



公開
 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：180203G200

農業部林業試驗所112年度科技計畫研究報告

計畫名稱：**研究森林經營之碳匯成效** (第1年/全程4年)
(英文名稱) **Analyzing the carbon sink effect of forest management**

計畫編號：112前瞻-18.2.3-森-G2

全程計畫期間：自 112年1月1日 至 115年12月31日
本年計畫期間：自 112年1月1日 至 112年12月31日

計畫主持人：**李隆恩**
研究人員：**董景生、王韻皓、王培蓉、唐盛林、李志璇、嚴晟瑋**
執行機關：**行政院農業委員會林業試驗所**



1122565



一、執行成果中文摘要：

淨零是全球面臨氣候危機所提出的對策，也是國家整體的重要目標。在淨零碳排的發展規劃中，產業總有以各種方式仍難以削減之碳排，最後將透過碳匯進行中和。其中，森林碳匯是人類最為熟悉且早已行之有年的技術。目前森林在碳匯提升的角色中，除了植樹增匯外，有效加強森林經營管理，減少退化造成碳排及透過撫育措施提高人工林生長量以增加碳吸存，皆是可努力之方向。由於臺灣森林面積廣闊且多樣性高，欲研究森林經營所達成的碳匯成效，精確的蓄積推估及生長變化監測是首要克服的技術。過去二十年遙測技術的快速發展為大尺度生物量及碳吸存的估算提供了有效的解決方案，光達技術的發展，也提升了森林調查的精度與效率。109-111年間，本所已嘗試開發許多監測與推估技術，如單木生長模式、相對關係模式、林型自動辨識模式、高光譜及光達蓄積量推估模式等。本計畫預計將以森林、林分及單木三個層級進行。森林層級部分，運用多尺度遙航測資訊，發展林業場域碳匯監測技術。林分層級部分，以林分結構分析，探討不同林分結構之碳匯差異，並整合相關資訊，提出營造高碳匯效益之結構組成。單木部分，運用高解析度地面光達，建立樹高曲線及立木材積等重要森林性態值推估模式。並藉由高碳匯功能植栽群之設計，開發碳匯議題下最合宜之都市與里山森林營造策略。期望能透過計畫之執行，分析森林經營之碳匯成效，並規劃提高人工林碳吸存之最適經營策略與植栽群設計，以作為未來森林碳匯研究之參據。

本計畫規劃以多元尺度之航遙測影像配合地面樣區進行碳匯估算模式建置，本年度工作為進行模式推估前置作業之資料蒐集，目前已完成4種尺度航遙測影像蒐集及30個地面樣區建置。

本計畫本年度以臺灣尚楠為研究對象，分別建立單木層級之樹高曲線式及立木材積式，並建立林分層級之林齡—蓄積量推估模式，研究結果可供森林活動溫室氣體自願減量專案之碳匯效益推估及監測數據計算之參考。

為瞭解臺灣北中南不同氣候下適合城鄉之原生植物對於提升都市及里山綠地碳匯之效益，本計畫挑選了26種原生植物，於北部試驗區(臺北)、中部試驗區臺中及南部試驗區(嘉義)各設置一個樣區，以1m x 1m的樣區交錯栽植，再以土壤呼吸儀進行碳通量之量測。截至112年12月的結果顯示，就淨初生產量(net primary production, NCP)而言，北部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭、仙草、臺灣大戟、臺灣油點草及日本前胡；中部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭、石薺葶、龍牙草、馬蘭及仙草；南部試驗區前五名之物種分別為石薺葶、圓葉節節菜、澤芹、馬蘭及臺灣澤蘭。

二、執行成果英文摘要：

Net Zero Emissions is the global strategy that created for facing with climate crisis. It is an important goal for the whole countries. In the development plan of Net Zero Carbon Emissions, industry always have various methods but still difficult to reduce carbon emission, and finally naturalized through carbon sink. Among these items, forest carbon sink is a well-known skill that has been developed for many years. In the present for increasing the role of forest carbon sinks, planting trees, strengthening the management of forest to reduce degradation caused by carbon emissions, and increasing the growth of plants with tending measures that benefits for carbon sequestration, are good directions that can be made effort. Due to the massive forest area and high diversity in Taiwan, accurate estimation of woods accumulation and Growing change detection are the first skills to achieve the positive affect for carbon sink. In the past twenty years, the rapid development of Remote sensing provided effective solutions to the estimation of large-scale structure of biomass and carbon sequestration, and Lidar can upgeade the efficiency and accuracy of forest investigation. In 109 to





111, we had tried to develop many kinds of survey and estimation skills, such as woods growth mode, relative relationship mode, forest automatic identification mode, hyperspectral imaging and Lidar volume estimation, etc. This project will be planned to process with forest, stand and individual levels. For forest, we will use multi-scale Remote-aerial Survey to develop carbon sink detecting skill; for standing forest, we will discuss difference carbon sink about the structure of standing forest and integrate documents to construct the structure of high carbon sink benefits; for wood, we will use High-resolution Lidar to build an estimation model for important forest traits, such as height and volume equations. In addition, we will develop the most suitable urban and forest management strategy in this carbon sink issue through the design of high carbon sink functional planting groups. We hope the carbon sink effect of forest management can be analyzed, creating the design of the most suitable management about improving the carbon sequestration and group plantings, as the reference of forest carbon sink research in the future.

This project is designed to establish a carbon sequestration estimation model using multi-scale aerial remote sensing images with ground sample plots. The work for this year involves data collection for the pre-processing of model estimation. Currently, we have completed the collection of aerial remote sensing images at four different scales and the establishment of 30 ground sample plots.

The project was focus on *Calocedrus formosana*, to establish tree height and volume curves at individual tree level. And build an age-stock estimation model at the stand level. The results can be used in voluntary Greenhouse Gas reduction projects for carbon sink benefit estimation.

To elucidate the role of native plants in augmenting carbon sequestration in urban and peri-urban green spaces across distinct climatic zones of Taiwan. This project selected 26 native plant species. Three experimental plots, each measuring 1m x 1m, were established in chosen trial areas located in Northern (Taipei), Central (Taichung), and Southern (Chiayi) Taiwan. These plots were systematically interplanted with the aforementioned species to assess their carbon sequestration capabilities. Soil respiration instruments were employed to quantify carbon flux. As of December 2023, the findings revealed notable variations in net primary production (NCP) rankings among the different trial areas. In the Northern trial area, the top performers were *Eupatorium formosanum*, *Mesona chinensis*, *Euphorbia formosana*, *Tricyrtis formosana*, and *Peucedanum japonicum*. The Central trial area's NCP rankings were led by *Eupatorium formosanum*, *Mosla scabra*, *Agrimonia pilosa*, *Aster taiwanensis*, and *Mesona chinensis*. Meanwhile, in the Southern trial area, *Mosla scabra*, *Rotala rotundifolia*, *Sium suave*, *Aster taiwanensis*, and *Eupatorium formosanum* emerged as the leading species.

三、計畫目的：

- 完成4種尺度航遙測影像蒐集及30個地面樣區建置。
- 建立人工林重要樹種單木測計統計模式3式及林分結構分析模型1式。
- 城鄉綠基盤與裸露地碳匯能力之比較。





四、重要工作項目及實施方法：

1. 完成4種尺度航遙測影像蒐集及30個地面樣區建置。
 - (1) 蒐集航遙測技術應用森林碳吸存之相關文獻，了解國內外目前研究發展的現況，並參考前人研究的成果，確定本計畫所蒐集之4種尺度之航遙測影像。
 - (2) 蒐集試驗區域不同尺度之航遙測影像，透過多元多尺度航遙測材料與技術在森林覆蓋、樹種組成與碳吸存調查應用等不同的優勢進行整合，並結合現地森林調查資料，確立不同尺度航遙測與碳吸存量之估算模型，評估各尺度航遙測影像之推估成效，以做為未來全面碳吸存調查方法的參考依據。
 - (3) 規劃於不同林型區域設置地面調查樣區，透過地面樣區調查資料推算林分之材積量、地上生物量，並與航遙測影像發展推估模式。
2. 建立人工林重要樹種單木測計統計模式3式及林分結構分析模型1式。
 - (1) 透過地面光達蒐集點雲資料，以區分求積之方式獲取立木材積，建立人工林重要樹種單木測計統計模式。
 - (2) 設置具代表性之地面樣區，蒐集樣區內林分直徑分布情形，建立林分結構分析模型1式。
3. 城鄉綠基盤與裸露地碳匯能力之比較。
 - (1) 蒐集綠基盤與裸露地碳匯能力及植栽之相關文獻及案例，了解國內外目前研究發展的現況。
 - (2) 比較3個不同地點之都市綠基盤及裸露地的碳匯能力，進行兩者碳吸存量及溫室氣體通量之量測。
 - (3) 選擇可行性植物種類作為基礎種類，進行其碳吸存及溫室氣體通量之量測，找出適合都市綠空間使用且具高碳匯功能的都市植栽群，以作為後續於公園、河岸及都會區立體植栽物種挑選之參考。

五、結果與討論：

運用航遙測技術優化森林碳匯變化監測體系：

1. 本計畫規劃以多元尺度之航遙測影像配合地面樣區進行碳匯估算模式建置，因此本年度工作為進行模式推估前置作業之資料蒐集，本年度應完成4種尺度航遙測影像蒐集及30個地面樣區建置。

- 完成4種尺度航遙測影像蒐集

本計畫目前已完成六龜試驗林四種尺度航遙測影像蒐集(如圖1.1)，針對每類型影像拍攝時間及影像特性分述如下：

- 空載光達

光達是主動式光學測距儀器，透過雷射脈衝達到物體反射時間差可準確計算距離與反射點位置。不同於攝影測量僅能測量地形地物表面，光達的雷射測距方法可以穿透部分植被縫隙，能取得不同植被層與地表物體或地面的三維點位。

本計畫所使用之空載光達資料為林試所委外拍攝取得之影像，採用Optech ALTM Pegasus HA500全波形光達感測器掃描，光達資料測繪作業時間為2020年11月1日、2020年11月2日及2021年4月2日等三趟飛航任務所組成，經率定檢核資料高程誤差量小於0.1公尺，水平誤差量小於0.4公尺。在點雲密度規劃為原始點雲第一或最後回波之平均密度每平方公尺不低於2點，在人工造林地的範圍不低於10點。在地形資料部份，主要產出1m x 1m解析度數值地表模型(DSM)及數值高程模型。

- SPOT影像



1122565



SPOT衛星為法國發射，其於1986年2月發射第一顆衛星 (SPOT-1)即展開SPOT序列衛星觀測任務，目前SPOT系列後續衛星SPOT-6及SPOT-7仍在進行運轉，影像產品解析度最高可達1.5公尺(全色態1.5公尺，多光譜6公尺)，多光譜波段包含R、G、B、NIR四個波段，重訪頻率為1天。本計畫使用之SPOT影像為SPOT6，拍攝日期為2020年7月20日。

- 高解析航照影像

本計畫所使用之高解析航照影像為林務局農林空測量所提供，農航所自2022年下半年開始即啟用DMC第三代數位相機，新式相機採用了最新CMOS感測器技術，像幅大約為第一代感測器的四倍，得以大幅減少航線數或提高地面解析度，可依需求作彈性規劃。此外，因具有超高像素之CMOS感測器，因此在單一全色域鏡頭拍攝時，可免除融合後製處理與潛在之各像幅邊界鑲嵌問題；且由於CMOS感測器的性能已大幅超越CCD感測器技術，無論在影像的成像品質，暗部細節，雜訊處理，皆有大大的改善。DMC III四個多光譜的波長為blue (435~495 nm)、green (525~585 nm)、red (619~651 nm)、NIR (808~882 nm)，單一像幅尺寸為25728像元×14592像元。本計畫所使用影像拍攝日期為2022年12月10、11及25日三趟任務組成，影像解析度為15公分。

- Worldview高解析衛星影像

WorldView-2 衛星影像為美國Maxar公司所屬，是一顆具有八個多光譜波段和高空間解析度感測器之商業衛星，其重新訪問和獲取完全相同位置影像所需平均時間為 1.1 天，空間解析度為0.46~0.52 m (全色波段，450~800 nm) 和 1.84~2.08 m (多光譜波段)。八個多光譜波段分別為coastal blue (400~450 nm)、blue (450~510 nm)、green (510~580 nm)、yellow (585~625 nm)、red (630~690 nm)、red-edge (705 ~745 nm)、NIR1 (770~895 nm) 和 NIR2 (860~1040 nm)。WorldView-3 則為第四代高解析度的衛星影像，具有更佳的全色波段0.3 m和多光譜波段1.2 m空間解析度，除了WorldView-2的八波段外，更多了八個SWIR 波段(1195~2365 nm)、12個CAVIS ACI 波段(desert clouds、aerosol-1、aerosol-2、aerosol-3、green、water-1、water-2、water-3、NDVI-SWIR、cirrus、snow，波長為405~2245 nm)。

本計畫所使用之Worldview2衛星影像包含R、G、B、NIR四個波段，解析度為50公分，拍攝日期為2021年10月6日及2021年1月17日之組合影像。

2. 完成37個地面樣區建置與調查

本計畫以六龜試驗林人工區域多尺度航遙測影像，結合地面樣區測量及調查資料，進行蓄積量推估模式建置，本年度目標為完成30個地面樣區調查，每樣區面積為0.05公頃，調查項目包含胸高直徑、樹高、樹種、立木至基線的垂直與水平距離，每樣區定位則是選取樣區長邊的中央基線，利用RTK測量定位基線端點，立木的座標位置，則是利用立木至基線相對位置解算求得，目前完成37個地面樣區，樣區及立木GIS圖如圖1.2，調查所建置之屬性資料如表1.1。

3. UAV光達資料蒐集

無人飛行載具(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)，俗稱無人機或無人飛機，指的是不需駕駛員在機內駕駛的飛機。無人飛機包括線控(Wire piloted)、無線電遙控(Radio piloted)及自動導航(Auto piloted)等，其中以自動導航者具有完整系統特性，又稱無人飛機系統(Unmanned Aircraft System, UAS)。無人飛機系統因其具有機動力強、時效性快、經費較廉、及較寬鬆天氣條件即可操作的優點等特性，可取得研究區即時、清晰、全面之中低空照片，作為研究分析最基礎、最重要的空間資訊。

近年來無人飛機系統的快速發展，以及光達測量設備的輕量化，使得空間資料的蒐集與調查更加便利快速。現今科技的快速成長，輕量型光達儀器已可由無人機來酬載，並可得到比空載光達數倍高解析度之高精度地形資料，彌補傳統上細微處判釋的不足。因此本案採用UAV光達





技術拍攝六龜試驗林光達點雲資料，以利後續結合地面調查資料，建置森林蓄積量推估模式，有效全面推估森林資源，盤點經濟林生長狀況。

主要拍攝區域為六龜試驗林轄區第1、2、3及4林班範圍內，拍攝15 組區域，每區拍攝範圍規格為100m * 100m，總拍攝面積為15 公頃，15個UAV樣區拍攝位置如圖1.3，相關作業及拍攝成果剖面圖如圖1.4。

4. UAV航照正射影像

本案進行UAV光達取像時，同步於UAV搭載航拍相機，針對15個樣區進行航拍取像，產製10公分高解析度正射影像，並配合本次高精度數值地形模型資料作為正射影像 糾正之高程資料，消除相片上投影誤差，正射成果如圖1.5。

5. UAV光達與地測初步分析

根據前人研究顯示UAV光達可產生非常高密度點雲資料，對於測量樹木位置、高度及冠層寬度有助益，可優化森林小尺度調查的選擇工具(Wallace et al. ,2012)；並且高解析度樹冠高度模型(CHM)常被用來估算單株樹高或林分高度、冠層孔隙分布狀況，進而分析林分組成狀況(Getzin et al.,2017)；Brede et al. (2017)同時比較空載、及地面光達調查結果，發現地面光達有時較困難測到冠層頂部，並且進一步推估兩者DBH的相關程度，提出空中光達具有DBH推估的潛力；Liao et al. (2022)則提出UAV 光達資料與現場測量的DBH結合，可以有效提高蓄積量估算的準確性，並且可能是未來樣區調查資料收集的新方向。

6. UAV光達、空載光達及地面樣區調查資料之比較

綜合前人研究的成果，本計畫在進行推估模式建置前，先進行UAV光達、空載光達及地面樣區調查資料之比較，以做為後續研究之參考，本計畫初步以10個重疊樣區進行分析，所得結果如表1.2，由表中可看出空載光達10個樣區樹高平均值為13.1，而地面調查與UAV光達樹高平均值分別為13.3與14.3，因空載光達的拍攝時間為2020年距本年度有2年多的差距，因此樹高平均值較低，符合林木生長特性，而UAV光達的樹高量測值較地面量測值高，也與前人研究普遍UAV光達測樹高較地面測樹高高的結果一致。若以空載光達與UAV光達所測樹高之之差值來分析，由圖1.6可看出兩者之 R^2 高達0.98，表示這兩種調查方式有極高的關連性，此研究結論可做為日後利用空載光達與UAV光達推估蓄積量之參考。

人工林經營之碳匯成效：

1. 運用地面光達資訊建立六龜地區臺灣肖楠人工林樹高曲線式及立木材積式

本計畫以Trimble x7雷射掃描儀取得臺灣肖楠人工林單木之胸徑及樹高資訊(圖2.1)，並運用Trimble Realworks軟體結合區分求積法，取得立木不同高度之直徑資訊，以計算立木材積。同時運用下列常見之樹高曲線式及立木材積式模型，以SAS統計軟體配適模式，結果如表2.1所示。由表中可知，樹高曲線式(1式)之RMSE值約為2.3926公尺，曲線圖如圖2.2所示，由圖中可知，本林分之臺灣肖楠單木樹高生長已漸趨緩，惟尚未達漸近線，優勢木之樹高生長應仍有一定之成長空間。配適效果最佳之立木材積式為3式(如表2.1)，其RMSE值為0.0797公尺，曲線圖如圖2.3所示。另由立木材積式2式之模擬效果略低於3式，其RMSE值為0.0985公尺，兩者之差異僅於曲線是否通過原點，雖以理論而言，無胸徑及無材積，惟模式建立之自變數區間本無包含原點，故兩式應皆可使用。由2式換算可知，本區域臺灣肖楠之形數為0.4745，較林業及自然保育署所使用之通用形數0.45略高(如圖2.4)，惟差異不大，其誤差約僅5%。又由4式及5式可知(表2.1)，胸徑對於材積之解釋力高於樹高，僅含胸徑之模式其誤差約為最佳模式(3式)之兩倍。僅含樹高之模式則因誤差過大，不建議使用。

2. 臺灣肖楠人工林林齡及林分蓄積量模式之建立





本計畫共計收集33個臺灣尚楠林分之蓄積量(如圖2.5、2.6)，樣本來自於林業及自然保育署新竹、臺中、南投、嘉義及屏東分署之樣區與本所蓮華池及六龜之樣區調查資料。本計畫以Schumacher生長模式建立林齡對林分蓄積量之推估式，結果如圖2.7所示；由圖中可知，臺灣尚楠林分生長至林齡100年時，蓄積量仍持續上升中，惟生長趨勢已漸緩，其生長潛能約為每公頃1,428平方公尺(土地承載力上限)。另運用模式模擬之結果進行平均生長量及連年生長量之推估，推估結果如圖2.8所示，連年生長曲線之反曲點約發生於37年，顯示臺灣尚楠林分至37年生時，生長速率已開始下降；平均生長曲線之最大值約發生於73年，顯示若以材積收穫最大化之考量，則林分輪伐期約可訂為70年左右，惟仍視各林分狀態及經營目標而定。

3. 森林碳匯活動溫室氣體抵換專案中減量額度計算之實務指南

本計畫透過蒐集國內外文獻及法令規章，結合林地野外調查之實務經驗，完成撰寫森林碳匯活動溫室氣體抵換專案中減量額度計算之實務指南，其中包含蓄積量預估之方式(確證所需)及碳匯監測與計算流程(MRV；查證所需)，未來可適用於森林活動溫室氣體自願減量專案中(此部分僅完成撰寫，尚未進行發表)。

4. ISO14064及14067碳盤查及碳足跡課程

為使本所執行淨零排放計畫團隊之成員接軌國際，了解碳盤查及碳足跡作業之相關規範與執行細節，本所特開辦研習課程，邀請台灣德國北德技術監護顧問股份有限公司(環境部溫室氣體合格查驗機構)之講師進行合計7日之教育訓練，預估共計訓練50人次，訓練人員於測驗合格後將取得ISO 14064-1、14067主任查證員及14064-2內部查證員證照。

自然式植栽設計對淨零減碳的貢獻：

完成北部試驗區(臺北)、中部試驗區臺中及南部試驗區(嘉義)中26種原生植物淨初生產量(net primary production, NCP)之測量。結果顯示北部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭、仙草、臺灣大戟、臺灣油點草及日本前胡；中部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭、石薺葶、龍牙草、馬蘭及仙草；南部試驗區前五名之物種分別為石薺葶、圓葉節節菜、澤芹、馬蘭及臺灣澤蘭。

六、結論：

1. 本計畫已蒐集多元尺度之航遙測影像，並完成30個地面樣區建置。未來將結合航遙測影像所衍生的指標，並搭配不同的演算方法，建置森林蓄積量推估模型。
2. 本計畫本年度以臺灣尚楠為研究對象，分別建立單木層級之樹高曲線式及立木材積式，並建立林分層級之林齡—蓄積量推估模式，研究結果可供森林活動溫室氣體自願減量專案之碳匯效益推估及監測數據計算之參考。
3. 由於北中南氣候條件不同，致使有碳匯潛力又適合栽植的原生草本植物種類不同。就臺灣北部而言，目前建議選擇臺灣澤蘭、仙草、臺灣大戟、臺灣油點草及日本前胡；臺灣中部建議選擇臺灣澤蘭、石薺葶、龍牙草、馬蘭及仙草；臺灣南部則建議選擇石薺葶、圓葉節節菜、澤芹、馬蘭及臺灣澤蘭。

七、參考文獻：

1. 李久先、顏添明 (1992) 人工林林分生長之探討—疏伐對林分結構及生長之影響。中興大學實驗林研究報告，16(1)：103-113。
2. 李久先、顏添明、鍾昇興 (1996) 森林經營理念及林木資訊相關問題之研究。台灣林業，22(6)：22-26。





3. 李隆恩、顏添明 (2010) 紅檜人工林疏伐後4年對林分及單木層級之影響。中華林學季刊, 43(2): 249-260。
4. 李隆恩、顏添明 (2019) 紅檜人工林疏伐後不同期間之疏伐效益分析。林業研究季刊, 41(4): 273-283。
5. 杜清澤、邱志明、林國銓 (2011) 人倫地區柳杉人工林地上部與地下部生物量之估算。中華林學季刊, 44(3): 401-412。
6. 邱志明、唐盛林、彭炳勳、鍾智昕 (2017) 紅檜人工林不同林分密度生長與自我疏伐之研究。中華林學季刊, 50(1): 19-32。
7. 陳鈺惠、楊銘鑫、王兆桓 (2010) 紅檜和台灣杉人工林單木直徑生長與枯死模式之研究。宜蘭大學生物資源學刊, 6(1): 71-77。
8. 黃進睦、吳孟珊、陳溢宏、陳麗琴 (2014) 蓮華池巒大杉二次疏伐對林份材積影響之研究。林業研究專訊, 32(5): 69-72。
9. 顏添明、李久先 (1998) 應用Richards生長模式分析疏伐林分之單木生長。中華林學季刊, 31(2): 165-176。
10. 羅卓振南、鍾旭和、邱志明 (1997) 疏伐與修枝對紅檜人工林生長之效應。台灣林業科學, 12(2): 145-153。
11. Abernethy, N. C. (1981) Predicted and projected diameter distributions of thinned old-field slash pine plantations. Masters thesis, School of Forest Research, University of Georgia.
12. Cannell, M. G. R., P. Rothery and E. D. Ford (1984) Competition within stands of *Picea sitchensis* and *Pinus contorta*. Annals of Botany 53: 349-362.
13. Hamilton, D.A. (1986) A Logistic Model of Mortality in Thinned and Unthinned Mixed Conifer Stands of Northern Idaho. Forest Science 32: 989-1000.
14. Harper, G., M. O' Neill, P. Fielder, T. Newsome and C. Delong (2009) Lodgepole pine growth as a function of competition and canopy light environment within aspen dominated mixedwoods of central interior British Columbia. Forest Ecology and Management 257: 1829-1838.
15. Kariuki, M. (2008) Modelling the impacts of various thinning intensities on tree growth and survival in a mixed species eucalypt forest in central Gippsland, Victoria, Australia. Forest Ecology and Management 256: 2007-2017.
16. Wang D.-H., S.-C. Tang, H.-C. Hsieh and C.-H. Chung (2008) Site Index Curve for Taiwania Plantations in the Liukuei Area. Taiwan Journal of Forest Science 23(4): 335-349.
17. Wang D.-H., C.-H. Chung, H.-C. Hsieh, S.-C. Tang and T.-H. Chen (2011) Baseline Survey and the Immediate Thinning Impact on the Stand Composition of Woody Plants and Overstory Structure of a Sugi Plantation (*Cryptomeria japonica*) in the Zenlen Area. Taiwan Journal of Forest Science 26(3): 295-303.
18. Wang D.-H., C.-H. Chung, H.-C. Hsieh, S.-C. Tang and T.-H. Chen (2015) Three-year Patch Thinning Effects on the Stand Structure in Overstory Trees of a Japanese Cedar Plantation in Taiwan. Taiwan Journal of Forest Science 30(1): 55-74.





19. Yen, T. M (2015) Relationships of *Chamaecyparis formosensis* crown shape and parameters with thinning intensity and age. *Annals of Forest Research* 58 (2): 323-332.
20. Yen, T. M. and C. T Wang (2013) Assessing carbon storage and carbon sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in Taiwan. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 20 (5): 455-460.
21. Yen, T. M., J. S. Lee and K. L. Huang (2008) Growth and yield models for thinning demonstration zones of taiwan red cypress (*Chamaecyparis formosensis* Matsum.) and japanese cedar (*Cryptomeria Japonica* D. Don) plantations in central Taiwan. *Quarterly Journal of Forest Research* 30 (3): 31-40.
22. Yen, T. M., J. S. Lee, C. L. Li, Y. T. Chen (2013) Aboveground biomass and vertical distribution of crown for Taiwan red cypress 20 years after thinning. *Dendrobiology* 70: 109-116.
23. Yen, T. M., L. M. Ai, C. L. Li, J. S. Lee and K. L. Huang (2009) Aboveground carbon contents and storage of three major taiwanese conifer species. *Taiwan Journal of Forest Science* 24 (2): 91-102.
24. Yen, T.-M., K.-L. Huang, L.-E. Li and C.-H. Wang (2019) Assessing carbon sequestration in plantation forests of important conifers based on the system of permanent sample plots across Taiwan. *Journal of Sustainable Forestry*. 39(4):392-406.



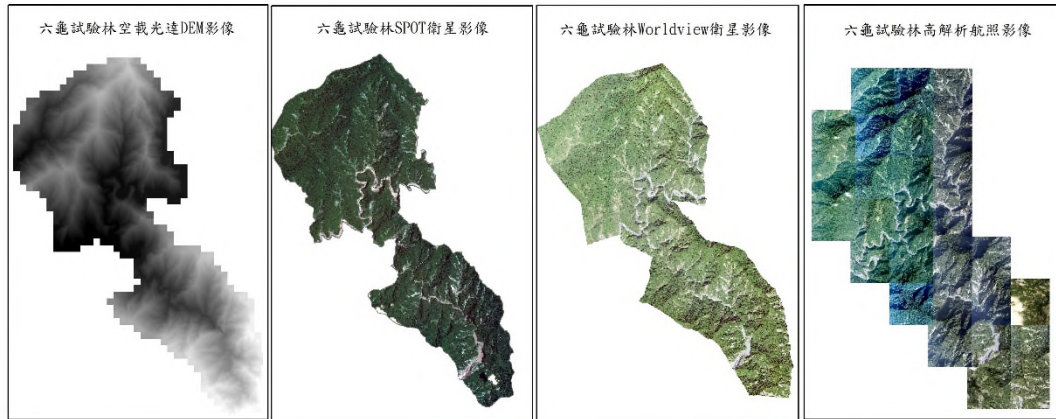
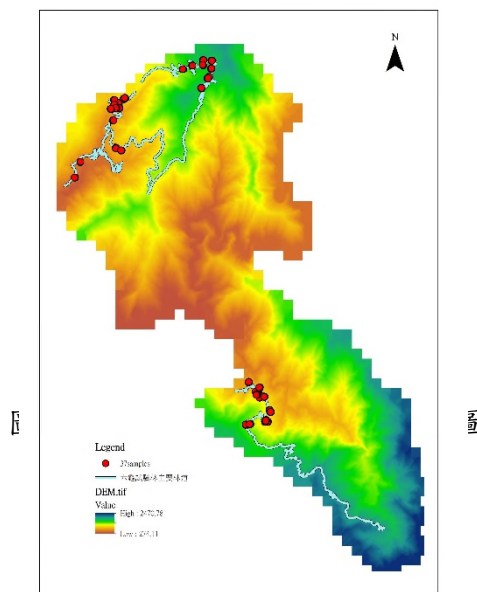


圖 1.1、多元尺度航遙測影像



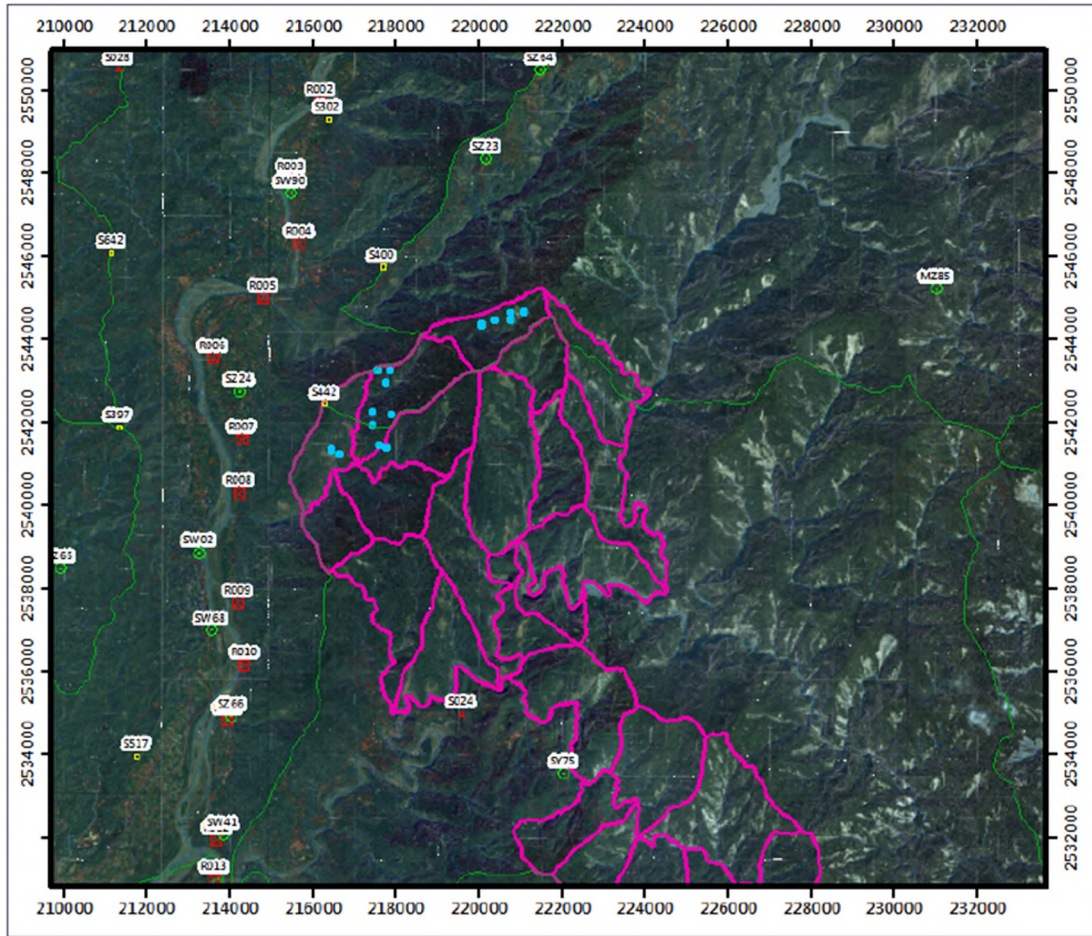


圖 1.3、15 個 UAV 拍攝樣區空間位置圖

UAV 光達拍攝

miniVUX-3 UAV 光達

六龜試驗林航線規劃

點雲平均密度每平方公尺210點

光達資料剖面圖1

地面佈標定位

光達資料剖面圖2

圖 1.4、UAV 光達拍攝作業及地形成果剖面圖





圖 1.5、UAV 航照正射影像成果

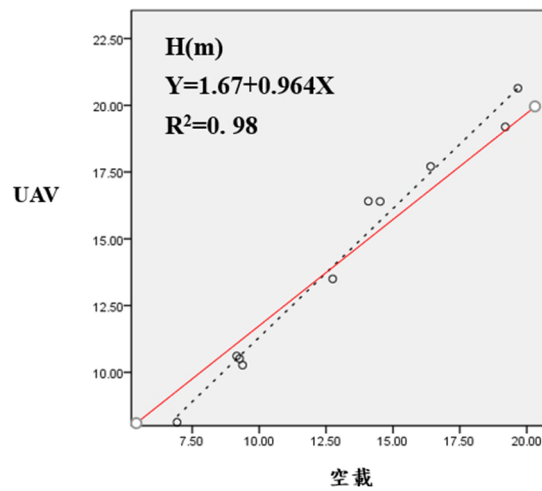


圖 1.6、UAV 光達與空載光達樹高差值散點圖





圖 2.1、以 Trimble x7 雷射掃描儀獲取六龜地區臺灣肖楠人工林性態值資訊

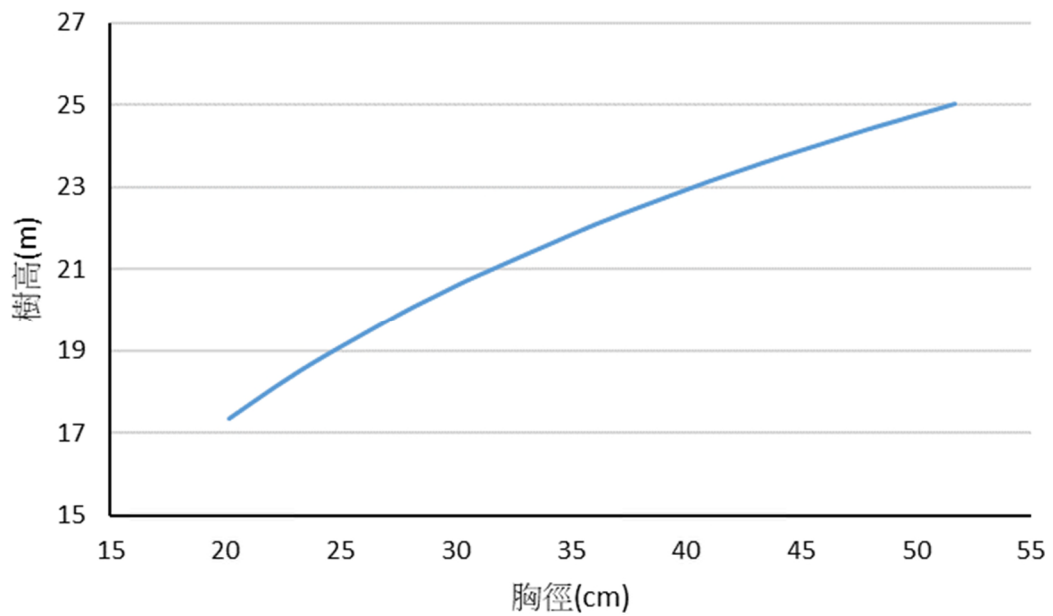


圖 2.2、樹高模擬曲線圖



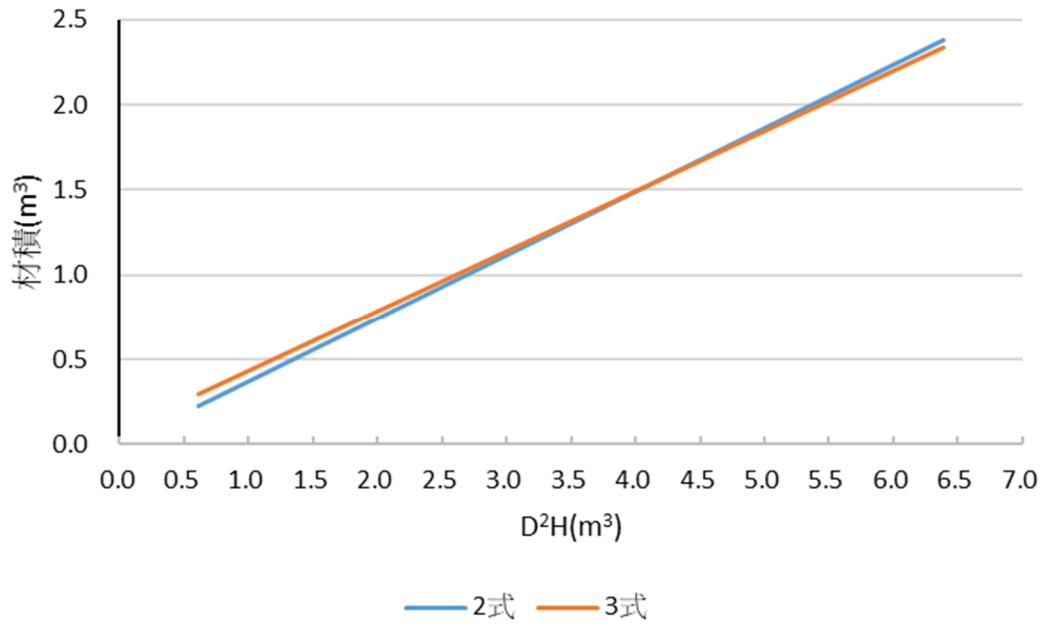


圖 2.3、立木材積模擬曲線圖

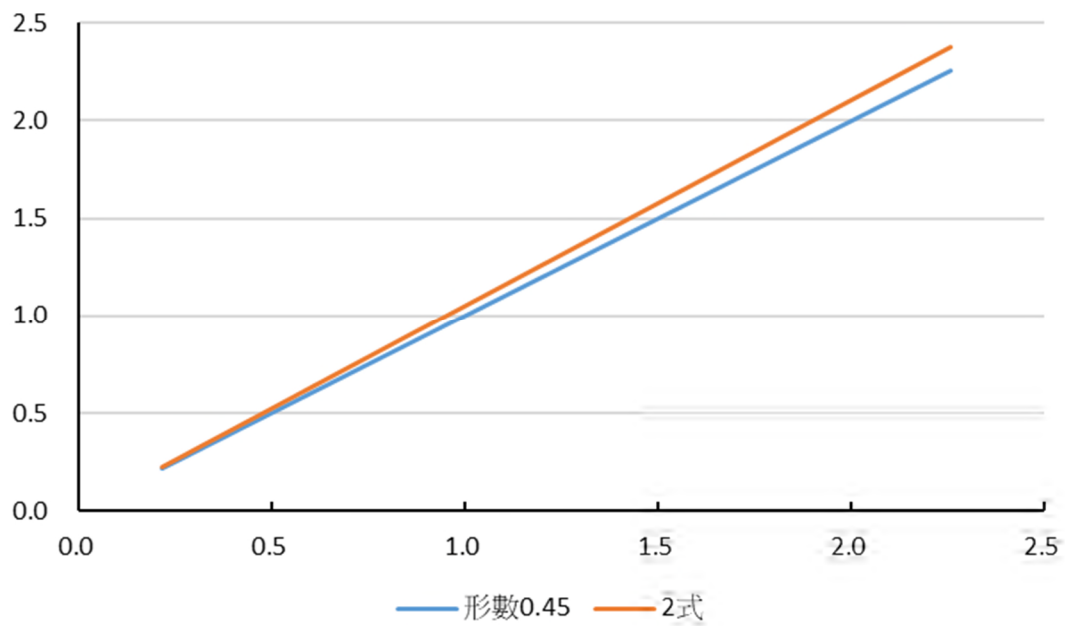


圖 2.4、立木材積模擬與形數 0.45 推估之差異圖





圖 2.5、蓮華池試驗林臺灣肖楠人工林樣區調查情形



圖 2.6、六龜試驗林臺灣肖楠人工林樣區調查情形



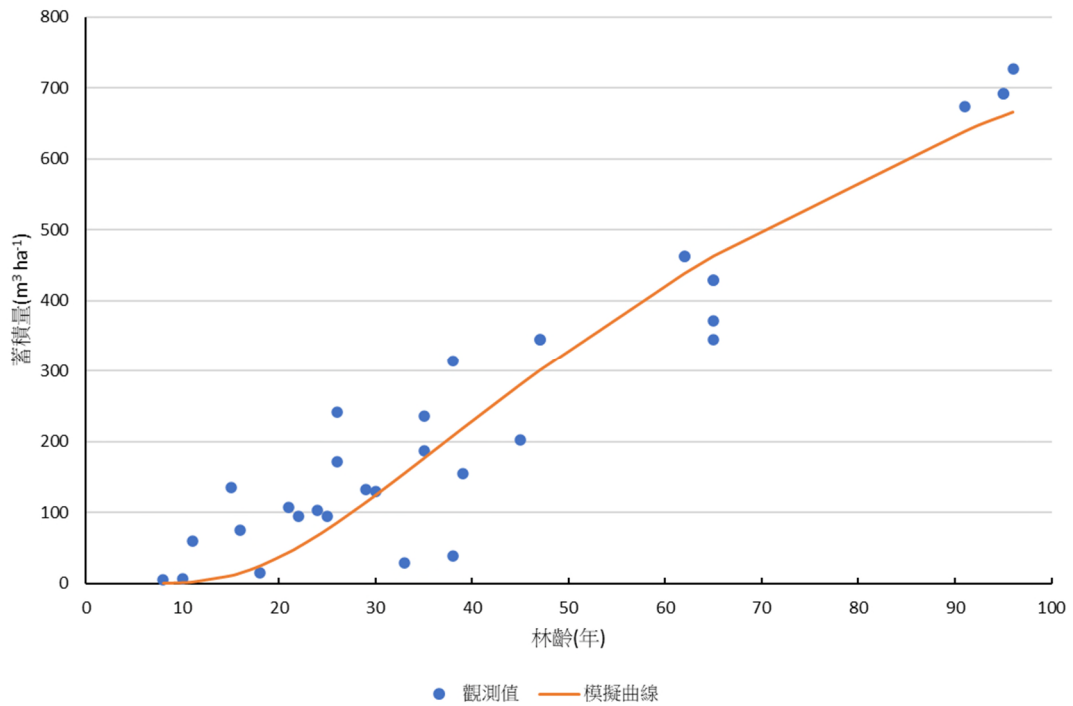


圖 2.7、六龜試驗林臺灣肖楠人工林每公頃蓄積量模擬曲線圖

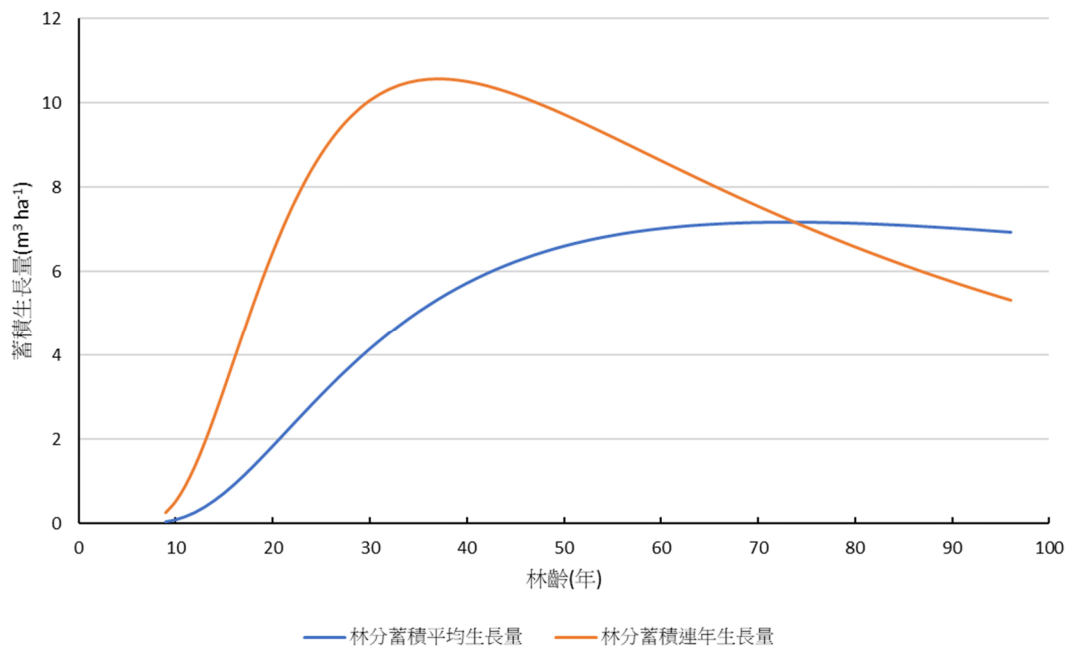


圖 2.8、六龜試驗林臺灣肖楠人工林每公頃生長量模擬曲線圖



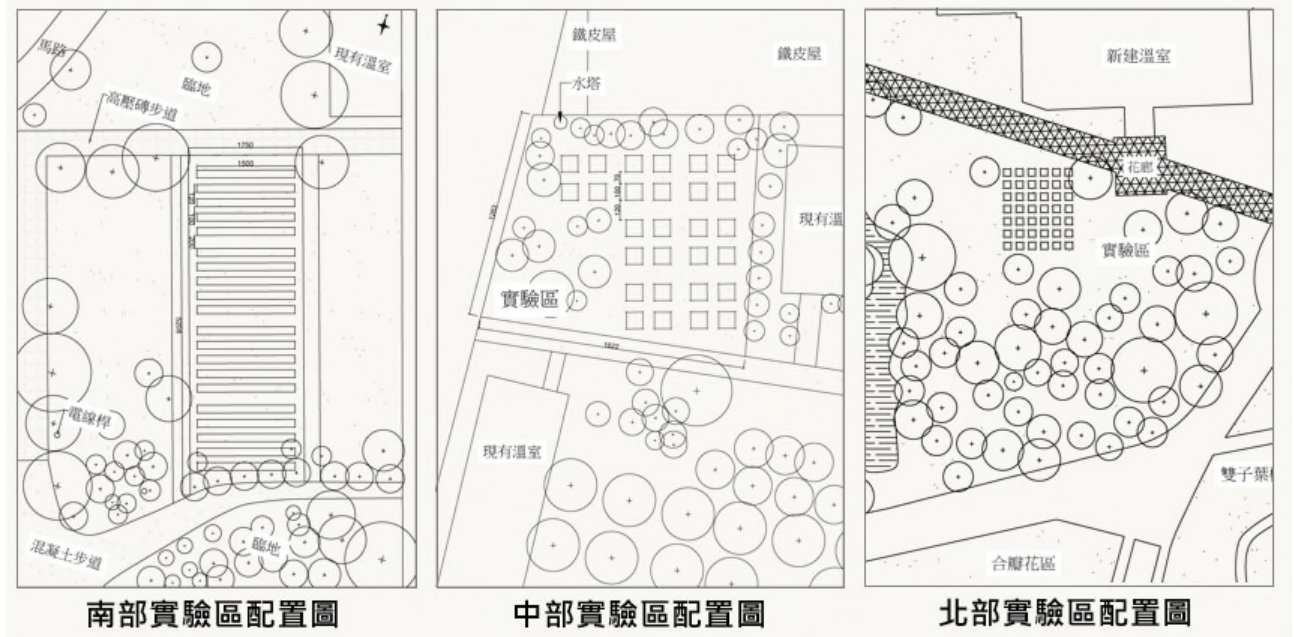


圖 3.1、本試驗北中南實驗區配置圖。



圖 3.2、物種碳通量量測示意圖。



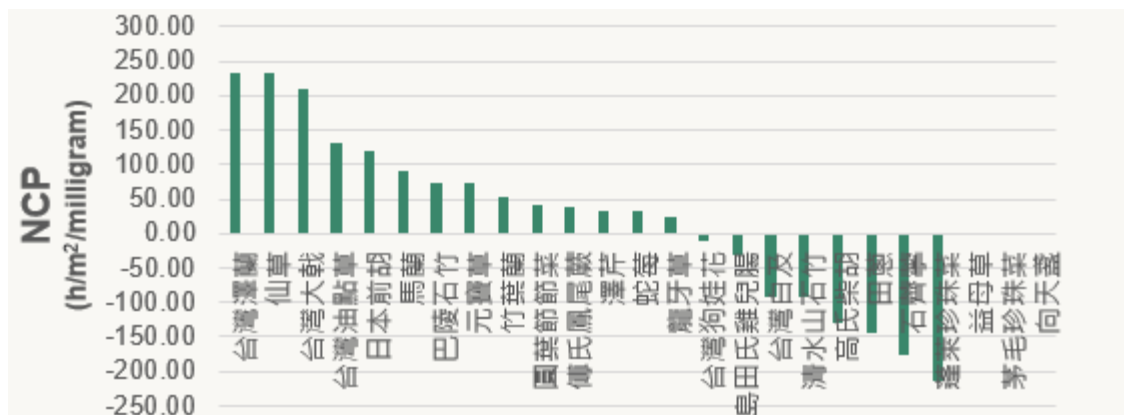


圖 3.3、北部試驗區(臺北)物種夏季及秋季平均 NCP 排序圖。



圖 3.4、中部試驗區(臺中)物種夏季及秋季平均 NCP 排序圖。

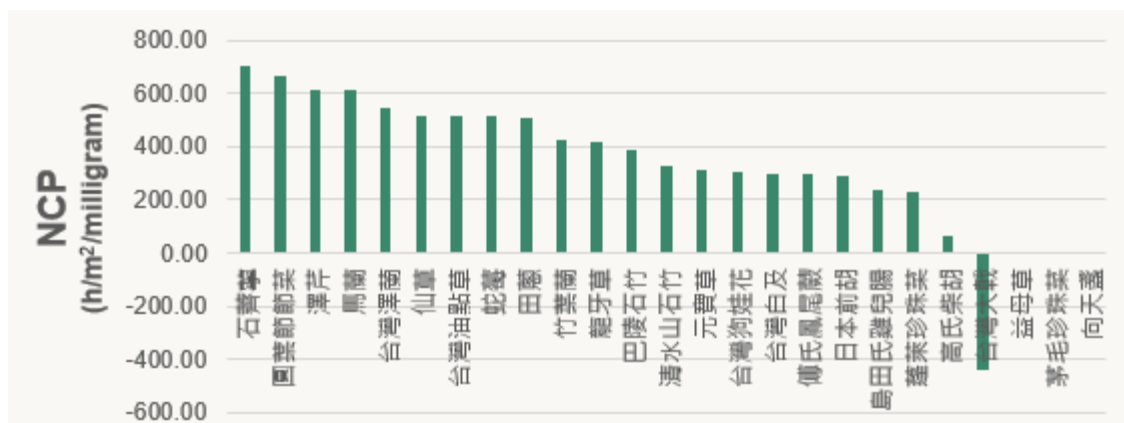


圖 3.5、南部試驗區(嘉義)物種夏季及秋季平均 NCP 排序圖。





表 1.1、樣區立木調查屬性資料表

Plot	Shape	樣點編號	林班	調查日	徑木編號	紀錄類型	徑木距離	徑木編號	樹種	胸高直徑	樹高	備註	樣區_1	材質_V_	樣區_12	TW1997_X	TW1997_Y
0	Point 2M	1	1	20200427	1	1	0.8	2.7	臺灣杉	33.2	11.5		0.8	0.42894488	6.1	220699.2819	254664.284
1	Point 2M	1	1	20200427	2	1	0.4	8.6	臺灣杉	48	18.6		0.4	1.078831245	0.2	220699.4005	254663.255
2	Point 2M	1	1	20200427	3	1	0.6	8.6	山龍眼科	12.1	6.9		0.6	0.03570444	0.2	220699.4955	254663.065
3	Point 2M	1	1	20200427	4	1	6	8.6	山龍眼科	14.2	11.4		6	0.081249623	0.2	220694.7123	254657.925
4	Point 2M	1	1	20200427	5	1	7.28	7.8	臺灣杉	49.8	13.5		7.28	1.106851426	1.1	220695.788	254656.988
5	Point 2M	1	1	20200427	6	1	8	4.7	山龍眼科	6	5.4		8	0.006870663	4.1	220698.9581	254656.92
6	Point 2M	1	1	20200427	7	1	10.94	6.4	臺灣杉	25	12.8		10.94	0.266627917	2.4	220697.9663	254653.73
7	Point 2M	1	1	20200427	8	1	12.9	4.3	臺灣杉	37.9	21.7		12.9	0.9414732	4.5	220700.4515	254652.348
8	Point 2M	1	1	20200427	9	1	11.25	4.4	殼斗科	7	9.2		11.25	0.015932857	4.4	220699.9824	254653.899
9	Point 2M	1	1	20200427	10	1	12.4	0.5	臺灣杉	28.5	18.2		12.4	0.46399847	8.3	220704.0366	254653.656
10	Point 2M	1	1	20200427	11	1	18.35	3.2	臺灣杉	29.2	17.8		18.35	0.47804717	5.6	220702.75	254647.414
11	Point 2M	1	1	20200427	12	1	17.26	6.5	雜木	8.4	6.2		17.26	0.015461557	2.3	220699.2922	254647.691
12	Point 2M	1	1	20200427	13	1	19.46	7.4	臺灣杉	37.6	17.1		19.46	0.76737873	1.4	220698.9131	254645.389
13	Point 2M	1	1	20200427	14	1	22.2	8.2	臺灣杉	49.6	24.3		22.2	1.75450994	0.6	220698.752	254642.597
14	Point 2M	1	1	20200427	15	1	24.86	7.8	臺灣杉	37.5	18.4		24.86	0.80967973	1	220699.7407	254640.157
15	Point 2M	1	1	20200427	16	1	27	6.3	臺灣杉	27.2	12.5		27	0.30900045	2.5	220701.6826	254638.466
16	Point 2M	1	1	20200427	17	1	25.7	2.2	臺灣杉	29.5	18.8		25.7	0.32047802	6.6	220705.3795	254640.648
17	Point 2M	1	1	20200427	18	1	28.85	0.3	臺灣杉	29.4	17.4		28.85	0.475818881	8.5	220706.8114	254642.847
18	Point 2M	1	1	20200427	19	1	26.92	0.5	臺灣杉	36.5	21.8		26.92	0.876304135	8.3	220707.3085	254639.878
19	Point 2M	1	1	20200427	20	1	29	2	臺灣杉	34.3	13		29	0.5085562	6.8	220706.3176	254637.153
20	Point 2M	1	1	20200427	21	1	27.6	3.1	臺灣杉	63.1	27.2		27.6	1.09201465	5.5	220704.7371	254638.586
21	Point 2M	1	1	20200427	22	1	26.1	2.6	臺灣杉	35.1	25.6		26.1	0.915043293	6.2	220705.0802	254640.175
22	Point 2M	1	1	20200427	23	1	25.4	6.6	臺灣杉	35.7	21.7		25.4	0.83545186	2.2	220701.0301	254639.92
23	Point 2M	1	1	20200427	24	1	28.16	7.7	臺灣杉	48	28.8		28.16	1.620422659	1.1	220699.4549	254641.799
24	Point 2M	1	1	20200427	25	1	21.95	6.3	臺灣杉	37.7	22.1		21.95	0.944754532	2.5	220700.5446	254643.273
25	Point 2M	1	1	20200427	26	1	22.06	3.7	雜木	10.9	9.8		22.06	0.041151102	5.1	220703.9965	254643.767
26	Point 2M	1	1	20200427	27	1	22.75	3	臺灣杉	38	3.6		22.75	0.19996788	5.8	220703.7961	254643.722
27	Point 2M	1	1	20200427	28	1	21.62	1.2	臺灣杉	24.8	21.5		21.62	0.400246383	7.6	220705.4331	254644.262
28	Point 2M	1	1	20200427	29	1	18.36	1.5	臺灣杉	29.3	29.6		18.36	0.59949387	7.3	220704.5417	254647.225
29	Point 2M	1	1	20200427	30	1	18.75	6.7	臺灣杉	36.6	18.5		18.75	0.774627992	2.1	220699.4343	254646.227
30	Point 2M	1	1	20200427	31	2	18.36	4	臺灣杉	43.4	21.7		18.36	1.24550902	1.8	220709.7986	254649.003
31	Point 2M	1	1	20200427	32	2	16.54	2.2	臺灣杉	46	25.2		16.54	1.53333349	1.1	220707.5969	254650.38
32	Point 2M	1	1	20200427	33	2	13.46	1.1	臺灣杉	46.2	24		13.46	1.510671251	9.9	220705.8325	254653.059
33	Point 2M	1	1	20200427	34	2	9.95	0.3	山龍眼科	6.5	8.2		9.95	0.012244554	9.1	220704.263	254656.215
34	Point 2M	1	1	20200427	35	2	7.5	2.9	臺灣杉	44.5	26.4		7.5	1.504563889	11.7	220706.241	254659.146
35	Point 2M	1	1	20200427	36	2	9.56	6.6	臺灣杉	30.3	21.6		9.56	0.59966687	15.4	220710.3057	254658.038
36	Point 2M	1	1	20200427	37	2	6.56	6.6	臺灣杉	41.3	26.6		6.56	1.30119659	15.4	220709.6297	254660.899
37	Point 2M	1	1	20200427	38	2	3.67	7.3	臺灣杉	48.2	25.7		3.67	1.79315355	16	220709.5623	254663.762
38	Point 2M	1	1	20200427	39	2	1.7	7.8	臺灣杉	29.7	17.36		1.7	0.308628381	16.6	220709.7023	254665.796
39	Point 2M	1	1	20200427	40	2	1.9	3.8	臺灣杉	26	19.6		1.9	0.405047481	12.6	220705.8549	254664.684
40	Point 2M	1	1	20200427	41	2	3.85	1.7	臺灣杉	29.8	15.5		3.85	0.44479696	10.5	220704.208	254662.344
41	Point 2M	2	2	20200430	1	1	0.2	2.4	雜木	13.5	4.8	與 3、2 為同株分枝	0.2	0.030917984	6.4	217590.1518	254149.833
42	Point 2M	2	2	20200430	2	1	0.2	2.4	雜木	8	5.6		0.2	0.01266902	6.4	217590.1518	254149.833
43	Point 2M	2	2	20200430	3	1	0.2	2.4	雜木	8.8	4.2		0.2	0.011495213	6.4	217590.1518	254149.833
44	Point 2M	2	2	20200430	4	1	0.4	3.6	水冬瓜	10	6.1		0.4	0.02155918	5.2	217591.367	254149.899
45	Point 2M	2	2	20200430	5	1	3.1	2.3	雜木	6.1	6.1		3.1	0.008022171	6.5	217590.9963	254152.734
46	Point 2M	2	2	20200430	6	1	4.2	1.1	江菓	53.2	14.5		4.2	1.450419607	7.2	217589.3351	254153.958
47	Point 2M	2	2	20200430	7	1	3.66	3.3	殼斗科	7.1	6.8		3.66	0.012151128	5.5	217591.4556	254153.161
48	Point 2M	2	2	20200430	9	1	7	8.7	水冬瓜	12.3	6.8	與 10 為同株分枝	7	0.08359804	0.1	217597.2135	254155.837
49	Point 2M	2	2	20200430	10	1	7	8.7	水冬瓜	17.7	7.4		7	0.081997111	0.1	217597.2135	254155.837
50	Point 2M	2	2	20200430	11	1	6.7	5	雜木	9.6	11.6	與 12、13 為同株分枝	6.7	0.03783558	3.8	217599.504	254155.978
51	Point 2M	2	2	20200430	12	1	6.7	5	雜木	6.3	4.4		6.7	0.006172146	3.8	217599.504	254155.978
52	Point 2M	2	2	20200430	13	1	6.7	5	雜木	25.2	12.7		6.7	0.265049911	3.8	217599.504	254155.978
53	Point 2M	2	2	20200430	14	1	5.74	3.3	雜木	11.9	8.9		5.74	0.044543704	5.5	217591.7022	254155.226
54	Point 2M	2	2	20200430	15	1	6.5	1.3	雜木	8.2	6.8	與 16 為同株分枝	6.5	0.016159913	7.5	217589.8064	254156.218
55	Point 2M	2	2	20200430	16	1	6.5	1.3	雜木	7.3	6.3		6.5	0.011865572	7.5	217589.8064	254156.218
56	Point 2M	2	2	20200430	17	1	7.1	2.5	雜木	7	9.2		7.1	0.015932857	6.3	217591.0691	254156.671
57	Point 2M	2	2	20200430	18	1	8	2	雜木	14.4	9.4		8	0.06888849	6.8	217590.6799	254157.624
58	Point 2M	2	2	20200430	19	1	8	3.3	雜木	6.2	7.1		8	0.0096459	5.5	217591.9701	254157.47
59	Point 2M	2	2	20200430	20	1	10.2	1.4	山龍眼科	6.4	6.3		10.2	0.009120169	7.4	217590.3443	254159.88
60	Point 2M	2	2	20200430	21	1	10.3	2	殼斗科	6.6	7.8		10.3	0.012008392	6.8	217590.952	254159.908
61	Point 2M	2	2	20200430	22	1	9.7	4.3	雜木	10.2	6.7		9.7	0.024636417	4.5	217593.1646	254159.039
62	Point 2M	2	2	20200430	23	1	10.6	4.3	殼斗科	9.1	6.5		10.6	0.019302855	4	217593.7878	254159.873
63	Point 2M	2	2	20200430	24	1	11.1	6.5	江菓	20.7	8.8	與 25 為同株分枝	11.1	0.133267963	2.3	217595.515	254160.168
64	Point 2M	2	2	20200430	25	1	11.1	6.5	江菓	6.2	4.9						



表 2.1、樹高曲線及立木材積模式模擬六龜地區臺灣肖楠所得係數及配適結果

模式	模式 編碼	係數		RMSE
		a	b	
$H = a + b \ln D$	1	-7.26824	8.18671	2.3926
$V = aD^2H$	2	3.727×10^{-5}		0.0985
$V = a + bD^2H$	3	8.085×10^{-2}	3.535×10^{-5}	0.0797
$V = aD^b$	4	5.640×10^{-4}	2.1164	0.1490
$V = aH^b$	5	2.340×10^{-4}	2.758	0.4636





圖1 南部試驗區物種夏季與秋季NCP值

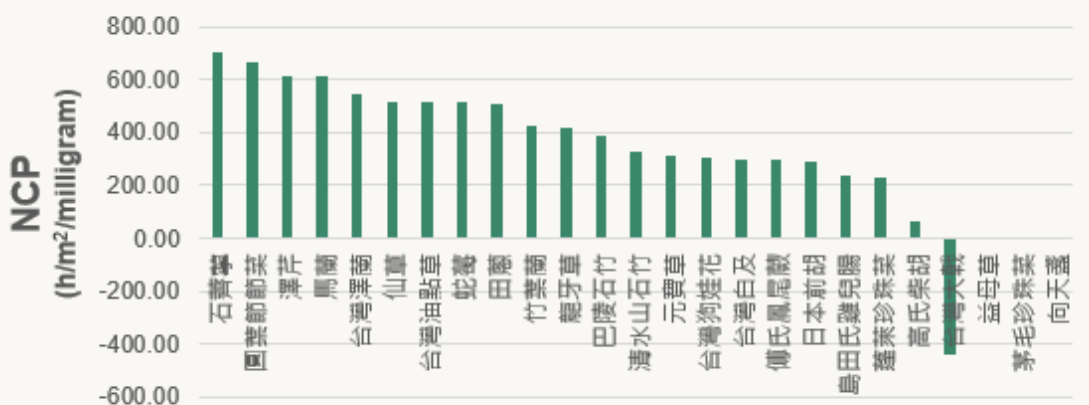


圖2 南部試驗區物種夏季與秋季NCP平均值排序圖

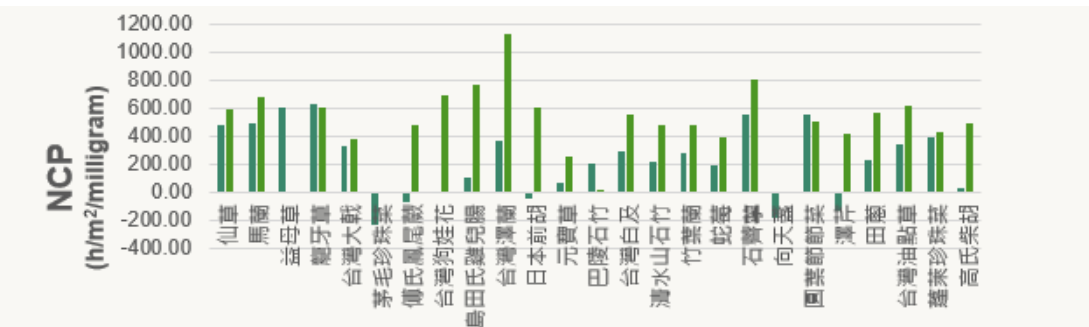
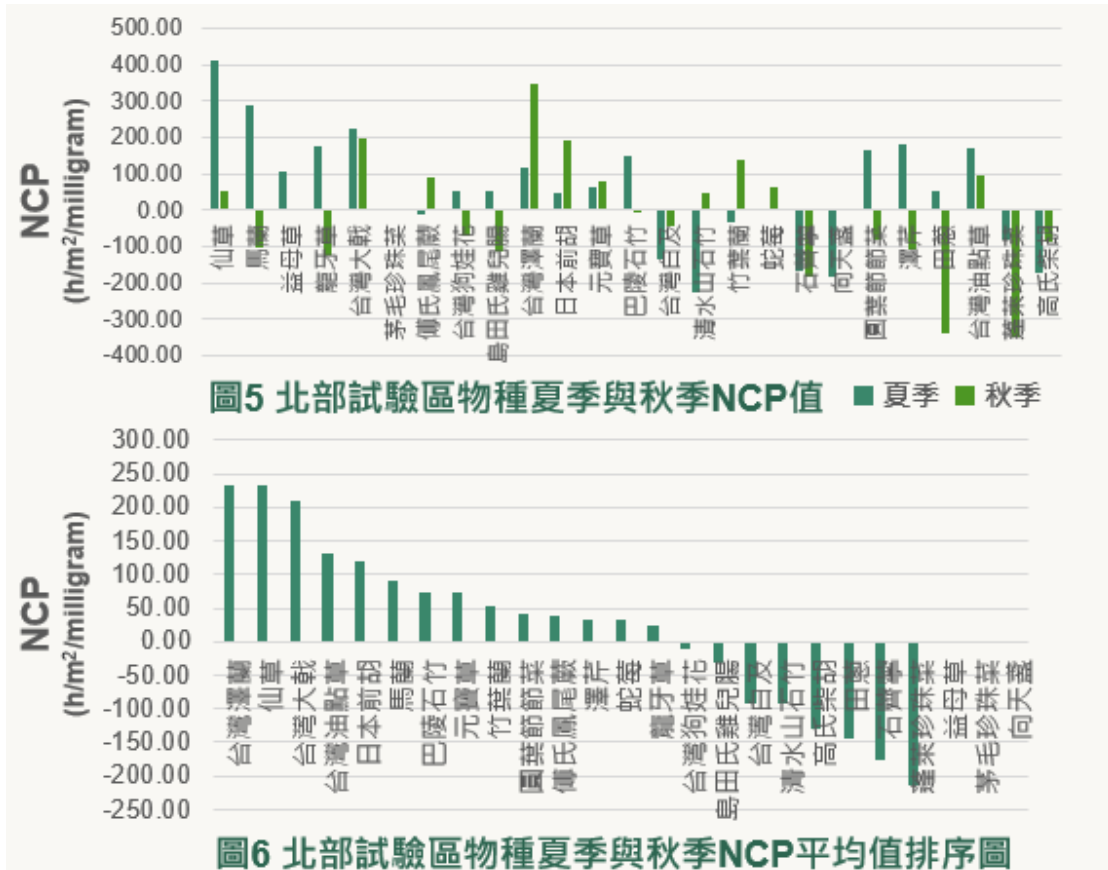


圖3 中部試驗區物種夏季與秋季NCP值



圖4 中部試驗區物種夏季與秋季NCP平均值排序圖





本年度已完成北部試驗區(臺北)、中部試驗區臺中及南部試驗區(嘉義)中 26 種原生植物淨群聚生產力(net community production, NCP)於 112 年度夏季及秋季之測量，此值可以代表該物種吸收二氧化碳並固存於植物體的能力。結果顯示南部試驗區前五名之物種分別為石薺葶(NCP 為 701.94 h/m²/mg)、圓葉節節菜(NCP 為 664.02 h/m²/mg)、澤芹(NCP 為 611.91 h/m²/mg)、馬蘭(NCP 為 611.34 h/m²/mg)及臺灣澤蘭(NCP 為 546.25 h/m²/mg) (圖 1、2)；中部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭(NCP 為 742.28 h/m²/mg)、石薺葶(NCP 為 677.90 h/m²/mg)、龍牙草(NCP 為 614.28 h/m²/mg)、馬蘭(NCP 為 581.75 h/m²/mg)及仙草(NCP 為 533.51 h/m²/mg) (圖 3、4)；北部試驗區前五名之物種分別為臺灣澤蘭(NCP 為 232.48 h/m²/mg)、仙草(NC 為 232.28 h/m²/mg)、臺灣大戟(NCP 為 208.35 h/m²/mg)、臺灣油點草(NCP 為 130.05 h/m²/mg)及日本前胡(NCP 為 119.66 h/m²/mg)(圖 5、6)。

