森林土壤碳匯基線研究

成果報告

委託機關：　農業部林業及自然保育署

執行單位：　台灣水資源與農業研究院

中華民國 113 年 12 月

農業部林業及自然保育署

計畫名稱：森林土壤碳匯基線研究

執行期間：112 年 8 月 10 日起至 113 年 11 月 30 日

計畫顧問：陳尊賢、郭鴻裕、黃裕星
計畫主持人：黃群智
協同主持人：陳昱蓉
執行人員：夏天恩、謝宇雯、張必輝、羅偉恩、簡靖芳、謝宏鑫、陳怡妏、劉芳萍

委辦機關：農業部林業及自然保育署
承辦單位：台灣水資源與農業研究院

中華民國 113 年 12 月

摘要

合理評估森林土壤有機碳儲存量，為臺灣迎向全球碳淨零行動方案的一環。本計畫應用臺灣歷年來森林土壤調查資訊，借鏡國外相關研究成果，初步建立起臺灣森林土壤有機碳儲存量/碳匯基線圖，藉以掌握國家森林土壤有機碳儲存量之重要資訊。本計畫首次為臺灣進行全面性森林土壤碳儲存量評估，填補國內在此領域之重要研究缺口。本計畫蒐整歐盟、美國、亞洲多國重要森林土壤有機碳儲存量研究之方法學、調查成果、地理資訊系統應用等文獻，已知在積極土壤管理下，森林土壤有機碳含量皆呈顯著增加。本計畫共盤點國內 52 項森林土壤相關研究、調查及分析資料，合計調查剖面數量達 5,168 筆，資料數 14,802 筆，均納入模型建置資料庫中。為推廣碳淨零議題，讓更多林業相關人員理解森林土壤碳吸存的重要性，本計畫辦理三場工作坊，參訓學員共達 178 人次，廣邀相關研究或從業人員共同研習數位土壤繪圖(Digital soil mapping)技術，獲得與會人員良好回響。

本計畫依土壤剖面深度，以分組歸納方式推估缺失之含石率；依海拔高度，以隨機森林推估總體密度缺失值，三種海拔區間皆是以有機碳含量為主要影響因子，剖面厚度或其他多項環境因子影響程度則較弱。接著篩選出顯著影響森林土壤有機碳儲存量之變因，包含林型、海拔、溫度、雨量及土壤分類等，用以評估線性回歸、Cubist 及隨機森林三種模型對森林土壤有機碳儲存量之推估能力。擇定以穩健性最佳的線性回歸作為主要模型，透過數位土壤繪圖技術，並校正山區土壤層厚度，繪製全臺八個林業地區分署及八種林型下之森林土壤有機碳儲存量基線圖，估算不同土壤深度之有機碳儲存量。結果顯示，全臺 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量約 132 百萬公噸（484 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 159 百萬公噸（583 百萬公噸二氧化碳當量）；0-50 公分森林土壤有機碳儲存量約為 188 百萬公噸（690 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 214 百萬公噸（785 百萬公噸二氧化碳當量）；0-100 公分森林土壤有機碳儲存量約為 283 百萬公噸（1,038 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 309 百萬公噸（1,133 百萬公噸二氧化碳當量）；0-150 公分森林土壤有機碳儲存量約為 303 百萬公噸（1,111 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 330 百萬公噸（1,210 百萬公噸二氧化碳當量）。臺灣森林土壤有機碳儲存量呈現隨海拔上升、溫度降低而增加的趨勢，熱帶、溫帶和寒帶森林土壤有機碳儲存量分別為 175±28.5、224±38.4 和 259±31.1 公噸碳/公頃。

本計畫所提出的臺灣森林土壤有機碳儲存量基線圖及森林土壤碳儲存資訊，可為臺灣實現 2050 年碳淨零目標提供科學依據。未來應持續精進臺灣森林土壤有機碳儲存量推估模式，且為解決國內森林土壤採樣點不足和高海拔地區預測誤差較大等問題，建議擴大採樣範圍並增加調查剖面數，用以改善數據誤差。此外，將變數資料進行特徵工程也是提升模型精確度可行方法。

關鍵詞：碳淨零、自然碳匯、黃碳、自然解方、數位土壤繪圖、森林土壤有機碳儲存量、森林土壤有機碳儲存量分布圖、森林土壤碳匯基線

目錄

目錄 III

表目錄 VII

圖目錄 XI

計畫緣起 1

壹、 計畫目標 4

貳、 計畫內容 5

一、 工作項目 5

(一) 研析國外、國內森林土壤碳匯研究（含方法學）成果 5

(二) 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程2梯次以上(活動總時數至少36小時,培訓人員總數須達加總人數60人次以上） 5

(三) 建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式 5

(四) 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式 5

(五) 國內森林土壤調查點位之碳匯推估 5

(六) 研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題 5

二、 研究流程及方法 6

(一) 變數篩選 7

(二) 資料庫建置 14

(三) 模型建置 16

(四) 模型效能評估 17

(五) 模型驗證（不確定性評估） 19

三、 計畫查核點辦理情形 20

(一) 契約變更 20

(二) 各階段審查標準 22

(三) 第四期辦理情形 23

參、 工作推動及執行成果說明 24

一、 研析國外、國內外森林土壤碳匯研究（含方法學）成果 24

(一) 彙整國外森林土壤碳匯研究成果 26

(二) 彙整國內森林土壤剖面碳匯調查結果，進行資料基本分析 81

(三) 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料 81

二、 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上 84

(一) 利用近端感測與數位化土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊 86

(二) 2023 年森林碳匯調查技術研習營 91

(三) 森林土壤碳匯基線研究工作坊（112 年） 95
(四) 113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊 101

三、 建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式 126
(一) 評估森林土壤碳匯量推估模式，分析影響不確定性與變異量之關鍵因子...126
(二)利用地理統計技術 (Geostatistics) 與數位化土壤繪圖技術 (Digital soil mapping)，繪製臺灣山區森林土壤碳匯分布初步地圖 143
(三) 比較森林土壤碳匯與不同地形單元、生態系統與土壤類別的相關性 149

四、 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式（應用更新後資料庫） 161
(一) 針對影響臺灣山區森林土壤碳匯推估模式之關鍵因子，提出解決方案 161
(二) 繪製屏東分署荖濃溪事業區範圍內 4.7 萬公頃森林土壤碳匯地圖 211
(三) 建立森林土壤碳匯繪圖模式準確性及減少變異性之解決方案 216

五、 國內森林土壤調查點位之碳匯推估 219
(一) 彙整林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯推估 219
(二) 繪製林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯分布初步地圖 268

六、 研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題 385
（一）依據 112、113 年所收集的現有森林土壤碳含量數據、推估模式、準確性評估、數位化土壤繪圖 (Digital soil mapping) 技術等成果，研提台灣森林土壤碳匯量之初步評估報告。 385
（二）利用數位化土壤繪圖(Digital soil mapping)技術，研提臺灣森林土壤碳匯量分布基線地圖之初步評估報告，及未來研究規劃內容。 394

肆、 結論與建議 396

一、 結論 396

二、 建議 397

伍、 參考文獻 399

附件 1、圖資索要紀錄.....423
附件 2、工作會議紀錄.....427
附件 3、教育訓練證明.....445
附件 4、計畫相關研習課程內容.....461
附件 5、113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊報名簡章.....491
附件 6、113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊三梯次課程滿意度調查.....497
附件 7、112 年森林土壤碳匯基線研究第 4 期報告書面審查回復.....509
附件 8、112 年森林土壤碳匯基線研究第 3 期報告書面審查回復.....513
附件 9、112 年森林土壤碳匯基線研究第 2 期報告書面審查回復.....517

表目錄

表 2-2-1 建立 DSM 使用之環境相關變數表 (Ma *et al.*, 2017) 7
表 2-2-2 環境相關變數表 8
表 2-3-1 變更工作項目對照表 20
表 2-3-2 變更重要期程與工作檢查項目對照表 21
表 2-3-3 重要期程與工作檢核項目 22
表 2-3-4 各工作項目辦理情形 23
表 3-1-1 不同國家森林土壤有機碳儲存量之研究成果彙整概況 25
表 3-1-2 不同緯度森林土壤與植被碳密度之比 28
表 3-1-3 13 種常見森林管理對森林土壤碳庫之影響 31
表 3-1-4 碳庫定義 33
表 3-1-5 FullCAM 與 Yasso07 兩者比較表 37
表 3-1-6 美國農業部土壤質地類別的 Ks 值 39
表 3-1-7 傳統繪圖與數位繪圖兩者的比較 45
表 3-1-8 依據土壤深度剖面群集分析之結果，得出含石量預設值(%) 54
表 3-1-9 Level I 採樣及分析方式 (1/2) 55
表 3-1-9 Level I 採樣及分析方式 (2/2) 56
表 3-1-10 Level I 資料庫土壤有機碳儲存量計算的方案 57
表 3-1-11 1990 至 2022 年美國森林的碳匯量比較表 63
表 3-1-12 土壤有機碳 (SOC) 密度觀測與林地屬性統計數據表 67
表 3-1-13 不同的土壤土綱在 SOC_{30} 和 SOC_{100} 的敘述統計 67
表 3-1-14 1990 年代至 2010 年代 8 個林地不同土層土壤有機碳含量、容重檢驗結果 71
表 3-1-15 空間預測模型環境屬性因子(1/2) 77
表 3-1-15 空間預測模型環境屬性因子 (2/2) 78
表 3-1-16 國內行政機關已調查森林土壤研究 82
表 3-1-17 國內學術單位已調查森林土壤研究 83
表 3-2-1 112、113 年森林土壤碳匯相關工作坊 84
表 3-2-2 「利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊」議程 85
表 3-2-3 Cubist 及 Random Forest 優劣比較 89
表 3-2-4 森林碳匯調查技術研習營課程表 92
表 3-2-5 森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)課程表 97
表 3-2-6 森林土壤碳匯基線研究工作坊課程表 103
表 3-2-7 三梯次工作坊課程滿意度問卷設計 124
表 3-3-1 資料異常無法採用態樣表 127
表 3-3-2 各分署土壤總體密度 (BD) 推算分區表 128
表 3-3-3 嘉義分署各分區原數據之土壤有機碳儲存量敘述統計表 145
表 3-3-4 宜蘭分署各分區原數據之土壤有碳儲存量敘述統計表 148
表 3-3-5 推估全臺林業分署各海拔 0-30 公分土壤之有機碳儲存量 151
表 3-3-6 推估全臺林業分署各海拔 0-50 公分土壤有機碳儲存量 152
表 3-3-7 推估全臺林業分署各林型 0-30 公分土壤有機碳儲存量 154
表 3-3-8 推估全臺林業分署各林型 0-50 公分土壤有機碳儲存量 155
表 3-3-9 推估全臺林業分署各土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量 158
表 3-3-10 推估全臺林業分署各土綱 0-50 公分土壤有機碳儲存量 159
表 3-4-1 新增國內行政機關及學術單位已調查森林土壤研究 162

表 3-4-2 本計畫所採用之林型分類原則 163
表 3-4-3 國內相關枯落物研究（邱祈榮整理） 164
表 3-4-4 全臺林業署各分署共 5,168 剖面之採樣剖面總體密度來源(1/2) 165
(續下表) 165
表 3-4-4 全臺林業署各分署 5,168 剖面之採樣剖面總體密度來源(2/2) 165
表 3-4-5 不同林型下推算土壤總體密度之線性擬合函數 184
表 3-4-6 全臺各分署範圍內不同林型下之土壤有機碳儲存量估計值 185
表 3-4-7 全臺林業分署 0-30 公分各坡度之已知土壤含石率 190
表 3-4-8 全臺林業分署 30-150 公分各土壤深度之已知含石率 192
表 3-4-9 全臺林業分署推估 0-150 公分各土壤深度之平均含石率 192
表 3-4-10 全臺林業分署 0-1,000 公尺訓練集和驗證集之各項模型指標評估表 197
表 3-4-11 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 訓練集和驗證集之各項模型指標評估表 200
表 3-4-12 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 訓練集和驗證集之各項模型指標評估表 203
表 3-4-13 推估荖濃溪事業區不同深度森林土壤有機碳儲存量 212
表 3-5-1 嘉義分署向前逐步回歸法篩選出之影響因子表 220
表 3-5-2 宜蘭分署向前逐步回歸法篩選出之影響因子表 224
表 3-5-3 嘉義分署各模型訓練及驗證指標及不確定性評估表 228
表 3-5-4 宜蘭分署各模型訓練及驗證指標及不確定性評估表 232
表 3-5-5 全臺林業分署 0-30 公分土壤有機碳儲量之影響因子表 245
表 3-5-6 全臺林業分署 0-50 公分土壤有機碳儲量之影響因子表 246
表 3-5-7 全臺林業分署 0-100 公分土壤有機碳儲量之影響因子表 248
表 3-5-8 全臺林業分署 0-150 公分土壤有機碳儲量之影響因子表 249
表 3-5-9 不同土壤深度有機碳儲存量的隨機森林參數 251
表 3-5-10 全臺林業分署 0-30 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=4,642) 252
表 3-5-11 全臺林業分署 0-30 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估 253
表 3-5-12 全臺林業分署 0-50 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=3,972) 255
表 3-5-13 全臺林業分署 0-50 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估 255
表 3-5-15 全臺林業分署 0-100 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=3,456) 258
表 3-5-16 全臺林業分署 0-100 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估 258
表 3-5-17 全臺林業分署 0-150 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=714) 261
表 3-5-18 全臺林業分署 0-150 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估 261
表 3-5-19 三種模型繪製的土壤有機碳儲存量地圖比較 263
表 3-5-20 嘉義分署四土層土壤有機碳儲存量推估成果敘述統計表 277
表 3-5-21 宜蘭分署四土層土壤有機碳儲存量推估成果敘述統計表 288
表 3-5-22 宜蘭分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 289
表 3-5-23 宜蘭分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數 291
表 3-5-24 宜蘭分署各林型及海拔之 0-50 土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 293
表 3-5-25 宜蘭分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數 295
表 3-5-27 宜蘭分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 298
表 3-5-28 宜蘭分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 299
表 3-5-28 花蓮分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 301
表 3-5-29 花蓮分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數 303
表 3-5-30 花蓮分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 305
表 3-5-31 花蓮分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數 307
表 3-5-32 花蓮分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量 309
表 3-5-33 花蓮分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存 310

表 3-5-34 花蓮分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 311
表 3-5-35 南投分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 313
表 3-5-36 南投分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 315
表 3-5-37 南投分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 317
表 3-5-38 南投分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 319
表 3-5-39 南投分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 321
表 3-5-40 南投分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 322
表 3-5-41 南投分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 323
表 3-5-42 屏東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 325
表 3-5-43 屏東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 327
表 3-5-44 屏東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 329
表 3-5-45 屏東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 331
表 3-5-46 屏東分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 333
表 3-5-47 屏東分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 334
表 3-5-48 屏東分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 335
表 3-5-49 新竹分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 337
表 3-5-50 新竹分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 339
表 3-5-51 新竹分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 341
表 3-5-52 新竹分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 343
表 3-5-53 新竹分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 345
表 3-5-54 新竹分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 346
表 3-5-55 新竹分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 347
表 3-5-56 嘉義分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 349
表 3-5-57 嘉義分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 351
表 3-5-58 嘉義分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 353
表 3-5-59 嘉義分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 355
表 3-5-60 嘉義分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 357
表 3-5-61 嘉義分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 358
表 3-5-62 嘉義分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 359
表 3-5-63 臺中分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 361
表 3-5-64 臺中分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 363
表 3-5-65 臺中分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 365
表 3-5-66 臺中分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 367
表 3-5-67 臺中分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 369
表 3-5-68 臺中分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 370
表 3-5-69 臺中分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 371
表 3-5-70 臺東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 373
表 3-5-71 臺東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數..... 375
表 3-5-72 臺東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 377
表 3-5-73 臺東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數..... 379
表 3-5-74 臺東分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 381
表 3-5-75 臺東分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量..... 382
表 3-5-76 臺東分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數 383
表 3-6-1 全臺各分署土壤及枯枝落葉層有機碳儲存量統計 386
表 3-6-2 資料轉換方法表 389

圖目錄

圖 2-2-1 研究流程圖 6
圖 2-2-2 臺灣本島土壤分類之土綱分布圖 9
圖 2-2-3 臺灣本島環境相關變數分布圖(1/2) 10
圖 2-2-3 臺灣本島環境相關變數分布圖(2/2) 11
圖 3-1-1 森林生態系碳儲存分類 26
圖 3-1-2 全球不同氣候類型之有機碳在下層土及表層土與地上部及地下部的含量 27
圖 3-1-3 IPCC 3 種方法示意圖 33
圖 3-1-4 數位土壤繪圖製作過程 45
圖 3-1-5 不同土壤深度的碳濃度、土壤總體密度及碳儲存量的變化 53
圖 3-1-6 歐洲森林 Level I 採樣點地圖 58
圖 3-1-7 森林土壤碳濃度地圖 59
圖 3-1-8 歐盟土壤資料中心 2.0 以及歐盟土壤觀測站 61
圖 3-1-9 各國 ESDAC 數據集的分布 61
圖 3-1-10 1990 至 2022 年美國森林的碳匯量長條圖 62
圖 3-1-11 美國森林保育署提出森林清查與分析碳監測之計畫 65
圖 3-1-12 美國本土地區國家森林清查 (NFI) 採樣地的分布圖 66
圖 3-1-13 隨機森林模型預測 NFI 樣區的土壤碳匯量（0-100 公分）分布圖 68
圖 3-1-14 隨機森林預測 NFI 樣區的土壤碳匯量（0-100 公分）之相對不確定性分布圖 68
圖 3-1-15 中國森林碳匯量估算方法使用頻率統計 69
圖 3-1-16 1990 年代及 2010 年代 4 個地區 0-20 cm 土壤深度的土壤碳含量 70
圖 3-1-17 韓國國家森林清查 (NFI) 和森林健康監測 (FHM) 樣區分布 72
圖 3-1-18 韓國國家森林清查 (NFI) 和森林健康監測 (FHM) 調查的樣區設計 73
圖 3-1-19 (a) 0 至 30 公分土壤、(b) 0 至 30 公分土壤和森林枯落物中碳儲存量圖 74
圖 3-1-20 日本國家森林土壤碳盤查調查點（黑點表示）分布 75
圖 3-1-21 預測 OC、BD、CF 以及 OCS 的程序 76
圖 3-1-22 0 至 30 公分的 OC、BD、CF 和 OCS 的日本全國尺度空間分布 79
圖 3-2-1 「利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力」上課影像 85
圖 3-2-2 全球土壤碳匯（0 至 30 公分）分布圖 (Minasny *et al.*, 2017) 86
圖 3-2-3 利用二層模型 (Two-step model) 產製 2001 年全球土壤碳匯分布圖 87
圖 3-2-4 數位土壤繪圖建置流程圖 89
圖 3-2-5 野外實習及室內訓練活動合影 93
圖 3-2-6 （左上）IDW 分析；（右上）Spline 分析；（下）Kriging 分析（學員練習） 98
圖 3-2-7 雲林縣高鐵沿線各鄉鎮累積栽種年數面積分布及長條圖（學員練習） 98
圖 3-2-8 學員上課筆記 99
圖 3-2-9 屏東縣受災地籍對接（學員練習） 99
圖 3-2-10 數位化土壤碳匯圖（學員練習） 100
圖 3-2-11 森林土壤碳匯基線研究工作坊課程規劃 101
圖 3-2-12 森林土壤碳匯基線工作坊參訓報到 104
圖 3-2-13 虞院長國興以全球暖化議題為參訓林業保育署同仁點題 104
圖 3-2-14 森林土壤碳匯基線工作坊課程講義封面 104
圖 3-2-15 林業保育署長官及本院院長開幕致詞 105
圖 3-2-16 本院陳顧問尊賢講授臺灣森林土壤類型與土壤碳匯量課程 106
圖 3-2-17 陳尊賢顧問講授土壤含碳量轉成土壤深度函數過程 106
圖 3-2-18 陳尊賢顧問講授高雄市茄濃溪工作站土系研究 106

圖 3-2-19 本院郭顧問鴻裕講授世界各國森林土壤碳匯調查技術介紹 107
圖 3-2-20 郭鴻裕顧問講授森林經營與土壤碳循環的變動關聯 107
圖 3-2-21 臺灣表土有機碳含量分布圖 108
圖 3-2-22 美國森林署碳監測流程介紹 108
圖 3-2-23 本院 GIS 工程師謝宏鑫講授森林土壤繪圖軟體應用課程 109
圖 3-2-24 地理圖資資料格式介紹 109
圖 3-2-25 待分析圖層之座標轉換操作 112
圖 3-2-26 symbology 操作，調整圖層視圖呈現 112
圖 3-2-27 透過屬性表選出特定區域範圍/鄉鎮市 113
圖 3-2-28 地理資訊圖資呈現 graduated colors 操作 113
圖 3-2-29 地理資訊圖資呈現：調整顏色漸層 114
圖 3-2-30 標示高鐵、焚化爐圖示 114
圖 3-2-31 分析「高鐵沿線 1.5 公里」與「焚化爐方圓 5 公里」之重點鄉鎮市區 115
圖 3-2-32 焚化爐及高鐵周邊選取範圍之操作 115
圖 3-2-33 「高鐵沿線 1.5 公里」與「焚化爐方圓 5 公里」之鄉鎮市區分析結果 116
圖 3-2-34 空間推估教材資料 116
圖 3-2-35 操作點開屬性表檢視資料內容 118
圖 3-2-36 Empirical Bayesian Kriging 分析 119
圖 3-2-37 經驗貝氏克利金 (Empirical Bayesian Kriging) 分析結果 119
圖 3-2-38 經驗貝氏克利金從表土至 30 公分深之有機土壤碳匯量（碳匯基線圖） 120
圖 3-2-39 有機土壤碳匯量推估標準差分布圖 120
圖 3-2-40 繪製散佈圖 scatter plot 121
圖 3-2-41 彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值散佈圖 121
圖 3-2-42 調整彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值散佈圖顏色呈現 122
圖 3-2-43 中興大學簡士濠教授講授森林土壤碳匯量計算及案例說明 122
圖 3-2-44 臺灣農業部門淨零四大主軸及策略 123
圖 3-2-45 農、林業淨零政策推動方向 123
圖 3-3-1 全臺各分署範圍內農試所採樣剖面分布圖 129
圖 3-3-2 嘉義一分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 131
圖 3-3-3 嘉義二分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 132
圖 3-3-4 嘉義三分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 133
圖 3-3-5 嘉義分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（2/2） .136
圖 3-3-6 宜蘭一分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 137
圖 3-3-7 宜蘭二分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 138
圖 3-3-8 宜蘭三分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖 139
圖 3-3-9 宜蘭分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（1/2） .141
圖 3-3-9 宜蘭分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（2/2） .142
圖 3-3-10 嘉義分署各分區採樣剖面 BD 取得方式示意圖 144
圖 3-3-11 宜蘭分署各分區採樣剖面 BD 取得方式示意圖 146
圖 3-3-12 土壤有機碳儲存量與海拔間的關係 150
圖 3-3-13 全臺林業分署不同海拔 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 153
圖 3-3-14 全臺林業分署不同海拔 0-50 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 153
圖 3-3-15 全臺林業分署不同林型 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 156
圖 3-3-16 全臺林業分署不同林型 0-50 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 157
圖 3-3-17 全臺林業分署不同土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 159
圖 3-3-18 全臺林業分署不同土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖 160

圖 3-4-1 宜蘭分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 166
圖 3-4-2 花蓮分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 167
圖 3-4-3 南投分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 168
圖 3-4-4 屏東分署各林型採樣　剖面 BD 取得方式示意圖 169
圖 3-4-5 新竹分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 170
圖 3-4-6 嘉義分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 171
圖 3-4-7 臺中分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 172
圖 3-4-8 臺東分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖 173
圖 3-4-9 天然針葉林修正前 BD 之散布圖 174
圖 3-4-10 天然針葉林修正後 BD 之散布圖 175
圖 3-4-11 天然針闊葉混淆林修正前 BD 之散布圖 176
圖 3-4-12 天然針闊葉混淆林修正後 BD 之散布圖 176
圖 3-4-13 天然闊葉林修正前 BD 之散布圖 177
圖 3-4-14 天然闊葉林修正後 BD 之散布圖 178
圖 3-4-15 人工針葉林修正前 BD 之散布圖 179
圖 3-4-16 人工針葉林修正後 BD 之散布圖 179
圖 3-4-17 人工針闊葉混淆林修正前 BD 之散布圖 180
圖 3-4-18 人工針闊葉混淆林修正後 BD 之散布圖 181
圖 3-4-19 人工闊葉林修正前 BD 之散布圖 182
圖 3-4-20 人工闊葉林修正後 BD 之散布圖 182
圖 3-4-21 木竹混淆林修正前 BD 之散布圖 183
圖 3-4-22 木竹混淆林修正後 BD 之散布圖 184
圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(1/3) 187
圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(2/3) 188
圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(3/3) 189
圖 3-4-24 屏東縣恆春鎮加都魯溪沿岸低坡度採樣剖面示意圖 191
圖 3-4-25 全臺各林業分署轄區內土壤採樣分布圖 194
圖 3-4-26 全臺林業分署採樣土壤總體密度數據分布直方圖 196
圖 3-4-27 全臺林業分署採樣土壤總體密度累積機率分布函數 196
圖 3-4-28 全臺林業分署 0-1,000 公尺 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2 198
圖 3-4-29 全臺林業分署 0-1,000 公尺 BD 測量值與推估值之散布圖 198
圖 3-4-30 全臺林業分署不同環境因子對 0-1,000 公尺土壤總體密度之影響程度 199
圖 3-4-31 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2 201
圖 3-4-32 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 測量值與推估值之散布圖 201
圖 3-4-33 全臺林業分署不同環境因子對 1,000-2,000 公尺土壤總體密度之影響程度 202
圖 3-4-34 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2 204
圖 3-4-35 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 測量值與推估值之散布圖 204
圖 3-4-36 全臺林業分署不同環境因子對 2,000 公尺以上土壤總體密度之影響程度 205
圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (1/4) 207
圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (2/4) 208
圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (3/4) 209
圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (4/4) 210

圖 3-4-38 荖濃溪事業區 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖 213
圖 3-4-39 荖濃溪事業區 0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖 214
圖 3-4-40 荖濃溪事業區 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖 215
圖 3-4-41 臺灣林業分署範圍土壤深度圖 218
圖 3-5-1 嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 221
圖 3-5-2 嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 221
圖 3-5-3 嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 222
圖 3-5-4 嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 222
圖 3-5-5 宜蘭分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 225
圖 3-5-6 宜蘭分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表\ 225
圖 3-5-8 宜蘭分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表 226
圖 3-5-9 嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 234
圖 3-5-10 嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 235
圖 3-5-11 嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 236
圖 3-5-12 嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 236
圖 3-5-13 宜蘭分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 237
圖 3-5-14 宜蘭分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 238
圖 3-5-15 宜蘭分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 239
圖 3-5-16 宜蘭分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子 240
圖 3-5-17 全臺林業分署各深度土壤有機碳儲存量分布直方圖與累積機率分布函數(1/2) 242
圖 3-5-17 全臺林業分署各深度土壤有機碳儲存量分布直方圖與累積機率分布函數 (2/2) ... 243
圖 3-5-18 全臺林業分署土壤深度 0-30 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表 244
圖 3-5-20 全臺林業分署土壤深度 0-100 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表 247
圖 3-5-21 全臺林業分署土壤深度 0-150 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表 250
圖 3-5-22 不同土壤深度有機碳儲存量之隨機森林網格搜索參數值 251
圖 3-5-23 土壤深度 0-30 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖 253
圖 3-5-24 土壤深度 0-50 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖 256
圖 3-5-25 土壤深度 0-100 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖 259
圖 3-5-26 土壤深度 0-150 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖 262
圖 3-5-27 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖（多元線性回歸） 264
圖 3-5-28 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 (Cubist) 265
圖 3-5-29 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖（隨機森林） 266
圖 3-5-30 嘉義分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 268
圖 3-5-31 臺灣山地植群帶與地理氣候集水區分區 269
圖 3-5-32 嘉義分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 270
圖 3-5-33 嘉義分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 271
圖 3-5-34 嘉義分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 272
圖 3-5-35 嘉義分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 273
圖 3-5-36 嘉義分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 274
圖 3-5-37 嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 275
圖 3-5-38 嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 276
圖 3-5-39 宜蘭分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 278
圖 3-5-40 宜蘭分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 279
圖 3-5-41 宜蘭分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 281
圖 3-5-43 宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 284
圖 3-5-44 宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 285

圖 3-5-45 宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 286
圖 3-5-46 宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖 287
圖 3-5-47 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 290
圖 3-5-48 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 292
圖 3-5-49 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 294
圖 3-5-50 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 296
圖 3-5-51 宜蘭分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 298
圖 3-5-52 宜蘭分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 300
圖 3-5-53 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 302
圖 3-5-54 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 304
圖 3-5-55 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 306
圖 3-5-56 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 308
圖 3-5-57 花蓮分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 310
圖 3-5-58 花蓮分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 312
圖 3-5-59 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 314
圖 3-5-60 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 316
圖 3-5-61 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 318
圖 3-5-62 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 320
圖 3-5-63 南投分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 322
圖 3-5-64 南投分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 324
圖 3-5-65 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 326
圖 3-5-66 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 328
圖 3-5-67 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 330
圖 3-5-68 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 332
圖 3-5-69 屏東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 334
圖 3-5-70 屏東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 336
圖 3-5-71 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 338
圖 3-5-72 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 340
圖 3-5-73 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 342
圖 3-5-74 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 344
圖 3-5-75 新竹分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 346
圖 3-5-76 新竹分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 348
圖 3-5-77 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 350
圖 3-5-78 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 352
圖 3-5-79 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 354
圖 3-5-80 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 356
圖 3-5-81 嘉義分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 358
圖 3-5-82 嘉義分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 360
圖 3-5-83 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 362
圖 3-5-84 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 364
圖 3-5-85 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 366
圖 3-5-86 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 368
圖 3-5-87 臺中分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 370
圖 3-5-88 臺中分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 372
圖 3-5-89 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 374
圖 3-5-90 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 376

圖 3-5-91 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖.....378
圖 3-5-92 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 380
圖 3-5-93 臺東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 382
圖 3-5-94 臺東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖 384

計畫緣起

因應全球 2050 碳淨零行動方案，臺灣已積極投入碳淨零技術發展與研究。國內學者 (Tsai *et al.*, 2010) 曾利用臺灣地區高山森林 165 個森林土壤剖面調查資料的部分結果，提出不同地區之森林生態系統與不同土綱 (Soil Order) 的有機碳儲存量（或碳匯量，為避免混淆其後均以「碳儲存量」表示）變異大。依據第四次森林資源調查，臺灣森林覆蓋率達 60.7%，森林總面積為 219.7 萬公頃，森林地上部總碳儲存量為 7.5 億公噸 CO_2 當量，但過去臺灣森林土壤之碳儲存量資料無完整建立、彙整、推估與繪製地圖，缺乏完整森林土壤有機碳儲存量推估與 GIS 分布基線圖。

土壤、森林與農業生產長期的碳吸存 (Carbon Sequestration) 作用有益於環境與農業生產。土壤碳吸存與土壤中穩定固體構造中的土壤有機碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 的儲存量 (Storage) 有關，而推估生態系統中土壤有機碳儲存量 (SOC stocks) 比探究全球暖化更重要。研究指出，海洋碳儲存量約為 3.9×10^{13} 公噸，大氣碳儲存量約為 7.5×10^{11} 公噸，而陸域系統中有 2.2×10^{12} 公噸碳儲存在 1 公尺深之土壤中，以及 5.5×10^{11} 公噸碳儲存在地上部的植物生質量 (Plant Biomass) 中，代表在陸域系統中，土壤為其中之最大碳儲存庫。當土壤受到擾動時，將顯著改變大氣中二氧化碳平衡 (Batjes, 1996; Eswaran *et al.*, 1993)。

依國際上不同國家長期田間試驗研究結果，於優良土壤碳儲存管理技術與耕作制度之下，農地土壤有機碳增加速率（每年每公頃表土 30 公分）可達 0.2 至 0.8 公噸碳，不同土地利用亦會影響土壤有機碳增加速率，如農地造林土壤有機碳增加速率可達 0.3 至 0.6 公噸碳，直接於林地造林則可達 0.8 至 1.1 公噸碳，其增加土壤碳儲存效益最大 (Minasny *et al.*, 2017)。除此之外，Stockmann 等人指出，土壤有機碳之碳吸存速率為影響土壤有機碳儲存量關鍵因素，但同時存在許多科學研究上已知及未知部分，進行初步評估，並提出以下問題：(1)未來推動增加森林土壤有機碳儲存量變化、預測與臺灣不同區域分布之差異；(2)氣候、地形、土壤類別與森林生態類別之變化，造成不同碳儲存量結果與變異 (variation)；(3)評估未來推動增加森林土壤有機碳儲存量準確性之方法，預測臺灣各地區分署森林土壤有機碳儲存量分布之差異 (Stockmann *et al.*, 2013)。

Tsai 等人 (2002) 推估森林土壤有機碳的儲存量，提出不同森林土壤 30 公分內之平均有機碳含量範圍在 7.12 kg C/m^2 (71.2 ton C/ha) 至 29.5 kg C/m^2 (295 ton C/ha) 之間；50 公分內平均有機碳含量範圍在 8.32 kg C/m^2 (83.2 ton C/ha) 至 38.3 kg C/m^2 (383 ton C/ha) 之間；100 公尺內平均有機碳含量範圍在 8.47 kg C/m^2 (84.7 ton C/ha) 至 41.9

kg C/m^2 (419 ton C/ha) 之間。150 公尺深度內有機碳含量有 51%至 80%集中於表土 30 公分深度內，而 72%至 91%則集中在 50 公分深度內。而 Tsai 等人亦推估，臺灣森林土壤總碳儲存量不同深度為 114 百萬公噸（0 至 30 公分）、126 百萬公噸（0 至 50 公分）及 160 百萬公噸（0 至 100 公分）。此外，目前臺灣對於森林土壤總碳儲存量並沒有其他完整推估與瞭解。

陳尊賢等人之研究於臺灣北部選擇六種主要分布樹種，包括針葉樹林之柳杉 (*Cyptomeria japonica* (L. F.) D. Don)、臺灣扁柏 (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. & Zucc. var. *formosana* (Hayata) Rehder)、臺灣杉 (*Taiwania cryptomerioides* Hayata)，與闊葉樹林之相思樹 (*Acacia confusa* Merr.)、油桐 (*Aleurites fordii* Hemsi.)、臺灣櫸 (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino) 等，依不同樹種或不同年齡分布區域內各採集三個土體，土壤有機碳儲存量在樹種間有顯著差異 ($p\text{-value} < 0.05$)，碳儲存量與樹齡大小無顯著相關。其中，油桐土壤有機碳儲存量最低，僅為 2 kg C/30 cm/m^2 (20 ton C/30cm/ha)、4 kg C/50 cm/m^2 (40 ton C/50cm/ha) 及 4 kg C/100 cm/m^2 (40 ton C/100cm/ha)，而臺灣扁柏土壤有機碳儲存量最高，可達 11 kg C/30 cm/m^2 (110 ton C/30cm/ha)、14 kg C/50 cm/m^2 (140 ton C/50cm/ha)及 21 kg C/100 cm/m^2 (210 ton C/100cm/ha)，其他樹種之土壤有機碳儲存量則居中，約為 6-8 kg C/30 cm/m^2 (60-80 ton C/30cm/ha)，8-10 kg C/50 cm/m^2 (80-100 ton C/50cm/ha)，與 10-14 kg C/100 cm/m^2 (100-140 ton C/100cm/ha)。由於各人工林之研究區域海拔高度與氣候條件上不同，結果顯示土壤有機碳儲存量與海拔高度呈正相關 ($p < 0.05$)，呈現隨年均溫度增加而減少，以及隨年雨量增加而增加的趨勢（陳尊賢等人，2005）。

臺灣地質複雜、地形、氣候與植物生態系統多變，地形垂直變化更提高推估土壤有機碳儲存量之困難程度，加上土壤總體密度 (Bulk Density)、土壤碳含量之測定、土壤含石量等野外採樣及測量上困難程度與測定誤差，對於土壤有機碳儲存量推估造成極大變異 (Coefficient of Variation, CV%)，高達 35%至 50%之不確定性 (Tsai *et al.*, 2010)。

林業署與林試所已完成森林土壤調查資料庫，有高達 8,000 筆以上的土壤調查樣點（僅土壤剖面形態特徵描述）(1993-2002) 與將近 700 筆之土壤剖面土壤碳含量、總體密度與基本性質分析資料。另外，針對極育土 (Ultisols)、弱育土 (Inceptisols) 與新成土 (Entisols) 之土壤剖面分析資料，林試所亦增加調查約 100 個土壤採樣點（杜清澤，2010-2012)。目前國內學術研究單位，如臺灣大學陳尊賢老師實驗室與林試所蔣先覺先生，累積達 100 個以上之土壤剖面碳儲存量研究調查資料，包含阿里山與太平山

山區、各林道為主之淋溶土 (Spodosols)、極育土 (Ultisols)、弱育土 (Inceptisols) 與新成土 (Entisols) 為主之土壤剖面碳儲存量分析資料（陳尊賢等人，1998-2015），陽明山國家公園有近 120 個森林土壤剖面（灰燼土，Andisols）碳儲存量資料（陳尊賢等人，1990-2012）及科技部更新造林計畫（陳尊賢等人，2013-2014），總計全臺有近 1,000 筆以上的森林土壤有機碳儲存量完整土壤剖面調查資料，尚未完整統一彙整、分析與評估。

本計畫目標為盤點並彙整森林土壤調查資料，建立臺灣森林土壤有機碳儲存量基線之研究，作為推動建立臺灣森林土壤有機碳儲存量及繪製碳儲存量分布地圖成果計畫之科學依據，以彌補國家森林土壤有機碳儲存量缺乏之重要資訊。

壹、計畫目標

本計畫首先蒐整並研析國內外前人研究成果，考量臺灣山區環境及氣候特性，綜合評估並建立起適用於臺灣森林土壤之碳儲存量推估模式，以利繪製出準確可信之全臺森林土壤有機碳儲存量基線分布圖，並透過工作坊之辦理，將實用之數位土壤繪圖原理及技術，推廣予從事森林研究、調查及政策推動等相關人員。本計畫具體目標條列如下，且逐一對應至各大工作項目，按部就班依序推動。

一、蒐整國內外森林土壤有機碳儲存量研究成果，並借鏡國際相關政策發展模式，以提供主管機關作為施政參考。

二、彙整國內森林土壤調查資料，分析並建立臺灣森林土壤有機碳儲存量推估模式，繪製臺灣森林土壤有機碳儲存量分布地圖。

三、辦理森林土壤有機碳儲存量工作坊，透過理論與實習並重之課程，幫助學員瞭解數位土壤繪圖 (Digital soil mapping, DSM) 技術。

四、研提潛在可協助國內林農獲取碳權之政策建言。

貳、計畫內容

一、工作項目

(一) 研析國外、國內森林土壤碳匯研究（含方法學）成果

1. 彙整國外森林土壤碳匯研究成果
2. 彙整國內森林土壤剖面碳匯調查結果，進行資料基本分析
3. 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料

(二) 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上（活動總時數至少 36 小時，培訓人員總數須達加總人數 60 人次以上）

(三) 建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式

1. 評估森林土壤碳匯量推估模式，分析影響不確定性與變異量之關鍵因子
2. 利用地理統計技術 (Geostatistics) 與數位化土壤繪圖技術 (Digital soil mapping)，繪製臺灣山區森林土壤碳匯分布初步地圖
3. 比較森林土壤碳匯與不同地形單元、生態系統與土壤類別的相關性

(四) 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式

1. 針對影響臺灣山區森林土壤碳匯推估模式之關鍵因子，提出解決方案
2. 繪製屏東林管處六龜工作站荖濃溪4.7萬公頃森林土壤碳匯地圖
3. 建立森林土壤碳匯繪圖模式準確性及減少變異性之解決方案

(五) 國內森林土壤調查點位之碳匯推估

1. 彙整林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯推估
2. 繪製林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯分布初步地圖

(六) 研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題

1. 依據112、113年所收集的現有森林土壤碳含量數據、推估模式、準確性評估、數位化土壤繪圖 (Digital soil mapping) 技術等成果，研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告。
2. 利用數位化土壤繪圖 (Digital soil mapping) 技術，研提臺灣森林土壤碳匯量分布基線地圖之初步評估報告，及未來研究規劃內容。

二、研究流程及方法

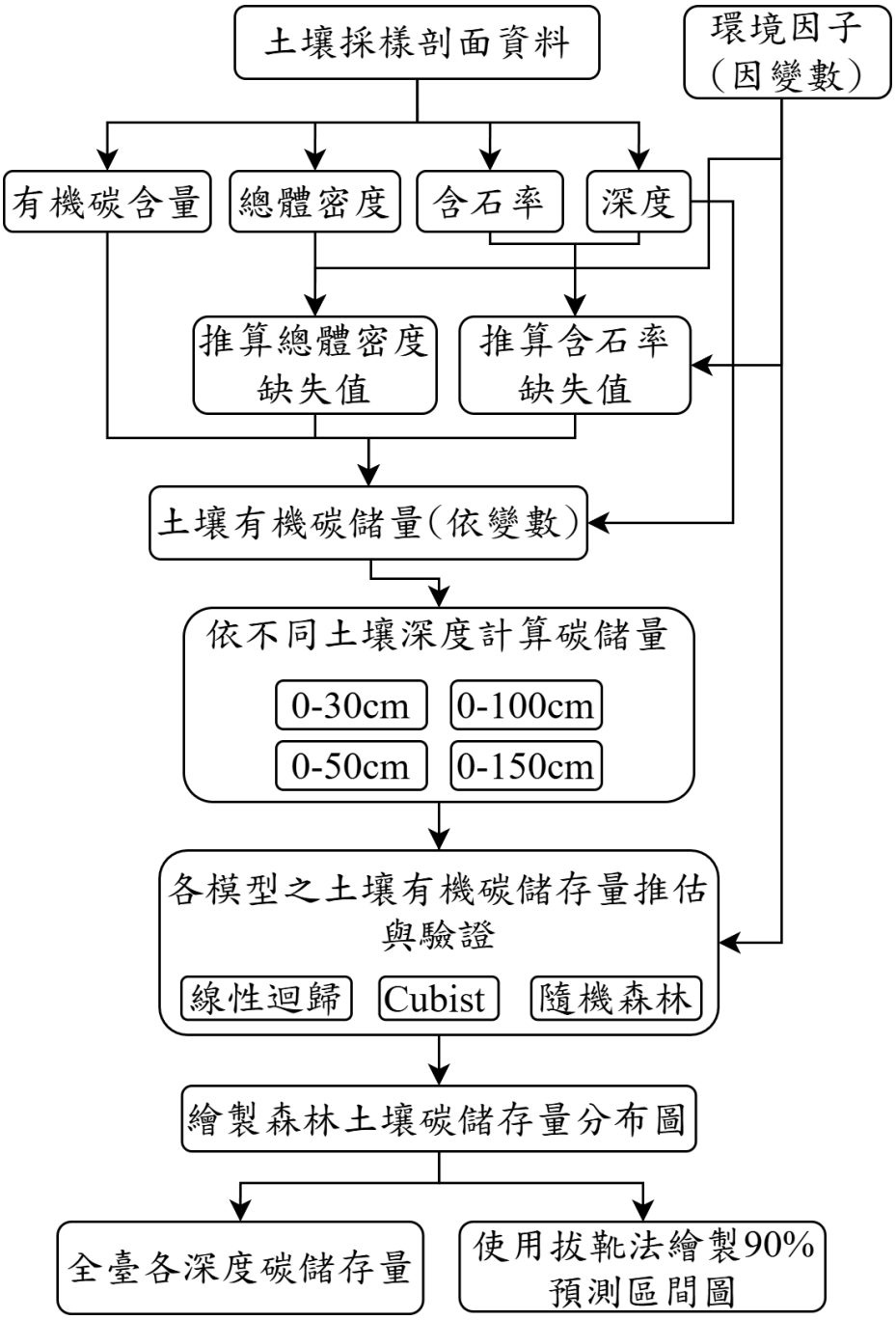


圖 2-2-1 研究流程圖

(一) 變數篩選

1. 應變數

應變數為土壤有機碳儲存量，單位可為 kg C/m^2 或 ton C/ha。剖面資料包含既有的有機碳含量外，許多剖面資料因缺少含石率、總體密度而無法計算土壤有機碳儲存量。因此，藉由已知含石率資料計算不同坡度與土壤深度的平均含石率，並回推相對應的坡度與土壤深度，以推估含石率缺失資料。另外，使用既有總體密度資料與環境因子建立隨機森林模型，推估總體密度缺失資料。兩者再行推算土壤有機碳儲存量，後續整合至資料庫進行分析。

2. 自變數

土壤的五大成土因子為氣候、生物、地形、母質及時間 (Dudal, 2005; Jenny, 1994; Bockheim *et al.*, 2014)，依此考量變數之選定。依據 Ma *et al.*(2017) 文獻指出，利用數位土壤繪圖 (Digital Soil Mapping, DSM) 繪製出中國上海浙江一帶之土壤有機碳儲存量基線圖，條列出各項評估因子（表 2-2-1）。本計畫同樣使用該文獻所提及之因子建置 DSM 資料庫，並額外納含土壤分類之土綱分布作為變數之一（圖 2-2-2）。本計畫所使用之自變數如表 2-2-2 所示，並逐一說明之。

表 2-2-1 建立 DSM 使用之環境相關變數表 (Ma *et al.*, 2017)

Type of data	Environmental Covariates	Source	Original Resolution
Remote Sensing	Landsat 7	Landsat	30 m
	Normalized difference vegetation index (NDVI)	Landsat	30 m
Digital Elevation	Elevation	SRTM	30 m
	Slope	SRTM	30 m
	Aspect	SRTM	30 m
	Terrain ruggedness index (TRI)	SRTM	30 m
	Topographic wetness index (TWI)	SRTM	30 m
	Terrain position index (TPI)	SRTM	30 m
	Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)	SRTM	30 m
	Multiresolution Ridge Top Flatness (MrRTF)	SRTM	30 m
	Stream power index (SPI)	SRTM	30 m
	Melton ruggedness number (MRN)	SRTM	30 m
Radar Climate	Sentinel-1 imagery	SAR	10 m
	Mean annual temperature (MAT)	WorldClim	1 km
	Total annual precipitation (TAP)	WorldClim	1 km

表 2-2-2 環境相關變數表

數據類型	環境變數	資料來源	空間解析度	資料時間
地形	高程 (Digital Elevation Model, DEM) 坡度 (Slope) 坡向 (Aspect) 地形崎嶇指數 (Terrain Ruggedness Index, TRI) 地形濕潤指數 (Topographic Wetness Index, TWI) 地形位置指數 (Terrain Position Index, TPI) 河谷底部平坦度多分辨率指標 (Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness, MRVBF) 山脊頂部平坦度多分辨率指標 (Multiresolution Ridge Top Flatness, MRRTF) 河流動力指數 (Stream Power Index, SPI) 梅爾頓崎嶇度數 (Melton Ruggedness Number, MRN)	內政部 國土測繪中心	20 m	2022 年
氣候	平均年均溫 (Mean Annual Temperature, MAT) 平均年總降雨量 (Total Annual Precipitation, TAP)	中央氣象署	1 km	2011 年- 2020 年
生物	常態化植生差異指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)	Sentinel-2	10 m	2015 年 6 月- 2020 年 12 月
	天然針葉林 (FT_1) 天然針闊葉混淆林 (FT_2) 天然闊葉林 (FT_3) 人工針葉林 (FT_4) 人工針闊葉混淆林 (FT_5) 人工闊葉林 (FT_6) 木竹混淆林 (FT_7) 竹林 (FT_8)	林業及自然保育署	10m	2017 年 10 月
土綱	新成土 (TG_1) 弱育土 / 新成土 (TG_2) 弱育土 (TG_3) 弱育土 / 淋溶土 (TG_4) 弱育土 / 灰燼土 (TG_5) 弱育土 / 有機質土 (TG_6) 弱育土 / 極育土 (TG_7) 淋溶土 / 弱育土 (TG_8) 淋溶土 (TG_9) 極育土 / 弱育土 (TG_10) 淋澱土 (TG_11) 極育土 / 弱育土 / 膨轉土 (TG_12) 極育土 / 淋溶土 / 弱育土 (TG_13) 極育土 / 淋溶土 (TG_14) 極育土 (TG_15) 極育土 / 氧化物土 (TG_16） 有機質土 (TG_17) 灰燼土 (TG_18) 膨轉土 (TG_19) 黑沃土 / 弱育土 / 膨轉土 (TG_20)	Chen et al., 2015	10 m	2015 年

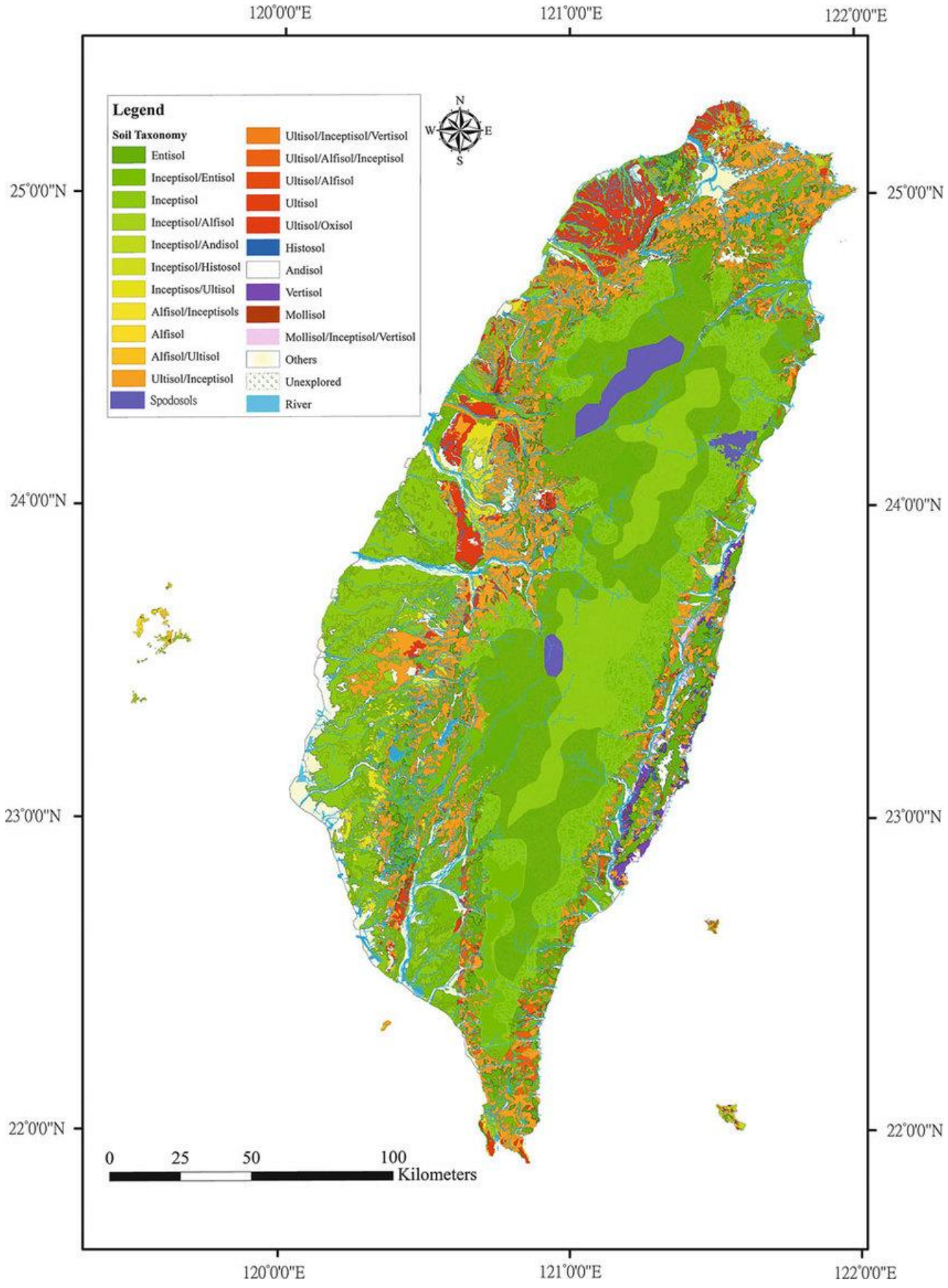


圖 2-2-2 臺灣本島土壤分類之土綱分布圖
（參考來源：Chen *et al*., 2015）

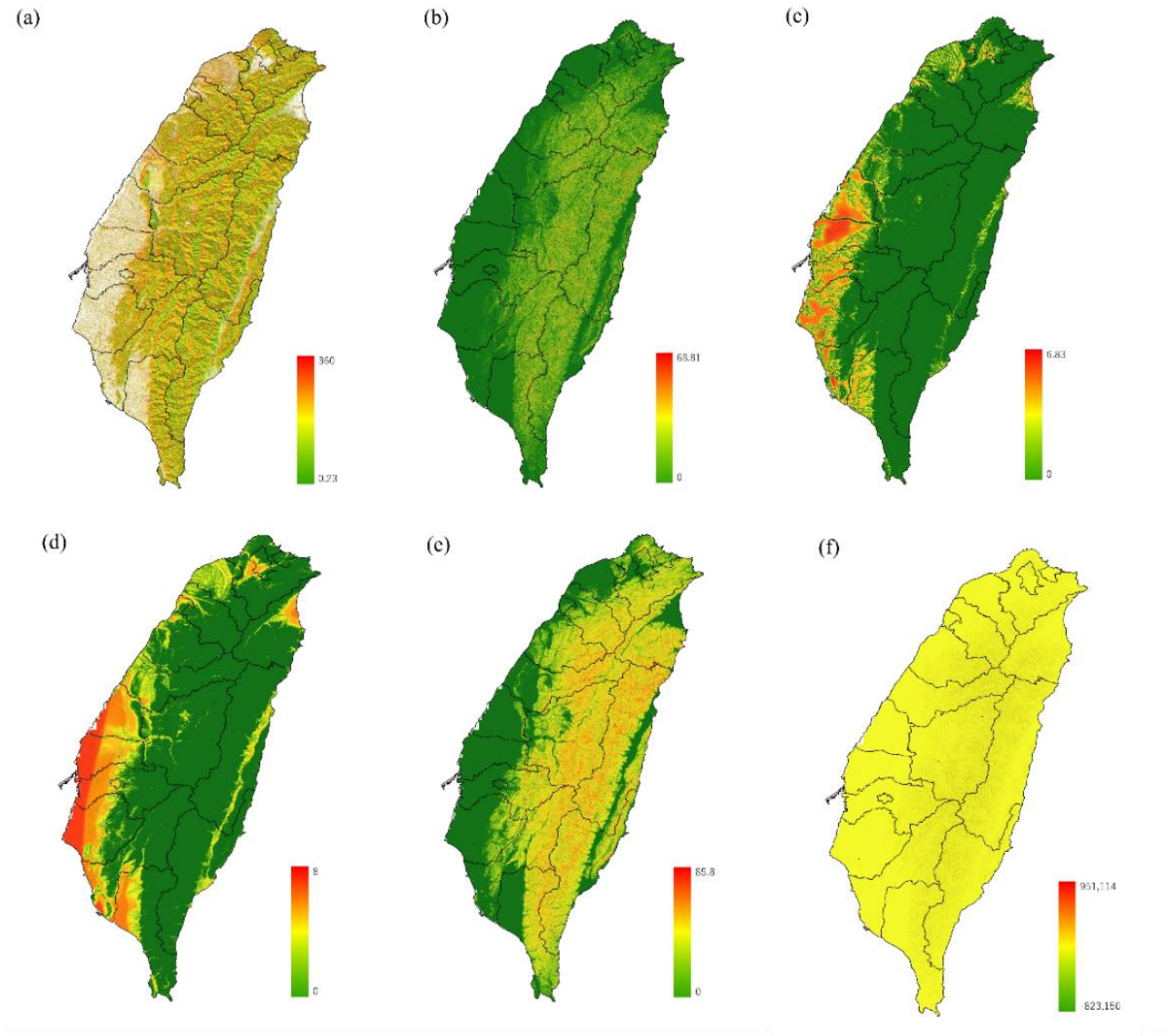


圖 2-2-3 臺灣本島環境相關變數分布圖(1/2)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a) 坡向：以正北方為 0 度，共 360 度；(b) 梅爾頓崎嶇度數 (MRN)：度數較低代表地形相對平坦，較高則為地形崎嶇；(c) 山脊頂部平坦度多分辨率指標 (MRRTF)：0 為陡峭或低窪區域，> 1 為較高之平地區域；(d) 河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)：0 為侵蝕地形，> 1 為沉積區域逐漸變大；(e) 坡度：坡度越大以紅色表示，反之以綠色表示；(f) 河流動力指數 (SPI)。

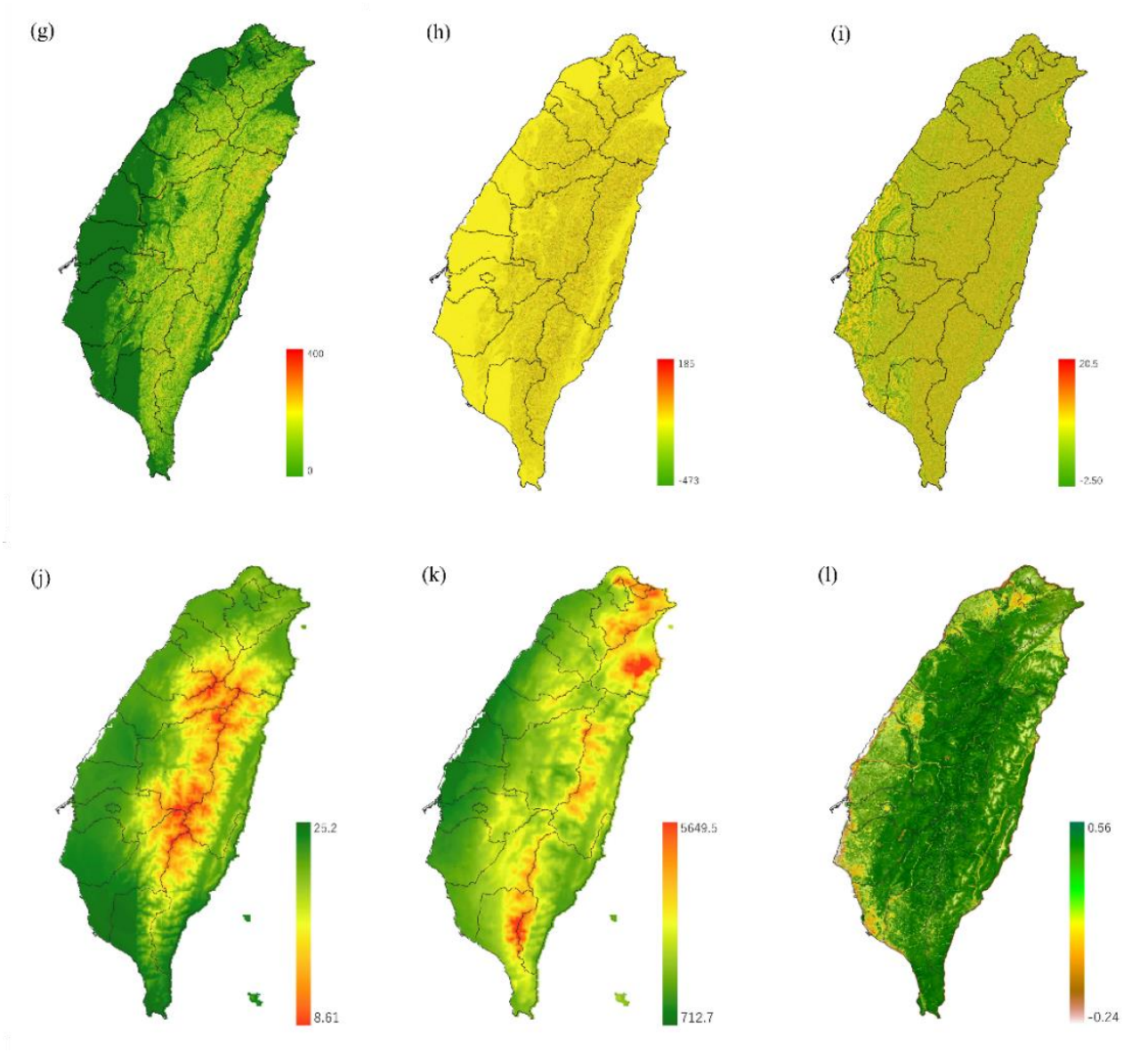


圖 2-2-3 臺灣本島環境相關變數分布圖(2/2)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(g) 地形崎嶇指數 (TRI)：0-80 m 為水平表面、81-116 m 接近水平表面、117-161 m 稍微崎嶇表面、162-239 m 中等崎嶇表面、240-497 m 中等崎嶇表面、498-958 m 高度崎嶇表面、959-4367 m 極度崎嶇表面；(h) 地形位置指數(TPI)：0 或趨近 0 為平坦、> 0 為山脊或山丘、< 0 為山谷或溝壑底部；(i) 地形濕潤指數 (TWI)：依據 2022 年臺灣本島資料繪製；(j) 平均年均溫 (MAT)：依據中央氣象署 2011-2020 年之平均值以反距離權重(IDW) 進行空間推估；(k) 平均年總降雨量 (TAP)：依據中央氣象署 2011-2020 年資料以 1 km 網格繪製；(l) 常態化植生差異指標 (NDVI)：2015 年 6 月至 2020 年底逐月 Sentinel-2 網格影像資料之 NDVI 數值平均。

(1) 高程 (Digital Elevation Model, DEM)

高程取自內政部國土測繪中心之數值高程模型，用以表達地表空間高程資訊，由一系列固定間隔之網格點構成，每個點包含地理位置和相對於海平面之高程值 (Gibson *et al.*, 2021; Tesfaye *et al.*, 2016; Tsui *et al.*, 2013)。DEM 透過多種方式取得，包括地面測量、航空攝影測量、衛星遙測探測和激光雷達 (LiDAR) 技術。本研究取用之空間解析度為 20 公尺，而坡向、梅爾頓崎嶇度數、山脊頂部平坦度多分辨率指標、坡度、地形崎嶇指數、地形位置指數皆以 DEM 資料所繪製。

(2) 坡向 (Aspect)

坡向為兩相鄰像元間數值變化程度最大之方向，並將坡向分為 360 度，正北方為 0 度，以度為單位表示之（圖 2-2-3(a)）。

(3) 梅爾頓崎嶇度數 (Melton Ruggedness Number, MRN)

梅爾頓崎嶇度數為一簡易流量累積相關指數，亦是坡度指數，表示分水嶺內之崎嶇程度 (Melton, 1965)。MRN 數值越高表示可能受構造隆升影響之地形，數值越低則表示構造穩定或隆升速率緩慢（式 2-1）。本計畫取用 2022 年 DEM 資料繪製臺灣本島 MRN 分布圖（圖 2-2-3(b)）。

$$M = Rb \times Ab^{-0.5} \qquad \text{（式 2-1）}$$

* R_b = 盆地地形（流域最高點和最低點之間的高度差）
* A_b = 盆地總面積

(4) 山脊頂部平坦度多分辨率指標 (Multiresolution Ridge Top Flatness, MRRTF)

山脊頂部平坦度多分辨率指標為地形指標，可識別各種比例之高平坦區域，數值零表示陡峭或低窪的區域，大於 1 之數值表示較高之平地區域（圖 2-2-3(c)）。

(5) 河谷底部平坦度多分辨率指標 (Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness, MRVBF)

根據谷底相對於周圍環境較低且平坦之谷底，以識別一定範圍內之沉積物質範圍。數值為零表示侵蝕地形，數值大於 1 即表示沉積區域逐漸變大（圖 2-2-3(d)）。

(6) 坡度 (Slope)

坡度百分比為垂直高度變化與水平距離之比，並以百分比形式示之。坡度越大以紅色表示，而坡度越小則以綠色表示（圖 2-2-3(e)）。

(7) 河流動力指數 (Stream Power Index, SPI)

SPI 用以衡量侵蝕性之地形指標，常用於河道沖蝕及地貌變遷（式 2-2）（圖 2-2-3(f)）。

$$SPI = ln(AS \cdot tan\beta) \quad \text{（式 2-2）}$$

* As = 指定點以上之集水區面積
* β = 該集水區平均坡度值

(8) 地形崎嶇指數 (Terrain Ruggedness Index, TRI)

地形崎嶇指數用於表示 DEM 相鄰之間的高程差異量。0 至 80 公尺被認為代表水平地形表面；81 至 116 公尺代表接近水平表面；117 至 161 公尺代表稍微崎嶇表面；162 至 239 公尺代表中等崎嶇表面；240 至 497 公尺代表中等崎嶇表面；498 至 958 公尺代表高度崎嶇表面；959 至 4367 公尺代表極度崎嶇表面（圖 2-2-3(g)）。

(9) 地形位置指數 (Terrain Position Index, TPI)

地形位置指數為描述地形微地貌之指數，可用於分析地形起伏、水文過程和生態系統等方面。TPI 數值等於零或趨近於零代表平坦或接近連續之斜率；數值大於零則代表中心像素遠高於周圍區域，為山脊或山丘；小於零為中心像素遠低於周圍區域，代表山谷或溝壑底部（圖 2-2-3(h)）。

(10) 地形濕潤指數 (Topographic Wetness Index, TWI)

地形濕潤指數描述一個地區積水趨勢，常表土壤濕度（式 2-3）。數值越高代表其地區越濕潤，本計畫取用 2022 年資料繪製出臺灣本島的 TWI 分布圖（圖 2-2-3(i)）。

$$TWI = ln\frac{a}{tanb} \quad \text{（式 2-3）}$$

*a =上坡面積 (m^2)
*b = 坡度 （以弧度表示）

(11) 平均年均溫 (Mean Annual Temperature, MAT)

溫度資料取自中央氣象署 2011 年至 2020 年之測站資訊，當年度計算溫度之平均後，再行計算 10 年之平均，並以反距離權重 (Inverse Distance Weight, IDW) 進行空間推估（圖 2-2-3(j)）。

(12) 平均年總降雨量 (Total Annual Precipitation, TAP)

降雨量資料取自中央氣象署 2011 年至 2020 年公布的平均年總降雨量，使用 1 km 網格進行繪製。本計畫取用 2011 至 2020 年資料繪製出臺灣本島 TAP 分布圖（圖 2-2-3(k)）。

(13) 常態化植生差異指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

常態化植生差異指標取自 ESA 歐洲太空總署 Sentinel-2 所建立之 NDVI 數據庫，用以建立綠度土地利用資料來源。NDVI 為研究地表植物覆蓋的重要量化指標（式 2-4），NIR 為近紅外光反射，RED 為紅光反射。NDVI 數值落在+1 至-1 之間，數值越高則代表植物生長得越繁盛，數值越低則為不利於植物生長之土地覆蓋型態。Sentinel-2 每隔 5 天為全球提供 10 公尺之正弦投影之網格影像以建立 NDVI 數據庫(Wu *et al.*, 2017)。本計畫取用 2015 年六月至 2020 年底之逐月資料，並將各網格影像中之 NDVI 數值進行平均，用以大致瞭解臺灣林帶之綠覆情形（圖 2-2-3(l)）。

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \qquad \text{（式 2-4）}$$

(14) 土壤分類

美國農部於 1975 年建立土壤分類系統，並由農試所參考繪製臺灣土壤分類之土綱分布情形。

(二) 資料庫建置

1. 影響因子篩選方法

確定變數之間是否具有影響以及影響程度為何，能有效協助研究人員瞭解其中之因果關係，並藉此建立更為簡潔和強大之預測模型，從而提高計算效率和預測準確性(Lo *et al.*, 2015; Nachman *et al.*, 2013)。模型建置時，時常會將具有相關性的因子都納入考量，即使這些因子具有文獻佐證其相關性，並具有準確的方向性，但各地所受到因子的影響程度都有所不同 (Akoglu, 2018; Cohen, 1969; Jupp *et al.*, 1980)。舉例來說，歐洲西部盛行西風，並會隨著北大西洋高壓帶，會有季節上的位移及影響範圍，而臺灣四面環海，地處亞熱帶及熱帶交界處，具備熱帶季風氣候的氣候特徵，因此在成土因子中的「氣候」應審慎評估避免誤植。如前所述，本計畫取用之影響因子參考 Ma *et al.*(2017) 文獻，該文獻因研究試區位於東亞，與臺灣氣候相近，因此在使用上無前述所言之情形。即使如此，該地能夠被正確使用之因子可能對於臺灣會有所不同；因此，須將各項因子進行「逐步回歸法 (Stepwise Regression)」，以評估各項因子間的顯著性、影響程度等，避免 GIGO (Garbage In, Garbage Out)，意旨進入系統的數據或指令是錯誤或低品質的，那麼輸出的成果也將會是錯誤或低品質的的情形發生 (Bendel *et al.*, 1977; Henderson *et al.*, 1989; Jennrich *et al.*, 1968)。

逐步回歸法能夠找出一組最佳的預測變數，從而使得模型變得既簡潔又有效，特別是在建立線性回歸模型時，較能達到最佳效益。逐步回歸法的篩選方式分為「向前(Forward)」及「向後(Backward)」(Bendel *et al.*, 1977; Henderson *et al.*, 2021)。前者是從一個不包含任何預測變數的模型開始，並且在僅有一個常數項下，逐一添加變數，藉由觀察變數對於模型的影響程度，以判斷該變數對於模型的影響大小；後者則是一開始就包含所有的預測變數，並藉由逐一移除變數，查看在該變數被單獨移除後，對於模型的影響程度，以判斷該變數對於模型的影響大小。兩者各有優勢與劣勢，總體來說，當變數數量龐大，向前法通常比較高效，因為從小模型開始建立；向後法則在資料庫極為龐大時較為有利，至於判斷變數數量的多寡，則以該研究領域有關，並沒有準確的公式表示。本計畫所使用之變數數量在初始時共有 36 個，為能高效運算成果，則以向前逐步回歸法進行變數精煉 (Derksen *et al.*, 1992; In *et al.*, 1997; Montanaro *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007; Zhang, 2016)。向前逐步回歸法之施作流程如下：

(1) 建立資料庫

資料庫於建置時，須注意資料類型，如為類別型資料，應確認是否由數值型資料轉置成類別型資料，避免模型誤判資料庫中須盡可能避免「No Data」，本計畫於資料庫建立前期已將 No Data 資料刪除。

(2) 逐步添加變數

逐一考慮將每個未被選入模型的預測變數添加到模型中。對於每個預測變數，計算添加該變數後模型之性能指標，包含決定係數 (R^2) 增量和模型的赤池資訊量準則 (AICc)。

(3) 選擇最佳變數

被選定的變數中，能使模型性能最大化的預測變數添加到模型中。性能可以根據不同的準則來衡量，如最小化預測誤差、最大化 R^2或最小化資訊量準則等。

(4) 重複添加過程

重複上述過程，每次都選擇一個新的變數添加到模型中，直至達成停止標準。停止標準能是預先設定的變數數量上限、模型性能的改善不再顯著，抑或是達到某個資訊量準則臨界值。本研究先以篩入顯著性為 0.1 之變數，篩出顯著性為 0.1 之變數執行。

2. 影響程度評估

隨機森林中具備重要性評估，通過評估每個變數在決策樹分割點上以計算變數之重要性。變數在模型預測性能上的貢獻，以通過「百分比均方誤差 (%IncMSE)、節點不純度減少值 (IncNodePurity)」進行衡量，並且在不依賴於變數之間之線性關係下，能夠捕捉複雜之交互作用 (Han *et al.*, 2016; Louppe *et al.*, 2013, 2014)。逐步回歸法則建立在變數間關係為線性之前提下，因此逐步回歸法適用於線性關係之探討，而非非線性關係 (Auret *et al.*, 2012)。

在資料初步研析中，常以逐步回歸法進行線性關係之探討，原因在於逐步回歸法具有簡單之特性，對於變數間之探討具有關鍵性之作用；隨機森林之影響程度評估雖然能探討非線性之變數關係，但也因為如此，各項數據集需審慎瞭解資料及其學理背景下合理關係，也因各項數據集不同，所訂定之影響程度閾值也會不同。為求初始分析以探討相關變數為主，此階段暫以逐步回歸法訂定重要變數，於後續討論並精進變數方法學。

(三) 模型建置

1. 多元線性回歸模型

確立自變數後，將各土層之土壤有機碳儲存量進行線性擬合。建立簡易線性模型能將自變數與應變數之關係簡化，能初步瞭解該關係是否符合學理之外；同時，作為模型比較基礎，任何比此更複雜之模型應當比線性模型表現能力更佳，以證明其額外複雜度之必要性，並評估模型是否需進行精進之依據 (Olaya-Abril *et al.*, 2017)。

2. Cubist 模型

Cubist 模型為一種用於預測連續目標變數之機器學習，可將其視為決策樹 (Decision Tree) 之延伸，並結合線性回歸模型之多項特性，亦即由多個回歸模型組成。此模型適合處理大量特徵和非線性關係之資料庫，並且在保持模型解釋性之前提下，同時提供極佳的預測能力 (John *et al.*, 2020, 2021)。模型會創建一系列之規則，每條規則都有其對應數據的特定子集，並針對該子集進行線性回歸。這些規則用於對數據進行劃分，使得每個子集都相對均勻且簡易，滿足各項規則皆可用線性回歸式描述之。

Cubist 模型具有易於理解之特性，作為模型訓練之基礎，能快速調整其中參數，適配數據集之特徵及變化，進而解釋自變數與應變數之非線性關係及其複雜之交互作用。由於其簡易架構的優點，應用領域包含金融、醫療、生物統計等皆有卓越的貢獻。

3. 隨機森林模型

隨機森林（Random Forest，後簡稱為「RF」）為一種集成學習，以多個決策樹為預測結果，以提高整體模型之準確性及穩健性 (Robustness)。決策樹透過將特徵空間劃分為多個區域進行預測，每個區域都代表著一種類別，並依此分類各項數據，直至所有數據皆有所屬。為了增加模型的泛化能力 (Generalization)，會在每種決策樹隨機增加特徵以增加模型的多樣性。隨機特徵將能使模型高度擬合數據型態而不至於過擬合 (Overfitting)，多數領域應用隨機森林的原因在於隨機森林能分析多數非線性之關係，而現實生活中各項變數多數為非線性關係，因此模型較能貼近實際情形，並即時做出因應 (Belgiu *et al.*, 2016; Biau *et al.*, 2016)。

隨機森林最大的缺點，調配出適合模型之超參數需要耗費較高的計算成本。隨機森林會反覆學習特徵，因此在建立單一個隨機森林模型時，須建立數個小模型相互輔助，因此在設備上之限制高於其他集成模型許多 (Qi *et al.*, 2012)；再者，雖然能適配出數據庫之大體趨勢，但也因為其以大局為重之特性，使得特殊情境下之數據可能被弭平（如極端值或其他群值）。但就所有機器學習而言，高度的準確性及穩健性仍舊對於初步建立模型以瞭解整體趨勢上，並求其具有一定精度之研究來說，為所有機器學習中之首選 (Breiman *et al.*, 2001; Pal *et al.*, 2005)。

選用此三種模型為本次研究之方法學，在於能廣泛瞭解資料分布型態及各項因子之間之關係。多元線性回歸使用最小平方法捕捉應變數與自變數的線性關係，簡單且解釋性強，可捕捉到資料的基本趨勢，但對非線性資料的預測有限。Cubist 模型根據資料特徵，使用決策樹將資料拆分成數個子集，並在每個子集內擬合線性回歸，適合處理非線性關係。而隨機森林模型由多個決策樹組成，能詳細捕捉到資料的變異和非線性關係，預測結果精細且已廣泛運用在 DSM，但其結果較難以解釋且需要經過反覆訓練尋找模型的超參數，亦即為決策樹的數量，預期花費時間比其餘兩個高。那這三個模型各有優缺點，最終選擇的模型將依據資料的特性和預測需求決定。

(四) 模型效能評估

在建立模型後，利用指標進行評估至關重要，能從不同角度衡量模型性能及穩定性並協助建模者如何精進及修改模型；除此之外，模型往往會在建立前，將整體資料拆分為訓練資料及驗證資料，前者為訓練模型使用，後者則利用外部資料，餵入整體模型以瞭解該模型是否具備外推性，同時驗證該模型是否為適配訓練資料而有過擬合之情形發生。

為評估模型性能，經常使用下述五項指標進行模型評估，分別為 R^2（解釋能力）、Concordance(一致性指數)，以及損失函數，分別為均方誤差 (Mean square error, MSE)、均方根誤差 (Root Mean square error, RMSE)，最後則為偏差 (bias)，並由下逐一說明之 (Bach *et al.*, 2013; Pandit *et al.*, 2019)。

1. 決定係數 (R^2)

也稱為決定係數，用於量化模型中應變數對於變異量為何，可由一個或多個自變數通過回歸關係來解釋模型，並能作為模型擬合優度之指標，反映模型對觀測數據之「解釋能力」。R^2 數值介於 0 至 1 之間，值越接近 1，意味著模型解釋能力越強。然而，高度的 R^2 並不意味模型為最佳，因其未考量模型之複雜度，而有可能出現過擬合 (Overfitting) 之情勢 (Hawkins *et al.*, 2004; Ying *et al.*, 2019)。

2. 一致性指數 (Concordance)

一致性指數（亦稱為「C-index」）為衡量預測模型對時間至事件數據預測能力之主要指標之一，指模型預測與實際觀察結果之間之一致性或相關性 (Flaxman *et al.*, 2011)。倘若該模型 C-index 為 0.8，即為在無隨機錯誤之情況下，該模型正確預測樣本中事件發生順序概率為 80%。亦即當模型預測某一樣本較另一樣本有較高風險時，在 80%的情況下，該樣本能更早的發生事件 (Cheng *et al.*, 2015)。C-index 越接近 1，模型的預測效能越好；越接近 0.5，則表明模型預測效能差。

3. 均方誤差 (Mean Square Error, MSE)

為了能夠取得模型的最佳解，需要對該模型參數進行適度的調優，為確定調整模型參數方向正確，需要一個指標來評估，損失函數 (Loss Function) 能夠作為簡易評判之標準，適度為調整模型提出建言。基於空間推估模型，期予推估值與觀測值差距越小越好，此差距即為殘差 (Residual)，同時也是損失函數中的損失 (Loss)。評估損失有多種方法，本計畫以最為常見之均方誤差及均方根誤差為評估指標。

計算每個樣本預測值與實際值之差，並將差值進行平方並求和。MSE 越小，表示該模型預測結果越接近實際值，即模型性能越好。當 MSE 為 0 時，表示模型的預測完全準確。MSE 最大的優點在於較大的誤差給予更高的「懲罰 (Penalty)」，因誤差值取自平方，能使模型誤差相較於平均絕對值誤差 (Mean Absolute Error, MAE) 更加敏感 (da Silva Chagas *et al.*, 2016)；反之，MSE 的缺點在於極端值 (Outlier) 較為敏銳。當存在極端值時，MSE 可能加劇誤差影響模型之程度。

4. 均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE)

RMSE 為將 MSE 取平方根，RMSE 越小，表示模型的預測結果越接近實際值，即模型解釋能力越好。RMSE 既具有 MAE 之優點，即與原始數據單位保持一致(因 RMSE 為 MSE 的平方根)，同時具備 MSE 之優點，即能將極端值給予更大懲罰之特性 (Zhou *et al*., 2016)。

5. 偏差 (Bias)

機器學習中，偏差為模型預測平均數上描述不精確性，即模型預測之平均數與實際數據之差異。高偏差通常表以模型過於簡單，未能捕捉數據中之關鍵結構（即「欠擬合 (Underfitting)」)，並間接影響模型之泛化能力 (Generalization)。

(五) 模型驗證（不確定性評估）

為了確認模型具有代表性，當外部資料餵入時，評估是否具備與訓練模型一樣之效能，須對模型進行驗證。拔靴法 (Bootstrap) 為一種交叉驗證方法 (Cross-Validation)，用以評估模型穩定性和性能之不確定性具有強大且相對簡單之優點，廣泛應用於統計推斷、模型評估和其他需要估計不確定性之分析等 (Liaw *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2020)。從原始數據集中透過隨機重複抽樣估計敘述統計量（如平均值、中位數、變異數）之分布，再行估量不確定性和建立信賴區間，尤其當傳統假設（如常態分布）可能不成立或樣本量較小時極為適用。透過在不同 Bootstrap 樣本集上訓練和測試模型，能確立模型預測之變異性，從而更好地瞭解模型在面對不同數據時之泛化能力 (Altman *et al.*, 2017)。

本計畫應用 Bootstrap 法進行不確定性評估，透過重複抽樣建立多個訓練集，分別計算模型評估指標，並呈現其平均值與標準差，藉此評估模型性能的穩定性；同時，將這些模型的預測結果地圖進行套疊，依據過往數位土壤繪圖相關研究 (Padarian et al.,2017; Padarian et al.,2019)，以 90%預測區間建立不確定性空間分布圖，以評估不確定在空間分布上的差異。該方法不僅能量化模型性能的穩健性 (robustness)，也能視覺化預測結果不確定性的空間分布，有助於掌握預測結果的可信程度。

三、計畫查核點辦理情形

(一) 契約變更

為使計畫順利推動，本研究團隊不定期與林業及自然保育署進行工作會議，報告工作進度及未來執行方向。本計畫已召開二場工作會議，會議討論議題及決議整理如附件 2，並依決議進行契約變更（表 2-3-1、表 2-3-2）（參照附件 2）。

表 2-3-1 變更工作項目對照表

服務建議書	原工項	修正工項
四、工作項目及內容	（二） 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次 1. 舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習土壤繪圖軟體基本操作（3 天課程）： 辦理工作坊或實習課程，林業署、各分署及農航所代表（每單位 3 至 4 人），規劃實習課程及工作坊含演講（9 小時）及土壤繪圖軟體基本操作（9 小時），內容包含臺灣的森林土壤、國內外土壤碳匯現況、增匯減排，基本操作練習森林土壤剖面碳量計算、ArcGIS Pro 基本操作、地理統計技術與軟體應用。 2. 舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習數位化土壤繪圖(Digital soil mapping)技術（3 天課程）： 辦理工作坊或實習課程，林業署、各分署及農航所代表（每單位 3 至 4 人），規劃實習課程及工作坊含演講（9 小時）及森林土壤碳匯量估算和繪製練習（9 小時），內容包含地理統計發展及其在土壤環境科學之應用、土壤碳匯量計算、土壤碳匯空間分布，練習數位化土壤繪圖技術 (Digital soil mapping)，繪製臺灣山區一案例之森林土壤碳匯分布初步地圖。以荖濃溪為例，繪製荖濃溪工作站（4.7 萬公頃）森林土壤碳匯分布初步地圖。	（二） 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上(活動總時數至少 36 小時，培訓人員總數需達加總人數 60 人次以上） 舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程，邀請林業保育署暨各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關等人員出席，以增進對森林土壤碳匯及調查技術之瞭解，活動總時數至少 36 小時，總參與人次達 60 人次以上。內容應包含： 森林土壤類型及碳匯調查技術之基礎知識、森林土壤繪圖軟體應用及碳匯量計算、繪製森林土壤碳匯地圖等實作課程。

表 2-3-2 變更重要期程與工作檢查項目對照表

原工項

檢核點	驗核標準	交付期限
第 1 期	提出工作執行規劃	決標日次日起一個月內
第 2 期	1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。 3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。 ~~4.舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次。~~	112 年 12 月 31 日前
第 3 期	1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。 2.精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。	113 年 5 月 31 日前
第 4 期	1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。 2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	113 年 11 月 30 日前

修正工項

檢核點	驗核標準	交付期限
第 1 期	提出工作執行規劃	決標日次日起一個月內
第 2 期	1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。 3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。	112 年 12 月 31 日前
第 3 期	1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。 2.精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。 3.辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上（活動總時數至少 36 小時，培訓人員總數需達加總人數 60 人次以上）。	113 年 5 月 31 日前
第 4 期	1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。 2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	113 年 11 月 30 日前

(二) 各階段審查標準

依本專案徵求文件及勞務採購契約規定，本計畫執行期可分為四期，各階段之查核項目與工作要求詳列如下（表 2-3-3）。

表 2-3-3 重要期程與工作檢核項目

項次	驗核標準	交付期限	交付項目
第 1 期	提出工作執行規劃。（1 式）	決標日次日起 一個月內	紙本 3 本 / 電子檔 2 份
第 2 期	1. 彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。（1 式） 2. 彙整國內重要機關土壤調查資訊。（1 式） 3. 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。（1 式）	112 年 12 月 31 日前	紙本 15 本 / 電子檔 2 份
第 3 期	1. 建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。（1 式） 2. 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。（1 式） 3. 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上（活動總時數至少 36 小時，培訓人員總數需達加總人數 60 人次以上）。（2 梯次）	113 年 5 月 31 日前	紙本 15 本 / 電子檔 2 份
第 4 期	1. 國內森林土壤調查點位之碳匯推估。（1 式） 2. 研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。（1 式）	113 年 11 月 30 日前	紙本 15 本 / 電子檔 2 份
成果報告	各期工作資料彙整及依期末審查意見修正（1 式）	期末審查會議後，依規定期限繳交	紙本 5 本 / 電子檔 3 份

(三) 第四期辦理情形

本計畫自 112 年 8 月 10 日完成議價程序後，截至 113 年 11 月 30 日止，對應第 4 期查核點之已辦理情形歸納如下（表 2-3-4），各工作項目詳細辦理情形則如後各章節所述。

表 2-3-4 各工作項目辦理情形

第 4 期查核項目	辦理情形	頁碼
1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。	全臺 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量約 132 百萬公噸（484 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 159 百萬公噸（583 百萬公噸二氧化碳當量）；0-50 公分森林土壤有機碳儲存量約為 188 百萬公噸（690 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 214 百萬公噸（785 百萬公噸二氧化碳當量）；0-100 公分森林土壤有機碳儲存量約為 283 百萬公噸（1,038 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 309 百萬公噸（1,133 百萬公噸二氧化碳當量）；0-150 公分森林土壤有機碳儲存量約為 303 百萬公噸（1,111 百萬公噸二氧化碳當量），加上枯枝落葉層後約為 330 百萬公噸（1,210 百萬公噸二氧化碳當量）。	P219-P384
2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	臺灣 0-150 公分的森林土壤碳儲存總量約為 330 百萬噸，碳儲存量隨海拔升高，氣溫下降而增加。熱帶森林的碳儲存量最低，寒帶森林的最高，這趨勢與全球森林土壤一致。 本期遇到的問題主要有，高山地區預測誤差過大、在採樣點稀少的地方預測精度不佳。未來可由增加資料量、運用 GIS 捕捉地形特徵、使用更全面的特徵工程進行資料處理等方式來處理。	P385-P398

參、工作推動及執行成果說明

一、研析國外、國內外森林土壤碳匯研究（含方法學）成果

本工作項目盤點並彙整國內外的森林土壤有機碳儲存量研究成果，瞭解國外、國內森林土壤有機碳儲存量研究趨勢，提供本計畫研究之參考。臺灣過去由政府、學術單位等執行之森林土壤調查資料尚未彙整與分析，藉由此工作項目執行過程，將全國所有森林土壤調查實測資料彙整為資料庫，以完備國內森林土壤有機碳儲存量資料庫。

為因應全球面臨氣候變遷威脅，世界各國已積極推動不同部門之碳淨零政策與目標。森林是陸地生態系統最大的碳庫，佔整個陸地生態系統的 46.6% (Luyssaert *et al.*, 2008; Pan *et al.*, 2011)。過去在計算碳儲存量時多著重在森林地上部，而忽略了土壤中碳儲存量計算，低估了碳儲存量。森林土壤有機碳儲存量之計算相比於農地土壤及平地土壤，因森林植物組成種類豐富、土壤類型多元化、地形種類繁多、氣候類型不同、坡度不同等因子，讓森林土壤有機碳儲存量更加難以估算。

森林土壤具有極大的空間變異 (Spatial Variability)，實際進行土壤調查需耗費大量人力、物力與時間，因此土壤轉換函數應運而生 (Briggs *et al.*, 1907)，含地域分析、地形屬性分析。由不同地域屬性所建立之回歸式可用來解釋研究區域中 41 至 64%之變異 (Moore *et al.*, 1993)。利用地域分析與地理資訊系統所繪製之土壤圖與依傳統調查方式所繪製出土壤圖作比較，相似性介在 40%至 79%間 （陳尊賢等人，2002；蔡呈奇等人，2002），可有效節省調查時間減少人力與物力消耗，並能提供合理的可用資訊。

森林土壤有機碳儲存量可應用數位土壤繪圖技術估算區域性有機碳儲存量 (Lugato *et al.*, 2014; McBratney *et al.*, 2003)。應用資料蒐集、資料輸入、模型訓練、模型驗證、預測圖資之過程，推算森林土壤有機碳儲存量。本研究初期協助彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林土壤有機碳儲存量研究成果、重要議題、各國重要碳淨零政策與目標、森林土壤有機碳儲存量相關方法學及地理資訊系統於森林土壤有機碳儲存量之相關應用，概述如表 3-1-1。

林業署已完成的森林土壤資料庫，有大量的調查樣點（近 8,000 筆僅土壤剖面形態特徵描述）(1993-2002) 與 500 筆以上的土壤剖面土壤碳含量、總體密度與基本性質分析資料。另外，林試所又陸續增加調查了 100 個土壤採樣剖面，主要以極育土(Ultisols)、弱育土 (Inceptisols) 與新成土 (Entisols) 為主之土壤剖面分析資料（杜清澤，2010-2012），已調查之點位及各學術單位的土壤調查點位於後續章節述明。

表 3-1-1 不同國家森林土壤有機碳儲存量之研究成果彙整概況

重要議題	項目說明	資料來源（資料邊界）
碳淨零	彙整全球先進國家之淨零政策，整理正在推動之碳淨零政策與目標	聯合國氣候行動網站 https://unfccc.int/ 歐盟氣候行動網站不同國家森林土壤碳匯研究成果之彙整規劃 美國淨零目標網站 https://climateactiontracker.org/countries/usa/net-zero-targets/
森林土壤有機碳儲存量方法學	彙整全球森林相關研究成果，彙整重要文獻與森林土壤有機碳儲存量之方法學	Lal, 2005（世界森林）；Luyssaert *et al.*, 2008（世界森林）；Pan *et al.*, 2011（世界森林）；Achat *et al.*, 2015（世界森林）
森林土壤有機碳儲存量調查報告	彙整目前已知全球森林土壤有機碳儲存量調查資料，包含各地試驗結果或推動報告，分析評估過程之關鍵執行因子	美國森林網站的森林土壤碳倡議 https://www.americanforests.org/project/forest-soil-carbon-initiative/ 微生物學會網站的瞭解熱帶森林土壤有機碳儲存量 Zhang *et al.*, 2022（中國北京）；Akinbode *et al.*, 2022（非洲）；Martin *et al.*, 2021（法國）
應用地理資訊系統進行數位土壤繪圖(Digital soil mapping)	彙整國際重要科學研究成果，包含應用數位土壤繪圖技術相關成果、估算區域性有機碳儲存量、應用資料蒐集與輸入等模式、模型訓練與驗證等相關作法與執行上的困難	Briggs and McLane, 1907（美國）；Moore *et al.*, 1993（美國）；Lugato *et al.*, 2014（歐盟）；McBratney *et al.*, 2003（世界森林）；Huynh *et al.*, 2022（越南）；Bulmer *et al.*, 2019（全球森林）；Farooq *et al.*, 2022（查謨和喀什米爾）
其他	彙整世界先進國家林業推動過程相關數據，收集重點目標、關鍵問題與挑戰	美國農業部林業署網站 https://www.fs.usda.gov/ 聯合國農糧組織網站 https://www.fao.org/home/en 歐洲林業部門網站 https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/forestry_en

(一) 彙整國外森林土壤碳匯研究成果

● 工作推動說明

森林土壤有機碳儲存量研究領域所涉及議題，包含森林土壤有機碳儲存量方法學、森林土壤有機碳儲存量調查與地理資訊系統應用等相關研究，經本團隊彙整、分析後，本計畫針對各議題進行重點整理。

● 執行成果

1. 森林土壤有機碳儲存量方法學（世界森林）

森林生態系中的碳 (C) 儲存牽涉多種元素，包括生物量碳和土壤碳（圖 3-1-1）。全球森林總面積約為 40-50 億公頃 (ha)，蘊藏約 860 Pg C。其中超過 30%之面積為未受人為管理之原始森林。根據分析，這些原始森林每年可吸收約 13±5 億 t C (Luyssaert *et al.*, 2008; Raihan *et al.*, 2019)。全球範圍內，約有 40%以上之總有機碳儲存於陸地森林土壤中，這數據基於 IPCC(2007) 和 Wei 等人的研究(2014)。

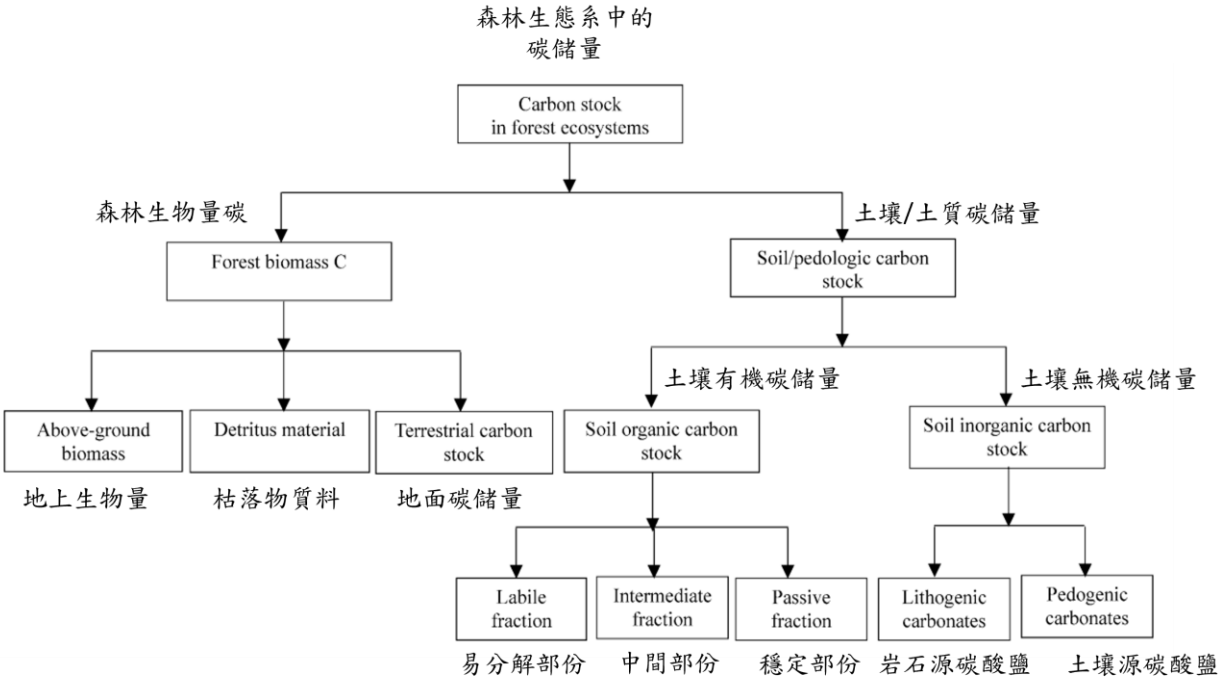


圖 3-1-1 森林生態系碳儲存分類
（資料來源：Lal *et al.*, 2005）

在全球範圍內，土壤以有機形式儲存的碳量約為大氣中碳之兩到三倍，在大多數 IPCC 氣候區域中都得到了確認 (Ray *et al.*, 2011; Scharlemann *et al.*, 2014; Vashum *et al.*, 2012)。在陸地生態系中，近一半之總有機碳 (C) 儲存在森林土壤中（圖 3-1-2）。隨著緯度增加，土壤碳與植被碳之比亦增加，比例範圍為高緯度 3 至 17、中緯度 1.2 至 3 以及低緯度 0.9 至 1.2（表 3-1-2）。

土壤有機碳儲存量和品質受到多種自然和人為因素影響。自然因素包括氣候（風、火災、乾旱等）、植被、地形和疾病等；而人為因素則包括森林經營管理、砍伐、農地轉為林地以及人工林後的管理等。土地利用的變化可能會消耗土壤碳庫，尤其是農業生態系轉變的情況，例如森林轉為農地，可能導致土壤有機碳儲存量降低 20%至 50%(Deng *et al.*, 2014; Lal *et al.*, 2005)。然而，進行農地造林有望扭轉部分土壤碳庫的退化，提升土壤有機碳儲存量。

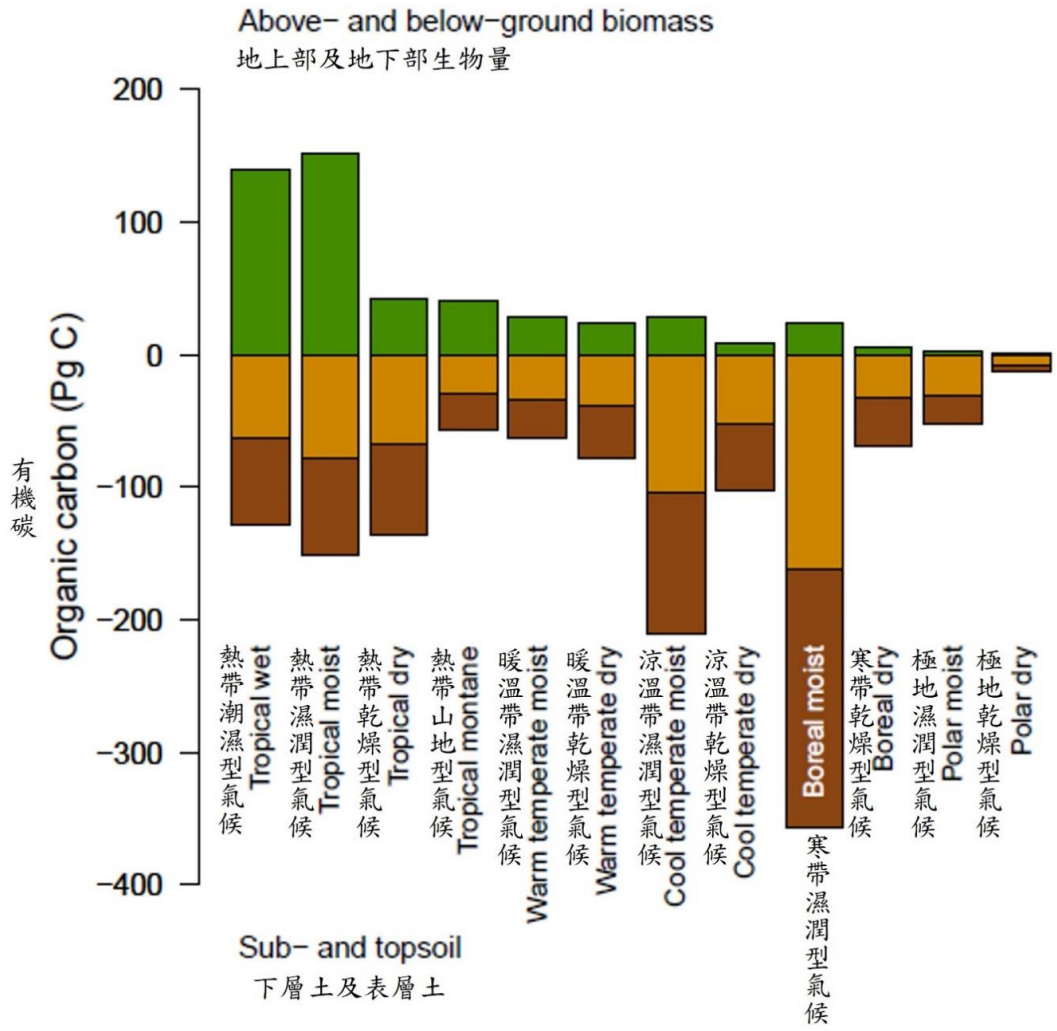


圖 3-1-2 全球不同氣候類型之有機碳在下層土及表層土與地上部及地下部的含量
（資料來源：Scharlemann *et al.*,2020）

表 3-1-2 不同緯度森林土壤與植被碳密度之比

緯度	地區（國家）	土壤 C：植被 C	碳通量(Pg C/year)
高	俄羅斯	3.38	+0.30 至+0.50
	加拿大	17.29	+0.08
	阿拉斯加	5.44	+0.48±0.1
	平均	8.70±7.50	
中	美國	1.74	+0.10 至+0.25
	歐洲	2.81	+0.09 至+0.12
	中國	1.19	-0.02
	澳洲	1.84	痕量
	平均	1.90±0.67	+0.26±0.09
低	亞洲	1.05	-0.50 至-0.09
	非洲	1.21	-0.25 至-0.45
	美洲	0.92	-0.50 至-0.70
	平均	1.06±0.15	-1.65±0.40
淨效應			-0.9±0.40

（資料來源：Lal, 2005）

依不同程度管理森林時，會對土壤碳的儲存產生影響。以下呈現 13 種常見森林管理方式對土壤碳之影響，並參考 Mayer 博士於 2020 年之研究（表 3-1-3）。

(1) 造林

造林對土壤碳之存儲有極大影響 (Bárcena *et al.*, 2014; Karhu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012)，該影響與過去土地利用之歷史息息相關。原為農田處經造林後，土壤有機碳儲存量通常會增加。而在草地和泥炭地之區域，造林後土壤有機碳儲存量可能保持不變，甚至減少 (Don *et al.*, 2011; Roulet *et al.*, 2000)。此外，土壤碳之吸存速率也受到樹種及土壤特性影響，代表有必要進行對造林後之長期碳儲存、碳穩定性以及深層土壤有機碳儲存量進行評估及研究。

(2) 原始林轉變為次生林與人工林

原始森林轉變為次生林與人工林會導致土壤有機碳儲存量下降 (Mayer *et al.*, 2020)，特別是如果在重新造林之前先將其轉變為農業用地。因此，為了土壤有機碳儲存量而保留原始森林，僅於區域自然擾動狀況下進行評估。由於「原始森林」定義不一致，全球估計森林轉化對土壤有機碳儲存量影響變得困難。

(3) 伐採

伐採會導致土壤有機碳儲存量減少 (Achat *et al.*, 2015; Clarke *et al.*, 2015; de Araujo Filho *et al.*, 2018)，其中碳損失最高為林地和表層礦質土壤。關於深層土壤有機碳儲存量研究相對少數，現有研究並未涵蓋許多土壤類型，需要針對一系列土壤和森林生態系類型建立長期研究地點，並研究解決收穫後土壤碳損失之機制。

(4) 清除收穫殘留物

清除收穫殘留物對森林土壤有機碳儲存量有整體負面影響，整棵樹和樹樁採伐作業後土壤碳損失最大，在營養貧乏的地區，對生育力、生產力和長期碳吸存產生嚴重後果。

(5) 整地土壤擾動

整地可能導致土壤擾動，進而減少土壤碳之儲存量 (Deng *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2002)，特別是對有機表土影響較大；然而，透過改善樹苗生長情況，此損失在輪作期間被補償。若將有機材料引入更深土壤層，將有助於提高碳穩定性。為更清楚地掌握不同管理技術（例如：整地、排水或有機層的調整）對土壤碳之影響，需要進行更深入的研究；同時，對泥炭地森林土壤有機碳儲存量的長期影響也需要進行進一步研究。

(6) 氮的添加

添加氮對各種森林生態系之土壤有機碳儲存量整體上有正面影響 (Frey *et al.*, 2014; Hyvönen *et al.*, 2008)，然而，仍需要平衡添加氮的好處與化石燃料燃燒相關環境成本，以及與肥料生產、分配和施用有關之 CO_2 排放。此外，氮在不同穩定性之土壤有機質中存在之形式，以及添加氮產生更多土壤碳庫之具體機制，這些研究能全面理解氮對土壤有機碳儲存量之影響。

(7) 具有固氮化合物的物種

帶有固氮能力樹種之土壤有機碳儲存量比其他樹種高，尤其在土壤質地惡劣區域，固氮樹種可以比其他樹種更快的增加土壤有機碳儲存量 (Wang *et al.*, 2010; Macedo *et al.*, 2008)。雖然固氮樹種可以促進土壤碳的累積，但整體機制尚未成熟。為了更深入理解整體運作需進行長期實地研究，以釐清樹木生長強化、地下碳分配增加，以及對土壤的擾動等因素對土壤有機碳儲存量的影響，將有助於更好地瞭解有機物降解的過程。

(8) 樹種選擇

樹種選擇會直接影響土壤有機碳儲存量，針葉樹種在森林地表中累積更多的碳，闊葉樹種往往在礦質土壤中儲存更多的碳 (Schulp *et al.*, 2008; Vesterdal *et al.*, 2008)。某些闊葉物種與枯落物分解和土壤大型動物有關，但對碳穩定之影響仍有待闡明。闊葉樹種於肥沃和溫暖之場地條件下吸收更多土壤碳，而針葉樹種於不太肥沃和涼爽條件下儲存更多的碳。樹種高度依賴環境，土壤碳吸存、碳穩定性以及物種與立地條件的相互作用應該在廣闊的空間範圍內進行研究。

(9) 樹種多樣性的管理

樹種多樣性的增加可以對溫帶和亞熱帶森林土壤有機碳儲存量產生積極影響(Liu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018)，但在許多情況下，沒有觀察到物種多樣性對土壤碳明顯之影響。樹種特性，特別是固氮樹種，對土壤有機碳儲存量之影響大於樹種多樣性。混合林對自然干擾和氣候變遷具有更強抵抗能力 (Jactel *et al.*, 2017)，這將保護土壤有機碳儲存量。

(10) 林分密度和間伐管理

林分密度和間伐管理對森林土壤有機碳儲存量影響較小，需要進行不同間伐強度的長期實驗，特別是在南美洲和非洲。

(11) 食草動物調節

如果排除有蹄類食草動物，土壤有機碳儲存量會相對較高。食草性監管被視為一種積極主動之管理方式，有助於積極影響森林生態系統中土壤有機碳儲存量 (Mayer *et al.*, 2020)。然而，熱帶森林方面之相關資訊相對有限，且對食草動物如何影響植物與土壤相互作用之認識普遍缺乏。建議沿著食草梯度進行實地實驗，以便預測臨界食草負荷和實現生態可持續族群密度。理解食草動物對土壤有機碳儲存量之影響，尤其是在熱帶森林生態系統中。

(12) 清除廢棄物和用於飼料、燃料和動物墊料

生物質與土壤有機碳儲存量減少有關 (Mayer *et al.*, 2020)，然而，如果用於動物墊料廢棄物隨後用作耕地的有機質肥料，則可以抵消負面影響。在評估社區依賴森林生物量清除之地區土壤碳時，須從景觀層面進行整體觀察。

(13) 消防管理

森林火災會對森林土壤有機碳儲存量產生負面影響 (Hurteau *et al.*, 2011; Meigs *et al.*, 2009)，預防森林生態系野火的做法包括砍伐易受影響的林分，轉變為不易燃物種（例如：從針葉樹種到闊葉樹種）。

表 3-1-3 13 種常見森林管理對森林土壤碳庫之影響

森林經營方式	對土壤碳的影響	知識差距	研究需求
造林 (Bárcena *et al.*, 2014; Karhu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2012)	正向，以農地轉成林地較顯著	對深層土壤有機碳儲存量和土壤碳穩定性的影響，主要驅動通量和過程。	針對礦物和有機土壤的時間序列的長期重複研究
原始林轉變為次生林與人工林 (Mayer *et al.*, 2020)	負向，特別是透過農業土地用途進行轉型時	經常缺乏用於基準測試的原始林的明確定義；有關長期影響的數據有限。	長期研究地點
伐採 (Achat *et al.*, 2015; Clarke *et al.*, 2015; de Araujo Filho *et al.*, 2018)	負向	現有研究未涵蓋許多土壤類型；關於深層土壤碳收穫影響的數據有限。	涵蓋一系列土壤和森林生態系類型的長期研究地點
去除收穫殘留物	負向	現有研究未涵蓋許多土壤類型及做法；關於長期影響和影響持續時間的數據有限。	涵蓋一系列土壤和森林生態系類型的長期研究地點
整地 (Deng *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2002)	負向	預期效果（更好的再生）和非預期效果（土壤有機質分解率增加）之間的權衡；土壤擾動效應持續時間未知。	土壤擾動引起的土壤碳損失的量化；土壤擾動對土壤有機質影響的機制理解
氮的添加(Frey *et al.*, 2014; Hyvönen *et al.*, 2008)	正向	氮摻入穩定土壤有機質的機制。	菌根真菌的組成和豐度變化之間的聯繫以及與額外營養物 (P、K) 添加的相互作用
選擇具有固氮夥伴的物種 (Wang *et al.*, 2010; Macedo *et al.*, 2008)	負向	增強樹木生長、增加地下碳分配和減少舊土壤流失的相對貢獻；N_2O 排放量的增加可以抵銷對土壤碳產生正面影響的風險。	針對碳封存和 N_2O 排放的綜合長期實地研究
樹種選擇 (Schulp *et al.*, 2008; Vesterdal *et al.*, 2008)	針葉樹種在森林地面儲存更多的碳；闊葉樹種可以在土壤礦質土壤中儲存更多（且更穩定）的土壤碳	瞭解與場地條件（土壤性質、氣候）的相互作用。	土壤碳庫大小和土壤碳穩定性以及常見花園實驗中驅動過程的大規模研究
樹種多樣性管理 (Liu *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018)	正向或中性	物種多樣性和功能多樣性的互動。	對不同程度的物種多樣性和功能多樣性的常見園林實驗進行長期、大規模的監測
林分密度和間伐管理	中性	關於土壤碳庫的長期影響和間伐強度的資訊有限。	不同林分密度和/或間伐強度的長期實驗
食草動物的調節 (Mayer *et al.*, 2020)	正向	熱帶森林的數據有限；缺乏對食草動物對植物及土壤之交互作用（包括物理干擾）影響。	沿著食草梯度進行實驗以描述生態上可持續之族群密度
清除廢棄物和生物質作為飼料、燃料或動物墊料	負向	農業、農林業和林業之間的相互作用。有關砍伐的地下根系生產/土壤碳影響的資訊有限。	永續森林飼料和薪材生產重複實驗
消防管理 (Hurteau *et al.*, 2011; Meigs *et al.*, 2009)	依每件滅火和燃燒的情況定義為正向或負向	火災引起之土壤加熱和生物物理過程的變化；未被充分研究的地區，例如中亞和熱帶地區。	較短的回歸間隔和更強烈的火災對火災敏感系統中土壤碳的影響

（資料來源：Mayer, 2020）

評估森林土壤有機碳儲存量之動態變化具有一定程度之挑戰性,與農地土壤相比,森林土壤更加複雜,若無過去土壤有機碳之基線數據,難以確定當前差異來自於何種「起始條件」,抑或為管理行動所致。土壤碳庫大小和變化影響整體生態系統之碳平衡,在更全面的考慮中,評估管理對減緩溫室氣體排放之影響,一方面需要考慮森林和生態系統碳儲存,包括重要土壤碳庫之間之協同作用和權衡;另一方面,須考慮森林木材、纖維或能源生產之替代和儲存效應。此外,應當關注土壤碳庫大小和變化對養分循環之影響,尤為森林管理活動而增加土壤有機碳儲存量,須保持土壤有機碳與養分之間的平衡,以確保森林養分能夠持續吸存。

2. IPCC 森林土壤碳儲存方法

參考《2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories》與《2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories》(為 2006 年 IPCC 指南的修訂版),IPCC 估算林地和轉化為林地的土地上生物量、死有機物質以及土壤有機碳變化產生的溫室氣體排放和移除,將森林所儲之碳庫 (Carbon Pool) 區分為生物量 (Biomass)(包含地上部及地下部生物量)、死有機質 (Dead Organic Matter)(包含死木與枯落物)、土壤 (Soils)(包含土壤有機質)等五種碳庫(表 3-1-4),並針對森林土壤碳儲存相關指引方法加以詳述。

IPCC 針對不同發展程度的國家提供不同的國家溫室氣體盤查方法如圖 3-1-3,(1)方法 1 (Tier 1):當國家缺乏估算溫室氣體所需參數及因子的數據時,可使用簡單公式及預設值,加上簡易活動數據調查(如面積)即可估算,但是結果不確定性高;(2)方法 2 (Tier 2):已建立國家特殊環境及條件之參數及因子數據,則可使用此國家特定數據導入第一層級方法的公式,進行更精準的估算;(3)方法 3 (Tier 3):國家有能力進行更全面性、更詳細、更準確及經常性的採樣量測,甚至可建立國家特定模式,所得結果有更高的確定性。

表 3-1-4 碳庫定義

碳庫		說明
生物量 (Biomass)	地上部 (Aboveground Biomass)	土壤上方所有活的木本和草本之生物量，包括莖、殘幹(Stump)、枝、樹皮、種子和葉。註：如果森林下層植被占地上部生物量碳庫比例較小，其值可以忽略不計入，但在整個調查時間中應一致。
	地下部 (Belowboveground Biomass)	活根的全部生物量。建議直徑低於 2 公釐的細根經常是不計入在內，因為只憑經驗將直徑低於 2 公釐的細根與土壤有機質或枯落物相區分是相當困難的。
死有機質 (Dead Organic Matter)	死木 (Dead wood)	除枯落物外的所有非活的木質生物量，無論是直立的、橫躺在地面上的或者在土壤中的。死木包括直徑大於或等於 10 公分的枯倒木、死根和殘幹。
	枯落物 (Litter)	所有非活的生物量，建議直徑應大於 2 公釐（因要與土壤有機物區分）及直徑小於死木所定義的最小直徑（例如 10 公分）、在礦質或有機質土壤上已經死亡的、各種程度的腐朽狀況的所有非活的生物量。這包括土壤類型所定義的枯落物層及在礦質或有機質土壤上的活細根（最小直徑應低於地下部生物量所規定）。
土壤 (Soils)	土壤有機質 (Soil Organic Matter)	包括達到所選擇深度的礦質土壤的有機碳，如在土壤中的活和死的細根和死有機質、如果不能憑經驗區分的最小直徑小於 2 公釐（建議值）的根及死有機質。土壤深度預設值為 30 公分。

（資料來源：IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, 2006）

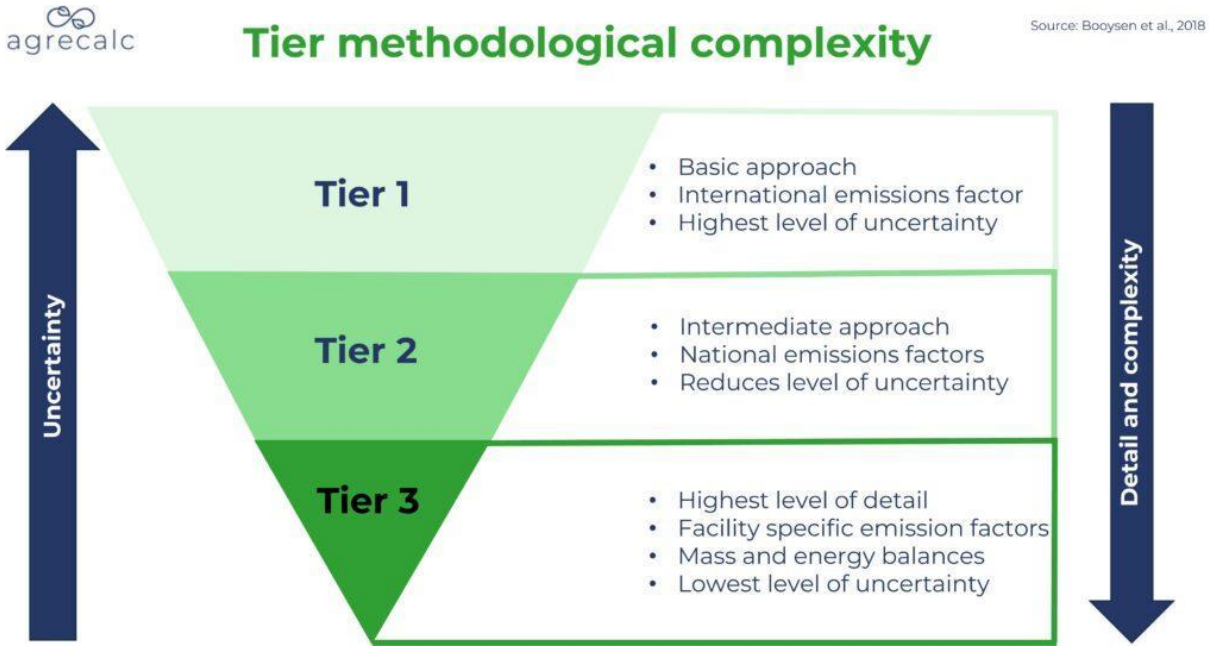


圖 3-1-3 IPCC 3 種方法示意圖
（參考來源：Booysen et al., 2018）

(1) 方法 1(Tier 1)

制定森林管理在不同氣候區域影響的預設排放係數（即在編制溫室氣體清單時使用的數據），目前的科學基礎還不夠完善，因此，在方法 1 中，暫時假設森林土壤有機碳儲存量不會受到管理活動的影響。最近的研究指出，對土壤有機碳儲存量的影響難以確定，不同的報告甚至可能相互矛盾。如果使用方法 2 或方法 3 的活動數據，無需計算礦物土壤有機碳儲存量變化（即土壤有機碳儲存量的變化為零）。而如果使用方法 1 的活動數據，且無法確定由森林轉換成林地的土地數量，清單的製作者應當在清單期的開始和結束時估算林地土壤有機碳儲存量，以評估土壤有機碳儲存量的變化。

將林地土壤有機碳儲存量的變化與其他土地利用方式的儲量變化相加，可以估算土地利用變化的影響。如果編製清單的人沒有計算林地的存量，可能會導致系統性錯誤。例如，將土地從林地轉換為耕地或草地的情況，可能在清單的最後一年估計土壤有機碳儲存量，但在清單的第一年（當它是森林時）則可能沒有儲量。這樣的話，轉換為耕地或草地被認為是土壤碳的增加，因為假設林地中的土壤有機碳儲存量為零，而耕地和草地中的不是，這可能會導致對碳儲存量的估計產生偏差。在使用（式 3-1）、（式 3-2）估計土壤剖面頂部 30 cm 的 SOC0 和 SOC0-T 時，需要注意，裸露的基岩面積在土壤有機碳儲存量的計算中並不包括在內，假設這部分土壤有機碳儲存量為零。

$$\Delta C_{Mineral} = \frac{(SOC_0 - SOC_{(0-T)})}{D} \qquad （式 3-1）$$

$$SOC_{Mineral} = \sum_{c,s,i}(SOC_{REF_{c,s,i}} . F_{LU_{c,s,i}} . F_{MG_{c,s,i}} . F_{I_{c,s,i}} . A_{c,s,i}) \qquad （式 3-2）$$

*$\Delta C_{Mineral}$ = 礦質土壤有機碳匯量的年變化，tonnes C yr^{-1}

*SOC_0 = 礦質土壤有機碳匯量 ($SOC_{Mineral}$) 在清查時間段的最後一年，tonnes C

*$SOC_{(0-T)}$ = 礦質土壤有機碳匯量 (SOCMineral) 在清查期初，tonnes C

*T = 單個庫存時間段內的年數，yr

*D = 礦質土壤有機碳匯量變化因數的時間依賴性，默認時間為平衡 SOC 值之間的過渡期，yr。通常為 20 年，但視情況而定基於計算 F_{LU}、F_{MG} 和 F_I 因素時所做的假設。如果 T 超過 D，則使用該值讓 T 獲得庫存時間段（0-T 年）的年變化率

*c = 表示清單中包括的氣候區

*s = 表示清單中包含的土壤類型

*i =表示清單中包含的一組管理系統

*$SOC_{Mineral}$ = 特定時間礦質土壤有機碳總儲量，tonnes C

*$SOC_{REFc,s,i}$ =參考條件下礦質土壤的土壤有機碳匯量, tonnes C ha^{-1}

*$F_{LU\ c,s,i}$ = 礦質土壤有機碳土地利用系統或特定土地利用子系統的儲量變化因數，dimensionless

*$F_{MG\ c,s,i}$ = 礦質土壤有機碳管理體制的儲量變化因數，dimensionless

*$F_{I\ c,s,i}$ = 礦質土壤有機碳輸入量變化因數，dimensionless

*$A_{c,s,i}$ =正在估算的地層的土地面積，ha

(2) 方法 2 (Tier 2)

礦質土壤中有機碳的總存量可以通過（式 3-1）和（式 3-2）計算。這兩個公式考慮了土壤有機碳儲存量和特定國家的儲量變化因素，這些因素包括森林類型(forest type, F_I)、管理方式 (management, F_{MG}) 和自然擾動制度 (natural disturbance regime, F_{ND})。特別需要注意的是，（式 3-2）中的土地利用因素 (land-use factor, F_{LU}) 使用自然擾動機制(F_{ND}) 的儲量變化因素來代替。

此外，為了更準確地指定土壤有機碳儲存量，還可以納入特定國家的資訊，如參考碳儲存量、氣候區域、土壤類型和/或土地管理分類系統。這樣的資訊可以提高模型的準確性，使其更符合實際情況。

(3) 方法 3 (Tier 3)

方法 3 的建立需要充分的知識和數據，以制定正確且全面的國內估算方法，包括對模型結果的評估以及實施國內監測計畫和/或建模工具。方法的基本要素可以總結為以下四點（改編自 Webbnet Land Resource Services Pty ltd，1999 年）：

(A) 按照氣候帶、主要森林類型和管理制度的劃分進行分層，使其與清單中其他碳庫，尤其是生物量的分層相一致。

(B) 確定各地層中的主要土壤類型。

(C) 描述相應的土壤碳庫，明確土壤有機碳輸入和輸出速率中的決定因素過程以及這些過程發生的條件。

(D) 制定和實施適當的方法，基於業務需求估計森林土壤中每一層的碳儲存量變化，包括模型評估程式；在方法方面的考慮應該包括監測活動（如重複的森林土壤調查）和建模研究的結合，以及建立基準網站。科學文獻提供了有關良好土壤監測實踐的進一步指導 (McKenzie *et al.*, 2000) 為此目的開發或改編的模型應經過同行評審和驗證，確保其觀測結果能夠代表所研究的生態系統，並且具有獨立於校準數據的可信性。

(4) 以國家為範例說明 IPCC 方法 3（澳洲、芬蘭）

A. 澳洲

澳洲採用 FullCAM 模型估算土壤有機碳儲存量，應用於 25 m × 25 m 的區域，被視為最佳的遙測尺度，能夠有效檢測土地利用變化，同時評估各種土地類型的碳儲存量變化。

在數據的提取方面，模型使用每日和每月的氣候數據，以及對土壤特性的空間估計值。這些數據是模型運行所需的重要輸入。初始的土壤有機碳儲存量基於國家地圖分配到三個有機碳組分中，這為模型的啟動提供了基礎。

透過國家農業統計數據，模型考慮了種植的作物和牧場的類型、管理做法以及它們在土地區域中的相對分配。植物生長模型以水的可用性和降雨量為基礎定義總增長，這進一步影響了土壤有機碳儲存量。

FullCAM 模型按月時間運行，使用一級衰變方程來模擬可分解和抗性植物材料、腐植質碳庫的碳發生分解。最後，通過在不同情景下運行模型，從 1970 年至今量化了管理對土壤有機碳儲存量的影響，以便更好理解不同時期土地管理對碳庫變化的影響。

B. 芬蘭

芬蘭使用 Yasso07 土壤碳模型來研究森林碳儲存量變化和土地利用情況。Yasso07 是一種針對土壤碳循環的模型，它基於有機材料的溶解度，包含四個狀態變數：酸、水、乙醇和不溶性。同時，考慮了腐爛率最低的腐植質庫速度。這個模型應用於報告國家溫室氣體清單，透過區域估計、年度氣候參數和有機物質輸入等因素生成每公頃年度碳庫變化率。

Yasso07 模型在不同的土地利用類別中一致使用，例如森林轉變為農田，並且根據模擬結果進行土壤剩餘的分配。模型的參數基於全球大型資料庫，使用馬可夫鏈蒙特卡羅方法進行估算。其結果以統計機率分布呈現，顯示了參數值的不確定性。

Yasso07 模型不僅在芬蘭廣泛應用，還在其他國家的 UNFCCC 報告中得到使用，如奧地利、捷克等。這個模型簡單、透明、可驗證，成為地球系統模型的標準組件，廣泛應用於科研和報告領域。

澳洲與芬蘭兩個國家都以土壤模型估算森林碳儲存量變化，因土壤模型可準確的模擬不同氣候條件和林地管理方式下，土壤有機碳的動態變化。兩者模型差異如下表 3-1-5。

表 3-1-5 FullCAM 與 Yasso07 兩者比較表

	Yasso07	FullCAM
簡述	動態土壤碳模型。類比有機物的分解。	生態系全碳模型。整合生物量、分解、土壤碳模型和計算工具。
土地利用類型	森林	森林、作物、農林業
輸入變數	(1) 初始土壤碳存量 (2) 土壤中的碳輸入 (3) 氣候	森林生理生長模型 3PG、森林碳計數模型 CAMFor、種植和放牧系統 CAMAg、微生物分解模型 GENDEC 和洛桑土壤碳模型 RothC 需要
時間期程	年	未知
深度	1 公尺	0-20 公分（表土）

（資料來源：IPCC, 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, 2006)

3. 土壤轉換函數

對於土壤、水文、地表和氣候科學來說，在獲取準確的土壤濕度和土壤溫度等數據對於減少預測土壤呼吸、熱量和水通量的不確定為重要因素。為此，土壤科學家開發土壤轉換函數 (Pedotransfer function, PTF)，其能夠把土壤資訊連結至土壤特性和參數化土壤。陸地表面模型 (Land Surface Model, LSM) 是地球系統模型 (Earth System Model, ESM) 的一部分，對於預測氣候和土地利用變化下地表動態至關重要 (Gutmann *et al.*, 2007; Van *et al.*, 2017)。然而，為了減少現有預測中的不確定性，需要對土壤系統的多個關鍵變數和過程進行可靠的模型表示，包括土壤礦物質含量、含水量、溫度和碳儲存量，以及溶質遷移、熱量和水流等過程 (GOEBEL *et al.*, 2011; Lal *et al.*, 2004; Šimůnek *et al.*, 1993)。在氣候和土地利用情境的變化下，地球系統的陸地分區會有不同的反應。改進對土壤狀態和相關過程的預測，特別是土壤特性的表示，有助於減輕 LSM 的缺陷，例如在短期到中期天氣預報中可能出現的持續溫度偏差或對亞馬遜雨林等重要生態系統碳平衡的預測。

在森林土壤有機碳儲存量的推估方法學中，土壤轉換函數 (Pedotransfer Functions, PTF)用於從容易測量的土壤物理和化學性質估算出難以直接測量的土壤特性。特別應用於預測土壤水分特性、土壤有機碳儲存量以及其他與土壤相關的生態參數，對於全面評估森林生態系統的碳儲存量潛力相當重要。

A. 推估土壤有機碳存量

藉由輸入變數（土壤類型、pH 值、土壤密度、粒徑分布（砂、粘土和黏土的比例）、有機質含量等）與輸出變數（土壤有機碳存量），應用於利用 PTF 來估計不同深度和不同類型土壤的有機碳存量，尤其在地表資料不足的情況下。

B. 模擬土壤碳動態

結合 PTF 和土壤碳模型（如 RothC, CENTURY, Yasso 等），可以模擬不同管理措施和氣候變化下，土壤有機碳的動態變化。PTF 提供將土壤物理化學屬性轉換為碳迴圈相關參數的方法，如分解速率常數、碳輸入量等。

C. 評估氣候變化影響

透過結合氣候模型輸出（如溫度、降水量變化）和 PTF，預測未來不同氣候下的土壤碳匯量。可應用於評估氣候變化對森林土壤碳匯的潛在影響，輔助制定適應性管理策略。

D. 提高數據精度及空間解析度

在 GIS 環境中，PTF 可用來進行空間插值，從而推估整個區域內土壤的碳存量和其他相關參數。可協助管理者和科學家理解和視覺化土壤碳在大範圍內的分布，特別是在複雜的森林地形中。

(1) 土壤轉換函數 (pedotransfer function, PTF) 發展過程

最早的估計方程式可追溯到二十世紀初，首次透過回歸式將土壤濕度特徵與土壤質地連結 (Briggs & Lane, 1907; Veihmeyer & Hendrickson, 1927)。Bouma(1989)提出的土壤轉換函數 (pedotransfer function, PTF) 包含所有早期的估計方法，其概念為將土壤的結構和成分數據轉換為土壤功能資訊，如定義土壤水力函數、礦化常數和吸附特性等參數，且可透過數學模型來量化土壤生態系統服務。

Bouma (1989) 區分了兩種類型之 PTF，有連續 PTF 和類別 PTF (Wösten *et al*., 1995)。連續 PTF 使用連續數量，例如黏土、沙子或有機物含量。類別 PTF 將建模參數與土壤屬性類別相關聯，如土壤調查中所區分 (Bouma, 1989)，如 Baker & Bouma (1975) 對被歸類為 Tama 粉砂壤土的地下層進行保水性和導水率曲線的多次測量。此方法的結果顯示相對較窄之頻帶，表示空間變異性。當在其他地點之 Tama 淤泥土壤中進行新的測量時，所得的結果與先前建立的頻帶內吻合良好，證明其給定土壤系列中測量數據外推到沒有測量處，同時具有相同土壤分類地點之可能性。因此，土壤系列被用作類土壤傳遞函數，它亦可以與給定土壤系列內的特定土壤層或更一般的紋理

類別相關 (Baker, 1978)。Wösten 等人 (1986) 對荷蘭的土壤層進行了類似的分析，並比較了四種產生土壤水力函數的方法 (Wösten *et al.*, 1990)，包括直接測量和使用類別 PTF 和連續 PTF。結果顯示兩種方法之間的差異不具統計意義，這證明兩種類型 PTF 的潛力。

(2) 推導與評估土壤轉換函數之方法

PTF 開發目的為使用土壤特性資料庫建立預測模型，資料庫包含合適的預測因子（「基本土壤特性」和所需的「估計值」），大多數 PTF 在預測變數資料（「輸入變數」）與估計值（「輸出變數」）方面會有所不同，典型的預測變數資料為沙子、淤泥和黏土的百分比 (Campbell & Shiozawa, 1992; Cosby *et al.*, 1984; Rawls & Brakensiek, 1985; Saxton *et al.*, 1986)、堆積密度以及有機碳或有機質 (De Lannoy *et al.*, 2014; Rawles & Brakensiek, 1982; Rawls *et al.*, 1983)。建立 PTF（即預測變數和估計變數之間的派生關係）的數學與統計框架極為多樣。大多數方法完全是經驗、純粹依靠數據，且從為特定土壤質地類別提供土壤水力參數的查找表到簡單的線性/非線性回歸模型，再到更複雜的資料探勘方法，如人工神經網路 (ANN)、回歸和分類樹及其衍生物（例如：分類和回歸樹、卡方自動交互檢測 (CHAID)、提升樹和隨機森林）、k 最近鄰類型演算法和支援向量機 (SVM) 等。

A. 表格查找類別土壤轉換函數

查找表已廣泛應用於土壤科學和其他學科，如地表建模、土壤調查指南（包含田間持水量、飽和導水率值的質地等級平均值等）（表 3-1-6），其缺點為土壤質地類別中有許多可變性的參數。

表 3-1-6 美國農業部土壤質地類別的 Ks 值

質地類別	Cosby et al. (1984)	Carsel and Parrish (1988)	Zhang and Schaap (2017)
黏土 Clay	8.4	4.8	14.8
坋質黏土 Silty clay	11.6	0.5	9.6
砂質黏土 Sandy clay	62.4	2.9	11.4
黏質壤土 Clay loam	21.1	6.2	7.1
坋質黏壤土 Silty clay loam	17.6	1.78	11.1
砂質黏壤土 Sandy clay loam	38.5	-	13.2
壤土 Loam	29.2	25.0	13.3
坋質壤土 Silt loam	24.3	10.8	18.5
砂質壤土 Sandy loam	45.2	106.1	37.5
坋土 Silt	-	6.0	43.8
壤質砂土 Lomy sand	121.7	350.2	108.2
砂土 Sand	402.8	712.8	643.0

*所有結果都轉換為同一單位：cm/d

B. 回歸技術

回歸技術因其簡單性而被廣泛用於確定預測變數和估計變數之間的關係。回歸分析可以根據變數之間的預期關係使用線性回歸或非線性回歸。它們通常遵循一般形式：

$$p = a\text{*Sand} + b\text{*Silt} + c\text{* dry bulk density} + \cdots + X\text{* var}X \qquad \text{（式 3-3）}$$

*p 是要估計的土壤特性。a、b、c 和 x 是回歸係數

*$varX$ 是任何其他可以輕鬆測量的基本土壤屬性(Wösten et al., 2001)

Gupta and Larson (1979) 可能是最早建立線性回歸，根據土壤粒徑分布、有機質和容重來估計土壤保水特性的人。Rawls and Brakensiek (1985) 在土壤水力參數和土壤質地以及容重之間建立指數關係。回歸分析的優點為執行簡單、使用方便，但缺點為回歸方程式（例如線性、對數或指數）和預測變數必須先確定，並且土壤特性和預測變數之間的關係，資料庫的不同部分可能會有所不同。若自變數和應變數之間的關係不複雜，則增強多元線性回歸可能是一種有效的方法。Cosby 等人 (1984) 進行變異數分析以確定水力參數與預測變數的顯著性，然後建立關係以根據預測變數的單變數和多變數函數估計水力參數。

C. 支持向量演算法

支援向量機 (SVM) 為一種經常用於建構 PTF 的資料工具，SVM 使用監督式的非參數統計學習方法，此方法最初以一組標記資料呈現，SVM 訓練是找到一個超平面，此超平面可以將資料集分成離散的預定義數量的類別 (Vapnik, 2013; Vapnik &Vapnik, 1998)。最佳分離超平面是在校準過程中以迭代方式獲得的最小化錯誤分類的決策邊界 (Mountrakis *et al*., 2011; Zhu & Blumberg, 2002)。最簡單的形式是 SVM 是線性二元分類器，它將一個類別分配給已定的測試樣本。在實際應用中，線性可分性並不常見。在這種情況下，為準確地將資料集分類，使用核函數解決問題。

假設有訓練資料集 (xi, yi)(i= 1, …, nt)，其中 xi 是資料點，i 是資料點 xi 對應的屬性。在 ε−支持向量回歸中，目標是找到一個函數 f(x) 來估計未知變數 x，對於所有訓練數據，該函數與實際獲得的目標 yi 的偏差最多為 ε，並且盡可能平坦。回歸公式如（式 3-4）。

$$f(x) = \sum_{i=1}^{l} w_i \emptyset(x) + b \qquad \text{（式 3-4）}$$

其中 Φ(x)表示非線性變換（使用核函數），將資料映射到更好的表示空間，使不可分離的問題變得可分離。wi 是權重，b 是偏差項；wi 和 b 都是透過最小化以下目標函數來估計的參數：

$$\frac{1}{2}|w|^2 + C\sum_{i=1}^{l}(\zeta + '\zeta^*) \qquad \text{（式 3-5）}$$

$$\begin{cases} y_i - f(x) - b \le \varepsilon + \zeta^*{}_i \\ f(x) + b - y_i \le \varepsilon + \zeta_i, \\ \zeta_i, \zeta^*{}_i \ge 0, i = 1, \dots l \end{cases} \qquad \text{（式 3-6）}$$

這裡$|w|^2 = \sum_{i=1}^{l} {w_i}^2$ Ψ、Ψ^*是為因應不可行約束而引入的鬆弛變數 (Vapnik, 2013)。成本參數 $C>0$ 決定了 SVM 結構的複雜性和允許大於 ε 的偏差量之間的權衡。不敏感參數 ε 控制不敏感區域的寬度；較大的 ε 值將導致支持向量數量較少，並導致泛化能力較差 (Twarakavi *et al.*, 2009)。有許多核函數可用 (Vapnik, 2013; Vapnik & Vapnik, 1998)。Twarakavi 等人(2009) 使用徑向基核函數來執行非線性變換。

D. 隨機森林

鑑於其預測性能，該技術近年來已被廣泛應用 (Akpa *et al.*, 2016; Koestel & Jorda, 2014; Sequeira *et al.*, 2014)。De Souza *et al.*(2016) 分析了隨機森林技術在根據土壤特性和環境協變數預測容重方面的表現。Koestel and Jorda (2014) 使用此方法來預測優先運輸的強度。Tóth *et al.*(2014) 發展了點 PTF，使用條件推理森林 (cforest) 方法來預測 0、-33、-1,500 和-150,000 kPa 矩陣的保水量，條件推理森林 (cforest) 方法是一種基於條件推理樹 (ctree) 的隨機森林方法 (Strobl *et al.*, 2008)。此方法的優點是，當使用不同尺度測量的自變數（例如，黏土含量-區間，土壤類型-名義值，以及表土和底土區別-二分法）時，在 ctree 連續變數中或具有更多類別的預測變數不受青睞，因分析自變數和應變數之間關係的統計資料使用這些變數的條件分布 (Hothorn *et al.*, 2006)。

(3) 土壤碳參數化

轉換因子 1.724 (van Bemmelen, 1890) 用於根據有機碳 (SOC) 含量估算 SOM，被視為最早的 PTF 之一。因此，在生物地球化學或生態研究領域中，存在許多簡單的轉換規則，且通常應用於將土壤圖的資訊中。

在氣候變遷的背景下，土壤碳儲量的準確量化至關重要。碳儲存量以每單位面積的質量 C 表示，需要參考深度、該層的 SOC 含量以及土壤容重。因此，應用 PTF 來

估計容重可能會導致碳儲存量預測存在很大的不確定性 (Kobal *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2015)，特別是透過重複清查來量化土壤有機碳儲存量的時間變化 (Schrumpf *et al.*, 2011)。存在許多用於估算堆積密度的 PTF。然而，它們的應用通常僅限於特定區域 (Bernoux *et al.*, 1998; De Souza *et al.*, 2016)、森林土壤 (Kobal *et al.*, 2011; Nussbaum *et al.*, 2016)或土壤分類學資料庫 (Benites *et al.*, 2007; Manrique & Jones, 1991)。根據 Adams (1973)模型，PTF 對總體密度的估計始終基於 SOC 含量，其中土壤的總體密度可以建模為有機物和礦物質成分的混合物。以黏土和/或淤泥含量表示的礦物成分被認為是統計上顯著的解釋變數 (Bernoux *et al.*, 1998; Benites *et al.*, 2007; Botula *et al.*, 2015)。此外，粗粒部分 (> 2 mm) 和土壤深度具有預測潛力 (Nussbaum *et al.*, 2016) 以及鹼性陽離子總和 (Benites *et al.*, 2007) 和其他環境協變數 (De Souza *et al.*, 2016)。Minasny 等人 (2006)根據黏土含量、淤泥含量、土壤顏色和深度，導出了 SOC 含量和總體密度的 PTF，並應用指數深度函數來隨後估算澳洲 1,500 km^2 地區的碳儲存量。

土壤有機碳為全球碳循環的重要組成部分，模型是增進對碳固存和土壤 CO_2 排放的工具。對於 RothC 模型 (Coleman & Jenkinson, 2005)，Falloon 等人 (1998) 的另一個 PTF，根據總 SOC 含量估計惰性有機物。此外，Moore 等人(1992)的 PTF，因溶解有機碳吸附等溫線的參數是根據 SOC、草酸鹽可萃取的 Al 和連二亞硫酸鹽可萃取的 Fe 含量來估計。

(4) 生物過程參數化

大多數重要的土壤物理性質皆可透過 PTF 來預測，但在土壤生物性質方面的工作卻很少 (McBratney *et al.*, 2002)。光合作用等基本生物過程可以根據蒸氣壓不足和土壤水分含量進行預測，但沒有準確的 PTF (Rogers *et al.*, 2016)。Filser 等人 (2016) 表明，納入土壤生物群活動（植物殘留物消耗和生物擾動改變土壤的形成、深度、水力特性和物理異質性）可以強烈影響 SOM 模型的預測結果，但這種土壤生物活動可以反過來根據土壤特性進行預測 (Bardgett & van der Putten, 2014)。

模擬土壤結構、生物活動和根系生長隨時間變化的方法相對較少 (Leij *et al.*, 2002; Stamati *et al.*, 2013)。物理和生物過程之間相互作用的模型仍然相對較少 (Laudone *et al.*, 2011; Šimůnek *et al.*, 2009)。測量技術的最新進展提供了關於土壤生物群和生物多樣性對土壤和作物過程的作用的新見解。

最近的模型描述土壤生物群的機械過程 (Barot *et al.*, 2007; Blanchart *et al.*, 2009)、食物網特性 (de Vries *et al.*, 2013) 以及生物區室對土壤中 C 和 N 循環的貢獻 (Huang

et al., 2010; Li *et al*., 2017)。在過去的十年中，在將植物和土壤氮循環過程納入陸地生態系統模型方面取得了重大進展。正如 Thomas 等人 (2015) 所評論的，如今的 TEM 包括植物和土壤養分循環過程以及碳循環中的氮素限制。

(5) PTF 潛在發展

透過更準確地估計土壤 pH 和 N 等土壤變數，尤其是土壤溫度和保水參數的知識，可使用 PTF 來開發性能更好的模型來估計土壤微生物多樣性和 CN 過程。回歸變數的相對重要性分析支持了這樣的發現：土壤水可用性變數是 C Mic 的主要驅動因素，僅佔解釋變異數的 80%以上 (Serna-Chavez *et al*., 2013)。儘管如此，地中海半乾旱條件下的研究表明，乾燥條件下的微生物生物量高於中溫條件下的微生物量 (Sherman *et al*., 2012)。根據主要生物群落（北方森林、溫帶針葉林、溫帶闊葉林、熱帶和亞熱帶森林）的具體關係，得出 0 至 30 公分和 0 至 100 公分土壤剖面中土壤微生物生物量 C 和 N 的全球儲存量估計值。

主要土壤微生物和菌根的異養呼吸和養分礦化活性受到土壤含水量的強烈影響 (Zhao *et al*., 2016)。水文變異及其對土壤水分 (Rodriguez-Iturbe & Porporato, 2004) 對分解者活動的影響都需要在土壤碳和養分循環的數學模型中加以考慮。土壤濕度對分解者活動和分解速率的影響通常透過在整個分解者群落層級上定義的動力學速率校正函數來描述。當土壤濕度降低時，分解者活性也會降低，各個分解者群體對水分可用性的反應存在很大差異（例如，細菌通常比真菌對水分壓力更敏感）。土壤濕度反應的形狀和分解劑活動有效停止的閾值土壤濕度（水分脅迫閾值）因生物群落和土壤類型而異，因此生物體類型（例如：土壤動物、細菌和真菌）的反應也不同 (Freckman, 1986)。Manzoni 等人 (2012) 表明，社區層面的分解者的反應在土壤和地表廢棄物中是不同的，但在生物群落和氣候中是相似的。這導致與生物活動停止時的點相對應的幾乎恆定的土壤濕度閾值，在與土壤濕度值相當的水勢閾值下，溶質擴散在土壤中受到強烈抑制，而在枯落物中，可能是脫水而不是擴散限制壓力點周圍的生物活動。由於這些內在的限制和缺乏對不同水文氣候狀況的適應，降雨模式的變化（土壤水分平衡的主要驅動因素）可能對土壤碳和養分循環產生巨大影響 (Manzoni *et al*., 2012)。研究中得出的生物群（細菌和真菌）活動之間的關係允許推斷更大區域和生物群落土壤功能的相關 PTF。

目前地球系統模型中的陸地生態系模型以較穩定的氣候變數作為自變數，也適用於預測土壤生物多樣性的模型。區域到全球土壤生物多樣性製圖主要基於微生物多樣性 (Fierer *et al*., 2009)，這被證明與基於微生物碳 C Mic 的微生物質量估計相對應

(Serna-Chavez *et al*., 2013)。土壤剖面 C Mic 似乎可以透過降水量、蒸散量、溫度、土壤 pH 值和總氮的組合來解釋。該模型呈現了粗粒度氣候變數（降水和溫度）的經典大規模分布建模元素的典型組合，這些元素在預測全球到大陸尺度的模式方面具有穩健性。

4. 數位土壤繪圖

土壤地圖在森林管理中扮演著關鍵角色，提供必要的基本資訊。數位土壤繪圖透過使用先進的技術，能夠準確預測大面積土壤的特性，同時節省了採樣和分析的成本 (Jeong *et al.*, 2017)。相較於傳統的土壤繪圖方法，數位土壤繪圖 (Digital Soil Mapping, DSM)提供更豐富的土壤資訊 (Lagacherie *et al.*, 2008; McBratney *et al.*, 2003)。

(1) 提高土壤碳數據的空間精確性

DSM 透過集成多源數據（如：衛星圖像、地面觀測數據、土壤樣本分析結果等），利用機器學習或統計模型來推測土壤屬性（包括土壤有機碳含量）的空間分布。可以更精確的顯示出不同地區和深度的土壤碳存量，並提供更精細的空間格局，有助於識別碳存量高的區域。

(2) 監測土壤碳變化

藉由定期更新 DSM 產生的土壤碳地圖，可以監控土壤碳的時間變化，識別碳存量的增減趨勢，對於評估森林生態系統健康和碳匯量相當重要。

傳統的土壤繪圖主要著重於劃定不同土壤之間的邊界並進行分類；而 DSM 使用定量技術，基於土壤和環境變數，對每個圖元中的土壤屬性進行分類和預測 (Bulmer *et al.*, 2019)（表 3-1-7）。這包括更高解析度的土壤數據、更廣泛的測繪範圍，並結合廣泛的環境因素，以預測土壤類別和屬性，同時更好地理解測繪的不確定性。數位土壤繪圖是基於實地土壤觀測和環境預測因子之間的定量關係，建立土壤預測模型（圖 3-1-4），可得知土壤特性的空間模式 (Loiseau *et al.*, 2019; McBratney *et al.*, 2003)。在森林土壤資訊中，尤其是在土壤固碳、全球變遷和火災對土壤特性的影響方面，DSM 具有重要作用。儘管 DSM 有潛在的應用機會，但仍需克服一些挑戰，例如：高品質輸入數據和現場評估的成本 (Bulmer *et al.*, 2019)。

表 3-1-7 傳統繪圖與數位繪圖兩者的比較

項目	傳統繪圖	數位繪圖
地圖形式	帶標籤的多邊形（等值線）	向量（幾何加資料）和網格
連續性	較主觀	更客觀
更新	靜態	可重新計算輸出，並且即時更新資訊
尺度	固定	更易於表達多種尺度
可及性	需要列印，或查看靜態圖像	可在網路上搜尋，並作為互動式圖像表示
景觀和水文過程可視化	從等高線推斷水流通道位置	明確描述積水處，使流動數位化為地形分析

（資料來源：Bulmer *et al.*, 2019）

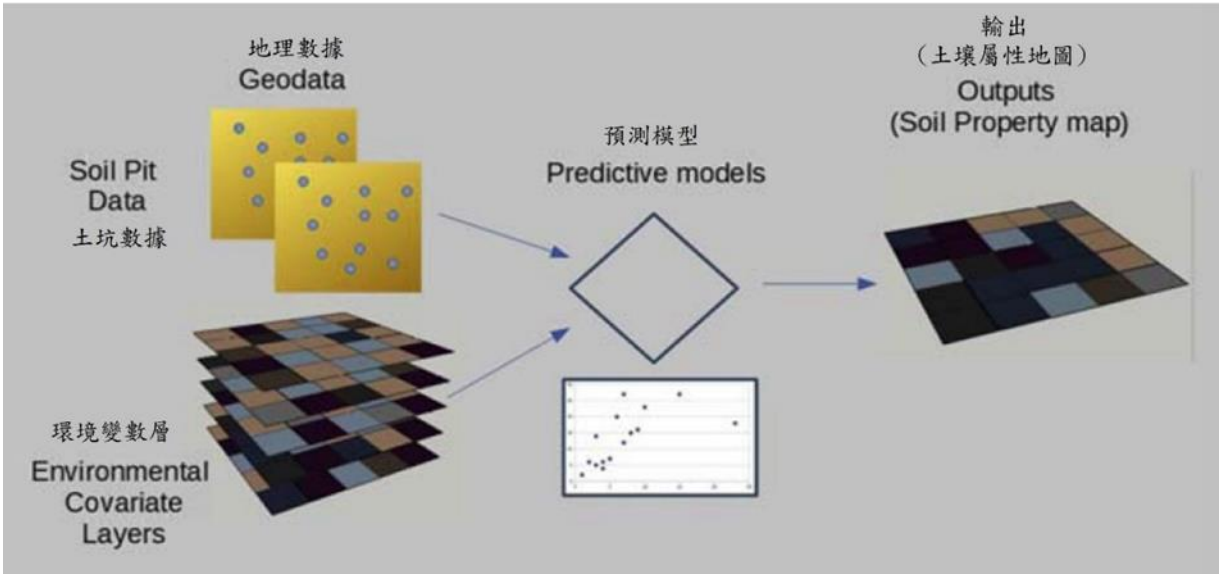


圖 3-1-4 數位土壤繪圖製作過程
（資料來源：Bulmer *et al.*, 2019）

(3) 土壤有機碳的空間分布與預測方法

過去傳統的統計方法難以準確判定未取樣地點的土壤特性分布，地理統計學則是一種研究土壤特徵在空間上的分布、減少評估誤差變異數和節省執行成本的有效方法 (Saito *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2014; Behera *et al.*, 2015)。早期的研究者運用地理空間技術來評估土壤的空間相關性並評估土壤特徵的地理變化性 (Wei *et al.*, 2008)。在最近的一項研究中，喜馬拉雅山區的學者們使用了數位土壤繪圖的方法，結合了普通克利金法 (Ordinary Kriging, OK)、回歸克里金法 (Regression Kriging, RK)，以及機器學習方法，如隨機森林 (Random Forest, RF)，來評估土壤有機碳的空間分布 (Farooq *et al.*, 2022)。

A. 普通克里金法 (Ordinary Kriging, OK)

普通克利金法是一種地理統計技術，透過內插法估計未取樣位置之值，方法為利用附近已知數據之資訊 (Farooq *et al.*, 2022; Mishra *et al.*, 2009)。運作方式為將變異函數擬合至已知數據上，確定觀測值空間方差結構，進而幫助評估用於跨越空間的未取樣位置之克里金法權重。普通克利金法利用觀測點的空間自相關 (Spatial Auto-correlation)，通過將空間中的值與距離相互建模為變異函數，從而進行內插。SOC 空間相依性 (Spatial Dependence) 為透過實驗半變異函數模型進行評估。克里金法的權重基於觀測值與目標位置的距離計算而來；當觀察點離目標點越近，其權重就越大。此方法基於平穩性概念，平均值和變異數於空間中為穩定態（式 3-7）。

$$\hat{z}(s)_0 = \sum_{i=0}^{n} \lambda_i . Z(s)_i \qquad （式 3-7）$$

*$\hat{z}(s)_0$ 是未採樣位置的估計值$(s)_0$
*$Z(s)_i$ 是量測值$(s)_i$
*λ_i 是加權指數
*n 是搜尋區域中考量的點數

B. 回歸克里金法 (Regression Kriging , RK)

回歸克里金法結合了回歸和克里金法兩種技術 (Hengl *et al.*, 2004; Meng *et al.*, 2013)。在這種方法中，回歸用於擬合隨土壤性質變化而變動的輔助變數，而簡單克里金法則用於擬合解釋不了的殘差變化，即模型無法解釋之差異。簡而言之，該方法為空間預測技術，同時考慮了兩個方面。通過回歸將應變數或目標變數與地形特徵、遙測相關指數等解釋變數或輔助變數相關聯（式 3-8）；其次，通過克里金法，處理回歸之殘差。回歸克里金法基於某些假設，包括線性、常態性、共線性和同方差。

$$\hat{z}(s)_0 = \hat{m}(s)_0 + \hat{e}(s)_0 = \sum_{k=0}^{p} \hat{\beta}_k . q_k(s)_0 + \sum_{i=0}^{n} \hat{\lambda}_i . e(s)_i \qquad （式 3-8）$$

*$\hat{z}(s)_0$ 是差值$(s)_0$
* $\hat{m}(s)_0$ 給予擬合漂變
*$\hat{e}(s)_0$ 是差值殘差
*$\hat{\beta}_k$ 代表估計的漂變模型係數（$\hat{\beta}_0$是估計截距）
*$\hat{\lambda}_i$ 表示由殘差的空間相關結構解析的克里金權重
*$e(s)_i$的殘差是$(s)_i$

C. 隨機森林 (Random Forest, RF)

隨機森林是一種遞歸劃分的方法，透過生成多個回歸樹，然後對它們的結果進行平均 (Biau *et al.*, 2016)。每個分類或回歸樹都使用資料的隨機子集（拔靴樣本，bootstrap samples）和相應的隨機預測變數來建立（式 3-9）。大量的結果被平均，形成綜合的預

測。隨機森林是一種監督學習方法，使用標記資料集來訓練，以便模型能夠準確預測新資料集的結果。隨機森林是一種分類演算法，通過隨機性選擇建立每個樹的預測變數，試圖構建出不相互關聯的樹森林。所有的結果都被整合在一起，以提供更準確和可靠的預測。

$$f(x) = \frac{1}{B}\sum_{b}^{B} t^{*}\, b(x) \qquad \text{（式 3-9）}$$

*b 是各拔靴法樣本
*t*b 的 b 是各決定樹

(4) 不同 SOC 預測方法的比較與應用

目前已經有多種模型可用於預測土壤有機碳 (SOC) 的空間分布，其中最常見的是多元線性回歸 (Florinsky *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2015; Thompson *et al.*, 2005)。這種方法之所以廣泛應用，是因為它簡單易懂、計算高效且容易解釋 (Thompson *et al.*, 2006)。然而，這種方法僅能檢測到反應變數和環境預測變數之間的線性關係。事實上，這些關係通常更為複雜且非線性 (Lark, 1999)。

因此，一些研究採用分類和回歸樹 (CART) 模型 (Hobley *et al.*, 2015; Ru *et al.*, 2016)、廣義線性模型 (Mckenzie *et al.*, 1999) 和人工神經網路 (Alvarez *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2013) 等方法，以便更好地探測目標變數和環境預測變數之間的非線性關係。CART 方法是一種被廣泛使用的機器學習方法，對於處理非線性和非加性關係方面表現卓越 (Myles *et al.*, 2004)。而隨機森林 (RF) 是 CART 的擴展，是一種相對較新且提高預測精度的方法 (Breiman, 2001)。相較於其他預測模型，RF 方法具有一些優點，包括抗過度擬合、對雜訊特徵不敏感以及實現錯誤率的無偏測量 (Breiman, 2001)。到目前為止，一些研究已成功使用 RF 模型來聯繫 SOC 與環境變數 (Grimm *et al.*, 2008; Rossel *et al.*, 2010; Wiesmeier *et al.*, 2011)。

在支持向量回歸 (SVR)、人工神經網路 (ANN) 和隨機森林 (RF) 等方法的比較中，結果顯示，支持向量回歸 (SVR) 模型在均方根誤差 (RMSE) 和 R^2 值方面表現最佳，被視為最佳模型。同時，研究建議對於性能接近的 SVR 和 ANN 模型進行校準，以適用於其他土壤特性的空間預測 (Balabin *et al.*, 2011; Farooq *et al.*, 2022)。

5. 歐盟森林土壤有機碳儲存量相關文獻

這小節內容主要涵蓋三份文獻，分別是歐洲表土有機碳地圖、歐盟森林土壤有機碳儲存量，以及歐盟政策在土壤資料整合方面的推動。在綜合和分析這些文獻後，從中彙整重點進行說明。

(1) 歐洲表土有機碳地圖

自 20 世紀農業集約化以來，觀察到土壤中有機碳 (OC) 含量下降的趨勢，對農業生產系統產生影響，因為 OC 是土壤有機質 (OM) 的主要構成部分。根據官方通訊「邁向土壤保護專題策略」(Montanarella, 2002)，該通訊於 2002 年通過，指出土壤面臨八項主要威脅之一是有機質減少，尤其在南歐地區。有機質對土壤肥力和通氣至關重要，因此減少 OM 含量被視為土壤品質下降的指標，為因應環境問題，各國積極提升對歐洲 OM 的準確資訊，包括土壤退化、沙漠化、侵蝕以及全球氣候變遷的影響。確保土地永續管理的關鍵在於維持土壤中的有機質，因為土壤有機質在各種土壤形成過程中扮演極重要的角色。

地圖的主要目的是識別並保護歐洲 T_0 時間點現有 OC 和 OM 含量的基礎資訊 (Jones *et al.*, 2003)，即定義「基線」或參考水平，以便監控未來趨勢 (Lugato *et al.*, 2014; Vågen *et al.*, 2013)。此地圖呈現計算 OC 在歐洲表土（0 至 30 公分）中的含量分布，包含編譯和分析 OC 含量的數據，因在大多數情況下為測量的參數。下一目標為確定土壤 OC 和 OM 含量的未來趨勢，以開發更永續的土地管理系統，避免或減少進一步損失。

A. 評估歐洲土壤有機物的含量

歐洲表土的有機碳 (OC) 含量繪圖是透過 OC 的測量轉換成有機質 (OM) 含量，轉換比例為 OC:OM=1:1.72。先前的研究試圖使用各種方法和資料庫來估計歐洲區域的碳儲存量，以深入探討土壤中碳的分布。雖然不同國家已經進行 OC 含量的系統性測量，但某些國家的地理參考有限，使得在歐洲層面定義 OC 狀態的基線成為一項挑戰。

為解決問題，歐洲土壤局 (ESB) 在伊斯普拉總部贊助歐洲土壤資訊的收集，並成功建立歐洲土壤資料庫。資料庫匯集歐洲各地的土壤數據，為整個歐洲提供協調一致、符合國際標準的土壤分類。報告強調 ESB 的方法，旨在改進歐洲土壤 OC 的時空分布。提供統一的 OC 狀態基線，有望為未來的土地管理和政策制定提供寶貴的參考。

B. 歐洲土壤資料庫

歐洲土壤資料庫 (SPADE 1) 中包含有機碳 (OC) 的數據，主要針對表土（0 至 30 公分）和其他土壤特性進行研究。然而，由於地理參考數據的困難，SPADE 1 的資料在地理上並不全面，且存在低重複性的問題。為了更準確地描繪歐洲土壤有機碳的分布，引入外推法程序，該程序將分析數據連結到代表土壤製圖單位的多邊形 (SMU)。報告指出，考慮土壤類型和質地等主要土壤的輸入參數是分析數據中數千次 OC 測量的必要步驟。

首次嘗試應用直接繪圖法針對歐洲層級的 OC 問題，利用歐洲土壤資料庫的表土圖，並利用 Pedo-transfer 規則生成 OC 數據 (Kaur *et al*., 2002; Tietje *et al*., 1993)。然而，仍然存在一些挑戰，如估計值的近似性、僅適用於歐陸式層級，以及難以建立某些土壤的真實 OC 含量。為了解決這些挑戰，引入適用於歐洲的修訂 Pedo-Transfer 方法。基於修訂後的 Pedo-transfer 規則和歐洲土壤資料庫，使用地理資訊系統 (GIS) 進行 OC 含量的空間表示，修訂的 Pedo-transfer 規則使用 5 個輸入參數，其中刪除原有的 6 個參數中的溫度，並針對 OC_TOP 進行四類的結果分類。

研究的資料來源包括土壤、土地利用和氣候資料，用於計算歐洲表土中 OC 含量的連續空間專題圖層。報告指出，目前的 SPADE 1 資料庫在土壤剖面和分析數據的標準化上還存在一些不足，未來需要更好的土壤剖面資料庫和更多的標準化分析數據。

C. 地面測量數據調查

這份研究的數據來自於 1979-1983 年間英格蘭和威爾斯的國家土壤盤查 (NSI)(McGrath *et al.*, 1992)。OC 含量是透過濕式重鉻酸消解法測定的 (Avery *et al.*, 1982)。義大利的 OC 資料是由 Rusco 編製 (In prep.)，並以相似的方式進行分析。

英格蘭和威爾斯，以及義大利的土壤有機碳 (OC) 含量的研究提供土壤保育需求以及可能的土壤退化問題的寶貴資訊。以下是對這些資訊更詳細的整理和分析。

英格蘭和威爾斯的土壤樣本抽樣採用 5 公里 × 5 公里的網格，總共有 5,500 多個點的資料。系統化的抽樣程序確保各種土地覆蓋類型的充分覆蓋，抽樣方案的特點是使用了系統化地面樣品，使得可以進行點估計和總結估計的比較。這種方法的優勢在於能夠處理各種土壤測量數據類型、環境條件和有機碳 (OC) 值，從而提供對土壤特性的全面理解。

對於英格蘭和威爾斯的 OC 含量，建模和地面測量的比較顯示了在不同土壤亞組

之間的變化。特別值得注意的是對有機質土 (Histosols) 的模型進行高估，可能是由於其在模型中的表示不夠準確。這些比較強調土壤模型的優越性，同時也凸顯在特定土壤類型下的挑戰。此外，使用點聚合的方法進行回歸分析，使得更好地理解 OC 在地面觀測值和建模數據之間的關係。

在義大利，土壤的抽樣主要來自農業用地，約有 6,800 個樣本點。然而，這些樣本點在某些地區高度聚集，可能影響義大利地面資料在編制一般統計資料方面的適用性。儘管樣本點的局限性可能存在，這些數據仍然對南歐地區的農業用地情況的估計以及有機碳 (OC) 的驗證是有價值的。

在土壤類型方面，糧農組織的土壤分組代碼用於對不同土壤的歸類。在土壤類型 (STU) 與土壤測繪單位 (SMU) 之間的關係存在需克服的問題。使用主導的 STU 進行 OC 的估算，可能導致對某些土壤類型的高估或低估。然而，對於整體來說，這種土壤分組的方法仍然提供對土壤有機碳的整體估計，使得能夠理解土壤在不同地區的特性。總共有 1,657 個土壤測繪單位 (SMU)，其中英格蘭和威爾斯佔 75 個，義大利佔 22 個。這些 SMU 是進行空間聚合的單位，將土壤特性在不同地區進行比較和分析。

研究涉及土壤侵蝕和土壤退化的問題，透過比較土壤侵蝕率和 OC 含量，可以凸顯土壤退化的可能區域，對於制定土壤保育策略和應對土壤侵蝕的挑戰至關重要。研究使用 PESERA 模式估算歐洲的土壤侵蝕損失，提供以 1 公里分辨率測量土壤退化的資訊。透過比較這些估算和 OC 含量，研究突顯土壤有機碳在面臨土壤侵蝕的地區的重要性。

研究目標為準確描述歐洲表土 OC 的地理分布，強調 OC 含量而非 OC 匯量。研究發現批量密度測量數據的稀缺性導致潛在計算錯誤，特別是在 OC 變化較大的地區。研究也指出土地利用和植被變化對 OC 含量的影響，需要更多實地數據進一步驗證。

(2) 歐盟森林土壤有機碳儲存量

歐洲森林土壤中碳的儲存約為樹木的 1.5 倍 (EC/UN-ECE, 2003)。根據預期，未來歐洲森林土壤碳循環的重要性將進一步提升 (Liski *et al.*, 2002; Smith *et al.*, 2006)。然而，由於存在眾多可用的模型和清單結果，全面準確地評估整個歐洲大陸範圍內土壤有機碳儲存量的作用仍然面臨相當大的挑戰。例如：Cannell 等人 (1992) 初步估計歐洲森林土壤中儲存的碳為 3-4 Gt。Liski 等人 (2002) 提供的模型估算為 5 Gt C。Goodale 等人 (2002) 估計森林土壤有機碳儲存量為 13.7 Gt，其中包括 O 層。Jones 等人 (2004) 以及 Schils 等人 (2008) 估算歐洲所有土壤包括泥炭的總碳量為 79 Gt C。每個估算皆

涉及不同的面積範圍、土壤深度和方法，因此特定國家的結果可能有相當大的偏差。

西歐森林土壤的碳含量在 1990 年以 26 Mt C a^{-1}（每年 2,600 萬噸碳）的速率增加 (Liski *et al.*, 2002)。De Vries 等人 (2000) 估計森林土壤中封存約 76 Mt a^{-1}。Janssens 等人 (2003) 發表 110 g C/m^2 的估計值（在應用 Liski *et al.*, 2002）計算相同大小的森林面積後，等於 151 Mt C a^{-1}。事實證明，若沒有可比較和統一的盤點數據，就無法準確地確定土壤的作用。

2010 年有研究首次嘗試使用 EU/ICP 森林一級盤點調查的資料對歐洲森林土壤的碳含量進行統一評估 (Baritz *et al.*, 2010)，目的在估算土壤基線碳濃度和儲量，該方法學包括從使用歐洲土壤圖集 (Soil Atlas of Europe)的氣候帶劃分歐洲土壤碳測量點位之生物地理分層 (biogeographic stratification)。顯示 O 層碳匯量估算範圍從 1.3 至 70.8 t C/ha，0 至 20 公分礦質土 (mineral soil)（德國 0 至 30 公分）（5 至 95%信賴區間）。由於方法學差異和數據差距，有機質土 (histosol) 被排除在外。當查看調查地層中位數時，發現關聯性，如 O 層中砂質土壤的碳儲存量明顯高於其它細質土壤 (fine-textured soils)。然而，變異性太高導致某些關聯性消失，例如，在西歐或中歐，淺層土壤 (Leptosols 薄層土）和更深層發育的土壤（淋澱土 Podzols）和變育土 (Cambisols) 之間有機質土的碳儲存量差異不大。研究也發現，僅針對表土 (topsoils) 進行調查並不足以瞭解森林土壤中有機質的區域模式，除非將底土 (subsoil) 也包含進研究。假設對歐洲來說，如果數據僅根據大尺度氣候區進行分層抽樣，會很困難從資料庫中選取氣候、組成質地 (texture) 及地勢 (relief) 等影響採樣數據的因子。必須考慮資料庫中系統誤差的影響相當大（但近期資料的可用性程度無法識別）。研究結果支持找出碳儲存量採樣點 (site) 因子間的關聯性，像是氣候帶和土壤類型，與農業土壤中低得多的碳濃度相比，結果顯示森林土壤對歐洲陸地碳循環的重要性 (Baritz *et al.*, 2010；Nabuurs *et al.*, 1997)。此外，結果亦間接改善 IPCC 溫室氣體清冊中土壤的報告。

因跨歐陸實在太大，土壤分析有必要考量氣候區進行分區，研究參考歐洲土壤區域開發的氣候區地圖（歐洲分 34 區），將本研究氣候區統整分為 7 區，如副極地-極地、極地到溫帶、溫帶的海洋性到次海洋性氣候、溫帶的次海洋性到次大陸性氣候、溫帶大陸性氣候、溫帶山地帶與地中海型氣候。

A. 森林土壤有機碳含量：O 層碳含量的計算方式與礦質土不同

- O 層：

$$C\text{-}stock_{O\text{-}lay} = C\text{-}conc_{O\text{-}lay} \times weight \quad \text{（式 3-10）}$$

*C-stock$_{O\text{-}lay}$ =有機層中的碳匯量(g/m^2/100 = t/ha)
*C-conc$_{O\text{-}lay}$ =有機層中的有機碳濃度(g/kg)
*Weight =有機層乾重(kg/m^2)

- 有機質土：

$$C\text{-}stock_{min} = C\text{-}conc_{min} \times d \times CF_{st} \quad \text{（式 3-11）}$$

*C-stock$_{min}$ = 礦質土(mineral soil)的碳匯量(kg/m^2×10 = t/ha)
*d = 深度層(class/horizon)厚度(m)
*C-conc$_{min}$ = 有機碳濃度(g/kg)
*BD = 土壤總體密度(kg/dm^3)
*CFst = 含石量校正係數，100 -（%石頭）/100

(A) 土壤總體密度 (Bulk density，BD)

對於高地土壤 2,750 筆資料，資料庫中並無有關土壤總體密度的資訊。因此，Honeysett 和 Ratkowsky (1989) 使用土壤傳導函數 (pedo-transfer function, PTF)進行估算。函數需將 C-concmin 乘以 1.724（假設 SOM 由 58.14%的碳組成），以轉換成土壤有機質 (soil organic matter, SOM) 的量 (Honeysett & Ratkowsky, 1989)（式 3-12）。

$$BD = \frac{1}{0.564 + 0.0556 \times SOM} \quad \text{（式 3-12）}$$

* *SOM* = SOC (%) × 1.724 (Van Bemmelen factor of 1.724)

**BD:* bulk density，土壤容積比重

從國家資料中心提供的土壤總體密度（圖 3-1-5）可明顯看出，測量值的範圍相當廣泛，使用資料進行測試的回歸模型仍然僅能解釋不到測量值的 35%，而已發表的 PTF 的解釋率則高達 50-60% (De Vos *et al.*, 2005)。Honeysett 和 Ratkowsky (1989) 開發的 PTF 在土壤深度增加的情況下逐漸變得不夠準確。Wirth 等人 (2004) 對大型資料庫中土壤總體密度的變異性和不確定性進行了大規模的分析。儘管該研究中的土壤總體密度並非從 PTF 中推導而來，而是在現場使用滲透法 (penetration method) 等方法估計的，但若使用不準確的土壤總體密度進行估算，可能導致出現誤差的估計值。

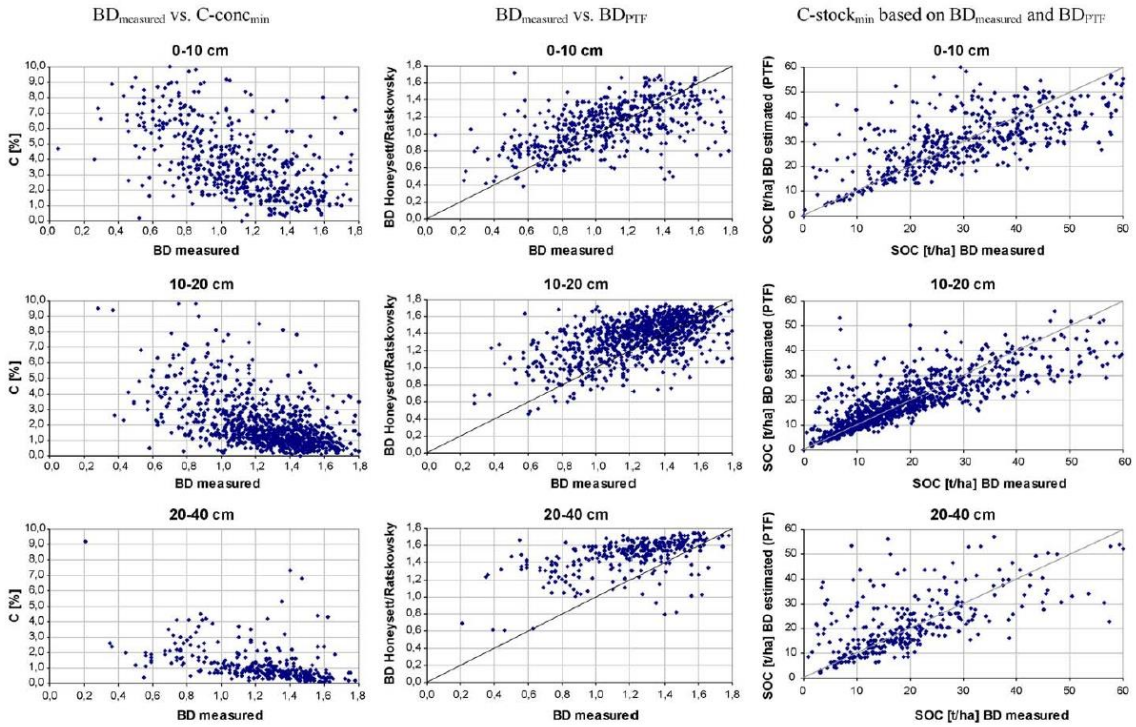


圖 3-1-5 不同土壤深度的碳濃度、土壤總體密度及碳儲存量的變化
（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

(B) 含石量 (Stone content)

在 Level I 的調查資料庫中，僅有 73%的資料包含含石量的數據。如果在估算森林土壤有機碳儲存量時排除含石量的情況，可能導致對森林碳儲存量的高估。為了盡可能使用更多的 Level I 資料庫和採樣點 (plots) 進行評估，缺少含石量數據的點位需要一個能夠估算含石量的程序。因此，假設土壤類型 (sub unit-level) 具有高度相關性。為了進行含石量的估算，應用了群集分析 (Cluster analysis) 來分析所獲得的不同深度的土壤資料中的石頭量 (stoniness)（使用 WARD cluster; SPSS Inc., 2007)。群集分析的結果整理成 10 個層次（表 3-1-8），顯示大多數的表土層採樣結果（表 4-1-9）中，含石量都低於 30%。

表 3-1-8 依據土壤深度剖面群集分析之結果，得出含石量預設值(%)

Cluster	U5	U10	U20	U30[a]	Dominant soil types[b] 主要土壤類型	*N*
1	9	12	14	19	Dystric Gleysols, Calcaric Regosols, Cambic Arenosols, Eutric Cambisols, Haplic and Chromic Luvisols, Haplic and Ferric Alisols	8
2	0	16	26		Eutric Fluvisols	
3	3	3	5	12	Calcaric Fluvisols, Eutric and Calcic Gleysols, Haplic Arenosols, Gleyic Cambisols, Haplic Calcisols, Stagnic and Gleyic Luvisols, Dystric Planosol	57
4	4	20	25	20	Gleyic Arenosols, Calcaric Cambisols, Podzols (Haplic, Cambic and Carbic)	82
5	19	22	24	36	Eutric and Dystric Leptosols, Cambisols (Dystric, Humic and Chromic), Gleyic Podzols	122
6	22	31	34	57	Dystric Regosols, Rendzic Leptosols Ferric Podzols	61
7	36	3	36		Lithic Leptosols	5
8	25	14	17		Vertic Cambisols, Vertic Luvisols	
9	6	27	33		Haplic Chernozems	1
10	1	1	3		Albic Luvisols, Podzoluvisols (Dystric, Gleyic and Stagnic)	13

*僅在德國有樣點（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

(C) 土壤有機碳(SOC)儲量計算

資料庫應用了 9 種不同的計算方案（表 3-1-10、圖 3-1-6），以便未來每次都可以進行重新計算或使用。

B. 森林土壤有機碳(SOC)濃度地圖

為了繪製碳濃度地圖，使用了點到面分析 (point-polygon analysis) 的方法，將每個 Level I 樣點對應到歐洲土壤資料庫 (European Soil Database, SGDBE) 中的土壤繪圖單位 (soil map unit, SMU)。通過計算，得到了每個 SMU 的平均碳濃度。這些土壤圖是根據氣候帶進行分層。為了評估土壤碳濃度地圖的可靠性，分別繪製每個氣候帶 SMU (climate-SMU) 樣點發生的頻率。這種簡單而具有代表性的方法將 Level I 樣點的分布與 SGDBE 的差異結合在一起。

表 3-1-9 Level I 採樣及分析方式 (1/2)

Country	16km×16km grid (Level 1)	O-layer	Mineral soil	Carbon	BD	Stone content
AT	N=131, 1987-1989	OL+OF+OH	1 soil pit, 130cm wide	DC	PTF from SOC	Visual assessment
BE_{FI}	N=16; 1993	OL+OF+OH, 36 subsamples	Auger sampling in each of the 4 Level	DC	Measured	Visual assessment
BE_{WA}	N=21, 1994-1995	OL+OF+OH,10 subsamples	I quadrants	DC	Measured	Visual assessment
BU	N=286(10 regions, 2 per year)	OF+OH(OH sampled separately if >1 cm); 3 subsamples	1 soil pit, 3 subsamples	Tyurin	Measured	Measured: 2-5mm; >5mm: visual assessment
CH	N=48, 1993	Sampled occasionally: independent inventory	1 soil pit	DC	Measured(80% of the sites)	Visual assessment
CZ	N=100, 1995-1996	No OL, OF and OH are mixed, 5 subsamples	1 soil pit, 3 subsamples(from all pit sides)	Tyurin	n.d.	Visual assessment
EE	N=91, 1990-1994	No OL, OF and OH separate, 3 subsamples	1 soil pit, 3 samples	Tyurin	Estimated	Visual assessment
DE	N=416, 1987-1993	OL(depends on Federal land; if yes, then with OF); OF, OH mostly separately; 8 subsamples)	1 soil pit in the plot centre; 8 satellite borings	DC, WB	Measured, estimated	Visual assessment
DK	N=25; 1994	OL, OF+OH, 4 repetitions per horizon	Along diagonal line of a 50m× 50m plot; 16 borings to one composite each 4.7m	DC	Measured	Visual assessment
EL	N=15, 1993/1994	No OL; OF+OH	2 soil pits(high stone content: sampling in an adjacent area)	WB	Not determined	Visual assessment
ES	N=464, 1993-1995	OF and OH separate; 4 subsamples (1per quadrant of the ICP plot)	3 pits	WB	Measured	Visual assessment
F	N=517, 1993-1994	OL, OF+OH, 2 subsamples	2 soil pits	DC	Measured	Visual assessment
FI	N=384 plots, 1986-1989, 1995(104 plots)(Histosols were excluded)	Subsamples(10 locations around the soil pit (composite from 1 to 3 subsamples)	N=5 soil pits(50cm deep) 1 pit: depth classes	DC(and LoI0	Measured, estimated	Soil pit: visual estimate; plot: Viro's stoniness index
HU	N=67, 1994	OL+OF+OH, 9 subsamples	9 small pits	Tyurin	Estimated	Visual assessment
IE	N=22, 1995	OL+OF+OH, 3 subsamples	1 soil pit	WB, LoI	Measured	Not recorded
IT	N=20, 1994	OL+OF+OH	3 borings	n.d.	n.d.	n.d.
LT	N=67, 1992	OL+OF+OH, Subsamples	Soil pit 8 no samples from the pit; 12sibsamples from cores	DC	Not determined	Visual assessment(stones present/ absent)

* Country 國家：AT 奧地利、BE 比利時；佛蘭德斯和瓦隆、BU 保加利亞、CH 瑞士、CZ 捷克共和國、EE 愛沙尼亞、DE 德國、DK 丹麥、EL 希臘、ES 西班牙、F 法國、FI 芬蘭、HU 匈牙利、IE 愛爾蘭、IT 義大利、LT 立陶宛。

* O 層：森林地面的通氣有機層，由未分解或部分分解的枯枝落葉組成；OL 層：枯枝落葉層（樹葉/針葉、樹枝）和木質材料（包括樹皮）、水果等；OF 層（破碎 fragmented 及/或 altered）：部分分解（即碎片、漂白、斑點）的有機質層；OH 層（腐植質、腐化作用）：分解良好的無定形/非結晶體 (amorphous) 有機物。

* PTF：土壤傳導函數 pedo-transfer function。（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

(續下頁)

表 3-1-9 Level I 採樣及分析方式 (2/2)

Country	16km×16km grid (Level 1)	O-layer	Mineral soil	Carbon	BD	Stone content
LV	N=75, 1991	H and O layers sampled	No samples	Not analysed	n.d.	n.d.
NL	N=11,1995	OL+OF+OH	20 subsamples	n.d.	Estimated	Visual assessment
PO	N=148, 1995	OF+OH(no L), 9 samples (cylinders)	Soil pit (soil textural analyis, pH)(spade) 0-10, 10-20, 20-40, 40-80 cm: 9 cores	DC	BD measured in 2003(0-10cm)	1-20mm: analysed; >20mm:visual assessm.
PT	N=157, 1995	OL+OF+OH	16 subsamples	n.d.	n.d.	n.d.
RO	N=242, 1992	OL+OF+OH(composite, Sample)	1 soil pit	Tyurin	n.d.	n.d.
SE	N=1249 as part of the NFI 5km × 5km- 15km × 15km(1985-1988, N=75 in 1995)	O-layer > 2cm: OF+OH (composite, no L) O-layer< 2cm (Mull, Mullmoder): L+OF+A 1-5 samples per plot (core sampler)	1 soil pit, horizons in depth layers 0-10, 10-20, 50-60 cm; Podzols: additionally 0-5 cm of the upper part of the Bs horizon	DC	PTF based on SOC	Viro method
SI	N=43, 1994-1995	OL, OF, OH separately, 3 subsamples	Composite sample from borings N=9(0-5, 5-10 cm) and N=6(10-20cm)	DC	Measured	n.d.
SK	N=112, 1993	OL+OF, OH, 20(10) subsamples	20 soil pits(“shallow pit method”)	Tyurin	Measured, estimated	Visual assessment
UK	N=67, stratified, 1993-1996	OL+ OF mixed, OH separate, 4 subsamples(1 for each direction as composite from 7 subplots	N=28 small soil pits(spade)	LOI	No	No

*Country 國家：LV 拉脫維亞、NL 荷蘭、PO 波蘭、PT 葡萄牙、RO 羅馬尼亞、SE 瑞典、SI 斯洛維尼亞、SK 斯洛伐克、UK 英國。此表中未列出的歐盟國家：LU 盧森堡、MT 馬爾他、CY 塞浦路斯。縮寫根據歐盟統計局 (EUROSTAT)；BEFl：法蘭德斯；BEWa：瓦隆。

表 3-1-10 Level I 資料庫土壤有機碳儲存量計算的方案

Code	*N*	Mineral soil (min)	O-layer (O)	H horizon (H)	Pre-processing
0	173	n.d.	n.d.	n.d.	No data available
1	1851	Measured	X	(X)	min: BD provide; default values for stoniness O: calculated acc. To Eq. (1) (includes 104 plots with H)
2	1707	Estimated	X	(X)	min: BD not provided; pedo-transfer function was used; default for stoniness O calculated acc. To Eq. (1) (includes 73 p;ots with H)
3	389	Estimated	n.d.	n.d.	min: as with code = 2 O: no gap filling; many Eutric and Calcaric soil types with humus type = Mull (no O-layer sampled)
4	259	Measured	n.d.	n.d.	Min: as with code = 1 O: as with code = 3
5	634	n.d.	X	n.d.	min: no gap filling: (a) shallow or hydromorphic soils and peat; (b) missing data for one depth class O: thick O-layers; calculated acc. to Eq. (1)
6	113	n.d.	n.d.	*Weight* is missing	Min: no gap filling; peat soils H: BD based on PTF; standard depth = 20 cm
7	7	n.d.	X	X	min: no gap filling O/H: calculated acc. to Eq. (1)
8	129	Estimated	*Weight* is missing	n.d.	min: as with code = 2 and 3 O: *weight* was estimated based on averages per soil type
9	6	Measured	*Weight* is missing	n.d.	min: as with code = 1 and 4 O: as with code = 8

* n.d.：無資料；BD：土壤總體密度（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

森林土壤有機碳 (SOC) 濃度地圖（圖 3-1-7）顯示表土（0 至 5 公分以及 0 至 10 公分）的碳濃度 (%)。碳濃度低於 2%的地區主要位於瑞士北部和芬蘭，主要是淋澱土 (Podzols)，表土典型為淋溶 eluviated，腐植質較少。在歐洲東部亞大陸性氣候地區，其他 SOC 濃度較低的區域也可見。

森林土壤的有機碳含量明顯高於農耕土地。這種差異主要是由於氣候、地理位置、海拔等多種因素引起的。因此，建議在進行土壤採樣時，應詳細描述點位的位置和相關細節資訊，包括土壤介紹、腐植質及植被類型、氣候帶、海拔、坡向和坡度等。隨著海拔的升高，土壤碳濃度也會增加。土壤的位置和母質也直接影響碳濃度，例如土壤中鈣含量越高，碳濃度也會越高。對於經過人為管理的土地，特別需要注意標記，包括是否有施肥、種植哪種作物或樹種等資訊。通常，質地較粗糙的沙土，如淋澱土 (Podzols)、砂質土 (Arensosols)、腐石土 (Regosols)，養分較低；而質地較粗糙的沙土，如變育土 (Cambisols)、高活性淋餘土 (Luvisols)，養分通常較高。森林中的 O 層土可以迅速對環境變化作出反應，例如樹種變更或大氣污染物的影響。這可能會導致森林土壤的變異性增加，因此，在管理森林時，O 層土的厚度和碳儲存量可能會出現變化。

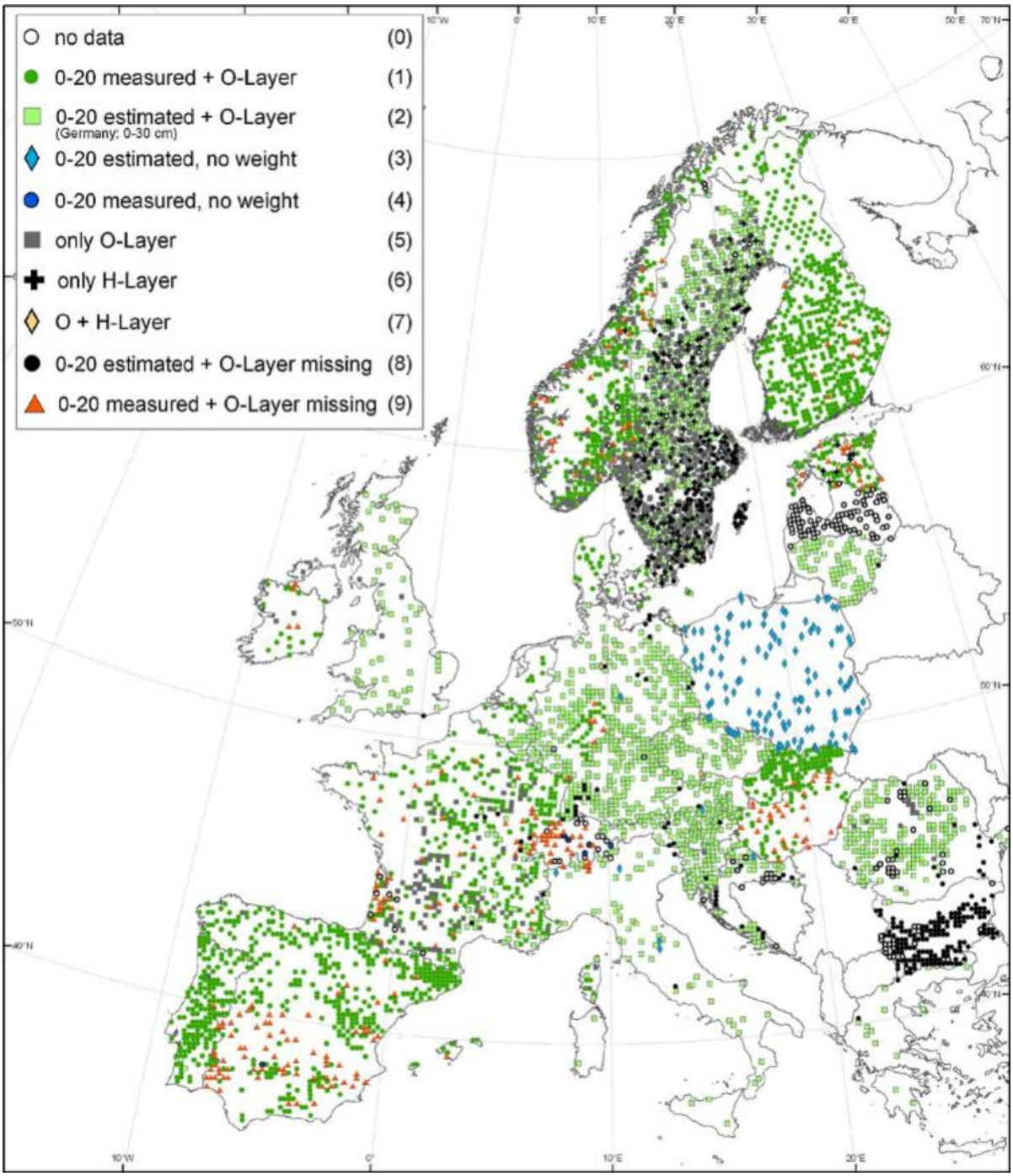


圖 3-1-6 歐洲森林 Level I 採樣點地圖

（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

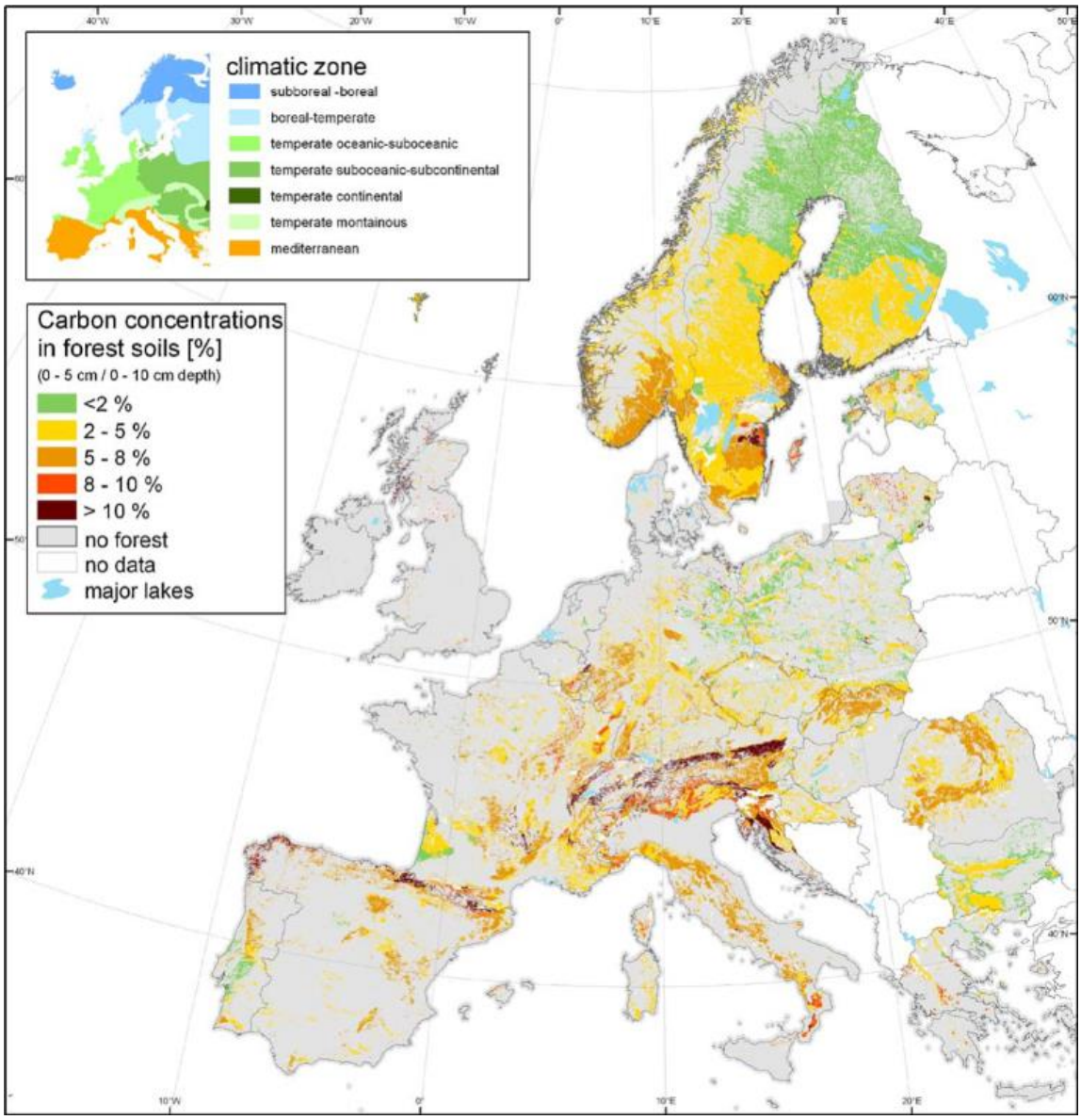


圖 3-1-7 森林土壤碳濃度地圖

（資料來源：Baritz *et al.*, 2010）

(3) 歐盟政策推動

土壤被視為一種不可再生的資源，因為它們形成的速度極慢。即使在受到某種形式的損害後，土壤仍具有恢復的能力。土壤的再生過程相當複雜，需要耗費大量的時間和精力。研究指出，將受損的土壤恢復到原始狀態可能需要長達 10 年的時間 (Ronchi *et al.*, 2019)。

土壤退化被定義為土壤品質和提供特定功能的損失 (Blum, 2008; Lal, 2015)。這種退化過程可能是由於外部自然事件，例如風暴或颶風，對土壤穩定性造成威脅，可能導致山體滑坡或洪水；或者是由人類活動引起的，例如農業的集約化改變了土壤中的養分和引起了污染。

歐洲正面臨土地退化的挑戰，且近年來受到氣候變遷的影響而加劇。因此，歐盟將土壤管理視為一個越來越重要的課題，在各個領域都需要政策的推動來解決相關問題 (Cowie *et al.*, 2018)。歐盟在土壤保護方面已經進行了多種嘗試，於 2006 年制定了歐盟土壤保護共同戰略 (COM(2006)23)，其中包括提出歐盟土壤框架指令的建議，以引導成員國採取行動來預防土壤退化 (Montanarella, 2015)。

A. 歐盟的土壤威脅

根據研究約有 11.4%的歐盟領土已因中度至重度土壤侵蝕(每年每公頃超過 5 噸)而發生改變 (Ronchi *et al.*, 2019)，在歐盟，水造成的土壤侵蝕平均每年每公頃 2.4 噸，每年因水造成的土壤流失量估計為 9.7 億噸。土壤重要功能取決於土壤中土壤有機質 (SOM) 的含量，SOM 的主要成分是土壤有機碳。據估計，歐洲約 45%的礦質土壤有機碳含量較低或極低 (0-2%)，45%的礦質土壤有機碳含量中等 (2-6%)(de Brogniez *et al.*, 2015; Lugato *et al.*, 2014)。

(A) 土壤壓實

土壤壓實是一種物理退化過程 (Abdelrahman *et al.*, 2016)，影響孔隙度、滲透性和其他重要的生物、化學和物理特性，約 3,300 萬公頃受到嚴重壓實影響，佔 EU MS 覆蓋面積的 4% (Lamandé *et al.*, 2018)，受土壤壓實影響最顯著的地區是歐洲北部和中部地區。

(B) 污染

造成廣泛土壤污染的重要因素是農業中的農藥、礦物肥料等農化產品的過量使用。這些對土壤生物群落（以及土壤功能）、地下水源並最終對食品安全產生重大影響。因為它們在水土系統中的相互作用非常複雜。因此，對其空間分布的估計有很大差異。在歐洲，由於化學肥料的使用較多，西歐 MS 的土壤養分濃度較高 (FAO *et al.*, 2015)。

(C) 鹽鹼化

土壤鹽鹼化是土壤中鹽分的增加。它被認為是歐洲主要的土壤退化威脅之一，其根源在於自然原因（地質、氣候、地形和水文），或者是由於不可持續的人類活動導致次生鹽鹼化 (Daliakopoulos *et al.*, 2016)。

B. 歐洲土壤資料中心

歐洲土壤資料中心 (ESDAC) 由歐盟委員會聯合研究中心 (JRC) 主辦，是歐盟土壤數據、政策制定支援和提高曝光度的協調中心。成立於 2006 年，目的為歐盟成員國

提供統一的土壤相關資訊，ESDAC 目前擁有 88 個數據集、6,000 張地圖、6 個地圖集、500 份科學出版物和大量與土壤相關的材料 (Panagos *et al.*, 2022)。歐盟委員會啟動了歐盟土壤觀測站 (EUSO)，以更好地支援歐盟的環境、農業和氣候政策，並成為歐盟委員會有關所有土壤問題的長期中央科學和技術參考點（圖 3-1-8）。



圖 3-1-8 歐盟土壤資料中心 2.0 以及歐盟土壤觀測站
（資料來源：Panagos *et al.*, 2022）

大多數的使用者來自學術界 (56%) 和研究機構 (18%)，學術界將 ESDAC 數據集用於研究、建模、博士、碩士論文、製圖、學術作業、教學、論文等。歐洲國家（德國、法國、義大利、英國、西班牙、荷蘭、希臘、葡萄牙、比利時和羅馬尼亞）以及美國和中國是過去 10 年中使用次數最多的（>1,000 次數據）（圖 3-1-9）。

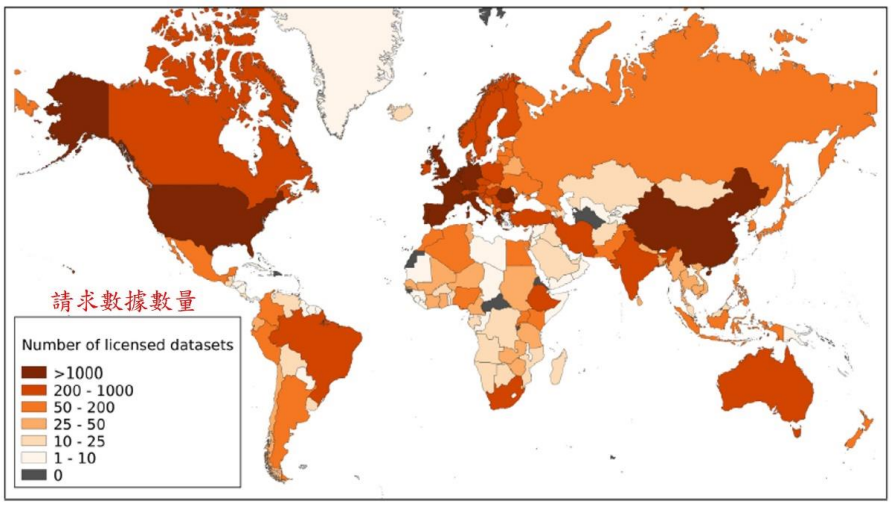


圖 3-1-9 各國 ESDAC 數據集的分布
（資料來源：Panagos *et al.*, 2022）

ESDAC 可以作為國家土壤研究所專題門戶的一個例子。ESDAC 成功的要素是實施開放獲取數據政策，提供完整記錄的數據集以及可操作和及時的服務台，並定期更新保持資訊，透過豐富的通訊向其使用群宣布。從主題上看，預計 ESDAC 將有更多來自大型研究專案、監測計劃、技術進步和政策制定的數據流。歐洲農業土壤聯合計畫(EJP)是歐盟資助的最大研究專案之一，為期 2020-2024 年，EJP SOIL 的目標之一是協調大陸尺度的數據集；這些新數據集將託管在 ESDAC 中 (Visser *et al.*, 2020)。

6. 美國森林土壤碳匯相關文獻

根據美國國家溫室氣體清冊，2022 年美國的森林儲存約 597 億噸碳（圖 3-1-10 及表 3-1-11），大部分碳儲存於森林生態系中 (95%)，其餘部分儲存在木材產品中，最大碳庫為森林土壤，約佔 2022 年森林碳儲存總量的 52%。自 1990 年以來，美國森林碳儲存量增加了 12%，幾乎所有的森林碳庫皆有上升之趨勢，但近年來上升之幅度逐漸趨緩。美國面積約有三分之一被森林所覆蓋，森林所在區域因地點、氣候、植被類型、和干擾程度等因素而有不同之環境特徵，由於這些差異，美國森林中不同的森林碳庫有不同比例的碳儲存量。因此，特定區域內的碳量或碳密度亦會改變 (Wilson *et al.*, 2013)。

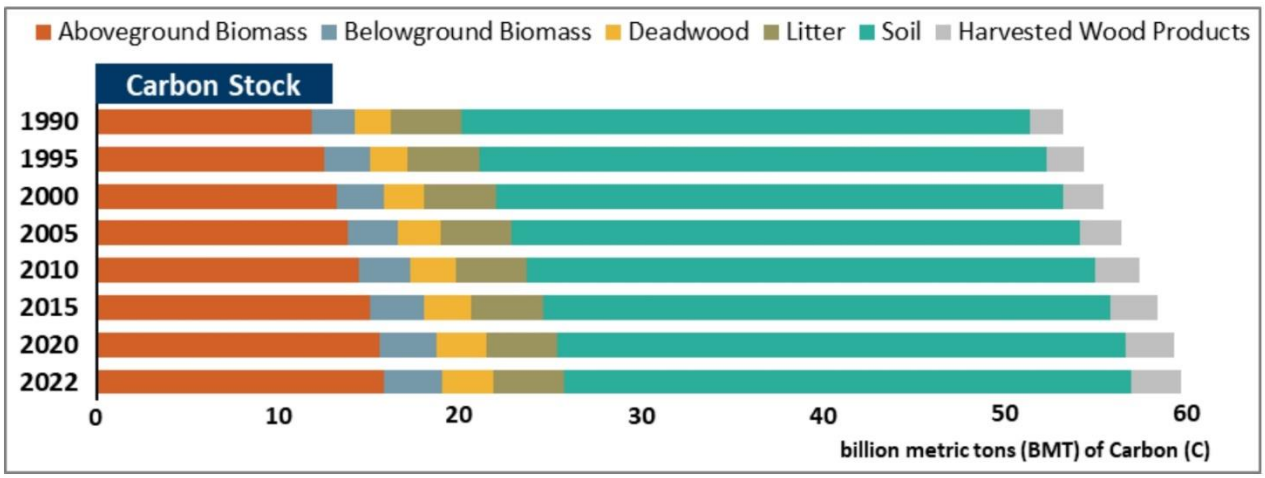


圖 3-1-10 1990 至 2022 年美國森林的碳匯量長條圖
（資料來源：U.S. National Greenhouse Gas Inventory, April 2023)

表 3-1-11 1990 至 2022 年美國森林的碳匯量比較表

Pool	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022 MMT C	2022 % of Total
Forest Ecosystem	51,354	52,308	53,237	54,098	54,952	55,810	56,623	56,951	95%
Soil (Mineral and Organic)	31,235	31,232	31,230	31,229	31,229	31,232	31,232	31,233	52%
Aboveground Biomass	11,899	12,573	13,226	13,849	14,453	15,051	15,635	15,861	27%
Litter	3,929	3,936	3,943	3,922	3,913	3,911	3,888	3,888	7%
Belowground Biomass	2,344	2,481	2,614	2,740	2,862	2,982	3,098	3,143	5%
Deadwood	1,948	2,086	2,224	2,359	2,496	2,634	2,771	2,827	5%
Harvested Wood Products (HWP)	1,895	2,061	2,218	2,353	2,462	2,567	2,695	2,749	5%
HWP in Use	1,249	1,326	1,395	1,447	1,471	1,490	1,530	1,549	3%
HWP in Disposal	646	735	823	906	991	1,076	1,165	1,200	2%
Total C Stock	53,249	54,369	55,455	56,451	57,414	58,376	59,318	59,701	100%

（資料來源：U.S. National Greenhouse Gas Inventory, April 2023）

美國南大西洋是一個生物多樣性的地區，從山區到山麓，從沿海到海岸，北卡羅來納州和南卡羅來納州的森林占美國本土林地的 5%，儘管兩州只佔不到陸地面積的 3%，但北卡羅來納州和南卡羅來納州的森林碳儲存量為美國森林部門每一年度的 7%，總體約抵消美國年度溫室氣體排放量的 11%以上 (Domke *et al*., 2021)。沿海平原的火炬松和其他松樹種主要以生產木製品為主，由於該地區氣候溫暖、潮濕，收穫期為北美最短 (Fox, 2000)；而較涼爽、地形崎嶇的內陸地區為生長緩慢的混合林，亦為重要的林業產業 (Griffith *et al*., 2003; Napton *et al*., 2010)。

南大西洋各國的森林碳儲存量以土壤為主，以北卡羅來納州和南卡羅來納州為例，1 公尺的土壤包含超過 46%的森林碳量，而地上部為 39%(Domke *et al.*, 2021)。因此，土地利用和管理在南大西洋國家之土地部門碳儲存中的作用，首先要評估基準線和碳儲存量之變化，且需進行完整的系統評估，如何影響土壤作為該地區森林生態系中的主要碳庫 (Buchholz *et al.*, 2021, Lan *et al.*, 2020)。

美國森林土壤之有機碳調查是由美國農業部森林保育署的 Forest Inventory and Analysis (FIA) 計畫進行森林清查 (NFI) 監測（圖 3-1-11），FIA 計畫自 2001 年開始，持續投入於測量土壤屬性，並於美國本土以及阿拉斯加東南部和中南部沿海地區的林地中累積廣泛的 SOC 數據，代表 FIA 計畫持續使用特定國家的 SOC 預測，部分使用自然資源保護局編制的國家土壤地理 (STATSGO) 資料庫中的 SOC 估計值的模型。從 STATSGO 資料庫獲得的估計值為大地圖單位的平均值，預計不會為特定位置（例如 NFI 圖）提供準確的估計值。為了提高美國森林 SOC 估計的準確性，首次使用 NFI SOC 來預測所有森林 NFI 樣地 100 公分深度的 SOC 密度，將土壤形成因素和 SOC 觀

測結果納入新的估算框架，導致全國 SOC 密度增加 75% (48 ± 0.78 Mg/ha)。大幅增加森林土壤有機碳儲存量的貢獻，從森林生態系總碳儲存量從約 44% (17 Pg) 增加至 56% (28 Pg)(Domke *et al.*, 2017)。

FIA 採用航空攝影（例如：國家農業圖像計畫，美國農業部農業服務局[2011]等），以確定所有採樣點的土地利用（例如：森林或農田），再來使用影像（例如：國家土地覆蓋資料庫；Homer *et al.*, 2012）從衛星資料獲得。地層為地理區域（例如：州或估計單位），其中包括具有相似屬性的地域；在許多地區，地層由預測的冠層覆蓋率定義。全國基礎採樣強度永久地域大約每 2,428 公頃，分布在美國 48 個相鄰州的四個地理區域（圖 3-1-12）(Domke et al., 2017)。每個永久性地區由一系列較小的固定半徑 (7.32 m)地區（即子地區）組成，這些地區以三角形排列，間距為 36.6 公尺，中間有一個子地區。土壤樣本與其他非立木生態系統屬性（例如：枯落物）(Domke *et al.*, 2016)，在至少存在一種森林條件的每 16 個基地強度樣地上，大約每 38,848 公頃分布一次（美國農業部林業署，2011 年）。沿著與子樣地相鄰的土壤採樣帶採集土壤樣本，深度為 20.32 公分。

在 NFI 中採樣數中，淋餘土 (Alfisols) 為 894 筆，為最常見的土壤土綱、極育土 (Ultisols) 為 680 筆、弱育土 (Inceptisols) 為 588 筆以及黑沃土 (Mollisols) 為 586 筆估計透過 NFI 測量獲得的 SOC 密度（0 至 20.32 公分），範圍為<1–524 Mg/ha，估計平均值為 54 ± 0.61 Mg/ha，淋澱土的土壤碳含量密度最高，為 72 ± 2.40 Mg/ha，而淋餘土的土壤碳含量密度最低，為 28 ± 1.81 Mg/ha（表 3-1-12）。在 NFI 中代表的所有土壤順序中，第一層（0 至 10.16 公分）SOC 估計值大於第二個層（10.16 至 20.32 公分）（表 3-1-12）。

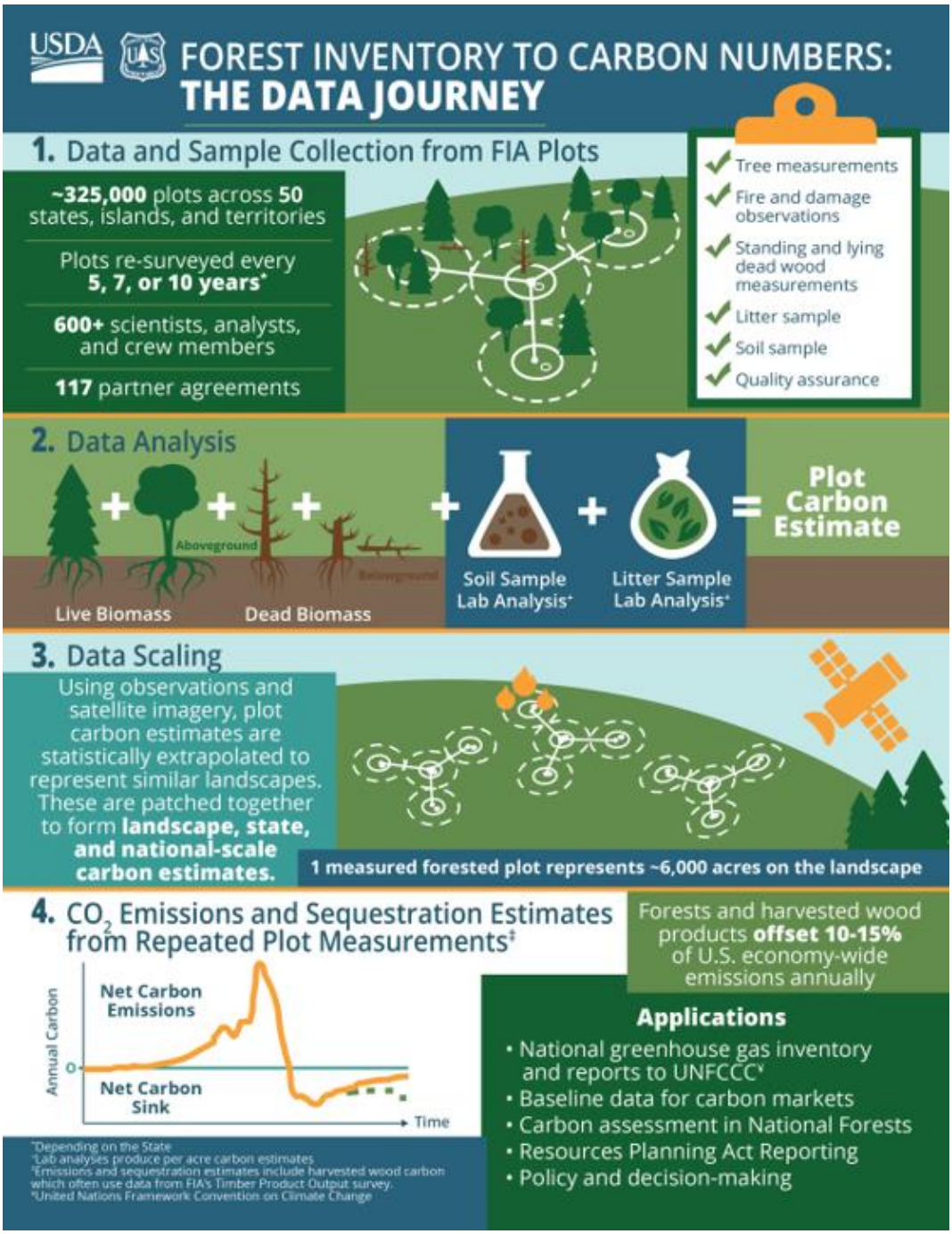


圖 3-1-11 美國森林保育署提出森林清查與分析碳監測之計畫
（資料來源：Forest Service U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE)

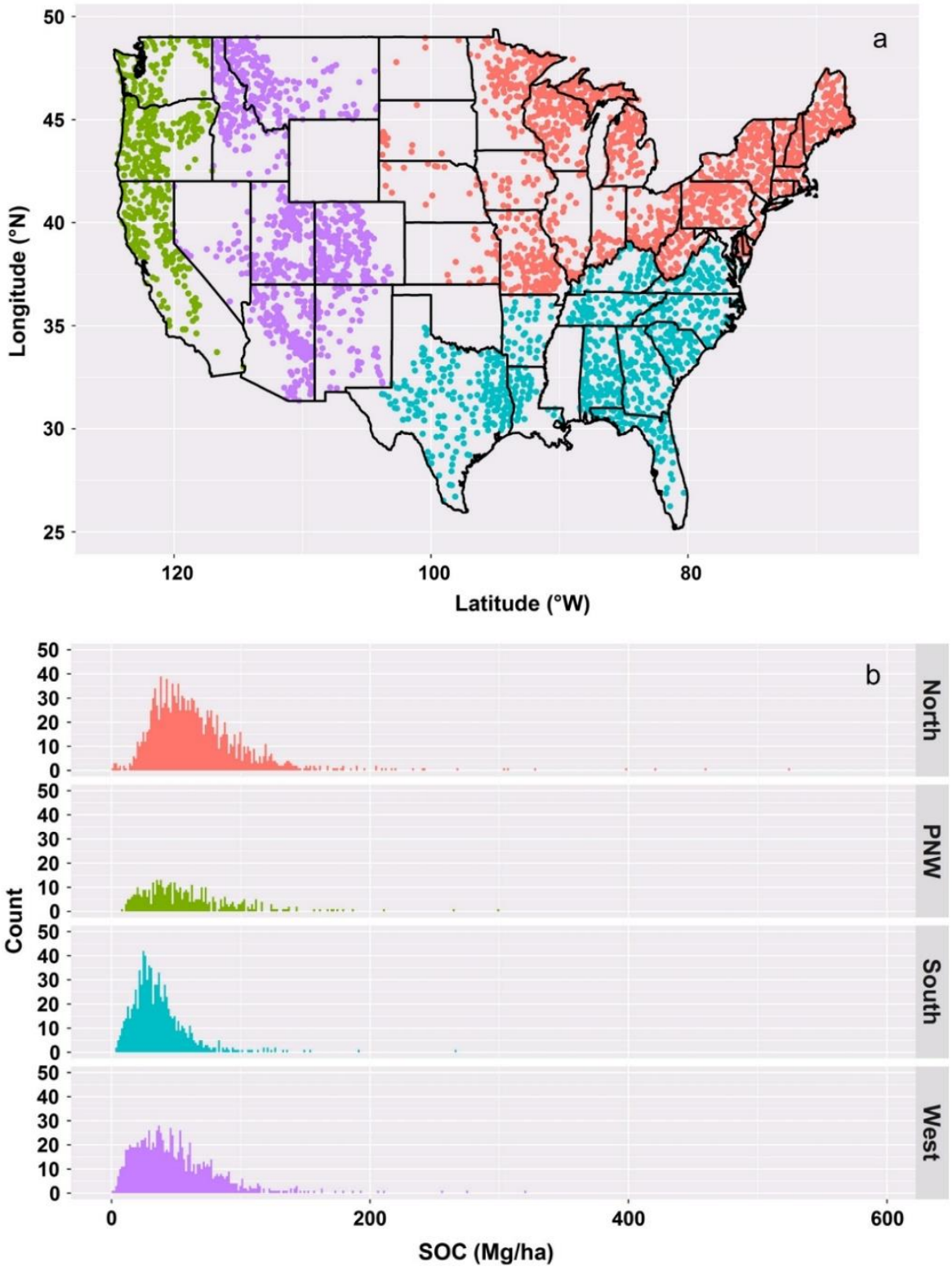


圖 3-1-12 美國本土地區國家森林清查 (NFI) 採樣地的分布圖

* PNW 為 Pacific Northwest（西北太平洋）（資料來源：Domke *et al*., 2017）

表 3-1-12 土壤有機碳 (SOC) 密度觀測與林地屬性統計數據表

Soil order	n	AGLTC (Mg/ha)	Basal area (m2)	SOC (Mg/ha)					
				1	2	Total	SD	CS	SD CS
All	3,636	45.53	21.75	33.10	22.94	54.01	37.05	62.87	40.06
Alfisols	894	45.87	21.31	31.06	20.24	49.51	28.47	59.14	36.37
Andisols	133	81.25	30.24	34.83	27.10	60.24	41.25	69.39	26.53
Aridisols	112	8.38	13.10	16.81	13.05	28.66	19.19	28.63	16.18
Entisols	209	25.48	19.51	23.41	16.34	38.62	29.25	51.23	45.15
Histosols	30	37.87	21.59	35.71	32.42	61.20	51.94	144.05	34.32
Inceptisols	588	53.04	23.68	38.65	28.47	63.97	45.23	66.20	45.95
Mollisols	586	28.51	18.77	34.14	24.83	56.46	32.49	47.16	28.45
Spodosols	395	55.49	25.30	42.79	31.92	72.06	47.62	107.03	42.32
Ultisols	680	53.48	21.78	29.97	17.53	46.31	30.94	57.37	22.07
Vertisols	9	17.35	10.28	23.60	13.91	35.96	10.80	47.35	13.82

*SOC1 為表層土壤有機碳（0 至 10.16 公分）
*SOC2 為第二層土壤有機碳（10.16 至 20.32 公分）
*SD 為總 SOC 平均值的標準差
*CS 為土壤有機碳預測（0 至 100 公分）
（資料來源：Domke *et al.*, 2017）

SOC30 估計值結合 NFI（0 至 20.32 公分）的數值和統一數據集（20.32 至 30 公分）的預測值，範圍為 11 至 541 Mg/ha，平均值為 67 ± 0.63 Mg/ha（表 3-1-13）。SOC100 的估計值範圍為 40 至 595 Mg/ha，平均值為 110 ± 0.69 Mg/ha（表 3-1-13）。並利用隨機森林(RF)預測 NFI 樣區的森林土壤有機碳儲存量（圖 3-1-13）與相對不確定性（圖 3-1-14），隨機森林為缺乏土壤數據時預測土壤有機碳儲存量有效且計算效率高之方法。美國森林的土壤碳庫變化很大且仍然存在許多不確定性。

表 3-1-13 不同的土壤土綱在 SOC_{30} 和 SOC_{100} 的敘述統計

	SOC30			SOC100		
Soil order	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
All	67.11	11.35	541.00	109.66	40.58	594.74
Alfisols	59.84	13.09	285.89	91.41	44.66	317.46
Andisols	80.57	32.26	285.43	142.32	94.01	347.18
Aridisols	40.15	15.75	102.57	98.30	73.90	160.72
Entisols	49.17	14.93	214.75	84.89	50.65	250.47
Histosols	81.38	37.41	287.54	134.36	90.38	340.51
Inceptisols	80.14	16.43	541.00	133.88	70.17	594.74
Molisols	72.96	21.80	283.39	133.81	82.65	344.24
Spodosols	85.94	16.01	434.34	123.25	53.33	471.66
Ultisols	56.31	11.35	243.16	85.54	40.58	272.39
Vertisols	53.49	38.95	73.66	143.91	129.37	164.07

（資料來源：Domke *et al.*, 2017）

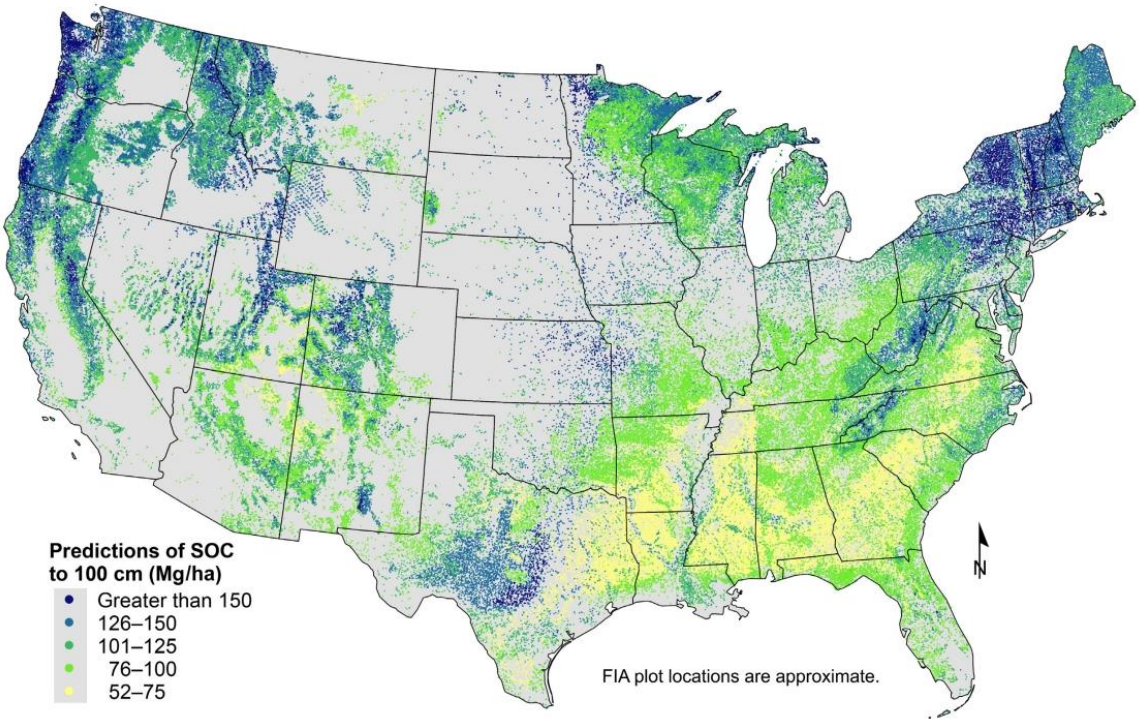


圖 3-1-13 隨機森林模型預測 NFI 樣區的土壤碳匯量（0-100 公分）分布圖
（資料來源：Domke *et al.*, 2017）

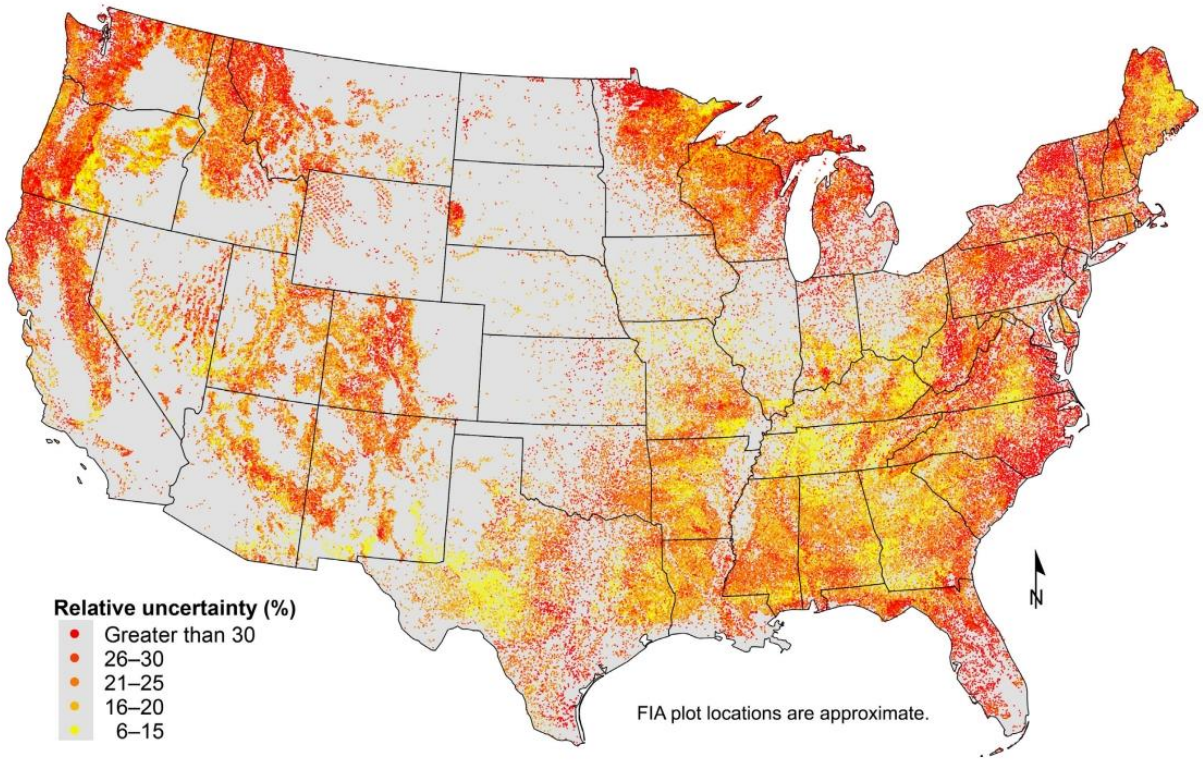


圖 3-1-14 隨機森林預測 NFI 樣區的土壤碳匯量（0-100 公分）之相對不確定性分布圖
（資料來源：Domke *et al.*, 2017）

7. 亞洲森林土壤碳匯相關文獻

(1) 中國

中國的森林面積為 156 兆公頃，從東北部的寒帶針葉林和落葉闊葉林到南部和西南部的熱帶雨林和常綠闊葉林，它們包括北半球幾乎所有主要的森林生物群落 (Fang *et al*., 2012)。自 1980 年代以來，中國政府實施許多大型國家森林保護工程，中國的氣候變遷和保護措施影響森林生態系對碳的吸收 (Fang *et al*., 2014; Feng *et al*., 2019)。許多研究利用模型模擬 (Piao *et al*., 2009) 或區域評估 (Pan *et al*., 2011; Tang *et al*., 2018) 分析中國森林土壤有機碳儲存量的時間動態。

Zhu 等人 (2020) 針對中國 8 個永久林地進行土壤有機碳儲存量之研究，測量 1990 年代和 2010 年代兩個時期中國熱帶、亞熱帶、溫帶和北方森林的 8 個永久林地的 SOC 密度，以量化 SOC 變化，並分析森林 SOC 動態的潛在生物和氣候驅動因素。中國分析森林碳儲存量估算方法可分為 15 種（圖 3-1-15），在土壤有機碳儲存量估算方面主要採用 4 種方法，如 S1、S2、S3 以及 S4，其中 S1（土壤類型法）佔所有方法中的 84.95% (Sun *et al*., 2020)，此方法根據不同土壤類型採樣資料獲得分類單位的土壤有機碳儲存量，並根據土壤土綱類型計算區域土壤有機碳儲存量。

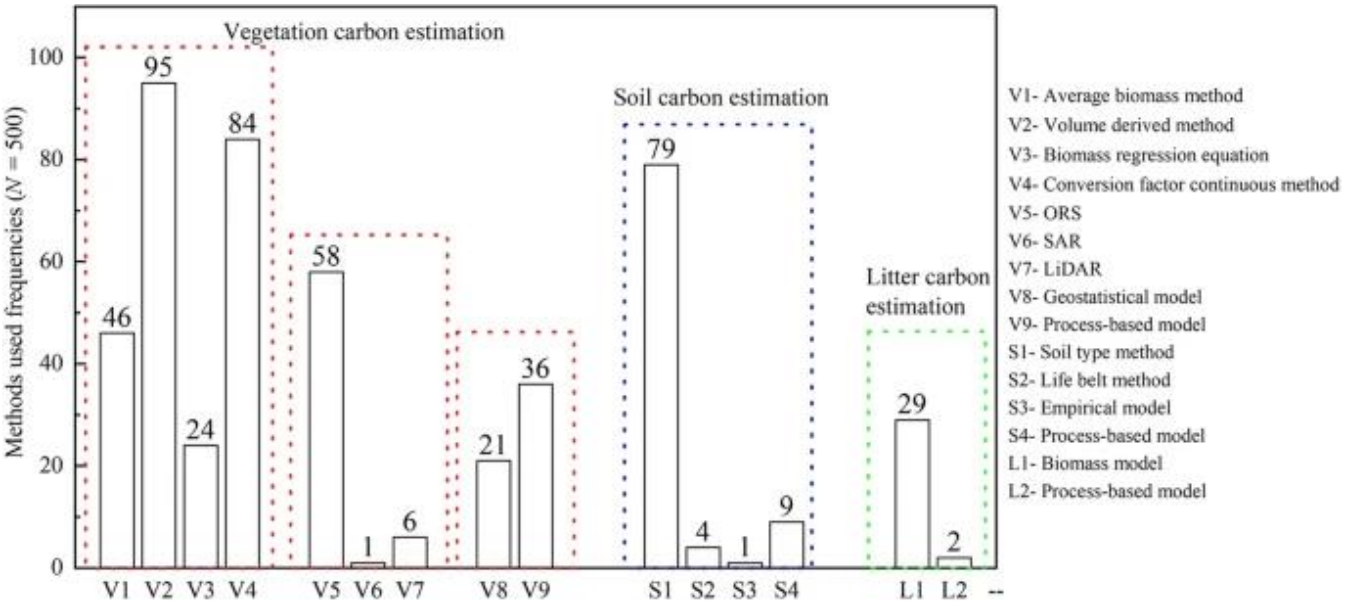


圖 3-1-15 中國森林碳匯量估算方法使用頻率統計

（資料來源：Sun *et al*., 2020）

在 1990 年代和 2010 年代，中國從北到南四個森林點的 8 個永久林地的土壤有機碳儲存量進行調查。1990 年代至 2010 年，20 公分土層 SOC 含量、容重及 SOC 儲存量變化（圖 3-1-16）。2010 年代 0 至 20 公分深度的 SOC 含量顯著高於 1990 年代 (3.2 ± 0.7 % vs. 2.9 ± 0.6%; P < 0.001)（表 3-1-14）。整個研究地點 20 公分深度的 SOC 含量平均增加率為 0.02% yr $^{-1}$，範圍為 0.01% yr^{-1} 至 0.04% yr^{-1}。0 至 10 公分土層 (0.03 ± 0.02% yr^{-1})中 SOC 含量的增加速率是 10 至 20 公分土層(0.01 ± 0.01 % yr^{-1})中 SOC 含量增加速率的 3 倍。同時，大多數站點（8 個站點中的 6 個）20 公分土層的容重均下降，平均下降率為 2.7 ± 3.7 mg cm^{-3} yr^{-1}。結果發現，過去 20 年來，表層 20 公分土層的土壤有機碳儲存量顯著增加（P < 0.001，表 3-1-14），平均累積率 332.4 ± 200.2 kg C ha^{-1} yr^{-1} (0.7 ± 0.4 % yr^{-1})。溫帶人工林 0 至 20 公分的土壤有機碳儲存量增幅最大 (630.8 ± 111.2 kg C ha^{-1} yr^{-1})。相較之下，亞熱帶混合林的增幅最小 (117.3 ± 25.2 kg C ha^{-1} yr^{-1})。值得注意的是，亞熱帶常綠原始林頂部 20 公分深度的土壤有機碳儲存量從 1988 年的 35.6 ± 6.0 Mg C ha^{-1} 增加到 2008 年的 45.6 ± 6.9 Mg C ha^{-1}，導致研究地點中最高的相對累積率 (1.4 ± 0.2 % yr^{-1})。

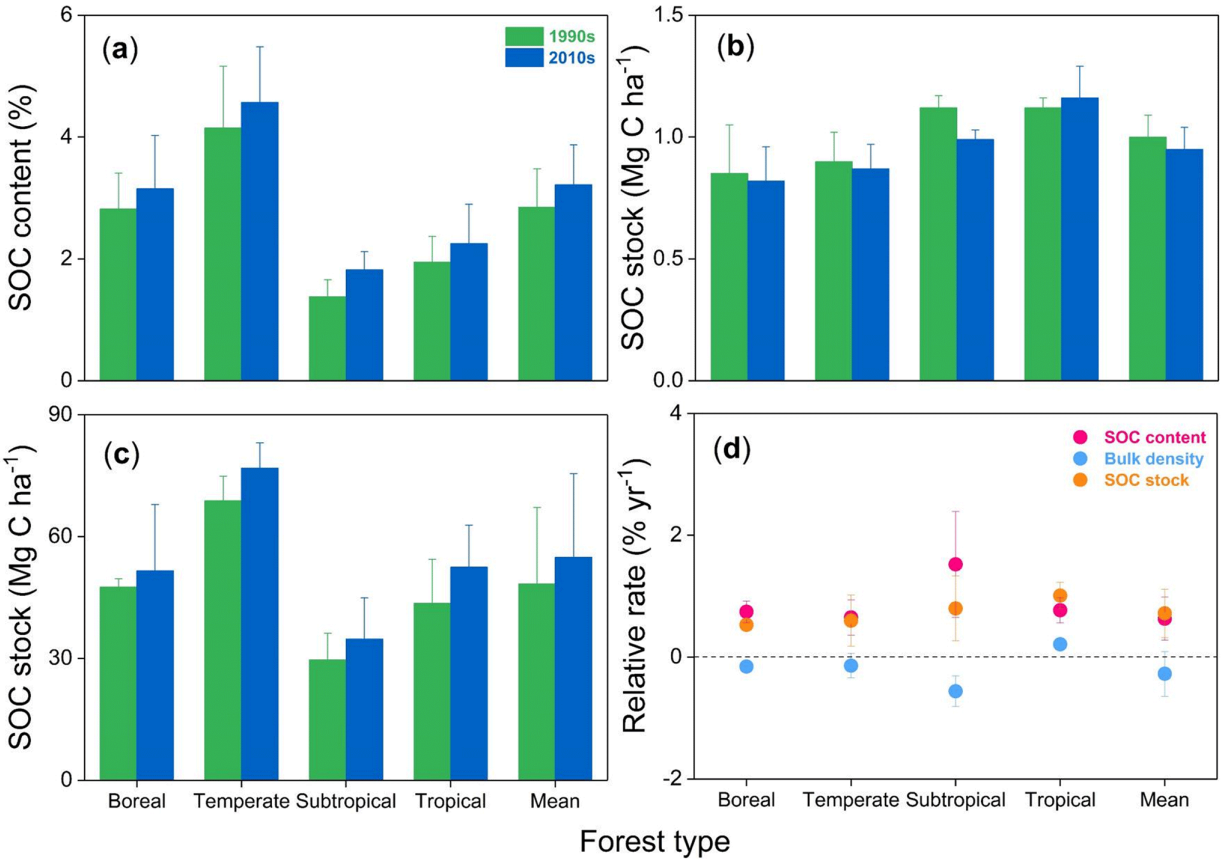


圖 3-1-16 1990 年代及 2010 年代 4 個地區 0-20 cm 土壤深度的土壤碳含量

（資料來源：Zhu *et al.*, 2020）

表 3-1-14 1990 年代至 2010 年代 8 個林地不同土層土壤有機碳含量、容重檢驗結果

Soil horizon	SOC content			Bulk density			SOC stock		
	t	d*f*	*P*	*t*	d*f*	*P*	*t*	d*f*	*P*
0–10 cm	−4.22	7	<0.01	2.19	7	0.06	−6.50	7	<0.001
10–20 cm	−4.09	7	<0.01	3.30	7	<0.05	−3.26	7	<0.05
Top 20 cm	−5.65	7	<0.001	1.01	7	0.35	−5.85	7	<0.001
Whole soil profile	–	–	–	–	–	–	−4.15	7	<0.01

（資料來源：Zhu *et al.*, 2020）

中國近 20 年來，森林 0 至 20 公分內的土壤有機碳儲存量增加 2.4~12.6 Mg C ha^{-1} (Zhu *et al*., 2020)，年累積率為 332.4 ± 200.2 kg C ha^{-1}。平均累積率 (421.2 kg C ha^{-1} yr^{-1}) 可能佔中國森林植被碳吸收率 (702.0 kg C ha^{-1} yr^{-1}) 的一半以上。近幾十年來，森林土壤持續發揮著重要的碳儲存作用，森林土壤儲存大量的碳，並緩慢地穩定的累積，但一旦受到干擾，就會迅速釋放到大氣中。

(2) 韓國

韓國森林面積佔陸地總面積的 64% (KFS, 2019)，森林組成為針葉林 31.8%；闊葉林 38.4%以及混合林 27.2%，韓國主要土壤土綱為弱育土 (Inceptisols)、新成土 (Entisols)、極育土 (Ultisols)、淋餘土 (Alfisols)及火山灰燼土 (Andisols)(Cha *et al.*, 2019)。為估算韓國森林土壤和枯落物的碳儲存量，使用 2016 年至 2019 年第七次 NFI (NFI7) 和 FHM 調查的數據（圖 3-1-17）。NFI 提供有關生長蓄積量、胸徑 (DBH)、高度、樹木密度、樹齡以及每種森林類型和樹種的樣地數量的數據。且提供有關每種森林類型和物種的土壤和枯落物特性以及碳濃度的數據。2016 年至 2019 年進行 NFI7 和 FHM 的永久採樣點由四個子採樣點組成，僅在中心子樣區 (Subplot 1) 收集土壤和枯落物樣本（圖 3-1-18）。

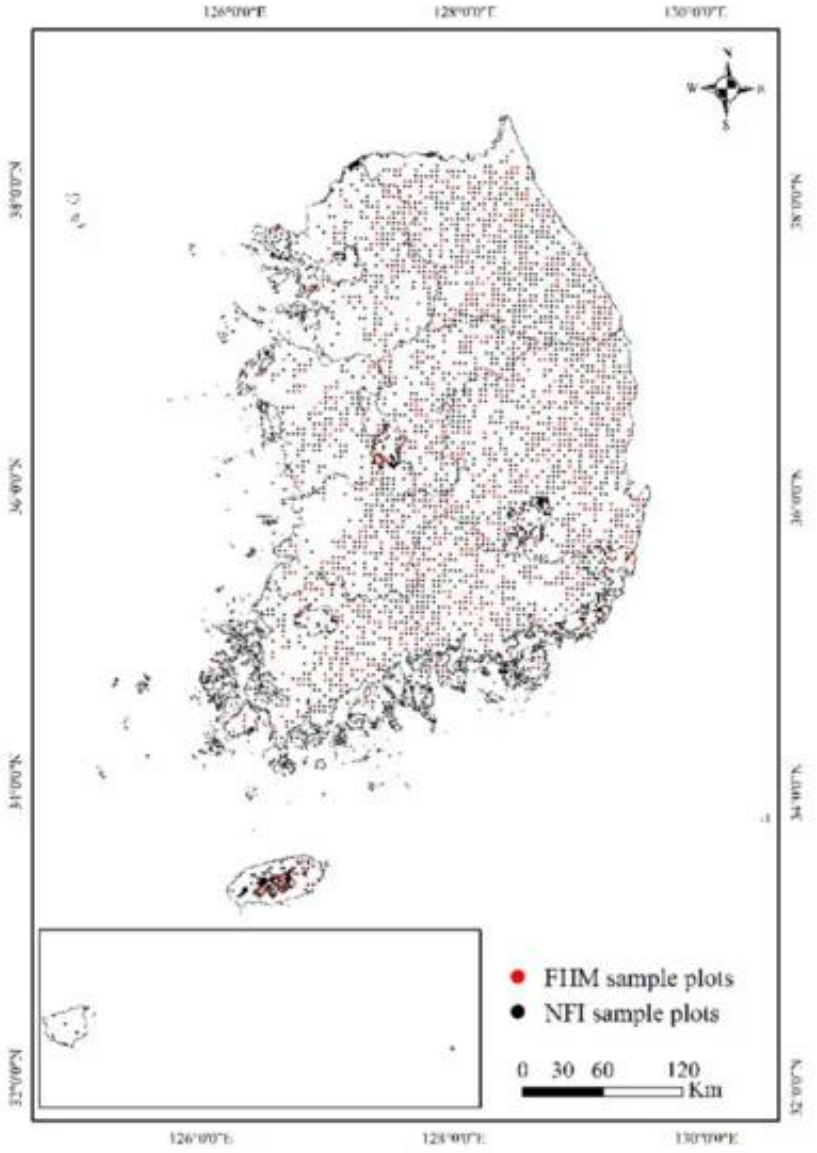


圖 3-1-17 韓國國家森林清查 (NFI) 和森林健康監測 (FHM) 樣區分布

（資料來源：Lee *et al.*, 2020）

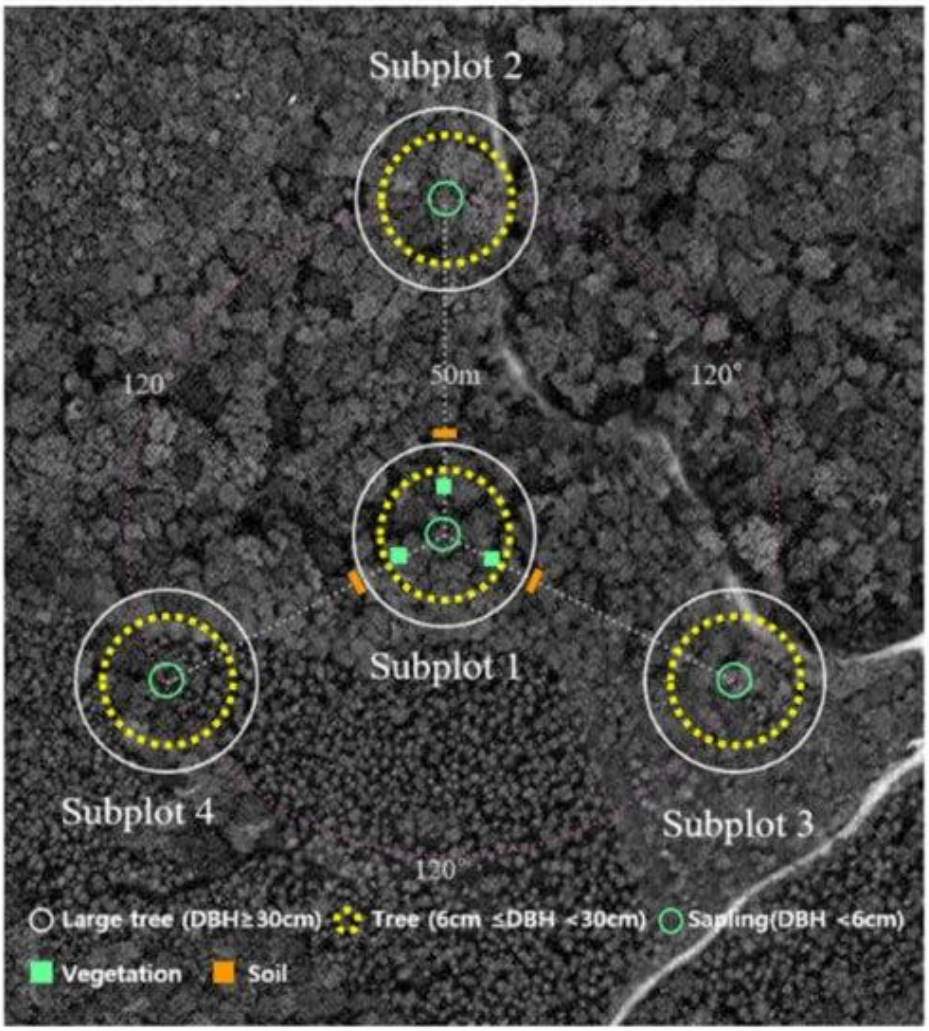


圖 3-1-18 韓國國家森林清查 (NFI) 和森林健康監測 (FHM) 調查的樣區設計
（資料來源：Lee *et al.*, 2020）

韓國使用 RF2 模型建立兩個碳儲存地圖，一種僅針對土壤有機碳儲存量（圖 3-1-19a），另一種針對土壤和枯落物碳儲存量（圖 3-1-19b）。土壤有機碳儲存量圖平均值約為 38.09 ± 0.03 t C ha^{-1}，對於土壤和枯落物之碳儲存量圖，平均值約為 42.09 ± 0.03 t C ha^{-1}。地圖顯示，韓國東北部的江原道和韓國南部島嶼濟州島擁有大量的土壤有機碳儲存量。以江原道為例，森林裡有大量的蓄積量。濟州島是由大陸板內火山作用形成的火山島(Koh *et al.*, 2013)，說明濟州島富有巨大的土壤有機碳儲存量。此外，土壤有機碳儲存量圖顯示出與韓國主要山區地形分布相似的趨勢 (Tak *et al.*,2013; Park *et al*,. 2008)。這些地區的平均海拔值為 446 至 794 公尺 (Tak *et al.*, 2013)。不同國家森林碳儲存量的差異可能是由於母土物質、平均溫度和降水量以及林分狀況（如林齡等級、蓄積量和樹種）的差異造成的，各國測量尺度、量化方式和樣本數的不同也會造成土壤有機碳儲存量的差異 (Vanguelova *et al.*, 2016)。

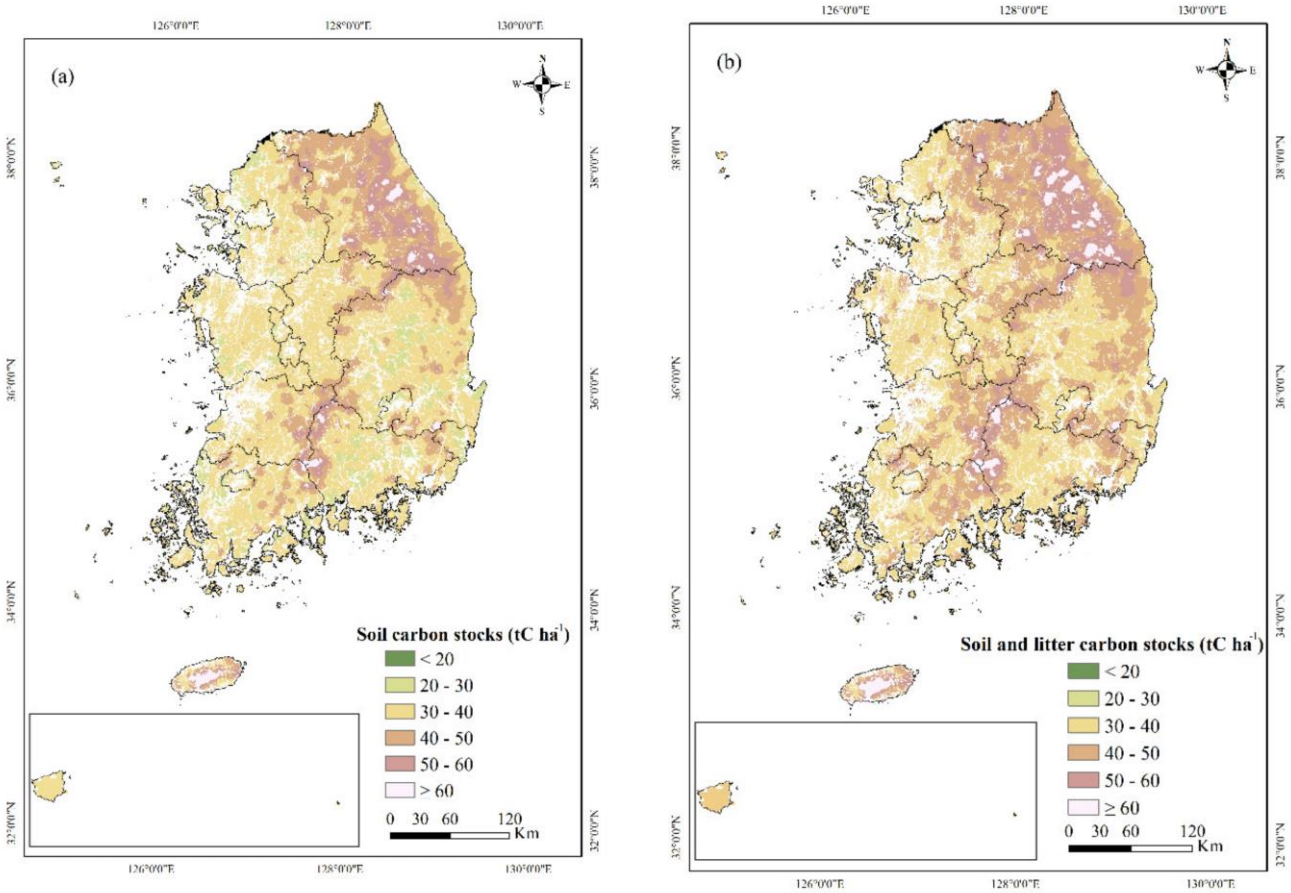


圖 3-1-19 (a) 0 至 30 公分土壤、(b) 0 至 30 公分土壤和森林枯落物中碳儲存量圖
（資料來源：Lee *et al.*, 2020）

(3) 日本

日本森林分布在山區，佔陸地總面積的三分之二。在日本全國範圍內，森林有機碳儲存量的地理分布是透過基於土壤 (Morisada *et al.*, 2004) 和行政區劃 (Ukawa *et al.*, 2012) 的方法估計。也曾使用空間分辨率為 1 km 的 CENTURY 生態系統模型，模擬日本全國潛在的 SOC 變化 (Hashimoto *et al.*, 2012)。然而，日本森林多位於複雜且不穩定的地形 (Ashton *et al*,. 2020；Yamashita *et al.*, 2022)，日本森林的土壤性質易受到微地形的調節；如坡度位置，可能會導致 WRB（世界參考基準）或 USDA 土壤分類法的土壤圖類別內出現較大的空間變化。

土壤數據來自於日本國家森林土壤碳盤查，採樣間隔為 4 至 20 公里網格，每個站點從四個不同方向（北、南、東、西；距離中心點 17.8 m）採集土壤樣本（圖 3-1-20），土壤深度為 0 至 5 公分、5 至 15 公分以及 15 至 30 公分，並根據測量值計算每個深度的平均值。由於森林土壤有機碳儲存量的全國尺度空間變化明顯受到土壤類型、氣溫、坡度和海拔等多種環境因素的影響 (Nanko *et al.*, 2017)，利用機器學習模型的 DSM 能夠同時考慮這些因素來預測 SOC。

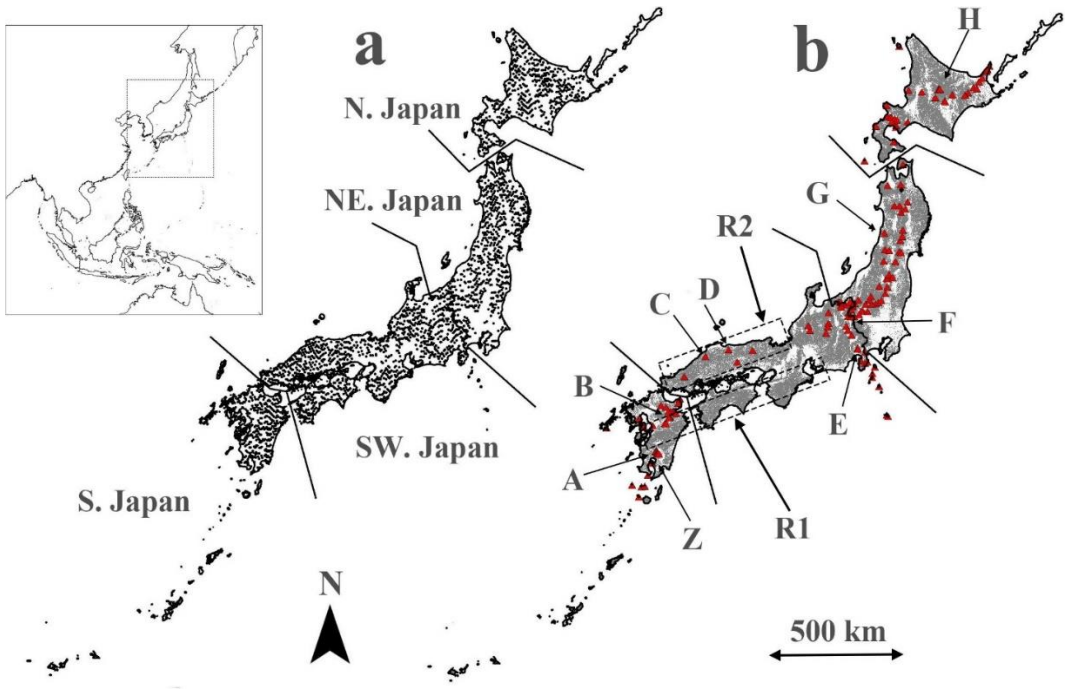


圖 3-1-20 日本國家森林土壤碳盤查調查點（黑點表示）分布

* 紅色三角形為火山分布

* 灰色陰影區域為目標的森林區域，空白區域主要為農田或城市

* A)霧島山；B)阿蘇山；C)三部山；D)大山；E)富士山；F)淺間山；G)鳥海山；H)大雪山

（資料來源：Yamashita *et al.*, 2022）

在空間預測模型上，考量 40 種環境屬性因子，如地形、氣候、土壤類型、地質和植被等（表 3-1-15），為確定日本森林碳儲存量適當的空間預測模型，使用七個模型，如三種不同的建模方法（OK、RK 和 RF）以及四組解釋屬性。評估每個模型的性能後，在考慮精度和計算成本之間的平衡的同時，選擇最佳模型進行映射（圖 3-1-21），使用解析度為 10 m 的網格，在所有林區的 0 至 5 公分、5 至 15 公分以及 15 至 30 公分深度處繪製 SOC 含量 (OC)、總體密度 (BD)、粗粒岩石 (CF)以及土壤有機碳儲存量 (OCS)，也確定最佳模型的每個變數的重要性。

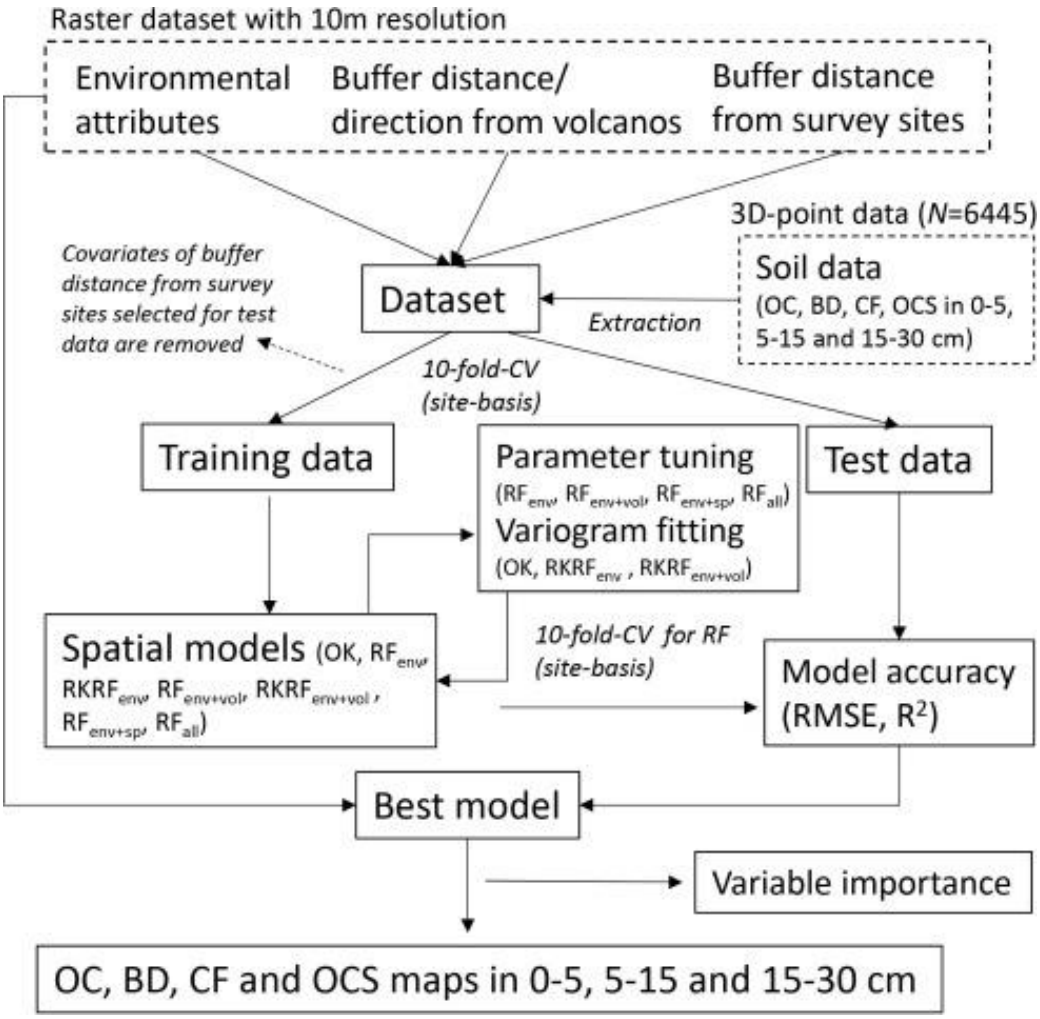


圖 3-1-21 預測 OC、BD、CF 以及 OCS 的程序
（資料來源：Yamashita *et al*., 2022）

表 3-1-15 空間預測模型環境屬性因子(1/2)

Group of attributes	Abbreviation	Description	Unit	Source
Micro-Topography	ALT	Altitude	m	GSI DEM10B
	ASP	Aspect	degree	GSI DEM10B
	MCSLP	Slope	degree	GSI DEM10B
	CPLAN	Plan Curvature	m^{-1}	GSI DEM10B
	CPROF	Profile Curvature	m^{-1}	GSI DEM10B
	CTOTL	Total Curvature	m^{-1}	GSI DEM10B
	MS	Mid Slope Position	–	GSI DEM10B
	MRRTF	Multi Resolution index of the Ridge Top Flatness	–	GSI DEM10B
	MRVBF	Multi Resolution index of Valley Bottom Flatness	–	GSI DEM10B
	HO	Slope Height	m	GSI DEM10B
	HU	Valley Depth	m	GSI DEM10B
	TPI	Topographic Position Index	–	GSI DEM10B
	LS	Slope length factor	–	GSI DEM10B
	WIND	Wind Exposition	–	GSI DEM10B
	VRM	Vector ruggedness measure	–	GSI DEM10B
	TCA	Catchment area	m^2	GSI DEM10B
	TWI	Topographic wetness index	–	GSI DEM10B
	CONV	Convergence index	–	GSI DEM10B

表 3-1-15 空間預測模型環境屬性因子 (2/2)

Group of attributes	Abbreviation	Description	Unit	Source
Meso-Topography[*1]	TGP	Terrain group	–	30-m DEM based on GSI DEM5A, 5B, and 10B
	HAND	Hight Above the nearest drainage	degree (Ln)	30-m DEM based on GSI DEM5A, 5B, and 10B
	MSSLP	Meso-scale slope gradient	degree (Ln)	30-m DEM based on GSI DEM5A, 5B, and 10B
	TEXTR	Surface texture	–	30-m DEM based on GSI DEM5A, 5B, and 10B
Vegetation	NDVI	monthly NDVI	–	GSI and Tokai Univ. 2008–2012
Soil and geology	SOIL	Soil type [*2]	–	National Land Agency 1967–1978
	GEO	Geological type [*3]	–	National Land Agency 1967–1978
Climate	MAP	Mean Annual Precipitation	mm	JMA 2012
	MAT	Mean Annual Temperature	degree	JMA 2012
	WI	Warm Index[*4]	–	JMA 2012
	SNOW	Maximum Snow Amount	cm	JMA 2012

（資料來源：Yamashita *et al*., 2022）

藉由隨機森林預測的 0 至 30 公分土層深度，在日本全國範圍內，OC 和 OCS 隨著緯度的增加而增加，日本北部和東北部的 OC 和 OCS 明顯高於日本南部和東南部。在區域範圍內，在一些火山周圍發現 OC 和 OCS 數值較高，如 Mts。阿蘇、大山、富士（圖 3-1-22），區域尺度上 BD 空間變化趨勢與 OC 相反；預計 OC 較高之區域 BD 較低，在日本南部和西南部的 BD 值較低之地區 CF 值較高，而在日本北部和東北部，CF 值大部分較低。OCS 的空間分布反映了 OC、BD 和 CF 的空間分布，且在日本北部和西北部較高。

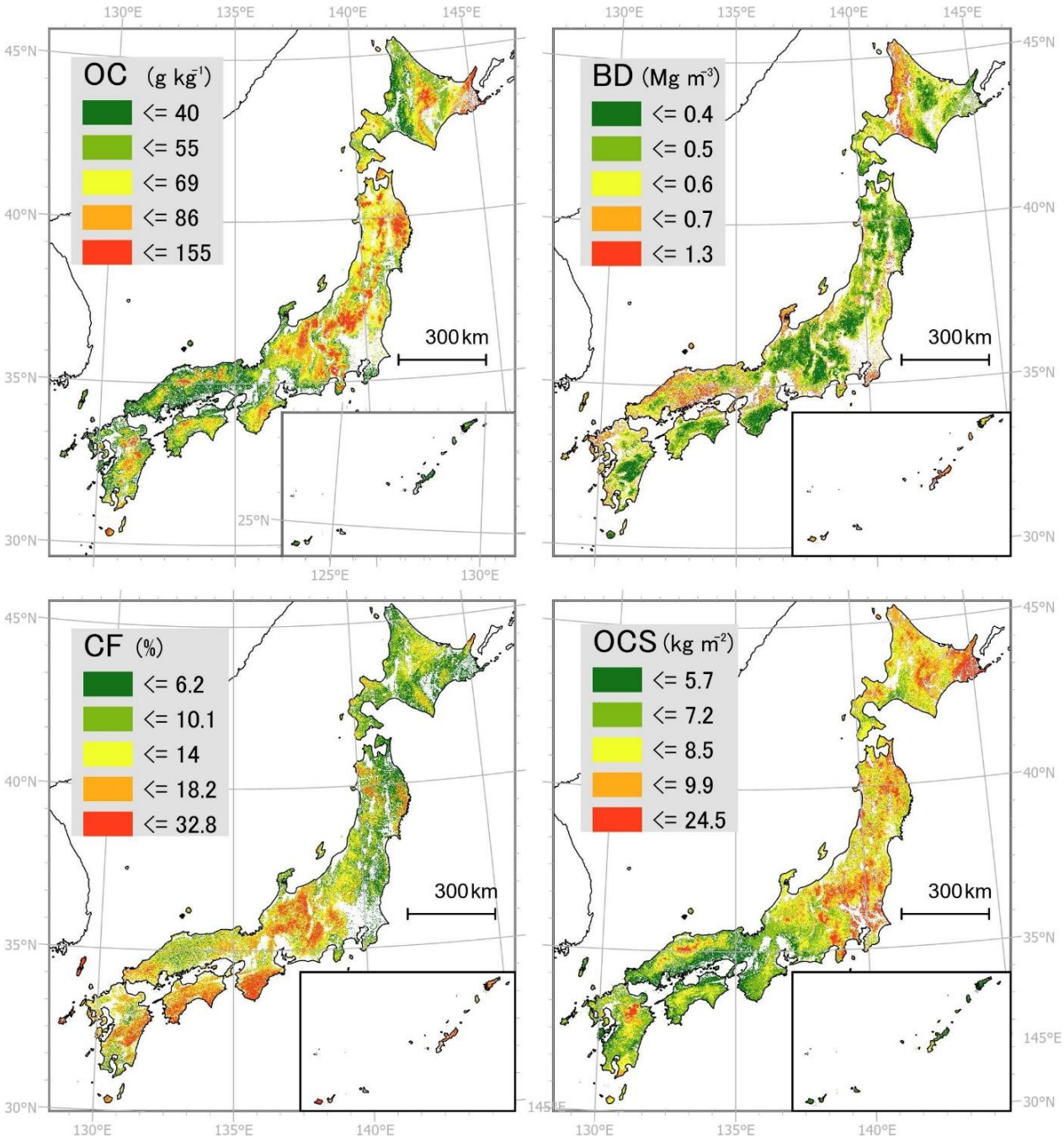


圖 3-1-22 0 至 30 公分的 OC、BD、CF 和 OCS 的日本全國尺度空間分布

（資料來源：Yamashita *et al*., 2022）

8. 初步評估臺灣森林土壤碳匯面臨的潛力與挑戰策略

(1) 面臨之潛力

回顧前述森林土壤碳吸存相關文獻，像是美國和歐盟等已開發國家在土壤有機碳儲存量方面有大量相關研究。根據這些研究，陸地生態系統中近一半的總有機碳 (C) 儲存在森林土壤中 (IPCC, 2007；Wei *et al.*, 2014)，而且被視為具有相當大的碳吸存潛力(Perruchoud *et al.*, 1999；Halliday *et al.*, 2003)。然而，由於我國在發展森林土壤有機碳儲存量方面起步較晚，目前國家清冊中未將土壤有機碳儲存量納入計算，導致低估了臺灣森林碳儲存總量。若將森林土壤有機碳儲存量納入考量，對於實現 2050 碳淨零目標將有顯著幫助。

土壤有機碳儲存量和品質受到多種因素的影響，包括自然因素（如地形、風、火災和乾旱等）和人為因素（如森林經營管理、森林砍伐、農地轉林地等）(Mayer, 2020)。最近的研究表明，較高的森林多樣性能夠增加土壤的碳氮含量 (Chen *et al.*, 2023)。對於提高土壤碳含量的研究成果，以本地的森林土壤調查資料為基礎進行評估將對臺灣具有實際可行性。為了深入研究實際的碳吸存機制，需要進一步完善土壤的基本資料，特別是針對森林土壤碳的調查，以實現對森林碳儲存量的更精確瞭解。

(2) 面臨之挑戰策略

臺灣的氣候被歸類為熱帶和亞熱帶，大部分地區都是高山陡峭的地勢。由於森林土壤調查需要覆蓋廣泛的地域，因此實施起來確實有一定的挑戰。在這方面，可以參考歐盟對森林土壤有機碳儲存量的調查和估算模式 (Baritz *et al.*, 2010)。歐盟和臺灣面臨類似的情況，由於歐洲的範圍龐大，故可參考歐洲土壤區域 (Soil Regions) 所開發的氣候區地圖（歐洲分為 34 區）。這種區分將氣候區劃分為 7 個部分，包括副極地-極地、極地到溫帶、溫帶的海洋性到次海洋性氣候、溫帶的次海洋性到次大陸性氣候、溫帶大陸性氣候、溫帶山地帶和地中海型氣候。在臺灣，這個分類可以應用於北部和中部的亞熱帶氣候、南部的熱帶氣候以及高山地區的寒帶氣候。

此外，Baritz *et al.*(2010) 提供了各種森林土壤含碳量和總體密度的公式。文中還建議，土壤採樣點的描述應包括詳細的位置和細節資訊，例如：土壤介紹、腐植質和植被類型、氣候帶、海拔、坡向和坡度等。這些建議同樣適用於臺灣各林業範圍中的森林土壤採樣，有助於提高資料的準確性和可比性。

(二) 彙整國內森林土壤剖面碳匯調查結果，進行資料基本分析

- **工作推動說明**

為能交互參照並善加利用國內主管機關及/或學術單位，歷年來森林土壤調查、分析資料，本工作項目（二）與工作項目（三）合併探討，詳述如下章節。

(三) 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料

- **工作推動說明**

為完成臺灣森林土壤有機碳儲存量基線圖，須彙整並研篩可用之土壤調查成果，本計畫以臺灣行政機關（如林業試驗所，簡稱林試所；農業試驗所，後簡稱農試所）及學術單位（如臺灣大學、宜蘭大學等）已採集之森林土壤樣本調查結果，作為可靠之資料蒐集來源，共計彙整 52 項森林調查成果，並檢附於光碟中。

- **執行成果**

將蒐整所得歷年來 52 項國內森林土壤相關研究、調查及分析資料，歸類為「國內行政機關已調查森林土壤研究」（表 3-1-16）及「國內學術單位已調查森林土壤研究」（表 3-1-17）兩大類，分別羅列其來源資料庫或計畫名稱，以利對照查找。本計畫將依據「國內行政機關已調查森林土壤研究」及「國內學術單位已調查森林土壤研究」資料庫建立森林土壤碳匯推估模式，並進一步分析其中相關影響因子，詳述於後續章節。

表 3-1-16 國內行政機關已調查森林土壤研究

研究內容	資料來源
森林資源調查與土壤調查資料庫	林業署與林試所 (1993 – 2002)
臺灣高山森林土壤形態、性質與分類，81 農建-9.1-林-43-(6-4)，82 農建-9.1-林 11-2-4（42 個剖面，249 個樣品）	蔣先覺等人 (1994)
福山試驗林土壤調查與分類	林光清等人 (1996)
耕作土壤及森林土壤碳存量（163 個剖面），1997	
Total organic carbon pool in forest soils of Taiwan（72 個剖面）2000 - 2007	
不同氣候區之森林經營與土地利用型式對土壤碳貯存量之研究(I)	王巧萍(2002)
四湖及後龍海岸林土壤有機物之組成與分布	陳財輝、陳振興 (2003)
阿里山森林鐵路沿線土壤剖面標本製作及性質調查，93-05-8-02，94-05-8-02（11 個剖面，59 個樣品）	陳尊賢等人(2004 – 2005)
臺灣不同氣候區天然林枝葉層與表土層碳匯存量	張朝婷等人 (2005)
不同森林生態系土壤中有機碳庫之建立	陳詠琮等人 (2005)
森林土壤的碳吸存量	顏江河(2005)
土壤碳吸存之時空變異，94 農科-11.1.1-森-G1-2（32 個剖面，132 個樣本）	陳尊賢等人 (2005)
森林資源碳吸存資料庫建置計畫，94 農發-17.2-務-01（45 個剖面，135 個樣本）	林世宗、蔡呈奇 (2005)
臺灣土壤剖面碳存量（農地剖面 375 個），2008	
苖濃溪事業區（585 個樣本），2010	
臺灣森林土壤碳庫量推估，TFBM-980222（78 個土壤剖面，309 個樣本）	杜清澤(2010)
土壤樣品檢測（75 個剖面，327 個樣本）	林試所(2010)
林業署原始 146 profile 總整理（146 個土壤剖面，609 個樣本）	林業署 (2010、2012)
土壤樣品檢測，FSW-QP12-03（62 個剖面，282 個樣本）	林試所(2011)
臺灣森林土壤碳庫推估，TFBM-980222（68 個土壤剖面，265 個樣本），2011	
101 調查 30 樣點彙整（123 個樣本）	杜清澤(2012)
苖濃溪事業區（22 個剖面，68 個樣本），2012	
臺灣土壤調查成果中的臺灣森林土壤資料（381,692 筆土壤樣本）	農試所 (1992 – 2008)
臺灣土壤調查成果中的臺灣森林土壤資料（112,775 筆土壤樣本）	農試所 (2008 – 2020)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-1-17 國內學術單位已調查森林土壤研究

地區	研究內容	資料來源
陽明山國家公園	陽明山國家公園土壤特性與類別分布之空間變異與模式建立(1/2)	陳尊賢、蔡呈奇(2000)
	陽明山國家公園之地形土序及其化育作用(I)(1/2)	陳尊賢等人(2002)
	七星山與紗帽山火山岩來源土壤之特性、化育與分類	黃政恆(1989)
	面天山火山岩來源土壤之特性、化育與分類	余東峰(1994)
	磺嘴山地區土壤之特性、化育與分類	周宗成(1998)
	應用地域分析與地理資訊系統繪製土壤圖:以臺灣北部火山灰土壤為例	蔡呈奇(2001)
	七星山優勢樹種生物量估算養分濃度與土壤性質之探討	李欣蓉(2003)
	兩個不同風化時間的地形序列中火山土壤特性比較	鄭亦均(2013)
太平山地區	宜蘭太平山地區淋溶化土之特性化育與分類	吳森博(2004)
三星鄉山區	Characteristics and genesis of Inceptisols with placic horizons in the subalpine forest soils of Taiwan	Wu *et al.* (2005)
拉拉山地區	拉拉山自然保護區之土壤	林光清(1987)
	台灣北部塔曼山區灰壤化土之特性、化育與分類	劉鎮宗(1989)
阿里山地區	祝山與萬歲山區土壤之特性、化育與分類	林經維(1999)
	嘉義祝山地區砂質與壤質淋溶土土壤之特性與化育作用	邱春媚(2003)
	阿里山區粗質地淋溶土的化育作用與土壤溶液化學(1/2)	陳尊賢等人(2004、2005)
	阿里山森林鐵路沿線土壤剖面標本製作及性質調查	
	阿里山祝山鐵路沿線土壤剖面標本製作及性質調查（祝山、自忠、麟芷山、塔塔加等地區土壤剖面標本製作及性質調查）	
	阿里山地區淋溶化土壤伴隨黏粒洗入之特性化育作用與分類	許禎原(2015)
阿里山	Hydroxy-interlayered minerals of forest soils in A-Li Mountain, Taiwan	Pai *et al.* (2004)
嘉義縣	Fractionation of rare earth elements in soil profiles along an elevation gradient in central Taiwan	Wu *et al.* (2024)
墾丁地區	墾丁萬里得山區極育土之化育作用與地形的關係	蔡呈奇(1994)
宜蘭、屏東	Morphology and pedogenesis of placic horizons in podzolic Ultisols with high clay content in humid subtropical forests	Hseu *et al.* (2019)
杉林溪、阿里山、水里	Using pXRF and Vis-NIR for characterizing diagnostic horizons of fine-textured podzolic soils in subtropical forests,	Huang *et al.* (2023)
南投地區	Subalpine loamy Spodosols in Taiwan: Characteristics, micromorphology, and genesis	Li *et al.* (1998)
福山	福山天然闊葉林 25 公頃永久樣區土壤性質之空間變異	廖偉志(2005)
	福山 25 公頃永久樣區之土壤植被與地形三者間相關性的探討(1/3)、(2/3)、(3/3)	陳尊賢等人(2006)
蓮華池	蓮華池 25 公頃闊葉林長期動態樣區土壤性質之空間變異	林佳佳(2009)
南仁山	南仁山區環境對土壤性質及化育作用之影響	江斐瑜(1990)
	南仁山區土壤性質在不同地形位置之分布	崔君至(1999)
	南仁山溪谷樣區土壤水份含量與土壤溶液組成隨時間與空間之變異	陳慧美(2003)
	全球變遷: 南仁山森林生態系研究-南仁山土壤水分含量及土壤溶液組成之變化(2/2)	陳尊賢等人(2003、2004)
	全球變遷：南仁山森林生態系研究-東北季風對南仁山森林生態系土壤中碳氮礦化速率及動態變化之影響(1/2)	
臺灣山區	Differentiation of fine-textured podzolic soils controlled by climate and landscape in Taiwan	Huang *et al.* (2022)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

二、辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上

因應全球 2050 碳淨零行動方案，臺灣已積極投入碳淨零技術發展與研究。農業部提出 2030 年自然碳匯增量 135.75 萬公噸，2040 年達 1,000 萬公噸之目標。過去在計算自然碳匯時僅將森林地上部納入計算，而森林土壤及海洋尚缺基礎資料，嚴重低估臺灣的碳匯潛力。臺灣土地 60.7%屬於森林地，面積達 219.7 萬公頃，臺灣森林土壤貯存了大量的碳，對大氣中二氧化碳濃度具有相當程度的影響。過去臺灣森林土壤總碳存量並沒有其他完整的推估與瞭解，在目前缺乏完整的森林土壤有機碳儲存量推估與基線圖之下，未來在森林經營的過程中較難以掌握整體森林土壤碳庫的變化。為了增進碳淨零相關議題的瞭解，本研究院人員積極參與相關之工作坊及演講，並邀請專家及專業講師開設森林土壤碳匯工作坊，教授知識課程及資訊課程，提升林業及碳淨零相關人員對森林土壤有機碳儲存量之瞭解；同時，加強工作坊參與者對森林土壤有機碳儲存量問題的認識，提升其專業知識能力。

- **工作推動說明**

配合自然保育署 112-113 年「森林土壤碳匯基線研究」計畫，此期間參與的外部工作坊及台農院自行開設的工作坊包含:「利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力（包含利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊、如何估算區域或國家尺度土壤有機碳匯潛力）參與外部工作坊（圖 3-2-1、圖 3-2-5）」、「2023 年森林碳匯調查技術研習（參與外部工作坊）」、「森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)（台農院開設工作坊-112 年 8 月、10 月）」、「森林土壤碳匯基線研究工作坊(2024)（台農院開設工作坊-113 年 1 月、2 月、3 月）」（表 3-2-1）。

表 3-2-1 112、113 年森林土壤碳匯相關工作坊

工作坊名稱	**辦理單位**	**辦理時間**
利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊	臺大農化系	112 年 8 月 3、4 日
如何估算區域或國家尺度土壤有機碳匯潛力	農試所農化組	112 年 8 月 7 日
2023 年森林碳匯調查技術研習	宜大森林系	112 年 9 月 5~8 日
森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)	台農院	112 年 8 月 17、18 日
森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)	台農院	112 年 10 月 4~6 日
森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)	台農院	112 年 10 月 12、13 日
本案辦理之工作坊	**辦理單位**	**辦理時間**
113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊第一梯次	台農院	113 年 1 月 23、24 日
113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊第二梯次	台農院	113 年 2 月 20、21 日
113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊第三梯次	台農院	113 年 3 月 12、13 日





圖 3-2-1 「利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力」上課影像

表 3-2-2 「利用近端感測與數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊」議程

時間	內容	講者
	第一天（8 月 3 日）臺灣大學農業化學系洋菇館	
10:10-11:00	應用數位土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力基本概念	Prof. Budiman Minasny
11:10-12:00	R 語言介紹	
13:30-14:30	應用數位土壤繪圖繪製土壤有機碳匯量案例研究	
14:50-15:50	使用 R 執行數位土壤繪圖之流程-以土壤有機碳匯潛力估算為例	Dr. Wartini Ng
15:50-16:30	綜合討論	
	第二天（8 月 4 日）臺灣大學農業化學系洋菇館	
8:30-9:30	應用近端感測量測土壤有機碳基本概念	Prof. Budiman Minasny
9:50-11:30	應用土壤光譜估算土壤有機碳之研究案例	Dr. Wartini Ng
11:30-11:50	綜合討論	許正一 教授
13:30-16:30	科學文章撰寫教學	Prof. Budiman Minasny
16:30-17:00	綜合討論	許正一 教授
	第三天（8 月 7 日）農業試驗所土壤陳列館 1F 視聽室	
15:00-17:00	如何估算區域或國家尺度土壤有機碳匯潛力	Prof. Budiman Minasny

(一) 利用近端感測與數位化土壤繪圖估算土壤有機碳匯潛力工作坊

1. 講師介紹

- Prof. Budiman Minasny

澳洲雪梨大學農業與環境學院土壤景觀建模教授。畢業於印尼北蘇門答臘大學並取得學士學位，爾後於雪梨大學取得土壤科學碩士和博士學位。專精於土壤在應對氣候變化、糧食、水、能源安全以及維護生物多樣性方面的作用，並被譽為數位土壤繪圖和建模領域權威。曾獲得澳洲研究理事會頒發的 QEII 和未來研究員獎，並於 2019 年被 Web of Science 評為高引用研究員，至今已發表 170 餘篇文章。

- Dr. Wartini Ng

澳洲雪梨大學理學院土壤安全博士後研究員。專長為使用紅外光譜感測器進行土壤監測和評估，利用光譜資料透過機器學習建立預測模型，探討相關影響因子，已於多個國際會議上獲得獎項。

2. 課程內容

全球土壤碳匯的分布受到多種因素的影響，主要包括氣候、土壤類型、植被覆蓋和人類活動。熱帶和亞熱帶地區通常具有更高的土壤有機碳含量，這部分歸因於高生物量和快速的有機物分解；相較之下，極地和高山區域的土壤碳含量較低，主要由於低溫和生物活動較為緩慢所致。隨著氣候變遷加劇，氣溫上升可能導致加速土壤有機碳的分解，並釋放更多的二氧化碳進入大氣中；另一方面，氣候變遷也可能影響植被生長和分解速率，進而影響土壤碳的積累及分布（圖 3-2-2）。

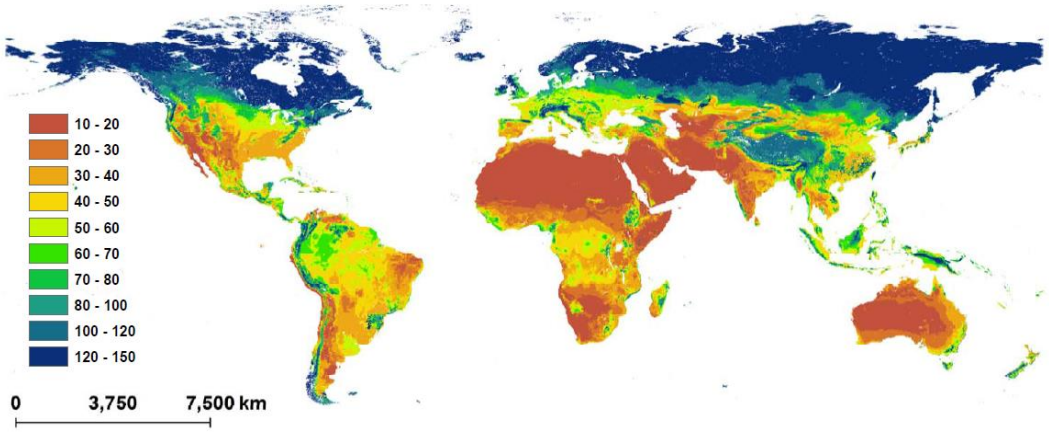


圖 3-2-2 全球土壤碳匯（0 至 30 公分）分布圖 (Minasny *et al.*, 2017)

土壤有機碳在碳循環中扮演關鍵角色，顯著影響氣候調節和環境永續性；然而，既有土壤碳評估方法有其侷限，受制於空間解析度 (Spatial Resolution) 和樣本點密度 (Sampling Point Density, SPD)。本次工作坊主要探討利用近端感測技術和數位土壤繪圖，提高土壤有機碳匯潛力估算精確度的方法。近端感測技術為搭載在飛機、衛星或設置在地面上的儀器，透過電磁輻射、光譜學和雷達等技術，以極高的空間及時間解析度，將各式土壤數據數位化，並透過後續分析及技術研析其中的相關性，再以不確定性評估 (Uncertainty) 以驗證其穩定性及可信度，建置了基線的標準化流程。農業和環境科學相關領域利用近端感測來分析碳匯力的各式案例中顯示，能確實提高數據解析度、範圍和準確性方面的優勢，同時降低人力及硬體等相關成本 (England *et al.*, 2018; Ji *et al.*, 2019; Viscarra Rossel *et al.*, 2017)；其中，數位土壤繪圖 (Digital Soil Mapping, DSM)則是一種整合地理資訊系統 (GIS)、全球定位系統 (GPS)和數據分析技術的方法，用於生成高精土壤分布圖。其在農業、土地規劃和自然資源管理中的相關應用領域表明，數位土壤繪圖有助於精確施肥、減少土地侵蝕以及提高土地可持續性 (Padarian *et al.*, 2022)。

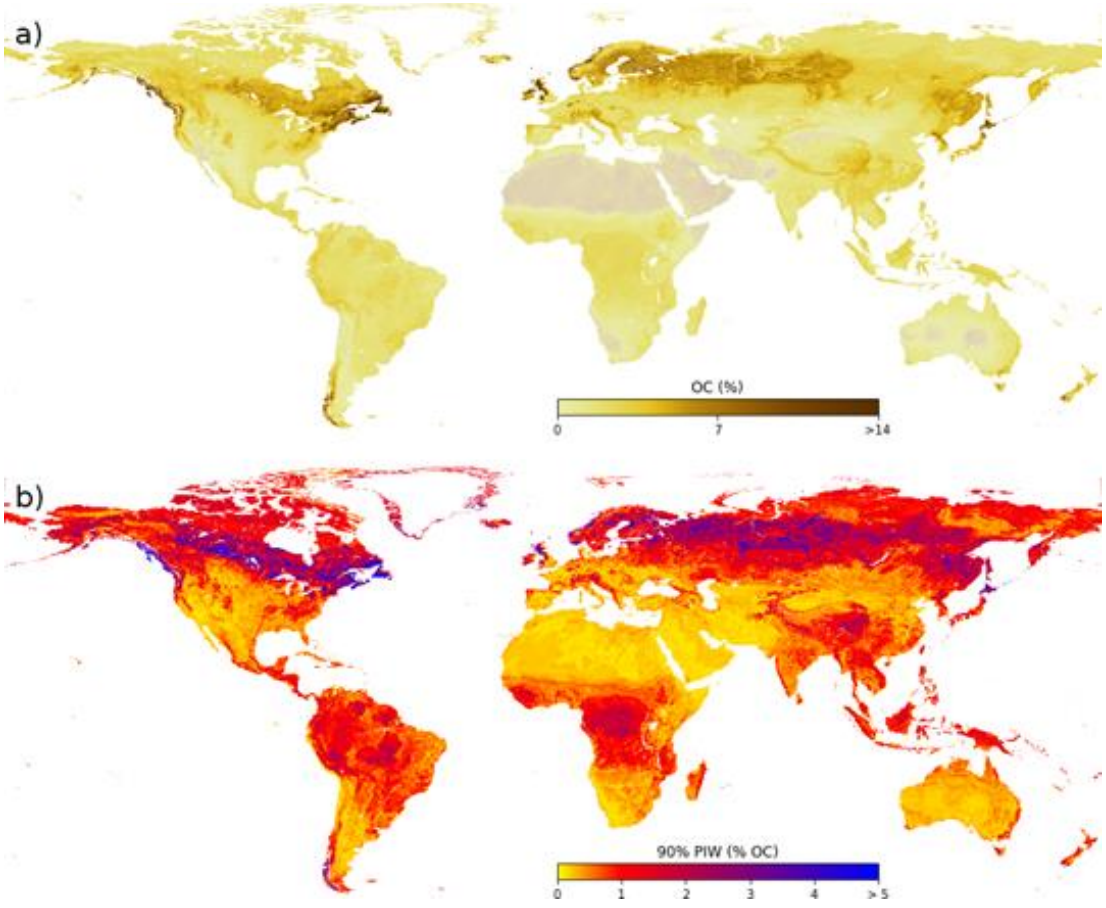


圖 3-2-3 利用二層模型 (Two-step model) 產製 2001 年全球土壤碳匯分布圖
(Angelopoulou *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2020)

Prof. Minasny 針對全球 20 個不同的地區進行土壤調查及研究中發現，利用現行技術及穩定且高效管理下，以每年千分之四的碳匯量是有可能的，並表明具有低初始土壤有機碳匯量的土壤，特別是在每公頃低於 30 公噸碳的表土層，表現出極高的碳封存率，甚至可達每年千分之十的碳匯量，並在最初的二十年內最為明顯，同時於課堂中利用多種數據及圖表論證之。並且於 2022 年，於 Remote Sensing of Environment(2022-2023 年 IF 值為 14.01，在所有學術領域中皆為 Q1）的期刊發表中提出影響甚大的研究成果，大致內容為介紹一種半機器學習模型，以監測全球範圍內的碳匯量。利用全球最龐大的土壤數據庫生成了 2001 年的全球碳匯基線圖（圖 3-2-3），再透過遠程遙測中取得每年土地覆蓋的變化趨勢，確立 SOC 的變異程度、速率及方向。最大的碳匯損失發生在熱帶和亞熱帶地區，佔全球總損失近五成，每年甚至有超過 1,600 萬公頃的土地碳匯量低於每年的千分之四目標。

工作坊後半部為實作課程，Dr. Ng 分享建置 DSM 模型的程式碼，並從 R 語言的應用軟體介紹，逐一講解至各行程式碼用途，最後與學員討論實作情形及相關問題探討。Dr. Ng 使用 R 語言進行土壤數據的統計運算及空間化分析，並利用反距離加權法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 和克利金 (Kriging)，將土壤數據轉換成空間資料，以空間內插法 (Spatial Interpolation) 進行推估及面化，最後將推估成果作為應變數餵入模型之中以進行訓練，最後再以七三拆分中的驗證資料進行模型驗證，確立模型穩健性及可信度後，繪製數位土壤繪圖（即土壤碳匯基線圖）（圖 3-2-4）。

常見的土壤相關連續型資料有酸鹼值、元素濃度、總體密度等，連續型資料可用 Multiple Linear Regression、Decision Tree、Cubist Models、Random Forest、Regression Kriging 進行分析；類別型資料則包括土壤質地、排水等級、地形分類等，可使用 Multinomial logistic regression、C5 decision tress、Radom forest 進行分析。評估土壤預測圖的不確定性分析則可使用 Bootstrapping、Data partitioning and cross validation、Fuzzy clustering and cross validation；接著，分析不同的土壤物理性質數據，包含土壤質地、總體密度、含石量、飽和導水度及有效性水分含量。除了使用模式預測及繪圖分析外，另外還可以評估模式預測前的數質轉換及數據架構是否有符合常態分布；其中，Soil texture 套件可以快速整理土壤質地的資料，並在學理基礎上快速建立相關連結並擬定模型建置方法及效益評估。

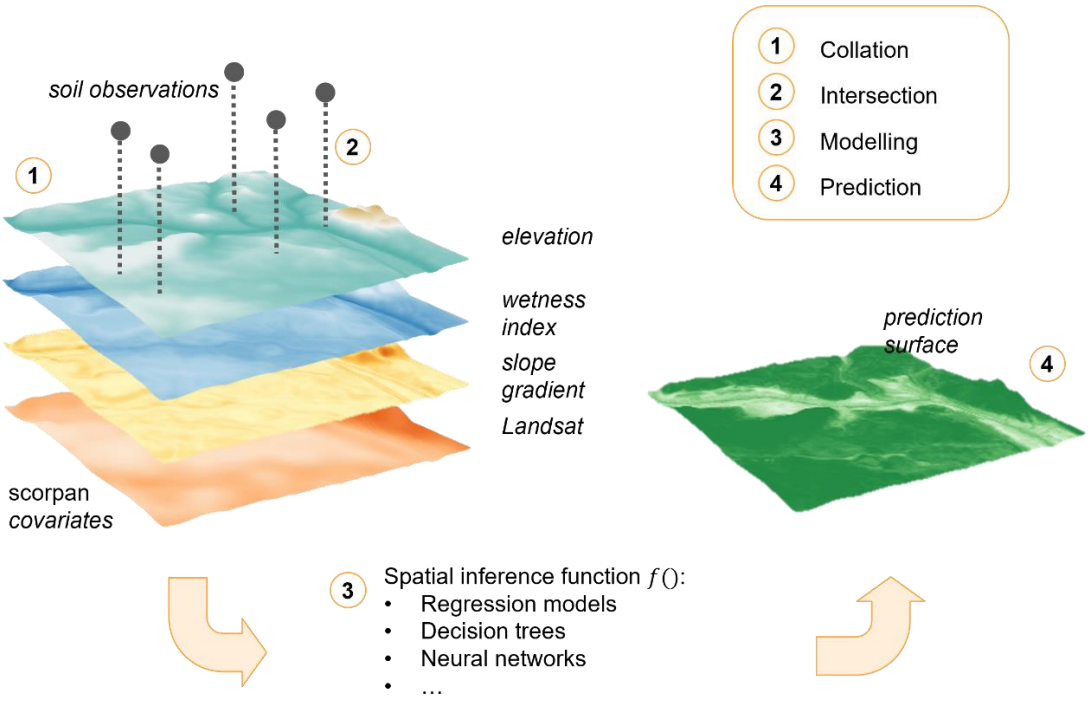


圖 3-2-4 數位土壤繪圖建置流程圖

3. 技術應用與研究發想

本次講座著重在能以國外學者的角度，切入瞭解國際相關領域於學術上執行的流程及方法學，特別在 DSM 中所使用的模型建置方法。Cubist 和 Random Forest 都是機器學習中用於回歸和分類的強大演算法，但仍有一些不同之處，並根據上課內容整理出以下幾點（表 3-2-3）：

表 3-2-3 Cubist 及 Random Forest 優劣比較

Cubist		**Random Forest**	
優勢	劣勢	優勢	劣勢
·解釋性高 以決策樹為基礎，因此模型的解釋性相對較高，能夠容易理解每個預測如何根據特徵進行決策 **·對異常值和雜訊穩健性** 在處理異常值和雜訊方面表現得相對較好，使得模型對於現實世界中的複雜數據更具代表性 **·可調參數少** 參數較少，使得模型的調整和優化相對簡單	**·僅適用於線性回歸** 對於分類問題的性能可能不如一些專門的分類算法 **·對高度非線性數據的適應較差** 方法建立在回歸樹上，對於高度非線性的數據建模相對有限	**·高準確性** 通常在預測準確性上表現良好，即使在高度非線性和複雜的數據集上也能有效應對 **·對大量特徵的處理** 對於具有大量特徵的數據集具有較好的擴展性和處理能力 **·不容易過擬合** 由於 Random Forest 為基於多棵樹的集成方法，針對過擬合的抵抗能力相對較強	**·較難解釋** Random Forest 的模型複雜度高，導致模型解釋性相對較差，可能難以理解模型是如何進行預測 **·需調優參數** 調整 Random Forest 的超參數極其不易，需要進行一系列驗證以找到最佳的參數組合

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

總結來說，Cubist 在解釋性和處理異常值方面表現出色，特別適用於單一線性回歸上，而 Random Forest 則以高準確性和對複雜數據的適應性而著稱，特別適用於需要處理大量特徵時。因此在選擇使用何種模型時，應當取決於標的要求和數據特性，而在課程中，Dr. Ng 除前述介紹之外，並實際操作出成果，再透過比較讓學員能實際瞭解方法在根本上的重要性，特別在 DSM 上模型的選用則扮演著舉足輕重的角色。

除此之外，台農院相關研究及技術人員結合講座內容及各領域之專業知識，綜合整理出以下於執行研究時之建議：

(1) Digital Soil Mapping 的分析因子中，土地利用型的變化遠比想像中的複雜。為了彌補臺灣開放及申請資料上的限制，建議使用衛星影像並加值應用，剖析不同土地利用型上的變化。不過衛星影像的使用限制上仍須嚴加探討，如影像取得所需考量的成本，開放影像的空間解析度及後續校正問題等。

(2) 由於 SOC 的增長或減少非一朝一夕下能夠觀察出，加上高度 CV%以及實際採樣成本上的考量，SOC 並非如氣象測站監測雨量般即時且準確。由於氣候、土地利用型等因子在時間上相較於緯度、海拔等，變化較為劇烈，因此在時間整合上需謹慎評估。Prof. Minasny 所使用的時間尺度為整年度區間的平均值，在課堂結束後也詢問有關於數值統計上及趨勢處理方式，爾後應納入基線繪製考量。

(3) 針對衛星影像的使用，講者使用 Q25、50、75、90、95 的影像提取數值，作為其中的變數施作 DSM。

(4) 在預測值的成果呈現中，似乎將網格資料以 Contour 的方式轉換成等值線去做設色，但呈現方式容易基於分級方式使得呈現上會較為破碎，並且會因連續型資料變成類別型資料，讓中間的浮點位消失。雖然對於讀者在查找顏色所對應的數值會比較方便，並且會大大減少資料的儲存容量，但是對於細部資料的分析損失極大，因此在執行上需嚴正考量資料格式的使用。

(5) 講者提點在農業的土地利用型、氣候以及森林密度最為重要，後續在蒐集資料上能夠快速收斂範圍。

(6) 資料的考量並非只有整年度區間下的平均值，也須針對 Long-term sites、Measure fluxes 上進行不同程度上的比較，以確保考量時不會漏掉各種因子因「時間」所產生的趨勢變化影響。

本次工作坊將數位土壤繪圖、地理統計資訊及 R 語言做了廣泛的介紹及應用。未來在執行土壤相關計畫時，可依本次的工作坊為參考，邀請土壤專家及資訊專家開設相關課程，訓練相關計畫執行人員及承辦人員土壤碳匯知識及技術，並在此課程中學習與碳淨零相關的專業資訊技能所須具備之土壤科學的相關專業知識。藉由 Prof. Minasny 和 Dr. Ng 講授數位土壤繪圖技術的原理、參數因子，以及模式預測步驟等，並以丹麥、法國為例，展示土壤有機碳 (SOC) 繪製之研究結果。本研究能藉由此次課程中所瞭解的相關影響因子，透過空間及非空間土壤推斷系統，以建置土壤碳封存潛力圖模式、有機土壤碳的監測、報告與驗證機制 (Monitoring, Reporting and Verification, MRV)。

(二) 2023 年森林碳匯調查技術研習營

我國國家溫室氣體排放清冊中林業活動碳量估算之估算層級，採層級 1 與層級 2 方法來估算，林業部門碳庫主要針對林木生物量的碳量估算，其他死有機質及土壤的部分則予以忽略。一般而言，44%的森林碳存在於活體生物量中（地上部與地下部生物量的碳含量為 2,960 億噸），土壤有機質中則有最高比例的森林碳(45%)，枯木 (dead wood) 與枯枝落葉 (litter) 中有 10%的森林碳。我國森林面積高達 60.7%，森林死有機質（枯落物）與森林土壤的碳庫尚未有完整的調查與推估，對於國家溫室氣體排放的推估存在極大的不確定與誤差。如果進行森林的完整調查資料，粗估我國森林可以擁有每年減排 48.11 公噸 CO_2 當量 (Mt CO_2e/yr) 的潛力，可抵減全國溫室氣體 (Greenhouse Gas, GHG) 總排放量的 16%以上。

我國應結合森林及土壤專業，定期調查完整我國符合聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 的量測、報告、驗證(measurement, reporting, and verification, MRV) 制度森林碳匯年增量報告。MRV 制度涉及許多必須組織、標準化和協調的過程，本調查技術研習（2023 年森林碳匯調查技術研習）學員來自各機關、大學之地理、遙測、森林及土壤等領域，培養未來森林土壤碳匯調查研究之人才。課程內容含理論課程：森林土壤剖面形態特徵與描述、森林土壤碳匯的重要性、臺灣森林土壤的碳匯、森林土壤碳匯的空間推估方法-地理統計、森林土壤及林地腐植質層-碳含量分析與碳存量估算、森林土壤及林地腐植質層-碳含量分析與碳存量估算、森林土壤野外調查技術-土壤顏色、質地、構造與結持度、森林碳經營策略及計畫評估方法之探討、森林地上部碳匯調查樣區劃設說明及森林調查說明；野外實習課程：森林地表枯落物與土壤碳含量調查技術野外實習、土壤剖面野外

實習、土壤質地、構造與結持度實習、森林地上部碳匯調查現場實務說明及實作（表3-2-4）。研習營中透過理論課程及野外實習課程培養未來森林土壤碳匯專業人力及提供學員彼此交流成長的管道，有助於更廣泛地制定永續的國家森林資源政策（圖 3-2-5）。

表 3-2-4 森林碳匯調查技術研習營課程表

時間	9月5日（二）	9月6日（三）	9月7日（四）	9月8日（五）
8:10 - 10:00		森林土壤碳匯的空間推估方法-地理統計 嘉大農藝學系 莊愷瑋 教授	森林碳經營策略及計畫評估方法之探討 臺大森林系 鄭欽龍 名譽教授	地上部 現地考核 臺大森林系 鄭欽龍 名譽教授
10:10 - 12:00		森林土壤及林地腐植質層-碳含量分析與碳存量估算 環境部 崔君至 高級環境技師	森林地上部碳匯調查樣區劃設說明及森林調查說明 臺大森林系 鄭欽龍 名譽教授	地下部 現地考核 臺大農化系 陳尊賢 名譽教授
13:10 - 15:00	森林地表枯落物與土壤碳含量調查技術野外實習 林試所 杜清澤 副研究員	森林土壤野外調查技術-土壤顏色、質地、構造與結持度 中興土壤 賴鴻裕 教授	森林地上部碳匯調查現場實務說明及實作 植群生態研究有限公司 宋梧魁 負責人	
15:10 - 17:00	森林土壤野外調查技術(土壤剖面)野外實習 林試所 蘇德忠 技工	森林土壤野外調查技術-土壤顏色、質地、構造與結持度實習 中興土壤 賴鴻裕 教授		
19:10 - 21:00	森林土壤野外調查技術-森林土壤剖面形態特徵與描述 臺大農化系 陳尊賢 名譽教授	森林土壤碳匯的重要性 臺大農化系 陳尊賢 名譽教授	臺灣森林土壤的碳匯 臺大農化系 陳尊賢 名譽教授	

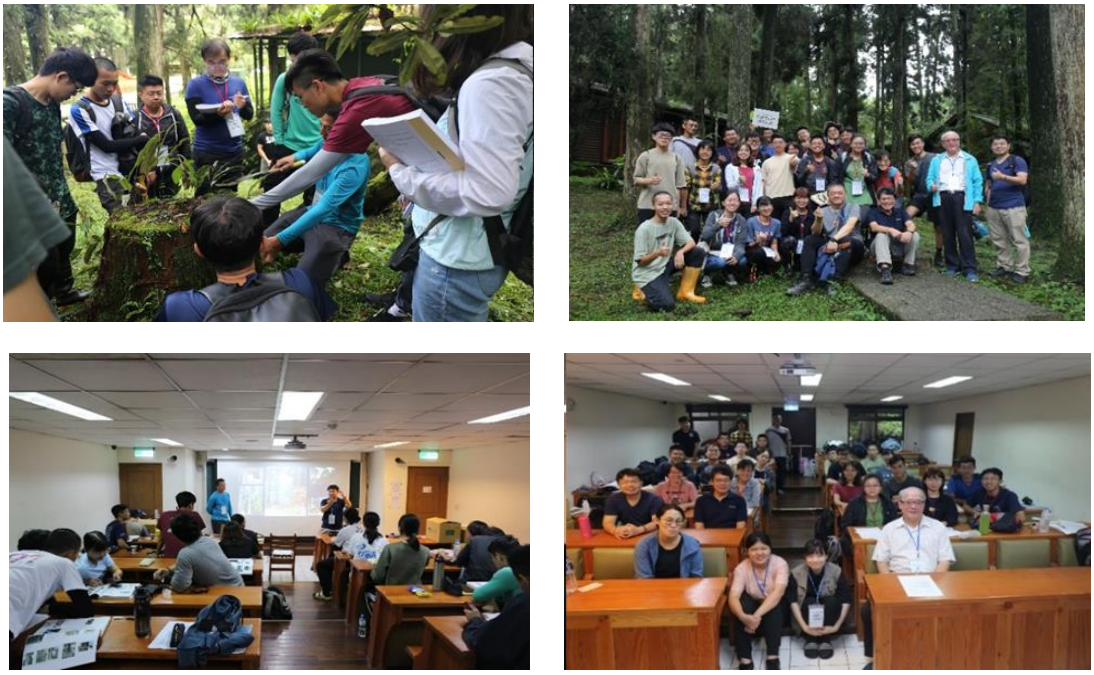


圖 3-2-5 野外實習及室內訓練活動合影

1. 講師介紹

(1) 陳尊賢名譽教授，為臺灣大學農化系及台農院顧問，多年來進行臺灣土壤重金屬研究與實務之重要工作，長期擔任政府各相關單位委員會委員，協助制定法規、政策，積極參與推動土壤碳匯與地下水品質之維護與整治，並發表許多土壤碳匯相關文獻，對於土壤碳匯研究領域之推廣，不遺餘力。

(2) 鄭欽龍名譽教授，曾任臺灣大學森林環境暨資源學系教授，專長為林政學、森林經營學 林業經營經濟學、森林土壤碳匯調查。

(3) 崔君至，環保署高級環境技師，專長為農藥化學、碳含量分析與碳存量估算。

(4) 賴鴻裕，中興大學土壤環境科學系教授兼土調中心主任，專長為土壤肥力、土壤整治、植生復育、土壤調查。

(5) 莊愷瑋，嘉義大學農藝學系教授，專長為土壤化學、植物營養學、土壤碳匯、土壤污染調查與復育、生物環境資料分析。

(6) 杜清澤，林業試驗所育林組副研究員，專長為森林土壤之調查與分類、森林土壤碳庫量之推估、森林土壤資料庫之維護管理。

(7) 蘇德忠，林業試驗所技工，專長為森林土壤野外調查技術、野外實習。

(8) 宋梧魁，植群生態研究有限公司，專長為林產收穫實務技術及森林資源調查。

2. 上課成效

因應淨零排放目標，森林碳匯為一重要增匯及負碳來源。因此，森林碳匯調查技術即為森林碳匯評估之基石。為培育森林碳匯調查相關技術人才，由宜蘭大學森林系蔡呈奇教授主辦 2023 年森林碳匯調查技術研習課程，藉由課堂講習及現場實作，使參與課程的學員都能實際瞭解森林地上部及地下部之測量及取樣方法。

研習課程主要分為野外的實作調查課程及室內的理論課程。在野外的課程中有一堂實際土壤樣品採集，若是未來需規劃實際進行採集用以豐富數據庫，可增加未來在規畫及實際操作時的經驗。

不論是室內或是室外的課程，皆有介紹到每種土綱大致的含碳量多寡，顯示土壤含碳量與土綱密切相關。臺灣森林占地幅員廣大，現有的土壤調查資料不足，學習土壤碳匯與土綱關係，可增加在模式建立時的概念。

理論課程中由土壤的種類、國內的森林土壤、國外的碳匯現況進行介紹，可增加碳淨零的研究概念，對正在執行的研究計畫提供執行方向的參考。

在森林土壤碳匯的空間推估方法中學到，森林土壤碳匯推估可由空間推估或土壤推估進行，兩種方法皆是研究人員採用的方法，未來在進行臺灣的森林土壤碳匯推估時，可兩種皆使用，再從中找尋最適合臺灣森林推估模式。

此次研習課程雖第一天遭逢颱風假，但將原定四天半課程全數分配至三天半內教授完成，課程精實且豐富，從中不但學習到國際上森林碳匯之發展概況，並對實際測量森林地上部及地下部資源有初步之瞭解。臺灣目前雖已完成第四次森林資源調查，但其中並不包括森林土壤調查，如此會遠遠低估臺灣森林碳匯量。為補足此部分，才促成此課程之誕生，期望能為森林土壤調查工作充實技術人力。

(三) 森林土壤碳匯基線研究工作坊（112 年）

在土壤碳匯管理技術下，國際上各國長期田間試驗研究結果，在優良土壤管理制度下 (Minasny *et al.*, 2017)(高引用論文)，農地土壤碳匯速率(每年每公頃表土 30 cm）可增加 0.2 至 0.8 噸碳，但是農地造林可增加 0.3 至 0.6 噸碳，直接林地造林可增加 0.8 至 1.1 噸碳，增碳效益最大。Stockmann *et al.*(2013)（高引用論文）指出，土壤有機碳之碳吸存速率為土壤碳匯量關鍵因素，但存在許多科學研究上已知部份、已知道尚未知道的部份及至今完全不知道的部份。初步評估以下問題：(1) 未來推動增加森林土壤碳匯量變化、預測與臺灣不同區域分布之差異。(2) 因為氣候、地形、土壤類別與森林生態類別之變化，會造成不同碳匯結果與變異 (variation)。(3) 需要評估未來推動增加森林土壤碳匯準確性方法、預測與臺灣各地區分署森林土壤碳匯分布之差異。

「森林土壤碳匯基線研究」計畫中辦理工作坊兩梯次，每次三天（表 3-2-5），用以增進林業相關人員對於森林土壤碳匯之瞭解並提升完成森林土壤碳匯量估算目標的專業能力。工作坊配合計畫目標及各工作項目執行步驟需求，邀請專家學者及專業講師開授知識課程及資訊課程。

1. 講師介紹

- 知識課程講師

  知識課程師資皆為臺灣森林土壤碳匯研究專家

(1) 陳尊賢名譽教授，為臺灣大學農化系及台農院顧問，多年來進行臺灣土壤重金屬研究與實務之重要工作，長期擔任政府各相關單位委員會委員，協助制定法規、政策，積極參與推動土壤碳匯與地下水品質之維護與整治，並發表許多土壤碳匯相關文獻，對於土壤碳匯研究領域之推廣，不遺餘力。

(2) 郭鴻裕前組長，農試所農化組退休，協助設立臺灣土壤陳列館，統籌全國土壤網格肥力調查，完成全國土壤調查，將歷年調查的土壤資料數位化，發表土壤碳匯相關文獻。

(3) 簡士濠特聘教授，屏科大水土保持系，專長為土壤調查與分類、土壤化育、土壤改良及保育、土壤碳匯、土地資源利用管理，並積極推廣數位土壤繪圖應用於土壤碳匯量上。

(4) 杜清澤副研究員，林業試驗所育林組，專長為森林土壤之調查與分類、森林土壤碳庫量之推估、森林土壤資料庫之維護管理。

(5) 蔡呈奇教授，宜蘭大學森林系，目前從事土壤科學教學、研究與推廣工作。研究主要為土壤分類與化育、生物炭與土壤的交互作用、火山灰土壤、土壤碳匯的推估與增進技術、土壤碳保存的作用。

- 資訊課程講師

(1) 簡士濠特聘教授,屏東科技大學水土保持系,專長為土壤調查與分類、土壤化育、土壤改良及保育、土壤碳匯、土地資源利用管理，並積極推廣數位土壤繪圖應用於土壤碳匯量上。多次參加澳洲雪梨大學舉辦 Digital soil mapping 國際訓練班及國際研討會與各國土壤碳匯專家進行深度學習及交流，讓臺灣的森林土壤碳匯地圖繪製技術與研究能接軌國際學術專業。

(2) 許健輝副研究員，農試所化學組，專長為土壤化學、土壤調查、土壤碳匯、土壤污染、儀器分析。多次參加澳洲雪梨大學舉辦 Digital soil mapping 國際訓練班及國際研討會與各國土壤碳匯專家進行深度學習及交流，讓臺灣的森林土壤碳匯地圖繪製技術與研究能接軌國際學術專業。

(3) 黃國展處長，台灣水資源與農業研究院數位發展處處長，專長為空間資訊分析、空間資料正規化、空間大數據管理、圖資服務視覺化應用。參與林業署林政業務管理系統、環境部化學物質管理署化學雲、臺糖公司土地資產 GIS 系統等大型專案系統開發建置。國立中興大學森林系、國立嘉義大學森林系、土木系、國立彰化師範大學地理系等大學業界講師,著有「GIS 與空間決策分析 ArcGIS 入門」、「ArcGIS 地理資訊系統入門與應用」，推廣空間資訊技術應用。

(4) 謝宏鑫工程師，台灣水資源與農業研究院資料工程師，專長為地理資訊軟體、程式語言撰寫及相關應用，目前正執行多項碳匯計畫如農地土壤、森林土壤碳匯相關研究。

表 3-2-5 森林土壤碳匯基線研究工作坊(2023)課程表

時間	8 月 17 日（四）	8 月 18 日（五）	10 月 4 日（三）	10 月 5 日（四）	10 月 6 日（五）	10 月 12 日（四）	10 月 13 日（五）
09:10 - 12:00	專題演講 國際森林土壤碳匯調查技術發展趨勢與我國森林碳匯調查之建議 郭鴻裕 顧問 戰情室	專題演講 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯 陳尊賢 顧問 交誼廳	資訊課程 ArcGIS 基本操作 黃國展 處長 電腦教室	專題演講 臺灣森林土壤碳匯量分布現況與增加森林土壤碳匯案例分享 陳尊賢 顧問 訓練教室		專題演講 地表枯落物與土壤含碳量調查技術 杜清澤 副研究員 訓練教室	專題演講 土壤轉換函數及地域（形）分析應用於土壤資訊之預測 蔡呈奇 教授 訓練教室
13:10 - 17:00			專題演講 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯 陳尊賢 顧問 訓練教室		資訊課程 Geostatistics soil mapping 基本操作 簡士濠 教授 陳俊元 助教 劉冠男 助教 電腦教室	資訊課程 ArcGIS 總複習 謝宏鑫 工程師 電腦教室	資訊課程 數位化土壤繪圖技術土壤繪圖空間分布：一個實例的土壤碳匯基線繪製 許健輝 副研究員 楊博鈞 助教 羅郁淨 助教 電腦教室

2. 上課成效

學員在資訊課程中都能習得基本的 ArcGIS、R 用法及繪製一個區域的土壤碳匯圖。ArcGIS 基本操作課程中學習到 (1) 點、線、面圖層套疊，(2) 不同座標模式轉換，(3) 圖資資訊合併 (4) 圖例控制 (5) IDW、Spline 及 Kriging 分析，學員練習。ArcGIS 總複習中學習到 (1) 點、線、面圖層套疊，進行分析及運算，並出圖。(2) Excel 大量數據的快速整理、合併，資料對接及出圖。在數位土壤繪圖技術土壤匯圖空間分布中學習到 R 的基本操作、使用套件匯入土壤資料、疊合共變數、模型測試、圖資繪製，學員練習如圖 3-2-6 至圖 3-2-10 所示。

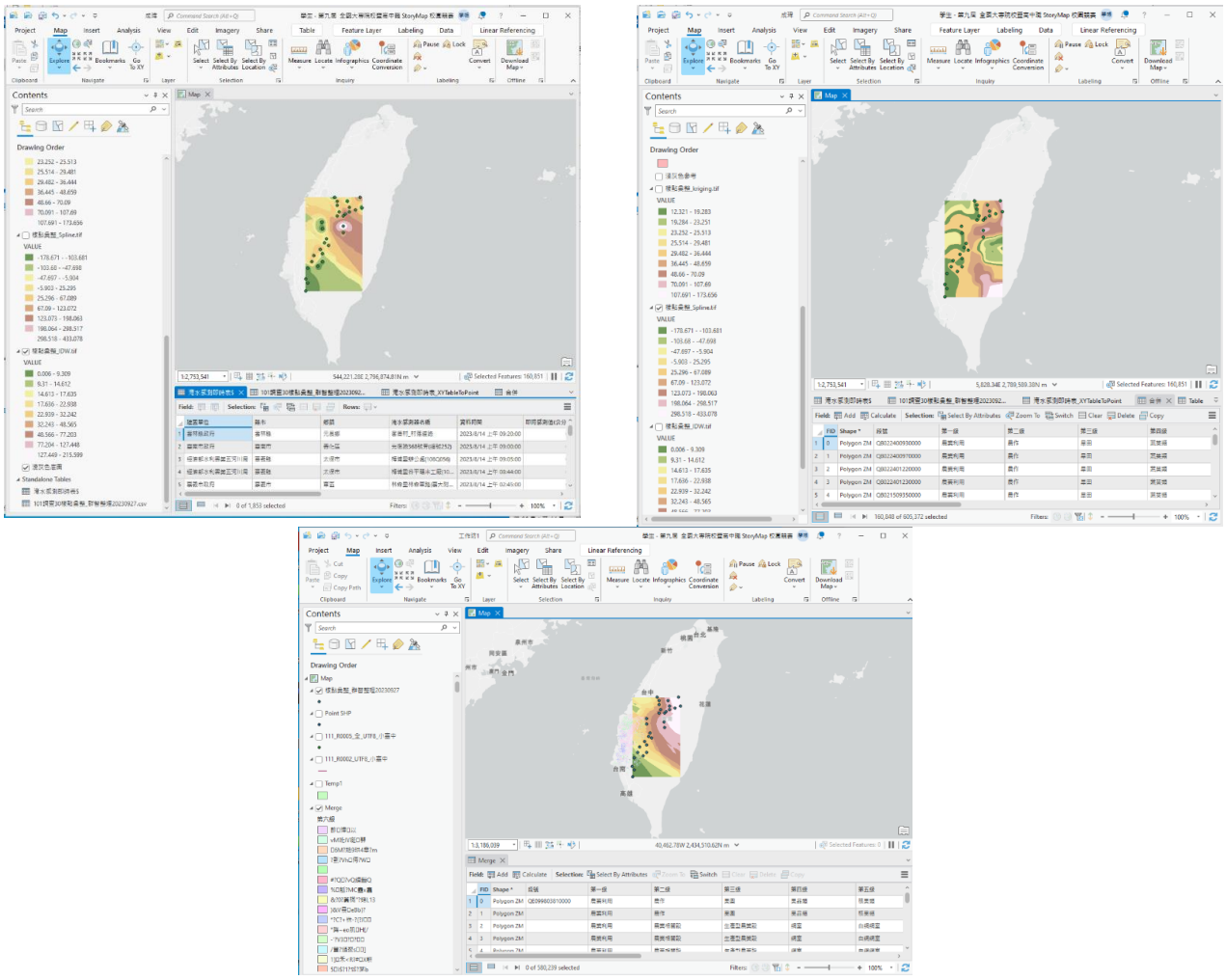


圖 3-2-6 （左上）IDW 分析；（右上）Spline 分析；（下）Kriging 分析（學員練習）

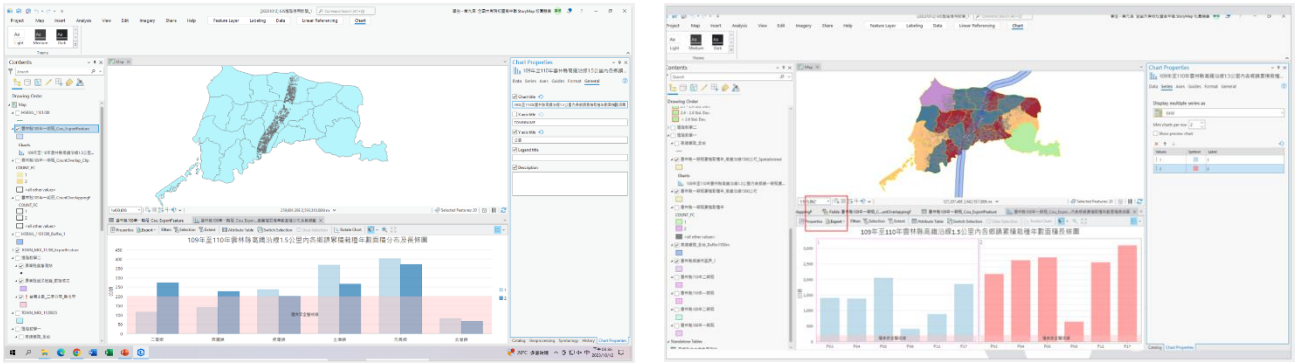


圖 3-2-7 雲林縣高鐵沿線各鄉鎮累積栽種年數面積分布及長條圖（學員練習）

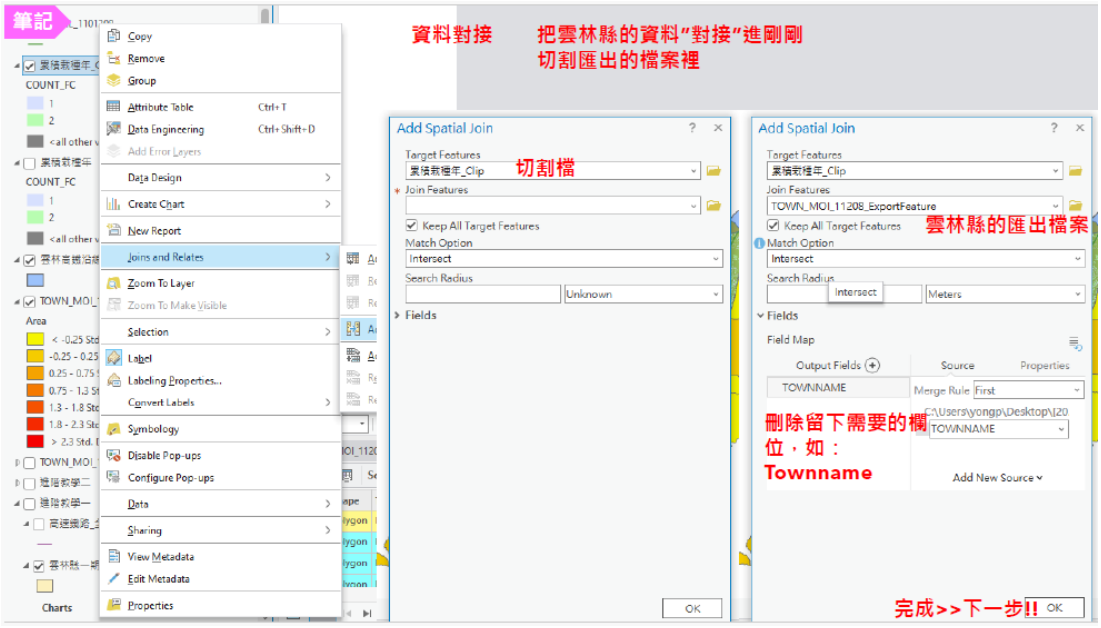


圖 3-2-8 學員上課筆記

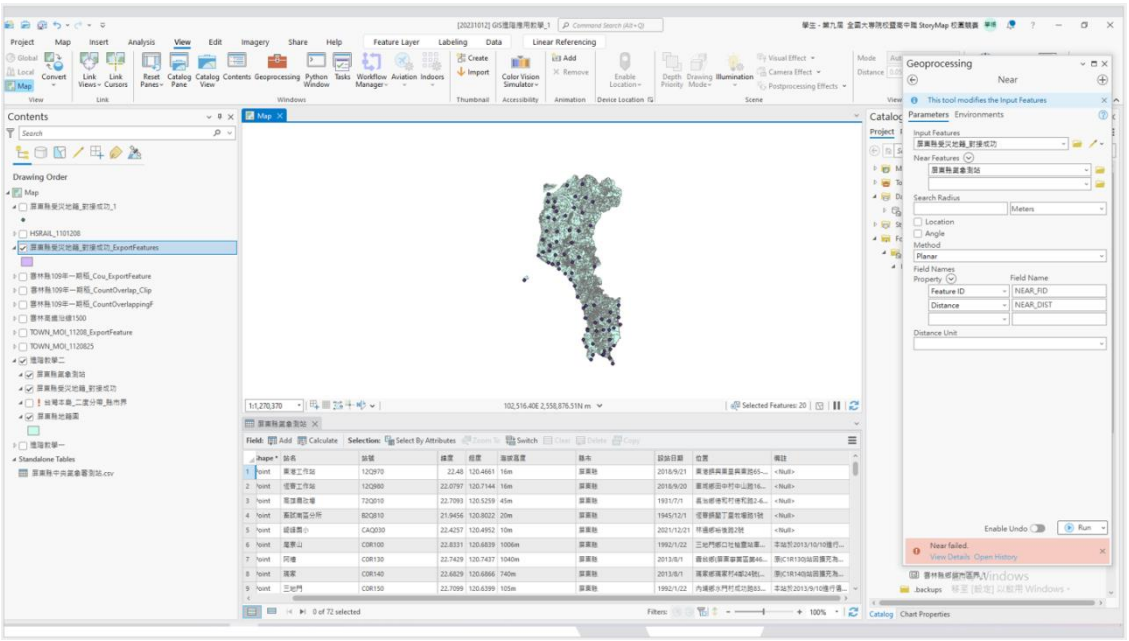


圖 3-2-9 屏東縣受災地籍對接（學員練習）

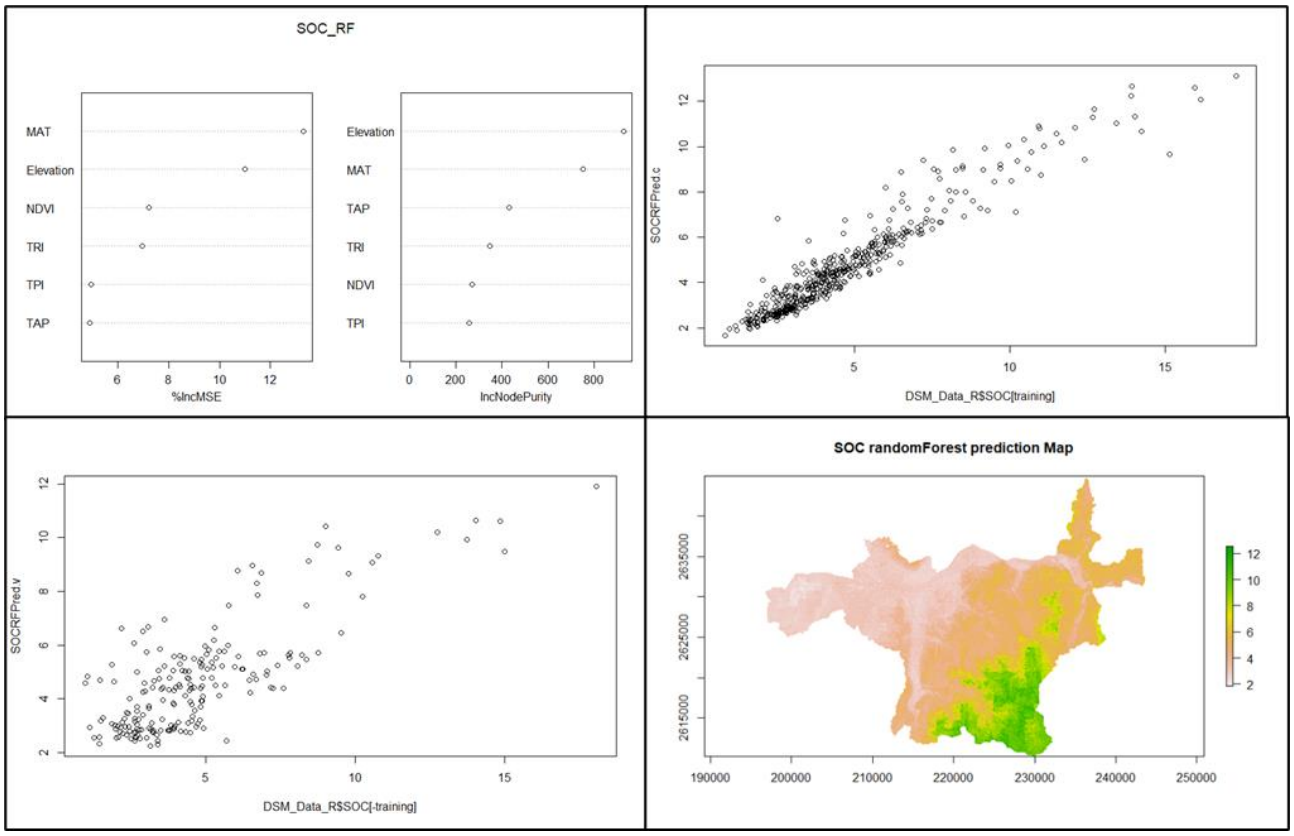


圖 3-2-10 數位化土壤碳匯圖（學員練習）

(四) 113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊

本計畫正積極進行臺灣森林土壤碳匯基線研究，在具有完整森林土壤碳匯推估與GIS 分布基線圖下，透過全臺森林經營規模、面積等資訊，期 2030 年掌握整體森林土壤碳庫變化，以利推動淨零排放進一步的相關研究。

1. 辦理目的

為接軌「臺灣 2050 淨零排放」推廣達成目標的重要一環「森林土壤碳匯」，提升林業相關人員對碳淨零議題及森林土壤碳匯的瞭解，以及森林土壤碳匯在碳淨零議題中的關鍵地位，本計畫開設三梯次的工作坊，邀請林業保育署及其各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關同仁參加（圖 3-2-11），學習並認識何為土壤碳匯基線。每個梯次都包括基礎、進階和應用三階段漸進課程（表 3-2-6），循序瞭解世界各國森林土壤碳匯調查技術及臺灣土壤碳匯基線繪製方法，共同投入淨零碳排的行列，報名資訊參閱附件 5。

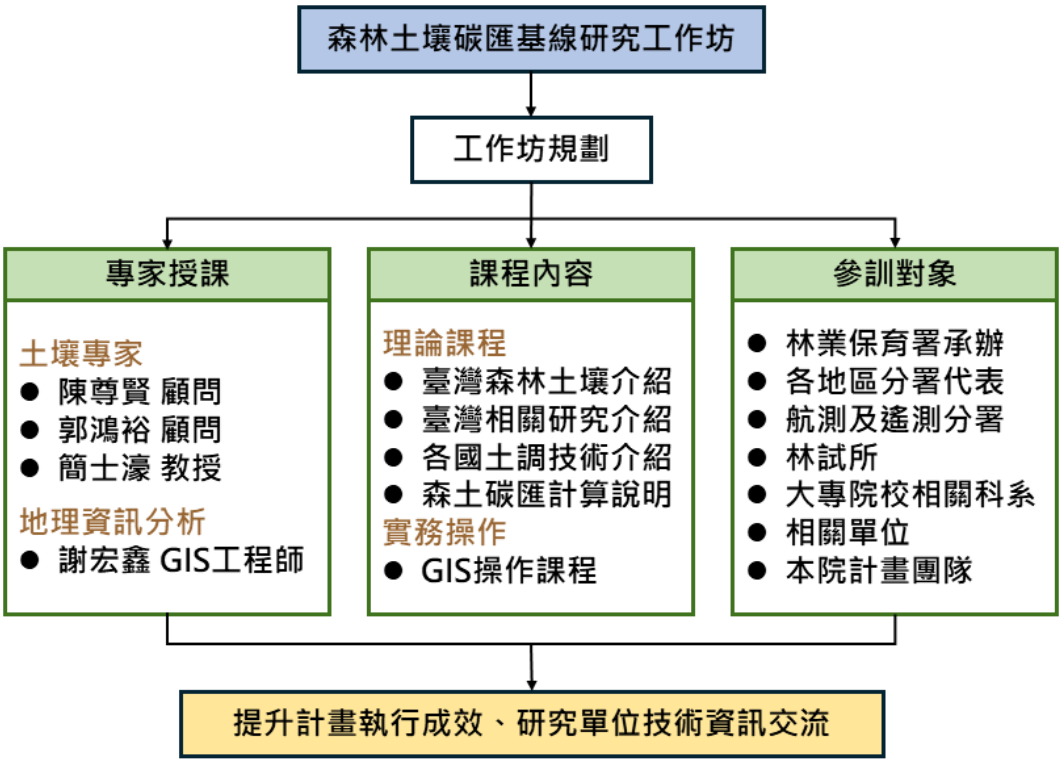


圖 3-2-11 森林土壤碳匯基線研究工作坊課程規劃

三梯次工作坊辦理日期為：第 1 梯次 113 年 1 月 23 日~24 日、第 2 梯次 113 年 2 月 20 日~21 日、第 3 梯次 113 年 3 月 12 日~13 日，皆為週二至週三，第一日為基礎課程、第二日為進階課程。

2. 講師介紹

(1) 陳尊賢名譽教授（國立臺灣大學農業化學系）及台農院顧問：多年來進行臺灣土壤調查與土壤碳匯研究與實務之重要工作，長期擔任政府各相關單位委員會委員，協助制定法規、政策，積極參與推動土壤碳匯研究，發表數篇 SCI 土壤碳匯相關論文，對土壤碳匯研究領域之推廣不遺餘力。

(2) 郭鴻裕顧問（農業試驗所農業化學組組長退休及台農院顧問）：曾任農業試驗所農業化學組研究員兼組長，協助設立臺灣土壤陳列館，統籌全國土壤網格肥力調查、完成全國土壤調查，將歷年調查的土壤資料數位化等。

(3) 謝宏鑫 GIS 工程師（台灣水資源與農業研究院）：專長為森林土壤繪圖軟體應用、ArcGIS 專業工程師，目前正參與多項農田土壤碳匯計畫，包含農地土壤、森林土壤碳匯等政府相關計畫。

(4) 簡士濠教授（國立中興大學土壤環境科學系）：專長為土壤調查與分類、土壤化育、土壤改良及保育、土壤碳匯、土地資源利用管理，積極推廣數位土壤繪圖以應用於土壤碳匯量上。具豐富澳洲雪梨大學 Digital soil mapping 國際訓練班及國際研討會經驗，與各國土壤碳匯專家深度學習交流，使臺灣的森林土壤碳匯地圖繪製技術研究與國際學術專業接軌。

3. 課程內容

為強化林業相關人員業務推動能量，辦理工作坊以推廣國家重大政策淨零碳排之土壤碳匯知識及技能（圖 3-2-12），每一梯次皆含基礎、進階及應用課程，學員可任選時段參加，配工作坊各課程講義（圖 3-2-14），供參訓同仁訓迅速掌握課程方向及操作 ArcGIS Pro 筆記，開場首先邀請林業保育署汪處長昭華致詞，接著由本院虞院長國興致詞（圖 3-2-15），歡迎各林業單位相關人員參加本工作坊，提升森林土壤碳匯知識。

本院虞院長以介紹阿瑞尼斯 (Svante August Arrhenius) 發現二氧化碳濃度若上升一倍則平均溫度上升 5~6°C 及基林曲線 (Keeling Curve) 指出工業革命後全球二氧化碳濃度以指數形式攀升、地球臭氧層變薄以致地球暖化等情況（圖 3-2-13），開啟近代國際間碳淨零議題、聯合國永續發展目標 (SDGs) 等全球規模減碳之永續地球行動—為本次工作坊點題。

表 3-2-6 森林土壤碳匯基線研究工作坊課程表

時間	1 月 23 日/ 2 月 20 日/ 3 月 12 日	1 月 24 日/ 2 月 21 日/ 3 月 13 日
9:00-9:10	報 到	報到
9:10-9:20	開幕致詞 林業保育署 汪處長昭華 陳組長連晃 吳科長俊奇 台農院 虞院長國興	
9:20-10:30	臺灣森林土壤類型 與土壤碳匯量 (1) 台灣水資源與農業研究院 陳尊賢 顧問	森林土壤繪圖軟體應用 (ArcGIS Pro 操作) 及繪製 森林土壤碳匯地圖 (1) 台灣水資源與農業研究院 謝宏鑫 GIS 工程師
10:30-10:40	休 息 時 間	
10:40-11:50	臺灣森林土壤類型 與土壤碳匯量 (2) 台灣水資源與農業研究院 陳尊賢 顧問	森林土壤繪圖軟體應用（ArcGIS Pro 操作）及繪製 森林土壤碳匯地圖 (2) 台灣水資源與農業研究院 謝宏鑫 GIS 工程師
11:50-12:00	課 程 討 論	
12:00-13:10	午 餐	
13:10-14:30	國際森林土壤碳匯 調查技術發展 (1) 台灣水資源與農業研究院 郭鴻裕 顧問	森林土壤碳匯量計算 及案例說明 (1) 中興大學 土壤環境科學系 簡士濠 特聘教授
14:30-14:40	休 息 時 間	
14:40-15:40	國際森林土壤碳匯 調查技術發展 (2) 台灣水資源與農業研究院 郭鴻裕 顧問	森林土壤碳匯量計算 及案例說明 (2) 中興大學 土壤環境科學系 簡士濠 特聘教授
15:40-16:00	綜 合 討 論 台農院 郭鴻裕顧問 台農院 陳尊賢顧問	結 業 式 與 綜 合 討 論 林業署 陳連晃組長 台農院 陳尊賢顧問 中興大學 簡士濠教授
16:00	賦歸	



圖 3-2-12 森林土壤碳匯基線工作坊參訓報到



圖 3-2-13 虞院長國興以全球暖化議題為參訓林業保育署同仁點題

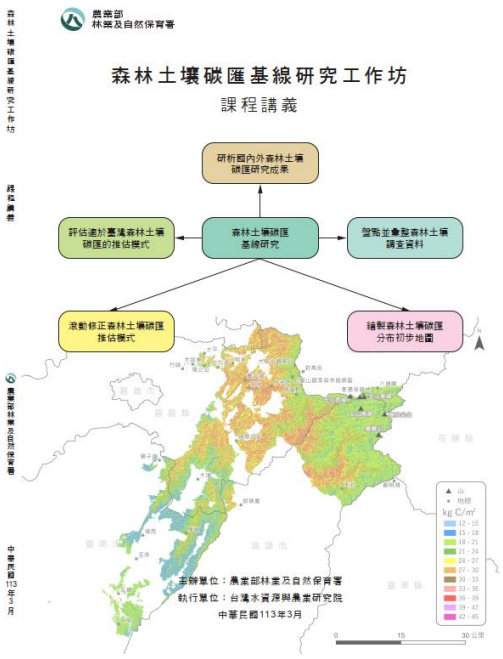


圖 3-2-14 森林土壤碳匯基線工作坊課程講義封面



圖 3-2-15 林業保育署長官及本院院長開幕致詞

「基礎課程」包含 (1) 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯量、(2) 世界各國森林土壤碳匯調查技術，課程內容說明如下：

(1) 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯量：瞭解森林土壤種類與土壤碳匯基本觀念以及森林土壤碳匯對永續森林管理和達成碳淨零的重要性。

介紹臺灣高山土壤代表剖面、高山淋溶化土壤 (Podzolic soils)（漂白層、黏聚層、淋溶層）特性/分類/分布（圖 3-2-16）、土壤含碳量轉成土壤深度函數過程（圖 3-2-17）、森林土壤碳匯量計算公式、臺灣森林土壤土綱 (Soil order) 土壤含碳量與變異%，並舉高雄市荖濃溪工作站土系研究（圖 3-2-18）做介紹，結尾說明本計畫擬解決問題及研究方法重點。



圖 3-2-16 本院陳顧問尊賢講授臺灣森林土壤類型與土壤碳匯量課程

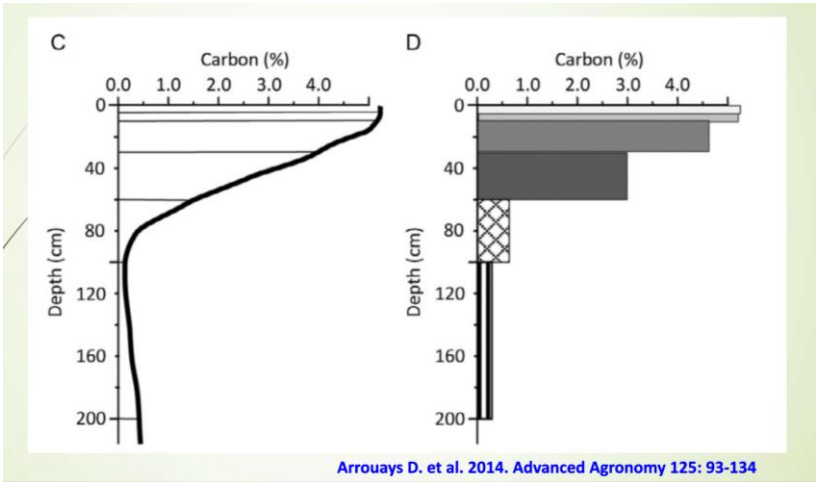


圖 3-2-17 陳尊賢顧問講授土壤含碳量轉成土壤深度函數過程

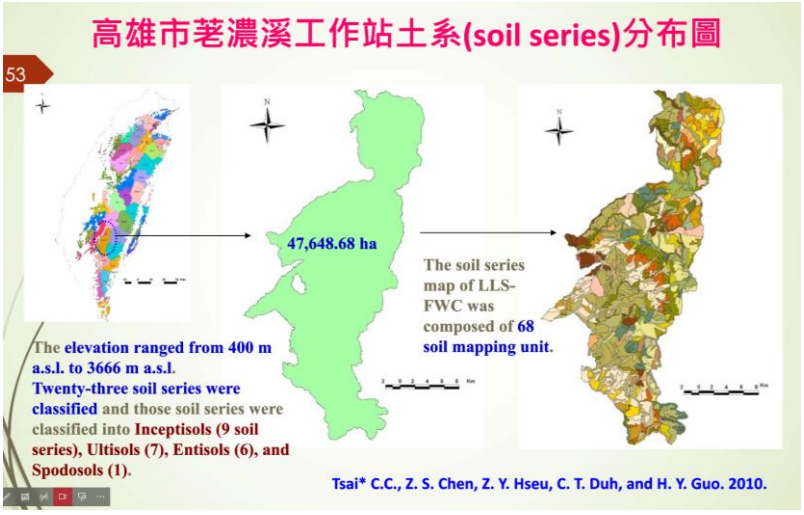


圖 3-2-18 陳尊賢顧問講授高雄市茄濃溪工作站土系研究

(2) 國際森林土壤碳匯調查技術發展：介紹世界各國（如 FAO、美國 USDA、歐盟、德國、日本、韓國）對森林土壤碳匯調查技術，臺灣應如何應用這些技術進行未來森林土壤碳匯調查規劃。

首先介紹森林管理操作對森林土壤碳庫影響（圖 3-2-19），透過森林經營與土壤碳循環的變動關聯（圖 3-2-20），引出臺灣能否產出符合國際規範的森林國家清冊與國際接軌議題，後介紹德國、美國、日本、韓國及其他歐洲國家之國家森林調查取樣方式（圖 3-2-22）、分析方式，最後到土壤調查比例尺範圍規範。



圖 3-2-19 本院郭顧問鴻裕講授世界各國森林土壤碳匯調查技術介紹

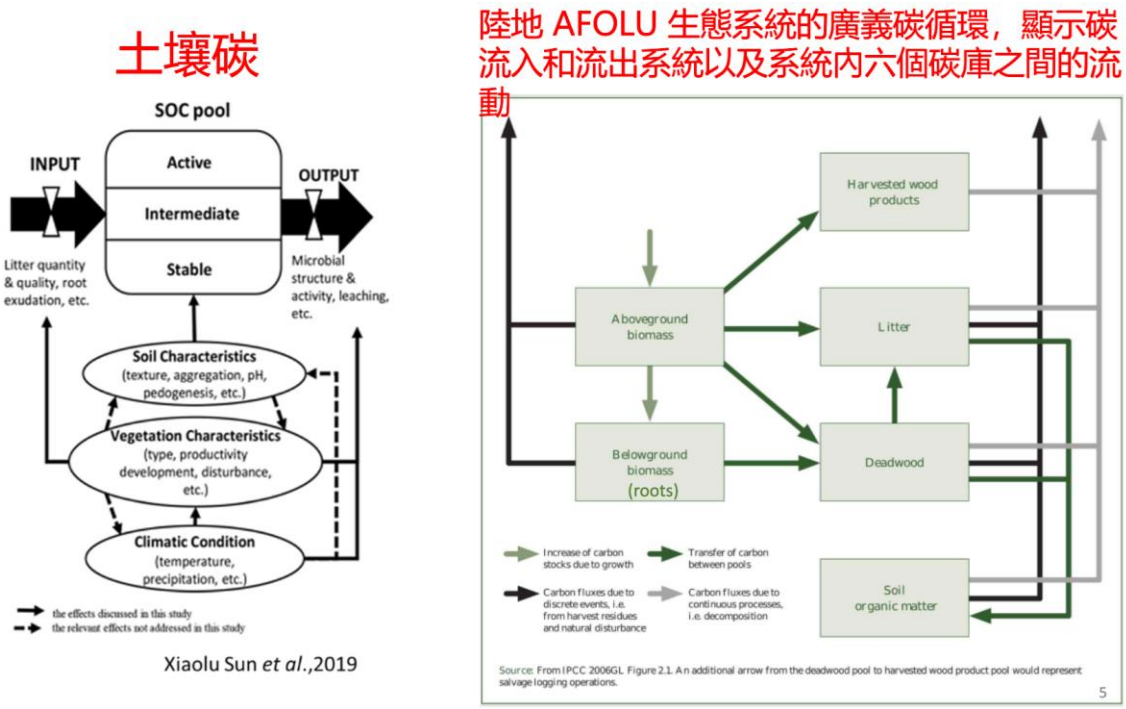


圖 3-2-20 郭鴻裕顧問講授森林經營與土壤碳循環的變動關聯

簡報中穿插臺灣第四次森林資源調查資料、農試所與林試所的土壤調繪點位資料分析結果（圖 3-2-21）

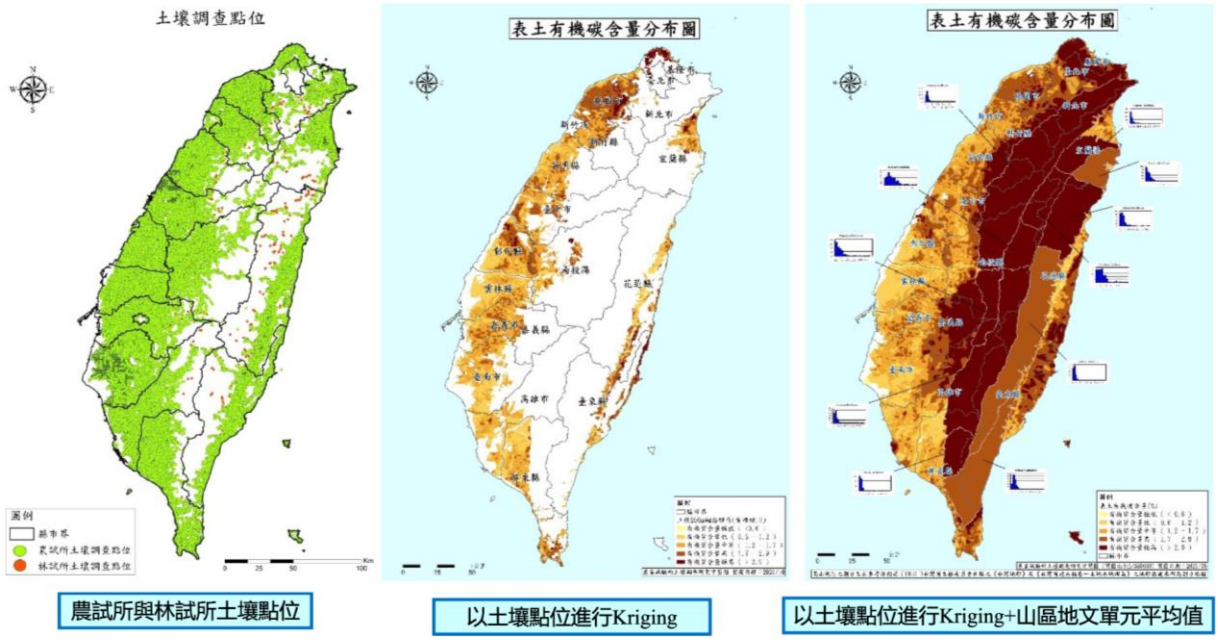


圖 3-2-21 臺灣表土有機碳含量分布圖

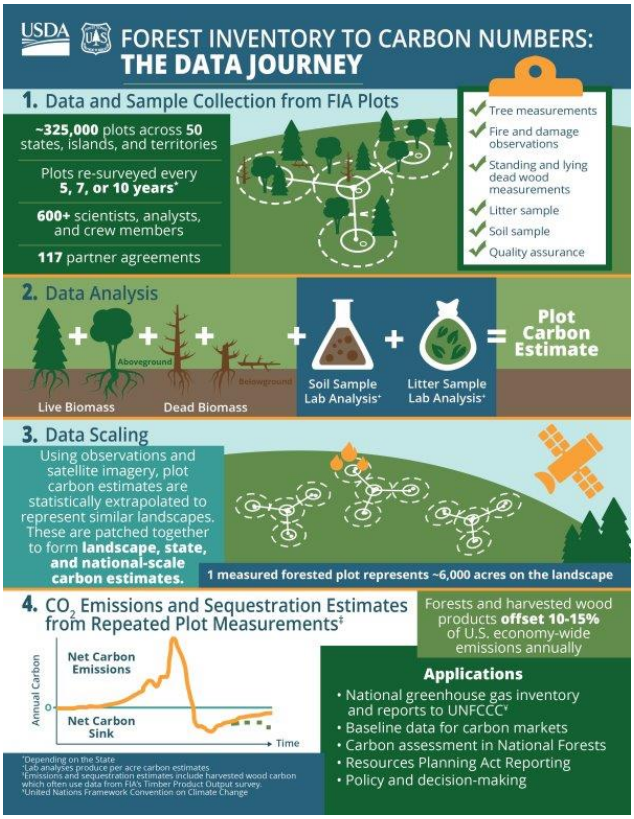


圖 3-2-22 美國森林署碳監測流程介紹

「進階及應用課程」包含 (1) 森林土壤繪圖軟體應用 (ArcGIS Pro) 及繪製森林土壤碳匯地圖、(2) 森林土壤碳匯量計算及案例說明，課程內容（圖 3-2-23）說明如下：




圖 3-2-23 本院 GIS 工程師謝宏鑫講授森林土壤繪圖軟體應用課程

(3) ArcGIS Pro 操作練習及繪製森林土壤碳匯地圖：

目前已知進行森林土壤碳匯基線研究僅林試所農業化學組及本院兩單位，本課程教導學員 ArcGIS Pro 的操作技術，以臺灣真實的森林土壤調查資料繪製一個區域的森林土壤碳匯地圖。

A. 地理資訊系統 ArcGIS Pro 應用簡介

介紹地理資訊系統、投影座標系統、地理圖資格式（圖 3-2-24）、ArcGIS Pro 基礎介面、網路提供開放圖資平台，如政府資料開放平臺等。

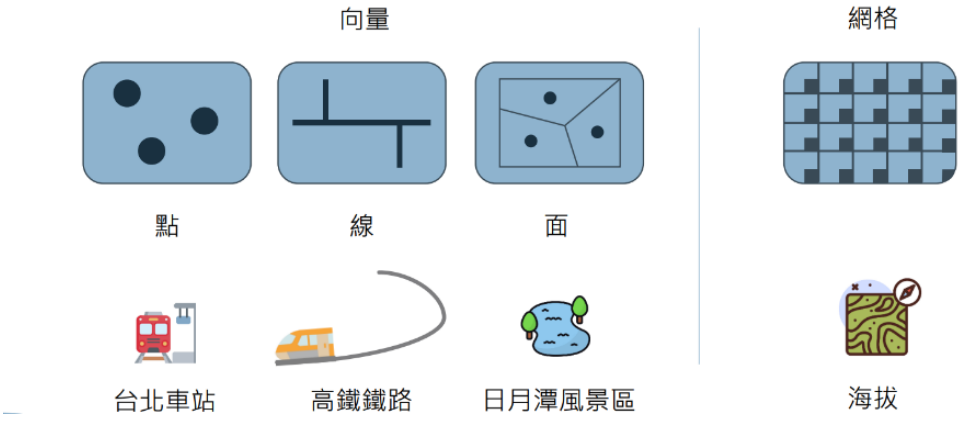


圖 3-2-24 地理圖資資料格式介紹

B. 入門實作：以 ArcGIS Pro 操作，分析符合「高鐵沿線 1.5 公里」及「焚化爐方圓 5 公里」兩項條件之鄉鎮市，操作方式：

(A) 操作之圖層座標應一致

- 開啟 ArcGIS Pro 教材檔案，確認左邊 Contents 已包含焚化爐、臺灣本島二度分帶及高鐵鐵路 3 個圖層（圖 3-2-25，步驟 1）。
- 注意 ArcGIS Pro 會以首張點開的圖層座標為預設座標，需確認焚化爐、高鐵鐵路兩個圖層座標系統是否一致、並調成一致再進行下一步分析。分別點選兩張圖層，分別對兩張圖層按右鍵，選 properties > source > spatial reference，確認地理座標系統（圖 3-2-25，步驟 2），經發現焚化爐圖層為 WGS84、高鐵沿線圖層為 TWD97。
- 將焚化爐圖層調整為 TWD97 座標，與高鐵鐵路圖層一致並另存檔案（圖 3-2-25，步驟 3~5）：對焚化爐圖層案右鍵 > data > export features > enironments > 匯出座標系統欄位下拉選單選「高鐵鐵路」> ok > 另存名稱（如焚化爐_1）及位置。依前述步驟檢測「焚化爐_1」圖層確認為 TWD97 座標。

(B) 調整底圖呈現方式，以利辨識

- 本分析操作底圖為臺灣鄉鎮市界線，學習操作調整顯示顏色，方便視圖者輕鬆辨識。點選底圖「二度分帶」> feature layer > symbology > unique values，在 color scheme 下拉選單依視圖需求調整鄉鎮市顏色區分（圖 3-2-26）。
- 屬性表介紹及透過屬性表輕鬆選出想要分析的範圍：在二度分帶圖層按右鍵 > attribute table，透過屬性表可瞭解地理圖資所包含的資料。選取特定區域範圍，attribute table > select by attributes > 在下拉選單中（圖 3-2-27，步驟 11）選擇 countyname/is equal/新北市，ArcGIS Pro 圖資呈現會將新北市區域範圍整個選取出來。
- 按屬性表下方 show selected records（圖 3-2-27，步驟 12），一次性顯示所有被選取的（新北市）資料。
- 地理資訊圖資呈現：以面積大小區分鄉鎮市：選取二度分帶圖層 > feature layer > symbology > graduated colors （圖 3-2-28，步驟 13），在出現的視窗

中，method 可下拉選擇各鄉鎮市面積的區分計算方式、classes 可下拉選擇區分的階層數、color scheme 下拉為選擇區分顏色之漸層呈現，選擇內容可參照圖片操作範例（圖 3-2-28，步驟 14）。

- 色彩顯示的漸層調整（圖 3-2-29，步驟 15）
- 標記圖示：在地圖上標示出焚化爐及高鐵位置。點開「焚化爐_1」圖層 > 按圖示 > format point symbol > gallery > 選取適合的圖示（圖 3-2-30），format point symbol > properties > 調整圖示大小及圖示顏色。同樣做法也在「高鐵鐵路」圖層操作。

(C) 分析「高鐵沿線 1.5 公里」與「焚化爐方圓 5 公里」重點鄉鎮市區（圖 3-2-31）

- 焚化爐方圓 5 公里：點「焚化爐_1」圖層 > select by location > 彈出視窗中，input features 選二度分帶圖層、selecting features 選「焚化爐_1」、search distance 選擇 5 公里（圖 3-2-32，步驟 19） > apply。
- Select subset from current selection
- 再選取高鐵沿線 1.5 公里範圍：「高鐵鐵路」圖層 > select by location > 彈出視窗中，input features 選二度分帶圖層、selecting features 選「高鐵鐵路」、search distance 選擇 1.5 公里 > selection type 下拉選單 > Select subset from current selection（係指分析時，除現有選取的「焚化爐方圓 5 公里」，額外再選取「高鐵鐵路周邊 1.5 公里」，同時符合兩條件進行分析）（圖 3-2-32，步驟 20）> apply；分析結果如圖 3-2-33。

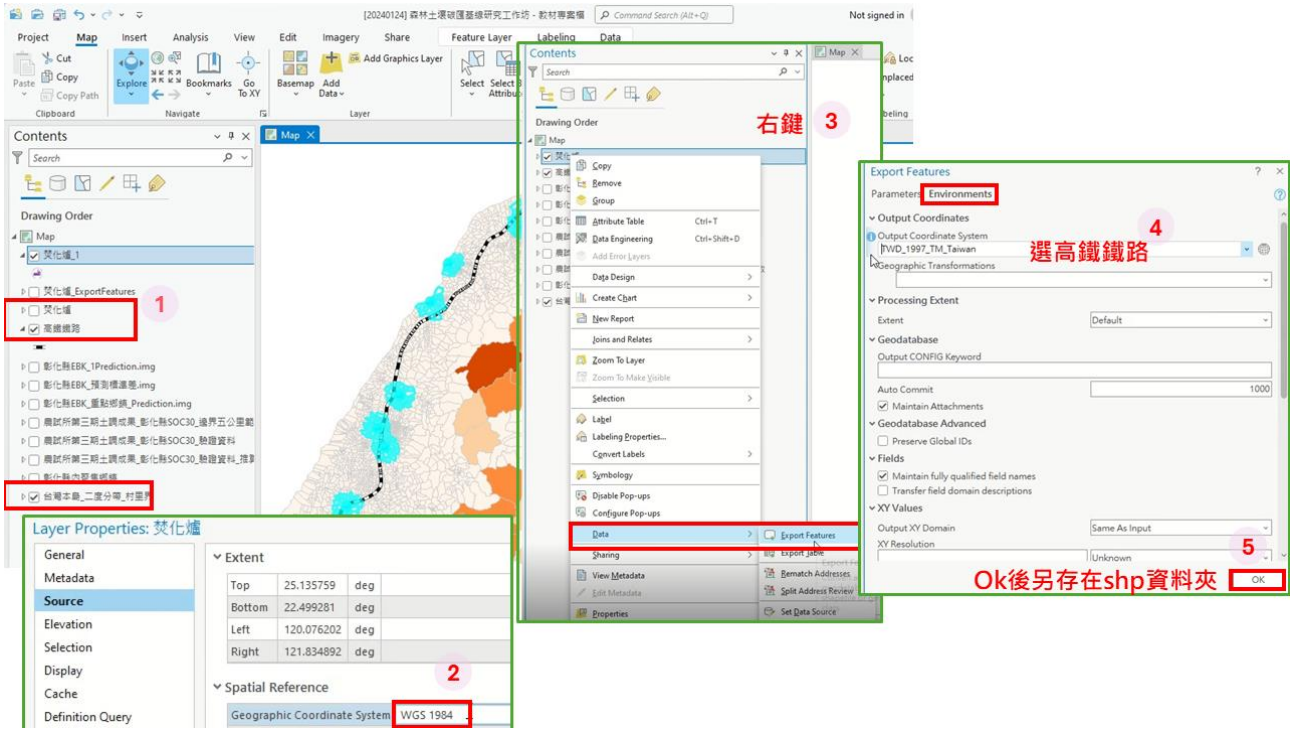


圖 3-2-25 待分析圖層之座標轉換操作

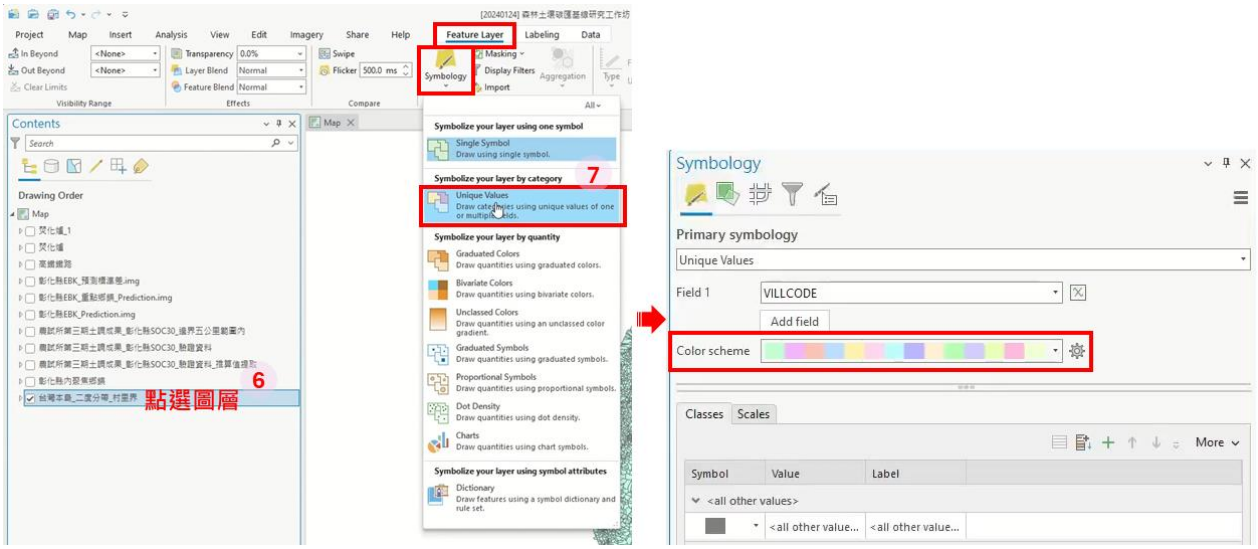


圖 3-2-26 symbology 操作，調整圖層視圖呈現

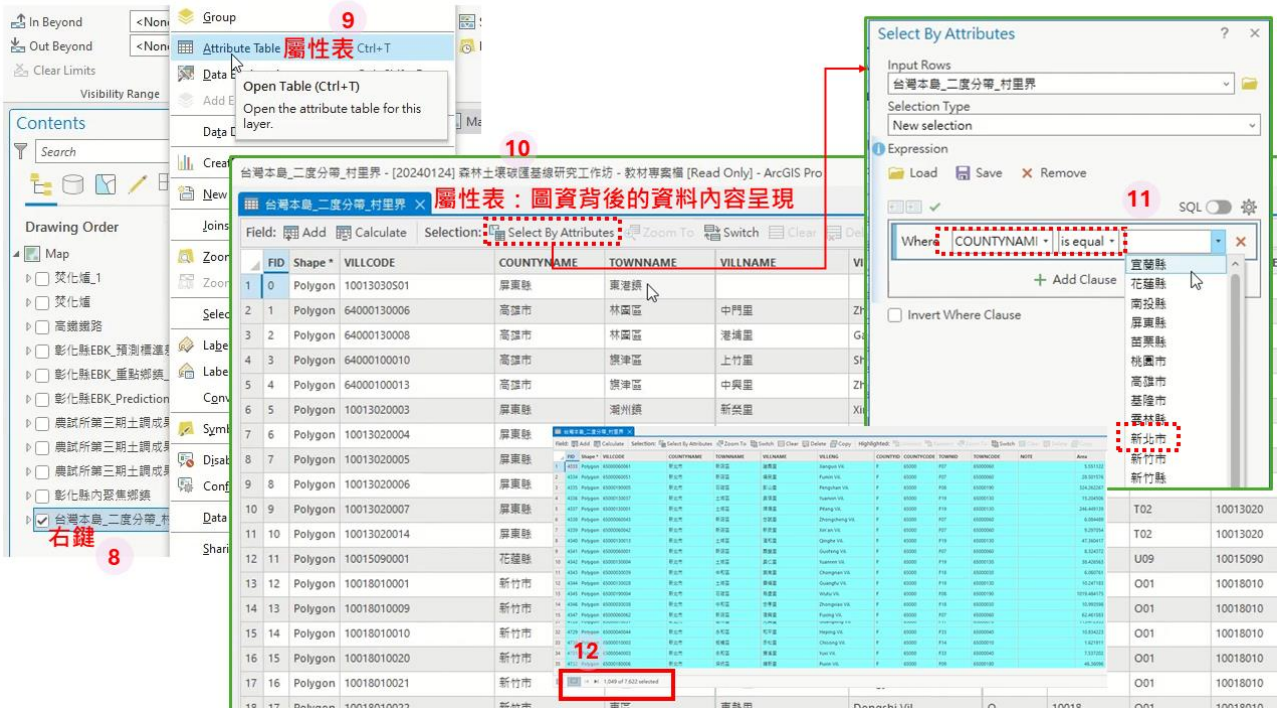


圖 3-2-27 透過屬性表選出特定區域範圍/鄉鎮市

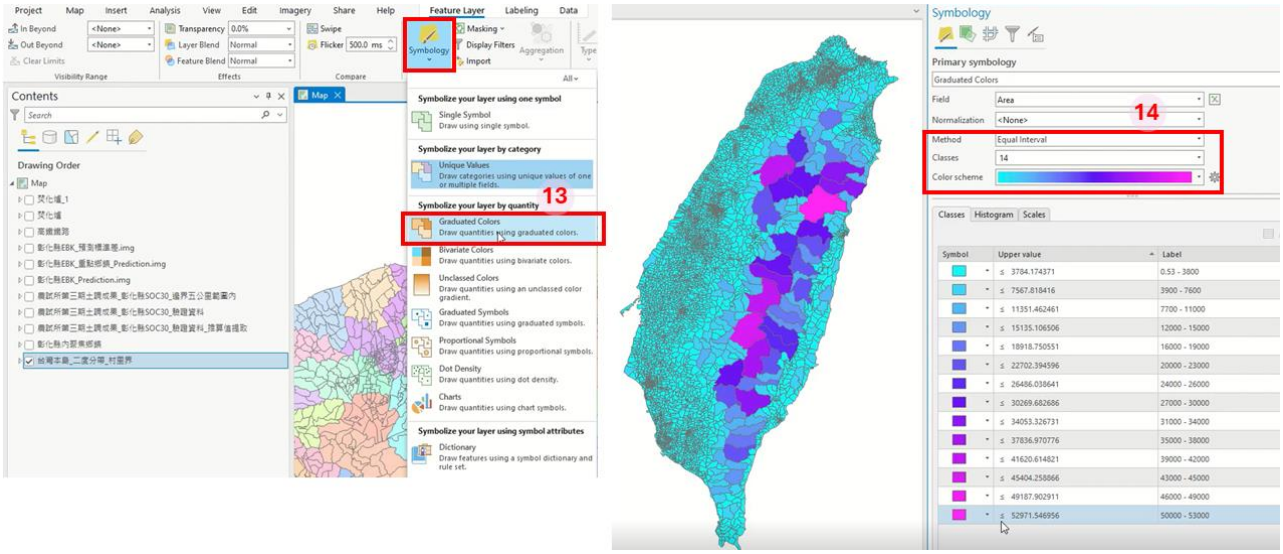


圖 3-2-28 地理資訊圖資呈現 graduated colors 操作

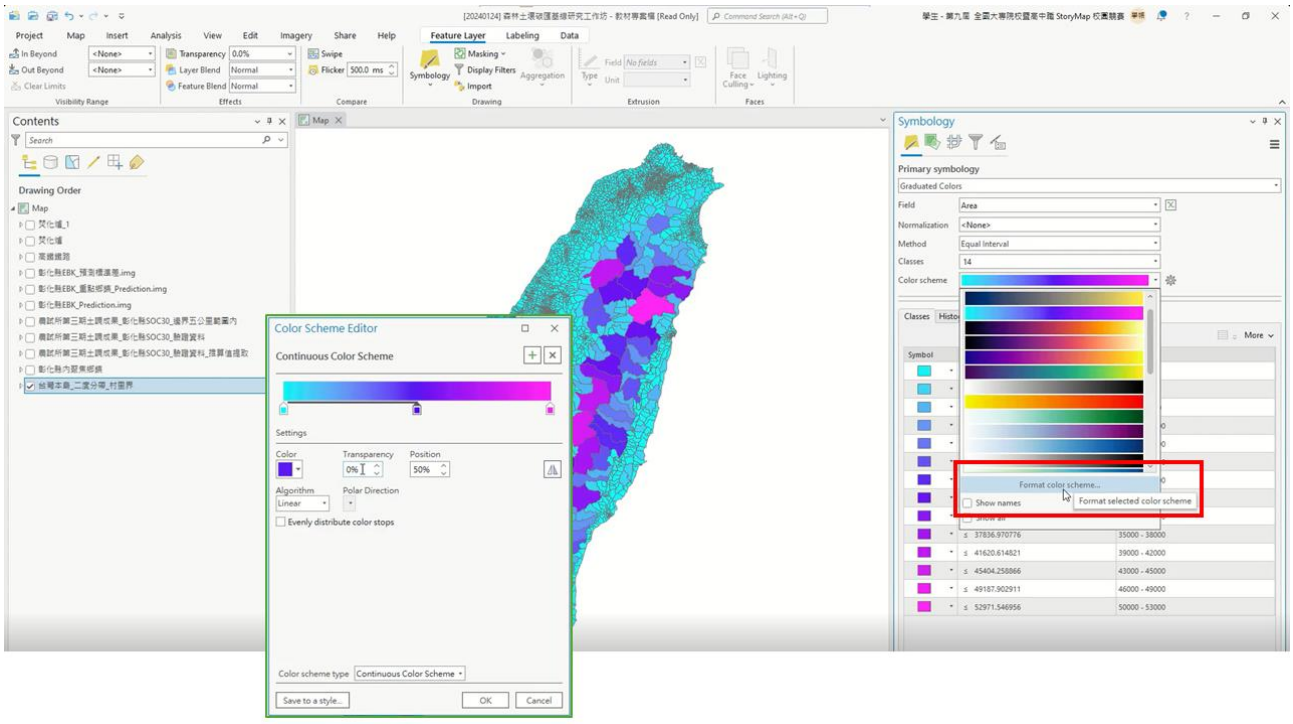


圖 3-2-29 地理資訊圖資呈現：調整顏色漸層

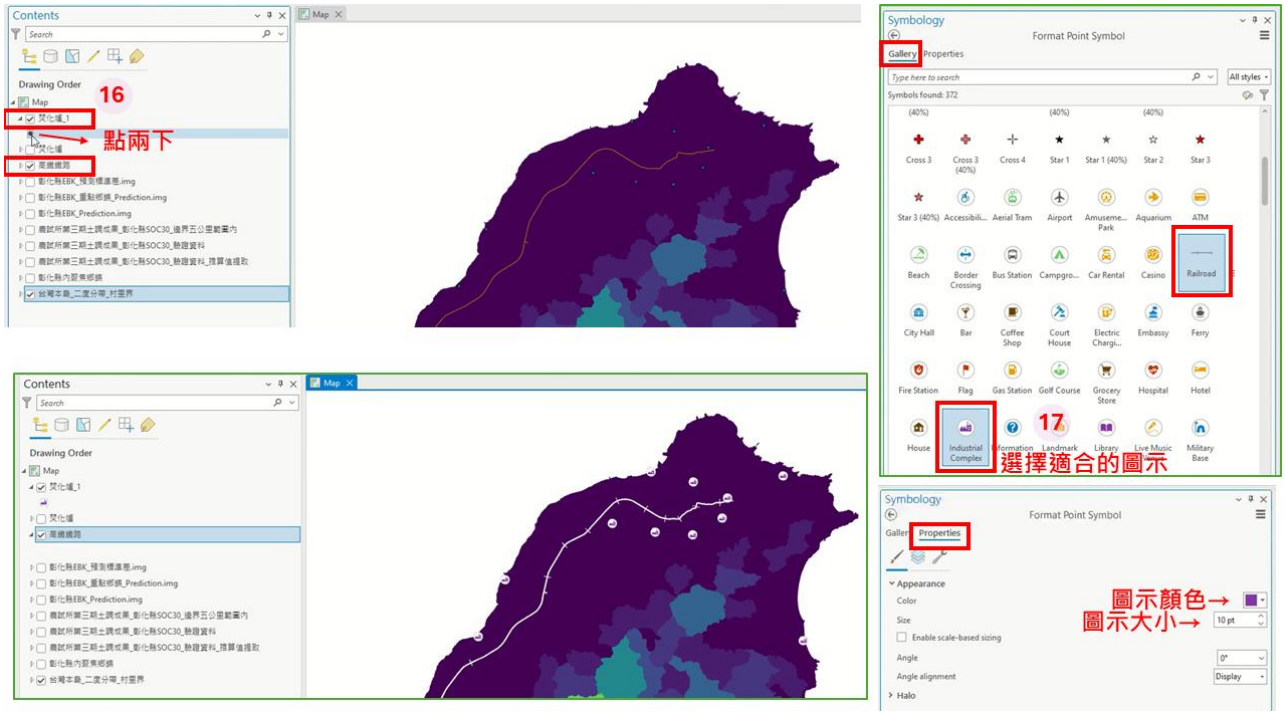


圖 3-2-30 標示高鐵、焚化爐圖示



圖 3-2-31 分析「高鐵沿線 1.5 公里」與「焚化爐方圓 5 公里」之重點鄉鎮市區 (台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

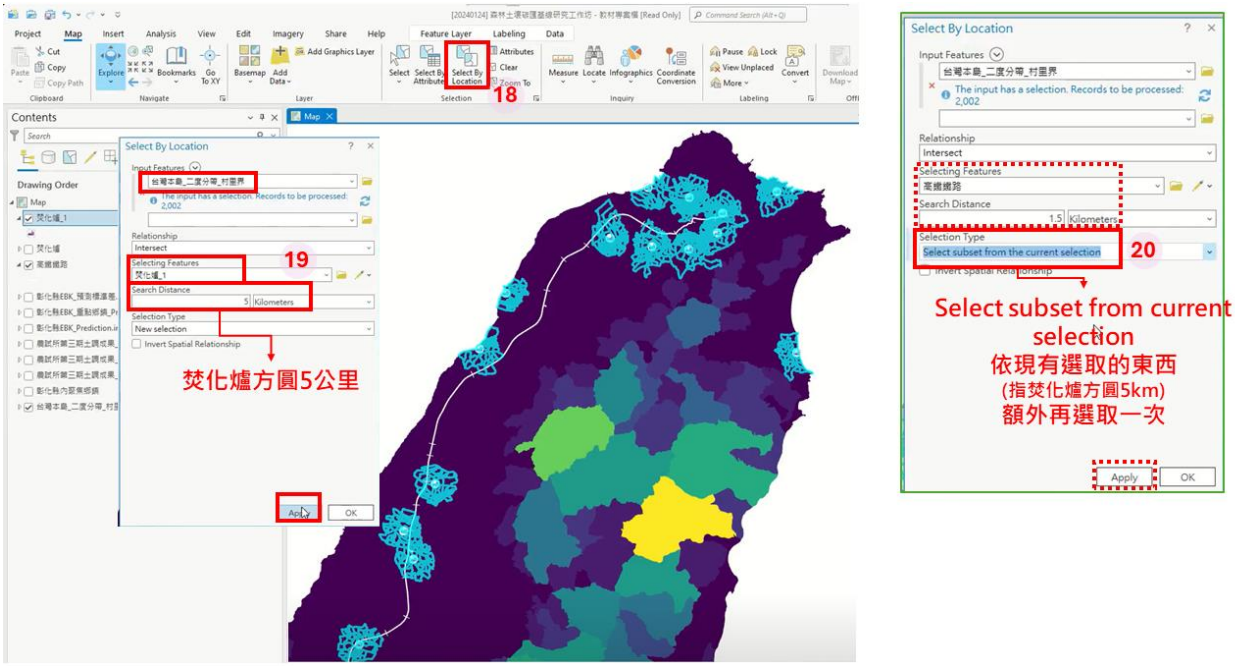


圖 3-2-32 焚化爐及高鐵周邊選取範圍之操作

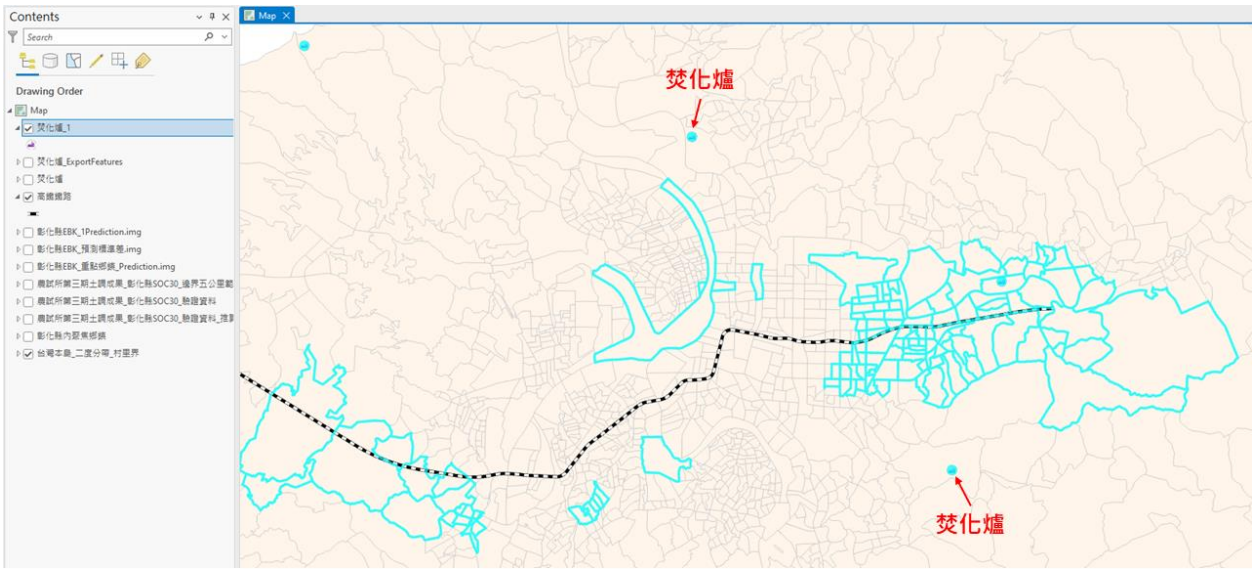


圖 3-2-33 「高鐵沿線 1.5 公里」與「焚化爐方圓 5 公里」之鄉鎮市區分析結果

C. 森林土壤碳匯基線繪製及驗證

操作教材資料如下（圖 3-2-34），為農試所 1992~2008 年以 5×5 km 網格採樣彰化縣土壤 30 公分資料，操作「經驗貝氏克利金」空間推估進行圖資分析，繪製彰化縣 0~30 公分深之有機土壤碳匯量（碳匯基線圖）。繪製方法如下：

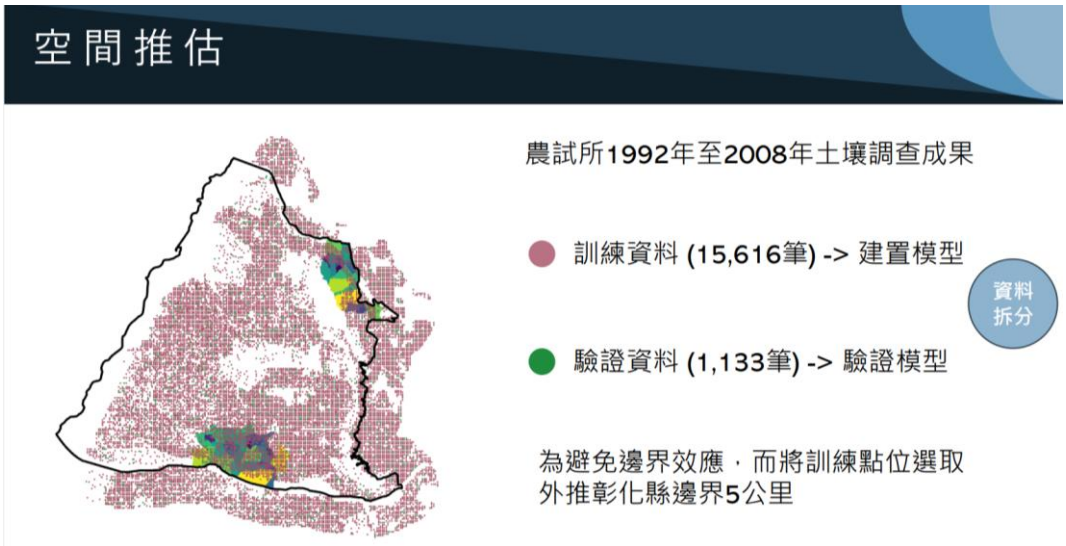


圖 3-2-34 空間推估教材資料

(A) 繪製

- 檢視圖資「彰化縣土壤 30 公分 5×5 km 網格」圖資內容：點擊「彰化縣土壤 30 公分 5×5 km 網格」右鍵 > zoom to layer （圖 3-2-35，步驟 21），zoom to layer 可使畫面直接切換至圖層位置。點擊「彰化縣土壤 30 公分 5×5 km 網格」右鍵 > attribute table（屬性表）> 屬性表中每一個欄位皆為一筆資料，在地圖上以「點」呈現（圖 3-2-35，步驟 22），如圖 3-2-35 屬性表 FID-0 即為在座標 191375, 26331255 之土壤 30 公分深度 0.2487 CO_2 kg/m^2 資料。
- 使用經驗貝氏克利金空間推估：analysis > tools > empirical Bayesian Kriging（圖 3-2-36，步驟 23）> input feature：選取待分析「彰化縣土壤 30 公分 5×5 km 網格」圖層、Z value field：選「SOC_30」，表示以有機土壤碳匯土壤 0~30 公分資料推估、output raster：經驗貝氏克利金分析結果的匯出位置及檔案名稱，在此建議選擇練習教材中的 EBK 資料夾，並將檔案名稱取為「彰化縣 EBK_Prediction_1」、output cell size：經驗貝氏克利金分析的網格大小/解析度，可以需求自行調整，建議選 100×100 m（圖 3-2-37，步驟 24），每個網格大小為 1 公頃 > run > 結果如圖 4-2-37。
- 將分析結果依彰化縣範圍裁切，以利圖資辨識、美觀。在 empirical Bayesian Kriging 視窗 > environments > processing extent，extent 下拉選單選取「彰化縣 EBK_Prediction」（圖 3-2-38，步驟 25），選擇後欄位會顯示 As Specified Below，此操作表示 empirical Bayesian Kriging 分析結果的顯示邊界會依「彰化縣 EBK_ Prediction」的邊界一致 > mask，指裁切形狀，選「彰化縣土壤 30 公分 5×5 km 網格」 > run。
- 經驗貝氏克利金從表土至 30 公分深之有機土壤碳匯量（碳匯基線圖）完成（圖 4-2-38）。

(B) 驗證

- 有機土壤碳匯量推估標準差分布：empirical Bayesian Kriging 視窗 > parameters > output parameters > output surface type 下拉選單選 standard error of prediction（推估標準差）（圖 3-2-39，步驟 26）。
- 彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值的散佈圖：將教材「推算值提取」（圖 4-2-40，步驟 27）圖層往上拖曳，使其出現在圖資最上層以檢視。檢視「推

算值提取」圖層屬性表資料（圖 3-2-40，步驟 28）。

- 對「推算值提取」圖層按右鍵 ＞create chart＞scatter plot（圖 3-2-40，步驟 29）。chart properties 視窗＞ 散佈圖 X 軸選「SOC_30」、散佈圖 Y 軸選「RESTERVALU」（如圖 3-2-41，步驟 30） ＞ 彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值散佈圖完成（如圖 3-2-41）。
- 調整散佈圖顏色呈現，以利辨識：選取「推算值提取」＞ feature layer ＞ symbology＞graduated colors （圖 3-2-42，步驟 31）＞在 field 下拉選單選取要改變顏色的資料、即屬性表「Residual（推估數值）」欄位（圖 3-2-42，步驟 32）＞classes 可下拉選擇區分的階層數、color scheme 下拉為選擇區分顏色之漸層呈現，選擇顏色可參照圖片（圖 3-2-42）操作範例。
- 點選 more ＞ format all symbols ＞ properties ＞ outline color 選無顏色（圖 3-2-42，步驟 33）；殘差越小顏色越淺，殘差值越高顏色越深、易辨識。

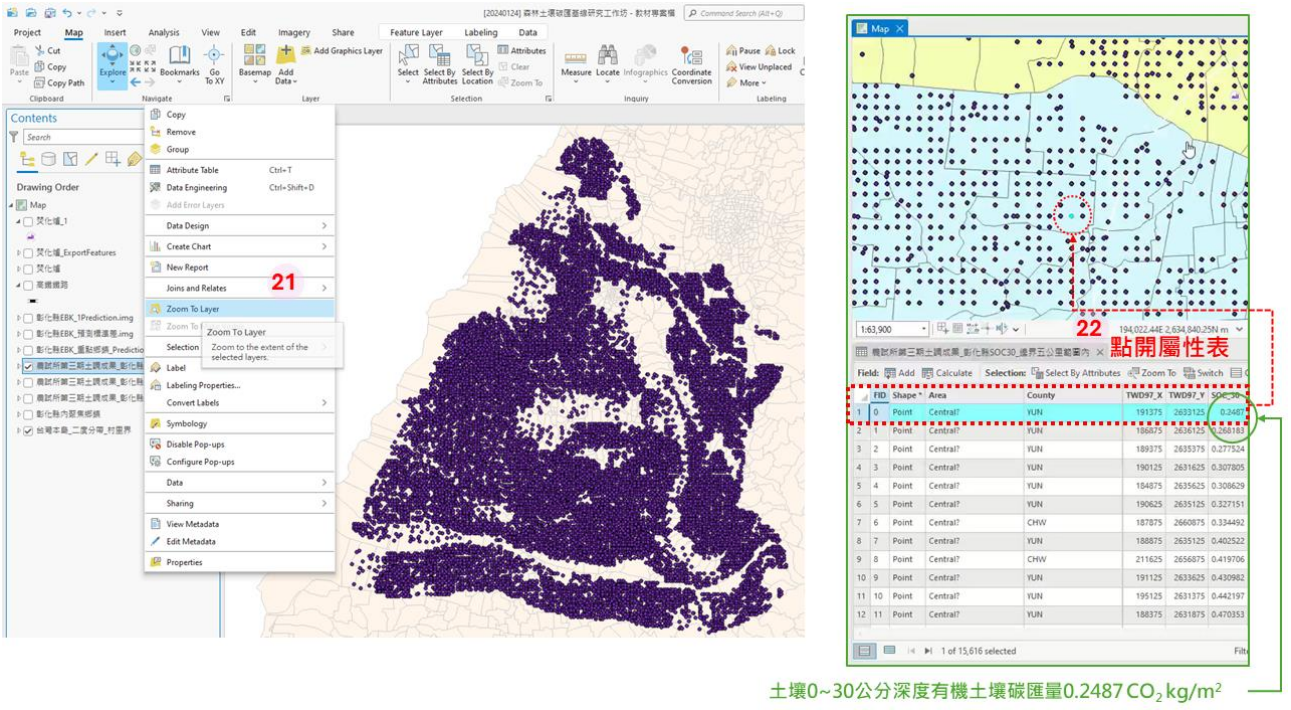


圖 3-2-35 操作點開屬性表檢視資料內容

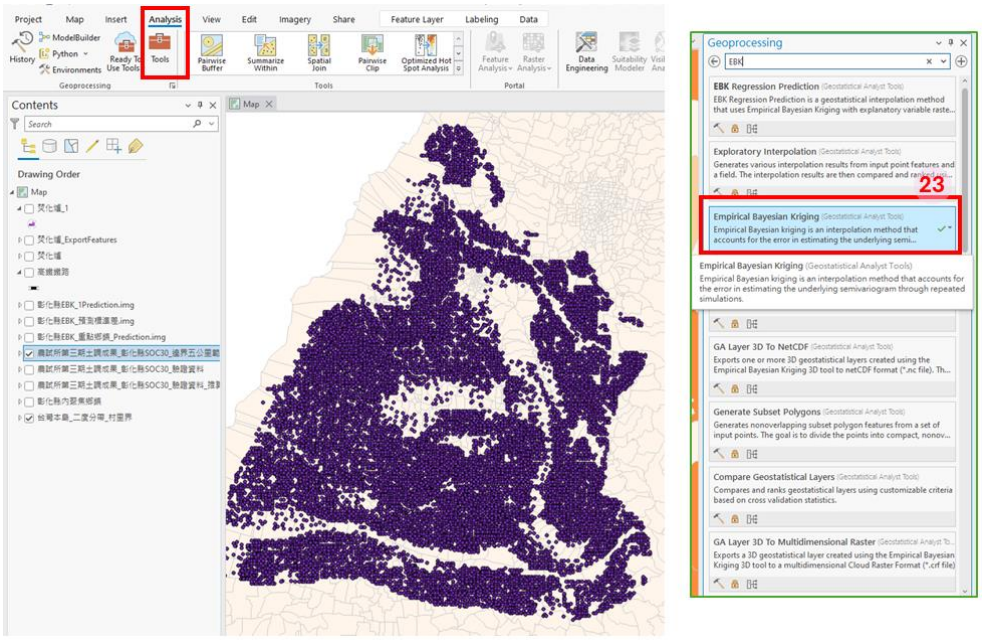


圖 3-2-36 Empirical Bayesian Kriging 分析

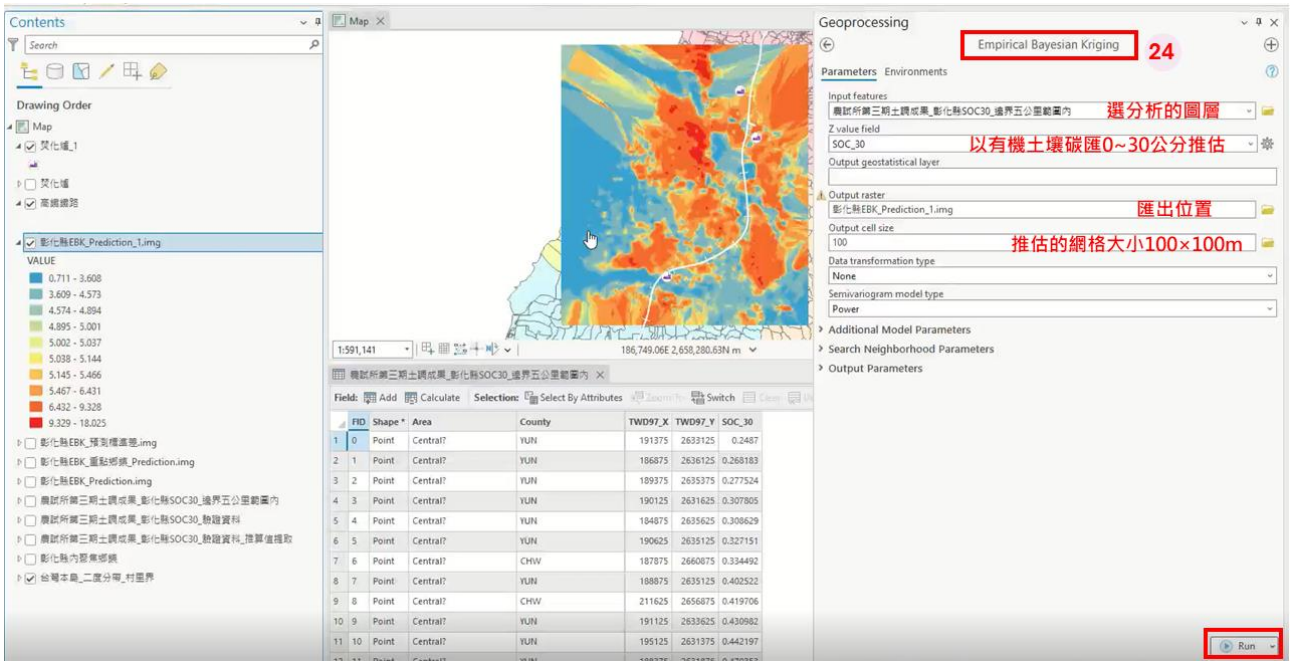


圖 3-2-37 經驗貝氏克利金 (Empirical Bayesian Kriging) 分析結果

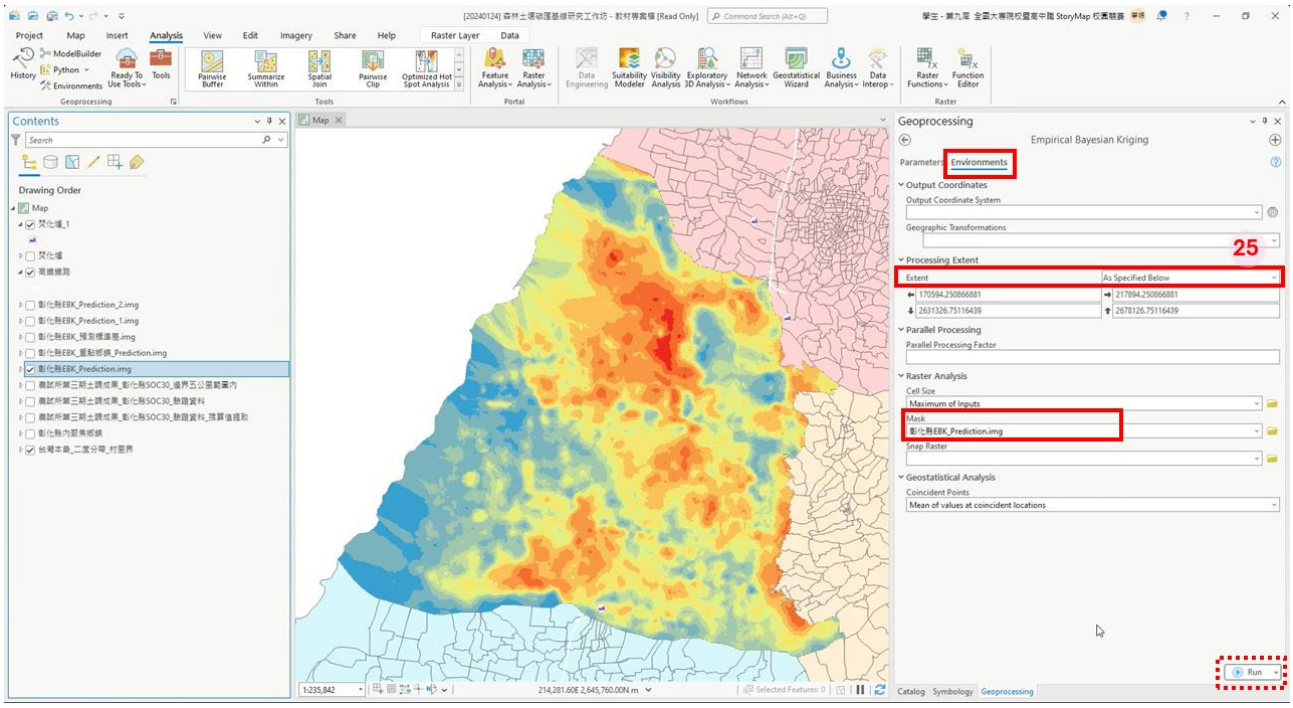


圖 3-2-38 經驗貝氏克利金從表土至 30 公分深之有機土壤碳匯量（碳匯基線圖）



圖 3-2-39 有機土壤碳匯量推估標準差分布圖

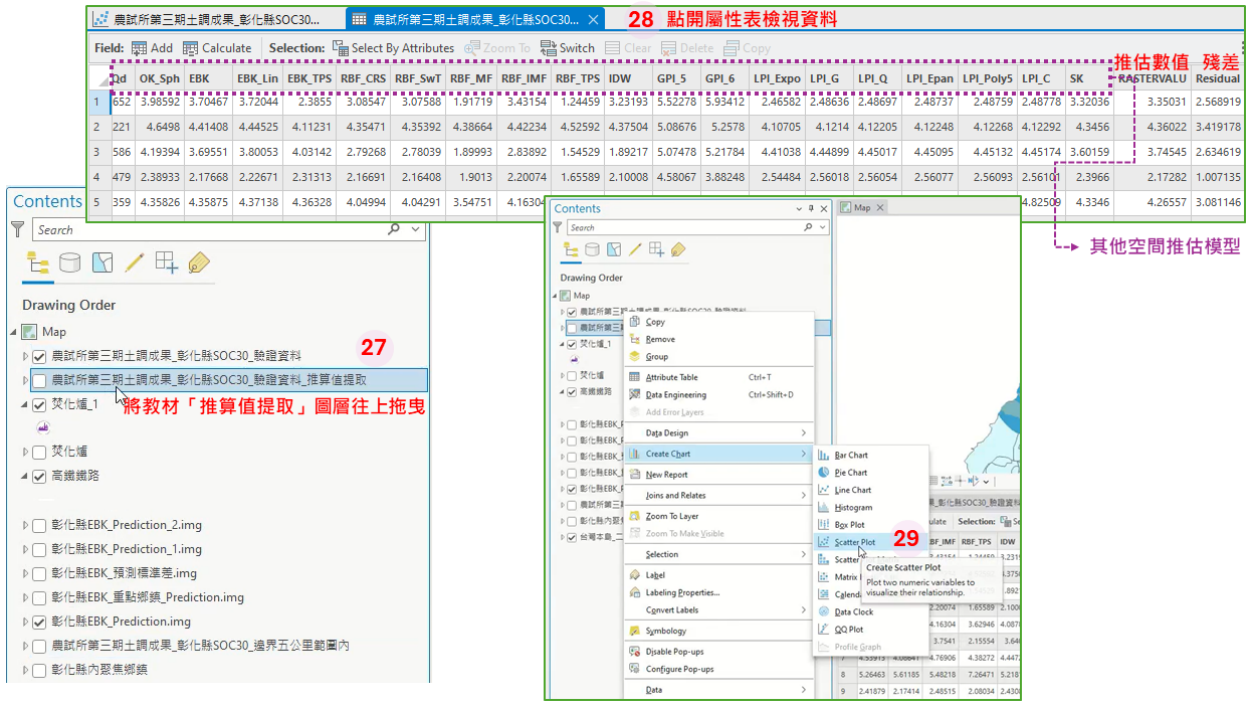


圖 3-2-40 繪製散佈圖 scatter plot

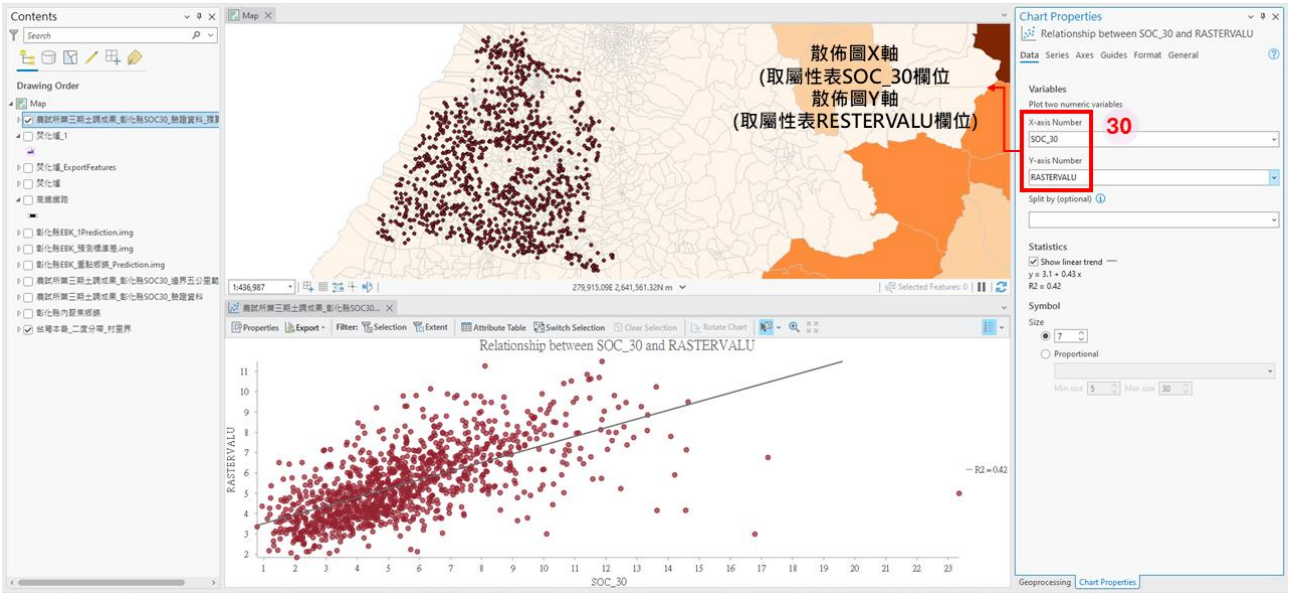


圖 3-2-41 彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值散佈圖

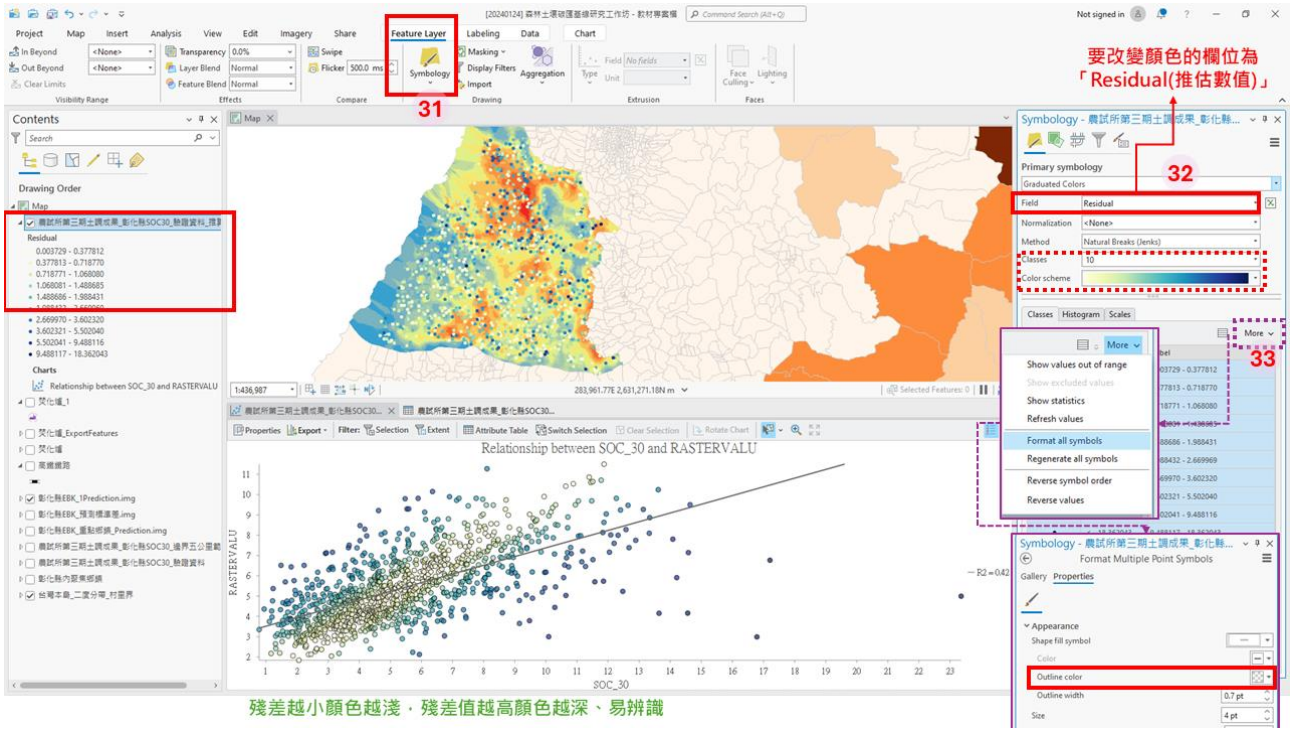


圖 3-2-42 調整彰化縣 0~30 公分土壤碳匯推估值散佈圖顏色呈現

(4) 森林土壤碳匯量計算及案例說明：介紹國際減碳發展趨勢、減碳與增匯基本概念、森林及農田土壤碳匯估算與模擬、森林土壤增匯管理策略。

由淺入深循序漸進向學員說明國際減碳發展趨勢、何謂淨零排放 (Zero emission)、碳盤查 (Carbon Footprint Verification, CFV)、碳定價 (Carbon Pricing) 碳交易/碳排放權交易系統 (Emissions Trading Systems)、碳稅 (Carben Tax) 與碳費 (Carben Fee) 差異；臺灣未來規劃以碳費方式減碳。



圖 3-2-43 中興大學簡士濠教授講授森林土壤碳匯量計算及案例說明

介紹臺灣 2050 年淨零轉型目標、農業部門因應氣候變遷策略架構（圖 4-2-43），策略架構中與本研究密切相關為林業提供之「增匯」功能，並針對林業如何增匯提出增加森林面積、加強森林經營管理、提高國產材利用之 3 項政策方針，（圖 3-2-44、3-2-45）。臺灣森林面積 219 萬公頃，占全臺 60.7%土地面積，其中 21%為人工林，近 46 萬公頃，而人工林中有 51%為針葉林，由此推估，臺灣森林每年碳匯量約為 2,140 萬公噸 CO_2，期 2050 年新增 97.8 萬公噸 CO_2。

最後介紹森林土壤碳儲量、碳排計算/估算公式，如臺灣森林土讓碳儲量 22,460 萬噸碳 (Chen and Hseu, 1997) 平均每公頃儲存 147 萬噸碳或 539 頓 CO_2；依第四次全國森林資源調查，臺灣森林蓄積量 5 億 2 百萬 m^3，生產性人工林總蓄積量 5,726 萬 m^3，每公頃蓄積量 220.6 m^3，平均每公頃碳儲存量 55 噸或 201 噸 CO_2；2019 年臺灣森林碳吸收量每年 2,144 萬噸 CO_2，佔台灣總碳排放量 7.5%，每年每公頃吸存 9.76 噸 CO_2（國家溫室氣體排放報告，2021）。



圖 3-2-44 臺灣農業部門淨零四大主軸及策略

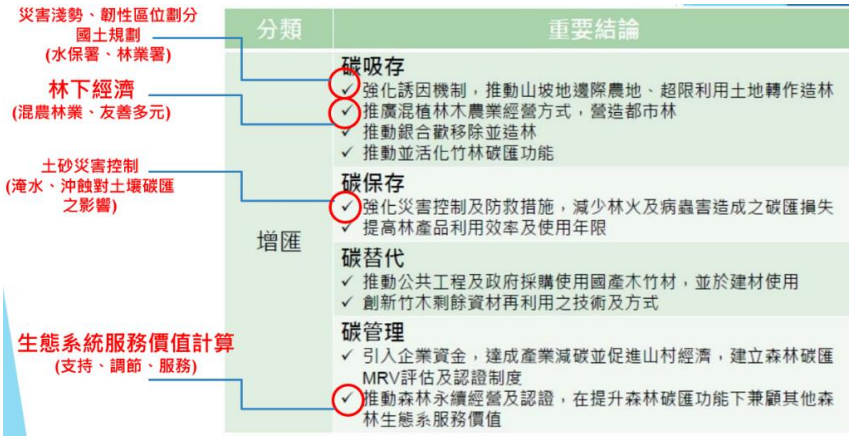


圖 3-2-45 農、林業淨零政策推動方向

4. **辦理成效**

113 年辦理三梯次工作坊旨在推廣森林土壤碳匯相關知識，工作坊亦為相關研究領域人士提供學習與交流平臺，加強林業相關人員業務推動能力，促進森林土壤碳匯專業知識交流和合作，三梯次參與人次各為 65、78、35，共 178 人次參與本工作坊。

(1) 課程滿意度調查

工作坊策畫團隊提供課後滿意度問卷，參訊學員能於課程結束後提供我們改善與建議（附件 6），問卷設計如下（表 3-2-7），三梯次各單位填報滿意度問卷共 38 人，包含林業保育署、各林業分署及航遙測分署 18 人、林試所、林試所各地研究中心 3 人、大專院校（大學生、研究人員、教職人員）10 人、民營企業 4 人、本院相關計畫同仁 2 人；農業部生物多樣性研究所 1 人。

表 3-2-7 三梯次工作坊課程滿意度問卷設計

• 臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 • 世界各國森林土壤碳匯調查技術 • 森林土壤繪圖軟體應用（ArcGIS Pro 操作）及繪製森林土壤碳匯地圖 • 森林土壤碳匯量計算及案例說明	非常不滿意----------非常滿意				
	1	2	3	4	5
(一) 課程內容滿意度					
1. 本堂課程講師的教學方式有助提升學習成效	□	□	□	□	□
2. 本堂課程教材的滿意程度	□	□	□	□	□
3. 本堂課程有助於您的工作或業務應用	□	□	□	□	□
4. 本堂課程提供的場地及設備有助於學習	□	□	□	□	□
5. 您對本堂課程講師整體表現的滿意程度	□	□	□	□	□
6. 您對本堂課程進行整體的滿意程度	□	□	□	□	□
7. 對於本堂課程教學，您是否有其他建議？					
8. 本堂課程除了講師教授的主題外，您還想知道什麼資訊？					
(二) 本次工作坊活動與場地安排滿意度					
1. 課程與辦理主題相符	□	□	□	□	□
2. 課程時間的安排	□	□	□	□	□
3. 活動地點的安排	□	□	□	□	□
4. 電腦教室設備滿意度	□	□	□	□	□
5. 行政服務或工作人員的態度	□	□	□	□	□
6. 整體而言，我對本次工作坊滿意程度	□	□	□	□	□
7. 對於本次工作坊，您是否有其他課程需求建議？					
8. 本次工作坊對您最有幫助的地方是？					
9. 如果您還有其他建議事項，請提供給我們，讓我們對下次活動辦理可以更為精進。					

滿意度問卷結果，參訓同仁對 4 堂課課程內容及工作坊活動辦理場地滿意程度皆為 4 至 5 級，整體對課程表示非常滿意，回饋之改善精進建議包含：(A)部分課程講義教材簡報內容豐富，一頁兩張簡報之篇幅易使文字較小不清晰，建議一併提供課程簡報電子檔，供參訓同仁複習。(B) 臺灣森林土壤介紹課程，建議輔以實際土方採樣分析實做或提供土方樣本，提升課程體驗感受度。(C) 課程內容建議增加森林土壤碳匯量的管理策略、方法，提供相關研究、承辦同仁有明確方向建議。(D) GIS 電腦操作時間應拉長，並提供每步驟操作截圖之工作手冊或課堂螢幕錄影，讓參訓同仁能輕鬆跟上操作進度及課後複習。(E) 森林土壤碳匯公式課程，建議講師提供簡易題目讓現場同仁參與森林土壤碳匯公式數值計算，提升碳匯公式親切感。

(2) 辦理檢討及精進

對前述 5 項參訓學員回饋建議，團隊已於課後提供各講師聯絡信箱資訊，有疑問及課程內容文獻查找，皆可直接聯絡本團隊或老師信箱；提供參訊學員課程錄影影片連結，學員可於課後撥放授課影片複習程進度。未來工作坊辦理，電腦操作課程團隊會提供逐步操作電腦截圖講義、增加實務公式計算及視情況規劃土壤樣本體驗。

三、建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式

(一) 評估森林土壤碳匯量推估模式，分析影響不確定性與變異量之關鍵因子

● 工作推動說明

首先敘明此工作項目所使用之研究材料及所涵蓋之試驗區域範圍。計畫前期初步建立模式時所使用之研究土壤調查成果，主要以農業部林業及自然保育署[1]（後簡稱林業署）582 筆採樣資料及農試所共計 112,774 筆土壤調查資料為大宗。由於農試所資料筆數龐大，且在採樣方法、流程，甚至在後續校正及分析方式皆以學理作為佐證背景，統一規範並標準化之，可信度極高；因此，前期報告以農試所提供之 2008 年至 2020 年進行全臺土壤調查作為基礎資料，依序說明基礎資訊內容與推算應用方法，並以資料內之「土壤有機碳量 SOC (kg C/m^2)」為整理目標，透過土壤有機碳儲存量推算公式（式 3-13）分析各項影響森林土壤有機碳儲存量因子，以呈現土壤有機碳儲存量測繪之結果：

$$SOC\ stock = （TOC \cdot BD \cdot Thickness） \cdot （1\text{-}Stone）/100 \qquad （式\ 3\text{-}13）$$

*_SOC stock_ : Soil Organic Carbon Stock，土壤有機碳儲存量。單位為 kg C/m^2
*_TOC_ : Total Organic Carbon，土壤總碳量。單位為 g/kg
*_BD_ : Bulk Density，總體密度。單位為 g/cm^3
*_Thickness_ : 採樣土壤層厚度。單位為 cm
*_Stone_ : 含石量。以%表示

農試所於 2008 年至 2020 年進行全臺土壤調查，總資料筆數為 112,774 筆土壤剖面資料，39,727 筆採樣剖面資料，資料空間範圍為臺灣全境（包含離島），唯本計畫針對臺灣本島分署[2]範圍為研究試區進行探討。採樣調查時除時間較長外，現地採樣會因人為因素等而有紀錄不全之疑慮，或紙本資料於數位化過程中因紀錄資料缺失以致無法判讀，產生數化資訊有空白欄位之情形；此外，極少數資料為異常數據（表 3-3-1），而無法採用，如無座標資訊、TOC 存在負值、含石量為 100%卻有 TOC 之情形等疑慮。另一方面，幾乎所有數據均未納入含石量，且因調查時間跨度大，難以追溯相關佐證資訊（如現場照片等），所以本計畫暫以 0 代表含石量。

[1] 農業部林業及自然保育署：前身機關名為行政院農業委員會林務局，於 2023 年隨農委會升格為農業部而改制更名為「農業部林業及自然保育署」。
[2] 分署：前身機關名為行政院農業委員會林務局林區管理處，於 2023 年隨農委會升格為農業部而改制更名為「分署」。

表 3-3-1 資料異常無法採用態樣表

資料異常類別	內容說明	資料筆數
無座標資訊	無空間座標之採樣剖面	6,316
TOC 存在負值	有機質含量皆為正值	20
含石量為 100%卻有 TOC	100%的含石量無土壤可測定 TOC	214
土樣深度為 0 公分	多為沒有紀錄上下界深度致使土壤深度為 0 公分	7,731
BD 大於 2 g/cm^3	BD 在 1.6 g/cm^3 視為極值，總體密度常理來說數值不超過 2	292

於分析資料前期階段需進行資料內容與屬性確認，須排除非符合土壤性狀之異常數據，以避免異常值影響統計結果導致準確性降低模型之預測能力，而誤導決策判斷(Osborne, 2012; Sylvia *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2004)。此外，除了將異常值刪除，資料進入地理資訊系統中展點過程，僅保留八大分署範圍內之資料，總計 2,900 筆作為訓練資料（本計畫為林業署委辦之，將研究試區訂定為分署轄內之目的為針對國有林地經管範圍，以利林業署於基線界定後便於規劃管理），並根據嘉義及宜蘭分署分區進行 BD 推算（表 3-3-2），以利土壤有機碳儲存量評估，相關內容於後續說明之。

● **執行成果**

1. 總體密度推算方法

由於農試所資料中，總體密度資料從缺（112,774 筆中有 63,183 筆無 BD 資料，約佔總筆數的 56%），須藉由其他土壤性質數據進行推算得知 BD，以利進行後續土壤有機碳儲存量之推估（Al-Shammary *et al.*, 2018; Heuscher *et al.*, 2005; 林俐玲等，1993；簡士濠等，2015）。臺灣山區地勢起伏大，相近地區在土壤性質上變異程度極高（Amuyou *et al.*, 2013; Bojko *et al.*, 2017; 廖偉志，2006），無法僅用單一線性回歸表示全臺 BD 與自變數之線性關係。本計畫以林業署提供之分署圖資，將農試所提供之土壤調查數據展點（使用軟體為 ArcGIS Pro（3.1.3 版本）），保留坐落於分署範圍內之採樣剖面，後利用內政部國土測繪中心提供之開放資料 - 全臺 20 公尺網格數值地形模型 (Digital Elevation Model, DEM) 加值建置，將八處分署依林型分布，再行切分成三種海拔，分別為 1,000 公尺以下（闊葉林）、1,000 至 2,000 公尺（混合林）及 2,000 公尺以上（針葉林）(Chatterjee, *et al.*, 2016; Kosaka *et al.*, 2005)，概算不同海拔及地區之土壤有機碳儲存量，將全臺分署內農試所採樣剖面分布圖於 3-3-1 所示，BD 推算分區分類結果如表所示（表 3-3-2）

表 3-3-2 各分署土壤總體密度 (BD) 推算分區表

海拔 / 分署	1,000 公尺以下	1,000 至 2,000 公尺	2,000 公尺以上
臺中	臺中一	臺中二	臺中三
花蓮	花蓮一	花蓮二	花蓮三
南投	南投一	南投二	南投三
屏東	屏東一	屏東二	屏東三
新竹	新竹一	新竹二	新竹三
嘉義	嘉義一	嘉義二	嘉義三
宜蘭	宜蘭一	宜蘭二	宜蘭三

以「嘉義分署」及「宜蘭分署」為初步探討標的，並根據審查委員的指導及相關論述進行滾動式精進，持續將其它分署繪製完成，以完成全臺國有森林土壤有機碳儲存量基線圖，供相關研究使用及政策擬定參酌。

下圖為全臺所有分署轄區內（圖 3-3-1），農試所採樣剖面之分布圖。依照前述海拔劃分方式，以棕色點位表示為海拔 1,000 公尺以下之採樣剖面，綠色表示為 1,000 至 2,000 公尺之採樣剖面，紅色則為海拔 2,000 公尺以上之採樣剖面，以此方式表示採樣剖面於各分署三類海拔範圍內之分布情形。

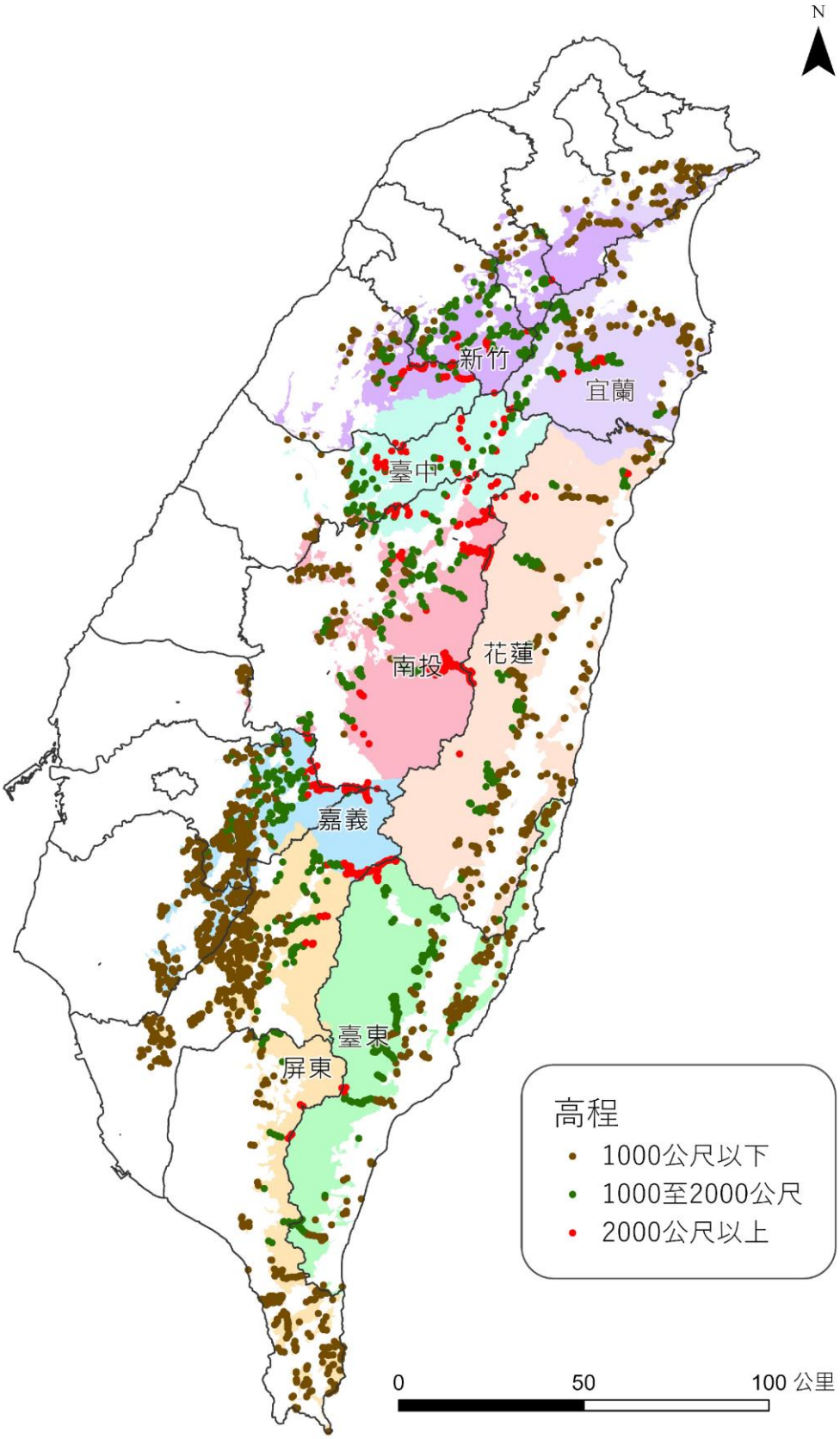


圖 3-3-1 全臺各分署範圍內農試所採樣剖面分布圖

（資料來源：台灣水資源與農業研究院（2023 年林業署委辦計畫））

2. 總體密度推算成果

由於前述 BD 資料從缺筆數大於 50%，因此需藉已知資訊進行推估，本計畫將藉各分署之分區 BD 以線性關係推算未知 BD，計算將採用土扣採集土樣後測得之 BD 為應變數（於後續圖表中表示為「實驗室數據」），土壤剖面厚度 (Thickness) 及 TOC（單位為%，而非 g/kg）為自變數，來計算各分區 BD 與自變數之線性回歸式 (Heuscher *et al.*, 2005; Manrique *et al.*, 1991; Tranter *et al.*, 2007)。然而，資料仍存在離群值，為了能初步篩選離群值以利後續建立線性回歸式時較具有代表性，後以轉換函數（式 3-14）先行推算 BD（於後續圖表中表示為「公式計算後」) (Tsui *et al.*, 2013)，再與實驗室 BD 數據進行線性回歸，計算 R^2。理想回歸式斜率須為「1」，即表示該線性回歸能較為準確推算實際狀況。

$$BD = 1.3026+0.169 \cdot \log(d) - 0.256\,(\ln(SOC))^2 \qquad \text{（式 3-14）}$$

**d : 同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm*
**SOC : Soil Organic Carbon，土壤有機碳含量。以%表示*

將實驗室 BD 數據與計算後的 BD 進行線性回歸後，得知該線性回歸式之解釋能力 R^2，再將兩者 BD 之間的殘差由大到小排序，由最大的殘差開始刪除，直至 R^2 大於 0.60 (Bailey *et al.*, 2003; Håkansson *et al.*, 2000)。由於模型或是回歸式的解釋能力是基於各領域所探討之標的關係，皆會產生不同閾值，然針對土壤性質中 BD 的推算，為能夠盡可能保留資料筆數且達一定代表性，後制定資料篩選原則，即「兩者 BD 的殘差須小於 0.5 的情況下，解釋能力能解釋『多數』現象」，因此將 R^2 訂定為 0.60 以符合過半標準 (Cameron *et al.*, 1997; Gelman *et al.*, 2019; Ozili, 2023)。

由農試所提供之土壤調查成果表中，將既有 BD 數據與式 4-14 計算成果繪製散布圖，以瞭解整體趨勢及回歸成果是否適用於擬合，再依據 R^2 為 0.60 之過半標準進行篩選，得出可用於線性擬合回歸之數據集。利用原始數據中可進行擬合之採樣資料中，Thickness 及 TOC 作為自變數，BD 作為應變數進行擬合（使用 Python 3.10.9 版本進行線性擬合）；最後，利用實驗室 BD 數據與各分區建立線性擬合回歸後之推算 BD 繪製散布圖，並添加 R^2 及 95%信賴區間以瞭解資料解釋能力及變異情形。

(1) 嘉義分署

A. 嘉義一（海拔 1,000 公尺以下）

嘉義一分區於原資料中採樣剖面數為 424 筆，平均數為 1.32 g/cm^3，標準差為 0.19 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.34 g/cm^3，標準差為 0.20 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-2 左），解釋能力 R^2 為 0.57，斜率為 0.78。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 398 筆，平均數為 1.34 g/cm^3，標準差為 0.17 g/cm^3。透過式 4-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.36 g/cm^3，標準差為 0.17 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-2 右），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.76。

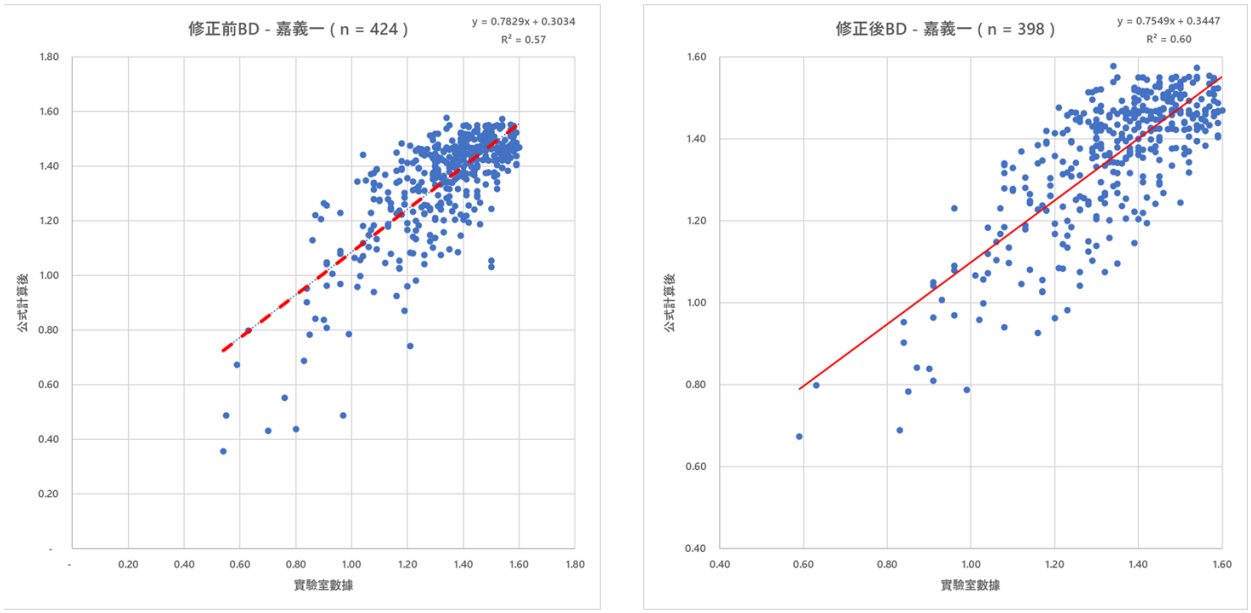


圖 3-3-2 嘉義一分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立嘉義一於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合（式 3-15），並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-5 (b)），得解釋能力 R^2 為 0.56。

$$BD = (1.32 \cdot 10^{-3} \cdot Thickness) - (0.12 \cdot TOC) + 1.56 \qquad \text{（式 3-15）}$$

Thickness :採樣土壤層厚度。單位為 cm
TOC : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

B. 嘉義二（海拔 1,000 至 2,000 公尺）

嘉義二分區於原資料中採樣剖面數為 32 筆，平均數為 0.94 g/cm^3，標準差為 0.27 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.89 g/cm^3，標準差為 0.43 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-3 左），解釋能力 R^2 為 0.44，斜率為 1.08。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 30 筆，平均數為 0.92 g/cm^3，標準差為 0.26 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.93 g/cm^3，標準差為 0.41 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-3 右），解釋能力 R^2 為 0.61，斜率為 1.22。

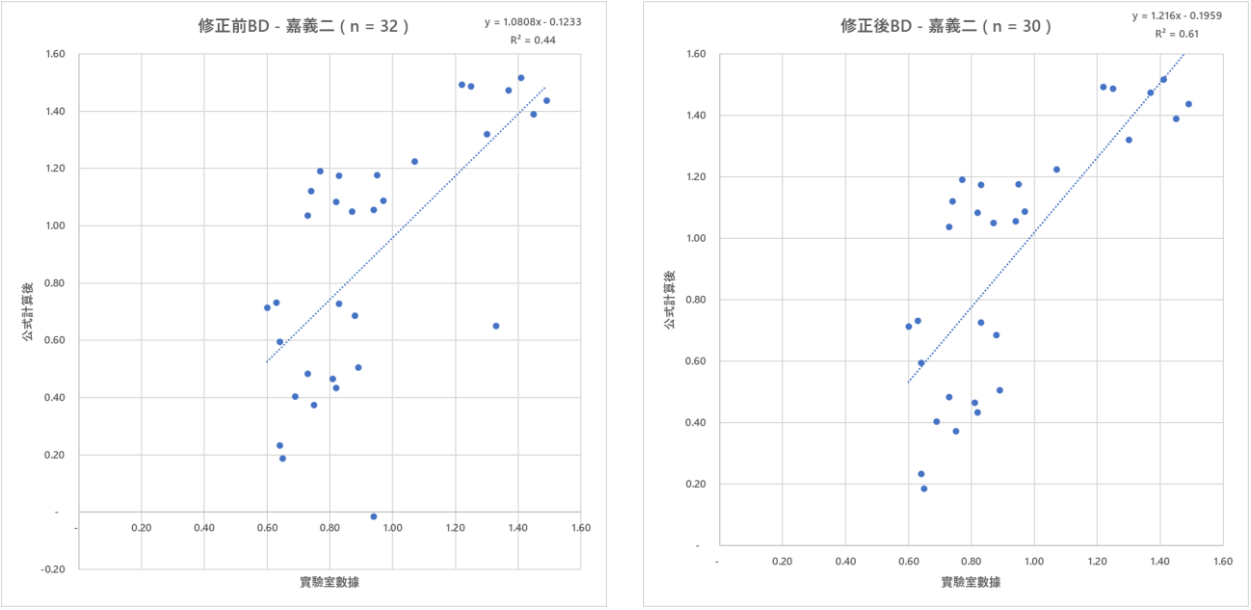


圖 3-3-3 嘉義二分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立嘉義二於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合（式 3-16），並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-5 (e)），得解釋能力 R^2 為 0.59。

$$BD = -(2.35 \cdot 10^{-3} \cdot Depth) - (0.08 \cdot TOC) + 1.37 \qquad \text{（式 3-16）}$$

*_Depth_ :同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm
*_TOC_ : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

C. 嘉義三（海拔 2,000 公尺以上）

嘉義三分區於原資料中採樣剖面數為 85 筆，平均數為 0.87 g/cm^3，標準差為 0.24 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.93 g/cm^3，標準差為 0.39 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-4 左），解釋能力 R^2 為 0.61，斜率為 1.25。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 82 筆，平均數為 0.88 g/cm^3，標準差為 0.24 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.95 g/cm^3，標準差為 0.37 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-4 右），解釋能力 R^2 為 0.67，斜率為 1.24。

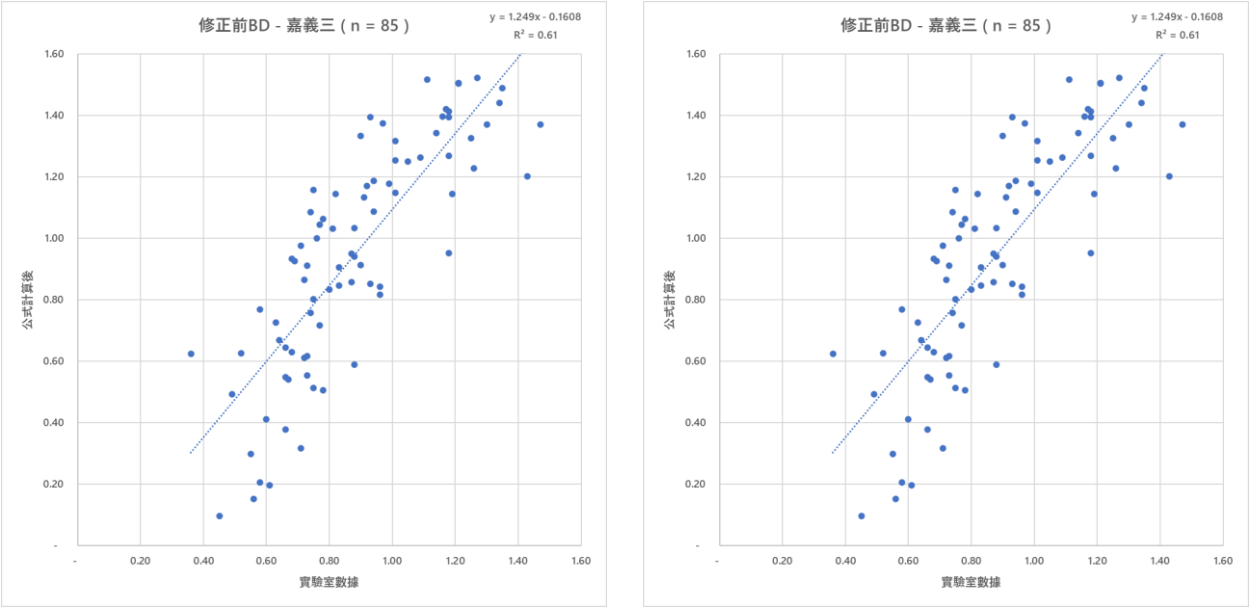


圖 3-3-4 嘉義三分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立嘉義三於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合（式 3-17），並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-5 (h)），得解釋能力 R^2 為 0.70。

$$BD = -(2.87 \cdot 10^{-3} \cdot Depth) - (8.47 \cdot 10^{-2} \cdot TOC) + 1.32 \qquad \text{（式 3-17）}$$

*$Depth$:同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm
*TOC : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

D. 嘉義分署採樣總體密度及土壤有機碳儲存量變異性探討

嘉義分署採樣數量相較於其它分署較多，共計 541 筆，並且在起初移除異常值後，透過式 3-14 推算總體密度，即有極高之相關性表示。在三類分區各自擬合線性回歸式並推估總體密度後，仍保有極高的相關性及解釋能力，斜率上也皆趨近於 1，但仍有一些偏估。嘉義一在較高之總體密度土樣中出現高估情形（圖 3-3-5 (b)），而在總體密度 1.0 以下出現低估現象，並且在數值分布上，多以總體密度大於 1.0 之採樣數據為多。雖嘉義一在總體密度低值出現低估，但在原總體密度推算碳儲存量與推算總體密度推算碳儲存量之回歸上，出現極高之代表性 (R^2=0.86)（圖 3-3-5 (c)），在嘉義一推算總體密度後計算之土壤有機碳儲存量與原數據相近。嘉義二則因樣本數少 (n=32) 且資料分布較為離散，使得總體密度於觀測值與推估值之間之回歸僅有 0.41 的解釋能力（圖 3-3-5 (e)），並有低值出現高估，高值出現低估之情勢發生。在原總體密度與推算總體密度計算之土壤有機碳儲存量之線性擬合中，解釋能力僅佔 0.23（圖 3-3-5 (f)），除了因數據量少且分布離散之外，而有出現低值及高值擴張之情形。在 X 軸的極端值處，數據點可能因數量稀少，進而對於回歸線預測之不確定性增加。當數據點較少時，任何新增加的數據點都可能對回歸線的斜率和位置產生較大影響，從而增加信賴區間的範圍；另一種可能則為擬合之線性模型不完全適合數據，尤其是在範圍極端值處，可能會出現異常值或非線性趨勢，這也會增加信賴區間的寬度。嘉義三則相較於嘉義二，更為穩定，樣本數為 85 筆，解釋能力雖為 0.63，但仍有與嘉義二在 X 軸極值上有發散之情形（即信賴區間範圍擴大）（圖 3-3-5 (h)）。於土壤有機碳儲存量之回歸上（圖 3-3-5 (i)），高值出現信賴區間明顯擴散之情勢，樣本數於高值較為稀疏之外，在原數據與推算 BD 計算 SOC 上出現較大的殘差。

於嘉義分署整體數據上，多數聚集於高值之總體密度，而低值在數量上逐漸稀少，也使得信賴區間的範圍擴大（圖 3-3-5 (k)）。即使在低值處出現高估總體密度之趨勢，但在高值僅發生輕微的低估，並於（圖 3-3-5 (b)）中說明多數高值 BD 發生在嘉義一之範圍內，在低 SOC 出現極佳的線性擬合，且斜率幾近於 1；高值同樣因為數量逐步稀少，且因少量數據出現嚴重低估，使得高值出現信賴區間擴散趨勢（圖 3-3-5 (l)）。即使如此，整體之解釋能力仍舊具有相當優異的代表性，若將高值的兩處極端偏估刪除，R2 能達到優異的 0.75，對於總體密度之推算與原始總體密度之間具有高度的相關性。

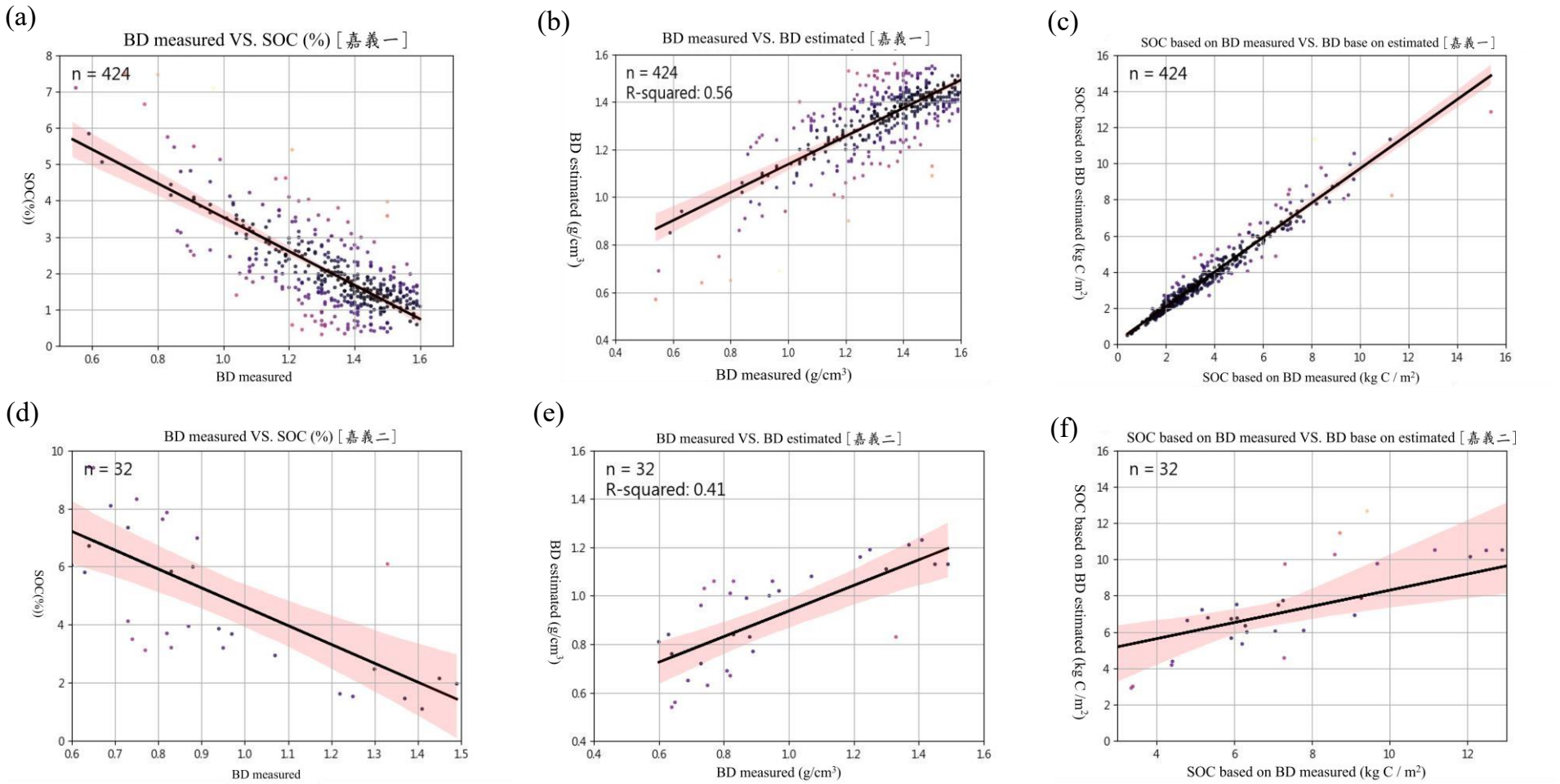


圖 3-3-5 嘉義分署分區之量測及推估總體密度有機碳含量及碳儲存量之變異性（1/2）

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)- (c) 嘉義一土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)、(d)-(f) 嘉義二土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)

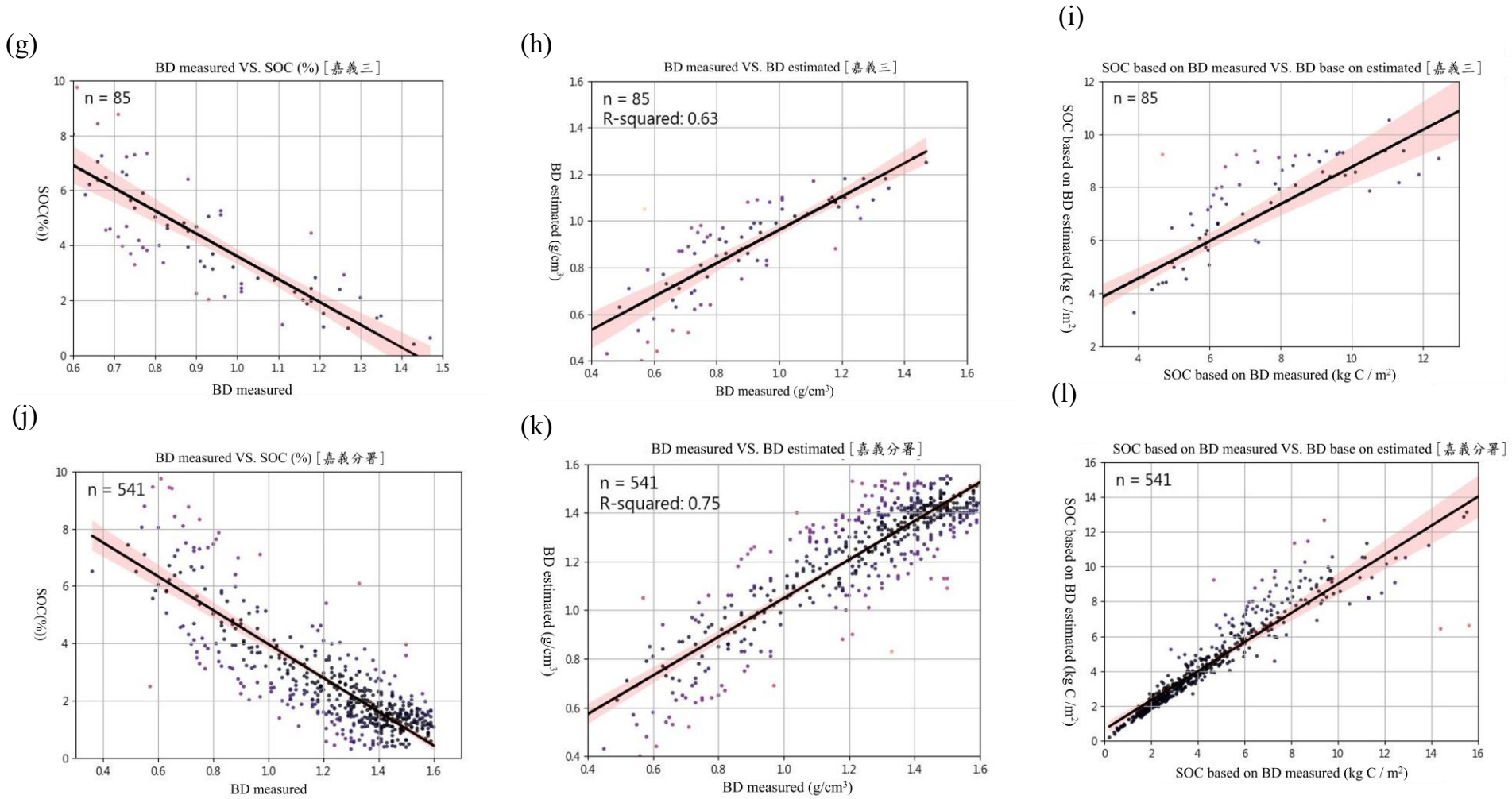


圖 3-3-5 嘉義分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（2/2）
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(g)- (i) 嘉義三土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)、(j)-(l) 嘉義分署土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)。

(2) 宜蘭分署

A. 宜蘭一（海拔 1,000 公尺以下）

宜蘭一分區於原資料中採樣剖面數為 61 筆，平均數為 1.00 g/cm^3，標準差為 0.27 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.02 g/cm^3，標準差為 0.39 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-6 左），解釋能力 R^2 為 0.34，斜率為 0.80。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 38 筆，平均數為 1.07 g/cm^3，標準差為 0.23 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.15 g/cm^3，標準差為 0.22 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-3-6 右），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 1.02。

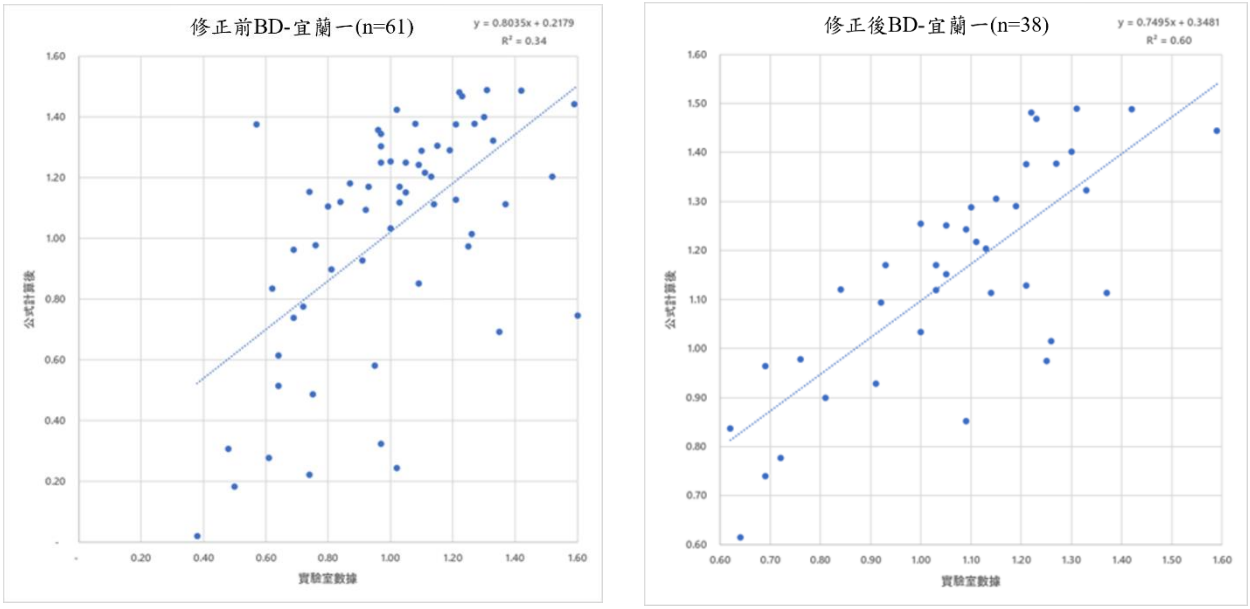


圖 3-3-6 宜蘭一分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立宜蘭一於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合得 (式 3-18)，並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-9(b)），得解釋能力 (R2=0.81)。

$$BD = -（0.015 \cdot Depth）-（0.16 \cdot TOC）+1.88 \qquad （式\ 3\text{-}18）$$

**Depth* :同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm
**TOC* : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

B. 宜蘭二（海拔 1,000 至 2,000 公尺）

宜蘭二分區於原資料中採樣剖面數為 50 筆，平均數為 0.97 g/cm³，標準差為 0.34 g/cm³。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.98 g/cm³，標準差為 0.34 g/cm³，並繪製出散布圖（圖 3-3-7 左），解釋能力 R^2 為 0.31，斜率為 0.55。為符合解釋能力過半標準 (R^2 大於 0.60)，自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 37 筆，平均數為 0.97 g/cm³，標準差為 0.32 g/cm³。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.07 g/cm³，標準差為 0.27 g/cm³，並繪製出散布圖（圖 3-3-7 右），解釋能力 R^2 為 0.61，斜率為 0.67。

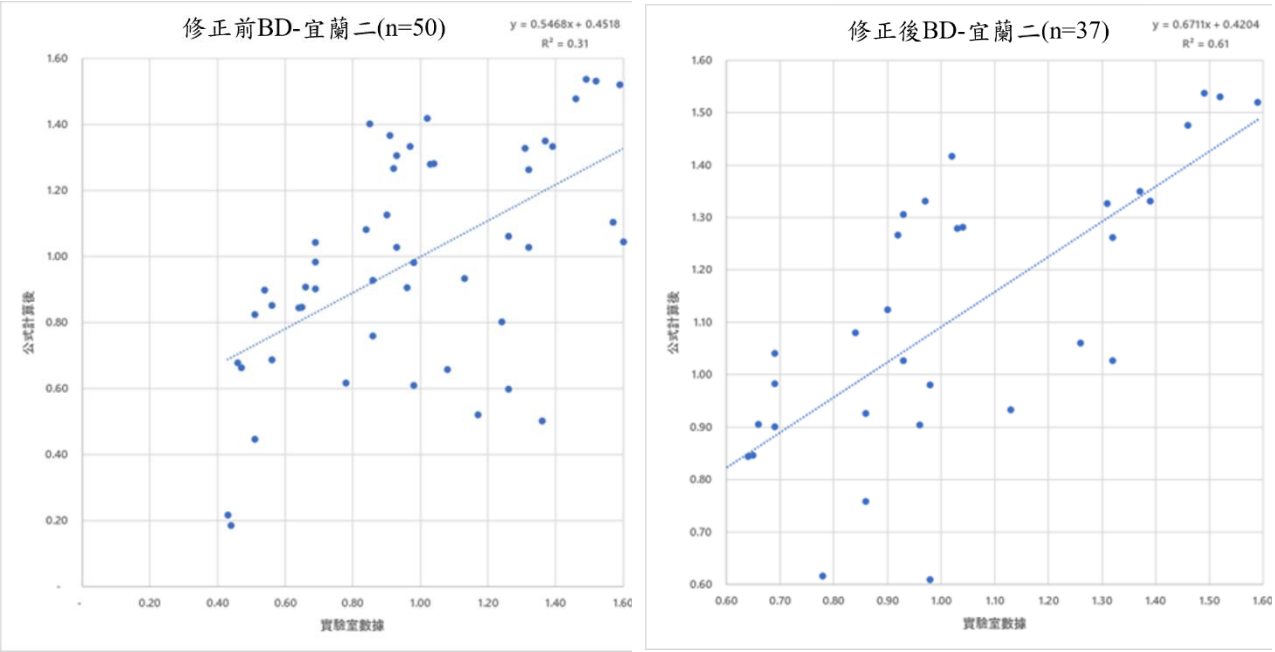


圖 3-3-7 宜蘭二分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立宜蘭二於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合得（式 3-19），並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-9(e)），得解釋能力 R^2 為 0.60。

$$BD = (7.13 \cdot 10^{-3} \cdot Depth) - (0.15 \cdot TOC) + 1.38 \qquad (式\ 3\text{-}19)$$

*_Depth_ :同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm
*_TOC_ : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

C. 宜蘭三（海拔 2,000 公尺以上）

宜蘭三分區於原資料中採樣剖面數為 26 筆，平均數為 0.96 g/cm³，標準差為 0.23 g/cm³。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.98 g/cm³，標準差為 0.35 g/cm³，並繪製出散布圖（圖 3-3-8 左），解釋能力 R^2為 0.31，斜率為 0.55。為符合解釋能力過半標準（R^2大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 19 筆，平均數為 0.90 g/cm³，標準差為 0.23 g/cm³。透過式 4-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.10 g/cm³，標準差為 0.26 g/cm³，並繪製出散布圖（圖 3-3-8 右），解釋能力 R^2為 0.86，斜率為 1.08。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.10 g/cm³，標準差為 0.26 g/cm³，並繪製出散布圖（圖 3-3-8 右），解釋能力 R^2為 0.86，斜率為 1.08。

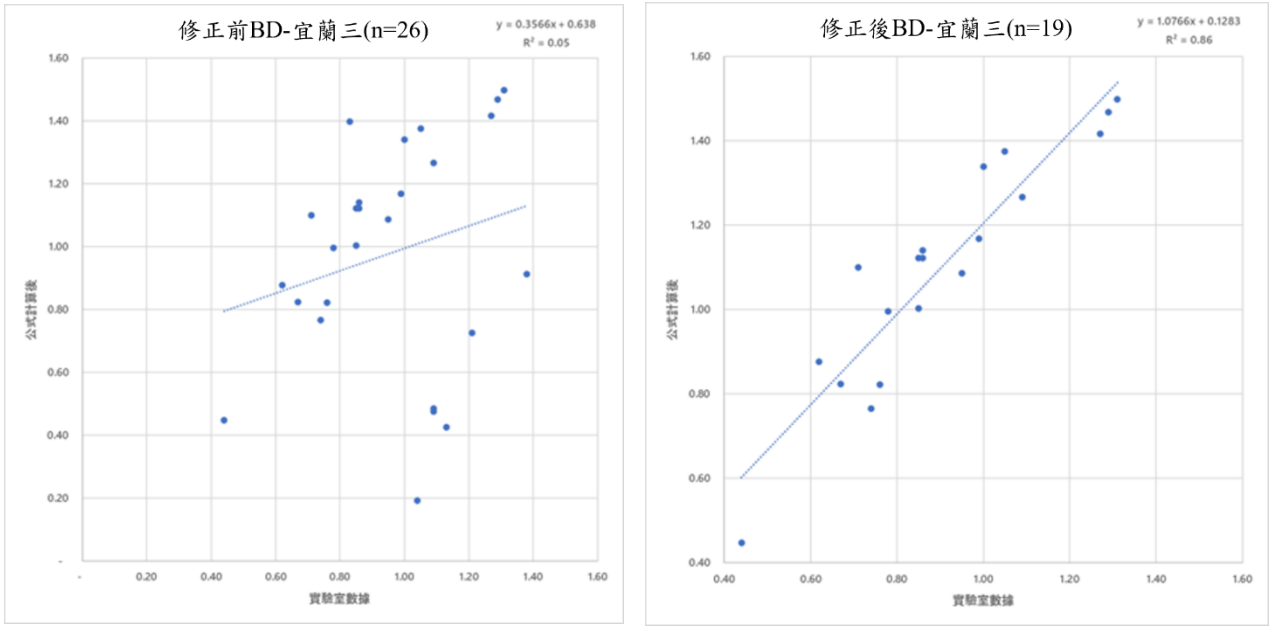


圖 3-3-8 宜蘭三分區修正前（左）、修正後（右）之散布圖

確立宜蘭三於修正後資料符合該分區之代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC) 及採樣土壤層厚度 (Thickness) 與實驗室 BD 數據進行線性擬合（式 3-20），並將實驗室 BD 數據與線性擬合回歸式推算 BD 建立散布圖（圖 3-3-9(h)），得解釋能力 R^2為 0.86。

$$BD = -\left(2.53 \cdot 10^{-3} \cdot Depth\right) - \left(0.14 \cdot TOC\right) + 1.44 \qquad \text{（式 3-20）}$$

*_Depth_ :同 Thickness，採樣土壤層厚度。單位為 cm
*_TOC_ : Total Organic Carbon，土壤總有機碳含量。以%表示

D. 宜蘭分署採樣總體密度及土壤有機碳儲存量變異性探討

宜蘭分署採樣數量相較於其他分署較少，僅共計 137 筆，在進行回歸線預測時，不確定性的增加較於嘉義分署大，在起初移除異常值後，透過式 3-14 推算總體密度，即有極高之相關性表示。在三類分區各自擬合線性回歸式並推估總體密度後，仍保有極高的相關性及解釋能力，斜率上也皆趨近於 1，因採樣數據少故仍有一些偏估。宜蘭一因樣本數少 (n=61) 且資料分布較為離散，使得總體密度於觀測值與推估值之間之回歸僅有 0.42 的解釋能力（圖 3-3-9 (b)），在原總體密度與推算總體密度計算之土壤有機碳儲存量之線性擬合中，解釋能力僅佔 0.15（圖 3-3-9 (c)），除了因數據量少且分布離散之外，而有出現低值及高值擴張之情形，數據點多集中在 X 軸的中段處且分布零散沒有收斂，進而對於回歸線預測之不確定性增加。宜蘭二因樣本數少 (n=50) 且資料分布較為離散，使得總體密度於觀測值與推估值之間之回歸僅有 0.31 的解釋能力（圖 3-3-9 (e)），在原總體密度與推算總體密度計算之土壤有機碳儲存量之線性擬合中，解釋能力僅佔 0.34（圖 3-3-9 (f)），除了因數據量少且分布離散之外，而有出現低值及高值擴張之情形，尤其高值擴張情形更大。在 X 軸的極端值處，數據點可能因數量稀少，進而對於回歸線預測之不確定性增加。宜蘭三因樣本數極少 (n=26)，且資料分布離散，使得解釋能力僅有 0.06（圖 3-3-9 (h)），在原總體密度與推算總體密度計算之土壤有機碳儲存量之線性擬合中，解釋能力僅佔 0.16（圖 3-3-9 (i)），除了因數據量過少且數據較發散外，而有明顯出現數值擴張之情形，尤其以高、低值較大，進而對於回歸線預測之不確定性增加。

於宜蘭分署整體數據上，僅有 137 個數據點且分布較分散，使得信賴區間的範圍擴大（圖 3-3-9 (k)），低值出現數據低估的情形，使低值有信賴區間擴散趨勢；高值因數量少且有少量數據出現嚴重高估，使得高值的信賴區間擴散趨勢較大（圖 3-3-9 (l)）。總體而言，當數據點較少時，任何新增加的數據點都可能對回歸線的斜率和位置產生較大影響，從而增加信賴區間的範圍，即使如此，整體之解釋能力仍具有一定的代表性（R^2為 0.32）。

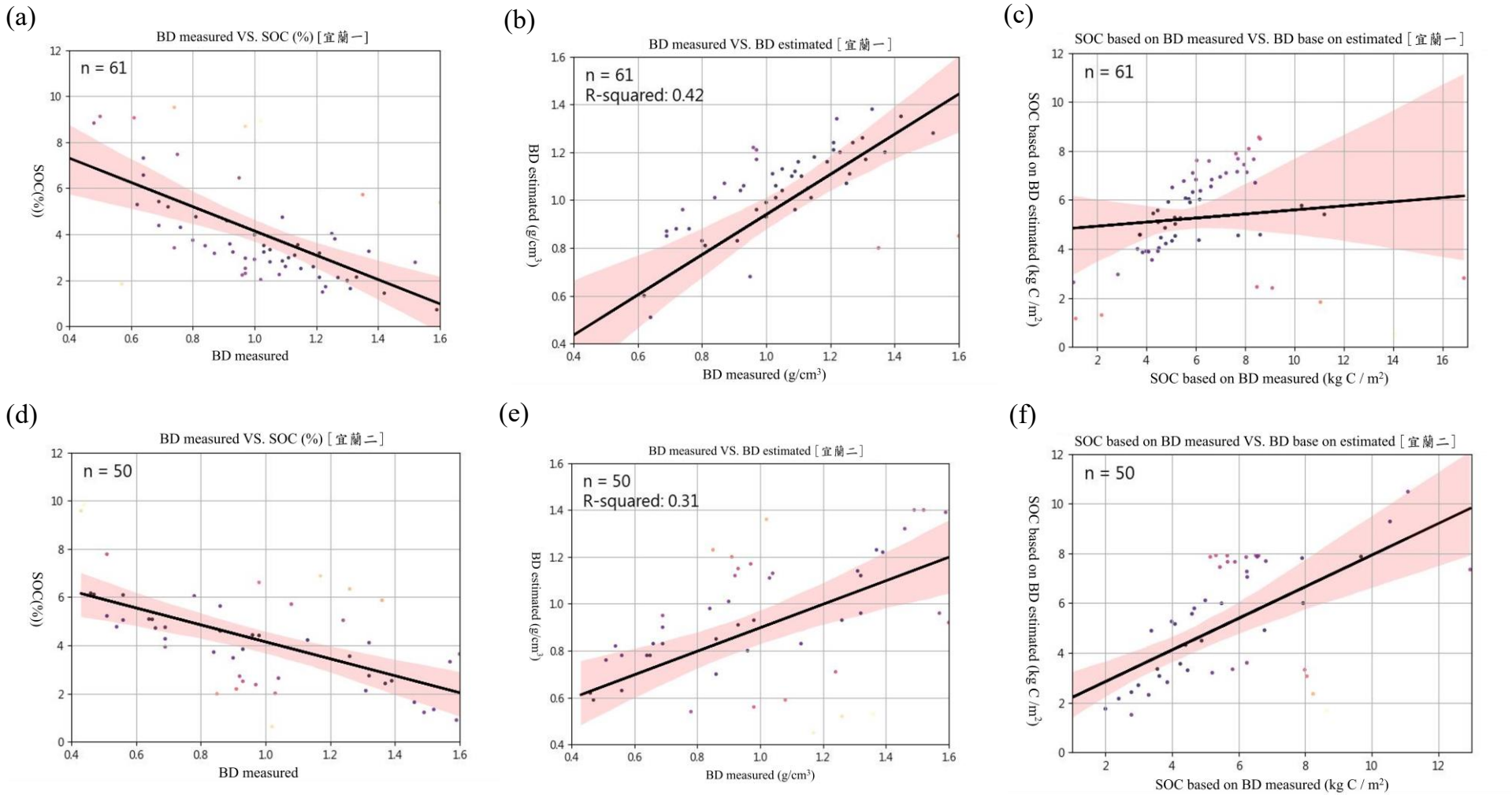


圖 3-3-9 宜蘭分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（1/2）
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)- (c) 宜蘭一土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)、(d)-(f) 宜蘭二土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)

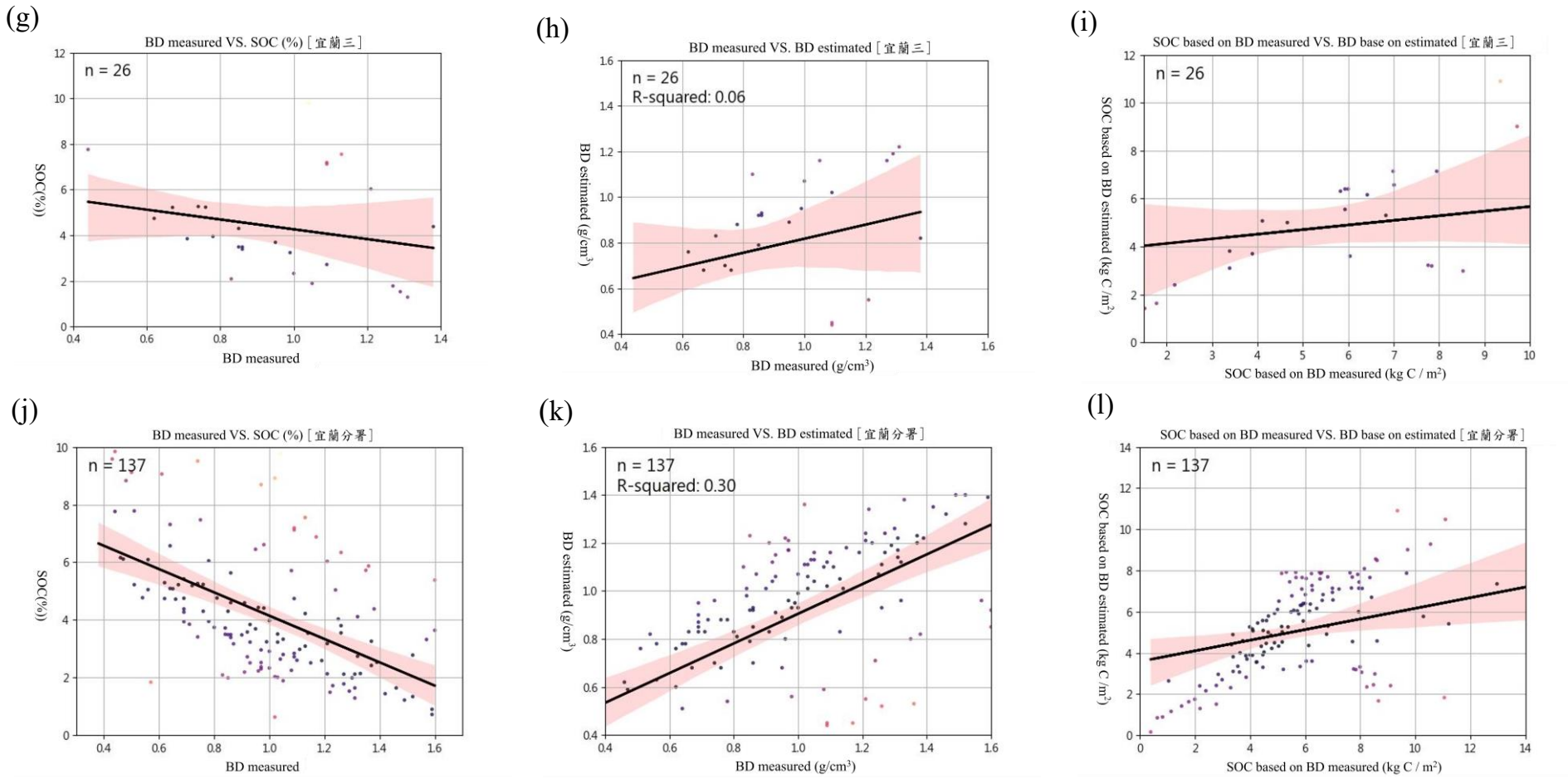


圖 3-3-9 宜蘭分署分區之量測及推估總體密度、有機碳含量及碳儲存量之變異性（2/2）
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(g)- (i) 宜蘭三土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)、(j)-(l) 宜蘭分署土壤樣本為總體密度觀測值(BD measured)，分別與有機碳含量(SOC%)、推估值(BD estimated)以及土壤總體密度觀測值(BD measured)推算土壤有機碳儲存量(SOC stock)與推估值(BD estimated)推算土壤有機碳儲存量之散佈圖(95%信賴區間為兩側粉紅區域)

(二) 利用地理統計技術 (Geostatistics) 與數位化土壤繪圖技術 (Digital soil mapping)，繪製臺灣山區森林土壤碳匯分布初步地圖

● **工作推動說明**

總體密度完成推算後，即可套用式 3-13 推得土壤有機碳儲存量 (SOC stock)。但由於目標土壤厚度有四層，分別為 0 至 30 公分、0 至 50 公分、0 至 100 公分、0 至 150 公分（以下簡稱「四土層」），與土壤採樣厚度不一，因此需要進行推算以取得四種厚度之土壤有機碳儲存量，推算方式以「比例」推算之 (Kaur *et al.*, 2002; Mohammed *et al.*, 2023)。此處假設欲得土層各深度之土壤有機碳儲存量為等值，以簡易推算四土層之有機碳儲存量。欲計算 0 至 30 公分，則將 0 至 10 公分土壤有機碳儲存量 5 kg C/m² (50 ton C/ha) 加上 10 至 20 公分土壤有機碳儲存量 2 kg C/m² (20 ton C/ha) 後，再將 20 至 50 公分土壤有機碳儲存量 1.5 kg C/m² (15 ton C/ha) 除以 3（即該土層厚度中，每 10 公分之土壤碳匯量為 5 ton C/ha）後，與前土壤有機碳儲存量相加，得 0 至 30 公分之土壤有機碳儲存量為 7.5 kg C/m² (75 ton C/ha)。依照上述方法，即可簡易推算四土層之土壤有機碳儲存量。

此處僅以簡單數學計算嘉義及宜蘭分署範圍內，四種不同深度之土壤有機碳儲存量，以利後續與利用地理統計技術及數位土壤繪圖技術，所產製之兩分署森林土壤有機碳儲存量基線圖（詳見工項 5-2）進行比較。

● **執行成果**

藉由上述流程篩選出嘉義及宜蘭分署之採樣剖面，提供後續分析中使用，並詳述兩分署之剖面分布及相關敘述統計。

1. 嘉義分署之土壤有機碳儲存量

經由先前數據之篩選後，最終使用之採樣剖面共計 711 處，並主要分布在嘉義分署 1,000 公尺以下之山區。海拔 1,000 以下之嘉義分署範圍內之山區，以橘色呈現（圖 4-3-10）；海拔 1,000 至 2,000 公尺以藍色呈現；海拔 2,000 以上則以粉紅色呈現。剖面則以取得方式作區分，「既有」為農試所提供之數據庫中，即有 BD 數值；「推算」則透過上述方式進行運算得知。最終取用之採樣剖面中，多數分布在嘉義分署 1,000 公尺以下之山區，共有 499 筆（佔嘉義分署總採樣個數近七成以上），範圍內包含梅嶺、木瓜坑、豐山、茅山、竹坑溪等地，毗鄰曾文水庫及南化水庫；再者為 1,000 至 2,000 公尺之山區，共計 112 處（佔嘉義分署總採樣個數 16%），範圍內包含九龍山、蕃薯

寮、十字路、奮起湖、石棹、二萬坪等；以及海拔 2,000 公尺以上之山區，採樣剖面數共計 100 筆，並主要分布在玉山、阿里山、天池、荖濃溪上游、雲峰、南鞍、大塔山、眠月，毗鄰嘉明湖、向陽山、關山、秀姑巒山、鹿林山等。

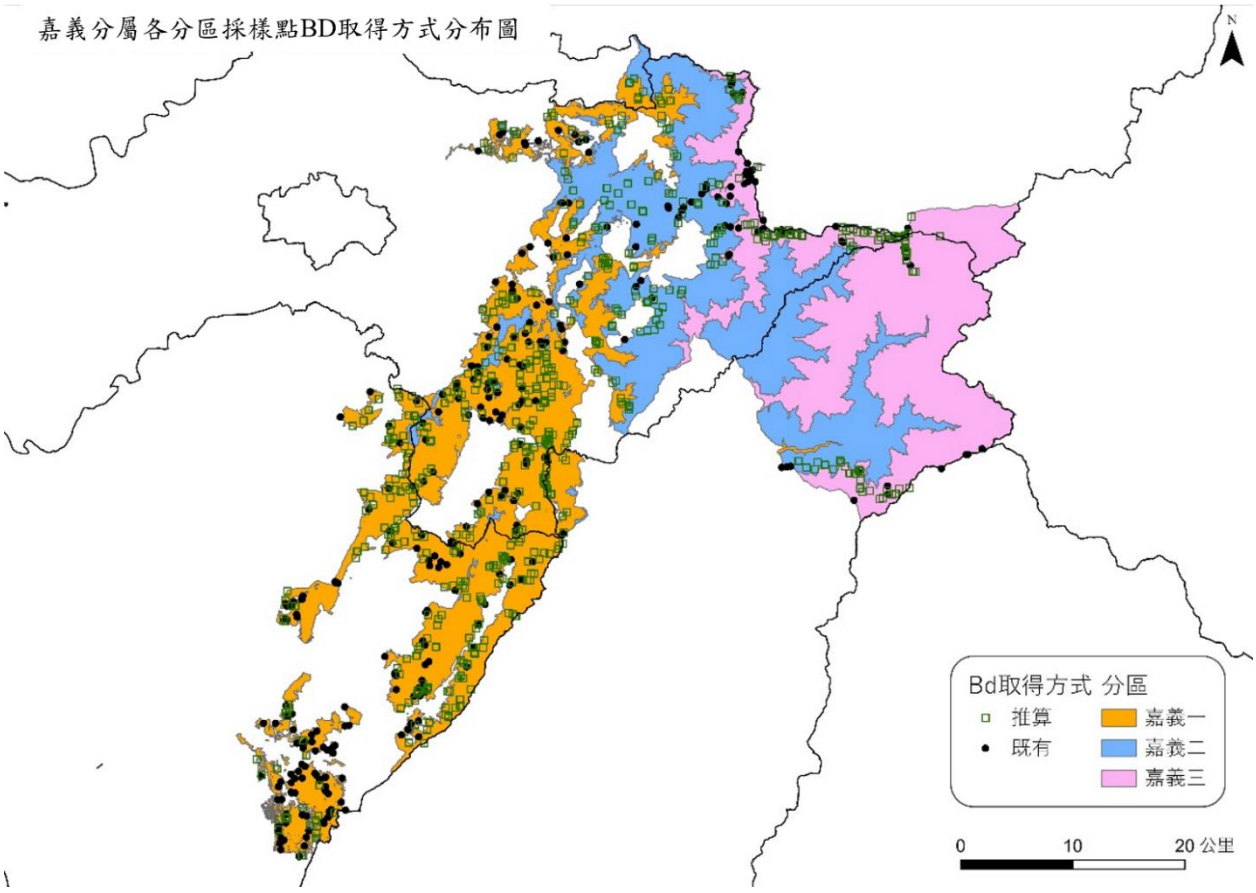


圖 3-3-10 嘉義分署各分區採樣剖面 BD 取得方式示意圖

嘉義一 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 499 處（表 3-3-3），土壤有機碳儲存量為 7.13±2.55 kg C/m² (71.3±25.5 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 481 處，土壤有機碳儲存量為 11.2±4.03 kg C/m² (112±40.3 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 99 處，土壤有機碳儲存量為 15.3±6.85 kg C/m² (153±68.5 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 80 處，土壤有機碳儲存量為 22.8±9.03 kg C/m² (228±90.3 ton C/ha)。嘉義二 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 112 處，土壤有機碳儲存量為 10.1±3.77 kg C/m² (101±37.7 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 111 處，土壤有機碳儲存量為 15.8±5.31 kg C/m² (158±53.1 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 58 處，土壤有機碳儲存量為 23.1±7.09 kg C/m² (231±70.9 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 26 處，土壤有機碳儲存量為 31.2±11.8 kg C/m² (312±118 ton C/ha)。嘉義三 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 100 處，土壤有機碳儲存量為 8.29±4.16 kg C/m²

(82.9±41.6 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 97 處，土壤有機碳儲存量為 14.3±5.34 kg C/m² (143±53.4 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 90 處，土壤有機碳儲存量為 18.3±6.40 kg C/m² (183±64.0 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 14 處，土壤有機碳儲存量為 23.8±10.2 kg C/m² (238±102 ton C/ha)。

嘉義分署整體範圍內，0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 711 處，土壤有機碳儲存量為 7.75±3.22 kg C/m² (77.5±32.2 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 689 處，土壤有機碳儲存量為 11.2±4.03 kg C/m² (112±40.3 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 248 處，土壤有機碳儲存量為 15.4±6.85 kg C/m² (154±68.5 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 120 處，土壤有機碳儲存量為 22.9±8.96 kg C/m² (229±89.6 ton C/ha)。

表 3-3-3 嘉義分署各分區原數據之土壤有機碳儲存量敘述統計表

	土壤深度	土壤採樣剖面	土壤有機碳儲存量(kg C/m²)			
分區	公分	個數	平均數 ± 標準差	CV%*	中位數	全距
嘉義一（海拔≦1,000 m）	0 - 30	499	7.13 ± 2.55	35.8	7.06	0.46 - 14.2
	0 - 50	481	11.2 ± 4.03	35.9	11.1	1.37 - 23.7
	0 - 100	99	15.3 ± 6.85	44.9	14.2	3.31 - 34.2
	0 - 150	80	22.8 ± 9.03	39.7	22.7	7.30 - 41.8
嘉義二（海拔 1,000 至 2,000 m）	0 - 30	112	10.1 ± 3.77	37.2	10.2	1.83 - 25.5
	0 - 50	111	15.8 ± 5.31	33.6	15.5	2.70 - 33.1
	0 - 100	58	23.1 ± 7.09	30.6	23.4	3.94 - 42.8
	0 - 150	26	31.2 ± 11.8	37.9	29.3	5.07 - 61.3
嘉義三（海拔≧2,000 m）	0 - 30	100	8.29 ± 4.16	50.2	8.06	1.53 - 20.3
	0 - 50	97	14.3 ± 5.34	37.3	13.9	3.49 - 29.5
	0 - 100	90	18.3 ± 6.40	35.0	17.9	5.26 - 34.0
	0 - 150	14	23.8 ± 10.2	43.0	21.1	9.10 - 47.0
嘉義分署	0 - 30	711	7.75 ± 3.22	41.6	7.40	0.46 - 25.5
	0 - 50	689	11.2 ± 4.03	35.9	11.1	1.37 - 24.0
	0 - 100	248	15.4 ± 6.85	44.5	14.2	3.31 - 34.2
	0 - 150	120	22.9 ± 8.96	39.1	22.8	7.30 - 41.8

*不確定性：Coefficient of varition (%), CV%

2. 宜蘭分署之土壤有機碳儲存量

由於宜蘭分署之採樣資料筆數未及嘉義分署，因此在變異程度上相較於嘉義分署更為不穩定，甚至在海拔 2,000 公尺以上（宜蘭三）之範圍內，僅有一處具有 0 至 150 公分土深的剖面資料。宜蘭分署境內之農試所採樣剖面數量共有 137 處，依海拔高度分成宜蘭一、宜蘭二以及宜蘭三（圖 3-3-11），其中，海拔 1,000 公尺以下之採樣剖面數共有 64 處（佔宜蘭分署總採樣剖面數近五成），範圍內包含烏岩角、新寮瀑布、太平山、觀音、澳花山、烏石鼻、赤鹿坑、松羅國家步道等地；再者為 1,000 至 2,000 公尺之山區，共計 54 處（佔宜蘭分署總採樣個數 39%），範圍內包含棲蘭山、蘭坎山、翠峰湖、南澳、清花山、明池、旗山等地；以及海拔 2,000 公尺以上之山區，採樣剖面數共計 19 筆，主要分布於加羅湖、馬比杉山、塚呂馬布山、松風嶺等。

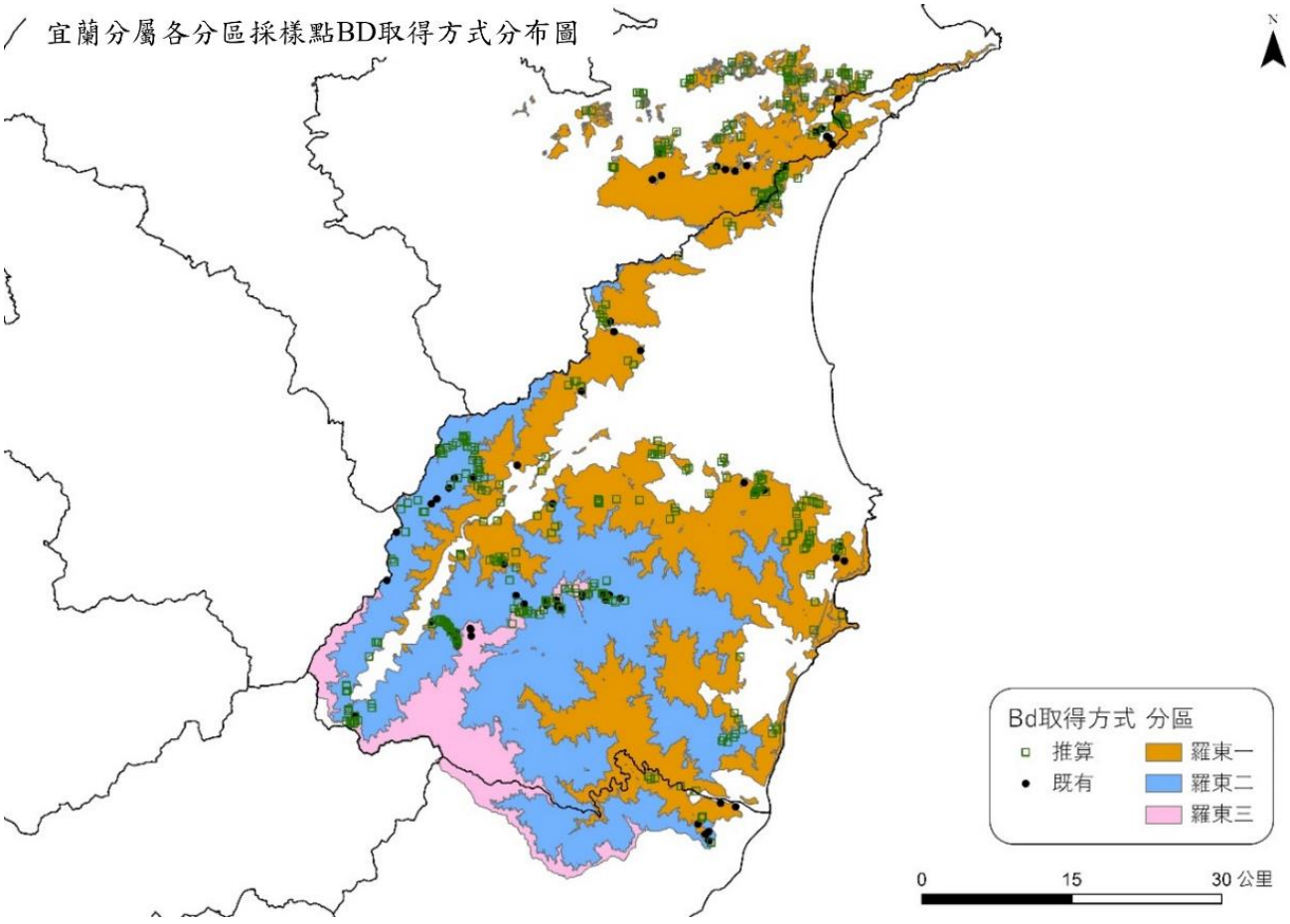


圖 3-3-11 宜蘭分署各分區採樣剖面 BD 取得方式示意圖

宜蘭一 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 64 處（表 3-3-4），土壤有機碳儲存量為 9.25±3.28 kg C/m² (92.5±32.8 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 64 處，土壤有機碳儲存量為 14.2±4.57 kg C/m² (142±45.7 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 37 處，土壤有機碳儲存量為 17.1±6.85 kg C/m² (171±68.5 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 5 處，土壤有機碳儲存量為 17.0±6.85 kg C/m² (170±68.5 ton C/ha)。宜蘭二 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 54 處，土壤有機碳儲存量為 7.75±3.10 kg C/m² (775±31.0 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 54 處，土壤有機碳儲存量為 13.7±4.45 kg C/m² (137±44.5 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 36 處，土壤有機碳儲存量為 16.5±5.33 kg C/m² (165±53.3 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 7 處，土壤有機碳儲存量為 16.2±8.89 kg C/m² (162±88.9 ton C/ha)。宜蘭三 0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 19 處，土壤有機碳儲存量為 9.62±4.97 kg C/m² (96.2±49.7 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 19 處，土壤有機碳儲存量為 15.0±6.73 kg C/m² (150±67.3 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 8 處，土壤有機碳儲存量為 17.3±7.83 kg C/m² (173±78.3 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 1 處，土壤有機碳儲存量之值為 26.2 kg C/m² (262 ton C/ha)。

宜蘭分署整體範圍內，0 至 30 公分之土壤採樣剖面數為 137 處，土壤碳儲存為 8.71±3.59 kg C/m² (87.1±35.9 ton C/ha)；0 至 50 公分之土壤採樣剖面數為 137 處，土壤有機碳儲存量為 14.1±4.90 kg C/m² (141±49.0 ton C/ha)；0 至 100 公分之土壤採樣剖面數為 81 處，土壤有機碳儲存量為 16.9±6.34 kg C/m² (169±63.4 ton C/ha)；0 至 150 公分之土壤採樣剖面數為 13 處，土壤有機碳儲存量為 17.3±9.84 kg C/m² (173±98.4 ton C/ha)。

表 3-3-4 宜蘭分署各分區原數據之土壤有碳儲存量敘述統計表

	土壤深度	土壤採樣剖面	土壤有機碳儲存量(kg C / m^2)			
分區	公分	個數	平均數 ± 標準差	CV%*	中位數	全距
宜蘭一	0 - 30	64	9.25 ± 3.28	35.5	9.77	1.32 - 20.4
	0 - 50	64	14.2 ± 4.57	32.1	14.5	4.48 - 27.4
	0 - 100	37	17.1 ± 6.85	40.0	17.9	7.03 - 34.0
	0 - 150	5	17.0 ± 11.1	65.4	12.5	7.40 - 37.5
宜蘭二	0 - 30	54	7.75 ± 3.10	40.0	7.68	0.76 - 12.8
	0 - 50	54	13.7 ± 4.45	32.5	14.7	1.81 - 20.4
	0 - 100	36	16.5 ± 5.33	32.3	17.7	5.17 - 27.6
	0 - 150	7	16.2 ± 8.89	55.0	12.0	6.24 - 33.5
宜蘭三	0 - 30	19	9.62 ± 4.97	51.7	8.72	3.51 - 23.3
	0 - 50	19	15.0 ± 6.73	45.1	13.7	6.04 - 35.8
	0 - 100	8	17.3 ± 7.83	45.3	17.7	6.18 - 33.2
	0 - 150	1	26.2	-	26.2	-
宜蘭分署	0 - 30	137	8.71 ± 3.59	41.2	9.16	0.76 - 23.3
	0 - 50	137	14.1 ± 4.90	34.7	14.4	1.81 - 35.8
	0 - 100	81	16.9 ± 6.34	37.6	17.8	5.17 - 34.0
	0 - 150	13	17.3 ± 9.84	57.0	12.5	6.24 - 37.5

*不確定性：Coefficient of varition (%), CV%

(三) 比較森林土壤碳匯與不同地形單元、生態系統與土壤類別的相關性

- **工作推動說明**

森林土壤碳儲存的變化與植被分布、生態系統生產力、分解速率和局部擾動狀況密切相關，由於高海拔和低海拔生態系的生態系過程和相關的碳儲存有所不同，因此將高海拔和低海拔地區的數據納入碳儲存量的估計中非常重要 (Prichard *et al*.,2000)。土壤質地和生物量的碳儲存之間存在指數關係，而生物量的碳儲存也與土壤儲存量有關 (Banfield *et al*., 2002)。

生物量、森林地面和礦質土壤的有機碳含量是氣候、演替、植被類型、土壤濕度、溫度、養分及土壤質地之間相互作用的結果。這些交互作用控制著生產和分解的主要過程，進而調節淨生態系的碳動態 (Peng *et al*., 1998)。

本計畫討論不同地形單元、生態系統以及土壤類別等環境重要因子，對於臺灣整體森林土壤碳匯之相關影響，其中生態系統將以臺灣林型的分布為依據，進而分析土壤有機碳儲存量的變化，並可間接比較天然林與人工林之土壤有機碳儲存量差異。第二期報告中土壤類別先以土綱作為影響因子，並繪製出臺灣土壤分類之土綱分布圖，第三期報告已重新整理環境因子作為自變數，包含三種粒徑分析（黏粒、坋粒、砂粒之土壤樣本佔比）、酸鹼值等，作為計畫未來比較土壤有機碳儲存量變化的重要因子。

臺灣本島位於中國大陸之東南緣，是一大陸島，因受到地殼板塊活動，島內地形複雜、高山林立，氣候多變，植物種類多元豐富。自 1854 年起，臺灣即開始執行生物多樣性的調查，包含基因多樣性、物種多樣性與生態系統多樣性，歷經近 170 多年之研究，調查成果豐碩，並陸續出版「臺灣植物目錄，A List of Plants from Formosa」、「臺灣植物圖譜」、「Flora of Taiwan 臺灣植物誌」第一版及第二版。

在生物系統多樣性方面，自 19 世紀以來缺乏有系統的調查，且早年較大規模的研究與森林資源調查多半基於林木生產的觀點，並未考量植群生態的觀點，因此也欠缺物種組成、結構及分布等相關資料，於 1995 年開始即著手調查植物多樣性與植群圖，作為自然環境監測、國土規劃、學術研究、自然保育及資源的永續經營之用。

● 執行成果

1. 不同地形單元影響森林土壤碳儲存

不同地形單元是影響土壤有機碳儲存量的重要因素之一，透過改變微氣候條件、植被類型和水分動態，進而影響土壤碳儲量，例如坡度較大、排水良好的山地，因降水充沛且溫度較低，有機質分解速度減慢，從而增加土壤有機碳的累積(Smith *et al*., 2015)；相反地，平原地區由於地勢平坦以及較高的溫度，導致有機質分解速度加快，土壤有機碳儲存量相對較低。

從森林生態系統來看多屬於高度複雜的環境，包含隨著不同高度的土壤變化、氣候與氣溫與植被種類，通常土壤有機碳儲存量在副熱帶氣候環境下，其空間分布與化學組成研究相對少，且控制因子也不清楚，以中國廬山案例來看，不同高度伴隨著不同土壤有機碳儲存量，高度越高所測得的土壤有機碳儲存較高，如圖3-3-12，變異性來自於平均年雨量、平均年溫、枯枝落葉層的碳/氮比例，土壤有機碳儲存量與平均年雨量呈現正相關，而與平均年溫與枯枝落葉層的碳/氮比例呈現負相關，透過此科學研究可知土壤碳動態平衡，並可知在全球暖化情況之下所帶來的森林生態系之預測改變 (Du *et al*., 2014)。

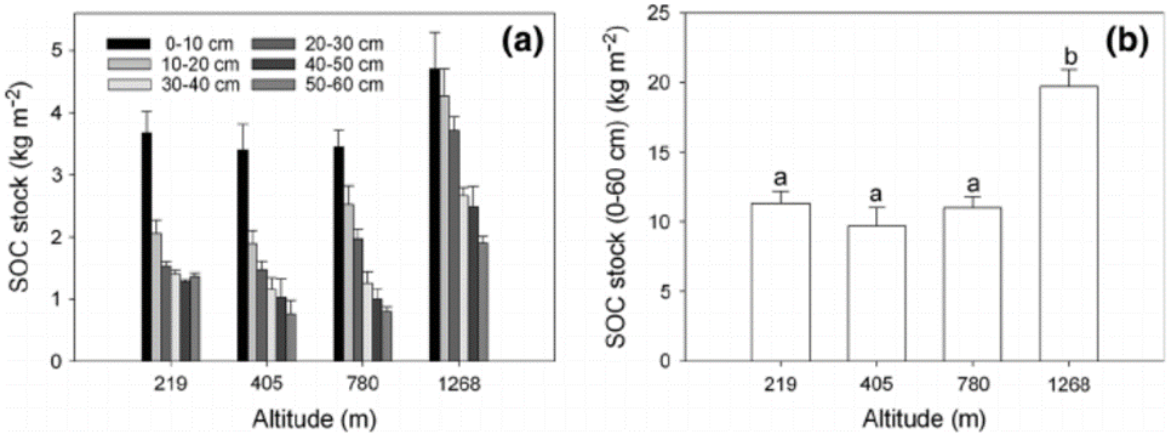


圖 3-3-12 土壤有機碳儲存量與海拔間的關係
（參考來源：Du *et al*., 2014）

本計畫應用蒐整之資料庫，將海拔以 1,000 公尺為單位，劃分成 0-1,000 公尺（低海拔）、1,000-2,000 公尺（中低海拔）、2,000-3,000 公尺（中高海拔）以及 3,000 公尺以上（高海拔），探討臺灣森林土壤 0-30 及 0-50 公分有機碳儲存量與海拔之間的關係。

(1) 土壤深度 0-30 公分土壤有機碳儲存量

各海拔之土壤有機碳儲存量資料如表 3-3-5。0-1,000 公尺之樣本數為 3,100 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 70.7 ton C/ha，標準差為 49.0 ton C/ha，變異係數 69.2%；1,000-2,000 公尺之樣本數為 1,426 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 113 ton C/ha，標準差為 99.7 ton C/ha，變異係數 88.4%；2,000-3,000 公尺之樣本數為 537 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 132 ton C/ha，標準差為 123 ton C/ha，變異係數 92.7%；3,000 公尺以上之樣本數為 106 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 99.3 ton C/ha，標準差為 64.4 ton C/ha，變異係數 64.9%。這些結果表明，海拔是影響土壤有機碳儲存量的一個重要因素。隨著海拔的增加，土壤有機碳儲存量先增加後減少，海拔 2,000-3,000 公尺區間的土壤有機碳儲存量最高，這可能與此區間的植被類型、氣候條件及土壤特性有關。此外，每個海拔區間的土壤有機碳儲存量都有較大的離散性，變異係數都超過 60%，此表明即使在同一個海拔區間內，不同採樣剖面的土壤有機碳儲存量存在較大差異，並使平均值的代表性降低。各採樣剖面土壤有機碳儲存量離散程度較高亦出現在採樣範圍分布較大的研究中 (Fitts, *et al*., 2021; Gray, *et al*., 2015; Jarmain *et al*., 2023) 為了處理離散程度高的數據並減少誤差，未來可增加樣本數、分層抽樣、數據轉換（如對數轉換、平方根轉換）、使用統計模型（線性回歸）、檢查和清理數據（仔細檢查數據中是否存在異常值或錯誤數據）、重複測量（在同一樣本點進行多次測量，減少隨機誤差）、進行敏感性分析（以了解不同變數對結果的影響，可進行針對性的控制）。

表 3-3-5 推估全臺林業分署各海拔 0-30 公分土壤之有機碳儲存量

海拔	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
公尺	個數	平均數 ± 標準差	變異係數(%)
0-1,000	3,100	70.7 ± 49.0	69.2
1,000-2,000	1,426	113 ± 99.7	88.4
2,000-3,000	537	132 ± 123	92.7
3,000 以上	106	99.3 ± 64.4	64.9

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(2) 土壤深度 0-50 公分之有機碳儲存量

各拔海拔之土壤有機碳儲存量資料如表 3-3-6。0-1,000 公尺之樣本數為 3,100 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 81.2 ton C/ha，標準差為 70.8 ton C/ha；變異係數 87.1%，1,000-2,000 公尺之樣本數為 1,426 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 137 ton C/ha，標準差為 132 ton C/ha；變異係數 95.9%，2,000-3,000 公尺之樣本數為 537 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 161 ton C/ha，標準差為 150 ton C/ha；變異係數 93.2%，3,000 公尺以上之樣本數為 106 筆，土壤有機碳儲存量之平均值為 124 ton C/ha，標準差為 92.4 ton C/ha；變異係數 74.8%。

表 3-3-6 推估全臺林業分署各海拔 0-50 公分土壤有機碳儲存量

海拔	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
公尺	個數	平均數 ± 標準差	變異係數(%)
≦1,000	3,100	81.2 ± 70.8	87.1
1,000 至 2,000	1,426	137 ± 132	95.9
2,000 至 3,000	537	161 ± 150	93.2
3,000 以上	106	124 ± 92.4	74.8

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

盒鬚圖為用來顯示數據分布情況的圖型，通常包括箱體（表示數據的四分位數範圍，箱體的底部是第一四分位數 (Q1)，頂部是第三四分位數 (Q3)）、中位數線（箱體內部的水平線表示數據的中位數 (Q2)）、鬍鬚（從箱體延伸出的線條，顯示數據的範圍，通常延伸到最小值和最大值（不包含離散值）、離散值（在盒鬚圖中，異常值通常以點的形式顯示，表示超出正常範圍的數據點）。0-30 公分與 0-50 公分的土壤有機碳儲存量皆隨著海拔的增加而逐漸增多，並在海拔 2,000-3,000 公尺的區間達到高峰，而在海拔 3,000 公尺以上的地區略微下降，如圖 3-3-13、圖 3-3-14。低海拔地區土壤有機碳儲存量較低，因氣溫較高、有機物分解速率較快，導致土壤中的碳累積相對較少；中高海拔地區土壤有機碳儲存量最高，因氣溫較低、有機物分解速率較慢，有助於土壤中有機碳的累積；而高海拔地區土壤有機碳儲存量略降低，可能與高海拔地區的極端環境條件如低溫、低氧等有關，條件限制植物的生長和碳的儲存，導致土壤有機碳儲存量的減少 (Yin *et al.*, 2022)。

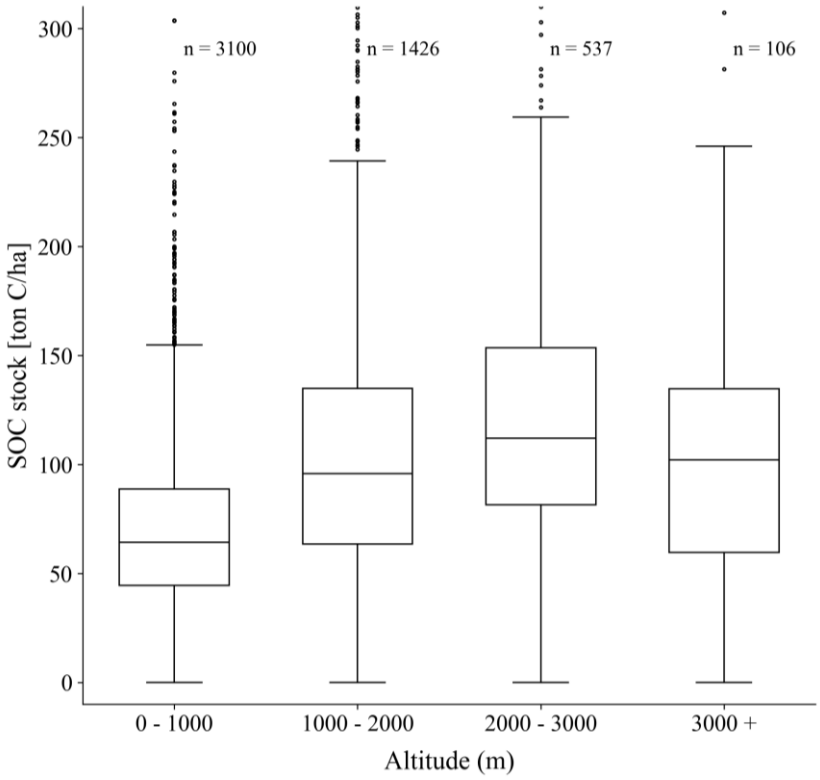


圖 3-3-13 全臺林業分署不同海拔 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

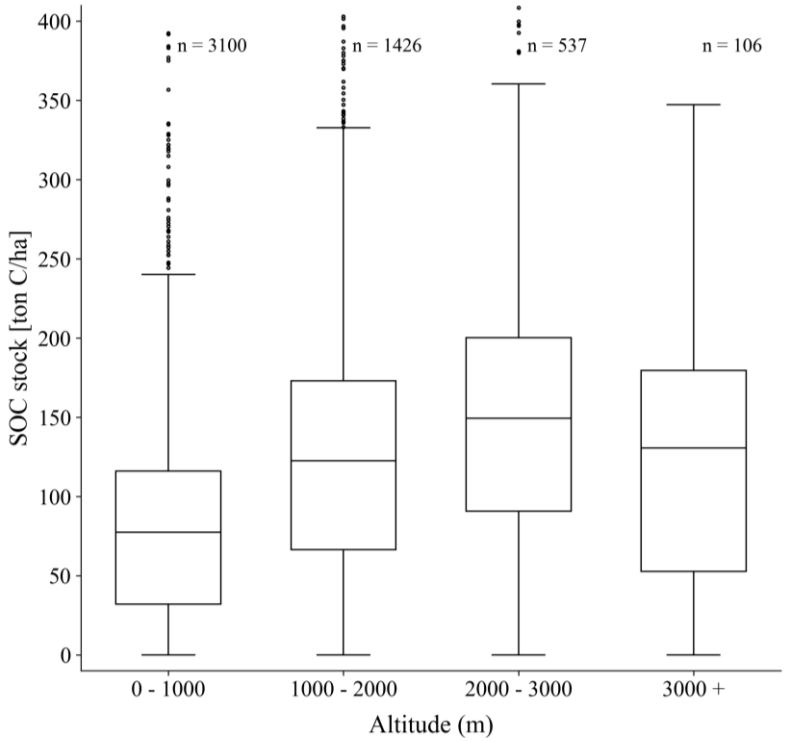


圖 3-3-14 全臺林業分署不同海拔 0-50 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

2. 不同生態系統影響森林土壤碳儲存

針葉林、闊葉林和針闊葉混淆林為常見的三種森林生態系統，其土壤有機碳儲存量存在顯著差異。本計畫應用蒐整之資料庫，並依照「中華民國國家溫室氣體排放清冊報告」中所歸納之林型做分類，分為天然針葉林、天然針闊葉混淆林、天然闊葉林、人工針葉林、人工針闊葉混淆林、人工闊葉林、木竹混淆林以及竹林共八類，探討臺灣森林土壤 0-30 及 0-50 公分有機碳儲存量與林型之間的關係。

(1) 土壤深度 0-30 公分之有機碳儲存量

依結果顯示，針葉林型土壤有機碳儲存量最高，134±194 ton C/ha；其次為天然針闊葉混淆林及人工針葉林，分別為 119±85.4 ton C/ha 和 120±84.8 ton C/ha；而最低為竹林及木竹混淆林，分別為 68.9±47.1 ton C/ha 與 63.6±39.7 ton C/ha（表 3-3-7）。不同林型的土壤有機碳儲存量有顯著差異，針葉林有較高的土壤有機碳儲存量，此結果與過去的研究相同 (Tsai *et al.*, 2009)。所有林型的變異係數均超過 50%，顯示這些數據的變異性較大，可能會影響平均值的代表性。特別是天然針葉林的變異係數高達 144%，顯示此林型各剖面的土壤有機碳儲存量差異非常大。高變異係數表明樣本間存在顯著的異質性，這可能與多種因素有關，未來可針對變異性較大的林型進行更多的取樣，以提高數據的準確性和代表性。

表 3-3-7 推估全臺林業分署各林型 0-30 公分土壤有機碳儲存量

林型	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
	個數	平均數±標準差	變異係數(%)
天然針葉林	143	134±194	144
天然針闊葉混淆林	104	119±85.4	72.0
天然闊葉林	1,687	98.7±94.9	96.2
人工針葉林	522	120±84.8	70.9
人工針闊葉混淆林	225	107±64.0	59.6
人工闊葉林	603	80.0±41.5	51.9
木竹混淆林	338	63.6±39.7	62.4
竹林	357	68.9±47.1	68.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(2) 土壤深度 0-50 公分之有機碳儲存量

依結果顯示，針葉林型土壤有機碳儲存量最高，約為 169±215 ton C/ha；其次為天然針闊葉混淆林，約為 147±127 ton C/ha；而最低為竹林及木竹混淆林，分別約為 88.6±68.8 ton C/ha 與 78.6±59.0 ton C/ha。

表 3-3-8 推估全臺林業分署各林型 0-50 公分土壤有機碳儲存量

林型	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
	個數	平均數±標準差	變異係數(%)
天然針葉林	143	169±215	127
天然針闊葉混淆林	104	147±127	86.5
天然闊葉林	1,687	115±124	108
人工針葉林	522	148±122	82.4
人工針闊葉混淆林	225	138±88.6	64.1
人工闊葉林	603	85.9±70.2	81.6
木竹混淆林	338	78.6±59.0	75.0
竹林	357	88.6±68.8	77.7

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

透過盒鬚圖結果得知（圖 3-3-15、圖 3-3-16），在 0-30 公分與 0-50 公分的土壤有機碳儲存量中，針葉林型為最高，因針葉林的生長環境氣溫較低，有機質分解速率低，有助於土壤中有機碳的累積 (Chiti *et al*., 2012)；其次為針闊葉混淆林型，雖地上生物量高但因生長環境氣溫較高多導致分解速快，使土壤有機碳含量相對較低 (Ameray *et al*., 2021)；土壤有機碳儲存量最低為竹林與木竹混淆林，原因可能為竹林根系較淺，葉子和枯枝的輸入量相對較少，導致竹林的土壤有機質累積量較低。此外，結果顯示天然林較人工林具有較高的土壤有機碳儲存量，研究表明，因天然林的生態系統結構和功能較為穩定，有利於碳的長期累積 (Liao *et al*., 2010)。

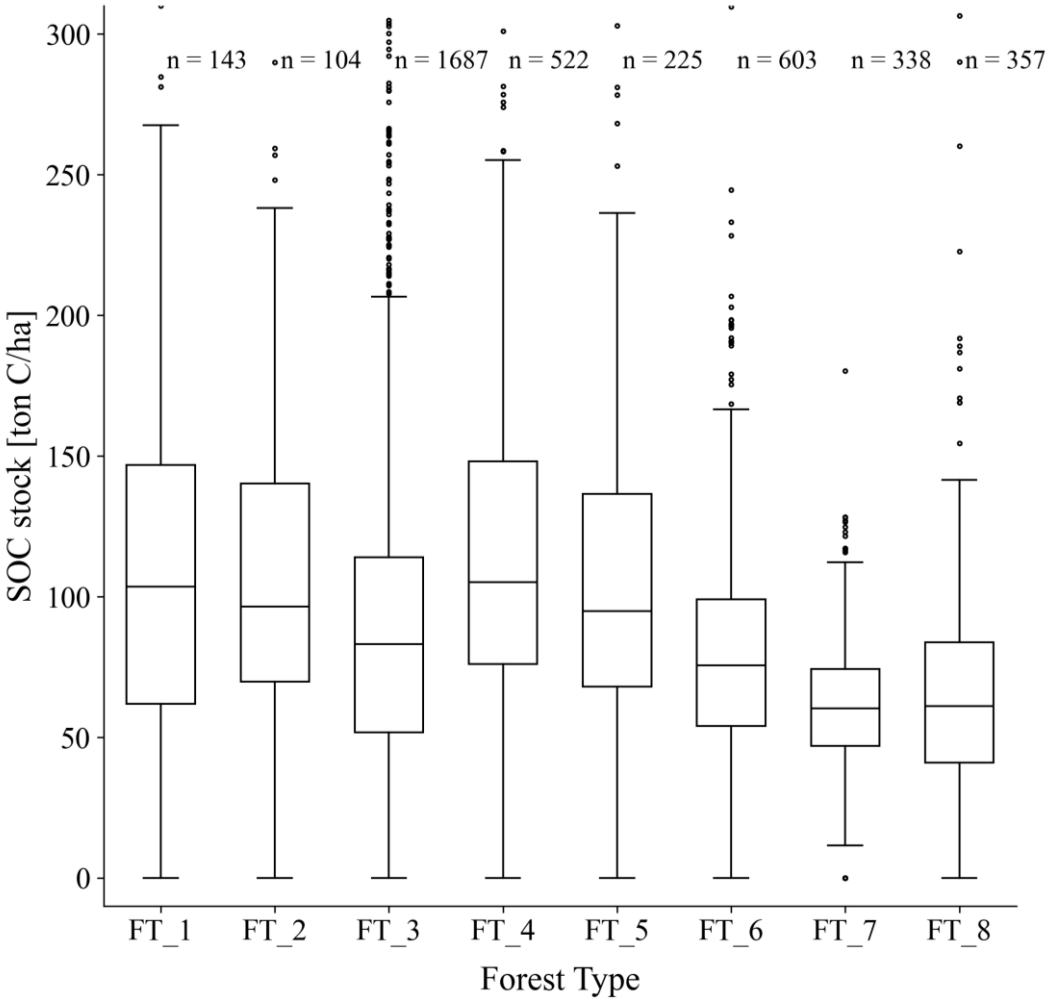


圖 3-3-15 全臺林業分署不同林型 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

（FT_1：天然針葉林；FT_2：天然針闊葉混淆林；FT_3：天然闊葉林；FT_4：人工針葉林；FT_5：人工針闊葉混淆林；FT_6：人工闊葉林；FT_7：木竹混淆林；FT_8：竹林）

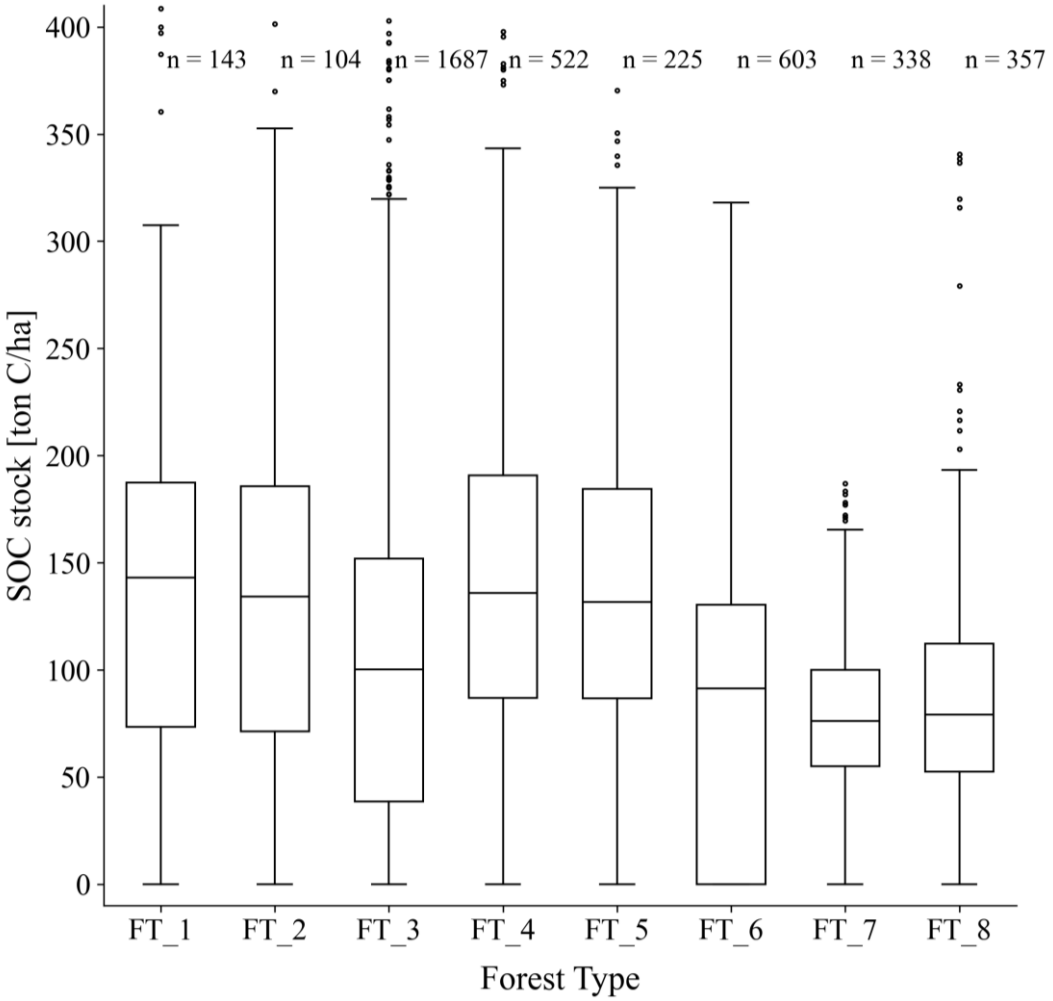


圖 3-3-16 全臺林業分署不同林型 0-50 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

（FT_1：天然針葉林；FT_2：天然針闊葉混淆林；FT_3：天然闊葉林；FT_4：人工針葉林；FT_5：人工針闊葉混淆林；FT_6：人工闊葉林；FT_7：木竹混淆林；FT_8：竹林）

3. 不同土壤類別影響森林土壤碳儲存

在土壤類別方面，土壤的物理化學性質對碳的固定和釋放能力具有決定性作用。壤土、砂土和黏土是三種主要的土壤類型。壤土因其適中的顆粒大小和良好的保水保肥能力，被認為是碳儲存量較高的土壤類型（Green *et al.*, 2018）。壤土中的有機質能夠在土壤微生物活動下逐漸分解和積累，形成穩定的土壤有機碳庫。黏土則因其顆粒細小、表面積大，具有較強的吸附能力，能夠有效固定有機碳（Huang *et al.*, 2020）。此外，黏土中豐富的礦物質和養分也有助於有機碳的長期穩定。然而，砂土的碳儲存量相對較低，這主要是因為砂土顆粒大，排水性強，養分容易流失，不利於有機碳的積累（Lal, 2004）。砂土中有機碳的分解速率較快，導致土壤碳儲存能力較弱。此外，土壤中石灰質的含量也會影響碳儲存能力，高石灰質土壤通常具有較低的有機碳含量，這是因為石灰質能夠提高土壤的 pH 值，進而促進有機質的分解（Lal, 2004）。

本計畫以美國農部土壤分類系統 (Soil Toxonomy) 中最高級綱目之土綱 (soil order) 作為土壤類別依據，已知臺灣森林土壤主要以弱育土 (Inceptisols)、新成土 (Entisols)、淋溶土 (Alfisols) 和極育土 (Ultisol) 為大宗 (Tsai *et al.*, 2010)，因此，本計畫以這四種土綱探討土壤類別與森林土壤有機碳儲存量之關係。

(1) 土壤深度 0-30 公分之有機碳儲存量

依結果顯示，新成土的土壤有機碳儲存量最高，為 100±93.4 ton C/ha；其次為弱育土，為 90.0±74.6 ton C/ha；而極育土和淋溶土較低，分別為 73.0±53.2 ton C/ha 和 82.6±42.7 ton C/ha。不同土綱之變異係數介於 51.7%至 93.0%之間，顯示採樣數據之變異性相當大，可能會影響平均值之代表性。其中以新成土之變異係數最高達 93.0%，顯示此土綱各剖面之土壤有機碳儲存量差異較大。高變異係數表明樣本間存在顯著之異質性，這可能與多種環境因子有關。值得注意的是，淋溶土之樣本數僅有 18 個，相較於其他土綱之樣本數明顯偏低，這可能影響了其數據之代表性，未來可針對此土綱進行更多之取樣。

表 3-3-9 推估全臺林業分署各土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量

林型	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
	個數	平均數±標準差	變異係數(%)
淋溶土	18	82.6 ± 42.7	51.7
新成土	1791	100 ± 93.4	93
弱育土	1631	90.0 ± 74.6	83
極育土	1293	73.0 ± 53.2	72.9

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

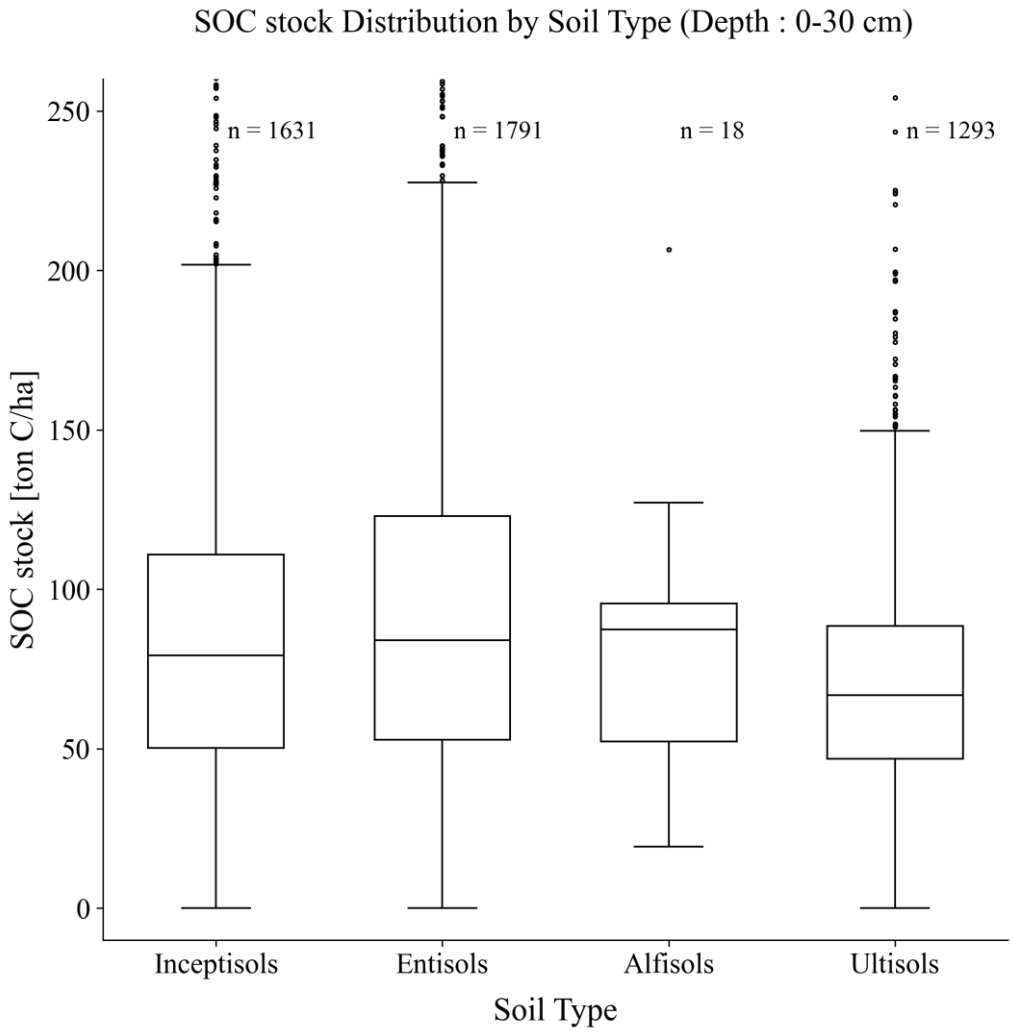


圖 3-3-17 全臺林業分署不同土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

（Inceptisols：弱育土；Entisols：新成土；Alfisols：淋溶土；Ultisols：極育土）

(2) 土壤深度 0-50 公分之有機碳儲存量

依結果顯示，新成土之土壤有機碳儲存量最高，約為 119±118 ton C/ha；其次為弱育土，約為 110±103 ton C/ha；而極育土及淋溶土較低，分別約為 84.6±76.5 ton C/ha 與 67.8±74.3 ton C/ha。

表 3-3-10 推估全臺林業分署各土綱 0-50 公分土壤有機碳儲存量

林型	樣本數	土壤有機碳儲存量(ton C/ha)	
	個數	平均數±標準差	變異係數(%)
淋溶土	18	67.8 ± 74.3	110
新成土	1791	119 ± 118	98.8
弱育土	1631	110 ± 103	94.1
極育土	1293	84.6 ± 76.5	90.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

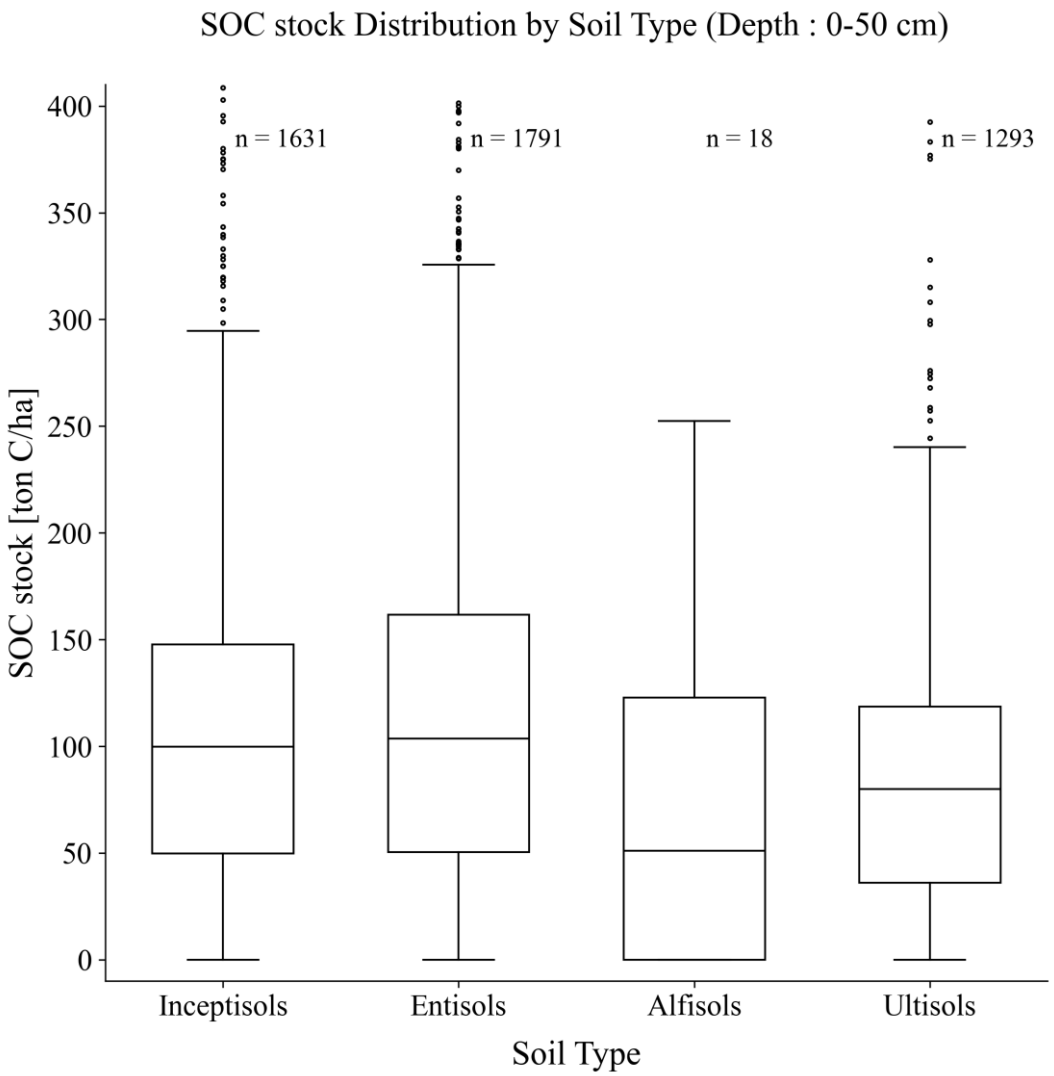


圖 3-3-18 全臺林業分署不同土綱 0-30 公分土壤有機碳儲存量盒鬚圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

（Inceptisols：弱育土；Entisols：新成土；Alfisols：淋溶土；Ultisols：極育土）

根據本計畫資料顯示，不同土壤類別對森林土壤碳儲存有不同程度影響。在臺灣森林主要的四種土綱中，新成土平均每公頃的碳儲存量最高，不論在 0-30 公分（100±93.4 ton C/ha）或 0-50 公分（119±118 ton C/ha）深度都居首位，其次為弱育土。極育土和淋溶土的平均碳儲存量相對較低。各土綱的變異係數都相當高（51.7%-93.0%），顯示樣本間存在明顯的差異，可能是因為高山森林地區的採樣剖面較少所致。

四、精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式（應用更新後資料庫）

(一) 針對影響臺灣山區森林土壤碳匯推估模式之關鍵因子，提出解決方案

- **工作推動說明**

團隊於第三期報告中，重新盤點並蒐整臺灣森林土壤採樣及實驗室分析資料，除新增多筆政府及學術單位研究成果，並依據審查委員建議，重新整理資料庫內容，讓新資料庫更為完善，且更能全面考量影響森林土壤有機碳儲存量之相關因子。除此之外，為能精進臺灣森林土壤有機碳儲存量推估模式，團隊從以下四個面向，改善潛在影響森林土壤有機碳儲存量之關鍵因子：

1. 增加全臺森林土壤剖面及分析數據

第二期報告已初步完成臺灣本島之國有林地土壤有機碳儲存量之推估模式，然而，整體執行後之初步評估模型解釋能力不如預期，主因為資料筆數不足以表示該研究試區之碳儲存推算；爰此，本計畫第三期以全臺資料為標的，重新蒐整歷年來森林土壤採樣及實驗室分析成果，相較於第二期之舊版資料庫，新增近千筆數據，有助於更為全面推算全臺森林土壤有機碳儲存量。

計畫前期基於土壤有機碳儲存量公式（式 3-13）進行推算之應變數，僅於資料庫建置時，將土壤總體密度、有機碳含量、採樣厚度及含石率等納入彙整。然而，第二期審查委員意見指出，土壤總體密度似乎與學理經驗數值有所落差，且第二期報告中，三種機器學習之解釋能力仍有待加強。考量土壤總體密度顯著影響土壤有機碳儲存量之推算，應更加細部考量不同因子與土壤總體密度間之關係，因此於第三期報告重新利用新版資料庫進行估算。

原先於計畫前期所彙整並使用之舊版資料庫，盤點各政府機關及學術單位之採樣及分析成果，並於表 3-3-1 表明處理資料異常項目及處理方向；新版資料庫則於舊版資料庫中新增農試所 1992 年至 2008 年網格式採樣，以及臺大農化系 2002 年至 2003 年於南投蓮華池、臺中鞍馬山等地採樣等多項調查成果（表 3-4-1），並從所有資料中（包含舊版資料庫及新版資料庫），盤點並彙整多項分析項目。除前述四項自變數（土壤總體密度、有機碳含量、採樣厚度、含石率）外，新增總碳量、總氮量、三種粒徑分析（黏粒、坋粒、砂粒之土壤樣本佔比）、酸鹼值、陽離子交換容量，並統整各項分析項目之單位，確保數據於後續分析上能更具有代表性。

由於彙整資料數量龐大，因此在蒐整資料後，需花費大量時間篩洗資料。政府機關及學術單位彼此於資料上開放與交流，導致某些原始資料出現誤繕的狀況，例如：在同一筆採樣數據下有不同之分析結果，因此需以「採樣座標」作為篩洗標準，將同座標且同一土壤深度，即土壤樣本具有相同上界及下界之數值，逐一檢核並移除重複，確保資料庫中無重複分析結果，以避免影響推估之合理性。

表 3-4-1 新增國內行政機關及學術單位已調查森林土壤研究

研究內容	資料來源
臺灣土壤調查成果中的臺灣森林土壤資料（381,692 筆土壤樣本），1992 – 2008	農試所
民國 97 年土壤網格調查剖面資料	農試所
民國 98 年土壤網格調查剖面資料	農試所
民國 99 年土壤網格調查剖面資料	農試所
民國 100 年土壤網格調查剖面資料	農試所
民國 101 年土壤網格調查剖面資料	農試所
臺灣森林坡地土壤調查	-
全臺各縣市不同土系調查資料	臺大農化系
全臺分區代表性土壤調查資料	臺師大
桃園、彰化、臺南代表性土系調查資料	屏科大
嘉義代表性土系調查資料	農試所
森林土壤調查資料	林務局
彰雲嘉地區土壤剖面資料	-
民國 104-106 年土壤調查數據	-
民國 105-106 年屏東土壤分析數據	-
屏東荖濃溪土壤分析數據	-
歷年土壤網格調查分析資料	農試所
Subalpine Loamy Spodosols in Taiwan: Characteristics, Micromorphology, and Genesis	Li *et al.*, 1998
Characteristics and genesis of Inceptisols with placic horizons in the subalpine forest soils of Taiwan	Wu and Chen, 2005
Morphology and pedogenesis of placic horizons in podzolic Ultisols with high clay content in humid subtropical forests	Hseu *et al.*, 2019
Differentiation of fine-textured podzolic soils controlled by climate and landscape in Taiwan	Huang *et al.*, 2022
Using pXRF and Vis-NIR for characterizing diagnostic horizons of fine-textured podzolic soils in subtropical forests	Huang *et al.*, 2023

2. 參照國家溫室氣體排放清冊歸納林型分布

林型分布於第二期報告中，是在個別林業分署轄區內，依照海拔高低進行分類，初步代表林型對森林土壤有機碳儲存量之潛在影響；於第三期報告中整理之新版資料庫，將林型依照國家溫室氣體排放清冊進行分類，以類別型資料作為其中一項影響因子，推估森林土壤有機碳儲存量。除更為貼合採樣數據受實際林型之影響程度，並可間接比較天然與人工森林之土壤有機碳儲存量差異。

在前期報告中，以嘉義及宜蘭分署為例，進行土壤總體密度推算前，初步以「海拔」，即 1,000 公尺以下、1,000 至 2,000 公尺及 2,000 公尺以上來劃分採樣剖面，代表林型分布概況，建立臺灣森林土壤有機碳儲存量推估模式（詳見工項三）。然而，於第三期報告中，依照「中華民國國家溫室氣體排放清冊報告」中所歸納之林型，將林業署航測及遙測分署提供之「全島森林林型分布圖」，重新進行分類，分類原則如表 3-4-2 所示。

表 3-4-2 本計畫所採用之林型分類原則

林型*	第四次森林資源調查森林類型及功能分類
天然針葉林	針葉樹林型+原生林+經改造天然林
天然針闊葉混淆林	針闊葉混淆林+原生林+經改造天然林
天然闊葉林	闊葉樹林型+原生林+經改造天然林
人工針葉林	針葉樹林型+半天然林+生產性人工林+保護性人工林
人工針闊葉混淆林	針闊葉混淆林+半天然林+生產性人工林+保護性人工林
人工闊葉林	闊葉樹林型+半天然林+生產性人工林+保護性人工林
木竹混淆林	竹針混淆林+竹針闊混淆林+竹闊混淆林
竹林	竹林

*參照「中華民國國家溫室氣體排放清冊報告」中所歸納之林型。

3. 利用土壤轉換函數推估不同深度之森林土壤有機碳儲存量

計算推得森林土壤有機碳儲存量後，因土壤樣本之上界與下界並非統一為文獻常見之四種土層上下界，即表土 0 至 30、50、100、150 公分，須將各剖面下各樣本之森林土壤有機碳儲存量轉置成四土層之數據。前期報告中以「等比例」方式進行推算，將森林土壤有機碳儲存量除以土壤樣本之厚度，並按比例累加成四土層之厚度而得；之後則以「土壤轉換函數 (Pedo-transfer Function)」為目標進行資料前處理，並於第四期報告中依此方法推算土壤有機碳儲存量。此方法以「樣條 (Spline)」的方式進行推算，將各土壤樣本厚度間之土壤有機碳儲存量平滑化，並外推至表土及該剖面能代表之最深土層下界，有助於更精準推算文獻常見之四土層成果。

4. 增加土壤表面之枯枝落葉層

以往在計算森林地上部之碳儲存量時，並未考量枯枝落葉層 (Litter Layer)，本計畫前期在計算森林土壤有機碳儲存量時也並未納入。然而，文獻表明枯枝落葉層對森林土壤有機碳儲存量有相當之貢獻（表 3-4-3）。之後在所盤點資料中，加入彙整枯枝落葉層數據，有助於更為全面計算森林土壤碳儲存總量。

表 3-4-3 國內相關枯落物研究（邱祈榮整理）

作者	年份	生育地	樹種	林齡	枯死木生物量 (ton/ha)	枯枝落葉層生物量 (ton/ha)	枯枝落葉層碳量 (ton/ha)	土壤碳量 (ton/ha)
洪富文等	1985	蓮華池	杉木	20	-	15.0	-	-
洪富文等	1986	蓮華池 關刀溪	南檜林帶	天然林	-	6.9 12.8	-	-
林世宗	1989	溪頭	柳杉	35	-	5.2	-	-
林國銓等	2003	福山	闊葉林	建造期 成熟期	8.5 36.1	4.6 5.1	-	-
林國銓等	2003 2004	六龜	臺灣杉	20（疏伐） 27（疏伐） 20（未疏伐） 27（未疏伐）	-	6.1 10.2 9.0 8.2	-	-
張朝婷	2005	壽卡 蓮華池 里龍山 鳴海山 大坪 鞍馬山 碧綠 小風口	熱帶榕楠林帶 亞熱帶南檜林帶 溫帶櫟林帶 冷溫帶冷杉林帶		-	3.24 8.57 12.70 15.31 10.62 54.16 59.05 39.62	1.4 3.6-4.8 3.6-4.8 3.6-4.8 3.6-4.8 26.8 26.8 16.9	32.6 41.8 35.2 37.4 55.6 8.4 66.3 5.7
向韻如	2006	埔里 巒大	天然林&人工林		-	-	11.63-12.93 12.05-13.39	129.26 133.91
柯淑惠	2006	內茅埔	臺灣櫸	9		3.74	1.44	47.92
王巧萍等	2008	四湖 台中港 永安 台東	木麻黃		19.32 16.18 15.28 13.67	30.25 64.37 29.40 15.73	-	42.86

承前所述，影響臺灣山區森林土壤有機碳儲存量推估模式之關鍵因子，首要為土壤總體密度，在新版資料庫中，部分樣點缺少土壤總體密度分析值，需以推算的方式來補足。為了區分土壤總體密度是否經由調查分析而取得，即「有」土壤總體密度分析數據者，以下代稱為「BD 既有」，反之，「無」土壤總體密度分析數據者，則代稱為「BD 推算」，利用 GIS 將資料庫中所有採樣剖面進行展點，藉由林業署提供之林業分署管轄範圍圖資進行劃分，產製各林業分署範圍內之土壤剖面數量表（表 3-4-4）。

表 3-4-4 全臺林業署各分署共 5,168 剖面之採樣剖面總體密度來源(1/2)

林型	土壤剖面數總計	宜蘭			花蓮			南投			屏東		
		BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計
人工針葉林	521	101	36	137	17	8	25	40	23	63	21	0	21
人工針闊葉混淆林	225	24	22	46	24	8	32	27	13	40	6	2	8
人工闊葉林	603	27	10	37	30	8	38	11	13	24	239	81	320
天然針葉林	143	2	1	3	4	9	13	30	14	44	8	1	9
天然針闊葉混淆林	104	3	0	3	5	2	7	29	16	45	6	0	6
天然闊葉林	1,687	118	103	221	179	56	235	112	63	175	247	61	308
木竹混淆林	338	0	4	4	1	3	4	13	26	39	63	18	81
竹林	357	1	0	1	6	0	6	25	15	40	69	27	96
其它	58	6	2	8	8	1	9	3	7	10	7	3	10
無調查成果	1,132	64	39	103	65	33	98	67	89	156	168	65	233
總計	5,168	346	217	563	339	128	467	357	279	636	834	258	1092

(續下表)

表 3-4-4 全臺林業署各分署 5,168 剖面之採樣剖面總體密度來源(2/2)

林型	新竹			嘉義			臺中			臺東		
	BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計	BD 推算	BD 既有	小計
人工針葉林	75	28	103	46	38	84	33	30	63	21	4	25
人工針闊葉混淆林	34	14	48	11	3	14	10	10	20	14	3	17
人工闊葉林	33	13	46	34	13	47	7	21	28	51	12	63
天然針葉林	15	3	18	14	3	17	11	14	25	14	0	14
天然針闊葉混淆林	14	8	22	3	2	5	4	7	11	4	1	5
天然闊葉林	211	82	293	79	41	120	42	41	83	216	36	252
木竹混淆林	9	7	16	123	54	177	2	5	7	10	0	11
竹林	23	12	35	100	62	162	5	6	11	6	0	6
其它	4	1	5	6	3	9	4	3	7	1	0	1
無調查成果	60	12	72	180	124	304	27	22	49	89	28	117
總計	478	180	658	596	343	939	145	159	304	426	84	511

各分署範圍內之採樣剖面分布情形，依前述八種林型來進行展點，並區分土壤總體密度來源（既有或推算），可大致描述各分署範圍內、在不同森林型態下，是否具有足夠的代表性資料點。

1. 宜蘭分署

宜蘭分署採樣剖面依林型、地勢、空間分布主要分為兩大部分，第一部分採樣剖面主要集中在宜蘭縣雙連埤野生動物重要棲息環境、太平山國家森林遊樂區、蘭陽平原龜山島眺望點等地（圖 3-4-1 藍框處）。這些區域覆蓋天然闊葉林、人工針葉林、人工針闊葉混淆林等多種林型。第二部分則是沿著蘇花公路和台九線的工業開採區，包括台泥礦區、信大水泥礦區、和平礦場等地（圖 3-4-1 紅框處），這些區域以天然闊葉林為主要林型，其餘採樣剖面則分布在區域內各林道附近。

宜蘭分署管轄範圍廣闊，有保存完好的自然保護區。區域內林型豐富，包括天然針、闊葉林、人工針葉林等。而採樣剖面分布以天然闊葉林和人工針葉林為主。

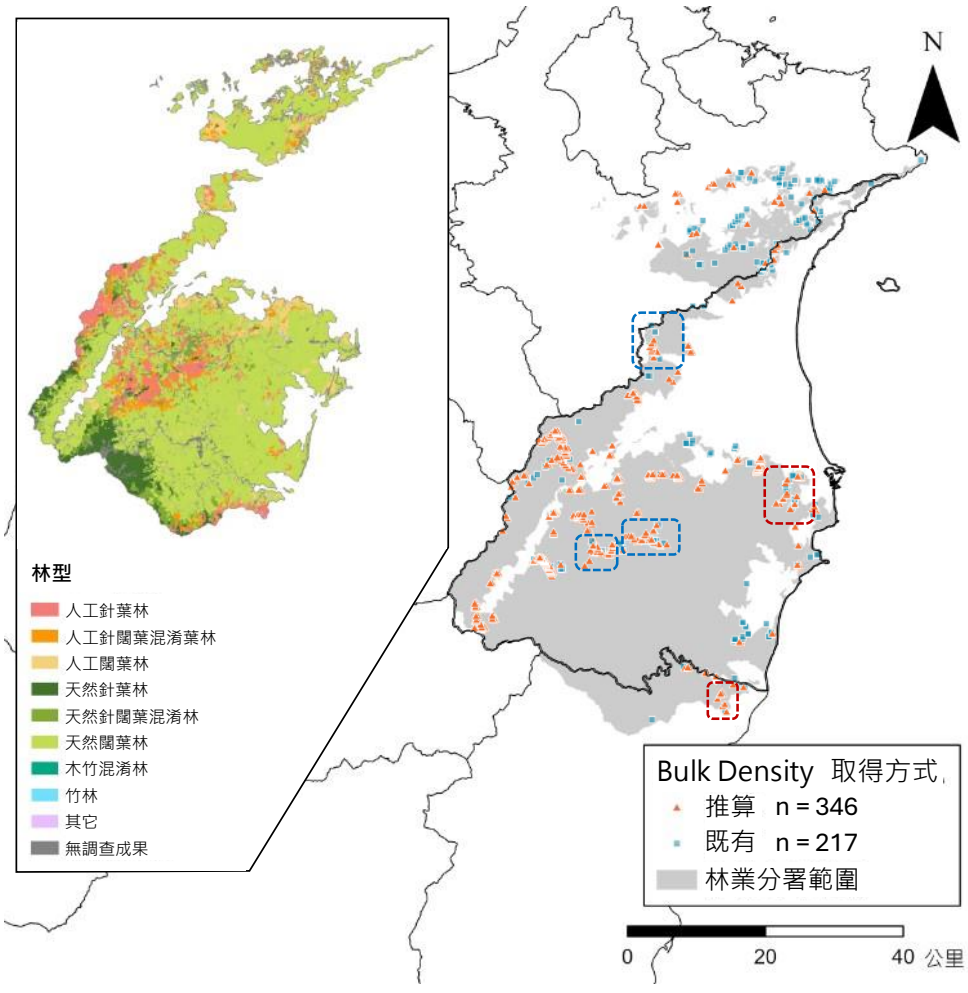


圖 3-4-1 宜蘭分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

2. 花蓮分署

花蓮分署採樣剖面依林型、地勢、空間分布主要分為兩大部分。第一部分採樣剖面分布於清水大山、千里眼山、見睛台山、馬錫山、嘉羅蘭山及虎狼山等山地（圖 3-4-2 藍框處）。這些區域以天然闊葉林為主要林型。第二部分採樣剖面集中在瑞紋石礦、久益石礦、聖昌石礦等工業開採區（圖 3-4-2 紅框處）。這些區域林型以天然闊葉林、人工闊葉林為主，其餘採樣剖面則集中在區域內各林道附近。

花蓮分署管轄範圍內多為天然森林，以天然闊葉林和天然針葉林為主要林型，而採樣剖面的林型則以天然闊葉林和人工闊葉林為主。

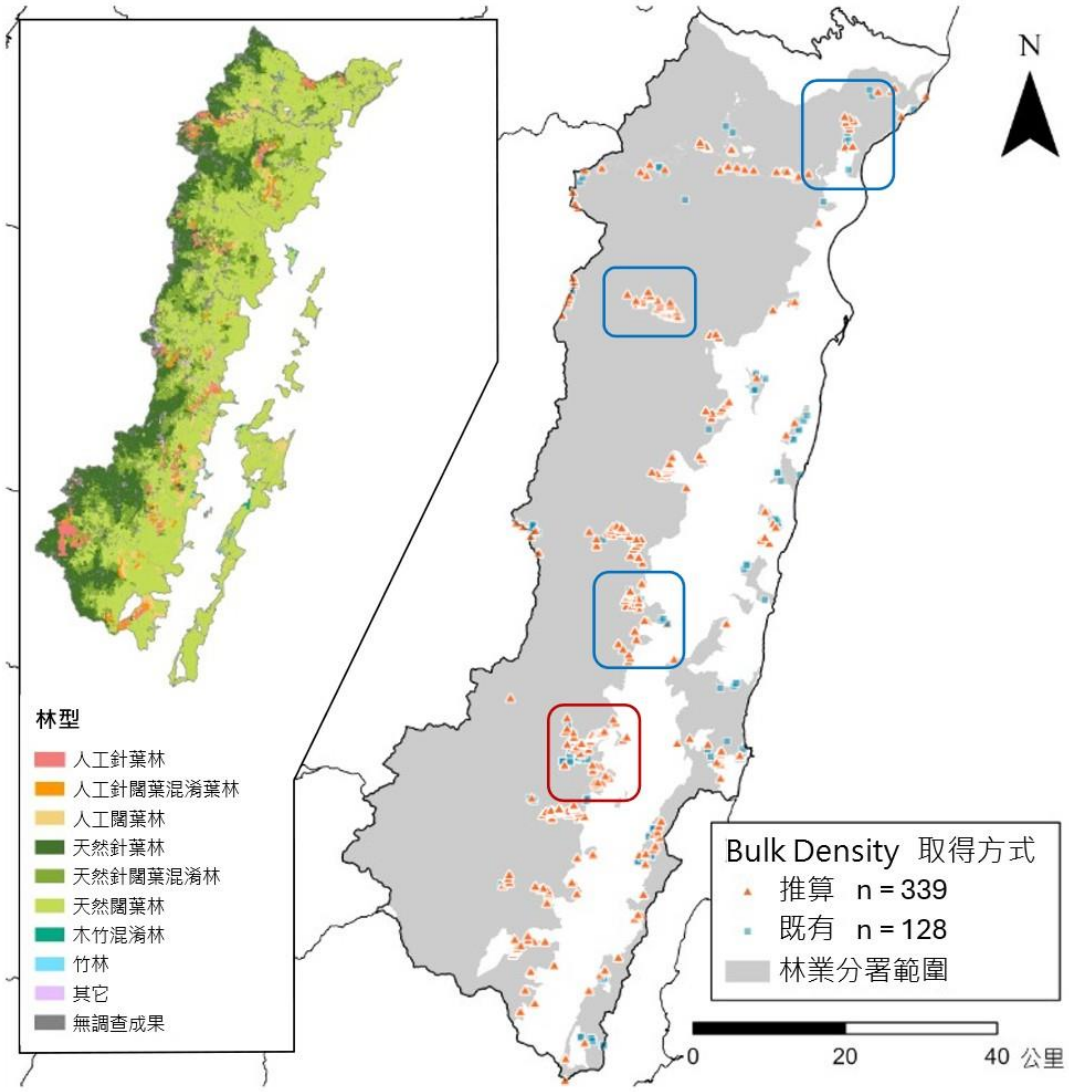


圖 3-4-2 花蓮分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

3. 南投分署

南投分署採樣剖面依林型、地勢、空間分布主要分為三大部分。第一部分採樣剖面包括花眉冷山、西關刀山北峰、尾上山、南華山、深坑山、大尖山、帖鹿桑山等山地（圖 3-4-3 藍框處）。這些區域主要林型為天然闊葉林、天然針葉林、人工針葉林和天然針闊葉混淆林等。第二部分採樣剖面則集中在雲林湖本八色鳥野生動物重要棲息環境、杉林溪森林生態渡假園區、丹大野生動物重要棲息環境等保護區等地（圖 3-4-3 紅框處）。這些區域林型較為複雜，包括竹林、木竹混淆林、天然闊葉林、人工闊葉林、人工針闊葉混淆林、天然針葉林及人工針葉林等。第三部分為烏溪沿岸、臺十四沿線區域（圖 3-4-3 黃框處），主要林型為天然闊葉林和天然針葉林，其餘採樣剖面則分布在區域內各林道附近。

南投分署管轄範圍內主要林型為天然闊葉林，但也廣泛分布天然針葉林、人工林和混淆林等其他林型。採樣剖面分布涵蓋各種林型，以天然闊葉林與人工針葉林為大宗。

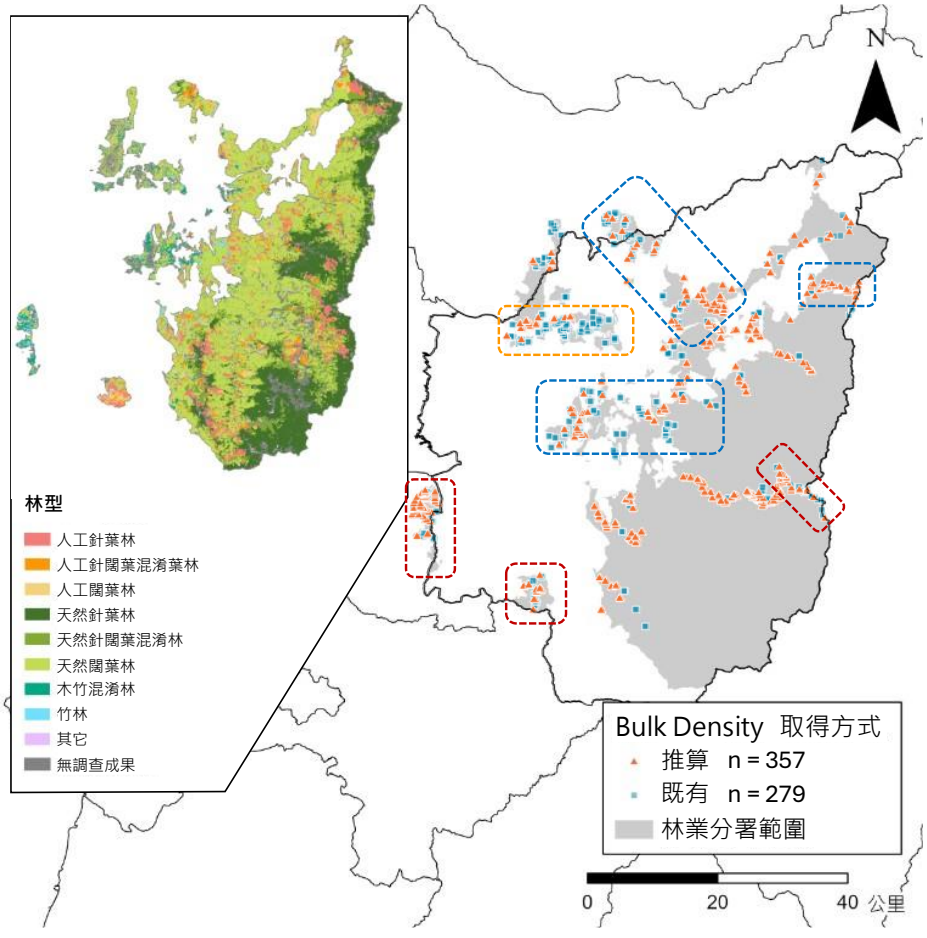


圖 3-4-3 南投分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

4. 屏東分署

屏東分署採樣剖面依林型、地勢、空間分布主要分為四大部分。第一部分包括獅子尾山、耆古巴林山東峰、牡丹富士山、北里龍山、下里龍山、老佛山等山地（圖 3-4-4 藍框處），這些區域主要林型為天然闊葉林和人工闊葉林。第二部分採樣剖面集中在高雄市甲仙、六龜、杉林、美濃、田寮等行政區（圖 3-4-4 紅框處）。這些區域林型種類豐富，包括天然闊葉林、人工闊葉林、木竹混淆林和竹林等。第三部分為枋山溪上游、楓港溪下游沿岸（圖 3-4-4 黃框處），主要林型為天然闊葉林和人工闊葉林。第四部分則是墾丁國家公園和南仁山生態保護區等自然保護區（圖 3-4-4 綠框處），林型以天然闊葉林和人工闊葉林為主，其餘採樣剖面則集中在區域內各林道附近。

屏東分署管轄範圍內主要林型為天然闊葉林和人工闊葉林。採樣剖面分布涵蓋各種林型，照採樣剖面數量排序依序為以天然闊葉林、人工闊葉林為大宗，其次為竹林及木竹混淆林。

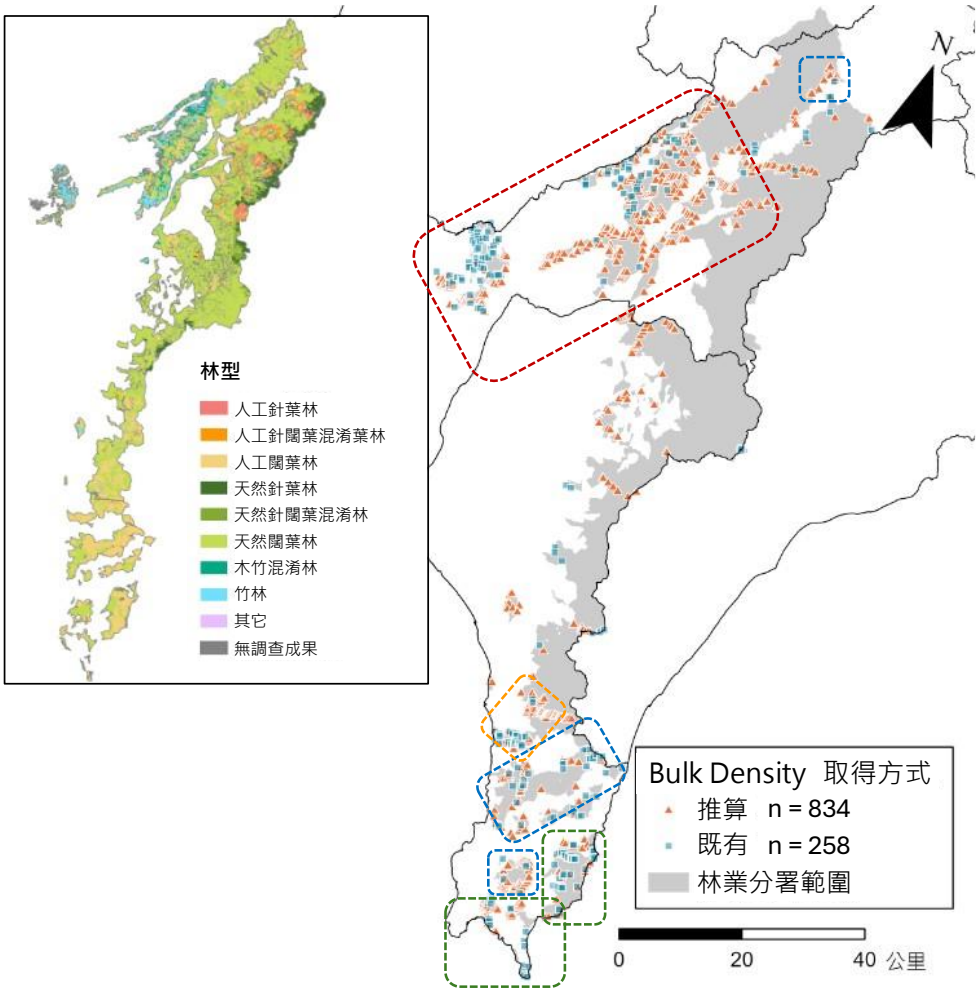


圖 3-4-4 屏東分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

5. 新竹分署

新竹分署採樣剖面依林型、地勢和空間分布主要分為四個部分。第一部分包括島俱子山、基那吉山、太閣南山、班山、北坑山和向天湖山等山地（圖 3-4-5 藍框處），這些區域的主要林型為天然針葉林、人工針葉林、人工針闊葉混淆林和天然闊葉林。第二部分為竹專 2 線沿線（圖 3-4-5 紅框處），主要林型為人工針闊葉混淆林和人工針葉林。第三部分則是插天山自然保留區和東眼山國家森林遊樂區（圖 3-4-5 黃框處），這些區域的林型以天然闊葉林為主。第四部分採樣剖面則位於苗栗縣南庄鄉南側，主要林型為天然闊葉林和人工針葉林（圖 3-4-5 紫框處），其餘採樣剖面則分布在管轄區內的各條林道與原住民部落周邊。

新竹分署主要林型為天然闊葉林和天然針葉林，而採樣剖面的分布林型以天然闊葉林和人工針葉林為主。採樣剖面空間分布較為分散，分布涵蓋不同林型，以天然闊葉林為大宗，人工針葉林次之。

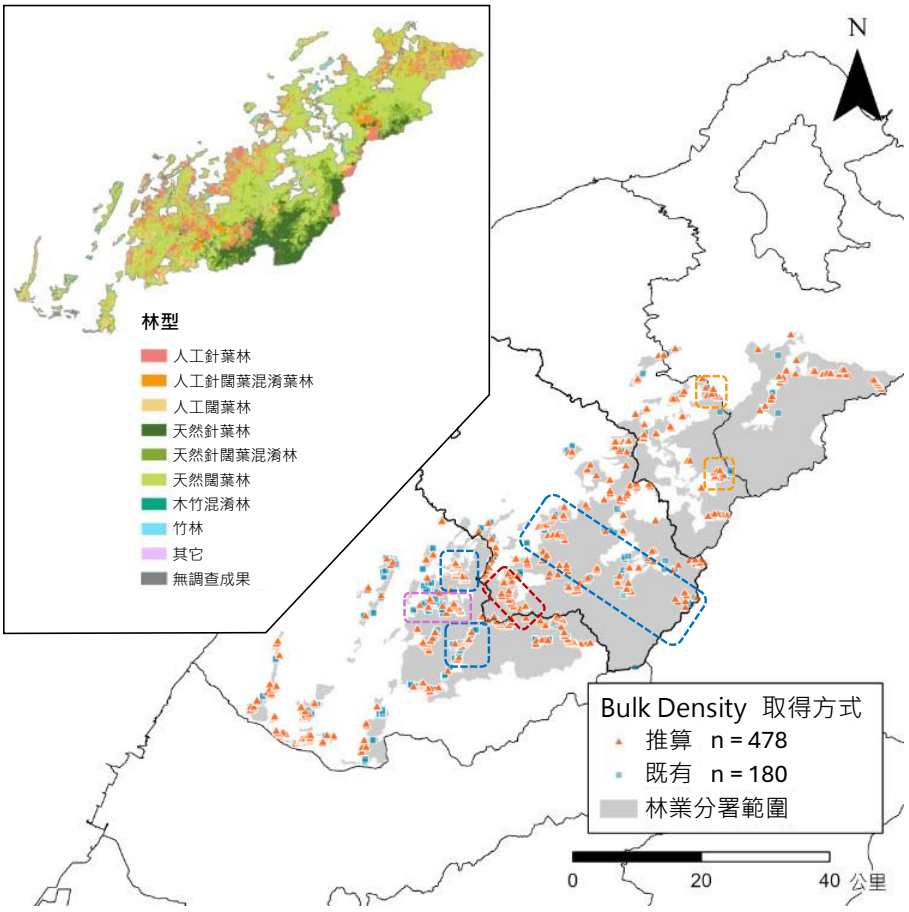


圖 3-4-5 新竹分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

6. 嘉義分署

嘉義分署採樣剖面依林型、地勢和空間分布主要分為四個部分。第一部分包括臺18線沿屏遮那山、二萬平山、小笠原山路段，梯子板山、東水山、兒玉山、石山及玉山群峰等山地（圖 3-4-6 藍框處），這些地區的主要林型有天然闊葉林、人工闊葉林、人工針葉林、天然針葉林和天然針闊葉混淆林等。第二部分為嘉義縣番路鄉南側、大埔鄉北側（圖 3-4-6 紅框處），主要林型為木竹混淆林、天然闊葉林和竹林。第三部分則是南化水庫集水區（圖 3-4-6 黃框處），林型包括天然闊葉林、人工闊葉林、木竹混淆林和竹林。第四部分採樣剖面於台南市左鎮區南側（圖 3-4-6 紫框處），主要林型為竹林、木竹混淆林和天然闊葉林，其餘採樣剖面則集中在林道附近。

嘉義分署管轄區涵蓋天然闊葉林、天然針葉林、人工林、混淆林和竹林等多種林型，區域內林型複雜多樣。而採樣剖面的分布林型以天然闊葉林和木竹混淆林為主。

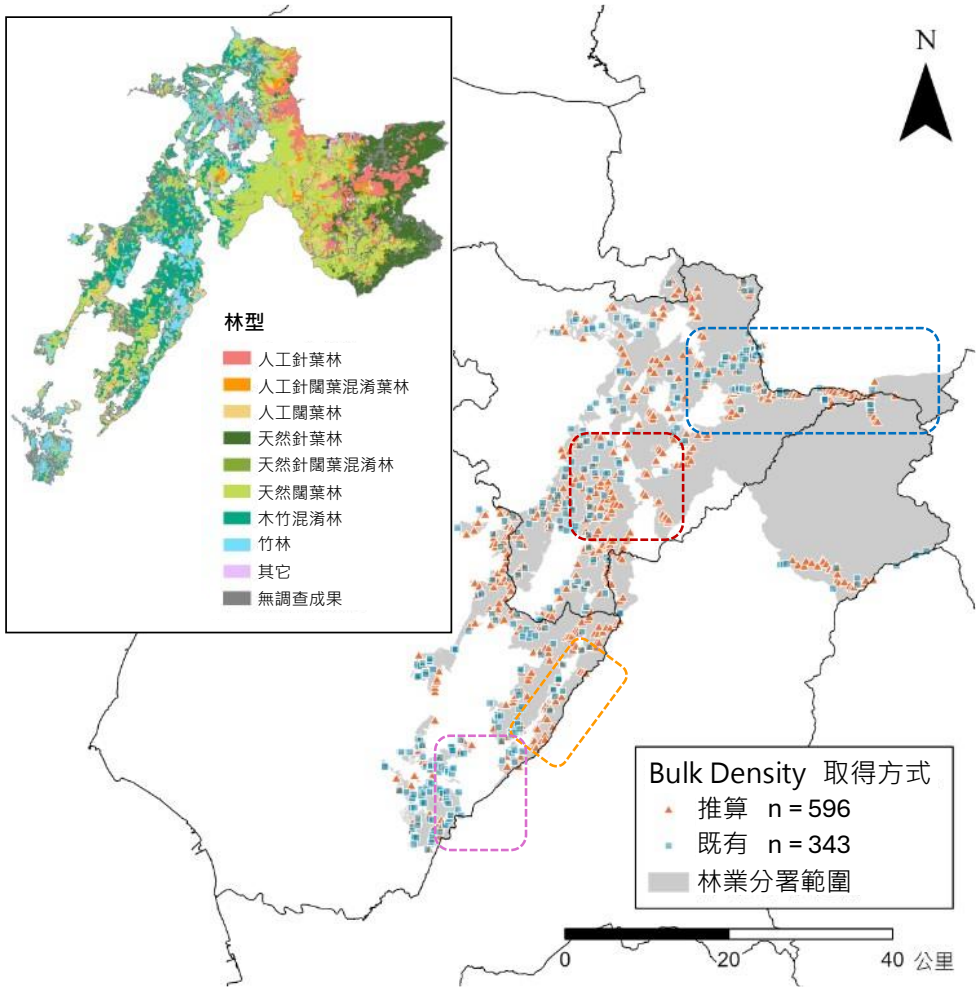


圖 3-4-6 嘉義分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

7. 臺中分署

臺中分署採樣剖面依林型、地勢和空間分布主要分為四個部分。第一部分為德基水庫集水區、櫻花鉤吻鮭野生動物保護區等地（圖 3-4-7 藍框處），這些區域的主要林型為天然闊葉林、天然針葉林、人工闊葉林和人工針葉林等。第二部分為臺 14 線沿合歡山路段（圖 3-4-7 紅框處），主要林型為天然針葉林。第三部分則是鞍馬山、小雪山、拾丸山南峰等山地（圖 3-4-7 黃框處），林型以人工針葉林為主。第四部分採樣剖面則位於臺中市和平區西側南投縣仁愛鄉北側（圖 3-4-7 紫框處），主要林型包括天然闊葉林、人工闊葉林、人工針葉林和人工針闊葉混淆林等。

臺中分署整體主要林型為天然闊葉林、天然針葉林、人工闊葉林和人工針葉林等。而採樣剖面分布則集中在天然闊葉林和人工針葉林。

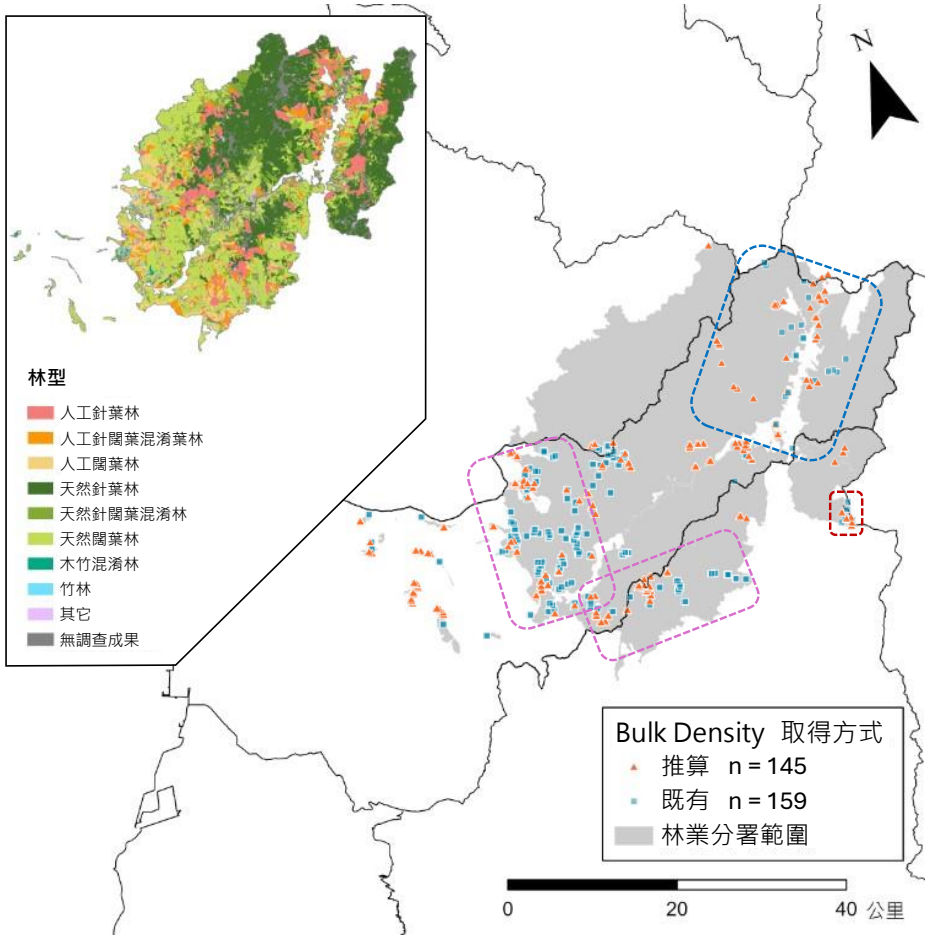


圖 3-4-7 臺中分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

8. 臺東分署

臺東分署採樣剖面依林型、地勢和空間分布主要分為四個部分。第一部分包括水母丁溪上游區域（圖 3-4-8 藍框處），這個區域的主要林型為天然闊葉林。第二部分為海岸山脈南側德高老山、寶華山、都蘭山和海瑞鄉、延平鄉東側等地（圖 3-4-8 紅框處），主要林型為天然闊葉林和人工闊葉林。第三部分則是向陽國家森林遊樂區（圖 3-4-8 黃框處），這些保護區的林型以天然針葉林和人工針葉林為主。第四部分採樣剖面於利嘉野生動物重要棲息環境、知本國家森林遊樂區和臺東大武自來水水質水量保護區（圖 3-4-8 紫框處），主要林型為天然闊葉林和人工闊葉林。

臺東分署整體主要林型為天然闊葉林、人工闊葉林、天然針葉林和人工針葉林，而採樣剖面的分布則以天然闊葉林和人工闊葉林為主要林型。

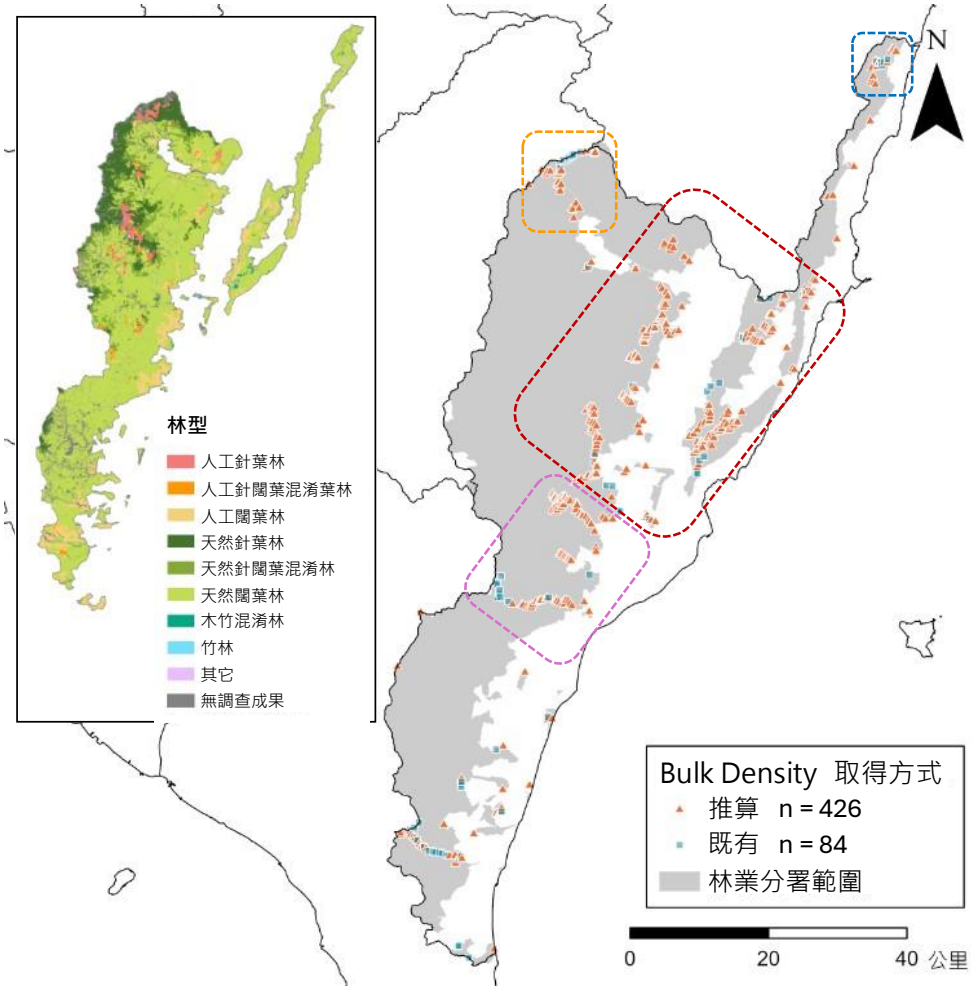


圖 3-4-8 臺東分署各林型採樣剖面 BD 取得方式示意圖

接著依據八種不同林型，分別以線性擬合方式，推算出各區範圍內缺少的土壤總體密度值，參照工項三逐步回歸的方式，取得八種林型下土壤總體密度與土壤深度及土壤有機碳含量間的相關函數如下，並彙整如表 3-4-5 所示。

1. 天然針葉林

天然針葉林的原資料中採樣剖面數為 126 筆，平均數為 0.97g/cm^3，標準差為 0.26 g/cm^3。透過式 4-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.98 g/cm3，標準差為 0.40 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-9），解釋能力 R^2 為 0.47，斜率為 1.03。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 110 筆，平均數為 0.99 g/cm^3，標準差為 0.26 g/cm^3。透過式 4-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.06 g/cm3，標準差為 0.32 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-10），解釋能力 R^2 為 0.61，斜率為 0.95。

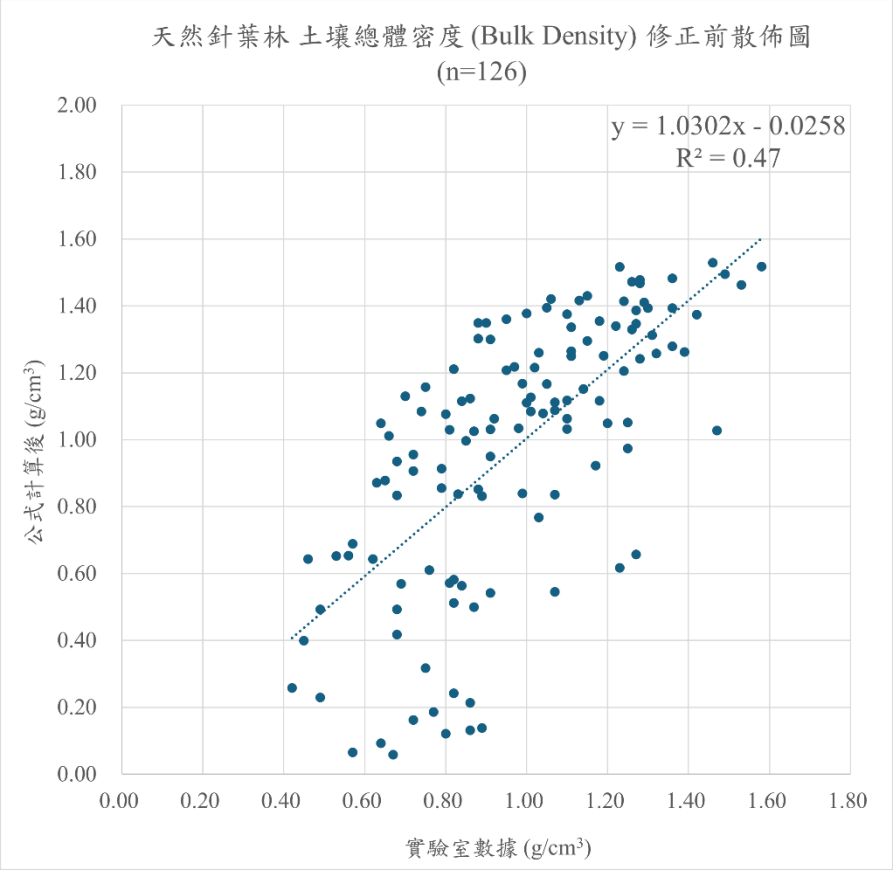


圖 3-4-9 天然針葉林修正前 BD 之散布圖

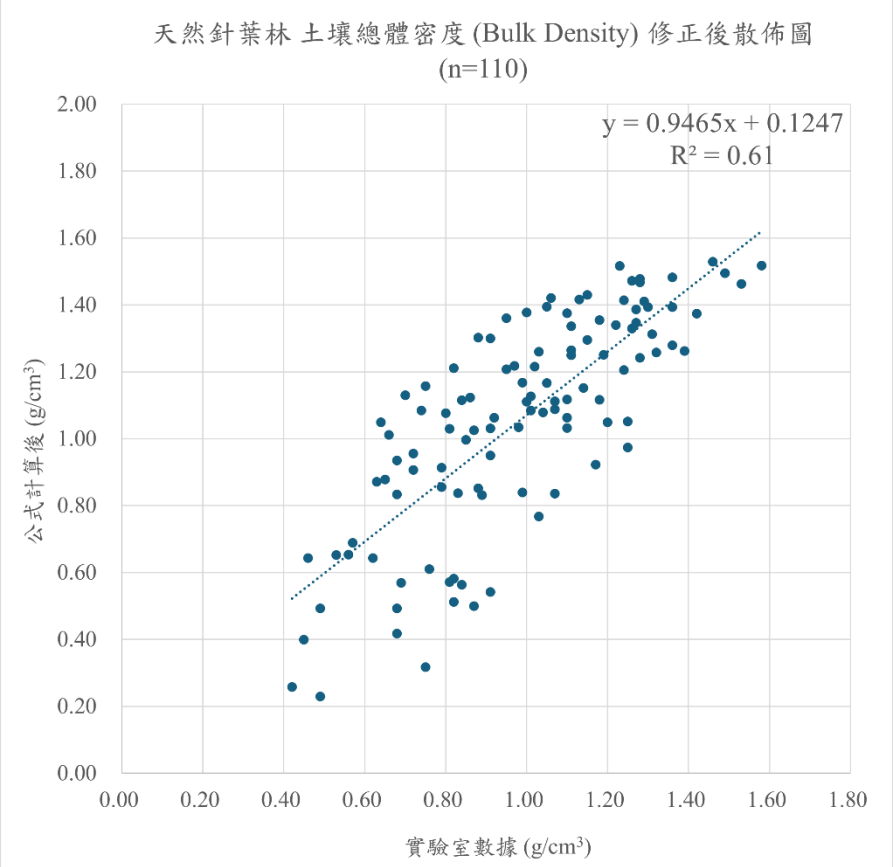


圖 3-4-10 天然針葉林修正後 BD 之散布圖

2. 天然針闊葉混淆林

天然針闊葉混淆林的原資料中採樣剖面數為 78 筆，平均數為 1.10 g/cm^3，標準差為 0.28 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.06 g/cm^3，標準差為 0.39 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-11），解釋能力 R^2 為 0.38，斜率為 0.85。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 69 筆，平均數為 1.11 g/cm^3，標準差為 0.29 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.10 g/cm^3，標準差為 0.35 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-12），解釋能力 R^2 為 0.61，斜率為 0.92。

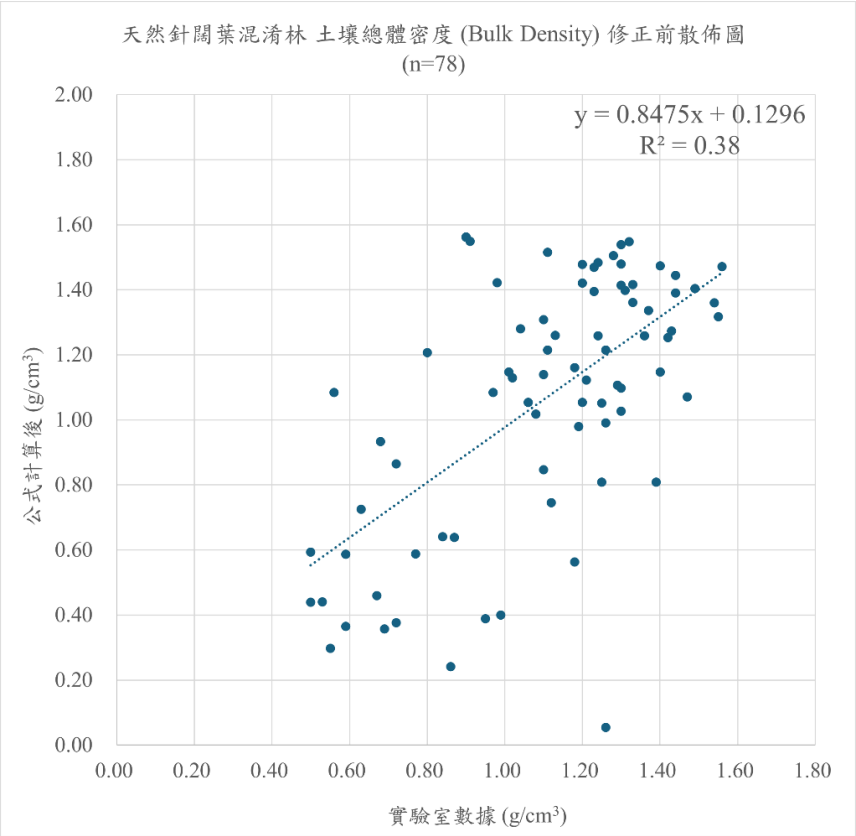


圖 3-4-11 天然針闊葉混淆林修正前 BD 之散布圖

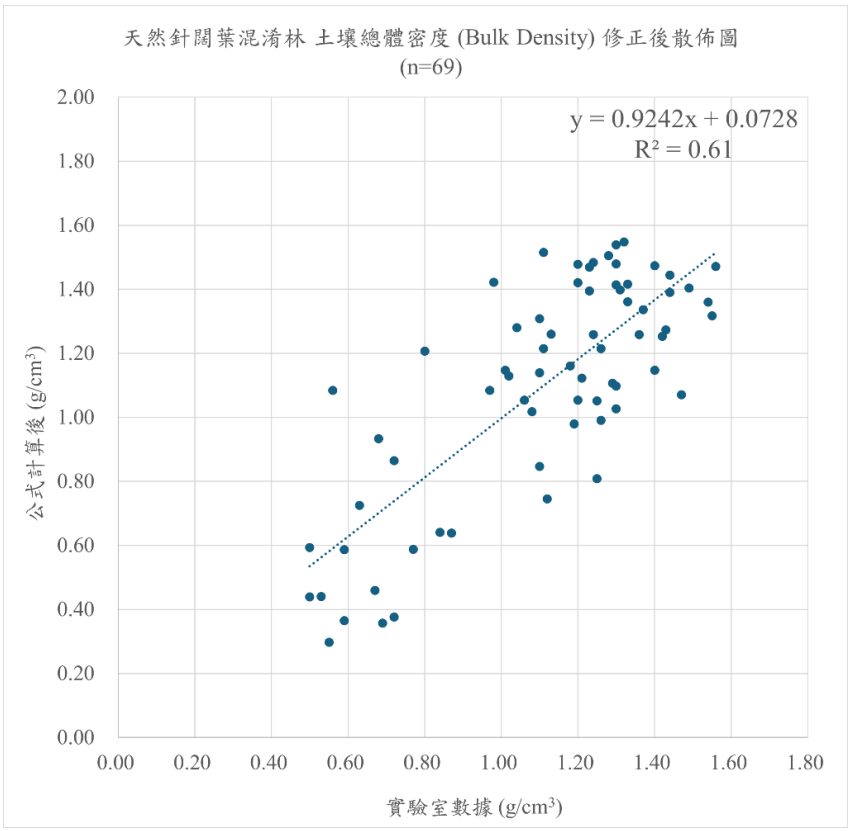


圖 3-4-12 天然針闊葉混淆林修正後 BD 之散布圖

3. 天然闊葉林

天然闊葉林的原資料中採樣剖面數為 1002 筆，平均數為 1.19 g/cm^3，標準差為 0.32 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.09 g/cm^3，標準差為 0.37 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-13），解釋能力 R^2 為 0.41，斜率為 0.75。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 876 筆，平均數為 1.20 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.16 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-14），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.78。

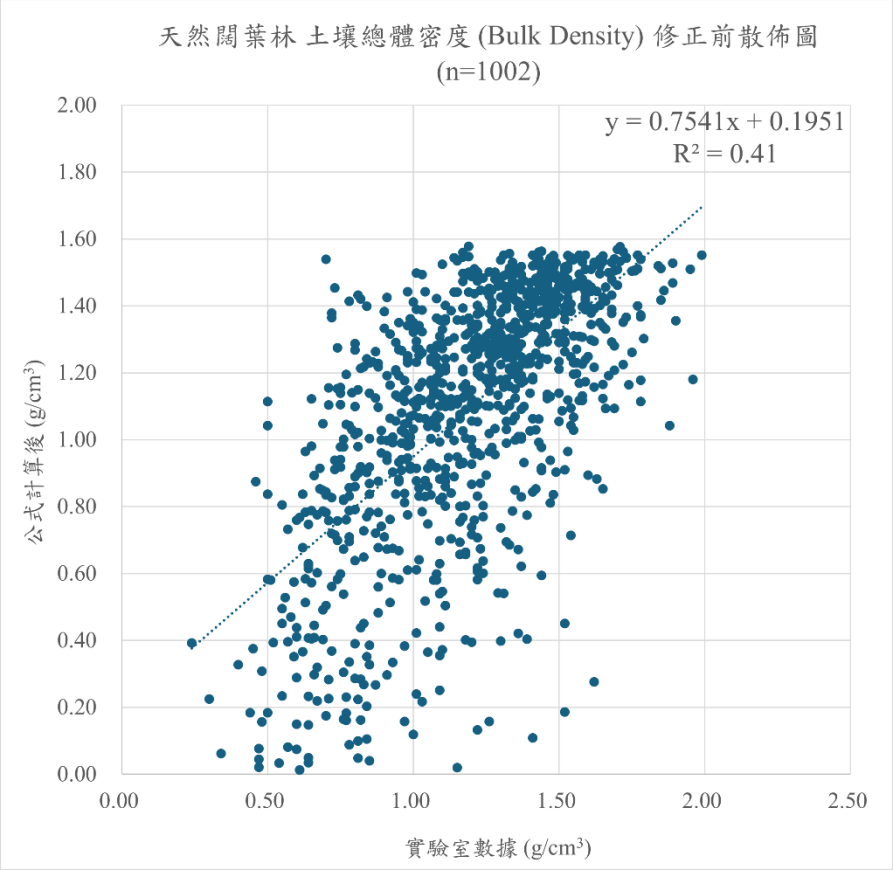


圖 3-4-13 天然闊葉林修正前 BD 之散布圖

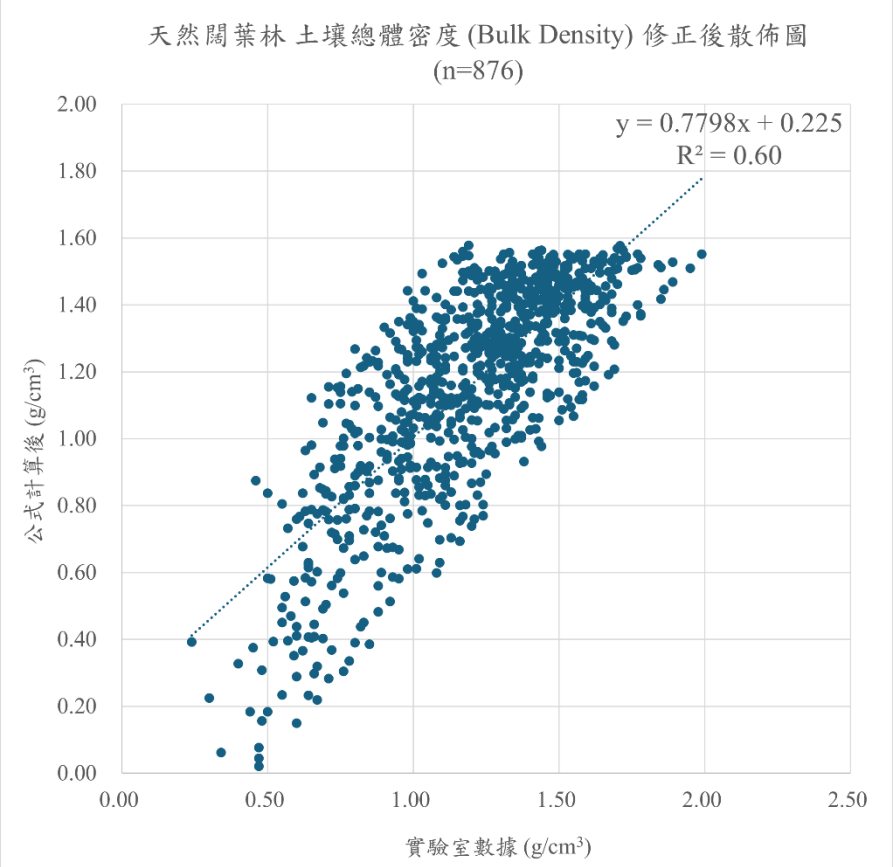


圖 3-4-14 天然闊葉林修正後 BD 之散布圖

4. 人工針葉林

人工針葉林的原資料中採樣剖面數為 467 筆，平均數為 1.0 g/cm^3，標準差為 0.34 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 0.82 g/cm^3，標準差為 0.78 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-15），解釋能力 R^2 為 0.36，斜率為 0.76。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 358 筆，平均數為 1.05 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.09 g/cm^3，標準差為 0.35 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-16），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.87。

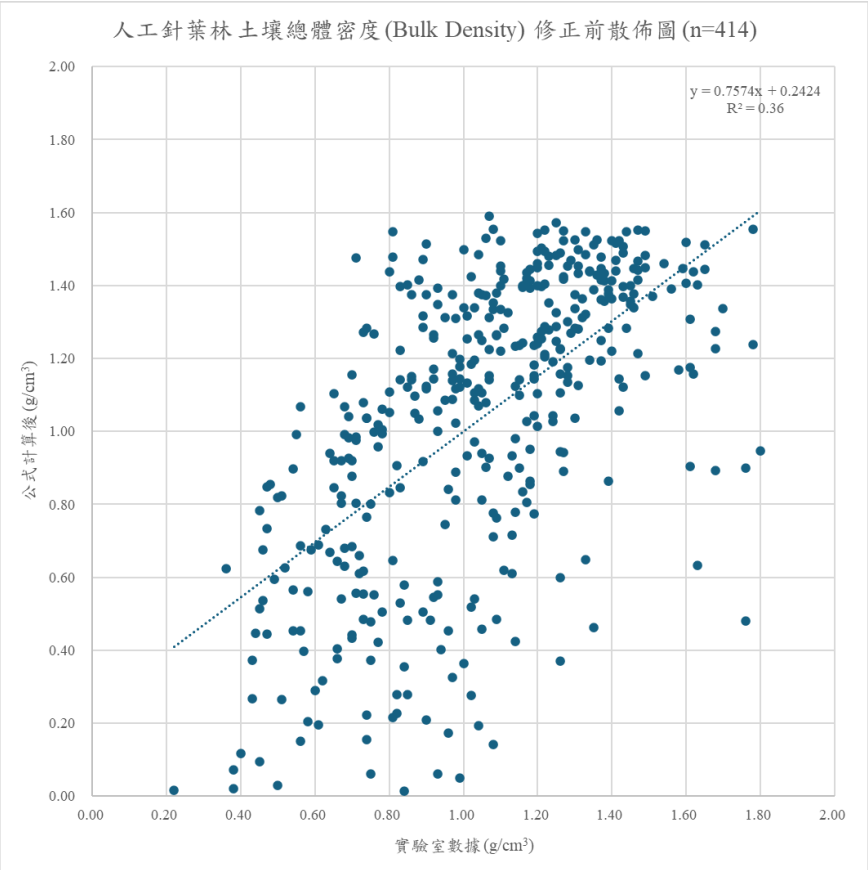


圖 3-4-15 人工針葉林修正前 BD 之散布圖

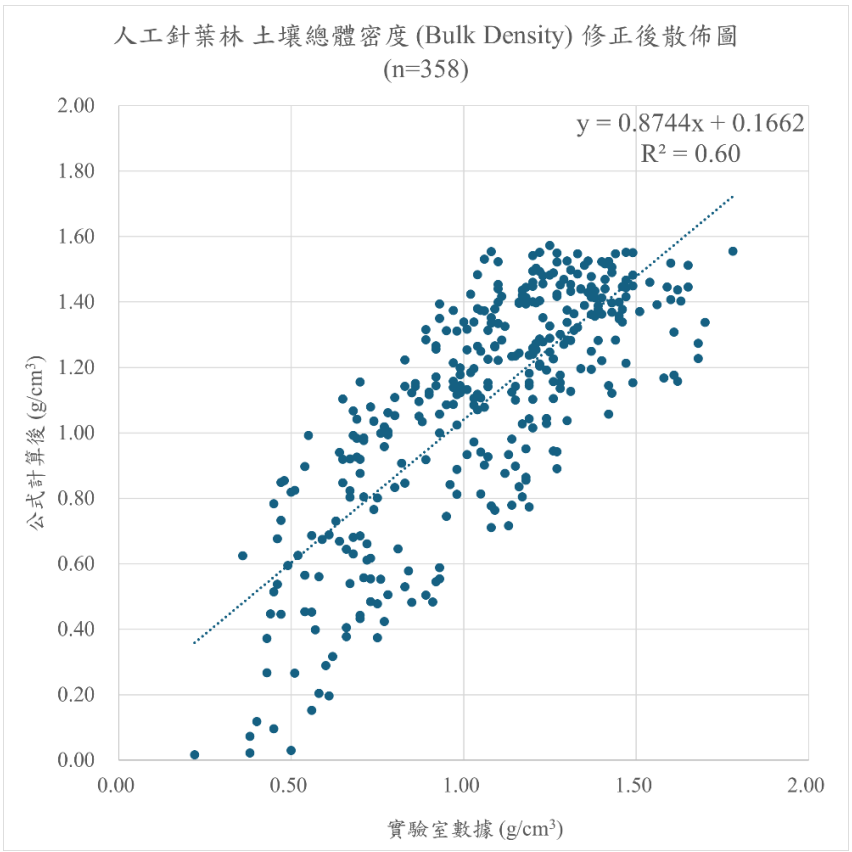


圖 3-4-16 人工針葉林修正後 BD 之散布圖

5. 人工針闊葉混淆林

人工針葉林的原資料中採樣剖面數為 174 筆，平均數為 1.08 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3。透過式 4-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.04 g/cm^3，標準差為 0.39 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-17），解釋能力 R^2 為 0.43，斜率為 0.81。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 151 筆，平均數為 1.10 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.11 g/cm^3，標準差為 0.31 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-18），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.77。

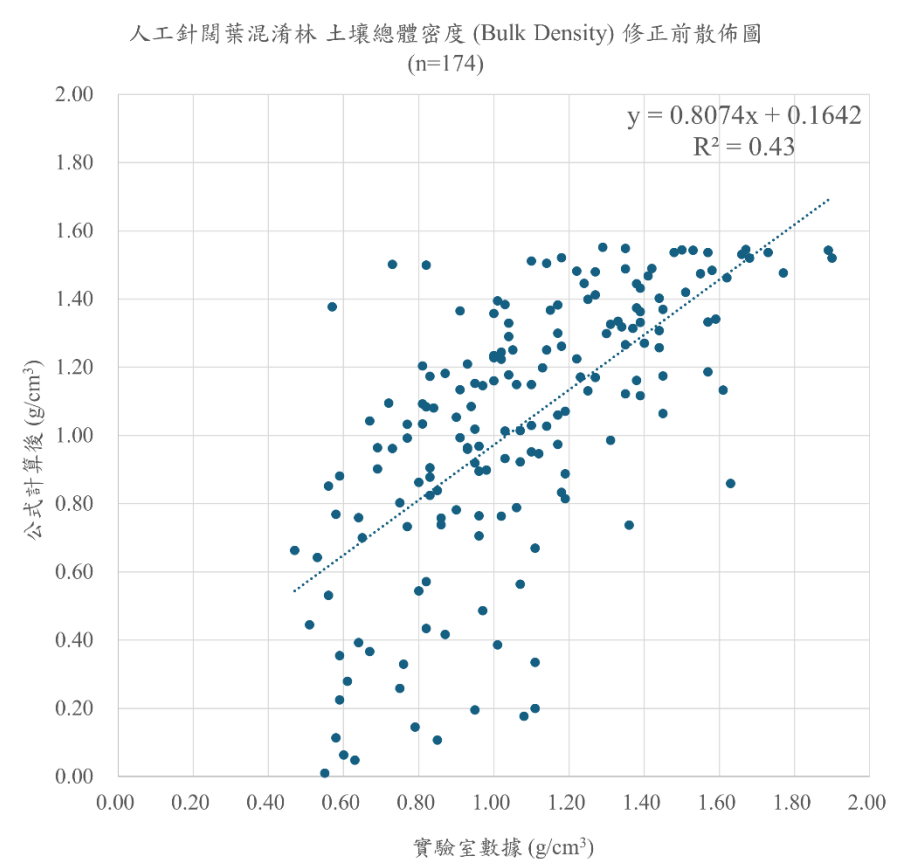


圖 3-4-17 人工針闊葉混淆林修正前 BD 之散布圖

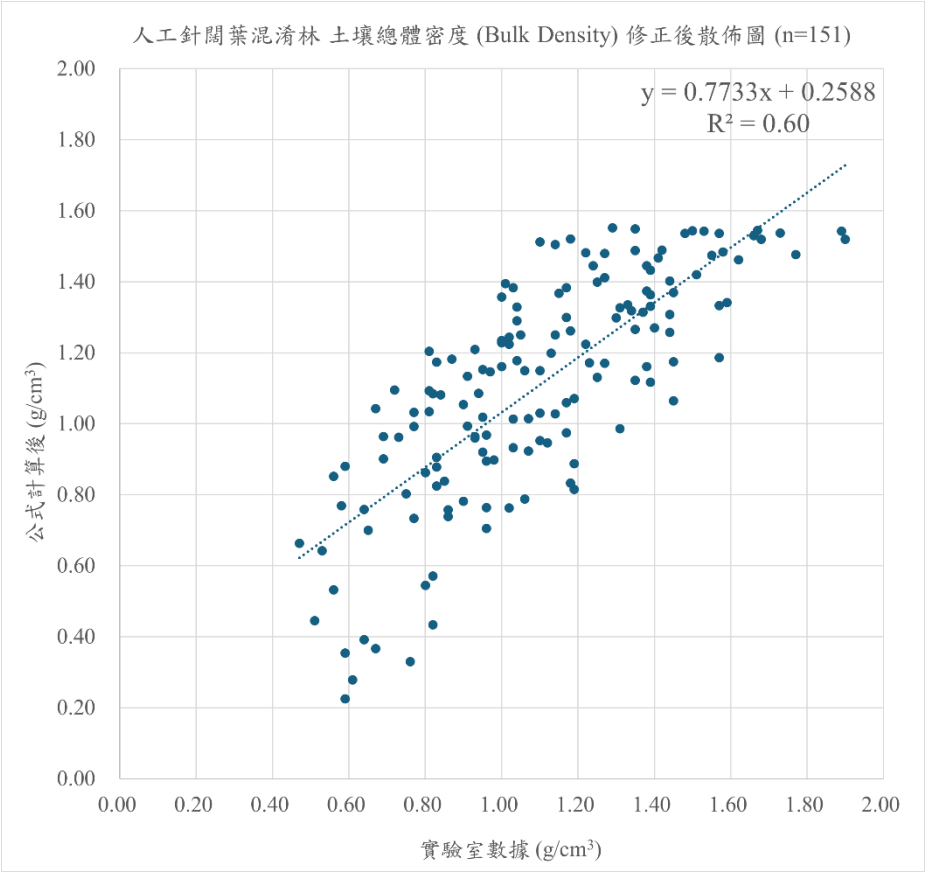


圖 3-4-18 人工針闊葉混淆林修正後 BD 之散布圖

6. 人工闊葉林

人工闊葉林的原資料中採樣剖面數為 366 筆，平均數為 1.24 g/cm^3，標準差為 0.27 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.20 g/cm^3，標準差為 0.30 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-19），解釋能力 R^2 為 0.37，斜率為 0.68。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 329 筆，平均數為 1.25 g/cm^3，標準差為 0.25 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.24 g/cm^3，標準差為 0.26 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-20），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.79。

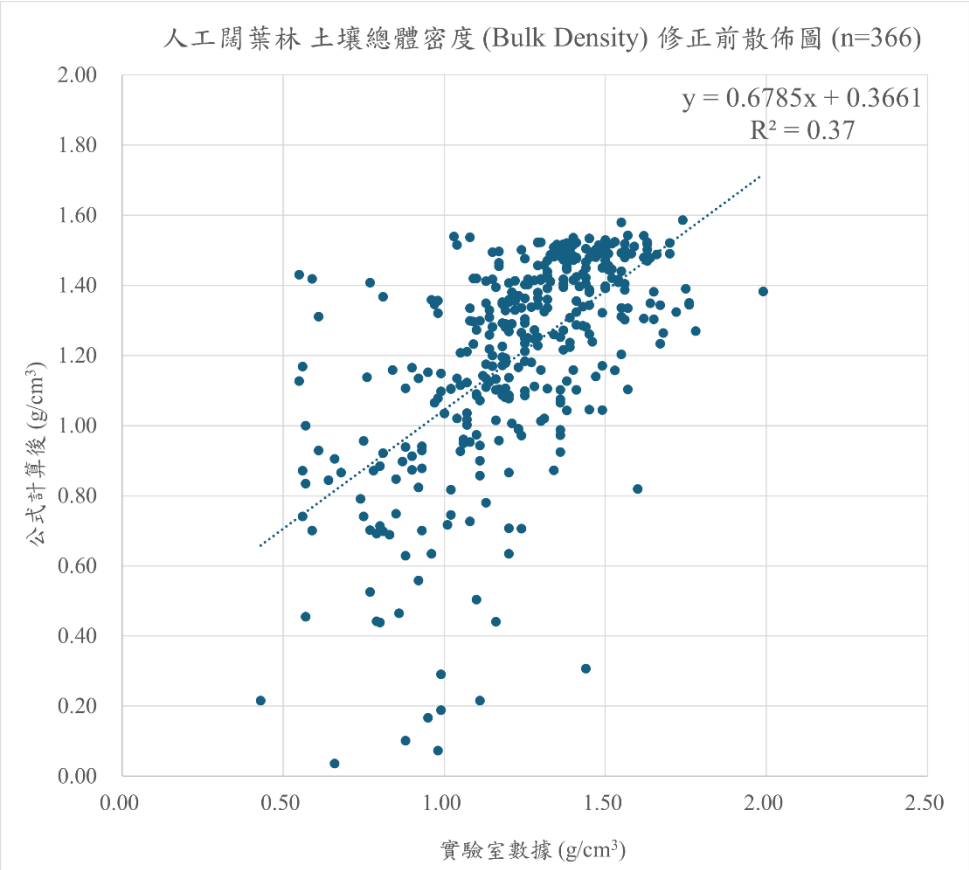


圖 3-4-19 人工闊葉林修正前 BD 之散布圖

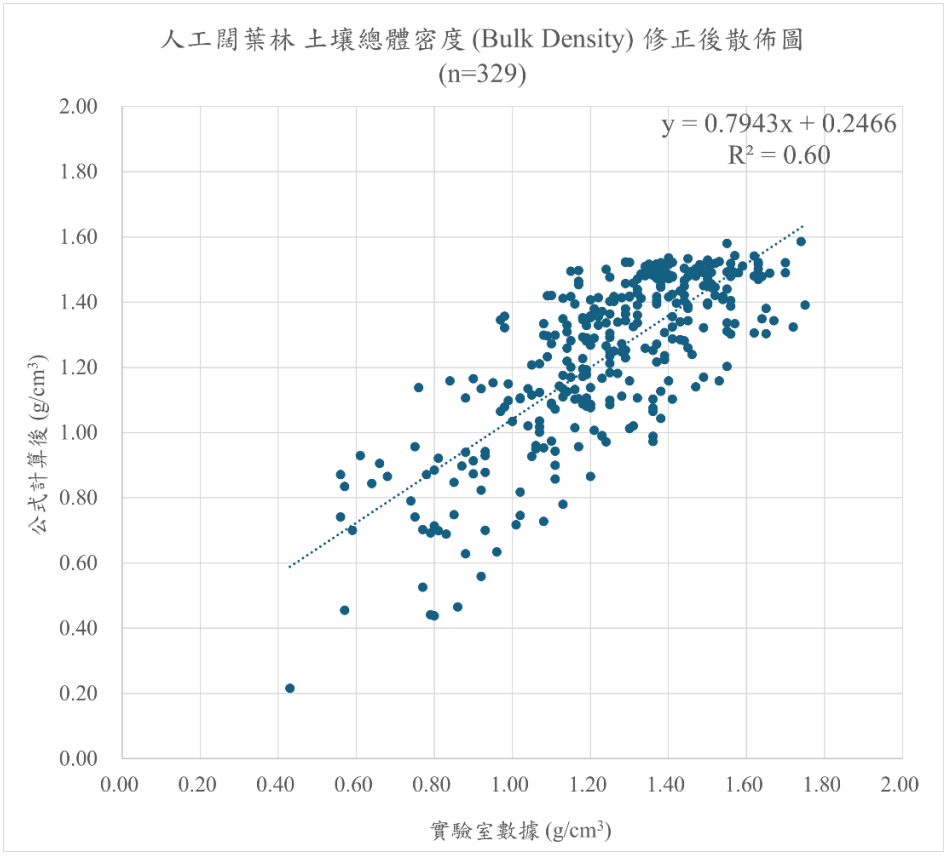


圖 3-4-20 人工闊葉林修正後 BD 之散布圖

7. 木竹混淆林

木竹混淆林的原資料中採樣剖面數為 256 筆，平均數為 1.39 g/cm^3，標準差為 0.24 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.32 g/cm^3，標準差為 0.23 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-21），解釋能力 R^2 為 0.37，斜率為 0.58。為符合解釋能力過半標準（R^2 大於 0.60），自數據中計算殘差，由高至低逐一刪減，直至符合解釋能力過半標準。於資料修正後，採樣剖面數為 208 筆，平均數為 1.41 g/cm^3，標準差為 0.20 g/cm^3。透過式 3-14 推算出「公式計算後 BD」，平均數為 1.34 g/cm^3，標準差為 0.18 g/cm^3，並繪製出散布圖（圖 3-4-22），解釋能力 R^2 為 0.60，斜率為 0.69。

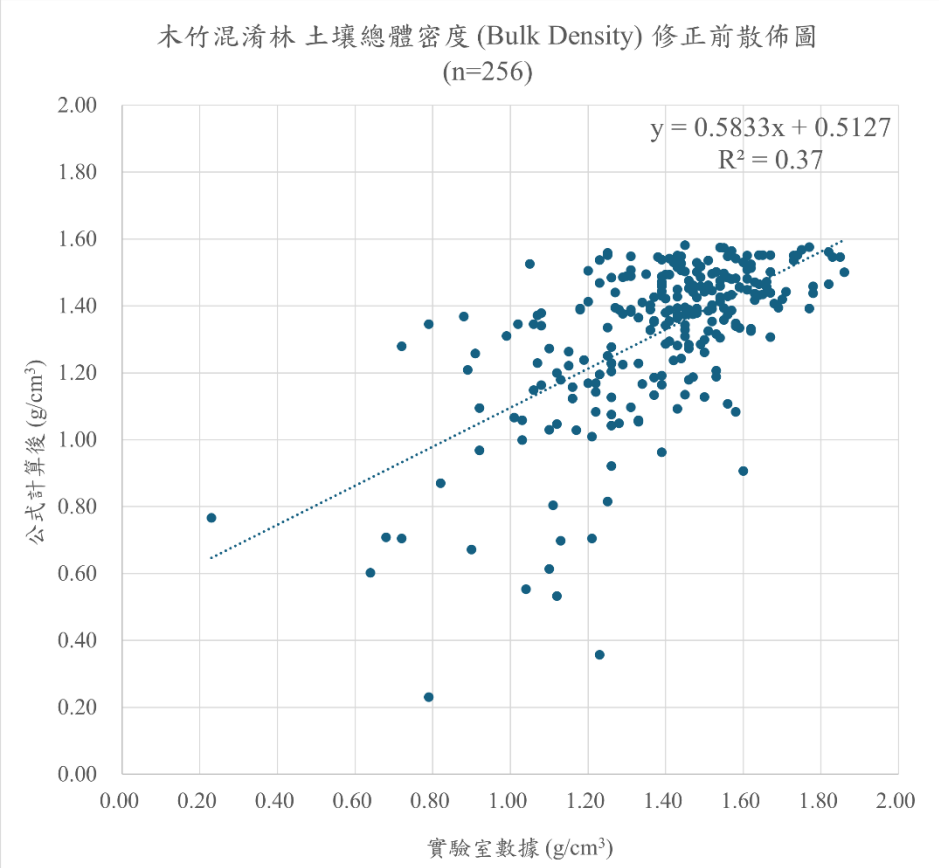


圖 3-4-21 木竹混淆林修正前 BD 之散布圖

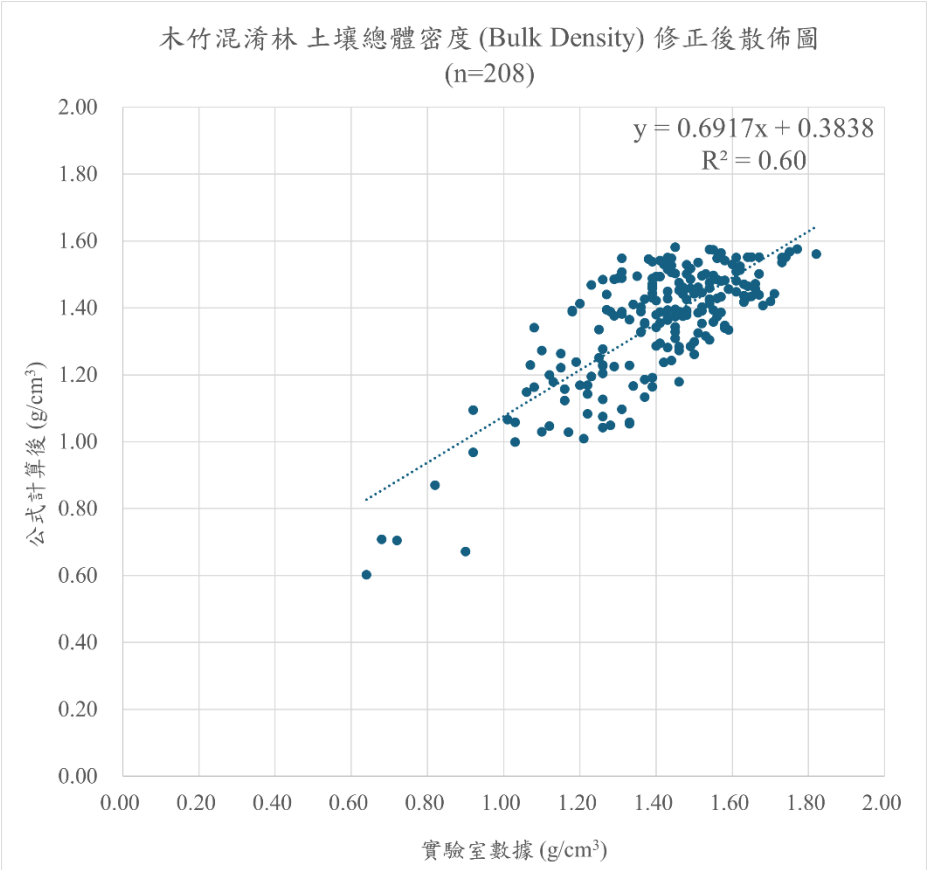


圖 3-4-22 木竹混淆林修正後 BD 之散布圖

表 3-4-5 不同林型下推算土壤總體密度之線性擬合函數

林型	剖面數	函數	R^2
天然針葉林	151	$Bd = (5.11\times10^{-4}\times Depth) + (-0.06\times TOC) + 1.40$	0.61
天然針闊葉混淆林	108	$Bd = (6.91\times10^{-3}\times Depth) + (-0.06\times TOC) + 1.34$	0.61
天然闊葉林	1750	$Bd = (5.47\times10^{-4}\times Depth) + (-0.07\times TOC) + 1.60$	0.60
人工針葉林	528	$Bd = (2.36\times10^{-3}\times Depth) + (-0.06\times TOC) + 1.40$	0.60
人工針闊葉混淆林	231	$Bd = (4.88\times10^{-3}\times Depth) + (-0.07\times TOC) + 1.45$	0.60
人工闊葉林	616	$Bd = (2.51\times10^{-3}\times Depth) + (-0.07\times TOC) + 1.55$	0.60
木竹混淆林	348	$Bd = (3.79\times10^{-4}\times Depth) + (-0.09\times TOC) + 1.71$	0.60
竹林	365	$Bd = (6.66\times10^{-4}\times Depth) + (-0.08\times TOC) + 1.64$	0.60

表格說明：土壤總體密度(bulk density, Bd, g cm^{-3})與土壤深度(Depth, cm)及土壤有機碳含量(SOC, %)呈線性關係。

接著利用公式 3-13，以等比例方式，推算出各分署轄管範圍內，位於不同林型下，0-30、0-50、0-100 及 0-150 公分深度之土壤有機碳儲存量，如表 3-4-6。

表 3-4-6 全臺各分署範圍內不同林型下之土壤有機碳儲存量估計值

分署	深度 (cm)	土壤有機碳儲存量 (kg / C m^2)							
		天然針葉林	天然針闊葉混淆林	天然闊葉林	人工針葉林	人工針闊葉混淆林	人工闊葉林	木竹混淆林	竹林
新竹	0-30	9.08±4.37 (17)	16.48±6.30 (21)	15.43±9.10 (247)	14.95±5.74 (97)	15.87±6.68 (45)	11.15±4.86 (39)	12.97±7.49 (15)	13.78±5.22 (33)
	0-50	16.12±5.75 (11)	27.10±9.30 (16)	25.32±13.2 (184)	23.43±9.09 (76)	25.58±9.22 (31)	17.63±7.24 (28)	20.94±13.6 (10)	21.29±7.48 (22)
	0-100	42.11±12.2 (3)	43.53±3.81 (3)	44.64±30.9 (37)	44.54±17.3 (13)	47.40±13.3 (12)	31.03±15.8(2)	45.70±40.6 (3)	40.06±15.3 (3)
	0-150	-	55.87 (1)	47.54±18.7 (8)	54.99±18.5 (7)	62.20±24.7 (3)	53.35 (1)	125.21 (1)	43.03±13.3 (2)
臺中	0-30	17.56±13.6 (19)	17.20±6.42 (9)	12.81±5.84 (67)	14.01±8.48 (58)	18.42±13.0 (16)	14.87±5.37 (21)	12.39±2.43 (5)	10.59±4.13 (8)
	0-50	29.14±19.3 (13)	26.16±8.88 (6)	20.37±9.13 (36)	23.59±10.3 (36)	30.67±20.6 (11)	23.29±9.86 (9)	19.17 (1)	16.99±6.84 (5)
	0-100	72.13±64.1 (3)	-	44.23±16.8 (7)	47.08±12.4 (5)	40.59±1.35 (3)	50.19 (1)	-	-
	0-150	67.23 (1)	-	64.74±16.9 (5)	62.47±21.2 (4)	62.91±9.31 (2)	66.00 (1)	-	-
南投	0-30	22.51±48.1 (42)	16.87±8.42 (42)	14.74±8.82 (163)	16.40±7.93 (63)	14.12±5.93 (40)	12.86±5.83 (23)	8.46±6.67 (36)	9.77±6.37 (36)
	0-50	30.77±50.8 (38)	27.45±10.6 (35)	22.52±12.5 (125)	25.25±10.9 (57)	22.28±8.60 (32)	18.94±8.26 (18)	12.64±8.92 (31)	16.67±9.43 (31)
	0-100	35.32±12.4 (11)	43.36±21.7 (6)	37.90±28.6 (31)	46.87±20.6 (9)	44.50±15.9 (9)	37.07±16.0 (8)	34.27±28.4 (5)	35.06±20.3 (5)
	0-150	50.26±17.3 (3)	44.15±15.7 (3)	47.95±25.6 (10)	50.99±4.04 (3)	80.90±22.5 (4)	47.17±20.0 (3)	52.58 (1)	40.18±7.45 (2)
嘉義	0-30	15.46±5.92 (17)	13.75±6.81 (5)	11.46±6.04 (116)	16.52±7.10 (84)	14.57±6.65 (14)	10.82±5.18 (43)	9.29±2.87 (172)	10.77±5.45 (157)
	0-50	24.79±6.95 (16)	20.09±5.95 (5)	17.83±9.21 (105)	24.40±9.62 (82)	23.75±9.12 (14)	17.12±7.62 (38)	14.52±4.59 (154)	16.68±8.17 (148)
	0-100	30.02±5.79 (2)	-	31.64±13.6 (16)	35.76±18.6 (23)	31.46±18.8 (2)	33.76±17.4 (6)	26.45±7.88 (25)	33.73±18.7 (36)
	0-150	34.43 (1)	-	45.45±16.6 (14)	48.48±21.4 (16)	63.41 (1)	52.52±29.6 (3)	40.67±8.82 (17)	46.37±18.7 (23)
屏東	0-30	13.38±4.90 (9)	8.44±3.77 (6)	11.64±5.38 (254)	16.50±7.07 (20)	16.55±5.12 (8)	11.20±3.73 (226)	11.37±3.35 (75)	9.75±3.62 (90)
	0-50	26.09±2.91 (5)	13.60±6.26 (5)	17.68±7.82 (229)	24.74±10.3 (17)	22.57±6.13 (6)	17.26±4.90 (209)	17.86±5.36 (74)	15.16±5.34 (90)
	0-100	-	40.51 (1)	35.97±29.3 (40)	35.34±24.8 (4)	42.52 (1)	29.79±8.33 (32)	38.39±10.0 (7)	28.66±10.3 (13)
	0-150	-	-	48.48±34.5 (29)	52.65±29.8 (3)	53.81 (1)	44.47±9.90 (28)	54.95±16.4 (7)	41.98±12.3 (12)
臺東	0-30	10.80±5.13 (14)	16.19±4.17 (5)	12.54±5.51 (242)	14.23±4.00 (25)	12.06±4.53 (17)	10.83±4.44 (63)	12.42±5.07 (10)	12.78±2.70 (6)
	0-50	17.35±6.43 (14)	26.11±5.69 (5)	19.40±8.14 (204)	20.69±5.23 (25)	18.69±7.09 (16)	16.52±6.57 (52)	16.69±5.92 (5)	17.51±3.77 (2)
	0-100	30.64±13.5 (6)	50.80±2.19 (2)	32.18±12.4 (35)	32.53±3.75 (8)	32.45±11.3 (6)	30.26±12.9 (8)	27.14±8.76 (3)	-
	0-150	15.10 (1)	-	56.74±15.5 (5)	34.55 (1)	56.06±36.6 (2)	61.27±12.6 (2)	33.74±11.6 (2)	-
花蓮	0-30	13.76±5.35 (13)	13.11±4.46 (6)	13.83±12.1 (231)	14.79±4.09 (24)	13.74±4.44 (32)	13.05±5.58 (37)	12.70±3.51 (4)	14.05±3.58 (6)
	0-50	22.36±4.15 (11)	19.51±6.22 (6)	20.28±16.0 (199)	21.10±5.55 (23)	20.38±5.92 (32)	19.58±8.10 (37)	20.06±4.97 (4)	21.62±5.17 (6)
	0-100	35.60±5.22 (5)	-	36.48±25.4 (22)	29.36±2.92 (5)	36.07±8.09 (8)	36.92±20.0 (4)	-	-
	0-150	41.06±5.55 (3)	-	41.54±17.5 (12)	37.06±5.10 (5)	55.57 (1)	19.89 (1)	-	-
宜蘭	0-30	15.90±9.82 (3)	13.55±2.07 (2)	14.98±9.23 (199)	15.98±8.25 (120)	14.30±6.02 (46)	14.27±5.68 (32)	17.48±12.6 (4)	17.17 (1)
	0-50	21.77±12.2 (3)	13.28 (1)	24.13±14.0 (139)	24.42±13.9 (88)	22.87±8.73 (28)	23.43±6.53 (21)	29.53±19.3 (3)	21.32 (1)
	0-100	-	17.37 (1)	48.74±29.1 (26)	44.49±40.4 (15)	34.75±8.76 (6)	38.40±24.6 (3)	54.45±42.9 (2)	-
	0-150	-	23.06 (1)	49.30±11.5 (9)	48.50±9.44 (5)	35.36 (1)	45.51 (1)	-	-

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表格說明：利用土壤有機碳儲存量(kg C m^2) = [有機碳(g kg)×總體密度(g cm^3)×深度(cm)]×[1-含石率(%)]÷100 進行計算，數值表示方式為平均值±標準差（樣本數 n）；由於原始數據缺乏含石率資料，故此處計算結果未納入含石率。

● 執行成果

1. 含石率推算方法與結果

(1) 含石率推算方法

準確估計含石率對於土壤有機碳儲存量的推估相當重要，但由於本計畫之土壤採樣剖面中，僅 3,807 筆有含石率紀錄（約佔總樣本的 26%），可能會大幅高估土壤有機碳儲存量，進而影響模型的準確性及代表性。雖然含石率通常被認為與坡度等地形因子相關 (Kutiel *et al*., 1998; Gallardo-Cruz *et al*., 2009; Chen *et al*., 2011)，但在本計畫之採樣剖面中，已知含石率與各地形因子的線性關係非常低（圖 3-4-23），R^2趨近於 0。這種弱相關性代表單純依靠地形因子進行線性回歸可能無法準確推估含石率。由於含石率的特性在不同地區差異極大，目前學界尚未有泛用的含石率推估模型。考量到坡度對土壤沖刷和岩石積累的影響，以及土壤深度與母質風化程度的關係，本計畫將選擇坡度與土壤深度作為劃分標準。藉由已知含石率之剖面計算不同坡度與土壤深度的平均含石率，並將推算結果代回相對應的坡度與土壤深度。

考量到本計畫使用的坡度數據為 20 公尺x20 公尺的網格資料，為了提高淺層土壤（0-30 公分）含石率推算的準確性，本研究另外採用林業保育署提供之林型調查資料進行推估。該資料包含 1,600 筆詳細的表土含石率與現地觀察之坡度資料，可以更精確的反映小尺度地形變化對含石率的影響。坡度的區分法使用自然斷點法 (Natural Breaks)，該方法可以最小化組內變異，最大化組間變異 (Jenks, 1967)，以達到最大的分組效益。在應用自然斷點法時，本計畫分析坡度數據的分布特徵，將其分為 6 個等級，每個等級內的坡度數值相近，有助於含石率的推估。

對於 30-150 公分的土壤剖面，由於缺乏相應的林業保育署資料，本研究主要依據現有的土壤剖面資料進行含石率推估。在該深度範圍內，使用坡度區分土壤無法有效反映含石率隨坡度增加的趨勢。可能是因為深層土壤的含石率受到土壤化育過程的影響，而非當前地表坡度的直接作用。隨著深度增加，土壤剖面可能經歷複雜的成土作用，如岩石風化、土壤侵蝕和堆積等，導致含石率分布不均。使得坡度與深層土壤含石率之間的關係不如表層土壤明顯。為了更準確地捕捉含石率變化趨勢，本研究結合土壤深度和已知含石率資料，將深度 30-150 公分的土壤剖面分為三個區間（30-50、50-100、100-150 公分），並分別計算各區間的平均含石率。相較於使用坡度分組，此方法可以明顯的反映深層土壤含石率之垂直變化趨勢。

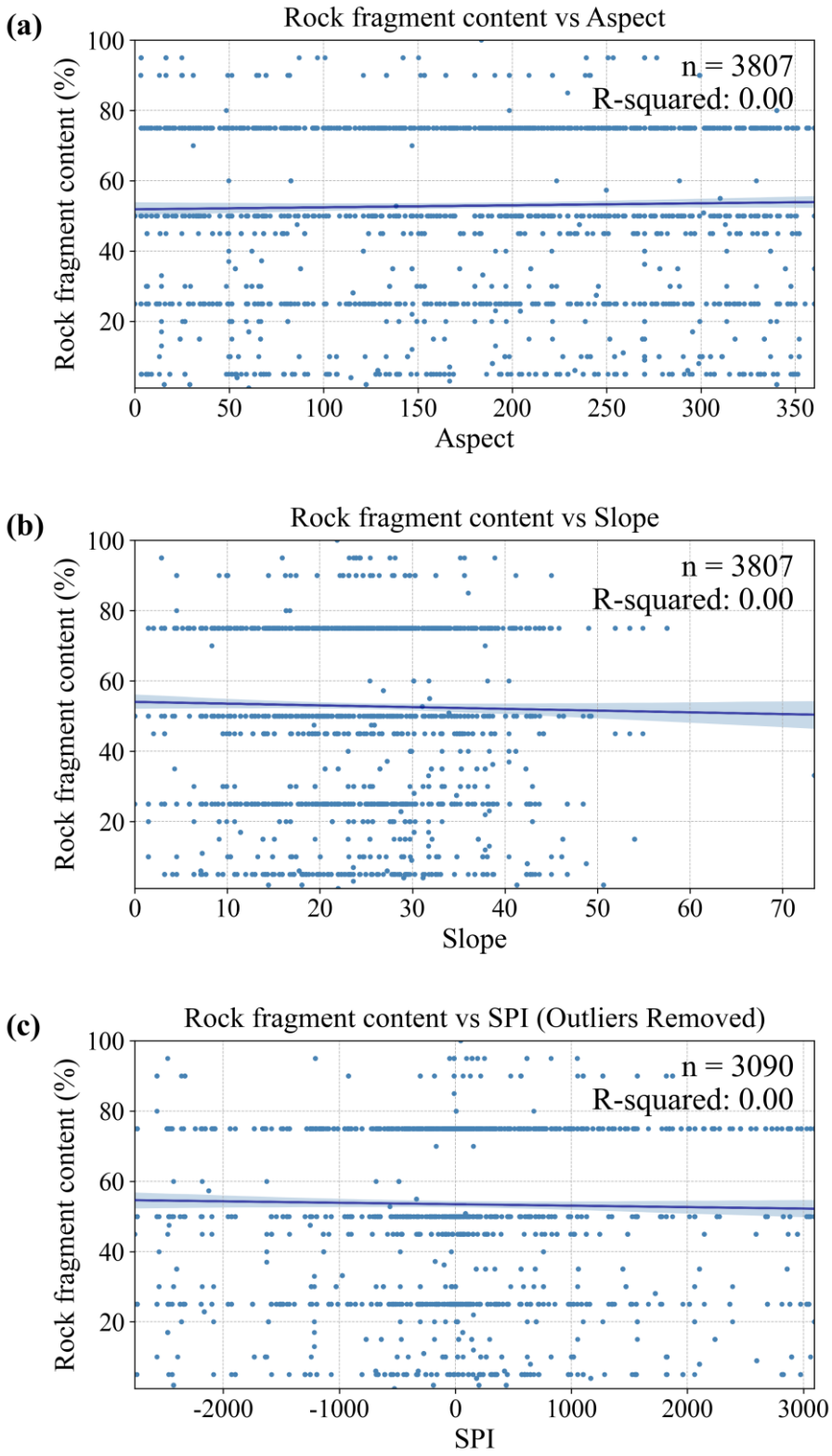


圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(1/3)

(a) 坡向；(b) 坡度；(c) 河流動力指數 (SPI)

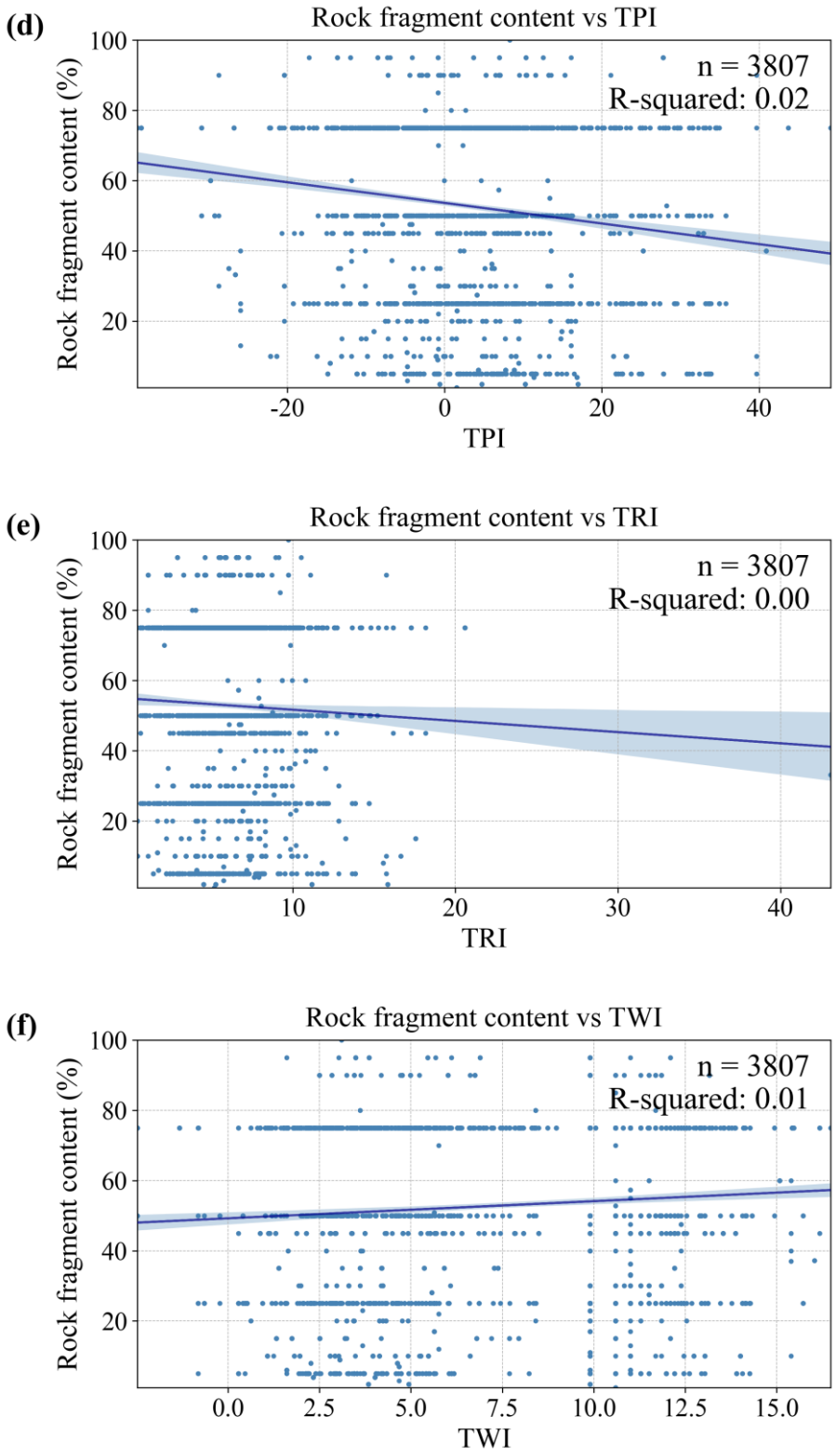


圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(2/3)

(d) 地形位置指數 (TPI)；(e) 地形崎嶇指數 (TRI)；(f) 地形濕潤指數 (TWI)

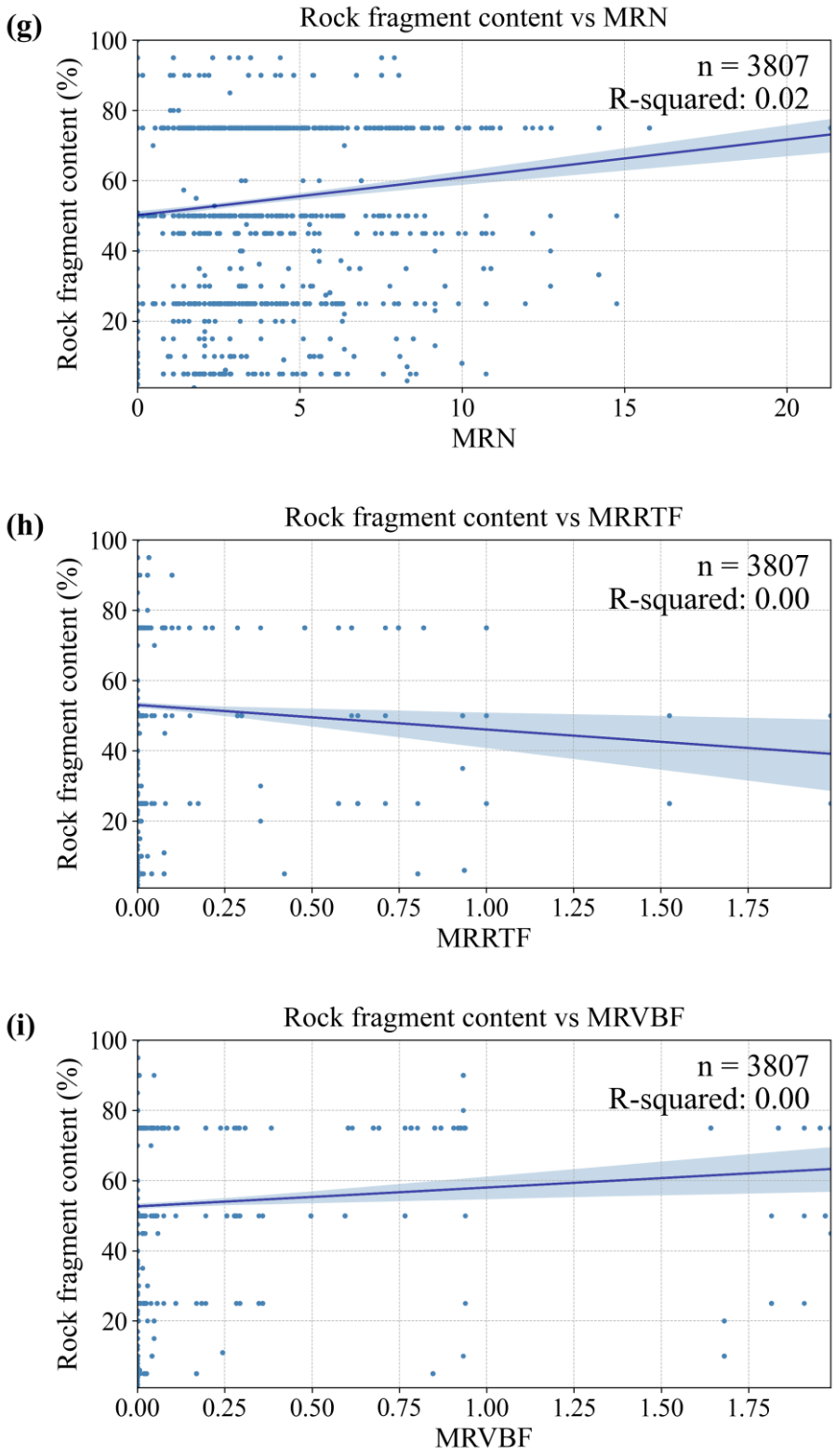


圖 3-4-23 全臺林業分署範圍已知含石率與各地形因子之線性關係(3/3)

(g) 梅爾頓崎嶇度數 (MRN)；(h) 山脊頂部平坦度多分辨率指標 (MRRTF)；(i) 河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)

(2) 土壤深度0-30公分含石率推算結果

土深 0-30 公分的含石率資料缺乏時，根據已知的坡度資料來推算該深度含石率（表 3-4-7）。已知土壤含石率在深度 0-30 公分的範圍變異非常大，變異係數 (CV) 皆大於 97%，說明含石率在各坡度區間內存在較大的變異性。該變異性可能源於多種因素，包含人為干擾（如農業活動）、局部地形差異導致的侵蝕與沉積作用，以及母質層的空間異質性等。儘管如此，含石率整體上仍呈現隨坡度增加而上升的趨勢，這與坡度增加導致表層土壤侵蝕加劇，暴露更多岩石碎屑的理論相符 (Ziadat & Taimeh, 2013; Fang *et al.*, 2015)。值得注意的是，坡度 0-8.09%區間的平均含石率略高於坡度 8.09-18.9%區間，可能是由於林業分署內較平坦的區域 (0-8.09 %) 包括河床地區，此區的河床侵蝕 (Riverbank erosion) 導致土壤無法抵抗而被沖蝕 (Roslan *et al.*, 2013)，因此推測為造成含石率較高的結果。圖 3-4-24 為屏東縣恆春鎮加都魯溪沿岸低坡度採樣剖面，從圖中可以發現沿岸有兩筆高含石率採樣紀錄。

表 3-4-7 全臺林業分署 0-30 公分各坡度之已知土壤含石率

坡度 (%)	樣本數	平均含石率 (%)	變異係數 (%)
0.00 - 8.09	77	18.9±23.6	124
8.09 - 18.9	190	17.1±23.9	140
18.9 - 28.6	336	19.8±24.9	126
28.6 - 36.8	499	22.0±26.6	121
36.8 - 45.4	423	27.6±28.1	102
45.4 – 100	75	25.6±25.0	97.6

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

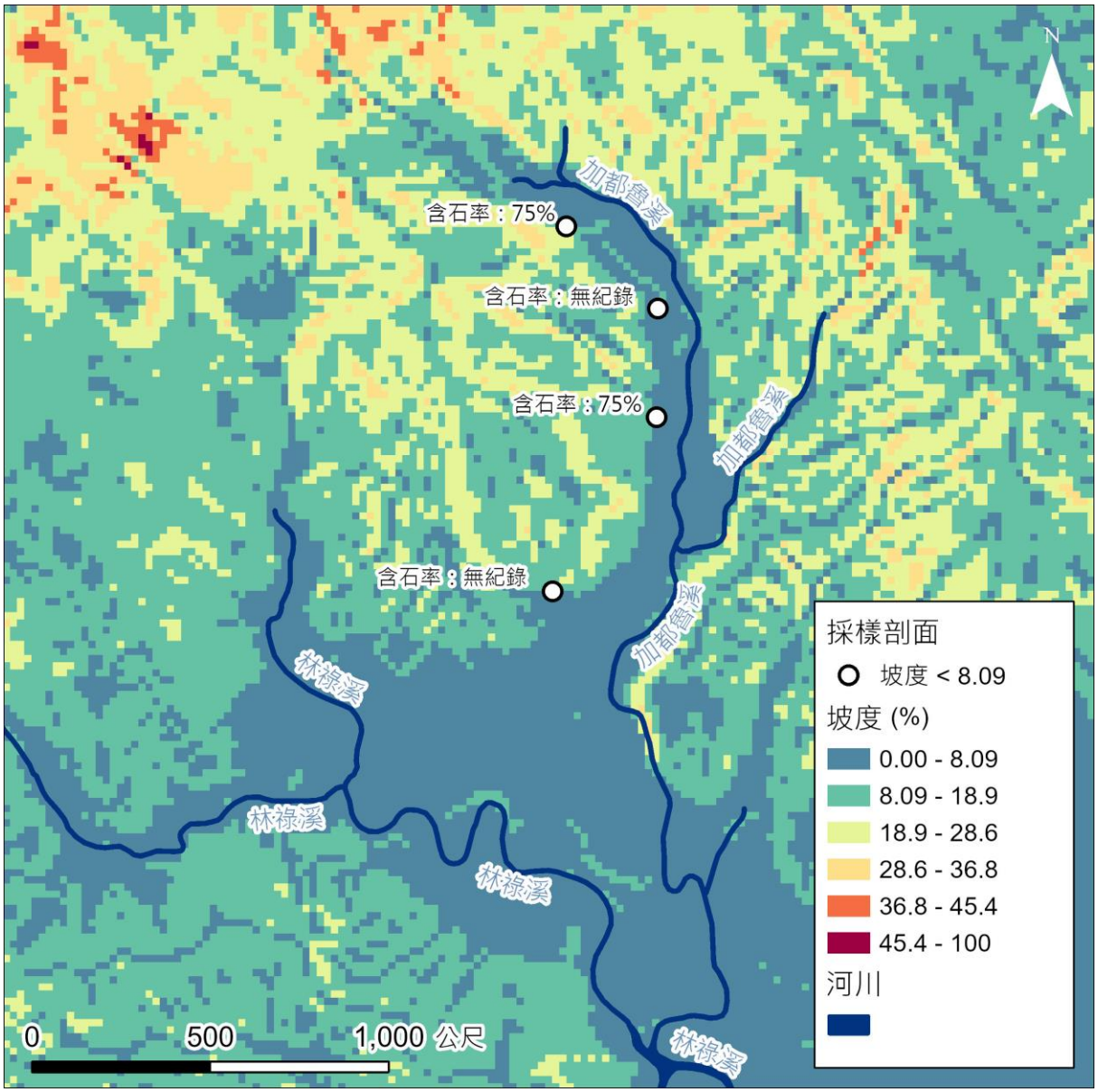


圖 3-4-24 屏東縣恆春鎮加都魯溪沿岸低坡度採樣剖面示意圖

(3) 土壤深度30-150公分含石率推算結果

土深 30-150 公分的含石率資料缺乏時，根據本計畫現有採樣資料中的含石率數值，推算該深度範圍內各層之含石率（表 3-4-8）。土壤含石率在深度 30-150 公分的範圍內呈現明顯的垂直變化趨勢。如表 3-4-8 所示，平均含石率從 30-50 公分的 53.0%逐漸增加到 100-150 公分的 60.4%，反映了隨深度增加土壤含石率逐漸升高的趨勢。儘管含石率隨深度增加，其變異係數 (CV) 卻呈現下降趨勢，從 30-50 公分的 47.4%降至 100-150 公分的 35.7%。表 3-4-9 呈現全臺林業分署各土壤深度（0-150 公分）含石率，此數據包含實測值與推估值，並依深度分層計算其平均含石率。表 3-4-9 為總和已知含石率與推估含石率的結果。從表中可以發現，含石率隨深度增加而上升，從表層（0-30 公分）的 24.1%逐漸增加至深層（100-150 公分）的 60.4%。此外，有含石率資料的樣本比例也隨深度增加，從表層的 17%上升至深層的 88%，反映深層土壤的含石率資料更為完整。在不確定性的部分，含石率的變異係數從表層的 59.3%降至 50-100 公分處的 28.5%，說明深層土壤含石率分布較為均勻。而總樣本數則隨深度遞減，從表層的 7,212 筆減至深層的 1,064 筆，代表深層土壤的資料較少，在後續的碳儲存推估模型結果中，深層土壤推估結果的代表性可能會遜於表層土壤。

表 3-4-8 全臺林業分署 30-150 公分各土壤深度之已知含石率

深度(cm)	樣本數	平均含石率 (%)	變異係數(%)
30 - 50	533	53.0±25.1	47.4
50 - 100	1,101	57.0±24.4	42.9
100 - 150	941	60.4±21.6	35.7

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-4-9 全臺林業分署推估 0-150 公分各土壤深度之平均含石率

深度(cm)	樣本數	平均含石率(%)	變異係數(%)	已知含石率比例(%)
0 - 30	7,212	24.1±14.3	59.3	17
30 - 50	3,740	38.2±18.7	49.0	14
50 - 100	2,786	54.5±15.5	28.5	40
100 - 150	1,064	60.4±20.3	33.6	88

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

2. 總體密度 (BD) 推算方法與結果

(1) 總體密度推算方法

由於本計畫整理之最終分析資料中，總體密度從缺比例非常高（14,802 筆中有 10,837 筆無 BD 資料，約佔總筆數的 73%），須藉由其它土壤性質資料進行總體密度推算，而一般僅使用土壤性質的轉換函數來推算，在不同地區所得出之結果代表性較差。隨著數位土壤繪圖 (Digital soil mapping) 日益普及，越來越多研究通過結合土壤性質和環境資料來預測總體密度 (Al-Shammary *et al*.,2018)。近 10 年，已有許多研究使用隨機森林 (Random Forest) 來預測土壤 BD，並獲得比線性回歸良好的預測結果 (Rodríguez-Lado *et al*., 2015; Akpa *et al*., 2016; Katuwal *et al*., 2020)。由於臺灣山區地勢起伏大，鄰近地區在土壤性質上變異程度極高（Amuyou *et al*., 2013; Bojko *et al*., 2017; 廖偉志，2006），無法僅用單一線性回歸表示全臺 BD 與自變數間之關係，因此本計畫選定隨機森林作為推估總體密度的模型。

在自變數的部分，使用與推估土壤有機碳儲存量相同的環境因子（表 2-2-2），並加上土壤轉換函數 (Tsui *et al*.,2013) 所使用之變數（土壤有機碳 (%)、厚度），共 46 個自變數作為環境因子。由於原始採樣剖面缺乏環境因子，將使用 ArcGIS Pro 中的 Extract Multi Values to Points 功能將環境因子萃取到採樣剖面中。在評估模型效能的部分，將資料分成 70% 的訓練集和 30% 的驗證集，使用決定係數 (R^2)、一致性指數 (Concordance Index)、均方誤差 (MSE)、均方根誤差 (RMSE) 和偏差 (Bias) 等指標進行評估，而考量到總體密度與海拔呈高度相關 (Saeed *et al*., 2014; Zhou *et al*., 2016)，再將採樣剖面切分為三種海拔，分別為 0-1,000 公尺（代表闊葉林）、1,000-2,000 公尺（代表混合林）及 2,000 公尺以上（代表針葉林）(Chatterjee *et al*., 2016; Kosaka *et al*., 2005)，概算不同海拔之土壤總體密度。

全臺分署範圍內，農試所採樣點分布如圖 3-4-25 所示，依照前述海拔劃分方式，以紅色點位表示為海拔 1,000 公尺以下之採樣剖面（剖面數：3,100；樣本數：8,485；有 BD 樣本數：2,334），綠色表示為 1,000-2,000 公尺之採樣剖面（剖面數：1,426；樣本數：4,269；有 BD 樣本數：943），藍色則為海拔 2,000 公尺以上之採樣剖面（剖面數：642；樣本數：2,048；有 BD 樣本數：682），以此方式表示採樣剖面於各分署三類海拔範圍內之分布情形。

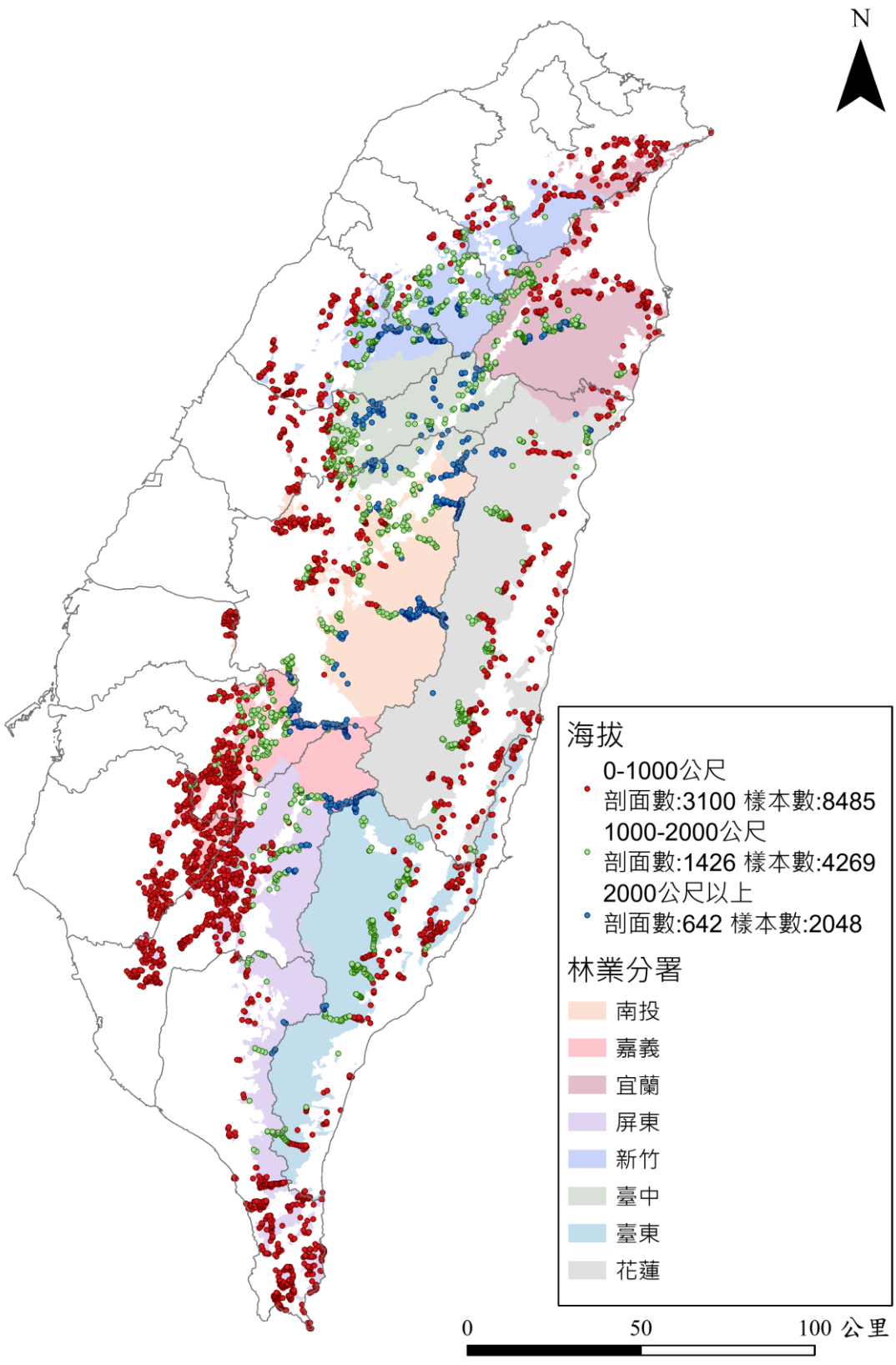


圖 3-4-25 全臺各林業分署轄區內土壤採樣分布圖

（資料來源：台灣水資源與農業研究院（2023 年林業署委辦計畫）；台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(2) 總體密度 (BD) 推算成果

由於前述 BD 資料從缺筆數大於 50%，因此需藉已知資訊進行推估，本計畫藉各海拔之已知 BD 值以隨機森林推算未知 BD，計算採用土樣剖面採集後測得之 BD 為依變數（於後續圖表中表示為"BD measured"），土壤剖面厚度 (Thickness)、TOC (g/kg)及 44 項環境因子作為自變數，來訓練各海拔之 BD 推估模型。然而，資料仍存在離群值，為了能初步篩選 BD 離群值以利後續建立模型時較具有代表性，先使用 Kolmogorov-Smirnov (KS) 檢定來驗證樣本是否符合常態分布。

KS 檢定的運作是比較樣本分布與理論分布間的差異，來判斷樣本是否符合常態分布，該方法對於大樣本 ($n \geq 30$) 具有較佳檢定效果 (Justel *et al*., 1997)，驗證結果顯示 BD 樣本與常態分布有顯著的差異 ($p\text{-value} < 0.05$)，即拒絕虛無假設，認為樣本不符合常態分布。從圖 3-4-26 可以看出，BD 資料整體分布呈現明顯的左偏態（平均值為 1.18 g/cm^3，中位數為 1.24 g/cm^3，標準差為 0.34 g/cm^3），而從圖 3-4-27 也可以看出，累積機率分布在樣本值與理論值間存在顯著差異，KS 統計量為 0.66。在樣本有偏態時，經常使用 Tukey 法 (Tukey's method) 篩選離群值，該方法使用 1.5 倍四分位間距 (IQR) 識別離群值 (Seo, 2006)，最終移除 6 筆離群值，共 3,559 筆資料作為模型訓練樣本。

在移除離群值確立資料代表性後，利用採樣剖面之土壤總碳量 (TOC)、採樣土壤層厚度 (Thickness)、環境因子與測量 BD 資料進行模型建置，並使用網格搜索 (Grid Search) 測試隨機森林的參數 ntree（決策樹的數量）與 mtry（訓練特徵數）於哪一種組合下驗證集的 R^2 最高，將 R^2 最高的組合作為選定參數，由於 R^2 增量會隨著 ntree 的增加而遞減，ntree 測試參數常用 2 的冪次，而 mtry 預設為特徵數三分之一，通常會將此值加倍或減半來測試效能 (Oshiro *et al*., 2012; Al-Shammary *et al*., 2018)。此外，雖然 R^2 會隨著 ntree 的數量增加而不斷上升，但反覆訓練的過程會耗費大量計算資源，在此使用早停法 (Early Stopping) 作為停止搜索依據，當某次模型訓練結果之 R^2 增量不超過先前訓練結果 0.01 時，則使用該次訓練參數作為模型最佳參數。早停法是一種訓練機器學習模型的技術，其透過設定準確度增加的閾值，提前結束訓練來平衡運算時間與模型表現。

當訓練好模型後，除了利用前述指標確認模型效能外，也需要評估各自變數在模型中的重要性，由於隨機森林較難像線性回歸一樣透過簡單的回歸式表示各自變數的

重要性，而自變數的重要性為評估是否有拆分資料必要性的依據，因此使用百分比均方誤差 (%IncMSE)、節點不純度減少值 (IncNodePurity) 來評估變數的重要性。

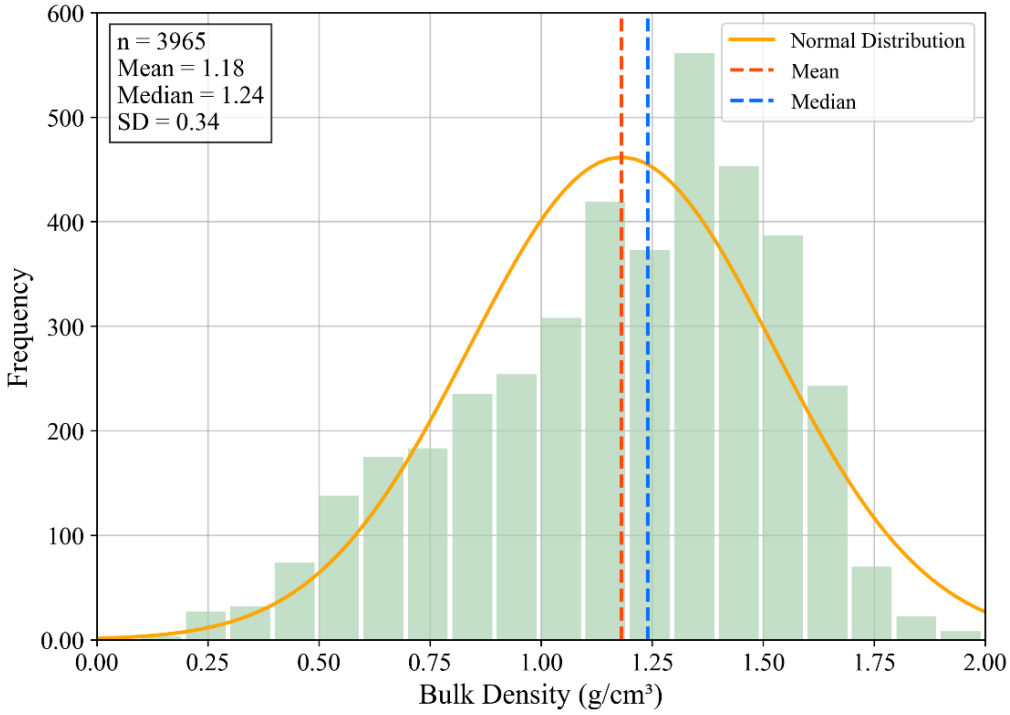


圖 3-4-26 全臺林業分署採樣土壤總體密度數據分布直方圖

台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

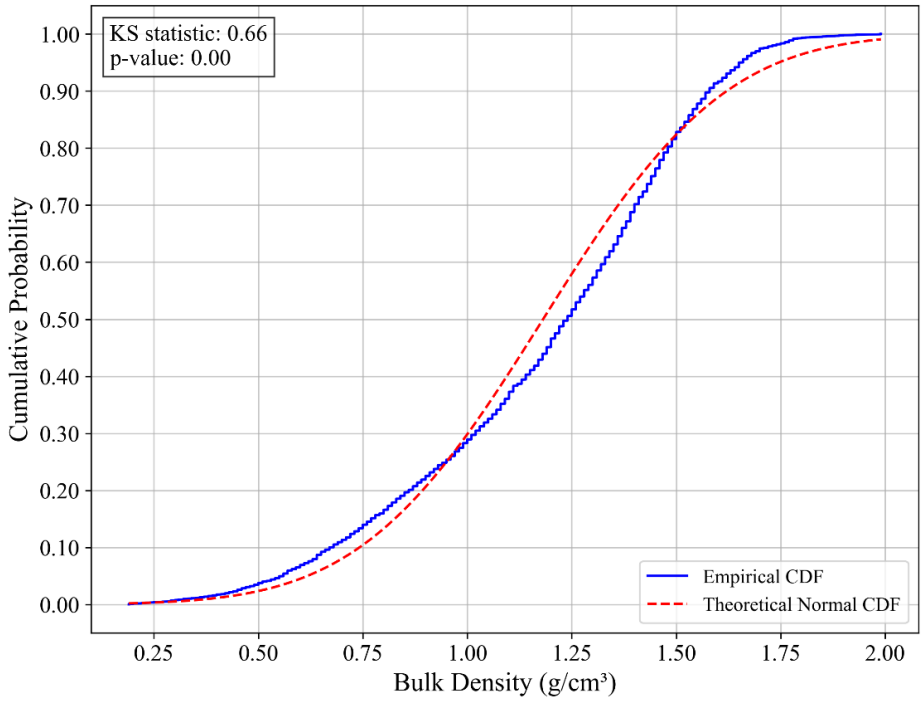


圖 3-4-27 全臺林業分署採樣土壤總體密度累積機率分布函數

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

A. 海拔 0-1,000 公尺

海拔 0-1,000 公尺的訓練資料為 2,334 筆，BD 平均值為 1.32 g/cm^3，標準差為 0.26 g/cm^3，根據網格搜索與早停法的篩選結果，以最佳參數 (ntree =32, mtry =15) 訓練模型（圖 3-4-28），模型效能如表 3-4-10 所示，R^2 與一致性指數在驗證集和訓練集都大於 0.5，而使用 Bootstrap 法驗證的結果也顯示 R^2 大於 0.5，且與單次模型訓練的結果相比沒有明顯差異，表示模型有一定的解釋力和較高的穩定性。而從圖 3-4-29 也可以發現，推估模型可以良好的捕捉到 BD 的整體趨勢，R^2 高達 0.86 且 95%信賴區間範圍非常窄，偏差趨近於 0，代表樣本預測趨勢與母體趨勢差異非常小。

在不確定性的部分，RMSE 在驗證集為 0.16（表 3-4-10），根據 95%預測區間顯示，BD 推估值與測量值的差異約在±0.16（圖 3-4-29），且在測量 BD 值較低和較高時分別出現輕微高估與低估之情勢，可能是由於隨機森林計算出之 BD 是由多棵決策樹的推估結果平均而來，在產生概括總體趨勢的結果時也犧牲掉少數離群樣本的準確性。

表 3-4-10 全臺林業分署 0-1,000 公尺訓練集和驗證集之各項模型指標評估表

Statistics	Training Model (n = 1,591)	Validation Model (n = 682)	Bootstrap validation	
			Training Model	Validation
R^2	0.94	0.60	0.95±0.00	0.64±0.00
Concordance	0.94	0.78	0.94±0.00	0.78±0.00
MSE	0.00	0.03	0.00±0.00	0.02±0.00
RMSE	0.06	0.16	0.06±0.00	0.15±0.00
Bias	0.00	-0.01	0.00±0.00	-0.02±0.00

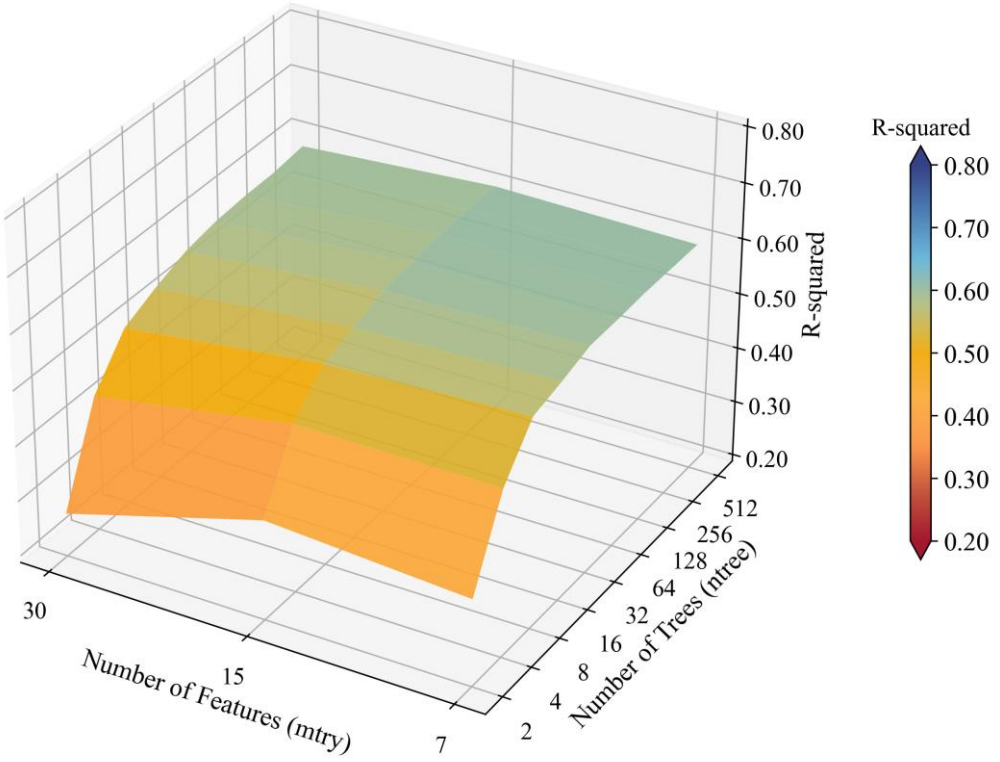


圖 3-4-28 全臺林業分署 0-1,000 公尺 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2

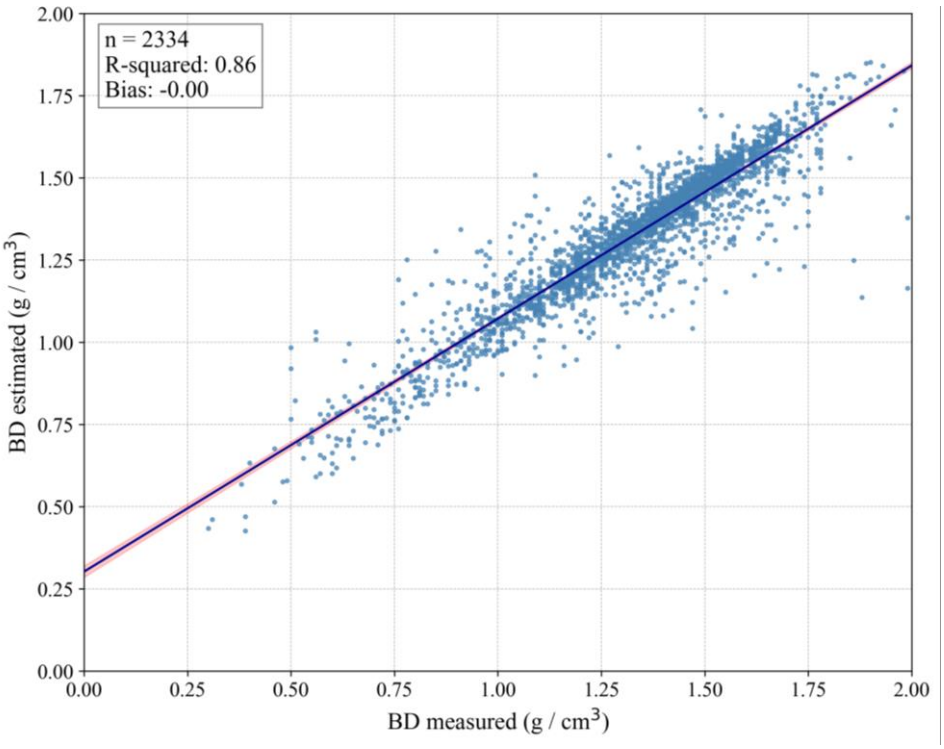


圖 3-4-29 全臺林業分署 0-1,000 公尺 BD 測量值與推估值之散布圖

在變數非線性影響程度評估的部分，有機碳含量 (TOC %) 為主要的影響因子（圖 3-4-30），海拔 (DEM)、年均溫度 (MAT)、年總降雨量 (TAP) 對土壤總體密度 (BD) 也有一定的影響。其餘地形因子，如地形位置指數 (TPI)、河流動力指數 (SPI)、地形崎嶇指數 (TRI) 與常態化差值植生指標 (NDVI) 對 BD 也有些微的貢獻，這些地形因子與其他環境因子的相互作用可能會影響植被生長，間接改變 TOC 含量，進而影響土壤的總體密度。

在模型拆分評估的部分，由於訓練模型需要一定的樣本數，且大部分環境因子在拆分資料後，貢獻程度遠不如 TOC，因此在海拔 1,000 公尺以下的資料將不再進行拆分，並在後續研究中，比較使用拆分海拔資料和使用整體資料推估的總體密度，同時探討資料的變異性。

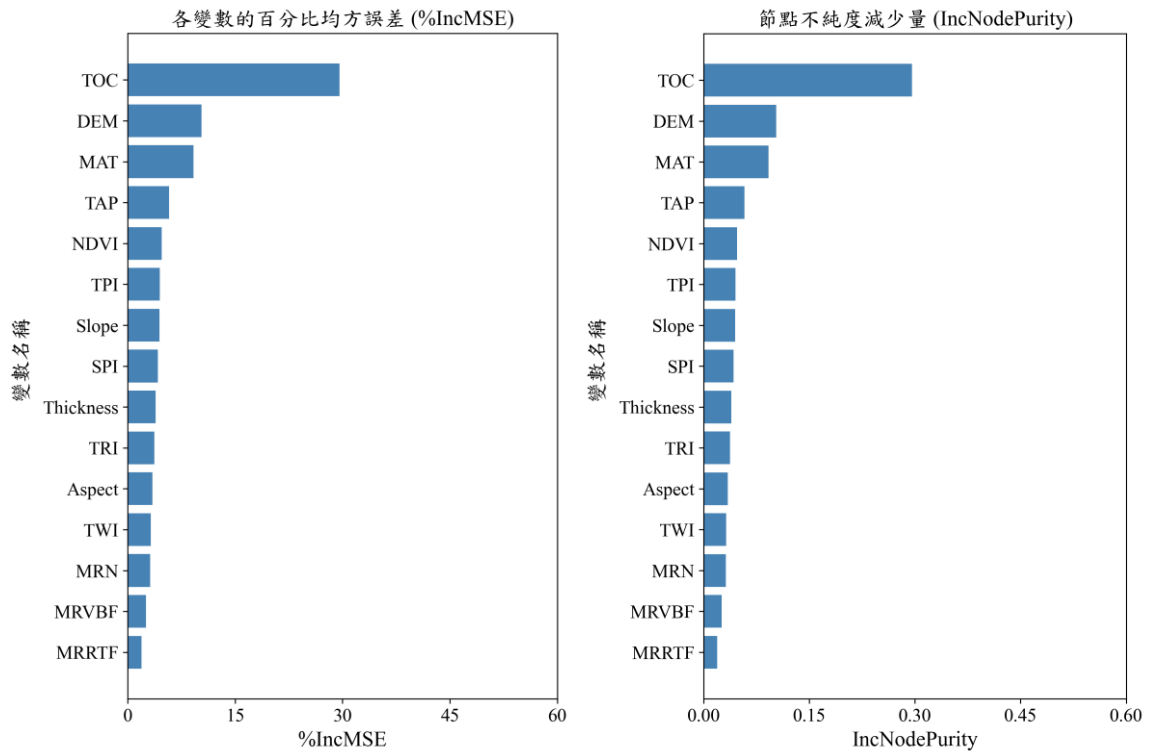


圖 3-4-30 全臺林業分署不同環境因子對 0-1,000 公尺土壤總體密度之影響程度

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

B. 海拔 1,000-2,000 公尺

海拔 1,000-2,000 公尺的訓練資料為 943 筆，平均數為 1.03 g/cm^3，標準差為 0.35 g/cm^3，根據網格搜索與早停法的篩選結果，以最佳參數 (ntree =32, mtry=15) 訓練模型（圖 3-4-31），模型效能如表 3-4-11 所示，R^2 與一致性指數在驗證集和訓練集都大於 0.5，而使用 Bootstrap 法驗證的結果也顯示 R^2 大於 0.5，雖然 Bootstrap 驗證集與訓練集 R^2 差距較大，且各項指標表現略遜於 1,000 公尺以下之推估結果，但整體上仍有一定的解釋力和穩定性。而從圖 3-4-32 也可以發現，推估模型可以良好的捕捉到總體密度 (BD) 的整體趨勢，R^2 高達 0.85 且 95%信賴區間範圍非常窄，偏差趨近於 0，代表樣本預測趨勢與母體趨勢差異非常小。

在不確定性的部分，海拔 1,000-2,000 公尺訓練模型的預測誤差大於海拔 0-1,000 公尺，RMSE 在驗證集達 0.2 以上（表 3-4-11），根據 95%預測區間顯示，BD 推估值與測量值的差異約在±0.2（圖 3-4-32），且在測量 BD 值低和高時分別出現高估與低估之情勢，除了隨機森林模型導致的離群值偏差外，也有可能是因為較少的樣本數導致推估誤差增加。

表 3-4-11 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 訓練集和驗證集之各項模型指標評估表

Statistics	Training Model (n = 662)	Validation Model (n = 284)	Bootstrap validation	
			Training Model	Validation
R^2	0.93	0.61	0.93±0.00	0.53±0.00
Concordance	0.93	0.8	0.93±0.00	0.78±0.00
MSE	0.01	0.05	0.01±0.00	0.06±0.00
RMSE	0.09	0.22	0.09±0.00	0.24±0.00
Bias	0	0.02	0.00±0.00	0.04±0.00

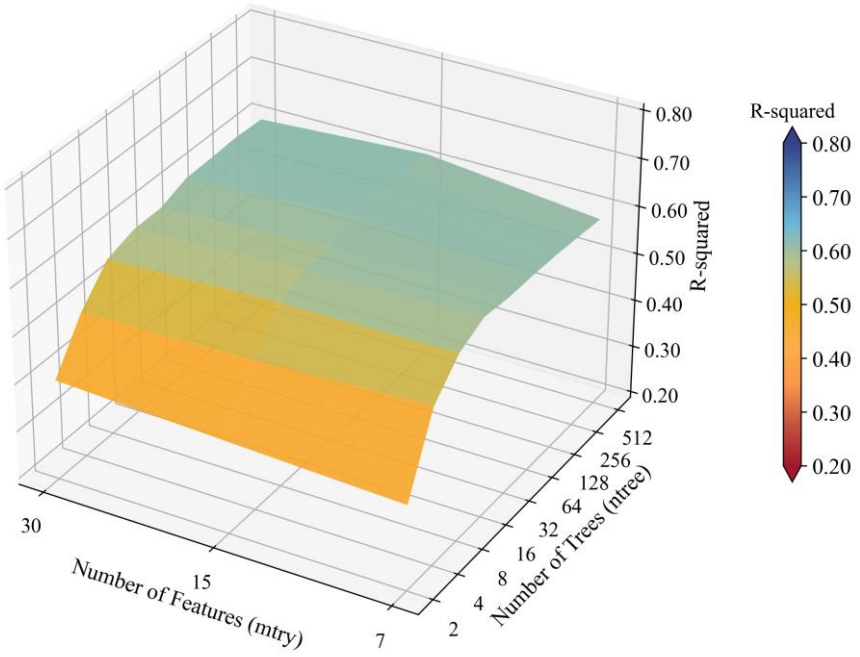


圖 3-4-31 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2

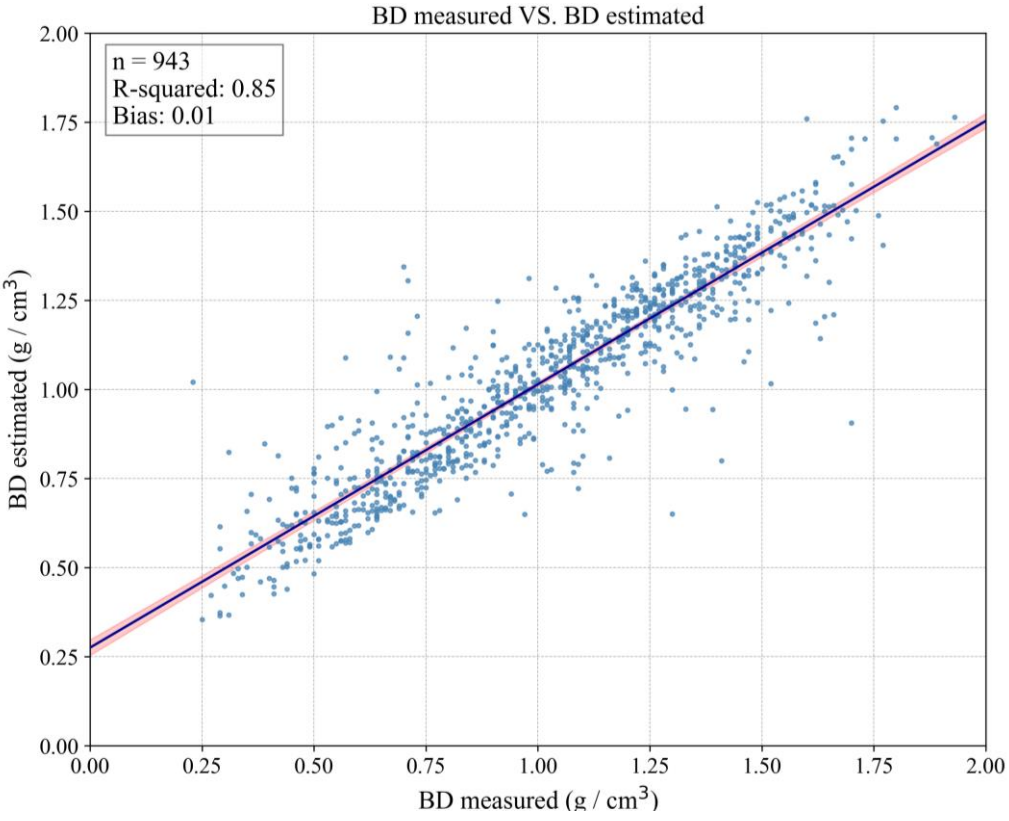


圖 3-4-32 全臺林業分署 1,000-2,000 公尺 BD 測量值與推估值之散布圖

在變數非線性影響程度評估的部分，有機碳含量 (TOC %) 與土壤剖面厚度 (Thickness) 為主要的影響因子（圖 3-4-33），年均溫度 (MAT)、常態化差值植生指標 (NDVI)、海拔 (DEM) 等環境因子對總體密度 (BD) 也略有影響。相較於 0-1,000 公尺的土壤，1,000-2,000 公尺之土壤總體密度更多取決於土壤剖面本身之性質，各項環境因子的影響隨海拔上升而降低。

在模型拆分評估的部分，由於訓練模型需要一定的樣本數且大多數環境因子在拆分資料後，貢獻程度遠不如 TOC，因此在海拔 1,000-2,000 公尺的資料將不再進行拆分，並在後續研究中，比較使用拆分海拔資料和使用整體資料推估的總體密度，同時探討資料的變異性。

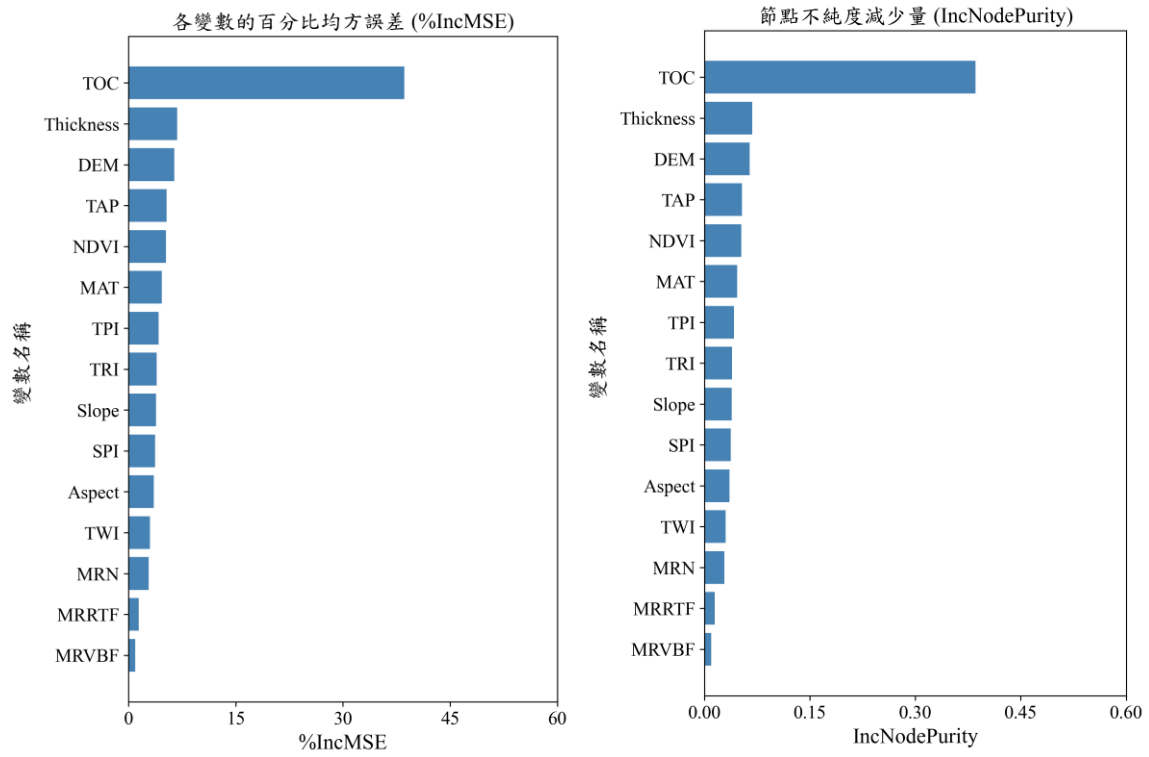


圖 3-4-33 全臺林業分署不同環境因子對 1,000-2,000 公尺土壤總體密度之影響程度

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

C. 海拔 2,000 公尺以上

海拔 2,000 公尺以上的訓練資料為 682 筆，平均數為 0.92 g/cm^3，標準差為 0.32 g/cm^3，根據網格搜索與早停法的篩選結果，以最佳參數 (ntree=32,mtry=15) 訓練模型（圖 3-4-34），模型效能如表 3-4-12 所示，R^2 與一致性指數在驗證集和訓練集都大於 0.6，而使用 Bootstrap 法驗證的結果也顯示 R^2 大於 0.6，且各項指標與單次模型訓練的結果比較後幾乎沒有差異，表示模型有一定的解釋力和高度的穩定性。而從圖 3-4-34 也可以發現，推估模型可以良好的捕捉到總體密度 (BD) 的整體趨勢，R^2 高達 0.86 且 95%信賴區間範圍非常窄，偏差趨近於 0，代表樣本預測趨勢與母體差異非常小。

在不確定性的部分，海拔 2,000 公尺以上訓練模型的預測誤差大於海拔 0-1,000 公尺、小於海拔 1,000-2,000 公尺，RMSE 在驗證集為 0.19（表 3-4-12），根據 95%預測區間顯示，BD 推估值與測量值的差異約在±0.2（圖 3-4-35），在偏差的部分，相較於海拔 0-1,000 公尺與 1,000-2,000 公尺的訓練資料，海拔 2,000 公尺以上的資料僅在 BD 值低時出現高估之情勢，BD 值高時則無明顯偏差。

表 3-4-12 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 訓練集和驗證集之各項模型指標評估表

Statistics	Training Model (n = 480)	Validation Model (n = 205)	Bootstrap validation	
			Training Model	Validation
R^2	0.95	0.65	0.95±0.00	0.69±0.00
Concordance	0.94	0.81	0.94±0.00	0.82±0.00
MSE	0.01	0.04	0.01±0.00	0.03±0.00
RMSE	0.07	0.19	0.08±0.00	0.18±0.00
Bias	0.00	0.00	0.00±0.00	-0.01±0.00

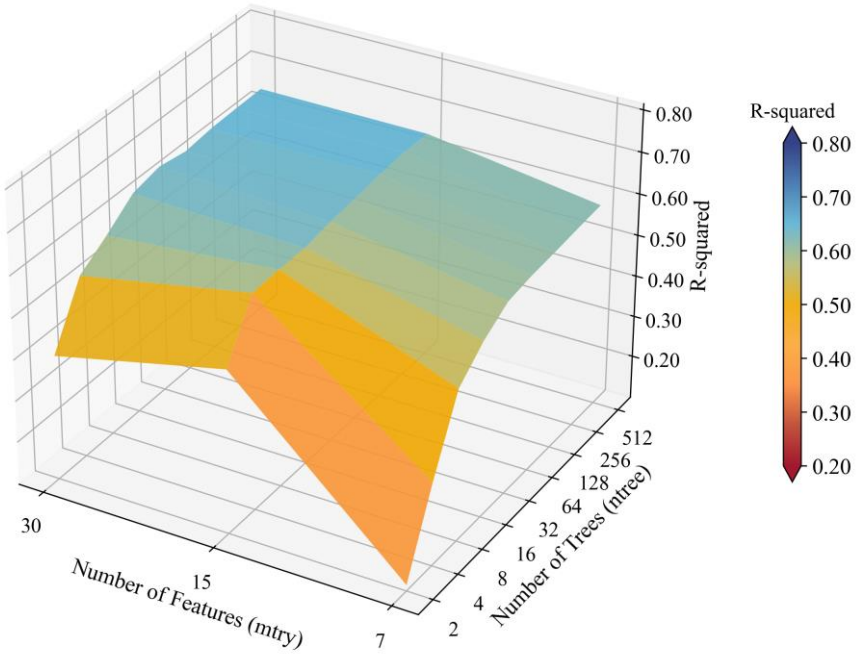


圖 3-4-34 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 推估模型在不同參數組合下的驗證集 R^2

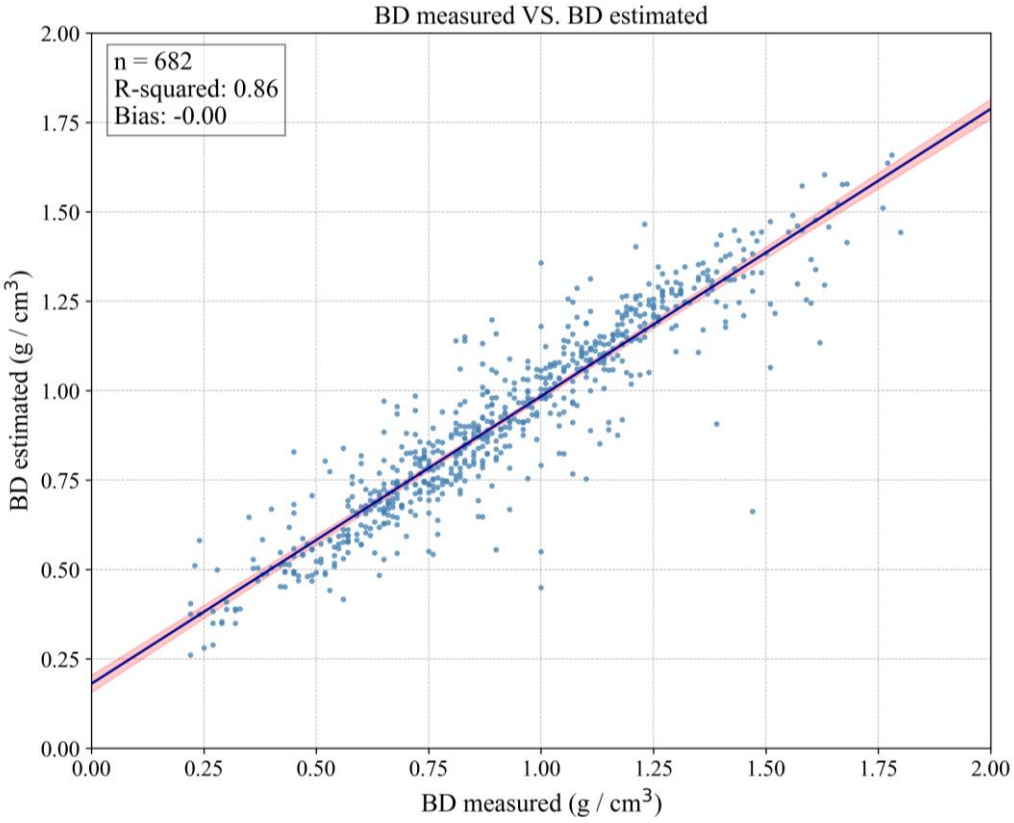


圖 3-4-35 全臺林業分署 2,000 公尺以上 BD 測量值與推估值之散布圖

在變數非線性影響程度評估的部分，結果顯示有機碳含量 (TOC %) 為主要影響因子（圖 3-4-36）。相較於海拔 0-1,000 公尺及 1,000-2,000 公尺的區間，在海拔 2,000 公尺以上的範圍中，環境因子對總體密度 (BD) 的影響程度較弱。可能是因為該海拔範圍較低的溫度，導致物理及化學風化作用較為緩慢，進而利於有機碳的累積與儲存。較高的有機碳含量使得其他環境因子在此海拔範圍對 BD 的影響更為薄弱。

在模型拆分評估的部分，由於訓練模型需要一定的樣本數且大多數環境因子在拆分資料後，貢獻程度遠不如 TOC，因此在海拔 2,000 公尺以上的資料將不再進行拆分，並在後續研究中，比較使用拆分海拔資料和使用整體資料推估的總體密度，同時探討資料的變異性。

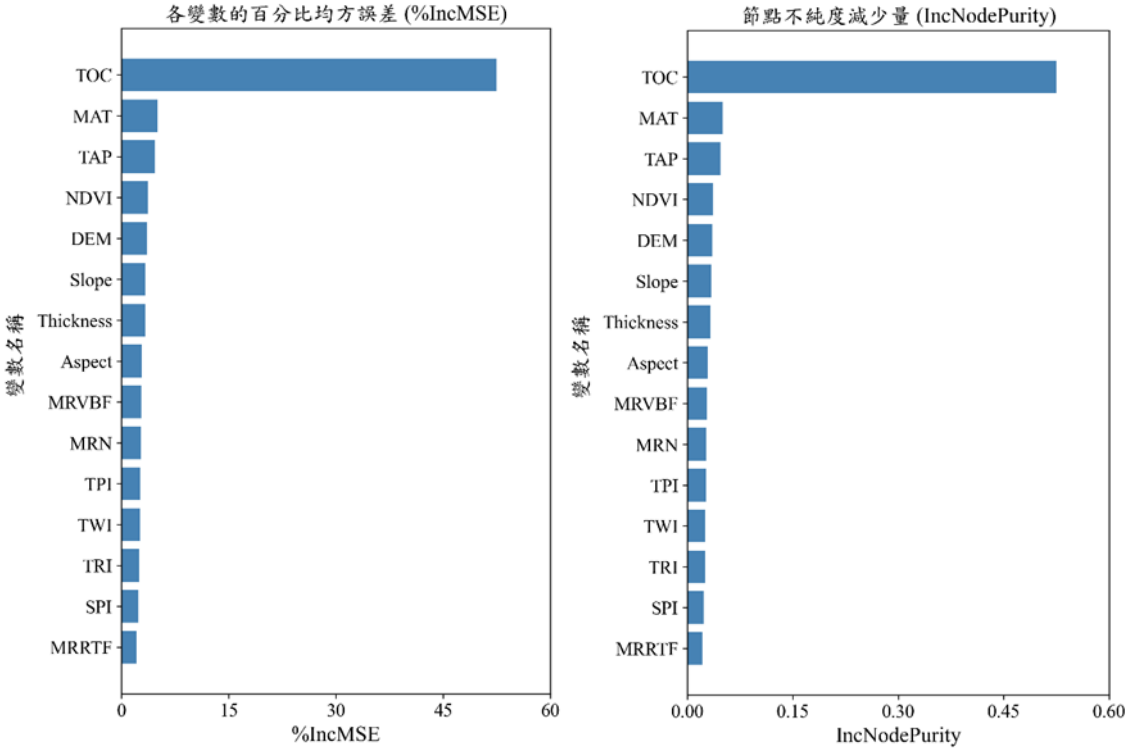


圖 3-4-36 全臺林業分署不同環境因子對 2,000 公尺以上土壤總體密度之影響程度

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(3) 採樣總體密度及土壤有機碳儲存量變異性探討

本計畫採用隨機森林 (Random Forest) 對不同海拔區間的總體密度 (Bulk Density, BD) 進行推估，並分析其與土壤有機碳儲存量的關係。推估結果顯示，模型在訓練樣本 (n=3,959) 上展現出良好的擬合能力（圖 3-4-37 (k)），R^2值達到 0.89，表示模型能解釋約 89%的變異，而使用量測的總體密度與推算的總體密度計算的土壤有機碳儲存量也呈現高度相關（圖 3-4-37 (l)），R^2值高達 0.94。而各海拔區間的模型其驗證集 R^2 均高於 0.5，模型偏差 (Bias) 均小於 0.05，代表所建構之模型能有效捕捉 BD 整體變化的趨勢，且系統性偏差趨近於 0，在局部範圍內，不同海拔的總體密度在數值與不確定性上呈現出不同的特徵，以下逐一說明之。

在海拔 0-1,000 公尺的區域，總體密度在高值 (BD>1.5) 處出現輕微低估（圖 3-4-37 (b)），低值 (BD<1.0) 處出現輕微高估，數值分布多集中在總體密度 1-1.5 的範圍。儘管如此，該區域使用量測的總體密度與推算的總體密度計算的土壤有機碳儲存量間仍呈現極高之相關性 (R^2=0.97)（圖 3-4-37 (c)），代表使用推估值計算之土壤有機碳儲存量有一定之代表性。在海拔 1,000-2,000 公尺範圍內，低值處與高值處同樣存在高估與低估（圖 3-4-37 (e)），總體密度主要分布在 0.5 至 1.5 之間。該區域之不確定性較海拔 0-1,000 公尺之區域高，可能是由於較高的海拔導致溫度變化比低海拔的副熱帶氣候更為明顯，再加上該區域處於闊葉林與針葉林的過渡地帶，生物因子較為複雜，因此總體密度推估有較高的不確定性。然而，該區域藉由量測的總體密度與推算的總體密度計算的土壤有機碳儲存量間仍呈現高度相關性 (R^2=0.94)（圖 3-4-37 (f)）。至於在海拔 2,000 公尺以上的區域，整體數值分布略低於 1,000-2,000 公尺範圍，但仍以 0.5 至 1.5 之間為主。該區域雖然樣本數較少 (n=682)，但低值與高值處的偏差反而較不明顯，可能是由於較低的溫度及單一的林型（針葉林）所致。

從整體來看，土壤總體密度多數聚集於高值處（圖 3-4-37 (k)），並隨數值降低而減少。此外，總體密度存有小於 1 的值，且出現低值高估問題，推測是採樣剖面為有機質土 (Histosol)，國外文獻表示有機質土之總體密度約為 0.25 至 0.3 (Buringh, 1984; Batjes, 1996)，但臺灣有機質土量少，故對於模型影響不大。在各海拔範圍均出現低值處高估和高值處低估之趨勢，可能是隨機森林演算法的特性。隨機森林作為一種集成學習方法，其預測結果由多個決策樹的輸出平均，此特性使得模型在處理極端值時傾向於「回歸平均」，導致預測結果的變異範圍小於實際觀測值的變異範圍。儘管隨機森林模型存在使用上的限制，但其在預測整體數值時，仍展現優異的解釋能力和代表性。

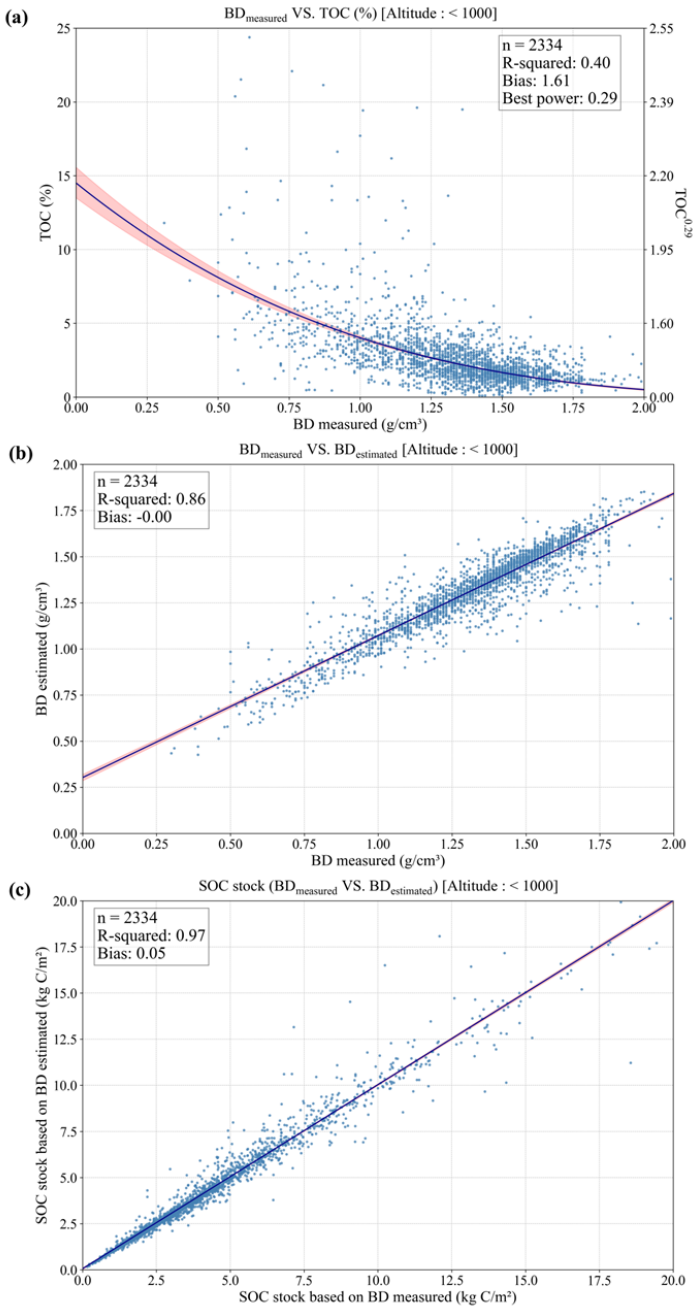


圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (1/4)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)-(c) 為海拔 0-1,000 公尺之土壤總體密度觀測值 (BD measured) 的散布圖，分別呈現其與 (a) 有機碳含量 (TOC%)、(b) 總體密度推估值 (BD estimated)，以及 (c) 土壤有機碳儲存量 (SOC stock) 的關係。其中 (a) 呈現有機碳含量與總體密度的非線性關係，此關係可以用冪函數描述，其中 TOC 隨著 BD 的增加而遞減，最佳擬合指數約為-0.29。(c) 包含由觀測值 (BD measured) 和推估值 (BD estimated) 兩種方式計算的土壤有機碳儲存量結果，圖中粉紅色區域代表 95%信賴區間。

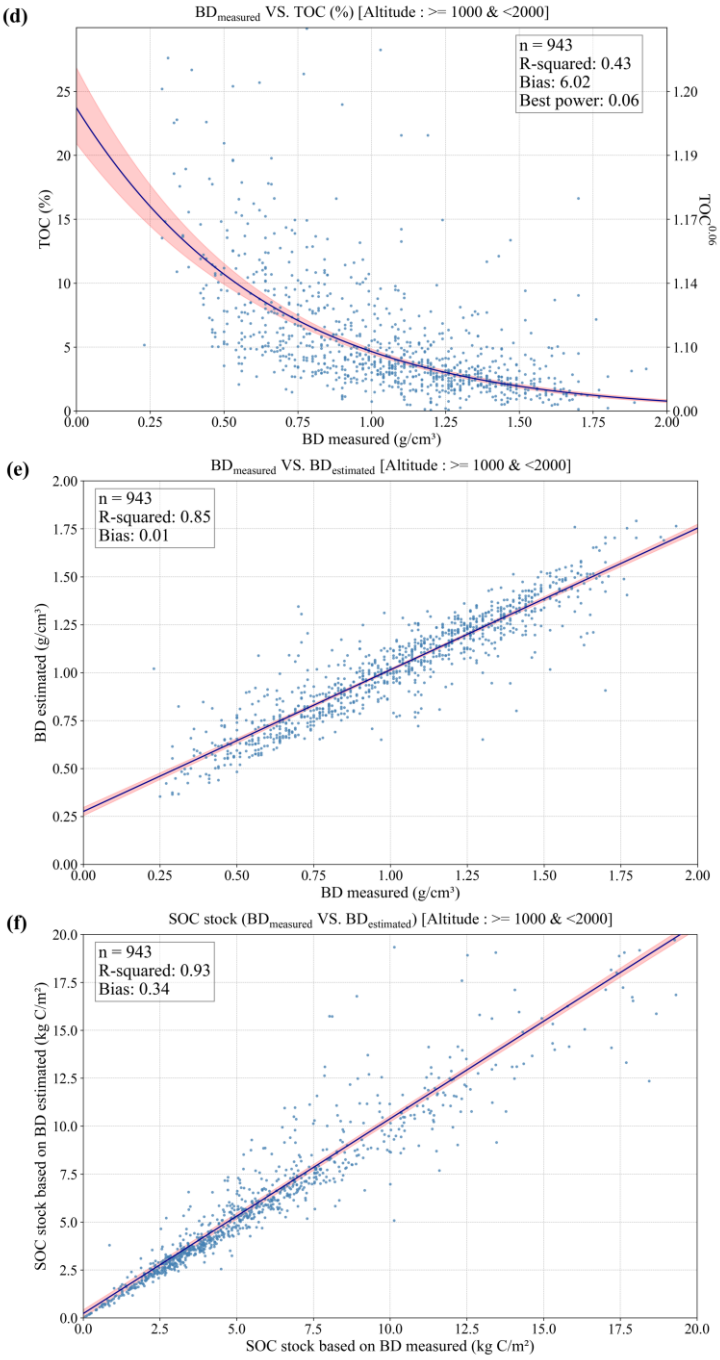


圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (2/4)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(d)-(f) 為海拔 0-1,000 公尺之土壤總體密度觀測值 (BD measured) 的散布圖，分別呈現其與 (d) 有機碳含量 (TOC%)、(e) 總體密度推估值 (BD estimated)，以及 (f) 土壤有機碳儲存量 (SOC stock) 的關係。其中 (d) 呈現有機碳含量與總體密度的非線性關係，此關係可以用冪函數描述，其中 TOC 隨著 BD 的增加而遞減，最佳擬合指數約為-0.29。(f) 包含由觀測值 (BD measured) 和推估值 (BD estimated) 兩種方式計算的土壤有機碳儲存量結果，圖中粉紅色區域代表 95%信賴區間。

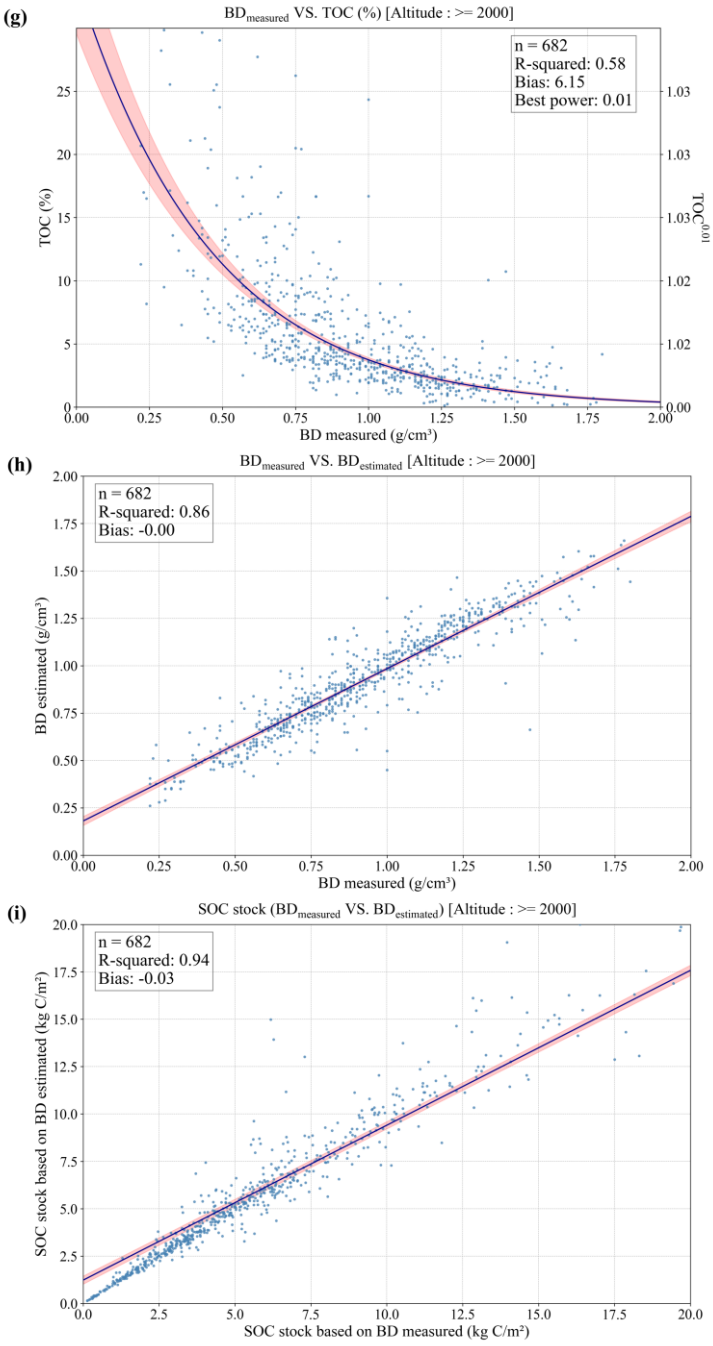


圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (3/4)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(g)-(i) 為海拔 0-1,000 公尺之土壤總體密度觀測值 (BD measured) 的散布圖，分別呈現其與 (g) 有機碳含量 (TOC%)、(h) 總體密度推估值 (BD estimated)，以及 (i) 土壤有機碳儲存量 (SOC stock) 的關係。其中 (g) 呈現有機碳含量與總體密度的非線性關係，此關係可以用冪函數描述，其中 TOC 隨著 BD 的增加而遞減，最佳擬合指數約為-0.29。(i) 包含由觀測值 (BD measured) 和推估值 (BD estimated) 兩種方式計算的土壤有機碳儲存量結果，圖中粉紅色區域代表 95%信賴區間。

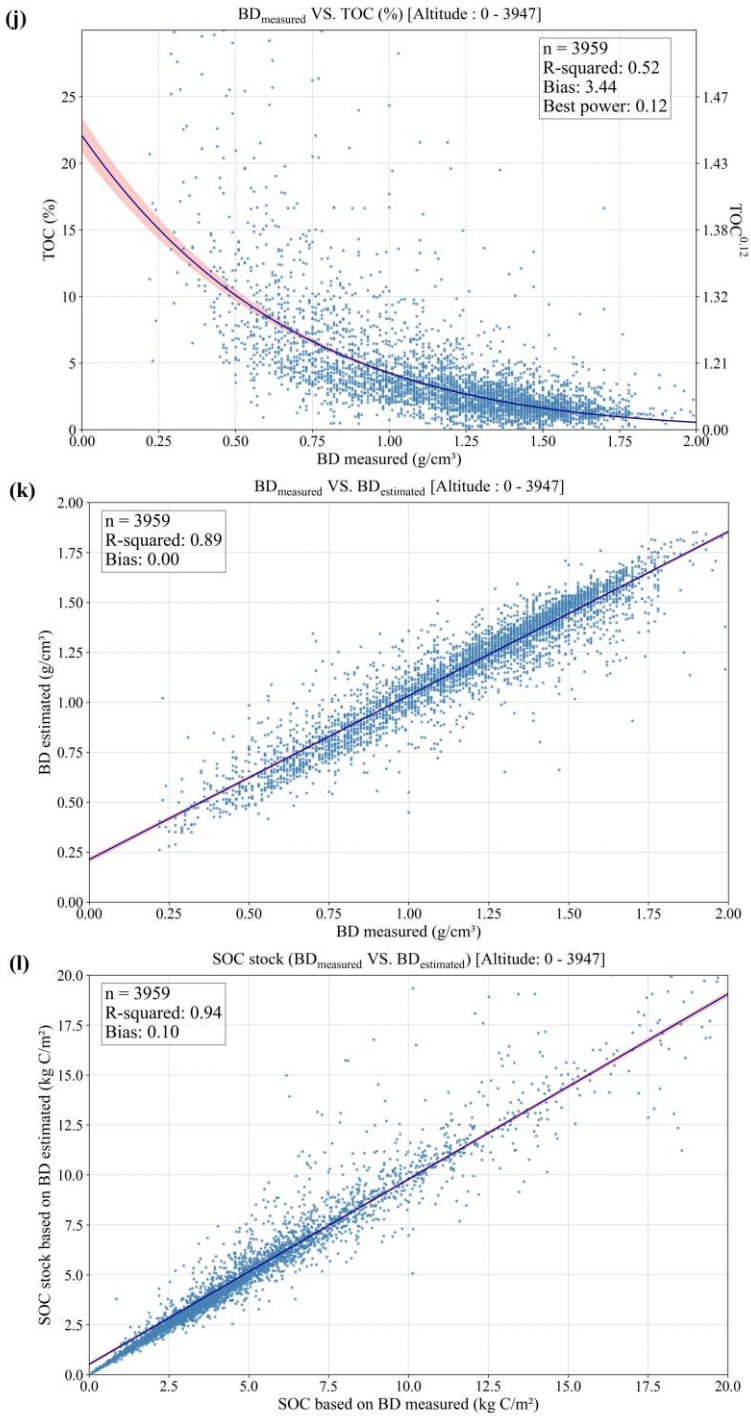


圖 3-4-37 全臺林業分署森林土壤總體密度、有機碳含量及土壤有機碳儲存量間之變異性 (4/4)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(j)-(l) 為海拔 0-1,000 公尺之土壤總體密度觀測值 (BD measured) 的散布圖，分別呈現其與 (j) 有機碳含量 (TOC%)、(k) 總體密度推估值 (BD estimated)，以及 (l) 土壤有機碳儲存量 (SOC stock) 的關係。其中 (j) 呈現有機碳含量與總體密度的非線性關係，此關係可以用冪函數描述，其中 TOC 隨著 BD 的增加而遞減，最佳擬合指數約為-0.29。(l) 包含由觀測值 (BD measured) 和推估值 (BD estimated) 兩種方式計算的土壤有機碳儲存量結果，圖中粉紅色區域代表 95%信賴區間。

(二) 繪製屏東分署荖濃溪事業區範圍內 4.7 萬公頃森林土壤碳匯地圖

● 工作推動說明

本計畫應用已更新完成、更加完善之森林土壤資料庫，於第四期繪製全臺尺度之森林土壤碳儲存分布圖，並切分出屏東分署範圍，以六龜工作站荖濃溪作為示範案例，呈現本計畫所歸納出之重要環境因子，並與前人已發表之科學論文研究進行比較，評估未來繪製相關圖資時所需之關鍵資訊。

● 執行成果

本計畫藉由數位土壤繪圖 (Digital Soil Mapping, DSM) 產製全臺灣森林各土壤深度的土壤有機碳儲存量成果，並以 GIS 工具裁切至荖濃溪事業區範圍，生成土壤有機碳儲存量分布圖。圖 3-4-38 (a) 為 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖，圖 3-4-39 (a) 為 0-50 公土壤有機碳儲存量分布圖、圖 3-4-40 (a) 為 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖。碳儲存量成果分為無加權和加權兩種土壤深度方式，前者土壤有機碳儲存量 0-30 公分推估為 5.51 百萬公噸，0-50 公分 7.39 百萬公噸，0-100 公分 10.26 百萬公噸；而後者土壤有機碳儲存量在 0-30 公分估算為 5.51 百萬公噸，0-50 公分估算為 7.34 百萬公噸，0-100 公分估算為 8.53 百萬公噸（表 3-4-13）。

在 Tsai *et al.* (2010) 研究強調 DSM 探討研究土壤碳匯的空間分布和土壤有機碳儲存量有關鍵作用，並以荖濃溪事業區範圍做為 DSM 案例研究區，分別估計 0-30 公分（圖 3-4-38 (b)）、0-50 公分（圖 3-4-39 (b)）、0-100 公分（圖 3-4-40 (b)）土壤有機碳儲存量，其計算有機碳儲存量公式與本計畫相同，但不同之處在於未考慮環境因子、缺失的總體密度係使用 Chen & Hseu (1997) 提出的資料，含石率以 0-30 公分 30%及 30-100 公分 40%代表，並使用普通克利金法 (Ordinary Kriging) 推估空間分布。該研究結果在 0-30 公分土壤有機碳儲存量估算為 7.30 百萬公噸，0-50 公分土壤有機碳儲存量估算為 8.94 百萬公噸、0-100 公分則估算總量約為 10.9 百萬公噸（表 3-4-13）。這些數據可作為本計畫的對照參考。

整體而言，本計畫透過 DSM 方法計算的土壤有機碳儲存量（加權土壤深度），些微少於 Tsai 等人所估計，在 0-30 公分相差約 1.79 百萬公噸、0-50 公分相差約 1.6 百萬公噸、0-100 公分相差約 2.37 百萬公噸。然而，若以未加權土壤深度比較，在 0-100 公分土壤有機碳儲存量則差異不大，表明土壤有機碳儲存量係隨深度減少。若從空間分布圖來看，0-30 公分土壤有機碳儲存量在本計畫最大值為每公頃 136 公噸，而在 Tsai

等人的最大值為每公頃 700 公噸，其中研究區的北面有兩處高值區域（圖 3-4-38 (b)），但在本計畫的相同位置則為低值（圖 3-4-38 (a)），顯示兩者空間分布存在差異；0-50 公分部分，土壤有機碳儲存量在本計畫最大值為每公頃 194 公噸，呈現增加趨勢，而在 Tsai 等人的最大值為每公頃 700 公噸，其中每公頃 300-500 公噸類別明顯增加，兩者土壤有機碳儲存量土壤有機碳儲存量的空間分布存在不小差異；最後，0-100 公分土壤有機碳儲存量在本計畫最大值增加至每公頃 271 公噸，而 Tsai 等人的最大值仍為每公頃 700 公噸，兩者土壤有機碳儲存量的空間分布存在不小差異。本計畫加入環境因子的海拔解釋力高，因此成果與海拔呈現高度相似性。

造成土壤有機碳儲存量差異可能原因包括採樣剖面數量或是剖面位置特性的差異，Tsai 等人係採用農業部林業試驗所於民國 85 年採樣剖面，過往的剖面資料與近年的剖面資料隨時間變化，受到環境、氣候而改變。另外，Tsai 等人的研究方法無加權土壤深度，可能會造成整體高估的趨勢。在缺失的含石率估算方式不同所造成碳儲存量差異，若本計畫採用其計算缺失含石率的方法，0-100 公分的碳儲存量將會高於其所推估的值。此外，土壤有機碳儲存量空間推估方法不同，Tsai 等人採用普通克利金推估，此為空間插值方法，對於外推能力較差，若資料不均勻會導致精確性不足，可能導致碳儲存量的高估。綜合來說，在未加權土壤深度的土壤有機碳儲存量上與 Tsai 等人相近，但本研究在 DSM 計算加入環境因子，使得成果能揭示更細微的分布樣態，以支持更為精確的評估及決策。

表 3-4-13 推估荖濃溪事業區不同深度森林土壤有機碳儲存量

土壤深度 (cm)	無加權土壤深度之土壤有機碳儲存量 (Mt C)	加權土壤深度之土壤有機碳儲存量 (Mt C)	Tsai *et al.* (2010) 之土壤有機碳儲存量 (Mt C)
0-30	5.51	5.51	7.30
0-50	7.39	7.34	8.94
0-100	10.26	8.53	10.9

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

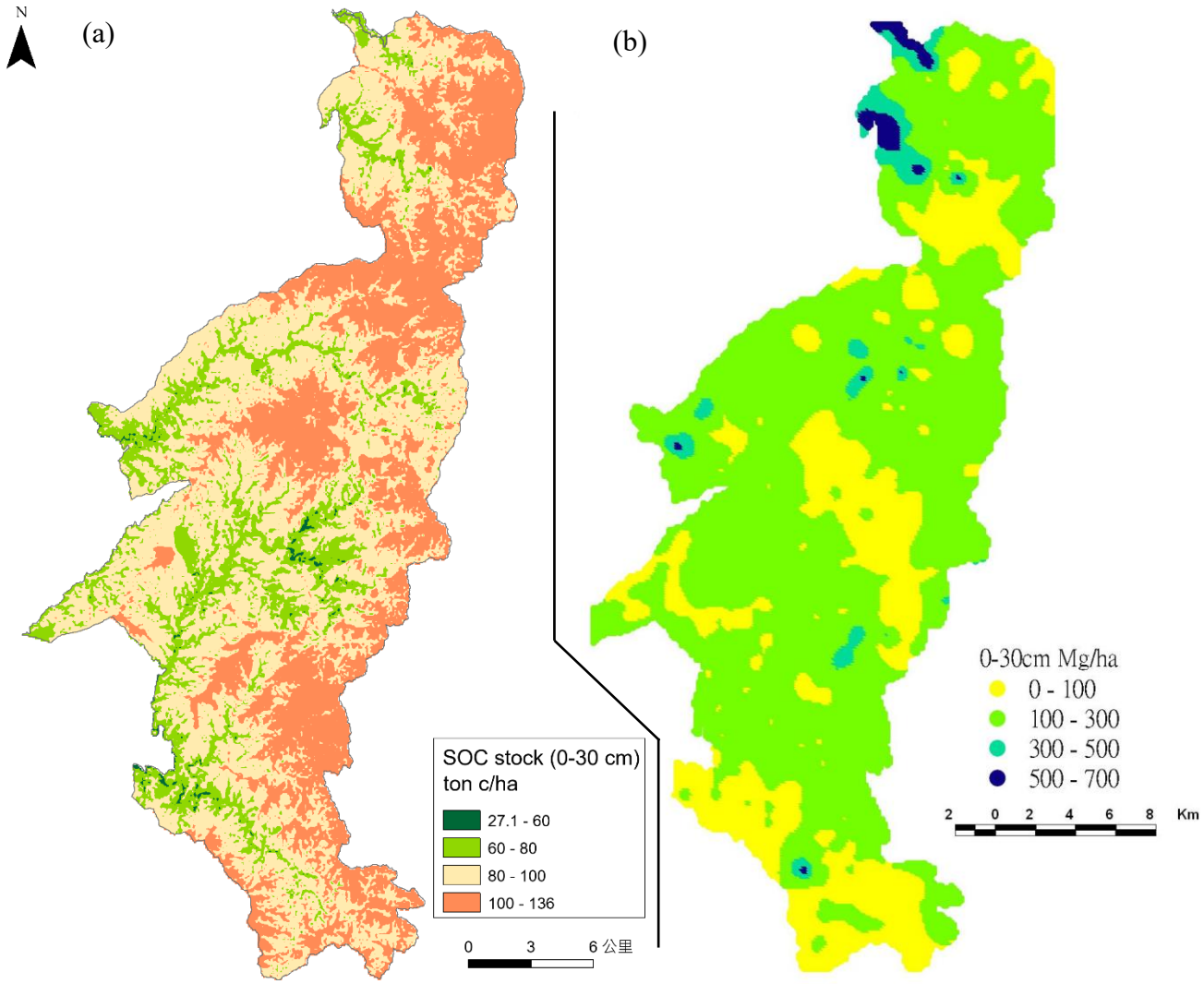


圖 3-4-38 芷濃溪事業區 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a) 為本計畫芷濃溪事業區 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖；(b) 為 Tsai 等人所繪製芷濃溪事業區 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖

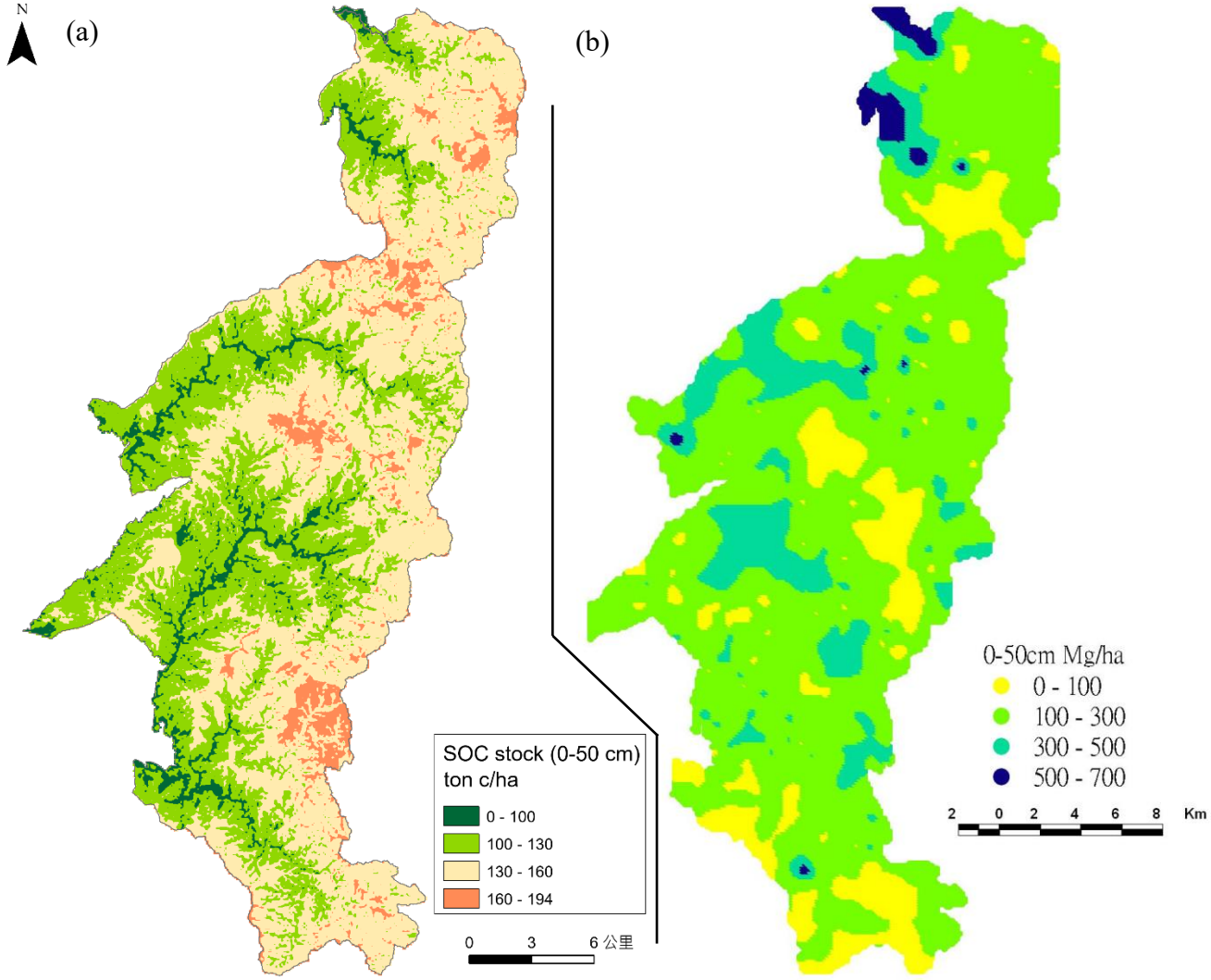


圖 3-4-39 荖濃溪事業區 0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a) 為本計畫荖濃溪事業區 0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖；(b) 為 Tsai 等人所繪製荖濃溪事業區 0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖

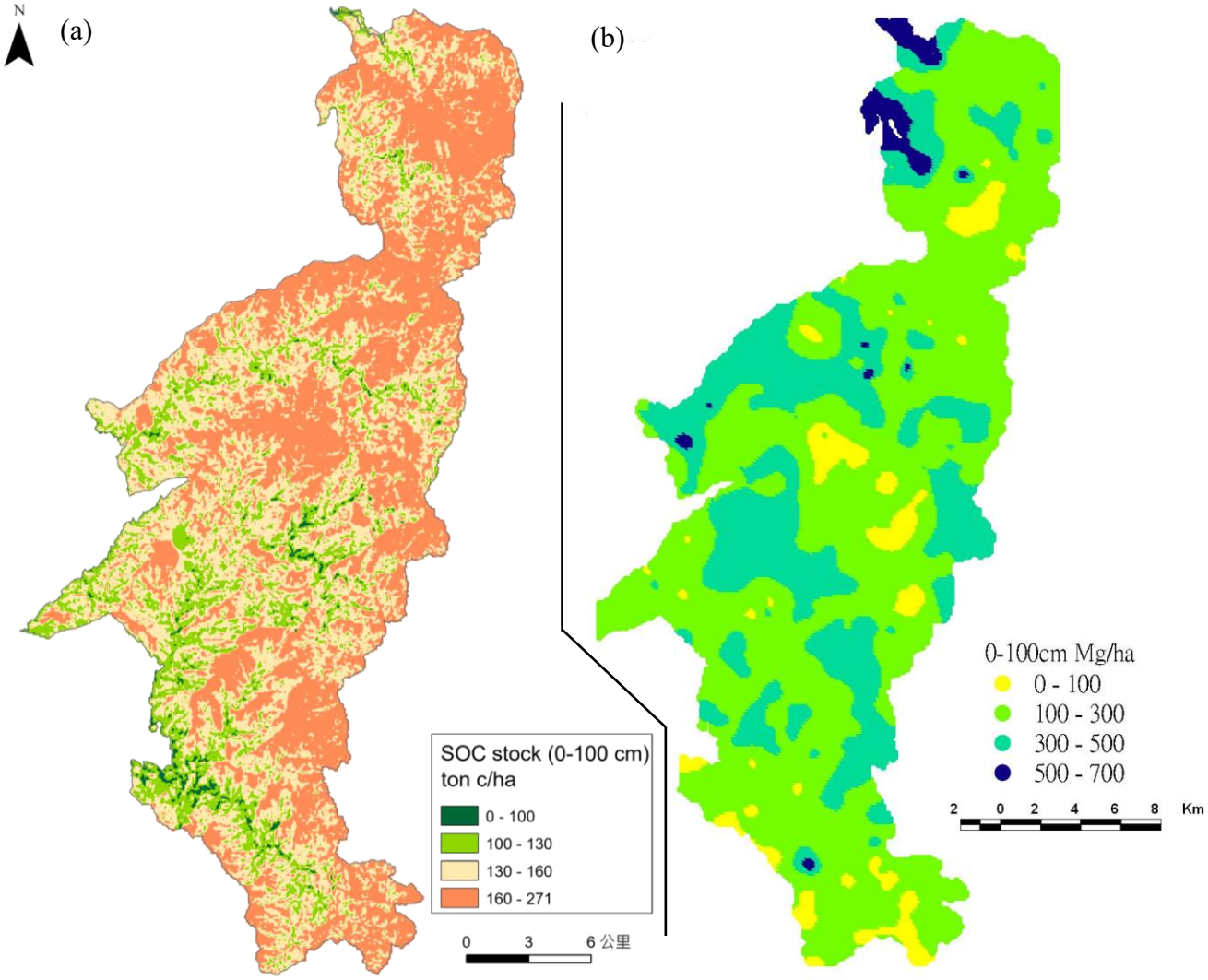


圖 3-4-40 荖濃溪事業區 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a) 為本計畫荖濃溪事業區 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖；(b) 為 Tsai 等人所繪製荖濃溪事業區 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖

(三) 建立森林土壤碳匯繪圖模式準確性及減少變異性之解決方案

● 工作推動說明

依工作項目三及四所執行成果進行討論，並延伸探討影響森林土壤碳儲存模式建立過程所造成的變異性之處，包含彙整盤點資料上的差異性、資料本身數量問題、資料存在極端值之可能性，亦或是於採樣過程所造成的採樣差異、量測誤差，皆可能導致建立森林土壤碳儲存模式之變異性，此部分在工作項目六有完整的評估。在此，此章節專注在土壤繪圖上，探討加權土壤深度之用意，以增進準確性。

● 執行成果

本計畫自執行以來，由於資料筆數限制、部分分署資料筆數過少，所以嘗試建立不同森林土壤碳儲存模式，比較出最適合作為第四期成果展現之模型，經工作項目三及四之評估，將優先選用線性回歸建立推估森林土壤有機碳儲存量之模式，以全臺灣採樣剖面資料建立模型，在工作項目四呈現臺灣各林業分署各土壤深度森林土壤有機碳儲存量分布圖。

然而，本計畫發現，基於數位土壤繪圖 (DSM) 計算之土壤有機碳儲存量 (SOC)，針對不同土壤深度 0-30 公分（以下用 SOC 0-30 表示）、0-50 公分（以下用 SOC 0-50 表示）、0-100 公分（以下用 SOC 0-100 表示）、0-150 公分（以下用 SOC 0-150 表示）的結果可能存在高估問題。例如，在 SOC 0-30 中，某些地區的實際土壤深度僅有 20 公分。因此，本研究針對土壤深度進行加權調整，以提高土壤有機碳儲存量推估值的精確性。在土壤深度計算方法，本計畫使用 Tsai *et al.* (2001) 所提及之計算公式，利用地形的坡度 (slope) 估算土壤深度。土壤深度的計算公式如下（式 3-21）。

$$\text{土壤深度} = 103 - 0.684 \times \text{坡度}(\%) \qquad \text{（式 3-21）}$$

通過此公式計算後，得出臺灣範圍的土壤深度，最深約為 105.32 公分，而最淺約為 48.67 公分（圖 3-4-41）。並使用 GIS 切分至林業分署範圍，轉為網格 (raster) 資料，再利用 Raster Calculator 工具，分別以不同深度（0-50、0-100、0-150 公分）按照比例計算（SOC 0-30 無須處理，因土壤深度大於 30 公分）。對於 SOC 0-50，若土壤深度介於 30-50 公分之間，計算方法可參考公式 2（土壤深度為 35 公分），其中S_{35}為土壤深度 35 公分土壤有機碳儲存量，SOC_{50}為 SOC 0-50，而若厚度大於等於 50 公分則無需調整。對於 SOC 0-100，若土壤深度在 30-50 公分之間，亦按照公式 2 計算，若土壤深度為 50 公分則以 SOC 0-50 表示，若土壤深度在 50-100 公分之間，計算方法可參考公式 3（土壤深度為 65 公分），其中S_{65}為土壤深度 65 公分土壤有機碳儲存量，SOC_{100}為

SOC 0-100，若土壤深度大於等於 100 公分則無需調整。而 SOC 0-150 的計算方法，在土壤深度 0-100 公分皆與 SOC 0-100 相同，不同處於土壤深度在 100-150 公分，計算按照公式 4，中S_{105}為土壤深度 105 公分土壤有機碳儲存量，SOC_{150}為 SOC 0-150。最終求得經土壤深度加權後之土壤有機碳儲存量，以增加森林土壤碳匯繪圖模式的準確性。

$$S_{35} = SOC_{50} \times (\frac{35}{50}) \quad （式 3-22）$$

$$S_{65} = SOC_{100} \times (\frac{65}{100}) \quad （式 3-23）$$

$$S_{105} = SOC_{150} \times (\frac{105}{150}) \quad （式 3-24）$$

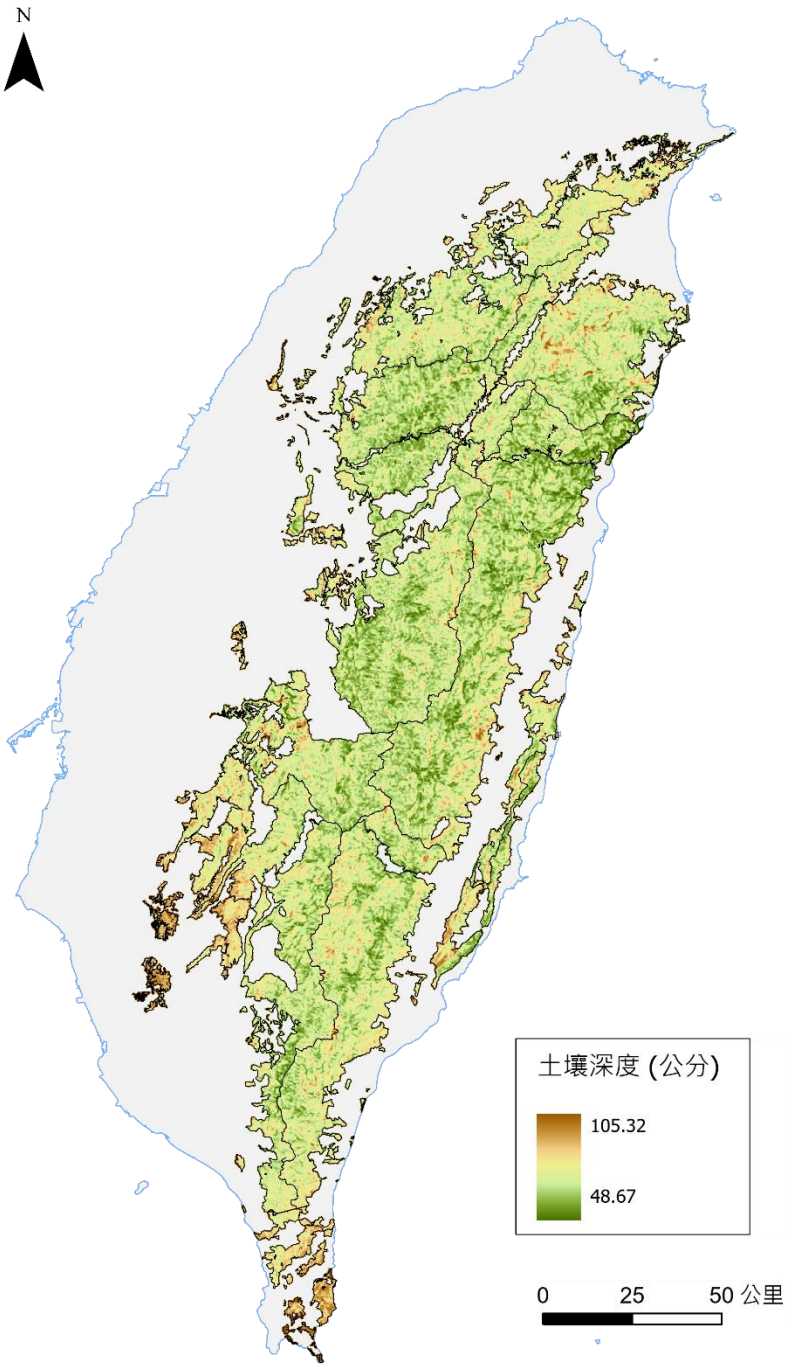


圖 3-4-41 臺灣林業分署範圍土壤深度圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

五、國內森林土壤調查點位之碳匯推估

(一) 彙整林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯推估

- **工作推動說明（應用第二期報告舊資料庫）**

首先以嘉義分署及宜蘭分署為例，篩選出顯著影響土壤有機碳儲存量之因子，評估線性回歸、Cubist 及隨機森林共三種不同模型之代表性及不確定性。

1. 影響因子篩選成果

基於前述之向前逐步回歸法，兩分署之四土層完成變數篩選，得知各項因子影響該土層之相關係數及顯著性，並以表 3-5-1 及表 3-5-2 呈現之。

(1) 嘉義分署

全臺共有 23 類土壤分類單位，在嘉義分署範圍內土壤分類共有七類，加上氣候、地形、生物之相關因子，共有 20 個自變數作為整體之初始資料庫。藉由向前逐步回歸法篩選出顯著性小於 0.1 之因子後，嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量與十項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-1），SOC30 與 DEM、MRRTF、Slope、TAP、TRI、TG_21 為正相關，與 MAT、MRN、SPI、TG_20 為負相關；嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量與七項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-2），SOC50 與 TG_21、MRRTF、TPI、TG_22 為正相關，與 MAT、TG_14、TG_6 為負相關；嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量與五項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-3），SOC100 與 TG_23、TPI、Slope 為正相關，與 SPI、TG_12 為負相關；嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量與五項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-4），SOC150 與 TPI、DEM 為正相關，與 Aspect、MAT、MRN 為負相關。

表 3-5-1 嘉義分署向前逐步回歸法篩選出之影響因子表

土壤深度(cm)	變數	顯著性	皮爾森相關係數
0-30	MAT	0.00***	-0.33
	MRRTF	0.00***	0.11
	TRI	0.00***	0.10
	TG_21	0.00***	0.01
	DEM	0.04**	0.30
	Slope	0.04**	0.12
	TG_20	0.06*	-0.07
	SPI	0.06*	-0.07
	TAP	0.07*	0.20
	MRN	0.09*	-0.02
0-50	MAT	0.00***	-0.41
	TG_21	0.00***	0.01
	MRRTF	0.00***	0.11
	TPI	0.02**	0.20
	TG_22	0.05*	0.08
	TG_14	0.08*	-0.03
	TG_6	0.09*	-0.15
0-100	TG_23	0.00***	0.32
	TPI	0.00***	0.23
	Slope	0.00***	0.03
	SPI	0.03**	-0.10
	TG_12	0.08*	-0.22
0-150	TPI	0.00***	0.30
	Aspect	0.00***	-0.07
	MAT	0.01***	-0.30
	DEM	0.05**	0.27
	MRN	0.02**	-0.13

註：

* p-value ≤ 0.1；** p-value ≤ 0.05；*** p-value ≤ 0.01。

MAT：平均年均溫(Mean Annual Temperature)

MRRTF：山脊頂部平坦度多分辨率指標(Multiresolution Ridge Top Flatness)

TRI：地形崎嶇指數(Terrain Ruggedness Index)

TG_21：弱育土 / 新成土 / 極育土

DEM：高程(Digital Elevation Model)

Slope：坡度

TG_20：雜地

SPI：河流動力指數(Stream Power Index)

TAP：平均年總降雨量(Total Annual Precipitation)

MRN：梅爾頓崎嶇度數(Melton Ruggedness Number)

TG_22：淋溼土 / 弱育土 / 極育土

TG_14：極育土 / 弱育土

TG_6：弱育土 / 新成土

TG_23：弱育土 / 淋溶土 / 新成土

TG_12：新成土

Aspect：坡向

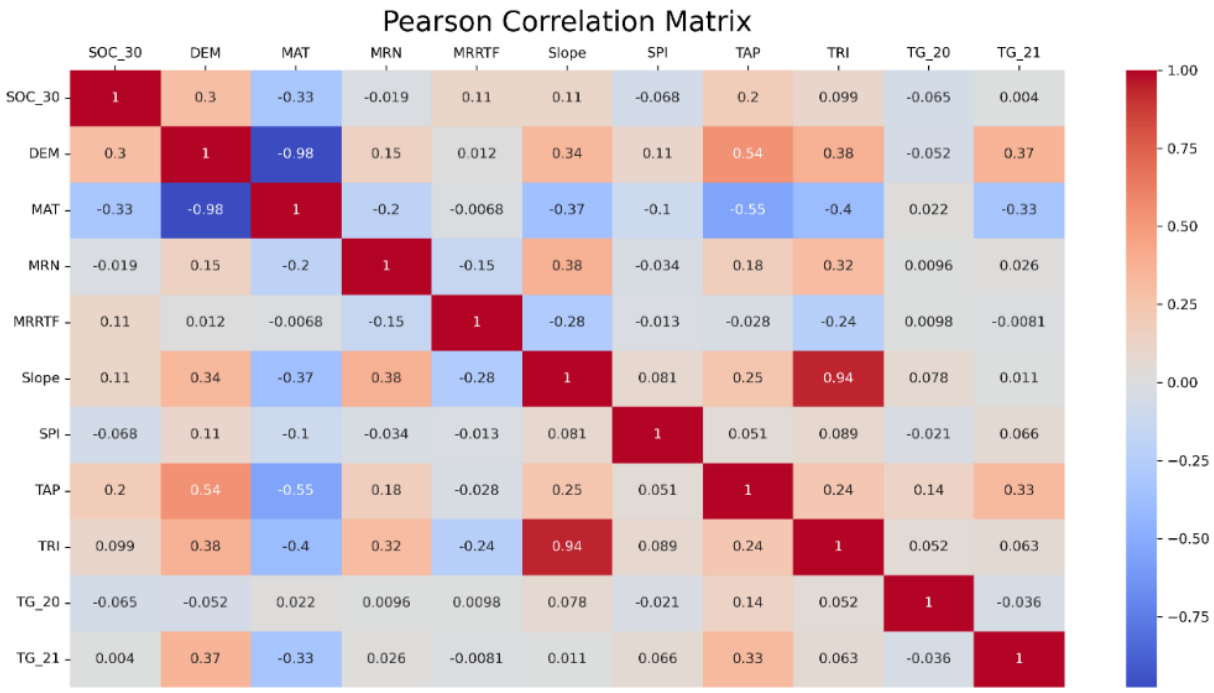


圖 3-5-1 嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

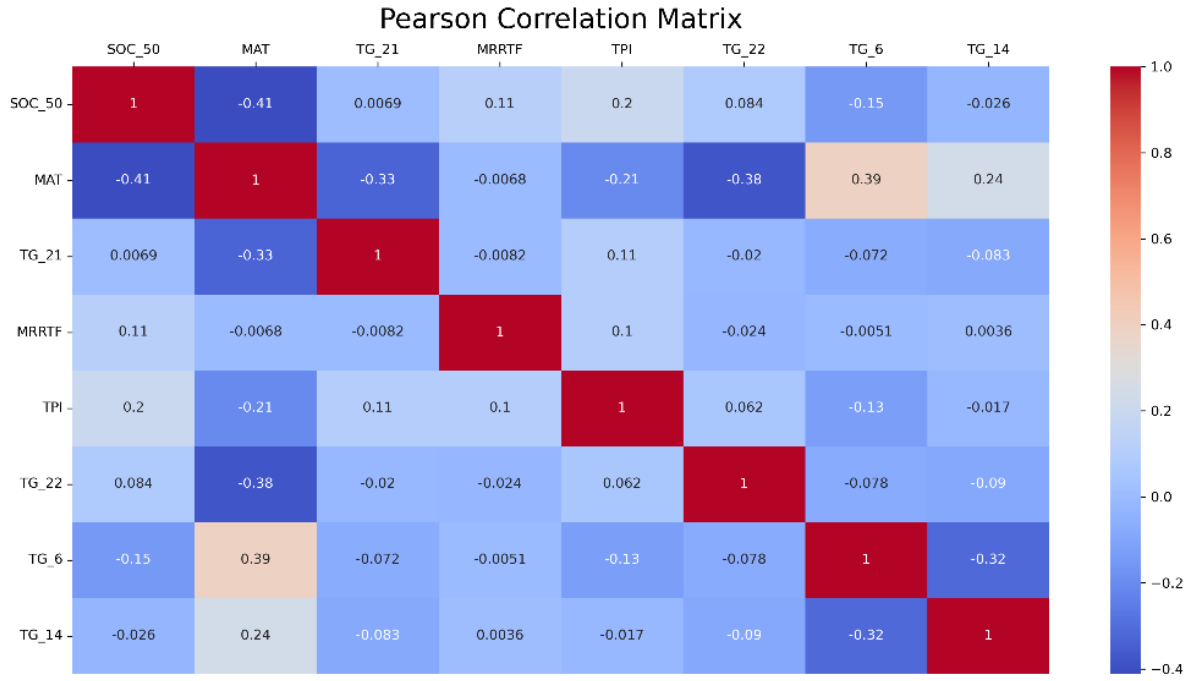


圖 3-5-2 嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

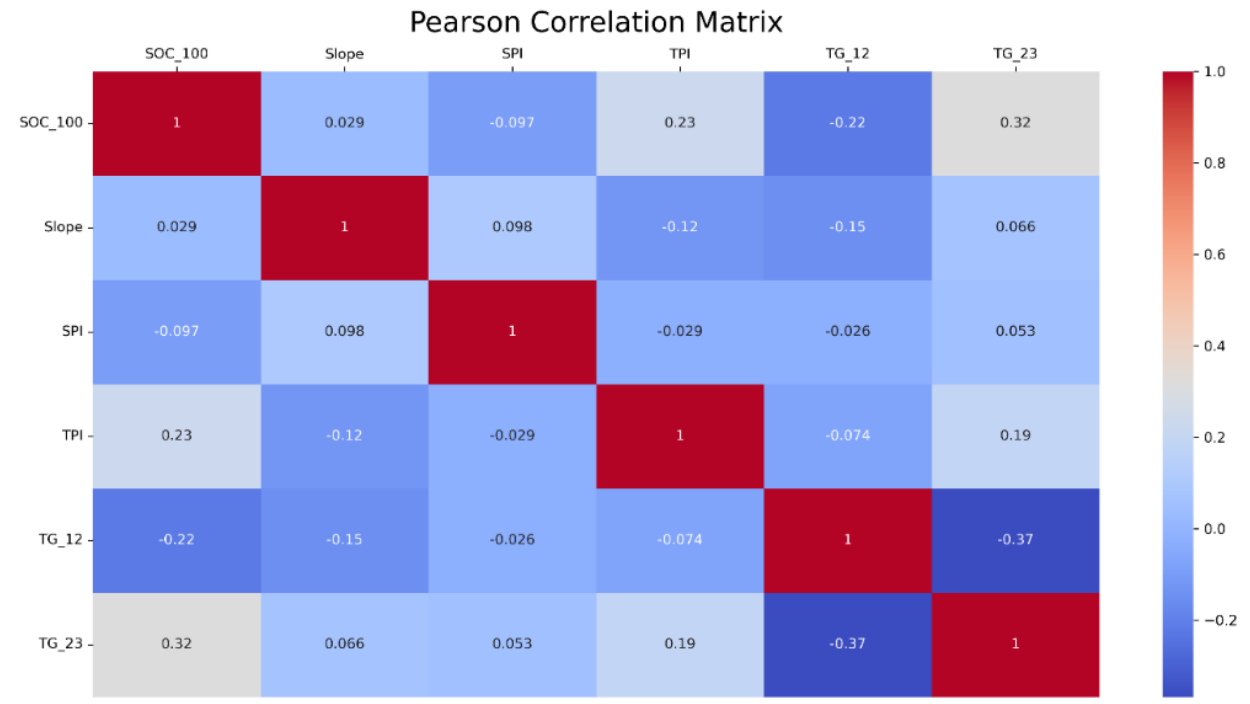


圖 3-5-3 嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)



圖 3-5-4 嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(2) 宜蘭分署

宜蘭分署因資料樣點分布為局部聚集，並且多半以帶狀分布，而非均勻散點；再者，部分宜蘭分署範圍以「狹帶型」分布在宜蘭縣北境之山區（貢寮至礁溪、員山一帶），並與宜蘭分署南部轄區內中間相隔蘭陽平原，因此在空間推算時會遭阻隔 (Cohen *et al.*, 1980, 1981)。宜蘭分署在推算資料時之資料樣點數並非如嘉義分署多（0 至 30 公分之採樣剖面數僅為 134 筆），因此在變數篩選上，無法與嘉義分署般以 0.1 的顯著性選擇影響因子，而需將顯著性改以「0.3」訂定閾值之(In *et al.*, 1997；Pace, 2008；Rose *et al.*, 2019)。常理來說，大範圍之空間推估除了需要考量面積大小及地形或其他阻隔之外（如鐵路、國道、河川等），資料數量也在模型建置上扮演舉足輕重的地位，少量的資料點數無法完整表現與其他因子，以及與應變數（土壤有機碳儲存量）之關係(Dakin, 2001；Hansen, 2000)。本研究初步仍以與嘉義分署所使用之分析方法概同，於後敘明方法論之精進。

全臺共有 23 類土壤分類單位，在宜蘭分署範圍內土壤分類共有十一類，加上氣候、地形、生物之相關因子，共有 24 個自變數作為整體之初始資料庫。藉由向前逐步回歸法篩選出顯著性小於 0.3 之因子後，嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量與五項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-5），SOC30 與 TRI 為正相關，與 TG_23、MRN、TG_6、SPI 為負相關；嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量與三項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-6），SOC50 與 TG_2、MRN 為正相關，與 TG_6 為負相關；嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量與六項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-7），SOC100 與 TPI、TG_12、TG_2 為正相關，與 MRN、Slope、TG_6 為負相關；嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量與七項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-8），SOC150 與 Aspect、MRRTF、TAP 為正相關，與 NDVI、MRVBF、TRI、MAT 為負相關。

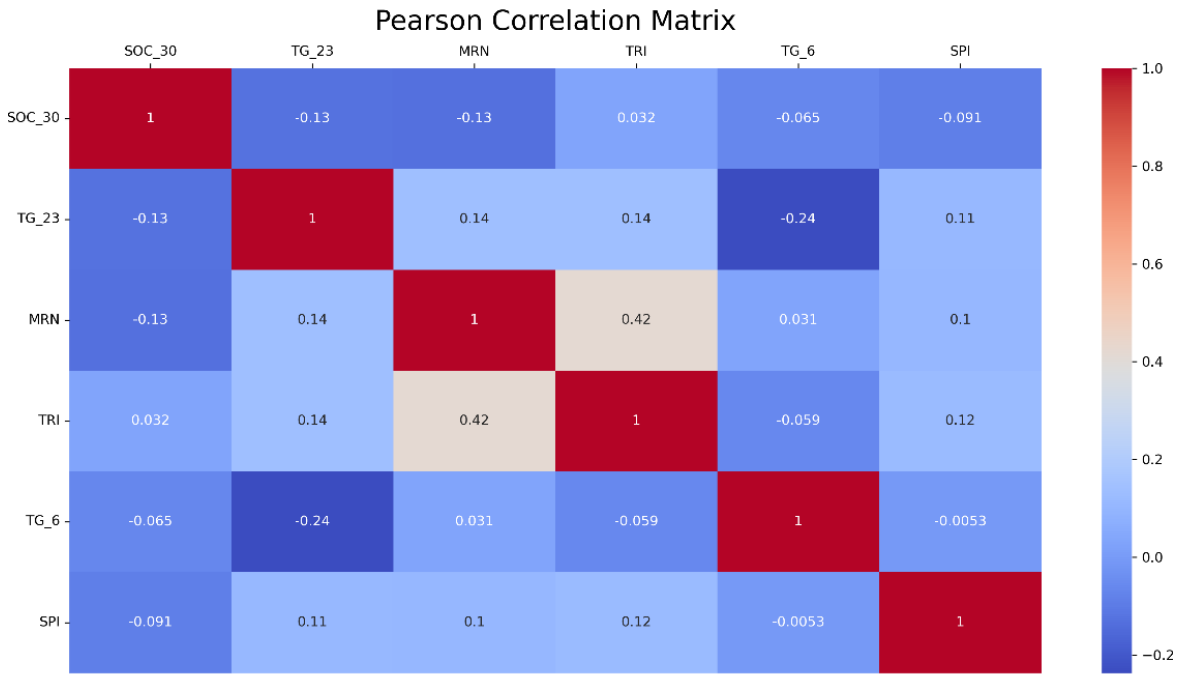
表 3-5-2 宜蘭分署向前逐步回歸法篩選出之影響因子表

土壤深度 (cm)	變數	顯著性	皮爾森相關係數
0-30	TG_23	0.00***	-0.13
	MRN	0.04**	-0.13
	TRI	0.12*	0.03
	TG_6	0.22*	-0.07
	SPI	0.27*	-0.09
0-50	TG_6	0.04**	-0.41
	TG_2	0.26*	0.01
	MRN	0.24*	0.11
0-100	MRN	0.08*	-0.13
	Slope	0.10*	-0.10
	TPI	0.08*	0.12
	TG_12	0.10*	0.02
	TG_2	0.13*	0.11
	TG_6	0.28*	-0.24
0-150	Aspect	0.06*	0.67
	NDVI	0.18*	-0.05
	MRRTF	0.23*	0.26
	TAP	0.07*	0.01
	MRVBF	0.03*	-0.24
	TRI	0.03*	-0.16
	MAT	0.19*	-0.04

註：

* p-value ≤ 0.1；** p-value ≤ 0.05；*** p-value ≤ 0.01。

*代號如表 3-5-1



圖

3-5-5 宜蘭分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

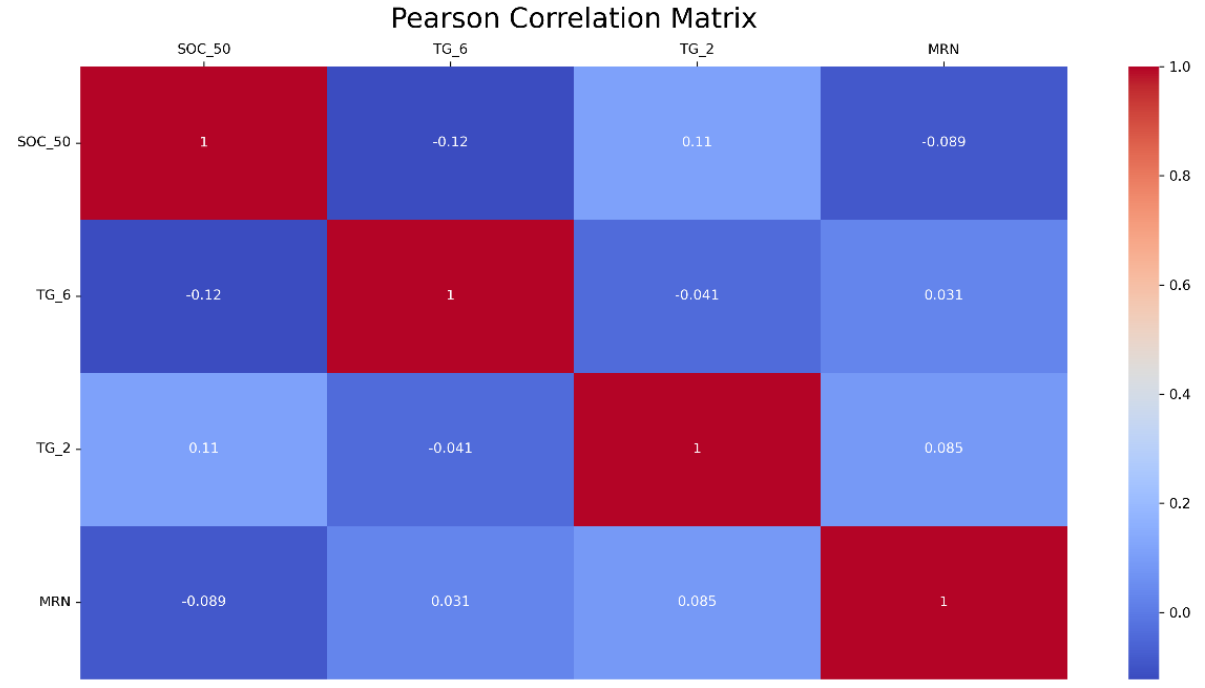


圖 3-5-6 宜蘭分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表\

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

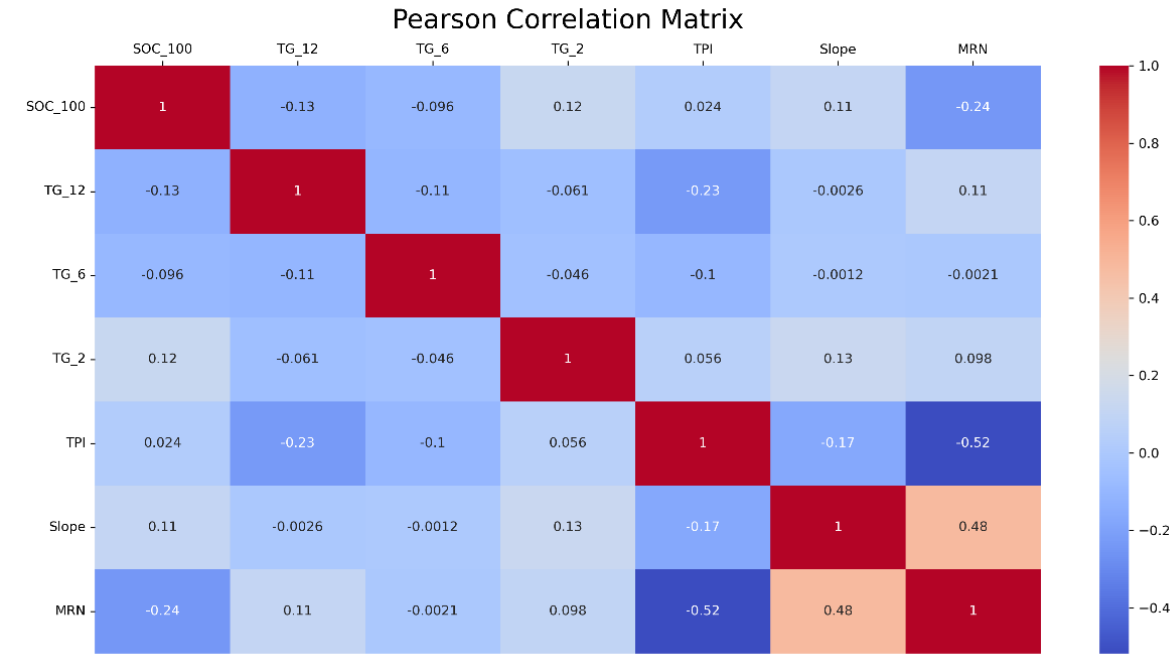


圖 3-5-7 宜蘭分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

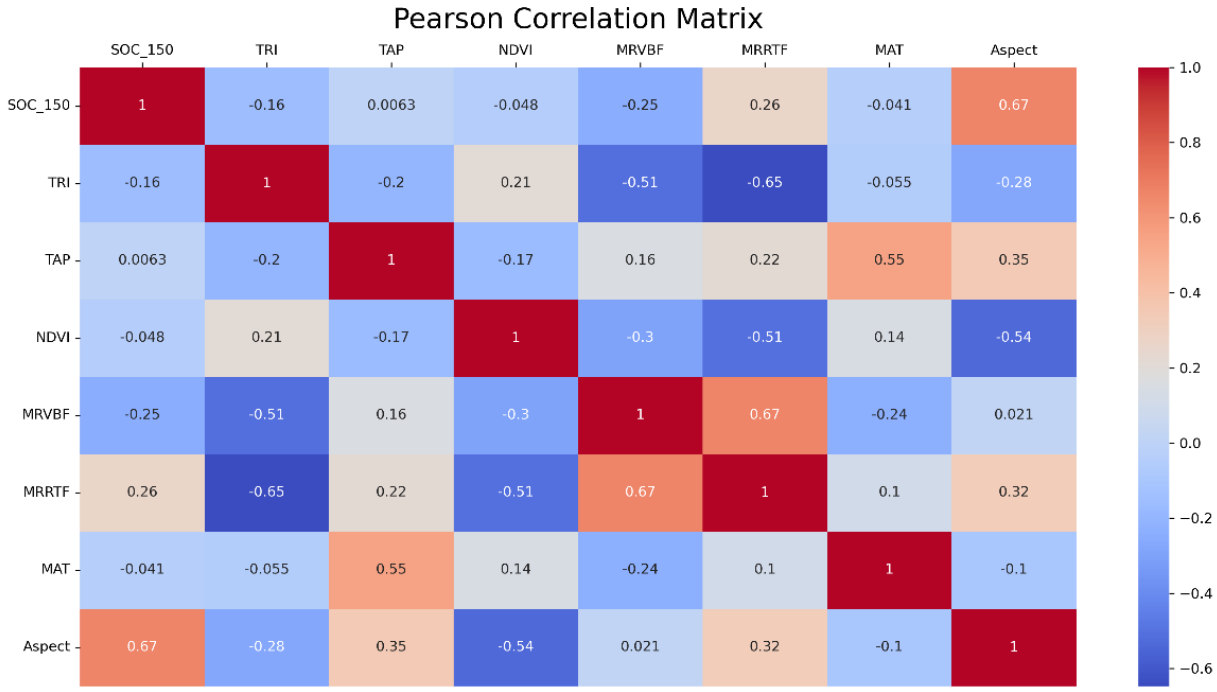


圖 3-5-8 宜蘭分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

2. 模型代表性及不確定性評估

(1) 嘉義分署

本計畫於現階段評估三種不同模型，分別為線性回歸模型、Cubist 模型及隨機森林模型，在預測四個不同土壤有機碳儲存量上以四種土層（表土至 30、50、100、150 公分）個別建立模型時的性能（表 3-5-3）；同時，利用拔靴法衡量模型性能之不確定性。模型各項性能根據決定係數 (R^2)、一致性指數 (Concordance)、均方誤差 (MSE)、均方根誤差 (RMSE) 及偏差 (Bias) 進行評估。

A. SOC 0 至 30 公分

在 SOC 從表土至 30 公分之各項模型表現力上，隨機森林模型於訓練模型上表現卓越，展現出高度 R^2 (0.92) 和一致性指數 (0.88)，表明該模型能夠準確捕捉到土壤有機碳儲存量之變異性；此外，隨機森林之兩項損失函數（MSE 為 1.57 kg C/m^2，RMSE 為 1.25 kg C/m^2) 顯示其具有較高之預測準確性，且在偏差方面表現良好，即預測結果無顯著系統性偏差。相比之下，線性回歸模型和 Cubist 模型在所有評估指標上均表現較差（線性回歸模型 R^2為 0.16，一致性指數為 0.28；Cubist 模型 R^2為 0.24，一致性指數為 0.41），在 R^2和一致性指數上顯示出較低之相關性和一致性，兩模型在兩項損失函數亦同（線性回歸模型 RSE 為 7.94 kg C/m^2，RMSE 為 2.81 kg C/m^2；Cubist 模型 RSE 為 7.22 kg C/m^2，RMSE 為 2.69 kg C/m^2）。在訓練模型之偏差中，線性回歸模型和 Cubist 模型顯示出極低之 Bias（線性回歸模型為 1.33×10^{-14}，Cubist 模型為 0.12），預測沒有系統性偏誤；反之，隨機森林模型則表示出輕微的負偏差 (-0.008)，但仍然很接近零，表明即使預測有微小之系統性偏低，模型整體預測準確性仍高。

驗證方面，隨機森林驗證 R^2值達到 0.20，顯示出隨機森林模型出現過擬合之情形。線性回歸模型和 Cubist 模型雖然在驗證 R^2值之分別為 0.17 和 0.28，但在與訓練模型差值上，仍比隨機森林模型低出許多。在 MSE 及 RMSE 上，隨機森林驗證模型分別為 10.3 kg C/m^2 及 3.20 kg C/m^2，線性回歸驗證模型分別為 10.6 kg C/m^2 及 3.25 kg C/m^2，Cubist 驗證模型分別為 11.0 kg C/m^2 及 3.31 kg C/m^2，在損失函數表現上，三種模型皆不甚理想。偏差結果中，線性回歸模型為-0.24，Cubist 模型為-0.18，隨機森林模型則為-0.24，驗證模型準確性皆處於中等數值。總而論之，隨機森林模型雖在訓練模型中表現出極高之解釋能力，但卻出現過擬合問題，對於模型可信度及代表性仍有待商榷。

表 3-5-3 嘉義分署各模型訓練及驗證指標及不確定性評估表

Chaiyi Branch		Linear Regression		Cubist		Random Forest		Bootstrap (Uncertainty)	
Depth (cm)	**Statistics**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**
	R^2	0.16	0.17	0.24	0.14	0.92	0.20	0.14	0.03
	Concordance	0.28	0.27	0.41	0.28	0.88	0.30	0.29	0.03
SOC 30	MSE	7.94	10.6	7.22	11.0	1.57	10.3	9.24	0.58
	RMSE	2.81	3.25	2.69	3.31	1.25	3.20	3.04	0.10
	Bias	1.33×10^{-14}	-0.24	0.12	-0.18	-0.008	-0.24	-0.04	0.24
	R^2	0.21	0.29	0.26	0.26	0.63	0.26	0.19	0.03
	Concordance	0.35	0.41	0.40	0.41	0.64	0.37	0.33	0.03
SOC 50	MSE	18.1	16.0	17.0	16.5	10.4	16.7	18.7	1.23
	RMSE	4.26	4.00	4.12	4.06	3.23	4.09	4.33	0.14
	Bias	-2.31×10^{-14}	-0.33	0.17	-0.04	0.01	-0.19	-0.04	0.31
	R^2	0.15	0.09	0.14	0.11	0.58	0.14	0.12	0.04
	Concordance	0.26	0.29	0.24	0.23	0.52	0.25	0.20	0.03
SOC 100	MSE	49.6	72.6	51.1	40.0	32.4	37.4	48.4	4.10
	RMSE	7.05	8.52	7.15	6.32	5.69	6.11	6.95	0.29
	Bias	-1.07×10^{-14}	-1.01	-0.79	-0.87	0.05	0.23	-0.02	0.83
	R^2	0.28	0.09	0.47	0.19	0.90	0.15	0.20	0.07
	Concordance	0.43	0.24	0.59	0.33	0.86	0.31	0.32	0.06
SOC 150	MSE	85.6	92.2	64.4	83.1	21.6	78.8	92.9	13.5
	RMSE	9.25	9.60	8.02	9.12	4.65	8.88	9.61	0.70
	Bias	2.13×10^{-14}	-2.22	-0.61	-3.15	0.13	-1.28	0.02	2.04

B. SOC 0 至 50 公分

在 SOC 從表土至 50 公分之各項模型表現力上，隨機森林模型於訓練模型上雖未及 SOC 30 般表現優良，但仍舊有 0.63 之解釋能力。一致性指數為 0.64，表明該模型能夠大致捕捉到土壤有機碳儲存量之變異性；此外，隨機森林之兩項損失函數（MSE 為 10.4 kg C/m^2，RMSE 為 3.23 kg C/m^2）表現能力不穩定。在偏差方面表現良好 (0.01)，雖然在預測結果顯示無顯著系統性偏差，但在損失函數上之不穩定現象下，該模型在代表性上存在潛在不確定性。線性回歸模型和 Cubist 模型在所有評估指標上均表現優於 SOC 30（線性回歸模型 R^2為 0.21，一致性指數為 0.35；Cubist 模型 R^2為 0.26，一致性指數為 0.26），同樣在 R^2和一致性指數上顯示出較低之相關性和一致性，兩模型在兩項損失函數則表現極差（線性回歸模型 RSE 為 18.1 kg C/m^2，RMSE 為 4.26 kg C/m^2；Cubist 模型 RSE 為 17.0 kg C/m^2，RMSE 為 4.12 kg C/m^2）。在訓練模型之偏差中，線性回歸模型和 Cubist 模型顯示出極低之 Bias（線性回歸模型為-2.31×10^{-14}，Cubist 模型為 0.17），預測沒有系統性偏誤；反之，隨機森林模型則表示出正偏差 (0.01)，但仍然很接近零，表明即使預測有微小之系統性偏低，模型整體預測準確性仍高。

驗證方面，隨機森林驗證 R^2值達到 0.26，顯示出隨機森林模型同樣出現過擬合之情勢。線性回歸模型 R^2為 0.29，外部資料解釋能力比訓練模型高，可能因數據量極少或訓練資料有離群值存在。Cubist 模型驗證 R^2為 0.26，與訓練模型之解釋能力相同，表示無過擬合之情形，同樣具有外推能力，即使如此，解釋能力仍舊偏低。在 MSE 及 RMSE 上，隨機森林驗證模型分別為 16.7 kg C/m^2 及 4.09 kg C/m^2，線性回歸驗證模型分別為 16.0 kg C/m^2 及 4.00 kg C/m^2，Cubist 驗證模型則分別為 16.5 kg C/m^2 及 4.06 kg C/m^2。在損失函數表現上，三種模型皆不甚理想。偏差結果中，線性回歸模型為-0.33，Cubist 模型為-0.04，隨機森林模型則為-0.19，驗證模型準確性偏低且極度不穩定。總而論之，隨機森林模型雖在訓練模型中表現出較高之解釋能力，但仍舊因出現過擬合問題，在訓練模型上也僅有 0.63 的解釋能力，且 Bootstrap 之 R^2為 0.19，僅能在少數資料中具有代表性。

C. SOC 0 至 100 公分

三種模型在 SOC 0 至 100 公分資料之解釋能力上差異極大，線性回歸模型在 R^2 僅有 0.15，Cubist 模型為 0.14，隨機森林模型則為 0.58。雖然隨機森林模型同樣為三種模型中表現最為突出，隨機森林驗證模型 R^2 為 0.14，但與訓練模型 R^2 相差 0.44，亦與 SOC 30 及 SOC 50 存在過擬合之疑慮。損失函數方面，線性回歸訓練模型之 MSE 為 49.6 kg C/m^2，驗證模型為 72.6 kg C/m^2，RMSE 為 7.05 kg C/m^2，驗證模型為 8.52 kg C/m^2；Cubist 訓練模型之 MSE 為 51.1 kg C/m^2，驗證模型為 40.0 kg C/m^2，RMSE 為 7.15 kg C/m^2，驗證模型為 6.32 kg C/m^2；隨機森林訓練模型之 MSE 為 32.4 kg C/m^2，驗證模型為 37.4 kg C/m^2，RMSE 為 5.69 kg C/m^2，驗證模型為 6.11 kg C/m^2。針對損失函數而論，與 SOC 30 及 SOC 50 相比擴大許多，表示三種模型皆出現極度不穩定，於嘉義分署範圍內無法代表各處土壤有機碳儲存量。即使在偏差上獲得高穩定性之表現（線性回歸訓練模型之 Bias 為-1.07×10^{-14}，Cubist 模型為-0.79，隨機森林模型為 0.05），但在隨機森林之 Bootstrap 解釋能力仍僅有 0.12，無法作為該地該土層之基線圖。

D. SOC 0 至 150 公分

於 SOC 0 至 150 公分之訓練模型建置上，隨機森林模型仍然表現出色，其高 R^2 (0.90) 和一致性指數 (0.86) 顯示對 SOC 變異性強大解釋能力（線性回歸訓練模型之 R^2 為 0.28，Cubist 訓練模型之 R^2 為 0.47）。雖然在解釋能力上表現突出，但在隨機森林模型之 MSE 和 RMSE 有所增加（分別為 21.6 kg C/m^2 及 4.65 kg C/m^2），但與其他模型相比仍然保持較低之誤差水平（線性回歸訓練模型之 MSE 及 RMSE 分別為 85.6 kg C/m^2 及 9.25 kg C/m^2；Cubist 訓練模型之 MSE 及 RMSE 分別為 64.4 kg C/m^2 及 8.02 kg C/m^2）。Cubist 模型與線性回歸模型相比顯示出一致之疑慮，但在偏差表現上，顯示出兩者在預測上之準確性和穩定性（線性回歸訓練模型之偏差為 2.13×10^{-14}；Cubist 訓練模型則為-0.61）。隨機森林之偏差接近零 (0.13)，表明隨機森林模型在訓練階段能非常準確地預測出 SOC 值。

Bootstrap 揭示模型性能之不確定性，尤為高 SOC 上。在所有土層中，Bootstrap 之各項指標皆顯示出模型具有較高之不確定性，可能與樣本變異性或模型對特定數據點敏感性有關。MSE 和 RMSE 之不確定性也隨著土層厚度增加而增加，特別是在 SOC 150 在處理高變異性數據時模型穩定性減少。

(2) 宜蘭分署

A. SOC 0 至 30 公分

線性回歸模型於訓練階段 R^2極低 (0.06)(表 3-5-4)，表明模型無法有效解釋變異。驗證階段之性能進一步下降，顯示模型對未見數據之泛化能力極差。在損失函數方面，MSE 為 11.9 kg C/m^2，RMSE 為 3.45 kg C/m^2，模型於穩定性之表現能力較低。Bias 則接近零，模型沒有顯著系統性偏差。Cubist 模型在訓練階段時 R^2和 Concordance 無法計算，原因在於模型完全無法捕捉數據之變異性；對於驗證階段，結果也亦是如此。隨機森林模型則於訓練階段顯示出較高 R^2值 (0.72)，但在驗證階段大幅下降。雖然驗證階段之 MSE 和 RMSE 相對較高（分別為 13.96 kg C/m^2 及 3.74 kg C/m^2），但與訓練階段相比較為穩定，表明模型具一定之穩定性。Bias 在訓練階段接近零 (-0.01)，驗證階段則略有偏差 (-0.33)。最後，該土層之 Bootstrap 結果顯示上，模型性能不確定性較大，亦即於該深度之模型預測受到樣本變異性強烈影響。

B. SOC 0 至 50 公分

線性回歸模型性能於訓練和驗證階段皆極低（分別為 0.04 及 0.01），表示模型不適合捕捉該土層之土壤有機碳儲存量變化。Bias 在訓練階段接近零 (8.88×10^{-15})，在驗證階段略顯負值 (-0.45)。Cubist 模型於決定係數上呈現 NaN，原因在於數據點稀少，無法抓取特徵值以建立模型。隨機森林模型在訓練階段顯示出相對較高之 R^2值 (0.17)，但驗證階段顯著降低 (4.56×10^{-5})，幾乎趨近於零，即該模型無法解釋任何應變數之變異性。驗證階段之 MSE 和 RMSE 相對較高（分別為 35.2 kg C/m^2 及 5.93 kg C/m^2），訓練階段則相對穩定（分別為 18.3 kg C/m^2 及 4.27 kg C/m^2），表明模型具有些微之穩定性。雖然模型能夠在訓練數據上捕捉土壤有機碳儲存量之變異，但對於外部資料之預測能力不夠穩健。

表 3-5-4 宜蘭分署各模型訓練及驗證指標及不確定性評估表

Yilan Branch		Linear Regression		Cubist		Random Forest		Bootstrap (Uncertainty)	
Depth (cm)	**Statistics**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**	**Training Model**	**Validation**
SOC 30	R^2	0.06	0.02	NaN	NaN	0.72	0.01	0.01	0.02
	Concordance	0.12	0.05	0	0	0.42	0.01	0.02	0.05
	MSE	11.9	13.6	13.1	13.6	7.80	13.96	13.7	2.43
	RMSE	3.45	3.69	3.62	3.69	2.79	3.74	3.69	0.33
	Bias	-1.78×10^{-15}	-0.43	0.67	0.33	-0.01	-0.33	-0.02	0.69
SOC 50	R^2	0.04	0.01	NaN	NaN	0.17	4.56×10^{-5}	0.01	0.02
	Concordance	0.07	0.03	0	0	0.12	-0.01	0.01	0.04
	MSE	19.6	34.4	20.4	34.6	18.3	35.2	25.5	4.82
	RMSE	4.42	5.86	4.52	5.88	4.27	5.93	5.03	0.49
	Bias	8.88×10^{-15}	-0.45	0.36	-0.11	-0.01	-0.41	0.04	0.91
SOC 100	R^2	0.20	0.17	0.14	0.08	0.82	0.01	0.03	0.03
	Concordance	0.33	0.29	0.24	0.18	0.73	0.06	0.08	0.08
	MSE	33.4	30.3	36.0	33.8	13.5	40.5	44.3	6.61
	RMSE	5.78	5.51	6.00	5.81	3.67	6.36	6.64	0.48
	Bias	3.55×10^{-15}	-0.07	0.22	0.47	0.01	-0.36	0.06	1.31
SOC 150	R^2	0.97	0.01	NaN	NaN	0.81	0.11	0.13	0.14
	Concordance	0.88	-2.37×10^{-5}	0	0	0.59	-0.02	-0.01	0.12
	MSE	2.51	2.11×10^{7}	97.2	110	37.8	127	133	37.6
	RMSE	1.58	4.59×10^{3}	9.86	10.5	6.15	11.3	11.4	1.57
	Bias	-4.26×10^{-14}	2.30×10^{3}	-1.58	10.4	0.09	10.7	0.85	5.92

C. SOC 0 至 100 公分

線性回歸模型於訓練階段表現稍好，但驗證階段性能低下，可能於該深度模型中，土壤有機碳儲存量之變化過於簡化。Cubist 繼續顯示結果缺失，同樣為數據不足以訓練模型，抑或模型於此深度之表現不佳。隨機森林模型於該土層之訓練階段表現出良好 R^2 (0.82)，但於驗證階段表現極差 (0.01)，不確定性評估與驗證階段之決定係數有相近數值 (0.03)，顯示出隨機森林模型在此深度即劇缺乏擬合能力及泛化性。

D. SOC 0 至 150 公分

線性回歸模型於該土層之訓練階段有極高 R^2 (0.97)，但驗證階段極低之 R^2和負值 Concordance 表明模型過擬合，對新數據之預測能力差。Cubist 模型於該土層仍沒有結果，須進一步調查數據與模型構建過程。隨機森林模型於訓練階段有極高 R^2 (0.81)和 Concordance (0.59)，但在驗證階段 R^2降低 (0.11)，並且於不確定性評估指標上皆表明模型於土壤有機碳儲存量之預測數值上泛化性不足。

總體而言，隨機森林模型於訓練階段通常表現最佳，但在驗證階段穩定性較低，特別是在 SOC 50 和 SOC 150 上。線性回歸於 SOC 150 表現出極端過擬合趨勢，而 Cubist 模型由於結果缺失，難以評估其性能。針對缺失之數值，可能原因包含數據問題、模型構建錯誤或計算疑義，這些結果強調進行土壤有機碳儲存量推估時模型選擇和評估方法之重要性。

3. 變數非線性影響程度評估

由於初次資料結構及相關變數之交互關係學理探討應當以概敘方式行之，因此以逐步回歸法以線性關係挑選出重要變數。但由於土壤相關因子之間關係為非線性關係，因此仍執行隨機森林中之變數重要性評估，以探討其對應關係，分兩分署四土層說明。

(1) 嘉義分署

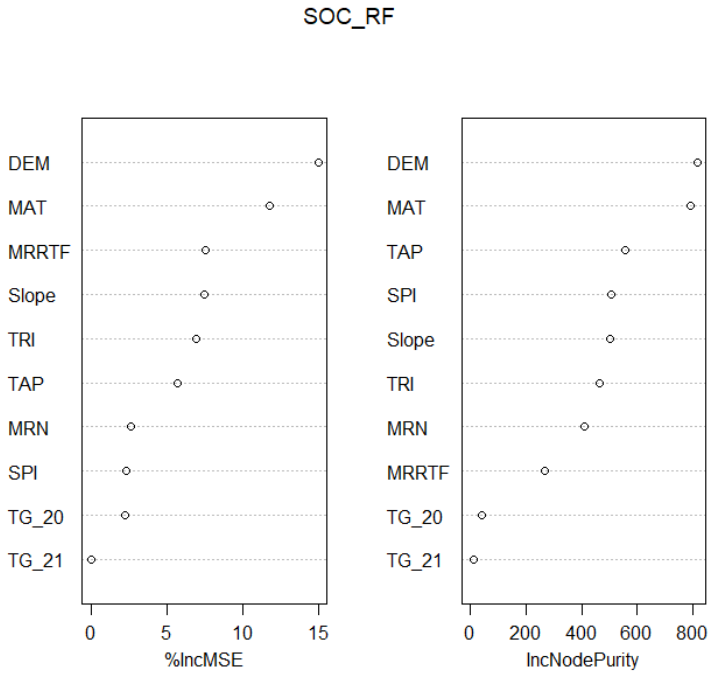


圖 3-5-9 嘉義分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

在隨機森林模型中，每個變數間之重要性通常通過兩種方法來衡量：百分比增加均方誤差 (%IncMSE) 及節點不純度增量 (IncNodePurity)，以示變數對於模型之貢獻多寡。數值高程模型 (DEM) 對嘉義分署 0 至 30 公分之土壤有機碳儲存量影響最大（圖 3-5-9)，並與溫度、濕度等微氣候條件相關，影響有機物分解和土壤碳之積累。排名第三的重要因子山脊頂部平坦度多分辨率指標 (MRRTF) 及平均年總降雨量 (TAP) 皆與降雨量有關，顯示降雨量對 0 至 30 公分之碳儲存量有一定程度之影響；TAP 影響土壤水分條件，進而影響濕度及有機物分解。而在母質之相關變數中，雜地 (TG_20) 及弱育土/淋溶土/新成土 (TG_21) 雖有被篩選入模型內，但影響程度最低。

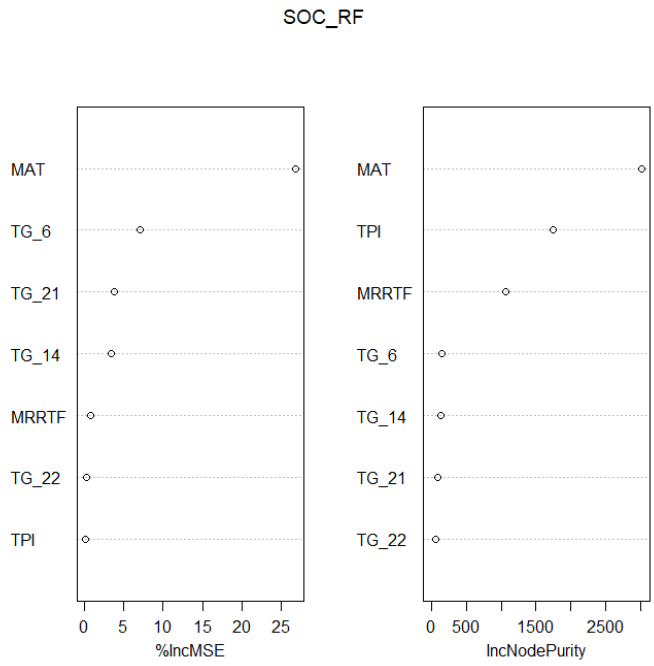


圖 3-5-10 嘉義分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

平均年均溫 (MAT) 在兩項指標上均被證實為最關鍵變數（圖 3-5-10），考慮到嘉義地區位於臺灣中南部，在熱帶與亞熱帶氣候之間的過渡帶，溫度對土壤碳循環影響顯著。在此氣候範圍內，較高溫度可能促使土壤有機碳分解，而嘉義地區隨海拔增加，降低溫度梯度進一步強調了溫度變化對土壤有機碳儲存量的影響；此外，弱育土/新成土(TG_6)、弱育土/新成土/極育土 (TG_21)、弱育土/灰燼土 (TG_14)、山脊頂部平坦度多分辨率指標 (MRRTF) 及淋溶土/弱育土/極育土 (TG_22)，在%IncMSE 和 IncNodePurity 表明較小且不固定之重要性。河流動力指數 (TPI) 重要性雖低於 MAT，仍在模型中具有一定之影響程度。

嘉義分署 0 至 100 公分之土壤有機碳儲存量於隨機森林模型中，各因子重要性分析如（圖 3-5-11）。分析的因子包括弱育土/淋溶土/新成土 (TG_23)、新成土 (TG_12)、地形位置指數 (TPI)、坡度 (Slope)及河流動力指數 (SPI)。TG_23 為影響%IncMSE 最顯著之因子，表明在該土層之土壤有機碳儲存量變異性主要受土壤分類影響。

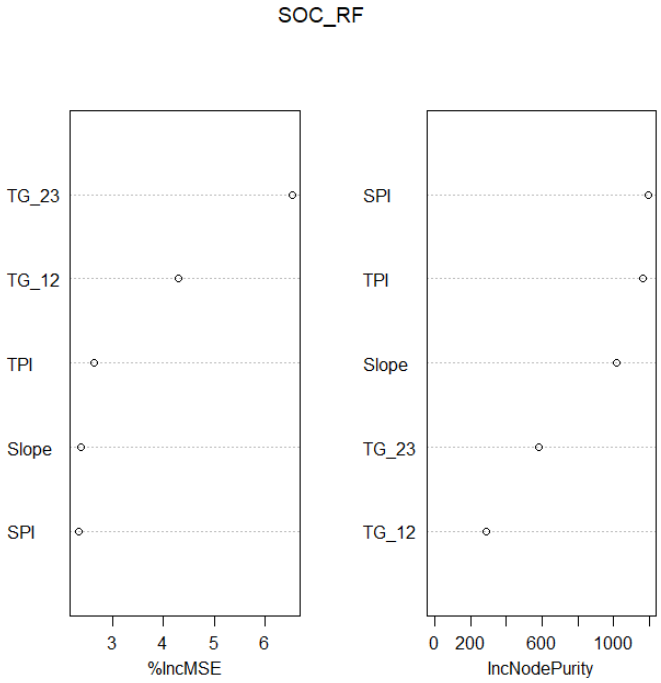


圖 3-5-11 嘉義分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

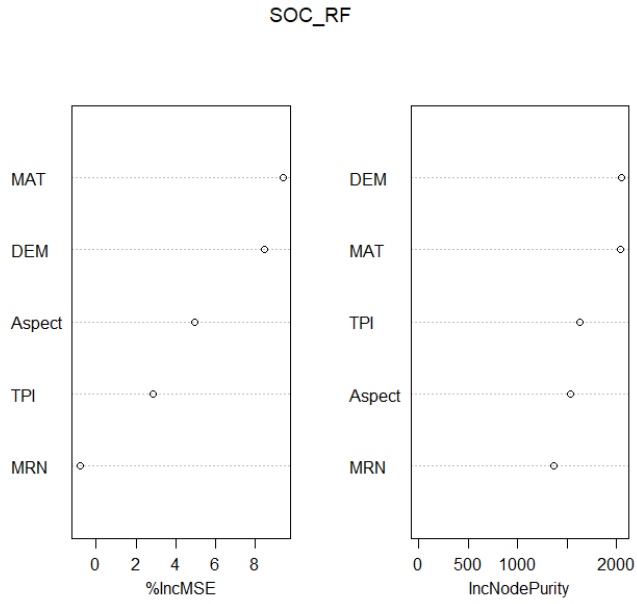


圖 3-5-12 嘉義分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

在%IncMSE 分析中，平均年均溫 (MAT) 顯示出顯著高值，強調溫度在控制土壤有機碳儲存量變異性中佔有主導作用，並在提高決策樹節點分裂時之預測淨度發揮重要影響（圖 3-5-12）；同時，高程 (DEM) 在兩項衡量指標中均占據前列位置，溫度也反映在高度變化上，顯示此處之重要因子為溫度。在此模型評估中，梅爾頓崎嶇度數

(MRN)之影響程度較低，在考慮較深土層時，崎嶇度數中坡度對於土壤有機碳儲存量之影響程度較為薄弱。

(2) 宜蘭分署

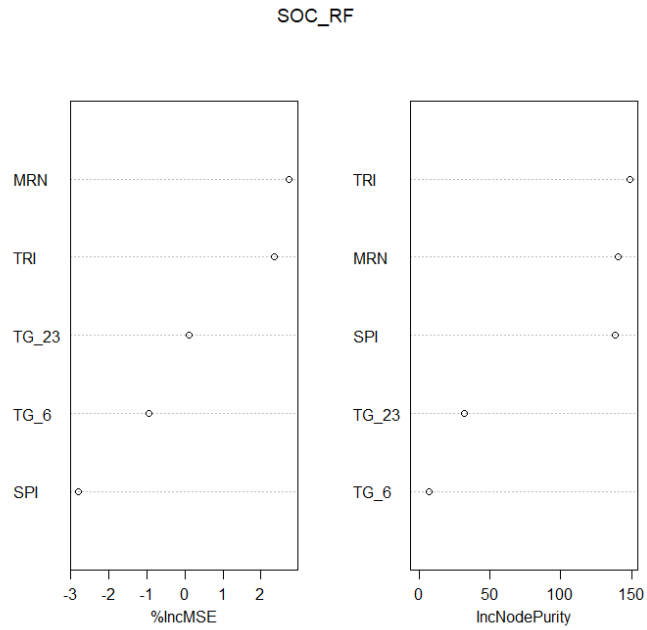


圖 3-5-13 宜蘭分署 0 至 30 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

梅爾頓崎嶇度數(MRN)及地形崎嶇指數 (TRI) 在預測該土層之土壤有機碳儲存量起到關鍵作用（圖 3-5-13），MRN 及 TRI 皆與坡度及地形相關，顯示在該土層內，最重要的影響因子為坡度與地形；同時，弱育土/淋溶土/新成土 (TG_23)、弱育土/新成土(TG_6) 與河流動力指數 (SPI) 對該地之土壤有機碳儲存量影響則顯得相對較弱。SPI 則對於土壤有機碳預測重要性最低，可能與該地區特有之土壤化學性質或水分調節機制相關。

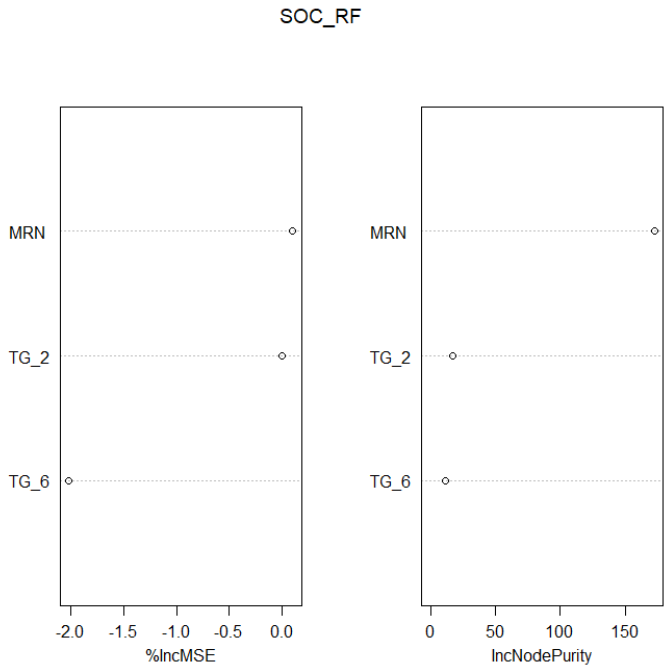


圖 3-5-14 宜蘭分署 0 至 50 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 50 公分土層中有三個重要因子分別為梅爾頓崎嶇度數 (MRN)、弱育土 (TG_2)、弱育土/新成土 (TG_6)，並於%IncMSE 中表示（圖 3-5-14），MRN、TG_2 及 TG_6 均呈現出負值，表明這些變數的移除會使模型預測均方誤差微幅減少。這種現象表明因子在模型中可能不是有機土壤有機碳儲存量變異之主要預測變數，並在其中可能存在著共線性問題。在 IncNodePurity 的分析中，所有三個因子的重要性極為有限，MRN 的重要性最高，但相較於其他變數仍然不算顯著。這些因子在模型節點分裂過程中對於提高預測準確度貢獻能力極差，雖然該土層之土壤有機碳儲存量預測可能不如其他環境或土壤特性因子重要，但對於後續土壤碳吸存機制研究及管理措施制定具有指導意義。

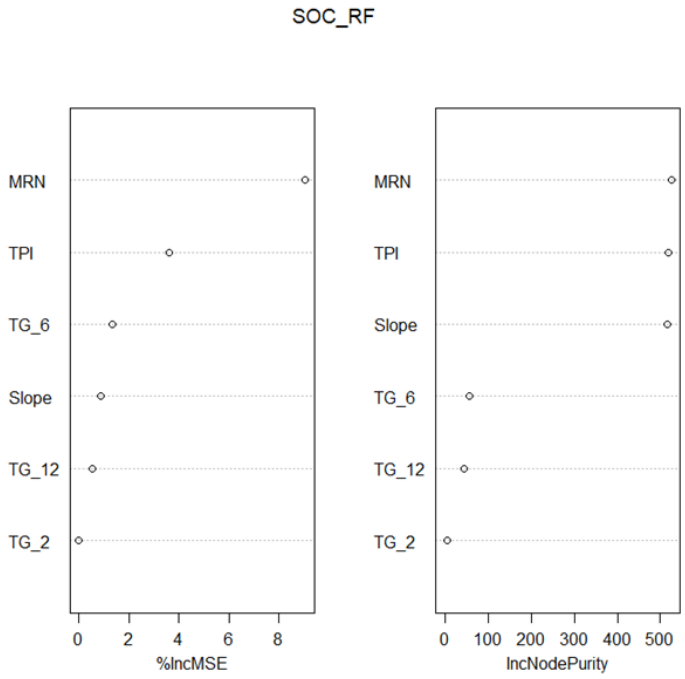


圖 3-5-15 宜蘭分署 0 至 100 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 100 公分之土壤有機碳儲存量於隨機森林模型中各因子之重要性分析如（圖 3-5-15），分別探討梅爾頓崎嶇度數 (MRN)、地形位置指數 (TPI)、弱育土 (TG_2)、弱育土/新成土 (TG_6)、坡向 (Slope) 等因素。在模型預測均方誤差百分比增量 (%IncMSE) 的分析中，MRN 顯示為最重要的因子，這表示地形的崎嶇度在預測土壤有機碳含量時起著關鍵作用。TPI 和 Slope 也表現出一定的重要性，這可能意味著地形位置和斜率對於土壤有機碳的累積和分布有顯著影響。TG_6 和 TG_12 的重要性相對較低，這可能反映出在宜蘭分署之土壤相關因子對土壤有機碳儲存量之直接影響較小。在決策樹節點不純度增量 (IncNodePurity) 評估中，MRN 同樣顯示出最高之重要性，進一步確立地形崎嶇度對土壤有機碳儲存量預測之準確性影響。Slope 重要性居中，表明坡向對於分類淨度有一定貢獻；TG_6 及 TG_12 則在評估中重要性相對較低。

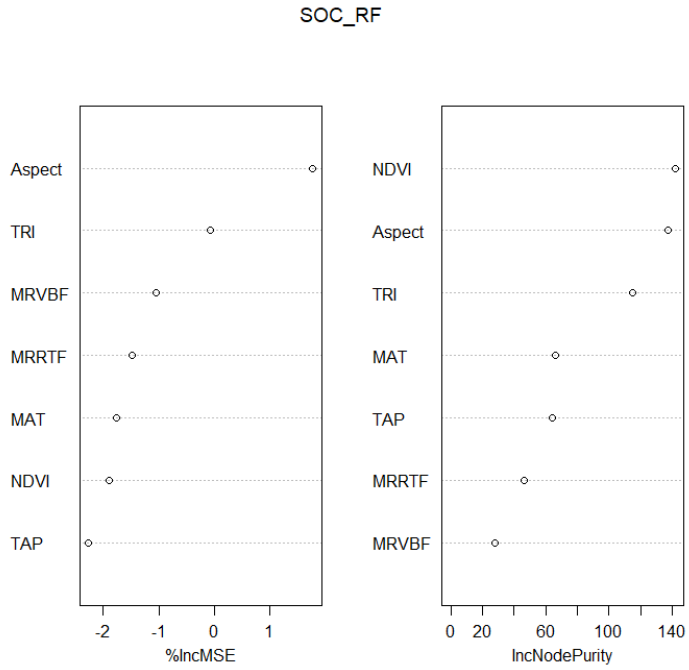


圖 3-5-16 宜蘭分署 0 至 150 公分土壤有機碳儲存量重要影響因子

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳之隨機森林模型中各因子重要性分析（圖 3-5-16）。圖中評估以下幾個環境變數的重要性：坡向 (Aspect)、地形崎嶇指數 (TRI)、河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)、山脊頂部平坦度多分辨率指標 (MRRTF)、平均年均溫 (MAT)、常態化植生差異指標 (NDVI)以及平均年總降雨量 (TAP)。

自%IncMSE 中表示，坡向 (Aspect) 對模型預測性能影響最大，顯示其在土壤有機碳含量變異中的重要性。其他變數如 TRI 和 MRVBF 的影響程度則次之。而 NDVI 和 TAP 負值則表示變數在模型中並非土壤有機碳儲存量之主要因子。在 IncNodePurity 分析中，NDVI 為最重要之變數，表明植被狀況和健康度對於土壤有機碳儲存量之預測起到關鍵作用；Aspect 抑在分析中表現出較高之重要性。簡而言之，NDVI 和地形特徵（如坡向和崎嶇度）為影響該土層土壤有機碳含量之關鍵因子，而氣候因子（如溫度和降雨量）同樣對於土壤有機碳儲存量之影響也不容忽視。

● **執行成果（應用更新後資料庫）**

以本計畫之環境相關變數作為自變數(表 2-2-2)，篩選出顯著影響土壤有機碳儲存量之因子，評估線性回歸、Cubist 及隨機森林共三種不同模型之代表性及不確定性。

為確保模型輸入資料的準確性及代表性，適當處理離群值相當重要，欲處理離群值前，須了解資料之分布情況。本計畫將所有樣本，利用直方圖分別呈現土壤有機碳儲存量 0-30 公分（圖 3-5-17 (a)）、0-50 公分（圖 3-5-17 (c)）、0-100 公分（圖 3-5-17 (e)）、0-150 公分（圖 3-5-17 (g)）的分布特徵。從圖 3-5-17 (a) 可見，樣本數共有 4,986，平均值為 9.26 kg/m^2，中位數為 7.77 kg/m^2，標準差為 7.94 kg/m^2，呈現明顯的右偏態。大部分土壤有機碳儲存量分布於 0-15 kg/m^2 之間，隨後快速下降，但仍有部分樣本的土壤有機碳儲存量值較高；圖 3-5-17 (c) 共有 4,256 個樣本，平均值為 12.9 kg/m^2，中位數為 11 kg/m^2，標準差為 10.4 kg/m^2，亦呈現右偏態，大部分土壤有機碳儲存量介於 5-20 kg/m^2 中；圖 3-5-17 (e) 共有 3,705 個樣本，平均值為 19.5 kg/m^2，中位數 16.8 kg/m^2，標準差為 14.9 kg/m^2，呈現右偏態，大部分土壤有機碳儲存量介於 5-30 kg/m^2 中；圖 3-5-17 (g) 共有 786 個樣本，平均值為 25kg/m^2，中位數 16.9 kg/m^2，標準差為 28.6 kg/m^2，呈現右偏態，大部分土壤有機碳儲存量介於 5-40 kg/m^2。

以上資訊表示，土壤有機碳儲存量含量隨累積深度增加而增加，另外在標準差亦是逐漸增加，表層土壤之土壤有機碳儲存量變異程度相對較小，並隨深度越深變異越大，可能是由於樣本數較少而導致。本計畫使用 Kolmogorov-Smirnov (KS) 檢定驗證樣本是否為常態分布，不同深度（圖 3-5-17 (b)、圖 3-5-17 (d)、圖 3-5-17 (f)、圖 3-5-17 (h)）土壤碳儲存量皆與常態分布有顯著的差異 (p-value < 0.05)，而累積機率分布在樣本值與理論值間存在顯著差異，KS 統計量由淺到深分別為 0.94、0.97、0.99、0.98。在樣本有偏態時，可使用 Tukey 法 (Tukey's method) 篩選離群值，該方法使用 1.5 倍四分位間距 (IQR) 識別離群值 (Seo, 2006)。最終土壤有機碳儲存量在 0-30 公分範圍移除 344 筆離群值，共 4,642 筆資料作為模型訓練樣本；土壤有機碳儲存量在 0-50 公分範圍移除 281 筆離群值，共 3,972 筆資料作為模型訓練樣本；土壤有機碳儲存量在 0-100 公分移除 249 筆離群值，共 3,456 筆資料作為模型訓練樣本；土壤有機碳儲存量在 0-150 公分移除 72 筆離群值，共 714 筆資料作為模型訓練樣本。

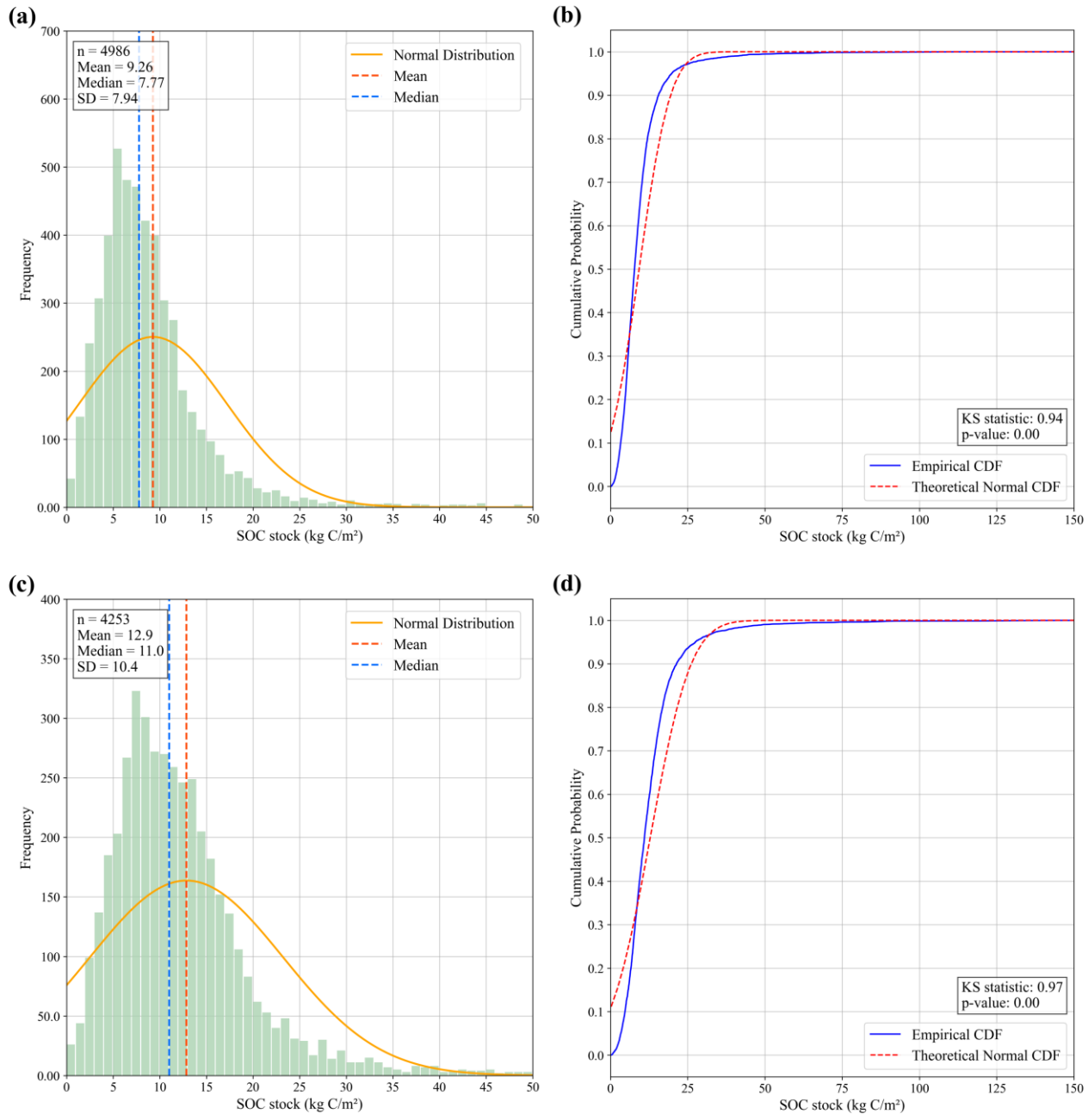


圖 3-5-17 全臺林業分署各深度土壤有機碳儲存量分布直方圖與累積機率分布函數 (1/2)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a) 0-30 公分土壤有機碳儲存量分布直方圖 (b) 0-30 公分土壤有機碳儲存量累積機率分布函數 (c) 0-50 公分土壤有機碳儲存量分布直方圖 (d) 0-50 公分土壤有機碳儲存量累積機率分布函數

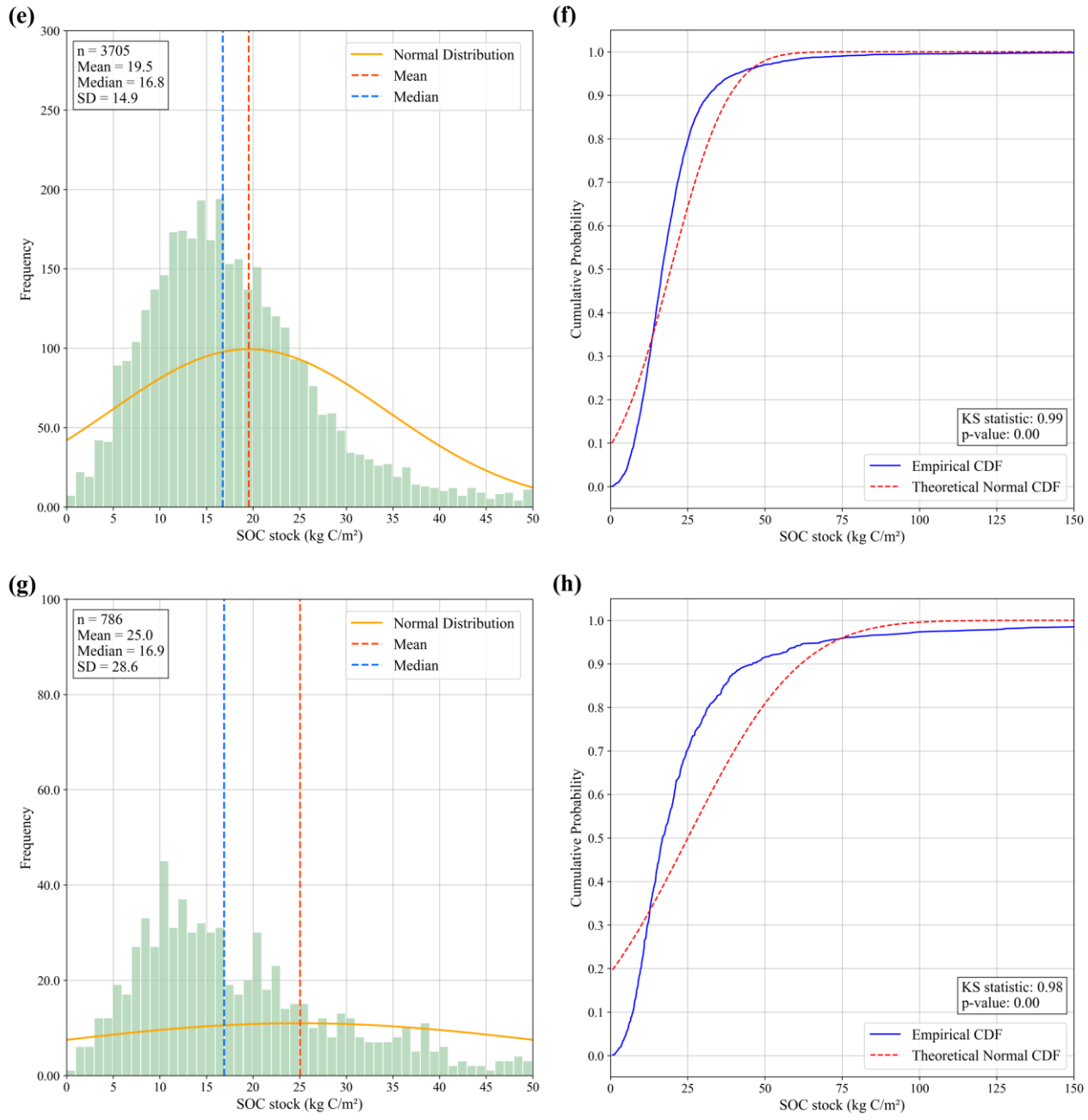


圖 3-5-17 全臺林業分署各深度土壤有機碳儲存量分布直方圖與累積機率分布函數 (2/2)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(e) 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布直方圖 (f) 0-100 公分土壤有機碳儲存量累積機率分布函數 (e) 0-100 公分土壤有機碳儲存量分布直方圖 (f) 0-100 公分土壤有機碳儲存量累積機率分布函數

1. 影響因子篩選成果

全臺灣共有 20 類土壤分類單位 (Chen *et al.*, 2015)，再加上氣候、地形、生物之相關因子，共有 41 個因變數作為整體之初始資料庫。本計畫為了確保所選變數對模型有顯著貢獻及避免多重共線性問題，使用向前逐步回歸法篩選出顯著性小於 0.1 且變異數膨脹因子 (VIF) 小於 10 的因子後，針對全臺灣不同深度（0-30 公分、0-50 公分、0-100 公分、0-150 公分）之土壤有機碳儲存量 (SOC) 與各自變數進行皮爾森相關性分析 (Pearson Correlation Analysis)，以下依序說明各深度之分析結果。

(1) 土壤深度 0-30 公分

0-30 公分土壤有機碳儲存量與十五項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-18），結果顯示（表 3-5-5），與土壤有機碳儲存量呈現正相關依序為高程 (DEM)、地形位置指數 (TAP)、地形位置指數 (TPI)、人工針葉林 (FT_4)、天然闊葉林 (FT_3)、地形崎嶇度指數 (TRI)、弱育土 (TG_3)、淋溶土 (TG_11)、人工針闊葉混淆林 (FT_5)、極育土/淋溶土/弱育土 (TG_13)、灰燼土 (TG_18)；與土壤有機碳儲存量呈現負相關之變數，依序為河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)、人工闊葉林 (FT_6)、膨轉土 (TG_19)、弱育土/灰燼土 (TG_5)。

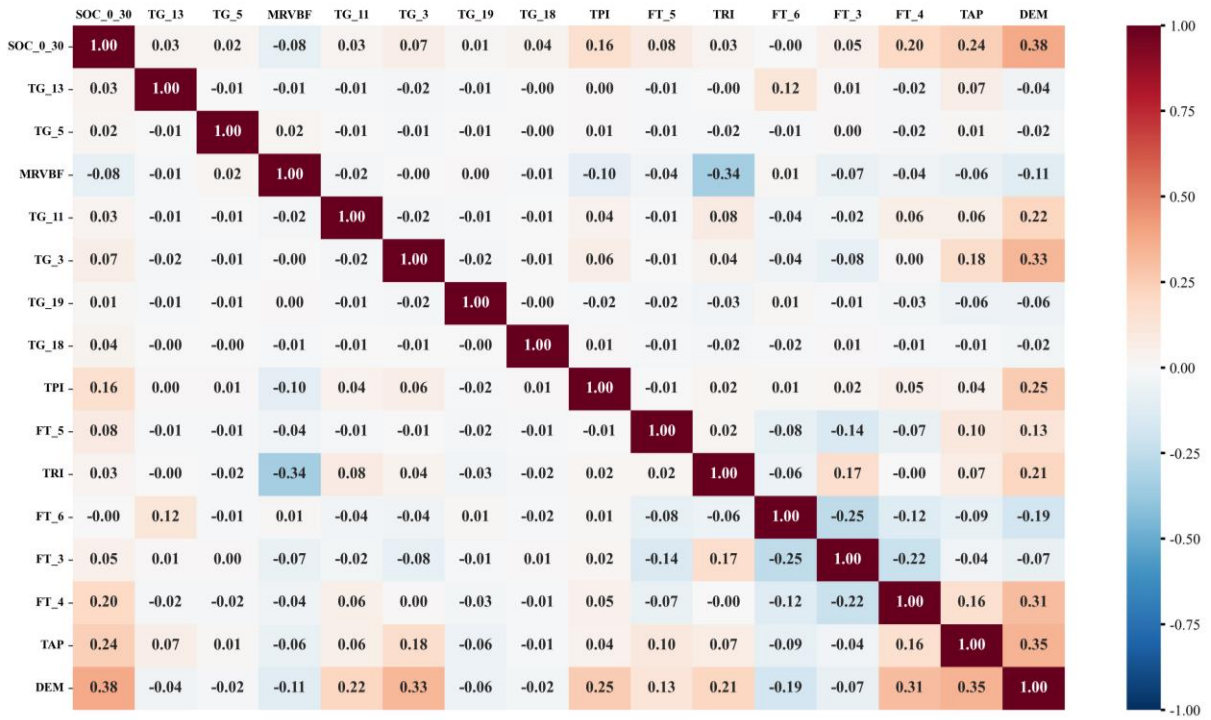


圖 3-5-18 全臺林業分署土壤深度 0-30 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-5 全臺林業分署 0-30 公分土壤有機碳儲量之影響因子表

變數	顯著性	皮爾森 相關係數
DEM	0.00***	0.38
TAP	0.00***	0.24
FT_4	0.00***	0.20
FT_3	0.00***	0.05
FT_6	0.00***	0.00
TRI	0.00***	0.03
FT_5	0.00***	0.08
TPI	0.00***	0.16
TG_18	0.00***	0.04
TG_19	0.00***	0.01
TG_3	0.00***	0.07
TG_11	0.00***	0.03
MRVBF	0.00***	-0.08
TG_5	0.06*	0.02
TG_13	0.09*	0.03

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

註：
* p-value ≤ 0.1；** p-value ≤ 0.05；*** p-value ≤ 0.01。
*代號如表 3-5-1

(2) 土壤深度 0-50 公分

0-50 公分土壤有機碳儲存量與十七項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-19），結果顯示（表 3-5-6），與土壤有機碳儲存量呈現正相關依序為高程 (DEM)、平均年總降雨量 (TAP)、地形位置指數 (TPI)、人工針葉林 (FT_4)、天然闊葉林 (FT_3)、地形崎嶇度指數 (TRI)、天然針闊葉混淆林 (FT_2)、人工針闊葉混淆林 (FT_5)、弱育土 (TG_3)、淋溶土 (TG_11)、弱育土/灰燼土 (TG_5)、極育土/淋溶土/弱育土 (TG_13)、灰燼土 (TG_18)；呈現負相關依序為極育土/弱育土 (TG_10)、河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)、人工闊葉林 (FT_6)、膨轉土 (TG_19)。



圖 3-5-19 全臺林業分署土壤深度 0-50 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-6 全臺林業分署 0-50 公分土壤有機碳儲量之影響因子表

變數	顯著性	皮爾森 相關係數
DEM	0.00***	0.40
TAP	0.00***	0.26
TPI	0.00***	0.18
FT_4	0.00***	0.20
FT_3	0.00***	0.06
FT_6	0.00***	0.00
FT_5	0.00***	0.11
TG_19	0.00***	0.02
TG_18	0.00***	0.03
TRI	0.00***	0.05
MRVBF	0.00***	-0.09
TG_13	0.01***	0.04
TG_5	0.01**	0.03
FT_2	0.02**	0.05
TG_3	0.02**	0.09
TG_11	0.02**	0.04
TG_10	0.09*	-0.14

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

註：

* p-value ≤ 0.1；** p-value ≤ 0.05；*** p-value ≤ 0.01。

*代號如表 3-5-1

(3) 土壤深度 0-100 公分

0-100 公分土壤有機碳儲存量與十六項自變數進行皮爾森相關性分析(圖 3-5-20)，結果顯示（表 3-5-7），土壤有機碳儲存量依序與高程 (DEM)、地形位置指數 (TPI)、人工針葉林 (FT_4)、天然闊葉林 (FT_3)、新成土 (TG_1)、地形崎嶇度指數 (TRI)、天然針闊葉混淆林 (FT_2)、人工針闊葉混淆林 (FT_5)、極育土/淋溶土/弱育土 (TG_13)、灰燼土 (TG_18)、淋溶土/弱育土 (TG_8)呈現正相關；依序與極育土/弱育土 (TG_10)、河谷底部平坦度多分辨率指標 (MRVBF)、人工闊葉林 (FT_6)、弱育土/新成土 (TG_2)、膨轉土 (TG_19) 則呈現負相關。



圖 3-5-20 全臺林業分署土壤深度 0-100 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-7 全臺林業分署 0-100 公分土壤有機碳儲量之影響因子表

變數	顯著性	皮爾森 相關係數
DEM	0.00***	0.39
TPI	0.00***	0.18
FT_4	0.00***	0.20
FT_3	0.00***	0.05
FT_6	0.00***	0.01
FT_5	0.00***	0.09
TG_13	0.00***	0.05
MRVBF	0.00***	-0.10
TRI	0.00***	0.05
TG_1	0.00***	0.12
TG_10	0.00***	-0.13
TG_8	0.01**	0.02
TG_2	0.02**	-0.01
TG_18	0.05**	0.02
FT_2	0.06*	0.06
TG_19	0.06*	0.00

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

註：

* p-value ≤ 0.1；** p-value ≤ 0.05；*** p-value ≤ 0.01。

*代號如表 3-5-1

(4) 土壤深度 0-150 公分

0-150 公分土壤有機碳儲存量與十項自變數進行皮爾森相關性分析（圖 3-5-21），結果顯示（表 3-5-8），土壤有機碳儲存量依序與高程 (DEM)、坡度 (SLOPE)、天然針葉林 (FT_1)、人工針葉林 (FT_4)、弱育土 (TG_3)、人工針闊葉混淆林 (FT_5)、淋溶土/弱育土 (TG_8)、膨轉土 (TG_19) 呈現正相關；與弱育土/新成土 (TG_2)、梅爾頓崎嶇度數 (MRN) 則呈現負相關。

表 3-5-8 全臺林業分署 0-150 公分土壤有機碳儲量之影響因子表

變數	顯著性	皮爾森 相關係數
DEM	0.00***	0.29
FT_5	0.00***	0.13
FT_1	0.00***	0.14
FT_4	0.00***	0.16
MRN	0.01***	-0.04
Slope	0.02**	0.09
TG_8	0.02**	0.07
TG_2	0.02**	-0.09
TG_3	0.03**	0.02
TG_19	0.09*	0.05

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

註：

* *p*-value≤0.1；** *p*-value≤0.05；*** *p*-value≤0.01。

DEM：高程 (Digital Elevation Model)

FT_5：人工針闊葉混淆林

FT_1：天然針葉林

FT_4：人工針葉林

MRN：梅爾頓崎嶇度數

Slope：坡度

TG_8：淋溶土/弱育土

TG_2：弱育土/新成土

TG_3：弱育土

TG_19：膨轉土

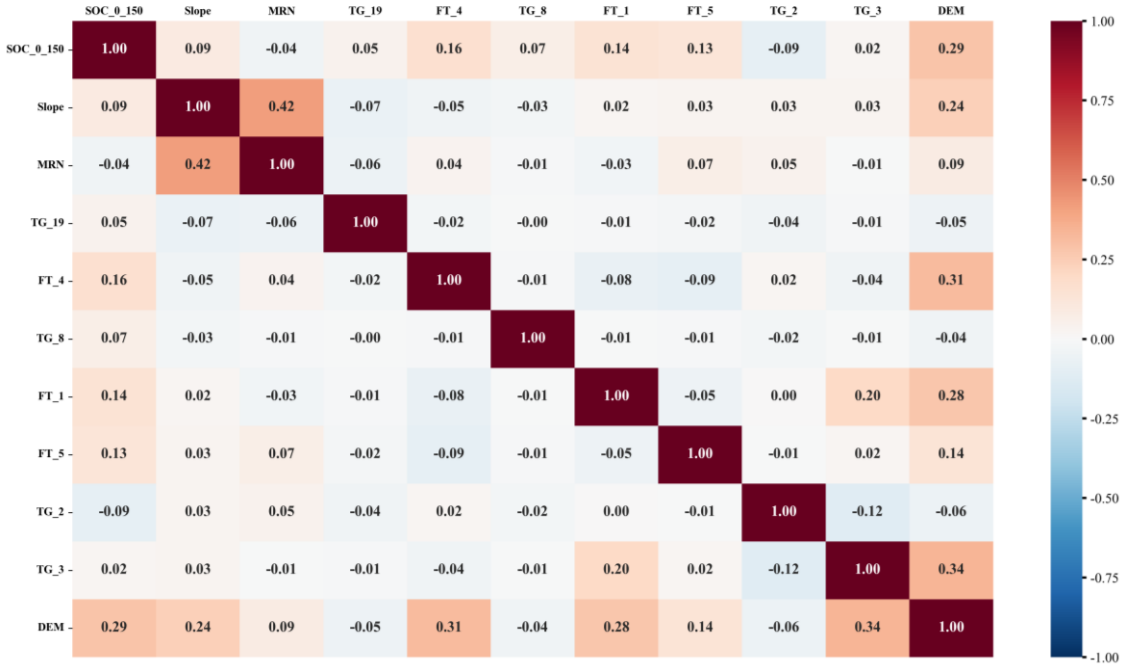


圖 3-5-21 全臺林業分署土壤深度 0-150 公分有機碳儲量之變數皮爾森相關性矩陣表

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

2. 模型代表性及不確定性評估

本計畫評估三種不同模型，分別為多元線性回歸、Cubist 模型及隨機森林模型，於此使用篩選後的樣本，拆分 70%為訓練集 (Training set)，30%為驗證集 (Validation set)，針對四種不同土層深度（0-30、50、100、150 公分）的土壤有機碳儲存量，各自建立預測模型，並比較模型的表現；同時，利用拔靴法 (Bootstrap) 衡量模型性能之不確定性。模型各項性能根據決定係數 (R^2)、一致性指數 (Concordance)、均方誤差 (MSE)、均方根誤差 (RMSE) 及偏差 (Bias) 進行評估，結果呈現於表 D2，以下為各土層深度的分析結果。

為提高隨機森林模型評估結果的準確性，本計畫對該模型的兩個參數進行評估，分別為決策樹的數量 (ntree) 和各節點隨機選擇的變數數量 (mtry)。參數的選擇根據驗證集的決定係數 (R^2) 評估，採用網格搜索 (Grid Search) 與早停法 (Early Stopping) 決定最佳參數 (圖 3-5-22)，當 R^2的增量小於 0.01 時，即停止搜索。在網格搜索設置的部份，根據相關文獻建議，ntree 的選擇使用 2 的冪次進行測試，而 mtry 的值則以特徵數的三分之一為基準，使用加倍和減半的值進行測試 (Oshiro *et al.*, 2012；Al-Shammary *et al.*, 2018)。不同土壤深度下的最佳參數組合如表 3-5-9 所示，ntree 的最佳值在淺層土壤（0-30 公分）為 256，而在更深的土層則增加到 512。mtry 的最佳值也隨深度變化，在 0-150 公分深度時降到 3，可能是因樣本數與環境因子的差異所導致。

表 3-5-9 不同土壤深度有機碳儲存量的隨機森林參數

深度 (cm)	樣本數	ntree	mtry	驗證集 R^2
0-30	4,642	256	5	0.23
0-50	3,972	512	5	0.27
0-100	3,456	512	5	0.20
0-150	714	512	3	0.11

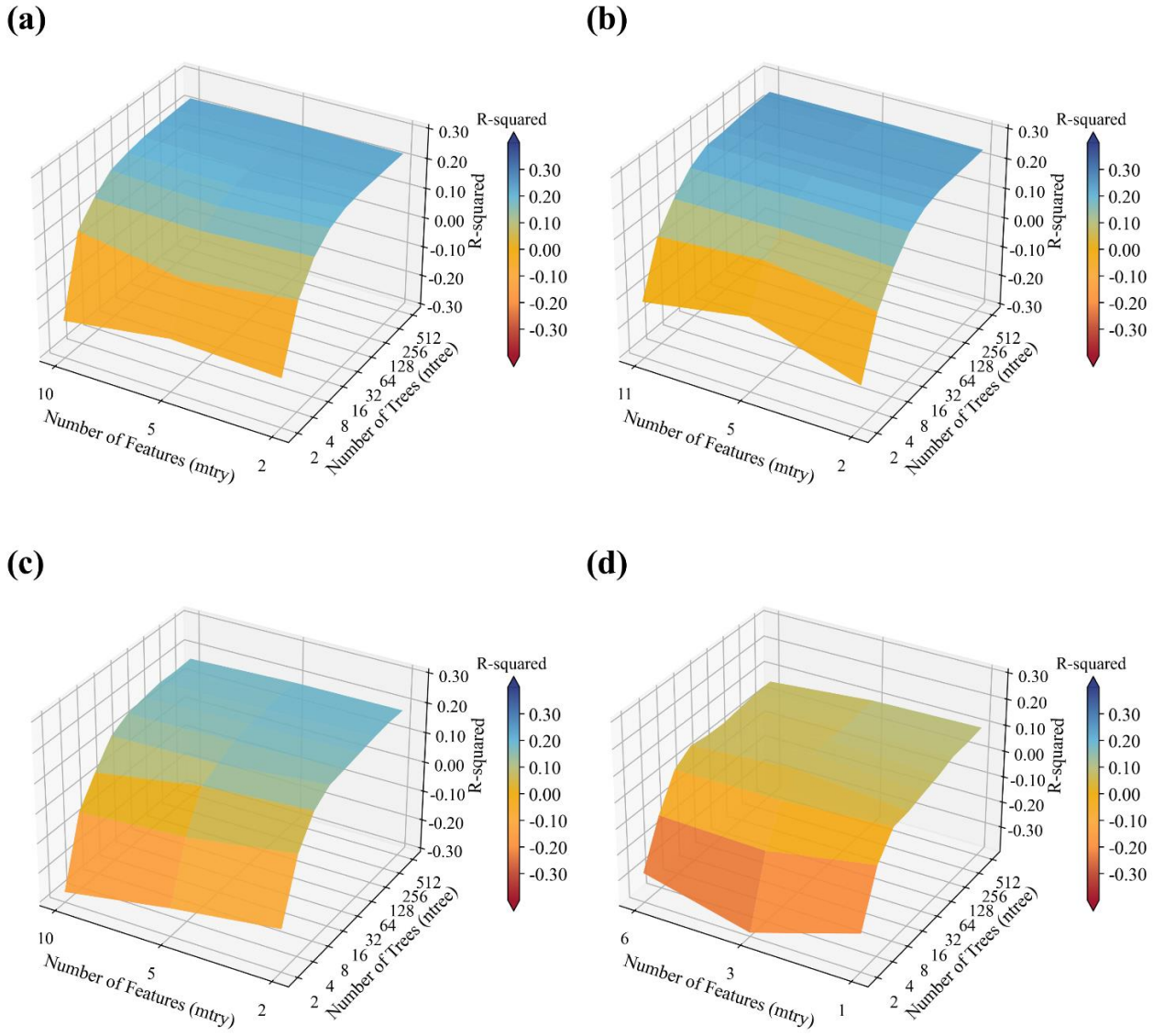


圖 3-5-22 不同土壤深度有機碳儲存量之隨機森林網格搜索參數值

(a)、(b)、(c)、(d) 分別為 0-30、0-50、0-100、0-150 公分之土壤有機碳儲存量網格搜索參數值

A. 土壤深度 0-30 公分土壤有機碳儲存量（樣本數為 4,642）

在訓練集部分（表 3-5-10），隨機森林表現優異，R^2 高達 0.8，而多元線性回歸與 Cubist 表現較差，R^2 分別為 0.21 與 0.22；在一致性指數部分，Cubist 為最佳 (0.67)，再來是多元線性回歸 (0.66) 以及隨機森林 (0.5)；至於損失函數 (Loss function) 部分，以隨機森林表現最佳 (MSE=3.23, RMSE=1.8 kg C/m^2)，均優於 Cubist (MSE=12.2, RMSE=3.5 kg C/m^2) 與多元線性回歸 (MSE=12.4, RMSE=3.53 kg C/m^2)。而在 Bias 部分，隨機森林 (0) 與多元線性回歸 (0.01) 皆為正偏差，Cubist 則出現負偏差 (-0.16)，顯示出 Cubist 的預測結果有系統性偏低的問題。

在驗證集部分（表 3-5-10），隨機森林的 R^2 為 0.23，與訓練集之 0.8 有顯著差別，表示其有嚴重過擬合 (Overfitting) 之情勢，而多元線性回歸、Cubist 皆與訓練集表現相似，有良好的泛化能力；在一致性指數部分，Cubist 與多元線性回歸皆為 0.67，隨機森林則增至 0.57；至於損失函數部分，隨機森林有增加趨勢 (MSE=11.9, RMSE=3.45 kg C/m2)，但表現仍優於多元線性回歸 (MSE=12.7, RMSE=3.57 kg C/m^2) 與 Cubist (MSE=12.6, RMSE=3.56 kg C/m^2)。最後在 Bias 部分，多元線性回歸從正偏差變為負偏差 (-0.03)，Cubist 與隨機森林維持負偏差 (-0.22) 與正偏差 (0.10)。圖 3-5-23 展示各模型 0-30 公分土壤有機碳儲存量之觀測值與預測值散布圖，可以發現三個模型皆有低值高估，高值低估之情形，而最佳預測區間為 7-8。

在不確定性評估部分（表 3-5-11），多元線性回歸在訓練集及驗證集的各項指標差異不大；而 Cubist 的 R^2 在訓練集 (0.36±0.03) 上有稍微高於驗證集之情況 (0.16±0.02)，顯示出 Cubist 有輕微過擬合的情形；隨機森林的 R^2 在訓練集 (0.89±0.00) 上明顯高於驗證集 (0.09±0.02)，代表隨機森林有明顯的過擬合問題，並且 MSE 與 RMSE 大幅增加，MSE 從 1.67±0.07 增至 59.1±12.6，RMSE 從 1.29±0.03 kg C/m^2 增至 7.64±0.82 kg C/m^2。

表 3-5-10 全臺林業分署 0-30 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=4,642)

統計量	多元線性回歸		Cubist		隨機森林	
	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)
R^2	0.21	0.21	0.22	0.22	0.80	0.23
Concordance	0.66	0.67	0.67	0.67	0.50	0.57
MSE	12.4	12.7	12.2	12.6	3.23	11.9
RMSE	3.53	3.57	3.5	3.56	1.80	3.45
Bias	0.01	-0.03	-0.16	-0.22	0.00	0.10

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-11 全臺林業分署 0-30 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估

統計量	多元線性回歸（拔靴法 n=100）		Cubist（拔靴法 n=100）		隨機森林（拔靴法 n=100）	
	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集
R^2	0.21±0.01	0.20±0.01	0.36±0.03	0.16±0.02	0.89±0.00	0.09±0.02
Concordance	0.67±0.00	0.66±0.01	0.71±0.01	0.65±0.01	0.92±0.00	0.67±0.01
MSE	12.5±0.32	12.7±0.43	10.2±0.55	14.0±0.78	1.67±0.07	59.1±12.6
RMSE	3.53±0.05	3.56±0.06	3.19±0.09	3.74±0.10	1.29±0.03	7.64±0.82
Bias	0.00±0.00	0.01±0.11	-0.14±0.04	-0.12±0.12	0.00±0.00	-1.18±0.18

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

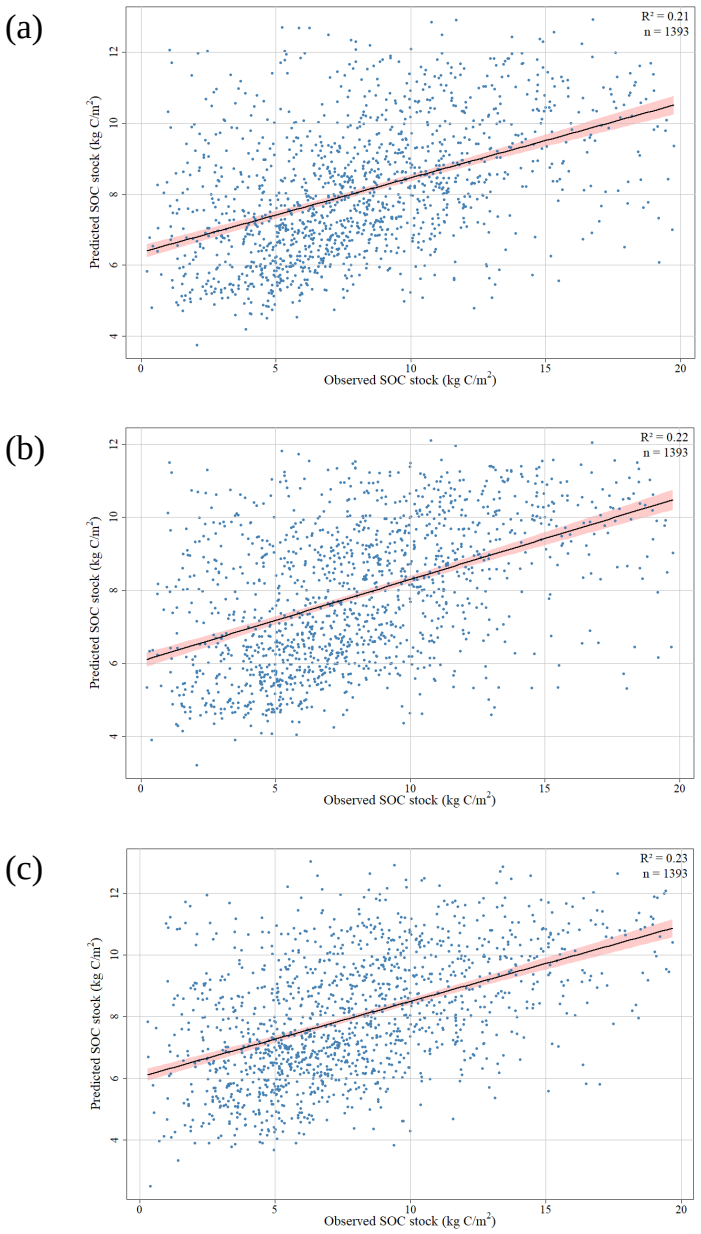


圖 3-5-23 土壤深度 0-30 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)、(b)、(c) 分別為線性回歸模型、Cubist 模型和隨機森林模型的實際與推估土壤有機碳儲存量驗證集散布圖，圖中粉紅色和淺橘色區域分別代表 95%信賴區間和 95%預測區間。

B. 土壤深度 0-50 公分土壤有機碳儲存量（樣本數為 3,972）

在訓練集部分（表 3-5-12），隨機森林表現優異，R^2 高達 0.79，而多元線性回歸與 Cubist 表現較差，R^2 分別為 0.23 與 0.27；在一致性指數部分，多元線性回歸與 Cubist 為最佳 (0.68)，再來是隨機森林 (0.5)；至於損失函數部分，以隨機森林表現最佳 (MSE=6.43, RMSE=2.54 kg C/m^2)，均優於 Cubist (MSE=23.1, RMSE=4.8 kg C/m^2)與多元線性回歸 (MSE=24, RMSE=4.9 kg C/m^2)。而在 Bias 部分，隨機森林為正偏差 (0.01)，然而多元線性回歸 (-0.09) 與 Cubist (-0.31) 則為負偏差，顯示預測結果有系統性偏低問題。

在驗證集部分（表 3-5-12），隨機森林的 R^2 為 0.27，與訓練集之 0.79 有顯著差別，表示其有嚴重過擬合之情勢，而多元線性回歸表現一致（皆為 0.23），有良好的泛化能力，Cubist 則些為降至 0.25；在一致性指數部分，多元線性回歸與 Cubist 皆些微降至 0.67，隨機森林則增至 0.6；至於損失函數部分，隨機森林表現有增加趨勢（MSE=23.8, RMSE=4.87），且略遜於多元線性回歸（MSE=22.3, RMSE=4.73）與 Cubist（MSE=21.7, RMSE=4.65）。最後 Bias 部分，多元線性回歸從負偏差變為正偏差 (0.21)，Cubist 與隨機森林維持負偏差 (-0.07) 與正偏差 (0.06)。於圖 3-5-24 展示各模型 0-50 公分土壤有機碳儲存量之觀測值與預測值散布圖，可以發現三個模型皆有低值高估，高值低估之情形，而最佳預測區間為 12-13。此外，在 Cubist 模型的預測結果呈現明顯的資料斷層，可能因為其基於決策樹的分割策略，將資料點明顯分為幾個區段。

在不確定性評估部分（表 3-5-13），多元線性回歸在訓練集及驗證集的各項指標差異不大；而 Cubist 的 R^2 在訓練集 (0.39±0.04) 稍微高於驗證集之情況 (0.18±0.02)，顯示出 Cubist 有輕微過擬合的情形；隨機森林的 R^2 在訓練集 (0.88±0.00) 明顯高於驗證集 (0.11±0.02)，代表隨機森林有明顯的過擬合問題，並且 MSE 與 RMSE 大幅增加，MSE 從 3.57±0.17 增至 97.3±18.4，RMSE 從 1.89±0.04 kg C/m^2 增至 9.82±0.94 kg C/m^2。

表 3-5-12 全臺林業分署 0-50 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=3,972)

統計量	多元線性回歸		Cubist		隨機森林	
	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)
R^2	0.23	0.23	0.27	0.25	0.79	0.27
Concordance	0.68	0.67	0.68	0.67	0.50	0.60
MSE	24.0	22.3	23.1	21.7	6.43	23.8
RMSE	4.90	4.73	4.8	4.65	2.54	4.87
Bias	-0.09	0.21	-0.31	-0.07	0.01	0.06

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-13 全臺林業分署 0-50 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估

統計量	多元線性回歸（拔靴法 n=100）		Cubist（拔靴法 n=100）		隨機森林（拔靴法 n=100）	
	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集
R^2	0.24±0.01	0.22±0.02	0.39±0.04	0.18±0.02	0.88±0.00	0.11±0.02
Concordance	0.68±0.00	0.67±0.01	0.72±0.01	0.66±0.01	0.92±0.00	0.68±0.01
MSE	23.4±0.55	23.8±0.76	18.9±1.07	26.5±1.31	3.57±0.17	97.3±18.4
RMSE	4.83±0.06	4.88±0.08	4.34±0.12	5.15±0.13	1.89±0.04	9.82±0.94
Bias	0.00±0.00	-0.01±0.15	-0.21±0.07	-0.22±0.18	0.00±0.01	-1.51±0.28

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

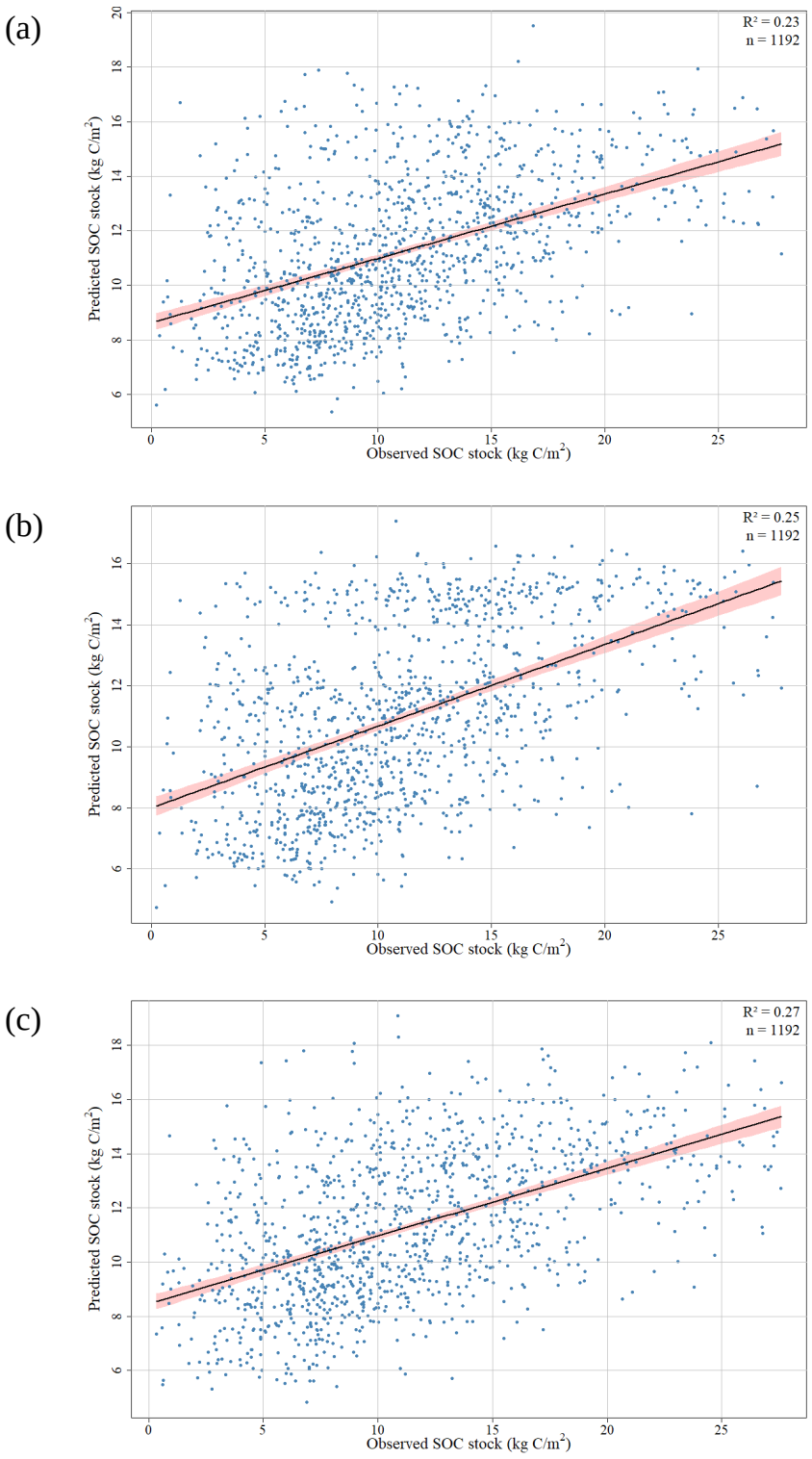


圖 3-5-24 土壤深度 0-50 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)、(b)、(c) 分別為線性回歸模型、Cubist 模型和隨機森林模型的實際與推估土壤有機碳儲存量驗證集散布圖，圖中粉紅色和淺橘色區域分別代表 95%信賴區間和 95%預測區間。

C. 土壤深度 0-100 公分土壤有機碳儲存量（樣本數為 3,456）

在訓練集部分（表 3-5-15），隨機森林表現優異，R^2 達 0.75，而多元線性回歸與 Cubist 表現較差，R^2 皆為 0.21；在一致性指數部分，多元線性回歸與 Cubist 為最佳 (0.66)，再來是隨機森林 (0.5)；至於損失函數部分，以隨機森林表現最佳 (MSE=15.6, RMSE=3.94 kg C/m^2)，均優於 Cubist (MSE=49.8, RMSE=7.06 kg C/m^2) 與多元線性回歸 (MSE=50.2, RMSE=7.09 kg C/m^2)。而在 Bias 部分，隨機森林為正偏差 (0.01)，然而多元線性回歸 (-0.04) 與 Cubist (-0.3) 則為負偏差，表示預測結果有系統性偏低的問題。

在驗證集部分（表 3-5-15），隨機森林的 R^2 為 0.2，與訓練集之 0.75 有顯著差別，表示其有嚴重過擬合之情勢，而多元線性回歸、Cubist 與訓練集表現相似；一致性指數部分，多元線性回歸與 Cubist 皆些微增至 0.67，隨機森林則增至 0.59；至於損失函數部分，隨機森林有增加趨勢 (MSE=49.1, RMSE=7.016 kg C/m^2)，表現略遜於多元線性回歸 (MSE=48.7, RMSE=6.98) 與 Cubist (MSE=48.3, RMSE=6.95)。最後 Bias 部分，多元線性回歸從負偏差變為正偏差 (0.1)，Cubist 則維持負偏差 (-0.17)，隨機森林從正偏差變為負偏差 (-0.22)，表示預測結果有系統性偏低的問題。於圖 3-5-25 展示各模型 0-100 公分土壤有機碳儲存量之觀測值與預測值散布圖，在三個模型皆有低值高估，高值低估之情形，而最佳預測區間為 17-18。

在不確定性評估部分（表 3-5-16），多元線性回歸在訓練集及驗證集的各項指標差異不大；而 Cubist 的 R^2 在訓練集 (0.32±0.04) 稍微高於驗證集之情況 (0.16±0.03)，顯示出 Cubist 有輕微過擬合的情形，MSE 與 RMSE 些微增加；在隨機森林的 R^2 在訓練集 (0.85±0.01) 明顯高於驗證集 (0.09±0.02)，代表隨機森林有明顯的過擬合問題，並且 MSE 與 RMSE 大幅增加，MSE 從 9.09±0.35 增至 202±32.8 kg C/m^2，RMSE 從 3.01±0.06 增至 14.2±1.16 kg C/m^2。

表 3-5-15 全臺林業分署 0-100 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=3,456)

深度 (cm)	統計量	多元線性回歸		Cubist		隨機森林	
		訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)
0-100 n = 3456	R^2	0.21	0.22	0.21	0.23	0.75	0.20
	Concordance	0.66	0.67	0.66	0.67	0.50	0.59
	MSE	50.2	48.7	49.8	48.3	15.6	49.1
	RMSE	7.09	6.98	7.06	6.95	3.94	7.01
	Bias	-0.04	0.1	-0.3	-0.17	0.01	-0.22

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-16 全臺林業分署 0-100 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估

深度 (cm)	統計量	多元線性回歸 （拔靴法 n=100）		Cubist （拔靴法 n=100）		隨機森林 （拔靴法 n=100）	
		訓練集	驗證集	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集
0-100	R^2	0.21±0.01	0.20±0.02	0.32±0.04	0.16±0.03	0.85±0.01	0.09±0.02
	Concordance	0.66±0.01	0.66±0.01	0.70±0.01	0.65±0.01	0.91±0.00	0.66±0.01
	MSE	49.8±1.33	50.3±1.89	43.0±2.62	54.6±3.46	9.09±0.35	202±32.8
	RMSE	7.05±0.09	7.09±0.13	6.56±0.20	7.38±0.23	3.01±0.06	14.2±1.16
	Bias	0.00±0.00	0.03±0.27	-0.21±0.11	-0.17±0.32	0.00±0.01	-2.29±0.38

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

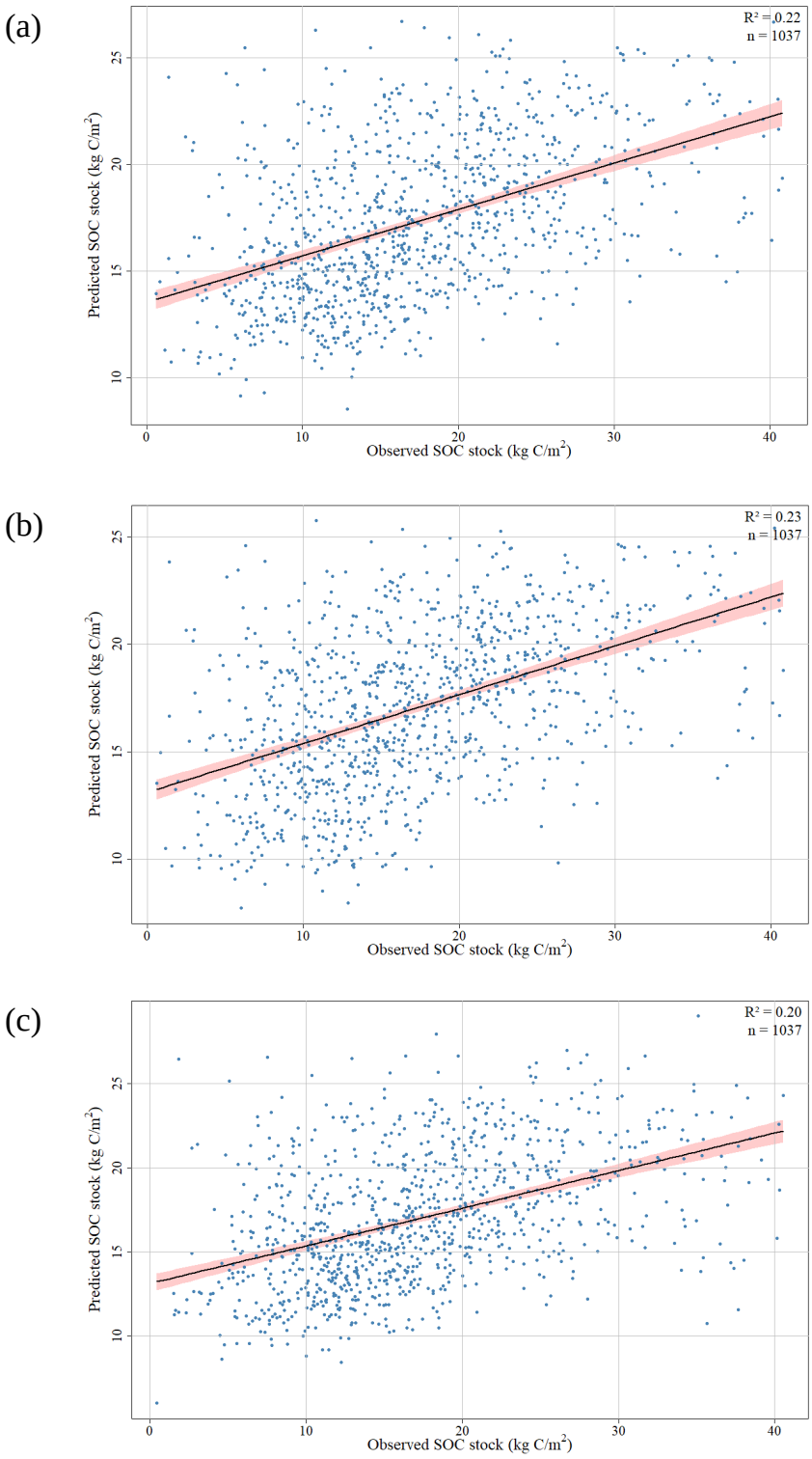


圖 3-5-25 土壤深度 0-100 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)、(b)、(c) 分別為線性回歸模型、Cubist 模型和隨機森林模型的實際與推估土壤有機碳儲存量驗證集散布圖，圖中粉紅色和淺橘色區域分別代表 95%信賴區間和 95%預測區間。

D. 土壤深度 0-150 公分土壤有機碳儲存量（樣本數為 714）

在訓練集部分（表 3-5-17），隨機森林在 R^2 表現最佳 (0.58)，而多元線性回歸與 Cubist 表現較差，R^2 分別為 0.14 與 0.12；在一致性指數部分，多元線性回歸最佳 (0.61)，再來是 Cubist (0.61) 以及隨機森林 (0.49)；至於損失函數部分，隨機森林表現最佳 (MSE=51.4, RMSE=7.17 kg C/m^2)，均優於多元線性回歸 (MSE=106, RMSE=10.3 kg C/m^2) 與 Cubist (MSE=111, RMSE=10.6 kg C/m^2)。而在 Bias 部分，隨機森林為正偏差 (0.02)，多元線性回歸 (-0.28) 與 Cubist 則為負偏差 (-1.75)，顯示預測結果有系統性偏低的問題。

在驗證集部分（表 3-5-17），隨機森林的 R^2 為 0.11，與訓練集之 0.58 有差別，表示其有過擬合之情勢，而多元線性回歸與 Cubist 分別從 0.14 與 0.12 增至 0.16；在一致性指數部分，多元線性回歸與 Cubist 皆為 0.64，隨機森林則為 0.57；至於損失函數部分，隨機森林有增加趨勢 (MSE=93.8, RMSE=9.69 kg C/m^2)，且表現略遜於多元線性回歸 (MSE=87.1, RMSE= 9.33) 與 Cubist (MSE= 87.2, RMSE=9.34)。最後 Bias 部分，除了 Cubist 仍為負偏差之外 (-0.79)，多元線性回歸與隨機森林從負偏差變為正偏差，分別為 0.64 與 0.96。於圖 3-5-26 展示各模型 0-150 公分土壤有機碳儲存量之觀測值與預測值散布圖，總體而言三個模型皆有低值高估，高值低估之情形，而最佳預測區間為 17-18。

在不確定性評估部分（表 3-5-18），多元線性回歸在訓練集及驗證集的各項指標差異不大；而 Cubist 之 R^2 在訓練集 (0.33±0.10) 些微高於驗證集之結果 (0.06±0.04)，顯示出 Cubist 有輕微過擬合的情形，MSE 與 RMSE 皆有增加趨勢；隨機森林之 R^2 在訓練集 (0.69±0.02) 明顯高於驗證集 (-0.01±0.03)，代表隨機森林有明顯過擬合之問題，並且 MSE 與 RMSE 大幅增加，MSE 從 38.4±4.51 增至 847±214 kg C/m^2，RMSE 從 6.19±0.36 增至 28.9±3.70 kg C/m^2。

表 3-5-17 全臺林業分署 0-150 公分不同模型訓練集和驗證集指標評估 (n=714)

深度 (cm)	統計量	多元線性回歸		Cubist		隨機森林	
		訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)	訓練集 (70%)	驗證集 (30%)
0-150 n = 714	R^2	0.14	0.16	0.12	0.16	0.58	0.11
	Concordance	0.62	0.64	0.61	0.64	0.49	0.57
	MSE	106	87.1	111	87.2	51.4	93.8
	RMSE	10.3	9.33	10.6	9.34	7.17	9.69
	Bias	-0.28	0.64	-1.75	-0.79	0.02	0.96

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-18 全臺林業分署 0-150 公分不同模型訓練集和驗證集指標不確定性評估

深度 (cm)	統計量	多元線性回歸 （拔靴法 n=100）		Cubist （拔靴法 n=100）		隨機森林 （拔靴法 n=100）	
		訓練集	驗證集	訓練集	驗證集	訓練集	驗證集
0-150	R^2	0.16±0.03	0.10±0.03	0.33±0.10	0.06±0.04	0.69±0.02	0.00±0.03
	Concordance	0.63±0.01	0.61±0.01	0.68±0.03	0.59±0.02	0.84±0.01	0.62±0.01
	MSE	98.9±5.25	109±7.37	79.7±12.9	132±21.2	38.4±4.51	847±214
	RMSE	9.94±0.27	10.4±0.35	8.90±0.73	11.5±0.90	6.19±0.36	28.9±3.70
	Bias	0.00±0.00	-0.07±0.85	-1.08±0.40	-1.24±0.94	-0.01±0.02	-6.46±1.82

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

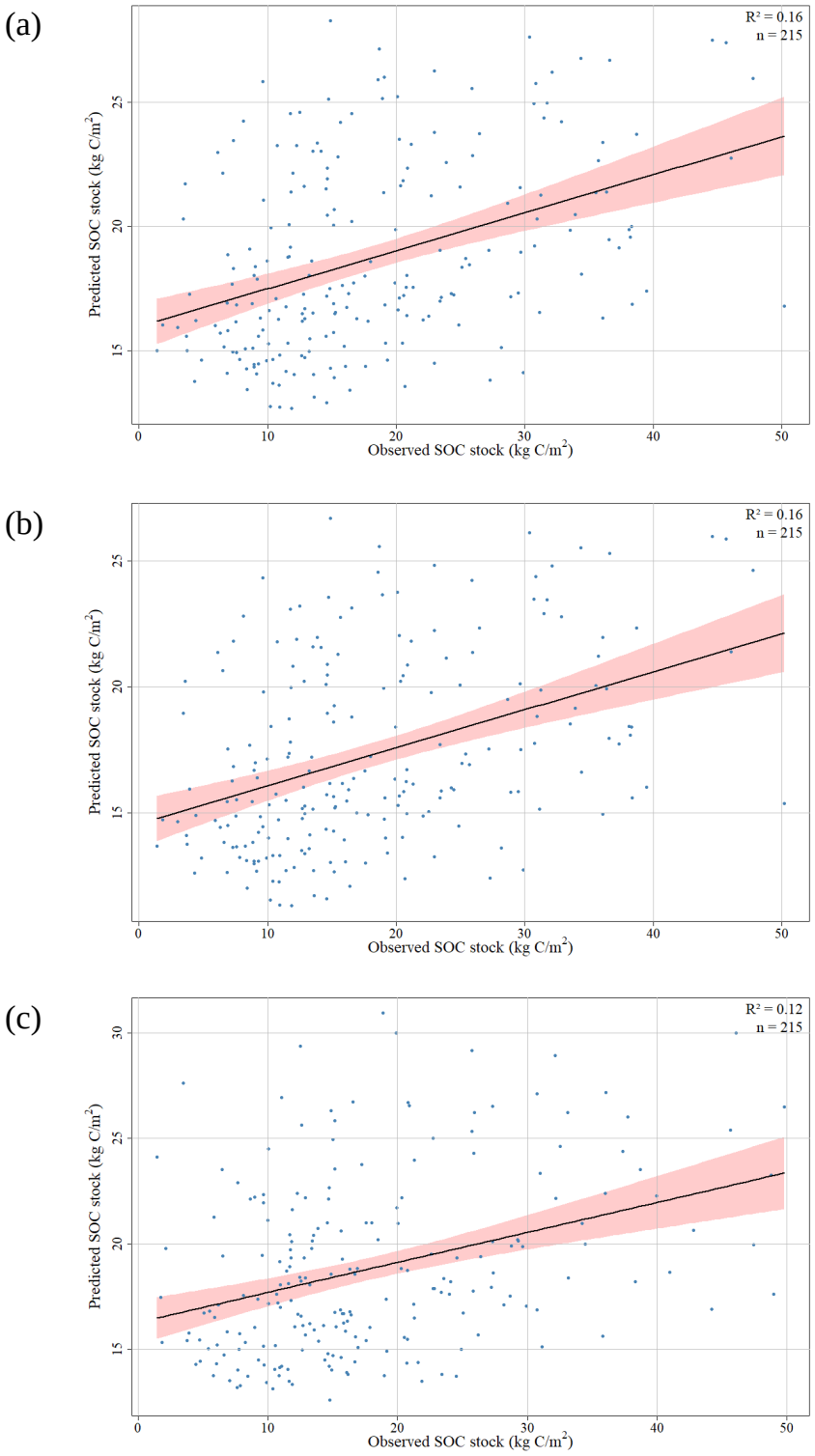


圖 3-5-26 土壤深度 0-150 公分有機碳儲存量測量值與推估值之各模型驗證集散布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

(a)、(b)、(c) 分別為線性回歸模型、Cubist 模型和隨機森林模型的實際與推估土壤有機碳儲存量驗證集散布圖，圖中粉紅色和淺橘色區域分別代表 95%信賴區間和 95%預測區間。

E. 各模型推算森林土壤有機碳儲存量比較

最後，以屏東分署分別展示各模型計算森林土壤有機碳儲存量（0-30 公分）成果，多元線性回歸成果為圖 3-5-27，Cubist 之成果為圖 3-5-28，而圖 3-5-29 為隨機森林之成果。首先，使用多元線性回歸繪製的土壤有機碳儲存量地圖其空間分布較為均勻，且隨著海拔變化而漸變，整體較為平滑的預測結果能捕捉到資料分布的整體趨勢（圖 3-5-27）。然而，該模型較難呈現資料的局部空間變異。而在 Cubist 模型繪製的土壤有機碳儲存量地圖，其空間分布在高海拔地區出現明顯的數值斷層，其預測結果在低海拔範圍內較為精細，在高海拔範圍則趨於一致（圖 3-5-28），可能是因為 Cubist 模型透過決策樹拆分資料分別訓練模型所導致，使得其在預測高海拔土壤有機碳儲存量的精度較低。至於在隨機森林的部分，其計算的土壤有機碳儲存量地圖在較小的空間尺度上呈現出較大的變異（圖 3-5-29）。該模型雖然能夠詳細捕捉資料在空間上的變異，但由於其計算結果在圖面上較難繪製出連續的等值線，導致模型在解釋資料分布趨勢時較為困難。可參考表 3-5-19 所統整的三種模型優劣比較。

表 3-5-19 三種模型繪製的土壤有機碳儲存量地圖比較

模型	多元線性回歸	Cubist	隨機森林
特徵	碳儲存量分布均勻並隨海拔漸變	低海拔資料較為精細，高海拔則趨於一致	碳儲存量的空間分布在小範圍內變異較大
優勢	能捕捉主要趨勢及解釋性高	可以捕捉多種特徵組合的資料，適用非線性關係	適用於非線性資料且能詳細捕捉空間變異
劣勢	較難預測局部變異	高海拔預測精度較差	預測結果可能會過擬合，且較難解釋分布趨勢

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

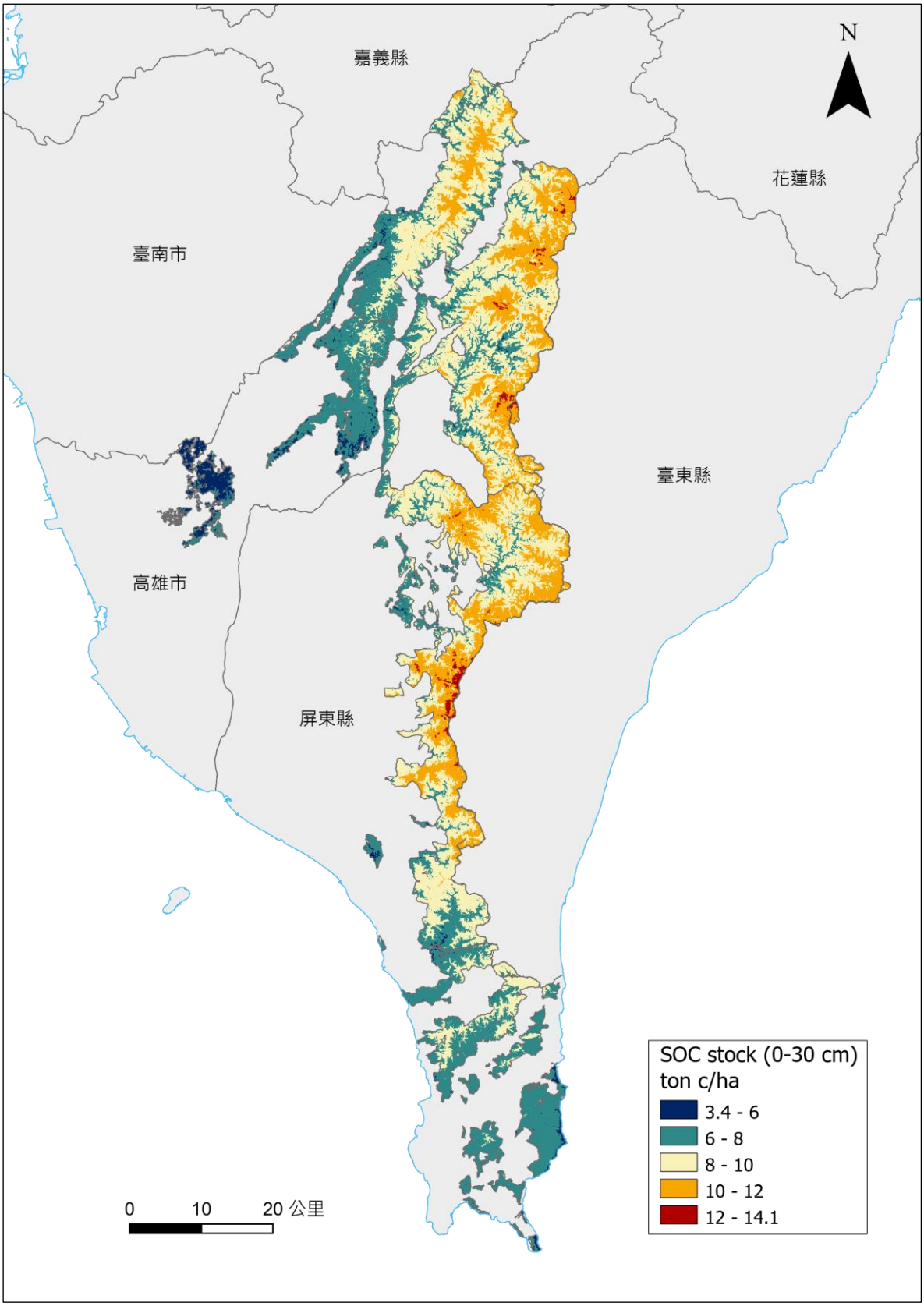


圖 3-5-27 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖（多元線性回歸）

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

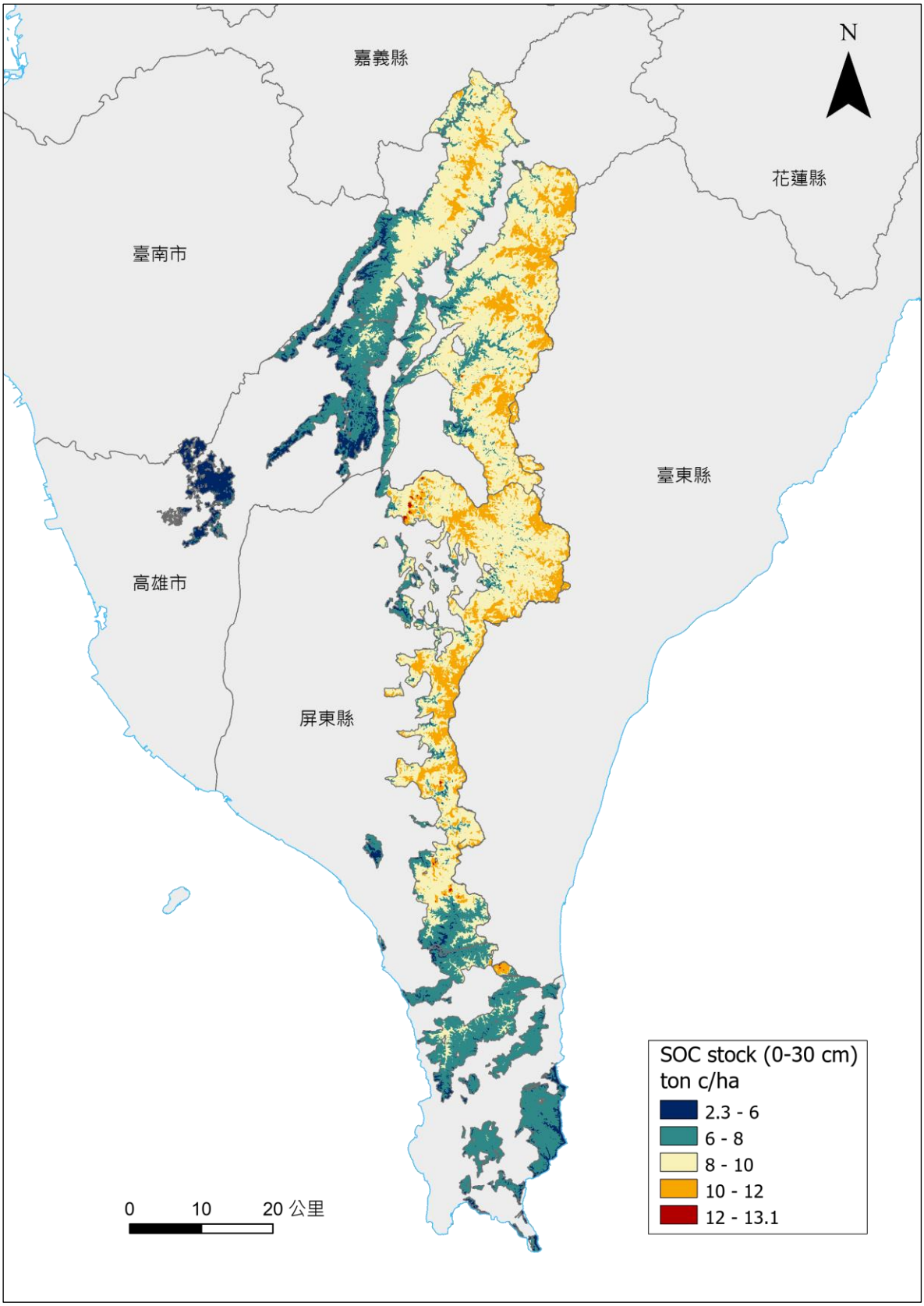


圖 3-5-28 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖 (Cubist)

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

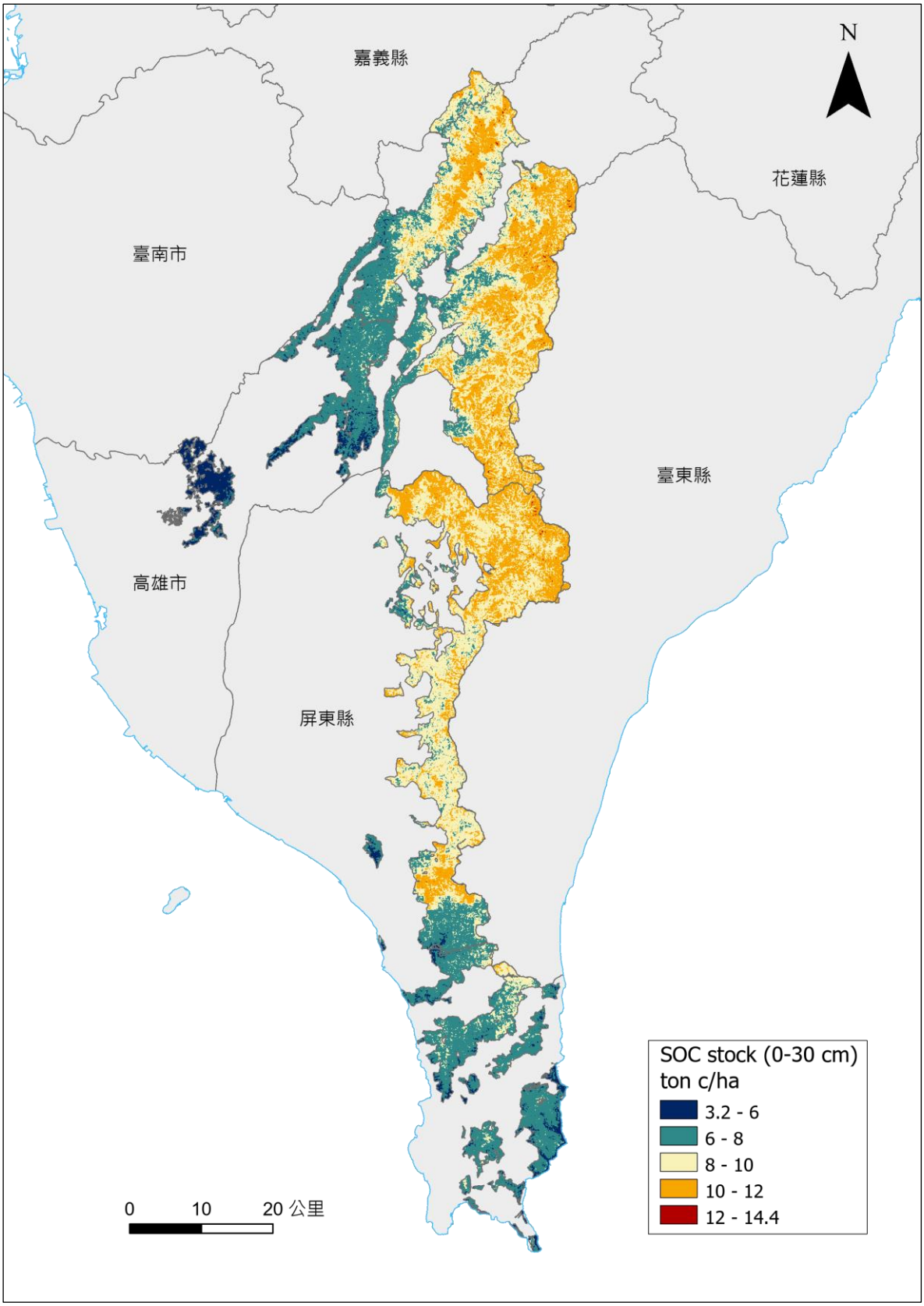


圖 3-5-29 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖（隨機森林）

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

3. 總結

根據各種模型在不同深度之土壤有機碳儲存量評估結果顯示，三種模型的預測結果皆出現低值處高估、高值處低估之情勢，表示三種模型皆難以捕捉到土壤有機碳儲存量的局部變化，可能是由於模型參數設定、環境因子與土壤有機碳儲存量間關係難以捕捉所致。除此之外，隨深度增加，預測結果的標準差也呈現增大的趨勢。雖然模型指標在 0-30、0-50 及 0-100 公分區間表現相似，但在深度 0-150 公分處，由於資料不確定性較大，模型的各項指標都有所下降，整體表現較差。

比較三種模型的指標可以發現，雖然線性回歸模型在各項指標上表現一般，但資料數值大致沿著回歸線分布，偏差較小，顯示該模型能捕捉到資料整體趨勢。而 Cubist 模型預測結果在土壤深度 0-50 公分時則出現明顯的資料斷層，可能是由於其透過決策樹將資料分類，在各類別下建立線性回歸，導致各區間預測精度不同所致。至於在隨機森林的部份，雖然其在訓練集的 R^2 表現優異，但在土壤深度 0-30、0-50、0-100 公分驗證集的表現卻與線性回歸模型和 Cubist 模型差異不大，在 0-150 公分處表現甚至比前兩者表現更差，顯示其有嚴重過擬合的情況。

經過拔靴法交叉驗證後，三個模型中表現以多元線性回歸最佳。儘管隨機森林模型在訓練集中表現優異，但在交叉驗證後過擬合的問題更加明顯，需透過更全面的參數選擇來避免。然而，由於隨機森林所需的計算資源較高，且超參數種類繁多，透過網格搜索或隨機搜索 (Random Search) 尋找最佳超參數會大幅增加運算成本。最後，以屏東分署展示各模型於森林土壤有機碳儲存量分布圖，並比較模型優劣。而考量到運算成本及模型的泛化程度，本期計畫以多元線性回歸作為探討土壤有機碳儲存量空間變異的預測模型，並於下一章討論後續模型之精進方向，

(二) 繪製林試所與農試所森林土壤調查點位之森林土壤碳匯分布初步地圖

● **工作推動說明（應用第二期報告舊資料庫）**

承前所述，以嘉義分署及宜蘭分署為例，繪製森林土壤有機碳儲存量基線圖，並探討其潛在變異程度。

1. 嘉義分署

(1) 推估基線成果

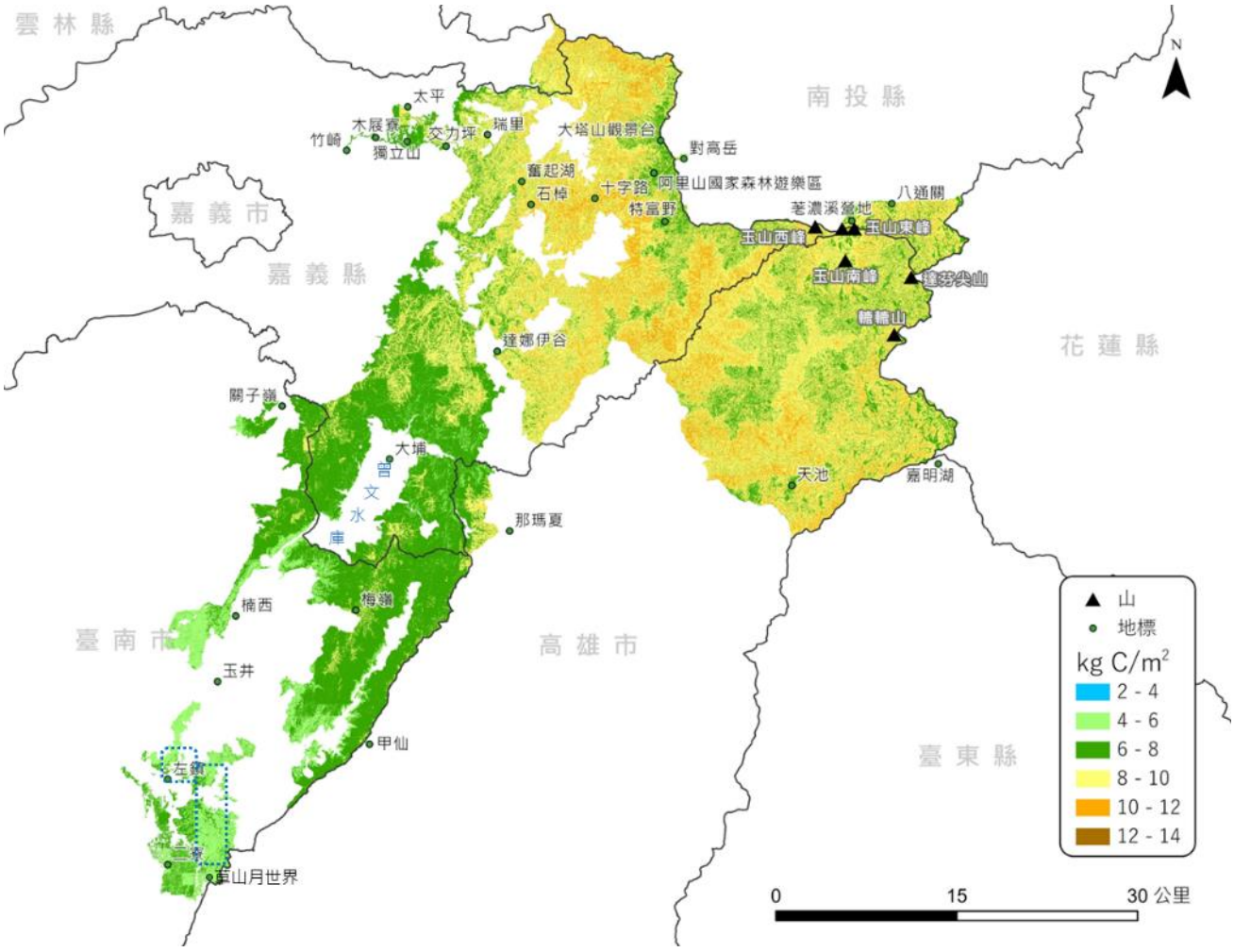


圖 3-5-30 嘉義分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量推估分布結果如（圖 3-5-30）所示，碳匯量最低在臺南左鎮區草山里，與高雄田寮、燕巢[3]同為月世界泥岩惡地土壤[4]（圖 3-

[3] 田寮月世界 https://reurl.cc/97oOdV、草山月世界 https://reurl.cc/37rjd8。

[4] 梁耀竹、曾喜育、邱清安、曾彥學，2011。臺灣西部惡地之植群調查。林業研究季刊。33(3)：23-36。

5-30 藍框處），整體碳儲存量分布由平地往山地帶增加，至曾文水庫（嘉義縣大埔鄉，海拔 227 公尺）碳儲存量約在 8 kg C/m^2 (80 ton C/ha)，由達娜伊谷（海拔 500 公尺）往內陸碳儲存量已達 10 kg C/m^2 (100 ton C/ha)；阿里山森林鐵路[5]部分，從竹崎站（海拔 127 公尺）、木屐寮（海拔 324 公尺）、獨立山（海拔 743 公尺）、交力坪（海拔 997 公尺）至終點奮起湖站（海拔 1,403 公尺），隨海拔上升 1,276 公尺，土壤有機碳儲存量從竹崎 6 kg C/m^2 (60 ton C/ha)增加至 12 kg C/m^2 (120 ton C/ha)，土壤有機碳儲存量 12-14 kg C/m^2 (120-140 ton C/ha)的地點散狀分布在十字路（海拔 1,534 公尺）、玉山東峰（海拔 3,896 公尺）、南橫天池（海拔 2,200 公尺）、達娜伊谷、嘉明湖（海拔 3,310 公尺）間，係玉山國家公園範圍，該區域植被氣候分區為櫟林帶 (Quercus zone) 至鐵杉雲杉林帶(Tsuga-Picea zone)[6]（圖 3-5-31）。

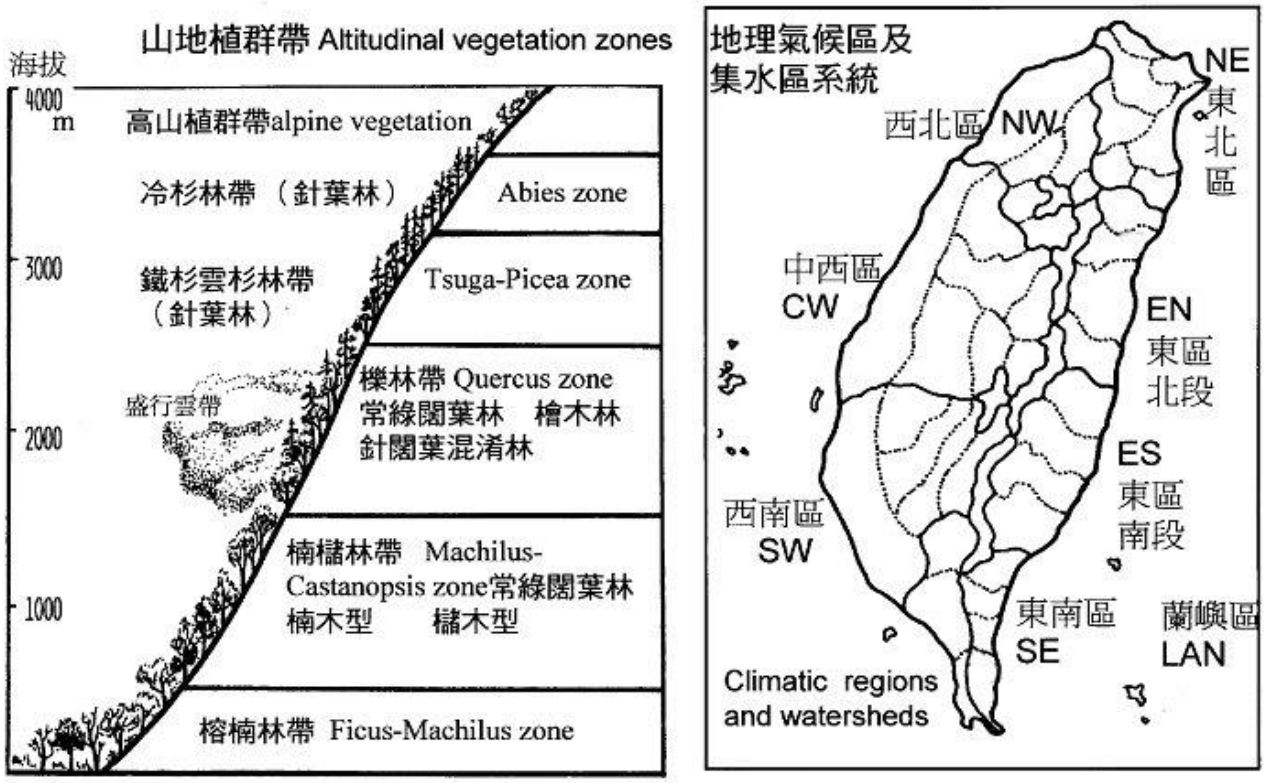


圖 3-5-31 臺灣山地植群帶與地理氣候集水區分區
（參考來源：蘇鴻傑，1992）

[5] 林業及自然保育署阿里山林業鐵路及文化資產管理處 https://afrch.forest.gov.tw/。
[6] 蘇鴻傑，1992。臺灣之植群:山地植群帶與地理氣候區。臺灣生物資源調查及資訊管理研習會論文集, p.39-53。

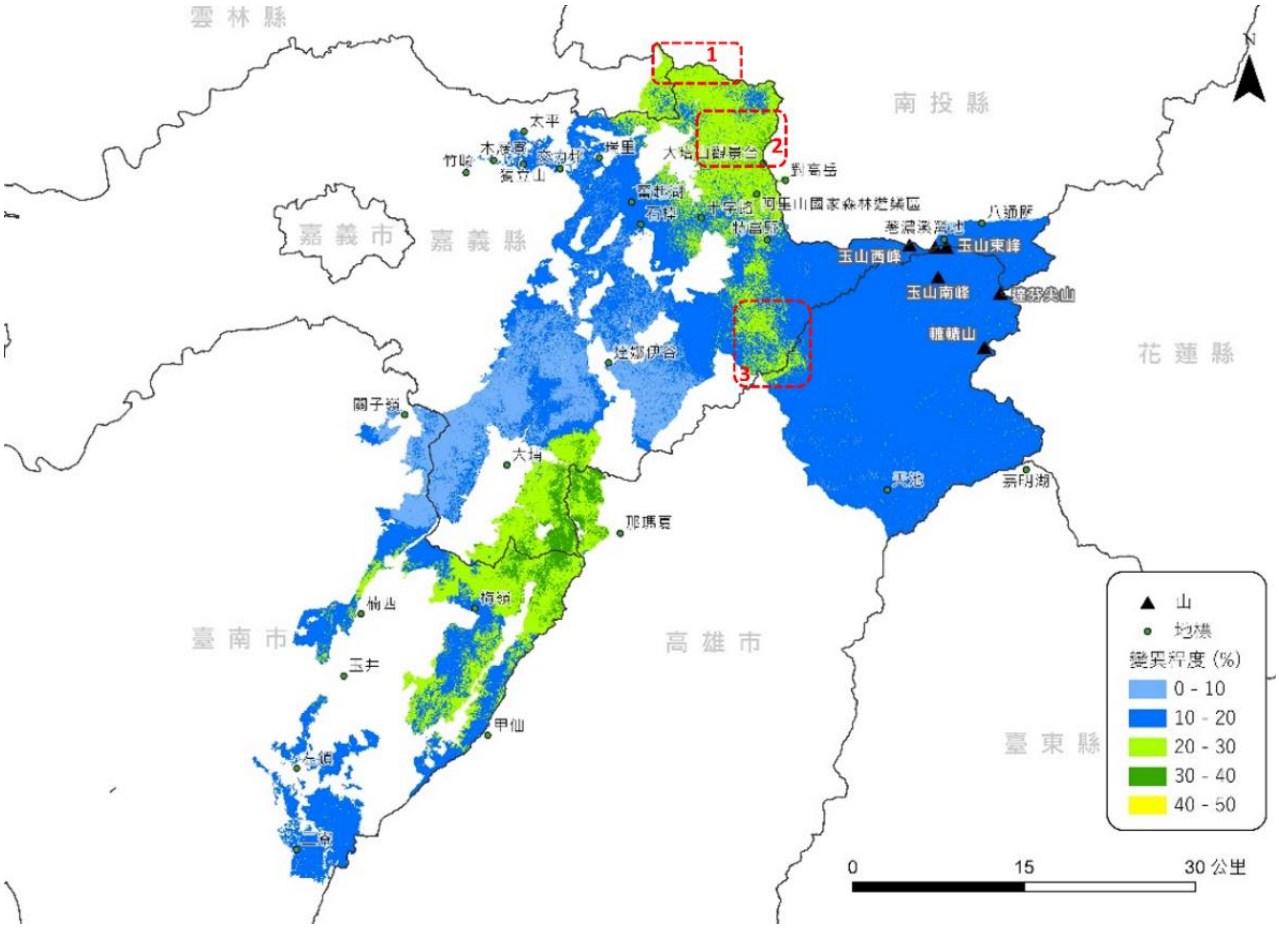


圖 3-5-32 嘉義分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 30 公分之森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果（圖 3-5-32），變異程度由低至高從淺藍色至黃色，土壤變異程度低，穩定地區在嘉義縣阿里山鄉、高雄市桃源區天池—玉山東峰（玉山國家公園）及南投縣信義鄉玉山國家公園、八通關等地，整體海拔於 2,000 公尺以上至 3,952 公尺，為山區霧林帶、植被為檜木林、針葉林為主；另臺南左鎮、草山區因皆為泥岩土壤變易程度約 34%，變異程度相對較低。

變異程度高之地區集中在臺南市楠西區及南化區、高雄市那瑪夏區與嘉義縣阿里山鄉南部交界，及雲林古坑鄉與南投縣交界的石壁、曲坑仔地區、嘉義縣阿里山鄉大塔山觀景臺、嘉義縣與高雄市那瑪夏區交界處（圖 3-5-32）。變異程度高原因可能為土地利用變化，經歷農業開發或森林伐採等活動，導致土壤碳釋放增加，降低碳儲存量 (Veldkamp, 1994)；不同土壤類型和質地固碳能力有所不同，例如黏質土壤通常比砂質土壤更能有效地吸存碳；溫度和降雨量的變化亦會影響土壤微生物的活性，並直接影響土壤有機碳的分解與固定 (Churchman *et al.*, 2020)。

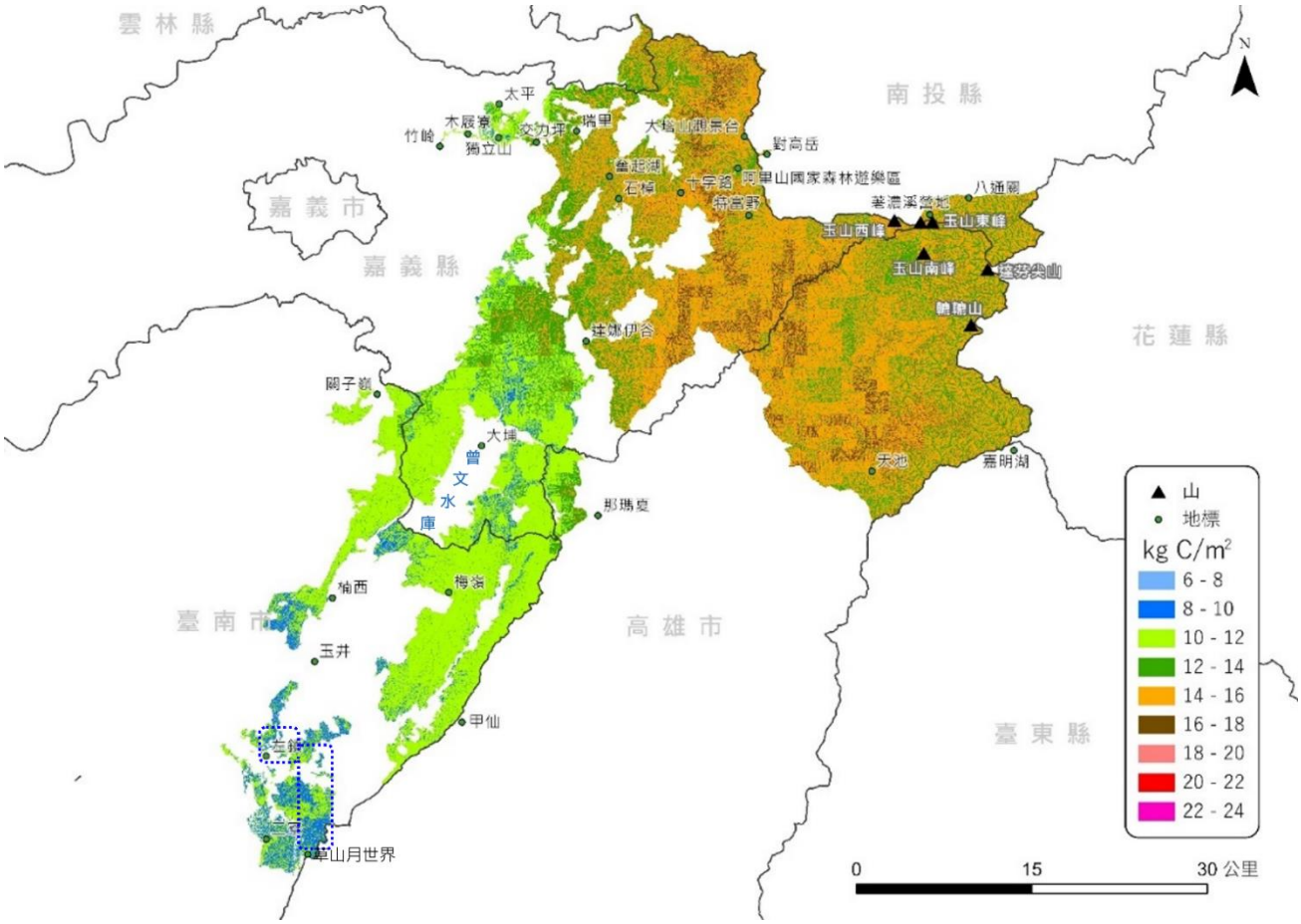


圖 3-5-33 嘉義分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 50 公分之森林土壤有機碳儲存量分布結果（圖 3-5-33），碳儲存量最低在臺南左鎮區草山里，與高雄田寮、燕巢同為月世界泥岩惡地土壤（圖 3-5-33 藍框處），約 6-8 kg C/m^2 (60-80 ton C/ha)，整體碳儲存量分布由平地往山地帶增加，至曾文水庫（嘉義縣大埔鄉，海拔 227 公尺）碳儲存量約在 12 kg C/m^2 (120 ton C/ha)，由達娜伊谷（海拔 500 公尺）再往內陸碳儲存量已達 16 kg C/m^2 (160 ton C/ha)；阿里山森林鐵路部分，從竹崎站（海拔 127 公尺）、木屐寮（海拔 324 公尺）、獨立山（海拔 743 公尺）、交力坪（海拔 997 公尺）至終點奮起湖站（海拔 1,403 公尺），隨海拔上升 1,276 公尺，土壤有機碳儲存量從竹崎 10 kg C/m^2 (100 ton C/ha) 增加至 16 kg C/m^2 (160 ton C/ha)，較高的土壤有機碳儲存量地點散狀分布在在十字路（海拔 1,534 公尺）、玉山東峰（海拔 3,896 公尺）、達娜伊谷、南橫天池（海拔 2,200 公尺）間，碳儲存量約有 16-18 kg C/m^2 (160-180 ton C/ha)。

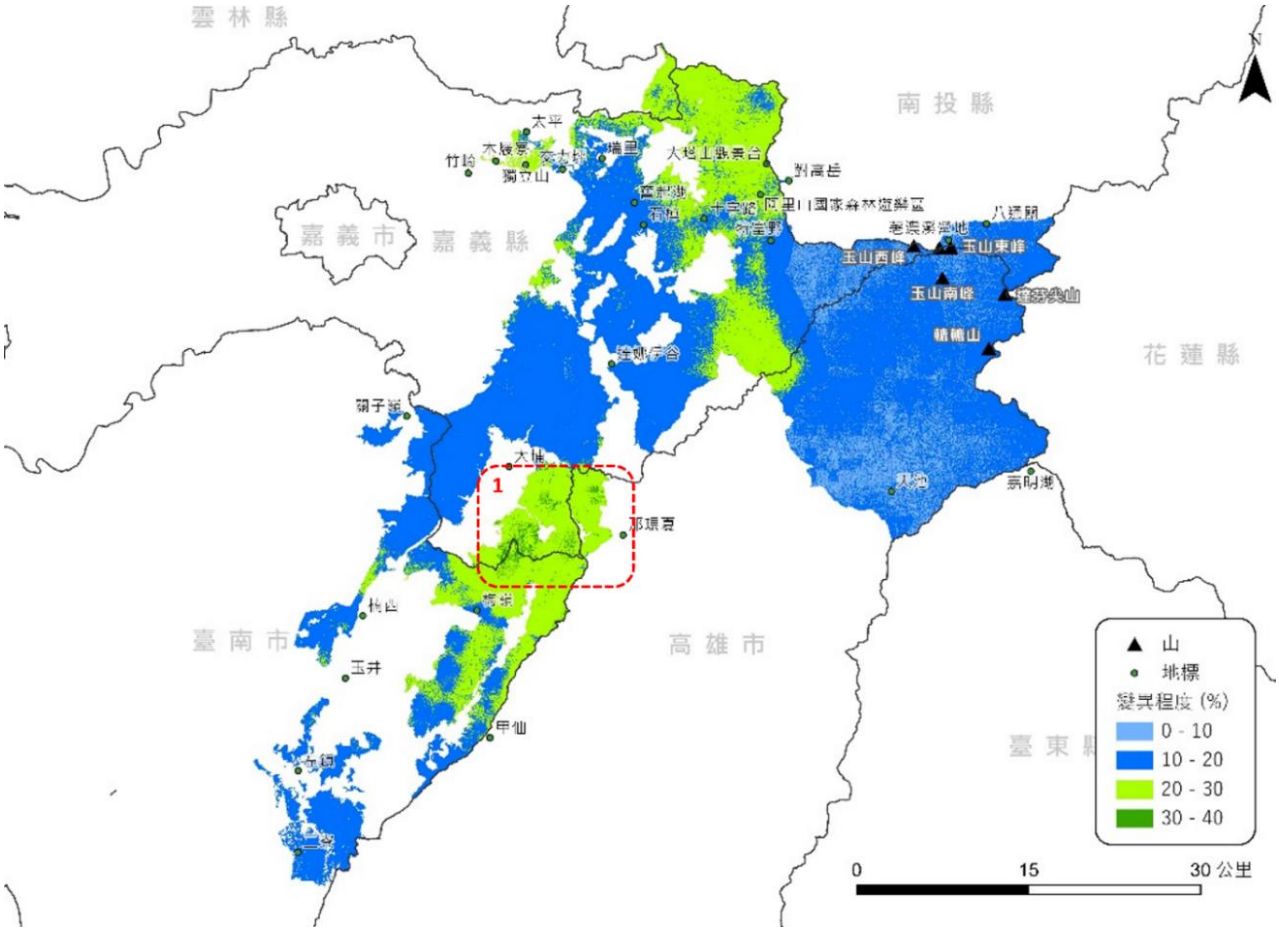


圖 3-5-34 嘉義分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果（圖 3-5-34），變異程度由低至高從淺藍色至深綠色，土壤變異程度低、穩定地區在嘉義縣阿里山鄉、高雄市桃源區天池—玉山東峰（玉山國家公園）及南投縣信義鄉玉山國家公園、八通關等地，整體海拔於 2,000 公尺至 3,952 公尺，為山區霧林帶、植被為檜木林、針葉林為主；變異程度高地區為嘉義縣與臺南市的交界，地點分布在三角南山附近（圖 3-5-34，1 號紅框處）。變異程度高原因可能為森林組成和生態系統健康程度，森林的樹種組成、樹齡結構和整體生態系統的健康狀態對其碳吸存能力有直接影響 (Pan *et al.*, 2011；Poorter *et al.*, 2015)。

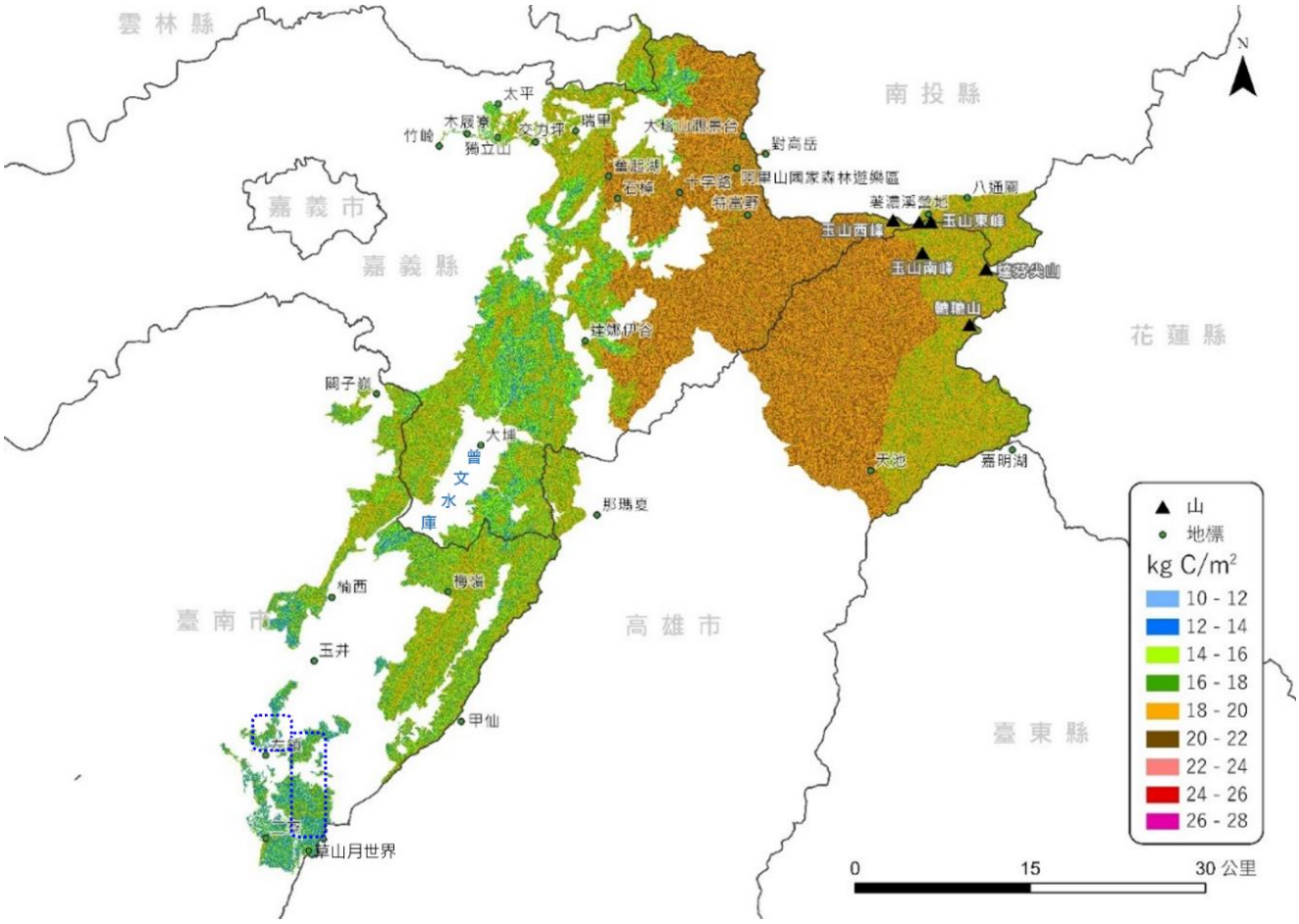


圖 3-5-35 嘉義分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量分布結果（圖 3-5-35），碳儲存量最低分布於臺南左鎮區草山里，與高雄田寮、燕巢同為月世界泥岩惡地土壤（圖 3-5-35 藍框處），約為 10 至 14 C/m^2，整體碳儲存量分布由平地往山地帶增加，至曾文水庫（嘉義縣大埔鄉，海拔 227 公尺）碳儲存量約在 18 kg C/m^2 (180 ton C/ha)，由達娜伊谷（海拔 500 公尺）再往內陸碳儲存量已達 20 kg C/m^2 (200 ton C/ha)；阿里山森林鐵路，從竹崎站（海拔 127 公尺）、木屐寮（海拔 324 公尺）、獨立山（海拔 743 公尺）、交力坪（海拔 997 公尺）至終點奮起湖站（海拔 1,403 公尺），隨海拔上升 1,276 公尺，土壤有機碳儲存量從竹崎 16 kg C/m^2(160 ton C/ha)增加至 20 kg C/m^2 (200 ton C/ha)，較高的碳儲存量集中在分布在十字路（海拔 1,534 公尺）至南橫天池（海拔 2,200 公尺）間，碳儲存量約有 18-22kg C/m^2 (180-220 ton C/ha)。

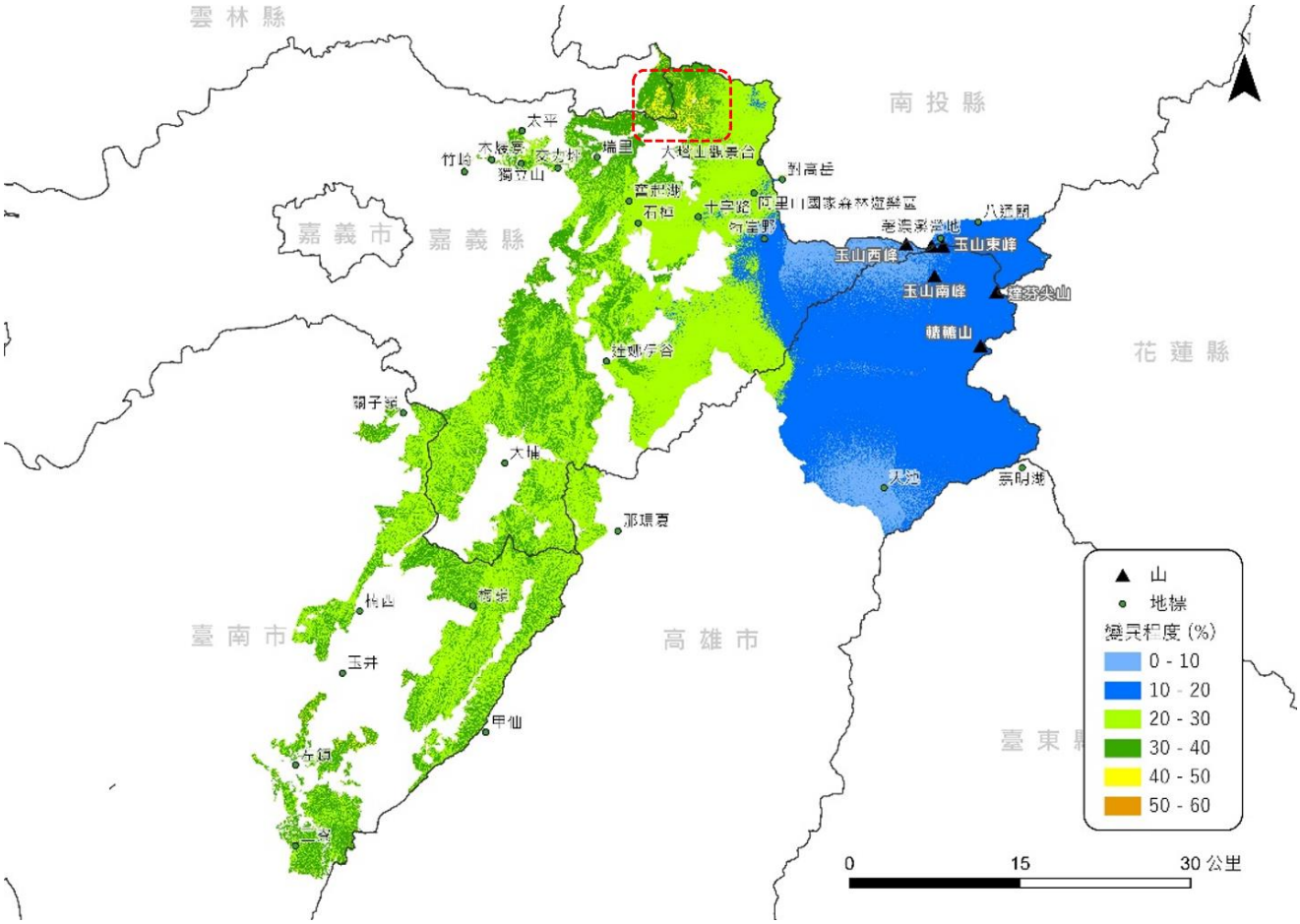


圖 3-5-36 嘉義分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署轄區 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果（圖 3-5-36），變異程度由低至高從淺藍色至棕色，土壤變異程度低、穩定地區在嘉義縣阿里山鄉、高雄市桃源區天池、玉山西峰等地，整體海拔於 2,000 公尺至 3,952 公尺，為山區霧林帶、植被為檜木林、針葉林為主，此範圍地區為長期未被破壞的原始森林，植被穩定有助於保持土壤有機碳穩定性且山區有較少土壤侵蝕，亦有助於保持土壤有機碳 (Jones, 1945)；嘉義縣與臺南市地區的變異程度平均為 20 至 40%；變異程度高地區為雲林縣與嘉義縣的交界，主要分布於石鼓盤溪流經之區域，變異程度達 40 至 50%（圖 3-5-36，紅框處）。變異程度高之主要原因可能為地形和水文條件等影響，溪流經過區域可能有更高的水分，這有助於有機物累積和減緩有機物分解速率，從而影響碳儲存量；地形起伏和排水狀況亦會影響水分流動和停留時間，並直接影響土壤有機碳的累積 (Grosse *et al.*, 2011；Sutfin *et al.*, 2016)。

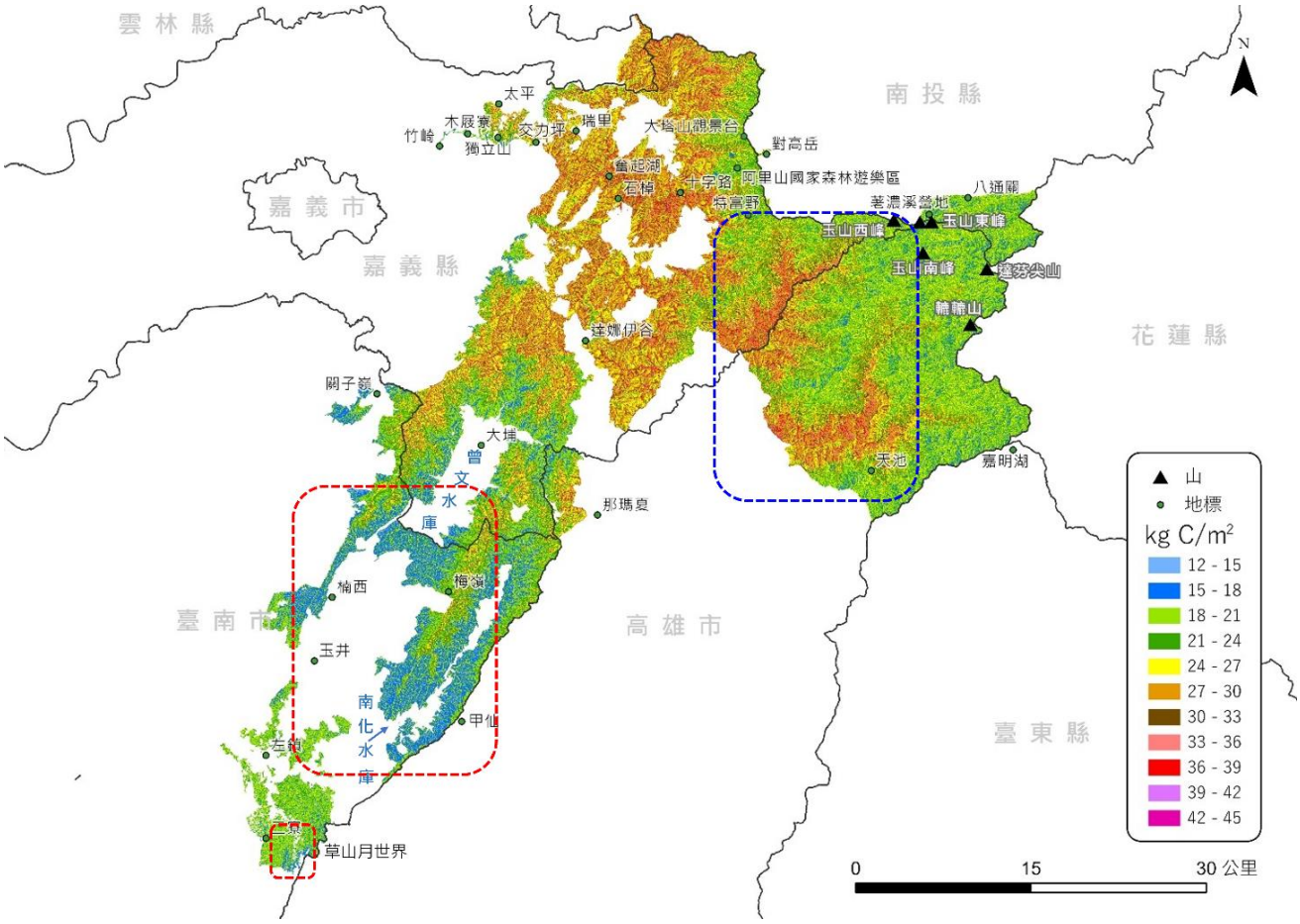


圖 3-5-37 嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量分布結果（圖 3-5-37），碳儲存量最低在臺南南化水庫附近、臺南市與嘉義縣交界處、曾文水庫、臺南二寮、高雄燕巢（月世界泥岩惡地土壤）（圖 3-5-37 紅框處），約為 12-15 kg C/m^2 (120-150 ton C/ha)，整體碳儲存量分布由平地往山地帶增加，至曾文水庫（嘉義縣大埔鄉，海拔 227 公尺）碳儲存量約在 24-27 kg C/m^2 (240-270 ton C/ha)，由達娜伊谷（海拔 500 公尺）再往內陸碳儲存量已達 30 kg C/m^2 (300 ton C/ha)；阿里山森林鐵路，從竹崎站（海拔 127 公尺）、木屐寮（海拔 324 公尺）、獨立山（海拔 743 公尺）、交力坪（海拔 997 公尺）至終點奮起湖站（海拔 1,403 公尺），隨海拔上升 1,276 公尺，土壤有機碳儲存量從竹崎 21 kg C/m^2 (210 ton C/ha)增加至 30 kg C/m^2 (300 ton C/ha)，較高的土壤有機碳儲存量分布在高雄市楠梓仙溪與荖濃溪流經之地區（圖 3-5-37 藍框處），因河流能夠運輸和沉積豐富之有機物質，故溪流和河流周邊土壤通常含有高量有機物 (Wantzen *et al.*, 2008)，約有 36-39 kg C/m^2 (360-390 ton C/ha)。

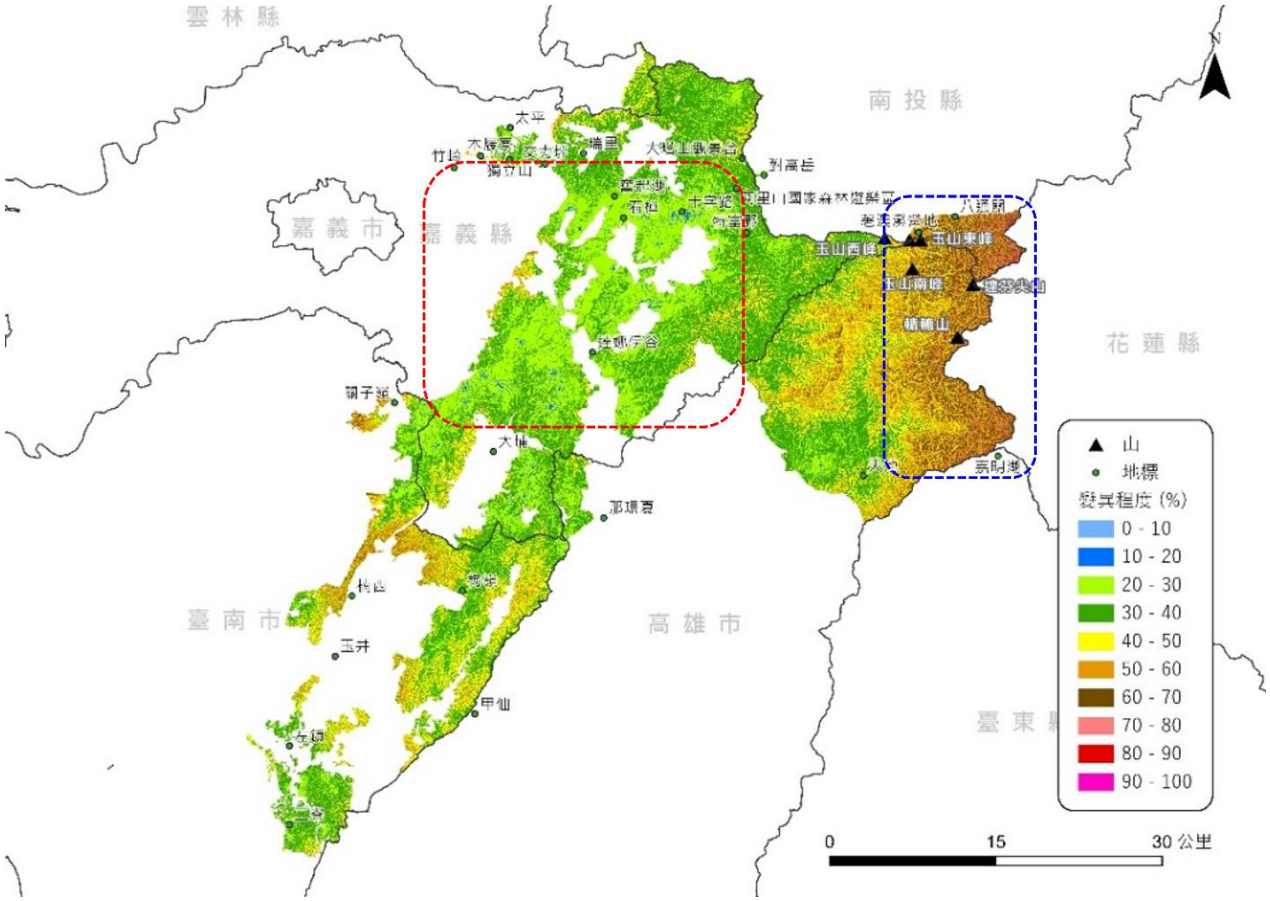


圖 3-5-38 嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果（圖 3-5-38），變異程度由低至高從淺藍色至桃紅色，土壤變異程度較低、穩定地區在嘉義縣阿里山鄉、竹崎鄉地區，約 20 至 30%（圖 3-5-38，紅框處）；變異程度高地區為南投縣、高雄市與花蓮縣交界，包含玉山東峰、玉山南峰、玉山國家公園與達芬尖山等地，變異程度達 50 至 60%（圖 3-5-38，藍框處）。變異程度高可能原因如高海拔地形、複雜氣候條件、植被分布和種類差異、土壤微生物活性、土壤侵蝕與保護區管理措施等(Xin *et al.*, 2016)。

根據上述 0 至 30 公分、0 至 50 公分、0 至 100 公分及 0 至 150 公分的森林土壤有機碳儲存量得知，臺灣森林土壤表層碳儲存量隨海拔上升有增加趨勢，在高山地區有較多有機碳儲存量，並集中在 0 至 50 公分之土壤層，且具有距地表越深，其碳儲存量越低之現象。不同海拔、坡向、坡度及林型間，土壤有機碳儲存量變化皆有顯著差異，於不同海拔高，尤其在微氣候上，影響土壤有機碳分解及含量多寡 (Wang *et al.*, 2002)，臺灣中海拔之植群種類及生物量都較高，亦可能為土壤有機碳含量較高之原因。

(2) 土壤有機碳匯量推估成果敘述統計

表 3-5-20 嘉義分署四土層土壤有機碳儲存量推估成果敘述統計表

深度 (cm)	面積	土壤有機碳儲存量 (kg C/m^2)			土壤有機碳總量
	公頃	平均數 ± 標準差	中位數	全距	(t C)
0 - 30	134,235.8	8.26 ± 1.44	8.32	3.45 - 13.1	11,081,778
0 - 50		13.4 ± 2.05	13.9	7.32 - 23.7	17,989,202
0 - 100		16.2 ± 2.24	18.6	11.3 - 27.5	24,333,413
0 - 150		31.9 ± 5.09	24.2	12.2 - 44.1	32,788,566

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

嘉義分署面積為 134,235.8 公頃（表 3-5-20），0 至 30 公分之土壤有機碳儲存量為 8.26±1.44 kg C/m^2 (82.6±14.4 ton C/ha)，中位數為 8.32 kg C/m^2 (83.2 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 11,081,778 t C；0 至 50 公分之土壤有機碳儲存量為 13.4±2.05kg C/m^2 (134±20.5 ton C/ha)，中位數為 13.9 kg C/m^2 (139 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 17,989,202 t C；0 至 100 公分之土壤有機碳儲存量為 16.2±2.24 kg C/m^2 (162±22.4 ton C/ha)，中位數為 18.6 kg C/m^2 (186 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 24,333,413 t C；0 至 150 公分之土壤有機碳儲存量為 31.9±5.09 kg C/m^2 (319±50.9 ton C/ha)，中位數為 24.2 kg C/m^2 (242 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 32,788,566 t C。

2. 宜蘭分署

(1) 推估基線成果

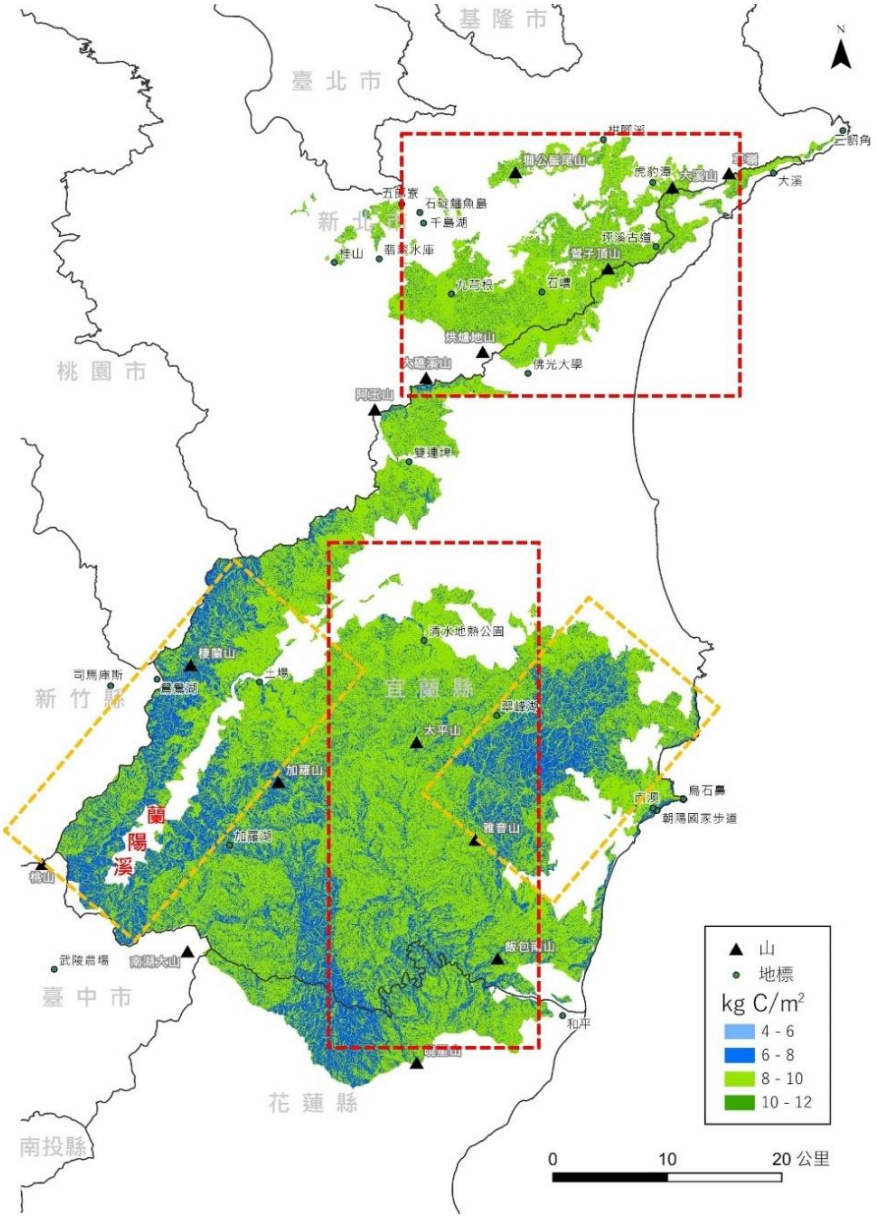


圖 3-5-39 宜蘭分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量推估分布結果如（圖 3-5-39）所示，碳儲存量較低分布在蘭陽溪上游周圍，並延伸至棲蘭山（宜蘭縣與桃園市交界部分）、加羅湖（海拔 2,242 公尺）、芽丁溫泉等地（圖 3-5-39 黃框處），約 6-8 kg C/m^2 (60-80 ton C/ha)；其餘大部分管區範圍含碳量較高，約 8-10 kg C/m^2 (80-100 ton C/ha)（圖 3-5-39 紅框處），由北往南包含新北市的九芎根（海拔 610 公尺）、坪溪古道（海拔 705

公尺）等地；宜蘭縣的翠峰湖（海拔 1,900 公尺）、太平山（海拔 1,950 公尺）、雅音山（海拔 1,681 公尺）、飯包南山（海拔 810～640 公尺）、花蓮縣曉星山（海拔 2,644 公尺）等地區。宜蘭分署所管轄地區的森林土壤有機碳儲存量較平均，碳儲存量最少的地區為 4 kg C/m^2 (40 ton C/ha)，大部分的碳儲存量為 8-10 kg C/m^2 (80-100 ton C/ha)，可能原因為宜蘭分署範圍擁有雪山山脈和中央山脈的一部分，森林是有機物質的主要來源，包括落葉、枯枝、動植物遺體等，這些有機物在分解過程中積累於土壤中，提高了土壤的碳儲存量 (Lal, 2018)；宜蘭分署範圍內的森林覆蓋率高，且森林類型多樣，如闊葉林和針葉林，這些因素都有助於土壤碳的累積。

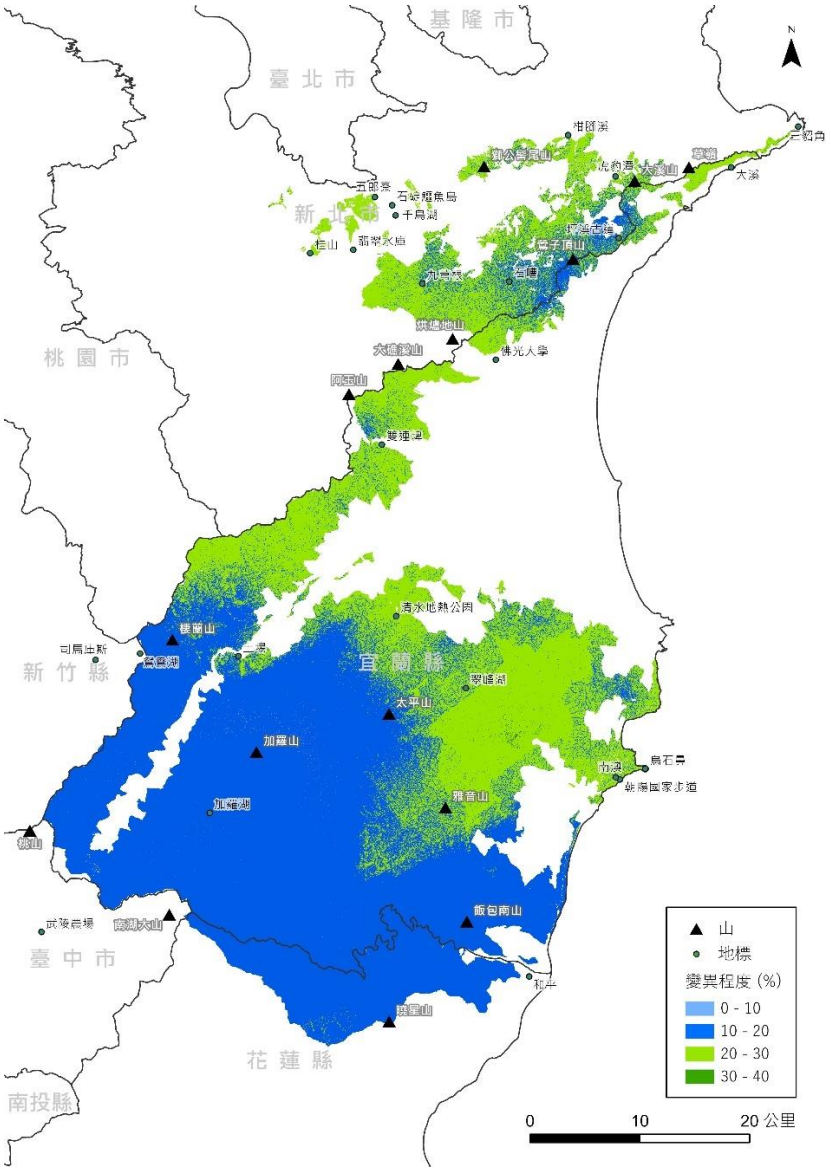


圖 3-5-40 宜蘭分署 0 至 30 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 30 公分之森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果如（圖 3-5-40）所示，變異程度由低至高從淺藍色至深綠色，土壤變異程度較低的地區分布於雪山山脈以及中央山脈範圍、雅音山、南澳等地，地形起伏大（海拔 400 公尺至 2,644 公尺），碳匯量變異程度約為 20 至 30%。變異程度高之地區集中於蘭陽平原周圍以及宜蘭縣與新北市交界之郊山區域，包含新北市的桂山、草嶺等地；宜蘭縣的朝陽國家步道、清水地熱公園、雙連埤等地區，碳儲存量變異程度約為 20-30%。變異程度高之原因可能為土地利用變化，如農業開發、建設活動等，改變原有的土壤結構和有機質含量，導致土壤有機碳儲存量的變異 (Albani *et al.*, 2006；Post *et al.*, 2000)；在朝陽步道、清水地熱、雙連埤與草嶺等範圍是人們活動較多的區域，導致土壤受到壓實，減少了土壤通氣性和微生物活性 (Clark *et al.*, 1967)；另外，蘭陽平原是一個農業發達的地區，農業活動如施肥、耕作和收割都會影響土壤的有機質含量和微生物結構，這些都可能導致土壤有機碳儲存量變異。

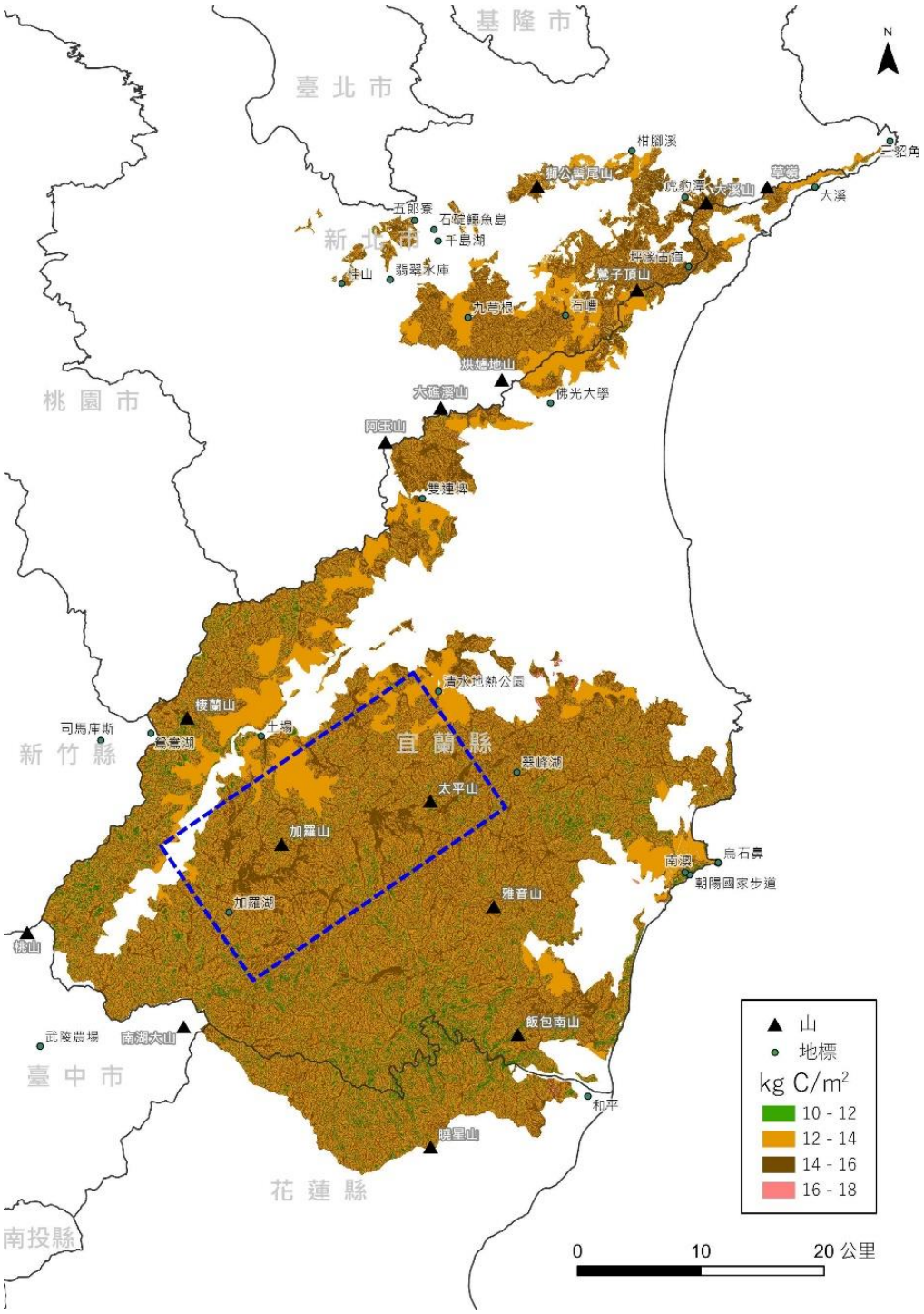


圖 3-5-41 宜蘭分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量推估分布結果如（圖 3-5-41）所示，碳儲存量較低之區域分布在宜蘭縣與花蓮縣交界處，約為 10-12 kg C/m^2 (100-120 ton C/ha)；其次為蘭陽溪中、下游周圍以及新北市九芎根、獅公髻尾山等地區，約為 12-14 kg C/m^2 (120-140 ton C/ha)；明顯含碳量較高之區域為宜蘭縣太平山及加羅山附近，約為 14-16 kg C/m^2 (140-160 ton C/ha)（圖 3-5-41 藍框處）。

太平山以及加羅山為臺灣宜蘭縣著名的山脈，皆屬於高海拔地區，氣候條件涼爽且濕潤，能抑制土壤中有機物的分解速度，導致有機物質易累積於土壤中 (Lützow *et al.*, 2006)；山區擁有豐富的自然森林，包括針葉林和闊葉林，森林提供了大量的有機物，如落葉、枯枝和林下植物殘體。當植物殘體被轉化為土壤有機質，進而提高了土壤的碳儲存量 (Kowalska *et al.*, 2020)；太平山與加羅山的森林生態系統相對穩定，受到的人為干擾較少，自然保護區的設立和有效的管理措施，保護森林免受過度砍伐和開發的影響，有助於土壤碳的穩定和增加 (Jandl *et al.*, 2007；Lai, 2004)。

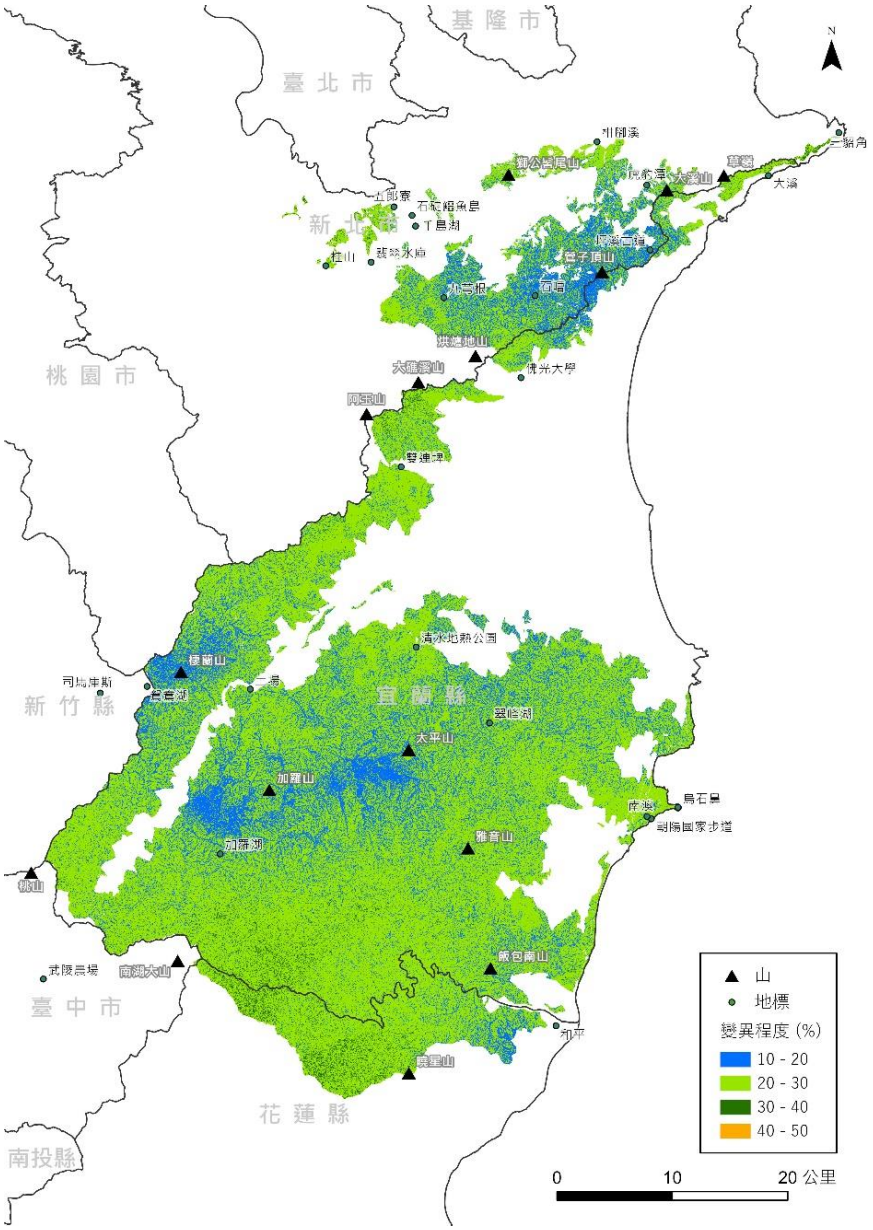


圖 3-5-42 宜蘭分署 0 至 50 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖
(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 50 公分之森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果如（圖 3-5-42）所示，變異程度由低至高從藍色至橘黃色，土壤變異程度較低的地區分布於新北市鶯子頂山、坪溪古道等地；宜蘭縣棲蘭山、加羅山與太平山附近，碳儲存量變異程度約為 10-20%。

變異程度高之地區散布於其他區域，如新北市的獅公髻尾山、桂山等；宜蘭縣的雙連埤、南澳、雅音山、飯包南山等地區，碳儲存量變異程度約為 20 至 30%。

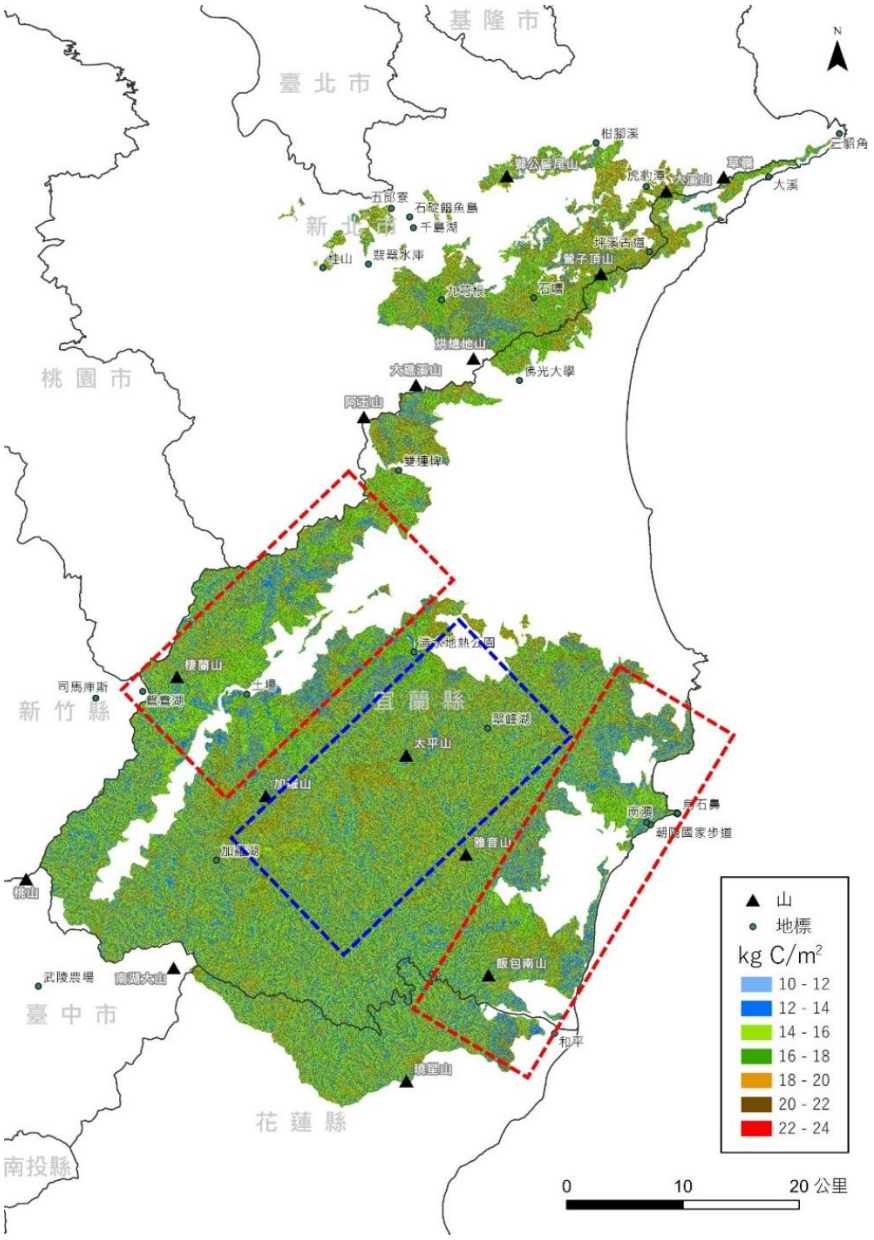


圖 3-5-43 宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量推估分布結果如(圖 3-5-43)所示，可從圖中得知，0 至 100 公分土層的土壤碳含量較沒有明顯的地區性，幾乎都呈現綠色，碳含量大約為 14-18 kg C/m^2 (140-180 ton C/ha)，但仍可看出顏色上的差異，如蘭陽溪下游以及南澳沿海之區域含碳量較低(圖 3-5-43 紅框處)，約為 10-12 kg C/m^2 (100-120 ton C/ha)；太平山與加羅山之地區含碳量較高（圖 3-5-43 藍框處），約為 18-20 kg C/m^2 (180-200 ton C/ha)。因森林土壤碳量主要集中於 0 至 50 公分的土層，50 公分以下之深度所含的碳量微乎其微，因此圖中的分布差異不大。

蘭陽溪下游以及南澳之沿海地區森林土壤含碳量低，可能為河流下游通常有大量的沖積作用，導致土壤有機質的流失；而沿海地區可能受到海水的影響，如鹽分的累積，這可能抑制微生物活動，從而影響土壤碳的累積 (Morrissey *et al.*, 2014；Spivak *et al.*, 2019)。沿海和河流沖積平原的土壤質地與山區的土壤相比，可能含有更多的沙質成分，這些土壤的通氣性和排水性較好，但同時也可能加速有機質的分解和土壤碳的釋放。

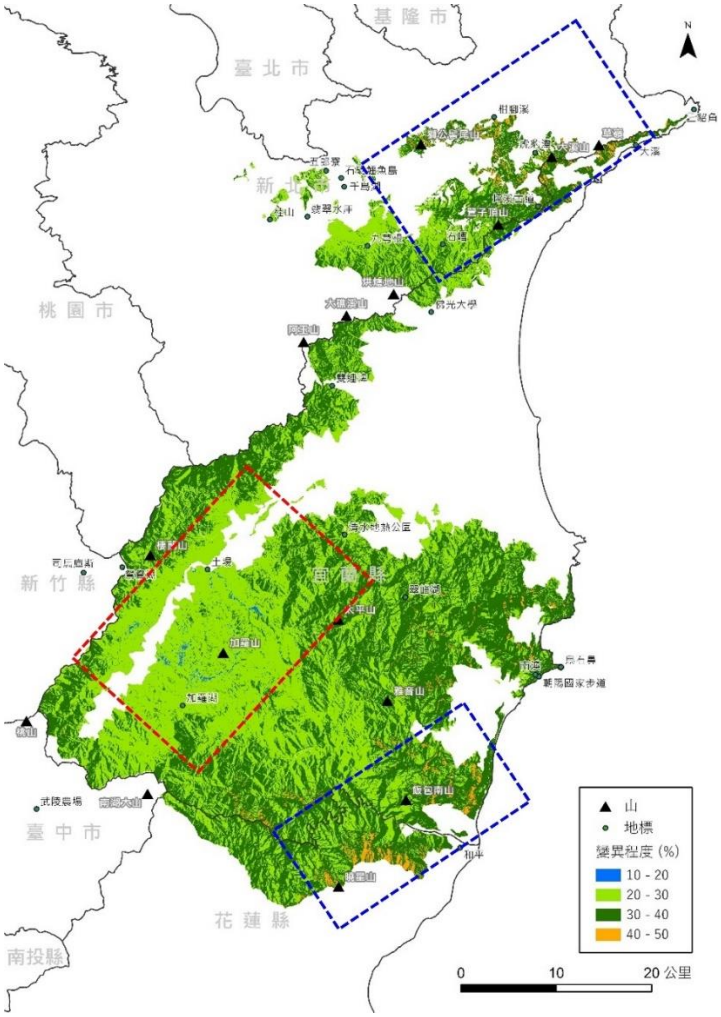


圖 3-5-44 宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 100 公分森林土壤有機碳儲存量變異分布如（圖 3-5-44）所示，變異程度由低至高從藍色至橘黃色，土壤變異程度較低的地區分布於太平山、加羅山、棲蘭山等地，碳儲存量變異程度約為 20 至 30%，其中加羅山周圍有少部分約為 10 至 20%。變異程度高之地區分布於新北市草嶺、獅公髻尾山等地、宜蘭縣飯包南山及花蓮縣曉星山之區域，約為 40 至 50%。

變異程度高之原因可能為土地利用變化，如農業開發、建設活動等，改變原有的土壤結構和有機質含量，導致土壤有機碳儲存量的變異；草嶺可能為人們活動較多之區域，導致土壤受到壓實，減少了土壤通氣性和微生物活性 (Gebhardt *et al.*, 1985)。

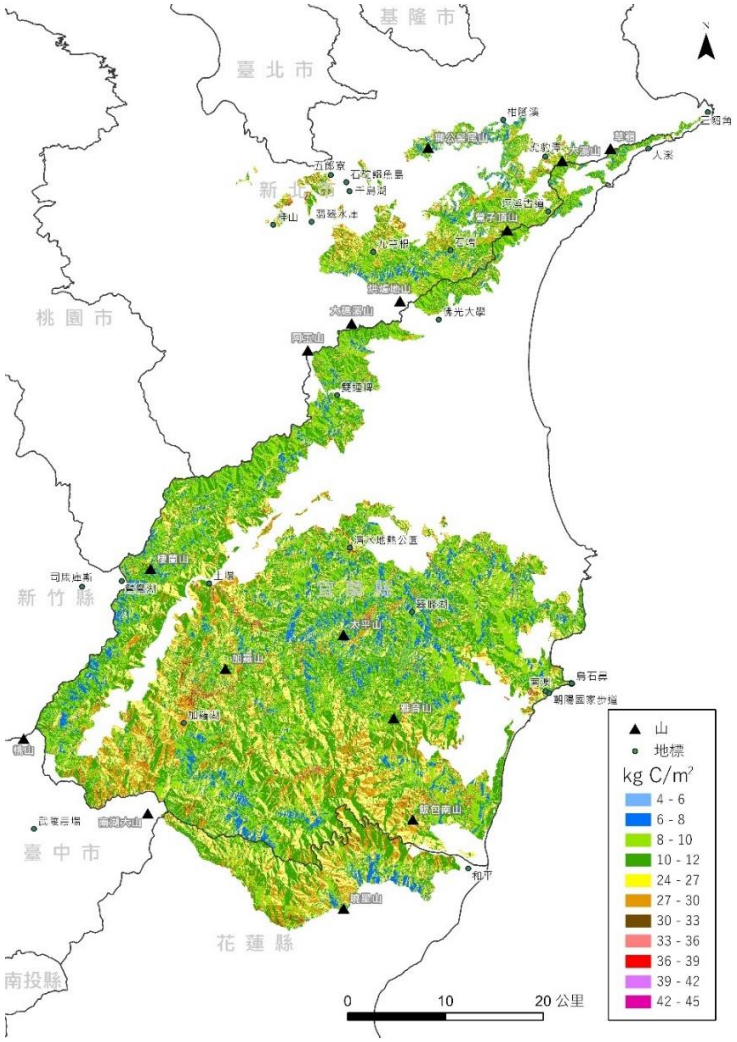


圖 3-5-45 宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量推估分布結果如(圖 3-5-45)所示，較 0 至 100 公分的土層有更多差異，可能因素很多，如土層深度的增加，較深之土層可能受到地表過程的影響較小，但在長期地質過程中累積較多的有機質，導致碳含量的變異性增加；土壤發育程度的差異，不同地區的土壤發育程度可能有所不同，在山區，由於地形和水土保持條件的變化，這將導致較深層土壤中的有機碳含量增加；地下水文條件的變化，隨著深度的增加，土壤可能接觸到地下水流，這會影響土壤中有機質的分解和積累。在某些地區，較深層的土壤可能因此具有較高的水分含量，導致有機質分解速度減慢，有機碳含量增加，上述原因都有可能對碳儲存量多寡造成影響。

含碳量較高之地區分布於宜蘭縣的加羅山、加羅湖、飯包南山、宜蘭縣的曉星山等地區，可能原因為由於山區其較高的海拔和較低的人類活動影響，生態系統較為原始，原生森林通常有更高的生物量和較厚的枯落物層，這為土壤提供了豐富的有機質，從而增加了土壤碳的儲存。

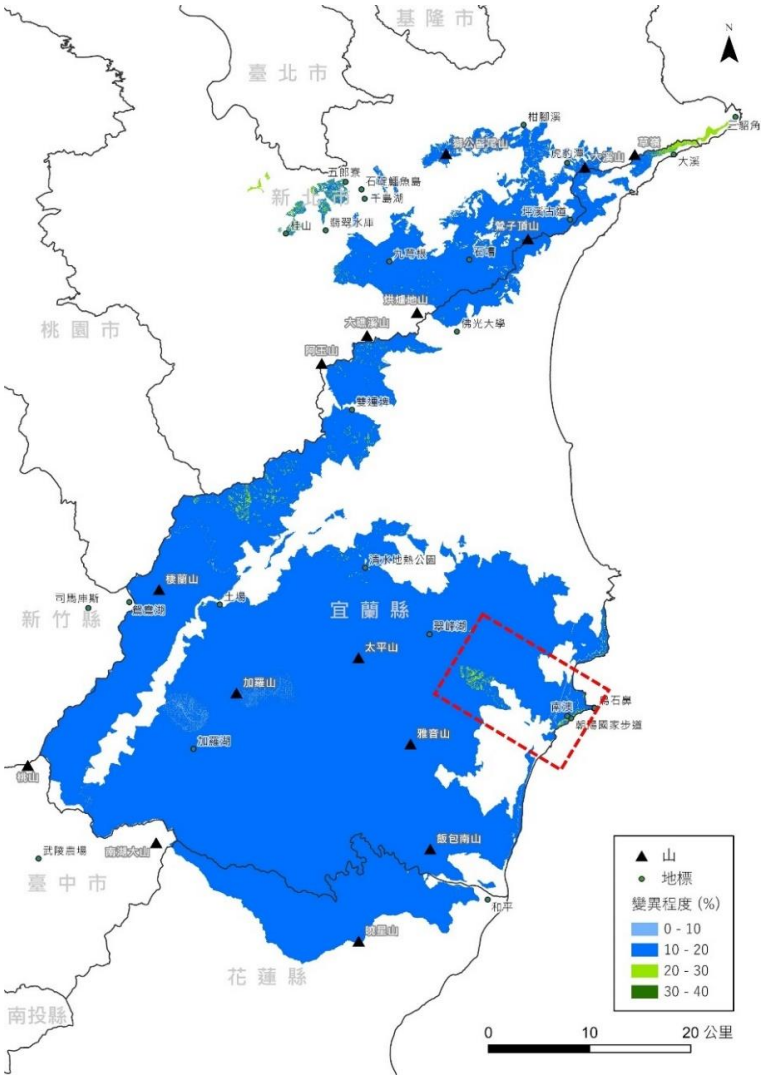


圖 3-5-46 宜蘭分署 0 至 150 公分森林土壤有機碳儲存量變異程度分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署 0 至 150 公分之森林土壤有機碳儲存量變異度分布結果如（圖 3-5-46）所示，變異程度由低至高從淺藍色至深綠色，土壤變異程度平均分布為 10 至 20%，較高的地區分布於南澳北溪上游周圍以及南澳等地（圖 3-5-46 紅框處），碳儲存量變異程度約為 20 至 30%，溪流上游地區通常水文條件複雜，洪水和侵蝕作用可能對土壤有機碳儲存量造成影響。

(2) 土壤有機碳匯量推估成果敘述統計

表 3-5-21 宜蘭分署四土層土壤有機碳儲存量推估成果敘述統計表

深度 (cm)	面積	土壤有機碳儲存量 (kg C/m^2)			土壤有機碳總量
	公頃	平均數 ± 標準差	中位數	全距	(t C)
0-30	176,286.68	8.39 ± 0.78	8.37	5.78 – 11.2	14,782,617
0-50		13.6 ± 0.70	13.8	11.8 – 16.6	23,983,876
0-100		15.8 ±2.26	15.2	10.7 – 23.5	27,890,621
0-150		19.0 ± 2.40	24.2	13.4 – 29.2	33,785,892

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

宜蘭分署面積為 176,286.68 公頃（表 3-5-21），0 至 30 公分之土壤有機碳儲存量為 8.39±0.78 kg C/m^2 (83.9±7.8 ton C/ha)，中位數為 8.37 kg C/m^2 (83.7 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 14,782,617 t C；0 至 50 公分之土壤有機碳儲存量平均值為 13.6±0.70 kg C/m^2 (136±7 ton C/ha)，中位數為 13.8 kg C/m^2 (138 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 23,983,876 t C；0 至 100 公分之土壤有機碳儲存量為 15.8±2.26 kg C/m^2 (158±22.6 ton C/ha)，中位數為 15.2 kg C/m^2 (152 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 27,890,621 t C；0 至 150 公分之土壤有機碳儲存量為 19.0±2.40 kg C/m^2 (190±24 ton C/ha)，中位數為 24.2 kg C/m^2 (242 ton C/ha)，土壤有機碳儲存總量為 33,785,892 t C。

- **執行成果（應用更新後資料庫）**

應用更新後資料庫及前述精進模型，重新評估各地區分署不同深度森林土壤中的有機碳儲存量。

1. 宜蘭分署

(1) 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

宜蘭分署位於臺灣東北部，總面積為 176,330 公頃，轄區從沿海紅樹林延伸至海拔 3,600 公尺的高山地區，年均溫 18.5℃，年均降雨量 2,678 毫米。區內隨海拔高度變化呈現亞熱帶、溫帶及亞寒帶等氣候型態，轄區內天然林占 75%、人工林占 25%。林型以天然闊葉林分布最廣。0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-47），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-139 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-139 ton C/ha) 主要出現在太平山國家森林遊樂區及明池國家森林遊樂區，呈現橙色至深橙

色區域;較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布在南湖北山及喀拉業山一帶。分布型態與當地的林型組成、海拔高度及地形條件有關。

海拔與林型交叉分析結果顯示(表 3-5-22),海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 7.39 百萬公噸,天然闊葉林占比最大,碳儲存量為 5.37 百萬公噸;海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 6.76 百萬公噸,天然闊葉林占比最大,碳儲存量為 4.02 百萬公噸;海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 1.55 百萬公噸,天然針葉林占比最大,碳儲存量為 0.62 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言,海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (117±5.76 ton C/ha),海拔 0-1,000 公尺的竹林則為最低值 (72.5±5.14 ton C/ha)。在變異性方面,海拔 2,000 公尺以上的人工闊葉林表現最大的變異性 (99.3±14.2 ton C/ha),而海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林則具有較小的變異性 (117±5.76 ton C/ha)。宜蘭分署轄區內 0-30 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 15.7 百萬公噸。

表 3-5-22 宜蘭分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.18	0.22	0.57	0.00	0.01	5.37	0.00	0.00	1.02	7.39
	1,000-2,000	0.76	0.40	0.10	0.11	0.42	4.02	0.00	0.00	0.95	6.76
	2,000 以上	0.18	0.09	0.00	0.62	0.17	0.21	0.00	0.00	0.29	1.55
	總計	1.11	0.71	0.67	0.73	0.61	9.59	0.01	0.00	2.26	15.7
平均 (tC/ha)	0-1,000	93.3±5.99	87.8±6.21	87.6±8.96	75.9±9.80	77.7±7.19	84.2±9.36	72.7±8.56	72.5±5.14	77.8±12.4	81.1±7.41
	1,000-2,000	105±8.61	101±8.76	96.2±9.83	79.6±10.6	83.2±9.85	94.9±10.9	83.6±2.50	75.8±5.79	89.7±13.7	89.9±10.1
	2,000 以上	117±5.76	110±5.70	99.3±14.2	88.6±8.29	84.5±8.38	98.9±8.88	0.00±0.00	0.00±0.00	93.9±12.5	76.9±44.7
	總計	105±11.6	99.8±11.3	94.4±6.06	81.3±6.57	81.8±3.61	92.7±7.60	52.1±45.5	49.4±42.9	87.1±8.36	82.6±15.9

(台灣水資源與農業研究院製作,2024,林業及自然保育署委辦計畫)

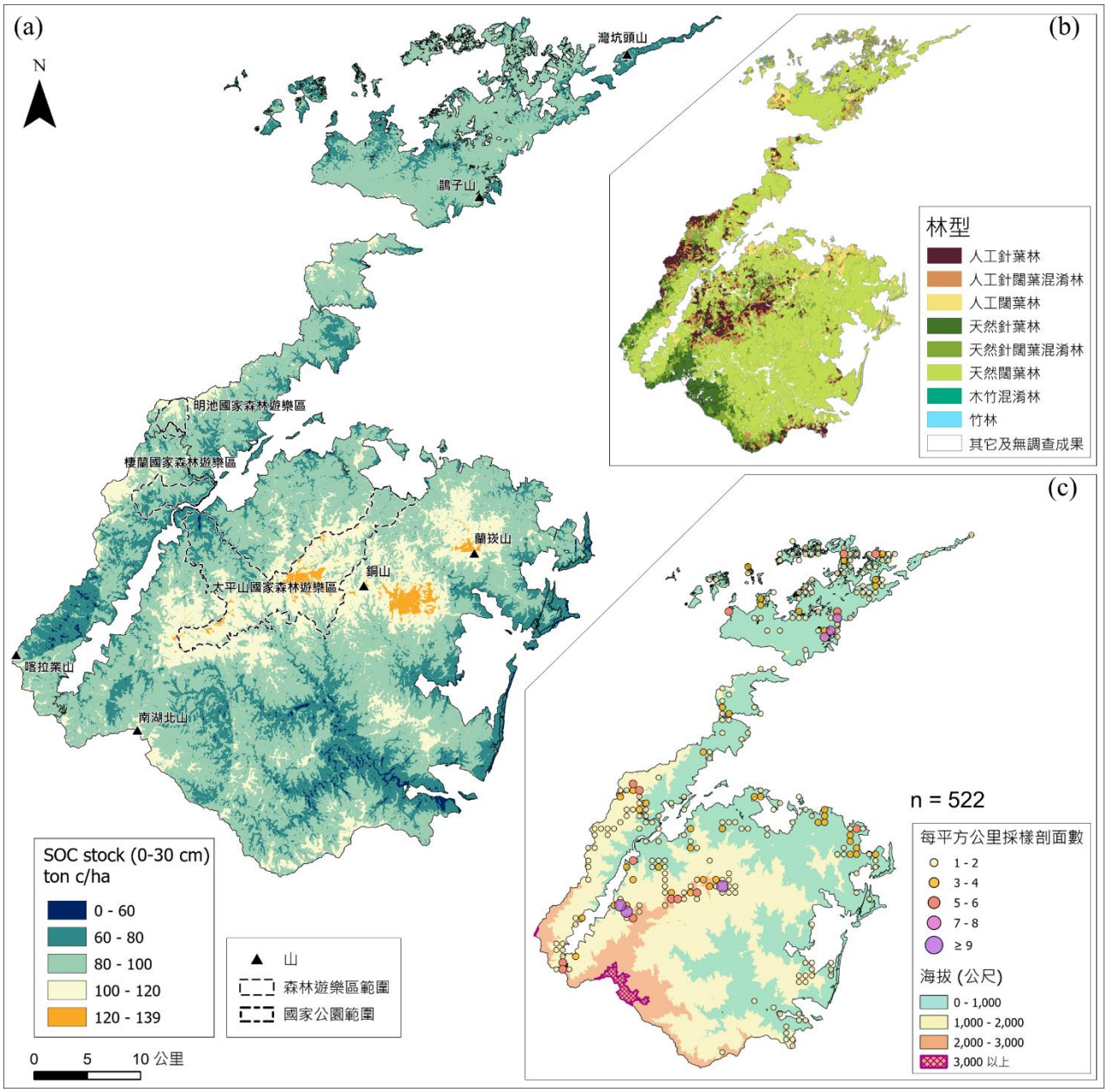


圖 3-5-47 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署林型空間分布圖及圖 (c) 宜蘭林分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-48），預測值的不確定性在空間分布上差異明顯，整體變異範圍為 3.6-228 ton C/ha 之間。高度不確定區域 (40-228 ton C/ha) 集中於太平山與明池國家森林遊樂區週邊，儘管這些地區有機碳儲存量豐富，但因採樣密度低，每平方公里約 1-2 個剖面，使預測結果的可靠度受到限制。相對而言，採樣剖面密集的區域呈現較小的預測區間，反映出採樣策略對結果準確性的影響。

就垂直分布而言（表 3-5-23），採樣工作主要於 0-1,000 公尺 (n = 312) 及 1,000-2,000 公尺 (n＝181) 的範圍， 2,000 公尺以上高海拔地區採樣數量明顯較少 (n＝29)，使該區域的預測存在較大不確定性。其中海拔 2,000 公尺以上的人工闊葉林變異程度最高 (99.3±14.2 ton C/ha)，因缺乏實際採樣資料，其結果不確定性較大。相比之下，同一海拔的人工針葉林樣本較多 (n = 24)，其結果呈現較低的變異性 (117±5.76 ton C/ha)，提供了更可靠的估算結果。值得一提的是，低海拔天然闊葉林儘管擁有最充足的採樣剖面 (n＝163)，卻仍有較大的變異性 (84.2±9.36 ton C/ha)，顯示低海拔地區的環境變異大，有機碳儲存量容易受到各種環境因子干擾。

表 3-5-23 宜蘭分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	26	23	27	1	0	163	4	67	1	312
1000-2000	83	22	6	1	3	39	0	27	0	181
2000 以上	24	1	0	1	0	2	0	1	0	29
總計	133	46	33	3	3	204	4	95	1	522

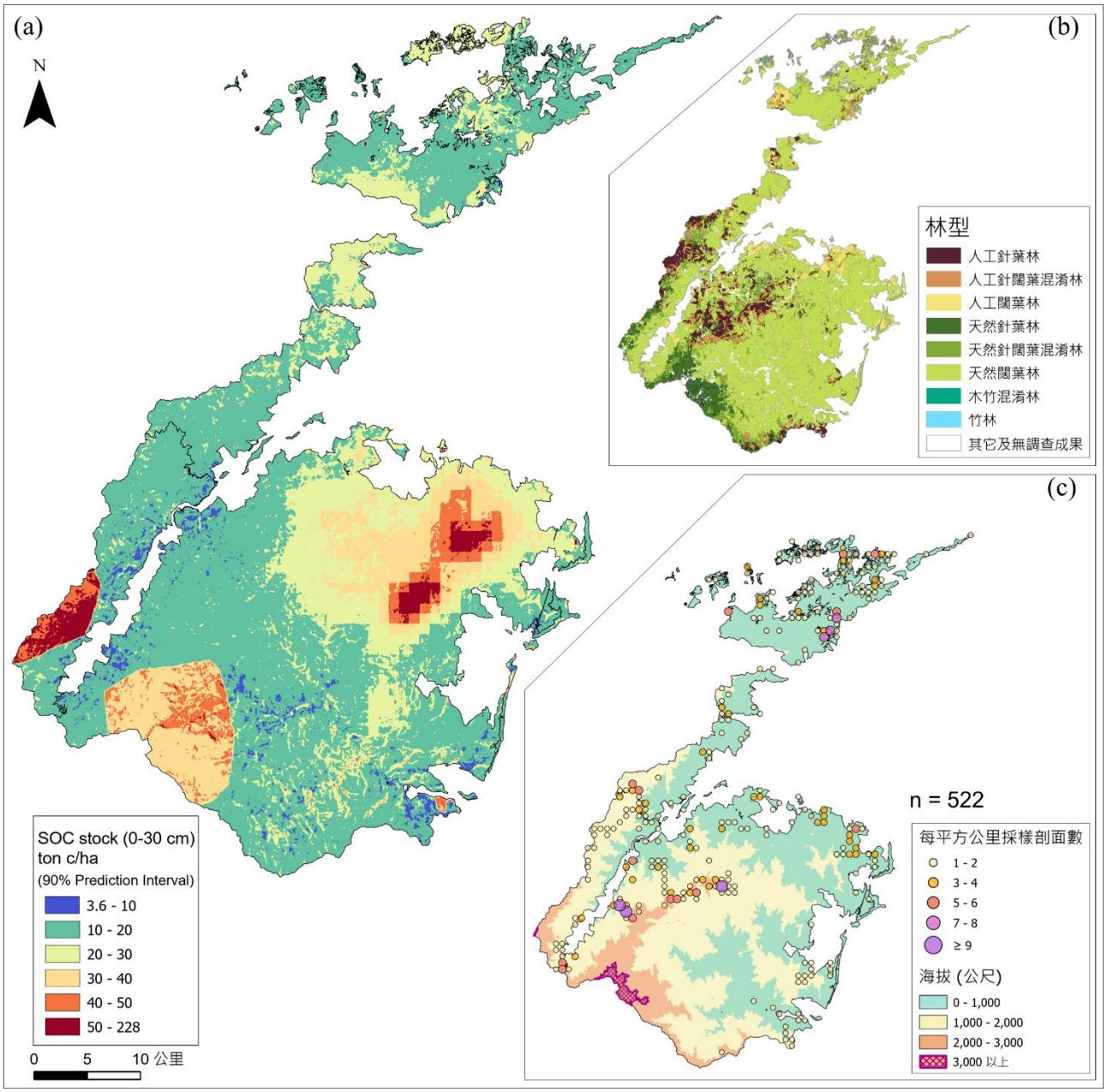


圖 3-5-48 宜蘭分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署林型空間分布圖及圖 (c) 宜蘭林分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-49），有機碳儲存量的空間分布呈現顯著差異，數值範圍介於 0-198 ton C/ha。有機碳儲存量較豐富之區域 (160-198 ton C/ha) 主要分布於太平山及明池國家森林遊樂區週邊，形成明顯的橙色至紅色區域；有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則散布於灣坑頭山及喀拉業山一帶。這些分布特徵主要受到林型結構、地形變化及海拔高度的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-24），0-1,000 公尺區域的碳儲存總量達 10.5 百萬公噸，以天然闊葉林貢獻最多，達 7.61 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間的碳儲存總量為 9.59 百萬公噸，其中天然闊葉林占比最高，有機碳儲存量為 5.64 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳儲存總量為 2.23 百萬公噸，以天然針葉林占比最高，達 0.88 百萬公噸。在每公頃有機碳儲存量的分析中，2,000 公尺以上的人工針葉林展現最高儲存能力 (163±7.88 ton C/ha)，而 0-1,000 公尺的竹林則為最低 (102±8.28 ton C/ha)。就變異程度而言，2,000 公尺以上的人工闊葉林顯示最大變異性 (142±17.0 ton C/ha)，同海拔的人工針葉林變異性較小 (163±7.88 ton C/ha)。宜蘭分署轄區內 0-30 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 22.3 百萬公噸。

表 3-5-24 宜蘭分署各林型及海拔之 0-50 土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.26	0.33	0.81	0	0.02	7.61	0.01	0.01	1.43	10.5
	1,000-2,000	1.06	0.58	0.13	0.15	0.66	5.64	0	0	1.36	9.59
	2,000 以上	0.24	0.13	0.01	0.88	0.27	0.29	0	0	0.41	2.23
	總計	1.56	1.04	0.95	1.03	0.95	13.5	0.01	0.01	3.2	22.3
平均 (tC/ha)	0-1,000	132±9.16	131±9.76	124±13.2	106±13.2	121±10.8	119±13.6	103±13.0	102±8.28	109±19.4	116±11.6
	1,000-2,000	147±12.0	147±12.1	134±14.3	112±12.7	130±12.7	133±15.2	114±3.18	104±8.27	128±19.5	128±15.2
	2,000 以上	163±7.88	160±7.66	142±17.0	126±10.5	133±9.49	140±10.4	0.00±0.00	0.00±0.00	134±16.1	111±64.0
	總計	147±15.2	146±14.7	133±9.09	115±9.87	128±6.48	131±10.5	72.3±62.9	68.6±59.4	124±12.9	118±22.3

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

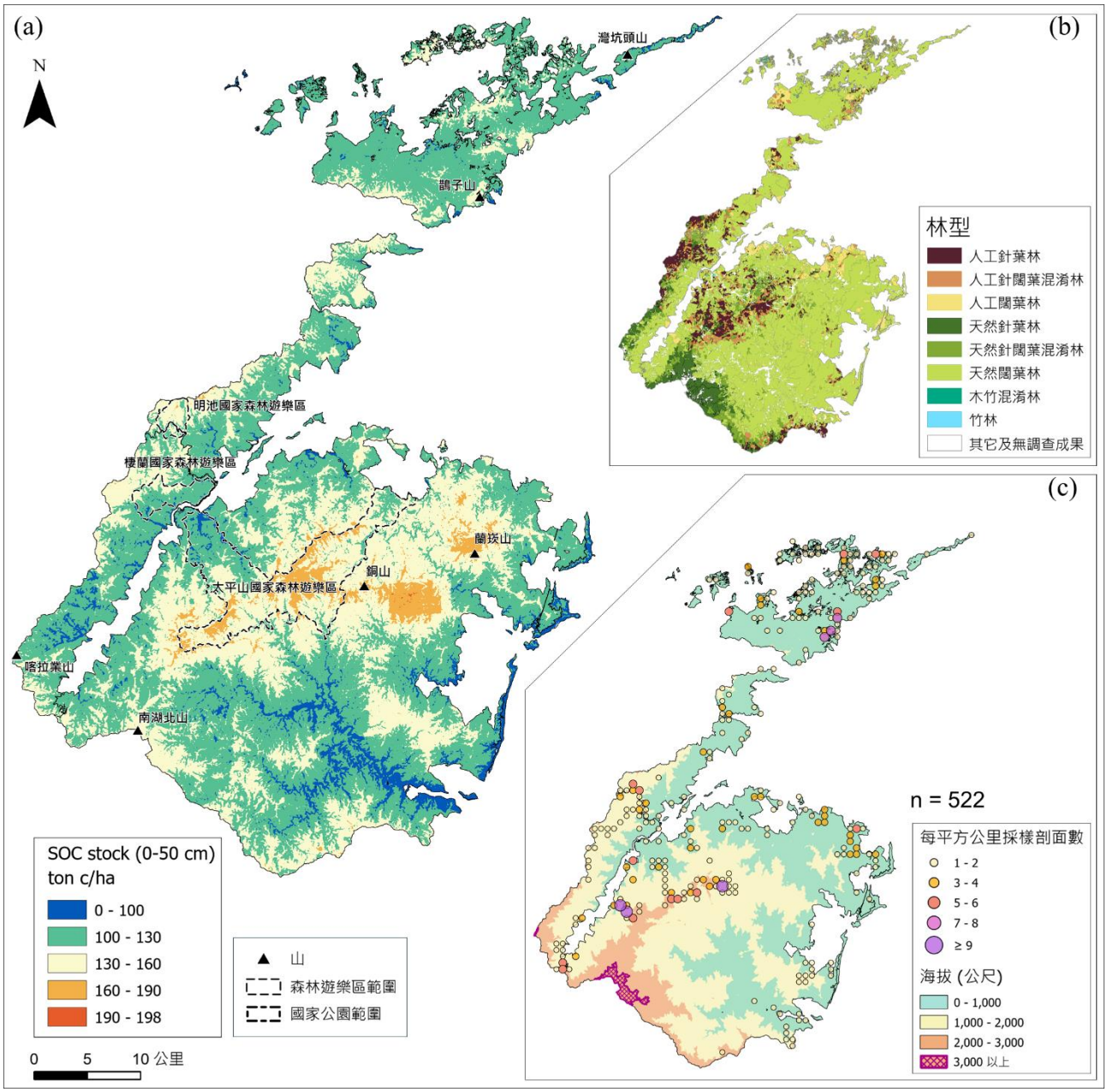


圖 3-5-49 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署林型空間分布圖及圖 (c) 宜蘭林分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-50），預測值的不確定性在空間上呈現明顯的異質性，範圍涵蓋 5.5-352 ton C/ha。預測的不確定性在太平山及明池國家森林遊樂區週邊特別明顯 (40-352 ton C/ha)，這些區域雖具有較高的碳儲存潛力，但因採樣剖面密度較低 (每平方公里 1-2 個剖面)，增加了預測的不確定性。相對地，採樣剖面分布較密集的區域展現出較小的預測區間，凸顯採樣密度對預測可靠度的重要性。

檢視採樣剖面的海拔分布特徵（表 3-5-25），發現採樣範圍多集中於 0-1,000 公尺 (n = 284) 及 1,000-2,000 公尺 (n = 162)，而 2,000 公尺以上的區域僅有少數樣本 (n = 26)，導致高海拔地區的預測結果存在較大不確定性。林型分布方面，天然闊葉林的採樣剖面最為豐富 (n = 181)，其次是人工針葉林 (n = 118)，使這些林型的有機碳儲存量估計較為可靠。變異程度分析呈現，2,000 公尺以上人工闊葉林的標準差最大 (142±17.0 ton C/ha)，但由於缺乏實際採樣資料，其預測結果的參考價值有限。相比之下，同海拔的人工針葉林樣本數較多 (n = 22)，展現較小的變異性 (163±7.88 ton C/ha)，提供了較為穩定的估計結果。值得注意的是，即使在擁有最多採樣剖面的低海拔天然闊葉林 (n = 148) 中，仍觀察到較大的變異幅度 (119±13.6 ton C/ha)，突顯此區域環境較複雜，環境變異較大之特徵。

表 3-5-25 宜蘭分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	22	21	25	1	0	148	3	63	1	284
1000-2000	74	22	5	1	3	32	0	25	0	162
2000 以上	22	1	0	1	0	1	0	1	0	26
總計	118	44	30	3	3	181	3	89	1	472

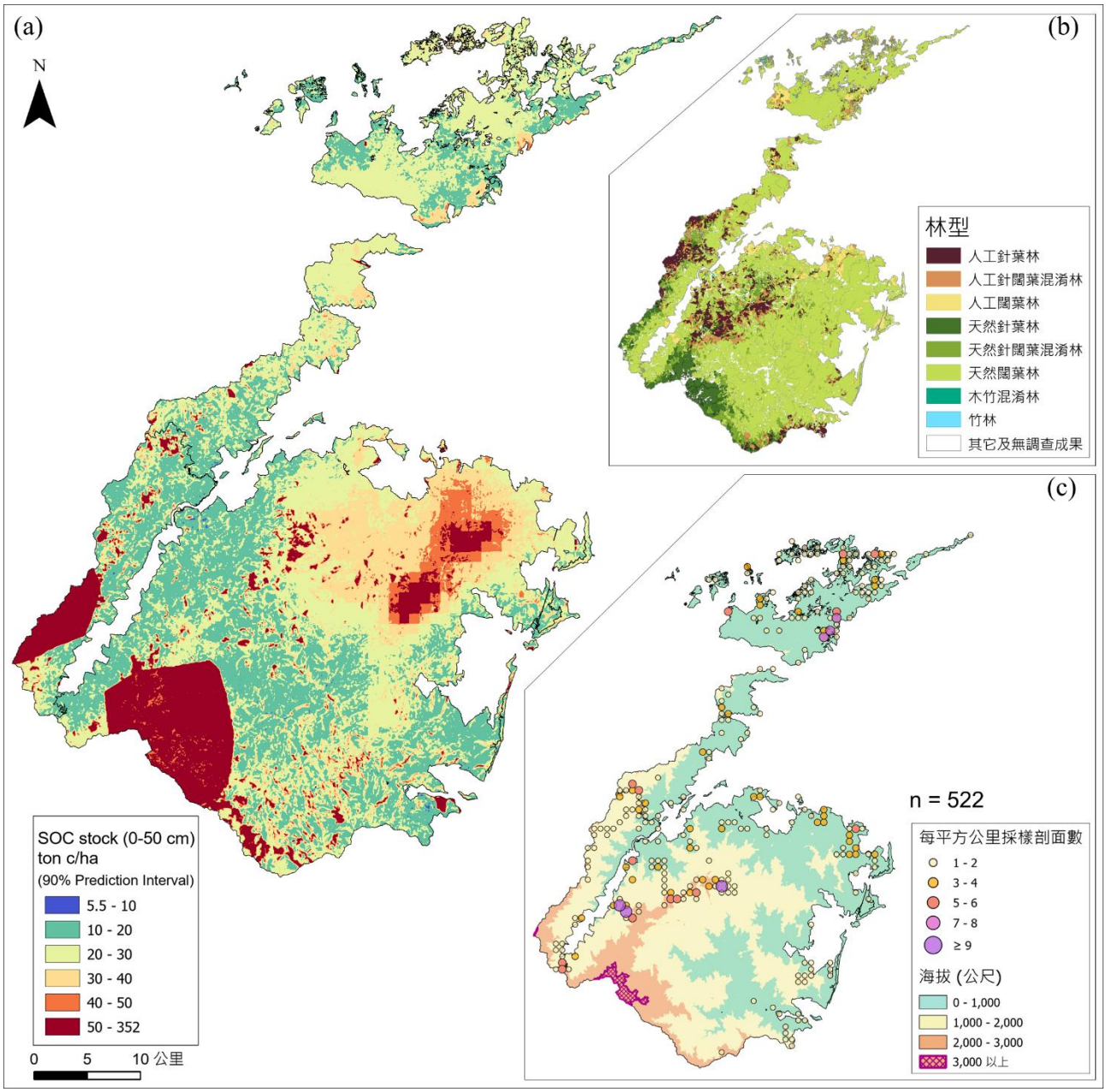


圖 3-5-50 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署林型空間分布圖及圖 (c) 宜蘭林分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 宜蘭分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-51），有機碳儲存量的空間分布範圍為 0-265 ton C/ha。高碳儲存區 (190-265 ton C/ha) 主要分布於太平山國家森林遊樂區中心區域，並向外呈放射狀分布；中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 集中明池國家森林遊樂區週邊；較低有機碳儲存量區域 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於南湖北山東側低海拔處。0-150 公分的分布型態與 0-100 公分相近，整體有機碳儲存量空間分布受地形、林型及土壤深度的影響。

海拔與林型的交叉分析顯示，在 0-100 公分深度中（表 3-5-26），0-1,000 公尺的碳儲存總量為 14.2 百萬公噸，其中天然闊葉林貢獻 10.3 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間的總量達 13.6 百萬公噸，天然闊葉林佔 7.96 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的儲存量為 3.45 百萬公噸，以天然針葉林的 1.4 百萬公噸最多。而在 0-150 公分深度中（表 3-5-27），各海拔各林型碳儲存量皆些微增加。就平均每公頃有機碳儲存量而言，0-100 公分土層中（表 3-5-26），2,000 公尺以上的人工針葉林展現最高值 (233±7.39 ton C/ha)。0-150 公分同樣是 2,000 公尺以上的人工針闊葉混淆林具有最高儲存量 (263±14.6 ton C/ha)（表 3-5-27）。宜蘭分署轄區內 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存總量分別為 31.2 百萬公噸與 32.6 百萬公噸。

表 3-5-26 宜蘭分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.35	0.45	1.07	0.01	0.03	10.3	0.01	0.01	1.96	14.2
	1,000-2,000	1.51	0.81	0.19	0.24	0.96	7.96	0	0	1.94	13.6
	2,000 以上	0.35	0.18	0.01	1.4	0.42	0.45	0	0	0.64	3.45
	總計	2.22	1.44	1.28	1.64	1.41	18.7	0.01	0.01	4.53	31.2
平均 (t C/ha)	0-1,000	183±10.5	176±13.6	165±14.4	141±11.1	163±10.8	162±14.0	145±14.9	146±10.2	149±23.2	159±14.5
	1,000-2,000	209±13.6	205±13.6	193±11.5	174±11.9	189±13.6	188±12.5	161±4.08	165±9.94	182±19.9	185±16.7
	2,000 以上	233±7.39	228±7.48	210±10.5	201±14.0	208±11.5	214±11.3	0.00±0.00	0.00±0.00	208±18.7	167±95.1
	總計	208±24.9	203±26.3	189±23.1	172±30.1	186±22.7	188±26.1	102±88.7	104±90.3	180±29.4	170±40.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-27 宜蘭分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.39	0.54	1.06	0.01	0.03	10.6	0.01	0.01	2.14	14.7
	1,000-2,000	1.65	0.95	0.19	0.34	1	7.83	0	0	2.08	14
	2,000 以上	0.37	0.21	0.01	1.76	0.41	0.43	0	0	0.67	3.85
	總計	2.41	1.69	1.25	2.12	1.43	18.8	0.01	0.01	4.88	32.6
平均 (tC/ha)	0-1,000	200±13.0	210±13.4	162±15.4	213±12.8	164±13.4	166±13.9	161±14.2	159±10.1	163±22.1	178±23.0
	1,000-2,000	229±15.9	242±16.9	189±15.4	252±22.0	196±17.3	185±17.0	162±3.42	181±14.4	196±27.1	203±30.3
	2,000 以上	246±12.0	263±14.6	217±16.0	253±22.2	201±26.3	204±26.0	0.00±0.00	0.00±0.00	217±30.1	178±103
	總計	225±23.3	238±26.5	189±27.8	239±22.8	187±19.9	185±19.2	108±93.3	113±98.8	192±27.2	186±39.9

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

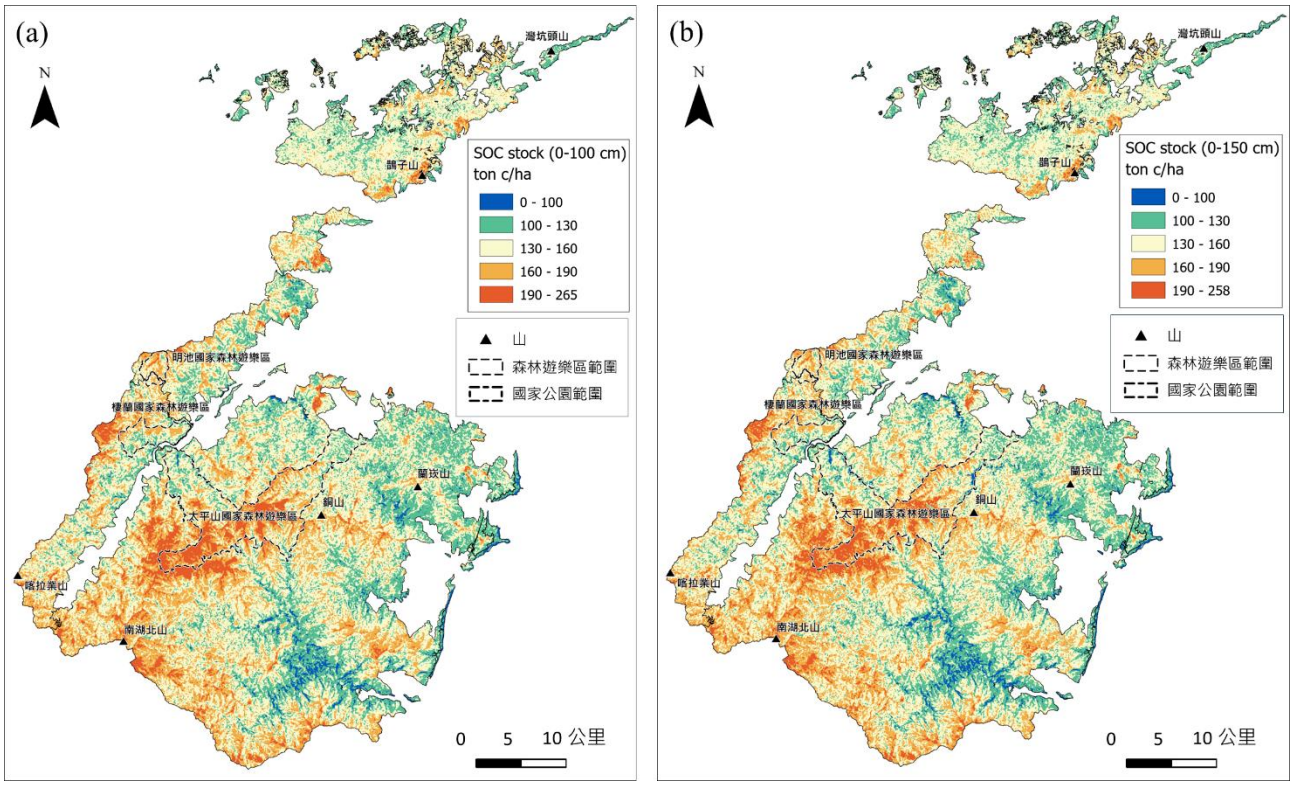


圖 3-5-51 宜蘭分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 宜蘭分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-52），0-100 公分土層的預測不確定性範圍為 5.5-302 ton C/ha，而 0-150 公分則為 9.7-695 ton C/ha。兩個深度的高不確定性區域，分別為 90-302 及 90-695 ton C/ha，均出現在太平山森林遊樂區及其週邊，這些區域的採樣密度相對較低，增加了預測不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-28），0-100 公分土層的取樣主要集中在 0-1,000 公尺區間 (n＝214)，其次為 1,000-2,000 公尺 (n＝101)，而 2,000 公尺以上區域僅有少量樣本 (n＝21)。0-150 公分土層的採樣規模較小，0-1,000 公尺有 39 個樣本，1,000-2,000 公尺有 29 個，2,000 公尺以上僅 5 個，使 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量的估計存在較大不確定性。變異程度顯示，在 0-100 公分土層中，人工針葉林的標準差隨海拔升高而減小，從低海拔的 183±10.5 ton C/ha 降至高海拔的 233±7.39 ton C/ha。0-150 公分土層則呈現不同特徵，天然針葉林在 1,000-2,000 公尺的變異性最大（推估結果為 252±22.0 ton C/ha，原始樣本數為 1）。值得注意的是，即使在採樣剖面最多的低海拔天然闊葉林（推估結果為 0-100 公分，原始樣本數為 112），仍可觀察到明顯的變異 (162±14.0 ton C/ha)，顯示 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量變異程度較大。

表 3-5-28 宜蘭分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	17	15	18	1	0	112	3	47	1	214
	1,000-2,000	50	13	3	1	2	18	0	14	0	101
	2,000 以上	18	1	0	1	0	0	0	1	0	21
	總計	85	29	21	3	2	130	3	62	1	336
0-150	0-1,000	3	2	3	0	0	22	2	0	7	39
	1,000-2,000	13	4	0	0	2	7	0	0	3	29
	2,000 以上	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5
	總計	21	6	3	0	2	29	2	0	10	73

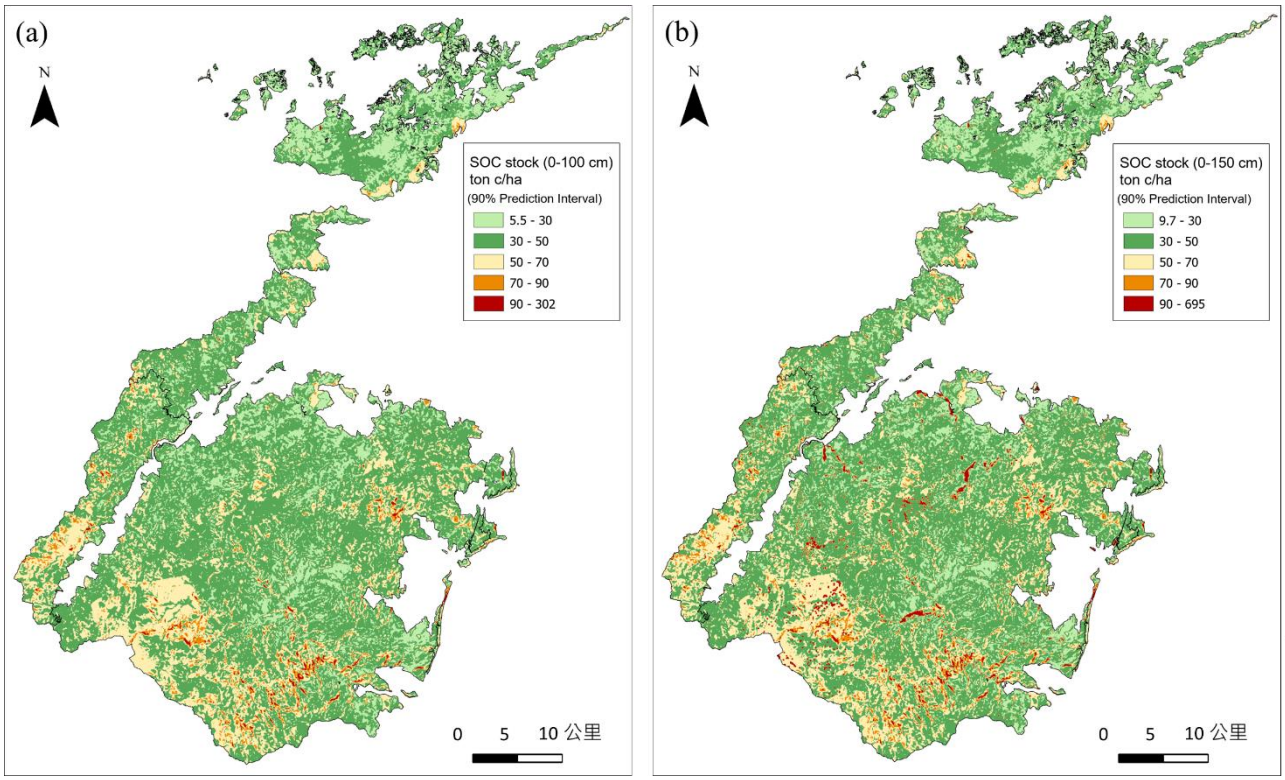


圖 3-5-52 宜蘭分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 宜蘭分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 宜蘭分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

2. 花蓮分署

(1) 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

花蓮分署位於臺灣東部花蓮縣境內，總面積為 318,608 公頃，轄區從海拔 100 公尺延伸至 3,500 公尺，低海拔區域冬季平均溫度約 20℃，高海拔區域冬季平均溫度約 5℃，全區年均溫 17.1℃，年均降雨量 2,207 毫米。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-53），有機碳儲存量在空間上呈現明顯差異，變異範圍在 0-141 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-141 ton C/ha) 主要分布於立霧主山、六順山、馬西山一帶；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 位於海拔 3000 公尺以上敞區；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則分布於八里灣山及月眉山周邊。這種分布型態主要受到地形條件、土壤性質及林型組成的影響。海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-28），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 6.10 百萬公噸，以天然闊葉林貢獻最多，達 4.94 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區域的碳儲存總量為 11.2 百萬公噸，其中天然闊葉林儲存量為 7.34 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳

儲存總量為 10.2 百萬公噸，以天然針葉林主導，達 4.77 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (109±9.97 ton C/ha)，而木竹混淆林無有機碳儲存量。在變異程度方面，天然針闊葉混淆林於低海拔區域顯示最大的變異性 (58.6±12.4 ton C/ha)，而人工針闊葉混淆林在高海拔區域呈現較小的變異性（推估結果為 104±9.35 ton C/ha，原始樣本數為 3）。花蓮分署的森林土壤有機碳儲存總量為 27.5 百萬公噸。

表 3-5-28 花蓮分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.01	0.02	0.32	0	0.01	4.94	0.02	0.03	0.73	6.1
	1,000-2,000	0.25	0.2	0.36	0.21	1.45	7.34	0	0.01	1.41	11.2
	2,000 以上	0.54	0.21	0.1	4.77	1.81	0.9	0	0	1.86	10.2
	總計	0.8	0.42	0.78	4.99	3.27	13.2	0.03	0.04	4	27.5
平均 (tC/ha)	0-1,000	89.8±5.45	79.9±5.74	79.4±8.44	65.3±9.81	58.6±12.4	74.3±9.34	63.4±9.68	68.2±13.7	64.8±13.3	71.5±10.0
	1,000-2,000	101±9.23	96.1±9.29	92.1±10.0	82.3±11.4	82.4±10.0	88.3±9.41	74.7±5.49	74.3±7.00	79.5±13.1	85.6±9.34
	2,000 以上	109±9.97	104±9.35	104±9.43	96.1±10.8	90.8±9.49	100±9.20	0.00±0.00	0.00±0.00	98.0±11.8	78.0±44.5
	總計	99.9±9.69	93.2±12.1	91.8±12.3	81.2±15.4	77.3±16.7	87.6±13.1	46.0±40.3	47.5±41.3	80.7±16.6	78.4±19.7

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

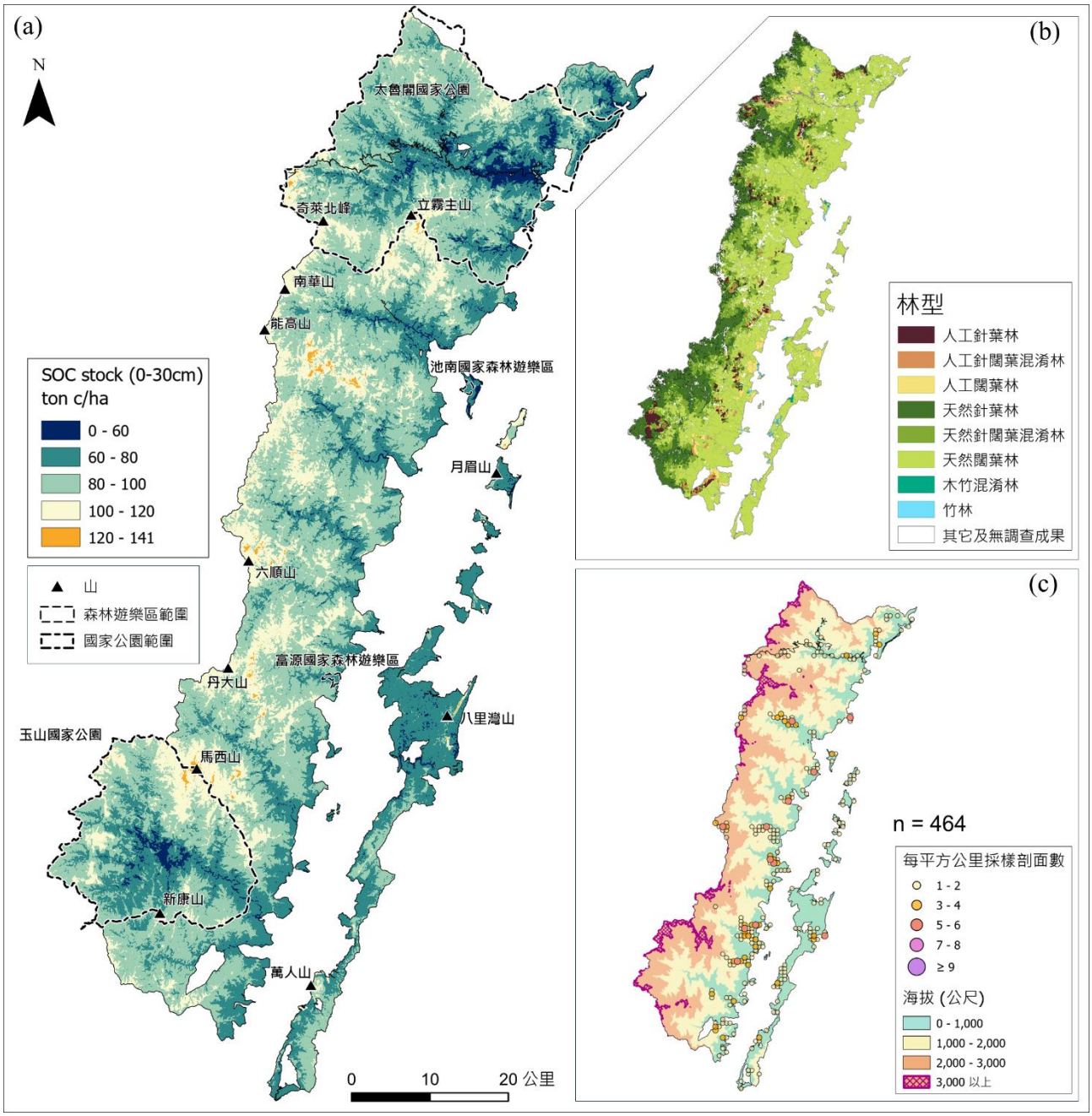


圖 3-5-53 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署林型空間分布圖及圖 (c) 花蓮分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-54），預測值的不確定性在空間上存在顯著差異，整體變異範圍為 3.6-126 ton C/ha。高度不確定區域 (50-126 ton C/ha) 主要出現在太魯閣國家公園北側及玉山國家公園東側，這些地區雖具備較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭導致採樣剖面密度偏低（每平方公里 1-2 個剖面），以及受到淋溶土 (Spodosols) 資料影響，使預測結果的可信度受到限制。

採樣剖面分布特徵顯示（表 3-5-29），採樣剖面多集中於 0-1,000 公尺 (n＝277) 及 1,000-2,000 公尺 (n = 144) 的範圍，而 2,000 公尺以上的高海拔地區樣本數量較少 (n＝43)，導致該區域的預測不確定性升高。林型分布方面，天然闊葉林的採樣剖面最豐富 (n＝234)，其次為人工闊葉林 (n＝37) 及人工針闊葉混淆林 (n＝32)，使這些林型的有機碳儲存量推估較為可信。分析變異程度時發現，各類林型的標準差普遍隨海拔升高而增加。低海拔 (0-1,000 公尺) 的天然闊葉林雖有充足的採樣剖面 (n＝163)，仍呈現明顯的變異性 (74.3±9.34 ton C/ha)，體現沿海地區土壤性質的多樣化。特別的是，中海拔 (1,000-2,000 公尺) 的人工針葉林儘管樣本數適中 (n＝24)，卻展現較大的變異幅度 (101±9.23 ton C/ha)，表明該海拔帶土壤特性的複雜性。

表 3-5-29 花蓮分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	0	6	30	0	3	163	4	65	6	277
1000-2000	24	23	7	7	3	67	0	13	0	144
2000 以上	1	3	0	6	1	4	0	28	0	43
總計	25	32	37	13	7	234	4	106	6	464

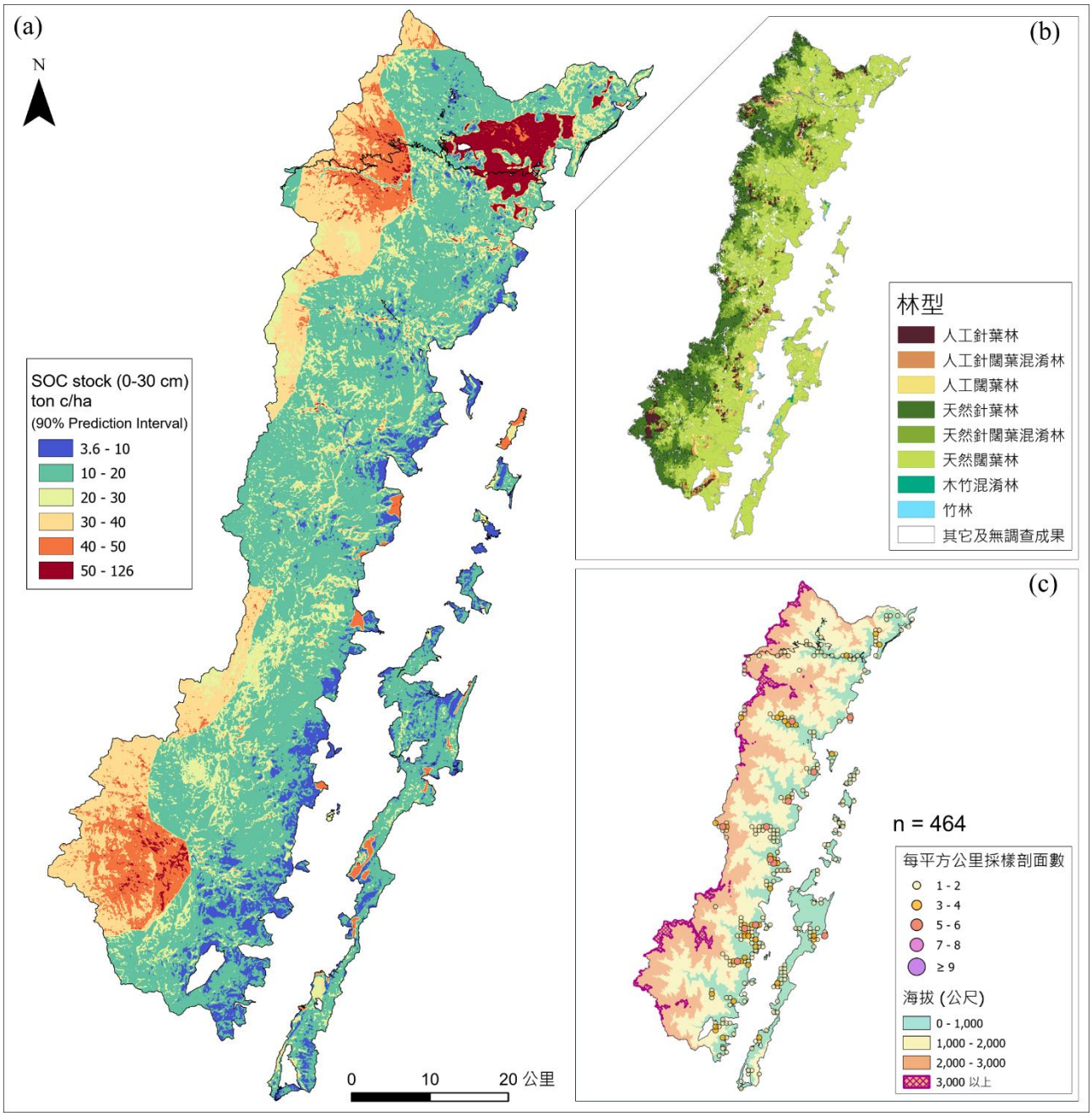


圖 3-5-54 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署林型空間分布圖及圖 (c) 花蓮分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-55），有機碳儲存量的空間分布範圍介於 0-197 ton C/ha。有機碳儲存量較高區域 (190-197 ton C/ha) 主要集中於太魯閣國家公園南北側及玉山國家公園東側；中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 分布於能高山至奇萊北峰一帶；低有機碳儲存量區域 (0-100 ton C/ha) 則沿海岸山脈及八里灣山周邊呈帶狀分布。整體分布型態反映出地形地勢、土壤深度及林型組成的綜合影響。海拔與林型的交叉分析成果顯示（表 3-5-30），0-1,000 公尺區域的碳儲存總量為 8.60 百萬公噸，其中天然闊葉林佔最大比例，達 6.98 百萬公噸；1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 16.1 百萬公噸，天然闊葉林貢獻 10.3 百萬公噸；2,000 公尺以上區域則累積了 14.7 百萬公噸，以天然針葉林為大宗，儲存量達 6.70 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量分析，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高儲存能力 (155±12.3 ton C/ha)，而同一海拔的木竹混淆林及竹林則無有機碳儲存量。花蓮分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量達 39.4 百萬公噸。

表 3-5-30 花蓮分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.01	0.02	0.45	0.01	0.02	6.98	0.03	0.05	1.02	8.6
	1,000-2,000	0.35	0.29	0.5	0.3	2.27	10.3	0.01	0.01	2.02	16.1
	2,000 以上	0.77	0.31	0.14	6.7	2.82	1.27	0	0	2.65	14.7
	總計	1.14	0.62	1.09	7.01	5.11	18.6	0.04	0.06	5.69	39.4
平均 (tC/ha)	0-1,000	127±6.92	117±8.82	111±13.6	90.7±11.6	96.6±15.3	105±13.6	88.2±15.9	95.9±23.0	90.8±19.3	102±13.5
	1,000-2,000	141±11.7	141±12.2	129±13.1	115±14.1	129±12.8	124±11.9	102±7.24	102±9.79	114±17.8	122±14.9
	2,000 以上	155±12.3	152±11.5	146±11.6	135±13.7	141±11.8	142±11.3	0.00±0.00	0.00±0.00	140±14.8	112±64.0
	總計	141±14.1	137±17.7	129±17.5	114±22.2	122±23.2	124±18.5	63.3±55.2	65.8±57.1	115±24.5	112±27.8

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

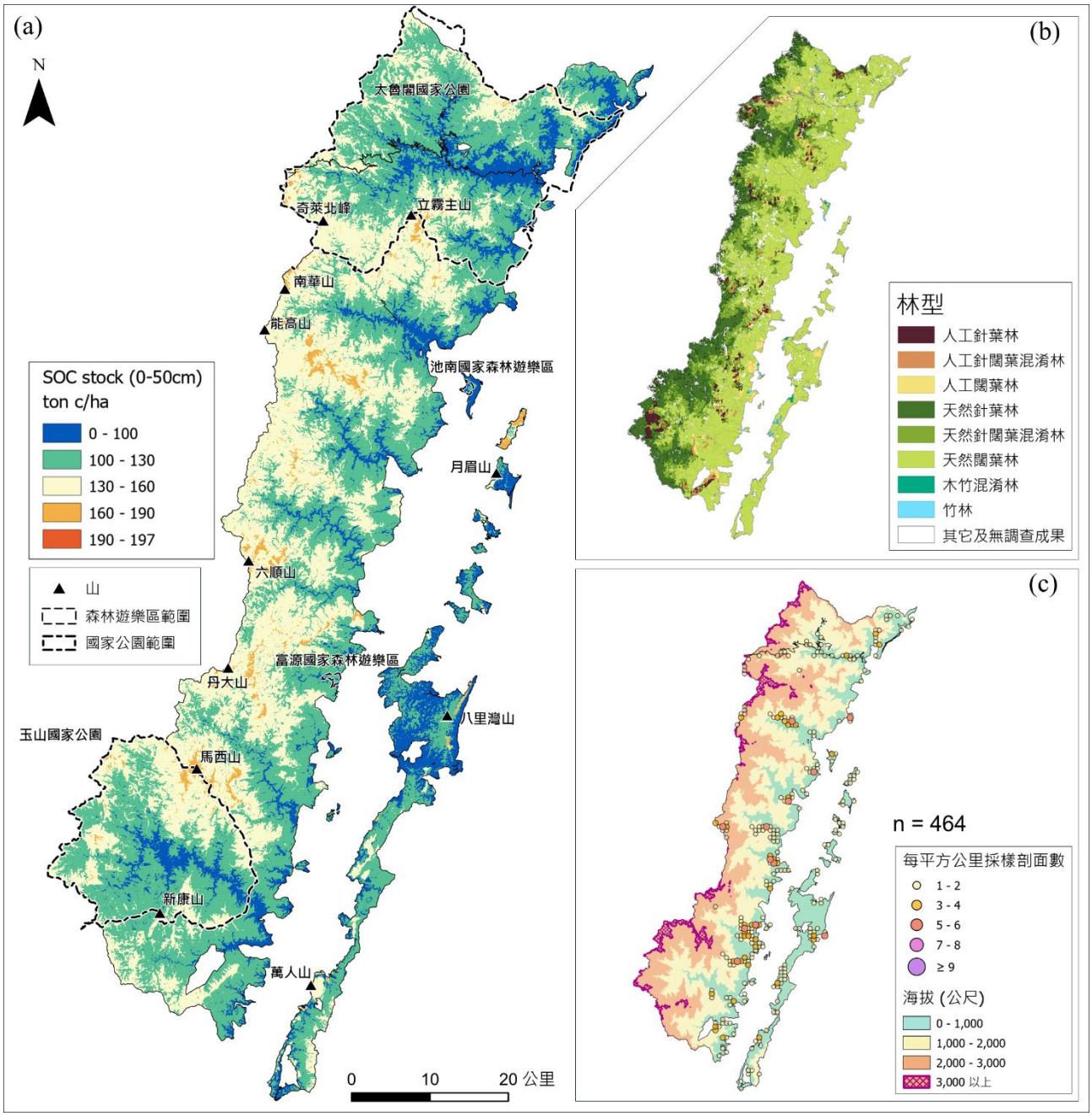


圖 3-5-55 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署林型空間分布圖及圖 (c) 花蓮分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-56），預測值的不確定性範圍為 5.5-207 ton C/ha。預測不確定性較大的區域 (50-207 ton C/ha) 集中於太魯閣國家公園北側及玉山國家公園東側，這些區域雖具較高的碳儲存潛力，但因地形限制導致採樣剖面稀疏（每平方公里 1-2 個剖面），以及土網分布，增加了預測的不確定性。

從海拔分布來看（表 3-5-31），採樣工作以低海拔為主，0-1,000 公尺有最多樣本 (n = 232)，1,000-2,000 公尺次之 (n = 138)，而 2,000 公尺以上區域的採樣數量最少 (n = 37)。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面數量最多 (n = 201)，其次為人工闊葉林 (n = 37) 及人工針闊葉混淆林 (n = 32)，採樣剖面分布的不均勻性直接影響預測結果的可靠程度。經由標準差的範圍可以發現，中海拔（1,000-2,000 公尺）的人工針葉林呈現較大的變異性（推估結果為 141±11.7 ton C/ha，原始樣本數為 24），而低海拔天然闊葉林儘管擁有豐富的採樣剖面 (n = 136)，其標準差仍達 105±13.6 ton C/ha，凸顯出土壤碳儲存特性在空間上的高度異質性。高海拔地區的天然針葉林 (n = 4) 也展現明顯的變異性 (135±13.7 ton C/ha)，這可能與複雜的地形及氣候條件有關。

表 3-5-31 花蓮分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	0	6	30	0	3	136	4	47	6	232
1000-2000	24	23	7	7	3	62	0	12	0	138
2000 以上	0	3	0	4	1	3	0	26	0	37
總計	24	32	37	11	7	201	4	85	6	407

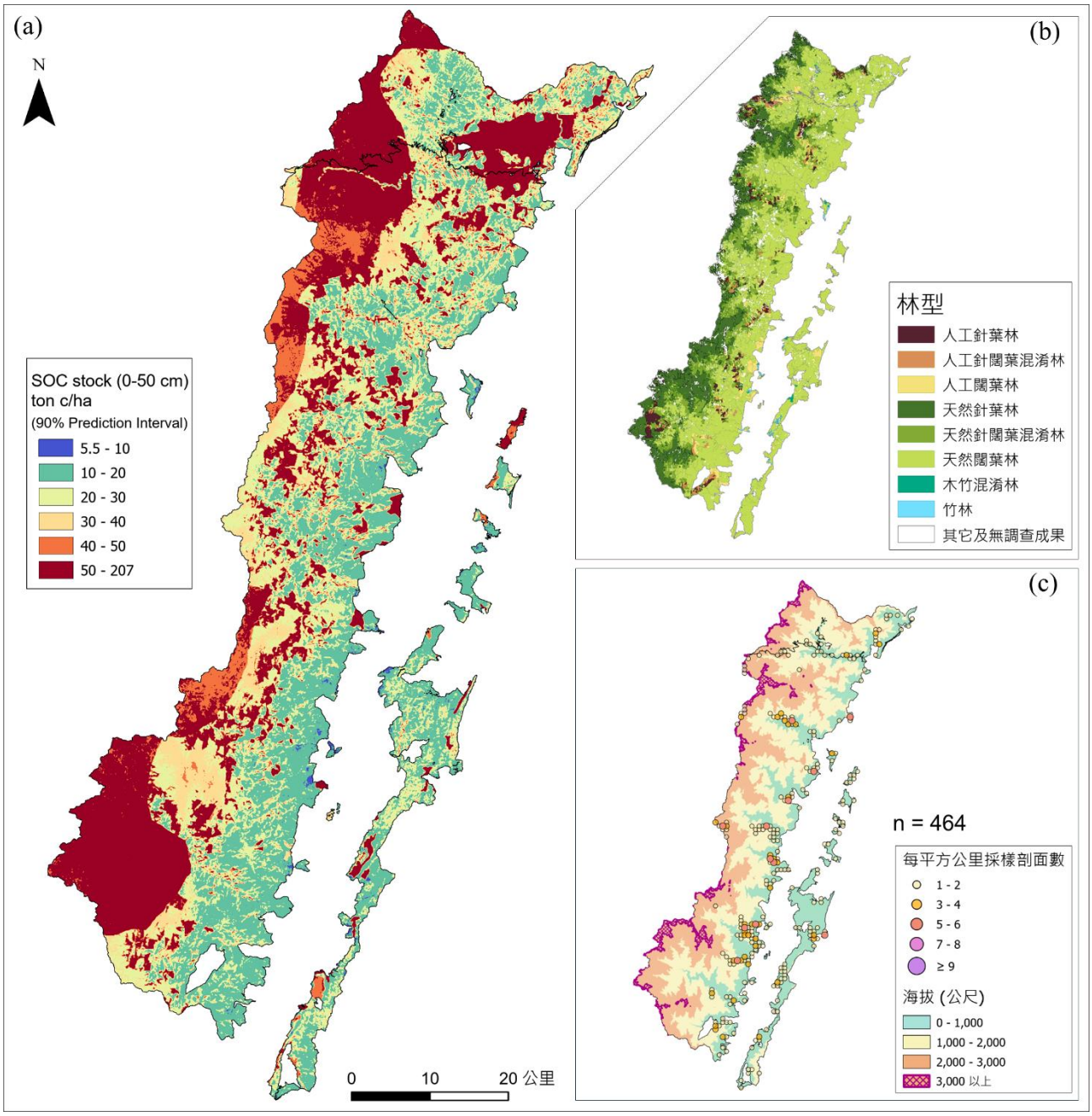


圖 3-5-56 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署林型空間分布圖及圖 (c) 花蓮分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 花蓮分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-57），有機碳儲存量範圍為 0-289 ton C/ha。較高有機碳儲存量區域 (190-289 ton C/ha) 集中於太魯閣國家公園北部及奇萊山脈西側；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 主要分布於池南國家森林遊樂區一帶；有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則沿海岸山脈呈帶狀分布。0-150 公分的分布趨勢相近，整體空間分布受地形、土壤深度及地質條件的影響。

海拔與林型的交叉分析顯示（表 3-5-32），0-100 公分土層中，0-1,000 公尺的碳儲存總量為 13.2 百萬公噸，以天然闊葉林為大宗 (10.7 百萬公噸)；1,000-2,000 公尺區間累積了 24.1 百萬公噸，其中天然闊葉林佔 15.6 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的儲存量為 22.0 百萬公噸，以天然針葉林最多 (10.1 百萬公噸)。0-150 公分土層的總有機碳儲存量略高（表 3-5-33），分別為低海拔 14.6 百萬公噸、中海拔 24.2 百萬公噸及高海拔 24.9 百萬公噸，總計 63.7 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量分析顯示，0-100 公分土層中，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (234±12.5 ton C/ha)，而木竹混淆林及竹林在該海拔無碳儲存。0-150 公分土層的分析結果指出，2,000 公尺以上的天然針葉林展現最高儲存量 (261±24.0 ton C/ha)。

表 3-5-32 花蓮分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.01	0.04	0.69	0.01	0.04	10.7	0.05	0.08	1.57	13.2
	1,000-2,000	0.52	0.42	0.76	0.45	3.34	15.6	0.01	0.01	3.05	24.1
	2,000 以上	1.17	0.46	0.21	10.1	4.18	1.91	0	0	3.99	22
	總計	1.7	0.91	1.65	10.6	7.56	28.2	0.06	0.09	8.61	59.4
平均 (tC/ha)	0-1,000	185±6.60	178±8.91	169±14.8	147±9.90	153±15.6	161±16.7	136±18.6	148±20.1	140±22.8	157±17.2
	1,000-2,000	208±11.5	203±12.0	194±13.4	174±13.4	190±13.2	187±13.9	164±11.0	164±9.78	172±20.8	184±16.4
	2,000 以上	234±12.5	224±11.2	218±10.4	204±14.6	210±11.6	213±11.1	0.00±0.00	0.00±0.00	210±18.3	168±95.8
	總計	209±24.5	202±23.0	194±24.6	175±28.8	184±28.7	187±26.2	99.9±87.6	104±90.3	174±35.1	170±41.0

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-33 花蓮分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.02	0.04	0.69	0.01	0.04	11.8	0.07	0.09	1.85	14.6
	1,000-2,000	0.53	0.47	0.7	0.62	3.31	15.3	0.01	0.01	3.3	24.2
	2,000 以上	1.18	0.52	0.19	12.9	4.04	1.84	0	0	4.23	24.9
	總計	1.73	1.03	1.58	13.6	7.39	28.8	0.08	0.1	9.38	63.7
平均 (tC/ha)	0-1,000	196±12.8	209±14.1	170±38.8	200±18.8	155±25.3	177±50.9	169±37.2	169±44.2	165±43.8	179±18.4
	1,000-2,000	213±15.4	230±16.0	179±19.5	238±21.6	188±20.6	184±19.3	182±16.5	181±15.7	186±23.7	198±22.9
	2,000 以上	237±25.5	254±23.0	202±24.6	261±24.0	203±24.2	205±23.7	0.00±0.00	0.00±0.00	223±29.0	176±102
	總計	215±20.4	231±22.4	184±16.1	233±30.7	182±24.7	188±14.7	117±102	117±101	191±29.2	184±40.1

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

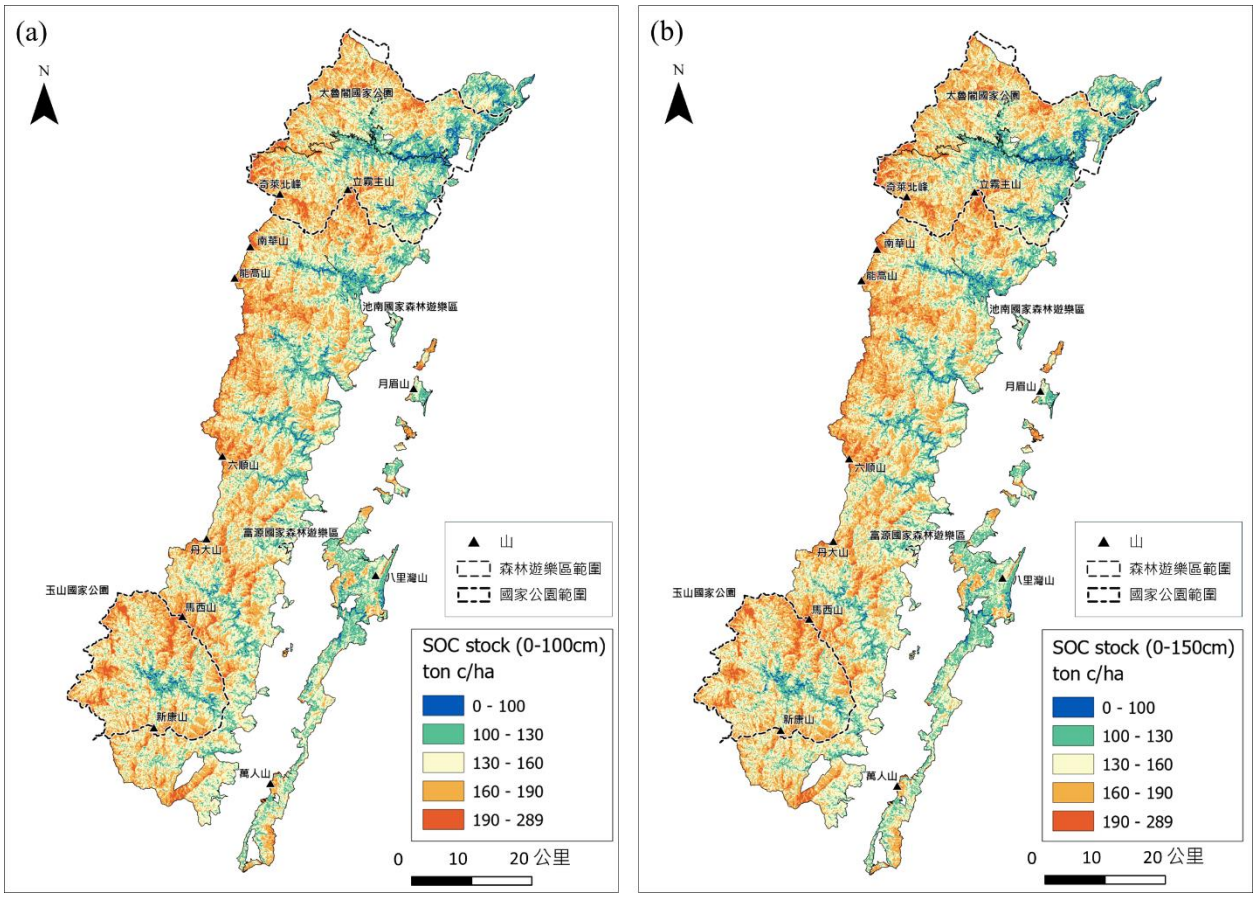


圖 3-5-57 花蓮分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 花蓮分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖指出（圖 3-5-58），0-100 公分土層的預測不確定性範圍為 9.5-373 ton C/ha，而 0-150 公分則為 9.5-650 ton C/ha。兩個深度的高不確定性區域均有出現在海岸山脈、太魯閣國家公園，這些地區採樣剖面密度偏低 (每平方公里 1-2 個採樣剖面)，使預測結果的準確度受到影響。

採樣剖面分布分析發現（表 3-5-34），0-100 公分土層的取樣以低海拔為主 (n = 192)，其次為中海拔 (n＝130)，高海拔地區樣本最少 (n＝28)。0-150 公分土層的採樣規模明顯較小，低海拔有 31 個樣本，中海拔 29 個，高海拔僅 6 個，導致 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存估計的不確定性提高。就林型分布而言，0-100 公分土層中天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝172)，而 0-150 公分則收集了 29 個樣本。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層的變異程度隨海拔升高而增加，高海拔人工針葉林的標準差達 234±12.5 ton C/ha。0-150 公分土層則呈現不同特徵，高海拔天然針葉林的變異性最大 (推估結果為 261±24.0 ton C/ha，原始樣本數為 1)。中海拔天然闊葉林雖有較多採樣剖面，但其標準差仍達 184±19.3 ton C/ha，顯示 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳含量的空間分布具有高度變異性。

表 3-5-34 花蓮分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	0	6	27	0	3	113	4	4	35	192
	1,000-2,000	23	23	5	7	3	59	0	0	10	130
	2,000 以上	0	3	0	4	0	0	0	0	21	28
	總計	23	32	32	11	6	172	4	4	66	350
0-150	0-1,000	0	0	3	0	0	20	0	0	8	31
	1,000-2,000	5	7	1	5	0	9	0	0	2	29
	2,000 以上	0	1	0	1	0	0	0	0	4	6
	總計	5	8	4	6	0	29	0	0	14	66

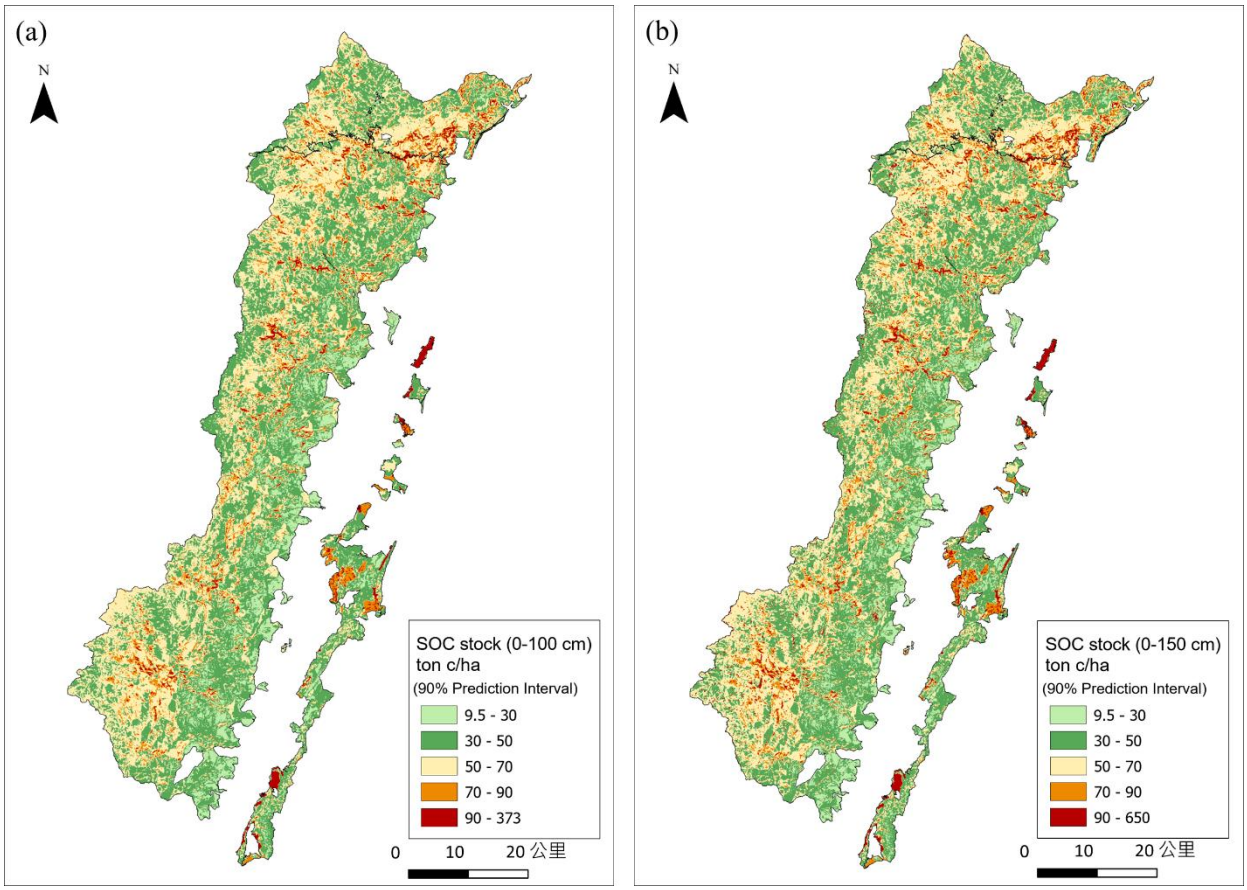


圖 3-5-58 花蓮分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 花蓮分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 花蓮分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

3. 南投分署

(1) 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

南投分署轄區位於臺灣本島中部，總面積為 85,054 公頃，年均溫 16.3℃，年均降雨量 1,966 毫米。轄區內天然林占 86%、人工林占 14%，以林相區分針葉樹林占 44%、針闊葉混淆林占 21%、闊葉樹林占 35%。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-59），有機碳儲存量在空間上呈現明顯的差異，變異範圍介於 0-138 ton C/ha。有機碳儲存量較高的區域 (120-138 ton C/ha) 主要分布於合歡山西側及卓社大山東側；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 於千卓萬山、卓杜大山、東鑾大山及馬博拉斯山一帶；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布於大橫屏山及清水溪地區。這種分布型態主要受到海拔高度、坡度及林型組成的影響。海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-35），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 2.25 百萬公噸，主要來自天然闊葉林的貢獻 (1.03 百萬公噸)；1,000-2,000 公尺區域的碳儲存總量為 6.54 百萬公噸，其中天然闊葉林儲存量為 3.80 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳儲存總量達 8.04 百萬公噸，以天然針葉林為主 (3.21 百萬公噸)。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (106±9.66 ton C/ha)，而低海拔木竹混淆林則為最低 (59.6±6.38 ton C/ha)。在變異程度方面，天然針葉林的標準差最大（推估結果為 76.6±15.0 ton C/ha，原始樣本數為 42），木竹混淆林則表現出較大的變異性（推估結果為 73.7±15.3 ton C/ha，原始樣本數為 38）。南投分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 16.8 百萬公噸。

表 3-5-35 南投分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.03	0.04	0.05	0.01	0.02	1.03	0.18	0.05	0.85	2.25
	1,000-2,000	0.33	0.27	0.19	0.07	0.26	3.8	0.03	0.04	1.56	6.54
	2,000 以上	0.61	0.17	0.06	3.21	0.83	1.27	0	0	1.89	8.04
	總計	0.97	0.48	0.29	3.28	1.11	6.1	0.2	0.09	4.29	16.8
平均 (tC/ha)	0-1,000	81.2±4.65	78.5±4.35	75.6±6.26	66.7±4.57	65.7±5.78	71.5±6.32	59.6±6.38	60.2±7.34	63.1±8.18	69.1±7.94
	1,000-2,000	92.1±8.55	87.1±8.57	90.2±8.85	69.2±8.70	72.8±9.38	84.8±8.91	71.5±5.97	77.2±5.36	77.0±11.4	80.2±8.51
	2,000 以上	106±9.66	99.8±8.91	102±7.63	93.9±9.04	85.9±8.77	96.1±8.78	90.0±3.00	93.8±0.00	95.0±11.2	95.9±6.21
	總計	93.2±12.6	88.5±10.7	89.4±13.4	76.6±15.0	74.8±10.2	84.1±12.3	73.7±15.3	77.1±16.8	78.4±16.0	81.7±13.6

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

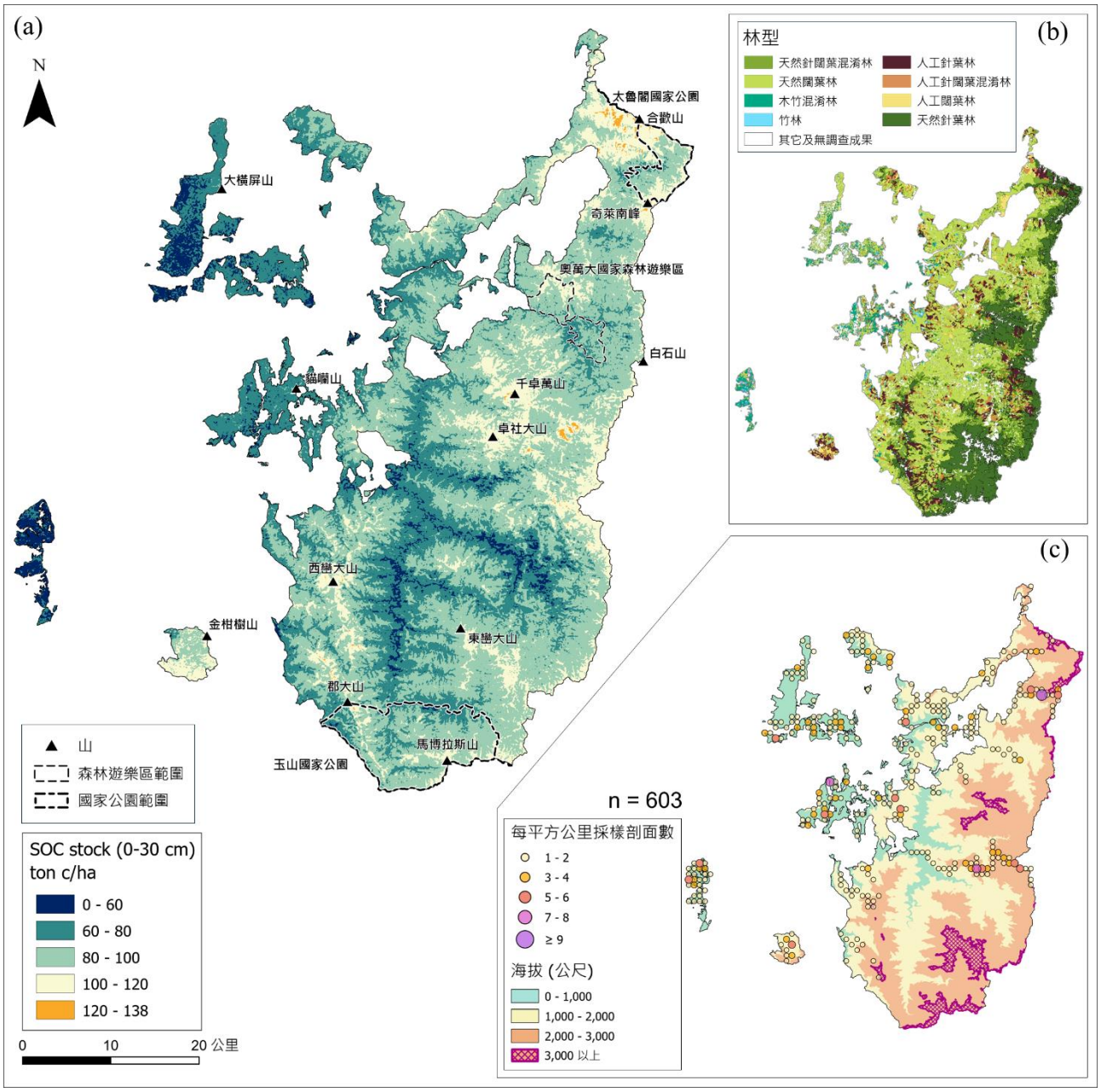


圖 3-5-59 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 南投分署林型空間分布圖及圖 (c) 南投分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-60），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 3.2-81 ton C/ha。高度不確定區域 (50-81 ton C/ha) 主要出現在分署東北側與南側，這些區域雖有較高的碳儲存潛力，但受限於地形陡峭（40%的林地坡度超過 35 度），導致採樣剖面分布稀疏，每平方公里 1-2 個剖面，也受到土綱分布影響。

採樣剖面分布特徵顯示（表 3-5-36），低海拔（0-1,000 公尺）區域擁有最多樣本 (n＝247)，中海拔（1,000-2,000 公尺）次之 (n＝200)，高海拔（2,000 公尺以上）地區則有 156 個採樣剖面。就林型分布而言，天然闊葉林的採樣剖面數量最多 (n = 165)，其次為天然針葉林與天然針闊葉混淆林（各 n＝42），使這些林型的有機碳儲存量推估較為可靠。變異程度分析發現，不同海拔的標準差呈現明顯差異。低海拔區域的標準差普遍較小，如人工針葉林的 81.2±4.65 ton C/ha (n = 8)；中海拔區域的變異性略高，以天然針闊葉混淆林的 72.8±9.38 ton C/ha (n = 12) 最為顯著；高海拔區域則展現較為穩定的變異性，其中天然針葉林 (n＝39) 的標準差為 93.9±9.04 ton C/ha，反映出高海拔森林生態系統的相對穩定性。

表 3-5-36 南投分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	8	7	11	0	0	64	36	96	25	247
1000-2000	33	23	10	3	12	86	2	18	13	200
2000 以上	22	10	2	39	30	15	0	38	0	156
總計	63	40	23	42	42	165	38	152	38	603

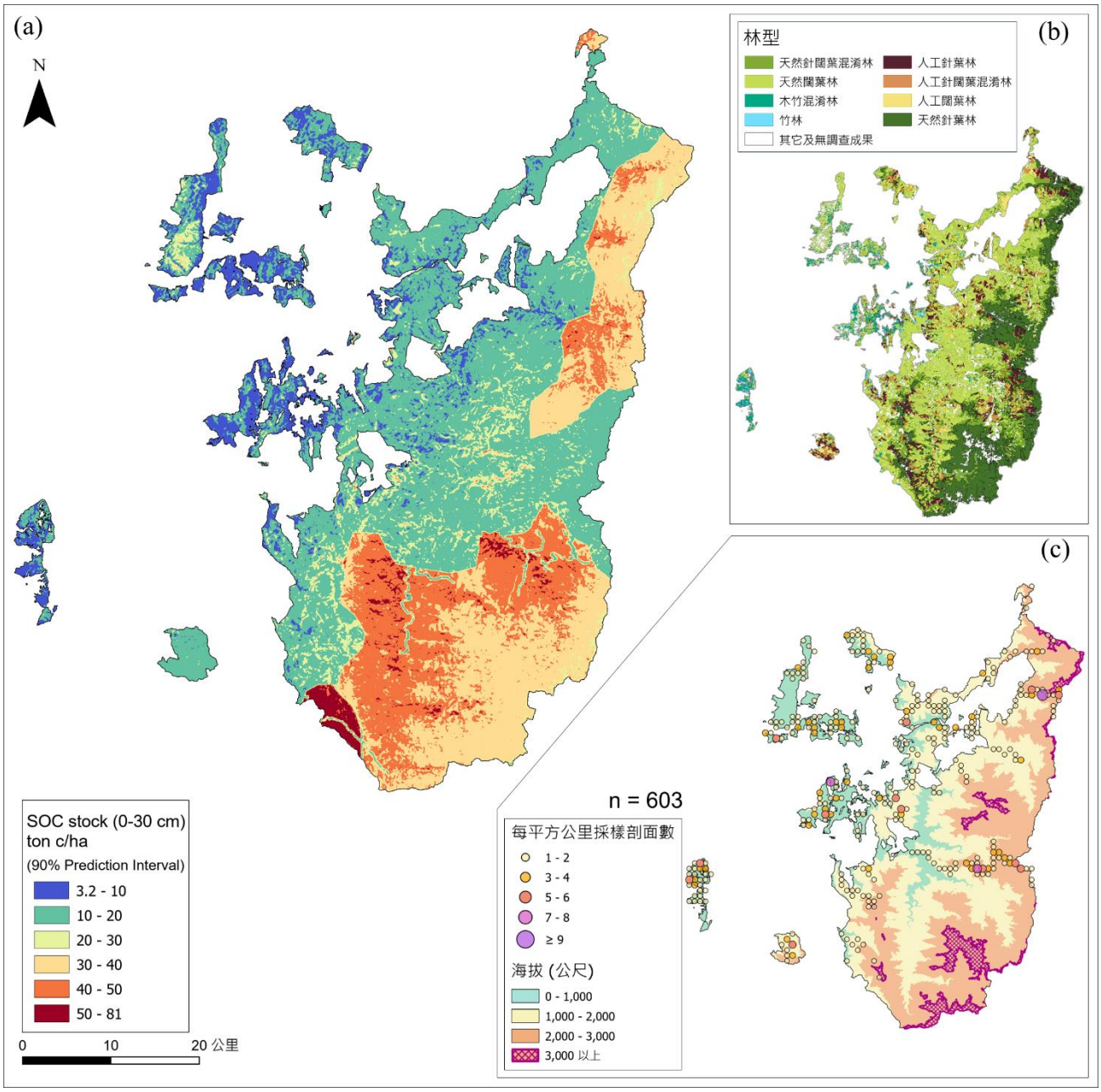


圖 3-5-60 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 南投分署林型空間分布圖及圖 (c) 南投分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-61），有機碳儲存量在空間上呈現顯著差異，變異範圍介於 0-198 ton C/ha。有機碳儲存量較高區域 (190-198 ton C/ha) 主要分布於合歡山東側及奇萊南峰；中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 集中於千卓萬山、卓杜大山、東鑾大山及馬博拉斯山一帶；有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則集中於大橫屏山周圍。這種分布型態主要受到地形地勢、土壤深度及林型組成的影響。海拔與林型的交叉分析顯示（表 3-5-37），0-1,000 公尺區域的碳儲存總量為 3.14 百萬公噸，其中天然闊葉林貢獻最多 (1.44 百萬公噸)；1,000-2,000 公尺區間的儲存量為 9.30 百萬公噸，天然闊葉林佔 5.36 百萬公噸；2,000 公尺以上的區域累積 11.5 百萬公噸，以天然針葉林為大宗，達 4.53 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (151±11.7 ton C/ha)，而低海拔木竹混淆林則為最低 (82.7±8.73 ton C/ha)。南投分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量達 24.0 百萬公噸。

表 3-5-37 南投分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.04	0.06	0.07	0.01	0.03	1.44	0.25	0.07	1.18	3.14
	1,000-2,000	0.46	0.4	0.26	0.1	0.42	5.36	0.04	0.05	2.22	9.3
	2,000 以上	0.87	0.25	0.08	4.53	1.31	1.8	0	0	2.7	11.5
	總計	1.38	0.71	0.4	4.64	1.75	8.6	0.28	0.12	6.09	24
平均 (tC/ha)	0-1,000	114±6.57	116±6.69	105±9.03	92.8±6.99	104±8.02	100±8.86	82.7±8.73	83.5±10.4	87.9±12.0	98.5±12.5
	1,000-2,000	130±10.4	128±10.7	126±11.1	98.9±11.1	116±11.8	119±11.3	98.1±8.23	106±7.27	109±15.3	115±12.2
	2,000 以上	151±11.7	147±10.7	143±9.04	133±11.5	135±10.8	136±10.4	125±4.62	127±0.00	136±14.1	137±8.53
	總計	132±18.3	130±15.6	125±18.7	108±21.4	118±15.5	119±18.1	102±21.4	105±21.8	111±24.0	117±19.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

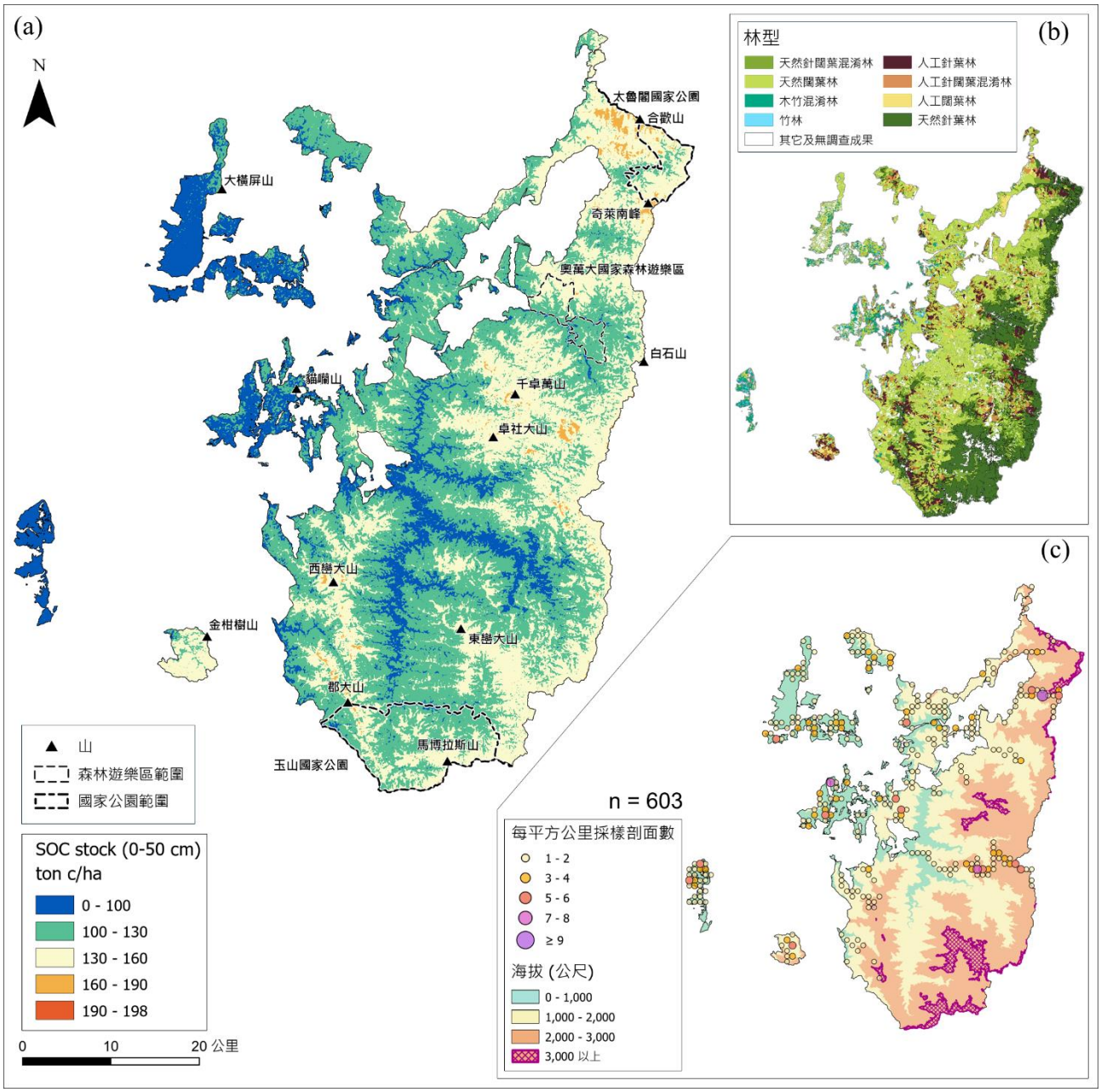


圖 3-5-61 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 南投分署林型空間分布圖及圖 (c) 南投分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-62），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 5.2-159 ton C/ha。高度不確定區域 (50-159 ton C/ha) 主要集中於分署東側與南側，這些區域雖具備較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，導致採樣剖面密度較低 (每平方公里 1-2 個剖面)，以及土網分布影響，增加預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-38），低海拔區域 (0-1,000 公尺) 擁有最多樣本 (n = 198)，中海拔 (1,000-2,000 公尺) 次之 (n = 167)，高海拔地區 (2,000 公尺以上) 則有 141 個採樣剖面。就林型而言，天然闊葉林的採樣數量最高 (n＝131)，其次為人工針葉林 (n＝57)，造成採樣剖面分布不均的現象。經由標準差的範圍可以發現，各林型在各海拔帶的變異程度存在差異。低海拔區域的變異性相對較小，如人工針闊葉混淆林的標準差為 116±6.69 ton C/ha (n = 4)；中海拔區域的天然針闊葉混淆林展現較大變異性 (推估結果為 116±11.8 ton C/ha，原始樣本數為 10)；而高海拔的天然針葉林 (n＝37) 則呈現相對穩定的變異範圍 (133±11.5 ton C/ha)。

表 3-5-38 南投分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	0	6	30	0	3	136	4	47	6	232
1000-2000	24	23	7	7	3	62	0	12	0	138
2000 以上	0	3	0	4	1	3	0	26	0	37
總計	24	32	37	11	7	201	4	85	6	407

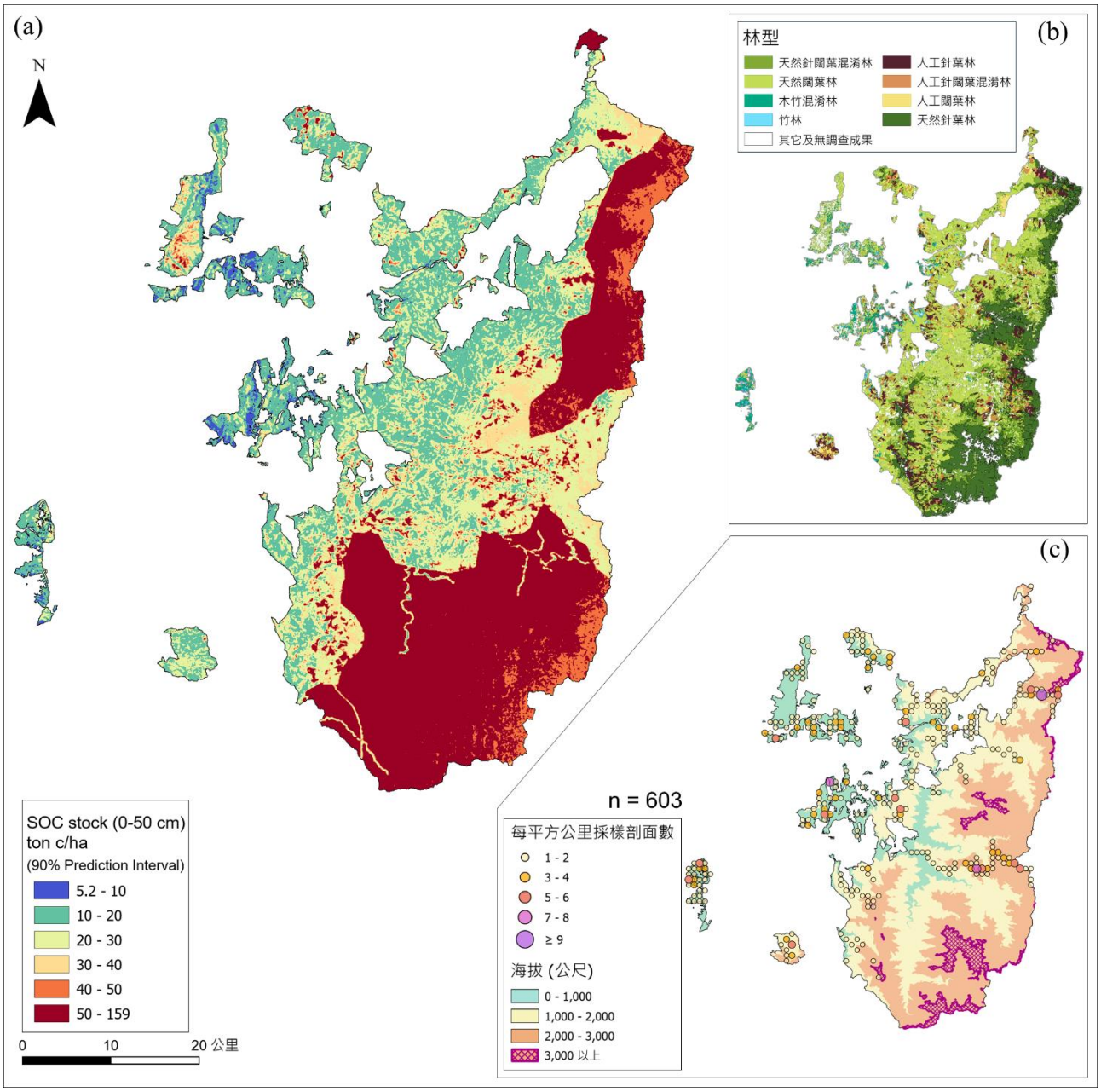


圖 3-5-62 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 南投分署林型空間分布圖及圖 (c) 南投分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 南投分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-63），有機碳儲存量範圍均為 0-295 ton C/ha。有機碳儲存量較高區域 (190-295 ton C/ha) 主要集中於合歡山東側及丹大林道周邊；中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 分布於奧萬大國家森林遊樂區至水里山區；有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於大橫屏山及日月潭周邊。兩個深度的空間分布型態相近，皆受到地形起伏及林型分布的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-39），0-100 公分土層中，0-1,000 公尺的碳儲存總量為 5.08 百萬公噸，其中天然闊葉林貢獻 2.30 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間累積了 14.7 百萬公噸，天然闊葉林佔 8.40 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的儲存量為 17.9 百萬公噸，以天然針葉林為主 (7.01 百萬公噸)。0-150 公分土層的總量略高（表 3-5-40），分別為低海拔 5.79 百萬公噸、中海拔 14.8 百萬公噸及高海拔 19.6 百萬公噸，總計 40.2 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量分析顯示，0-100 公分土層中，2,000 公尺以上的人工針葉林展現最高值 (234±13.1 ton C/ha)，低海拔木竹混淆林則為最低 (139±12.5 ton C/ha)。在 0-150 公分土層中，2,000 公尺以上的天然針葉林具有最高的儲存量 (258±25.1 ton C/ha)。

表 3-5-39 南投分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.07	0.09	0.11	0.02	0.04	2.3	0.41	0.11	1.93	5.08
	1,000-2,000	0.73	0.62	0.4	0.17	0.67	8.4	0.06	0.08	3.57	14.7
	2,000 以上	1.36	0.39	0.12	7.01	2.02	2.8	0	0	4.18	17.9
	總計	2.15	1.1	0.63	7.2	2.73	13.5	0.47	0.2	9.67	37.6
平均 (t C/ha)	0-1,000	181±9.88	179±10.1	167±14.5	152±10.3	165±12.9	160±13.4	139±12.5	140±13.7	144±17.6	158±15.8
	1,000-2,000	205±11.7	199±13.0	197±14.0	169±13.5	186±14.4	187±14.3	158±12.6	168±10.3	176±18.9	183±16.0
	2,000 以上	234±13.1	225±11.2	220±9.63	205±13.7	208±12.3	211±11.5	196±7.73	199±0.00	210±17.8	212±12.3
	總計	206±26.8	201±23.2	194±26.7	175±27.3	186±21.7	186±25.9	164±29.2	169±29.5	177±33.3	184±27.1

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-40 南投分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.08	0.12	0.11	0.03	0.04	2.5	0.51	0.14	2.28	5.79
	1,000-2,000	0.76	0.71	0.38	0.21	0.65	8.21	0.07	0.09	3.72	14.8
	2,000 以上	1.37	0.44	0.12	8.83	1.92	2.6	0	0	4.34	19.6
	總計	2.21	1.26	0.61	9.07	2.62	13.3	0.57	0.23	10.3	40.2
平均 (tC/ha)	0-1,000	203±14.9	222±14.7	171±12.6	230±12.6	179±14.3	173±13.9	170±11.5	167±13.1	170±16.6	187±24.5
	1,000-2,000	214±21.2	228±23.7	187±22.0	217±21.8	181±26.9	183±23.6	184±14.0	183±14.1	184±27.9	196±18.3
	2,000 以上	238±28.7	252±27.5	208±21.6	258±25.1	198±28.2	197±27.2	230±7.20	190±0.00	219±31.5	221±24.8
	總計	218±17.7	234±15.8	189±18.5	235±21.1	186±10.7	184±11.8	195±31.7	180±11.9	191±25.0	201±18.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

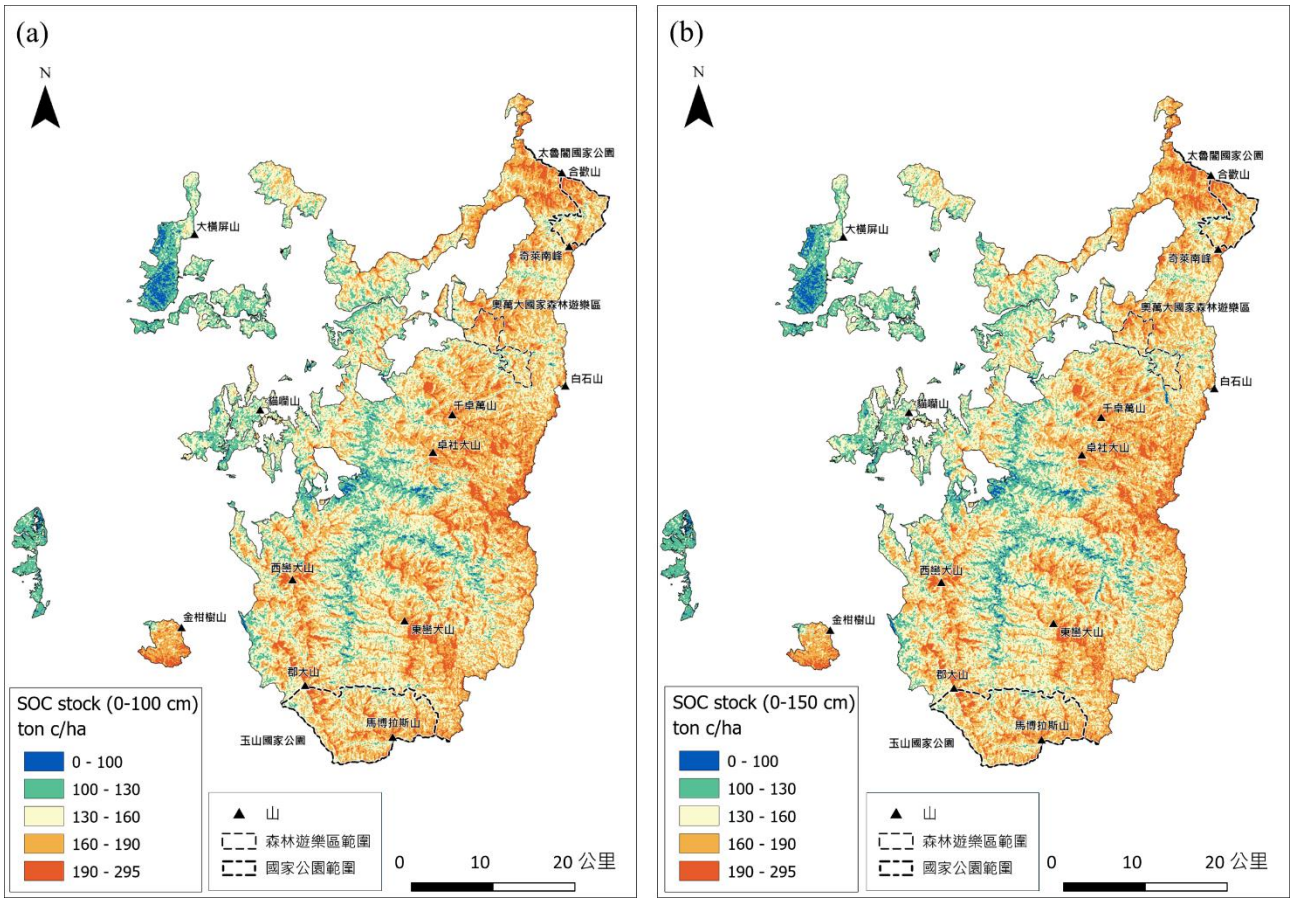


圖 3-5-63 南投分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 南投分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 南投分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-64），0-100 公分土層的預測不確定性範圍為 9.2-219 ton C/ha，而 0-150 公分則為 9.2-679 ton C/ha。兩個深度的高不確定性區域主要出現在丹大林道及奧萬大森林遊樂區周邊，這些地區地形陡峭，導致採樣剖面密度較低 (每平方公里 1-2 個剖面)。

採樣剖面分布分析指出（表 3-5-41），0-100 公分土層的取樣以低海拔最多 (n = 194)，中海拔次之 (n = 162)，高海拔最少 (n = 133)。0-150 公分土層的採樣規模明顯縮減，低海拔僅 52 個樣本，中海拔 39 個，高海拔 29 個，使 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量的推估存在較大不確定性。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面數在 0-100 公分最多 (n = 127)，0-150 公分則降至 31 個。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層的變異程度隨海拔升高而增加，如人工針葉林從低海拔的 181±9.88 ton C/ha 上升至高海拔的 234±13.1 ton C/ha。0-150 公分土層則呈現不同特徵，高海拔天然針葉林的變異性最大（推估結果為 258±25.1 ton C/ha，原始樣本數為 10）。這種變異性的差異顯示出，0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存特性在不同海拔及林型間具有明顯的空間異質性。

表 3-5-41 南投分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	8	4	9	0	0	46	31	19	77	194
	1,000-2,000	28	18	7	3	10	69	0	13	14	162
	2,000 以上	21	9	2	35	24	12	0	0	30	133
	總計	57	31	18	38	34	127	31	32	121	489
0-150	0-1,000	3	1	3	0	0	15	5	4	21	52
	1,000-2,000	3	7	3	2	7	14	0	2	1	39
	2,000 以上	5	1	2	10	2	2	0	0	7	29
	總計	11	9	8	12	9	31	5	6	29	120

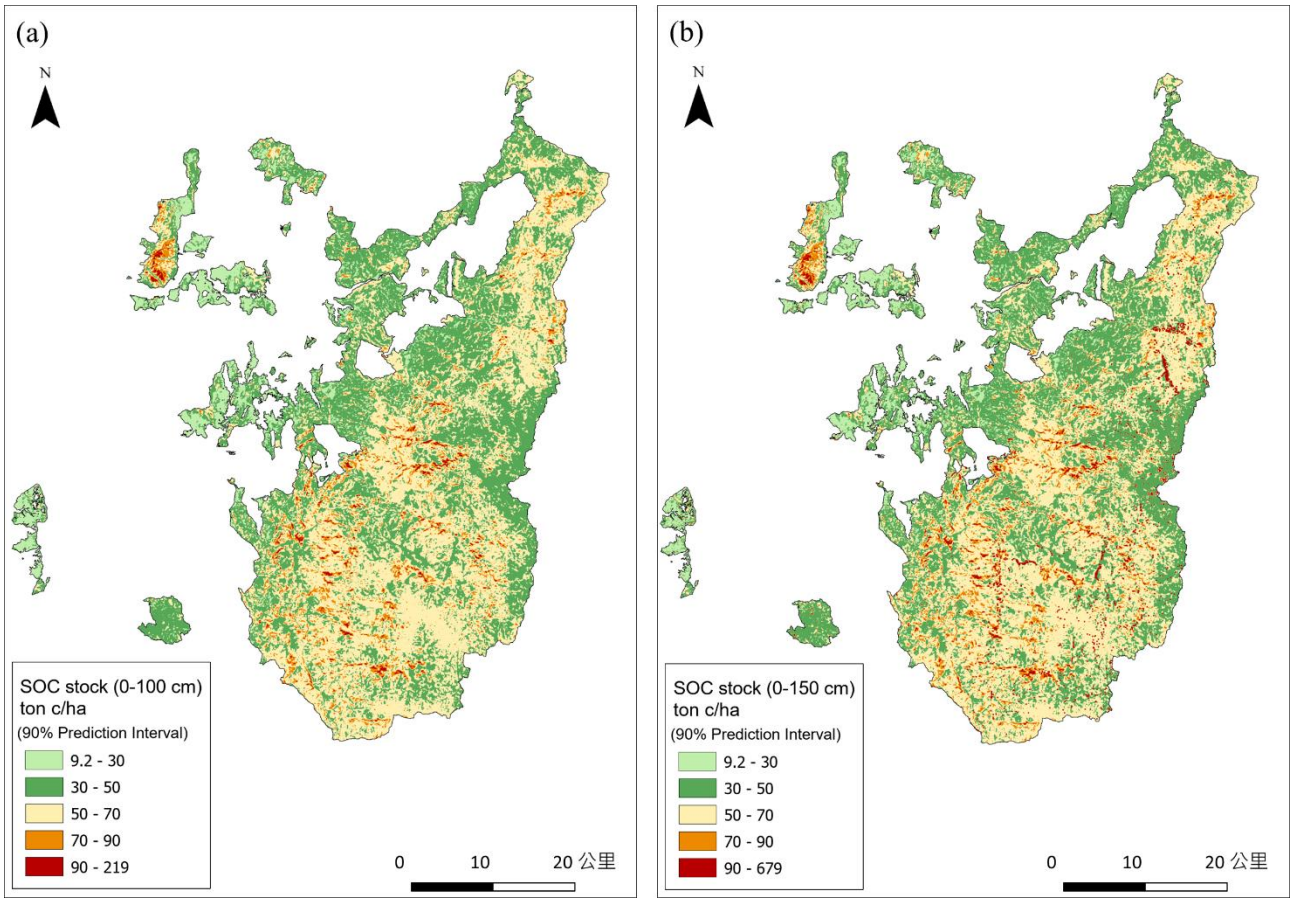


圖 3-5-64 南投分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 南投分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 南投分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

4. 屏東分署

(1) 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

屏東分署轄區位於臺灣本島南部，北接嘉義分署，東以中央山脈陵脊與臺東分署為界，西鄰臺灣海峽，南面巴士海峽，年均溫 19.4℃，年均降雨量 2,455 毫米，總面積約 228,125 公頃。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-65），有機碳儲存量在空間上呈現明顯差異，變異範圍在 0-145 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-145 ton C/ha) 主要出現在北大武山、關山；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 分布在關山至卑南主山一帶；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則集中於旗尾山西側、墾丁國家公園。這種分布型態主要受到地形條件、林型組成及土壤特性的影響。海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-42），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 6.73 百萬公噸，以天然闊葉林及人工闊葉林為主，分別貢獻 2.64 百萬公噸及 1.81 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區域的碳儲存總量為 7.60 百萬公噸，其中天然闊葉林儲存量為 4.80 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳儲存總量為 2.43 百萬公噸，以天然闊葉林及天然針葉林為主，分別為 0.83 百萬公噸及 0.59 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 117±7.11 ton C/ha，原始樣本數為 5），而低海拔竹林則為最低（推估結果為 60.6±6.04 ton C/ha，原始樣本數為 93）。屏東分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 16.8 百萬公噸。

表 3-5-42 屏東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.01	0.01	1.81	0	0	2.64	0.27	0.3	1.7	6.73
	1,000-2,000	0.12	0.12	0.76	0.04	0.1	4.8	0.02	0.02	1.63	7.6
	2,000 以上	0.14	0.08	0.05	0.59	0.23	0.83	0	0	0.52	2.43
	總計	0.26	0.21	2.62	0.62	0.33	8.28	0.28	0.32	3.85	16.8
平均 (t C/ha)	0-1,000	88.3±5.06	85.2±5.07	78.6±7.38	66.0±5.81	65.9±7.72	78.1±8.11	65.5±5.42	60.6±6.04	68.7±9.21	73.0±9.82
	1,000-2,000	104±7.40	97.3±7.56	97.0±7.38	87.7±10.7	86.8±10.5	97.1±8.98	77.1±5.94	84.1±5.68	87.3±10.2	91.0±8.46
	2,000 以上	117±7.11	110±6.35	111±7.29	104±8.85	99.0±8.14	109±6.95	0.00±0.00	0.00±0.00	103±10.4	83.8±47.8
	總計	103±14.3	97.7±12.6	95.4±16.0	85.9±19.0	83.9±16.7	94.8±15.8	47.5±41.6	48.2±43.4	86.5±17.4	82.6±21.9

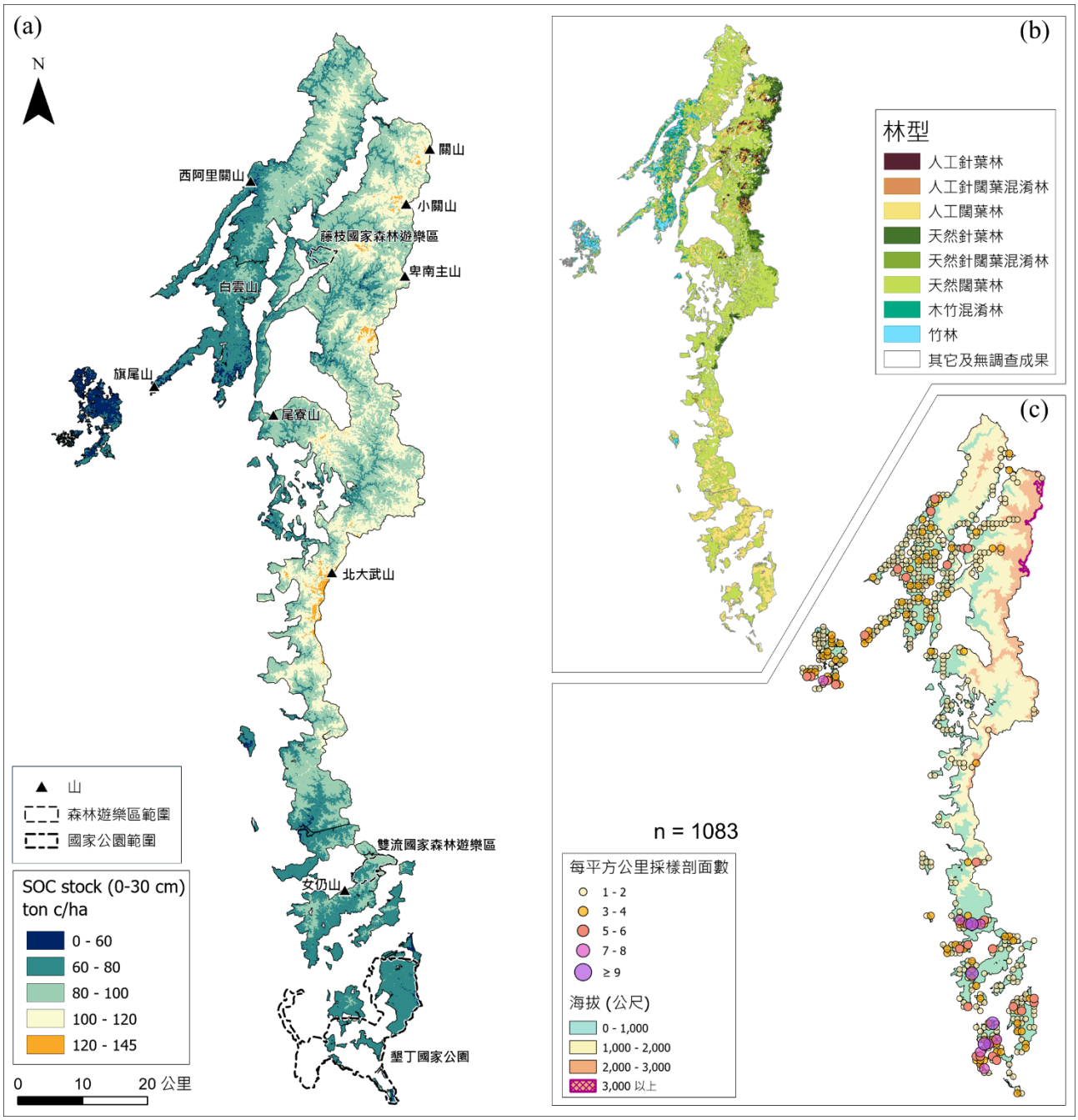


圖 3-5-65 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 屏東分署林型空間分布圖及圖 (c) 屏東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-66），預測值的不確定性在空間上呈現差異，變異範圍為 3.5-120 ton C/ha。高度不確定區域 (50-120 ton C/ha) 主要分布於北大武山一帶，這些地區雖具有較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，導致採樣剖面密度較低（每平方公里 1-2 個剖面），使預測結果的不確定性增加。

從海拔分布來看（表 3-5-43），採樣工作高度集中於低海拔地區 (n＝953)，中海拔次之 (n = 107)，高海拔樣本最少 (n = 23)。就林型而言，人工闊葉林的採樣剖面最多 (n = 319)，其次為天然闊葉林 (n = 307)，而天然針葉林及天然針闊葉混淆林的採樣剖面則相對較少（分別為 n＝9 及 n＝6），顯示中高海拔林型的有機碳儲存量估計可能存在較大不確定性。經由標準差的範圍可以發現，各海拔和林型的變異程度有所差異。低海拔區域的標準差普遍較小，如人工針葉林的 88.3±5.06 ton C/ha；中海拔區域的變異性略高，如天然針闊葉混淆林的 86.8±10.5 ton C/ha；高海拔區域的天然針葉林則展現中等程度的變異性 (104±8.85 ton C/ha)，這種變異模式反映了地形複雜度對土壤碳儲存特性的影響。

表 3-5-43 屏東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	3	1	303	0	3	252	71	227	93	953
1000-2000	13	5	16	0	3	52	5	11	2	107
2000以上	5	2	0	9	0	3	0	4	0	23
總計	21	8	319	9	6	307	76	242	95	1083

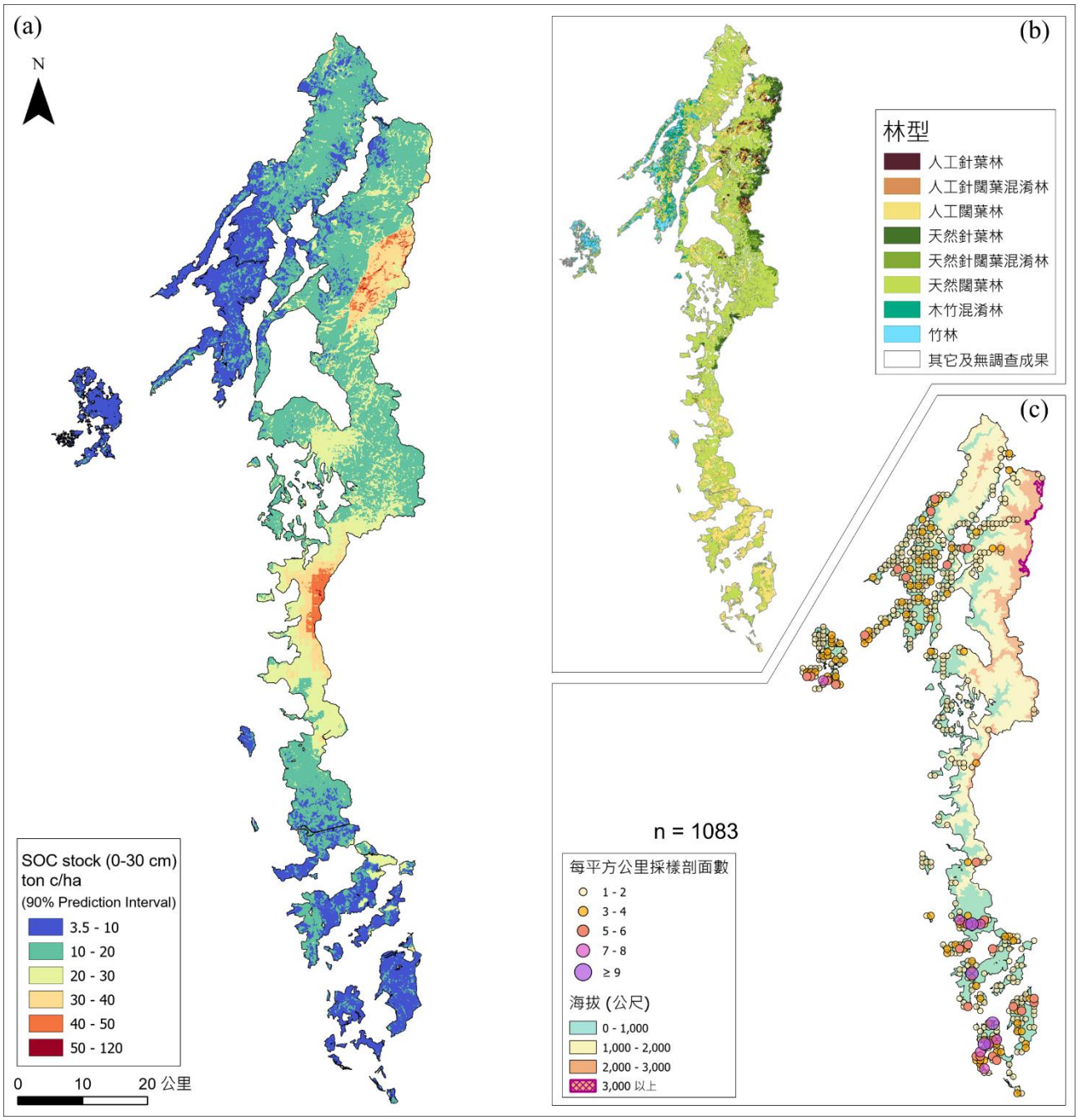


圖 3-5-66 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 屏東分署林型空間分布圖及圖 (c) 屏東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-67），有機碳儲存量在空間上呈現明顯差異，變異範圍介於 0-202 ton C/ha。較高有機碳儲存量區域 (190-202 ton C/ha) 主要集中於北大武山、小關山一帶；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 分布於關山至卑南主山一帶；低有機碳儲存量區域 (0-100 ton C/ha) 則集中於旗尾山西側及恆春半島南端。這種分布型態主要受到地形地勢、土壤深度及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-44），0-1,000 公尺區域的碳儲存總量為 9.40 百萬公噸，其中天然闊葉林和人工闊葉林分別貢獻 3.71 百萬公噸及 2.53 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間的總量為 10.7 百萬公噸，以天然闊葉林為主，達 6.73 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的儲存量為 3.44 百萬公噸，主要來自天然闊葉林 (1.17 百萬公噸) 及天然針葉林 (0.82 百萬公噸)。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (165±8.70 ton C/ha)，而低海拔竹林則為最低 (83.5±9.18 ton C/ha)。屏東分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量達 23.5 百萬公噸。

表 3-5-44 屏東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.01	0.01	2.53	0	0	3.71	0.37	0.41	2.35	9.4
	1,000-2,000	0.16	0.18	1.06	0.05	0.15	6.73	0.02	0.03	2.28	10.7
	2,000 以上	0.19	0.11	0.07	0.82	0.36	1.17	0	0	0.73	3.44
	總計	0.37	0.3	3.65	0.87	0.51	11.6	0.39	0.44	5.36	23.5
平均 (tC/ha)	0-1,000	124±7.42	125±8.79	110±11.0	92.0±8.12	101±8.78	110±11.8	90.8±7.62	83.5±9.18	95.1±14.0	103±14.7
	1,000-2,000	146±10.2	142±10.6	135±10.5	122±13.9	136±13.5	136±12.6	106±9.33	115±7.78	122±14.6	129±13.3
	2,000 以上	165±8.70	162±7.69	155±8.78	145±11.8	152±10.7	153±9.10	0.00±0.00	0.00±0.00	146±13.7	120±68.3
	總計	145±20.7	143±18.3	133±22.7	120±26.7	129±26.4	133±22.0	65.5±57.2	66.2±59.5	121±25.7	117±31.0

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

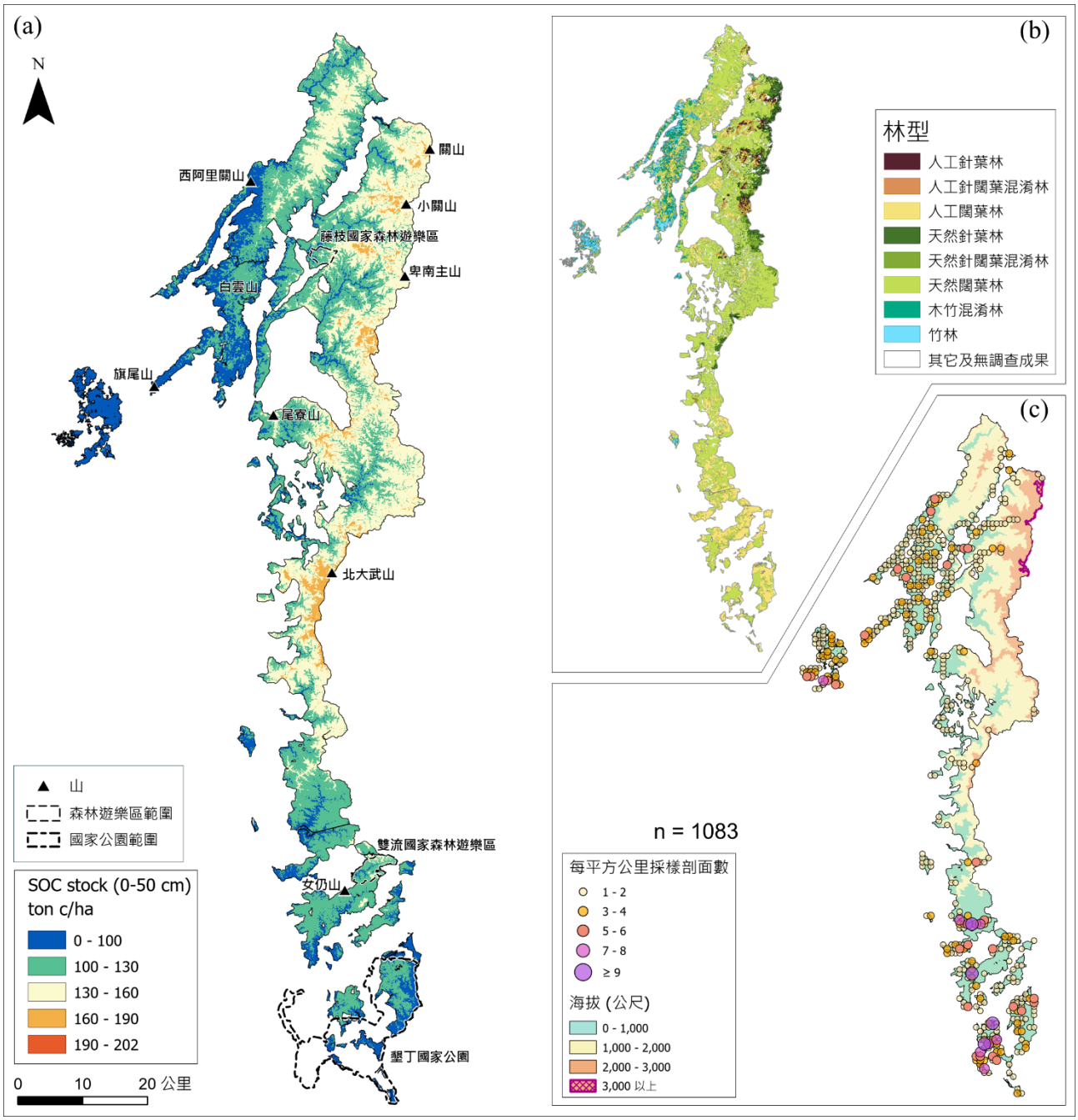


圖 3-5-67 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 屏東分署林型空間分布圖及圖 (c) 屏東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-68），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 5.1-206 ton C/ha。高度不確定區域 (50-206 ton C/ha) 主要分布於北大武山及關山地區，這些區域雖具備較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，限制採樣活動，使每平方公里的採樣剖面僅有 1-2 個，而關山一帶因土綱分布而造成。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-45），取樣工作主要集中於低海拔 (n = 759)，中海拔樣本數量明顯減少 (n = 101)，高海拔區域的採樣更為稀少 (n = 19)。就林型而言，天然闊葉林具有最多採樣剖面 (n = 243)，其次為人工闊葉林 (n = 220)，而天然針葉林及天然針闊葉混淆林的樣本數量較少 (均為 n < 10)，導致高海拔地區的預測結果存在較大不確定性。經由標準差的範圍可以發現，各林型在各海拔帶的變異程度有所差異。低海拔區域的人工針葉林展現較小的變異性（推估結果為 124±7.42 ton C/ha，原始樣本數為 3），中海拔天然針葉林則顯示較大的變異幅度 (122±13.9 ton C/ha)。特別的是，高海拔天然針葉林的標準差達 145±11.8 ton C/ha (n = 9)，反映出有機碳儲存量在高海拔地區的空間異質性。

表 3-5-45 屏東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	3	1	205	0	3	192	69	88	198	759
1000-2000	11	4	15	0	3	50	5	2	11	101
2000 以上	3	2	0	9	0	1	0	0	4	19
總計	17	7	220	9	6	243	74	90	213	879

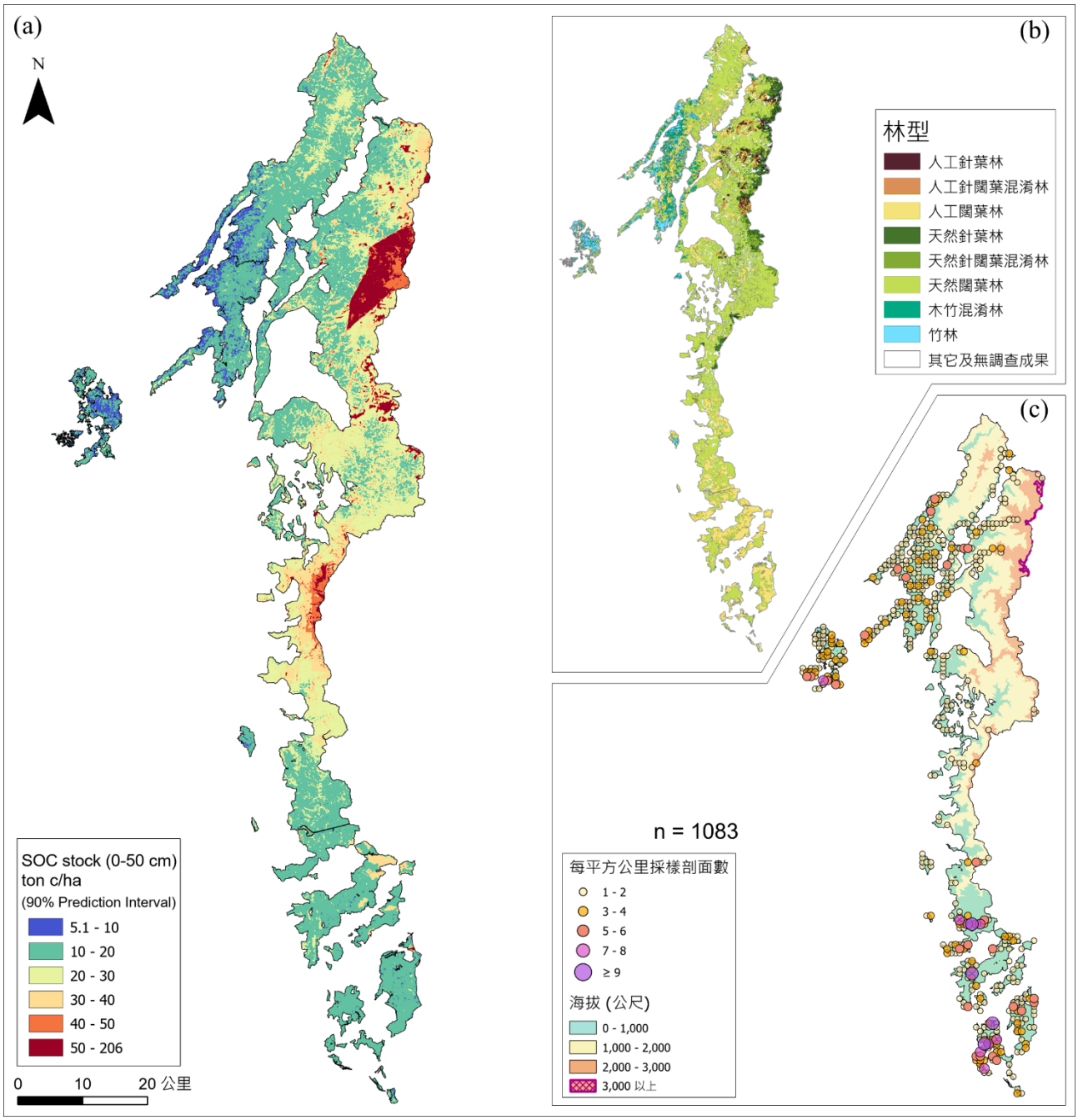


圖 3-5-68 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 屏東分署林型空間分布圖及圖 (c) 屏東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 x 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 屏東分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-69），有機碳儲存量範圍分別為 0-271 ton C/ha 及 0-270 ton C/ha。兩個深度的空間分布型態相近，有機碳儲存量較高區域 (190-270 ton C/ha) 主要集中於海拔大於 3000 公尺區域；中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 分布於關山至卑南主山一帶；有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則集中於旗尾山西側及恆春半島南端。空間分布型態反映出地形條件及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析顯示（表 3-5-46），0-100 公分土層中，0-1,000 公尺的碳儲存總量為 14.1 百萬公噸，其中天然闊葉林貢獻 5.42 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間的總量為 15.1 百萬公噸，天然闊葉林佔 9.47 百萬公噸；2,000 公尺以上區域為 4.88 百萬公噸，主要來自天然闊葉林（1.66 百萬公噸）。0-150 公分土層的碳儲存總量略高（表 3-5-47），分別為低海拔 14.5 百萬公噸、中海拔 15.2 百萬公噸及高海拔 5.31 百萬公噸，總計 35.0 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，0-100 公分土層中，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (235±11.0 ton C/ha)，低海拔竹林則為最低 (134±9.96 ton C/ha)（表 5-2-26）。0-150 公分土層的分析結果顯示，2,000 公尺以上的天然針葉林展現最高儲存量 (273±24.8 ton C/ha)（表 5-2-27）。

表 3-5-46 屏東分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.02	0.02	3.82	0	0	5.42	0.57	0.65	3.54	14.1
	1,000-2,000	0.24	0.26	1.51	0.07	0.21	9.47	0.03	0.05	3.25	15.1
	2,000 以上	0.27	0.16	0.09	1.16	0.5	1.66	0	0	1.04	4.88
	總計	0.53	0.43	5.43	1.23	0.71	16.6	0.61	0.7	7.83	34
平均 (t C/ha)	0-1,000	184±8.05	187±18.1	166±14.5	139±10.8	150±10.0	160±13.1	140±10.1	134±9.96	143±17.2	156±19.7
	1,000-2,000	214±12.0	204±12.4	193±11.2	174±12.9	190±14.2	191±14.0	164±10.4	174±12.0	174±16.9	186±16.3
	2,000 以上	235±11.0	228±9.76	222±11.7	206±13.6	213±12.0	218±10.3	0.00±0.00	0.00±0.00	208±18.5	170±96.8
	總計	211±25.5	206±20.6	194±28.0	173±33.5	184±32.2	190±28.9	101±88.5	102±91.0	175±32.5	171±42.3

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-47 屏東分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.02	0.02	3.63	0	0	5.47	0.66	0.76	3.91	14.5
	1,000-2,000	0.26	0.3	1.43	0.1	0.21	9.37	0.04	0.05	3.47	15.2
	2,000 以上	0.29	0.18	0.09	1.54	0.49	1.6	0	0	1.12	5.31
	總計	0.57	0.51	5.14	1.64	0.7	16.4	0.7	0.81	8.5	35
平均 (tC/ha)	0-1,000	204±13.9	223±15.2	158±11.9	183±15.1	161±19.8	161±15.1	161±12.5	156±10.5	158±18.1	174±24.4
	1,000-2,000	234±16.0	243±16.7	182±15.6	235±23.2	185±23.3	189±17.8	185±11.1	191±9.93	186±20.8	203±25.6
	2,000 以上	248±23.3	258±25.1	214±23.3	273±24.8	209±22.0	210±19.2	0.00±0.00	0.00±0.00	225±32.7	182±105
	總計	229±22.3	241±17.2	185±28.2	230±45.3	185±24.4	187±24.4	115±101	116±102	190±33.6	186±44.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

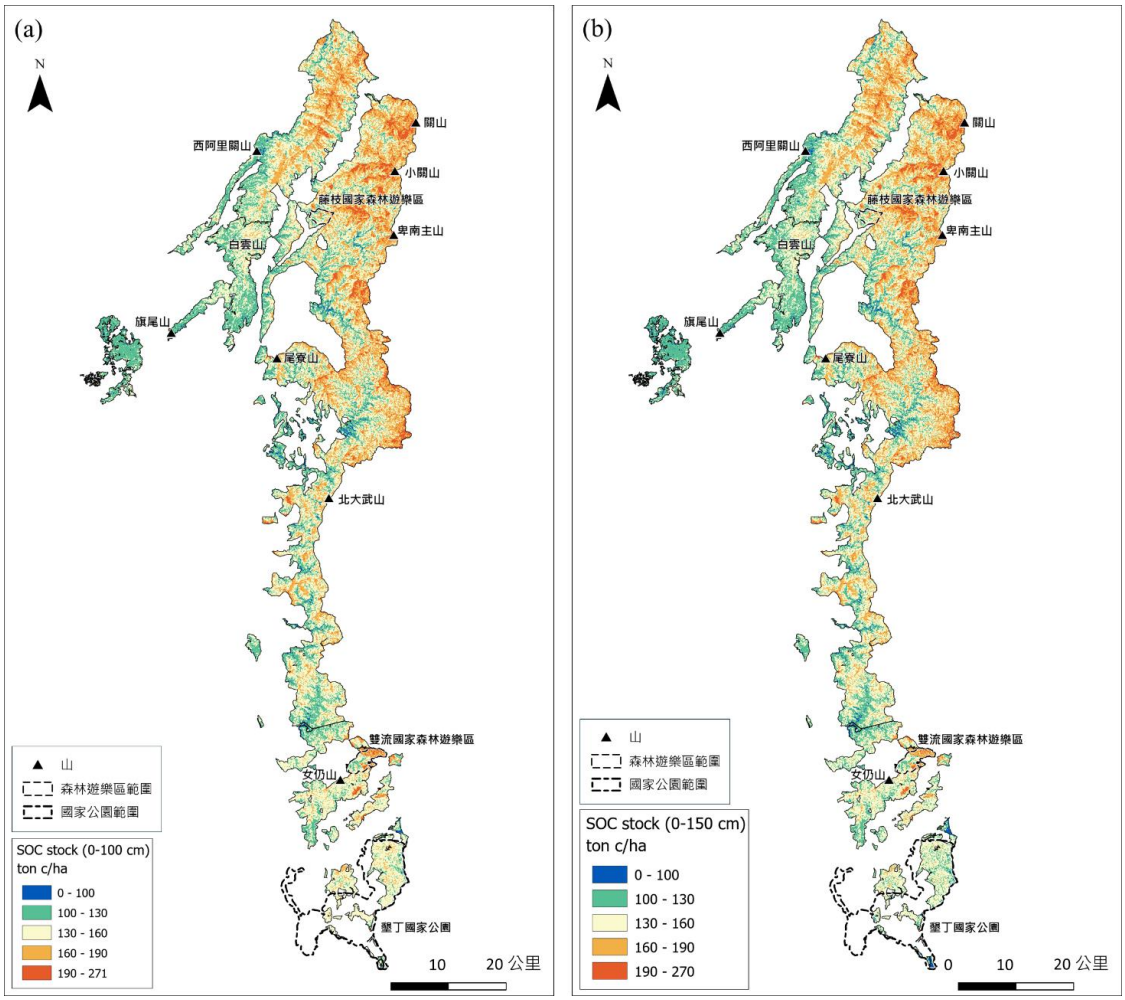


圖 3-5-69 屏東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 屏東分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 屏東分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-70），兩個深度的預測不確定性範圍均為 9.5-371 ton C/ha。高度不確定區域主要分布於高海拔地區，這些區域雖具備較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，導致採樣剖面密度較低 (每平方公里 1-2 個剖面)，增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布特徵顯示（表 3-5-48），0-100 公分土層的取樣主要集中於低海拔 (n = 725)，中海拔樣本明顯較少 (n = 91)，高海拔區域僅有少數樣本 (n = 13)。0-150 公分土層的採樣規模更小，低海拔有 110 個樣本，中海拔 25 個，高海拔僅 3 個。就林型而言，0-100 公分土層中天然闊葉林的採樣剖面最多 (n = 223)，而 0-150 公分土層則僅有 42 個樣本。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層的變異性隨海拔升高而增加，如人工針葉林從低海拔的 184±8.05 ton C/ha 升至高海拔的 235±11.0 ton C/ha。0-150 公分土層則呈現不同特徵，高海拔天然針葉林的變異性達 273±24.8 ton C/ha，且採樣剖面數量極少 (n = 1)，顯示 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳含量估計在高海拔有高度的不確定性。

表 3-5-48 屏東分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	3	1	191	0	3	180	68	87	192	725
	1,000-2,000	11	3	15	0	2	42	5	2	11	91
	2,000 以上	3	2	0	5	0	1	0	0	12	13
	總計	17	6	206	5	5	223	73	89	205	829
0-150	0-1,000	0	0	34	0	0	28	7	15	26	110
	1,000-2,000	3	1	2	0	1	14	1	0	3	25
	2,000 以上	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3
	總計	5	1	36	1	1	42	8	15	29	138

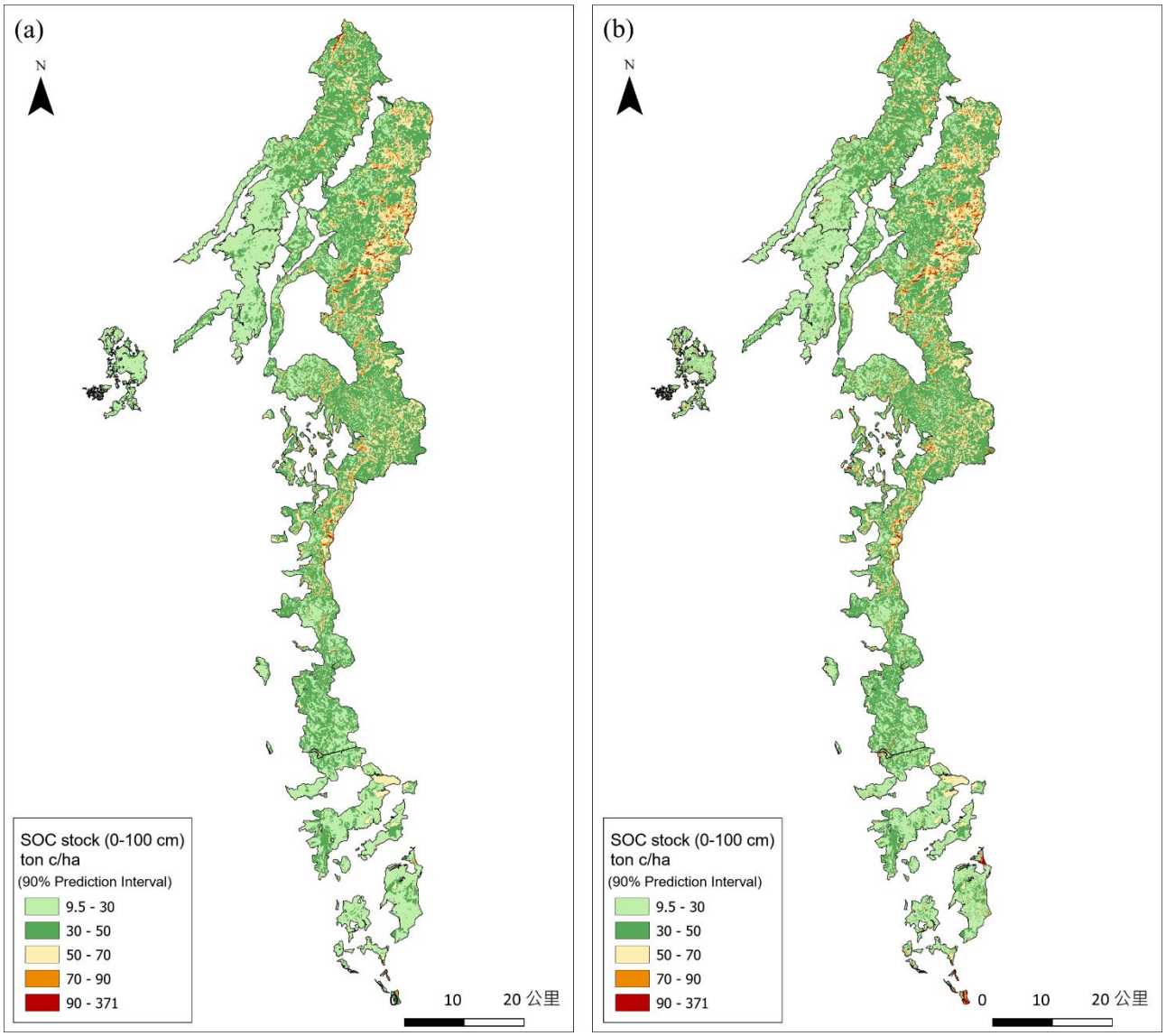


圖 3-5-70 屏東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 屏東分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 屏東分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

5. 新竹分署

(1) 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

新竹分署轄區位於臺灣本島中北部，東以中央山脈與宜蘭縣及臺中市為界，轄管面積約 170,344 公頃，年均溫 18.1℃，年均降雨量 2,135 毫米。0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-71），有機碳儲存量在空間上呈現差異，變異範圍在 0-156 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-156 ton C/ha) 主要分布於觀霧國家森林遊樂區東側；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 區域內皆有分布；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布於向天湖山西側。這種分布型態主要受到地形條件、海拔高度及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-49），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 3.63 百萬公噸，以天然闊葉林為主要來源（2.17 百萬公噸）；1,000-2,000 公尺區域的碳儲存總量為 7.14 百萬公噸，天然闊葉林儲存量為 4.15 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳儲存總量為 2.26 百萬公噸，以天然針葉林為主（0.88 百萬公噸）。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 110±5.40 ton C/ha，原始樣本數為 18），而低海拔木竹混淆林則為最低（推估結果為 60.5±7.31 ton C/ha，原始樣本數為 11）。新竹分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 13.0 百萬公噸。

表 3-5-49 新竹分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.31	0.15	0.2	0	0.04	2.17	0.03	0.06	0.65	3.63
	1,000-2,000	0.66	0.33	0.24	0.22	0.47	4.15	0.01	0.06	1.02	7.14
	2,000 以上	0.22	0.1	0.01	0.88	0.37	0.38	0	0	0.3	2.26
	總計	1.19	0.58	0.45	1.11	0.88	6.7	0.04	0.12	1.97	13
平均 (tC/ha)	0-1,000	91.5±9.20	85.6±7.82	75.6±6.94	82.0±15.5	73.3±4.56	79.3±9.21	60.5±7.31	66.0±6.08	74.5±11.8	76.5±9.53
	1,000-2,000	97.8±7.20	94.3±6.58	89.2±6.16	83.1±9.92	80.0±8.06	90.7±7.49	77.4±5.67	76.8±5.06	85.8±10.0	86.1±7.44
	2,000 以上	110±5.40	106±4.49	106±4.01	86.6±8.41	85.9±8.83	101±6.51	99.3±0.00	0.00±0.00	93.2±11.5	87.5±33.9
	總計	99.7±9.37	95.2±10.1	90.1±15.0	83.9±2.40	79.7±6.29	90.5±11.1	79.1±19.5	47.6±41.6	84.5±9.41	83.4±13.9

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

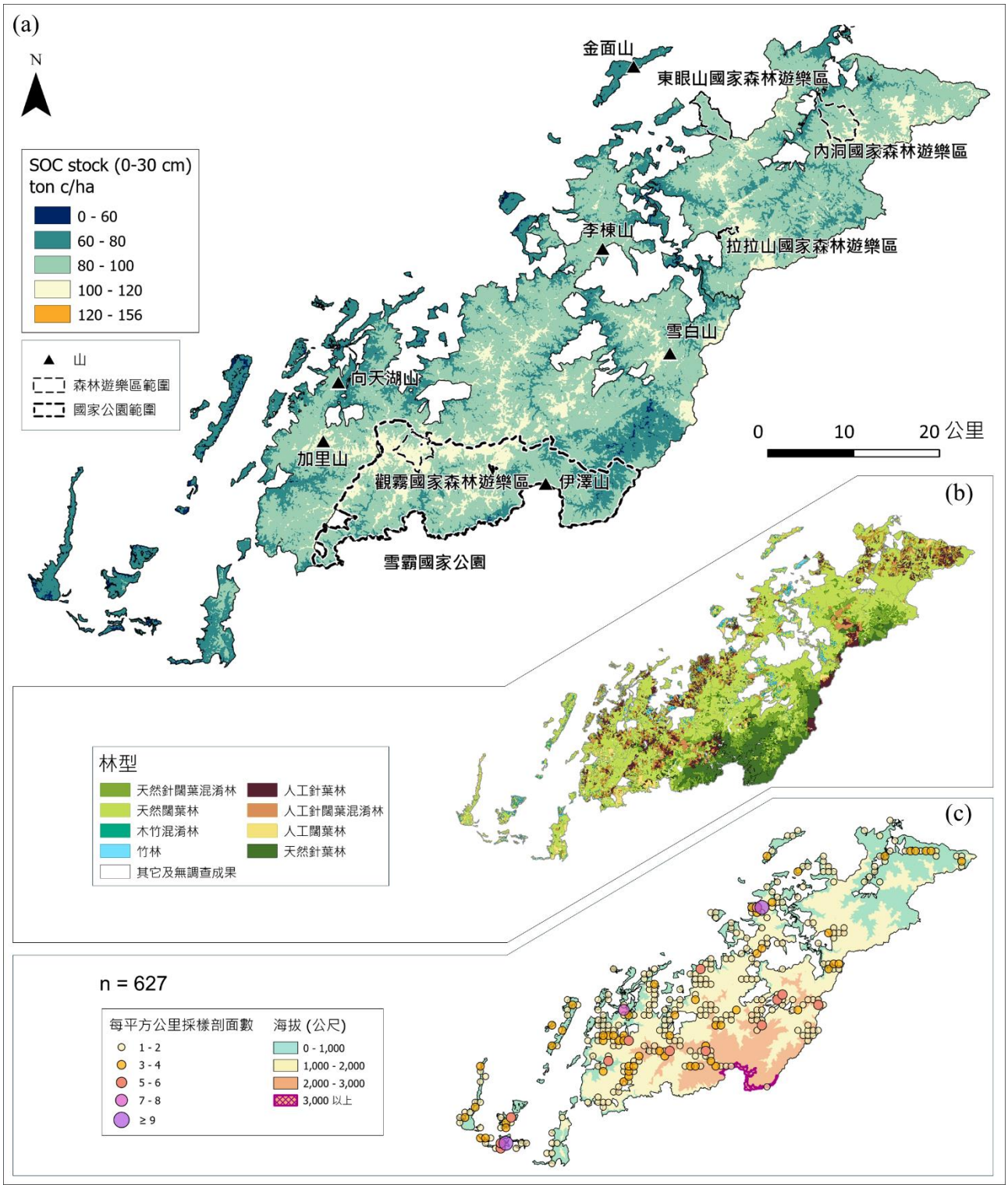


圖 3-5-71 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 新竹分署林型空間分布圖及圖 (c) 新竹分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-72），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 3.2-72 ton C/ha。高度不確定區域 (50-72 ton C/ha) 主要出現在觀霧國家森林遊樂區東側，這些區域雖具有較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，導致採樣剖面密度偏低（每平方公里 1-2 個剖面），以及受到土綱分布影響。

從海拔分布來看（表 3-5-50），採樣剖面集中於中海拔（推估結果為 1,000-2,000 公尺，原始樣本數為 295）及低海拔（推估結果為 0-1,000 公尺，原始樣本數為 247）區域，而高海拔地區（2,000 公尺以上）的樣本數量較少 (n＝85)。就林型分布而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n = 279)，其次為人工針葉林 (n = 99)，而天然針葉林及天然針闊葉混淆林的樣本數量較少（分別為 n＝17 及 n＝21）。經由標準差的範圍可以發現，各海拔和林型的變異程度差異明顯。低海拔區域的天然針闊葉混淆林具有較小的標準差 (73.3±4.56 ton C/ha)；中海拔區域的變異性略高，如天然針葉林的 83.1±9.92 ton C/ha；高海拔人工闊葉林則展現相對穩定的變異特性 (106±4.01 ton C/ha)，體現了各林型在碳儲存上的空間異質性。

表 3-5-50 新竹分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	20	13	35	0	0	106	11	47	15	247
1000-2000	61	21	7	9	14	146	4	14	19	295
2000 以上	18	13	1	8	7	27	0	11	0	85
總計	99	47	43	17	21	279	15	72	34	627

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

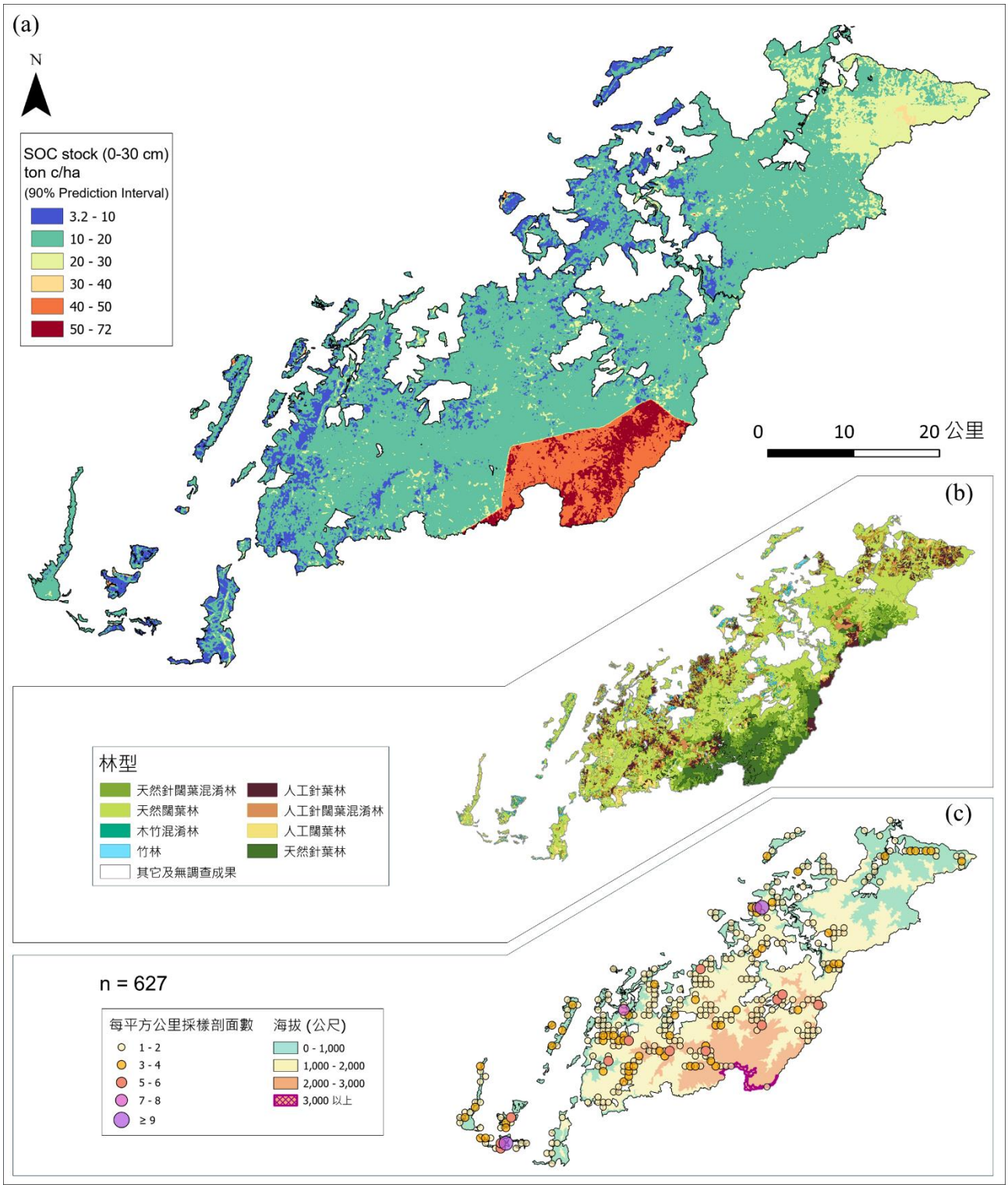


圖 3-5-72 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 新竹分署林型空間分布圖及圖 (c) 新竹分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-73），有機碳儲存量在空間上呈現明顯差異，變異範圍在 0-230 ton C/ha 之間。較高有機碳儲存量區域 (190-230 ton C/ha) 主要分布於觀霧國家森林遊樂區東側；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 分署內皆有分布；較低有機碳儲存量區域 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於向天湖山西側。這種分布型態主要受到地形地勢、土壤深度及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-51），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 5.13 百萬公噸，其中天然闊葉林貢獻最多，達 3.06 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區間的總量為 10.1 百萬公噸，天然闊葉林佔 5.79 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的儲存量為 3.27 百萬公噸，以天然針葉林為主要來源（1.26 百萬公噸）。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (154±6.28 ton C/ha)，而低海拔木竹混淆林則為最低 (83.2±10.5 ton C/ha)。新竹分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量達 18.5 百萬公噸。

表 3-5-51 新竹分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.44	0.23	0.28	0.01	0.07	3.06	0.04	0.09	0.92	5.13
	1,000-2,000	0.92	0.47	0.33	0.31	0.73	5.79	0.01	0.08	1.44	10.1
	2,000 以上	0.31	0.15	0.01	1.26	0.58	0.53	0	0	0.43	3.27
	總計	1.67	0.85	0.62	1.57	1.38	9.38	0.05	0.17	2.79	18.5
平均 (t C/ha)	0-1,000	130±14.0	127±12.2	105±10.4	118±24.3	116±6.56	112±13.8	83.2±10.5	91.2±8.45	105±18.6	110±15.5
	1,000-2,000	137±10.2	137±9.44	123±8.40	116±11.4	125±9.60	126±10.1	106±7.58	105±7.10	121±14.0	122±11.5
	2,000 以上	154±6.28	153±5.96	146±5.26	124±9.70	135±9.35	142±7.18	137±0.00	0.00±0.00	135±13.8	125±47.8
	總計	140±12.1	139±12.9	125±20.2	119±4.10	125±9.33	127±14.9	109±27.0	65.4±57.0	120±14.9	119±19.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

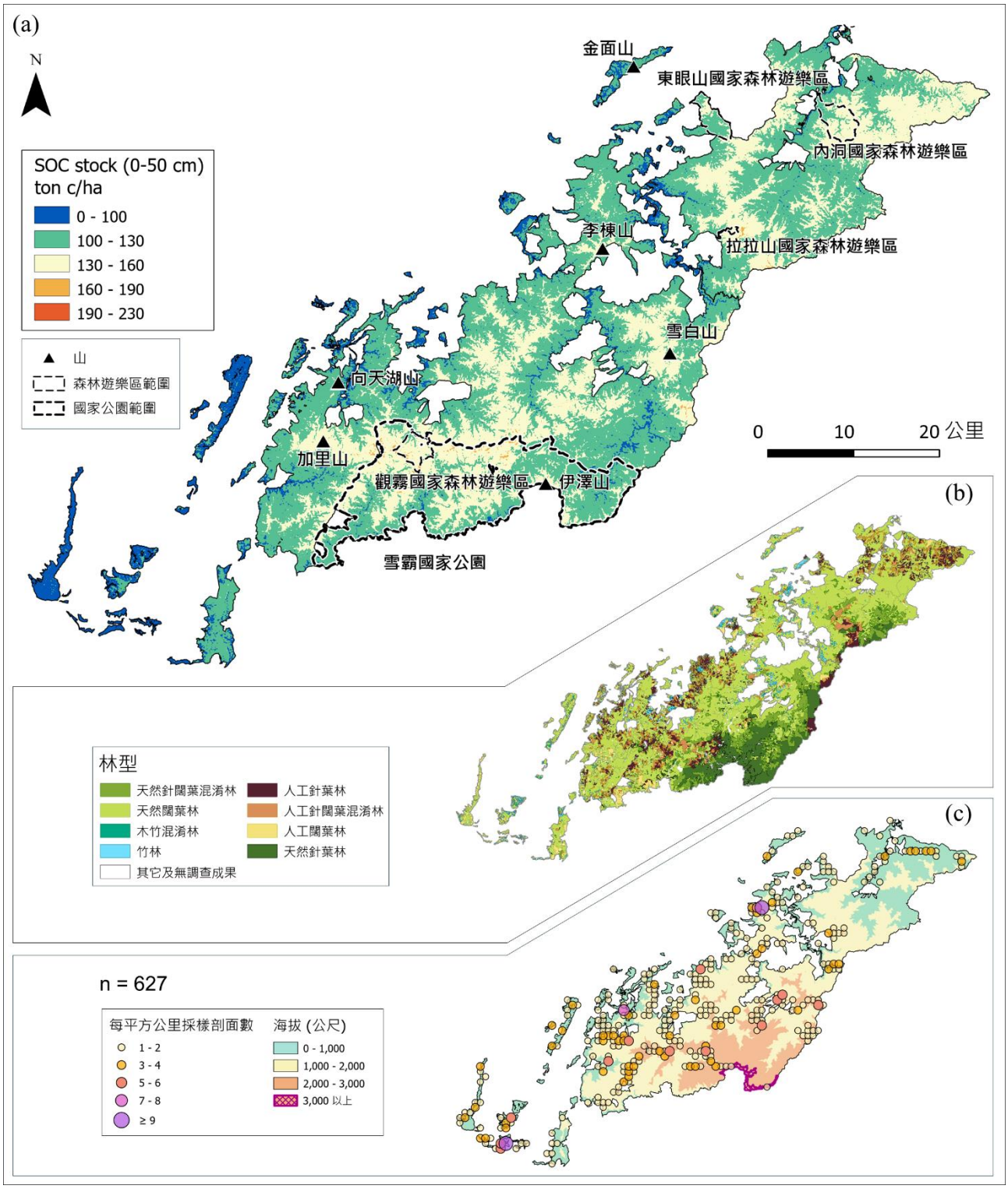


圖 3-5-73 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 新竹分署林型空間分布圖及圖 (c) 新竹分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 x 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-74），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 5.2-177 ton C/ha。高度不確定區域 (50-177 ton C/ha) 主要出現在觀霧國家森林遊樂區東側及拉拉山國家森林遊樂區北側，這些區域雖具有較高的碳儲存潛力，但因地形陡峭，導致採樣剖面密度較低（每平方公里 1-2 個剖面），觀霧國家森林遊樂區東側係因土綱分布影響。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-52），中海拔（1,000-2,000 公尺）區域擁有最多樣本 (n = 265)，低海拔（0-1,000 公尺）次之 (n = 197)，高海拔地區（2,000 公尺以上）的採樣剖面數量最少 (n＝80)。就林型分布而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝234)，其次為人工針葉林 (n = 90)，木竹混淆林及天然針闊葉混淆林的採樣剖面則較少（分別為 n＝15 及 n＝18）。經由標準差的範圍可以發現，各林型在各海拔帶的變異程度有所差異。低海拔天然針闊葉混淆林展現較小的變異性 (116±6.56 ton C/ha)，中海拔區域的變異程度較為一致，如天然針葉林的 116±11.4 ton C/ha。高海拔地區的人工闊葉林則呈現最小的標準差 (146±5.26 ton C/ha)。

表 3-5-52 新竹分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	17	12	28	0	0	80	11	36	13	197
1000-2000	57	20	6	9	13	127	4	11	18	265
2000 以上	16	13	1	8	5	27	0	10	0	80
總計	90	45	35	17	18	234	15	57	31	542

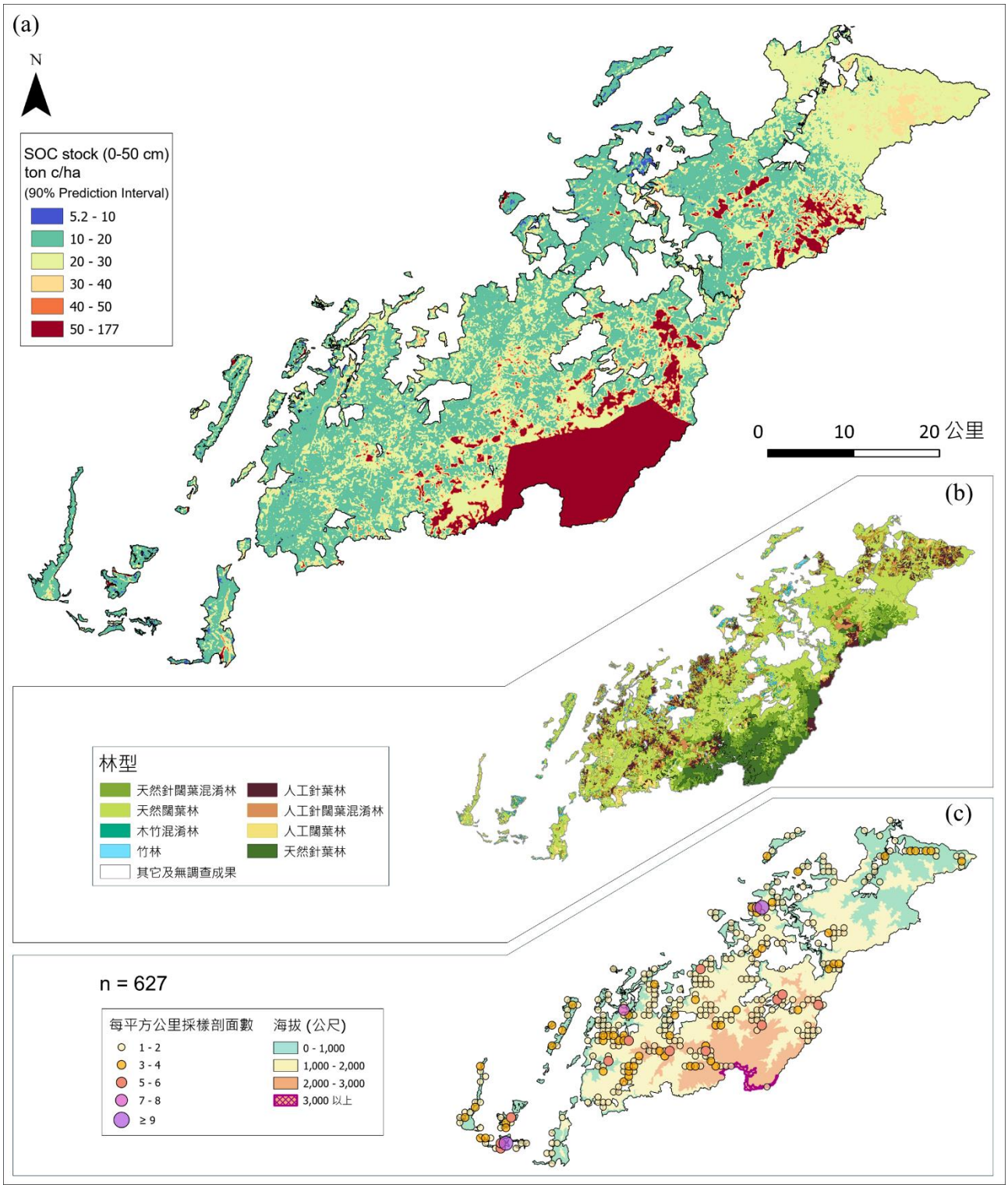


圖 3-5-74 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 新竹分署林型空間分布圖及圖 (c) 新竹分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 新竹分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分及 0-150 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示(圖 3-5-75),兩個深度的有機碳儲存量範圍均為 0-272 ton C/ha。有機碳儲存量較高區域 (190-272 ton C/ha) 主要分布於觀霧國家森林遊樂區東側及內洞國家森林遊樂區週邊;中等有機碳儲存量區域 (130-160 ton C/ha) 集中於加里山及李棟山一帶;有機碳儲存量較低區域 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於向天湖山西側。整體空間分布型態反映出地形條件及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示(表 3-5-53),0-100 公分土層中,0-1,000 公尺區域的碳儲存總量為 7.5 百萬公噸,其中天然闊葉林貢獻 4.47 百萬公噸;1,000-2,000 公尺區間的總量為 15.3 百萬公噸,天然闊葉林佔 8.76 百萬公噸;2,000 公尺以上區域的總量為 5.16 百萬公噸,以天然針葉林為主(2.04 百萬公噸)。0-150 公分土層的碳儲存總量略高(表 3-5-54),分別為低海拔 8.04 百萬公噸、中海拔 15.9 百萬公噸及高海拔 6.28 百萬公噸,總計 30.2 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量分析顯示,0-100 公分土層中(表 5-2-33),2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值(推估結果為 234±8.31 ton C/ha,原始樣本數為 15),低海拔木竹混淆林則為最低(推估結果為 139±11.7 ton C/ha,原始樣本數為 7)。0-150 公分土層的分析結果指出(表 5-2-34),2,000 公尺以上的天然針葉林展現最高儲存量 (287±13.0 ton C/ha)。

表 3-5-53 新竹分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.62	0.31	0.44	0.01	0.1	4.47	0.07	0.14	1.38	7.53
	1,000-2,000	1.37	0.7	0.51	0.47	1.09	8.76	0.02	0.12	2.2	15.3
	2,000 以上	0.47	0.22	0.02	2.04	0.91	0.82	0	0	0.68	5.16
	總計	2.47	1.23	0.97	2.52	2.1	14	0.08	0.27	4.26	27.9
平均 (t C/ha)	0-1,000	183±10.0	174±10.2	166±9.50	155±22.2	161±8.72	163±11.7	139±11.7	147±10.7	158±17.3	161±13.2
	1,000-2,000	205±13.1	203±12.6	191±12.1	176±13.0	188±14.1	191±13.5	172±10.5	169±10.2	186±17.6	187±12.6
	2,000 以上	234±8.31	229±8.47	225±7.50	201±12.7	211±10.8	218±8.77	209±0.00	0.00±0.00	212±16.8	193±73.3
	總計	207±26.1	202±27.5	194±29.7	177±23.0	186±25.3	191±27.4	173±34.9	105±91.9	185±27.0	180±34.7

(台灣水資源與農業研究院製作,2024,林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-54 新竹分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.71	0.39	0.43	0.01	0.1	4.65	0.08	0.16	1.51	8.04
	1,000-2,000	1.49	0.83	0.49	0.69	1.16	8.74	0.02	0.13	2.37	15.9
	2,000 以上	0.52	0.26	0.02	2.92	0.96	0.81	0	0	0.79	6.28
	總計	2.72	1.48	0.95	3.61	2.22	14.2	0.1	0.29	4.67	30.2
平均 (tC/ha)	0-1,000	208±11.9	218±14.1	164±13.2	225±14.1	169±11.9	170±13.7	162±14.0	164±13.7	173±22.8	184±25.6
	1,000-2,000	223±18.4	241±18.9	184±16.2	255±16.7	199±17.7	191±16.4	182±15.0	181±13.4	200±22.3	206±27.3
	2,000 以上	259±9.93	271±10.6	218±9.35	287±13.0	222±11.3	216±12.1	239±0.00	0.00±0.00	246±24.2	217±85.1
	總計	230±26.0	243±26.7	189±26.9	256±31.1	197±26.3	192±23.1	194±40.3	115±100	206±36.9	202±37.5

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

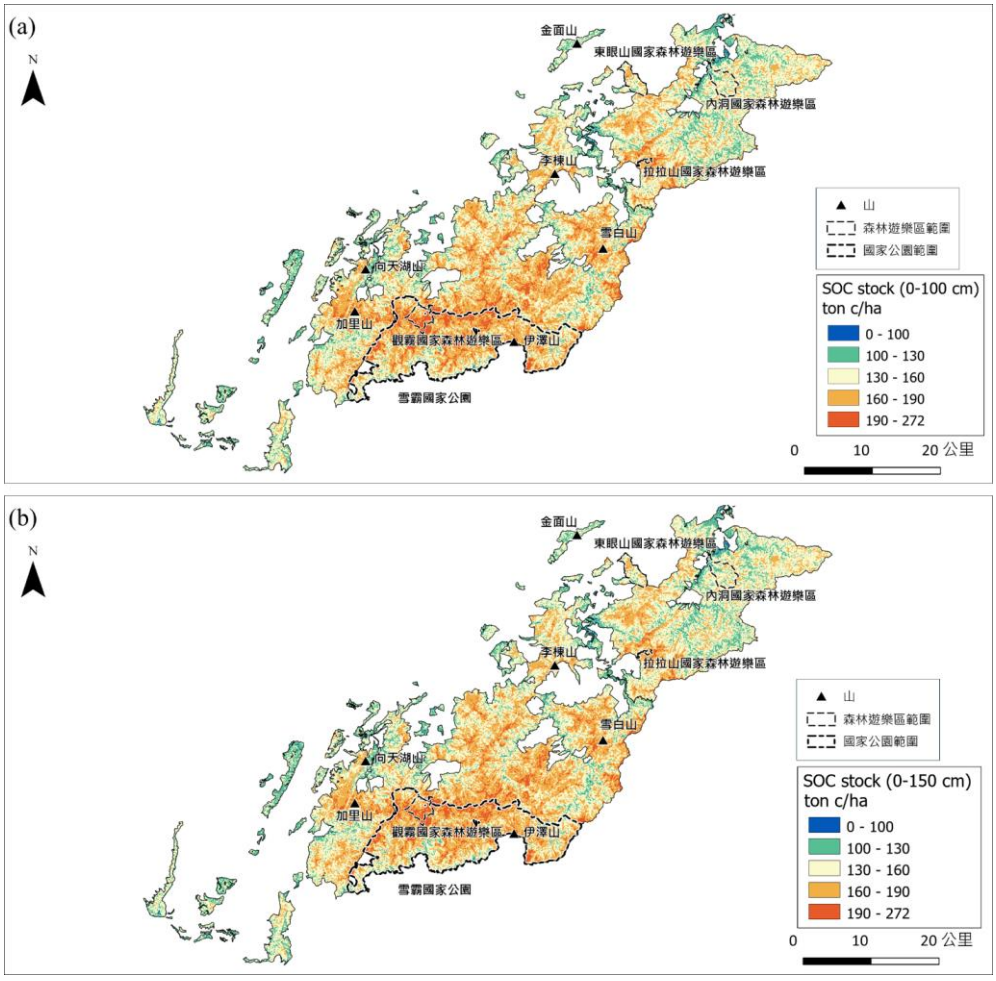


圖 3-5-75 新竹分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 新竹分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 新竹分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90% 預測區間圖顯示（圖 3-5-76），0-100 公分土層的預測不確定性範圍為 9.1-263 ton C/ha，而 0-150 公分則為 9.1-578 ton C/ha。兩個深度的高不確定性區域主要出現在拉拉山國家森林遊樂區北側及觀霧國家森林遊樂區東側，這些區域採樣剖面密度較低（每平方公里 1-2 個剖面），增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-55），0-100 公分土層的取樣工作以中海拔為主 (n = 205)，低海拔次之 (n = 120)，高海拔採樣剖面最少 (n = 63)。0-150 公分土層的採樣規模明顯較小，中海拔有 47 個樣本，低海拔 18 個，高海拔 21 個。就林型而言，0-100 公分土層中天然闊葉林的採樣剖面最多 (n = 167)，而 0-150 公分土層則僅有 44 個樣本，採樣規模的縮減可能影響 0-100 公分與 0-150 公分土壤有機碳儲存量估計的準確度。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層的變異程度隨海拔升高而增加，整體從低海拔的 161±13.2 ton C/ha 上升至高海拔的 193±73.3 ton C/ha。0-150 公分土層則呈現不同特徵，高海拔天然針葉林的變異性較大 (287±13.0 ton C/ha)，同時採樣剖面數量較少 (n = 2)，顯示 0-100 公分與 0-150 公分有機碳儲存量估計具有高度之不確定性。

表 3-5-55 新竹分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	12	6	20	0	0	47	7	7	21	120
	1,000-2,000	48	14	6	5	12	97	3	13	7	205
	2,000以上	15	9	1	4	4	23	0	0	7	63
	總計	75	29	27	9	16	167	10	20	35	388
0-150	0-1,000	1	2	1	0	0	10	3	1	0	18
	1,000-2,000	9	4	1	1	1	27	0	2	2	47
	2,000以上	4	5	0	2	3	7	0	0	0	21
	總計	14	11	2	3	4	44	3	3	2	86

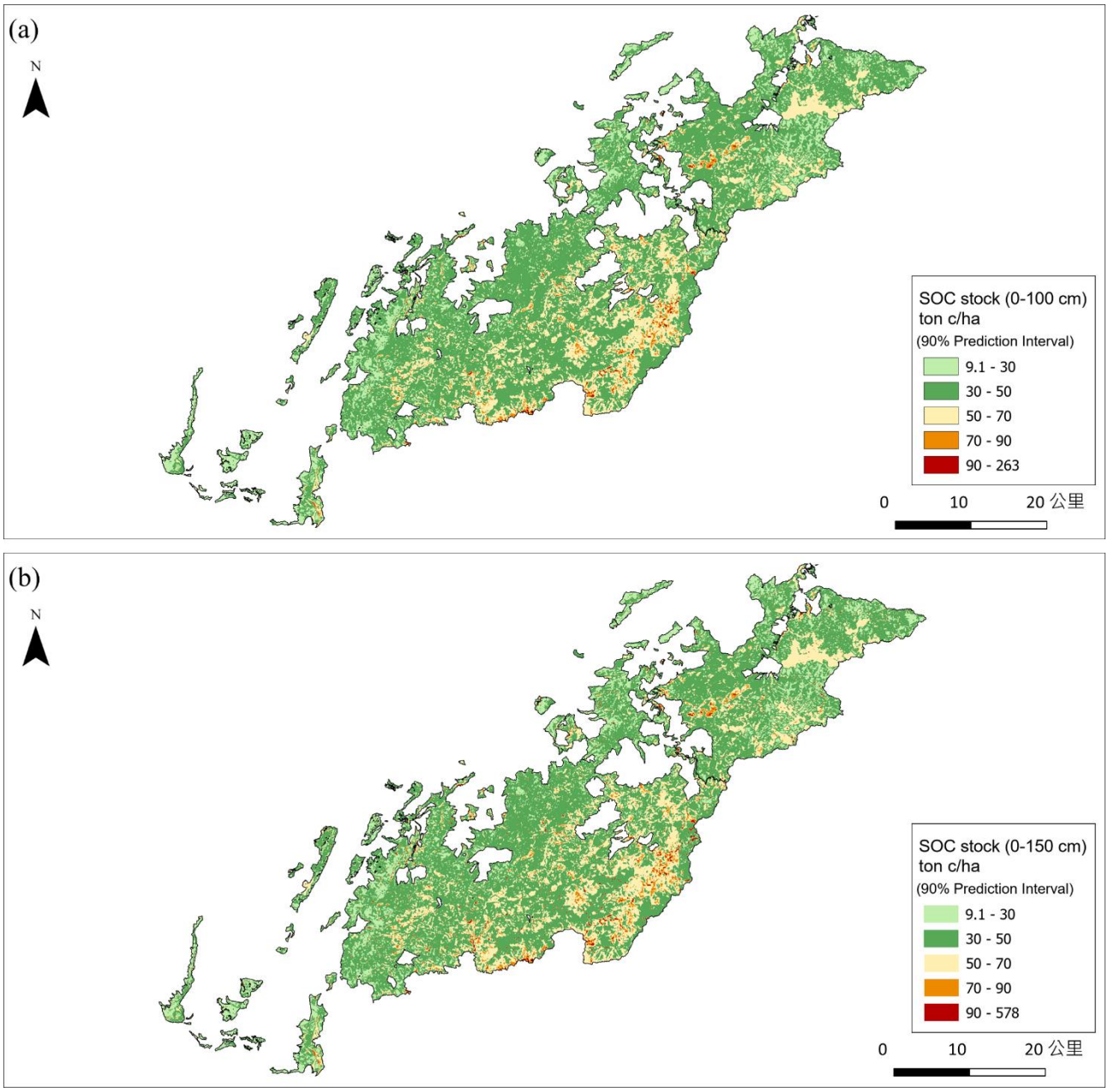


圖 3-5-76 新竹分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 新竹分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 新竹分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

6. 嘉義分署

(1) 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

嘉義分署轄區位於臺灣西南部中央山脈南部西側，跨雲林、嘉義、臺南、高雄等縣市，海拔從 40 公尺延伸至 3,952 公尺的玉山，年均溫 17.4℃，年均降雨量約 2,033 毫米。轄區內天然林與人工林分別佔 61%及 39%，以針葉樹林的紅檜、台灣杉、柳杉為主，闊葉樹林則以樟楠類、櫧櫟類為主。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-77），有機碳儲存量在空間上呈現差異，變異範圍在 0-136 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-136 ton C/ha) 主要分布於玉山國家公園週邊；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 集中於阿里山國家森林遊樂區、玉山國家公園一帶；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布於雲林及石壁山區域。這種分布型態主要受到地形條件、海拔高度及林型組成的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-56），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 3.60 百萬公噸，其中木竹混淆林及天然闊葉林分別貢獻 0.94 百萬公噸及 0.63 百萬公噸；1,000-2,000 公尺區域的碳儲存總量為 3.55 百萬公噸，天然闊葉林儲存量為 1.63 百萬公噸；2,000 公尺以上區域的碳儲存總量為 3.85 百萬公噸，以天然針葉林為主（1.21 百萬公噸）。就平均每公頃有機碳儲存量而言，2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 110±7.34 ton C/ha，原始樣本數為 59），而低海拔竹林則為最低（推估結果為 60.4±6.55 ton C/ha，原始樣本數為 112）。嘉義分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 11.0 百萬公噸。

表 3-5-56 嘉義分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0	0.23	0	0	0.63	0.94	0.4	1.4	3.6
	1,000-2,000	0.18	0.11	0.19	0.01	0.03	1.63	0.18	0.26	0.95	3.55
	2,000 以上	0.72	0.13	0.07	1.21	0.14	0.66	0	0	0.91	3.85
	總計	0.9	0.25	0.49	1.22	0.17	2.92	1.12	0.67	3.26	11
平均 (t C/ha)	0-1,000	81.7±5.85	83.0±3.87	75.1±6.46	62.9±4.80	72.7±2.45	73.8±6.42	63.8±5.03	60.4±6.55	64.8±7.54	70.9±8.32
	1,000-2,000	99.9±5.79	94.3±6.96	93.1±6.45	79.4±8.87	79.4±8.26	91.2±7.46	75.4±6.28	78.3±6.20	80.2±9.37	85.7±8.91
	2,000 以上	110±7.34	103±5.69	105±5.41	94.3±8.35	89.5±7.56	102±6.80	0.00±0.00	0.00±0.00	98.7±10.2	78.1±44.7
	總計	97.2±14.3	93.6±10.2	91.0±15.0	78.9±15.7	80.5±8.44	89.1±14.4	46.4±40.6	46.2±41.0	81.2±17.0	78.2±19.6

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

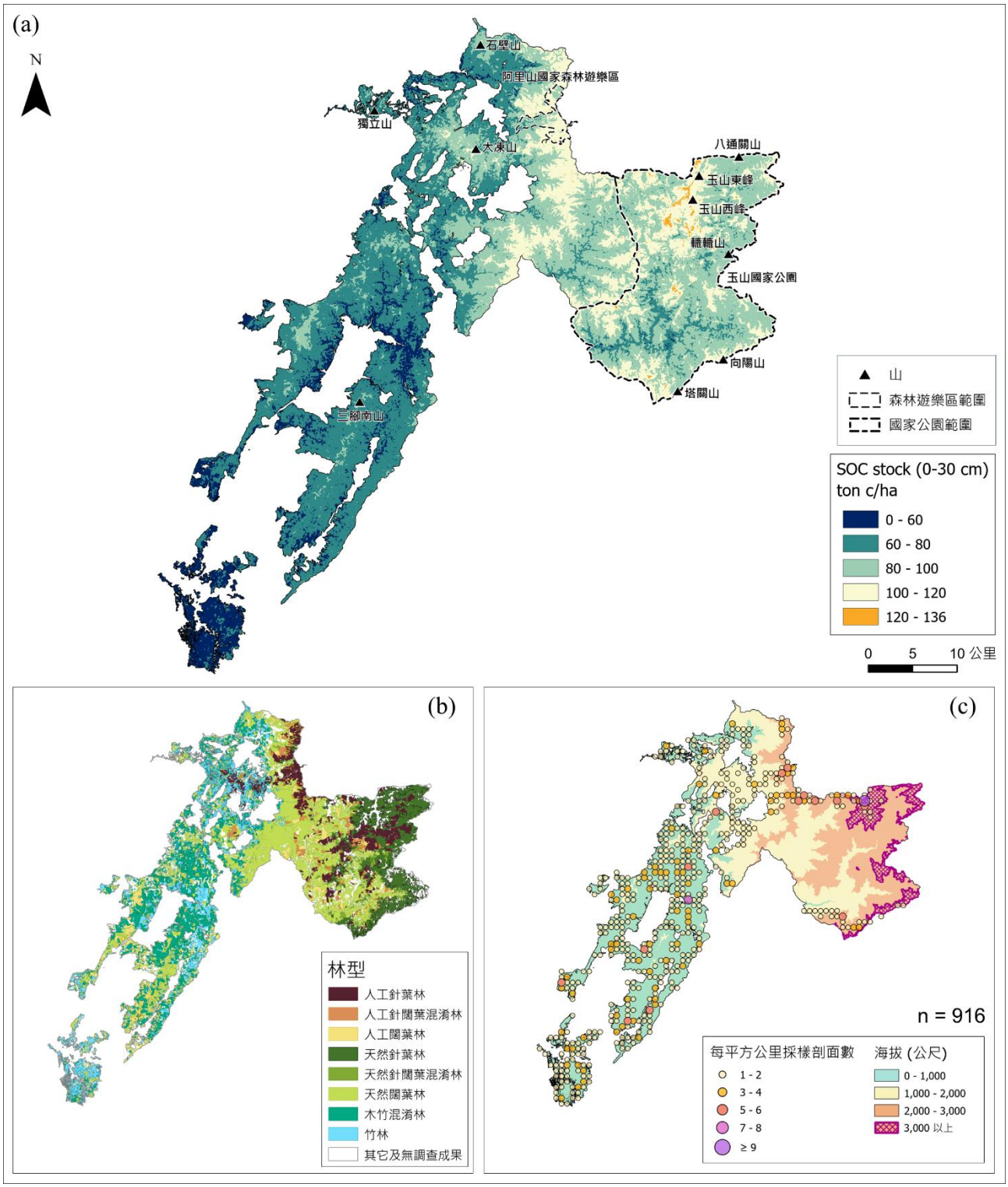


圖 3-5-77 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署林型空間分布圖及圖 (c) 嘉義分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-78），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 3.1-76 ton C/ha。高度不確定區域 (50-76 ton C/ha) 主要出現在玉山國家公園及阿里山國家森林遊樂區東側，這些區域的採樣剖面密度相對較低（每平方公里 1-2 個剖面），增加了預測的不確定性，以及受土綱分布影響。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-57），取樣工作高度集中於低海拔區域 (n＝629)，中海拔 (n＝142) 及高海拔 (n＝145) 的採樣剖面數量相近。就林型而言，無調查成果的採樣剖面最多 (n＝295)，其次為木竹混淆林 (n＝173) 及竹林 (n＝159)，天然針闊葉混淆林的樣本數量最少 (n＝5)，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，各海拔和林型的變異程度有所差異。低海拔區域的天然針闊葉混淆林展現最小的變異性（推估結果為 72.7±2.45 ton C/ha，原始樣本數為 1）；中海拔區域的標準差普遍較大，如天然針葉林的 79.4±8.87 ton C/ha (n = 1)；高海拔人工闊葉林則呈現相對穩定的變異特性（推估結果為 105±5.41 ton C/ha，原始樣本數為 6），顯示出採樣數量對變異性估計的影響。

表 3-5-57 嘉義分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	3	0	35	0	1	77	161	240	112	629
1000-2000	23	7	3	1	0	25	12	24	47	142
2000 以上	59	7	6	16	4	15	0	38	0	145
總計	85	14	44	17	5	117	173	302	159	916

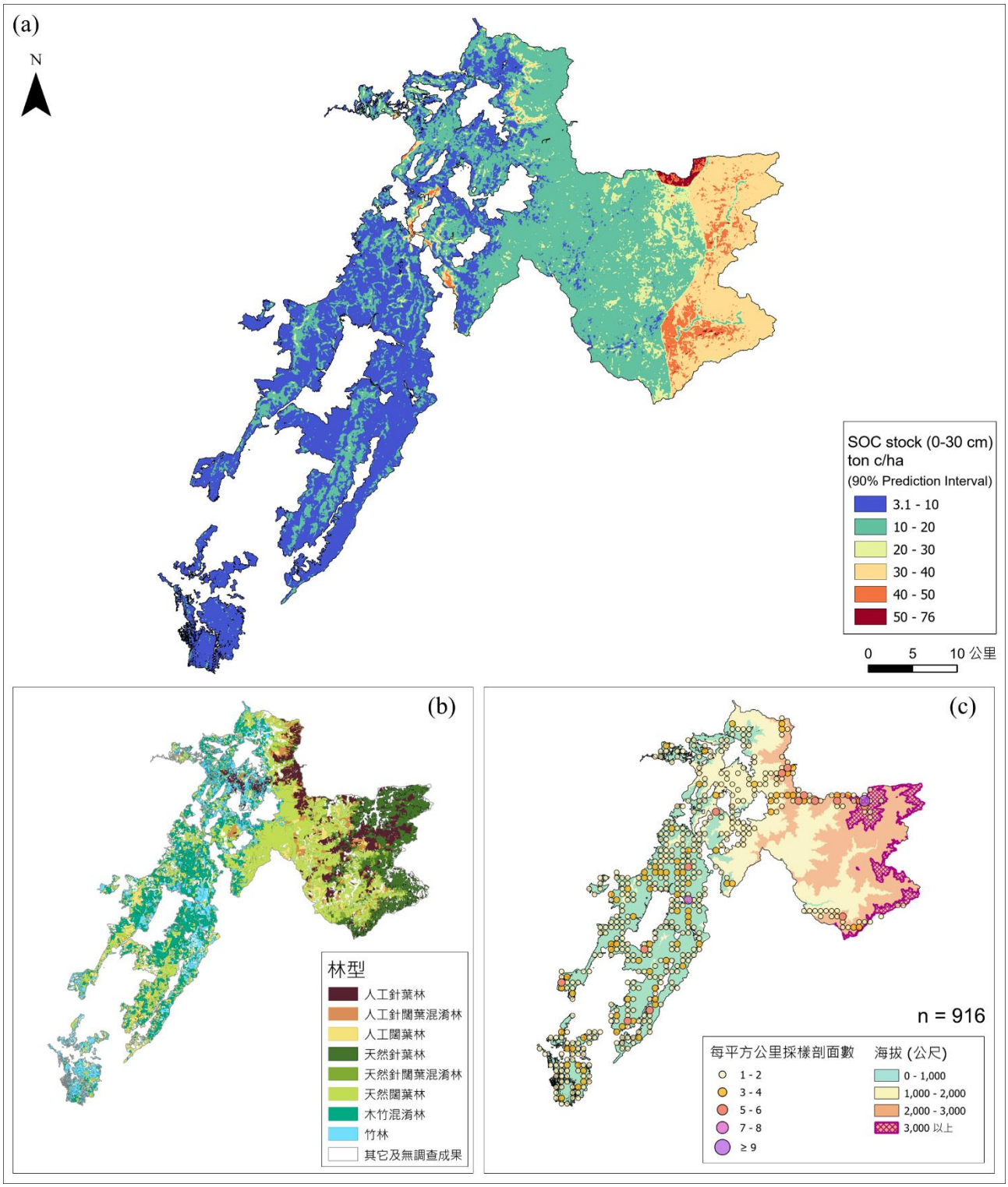


圖 3-5-78 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署林型空間分布圖及圖 (c) 嘉義分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-79），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-187 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (160-187 ton C/ha) 主要出現在玉山國家公園區域；中等偏高的碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 分布在阿里山國家森林遊樂區周圍；較低的碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則集中在西部低海拔區域。這種分布型態與當地的海拔高度、林型組成及地形條件有關。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-58），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 4.98 百萬公噸，以木竹混淆林儲存量最大，達 1.30 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 4.93 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 2.28 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 5.43 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 1.71 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (154±8.92 ton C/ha)，海拔 0-1,000 公尺的竹林則為最低值 (82.8±9.77 ton C/ha)。嘉義分署轄區內 0-50 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 15.3 百萬公噸。

表 3-5-58 嘉義分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0	0.32	0	0	0.88	1.3	0.55	1.92	4.98
	1,000-2,000	0.24	0.16	0.26	0.02	0.05	2.28	0.25	0.36	1.31	4.93
	2,000 以上	1.01	0.19	0.1	1.71	0.21	0.92	0	0	1.28	5.43
	總計	1.26	0.36	0.68	1.72	0.27	4.07	1.55	0.91	4.51	15.3
平均 (t C/ha)	0-1,000	115±8.17	122±6.19	104±9.32	88.0±7.07	112±4.28	103±9.45	88.1±7.30	82.8±9.77	89.1±11.5	101±14.1
	1,000-2,000	139±7.76	137±9.36	129±8.51	110±10.5	124±10.3	127±9.70	104±7.93	108±7.90	111±13.1	121±13.2
	2,000 以上	154±8.92	150±7.13	145±7.11	133±10.9	138±9.27	143±8.16	0.00±0.00	0.00±0.00	139±13.5	111±63.4
	總計	136±19.7	136±14.0	126±20.5	110±22.5	125±12.9	124±19.8	63.9±55.9	63.4±56.3	113±25.0	111±27.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

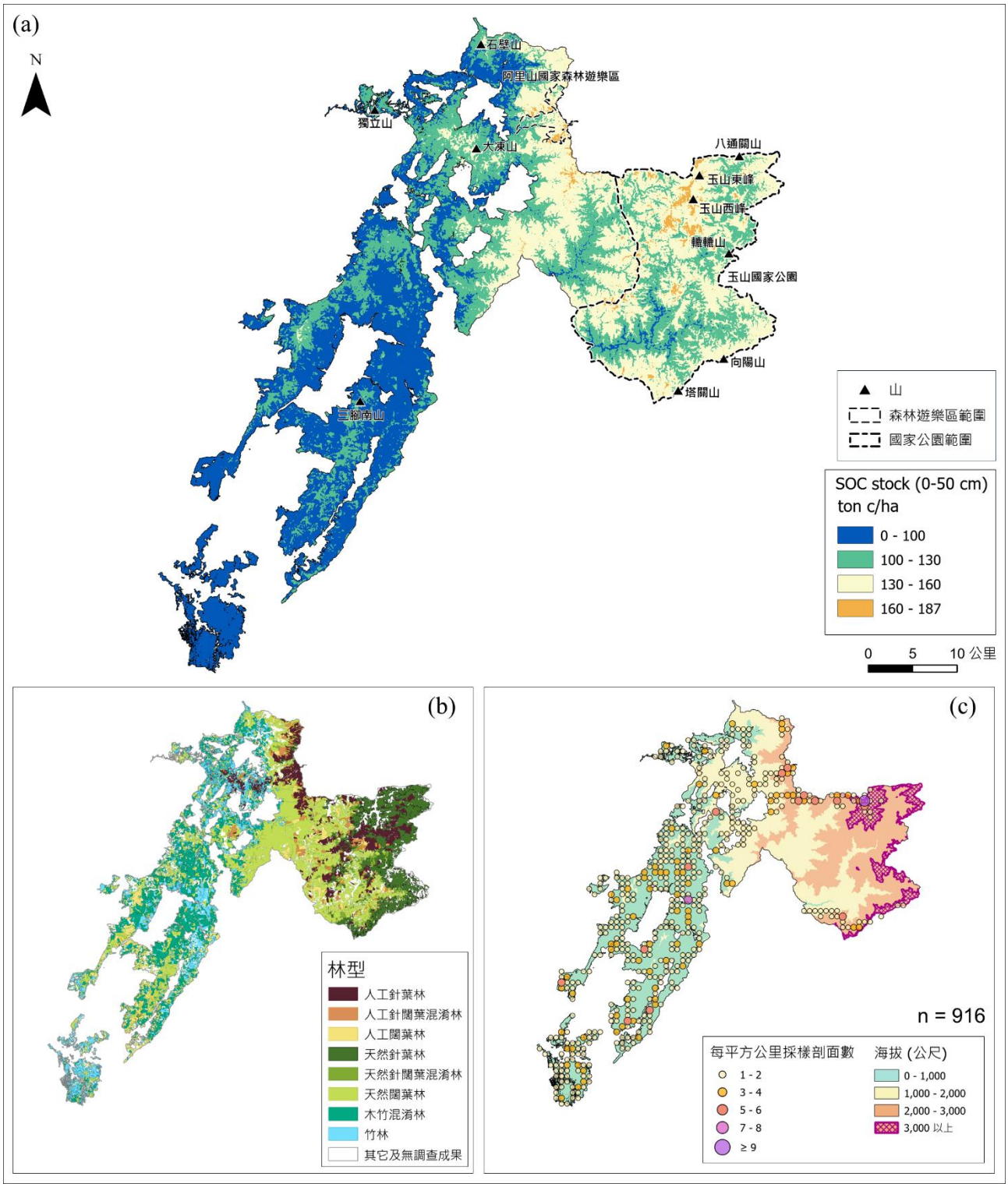


圖 3-5-79 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署林型空間分布圖及圖 (c) 嘉義分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90% 預測區間圖顯示（圖 3-5-80），預測值的不確定性在空間分布上差異明顯，變異範圍為 4.7-115 ton C/ha。高度不確定區域 (50-115 ton C/ha) 主要集中於玉山國家公園東部區域，其次為阿里山國家森林遊樂區部分地區。這些區域雖然有機碳儲存量較高，但因地形陡峭、採樣困難，採樣密度相對較低（每平方公里 1-2 個剖面），使預測結果的不確定性增加，也受到土綱分布影響。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-59），取樣工作主要集中在海拔 0-1,000 公尺區域 (n = 569)，其次為 1,000-2,000 公尺 (n = 139) 及 2,000 公尺以上 (n = 138) 的範圍。就林型而言，其他的類別採樣剖面最多 (n = 268)，其次為木竹混淆林 (n = 157) 及竹林 (n = 151)，天然針闊葉混淆林的採樣剖面數量最少 (n = 5)，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，總體而言人工針葉林具有最大的變異性 (136±19.7 ton C/ha)，反映出不同海拔高度的人工針葉林碳儲存特性差異顯著。相較之下，天然針闊葉混淆林的變異性較小 (125±12.9 ton C/ha)，顯示出較為穩定的碳儲存特性。值得注意的是，採樣剖面數量較多的木竹混淆林 (n = 157) 卻呈現出較大的變異性 (63.9±55.9 ton C/ha)，顯示該林型受到複雜的環境因子影響，使其碳儲存特性較不穩定。

表 3-5-59 嘉義分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	3	0	33	0	1	69	145	214	104	569
1000-2000	23	7	3	1	0	23	12	23	47	139
2000 以上	59	7	6	16	4	15	0	31	0	138
總計	85	14	42	17	5	107	157	268	151	846

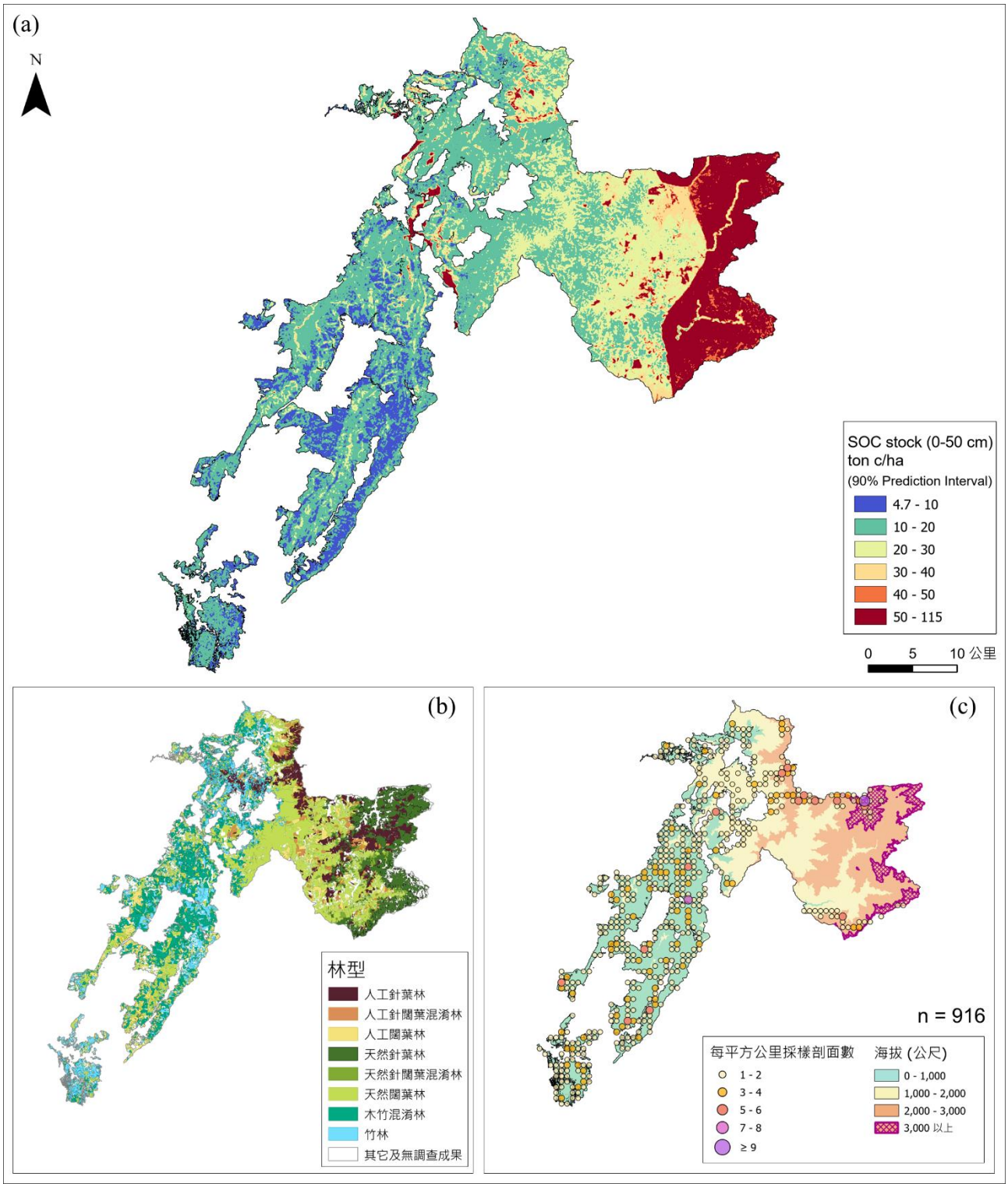


圖 3-5-80 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署林型空間分布圖及圖 (c) 嘉義分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 嘉義分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-81），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-277 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (190-277 ton C/ha) 主要出現在玉山國家公園、阿里山國家森林遊樂區之區域；中等偏高的碳儲存量 (160-190 ton C/ha) 分布在阿里山國家森林遊樂區周圍；較低的碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則集中在西部低海拔區域。0-150 公分土壤有機碳儲存量則呈現相似的空間分布趨勢，變異範圍在 0-274 ton C/ha 之間。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-60），0-100 公分土層中，海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 7.82 百萬公噸，以其它或無調查結果儲存量最大，達 3.02 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 7.62 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 3.49 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 8.42 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 2.68 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (238±12.4 ton C/ha)，海拔 0-1,000 公尺的竹林則為最低值 (135±10.9 ton C/ha)。嘉義分署轄區內 0-100 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 23.9 百萬公噸。0-150 公分土層的分析結果顯示相似的趨勢（表 3-5-61），但儲存量略高。海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 8.75 百萬公噸，1,000-2,000 公尺為 8.13 百萬公噸，2,000 公尺以上為 9.37 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量以海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林最高 (254±22.7 ton C/ha)。轄區總碳儲存量達 26.2 百萬公噸。

表 3-5-60 嘉義分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0.01	0.49	0	0	1.34	2.06	0.9	3.02	7.82
	1,000-2,000	0.37	0.25	0.41	0.02	0.08	3.49	0.38	0.56	2.05	7.62
	2,000 以上	1.56	0.29	0.15	2.68	0.33	1.4	0	0	2	8.42
	總計	1.94	0.54	1.05	2.7	0.41	6.23	2.45	1.46	7.07	23.9
平均 (tC/ha)	0-1,000	175±11.7	179±11.5	160±11.4	138±9.88	168±6.55	157±11.6	140±9.65	135±10.9	140±14.2	155±17.1
	1,000-2,000	213±12.0	207±14.0	200±14.1	174±15.4	192±13.5	195±14.6	161±13.0	167±12.2	173±19.0	187±18.7
	2,000 以上	238±12.4	228±10.2	224±9.64	209±14.7	212±12.9	218±10.9	0.00±0.00	0.00±0.00	216±18.7	172±97.7
	總計	209±31.5	205±24.5	195±32.7	173±35.5	191±22.1	190±30.6	100±87.5	101±88.6	177±38.1	171±43.5

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-61 嘉義分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.01	0.01	0.47	0	0	1.38	2.41	1.04	3.42	8.75
	1,000-2,000	0.41	0.3	0.4	0.03	0.08	3.55	0.44	0.63	2.29	8.13
	2,000 以上	1.67	0.34	0.15	3.38	0.34	1.38	0	0	2.12	9.37
	總計	2.09	0.64	1.03	3.42	0.42	6.31	2.84	1.67	7.82	26.2
平均 (tC/ha)	0-1,000	195±17.9	229±13.4	155±13.4	181±8.64	175±12.0	163±16.1	163±15.4	156±15.3	159±16.5	175±24.0
	1,000-2,000	235±15.1	248±17.3	198±17.6	246±26.1	202±22.1	198±18.4	183±17.7	186±17.4	194±22.0	210±25.8
	2,000 以上	254±22.7	268±18.6	220±14.1	263±26.2	216±24.6	215±19.3	0.00±0.00	0.00±0.00	229±30.2	185±107
	總計	228±30.0	248±19.8	191±33.3	230±43.2	197±20.6	192±26.4	115±100	114±99.9	194±35.1	190±45.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

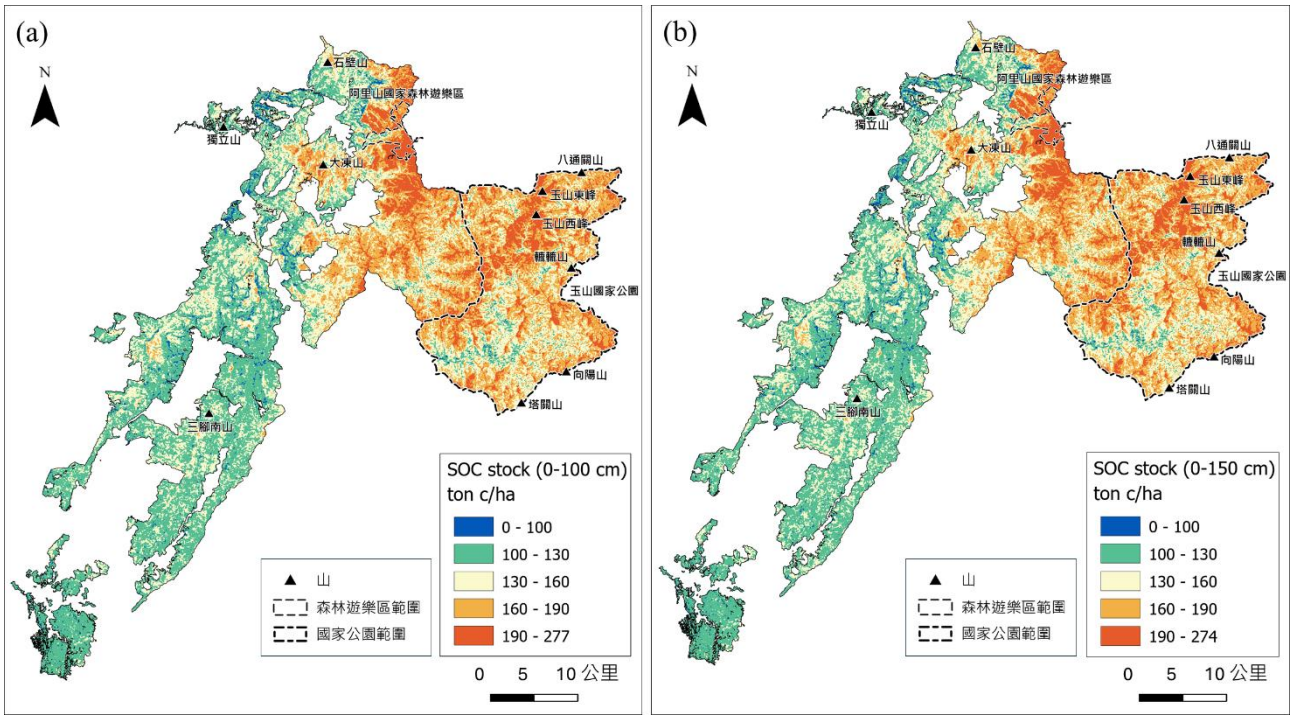


圖 3-5-81 嘉義分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 嘉義分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-82），0-100 公分土層的預測值不確定性變異範圍為 8.7-244 ton C/ha，0-150 公分土層則為 8.7-633 ton C/ha。高度不確定區域主要集中於玉山國家公園東部區域及阿里山國家森林遊樂區部分地區，這些區域的採樣剖面密度相對較低。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-62），0-100 公分土層的取樣工作主要集中在海拔 0-1,000 公尺區域 (n = 553)，其次為 1,000-2,000 公尺 (n = 138) 及 2,000 公尺以上 (n = 114) 的範圍。0-150 公分土層的採樣數量較少，0-1,000 公尺有 101 個採樣剖面，1,000-2,000 公尺有 37 個，2,000 公尺以上有 31 個。就林型而言，兩個深度的採樣都以其他的類別之採樣剖面最多（分別為 242 及 48 個），反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層中，人工針葉林具有最大的變異性（±31.5 ton C/ha），而天然針闊葉混淆林的變異性較小（±22.1 ton C/ha）。0-150 公分土層的變異性普遍較大，其中天然針葉林的變異性最高（±43.2 ton C/ha）。

表 3-5-62 嘉義分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	3	0	31	0	1	67	143	101	207	553
	1,000-2,000	23	7	3	1	0	22	12	47	23	138
	2,000 以上	54	7	5	15	4	15	0	0	14	114
	總計	80	14	39	16	5	104	155	148	244	805
0-150	0-1,000	0	0	5	0	0	13	24	22	37	101
	1,000-2,000	6	1	0	1	0	2	3	16	8	37
	2,000 以上	19	1	2	2	1	2	0	0	4	31
	總計	25	2	7	3	1	17	27	38	49	169

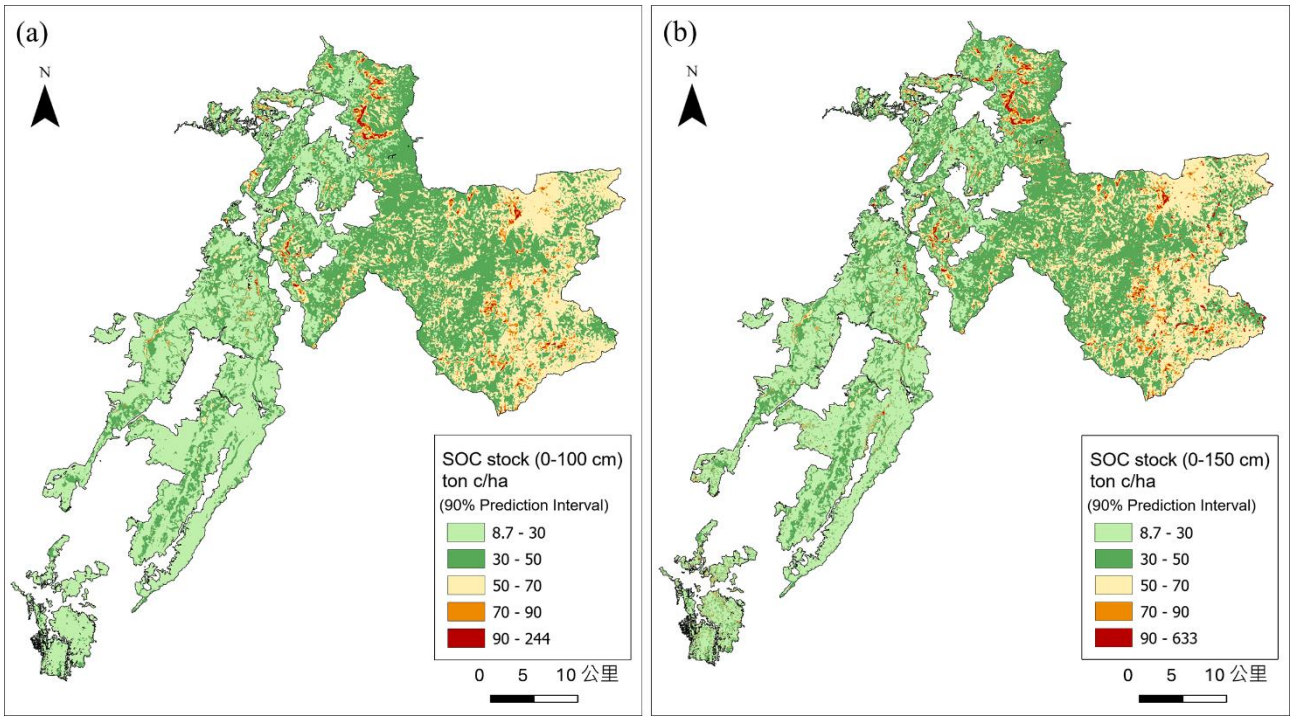


圖 3-5-82 嘉義分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 嘉義分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 嘉義分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

7. 臺中分署

(1) 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

臺中分署位於臺灣中部，轄區面積達 138,726 公頃，涵蓋雪霸國家公園、武陵國家森林遊樂區等重要保護區，年均溫 15.2℃，年均降雨量 2,038 毫米。轄區內天然林占 72%，由於海拔高度差異大，形成從熱帶到寒帶的垂直植被分布，林相以天然針葉混淆林、針闊混淆林及闊葉混淆林為主。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-83），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-135 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-135 ton C/ha) 主要分布於雪霸國家公園區域、石門山、白姑大山一帶；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 集中於大雪山及武陵國家森林遊樂區一帶；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布於低海拔區域。這種分布型態主要受到林型組成、海拔高度及地形條件的影響。海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-63），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 0.70 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 0.28 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 4.48 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 2.03 百萬公噸；海拔 2,000

公尺以上的碳儲存總量為 7.04 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 3.14 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 107±8.58 ton C/ha，原始樣本數為 47），海拔 0-1,000 公尺的木竹混淆林則為最低值（推估結果為 61.1±6.56 ton C/ha，原始樣本數為 3）。臺中分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 12.2 百萬公噸。

表 3-5-63 臺中分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.02	0.04	0.08	0	0.03	0.28	0.01	0.01	0.22	0.7
	1,000-2,000	0.29	0.22	0.38	0.25	0.34	2.03	0.01	0.01	0.95	4.48
	2,000 以上	0.97	0.22	0.1	3.14	0.59	0.71	0	0	1.3	7.04
	總計	1.27	0.48	0.56	3.39	0.96	3.03	0.02	0.03	2.47	12.2
平均 (tC/ha)	0-1,000	84.9±4.32	78.6±5.31	78.1±4.62	65.5±4.08	64.4±3.82	75.0±5.39	61.1±6.56	68.3±5.62	68.1±7.00	71.6±7.91
	1,000-2,000	97.1±6.73	91.5±6.99	92.0±6.93	77.4±8.89	75.4±8.52	89.0±7.94	73.6±4.46	78.5±5.92	79.5±11.3	83.8±8.59
	2,000 以上	107±8.58	102±8.24	104±7.78	91.5±10.1	86.8±9.25	98.8±8.31	0.00±0.00	0.00±0.00	95.5±12.3	76.1±43.6
	總計	96.3±11.1	90.6±11.6	91.2±12.7	78.1±13.0	75.5±11.2	87.6±12.0	44.9±39.4	48.9±42.7	81.1±13.8	77.1±18.6

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

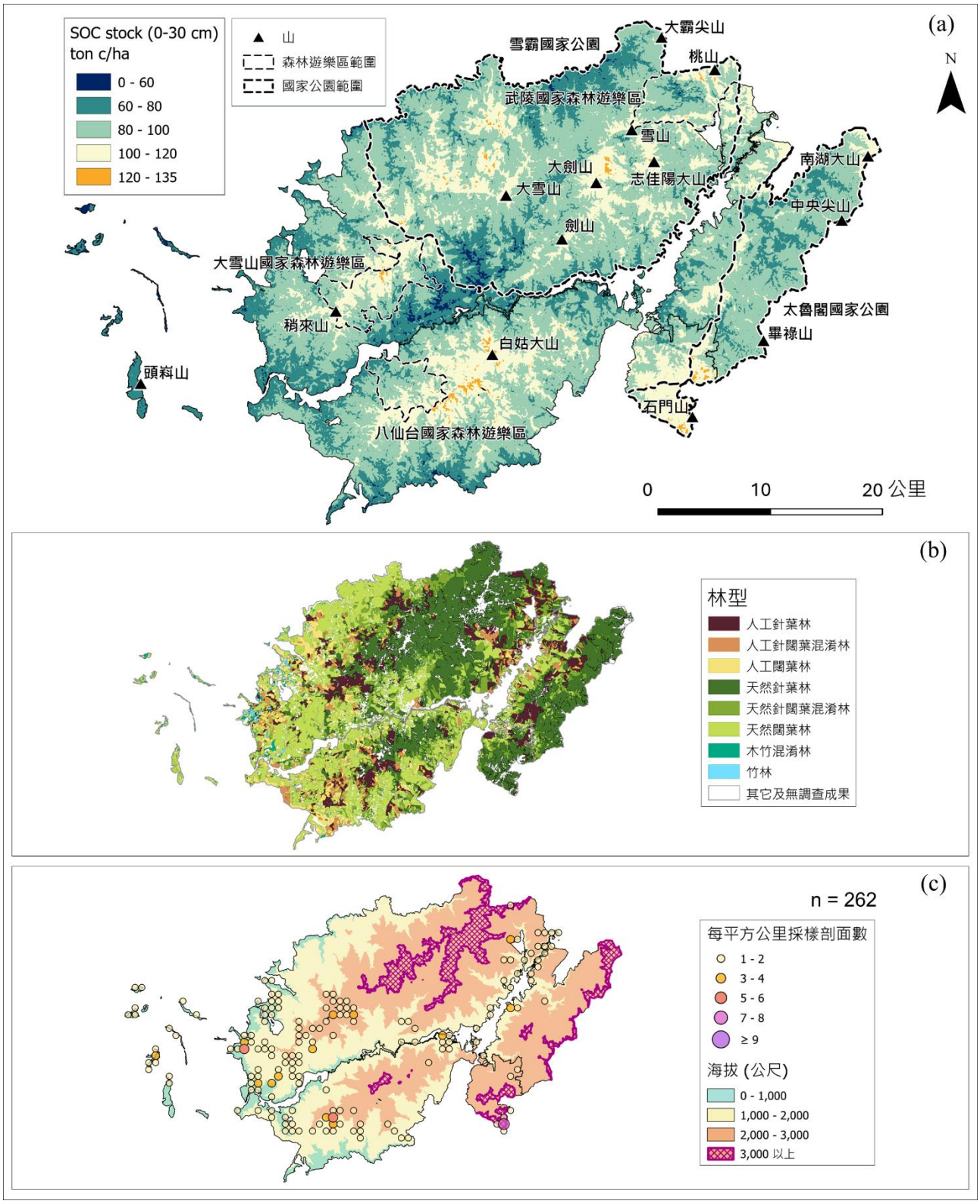


圖 3-5-83 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺中分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺中分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-84），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 3.1-79 ton C/ha。高度不確定區域（50-79 ton C/ha）主要出現在武陵國家森林遊樂區東側，這些區域的採樣剖面密度相對較低（每平方公里 1-2 個剖面），以及土綱分布影響，增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-64），取樣工作分布於 0-1,000 公尺 (n = 60) 、1,000-2,000 公尺 (n = 104) 及 2,000 公尺以上 (n = 98) 的範圍。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝70) ，其次為人工針葉林 (n＝61) ，天然針闊葉混淆林的採樣剖面數量最少 (n＝9) ，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，天然針葉林具有最大的變異性 (±13.0 ton C/ha) ，反映出不同海拔高度的天然針葉林碳儲存特性差異顯著。相較之下，天然針闊葉混淆林的變異性較小 (±11.2 ton C/ha) ，顯示出較為穩定的碳儲存特性。

表 3-5-64 臺中分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	3	2	5	0	1	25	3	15	6	60
1000-2000	11	7	15	10	4	35	2	18	2	104
2000 以上	47	9	2	9	4	10	0	17	0	98
總計	61	18	22	19	9	70	5	50	8	262

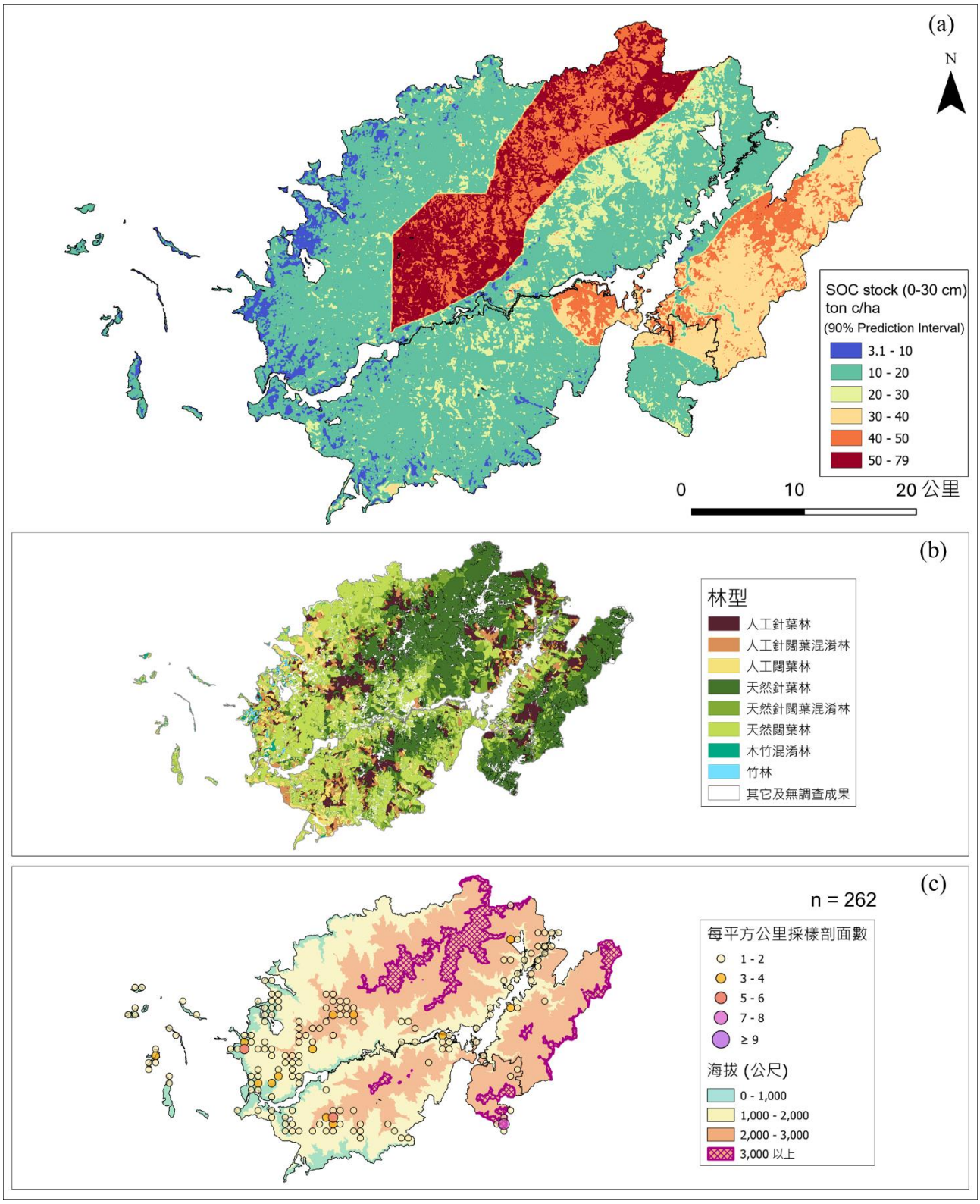


圖 3-5-84 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺中分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺中分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-85），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-190 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (160-190 ton C/ha) 主要分布於雪霸國家公園及太魯閣國家公園交界處；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 位於高海拔山區；較低的有機碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則集中於低海拔區域。這種分布型態主要受到林型組成、海拔高度及地形條件的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-65），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 0.98 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 0.39 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 6.36 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 2.85 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 10.1 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 4.43 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 152±10.6 ton C/ha，原始樣本數為 36），海拔 0-1,000 公尺的木竹混淆林則為最低值（推估結果為 84.1±9.40 ton C/ha，原始樣本數為 1）。臺中分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 17.4 百萬公噸。

表 3-5-65 臺中分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.02	0.06	0.11	0	0.04	0.39	0.02	0.02	0.31	0.98
	1,000-2,000	0.4	0.32	0.52	0.35	0.54	2.85	0.01	0.02	1.34	6.36
	2,000 以上	1.37	0.33	0.14	4.43	0.93	1	0	0	1.85	10.1
	總計	1.8	0.71	0.78	4.78	1.51	4.25	0.03	0.03	3.5	17.4
平均 (t C/ha)	0-1,000	120±6.57	117±8.75	109±6.45	90.8±5.80	103±5.62	105±7.40	84.1±9.40	94.4±8.10	94.3±10.7	102±12.2
	1,000-2,000	136±8.63	134±9.37	128±9.39	108±10.2	119±10.2	125±10.2	101±6.40	108±7.90	113±14.9	119±12.4
	2,000 以上	152±10.6	149±9.99	145±8.92	129±12.4	136±10.7	139±9.61	0.00±0.00	0.00±0.00	136±15.2	110±62.5
	總計	136±15.7	133±15.9	127±18.3	109±19.2	119±16.4	123±17.3	61.7±54.1	67.3±58.7	114±20.9	110±26.3

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

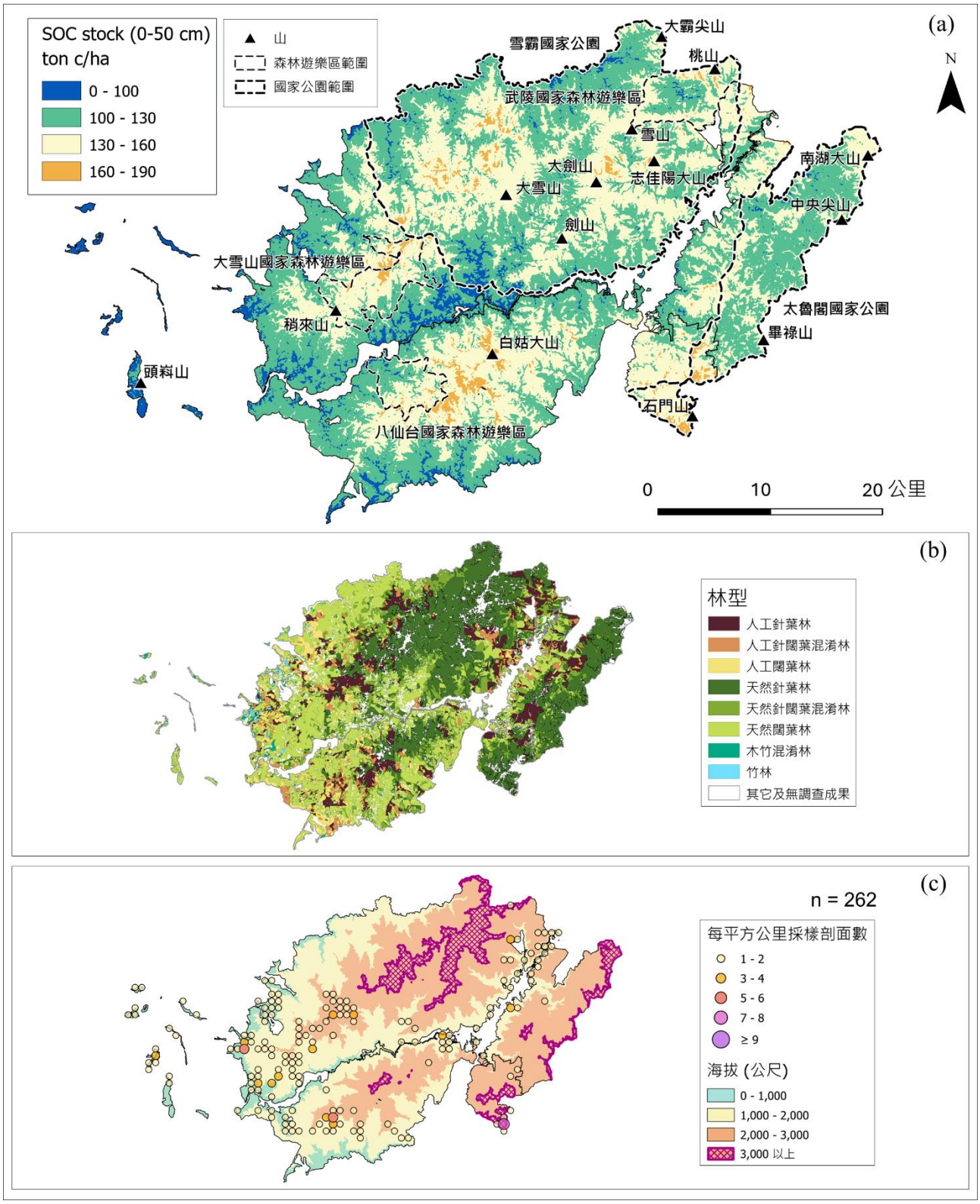


圖 3-5-85 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺中分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺中分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-86），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 5.7-126 ton C/ha。高度不確定區域 (50-126 ton C/ha) 主要出現在雪霸國家公園區域及太魯閣國家公園交界處，這些區域因採樣剖面密度相對較低（每平方公里 1-2 個剖面），以及土綱分布，增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-66），取樣工作分布於 0-1,000 公尺 (n＝40)、1,000-2,000 公尺 (n = 62) 及 2,000 公尺以上 (n = 72) 的範圍。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝47)，其次為人工針葉林 (n＝42)，天然針闊葉混淆林的採樣剖面數量最少 (n＝6)，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，天然針葉林具有最大的變異性 (109±19.2 ton C/ha)，反映出不同海拔高度的天然針葉林碳儲存特性差異顯著。相較之下，天然針闊葉混淆林的變異性較小 (119±16.4 ton C/ha)，顯示出較為穩定的碳儲存特性。

表 3-5-66 臺中分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	1	2	4	0	1	18	1	9	4	40
1000-2000	5	4	5	7	2	24	1	12	2	62
2000 以上	36	5	1	7	3	5	0	13	0	72
總計	42	11	10	14	6	47	2	36	6	174

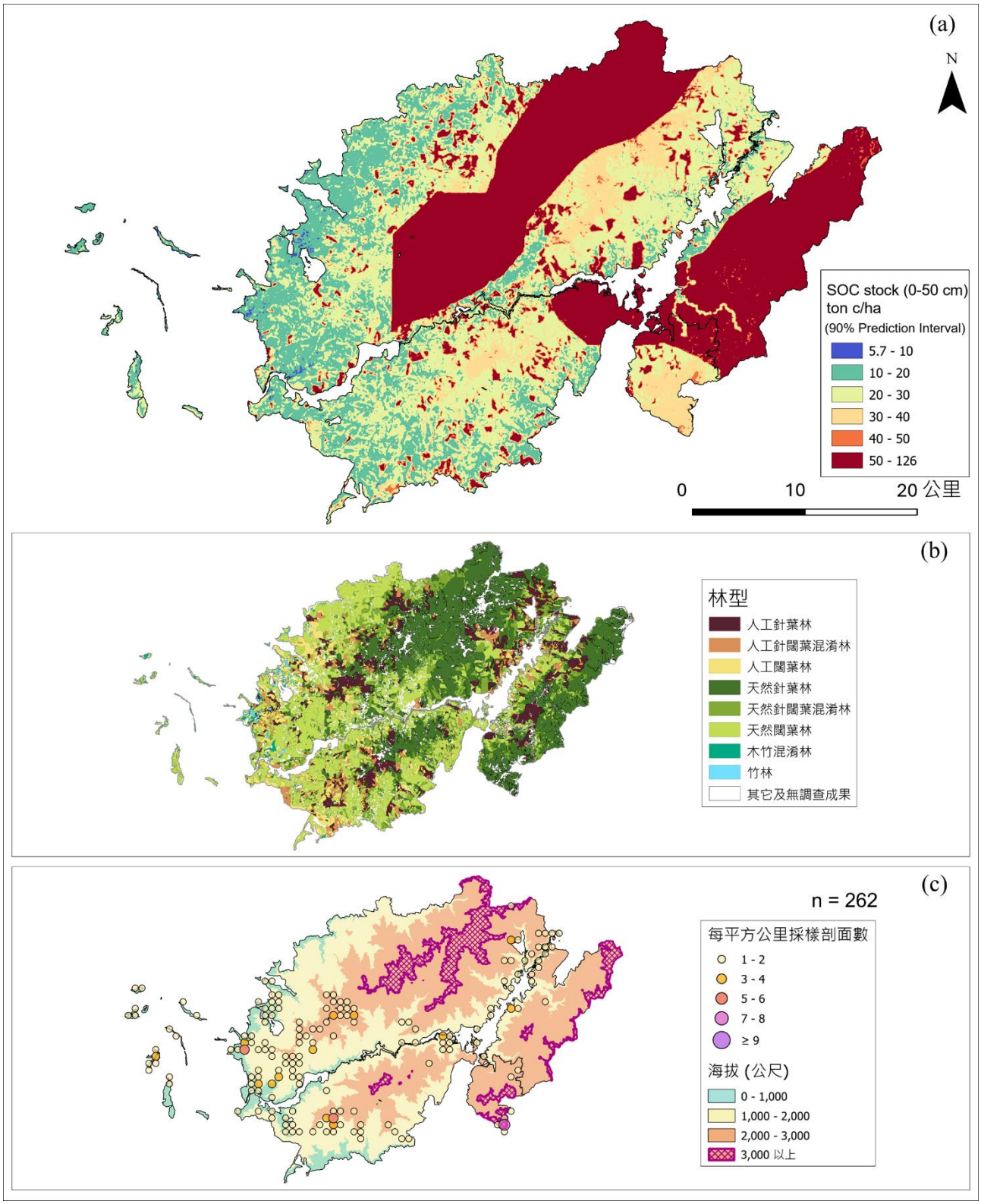


圖 3-5-86 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺中分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺中分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 臺中分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-87 (a)），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-287 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (190-287 ton C/ha) 主要出現在雪霸國家公園及太魯閣國家公園區域；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 集中於大雪山及武陵國家森林遊樂區一帶；較低的有機碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於低海拔區域。0-150 公分土壤有機碳儲存量則呈現相似的空間分布趨勢（圖 3-5-87 (b)），變異範圍在 0-280 ton C/ha 之間。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-67），0-100 公分土層中，海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 1.55 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 0.62 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 9.84 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 4.37 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 15.8 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 7.11 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (235±12.3 ton C/ha)，海拔 0-1,000 公尺的木竹混淆林則為最低值 (142±10.7 ton C/ha)。臺中分署轄區內 0-100 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 27.2 百萬公噸。0-150 公分土層的分析結果顯示相似的趨勢（表 3-5-68），但儲存量略高。海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 1.72 百萬公噸，1,000-2,000 公尺為 10.8 百萬公噸，2,000 公尺以上為 19.1 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量以海拔 2,000 公尺以上的天然針葉林最高 (283±26.7 ton C/ha)。轄區總碳儲存量達 31.7 百萬公噸。

表 3-5-67 臺中分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0.04	0.09	0.18	0.01	0.07	0.62	0.03	0.03	0.5	1.55
	1,000-2,000	0.63	0.49	0.8	0.56	0.85	4.37	0.02	0.03	2.1	9.84
	2,000 以上	2.12	0.49	0.21	7.11	1.44	1.54	0	0	2.91	15.8
	總計	2.79	1.07	1.2	7.68	2.36	6.53	0.04	0.06	5.51	27.2
平均 (t C/ha)	0-1,000	188±13.0	181±16.2	171±9.17	148±9.15	162±9.23	165±9.53	142±10.7	152±9.82	151±15.1	162±15.7
	1,000-2,000	212±11.8	203±12.7	196±12.6	174±14.4	187±13.8	191±13.6	160±10.1	171±11.0	177±20.4	186±16.6
	2,000 以上	235±12.3	226±10.7	221±10.2	207±15.5	211±12.6	215±11.3	0.00±0.00	0.00±0.00	214±19.8	170±96.6
	總計	211±23.3	204±22.2	196±24.8	176±29.5	187±24.8	190±24.9	101±87.7	108±93.7	180±31.7	173±40.3

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-68 臺中分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0.04	0.11	0.19	0.01	0.08	0.66	0.03	0.03	0.57	1.72
	1,000-2,000	0.7	0.6	0.81	0.83	0.91	4.49	0.02	0.03	2.41	10.8
	2,000 以上	2.31	0.58	0.21	9.72	1.48	1.51	0	0	3.33	19.1
	總計	3.05	1.3	1.21	10.6	2.46	6.66	0.05	0.06	6.31	31.7
平均 (tC/ha)	0-1,000	213±11.9	227±13.9	177±13.2	229±16.0	182±10.5	175±13.2	170±14.0	177±12.2	172±18.6	191±24.4
	1,000-2,000	236±18.0	250±16.5	198±14.6	259±16.9	200±18.6	197±17.6	189±9.26	190±10.8	202±24.5	213±27.0
	2,000 以上	255±25.7	267±21.5	221±16.9	283±26.7	216±24.2	209±25.0	0.00±0.00	0.00±0.00	245±32.2	188±110
	總計	234±20.9	248±20.3	199±21.9	257±26.9	199±17.1	194±17.3	120±104	122±106	207±36.6	198±41.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

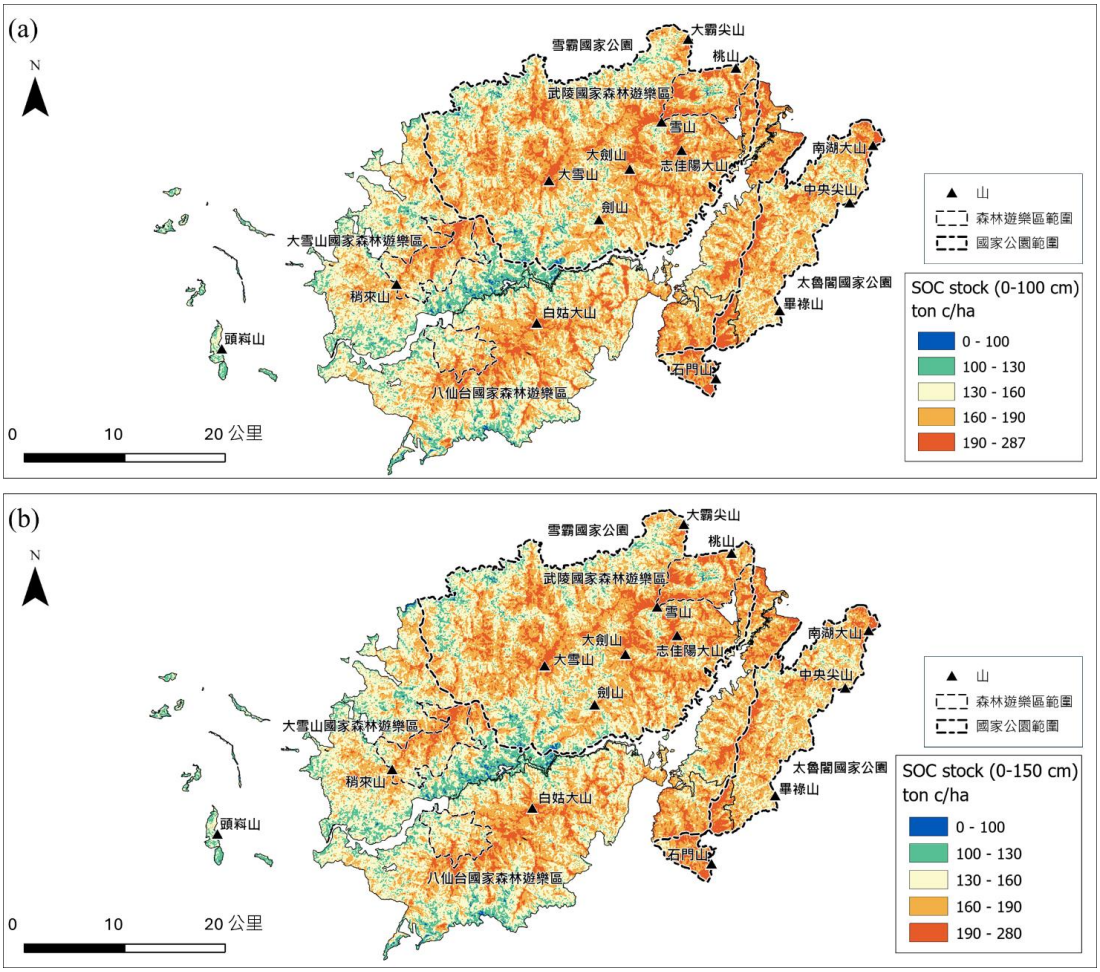


圖 3-5-87 臺中分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺中分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 臺中分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-88），0-100 公分土層的預測值不確定性變異範圍為 9.5-248 ton C/ha，0-150 公分土層則為 9.5-645 ton C/ha。高度不確定區域主要集中於雪霸國家公園區域，這些區域的採樣剖面密度相對較低。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-69），0-100 公分土層的取樣工作主要分布於 2,000 公尺以上 (n＝63)，其次為 1,000-2,000 公尺 (n＝57) 及 0-1,000 公尺 (n＝26) 的範圍。0-150 公分土層的採樣數量較少，以 1,000-2,000 公尺最多 (n＝21)，其次為 2,000 公尺以上 (n＝16)。就林型而言，0-100 公分深度以天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝38)，而 0-150 公分深度則同樣以天然闊葉林最多 (n = 13)。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層中，人工針葉林具有最大的變異性 (211±23.3 ton C/ha)，而天然針闊葉混淆林和人工針闊葉混淆林的變異性較小（分別為 187±24.8 及 204±22.2 ton C/ha）。0-150 公分土層的變異性普遍較大，其中天然針葉林的變異性最高 (257±26.9 ton C/ha)。採樣剖面數量對於預測結果的可靠度有明顯影響，特別是在 0-100 公分與 0-150 公分採樣剖面數量明顯較少的情況下。

表 3-5-69 臺中分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	0	2	1	0	1	12	1	6	3	26
	1,000-2,000	5	4	5	6	2	21	0	12	2	57
	2,000 以上	30	5	1	5	3	5	0	14	0	63
	總計	35	11	7	11	6	38	1	32	5	146
0-150	0-1,000	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2
	1,000-2,000	1	1	2	2	0	12	0	0	3	21
	2,000 以上	5	3	0	1	0	1	0	0	6	16
	總計	6	4	2	3	1	13	0	1	9	39

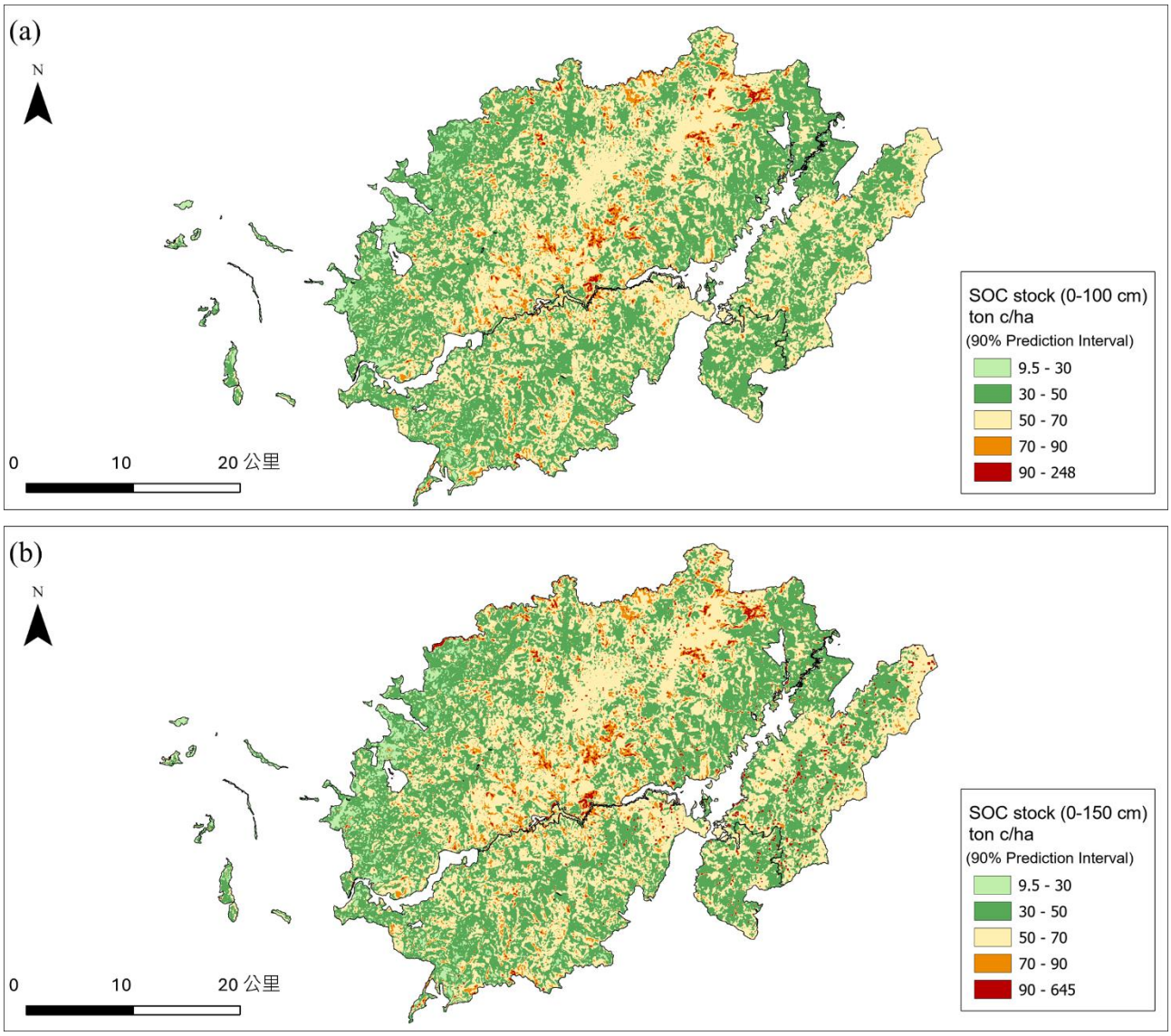


圖 3-5-88 臺中分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺中分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺中分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

8. 臺東分署

(1) 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量

臺東分署位於臺灣東部，轄區面積約 237,795 公頃，從海岸線延伸至海拔 3,000 公尺以上的高山區，年均溫 19.1℃，年均降雨量 2,087 毫米。轄區內林相豐富多樣，以天然闊葉林為主，占全區面積最大比例，其次為天然針葉林及人工闊葉林。

0-30 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-89），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-145 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (120-145 ton C/ha) 主要出現在北大武山及向陽國家森林遊樂區周圍；中等有機碳儲存量 (80-100 ton C/ha) 集中於都蘭山一帶；較低的有機碳儲存量 (0-60 ton C/ha) 則零星分布於低海拔區域。這種分布型態主要受到林型組成、海拔高度及地形條件的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-70），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 6.47 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 4.45 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 8.44 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 6.38 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 4.49 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 1.67 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 115±8.27 ton C/ha，原始樣本數為 9），海拔 0-1,000 公尺的天然針闊葉混淆林則為最低值 (58.5±6.18 ton C/ha)。臺東分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 19.4 百萬公噸。

表 3-5-70 臺東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0.02	1.06	0.01	0.02	4.45	0.03	0.02	0.87	6.47
	1,000-2,000	0.07	0.09	0.32	0.09	0.41	6.38	0	0	1.06	8.44
	2,000 以上	0.34	0.06	0.04	1.67	0.75	0.85	0	0	0.78	4.49
	總計	0.42	0.16	1.42	1.77	1.18	11.7	0.03	0.02	2.71	19.4
平均 (tC/ha)	0-1,000	83.9±5.94	79.9±4.76	76.7±8.34	59.0±6.35	58.5±6.18	74.7±8.45	67.1±16.8	68.3±11.2	67.5±10.8	70.6±8.83
	1,000-2,000	98.5±5.59	93.9±7.27	90.3±7.89	80.6±8.21	79.7±9.25	91.5±9.94	74.4±5.15	80.7±3.91	86.2±11.4	86.2±7.90
	2,000 以上	115±8.27	106±7.30	103±7.01	97.3±10.5	92.2±9.87	104±8.49	0.00±0.00	0.00±0.00	100±11.2	79.6±45.6
	總計	99.0±15.3	93.2±12.9	90.0±13.1	79.0±19.2	76.8±17.0	90.0±14.7	47.2±41.0	49.7±43.4	84.7±16.5	78.8±21.5

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

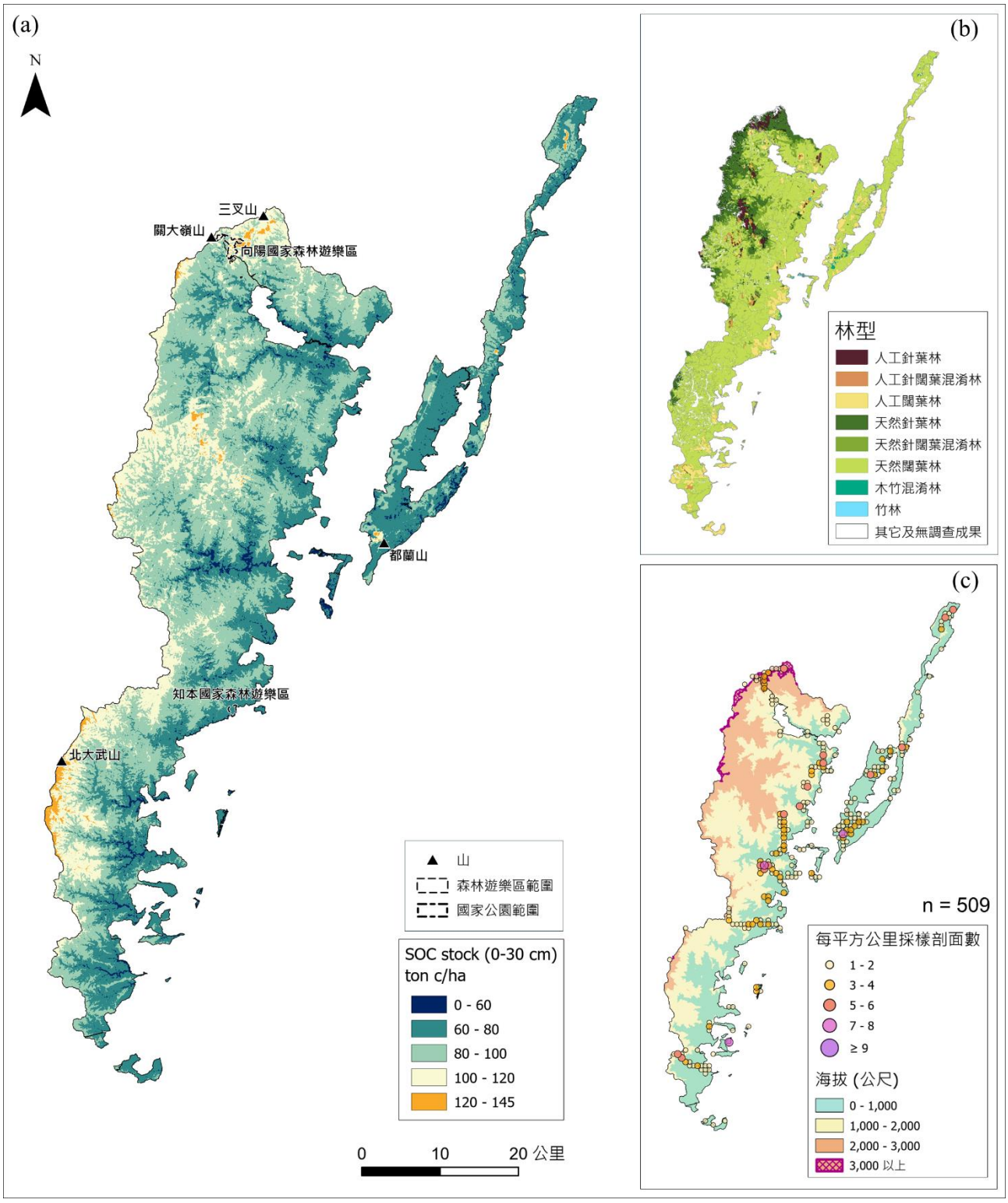


圖 3-5-89 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺東分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(2) 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-90），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 3.2-95 ton C/ha。高度不確定區域 (50-95 ton C/ha) 主要出現在向陽國家森林遊樂區周圍，這些區域的採樣剖面密度相對較低（每平方公里 1-2 個剖面），增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-71），取樣工作主要分布於海拔 0-1,000 公尺 (n = 266) 及 1,000-2,000 公尺 (n = 204) 的範圍，2,000 公尺以上區域的採樣剖面數量較少 (n = 39)。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n = 251)，其次為無調查成果 (n = 117) 及人工闊葉林 (n = 63)，天然針闊葉混淆林的採樣剖面數量最少 (n = 5)，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，人工針葉林具有最大的變異性 (99.0±15.3 ton C/ha)，反映出不同海拔高度的人工針葉林碳儲存特性差異顯著。相較之下，人工針闊葉混淆林的變異性較小 (±12.9 ton C/ha)，顯示出較為穩定的碳儲存特性。

表 3-5-71 臺東分署各林型及海拔之 0-30 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	0	2	49	0	0	128	10	72	5	266
1000-2000	16	14	14	11	3	122	0	23	1	204
2000 以上	9	1	0	3	2	1	0	23	0	39
總計	25	17	63	14	5	251	10	118	6	509

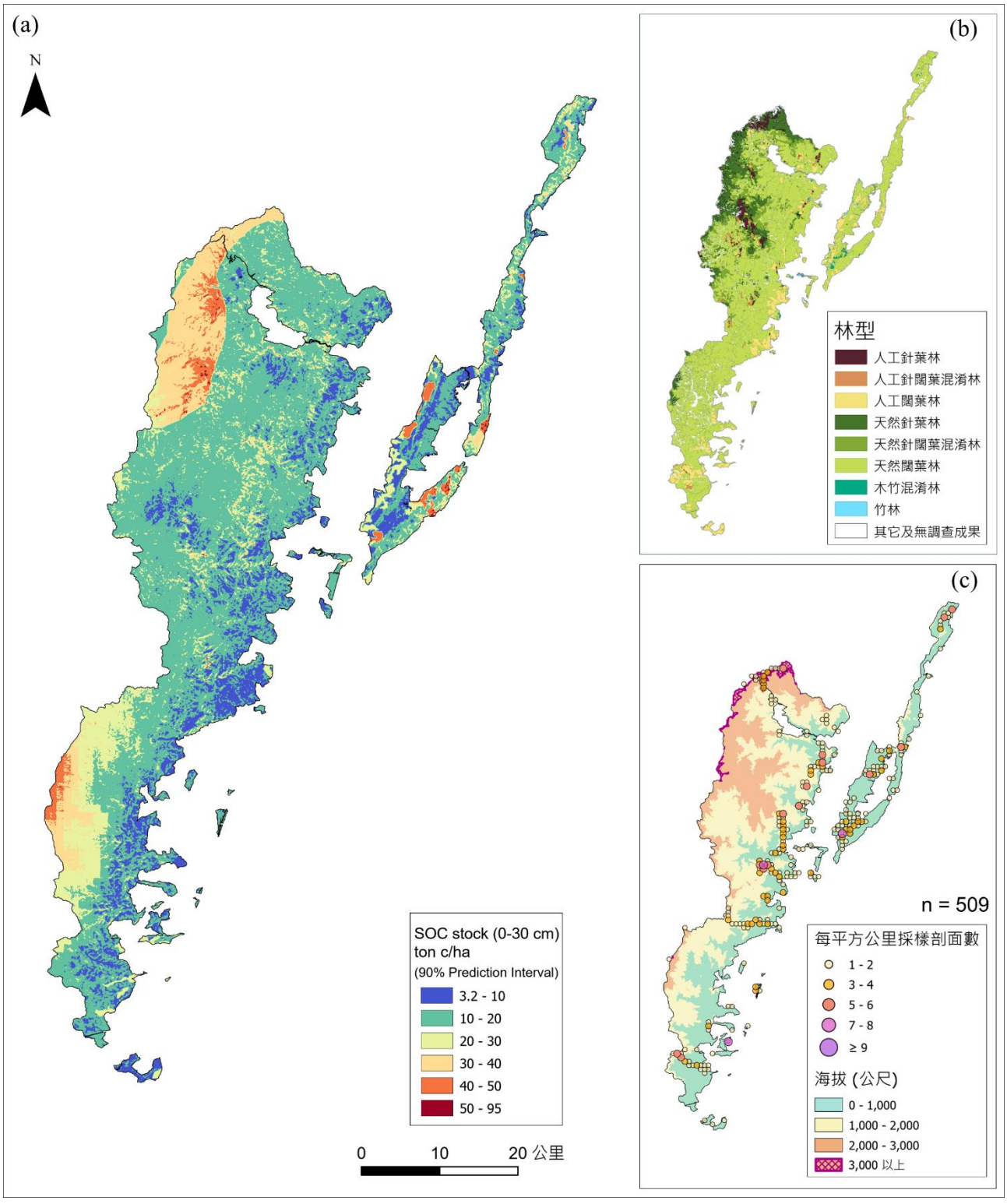


圖 3-5-90 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-30 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺東分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 x 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(3) 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量

0-50 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-91），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-213 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (190-213 ton C/ha) 主要出現在北大武山及向陽國家森林遊樂區周圍；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 集中於都蘭山一帶；較低的有機碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於低海拔區域。這種分布型態主要受到林型組成、海拔高度及地形條件的影響。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-72），海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 9.06 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 6.24 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 11.9 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 8.91 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 6.39 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 2.33 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值（推估結果為 161±10.1 ton C/ha，原始樣本數為 9），海拔 0-1,000 公尺的人工針葉林則為最低值 (117±7.86 ton C/ha)。臺東分署轄區的森林土壤有機碳儲存總量為 27.3 百萬公噸。

表 3-5-72 臺東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0.02	1.48	0.01	0.04	6.24	0.04	0.02	1.2	9.06
	1,000-2,000	0.1	0.14	0.44	0.12	0.64	8.91	0	0	1.49	11.9
	2,000 以上	0.48	0.08	0.06	2.33	1.15	1.18	0	0	1.1	6.39
	總計	0.58	0.24	1.98	2.46	1.84	16.3	0.05	0.03	3.79	27.3
平均 (t C/ha)	0-1,000	117±7.86	117±6.83	107±13.5	81.1±9.11	93.9±8.38	105±12.9	94.4±26.9	97.3±20.1	93.4±16.4	101±11.9
	1,000-2,000	137±7.49	136±10.4	125±11.2	111±11.2	125±12.3	128±14.0	102±7.25	110±6.38	121±15.9	122±12.0
	2,000 以上	161±10.1	154±8.52	144±7.98	136±13.7	142±12.8	145±11.3	0.00±0.00	0.00±0.00	142±14.3	114±64.9
	總計	138±22.1	136±18.2	126±18.3	109±27.3	120±24.4	126±20.3	65.3±56.7	69.1±60.2	119±24.5	112±30.2

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

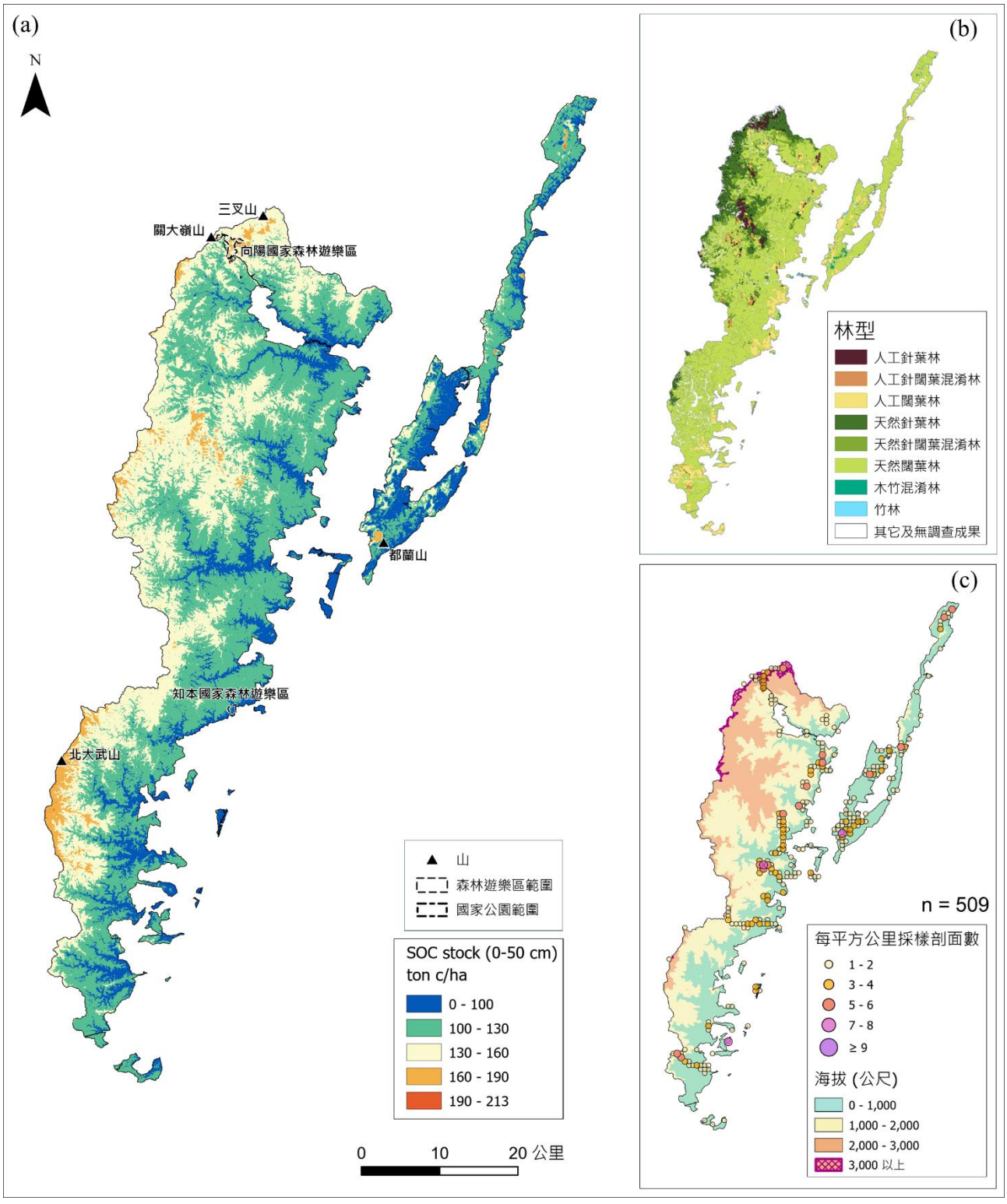


圖 3-5-91 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺東分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c) 採用 1 × 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(4) 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-92），預測值的不確定性在空間上分布不均，變異範圍為 5.3-174 ton C/ha。高度不確定區域 (50-174 ton C/ha) 主要出現在都蘭山北部，這些區域的採樣剖面密度相對較低 （每平方公里 1-2 個剖面），亦受到土綱分布影響，增加了預測的不確定性。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-73），取樣工作分布於 0-1,000 公尺 (n = 191) 及 1,000-2,000 公尺 (n＝198) 的範圍，2,000 公尺以上區域的採樣剖面數量較少 (n＝38)。就林型而言，天然闊葉林的採樣剖面最多 (n＝213)，其次為無調查成果 (n＝92) 及人工闊葉林 (n＝53)，木竹混淆林 (n＝5) 及竹林 (n＝2) 的採樣剖面數量較少，反映出採樣分布的不均衡性。經由標準差的範圍可以發現，人工針葉林具有最大的變異性 (±22.1 ton C/ha)，反映出不同海拔高度的人工針葉林碳儲存特性差異顯著。相較之下，人工針闊葉混淆林的變異性較小 (±18.2 ton C/ha)，顯示出較為穩定的碳儲存特性。

表 3-5-73 臺東分署各林型及海拔之 0-50 公分土壤採樣剖面數

海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	其它	竹林	總計
	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-1000	0	2	40	0	0	92	5	51	1	191
1000-2000	16	14	13	11	3	120	0	20	1	198
2000以上	9	1	0	3	2	1	0	22	0	38
總計	25	17	53	14	5	213	5	93	2	427

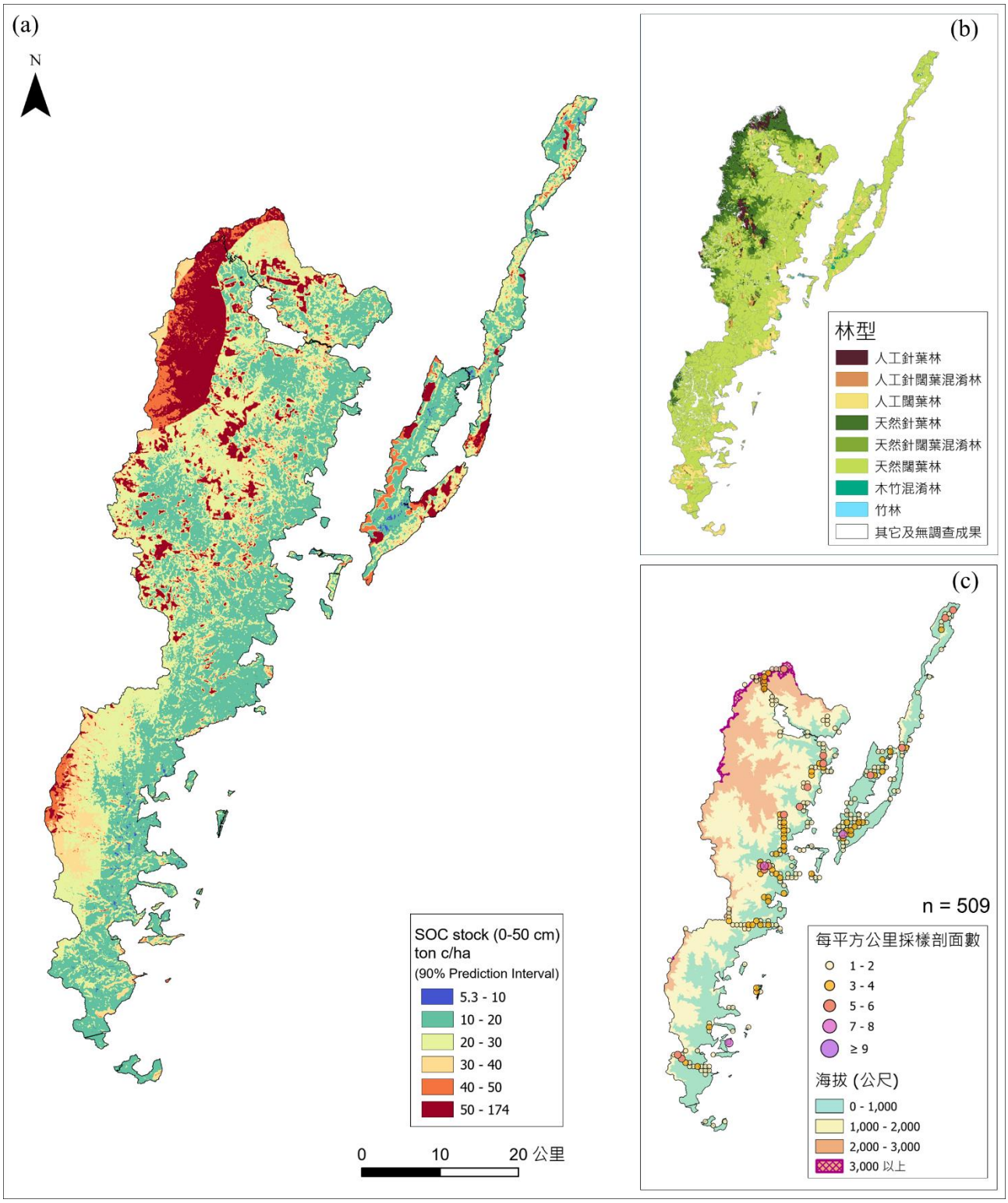


圖 3-5-92 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-50 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺東分署林型空間分布圖及圖 (c) 臺東分署海拔高度與土壤採樣剖面密度分布圖；其中圖 (b) 依據第四次全國森林資源調查資料繪製，圖 (c)採用 1 x 1 公里網格進行空間分析，計算各網格內土壤採樣剖面數量，以呈現採樣剖面之空間分布特性及其與地形海拔之關係。

(5) 臺東分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量

0-100 公分土壤有機碳儲存量分布圖顯示（圖 3-5-93），有機碳儲存量在空間上的變異範圍在 0-273 ton C/ha 之間。較高的有機碳儲存量 (190-273 ton C/h) 主要出現在知本國家森林遊樂區及向陽國家森林遊樂區周圍；中等有機碳儲存量 (130-160 ton C/ha) 集中於都蘭山一帶；較低的有機碳儲存量 (0-100 ton C/ha) 則零星分布於低海拔區域。0-150 公分土壤有機碳儲存量則呈現相似的空間分布趨勢，變異範圍在 0-281 ton C/ha 之間。

海拔與林型的交叉分析結果顯示（表 3-5-74），0-100 公分土層中，海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 14.1 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 9.71 百萬公噸；海拔 1,000-2,000 公尺的碳儲存總量為 17.7 百萬公噸，以天然闊葉林儲存量最大，達 13.3 百萬公噸；海拔 2,000 公尺以上的碳儲存總量為 9.57 百萬公噸，以天然針葉林儲存量最大，達 3.51 百萬公噸。就平均每公頃有機碳儲存量而言，海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林具有最高值 (240±12.7 ton C/ha)，海拔 0-1,000 公尺的竹林則為最低值 (147±17.8 ton C/ha)。臺東分署轄區內 0-100 公分的森林土壤有機碳儲存總量為 41.4 百萬公噸。0-150 公分土層的分析結果顯示相似的趨勢（表 3-5-75），但儲存量略高。海拔 0-1,000 公尺的碳儲存總量為 15.1 百萬公噸，1,000-2,000 公尺為 17.8 百萬公噸，2,000 公尺以上為 10.6 百萬公噸。平均每公頃有機碳儲存量以海拔 2,000 公尺以上的人工針葉林最高 (254±24.4 ton C/ha)。轄區總碳儲存量達 43.6 百萬公噸。

表 3-5-74 臺東分署各林型及海拔之 0-100 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (Mt C)	0-1,000	0	0.03	2.33	0.02	0.06	9.71	0.07	0.03	1.85	14.1
	1,000-2,000	0.16	0.2	0.68	0.19	0.98	13.3	0	0.01	2.17	17.7
	2,000 以上	0.71	0.12	0.09	3.51	1.72	1.77	0	0	1.64	9.57
	總計	0.88	0.36	3.09	3.72	2.77	24.8	0.07	0.04	5.66	41.4
平均 (tC/ha)	0-1,000	184±10.4	176±9.95	169±15.2	139±11.7	154±12.4	163±15.3	149±26.3	147±17.8	144±19.7	158±15.4
	1,000-2,000	211±10.2	203±12.2	190±12.3	175±11.5	190±13.8	190±13.6	170±5.78	177±7.27	177±17.2	187±13.7
	2,000 以上	240±12.7	229±10.0	220±10.2	204±13.4	212±11.8	217±10.1	0.00±0.00	0.00±0.00	211±17.4	170±97.2
	總計	212±28.3	203±26.5	193±25.6	173±32.7	185±29.5	190±26.9	106±92.7	108±94.9	177±33.7	172±43.4

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

表 3-5-75 臺東分署各林型及海拔之 0-150 公分土壤有機碳總儲存量與平均儲存量

統計類型	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
總量 (MtC)	0-1,000	0	0.04	2.36	0.03	0.07	10.4	0.08	0.04	2.14	15.1
	1,000-2,000	0.17	0.24	0.65	0.26	1.02	13.1	0	0.01	2.33	17.8
	2,000 以上	0.75	0.13	0.08	4.54	1.69	1.7	0	0	1.73	10.6
	總計	0.92	0.41	3.09	4.83	2.77	25.2	0.08	0.05	6.21	43.6
平均 (tC/ha)	0-1,000	204±10.3	213±10.2	171±37.3	219±22.3	172±16.9	174±41.0	175±35.5	179±42.9	167±36.0	186±20.0
	1,000-2,000	220±16.6	237±18.6	181±17.1	240±20.2	197±21.9	188±18.5	185±13.1	178±7.95	190±21.2	202±24.1
	2,000 以上	254±24.4	254±24.6	196±26.0	264±27.6	208±24.1	208±21.2	0.00±0.00	0.00±0.00	223±29.9	179±104
	總計	226±25.5	235±20.7	183±12.5	241±22.8	192±18.2	190±17.2	120±104	119±103	193±28.2	189±39.1

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

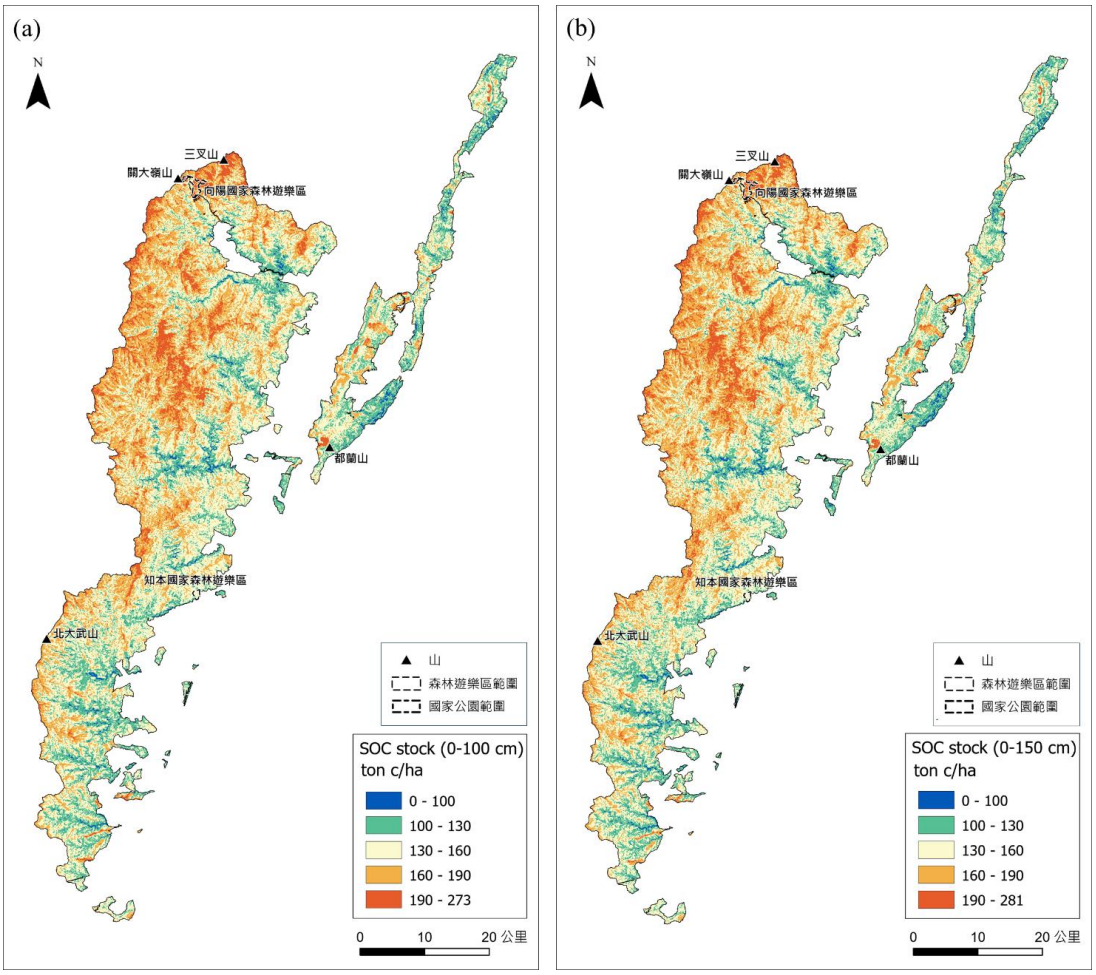


圖 3-5-93 臺東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖、圖 (b) 臺東分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量空間分布圖

(6) 臺東分署 0-100 公分與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量不確定性評估

森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間圖顯示（圖 3-5-94），0-100 公分土層的預測值不確定性變異範圍為 10-302 ton C/ha，0-150 公分土層則為 10-684 ton C/ha。高度不確定區域主要集中於都蘭山北部及沿海區域，這些區域的採樣剖面密度相對較低。

採樣剖面分布分析顯示（表 3-5-76），0-100 公分土層的取樣工作主要分布於 1,000-2,000 公尺 (n = 187) 及 0-1,000 公尺 (n = 142) 的範圍，2,000 公尺以上區域的採樣剖面數量較少 (n = 33)。0-150 公分土層的採樣數量明顯較少，1,000-2,000 公尺有 58 個採樣剖面，0-1,000 公尺有 29 個，2,000 公尺以上僅有 8 個。就林型而言，兩個深度都以天然闊葉林的採樣剖面最多（分別為 180 及 42 個）。經由標準差的範圍可以發現，0-100 公分土層中，人工針葉林具有最大的變異性（±28.3 ton C/ha），而人工針闊葉混淆林的變異性較小 (±26.5 ton C/ha)。0-150 公分土層的變異性普遍較大，其中天然針葉林的變異性最高 (±22.8 ton C/ha)。

表 3-5-76 臺東分署各林型及海拔之 0-100 公分與 0-150 公分土壤採樣剖面數

深度 (cm)	海拔 (m)	人工林			天然林			木竹混淆林	竹林	其它	總計
		針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林	針葉林	針闊葉混淆林	闊葉林				
0-100	0-1,000	0	1	34	0	0	71	4	0	32	142
	1,000-2,000	16	14	13	11	3	109	0	1	20	187
	2,000 以上	9	1	0	3	2	0	0	0	18	33
	總計	25	16	47	14	5	180	4	1	70	362
0-150	0-1,000	0	0	6	0	0	13	3	0	7	29
	1,000-2,000	6	5	5	4	2	29	0	0	7	58
	2,000 以上	2	1	0	2	0	0	0	0	3	8
	總計	8	6	11	6	2	42	3	0	17	95

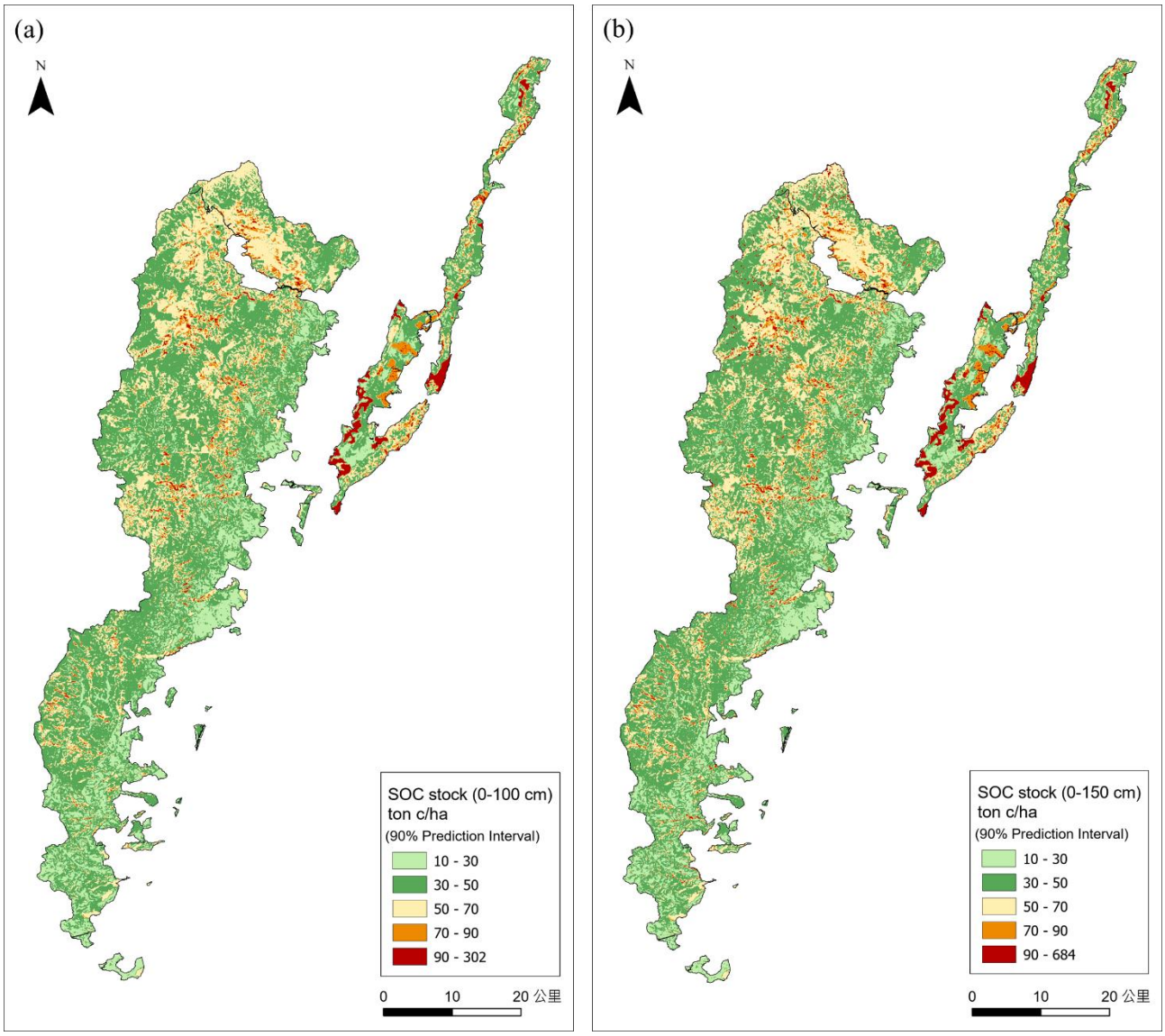


圖 3-5-94 臺東分署 0-100 與 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間分布圖

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

圖 (a) 臺東分署 0-100 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖、圖 (b) 臺東分署 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量 90%預測區間空間分布圖

六、研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題

(一)依據 112、113 年所收集的現有森林土壤碳含量數據、推估模式、準確性評估、數位化土壤繪圖 (Digital soil mapping) 技術等成果，研提台灣森林土壤碳匯量之初步評估報告。

● **工作推動說明**

本計畫以繪製森林土壤有機碳儲存量基線為研究主軸，透過數位土壤繪圖技術 (Digital soil mapping, DSM) 建立土壤有機碳儲存量推估模型，並評估模型效能及代表性確立模型之可信度，本研究除了 0-150 公分森林土壤有機碳儲存量外，亦將枯枝落葉層有機碳儲存量納入計算，相關結果於執行成果呈現。然而，研究過程中發現多項待釐清及精進之處，茲分述討論如下。

● **執行成果**

1. 枯枝落葉層 (litter layer)

過往文獻表明枯枝落葉層對森林土壤有機儲存量有相當的貢獻（張朝婷，2005；向韻如，2006）。而本計畫之枯枝落葉層計算係根據張朝婷 (2005) 的研究論文資料，依按照不同海拔的採樣剖面進行分類，分成 0-1,000 公尺、1,000-2,000 公尺、2,000 公尺以上，並依照其枯枝落葉層碳儲存量進行平均計算而得，相關結果整理於表 3-6-1，分別呈現各分署於不同土壤深度（0-30、0-50、0-100 及 0-150 公分）之土壤有機碳儲存量及枯枝落葉層數據。臺灣森林土壤總碳儲存量未加上枯枝落葉層為 303 百萬公噸，加總後為 330 百萬公噸（0-150 公分）。而全臺 0-30 公分森林碳儲存量為 132 百萬公噸，全臺 0-50 公分森林碳儲存量為 188 百萬公噸，全臺 0-100 公分森林碳儲存量為 309 百萬公噸。

各分署各土壤深度之碳儲存量，加上枯枝落葉層之碳儲存量後，平均增加約為 8%-14%左右，與過往研究增加的百分比趨勢相同，亦表明枯枝落葉層雖占總碳量相對較少，但仍有其重要性 (Domke *et al*., 2016)。然而本計畫僅使用張朝婷 (2005) 研究資料進行推估，儘管枯枝落葉層無明顯的空間樣態 (Schöning *et al*., 2006)，但未來研究應有足夠樣本代表臺灣的分布情形，對於更加合理推估枯枝落葉層碳量，未來仍值得進一步探討。

表 3-6-1 全臺各分署土壤及枯枝落葉層有機碳儲存量統計

	臺灣林業分署	土壤有機碳儲存量 (Mt C)	枯枝落葉層碳儲存量 (Mt C)	總碳儲存量 (Mt C)
0-30	宜蘭	135.7	2.41	18.1
	花蓮	27.5	5.85	33.4
	南投	16.8	3.99	20.8
	屏東	16.8	2.76	19.5
	新竹	13	2.63	15.7
	嘉義	11	2.08	13.1
	臺中	12.2	3.01	15.2
	臺東	19.4	3.6	23
	總計	132	26.3	159
0-50	宜蘭	22.3	2.41	24.7
	花蓮	39.4	5.85	45.2
	南投	24	3.99	28
	屏東	23.5	2.76	26.3
	新竹	18.5	2.63	21.1
	嘉義	15.3	2.08	17.4
	臺中	17.4	3.01	20.4
	臺東	27.3	3.6	30.9
	總計	188	26.3	214
0-100	宜蘭	31.2	2.41	33.7
	花蓮	59.4	5.85	65.2
	南投	37.6	3.99	41.6
	屏東	34	2.76	36.8
	新竹	27.9	2.63	30.6
	嘉義	23.9	2.08	25.9
	臺中	27.2	3.01	30.2
	臺東	41.4	3.6	45
	總計	283	26.3	309
0-150	宜蘭	32.6	2.41	35
	花蓮	63.7	5.85	69.6
	南投	40.2	3.99	44.2
	屏東	35	2.76	37.8
	新竹	30.2	2.63	32.9
	嘉義	26.2	2.08	28.3
	臺中	31.7	3.01	34.7
	臺東	43.6	3.6	47.2
	總計	303	26.3	330

(台灣水資源與農業研究院製作，2024，林業及自然保育署委辦計畫)

2. 不確定性 (uncertainty) 討論與初步報告評估

本計畫之不確定性評估係用拔靴法 (Bootstrap) 所繪製，方法為從原始資料中重複抽樣並訓練模型數次（設定 100 次），並藉由不同模型預測土壤有機碳儲存量，因此每個網格會存有多個預測值，再藉由多個預測值計算其變異程度。例如，若 A 網格經過一百次迭代的預測值相差不大，表示 A 網格的整體預測可靠性高；反之，若 B 網格經過一百次迭代後預測值變化大，表明 B 點的整體預測不確定性高。不確定性地圖之繪製，是取預測值的 5%至 95%分位數為 90%預測區間 (Kempen *et al*., 2019；Loiseau *et al*., 2019)，並繪製空間分布圖來直觀展示分布樣態。然而，本計畫成果發現整體不確定性與海拔呈現正向關係，亦即低海拔的預測值可靠性高，而高海拔預測值不確定性高，推測為高海拔地區因易達性 (accessibility) 較低，致使採樣剖面數量不足所致。此外，各分署的 0-30 與 0-50 公分碳儲存量預測區間圖中，預測誤差大主要因為淋溶土 (Spodosols) 與弱育土 (Inceptisols) 兩種土綱所造成。以下初步報告評估討論減少碳儲存量誤差的可能方法，主要分為剖面資料與訓練模型兩方面。

3. 剖面資料

本階段以農試所 2008 年至 2020 年之全臺土壤調查成果作為主資料進行推算，在進行推算前，為了降低極端值或異常值對結果的不利影響，必須對部分資料進行校正，校正方式包含去除極端值、不合學理之數值等。推算時發現，因資料筆數於篩選後逐步減少，將大幅減少該研究試區可用之代表數據，致使在模型建立後外部推算下，無法有足夠之採樣剖面代表空白處 (Caponnetto *et al.*, 2013)；除此之外，山區採集樣本不易，調查團隊須將採集樣本攜回實驗室進行分析，不管在設備及時間成本上，皆所費不貲。即使如此，也須嚴謹對待資料之合理性而將資料進行移除，使得資料數量稀少而無法代表該研究試區之有機土壤碳匯量之趨勢變化。

(1) 納入其他彙整資料

農試所之調查資料具有嚴謹的資料調查流程，包含標準化採樣程序、固定 SOP 分析及反覆驗證，不管在採樣團隊上之訓練，或是在整體流程上，具有高度可信度。即使如此，考量「資料總筆數稀少」及「代表性不足」等問題，本團隊經討論後，決議將其他資料納入總資料庫中進行 DSM 建模。因此本團隊經討論後，決議於後期分析中將其他彙整資料納入，並於後續建模之代表性進行空間代表性範圍比較，以廣泛考量各山區代表性。增加數據點能提高統計功效，除了能夠提升正確識別資料分布及效應外，避免因資料量不足而被視為離散值，也能減少因隨機變異而產生之噪點，噪點

對於整體資料影響程度縮減，同時判定該資料是否為異常值起到關鍵作用 (Hill *et al.*, 2013；Hornung *et al.*, 2012；Salk *et al.*, 2018)。然而，增加數據點有許多優點，仍須注意數據品質，大量但低品質數據可能不會帶來預期效益，因此針對實踐中應平衡數據量和品質進行評估及考量。

(2) 資料變數轉換

本計畫之剖面資料剖面密度不高，致使原始數據中可能存在許多極大或極小值，但這些極大或極小值並非異常，是因資料稀疏使得對整體資料造成不利影響，解決方法為將應變數作對數轉換 (Log Transformation) (Changyong *et al.*, 2014; Curran-Everett, 2018; Keene, 1995)。將應變數取對數為統計分析中常見之建模資料前處理方式，目的在於縮小數據範圍，能有效縮小數據範圍而不致於失真，且能反映出整體數據之比例分布；應變數和自變數之間之關係可能為指數性或冪律關係 (Power Law Relationship)，取對數將能使非線性之關係轉為線性關係，因此在多數數據中抓取特徵將更為容易皆精確 (Faloutsos *et al.*, 1999；Wheeldon *et al.*, 2003)。其中，最大的優點莫過於將偏斜數據轉換成接近常態分布之形態，透過常態分析檢定（如 Kolmogorov-Smirnov 檢定或 D'Agostino's K^2 檢定等）確立數據是否為常態分布（表 3-6-2），將能符合多項建模須為常態分布之基本假設。除此之外，也可將其他數據進行如取對數之優化方法，如平方根轉換或 Box-Cox 轉換等。但在選擇合適之數據轉換方法時，取決於數據特性和分析目標。在進行轉換時，應該仔細考慮轉換之合理性和對分析結果潛在之影響。

表 3-6-2 資料轉換方法表

轉換類型	前提假設	適用分布
對數轉換 (Log Transformation)	數據應為正值	用於右偏分布，特別是當數據範圍廣泛時
平方根轉換 (Square Root Transformation)	數據應為非負值	用於右偏分布，但偏度較對數轉換時輕微
倒數轉換 (Reciprocal Transformation)	數據不應包含零或負值	用於具有強烈非線性趨勢的數據，特別是當大數值需要被壓縮時
Box-Cox 轉換	數據應為正值 轉換參數 λ 需要通過數據來估計	用於各種偏態分布，特別是當不確定哪種轉換最適合時
Yeo-Johnson 轉換	相較於 Box-Cox 轉換，沒有嚴格的數據正值要求	用於包括零和負值的數據集，適用範圍更廣
指數轉換 (Exponential Transformation)	無特定假設，但須根據數據特性選擇合適指數	用於左偏分布
二次或高階多項式轉換	無特定假設，但轉換應基於數據與自變數間關係之視覺評估	用於非線性關係，例如 U 形或倒 U 形關係
標準化 / 歸一化 (Standardization / Normalization)	無特定假設，但標準化假設數據近似常態分布	用於將數據縮放到一定範圍或單位，尤在機器學習模型中
二值化 / 分類 (Binarization / Categorization)	選擇合適之閾值或分類標準	用於需要將連續變數轉換為類別變數之情形

4. 訓練模型

在模型預測碳儲存量前，需要各項工作包含變數篩選、適配模型、模型超參數優化以及模型驗證。

(1) 變數篩選方法

本計畫使用資料變數篩選方法為「向前逐步回歸法」，該方法為每一次之變數篩選僅增加一個變數至模型當中，並藉由多項條件多次迭代進行，直至所有變數完成條件篩選。向前逐步回歸法優勢在於能有效地考量線性關係，換句話說，適用於解釋變數間的線性關係。然而，其侷限性在於僅考量自變數與應變數間的線性關係，未能捕捉變數間存在的非線性關係。因此，在篩選變數方法可考慮使用其他能處理非線性關係之模型。例如，極限梯度提升 (eXtreme Gradient Boosting, XGBoost) 是強大的集成學習方法，通過迭代添加新模型（通常為決策樹）來改進現有模型的預測結果。此外，主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和偏最小二乘回歸 (Partial Least Squares Regression, PLSR) (Chen *et al.*, 2015；Sheridan *et al.*, 2016；Velthoen *et al.*, 2023)

皆有助於分析變數間的非線性關係，PCA 為降低資料維度方法，在保有原來資訊上提取主要的變數特徵；PLSR 為處理自變數間的共線性關係，從而提取最相關的自變數。未來在選擇變數篩選的方法，除了向前逐步回歸法外，可參考以上分析種類，以及資料先進行預處理而求得最適方法，幫助進一步篩選出理想變數，也擬合出合理關係並建置高效模型，準確預測土壤有機碳儲存量並顯著提升模型可信度。

(2) 適配模型

本計畫建置之模型種類共有三種，分別為線性回歸模型、Cubist 模型、隨機森林模型，分別在線性及非線性上抓取特徵關係。最終選定線性回歸為本計畫模型，過程可參考工作項目 5-1 模型代表性及不確定性評估，而全臺灣林業分署 0-30 公分的訓練之驗證與不確定性評估之驗證 R^2 為 0.21 及 0.20；0-50 公分的訓練之驗證與不確定性評估之驗證 R^2 為 0.23 及 0.22；0-100 公分的訓練之驗證與不確定性評估之驗證 R^2 為 0.22 及 0.20；0-150 公分的訓練之驗證與不確定性評估之驗證 R^2 為 0.16 及 0.10，隨著土壤深度越深，解釋力越低的情況。一般情況下，若模型無過擬合之情形，應當數值接近，且訓練模型之決定係數高於驗證模型之決定係數，在此現象意即在外部推估上比訓練模型更有解釋能力，同時表明訓練模型並未準確抓取資料特徵致使此現象發生 (Cao *et al.*, 2023；Steel, 2007)；另外，在隨機森林模型表現上，不同土壤深度之訓練模型雖然表現優異，但在驗證模型之決定係數中卻表明該訓練模型出現強烈過擬合現象，意即模型不具有外推解釋能力。若模型不具有外推解釋能力，則表明該模型無法準確推算其他山區之影響變化，僅能適配訓練資料採樣剖面下之成土因子。

在各項領域初步研究階段，皆會使用線性回歸模型處理之，原因在於簡單且易懂之特性能使操作者快速瞭解資料特性，並針對特性制定後續研析方向 (Slade *et al.*, 2013；Svärdström *et al.*, 2000)。本階段除了因資料數量稀少的問題之外，對於模型的選配上仍須著墨。機器學習方法之應用範圍非常廣泛，在不同領域中最常用之方法可能會有所不同。然而，可以根據普遍性和多功能性，列出在多個領域中普遍被認為最常用和最有效之前五種機器學習方法：

A. 隨機森林 (Random Forest, RF)

作為一種集成學習方法，通過結合多個決策樹來提高預測準確性，在處理分類及回歸問題上具有極度強大之特性 (Couronné *et al.*, 2018；Kursa, 2014)。該模型之穩健性使其能有效處理缺失值和非平衡數據集，然而，隨機森林模型可能會在某些情況下過於複雜，尤其是當決策樹數量增加時導致計算效率下降和模型解釋性變差的問題

(Deniskoer *et al.*, 2018)。

B. 梯度提升法 (Gradient Boosting Machine, GBM)

梯度提升法及其衍生版本，如 XGBoost、LightGBM 和 CatBoost，因其在提高模型性能方面之效率而備受青睞 (Chen *et al.*, 2019；Hancock *et al.*, 2020；Ke *et al.*, 2017；Prokhorenkova *et al.*, 2018；Qiu *et al.*, 2021)。這些方法通過逐步建立模型以最小化損失函數，提供了強大之預測能力，尤其在處理大型數據集時表現出色，但這也伴隨著對參數調整的高度敏感性，有時可能導致過擬合。

C. 支援向量機 (Support Vector Machine, SVM)

在許多二分法問題中，支援向量機表現優異，甚至時常優於上述兩種機器學習方法 (Pisner *et al.*, 2020；Steinwart *et al.*, 2008)。通過最大化類別間邊界來進行有效分類，尤其在高維數據集中表現極度良好，但在大規模數據中訓練效率較低，也因此在選擇合適之核函數 (Kernel Function) 和參數設置上具有挑戰性。

D. 類神經網路 (Artificial Neural Networks, AN)

類神經網路和深度學習在圖像和語音辨識、自然語言處理等領域，取得革命性進展，通過模擬人腦神經元進行學習，具有強大之非線性建模能力 (Yang *et al.*, 2020；Yegnanarayana, 2009)。即使如此，深度學習模型通常需要大量數據建立，並且需要較高之計算資源及成本；此外，模型可解釋性通常較低，使得在需要透明度之應用中極其有限。

E. K-最近鄰法 (K-Nearest Neighbors algorithm, K-NN)

K-NN 以其簡單性和有效性在分類和回歸問題中得到廣泛應用，其特色在於不需要建立模型，但易於理解和建立。然而，K-NN 在大數據集上效率較低，因其需要存儲全部數據並在預測時進行計算極為密集之搜尋鄰近 (Larose *et al.*, 2014)。

雖然上述機器學習方法各有優勢，但選擇最合適之機器學習仍取決於具體問題、數據特徵和性能要求，理解每種方法特點和限制對於探尋最佳機器學習性能極為重要。

(3) 模型參數優化

現今機器學習領域，對於參數的調整是極其關鍵與重要，而超參數 (Hyperparameter) 的調整已成為提升模型性能的核心步驟，過程重要性源於多個方面，涵蓋提升模型效能到適應特定應用之需求。首先，參數設定對於改善模型在特定數據集上之表現至關重要，不僅涉及提高模型準確性，還包含提升其預測能力 (Huang *et al.*, 2016；Segal, 2004)。在參數優化方法中，網格搜索 (Grid Search) 和隨機搜索 (Random Search) 為最基礎且常用之方法。網格搜索通過窮舉所有可能的參數組合來尋找最佳解，雖然全面但耗時；隨機搜索則是隨機採樣參數組合進行測試，在較短時間內即可找到較好的參數組合 (Bergstra & Bengio, 2012)，而貝葉斯優化適合在計算資源有限的情況下，通過通過機率模型引導搜索方向，加速選擇最適參數之流程，此方法特別適合計算成本較高之模型優化 (Snoek et al., 2012)。其次，過擬合是機器學習中常見且棘手之問題。通過調整如常態化強度、模型複雜度等參數，能有效降低過擬合風險，從而使模型在不同數據集上皆能保持穩定表現 (Boulesteix *et al.*, 2012；Speiser *et al.*, 2019)。

在處理分類 (classification) 問題時，數據集往往存在類別不平衡之情形，透過設置特定參數，如調整類別權重，能使模型更加重視數量較少之類別，從而提高模型於不平衡數據集上之整體表現；此外，在大規模數據集處理過程中，參數設定對於確保模型訓練和預測速度至關重要。研究者時常須在模型訓練完成後，評估該模型之性能及解釋能力，並對模型做出適當調整，進行重新建模，並反覆此過程 (Raschka, 2018)。合理設定模型參數，如降低模型複雜度或減少訓練迭代次數，能在確保性能的同時減少計算資源之消耗 (Carlberg *et al.*, 2013)。尤其如 XGBoost 等集成學習上，參數數量眾多，並分為四大類：泛化參數 (General Parameters)、助推器參數 (Booster Parameters)、學習率參數 (Learning Task Parameters) 以及命令行參數，多達十多種參數可供選擇及調配 (Kumar *et al.*, 2012)。隨機森林模型也具備 11 種可調整之參數，包括樹的數量、最佳分類特徵數量、最大深度、節點最小樣本等。因此選定合適參數將能大幅減少時間及設備成本，並提升最佳模型之效益。

精確設定模型參數為建立機器學習模型最佳性能之關鍵，不僅限於解釋能力、計算效率和資源消耗之間找到最佳平衡點，包含應對過擬合、數據不平衡等挑戰，以及依照不同資料型態及情境做出合理調整之需求 (Zhang *et al.*, 2012)。建立模型往往須透過長時間探尋實驗和調整來實現，因此，在訓練模型上，為本計畫之作業大宗，對研究成果具有關鍵影響。

(4) 驗證方法

當前模型使用之驗證方法為拔靴法 (Bootstrap)，在樣本數較小之情況下，此方法透過有放回抽樣的方式，能創建與原始數據集大小相同的樣本。其不僅不依賴數據分布假設，且在某些情況下能減少由隨機抽樣導致之偏差。但缺點在於每次抽樣皆須重新訓練模型，計算成本高，且由於模型須評估土壤有機碳儲存量在外推能力之高低，對於模型的泛化能力上，可能須改以「交叉驗證(Cross Validation, CV)」之方式執行之(Browne, 2000)。

交叉驗證是機器學習中最常用且可靠的模型評估方法之一，其針對大數據集及模型複雜時格外合適。其將訓練資料隨機拆分成數等份，並依序建立模型後，進行模型之泛化能力及損失函數等比較。至於每次僅拔除一筆資料，剩下數據建立模型，並依拔除資料處取得模型推算值後，與觀測值比較差異，此方法為「留一交叉驗證 (Leave-one-out Cross Validation)」(Vehtari *et al.*, 2017；Wong, 2015)，此方法雖然計算成本較高，但能最大程度利用有限的數據；若為將訓練資料拆分成十等份，將其中九等份建立模型，並用剩餘的一份對模型做驗證，能得出十份決定係數，並將其做中位數或平均數（通常為平均數），即為「十折交叉驗證 (10-fold Cross Validation)」(Fushiki, 2011；Malakouti *et al.*, 2023)。十折交叉驗證之特性為「隨機」切分資料，因此能確認模型之穩定性，並且能評估模型是否具有過擬合或乏適等問題 (Yadav *et al.*, 2016)。選擇適當的驗證方法對於確保模型的可靠性和實用性相當重要，在實際應用中，經常需要根據具體情況綜合評估多種驗證方法，以獲得較準確之模型評估結果。

5. 小結

本計畫選定多元線性回歸為本研究模型，而有機碳儲存量推估模型之準確度取決於資料筆數、模型方法、參數設定及驗證方式等。基於此，本計畫於現階段提出初步規劃，並將持續精進改善，以建立更全面的森林土壤有機碳儲存量推估模型，探討變數間關係，並精準推算出森林碳儲存量與其空間分布，作為評估減碳增匯方法成效的基礎數據，並供相關政策研擬參考。

(二)利用數位化土壤繪圖(Digital soil mapping)技術，研提臺灣森林土壤碳匯量分布基線地圖之初步評估報告，及未來研究規劃內容。

- **工作推動說明**

透過本計畫執行，建立起嚴謹之研究流程，以評估臺灣森林土壤有機碳儲存量，並產製全臺森林土壤有機碳儲存量基線圖，建置全臺森林土壤有機碳儲存量線性回歸模型作為推算之基礎。本團隊於今 (113) 年度審慎評估各研究流程細項，確保研究方法之學術嚴謹，並藉由多項驗證及不確定性評估，以審視模型是否具有代表性及足夠之解釋能力。確認整體流程無誤後，評估各項因子與森林土壤有機碳儲存量之關係，並建立合理之線性模型，以更為詳盡且精確推算森林土壤有機碳儲存量。

- **執行成果**

本計畫旨在建立臺灣森林土壤碳匯分布基線圖。研究過程中，納入各項環境因子，並以逐步向前回歸法篩選出與森林土壤有機碳具相關性之因子，計算碳儲存量時，由於部分採樣剖面缺乏土壤總體密度與含石率數據，故以建立模型與平均數值方式進行補足，以利碳儲存量計算。此外，本計畫比較線性回歸、Cubist、隨機森林三種模型推估碳儲存量的表現，經由不確定性評估後選定最佳模型，再透過計算全台灣土壤厚度資料進行加權，以避免深層土壤有機碳儲存量高估，最後分別以不同海拔推估累積在表土之枯枝落葉層碳儲存量。全臺灣森林土壤有機碳儲存量約為 330 百萬公噸碳，至於臺灣森林土壤有機碳儲存量之詳細結果與討論，詳見前述第五工作項目內容。

未來研究規劃以計畫研究限制為基礎，現存問題可分為三大主軸，分別為剖面數量與品質、環境因子資料庫、模型預測精確度。在剖面數量與品質方面，主要包括採樣剖面分布不均勻、高海拔（海拔>2,000 公尺）地區土綱分類不精確及採樣資料不足等問題。從各分署不同土壤深度的預測區間圖中發現，模型推估的碳儲存量存在明顯誤差，特別是 0-30 公分與 0-50 公分土層的碳儲存量在高海拔地區的誤差明顯大於低海拔地區，而 0-100 公分與 0-150 公分則呈現高低海拔地區皆有較大誤差的情況，使得高低海拔間誤差差異不明顯。未來將透過蒐集過往文獻修正土綱分布圖，以減少偏誤並提升推估準確性。針對採樣剖面分布不均與資料不足的問題，根據農業部林業及自然保育署第四次森林資源調查報告，規劃擴大採樣範圍至全臺灣各縣市森林覆蓋區，此舉亦更符合臺灣 2050 淨零排放路徑的森林碳匯政策，有助於更完整的評估臺灣森林土壤碳匯基線。

本計畫之環境因子資料庫，係參考 Ma et al. (2017) 所提出，再加入土壤分類之土綱 (Chen et al., 2015) 作為變數。除此之外，未來研究規劃加入增強型植被指數 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 來評估植被生長狀況，提供更詳細的生物資訊。此外，加入美國太空總署 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提供的全球生態系統動力學調查資料，包含地上生物量密度、地面樹冠高度等，以及國際土壤資料參照中心 (International Soil Reference and Information Centre, ISRIC) 的土壤性質資訊，包含 pH 值、土壤密度等，藉此增強生物與土壤因子對碳儲存量的解釋能力，以提升模型預測準確性。

最後，模型預測存在問題主要為多數環境因子與碳儲存量相關性低、機器學習模型過擬合情況、模型解釋性不足。針對變數間相關性低的問題，除了前面提及增加環境因子外，亦可使用特徵工程 (feature engineering) 進行變數轉換，以增加變數間的相關性。此外，本計畫目前採用 20×20 公尺的網格大小，但此尺度不一定能完整反映地形因子與土壤有機碳儲存量的關係，未來將利用地理資訊系統 (GIS) 將地形資料重取樣，透過敏感度分析 (Sensitivity analysis) 測試不同網格尺度下，地形因子與土壤有機碳儲存量的相關性。本計畫使用隨機森林推估碳儲存量時出現模型過擬合現象，未來研究可評比文獻中常見的模型 (Wadoux *et al*., 2020)，例如支援向量機 (Support Vector Machine, SVM)、類神經網路 (Artificial Neural Network, ANN)，在模型超參數 (Hyperparameter) 方面，可使用貝葉斯優化 (Bayesian optimization) 進行自動化調教，以減少使用隨機搜索 (random search) 與網格搜索 (grid search) 的訓練時間 (Yang & Shami, 2020)，同時降低過擬合問題，提升模型解釋性與預測準確率。

肆、結論與建議

一、結論

(一) 透過國內、外文獻回顧，歸納出多種常見森林管理方式，可對土壤有機碳儲存量產生影響，其中造林、氮添加、樹種選擇（包含具有固氮能力的樹種）、樹種多樣性管理、草食動物的調節等，有助於增加碳儲存量；反之，原始林的轉變、伐採、整地、移除收穫殘體或其他生物質、降低林分密度和間伐管理等，潛在會減少有機碳儲存量。

(二) 分析國內主管機關及/或研究單位之森林土壤調查數據時，發現除 2,000 公尺以上高海拔區域樣點數量明顯偏少外，多數樣點亦普遍缺乏枯枝落葉層、含石率及總體密度等關鍵數據。為解決資料不足的問題，本研究運用隨機森林模型推估總體密度值，結果具有良好的解釋力（驗證集 R^2>0.5），並依據坡度與土壤深度分組之平均值推估含石率，整體上可以抓到含石率隨坡度與土壤厚度加深而升高的趨勢，然而高海拔地區採樣點不足仍是影響推估準確度的主要因素。

(三) 經過今（113）年增補的資料，本計畫建立森林土壤有機碳儲存量新資料庫，並篩選出顯著影響森林土壤有機碳儲存量之變因，包含林型、海拔、溫度、雨量及土壤分類等，以穩健性最佳的線性回歸模型，繪製出全臺尺度之森林土壤有機碳儲存量分布圖。

(四) 全臺森林土壤有機碳儲存量，依不同土壤深度估算結果顯示：表土 0-30 公分深度的有機碳儲存量為 132 百萬公噸（含枯枝落葉層後增至 159 百萬公噸），相當於 484 至 583 百萬公噸二氧化碳當量；在 0-50 公分深度時有機碳儲存量增加至 188 百萬公噸（含枯枝落葉層則為 214 百萬公噸），相當於 690 至 785 百萬公噸二氧化碳當量；至 0-100 公分深度時有機碳儲存量達 283 百萬公噸（含枯枝落葉層為 309 百萬公噸），相當於 1,038 至 1,133 百萬公噸二氧化碳當量；在 0-150 公分深度時則為 303 百萬公噸（含枯枝落葉層為 330 百萬公噸），相當於 1,111 至 1,210 百萬公噸二氧化碳當量。

(五) 臺灣森林土壤有機碳儲存量隨海拔增加而增加，隨氣溫下降而降低。臺灣熱帶森林土壤有機碳儲存量為 175±28.5 公噸/公頃，溫帶森林土壤有機碳儲存量為 224±38.4 公噸/公頃，寒帶森林土壤有機碳儲存量為 258.5±31.1 公噸/公頃。此趨勢與全球研究相符合。

二、建議

森林土壤有機碳儲存量屬動態變化數據，除迫切需要建立基線資料外，亦需長期監測、評估其變化情形，方能合理納入國家溫室氣體排放清冊統計量，或是換算成可供抵換或交易之碳權。從長遠角度來看，為精進推估模型預測能力，可從以下各方面來進行：

(一) 森林土壤有機碳儲存量分布圖應用範圍廣，建議將森林土壤有機碳儲存量之量測，納入國家淨零目標之長遠規劃，建議透過定期全國森林土壤調查，增加累積樣本數量及涵蓋範圍，從林業各地區分署轄區擴展至全臺森林區域，特別是涵納不同地形和生態系統類型的樣本，以提高模型的代表性和普適性，以利呈現農業部門良好之負碳效益。

(二) 針對現有土綱分類在高山地區不精確之問題，建議透過蒐集過往文獻修正土綱分布，以減少偏誤並提升推估之準確性。

(三) 擴充環境因子資料庫，除現有變數外，未來可加入增強型植被指數 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 以評估植被生長狀況，並整合美國太空總署 (NASA) 提供的全球生態系統動力學調查資料（如地上生物量密度、地面樹冠高度等），以及國際土壤資料參照中心 (ISRIC) 提供的土壤性質資訊（如 pH 值、土壤密度等），藉此增強生物與土壤因子對碳儲存量的解釋能力。

(四) 使用更全面的特徵工程進行資料處理，本計畫資料前處理僅初步移除不合理的值（e.g.極端值、無座標資訊、TOC 存在負值、含石率為 100 卻有 TOC 值等），未來可進一步採用更進階的資料轉換方法，包括使用標準化或規一化來調整特徵尺度，以及透過對數轉換來加強環境因子與碳儲存量間的線性關係。前述作法是為了更有效利用數量有限的樣本捕捉到有機碳儲存量與環境因子間的相關性，提升模型預測的效能。

(五) 結合空間數據和遙測技術，進一步細化和精確化土壤有機碳儲存量的空間分布和變異性分析，從而為實現全國範圍內的森林碳儲存量動態監測和管理提供技術支持，以供在減排及增匯相關方法學上，能有森林土壤有機碳儲存量基線作為評估依據，進一步有助於相關政策之擬定。

(六) 在本計畫模型評估中，隨機森林 (Random Forest) 模型在初步調校中出現嚴重的過擬合 (Overfitting) 現象，因此本計畫採用穩定性較佳的線性回歸作為主要推估模型。在未來的計畫中建議採用更全面的參數調校，考量到模型參數繁多且複雜，可採用貝葉氏優化 (Bayesian Optimization) 來有效率地搜尋最佳超參數 (Hyperparameter) 組合，並將支援向量機 (Support Vector Machine, SVM) 和類神經網路 (Neural Network) 等過往研究中常見的機器學習模型納入評估，從資料品質暨模型的角度進行優化。

伍、參考文獻

(一)中文期刊及書目

王巧萍。2002。不同氣候區之森林經營與土地利用型式對土壤碳貯存量之研究(I)。農委會92年科技計劃成果報告。

向韻如。2006。以林地區塊法估算埔里及巒大事業區森林土壤有機碳庫。中興大學森林學研究所碩士論文。

杜清澤。(2010-2011)。臺灣森林土壤碳庫量推估。行政院農業委員會林業署委託計畫。計畫編號 TFBM-980222。

林光清、洪富文、程煒兒、蔣先覺、張雲翔。1996。福山試驗林土壤調查與分類。臺灣林業科學 11(2)：159-174。

林俐玲, & 陳佩松. (1993). 坡面表土飽和水力傳導度之推估. 中華水土保持學報, 24(2), 119-130.

邱志郁。2005。海拔高度差異對於森林土壤有機物組成與特性之影響(I)。國科會94年度研究計畫成果報告。

柯淑惠。2006。臺灣櫸人工林生物量及碳匯存量之研究。中興大學森林學研究所碩士論文。

胡庭恩。2006。臺灣北部地區主要人工林土壤碳貯存量之估算。臺灣大學農業化學研究所碩士論文（陳尊賢指導）。

張朝婷、邱祈榮、王巧萍。2005。臺灣不同氣候區天然林枝葉層與表土層碳匯存量。森林經營對二氧化碳吸存貢獻研討會論文集。109-120 頁。

張瑀芳、林世宗、蔡呈奇。2006。臺灣東北部柳杉人工林土壤有機碳匯量的推估。 臺灣林業科學21(4):383-93,2006

張瑀芳、林世宗、蔡呈奇。2006。臺灣東北部柳杉人工林土壤有機碳匯量的推估。臺灣林業科學 21(4): 383-393.

張瑀芳、蔡呈奇。2008。棲蘭山地區檜木天然林與保育更新林土壤性質的比較。國立宜蘭大學生物資源學刊 4(1): 69-77.

陳財輝、陳振興。2003。四湖及後龍海岸林土壤有機物之組成與分布。臺灣林業科學18(2)：159-162

陳尊賢，崔君至，蔡呈奇，郭鴻裕。土壤資訊在環境影響評估之應用. In: 中華土壤肥料學會主辦 [土壤資訊應用研討會論文集]. 2002。

陳尊賢、林世宗、蔡呈奇、廖天賜、郭耀綸、許正一、王亞男、江博能、蕭英倫、黃正介、簡士濠。2010。更新造林對森林碳吸存之效應：林分碳與土壤碳。行政院國科會國家型委託研究計畫 （計劃編號：NSC 98-3114-B-002-006）。期末報告。47頁。

陳尊賢、崔君至、蔡呈奇、陳慧美、吳佳其。2004。全球變遷：南仁山森林生態系研究-東北季風對南仁山森林生態系土壤中碳氮礦化速率及動態變化之影響 (1/2)。行政院國科會生物處委託計畫 (NSC 92-2621-B-002-013)。執行進度報告。29頁。

陳尊賢、崔家綺、李依庭、陳柏翰、鄭亦均。2013。更新造林對森林碳吸存之效應：林分碳與土壤碳-臺灣中部更新造林對土壤碳吸存之效應(I)。行政院國科會自然處委託計畫 (NSC-101-2621-M-002-025)。研究成果報告精簡版。

陳尊賢、蔡呈奇、吳森博、賴鴻裕、簡士濠、李家興。2004。阿里山森林鐵路沿線土壤剖面標本製作及性質調查。行政院農業委員會林業署嘉義林區管理處委託研究計畫（計畫編號：93-05-8-02)。期末報告。66頁。

陳尊賢、蔡呈奇、吳森博、賴鴻裕、簡士濠、李家興。2005。阿里山祝山鐵路沿線土壤剖面標本製作及性質調查（祝山、自忠、麟芷山、塔塔加等地區土壤剖面標本製作及性質調查）。行政院農業委員會林業署嘉義林區管理處委託研究計畫（計畫編號：94-05-8-02）。期末報告。59頁。

陳尊賢、蔡呈奇、邱春媚。2004。阿里山區粗質地淋溶土的化育作用與土壤溶液化學(1/2)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-92-2313-B-002-111）。兩年期計畫期中精簡報告30頁。

陳尊賢、蔡呈奇、胡庭恩、賴鴻裕、崔君至、黃正介、蘇紹瑋、廖偉志、林淳純、簡士濠、李家興、張瑜芳。2005。土壤碳吸存之時空變異。行政院農業委員會林業試驗所94年度林業科技補助計畫研究報告。 （計畫編號：94農科-11.1.1-森-G1-2）。

陳尊賢、蔡呈奇、張哲綺、崔君至、蘇紹瑋、李家興、黃正介、魏甄蓮。2007。福山25公頃永久樣區之土壤植被與地形三者間相關性的探討(2/3)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-95-2621-B-002-003）。三年期計畫第二年期中精簡報告 51頁。

陳尊賢、蔡呈奇、張學雷、高政毅。2002。陽明山國家公園之地形土序及其化育作用(I) (1/2)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-91-2313-B-002-347）。期末報告4頁。

陳尊賢、蔡呈奇、陳慧美。2003。全球變遷: 南仁山森林生態系研究-南仁山土壤水分含量及土壤溶液組成之變化(2/2)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-92-2621-B-002-003)。期末報告4頁。

陳尊賢、蔡呈奇、廖偉志、崔君至。2006。福山25公頃永久樣區之土壤植被與地形三者間相關性的探討(1/3)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-94-2621-B-002-007）。三年期計畫期末報告。

陳尊賢、蔡呈奇、劉天麟、張至懿、魏甄蓮、蘇紹瑋、崔君至、李家興、黃正介、陳品潔、廖健利、林佳佳、陳怡君。2008。福山25公頃永久樣區之土壤植被與地形三者間相關性的探討(3/3)。行政院國科會生物處委託計畫 （計畫編號:NSC-97-2811-B-002-009）。三年期計畫第三年期中精簡報告 23頁。

陳尊賢、蔡呈奇。2000。陽明山國家公園土壤特性與類別分布之空間變異與模式建立(1/2) 行政院國科會生物處委託計畫 (NSC-89-2621-B-002-008)。執行進度報告。25頁。

陳尊賢。1999。南仁山區土壤性質優勢樹種與地形間之關係(I)。國科會88 年度研究計畫成果報告。

陳詠琮、向韻如、顏江河、游偉青、康碩容。2005。不同森林生態系土壤中有機碳庫之建立。農委會94年研究計畫成果報告。

廖偉志。2006。福山天然闊葉林 25公頃永久樣區土壤性質之空間變異。臺灣大學農業化學研究所碩士論文（陳尊賢指導）。

蔡呈奇，陳尊賢。土壤轉換函數及地域分析應用於土壤資訊之預測. In: 中華土壤肥料學會主辦 [土壤資訊應用研討會論文集]. 2002。

簡士濠, 李明, 熹劉, & 睿呈. (2015). 以有限資料建立土壤轉換函數推估坡耕地之總體密度. 農業工程學報, 61(4), 11-22.

顏江河。2005。森林土壤的碳吸存量。森林與環境變遷研討會論文集。58-70頁。

(二)國外文獻

AbdelRahman, M. A., Natarajan, A., Srinivasamurthy, C. A., & Hegde, R. (2016). Estimating soil fertility status in physically degraded land using GIS and remote sensing techniques in Chamarajanagar district, Karnataka, India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 19(1), 95-108.

Achat, D. L., Fortin, M., Landmann G., Ringeval, B. and Augusto, L. Forest Soil Carbon is Threatened by Intensive Biomass Harvesting. (2015) Scientific Reports. 5:15991.

Adhikary, P. P., & Dash, C. J. (2017). Comparison of deterministic and stochastic methods to predict spatial variation of groundwater depth. Applied Water Science, 7, 339-348.

Akinbode, A. A., Oke, D. O. and Akinbi, O. J. (2022). Carbon Storage in Soils: A Case Study of Cocoa Agroforestry in Idanre Forest Reserve, Ondo State, Nigeria. Applied Ecology and Forestry Science. 5(1).

Akinwande, M. O., Dikko, H. G., & Samson, A. (2015). Variance inflation factor: as a condition for the inclusion of suppressor variable (s) in regression analysis. Open journal of statistics, 5(07), 754.

Akoglu, H. (2018). User's guide to correlation coefficients. Turkish journal of emergency medicine, 18(3), 91-93.

Albani, M., Medvigy, D., Hurtt, G. C., & Moorcroft, P. R. (2006). The contributions of land-use change, CO_2 fertilization, and climate variability to the Eastern US carbon sink. Global change biology, 12(12), 2370-2390.

Al-Shammary, A. A. G., Kouzani, A. Z., Kaynak, A., Khoo, S. Y., Norton, M., & Gates, W. (2018). Soil bulk density estimation methods: A review. Pedosphere, 28(4), 581-596.

Altman, N., & Krzywinski, M. (2017). Ensemble methods: bagging and random forests. Nature Methods, 14(10), 933-935.

Alvarez, R., Steinbach, H. S., & Bono, A. (2011). An artificial neural network approach for predicting soil carbon budget in agroecosystems. Soil Science Society of America Journal, 75(3), 965-975.

Amuyou, U. A., Eze, E. B., Essoka, P. A., Efiong, J., & Egbai, O. O. (2013). Spatial variability of soil properties in the Obudu Mountain region of southeastern Nigeria. International Journal of Humanities and Social Science, 3(15), 145-149.

Angelopoulou, T., Balafoutis, A., Zalidis, G., & Bochtis, D. (2020). From laboratory to proximal sensing spectroscopy for soil organic carbon estimation—A review. Sustainability, 12(2), 443.

Arrouays, D., Grundy, M. G., Hartemink, A. E., Hempel, J. W., Heuvelink, G. B., Hong, S. Y., ... & Zhang, G. L. (2014). GlobalSoilMap: Toward a fine-resolution global grid of soil properties. Advances in agronomy, 125, 93-134.

Arrouays, D., Grundy, M.G., Hartemink, A.E., Hempel, J.W., Heuvelink, G.B.M., Hong, S.Y., Lagacherie, P., Lelyk, G., McBratney, A.B., McKenzie, N.J., Mendonça-Santos, M.D. Minasny, B., Montanarella, L., Odeh, I.O.A., Sanchez, P.A., Thompson, J.A., Zhang, G.L., (2014). Global Soil Map: towards a fine resolution global grid of soil properties. Adv. Agron. 125, 93-134.

Ashton, P., & Zhu, H. (2020). The tropical-subtropical evergreen forest transition in East Asia: An exploration. Plant diversity, 42(4), 255-280.

Auret, L., & Aldrich, C. (2012). Interpretation of nonlinear relationships between process variables by use of random forests. Minerals Engineering, 35, 27-42.

Bach, F., & Moulines, E. (2013). Non-strongly-convex smooth stochastic approximation with convergence rate O (1/n). Advances in neural information processing systems, 26.

Bailey, K. L., & Lazarovits, G. (2003). Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. Soil and tillage research, 72(2), 169-180.

Baker, F. G. (1978). Variability of hydraulic conductivity within and between nine Wisconsin soil series. Water Resources Research, 14(1),103–108. https://doi.org/10.1029/WR014i001p00103.

Balabin, R. M., & Lomakina, E. I. (2011). Support vector machine regression (SVR/LS-SVM)—an alternative to neural networks (ANN) for analytical chemistry? Comparison of nonlinear methods on near infrared (NIR) spectroscopy data. Analyst, 136(8), 1703-1712.

Bárcena, T. G., Kiær, L. P., Vesterdal, L., Stefánsdóttir, H. M., Gundersen, P., & Sigurdsson, B. D. (2014). Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis. Global Change Biology, 20(8), 2393-2405.

Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L., & Van Ranst, E. (2010). Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. Forest Ecology and Management, 260(3), 262-277.

Bartlett, P. L., Long, P. M., Lugosi, G., & Tsigler, A. (2020). Benign overfitting in linear regression. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(48), 30063-30070.

Batjes, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. European journal of soil science, 47(2), 151-163.

Batjes, N.H., 1996. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. Eur. J. Soil Sci. 47, 151-163.

Behera, S. K., & Shukla, A. K. (2015). Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid soils of India. Land Degradation & Development, 26(1), 71-79.

Behrens, T., Förster, H., Scholten, T., Steinrücken, U., Spies, E.D., Goldschmitt, M., 2005. Digital soil mapping using artificial neural networks. J. Plant Nutr. Soil Sci. 168 (1), 21–33.

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 114, 24-31.

Bendel, R. B., & Afifi, A. A. (1977). Comparison of stopping rules in forward" stepwise" regression. Journal of the American Statistical association, 46-53.

Berrar, D. (2019). Cross-Validation.

Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. Test, 25, 197-227.

Biau, G., & Scornet, E. (2016). A random forest guided tour. Test, 25, 197-227.

Blum, W. E. (2008). Characterisation of soil degradation risk: an overview. Threats to soil quality in Europe, 23438, 5-10.

Bockheim, J. G., Gennadiyev, A. N., Hartemink, A. E., & Brevik, E. C. (2014). Soil-forming factors and Soil Taxonomy. Geoderma, 226, 231-237.

Boettinger *et al.* editors. (2010). Digital soil mapping. Springer.

Bojko, O., & Kabala, C. (2017). Organic carbon pools in mountain soils—Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. Catena, 149, 209-220.

Booysen, J., Booysen, W., & Kleingeld, M. (2018). A risk management strategy to identify and prioritise factors affecting industry's carbon tax liability. South African Journal of Industrial Engineering, 29(3), 26-39.

Boulesteix, A. L., Janitza, S., Kruppa, J., & König, I. R. (2012). Overview of random forest methodology and practical guidance with emphasis on computational biology and bioinformatics. Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 2(6), 493-507.

Bouma, J. (1989). Using soil survey data for quantitative land evaluation. In B. A. Stewart (Ed.), Advances in soil science (Vol. 9, pp. 177–213).New York: Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_4

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine learning, 45, 5-32.

Briggs, L. J., & McLane, J. W. (1907). The moisture equivalents of soils (No. 45). US Government Printing Office.

Brown, C., Peguero, G., & Sunderman, L. (2016). "Forest type and soil carbon storage: A comparison of boreal, temperate, and tropical forests." Global Change Biology, 22(12), 420-429.

Browne, M. W. (2000). Cross-validation methods. Journal of mathematical psychology, 44(1), 108-132.

Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. E. (1996). Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical analysis, 28(4), 281-298.

Brunsdon, C., Fotheringham, S., & Charlton, M. (2000). Geographically weighted regression as a statistical model.

Bulmer, C., Paré, D. and Domke, G. M. (2019). Chapter 14- A New Era of Digital Soil Mapping Across Forested Landscapes. Developments in Soil Science. 36:345-371.

Burgess, T. M., & Webster, R. (1980). Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: I The semi-variogram and punctual kriging. Journal of soil science, 31(2), 315-331.

Cameron, A. C., & Windmeijer, F. A. (1997). An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. Journal of econometrics, 77(2), 329-342.

Cao, X., & Yousefzadeh, R. (2023). Extrapolation and AI transparency: Why machine learning models should reveal when they make decisions beyond their training. Big Data & Society, 10(1), 20539517231169731.

Caponnetto, P., Campagna, D., Cibella, F., Morjaria, J. B., Caruso, M., Russo, C., & Polosa, R. (2013). EffiCiency and Safety of an eLectronic cigAreTte (ECLAT) as tobacco cigarettes substitute: a prospective 12-month randomized control design study. PloS one, 8(6), e66317.

Carlberg, K., Farhat, C., Cortial, J., & Amsallem, D. (2013). The GNAT method for nonlinear model reduction: effective implementation and application to computational fluid dynamics and turbulent flows. Journal of Computational Physics, 242, 623-647.

Cavanaugh, J. E. (1997). Unifying the derivations for the Akaike and corrected Akaike information criteria. Statistics & Probability Letters, 33(2), 201-208.

Cha, J. Y., Cha, Y., & Oh, N. H. (2019). The effects of tree species on soil organic carbon content in South Korea. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 124(3), 708-716.

Changyong, F. E. N. G., Hongyue, W. A. N. G., Naiji, L. U., Tian, C. H. E. N., Hua, H. E., & Ying, L. U. (2014). Log-transformation and its implications for data analysis. Shanghai archives of psychiatry, 26(2), 105.

Chatterjee, S., Ghosh, S., Dawn, S., Hore, S., & Dey, N. (2016). Forest Type Classification: A hybrid NN-GA model based approach. In Information Systems Design and Intelligent Applications: Proceedings of Third International Conference INDIA 2016, Volume 3 (pp. 227-236). Springer India.

Chen, C., Zhang, Q., Ma, Q., & Yu, B. (2019). LightGBM-PPI: Predicting protein-protein interactions through LightGBM with multi-information fusion. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 191, 54-64.

Chen, S., Wang, W., Xu, W., Wang, Y., Wan, H., Chen, D., ... & Bai, Y. (2018). Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(16), 4027-4032.

Chen, T., He, T., Benesty, M., Khotilovich, V., Tang, Y., Cho, H., ... & Zhou, T. (2015). Xgboost: extreme gradient boosting. R package version 0.4-2, 1(4), 1-4.

Chen, X., Taylor, A.R., Reich, P.B. *et al.* Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual. Nature (2023).

Cheng, Á., Doecke, J. D., Sharples, R. A., Villemagne, V. L., Fowler, C. J., Rembach, A., ... & Hill, A. F. (2015). Prognostic serum miRNA biomarkers associated with Alzheimer's disease shows concordance with neuropsychological and neuroimaging assessment. Molecular psychiatry, 20(10), 1188-1196.

Churchman, G. J., Singh, M., Schapel, A., Sarkar, B., & Bolan, N. (2020). Clay minerals as the key to the sequestration of carbon in soils. Clays and Clay Minerals, 68, 135-143.

Clark, F. E., & Kemper, W. D. (1967). Microbial activity in relation to soil water and soil aeration. Irrigation of agricultural lands, 11, 472-480.

Clarke, N., Gundersen, P., Jönsson-Belyazid, U., Kjønaas, O. J., Persson, T., Sigurdsson, B. D., ... & Vesterdal, L. (2015). Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. Forest Ecology and Management, 351, 9-19.

Cohen, J. (1969). rc: A profile similarity coefficient invariant over variable reflection. Psychological Bulletin, 71(4), 281.

Cohen, R., & Schuepfer, T. (1980). The representation of landmarks and routes. Child development, 1065-1071.

Cohen, R., & Weatherford, D. L. (1981). The effect of barriers on spatial representations. Child development, 1087-1090.

Conant, R. T., & Paustian, K. J. E. P. (2002). Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales. Environmental pollution, 116, S127-S135.

Couronné, R., Probst, P., & Boulesteix, A. L. (2018). Random forest versus logistic regression: a large-scale benchmark experiment. BMC bioinformatics, 19, 1-14.

Cowie, A. L., Orr, B. J., Sanchez, V. M. C., Chasek, P., Crossman, N. D., Erlewein, A., ... & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. Environmental Science & Policy, 79, 25-35.

Cressie, N. (1990). The origins of kriging. Mathematical geology, 22, 239-252.

Curran-Everett, D. (2018). Explorations in statistics: the log transformation. Advances in physiology education, 42(2), 343-347.

da Silva Chagas, C., de Carvalho Junior, W., Bhering, S. B., & Calderano Filho, B. (2016). Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. Catena, 139, 232-240.

Dakin, S. C. (2001). Information limit on the spatial integration of local orientation signals. JOSA A, 18(5), 1016-1026.

Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. Science of the total environment, 573, 727-739.

de Araujo Filho, R. N., dos Santos Freire, M. B. G., Wilcox, B. P., West, J. B., Freire, F. J., & Marques, F. A. (2018). Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. Forest Ecology and Management, 407, 210-220.

de Brogniez, D., Ballabio, C., Stevens, A., Jones, R. J. A., Montanarella, L., & van Wesemael, B. (2015). A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model. European Journal of Soil Science, 66(1), 121-134.

Deluca, T. H., & Boisvenue, C. (2012). Boreal forest soil carbon: distribution, function and modelling. Forestry, 85(2), 161-184.

Deng, L., Liu, G. B., & Shangguan, Z. P. (2014). Land-use conversion and changing soil carbon stocks in C hina's 'Grain-for-Green'Program: a synthesis. Global change biology, 20(11), 3544-3556.

Deng, L., Zhu, G. Y., Tang, Z. S., & Shangguan, Z. P. (2016). Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks. Global Ecology and Conservation, 5, 127-138.

Denisko, D., & Hoffman, M. M. (2018). Classification and interaction in random forests. Proceedings of the National Academy of Sciences, 115(8), 1690-1692.

Derksen, S., & Keselman, H. J. (1992). Backward, forward and stepwise automated subset selection algorithms: Frequency of obtaining authentic and noise variables. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 45(2), 265-282.

Dieleman, W. I., Venter, M., Ramachandra, A., Krockenberger, A. K., & Bird, M. I. (2013). Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: Implications for soil carbon storage. Geoderma, 204, 59-67.

Domke, G. M., Perry, C. H., Walters, B. F., Nave, L. E., Woodall, C. W., & Swanston, C. W. (2017). Toward inventory-based estimates of soil organic carbon in forests of the United States. Ecological Applications, 27(4), 1223-1235

Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2011). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks–a meta-analysis. Global Change Biology, 17(4), 1658-1670.

Dudal, R. (2005). The sixth factor of soil formation. Eurasian Soil Science C/C of Pochvovedenie, 38, S60.

England, J. R., & Viscarra Rossel, R. A. (2018). Proximal sensing for soil carbon accounting. Soil, 4(2), 101-122.

Eswaran H., Van der Berg E., Reich P. (1993). Organic carbon in soils of the world. Soil Sci. Soc. Am. J. 57:192-194.

Eswaran, H., Van Den Berg, E., & Reich, P. (1993). Organic carbon in soils of the world. Soil science society of America journal, 57(1), 192-194.

Faloutsos, M., Faloutsos, P., & Faloutsos, C. (1999). On power-law relationships of the internet topology. ACM SIGCOMM computer communication review, 29(4), 251-262.

Fang, J., Guo, Z., Hu, H., Kato, T., Muraoka, H., & Son, Y. (2014). Forest biomass carbon sinks in E ast A sia, with special reference to the relative contributions of forest expansion and forest growth. Global change biology, 20(6), 2019-2030.

Farahmand, S., Sameti, M., & Salahaldin Sasan, S. (2014). Spatial variations of β-convergence coefficient in Asia (The GWR Approach). Iranian Economic Review, 18(1), 81-101.

Farooq, I., Bangroo, S. A., Bashir, O., Shah, T. I., Malik, A. A., Iqbal, A. M., Mahdi, S. S., Wani, O. A., Nazir, N. and Biswas A. (2022). Comparison of Random Forest and Kriging Models for Soil Organic Carbon Mapping in the Himalayan Region of Kashmir. Land. 11(12), 2180.

Flaxman, A. D., Vahdatpour, A., Green, S., James, S. L., & Murray, C. J. (2011). Random forests for verbal autopsy analysis: multisite validation study using clinical diagnostic gold standards. Population health metrics, 9, 1-11.

Florinsky, I. V., Eilers, R. G., Manning, G. R., & Fuller, L. G. (2002). Prediction of soil properties by digital terrain modelling. Environmental Modelling & Software, 17(3), 295-311.

Frey, S. D., Ollinger, S., Nadelhoffer, K. E., Bowden, R., Brzostek, E., Burton, A., ... & Wickings, K. (2014). Chronic nitrogen additions suppress decomposition and sequester soil carbon in temperate forests. Biogeochemistry, 121, 305-316.

Fushiki, T. (2011). Estimation of prediction error by using K-fold cross-validation. Statistics and Computing, 21, 137-146.

Gao, C., Zhong, Y., Mensah, I. A., Tao, S., & He, Y. (2022). Spatio-Temporal impact of global migration on carbon transfers based on complex network and stepwise regression analysis. Sustainability, 14(2), 844.

Gebhardt, M. R., Daniel, T. C., Schweizer, E. E., & Allmaras, R. R. (1985). Conservation tillage. Science, 230(4726), 625-630.

Gelman, A., Goodrich, B., Gabry, J., & Vehtari, A. (2019). R-squared for Bayesian regression models. The American Statistician.

Gibson, A. J., Hancock, G. R., Bretreger, D., Cox, T., Hughes, J., & Kunkel, V. (2021). Assessing digital elevation model resolution for soil organic carbon prediction. Geoderma, 398, 115106..

GOEBEL, M. O., Bachmann, J., Reichstein, M., Janssens, I. A., & Guggenberger, G. (2011). Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition–is there a link to extreme climatic events?. Global Change Biology, 17(8), 2640-2656.

Gollini, I., Lu, B., Charlton, M., Brunsdon, C., & Harris, P. (2015). GWmodel: An R Package For Exploring Spatial Heterogeneity Using Geographically Weighted Models. Journal of Statistical Software, 63(17), 1–50.

Goodale, C. L., Apps, M. J., Birdsey, R. A., Field, C. B., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jenkins, J. C., Kohlmaier, G. H., Kurz, W., Liu, S., Nabuurs, G.-J., Nilsson, S., Shvidenko, A. Z., & Shvidenko, A. Z. (2002). Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. Ecological applications, 12(3), 891-899.

Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. Geoderma, 89(1-2), 1-45.

Green, R. N., Trowbridge, R. L., & Klinka, K. (2018). "Towards a taxonomic classification of humus forms." Forest Science, 27(4), 879-892.

Griffith, D. A., & Csillag, F. (1993). Exploring relationships between semi-variogram and spatial autoregressive models. Papers in Regional Science, 72(3), 283-295.

Grimm, R., Behrens, T., Märker, M., Elsenbeer, H., 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using random forests analysis. Geoderma 146 (1), 102–113.

Grinand, C., Arrouays, D., Laroche, B., Martin, M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. Geoderma 143 (1), 180–190.

Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M., McGuire, A. D., Camill, P., Tarnocai, C., ... & Striegl, R. G. (2011). Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 116(G4).

Guo, L. B., & Gifford, R. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. Global change biology, 8(4), 345-360.

Guo, P. T., Li, M. F., Luo, W., Tang, Q. F., Liu, Z. W., & Lin, Z. M. (2015). Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach. Geoderma, 237, 49-59.

Guo, P. T., Wu, W., Sheng, Q. K., Li, M. F., Liu, H. B., & Wang, Z. Y. (2013). Prediction of soil organic matter using artificial neural network and topographic indicators in hilly areas. Nutrient cycling in agroecosystems, 95, 333-344.

Gutmann, E. D., & Small, E. E. (2007). A comparison of land surface model soil hydraulic properties estimated by inverse modeling and pedotransfer functions. Water Resources Research, 43(5).

Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil and Tillage Research, 53(2), 71-85.

Han, H., Guo, X., & Yu, H. (2016, August). Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease gini based on random forest. In 2016 7th ieee international conference on software engineering and service science (icsess) (pp. 219-224). IEEE.

Hancock, J., & Khoshgoftaar, T. M. (2020, December). Performance of catboost and xgboost in medicare fraud detection. In 2020 19th IEEE international conference on machine learning and applications (ICMLA) (pp. 572-579). IEEE.

Hansen, B. E. (2000). Sample splitting and threshold estimation. Econometrica, 68(3), 575-603.

Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2009. The Elements of Statistical Learning: Data

Hawkins, D. M. (2004). The problem of overfitting. Journal of chemical information and computer sciences, 44(1), 1-12.

Henderson, D. A., & Denison, D. R. (1989). Stepwise regression in social and psychological research. Psychological Reports, 64(1), 251-257.

Hengl, T., de Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M. G., & Gonzalez, M. R. (2014). SoilGrids1km—global soil information based on automated mapping. PloS one, 9(8), e105992.

Hengl, T., Heuvelink, G. B., & Rossiter, D. G. (2007). About regression-kriging: From equations to case studies. Computers & geosciences, 33(10), 1301-1315.

Hengl, T., Heuvelink, G. B., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. Geoderma, 120(1-2), 75-93.

Heuscher, S. A., Brandt, C. C., & Jardine, P. M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. Soil Science Society of America Journal, 69(1), 51-56.

Heuscher, S. A., Brandt, C. C., & Jardine, P. M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. Soil Science Society of America Journal, 69(1), 51-56.

Hill, J. T., Demarest, B. L., Bisgrove, B. W., Gorsi, B., Su, Y. C., & Yost, H. J. (2013). MMAPPR: mutation mapping analysis pipeline for pooled RNA-seq. Genome research, 23(4), 687-697.

Hobley, E., Wilson, B., Wilkie, A., Gray, J., & Koen, T. (2015). Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia. Plant and Soil, 390, 111-127.

Hornung, G., Bar-Ziv, R., Rosin, D., Tokuriki, N., Tawfik, D. S., Oren, M., & Barkai, N. (2012). Noise–mean relationship in mutated promoters. Genome research, 22(12), 2409-2417.

Huang, B. F., & Boutros, P. C. (2016). The parameter sensitivity of random forests. BMC bioinformatics, 17(1), 1-13.

Huang, J., & Hartemink, A. E. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. Earth-Science Reviews, 208, 103295.

Huang, Y., Zou, J., Zheng, X., & Wang, Y. (2020). "Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C: N ratios." Soil Biology and Biochemistry, 35(7), 973-982.

Hurteau, M. D., & Brooks, M. L. (2011). Short-and long-term effects of fire on carbon in US dry temperate forest systems. BioScience, 61(2), 139-146.

Hurvich, C. M., & Tsai, C. L. (1993). A corrected Akaike information criterion for vector autoregressive model selection. Journal of time series analysis, 14(3), 271-279.

Huynh, C. V., Pham, T. P., Nguyen, L. H. K., Nguyen, H. T., Nguyen, P. T., Le, Q. N. P., Tran, P. T. T., Nguyen, M. T. H. and Tran, T. T. H. Application GIS and Remote Sensing For Soil Organic Carbon Mapping in a Farm-scale in The Hilly Area of Central Vietnam. (2022) Air, Soil and Water Research. 15.

Hyvönen, R., Persson, T., Andersson, S., Olsson, B., Ågren, G. I., & Linder, S. (2008). Impact of long-term nitrogen addition on carbon stocks in trees and soils in northern Europe. Biogeochemistry, 89, 121-137.

Ikechukwu, M. N., Ebinne, E., Idorenyin, U., & Raphael, N. I. (2017). Accuracy assessment and comparative analysis of IDW, spline and kriging in spatial interpolation of landform (topography): an experimental study. Journal of Geographic Information System, 9(3), 354-371.

In Lee, K., & Koval, J. J. (1997). Determination of the best significance level in forward stepwise logistic regression. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 26(2), 559-575.

In Lee, K., & Koval, J. J. (1997). Determination of the best significance level in forward stepwise logistic regression. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 26(2), 559-575.

IPCC/UNEP/OECD/IEA. 1997. Revised 1996 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: Reporting instructions (Vol. 1)；Workbook (Vol. 2)；Reference Manual (Vol. 3) Intergovernmental Panel in Climate Change, United Nations Environment Programme, Organization for Economic Operation and Development, International Energy Agency, Paris.

ITPS, F. A. (2015). Status of the world's soil resources (SWSR)—Main report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 650.

Jactel, H., Bauhus, J., Boberg, J., Bonal, D., Castagneyrol, B., Gardiner, B., ... & Brockerhoff, E. G. (2017). Tree diversity drives forest stand resistance to natural disturbances. Current Forestry Reports, 3, 223-243.

Jalabert, S. S. M., Martin, M. P., Renaud, J. P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., & Arrouays, D. (2010). Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. Soil Use and Management, 26(4), 516-528.

Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. Geoderma, 137(3-4), 253-268.

Jennrich, R. I., & Sampson, P. F. (1968). Application of stepwise regression to non-linear estimation. Technometrics, 63-72.

Jenny, H. (1994). Factors of soil formation: a system of quantitative pedology. Courier Corporation.

Jeong, G., Oeverdieck, H., Park, S. J., Huwe, B., & Ließ, M. (2017). Spatial soil nutrients prediction using three supervised learning methods for assessment of land potentials in complex terrain. Catena, 154, 73-84.

Ji, W., Adamchuk, V. I., Chen, S., Su, A. S. M., Ismail, A., Gan, Q., ... & Biswas, A. (2019). Simultaneous measurement of multiple soil properties through proximal sensor data fusion: A case study. Geoderma, 341, 111-128.

Jien, S. H., C. C. Tsai, Z. Y. Hseu, H. Y. Guo, C. T. Duh, Z. S. Chen. 2012. Organic carbon stocks and management strategies of the soils in Taiwan based on the soil information system. pp. 63-88. In: Soil Organic Matter: Ecology, Environmental Impact and Management. P. A. Björklund and F. V. Mello (editors). Nova Science Publishers, Inc. (ISBN 978-1-62100-272-7) (Invited Book chapter)

Jien, S. H., S.P. Wu, Z.S. Chen, T. H. Chen, and C.Y. Chiu. 2010. Characteristics and pedogenesis of podzolic forest soils along a toposequence near a subalpine lake in northern Taiwan. Botanical Studies 51: 223-236 (SCI). Google scholar citation 12.

John, K., Abraham Isong, I., Michael Kebonye, N., Okon Ayito, E., Chapman Agyeman, P., & Marcus Afu, S. (2020). Using machine learning algorithms to estimate soil organic carbon variability with environmental variables and soil nutrient indicators in an alluvial soil. Land, 9(12), 487.

John, K., Kebonye, N. M., Agyeman, P. C., & Ahado, S. K. (2021). Comparison of Cubist models for soil organic carbon prediction via portable XRF measured data. Environmental monitoring and assessment, 193, 1-15.

Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). Using ArcGIS geostatistical analyst (Vol. 380). Redlands: Esri.

Jones, E. W. (1945). The structure and reproduction of the virgin forest of the north temperate zone. The New Phytologist, 44(2), 130-148.

Jones, M. B., Donnelly, A., & van Oijen, M. (2017). "Modeling the impact of climate change on carbon storage in managed and unmanaged forests using ForestGrowth-SAFE." Forest Ecology and Management, 391, 2-16.

Jones, R. J. A., Hiederer, R., Rusco, E., Loveland, P. J., & Montanarella, L. (2004). The map of organic carbon in topsoils in Europe, Version 1.2, September 2003. Special publication, 72.

Jupp, P. E., & Mardia, K. V. (1980). A general correlation coefficient for directional data and related regression problems. Biometrika, 67(1), 163-173.

Karhu, K., Wall, A., Vanhala, P., Liski, J., Esala, M., & Regina, K. (2011). Effects of afforestation and deforestation on boreal soil carbon stocks—Comparison of measured C stocks with Yasso07 model results. Geoderma, 164(1-2), 33-45.

Kaur, R., Kumar, S., & Gurung, H. P. (2002). A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. Soil Research, 40(5), 847-858.

Kaur, R., Kumar, S., & Gurung, H. P. (2002). A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. Soil Research, 40(5), 847-858.

Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., ... & Liu, T. Y. (2017). Lightgbm: A highly efficient gradient boosting decision tree. Advances in neural information processing systems, 30.

Keene, O. N. (1995). The log transformation is special. Statistics in medicine, 14(8), 811-819.

Kennedy, M. (2006). Introducing geographic information systems with ArcGIS. John Wiley & Sons.

Kleijnen, J. P. (2009). Kriging metamodeling in simulation: A review. European journal of operational research, 192(3), 707-716.

Kletting, P., & Glatting, G. (2009). Model selection for time-activity curves: the corrected Akaike information criterion and the F-test. Zeitschrift für medizinische Physik, 19(3), 200-206.

Koh, G.W.；Park, J.B.；Kang, B.R.；Kim, G.P.；Moon, D.C. Volcanism in Jeju Island. J. Geol. Soc. Korea 2013, 49, 209–230.

Kosaka, N., Akiyama, T., Tsai, B., & Kojima, T. (2005, July). Forest type classification using data fusion of multispectral and panchromatic high-resolution satellite imageries. In Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS'05. (Vol. 4, pp. 2980-2983). IEEE.

Kowalska, A., Pawlewicz, A., Dusza, M., Jaskulak, M., & Grobelak, A. (2020). Plant–soil interactions in soil organic carbon sequestration as a restoration tool. In Climate change and soil interactions (pp. 663-688). Elsevier.

Kuhn, M., Johnson, K., 2013. Applied Predictive Modeling. Springer, New York.

Kumar, A., & Daume III, H. (2012). Learning task grouping and overlap in multi-task learning. arXiv preprint arXiv:1206.6417.

Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., & Matějková, Š. (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. Precision Agriculture, 12, 813-830.

Kursa, M. B. (2014). Robustness of Random Forest-based gene selection methods. BMC bioinformatics, 15, 1-8.

Lagacherie, P. (2008). Digital soil mapping: a state of the art. Digital soil mapping with limited data, 3-14.

Lagacherie, P., & Gomez, C. (2018). Vis-NIR-SWIR remote sensing products as new soil data for digital soil mapping. Pedometrics, 415-437.

Lai, R. (2004). Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. Journal of Sustainable Forestry, 21(1), 1-30.

Lal, R. (2004). "Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security." Science, 304(5677), 1623-1627.

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, 7(5), 5875-5895.

Lal, R. (2018). Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. Global change biology, 24(8), 3285-3301.

Lal, R. Forest soils and carbon sequestration. (2005) Forest Ecology and Management. 220:1-3.

Lal, R., & Shukla, M. K. (2004). Principles of soil physics. CRC Press.

Lamandé, M., Greve, M. H., & Schjønning, P. (2018). Risk assessment of soil compaction in Europe–Rubber tracks or wheels on machinery. Catena, 167, 353-362.

Lark, R. M. (1999). Soil–landform relationships at within-field scales: an investigation using continuous classification. Geoderma, 92(3-4), 141-165.

Larose, D. T., & Larose, C. D. (2014). k-nearest neighbor algorithm.

Lee, S., Lee, S., Shin, J., Yim, J., & Kang, J. (2020). Assessing the carbon storage of soil and litter from National Forest Inventory data in South Korea. Forests, 11(12), 1318.

Li, D., Niu, S., & Luo, Y. (2012). Global patterns of the dynamics of soil carbon and nitrogen stocks following afforestation: a meta-analysis. New Phytologist, 195(1), 172-181.

Liao, C., Luo, Y., Fang, C., Chen, J., & Li, B. (2012). The effects of plantation practice on soil properties based on the comparison between natural and planted forests: a meta-analysis. Global ecology and biogeography, 21(3), 318-327.

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R news, 2(3), 18-22.

Lin, K. C., C. P. Wang, C. M. Huang, F. W. Horng and C. M. Chiu (2003) Estimates of biomass and carbon storage in two Taiwania plantations of the Liukuei Experimental Forest. Taiwan J. For. Sci. 18:85-94.

Liu, H., Shah, S., & Jiang, W. (2004). On-line outlier detection and data cleaning. Computers & chemical engineering, 28(9), 1635-1647.

Liu, L., Wang, H., Dai, W., Lei, X., Yang, X., & Li, X. (2014). Spatial variability of soil organic carbon in the forestlands of northeast China. Journal of forestry research, 25(4), 867-876.

Liu, X., Trogisch, S., He, J. S., Niklaus, P. A., Bruelheide, H., Tang, Z., ... & Ma, K. (2018). Tree species richness increases ecosystem carbon storage in subtropical forests. Proceedings of the Royal Society B, 285(1885), 20181240.

Liu, Y., Zhao, L. D., Zhu, Y., Liu, Y., Li, F., Yu, M., ... & Nan, C. W. (2016). Synergistically optimizing electrical and thermal transport properties of BiCuSeO via a dual-doping approach. Advanced Energy Materials, 6(9), 1502423.

Lo, A., Chernoff, H., Zheng, T., & Lo, S. H. (2015). Why significant variables aren't automatically good predictors. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(45), 13892-13897.

Loiseau, T., Chen, S., Mulder, V. L., Dobarco, M. R., Richer-de-Forges, A. C., Lehmann, S., ... & Arrouays, D. (2019). Satellite data integration for soil clay content modelling at a national scale. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 82, 101905.

Louppe, G. (2014). Understanding random forests: From theory to practice. arXiv preprint arXiv:1407.7502.

Louppe, G., Wehenkel, L., Sutera, A., & Geurts, P. (2013). Understanding variable importances in forests of randomized trees. Advances in neural information processing systems, 26.

Lugato, E., Panagos, P., Bampa, F., Jones, A., & Montanarella, L. (2014). A new baseline of organic carbon stock in European agricultural soils using a modelling approach. Global change biology, 20(1), 313-326.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions–a review. European journal of soil science, 57(4), 426-445.

Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., Ciais, P., & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. Nature, 455(7210), 213-215.

Ma, Y., Minasny, B., & Wu, C. (2017). Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China. Geoderma Regional, 10, 144-153.

Macedo, M. O., Resende, A. S., Garcia, P. C., Boddey, R. M., Jantalia, C. P., Urquiaga, S., ... & Franco, A. A. (2008). Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. Forest Ecology and Management, 255(5-6), 1516-1524.

Malakouti, S. M., Menhaj, M. B., & Suratgar, A. A. (2023). The usage of 10-fold cross-validation and grid search to enhance ML methods performance in solar farm power generation prediction. Cleaner Engineering and Technology, 15, 100664.

Malone *et al.* (2017) Using R for digital soil mapping. Springer.

Manrique, L. A., & Jones, C. A. (1991). Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. Soil Science Society of America Journal, 55(2), 476-481.

Mansuy, N., Thiffault, E., Paré, D., Bernier, P., Guindon, L., Villemaire, P., Poirier, V., Beaudoin, A., 2014. Digital mapping of soil properties in Canadian managed forests at 250m of resolution using the k-nearest neighbor method. Geoderma 235, 59–73.

Martin, M. P., Dimassi, B., Dobarco, M. R., Guenet, B., Arrouays, D., Angers, D. A., Blache, F., Huard, F., Soussana, J-F. and Pellerin, S. Feasibility of the 4 per 1000 Aspirational Target For Soil Carbon: A Case Study for France. (2021) Global Change Biology. 27:2458-2477.

Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W., ... & Vesterdal, L. (2020). Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. Forest Ecology and Management, 466, 118127.

McBratney AB, Minasny B, MacMillan RA, Carré F (2011) Digital soil mapping. In: Li H, Sumner M, editors, Handbook of Soil Science, CRC Press, volume 37. pp. 1–45.

McBratney, A. B., Santos, M. M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. Geoderma, 117(1-2), 3-52.

McKenzie, N. J., & Ryan, P. J. (1999). Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. Geoderma, 89(1-2), 67-94.

McKenzie, N.J., Cresswell, H.P., Ryan, P.J. and Grundy, M. (2000). Opportunities for the 21st century: Expanding the horizons for soil, plant, and water analysis. Communications in Soil Science and Plant Analysis 31: 1553-1569.

Meigs, G. W., Donato, D. C., Campbell, J. L., Martin, J. G., & Law, B. E. (2009). Forest fire impacts on carbon uptake, storage, and emission: the role of burn severity in the Eastern Cascades, Oregon. Ecosystems, 12, 1246-1267.

Melton, M. A. (1965). The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. The Journal of geology, 73(1), 1-38.

Meng, Q., Liu, Z., & Borders, B. E. (2013). Assessment of regression kriging for spatial interpolation–comparisons of seven GIS interpolation methods. Cartography and geographic information science, 40(1), 28-39.

Metter, R. B., Rittenberger, J. C., Guyette, F. X., & Callaway, C. W. (2011). Association between a quantitative CT scan measure of brain edema and outcome after cardiac arrest. Resuscitation, 82(9), 1180-1185.

Minasny *et al.*(2013) Digital mapping of soil carbon. Book chapter.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016). Digital soil mapping: A brief history and some lessons. Geoderma, 264, 301-311.

Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A. C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C. C., Vagen, T.-G., Wesemael. B., & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. Geoderma, 292, 59-86.

Mining, Inference, and Prediction. Springer, New York.

Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., & Van Meirvenne, M. (2009). Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. Soil Science Society of America Journal, 73(2), 614-621.

Mohammed, Z. M., & Salim, S. B. (2023, December). Point Pedotransfer Functions (PPTF) for Estimating Soil Water Retention Curve by Multiple Linear Regression Methods. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 1252, No. 1, p. 012059). IOP Publishing.

Montanarella, L. (2002). Towards a Thematic Strategy for Soil Protection. Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Brussels, Belgium.

Montanarella, L. (2015). Agricultural policy: Govern our soils. Nature, 528(7580), 32-33.

Montanaro Gauci, M., Kruger, T. F., Coetzee, K., Smith, K., Van Der Merwe, J. P., & Lombard, C. J. (2001). Stepwise regression analysis to study male and female factors impacting on pregnancy rate in an intrauterine insemination programme. Andrologia, 33(3), 135-141.

Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A. E., & Peterson, G. A. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil science society of america journal, 57(2), 443-452.

Morisada, K., Ono, K., & Kanomata, H. (2004). Organic carbon stock in forest soils in Japan. Geoderma, 119(1-2), 21-32.

Morrissey, E. M., Gillespie, J. L., Morina, J. C., & Franklin, R. B. (2014). Salinity affects microbial activity and soil organic matter content in tidal wetlands. Global change biology, 20(4), 1351-1362.

Myles, A. J., Feudale, R. N., Liu, Y., Woody, N. A., & Brown, S. D. (2004). An introduction to decision tree modeling. Journal of Chemometrics: A Journal of the Chemometrics Society, 18(6), 275-285.

Nabuurs, G. J., Päivinen, R., Sikkema, R., & Mohren, G. M. J. (1997). The role of European forests in the global carbon cycle—a review. Biomass and bioenergy, 13(6), 345-358.

Nachman, B., & Lester, C. G. (2013). Significance variables. Physical Review D, 88(7), 075013.

Nakaya, T., Fotheringham, A. S., Brunsdon, C., & Charlton, M. (2005). Geographically weighted Poisson regression for disease association mapping. Statistics in medicine, 24(17), 2695-2717.

Nematzadeh, Z., Ibrahim, R., & Selamat, A. (2015, May). Comparative studies on breast cancer classifications with k-fold cross validations using machine learning techniques. In 2015 10th Asian control conference (ASCC) (pp. 1-6). IEEE.

Odeh, I. O., McBratney, A. B., & Chittleborough, D. J. (1995). Further results on prediction of soil properties from terrain attributes: heterotopic cokriging and regression-kriging. Geoderma, 67(3-4), 215-226.

Olaya-Abril, A., Parras-Alcántara, L., Lozano-García, B., & Obregón-Romero, R. (2017). Soil organic carbon distribution in Mediterranean areas under a climate change scenario via multiple linear regression analysis. Science of the Total Environment, 592, 134-143.

Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information System, 4(3), 313-332.

Ormsby, T. (2004). Getting to know ArcGIS desktop: basics of ArcView, ArcEditor, and ArcInfo. ESRI, Inc.

Osborne, J. W. (2012). Best practices in data cleaning: A complete guide to everything you need to do before and after collecting your data. Sage publications.

Ozili, P. K. (2023). The acceptable R-square in empirical modelling for social science research. In Social research methodology and publishing results: A guide to non-native english speakers (pp. 134-143). IGI Global.

Pace, N. L. (2008). Independent predictors from stepwise logistic regression may be nothing more than publishable P values. Anesthesia & Analgesia, 107(6), 1775-1778.

Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2017). Chile and the Chilean soil grid: a contribution to GlobalSoilMap. Geoderma Regional, 9, 17-28.

Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2019). Using deep learning for digital soil mapping. Soil, 5(1), 79-89.

Padarian, J., Stockmann, U., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2022). Monitoring changes in global soil organic carbon stocks from space. Remote Sensing of Environment, 281, 113260.

Páez, A., Farber, S., & Wheeler, D. (2011). A simulation-based study of geographically weighted regression as a method for investigating spatially varying relationships. Environment and Planning A, 43(12), 2992-3010

Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. International journal of remote sensing, 26(1), 217-222.

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A.,Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., Mcguire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. Science, 333(6045), 988-993.

Pan, Y., Chen, J. M., Birdsey, R., McCullough, K., He, L., & Deng, F. (2011). Age structure and disturbance legacy of North American forests. Biogeosciences, 8(3), 715-732.

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Borrelli, P., Köninger, J., Ballabio, C., Orgiazzi, A., Lugato, E., Liakos, L., Hervas, J., Jones, A., Montanarella, L. (2022). European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies. European Journal of Soil Science, 73(6), e13315.

Pandit, V., & Schuller, B. (2019). The many-to-many mapping between the concordance correlation coefficient and the mean square error. arXiv preprint arXiv:1902.05180.

Park, S. J., & Son, I. (2008). Discussions on the distribution and genesis of mountain ranges in the Korean peninsular (III): Proposing a new mountain range map. Journal of the Korean Geographical Society, 43(3), 276-295.

Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., & Wang, T. (2009). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 458(7241), 1009-1013.

Pisner, D. A., & Schnyer, D. M. (2020). Support vector machine. In Machine learning (pp. 101-121). Academic Press.

Poorter, L., van der Sande, M. T., Thompson, J., Arets, E. J., Alarcón, A., Álvarez-Sánchez, J., ... & Peña-Claros, M. (2015). Diversity enhances carbon storage in tropical forests. Global Ecology and Biogeography, 24(11), 1314-1328.

Post, W. M., & Kwon, K. C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. Global change biology, 6(3), 317-327.

Pouladi, N., Møller, A. B., Tabatabai, S., & Greve, M. H. (2019). Mapping soil organic matter contents at field level with Cubist, Random Forest and kriging. Geoderma, 342, 85-92.

Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: unbiased boosting with categorical features. Advances in neural information processing systems, 31.

Qi, Y. (2012). Random forest for bioinformatics. Ensemble machine learning: Methods and applications, 307-323.

Qiu, Y., Zhou, J., Khandelwal, M., Yang, H., Yang, P., & Li, C. (2021). Performance evaluation of hybrid WOA-XGBoost, GWO-XGBoost and BO-XGBoost models to predict blast-induced ground vibration. Engineering with Computers, 1-18.

Quinonero-Candela, J., Sugiyama, M., Schwaighofer, A., & Lawrence, N. D. (Eds.). (2008). Dataset shift in machine learning. Mit Press.

Raihan, A., Begum, R. A., Mohd Said, M. N., & Abdullah, S. M. S. (2019). A review of emission reduction potential and cost savings through forest carbon sequestration. Asian Journal of Water, Environment and Pollution, 16(3), 1-7.

Raschka, S. (2018). Model evaluation, model selection, and algorithm selection in machine learning. arXiv preprint arXiv:1811.12808.

Ray, R., Ganguly, D., Chowdhury, C., Dey, M., Das, S., Dutta, M. K., ... & Jana, T. K. (2011). Carbon sequestration and annual increase of carbon stock in a mangrove forest. Atmospheric Environment, 45(28), 5016-5024.

Reyes, J. F., Correa, C., & Zúñiga, J. (2017). Reliability of different color spaces to estimate nitrogen SPAD values in maize. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 14-22.

Ribeiro, M., Grolinger, K., & Capretz, A. M. M. (2015, December). Mlaas: Machine learning as a service. In 2015 IEEE 14th international conference on machine learning and applications (ICMLA) (pp. 896-902). IEEE.

Rizzo, R., Demattê, J.A., Lepsch, I.F., Gallo, B.C., Fongaro, C.T., 2016. Digital soil mapping at local scale using a multi-depth Vis–NIR spectral library and terrain attributes. Geoderma 274, 18–27.

Ronchi, S., Salata, S., Arcidiacono, A., Piroli, E., & Montanarella, L. (2019). Policy instruments for soil protection among the EU member states: A comparative analysis. Land use policy, 82, 763-780.

Rose, S., & McGuire, T. G. (2019). Limitations of p-values and R-squared for stepwise regression building: a fairness demonstration in health policy risk adjustment. The American Statistician, 73(sup1), 152-156.

Rossel, R. V., & Behrens, T. (2010). Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. Geoderma, 158(1-2), 46-54.

Roulet, N. T. (2000). Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto Protocol: Prospects and significance for Canada. Wetlands, 20(4), 605-615.

Ru, F., Yin, A., Jin, J., Zhang, X., Yang, X., Zhang, M., & Gao, C. (2016). Prediction of cadmium enrichment in reclaimed coastal soils by classification and regression tree. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 177, 1-7.

Saito, H., McKenna, S. A., Zimmerman, D. A., & Coburn, T. C. (2005). Geostatistical interpolation of object counts collected from multiple strip transects: Ordinary kriging versus finite domain kriging. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19, 71-85.

Salk, J. J., Schmitt, M. W., & Loeb, L. A. (2018). Enhancing the accuracy of next-generation sequencing for detecting rare and subclonal mutations. Nature Reviews Genetics, 19(5), 269-285.

Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., Bukoski, J. J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E. M., Ermgassen, P. z., Lewis, C. J. E., Macreadie, P. I., Glass, L., Gress, S., Jardine, S. L., Jones, T. G., Nsombo, E. N., Rahman, M. M., Sanders, C. J., Spalding, M., & Landis, E. (2018). A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. Environmental Research Letters, 13(5), 055002.

Schratz, P., Muenchow, J., Iturritxa, E., Richter, J., & Brenning, A. (2019). Hyperparameter tuning and performance assessment of statistical and machine-learning algorithms using spatial data. Ecological Modelling, 406, 109-120.

Schulp, C. J., Nabuurs, G. J., Verburg, P. H., & de Waal, R. W. (2008). Effect of tree species on carbon stocks in forest floor and mineral soil and implications for soil carbon inventories. Forest ecology and management, 256(3), 482-490.

Scott, L. M., & Janikas, M. V. (2009). Spatial statistics in ArcGIS. In Handbook of applied spatial analysis: Software tools, methods and applications (pp. 27-41). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Segal, M. R. (2004). Machine learning benchmarks and random forest regression.

Sheridan, R. P., Wang, W. M., Liaw, A., Ma, J., & Gifford, E. M. (2016). Extreme gradient boosting as a method for quantitative structure–activity relationships. Journal of chemical information and modeling, 56(12), 2353-2360.

Šimůnek, J., & Suarez, D. L. (1993). Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development. Water Resources Research, 29(2), 487-497.

Slade, G. D., Fillingim, R. B., Sanders, A. E., Bair, E., Greenspan, J. D., Ohrbach, R., ... & Maixner, W. (2013). Summary of findings from the OPPERA prospective cohort study of incidence of first-onset temporomandibular disorder: implications and future directions. The Journal of Pain, 14(12), T116-T124.

Smith, G. (2018). Step away from stepwise. Journal of Big Data, 5(1), 1-12.

Smith, P., Davis, S. J., Creutzig, F., Fuss, S., Minx, J., Gabrielle, B., ... & Yongsung, C. (2016). Biophysical and economic limits to negative CO2 emissions. Nature climate change, 6(1), 42-50.

Song, W., Jia, H., Li, Z., & Tang, D. (2018). Using geographical semi-variogram method to quantify the difference between NO2 and PM2. 5 spatial distribution characteristics in urban areas. Science of the Total Environment, 631, 688-694.

Speiser, J. L., Miller, M. E., Tooze, J., & Ip, E. (2019). A comparison of random forest variable selection methods for classification prediction modeling. Expert systems with applications, 134, 93-101.

Spivak, A. C., Sanderman, J., Bowen, J. L., Canuel, E. A., & Hopkinson, C. S. (2019). Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. Nature Geoscience, 12(9), 685-692.

Steel, D. (2007). Across the boundaries: Extrapolation in biology and social science. Oxford University Press.

Steinwart, I., & Christmann, A. (2008). Support vector machines. Springer Science & Business Media.

Stockmann, U., M. A. Adams, J. W. Crawford, D. J. Field, N. Henakaarchchi, M. Jenkins, B. Minasny, A. B. McBratney, V. de R. de Courcelles, K. Singh, I. Wheeler, L. Abbott, D.A. Angers, J. Baldock, M. Bird, P.C. Brookes, C. Chenu, J. Jastrow, R. Lal, J. Lehmann, A. G. ODonnell, W. J. Parton, D. Whitehead, and M. Zimmermann. 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. Agric. Ecosystem and Environ. 164: 80-99.

Stolbovoy, V., Montanarella, L., Filippi, N., Jones, A., Gallego, J., & Grassi, G. (2005). Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soils of European Union. Office for Official Publications of the European Communities.

Sun, W., & Liu, X. (2020). Review on carbon storage estimation of forest ecosystem and applications in China. Forest Ecosystems, 7(1), 1-14.

Sun, Y., Kang, S., Li, F., & Zhang, L. (2009). Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China. Environmental Modelling & Software, 24(10), 1163-1170.

Sutfin, N. A., Wohl, E. E., & Dwire, K. A. (2016). Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems. Earth Surface Processes and Landforms, 41(1), 38-60.

Svärdström, G., & Wennström, J. L. (2000). Periodontal treatment decisions for molars: an analysis of influencing factors and long-term outcome. Journal of periodontology, 71(4), 579-585.

Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G., & Zuberer, D. A. (2005). Principles and applications of soil microbiology (No. QR111 S674 2005). Pearson.

Tak, H. M., Kim, S. H., & Son, I. L. L. (2013). A study on distributions and spatial properties of geomorphological mountain area. Journal of the Korean Geographical Society, 48(1), 1-18.

Tani, M., & Higashi, T. (1999). Vertical distribution of low molecular weight aliphatic carboxylic acids in some forest soils of Japan. European journal of soil science, 50(2), 217-226.

Tashi, S., Singh, B., Keitel, C., & Adams, M. (2016). Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta-analysis of global data. Global Change Biology, 22(6), 2255-2268.

Tesfaye, M. A., Bravo, F., Ruiz-Peinado, R., Pando, V., & Bravo-Oviedo, A. (2016). Impact of changes in land use, species and elevation on soil organic carbon and total nitrogen in Ethiopian Central Highlands. Geoderma, 261, 70-79.

Thompson, B. (1995). Stepwise regression and stepwise discriminant analysis need not apply here: A guidelines editorial. Educational and psychological measurement, 55(4), 525-534.

Thompson, J. A., & Kolka, R. K. (2005). Soil carbon storage estimation in a forested watershed using quantitative soil-landscape modeling. Soil science society of America journal, 69(4), 1086-1093.

Thompson, J. A., Pena-Yewtukhiw, E. M., & Grove, J. H. (2006). Soil–landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. Geoderma, 133(1-2), 57-70.

Tietje, O., & Tapkenhinrichs, M. (1993). Evaluation of pedo-transfer functions. Soil Science Society of America Journal, 57(4), 1088-1095.

Trangmar, B. B., Yost, R. S., & Uehara, G. (1986). Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 38, 45-94.

Tranter, G., Minasny, B., McBratney, A. B., Murphy, B., McKenzie, N. J., Grundy, M., & Brough, D. (2007). Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. Soil Use and Management, 23(4), 437-443.

Tsai C. C., Z. S. Chen and C.T. Duh. 2012. Estimation of soil organic carbon stock in subtropical forest region based on digital soil map in Taiwan. Fifth Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012. University of Sydney, Australia, 10-13 April, 2012. (oral presentation)

Tsai C.C., Z. S. Chen, Z. Y. Hseu, C. T. Duh, and H. Y. Guo. 2010. Organic Carbon Storage and Management Strategies of the Forest Soils Based on the Forest Soil Survey Database in Taiwan. pp. 85-102. Chen, Z.S. and Agus, F. (editors). In: Proceedings of the International Workshop on the Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Countries. Organized by Food and Fertilizer Technology Center (FFTC). Bogor, Indonesia, Sep 27-Oct 2, 2010. ISBN-978-602-8039-27-7. (Invited speaker).

Tsai, C. C. and Z. S. Chen. 2002. The estimation of total soil carbon stock in Taiwan forest soils. P. 53-62. In: Proceedings of International Symposium on Forest Carbon Sequestration and Monitoring. Nov. 11-15. 2002. Taipei. Taiwan.

Tsai, C. C., C. C. Tsai, Z. S. Chen, and H. Y. Guo. 2012. Mapping organic carbon stocks by using estimated bulk density in the rural soils of Taiwan. Fifth Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012. University of Sydney, Australia, 10-13 April, 2012. (Accepted as poster paper #81)

Tsai, C. C., Chen, Z. S., Hseu, Z. Y., Duh, C. T., & Guo, H. Y. (2010). Organic carbon storage and management strategies of the forest soils based on the forest soil survey database in Taiwan. In: Proceedings of international workshop on evaluation and sustainable management of soil carbon sequestration in Asian countries, IPB International Conference Center, Boger.

Tsai, C. C., T. E. Hu, and Z. S. Chen. 2009. Estimation of soil organic carbon stocks in plantation forest soils of Northern Taiwan. Taiwan Journal of Forest Science 24(2): 103-115.

Tsai, C. C., Z. S. Chen, and C. T. Duh. 2012. Estimation of soil organic carbon stock in subtropical forest region based on digital soil map in Taiwan. pp. 357-361. In: Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012, Sydney, Australia. B. Minasny, B. P. Malon, and A. B. McBratney (editors). CRC Press. (ISBN 9780415621557) (Published: July 24, 2012 by CRC Press - 482 Pages)

Tsai, C. C., Z. S. Chen, C. T. Duh, and F. W. Horng. 2001. Prediction of soil depth using a soil-landscape regression model: Case study of the forest soils of southern Taiwan. Proc. National Sci. Council, ROC. Part B: Life Sci. 25(1): 34-39.

Tsui, C. C., Guo, H. Y., & Chen, Z. S. (2013). Estimation of soil carbon stock in Taiwan arable soils by using legacy database and digital soil mapping. Soil processes and current trends in quality assessment, 311-335.

Tsui, C. C., Tsai, C. C., & Chen, Z. S. (2013). Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. Geoderma, 209, 119-127.

Tsui, C. C., X. N. Liu, C. C. Tsai and Z. S. Chen. 2017. Spatial Variations of Soil Organic Carbon Stocks and the Related Environmental Factors in Volcanic Ash Soils in Northern Taiwan. 2017 International Conference on Pedometrics. Wageningen University, Netherlands. June 26-July 1, 2017.

Tsukamoto, Y. (1998). Conservation of Forest, Water, and Soil: Hydrogeomorphology in Unstable Terrain with High Humidity. Asakura Shoten, Tokyo (in Japanese).

Vågen, T. G., & Winowiecki, L. A. (2013). Mapping of soil organic carbon stocks for spatially explicit assessments of climate change mitigation potential. Environmental Research Letters, 8(1), 015011.

Van Looy, K., Bouma, J., Herbst, M., Koestel, J., Minasny, B., Mishra, U., ... & Vereecken, H. (2017). Pedotransfer functions in Earth system science: Challenges and perspectives. Reviews of Geophysics, 55(4), 1199-1256.

Vanguelova, E. I., Bonifacio, E., De Vos, B., Hoosbeek, M. R., Berger, T. W., Vesterdal, L., ... & Zhiyanski, M. (2016). Sources of errors and uncertainties in the assessment of forest soil carbon stocks at different scales—review and recommendations. Environmental monitoring and assessment, 188, 1-24.

Vashum, K. T., & Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests-a review. Journal of Ecosystem & Ecography, 2(4), 1-7.

Vehtari, A., Gelman, A., & Gabry, J. (2017). Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. Statistics and computing, 27, 1413-1432.

Veldkamp, E. (1994). Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. Soil Science Society of America Journal, 58(1), 175-180.

Velthoen, J., Dombry, C., Cai, J. J., & Engelke, S. (2023). Gradient boosting for extreme quantile regression. Extremes, 1-29.

Vesterdal, L., Schmidt, I. K., Callesen, I., Nilsson, L. O., & Gundersen, P. (2008). Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. Forest Ecology and Management, 255(1), 35-48.

Vidgen, B., & Derczynski, L. (2020). Directions in abusive language training data, a systematic review: Garbage in, garbage out. Plos one, 15(12), e0243300.

Viscarra Rossel, R. A., Lobsey, C. R., Sharman, C., Flick, P., & McLachlan, G. (2017). Novel proximal sensing for monitoring soil organic C stocks and condition. Environmental Science & Technology, 51(10), 5630-5641.

Visser, S., Keesstra, S., Ní Choncubhair, Ó., Mulder, T.,Costantini, E., Sousanna, J.F., Chenu, C., Kuikman, P.,Barron, J., Halberg, N., 2020. Roadmap for the European Joint Program SOIL: towards climate-smart sustainable management of agricultural soils. TERRAenVISION 2019 Barc. Spain 2–7 ,September 2019.

Wang H, Cornell JD, Hall CAS, Marley DP.2002. Spatial and seasonal dynamics of surface soil carbon in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. Ecol Mod 147:105-22.

Wang, F., Li, Z., Xia, H., Zou, B., Li, N., Liu, J., & Zhu, W. (2010). Effects of nitrogen-fixing and non-nitrogen-fixing tree species on soil properties and nitrogen transformation during forest restoration in southern China. Soil Science & Plant Nutrition, 56(2), 297-306.

Wang, Q., Koval, J. J., Mills, C. A., & Lee, K. I. D. (2007). Determination of the selection statistics and best significance level in backward stepwise logistic regression. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 37(1), 62-72.

Wang, Q., Zhou, Y., Ding, W., Zhang, Z., Muhammad, K., & Cao, Z. (2020). Random forest with self-paced bootstrap learning in lung cancer prognosis. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM), 16(1s), 1-12.

Wang, Y. Q., & Shao, M. A. (2013). Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. Land Degradation & Development, 24(3), 296-304.

Wantzen, K. M., Yule, C. M., Mathooko, J. M., & Pringle, C. M. (2008). Organic matter processing in tropical streams. In Tropical stream ecology (pp. 43-64). Academic Press.

Wardle, D. A. (1998). Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis. Soil Biology and Biochemistry, 30(13), 1627-1637.

Wei, J., Li, Z., Cribb, M., Huang, W., Xue, W., Sun, L., Guo, J., Peng, Y., Li, J., Lyapustin, A., Liu, L., Wu, H., & Song, Y. (2020). Improved 1 km resolution PM 2.5 estimates across China using enhanced space–time extremely randomized trees. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(6), 3273-3289.

Were, K., Bui, D.T., Dick, Ø.B., Singh, B.R., 2015. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an Afromontane landscape. Ecol. Indic. 52, 394–403.

Wheeldon, R., & Counsell, S. (2003, September). Power law distributions in class relationships. In Proceedings Third IEEE International Workshop on Source Code Analysis and Manipulation (pp. 45-54). IEEE.

White, A., Cannell, M. G. R., & Friend, A. D. (2000). The high-latitude terrestrial carbon sink: a model analysis. Global Change Biology, 6(2), 227-245.

Wiesmeier, M., Barthold, F., Blank, B., & Kögel-Knabner, I. (2011). Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. Plant and soil, 340, 7-24.

Wilson, B. T., Woodall, C. W., & Griffith, D. M. (2013). Imputing forest carbon stock estimates from inventory plots to a nationally continuous coverage. Carbon balance and management, 8(1), 1-15.

Wong, T. T. (2015). Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. Pattern recognition, 48(9), 2839-2846.

Wösten, J. H. M., Bannink, M. H., de Gruijter, J. J., & Bouma, J. (1986). A procedure to identify different groups of hydraulic conductivity and moisture retention curves for soil horizons. Journal of Hydrology, 86(133), 145.

Wösten, J. H. M., Finke, P. A., & Jansen, M. J. W. (1995). Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. Geoderma, 66(3-4), 227-237.

Wu, C. D., McNeely, E., Cedeño-Laurent, J. G., Pan, W. C., Adamkiewicz, G., Dominici, F., Lung, S.-C. C., Su, H.-J., & Spengler, J. D. (2014). Linking student performance in Massachusetts elementary schools with the "greenness" of school surroundings using remote sensing. PloS one, 9(10), e108548.

Xie, Y., Chen, T. B., Lei, M., Yang, J., Guo, Q. J., Song, B., & Zhou, X. Y. (2011). Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis. Chemosphere, 82(3), 468-476.

Xin, Z., Qin, Y., & Yu, X. (2016). Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the Loess Plateau, China. Catena, 137, 660-669.

Yadav, S., & Shukla, S. (2016, February). Analysis of k-fold cross-validation over hold-out validation on colossal datasets for quality classification. In 2016 IEEE 6th International conference on advanced computing (IACC) (pp. 78-83). IEEE.

Yamashita, N., Ishizuka, S., Hashimoto, S., Ugawa, S., Nanko, K., Osone, Y., ... & Hirai, K. (2022). National-scale 3D mapping of soil organic carbon in a Japanese forest considering microtopography and tephra deposition. Geoderma, 406, 115534.

Yang, G. R., & Wang, X. J. (2020). Artificial neural networks for neuroscientists: a primer. Neuron, 107(6), 1048-1070.

Yang, L., & Shami, A. (2020). On hyperparameter optimization of machine learning algorithms: Theory and practice. Neurocomputing, 415, 295–316.

Yegnanarayana, B. (2009). Artificial neural networks. PHI Learning Pvt. Ltd..

Ying, X. (2019, February). An overview of overfitting and its solutions. In Journal of physics: Conference series (Vol. 1168, p. 022022). IOP Publishing.

Zarei, M., Najarchi, M., & Mastouri, R. (2021). Bias correction of global ensemble precipitation forecasts by Random Forest method. Earth Science Informatics, 14, 677-689.

Zavadskas, E. K., Stević, Ž., Turskis, Z., & Tomašević, M. (2019). A novel extended EDAS in Minkowski Space (EDAS-M) method for evaluating autonomous vehicles. Studies in Informatics and Control, 28(3), 255-264.

Zhang, G. L., S. Young Hong, and Z. S. Chen. (2011). Soil information in East Asia: An overview. International workshop on the GlobalSoilMap.net: GSM-Progessing the new perspectives on soil

information in Oceania. Indonesia Center of Zhang, Z., Zha, Y., Yu, Y., Zhang, X., Smith, P. and Rodrigo-Comino, J. (2022). Evaluating Indices of Soil Organic Carbon Stability. A Case Study for Forest Restoration Projects Near Beijing, China. (2022) Ecological Indicators. 142:109222.

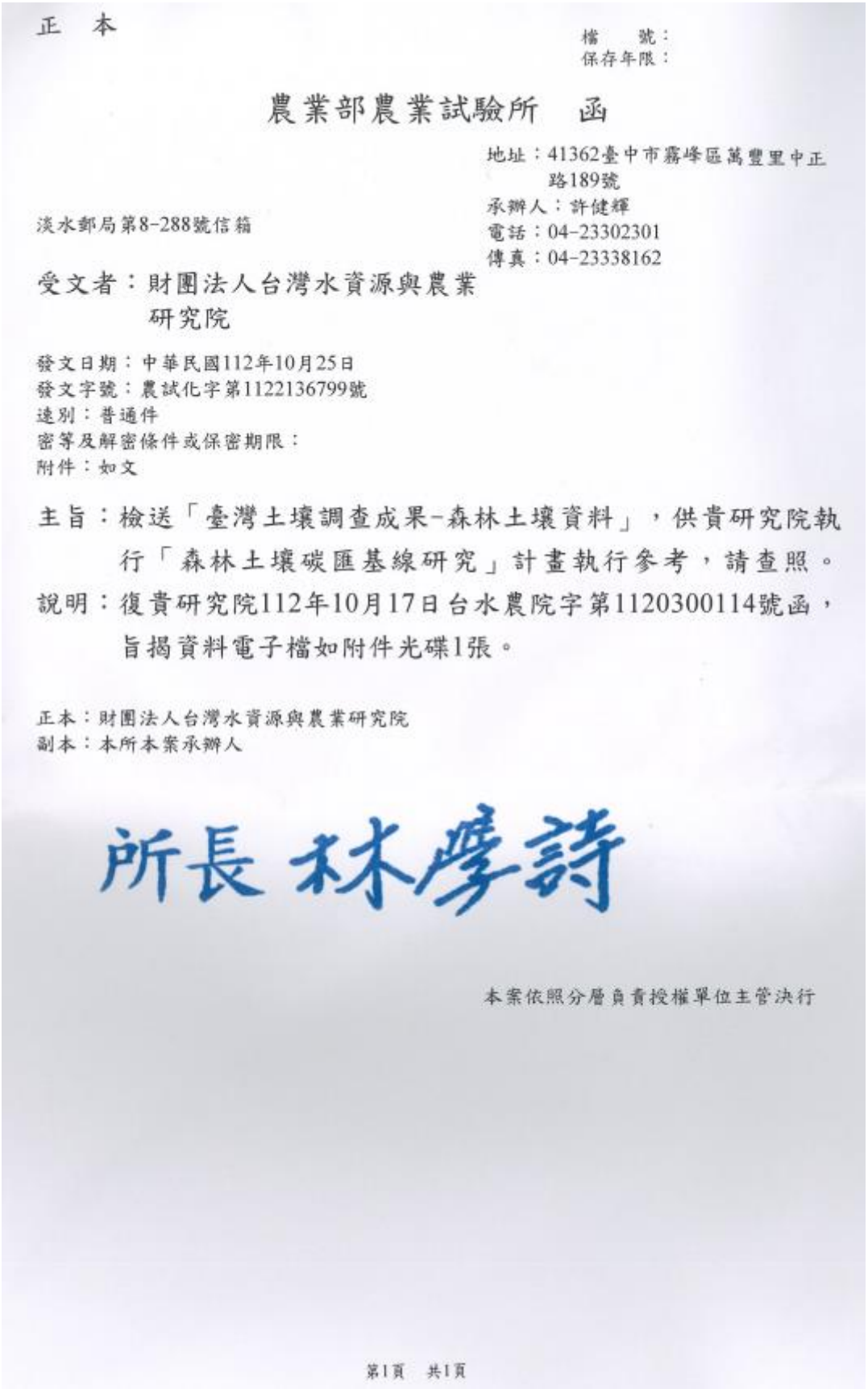
Zhang, Y., & Yeung, D. Y. (2012). A convex formulation for learning task relationships in multi-task learning. arXiv preprint arXiv:1203.3536.

Zhang, Z. (2016). Variable selection with stepwise and best subset approaches. Annals of translational medicine, 4(7).

Zhou, X., Zhu, X., Dong, Z., & Guo, W. (2016). Estimation of biomass in wheat using random forest regression algorithm and remote sensing data. The Crop Journal, 4(3), 212-219.

附件1、圖資索要紀錄

圖資索要公文



正　本

檔　　號：
保存年限：

農業部農業試驗所　函

地址：41362臺中市霧峰區萬豐里中正路189號
承辦人：許健輝
電話：04-23302301
傳真：04-23338162

淡水郵局第8-288號信箱

受文者：財團法人台灣水資源與農業研究院

發文日期：中華民國112年10月25日
發文字號：農試化字第1122136799號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：如文

主旨：檢送「臺灣土壤調查成果-森林土壤資料」，供貴研究院執行「森林土壤碳匯基線研究」計畫執行參考，請查照。

說明：復貴研究院112年10月17日台水農院字第1120300114號函，旨揭資料電子檔如附件光碟1張。

正本：財團法人台灣水資源與農業研究院
副本：本所本案承辦人

所長 林學詩

本案依照分層負責授權單位主管決行

第1頁　共1頁

附件 2、工作會議紀錄

農業部林業及自然保育署
森林土壤碳匯基線研究

第一次工作會議紀錄

時間：112 年 9 月 23 日(星期五)下午 16 時 00 分

地點：林業及自然保育署(臺北市中正區杭州南路一段 2 號)

主持人：沈怡伶副組長

出席人員

林業署：黃鏡諺簡任技正、吳俊奇科長、柯人豪技正

台灣水資源與農業研究院：陳尊賢顧問、黃群智研究專員、賴靖陽研究專員

記錄：黃群智

計畫執行規劃

本計畫由台農院陳尊賢顧問督導，各項工作內容及參與人力如下表：

工作項目及內容	參與成員
112-113 年度工作規劃	
工項 1. 研析國外、國內森林土壤碳匯研究成果	
(1)彙整國外森林土壤碳匯研究成果	黃群智 陳昱蓉
(2)彙整國內森林土壤剖面碳會調查結果，進行資料基本分析	
(3)彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料	
工項 2. 舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次	
(1)舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習土壤繪圖軟體基本操作	黃群智 謝宏鑫
(2)舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習數位化土壤匯圖技術	
工項 3. 建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式	
(1)評估森林土壤碳匯量推估模式	黃群智 陳昱蓉 劉芳萍 謝宏鑫
(2)比較森林土壤碳匯與不同地形單元的相關性	
(3)繪製陽明山國家公園地區、太平山地區、阿里山地區碳匯分布圖	
工項 4. 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式	
(1)針對影響臺灣山區森林土壤碳匯推估模式之關鍵因子，提出解決方案	黃群智、陳昱蓉 劉芳萍、謝宏鑫
(2)建立森林土壤碳匯圖模式準確性及減少變異性之解決方案	
(3)繪製屏東分署六龜工作站荖濃溪 4.7 萬公頃森林土壤碳匯地圖	
工項 5. 國內森林土壤調查點位之碳匯推估	
(1)彙整及分析國內森林土壤調查點位之森林土壤碳匯推估	黃群智、陳昱蓉 劉芳萍、謝宏鑫
(2)繪製國內森林土壤調查點位之碳匯分布圖	
工項 6. 研提臺灣森林土壤調查點位之碳匯初步評估報告及相關問題	
(1)繪製國內森林土壤調查點位之碳匯初步基線圖	黃群智、陳昱蓉 劉芳萍、謝宏鑫
(2)研提未來研究規劃內容	

各項工作進度規劃如下表：

重要工作項目	工　作　數　量				金額(千元)	實施地點
	單位	全程計畫目標 112 年 8 月 至 113 年 11 月	112 年度 預定目標	113 年度 預定目標	農委會 經費	
1.研析國外、國內森林土壤碳匯研究(含方法學)成果	式	彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 彙整國內重要機關土壤調查資訊。 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。	彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 彙整國內重要機關土壤調查資訊。 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。		877.67	新北市
2.辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次	梯次	舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次。	舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次。		941.18	
3.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式	式	建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。		建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。	1040.47	
4.精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式	式	精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。		精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。	1000.14	
5.國內森林土壤調查點位之碳匯推估	式	國內森林土壤調查點位之碳匯推估。		國內森林土壤調查點位之碳匯推估。	702.96	
6.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題	式	國內森林土壤調查點位之碳匯推估。		國內森林土壤調查點位之碳匯推估。	337.58	

重要期程與工作檢核項目：

檢核點	驗核標準	交付期限	數量
第 1 期	提出工作執行規劃	決標日次日起一個月內	紙本 3 本/電子檔 2 份
第 2 期	彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 彙整國內重要機關土壤調查資訊。 彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。 舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次。	112 年 12 月 31 日前	紙本 15 本/電子檔 2 份
第 3 期	建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。	113 年 5 月 31 日前	紙本 15 本/電子檔 2 份
第 4 期	國內森林土壤調查點位之碳匯推估。 研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	113 年 11 月 30 日前	紙本 15 本/電子檔 2 份
成果報告	各期工作資料彙整及依期末審查意見修正	期末審查會議後，依規定期限繳交	紙本 5 本/電子檔 3 份

討論事項

案由一：討論工項二「辦理森林土壤碳匯基線研究工作坊或實習課程 2 梯次」辦理細節。

說明：

台農院 112 年 10 月 4 日至 6 日及 10 月 11 日至 13 日辦理 2 梯次工作坊課表如下：

<table>
<tr><td colspan="4">工作坊 1</td></tr>
<tr><td>時間</td><td>10 月 4 日(三)</td><td>10 月 5 日(四)</td><td>10 月 6 日(五)</td></tr>
<tr><td>08:50-9:10</td><td colspan="3">報到</td></tr>
<tr><td>09:10-10:00</td><td rowspan="2">資訊課程

ArcGIS 基本操作

謝宏鑫 工程師
電腦教室</td><td rowspan="2">專題演講

臺灣森林土壤碳匯量分布現況與增加森林土壤碳匯案例分享

陳尊賢 顧問
訓練教室</td><td rowspan="2">專題演講

國際森林土壤碳匯調查技術發展趨勢與我國森林碳匯調查之建議

郭鴻裕 顧問
訓練教室</td></tr>
<tr><td>10:10-11:00</td></tr>
<tr><td>11:10-12:00</td><td colspan="3">午休時間</td></tr>
<tr><td>12:00-13:00</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="3">資訊課程

Digital soil mapping 基本操作

許健輝 副研究員
楊博鈞 助教
羅郁淨 助教
電腦教室</td><td rowspan="3">資訊課程

Geostatistics soil mapping 基本操作

簡士濠 特聘教授
陳俊元 助教
劉冠男 助教
電腦教室</td></tr>
<tr><td>13:10-14:00</td></tr>
<tr><td>14:10-15:00</td><td rowspan="3">專題演講

臺灣森林土壤類型與土壤碳匯

陳尊賢 顧問
訓練教室</td></tr>
<tr><td>15:10-16:00</td></tr>
<tr><td>16:10-17:00</td></tr>
</table>

工作坊 2			
時間	10 月 11 日(三)	10 月 12 日(四)	10 月 13 日(五)
08:50-9:10	報到		
09:10-10:00 10:10-11:00 11:10-12:00	專題演講 **地理統計發展及其在森林土壤環境之應用案例分析** 簡士濠 教授 訓練教室	專題演講 **地表枯落物與土壤含碳量調查技術** 杜清澤 副研究員 訓練教室	專題演講 **土壤轉換函數及地域(形)分析應用於土壤資訊之預測** 蔡呈奇 教授 訓練教室
12:00-13:00	午休時間		
13:10-14:00 14:10-15:00 15:10-16:00 16:10-17:00	資訊課程 **森林土壤碳匯量計算與土壤碳匯空間分布之繪製練習** 簡士濠 教授 陳俊元 助教 劉冠男 助教 電腦教室	資訊課程 **ArcGIS 總複習** 謝宏鑫 工程師 電腦教室	資訊課程 **數位化土壤繪圖技術土壤繪圖空間分布：一個實例的土壤碳匯基線繪製** 許健輝 副研究員 楊博鈞 助教 羅郁淨 助教 電腦教室

詳述 10 月 4 日至 6 日及 10 月 11 日至 13 日，課程間相關性及工作坊辦理目的。

會中討論：

課程中講師皆為臺灣土壤碳匯之翹楚，尤其是許健輝副研究員及簡士濠教授多次參加澳洲雪梨大學舉辦數位化土壤匯圖國際訓練班及國際研討會，並將會中學習到的國際最新技術帶回臺灣，讓臺灣的土壤碳匯研究與國際接軌。

課程由最基礎的臺灣森林土壤類型與分布講起，帶領學員認識臺灣森林土壤碳匯資料庫及其碳匯量如何計算評估及如何利用 ArcGIS 繪製土壤碳匯地圖、介紹世界各國(FAO，美國 USDA、歐盟、德國、日本、韓國)對森林土壤碳匯調查方法及未來臺灣如何執行碳匯量之技術規畫與

問題，臺灣該如何進行森林土壤碳匯調查及增加碳匯研究之案例說明，進階到如何將現有各地區森林土壤碳匯資料，使用地理統計技術(Geostatistics)及土壤轉換函數(pedotransfer function)，將臺灣現有的森林土壤調查剖面碳資料庫，來預測全臺灣各地區森林土壤碳匯量及繪製碳匯地圖，及評估其變異數與不確定性。

案由二：加開以森林地下部教學為導向的工作坊。備選課程如下：森林土壤碳匯的重要性(郭鴻裕)、臺灣森林土壤的碳匯(陳尊賢)、森林土壤碳匯的空間推估方法-數位土壤繪圖(許健輝)、森林土壤野外調查技術-土壤剖面觀察與描述(陳尊賢)、森林地表枯落物與土壤碳含量調查技術(杜清澤)、森林土壤碳匯的空間推估方法-地理統計(莊愷瑋)、森林土壤及林地腐植層-碳含量分析與碳存量估算(崔君至)、森林土壤野外調查技術-土壤顏色質地構造與結持度(賴鴻裕)、森林碳經營策略及計畫評估方法之探討(鄭欽龍)等。

說明：

討論林業及自然保育署期望的課程方向。

想邀請的講師。

討論林業及自然保育署期望的課程內容及時間。

契約中的「每梯次三天課程」「林業署、各分署及農航所代表(每單位 3 至 4 人)」，是否有需要變更為「邀請林業相關人員」。

決議：

進行契約變更，變更內容如下表

工作項目：

原工項	修正工項
(二)辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次 1.舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習土壤繪圖軟體基本操作 (3 天課程) 辦理工作坊或實習課程，林業署、各分署及農航所代表 (每單位 3 至 4 人)，規劃實習課程及工作坊含演講 (9 小時)及土壤繪圖軟體基本操作 (9 小時)，內容包含臺灣的森林土壤、國內外土壤碳匯現況、增匯減排，基本操作練習森林土壤剖面碳量計算、ArcGIS Pro 基本操作、地理統計技術與軟體應用。 2.舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習數位化土壤繪圖 (Digital soil mapping) 技術 (3 天課程)。 辦理工作坊或實習課程，林業署、各分署及農航所代表 (每單位 3 至 4 人)，規劃實習課程及工作坊含演講 (9 小時)及森林土壤碳匯量估算和繪製練習 (9 小時)，內容包含地理統計發展及其在土壤環境科學之應用、土壤碳匯量計算、土壤碳匯空間分布，練習數位化土壤繪圖技術 (Digital soil mapping)，繪製臺灣山區一案例之森林土壤碳匯分布初	(二)辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上(活動總時數至少 36 小時，參與總人次達 60 人次以上) 舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程，邀請林業保育署暨各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關等人員出席，以增進對森林土碳匯及調查技術之瞭解，活動總時數至少 36 小時，總參與人次達 60 人次以上。內容應包含： 森林土壤類型及碳匯調查技術之基礎知識、森林土壤繪圖軟體應用及碳匯量計算、繪製森林土壤碳匯地圖等實作課程。

步地圖。以苖濃溪為例，繪製苖濃溪工作站 (4.7 萬公頃)森林土壤碳匯分布初步地圖。	

重要期程與工作簡查項目

原工項

檢核點	驗核標準	交付期限
第 1 期	提出工作執行規劃	決標日次日起一個月內
第 2 期	1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。 3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。 ~~4.舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次。~~	112 年 12 月 31 日前
第 3 期	1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。 2. 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。	113 年 5 月 31 日前
第 4 期	1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。 2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	113 年 11 月 30 日前

修正工項

檢核點	驗核標準	交付期限
第 1 期	提出工作執行規劃	決標日次日起一個月內
第 2 期	1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。 2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。 3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。	112 年 12 月 31 日前
第 3 期	1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。 2.精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。 3. 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上(活動總時數至少 36 小時，培訓人員總數需達加總人數 60 人次以上)。	113 年 5 月 31 日前
第 4 期	1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。 2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。	113 年 11 月 30 日前

案由三：詳述工項 1 所蒐集的過去土壤調查資料範圍，工項 3 至 5 預計以何種分析方式推估臺灣森林土壤碳匯，如何修正推估方式的不確定性提高準確性，工項 6 中預計展現的基線初步成果。

說明：

詳述本研究的執行方式，預期展現的成果。

詳述為何選擇陽明山地區、太平山地區、阿里山地區、荖濃溪事業區繪製森林土壤碳匯地圖。

討論林業及自然保育署期望在本案中獲得的成果。

會中討論：

過去林業署曾經委辦許多土壤調查計畫，藉由本計畫將過去的計畫結果進行全面性的盤點及統整。

過去土壤計畫中(農試所、林試所、不同大學研究室)使用不同的資料取樣，應將這些資料進行統整，讓這些資料可以更好的被使用。

國外的土壤碳匯研究成果應進行完善彙整，並提出可應用在臺灣的方法。

本研究計畫中提到的範例區：陽明山地區、太平山地區、阿里山地區、荖濃溪事業區，是因為具有完整的低海拔至高海拔(阿里山地區)、完整的各種土綱(荖濃溪事業區)、各樹種與土壤碳匯關係(太平山地區)，可用來評估各種變異模式與土壤碳匯量間的關係，因此選用這些範例區。

113 年最後可有最初步的全臺森林土壤碳匯量。為降低不確定性及變異性，較為細緻的森林土壤碳匯量有待未來分年進行。

臨時動議

散會(17 時 30 分)

正本

檔　　號：
保存年限：

農業部林業及自然保育署　函

地址：100024臺北市中正區杭州南路一段2號
聯絡人：柯人豪
電話：(02)2351-5441 #613
傳真電話：(02)2351-9702
電子信箱：m3133@forest.gov.tw

251新北市淡水紅樹林郵局第288號信箱

受文者：財團法人台灣水資源與農業研究院

發文日期：中華民國112年11月22日

發文字號：林企字第1121634957號

速別：普通件

密等及解密條件或保密期限：

附件：如主旨

裝

主旨：檢送本署已用印之「森林土壤碳匯基線研究」（案號：tfbh-1120212）第1次契約變更工項對照表正本1份，請併原契約留存，請查照。

說明：依據本署112年11月8日林企字第1121631264號函續辦，兼復貴院112年11月14日台水農院字第1120300133號函。

訂

正本：財團法人台灣水資源與農業研究院
副本：本署秘書室、主計室、政風室、保育企劃組(均含第1次契約變更條文對照表影本1份)

線

署長林華慶

「森林土壤碳匯基線研究」案

第 1 次契約變更條文對照表

服務建議書	原工項	修正工項
四、工作項目及內容	(二)辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次 1.舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習土壤繪圖軟體基本操作（3 天課程） 辦理工作坊或實習課程，林務局、各林管處及農航所代表（每單位 3 至 4 人），規劃實習課程及工作坊含演講（9 小時）及土壤繪圖軟體基本操作（9 小時），內容包含臺灣的森林土壤、國內外土壤碳匯現況、增匯減排，基本操作練習森林土壤剖面碳量計算、ArcGIS Pro 基本操作、地理統計技術與軟體應用。 2.舉辦森林土壤碳匯工作坊-學習數位化土壤繪圖（Digital soil mapping）技術（3 天課程）。 辦理工作坊或實習課程，林務局、各林管處及農航所代表（每單位 3 至 4 人），規劃實習課程及工作坊含演講（9 小時）及森林土壤碳匯量估算和繪製練習（9 小時），內容包含地理統計發展及其在土壤環境科學之應用、土壤碳匯量計算、土壤碳匯空間分布，練習數位化土壤繪圖技術（Digital soil mapping）， 1	(二)辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程 2 梯次以上(活動總時數至少 36 小時，參與總人次達 60 人次以上) 舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程，邀請林業保育署暨各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關等人員出席，以增進對森林土壤碳匯及調查技術之瞭解，活動總時數至少 36 小時，總參與人次達 60 人次以上。內容應包含： 森林土壤類型及碳匯調查技術之基礎知識、森林土壤繪圖軟體應用及碳匯量計算、繪製森林土壤碳匯地圖等實作課程。

<table>
<tr><td>服務建議書</td><td>原工項</td><td>修正工項</td></tr>
<tr><td></td><td>繪製臺灣山區一案例之森林土壤碳匯分布初步地圖。以荖濃溪為例，繪製荖濃溪工作站（4.7萬公頃）森林土壤碳匯分布初步地圖。</td><td></td></tr>
<tr><td>重要期程與工作檢查項目</td><td>
<table>
<tr><th>檢核點</th><th>驗核標準</th><th>交付期限</th></tr>
<tr><td>第1期</td><td>提出工作執行規劃</td><td>決標日次日起一個月內</td></tr>
<tr><td>第2期</td><td>1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。
2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。
3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。
~~4.舉辦森林土壤碳匯工作坊或實習課程2梯次。~~</td><td>112年12月31日前</td></tr>
<tr><td>第3期</td><td>1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。
2. 精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。</td><td>113年5月31日前</td></tr>
<tr><td>第4期</td><td>1.國內森林土壤調查點位之碳匯推估。
2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。</td><td>113年11月30日前</td></tr>
</table>
</td><td>
<table>
<tr><th>檢核點</th><th>驗核標準</th><th>交付期限</th></tr>
<tr><td>第1期</td><td>提出工作執行規劃</td><td>決標日次日起一個月內</td></tr>
<tr><td>第2期</td><td>1.彙整歐盟、美國與亞洲等不同國家森林碳匯研究成果。
2.彙整國內重要機關土壤調查資訊。
3.彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。</td><td>112年12月31日前</td></tr>
<tr><td>第3期</td><td>1.建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式。
2.精進國內森林土壤碳匯研究，滾動修正森林土壤碳匯推估模式。
3. 辦理森林土壤碳匯工作坊或實習課程2梯次以上(活動總時數至少36小時，培訓人員總數需達加總人數60人次以上)。</td><td>113年5月31日前</td></tr>
<tr><td>第4期</td><td>1.國內森林土壤調查點位之碳匯推 估。
2.研提臺灣森林土壤碳匯量之初步評估報告及相關問題。</td><td>113年11月30日前</td></tr>
</table>
</td></tr>
</table>

農業部林業及自然保育署

年 月 日

財團法人台灣水資源與農業研究院

中華民國 112 年 11 月 09 日

2

9

農業部林業及自然保育署

森林土壤碳匯基線研究計畫

工作會議紀錄

壹、 時間：113 年 01 月 03 日(星期五)上午 9 時 30 分

貳、 地點：林業及自然保育署 6 樓會議室

參、 主持人：吳科長俊奇

肆、 出(列)席單位

一、 林業及自然保育署：吳俊奇科長、柯人豪技正

二、 台灣水資源與農業研究院：賴靖陽主任、黃群智博士、謝宏鑫研究員、謝宇雯研究專員

記錄：謝宇雯

伍、 報告事項：

一、112 年各工項執行情況說明：詳如議程

二、資料彙整情況說明：詳如議程

三、嘉義分署、宜蘭分署轄區土壤有機碳儲存量推估：詳如議程

四、各工項期程說明：詳如議程

陸、 討論事項

案由一：森林土壤資料研析內容，土壤碳匯增加趨勢

說　明：

1. Luyssaert 等人(2008)以 15 至 800 年樹齡的森林進行土壤分析，結果表明古老的森林可以持續累積碳，土壤碳的累積並沒有在一定時間後形成平衡而不再增加。
2. Tsai 等人(2009)以 3 種闊葉樹及 6 種針葉樹進行土壤碳存量估算，不同樹種碳存量有顯著差異，油桐土壤有機碳存量最低，扁柏最高；依相近樹種進行不同年份土壤有機碳存量比較，土壤有機碳會隨時間增加而逐步累積，針葉林土壤有機碳增加有一段時間的穩定期，穩定期過後會在持續增加土壤有機碳(表 1)。

表 1. 不同樹種 3 土壤深度土壤有機碳存量比較

Tree species		Stand age (yr)	*n*	0~30 cm Mean	0~30 cm CV%	0~50 cm Mean	0~50 cm CV%	0~100 cm Mean	0~100 cm CV%
				Broadleaf trees					
相思樹	*Acacia confusa* (Aca)	50	3	9.8 ab[1)]	24[2)]	12 abc	23	15 abc	33
油桐	*Aleurites fordii* (Ale)	20	3	2.2 d	61	4.0 e	67	4.0 e	67
臺灣櫸	*Zelkova formosana* (Zel)	27	3	7.4 bc	19	8.6 bcd	9	9.7 cde	42
				Coniferous trees					
柳杉	*Cryptomeria japonica* (Cry I)	20	3	5.7 bcd	21	6.9 de	8	8.1 cde	2
	Cryptomeria japonica (Cry II)	40	3	5.5 cd	21	7.0 de	23	8.4 cde	33
	Cryptomeria japonica (Cry III)	51	3	7.0 bc	3	8.4 cd	16	12 bcd	36
台灣杉	*Taiwania cryptomerioides* (Tai)	10	3	9.2 abc	30	14 ab	19	17 ab	17
扁柏	*Chamaecyparis obtusa* var. *formosana* (ChO)	37	3	12 a	33	16 a	35	21 a	40
巒大杉	*Cunninghamia konishii* (Cun)	16	3	9.0 abc	37	12 abc	35	12 bcd	35
紅檜	*Chamaecyparis formosensis* (ChF)	16	3	5.9 bcd	30	6.6 de	16	6.6 de	16
肖楠	*Calocedrus macrolepis* var. *formosana* (Cal)	30	3	5.1 cd	23	6.6 de	29	7.8 cde	23

[1)] Means followed by same letter within a column do not significantly differ based on Duncan's multiple tests ($p < 0.05$).

[2)] CV%, coefficient of variation.

Luyssaert, S., Schulze, E. D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B. E., ... & Grace, J. (2008). Old-growth forests as global carbon sinks. Nature, 455(7210), 213-215.

Tsai, C. C., Hu, T. E., Lin, K. C., & Chen, Z. S. (2009). Estimation of soil organic carbon stocks in plantation forest soils of Northern Taiwan. Taiwan J For Sci, 24(2), 103-115.

決議：

1. 目前在國際文獻中對於森林土壤碳匯量的影響因子以氣候及海拔較為顯著，本計畫會再針對臺灣森林林型分布圖與森林土壤碳匯變化趨勢進行相關性的研究與探討。
2. 可再針對土壤土綱與土壤碳含量進行比較與分析。
3. 可再蒐集更完整的森林土壤碳含量逐年累積的研究，目前提出的兩篇文獻研究尺度尚有疑慮處。
4. 山地有土壤的不多，土壤碳累積有限，可多研析與臺灣有相同地形(e.g.日本)國家的森林土壤碳匯研究。
5. 需再蒐集更多有關國家大尺度的研究文獻，而非小尺度如部分地區的研究，以利作為森林土壤碳匯量整體趨勢的佐證。

案由二：世界各國已陸續進行土壤碳匯量計算並將森林土壤碳匯列入清冊

說　明：

一、 美國國家溫室氣體清冊指出 2022 年美國的森林儲存約 597 億噸碳，大部分碳儲存於森林生態系中(95%)，其餘部分儲存在木材產品中，最大碳庫為森林土壤(圖 1)，約佔 2022 年森林碳匯總量的 52%(U.S. National Greenhouse Gas Inventory, April 2023)。

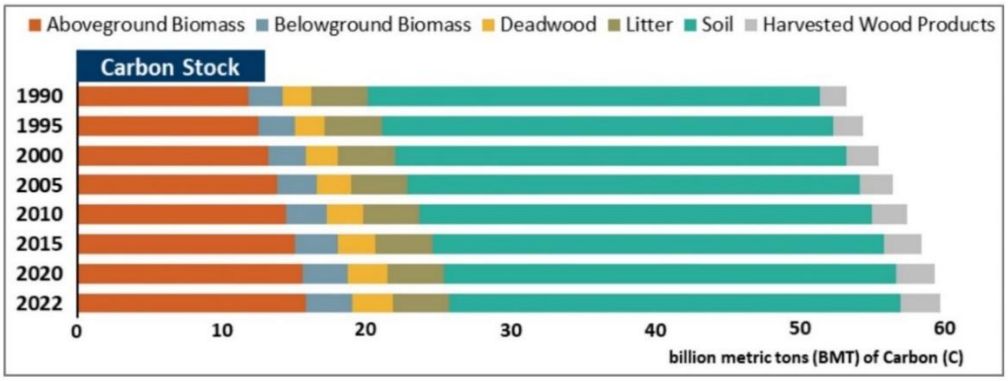


圖 1. 1990 至 2022 年美國森林的碳匯長條圖

(資料來源：U.S. National Greenhouse Gas Inventory, April 2023)

二、 歐盟已於 2019 年將森林土壤碳列入清冊中，制定 2050 年具有法律約束力的氣候中和目標，其中包括土壤等土地利用和林業部門在減少歐盟整體排放量方面發揮的重要作用。除了土壤在減緩氣候變遷政策中的作用外，土壤管理決策還將影響其他政策領域。2019 年成員國報告有機土壤淨排放量為 108 Mt CO_2，礦質土壤淨移除量為 44 Mt CO_2(European Environment Agency, September 2022)。

三、 亞洲，日本、韓國、中國皆有全國森林土壤碳存量推估的研究，雖尚未列入清冊中，但皆已承諾朝向 2050 年達成碳淨零目標。

決議：

1. 可再針對各國於清冊列出的土壤碳匯量計算以及碳權的轉換，並進行彙整。
2. 進一步分析各國國家尺度的森林土壤碳匯調查以及森林土壤碳匯方法學。

柒、 臨時動議

案由一：有關明年工作坊事宜邀請林業署長官出席開幕式

決　議：保育企劃組組長已承諾參加第一梯次工作坊開幕式。

案由二：未來計畫期程中會再精進之研究部分

決　議：

1. 將枯枝落葉層納入森林土壤碳匯量計算
   (1) 研析枯枝落葉層資料 (影響因子)
   (2) 蒐整枯枝落葉層資料 (杜清澤等人)
   (3) 枯枝落葉層推算 (藉由影響因子進行建模推算)
   (4) 驗證評估
2. 全臺森林資料重新整理，並全數使用
3. 繪製全臺土壤樣本情形分布圖(包含有枯枝落葉層及全臺灣數據)
4. 精進總體密度推算，分區方式原為「高程」改為「林型」
5. 使用土壤轉換函數，推算 30 公分、50 公分、100 公分以及 150 公分深之 SOC
6. 精進機器學習建置模型
7. 評估生態區域碳匯量
8. 海拔剖面碳匯量趨勢圖建置與探討
9. 林型分布圖、樹齡、優勢樹種分布圖

案由三：森林土壤碳匯基線研究後續可規劃之方向

決　議：

因目前各國在碳權上的規定各有不同，尤其是森林土壤部分，目前仍處於研究階段，需再彙整各國的方法學並分析與探討，針對臺灣森林土壤情形，評估是否可列入國家清冊中，以及所需的資料成本和效益分析，提出適合臺灣的建議。

捌、 散會(11 時 00 分)

附件 3、教育訓練證明

國立宜蘭大學
National Ilan University NIU

森林土壤碳匯評估與增進技術研究
2023 年森林碳匯調查技術研習課程

研習證明書

陳昱蓉 君參加國立宜蘭大學森林暨自然資源學系於中華民國 112 年 9 月 4 日（一）至 9 月 8 日（五）主辦之「2023 年森林碳匯調查技術研習」課程（農業部資源永續利用司氣候治理科補助）。

特頒此證，以茲證明

國立宜蘭大學 森林暨自然資源學系 宜蘭市神農路一段1號

計畫主持人
國立宜蘭大學森林暨自然資源學系
蔡呈奇教授

中華民國 112 年 09 月 08 日

國立宜蘭大學
National Ilan University NIU

森林土壤碳匯評估與增進技術研究
2023 年森林碳匯調查技術研習課程

研習證明書

黃群智 君參加國立宜蘭大學森林暨自然資源學系於中華民國 112 年 9 月 4 日（一）至 9 月 8 日（五）主辦之「2023 年森林碳匯調查技術研習」課程（農業部資源永續利用司氣候治理科補助）。

特頒此證，以茲證明

國立宜蘭大學 森林暨自然資源學系 宜蘭市神農路一段1號

計畫主持人
國立宜蘭大學森林暨自然資源學系
蔡呈奇教授

中華民國 112 年 09 月 08 日

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
國際森林土壤碳匯調查技術發展趨勢
與我國森林碳匯調查之建議
簽到單

課程名稱: 國際森林土壤碳匯調查技術發展趨勢與我國森林碳匯調查之建議
課程時間：112 年 8 月 17 日(四) 09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 5F 戰情室
講師：郭鴻裕

上課學員：

姓名	簽名	姓名	簽名
黃群智			
陳昱蓉			
謝承翰			
成瑋	成瑋		
徐鈺庭	徐鈺庭		
葉怡廷	葉怡廷		

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
臺灣森林土壤類型與土壤碳匯
簽到單

課程名稱: 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯
課程時間：112 年 8 月 18 日(五) 09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 交誼廳
講師：陳尊賢

上課學員：

姓名	簽名	姓名	簽名
黃群智		余品臻	
謝承翰			
洋仲緯			
楊朗偉			
陳昱蓉			
林冠妤			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
ArcGIS 基本操作
簽到單

課程時間：112 年 10 月 4 日(三) 09 時 00 分-14 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室
講師：黃國展

上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	余品臻		
陳逸庭	劉珮琦		
陳昱蓉	謝承翰		
劉芳萍	董洛珊		
鄭可萱			
成瑋			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
臺灣森林土壤類型與土壤碳匯
簽到單

課程名稱：臺灣森林土壤類型與土壤碳匯
課程時間：112 年 10 月 4 日(三) 14 時 00 分-17 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：陳尊賢

上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	劉珮琦		
成瑋	陳昱蓉		
陳逸庭			
林冠妤			
劉芳萍			
謝承翰			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
臺灣森林土壤碳匯量分布現況與增加森林土壤碳匯案例分享
簽到單

課程名稱：臺灣森林土壤碳匯量分布現況與增加森林土壤碳匯案例分享
課程時間：112 年 10 月 5 日(四)　09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：陳尊賢　陳尊賢
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	陳遠庭		
劉芳萍	成瑋		
謝炳秀			
謝宏鑫			
林冠妙			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
Geostatistics soil mapping 基本操作
簽到單

課程名稱：Geosatistics soil mapping 基本操作
課程時間：112 年 10 月 6 日(五)　13 時 00 分-17 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室
講師：簡士濠
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	謝宏鑫		
陳昱蓉	陳遠庭		
劉芳萍	成瑋		
謝炳秀			
林冠妙			
謝炳秀			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
地表枯落物與土壤含碳量調查技術
簽到單

課程名稱：地表枯落物與土壤含碳量調查技術
課程時間：112 年 10 月 12 日(四)　09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：杜清澤 副研究員
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	陳昱蓉		
余品臻	王啓瑋		
謝宏鑫	成瑋		
張世偉	陳尊賢		
謝炳秀	楊勛學		
林冠妙			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
ArcGIS 總複習
簽到單

課程名稱：ArcGIS 總複習
課程時間：112 年 10 月 12 日(四)　13 時 00 分-17 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：謝宏鑫
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智			
劉芳萍			
張世偉			
林冠妙			
陳遠庭			
陳昱蓉			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
土壤轉換函數及地域(形)分析
應用於土壤資訊之預測
簽到單

課程名稱：土壤轉換函數及地域(形)分析應用於土壤資訊之預測
課程時間：112 年 10 月 13 日(五)　09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：蔡呈奇 教授
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
黃群智	陳遠庭		
陳呈奇			
柯人豪			
張文璋			
成璋			
楊勛儒			

森林土壤碳匯基線研究
工作坊
數位化土壤繪圖技術土壤繪圖空間分布：
一個實例的土壤碳匯基線繪製
簽到單

課程名稱：數位化土壤繪圖技術土壤繪圖空間分布：一個實例的土壤碳匯基線繪製
課程時間：112 年 10 月 13 日(五)　13 時 00 分-17 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室
講師：許健輝 副研究員
上課學員：

簽名	簽名	簽名	簽名
陳遠庭			
張文璋			
黃群智			
楊勛儒			
成璋			
柯人豪			

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次
台灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二)　09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院20F訓練教室
講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
林業及自然保育署保育企劃組	陳建晃	組長	陳建晃
林業及自然保育署保育企劃組	吳俊奇	科長	
林業及自然保育署保育企劃組	柯人豪	技正	柯人豪
台灣水資源與農業研究院	虞國興	院長	
台灣水資源與農業研究院	黃啟瑞	助理院長	黃啟瑞
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	劉哲諺	研究專員	劉哲諺
台灣水資源與農業研究院	李卉妤	研究專員	李卉妤
二	陳遠庭	副所長	陳遠庭

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次
臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二)　09 時 00 分-12 時 00 分
課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室
講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	魏郁軒	簡任技正	魏郁軒	魏郁軒
林業及自然保育署森林管理組	吳景揚	技士	吳景揚	吳景揚
林業及自然保育署	洪儷文	技士	洪儷文	洪儷文
林業及自然保育署	藍瑞銘	技正	藍瑞銘	藍瑞銘
林業及自然保育署	吳國欽	技正	吳國欽	吳國欽
林業及自然保育署新竹分署	吳秉昇	技佐	吳秉昇	吳秉昇
林業及自然保育署嘉義分署	張雯婷	技正	張雯婷	張雯婷
林業及自然保育署宜蘭分署	蕭崇仁	分署長	蕭崇仁	
林業及自然保育署宜蘭分署	張雅心	技士	張雅心	張雅心
林業及自然保育署宜蘭分署	沈舒蕎	技正	沈舒蕎	沈舒蕎
林業及自然保育署宜蘭分署	吳明瑾	技士	吳明瑾	吳明瑾

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署宜蘭分署	莊御祥	技佐	莊御祥	莊御祥
林業及自然保育署花蓮分署	張景昇	技正	張景昇	張景昇
林業及自然保育署臺東分署	陳明男	技佐	陳明男	陳明男
林業試驗所	涂富鈞	助理研究員	涂富鈞	涂富鈞
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	莊宜軒		莊宜軒	莊宜軒
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	鄭勝榮	研究生	鄭勝榮	鄭勝榮
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	魏子穎	研究生	魏子穎	魏子穎
國立臺北大學自然資源與環境管理研究所	李沂潔	研究生	李沂潔	李沂潔
中國文化大學	許立達	副教授	許立達	許立達
國立宜蘭大學	廖奕涵	學生	廖奕涵	廖奕涵
大安森林公園之友基金會	王献生	解說員	王献生	王献生

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
台農院	陳尊賢	顧問	陳尊賢	
台農院	田璐佐	研究專員	田璐佐	
台農院	張必輝	研究專員	張必輝	
台農院	楊璞	研究專員	楊璞	
台農院	林翔均	研究專員	林翔均	
台農院	陳昱蓉	研究專員	陳昱蓉	
		研究專員	簡祥秀	
台農院	郭鴻裕	顧問	郭鴻裕	
台農院	李宥妍	研究專員	李宥妍	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
林業及自然保育署保育企劃組	陳連晃	組長	陳連晃
林業及自然保育署保育企劃組	吳俊奇	科長	
林業及自然保育署保育企劃組	柯人豪	技正	柯人豪
台灣水資源與農業研究院	虞國興	院長	
台灣水資源與農業研究院	黃啟瑞	助理院長	黃啓瑞
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	劉哲諺	研究專員	劉哲諺
台灣水資源與農業研究院	李卉妤	研究專員	李卉妤
	陳逸良	副所長	陳逸良

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	魏郁軒	簡任技正	魏郁軒	魏郁軒
林業及自然保育署森林管理組	吳景揚	技士	吳景揚	吳景揚
林業及自然保育署	洪儷文	技士	洪儷文	洪儷文
林業及自然保育署	藍瑞銘	技正	藍瑞銘	
林業及自然保育署	吳國欽	技正	吳國欽	吳國欽
林業及自然保育署新竹分署	吳秉昇	技佐	吳秉昇	吳秉昇
林業及自然保育署嘉義分署	張雯婷	技正	張雯婷	張雯婷
林業及自然保育署宜蘭分署	蕭崇仁	分署長		
林業及自然保育署宜蘭分署	張雅心	技士	張雅心	張雅心
林業及自然保育署宜蘭分署	沈舒蕎	技正	沈舒蕎	沈舒蕎
林業及自然保育署宜蘭分署	吳明瑾	技士	吳明瑾	吳明瑾

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署宜蘭分署	莊御祥	技佐	莊御祥	莊御祥
林業及自然保育署花蓮分署	張景昇	技正	張景昇	張景昇
林業及自然保育署臺東分署	陳明男	技佐	陳明男	陳明男
林業試驗所	涂富鈞	助理研究員	涂富鈞	涂富鈞
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	莊宜軒		莊宜軒	莊宜軒
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	鄭勝榮	研究生	鄭勝榮	鄭勝榮
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	魏子穎	研究生	魏子穎	魏子穎
國立臺北大學自然資源與環境管理研究所	李沂潔	研究生	李沂潔	李沂潔
中國文化大學	許立達	副教授	許立達	許立達
國立宜蘭大學	廖奕涵	學生	廖奕涵	廖奕涵
大安森林公園之友基金會	王献生	解說員	王献生	王献生

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 1 月 23 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	劉哲諺	研究專員	劉哲諺
台灣水資源與農業研究院	李卉妤	研究專員	李卉妤

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	魏郁軒	簡任技正	魏郁軒	魏郁軒
林業及自然保育署森林管理組	吳景揚	技士		
林業及自然保育署	洪儷文	技士		
林業及自然保育署	藍瑞銘	技正		
林業及自然保育署	吳國欽	技正		
林業及自然保育署新竹分署	吳秉昇	技佐	吳秉昇	吳秉昇
林業及自然保育署嘉義分署	張雯婷	技正	張雯婷	張雯婷
林業及自然保育署宜蘭分署	張雅心	技士	張雅心	張雅心
林業及自然保育署宜蘭分署	沈舒蕎	技正	沈舒蕎	沈舒蕎
林業及自然保育署宜蘭分署	吳明瑾	技士	吳明瑾	吳明瑾

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽名
農院	楊壢	研究員	楊壢
台農院	田雅行	研究專員	田雅行
台農院	賴瑞陽	專員	賴瑞陽
台農院	簡珮秀	研究專員	簡珮秀
台農院	李宿妍	研究專員	李宿妍
台農院	成禕	研究專員	成禕
台農院	梁芯雯	研究專員	梁芯雯
台農院	謝慧娟	研究專員	謝慧娟
台農院	劉芳萍	研究專員	劉芳萍
台農院	林冠妤	研究專員	林冠妤

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	
台灣水資源與農業研究院	劉哲諺	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	李卉妤	研究專員	
〃		〃	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 特聘教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	魏郁軒	簡任技正		
林業及自然保育署森林管理組	吳景揚	技士		
林業及自然保育署	洪儷文	技士		
林業及自然保育署	藍瑞銘	技正		
林業及自然保育署	吳國欽	技正		
林業及自然保育署新竹分署	吳秉昇	技佐		
林業及自然保育署嘉義分署	張雯婷	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	張雅心	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	沈舒蕎	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	吳明瑾	技士		

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 特聘教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署宜蘭分署	莊御祥	技佐		
林業及自然保育署花蓮分署	張景昇	技正		
林業及自然保育署臺東分署	陳明男	技佐		
林業試驗所	涂富鈞	助理研究員		
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	莊宜軒			
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	鄭勝榮	研究生		
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	魏子穎	研究生		
國立臺北大學自然資源與環境管理研究所	李沂潔	研究生		
中國文化大學	許立達	副教授		
國立宜蘭大學	廖奕涵	學生		
大安森林公園之友基金會	王献生	解說員		

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第一梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 1 月 24 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 特聘教授

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	
台灣水資源與農業研究院	劉哲諺	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	李卉妤	研究專員	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
林業及自然保育署	汪昭華	處長	汪昭華
台灣水資源與農業研究院	虞國興	院長	虞國興
台灣水資源與農業研究院	陳尊賢	顧問	陳尊賢
台灣水資源與農業研究院	黃啟瑞	助理院長	黃啟瑞
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	簡靖芳	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	陳鼎尹	研究專員	陳鼎尹
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	彭麗文	技正	彭麗文	彭麗文
林業及自然保育署森林管理組	許曉華	科長	許曉華	許曉華
林業及自然保育署	王守民	技士	王守民	王守民
林業及自然保育署嘉義分署	劉彥妤	科員	劉彥妤	劉彥妤
林業及自然保育署宜蘭分署	邱昱仁	技術士	邱昱仁	邱昱仁
林業及自然保育署宜蘭分署	李駿毅	森林護管員	李駿毅	李駿毅
林業及自然保育署宜蘭分署	李孝勤	森林護管員	李孝勤	李孝勤
林業及自然保育署宜蘭分署	李坤益	約僱護管員	李坤益	李坤益
林業及自然保育署花蓮分署	邱煌升	科長		
林業及自然保育署花蓮分署	王元均	技正	王元均	王元均
林業及自然保育署花蓮分署	張世勳	技佐	張世勳	張世勳

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署臺東分署	張淑雅	技正	張淑雅	張淑雅
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士	楊旻憲	楊旻憲
林業試驗所	林鴻志	助理研究員	林鴻志	林鴻志
林業試驗所	周晏竹	助理	周晏竹	周晏竹
臺大實驗林	陳秋萍	副研究員	陳秋萍	陳秋萍
中國文化大學森林暨自然保育學系	胡正恆	助理教授	胡正恆	胡正恆
TUV SUD 台灣分公司	歐岱恩	工程師	歐岱恩	歐岱恩
斯創教育工作群	李芝瑩	執行長	李芝瑩	李芝瑩
斯創教育有限公司	盧居煒	教育總監	盧居煒	盧居煒
易境永續設計顧問有限公司	陳建良	專案經理	陳建良	陳建良
易境永續設計顧問有限公司	吳佳玲	碳資產規劃師	吳佳玲	吳佳玲

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
國立中興大學	張佳祺	博士生	張佳祺	張佳祺
國立中興大學	鄭祖全	學生		
國立中興大學水土保持學系	吳承澤	學生	吳承澤	吳承澤
國立中興大學森林學系	葉佳樂	碩士生		
國立嘉義大學	許雲皓	學生	許雲皓	許雲皓
國立嘉義大學	吳佳嬑	研究生	吳佳嬑	吳佳嬑
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	魏清妤	學生	魏清妤	魏清妤
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	劉致廷	研究生	劉致廷	劉致廷
國立嘉義大學生物資源學系	黃盈甄	學生		
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	羅筱淇	研究生	羅筱淇	羅筱淇
	劉威伶			

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
台農院	研究專員	劉芳萍	劉芳萍
台農院	李井妤	研究專員	李井妤
台農院	李宥妍	研究專員	李宥妍
台農院	陳昱蓉	研究專員	陳昱蓉
農院	楊鏞	研究專員	楊鏞
〃	田竣任	〃	田竣任
〃	連怡妝	〃	連怡妝
〃	成瑋	〃	成瑋

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署集水區治理組	彭麗文	技正	彭麗文	彭麗文
林業及自然保育署森林管理組	許曉華	科長	許曉華	許曉華
林業及自然保育署	王守民	技士	王守民	王守民
林業及自然保育署嘉義分署	劉彥妤	科員	劉彥妤	劉彥妤
林業及自然保育署宜蘭分署	邱昱仁	技術士	邱昱仁	邱昱仁
林業及自然保育署宜蘭分署	李駿毅	森林護管員	李駿毅	李駿毅
林業及自然保育署宜蘭分署	李孝勤	森林護管員	李孝勤	李孝勤
林業及自然保育署宜蘭分署	李坤益	約僱護管員	李坤益	李坤益
林業及自然保育署花蓮分署	邱煌升	科長		
林業及自然保育署花蓮分署	王元均	技正	王元均	王元均
林業及自然保育署花蓮分署	張世勳	技佐	張世勳	張世勳

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署臺東分署	張淑雅	技正	張淑雅	張淑雅
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士	楊旻憲	楊旻憲
林業試驗所	林鴻志	助理研究員		
林業試驗所	周晏竹	助理	周晏竹	周晏竹
臺大實驗林	陳秋萍	副研究員	陳秋萍	陳秋萍
中國文化大學森林暨自然保育學系	胡正恆	助理教授	胡正恆	胡正恆
TUV SUD 台灣分公司	歐岱恩	工程師	歐岱恩	歐岱恩
斯創教育工作群	李芝瑩	執行長	李芝瑩	李芝瑩
斯創教育有限公司	盧居煒	教育總監	盧居煒	盧居煒
易境永續設計顧問有限公司	陳建良	專案經理	陳建良	陳建良
易境永續設計顧問有限公司	吳佳玲	碳資產規劃師	吳佳玲	吳佳玲

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
國立中興大學	張佳祺	博士生	張佳祺	張佳祺
國立中興大學	鄭祖全	學生		
國立中興大學水土保持學系	吳承澤	學生	吳承澤	吳承澤
國立中興大學森林學系	葉佳樂	碩士生		
國立嘉義大學	許雲皓	學生	許雲皓	許雲皓
國立嘉義大學	吳佳嬑	研究生	吳佳嬑	吳佳嬑
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	魏清妤	學生	魏清妤	魏清妤
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	劉致廷	研究生	劉致廷	劉致廷
國立嘉義大學生物資源學系	黃盈甄	學生		
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	羅筱淇	研究生	羅筱淇	羅筱淇
	劉威伶			

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 2 月 20 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	郭鴻裕	顧問	
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	簡靖芳	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	陳鼎尹	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業試驗所	林鴻志	助理研究員		
林業試驗所	周晏竹	助理		
臺大實驗林	陳秋萍	副研究員		
中國文化大學 森林暨自然保育學系	胡正恆	助理教授		
TUV SUD 台灣分公司	歐岱恩	工程師		
易境永續設計顧問 有限公司	陳建良	專案經理		
國立中興大學	張佳祺	博士生		
國立中興大學	鄭祖全	學生		
國立中興大學 水土保持學系	吳承澤	學生		
國立中興大學 森林學系	葉佳樂	碩士生		
國立嘉義大學	許雲皓	學生		

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署 森林管理組	吳景揚	技士		
林業及自然保育署	王守民	技士		
林業及自然保育署	洪儷文	技士		
林業及自然保育署 嘉義分署	劉彥妤	科員		
林業及自然保育署 宜蘭分署	邱昱仁	技術士		
林業及自然保育署 宜蘭分署	李駿毅	森林護管員		
林業及自然保育署 宜蘭分署	李孝勤	森林護管員		
林業及自然保育署 宜蘭分署	李坤益	約僱護管員		
林業及自然保育署 花蓮分署	張世勳	技佐		
林業及自然保育署 臺東分署	張淑雅	技正		
林業及自然保育署 屏東分署	楊旻憲	技士		

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
國立嘉義大學	吳佳嬑	研究生		
國立嘉義大學 森林暨自然資源學系	魏清妤	學生		
國立嘉義大學 森林暨自然資源學系	劉致廷	研究生		
國立嘉義大學 生物資源學系	黃盈甄	學生		
國立臺灣大學 森林環境暨資源學系	羅筱淇	研究生		
	劉威伶			

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	簡靖芳	博士	簡靖芳
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	陳鼎尹	研究專員	陳鼎尹
台灣水資源與農業研究院	李宥妍	研究專員	李宥妍
〃	楊壩	〃	楊壩
〃	田竣任	〃	田竣任
〃	連怡妏	〃	連怡妏
〃	成瑋	〃	成瑋

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署森林管理組	吳景揚	技士	吳景揚	吳景揚
林業及自然保育署	洪儷文	技士	洪儷文	洪儷文
林業及自然保育署嘉義分署	劉彥妤	科員	劉彥妤	劉彥妤
林業及自然保育署宜蘭分署	邱昱仁	技術士	邱昱仁	邱昱仁
林業及自然保育署宜蘭分署	李駿毅	森林護管員	李駿毅	李駿毅
林業及自然保育署宜蘭分署	李孝勤	森林護管員	李孝勤	李孝勤
林業及自然保育署宜蘭分署	李坤益	約僱護管員	李坤益	李坤益
林業及自然保育署花蓮分署	張世勳	技佐	張世勳	張世勳
林業及自然保育署臺東分署	張淑雅	技正	張淑雅	張淑雅
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士	楊旻憲	楊旻憲

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業試驗所	林鴻志	助理研究員		
林業試驗所	周晏竹	助理	周晏竹	周晏竹
臺大實驗林	陳秋萍	副研究員	陳秋萍	陳秋萍
中國文化大學森林暨自然保育學系	胡正恆	助理教授	胡正恆	胡正恆
TUV SUD 台灣分公司	歐岱恩	工程師		
易境永續設計顧問有限公司	陳建良	專案經理	陳建良	陳建良
國立中興大學	鄭祖全	學生		
國立中興大學	張佳祺	博士生		
國立中興大學水土保持學系	吳承澤	學生	吳承澤	吳承澤
國立中興大學森林學系	葉佳樂	碩士生		
國立嘉義大學	許雲皓	學生	許雲皓	許雲皓

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
國立嘉義大學	吳佳嬑	研究生	吳佳嬑	吳佳嬑
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	魏清妤	學生	魏清妤	魏清妤
國立嘉義大學森林暨自然資源學系	劉致廷	研究生	劉致廷	劉致廷
國立嘉義大學生物資源學系	黃盈甄	學生		
國立臺灣大學森林環境暨資源學系	羅筱淇	研究生	羅筱淇	羅筱淇
	劉威伶			

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第二梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 2 月 21 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽名
國立中興大學 土壤環境科學系	簡士濠	教授	
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	簡靖芳	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	陳鼎尹	研究專員	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113 年 3 月 12 日(二) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
國立中興大學	鄭祖全	學生		
	錢重愷			
台農院	李宥妍	研究專員	李宥妍	李宥妍
生物多樣性研究所	陳雅芳	助理	陳雅芳	陳雅芳
台農院	成瑋	研究專員	成瑋	成瑋

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究 簽到單

課程時間：113年3月12日 (二) 09時00分-12時00分

課程地點：台灣水資源與農業研究院20F訓練教室

講師：陳尊賢 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署	沈玉婷	技正		
林業及自然保育署新竹分署	許家寧	技士		
林業及自然保育署南投分署	許瑋軒	森林護管員		
林業及自然保育署嘉義分署	陳識安	技正		
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	高裕閔	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	張詠嬋	技佐		
林業及自然保育署宜蘭分署	葉清旺	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	劉宛儒	約僱助理		
裕隆汽車 ESG 委員會	方舒緯	環境專案管理師		

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 3 月 12 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽名
林業及自然保育署	汪昭華	處長	
林業及自然保育署保育企劃組	吳俊奇	科長	
林業及自然保育署保育企劃組	柯人豪	技正	
台灣水資源與農業研究院	郭鴻裕	顧問	
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	
台灣水資源與農業研究院	劉芳萍	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	陳雅芳	研究專員	

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 3 月 12 日(二) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署	沈玉婷	技正	沈玉婷	沈玉婷
林業及自然保育署新竹分署	許家寧	技士	許家寧	許家寧
林業及自然保育署南投分署	許瑋軒	森林護管員	許瑋軒	許瑋軒
林業及自然保育署嘉義分署	陳識安	技正		
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	高裕閔	技士	高裕閔	高裕閔
林業及自然保育署宜蘭分署	張詠嬋	技佐		
林業及自然保育署宜蘭分署	葉清旺	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	劉宛儒	約僱助理	劉宛儒	劉宛儒
農業部生物多樣性研究所	陳柏蓉	業務助理	陳柏蓉	陳柏蓉

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

世界各國森林土壤碳匯調查技術 簽到單

課程時間：113 年 3月12日(二) 13時00分-16 時 00分

課程地點：台灣水資源與農業研究院20F訓練教室

講師：郭鴻裕 顧問

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
裕隆汽車 ESG 委員會	方舒緯	環境專案管理師	方舒緯	方舒緯
國立中興大學	鄭祖全	學生	鄭祖全	鄭祖全
		錢重愷	錢重愷	錢重愷

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署	沈玉婷	技正	沈玉婷	沈玉婷
林業及自然保育署森林管理組	許曉華	科長	許曉華	許曉華
林業及自然保育署集水區治理組	彭麗文	技正		
林業及自然保育署新竹分署	許家寧	技士	許家寧	許家寧
林業及自然保育署南投分署	許瑋軒	森林護管員	許瑋軒	許瑋軒
林業及自然保育署嘉義分署	陳識安	技正		
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	高裕閔	技士	高裕閔	高裕閔
林業及自然保育署宜蘭分署	張詠嬋	技佐	張詠嬋	張詠嬋
林業及自然保育署宜蘭分署	葉清旺	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	劉宛儒	約僱助理	劉宛儒	劉宛儒

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署花蓮分署	王元均	技正		
農業部生物多樣性研究所	陳柏蓉	業務助理	陳柏蓉	陳柏蓉
裕隆汽車 ESG 委員會	方舒緯	環境專案管理師	方舒緯	方舒緯
國立中興大學	鄭祖全	學生	鄭祖全	鄭祖全
國立臺灣大學森林環境暨資源所	林澤禹	學生		
		錢重愷	錢重愷	錢重愷

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤繪圖軟體應用及繪製森林土壤碳匯地圖 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 09 時 00 分-12 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 電腦教室

講師：謝宏鑫 工程師

單位	姓名	職稱	簽名
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	黃群智
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	劉芳萍	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	陳雅苹	研究專員	陳雅苹
〃	李宿妍	〃	李宿妍
〃	成璋	〃	成璋

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署	沈玉婷	技正	沈玉婷	沈玉婷
林業及自然保育署森林管理組	許曉華	科長	許曉華	許曉華
林業及自然保育署集水區治理組	彭麗文	技正		
林業及自然保育署新竹分署	許家寧	技士	許家寧	許家寧
林業及自然保育署南投分署	許瑋軒	森林護管員	許瑋軒	許瑋軒
林業及自然保育署嘉義分署	陳識安	技正		
林業及自然保育署屏東分署	楊旻憲	技士		
林業及自然保育署宜蘭分署	高裕閔	技士	高裕閔	高裕閔
林業及自然保育署宜蘭分署	張詠婷	技佐	張詠婷	張詠婷
林業及自然保育署宜蘭分署	葉清旺	技正		
林業及自然保育署宜蘭分署	劉宛儒	約僱助理	劉宛儒	劉宛儒

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽到	簽退
林業及自然保育署花蓮分署	王元均	技正		
農業部生物多樣性研究所	陳柏蓉	業務助理	陳柏蓉	陳柏蓉
裕隆汽車 ESG 委員會	方舒緯	環境專案管理師	方舒緯	方舒緯
國立中興大學	鄭祖全	學生	鄭祖全	鄭祖全
國立臺灣大學森林環境暨資源所	林澤禹	學生		
		錢重愷	錢重愷	錢重愷

森林土壤碳匯基線研究工作坊 第三梯次

森林土壤碳匯量計算及案例說明 簽到單

課程時間：113 年 3 月 13 日(三) 13 時 00 分-16 時 00 分

課程地點：台灣水資源與農業研究院 20F 訓練教室

講師：簡士濠 教授

單位	姓名	職稱	簽名
國立中興大學土壤環境科學系	簡士濠	教授	簡士濠
台灣水資源與農業研究院	黃群智	博士	
台灣水資源與農業研究院	謝宇雯	研究專員	謝宇雯
台灣水資源與農業研究院	謝宏鑫	工程師	謝宏鑫
台灣水資源與農業研究院	劉芳萍	研究專員	
台灣水資源與農業研究院	陳雅苹	研究專員	陳雅苹

附件 4、計畫相關研習課程內容

一、 2023 年森林碳匯調查技術研習

（一） 森林地表枯落物與土壤碳含量調查技術野外實習





圖 4-6. 野外調查實習 (左)30cm×30cm 方框，(右)土鑽進行每 10 公分採樣

(資料來源：杜清澤 副研究員、蘇德忠 技工，農業部林業試驗所)

在此課程中學習如何進行森林土壤採樣，分為地表枯落物層(L、H)、以及土壤層，聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)建議土壤採樣採表面 50cm，打到樹根則換位置重打。學習如何填寫野外調查紀錄表，臺灣的紀錄表經由林業署及土壤專家們討論已製作出通用的格式(附件五)，供臺灣的土壤調查使用，未來各單位各實驗室都可用相同的表格進行紀錄。表格中有很多項目是由採樣人員進行主觀判斷，依採樣人員的判斷為主，e.g.沖蝕程度(無、輕微、中等、嚴重、極嚴重)。採樣部依序為拍照、填寫紀錄表、定位(以指北針定位北方)、以 30cm*30cm 方框放置並插入地面、蒐集方框內的枯枝落葉並秤重(鮮重測含水量)、枯枝落葉帶回實驗室烘乾(乾重測含碳量)、以土鑽每 10 公分進行採樣 (圖 4-6)、直至採集完五個深度的樣品、依採樣順序進行拍照，將土樣帶回實驗室進行分析。

（二） 森林土壤野外調查技術(土壤剖面)野外實習

在野外以手指感覺法決定土壤砂粒、坋粒、黏粒之重量百分比，並以質地三角圖(圖 4-7)判定土壤質地，土壤質地以 12 等級紀錄(砂土、壤質砂土、砂質壤土、壤土、坋質壤土、坋土、砂質黏壤土、黏質壤土、坋質黏壤土、砂質黏土、坋質黏土、黏土。)(17) 此部分依現場採樣人員的主觀判斷為準。臺灣林地土壤大多為黏壤土。

結持度則依土壤表現的內聚力與附著力的程度與種類判斷，此部分也依照採樣人員的主觀判斷為準。

表 1. 12 種土壤質地等級

質地等級	
砂土(sand)	砂質黏壤土(sandy clay loam)
壤質砂土(loamy sand)	黏質壤土(clay loam)
砂質壤土(sandy loam)	坋質黏壤土(silty clay loam)
壤土(loam)	砂質黏土(sandy clay)
坋質壤土(silty loam)	坋質黏土(silty clay)
坋土(silt)	黏土(clay)

層界的形狀主要有平滑、波狀、不規則、破碎(圖)，此部分也依照採樣人員的主觀判斷為準。

森林土壤野外調查技術森林土壤剖面形態特徵與描述

土壤剖面中，各土層的顏色有其代表意義：黑色的土壤有機碳含量高；紅色土壤有機碳含量低；白色表示曾經泡過水；黃色富含鐵質。土壤化育層主要有幾種：有機表育層(O 層)、診斷表育層(A 層)、診斷化育層(E 層與 B 層)、母質層(C 層)、母岩層(R 層)(表 2)。土壤層界(Boundary)部分主要分為：平滑、波狀、不規則、破碎四種(圖)。

土壤顏色可使用 Munsell soil color chart 進行比對，由現場調查員判定土壤顏色，土壤顏色依現場調查人員判定為準；土壤質地的部分，分為砂粒、矽粒、黏粒。依據正三角土壤質地圖(圖 4-7)，由現場調查人員手感覺判別法認定；土壤構造則會影響植物的穿透力及保持養分與水分的能力，一般土壤構造之型態有七種，分為：屑粒狀、團粒狀、碟狀、稜塊狀、亞稜塊狀、稜柱狀、柱狀。結持度則影響植物根的穿透力及保持水分的含量。此部分與土壤的乾燥、潮濕、膠結有關。可再細分為九個等級，以潮濕為例可分為：鬆散、易碎、碎、緊密、很緊密、極緊密、微堅固、堅固、很堅固。

上述的土壤特徵皆以現場調查人員的判斷為主。

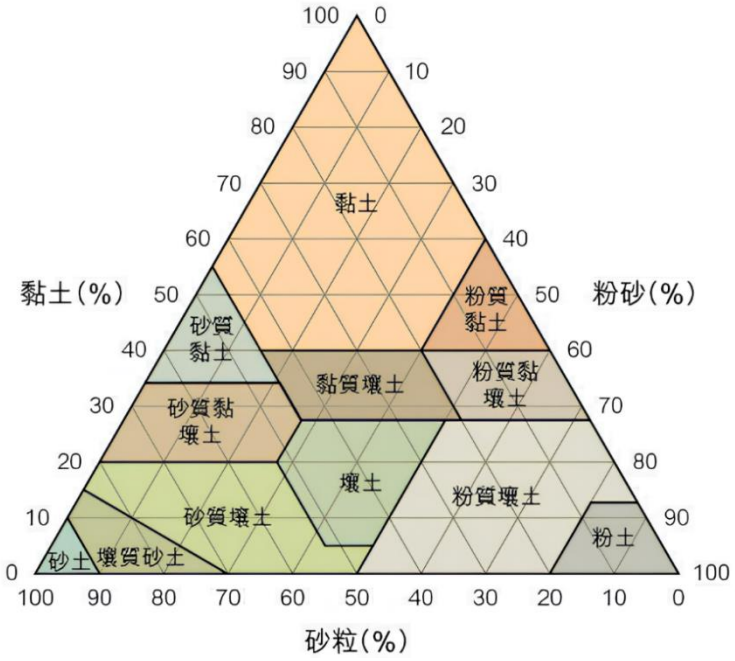


圖 4-7. 土壤質地三角圖
資料來源：土壤描述與採樣野外手冊

（三） 森林土壤碳匯的空間推估方法-地理統計

計算森林土壤碳匯量可由空間推估或土壤推估進行，此兩種推估方式皆有學者使用。地理統計是目前應用於分析處理土壤空間資訊最普遍的一套統計分析方法，除了涵蓋傳統統計方法的基本原則，並演繹出能用於解釋和推估模擬資料空間變異性的理論模式。其應用主要是以半變異圖(semivariogram)(圖)來描述資料的空間變異性結構，並以克利金法的最佳線性無偏估式進行空間內插推估。

典型的半變異含數有三個重要參數(圖)，分別為碎塊(nugget)、門檻(sill)和範圍(range)。γ(h)最終會趨於一個固定質，這個值稱為門檻，其中距離 「h」稱為「Range」，表示超出這個範圍的數據之間不存在相關性。另一個特徵是碎塊效應，即曲線在半方軸上的截距。這可能是由於小樣本之間的小間隔的變化或觀測值的實驗誤差造成的。

克利金(Kriging)又分為：線性克利金模式、非線性克利金模式、多變數克利金模式、無母數克利金模式等。克利金法又稱為空間局部估計或空間局部插值，是地理統計學兩大主要內容之一。此方法是建立在變異函數理論及結構分析理論基礎上，在有限區域內對區域化變數的取值，進行無偏最佳化估計的一種方法。

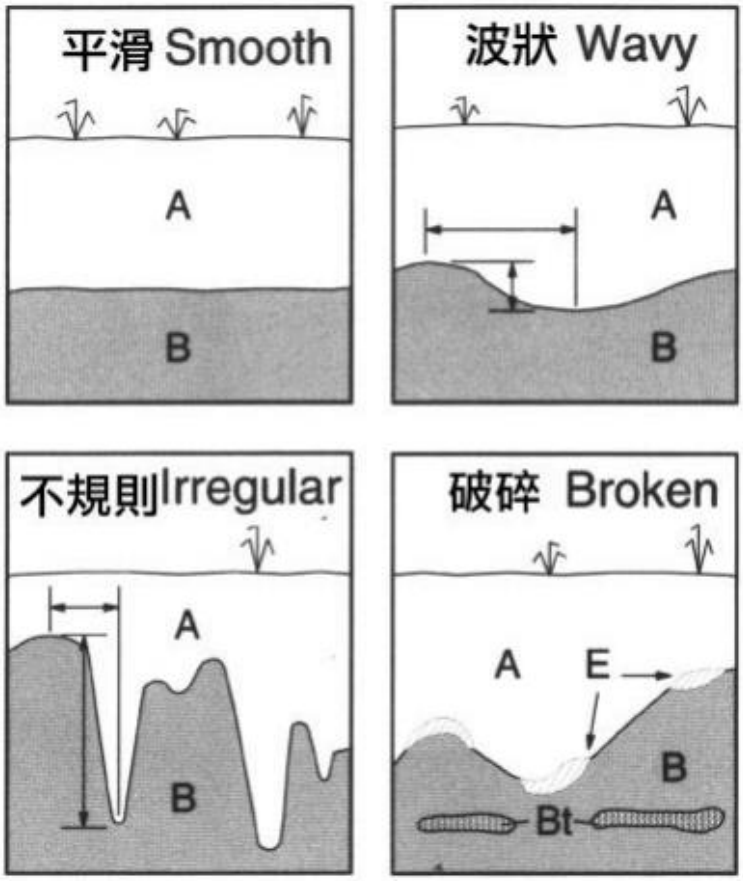


圖 4-8. 土壤層界形狀

資料來源：土壤描述與採樣野外手冊

(資料來源：杜清澤 副研究員、蘇德忠 技工，農業部林業試驗所)

地理統計在土壤資訊的管理應用，可應用在：土壤肥力與施肥推薦的應用、土壤調查與管理決策的應用、導入地理統計概念的採樣策略等。

初學者在學習地理統計時可從幾款入門軟體開始：Geostatistical Environment Assessment Software (GEO-EAS)、Geostatistical Software Library and User's Guide (GSLIB)、Geostatistics for the Environmental Sciences (GS+)。

土壤碳匯的空間推估依程序分三個步驟：首先定義單點範圍(e.g. 每公頃 100 ×100 m^2)和計算 OC、BD、含石率；接著設定空間變異網格大小(e.g. 2 × 2、5 × 5、10 × 10、20 × 20、25 × 25 m^2)；最後計算深度累計(0-5、5-10、10-20、20-40、40-60、60-100 cm)。

碳庫空間精準估算有兩種程序，程序 1：Step1. 設定單層網格大小、土層數及厚度。Step 2. 採樣點配置圖套疊網格。Step 3. 分別以 OC、BD、RF 的定位採樣分析資料，進行各層地

理統計的空間變異分析和網格平均值的克利金推估。Step 4. 計算單一網格碳庫平均值。Step 5. 合計單層每公頃碳庫。Step 6. 累計土層深度每公頃總碳庫 TSOC。

程序 2：Step1. 設定單層網格大小、土層數及厚度。Step 2. 採樣點配置圖套疊網格。Step 3. 先以各層 OC、BD、RF 的定位採樣分析資料計算該網格大小的碳庫平均值。Step 4. 再以 Step 3 計算之各層 SOC 資料進行地理統計的空間變異分析，推估出代表網格平均值的克利金推估 SOC。Step 5. 合計單層每公頃碳庫。Step 6. 累計土層深度每公頃總碳庫 TSOC。

(資料來源：莊愷瑋 教授，國立嘉義大學農藝學系)

表 2. 主要、過度與一般化育層之組合

化育層	標準
O	富含枯枝落葉及腐植質等有機物
A	礦物質與有機物(腐植質)累積，但鐵、鋁及粘粒已流失
AB(或 AE)	以 A 層特徵為主，但含有部分 B(或 E)層的特徵
A/B(或 A/E 或 A/C)	A 與 B 層物質片段分開混合，但仍以 A 層物質所佔比例較多
AC	以 A 層特徵為主，但含有部分 C 層的特徵
E	流失矽、鐵、鋁、粘粒或有機物的礦物質層
EA(或 EB)	以 E 層特徵為主，但含有部分 A(或 B)層的特徵
E/A	E 與 A 層物質片段分開混和，但仍以 E 層物質所佔比例較多
E 和 Bt	在 E 層中含有薄膜(Bt)
BA(或 BE)	以 B 層特徵為主，但含有部分 A(或 E)層的特徵
B/A(或 B/E)	B 與 A(或 E)層物質片段分開混合，但仍以 B 層物質所佔比例較多
B	矽、鐵、鋁、粘粒、有機物碳酸鈣及硫酸鈣等之聚積亞表層；或碳酸鈣散失；或三二氧化物聚積；或形成構造
BC	以 B 層特徵為主，但含有部分 C 層的特徵

資料來源：土壤描述與採樣野外手冊

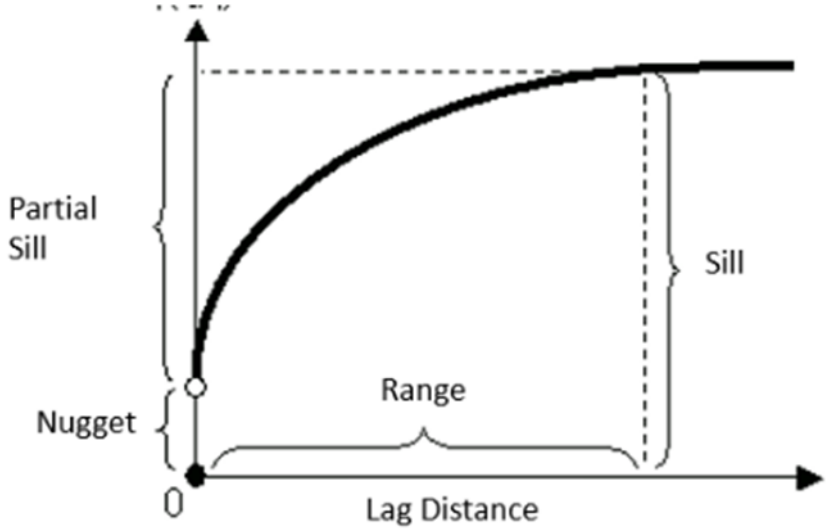


圖 4-9. 半變異圖特徵：碎塊(nugget)、門檻(sill)和範圍(range)

（四） 森林土壤及林地腐植層-碳含量分析與碳存量估算

在國際發展趨勢中歐盟執委會於 2019 年決議通過歐盟綠色新政，首要目標為在 2050 年始歐洲實現氣候中和，將 2030 年歐盟溫室氣體排放量較 1990 年減少 50%的目標，提升到減少 55%。為了能達成目標，歐盟執委會提出落實的碳邊境調整機制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)。CBAM 管制水泥、電力、肥料、鋼鐵、鋁等五大高碳排產業，未來輸出產品至歐盟的國家，需要趕快訂定完整碳定價制度。

為了達成 2050 年淨零碳排放目標，有幾種減碳技術：碳捕捉/碳封存、碳匯。主要的碳庫有大氣、海洋、森林、土壤。全球森林碳匯 54%集中在五個國家：俄羅斯聯邦、巴西、加拿大、美國、中國。森林碳庫可分為三大類：生物量、死有機質、土壤。

森林碳匯已發展成熟，土壤碳匯將是最具潛力的機制。2015 年法國在 COP21 提出千分之四倡議，利用固碳，全球每年提高土壤有機碳含量 4 ‰將可抵消人類活動所增加的二氧化碳排放，且有益土壤健康，有助提升農作產量、維護糧食安全。土壤有機質約含有 58%的碳，當有機質進一部形成腐植質，需要數百年才能分解，土壤是陸地系統中最大的碳匯。土壤碳匯=有機碳含量/1000．總體密度．(100-含石量) ．土層總體積。

森林土壤碳匯估算有幾個困難點：缺乏土壤總體密度的測量、缺乏長期野外試驗的數據，環境和土壤變數及土地利用和操作管理。未來在執行森林土壤碳匯估算時，需設法解決前述問題。

(資料來源：崔君至 博士 環境保護署 高級環境技術師)

（五） 森林碳經營策略及計畫評估方法之探討

森林碳經營有幾個策略：保持或增加森林生態系的範圍、持續基本生態功能、減少因自然干擾(含野火)引起地碳損失、強化自然干擾後森林恢復能力、優化在橫跨地景中可提供高碳價值區位的管理、維持或增加碳存量並保留森林特性、藉由明險的森林改造增強或維持封存容量。

在森林經營方面從選擇實施地點、策略、方法開始就需審慎評估，避免無效率計畫排擠有限預算。並且要進行成本效能分析，以投資成本獲得最多物理量效果為目標；在成本效益分析上，則以投資成本獲得最大淨經濟效益為目標。

(資料來源：鄭欽龍 名譽教授，國立臺灣大學森林環境暨資源學系)

（六） 森林地上部碳匯調查樣區劃設說明及森林調查說明

由國家主導的森林資源調查主要分為三種：事業區檢定調查、全國森林資源調查、森林永久樣區調查。事業區檢定調查始於日治時期，終於第四次森林資源調查後。以事業區為單位，10 年為一期。全國森林資源調查目前經歷過四次，第一次為民國 43 年至 5 年，森林占全島面積 55.08%，第四次為民國 97 年至 103 年，森林占全島面積 61.7%。森林永久樣區調查於民國 86 年啟動，依林型及海拔等條件設置，永久樣區總計 2330 個樣區，原則上 5 年複查 1 次，僅 154 個樣區因調查成本高，採 10 年複查 1 次。

(資料來源：鄭欽龍 名譽教授，國立臺灣大學森林環境暨資源學系)

二、 森林土壤碳匯基線研究工作坊(112 年)

知識課程由最基礎的臺灣森林土壤類型與分布講起，帶領學員認識臺灣森林土壤碳匯資料庫及其碳匯量如何計算評估及如何利用 ArcGIS 繪製土壤碳匯地圖、介紹世界各國(FAO、美國 USDA、歐盟、德國、日本、韓國)對森林土壤碳匯調查方法及未來臺灣如何執行碳匯量之技術規畫與問題，臺灣該如何進行森林土壤碳匯調查及增加碳匯研究之案例說明，進階到如何將現有各地區森林土壤碳匯資料，使用地理統計技術(Geostatistics)及土壤轉換函數(pedotransfer function)，將臺灣現有的森林土壤調查剖面碳資料庫預測全臺灣各地區森林土壤碳匯量及繪製碳匯地圖及評估其變異數與不確定性，目前均有實際資料庫及相關地區研究成果，已發表於國際期刊與國際會議中。

資訊課程開設地理統計繪圖及數位化土壤繪圖(Digital soil mapping)課程，分別由空間及土壤類型分布進行森林土壤碳匯的推估、地區性碳匯量計算及評估其變異數與不確定性，再由 ArcGIS 呈現視覺化的碳匯地圖展現。資訊課程中藉由臺灣大學、農試所、林試所、宜蘭大學等研究單位建立之資料庫，曾經完整進行各地區土壤採樣碳分析的苖濃溪事業區、阿里山地區的土壤碳數據，教導學員進行不同地區之土壤類型、低海拔至高海拔及溫度與碳匯間，以建立相關模式運算及數位土壤繪圖技術，用以初步推估範例區土壤碳匯量並產製初步土壤碳匯基線圖。

（一） 國際森林土壤碳匯調查技術發展趨勢與我國森林碳匯調查之建議

課程旨在探討國際上關於森林土壤碳匯調查技術的最新發展趨勢，並提供對於我國進行森林碳匯調查的實用建議。瞭解現遙測技術、數據模擬和地理資訊分析等工具在森林碳匯調查中的應用，以及相關技術的最新創新。以下為課堂中的重點整理：

1. IPCC 的森林碳匯調查

(1) IPCC 第 1 層(方法)

層級 1 設計為最容易使用，其中使用了方程和默認參數值(例如，排放和庫變化因子)。對於方法 1，通常有全球可用的活動數據估計來源(例如，森林砍伐率、農業生產統計數據、全球土地覆蓋圖、化肥使用、牲畜數量數據等)，儘管這些數據通常在空間上是粗糙的。

兩次調查的成果統計中，可獲得森林面積增加的數據以及林木蓄積的年生長量，可據以估算「其他土地轉變為林地」及「林地維持為林地」所增加的蓄積量，再乘上活動係數即可

得到碳匯數據，另外需再扣除依據林業統計發布的森林災害面積所估算的損失量，即為森林碳匯清冊數據。

(2) IPCC 第 2 層(方法)

來自現有森林清單和/或生態研究的 MAI* 和/或森林體積或生物量值。為所有非樹木池提供默認值。新收集的森林生物量數據。MAI*== 樹木生長的平均年增量。

方法 2 可以使用與方法 1 相同的方法，但應用基於國家或地區特定數據的排放和庫變化因子，用於最重要的土地利用或牲畜類別。方法 2 通常使用更高的時間和空間分辨率以及更細分的活動數據，以對應特定區域和專門的土地利用或牲畜類別的國家定義係數。

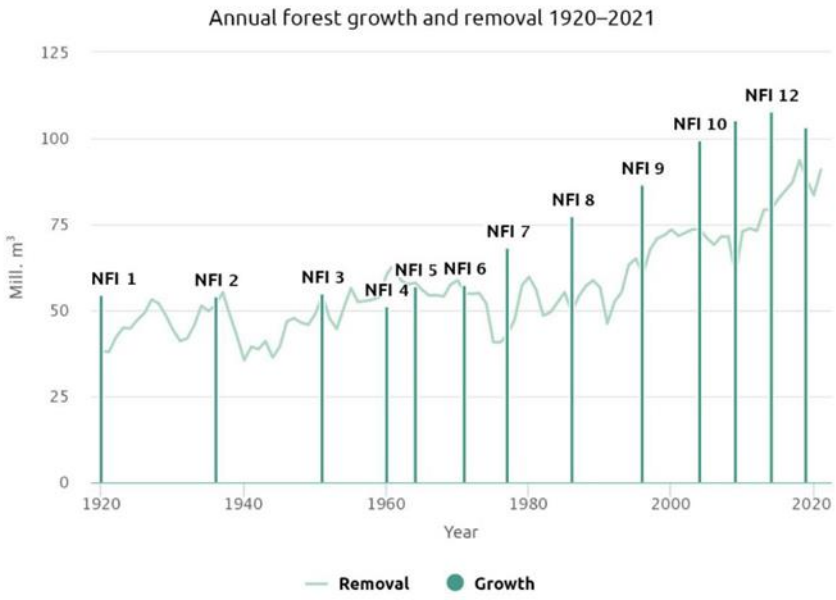


圖 4-10. 1920-2021 年芬蘭每年平均的生長量及移除量

(3) IPCC 第 3 層級(方法)

從地塊和/或校準過程模型中重複測量樹木。可以使用按國家地區和森林類型分層的其他匯的默認數據，或過程模型的估計。

使用第 3 層高階方法，包括針對國家情況量身定制的模型和清單測量系統，隨著時間的推移不斷重複，並由高分辨率活動數據驅動，並在次國家層面進行分類。這些高階方法比低階方法提供更大確定性的估計。此類系統可能包括定期重複的綜合現場採樣和/或以 GIS 劃分的林木年齡、等級/生產數據、土壤數據以及土地利用和管理活動數據系統，彙集多種類型

的監測。儘管三個層級之間的方法不同，但所有層級都共同遵守 IPCC 良好實踐的透明度、完整性、一致性、可比性和準確性概念，從而提高估計的準確性。(世界銀行,2020)

（二）國際上森林碳匯發展概況及趨勢

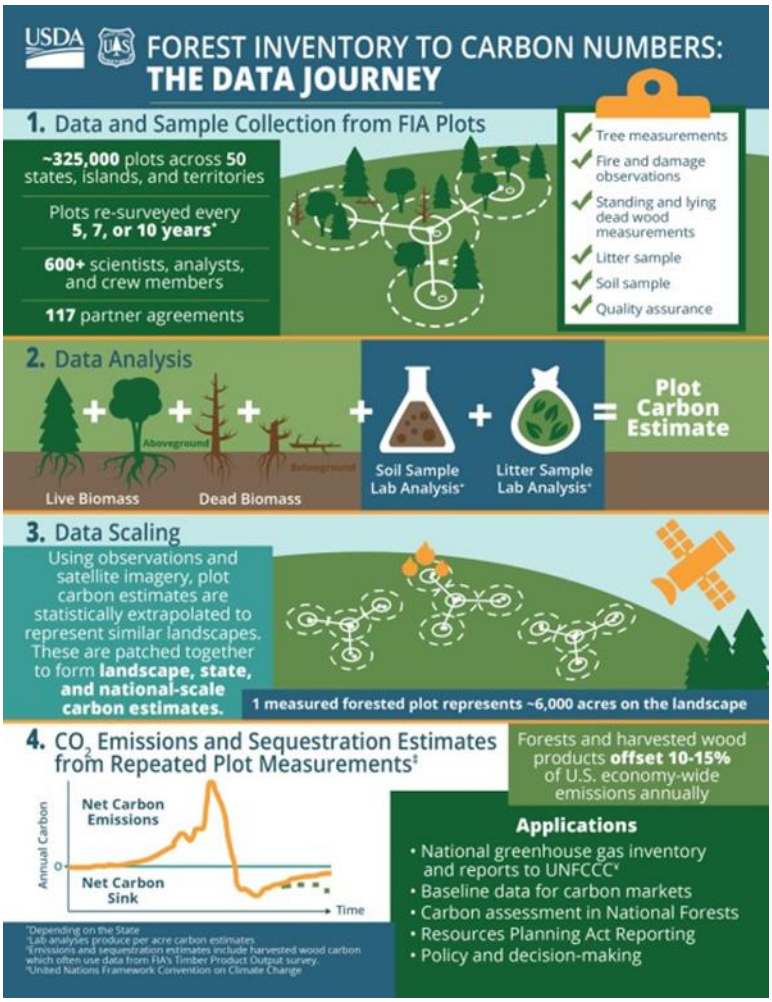


圖 4-11. 美國森林保育署提出森林清查與分析碳監測之計畫

(1) 芬蘭

根據調查顯示從 1920 年至 2021 年期間，芬蘭的森林生長量是逐年上升的趨勢，而近幾年來每年的森林砍伐量是遠高於森林生長量(圖 4-10)，代表芬蘭有積極的做森林經營管理，伐採下的木材可以製成林產品做利用，仍然是將碳匯存在木材中，而森林持吸收二氧化碳。

(2) 美國

美國森林保育署提出一個森林清查與分析碳監測之計畫(圖 4-11)，分為 4 大部分，(1)該計劃對 325,000 塊公有或私人土地上的樹木進行計數、測量和監測，以 FIA 樣區評估的資料

蒐集，調查包含火災後的損失觀測、林分及風倒木、枯枝落葉等，預計 5、7 或 10 年調查一次。(2)資料分析，森林地上部分、地下部、枯死木的分析加上土壤含枯枝落葉的分析。(3)利用衛星資料根據樣區地形、尺度做調查及估算。(4)根據調查資料計算出碳匯的變化，進而修正森林經營的方向。(圖 12)為美國地上部及地下部調查計算出的碳匯。

(3) 歐洲國家

(圖 4-13、表 20)為 23 個歐洲國家森林調查(NFI)取樣歷程及網格大小，各國森林資源調查的週期時間有縮短的趨勢，一般來說是 5 年做一次。

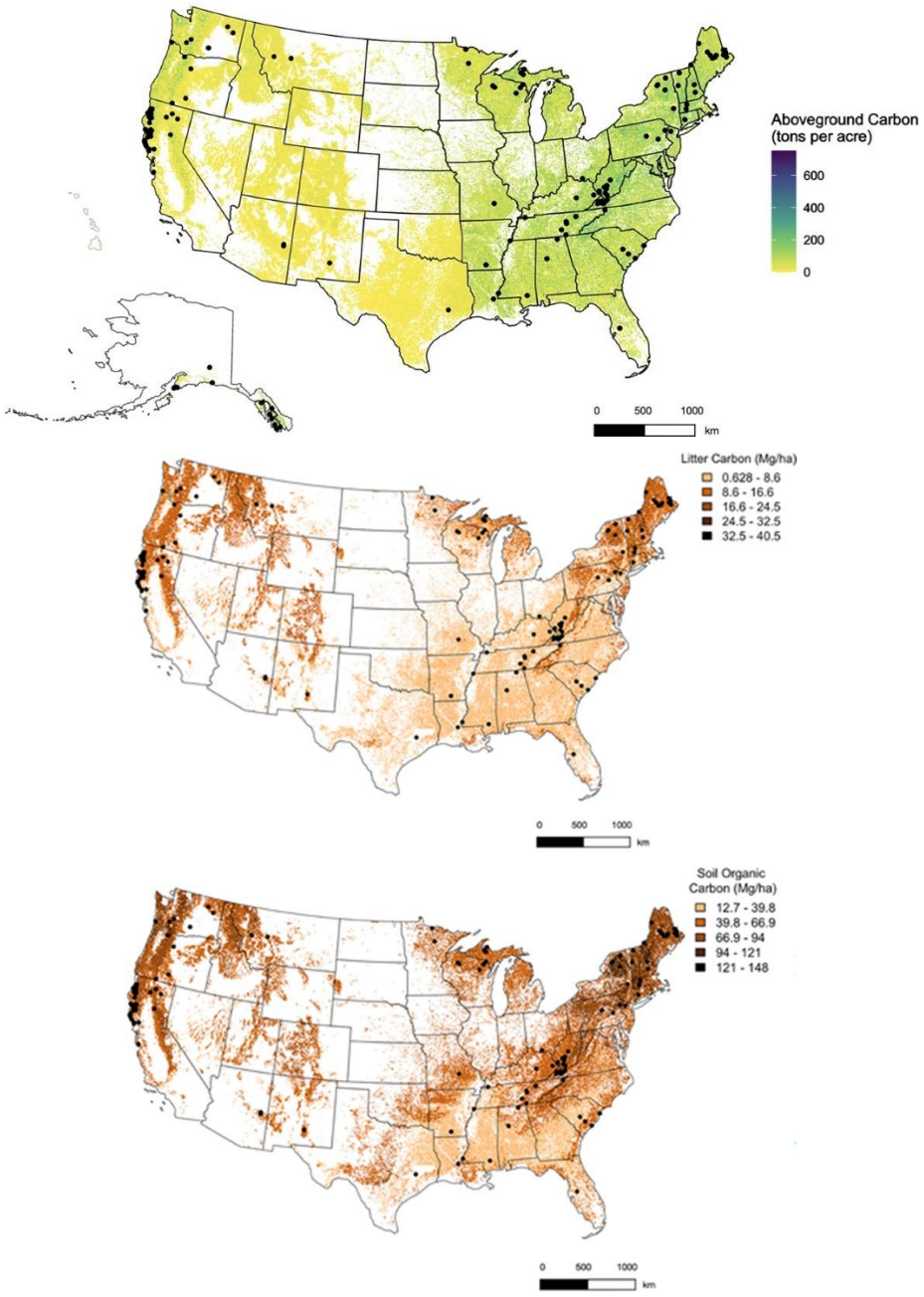


圖 4-12. (上圖) 美國地上部的碳匯量(單位：噸)；(中、下圖) 美國枯枝落葉與土壤的碳匯量(單位：噸)

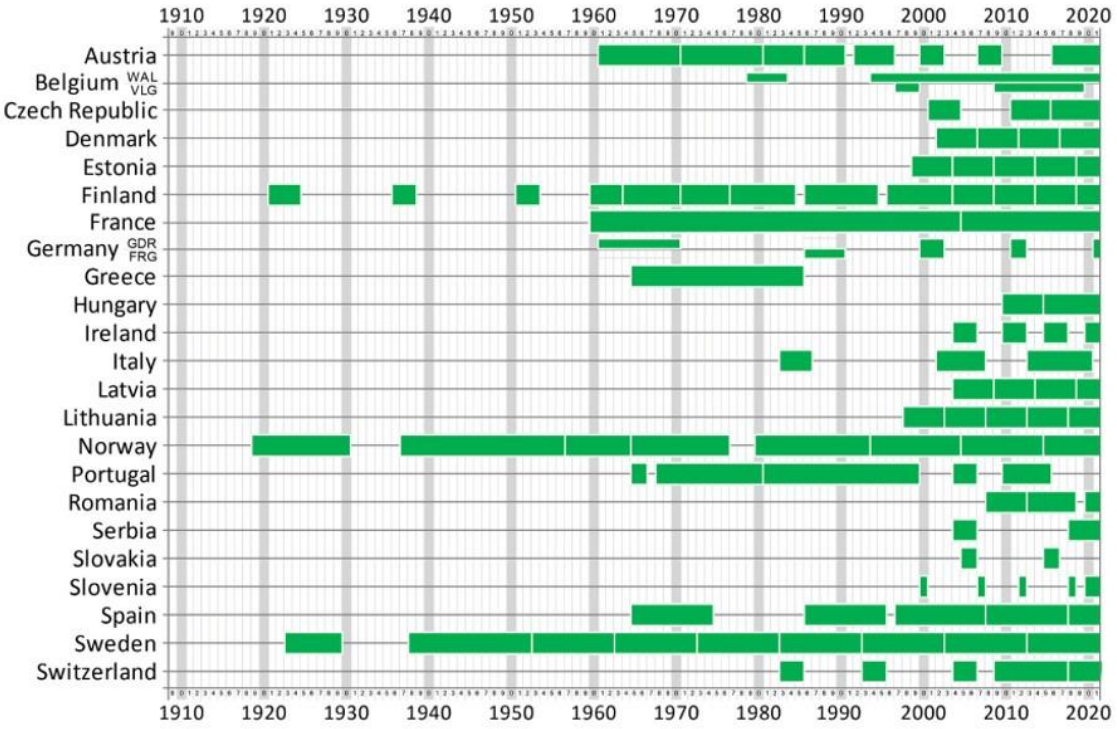


圖 4-13. 23 個歐洲國家森林調查(NFI)取樣歷程

2. 預期效益

(1) 以臺灣大學實驗林不同環境林班地 3600 公頃為計劃執行驗證區，採用符合國際新規範的估量方法，調查森林生物量、土壤和木材產品的年度碳吸存量；驗證調查森林地下部及地面的森林碳匯的可行性，供全臺森林區碳調查計畫參採。完成全臺調查報告如被 UNFCCC 接受，以林業署及英國森林調查資料為基礎，粗估我國森林每年公頃的土壤有機碳及根部(森林地下部)累積為 3.72 噸碳，折算森林地下部可以再增加 7.168 Mt/年的碳吸儲量，折合為 26.67 Mt CO_2e/年，森林可再增加抵減全國年碳排放量 9.27%，約等值新台幣 780 億元/年(歐市碳牌價計算)。

(2) 建立 GIS、遙測、近地遙測應用技術，擴大樣區點數和面積的調查資料對精進森林碳匯量和通量的估計，並改進大區域碳通量的模型參數的價值。

(3) 調查資料可提供其他計畫資料開發副效益，如：森林水文、森林資源、土壤特性、生物多樣性等經營，符合 MRV for REDD$^+$所提「助益於現有的國家森林經營資訊，並且也有助於更廣泛地制定永續的國家森林資源政策」。

(4) 建立永續的森林經營管理必須資訊，提供當前和未來的原材料供應，保護和增進生物多

樣性，保護土壤和水質，以經營管理森林生態、經濟和社會功能。

表 3. 23 個歐洲國家森林調查(NFI)網格大小

NFI – Country	Grid size (km × km)
Austria	3.9 × 3.9
Belgium	1.0 × 0.5
Czech Republic	2.0 × 2.0
Denmark	2.0 × 2.0
Estonia	5.0 × 5.0
Finland	3.0 × 3.0 to 20.0 × 20.0
France	1.0 × 1.0
Germany	2.0 × 2.0 to 4.0 × 4.0
Greece [a]	–
Hungary	4.0 × 4.0
Ireland	2.0 × 2.0
Italy	1.0 × 1.0
Latvia	4.0 × 4.0
Lithuania	4.0 × 4.0
Norway [b]	3.0 × 3.0 to 9.0 × 9.0
Portugal	2.0 × 2.0
Romania	2.0 × 2.0 and 4.0 × 4.0
Serbia	4.0 × 4.0
Slovakia	4.0 × 4.0
Slovenia [c]	4.0 × 4.0 (2.0 × 2.0)
Spain	1.0 × 1.0
Sweden	3.0 × 3.0 to 20.0 × 20.0
Switzerland	1.4 × 1.4

（三） 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯

本課程介紹了臺灣的森林土壤類型和土壤碳匯計算，並介紹臺灣相關土壤碳含量之研究，臺灣森林土壤類型主要為弱育土、新成土、淋餘土及極育土，土壤分類面積分布(表 5)及臺灣東部至西部土壤種類分布示意圖(圖 4-16)。

1. 森林土壤碳含量計算

(1) 土壤碳含量轉成土壤深度函數的過程(圖 4-17)

在不改變原來碳的總量下，評估不同土壤深度的碳含量。根據圖中函數面積相等的原則下，假如有已知的土壤深度，就可推算出土壤的碳含量。

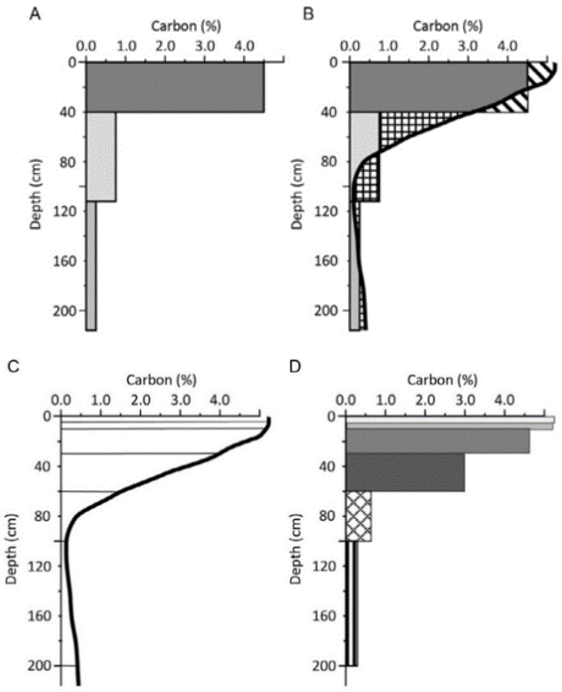


圖 4-17. 等面積二次條方程式

(Arrouays D. *et al.* 2014)

表 4. 臺灣森林土壤土綱面積分布

Table 1. The approximate area of Soil Orders in forest soils of Taiwan

Soil Order	Approximate area (km^2)	Percentage of land use (%)
Inceptisols 弱育土	7,415	44.2
Entisols 新成土	5,923	35.3
Alfisols 淋餘土	1,805	10.8
Ultisols 極育土	1,250	7.5
Andisols 火山灰儘土	184	1.1
Mollisols	120	0.72
Spodosols 淋澱土	10	0.06
Histosols 有機質土	2	0.01
Vertisols	1	<0.01
Miscellaneous lands	60	0.36
Total area	**16,770**	**100**

Cited from Chen and Hseu (1997)

資料來源：Chen and Hseu (1997)

(2) 森林土壤碳匯量計算公式

$$\text{土壤碳含量 (\%)} = \text{土壤有機質含量} / 1.724 \quad \text{(式 17)}$$

*Van Bemmelen factor of 1.724

- 利用轉換函數估算土壤總體密度 (Pedotransfer function was adopted for estimating the bulk density (Bd)：

$$Bd = 1.3026 + 0.169\log(d) - 0.256[\ln SOC]^2 \quad \text{(式 18)}$$

- 土壤碳匯量計算 Soil organic carbon stock (SOCS, kg m-2) for a certain soil depth (h) was calculated as follows：

SOC stock (kg m-2) = [SOC (g kg-1) × Bd (g cm-3) × thickness x (cm)] x (1-stone %) /100 (式 19)

- 某地區土壤碳匯總重量

$$SOCstock_h = SOCD_{ih} \times \boldsymbol{Area_{grid}} \quad \text{(式 20)}$$

(3) 森林土壤碳匯計算之主要變異因子

- 土壤容積密度
- 土壤含石量
- 土壤有機層(O 層)深度

2. 2023-2026 年森林土壤碳匯綱要計畫

彙整臺灣森林土壤碳匯資料庫、預測模式、不確定性分析及利用新技術繪製各林區管理處森林土壤碳匯分布圖。

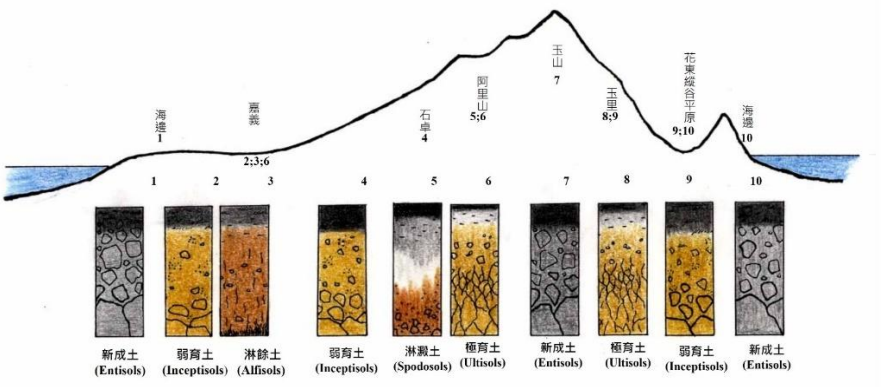


圖 4-16. 臺灣西部至東部之土壤種類分布示意圖
資料來源：崔君至 手繪，2009

(1) 計畫目標

- 盤點全國所有森林土壤調查實測資料，完整高山森林土壤碳匯資料庫，並逐步建立及繪製臺灣各分署森林土壤碳匯分布基線圖，補足國家資源清冊的資料庫。
- 利用資料庫中各項環境因子(地形單元、氣候)、森林生態系類型及土壤分類類型，與土壤碳含量之間的回歸關係，建立森林土壤碳存量的推估模式(轉換函數)。
- 除了能釐清影響森林土壤碳存量的變異因子，更希望藉由國際 Digital Soil Mapping 之技術與經驗，以少數因子來推估森林土壤的碳存量，減少野外採樣之人力、物力與時間的消耗。
- 利用 GIS, Geostatistics, Digital soil mapping 技術，以準確繪出臺灣各分署森林土壤碳匯分布基線圖，補足國家森林資源清冊的資料庫。
- 分年分地區性持續驗證臺灣各分署之森林土壤碳匯量與碳分布基線圖。

(2) 研究方法與重點

- 盤點全國所有森林土壤調查資料，包括臺灣高山森林土壤 8000 個有座標土壤剖面調查資料中，有近 900 個有土壤碳含量資料庫，加上學術單位的各土綱剖面(Entisols, Inceptisols, Ultisols, Spodosol, Andisols) 近 150 個土壤剖面調查資料，將近 1000 筆以上的森林土壤剖面調查資料，以完整蒐集高山森林土壤碳匯資料庫。
- 彙整資料庫的各項環境因子(地形單元、氣候)、森林生態系類型及土壤分類，利用適當的統計方法解析各項因子彼此之間的相關性(相異性或相依性)，建立各種環境因子(地形、氣候)、森林生態系類型、及土壤性質(總體密度，bulk density)與土壤碳含量的相關數學式(土壤轉換函數，pedotransfer function)。
- 以 Digital soil mapping 技術，等面積二次樣條方程式(equal-area quadratic spline model)來繪製土壤剖面不同深度碳含量模式，以準確繪出臺灣各分署森林土壤碳匯分布基線圖，補足國家森林資源清冊的資料庫。
- 以少數因子來推估森林土壤的碳存量，修正與驗證臺灣各林管區森林土壤碳匯分布的準確性。
- 利用國際 Digital Soil Mapping 技術與經驗，分 3 年將 8 個分署(113 年 2 個分署，114 年 3 個分署，115 年 3 個分署)，繪製臺灣各林管區森林土壤碳匯分布基線圖。
-

(3) 預期效益

- 建立環境因子(氣候與地形)、森林生態系類型及土壤性質與森林土壤碳含量(匯)的相關

數學式。

- 推估臺灣及各分署森林土壤的碳存(匯)量及不確定分析。
- 利用國際 Digital Soil Mapping 技術與經驗，繪製臺灣各分署森林土壤碳匯分布基線圖。

（四） 臺灣森林土壤碳匯現況與增加土壤碳匯案例分享

課程深入探討臺灣森林土壤碳匯的現況，同時分享土壤碳匯的案例。通過結合理論探討與案例分享，更加理解臺灣森林土壤碳匯的概況。

1. 案例 1 臺灣森林土壤碳庫量推估

計畫執行於民國 98 年 12 月 31 日至民國 99 年 12 月 30 日，調查區域涵蓋宜蘭林區各事業區、新竹林區各事業區、東勢林區各事業區及立霧溪事業區。計畫完成大甲溪以北 78 處土壤剖面及枯枝落葉層採樣；各土壤剖面化育層土壤及枯枝落葉層之 C、N 分析；各土壤剖面化育層土壤粒徑分析(clay%、silt%、sand%)；各土壤剖面化育層土壤 pH 及各養份元素(Ca、Cu、F、K、Mg、Mn、P、Zn)分析。採樣點 78 個，其中極育土(Ultisols)20 個、弱育土(Inceptisols)34 個、新成土(Entisols)有 24 個。調查結果如圖 4-18 表示，分別為極育土(表 22)、弱育土(表 23)、新成土(表 24) 的碳含量資料。三種土壤表土 0-30 公分的 SOC 含量皆佔表土 0-100 公分總 SOC 的 60%以上；0-50 公分佔總 SOC 量的 78%以上；顯示表土 30 公分佔了大部分的 SOC 含量。各樣本之間的標準差和變異數很大，可能是因為臺灣地形複雜，而林地多位於地形陡峭的山區。由於新成土和弱育土含石量高，導致土壤容積密度變異大，這也造成了土壤容積密度和含石量測值的不確定性。

2. 案例 2 臺灣北部地區人工林土壤碳存量的估算(蔡呈奇，胡庭恩，林國銓，陳尊賢，民 98)

此研究在臺灣北部區選取共 9 種人工林樹種，包含 3 種闊葉樹種與 6 種針葉樹種，於林下採集土壤樣本進行分析並推估該人工林下土壤之有機碳存量，經研究結果指出，土壤樣體分為弱育土(Inceptisols)與極育土(Ultisols)兩類土綱；闊葉人工林之土壤總體密度較高於針葉樹人工林，在闊葉樹與針葉樹人工林中的平均土壤含石率(0-30cm)分別約為 17%與 14%。闊葉樹人工林下平均的土壤有機碳含量為 28g kg^{-1}(0-30cm)，在針葉樹人工林下則為 48g kg^{-1}(0-30cm)。土壤有機碳存量以油桐人工林存量最低，臺灣扁柏人工林存量最高。

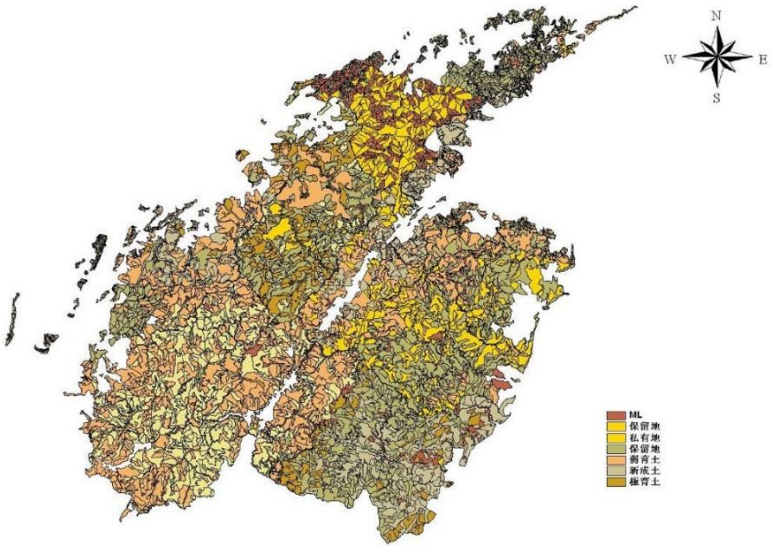


圖 4-18. 計畫調查區域圖

資料來源：(杜清澤 等人，2010，林業署委託計畫 案號：TFBM-980222)

3. 案例 3 更新造林對土壤碳吸存的效應：以臺灣二葉松林火燒後為例(蔡呈奇，張瑀芳，林世宗，陳尊賢，民 101)

此研究以臺灣東北部大甲溪事業區之臺灣二葉松火災跡地更新造林地區為研究區域，採集地表枯落物與不同深度的土壤樣本，分析其中的碳含量與推估樣區碳吸存量，主要的研究目的為評估與探討火災跡地更新造林之後，不同造林時間土壤碳吸存量的變化以及更新造林對土壤碳吸存之效應。研究結果指出，研究區內的土壤多為新成土與弱育土，樣區地形坡度陡峭，易受到地形不穩定的擾動。森林火災後儘速進行更新造林，可以明顯的提高地表枯落物的碳吸存(累積)量，但並沒有顯著增加土壤的碳匯存量，而更新造林時間愈晚，土壤的碳匯存量將會減少的愈多。研究得出森林火災後應盡速造林，此對於臺灣森林土壤碳吸存會有相當的助益。

表 5. 20 個極育土(Ultisols)樣本剖面資料碳匯統計表

	SOC (Mg C/ha)					
	O 層	土壤				
		0-30cm		0-50cm		0-100cm	
平均數	3.25	61.2	60.87%	80.1	78.98%	103.7	100%
標準差	2.78	25.58		32.08		41.73	
變異數	7.72	654.12		1028.81		1741.60	
變異係數	0.86	0.42		0.4		0.4	
最小值	0.34	24.28		32.8		33.8	
最大值	10.27	108.34		154		190	
個數	20	20		20		20	

資料來源：(杜清澤 等人，2010，林業署委託計畫 案號：TFBM-980222)

（五） 地表枯落物與土壤含碳量調查技術

1. 森林中的五個碳庫

(1) 地上部生物量(Above ground biomass)

土壤以上的所有活植物生物量，包括木本和草本植物，包括莖、樹幹、樹枝、樹皮、種子和樹葉。

(2) 地下部生物量(Below ground biomass)

活根的所有生物量。直徑小於(建議的) 2 mm 的細根通常被排除在外，因為這些細根通常無法憑經驗與土壤有機質或枯枝落葉區分開來。

(3) 死木(Dead Wood)

包括不包含在枯枝落葉中的所有無生命木質生物量，無論是站立的、躺在地上的還是在土壤中的。 死木包括直徑大於或等於 10 cm (或國家規定的直徑)的臥地木、死根和樹幹。

(4) 枯落物(Litter)

包括所有的非生物量，其大小為大於土壤有機物的極限(建議 2 mm)，並且小於死木選擇的最小直徑(例如 10 cm)、倒伏死亡、處於礦物或有機土壤上方或內部的各種分解狀態；另外也包括直徑小於 2 公分的活細根。

(5) 土壤有機質(Soil organic matter)

包括礦質土壤中的有機碳，達到國家選擇的特定深度，並在整個時間序列中始終如一地應用。 土壤中活的和死的細根和死有機質(DOM)，小於根和 DOM 的最小直徑限制(建議 2 mm)，包含在土壤有機質中，因為無法根據經驗將它們與土壤有機質區分開來。

表 6. 34 個弱育土(Ultisols) 樣本剖面資料碳匯統計表

	SOC (Mg C/ha)						
	O 層	土壤					
		0-30cm		0-50cm		0-100cm	
平均數	6.13	68.8	62.7%	86.4	78.2%	111	100%
標準差	6.57	40.1		47.2		59.0	
變異數	43	1612		2228		3485.92	
變異係數	1.07	0.58		0.55		0.53	
最小值	0.11	18.5		22.6		29.1	
最大值	27.8	174		210		254	
個數	34	34		34		34	

資料來源：(杜清澤 等人，2010，林業署委託計畫 案號：TFBM-980222)

表 7.24 個新成土(Entisols) 樣本剖面資料碳匯統計表

	SOC (Mg C/ha)						
	O 層	土壤					
		0-30cm		0-50cm		0-100cm	
平均數	4.56	41.4	66.1%	51.2	78.5%	69.9	100%
標準差	1.93	28.8		34.8		52.2	
變異數	3.73	833		1213		2726	
變異係數	0.42	0.70		0.68		0.75	
最小值	1.30	10.02		11.00		12.04	
最大值	8.99	134.17		160.79		211.00	
個數	24	24.00		24.00		24.00	

資料來源：(杜清澤 等人，2010，林業署委託計畫 案號：TFBM-980222)

2. 土壤有機碳庫估計(參考 IPCC 關於土地利用、土地利用變化和林業方面的優良做法指南)

土壤有機碳庫可通過採樣點上採集的土壤樣本進行估計。土壤樣本通常是用不同深度的金屬筒或使用挖掘方法採集的。「優良做法」是在每個採樣點和每種深度上收集一種複合樣本(建議每個複合體收集 2 至 4 個此類樣本)，隨後將它們混合在一起，針對每種深度和每個點做一個複合樣本。分為林地腐植質層的採樣與土壤總體密度樣本採樣步驟如下：

- 林地腐植質層的採樣

(1) 拍攝採樣環境照：依採樣規劃至採樣剖面，先尋找沒有明顯被踩踏的地表位置，採樣人員也應小心不要四處踩踏。拍攝採樣環境照 2 張，需 2 張不同的自然地景照如圖 4-19。

(2) 填寫紀錄表依紀錄表順序，填寫紀錄表，可由採樣人員一人或數人一起填寫，請記得在記錄表中填入主要填寫與紀錄的人員。

(3) 利用採樣框架採集林地腐植質層：將地表覆蓋的地被植體撥開，露出地被層。因撥開植

體而掉落地面的新鮮葉子與枝條等，應小心撿拾移除。

(4) 放置不鏽鋼採樣方框：以指北針定出正北的方向，將不鏽鋼採樣方框(30 cm×30 cm)放置並插入於地面如圖，將方框內新鮮的葉子、枝條與可以辨別的攝食根系先移出，拍攝30cm*30cm 方框置於地面的枯枝落葉照(圖 4-20)。



圖 4-19. 採樣環境照



圖 4-20. 安插不鏽鋼採樣方框(30 cm×30 cm)

(5) 收集植物殘體：徒手收集方框內的所有植物殘體(不包括地表攝食根系)，裝入已編號的採樣袋中，置於計重秤上秤重，並記錄鮮重於紀錄表中。無樣品可採集時請註明鮮重為 0 公克。拍攝林地腐植質裝入已編號的採樣袋中置於計重秤上照片(圖 4-21)，無樣品可採集時亦將未裝樣的空採樣袋放入。






圖 4-21. 收集植物殘體

- 土壤總體密度樣本的採樣

(1)土環建置：將衝擊驅動式土環置於採樣框架中，並以膠槌將土環打入土壤中，應注意打入的深度，避免內襯管中的土壤產生壓實現象，影響土壤總體密度的量測結果。(土環高於地面約 3 公分，代表內襯管已經填滿)如圖 4-22。

(2)取出土環：土環打入到固定深度並確認之後，請旋轉時十字把手或前後左右搖動把手，將土環與底部的土壤分離，再從土體中取出整個土環。(勿用力轉動與搖動，以免土壤在土環中可能崩落或鬆散)(圖 4-23)



圖 4-22. 土環建置過程



圖 4-23. 將土環取出

(3) 土壤取樣：將內襯管自土環中小心取出，立即將平整的上方套上蓋子，並利用刮刀將不平整的另一方，小心削平，並加蓋。有植根突出，用修枝剪剪除，有小石塊亦可用修枝剪慢慢剪除。取樣時若有遇到粗大的植根，土環會有反彈的情形，遇到較大石塊，土環可能完全無法再深入土層中。如果在 0-10 公分土層的採樣中遇到，請立刻在另一個林地腐植質採樣框架中，重新打入土環並取樣(如果都無法順利取樣，可在周圍 1 公尺範圍中找位置取樣)。在 10-20 與 20-30 公分中遇到困難，可以重複上述的做法。30-40 與 40-50 公分中遇到困難，則可以取出內襯管，加蓋後量取土壤的取樣深度，在內襯管以麥克筆紀錄土壤的位置(畫圓)與上下層關係(箭頭)，以確定採樣的厚度與深度，並將採樣深度記錄在紀錄表中(圖 4-24)。



圖 4-24 土壤取樣過程

3. 測量土壤相關碳濃度的方法

根據科學文獻，對測量土壤相關碳濃度的方法及其在實地的應用可分為四類，包括：

- 使用實驗室分析土環(soil core)的傳統方法
- 直接測量生態系統碳交換
- 新興技術

- 發展中技術

(1) 直接測量生態系統碳交換

透過測量生態系統二氧化碳交換量估算土壤碳匯量變化，有渦度協方差法(Eddy covariance methodology)與土壤呼吸室(Soil respiration chambers)，詳細介紹如下。

- 渦度協方差法(Eddy covariance methodology)

渦度協方差法相關技術利用微氣象原理估算垂直風速與物質或能量脈動的協方差, 是可以直接測量植被冠 層與大氣間能量與物質交換通量的重要技術, 目前已經發展成為國際通用的通量觀測標準方法(Baldocchi *et al.*, 2001；Baldocchi, 2003, 2020)。

- 土壤呼吸室

土壤呼吸為土壤表面排放的二氧化碳通量 (Fc)，是陸地碳預算中 CO_2 返回大氣的最大組成部分，占生態系呼吸的 50-70%。土壤呼吸是整體生物活性的良好估計，為土壤品質的描述指標。土壤呼吸測量用於土壤碳循環研究，以檢測土壤有機質分解速率的早期變化，以回應各種土壤或作物管理實踐。土壤呼吸速率可用來估計來自淨生態系二氧化碳交換的作物淨光合作用。

(2) 新興技術

透過測量可見光-近紅外線範圍內的漫反射率可以成功預測土壤有機質濃度。優點為可用作實驗室或現場方法， 與傳統的實驗室土壤碳分析方法相比，當需要大量樣本進行分析時，更快速、更及時、更便宜，因此更有效地獲取數據。這主要是因為該方法幾乎不需要樣品製備，不使用化學品，因此沒有化學廢物；缺點為儀器與灰化爐技術一樣昂貴，需要複雜的光譜處理和統計軟體來解釋複雜的光譜並開發校準因數

（六） 土壤轉換函數及地域(形)分析應用於土壤資訊之預測

1. 土壤轉換函數(Pedotransfer functions, PTFs)

(1) 定義

- 將已有的資料轉變為所需要的資料
- 利用其它簡單、例行的或可便宜測量的性質來預測若干土壤性質的預測函數(Bouma, 1989)

(2) 發展過程

許多國家的土壤科學的機構都有屬於自己的一套〝經驗法則(rule of thumb)〞，用於推估那些困難量度之土壤性質。但由於特別的困難、測量的花費較高與大量資料庫的有效性，在土壤轉換函數的發展中最廣泛的研究為水份吸持度的推估(estimation of water retention)。1970 年代開始使用大量資料庫之總括性的研究逐漸發展起來，1981 年正式提出土壤函數(pedofunction)名詞，而為避免與土壤物理學(或其它學科)所使用的〝轉換函數〞名詞混淆，Bouma (1989)將其稱為〝土壤轉換函數(pedotransferfunction)〞。

(3) 建立土壤轉換函數的原則

- 土壤轉換函數的目的為預測那些一般較難或花費較貴去量度的性質，用來作為預測的變數應是較容易量度的性質。
- 獲得預測變數資料的花費(cost)與力氣(effort)應遠低於所欲預測的性質。
- 評估土壤轉換函數是否適當，預測的效率與預測變數的效率之比率均應＞1。
- 不確定性(uncertainty)--除非能夠評估所建立函數的不確定性，否則不要使用土壤轉換函數來作預測；假如有許多土壤轉換函數可供利用，盡量選擇變異最小的函數。

(4) 土壤的空間變異

分為系統性(systematic)變異與隨機性(random)變異，系統性變異由於地質、地形逐漸或顯著的改變與土壤生成因子間的交互作用所造成的；隨機性變異由於採樣或分析上的誤差所造成。眾多變異中，變異最小(CV% <15%)的性質有土壤顏色(色彩與色值)、土壤 pH 值、A 化育層厚度；變異中等的性質(CV% <15% -35%)有土壤質地(砂粒、坋粒與黏粒)、陽離子交換容量(CEC)、鹽基飽和度、土壤構造(等級與大小)與碳酸鈣當量；變異最大的性質(CV% >35%)則為 B 化育層厚度、土體厚度、土壤顏色(色度)、斑紋出現的深度、碳酸鹽累積的深度、交換性鹽基含量、細黏粒含量與有機質含量等。

(5) 數值高度模型(Digital Elevation Model, DEM)

1958 年由美國麻省理工學院(MIT)之 Dr. Miller 提出數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)之觀念。利用各種測量方法來量取地面上有限的地形要點的平面位置(X, Y)及其相對應的高度值(Z)。以數值型式來描述地形起伏變化之資料即稱之為數值地形模型(DTM)或稱之為數值高度模型(Digital Elevation Model, DEM)。

目前數值地形模型主要的三種資料結構為規則網格(regular grid)、數值等高線(digital contours)和不規則三角網(TIN)。實際應用上以規則網格最普遍，其中網格狀數值高度模型(DEM)為資料產生較容易、現有資料數量最龐大、完整與資料結構簡單之數值地形模型。

(6) 地域分析及其應用

透過數學的運算所得到的各種地域屬性(terrain attributes)資料，對於分析地形與土壤兩者的關係或繪製土壤圖皆極為有用，特別是在集水區地區。應用：

- 流域網及流域盆地設計、路線分析及水文模型的分布等水文的研究，這些研究的結果能與生態模型或全球氣候模型相連接。
- 預測在一個小集水區(watersheds)或特別的地景(catena)之內土壤表面水飽和區域、沖蝕與堆積的區域及其它水文的作用。
- 土地利用/土地覆蓋/植被的製圖上、精緻農業以及水成型土壤之土壤圖的繪製。

（七） ArcGIS 基本操作

ArcGIS 是地理資訊系統(GIS)的套件，GIS 是一種將地理空間資訊(地理數據)組織、分析、顯示和管理的技術。ArcGIS 提供了一個全面的平台，使用戶能夠收集、管理、分析和展示地理空間數據，並應用這些數據來解決各種問題。其中最為知名的是 ArcMap 和 ArcGIS Pro，它們是用於地理空間數據分析和地圖製作的桌面應用程序。課程包含 ArcGIS Pro 的介面與圖資檔案與操作、座標系統定義與轉換、圖資合併、欄位計算與匯出、圖例設定、內插工具與地圖輸出。以下為課程重點整理：

1. 地圖基本操作

可利用滑鼠進行地圖或場景的平移，滑鼠左鍵、右鍵和滾輪鍵均具有內置功能詳如表 9。

表 8. ArcGIS Pro 相關圖示操作說明

功能	說明
瀏覽	滑鼠左鍵、右鍵和滾輪鍵均具有內置功能，如下所示： 左鍵單擊 -彈出視窗 向左拖動 -在 2D 和 3D 模式下進行平移 中間拖動 -在 2D 模式下進行平移 中間滾輪 -縮放 按一下中鍵並拖動 -旋轉和傾斜(僅適用於 3D) 按住右鍵 -連續縮放 按右鍵 -顯示其他工具的快顯功能表
全圖	視圖將縮放至地圖中資料的全圖範圍
縮放至所選項	視圖將以一組所選要素的範圍為中心進行顯示並放大。 縮放至單個所選要素將縮放至其完整幾何，但在縮放至單個選定點時，視圖將以固定的百分比進行縮放。

2. 座標系統定義與轉換

坐標系是一個參考框架，用於定義要素在二維或三維空間中的位置。地圖和場景使用坐標系在地球表面和相對位置上正確定位並顯示資料。空地圖或場景可從添加到它們的第一個圖層獲取坐標系。當向地圖或場景添加更多圖層時，將使用地圖或場景的當前坐標系自動顯示這些圖層，如果地圖或場景的地理坐標系與圖層的地理坐標系不同，則將使用變換對資料進行即時投影。

附件 5、113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊報名簡章

113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊

一、 委辦機關：農業部林業及自然保育署
二、 主辦機關：財團法人台灣水資源與農業研究院
三、 辦理日期：第一梯次-113 年 1 月 23 日(星期二)、24 日(星期三)
第二梯次-113 年 2 月 20 日(星期二)、21 日(星期三)
第三梯次-113 年 3 月 12 日(星期二)、13 日(星期三)
四、 辦理地點：台灣水資源與農業研究院 20 樓-5 訓練教室與 20 樓-3 電腦教室
五、 參加對象：林業保育署暨各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關等人員。

六、 本研究計畫及工作坊目的

因應 2050 淨零轉型，國家發展委員會規劃 12 項關鍵策略，其中「自然碳匯」包含森林、土壤、海洋三大碳匯，農業部提出 2030 年自然碳匯增量 135.75 萬公噸，2040 年達 1000 萬公噸的目標，過去森林碳匯只將森林地上部納入計算，因目前森林土壤及海洋缺乏基礎資料，雖然起步較晚但森林土壤仍具有極大的碳匯潛力。台灣水資源與農業研究院承接林業及自然保育署 112-113 年計畫，執行「森林土壤碳匯基線研究」用以補足國家碳匯清冊的不足。

為接軌「臺灣 2050 淨零排放」推廣達成目標的重要一環「森林土壤碳匯」，提升林業相關人員對碳淨零議題及森林土壤碳匯的瞭解，本計畫開設三個梯次工作坊，歡迎林業保育署暨各地區分署、大專院校林業相關科系及其他林業相關機關等同仁報名。每梯次皆含基礎、進階及應用課程，參加學員可選擇合適梯次報名參與。

七、 課程表

- 第 1 梯次：民國 113 年 1 月 23 日(星期二)、24 日(星期三)
- 第 2 梯次：民國 113 年 2 月 20 日(星期二)、21 日(星期三)
- 第 3 梯次：民國 113 年 3 月 12 日(星期二)、13 日(星期三)

時間	**基礎課程**	**進階及應用課程**
9:00-9:10	報 到	
9:10-10:30	臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究(1) 台灣水資源與農業研究院 陳尊賢 顧問	森林土壤碳匯量計算及案例說明(1) 屏東科技大學 水土保持學系 簡士濠 特聘教授
10:30-10:40	休 息 時 間	
10:40-11:50	臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究(2) 台灣水資源與農業研究院 陳尊賢 顧問	森林土壤碳匯量計算及案例說明(2) 屏東科技大學 水土保持學系 簡士濠 特聘教授
11:50-12:00	綜 合 討 論	
12:00-13:10	午 餐	
13:10-14:30	世界各國森林土壤碳匯查技術(1) 台灣水資源與農業研究院 郭鴻裕 顧問	森林土壤繪圖軟體應用 (ArcGIS Pro 操作)及繪製 森林土壤碳匯地圖(1) 台灣水資源與農業研究院 謝宏鑫 GIS 工程師
14:30-14:40	休 息 時 間	
14:40-15:50	世界各國森林土壤碳匯調查技術(2) 台灣水資源與農業研究院 郭鴻裕 顧問	森林土壤繪圖軟體應用 (ArcGIS Pro 操作)及繪製 森林土壤碳匯地圖(2) 台灣水資源與農業研究院 謝宏鑫 GIS 工程師
15:50-16:00	綜 合 討 論	

八、課程介紹

本工作坊為強化林業相關人員業務推動能量，推廣達成國家重大政策淨零碳排一環中土壤碳匯知識及技能而開設，每一梯次皆含基礎、進階及應用課程，學員可任選時段參加：

「基礎課程」於 1 月 23 日、2 月 20 日、3 月 12 日開設，包含(1)臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究與(2)世界各國森林土壤碳匯調查技術：

(一) 臺灣森林土壤類型及土壤碳匯研究：瞭解森林土壤種類與土壤碳匯基本觀念以及森林土壤碳匯對永續森林管理和達成碳淨零的重要性。(3 小時)

(二) 世界各國森林土壤碳匯調查技術：介紹世界各國(如 FAO、美國 USDA、歐盟、德國、日本、韓國)隊森林土壤碳匯調查技術，臺灣應如何應用這些技術進行未來森林土壤碳匯調查規劃。(3 小時)

「進階及應用課程」於 1 月 24 日、2 月 21 日、3 月 13 日開設，包含森林土壤碳匯量計算及案例說明、森林土壤繪圖軟體應用(ArcGIS Pro)及繪製森林土壤碳匯地圖：

(一) 森林土壤碳匯量計算及案例說明：進一步學習森林土壤碳匯量計算並透過臺灣實際的案例說明增進學員對碳匯的理解。(3 小時)

(二) 森林土壤繪圖軟體應用(ArcGIS Pro)及繪製森林土壤碳匯地圖：教導學員 ArcGIS 的操作技術，以臺灣真實的森林土壤調查資料繪製一個區域的森林土壤碳匯地圖。(3 小時)

九、師資介紹

(一) 陳尊賢名譽教授(臺灣大學農化系)及台農院顧問：多年來進行臺灣土壤調查與土壤碳匯研究與實務之重要工作，長期擔任政府各相關單位委員會委員，協助制定法規、政策，積極參與推動土壤碳匯研究，並發表許多土壤碳匯相關論文，對於土壤碳匯研究領域之推廣，不遺餘力。

(二) 郭鴻裕顧問(農業試驗所農業化學組前組長退休及台農院顧問)：曾任農業試驗所農業化學組研究員兼組長，協助設立臺灣土壤陳列館，統籌全國土壤網格肥力調查，完成全國土壤調查，將歷年調查的土壤資料數位化，也發表許多土壤碳匯相關論文。

(三) 簡士濠特聘教授(屏東科技大學水土保持學系)：專長為土壤調查與分類、土壤化育、土壤改良及保育、土壤碳匯、土地資源利用管理，並積極推廣數位土壤繪圖應用於土壤碳匯量上。多次參加澳洲雪梨大學舉辦 Digital soil mapping 國際訓練班及國際研討會，參與各國土壤碳匯專家進行深度學習及交流，讓臺灣的森林土壤碳匯地圖繪製技術與研究能接軌國際學術專業。

(四) 謝宏鑫 GIS 工程師(台灣水資源與農業研究院)：專長為森林土壤繪圖軟體應用、ArcGIS 專業工程師，目前正參與多項農田土壤碳匯計畫，包含農地土壤、森林土壤碳匯的政府相關計畫。

十、報名方式

(一) 本工作坊一律採線上報名(QR Code 或網址)，請詳閱下列報名表說明，**報名日期自即日起至 113 年 1 月 8 日(星期一)下午 17:00 前截止人員報名，每梯次報名上限人數為 40 人，**有任何疑問請洽工作坊聯絡人：黃群智 博士 電話：02-2805-3497 #849 或 E-Mail: chiunjr043@triwra.org.tw；謝宇雯 研究專員 電話：02-2805-3497 #872 或 E-Mail: wen964636@triwra.org.tw。

(二) 報名網址：https://reurl.cc/Ryp56g

QR Code：

(三) 本工作坊課程每一梯次全程參與者，列入公務人員終身學習及環境教育時數認證(12 小時)。

報名表

服務機關		姓名	
職稱		身分證字號 (公務人員終身學習及環境教育時數認證用)	
E-mail		行動電話	
餐飲	□ 葷　　□ 素		
□ 參加第 1 梯次工作坊，113 年 1 月 23 日(星期二)(基礎課程) □ 參加第 1 梯次工作坊，113 年 1 月 24 日(星期三)(進階及應用課程) □ 參加第 2 梯次工作坊，113 年 2 月 20 日(星期二)(基礎課程) □ 參加第 2 梯次工作坊，113 年 2 月 21 日(星期三)(進階及應用課程) □ 參加第 3 梯次工作坊，113 年 3 月 12 日(星期二)(基礎課程) □ 參加第 3 梯次工作坊，113 年 3 月 13 日(星期三)(進階及應用課程)			

十一、交通指引

(一) 地址：新北市淡水區中正東路 2 段 27-5 號 20 樓(位於安泰登峰大樓內，地圖上位置①)

(二) 捷運：搭乘臺北捷運淡水線(紅線)【R-32 紅樹林站】1 號出口(地圖上位置②)，步行 5 至 8 分鐘可抵達。

(三) 公車：可搭乘 756、757、818、821、837、857、880、882、883、892、893、947、957、983、紅 23、紅 52 到【輕軌紅樹林站】下車(地圖上位置③)，走路約 3 分鐘即可抵達。

(四) 停車場：安泰登峰大樓不開放對外停車，請儘量搭乘大眾交通工具前來本研究院。附近有兩處停車場，資訊如下：

1. Times 淡水中正東路一段停車場(淡水區中正東路一段 137 號，地圖上位置④，每 0.5 小時收費 10 元，當日最高 60 元，共有 100 格車位)。
2. 紅樹林站停車場(淡水區中正東路二段 68 號，地圖上位置⑤，每小時收費 20 元，共有 215 格車位)。



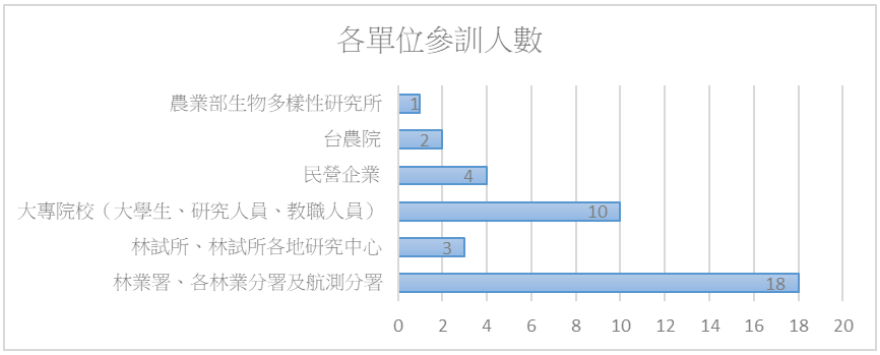
附件 6、113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊三梯次課程滿意度調查

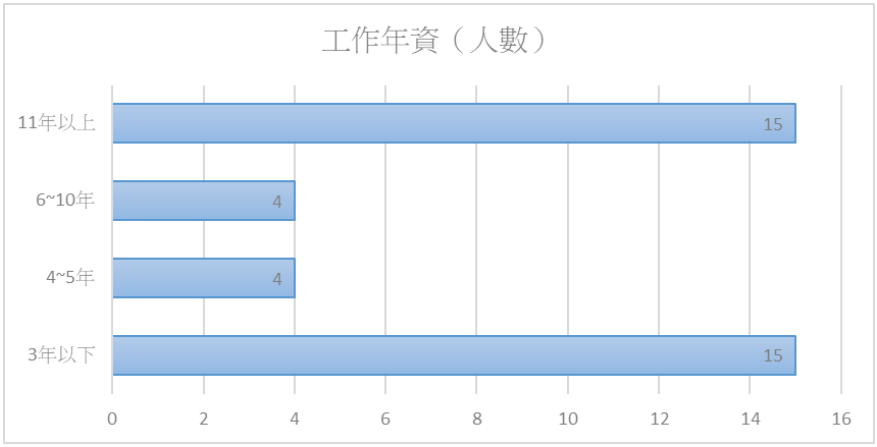
113 年森林土壤碳匯基線研究工作坊
三梯次課程滿意度調查

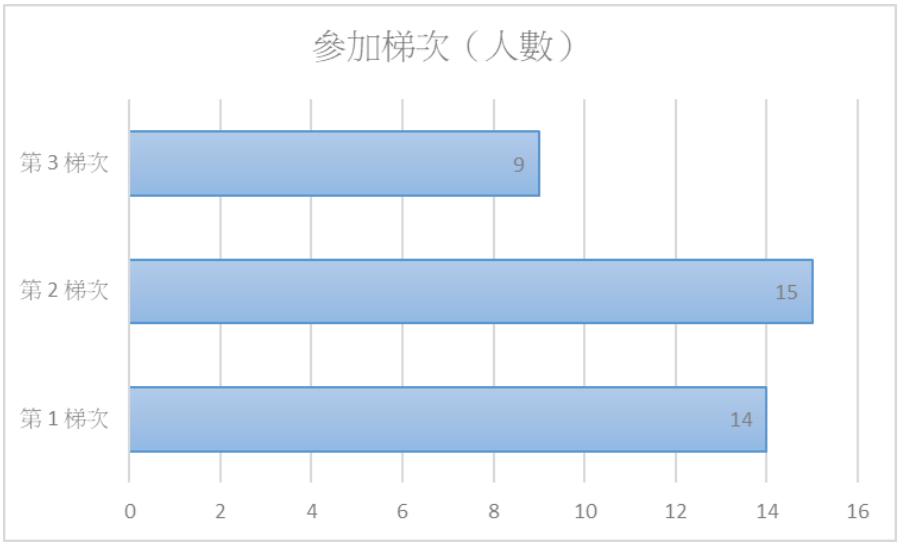
一、 各單位參訓同仁滿意度問卷回覆人數如下：林業保育署、各林業分署及航測分署 18 人；林試所、林試所各地研究中心 3 人；大專院校(大學生、研究人員、教職人員)10 人；民營企業 4 人；台農院 2 人；農業部生物多樣性研究所 1 人。各單位填表人數如下圖，共 38 人。

二、 參訓同仁工作年資如下：3 年以下 15 人；4~5 年 4 人；6~10 年 4 人；11 年以上 15 人。

三、 參加梯次：第 1 梯次 14 人；第 2 梯次 15 人；第 3 梯次 9 人。



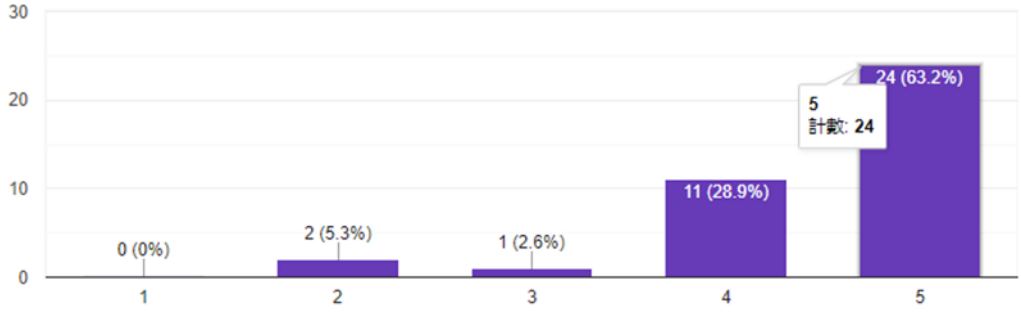




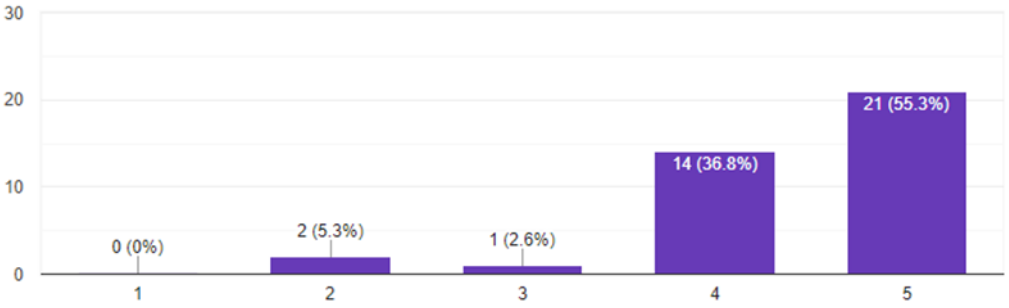
四、 各項課程滿意度問卷，「1」為非常不滿意，「5」為非常滿意，以下皆同。

(七) 臺灣森林土壤類型與土壤碳匯量，陳尊賢顧問

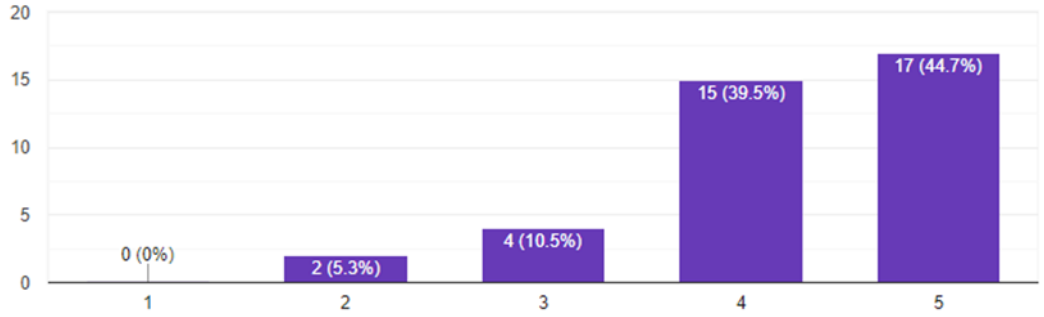
1. 本課堂講師的教學方式有助提升學習成效



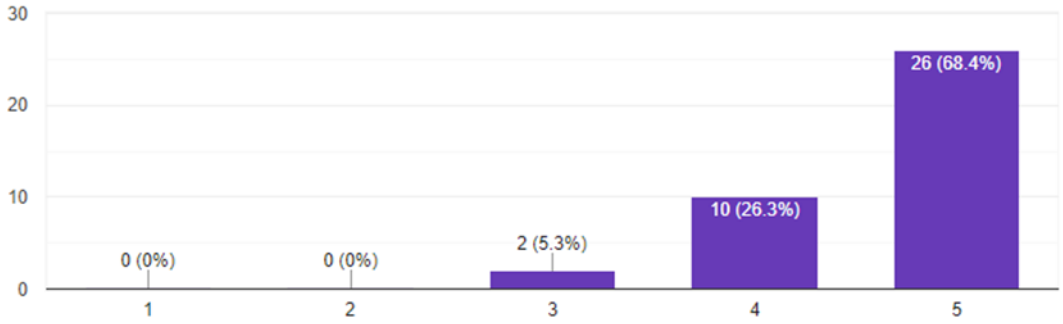
2. 本課程教材的滿意度



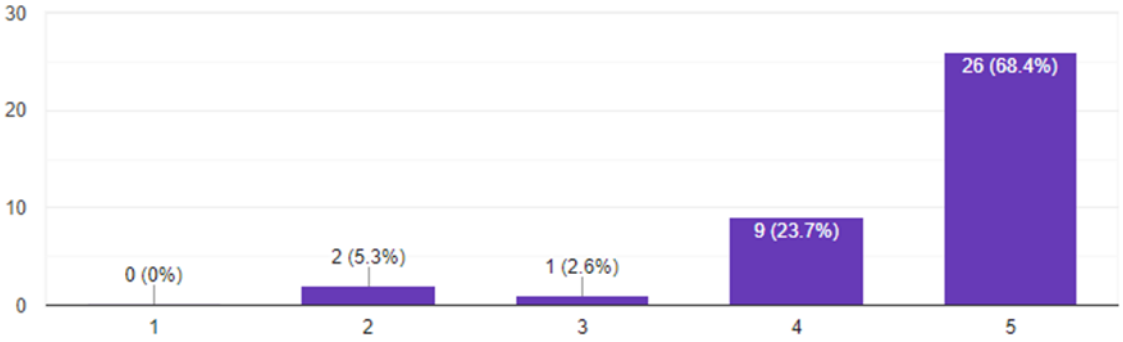
3. 本堂課程有助於您的工作或業務應用



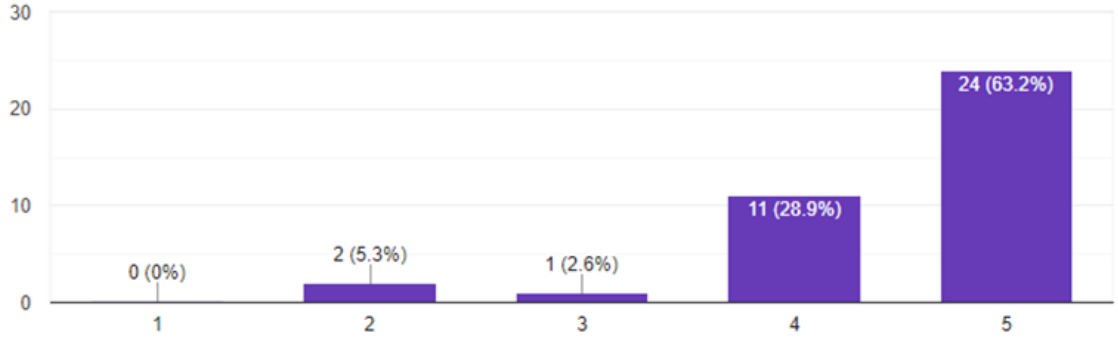
4. 本堂課程提供的場地及設備有助於學習



5. 您對本堂課程講師整體表現的滿意程度



6. 您對本堂課程進行整體的滿意程度

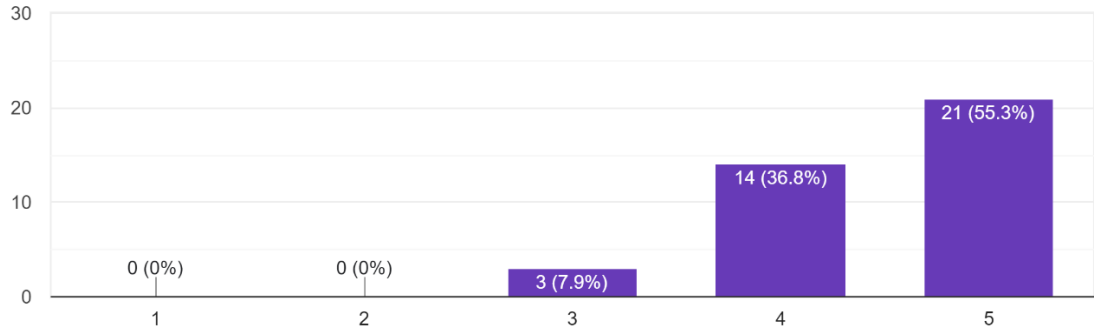


7. 對於本堂課程教學，您是否有其他建議？
   (1) 希望可提供教材電子檔供參考(紙本字體太小，無法閱讀)
   (2) 希望土壤的基礎知識多一點，比較幫助快速進入課程內容
   (3) 希望有實際採土樣分析課程

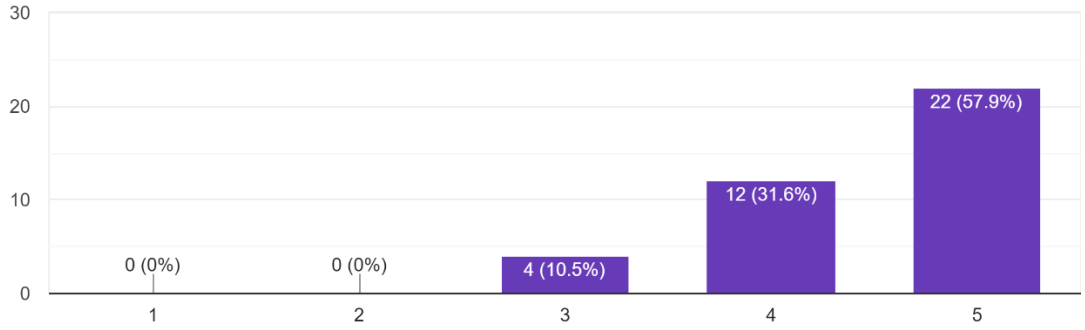
8. 本堂課程除了講師教授的主題外，您還想知道什麼資訊？

(八) 國際森林土壤碳匯調查技術發展，郭鴻裕顧問

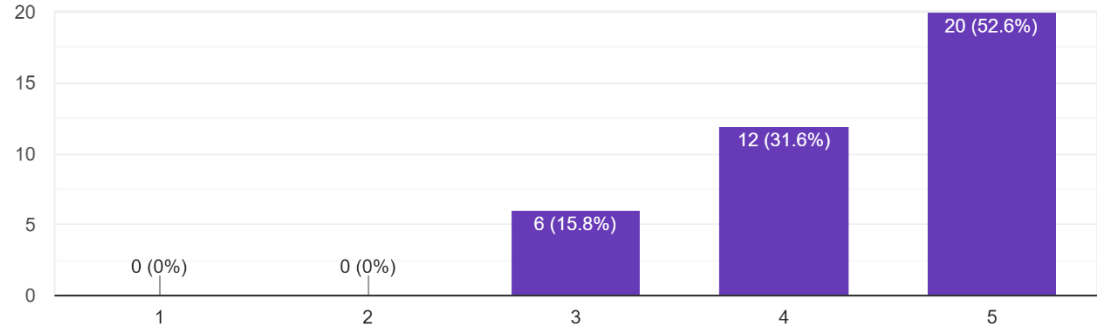
1. 本堂課堂講師的教學方式有助提升學習成效



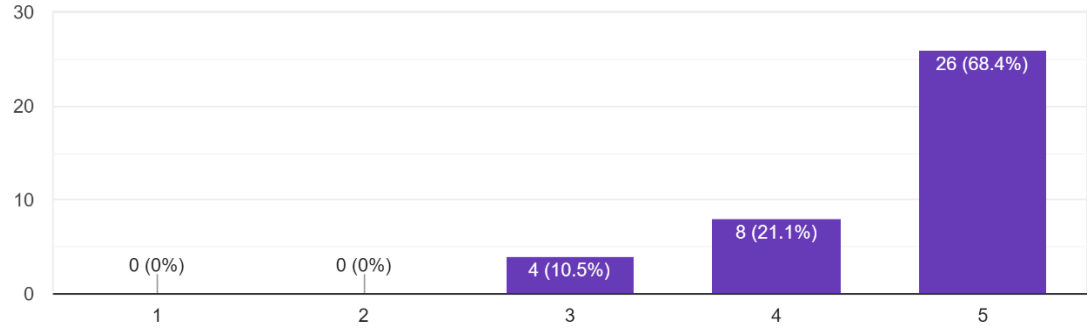
2. 本課程教材的滿意度



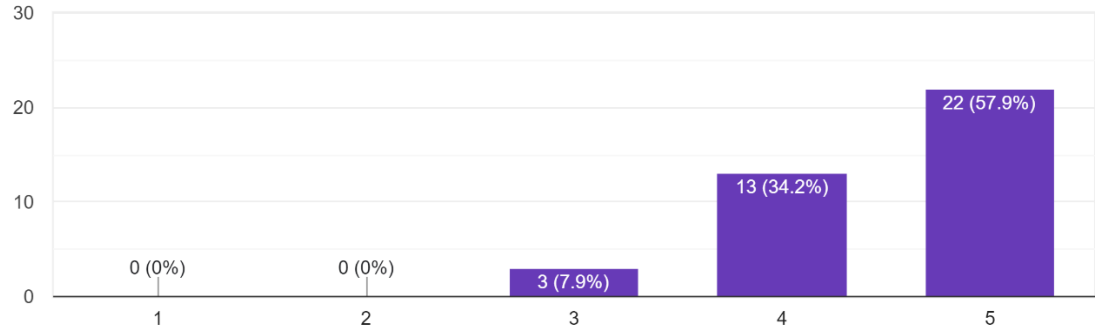
3. 本堂課程有助於您的工作或業務應用



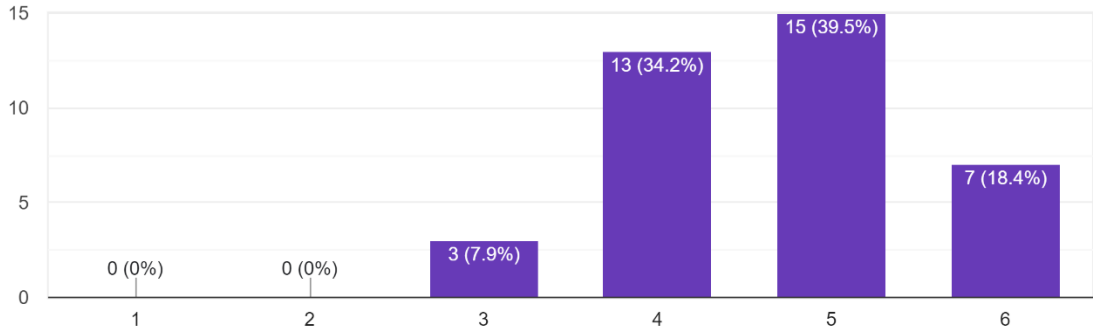
4. 本堂課程提供的場地及設備有助於學習



5. 您對本堂課程講師整體表現的滿意程度



6. 您對本堂課程進行整體的滿意程度

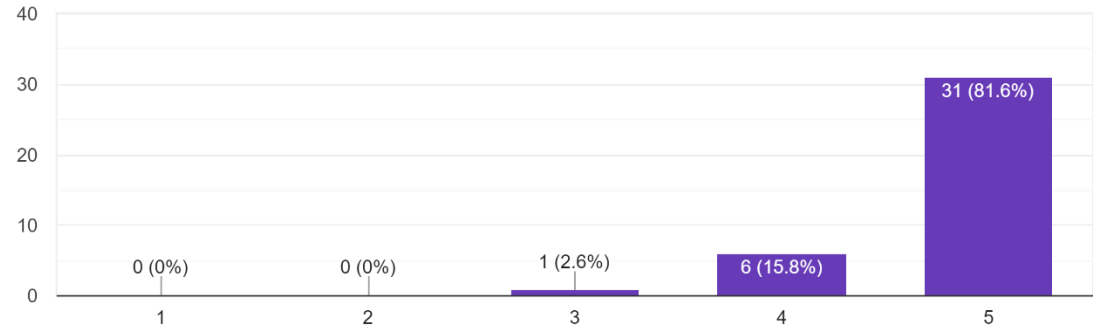


7. 對於本堂課程教學，您是否有其他建議？
   希望可提供教材電子檔供參考(紙本字體太小，無法閱讀)

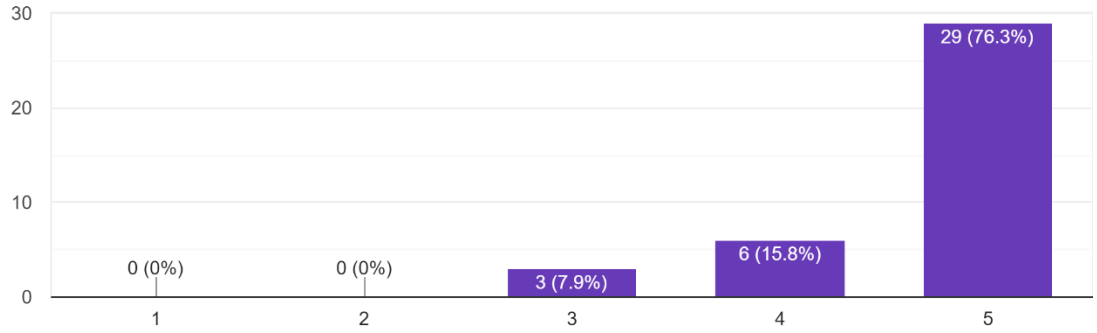
8. 本堂課程除了講師教授的主題外，您還想知道什麼資訊？
   提高森林土壤碳匯量的管理策略、方法或方向建議

(九) 森林土壤繪圖軟體應用(ArcGIS Pro 操作)及繪製森林土壤碳匯地圖，謝宏鑫工程師

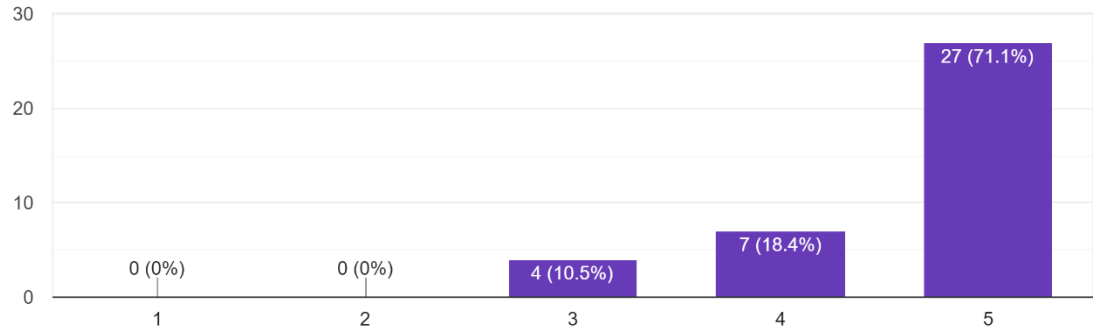
1. 本堂課堂講師的教學方式有助提升學習成效



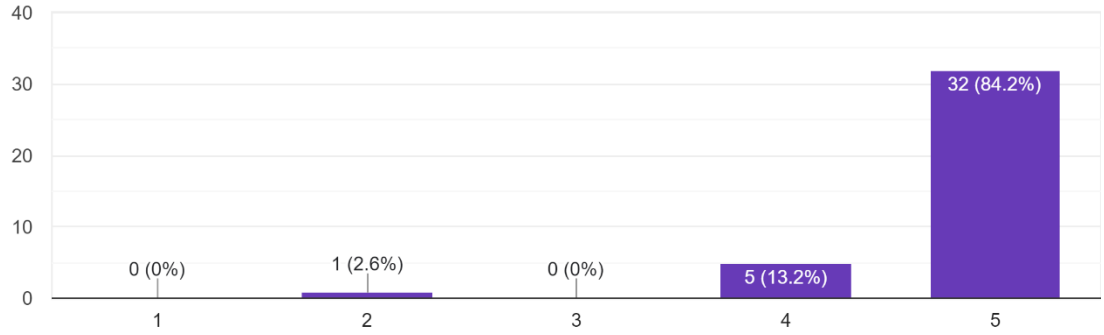
2. 本課程教材的滿意度



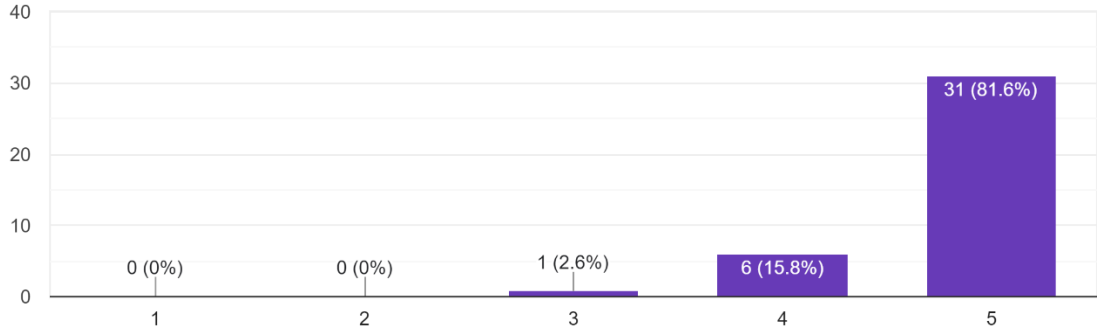
3. 本堂課程有助於您的工作或業務應用



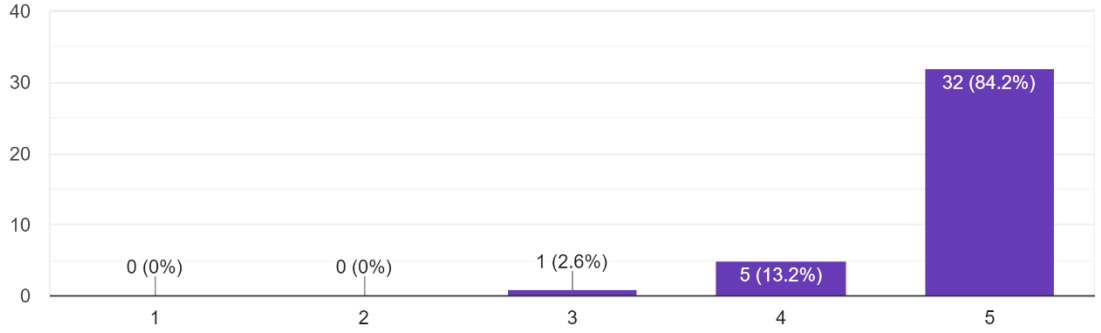
4. 本堂課程提供的場地及設備有助於學習



5. 您對本堂課程講師整體表現的滿意程度



6. 您對本堂課程進行整體的滿意程度



7. 對於本堂課程教學，您是否有其他建議？
   (1) ArcGIS 操作相對困難，建議時間可以再加長
   (2) 實機操作速度可以慢一點吸收會更好
   (3) 本身有用過 GIS，所以還能適應。但 PPT 沒有操作步驟的截圖，對第一次操作的人來說可能會比較難跟上。不過後來有提供螢幕錄影，應該就沒問題了

~ 但建議前一天可以提醒大家帶 USB

(4) 對於程式介面比較不熟悉，希望可以用工作手冊形式呈現講義內容，幫助熟悉講義內容

(5) 語速太快

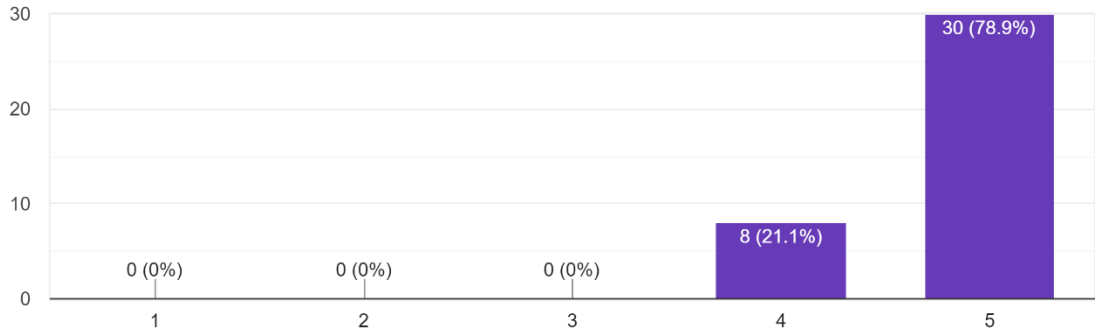
(6) 很棒，很實用，錄影可複習很方便

(7)

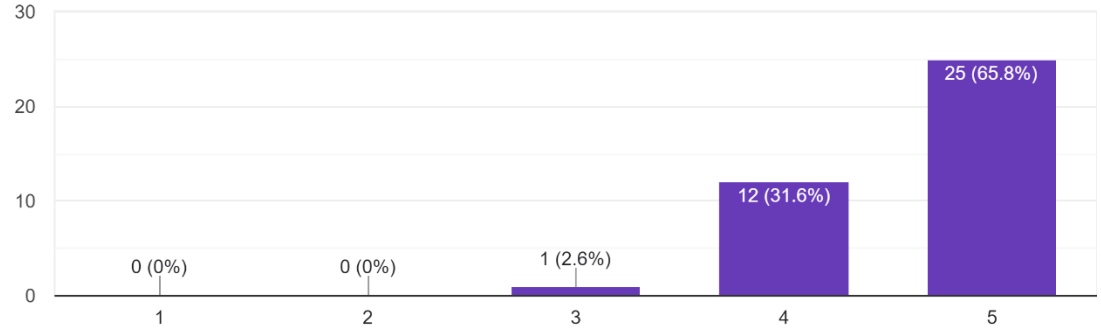
8. 本堂課程除了講師教授的主題外，您還想知道什麼資訊？
希望瞭解更多相關的空間分析工具與應用，或土壤碳匯的計算等等

(十) 淨零碳排：土壤碳匯估算、增匯管理技術與策略-以森林土壤角度評估，簡士濠教授

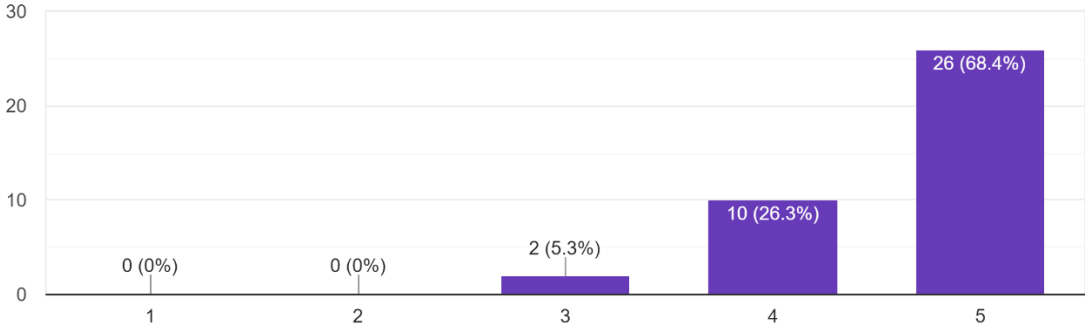
1. 本堂課堂講師的教學方式有助提升學習成效



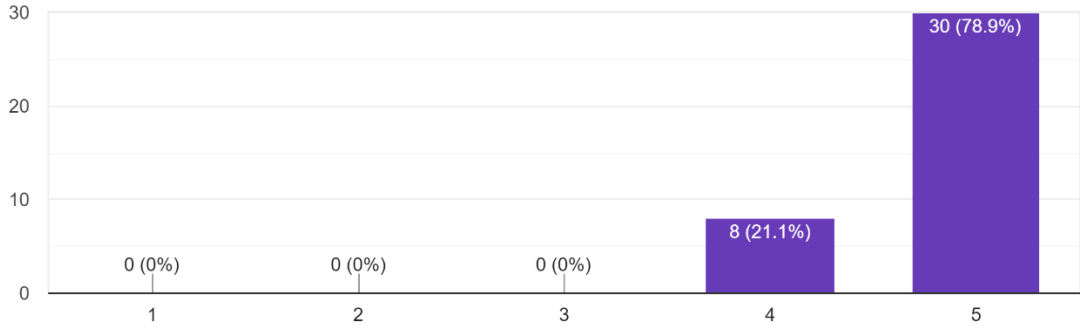
2. 本課程教材的滿意度



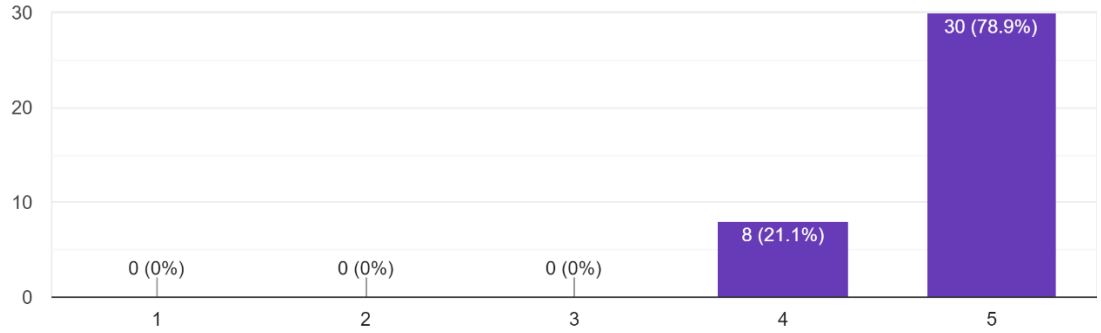
3. 本堂課程有助於您的工作或業務應用



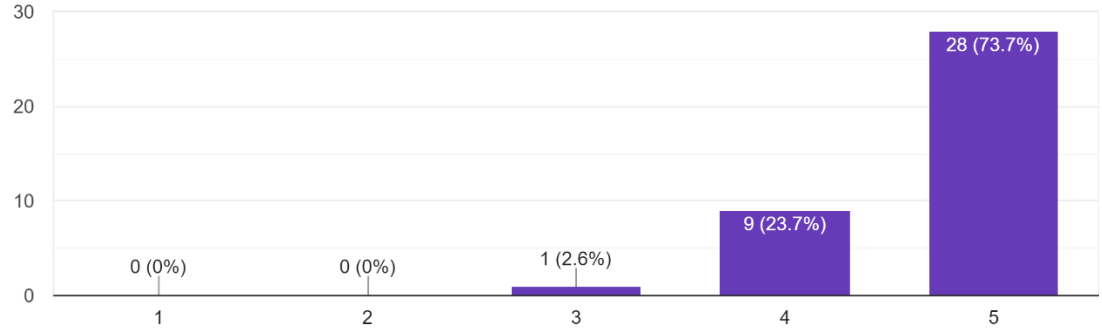
4. 本堂課程提供的場地及設備有助於學習



5. 您對本堂課程講師整體表現的滿意程度



6. 您對本堂課程進行整體的滿意程度

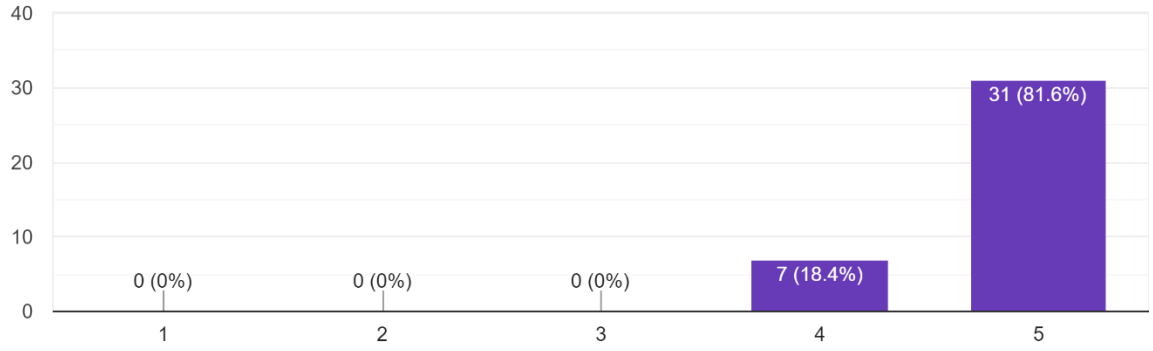


7. 對於本堂課程教學，您是否有其他建議？
   (1) 希望可提供教材電子檔供參考(紙本字體太小)
   (2) 教材內不是最新簡報
   (3) 農、林業增匯重點內容(如土砂災害控制、生態系統服務價值計算...)我國限又繼散內容可以再多做說明

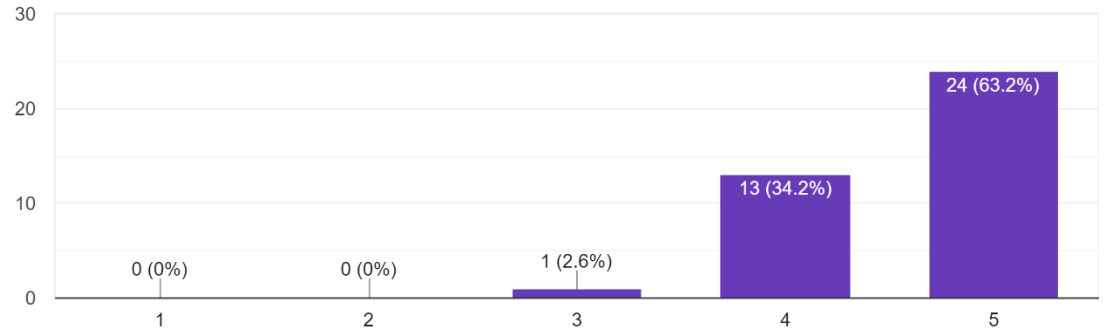
8. 本堂課程除了講師教授的主題外，您還想知道什麼資訊？
   (1) 土砂災害控制碳保存世界各國及我國的計算現況
   (2) 影像分類
   (3) 土砂災害控制碳保存世界各國及我國的計算現況

五、 本次工作坊活動與場地安排滿意度

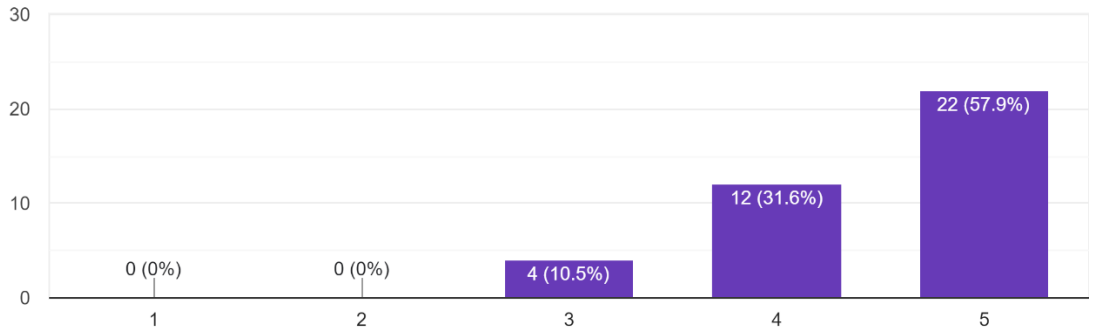
1. 課程與辦理主題相符



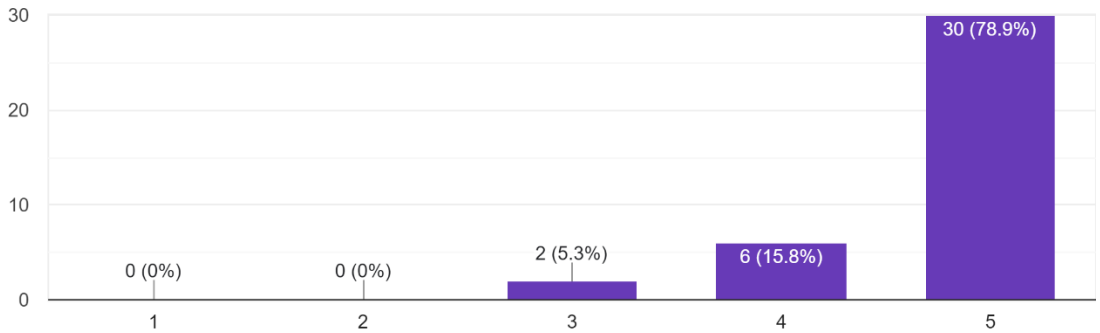
2. 課程時間的安排



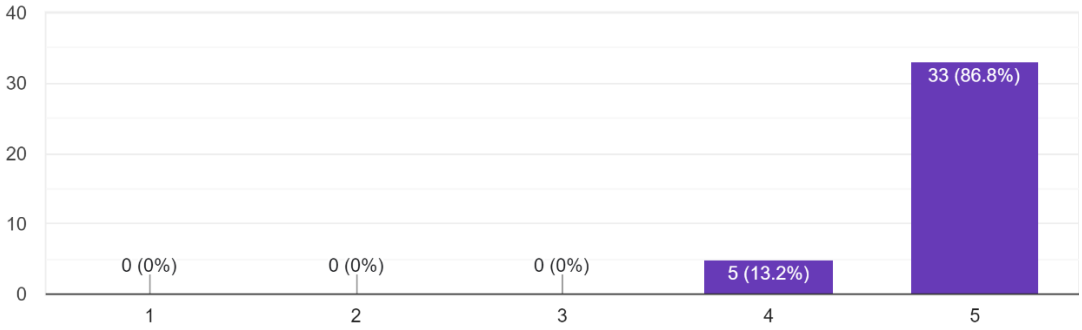
3. 活動地點的安排



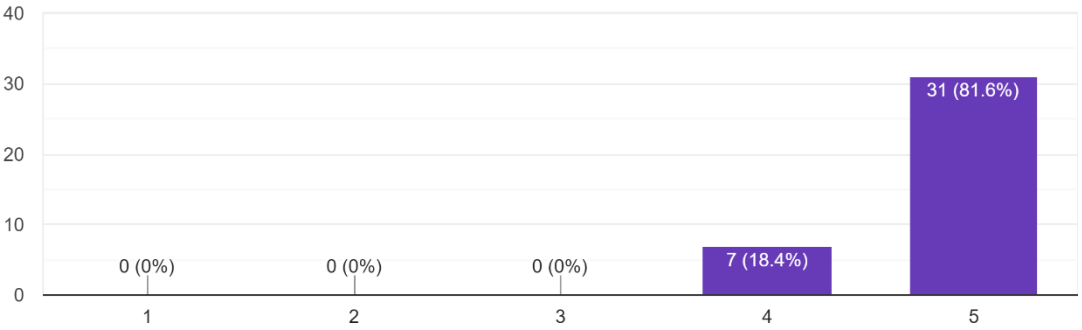
4. 電腦教室設備滿意度



5. 行政服務或工作人員的態度



6. 整體而言，我對本次工作坊滿意程度



7. 對於本次工作坊，您是否有其他課程需求建議？
   (1) 實作
   (2) 希望能多一點的實際案例的計算或操作，能將理論概念更實務化或實際應用

8. 本次工作坊對您最有幫助的地方是？
   (1) 瞭解碳匯及我國森林土壤碳匯之困境和發展方向
   (2) 資訊密度很高，收穫很多
   (3) Arc GIS 操作與錄影、問題討論(森林保險)
   (4) 土壤固碳算式
   (5) 沒有
   (6) 增加知識
   補充了對碳匯的相關知識

9. 如果您還有其他建議事項，請提供給我們，讓我們對下次活動辦理可以更為精進。
   (1) 實機操作太專業可以另外開課，工作坊可以多找些綠碳的學者共同講授
   (2) 工作人員辛苦了!
   (3) 一切都很棒!

附件 7、112 年森林土壤碳匯基線研究第 4 期報告書面審查回復

審查結果：修正後通過

委員意見	台農院辦理情形
研究成果豐碩，建議儘早投稿發表期刊。以下內容請補充說明：	感謝委員建議。敝團隊會儘早將本期的結果進行投稿。
1. 請於3種模型指標評估表中標註各項統計準則(R2, Concordance, MSE等)之最低門檻，以作為數據可信度或代表性之參考依據。	感謝委員的建議。敝團隊使用 2R2、Concordance、MSE 和 RMSE 等指標進行模型效能的全面評估，這些指標在理論上確實有一定的最佳化方向（如 R2、Concordance 越接近 1 越好，MSE 和 RMSE 越小越好）。然而，最低門檻的設定需要根據研究目標、數據特性和應用情境來調整，較難以單一數值定義統一標準。
2. 全臺有機碳儲存量推估成果屬於標準差(standard deviation)或為標準誤差(standard error)。	感謝委員提問。模型評估中，表格所顯示的為 standard deviation，亦即標準差。
3. 森林土壤碳匯基線是否已可提供林業及自然保育署應用？	感謝委員提問。敝團隊今年已提出森林土壤碳匯基線的初步成果，若政策規劃上有立即需要使用的必要，可就現有的成果進行使用。而敝團隊未來會持續進行基線的精進及修正。
4. 未來如何提高總體密度(BD)測試集之預測能力，以及後續模式驗證之規劃。總體密度(BD)用隨機森林法預測時，如何提航準確度？	感謝委員提問。敝團隊使用隨機森林推估土壤剖面的 BD 值，結果顯示 R^2 為 0.89，表示模型有 89%的解釋能力，能有效捕捉趨勢。因此，敝團隊在未來計畫會沿用此方法進行 BD 值的估算。
5. 建議將不同土壤深度的差異與國際間數值進行比較。	感謝委員建議。未來研究會考量加入國際計算數值成果進行比較。
6. 若未來相關推估數據納入國家尺度溫室氣體排放清冊中，0~30公分是否足以代表基線碳儲量？	感謝委員的提問。將 0-30 公分作為基線碳儲量的代表，是基於國際上普遍採用的土壤碳儲量評估深。此深度範圍涵蓋了耕作層與土壤有機碳最活躍的部分，對於評估農業土地及大多數生態系統的碳儲量具有較高的代表性。然而，若將未來數據納入國家尺度的溫室氣體排放清冊，仍需視實際應用需求及數據特性進行評估。
7. 推估模式可否應用於推估森林土壤碳匯變動量？	感謝委員提問。敝團隊建立的推估模式具備良好穩健性，理論上可以推估森林土壤碳匯之變動量。然而，現階段仍需著重提升資料的完備性以及模型架構。在資料收集過程中，我們需要確保環境因子與土壤碳匯在時間和空間解析度上的一致性。由於土壤碳匯受到土地利用、森林管理措施等多樣環境因子影響，需要進行長期監測以提升模式預測的可信度，另外模型的適配程度的預測結果亦需關注。綜合以上考量，本團隊認為此模式具有推估森林土壤碳匯變動量的潛力，我們將透過建立完整的長期監測網絡、引入更多環境變數，以及優化模型架構，進一步提升其在不同應用場景下的精

	準度與泛化能力。
8. 報告內容部分誤植為林管處，請修正為分署名稱；另請修正六龜工作站荖濃溪事業區。	感謝委員指正。已修正報告書內文中名詞。

附件 8、112 年森林土壤碳匯基線研究第 3 期報告書面審查回復

委員意見	台農院辦理情形
蕭委員代基	
本研究使用長期收集的森林土壤採樣數據及回歸分析方法建立臺灣森林土壤碳匯預測模式，但是採用逐步回歸方法來篩選變數可能會有一個風險，也就是篩掉符合土壤理論的變數因此建議應根據土壤物理/化學理論建立模式。	感謝委員撥冗提問。土壤的五大成土因子為氣候、生物、地形、母質及時間(Dudal, 2005; Jenny, 1994; Bockheim *et al.*, 2014），本計畫依此考量變數之選定。依據 Ma *et al.*（2017）文獻指出，利用數位土壤繪圖（Digital Soil Mapping, DSM）繪製出中國上海浙江一帶之土壤有機碳儲存量基線圖，條列出各項評估因子（表 2-2-1）。本計畫同樣使用該文獻所提及之因子建置 DSM 資料庫，並額外納含土壤分類之土綱分布作為變數之一（圖 2-2-2），本計畫之環境因子如表 2-2-2 所示，(第三期報告 p.7)。此外，本計畫已利用地形、坡度、氣溫、不同土壤類型等影響碳儲存量變化之因子進行分析，結果請參考p.244-255頁。
陳委員朝圳	
1.期中評核標準達成情形： (1)計畫已建立臺灣森林土壤碳匯量推估模式，並彙整了國內 57 項相關研究成果進行整合分析，初步評估臺灣森林土壤有機碳儲存量。	感謝委員肯定。本計畫以臺灣行政機關（如林業試驗所、農業試驗所及學術單位（如臺灣大學、宜蘭大學等）已採集之森林土壤樣本調查結果，作為可靠之資料蒐集來源。
(2)藉由滾動式修正，精進推估模式，並對數據進行了詳細分析和驗證。	感謝委員肯定。團隊將持續深入數據分析與驗證工作，確保模式具備穩健性與科學性，為森林碳匯管理和相關應用提供更可靠的技術支持。
(3)計畫共辦理了 3 梯次的工作坊和實習課程，總時數達 36 小時共計培訓 178 人次超出預期的培訓目標。	感謝委員肯定。本研究院人員積極參與相關之工作坊及演講，並邀請專家及專業講師開設森林土壤碳匯工作坊，教授知識課程及資訊課程，提升林業及碳淨零相關人員對森林土壤有機碳儲存量之瞭解；同時，加強工作坊參與者對森林土壤有機碳儲存量問題的認識，提升其專業知識能力。
2.亮點成果及預期效益： (1)計畫在建立和修正森林土壤碳匯推估模式方面，以空間展示方式及機器學習法，繪製土壤碳匯空間分布圖，提升了碳儲存量估算的準確性。	感謝委員肯定。未來團隊將進一步優化模型，為森林碳匯管理及相關政策提供更具科學性的支持。
(2)研究成果在森林碳匯管理方面具備產業實用性，對政策制定和產業發展有重要參考價值。	感謝委員肯定。團隊將持續推動森林碳匯管理的實務應用，並加強與政策及產業需求的結合，確保研究成果在政策制定與產業發展中發揮更大價值。
3.計畫執行進度符合期中評核標準，已初步呈現森林土壤碳匯推估模式。	感謝委員肯定。我團隊將持續優化森林土壤碳匯推估模式，確保其科學性與實用性，並按照評核標準推動後續工作，為實現計畫目標奠定更穩固的基礎。
4.天然針葉林 BD 修正前、後散佈圖其修正前	感謝委員撥冗提問。我們在國內資料中彙整出

委員意見	台農院辦理情形
n=126 修正後 n=110 刪除 16 個數據其刪除原因為何？	15,445筆資料，共5,320筆土壤剖面，但這些土壤資料中缺乏總體密度的佔了71%。要計算土壤的碳儲存量，需要有土壤的總有機碳量、總體密度、厚度，森林土壤還需要扣掉含石量。為了要估算未知總體密度的點位，使用已有總體密度的資料去推估未知總體密度的資料，我們先將已知的點位繪製成散佈圖，並將極端總體密度值刪除，建立回歸式。
5.各分署不同林型不同厚度之土壤有機碳儲存量估值其單位為何？	感謝委員撥冗提問。第三期報告書中內文使用的是kg C/m^2，摘要中使用的是ton C/ha，後者數值為前者之十倍，未來的報告書會統一使用ton C/ha來表示。
6.不同林型之碳儲存量之空間分布圖其單位建議以 t CO_2e/ha 表達。	感謝委員建議。未來報告書若涉及不同資料間比較，或是結合溫室氣體排放量共同估算其效益，將會補充t CO_2e/ha之單位標示。
7.土壤有機碳儲存量的影響變數，除了目前所考慮之林型及土壤厚度之外，地形因子（如坡度、坡向），土壤及雨量等因子，未來是否列入推估模式之參數。	感謝委員撥冗提問。本計畫使用五大成土因子（氣候、生物、地形、母質及時間）作為環境自變數，其中已包含坡度、坡向、土壤類型、年均降雨量等地形、土壤及氣候因子。
王委員升陽	
1.請說明本計畫中各項碳儲存單位。	感謝委員撥冗提問。第三期報告書中內文使用的是kg C/m^2，摘要中使用的是ton C/ha，後者數值為前者之十倍，未來的報告書會統一使用ton C/ha來表示。
2.請說明所用方法與結果被學界、官方接受的程度為何？	感謝委員撥冗提問。本研究在方法上主要參考高引用的森林土壤碳匯、數位土壤繪圖文獻(Baritz *et al.*, 2010; Ma *et al.*,2017; Olaya-Abril *et al.*, 2017 etc.)，這些方法已經得到學界的廣泛認可和採用。本計畫所產出的「臺灣森林土壤碳匯」推估成果，不論是在資料規模或是推估方法都是目前最完整和先進的。我們未來會持續精進，讓「森林土壤碳匯基線研究」成果扣合政策-作為臺灣邁向2050年碳淨零的基礎數據。

附件 9、112 年森林土壤碳匯基線研究第 2 期報告書面審查回復

委員意見	台農院辦理情形
鄭委員智馨	
修正後通過，應修正或變更事項如評述意見。	
1. 作者文獻收集良好，但需修正文獻書寫格式，目前版本並不一致。	感謝委員撥冗指正，已修正 Page 180-195 文獻格式。
2. Page 78-81: 此小節名詞與公式前後使用不一致，SOC/TOC, Thickness/Depth, 式 4-2 使用 ln 轉換，但式 4-3 以後式子則無 ln 轉換。Page 79 所提平均 BD 1.34 g/cm3 對山區土壤而言，似乎有些高。	感謝委員提點，下述以條列形式回覆委員建議： 1. 式 4-2 之 SOC 為誤植，已修正為 TOC，謝謝委員提醒；Thickness 及 Depth 部分，兩項皆指土壤樣本下界深度減去上界深度(即土壤樣本厚度)，應為求統一已將 Depth 改成 Thickness。 2. 式 4-2 為蔡呈奇教授等人於 2013 年文獻中，綜合研究試區內所有數據，計算土壤總體密度(BD)之推算公式，作為代表全臺 BD 之計算公式。本研究依此公式，將有紀錄 BD 之樣本數據，利用土壤樣本厚度(Thickness)及土壤總碳量(TOC)推算 BD；將推算 BD 與原始紀錄之 BD 擬合線性回歸，並揀選代表樣本至線性解釋能力高於六成，再重新將原始 BD 數值與 Thickness 及 TOC 進行線性擬合而得式 4-3，而非基於式 4-2 重新計算係數及常數。式 4-2 至 4-8 亦為如此，謝謝委員建議。 3. 森林土壤總體密度反映土壤緊實程度，對於理解土壤水分保持能力、透氣性以及根系生長條件等方面都具有代表性。森林土壤理想總體密度範圍因土壤類型（如砂質土、壤土或黏土）、森林類型、以及地理位置而有所不同。對於多數林木之土壤總體密度低於 1.6g/cm^{3}時，根系較能生長茁壯；若 BD 接近或超過 1.6g/cm^{3}時，土壤則過於緊實而限制水分及氣體流動，阻礙植物根系擴展。BD 在 1.0 到 1.4g/cm^3 之間則較為理想，既能保持良好土壤結構，亦能確保水分及空氣

委員意見	台農院辦理情形
	之流動性，有利於植物根系的健康成長。因此，森林土壤總體密度為 1.34g/cm^3，通常不會被認為太高，實際上這個值接近於理想範圍的上限。在特定情況下，即使是較高的BD也可能適合某些樹種或森林類型，須綜合考量BD 與其他土壤物理和化學特性，以及如何影響森林生態系統健康及生產力。
3. Page 89: SOC 推算：未看到考慮含石率的計算？臺灣山區含石率甚高，需納入考量。	感謝委員點出的缺失。儘管團隊在蒐整國內土壤剖面調查成果時，僅極少數樣品具有含石率數據，團隊會在第 3 期報告中依現有的含石率數據推估各樣品應有的含石量，將含石量納入計算。
4. 以 SOC 0-30 cm 數值為例，嘉義-與宜蘭-平均數值 7.13 與 9.25 kg C/m^2，為何此數據會明顯高於 Page 65 所列韓國土壤碳量與 Page 59 所列大多數土壤？	感謝委員點出的疑問。不同國家森林碳匯量的差異可能是由於母質、平均溫度和降水量以及林分狀況的差異造成，各國測量尺度、量化方式和樣本數的不同也會造成土碳匯量的差異(Vanguelova *et al.*, 2016)。韓國使用 RF2 模型進行碳匯量計算，本團隊使用的是線性回歸模型、Cubist、RF 並納入其他影響因子進行模式及回歸式推估。團隊會依照此期產生的結果於第 3、4 期，持續進行模式修正及精進，加強模式的解釋能力，提高數據的可信度。
5. Page 118 模式預測低 R^2 值，是否呈現顯著預測？加註 P value。此外，報告書並未詳細說明如何計算圖 6-19 之變異程度。	感謝委員提出的疑問。第 2 期報告中均方根誤差(RMSE)泛化程度 R^2 僅與同一區域使用的推估模式(Linear Regression, Cubist, Random Forest, Boostrap)進行比較，R^2 數據呈現的結果不列入結果良好的討論。R^2 值不列入結果良好的討論，此方式在相關文獻中也經常看到(*e.g.* Baritz *et al.*, 2010; Tsai *et al.*, 2010)。另加註 P value 部分，團隊會在第 3、4 期的報告中加入。
6. 在模式低 R^2 值下，作者如何說服推估碳量圖之結果良好？	感謝委員提出的疑問。第 2 期報告中均方根誤差(RMSE)泛化程度 R^2 僅與同一區域使用的推估模式(Linear Regression, Cubist, Random Forest, Boostrap)進行比較，R^2 數據呈現的結果不列入結果良好的討論。
7. 比較圖 6-17 嘉義、圖 6-26 宜蘭與圖 2-18、圖 2-19，均呈現臺灣森林土壤碳量高於韓國與日本，此結果如何解釋？在圖 6-26 中，又如何解釋棲蘭山、鴛鴦湖山區土	感謝委員提出的疑問。第 2 期報告中團隊使用線性回歸模型、Cubist、RF 並納入其他影響因子進行模式及回歸式推估，適合用在推估臺灣森林土壤碳匯量的模式仍然在

委員意見	台農院辦理情形
壤碳量低於低海拔坪林山區土壤碳量？	修正及精進中。過去宜蘭區域的土壤調查點位實在是過於稀少，團隊在第 2 期報告中僅用宜蘭區域數據進行推估，以致於進行計算時會產生解釋能力不足。團隊會於第 3、4 期中納入全臺數據，增加計算時的點位數以期提高模型解釋能力、數據的準確度。
8. 計畫執行教育訓練優良。	感謝委員的肯定。
陳委員朝圳	
修正後通過。	
1. 已完成歐盟、美國與亞洲國家森林土壤碳匯研究成果的彙整，符合期中評核標準。部分內容建議修正**併同第 3 期報**告提出修正回覆。	感謝委員撥冗點評。
2. P.19 表 2-1 不同國家森林土壤碳匯研究成果規劃之彙整，為表達文獻所研究之數據邊界，建議將「資料來源」之欄位表頭改為「資料來源（資料邊界）」。參考網站建議加入網址。	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 19。
3. P.20 圖 2-1. 森林生態系碳儲存分類，建議翻譯中文能更加精確，最上方的標題為「森林生態系統中的碳儲量」。這個主標題分為兩個主要部分：左側為「森林生物量碳」，右側為「土壤/土質碳儲量」。「森林生物量碳」進一步細分為「地上生物量」、「枯落物質料」和「地面碳儲量」。「土壤/土質碳儲量」分為「土壤有機碳儲量」和「土壤無機碳儲量」。「土壤有機碳儲量」再細分為三個亞類：「易分解部分」、「中間部分」和「穩定部分」。「土壤無機碳儲量」分為「岩石源碳酸鹽」和「土壤源碳酸鹽」。	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 20。
4. P.20 全文中之單位建議全部改為國際單位制 (SI) 縮寫，例如公頃改為 ha；噸碳改為 tC。	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 20。
5. P.21 圖 2-2 之全球氣候型分類之中文建議能更精準翻譯，建議改為熱帶潮濕型氣候、熱帶濕潤型氣候、熱帶乾燥型氣候、熱帶山地形氣候、暖溫帶濕潤型氣候、暖溫帶乾燥型氣候、涼溫帶濕潤型氣候、涼溫帶乾燥型氣候、寒帶濕潤型氣候、寒帶乾燥型氣候、極地濕潤型氣候、極地乾燥型氣候。標題建議改為全球不同氣候類型之有機碳在下層土及表層土與地上部及地	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 21。

委員意見	台農院辦理情形
下部的含量（資料來源：Mayer *et al.*, 2020 修改至 Scharlemann *et al.*, 2014）	
6. P.22 13 種森林經營活動之中文翻譯建議與 P.25 表 2-3 的森林經營方式的中文翻譯一致。	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 22、25。
7. P.22 表 2-2. 不同緯度森林土壤與植被碳密度之比，加拿大與俄羅斯之中文翻譯與英文順序顛倒。如果表格要進行中英對照，建議全部翻譯。	感謝委員指正，已更新修正於期中報告頁 22。
8. P.25 依據 13 種森林經營活動對森林土壤碳庫之影響，進行文獻收集與探索，唯對於各種森林經營活動對森林碳匯影響之文獻分析可再加強，最後以 Mayer *et al.*, 2020 所整理之表 2-3 來呈現，但此篇文獻未列入參考文獻，除了補入參考文獻之外，建議收集更多相關的文獻重新整理成更適合臺灣森林經營狀態下的土壤碳匯影響機制。	感謝委員建議，團隊會將此建議納入第 3 期報告中修正。
9. P.26 IPCC 森林土壤碳匯方法學，其中方法學使用層級，可分為 Tier 1、Tier.2 及 Tier 3 三類，報告中對於 Tier 之翻譯有時以「層級」、有時以「方法」、有時以「級方法」進行翻譯，建議統一以國家清冊之翻譯為準，Tier 翻譯為「方法」。	感謝指正，已統一用詞「方法」，並更新修正於期中報告中。
10. 26 建議針對 IPCC 2006 IPCC Guidelines for National Greenhous Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use Chapter 2: Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories 之有關森林土壤碳匯方法學框架之重要概念、方法學的選擇決策流程等重點有較詳細的論述。	感謝委員建議，團隊會將此建議納入第 3 期報告中修正。
11. P.27 報告內文中第一次出現之專有名詞其建議英文縮寫前應顯示英文全文內容，例如「森林類型（F_I）、管理方式（F_{MG}）和自然擾動制度（F_{ND}）。特別需要注意的是，（式 2-2）中的土地利用因素（F_{LU}）使用自然擾動機制（F_{ND}）的儲量變化因素來代替。」其中 FI, FMG, FND, FLU 之英文專有名詞為何？	感謝委員指正。未來在撰寫第 3、4 期報告，團隊會多加注意此類型錯誤。已修正 P.27 內文出現的第一次專有名詞前加上英文全文。
12. P.29 方法 3 選擇澳洲的 FullCAM 模型及芬蘭的 Yasso07 模型，其目的為何？兩種模型的差異為何？臺灣可以從兩個案例中學習哪些重要概念？建議能有一些建議，以利參考及形成未來臺灣在森林碳匯	感謝委員建議。FullCAM 模型於 25m × 25m 的區域中，具有最佳的遙測尺度，能夠有效檢測土地利用變化，同時評估各種土地類型的碳匯量變化。Yasso07 模型，則具有簡單、透明、可驗證等優點，成為地球

委員意見	台農院辦理情形
方法學的努力方向。	系統模型的標準組件，廣泛應用於科研和報告領域。在應用時可依據不同的土壤尺度、不同的土壤類型進行模型選擇。未來團隊在撰寫第 3、4 期報告時，會加強討論部分，將各國的研究成果納入臺灣未來如何應用的討論中。
13. P.30 土壤轉換函數(PTF)、陸地表面模型(LSM)、地球系統模型(ESM)等專有名詞第一次出現時以英文全名列出。而對於 PTF 在森林土壤碳匯推估或方法學中之應用為何？建議加強描述。	感謝委員指正。已修正 P.30 頁的專有名詞第一次出現時以英文全名列出，未來團隊在撰寫第 3、4 期報告時，會加強注意此類型錯誤。實際進行土壤調查及分析需耗費大量的人力、金錢及時間，因此 PTF 應運而生。使用已蒐整的數據，搭配土壤轉換函數建立某區域合適之推估模型進行該區域的土壤碳匯量推估，可降低人力、金錢及時間的耗費。
14. P.38 數位土壤製圖，本節中出現多處的 DSM，但因為有 DSM 的縮寫未有全文，DSM 是指數位地表模型(Digital Surface Model)嗎？還是其他意涵？建議標註全文。數位土壤圖製作在森林土壤碳匯基線研究中所扮演的角色為何？建議有所說明。	感謝指正，DSM 的全文為 Digital Soil Mapping，已更新修正於期中報告，並於頁 38~頁 41 闡述數位土壤繪圖於土壤碳匯基線研究中的重要。
15. P.42~70 提出各國家對森林土壤的碳匯之相關文獻探討，建議針對文獻進行系統分析(System Analysis)，尤其針對本計畫之研究主題(森林土壤碳匯基線研究)進行系統化的回應研究課題的問題定義，如此可更具體性的回應 P.71 臺灣森林碳匯推估所面臨的問題及因應策略。	感謝委員建議。第 3 期報告時會再加強討論部分，提出臺灣未來可行方向。
16. 表 3-1 已收集國內政府單位之森林土壤剖面碳匯調查成果。	感謝委員撥冗點評。
17. 建議於第 3 期報告時能提出彙整結果之相關重要研究結果，這些結果如何應用於森林土壤碳匯推估，列出研究缺口，並提出未來的研究方向之建議。	感謝委員建議。第 3 期報告時會彙整相關的重要結果，並提出未來的研究方向建議。
18. 表 3-1 已收集國內重要學術單位之森林土壤剖面資料。	感謝委員撥冗點評。
陳委員琦玲	
無異議通過。請於第 3、4 期報告中補充前述建議。	
1. 文中說明仍有許多錯誤，請檢視並修正，如(1) P.21 文中引用之表 2-2，應是表 2-3，該文獻亦未列於參考文獻列表中，(2) P. 46 之式 2-11 其下說明之參數，未見於公式中等。	感謝委員撥冗指正。文中錯誤部分會於第 3、4 期中修正。

委員意見	台農院辦理情形
2. 建議詳述 IPCC 2019 指引之方法 1, 2, 3 及其引用之公式。	感謝委員建議。第 3 期報告中會詳述 IPCC 2019 的指引方法。
3. 建議亦能彙整國外清冊 LULUCF 中有關森林碳匯之估算方法。	感謝委員建議。LULUCF 中有關森林碳匯之估算方法會納入第 3、4 期的報告中。
4. 本報告主要以農試所 2008-2020 年土壤調查資料進行分析，建議能將其他調查結果進行整合，或作為模式測試之數據。	感謝委員建議。第 3、4 期的報告中，團隊會將已蒐整的國內土壤調查數據納入分析中。
5. 本報告目前僅收集國內重要學術單位之調查資料，並條列於表 3-2，但尚未進行分析，建議下階段報告能進行資料比對與整合。	感謝委員建議。第 3、4 期的報告中，團隊會將已蒐整的國內土壤調查數據納入分析中。
6.建議能撰寫本報告之摘要。	感謝委員建議。第 3 期報告中，團隊會再針對報告之摘要進行撰寫。
7. 本計畫主要分析農試所 2008-2020 年之土調資料，但採樣時間長達 12 年，如何定義碳匯基線？	感謝委員建議。第 3、4 期的報告中，團隊會再針對這部分進行論述。
陳委員連晃	
無異議通過。	
1. 業依計畫書彙整國際相關研究成果。	感謝委員撥冗點評。
2. 已完成國內重要機關土壤調查資料彙整。	感謝委員撥冗點評。
3. 已蒐集彙整國內重要學術單位森林土壤剖面資料。	感謝委員撥冗點評。
劉委員雨庭	
無異議通過。	
1. 建議各地區之資料能用統一方式呈現。例如：總 C 量、分析方法、森林保護/增匯管理方式等。如此才能有效歸納資料。	感謝委員建議。未來第 3、4 期報告，團隊會使用統一單位。
2. 資料完整。	感謝委員肯定。
3. 彙整資料豐富。唯建議提供一綜合評述之段落，即除了指出成果出處外，希望也能提供成果摘要。	感謝委員建議。未來第 3、4 期報告，團隊會加入成果摘要。
4.計畫書內容連貫性有提升的空間，目前呈現的段落較片面，較難看出重點。	感謝委員建議。在第 3 期報告中，團隊會再針對報告書架構、內容連貫性等問題進行調整。
5.式 2-11 錯誤。	感謝委員指正，已更新修正於第 2 期報告第 46 頁。
柳委員婉郁	
1. 本計畫符合第二次報告審查標準。	感謝委員撥冗點評。
2. 第一個工作項目盤點匯整森林土壤調查資料，目前國內或國外做了相當多森林土壤調查資料，建議可做更有系統的分類整理，或提供臺灣森林土壤碳匯熱點分布圖(根據過去文獻)等，供未來制定相關政策	感謝委員建議。未來第 3、4 期報告，團隊會將國內外森林土壤調查資料，做更有系統的整理。

委員意見	台農院辦理情形
之參考。	
3. 第三個工作項目為評估土壤碳匯的推估模式相當重要，如何利用不同參數如土壤有機質含量推估土壤碳匯相當重要，建議可提出主要影響參數(根據國內外文獻)，並整理這些參數之相關係數表，供未來署內參考。	感謝委員建議。未來第3、4期報告，團隊會持續精進推估模式，並提供主要影響參數，供署內參考。
4. 事實上森林土壤不一定在山坡地，許多森林亦位於平地與農地，因此"森林土壤變異度比農地、平地高出許多"句子有誤。	感謝委員指正。團隊未來在撰寫報告時，會修正此部分的錯誤，並再謹慎用字。
5. 建議未來報告重點應放於土壤碳匯的推估模式上，除了可繪製出分布熱點(以制定政策對應)、更能作為未來森林土壤碳匯預測，相關碳匯額度計算基礎參考依據。	感謝委員建議。團隊在未來第3、4期報告，會將重點放於土壤碳匯的推估模式上。