



■ 公開  
□ 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070101e600

## 行政院農業委員會林務局110年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育之研究** (第3年/全程3年)

(英文名稱) **Adaptation, monitoring, and conservation of vulnerable ecosystems under the impacts of changing climate**

計畫編號：110農科-7.1.1-務-e6(Z)

全程計畫期間：自 108年1月1日 至 110年12月31日

本年計畫期間：自 110年1月1日 至 110年12月31日

計畫主持人：陳子英

研究人員：謝長富、徐堉峰、廖宇賡、趙偉村、葉昱君、呂佳陵、徐若慈、王立豪、黃智偉、陳光耀、林育綺、林容諄、陳璋臨、林耕堯、練釗、李宗育、李吉凱、黃子庭、黃士烜、古鎮嘉、廖捷妤、沈文伶、邱子芸、劉軒宇

執行機關：國立宜蘭大學

# 目 錄

目錄.....	1
第一章 氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育之研究計畫說明 .....	5
一、前言.....	5
二、計畫架構.....	7
三、計畫分項目標.....	10
四、參考文獻.....	14
第二章 高解析度氣候模型建置及其在預測植群分佈與未來變遷之應用 .....	17
摘要.....	17
一、前言.....	18
1.1 氣候變遷下臺灣森林的可能變化趨勢 .....	18
1.2 前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要） .....	20
1.3 計畫目標.....	21
1.4 本（110）年度評核目標及預期績效.....	22
二、材料及方法.....	24
2.1 計畫架構、研究流程及成果應用規劃 .....	24
2.2 氣候降尺度模型 <i>clim.regression</i> .....	26
2.3 隨機森林（RANDOM FORESTS）生態棲位模型建立方法 .....	34
2.4 模型系集與總合（MODEL ENSEMBLE AND MAJORITY VOTING） .....	42
三、結果與討論.....	44
3.1 氣候降尺度模型 <i>clim.regression</i> .....	44
3.2 現行與未來氣候下的臺灣森林類型分布 .....	54
3.3 易危森林類型的模型系集總合與未來地理分布.....	80
3.4 計畫成果圖資應用與提供.....	93
四、績效指標與評核標準達成情形 .....	99
五、期中審查意見回應 .....	100
六、程式原始碼.....	105

6.1 CLIM.REGRESSION .....	105
6.2 氣候棲位模型與分布預測之隨機森林模型.....	110
七、參考文獻.....	114
<b>第三章 氣候變遷下高易危的臺灣水青岡生態系之調適、監測與保育研究 .....</b>	<b>119</b>
摘要.....	119
一、前言.....	120
二、前人研究.....	123
2.1 保育標的物之適應性經營(ACT) .....	123
2.2 臺灣水青岡之研究現況 .....	124
三、方法.....	127
3.1 發展臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育的操作平台，提升氣候變遷下細緻化經營與保育臺灣水青岡森林的能力.....	127
3.2 臺灣水青岡生態系在大白山到蘭崁山之監測.....	128
3.3 臺灣水青岡生態系在銅山地區及大白山到蘭崁山地區之族群分析 ....	128
四、結果.....	129
4.1 發展臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育的操作平台，提升氣候變遷下細緻化經營與保育臺灣水青岡森林的能力.....	129
4.2 林管處轄區內的水青岡保與平台會議 .....	135
4.3 大白山到蘭崁山配合UAV的臺灣水青岡監測調查.....	140
4.4 臺灣水青岡生態系在銅山地區及大白-蘭崁山地區之族群.....	148
4.5 採礦及水青岡森林的遊憩衝擊.....	153
五、結論與建議.....	156
六、期末評核標準.....	157
七、期中審查意見回應 .....	158
八、參考文獻.....	161
附錄一、保育工作會議公文及記錄 .....	170
<b>第四章 南仁山生態系監測保育與櫟櫟復育計畫 .....</b>	<b>184</b>
摘要.....	184
一、前言.....	186

1.1 氣候變遷對生態的影響與如何應對 .....	186
1.2 植株分布的主要理論.....	187
1.3 影響植株生存的相關因子之探討 .....	189
1.4 生物因子造成樹木死亡的機制與影響 .....	190
1.5 南仁山欖仁溪動態樣區的森林特性與動態變化.....	192
1.6 擬解決問題 .....	193
1.7 前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要） .....	194
1.8 計畫目標.....	196
1.9 本（110）年度目標 .....	198
二、材料及方法.....	199
2.1 研究地點.....	199
2.2 櫟櫟成樹植株監測 .....	202
2.3 櫟櫟原生地與區外自我更新小苗調查 .....	202
2.4 櫟櫟原生地採種與孵育 .....	203
2.5 櫟櫟區外栽植監測與本年度野外栽植 .....	203
2.6 南仁山地區小苗監測.....	204
2.7 欖仁溪小苗存活分析.....	206
2.8 欖仁溪樹木死亡植株空間分析 .....	207
三、結果與討論.....	211
3.1 櫟櫟成樹植株監測 .....	211
3.2 櫟櫟原生地小苗監測.....	215
3.3 櫟櫟原生地採種與保育與區外監測 .....	215
3.4 苗栗櫟櫟發現與建議.....	220
3.5 欖仁溪樣區小苗監測.....	221
3.6 南仁山樣帶小苗監測.....	226
3.7 出風山小苗監測 .....	226
3.8 欖仁溪樣區整體樣區的死亡植株分布分析.....	227
3.9 臺灣石櫟之培育與未來植栽討論 .....	230
3.10 臺灣冷杉樣區實際森林動態 .....	231
四、績效指標與期中評核標準達成情形 .....	233
五、期中審查意見回應 .....	235

六、參考文獻.....	237
<b>第五章 以臺灣水青岡與槲櫟森林的昆蟲為例 .....</b>	<b>248</b>
摘要.....	248
一、前言.....	249
二、前人研究.....	251
三、材料與方法.....	256
3.1 研究地區.....	256
3.2 研究方法.....	257
四、結果.....	260
4.1 以臺灣水青岡為食的鱗翅目昆蟲調查 .....	260
4.2 槲櫟植群樣區與境外復育區昆蟲調查 .....	264
五、討論.....	274
六、結論與建議.....	276
七、執行進度.....	278
八、期中審查意見回應 .....	279
九、參考文獻.....	280

# 第一章 氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育之研究計畫說明

## 一、前言

依據我國科技部 2011 年發佈之「臺灣氣候變遷報告」，指出臺灣地區近 50 年及 30 年來降水強度與頻率有逐漸增加趨勢，且趨於兩極化，即雨季越濕、乾季越乾；極端日雨量至 21 世紀末則將增加約 10% 至 30%。該研究顯示極端氣象事件之發生頻率與強度將與日俱增，使本島山區自然環境在氣候變遷與極端事件衝擊下益形脆弱。氣溫方面，發現臺灣暖化現象十分明顯，不論是 100 年、50 年和 30 年的平均溫度變化都有顯著上升趨勢。在季節變化方面，近 30 年的變化以冬季增溫幅度大於其他三季；高溫日數百年變化呈現增加的趨勢，以臺北增加幅度最大，約為每 10 年增加 1.4 天，近 50 年與 30 年的極端高溫日數分別增加為每 10 年 2 天與 4 天（許晃雄等，2011）。從上述數據顯示，無疑地，臺灣正與全球多數地區相同，正面臨著氣候暖化趨勢的影響。

氣候是主導多數生物分布的重要因子，生態學領域一直致力於研究生物與環境氣候的關係；植物的移動能力遠較動物為弱，因此植群與氣候的關係、以及生態氣候區劃分等研究，更是長久以來受到森林與生態學界的關注。隨著全球氣候資料庫的普及化，西元 2000 年起相關研究如森林的現生與未來分布（Rehfeldt *et al.*, 2006）、生態系統在全球暖化趨勢下的可能改變（Rehfeldt *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012），以及氣候變遷下的森林保育及調適策略等（Hansen and Phillips, 2015; Klassen and Burton, 2015; Wang *et al.*, 2016）迅速蓬勃發展。及至 2015 年以後，更有許多研究針對提出生物保育策略及其優先次序等概念框架（圖 1.1），認為政策管理者應從物種分布、氣候變遷趨勢、地理條件及土地利用等面向進行彙整分析，選定適宜之時空間尺度後，據以評定氣候變遷避難所的可能位置與容納量，進一步依據相關環境因子，評定各微避難所的保育優先次序。

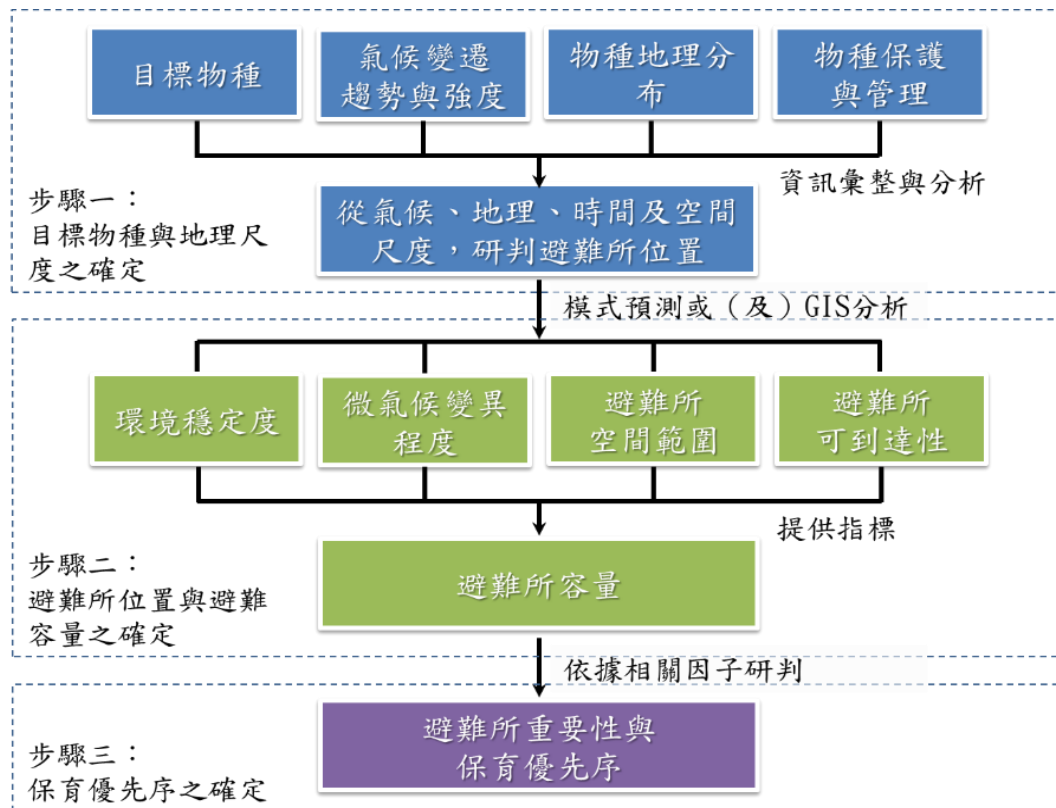


圖 1.1 Gunnar Keppel (2015) 提出的氣候變遷下生物保育策略概念。認為應針對物種的地理分布、現行保護管理措施、氣候變遷特性等因子，先找出可能的分布與未來避難位置，而後根據避難所面積、環境穩定度、可達性及氣候變異範圍等，進行保育優先次序評估。

臺灣有關森林植物與大尺度氣候的研究則相對稀少，Su(1984)、Chiou 等人 (Chiou *et al.*, 2010)、Li 等人 (Li *et al.*, 2013) 均曾以全島尺度進行森林植群的物種組成與結構分析，並透過觀察與經驗，描述不同植群類型與氣候的關係，並歸諸山地氣溫的垂直變化、降水的季節分配差異及季風影響，為影響臺灣森林植群分化的最重要因子；然而上述研究並未就統計及定量角度，深入探討各植群類型與氣候因子的關係。其他研究如 Chiu 等人 (Chiu *et al.*, 2013)、Lin 等人 (Lin *et*

al., 2012)、Lin and Chiu (2019) 則分別針對臺灣水青岡、亞高山針葉林及昆欄樹等個別物種或生態系，進行生育地氣候分析並預測未來的可能變化；但尚無法就全島森林植群在氣候變遷情境下的整體變化提出一致的結論。

因此，本計畫將延續林務局 105-107 年度「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」成果，在不同的未來情境下，對臺灣 13 種主要森林類型進行變遷預測研究，找出脆弱程度較高的類型。此外，根據模擬結果歸納而得的高易危森林類型，將選定其中數處重要地點，以野外調查監測或 UAV 定期影像收集等方式，瞭解氣候變遷或極端氣象事件對植物社會的可能衝擊；並從與植物關係最密切的昆蟲族群，找出易危森林類型的指標昆蟲物種，進一步探討氣候變遷對植食性昆蟲的衝擊，以及可能對植物社會造成的反饋。最後，本計畫將與林區管理處合作建構「氣候變遷區域保育平台」，將彙整後的研究成果提送至平台會議，經由管理機關與研究團隊的技術交流，使研究成果得與森林經營管理實際串接，並將研究結論轉化為可操作的管理措施，期能透過森林經營與合宜保育措施的介入，提高目標生態系的氣候變遷韌性，減緩氣候變遷帶來的衝擊。

## 二、計畫架構

本案係以 1 個統籌計畫，下屬 4 個細部計畫方式執行。執行單位包含臺灣生物多樣性保育學會、國立宜蘭大學、國立嘉義大學及國立師範大學，由國立宜蘭大學負責統籌。由於本計畫橫跨不同空間尺度，為使各團隊研究成果得以串接並彙整至區域保育平台進行後續利用，故規劃計畫架構及流程如圖 1.2。各團隊均依該流程執行對應之研究計畫，並於 110 年完成技術項目產出。產出項目提供予區域保育平台後，研究團隊則視林區管理處實務操作需要，參與後續會議並提供技術協助與建議。

臺灣生物多樣性保育學會負責全台氣候與森林植物分布資料的



收集，並經由程式工具與統計方法，建立適合臺灣山區使用的氣候圖層，據以分析各主要森林類型的現在與未來分布。透過不同未來階段的分布預測比較，找出適生棲地面積可能出現劇烈縮減的森林類型，據以歸納氣候變遷下的易危森林型，進一步產製關鍵氣候因子及變遷趨勢圖資，提供其他團隊辦理野外調查監測、以及區域保育平台進行未來林業經營管理措施之背景資訊。

國立宜蘭大學及國立嘉義大學則分別針對臺灣水青岡霧林、南仁山季風森林及新竹新豐槲櫟森林等地點，負責易危森林類型的長期監測與調查，搭配長期氣象觀測資料，探討氣候對於當地族群變化的影響。此外，透過不同的監測方法，例如定期 UAV 航攝影像的收集，擴大比對鄰近族群的變遷趨勢；同時藉由測試或收集種子、高壓、扦插等繁殖技術，做為未來建立種質園的技術基礎，提供區域復育平台未來推動繁殖與復育工作使用。除了上述的調查監測資料，易危族群的保育與復育尚需足夠的遺傳資料（包含基因的獨特性與多樣性）方能確保相關工作的有效性，本計畫因規模不足以涵蓋遺傳多樣性部分，將藉由補充資料收集，提供部分輔助資訊供林務局後續推動參考。

最後，植食性昆蟲的多樣性能夠反映森林生態系的優劣程度，植物族群的片斷化、氣候變遷導致的植物物候異常變化等，對於具有專食特性的植食性昆蟲具有嚴重的影響。分布狹小且物候動態波動劇烈的植物族群，經常難以支持專食性昆蟲族群的長久維持，進而導致專食性昆蟲物種數與族群數量的下降。國立師範大學團隊負責對臺灣水青岡及槲櫟森林進行昆蟲相調查，建立各個樣區的昆蟲相資料，進而探討各個臺灣水青岡的現行棲地是否可能受到暖化或人為開發影響，導致昆蟲物種消失的危機。此外，並研究監測槲櫟植群的昆蟲相，掌握數個境外復育區的蟲害狀況，族群復育的蟲害防治參考，並補充大尺度氣候變遷監測模式之不足。

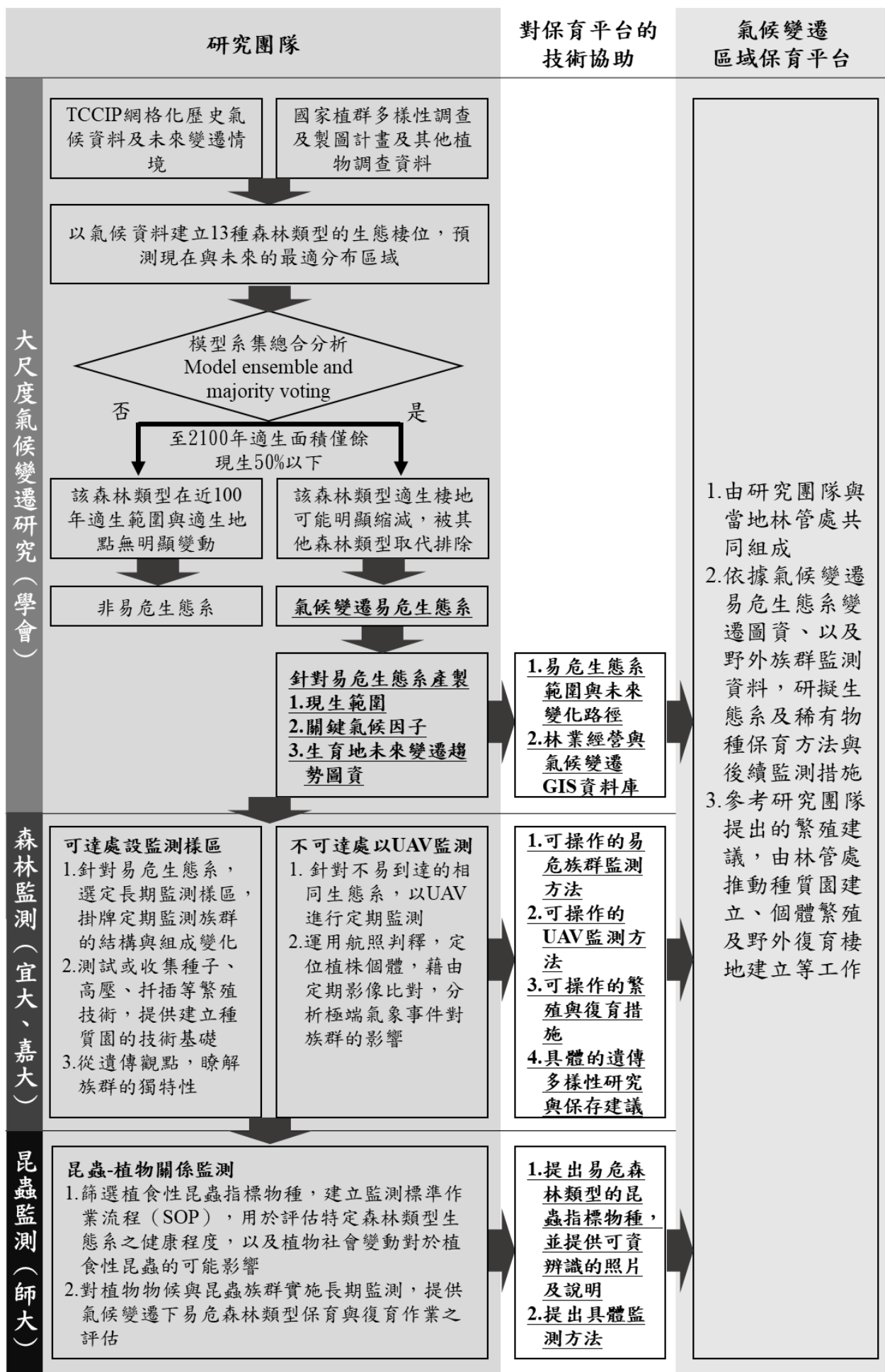


圖 1.2 本計畫流程圖。

### 三、計畫分項目標

針對圖 1.2 流程圖，由各細部計畫設定重要的分項目標如下，並由各團隊於負責章節內進行詳細描述，並轉化為區域保育平台可利用的研究成果。

#### 1、應用適應性規劃架構

Cross 等人認為面臨氣候變遷情境的保育工作推動，在規劃階段必須能彈性配合變遷情境模擬結果，確認保育工作介入點、經營行動與優先次序，同時在執行階段必須設定有效的監測與評估方法，隨時反饋或修正原有的規劃內容，提高保育策略對於變遷環境的調適能力（圖 1.3）。前期計畫大致已完成 ACT 架構內的步驟一至三，亦即確認臺灣地區可能遭受氣候變遷衝擊之地點與生態系；因此，本計畫將延續前期成果，針對不同地點的保育優先次序，以地區案例方式實際執行物種監測、保育及成效評估。並循 ACT 架構動態評估整體計畫之規劃準確性，必要時進行反饋與調整。

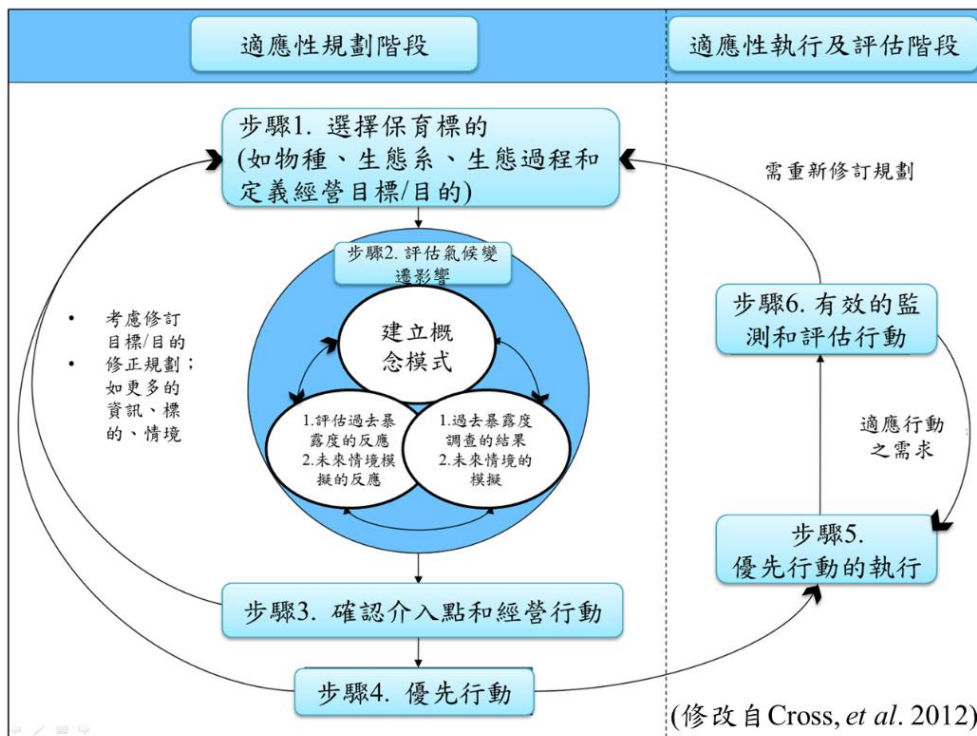


圖 1.3 Cross 等人提出的應用適應性規劃架構 (The Adaptation for Conservation Targets, ACT)。

在 ACT 架構下同時針對過去的主要台灣水青岡、南部風衝矮林或櫟櫟等族群、植群樣區布與植群圖資料進行收集，據以推動相關監測、調查及分布預測。本期計畫已收集高脆弱度生態系既有的植群調查與保育標的物種數據，同時進行動態樣區與相關監測點的定期複查，例如南仁山與欖仁溪的動態樣區、銅山水青岡動態樣區、新豐坑子口櫟櫟樣區、大白山-蘭崁山的水青岡樣區等，以五年一次或逐年進行複查，瞭解近期族群變化。由於稀有植物是許多昆蟲的專一或雜食目標，本期計畫亦針對鱗翅目昆蟲，監測其不同破碎化森林間的物種與族群數量變化，瞭解昆蟲相與植物社會功能完整性的關係，並藉由植食性昆蟲的多樣性反映森林生態系的優劣程度，以補充大尺度氣候變遷監測模式之不足。

此外，大尺度層級則配合全國植群調查資料，建立森林社會與脆弱物種的生態棲位與潛在分布，經由不同未來階段氣候變遷數據的引入，計算潛在面積縮減情形，做為評估和選擇適應性行動的參考依據。現地的監測調查，則可提供保育標的物種或森林在近期內所需的關注重點，同時提供大尺度氣候變遷模式修正的參考，經由反饋使預測方法獲得調整與改進，以滾動方式，修正並提高整體變遷預測的準確程度。

## 2、發展更細緻的植群單元的潛在植群預測與動態變遷模型

利用國家植群多樣性調查及製圖計畫建置之森林樣區與歷史樣區資料，配合高解析氣候模型（clim.regression）與機器學習方法，分別建構亞高山灌叢與森林、鐵冷杉針葉林、台灣水青岡森林（濕的溫帶落葉闊葉林）、熱帶山地霧林、南部風衝矮林或槲櫟-栓皮櫟森林（乾的溫帶落葉闊葉林）等易危森林類型的適生棲位與動態變遷研究，使森林植群的預測更貼近實際的地理分布，釐清易危森林的關鍵氣候因子，以利棲地管理與遷地保育推動；並依據高解析度的潛在植群分布圖，針對已知的這些易危森林類型，提出細緻化的保育經營與監測管理建議。

## 3、以農林業需求為導向，加值 TCCIP 網格化氣候資料

細緻化的森林植群預測模型，除了需要詳細的植物調查資料外，同時需要高解析度與精確的氣候資料配合。臺灣氣候變遷推估與資訊平臺（TCCIP）目前提供之網格化氣候資料以平均氣溫與累積降水等基本介量為主，未包含與森林生物分布相關的氣候因子，對農林業實務應用尚存隔閡。本計畫擬對 TCCIP 圖資進行加值，聚焦於 RCP4.5（約當氣溫上升 1.3°C 至 1.8°C）及 RCP8.5（約當氣溫上升 3.0°C 至 3.6°C）情境，產製重要生物氣候介量，包含溫量指數、生長積溫、熱濕指數等，形成與原始圖資相同解析度之圖層，俾利農林產業及研究單位應用。

## 4、針對高易危程度的生態系，發展區域性的監測與復育模式

目前發展的大尺度分析結果，雖可概略推測區域生態系與物種的未來變化，但仍需要小尺度研究的配合，針對生態系或稀有物種發展區域性的監測與復育模式。例如仿效日本水青岡所設立的長期監測體系，並針對脆弱物種進行遷地復育、適生棲地選擇或建置採穗園等。經由野外實際監測資料與動態變遷模型相互配合，將氣候變遷預測與實際的經營管理行動結合，降低易危生態系的氣候變遷風險，並可將小尺度監測資料回饋至氣候變遷與植群預測研究，進行預測模式的檢驗與修正。

#### 5、發展區域的保育平臺，將成果整合到林區管理處進行高易危生態系及脆弱物種的保育與經營管理

前期計畫已大致完成臺灣水青岡、槲櫟、南仁山的稀有植物的保育策略與復育技術。本期計畫將嘗試與易危生態系之該管林管處，合作成立氣候變遷區域性保育平臺，將所獲得的研究成果（包含保護區管理策略、脆弱物種遷地保育方法、移地栽植之後續管理與監測措施等）轉換為相關林區管理處可執行的保育實務措施；落實對高易危生態系如台灣水青岡森林（濕的溫帶落葉闊葉林）、南部風衝矮林或槲櫟-栓皮櫟森林（乾的溫帶落葉闊葉林）的脆弱物種保育與經營管理，整合相關領域的學者提出更細緻化的規劃措施。

#### 6、配合林區管理處進行異地保育與落實野外樣區的監測研究

異地保育包含對潛在遷徙廊道的輔助移植、對遺傳變異較特殊的族群進行異地保存（採種、育種或高壓、扦插）、培育、種質園的建造、森林或生態系的復舊等。本期計畫預計藉由保育平臺，搭接學界、專家和林管處三者，進行具體討論及落實現場經營管理。對脆弱物種的原棲地族群，則持續進行監測與設定應變門檻，瞭解族群的長期變化，藉由 ACT 架構下門檻值與預警機制的建立，使林管處瞭解這些脆弱生態系的變化趨勢，必要時得以適當輔助措施及時介入，減緩氣候變遷衝擊與提高生態系的回復能力。

#### 四、參考文獻

許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 2011 臺灣氣候變遷科學報告。國家科學委員會。

Chiou, C.-R., G.-Z.M. Song, J.-H. Chien, C.-F. Hsieh, J.-C. Wang, M.-Y. Chen, ...T.-Y. Chen (2010). Altitudinal distribution patterns of plant species in Taiwan are mainly determined by the northeast monsoon rather than the heat retention mechanism of Massenerhebung. *Botanical Studies*, 51, 89–97.

Chiu, C.-A., T.-Y. Chen, C.-C. Wang, C.-R. Chiou, Y.-J. Lai, and C.-Y. Tsai (2013). Using BIOMOD2 to model the species distribution of *Fagus hayatae*. *Quarterly Journal of Forest Research*, 35, 253–272. [In Chinese with English summary.]

Cross, M.S., E.S. Zavaleta, D. Bachelet, M.L. Brooks, C.A.F. Enquist, E. Fleishman, L.J. Graumlich, C.R. Groves, L. Hannah, L. Hansen, G. Hayward, M. Koopman, J.J. Lawler, J. Malcolm, J. Nordgren, B. Petersen, E.L. Rowland, D. Scott, S.L. Shafer, R.M. Shaw and G. Tabo (2012) The Adaptation for Conservation Targets(ACT)framework: a tool for incorporating climate change into natural resource management. *Environmental Management* 50:341-351.

Hansen, A.J. and L.B. Phillips (2015). Which tree species and biome types are most vulnerable to climate change in the US Northern Rocky Mountains? *Forest Ecology and Management*, 338, 68–83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.11.008>

Keppel, G. and G.W. Wardell-Johnson (2015) Refugial capacity defines holdouts, microrefugia and stepping-stones. *Trends Ecol. Evol.*20:1 – 22.

- Klassen, H.A. and P.J. Burton (2015). Climatic characterization of forest zones across administrative boundaries improves conservation planning. *Applied Vegetation Science*, 18, 343–356.  
<https://doi.org/10.1111/avsc.12143>
- Lin, C.-T., C.-F. Li, D. Zelený, M. Chytrý, Y. Nakamura, M.-Y. Chen, T.-Y. Chen, Y.-J. Hsia, C.-F. Hsieh, H.-Y. Liu, J.-C. Wang, S.-Z. Yang, C.-L. Yeh and C.-R. Chiou(2012). Classification of the high-mountain coniferous forests in Taiwan. *Folia Geobot*, 47, 373-401.
- Lin, C.-T. and C.-A. Chiu (2019) The Relic *Trochodendron aralioides* Siebold & Zucc. (Trochodendraceae) in Taiwan: Ensemble Distribution Modeling and Climate Change Impacts. *Forests*, 10(1), 7, <https://doi.org/10.3390/f10010007>
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, M.V. Warwell and J.S. Evans (2006). Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States. *International Journal of Plant Sciences*, 167, 1123–1150.
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, C. Sáenz-Romero and E.M. Campbell (2012). North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22, 119–141. <https://doi.org/10.1890/11-0495.1>
- Su, H.-J. (1984). Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (I). Analysis of the variations in climatic factors. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 17, 1–14.
- Wang, T., E.M. Campbell, G.A. O’Neill and S.N. Aitken (2012). Projecting future distributions of ecosystem climate niches: uncertainties and management applications. *Forest Ecology and Management*, 279, 128–140.



<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.034>

Wang, T., G. Wang, J. Innes, C. Nitschke, and H. Kang (2016). Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region. *Forest Ecology and Management*, 360, 357–366.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.004>

## 第二章 高解析度氣候模型建置及其在預測植群分佈與未來變遷之應用

### 摘要

精確而高解析度的氣候圖資，以及完整而明確的生物調查資料，是氣候變遷研究最重要的兩個主體，經由統計預測方法的搭配，才能瞭解生物與氣候的關係，進而推估暖化情境下的可能變化與預擬對策。本計畫以臺灣全島為尺度，完成臺灣地區氣候降尺度推估軟體 *clim.regression* 的開發與改良，可針對臺灣全島產製無固定尺度 (scale-free) 的氣候資料，並增納生物氣候及地形因子推估能力。亦利用 *clim.regression* 產製之氣候資料，對全臺 13 種與氣候相關森林類型進行氣候變遷衝擊研究。研究結論認為水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林、冷杉-鐵杉上部山地針葉林、柯屬-杜英屬山地霧林、八角茴香-桐屬熱帶季風林等 5 種森林，在未來暖化情境下可能喪失 50% 以上適生棲地，或是其變遷趨勢具有極高的不確定性，是容易到受氣候變遷衝擊的森林類型。

110 年為本研究計畫屆期年度，除了彙整氣候降尺度模型及各類型森林棲位分析與變遷模擬的詳細成果外，並以地理資訊系統平台，完成本計畫各階段產製成果與林務局森林經營圖資的整合。藉由森林分布變遷圖資與國有林事業區、現行造林區域及保護留區等經營管理圖層的套疊分析，將氣候變遷研究成果轉化為林業經營可利用的參考圖資。該成果將提供至氣候變遷區域保育平台，提供林區管理處及研究團隊推動野外族群長期監測及區外復育之參考。

**關鍵詞：** 氣候變遷、生物多樣性、生態系、物種分布、衝擊與調適

## 一、前言

### 1.1 氣候變遷下臺灣森林的可能變化趨勢

依據我國科技部 2011 年發佈之「臺灣氣候變遷報告」，發現臺灣暖化現象十分明顯，不論是 100 年、50 年和 30 年的平均溫度變化都有顯著上升趨勢。在季節變化方面，近 30 年的變化以冬季增溫幅度大於其他三季；高溫日數百年變化呈現增加的趨勢，以臺北增加幅度最大，約為每 10 年增加 1.4 天，近 50 年與 30 年的極端高溫日數分別增加為每 10 年 2 天與 4 天（許晃雄等，2011）。另根據臺灣氣候變遷推估與資訊平台（TCCIP）於 2017 年最新發布之「臺灣氣候變遷科學報告 2017—物理現象與機制」，各時段及各種氣候變遷情境的增溫變化推估相當一致：在 RCP8.5 情境下，全臺平均氣溫上升將超過 2°C，甚至有一半的模式推估臺灣各地區的增溫在世紀末將超過 3°C。對於雨量預測則與溫度不同，該報告指出，臺灣地區年平均降雨變化在四個不同未來情境下，從近未來、世紀中、世紀末三個時段，對於全年平均降雨改變量的模式系集中位數而言，並沒有顯而易見的系統性變化型態，模式系集變化量的中位數都在 -5%~+5% 之間，並沒有顯著增加或減少的趨勢。也就是說，諸多 CMIP5 氣候耦合模式推估臺灣區域年平均降雨變化沒有一致性的特徵，在增加與減少的情形都有的狀況下，難以針對未來的年平均降雨量變化有較佳的趨勢推論。在極端雨量部分，臺灣地區近 50 年及 30 年來降水強度與頻率有逐漸增加趨勢，且趨於兩極化，即雨季越濕、乾季越乾；極端日雨量至 21 世紀末將增加約 10% 至 30%。目前各情境推估大致顯示：世紀末（2081–2100 年）臺灣乾、濕季降雨改變率中位數的空間分布，將朝濕季更濕，且暖化情境愈顯著，雨量的增加量將更為明顯；乾季則是暖化情境愈顯著，雨量減少更趨明顯，降雨量的空間分布則以臺灣西南部減少的最嚴重。

根據 TCCIP 發布之氣候變遷趨勢資料，並依據 Lin 和 Tung(2017) 篩選六種對臺灣地區擬合程度較高的大氣環流模型 (GCMs)，林務局已於 2018 年完成臺灣森林適生範圍變化的模擬，顯示各類森林的適生範圍有向高海拔推移的趨勢，亦可觀察到熱帶森林的適生範圍沿著

西部平原、竹苗丘陵逐步朝北部推移的情形。在 RCP4.5 情境下，水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林、冷杉-鐵杉上部山地針葉林及檜木山地霧林的適生範圍將出現顯著的退縮，可確定為易受氣候變遷衝擊的森林生態系；尤其前二者的適生面積有可能縮減至現生範圍的 20% 以下，是受衝擊最嚴重的森林類型。對於熱帶森林的變化模擬，則呈現分歧的結果。由於降雨因子在熱帶森林的生態棲位模型內佔有極高的重要性，但是各種大氣環流模型對於未來降雨變化的預測卻極不一致，有些模型認為雨量將朝極端化增減及季間分配不均的方向變化；但有些緩和模型認為氣溫雖然上升，但年間總雨量仍維持與現今差異 -5%~+5% 範圍，變化不大。從最極端的情境來看，柯屬-杜英屬山地霧林及八角茴香-桐屬熱帶季風林這二類森林將可能面臨極高的氣候變遷衝擊，至世紀末僅餘 0.2% 及 18.73% 的適生棲地；但降水變化較緩和的氣候變遷情境，則預測熱帶森林有可能維持現生面積或擴大其棲地。至於中海拔以下的溫帶及亞熱帶山地森林，其適生面積的增減變化相對不明顯，從櫟屬山地闊葉林至榕楠山麓闊葉林範圍內，適生面積變化量約介於現生狀況的 75.41%–137.69% 間，且標準差變異範圍小，顯示各種氣候模型一致認為中海拔以下的溫帶及亞熱帶山地森林適生面積總量變化不大，受到氣候變遷的衝擊與威脅較低（謝長富等，2018）。

第 6 次全國農業會議結論指出，臺灣必須全面建立適應氣候變遷的農業生產模式及調適策略。永續森林經營是農業的一部份，在已知氣候變遷對臺灣森林生態系的可能衝擊，更有必要將高易危地點列入重點監測對象，從更高的預測精度、更細微的空間解析度、以及更綿密的現場監測網路等方式，建構森林生態系的調適、監測與保育策略，保持森林生態系對氣候變遷的因應能力與調適韌性，減緩氣候變遷對於生態系及伴生珍稀物種的衝擊，促使臺灣的森林與生物多樣性資源獲得永續的保育與利用。

地球物理及大氣科學領域正持續改善氣候變遷預測技術，包含預測趨勢的精度修正、以及空間解析度的提升。此外，由於近年演算方法的長足改進，機器學習與人工智慧技術被開始被應用在生態棲位分

析與動態模擬，大幅提升我們對物種及族群分布的掌握能力。為確實了解氣候變遷對於已知的高易危森林生態系的衝擊，並擬定合宜的因應策略，林業及保育部門必須持續追蹤國際新發布的氣候變遷模型，更新臺灣森林（尤其是高易危生態系）的適生分布預測，及時掌握森林環境與珍稀族群的可能變化，一旦出現退化，即可早期預警並備相關措施的採行。

## 1.2 前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要）

氣候是主導多數生物分布的重要因子，生態學領域一直致力於研究生物與環境氣候的關係，並形成專門探討生態棲位（climatic niche, 或稱 ecological niche）與生物空間分布的科學領域（Wang *et al.*, 2016a）。植物的移動能力遠較動物為弱，因此植群與氣候的關係、以及生態氣候區劃分等研究，更是長久以來受到森林與生態學界的關注（Bailey, 1983; Fang *et al.*, 2002; Holdridge, 1947; Su, 1984）。隨著生態棲位模擬方法以及高解析度氣候資料庫的進展，植群-氣候關係被應用到更廣泛的領域，諸如模擬森林的歷史、現生與未來分布（Rehfeldt *et al.*, 2006）、分析生態系統在全球暖化趨勢下的可能改變（Rehfeldt *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012），以及氣候變遷下的保育及調適策略等（Hansen and Phillips, 2015; Klassen and Burton, 2015; Wang *et al.*, 2016b）。謝長富等（2018）以機器學習法為基礎，針對臺灣 13 種森林類型進行現生及未來分布模擬，指出氣候變遷可能對於臺灣的水青岡森林、亞高山森林與灌叢等生態系造成顯著的棲地縮減；同時，在某些極端情境下，南部的熱帶霧林及熱帶季風林亦可能遭受極高的衝擊。

以生物群系（biome）或森林型（forest type）為分布模擬的地景單元，是最直觀且易於操作的方式，尤其溫帶國家如美國（Brinkmann *et al.*, 2011）、加拿大（Rehfeldt *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2012）、日本（Matsui *et al.*, 2018）、中國大陸（Wang *et al.*, 2016b）等，早已利用氣候資料庫完成國內主要森林植被的生態棲位模型建置，進而擬定大

面積森林資源的管理措施與氣候變遷因應對策。這種方法在熱帶及亞熱帶地區極少被應用，主要因為熱帶及亞熱帶闊葉森林類型間缺乏顯著的形相特徵，不易藉由航遙測影像劃定森林單元(Zhu *et al.*, 2015)；此外，熱帶及亞熱帶森林的物種組成複雜，各物種對於氣候環境的需求與生態棲位存在差異，也限制了生態棲位模擬方法的可應用程度(Martin *et al.*, 2007)。近年來氣候資料庫的解析度提升與電腦統計方法改進，使得上述限制獲得了轉機，尤其是機器學習(machine learning)與資料探勘(data mining)方法的進步，熱帶及亞熱帶森林若具備完整的調查資料與穩固的植群分類基準，配合充足的氣候變量因子，亦能獲得精準的棲位模型，達到預測熱帶及亞熱帶闊葉林分布的效果。Lin 等人已利用上述方法，以國家植群多樣性調查計畫建置之臺灣森林植被分類系統，對於臺灣 13 種森林類型的進行關鍵氣候因子分析與潛在分布模擬，並產製原生帶狀植被分布預測圖，交叉驗證準確度為 93%，可作為現行及未來氣候變遷情境下評估森林可能變化的研究工具(Lin *et al.*, 2020)。臺灣的地形變化劇烈、植被鑲嵌程度高，如能運用既有研究成果，以更細緻的群團(alliance)或群叢(association)單元發展潛在植被預測及未來動態分析技術，將可充分發揮本項研究在氣候變遷領域的應用價值。

### 1.3 計畫目標

本計畫期程 3 年(108-110 年)，全程計畫目標如下：

1. 發展以群團或群叢為單元的潛在植被預測與動態變遷模型，提升氣候變遷下細緻化經營與保育臺灣森林的能力：
  - (1) 利用國家植群多樣性調查及製圖計畫建置之森林樣區與歷史樣區資料，配合前期計畫發展之高解析氣候模型 *clim.regression* (Lin *et al.*, 2018) 與機器學習方法，建構以群團或群叢為單元的潛在植被預測與動態變遷模型，使森林植被的預測更貼近實際的地理分布。

- (2) 釐清氣候變遷下高易危植物社會的關鍵氣候因子，以利棲地管理與遷地保育之推動；並依據高解析度的潛在植被分布圖，針對已知的易危森林類型，提出細緻化的保育經營與監測管理建議。
2. 以農林業需求為導向，加值 TCCIP 網格化氣候資料，提升國產圖資在農林領域的應用價值：
    - (1) TCCIP 網格化氣候資料以平均氣溫與累積降水等基本介量為主，未包含與森林生物分布相關的氣候因子，對農林業實務應用尚存隔閡。
    - (2) 擬對 TCCIP 圖資進行加值，聚焦於 RCP 4.5（約當氣溫上升 1.3°C 至 1.8°C）及 RCP 8.5（約當氣溫上升 3.0°C 至 3.6°C）情境，產製重要生物氣候介量，包含溫量指數、生長積溫、熱濕指數、缺水指數等，形成與原始圖資相同解析度之圖層，俾利農林產業及研究單位應用。
  3. 建置可供林務局及林區管理處應用的氣候變遷 GIS 圖資：
    - (1) 針對已知的易危森林類型，產製細緻化的氣候資料及森林植被變遷圖層，提供統籌計畫建立的區域性復育平台使用。
    - (2) 以高易危生態系之植被預測模型為基礎，提供重要環境因子予野外監測團隊，驗證預測模型重要因子與植被動態變遷的相關性。
    - (3) 以 ESRI ArcGIS 為環境，發展適合林務局及林區管理處套疊使用之 GIS 資料庫，以利氣候變遷研究成果的流通與後續使用。

#### 1.4 本（110）年度評核目標及預期績效

本年度評核目標及預期績效如下：

1. 期中評核目標：

- (1) 完成 2 種易危森林類型的細緻化氣候與植被變遷圖資，提供區域性復育平台使用。
- (2) 以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，建構 GIS 資料庫雛形，嘗試於林業經營管理的適用性。

2. 期末評核目標：

- (1) 以氣候變遷總和模型 (ensemble model)，提出以群叢為單元的潛在植被預測與動態變遷成果。
- (2) 以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，發展適合林務局及林區管理處套疊使用之 GIS 資料庫。

除上項目標，本計畫 110 年度預定產出績效為國內期刊論文、國內研討會論文及研究報告各 1 篇。



## 二、材料及方法

### 2.1 計畫架構、研究流程及成果應用規劃

110 年度為本計畫屆期年度。依據過去年度執行情形、研究成果及委員歷次審查意見，彙整本計畫架構、研究流程及成果應用規劃如圖 2.1。

本計畫負責項目為圖 2.1 流程的「大尺度氣候變遷研究」。使用 TCCIP 發布的臺灣地區 5 公里網格化歷史氣候資料，以及 IPCC 第五次評估報告 (AR5) 及其耦合模式 (CMIP5) 提供的未來氣候變遷情境資料，做為模擬臺灣森林植群現生與未來分布的氣候資料基礎。森林植群資料部分，則利用國家植群多樣性調查及製圖計畫近 4000 處樣區，依 Li et al. (2013) 定義之森林類型及地理位置，由本計畫進行各森林類型的氣候棲位建置與預測。

研究流程包含三項研究技術開發，包含氣候降尺度模型 *clim.regression*、隨機森林 (Random Forests) 生態棲位模型建立方法、以及模型系集總合 (Model ensemble and majority voting)，將於以下段落說明分析方法。

研究成果部分，將根據不同森林類型的適生棲地縮減程度，以 50% 縮減量為門檻，找出氣候變遷下的易危生態系。經由整理這些易危森林類型的現生範圍、關鍵氣候因子及未來變遷趨勢，交給其他研究團隊進行小尺度的野外監測工作，瞭解氣候變遷是否確實對森林植物的結構、組成及植物-昆蟲交互關係等造成衝擊。此外，上述流程產製圖資均以一致的座標系統 (WGS84 經緯度座標系統) 及 ESRI ArcGIS Geodatabase 型式儲存，於本年度計畫與林務局森林經營圖層進行疊合分析。除了討論易危生態系的後續保育與調適措施外，GIS 成果資料庫將交予林務局，做為氣候變遷區域保育平台及森林經營相關業務後續應用。

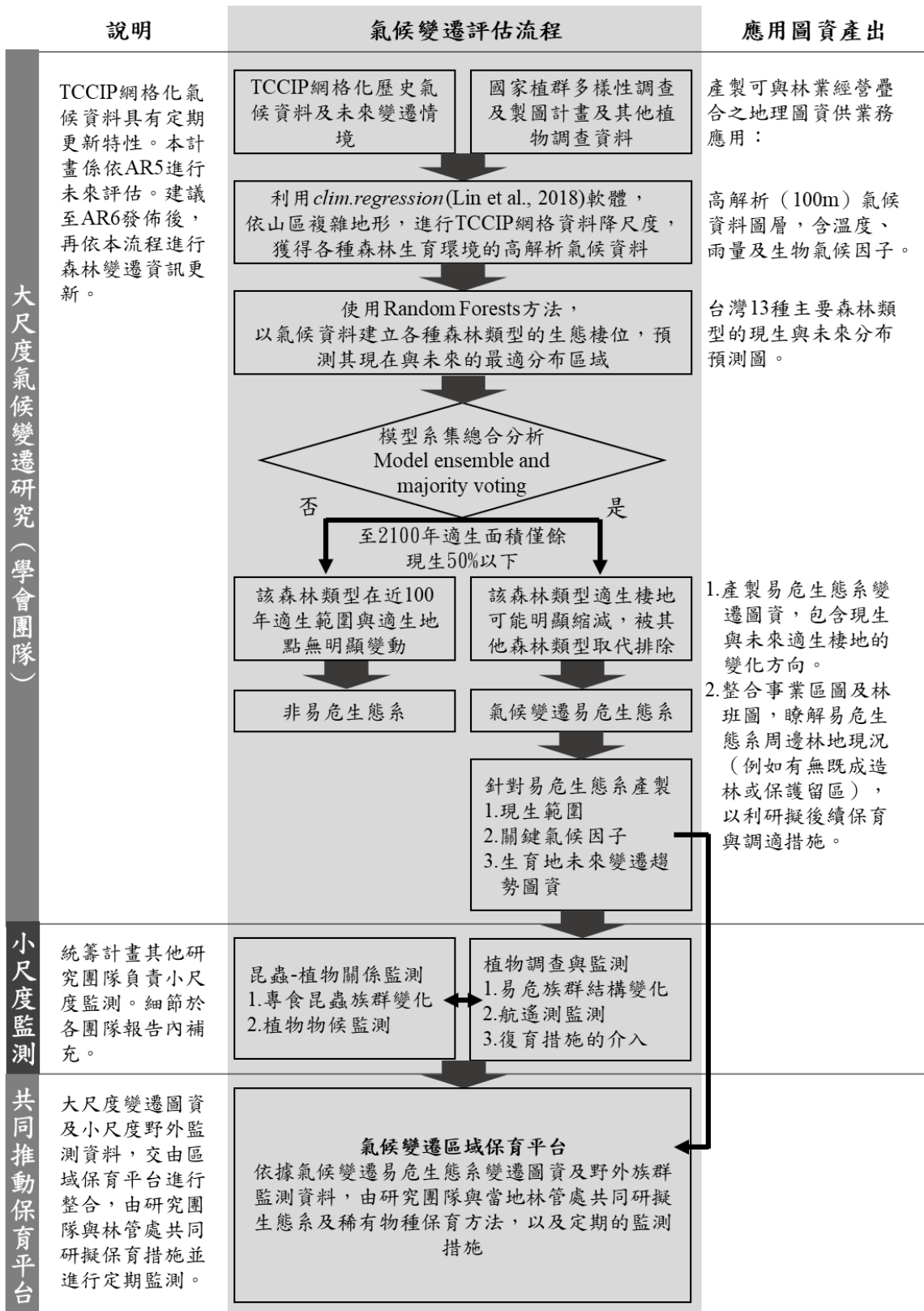


圖2.1 本計畫流程圖，以及與其他團隊及區域保育平台的整合情形。

## 2.2 氣候降尺度模型 *clim.regression*

臺灣地區之氣候觀測記錄雖已有百年歷史，然而大部分氣象站均設置於平地，山區設站歷史較久者僅有玉山、阿里山、鞍部等地，1980年以後測站數量雖有增加，但僅能構成點狀之氣象觀測記錄，對整體山區而言資料仍然貧乏。TCCIP 雖然整合了中央氣象局、經濟部水利署與臺灣電力公司等合計 1,614 個測站的氣象觀測數據，產生涵蓋 1960-2012 年的全臺 5 公里解析度之月降雨、平均溫度、最高溫及最低溫網格資料 (Weng and Yang, 2012)。該資料為山區提供了基本的氣候參考數據，然而就生態研究需求及山區地形與微氣候變化程度而言，5 公里解析度仍然過粗，無法呈現微氣候的局部差異。

山區氣候觀測資料缺乏的問題不僅發生在臺灣，而是全球各國皆面臨的相同問題。近 10 年來，全球各大氣候資料庫經過整合及空間推估與降尺度分析，產生了多種氣候資料圖集(如 WorldClim 資料庫)提供地圖測繪、物種分布預測及大尺度氣候研究等相關領域使用，其空間解析度包含 30 弧度-秒、2.5 弧度-分、5 弧度-分不等 (Hijmans *et al.*, 2005); 從大尺度研究角度而言，全球氣候資料庫確實彌補了山區資料不足的缺口，然而資料空間解析度的提升，仍是所有研究人員致力改善的目標。

本計畫利用 R 語言及 TCCIP 五公里網格氣候資料，開發 *clim.regression* 程式 (Lin *et al.*, 2018)，達到對臺灣地區氣候降尺度及優化的效果。*Clim.regression* 係以 TCCIP 提供之 5 公里解析度圖層為原始資料，透過目標網格及相鄰 8 網格構成之局部區域 (圖 2.2 A)，利用水平方向雙線性插值 (bilinear interpolation)，由目標點  $p$  的相鄰網格中心點氣候觀測值，計算目標點  $p$  的水平方向氣候估計值(圖 2.2 B); 而後利用相鄰 9 網格重複取樣之局部動態迴歸分析 (dynamic local regression) (圖 2.2 C) 獲得氣溫海拔遞減率校正值 (圖 2.2 D)，產生無固定尺度 (scale-free) 之氣候推估數據。由於該模式具備無固定尺度之特性，使用者可依據持有之座標點位產生對應之氣候資料，適合氣候變遷領域內有關生態學及植物地理分布研究者使用。

有關氣候降尺度模型的準確度驗證部分，選定了林業試驗所福山苗圃、蓮華池研究中心、六龜研究中心及太麻里研究中心、畢祿溪研究站等 5 處地點。該 5 處地點均設有長期氣象測站，且觀測資料未曾交予中央氣象局及國家防災科技中心，可視為與 TCCIP 五公里氣候網格互為獨立的歷史氣象觀測資料，適合做為 *clim.regression* 降尺度模型準確度驗證使用。此外，另選用中央氣象局直屬之高雄、台東、玉山等 10 處測站長期資料進行相同的驗證程序，據以比較獨立於 TCCIP 以外樣本及中央氣象局監測資料之模式推估誤差。驗證方式係依據各驗證測站座標位置，利用 *clim.regression* 產生連續年度之各月份氣溫及雨量推估數據，並當期之氣候實測數值進行差異比較。驗證項目包含：月平均氣溫、月平均高溫、月平均低溫及月累積降雨等 4 項。

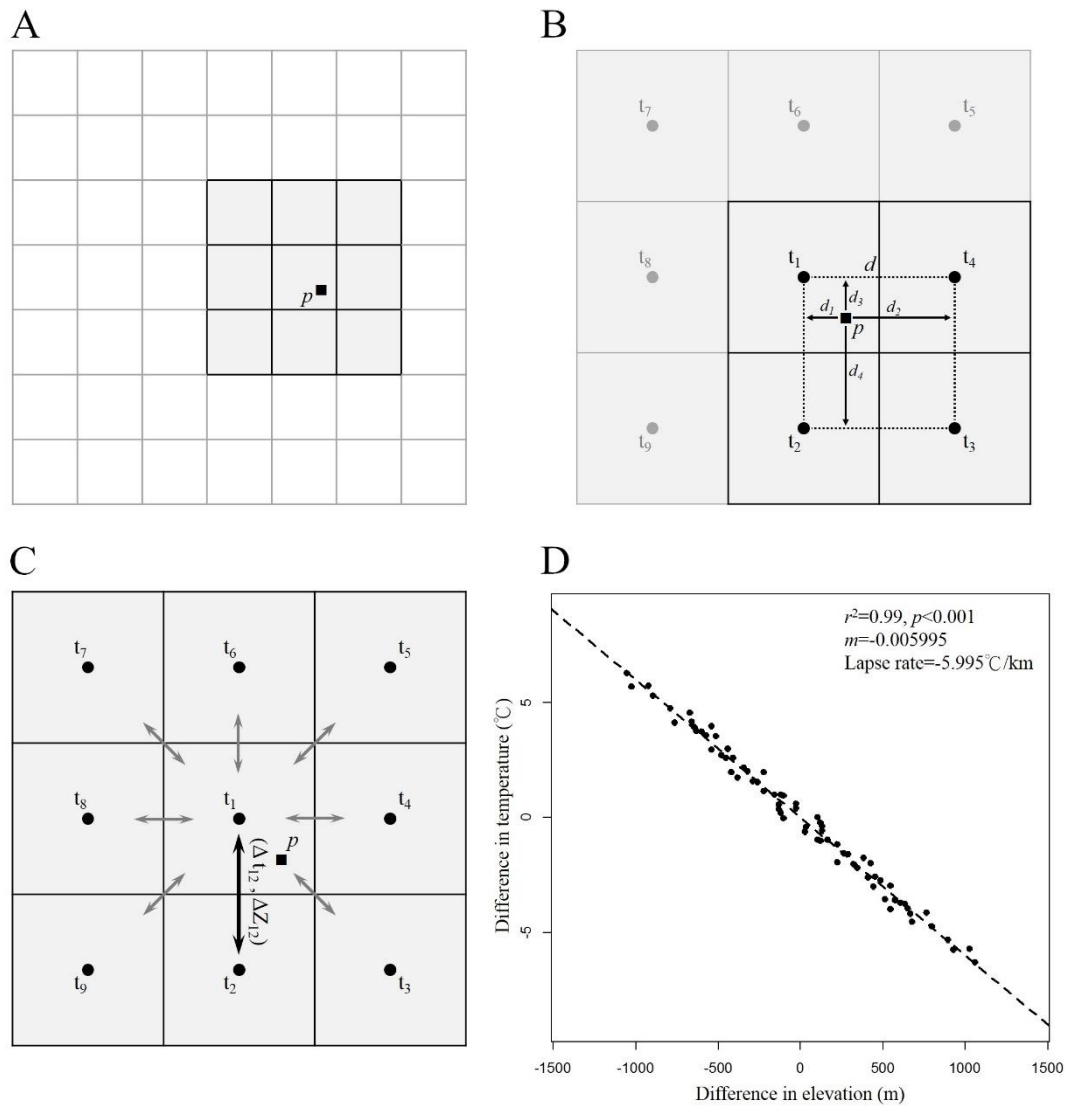


圖2.2 *clim.regression* 軟體的氣候降尺度四步驟。(A) 針對欲進行氣候降尺度推估的目標點  $p$ ，進行周邊9網格萃取，做為動態局部迴歸的樣本。(B) 利用水平方向雙線性插值法，由最鄰近四網格中心點觀測值，從水平方向推估  $p$  點的氣候狀況。(C) 利用九網格的成對取樣，計算區域內的「海拔-氣候變化」關係。(D) 以氣溫為例，兩兩成對網格的「海拔-氣溫變化」數對經簡單線性迴歸，獲得當地的氣溫遞減率 (lapse rate)，做為依據海拔高差修正  $p$  點氣候估測值的參數。



圖2.3 採用15處測站的長期氣候觀測資料，進行 $clim.regression$ 的準確度驗證。

表2.1 驗證 $clim.regression$ 降尺度模式採用的15處氣象測站及歷史資料期間。

Subordination	Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Observation period
Central Weather Bureau (CWB) Incorporated by TCCIP	Kaohsiung	120.32	22.57	2	1961-2009
	Taitung	121.15	22.75	9	
	Hualien	121.61	23.98	16	
	Hengchun	120.75	22.00	22	
	Keelung	121.74	25.13	27	
	Taichung	120.68	24.15	84	
	Anbu	121.53	25.18	826	
	Sunmoon Lake	120.91	23.88	1018	
	Alishan	120.81	23.51	2413	
	Yushan	120.96	23.49	3845	
Taiwan Forestry Research Institute (TFRI) independent from TCCIP	Taimali	120.98	22.60	120	1980-2009
	Liukuei	120.63	23.00	230	1999-2009
	Fushan	121.60	24.76	634	1992-2003
	Lienhuachih	120.90	23.93	666	1999-2009
	Piluhsi	121.31	24.23	2150	1991-2009

本計畫另取得 TCCIP 提供之 5 公里網格日尺度資料。日尺度資料之空間解析度與月尺度相同，但網格中心點儲存之資料內容為 1986-2014 年每日之降水量、日均溫度、日最高溫度及日最低溫度，由周圍測站之距離、高度、方位角等權重參數，由測站實測值進行空間內插獲得 (Weng and Yang, 2012)。

日尺度網格資料僅具備日降水量、日均溫度、日最高溫度及日最低溫度 4 個氣候參數，缺乏霜雪及輻射等氣象紀錄。本計畫另從颱洪中心建置之「大氣水文資料庫」取得 30 個中央氣象局局屬測站及 513 個自動測站之逐小時氣象資料，觀測期間為設站日至 2017 年底。逐時監測資料具有大量氣候細節特徵，包含氣溫、氣壓、相對濕度、平均風速、平均風向、降水量、日照時數等，將作為本研究衍生生物氣候因子的來源數據 (圖 2.4)。

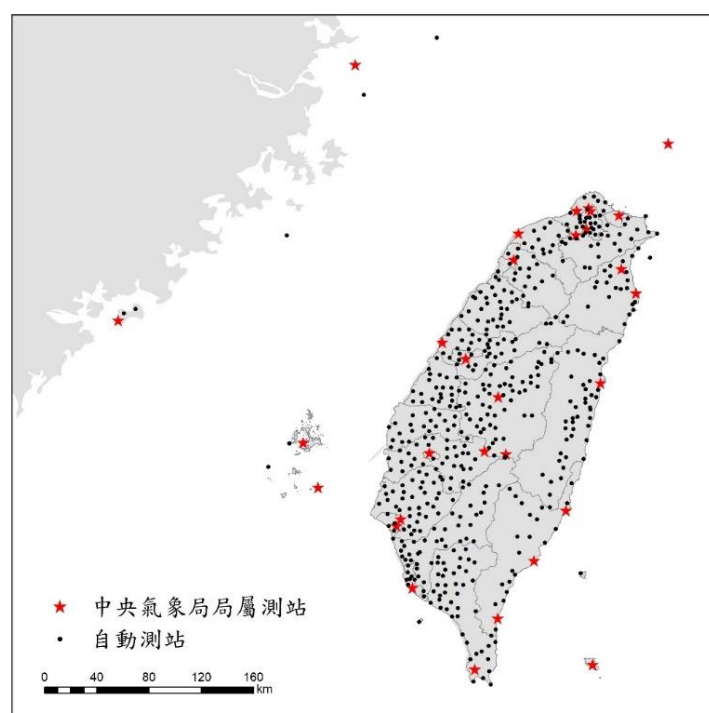


圖2.4 大氣水文資料庫內30個中央氣象局局屬測站及513個自動測站位置，做為配合TCCIP日尺度資料，衍生生物氣候因子的來源數據。

Wang *et al.* (2016a) 曾提出日積溫與月均氣溫之間係非線性關係，但在觀測樣本數足夠的狀況下，可藉由分段函數 (piecewise function) 找出日積溫與月均氣溫之關係式，且最適函數對觀測資料之  $r^2$  可達 0.95-0.99，成為利用月尺度介量間接推估日尺度介量的重要技術 (圖 2.5)。

本研究仿照 Wang *et al.* (2016a) 概念，使用 TCCIP 之 1986-2005 年逐日 5 公里網格資料，採  $0^{\circ}\text{C}$  以下為冷積門檻、 $5^{\circ}\text{C}$  以上為生長積溫門檻，計算每一網格各月份之冷積及生長積溫數值，作為統計模型之應變量 ( $y$ )；再利用日尺度資料，加總計算該網格之月均溫、月均高溫、月均低溫及月累計降水，作為統計模型之自變量 ( $x$ )。由於 Wang *et al.* 已表明  $y$  與  $x$  並非線性關係，故本研究採用隨機森林 (Random Forests) 方法 (Liaw and Wiener, 2002)，求取  $y$  與  $x$  的最適模型。隨機森林是一個包含多個決策樹的分類器，可以處理大量的輸入變數並學習高度不規則的模式；在本研究案例內，這個方法可以快速地從日尺度的網格化資料內，歸納積溫與當月氣溫及當月降水的關係，並形成可利用逐月氣候資料推估積溫之統計模型物件。再套入 *clim.regression* 產製的無固定尺度 (scale-free) 逐月溫度、雨量資料，即可獲得與 *clim.regression* 輸出圖層相同解析度的月積溫推估結果 (output)。

除氣候因子以外，本計畫另將坡向、稜線距離、地形凹凸度等地形特性，納入植群分布分析的備選因子。地形因子係以 30 公尺解析度之臺灣表面模型 (DSM) 為基礎，利用 ESRI ArcGIS 軟體轉換為：(1) 因應臺灣季風特性，衍生「東北-西南 (東北為  $90^{\circ}$ 、西南為  $-90^{\circ}$ 、西北及東南均為  $0^{\circ}$ )」坡向因子；(2) 稜線距離；(3) 山脊-山谷地形指標 (planform，山脊為正、山谷為負、平坡為零，圖 2.6)；據以分析森林植群的地形特性。

綜上各項來源，*clim.regression* 合計產生 105 種氣候與環境因子，作為建構不同森林類型棲位模型的預測變量 (predictors) (表 2.2)。



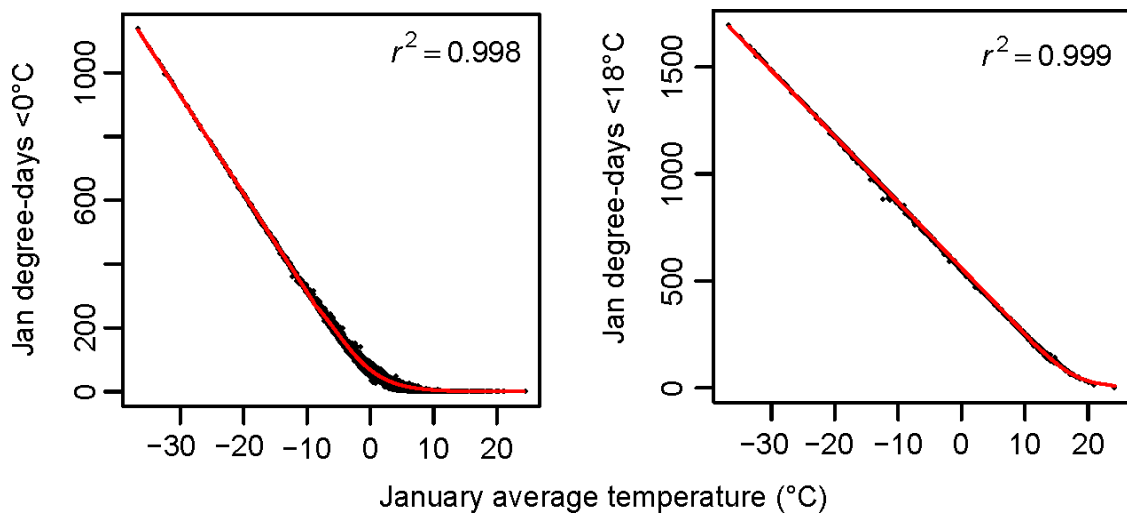


圖 2.5 以一月氣溫為例，利用 piecewise function 求取 0°C 及 18°C 以下日積溫與當月平均氣溫之迴歸關係 (Wang *et al.*, 2016a)。

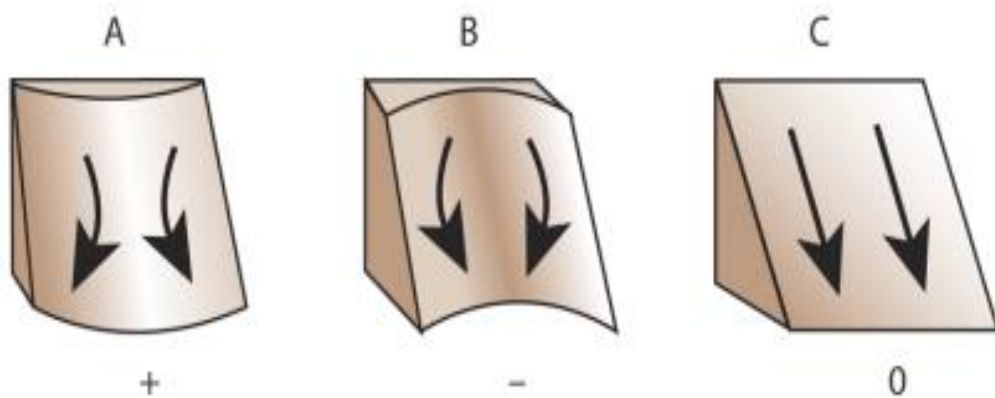


圖 2.6 地形凹凸度因子 (planform) 示意圖。本因子係利用數值表面模型 (DSM) 計算而來，對於位於突出而暴露的凸稜，以正值表示，且數值越大代表相對突出程度越高 (A)；若為兩側凹陷的溪谷或山谷地形，則以負數代表其相對凹陷程度 (B)；若地形無凹凸現象，則數值為零 (C)。

表 2.2 本研究採用之氣候與地形因子。

氣候或地形因子	說明	單位	變量數
planform	地形凹凸度，說明見圖 2.2	純數值	1
NEAR_DIST	與最近稜線的距離	meter	1
percip_jan–percip_dec	月累積降水	mm	12
MAP	年累積降水	mm	1
MSP	夏季降水	mm	1
WPR	冬季降水之全年占比 PPT_DJF/MAP (Li et al., 2013)	ratio	1
Tmin_jan–Tmin_dec	月平均低溫 (1 至 12 月)	°C	12
Tave_jan–Tave_dec	月平均氣溫 (1 至 12 月)	°C	12
MAT	年均溫	°C	1
Tmax_jan–Tmax_dec	月平均低溫 (1 至 12 月)	°C	12
TD	年溫差 Tave_jul minus Tave_jan	°C	1
AHM	全年熱濕指數 (MAT+10) / (MAP/1000)	°C/mm	1
SHM	夏季熱濕指數 (Tmean07) / (MSP/1000)	°C/mm	1
WI	溫量指數 Annual summation of mean monthly temperature higher than 5°C (Su, 1984)	°C	1
GDD1–GDD12	Monthly growing-degree-days	°C	12
AGDD2–AGDD12	Accumulated monthly growing-degree-days	°C	11
CDD1–CDD12	Monthly chilling-degree-days	°C	12
ACDD2–ACDD12	Accumulated monthly chilling-degree-days	°C	11
aspect_adj	1. 調整後坡向，數值介於-90 至 90 間 2. 圓周方位角 315° (西北) 及 135° (東南)轉換為 0°;圓周方位角 45° (東北)轉換為 90°;圓周方位角 225° (西南)轉換為-90°		1
<b>合計</b>			<b>105</b>

## 2.3 隨機森林 (Random Forests) 生態棲位模型建立方法

國家植群多樣性調查計畫於全臺天然林共完成約 4000 處森林樣區，包含樣區內所有樹木種類、個體胸徑、樹高之測量，以及灌木、草本、爬藤物種之名錄與覆蓋度，計算後轉化為詳細的組成表。按 Li et al. (2013) 對國家植群多樣性調查計畫資料的分析，將全部樣區歸納為 21 個森林類型 (forest types)，使用 Cocktail determination key 建立半自動分類方法，同時對 21 個植群類型提出其主要組成物種、特徵物種及環境因子概述。然而，在 Li et al. 未發表文獻中，曾將國家植群多樣性調查計畫的 3348 個樣區，依物種組成分類為 7 群級、21 群團、91 群叢。該未發表文獻所述「21 群團」與 Li et al. (2013) 描述的 21 個森林類型實為相等。因此，本研究認定 Li et al. (2013) 年發表的 21 個森林類型實為群團單元 (alliance)，但當時僅以森林類型 (forest types) 稱之，而未依植群命名法則提出正式的群團名稱。為忠於原發表文獻，本計畫仍沿用「森林類型」一詞。

參考 Li et al. (2013) 研究報告，抽取其中與氣候有關的 6 群級、13 群團、70 群叢分類單元及其對應樣區，做為建立氣候棲位模型的原始資料。至於分布狀況與氣候相關程度較低的植群類型，例如與崩塌及植物演替較相關的二葉松、赤楊植群類型；與地質因子相關程度較密切的高位珊瑚礁植群類型、太魯閣石灰岩植群類型；以及海岸林植群類型等，均不納入本計畫研究對象。整理完畢的植群分類架構及各階層樣區數量，詳如表 2.3。

表 2.3 本計畫整理之植群分類架構及各分類階層之對應樣區數量。

樣區數	群級	群團 (森林類型)	群叢代號	特徵物種
<b>348</b>	CLA10	High-mountain coniferous woodlands and forests		
<b>107</b>	C1A01	亞高山針葉灌叢及森林		
31			WO10010100	<i>Dryopteris alpestris</i> - <i>Juniperus squamata</i>
29			WO10010200	<i>Aconitum fukutomei</i> - <i>Juniperus squamata</i>
47			WO10010300	<i>Cystopteris fragilis</i> - <i>Abies kawakamii</i>
<b>241</b>	C1A02	冷杉-鐵杉上部山地針葉林		
28			FO10020100	<i>Yushania niitakayamensis</i> - <i>Abies kawakamii</i>
79			FO10020200	<i>Tsuga formosana</i> - <i>Abies kawakamii</i>
37			FO10020300	<i>Yushania niitakayamensis</i> - <i>Tsuga formosana</i>
27			FO10020400	<i>Pinus armandii</i> - <i>Tsuga formosana</i>
54			FO10020500	<i>Rhododendron pseudochrysanthum</i> - <i>Tsuga formosana</i>
16			FO10020600	<i>Photinia niitakayamensis</i> - <i>Picea morrisonicola</i>
<b>1561</b>	CLA20	Subtropical mountain zonal forests		
<b>564</b>	C2A03	檜木山地霧林		
14			FO20030100	<i>Machilus thunbergii</i> - <i>Chamaecyparis formosensis</i>
19			FO20030200	<i>Pasania hancei</i> v. <i>ternaticupula</i> - <i>Picea morrisonicola</i>
50			FO20030300	<i>Rhododendron formosanum</i> - <i>Chamaecyparis obtusa</i> v. <i>formosana</i>
94			FO20030400	<i>Rhaphiolepis indica</i> v. <i>tashiroi</i> - <i>Rhododendron formosanum</i>
69			FO20030500	<i>Vaccinium japonicum</i> v. <i>lasiostemom</i> - <i>Tsuga chinensis</i> v. <i>formosana</i>
103			FO20030600	<i>Machilus thunbergii</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
71			FO20030700	<i>Symplocos arisanensis</i> - <i>Cyclobalanopsis morii</i>
56			FO20030800	<i>Cyclobalanopsis sessilifolia</i> - <i>Chamaecyparis formosensis</i>
16			FO20030900	<i>Neolitsea acuminatissima</i> - <i>Pinus morrisonicola</i>
21			FO20031000	<i>Litsea elongata</i> v. <i>mushaensis</i> - <i>Cyclobalanopsis morii</i>
33			FO20031100	<i>Pasania kawakamii</i> - <i>Pseudotsuga wilsoniana</i>
18			FO20031200	<i>Sassafras randaiense</i>
<b>57</b>	C2A04	水青岡山地落葉霧林		
6			FO20040100	<i>Pasania konishii</i> - <i>Fagus hayatae</i>
24			FO20040200	<i>Carex filicina</i> - <i>Fagus hayatae</i>
10			FO20040300	<i>Michelia compressa</i> - <i>Fagus hayatae</i>
14			FO20040400	<i>Chamaecyparis obtusa</i> v. <i>formosana</i> - <i>Fagus hayatae</i>
3			FO20040500	<i>Enkianthus perulatus</i> - <i>Fagus hayatae</i>
<b>321</b>	C2A05	櫟屬山地闊葉林		
22			FO20050100	<i>Alnus formosana</i> - <i>Machilus japonica</i>

24		FO20050200	<i>Machilus japonica</i> - <i>Chamaecyparis formosensis</i>
76		FO20050300	<i>Oreocnide pedunculata</i> - <i>Machilus japonica</i>
18		FO20050400	<i>Camellia brevistyla</i> - <i>Machilus japonica</i>
28		FO20050500	<i>Lithocarpus lepidocarpus</i> - <i>Machilus zuihoensis</i> Hayata v. <i>mushaensis</i>
16		FO20050700	<i>Pseudotsuga wilsoniana</i> - <i>Tsuga chinensis</i> v. <i>formosana</i>
26		FO20050800	<i>Machilus japonica</i> - <i>Picea morrisonicola</i>
111		FO20050900	<i>Turpinia formosana</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
<b>312</b>	<b>C2A06</b>		<b>槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林</b>
55		FO20060100	<i>Euonymus laxiflorus</i> - <i>Engelhardia roxburghiana</i>
42		FO20060200	<i>Limlia uraiana</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i> f. <i>sessilis</i>
56		FO20060300	<i>Tricalysia dubia</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
16		FO20060400	<i>Daphniphyllum glaucescens</i> s. <i>oldhamii</i> v. <i>kengii</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
93		FO20060500	<i>Meliosma callicarpifolia</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
37		FO20060600	<i>Gordonia axillaris</i> - <i>Engelhardia roxburghiana</i>
3		FO20060700	<i>Ormosia formosana</i> - <i>Calocedrus macrolepis</i> v. <i>formosana</i>
10		FO20060800	<i>Michelia compressa</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
<b>209</b>	<b>C2A07</b>		<b>雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林</b>
122		FO20070100	<i>Turpinia ternata</i> - <i>Machilus japonica</i> v. <i>kusanoi</i>
53		FO20070200	<i>Glycosmis citrifolia</i> - <i>Machilus japonica</i> v. <i>kusanoi</i>
34		FO20070300	<i>Hydrangea angustipetala</i> - <i>Machilus japonica</i>
<b>98</b>	<b>C2A08</b>		<b>榕楠山麓闊葉林</b>
70		FO20080100	<i>Murraya paniculata</i> - <i>Ficus irisana</i>
28		FO20080200	<i>Radermachera sinica</i> - <i>Lagerstroemia subcostata</i>
<b>317</b>	<b>CLA30</b>		<b>Tropical mountain zonal forests</b>
<b>40</b>	<b>C3A09</b>		<b>柯屬-杜英屬山地霧林</b>
13		FO30090100	<i>Ilex uraiensis</i> - <i>Rhododendron formosanum</i>
20		FO30090200	<i>Helicia rengetiensis</i> - <i>Machilus japonica</i>
7		FO30090300	<i>Pasania dodoniifolia</i> - <i>Machilus thunbergii</i>
<b>207</b>	<b>C3A10</b>		<b>鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林</b>
11		FO30100100	<i>Dysoxylum hongkongense</i> - <i>Drypetes karapinensis</i>
11		FO30100200	<i>Amentotaxus formosana</i>
46		FO30100300	<i>Cinnamomum subavenium</i> - <i>Litsea acutivena</i>
69		FO30100400	<i>Sloanea formosana</i> - <i>Drypetes karapinensis</i>
32		FO30100500	<i>Ilex cochinchinensis</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
18		FO30100600	<i>Castanopsis fabri</i>

20		FO30100700	<i>Castanopsis indica</i> - <i>Schefflera octophylla</i>
<b>70</b>	<b>C3A11</b>		柃木屬-楨楠屬山麓闊葉林
31		FO30110100	<i>Ficus benjamina</i>
25		FO30110200	<i>Dysoxylum hongkongense</i> - <i>Bischofia javanica</i>
14		FO30110300	<i>Glochidion zeylanicum</i> - <i>Wendlandia uvariifolia</i>
<b>40</b>	<b>CLA50</b>	Tropical mountain azonal forests	
<b>40</b>	<b>C5A13</b>		八角茴香-桐屬熱帶季風林
5		FO50130100	<i>Syzygium formosanum</i> - <i>Keteleeria davidiana</i> v. <i>formosana</i>
24		FO50130200	<i>Antidesma hiiranense</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
11		FO50130300	<i>Euonymus tashiroi</i> - <i>Drypetes karapinensis</i>
<b>177</b>	<b>CLA60</b>	Subtropical mountain azonal woodlands and forests	
<b>177</b>	<b>C6A15</b>		烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林
30		FO60150100	<i>Hydrangea angustipetala</i> - <i>Myrsine seguinii</i>
23		FO60150200	<i>Symplocos glauca</i> - <i>Castanopsis cuspidata</i> v. <i>carlesii</i>
19		FO60150300	<i>Cyclobalanopsis sessilifolia</i> - <i>Litsea acuminata</i>
19		FO60150400	<i>Vaccinium emarginatum</i> - <i>Cyclobalanopsis longinux</i>
53		FO60150500	<i>Pyrenaria shinkoensis</i> - <i>Machilus thunbergii</i>
2		FO60150600	<i>Melastoma candidum</i> - <i>Keteleeria davidiana</i> v. <i>formosana</i>
31		FO60150700	<i>Bretschneidera sinensis</i> - <i>Machilus thunbergii</i>
<b>2443</b>	<b>合計</b>		

棲位模型 (niche modeling) 是利用統計過程，建立生物反應 (response) 與特徵值 (predictors) 的關係，據以描述生物的時空間分布或生態過程；藉由新的特徵值導入，例如氣候變遷情境或新地點的氣候與環境參數代入，可依據該統計關係推測生物的可能反應，諸如適存程度、潛在分布、潛在生長量等。然而，在實際狀況中，生態數據經常是多維 (multi-dimension) 的，而反應變量與特徵值可能具有連續特性、亦可能為離散特性，特徵值間也可能存在複雜的相互作用 (例如共線性)，且需解釋的生態關係可能為非線性，極為複雜，而非傳統的迴歸分析等方法能夠處理。

隨機森林是近年一個發展迅速的方法，以決策樹 (decision tree) 為基礎，經由隨機而多重的決策樹組建與集成 (ensemble)，可以有效解決上述問題，並包含同時處理分類 (classification) 與迴歸 (regression)

的能力。決策樹是數據探勘常用的一種方法，以資料母群體為根節點，在每一層的分支點對各因子進行變異數分析，找出變異量最大的變項作為分割準則。在這個方式的迭代進行下，將獲得樹型結構，樹中每個節點表示某個決策因子與其決策門檻值，而每個二元分支代表該決策對應之資料屬性值。最後，沿著根節點、分支點至枝條末端葉節點的過程，描述出了一組決策程序對應之數值分布或資料分類結果。

隨機森林則是一個包含多個決策樹的分類器，利用自助法 (bootstrap) 重複抽取樣本及變量組成訓練資料集 (training dataset) 與建構決策樹的多次重複過程，將各決策樹結果進行眾數計算 (voting)，經由合併每棵樹的預測結果來減少預測的方差，提高在測試資料集 (testing dataset) 的性能表現，是機器學習法 (machine learning) 用於分類和迴歸的最成功的模型之一。雖然在類別資料的分析與應用上，尤其是物種出現與否的預測，隨機森林的訓練資料集需要同時具備出現與不出現紀錄 (presence-absence data)，造成建置訓練資料的些許限制，然而，這個方法通常被認為有下列優點：

1. 自助法過程引入隨機特性，對於變量及樣本進行重複取樣，使得隨機森林模型不容易陷入過擬合，在預測應用時具有較高的彈性，且具有較好的抗噪能力。
2. 能夠處理高維度的資料，不需進行變量篩選，對資料集的適應能力強：既能處理離散型資料，也能處理連續型資料。尤其面對大數據集，此方法可以處理成千上萬的輸入變量，即使預測變量數量超過觀測值數據也同樣有效。
3. 對於不平衡數據集的適應能力佳，可以得到變數重要性排序，對多元共線性不敏感。
4. 訓練完成的模型可進行保存，並擴展至未給予類別標籤的數據，對該資料集進行非監督分類，達到預測的效果。

依據隨機森林原理，針對本研究資料建立分析流程如圖 2.5 及圖 2.6。按照植群計畫所有樣區的森林植群分類結果，建立每一種森林群

團的「出現」與「不出現」資料集。由於生態調查數據經常存在「不出現資料」遠高於「出現資料」的狀況，因此藉由隨機抽樣過程降低訓練資料集內「不出現資料」的比重，以 absence/presence ratio 介於 1 至 2 間為原則，以顧及樣本平衡及提高隨機森林的準確率。例如在表 2.3 所列的全部 2443 樣區中，八角茴香-桐屬熱帶季風林僅有 40 處樣本，相對而言，即有 2403 處不出現樣本。若以 40:2403 比例建構隨機森林訓練樣本，將造成模型極度偏向於「不出現」的一端，導致預測結果的偏誤；依據本計畫的取樣修正方法，將以 40 個出現樣本、搭配隨機抽取的 40-80 不出現樣本進行模型建構，以顧及總體樣本的平衡新。圖 2.7 為一次隨機森林的建置過程，可依據當次建模過程隨機抽取的 absence/presence 訓練樣本，獲得環境因子的重要值及相對應的分布預測結果。然而，平衡取樣過程將損失大量不出現樣本的環境資訊，僅能涵蓋總體樣本的一部分，故憑單一次隨機森林分析，不易獲得足以代表整體資料特性的預測模型。因此，本研究另設計了圖 2.8 流程進行多重隨機森林的集成 (ensemble)，利用集成的結果，針對單一群團獲得與原始資料相近的分布預測。重複上述方法，以多重隨機森林預測臺灣山區每一個地理網格 (解析度 100 公尺) 的 13 個森林群團適存度，再經圖 2.9 流程決定該網格為何種森林類型，以及與鄰近森林群團的混淆程度。



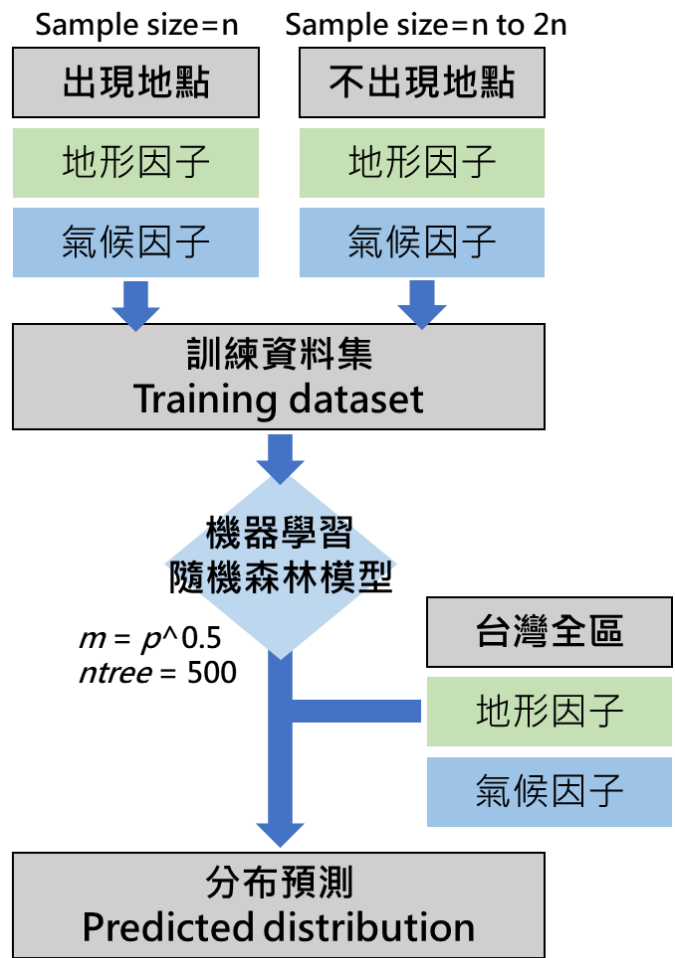


圖 2.7 本研究建立之隨機森林架構，包含模型訓練與分布預測過程。本流程輸出為單一隨機森林的預測結果，該結果再納入圖 2.5 流程，成為多重隨機森林總和評斷的來源資料。

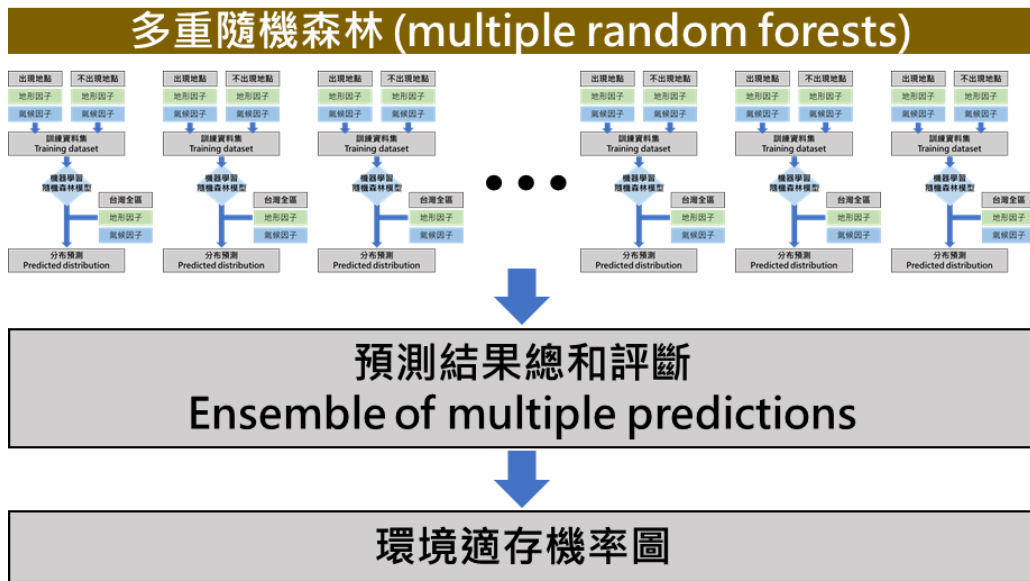


圖2.8 多重隨機森林示意。以平均權重對多組隨機森林輸出進行集成，獲得預測結果的機率分布。以物種分布預測為例，即是獲得該物種在地理空間的適存機率。

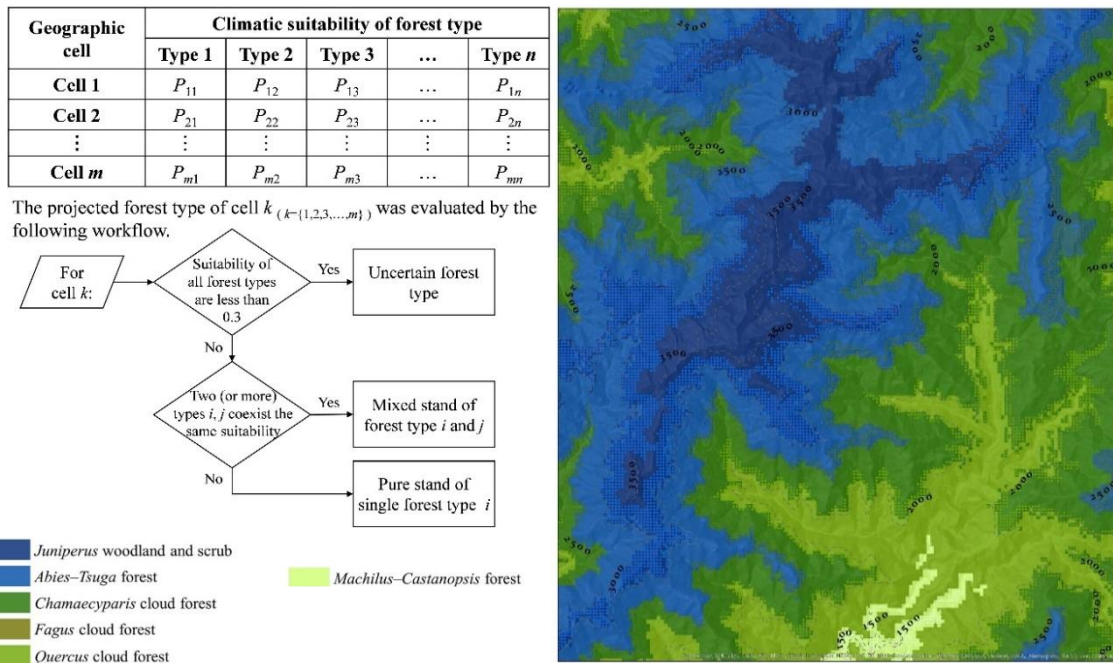


圖2.9 群團模型合併流程。對各網格預測13種森林群團的適存機率，單一群團呈現最高機率值者，則定義為單一植群型，若多群團呈現相同機率者，則認定為混淆植群型 (Lin *et al.*, 2020)。

## 2.4 模型系集與總合 (Model ensemble and majority voting)

IPCC 對外提供的未來氣候資料，主要是透過全球大氣-海洋耦合模式 (coupled atmosphereocean general circulation models, AOGCMs) 計算而得。它考慮了大氣運動、表面洋流、溫鹽環流、以及大氣/海洋交互作用，除此之外，大氣化學、植被及土壤的影響也都考慮在內，是目前模擬溫室氣體影響未來氣候最先進的工具 (徐與林，2008)。然而，各種耦合模式的適用區域及因子權重不同，因此各種模式對同一區域的未來氣候預測，經常構成一個數值區間，而非單一的預測值。以 TCCIP 提供的未來氣候資料為例，就包含了 49 種大氣海洋環流模式 (GCMs) 的預測結果 (表 2.10)。Lin and Tung 於 2017 年曾利用加權平均排序法 (Weighted average ranking, WAR) 及系統缺失點位法 (Demerit point system, DPS) 進行各種 GCM 於臺灣地區的適用程度評估，認為 CSIRO-Mk3-6-0、HadGEM2-AO、CESM1-CAM5、MIROC5、CCSM4、GISS-E2-R 等六種大氣環流模型之預測結果與臺灣地區的觀測資料最相符，可作為臺灣地區的適用備選模式。本研究依據 Lin & Tung 之結論，採行該研究建議之 6 種 GCM 模式，以基礎年期、2025、2035、2050、2065、2080 及 2090 等年度，利用 *clim.regression* 對未來氣候資料的降尺度處理。由於 TCCIP 未來氣候推估資料係基礎年期 (baseline) 之溫度及雨量相對變化量，且格式與 1960 年至 2012 年歷史氣候資料相近。因此，*clim.regression* 程式經調整後，可先將基礎年期資料與未來年度變化量依網格加總，再經由水平雙向插值計算及動態局部迴歸方法，進行未來年期的溫度、雨量的降尺度運算，圖 2.13 即為 *clim.regression* 利用 TCCIP 資料，以 100 公尺解析度推估臺灣中部山區 AR5 基礎年期 (1986-2005) 及本世紀末 (2100) 的年均溫分布情形。

然而，6 種 GCM 模式涵蓋了不同程度的降水與溫度變化，導致隨機森林產生不同的森林植群變化預測結果。當面對大量的、具有差異性的預測結果時，由於每一種結果都存在可能性，若逕以「平均法」計算，可能導致忽略極端狀態下的系統變化結果；而「系集 (ensemble)」與「多數決 (majority-voting)」則是處理大量可能狀態集合的常用方

法。系集與多數決的原理很簡單：團結力量大。雖然每種未來情境下的森林分布預測都可能未完美涵蓋未來的氣候狀態，但是藉由集合眾預測模型的結果，各取所長，同時汲取各種模式的優點，再利用統計方法產出最具信心的結果，將更有機會獲得接近未來變化的預測結果。此外，系集的分析過程尚包含「散度」、「平均值」與「極端值」等資訊，能夠完整表達多種情境下森林變遷的方向與不確定範圍，對於決策參考有極大的幫助。

本計畫共使用 6 種 GCM 的氣候資料，進行臺灣地區森林的未來變遷分析。理論上，每個 GCM 都指出一種未來的氣候可能變化方向，均具有相等的參考價值。故本研究在系集與多數決過程中，以等量權重方式，觀察不同 CGM 下的森林分布預測，找出多數模型認可的變遷方向，代表發生機率最高的森林變遷趨勢。實際操作部分，本計畫依據 6 種 GCM 獲得的各類型森林適生棲地預測結果，對各網格進行多數決計算，每個網格分別取得 0 分（每個 GCM 皆判斷為非適生棲地）至 6 分（每個 GCM 皆判斷為適生棲地），據以比較各類型森林適生棲地的時間與空間變化，評定氣候變遷下的受衝擊程度。

### 三、結果與討論

本節將計畫成果分為四節說明，分別為：「氣候降尺度模型 *clim.regression* (3.1)」、「現行與未來氣候下的臺灣森林類型分布(3.2)」、「易危森林類型的模型系集總合與未來地理分布 (3.3)」、「計畫成果圖資應用與提供 (3.4)」。

前 2 節以過去年度計畫成果為主，但增加對於地形因子及氣候因子重要性排序，以及深入估算各森林類型的適生面積與海拔的變異範圍；後 2 節則利用前期研究成果，配合 GIS 及林業經營相關圖資，探討不同森林類型的易危程度與可行的保育措施。

#### 3.1 氣候降尺度模型 *clim.regression*

臺灣 TCCIP 氣候網格資料係以 5 公里為單元，由全臺 1,614 個測站長期觀測資料推估而得，準確度優於 WorldClim 及 PRISM 等全球資料庫對臺灣地區的推估。為使 TCCIP 原始資料獲得最大的發揮應用，本研究參考 ClimateAP 發表文獻 (Wang *et al.*, 2017)，以 R 程式語言編寫相同功能之氣候模式 *clim.regression*。*Clim.regression* 式可依使用者輸入之座標，直接讀取 TCCIP 公告之臺灣地區 1960 年至 2012 年五公里網格歷史氣候資料，產生目標地點之氣候推估數據，輸出包含月尺度、季尺度及年平均等 105 組氣候變量 (表 2.3)。

*Clim.regression* 是一個自由尺度 (scale-free) 且能與山區地形對應的氣候降尺度模型，由於雙線性插值的連續平滑特性，以及利用動態局部迴歸產生的氣候遞減率進行高程校正，可隨山區地形起伏變化，進行精細的氣候校正推估。結果顯示，臺灣地區的年平均氣溫 (MAT) 範圍約介 1-28°C，呈現從低海拔向高山、由南向北遞減的趨勢。*clim.regression* 的產出圖資包含了詳細的溫度空間特徵，如埔里盆地的溫暖氣候，以及林口台地、八卦台地等相對涼爽的台地氣候環境，皆可在高解析度氣候圖層內獲得顯示 (圖 2.10 A-B)。年累積降水 (MAP) 的空間分佈則與年均溫不同，高解析年降水圖層顯示臺灣東北部的台北和宜蘭山區，以及中央山脈西南側的高雄、屏東山區，是臺灣降水最豐沛的地點，甚至某些年降水量可達 6000 毫米的熱點地區，亦在降尺度圖層中被清晰地反映出來 (圖 2.10 C-D)。

與原始的 5 公里網格化氣候數據相比，降尺度後的氣候圖層具備更多的地形資訊（圖 2.10）。自由尺度方法的優點，除了可為大尺度的生態氣候區分類、氣候生態棲位建模和預測等研究提供連續（continuous）、無接縫（seamless）及高解析度（high-resolution）的氣候圖層；亦可針對特定地點，例如植群調查樣區或特定物種的分布地點，產生準確的氣候估計值，以利探討物種生育情形與氣候關係的相關性研究。

本研究發現，利用九個相鄰網格的「氣候-海拔」成對數值建立動態局部線性迴歸模型，可解釋九網格範圍（15 km×15 km）月平均溫度總變化的 85.3%（rsquare）；對月最低氣溫（83.1%）及月最高氣溫（81.9%）的解釋量則略低。至於降水的降尺度估計困難度高，依據本研究結果，只有 20.3-25.7%的降水變化可以通過局部迴歸方法獲得解釋（表 2.4）。

此外，利用本方法發現臺灣山區的平均氣溫遞減率為 $-5.65^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，但具有明顯的季節性與地區性差異。圖 2.11 為四季的氣溫遞減率空間分布圖，顯示中央山脈的中西側，尤其是新竹、苗栗、南投、嘉義至高雄的山地，冬季期間的月平均氣溫遞減率較低（ $-2$  至  $-5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）；相較之下，冬季期間東北山區和恆春半島的氣溫遞減率非常陡峭（從  $-6$  到  $-9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）（圖 2.11 A）。到了夏季，氣溫遞減率的區域差異相對趨於緩和，全島各地約介於  $-4$  至  $-7^{\circ}\text{C}/\text{km}$  之間（圖 2.11 C）。整體而言，臺灣東北部的台北和宜蘭山區、恆春半島、大武山及海岸山脈等地，一年四季的氣溫遞減率皆較陡峭（ $<-6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ）。本計畫另選定阿里山與太平山，以上述方法分析溫度變化與海拔的關係，結果顯示阿里山地區冬季與夏季的氣溫遞減率差異相近，約介  $-6.00$  到  $-6.44^{\circ}\text{C}/\text{km}$  間，且動態局部迴歸的解釋率極佳（圖 2.12 A-B）；相較之下，太平山氣溫遞減率的季節差異明顯，溫度與海拔的關係較弱（圖 2.12 C-D）。

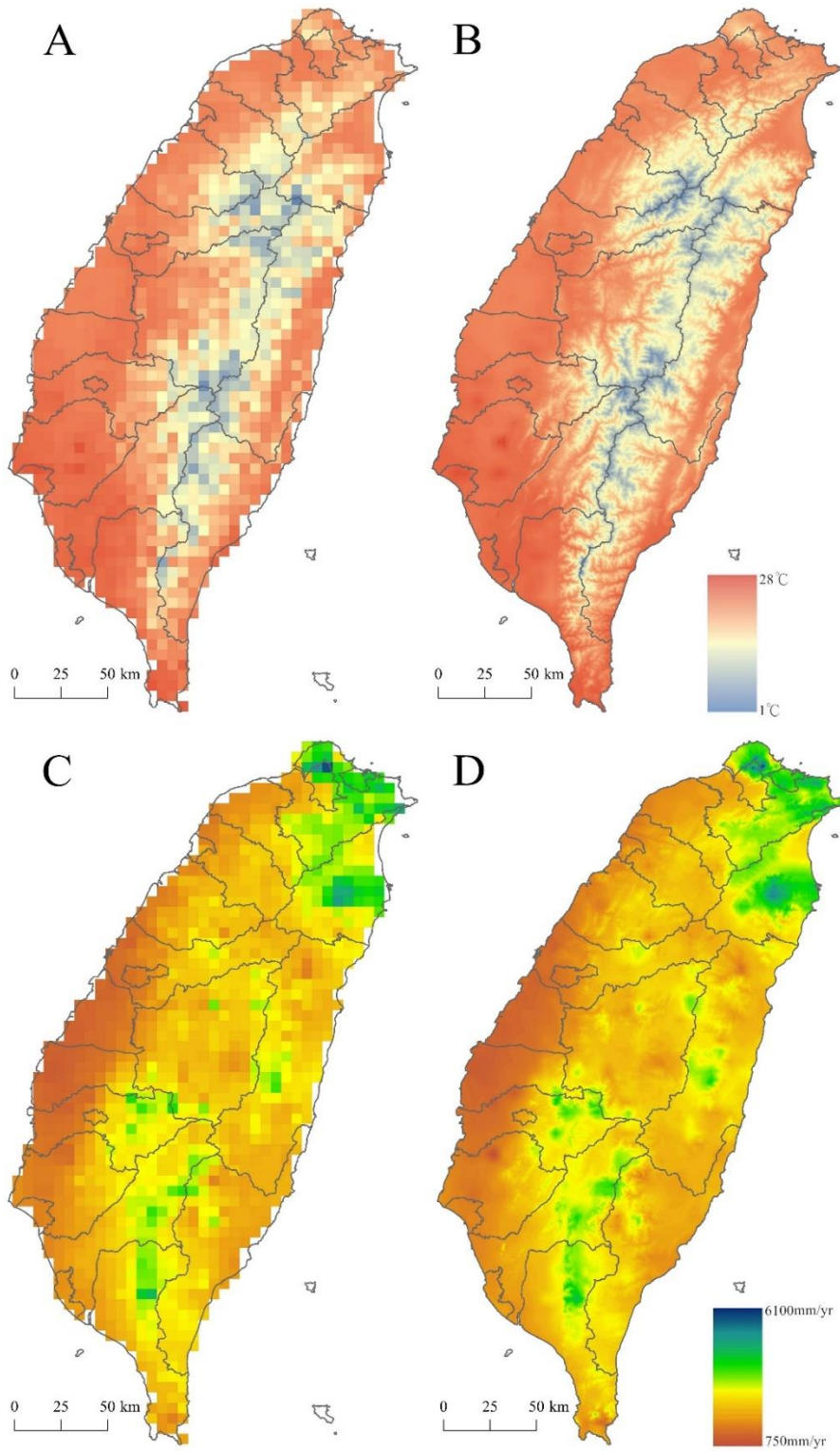


圖2.10 TCCIP提供的5公里網格化年平均氣溫 (A) 與年累積降水 (C) 資料；右圖則為以250公尺解析度降尺度後的年均溫 (B) 與年累積降水 (D) 。

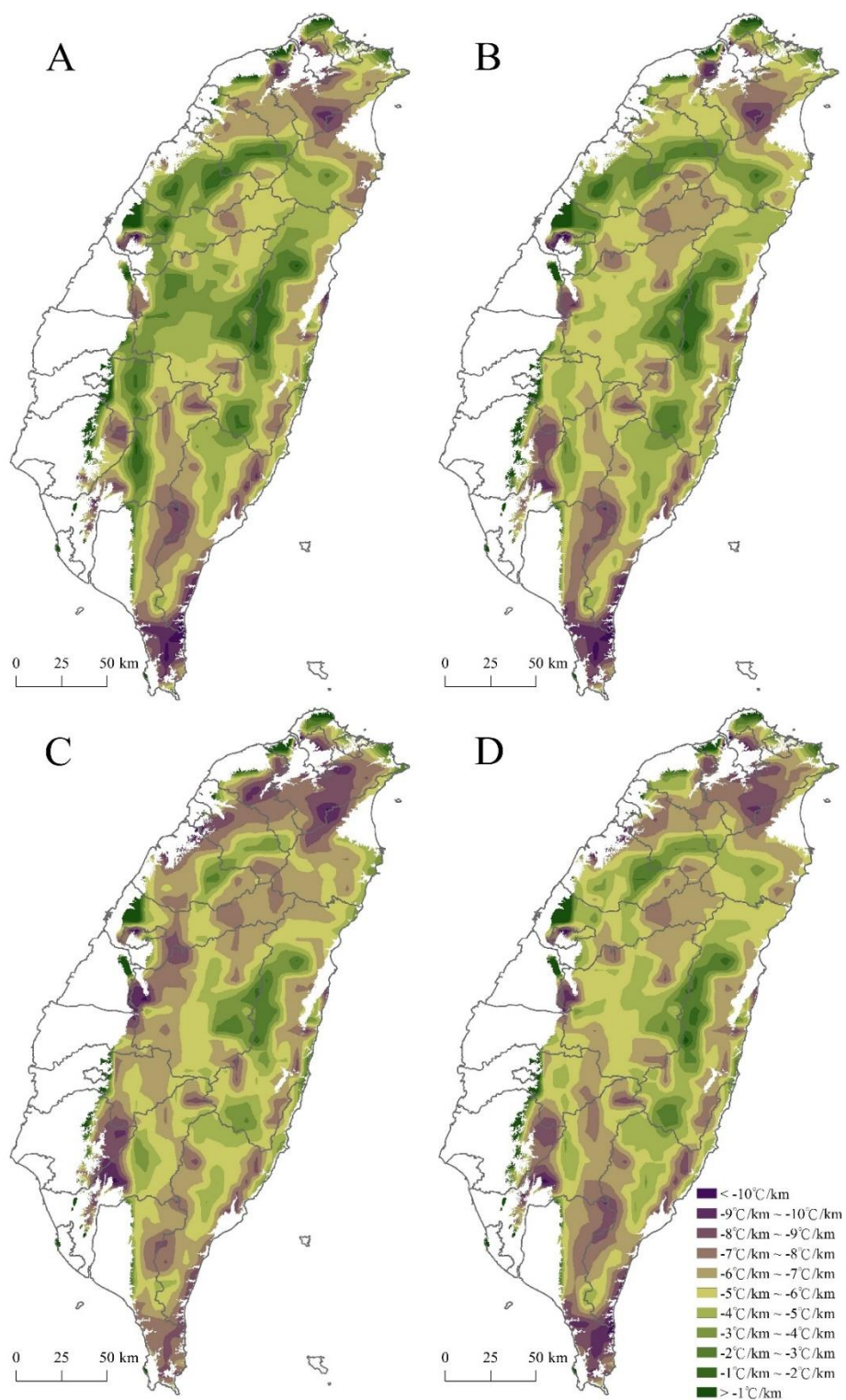


圖2.11 在250公尺解析度下，以*clim.regression*產生全臺一、四、七、十月（A-D）的氣溫遞減率分布情形。



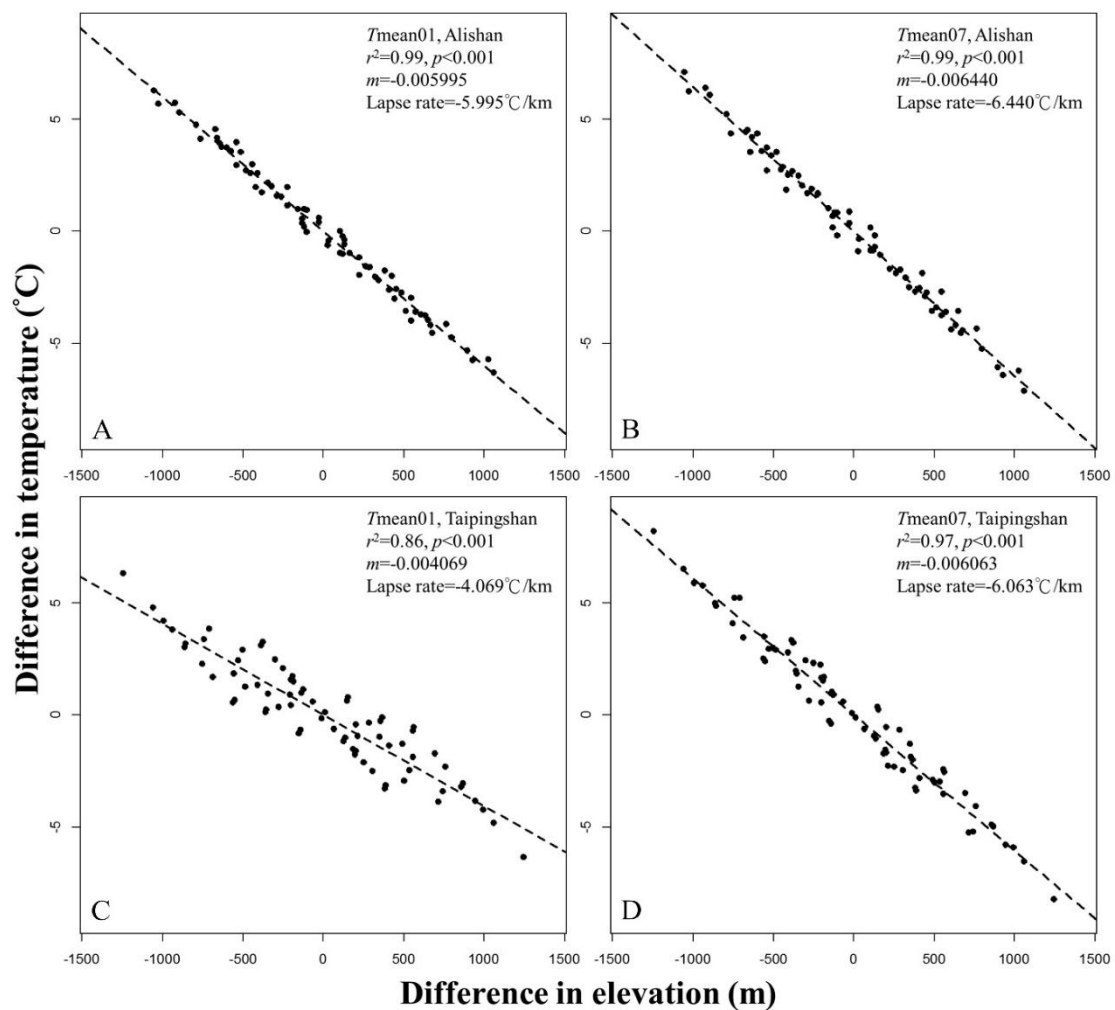


圖2.12 針對阿里山 (A,B) 及太平山 (C,D) 的冬夏兩季均溫資料，以動態局部迴歸方法計算該地區的氣溫遞減率。

表2.4 以動態局部迴歸方法對全臺所有5公里網格估算月尺度氣候介量的海拔遞減率，平均r square情形如下表。

Monthly variable	R <sup>2</sup> value / Month												Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Tmean	0.82	0.82	0.81	0.84	0.86	0.87	0.88	0.88	0.88	0.87	0.86	0.84	0.85
Tmin	0.79	0.80	0.81	0.83	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.84	0.83	0.80	0.83
Tmax	0.79	0.79	0.78	0.81	0.84	0.85	0.85	0.86	0.85	0.82	0.81	0.79	0.82
Precipitation	0.20	0.21	0.24	0.23	0.25	0.26	0.23	0.25	0.22	0.21	0.22	0.22	0.23

本研究以 15 個氣象站的歷史觀測資料與 *clim.regression* 推估結果進行比較，據以評估 *clim.regression* 降尺度模型的預測精度(表 2.5)。驗證顯示 *clim.regression* 對月平均溫度的預測準確度佳，平均絕對誤差 (MAE) 為  $0.56^{\circ}\text{C}$ ；對月最低溫度和月最高溫的預測精度稍差，MAE 為  $0.79^{\circ}\text{C}$  及  $0.80^{\circ}\text{C}$ 。對於降水的預測精度要低得多，平均而言，每月降水的估計值與實測時的 MAE 為 36.26 毫米。分析結果顯示，溫度是最可預測的氣候變量，但隨著海拔有不確定性提高的現象。整體而言，海拔 2500 公尺以下地區的月平均氣溫預測誤差約介於  $0.3\text{-}0.6^{\circ}\text{C}$  之間；該誤差值會隨著海拔的升高而增加( $r^2=0.55$ ,  $p=0.0015$ )，例如到了海拔 3000 公尺以上，平均預測誤差可能擴大到  $1.02^{\circ}\text{C}$ ，導致 *clim.regression* 的預測能力降低。在月低溫度和月高溫度部分，其誤差隨海拔的變化關係不明顯( $r^2=0.07$  及  $0.35$ ,  $p=0.3252$  及  $0.0209$ )。降水量的預測誤差亦與海拔變化沒有關係( $r^2=0.01$ ,  $p=0.7612$ )，顯示降水的相關因素應以區域性的地形變化、迎風及氣流抬升等效應為主，而非整體大尺度海拔地形的影響。

臺灣過去有一些關於氣候遞減率的相關研究，例如 Su (1984a) 提到山區溫度與海拔高度相關，遞減率在  $-3.08$  到  $-6.98^{\circ}\text{C}/\text{km}$  之間，且隨地區和季節而異。Guan *et al.* (2009) 則利用臺灣西部 43 個氣象站的數據，發現臺灣西部 1 月到 3 月的溫度遞減率從  $-3.22$  到  $-3.61^{\circ}\text{C}/\text{km}$  間，4 月到 12 月溫度遞減率則相對陡峭，介於  $-4.93$  至  $-5.62^{\circ}\text{C}/\text{km}$  間。Chiu *et al.* (2014) 則發表了相對全面的臺灣地區氣溫遞減率研究報告，根據 219 個氣象站的歷史記錄描述全臺灣的平均溫度遞減率為  $-5.17^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，且發現受到季風效應影響，中央山脈的冬季迎風側氣溫遞減率較為陡峭，約為  $-5.97^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，背風側則較緩和，約為  $-4.51^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，導致迎、背風兩側的氣溫遞減率出現明顯的對比。Chiu 等人亦指出，對於特定地點進行氣溫遞減率的估算，仍是一個極大的挑戰。本研究利用動態局部迴歸方法，得以精細估算特定地點的海拔遞減率，並將之回饋至氣溫及雨量降尺度模型內進行海拔的估計修正。利用這個方法獲得的氣溫海拔遞減率四季分布圖(圖 2.11)，與 Chiu 等人提出的氣溫遞減率格局相近，並能精確描繪出受東北季風影響的地區(如東北山區、花蓮至台東沿海山脈、恆春半島等)具有較陡的

遞減率，背風側（如中央山脈西側）則相對緩和。整體而言，本研究評估證明在地形多變的臺灣山區，*clim.regression* 確實提高了 TCCIP 原始氣候數據的預測精度，可產出準確且與地形對應的氣候變量估計值，適合山區氣候變遷及生態等相關研究運用。

利用 TCCIP 提供的 49 種環流模型(GCM)及 4 種濃度途徑(RCP)的未來情境，*clim.regression* 可產製與現行氣候相同解析度的未來氣候模擬資料，做為預測生物未來分布的環境氣候圖層。以圖 2.13 為例，該成果為根據基線期間與 RCP4.5 下的世紀末氣候情境，產生現行與未來年均溫的分布比對圖，從該圖不僅可以發現低海拔及平原地區明顯變暖，低溫區域則有向高海拔退縮的現象。

TCCIP 日尺度資料則用來產生衍生生物氣候因子，包含冷積（CCD, chilling degree days）及生長積溫（GDD, growing degree days）介量。以冷積溫度推估為例，以 0°C 為基礎溫度，計算網格中心點當月低於 0°C 的日均溫總和為冷積溫度（CDD），再使用隨機森林分析冷積溫度與所有降尺度後氣候因子的關係，從而預測網格內其他位置的冷積溫度值。分析結果顯示，預測值與實測值間具有高相關（Pearson's  $r=0.94$ ），預測之平均絕對誤差則為 0.06°C/month。隨機森林分析顯示，一月均溫 10°C 以下、年均溫 16°C 以下地點，開始有一月冷積溫度大於 0°C 的可能（亦即這些地點一月份有出現 0°C 以下氣溫的機會）。依上述方法即可產製山區冷積溫度及生長積溫預測圖層，以圖 2.14 為例，北臺灣每年的 11 月至隔年 4 月間，山區有可能出現 0°C 以下氣溫的機會。雪山、大霸尖山、南湖大山等 3000 公尺高山為 0°C 以下溫度最早出現、最晚結束的地點；但有一些海拔介於 1000–2000 公尺的山區，出現低溫的機率明顯偏高，例如烏來區阿玉山、南澳鄉太平山、南澳鄉大白山、南澳鄉飯包山、秀林鄉曉星山等地，從 12 月至隔年 3 月，都有 0°C 以下氣溫出現的機會。

依上述方法，*clim.regression* 得以同時估計任意地點的逐月 CCD 及 GDD，納為後續建立棲位模型的預測因子。

表2.5 以15處氣象測站資料進行的預測精度驗證結果。

Subordination	Climate variable	<i>Clim.regression</i>			TCCIP		
		MAE	RMSE	Variance explained (%)	MAE	RMSE	Variance explained (%)
CWB (10 stations)	Tmean (°C)	0.56	0.73	99.10	1.73	3.40	87.83
	Tmin (°C)	0.79	0.98	98.72	1.92	3.51	87.04
	Tmax (°C)	0.71	1.00	98.22	1.67	3.25	88.29
	Precipitation (mm)	34.65	64.63	94.39	31.10	67.08	93.75
TFRI (5 stations)	Tmean (°C)	0.58	0.74	98.56	1.34	1.56	96.75
	Tmin (°C)	0.82	1.17	97.27	1.24	1.49	96.51
	Tmax (°C)	1.52	1.85	95.61	2.53	2.78	92.27
	Precipitation (mm)	49.56	105.39	79.77	46.39	106.14	79.62
Average (15 stations)	Tmean (°C)	0.56	0.73	99.06	1.68	3.25	86.71
	Tmin (°C)	0.79	1.00	98.52	1.85	3.35	86.61
	Tmax (°C)	0.80	1.13	97.61	1.76	3.21	84.76
	Precipitation (mm)	36.26	70.16	93.00	32.74	72.30	92.43

表2.6 *clim.regression*提供49種GCM及4種RCP情境的未來氣候預測。

GCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5	GCM	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
10th-percentile	V	V	V	V	GFDL-ESM2M		V	V	V
25th-percentile	V	V	V	V	GISS-E2-H	V	V	V	V
75th-percentile	V	V	V	V	GISS-E2-H-CC		V		V
90th-percentile	V	V	V	V	GISS-E2-R	V	V	V	V
ACCESS1-0		V		V	GISS-E2-R-CC		V		V
ACCESS1-3		V		V	HadGEM2-AO	V	V	V	V
bcc-csm1-1	V	V	V	V	HadGEM2-CC		V		V
bcc-csm1-1-m	V	V	V	V	HadGEM2-ES	V	V	V	V
BNU-ESM	V	V		V	inmcm4		V		V
CanESM2	V	V		V	IPSL-CM5A-LR	V	V	V	V
CCSM4	V	V	V	V	IPSL-CM5A-MR	V	V	V	V
CESM1-BGC		V		V	IPSL-CM5B-LR		V		V
CESM1-CAM5	V	V	V	V	maximum	V	V	V	V
CESM1-CAM5-1-FV2		V		V	media	V	V	V	V
CMCC-CESM				V	minimum	V	V	V	V
CMCC-CM		V		V	MIROC5	V	V	V	V
CMCC-CMS		V		V	MIROC-ESM	V	V	V	V
CNRM-CM5	V	V		V	MIROC-ESM-CHEM	V	V	V	V
CSIRO-Mk3-6-0	V	V	V	V	MPI-ESM-LR	V	V		V
EC-EARTH				V	MPI-ESM-MR		V	V	V
ensemble	V	V	V	V	MRI-CGCM3		V	V	V
FGOALS-g2	V	V		V	MRI-ESM1				V
FIO-ESM	V	V	V	V	NorESM1-M		V	V	V
GFDL-CM3	V	V	V	V	NorESM1-ME		V	V	V
GFDL-ESM2G	V	V	V	V					

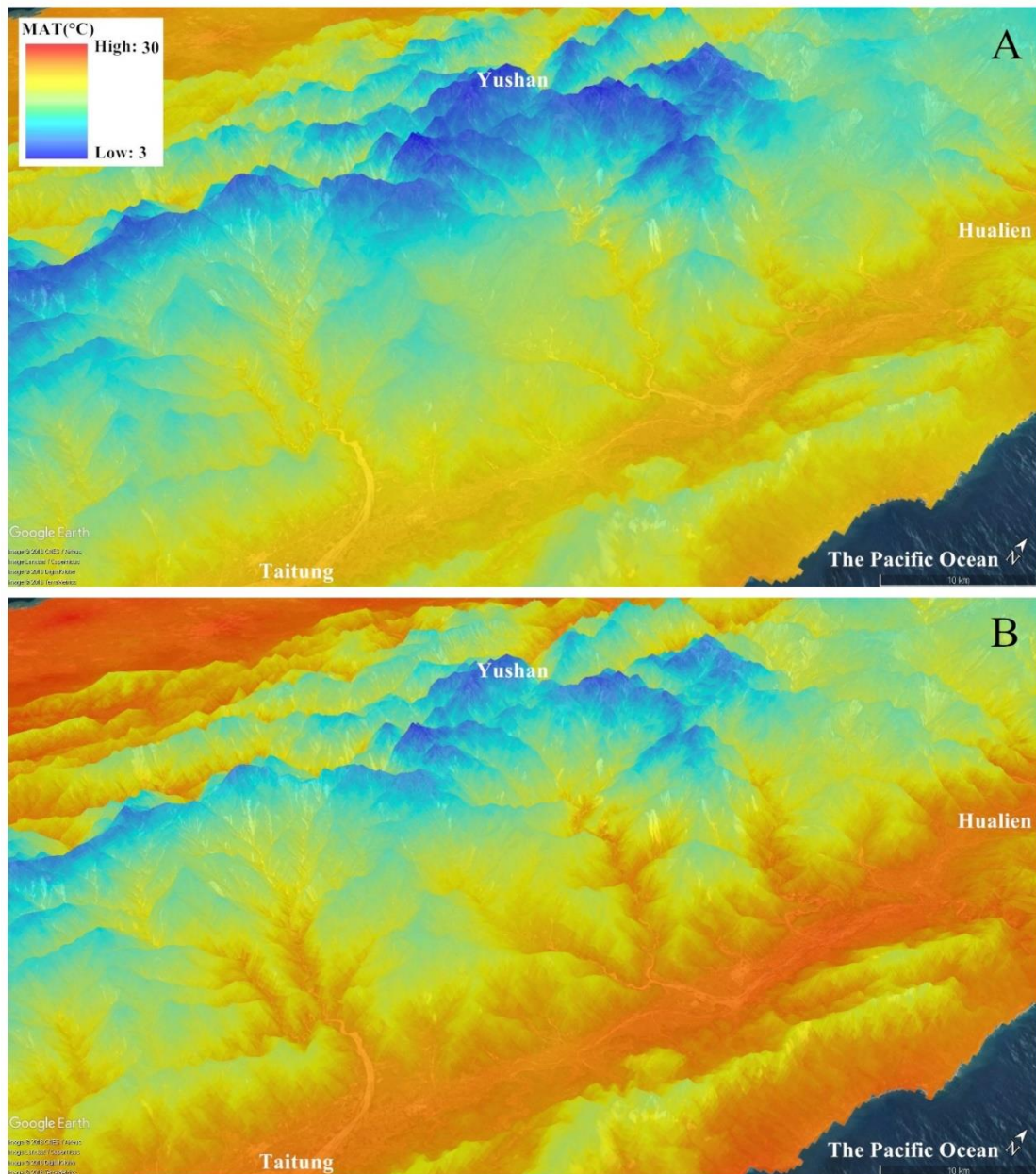
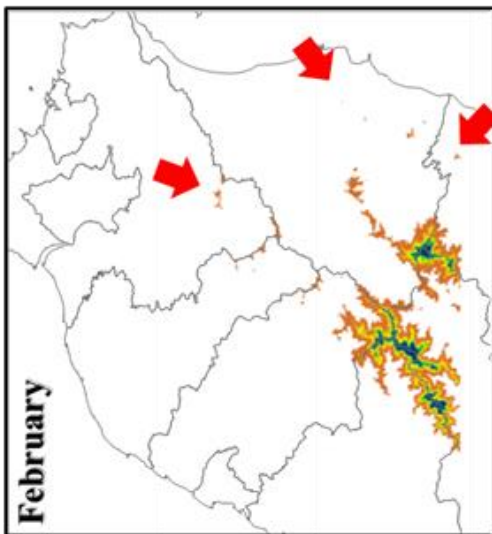
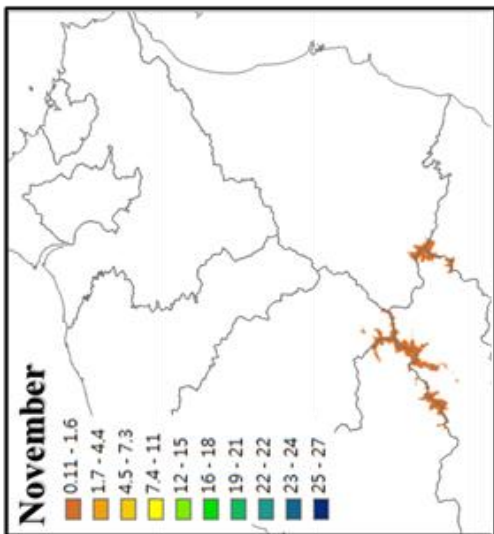
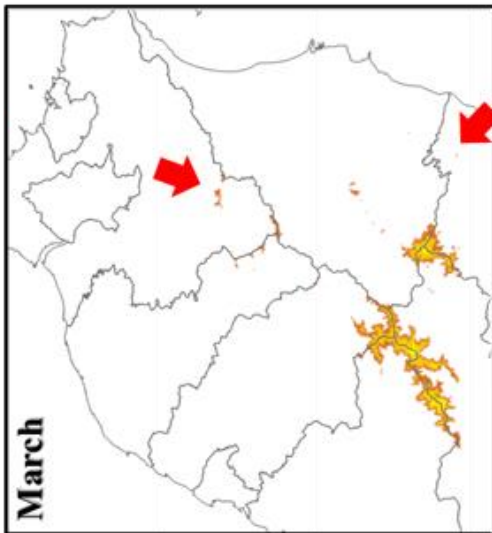
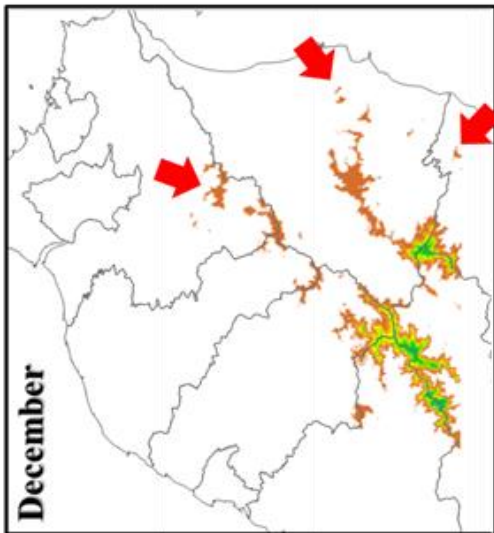
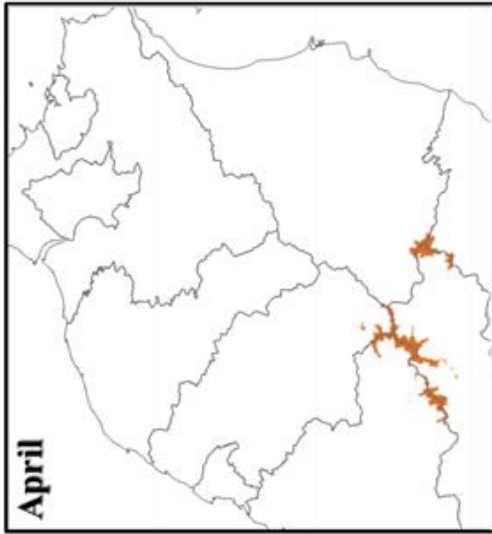
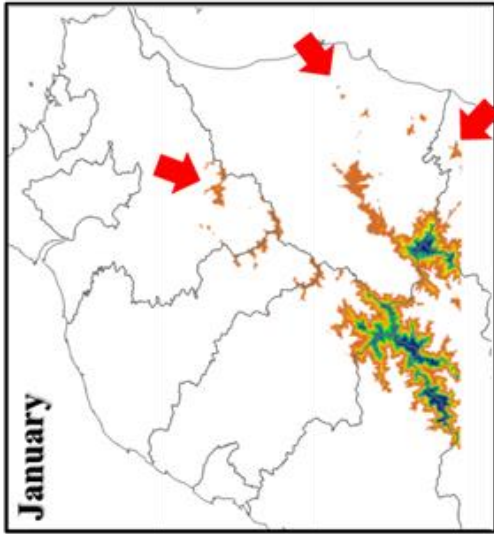


圖2.13 利用 $clim.regression$ 產生的高解析度現行年均溫分布圖 (A)，以及根據CSIRO-Mk3-6-0環流模型的RCP4.5情境，產生2100年的年均溫分布預測圖 (B)。上下兩圖的解析度均為250公尺。

圖2.14(次頁)利用 $clim.regression$ 計算北部山區的冷積溫度逐月分布。

Resolution = 250m



## 3.2 現行與未來氣候下的臺灣森林類型分布

### 3.2.1 現行氣候下的臺灣森林類型（群團等級）分布

依據多重隨機森林架構（圖 2.8），以表 2.2 所列的 105 個環境因子對每一群團建立隨機森林模型，再以多重隨機森林合併流程（Lin et al., 2020，圖 2.9），判別各空間點位之最適森林類型及機率，完成全臺群團層級之森林現生分布預測如圖 2.15，並以立體地形及南北向剖面方式，繪製各種森林類型預測結果的垂直分布圖（圖 2.16 及圖 2.17）。

為避免隨機森林模型發生過度擬合（over-fitting）問題，並提高電腦運算效率，在建立各群團分布預測模型時，預先採用全部 105 個環境氣候因子建立初始模型，經 100 次重複，選取其中重要值最高的 20 個因子做為預測變量（predictor），以建立實際應用的簡約模型。有關各群團簡約模型的重要因子、重要值、貢獻度及模型預測準確率等，彙整如表 2.8 及圖 2.18。

根據重要因子組成，我們發現對亞高山針葉灌叢及鐵冷杉上部山地針葉林兩種群團而言，溫度因子在氣候棲位模型中的佔比極高，分別達到 100% 及 98%，顯示溫度可能為決定群團適存度的關鍵因子，降水因子的影響則極輕微。亞高山針葉灌叢的分布，主要受到冬季低溫與夏初（4 月、5 月）氣溫影響；鐵冷杉群團的分布，則主要與夏季（4 至 9 月）氣溫有關。對霧林帶以下群團而言，降水因子所佔的比例逐漸提高，約可達 30% 至 40% 左右。溫度仍與群團分布高度相關，但不同的季節溫度分別扮演不同群團的關鍵因子：例如檜木霧林帶的分布與 5、6 月的高溫與生長積溫相關；櫟林帶及雅楠-楨楠林帶的分布則與冬季（10 月至次年 1 月）氣溫、冷積溫度及生長積溫有關。

較特殊的是，水青岡霧林帶呈現溫度、降水因子重要值相近情況。冬季（11 月至次年 1 月）氣溫、冷積溫度及冬季充沛降水，是本群團森林分佈地點的最大氣候特徵。柯屬-杜英屬山地霧林分布於中央山脈南段海拔約 1600-2000 公尺處，本群團的分布與降水呈現極高相關性（85%），溫度限制則來自於 1 月氣溫與 1 月生長積溫，反映出當

地水氣受地形抬升而形成潮濕環境，伴隨冬季低溫的氣候特徵，使得在中央山脈南端、北迴歸線以南的熱帶地區，仍然形成適合冷溫物種生存的地點，並與低海拔熱帶來源物種形成混淆鑲嵌現象。八角茴香-桐屬熱帶季風林分布於恆春半島迎向東北季風的坡面，溫度與降水因子分別佔了 72%及 20%的重要性，其中 12 月至次年 3 月的低溫(合計佔 41.57%因子權重)及 3 月與 7 月的降水(合計 10.41%)具有關鍵的影響，顯示恆春半島東北迎風面冬季低溫、但夏季雨量充沛的環境特色，使適合溫冷環境的物種得於迎風低溫環境獲得適合棲地。烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林則是臺灣東北部特有的群團類型，本群團受降水因子的影響程度較高，可達 57%，主要集中在 9 月至次年 1 月，氣溫因子的影響則僅佔 30%，且主要來自於年溫差(TD, 25.05%)影響，充分反映出臺灣北部冬季季風區的高降水與低溫特色。此外，地形因子與烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林的出現具有相關，分析顯示其生育地具有近稜線、偏向東北坡面的趨勢，反映出季風植被的地理特徵。

13 種森林類型的適生分布預測結果顯示，在海拔高於 100 公尺的 270 萬公頃範圍內，單一植群型(pure stand)面積約佔 72.67%，混淆植群型(mixed stand)面積則約佔 27.33%。其中以榕楠山麓闊葉林(*Ficus-Machilus*)所佔面積最大(25.64%)，櫟屬山地闊葉林(*Quercus*)及槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林(*Machilus-Castanopsis*)分佔 13.22%及 12.05%次之。另有 506 公頃(0.02%)土地，因隨機森林結果顯示各群團於當地氣候條件下適存度皆低，故無法判定屬於何種森林類型的適生範圍(表 2.7)。雖然不同森林類型隨海拔有明顯的垂直分帶現象，但各有主要的分布海拔區段，且在該區段佔據優勢地位。例如亞高山灌叢的分布以海拔 2941-3250 公尺為分布核心，鐵冷杉群團分布範圍則集中於 2586-2947 公尺間、檜木山地霧林則主要分布於 2100-2474 公尺等(表 2.10)。然而，全島仍有高達 27.33%區域屬於兩種森林群團以上共存混生的環境(表 2.7)。例如水青岡山地落葉霧林與櫟屬山地闊葉林在海拔 1700 公尺處有明顯的共存現象；槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林及雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林則在海拔 800-1000 公尺範圍佔有相近的適存機會；南部低海拔 200-300 公尺地區，則是



榕楠山麓闊葉林及控木屬-楨楠屬山麓闊葉林兩種群團經常混淆出現的地點。

隨機森林是一種集成分類器，具有聚合大量決策樹、形成穩健統計的特性，在建構生態棲位模型及預測潛在分布等領域已被廣泛應用（Chiu *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2015），並且在區域性或全球尺度的環境變遷及生物分布交互作用研究上，有許多成功的應用案例（Attorre *et al.*, 2011; Rehfeldt *et al.*, 2006; Rehfeldt *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2016a）。我們的研究亦證明，隨機森林法對臺灣森林群團的潛在分布預測具有很高的準確性，平均錯誤率僅 6.59%，具有良好的生態研究應用價值。

氣候梯度是形成植物社會分布分化的主要原因，導致森林的組成與結構呈現方向性變化（Whittaker, 1975），然而，這樣的方向性變化不一定存在遽然轉變的界線，而是可能是緩慢的、漸次的轉換過程。優良的生態棲位模型應當具備闡明上述生物漸進變化過程的密切因素，並能夠將這些生物反映現象精確地投射到至地理空間內。臺灣雖然有明顯的山地植群垂直分化，但因季風及山塊等因素影響，導致本島的東、西、南、北面氣候各有差異與特色。例如 Su（1984a）認為大山塊加熱效應（Massenerhebung effect）可能是影響山地植群垂直分化的重要因子，由於山體陸塊的保溫機制，使得同一海拔的山體溫度在山脈中部較高、而在北端和南端較低，導致臺灣北部和南部植群形成低降與壓縮的現象。Chiou 等人（Chiou *et al.*, 2010）認為東北季風引起的南北端降溫效應，可能高於大山塊加熱的影響，但亦支持臺灣南北端的植群壓縮現象。本研究建構的隨機森林模型與植群分布預測結果，確實證明可利用氣候資料模擬臺灣山地植群在南北兩端的海拔低降現象，以及在中央山脈中段呈現較廣泛的海拔分佈，證實具有極佳的擬真效果。

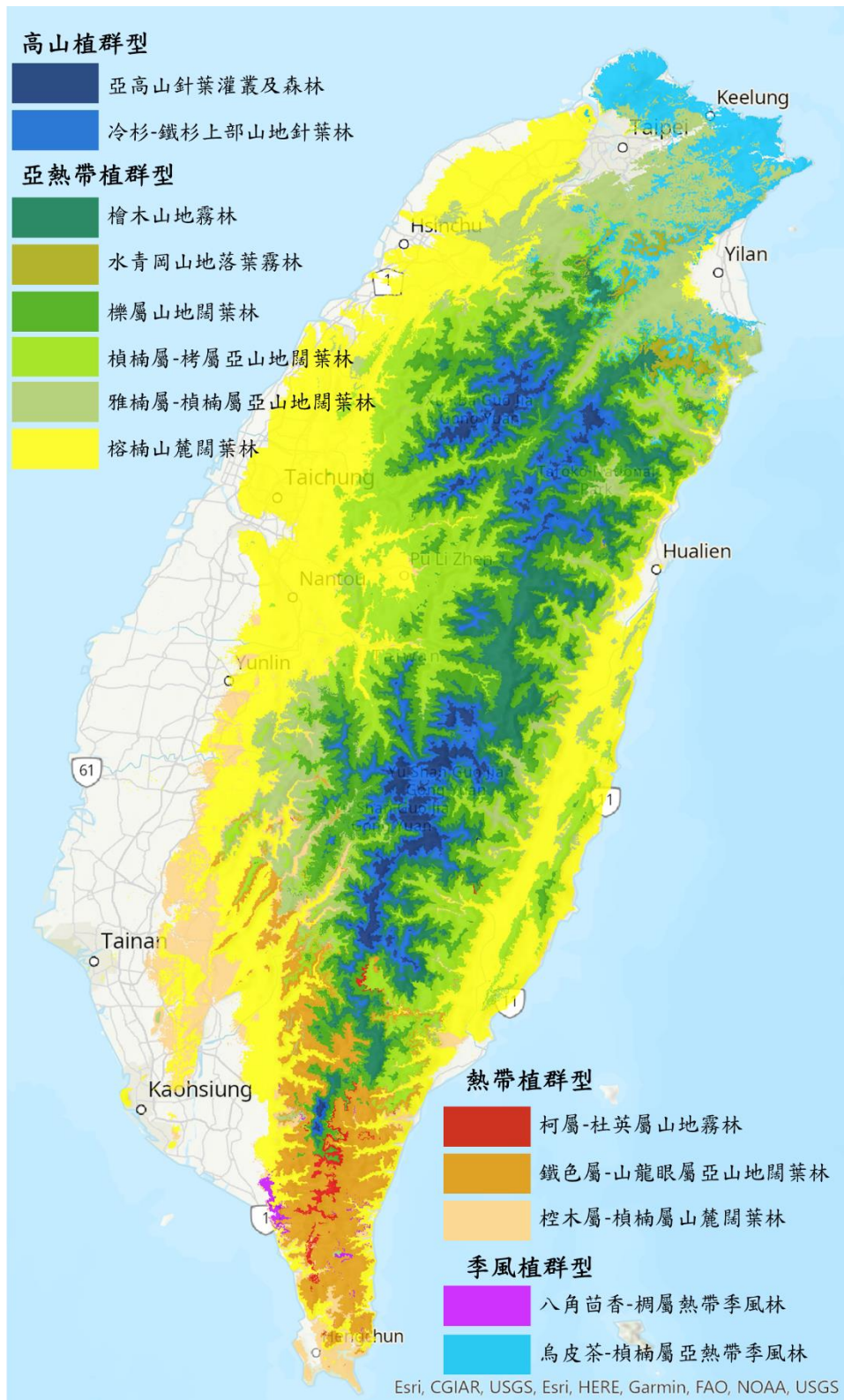


圖2.15 利用105個氣候因子，產生13種森林類型的現生分布預測圖。

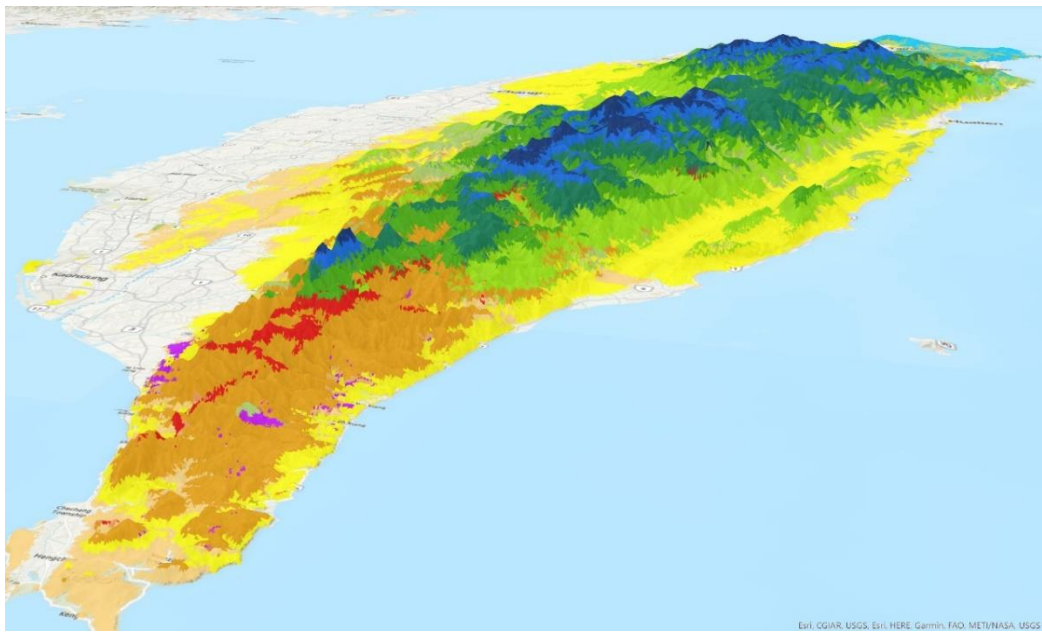


圖2.16 以立體方式呈現13種森林類型的分布預測，與地形有良好的吻合，充分反映臺灣山地植群的垂直分帶現象（圖例同2.15）。

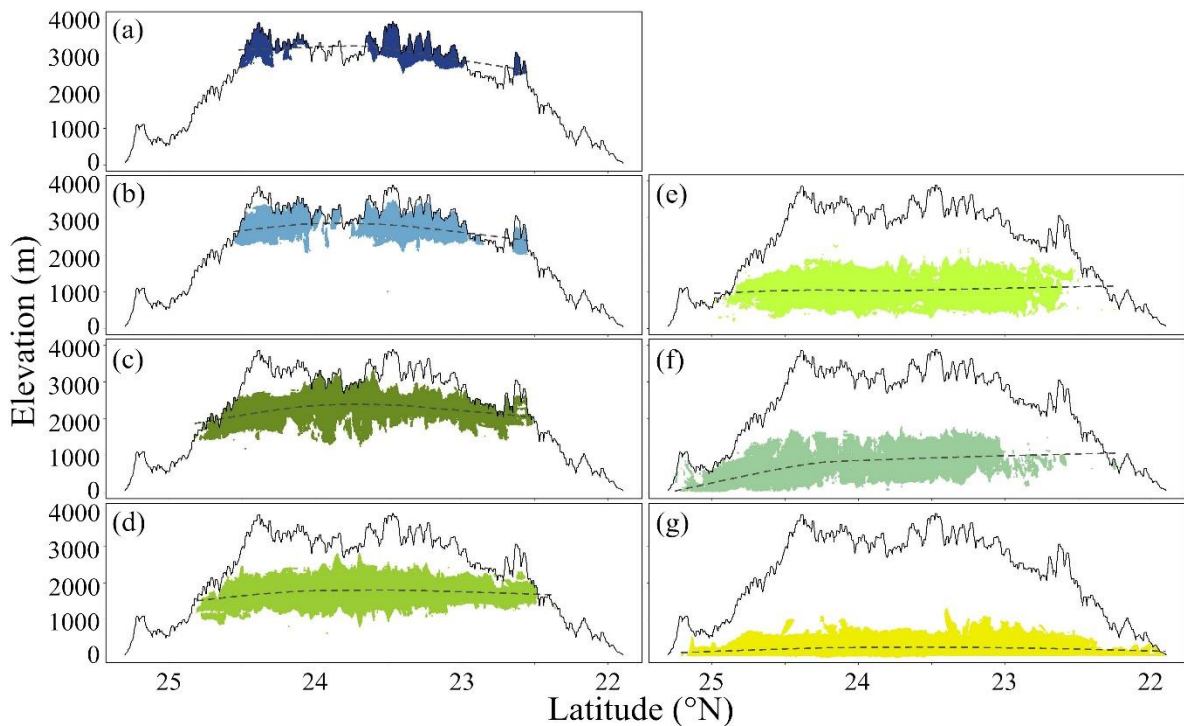


圖2.17 對分布遍及全臺南北的7種森林類型（亞高山針葉灌叢至榕楠山麓闊葉林）進行縱剖面，顯示山地植群預測結果有明顯的南北兩端低降現象（圖例同2.15）。

表 2.7 依據現行氣候資料推估之臺灣主要森林類型的適生面積。

森林類型	預測面積 (公頃)	佔全島 百分比	單一植群型		混淆植群型	
			面積 (公頃)	%	面積 (公頃)	%
<b>High-mountain coniferous woodlands and forests</b>						
亞高山針葉灌叢 及森林	29134	1.08%	13590	46.65%	15544	53.35%
冷杉-鐵杉上部 山地針葉林	114151	4.21%	76930	67.39%	37221	32.61%
<b>Subtropical mountain zonal forests</b>						
檜木山地霧林	250006	9.23%	204420	81.77%	45586	18.23%
水青岡山地落葉 霧林	15433	0.57%	9993	64.75%	5440	35.25%
櫟屬山地闊葉林	358009	13.22%	322318	90.03%	35691	9.97%
槲楠屬-栲屬亞 山地闊葉林	326277	12.05%	233338	71.52%	92939	28.48%
雅楠屬-槲楠屬 亞山地闊葉林	318017	11.74%	185980	58.48%	132037	41.52%
榕楠山麓闊葉林	694606	25.64%	531653	76.54%	162953	23.46%
<b>Tropical mountain zonal forests</b>						
柯屬-杜英屬山 地霧林	8750	0.32%	5474	62.57%	3276	37.43%
鐵色屬-山龍眼 屬亞山地闊葉林	143575	5.30%	111772	77.85%	31803	22.15%
柃木屬-槲楠屬 山麓闊葉林	240205	8.87%	122659	51.06%	117546	48.94%
<b>Tropical mountain azonal forests</b>						
八角茴香-桐屬 熱帶季風林	27314	1.01%	8096	29.64%	19218	70.36%
<b>Subtropical mountain azonal woodlands and forests</b>						
烏皮茶-槲楠屬 亞熱帶季風林	182806	6.75%	142180	77.78%	40626	22.22%
無法判定	506	0.02%	-	-	-	-
合計	2708789	100.00%	1968403	72.67%	739880	27.33%

表2.8 依據歷史氣候資料，統計各種森林類型現生環境的年均溫及年累積降水概況。

森林類型	年均溫 (°C)	標準差 (°C)	年累積降水 (mm)	標準差 (mm)
<b>High-mountain coniferous woodlands and forests</b>				
亞高山針葉灌叢及森林	4.54	1.64	2367	412
冷杉-鐵杉上部山地針葉林	8.64	1.76	2646	430
<b>Subtropical mountain zonal forests</b>				
檜木山地霧林	11.58	1.50	2699	386
水青岡山地落葉霧林	12.54	1.44	3389	682
櫟屬山地闊葉林	13.66	1.42	2681	362
槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林	17.15	1.66	2651	475
雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林	18.82	1.73	3104	725
榕楠山麓闊葉林	21.27	1.10	2390	418
<b>Tropical mountain zonal forests</b>				
柯屬-杜英屬山地霧林	16.03	1.44	2523	169
鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林	18.41	1.86	2623	468
柃木屬-槲楠屬山麓闊葉林	21.89	1.56	2362	406
<b>Tropical mountain azonal forests</b>				
八角茴香-桐屬熱帶季風林	19.51	1.98	2630	160
<b>Subtropical mountain azonal woodlands and forests</b>				
烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林	18.49	2.21	3695	695

表2.9 隨機森林方法獲得各種森林類型的重要因子及預測準確率。

森林類型	亞高山針葉灌叢及森林 預測準確率：95.68%			冷杉-鐵杉上部山地針葉林 預測準確率：94.88%			檜木山地霧林 預測準確率：89.87%		
	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度
重要因子	Tmax_may	7.22	6.78%	Tmax_jun	53.41	22.22%	Tmax_may	41.80	7.42%
	Tmin_dec	6.97	6.55%	Tmax_sep	27.25	11.34%	GDD5	41.63	7.40%
	Tmax_jun	6.97	6.54%	Tmax_aug	26.45	11.00%	Tave_jun	41.03	7.29%
	CDD3	6.66	6.25%	Tmax_feb	19.81	8.24%	Tave_may	39.85	7.08%
	Tave_apr	6.34	5.96%	Tmax_may	17.33	7.21%	Tmax_jun	38.73	6.88%
	Tmin_may	5.90	5.54%	Tave_jun	15.80	6.57%	GDD6	35.30	6.27%
	GDD4	5.82	5.47%	GDD6	13.46	5.60%	Tave_sep	33.57	5.96%
	Tmin_feb	5.67	5.33%	Tmax_apr	10.28	4.28%	GDD4	27.94	4.96%
	GDD3	5.53	5.19%	Tmax_jul	5.90	2.45%	Tave_apr	26.40	4.69%
	CDD11	5.25	4.93%	GDD3	5.54	2.30%	AGDD12	26.10	4.64%
	Tmin_nov	5.21	4.89%	precip_nov	5.51	2.29%	MSP	24.58	4.37%
	Tmin_apr	5.10	4.79%	Tave_sep	5.46	2.27%	GDD9	24.00	4.26%
	CDD2	5.04	4.73%	GDD9	5.28	2.20%	precip_aug	22.18	3.94%
	Tave_mar	4.91	4.61%	Tmax_jan	5.10	2.12%	precip_jan	21.41	3.80%
	Tmax_apr	4.75	4.46%	GDD10	4.82	2.01%	WPR	20.34	3.61%
	Tmin_mar	4.71	4.42%	GDD5	4.45	1.85%	Tmax_jul	20.30	3.61%
	Tmin_jan	4.20	3.94%	Tmax_mar	3.99	1.66%	WI	19.85	3.53%
	Tmin_sep	3.88	3.64%	GDD7	3.89	1.62%	MAT	19.48	3.46%
Tmin_oct	3.40	3.19%	TD	3.45	1.43%	Tmax_apr	19.31	3.43%	
Tmin_jun	2.97	2.79%	Tmax_oct	3.22	1.34%	Tmax_mar	19.11	3.40%	

森林類型	水青岡山地落葉霧林 預測準確率：97.55%			櫟屬山地闊葉林 預測準確率：88.01%			槲櫟屬-栲屬亞山地闊葉林 預測準確率：88.1%		
	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度
重要因子	TD	7.65	7.18%	Tmin_oct	27.32	8.53%	precip_sep	25.22	8.10%
	precip_jan	7.61	7.15%	CDD11	25.09	7.83%	Tave_nov	22.48	7.22%
	CDD12	6.07	5.70%	CDD12	22.35	6.97%	Tmin_jan	19.18	6.16%
	precip_dec	4.10	3.85%	Tmax_jan	17.71	5.53%	GDD11	18.50	5.94%
	precip_sep	4.00	3.76%	Tmax_nov	17.42	5.44%	GDD10	17.47	5.61%
	WPR	2.76	2.59%	precip_oct	16.03	5.00%	Tmax_oct	17.12	5.50%
	precip_nov	2.70	2.54%	Tmax_oct	16.03	5.00%	Tmin_dec	15.90	5.11%
	CDD1	2.38	2.23%	GDD10	16.02	5.00%	precip_oct	15.85	5.09%
	ACDD12	2.30	2.16%	AGDD12	15.54	4.85%	Tave_oct	15.71	5.05%
	Tmax_dec	2.29	2.15%	Tmax_dec	15.19	4.74%	precip_jun	15.43	4.96%
	Tmax_jan	1.90	1.79%	precip_sep	15.14	4.72%	precip_may	15.36	4.94%
	Tmax_feb	1.88	1.77%	precip_apr	14.36	4.48%	Tave_dec	15.22	4.89%
	Tmax_nov	1.77	1.67%	Tmin_may	14.20	4.43%	precip_dec	13.72	4.41%
	Tmax_apr	1.48	1.39%	CDD3	13.35	4.17%	precip_apr	13.12	4.22%
	Tmax_aug	1.37	1.28%	precip_mar	13.34	4.16%	precip_nov	12.61	4.05%
	Tmax_may	1.36	1.28%	Tmax_feb	12.92	4.03%	Tmax_dec	12.34	3.97%
	Tmax_jul	1.35	1.27%	Tave_oct	12.76	3.98%	Tave_jan	12.28	3.95%
	Tmax_sep	1.28	1.20%	precip_feb	12.00	3.75%	GDD1	11.59	3.72%
precip_oct	1.25	1.17%	MAT	11.88	3.71%	Tmin_feb	11.24	3.61%	
precip_jun	0.98	0.92%	WI	11.73	3.66%	GDD12	10.87	3.49%	

表2.9 (續) 隨機森林方法獲得各種森林類型的重要因子及預測準確率。

森林類型	雅楠屬-槿楠屬亞山地闊葉林 預測準確率：88.73%			榕楠山麓闊葉林 預測準確率：92.27%			柯屬-杜英屬山地霧林 預測準確率：95.11%		
	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度
重要因子	Tave_aug	19.48	34.48%	Tmax_sep	10.60	3.31%	precip_mar	7.94	20.11%
	GDD8	17.88	31.65%	Tmax_aug	8.15	2.54%	precip_apr	7.83	19.83%
	precip_mar	16.32	28.89%	Tmax_jul	6.68	2.09%	precip_feb	7.53	19.08%
	Tave_jul	13.98	24.74%	GDD10	6.42	2.00%	WPR	2.61	6.62%
	GDD7	13.69	24.23%	Tmax_oct	6.14	1.92%	ACDD12	1.72	4.36%
	Tave_sep	11.54	20.42%	Tave_jun	5.79	1.81%	precip_jul	1.63	4.14%
	precip_apr	11.20	19.83%	Tave_oct	5.69	1.78%	precip_dec	1.42	3.60%
	Tmin_jan	11.04	19.54%	SHM	5.09	1.59%	precip_jan	1.07	2.71%
	Tmin_feb	10.29	18.21%	Tave_may	4.62	1.44%	CDD3	1.07	2.70%
	GDD9	9.89	17.50%	Tmax_jun	4.49	1.40%	precip_may	0.95	2.41%
	Tmin_oct	9.07	16.06%	GDD9	4.32	1.35%	SHM	0.79	2.01%
	Tmin_sep	8.90	15.75%	GDD6	4.04	1.26%	AHM	0.79	2.01%
	GDD6	8.22	14.55%	GDD5	4.01	1.25%	precip_nov	0.77	1.95%
	precip_nov	8.04	14.23%	Tmax_may	3.85	1.20%	precip_aug	0.60	1.53%
	Tmin_aug	7.15	12.65%	Tave_sep	3.53	1.10%	CDD1	0.59	1.50%
	Tave_jun	6.72	11.89%	Tmax_nov	3.41	1.06%	precip_sep	0.56	1.41%
	Tmin_jun	6.44	11.39%	GDD8	2.88	0.90%	CDD2	0.52	1.31%
	Tmax_sep	6.36	11.25%	Tave_jul	2.62	0.82%	TD	0.44	1.12%
	Tmin_jul	6.33	11.20%	Tave_aug	2.60	0.81%	MAP	0.33	0.83%
	Tmax_aug	5.98	10.58%	GDD7	2.58	0.80%	MSP	0.30	0.77%

森林類型	鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林 預測準確率：96.59%			控木屬-槿楠屬山麓闊葉林 預測準確率：93.44%			八角茴香-桐屬熱帶季風林 預測準確率：93.44%		
	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度	因子名稱	Gini	貢獻度
重要因子	precip_mar	41.09	19.71%	Tave_feb	7.23	7.41%	Tmin_jan	5.65	14.31%
	TD	37.16	17.82%	GDD2	7.10	7.28%	Tmin_dec	4.51	11.41%
	precip_jul	25.46	12.21%	Tave_jan	6.11	6.27%	Tmin_feb	3.75	9.49%
	Tave_jan	13.43	6.44%	Tmax_feb	5.49	5.63%	Tmin_mar	2.51	6.36%
	Tmin_jan	9.94	4.77%	GDD1	5.32	5.46%	precip_mar	2.33	5.89%
	GDD1	8.70	4.17%	Tmax_jan	4.91	5.04%	precip_jul	1.79	4.52%
	precip_aug	8.29	3.98%	GDD3	4.49	4.61%	Tave_jan	1.78	4.51%
	precip_oct	6.66	3.20%	Tave_mar	3.77	3.87%	TD	1.68	4.27%
	Tmin_feb	6.10	2.93%	Tmin_mar	3.48	3.57%	GDD1	1.68	4.25%
	Tave_dec	5.98	2.87%	Tave_dec	2.70	2.77%	precip_aug	1.54	3.91%
	Tmax_aug	5.63	2.70%	Tmin_feb	2.45	2.52%	SHM	1.53	3.88%
	Tave_aug	5.31	2.55%	precip_mar	2.42	2.48%	Tmin_nov	1.49	3.78%
	GDD8	5.04	2.42%	GDD12	2.37	2.44%	AHM	1.45	3.68%
	GDD12	4.60	2.21%	Tmax_mar	2.11	2.16%	MSP	1.20	3.05%
	GDD7	4.49	2.15%	Tmax_dec	1.94	1.99%	precip_may	1.20	3.04%
	Tave_feb	4.17	2.00%	TD	1.77	1.82%	Tmin_jun	1.20	3.03%
	precip_feb	3.85	1.85%	Tmin_apr	1.57	1.61%	Tmin_apr	1.17	2.97%
	Tmin_dec	3.72	1.78%	Tmin_jan	1.52	1.55%	GDD2	1.06	2.69%
	Tmax_jan	3.61	1.73%	AHM	1.51	1.55%	Tave_dec	1.01	2.55%
	GDD2	3.22	1.54%	precip_may	1.24	1.27%	GDD12	0.95	2.41%

表2.9 (續) 隨機森林方法獲得各種森林類型的重要因子及預測準確率。

烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林			
預測準確率：89.58%			
森林類型	因子名稱	Gini	貢獻度
	TD	44.22	21.42%
	precip_nov	23.85	11.55%
	precip_dec	16.20	7.85%
	precip_oct	16.10	7.80%
	precip_sep	8.77	4.25%
	precip_jan	6.78	3.28%
	NEAR_DIST	6.67	3.23%
	precip_jun	6.15	2.98%
	SHM	5.79	2.81%
重要判別 因子	CDD12	4.76	2.31%
	AHM	4.52	2.19%
	WPR	4.48	2.17%
	precip_jul	4.01	1.94%
	precip_apr	3.87	1.87%
	planform	3.66	1.77%
	CDD11	3.63	1.76%
	precip_aug	3.31	1.60%
	MSP	3.30	1.60%
	precip_may	3.26	1.58%
	aspect_adj	3.16	1.53%



圖 2.18 各森林類型重要因子的類別統計。

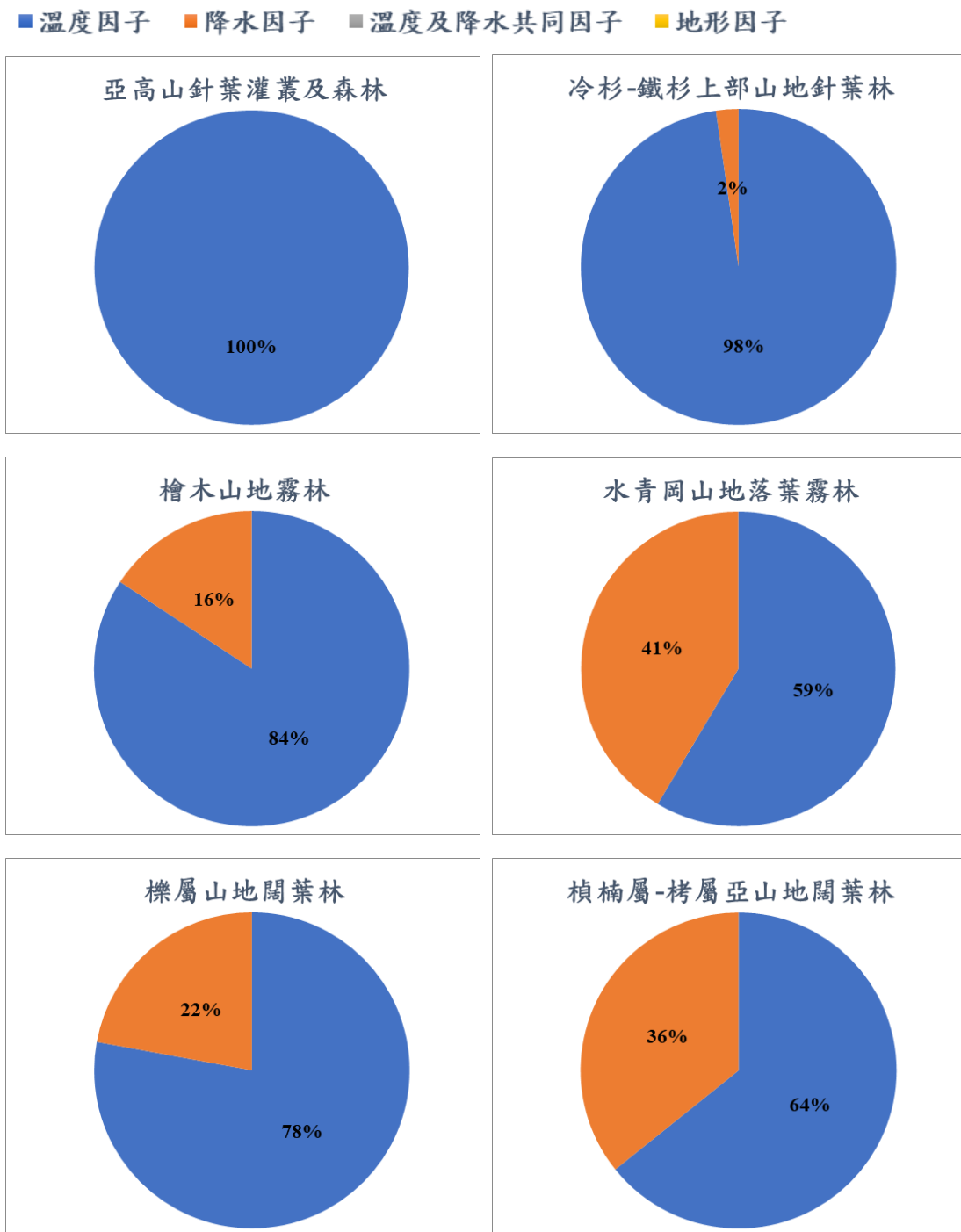


圖 2.18 (續) 各森林類型重要因子的類別統計。

■ 溫度因子    ■ 降水因子    ■ 溫度及降水共同因子    ■ 地形因子

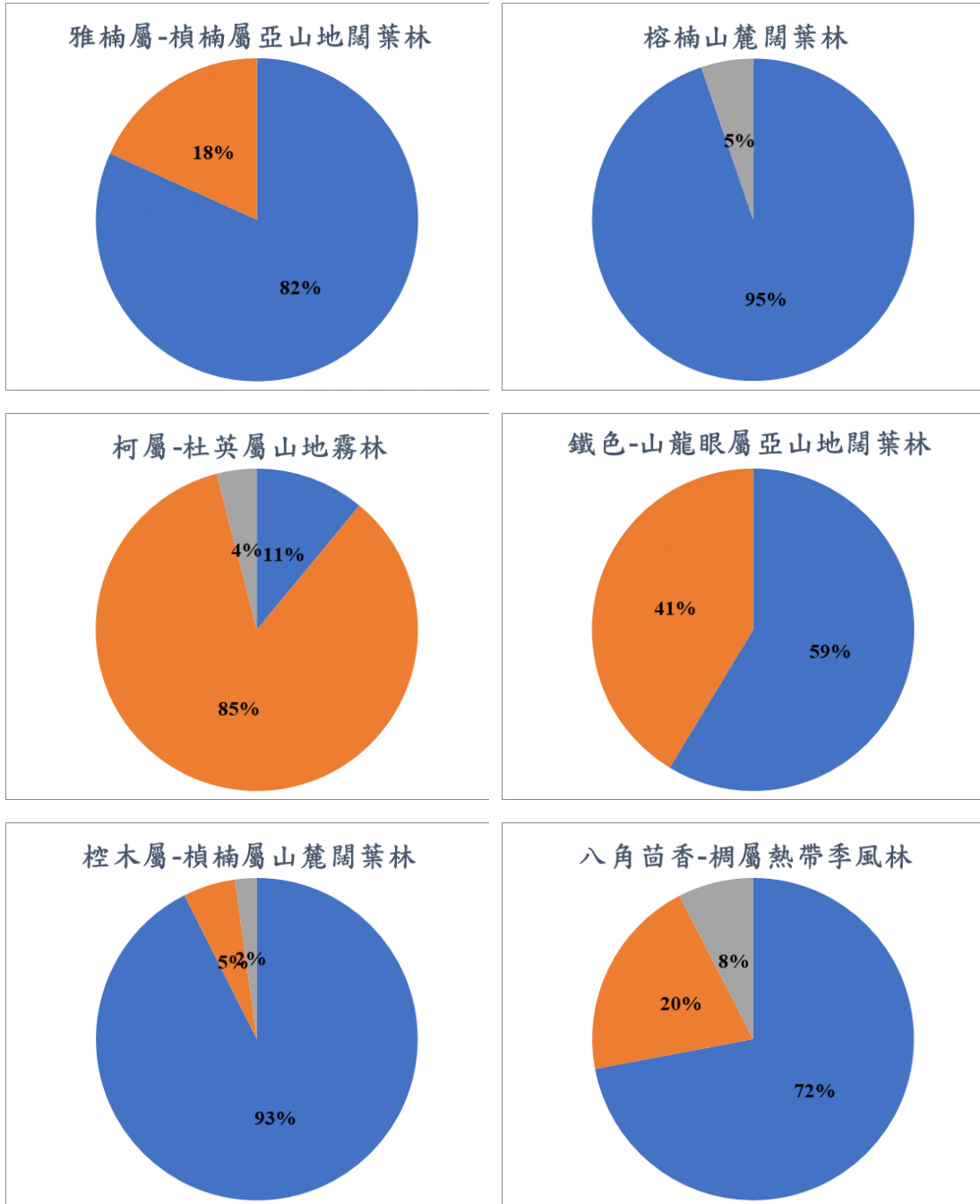
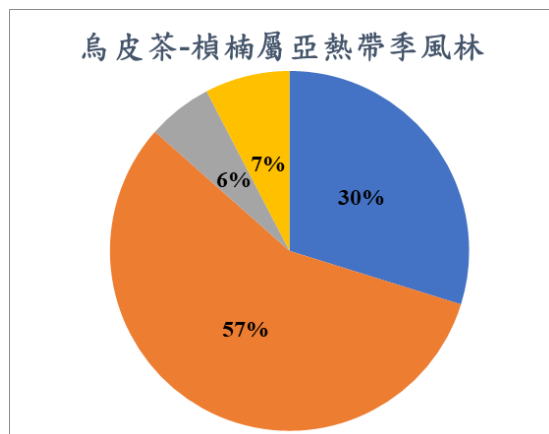


圖 2.18 (續) 各森林類型重要因子的類別統計。

■ 溫度因子   ■ 降水因子   ■ 溫度及降水共同因子   ■ 地形因子



### 3.2.2 現行氣候下的森林群叢分布

依據群團層級模型預測結果，選定隸屬該群團下、樣區數量不低於 10 處的群叢，配合相同的 105 種環境氣候因子，作為群叢層級模型的訓練樣本，據以針對該群團的分布區域，進一步判別不同群叢的潛在分布區與適存機率。以冷杉-鐵杉上部山地針葉林群團 (pure stand) 為例，該群團下共有「玉山箭竹-冷杉」、「鐵杉-冷杉」、「玉山箭竹-鐵杉」、「華山松-鐵杉」、「玉山杜鵑-鐵杉」及「玉山假沙梨-臺灣雲杉」等 6 群叢。在群叢層級模型建置時，即選定鐵冷杉群團下 6 群叢的 241 處樣區，重新進行隨機森林訓練，以 6 群叢作為模型判定項 (response variable)。該群叢層級模型僅被應用在鐵冷杉群團的預測範圍內，對既有的群團區域更細層級的判別與區劃，而不影響鐵冷杉群團以外模型的預測結果。

如群團層級模型判定為混淆植群型 (mixed stand) 時，則該混淆群團下的所有群叢皆被納入隨機森林訓練樣本，再據以判定混淆區內各群叢的適生機率。

表 2.3 係以 13 群團為例，顯示群團以下各群叢之隨機森林模型組成。包含前 20 名重要因子、重要值、貢獻度，以及利用該模型進行群叢判別時的袋外預測錯誤率 (OOB error rate)。群叢層級模型的建置過程，同樣採用「初始模型 (105 個環境與氣候因子)」-「重要因子篩選」-「建置簡約模型」的過程，避免過度擬合，提高統計運算效率。本研究已完成全臺群叢層級的森林植群預測圖，惟群叢數量高達 64 類，成圖顯示極為複雜。圖 2.19 及圖 2.20 分別為群團模型與群叢模型產生的預測結果，群叢模型確實依據氣候資料達成更細緻的棲地分類效果，以圖 2.19 的檜木群團 (土黃色) 為例，圖 2.20 進一步區分了群團以下的 6 個群叢適生區域。

圖 2.19 以羅東林區為例，顯示群團模型對適生棲地的分類結果。

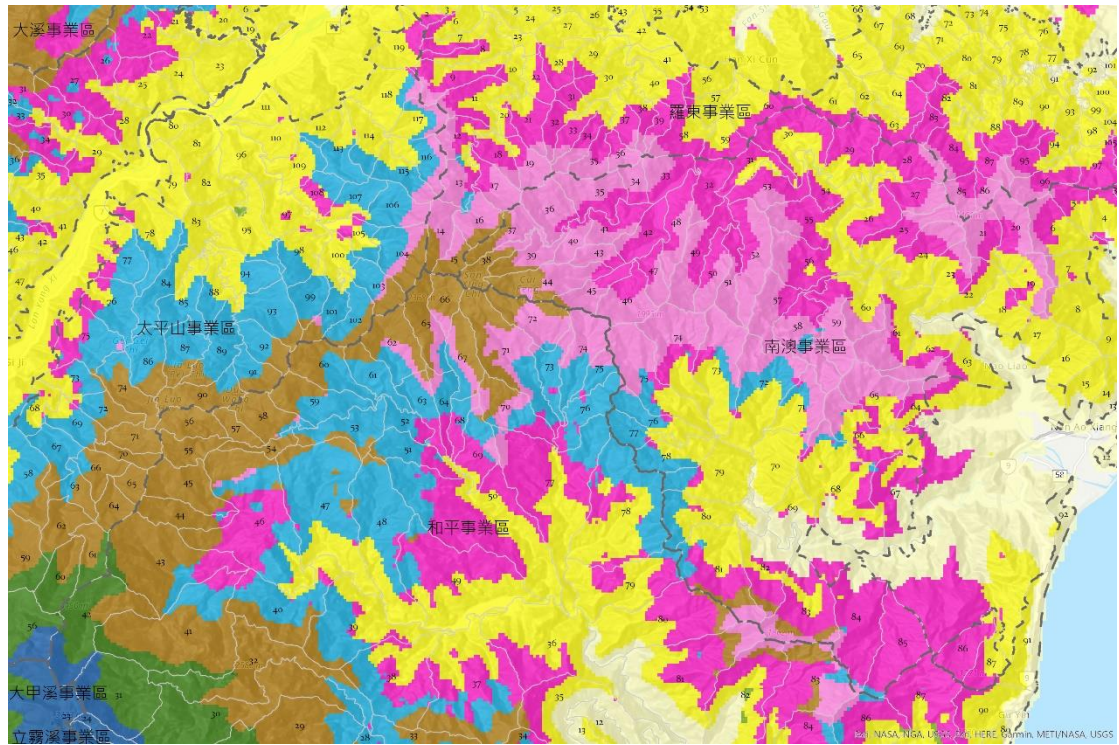
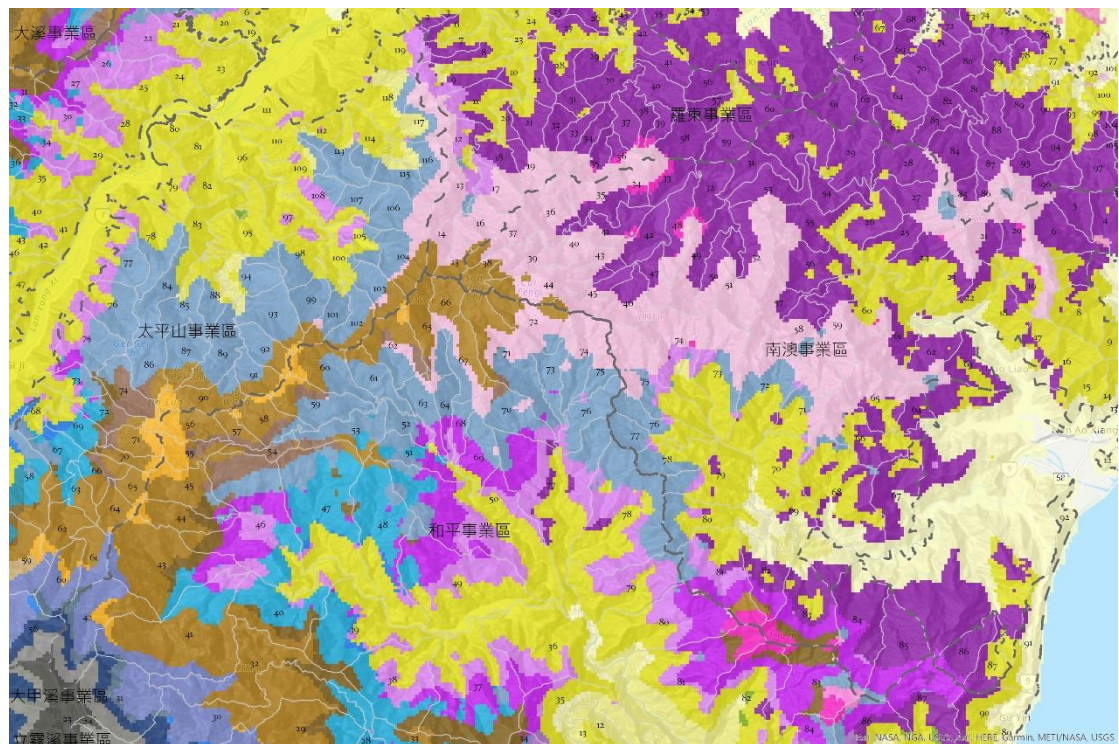


圖 2.20 針對圖 2.19 相同範圍，以群叢模型進行更細緻的棲地分類。



從群團及群叢層級模型的比較，可發現兩者具有顯著的差異。首先是群團模型主要用於較高層級與較大尺度的森林類型適生機率分析及分布範圍判定，根據重要因子組成表，我們發現在較大的地理尺度下，氣溫與群團類型的分布具有極高相關，除柯屬-杜英屬山地霧林群團外，氣溫因子對其餘 12 種群團的空間分布預測，均佔有 60%至 100%的貢獻程度。此結果可解釋為在較高的地理尺度下，群團類型的空間分布主要受到氣溫因子差異的影響，次則為降水因子。然而，觀察群團內不同群叢間的重要判別因子組成，可以發現群團層級與群叢層級模型的顯著不同。我們發現，在同一群團的不同群叢單元間，彼此的氣溫因子差異性顯著降低，相對的，降水與地形的特徵差異成為群叢空間分布的重要判別因子。

對於這樣的結果，可能的解釋是：大尺度的森林分布主要受到溫度的影響。但是當空間尺度限縮至單一群團時，例如探討杉群團內「玉山箭竹-冷杉群叢」、「鐵杉-冷杉群叢」、「玉山箭竹-鐵杉群叢」、「華山松-鐵杉群叢」、「玉山杜鵑-鐵杉群叢」及「玉山假沙梨-臺灣雲杉群叢」的棲位分化時，各群叢間的氣溫差異不再顯著，反而是降水及地形特徵與群叢的分布有較高的相關，成為隨機森林的重要判別因子。此一結果與蘇鴻傑提出的臺灣天然林氣候、植群型與地理氣候區劃分之結論相符，亦即認為就臺灣森林的地理與氣候分布而言，季節性溫度為第一主成分，並可做為垂直（山地）氣候帶劃分之依據；降水與其乾濕季變異則構成第二及第三主成分，代表同一海拔帶下臺灣各地的氣候差異，而成為地理氣候區分類之主要基礎(Su, 1985)。在蘇氏提出的臺灣山地植群分布示意圖裡(Su, 1984)，亦指出海拔（氣溫）是影響臺灣森林類型呈垂直帶狀分布的主要因素，而後在同一海拔帶內，隨著地形與水分梯度的差異，而產生不同植物社會的分化。

然而，我們也發現群叢模型的預測錯誤率較高，且產製極為複雜

的群叢分布預測圖。樣區驗證結果顯示，群團模型的整體錯誤率約在 6.59% 左右，但群叢模型的整體錯誤率提升至 31.68%。由於群團之下的各群叢，彼此的空間距離相對較近、所處環境之差異亦相對較小，利用機器學習模型對各群叢的棲地因子進行分群，必然導致預測準確度降低的結果。此外，複雜的群叢分布預測圖，雖然可以提供更多的生態研究訊息，但就林業實務而言，過度複雜的圖資反而可能增加經營機關與現場人員的困擾。以群團模型而言，產製的林帶分布圖相對簡要，且各群團的分布預測結果與一般林業從業人員的知識概念相近，例如圖 2.16 所示的鐵冷杉林、檜木霧林、水青岡落葉霧林至山地常綠闊葉林的垂直分化，極為直觀且易與經營實務結合。

綜上結果，建議林業部門在因應氣候變遷相關議題時，以群團模型做為探討氣候變遷對森林影響的主要工具，並以「群團」或「森林類型」之尺度研擬後續的因應與調適策略即可，此尺度層級有利於林業人員具體瞭解氣候變遷下的易危森林類型，進而使因應作為獲得落實。本研究已完成精細的群叢層級模型建置方法，建議可納入後續研究，挖掘不同森林群叢的棲位差異，進而發展更細緻的森林生態研究。

### 3.2.3 未來氣候下的臺灣森林類型分布

根據前述隨機森林模型，以及歷史氣候資料產製的現生森林群團分布預測資料，透過不同未來氣候情境的森林分布預測與現生範圍的比較，即可獲得不同氣候變遷情境下的臺灣森林分布變化。再透過 GCM 與不同期間的預測圖比較，即可瞭解各森林類型的潛在棲地增減，探討可能的族群消長及遷徙。

Lin and Tung (2017) 雖指出有 6 種 GCM 的未來預測與臺灣地區的氣候變化趨勢相符程度較高，然而，這 6 種 GCM 對於未來的氣溫

及雨量預測，彼此之間仍然存有明顯的差異（圖 2.21）。就溫度變化而言，所有 GCM 一致顯示溫度將持續上升，在 RCP 4.5 情境（暖化獲得穩定控制的情境）下，升溫幅度以 1°C（GISS-E2-R）至 2.4°C（CSIRO-Mk3-6-0）不等。然而，各 GCM 對於雨量的預測結果呈現較大差異，例如 RCP 4.5 情境下，CSIRO-Mk3-6-0 模型預測本世紀末臺灣地區的平均降雨的可能比基礎年期增加了 20% 至 25%；但 HadGEM2-AO 模型則顯示臺灣地區氣候將偏向乾旱發展，至 21 世紀末預測年降水量可能僅有基礎年期的 90% 左右；部分模型（如 CCSM4）則呈現未來降水總量將維持與目前相近的狀況。就 6 種 GCM 的未來溫度及雨量預測數值，可初步歸納：CSIRO-Mk3-6-0 為偏向極度暖濕氣候的變遷模型，HadGEM2-AO 為暖化但乾旱程度較為劇烈的變遷情境，MIROC5 為氣溫上升但降水總量維持不變的情境，CCM4 則是溫度變化及雨量變化均呈現緩和的變遷模型。利用這些不同變遷情境的氣候模型產生的森林潛在分布，有助於我們探索不同的氣候變遷趨勢下，臺灣森林植群的可能變化方向，並可藉由氣象資料的更新與驗證，追蹤臺灣地區氣候的實際變化，據以選定最可能的森林變遷預測結果，做為自然資源經營管理的參考。

本研究以 100 公尺解析度，依據前述 6 種 GCM，以 *clim.regression* 產生 RCP 4.5 情境下的全臺未來氣候資料，涵蓋時間階段為 2035、2050、2065、2080、2090 等五個未來年度。圖 2.22 以 6 種 GCM 的平均預測結果，選取現行氣候、2035 年、2065 年、2090 年等四個時期，呈現北臺灣主要森林群團的未來變化。以 6 種 GCM 的 RCP 4.5 氣候情境為材料，對於 13 種森林類型在各未來階段進行適生面積增減及海拔分布變化分析，並將極端情形（extreme）、溫和情形（moderate）及平均情形（average）分別表列於表 2.9 及表 2.10，據以評估未來各種森林可能受氣候變遷影響的衝擊程度與變異範圍。

根據各類型森林在未來三階段的適生面積與海拔分布變化（表 2.9-2.10 及圖 2.23-2.24），在 RCP4.5 情境下，水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林、冷杉-鐵杉上部山地針葉林、檜木山地霧林的適生範圍將出現顯著的退縮，在最極端的情形下，迄 2090 年可能縮



減至僅餘 2.06%、2.24%、25.90%、46.00%的適生面積；即使在平均狀態下，所餘棲地亦可能僅剩現在的 7.10%、16.08%、50.42%、53.96%，故可確定為易受氣候變遷衝擊的森林生態系。水青岡山地落葉霧林是受衝擊最嚴重的森林類型，迄 2090 年，在最劣情況下，臺灣水青岡的適存棲地面積將僅餘目前的 2.06%，即使在最佳的氣候變遷預測模型內，其適存面積亦將縮減到目前的 13.97%，顯見在氣候變遷影響下水青岡森林的存續將遭受嚴苛的挑戰。此外，亞高山針葉灌叢及森林在最劣情境下，至世紀末的適存棲地面積為目前的 2.24%，最佳情境下則剩餘 34.28%的適存棲地，是承受衝擊量僅次於水青岡山地落葉霧林的生態系。冷杉-鐵杉上部山地針葉林及檜木山地霧林承受的衝擊量稍低，但平均而言，其適生棲地至世紀末約縮減至現生範圍的 50%，在最劣情境下，則可能縮減至僅餘 25.9%及 46%，亦需進一步關注未來的實際變化。中海拔以下的溫帶及亞熱帶山地森林，其適生面積的增減變化相對不明顯，從櫟屬山地闊葉林至榕楠山麓闊葉林範圍內，適生面積變化量約介於現生範圍的 75.41%-137.69%間，且標準差變異範圍小，顯示 6 種 GCM 模擬一致認為中海拔以下的溫帶及亞熱帶山地森林適生面積總量變化不大，受到氣候變遷的衝擊與威脅較低。

本研究發現，柯屬-杜英屬山地霧林及八角茴香-桐屬熱帶季風林這兩種熱帶森林，在不同 GCM 的模擬結果間呈現極大的變異。以柯屬-杜英屬山地霧林為例，最劣情境顯示至世紀末其適生棲地僅餘目前的 0.2%，幾近滅絕；但最佳情境則顯示其適生棲地面積可能擴張達目前範圍的 158.63%。又以南仁山的八角茴香-桐屬熱帶季風林為例，最劣情境顯示至世紀末其適生棲地僅餘目前的 18.73%，但最佳情境則預測其適生棲地面積將擴張為目前的 358.43%。由於降雨因子在熱帶森林的生態棲位模型內佔有極高的重要性：例如柯屬-杜英屬山地霧林的前 3 名重要因子為 precip\_mar (20.11%)、precip\_apr (19.83%)、precip\_feb (10.98%)，代表 2 至 4 月雨量合計佔有總體模型解釋因子的 50.92%；又如八角茴香-桐屬熱帶季風林的前 3 名因子為低溫因子如 Tmin\_jan (14.31%)、Tmin\_dec (11.41%)、Tmin\_feb (9.49%)，另雨量亦佔了 20%的重要程度。因此，可預見氣候模型內

的雨量變化，將明顯影響熱帶森林的未來分布。目前大氣科學領域提出的多種大氣環流模型，對於全球氣溫的預測，均一致認為將朝向「升溫」方向變化，模型間的差異主要在於「升溫幅度」高低而已。然而，對於區域雨量變化趨勢預測部分，各 GCM 間存在明顯的差異，某些模型預測未來總降水量將大幅增加（如 CSIRO-Mk3-6-0），某些則認為將朝總體降水減少的方向發展（如 HadGEM2-AO）。也就是說，各種氣候變遷模型對於未來的雨量變化趨勢，尚無一致的結論。由於我們所選用的六種 GCM 對未來雨量估測仍有相當大的變異範圍，在不同的水分增減變化下，勢必導致隨機森林模型對熱帶森林適生範圍產生高度歧異的推估結果。準確預測降水的空間與時間分布，原本就是大氣科學領域中較困難的一環；在目前有限的氣候變遷預測技術基礎上，確實降低了我們對熱帶森林適生面積預測的掌握程度。從最劣情境來看，柯屬-杜英屬山地霧林及八角茴香-桐屬熱帶季風林這兩類森林仍可能面臨極高的氣候變遷衝擊。隨著大氣科學領域的研究進展，各種大氣環流模型的準確性將持續獲得調整改善，建議後續仍應依據新發布的 GCM 預測數據，適時更新熱帶森林的適生分布預測，及時掌握熱帶森林的可能變化；另一方面，建議應配合氣候資料及森林樣區監測，瞭解熱帶森林內的族群與結構變化方向，一旦生態系結構出現顯著的變化或退化，則可提出早期預警，以備相關因應措施的採行。

圖 2.23 為六種 GCM 的 RCP4.5 情境下，對於各種森林類型的適生面積預測的詳細結果。六種 GCM 在水青岡山地落葉霧林 (d)、亞高山針葉灌叢及森林 (a)、冷杉-鐵杉上部山地針葉林 (b)、檜木山地霧林 (c) 均獲得「面積縮減（數值小於 1）」的一致結論，顯示不論未來氣候變遷朝任何 GCM 模型發展，均有極高信心認為這四類森林的適生範圍將逐漸縮減。其中水青岡山地落葉霧林未來的適生棲地面積將僅餘現生的 10% 以下，極難避免嚴苛的適生棲地縮減與族群滅絕威脅，且此一衝擊在近未來就可能發生。亞高山針葉灌叢及森林面臨的暖化衝擊較水青岡森林來得緩和和一些，多數的 GCM (66.67%) 指出，在 RCP 4.5 情境下，亞高山灌叢至 21 世紀末的適存面積可能低於現生面積的 20%；然而，少數 GCM (33.33%) 模擬結果顯示，在暖化程度較低、降水變化較緩和的狀況下，亞高山針葉灌叢仍有機會

保留現生適存面積的 30%至 35%。但不論哪一種氣候變遷模型，均一致呈現亞高山灌叢適生棲地有逐漸縮減的可能性，必須及早研擬相關保育因應措施。冷杉-鐵杉上部山地針葉林遭遇的衝擊量再其次於亞高山灌叢。66.67%的 GCM 指出，RCP 4.5 情境下，鐵冷杉森林至 21 世紀末的適存面積可能僅餘目前的 25.9%至 47.04%，其中又以最暖濕的氣候模型（CSIRO-Mk3-6-0）的衝擊最強烈，顯示鐵冷杉林的適存棲地將僅餘目前的 25%左右；然而，兩個較緩和的 GCM（CCM4、GISS-E2-R）模擬顯示，當 21 世紀末氣溫升高幅度控制在 1.5°C 以下時，鐵冷杉林仍有可能維持與現生棲地相近的適存面積。此結果顯示，六種 GCM 對於鐵冷杉森林變遷的預測略有分歧，且暖化程度對於鐵冷杉森林的未來變化佔有關鍵角色，若未來趨勢朝向高度暖化的模型發展，則鐵冷杉林的適存棲地可能出現劇烈縮減；若暖化程度朝中等或緩和的模型發展，則鐵冷杉林遭受氣候變遷衝擊的機會相對為低。

對熱帶森林而言，不同大氣環流模型的森林變遷模擬結果具有顯著的差異。以柯屬-杜英屬山地霧林而言，極度暖濕（CSIRO-Mk3-6-0，總降水量增加 20%至 25%）或極度暖乾（HadGEM2-AO，總降水量減少 10%）模型皆顯示此型森林的適生棲地將出現劇烈縮減，在 RCP 4.5 情境下，預測至 21 世紀末可能僅餘現行適存面積的 0.2%或 13.39%，幾近滅絕；然而，另外 4 個大氣環流模型顯示，在年降水量變化未趨於極端化的狀況下，柯屬-杜英屬山地霧林有很高的機會保存與現行棲地面積相近的適存範圍。八角茴香-桐屬熱帶季風林對於氣候變化的調適能力較柯屬-杜英屬山地霧林略佳，除了最暖濕情境（CSIRO-Mk3-6-0）預測八角茴香-桐屬熱帶季風林適存面積可能出現劇烈縮減，至 21 世紀末僅存現行範圍的 18.73%以外，其餘大氣環流模型下並未發現本型森林可能發生縮減的跡象。歸納六種 GCM 對於熱帶森林的變遷分布預測結果，相對於高海拔或溫帶森林而言，可發現氣溫上升對於熱帶森林的影響較為輕微，但水分條件變化對於熱帶森林的未來變遷佔有極重要的關鍵角色。氣候變遷可能伴隨極端事件（如強降水、持續不降水日）的頻度與強度改變，對森林的水分條件帶來更高的不確定性。因此，不應輕忽對於柯屬-杜英屬山地霧林、八角茴香-桐屬熱帶季風林這兩種熱帶森林的長期監測，一旦發現未來

的氣候變遷朝向降水型態極端化發展時，就應即時配合森林調查資料，比較該型森林是否出現適存棲地的退縮變化，以便即時推動相關保育工作。

據上研究成果，本計畫認為臺灣的 13 種主要森林類型中，確定易受氣候變遷衝擊的森林類型為：水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林、冷杉-鐵杉上部山地針葉林。另外，柯屬-杜英屬山地霧林、八角茴香-桐屬熱帶季風林亦可能遭受嚴重衝擊，惟分析結果的不確定性高。

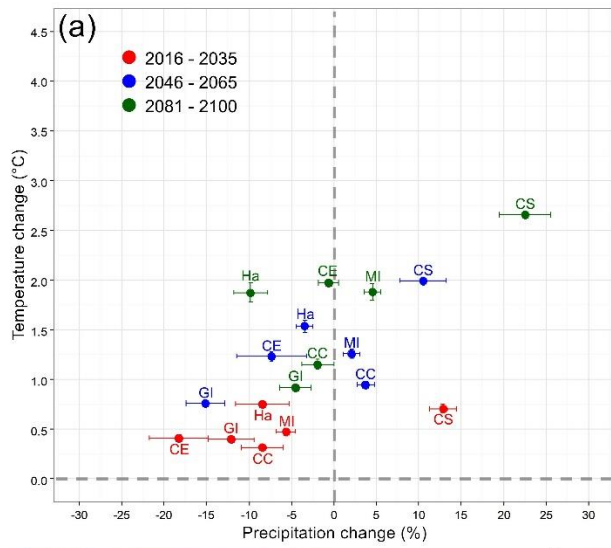


圖2.21 本研究選定6種大氣環流模型模擬森林的未來變化。各GCM在RCP 4.5情境下的年平均氣溫及年累計降水相對變化量如左圖。

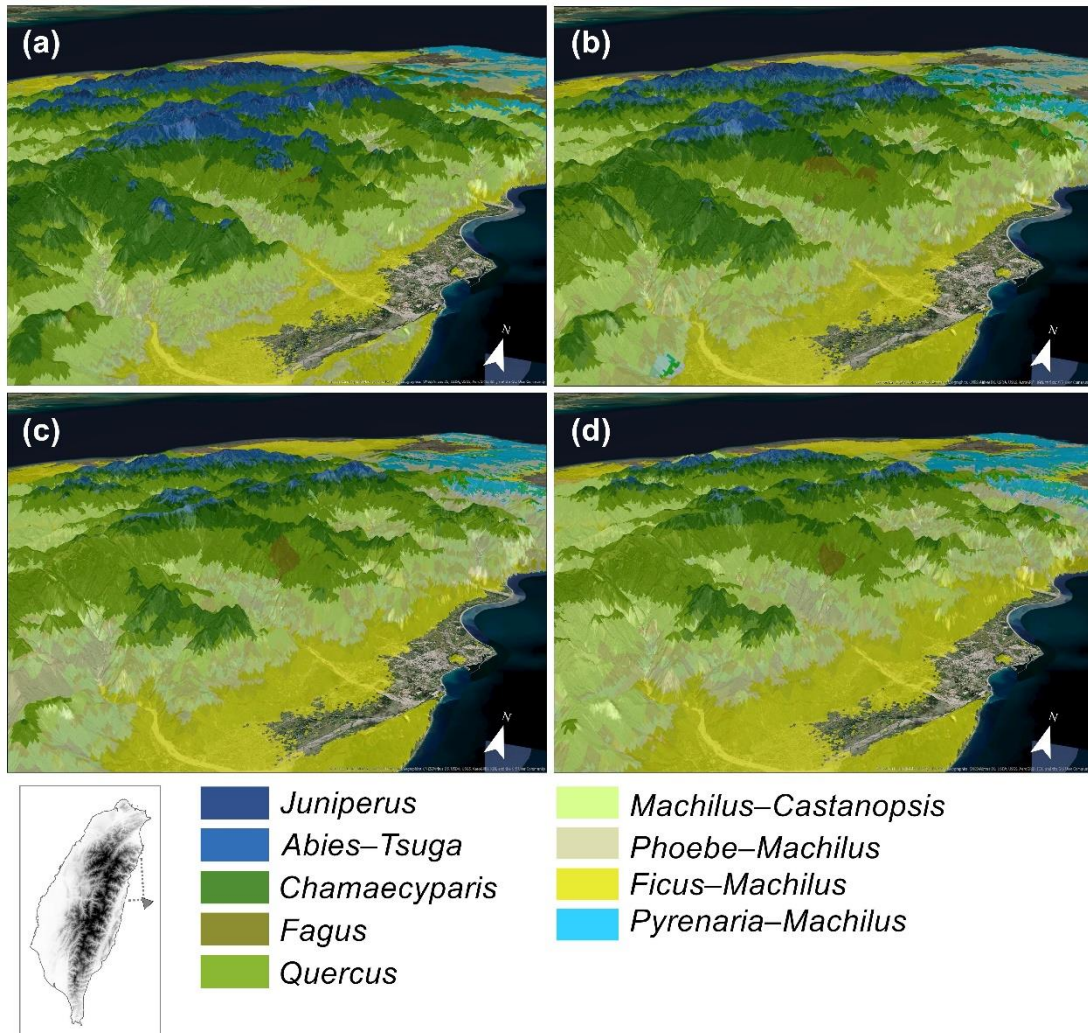


圖2.22 RCP 4.5情境下，北臺灣森林的現在與未來三階段平均變化。

表2.10 模擬13種森林類型於六種GCM及RCP 4.5情境下的適生區域面積變化情形

Forest type	Baseline area (ha)	2016-2035			2046-2065			2081-2100		
		Moderate	Average	Extreme	Moderate	Average	Extreme	Moderate	Average	Extreme
☑ <i>Juniperus</i>	29,134	62.54%	49.41%	36.00%	40.47%	26.53%	8.73%	34.28%	16.08%	2.24%
☑ <i>Abies-Tsuga</i>	114,151	91.93%	81.75%	69.30%	80.83%	63.74%	40.41%	79.50%	50.42%	25.90%
☑ <i>Chamaecyparis</i>	250,006	83.37%	79.48%	73.95%	74.49%	59.81%	51.29%	67.80%	53.96%	46.00%
☑ <i>Fagus</i>	15,433	52.59%	41.93%	31.44%	30.37%	15.08%	5.50%	13.97%	7.10%	2.06%
<i>Quercus</i>	358,009	105.21%	99.69%	90.97%	104.72%	95.56%	86.97%	110.09%	89.60%	75.41%
<i>Machilus-Castanopsis</i>	326,277	114.08%	98.45%	89.77%	104.43%	99.39%	94.81%	117.69%	91.41%	78.62%
<i>Phoebe-Machilus</i>	318,017	127.55%	98.51%	87.17%	101.90%	86.38%	65.22%	120.76%	91.65%	71.71%
<i>Ficus-Machilus</i>	694,606	116.38%	99.17%	77.02%	118.93%	108.07%	97.87%	137.69%	110.75%	81.06%
☑ <i>Pasania-Elaeocarpus</i>	8,750	406.33%	197.49%	69.12%	350.51%	166.44%	2.75%	158.63%	69.34%	0.20%
<i>Drypetes-Helicia</i>	143,575	162.78%	118.29%	62.27%	137.07%	106.68%	69.57%	152.02%	71.16%	23.83%
<i>Dysoxylum-Machilus</i>	240,205	247.09%	146.75%	80.89%	207.45%	171.43%	114.18%	270.85%	213.81%	120.78%
☑ <i>Illicium-Cyclobalanopsis</i>	27,314	273.07%	125.27%	30.33%	288.90%	181.28%	17.60%	358.43%	202.79%	18.73%
<i>Pyrenaria-Machilus</i>	182,806	96.27%	83.07%	79.01%	113.45%	91.03%	74.15%	123.48%	93.65%	72.76%

表2.11 模擬13種森林類型於六種GCM及RCP 4.5情境下的適生區域海拔變化情形

Forest type	Baseline elevation (m)	2016-2035			2046-2065			2081-2100			
		25% Qu.	Median	75% Qu.	25% Qu.	Median	75% Qu.	25% Qu.	Median	75% Qu.	
☑ <i>Juniperus</i>	2,941	3,098	3,250	3,008	3,183	3,347	3,069	3,242	3,406	3,271	3,426
☑ <i>Abies-Tsuga</i>	2,586	2,755	2,947	2,680	2,847	3,031	2,761	2,928	3,102	2,814	2,986
<i>Chamaecyparis</i>	2,100	2,284	2,474	2,232	2,411	2,601	2,345	2,532	2,714	2,407	2,596
☑ <i>Fagus</i>	1,230	1,514	1,690	1,233	1,626	1,815	1,292	1,763	1,915	1,306	1,428
<i>Quercus</i>	1,574	1,763	1,952	1,697	1,891	2,086	1,834	2,029	2,238	1,906	2,103
<i>Machilus-Castanopsis</i>	799	1,032	1,266	947	1,194	1,428	1,093	1,341	1,580	1,213	1,455
<i>Phoebe-Machilus</i>	397	706	1,007	389	686	1,016	572	898	1,239	717	1,079
<i>Ficus-Machilus</i>	112	207	355	127	242	425	129	247	454	136	270
☑ <i>Pasania-Elaeocarpus</i>	1,184	1,365	1,526	991	1,582	1,814	962	1,679	1,894	1,350	1,699
<i>Drypetes-Helicia</i>	553	776	1,040	702	950	1,227	842	1,071	1,325	981	1,227
<i>Dysoxylum-Machilus</i>	91	153	315	94	171	339	106	220	478	115	245
☑ <i>Illicium-Cyclobalanopsis</i>	258	401	542	335	525	778	376	590	852	346	587
<i>Pyrenaria-Machilus</i>	260	486	837	261	487	841	232	450	772	252	465

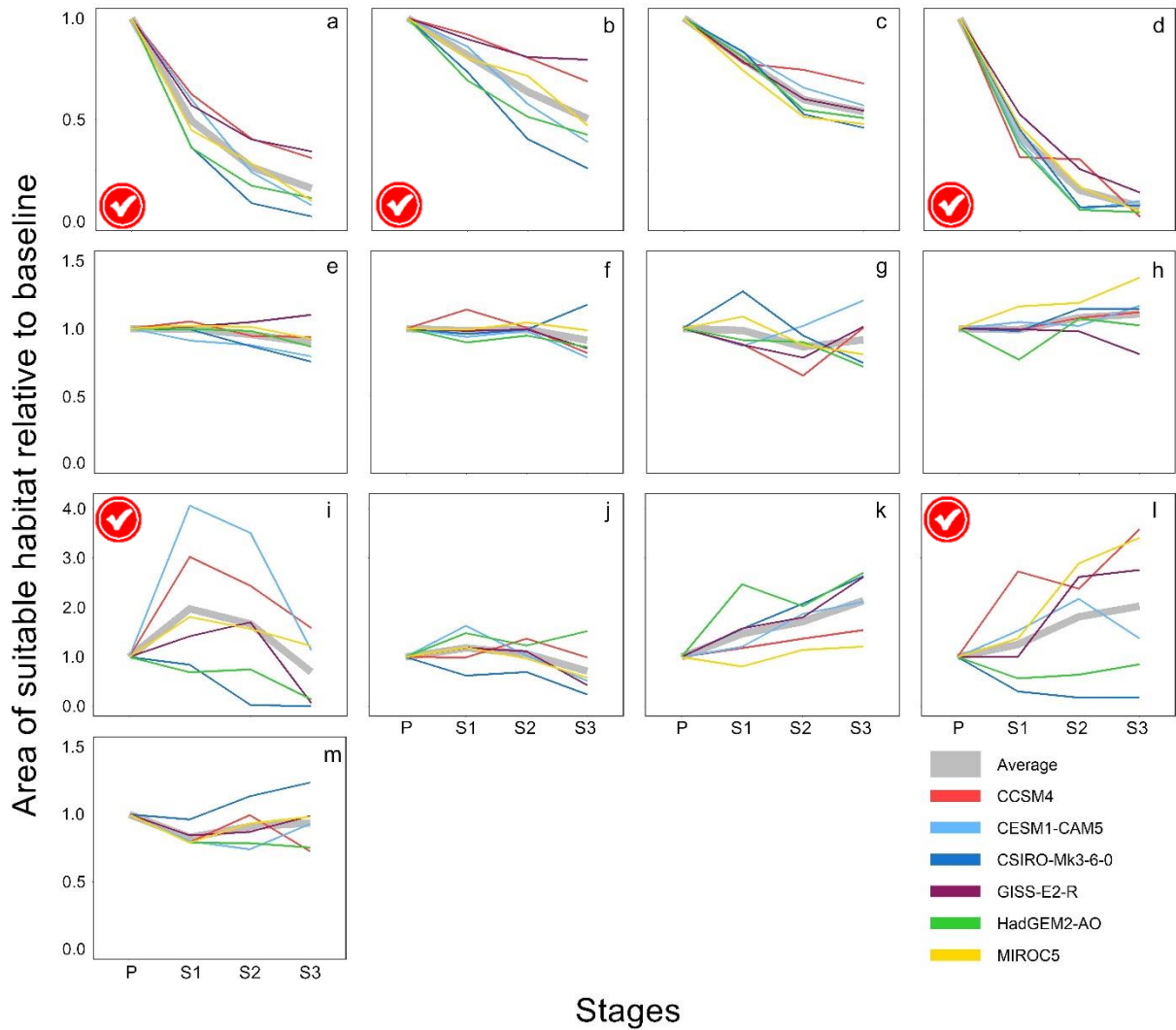


圖2.23 根據6種GCM的RCP 4.5暖化情境，分析13種森林類型現在與未來三階段（S1, 2035; S2, 2065; S3, 2090）的適生面積相對變化。粗體灰線代表6種GCM預測結果的平均值。打勾記號為相對易受氣候變遷衝擊的森林類型。

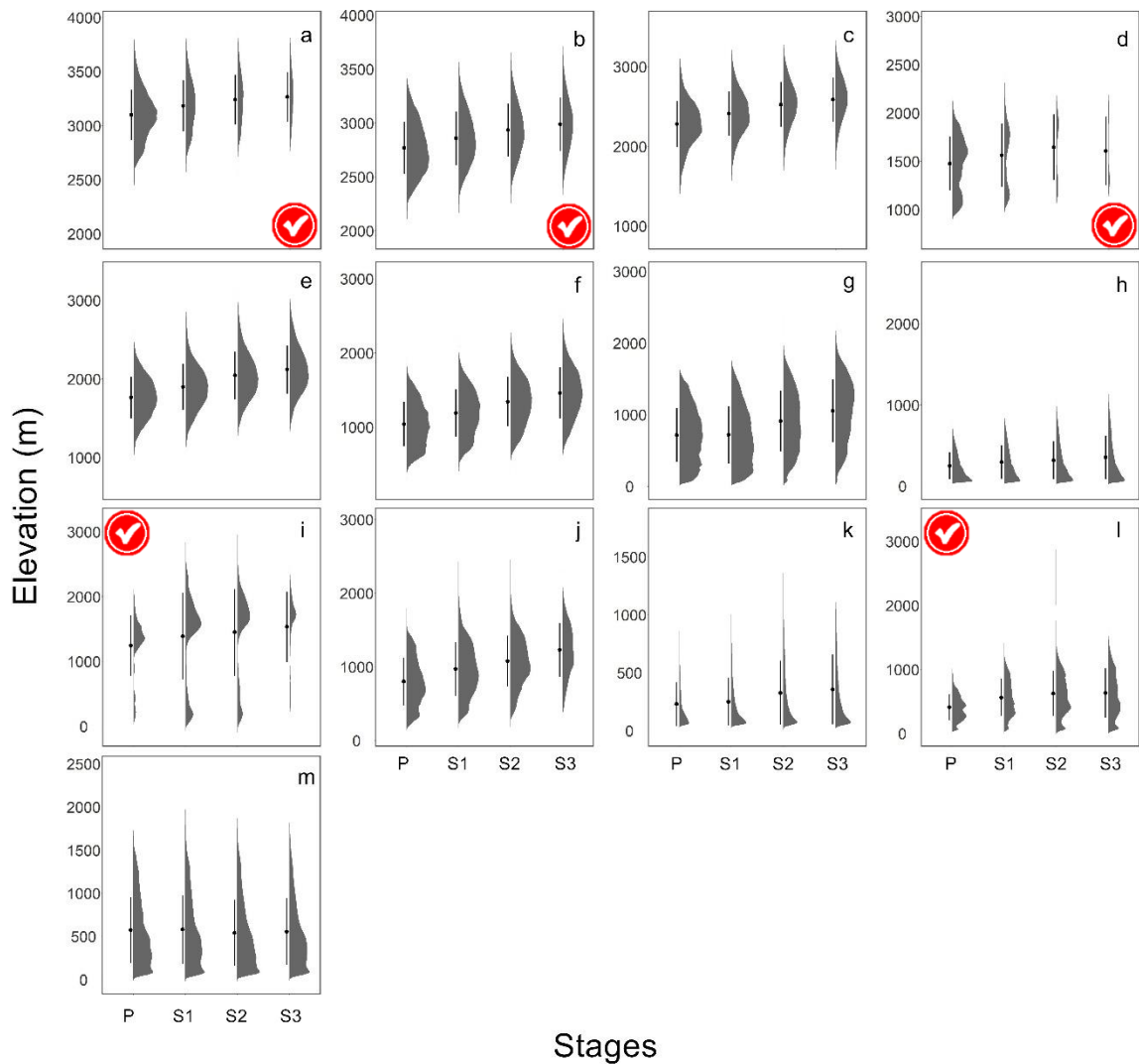


圖2.24 根據6種GCM的RCP 4.5暖化情境計算13種森林類型現在與未來三階段（S1, 2035; S2, 2065; S3, 2090）的海拔與適生面積平均變化。灰色陰影面積代表適生面積的相對變化量，粗體黑線代表25%至75%預測值分布範圍，黑點則為海拔分布中位數。打勾記號為相對易受氣候變遷衝擊的森林類型。



### 3.3 易危森林類型的模型系集總合與適生區域未來變化

#### 3.3.1 易危森林類型適生區域的未來變化

從上一節結果可發現，6種 GCM 的 RCP4.5 情境獲得的森林分布預測具有程度不等的差異。因此僅能採用平均值、標準差、變異範圍等方式，從不同 GCM 的結果歸納出森林適生面積與海拔分布的整體趨勢，說明可能存在的誤差範圍。然而，當我們要把不同 GCM 的預測結果投射至地理空間時，即需透過某些方法將多組預測結果合併至單一圖資，且必須包含多組預測結果的地理趨勢及變異範圍，方能呈現氣候變遷下各類型森林的可能地理分布變化。此節我們使用投票法 (Majority voting) 及等量權重方式，對 6 種 GCM 產生的森林分布模型系集進行歸納，各地理網格根據 GCM 預測有/無特定森林類型分布結果，取得 0 至 6 評分，0 代表各種 GCM 均預測非該森林類型的適存環境，6 則代表所有 GCM 均認為該網格氣候條件適宜該森林類型生存。依據評分結果製作未來的分布預測圖，即可找出多數模型認可的適生範圍變遷方向，同時可包含潛在分布機率較低的適生範圍（例如僅有 50% 的預測模型判定為出現的地區）。

本計畫共選定 4 種易危森林類型：水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林、冷杉-鐵杉上部山地針葉林、柯屬-杜英屬山地霧林。依據上述方法進行模型系集總合，並製作現生與未來地理分布圖。預測圖資係以 100 公尺為解析度，涵蓋全島海拔 100 公尺以上的山地及丘陵範圍，針對每一森林類型，每個地理網格分別取得 0 分（每個 GCM 皆判斷為非適生棲地）至 6 分（每個 GCM 皆判斷為適生棲地），並按 3 個不同未來階段製圖，比較適生棲地的空間變化，據以找出可能的遷徙廊道（適生棲地熱點隨時間朝特定方向移動），以利後續監測及保育工作應用。

圖 2.25 為水青岡山地落葉霧林現生與未來三階段經由 Majority voting 後的適生棲地分布情形。結果顯示：六分之五的 GCM (83.33%) 指出，21 世紀末烏來區波露山的氣候環境可能適合臺灣水青岡生存，且周邊棲地逐漸向露門山與波露山濃縮群聚，可能成為避難所；中等

數量氣候模型 (50%-75%) 指出，烏來區露門山至阿玉山稜線亦可能為臺灣水青岡的避難所；部分氣候模型 (33%-50%) 指出，三星山東側的中興崗、三星池一帶及嘉平林道沿線 (給里洛山東側海拔約 1700m 至 2000m 處) 亦是可能的避難所。少數模型 (33.33%) 指出，大白山、蘭坎山、拉拉山等地的水青岡族群仍有殘存的機會，但棲地面積縮減嚴重。

亞高山針葉灌叢及森林的分析結果顯示，本植群型主要分為中央山脈北段及南段兩部分。所有 GCM (100%) 一致指出，亞高山針葉灌叢植群將向高海拔遷徙，適存棲地面積持續縮減、濃縮，地形隔離程度明顯提高。在臺灣北部，所有模型 (100%) 一致呈現雪山、南湖大山及大雪山可能為最終的避難所；少數模型 (16.67%-33.33%) 指出，部分海拔 3500 公尺以上山頭，如大劍山、頭鷹山、大霸尖山、中央尖山、北合歡山等地，則可能殘存小面積的適宜棲地 (圖 2.26)。雪山東稜、合歡東峰、大雪山尾段等海拔低於 3500 公尺的山頭，未來很可能不再是本植群型的適存地點，對於特有或狹窄分布於這些地點的稀有物種，應及早預擬保護措施。

冷杉-鐵杉上部山地針葉林的分析結果顯示，鐵冷杉群團在中央山脈的現生分布大致分為北段及南段兩個主要部分。北段部分以雪山山系的大霸尖山、雪山、大雪山至白姑大山為一群，另以南湖大山、中央尖山、合歡山至奇萊山為一群 (圖 2.27)。所有 GCM (100%) 一致指出，鐵冷杉群團的適生棲地將向高海拔移動，惟中央山脈及雪山山脈各山頭在海拔 3000 公尺左右仍有稜線相連，故棲地片斷化情形不若亞高山針葉灌叢群團嚴重。所有 GCM (100%) 一致呈現，北臺灣鐵冷杉適存棲地未來將略為限縮，並區分為雪山山塊、中央山脈北段 (南湖至奇萊)、及中央山脈中段 (北合歡山以南) 等三群 (圖 2.27)。在中部地區，少數模型 (33.33%) 指出，目前現存於干卓萬山塊的鐵冷杉族群仍有殘存機會。在臺灣南部，所有模型 (100%) 一致呈現中央山脈南段 (秀姑巒山至卑南主山) 及玉山山塊鐵冷杉仍可維持連續分布；南、北大武山仍為與中央山脈大族群呈現隔離分布的地點。部分海拔接近 3000 公尺左右的山頭，如出雲山、玉穗山、南面山等，

多數模型(66.67%)認為將不再是適合鐵冷杉植群生存的棲地範圍(相關圖資以 Geodatabase 形式提供)。

有關柯屬-杜英屬山地霧林的適存棲地變遷分析部分，前一節已說明本群團適生範圍的關鍵因子以雨量為主，例如 precip\_mar (20.11%)、precip\_apr (19.83%)、precip\_feb (10.98%) 等。由於不同 GCM 對未來降水量預測的變異較大，導致各 GCM 形成較歧異的未來森林分布預測。從投票法結果也可發現，隨著時間階段拉長，柯屬-杜英屬山地霧林群團的適存棲地顯得分散，不如亞高山灌叢、鐵冷杉林或臺灣水青岡等高海拔及溫帶森林類型，得到評分較高的集中分布區域，因此較難進行不同氣候變遷模型的結果歸納，對熱帶森林的變化方向亦難獲得一致的結論(圖 2.28)。整體而言，柯屬-杜英屬山地霧林植群型的現生分布地點以中央山脈南段的姑子崙山、大漢山至衣丁山及大里力山為主，海拔約介 1400 至 1800 公尺左右。姑子崙山與大漢山為本群團適生分布區域的南界，並橫跨臺灣穗花杉自然保留區及浸水營野生動物重要棲息環境兩處保護區。所有 GCM (100%) 一致指出在 2035 年的氣候環境下，大漢山及姑子崙山將不再適合本群團生存，其分布南界將北移至衣丁山至大里力山稜線一帶。中等數量至少數 GCM(33.33%-50.00%)指出，衣丁山至大里力山海拔約 1800 公尺稜線、知本溪上游至松山海拔 1600 至 1900 公尺南坡、內本鹿盆地周圍等地，迄 2090 年可能仍適宜本森林類型生存。本植群型的氣候變遷預測的不確定性較高，整體而言可看出適棲範圍略有往北移動趨勢。本群團屬於較稀有的熱帶山地霧林，且為柳葉石櫟等稀有物種棲地，建議仍需配合現地監測及模式技術改善，對預測結果進行滾動修正。此外，所有 GCM 指出姑子崙山與大漢山的現生柯屬-杜英屬山地霧林可能迅速消失，建議應加以監測，以瞭解是否對臺灣穗花杉自然保留區及浸水營野生動物重要棲息環境等兩處保護留區的動、植物棲地造成影響。

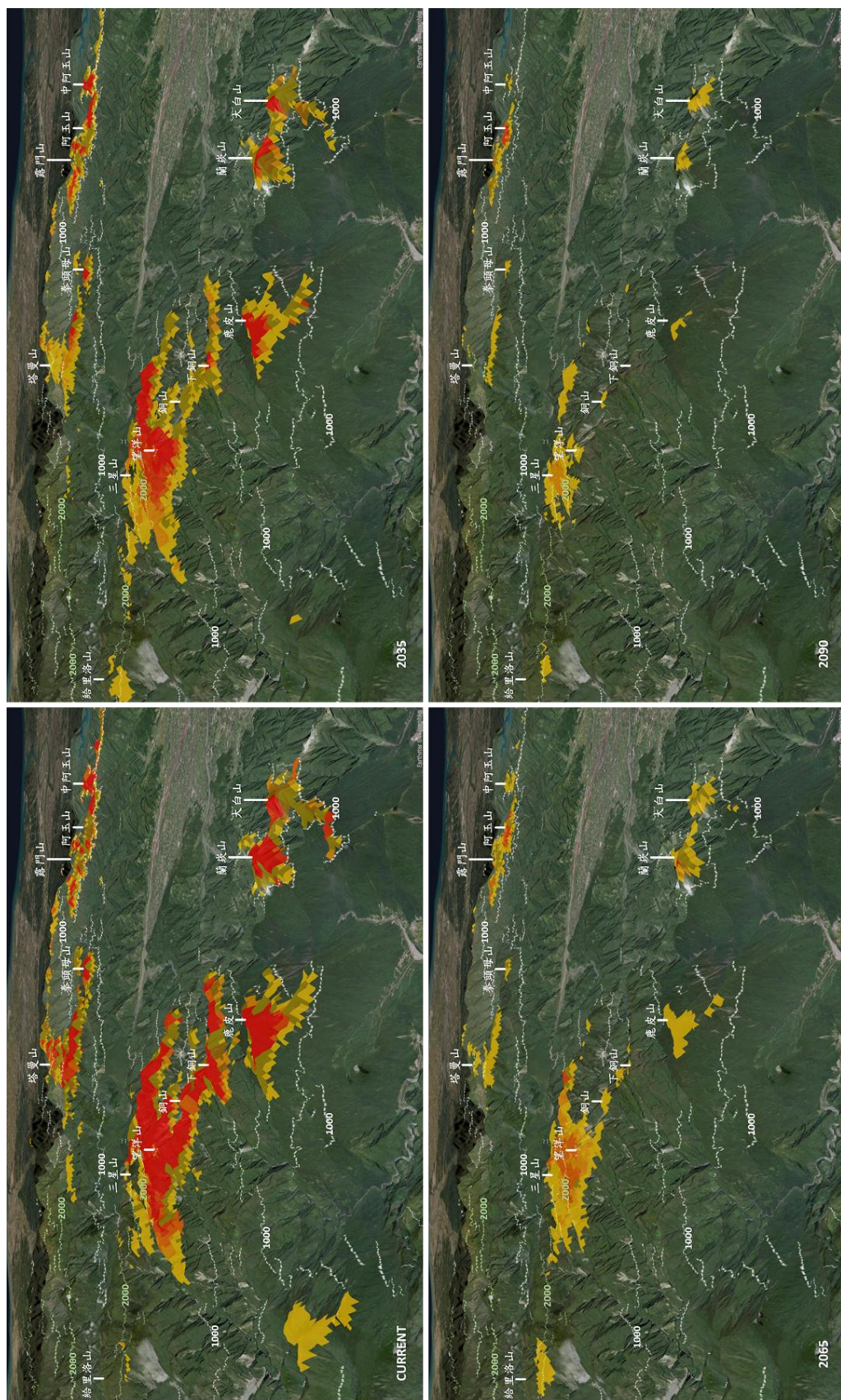


圖2.25 水青岡山地落葉霧林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。

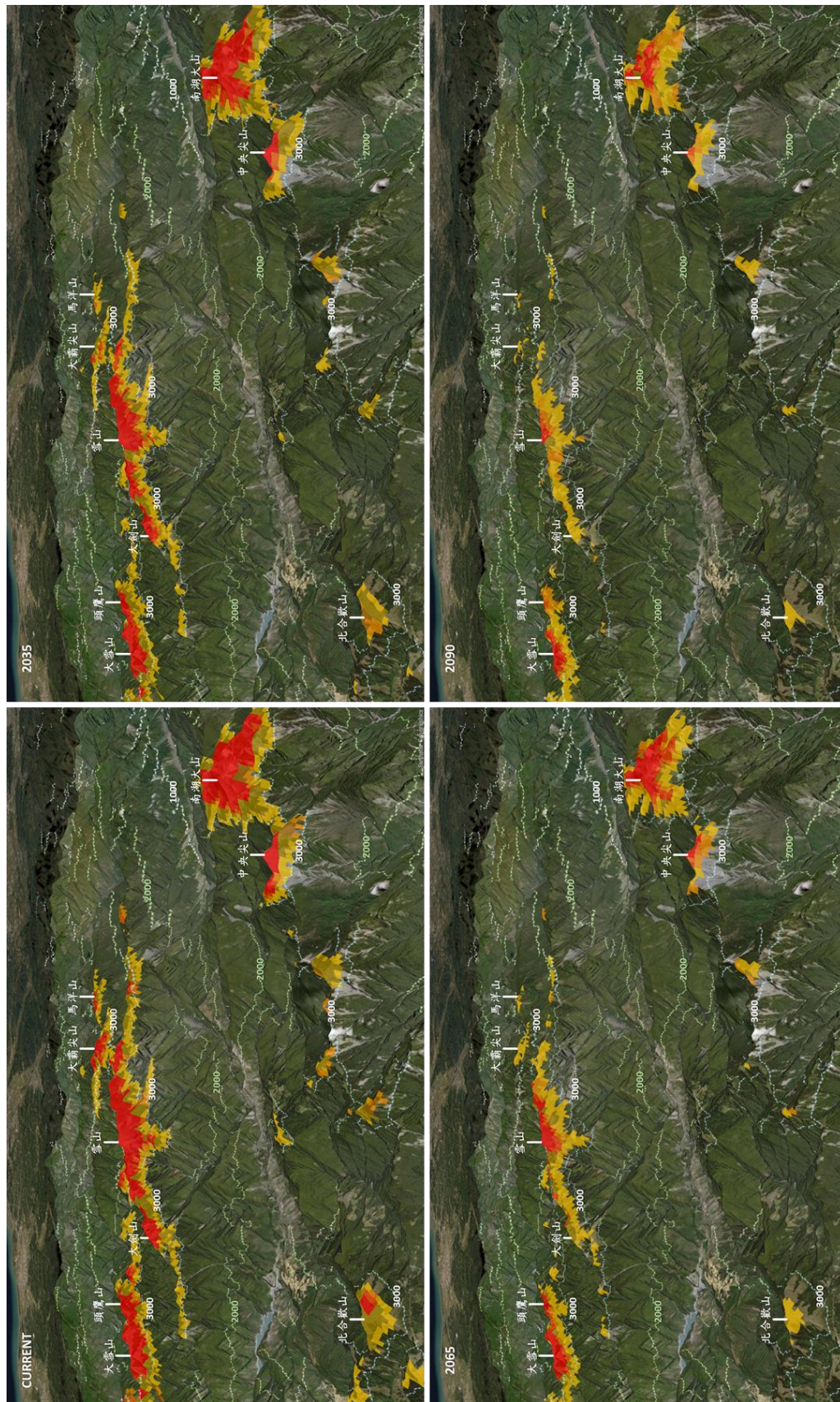


圖2.26 亞高山針葉灌叢及森林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。

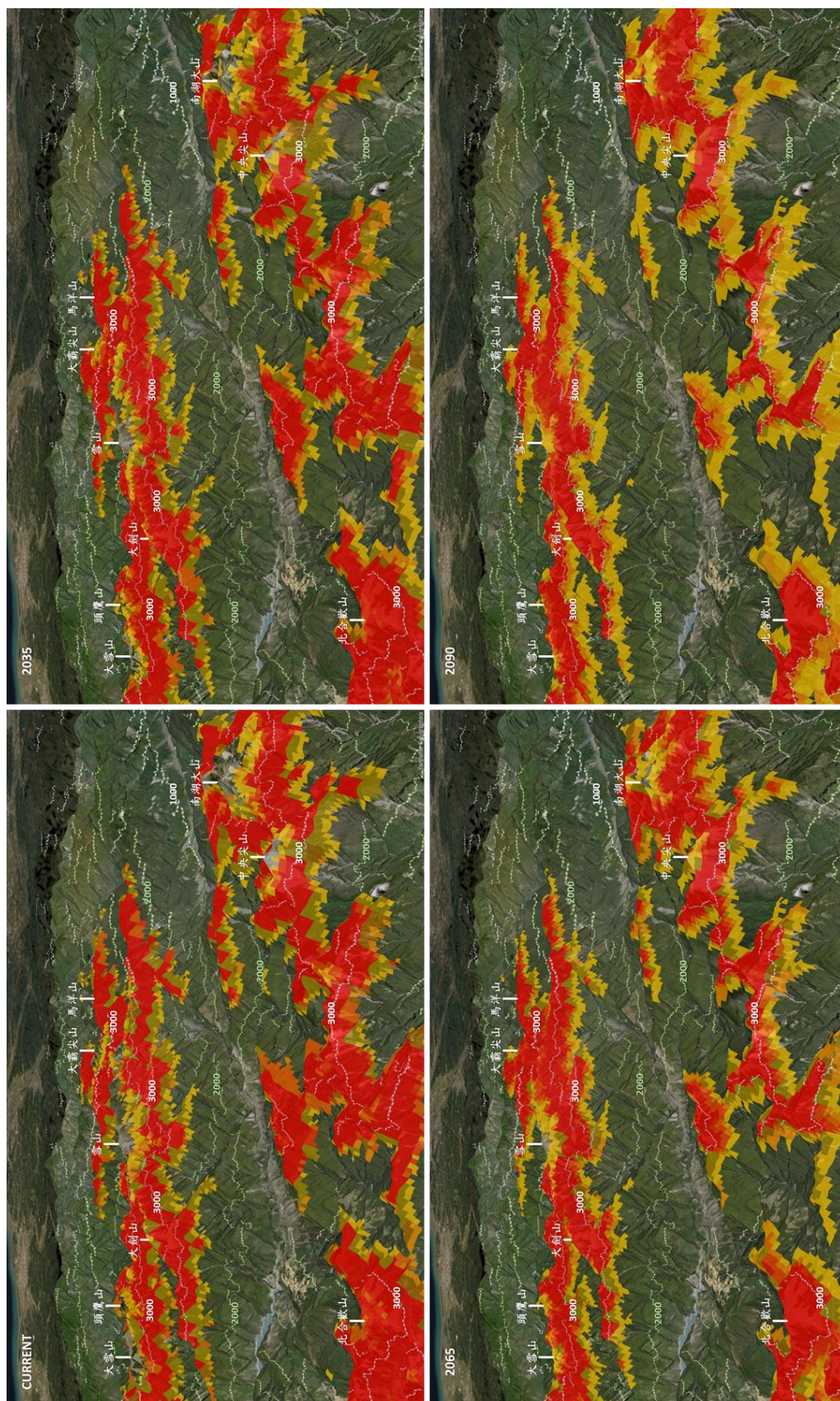


圖2.27 冷杉-鐵杉上部山地針葉林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。

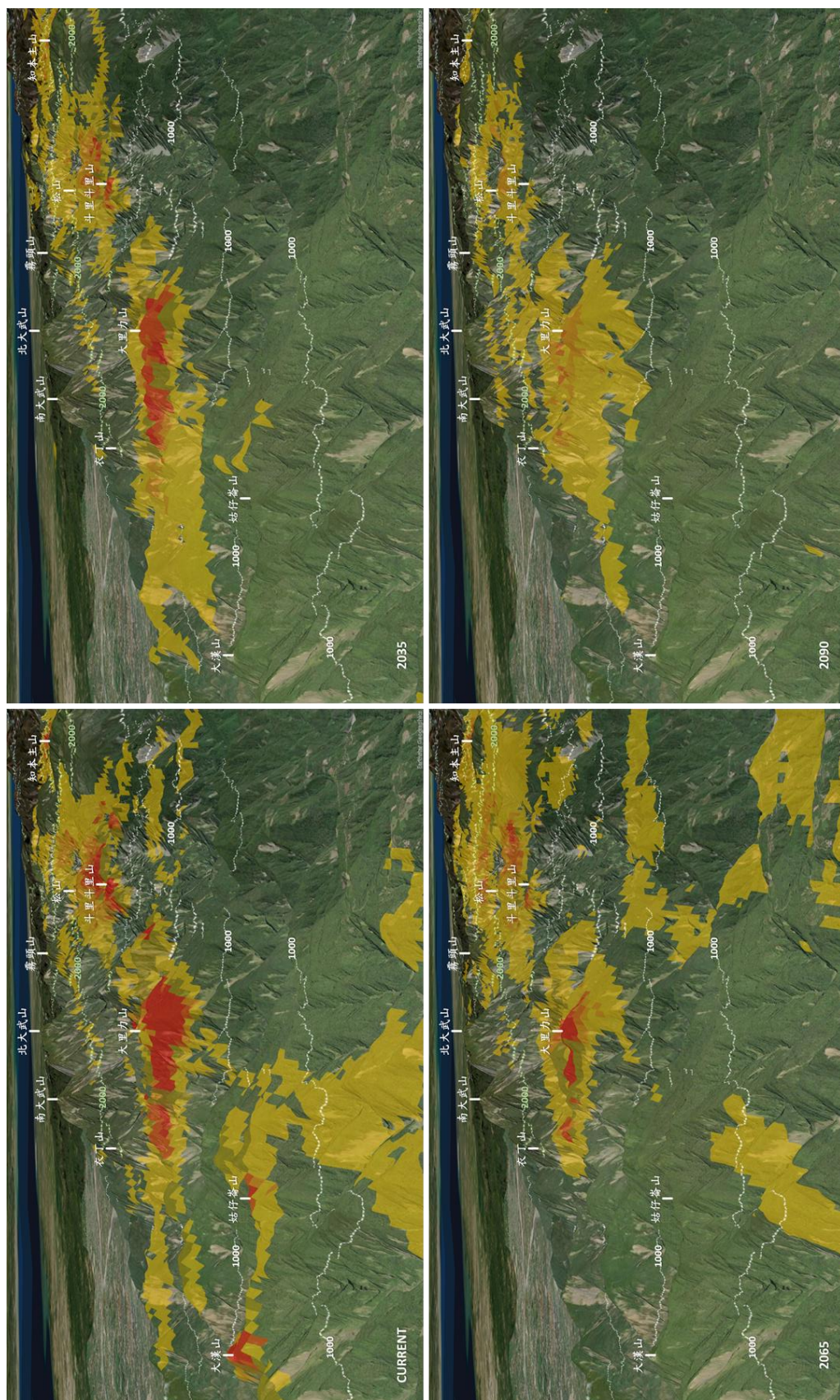


圖2.28 柯屬-杜英屬山地霧林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。

### 3.3.2 未來預測圖資在森林經營與保育的應用

本研究利用易危森林類型模型系集與地理分布預測結果，與現有的森林經營及自然保育圖資進行疊合分析，可探討保護留區保育標的的未來適存情形、適存棲地遷移及保育輔助方式、以及保護留區是否面臨調整需求等議題。

以水青岡霧林為例，新北市和桃園市交界處的水青岡純林，發現之初被認為是本物種在北半球分布的最南限(後來研究發現應以大白山、蘭炭山為最南族群)，在植物地理學上具有重要的研究價值；復因當地山區野生動物資源豐富，故於 81 年依文化資產保存法成立「插天山自然保留區」，面積約 7700 公頃。臺灣水青岡多生長羅培山、北插天山、盧平山至拉拉山的稜線附近，形成大面積純林，但調查顯示結實率偏低，種子不易發芽，小苗數量也少。隨機森林模型系集顯示，在現行氣候狀態下，樂佩山、北插天山、盧平山、拉拉山、塔曼山至巴博庫魯山之連續稜線確實是臺灣水青岡適存的環境，海拔約介 1600 至 2000 公尺間，但適存稜線狹窄，模型預測其寬度約僅 300 至 500 公尺左右。此外，在 6 個 GCM 的 RCP 4.5 情境下，臺灣水青岡在本區域的適存度可能快速下降，至 2065 年僅有 1 個 GCM 預測本區域稜線仍適合臺灣水青岡生存，至 2090 年則適存棲地幾乎消失殆盡(圖 2.29)。分析結果顯示，在氣候變遷的影響下，插天山自然保留區的保育標的可能在未來 50 年完全失去適合棲息的環境條件，逐漸走向在地滅絕，因此，除了持續監測與搶救具有遺傳特殊性的族群或個體外，未來有可能遭遇保護留區邊界及保育政策調整等課題。

相較於插天山自然保留區水青岡霧林帶的面積縮減與在地滅絕現象，銅山的水青岡族群的適存棲地，則呈現朝西、朝高海拔方向移動趨勢，迄 2090 年以三星山東側的中興崗、三星池一帶及嘉平林道沿線(給里洛山東側海拔約 1700m 至 2000m 處)為殘存適棲區域。為了釐清這些殘存適棲地點的林地利用現況，本計畫使用林務局第四次全國森林資源調查成果圖資，與銅山水青岡霧林帶棲地遷徙範圍進行套疊分析，發現臺灣水青岡目前棲息的銅山、下銅山、大白山及蘭炭山等地，森林資源調查均判定為天然林分布區域；水青岡適存棲地



隨著暖化趨勢朝翠峰湖及中興崗方向移動時，將與既有人工林範圍逐漸重合；至 2090 年殘存棲地中，除了極為侷限與高度隔離的大白山、蘭炭山、銅山等小面積地點，主要殘存棲地（中興崗、三星池一帶）與造林區域幾乎完全重疊（圖 2.30）。森林資源調查資料顯示，望洋山、三星山、中興崗、三星池附近均為經營程度較密集的生產性人工林，造林樹種以檜木為主（資源調查樹種代碼 A101）。基於保育珍貴的臺灣水青岡殘存族群目的，未來可考慮本區域人工林經營納入協助遷徙(assisted migration)作法，採取鄰近的銅山水青岡種子育成幼苗，並納為檜木人工林撫育疏伐或林地更新的栽植物種，可協助銅山族群得以順利遷徙至未來的氣候適存區，減輕氣候變遷帶來的衝擊。

除了水青岡霧林帶案例，易危森林類型模型系集與地理分布預測亦可用於其他森林的未來變遷評估。圖 2.31 係以雪山翠池的玉山圓柏純林為例，玉山圓柏(*Juniperus squamata*)在本研究中被歸類為「亞高山針葉灌叢及森林」群團優勢物種之一，其形態可分喬木及灌木兩類，喬木高度可達 35 公尺、胸徑約 1-3 公尺，樹冠呈圓柱形；灌木型則分布於風速強勁的高山草原與岩屑地，形成矮盤狀灌叢。玉山圓柏分布海拔約在 3200-3900 公尺，全島高山都可見蹤跡，又以玉山、雪山、秀姑巒山、馬博拉斯山、南湖大山、中央尖山及關山等地較為密集，是臺灣分布海拔最高樹種。雪山翠池是海拔最高（3520 公尺）的高山湖泊，則因地形封閉、風勢較弱，分布有臺灣面積最大的玉山圓柏純林，且以喬木形態聳立，是臺灣重要的高山景觀。依據隨機森林模型系集分析，翠池三叉山、雪山（含翠池）、雪山北峰至品田山稜線目前均為適合亞高山針葉灌叢生存的寒冷氣候狀態，隨著未來三階段的時間推移，本區域稜線仍將保持以亞高山針葉灌叢為優勢的植被狀態。由於翠池海拔稍低，2065 年仍有 83%模型系集判定為亞高山針葉灌叢適存地點，至 2090 年則研判仍有 50%機會為亞高山針葉灌叢優勢，可作為評估翠池玉山圓柏純林遭受氣候變遷衝擊的評估參考（圖 2.31）。

從本節應用案例可發現，隨機森林模型系集與森林經營圖資（如林班圖、人工林分布圖）或自然保育圖資（如保護留區範圍、國家公

園界線、珍貴自然地景分布地點)進行疊合分析,可以瞭解森林植群的未來潛在變化,並提供大量資訊供自然資源經營與管理政策參考。然而,上述研究結果要落實至自然資源管理層面,仍需要多方單位的有效整合。例如模型系集預測的急遽變遷地點,包含不同森林群團的變遷推移帶以及可能發生在地滅絕的地點,都需要野外監測團隊的配合,查核並評估系集預測的準確性。模型預測與野外監測的資料與研究成果,最終必須回歸到政府部門,以區域平台方式進行管理機關、林地經營單位與研究機構的三方整合,使研究結論能與森林經營管理措施結合,並提供後續政策的擬定或修正參考。有關區域平台之組織與運作方式,將於後續章節及其他研究團隊進行說明及討論。

然而,本研究同時強調,植群的實際變化尚受到許多與氣候非直接相關的環境因子、或是其他人為干擾的影響,例如崩塌、演替、火災、人為開發等,進而導致不同植群類型與不同演替階段森林的出現。這些與氣候相關程度較低的因子,及其導致形成的植群類型,在本計畫及 Li et al. (2013) 的研究中均以泛域植群 (azonal vegetation) 稱之。泛域植群的出現及未來變化,都是超出氣候變遷模式的可預測範圍。在使用氣候模型時需審慎瞭解統計工具的特性與能力範圍,避免對分析結果做出不適當或是過度的推斷。

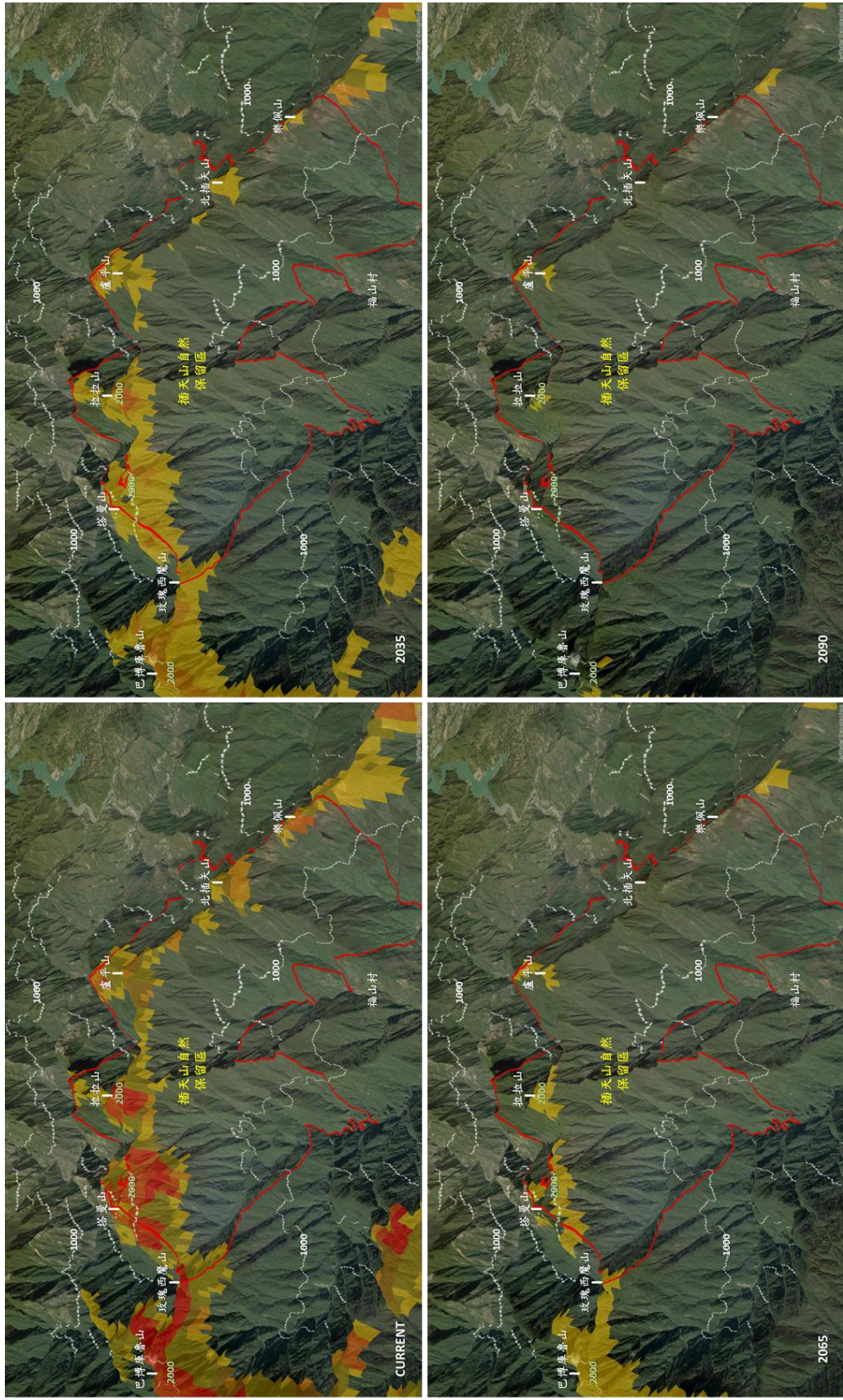


圖2.29 插天山自然保留區現行與未來三階段的水青岡霧林帶適存度變化情形。

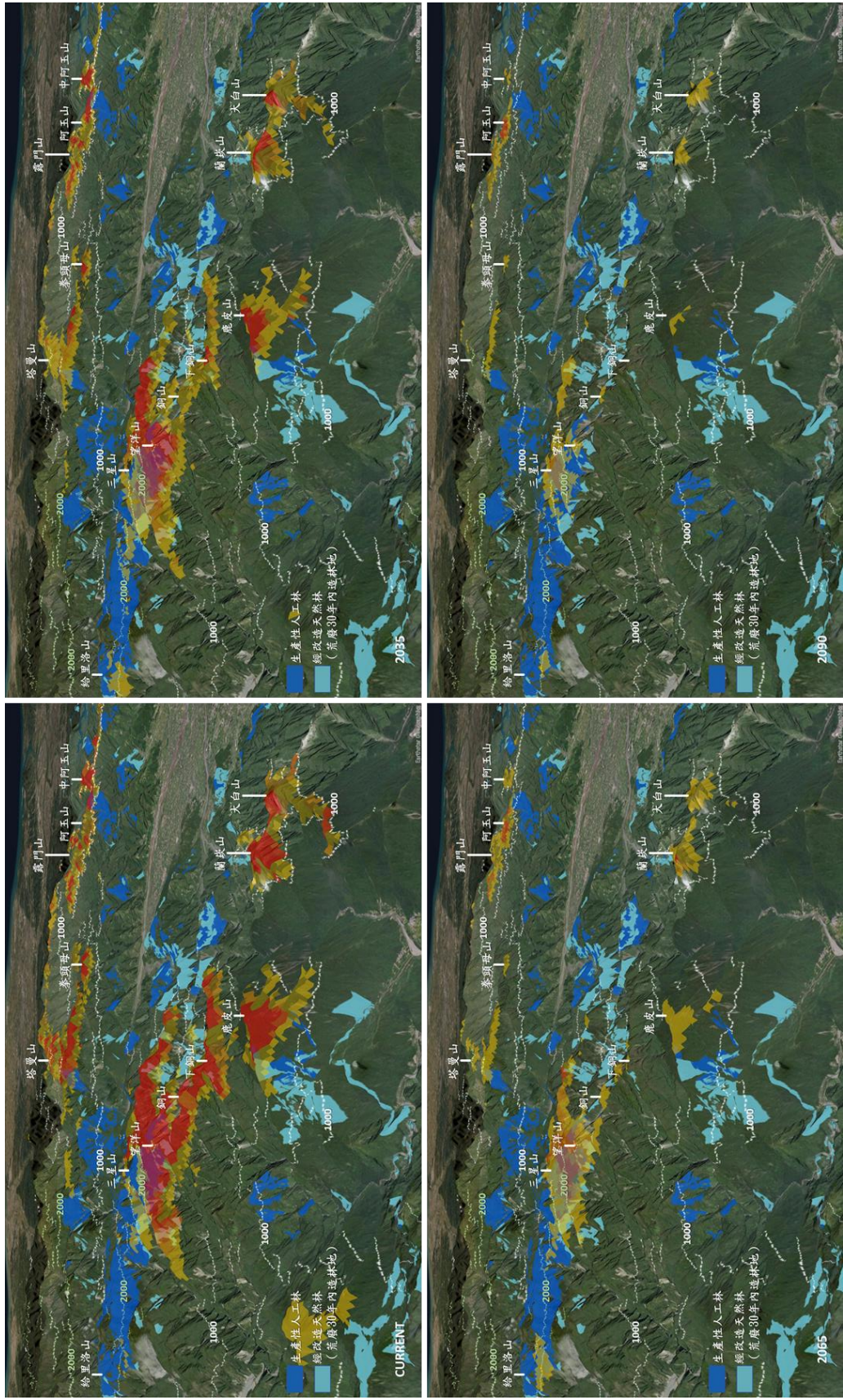


圖2.30 大白山、蘭茨山及銅山水青岡霧林帶適存棲地變遷與造林地疊合情形。

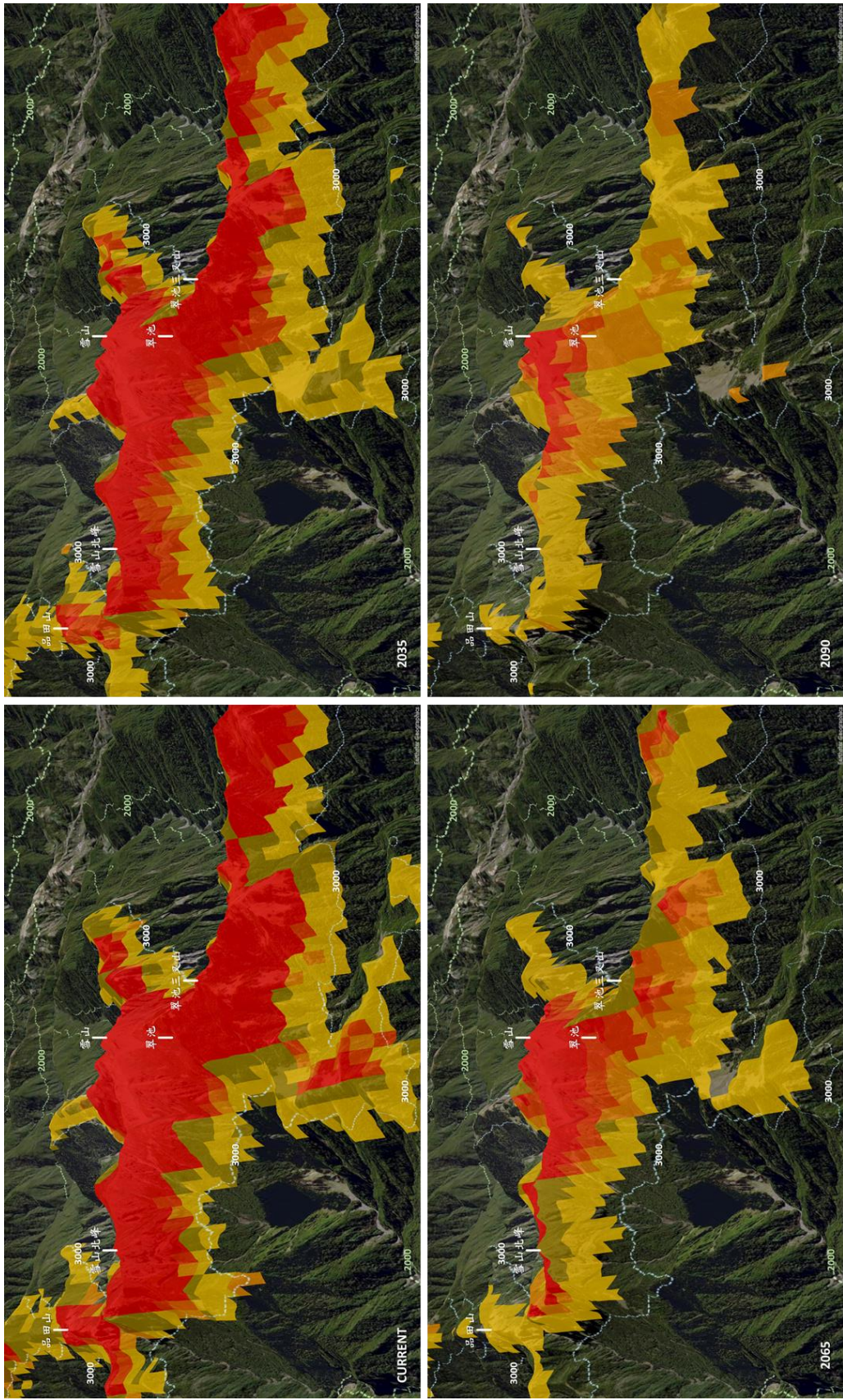


圖2.31 以翠池為例，套疊亞高山針葉灌叢的現生與未來分布，瞭解玉山圓柏林的景觀變化可能性。

### 3.4 原始程式碼與 GIS 資料庫

本計畫 108-110 年執行大量氣候資料產製及森林變遷模擬，獲得數量可觀的圖資。除做為本計畫研究分析及成果展示外，亦結合林務局既有的林業經營 GIS 圖資，將氣候變遷預測結果彙整為 GIS 資料庫，以利林務局後續運用。同時提供本計畫開發之兩項程式工具，包含氣候降尺度軟體 *clim.regression* 及以隨機森林發展之氣候棲位模擬預測程式。期末階段繳交之成果資料與圖資如表 2.12 所列。

#### 3.4.1 原始程式碼

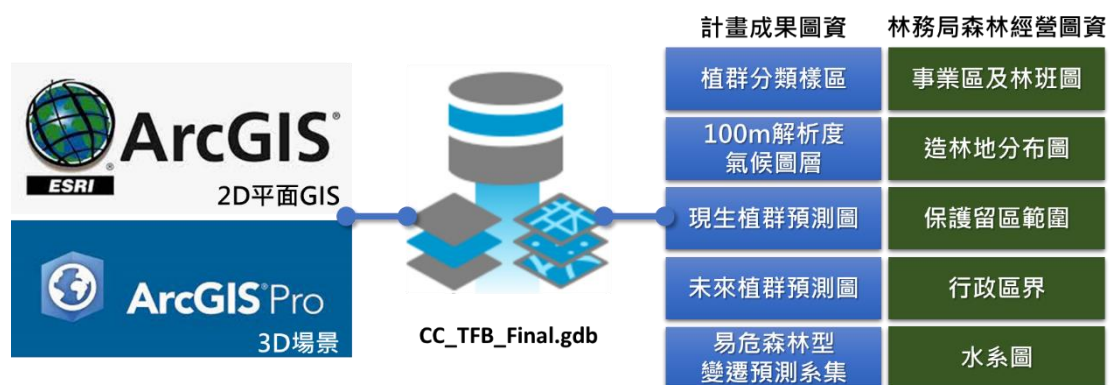
*Clim.regression* 原始程式碼如第六章「6.1 *clim.regression*」說明。該程式使用 TCCIP 產製之五公里網格化氣候資料，包含四個原始資料檔分別為月平均氣溫、月平均高溫、月平均低溫及月累積降水，再讀入使用者設定之座標（經度、緯度、海拔。可為單點座標、亦可採資料表型式讀入多筆座標），即可依使用者設定之年期，針對各座標產生指定期間的平均氣候資料。藉由指定座標的間隔調整，例如設定格點座標間距為 100 公尺，即可針對該指定解析度產生網格化氣候資料。

#### 3.4.2 GIS 資料庫

以 ESRI Geodatabase 儲存本計畫成果及林務局森林經營圖資，包含植群分類樣區、100 公尺解析度氣候圖層、現生植群（13 種森林類型分布預測圖）、未來植群預測圖（RCP4.5 情境、6 種大氣環流模型、5 個未來階段）、易危森林型變遷預測系集（RCP4.5 情境、5 個未來階段），以及林務局既有之事業區及林班圖、第四次全國森林資源調查造林地分布圖、保護留區圖層及行政區界等（圖 2.32）。利用該資料庫，分別建置 ESRI ArcMap 及 ArcGIS PRO 專案，進行資料的查詢、展示及林業圖資套疊分析。ArcMAP 以平面（2D 環境）作業為主，是林務局經常使用的 GIS 軟體，具有圖資地理對位、空間套疊分析等功能，且局內已建置大量 GIS 資料圖庫，不乏專業的軟體操作人才（圖 2.33）。在 ArcMAP 環境中，可瞭解不同森林類型的適生環境隨著時間的變遷，並經由事業區、林班、保護留區及水系的套疊，快

速掌握易受氣候變遷衝擊的地點，並藉由事業區及林班資訊，迅速掌握當地的森林經營現況。本計畫另以 ArcGIS PRO 建置立體場景 (scene)(圖 2.34)，使用者可在立體地形上進行直覺化操作方式，迅速瞭解氣候變遷下的森林可能發生的垂直分布與水平分布動態變化。使用者可根據不同時期的圖資疊合，從立體場景快速且直覺地研判森林適生區域的可能空間變化與遷移，並藉由立體地形、水系與集水區空間關係等，進而對於林區的未來經營與因應，產生清楚的概念與地景管理策略，有助本計畫研究成果的具體化，進而在林業經營管理業務獲得採納與運用。

圖2.32 本計畫成果GIS資料庫的結構示意圖。



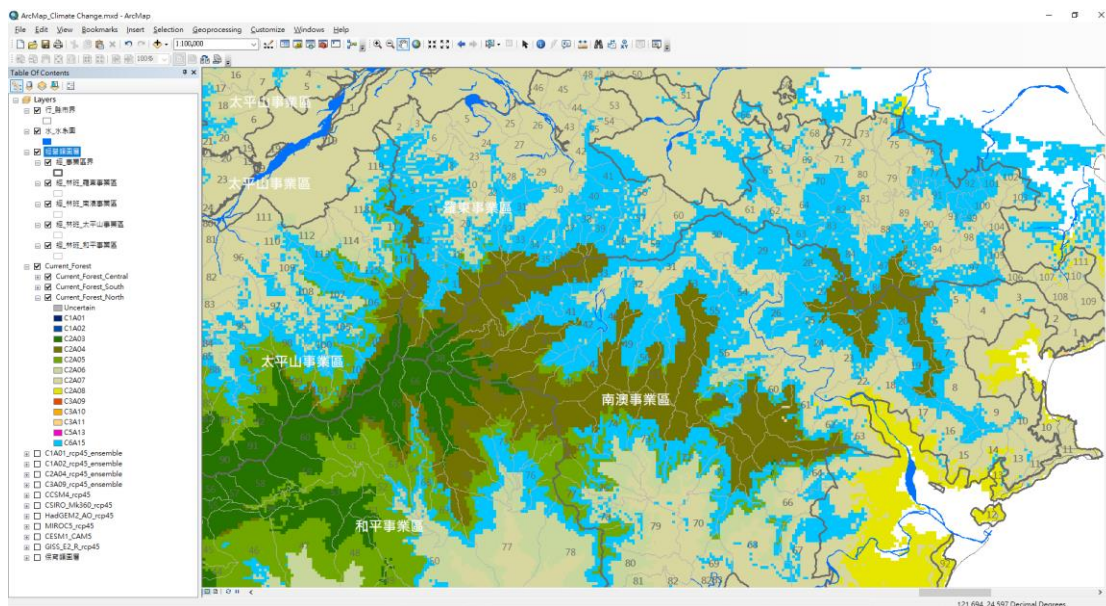


圖2.33 利用ESRI ArcMAP呈現成果資料庫。以銅山、大白山、蘭崁山各森林類型及臺灣水青岡森林為例，可快速瞭解臺灣水青岡在羅東事業區、南澳事業區、太平山事業區及和平事業區的潛在分布，以及水青岡森林鄰近地區的其他森林適生分布概況。

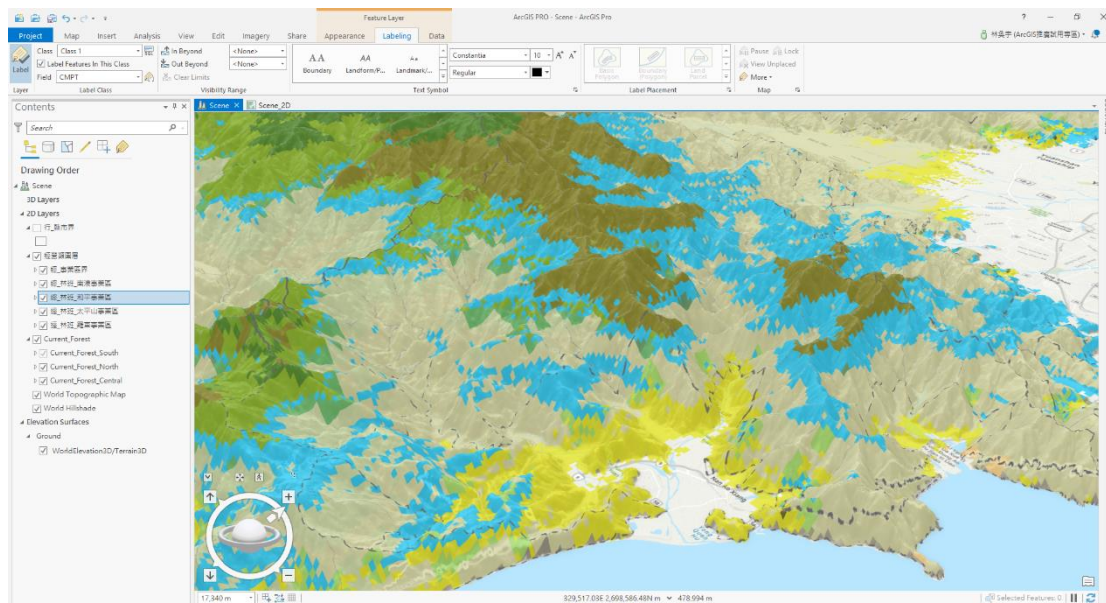


圖2.34 與圖2.31相同地點，由ArcGIS PRO呈現結果。利用3D場景可瞭解各森林類型潛在分布與地形的關係，以及各事業區、林班地形特性。亦可將各林班單元內不同海拔段的森林適生情形進行視覺化呈現。

表 2.12 期末階段移交林務局之成果電子檔及相關 GIS 圖資。



項目	形式	檔案名稱	說明
氣候資料	UTF-8 文字檔	資料夾「clim.regression」	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.本計畫開發之氣候降尺度程式，以 TCCIP 5km 氣候資料為來源，可針對臺灣山區任意點位，進行歷史階段氣候（1960-2009）及未來階段（2016-2090）進行高解析的氣候推估。</li> <li>2.文字檔 clim.regression.R：氣候降尺度主程式，以 R 軟體為執行平台。</li> <li>3. 文字檔 example.txt：clim.regression 的使用說明與指令範例。</li> </ol>
		資料夾「TCCIP_5km」	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.TCCIP 提供本計畫使用的臺灣地區 5 公里網格歷史氣候資料，包含月均溫、月均高溫、月均低溫及月降水量四個因子，涵蓋時間為 1960-2009 年。</li> <li>2.做為 clim.regression 的輸入背景資料。</li> </ol>
		資料夾「TCCIP_5km_future」	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.TCCIP 提供本計畫使用的臺灣地區 5 公里網格未來氣候資料，包含月均溫、月均高溫、月均低溫及月降水量四個因子，涵蓋時間為 2016-2090 年未來三階段。</li> <li>2.做為的輸入背景資料。</li> </ol>
生物分布預測工具	UTF-8 文字檔	資料夾「VEG_modeling」	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.本計畫建立之植群分布預測工具。</li> <li>2.文字檔 VEG_modeling.R：植群分布預測主程式，以 R 軟體為執行平台。</li> <li>3.使用說明如第六章「6.2 氣候棲位模型與分布預測之隨機森林模型」說明。</li> </ol>
氣候圖層	Geodatabase, point	Baseline_Taiwan_North	<ol style="list-style-type: none"> <li>1.臺灣地區海拔 100 公尺以上的山區及丘陵地，以等距間隔 100 公尺設置樣點，經 clim.regression 產生各樣點的 105 個氣候參數資料，氣候統計期間為 AR5 基期 1986-2005 年。</li> <li>2.資料包含 108 個欄位，分別為經度、緯度、海拔及 105 個氣候環境因子，環境因子列表參見本報告書表 2.2。</li> <li>3.因資料龐大達 270 萬餘點位，切分為北、中、南三區段儲存。</li> </ol>
		Baseline_Taiwan_Central	
		Baseline_Taiwan_South	
植群圖層	Geodatabase, point	VEG_plot	國家植群多樣性計畫 3348 個樣區資料的座標及 Li et al. (2013) 的植群分類結果。

Geodatabase, raster	Current_Forest	利用隨機森林法及本報告圖 2.9 流程，產製之臺灣 13 種森林類型的現生分布預測圖。
	C1A01_rcp45_ensemble_2035	氣候變遷易危森林類型「亞高山針葉灌叢及森林」的未來變遷預測系集，經投票法計算各地理網格評分後的結果。網格數值範圍為 0 至 6。共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	C1A01_rcp45_ensemble_2050	
	C1A01_rcp45_ensemble_2065	
	C1A01_rcp45_ensemble_2080	
	C1A01_rcp45_ensemble_2090	
	C1A02_rcp45_ensemble_2035	氣候變遷易危森林類型「冷杉-鐵杉上部山地針葉林」的未來變遷預測系集，經投票法計算各地理網格評分後的結果。網格數值範圍為 0 至 6。共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	C1A02_rcp45_ensemble_2050	
	C1A02_rcp45_ensemble_2065	
	C1A02_rcp45_ensemble_2080	
	C1A02_rcp45_ensemble_2090	
	C2A04_rcp45_ensemble_2035	氣候變遷易危森林類型「水青岡山地落葉霧林」的未來變遷預測系集，經投票法計算各地理網格評分後的結果。網格數值範圍為 0 至 6。共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	C2A04_rcp45_ensemble_2050	
	C2A04_rcp45_ensemble_2065	
	C2A04_rcp45_ensemble_2080	
	C2A04_rcp45_ensemble_2090	
	C3A09_rcp45_ensemble_2035	氣候變遷易危森林類型「柯屬-杜英屬山地霧林」的未來變遷預測系集，經投票法計算各地理網格評分後的結果。網格數值範圍為 0 至 6。共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	C3A09_rcp45_ensemble_2050	
	C3A09_rcp45_ensemble_2065	
	C3A09_rcp45_ensemble_2080	
	C3A09_rcp45_ensemble_2090	
	CCSM4_rcp45_2035	以 CCSM4 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	CCSM4_rcp45_2050	
	CCSM4_rcp45_2065	
	CCSM4_rcp45_2080	
	CCSM4_rcp45_2090	
	CSIRO-Mk3-6-0_rcp45_2035	以 CSIRO-Mk3-6-0 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	CSIRO-Mk3-6-0_rcp45_2050	
	CSIRO-Mk3-6-0_rcp45_2065	
	CSIRO-Mk3-6-0_rcp45_2080	
CSIRO-Mk3-6-0_rcp45_2090		
HadGEM2-AO_rcp45_2035	以 HadGEM2-AO 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。	
HadGEM2-AO_rcp45_2050		
HadGEM2-AO_rcp45_2065		
HadGEM2-AO_rcp45_2080		
HadGEM2-AO_rcp45_2090		
MIROC5_rcp45_2035		

	MIROC5_rcp45_2050	以 MIROC5 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	MIROC5_rcp45_2065	
	MIROC5_rcp45_2080	
	MIROC5_rcp45_2090	
	CESM1-CAM5_rcp45_2035	以 CESM1-CAM5 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	CESM1-CAM5_rcp45_2050	
	CESM1-CAM5_rcp45_2065	
	CESM1-CAM5_rcp45_2080	
	CESM1-CAM5_rcp45_2090	
	GISS-E2-R_rcp45_2035	以 CCSM4 大氣環流模型的 RCP 4.5 情境，模擬 13 種森林類型的未來變化，共包含 2035-2090 五個未來時間階段。
	GISS-E2-R_rcp45_2050	
	GISS-E2-R_rcp45_2065	
	GISS-E2-R_rcp45_2080	
	GISS-E2-R_rcp45_2090	

#### 四、績效指標與評核標準達成情形

##### 1. 績效指標：

	細項指標	預 量 值	估 化	實 際 達 成	說明
學術 著作 發表	國內期刊 論文	1		1	應用本計畫開發之隨機森林模型結構，於臺灣林業研究發表 1 篇研究報告 Application of Land-Use Inventory Data and Random Forest Models for Estimating Population Densities in Rural Areas。Taiwan Journal of Forest Science 36(2): 87-109, 2021.
	國內研討 會論文	1		1	6 月 4 日於臺灣大學生態學與演化生物學研究所 2021 學術發表會發表 "The restructuring of vegetation community under climate change in an island ecosystem" 海報論文。
	研究報告	1		1	完成林務局科技計畫研究報告 1 式。

##### 2. 期末評核標準：

評核標準	達成情形
以氣候變遷總和模型 (ensemble model)，提出以群叢為單元的潛在植被預測與動態變遷成果。	已完成，詳如期末報告書「3.2.2 現行氣候下的森林群叢分布」及「3.3.1 易危森林類型適生區域的未來變化」章節。
以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，發展適合林務局及林區管理處套疊使用之 GIS 資料庫。	已完成，如期末報告書「3.4 原始程式碼與 GIS 資料庫」及「六、程式原始碼」章節。

## 五、期中審查意見回應

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	<p>(1) 在完成 2 種易危森林類型的細緻化氣候與植被變遷圖資，提供區域性復育平台使用部分資料豐富，論述清楚，達成研究目標。</p>	<p>感謝委員建議，計畫期間完成各類易危森林類型之變遷分析圖資，將彙整為地理資訊系統資料庫，並於期末報告「3.4 原始程式碼與GIS資料庫」章節說明使用方式，俾利林務局後續使用參考。</p>
	<p>(2) 建議增加一段文字，說明計畫執行期間，各模式的比較。</p>	<p>本計畫執行期間共採用6種環流模式(GCM)及兩種暖化情境(RCP)進行植群變化分析，各模式之趨勢及差異，業以表格及圖形方式，說明於期末報告「3.2.3 未來氣候下的臺灣森林類型分布」及「3.3.1 易危森林類型適生區域的未來變化」章節內。</p>
	<p>(3) 在以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，建構 GIS 資料庫雛形，嘗試於林業經營管理的適用性部分，建議參考現行期刊論文做法，直接在報告的附錄，加入最終模型之 R 指令，幫助讀者有效率獲取資料。</p>	<p>本計畫以R軟體完成兩項重要工具的開發，分別是氣候降尺度軟體 clim.regression 及物種分布隨機森林模型。這兩項工具之R程式原始碼與相關使用說明，已列於期末報告「六、程式原始碼」章節。</p>
	<p>(4) 請在報告中，簡單說明使用者可如何獲得轉交給林務局的圖層資料，做為參考。</p>	<p>本計畫產製GIS圖資之使用範例，詳如期末報告「3.4 原始程式碼與GIS資料庫」章節說明。</p>

審查委員	審查意見	回復說明
	(5) 期中評核無異議通過。	無。
曾彥學委員	(1) 有關完成 2 種易危森林類型的細緻化氣候與植被變遷圖資，提供區域性復育平台使用部分，已達預期目標，相關資料應可提供未來使用。	感謝委員建議，計畫期間完成各類易危森林類型之變遷分析圖資，將彙整為地理資訊系統資料庫，並於期末報告「3.4 原始程式碼與GIS資料庫」章節說明使用方式，俾利林務局後續使用參考。
	(2) 在以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，建構 GIS 資料庫雛形，嘗試於林業經營管理的適用性部分，期中報告書面資料詳實，預測未來適生區域系統頗具期待。	
	(3) 已達期中評核標準，期中評核無異議通過。	無。
劉和義委員	(1) 有關完成 2 種易危森林類型的細緻化氣候與植被變遷圖資，提供區域性復育平台使用部分，細緻化氣候資料與其所導出的植被變遷圖資，非常詳實，但未有與植群可能實際變化的差異之討論。	感謝委員建議。植群的實際變化受到許多環境因子與人為干擾影響，例如崩塌、演替、火災、人為開發等，都是超出氣候變遷模式的預測範圍。有關模型預測能力的限制與使用時應注意的地方，已於「3.3.2 未來預測圖資在森林經營與保育的應用」最末段補充說明。

審查委員	審查意見	回復說明
	<p>(2) 在以 ESRI ArcGIS 為環境，整合本計畫產出氣候變遷成果與林務局森林經營圖資，建構 GIS 資料庫雛形，嘗試於林業經營管理的適用性部分，GIS 資料庫雛形構想良好，但缺乏如何應用於林業經營管理在實務上的應用是否可行及可能之困難處的討論。</p>	<p>期末報告已將植群變遷預測與林務經營圖資（林班圖、小班圖、保護留區圖）進行疊合，並建議相關圖資的使用方式。至於實務應用的可行性，可能須待資料移交林務局後，視林務局業務需求與操作回饋意見等，再檢討有無調整必要。</p>
	<p>(3) 此子計畫執行上基本是一個風險評估，非常精密，但保育無法全部以風險機率為依據，就像某一種癌症統計上可以估計死亡率，不過任何病人的病情進展，不一定會跟隨統計的變化來變化，整體千萬分之一的死亡機率對於病人而言毫無意義，個人不是百分百死亡就是存活；計畫主要依據的 GCM 模式，原作(Lin and Tung, 2017)就以手動的方式將蘭嶼獨立出來，雖然蘭嶼不在此計畫範圍，但類似上述個別癌症病人，不隨整體變化。本計畫涉及的每一個森林類型，雖然在未來不同年代上的風險可以評估，但操作上是現存棲地的實際生態區位 realized niche 進行評估，不等於真正的生態區位</p>	<p>贊成委員的建議，本計畫將期末報告特別說明預測模型的不確定性、以及植群長期監測的重要，以避免過度倚賴預測工具，而忽略了生態系的實際變化。</p>

審查委員	審查意見	回復說明
	<p>fundamental niche，所以個別森林類型的未來變化，不一定會依模型變化；又水水青岡計畫認為部分較小的台灣水青岡族群是氣候模型無法預測。由於此種不確定性，總計畫依據的 ACT 架構 (Cross et al. 2012) 原文就建議將植群的真實反應列入概念模式建立的基礎中，期末報告時，計畫應就氣候模型的植群變化與植群可能的真實反應之間的不確定性進行討論，提出實際可執行的情境模式或因應之道。</p>	
	<p>(4) 森林類型是否相等於群團或其他階層，應該明確表示。</p>	<p>在Li et al.未發表文獻中，曾將國家植群多樣性調查計畫的3348個樣區，依物種組成分類為7群級、21群團、91群叢。該未發表文獻所述「21群團」與Li et al. (2013) 描述的21個森林類型實為相等。因此，本研究認定Li et al. (2013) 年發表的21個森林類型實為群團單元 (alliance)，但當時僅以森林類型 (forest types) 稱之，而未依植群命名法則提出正式的群團名稱。為忠於原發表文獻，本計畫仍沿用「森林類型」一詞。</p> <p>已修正於「2.3 隨機森林 (Random Forests) 生態棲位</p>



審查委員	審查意見	回復說明
		模型建立方法」第一段文字。
	(5) 期中評核無異議通過。	無。

## 六、程式原始碼

### 6.1 *clim.regression*

*clim.regression* 是以 R 軟體為運作環境的程式，檔名為 *clim.regression.r*。以下為 *clim.regression* 的使用方式，僅需在 R 軟體內逐行貼上指令即可，#號跟隨文字則為該指令的補充說明。

```
# Please download and install dplyr package before you execute cilm.regression.
# Set working directory as the folder that "clim.regression.r" and the original 5-km climate data exist.
wkdir="F:/201903_clim.regression released"
setwd(wkdir)
source("clim.regression.r")
# Read the original 5-km precipitation and temperature data that TCCIP released.
precip.source=read.csv("climate.data.precip.surround.csv",header=T,sep=",")
tmin.source=read.csv("climate.data.tmin.surround.csv",header=T,sep=",")
tmean.source=read.csv("climate.data.tmean.surround.csv",header=T,sep=",")
tmax.source=read.csv("climate.data.tmax.surround.csv",header=T,sep=",")
# read datasheet covers locations (x,y,z) you want to estimate, the resolution of clim.regression outputs
  depends on the interval of x,y you set.
# Unit of geographical coordinate: deg.
# "C_Taiwan_100m.csv" is an example for primary users to practice how to execute clim.regression.
# The output of C_Taiwan_100m covers central Taiwan with a spatial resolution of 100 m.
# The users can substitute "C_Taiwan_100m.csv" by the other (x,y,z) file that covers their study area.
target.points=read.csv("C_Taiwan_100m.csv",header=T,sep=",")[1:3]

# The following script was used to generate climate data for historical periods of 1961-2009.
# clim.regression needs four input parameters:
# The first parameter is TCCIP original 5-km data. In this case, the TCCIP 5-km precipitation data was
  named as "precip.source".
# The second parameter is the target areas where you want to estimate. In this case, I set target points as
  central Taiwan with an x-y interval of 100m.
# Parameters 'from' and 'to', refer to average climate condition among the period you want to estimate.
# If you want to have downscaled data for a specific year, please set 'from' and 'to' as the same number,
  such as 'from=2000, to=2000'.
# In this case, I set 'from=1986,to=2005' to generate downscaled climate data based on the average of
  1986-2005.
precip = clim.regression(precip.source, target.points, from=1986, to=2005)$climate.adj.smooth
Tmin = clim.regression(tmin.source, target.points, from=1986, to=2005)$climate.adj.smooth
Tave = clim.regression(tmean.source, target.points, from=1986, to=2005)$climate.adj.smooth
Tmax = clim.regression(tmax.source, target.points, from=1986, to=2005)$climate.adj.smooth

# clim.reformat function works for combining the four object 'precip, Tmin, Tave, Tmax' exported by
  clim.regression to a complete datasheet.
climate=climate.reformat(precip, Tmin, Tave, Tmax)
```

*clim.regression.r* 檔案內之程式原始碼如下：

```

# This program is designed to downscale TCCIP 5km-grid climate data into a scale-free layer.
# Programmer: Huan-Yu Lin.
# Date: 2017-08-13

# Please download and install dplyr package before you excute cilm.regression

library(dplyr)

clim.regression=function(climate.source,target.points,from=1960,to=2009)
{
  colnames(target.points)=c("X","Y","elev")
  target.points$center_x=120+round((target.points$X-120)/0.05)*0.05
  target.points$center_y=21.6+round((target.points$Y-21.6)/0.05)*0.05
  target.points$east_x=120+ceiling((target.points$X-120)/0.05)*0.05
  target.points$west_x=120+floor((target.points$X-120)/0.05)*0.05
  target.points$north_y=21.6+ceiling((target.points$Y-21.6)/0.05)*0.05
  target.points$south_y=21.6+floor((target.points$Y-21.6)/0.05)*0.05
  target.points$d1=abs(target.points$X-target.points$west_x) # distance from x to center of NW grid
  target.points$d3=abs(target.points$Y-target.points$north_y) # distance from y to center of NW grid

  # Calculate the mean of monthly variables of assigned period.
  climate.data=matrix(NA,nrow=dim(climate.source)[1],ncol=12)
  for (i in 1:12) {
    if (from-to==0) {
      climate.data[,i]=climate.source[(to-1960)*12+4+(i-1)]
    } else {
      climate.data[,i]=rowMeans(climate.source[,seq(4+(i-1),4+(i-1)+(to-from)*12,by=12)])
    }
  }
  colnames(climate.data)=c("jan","feb","mar","apr","may","jun","jul","aug","sep","oct","nov","dec")
  climate.data=cbind(climate.source[,1:3],climate.data)
  climate.data$index=paste(round(climate.data$X,2),round(climate.data$Y,2),sep="_")
  # Extend the coverage of target points to east and west with 0.05 deg.
  # Calculate lapse rate of the center of each grids that covered target points.
  cx=seq(min(target.points$center_x)-0.05,max(target.points$center_x)+0.05,0.05)
  cy=seq(min(target.points$center_y)-0.05,max(target.points$center_y)+0.05,0.05)
  lapse.data=matrix(NA,ncol=27,nrow=length(cx)*length(cy))
  for (i in 1:length(cx)) {
    for (j in 1:length(cy)) {
      lapse.index=c(paste(cx[i]-0.05,cy[j]-0.05,sep="_"),
        paste(cx[i],cy[j]-0.05,sep="_"),
        paste(cx[i]+0.05,cy[j]-0.05,sep="_"),
        paste(cx[i]-0.05,cy[j],sep="_"),
        paste(cx[i],cy[j],sep="_"),
        paste(cx[i]+0.05,cy[j],sep="_"),
        paste(cx[i]-0.05,cy[j]+0.05,sep="_"),
        paste(cx[i],cy[j]+0.05,sep="_"),
        paste(cx[i]+0.05,cy[j]+0.05,sep="_"))
      lapse.index=data.frame(lapse.index)
      colnames(lapse.index)="index"
      lapse.index$index=as.character(lapse.index$index)
      reg.data=merge(lapse.index,climate.data,by="index")[,2:16]
    }
  }
}

```

```

if (dim(reg.data)[1]>4) {
  diff=matrix(NA,ncol=13,nrow=choose(dim(reg.data)[1],2))
  a=1
  for (m in 2:dim(reg.data)[1]-1) {
    a2=matrix(as.numeric(as.matrix(reg.data[c(m+1):dim(reg.data)[1],3:15])),
              ncol=13,byrow=F)
    a1=matrix(as.numeric(rep(reg.data[m,3:15],c(dim(reg.data)[1]-m))),ncol=13,byrow=T)
    diff[a:c(a+nrow(a1)-1),]=a1-a2
    a=a+nrow(a1)
  }
  lapse.rate=rep(NA,12)
  lapse.rsq=rep(NA,12)
  for (m in 1:12) {
    if (max(diff[,1])-min(diff[,1])<=25) { # if the elevational range among all subsampling grids
                                          is less than 25m.
      lapse.rate[m]=0 # set lapse rate as zero.
      lapse.rsq[m]=1 # set r-square as one.
    } else {
      slr=lm(diff[,m+1]~diff[,1])
      lapse.rate[m]=slr$coefficients[2]
      lapse.rsq[m]=summary(slr)$r.squared
    }
  }
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,1:3]=c(cx[i],cy[j],max(reg.data$elev)-min(reg.data$elev))
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,4:15]=lapse.rate
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,16:27]=lapse.rsq
} else { # if the number of neighbor grids of center_x is less than six.
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,1:3]=c(cx[i],cy[j],-9999) # set the elevation (in dataframe
                                                           'lapse.data') as -9999.
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,4:15]=0 # set the lapse rate (in dataframe 'lapse.data') as zero.
  lapse.data[(i-1)*length(cy)+j,16:27]=1 # set the lapse rate (in dataframe 'lapse.data') as one.
}
}
}
}
lapse.data=data.frame(lapse.data)
colnames(lapse.data)[1:3]=c("center_x","center_y","elev_diff")
colnames(lapse.data)[4:15]=c("lapse_1","lapse_2","lapse_3","lapse_4","lapse_5","lapse_6",
                             "lapse_7","lapse_8","lapse_9","lapse_10","lapse_11","lapse_12")
colnames(lapse.data)[16:27]=c("rsq_1","rsq_2","rsq_3","rsq_4","rsq_5","rsq_6",
                              "rsq_7","rsq_8","rsq_9","rsq_10","rsq_11","rsq_12")
lapse.data$index=paste(lapse.data$center_x,lapse.data$center_y,sep="_")

# Select four corner grids of point p
# Get temperature/precipitation/lapse rate of the center of each corner grid.
target.points$index=paste(round(target.points$west_x,2),round(target.points$north_y,2),sep="_")
t1=left_join(left_join(target.points,climate.data,by="index"),lapse.data,by="index")
target.points$index=paste(round(target.points$east_x,2),round(target.points$north_y,2),sep="_")
t2=left_join(left_join(target.points,climate.data,by="index"),lapse.data,by="index")
target.points$index=paste(round(target.points$west_x,2),round(target.points$south_y,2),sep="_")
t3=left_join(left_join(target.points,climate.data,by="index"),lapse.data,by="index")
target.points$index=paste(round(target.points$east_x,2),round(target.points$south_y,2),sep="_")
t4=left_join(left_join(target.points,climate.data,by="index"),lapse.data,by="index")

```

```

# Bilinear interpolation of temprature/percipitation.
p=matrix(NA,nrow=dim(target.points)[1],ncol=13)
for (i in 1:12) {
  p[,i]=(t1[(i-1)+16]*((0.05-target.points$d1)*(0.05-target.points$d3))+
    t2[(i-1)+16]*(target.points$d1*(0.05-target.points$d3))+
    t3[(i-1)+16]*((0.05-target.points$d1)*target.points$d3)+
    t4[(i-1)+16]*(target.points$d1*target.points$d3))/0.0025
}
# Calculate the evelation of point p based on bilinear interpolation from the nearest four corners.
p[,13]=(t1$elev.y*(0.05-target.points$d1)*(0.05-target.points$d3)+
  t2$elev.y*target.points$d1*(0.05-target.points$d3)+
  t3$elev.y*(0.05-target.points$d1)*target.points$d3+
  t4$elev.y*target.points$d1*target.points$d3)/0.0025
p=data.frame(p)
colnames(p)=c("p.jan","p.feb","p.mar","p.apr","p.may","p.jun",
  "p.jul","p.aug","p.sep","p.oct","p.nov","p.dec","p.elev")
# Calculate smoothed lapse rate of point p based on bilinear interpolation from the nearest four corners.
lapse.smooth=matrix(NA,nrow=dim(target.points)[1],ncol=12)
for (i in 1:12) {
  lapse.smooth[,i]=(t1[(i-1)+31]*((0.05-target.points$d1)*(0.05-target.points$d3))+
    t2[(i-1)+31]*(target.points$d1*(0.05-target.points$d3))+
    t3[(i-1)+31]*((0.05-target.points$d1)*target.points$d3)+
    t4[(i-1)+31]*(target.points$d1*target.points$d3))/0.0025
}
lapse.smooth=data.frame(lapse.smooth)
colnames(lapse.smooth)=c("lapse.smooth_1","lapse.smooth_2","lapse.smooth_3",
  "lapse.smooth_4","lapse.smooth_5","lapse.smooth_6",
  "lapse.smooth_7","lapse.smooth_8","lapse.smooth_9",
  "lapse.smooth_10","lapse.smooth_11","lapse.smooth_12")

target.points$index=paste(target.points$center_x,target.points$center_y,sep="_")
target.points=left_join(target.points,lapse.data[,c(3:28)],by="index")
target.points=cbind(target.points,lapse.smooth,p)
# Generate climate variables adjusted by (unsmoothed) lapse rate.
climate.adj=cbind(target.points[,1:3],target.points[,50:61]+
  (target.points$elev-target.points$p.elev)*target.points[,14:25])
climate.adj.byrsq=cbind(target.points[,1:3],target.points[,50:61],target.points[,50:61]+
  (target.points$elev-target.points$p.elev)*target.points[,14:25]*
  target.points[,26:37])

# Generate climate variables adjusted by smoothed lapse rate.
climate.adj.smooth=cbind(target.points[,1:3],target.points[,50:61]+
  (target.points$elev-target.points$p.elev)*target.points[,38:49])
climate.adj.smooth.byrsq=cbind(target.points[,1:3],target.points[,50:61],target.points[,50:61]+
  (target.points$elev-target.points$p.elev)*target.points[,38:49]*
  target.points[,26:37])

return(list(climate.adj=climate.adj,climate.adj.byrsq=climate.adj.byrsq,
  climate.adj.smooth=climate.adj.smooth,climate.adj.smooth.byrsq=climate.adj.smooth.byrsq))
}

# Recombine outputs of clim.regression into an entire data table for distribution projection.
climate.reformat=function(percip,Tmin,Tave,Tmax){

```

```

percip=na.omit(percip)
Tmin=na.omit(Tmin)
Tave=na.omit(Tave)
Tmax=na.omit(Tmax)
coordinate=percip[,1:3]
percip.matrix=matrix(NA,ncol=19,nrow=dim(percip)[1])
for (i in c(1,3,5,7,8,10,12)){percip.matrix[,i]=percip[,i+3]*31}
for (i in c(4,6,9,11)){percip.matrix[,i]=percip[,i+3]*30}
percip.matrix[,2]=percip[,2+3]*28.25 # Precipitation of Feburary
percip.matrix[,13]=rowSums(percip.matrix[,1:12]) # MAP
percip.matrix[,14]=rowSums(percip.matrix[,c(1,2,12)]) # PPT_DJF
percip.matrix[,15]=rowSums(percip.matrix[,c(3:5)]) # PPT_MAM
percip.matrix[,16]=rowSums(percip.matrix[,c(6:8)]) # PPT_JJA
percip.matrix[,17]=rowSums(percip.matrix[,c(9:11)]) # PPT_SON
percip.matrix[,18]=rowSums(percip.matrix[,c(5:9)]) # MSP
percip.matrix[,19]=percip.matrix[,14]/percip.matrix[,13] # WPR, the ratio of winter precipitation by
                                                    Li 2013

percip.dataframe=data.frame(percip.matrix)
colnames(percip.dataframe)=c("percip_jan","percip_feb","percip_mar","percip_apr",
                             "percip_may","percip_jun","percip_jul","percip_aug",
                             "percip_sep","percip_oct","percip_nov","percip_dec",
                             "MAP","PPT_DJF","PPT_MAM","PPT_JJA",
                             "PPT_SON","MSP","WPR")

Tmin.matrix=matrix(NA,ncol=16,nrow=dim(Tmin)[1])
Tmin.matrix[,1:12]=as.matrix(Tmin[,4:15])
Tmin.matrix[,13]=rowMeans(Tmin.matrix[,c(1,2,12)]) # Tmin_DJF
Tmin.matrix[,14]=rowMeans(Tmin.matrix[,c(3:5)]) # Tmin_MAM
Tmin.matrix[,15]=rowMeans(Tmin.matrix[,c(6:8)]) # Tmin_JJA
Tmin.matrix[,16]=rowMeans(Tmin.matrix[,c(9:11)]) # Tmin_SON
Tmin.dataframe=data.frame(Tmin.matrix)
colnames(Tmin.dataframe)=c("Tmin_jan","Tmin_feb","Tmin_mar","Tmin_apr",
                           "Tmin_may","Tmin_jun","Tmin_jul","Tmin_aug",
                           "Tmin_sep","Tmin_oct","Tmin_nov","Tmin_dec",
                           "Tmin_DJF","Tmin_MAM","Tmin_JJA","Tmin_SON")

Tave.matrix=matrix(NA,ncol=17,nrow=dim(Tave)[1])
Tave.matrix[,1:12]=as.matrix(Tave[,4:15])
Tave.matrix[,13]=rowMeans(Tave.matrix[,c(1:12)]) # MAT
Tave.matrix[,14]=rowMeans(Tave.matrix[,c(1,2,12)]) # Tmin_DJF
Tave.matrix[,15]=rowMeans(Tave.matrix[,c(3:5)]) # Tmin_MAM
Tave.matrix[,16]=rowMeans(Tave.matrix[,c(6:8)]) # Tmin_JJA
Tave.matrix[,17]=rowMeans(Tave.matrix[,c(9:11)]) # Tmin_SON
Tave.dataframe=data.frame(Tave.matrix)
colnames(Tave.dataframe)=c("Tave_jan","Tave_feb","Tave_mar","Tave_apr",
                           "Tave_may","Tave_jun","Tave_jul","Tave_aug",
                           "Tave_sep","Tave_oct","Tave_nov","Tave_dec",
                           "MAT","Tave_DJF","Tave_MAM","Tave_JJA","Tave_SON")

WI=Tave.dataframe[,1:12]-5
for (i in 1:12){WI[WI[,i]<0,i]=0}
WI=data.frame(rowSums(WI))
colnames(WI)="WI"
DM=sign(percip.dataframe[,1:12]-2*Tave.dataframe[,1:12]) # DM:dry month by Su 1985
for (i in 1:12){DM[DM[,i]<0,i]=0}
PD=matrix(0,ncol=12,nrow=dim(Tave)[1]) # PD: precipitation deficiency by Su 1985

```

```

for (i in 1:12){
  n=which(DM[,i]<=0)
  PD[n,i]=2*Tave.dataframe[n,i]-percip.dataframe[n,i]
}
PD=data.frame(rowSums(PD))
colnames(PD)="PD"
colnames(DM)=c("DM_jan","DM_feb","DM_mar","DM_apr","DM_may","DM_jun",
              "DM_jul","DM_aug","DM_sep","DM_oct","DM_nov","DM_dec")
Tmax.matrix=matrix(NA,ncol=19,nrow=dim(Tmax)[1])
Tmax.matrix[,1:12]=as.matrix(Tmax[,4:15])
Tmax.matrix[,13]=rowMeans(Tmax.matrix[,c(1,2,12)]) # Tmax_DJF
Tmax.matrix[,14]=rowMeans(Tmax.matrix[,c(3:5)]) # Tmax_MAM
Tmax.matrix[,15]=rowMeans(Tmax.matrix[,c(6:8)]) # Tmax_JJA
Tmax.matrix[,16]=rowMeans(Tmax.matrix[,c(9:11)]) # Tmax_SON
Tmax.matrix[,17]=Tave.dataframe[,7]-Tave.dataframe[,1] # TD = Tave_jul - Tave_jan
Tmax.matrix[,18]=(Tave.dataframe[,13]+10)/(percip.dataframe[,13]/1000) # AHM
Tmax.matrix[,19]=Tave.dataframe[,7]/(percip.dataframe[,18]/1000) # SHM
Tmax.dataframe=data.frame(Tmax.matrix)
colnames(Tmax.dataframe)=c("Tmax_jan","Tmax_feb","Tmax_mar","Tmax_apr",
                          "Tmax_may","Tmax_jun","Tmax_jul","Tmax_aug",
                          "Tmax_sep","Tmax_oct","Tmax_nov","Tmax_dec",
                          "Tmax_DJF","Tmax_MAM","Tmax_JJA","Tmax_SON",
                          "TD","AHM","SHM")
return(cbind(coordinate,percip.dataframe,Tmin.dataframe,
            Tave.dataframe,Tmax.dataframe,WI,PD,DM))
}

```

## 6.2 氣候棲位模型與分布預測之隨機森林模型

### Step 1: variable selection for Random Forest model

```

library("VSURF")
setwd("c:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711/by Li_2013_13types_varsel")
occurrence=read.csv("occurrence.csv",header=T,sep=",")
occurrence=occurrence[,c(2,6:62)]
forest.types=unique(occurrence$Name)

for (i in 1:length(forest.types)){

  n=which(occurrence$Name==forest.types[i])
  a=occurrence[-n,]
  p=occurrence[n,]
  a$Name=0
  p$Name=1
  run.times=10
  output.varexp=matrix(0,nrow=ncol(occurrence)-1,ncol=run.times)
  output.varexp.imp=matrix(0,nrow=ncol(occurrence)-1,ncol=run.times)
  output.varpred=matrix(0,nrow=ncol(occurrence)-1,ncol=run.times)
  output.varpred.imp=matrix(0,nrow=ncol(occurrence)-1,ncol=run.times)
  rownames(output.varexp)=colnames(occurrence)[-1]
  rownames(output.varexp.imp)=colnames(occurrence)[-1]
}

```

```

rownames(output.varpred)=colnames(occurrence)[-1]
rownames(output.varpred.imp)=colnames(occurrence)[-1]

for (j in 1:run.times){
  # RF variable selection by VSURF package.
  # Two sets of variables will be subset. varexp: core explanatory variables for explaining the model;
  # varpred: the most parsimonious set of variables for prediction.
  if (nrow(a)>nrow(p)*3){
    train = sample(1:nrow(a), nrow(p)*3)}else{
    train = sample(1:nrow(a), nrow(p)*2)
  }
  varsel.data=rbind(a[train,],p)
  varsel.data$Name=as.factor(varsel.data$Name)
  varsel.data=list(x=varsel.data[,-1],y=varsel.data[,1])
  varsel.result=VSURF(x=varsel.data$x,y=varsel.data$y,mtry=57/3)
  output.varexp[varsel.result$vselect.interp,j]=1
  output.varpred[varsel.result$vselect.pred,j]=1
  output.varexp.imp[varsel.result$vselect.interp,j]=
    varsel.result$imp.vselect.thres[1:length(varsel.result$vselect.interp)]
  output.varpred.imp[varsel.result$vselect.pred,j]=
    varsel.result$imp.vselect.thres[1:length(varsel.result$vselect.pred)]
}
write.csv(output.varexp,paste(forest.types[i],"varsel.exp.csv",sep="_"))
write.csv(output.varexp.imp,paste(forest.types[i],"varsel.exp.imp.csv",sep="_"))
write.csv(output.varpred,paste(forest.types[i],"varsel.pred.csv",sep="_"))
write.csv(output.varpred.imp,paste(forest.types[i],"varsel.pred.imp.csv",sep="_"))
}

```

## Step 2: Model construction and prediction

```

library(tree)
library(randomForest)
library("VSURF")

setwd("E:/NTU Thesis/Climate Change/clim.regression ")
source("clim.regression.r")
percip.source=read.csv("climate.data.percip.surround.csv",header=T,sep=",")
tmin.source=read.csv("climate.data.tmin.surround.csv",header=T,sep=",")
tmean.source=read.csv("climate.data.tmean.surround.csv",header=T,sep=",")
tmax.source=read.csv("climate.data.tmax.surround.csv",header=T,sep=",")

setwd("c:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711")
# Take central Taiwan as an example for calculating climate data at 100-m resolution.
target.points=read.csv("C_Taiwan_100m.csv",header=T,sep=",")
percip = clim.regression(percip.source,target.points,from=1986,to=2005)$climate.adj.smooth
Tmin = clim.regression(tmin.source,target.points,from=1986,to=2005)$climate.adj.smooth
Tave = clim.regression(tmean.source,target.points,from=1986,to=2005)$climate.adj.smooth
Tmax = clim.regression(tmax.source,target.points,from=1986,to=2005)$climate.adj.smooth
climate=climate.reformat(percip,Tmin,Tave,Tmax)
climate=climate[,-c(17:20,35:38,52:55,68:71,77:88)]

setwd("c:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711/by Li_2013_13types_varsel")

```



```

occurrence=read.csv("occurrence.csv",header=T,sep=",")
occurrence=occurrence[,c(2,6:62)]
forest.types=unique(occurrence$Name)
output.all=matrix(NA,ncol=length(forest.types),nrow=nrow(climate))

for (i in 1:length(forest.types)){
  setwd("C:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711/by Li_2013_13types_varsel")
  n=which(occurrence$Name==forest.types[i])
  a=occurrence[-n,]
  p=occurrence[n,]
  a$Name=0
  p$Name=1
  RF.varpred=read.csv(paste(forest.types[i],"varsel.pred.csv",sep="_"),header=T,sep=",")
  RF.varpred$sum=rowSums(RF.varpred[,2:11])
  # The subset of 'sum>=4' is close to the average number of predtion variable selected by VSURF.
  RF.varpred.selected=which(RF.varpred$sum>=4)
  run.times=100
  output=matrix(NA,ncol=run.times,nrow=nrow(climate))
  err=rep(NA,run.times)
  importance=matrix(NA,ncol=run.times,nrow=length(RF.varpred.selected))
  setwd("C:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711/by Li_2013_13types_varsel/Central")
  for (j in 1:run.times){
    train = sample(1:nrow(a), nrow(p)) # 對absence/presence進行平衡取樣(balanced sampling)
    rf.data=rbind(a[train,],p)
    rf.data$Name=as.factor(rf.data$Name)
    rf.data=rf.data[,c(1,RF.varpred.selected+1)]
    # let m equals to p^0.5, p=number of variables.
    rf.pred=randomForest(Name~.,data=rf.data,subset=c(1:nrow(rf.data)),
      mtry=ceiling(length(RF.varpred.selected)^0.5),ntree=500)
    err[j]=mean(rf.pred$err[,1])
    importance[,j]=rf.pred$importance[,1]
    output[,j]=predict(rf.pred,newdata=climate[,c(RF.varpred.selected+3)])
  }
  output.all[,i]=rowMeans(output)-1
  err=data.frame(err)
  colnames(err)="error rate"
  rownames(err)=seq(1:run.times)
  write.csv(err,paste("00_baseline_error rate of ",forest.types[i],".csv", sep=""))
  importance=data.frame(importance)
  colnames(importance)=seq(1:run.times)
  rownames(importance)=rownames(rf.pred$importance)
  write.csv(importance,paste("00_baseline_var importance of ",forest.types[i],".csv", sep=""))
}
output.all=data.frame(output.all)
colnames(output.all)=forest.types
write.csv(cbind(climate[,1:3],output.all),"00_baseline_prob of forest types_Central.csv")

## 以下程式，將從各林型機率值選出潛在機率最高者
setwd("C:/temp/Taiwan_veg_modeling_201711/by Li_2013_13types_varsel/Central")
data=read.csv("00_baseline_prob of forest types_Central.csv",header=T,sep=",")
output=matrix(NA,ncol=13,nrow=nrow(data))
output.prob=matrix(NA,ncol=13,nrow=nrow(data))
for (i in 1:nrow(data)){

```

```
max.types=which(data[i,5:17]==max(data[i,5:17]))
output[i,1:length(max.types)]=colnames(data)[max.types+4]
output.prob[i,1:length(max.types)]=as.numeric(data[i,max.types+4])
}
write.csv(cbind(data[,2:4],output,output.prob),"00_baseline_D_types.csv")
```

```
## 結束
```

## 七、參考文獻

- 徐嘉君、林淑華 (2008) 全球氣候變遷模式推估與情境模擬簡介。  
林業研究專訊, 15(2), 5–7。
- 許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 (2011) 臺灣氣候變遷科學報告。國家科學委員會。
- 謝長富等 (2018) 林務局「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」成果報告書。
- Attorre, F., M. Alfò, M. Sanctis, B. Francesconi, R. Valenti, M. Vitale and F. Bruno (2011). Evaluating the effects of climate change on tree species abundance and distribution in the Italian peninsula. *Applied Vegetation Science*, 14, 242–255. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01114.x>
- Bailey, R.G. (1983) Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management*, 7, 365–373. <https://doi.org/10.1007/BF01866919>
- Brinkmann, K., A. Patzelt, E. Schlecht and A. Buerkert (2011) Use of environmental predictors for vegetation mapping in semi-arid mountain rangelands and the determination of conservation hotspots. *Applied Vegetation Science*, 14, 17–30. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01097.x>
- Chiou, C.R., G.-Z.M. Song, J.H. Chien, C.F. Hsieh, J.C. Wang, M.Y. Chen, H.Y. Liu, C.L. Yeh, Y.J. Hisa and T.Y. Chen (2010) Altitudinal distribution patterns of plant species in Taiwan are mainly determined by the northeast monsoon rather than the heat retention mechanism of Massenerhebung. *Botanical Studies* 51: 89-97.
- Chiu, C.-A., T.-Y. Chen, C.-C. Wang, C.-R. Chiou, Y.-J. Lai and C.-Y. Tsai (2013) Using BIOMOD2 to model the species distribution of *Fagus hayatae*. *Quarterly Journal of Forest Research*, 35, 253–272.

[In Chinese with English summary.]

Chiu, C.A., P.H. Lin and C.Y. Tsai (2014) Spatio-temporal variation and monsoon effect on the temperature lapse rate of a subtropical island. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 25(2): 203-217.

Fang, J.-Y., Y.-C. Song, H.-Y. Liu and S.-L. Piao (2002) Vegetation-climate relationship and its application in the division of vegetation zone in China. *Acta Botanica Sinica*, 44, 1105–1122.

Guan, B.T., H.W. Hsu, T.H. Wey and L.S. Tsao (2009) Modeling monthly mean temperatures for the mountain regions of Taiwan by generalized additive models. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(2): 281-290.

Hansen, A.J. and L.B. Phillips (2015) Which tree species and biome types are most vulnerable to climate change in the US Northern Rocky Mountains? *Forest Ecology and Management*, 338, 68–83.

Hijmans et al., 2005

Holdridge, L.R. (1947) Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 105, 367–368.  
<https://doi.org/10.1126/science.105.2727.367>

Klassen, H.A. and P.J. Burton (2015) Climatic characterization of forest zones across administrative boundaries improves conservation planning. *Applied Vegetation Science*, 18, 343–356.  
<https://doi.org/10.1111/avsc.12143>

Li, C.-F., M. Chytrý, D. Zelený, M.-Y. Chen, T.-Y. Chen, C.-R. Chiou, Y.-J. Hsia, H.-Y. Liu, S.-Z. Yang, C.-L. Yeh, J.-C. Wang, C.-F. Yu, Y.-J. Lai, W.-C. Chao and C.-F. Hsieh (2013) Classification of Taiwan forest vegetation. *Applied Vegetation Science* 16: 698-719.

- Liaw, A. and M. Wiener (2002) Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18–22.
- Lin, C.-Y. and C.-P. Tung (2017) Procedure for selecting GCM dataset for climate risk assessment. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 28, 43-55, doi: 10.3319/TAO.2016.06.14.01(CCA)
- Lin, H.-Y., J.-M. Hu, T.-Y. Chen, C.-F. Hsieh, G. Wang and T. Wang (2018) A dynamic downscaling approach to generate scale-free regional climate data in Taiwan. *Taiwania*, 63, 245–266. <https://doi.org/10.6165/tai.2018.63.251>
- Lin, H.-Y., C.-F. Li, T.-Y. Chen, *et al.* (2020) Climate-based approach for modeling the distribution of montane forest vegetation in Taiwan. *Applied Vegetation Science*, 34, 239–253.
- Martin, P.H., R.E. Sherman and T.J. Fahey (2007) Tropical montane forest ecotones: climate gradients, natural disturbance, and vegetation zonation in the Cordillera Central, Dominican Republic. *Journal of Biogeography*, 34, 1792–1806. <https://www.jstor.org/stable/4640645>
- Matsui, T., K. Nakao, M.Higa, I. Tsuyama, Y. Kominami, T. Yagihashi and N. Tanaka (2018) Potential impact of climate change on canopy tree species composition of cool-temperate forests in Japan using a multivariate classification tree model. *Ecological Research*, 33, 289–302. <https://doi.org/10.1007/s11284-018-1576-2>
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, C. Sáenz-Romero and E.M. Campbell (2012) North American vegetation model for land-use planning in a changing climate: a solution to large classification problems. *Ecological Applications*, 22, 119–141. <https://doi.org/10.1890/11-0495.1>

- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, M.V. Warwell and J.S. Evans (2006) Empirical analyses of plant-climate relationships for the western United States. *International Journal of Plant Sciences*, 167, 1123–1150. <https://doi.org/10.1086/507711>
- Su, H.-J. (1984) Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (I). Analysis of the variations in climatic factors. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 17, 1–14.
- Wang, T.L., A. Hamann, D.L. Spittlehouse and T.Q. Murdock (2012) ClimateWNA – High-resolution spatial climate data for western North America. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:16-29.
- Wang, T.L., A. Hamann, D. Spittlehouse and C. Carroll (2016a) Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PLOS ONE*. DOI: 10.1371/journal.pone.0156720.
- Wang, T.L., G.Y. Wang, J. Innes, C. Nitschke and H.J. Kang (2016b) Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region. *Forest Ecology and Management* 360:357-366.
- Wang, T., G. Wang, J.L. Innes, B. Seely and B. Chen (2017) ClimateAP: an application for dynamic local downscaling of historical and future climate data in Asia Pacific. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* 4(4): 448-458.
- Weng, S.-P. and C.-T. Yang (2012) The construction of monthly rainfall and temperature dataset with 1km gridded resolution over Taiwan area (1960-2009) and its application to climate projection in the near future (2015-2039). *Atmospheric Sciences* 40(4): 349-369. [in Chinese with English summary]

- Whittaker, R.H. (1975). *Communities and Ecosystems*. MacMillan Publishing, New York, USA.
- Zhang, L., S. Liu, P. Sun, T. Wang, G. Wang, X. Zhang, and L. Wang (2015) Consensus forecasting of species distributions: the effects of niche model performance and niche properties. *PLoS ONE*, 10(3), e0120056.
- Zhu, H., C. Yong, S. Zhou, H. Wang and L. Yan (2015) Vegetation, floristic composition and species diversity in a tropical mountain nature reserve in southern Yunnan, SW China, with implications for conservation. *Tropical Conservation Science*, 8, 528–546.  
<https://doi.org/10.1177/194008291500800216>

### 第三章 氣候變遷下高易危的臺灣水青岡生態系之調適、監測與保育研究

#### 摘要

氣候變化或極端氣候對於植群與植物之「殘存地點」，如近來 Hannah (2014) 所謂的所提之堅守點概念，本研究以臺灣水青岡生態系為一實際案例進行保育評估，擬定適宜之保育策略與實務方法。依據長期氣候變遷對殘存地點，可依伴隨植物特性、周邊環境潛在威脅等因子，瞭解各殘存地點生態系及物種之保育急迫性，提出優先次序，建立保育平台及到各區域的林管處進行整合及實行工作會議，使用 ACT 進行保育平台的架構來減緩氣候變遷對於稀有植群與植物的衝擊到決策和策略規劃過程。

2021年進行大白山至大南澳嶺地區地景與的監測；並彙整出地景（無人載具）、植群、族群及物候的可執行監測方式及指標，提供給林管處使用。目前已在羅東林區管理處進行兩次水青岡森林會議，並討論臺灣水青岡森林在氣候變遷下之調適與保育，在平台會議上結合學者對移地復育成功的幼樹及小苗，進行栽植地點與方法的監測與評估，持續進行育苗及復育的參考建議。對高易危大白山-蘭崁山地區五個小族群的野外樣地嘗試無人載具的地景與地面族群調查完成初步監測調查的設置，並初步完成大白-蘭崁地區的水青岡調查，徑級多呈現鐘型；大白-蘭崁地區相較於去年銅山地區的複測，小樹更新狀況不佳，沒有充足的小樹補充，比對水青岡的遺傳研究，該地有銅山地區較少的基因型應先進行異地保存。

大白-蘭崁山的水青岡的緩衝區部分在礦場範圍內，這可供未來與礦區採礦的經營對策做相關討論。大白山相對其他區域更易到達且大白山北面和大北山頂已是網絡上宣傳的地點，對於未來的登山行為或管制應提早有因應對策。

**關鍵詞：**脆弱度、適應性經營、風險管理、無性繁殖



## 一、前言

近年來全球氣候變遷造成溫度增加與降雨型態改變，極端氣象事件頻繁，導致生態系遭受衝擊而變得較為脆弱，並影響森林生態系的經營管理（IPCC, 2007; Joyce *et al.*, 2014）。全世界的科學家、管理者和決策者，均提倡創新手法的發展，以減少氣候變遷對於物種、生態系統和生態功能的影響，為了避免特稀有物種及其棲地的滅絕消失，亦已依據現有知識基礎及風險程度，評估及找出氣候變遷影響之高風險物種及族群，在特定地區的特定物種發展一個量身訂做的管理手法及適宜之保育策略，來進行保育工作的實質推動（Staudinger *et al.*, 2012; 邱祈榮，2013）。

生物的棲息環境除了受到大尺度氣候影響以外，由於局部地形或區域的微氣候條件差異，使得某些小尺度地點可能出現暖化趨勢較鄰近地區緩慢的現象，例如陡峻山區的谷地、冷涼的迎風地點或高原的冷袋（coldair drainage）地形等，生物在這些地點有較高的機會躲避暖化威脅、降低滅絕風險（Skov and Svenning, 2004）。因此，科學界將暖化架構下的潛在冷涼棲地稱為「間冰期避難所（interglacial refugia）」（Rull, 2009；2010；Stewart *et al.*, 2010；Kimura *et al.*, 2014；Keppel and Wardell-Johnson, 2015；Stimokawabe *et al.*, 2015；Tzedakis 2013）。Hannah 與 Keppel 認為，微避難所面積與規模相對為大，這些地點在暖化情境下仍可維持較為長久的冷涼微氣候，避難物種有機會在此處靜待下一次地球冷期循環的來臨。日本圓齒水青岡（*Fagus crenata*）的研究也發現，當氣候變暖，整個水青岡植群帶有向上及向北遷移的趨勢，而低海拔的族群也出現種子產量稀少、林下無小苗、更新不良及漸漸被常綠闊葉樹取代的現象；因此也在尋找水青岡森林間冰期的避難所即及針對低海拔的族群進行調適、監測與保育之研究（松井哲哉等，2007；2009；原正利，2006）。

臺灣地區根據林務局 2015 至 2017 年「氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」計畫成果，對長期氣候變遷影響下可能的殘存分布地點，亦初步提出風險較高且應積極保育之物種與植群；並

針對臺灣水青岡的銅山、插天山及大白-蘭炭地區小族群的案例地點，對於生物社會以至物種層級可能遭受氣候變遷之衝擊與影響部分，完成初步的研究與評估（陳子英等，2017）。

臺灣水青岡（*Fagus hayatae*）森林與檜木為優勢的針闊葉混淆林是臺灣亞熱帶的山地櫟林帶（或稱山地雲霧帶）的主要植群，山地雲霧的森林因受到雲霧的浸沒（immersion）使得水分增加及溫度降低這如同 Hannah 與 Keppal 所稱的潛在的冷涼棲地，森林中包含有許多的特有種和特有的生物（黃星凡，2011），而臺灣水青岡森林又位在本帶東北區的稜線上（Su,1984），最近的研究顯示世界的雲霧森林都受到氣候變遷的衝擊，雲霧稀薄或變少，溫度在季節上的提高將使分布在山頂的這些植被最先受到影響（Helmer, *et al.*,2019; Foster, 2001）。

在熱帶一些靠近海邊海拔相對較低的山頂，因水分增加及溫度降低也出現山頂有雲霧繚繞的現象，有稱之為壓縮現象（telescope effect），也因山頂保留有中海拔的物種及低海拔物種的混合，在植被上稱為山頂植被壓縮（Whittaker and Fernández-Palacios, 2007）。然而如果由地質史上全新世變暖後，植被迅速向高海拔遷移，這些殘留在較低海拔山頂的小族群或壓縮植被反而是中海拔較大族群的殘存族群或植群，如果族群快速向高緯度或海拔分布部分族群的基因型減少或消失，這些更小的殘存族群或植群反而是氣候變遷中最脆弱的載體或森林（Keppel *et al.*,2015）。

本計畫認為，銅山與插天山的水青岡植被，相對於 Kepple 及 Hannah 等人發展之「殘存地點」概念頗為近似，大白-蘭炭山或阿玉山西峰甚至新發現的露門山附近的小族群所擁有的遺傳或植群，類似熱帶地區山頂壓縮植被所呈現的更小的殘存族群或森林（Whittaker and Fernández-Palacios, 2007），目前澳洲團隊已完成氣候變遷下的微避難所之案例研究，證實該架構具有實務應用性。臺灣應亦可利用林務局 2015 至 2017 年「氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」計畫成果、資料與研究基礎，仿照保育標的物之適應性經營（ACT）架構概念，推動本土性之分析與評估及調適、監測與保育之研究和管理。例如用前期研究結果確定臺灣水青岡森林的高易危地點，並透過

多模式的情境模擬，找出這些高易危生態系隨氣候變遷的可能遷徙路徑與避難地點。並針對臺灣水青岡森林已進行的詳細植群調查及分類，同時劃設樣點進行植群與族群的監測，並進行瀕危族群的復育。然而前期計畫只做到 ACT 行動的確認保育標的物、建構概念模式及發展一套模擬的氣候變遷情境和初步提供出經營管理行動；並未訂出管理行動之優先順序、實行優先順序的管理行動監測行動有效性及目標物之進展，調整無效率的行動或隨需要修正計畫。計畫尚可針對臺灣水青岡森林的高易危地點建置更細緻的現地詳細的監測，及配合林管處現地的施作，將更有利於細部地點的保育與經營管理。

本計畫旨在解決以下問題：

1. 利用林務局 105-107 年度推動「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」計畫的調查資料，以前期計畫建立的氣候變遷情境模擬和初步提供出的經營管理行動為基礎，建立臺灣細部潛在氣候植群的預測模型，並依據氣候變遷情境，對高易危地點的動態變化模擬資訊和過去 30 年的變遷資訊，過去的遺傳、植群與族群調查資料，以臺灣水青岡為例，建構更細緻的保育標的物之適應性經營 (ACT) 概念架構 (以群叢、標的物種或族群個體為原則)，提升氣候變遷下區域細緻化的經營與保育臺灣水青岡森林。
2. 對高易危臺灣水青岡生態系的監測方式進行監測調查及整合；臺灣水青岡生態系的監測可分成地景、植群、族群及個體物候，將針對宜蘭地區不同小區域的監測方式做最後兩年調查與重整，除架構出監測頻度與方法外，並提供給宜蘭地區的羅東林區管理處及新竹林區管理處同步的監測與管理方式，以提升氣候變化對高易危臺灣水青岡生態系在保育上的應用。
3. 針對羅東及新竹林區管理處所需就地與遷地保育的臺灣水青岡高易危生態系及其特性，可以用工作會議等方式的保育平台，協助各林管處依受危生態系的出現區域，劃出遷徙廊道或建立採種、嫁接、扦插等育苗體系或採穗園、撫育及再引種等技術，推動原生地鄰近區域之輔助移植及族群復育工作，或提供該物種於野外或

復育地區的植群與族群監測。例如：羅東林區管理處的臺灣水青岡森林及蘭崁山殘存林木的保育與復育；新竹林區管理處的鳥嘴山或插天山地區的就地保存等。

4. 提供對高易危臺灣水青岡生態系的監測資料，調校植被群預測與動態變遷模型，並針對可能潛在的地區重新尋找新的殘存的小族群，檢討臺灣森林變遷預測研究的準確性並進行必要修正，提高對於小尺度植群變化趨勢的掌握能力，使森林保育政策與全球氣候變遷趨勢迅速接軌。

## 二、前人研究

### 2.1 保育標的物之適應性經營 (ACT)

全球的科學家、管理者和決策者，均在提倡創新手法的發展，以減少氣候變遷對於物種、生態系統和生態功能的影(Mitchell *et al.*, 2007; US-GAO, 2007; Campbell, 2008)。Cross *et al.* (2012) 提出了保育標的物適應性經營的架構。其新穎的貢獻是透過一個簡單的過程，鼓勵多個公共和私人轄區參與，以地方為基礎，對特定物種、生態系統和生態功能的推導之適應行動。ACT 架構可以被用在任何層級已發生的正式保育規劃，並考量到多重未來情境 (scenario) 以提出不確定性，也可以具有獨立的規劃功能，也可用以被整合進入現存氣候變遷的決策和策略規劃過程。ACT 步驟可重覆監測、在管理上情境的改變和優先的事項，氣候變化和生態回應。儘管這個架構包含了規劃和實行及評估兩個階段，但著重在規劃階段 (步驟 1-4)。步驟一：確認保育標的物 (例如：物種、生態系或生態功能)，並明確說明未來的經營目標。步驟二：建構概念模式、發展一套模擬的氣候變遷情境特徵 (feature) 對於情境之回應。步驟三：以概念模式確立經營管理行動，實現每一個情境下陳述的目標。步驟四：訂出管理行動之優先順序。步驟五：實行優先順序的管理行動、步驟六：監測行動有效性及目標物之進展，調整無效率的行動或隨需要修正計畫。ACT 的架構考量了氣候變遷下，對於特定物種、生態系統及生態功能 (保育標的物) 的管理行動之發展，是基於一個前提：氣候變遷下有效的適應性經營，可依賴「生態

系統的地方性知識 (local knowledge) 」以及「不一定需要對於氣候變遷或它的影響有鉅細靡遺的預測 (projections) 」 (圖 3.1) 。

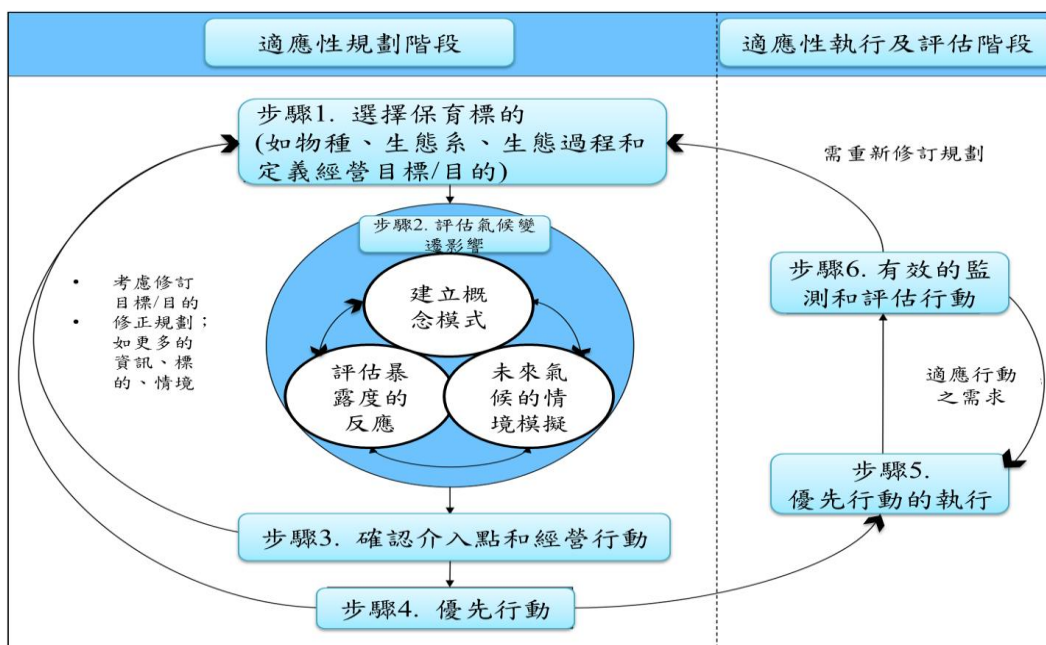


圖 3.1 保育標的物之適應性經營架構概念圖 (譯自 Cross *et al.*, 2012)

## 2.2 臺灣水青岡之研究現況

### 1. 分布與生態

臺灣水青岡族群目前僅出現在臺灣北部的烏嘴山、插天山及拉拉山一帶及逐鹿山、阿玉山西峰；蘭陽溪以南的銅山、下銅山到鹿皮山，及大白山及蘭崁山等山頭地區零星分布 (陳子英等, 2011; 陳品邑, 2012)，同時插天山及拉拉山一帶和蘭陽溪以南的銅山、下銅山是最大的族群，這些大族群主要分布在櫟林帶上層 (Su, 1984)，烏嘴山、阿玉山西峰、露門山附近、大白山及蘭崁山等則是小族群，這些小族群則分布於櫟林帶下層的山頂或稜線，並與常綠闊葉樹混生 (陳子英等, 2016)。近期調查也在大白山與蘭崁山間的山谷，及露門山附近陸續發現新的水青岡族群 (陳子英等, 2016; 劉景國, 2021) (圖 3.2)。

早期研究指出臺灣水青岡生長環境終年雲霧繚繞，陽光不強，故推論臺灣水青岡應為中性至耐陰性樹種（邱清安，1996），目前研究指出臺灣水青岡面臨種子結實率低，天然更新狀況不佳，小苗生長緩慢，容易被玉山箭竹(*Yushania niitakayamensis*)等下層植物覆蓋而死亡(黃立彥，2000)。之後的調查發現臺灣水青岡是利用冠層的孔隙更新，其幼苗可在林下受壓 30 年以上等待孔隙之形成（陳品邑，2012），在苗圃試驗及林下試驗中也顯示臺灣水青岡小苗在中光及小孔隙的環境下生長狀況最佳（韓尚霖，2015），然而現階段天然孔隙形成可能不足以促進臺灣水青岡的幼苗更新，導致幼苗在高生長前即遭玉山箭竹等地被植物覆蓋而死亡（陳品邑，2012；巫智斌，2013）。

近期的研究也指出臺灣水青岡的森林中存在一些共生的蛾蝶類與真菌類（徐堉峰，2017），因此應將水青岡森林視為一個生態系，此種完整且健康生態系（森林）的妥善保存才有可能保存其所負載的稀有物種；因此也把生態系視為粗濾網（生態系尺度），其內的稀有物種視為細濾網（物種尺度），並結合粗濾網（生態系尺度）和細濾網（物種尺度）兩種尺度進行保育，例如優先選定較可能受危害的避難所物種進行植被尺度的保存，在針對對棲地環境有特殊需求的易滅絕物種採細濾網的方式保育（Tingley *et al.*, 2014）。

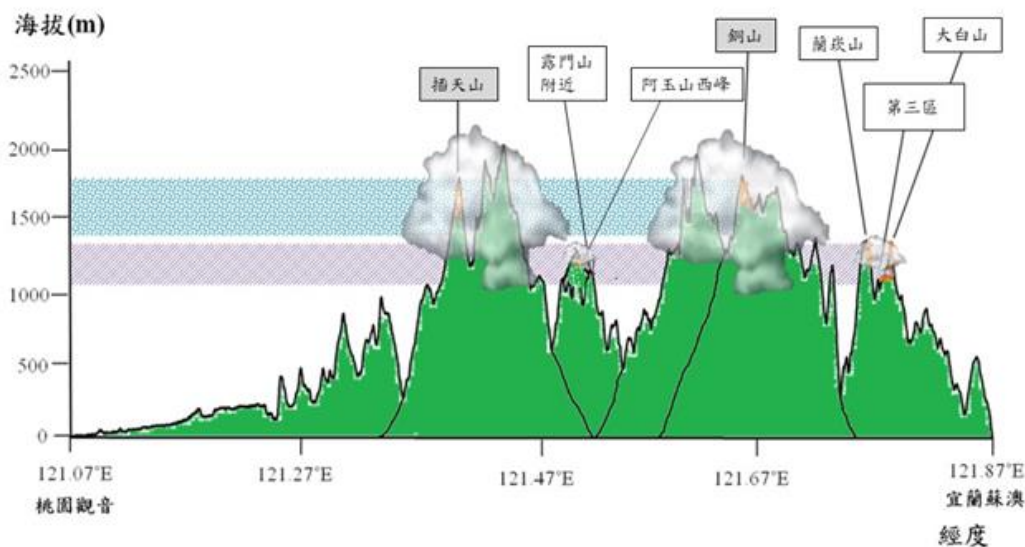


圖 3.2 臺灣水青岡分布山頭東西向橫剖面簡示圖

## 2. 大白山及蘭崁山之臺灣水青岡調查

2015 年分別在大白山與蘭崁山設立 0.24ha、0.29ha 之動態樣區，進行每木調查。經分析顯示大白山及蘭崁山水青岡在森林中的優勢度（IV 值）分別為 18.57% 及 28.61%，代表臺灣水青岡的優勢地位受低海拔植群入侵而喪失優勢性，而入侵植物主要為櫟林帶及楠櫨林帶植群（陳子英等，2016）。本計畫於 2021 年春天於大白山區清水溪溪谷的第三、四區臺灣水青岡族群，進行 UAV 的監測，由於該區地形陡峭，不易到達，因此以 UAV 找出水青岡位置，再到地面現場確定臺灣水青岡的數目與位置，並將地面調查的植株數化後，再於 2021 年秋天臺灣水青岡變色時再以 UAV 做調查，確認臺灣水青岡位置。

### 三、方法

#### 3.1 發展臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育的操作平台，提升氣候變遷下細緻化經營與保育臺灣水青岡森林的能力。

適應性經營規劃為一動態經營行動，特別是針對具有高度不確性的未來環境，透過監測及不斷修正、改善經營理念，使其經營目標盡可能維持在最佳狀態（陳朝圳、陳建璋，2015）。施行步驟為：（一）確定保育臺灣水青岡的保育目的和保育目標。（二）由過去的研究可知大白山和蘭炭山在過去的氣候影響下相當脆弱，且族群有較高的風險，水青岡族群未來變化的趨勢則由本研究預測推估（陳子英等，2016）。（三）綜合過去的風險性評估與未來預測的潛在危害，決定是否須修改水青岡的保育目的或保育目標，若決定更換目的或目標，仍要重新檢視氣候的影響並進行過去及未來脆弱度和風險性評斷。（四）列出可能的保育行動方針。（五）評估並選擇最佳的行動策略。（六）重點行動的執行。（七）監測並追蹤行動的效果，同時也要觀察水青岡森林或族群對行動的所有反應，視情況予以修改（圖 3.3）（Maxwell *et al.*, 2015）。

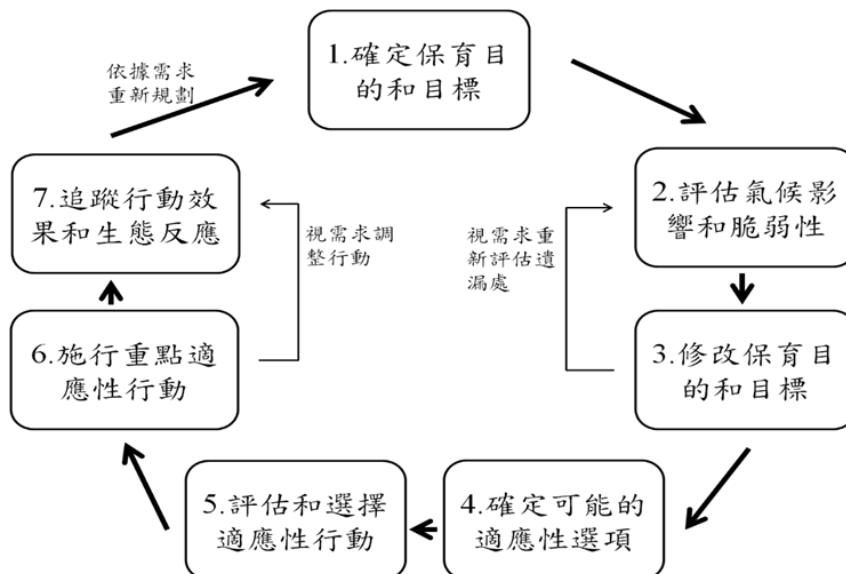


圖 3.3 適應性經營規劃概念圖（修改自 Maxwell *et al.*, 2015）



### 3.2 運用 UAV 對大白-蘭崁山臺灣水青岡生態系之監測

目前已針對大白山至大南澳嶺地區和銅山地區的植群進行分類，並設有永久樣區（陳子英等，2017），將持續以 UAV 進行地景的監測；對於大白山-蘭崁山區陡峭難以到達的永久樣區或樣木（陳子英等，2017），進行臺灣水青岡森林與族群的變化進行監測。

### 3.3 臺灣水青岡生態系在銅山地區及大白山到蘭崁山地區之族群分析

針對銅山於 2020 年複查 2.2ha 長期動態樣區，舉凡木本植物其胸高直徑（Diameter Breast Height, DBH）大於 1cm 且樹高高於 1.3m 者均附上號碼牌加以編定號碼，並記錄其樹種名稱、編號、胸高直徑；大白山到蘭崁山地區則調查出現在蘭崁山（第一區）位置是蘭崁山主峰北北西方之一小稜線上，海拔 1,425-1,450m 之間，蘭崁山到大白山之間（第二區）位於蘭崁山到大白山之間東稜末段之稜線上，海拔 1,170-1,210m 之間，溪谷區（第三區）位於大白山西邊的溪谷，於 2016 年發現，海拔 1,009-1,135m 之間，是臺灣地區海拔分布最低的族群；大白山北邊（第四區）位於大白山之尾段稜線上，海拔 1,300-1,350m 之間，2013 年發現該族群，母樹遠離其他族群外，其餘胸徑約在 10 至 30cm 左右，大白山山頂附近（第五區）位於大白山山頂右側下方附近，於 2013 年發現，海拔 1,350-1,420m 之間。

今年將目前有上標牌的樹種以樹高和胸徑做迴歸，比較六個地點的生長狀況，樹高和胸徑可作為樹木對生育地級的比較，來比較各區的差異。未來這些樣區或樣木位置也跟銅山長期樣區一起每隔 5 年回測一次，比對銅山和中低海拔的大白山至蘭崁地區植群與族群變化了解氣候變遷對脆弱性生態系的影響。

## 四、結果

### 4.1 發展臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育的操作平台，提升氣候變遷下細緻化經營與保育臺灣水青岡森林的能力。

就程序而言，釐清臺灣水青岡生態系在目前的保育問題及氣候變遷情境模擬下所出現的問題，針對族群、森林社會、地景及區域四個尺度，結合生物多樣性學會的地景及區域尺度進行水青岡森林未來的變動與遷移廊道規劃出可以復育與栽植的地區，同時結合過去的植群與植被調查，及銅山地區和大白至蘭崁地區的殘存的小森林，進行野外植群與族群的監測與調查，調查上結合地面與 UAV，並將資料彙整供學會預測模型的參考，並做為種質園與遷地保存預備地點的參考(圖 3.4)。

在整體保育上對水青岡的就地保存及異地保育進行通盤討論，以利棲地管理與遷地保育之推動；並依據高解析度的潛在植群分布圖，針對已知的易危地區，提出細緻化的保育經營與監測管理建議。例如：針對高易危地區之臺灣水青岡生態系案例，協助羅東及新竹林管處所轄有的水青岡森林依生態系，基於氣候變遷可能的衝擊，以實際的族群、植被進行監測，不同的尺度如個體間的物候，小族群數量和不同區域間植物社會動態變化的監測，以釐清氣候變遷對森林植被的影響；藉由計畫期間的氣候模擬預測，營造溫度升高後的遷移路線，規劃出遷徙廊道，並由過去在太平山山毛櫸步道所做的採種、種子發芽及幼苗耐陰實驗所得的苗木，建立育苗體系、撫育及遷徙廊道幼樹的試植，並提高該物種於生態保育教育之運用；另外針對未來氣候情境預測下，生育地有相當高機率會被中低海拔植群取代的大白和蘭崁山特殊基因型的水青岡小族群（江友中，2017），以高壓的方式將野外的族群保存於苗圃栽植及進一步做種質園的規劃，協助區外族群遺傳的保存及族群的移植工作，進行區外保育（鍾振德等，2018）。以上是針對臺灣水青岡對氣候變遷調適進行規劃，綜合和考量不同領域以及跨領域間議題之策略規劃（Strategic Planning），定期邀請不同領域的專家參與滾動式規劃（Rolling Wave Planning）。

羅東林區管理處的臺灣水青岡族群目前僅出現在蘭陽溪以南的銅山、下銅山到鹿皮山，及大白山及蘭崁山等山頭地區零星分布(陳子英等，2011)，同時銅山、下銅山是最大的族群，而大白山及蘭崁山與近期在大白山與蘭崁山之間的上坡及山谷陸續發現新的水青岡族群等則是小族群。由過去航照及風險的評估，銅山、下銅山的危機較小，同時目前銅山、下銅山持續有做動態樣區監測；而大白山及蘭崁山的臺灣水青岡族群暴露度較高，調適能力及回復力不佳，屬於有高滅絕風險的族群(陳子英等，2016)；相較其他地區，本區水青岡族群具有較多的特殊基因型(江友中，2017)；另外，在未來氣候情境預測下，水青岡生育地有相當高機率會被中低海拔植群取代。由於大白山和蘭崁山屬於獨立山頭，且與其他水青岡族群距離較遠，產生隔離，基因交流不易；面對未來氣候暖化持續威脅，一旦本區水青岡族群衰退，特殊的基因也將一併消失。臺灣水青岡的管理行動除考慮保育的成本大小由上而下，做討論(Shoo *et al.*, 2013)。整體而言，大致可分成一、就地保育的評估及監測 二、人為開發的活動及公眾之參與 三、異地及就地保存。其中在一、就地保育的評估及監測這部份，臺灣水青岡族群由於颱風、暴雨等極端事件而導致族群減少(陳子英，2015)。

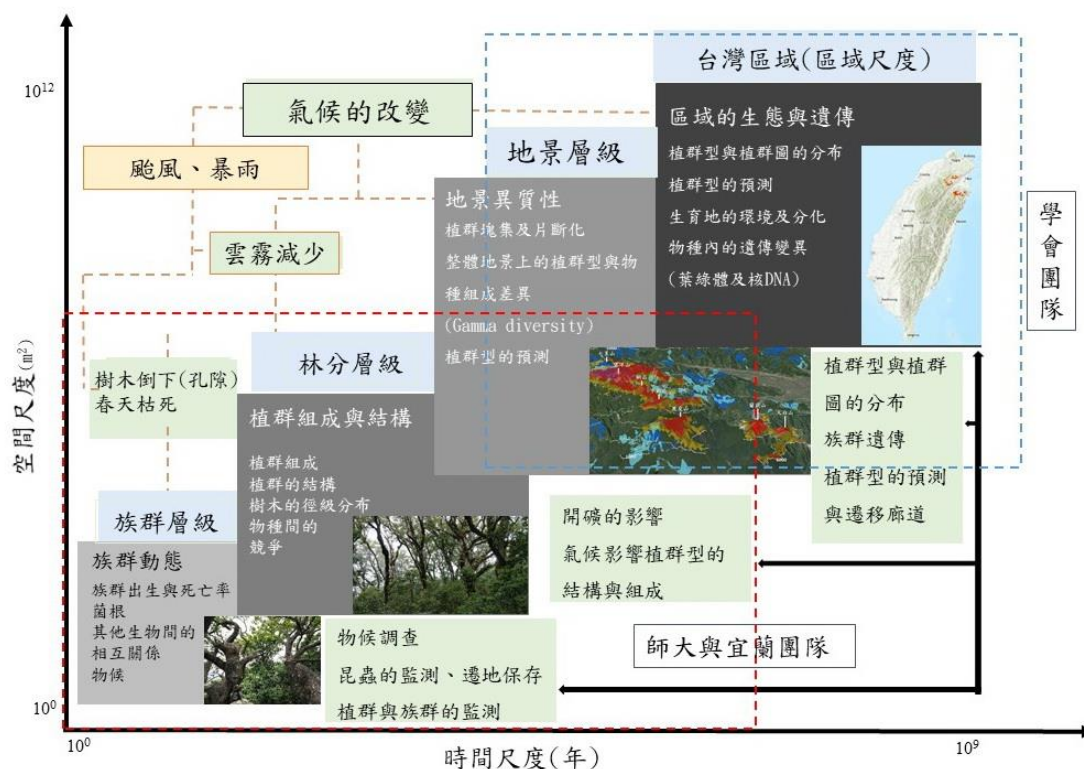


圖 3.4 在四種不同尺度下臺灣水青岡的調查與保育概念圖。師大與宜蘭團隊針對物候、昆蟲的監測、大白-蘭崁山區與銅山地區的族群與植群監測，並將監測結果與做比較，同時探討對地區開礦結果，學會團隊則針對水青岡植群未來的分布與遷移廊道做研究，提供遷移路徑及未來復育地點。

在人為開發活動及開放山林和 COVID-19 疫情下公眾之山林遊憩的參與上做預先管制，大白山附近的開礦對水青岡的衝擊是目前較大的，是否可在環評或其他方式加以限制，而銅山地區臺灣水青岡森林是臺灣最大的族群，野外監測所提供的資料作為氣候變遷資訊的參考資訊，同時對目前大白-蘭崁山增加的民眾數預先做管理評估（陳子英等，2016）。

由於大白山-蘭崁山一帶的族群與銅山之間的遺傳略有差異，由研究顯示，在銅山 K3、K4、K6 及 K7 的量較少，但鄰近較低海拔的大白山 1、大白山 2 和蘭崁山則在 K6、K4 和 K7 有較高的量，因此如果要增加銅山地區族群遺傳的多樣性，有必要保留這三個地區的小族群（江友中，2017）。而異地保存上，尚依賴散殖體的繁殖技術；而在大族群的臺灣水青岡森林中所設置的動態樣區，在森林建造時可提供生態資訊和移地時廊道的設計和地點的選定；以協助遷移或營造棲地廊道；當然最重要的可能是由先前的資訊評估目前保護區的適切性，如此才可進行保護區網和異地保存的作法（陳子英等，2016）。綜合上述觀點，大白山及蘭崁山小族群的水青岡森林較銅山地區，應屬於急需保育之族群，於此列出干預的事項及未來可供進行的監測與管理事項（表 3.1）。

表 3.1 臺灣水青岡保育的潛在行動

干預點	潛在行動		
棲地與族群穩定度評估	棲地穩定，族群具更新能力	→ 就地保育	設置樣區或標定樹木定期監測 → 協助族群更新 劃設保護區
	棲地面臨威脅，不易更新，野外族群數量少	→ 移地保育	種子庫與散殖體保育 → 種質園 協助族群更新或移地復育
臺灣水青岡低海拔族群	低海拔與中海拔族群遺傳物質分析	遺傳多樣性變異高 → 特殊的遺傳變異	棲地及族群穩定度評估與保育 → 遷地保存
物候	物候（吐葉、開花、結果）調查	極端氣候 → 對物候的影響	年度內的變化、不同地區的變化，果實豐歉年、蛾蝶類影響，降水對不同生長季的影響
植群與族群監測	定期監測臺灣水青岡範圍，特別是颱風過後的調查與記錄	極端氣候及季節性降水 →	颱風衝擊、降水增減或其他因素對植群的影響
人為開礦、遊憩活動及其他	開礦活動的評估	地景監測與評估 →	→ 開礦衝擊的評估
	近年森林遊憩活動的教育宣導	→ 民眾的宣導	→ 整體保育及無痕山林和環境保護的宣導

目前大白山及蘭崁山臺灣水青岡森林在 IPCC(2014)風險概念中，因分布海拔低，接近受颱風干擾之東部海岸，且主要族群位於山頂、稜線地形，屬於暴露度較高之生育環境；水青岡森林本身在臺灣具稀有性，加上不易天然更新，族群分布面積小，並與優勢的常綠殼斗科與樟科樹木競爭，增加了族群脆弱度；全球暖化、極端氣候與人為活動的危害，使得研究區水青岡族群在各種不利的因素下，承受更大的滅亡風險（陳子英等，2011；陳品邑，2012；巫智斌，2013；許驊，2015）。

由暴露度、脆弱度及危害三個因子列出對大白山及蘭崁山的臺灣水青岡森林之影響，同時由過去氣候影響、族群遺傳、人為開採礦石及生態氣候模擬探討等研究進行討論：

#### 1. 過去氣候影響：

過去研究顯示，全台的水青岡森林中，大白山、蘭崁山的年均溫有顯著上升。此外，蘇澳氣象站資料指出 1982-2013 年間共有 6 次豪雨事件，有 4 次出現在 2008 年前，2009 年後出現 2 次，6 次豪雨事件中有 3 次為颱風造成，尤其是 2010 年 10 月的梅姬颱風與 2012 年 7 月的蘇拉颱風分別帶來 1,195.9mm 和 615.8mm 的總雨量，在氣象站史上排名第一、第二，皆造成嚴重災害（許驊，2015）。

#### 2. 族群遺傳：

江友中（2017）指出大白山及蘭崁山一帶的臺灣水青岡族群具有特殊基因型，因這些族群位於獨立山頭，難以與其他地區的水青岡族群進行基因交流，造成族群間遺傳分化較大，而特殊基因便一直保持在本地水青岡族群中（林淑華、何坤益，2010）。分布狹窄的族群一旦經歷氣候暖化或極端氣候等瓶頸效應（population bottleneck），族群內殘存的植株可能近親繁殖以至於遺傳多樣性（genetic diversity）降低，對環境及氣候的調適能力也可能減弱，更不利於族群生存與繁衍（Williamson and Werth, 1999；李淑敏、姜保真，2011）。

為了達到臺灣水青岡保育之目的，基因多樣性應盡力維持，然而

大白山和蘭崁山極有可能是臺灣水青岡在低海拔的滯後族群，若無法利用自然的生態廊道與其他地區族群進行基因交流，則需透過人為方式協助族群遷地保存進行保育，否則暖化現象持續或極端氣候的發生，可能造成擁有特殊基因的水青岡族群滅絕，同時也不利於其他地區族群面對未來之氣候或疾病風險（李淑敏、姜保真，2011；Gray and Hamann, 2013）。

### 3. 人為開採礦石：

大白山與蘭崁山附近主要人為活動為礦石的開採，目前所調查到的水青岡母樹部分分布在礦場擴建的預定地中，距離最近的水青岡森林族群不足 50m，此外，有少數植株位於礦場預定地下方的溪谷內，一旦礦場開始動工，爆破、挖掘和廢棄砂土傾倒必然使鄰近及溪谷的水青岡族群承受直接傷害，而車輛機具所排出的噪音和廢氣，也會對較遠的水青岡森林生態系產生不利影響（陳子英等，2016），近日礦區在環評後仍想確定臺灣水青岡的數目與位置，為經營與管理起見應盡早確定族群的位置和數量。

### 4. 生態氣候模擬：

藉由各生態棲位模型預測暖化情境，顯示大白山及蘭崁山水青岡森林在未來分布極度不穩定，約再 20 至 30 年左右，研究區環境將不適宜水青岡族群，現有族群可能完全無法天然更新，族群消失意味生育地將被其他中低海拔植群取代，原本族群具有的特殊基因也將消失。為了避免憾事發生，現階段對策是建議在野外成立監測點，如動態樣區定期關注水青岡森林內的動態變化，並做好遷地保育的準備工作，一旦中低海拔植群數量大幅增加，便要立即進行遷地保育行動。

研究區的臺灣水青岡族群在自然情況下不僅處於高風險狀態，未來還需面對氣候暖化和中低海拔植群競爭的困境。然而，更大的威脅可能來自極端氣候，極端氣候能在短時間內對水青岡族群造成毀滅性打擊，然而極端氣候中的颱風和降雨強度目前僅能依過去的氣象資料了解，較難進行預測。然而藉由系統預測，顯示未來西北太平洋颱風

生成位置將向東南偏移，路徑朝北偏轉的機率提升，目前雖無法預測侵台的數目是否增加，但未來颱風待在溫暖海面的時間較長，有較高的機會成為強烈颱風，1980年後侵台颱風的生命歷程中達到強颱標準的比例明顯提高，此現象與上述生成位置改變、路線北偏以及太平洋海溫提高有關（許晃雄等，2011）。而全球預測顯示降水強度和頻率有增加的趨勢，且趨於兩極化，即雨季越溼，乾季越乾，此種變化對需溼冷穩定氣候的水青岡時極為不利之條件，尤其夏季及冬季的乾旱時間變長，然此現象是否與全球預測趨勢相同，還需進一步觀察（黎光泰，2018）。

## 4.2 林管處轄區內的水青岡保與平台會議

4.2.1 前期（2019年及2020年）的水青岡森林調適專門委員會會議成果簡述如下：

### 1. 2019年臺灣水青岡保育工作會議

2019年臺灣水青岡保育策略會議在羅東林管處，針對羅東處轄內臺灣水青岡的4個主要族群（銅山地區、大白山、蘭崁山、大白一蘭崁山間新發現族群）的族群現況，羅東處提出以下就地（*in situ*）及異地（*ex situ*）保育策略，

#### （1）就地（*in situ*）：

- a. 持續監測與林地（礦業租地區域）經營管理有關係的臺灣水青岡現地族群。
- b. 調查臺灣水青岡在大白山、蘭崁山之物候。
- c. 玉山箭竹開花後死亡對臺灣水青岡幼苗更新的影響。
- d. 針對大白、蘭崁小族群棲地，能否以精緻育林的概念進行施肥、除草（箭竹）等棲地管理。

#### （2）異地保育策略：

- a. 遺傳多樣性保存：



- (a) 收集大白、蘭崁山小族群有性繁殖(種子)進行異地復育。
- (b) 收集具特殊基因小族群的無性繁殖進行保存：目前蘭台苗圃現有 67 株蘭崁高壓苗、54 株嫁接苗。

b. 異地復育移植：

目前 120 株(銅山)種子苗移植試驗成果：，經 106 年移植 10 株於太平山山毛櫸步道口；107 年太平山工作站移植 70 株於翠峰林道 200m 雜木林空隙地及 4km 處空曠草生地，蘭台苗圃現尚有 67 株高壓苗。

2. 2020 年臺灣水青岡保育工作會議

2020 年臺灣水青岡保育策略會議在羅東林管處，第一次為室內討論，第二次為現勘討論及建議(圖 3.5)

(1) 執行之臺灣水青岡保育工作現況及相關問題討論：

a. 異地保育工作：

配合林務局「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」計畫適存度模擬結果，進行臺灣水青岡適宜棲地試驗，以做為未來水青岡復育參考運用。有關已移植之苗木生長現況及進行棲地調整改善。目前生長現況：

移植區域	山毛櫸 步道口 100 公尺	翠峰林道 200 公尺左 側雜木林空 隙地	翠峰林道 4 公里左側崩 塌治理過之 草生地	翠峰環 山步道 側	翠峰環 山步道 口停車 場旁
株數	10	40	70	200	50
移植時間	106	107	107	109	109

b. 種質保存園現況：

為保存蘭崁、大白山地區臺灣水青岡族群的遺傳物質，規劃本處白嶺苗圃為臺灣水青岡種質保存園，將 105 年高壓技術保存之 74 株苗木（蘭崁山 62 株，大白山 12 株），經 109 年 2 月定植於白嶺苗圃。

3. 2019 年新竹林區管理處插天山自然保留區路線維護管理討論會議：

北插天山步道系統木屋遺址至三角點路段適逢當地箭竹開花及臺灣水青岡結實，因事涉臺灣水青岡下種更新契機，建議用保護「文化資產保存法法定珍貴稀有植物-臺灣水青岡」為由研擬路線改道。在目前 3 步道系統選擇陡坡及裸露嚴重的區段，不破壞保留區原有自然狀態之前提下，進行手作步道及木棧道及橫向排水（過水路面）等設施，將登山遊客導入單一步道，不僅可達安全目的，也可以減少本區樹木根系裸露情況的發生與繼續惡化。（2）有關水青岡及玉山箭竹開花：建議由野外觀察物候調查記錄做起，水青岡採種期約在每年 9 月中旬～10 月上旬採取豐年的種實做保存。玉山箭竹開花及臺灣水青岡開花結果，是適合臺灣水青岡天然更新的時間，除了適時減緩進入之民眾亦可改變路線，然對於更新的狀況仍可做幼苗更新成長的監測。

4. 2021 年羅東林區管理處轄內臺灣水青岡的保育工作會議現況如下：

8 月 3 日（星期二）上午 10 時在羅東林區管理處會議

討論林區管理處轄區內臺灣水青岡族群因應氣候變遷對於臺灣水青岡之影響為「氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育研究，為臺灣水青岡適應性經營（ACT），召開本次會議。

（1）羅東處轄內臺灣水青岡的保育工作執行現況：

目前羅東處轄區內臺灣水青岡的分佈有銅山地區、大白山、蘭崁山及新發現的介於大白山與蘭崁山的中坡一區（大白新一區）

及近溪溝兩側的新二區（大白新二區），其中銅山地區有較大的族群；其他幾個地區族群數目較少，尤其蘭炭山、中坡一區（大白新一區）及新二區（大白新二區）族群都少於 60 株。整體報告如附錄 1。

(2) 委員建議：

- a. 臺灣水青岡保育工作的目標及分工，各個目標、策略、戰略方式建議要有一個整體的規劃。
- b. 建議棲地配合設立小型氣象站，可協助提供物候觀察資訊，各個區域微環境氣候不同，溫溼度不同，開花結果、豐年週期可能也因此不同。
- c. 有關種質保存園的改善：白嶺苗圃排水、雜草抑制等環境有改善，但看起來有葉面黃化，可能有肥料養分問題，建議用好康多 360 天長效型肥料，每一株約 100 公克即可。
- d. 建議豐年也做銅山族群種子苗採種，做區外的復育。
- e. 雖然豐年種子品質較佳，倘若蘭炭、大白低海拔區域採種的目的是為了做復育，但是有種子就是機會，仍建議嘗試進行採種復育。

(3) 會議結論：

- a. 為了保存蘭炭山、大白山的小族群遺傳基因，請冬山站倘有觀察到採種的機會，還是要把握機會進行採種復育、啟動異地復育。
- b. 今年利用高壓技術保存小族群水青岡的工作，請作業課持續協助督促現場執行，視今年高壓執行成效，評估後續是否持續執行。
- c. 現地物候觀察、移植棲地的監測復育工作請工作站應持續執

行，後續幕僚單位應彙整比較以展現成果，以留意氣候變遷對臺灣水青岡生態系的影響。為延續累積及保存資料，相關監測資料及研究報告、會議紀錄等建檔、後續的彙整很重要，相關資料請持續累積建置於本處 Z:\10 育樂課\@水青岡保育工作資料夾中。

#### (4) 未來的問題

有關大白-蘭崁地區的種子採集復育，未來面臨比較大的問題是培植出來苗木應該種到哪裡，續再請老師協助提供相關的資訊與建議。

#### 5. 2021 年 8 月 10 日野外到羅東林區管理處轄內對翠峰林道臺灣水青岡的現勘，現勘地區如下：

- (1) 翠峰林道 200 公尺左側雜木林空隙地的臺灣水青岡造林地 40 株
- (2) 翠峰林道 4 公里左側崩塌治理過之草生地 70 株
- (3) 翠峰環山步道口停車場旁 50 株
- (4) 105 年高壓技術保存之 74 株苗木(蘭崁山 62 株，大白山 12 株)，經 109 年 2 月定植於白嶺苗圃的臺灣水青岡種質保存園。

#### 6. 結果：翠峰林道 4 公里左側崩塌治理過之草生地 70 株和翠峰林道 200 公尺左側雜木林空隙地的臺灣水青岡造林地 40 株生長良好。白嶺苗圃的臺灣水青岡種質保存園需改善排水及土壤介質。

#### 4.2.2 羅東林區管理處近年在臺灣水青岡的保育

羅東林區管理處近年在臺灣水青岡的保育上完成 1. 現有大白-蘭崁山與太平山山毛櫸步道族群的調查及物候的監測。2. 族群遷移及臺灣水青岡的栽植試驗及復育，如 (1) 翠峰林道 200 公尺左側雜木林空隙地 (2) 翠峰林道 4 公里左側崩塌治理過之草生地 (3) 翠

峰環山步道口停車場旁 (4) 翠峰環山步道側 (5) 山毛櫸步道口 100 公尺。3. 高壓技術保存蘭崁山及大白山瀕危的植株於白嶺苗圃，作為未來臺灣水青岡種質保存園之用。

未來的問題有 1. 大白-蘭崁地區的種子採集復育，面臨培植出來苗木應該種到哪裡，需團隊再協助提供相關的資訊與建議。

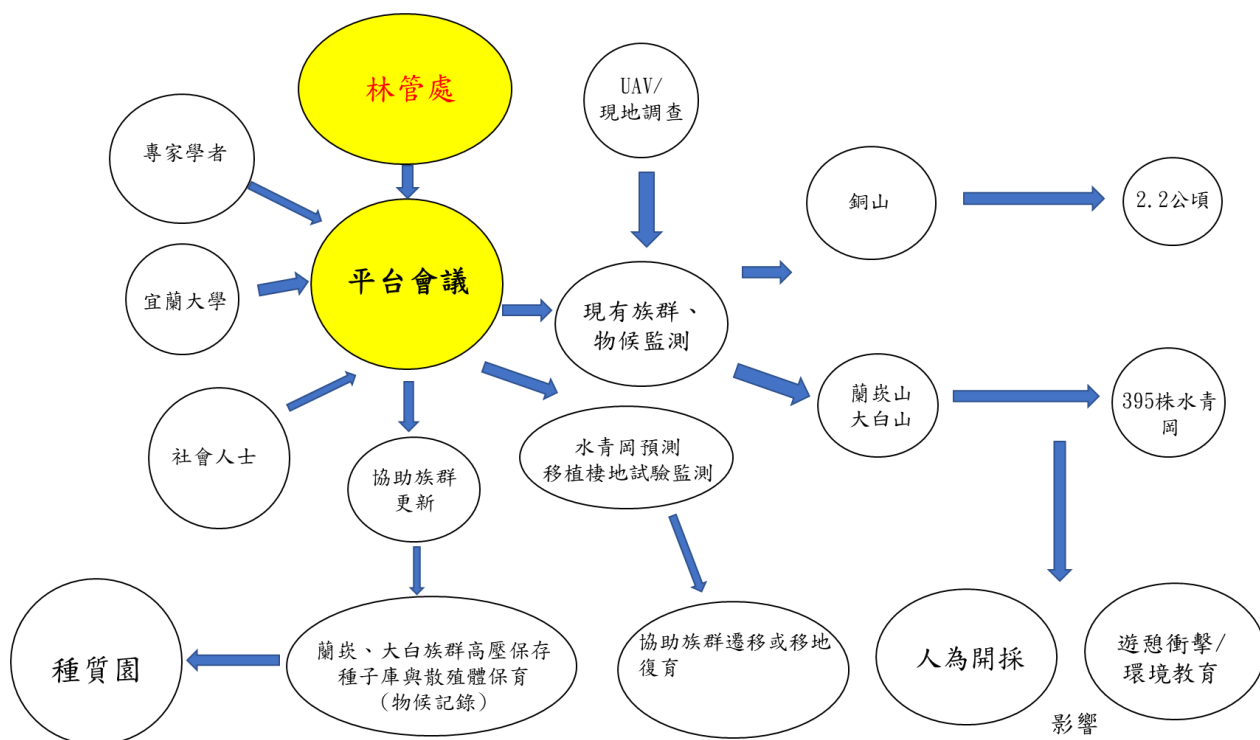


圖 3.5 計畫內經平台會議討論的操作項目

#### 4.3 大白山到蘭崁山配合 UAV 的臺灣水青岡監測調查：

由於臺灣水青岡屬於落葉性闊葉樹，春季抽芽，夏季成熟葉為深綠色，而秋季落葉由原本的深綠色轉為亮麗之金黃色，冬季則樹葉盡落獨留空枝，故若欲以 UAV 航照判釋臺灣水青岡樹冠之季節較宜選擇春、夏、秋三季，然而在夏季因水青岡葉子已經成熟呈深綠色，而易與其他樹種混淆，需較具經驗之調查者才得以依樹冠特徵與顏色區分，而秋季水青岡樹葉轉為金黃色時也易與同時期變色之青楓產生混淆，故在水青岡樹冠的判釋上仍具一定挑戰性而須進行持續性的研究

資料累積，以歸納出該區域的水青岡判釋特徵與伴生樹種的差異比較分析。

本計畫於 2021 年度春季（3 月）於大白山至蘭崁山地區以無人機飛行載具（UAV）配合臺灣水青岡族群監測調查，延續監測 2019 年秋季（11 月）及 2020 年春季（5 月）於大白山區清水溪溪谷的溪谷區（圖 3.6），臺灣水青岡主要分布於雲霧繚繞的霧林帶，其雲霧形成時間通常於中午過後便由於潮溼空氣隨著地形抬升而生成濃厚的雲霧，持續的時間更可能長達數十個小時，因此限制了 UAV 調查的可行調查時間，導致地物被雲層所遮蔽而影響飛行拍攝任務的進行（圖 3.7），而若 UAV 調查時間過於提前則會導致太陽入射角度過度傾斜而使所蒐集的 UAV 影像光度明顯不足造成後續疊圖與辨識上的困難，且會因 UAV 任務飛行區域的地形限制與太陽光入射角的交互影響而使所得 UAV 影像形成過多的陰影遮蔽，而降低後續生成影像之品質，午後則會因為太陽入射光度過強而使所蒐集 UAV 影像過度曝光影響圖像品質，且雲霧開始生成而影響飛行任務的進行，計畫期間經多次的飛行任務與後續疊圖品質的比較分析，歸納出本區域的最適飛行任務時間約每日 9：00~11：00，此時段之太陽入射角度、光度皆對影像品質有較好的呈現，而可供後續 UAV 影像疊合分析與圖像辨識之利用。

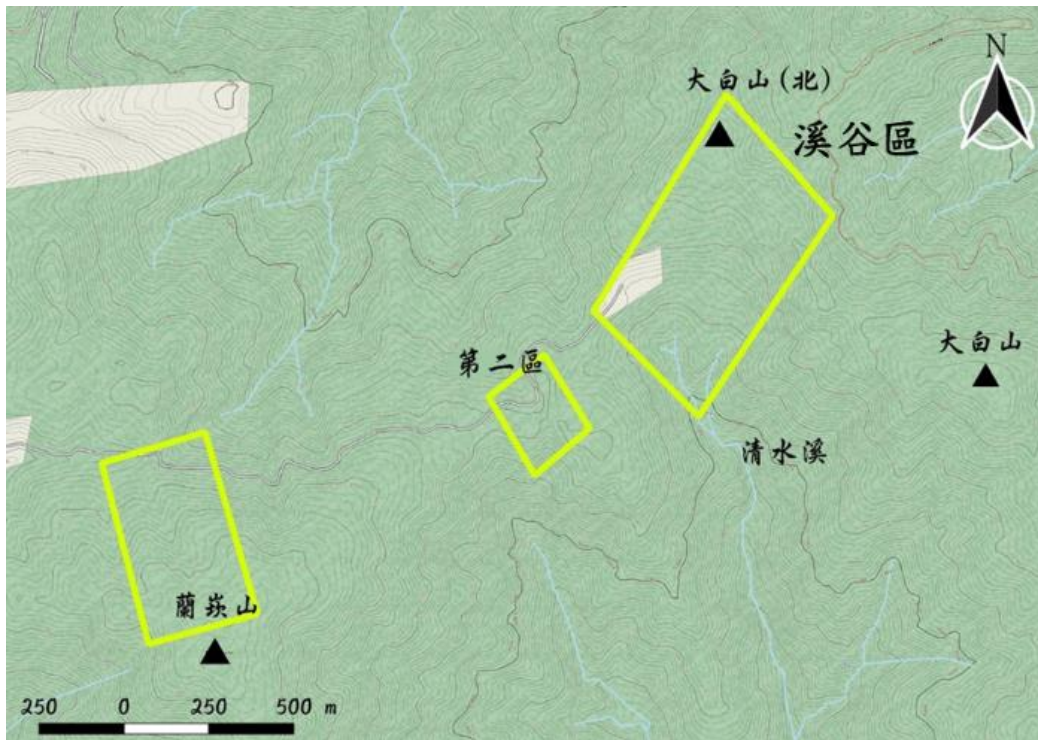


圖 3.6 計畫中 UAV 任務航線範圍

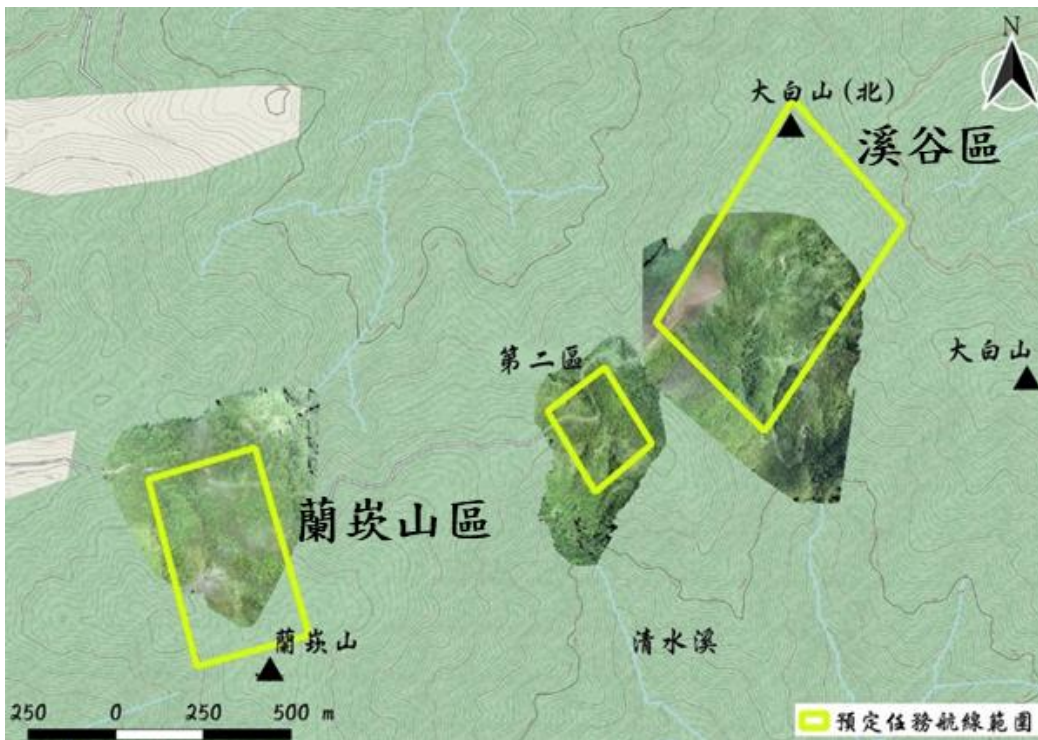


圖 3.7 航線規劃範圍與 UAV 實際疊合正射影像範圍

透過現地拍攝的 UAV 影像經軟體疊合成正射影像後，利用 GIS 軟體進行後續分析判釋，並以過去現地調查的臺灣水青岡點位進行比對，判釋可能的水青岡植株分布，以觀測現地調查未能觀測到之臺灣水青岡植株，以更加清楚呈現大白-蘭崁山地區臺灣水青岡族群可能出現的分布與族群數量。

利用 UAV 對目標樹種臺灣水青岡的族群監測，除了可以提供可能的臺灣水青岡植株分布位置，對於人員較難以到達的山稜、溪溝，也可藉由 UAV 影像疊合之正射影像圖，透過 GIS 軟體數化經圖像判釋可能的臺灣水青岡樹冠範圍（圖 3.8）。雖能透過 UAV 影像觀測上層優勢物種的分布狀況與生長情形，但伴生物種及下層地被植物的變化以及臺灣水青岡的族群更新狀況，仍需透過配合現地的詳細調查才能更精確的評估臺灣水青岡的族群變動，使監測更加全面與完整性。

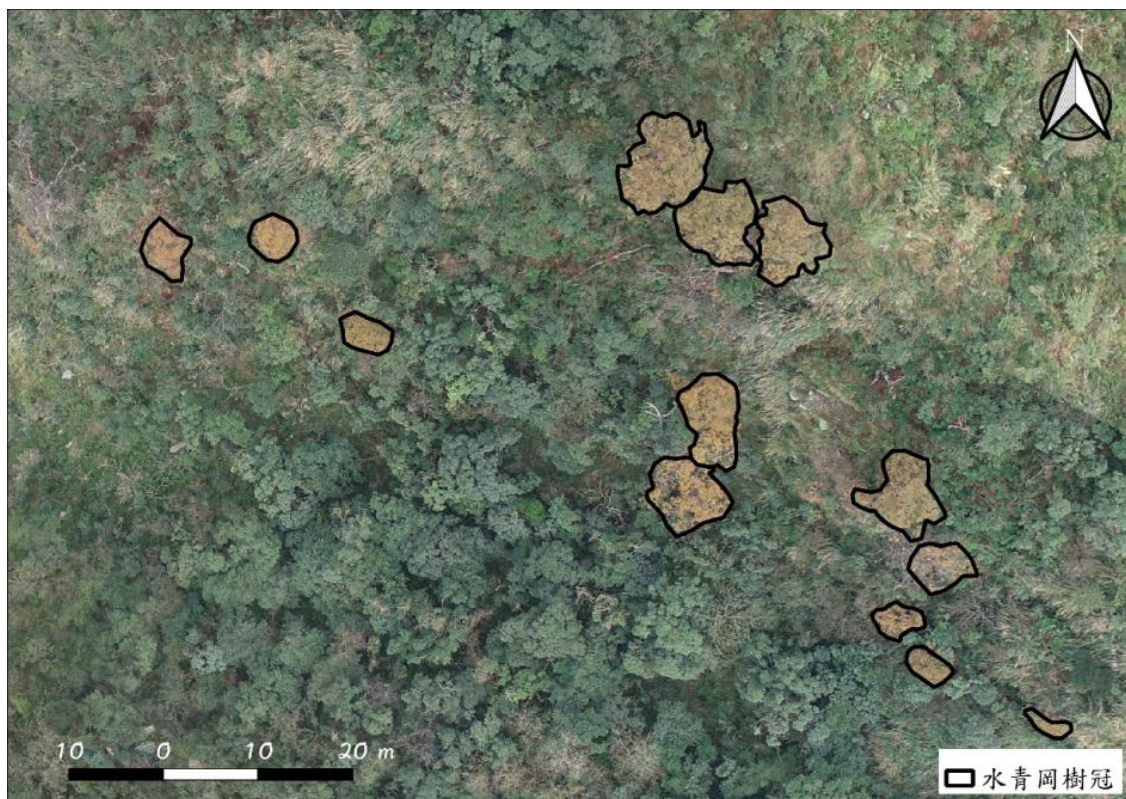


圖 3.8 利用 UAV 正射影像數化臺灣水青岡樹冠範圍

於 2021 年春季（3 月）執行大白山第三、四區的臺灣水青岡族群



監測，本次飛行任務飛行開始時間為上午 10：40，但仍面臨雲霧遮擋問題，於起飛點及大白山北面山脊皆被雲霧所壟罩，因此在北面山脊的 UAV 正射影像因特徵點不足而無法拼接成圖，但仍可透過為未經過拼接處理的 UAV 原始影像調查該區域的臺灣水青岡植株（圖 3.9、3.10），經比較 2020 年與今年度所調查的正射影像，新增約 16 棵的判識可能點位（圖 3.11），新增判釋的水青岡植株點位主要分布於過去 UAV 調查因雲霧遮擋無法拼接的區域以及航線邊緣的模糊影像，2021 年秋季（10 月底及 11 月初）兩次前往，因起霧與飄雨無法拍得整體狀態，而工作站於 10 月 29 日前往雖天氣好，但仍有雲霧，靠近大白山區有霧，無法拍得全區，11 月 6 日前往調查，部分葉子已脫落，只以 2020 及 2021 年所得整理出可能的植株，仍尚待地面做更確定的調查。



圖 3.9 2021 年春季（3 月）大白山北面山脊永久樣區

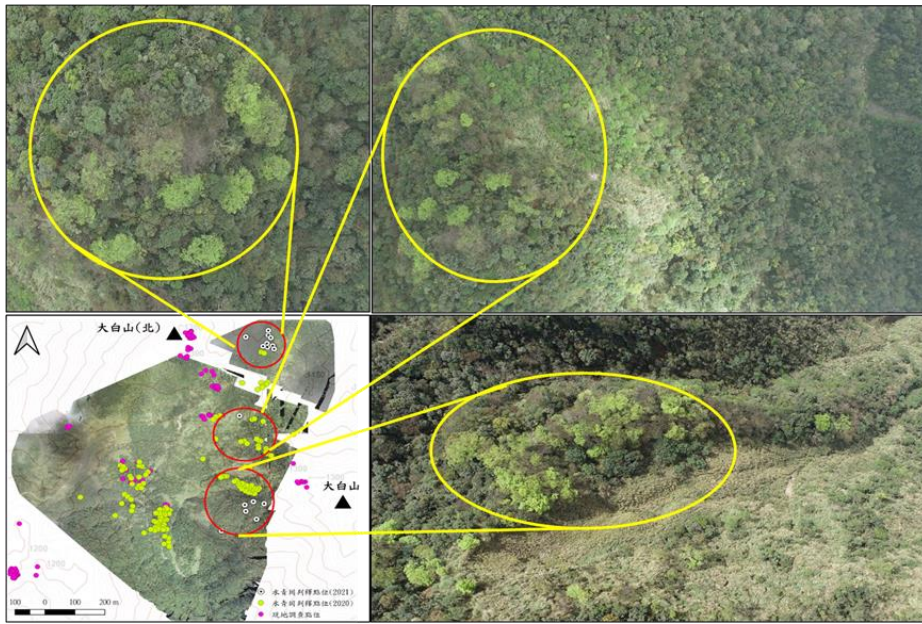


圖 3.10 2021 年春季（3 月）大白山區域大白山北邊及溪谷區新增判識可能點位

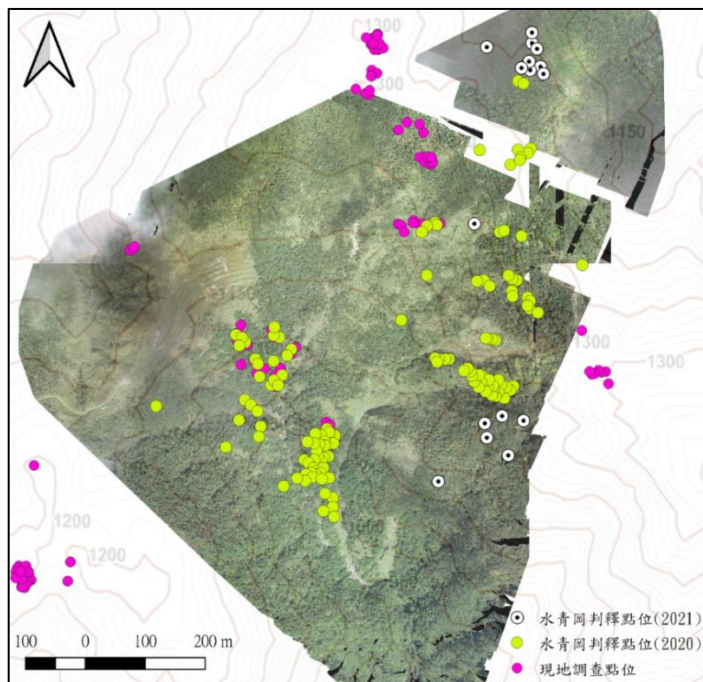


圖 3.11 2021 年春季（3 月）大白山北邊及溪谷區 UAV 判識可能的水青岡植株與現地調查點位

根據 2019、2020 年以及今年度（2021 年）的 UAV 正射影像顯示，臺灣水青岡族群與伴生樹種的分類判釋上仍有一定的限制，臺灣水青岡初始展葉的早春時期應為較佳的觀測時間，此時期的臺灣水青岡葉色鮮綠，較易與其他樹種做區分，但在影像的蒐集與分析上仍受限於天氣、時間與地形對影像品質的影響，在過去幾次的調查上皆面臨小區域的雲霧遮擋，尤其位於大白山北面山脊每天最早受到影響，在飛行任務的規劃上仍需要透過不斷的嘗試以獲取可供研究分析的資料品質，各期的 UAV 正射影像亦透過地面控制站的設置以避免不同季節的影像疊合誤差，以利未來應用 UAV 對目標樹種的族群的物候監測，除了可透過 UAV 正射影像判釋可能的臺灣水青岡族群分布，對於人員難以到達的地方，也能藉由 UAV 正射影像透過 GIS 軟體數位化可能的臺灣水青岡樹冠以觀測極端氣候衝擊下臺灣水青岡個體的生長狀況與物候變化，然而僅僅透過 UAV 的調查仍會受限於氣候狀況與影像判釋上的誤差，經由 2021 春季的 UAV 調查，發現在大白山北邊、溪谷區和大白山-蘭炭山（新一區）有許多疑似上次未標記到的臺灣水青岡，然因受限天候無法配合地面進行更詳細調查，因此結合空中的影相和現地的動態樣區調查仍是監測臺灣水青岡族群的必要設置（圖 3.12）。

UAV 正攝影像仍無法清楚判釋臺灣水青岡植物社會下層地被植物的變化及臺灣水青岡小苗更新的狀況或臺灣水青岡的細部生理特徵如成熟果實的孕性等，這些更詳細的個體物候的變化狀況與族群更新模式仍需透過研究人員的現地調查才能進行更詳細的觀測，因此臺灣水青岡族群的監測調查仍需透過地面每隔一段時期的現地長期樣區調查進行詳盡的族群更新變動，檢測與臺灣水青岡植物社會的植物組成分析並搭配空中的 UAV 正射影像的航照判釋輔助臺灣水青岡族群的分布與族群變動情形，達到不同尺度的族群監測整合，對大白-蘭炭地區的臺灣水青岡族群保育提供更有效率且更為全面性的監測調查模式，並確保調查人員安全與更便利及實用的監測方式（圖 3.13）。

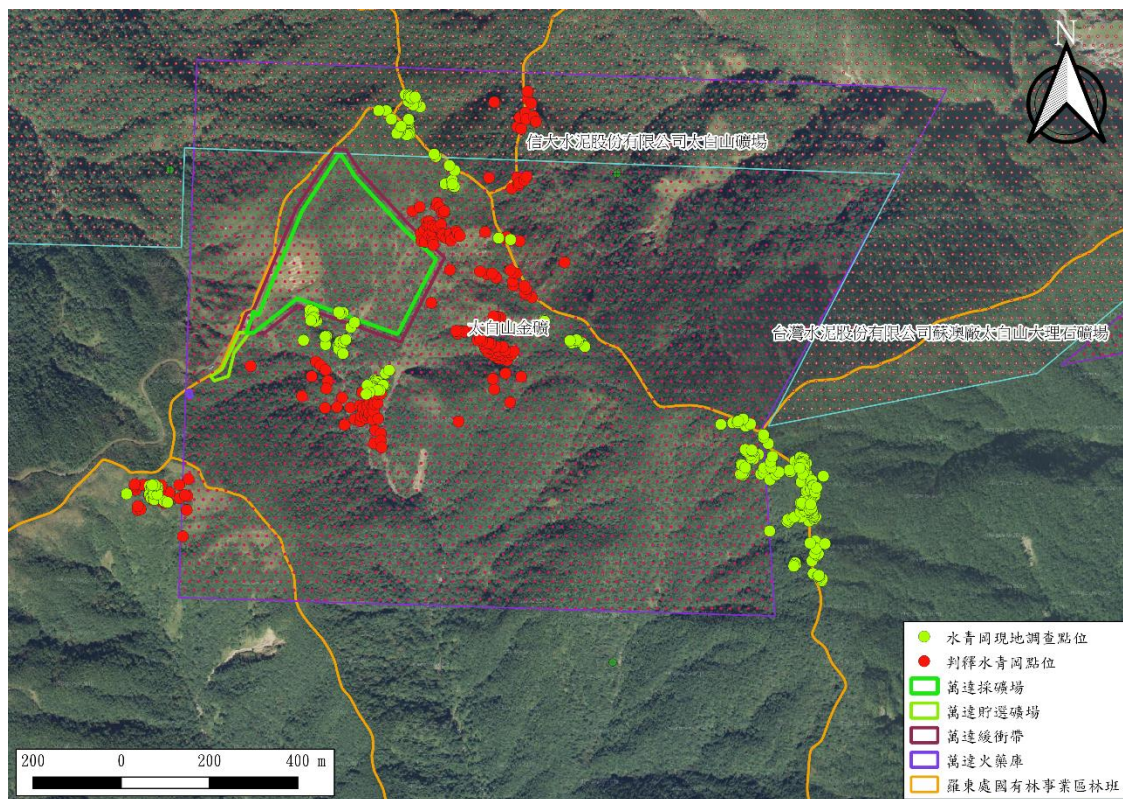


圖 3.12 大白-蘭炭地區現地與 UAV 調查水青岡的位置

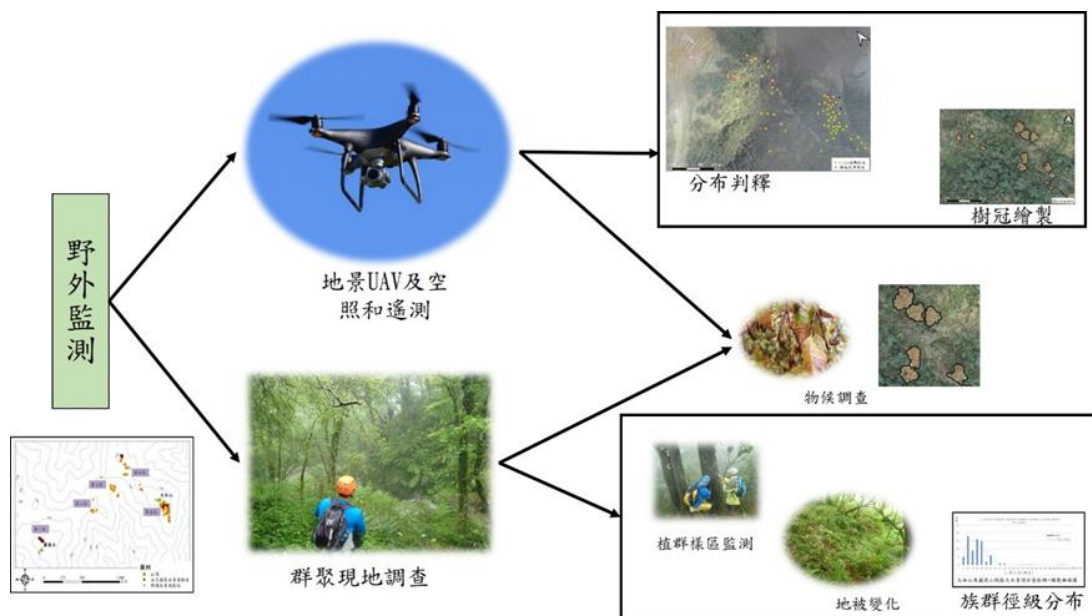


圖 3.13 運用 UAV 搭配現地調查野外監測流程

## 4.4 臺灣水青岡生態系在銅山地區及大白-蘭崁山地區之族群

### 4.4.1 蘭崁山動態樣區的初步調查：

蘭崁山臺灣水青岡的族群現況及下層地被植物變化，2021 年分別進行了數次的現地調查，目前發現蘭崁山先前玉山箭竹優勢的地被，在 2019 及 2020 年在箭竹開花死亡後，地被植物以紅鞘薹 (*Carex filicina*)、束草 (*Carex brunnea*)、栗蕨 (*Histiopteris incisa*) 及莠竹屬 (*Microstegium* sp.) 構成，玉山箭竹及白背芒 (*Miscanthus sinensis*) 僅佔少數，東段 (樣區 L08-L10 及 L13-L15) 空曠處玉山箭竹較多，但多為剛冒出之小苗；白背芒則在西北段 (樣區 L22-24) 與玉山箭竹零星的小苗混生，但數量皆不多，覆蓋度不到總樣區面積的 10%，與 2016 年下層皆是玉山箭竹相比，玉山箭竹覆蓋度減少相當多，根據日本的文獻指出臺灣水青岡可藉由林下矮竹開花死亡之際完成更新 (松井哲哉等, 2007; 2009)，但近年來團隊與林管處的物候調查未發現水青岡有開花的紀錄，同時 2021 年調查也未發現水青岡小苗，並且在 7 月的調查中，未發現編號 L18091 胸徑 1.9cm 之樣木，扣除原先死亡之樣木，目前蘭崁山的臺灣水青岡僅剩下 35 株，蘭崁山地區的徑級呈現鐘型 (圖 3.14)，6 年的觀測只看見一株開花，結果後不孕，相較於去年銅山地區的複測，小樹更新狀況不佳，沒有充足的小樹補充，比對水青岡的遺傳研究，該地有銅山地區較少的基因型應先進行異地保存，未來對該樣區應持續做植群及族群監測。

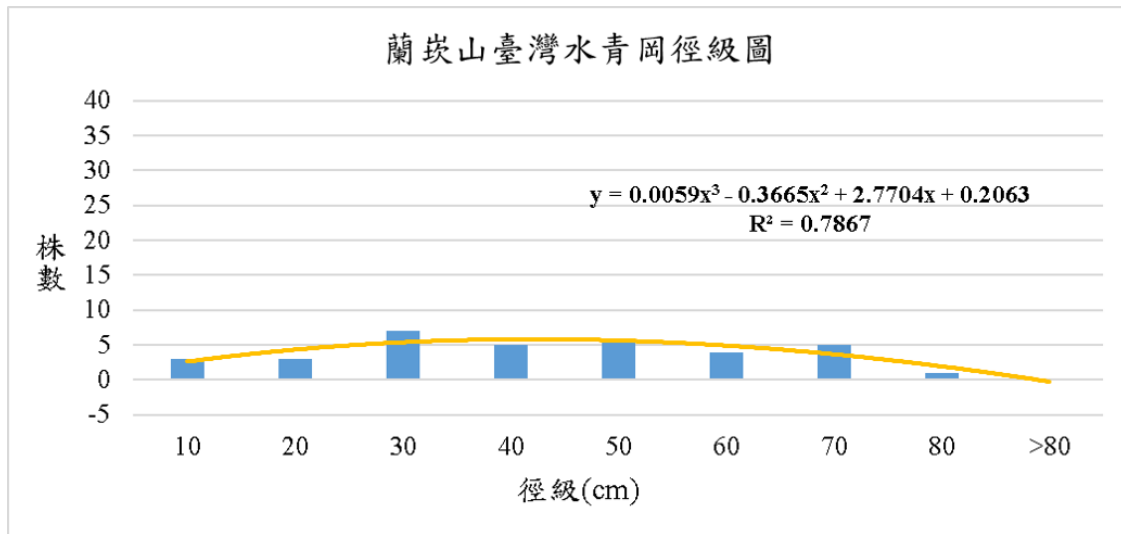


圖 3.14 蘭崁山臺灣水青岡徑級圖

#### 4.4.2 銅山地區及大白-蘭崁山地區之族群分析

大白-蘭崁山間稜線（新一區）位於蘭崁山到大白山之間東稜末段之稜線上，海拔 1,170-1,210m 之間，2016 年發現該族群，胸徑約在 10 至 40cm 左右，現今調查族群量約有 45 株，徑級分布圖呈鐘型（圖 3.15a）。其中上層的伴生物種以錐果櫟（*Quercus longinux* var. *longinux*）、豬腳楠（*Machilus thunbergii*）、長葉木薑子（*Litsea acuminata*）等為主，並與這些闊葉樹混生在一起。而其下層的植物由玉山箭竹及芒組成，已並非單純以玉山箭竹為主，今年調查 1 株胸徑超過 70cm 之大型樹木已死亡。

溪谷區（第三區）位於大白山西邊的溪谷，於 2016 年發現，海拔 1,009-1,135m 之間，是臺灣地區海拔分布最低的族群，該族群除 3 株水青岡位於萬達礦場西北側之陡坡上，其他族群皆位於礦場南側之溪谷中，並混在闊葉林間，不像蘭崁山或銅山地區形成水青岡的落葉純林，本區之水青岡族群多與豬腳楠、長尾尖葉櫛（*Castanopsis cuspidata* var. *carlesii*）、長葉木薑子、青楓（*Acer serrulatum*）等大喬木伴生，而其下層的植物組成以闊葉草本與蕨類為主，族群個體間分布距離較遠，但散雜在常綠闊葉樹間，但整體的生長曲線狀況及更新狀況較比

其他兩區更好，有不少胸徑小於 10cm 之幼樹，由於分布範圍廣闊，族群量目前調查有 75 株，胸徑約在 10 至 50cm 左右，徑級分布圖呈鐘型，因地形陡峭不易到達，部分植株可以看見，但不方便綁牌及量取胸徑，由 UAV 的調查推估約在 100 株以上（圖 3.15b），未來可搭配 UAV 和地面做調查。

大白山北邊（第四區）位於大白山之尾段稜線上，海拔 1,300-1,350m 之間，2013 年發現該族群，胸徑約在 10 至 80cm 左右，徑級分布圖為 S 型（圖 3.15c），因地形陡峭不易到達，部分植株可以看見，但不方便綁牌及量取胸徑。其中上層的伴生物種以大葉石櫟（*Lithocarpus kawakamii*）、豬腳楠、長葉木薑子等為主，但水青岡多突出於樹冠層，下層以后大埔石櫟（*Lithocarpus corneus*）為主。而其下層的植物 2018 年主要由玉山箭竹組成，但近年來玉山箭竹開花後雖然有些新的植株長回來，但目前仍以玉山箭竹及芒為主。

大白山山頂附近（第五區）位於大白山山頂附近，於 2013 年發現，海拔 1,350-1,420m 之間，位於大白山頂右下邊，是大白-蘭崁山區最大的族群，胸徑約在 10 至 100cm，現今調查族群量約有 180 株，徑級分布圖呈 s 型（圖 3.15d），植株多集中 10-50cm 左右，為本區最大族群。其中上層的伴生物種以大葉石櫟、后大埔石櫟、豬腳楠、長葉木薑子等為主，與這些闊葉樹混生在一起，並有臺灣吊鐘花（*Enkianthus perulatus*）。而其下層的植物由玉山箭竹及芒組成。

蘭崁山、大白-蘭崁山間稜線（新一區）和溪谷區（第三區）的上層伴生喬木以錐果櫟、豬腳楠、長葉木薑子為主，大白山北邊（第四區）及大白山山頂附近（第五區）則有較多的大葉石櫟、后大埔石櫟或臺灣吊鐘花為主，前者伴生殼斗科以錐果櫟為主，後者以大葉石櫟及后大埔石櫟為主。若將這四區與大白山山頂附近的植株相比，最大族群仍在大白山山頂附近，然而這些地區普遍更新不良。此外下層在大白山山頂附近（第五區）為玉山箭竹，而蘭崁山及大白山北邊在 2018-2019 年都出現玉山箭竹開花死亡的現象，目前只有稀疏的玉山箭竹混雜其間，尚未恢復到原先以玉山箭竹為優勢的狀態，至於溪谷區林下主要是以闊葉草本與蕨類為主，玉山箭竹只剩小部分，大白山到蘭崁

山中間的新一區則是玉山箭竹與芒混生在一起，未來也應持續觀察其變化。

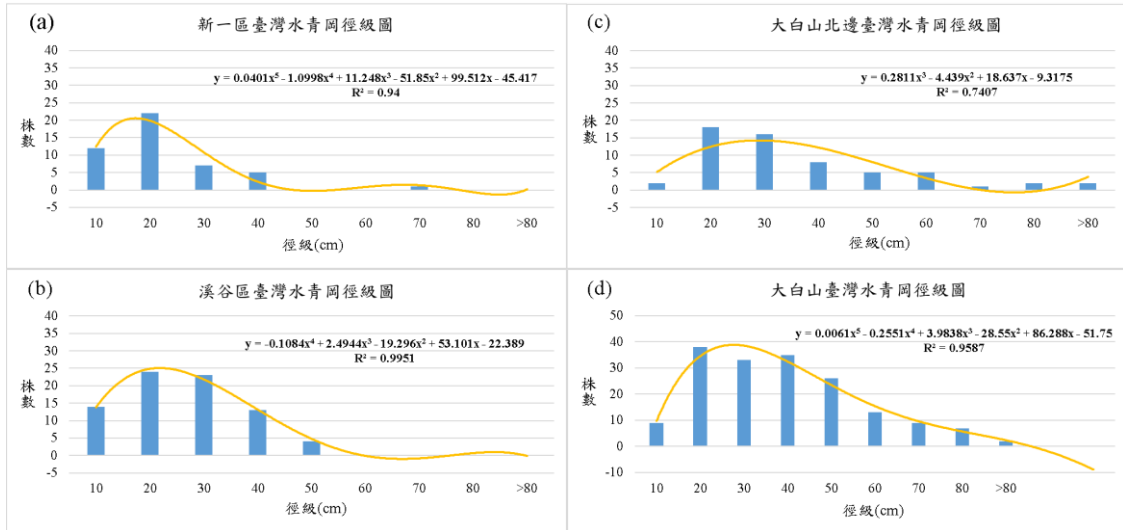


圖 3.15 大白山區四區徑級圖

銅山動態樣區共計 2.2ha 於 2020 年複查 (陳子英等, 2020), 重要值 (IV 值) 最高仍為臺灣水青岡的 31.8%, 上層的物種分別為臺灣水青岡及昆欄樹 (*Trochodendron aralioides*), 中層為三斗石櫟 (*Lithocarpus hancei*) 及白花八角 (*Illicium anisatum*), 臺灣水青岡於 2009 年新增樹極多是由於新增了 0.2ha 的樣區的關係, 2015 年有許多 10cm 徑級的植株死亡, 2020 年又新增許多 10cm 徑級的植株, 但多為分枝 (圖 3.16)。



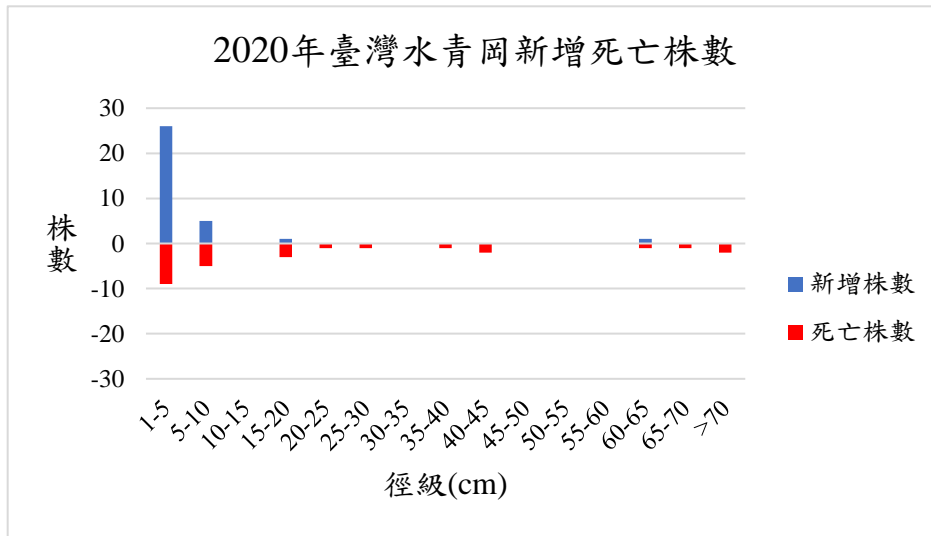


圖 3.16 臺灣水青岡 2020 年調查時的新增死亡株數徑級分布

臺灣水青岡共新增 33 株，死亡 26 株，共記錄到 444 株存活。新增植株多為徑級 10cm 的分枝；死亡植株有數棵徑級 40cm 以上的大樹死亡。

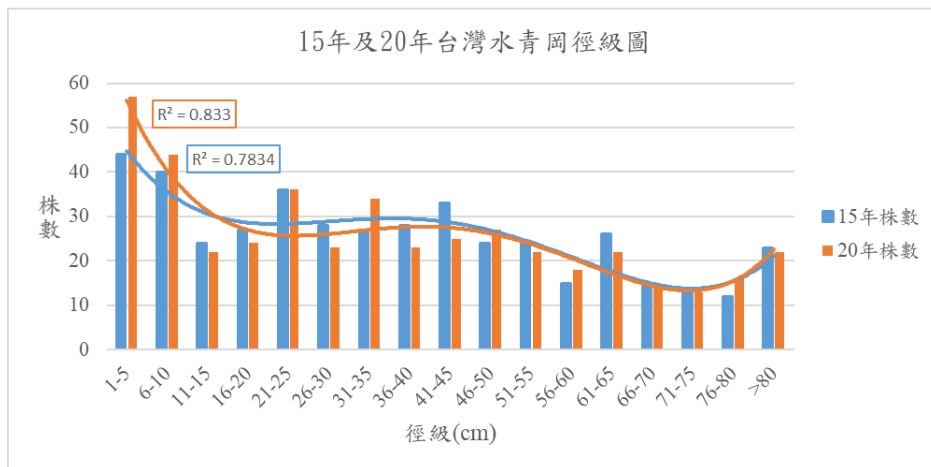


圖 3.17 2015-2020 年間臺灣水青岡徑級圖

銅山臺灣水青岡的徑級呈多形量型，有充足的小樹補充，族群更新狀況較穩定，相較於大白山及蘭炭地區，徑級呈現鐘型，小樹更新狀況不佳，沒有充足的小樹補充，造成族群狀況不穩定（圖 3.15）。

樹高-胸徑的趨勢可以看出出各區域間森林生長的狀況，其中由銅山與蘭崁與大白山地區的胸徑和數高趨勢圖來看，銅山是所有區中株數最多，胸徑和樹高曲線最好的區域，其次在大白-蘭崁地區以蘭崁山稜線大白山北和大白山頂附近是最好，其中以大白山山頂附近更優於後二者，而溪谷區、大白-蘭崁山中間山稜（新一區）最差，未來可加強監測這二個區域（圖 3.18）。

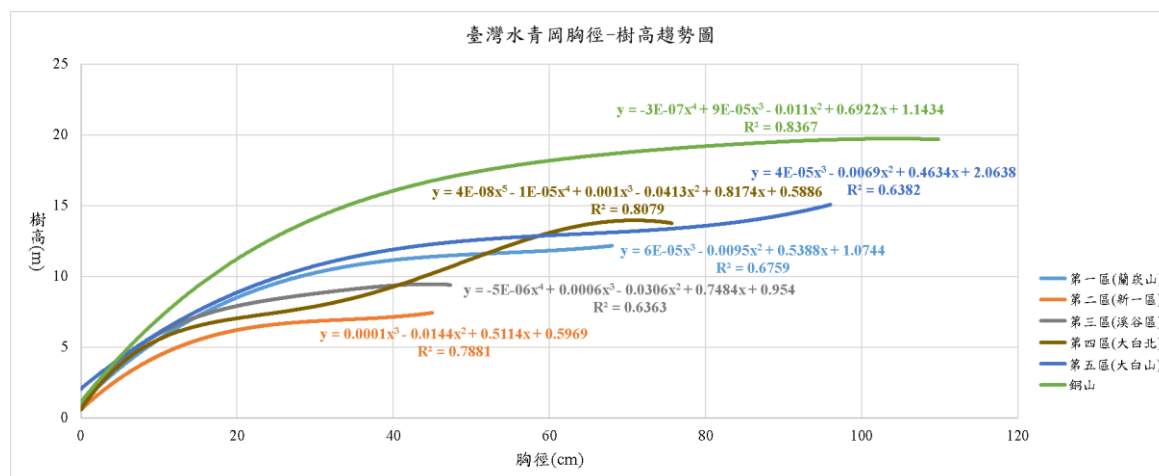


圖 3.18 銅山與大白-蘭崁山地區臺灣水青岡胸徑-樹高趨勢圖

#### 4.5 採礦及水青岡森林的遊憩衝擊

由此次現地調查繪出目前水青岡的立木資料可發現，萬達採礦場的預計開採區域只有溪谷區的幾株水青岡位於範圍中，但若將樣木套上 120m 的緩衝區，則部分的區域已在範圍之內，或許這資訊可供未來與礦區採礦的經營對策時做參考（圖 3.19、圖 3.20）。

另目前因開放山林及 COVID-19 疫情，大白山北面和大北山頂已是網絡上宣傳的熱點。由於萬達礦場產權仍屬私人開礦的範圍，而由安平坑林道（力霸產業道路）到潤泰礦區之間仍屬水泥道路，而由潤泰礦區以上，到萬達礦場的路況則需較好的四輪傳到或底盤較高的車輛方可到達道路終點的萬達礦區，由萬達礦區到大白山北邊之間，目前已由登山遊客踩出一條明顯道路，同時登山人數仍在增加中，近日內鳥嘴山登山賞水青岡的人數增加造成當地社區的反應，大白山比內鳥嘴山、插天山、太平山山毛櫸步道更易到達，對於未來的登山活動或管制應提早有對策。

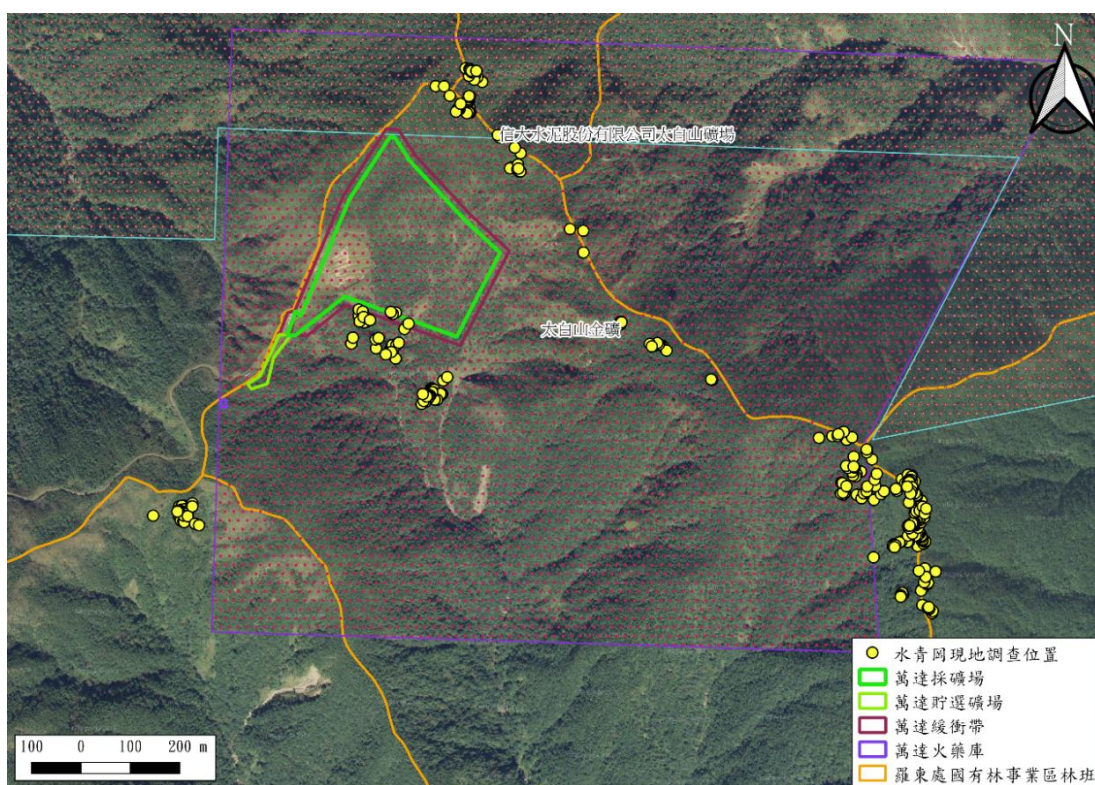


圖 3.19 大白-蘭崁地區水青岡現地調查位置

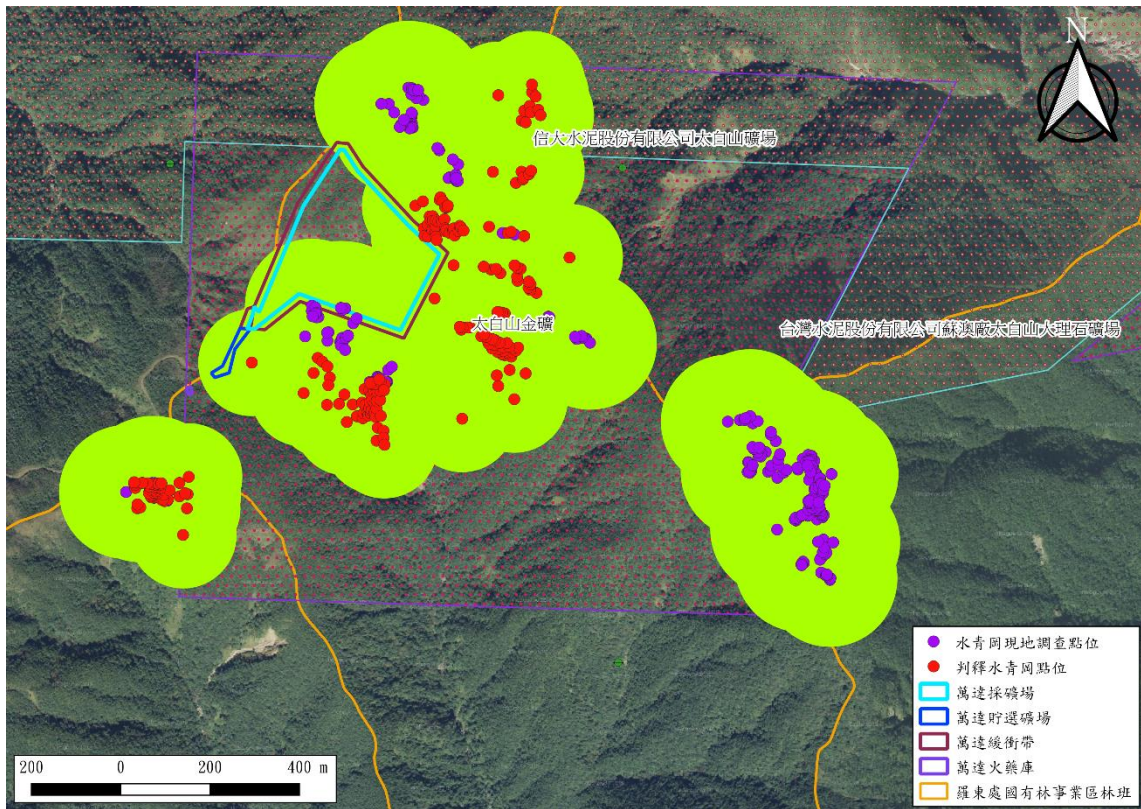


圖 3.20 大白-蘭崁地區水青岡緩衝範圍

## 五、結論與建議

1. 已於8月3日在羅東林區管理處進行第一次水青岡森林會議，討論保育標的物之適應性經營架構概念（ACT）（Cross *et al.*, 2012），操作臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育。同時並在8月10日赴翠峰林道現勘做討論，並對改善白嶺苗圃的高壓苗做建議。
2. 在UAV配合植群調查上，部分較小的臺灣水青岡族群是氣候模型無法預測的，這些陡峭的地形在臺灣水青岡落葉前或展葉時，葉顏色有變化時，可用UAV去調查：已試著用UAV去調查，經由2021春季的UAV調查，發現在大白山北邊、溪谷區和大白山-蘭崁山（新一區）有許多疑似上次未標記到的臺灣水青岡，並擬以秋季的調查作確認，然而秋季因雲霧無法取得更新的資訊，雲霧仍是本區使用航拍的限制。
3. 目前已由工作站與研究室初步完成大白-蘭崁山樣區調查，最近的水青岡森林下層玉山箭竹開花後，植株並未回復為玉山箭竹，未來可持續監測。大白-蘭崁地區和銅山調查資料相互比對，銅山的樹高-胸徑曲線高於大白-蘭崁地區，說明銅山的水青岡生長優於大白-蘭崁地區。
4. 將大白-蘭崁山的水青岡加入 120m 的緩衝區後，會有部分的區域在礦場預計採礦的範圍內，這可供未來對礦區採礦的經營對策做相關研擬。近日內烏嘴山登山賞水青岡的人數增加造成當地社區的反應，大白山比內烏嘴山、插天山、太平山山毛櫸步道更易到達，且大白山北面和大北山頂已是網絡上宣傳的地點，由於萬達礦場產權仍屬私人開礦的範圍，建議對於未來的登山活動或管制與否應提早有對策。

## 六、期末評核標準

評核標準	達成情形
1. 完成與林管處之水青岡森林保育平台二次會議，討論保育標的物之適應性經營架構概念與修正。	完成與林管處之水青岡森林保育平台二次會議。
2. 協助完成大白山-蘭崁山地區小族群的野外樣地監測調查，並探討未來的因應對策。	協助完成大白山-蘭崁山地區小族群的野外樣地監測調查。
3. 完成整合過去資料與其他子計畫之連結。	將大白山-蘭崁山地區小族群的野外的調查與銅山地區族群資料相比對。
4. 參加研討會完成一篇報告發表。	已參加中華林學會的研討會完成一篇報告發表。

## 七、期中審查意見回應

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	<p>(1) 在協助進行大白山-蘭炭山地區無人機對野外樣地小族群的監測調查部分，UAV 資料豐富，所得的臺灣水青岡監測調查的分布圖，實為不易。建議進一步量化 UAV 的資料，計算水青岡的族群與生物量參數。</p>	<p>會繼續在下一階段與林管處合作，應用 UAV 和地面調查大白-蘭炭山的族群與生物量參數。</p>
	<p>(2) 完成一次保育平台，將所獲得的成果整合到林區管理處之部分建議發展量化之物候參數，讓林管處人員得以有效率記錄物候事件。</p>	<p>已在會議中表達物候的調查意義及量化作法。</p>
	<p>(3) 期中評核無異議通過。</p>	<p>謝謝委員。</p>
曾彥學委員	<p>(1) 在協助進行大白山-蘭炭山地區無人機對野外樣地小族群的監測調查部分，結果非常正向，也提供林務局實際建議。</p>	<p>會繼續在下一階段與林管處合作，應用 UAV 和地面調查大白-蘭炭山的族群與生物量參數。</p>
	<p>(2) 完成一次保育平台，將所獲得的成果整合到林區管理處之部分執行進度均已達預測標準。</p>	<p>謝謝委員意見。</p>
	<p>(3) 已達期中評核標準，期中評核無異議通過。</p>	<p>謝謝委員。</p>

審查委員	審查意見	回復說明
劉和義委員	<p>(1) 大白山-蘭崁山地區無人機對野外樣地小族群的監測調查是非常良好的試驗，但應思考如何建立使用及應用上的SOP。</p>	<p>會繼續在下一階段與林管處合作，應用 UAV 和地面調查大白-蘭崁的族群與生物量參數。</p>
	<p>(2) 保育平台應該是日常事務，與保育工作會議之間的各自功能職掌應該明確區隔。</p>	<p>1.目前的做法是提供已知的水青岡研究成果給林管處進行野外操作，與遷地保育。</p> <p>2.對林管處提出的問題，經團隊工作會議的討論，在下次的保育平台會議中做回應。</p> <p>3.在研究團隊發展新的技術，俟成熟後提供給林管處做調查之用。</p>
	<p>(3) 在發展臺灣水青岡生態系在氣候變遷下之調適與保育的操作平台上，整體上非常優良，但在確認介入點及相對應的經營行動上，似乎沒有明確的指標及操作流程（所列之臺灣水青岡保育的潛在行動可視為原則上的架構，但實際操作上，例如如何界定棲地面臨威脅，就需要較為明確的指引或標準），宜在期末更精準地敘述或討論。</p>	<p>謝謝委員意見，會在期末更精準地敘述或討論。</p>



審查委員	審查意見	回復說明
	(4) 特殊的遺傳變異是否僅做遷地保存?是否亦需要進行異地保育工作,作為臺灣水青岡適宜棲地試驗的一部份。	目前已有蘭崁山和大白山的部分進行異地保育,這些苗木栽植於蘭台苗圃,進行保存與試驗。
	(5) 期中評核無異議通過。	謝謝委員。

## 八、參考文獻

- 江友中 (2017) 臺灣水青岡遺傳物質資源調查。行政院農業委員會林務局羅東林區管理處 105-731-01-11。57 頁。
- 巫智斌 (2013) 臺灣東北部銅山地區臺灣水青岡幼苗建立之研究。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士論文。宜蘭。66 頁。
- 李培芬 (2008) 氣候變遷對生態的衝擊。科學發展 424：34-43。
- 李淑敏、姜保真 (2011) 林木遺傳資源保育實例介紹。臺灣林業 37 (2)：16-22。
- 松井哲哉、田中信行、八木橋勉 (2007) 世界遺產白神山地ブナ林の氣候温暖化に伴う分布適域の変化予測。日本森林学会誌 89 (1)：7-13。
- 松井哲哉、田中信行、八木橋勉、小南裕志、津山幾太郎、高橋 潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価。地球環境 14 (2)：165-174。
- 林奐宇、胡哲明、陳子英、謝長富 (2017) 運用 TCCIP 網格化歷史及未來氣候資料於臺灣森林植群適生棲位模型建置及變遷預測。https：  
[//tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/upload/activity\\_agenda/20180402151450.pdf](https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/v2/upload/activity_agenda/20180402151450.pdf)
- 林奐宇、黎光秦、陳子英、胡哲明 (2017) 運用動態局部迴歸方法建置高解析度氣候模式及其生態應用。106 年森林資源永續發展研討會論文集 (森林經營與育林組)。中華林學會。82-84 頁。
- 邱祈榮 (2013) 建立氣候變遷對生物多樣性風險與脆弱度評估模式及因應策略規劃。行政院農業委員會林務局。
- 許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 (2011) 臺灣氣

候變遷科學報告。「臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫」計畫辦公室、國家災害防救科技中心。

邱清安 (1996) 插天山自然保留區植相與植群之研究。國立中興大學森林學研究所碩士論文。台中。162 頁。

邱清安、陳子英、王志強、邱祈榮、賴彥任、蔡智勇 (2013) 應用 BIOMOD2 模擬臺灣水青岡之分布。林業研究季刊 35 (4) : 253-272。

原正利 (2006) 東日本太平洋側におけるブナの分布とその下限を規定する要因について。植生学会誌 23 (1) : 1-12。

許晃雄、吳宜昭、周佳、陳正達、陳永明、盧孟明 (2011) 臺灣氣候變遷科學報告 2011。行政院國家科學委員會。台北。362 頁。

許驊 (2015) 臺灣地區水青岡森林的風險性評估。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士論文。宜蘭。89 頁。

郭嘉宜 (2015) 以 BIOMOD2 模擬暖化對臺灣水青岡森林之影響。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士論文。宜蘭。61 頁。

陳子英、毛俊傑、徐堉峰 (2016) 大白山及蘭崁山地區臺灣水青岡資源調查建置計畫。行政院農業委員會林務局羅東林區管理處第 104-731-01-02 號。87 頁。

陳子英、謝長富、毛俊傑、賴玉菁、林世宗、胡哲明、徐堉峰、楊正釗、林哲榮、孔祥璿、陳品邑、邱宗儀、巫智斌 (2011) 冰河子遺的夏綠林-臺灣水青岡。行政院農業委員會林務局。台北。271 頁。

陳子英、謝長富、林奐宇、黃啟東、趙偉村、廖宇賡、徐堉峰 (2016) 維管束植物殘存地點分布與保育策略之分析。第二章。「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究 期中報告」。行

政院農業委員會林務局主管科技計畫：105 農科-12.7.4-務-e2。  
13-43 頁。

陳品邑（2012） 宜蘭銅山臺灣水青岡林長期動態樣區之森林動態與  
天然更新。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士論文。宜蘭。  
132 頁。

陳朝圳、王慈憶（2009） 氣候變遷對臺灣森林之衝擊評估與因應策  
略。林業研究專訊 16（5）：1-5。

童慶斌（2012） 氣候變遷調適科技整合研究計畫-跨領域脆弱度評  
估與回復力建構科技發展計畫。行政院國家科學委員會。

童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒（2016） 氣候變遷調適行動計畫  
建構指引（初稿）。科技部 TaiCCAT 計畫。100 頁。

童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭（2015） 氣候變遷水資  
源風險評估與調適決策之探討。中國土木水利工程學會會刊 42  
（4）：30-45。

黃立彥（2000） 拉拉山臺灣山毛櫸林植群生態與天然更新之研究。  
國立中興大學森林學系碩士論文。台中。91 頁。

黃星凡（2011） 臺灣植物相之歷史生物地理學。國立臺灣博物館學  
刊 64（3）：33-63。

楊嘉棟（1999） 稀有及瀕絕植物之遷地保育。生物多樣性保育研討  
會論文集。行政院農業委員會。407-417 頁。

劉振榮、李河清、李明安、童慶斌、張靜貞、盧沛文、梁蜀昀、黃瑜  
惠、郭宗華（2015） 氣候變遷調適科技推動整合運作總計畫。  
行政院科技部補助專題研究計畫整合成果報告 MOST 104-2621-  
M008-001。112 頁。

黎光秦、林奐宇、陳子英（2017） 宜蘭縣大白蘭崁地區臺灣水青岡

適應性經營與保育。106 年森林資源永續發展研討會論文集（生態保育與森林保護組）。中華林學會。41-43 頁。

韓尚霖（2015）遮蔭與施肥處理對臺灣水青岡苗木生長與光合作用之效應。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系碩士論文。宜蘭。46 頁。

鍾振德、簡慶德、葉翠華、李玉珍（2018）臺灣水青岡復育方法。林業研究專訊 25（1）：43-46。

蘇鴻傑（2004）植群之多樣性及多樣化之分類法 臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 245；18（3）：207-219。

Aitken, S. N. and J. B. Bemmels (2016) Time to get moving : assisted gene flow of forest trees. *Evolutionary applications* 9(1) : 271-290.

Ashcroft, M.B. (2010) Identifying refugia from climate change. *Journal of Biogeography* 37(8) : 1407-1413.

Ashcroft, M.B.(2010)Identifying refugia from climate change. *J.Biogeogr.* 37(8) : 1407-1413.

Campbell ,J. Y., J. Hilscher ,J. Szilagyi (2008) In Search of Distress Risk. *Journal of Finance* 63(6) : 2899-2939.

Cross, M.S., P. McCarthy, G. Garfin, D. Gori and C.A. Enquist(2013) Accelerating adaptation of natural resource management to address climate change. *Conservation Biology*27(1) : 4-13.

Cross, M. S., E.S. Zavaleta, D. Bachelet, M.L. Brooks, C.A.F. Enquist, E. Fleishman, L.J. Graumlich, C.R. Groves, L. Hannah, L. Hansen, G. Hayward, M. Koopman, J.J. Lawler, J. Malcolm, J. Nordgren, B. Petersen, E.L. Rowland, D. Scott, S.L. Shafer, M.R. Shaw and G.M. Tabo (2012) The Adaptation for Conservation Targets (ACT) framework : a tool for incorporating climate change into natural

- resource management. *Environmental Management* 50(3) : 341-351.
- Fung, E., P. Imbach, L. Corrales, S. Vilchez, N. Zamora, F. Argottoy, L. Hannah and Z. Ramos (2017) Mapping conservation priorities and connectivity pathways under climate change for tropical ecosystems. *Climatic Change* 141(1) : 77-92.
- Hannah, L., L. Flint, A.D. Syphard, M.A. Moritz, L.B. Buckley and I.M. McCullough (2014) Fine-grain modeling of species' response to climate change : holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in ecology and evolution* 29(7) : 390-397.
- IPCC (2013) *Climate Change (2013) The Physical Science Basis*. Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. New York, USA. 1535pp.
- IPCC (2014) *Climate Change (2014) Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland. 151 pp.
- IPCC (2007) *Climate Change (2007) Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and A. Reisinger (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 104 pp.
- Janzen, D.H. (2001) Latent extinction—the living dead. *Encyclopedia of Biodiversity* 3 : 689-699.
- Joyce, L.A., S.W. Running, D.D. Breshears, V.H. Dale, R.W. Malmshemer, R.N. Sampson, B. Sohngen and C.W. Wood-all (2014) Ch.7 : Forests. *Climate Change Impacts in the United*

States : The Third National Climate Assessment, Melillo J. M., Terese (T.C.) Richmond, and G.W. Yohe(Eds.), U.S. Global Change Research Program. pp. 175-194. doi : 10.7930/J0Z60KZC.

Keppel, G. and G.W. Wardell-Johnson (2012) Refugia : keys to climate change management. *Global Change Biology* 18(8) : 2389-2391.

Keppel, G. and G.W. Wardell-Johnson (2015) Refugial capacity defines holdouts, microrefugia and stepping-stones : a response to Hannah *et al.* *Trends in ecology and evolution* 30(5) : 233-234.

Keppel, G. and G.W. Wardell-Johnson (2015) Refugial capacity defines holdouts, microrefugia and stepping-stones. *Trends in ecology and evolution* 30(5) : 233-234.

Keppel, G., K. Mokany, G.W. Wardell-Johnson, B.L. Phillips, J.A. Welbergen and A.E. Reside (2015) The Capacity of Refugia for Conservation Planning under Climate Change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13(2) : 106-112.

Keppel, G., K.P. van Nair, G.W. Wardell-Johnson, C.J. Yates, M. Byrne, L. Mucina, A.G.T. Schut, S.D. Hopper and S.E. Franklin (2012) Refugia : identifying and understanding safe havens for biodiversity under climate change. *Global Ecology and Biogeography* 21 : 393-404.

Kimura, M.K., K. Uchiyama, K. Nakao, Y. Moriguchi, L.S. Jose-Maldiaand and Y. Tsumura (2014) Evidence for cryptic northern refugia in the last glacial period in *Cryptomeria japonica*. *Annals of botany* 114(8) : 1687-1700.

Matsui, T., T. Yagihashi, T. Nakaya, H. Taoda, S. Yoshinaga, H. Daimaru and N. Tanaka (2004) Probability distributions, vulnerability and sensitivity in *Fagus crenata* forests following predicted climate

- changes in Japan. *Journal of Vegetation Science* 15(5) : 605-614.
- Maxwell, S.L., O. Venter, K.R. Jones and J.E.M. Watson (2015) Integrating human responses to climate change into conservation vulnerability assessments and adaptation planning. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1355(1) : 98-116.
- Rehfeldt, G.E., N.L. Crookston, C. Saenz-Romero and E.M. Campbell (2012) North American vegetation model for land-use planning in a changing climate : a solution to large classification problems. *Ecological Applications* 22(1) : 119–141.
- Rull, V. (2009) Microrefugia. *Journal of Biogeography* 36(3) : 481-484. Rull, V. (2010) On microrefugia and cryptic refugia. *Journal of Biogeography* 37(8) : 1623-1625.
- Shimokawabe A., Y. Yamaura, T. Akasaka, T. Sato, Y. Shida, S. Yamanaka and F. Nakamura (2015) The distribution of cool spots as microrefugia in a mountainous area. *PLoS ONE* 10(8) : e0135732. doi : 10.1371/journal.pone.0135732
- Skov, F. and J.C. Svenning (2004) Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecography* 27(3) : 366-380.
- Staudinger, M.D., N.B. Grimm, A. Staudt, S.L. Carter, F.S. Chapin III, P. Kareiva, M. Ruckelshaus, B.A. Stein (2012) Impacts of Climate Change on Biodiversity, Ecosystems, and Ecosystem Services : Technical Input to the 2013 National Climate Assessment. Cooperative Report to the 2013 National Climate Assessment. 296 pp.
- Stewart, J.R., A.M. Lister, I. Barnes and L. Dalén (2010) Refugia revisited : individualistic responses of species in space and



- time. Proc. R. Soc. B : Biol. Sci. 277(1682) : 661-671.
- Su, H. J. (1984) Studies on the Climate and Vegetation Types of the Natural Forests in Taiwan (II) Altitudinal Vegetation Zones in Relation to Temperature Gradient. Quart. Journ. Chin. For. 17(4) : 57-73. (Chinese summary)
- The Angiosperm Phylogeny Group (2016) An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants : APG IV. Botanical Journal of the Linnean Society 181 : 1–20.
- Tingley , R., M. Vallinoto , F. Sequeira , M.R. Kearney (2014) Realized niche shift during a global biological invasion. Proceedings of the National Academy of Sciences. 111(28) : 10233–10238.
- Tzedakis, P.C., B.C. Emerson and G.M. Hewitt (2013) Cryptic or mystic ? Glacial tree refugia in northern Europe. Trends in ecology and evolution 28(12) : 696-704.
- van Vuuren, D.P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G.C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J.- F. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S.J. Smith and S.K. Rose (2011) The representative concentration pathways : an overview. Climatic change 109(1-2) : 5-31.
- Wiens, J.A. and D. Bachelet (2010) Matching the multiple scales of conservation with the multiple scales of climate change. Conservation Biology 24(1) : 51-62.
- Williamson, P.S. and C.R. Werth (1999) Levels and patterns of genetic variation in the endangered species *Abronia macrocarpa* (Nyctaginaceae). American Journal of Botany 86(2) : 293-301.

- Whittaker, R.J., Fernández-Palacios J. M. 2ed (2007) *Island biogeography : ecology, evolution, and conservation*. Oxford University Press, Oxford.
- Whittaker R.J., Willis K.J. and Field R. (2001) Scale and species richness : towards a general, hierarchical theory of species diversity. *Journal of Biogeography*, 28 : 453–470.
- Helmer, E. H., Gerson, E. A., Baggett, L. S., Bird, B. J., Ruzycki, T. S., & Voggesser, S. M. (2019) Neotropical cloud forests and páramo to contract and dry from declines in cloud immersion and frost. *PLoS One*, 14(4), e0213155. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213155>
- Foster, P. (2001) The potential negative impacts of global climate change on tropical montane cloud forests. *Earth Sci. Rev.* 55 : 73–106

## 附錄一、保育工作會議公文及記錄

### 1. 羅東林區管理處臺灣水青岡保育工作會議

行政院農業委員會林務局

羅東林區管理處臺灣水青岡保育工作會議

壹、時間：110年8月3日（星期二）上午10時

貳、地點：羅東林區管理處會議及視訊

參、主持人：蕭處長崇仁

肆、出席單位及人員：如開會通知單

伍、報告事項：

本處轄內臺灣水青岡族群主要分布於銅山、蘭崁山、大白山等區域，因近年來氣候變遷對於臺灣水青岡之影響日益明顯，本處依據林務局委託之「氣候變遷下高易危生態系調適、監測與保育研究，進行臺灣水青岡適應性經營（ACT），爰召開本次會議。

一、羅東處轄內臺灣水青岡的保育工作執行現況：

1. 目前羅東處轄區內臺灣水青岡的分佈有銅山地區、大白山、蘭崁山及新發現的介於大白山與蘭崁山的中坡一區（大白新一區）及近溪溝兩側的新二區（大白新二區），其中銅山地區有較大的族群；其他幾個地區族群數目較少，尤其蘭崁山、中坡一區（大白新一區）及新二區（大白新二區）族群都少於60株。
2. 臺灣水青岡的遺傳物質保育部分，經委託國立中山大學江友中教授研究，建議現地進行物候調查及現地族群保育外，並同時進行異地保育（*ex site conservation*）工作。

3. 經多次專家會議，目前本處執行工作為：

- (1) 銅山、蘭崁山、大白山族群現有族群監測
- (2) 銅山移植棲地試驗（氣候變遷廊道的栽植試驗）

## 2. 羅東林區管理處依平台建議於 2021 年水青岡保育工作簡報內容

### 110年度羅東林區管理處 臺灣水青岡保育工作

#### 報告事項:

- 一、族群分布現況
- 二、保育建議
- 三、依專家會議本處執行工作:
  1. 現有族群監測
  2. 移植棲地試驗
  3. 種質保存園
  4. 蘭炭、大白族群高壓保存
  5. 蘭炭、大白族群豐年採種



#### 羅東處水青岡保育工作目標

臺灣水青岡的遺傳物質保育部分，經委託國立中山大學江友中教授研究，建議現地進行物候調查現地族群保育外，並同時進行異地保育(ex site conservation)工作。



- 一、現有族群監測
- 二、移植棲地試驗
- 三、種質保存園
- 四、蘭炭、大白族群高壓保存
- 五、蘭炭、大白族群豐年採種

#### 羅東處臺灣水青岡保育工作內容及分工

項次	工作項目	區域	執行內容	負責課室
1-1	現有族群監測	銅山	110年起每月調查	太平山站
1-2	現有族群監測	蘭炭、大白	104年起每月調查	冬山站
2	移植棲地試驗監測	銅山	5試驗區	太平山站
3	種質保存園	白嶺苗圃	保存蘭炭、大白小族群遺傳物質	太平山站
4	蘭炭、大白族群高壓保存	蘭炭、大白	溪谷、新一區	冬山站 作業課 育繖課
5	蘭炭、大白族群豐年採種	蘭炭、大白	採種、育苗	冬山站 作業課 育繖課

## 一、現有族群監測



## 二、銅山移植棲地試驗

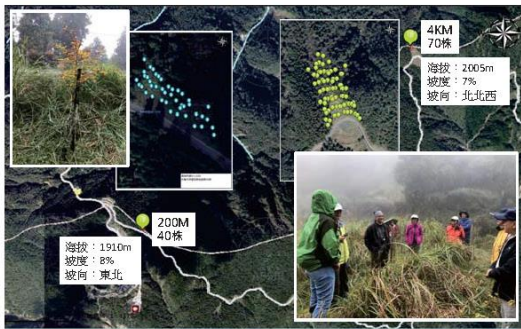
**銅山種子苗**  
移植樣區試驗 (5樣區)

**紀錄資料** • 109年每半年調查、110年起每季調查

- 環境氣象：翠峰湖氣象站(溫度、濕度、雨量)
- 出栽資料：時間、配置、苗高、基徑
- 植栽監測：苗高、基徑、存活率

位置	山毛櫸步道口 100公尺	翠峰林道200公尺左側雜木林空隙地	翠峰林道4公里左側崩塌治理場之原生地	翠峰環山步道側	翠峰環山步道口停車場旁
數量	10	40	70	200	50
移植時間	106	107	107	109	109

銅山種子苗 (107年種植)



## 三、種質保存園

1. 苗木來源：委託林試所鍾振德博士於105年執行蘭崁山、大白山區域小族群臺灣水青剛無性繁殖試驗成果
2. 高優技術保存之74株苗木(蘭崁山62株、大白山12株)
3. 持續監測紀錄生長情形並計算存活率

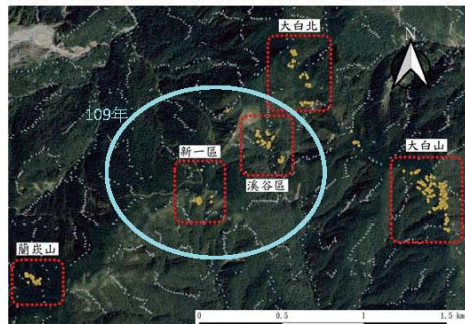


白嶺苗圃

海拔：1398m  
坡度：11%  
坡向：東北

1090422移植  
樹高cm 94.0±28.1  
胸徑mm 15.6±3.8

## 四、蘭崁、大白族群高壓保存



109.7.7 高壓(溪谷)-6株母樹、63個高壓條



## 五、蘭炭、大白族群豐年採種



109採種  
(溪谷區)  
16號樣木，計15包

### 110年度棲地試驗現況:

1. 銅山移植試驗棲地移植存活率、生長情形
2. 種質保存園排水改良、移植存活率、生長情形

請太平山工作站說明

### 小族群(溪谷區、新一區)高壓技術保存遺傳物質

1. 109年度高壓技術保存結果
2. 110年度執行現況

請作業課說明

#### 討論項目：

依照目前銅山、蘭炭、大白族群現地族群物候現況，是否執行蘭炭、大白族群豐年採種，提請討論。

1. 本案先請太平山工作站、冬山工作站說明目前銅山、蘭炭、大白族群現地族群物候現況。
2. 倘本年度適合進行採種試驗，關於採種區域、執行方式、執行期程、採種後培育計畫(培苗、育苗位置、期程、培苗需求)提請討論。

### 3. 2021 年羅東林區管理處轄內臺灣水青岡的會議紀錄

正 本

檔 號：  
保存年限：

#### 行政院農業委員會林務局羅東林區管理處 函

宜蘭縣宜蘭市神農路一段1號

地址：26548宜蘭縣羅東鎮中正北路118號  
承辦人：吳明瑾  
電話：03-9545114#251

受文者：陳教授子英

發文日期：中華民國110年8月13日  
發文字號：羅育字第1101241228號  
遠別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：  
附件：會議紀錄1份

主旨：檢送本處110年8月3日召開之「臺灣水青岡保育工作會議」  
會議紀錄1份，請查照。

正本：陳教授子英、林教授世宗、行政院農業委員會林業試驗所(楊副研究員正釗)、行  
政院農業委員會林務局、本處作業課、太平山工作站、冬山工作站  
副本：本處育樂課

處 長 蕭 崇 仁





行政院農業委員會林務局羅東林區管理處  
臺灣水青岡保育工作會議紀錄

壹、時間：110年8月3日（星期二）上午10時

貳、地點：本處3樓會議室及視訊

參、主持人：蕭處長崇仁

肆、出席單位及人員：如簽到單

伍、會議紀錄：

一、報告事項各委員建議：

1. 林世宗老師：

- (1) 臺灣水青岡保育工作的目標及分工，各個目標、策略、戰略方式建議要有一個整體的規劃。
- (2) 應先釐清高壓保存工作的目的，高壓是要做基因的保存，主要效益是以無性繁殖的增加個體數量，不是直接對現有棲地族群現地保育。
- (3) 因為人力經費資源有限，物候調查先釐清目標，確定方向後才能比較精準有效率的收集資料。

2. 陳子英老師：

- (1) 因應氣候變遷，應先區分緊急迫優先保育處理的，以及暫先觀察的族群，例如蘭炭山38棵今年剩下35棵，是迫切須要努力的區域。
- (2) 建議物候觀察時看到昆蟲，可以帶下來交給徐瑄峰老師，協助了解這個生態系的物種組成。
- (3) 建議棲地配合設立小型氣候站，可協助提供物候觀察資訊，各個區域微環境氣候不同，溫濕度不同，開花結果、豐年週期可能也因此不同。

- (4) 物候資訊除了豐年外，也可以看到昆蟲食物是否充足？  
展葉期與該棲地昆蟲的族群是否同步發生變化？
- (5) 以高壓保存下來的植株資訊要保存好，編號要可以對應現地的植株。

3. 楊正釗老師：

- (1) 有關種質保存園的改善：白嶺苗圃排水、雜草抑制等環境有改善，但看起來有葉面黃化，可能有肥料養分問題，建議用好康多 360 天長效型肥料，每一株約 100 公克即可。
- (2) 種質保存園的存活率不高，是否跟噴灌系統或其他因素有關，建議檢討一下原因。
- (3) 5 個棲地移植試驗，存活率成效好，很可能跟所移植的是種子苗有關。
- (4) 台灣水青岡的種子是中間型種子，稍能耐乾旱，可儲藏於 4°C，但不要放超過 6 年。
- (5) 建議豐年也做銅山族群種子苗採種，做區域外的復育。
- (6) 冬山站物候觀察的樹種應該都已達成熟可開花的階段，建議後續評估 4 區哪一區有機會採到種子，可以的話先了解各個區域的小族群結構。
- (7) 蘭炭、大白地區如要進行採種工作，建議先標定植株、開路、帶望遠鏡、現場先用 30 呎的檳榔刀勾樹枝之下來看，協助判斷是否有種子可採。
- (8) 109 年做的高壓發根率不高(成功率僅 9/63)，建議思考一下原因，以提高之後再執行高壓的成功率。

4. 林務局王守民技士

- (1) 建議羅東處的臺灣水青岡保育工作應該就各位專家意見先盤整保育工作的優先急迫順序，並提出困難需要協助之處。
- (2) 以高壓技術保存工作，現場母群體來源應有對應的編號及實驗設計，以避免重複採集。

二、 討論事項委員建議：

1. 林世宗老師：雖然豐年種子品質較佳，但回頭思考，倘若我們採種的目標是為了做復育，未達豐年雖然可能事倍功半，但是有種子就是機會，仍建議嘗試進行採種復育。
2. 陳子英老師：
  - (1) 我們做的高壓保存工作目的是要保存遺傳資訊，異地復育的素材倘若是種子苗是更好，所以如果有種子可以採集復育，也建議進行採集。
  - (2) 蘭崁、大白低海拔區域的遺傳物質與銅山不同，建議不混種，大白蘭崁地區的樣點也將配合林務局氣候變遷計畫，模擬預測區域，未來可再提供給作業課參考。
  - (3) 未來苗木的栽植要考慮其樹構特性，水青岡的苗木在半遮陰環境中會長的比較好。
  - (4) 銅山目前的棲地試驗等很重要，可以提供未來小族群復育的參考
3. 楊正釗老師：蘭崁山的族群珍貴，若有種子建議也是要先收集進行復育。
4. 育樂課吳思儀課長：建議依照老師們的建議，大白蘭崁地區的若有種子可以採集，應把握機會做復育，因為種子苗

可以保存比較完整的遺傳資訊。

5. 作業課傅正儀課長:有關大白蘭炭地區的的種子採集復育，未來面臨比較大的問題是培植出來苗木應該種到哪裡，續再請老師協助提供相關的資訊與建議。

### 三、會議結論:

1. 為了保存蘭炭山、大白山的小族群遺傳基因，請冬山站倘有觀察到採種的機會，還是要把握機會進行採種復育、啟動異地復育。
2. 今年利用高壓技術保存小族群水青岡的工作，請作業課持續協助督促現場執行，視今年高壓執行成效，評估後續是否持續執行。
3. 現地物候觀察、移植棲地的監測復育工作請工作站應持續執行，後續幕僚單位應彙整比較以展現成果，以留意氣候變遷的對台灣水青岡生態系的影響。為延續累積及保存資料，相關監測資料及研究報告、會議記錄等建檔、後續的彙整很重要，相關資料請持續累積建置於本處 Z:\10 育樂課\@水青岡保育工作資料夾中。

羅東林區管理處「臺灣水青岡保育工作會議」簽到

一、時間：110年8月3日（星期二）上午10時

二、地點：本處三樓會議室、視訊

三、主持人：

蕭處長崇仁	蕭崇仁
-------	-----

四、出席者：

陳教授子英	陳子英
林教授世宗	林世宗
楊博士正劍	(視訊)
行政院農業委員會林務局	(視訊)
鄧副處長江山	鄧江山

五、列席者：

作業課	傅正儀 李智輝
太平山工作站	林翊宇、視訊
冬山工作站	簡德璉
育樂課	吳明瑛 吳男爵

#### 4. 2021年8月10日野外到羅東林區管理處轄內對翠峰林道臺灣水青岡的現勘紀錄

正本

檔 號：  
保存年限：

### 行政院農業委員會林務局羅東林區管理處 函

260  
宜蘭市神農路一段1號(森林暨自然資源學系)

地址：26548宜蘭縣羅東鎮中正北路118號  
承辦人：洪明蕙  
電話：03-9545114分機132

受文者：陳教授子英

發文日期：中華民國110年8月5日  
發文字號：羅作字第1101230853號  
速別：普通件  
密等及解密條件或保密期限：普通  
附件：

主旨：茲敦請台端協助本處111年度國有林造林、陸域關注區生態  
植被復育計畫造林預定案及台灣水青岡保育計畫宜地復育等  
提供專業意見，請查照。

說明：

- 一、本處規劃於和平事業區（翠峰林道沿線）辦理旨揭造林工作，  
謹訂110年8月10日（星期二）上午8時30分於本處大門集合  
出發至現場勘查。
- 二、副本抄陳行政院農業委員會林務局，敬請派員指導；副本抄  
送太平山工作站，請屆時提供造林計畫相關資料。

正本：林教授世宗、陳教授子英

副本：行政院農業委員會林務局、鄧江山副處長、太平山工作站、育樂課、作業課

## 處長蕭崇仁

現勘照







## 第四章 南仁山生態系監測保育與榭櫟復育計畫

### 摘要

近年氣候變遷可能帶來的影響日趨明顯，目前許多學者也利用長期動態樣區的資料探討森林生態系的結構、組成甚至是物種的改變，許多研究均發現部分物種族群數量持續減少，甚至瀕臨滅絕，另外也利用空間分析探討樹木如何死亡與其帶來的影響，因此本研究承襲先前計畫之成果，於各高易危生態系進行監測並提供警訊，並結合政府單位進行作保育工作，本年度計畫主要監測臺灣石櫟與榭櫟之生存狀況與南仁山區之高易危生態系，以了解物種生存危機與生態系是否有改變。新竹榭櫟長年監測原生地與區外復育的植株，而南仁山區的部分，利用欖仁溪樣區每5-8年的複查資料進行物種與生態系的變化監測，也針對欖仁溪、樣帶以及出風山的小苗進行每季的調查，以監測生態系統與高脆弱度物種之變化。

榭櫟原生地之植株近年樹梢枯萎嚴重，大部分生長勢不佳，去年的榭櫟植株健康度評估中，即有多數植株健康度不佳。而今年年初死亡的6株榭櫟即為去年健康度評估最差之植株。而小苗的部分今年僅有3株，可能今年軍區準備動工與年初乾旱有關，由於明年軍區將開始動工，除了協調施工能對榭櫟植株造成最小影響外，也開始移植原生地小苗至新竹縣政府苗圃。區外栽植的部分目前在新竹林管處的林班地進行至今最大規模的300株栽植仍全數存活，其他區外栽植的植株雖然有受到昆蟲的危害但不至於死亡，反倒是棲地的管理影響植株生長較大，建議榭櫟苗木可在三年後才移植至區外，並配合栽植狀況與周遭環境之管理，其生長狀況會較良好。另外去年在苗栗有發現新的榭櫟族群，目前已經進行初步的調查。

而在動態樣區的小苗監測上，不論是欖仁溪、樣帶還是出風山，其小苗的組成變化不大，另外也發現環境因子中的對東北季風暴露度、地形凹凸度、與相對東北方位之坡向與欖仁溪小苗的死亡有很大的關係。欖仁溪動態樣區的空間分析結果呈現死亡植株在距離尺度<4m 時主要受到植株間的交互作用造成死亡，而死亡植株的分布受到

環境異質性的影響而呈現隨機分布，其中以負密度制約為主要造成植株死亡的影響因子。不同物種受到不同程度的密度制約影響可有助於物種共存在同一地區，而此也可能為促成欖仁溪樣區物種多樣性高的原因之一。

**關鍵詞：**氣候變遷、管理決策、生物保育

## 一、前言

### 1.1 氣候變遷對生態的影響與如何應對

目前全球正處於暖化的情境，許多自然系統受到溫度升高所造成的區域氣候變化，造成對生物有深遠與多樣的影響(如 Parmesan, 2007; Colwell *et al.*, 2008)。目前的結果顯示北半球中高緯度因溫度上升速度較快，而導致所受影響最大 (IPCC, 2007, Parmesan, 2007; Dillon *et al.*, 2010)。現今之氣候變化除了全球暖化外，另外也造成了氣候極端化現象。這些氣候的變畫已經影響到物種個體適存度、族群動態、分布範圍和生物多樣性 (Parmesan *et al.*, 2000)。由於溫度變化是明顯且較容易觀察的氣候因子 (IPCC, 2007)，目前已經有許多關於生物受到氣候暖化衝擊之反應的研究，結果顯示物種為了適應氣候暖化會改變其分布範圍並遷移到較適合生存的地區，不僅有動物、昆蟲等往高緯度地區或高海拔地區移動，連植物都有此現象發生，但倘若物種未能遷移至適合生存的地區，則物種的分布範圍將會縮小甚至是有滅絕的危機 (Parmesan, 2006; Feeley *et al.*, 2011; Feeley *et al.*, 2013)。而 IPCC (2021) 於今年的報告中更指出人類對於大氣、海洋與陸地的暖化影響是無庸置疑的，整體大氣、海洋、冰雪圈與生物圈已經發生廣泛且快速的變化。而此變化是數百至數千年所未見的，而這些變化也更支持極端事件是受到人為影響的。而著名的期刊科學 (Science) 其 2021 年 12 月的封面以森林死亡 (Forest Death) 為表述，主要說明德國東部的一塊 500 ha 的挪威雲杉 (Norway spruce trees) 私有造林地，在 2018 年 1 月遭受到大風暴，且倒了許多林木。接下來的 3 年裡，德國和中歐的大部分地區遭遇破紀錄的乾旱，造成挪威雲杉生長的壓力。接二連三的天然災害，使原本啃食枯木的枯樹皮甲蟲 (bark-boring beetles) 遷移到弱化的林木上，而在短期間內，便使得原本看起來很健康的高聳雲杉枯死了。

面對氣候變化對部分物種族群造成影響，Shoo *et al.* (2013) 提出具體的保育因應方法，其決策包含物種是否需要保育，物種是否有適當的內部或外部避難所為考量，並參考其遺傳多樣性之組成，而一步步地去討論行動方案。而生態系及物種面臨不同程度的氣候變遷脆弱

度時，可採用的因應對策隨著物種對應氣候變化的脆弱度與敏感度升高，與適應能力降低，對策就必須由低度介入處理到強力介入，包含現有棲地保護管理、物種的現地保護管理、協助遷徙或營造棲地廊道、協助族群重建與遷地保育等。在整體的行動方案中，能使物種進行天然更新仍為最好的選擇（Chazdon, 2008）。因為天然更新可以避免一些外來引入之種源問題，也可以維持其遺傳多樣性與確保苗木的生存（Thomas *et al.*, 2014）。然而，有些地區因為天然的種源缺乏或不足，以及棲地片斷化的問題，及種源遭受到遺傳流失而無法在變化的環境下生存，此時，對於物種進行異地復育與活體保存是全球植物保護的主要策略（Larkin *et al.*, 2016），主要可以避免物種滅絕，並且其活體材料可為將來重新種植的來源（Guerrant *et al.*, 2004; Guerrant *et al.*, 2013）。一般來說，在進行異地復育時，必須要兼顧到族群內的遺傳多樣性。若是以種子為繁殖材料，則在採種上的策略為由許多母樹上，每一株選取少量的種子會比僅由少數母樹採集大量種子來的好（Brown and Hardner, 2000）。

陳子英等（2018）執行因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究一案，其中有針對新竹的槲櫟與南仁山區的高脆弱度植物實際進行保育行動，包含大樹與小苗的監測，提出物種或生態系統可能遷移方向等，並對未來物種遷移提出可能因應對策。其中，槲櫟因原生地復育行為受到軍方反對，因此持續在模式評估可栽植地點進行維持遺傳多樣性的保育栽植，成效良好。而南仁山物種亦選定部分種類進行繁殖實際作為，待未來參考槲櫟的實際作為而進行保育步驟方案。因此本計畫擬持續進行槲櫟的區外保育措施外，對南仁山之物種亦開始進行監測，並討論策略與初步實際作為，以避免南仁山區物種滅絕。

## 1.2 植株分布的主要理論

在森林生態系統中影響植株分布的機制有很多，如棲位理論（Niche theory）以生態棲位（Ecological niche）來解釋族群的分布，其認為每個植株皆有其較具生存優勢的生態棲位，當植株間的生態棲

位重疊時可能會受到競爭排除原理影響各物種的分布範圍 (MacArthur and Levins, 1967; Pocheville, 2015)；而Hubbell (2001) 則提出中性理論 (Neutral theory)，其建立在每個植株的適存度皆是相等的假設下，一個群落的各植株存活、死亡與新增的發生機率應為相等，而植群的變動主要是受到隨機發生的種子傳播與死亡事件所影響，而非考慮植株的競爭能力；此外，樹木的分布也可能會受到密度制約 (Density-dependent) (Janzen, 1970; Connell, 1971)、空間隔離假 (Spatial segregation hypothesis) (Pacala, 1997)、空間自相關 (Spatially autocorrelated) (Getis, 2008) 與資源基礎理論 (Resource-based theory) (Conner, 1991) 等機制的影響。

而森林中物種分布的方式可透過空間分析得知，藉此了解不同森林的植群分布格局，而不同的影響因子與發展階段也會影響森林呈現不同的樣貌，進而可探討影響森林發展的相關機制 (Condit *et al.*, 2000; Larson *et al.*, 2015; Szmyt and Tarasiuk, 2018)。空間點格局分析 (Spatial point pattern analysis) 為計算特定面積下植株數量的總和來了解植株間的聚集程度，可將植群的分布格局大致區分成三種，分別是聚集分布 (Aggregate)、隨機分布 (Random) 與規則分布 (Regular)。當族群呈聚集分布時，代表植株在樣區內有群聚的現象；而當族群呈規則分布時，代表植株間較為互斥；則當族群呈現隨機分布時，代表植株間無明顯交互作用。

熱帶森林為世界上擁有最高的生物多樣性，依據Condit *et al.* (2000) 使用六個地區的熱帶森林動態樣區 (25-52 ha) 資料進行空間分析，其植群類型包含了落葉林到常綠林，結果呈現六個森林的物種多為聚集分布，但不同地區因生育地環境差異而有不同的聚集程度，在空間異質性較高的地區可能受到生態棲位與傳播限制 (Dispersal limitation) 的影響，其物種的聚集程度較高；而根據林奐宇 (2002) 在臺灣屬於暖溫帶雨林的樂佩山進行空間分析，結果顯示有80%以上的物種呈現聚集分布，隨著距離尺度增加，各物種呈現群聚的程度越高，並依據TWINSPAN分析與地形資料將整個樣區分成四個生育地後，各物種的分布則偏向隨機分布，表示這些物種的分布受

到其周圍環境因子影響，而當植株的適存範圍與樣區的環境條件相似時，則該族群在整個樣區即呈現隨機分布。綜合上述，可得知物種的分布確實會受到其生存特性與環境條件而有所影響，在環境異質性較高的樣區中，其環境條件更為複雜，造成多數物種僅適存在特定生育地中。

### 1.3 影響植株生存的相關因子之探討

樹木死亡為森林動態發展中重要的過程之一，死亡的樹木隨著時間被分解可提供其他生物養分以外，其釋出的空間也提供其他植株更多的可利用資源（如：陽光、水與土壤養分等），進而影響到森林結構的變化（Franklin *et al.*, 1987; Catherine *et al.*, 1998; Holzwarth *et al.*, 2013）。而在空間上，樹木死亡的分布主要受到兩個因素影響：原先所有存活植株的分布位置以及植株死亡事件如何發生在這些植株中，因此進行死亡植株的空間分析時，應在原植株群分布的位置上檢測樹木死亡事件的分布格局是否符合隨機死亡事件的假說（Kenkel, 1988），而此也符合了中性理論中假設每個植株面臨死亡的風險皆相等（Hubbell, 2001）。Aakala *et al.* (2012) 在明尼蘇達州（Minnesota）中 5 個美國赤松（*Pinus resinosa*）森林樣區檢測死亡樹木在空間上的分布是否符合隨機死亡事件，其結果證實在該研究樣區中死亡樹木多屬於隨機發生的事件。而 Silver *et al.* (2013) 在美國艾塔斯卡塔州立公園（Itasca State Park）天然林中，也同樣是針對美國赤松（*Pinus resinosa*）在樣區的死亡植株進行空間分析，其結果也證實死亡樹木分布為隨機發生於樣區中，而以整個樣區而言，其死亡植株在 2-4m 的距離尺度內呈現聚集分布，而當距離尺度 > 4 m 後則死亡植株在樣區皆呈現隨機分布。

在探討造成樹木死亡的因子方面，影響因素十分多樣並且可能有累加的效應加速植株的死亡（Manion, 1981; Franklin *et al.*, 1987）。在非生物因子方面，植株除了受到環境異質性的限制其分布（Condit *et al.*, 2000; 林奐宇, 2002; Pocheville, 2015），也受到環境壓力（如強

風、乾旱與土壤養分)與天災等因子影響造成植株死亡(Franklin et al., 1987; Ravento's et al., 2010; Allen et al., 2012)。而在 Allen et al. (2012) 在美國明尼蘇達州(Minnesota) 2個永久動態樣區進行調查,分別為松樹林(Pinus strobus)與殼斗科櫟屬植物(Quercus borealis)為主的森林樣區,針對暴風雨後造成樣區內植株分布格局變化進行探討,結果顯示暴風雨發生初期對兩個樣區的死亡植株在特定距離尺度下皆呈現群聚死亡的現象,而後期植株恢復的程度在兩個樣區則有明顯的差異,松樹林的新增植株為隨機發生在樣區中,而櫟屬植物則有較多幼苗建立在孔隙下,而幼苗與存活植株之間呈負相關,整體而言,以櫟屬植物為主的樣區恢復力較松樹林樣區佳。

#### 1.4 生物因子造成樹木死亡的機制與影響

在造成植株死亡的生物因子方面,樹木死亡可能受到植株間的資源競爭、動物危害與物理性傷害等因子的影響(Franklin et al., 1987; Chapin, 1989; Sliver et al., 2013; Holzwarth et al., 2013),其中以植株間的交互作用為主要的影響因子(Chapin, 1989; Das et al., 2011; Holzwarth et al., 2013; Sliver et al., 2013)。Chapin (1989)於北阿拉斯加凍原針對赤楊(*Alnus crispa*)族群進行空間分析,結果顯示赤楊種內對於資源的競爭強烈(如土壤養分)而呈現規則分布;Holzwarth et al. (2013)於德國海尼希國家公園(Hainich National Park)的成熟落葉林中探討造成樹木死亡的影響因子,結果顯示幼齡植株主要受到自我疏伐與植株大小的影響,相較老齡植株有較高死亡的風險。

在天然林中,植株間為了競爭資源造成下層木有較高的死亡風險,並且可能受到密度制約(Density-dependent)的影響造成存活植株傾向規則分布(Ravento's et al., 2010; Das et al., 2011; Larson et al., 2015; Miao et al., 2018),Ravento's et al. (2010)研究中指出植株死亡主要受到種內競爭的影響;Das et al. (2011)以14個天然針葉林樣區進行分析,其結果也顯示植株間的競爭為主要影響樹木死亡的因子,然而在空間分析方面僅3個樣區的樹木死亡為主要受到競爭的影響,而

多數樣區的樹木死亡事件是符合隨機死亡事件的假設；Larson *et al.* (2015) 於美國的喀斯開山脈 (Cascade Range) 西部的冷杉屬植物 (*Abies amabilis*) 進行幼齡林與老齡林調查，探討在時間尺度下存活與死亡植株的分布格局變化，其結果顯示在幼齡林的植株因競爭陽光資源與密度制約的影響，而有自我疏伐的情形，造成聚集性的植株死亡，隨著時間尺度有傾向規則分布的現象；另一方面，在老齡林中密度制約則不再是主要造成樹木死亡的因子，其同時也可能受到病蟲害、寒害或物理性傷害等其他因子的影響，造成死亡植株在小尺度呈現聚集分布但不明顯，並且其存活樹木的分布格局無明顯變化，代表植株符合隨機死亡的假說。綜合上述，我們可藉由空間分析的方式檢測造成樹木死亡的影響因子，其中在多數樣區多以植株間的競爭作用為造成植株死亡為主要因子，而我們也可透過分析的方式來檢測樹木死亡是否為隨機發生的事件，探討樣區中植株死亡的主要影響機制為何。

物種間的競爭作用方面，多以種內競爭較種間競爭更為強烈 (Ravento's *et al.*, 2010; Das *et al.*, 2011; Shen *et al.*, 2013)。Shen *et al.* (2013) 以常綠闊葉森林動態樣區的鼎湖山之 5 年的調查資料檢測 74 個物種是否受到種間與種內競爭的影響，結果在整個樣區中，所有物種皆會受到種內競爭的影響而有群聚死亡的現象，而在種間競爭的方面，則僅有 44.7% 的物種間有群聚死亡的現象，而 48.4% 的物種間在樣區的分布有明顯的分隔，而尚有部分物種間無明顯的交互作用。

此外，在同種族群內植株的生存也可能受到密度制約的影響 (Janzen, 1970; Connell, 1971)，而密度制約又可分為負密度制約 (negative density dependent) 與正密度制約 (positive density dependent)，負密度制約將空間視為有限的資源，隨著族群密度增加造成其族群成長率下降；正密度制約則是隨著族群密度增加可促進其族群成長率增長，種內密度增加有助於該族群的存活率 (Peters, 2003)。

在空間分析方面探討密度制約的相關研究中，Yu *et al.* (2009) 在中國內蒙古地區以松樹林為主的樣區進行分析，結果顯示樣區中的植株主要受到林火的影響，造成小徑木有較高的死亡風險，因此其死亡植株呈現聚集分布，並且植株間有負密度制約的效應，不同物種受到



的影響程度也有所差異。Miao *et al.* (2018) 也在中國海南島的尖峰嶺森林永久動態樣區進行調查，其植群屬於熱帶雨林，結果呈現死亡植株於族群內在小尺度下呈現聚集的現象，而死亡植株與存活植株之間在小尺度下也呈現聚集分布，因此在小尺度檢測到死亡植株有顯著的負密度制約所影響。Szmyt and Tarasiuk (2018) 則在波蘭的Kampinoski 國家公園以松樹林為主的森林樣區的研究結果也呈現死亡植株受到負密度制約的影響。綜合上述，可得知有許多樣區的植群是受到負密度制約造成植株死亡的現象，而此代表在族群密度高的區域有較高死亡的風險，但是不同物種所承受的密度制約影響可能有所差異，若能夠了解同一樣區中各物種受密度制約影響程度為何，應有助於我們更加了解物種間是如何共存在同一地區，以及各物種的死亡植株在族群內是否符合隨機死亡事件的假設。

## 1.5 南仁山欖仁溪動態樣區的森林特性與動態變化

南仁山欖仁溪永久動態樣區於 1989 年所設立為臺灣最早設立的永久動態樣區，是國內少數保存完善的低海拔原始林，至今每隔 5-8 年就會進行監測，擁有長期的族群結構資料，有助於了解樣區內隨著時間尺度對其森林生態過程的影響。欖仁溪樣區因冬季長期受到東北季風吹拂有明顯的植群分化(謝長富等, 1992)，依據 Ku *et al.* (2021) 將樣區依照東北季風的影響分為迎風型、中間型、與背風型植群，在迎風型植群之代表物種為杏葉石櫟-臺灣八角植群型 (*Lithocarpus amygdalifolius*-*Illicium arborescens* type)，而背風型植群之代表物種為山龍眼-鵝掌柴植群型 (*Helicia formosana*-*Schefflera octophylla* type)，中間型則為兩型之過度，而許多物種也有特殊之分布型。在迎風坡的植群單位密度與單位面積的物種數皆高於背風型生育地，也抑制樹木生長造成迎風坡的林木矮化、葉子較厚等特性來抵抗冬季的東北季風吹拂。而在 Chao *et al.* (2007b) 針對 88 個物種在欖仁溪樣區的空間分布進行分析，結果顯示在 < 2 m 的距離尺度下有高達 87.5% 的物種為聚集分布，9.1% 的物種則為隨機分布，並將物種分布與環境資料進行比較得知物種分布確實有受到空間異質性高的影響，而在不同生育

環境下物種的分布格局也有所差異。

森林生態是一個動態的發展過程，根據趙偉村等（2019）於欖仁溪樣區進行每木調查的結果顯示該次調查的年死亡率為 3.45%，為歷次調查期間中最高，而在各物種的族群變化方面，其物種數從 1997 年調查到的 132 種下降至 125 種，並且植株密度也從 1997 年的 10,434 株  $\text{ha}^{-1}$  下降至 9,696 株  $\text{ha}^{-1}$ ，其中有約 5.7 % 的物種自 1997 年減少超過 50 株  $\text{ha}^{-1}$ 。

## 1.6 擬解決問題

1. 利用團隊持續發展的大尺度分析結果，可初步了解區域性生態系與物種可能的變化，並配合高易危之生態系或臺灣之特稀有物種繼續進行其在氣候化衝擊下的植被預測與動態變遷模型外，也應發展區域性的監測與復育模式，例如仿效日本的模式提供野外的實地監測方法，或針對滅絕危險性較高的物種依照其脆弱度或實際可行之作為進行原地復育、遷地復育或其他可行之保育策略；並可以現地實際的狀況與動態變遷模型相互配合以區域的小尺度修正植被預測與動態變遷模型的成果。
2. 持續進行稀有物種或生態系之評估與監測，以小區域的現地資訊，充實氣候監測上模式的不足。在南仁山動態樣區或槲櫟分布地設立監測樣區，以小區域的現地動態資訊，提供為氣候監測模式上選擇的判斷，並可實際了解族群或生態系可能變化。
3. 利用樣區樹木長期監測調查結果，了解南仁山欖仁溪樣區影響物種死亡可能因子，期能由此結果納入保育策略考量。
4. 本計畫針對槲櫟、南仁山的稀有植物等發展出保育的對等策略，並依照監測結果即時與各相關管理單位溝通，並將所獲得的成果（包含保護區管理策略、脆弱物種遷地保育方法、移地栽植之後續管理與監測措施等）整合到各相關的林區管理處；落實對高易

危生態系及脆弱物種的保育與經營管理，整合相關領域的學者提出更細緻化的規劃措施。

## 1.7 前人研究概況（含近三年已完成之重要計畫成果摘要）

現今氣候變化對臺灣森林的影響，於陳子英等（2018）針對氣候變化對物種回復力中提到，在臺灣南部的熱帶森林，尤其是柯屬 - 杜英屬山地霧林及八角茴香 - 桐屬熱帶季風林，在降水極端化的情境下可能出現劇烈棲地縮減。但由於降雨因子在熱帶森林佔很高的重要性，可是各種大氣環流模型對未來降雨變化預測極為分歧，因此從最極端到最緩和的情境來看，這二類森林將可能面臨極高的氣候變化衝擊或有可能維持現生面積或擴大其棲地。除了模式推估不確定性外，另也因為熱帶森林的組成複雜，幾乎不可能以協助遷徙方式使現有森林移往未來適棲地點。因此，持續對熱帶森林社會及其特稀有物種的進行監測，可能是目前能夠採行的最佳因應措施，一旦稀有物種或生態系出現族群下降或退化現象，即迅速採取物種層級的保育工作。

而近年來南仁山區的氣候情況，依據陳子英等（2015）所提出之結果，認為由於氣候變化中極端事件的發生比長期平均氣候變化所帶來的影響更為重要，從氣象資料中顯示近年整體乾旱現象有上升的情形，此結果可能為欖仁溪樣區之 1997-2005 之動態帶來影響。在熱帶樣區的 BCI 樣區在 1982-1983 年期間受到聖嬰現象影響，使 BCI 樣區至少 16 種灌木和小喬木面臨滅絕危機（Condit *et al.*, 1996）。欖仁溪樣區中，1997-2005 年有許多小徑木死亡，因此乾旱現象可能對南仁山地區植群的組成、結構與動態造成影響。

欖仁溪樣區其植株數量與生物多樣性皆降低，但生物量則有些微的上升。許多研究指出，在溫度與 CO<sub>2</sub> 濃度增高的環境下，植物之光合作用速率會上升，而致生物量增加。因此，對於樣區內植株數降低，而生物量增高之現象，可能為植群演替、全球暖化或極端氣候所單獨或綜合性影響。

在南仁山生態系的研究中，歷次複查在物種組成變化與森林結構在不同的生育地的情況不一。主要為迎風型生育地的物種數量逐漸減少，植株數量也持續減少，每次復查資料顯示死亡株數高於新增株數，但背風型生育地則物種數量逐漸增加，植株數量則數量維持波動。而該區的迎風型生育地可能受到東北季風長期減弱的影響，致使部分藉由東北季風逆境下生存物種逐漸無法與其他物種競爭，因此數量大量下降，此部分已開始進行繁殖策略研究，並待研究成果產出後，能有實際作為應用到南仁山區。

另外，在森林的動態變化裡，瞭解小苗是如何建立並生存在大自然中是非常重要且必須的，因為小苗時期是整個植物生命週期中一個非常重要的階段（Caspersen and Sapruff, 2005），小苗的建立與生長將影響整座森林的組成、多樣性與分布等（Clark and Clark, 1989; Lin *et al.*, 2017; Johnson *et al.*, 2017），但是小苗的新增與建立卻也是被認為是植物更新過程中最艱難的階段（Chen *et al.*, 2012），因為容易受到環境因子、生物與非生物因子、機械傷害、生理壓力或是疾病等影響，這些因子常常會阻礙小苗生長甚至造成其死亡，僅有少部分的小苗能成功突破瓶頸並能長時間的生存與成長（Lin *et al.*, 2017），影響日後族群的更新與植物社會的發展（Astrup *et al.*, 2008），目前世界上許多稀有種或是瀕危物種皆是在此過程受到限制（Yates and Broadhurst, 2002），因此小苗的更新與建立是在植物社會中不可以忽略的重要歷程。

然而短期的小苗調查很難解釋森林當下的組成、結構與動態，因為短時間的急遽變化往往難以代表森林的整體狀態，因此持續對小苗進行監測可以瞭解森林更新的變化過程，所以長期調查確實有助於瞭解森林的動態與趨勢（ChangYang *et al.*, 2013b; Lin *et al.*, 2017）。Lin *et al.* (2017) 於墾丁高位珊瑚礁自然保留區內進行小苗研究共調查到 57 種 9,407 株的小苗，結果發現濕季的小苗新增量高於乾季，而不同物種的小苗存活半衰期則是有顯著的差異，大部分小苗則是 6 個月後其存活率僅剩一半，僅有 11% 的小苗可以存活超過 24 個月，而且陰性樹種較非陰性樹種存活得久；小苗壽命受到密度制約與種內競爭的

影響。

廖捷妤 (2019) 針對樣帶小苗研究顯示，兩次不同時期的小苗調查在種類上有很大差異，可能有物種移入移出樣帶；另外相隔 20 年的小苗植株數量差異很大，總小苗約為先前小苗的 30%，主要原因可能與單月更新苗數量有關。另外植物物候 (Phenology) 也可能影響小苗數量，1995-1997 年間可能某些植物的結實豐收年，因此其單一月份即有一物種大量 ( $\geq 50$  株) 更新的小苗，而因為有豐年的現象產生，造成物種株數優勢度上也有很大的差異。另外，也有可能因為 2014-2015 年的氣候較為往年異常，朱吟晨等 (2015) 表示 2015 年為臺灣近十年最乾旱的一年，因此可能造成土壤水分不足，種子無法順利萌芽並建立成小苗或是小苗不易生存。

陳子英等 (2018) 對新竹的槲欏長期監測中發現近年槲欏族群下降情況嚴重，短短五年僅存半數植株，因此預估槲欏族群可能於 10 年內大量消失。該研究提到針對此族群需要加強監測與保育作為，而雪上加霜的是，目前區外栽植之槲欏植株受到木蠹蛾危害，造成植株嚴重損害，此為將來持續區外栽植所需注意的。在保育策略上槲欏可以適用原地復育 (陳子英等, 2018)，但由於先前發文給軍方，均未獲得許可，因此仍以區外栽植為主要重點。而本團隊於 2019 年執行此計畫時，發現槲欏與臺灣石欏遭受嚴重的盜採與販賣行為，此也為將來本團隊可能遭遇之困難。

## 1.8 計畫目標

本計畫預定期程 3 年 (108-110 年)，全程計畫目標如下：

1. 持續發展對稀有的生態系與物種發展指標性的評估與監測方式，以小區域的現地資訊，充實氣候監測上模式的不足。

### (1) 生態系之監測

- A. 利用南仁山森林長期復查資料持續探討生態系之森林組成與

結構上的變化，尤其是對迎風型生態系變化情況之監測。

- B. 利用南仁山的欖仁溪、出風山與樣帶之小苗樣方進行逐季的持續監測，針對小苗物種組成變化及出生死亡情況逐季的監測生態系統之變化。
- C. 彙整前兩項之資料，在有生態系發生較大的變化時，能及早提出警訊與對策。

## (2) 待保育物種之監測

- A. 在複查結束後，針對需加強監測頻度之物種，進行每年的族群數量監測，以及早提出警訊。
- B. 監測出風山臺灣石櫟族群變化，掌握每年的族群數量。
- C. 監測新竹榲櫟的成樹與小苗之族群動態，持續關注榲櫟族群之變化。

## (3) 將這些高易危生態系之監測資料提供學會團隊，協助修正植被預測與動態變遷模型。

## 2. 發展區域的保育平台，將所獲得的成果整合到林區管理處；落實對高易危生態系及脆弱物種的保育與經營管理。

- (1) 由於新竹的榲櫟自物種繁殖、區外保育與栽植作業均接近成熟，且陳子英等（2018）已經提出榲櫟自種子採集到出栽之間的榲櫟培養栽植曆，因此本研究先期嘗試發展新竹縣與新竹林區管理處的保育平台，並持續努力與軍方溝通，期望此部分能得到與此物種相關之三個公務部門之共同許可合作。
- (2) 由於南仁山涉及屏東林區管理處與墾丁國家公園，因此強化與此兩單位之橫向聯繫與溝通，共同發展臺灣南部區域之保育平台，以落實對迎風型生育地此一高易危生態系與臺灣石櫟、希蘭灰木及唐杜鵑這三種脆弱物種之保育與經營管理。

## 1.9 本（110）年度目標

依據全程目標，訂定本（110）年度目標如下：

1. 在監測上，持續進行攬仁溪、出風山與樣帶的小苗監測。由小苗之物種組成與其動態探討生態系有無強烈的變化。逐季調查這三個地區小苗之物種與存活狀況。
2. 持續進行新竹槲櫟的成樹與小苗監測，並強化對造林地之管理與保育作為。
3. 持續監測區外栽植地點槲櫟生存狀況，並與新竹林區管理處與新竹縣政府持續針對槲櫟保育進行討論。
4. 由於臺灣石櫟之繁殖不順利，且其生長緩慢，因此今年針對未來可栽植地點與屏東林區管理處進行討論。但唐杜鵑與希蘭灰木若生長良好，則可以考慮先行栽植。

## 二、材料及方法

### 2.1 研究地點

本計畫主要以新竹縣新豐鄉的榭櫟分布地點與屏東縣滿州鄉的南仁山自然保留區為主要研究地點。南仁山生態系之物種研究位於屏東縣滿州鄉的南仁山生態保護區內，其內總共包含了四個樣區與一個樣帶，本研究僅在欖仁溪樣區、南仁山樣帶與另外選取臺灣石櫟主要分布範圍的出風山進行小苗監測。在榭櫟的部分，主要研究地點位於新竹縣新豐鄉牛牯嶺山區。

#### 1. 新竹新豐鄉榭櫟樣區

榭櫟分布區域主要在新竹縣新豐鄉與竹北市交界處之牛牯嶺山區，為鳳山連營區軍方所管理的範圍內，因此一般民眾不能隨意進入，也使得榭櫟族群不遭到過度破壞。目前針對榭櫟分布劃為四區(圖 4.1)

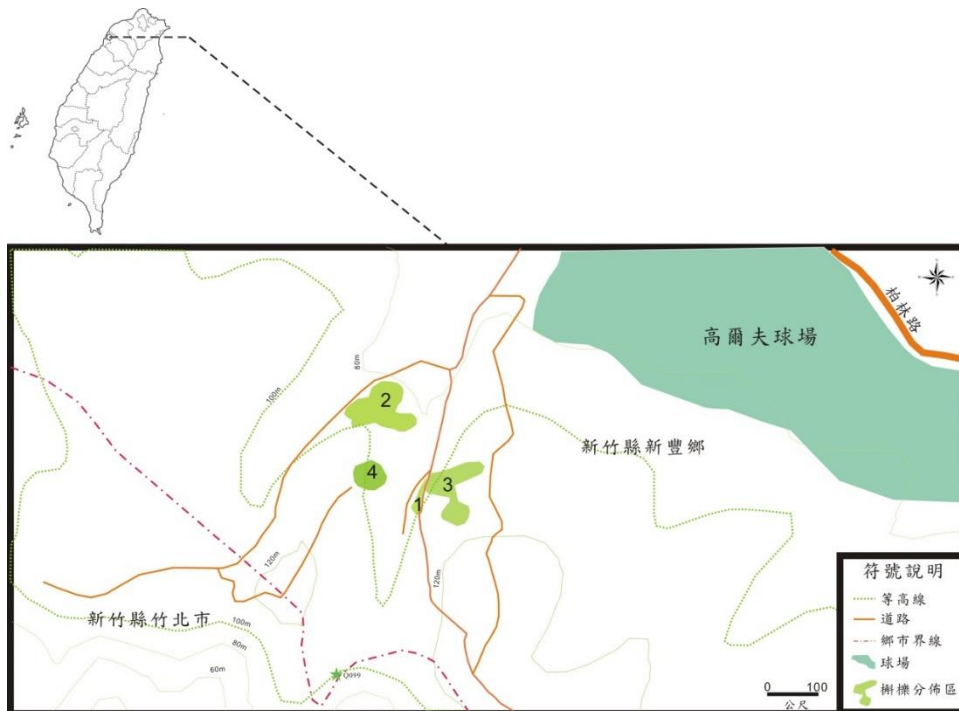


圖 4.1 研究區域圖。圖中淺綠色區塊為榭櫟分布之生育地位置。

榭櫟原生地氣候以中央氣象局自 1996-2016 年新竹測站之觀測資



料顯示，在新竹地區的年均溫為 23.2 °C，而年雨量為 1,778 mm，除了十月到隔年一月為較乾燥之氣候外，其餘月份雨量均高(圖 4.2 左)。榲欖生長在厚壤土，且其分佈的區域十分狹窄，其原生地之森林組成主要以九節木 (*Psychotria rubra*)、相思樹 (*Acacia confusa*)、江某 (*Schefflera octophylla*) 等樹種外，還有許多菝葜 (*Smilax chinensis*)、雙面刺 (*Zanthoxylum nitidum*) 等蔓藤植物，榲欖可能因為附近的植株競爭資源養分而導致生長受到限制。

## 2. 屏東南仁山生態保護區研究

南仁山生態保護區位於臺灣南部恆春半島東側，屬於墾丁國家公園的範圍。研究區域之氣候狀況以中央氣象局的恆春測站資料來看，年平均溫度為 25.8 °C，在雨量方面，夏季受到梅雨季的滯留鋒面、熱帶性低氣壓、颱風、颱風過後所引進的西南氣流以及冬季的東北季風影響，年雨量為 2,104 mm (圖 4.2 右)。

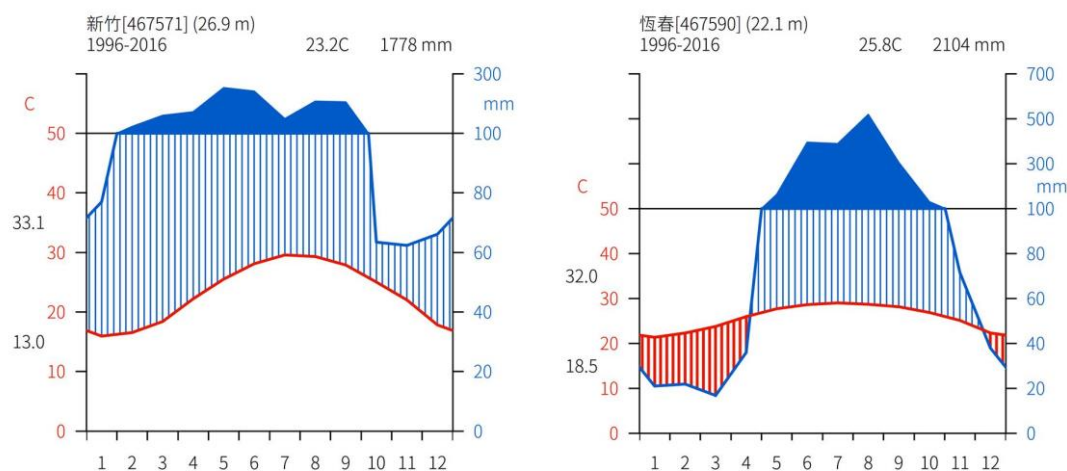


圖 4.2 新竹與恆春地區 1996-2016 年間生態氣候圖。(資料來源：中央氣象局)

南仁山生態保護區內依據不同研究目的共設置五個樣區與一個樣帶，即為欖仁溪樣區，南仁山溪谷樣區 I、II，南仁湖樣區，次生林樣區與南仁山樣帶 (圖 4.3)，而本計畫使用欖仁溪樣區與南仁山樣帶

之資料進行研究，以下分項敘述。

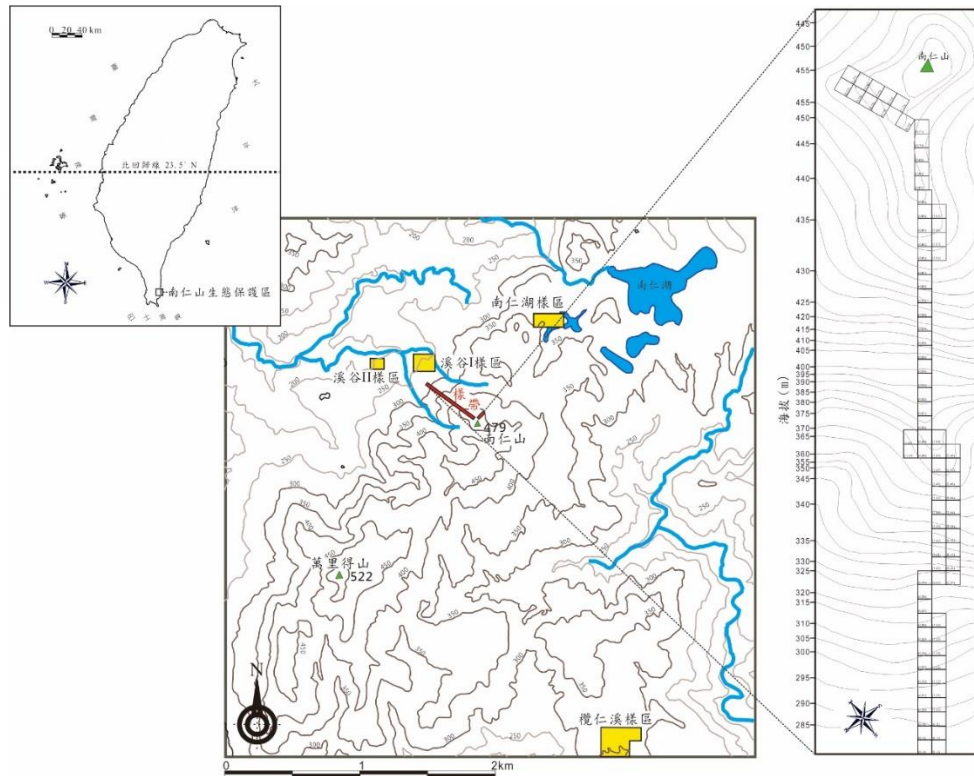


圖 4.3 南仁山保護區與其五個樣區的位置圖。

#### (1) 攬仁溪樣區

攬仁溪森林動態樣區位於萬里得山東側支稜一處朝東緩坡上，海拔高度為 284 至 341 m，總面積 5.88 ha，由南北兩塊為不同時期調查的樣區所組成，北邊 3 ha，東西向長 300 m，南北向寬 100 m，南邊 2.88 ha 則於 1997 - 2000 年間設立，東西向長 240 m，南北向寬 120 m，緊鄰北邊 3 ha 樣區 (Chao et al., 2007a)。在風速方面，每月平均風速為  $3.0 \text{ m s}^{-1}$ ，而冬季有東北季風的吹拂，使平均風速最高到達為  $8.4 \text{ m s}^{-1}$ 。目前已於 1991、1997、2005、2013 以及 2019 年完成每木調查。

樣區內植群受到東北季風及颱風雙重影響，造成了迎風、背風之不同的植被類型 (Chao et al., 2010)，過去研究發現東北季風長時間的強風逆境對植物社會具有相當大的影響，造成迎風區域

低矮林相、彎曲樹幹和破裂林冠等現象。

### (2) 南仁山溪谷樣區

南仁山溪谷樣區位於南仁山山腳處，約在港口溪支流之巴沙加魯溪旁。其海拔高度 224 - 275 m，總面積為 2.1 ha，樣區東西向長 150 m，南北向寬 140 m (圖 4.7)，樣區設置於 1993 年並同年進行第一次的每木調查，而目前也於 2000、2008、2013 與 2019-2020 年進行完成複查。由於樣區東側與北側受南仁山阻隔，因此冬天之東北季風對此樣區影響較小，森林物種組成上與欖仁溪樣區差異頗大，此樣區的植物社會有熱帶雨林之特徵，如幹生花及支柱根。

### (3) 南仁山樣帶

有鑒於恆春半島區域植群的特殊性，即於墾丁國家公園南仁山保護區設立永久樣區對臺灣僅存之低地闊葉林進行監測，並於 1994 年建立以研究植被帶轉換為目的的南仁山樣帶 (圖 4.7)。樣帶長約 300 m、寬 10-20 m，橫跨熱帶地區常見之低地常綠闊葉林及溫帶地區之下部山地常綠闊葉林，正是典型的熱帶及亞熱帶森林的交會帶，因此樣帶為植群交會帶對氣候變遷反應的最佳實驗地。目前僅於 1995、2013 與 2020 年完成三次的每木調查。

## 2.2 櫟欏成樹植株監測

對原生地之櫟欏成樹至 2020 年已編到 168 號，本研究仍持續依照先前調查路徑持續調查監測，若有高度超過 50 cm 的櫟欏植株則列入成樹加入每季監測。每年進行一次 DBH 測量，以了解植株生長狀況。

## 2.3 櫟欏原生地與區外自我更新小苗調查

對榲欖小苗調查起始於 2015 年春季調查樹木時，發現許多小苗存在，因小苗與成樹一樣分散，無法設立隨機或規則的小苗樣區調查，因此仍採用無樣區調查法，每株調查到的小苗於周邊土壤插入三隻竹筷，並繞以細紅線，以為將來監測用。小苗之編號在原生地為 9 碼，前 4 碼為發現年分，接續 2 碼為調查所在區 (01 - 04)，最後 3 碼是該年發現小苗之流水號，由 001 開始編號。而區外則由地點英文縮寫加上 S 表示小苗，之後為西元年分與流水號。

小苗於本研究之定義為自種子發芽到植株高度 < 50 cm 皆列為小苗，因此任何新發現的植株若高度小於 50 cm，則列為小苗，而當有小苗經監測高度超過 50 cm，或發現時高度已經超過 50cm，則另外綁上號碼牌，列入成樹資料庫。

而因軍區目前規畫動工中，因此小苗調查今年為最後一次，且今年所有調查到的小苗均送往新竹縣政府新湖苗圃照護，待整體施工完成，再將這些苗木種植回去進行原地保育。

## 2.4 榲欖原生地採種與孵育

由於 2019 年榲欖果實遭大量採集，因此本年度預計於十月初果實尚未完全成熟時進行果實收集，收集時將同一母樹之果實放入同一紙袋中，紙袋外寫上母樹編號；若由地上撿起來的果實，則列入 0 號，表示母樹不明。

收集到的果實於嘉義大學進行層積，將同一母樹的果實放入事先裝入水苔之封口袋中，袋上寫上母樹編號，置入 4°C 的冰箱中，待明年 2 月初再行破殼萌芽；並於嘉義大學溫室培養至 3 月後，再將苗木送至新竹縣政府或新竹林區管理處苗圃持續栽植。

## 2.5 榲欖區外栽植監測與本年度野外栽植

區外栽植的櫟櫟植株則每季進行高度測量，並檢視其開花結果等概況。在本年度栽植上，於新竹林區管理處關西地區於適合地點進行櫟櫟栽植，去年已完成 300 株植株的栽植。栽植過後維持每半年一次地監測。

## 2.6 南仁山地區小苗監測

生態系監測上，本研究在欖仁溪、出風山與樣帶進行小苗監測。本研究分別於欖仁溪設立 26 個小苗樣方（圖 4.4），出風山有 20 個，而樣帶有 90 個小苗樣方。每個小苗樣方大小皆為  $2 \times 1 \text{ m}^2$ ，以每季進行一次的調查。針對樣方內的所有小苗進行監測，若有新增小苗則掛上新的蘭花牌，並給予獨一無二的編號，記錄其物種名；若是先前已存在的小苗則記錄存活，若死亡則在確認後將牌回收。而在小苗高度部分則每年進行一次苗高測量。各個樣區之木本小苗樣方設置如下：

1. 從欖仁溪樣區中選取橫跨不同生育地的東西向木本植物樣方，以系統取樣的方式進行設點，在木本植物樣方西南角設立小苗樣方，共 15 個小苗樣方；另從樣區中選取海拔梯度變化最大之南北向木本植物樣方，同樣以系統取樣設點，共成立 11 個小苗樣方，總計 26 個小苗樣方，小苗樣方實際位置詳如圖 4.4。調查時間在 2015 年為每季調查 1 次，分別為 2015 年 1 月、2015 年 5 月、2015 年 9 月、2016 年 1 月；2016 年 6 月、2016 年 7 月、2016 年 8 月、2016 年 11 月、2016 年 12 月；而 2017-2019 年則是每個月皆調查一次；2020 年以後每季做一次調查。

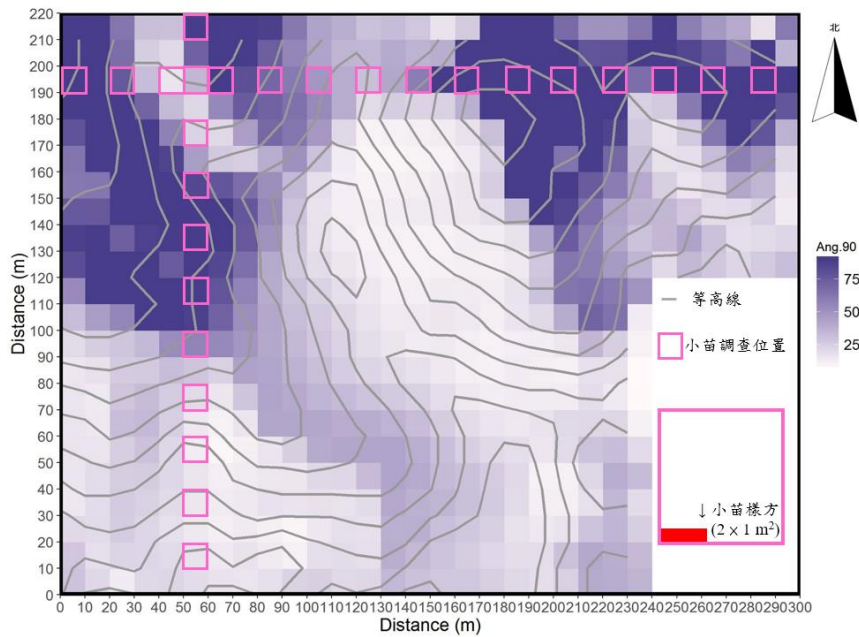


圖 4.4 欖仁溪樣區小苗樣方設立位置與各樣方相對東北邊之坡向圖。

2. 在出風山有臺灣石櫟分布區設立 5 個  $10 \times 10 \text{ m}^2$  的樣方，並於每個樣方的四個角落設立小苗樣方，總計共 20 個小苗樣方。調查時間為 2017 年 1 月、7 月與 12 月，2018 年起至 2019 年的每個月、2020 年每季（3 個月一次）皆會進行調查。
3. 在南仁山沿著樣帶設置 90 個小苗樣方。這 90 個小苗樣方初次由賴宜鈴於 1995 年設置（賴宜鈴，1996），而 2015 年開始本研究維持 20 年前所設立之樣方進行小苗調查（圖 4.5）。本研究至目前所調查次數共有 17 次，分別於 2015 年與 2016 年的 2 月、5 月、9 月與 12 月以及 2017 年的 2 月與 12 月，2018 年-2019 年的 2 月、5 月、9 月與 12 月，2020 年 2 月、5 月、8 月與 12 月進行調查。

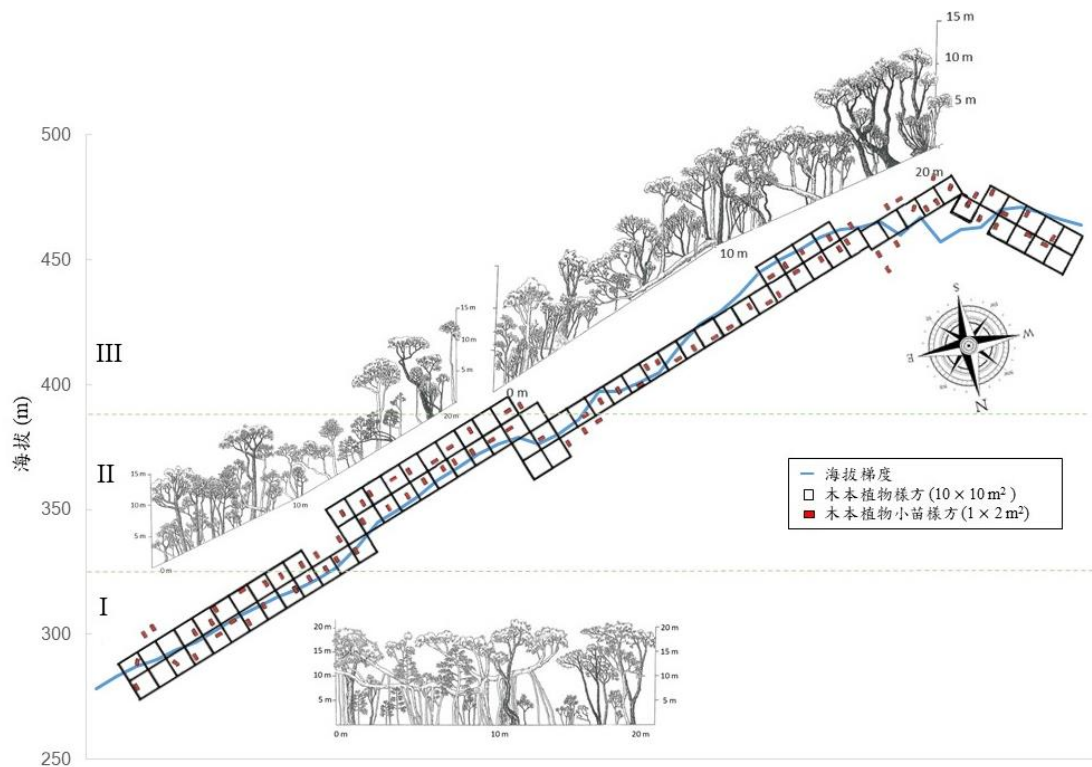


圖 4.5 南仁山樣帶小苗樣方（紅色點處）與植被剖面圖。

## 2.7 欖仁溪小苗存活分析

### 1. 小苗存活分析

本研究為了瞭解整體樣區長時間的小苗之存活率，利用 Kaplan-Meier analysis 繪製存活曲線，並採用無母數的統計方法-Log rank test 檢定是否有顯著的差異性 (Kleinbaum and Klein, 2012)，使用 R 語言的 survival package 內的 'survfit' 進行分析 (Therneau, 2020)。

### 2. 生物因子與非生物因子對於不同分佈型物種的小苗存活影響分析

本研究以 Ku et al. (2021) 針對南仁山欖仁溪樣區的物種分型，合併成三種類型，分別為迎風型、中間型與背風型物種。接著再利用多元 cox 模型 (Mix effects Cox models) (Cox 1972; Therneau & Grambsch 2000) 分析生物因子與非生物因子對於不同分佈型小苗的

死亡風險。

生物因子包含周圍同種小苗密度、周圍不同種小苗密度、周圍同種成樹生物量與周圍不同成樹生物量；非生物因子則包含海拔高度、凹凸度、坡度、坡向、暴露度指數。生物因子部分，會計算各個小苗樣區內同種小苗與不同種小苗的數量，並且會計算各小苗樣區周圍5m內的同種與不同種成樹的生物量。非生物因子部分海拔高度為各個小苗樣方的海拔高度；凹凸度為各小苗樣方所存在的10 x 10 m樣方內周圍8個矩形樣方最外圍的12個角落高度與中間樣方海拔高度的平均差值，若凹凸度 $>0$ 代表該樣方比周遭的樣方還要高，若凹凸度 $<0$ 代表該樣方比周遭的樣方還要低（Aiba et al., 2004）；坡度則藉由各樣方的海拔高度所匯出的等高線進行平均傾斜度的計算；坡向則以面向東北季風的方向為 $180^\circ$ ，而背向東北季的方向為 $0^\circ$ 進行加權；東北季風暴露度則是計算該樣方的東北風像是否受到前方山脈影響進行坡向、海拔高度的加權計算，若樣方的東北方向無任何山脈阻擋，且位於山頂其東北季風暴露度則為90，若樣方位於低谷，東北方向受地形阻擋，其東北季風暴露度指數為0（Chao et al., 2010）。而多元cox模型則用R語言的survival package內的'coxph'進行分析（Therneau & Lumley 2014）。

### 3. 小苗與大樹之間的相似性

本研究以計算各小苗樣區方圓0-50m內 $\geq 1\text{cm}$ 的木本植株物種數量，並以Chao et al.（2005）修改的Sørensen相似性公式計算每個小苗樣區與不同距離尺度下木本植物組成的相似性。

## 2.8 欖仁溪樹木死亡植株空間分析

在此分析中，分析對象為植株數量 $>15$ 株的物種，其中大小樹的分界依據Lutz et al.（2018）以各物種各徑級生物量加總為整體生物量一半作為區分大小樹的基準（圖4.6）。此外，在物種分布型方面依據Ku et al.（2021）分成四種類型，分別為迎風型、中間型、背風型與



廣泛分布型物種。

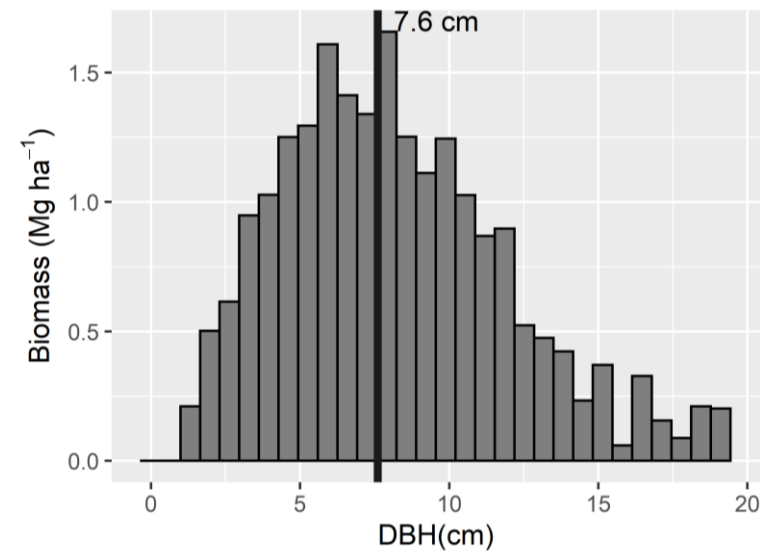


圖1.6 以紅花八角為例呈現其各徑級下累積的生物量。

大小樹的區分標準為各徑級生物量加總為整體生物量一半為基準，以紅花八角為例，以7.6cm作為大小樹區分的基準。

資料處理方面則是將紙本資料以Microsoft Excel進行資料輸入，而植株位置以整體樣區的西南角作為原點(0,0)，將樣區化為30,000 × 22,000 cm<sup>2</sup>的平面座標系統，依據點位圖各點植株資料進行轉換，以獲得每個植株的絕對座標，以此進行空間分布分析。但因樣區須以矩形大小來進行空間分析與物種-生育地關聯性分析，因此本研究僅分析最大矩形面積5.28ha的1997-2019年的調查資料。

空間點格局分析 (Spatial point pattern analysis) 為計算特定面積下植株數量的總和來了解植株間的聚集程度，可將族群的分布格局區分為三種：分別是聚集分布 (Aggregate)、隨機分布 (Random) 與規則分布 (Regular)。若族群呈聚集分布時，代表植株在樣區內有群聚的現象；而當族群呈規則分布時，代表植株之間的關係較為互斥；最後，族群呈現隨機分布時，代表植株間無明顯交互作用。

為瞭解欖仁溪5.28ha樣區中整體植株以及種內間的交互作用是否受到密度制約的影響，本研究整理1997年至2005年、2005年至2013

年與2013年至2019年三個調查期間的資料，依據每個植株於各個時期的存活狀態標記成"死亡 (dead)"或"存活 (alive)"，使用成對相關函數 (Pair-correlation function, PCF) 的  $g_{12}(r)$  來檢測各族群內死亡植株與存活植株分布之間的關係，並探討不同調查期間的密度制約對樣區內的植株影響有何變化。成對相關函數為根據Ripley (1976) 所提出的Ripley's K-function進行轉換的分析方式，其原理為以任意類型1的植株作為目標物，計算在特定距離尺度 ( $r$ ) 的環形面積中類型2的植株數量，除以類型2的強度函數 ( $\lambda_2$ )，藉此了解兩種類型的分布關係，可避免計算大尺度時受到小尺度的分布格局影響，更適合應用在植群結構複雜的森林 (Stoyan and Stoyan, 1994; Wiegand and Moloney, 2004; Wiegand and Moloney, 2014)。其中  $A$  為本試驗樣區之面積， $N_1$  為樣區內物種的類型1之總植株數量， $N_2$  為樣區內物種的類型2之總植株數量， $I_r(d_{ij} \leq r)$  為計算在  $r$  的距離尺度內之植株總數量的參數 (Ripley, 1976; Ripley, 1981)， $W_{ij}$  為邊緣校正常數 (edge correction factor)，本研究採用Ripley's等向性校正 (Ripley's isotropic correction) (Ripley, 1977; Ohser, 1983)。

$$K_{12}(r) = \frac{1}{\lambda_2} \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} I_r(d_{ij} \leq r) \times W_{ij} \text{ with } \lambda_2 = \frac{N_2}{A} \quad (\text{式1})$$

$$g_{12}(r) = \frac{1}{2\pi r} \times \frac{dK(r)}{dr} \quad (\text{式2})$$

為檢測樣區內植株死亡是否受到密度制約的影響，本研究以  $g_{\text{dead,dead+alive}}(r) - g_{\text{alive,dead+alive}}(r)$  進行分析 (Yu *et al.*, 2009; Wiegand and Moloney, 2014; Szmyt and Tarasiuk, 2018)。此外，我們採用隨機標記 (Random labeling) 假設模型來進行隨機模擬方法 (Monte Carlo method) (Kenkel, 1988; Goreaud and Pelissier, 2003; Wiegand and Moloney, 2014)，將該調查年死亡植株的數量隨機地放置於樣區中形成一組虛擬的點位資料 (Ripley, 1977; Ripley, 1981; Dale, 1999)。其假設死亡植株皆為隨機發生的事件，依據每個植株標記死亡與存活的資訊，以死亡植株數量隨機放置在死亡與存活植株的分布位置上，求得一組死亡植株在原族群分布內呈現隨機死亡的假設模型。在整體死亡植株方面，重複進行99次得到99組模擬資料後再進行成對相關函

數分析後，得出一個代表死亡植株在原族群分布內呈現隨機死亡的信賴區間 ( $\alpha=0.02$ )，而各物種的死亡植株方面，則是重複進行999次模擬所求得的信賴區間 ( $\alpha=0.002$ )。當檢測值高於信賴區間時，表示死亡植株較存活植株周圍的植株密度高，代表死亡植株多發生在植株密度較高的地方，證實其受到負密度制約的影響，而當檢測值低於信賴區間時，則表示死亡植株較存活植株周圍的植株密度低，代表死亡植株受到正密度制約的影響。

在空間分析方面皆在R語言中進行 (R Core Team, 2019)，使用其擴充套件“spatstat”進行成對相關函數分析 (Baddeley and Turner, 2005；Baddeley and Turner, 2013)。

另外為瞭解各物種死亡植株分布與樣區內各生育地之間的關聯性，依據Ku et al. (2021)將欖仁溪樣區劃分為三種生育地類型資料。本研究依據5.28 公頃樣區內10 × 10 m的各樣方生育地資訊，篩選死亡植株大於15株的物種進行分析，若各物種在每個生育環境下實際分布密度與假設模型下的密度相差至少97.5%，則物種分布與生育地環境關係呈現顯著的正或負相關 ( $\alpha < 0.05$ )。此分析使用R語言中Harms et al. (2001)建立的 `torusallspp` function進行分析 (R Core Team, 2019)。

### 三、結果與討論

#### 3.1 槲欏成樹植株監測

由 2012 年至今的調查資料顯示，在新竹縣新豐鄉與竹北鎮交界的槲欏原生地槲欏植株呈現逐年減少狀況(圖 4.7)。今年無新增小樹。由於前兩年共有 5 株小苗成長為小樹，顯示此處天然下種的小苗仍有機會成長為成樹。而死亡部分，今年至年底已經又死亡 8 株，其中兩株為暑假過後死亡。這些死亡植株中，有 2 株在去年評估時已經幾乎無樹冠的小樹，另有 6 株植株樹冠 90%以上都是枯梢，且底下多萌蘖。這些死亡植株，在去年的評估總和中，皆為評估最差之植株(圖 4.8)，因此藉由去年底的健康度評估以及採取積極策略管理為防止槲欏持續死亡之方法。目前評估同等級危險的植株尚有 7 株，由於先前進行棲地管理後，有些植株生長狀況轉好，但此無法有統計數據顯示是否顯著有效。由於暑假後又有 2 株死亡，因此年底時請關西團隊協助植株周遭林木清除，以便後續觀察現場狀況，再擬定管理方式，避免植株持續消亡。

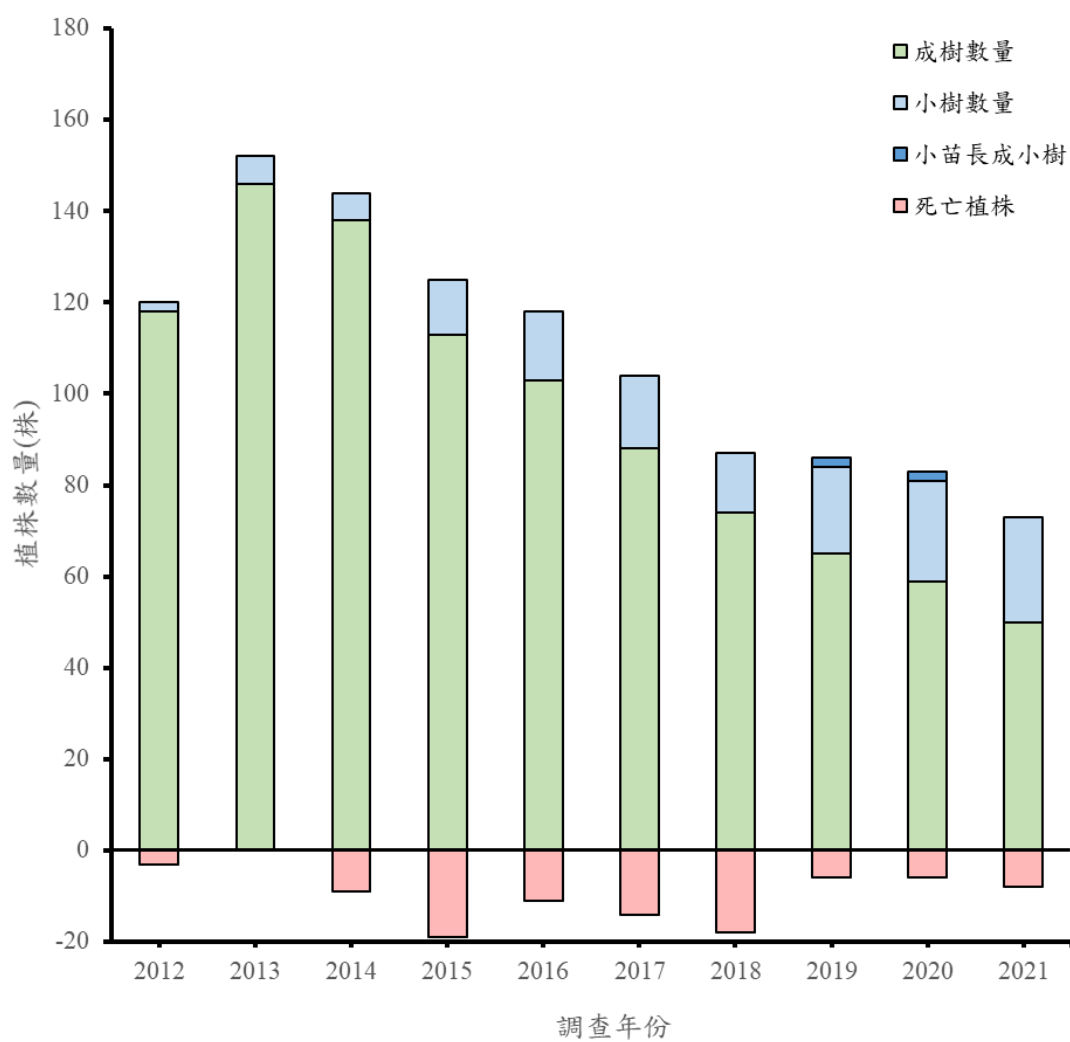


圖 4.7 新竹櫛欒原生地之逐年族群動態圖。

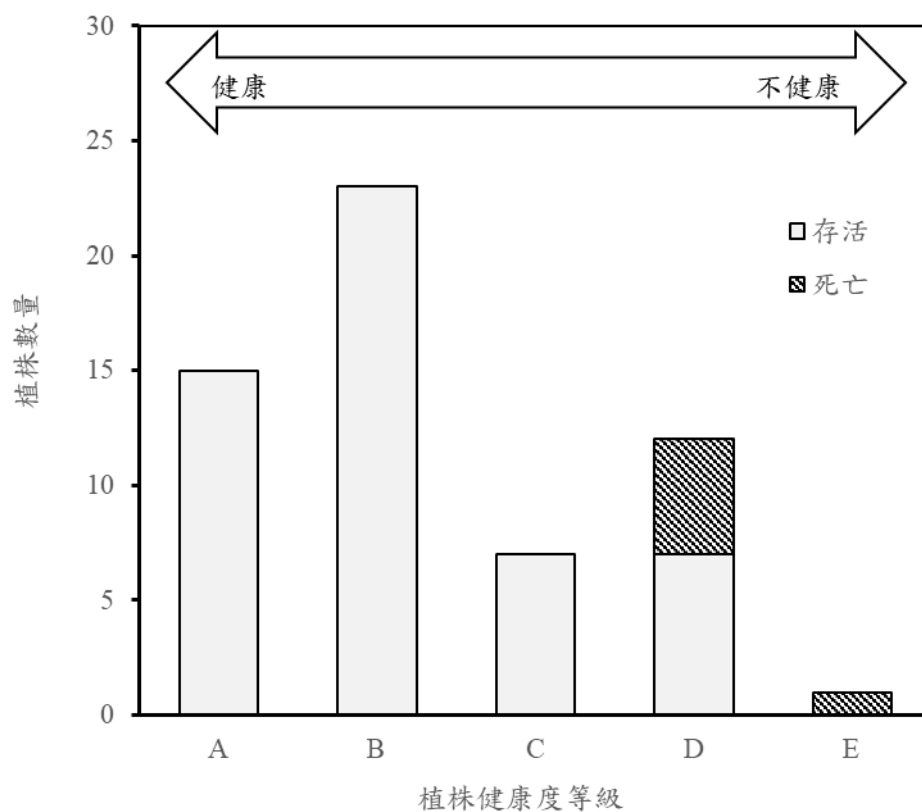


圖 4.8 新竹槲欖健康度評估各等級株數與死亡植株去年健康度。

因此至 2021 年底，槲欖植株僅存活 73 株植株，亦即在今年暑假後又新增兩株死亡，而現今仍然沒有新增植株，剩餘為 2013 年存活植株 (151 株) 的 48.3%；而這些存活植株中，只剩下 50 株 (33.1%) 胸高直徑大於 1 cm 的成樹 (圖 4.6，表 4.1)。

表 4.1 新竹縣新豐鄉檜欒原生地大樹和小樹植株逐年存活狀況。

調查年份	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
當年度存活植株	120	152	144	125	118	104	87	84	81	73
小樹數量*	2	6	6	12	15	16	13	19	22	23
成樹數量#	118	146	138	113	103	88	74	65	59	50
當年度新增成樹	-	28	1	0	2	0	1	0	0	0
當年度小苗長成小樹	-	-	-	0	0	0	0	2	2	0
當年度死亡植株	3	0	9	19	11	14	18	6	6	8
累計死亡植株	3	3	12	31	42	56	74	80	86	94
累計調查植株	123	155	156	156	160	160	161	164	167	167

\*小樹是指 DBH<1 cm 且 H≥0.5 m 之植株；#成樹植株指的是 DBH≥1 cm 之植株。而存活植株則是小樹加上成樹的數量。

### 3.2 檫欖原生地小苗監測

今年檫欖小苗新增僅有 4 株 (圖 4.9)，且主要新增區域並非以往新增最多區域。今年年初到五月的嚴重乾旱可能影響到小苗的萌芽與生存，但是檢視以往存活植株時，許多生長於路邊之小苗與其附近標記物完全不見，應為軍方近期高層長官頻繁巡視之環境清潔有關。去年底至今年年中死亡 8 株小苗，多數小苗之標示物與編號牌均消失，與以往自然死亡小苗狀況不一致，因此今年小苗死亡可能與乾旱或人為清除均有關。因此到今年年底，現場小苗仍存活 33 株，其中 6 株於 7 月份移至新湖苗圃，僅存 9 株自 2015 年存活至今。

面臨軍方明年的施工，本團隊與縣府、林區管理處、軍方及其規畫廠商保持溝通，除了將所有檫欖植株分布圖給予規畫廠商，並在多方開會討論下，由軍方同意盡最大能力保存仍存活植株，目前的工程規劃圖中僅只有 2 株植株會受到影響，而所有的施工地點皆避開檫欖聚集地點。另外本團隊也依據目前施工圖資，明年發現到新增的小苗若有接近施工範圍者，則一律送往新湖苗圃，待整體工程完成，軍方也承諾會設立一檫欖復育區域供現地保育使用。

### 3.3 檫欖原生地採種與保育與區外監測

去年於原生地收集到 817 顆種子，共由 38 株母樹採集而來。在經層積後，共有 258 株小苗運至新竹縣政府新湖苗圃。其中主要由於疫情突發，5 月初送了 144 株小苗至新湖苗圃後，後有許多小苗未能依照原定計畫於 5 月中前送至新湖苗圃，這些仍在嘉義的小苗因氣候因素，即使存活下來也無抽芽，因此第二批送至新湖苗圃的苗木反而比第一批送至的矮。如圖 4.10 中，左方較高的小苗即為今年較早送至苗圃之苗木，而右方較矮的則為 8 月初送至的苗木。



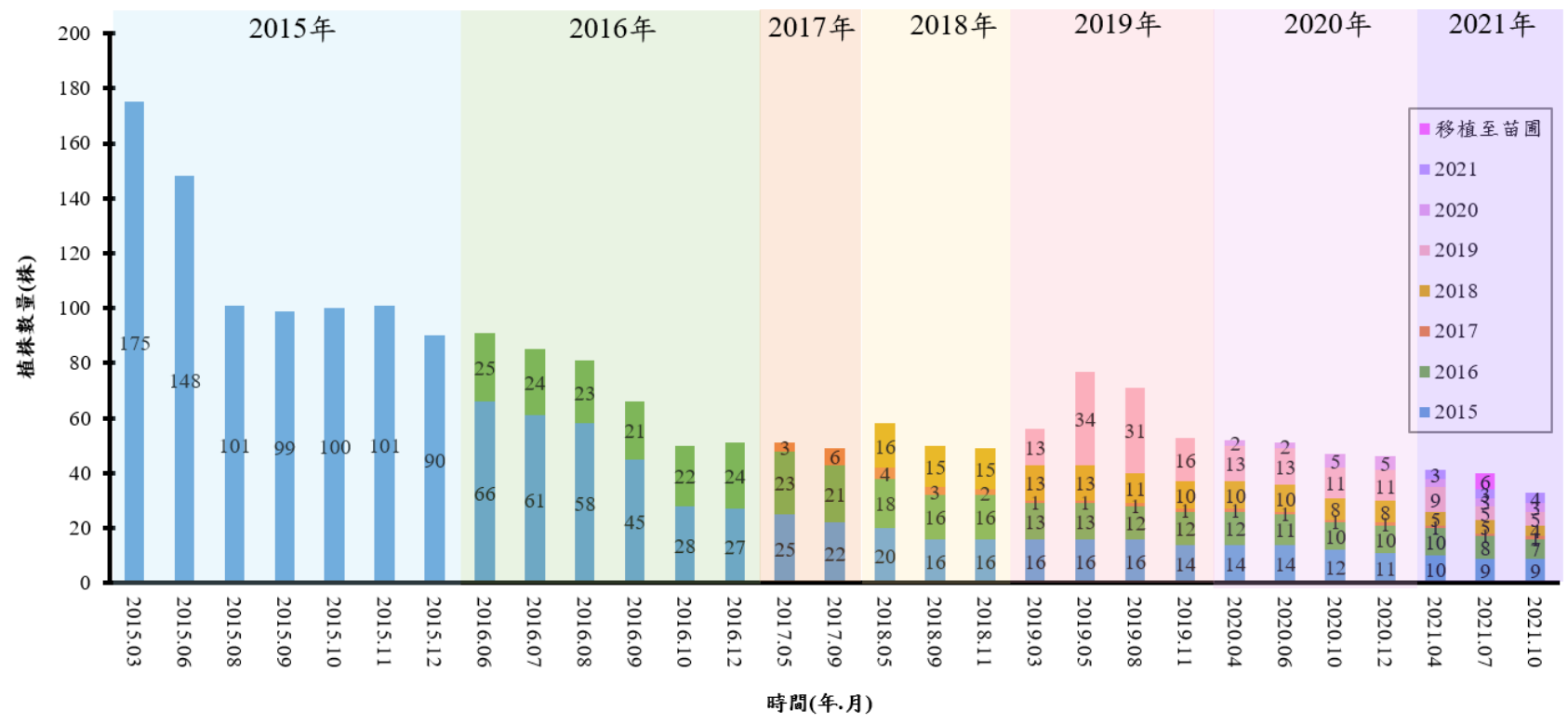


圖 4.9 新竹櫛櫟原生地小苗逐年族群動態圖。

在去年度的櫟櫟區外栽植中，由於新竹林區管理處的大力協助，因此去年 6 月 29 - 30 日則至關西造林地栽種 300 株苗木，每株苗木皆有掛上兩張小蘭花牌，白色蘭花牌是寫上其種源來自原生地的母樹編號，黃色蘭花牌是專屬關西造林地編號，是由英文字母 K 與數字 001-300 號組合而成，每株的編號不重複，並鋪設雜草抑制席避免雜草叢生影響苗木生長。今年針對關西造林地的 300 株植株，到目前全數存活，但有兩株去年生長即較差之植株今年沒有抽芽現象，需再多加注意。若造林地有植株死亡，本團隊再由苗圃移植植株過去。



圖 4.10 新湖苗圃今年度小苗生長狀況。

另外目前區外栽植主要監測縣政府造林地、鳳岡國小、彰化農場、山崎國小、縣政府前廣場、瑞峰國小、婦幼公園、楊梅造林地與關西造林地此九個地點持續進行監測，我們將同一地點所有植株依照栽植之後的時間（年）作圖，同一地點的數值我們採用該地點所有櫟櫟高度的平均值。其結果如圖 4.10。其中可以發現櫟櫟生長速度有所差異，栽植在中海拔地區的櫟櫟生長較快，當然這些植株也因為較晚栽種，所以初始苗高就比較高，但是其生長也較快；而同樣生長較快的植栽地點也有鳳岡生長最快的植株以及婦幼公園植株。鳳岡國小栽植植株生長有兩種不同趨勢，最主要還是早期除草所致；但是在 2018 年經本團隊與該校總務主任溝通並協助後，可以看到在鳳岡國小的其他植株也開始快速生長。

而櫟櫟區外栽植在幾個造林地上，我們可以看出縣府造林地生長趨緩，最主要是有木蠹蛾持續侵擾，導致造林地中植株生長偏慢，而其餘地點包含彰化農場與其他各校櫟櫟平均高度雖然仍較低，但是在團隊溝通協助後，植株在這幾年開始快速生長。

目前植株生長最高的是鳳岡國小的植株，目前高度約 530 cm，其他介於 400-500 cm 的植株有 6 株，其中 4 株位於婦幼公園，2 株位於瑞峰國小。而介於 300 - 400 cm 的植株有 31 株，其中 18 株位於婦幼公園，其他則有栽植較久的縣府造林地、楊梅造林地、彰化農場、與鳳岡國小。

由多年區外栽植結果中得知，整體未來區外栽植上，最好選取已在苗圃照護三年之植株，再將之栽植到區外，對於苗木高生長是有助益的。當然若是能栽植在如婦幼公園這種有良好土壤與澆灌環境下，植株之生長會比許多人為較少照護的地區好。

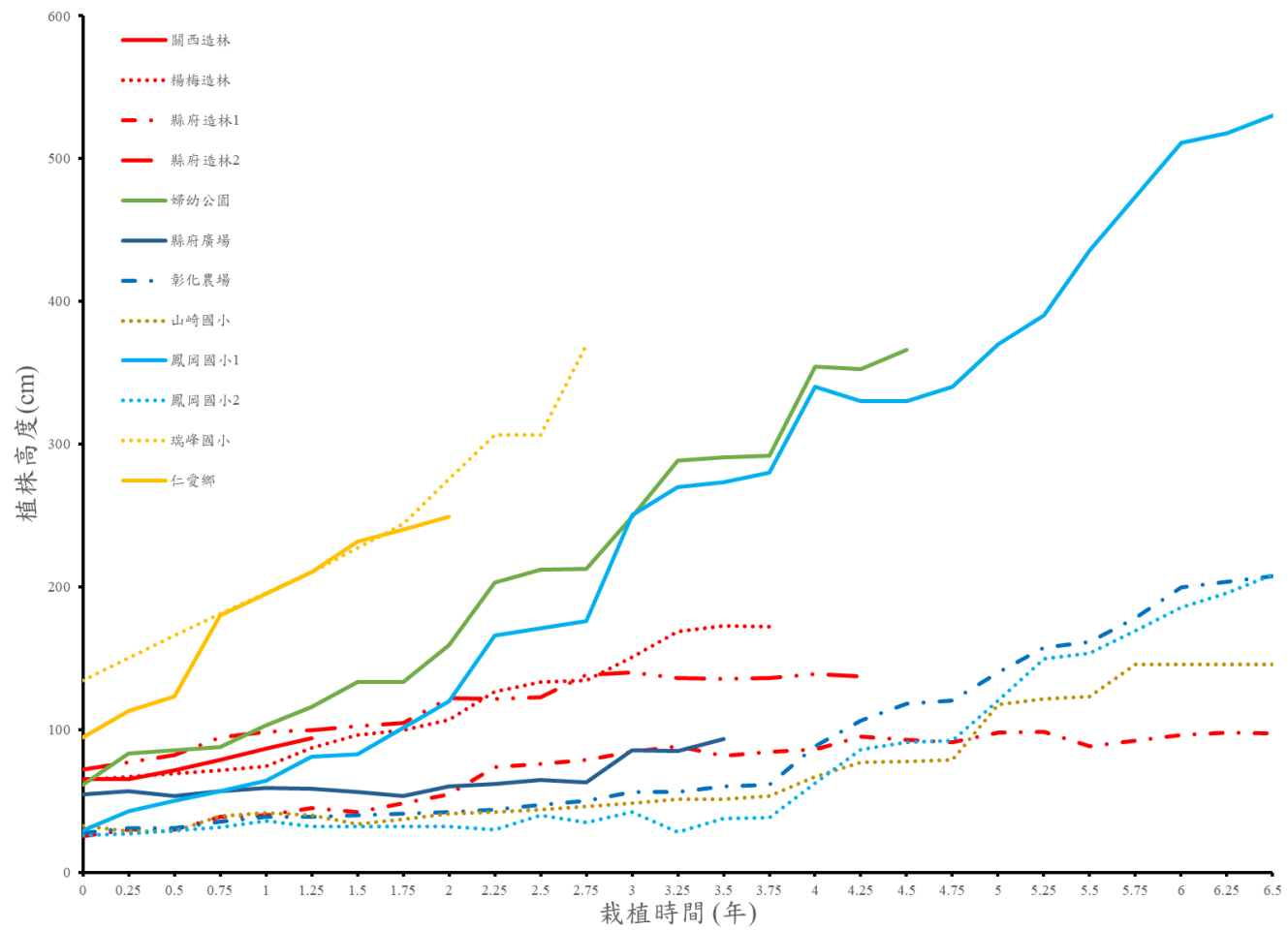


圖 4.11 各個區外栽植植株之栽植時間與植株高度圖。

### 3.4 苗栗檫櫟發現與建議

楊翊等(2020)發表苗栗族群的發現，該區屬私有地，且約有 70-100 株植株。本團隊今年三月份與學會團隊林奐宇研究員至現場進行空拍，並已處理為航攝立體模型，並先行繪製各植株樹冠圖，未來可藉由重複拍攝與樹冠繪製了解該處之植株大略動態與樹冠變化。

該地區檫櫟去年已有種子採集，並送至南庄苗圃培育，未來本團隊持續與新竹林區管理處討論後續作為。另外目前南庄苗圃尚有 675 株左右的新竹檫櫟小苗，請管理處在 2022 苗栗族群小苗可能開花時，盡量分開兩族群，避免族群間授粉。

在檫櫟適存範圍中，本研究以全世界檫櫟分布之氣候條件進行臺灣適存地點分析，如圖 4.12，由於北方與日本之檫櫟族群其冬天可耐受至零下 10 度的溫度範圍，因此模式預測到除了北部與西北部海邊外，中央山脈有部分區域也是適合分布地點。但以本研究先前區外栽植，檫櫟可於奮起湖與阿里山生存多年，但其生長緩慢。

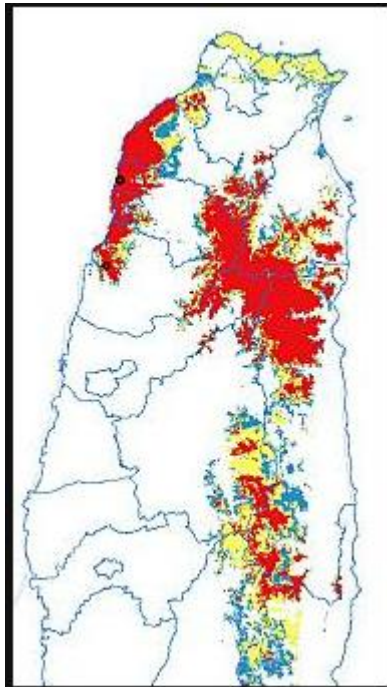


圖 4.12 檫櫟可生存地點預測圖。

### 3.5 欖仁溪樣區小苗監測

由於小苗監測上物種組成變化不大，因此本次直接以小苗存活曲線說明。欖仁溪樣區的小苗在經過12個月後有61%的存活率，而在36個月後則有41.6%的存活率，在第75個月的總存活長度中，尚有31.5%的小苗存活。由長期動態的分布來看，本研究的每平方公尺內的新增率與死亡率並無太大的變化與分布，所有小苗皆呈現穩定的生長（圖4.13A）。與其他研究相比，福山森林動態樣區的小苗存活率在第3年後則低於5%，且其小苗動態每隔兩年就有大量新增與大量死亡（Chang-Yang et al. 2013）；另外Lin et al.（2016）在墾丁動態樣區的研究中也顯示小苗的存活在4年之後，小苗的存活率接近0%。整體來說，南仁山小苗樣區相較於其他的動態樣區，其存活率高，且在6年後尚有30%以上的存活率（圖4.13B）。

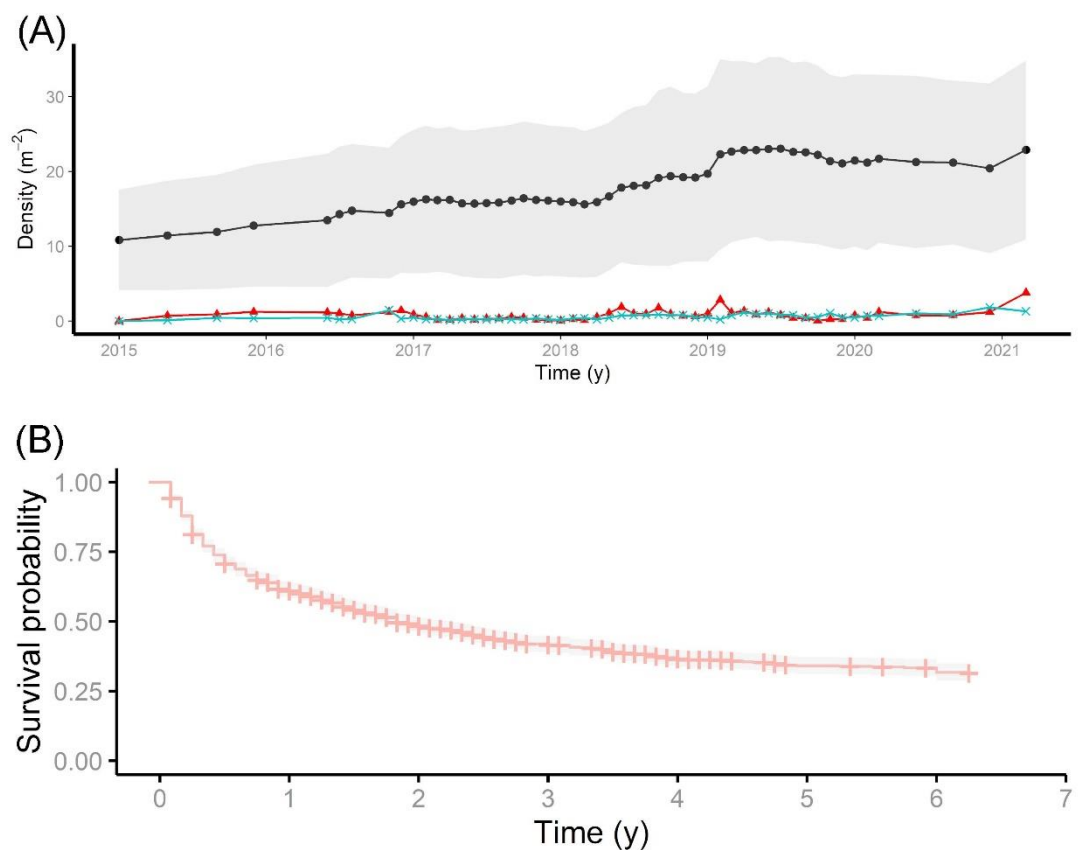


圖 4.13 南仁山攬仁溪樣區小苗的存活動態變化 (A) 各調查時間的小苗密度與新增死亡數量變化圖；(B) 小苗存活曲線。

在不同的生育地中，迎風型生育地內的小苗密度為三個生育地內最高，其次為中間型，背風型生育地之小苗密度最低（圖4.14A）。依照植物種類屬於迎風分布型或中間分布型與背風分布型的物種小苗在存活率表現上，中間分佈型的物種的存活率高於迎風與背風分佈型，並以背風型物種的存活率為最低（圖4.14B）。從影響小苗死亡風險的結果中顯示，中間分佈型的物種在暴露度指數、樹冠開闊度以及坡度越低且不同種的小苗密度越高，其死亡風險就越低（存活率高）；迎風分佈型的物種則在越低的海拔與不同種成樹生物量以及越大的凹凸度、同種與布同種小苗密度下，其死亡風險越低（存活率高）；而在存活率最低的背風型物種，主要受在東北季風暴露度越高、同種成樹生物量越大且樹冠開闊度越低、不同種小苗密度越低的情況下有較高的死亡風險（存活率低）。

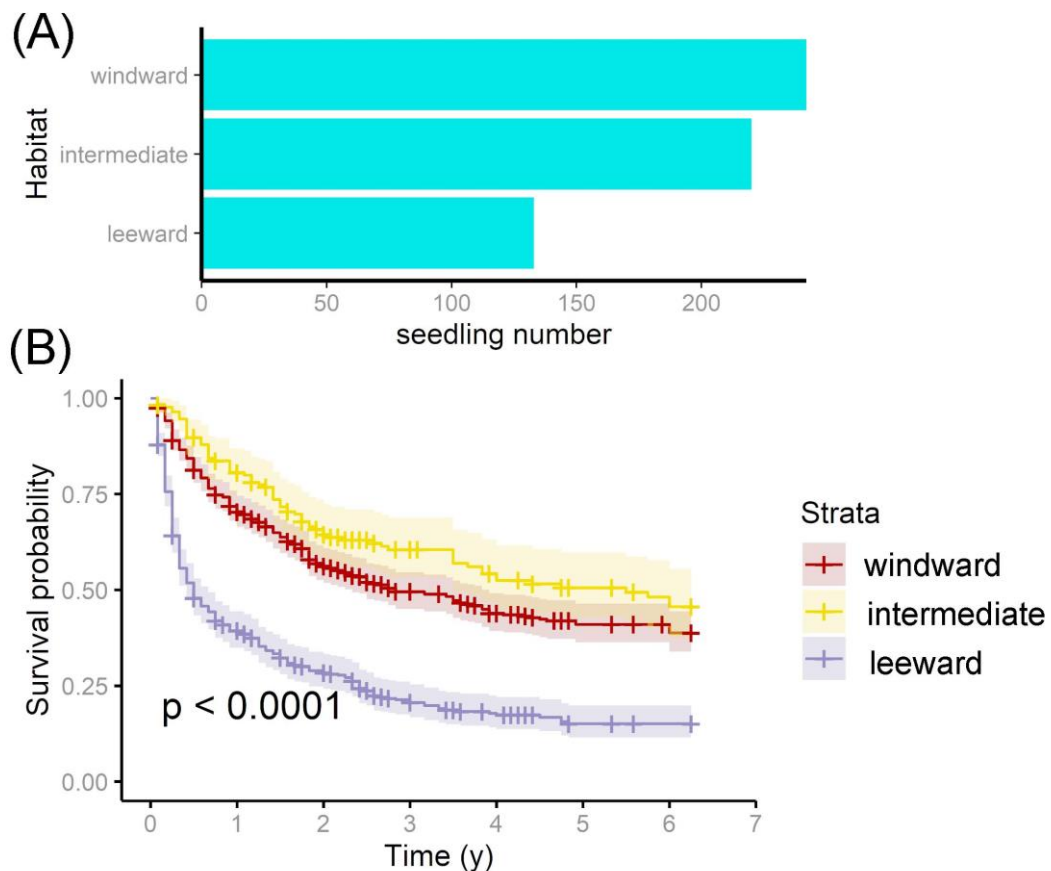


圖 4.14 三種不同生育地類型的小苗數量與其存活率 (A) 三個生育地內的小苗數量；(B) 迎風分佈型 (紅色)、中間分佈型 (黃色) 以及背風分佈型 (藍色) 的存活曲線。

而影響小苗的存活與死亡可能會受到養分資源的差異、耐陰性程度差異與干擾的發生頻度 (Moer 1997)。近年來颱風影響頻度減少，南仁山欖仁溪樣區所受的干擾頻度減低，從欖仁溪小苗樣區自 2015 年 3 月設立以來，只有 2016 年 9 月的莫蘭蒂強烈颱風影響本樣區，且影響甚劇。由本團隊的魚眼資料來看，在受颱風影響後 6 個月內的樹冠開闊度達最高，後則漸漸鬱閉。本研究背風型物種的死亡風險受到開闊度影響，且開闊度越低，死亡風險則越高 (圖 4.15C)。此也顯示，在颱風頻度減少的情況下，會導致背風型物種的死亡風險變高 (圖 4.15B)。而另一方面，樹冠開闊度減低的森林，卻讓中間分佈型物種的死亡風險降低，且這一型的物種在平緩且少受東北季風影響的區域，可以有最高的存活率 (死亡風險越小)。

然而，在迎風分佈型的物種則主要受到生物因子的影響，且為密度與資源競爭的雙重影響 (圖 4.15A)。當周圍的小苗密度越高，則死亡風險就越低；但另一方面則發現，周圍成樹的生物量越大，死亡風險就越高。目前由成樹的長期複查的動態結果來看，在迎風坡的小樹 (DBH < 17.2cm) 密度持續下降，但大樹 (DBH ≥ 17.2cm) 的生物量則隨時間上升。此現象顯示，若未來迎風坡生物地的周圍大樹生物量持續上升，則會影響到迎風型物種的存活。而在三種不同分佈型的物種中，不同種的小苗密度皆影響其死亡風險，且當不同種小苗密度越高，其死亡風險就越低，代表越多小苗，其存活率越好。此也表示，在密度高的南仁山欖仁溪樣區 (相較於全球其他的森林動態樣區，(Lutz et al. 2018))，植株的密度對於森林的更新，有促進的作用。

整體而言，南仁山欖仁溪樣區的小苗除了受到密度影響以外，也受到了干擾的影響，導致背風型物種的存活率低於中間分佈型的物種。



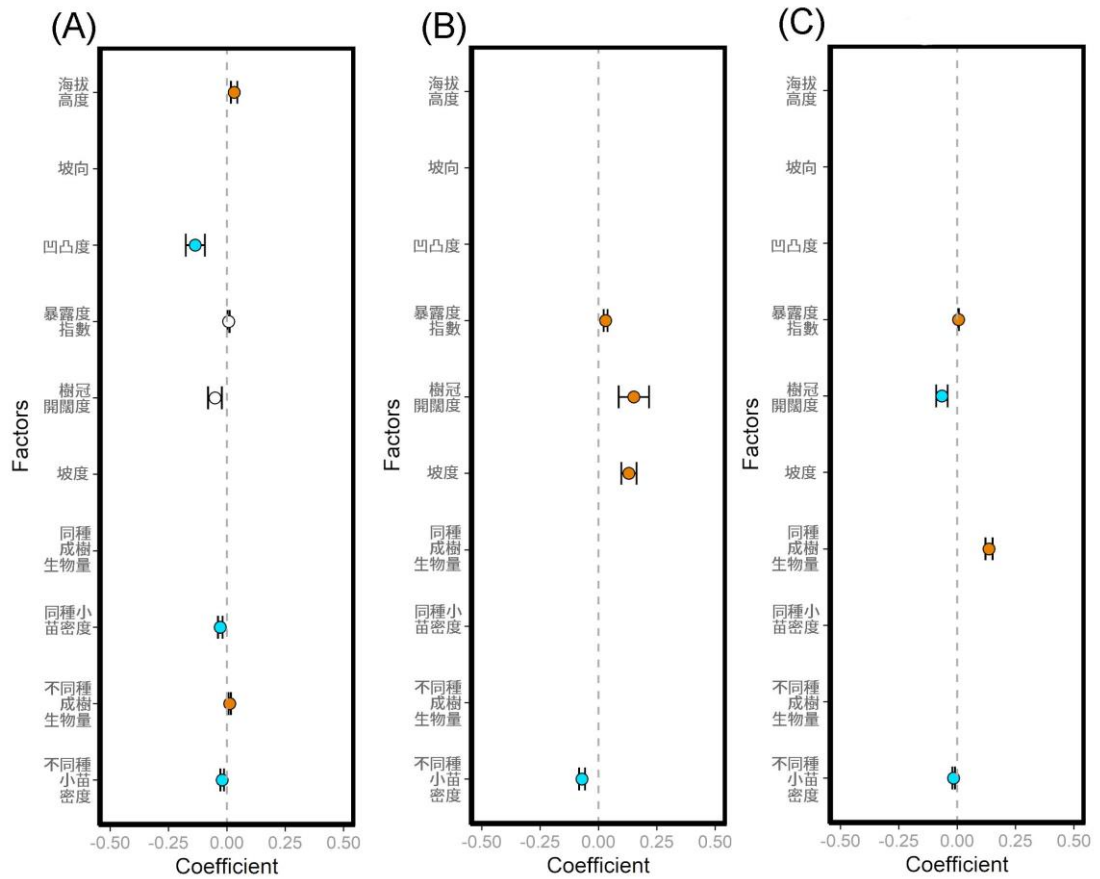


圖 4.15 影響不同分佈型物種小苗死亡風險之因子，係數(coefficient) 為正代表死亡風險與因子呈正相關（有顯著為紅色），反之則為負相關（有顯著為藍色），無顏色則為模型挑遠有影響但無顯著之因子。(A) 迎風分佈型物種；(B) 中間分佈型物種；(C) 背風分佈型物種。

本研究在75個月的（6年半）調查中，平均每個月記錄到561株小苗，共計71種小苗物種，以九節木、紅花八角、江某與小葉赤楠為最優勢。小苗與成樹組成的相似性結果中呈現距離小苗越近的成樹組成，相似性越高；而在距離10 m後則維持在28%-30%的相似性。從欖仁溪樣區的成樹組成中發現，紅花八角、九節木、革葉冬青與野牡丹的豐富度為最高，與小樹的優勢物種組成有所差異（圖4.16B、C）。

從Chao et al. (2005) 的相似性示範資料中，也呈現出小苗樣方與小樹組成只有20-50%的相似性（圖4.16A）；而Wang et al. (2020) 在Changbai Mountain 當中也顯示物種的功能性狀差異會導致個性狀的小苗組成與成樹組成的相似性不同。例如本研究中的江某因為大量種子與其發芽率高，導致在江某在小苗階段大量發生，但隨著密度過高與資源競爭，存活率低，導致江某在大樹階段呈現零星分布；而小葉赤楠也在調查中呈現出存活率之現象。

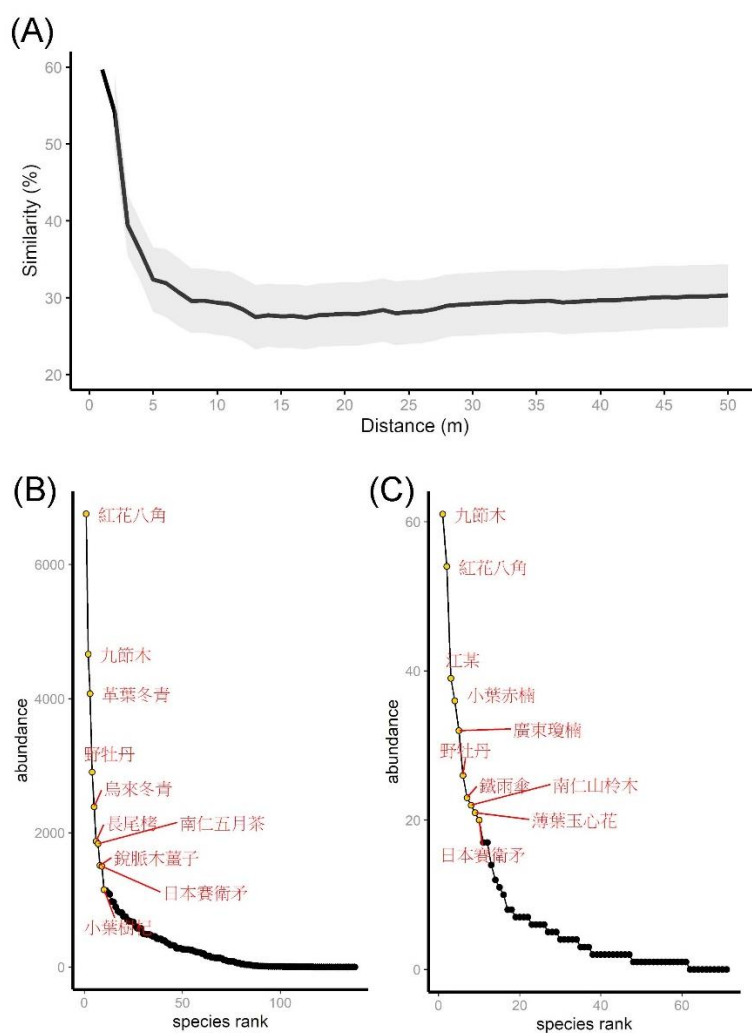


圖 4.16 苗與成樹組成相似性 (A) 小苗與成樹組成在不同距離尺度下的相似性；(B) 小苗組成的物種豐富度曲線；(C) 成樹組成的物種豐富度曲線

### 3.6 南仁山樣帶小苗監測

南仁山樣帶小苗從 1995 年 1 月開始設立樣區並進行每月調查，直至 1997 年 3 月共進行 27 次調查，共計調查到 7,567 株小苗，分屬於 32 科 52 屬 79 種，其中有 23 種小苗為臺灣特有種。在各物種小苗數量上，大戟科的茄苳為調查到數量最多的物種，數量高達 1,003 株，佔所有調查植株數量的 17.39%，其次為豬腳楠 763 株（13.23%）、鵝掌柴 702 株（12.17%）、與銳脈木薑子 551 株（9.55%），這四種植物小苗都為大量新增後大量死亡物種；有 66 種物種之小苗數量皆少於 100 株，其中有 43 種的物種之植株數量不超過 10 株。

本研究從 2015 年 2 月至 2021 年 12 月共進行 24 次調查，共計調查到 2,311 株小苗，同樣以茄苳為調查到最多數量的物種，共計有 278 株（12.17%），都是屬於僅有子葉的小苗，其存活期較短，目前尚未有茄苳長出初生葉並順利成長，而鵝掌柴總計調查到 272 株（11.90%）、交力坪鐵色調查到 227 株（12.17%）、與香楠 173 株（7.57%）。這四種小苗株數優勢物種當中，前兩種小苗存活期短，後兩者則有少數有觀察到由子葉小苗至發出初生葉。樣帶小苗調查到臺灣特有種共計有 20 種，目前也持續監測中。

### 3.7 出風山小苗監測

出風山自 2017 年起至 2021 年 12 月共進行 34 次木本小苗調查，共計有 19 科 31 屬 42 種 593 株，其小苗存活率高。在小苗植株上量上，以鵝掌柴 275 株（48.85%）最多，其中 232 株是僅有子葉的小苗植株，但是其存活率相對也低很多。雨傘仔 56 株（9.95%）則次之，而臺灣八角有 32 株（5.68%）為目前調查到植株數量第三名的物種，臺灣蕘花、九節木和小葉木犀分別調查 28 株、21 株和 20 株。有 8 種小苗僅調查到 1 株，如石苓舅、狗骨仔、長尾尖葉櫨、茄冬、淡綠葉衛矛、港口木荷、豬母乳、鐵冬青。而全部小苗中有 13 種的

小苗為臺灣特有種（臺灣八角、臺灣石櫟、臺灣蕘花、希蘭灰木、雨傘仔、南仁山柃木、南仁五月茶、恒春楨楠、香楠、高士佛赤楠、高士佛紫金牛、淡綠葉衛矛、港口木荷）。根據 2017 年臺灣維管束植物紅皮書名錄索引中，以臺灣石櫟為出風山所有小苗中受風險最高的物種，目前被列為極危等級（CR），目前僅調查到 2 株小苗，目前都還存活著，分別從 84 cm 長高至 145 cm 和 15 cm 長高至 20 cm，這兩株小苗也是所有小苗調查中唯一發現的；而希蘭灰木（2 株）從 2017 年 1 月初次調查即存在，目前也都尚存活，從當初 140 cm 長高至 158 cm，另一株則於 2020 年 1 月底發現，但是僅存活 3 個月就死亡。

### 3.8 欖仁溪樣區整體樣區的死亡植株分布分析

依據不同調查期間檢測密度制約對欖仁溪樣區內整體植株生存影響是否有所變化，結果顯示，歷次調查期間植株死亡皆有受到負密度制約的影響，並且隨著時間尺度的增加，負密度制約對樣區內植株造成死亡的影響有逐漸增強的現象（圖 4.17）。然而根據過往研究呈現當植群發展到後期時，密度制約應不再是造成植株死亡著主要因子（Kenkel, 1988；Das et al., 2011；Larson et al., 2015）。因此我們進一步探討為何本研究樣區的密度制約有逐漸增強的趨勢，其主要發生在何種類型的植株上？

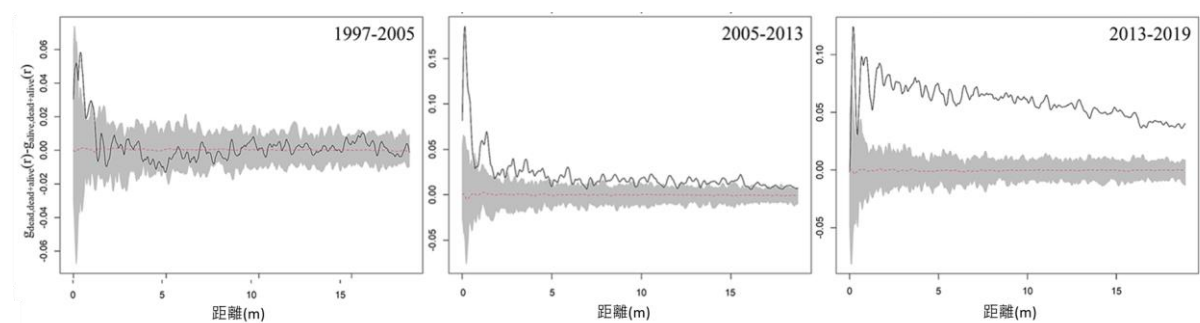


圖 4.17 基於隨機標記假設模型檢測密度制約對各時期的所有死亡植株造成之影響。實線為  $g_{\text{dead,dead+alive}}(r) - g_{\text{alive,dead+alive}}(r)$  分析的檢測值，信賴區間 ( $\alpha=0.02$ ) 為依據隨機標記假設模型進行隨機模擬 99 次並進行成對相關函數分析計算得知，

當實線高於信賴區間為正相關，表示死亡植株周圍的植株密度高於存活植株周圍的植株密度。

首先，本研究將整體植株區分成大小樹兩大類，檢測兩種類群在各時期受到密度制約的影響是否有所差異。整體而言，大樹之間受密度制約的影響較小，而小樹之間皆有受到負密度制約的影響，並且於2013年至2019年期間的死亡植株在各距離尺度下皆較存活植株周圍的植株密度高，死亡植株受到負密度制約的影響最大，並與整體死亡植株受密度制約的影響相比，可得知密度制約主要發生在整體小樹之間（圖4.18）。但為何密度制約對樣區內整體小樹生存的影響隨著時間尺度有逐漸增強的趨勢呢？參照前人研究探討可能原因為密度制約機制主要發生在小樹階段（Kenkel, 1988；Larson et al, 2015），或者受到干擾事件（如病蟲害、乾旱）的影響（Birch et al., 2019）。但上述仍未解釋到其隨著時間尺度增強的現象，則此可能代表樣區內植株可能處在一個植株間競爭壓力較高的環境中（Zhang and Wang, 2016）。此外，不同的物種因其生存策略或生育地環境不同，其受到的密度制約影響也可能有所差異（Szymt and Tarasiuk, 2018；Birch et al., 2019），因此，本研究進一步探討各物種分布型的小樹生存受密度制約的影響差異為何？又是何種類型的小樹主要受到負密度制約的影響？

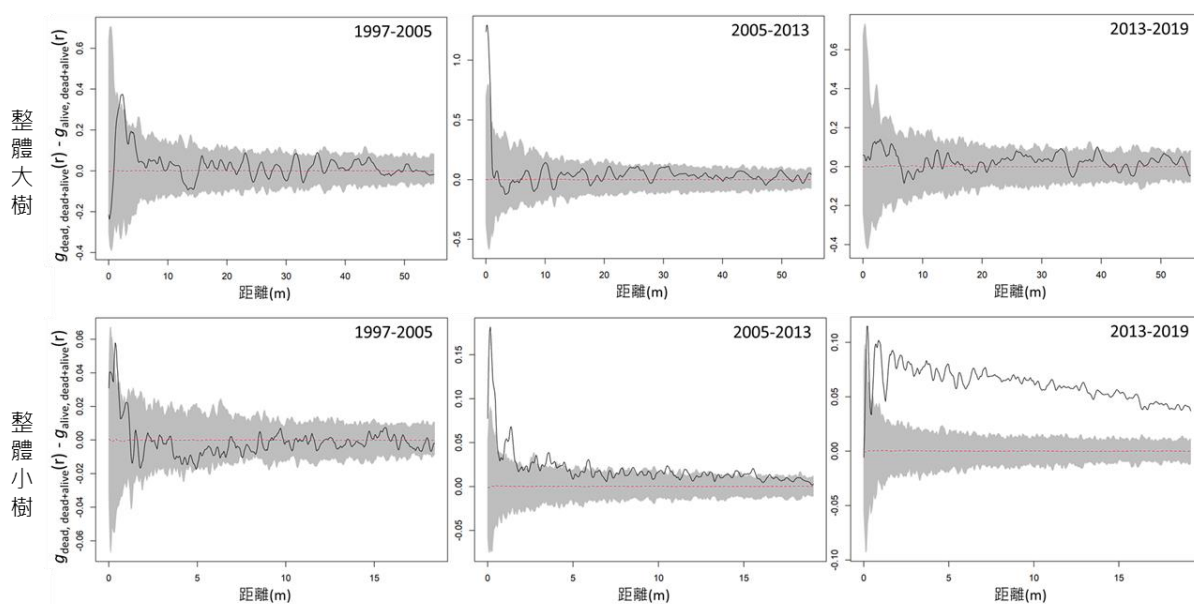


圖 4.18 基於隨機標記假設模型檢測密度制約對各時期整體大小樹之死亡植株造成的影響。實線為  $g_{dead,dead+alive}(r) - g_{alive,dead+alive}(r)$  分析的檢測值，信賴區間 ( $\alpha=0.002$ ) 為依據隨機標記假設模型進行隨機模擬 999 次並進行成對相關函數分析計算得知，當實線高於信賴區間為正相關，代表死亡植株較存活植株周圍的植株密度高。

統整各物種之小樹植株於歷次調查期間受到密度制約影響，結果顯示各物種小樹的死亡並非皆以負密度制約為主（表4.2），於2013年至2019年期間，物種之小樹受到負密度制約影響的比例僅有27%，顯示在整體小樹之植株死亡受負密度制約影響的現象主要發生在少部分物種，但亦有可能受到物種間小樹競爭的影響。

表4.2 歷次調查期間各物種之小樹植株受到密度制約影響的統整表。

密度制約 <sup>1</sup>	調查期間		
	1997-2005	2005-2013	2013-2019
正	27.6%	27.4%	36.0%
正,負	18.4%	25.0%	18.0%
負	26.4%	28.6%	27.0%
無	27.6%	19.0%	19.1%

<sup>1</sup>密度制約檢測結果分成4個類群：無代表未檢測到密度制約對該物種之影響，負代表該物種受到負密度制約的影響，正代表該物種受到正密度制約的影響，而正,負代表該物種同時受到負與正密度制約的影響。

依據各物種分布型分群的結果顯示，在迎風型物種的小樹方面，於1997年至2005年有46%物種未檢測出密度制約的影響，但受密度制約影響的物種比例逐漸增加，於2013年至2019年期間則轉變成46%的物種受到負密度制約的影響（表4.3）。另一方面，背風型物種的小樹於三個調查期間皆主要受到正密度制約的影響，並於2013年至2019年

期間增長為66%的物種受到正密度制約的影響（表4.3）。

表4.3 歷次調查期間依據各物種分布型分群之各物種小樹受到密度制約影響的統整表。

物種分布型 (物種數)	調查期間	密度制約 <sup>1</sup> (% (物種數))			
		正	正, 負	負	無
迎風型 (26)	1997-2005	0.11 (3)	0.07 (2)	0.34 (9)	0.46 (12)
	2005-2013	0.23 (6)	0.15 (4)	0.26 (7)	0.34 (9)
	2013-2019	0.11 (3)	0.11 (3)	0.46 (12)	0.30 (8)
中間型 (16)	1997-2005	0.25 (4)	0.18 (3)	0.31 (5)	0.25 (4)
	2005-2013	0.25 (4)	0.31 (5)	0.25 (4)	0.12 (2)
	2013-2019	0.31 (5)	0.12 (2)	0.31 (5)	0.25 (4)
背風型 (23)	1997-2005	0.33 (7)	0.19 (4)	0.23 (5)	0.23 (5)
	2005-2013	0.42 (9)	0.23 (5)	0.28 (6)	0.04 (1)
	2013-2019	0.66 (14)	0.19 (4)	0.19 (4)	0.04 (1)
廣泛分布型 (12)	1997-2005	0.41 (5)	0.08 (1)	0.33 (4)	0.16 (2)
	2005-2013	0.08 (1)	0.25 (3)	0.41 (5)	0.25 (3)
	2013-2019	0.25 (3)	0.25 (3)	0.16 (2)	0.33 (4)

<sup>1</sup> 密度制約檢測結果分成4個類群：無代表未檢測到密度制約對該物種之影響，負代表該物種受到負密度制約的影響，正代表該物種受到正密度制約的影響，而正,負代表該物種同時受到負與正密度制約的影響。

### 3.9 臺灣石櫟之培育與未來植栽討論

本團隊於今年9月2日至屏東處進行本計畫之討論。由於臺灣石櫟培育過程遭受許多困難，且培植不易，因此苗木直至今年才會送到屏東處，目前在苗圃內狀況良好。另外本團隊也於9月底會同屏東林區管理處恆春工作站進行臺灣石櫟探查，亦在出風山往出風鼻方向持續發現些許臺灣石櫟植株，但實際上植株數量仍需再次確認。未來可參照榲櫟模式，進行每一植株編號與持續監測其生長與健康度狀況，以避免此臺灣特稀有物種消失。目前依照學會團隊模式，不論何種情境，臺灣石櫟皆會朝向棲地破碎化而殘存於各個山頭上，因此持續監測其族群變化並擬定策略是重要的。本團隊先前已與墾丁國家公園管理處及屏東林區管理處討論於生態保護區回收之檳榔園或其他回收地成立南仁山特稀有植物園區，將來可為南仁山區物種保育以及民眾教育上之重點區域。

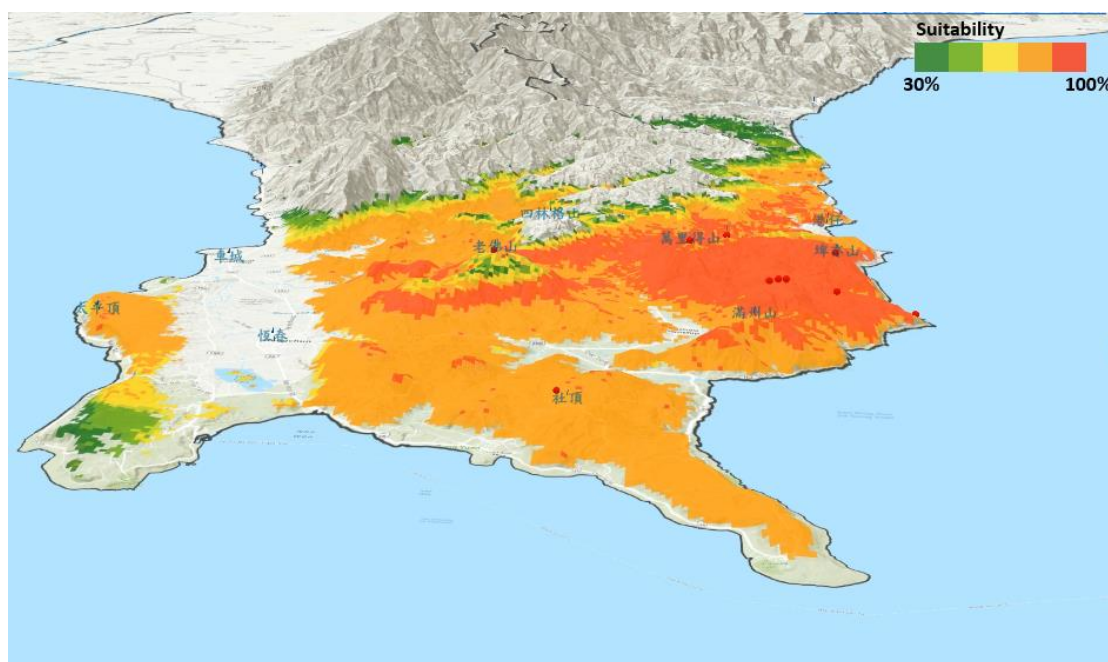


圖 4.19 模式預測臺灣石櫟未來殘存地點。

### 3.10 臺灣冷杉樣區實際森林動態

合歡山冷杉林森林動態樣區總面積為6 ha，包含約2 ha的箭竹高山草原與4 ha的冷杉森林，目前共調查了0.66 ha的冷杉森林樣區，共



計516筆資料（包含分支資料筆數），11種物種，總計為408 ha<sup>-1</sup>株，胸高斷面積為68.5 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>。在森林動態部分，植株密度從原本2008年的490株 ha<sup>-1</sup>，減少為408株 ha<sup>-1</sup>。胸高斷面積則從原本2008年的80.6m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>減少為68.5m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>，存活的胸徑生長量為6.96 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>，死亡的胸徑生長量為19.2 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>，新增的胸徑生長量則為0.028 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>。

因此目前初步結果顯示，合歡山樣區大樹死亡較多，而新增植株則相當少。當然調查期間並未發現有如德國森林的蟲害，但是森林內隨處可見多量的水鹿排遺，須注意是否因鹿科動物族群大量增加而導致此森林更新不易。另外森林內的玉山箭竹在這次調查也大量增加，是否也對此高海拔森林造成影響則待研究完成。

學會團隊研究顯示冷杉-鐵杉上部山地針葉林中，溫度因子佔有很高的重要性，而在對未來預測中，在最極端的情況下，至2090年其適生面積可能僅剩下25.90%，即使平均情況下，也僅存半數的適生面積。搭配本團隊今年所執行的研究顯示，冷杉林樣區中死亡植株遠多於新增植株，雖可能有鹿科動物或是高山箭竹的影響，但以動態來看的確是屬於衰退的狀態，因此必須多加注意。

#### 四、績效指標與期中評核標準達成情形

##### (一) 績效指標：

	細項指標	預估量化值	實際達成數	說明
學術著作發表	國內研討會論文	2	2	古鎮嘉、廖捷妤、沈玟伶、謝銓雯、謝蓓萱、趙偉村* (2021) 東北季風下南仁山欖仁溪樣區木本植物小苗的短期生存機制。110年森林資源永續發展研討會(國內, 森林生態組口頭發表第一名) 沈玟伶、李曜玟、古鎮嘉、趙偉村* (2021) 探討密度制約對欖仁溪樣區樹之木死亡空間格局的影響。110年森林資源永續發展研討會(國內, 森林生態組口頭發表佳作)
	國內期刊論文	1	0	趙偉村、林奐宇、廖捷妤、廖宇賡(2021) 檳櫟危機與復育策略。林業專刊 Ku, C.-C., G.-Z. M. Song, K.-J. Chao, W.-C. Chao (2021) Species-habitat associations of tree species under the northeast monsoon wind-affected tropical forest at Lanjenchi Forest Dynamics Plot, Taiwan. <i>Taiwania</i> . 66(1):39-47. (SCI) Davies, S. J., I. Abiem, K. A. Salim, and et al. (2021) . ForestGEO: Understanding forest diversity and dynamics through a global observatory network. <i>Biological Conservation</i> .253:1-24. (SCI) Zhong, Y., C. Chu, J. A. Myers, and et al (2021) Arbuscular mycorrhizal trees influence the latitudinal beta-diversity gradient

				of tree communities in forests worldwide. Nature Communications
	研究報告	1	1	產出農委會科技計畫成果報告一本。

(二) 期末評核標準：

評核標準	達成情形
完成南仁山小苗調查與分析，並完成南仁山樹木死亡空間分析	小苗調查已經完成，並也完成死亡空間分析
完成新竹槲櫟監測	已完成全年監測，除了大樹持續減少，也將會受到工程干擾苗木送至新湖苗圃。另也與相關團隊積極配合討論工程規劃，以避免槲櫟消失於原生育地。
使用學會團隊發展之圖資，與屏東處進行未來栽植討論	已於9月至屏東處進行報告與討論，並於9月底進行臺灣石櫟採種與新族群勘查。

## 五、期中審查意見回應

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	(1) 在完成南仁山小苗前兩季調查與分析，並初步完成南仁山樹木死亡空間分析部分，資料呈現與論述，較期中改善。	感謝委員肯定，期末報告我們會再深入討論小苗與木本植物相關，以為演替或更新探討
	(2) 期中評核無異議通過。	
曾彥學委員	(1) 建議將南庄苗圃 675 棵苗木與新湖苗圃 258 棵苗木先置苗圃培育至苗高 100 公分後再出栽。	將委員建議提供新竹林區管理處。依目前研究結果，的確到大苗再經由良好的斷根處理，可使植株再出栽地點生長更快速。
	(2) 已達期中評核標準，期中評核無異議通過。	
劉和義委員	(1) 有關南仁山小苗前兩季調查與分析與南仁山樹木死亡空間分析之調查與分析的結果良好，但與氣候變遷的關係需要有一明確的述說。	感謝委員建議，會在期末報告時呈現。
	(2) 新竹櫛櫟的監測良好，宜建立未來監測工作的 SOP。	感謝委員肯定，後續與新竹林區管理處進行此項商討。
	(3) 櫛櫟未來分布模式的成果不錯，但其用處為何?又疫情如何影響物種繁殖與栽植技術的執行，宜有陳述。	此為團隊疏忽，會再補充於期末報告。

審查委員	審查意見	回復說明
	<p>(4) 南仁山部分基本上為森林動態變化的觀察與分析，很難與氣候變遷的影響直接相連，期末時宜作關聯性的敘述與討論。</p>	<p>感謝委員的建議，此項研究與氣候變遷探討的確較難，但本團隊期末盡量達成。</p>
	<p>(5) 報告中指出短期的小苗調查很難解釋森林的組成、結構與動態，因此在氣候變遷的議題下進行此研究的意義為何？</p>	<p>本團隊期末報告有提到小苗更新對大樹組成的解釋能力，團隊這邊盡量於期末達成。</p>
	<p>(6) 榭櫟在苗栗的族群情況及如何監測，應更一步敘述。</p>	<p>感謝委員建議。苗栗因屬於私有地，目前主要以定期空拍監測。</p>
	<p>(7) 台灣的榭櫟，是冰河子遺？遷移的前鋒部隊？或者如構樹在南島般的由人帶入並野生化？現今的資料無法支持任一說法。因此以全世界榭櫟分布之氣候條件進行台灣適存地點分析，在不了解所有族群是否有遺傳分化的情形下，沒有實際的保育意義；報告中顯示由新竹榭櫟族群移植於奮起湖與阿里山的生長不良，但奮起湖、阿里山與其他原生地有相同的環境，間接地顯示台灣適存地點分析需要進一步敘述其用意。</p>	<p>本團隊先前有提供資料予中國研究榭櫟之團隊，也期望由其結果了解榭櫟的來由，但該團隊尚未見發表。另外適存地點分析團隊仍持續依照野外資料更新模式。</p>
	<p>(8) 期中評核無異議通過。</p>	

## 六、參考文獻

- 朱吟晨、林士堯、朱容練、劉俊志、陳永明 (2015) 2015年乾旱事件分析。國家災害防救科技中心。
- 林奐宇 (2002) 臺灣北部樂佩山區暖溫帶雨林森林組成結構及植物樹種空間分布型分析。國立臺灣大學植物學研究所碩士論文，133頁。
- 陳子英、謝長富、趙偉村、徐堉峰 (2015) 因應氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究。行政院農業委員會林務局 104年度科技計畫研究報告。
- 陳子英、謝長富、趙偉村、徐堉峰 (2018) 因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究。行政院農業委員會林務局 107年度科技計畫研究報告。
- 趙偉村、宋國彰、趙國容 (2019) 南仁山欖仁溪森林動態樣區複查計畫。行政院農業委員會林務局委託研究計畫 tfbc-1070204，129頁。
- 賴宜鈴 (1996) 南仁山亞熱帶雨林小苗動態及地被層植物組成之研究。臺灣大學植物學系研究所碩士論文，135頁。
- 廖捷妤 (2019) 南仁山樣帶木本植物的小苗動態與分布變化。嘉義大學森林暨自然資源研究所碩士論文，50頁。
- 謝長富、陳尊賢、孫義方、謝宗欣、鄭育斌、王國雄、蘇夢淮、江斐瑜 (1992) 墾丁國家公園亞熱帶雨林永久樣區之調查。墾丁國家公園管理處保育研究報告第85號，269頁。
- Aakala, T., S. Fraver, B.J. Palik, and A.W. D'Amato (2012) Spatially random mortality in old-growth red pine forests of northern Minnesota. *Canadian Journal of Forest Research* 42:899-907.

- Aiba, S., K. Kitayama and M. Takyu (2004) Habitat associations with topography and canopy of tree species in a tropical montane forest on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology* 174:147-161.
- Allen, M.S., V. Thapa, J.R. Arevalo, and M.W. Palmer (2012) Windstorm damage and forest recovery: accelerated succession, stand structure, and spatial pattern over 25 years in two Minnesota forests. *Plant Ecology* 213:1833-1842.
- Angulo, E., G.M. Luque, S.D. Gregory, J.W. Wenzel, C. Bessa-Gomes, L. Berec, and F. Courchamp (2018) Review: allee effects in social species. *Journal of Animal Ecology* 87:47-58.
- Astrup, R., K.D. Coates and E. Hall (2008) Recruitment limitation in forests: lessons from an unprecedented mountain pine beetle epidemic. *Forest Ecology and Management* 256 (10): 1743-1750.
- Baddeley, A. and R. Turner (2005) Spatstat: an R package for analyzing spatial point patterns. *Journal of Statistical Software* 12:1-42.
- Baddeley, A., R. Turner, J. Mateu, and A. Bevan (2013) Hybrids of gibbs point process models and their implementation. *Journal of Statistical Software* 55:1-43.
- Bartoń, K. (2020) MuMIn: multi-model inference. R package. <https://cran.r-project.org/web/packages/MuMIn/MuMIn.pdf>
- Berec, L., E. Angulo, and F. Courchamp (2007) Multiple allee effects and population management. *Trends in Ecology and Evolution* 22:185-191.
- Brown, A.H.D. and C.M. Hardner (2000) Sampling the gene pools of forest trees for ex situ conservation. In: Young A, Boyle TJB, Boshier D (eds) *Forest Conservation Genetics: Principles and Practice*. CABI Publishing, Wallingford, pp 185-196.

- Caspersen, J.P. and M. Saprunoff (2005) Seedling recruitment in a northern temperate forest: the relative importance of supply and establishment limitation. *Canadian Journal of Forest Research* 35(4): 978-989.
- Catherine, M.M., S.P. Hamburg, T.-C. Lin, F.-W. Horng, H.-B. King, and Y.-J. Hsia (1998) Typhoon Disturbance and Stand-Level Damage Patterns at a Subtropical Forest in Taiwan. *Biotropica* 30:238-250.
- Chang-Yang, C.-H., C.-L. Lu, I-F. Sun and C.-F. Hsieh (2013a) Flowering and fruiting patterns in a subtropical rain forest, Taiwan. *Biotropica* 45(2): 165-174.
- Chang-Yang, C.-H., Lu, C.-L., Sun, I-F. and C.-F. Hsieh. (2013b) Long-term seedling dynamics of tree species in a subtropical rain forest, Taiwan. *Taiwania* 58: 35-43.
- Chao, A., R. L. Chazdon, R. K. Colwell, and T.J. Shen (2005) A new statistical approach for assessing similarity of species composition with incidence and abundance data. *Ecology letters* 8: 148-159.
- Chao, W.-C., G.-Z. M. Song, K.-J. Chao, C.-C. Liao, S.-W. Fan, S.-H. Wu, T.-H. Hsieh, I.-F. Sun, Y.-L. Kuo and C.-F. Hsieh (2010) Lowland rainforests in southern Taiwan and Lanyu, at the northern border of Paleotropics and under the influence of monsoon wind. *Plant Ecology* 210:1-17.
- Chao, W.-C., K.-J. Chao, G.-Z. M. Song, C.-F. Hsieh (2007a) Species composition and structure of the lowland subtropical rainforest at Lanjenchi, southern Taiwan. *Taiwania* 52:253-269.
- Chao, W.-C., S.-H. Wu, H.-Y. Lin, C.-F. Hsieh and K.-J. Chao (2007b) Distribution patterns of tree species in the Lanjenchi lowland rain forest. *Taiwania*. 52:343-351.
- Chapin III, F.S., J.B. McGraw, and G.R. Shaver (1989) Competition causes



- regular spacing of alder in Alaskan shrub tundra. *Oecologia* 79:412-416.
- Chazdon, R.L. (2008) Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science* 320:1458-1460.
- Chen, F., L. Liu, F. Chen and G. Jia (2012) The ecological characteristics of seed germination and seedling establishment of *Manglietia patungensis*: implication for species Conservation. *American Journal of Plant Sciences* 3(10): 1455-1461.
- Chesson, P. (2000) Mechanisms of maintenance of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31:343-366.
- Clark, D.B. and D.A. Clark (1989) The role of physical damage in the seedling mortality regime of a neotropical rain forest. *Oikos*: 225-230.
- Colwell, R.K., G. Brehm, C.L. Cardelús, A.C. Gilman and J.T. Longino (2008) Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science* 322: 258-261.
- Condit, R., P.S. Ashton, P. Baker, S. Bunyavejchewin, S. Gunatilleke, N. Gunatilleke, S.P. Hubbell, R.B. Foster, A. Itoh, J.V. LaFrankie, H.S. Lee, E. Losos, N. Manokaran, R. Sukumar, and T. Yamakura (2000) Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science* 288:1414-1418.
- Condit, R., S.P. Hubbell and R.B. Foster (1995) Mortality rates of 205 Neotropical tree and shrub species and the impact of a severe drought. *Ecological Monographs* 65:419-439.
- Condit, R., S. P. Hubbell, and R. B. Foster. (1996) Assessing the response of plant functional types to climatic change in tropical forests. *Journal of Vegetation Science* 7(3): 405-416.

- Connell, J.H. (1971) On the role of natural enemies in preventing competitive exclusion in some marine animals and in rain forest trees. In P.J. Den Boer and G. Gradwell, eds. *Dynamics of Numbers in Populations*. Center for Agricultural Publication and Documentation, Wageningen. pp.298-312.
- Conner, K.R (1991) A historical comparison of resource-based theory and five schools of thought within industrial organization economics: do we have a new theory of the firm? *Journal of Management* 17:121-154.
- Cox, D.R. (1972) Regression models and life tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B* 34:187–220
- Dale, M.R.T. (1999) *Spatial Patterns Analysis of Plant Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge. 326pp.
- Das, A., J. Battles, N.L. Stephenson, and P.J. van Mantgem (2011) The contribution of competition to tree mortality in old-growth coniferous forests. *Forest Ecology and Management* 261:1203-1213.
- Diggle, P.J. (2003) *Statistical Analysis of Spatial Point Patterns*, 2nd ed. Edward Arnold, London. 159pp.
- Dillon, M.E., G. Wang and R.B. Huey (2010) Global metabolic impacts of recent climate warming. *Nature* 467:704-706.
- Feeley, K.J., J. Hurtado, S. Saatchi, M.R. Silman and D.B. Clark (2013) Compositional shifts in Costa Rican forests due to climate-driven species migrations. *Global Change Biology* 19:3472-3480.
- Feeley, K.J., M.R. Silman, M.B. Bush, W. Farfan, K.G. Cabrera, Y. Malhi, P. Meir, N.S. Revilla, M.N.R. Quisiyupanqui and S. Saatchi (2011) Upslope migration of Andean trees. *Journal of Biogeography* 38:783-791.

- Franklin, J.F., H.H. Shugart, and M.E. Harmon (1987) Tree death as an ecological process. *Bioscience* 37:550-556.
- Getis, A. (2008) A history of the concept of spatial autocorrelation: a geographer's perspective. *Geographical Analysis* 40:297-309.
- Gonzalez, P. (2001) Desertification and a shift of forest species in the West African Sahel. *Climate Research* 17: 217-228.
- Goreaud, F. and R. Pélissier (2003) Avoiding misinterpretation of biotic interactions with the intertype  $K_{12}$ -function: population independence vs. random labelling hypotheses. *Journal of Vegetation Science* 14: 681-692.
- Guerrant, E.O., K. Havens and M. Maunder, editors. (2004) *Ex situ plant conservation: supporting species survival in the wild*. Washington, D.C.: Island Press
- Guerrant, E.O., K. Havens and P. Vitt (2013) Sampling for effective ex situ plant conservation. *International Journal of Plant Sciences* 175(1):11-20. doi: 10.1086/674131.
- Holzwarth, F., A. Kahl, J. Bauhus, and C. Wirth (2013) Many ways to die – partitioning tree mortality dynamics in a near-natural mixed deciduous forest. *Journal of Ecology* 101:220-230.
- Hubbell, S.P. (2001) *The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography* (mPB-32). Princeton University Press, Princeton. 375pp.
- IPCC. (2007) *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R. K and A. Reisinger (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 104 pp.

- IPCC, (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Janzen, D.H. (1970) Herbivores and the number of tree species in tropical forests. *The American Naturalist* 104:501-528.
- Johnson, D.J., R. Condit, S.P. Hubbell and L.S. Comita (2017) Abiotic niche partitioning and negative density dependence drive tree seedling survival in a tropical forest. *The Royal Society* 284.
- Kenkel, N.C. (1988) Pattern of self-thinning in jack pine: testing the random mortality hypothesis. *Ecology* 69:1017-1024.
- Kleinbaum, D.G. and M. Klein (2012) *Survival analysis: a self-learning text*. Springer New York. p. 55-240.
- Ku, C.-C., G.-Z.M. Song, K.-J. Chao, and W.-C. Chao. (2021) Species-habitat associations of tree species under the northeast monsoon wind-affected tropical forest at Lanjenchi Forest Dynamics Plot, Taiwan. *Taiwania* 66: 39-47.
- Larkin, D.J., S.K. Jacobi, A.L. Hipp and A.T. Kramer (2016) Keeping all the PIECES: Phylogenetically informed ex situ conservation of endangered species. *PLoS ONE* 11(6): e0156973.doi:10.1371/journal.pone.0156973.
- Larson, A.J., J.A. Lutz, D.C. Donato, J.A. Freund, M.E. Swanson, J. HilleRisLambers, D.G. Sprugel, and J.F. Franklin (2015) Spatial aspects of tree mortality strongly differ between young and old-

growth forests. *Ecology* 96:2855-2861.

Laurance, S.G.W., W.F. Laurance, H.E.M. Nascimento, A. Andrade, P.M. Fearnside, E.R.G. Rebello and R. Condit (2009) Long-term variation in Amazon forest dynamics. *Journal of Vegetation Science* 20:323-333.

Lin, Y.-C., L.S. Comita, D.J. Johnson, M R. Chen and S.H.Wu (2017) Biotic vs abiotic drivers of seedling persistence in a tropical karst forest. *Journal of vegetation science* 28(1): 206-217.

Lutz, J. A., T. J. Furniss, D. J. Johnson, S. J. Davies, D. Allen, A. Alonso, K. J. Anderson-Teixeira, A. Andrade, J. Baltzer, and et al. (2018) Global importance of large-diameter trees. *Global Ecology and Biogeography* 27: 849-864.

MacArthur, R. (1970) Species packing and competitive equilibrium for many species. *Theoretical Population Biology* 1:1-11.

MacArthur, R. and R. Levins (1967) The limiting similarity, convergence, and divergence of coexisting species. *American Naturalist* 101:377-385.

Manion, P.D. (1981) *Tree Disease Concepts*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 399pp.

Miao, N., H. Xu, T.C. Moermond, Y. Li, and S. Liu (2018) Density-dependent and distance-dependent effects in a 60-ha tropical mountain rain forest in the Jianfengling mountains, Hainan Island, China: spatial pattern analysis. *Forest Ecology and Management* 429:226-232.

Moeur, M. (1997) Spatial models of competition and gap dynamics in old-growth *Tsuga heterophylla*/*Thuja plicata* forests. *Forest Ecology and Management* 94: 175-186.

- Pacala, S. (1997) Dynamics of plant communities. In M. Crawley, ed. *Plant Ecology*. Blackwell, Oxford. pp.532-555.
- Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37: 637-669.
- Parmesan, C. (2007) Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global Change Biology* 13: 1860-1872.
- Parmesan, C., T.L. Root and M.R. Willig (2000) Impacts of extreme weather and climate on terrestrial biota. *Bulletin of the American Meteorological Society* 81: 443-450.
- Peters, H. (2003) Neighbour-regulated mortality: the influence of positive and negative density dependence on tree populations in species-rich forests. *Ecology* 6:757-765.
- Pocheville, A. (2015) The ecological niche: history and recent controversies. In T. Heams, P. Huneman, G. Lecointre, and M. Silberstein, eds. *Handbook of Evolutionary Thinking in the Sciences*. Springer-Verlag, Dordrecht. pp.546-586.
- Pott, M.D. (2003) Drought in a Bornean everwet rain forest. *Journal of Ecology* 91: 467-474.
- R Core Team (2019) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Raventós, J., T. Wiegand, and M. De Luis (2010) Evidence for the spatial segregation hypothesis: a test with nine-year survivorship data in a Mediterranean shrubland. *Ecology* 91:2110-2120.

- Ripley, B.D.(1976) The second-order analysis of stationary point processes. *Journal of Applied Probability* 13:255-266.
- Ripley, B.D.(1977) Modelling Spatial Patterns. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)* 39:172-212.
- Ripley, B. D. (1981) *Spatial Statistics*. John Wiley and Sons, New York. 268pp.
- Shen, Y., L.S. Santiago, L. Ma, G.J. Lin, J.U. Lian, H.L. Cao, and W.H. Ye (2013) Forest dynamics of a subtropical monsoon forest in Dinghushan, China: recruitment, mortality and the space of community change. *Journal of Tropical Ecology* 29:131-145.
- Shoo, L.P., A.A. Hoffmann, S. Garnett, R.L. Pressey, Y.M. Williams, M. Taylor, L. Falconi, C.J. Yates, J.K. Scott, D. Alagador and S.E. Williams (2013) Making decisions to conserve species under climate change. *Climatic Change* 119: 239-246.
- Silver, E.J., S. Fraver, A.W. D'Amato, T. Aakala, and B.J. Palik (2013) Long-term mortality rates and spatial patterns in an old-growth *Pinus resinosa* forest. *Canadian Journal of Forest Research* 43:809-816.
- Stoyan, D. and H. Stoyan (1994) *Fractals, Random Shapes and Point Fields: Methods of Geometrical Statistics*. John Wiley and Sons, New York. 406pp.
- Szmyt, J. and S. Tarasiuk (2018) Species-specific spatial structure, species coexistence and mortality pattern in natural, uneven-aged Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)-dominated forest. *European Journal of Forest Research* 137:1-16.
- Therneau, T. M., P. M. Grambsch (2000) *Modeling survival data: extending the Cox model*. New York: Springer.

- Therneau, T. M., and T. Lumley. 2014. Package 'survival'. Survival analysis Published on CRAN 2: 119.
- Thomas, E., R. Jalonen, J. Loo, D. Boshier, L. Gallo, S. Cavers, S. Bordács, P. Smith and M. Bozzano (2014) Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. *Forest Ecology and Management* 333:66-75.
- Wang, Y., J. M. *La*-Montagne, F. Lin, Z. Yuan, J. Ye, X. Wang, and Z. Hao. (2020) Similarity between seed rain and neighbouring mature tree communities in an old-growth temperate forest. *Journal of Forestry Research* 31: 2435-2444.
- Wiegand, T. and K.A. Moloney (2004) Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos* 104:209-229.
- Wiegand, T. and K.A. Moloney (2014) *Handbook of Spatial Point Pattern Analysis in Ecology*. Chapman and Hall/CRC press, Boca Raton. 538pp.
- Yates, C.J. and L.M. Broadhurst (2002) Assessing limitations on population growth in two critically endangered *Acacia* taxa. *Biological Conservation* 108(1): 13-26.
- Yu, H., T. Wiegand, X. Yang, and L. Ci (2009) The impact of fire and density-dependent mortality on the spatial patterns of a pine forest in the Hulun Buir sandland, Inner Mongolia, China. *Forest Ecology and Management* 257:2098-2107.



## 第五章 以臺灣水青岡與槲櫟森林的昆蟲為例

### 摘要

依據我國目前氣候變遷相關計畫之研究成果，認為臺灣降水強度與頻率有逐漸增加趨勢，且趨於兩極化，即雨季越濕、乾季越乾。極端氣象事件之發生頻率與強度將與日俱增，使本島山區自然環境在氣候變遷與極端事件衝擊下益形脆弱。

植食性昆蟲的多樣性能夠反映森林生態系的優劣程度，在全球氣候變遷與極端氣候的威脅之下，進行冰河子遺物種的研究與相關保育措施的擬定顯得刻不容緩。本研究擬藉由進行臺灣水青岡樣區的昆蟲調查，建立各個樣區的昆蟲相資料，進而探討各個臺灣水青岡的現生地是否可能由於持續暖化造成的氣候異常或是人為開發的影響，導致物種滅絕或是棲地消失的危機。此外並針對新竹地區槲櫟植群的昆蟲進行研究與監測，建立物種資料，並監測境外復育區的植株蟲害情形。本計畫將持續於北部地區臺灣水青岡森林與新竹地區槲櫟植群進行昆蟲相調查和監測，增進對冰河子遺物種的了解，並研究、測試個別指標物種的監測方法，最後建立監測流程。以期針對此等珍貴子遺森林生態系進行更完善的生物多樣性保育。

本計畫已完成臺灣水青岡各樣區三年的採樣，以及槲櫟原生育地與復育區的調查，並針對所獲得的資料進行分析討論，最後根據調查結果提出相關建議。

**關鍵詞：**氣候變遷、臺灣水青岡、脆弱度、生物多樣性、棲地片段化、監測

## 一、前言

全球氣候變遷及氣候的極端化的衝擊除了生物多樣性的流失之外，最大的影響可能是稀有、特有及脆弱的生物族群及生態體系結構受到破壞（IPCC, 2007; Joyce *et al.*, 2014）。先進國家已展開許多研究，企圖瞭解物種、族群、動植物社會等對氣候變遷的敏感程度、脆弱度、及反應能力；此外，為了避免特稀有物種及其棲地的滅絕消失，亦已依據現有知識基礎及風險程度，針對評估屬氣候變遷影響之高風險物種及族群，擬定適宜之保育策略，並進行保育工作的實質推動（Staudinger *et al.*, 2012）。

我國目前氣候變遷相關計畫之研究成果，顯示極端氣象事件之發生頻率與強度將與日俱增，使本島山區自然環境在氣候變遷與極端事件衝擊下益形脆弱（許晃雄等，2011）。為減緩氣候變遷對於生物多樣性之衝擊，研究建議應根據暴露度、敏感度及調適能力，先依照物種或地區的狀況評估其脆弱度，再針對所產生的衝擊程度與脆弱度進行政策、社會或法令上的調適以減緩、降低或預先防止災害的產生，並永續的維持整個社會或生態系（童慶斌，2012）。

根據邱祈榮（2013）及林務局2013至2015年「因應氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」計畫成果，已初步瞭解全臺灣維管束植物在長期氣候變遷影響下可能的殘存分布地點，亦初步提出風險較高且應積極保育之物種與族群；小尺度方面，則已針對臺灣水青岡及南仁山植群等案例地點，對於生物社會以至物種層級可能遭受氣候變遷之衝擊與影響部分，完成初步的研究與評估。

生物的棲息環境除了受到大尺度氣候影響以外，由於局部地形或區域的微氣候條件差異，使得某些小尺度地點可能出現暖化趨勢較緩的現象，例如陡峻山區的谷地、冷涼的迎風地點或高原的冷袋（cold-air drainage）地形等，生物在這些地點有較高的機會躲避暖化威脅、降低滅絕風險（Skov and Svenning, 2004）。此現象與第四紀冰河時期古生物學研究提出之「生物避難所（refugia）」概念極為相近，因此，科學界將暖化架構下的潛在冷涼棲地稱為「間冰期避難所

(interglacial refugia) 」或「微避難所 (micro refugia) 」 (Rull, 2009, 2010; Stewart, *et al.*, 2010; Ashcroft *et al.*, 2012; Tzedakis *et al.*, 2013; Kimura *et al.*, 2014; Shimokawabe *et al.*, 2015) 。美國學者 Lee Hannah 及澳洲學者 Gunnar Keppel 分別於2014及2015年更進一步指出，暖化趨勢下的生物微避難所可再細分為「微避難所 (micro refugia) 」、「堅守點 (holdouts) 」及「遷徙跳石 (steppingstones) 」 。Hannah與Keppel認為，微避難所面積與規模相對為大，這些地點在暖化情境下仍可維持較為長久的冷涼微氣候，避難物種有機會在此處靜待下一次地球冷期循環的來臨。在保育機關 (構) 資源有限的條件下，堅守點與遷徙跳石地區應該受到更密切的保護，保護的作法則包含現生族群保護、協助就地繁衍、減低物種競爭或遷地保存等。

「因應氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」計畫係以「殘存地點」作為基礎概念，殘存族群多蝸居於較小地理尺度之局部棲地內，此一棲地環境多具備地形複雜、微環境偏於冷涼、生物競爭作用較不明顯等特性，類似於生物地理學所稱之「避難所」，亦與Kepple等人所提之研究概念有極高相似之處。

國際研究認為，保育策略必須依據已知生態系及物種所暴露之風險程度進行擬定，再根據應受保護對象之特性，選擇就地保護、廊道規劃、協助遷徙及遷地保育等不同對策 (Dawson *et al.*, 2011) 。2015年Keppel等人以澳洲塔斯馬尼亞 (Tasmania) 為案例，提出一系列研究架構，進行氣候變遷下微避難所之尺度與位置判定、避難容納量 (capacity) 分析，最終達成各避難所風險程度與保育優先次序評估之目標。該團隊認為，避難所之容納量由環境穩定度、微氣候異質性、棲地面積與可到達性等因子共同決定。

本計畫認為，Kepple及Hannah等人發展之研究架構與「殘存地點」概念頗為近似，且澳洲團隊已完成氣候變遷下的微避難所之案例研究，證實該架構具有實務應用性。臺灣相關研究方面，於「因應氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」計畫完成架構建立，推動適合臺灣氣候環境之本土性分析與評估，並且持續推動相關研究如「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」，經由各時期的氣候情境

變遷比較，找出可能遭受衝擊的生態系與地點，綜合不同氣候變遷情境的預測結果，針對易受氣候變遷衝擊的森林類型，找出未來可能的避難所或遷徙廊道位置，以及可行的保育措施建議。此外，本計畫依據「國家因應氣候變遷行動綱領」（行政院106年2月23日院臺環字第1060003687號函核定）持續發展對稀有的生態系與物種發展指標性的評估與監測方式，以小區域的現地資訊，充實氣候監測上模式的不足。

根據Michael and Elsa (2001) 指出許多當前的生物多樣性回復措施存有缺漏，對目標生物基礎資料的了解不夠完全，包括物種多樣性與物種分布情形、生態過程、以及目前環境對當地生態系的威脅程度及生物面對環境的衝擊調適方式等等。因此，針對高易危生態系進行監測與保育之研究，就先前研究篩選之臺灣水青岡指標物種與容易對臺灣水青岡、槲櫟造成危害的雜食性害蟲進行監測與研究，再針對這些目標生物的數量變化與偏好棲息的環境、雜食物種好發季節與危害程度等訊息詳加了解，以補充大尺度氣候變遷監測模式之不足。本細部計畫負責之部分為持續進行各個臺灣水青岡森林樣區、新竹槲櫟樣區及其境外復育區的昆蟲物種調查與監測，持續建立臺灣水青岡林與槲櫟森林的昆蟲物種清單，發展這些敏感區域的保育平台，將所獲得的成果整合到所轄之林區管理處；落實對高易危生態系及脆弱物種的保育與經營管理。

## 二、前人研究

臺灣水青岡分布於臺灣北部的山區，可視為多種動植物賴以生存的棲地島。銅山地區為面積最大的族群，其次為插天山自然保留區的北插天山向北延伸至逐鹿山、往南延伸至拉拉山等山頭；其他如鳥嘴山、大白山、蘭炭山的面積則較小，而西阿玉山僅有不到十株的殘存族群。Robert H. MacArthur 與 Edward O. Wilson 於 1967 年提出島嶼生物地理學的理論基礎之後，1974 年即有國外學者以鱗翅目昆蟲之專食性小蛾類與殼斗科寄主植物之分布關係進行島嶼生物地理學模型之相關研究 (Opler, 1974a,b; 1981)。而物種數與面積效應的模式

關係也有學者進一步檢視與探討 (Rey *et al.*, 1981)。這些關於島嶼生物地理學的研究論述可充做臺灣水青岡森林昆蟲研究之基礎。

林務局分別已於 2013 年及 2015 年完成「建立氣候變遷對生物多樣性風險與脆弱度評估模式及因應策略規劃」及「因應氣候變遷之生物多樣性脆弱度評估與風險管理研究」。在大尺度之維管束植物地理分布研究部分，提出牡丹至南仁山等 14 處可能為長期氣候變遷下的殘存地點，並依物種密度、地形及水系特徵等因子評估，認為其中 7 處殘存地點因植群缺乏向高海拔遷徙退卻空間，具有遭受暖化效應衝擊之疑慮，應為優先關注與保護的地點。該計畫於南仁山地區完成 21 年之森林複查資料分析，發現迎風型生育地在物種數量，植株密度以及生物多樣性逐漸減少，相對的在背風型生育地與溪谷樣區則無顯著之變化，顯示南仁山森林可能受東北季風影響而使得迎風型生育地產生變化；物種層級部分，則以欖仁溪樣區有較高比例之物種族群持續下降，並建議臺灣柯與希蘭灰木為亟待後續保育之物種。

臺灣水青岡森林片斷化研究以多時期航照圖進行地面覆蓋判識與現地的植群調查來探討氣候變化對水青岡森林的影響，同時與附近的氣候資料結合並初步建立災害風險性評估的架構，以危害與脆弱度的指標評估其風險性，像是不同海拔與不同大小族群的分布面積、覆蓋度的改變和物種組成差別、林內蛾蝶類夸父綠小灰蝶的族群差異等，來瞭解冰期之後的氣候暖化，對水青岡森林退縮與片斷化後所造成的影響。參考海岸淹水的文獻，初步建立災害風險評估公式（風險=危害 x 脆弱度），並依臺灣各地的水青岡森林建立其危害及評估脆弱度指標，以整合出不同地區水青岡森林的災害風險階級，結果有

1. 水青岡族群從過去30年航照圖資料中並無明顯向上遷徙情形；
2. 災害潛勢分級得到的結果，可知臺灣水青岡林各分布地受到氣候的衝擊程度，以崩塌、植被枯亡與上層枯損為分級，合計所受災害潛勢的面積佔各地區水青岡森林面積都不到10%；
3. 災害潛勢面積最高為大白山在2011年度所占面積達7.42%，阿玉山

在1980年度之前為5.36%次之，第三高是蘭崁山地區在2011年度為4.82%，代表水青岡森林會略受到極端氣候衝擊的影響；

4. 風險性評估以危害與脆弱度兩大層面探討，危害層面有自然因子的要素（如溫度、雨量或颱風）與災害潛勢分級（崩塌、植被枯亡或上層枯損）；以暴露度（生育地因子）、調適力（面積、族群和不同世代比例等）和回復力（幼苗更新、豐歉年）來代表脆弱度層面，共計有14個評估指標。

綜合風險性評估的結果，各地區水青岡森林依風險程度由高至低排序：蘭崁山是非常高風險、阿玉山是高風險、大白山是中等風險、烏嘴山是低風險、銅山與插天山是非常低風險。

已完成之計畫重要結果如後：

計畫研究期間採獲兩種以臺灣水青岡為食的舟蛾，為從前尚未記錄描述過的種類，已經與學者合作於2016年發表，刊登於國際期刊《動物分類群》(Zootaxa)，分別為 *Pheosiopsis seni* (沈氏夙舟蛾) 與 *Syntypistis taipingshanensis* (太平山跨舟蛾)，兩者皆為專食臺灣水青岡的種類。另發現兩種未有記錄的大型專食性裳蛾，業已詳細檢查鑑定並於今年(2021年)發表在美國昆蟲學會期刊(The Annals of the Entomological Society of America)，分別命名為雲霧裳蛾 (*Catocala nimbosa* Hsu & Wang) 及聖女裳蛾 (*C. Catocala seiohbo sanctocula* Hsu & Huang)。臺灣水青岡森林的昆蟲研究也發現臺灣水青岡林的面積大小與專食性昆蟲種數的關係密切，面積較小的臺灣水青岡森林鱗翅目昆蟲種數明顯不若較大面積的族群，符合島嶼生物地理的模型預測。研究經過篩選得到夸父瑾灰蝶、雲霧裳蛾、聖女裳蛾以及水青岡專食性舟蛾兩種等指標物種(如表 5.1)，各個樣區經過指標物種評估與鱗翅目昆蟲多樣性評等得到臺灣水青岡森林生態脆弱度矩陣，內含各個樣區的評估結果。以上成果整合於「臺灣水青岡森林片斷化之研究」，完整呈現整體成果。

表5.1 臺灣水青岡的指標昆蟲物種。

臺灣水青岡 分布區域	銅山	北插天 山	鳥 嘴 山	大 山	白 蘭 山	崁 阿 玉 山
面積 (KM <sup>2</sup> )	11.54	3	0.06	0.34	0.0043	< 2. trees
夸父瑾灰蝶	○	○	X	X	X	X
雲霧裳蛾	○	○	○	X	X	X
聖女裳蛾	○	○	○	X	X	X
沈氏夙舟蛾	○	○	X	○	○	X
太平山胯舟蛾	○	○	X	○	○	X

先前計畫調查發現新豐榭櫟之原生育地有鞘蛾科 (Coleophoridae) 的取食記錄，鞘蛾科的蛾類在臺灣資料甚少，目前僅有幾筆記錄，推估該種為寡食性的種類，以殼斗科植物為食。此外，進一步調查與統計指出取食榭櫟的鱗翅目昆蟲超過六成的種類為雜食性，而食性較專一的物種皆為較小型的蛾類。雜食性種類若是大量發生可能會對榭櫟的生存造成影響甚至危害，須持續調查與關注。

先期研究成果指出，取食利用臺灣水青岡的鱗翅目昆蟲累計已知者達到19科122種，近幾年持續增加中。對專食性昆蟲而言，臺灣水青岡是幼蟲唯一的生存依靠，因此存續和族群回復也可能因受颱風的影響而岌岌可危。昆蟲之生活史相當複雜，無法隨著植物立即遷移，若是單就臺灣水青岡進行移地復育，專食性昆蟲恐將在原棲地坐以待斃，因此應就地設法進行該地區臺灣水青岡的保護和復育，以確保該地區專食性昆蟲的食物來源無虞。

歷年的研究至少有13科57種取食臺灣水青岡昆蟲的鱗翅目昆蟲飼育成功，有許多種類已經完成鑑定，其中不乏新發現的種類，例如沈氏夙舟蛾 (*Pheosiopsis seni*) 與太平山胯舟蛾 (*Syntypistis*

*taipingshanensis*) 均是新近被命名發表的蛾種，另外還有許多種類尚待進一步的研究。

此外，2017 年的計畫成果指出以 DNA barcode 資料庫比對的方式對於臺灣山毛櫸鱗翅目種類鑑定是有效的。雖然尚有些樣本無法藉由此方法比對出其確切種類，若未來臺灣山毛櫸林的鱗翅目成蟲 COI 序列資料庫完備後，即可以協助解決鑑定問題。



### 三、材料與方法

#### 3.1 研究地區

水青岡植物在全世界約有 12 種，分佈於北半球溫帶地區，臺灣水青岡是本類植物在北半球分布之南緣，也是臺灣最具代表性的冰河子遺植物。由地下花粉的分析結果，證明臺灣水青岡在冰河時期曾分布到臺灣北部的低海拔地區，目前只殘存在北部幾個山頭及主稜上，包括北插天山、拉拉山、銅山、大白山、蘭炭山、阿玉山及烏嘴山，海拔 1,225–2,000 m。這說明了臺灣水青岡在冰期結束後，氣候變暖，整個族群往較高海拔遷移，使得原先分布廣闊之族群逐步退縮，而呈現片斷化分佈。因此現在全球氣候的暖化，將加速臺灣水青岡的衰退，最後從這些山頭消失（陳子英等，2011）。

目前在臺灣東北部的臺灣水青岡森林分布於數個地區：

1. 蘭炭山：位於宜蘭縣南澳鄉山區，在海拔 1,450 m 的一座山頭上，沿著稜線生長約呈 Z 字型，覆蓋範圍約為 0.3 ha，族群稀少僅有 38 棵。
2. 大白山：位於宜蘭縣南澳鄉山區，海拔約 1,350 m，沿著狹長的山頭稜線生長，覆蓋範圍約為 30 ha。
3. 銅山地區：位於宜蘭縣南澳鄉山區，海拔約 1,800 m，分布於望洋山至銅山、下銅山並延伸至鹿皮山之稜線上，覆蓋範圍約 1,154 ha，為最大的分布地區。
4. 阿玉山：位於宜蘭縣與新北市交界處山區，海拔約 1,420 m，族群極少，僅有零星數棵。
5. 插天山：位於桃園縣與新北市交界處山區，海拔約 1,450 至 1,700 m，分布於北插天山至拉拉山一帶，覆蓋範圍約有 300 多公頃，現已劃設為「插天山自然保留區」。

臺灣的榲欖天然族群分布局限於新竹縣新豐鄉坑子口靶場周邊，

全區隸屬於國軍管轄範圍。

臺灣水青岡與槲櫟可說是臺灣地區研究氣候變遷對生物多樣性衝擊與回復的最佳對象，從遺傳多樣性、物種多樣性、及生態系多樣性的角度均可加以探討。

### 3.2 研究方法

將臺灣水青岡森林依照族群大小分成二型來探討：(1) 為銅山及插天山地區目前較大區域的森林與 (2) 為目前殘存或子遺的小片森林，如蘭炭山、大白山、阿玉山、鳥嘴山地區。槲櫟樣區則以普查的方式針對原生地以及境外復育區進行昆蟲調查與雜食性物種監測。

#### 1. 重要工作項目為：

- (1) 持續調查鱗翅目昆蟲多樣性之研究，建立各研究樣區的昆蟲相資料。
- (2) 依序建立各個樣區指標昆蟲物種的監測方法，以小區域的現地動態資訊，提供為氣候監測模式上選擇的判斷。
- (3) 記錄嫩葉時期的雜食性昆蟲發生情形，以及數量是否爆發，對稀有物種或生態系造成影響。
- (4) 針對境外復育區的槲櫟蟲害情形進行監測。
- (5) 試驗各個指標物種的監測方法，最後建立監測流程。

#### 具體工作如下：

- (1) 於各個臺灣水青岡森林樣區進行昆蟲相調查，並進行新竹地區槲櫟植群樣區與境外復育區的調查。
- (2) 監測夸父矽灰蝶與專食性裳蛾、水青岡舟蛾等專食性昆蟲種類於各個樣區的差異與變化情形。

- (3) 記錄嫩葉時期的雜食性昆蟲發生情形。
  - (4) 臺灣水青岡的開芽物候、族群內開芽率的同步性對於專食性物種的存續可能具有關鍵性的影響，因此在進行春季昆蟲調查的同時，將同時估算記錄各次調查開芽情形。
2. 研究方法：主要研究對象為直接取食與利用臺灣水青岡與槲櫟的昆蟲，以鱗翅目昆蟲為主進行物種調查。採集取食、棲息於各部位的昆蟲，包括：
- (1) 幼嫩葉片：觀察採集並記錄取食的成蟲與幼蟲，幼蟲帶回飼養以確定種類。(可能多為一年一世代的種類，需細心照顧)
  - (2) 花序：開花季節採集、觀察花序，若有幼蟲取食則帶回飼養，以確定種類。
  - (3) 果實、種子：若遇有結實情形則觀察記錄是否有昆蟲利用，利用昆蟲種類及利用情形。
  - (4) 老熟葉片：觀察採集並記錄取食的成蟲與幼蟲，幼蟲帶回飼養以確定種類。(幼蟲有可能為雜食性，必須想辦法釐清)
  - (5) 樹皮、樹枝、倒木：觀察是否有昆蟲利用棲息，並記錄種類。
3. 採樣方法：參考臺灣野生動物調查昆蟲資源調查手冊（楊平世等，1996），擬定採樣方法如下。
- (1) 寄主植物翻察法：檢視翻察葉片、花序、果實，搜尋可能棲息的昆蟲幼蟲或是成蟲。
  - (2) 樹冠採樣：利用高枝剪隨機剪取樹冠枝條，以找尋卵粒及幼蟲。
  - (3) 定量標準：各樣區隨機選取10棵樹，每棵樹的取樣數量為10個長度30公分的枝條。
  - (4) 夜間燈光誘集：主要目的為調查各個臺灣水青岡樣區專食性裳

蛾族群量的差異，於成蟲活動季節進行。

4. 採樣頻度：分別於植物開花展葉期與葉片成熟期進行採樣，至少 1 至 2 次。棲息於樹皮與倒木、樹枝的昆蟲種類，於研究採樣期間若有遭遇則觀察記錄種類與利用方式。
5. 幼蟲飼養記錄：將帶回室內飼養的幼蟲分別拍照、編號，依照採集日期將幼蟲飼養記錄歸檔整理，累積物種資料以便後人進行相關研究。
6. 成蟲標本：飼養所得之成蟲，統一整理、鑑定，鑑定參照井上寬等（1982）；施禮正（2008）；張保信（1989a）；張保信（1989b）；張保信（1990a）；張保信（1990b）；張保信（1991）；傅建明、左漢榮（2002）；傅建明、左漢榮（2004）；矢田脩（2007）；岸田泰則（2011a）；岸田泰則（2011b）；岸田泰則（2013a）；岸田泰則（2013b）；日本産の蛾の WEB 図鑑（2003）。

## 四、結果

本年度持續進行臺灣水青岡與槲櫟的鱗翅目昆蟲調查，臺灣水青岡的調查以昆蟲相較豐富的區域為主，分別為銅山、北插天山、鳥嘴山等地區。槲櫟的調查樣區分別為新豐坑子口靶場附近的原生育地以及三個復育區，分別為明新科大旁邊的林班地、位於楊梅太平靶場附近的雜木林、竹北市婦幼館北側的國際環境教育園區（婦幼公園）等地。此外，2019年新發現之生育地（苗栗營頭頂）也同時進行探勘性調查。

### 4.1 以臺灣水青岡為食的鱗翅目昆蟲調查：

研究團隊自三月初開始前往各個樣區進行春季調查，目前共計進行9次調查，採獲以臺灣水青岡葉片為食的昆蟲幼蟲14科33種169隻次，其中銅山採獲7科12種48隻次、北插天山9科21種62隻次、鳥嘴山12科15種59隻次，各樣區採樣情形比較如圖5.1。與往年相比，今年鱗翅目調查之幼蟲數量依然較少且採獲種數也偏少的情形，今年銅山與鳥嘴山少量結實，並未調查到蛀實捲蛾利用的情形。

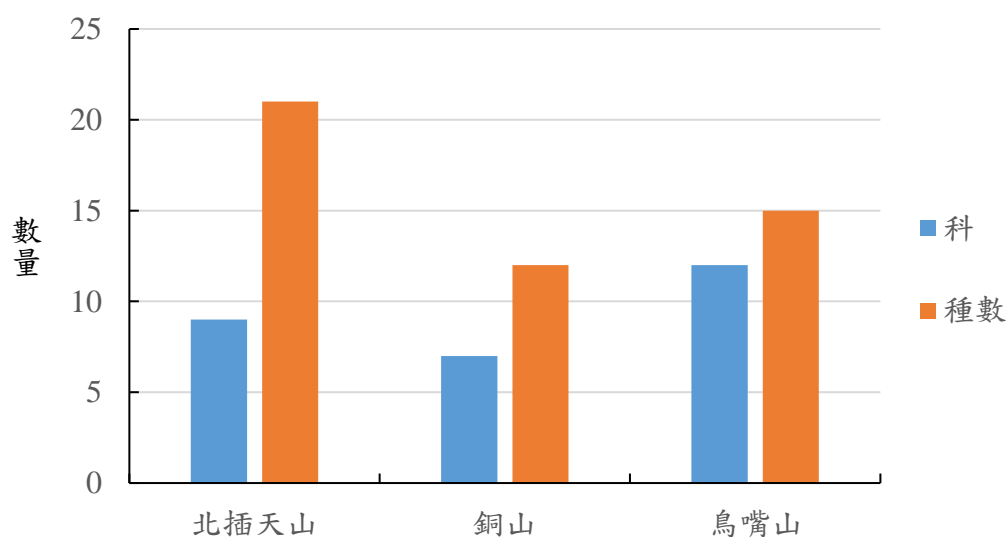


圖5.1 2021年臺灣水青岡各樣區採獲鱗翅目昆蟲種數比較。

本年度調查共發現 3 種新記錄種類，其中冠潛蛾科 *Tischeria* sp. 與捲蛾科 Tortricidae sp.14 為專食種；天蛾科的 Sphingidae sp.1 可能為狹食性的物種。本年度目前採獲之鱗翅目昆蟲名錄整理如表 5.2。

表5.2 2021年臺灣水青岡鱗翅目昆蟲名錄。

科別	種類	地點/數量			食性	新增種類
		北插	銅山	烏山		
天蛾科 Sphingidae	Sphingidae sp.1		1		狹	●
尺蛾科 Geometridae	<i>Eupithecia</i> sp. 球果尺蛾屬	3			專	
	Geometridae sp.2		1	1	專	
	Geometridae sp.5	1			廣	
	Geometridae sp.9	1			廣	
	<i>Operophtera brunnea</i> 灰褐波冬尺蛾	1			廣	
舟蛾科 Notodontidae	<i>Fentonia ocypete</i> <i>crenulata</i> 鋸紛舟蛾	1			狹	
	<i>Pheosiopsis seni</i> 沈氏夙舟蛾			3	專	
	<i>Syntypistis taipingshanensis</i> 太平山跨舟蛾	2		2	專	
刺蛾科 Limacodidae	<i>Parasa</i> sp.			1	廣	
夜蛾科 Noctuidae	<i>Amphipyra tarokoensis</i> 太魯閣雜夜蛾	nr. 1			廣	
	<i>Amphipyra</i> sp.		1		廣	
	<i>Mniotype melanodonta</i>		2			
	Noctuidae sp.1	2	1		專	
	Noctuidae sp.2	2		3	廣	
冠潛蛾科 Tischeriidae	<i>Tischeria</i> sp.			9	專	●
枯葉蛾科 Lasiocampidae	Lasiocampidae sp.2			1	廣	

捲蛾科 Tortricidae	<i>Acleris</i> sp.	8			專
	Tortricidae sp.11	21	29		專
	Tortricidae sp.14	1			專
	Tortricidae sp.6	3			廣
	<i>Ypsolopha</i> sp.	1			專
細蛾科 Gracillariidae	<i>Caloptilia</i> sp.	1	1	5	專
	<i>Phyllonorycter</i> sp.	3	5	17	專
微蛾科 Nepticulidae	<i>Stigmella</i> sp.	5	2	3	專
鈎蛾科 Drepanidae	<i>Parapsestis</i> nr. <i>tomponis</i>	2		1	專
裳蛾科 Erebidae	圍異波紋蛾 <i>Acidon</i> nr. <i>pseudohypena</i>	1	2		專
	<i>Catocala</i> <i>seiohbo</i> <i>sanctocula</i>	1	2	1	專
	聖女裳蛾 <i>Lymantria monacha</i>	1			廣
	細紋絡毒蛾 Lymantrinae sp.		1		廣
	Lymantrinae sp.6			1	狹
蓑蛾科 Psychidae	Psychidae sp.2			9	廣
螟蛾科 Pyralidae	Pyralidae sp.2			2	廣

本年度記錄春季各樣區之臺灣水青岡即時開芽情形如表 5.3。春季調查發現各樣區之地被環境異常乾燥，臺灣水青岡普遍由於缺水而開芽狀況不佳。其中北插天山樣區的稜線尤其乾燥，休眠芽苞由於缺水而遲遲未展，該區有部分臺灣水青岡的尾端枝條枯落而衰弱，有部分植株已經死亡；同時期位於中坡或是山凹處較能保水，生長於此處之植株葉片則已經平展。

表5.3 2021年臺灣水青岡春季開芽期物候記錄。

樣區	調查日期	開芽情形 (2021)
銅山	0225	尚未開芽，冠層有些芽開始發育，氣候偏乾。
	0330	開芽約 6 成，個體差異大。大部分個體嫩葉平展，3 成嫩葉尚未平展。部分植株剛開始抽芽發育。
北插天山	0319	坡面上有少數葉片已平展，稜線地被乾燥，大部分植株都還沒開芽。蟲少。有部分山毛櫸的尾端枝條枯落而衰弱，有部分植株已經死亡。
	0408	多數植株葉片成熟硬化，少部分尚有平展嫩葉。
鳥嘴山	0310	樹冠開芽 5 成，林下休眠芽開始發育抽長。
	0326	嫩葉平展尚未硬化。蟲還很小，數量少。

比較 2016-2021 年的資料發現鱗翅目昆蟲數量有變少的趨勢，銅山樣區的變化較北插天山及鳥嘴山明顯 (圖 5.2)。春季為臺灣水青岡開始萌芽的時期，許多昆蟲也在此時結束休眠，開始取食利用臺灣水青岡的嫩芽與葉片，這段期間也是臺灣水青岡昆蟲採樣的重要時期。嫩葉富含昆蟲生長發育所需的養分，短時間內從芽體生長抽長到葉片質地的變化也提供昆蟲眾多的生態棲位，此等特性供養許多配合植物物候而特化的專食性種類，因此嫩葉相較於成熟葉片而言提供了更多昆蟲種類取食和利用。春季臺灣水青岡森林昆蟲數量減少的現象可能對森林生態系造成影響，研究團隊將持續監測觀察後續發展與變化。



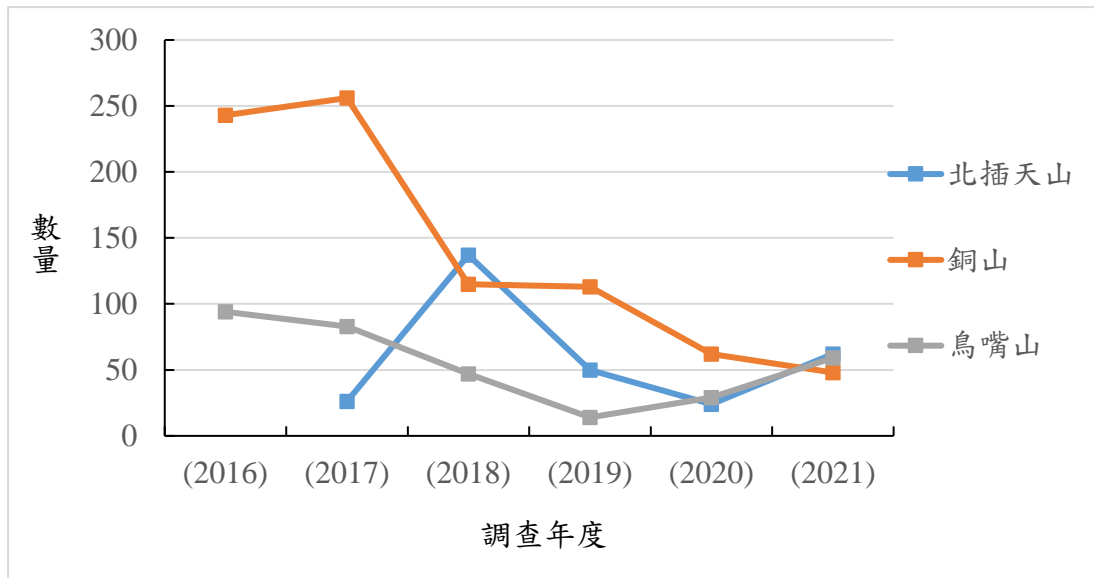


圖 5.2 2016-2021 年臺灣水青岡各樣區鱗翅目昆蟲數量之比較。

春季乾燥缺水不利於臺灣水青岡嫩葉開展，可能導致這幾年嫩葉期的鱗翅目幼蟲與往年相比種類與數量較少。對於植食性昆蟲而言，缺乏充足的嫩葉做為食物導致幼蟲無法順利長成，同時缺乏霧氣導致環境乾燥等逆境因素也讓其生存面臨挑戰。

調查發現銅山、鳥嘴山與北插天山樣區的林底層玉山箭竹持續枯亡的情形，由於箭竹枯亡空出的棲地有被其他草本或是灌叢取代的情形。先前銅山與鳥嘴山、北插天山區調查發現的的當年生幼苗大部分已不復見。以上訊息已提供給水青岡植群研究團隊參考。

#### 4.2 榭櫟植群樣區與境外復育區昆蟲調查：

榭櫟與臺灣水青岡同為冰河子遺植物，臺灣水青岡生育地位於較高海拔，插天山自然保留區為其存續設下了阻隔人為干擾的屏障，然而榭櫟目前的原生育地面積狹小，雖然位於軍事管制區內可阻隔多數人為干擾，然而位處低海拔丘陵，周圍伴生樹種競爭激烈，在全球暖化持續的情況下族群恐難長久維持，因此境外復育區的設置為必要的

保育措施之一。復育區的榲欖個體的生長狀況、是否遭受昆蟲危害必須受到後續的觀察與監測。

目前研究團隊除了新豐的榲欖原生育地之外，尚有三處榲欖復育區的調查監測樣區；分別為明新科技大學旁邊的林班地、桃園楊梅區的太平靶場附近，以及新竹婦幼公園，除此之外，也同時進行苗栗營頭頂地區之探勘性調查。

本年度自二月中旬前往榲欖原生育地與境外復育區進行採樣，共記錄以榲欖為食鱗翅目昆蟲幼蟲 12 科 31 種 157 隻次，各樣區種數比較如圖 5.3。其中新豐（原生育地）記錄 6 科 13 種 30 隻次、太平靶場 7 科 15 種 42 隻次、婦幼公園 1 科 1 種 40 隻次、明新科大 5 科 5 種 10 隻次，營頭頂地區則調查有 6 科 8 種 35 隻次。詳細調查資料與名錄如表 5.4。

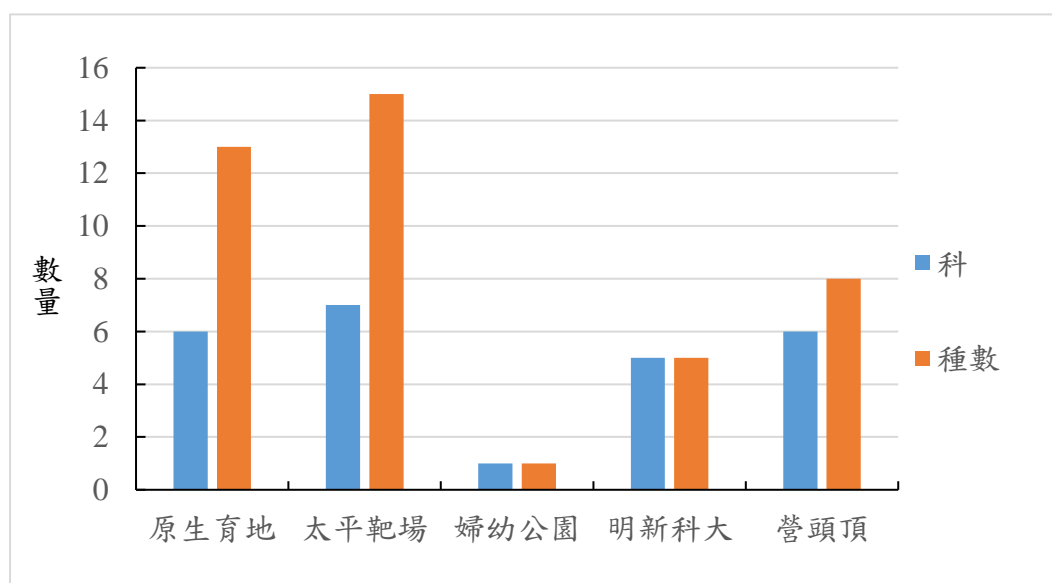


圖 5.3 2021 年榲欖原生育地與復育區採獲之鱗翅目昆蟲種數比較。

表 5.4 2021 年櫟櫟原生育地及復育區鱗翅目昆蟲名錄。

科	學名	中名	地點					新增種類
			原 生 育 地	太 平 靶 場	婦 幼 公 園	明 新 科 大	營 頭 頂	
尺蛾科 Geometridae	<i>Cleora alienaria</i>	汗褐鋸尺蛾		2		1	2	
	<i>Cusiala boarmioides</i>	白波緣尺蛾	1				1	
	<i>Ectropis</i> sp.			2				
	<i>Hyposidra talaca talaca</i>	突角黯鉤尺蛾	1	1				
	Geometridae sp.						1	
舟蛾科 Notodontidae	<i>Phalera formosicola</i>	<i>assimilis</i> 頂斑圓掌舟蛾					7	●
刺蛾科 Limacodidae	<i>Nagodopsis shirakiana</i>	素木氏烏糞刺蛾		1				
	<i>Nagodopsis shirakiana</i>	透翅刺蛾		1				
	<i>Phlossa conjuncta</i>	三角斑刺蛾		1				
夜蛾科 Noctuidae	<i>Tiracola plagiata</i>	掌夜蛾					2	
枯葉蛾科 Lasiocampidae	<i>Gastropacha formosana</i>	<i>pardale</i> 緣斑枯葉蛾					1	
	<i>Kunugia metanastroides</i>	<i>undans</i> 波紋枯葉蛾		4				
	<i>Lebeda nobilis</i>	大灰枯葉蛾		1				
	<i>Trabala vishnou guttata</i>	青黃枯葉蛾		8			1	
捲蛾科 Tortricidae	Tortricidae sp.Q1		1	3				
	Tortricidae sp.Q3		1	1		1		
	Tortricidae sp.Q4		2					●
	Tortricidae sp.Q5		1					●
	Tortricidae sp.Q6		2					●
細蛾科 Gracillariidae	<i>Acrocercops unistriata</i>			5				
	<i>Phyllonorycter</i> sp.			8			9	
微蛾科 Nepticulidae	<i>Stigmella</i> sp.						12	
裳蛾科 Erebidae	<i>Euproctis taiwana</i>	臺灣黃毒蛾		1				
	<i>Lymantria xyлина</i>	黑角舞蛾	1					

	<i>Olene dudgeoni</i>	褐斑毒蛾	2	
	<i>Orgyia postica</i>	小白紋毒蛾	1	40
	<i>Spilarctia subcarnea</i>	人紋污燈蛾		1
叢蛾科 Psychidae	Psychidae sp.1		13	6
螟蛾科 Pyralidae	Pyralidae sp.Q2		5	
	<i>Sacada</i> sp.		1	
鞘蛾科 Coleophoridae	<i>Coleophora melanographa</i>	黑紋鞘蛾	1	

本年度檫欏鱗翅目昆蟲調查發現 6 種新記錄種類，其中頂斑圓掌舟蛾 (*Phalera assimilis formosicola*) 為狹食性物種，螟蛾科的 *Sacada* sp. 為廣食種，其餘四種食性尚待更多資料收集後確認。太平靶場檫欏調查到的鱗翅目昆蟲種數最多，有 15 種鱗翅目昆蟲利用，然而大多為雜食性種類，其中青黃枯葉蛾較為優勢。值得一提的是春季調查在復育區—婦幼公園發現有數棵植株遭受為數眾多的小白紋毒蛾啃食嫩葉與花序危害，幸好該區所植檫欏環境陽光充足而樹勢強健，小白紋毒蛾的啃食並未造成太大的影響。

位在新豐的檫欏原生育地由於周圍雜木林生長茂盛而成鬱閉環境，近幾年雜食性昆蟲幸未造成檫欏嚴重危害，然而調查期間已有幾棵樣樹陸續死亡，急需管理單位注意與因應。除此之外，各個樣區均發現許多叢蛾科的利用痕跡，然而多為空巢而無法完全確定種類。

今年春季嫩葉期蟲害情形較少，但是青黃枯葉蛾的危害不可輕忽，青黃枯葉蛾的危害區域主要為太平靶場，青黃枯葉蛾的熟齡幼蟲體型與食量較大，研究團隊持續注意其族群量是否有異常增加。青黃枯葉蛾幼蟲與繭的外部具有毒毛，若不慎誤觸可能造成疼痛與皮膚潰爛，必須小心因應。

新豐的檫欏原生育地今年持續發現鞘蛾科 (Coleophoridae) 的記錄，鞘蛾科的蛾類在臺灣資料甚少，目前僅有幾筆記錄。本研究發現之種類經比對研究後鑑定為臺灣新記錄蛾種 *Coleophora*

*melanographa* (暫稱為黑紋鞘蛾)，該蛾種在其他地區已知是僅以落葉性櫟樹為寄主植物的狹食性蛾種，過去已知分布於日本(北海道與本州)及中國大陸(江蘇省)，本研究之記錄是臺灣新記錄，且無疑是其位置最南的記錄 (Baldizzone and Oku, 1990；廣渡等，2013)。

#### 5 建立臺灣水青岡指標昆蟲監測方法—兩種專食性舟蛾：

本年度另一目標在於測試並建立指標昆蟲—沈氏夙舟蛾與太平山胯舟蛾的監測方法，本計畫目前已經完成該蛾類生育地—銅山、北插天山、鳥嘴山與大白蘭崁山區等四處監測樣點的選定與樣樹標定(圖 5.4)，設計調查記錄表格格式(表 5.6)，依據以往多年調查累積的調查與試驗資料，擬定具體監測項目與方法如下：

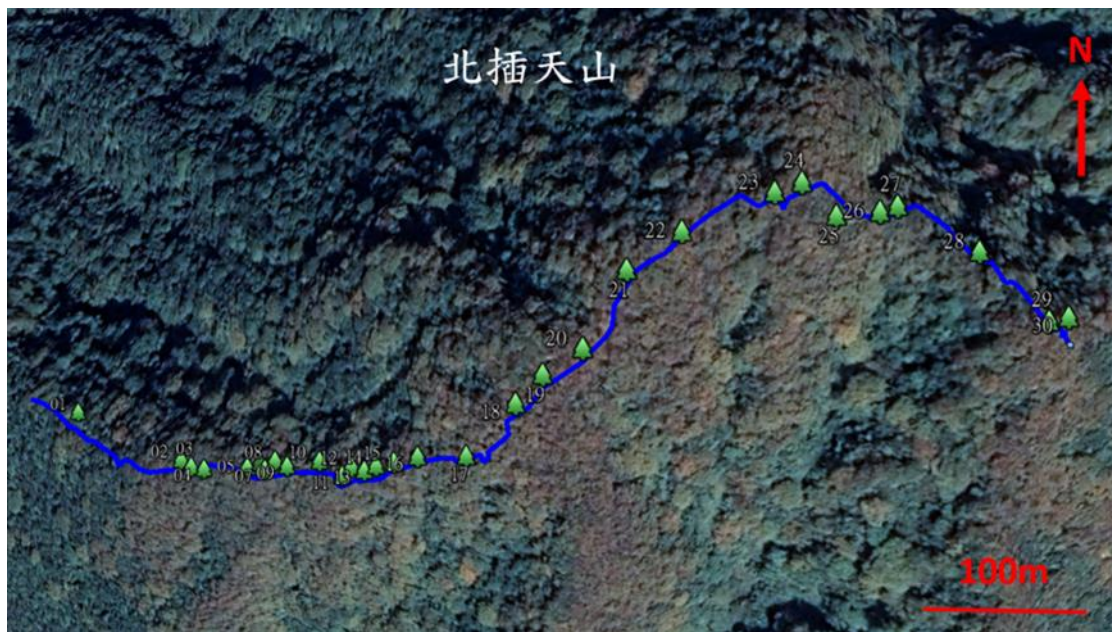


圖 5.4 兩種專食性舟蛾監測樣線與樣點設置圖。



圖 5.4 (續) 兩種專食性舟蛾監測樣線與樣點設置圖。

表 5.5 兩種專食性舟蛾調查記錄表。

日期：\_\_\_\_\_ 地點：\_\_\_\_\_

調查者：\_\_\_\_\_

天氣：\_\_\_\_\_

開始時間/氣溫：\_\_\_\_\_

結束時間/氣溫：\_\_\_\_\_

植株編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
沈氏夙舟蛾幼蟲															
太平山胯舟蛾幼蟲															
舟蛾幼蟲數量(不分種)															
植株編號	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
沈氏夙舟蛾幼蟲															
太平山胯舟蛾幼蟲															
舟蛾幼蟲數量(不分種)															
以下為成蟲觀測數量															
沈氏夙舟蛾成蟲															
太平山胯舟蛾成蟲															
備註	每一植株上的蟲分別裝在一個盒子內，並且標記為哪一植株。														



## 1. 成蟲監測:

於五至八月的成蟲發生期進行監測，首要目標在於記錄專食性舟蛾的族群變化。該種蛾類夜間具有趨光性，建議可採用夜間燈光誘集法進行調查。調查時間介於晚上七點至十二點，記錄趨光而至誘集布幕的成蟲數量，並統計總數量以進行比較。

建議調查用具之規格與明細如下所擬:

- (1) 燈具採用電壓12V功率8W、T5規格、長度30公分的黑燈管，或是採用電壓12V功率15-35W之HID燈管，燈具與線路必須做好防水措施以防浸水損壞。
- (2) 誘集布幕長2公尺、寬1.5公尺，底部距地面約50公分，布幕四個角必須以繩索固定牢靠以避免強風干擾。
- (3) 電源採用可供應電壓12V的行動電源（網路購買），內含容量3400mA之18650動力鋰電池6-8顆，並準備多組電池以供替換。
- (4) 毒瓶與毒管製作：採用耐腐蝕的塑膠或是玻璃材質的容器製作毒管，內部以棉花沾取乙酸乙酯為毒藥置於容器底部固定妥當，挑選適合的蓋子以防毒藥溢散。
- (5) 鱗翅目昆蟲專用紙袋：可至昆蟲飼育用品行購買專用蠟光紙袋，尺寸規格為9.3cm×6.0cm。
- (6) 捕蟲網、捕蟲桿：網徑45cm，使用鱗翅目專用細網。捕蟲桿材質為玻璃纖維或是碳纖維，拉伸長度5m為佳。

**\*\*監測流程與注意事項:成蝶\*\***

- (1) 調查前進行天氣評估，挑選晴朗的天氣進行調查。天候不佳與大雨過後避免入山以免山崩落石危及調查人員生命安全。
- (2) 每次調查前按照所擬明細檢查調查用具是否齊備。

- (3) 分別在各樣區選定視野良好無遮蔽之開闊處做為燈光誘集樣點。
- (4) 於五月至八月，挑選農曆的月朔前後一周至選定之樣點進行夜間燈光誘集。
- (5) 調查時間介於晚上七點至十二點。
- (6) 記錄趨光至誘集布幕之成蟲數量。
- (7) 累積年度資料，比較年間之差異與變化。

## 2. 幼生期監測:

成蟲產卵於成熟葉片下表面，卵的顏色為淡綠色。幼生期的監測可待水青岡葉片硬化成熟後進行，每年大約從五月底開始，採用寄主植物翻查法進行調查，翻找臺灣水青岡成熟葉片進行調查作業，記錄調查數量。臺灣水青岡生長緩慢，因此進行調查時應避免採用採剪法大量剪取枝葉而造成植物傷害。

### **\*\*監測流程與重點:幼生期\*\***

- (1) 調查行前先評估天氣狀況，天候不佳與大雨過後避免入山以免山崩落石危及調查人員生命安全。
- (2) 在各個臺灣水青岡分布地區選定樣樹。
- (3) 於六月至九月，以寄主植物翻查法調查幼蟲生長概況與利用情形，並注意是否有天敵或是寄生的狀況。
- (4) 記錄調查期間之幼蟲數量與寄生率、死亡率。
- (5) 比較各年度調查之變化情形。

## 五、討論

本年度臺灣水青岡普遍由於缺水而開芽狀況不佳，嫩葉期也較往年延後。其中北插天山樣區的稜線尤其乾燥，3月19日前往調查發現休眠芽苞由於缺水而遲遲未展，該區有部分山毛櫸的尾端枝條枯落而衰弱，有部分植株已經死亡；4月8日前往調查則發現大部分葉片已經硬化，與往年嫩葉期約持續一個月相較之下顯得很不尋常。雲霧繚繞、水氣豐沛本為臺灣水青岡生育地之常態，先前連續兩年春季調查期間樣區環境乾燥，今年初的乾旱使得春季生長期缺水情形更加嚴重。春季缺乏水氣與霧氣對於臺灣水青岡本身與賴以為生的植食性昆蟲而言無疑產生嚴重的影響與衝擊。

銅山、鳥嘴山與北插天山樣區的林底層玉山箭竹持續枯亡的情形，由於箭竹枯亡空出的棲地有被其他草本或是灌叢取代的情形，去年發現剛萌發的小苗已經不見蹤影。近幾年玉山箭竹續枯亡與地被植物相的改變說明臺灣水青岡的生育地環境可能已經發生變化。

榲欖的春季調查在復育區—竹北婦幼公園發現有數棵植株遭受為數眾多的小白紋毒蛾啃食嫩葉與花序危害，後續觀察幸未對植株造成重大影響，然而小白紋毒蛾雌蟲不擅飛行，羽化交尾之後將卵塊產於繭上，幼蟲具群聚性，經常對植物產生危害，因此仍須加以留意。多斑豹蠹蛾幼蟲為雜食性，取食部位為木質化的莖，受蛀食危害的莖呈現中空，輕微受力即斷裂，原生育地與復育區的榲欖植株均受其危害而影響生長。

氣候變遷與極端氣候對於臺灣水青岡與榲欖族群造成存續上的壓力，為了將研究採樣對植物生長的影響減至最低，應避免大量的採剪枝葉造成植物傷害。因此本研究的昆蟲幼蟲採樣以寄主植物翻查法代替採剪法來進行調查，往後若有相關研究進行也建議採用此方法。

專食臺灣水青岡之兩種裳蛾日前已經於國際期刊（*Annals of the Entomological Society of America*）發表，分別為聖女裳蛾 *Catocala seiohbo sanctocula* Hsu & Huang（新亞種）與雲霧裳蛾 *Catocala*

*nimbosa* Hsu & Wang (新種)。發表期刊網頁最後所附之補充資料連結(saaa062\_suppl\_supplementary\_table\_s5)說明各個物種之詳細資料，包含幼蟲生態圖片、食性範圍、各個物種的參考文獻資料與附註說明等，可充作以臺灣水青岡為食的鱗翅目昆蟲資料庫。未來第一線的調查人員可以藉由此豐富的資料進行以臺灣水青岡為食之鱗翅目物種資料索引與幼蟲初步鑑定。

## 六、結論與建議

### 1. 槲櫟

位在新豐的槲櫟原生育地由於周圍雜木林生長茂盛而成鬱閉環境，近幾年雜食性昆蟲幸未造成槲櫟嚴重危害，然而調查期間已有幾棵樣樹陸續死亡，急需管理單位注意與因應。危害槲櫟葉片主要的潛在物種為青黃枯葉蛾，幼蟲為聚生性而食量大，幼蟲與繭的外部具有毒毛，若不慎誤觸可能造成疼痛與皮膚潰爛，必須小心因應。

嘉義大學團隊於調查期間發現木蠹蛾幼蟲蛀蝕新鮮的槲櫟枝條，危害甚鉅，後將樣本提供本團隊進行飼育確認種類。經飼養已於羽化，鑑定後確認為多斑豹蠹蛾 (*Zeuzera multistrigata*)。

婦幼公園種植的槲櫟由於位在市區，為多日照的環境，鱗翅目昆蟲明顯較少，然而葉片每年由於鞘翅目昆蟲危害造成孔洞狀食痕，雖無立即危害影響，仍須加以觀察留意，若危害嚴重時建議公園周圍路燈設置避開植株附近應可改善鞘翅目昆蟲取食葉片的問題。

### 2. 臺灣水青岡

臺灣水青岡昆蟲調查發現近三年嫩葉期的鱗翅目幼蟲與往年相比種類與數量較少，目前發現臺灣水青岡嫩葉期的鱗翅目昆蟲數量與當季環境的水氣有關，往年臺灣水青岡萌芽期大多適逢山區多雨的時節，雲霧繚繞、水氣豐沛為此時山區常態；然而這三年春季調查期間各樣區環境呈現較為乾燥，影響臺灣水青岡開芽期的一致性與葉片的品質，這對於鱗翅目昆蟲發育有不利的影響。

根據歷年來之觀察，每年二月底至三月初，臺灣水青岡樹冠上層之休眠芽會率先發育開展，花序也伴隨抽出。以專食性物種而言，在此時有一批鱗翅目昆蟲成蟲產卵後卵隨即孵化，另一批鱗翅目昆蟲則結束越冬而孵化。臺灣水青岡的嫩葉期持續約3周至1個月左右，這兩批食用嫩葉之幼蟲配合臺灣水青岡的物候迅速成長，在四月底之前化蛹，有些種類會在不久之後羽化成蟲，有些則進入休眠狀態，直至

接下來的冬天或來年春天羽化。嫩葉期的專食性昆蟲多為一年一世代的種類，少數為一年兩世代以上的種類。雜食性昆蟲的發生則每年皆有不同，由於臺灣水青岡一年僅有一次生長期（春季），因此針對臺灣水青岡嫩葉時期進行即時而持續的蟲害監測有其必要性。

前期計畫篩選出的指標物種，分別為夸父瑾灰蝶、雲霧裳蛾、聖女裳蛾、沈氏夙舟蛾以及太平山胯舟蛾。每一種指標物種的存在與否分別代表該地水青岡森林環境的健康程度，若是水青岡森林環境發生變化，原本存在該地的指標昆蟲將率先受到影響而減少或消失。本計畫試驗並規劃各個指標物種的監測方法，提供各個指標昆蟲的監測方法與監測流程，由於疫情關係目前無法舉辦工作坊，日後若有需要可擇期辦理，提供第一線工作人員進行簡易監測。

## 七、執行進度

### 1. 執行情形：

執行進度累積(%)：

	110.01-110.03	110.01-110.06	110.01-110.09	110.01-110.12
預定百分比	20%	50%	70%	100%
實際百分比	20%	50%	70%	100%

### 2. 執行情形概述：

建立鱗翅目昆蟲資料：

- (1) 昆蟲調查採樣：已前往北插天山、銅山、鳥嘴山的臺灣水青岡樣區進行共計 9 次的調查，檫櫟的原生育地與各地復育區分別進行了共計 13 次的調查。
- (2) 幼蟲飼育與化蛹後處理：調查採獲之幼蟲須進行飼養至成蟲以進行詳細鑑定。
- (3) 已完成臺灣水青岡指標昆蟲之監測方法—沈氏夙舟蛾以及太平山胯舟蛾。

## 八、期中審查意見回應

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	(1) 在進入臺灣水青岡樣區進行昆蟲調查，記錄嫩葉時期的雜食性昆蟲發生情形部分，資料豐富，論述清楚。	謝謝委員的肯定。
	(2) 建議呈現跨年的資料料(表5.2)，以利比較。	彙整資料將朝此方向努力，以比較圖的方式呈現。
	(3) 期中評核無異議通過。	謝謝。
曾彥學委員	(1) 已達期中評核標準，期中評核無異議通過。	謝謝。
劉和義委員	(1) 第一章總計畫的計畫流程圖所列之對保育平台的技術協助，在期末時應該需要明確的提供。如有困難之處，應提出說明。	前期計畫結果已篩選出指標昆蟲物種。本計畫目前持續試驗各個指標物種的監測方法，未來會提供各個指標昆蟲的監測方法與監測流程，由於疫情關係目前無法舉辦工作坊，日後若有需要可擇期辦理，提供第一線工作人員進行簡易監測。
	(2) 榭櫟是否為冰河子遺植物，可能需要進一步的研究，敘述上應盡可能保守。榭櫟復育地發現的臺灣新記錄蛾種，是否可能由島外地區移入，此種可能性有助於判斷臺灣榭櫟的來源。	謝謝委員提供意見，要確認新物種是否為島外移入可能必須要取得鄰近地區近似種的樣本資料，若是未來經費許可將朝此方向努力。
	(3) 期中評核無異議通過。	謝謝。



## 八、參考文獻

- 矢田脩 (2007) 新訂原色昆蟲大圖鑑 I。460pp。
- 岸田泰則 (2011) 日本產蛾類標準圖鑑 I。352pp。
- 岸田泰則 (2011) 日本產蛾類標準圖鑑 II。416pp。
- 廣渡俊哉、坂卷祥孝、那須義次、岸田泰則 (2013) 日本產蛾類標準圖鑑 III。359pp。
- 岸田泰則、坂卷祥孝、那須義次、廣渡俊哉 (2013) 日本產蛾類標準圖鑑 IV。552pp。
- 唐立正 (2000) 插天山自然保留區昆蟲相調查研究 (II)。農委會林務局新竹林區管理處。
- 徐堉峰、羅尹廷 (2001) 夸父綠小灰蝶之生態學研究 (一)。行政院農業委員會林務局新竹林區管理處。
- 徐堉峰、黃嘉龍 (2002) 夸父綠小灰蝶之生態學研究 (二)。行政院農業委員會林務局新竹林區管理處。
- 張保信 (1989a) 臺灣蛾類圖說 (一)。臺灣省立博物館。
- 張保信 (1989b) 臺灣蛾類圖說 (二)。臺灣省立博物館。
- 張保信 (1990a) 臺灣蛾類圖說 (三)。臺灣省立博物館。
- 張保信 (1990b) 臺灣蛾類圖說 (四)。臺灣省立博物館。
- 張保信 (1991) 臺灣蛾類圖說 (五)。臺灣省立博物館。
- 陳子英 (2009) 臺灣水青岡林生物多樣性調查及保育機制之研究 (1/3)。行政院農業委員會林務局。117 頁。

- 陳子英 (2010) 臺灣水青岡林生物多樣性調查及保育機制之研究 (2/3)。行政院農業委員會林務局。132 頁。
- 陳子英 (2011) 臺灣水青岡林生物多樣性調查及保育機制之研究 (3/3)。行政院農業委員會林務局。214 頁。
- 陳子英、謝長富、毛俊傑、賴玉菁、林世宗、胡哲明、徐堉峰、楊正釗、林哲榮、孔祥璿、陳品邑、邱宗儀、巫智斌 (2011) 冰河子遺的夏綠林-臺灣水青岡。行政院農業委員會林務局。271 頁。
- 傅建明、左漢榮 (2002) 鞍馬山的蛾 (1)。台中縣鄉土自然研究會。
- 傅建明、左漢榮 (2004) 鞍馬山的蛾 (2)。台中縣鄉土自然研究會。
- 楊平世、吳文哲、洪淑彬 (1996) 臺灣野生動物調查昆蟲資源調查手冊。行政院農業委員會。227 頁。
- 羅尹廷 (2001) 夸父綠小灰蝶之生態學初探。碩士論文。國立臺灣師範大學生物學系。72 頁。
- 施禮正 (2008) 臺灣蛾訊 MOTHS of Taiwan。2019 年 1 月 16 日，取自：<http://mothtaiwan.blogspot.com>
- Baldizzone, G. and T. Oku. (1990) Descriptions of Japanese Coleophoridae. III. Tyo to GA 41: 97-112.
- Krauss J., I. Steffan-Dewenter and T. Tschardt (2003) Local species immigration, extinction, and turnover of butterflies in relation to habitat area and habitat isolation. *Oecologia* 137:591-602.

- MacArthur, R.H. and E.O. Wilson (1967) *The Theory of Island Biogeography*. Princeton University Press.
- MacArthur, R.H. and E.O. Wilson (1963) An equilibrium theory of insular zoogeography. *Evolution* 17: 373-387.
- Michael J. Novacek and Elsa E. Cleland (2001). The current biodiversity extinction event: Scenarios for mitigation and recovery. *PNAS* 98: 5466-5470
- NHM (2019) Hosts: a Database of the World's Lepidopteran Hostplants. <http://www.nhm.ac.uk/our-science/data/hostplants/search/index.dsml> ; accessed: Jan. 16. 2019.)
- Opler, P. A (1974a) Biology, Ecology, and Host Specificity of Microlepidoptera Associated with *Quercus agrifolia* (Fagaceae). University of California Publications in Entomology 75:1-83, plates 1-7.
- Opler, P.A. (1974b) Oaks as Evolutionary Islands for Leafmining Insects. *American Scientist* 62:67-73.
- Opler P.A. and D.R. Davis(1981) The leafmining moths of the genus *Cameraria* associated with Fagaceae in California (Lepidoptera, Gracillariidae). *Smithsonian contributions to Zoology* 333: 58.
- Rey, J. R., McCoy, Earl D. and D.R. Strong (1981) Herbivore Pests, Habitat Islands, and the Species-Area Relation. *Am. Nat.* 1981. Vol. 117, pp. 611-622.
- Robinson, G.S., P.R. Ackery, I.J. Kitching, G.W. Beccaloni and L.M. Hernández (2001) Hostplants of the moth and butterfly caterpillars of the Oriental region. Natural History Museum in association with Southdene Sdn Bhd. 744 pp.

- Robinson, G.S., P.R. Ackery, I.J. Kitching, G.W. Beccaloni and L.M. Hernández (2002) Hostplants of the moth and butterfly caterpillars of America north of Mexico. *Memoirs of the American Entomological Institute* 69: 1-824.
- Roger, L. H. Dennis. (1993). *Butterflies and Climate Change*. Manchester University Press, Manchester, U.K. 302 pp.
- Sørensen, T. (1948) A Method of Establishing Groups of Equal Amplitudes in Plant Sociology Based on Similarity of Species Content and Its Application to Analyses of the Vegetation on Danish Commons. *Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Biologiske Skrifter*, 5, 1-34.
- Wilson, E.O. (1988) The current state of biological diversity. In: Wilson, E.O. & F.M. Peter (eds.) *Biodiversity*. National Academy Press, Washington, D.C. Pp. 3-18
- Yu-Feng Hsu, Li-Hao Wang, Chia-Lung Huang, Michael F. Braby, Wen-Jie Lin, Rung-Juen Lin, and Yu-Ming Hsu. (2021) *Annals of the Entomological Society of America*, Volume 114, Issue 3, May 2021, Pages 338–354, <https://doi.org/10.1093/aesa/saaa062>
- 日本産の蛾の WEB 図鑑 An Identification Guide of Japanese Moths Compiled by Everyone(AIGJMCE)(2003). Retrieved 1. 16, 2019, from the World Wide Web:  
[http://www.jpmoth.org/Noctuidae/Catocalinae/Catocala\\_nubila.html](http://www.jpmoth.org/Noctuidae/Catocalinae/Catocala_nubila.html)