



☒ 公開
☐ 密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：070101e601

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：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（3/3）（第3年/全程3年）

(英文名稱) Construction of high-resolution climate downscaling model and its application in the projections of vegetation distribution and future changes (3/3)

計畫編號：110農科-7.1.1-務-e6(1)

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：謝長富

研究人員：葉昱君、呂佳陵、徐若慈

執行機關：社團法人台灣生物多樣性保育學會



1101115



一、執行成果中文摘要：

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。

二、執行成果英文摘要：

三、計畫目的：

1. 發展以群叢為單元的潛在植被預測與動態變遷模型：
 - (1) 依據Lin et al. (2020)發表之植被分布預測架構，利用各植群單元適存氣候幅度與關鍵氣候因子，完成臺灣地區潛在氣候植被預測圖。
 - (2) 引入TCCIP公布之未來氣候變遷情境資料，嘗試模擬臺灣植被未來的可能變化。
2. 加值TCCIP網格化氣候資料，產製符合農林需求的生物氣候圖層：完成clim.regression功能強化及發表，提供外界使用。
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) 依據本計畫研究成果，針對已知的易危森林類型（以臺灣水青岡落葉霧林、南仁山熱帶季風森林、新竹槲櫟族群及亞高山針葉森林為主），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。

四、重要工作項目及實施方法：

1. 植群樣區資料整理與分類架構之建立：
 - (1) 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，可計算後轉化為詳細的組成表。此外，本計畫另已收集約10000個文獻樣區資料，文獻樣區調查方法並不均一：有些樣區資料極為詳細，可併同植群計畫樣區共同使用；但也有些樣區面積較小、分散、或僅調查特定徑級以上之林木，無法併同植群樣區進行植群分類分析，以避免統計偏誤發生。因此，108年度將以植群計畫樣區之資料型態為



1101115



基準，進行歷史樣區的篩選分級，品質較高的歷史樣區資料將納入植群分類分析使用；對於品質未符合植群計畫標準的歷史樣區，不納入植群分析使用，但保留作為後續檢核植被預測圖資之驗證資料來源。

- (2) Li et al. (2013) 採用的Cocktail method (Bruehlheide 1997, 2000; Bruehlheide & Chytrý 2000; Koci et al. 2003) 為主要分類方法，確定臺灣21種主要森林類型的分類架構，包含12種帶狀植被 (zonal vegetation) 與9種泛域植被 (azonal vegetation)。本研究將依據該架構，持續向下完成更細緻的植群單元分類工作。
 - (3) 本計畫109年度參考Li et al. (2013) 成果，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。此外，受隨機森林方法及最小樣本限制，樣區數低於10個（不含）之群叢類型，不納入環境因子及分布預測分析。本研究最終採用了2417個樣區做為訓練樣本，涵蓋13群團、64群叢，已於109年度完成各群團與群叢層級的氣候棲位模型建置與驗證工作。
2. TCCIP網格化氣候資料與生物氣候圖層建置：
- (1) Lin et al. (2018) 利用TCCIP發布之5公里網格歷史及未來氣候資料，開發統計降尺度工具clim.regression，利用氣溫遞減率的動態校正，對臺灣山區產製自由尺度化 (scale-free) 的氣候圖資，包含月均溫、月均高溫、月均低溫、月累積降水及季尺度、年尺度等73種氣候因子。然而受到TCCIP原提供數據為月尺度之限制，clim.regression目前無法產製日尺度之生物氣候衍生介量，例如日生長積溫、日冷積溫、連續不降水日等。這些因子與生物潛在分布具有極高相關，本計畫擬強化clim.regression產製日尺度衍生介量的能力，提升後續生物分布模擬的準確度。
 - (2) 109年度已仿照Wang et al. (2016a) 概念，使用TCCIP之19862005年逐日5公里網格資料，採0°C以下為冷積門檻、5°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。
 - (3) 除氣候因子以外，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°、西南為-90°、西北及東南均為0°）」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2.3)；據以取得森林植群的地形特性資料。
3. 森林植被適生分布預測及未來變遷分析：
- (1) 前期計畫已利用隨機森林法建立氣候棲位分析與潛在分布預測流程，對於13種森林在臺灣的潛在分布可達到93%的預測準確度 (Lin et al., 2020)。該流程係以森林類型



1101115



為應變量，以clim.regression產製之57類氣候因子為自變量，對單一植被類型建構一組隨機森林模型；再經由13類森林植被的13組隨機森林模型，在不同空間地點進行模型比較競爭，最優者獲判定為該地點的潛在森林類型。

- (2) 110年度將延續該分析流程，將原有應變量（13種森林類型）置換為新產出的群叢單元，自變量除clim.regression原有的57類氣候因子外，另將增納日尺度之生物氣候衍生因子及地形因子，經由隨機森林分析後，獲得各群叢單元的生態氣候棲位模型，進而利用該棲位模型，對歷史氣候觀測資料及未來氣候資料，進行潛在植群的現在分布與未來變遷模擬。
- (3) 隨機森林是機器學習法的一種，在巨量資料（big data）且類別取樣均衡（balanced samplings）前提下，將可獲得最優化的表現；遞換準確的訓練樣本與反覆的模型學習，則可提升隨機森林的預測能力。因此，本研究將與其他計畫配合，將氣候變遷易危生態系的周邊植被細部資料（如臺灣水青岡森林與周邊不同植物社會的現況分布圖）納入隨機森林訓練樣本，利用細緻的現場調查數據進行模型調校驗證，提高機器學習模型對野外現況的模擬準確度。

五、結果與討論：

詳附件成果報告書。

六、結論：

詳附件成果報告書。

七、參考文獻：

詳附件成果報告書。





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 $-5\%\sim+5\%$ 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：



1101115



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。



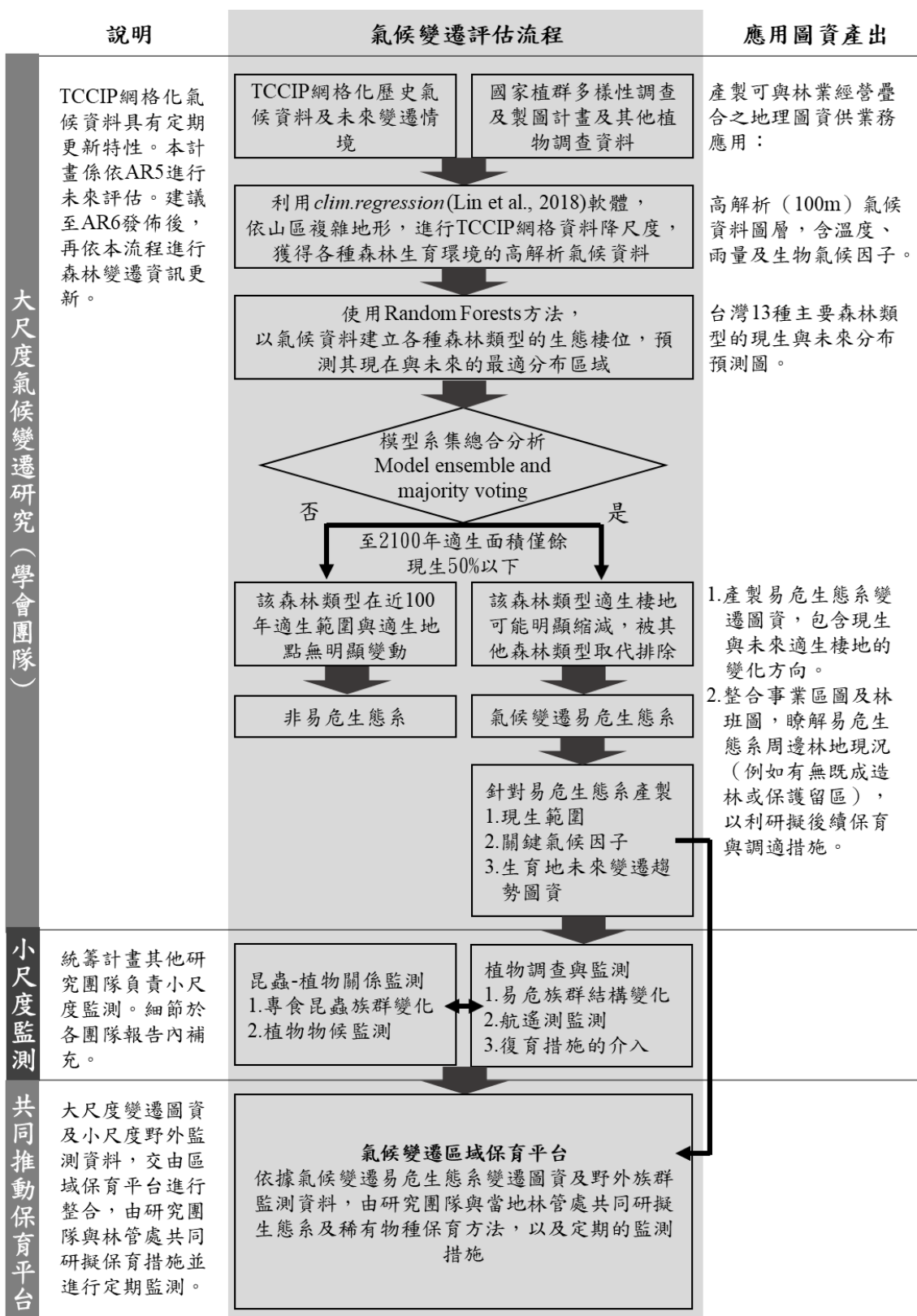


圖2.1 本計畫流程圖，以及與其他團隊及區域保育平台的整合情形。



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。



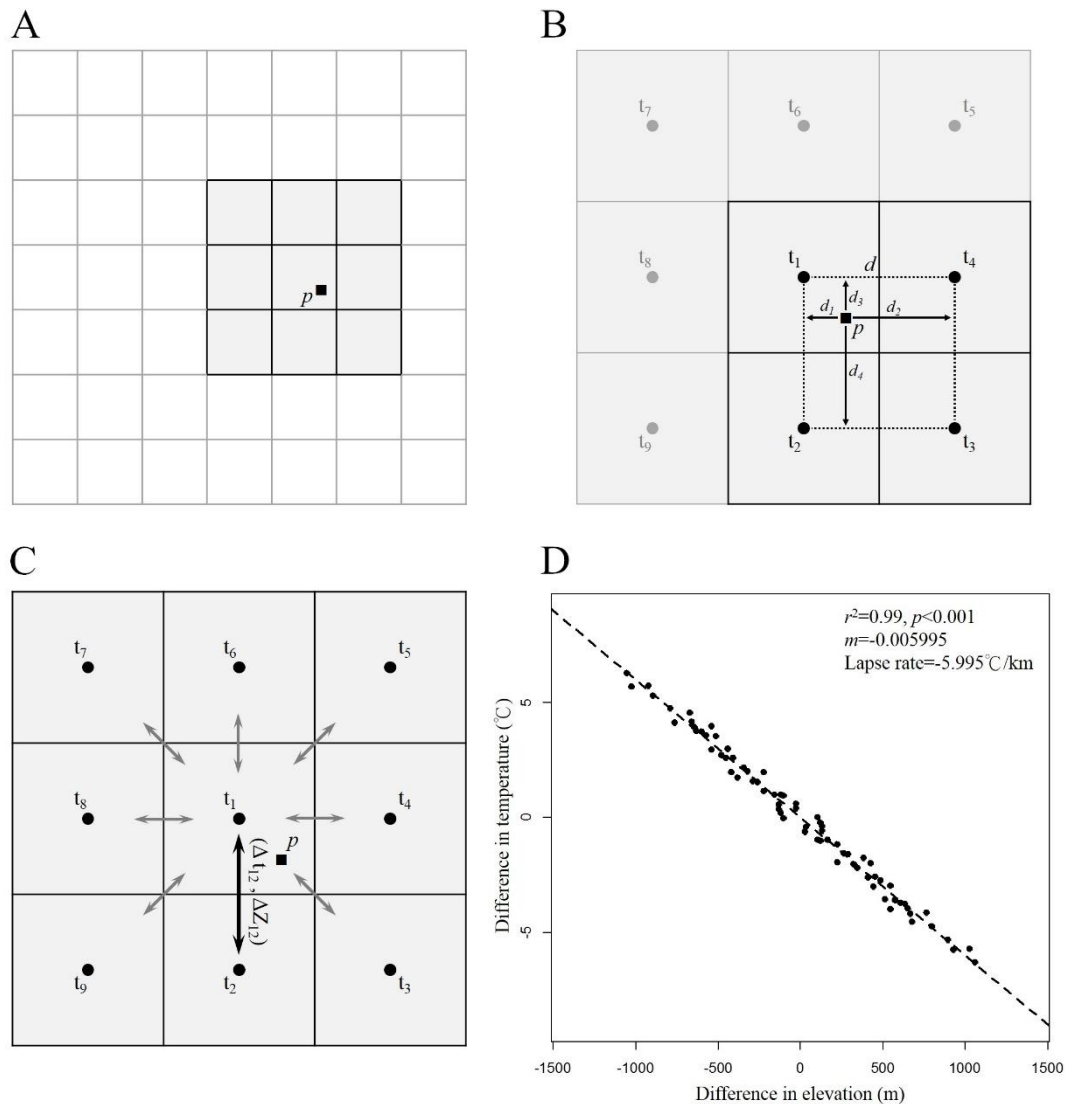


圖2.2 *clim_regression*軟體的氣候降尺度四步驟。(A) 針對欲進行氣候降尺度推估的目標點 p ，進行周邊9網格萃取，做為動態局部迴歸的樣本。(B) 利用水平方向雙線性插值法，由最鄰近四網格中心點觀測值，從水平方向推估 p 點的氣候狀況。(C) 利用九網格的成對取樣，計算區域內的「海拔-氣候變化」關係。(D) 以氣溫為例，兩兩成對網格的「海拔-氣溫變化」數對經簡單線性迴歸，獲得當地的氣溫遞減率 (lapse rate)，做為依據海拔高差修正 p 點氣候估測值的參數。





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。本計畫另從颱風中心建置之「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）。

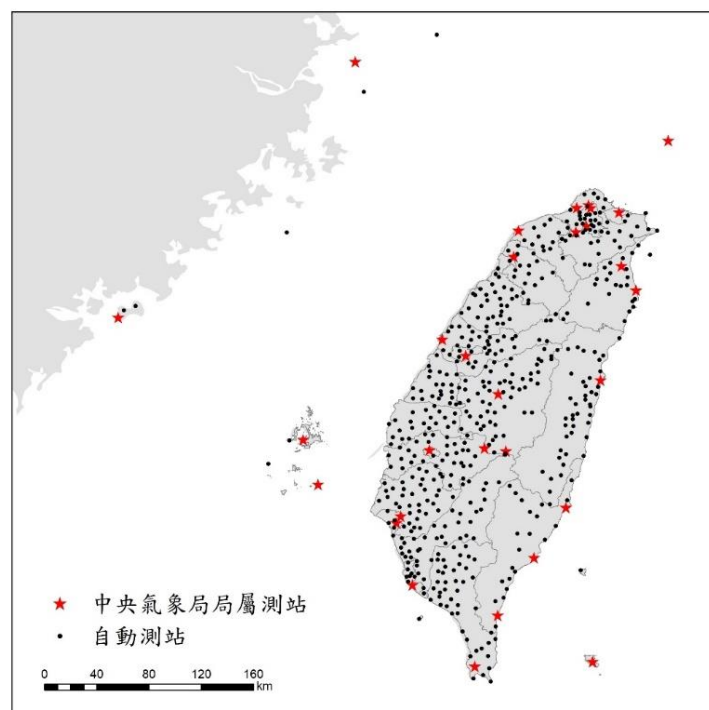


圖2.4 大氣水文資料庫內30個中央氣象局局屬測站及513個自動測站位置，做為配合TCCIP日尺度資料，衍生生物氣候因子的來源數據。





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°C 以下為冷積門檻、 5°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° 、西南為 -90° 、西北及東南均為 0°)」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)。



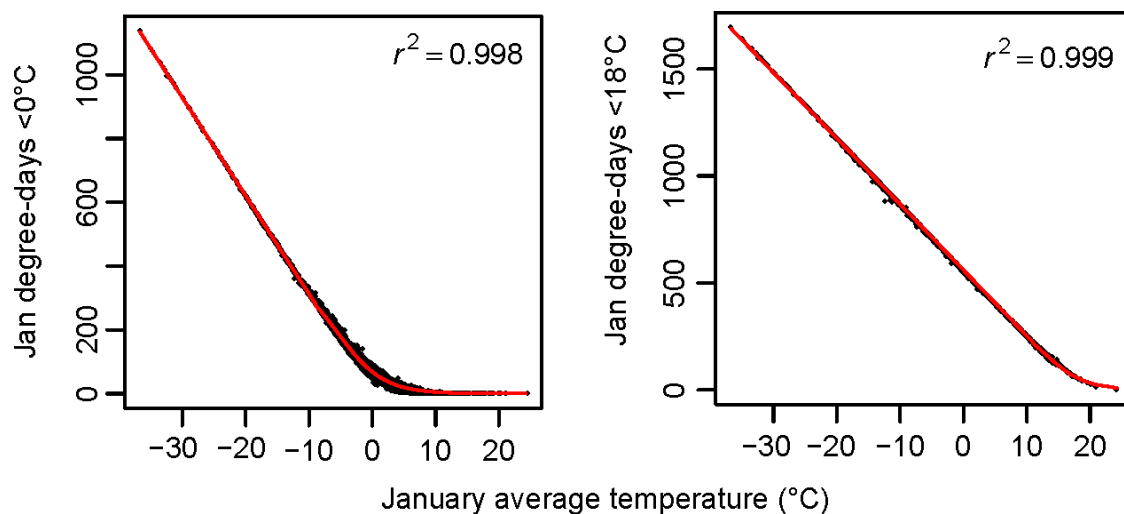


圖 2.5 以一月氣溫為例，利用 piecewise function 求取 0°C 及 18°C 以下日積溫與當月平均氣溫之迴歸關係 (Wang *et al.*, 2016a)。

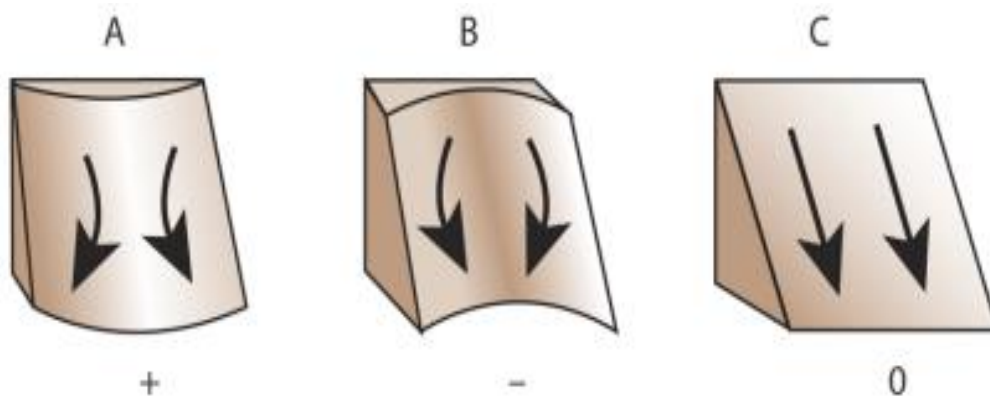


圖 2.6 地形凹凸度因子 (planform) 示意圖。本因子係利用數值表面模型 (DSM) 計算而來，對於位於突出而暴露的凸稜，以正值表示，且數值越大代表相對突出程度越高 (A)；若為兩側凹陷的溪谷或山谷地形，則以負數代表其相對凹陷程度 (B)；若地形無凹凸現象，則數值為零 (C)。





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
合計			105





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
348		CLA10	High-mountain coniferous woodlands and forests	
107		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>
241		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>
1561		CLA20	Subtropical mountain zonal forests	
564		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>
57		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>
321		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>
312	C2A06	槲楠屬-栲屬亞山地闊葉林	
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>
209	C2A07	雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林	
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>
98	C2A08	榕楠山麓闊葉林	
70		FO20080100	<i>Murraya paniculata</i> - <i>Ficus irisan</i>
28		FO20080200	<i>Radermachera sinica</i> - <i>Lagerstroemia subcostata</i>
317	CLA30 Tropical mountain zonal forests		
40	C3A09	柯屬-杜英屬山地霧林	
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>
207	C3A10	鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林	
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>
70	C3A11		柃木屬-槲楠屬山麓闊葉林
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>
40	CLA50	Tropical mountain azonal forests	
40	C5A13		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>
177	CLA60	Subtropical mountain azonal woodlands and forests	
177	C6A15		烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林
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>
2443	合計		

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



1101115



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。



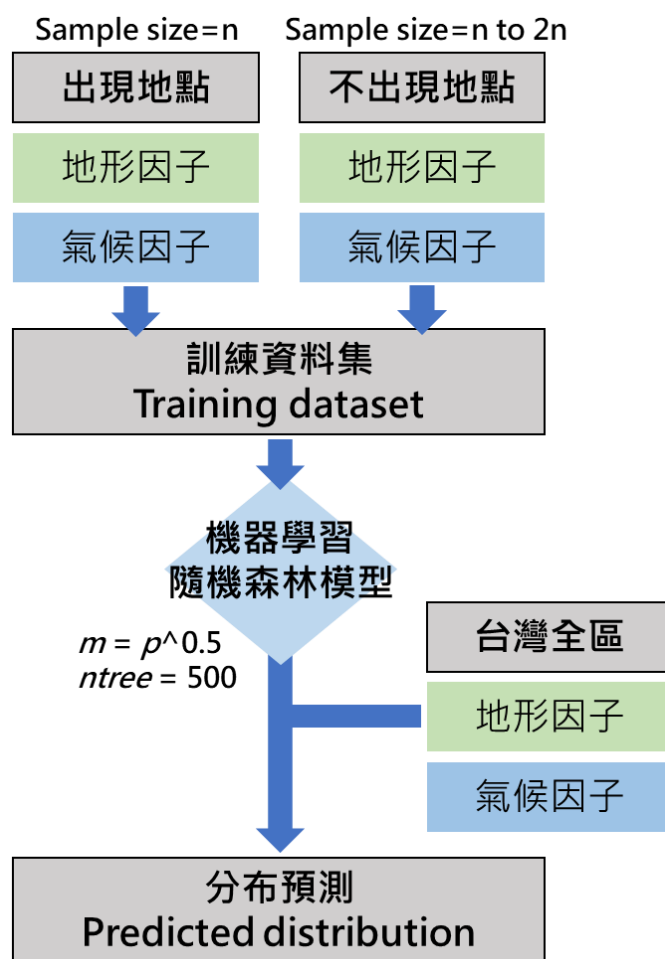


圖 2.7 本研究建立之隨機森林架構，包含模型訓練與分布預測過程。本流程輸出為單一隨機森林的預測結果，該結果再納入圖 2.5 流程，成為多重隨機森林總和評斷的來源資料。



1101115

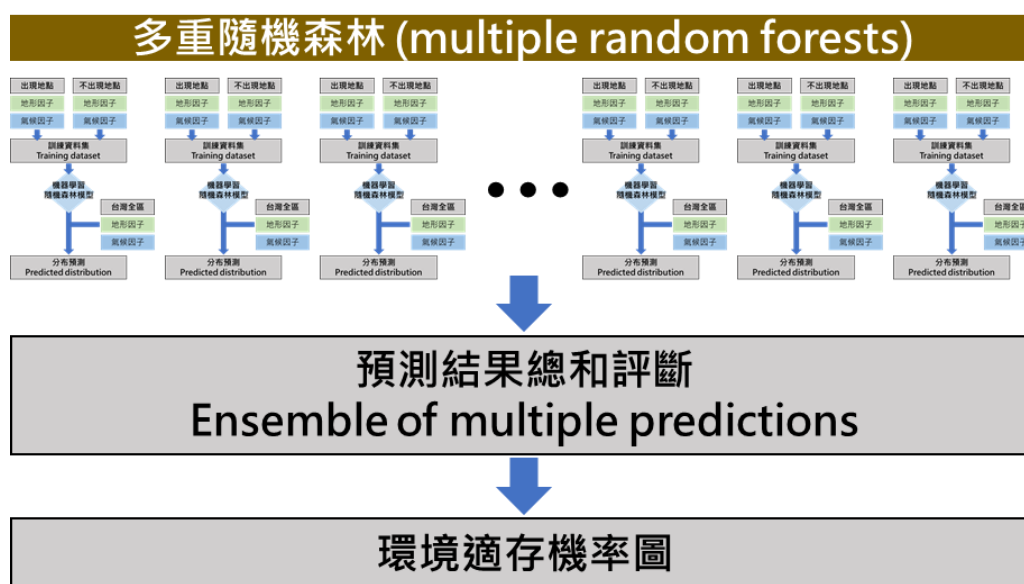


圖2.8 多重隨機森林示意。以平均權重對多組隨機森林輸出進行集成，獲得預測結果的機率分布。以物種分布預測為例，即是獲得該物種在地理空間的適存機率。

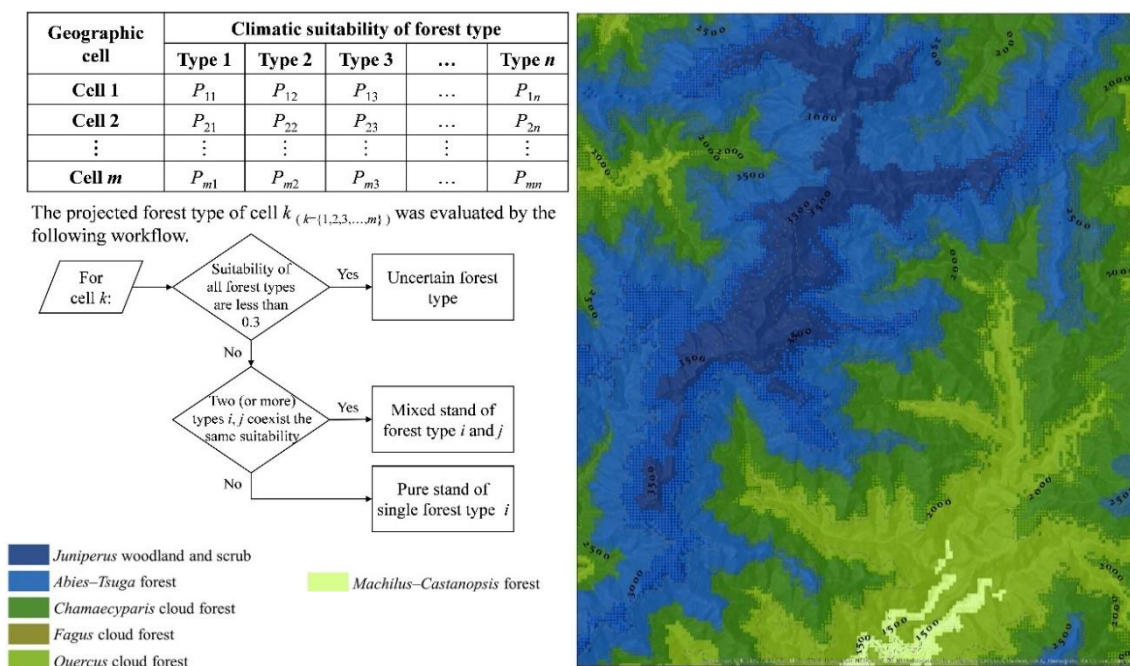


圖2.9 群團模型合併流程。對各網格預測13種森林群團的適存機率，單一群團呈現最高機率值者，則定義為單一植群型，若多群團呈現相同機率者，則認定為混淆植群型 (Lin *et al.*, 2020)。



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%（ r^2 ）；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）。



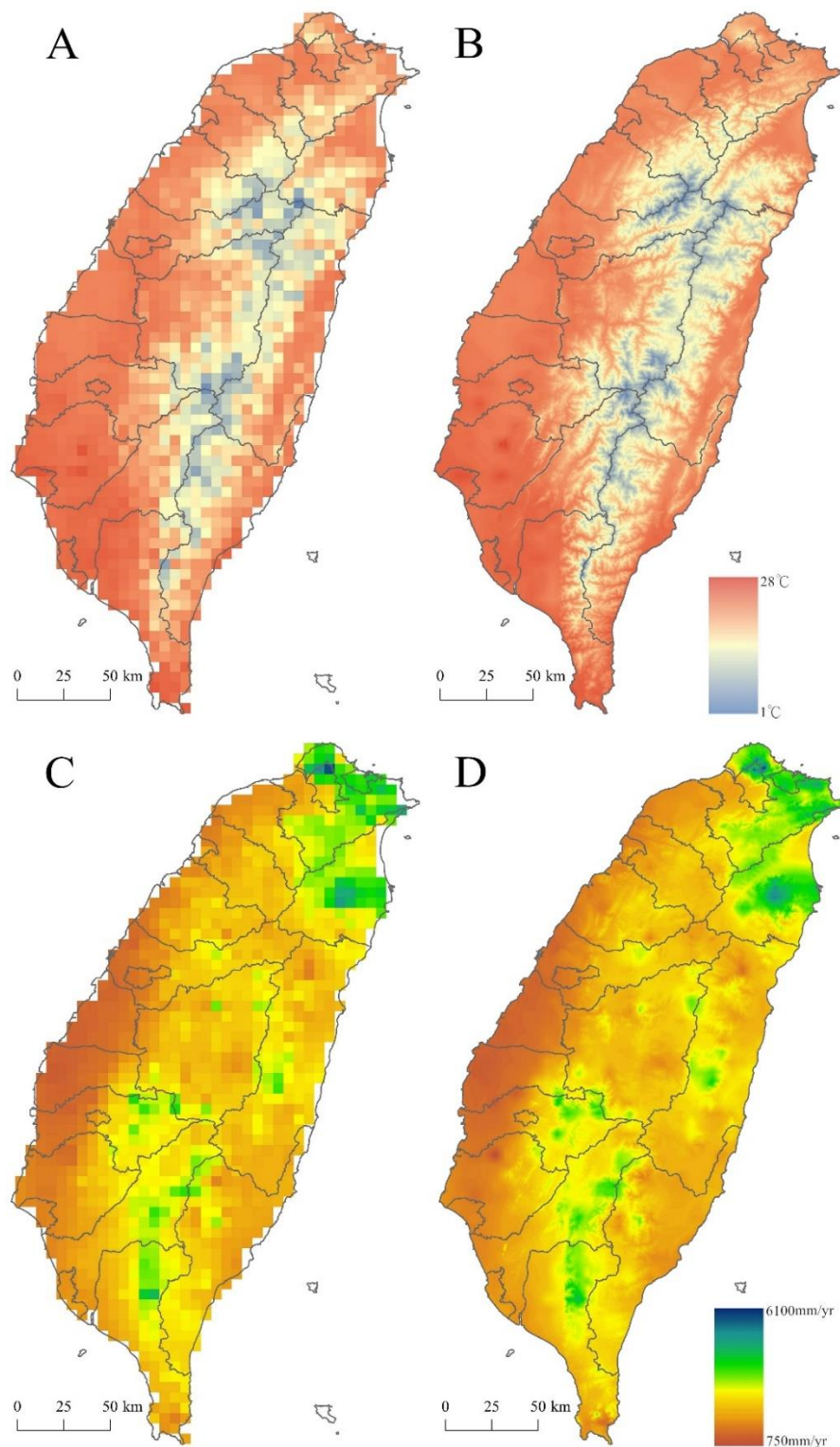


圖2.10 TCCIP提供的5公里網格化年平均氣溫 (A) 與年累積降水 (C) 資料；右圖則為以250公尺解析度降尺度後的年均溫 (B) 與年累積降水 (D)。



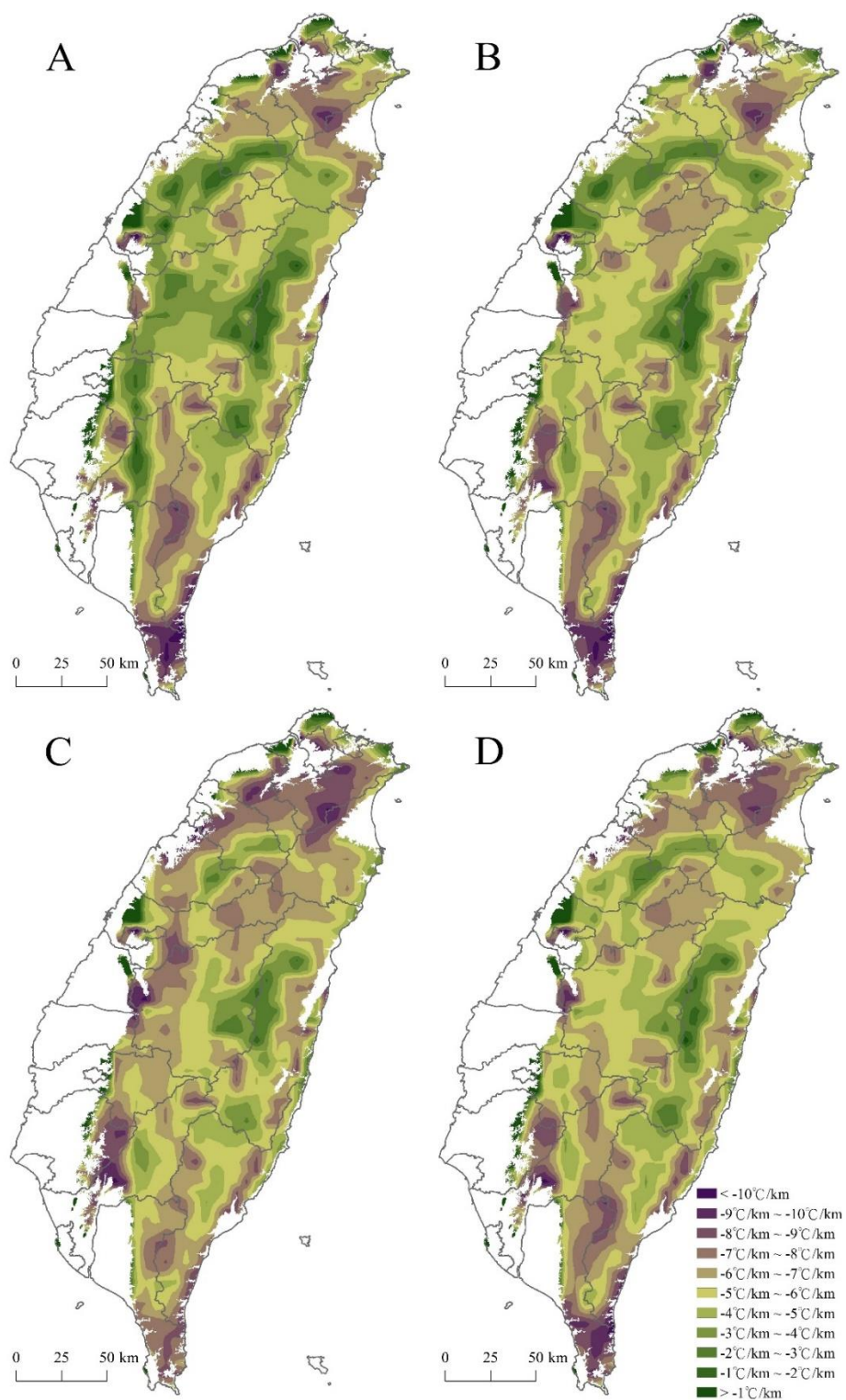


圖2.11 在250公尺解析度下，以`clim.regression`產生全臺一、四、七、十月（A-D）的氣溫遞減率分布情形。



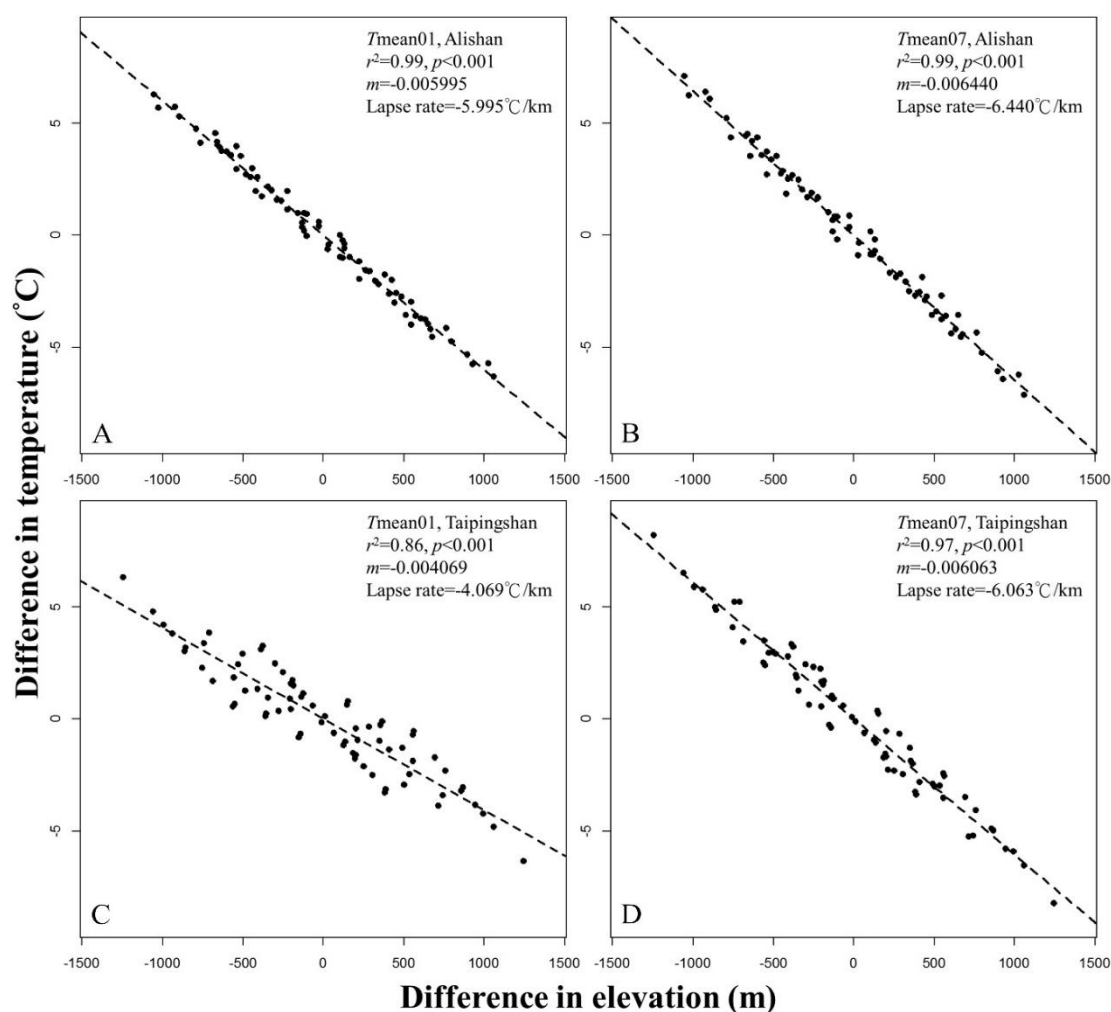


圖2.12 針對阿里山 (A,B) 及太平山 (C,D) 的冬夏兩季均溫資料，以動態局部迴歸方法計算該地區的氣溫遞減率。

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 ² 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



1101115

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°C ；對月最低溫度和月最高溫的預測精度稍差，MAE 為 0.79°C 及 0.80°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°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 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{month}$ 。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	Clim.regression			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					



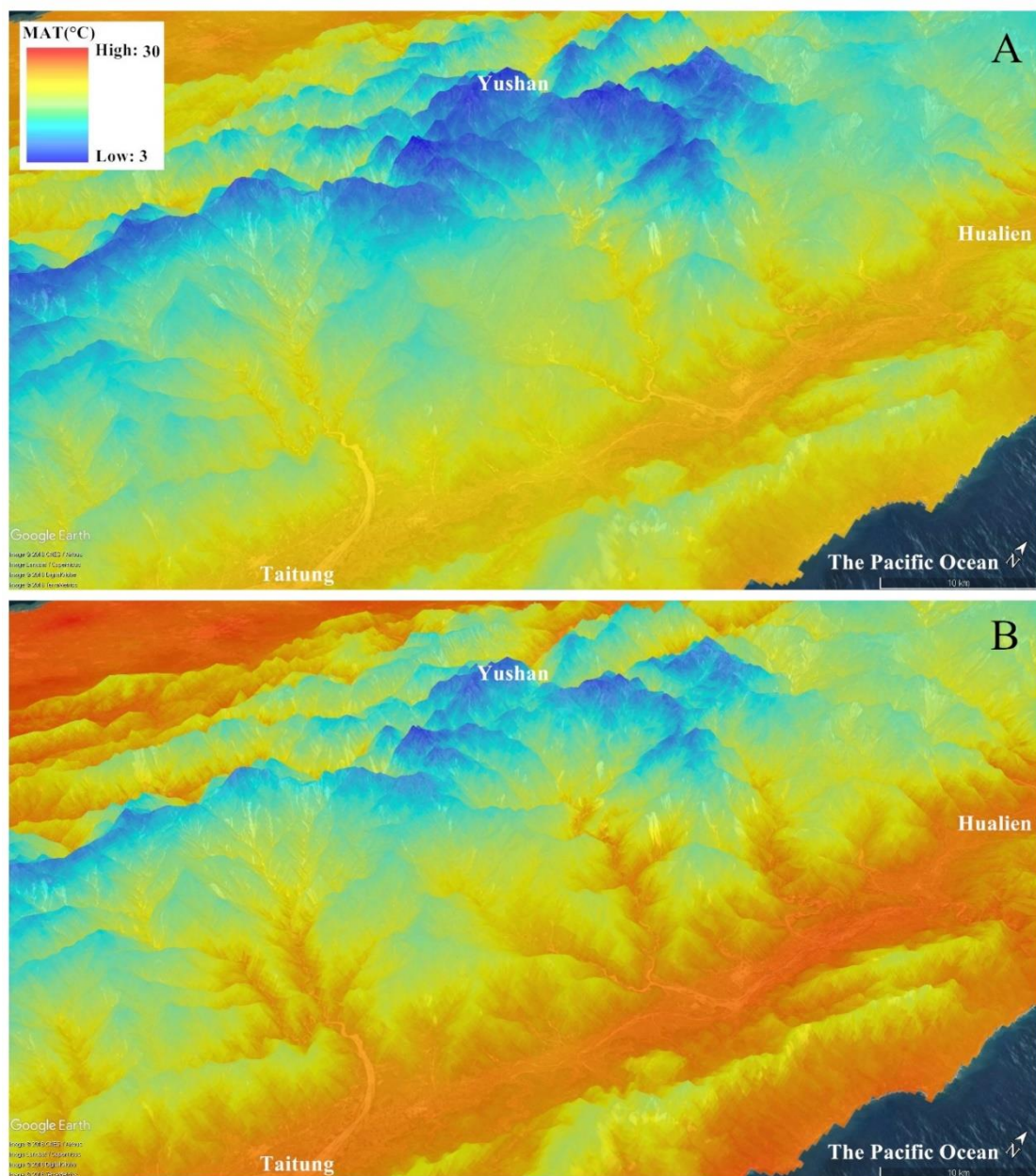
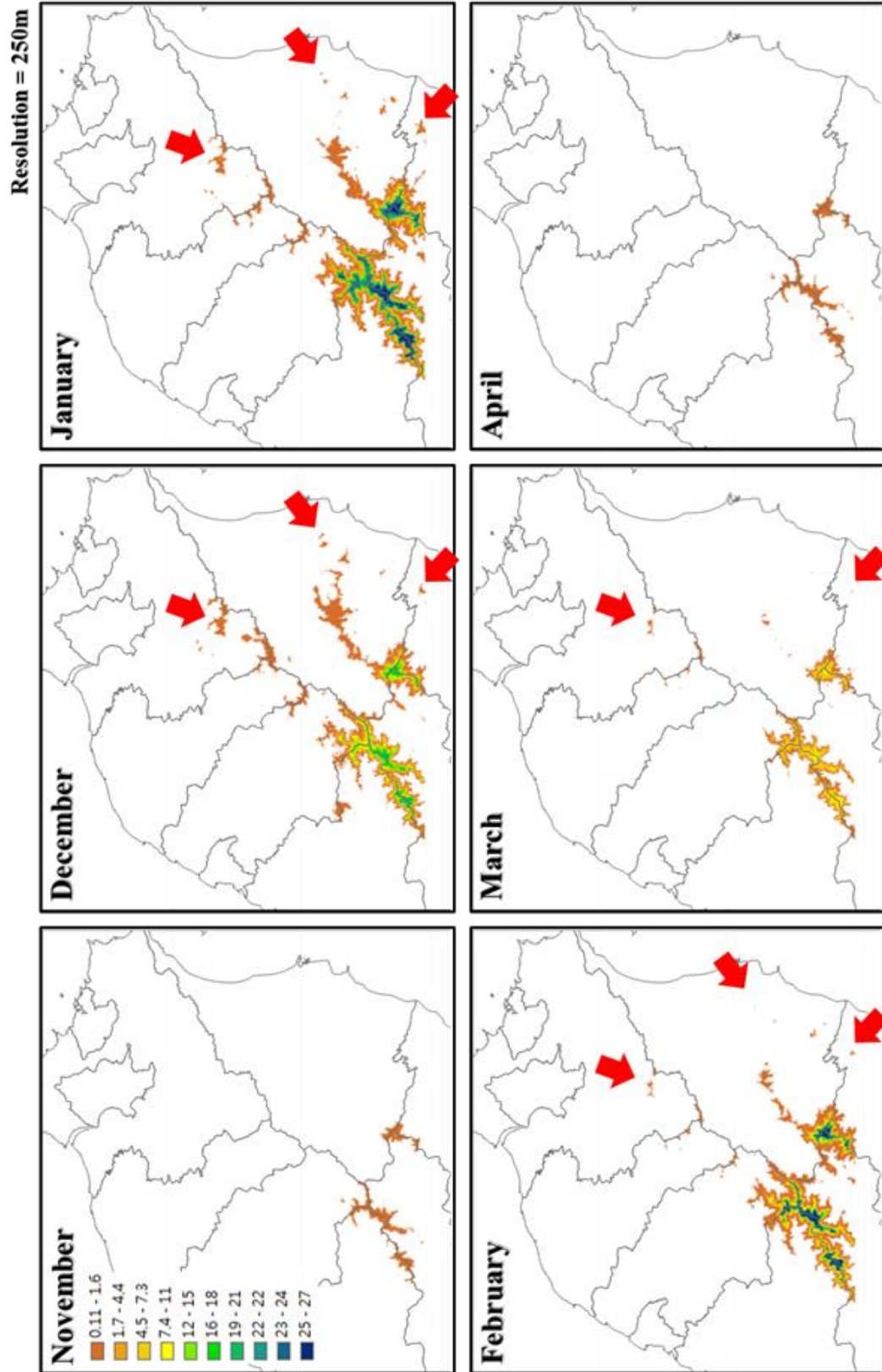


圖2.13 利用 $clim.regression$ 產生的高解析度現行年均溫分布圖（A），以及根據CSIRO-Mk3-6-0環流模型的RCP4.5情境，產生2100年的年均溫分布預測圖（B）。上下兩圖的解析度均為250公尺。

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







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





榕楠山麓闊葉林及桫欏屬-槲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。



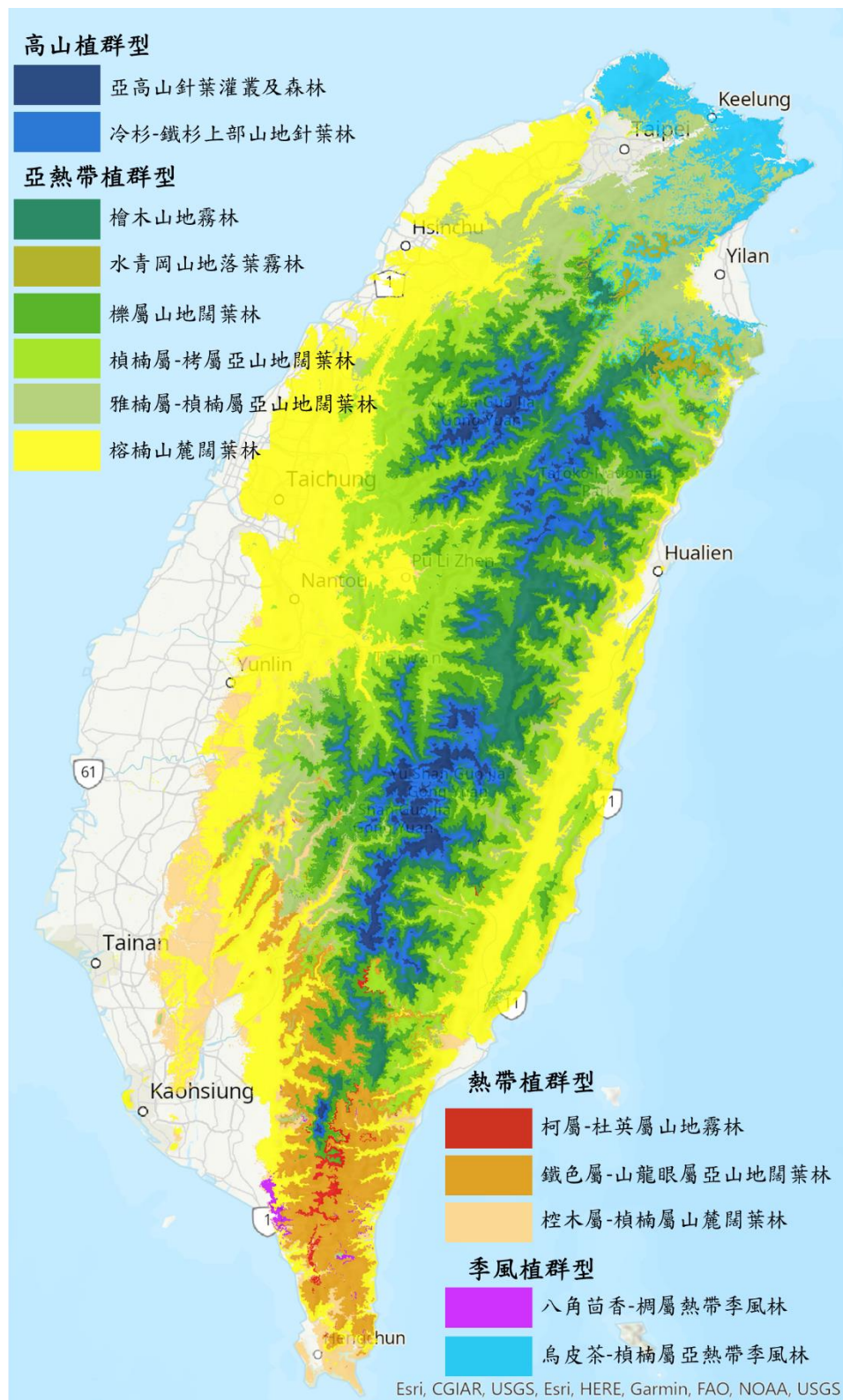


圖2.15 利用105個氣候因子，產生13種森林類型的現生分布預測圖。



1101115

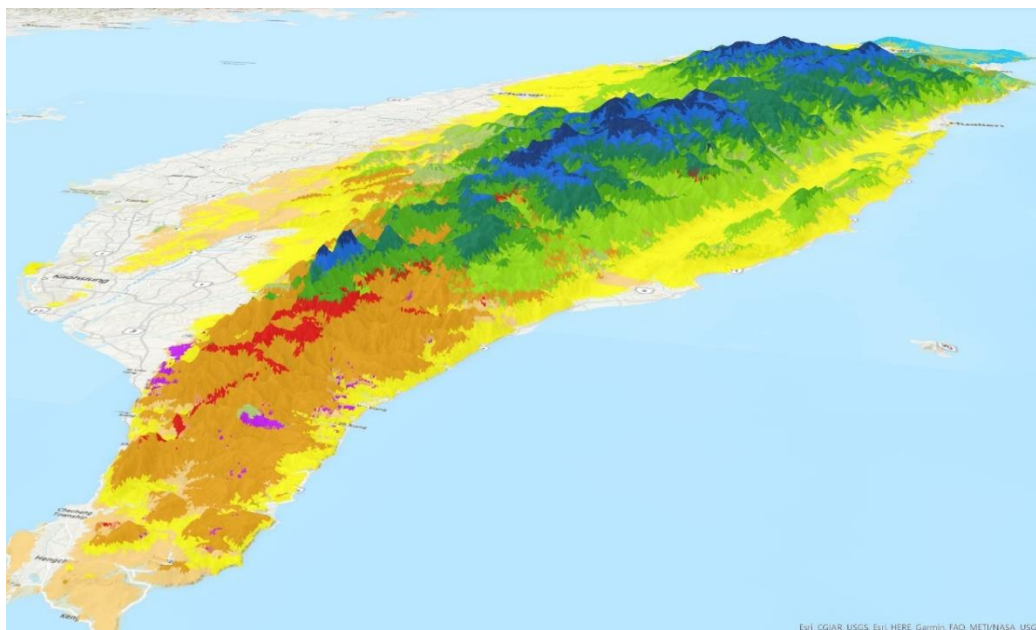


圖2.16 以立體方式呈現13種森林類型的分布預測，與地形有良好的吻合，充分反映臺灣山地植群的垂直分帶現象（圖例同2.15）。

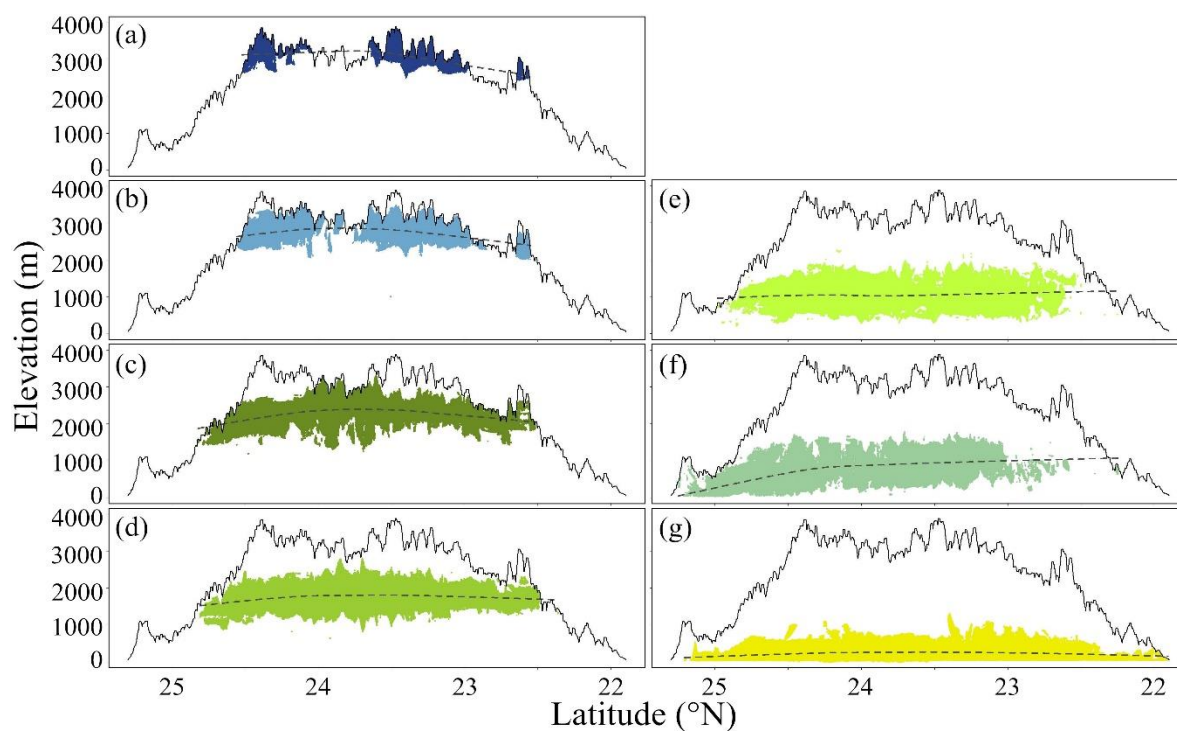


圖2.17 對分布遍及全臺南北的7種森林類型（亞高山針葉灌叢至榕楠山麓闊葉林）進行縱剖面，顯示山地植群預測結果有明顯的南北兩端低降現象（圖例同2.15）。





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)	%
High-mountain coniferous woodlands and forests						
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%
Subtropical mountain zonal forests						
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%
Tropical mountain zonal forests						
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%
Tropical mountain azonal forests						
八角茴香-桐屬熱帶季風林	27314	1.01%	8096	29.64%	19218	70.36%
Subtropical mountain azonal woodlands and forests						
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%



1101115



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)
High-mountain coniferous woodlands and forests				
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
Subtropical mountain zonal forests				
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
Tropical mountain zonal forests				
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
Tropical mountain azonal forests				
八角茴香-桐屬熱帶季風林	19.51	1.98	2630	160
Subtropical mountain azonal woodlands and forests				
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 判 別 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 判 別 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
重要別因子	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
重要別因子	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。

森林類型	烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林		
	預測準確率：89.58%		
重要判別因子	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%
	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。

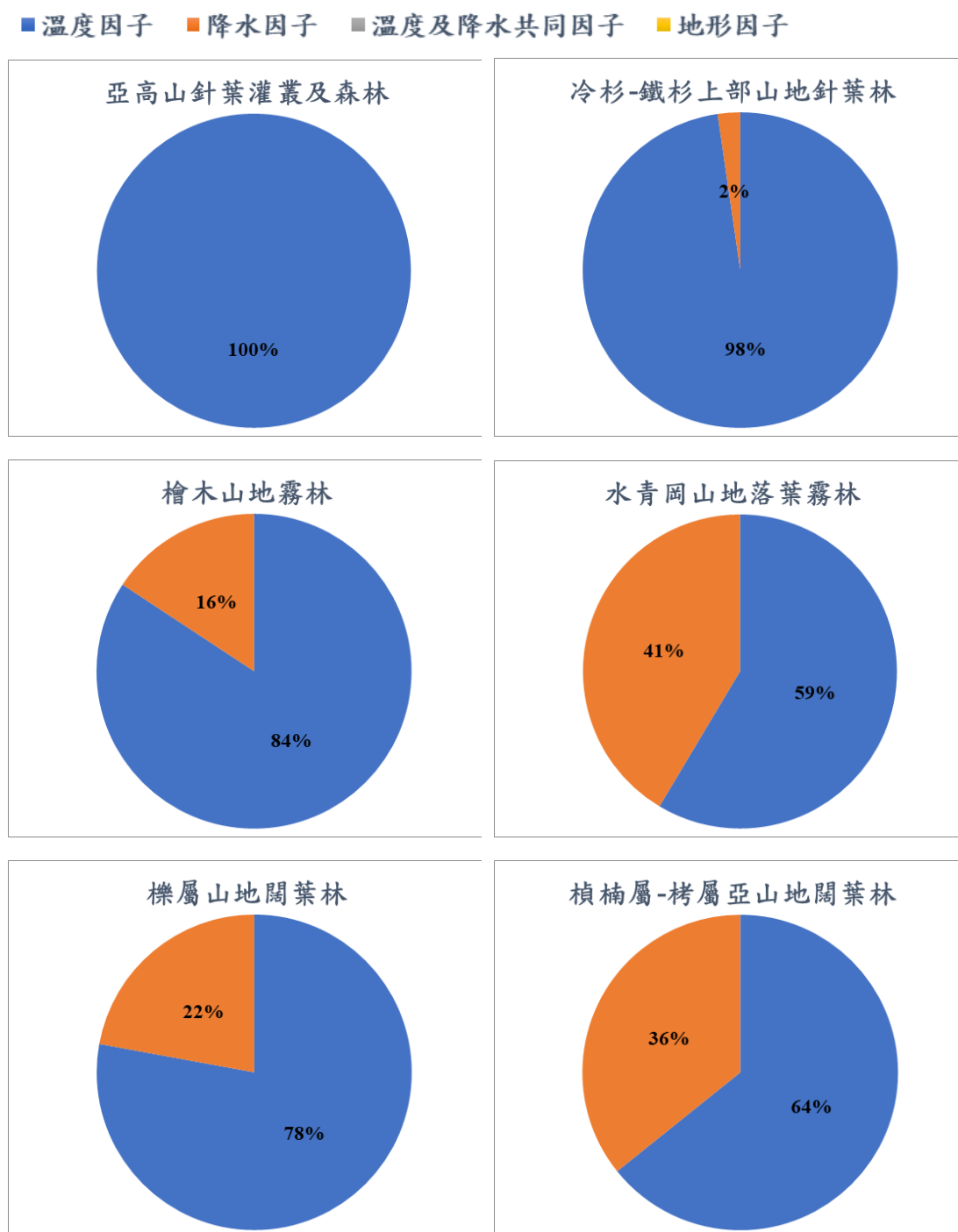




圖 2.18 (續) 各森林類型重要因子的類別統計。

■ 溫度因子 ■ 降水因子 ■ 溫度及降水共同因子 ■ 地形因子

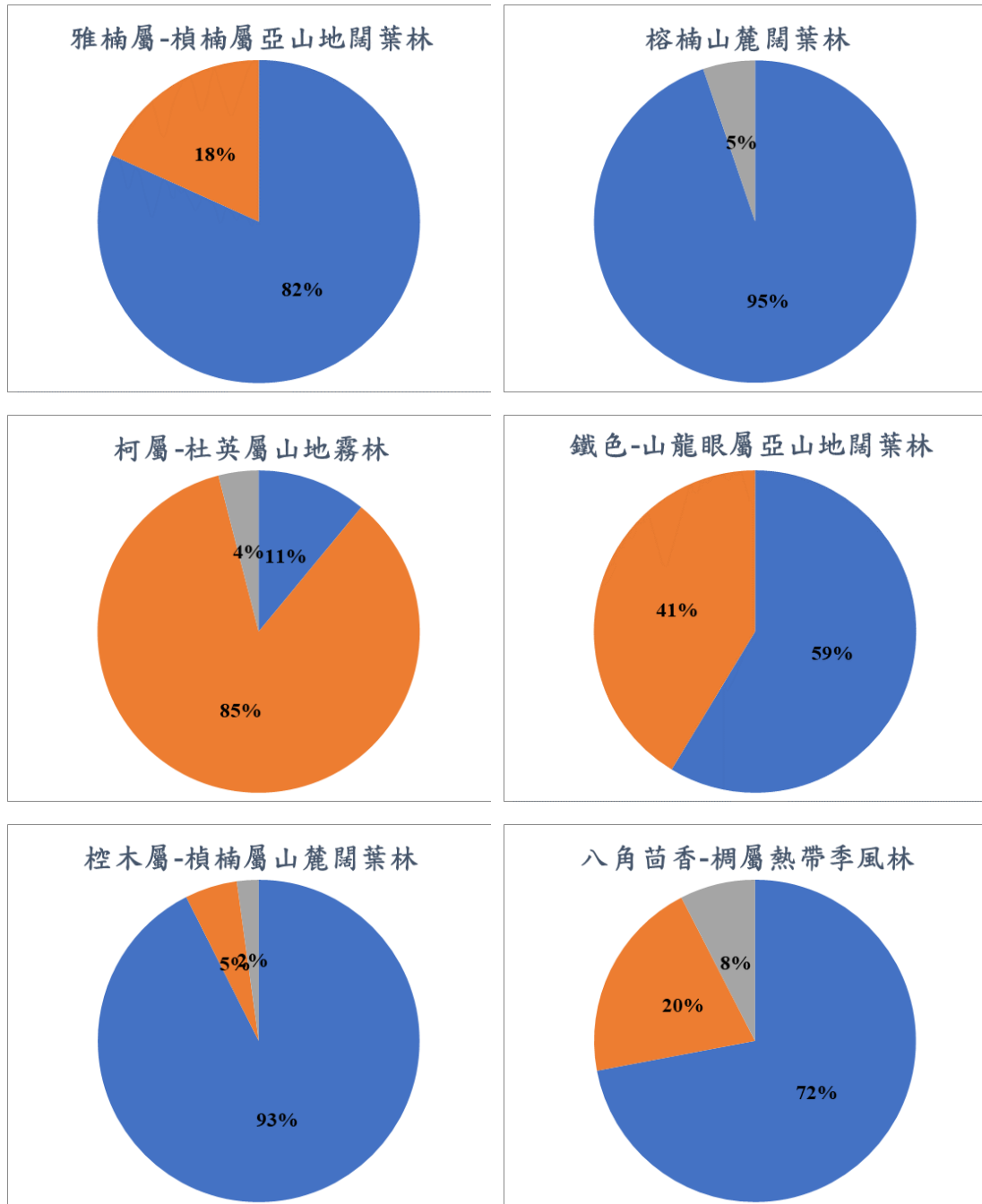
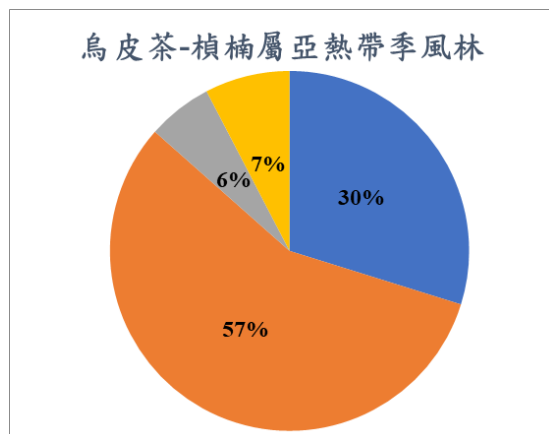




圖 2.18 (續) 各森林類型重要因子的類別統計。

■ 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。

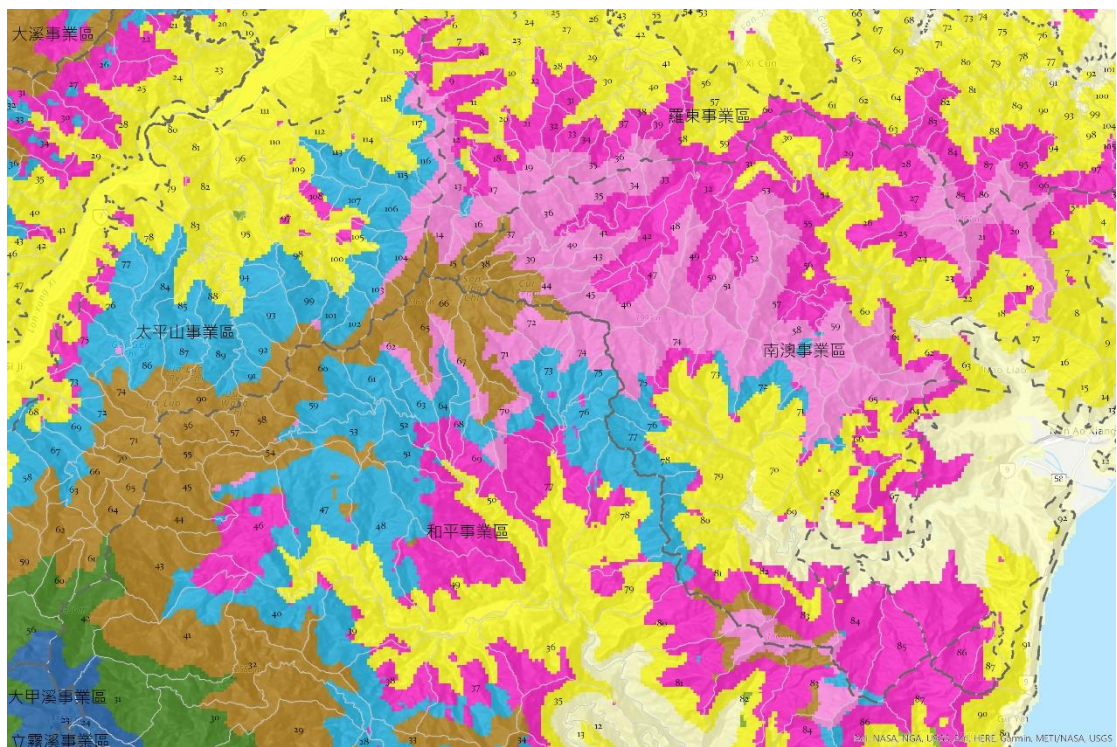
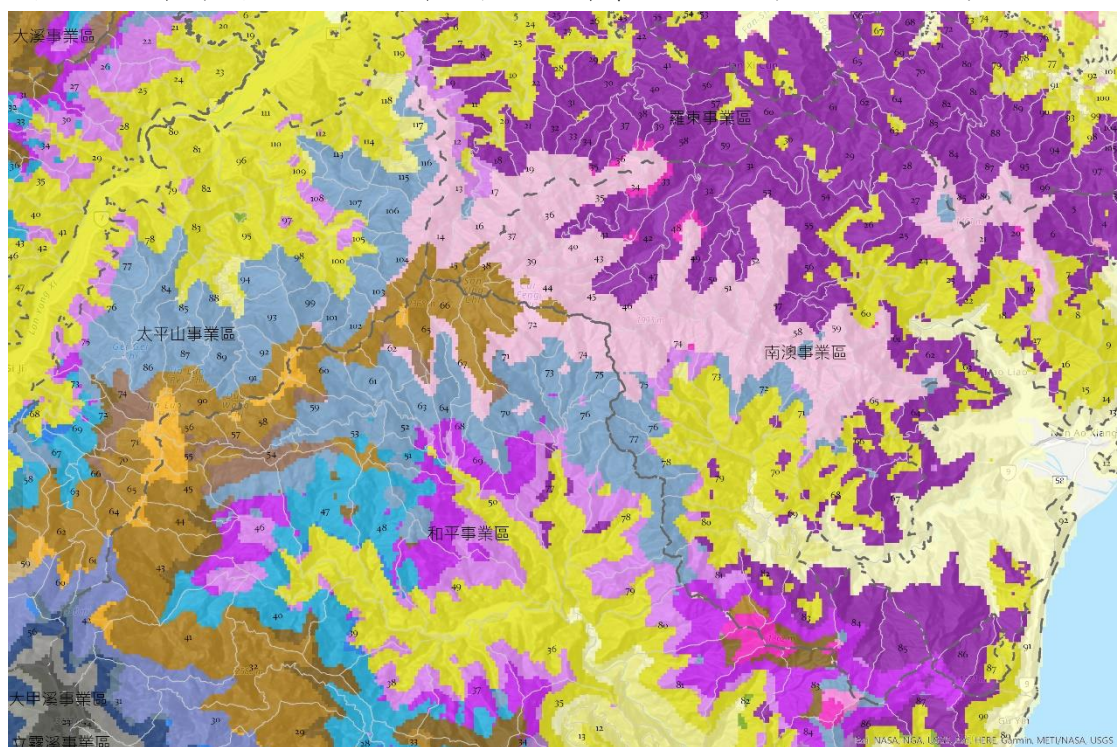


圖 2.20 針對圖 2.19 相同範圍，以群叢模型進行更細緻的棲地分類。



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-櫚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，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。



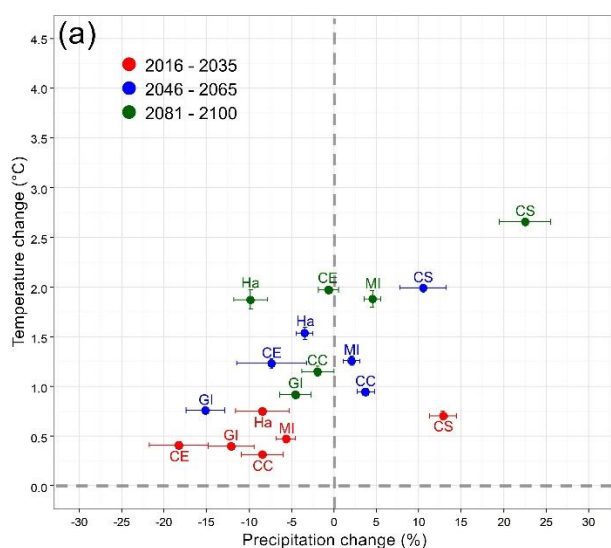


圖2.21 本研究選定6種大氣環流模型模擬森林的未來變化。各GCM在RCP 4.5情境下的年平均氣溫及年累計降水相對變化量如左圖。

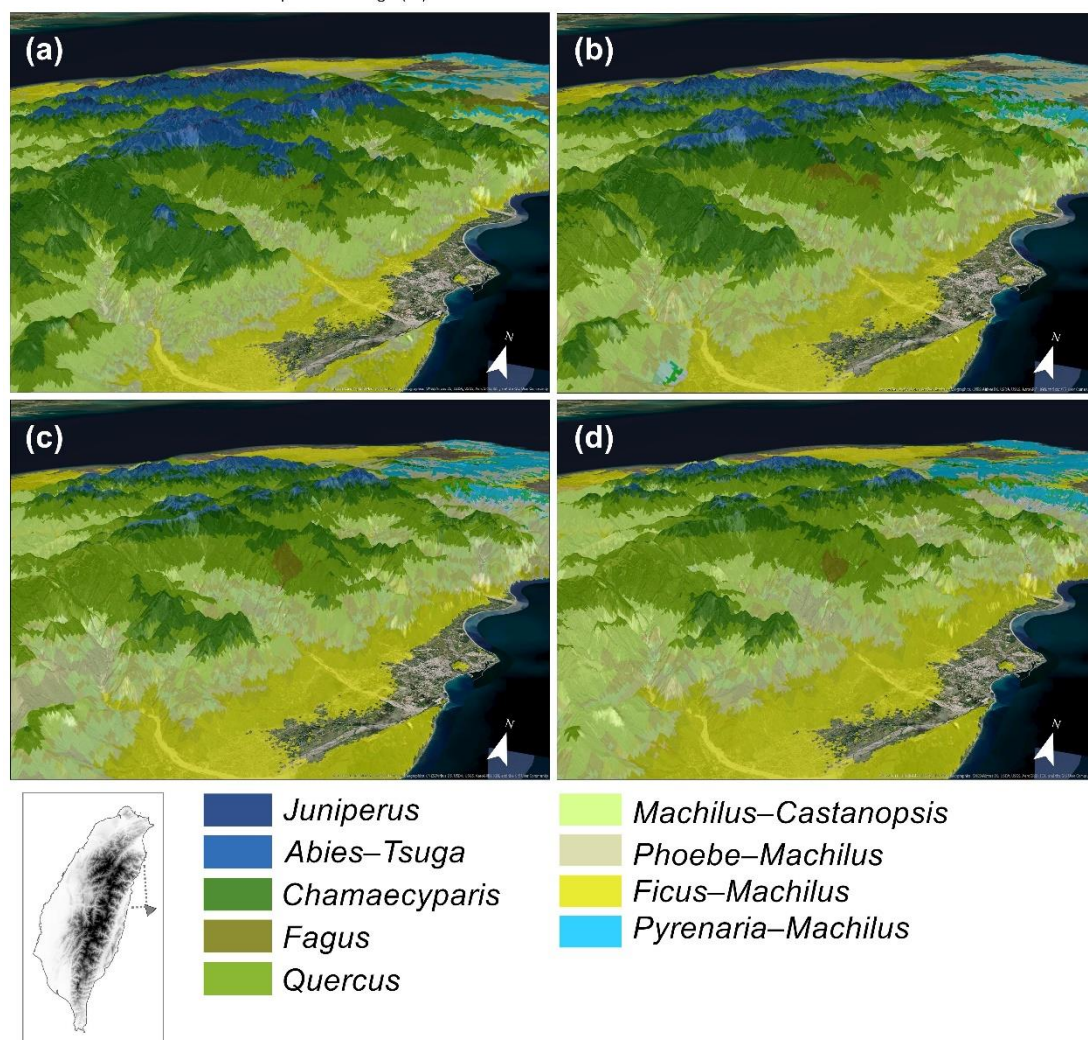


圖2.22 RCP 4.5情境下，北臺灣森林的現在與未來三階段平均變化。





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.	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	3,099	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	3,154
✓ <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	2,782
✓ <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	1,936
<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	2,319
<i>Machilus-Castanopsis</i>	799	1,032	1,266	947	1,194	1,428	1,093	1,341	1,580	1,213	1,455	1,696
<i>Phoebe-Machilus</i>	397	706	1,007	389	686	1,016	572	898	1,239	717	1,079	1,393
<i>Ficus-Machilus</i>	112	207	355	127	242	425	129	247	454	136	270	517
✓ <i>Pasania-Elaeocarpus</i>	1,184	1,365	1,526	991	1,582	1,814	962	1,679	1,894	1,350	1,699	1,865
<i>Drypetes-Helicia</i>	553	776	1,040	702	950	1,227	842	1,071	1,325	981	1,227	1,487
<i>Dysoxylum-Machilus</i>	91	153	315	94	171	339	106	220	478	115	245	521
✓ <i>Illicium-Cyclobalanopsis</i>	258	401	542	335	525	778	376	590	852	346	587	893
<i>Pyrenaria-Machilus</i>	260	486	837	261	487	841	232	450	772	252	465	784



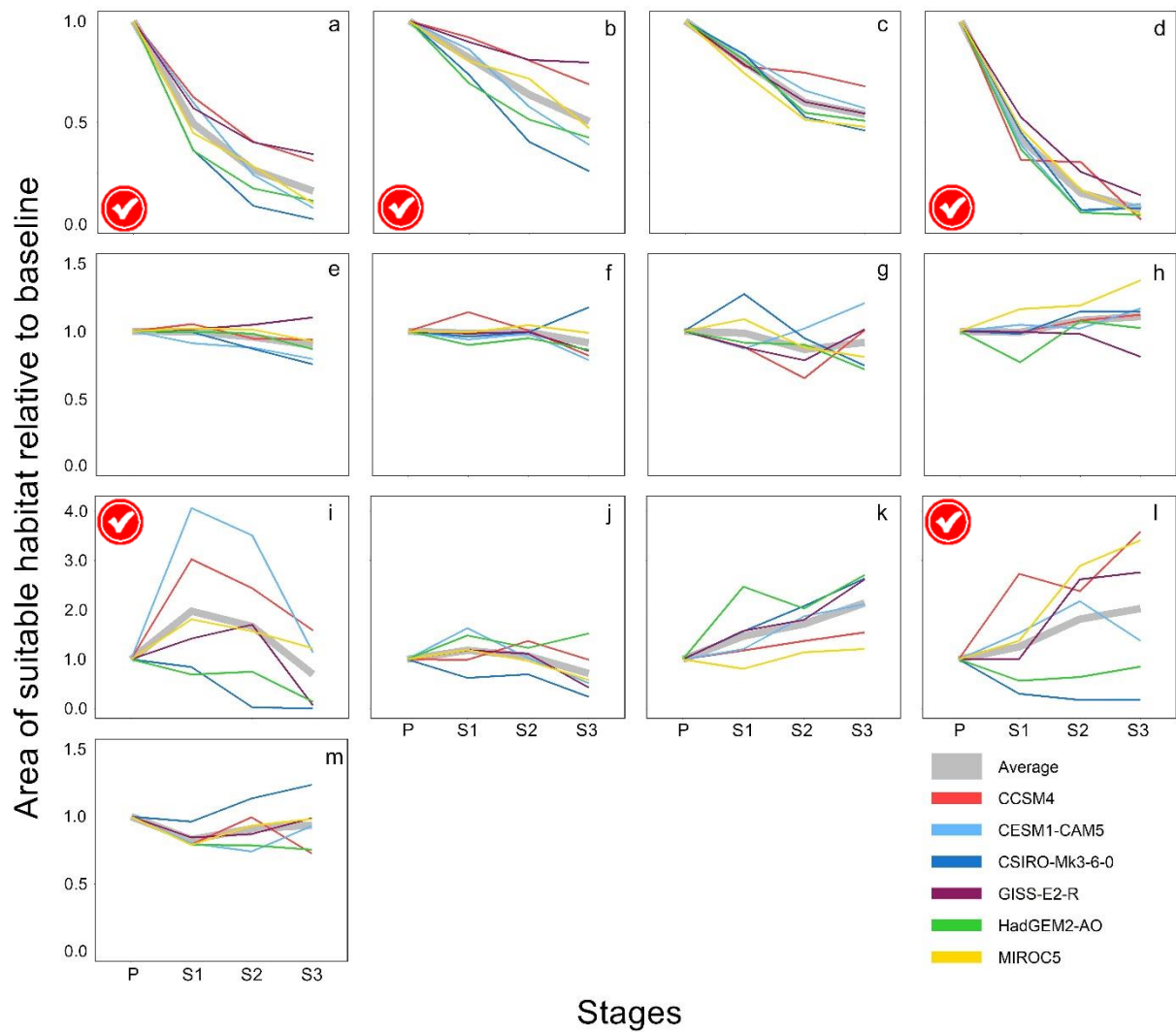


圖2.23 根據6種GCM的RCP 4.5暖化情境，分析13種森林類型現在與未來三階段（S1, 2035; S2, 2065; S3, 2090）的適生面積相對變化。粗體灰線代表6種GCM預測結果的平均值。打勾記號為相對易受氣候變遷衝擊的森林類型。



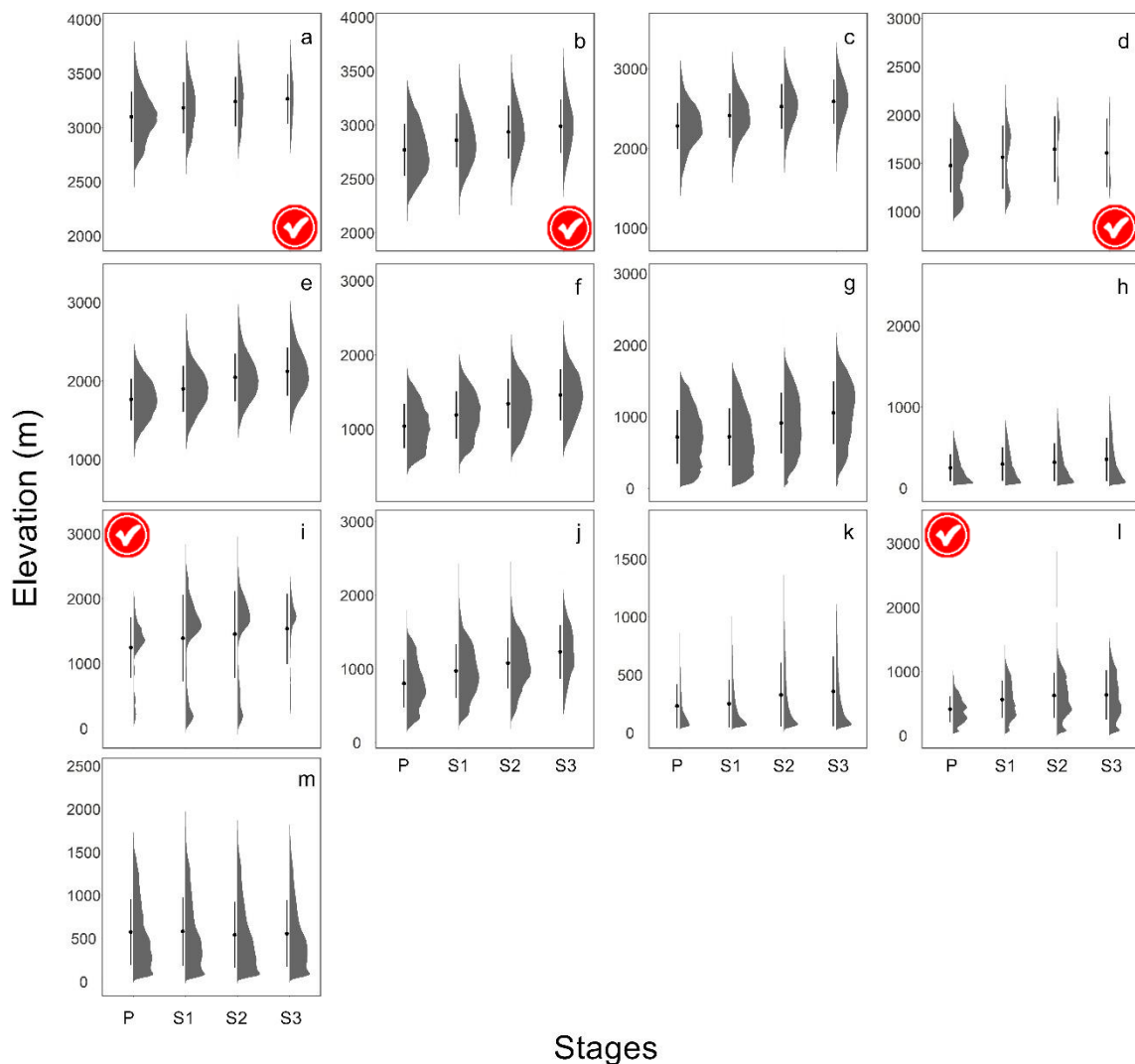


圖2.24 根據6種GCM的RCP 4.5暖化情境計算13種森林類型現在與未來三階段（S1, 2035; S2, 2065; S3, 2090）的海拔與適生面積平均變化。灰色陰影面積代表適生面積的相對變化量，粗體黑線代表25%至75%預測值分布範圍，黑點則為海拔分布中位數。打勾記號為相對易受氣候變遷衝擊的森林類型。





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，目前現存於千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，大漢山及姑仔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。



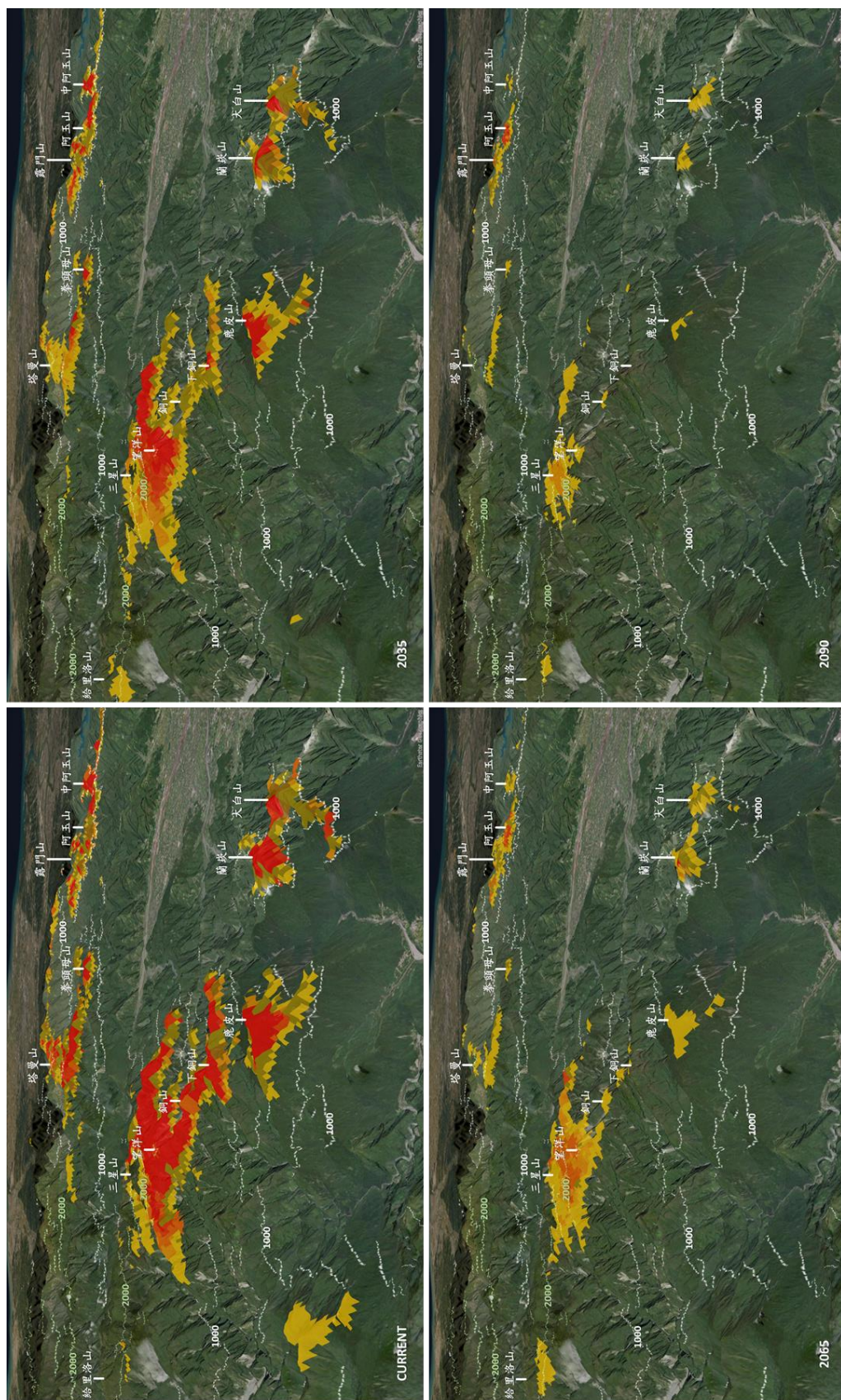


圖2.25 水青岡山地落葉霧林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。



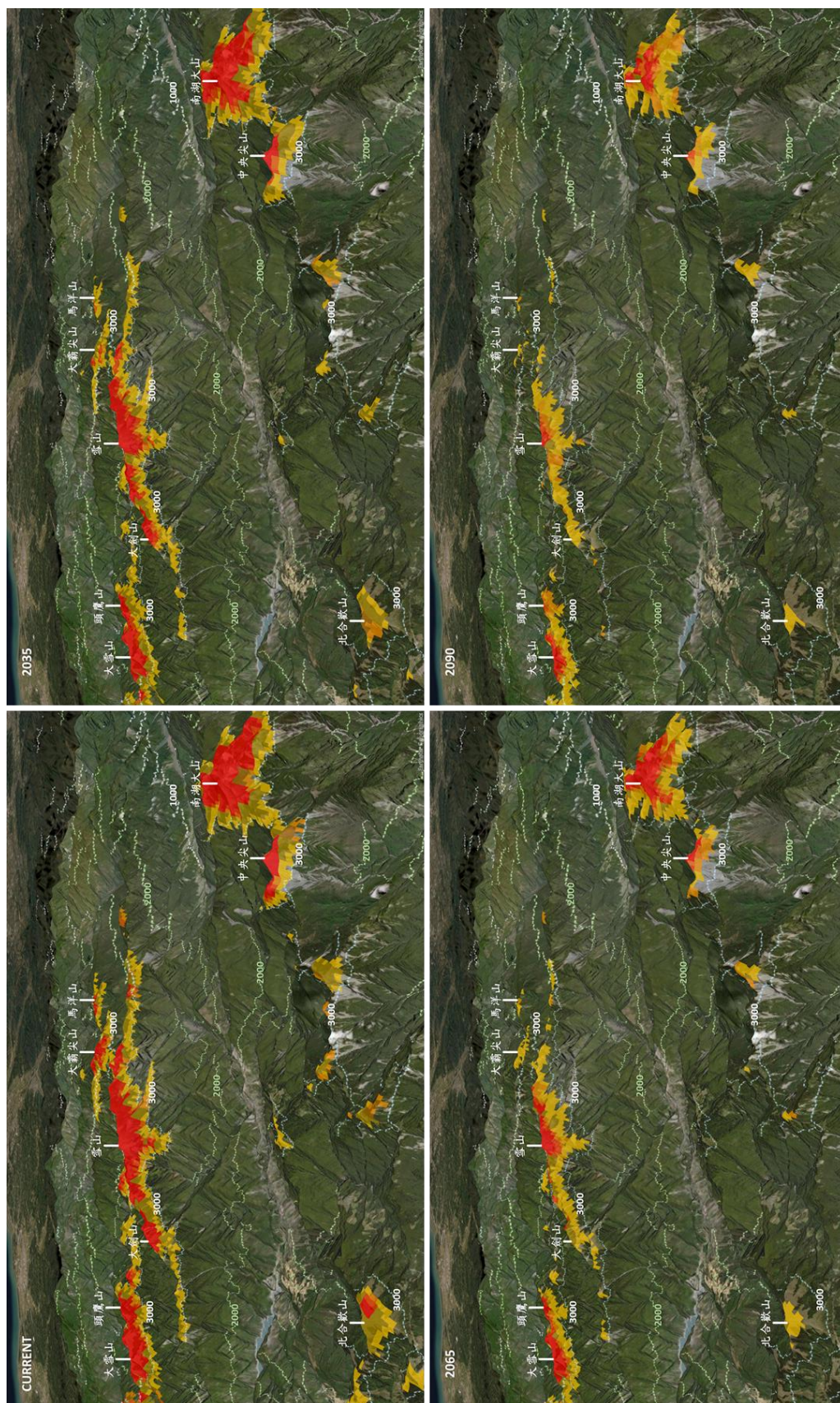


圖2.26 亞高山針葉灌叢及森林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。



1101115

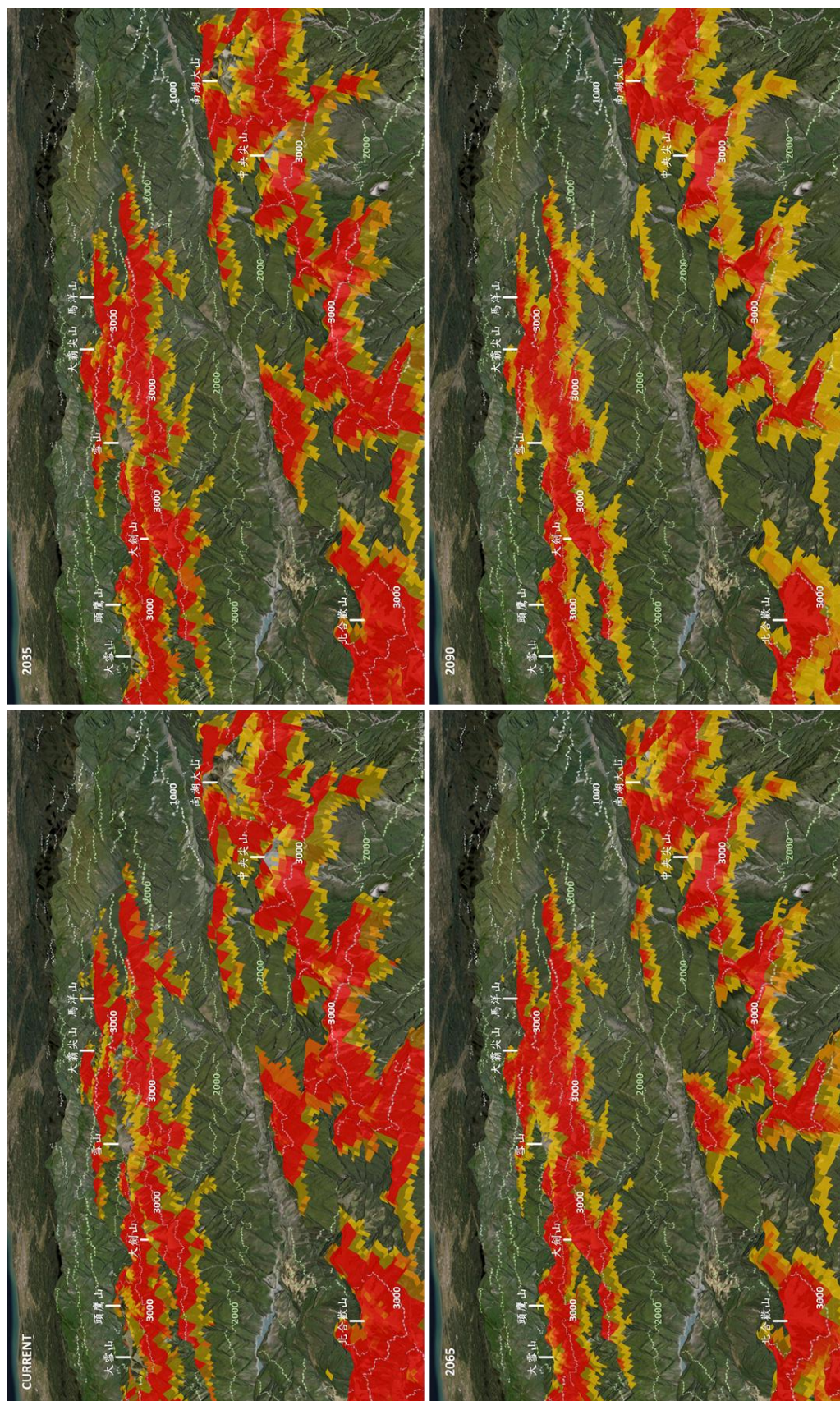


圖2.27 冷杉-鐵杉上部山地針葉林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。



1101115

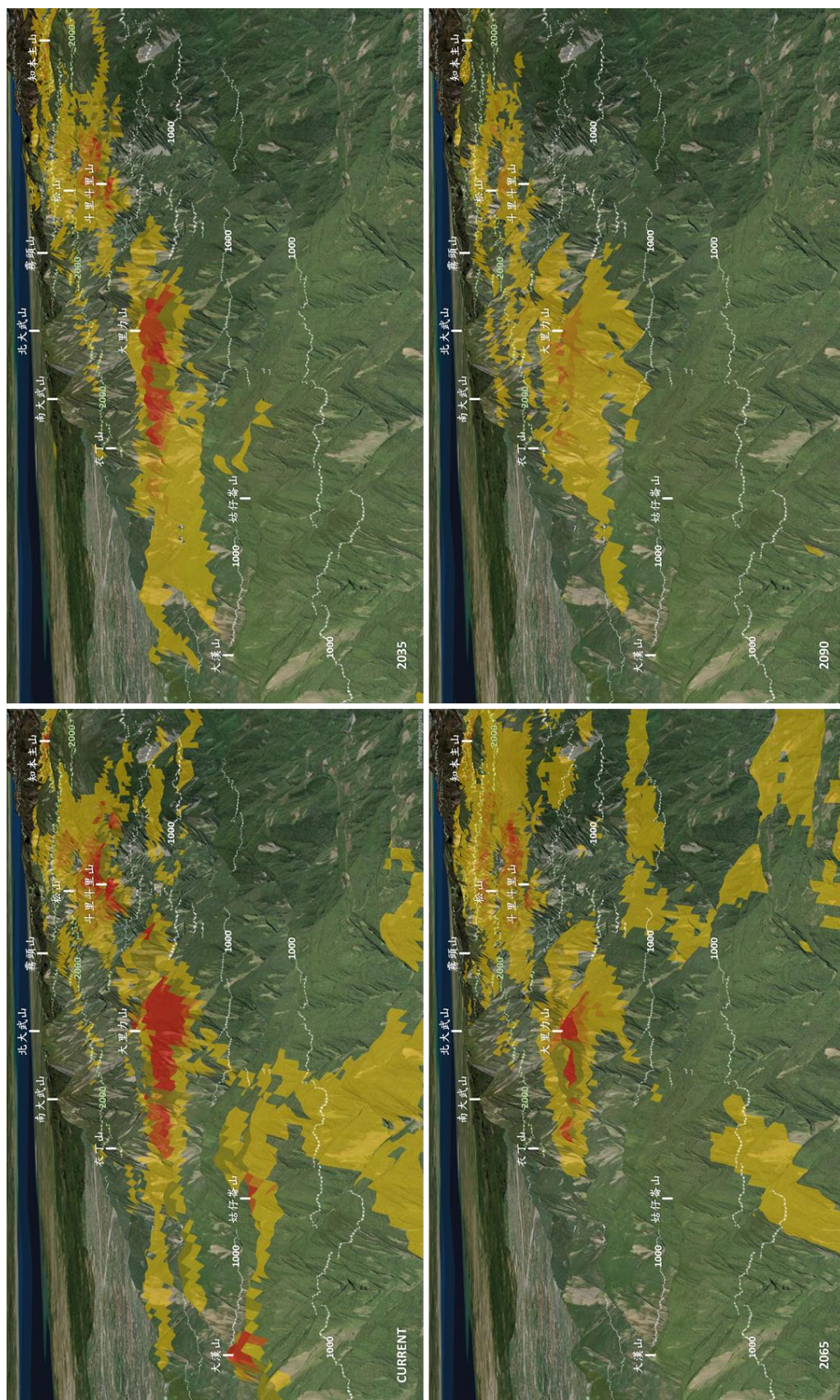


圖2.28 柯屬-杜英屬山地霧林現生與未來三階段經由Majority voting後的適生棲地分布情形。





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。根據本計畫研究結果,可歸納應強化監測及保育的重點如下:

- (1) 針對模型系集預測的急遽變遷地點,例如不同森林群團的變遷推移帶(如水青岡森林與常綠闊葉林的交界帶、鐵冷杉針葉純林下緣與闊葉林的混淆帶等),以及可能發生在地滅絕的地點(例如大白山、蘭坎山等預測現生族群將不復存在之處),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。
- (2) 熱帶霧林的預測不確定性極高,現有結果認為在降水極端化的狀況下,有可能導致這些對降水因子相對敏感的森林發生顯著退縮。然而目前對於熱帶霧林的調查研究相對缺乏,建議可針對中央山脈南段大漢山一帶的熱帶霧林加強研究調查,瞭解物種組成及森林動態變化。降水監測部分,除建立與氣象局、國家災害防救科技中心的密切聯繫外,建議在霧林帶位置(海拔1500-2500公尺山區)補設氣象測站,尤其著重降水及雲霧的監測,方能掌握降水及大氣含水量的變化趨勢。若有水分條件有趨於極端化時,則可及早對熱帶霧林生態系進行必要保護措施。
- (3) 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。

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,本計畫以泛域植群(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。



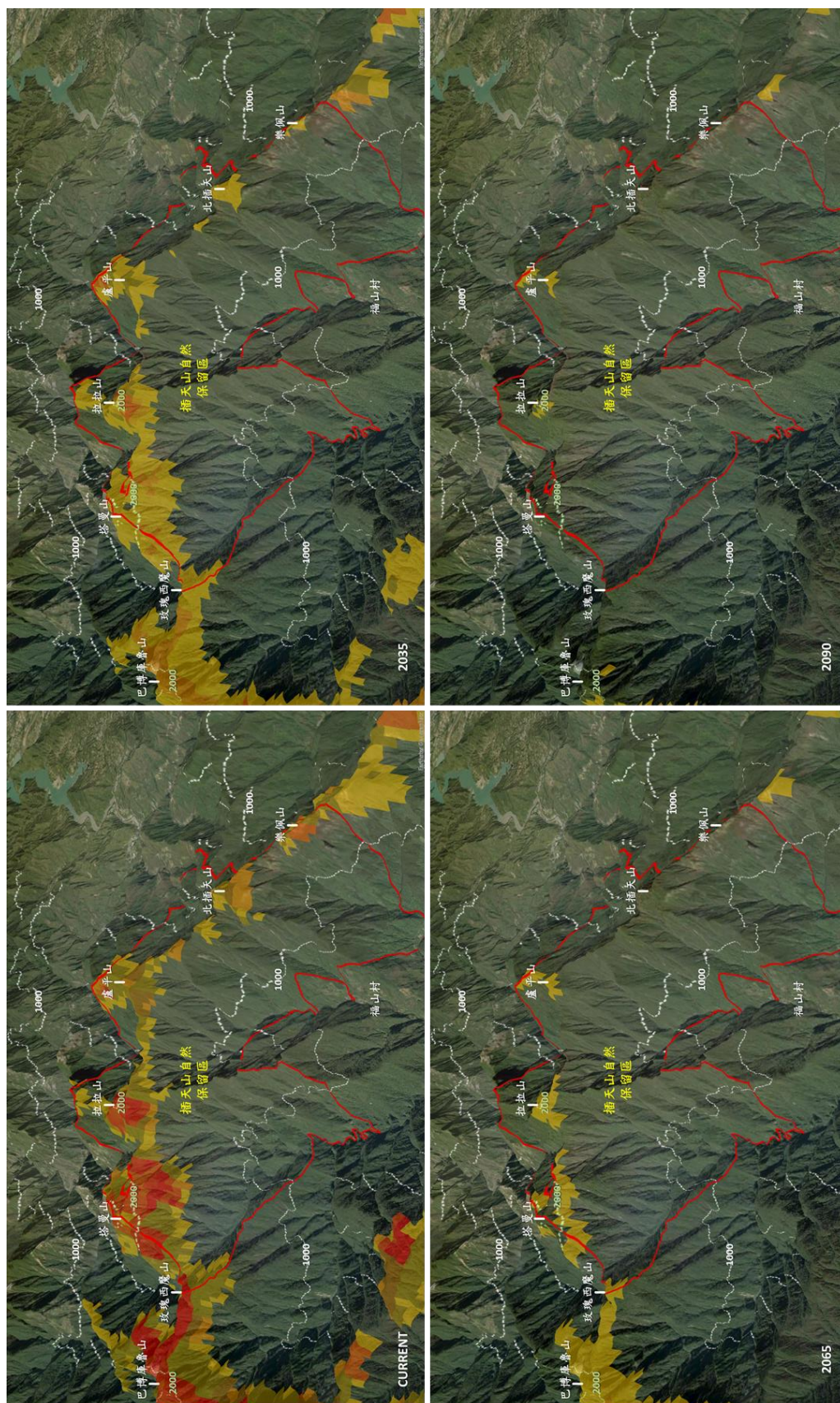


圖2.29 插天山自然保留區現行與未來三階段的水青岡霧林帶適存度變化情形。



1101115

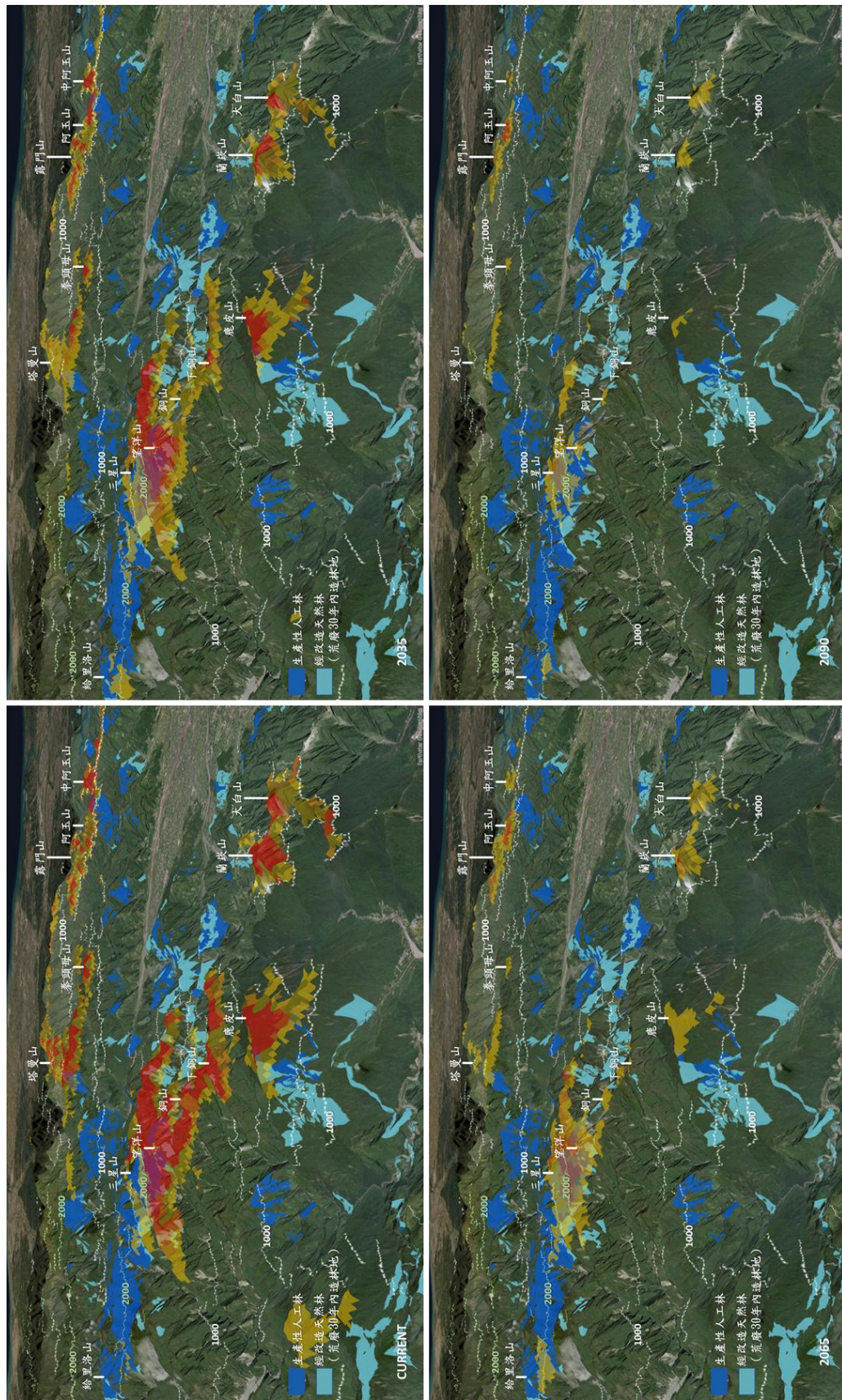


圖2.30 大白山、蘭炭山及銅山水青岡霧林帶適存棲地變遷與造林地疊合情形。



1101115

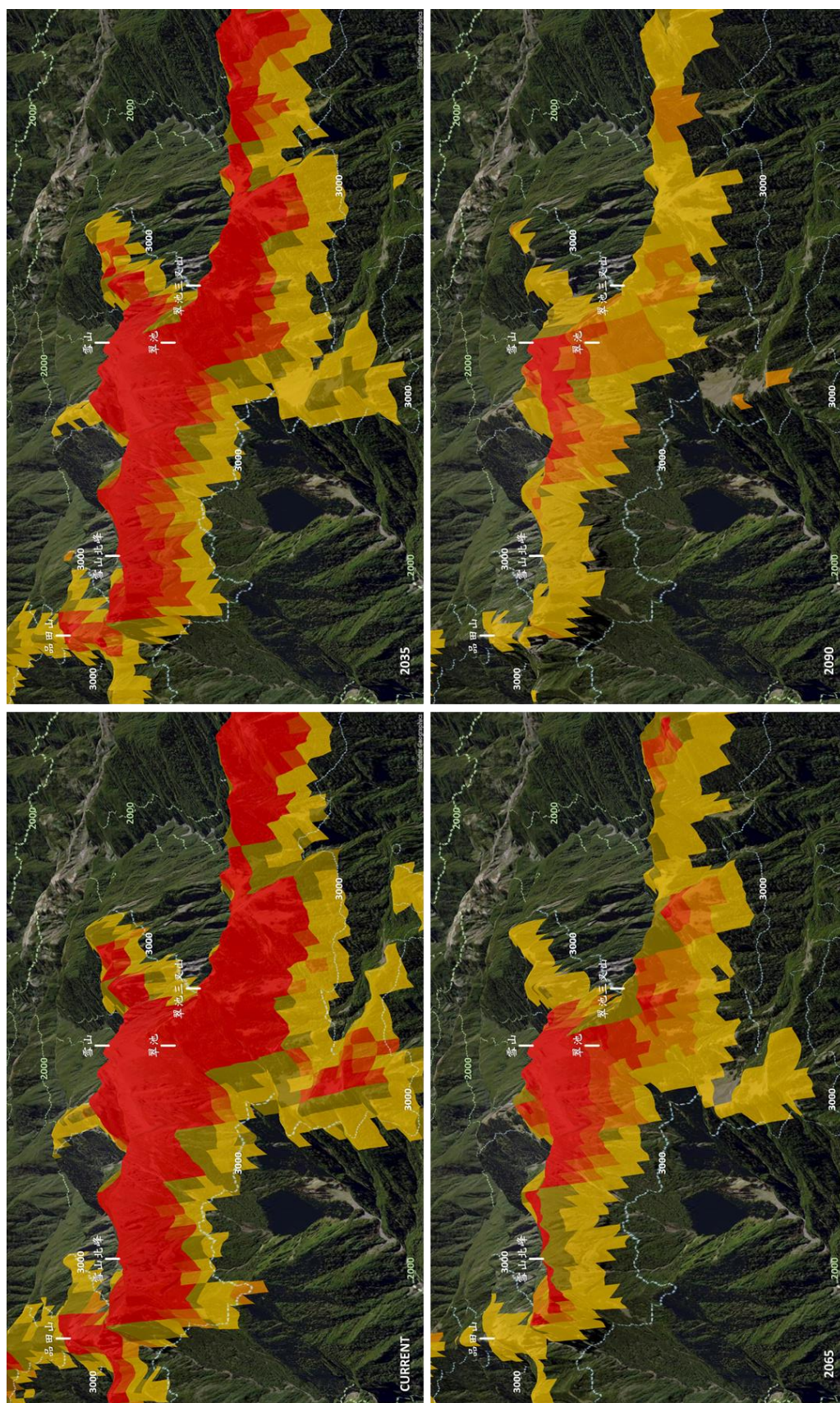


圖2.31 以翠池為例，套疊亞高山針葉灌叢的現生與未來分布，瞭解玉山圓柏林的景觀變化可能性。



1101115



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

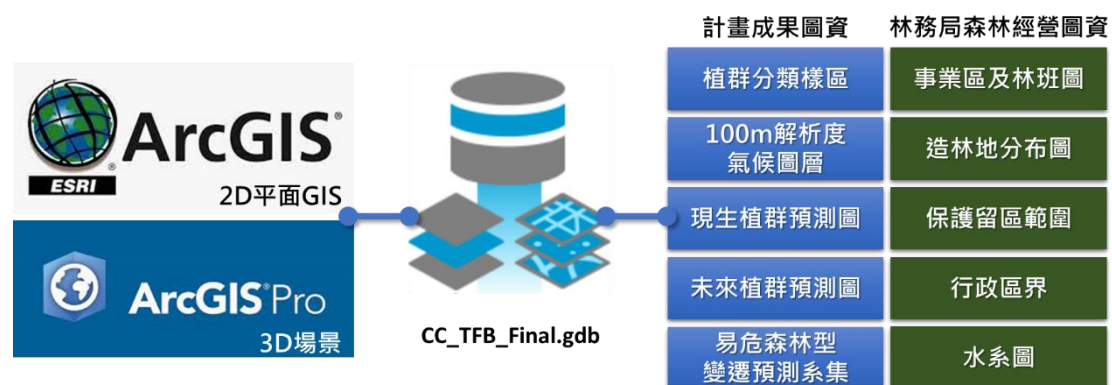
以 ESRI Geodatabase 儲存本計畫成果及林務局森林經營圖資，包含植群分類樣區、100 公尺解析度氣候圖層、現生植群（13 種森林類型分布預測圖）、未來植群預測圖（RCP4.5 情境、6 種大氣環流模型、5 個未來階段）、易危森林型變遷預測系集（RCP4.5 情境、5 個未來階段），以及林務局既有之事業區及林班圖、第四次全國森林資源調查造林地分布圖、保護留區圖層及行政區界等（圖 2.32）。利用該資料庫，分別建置 ESRI ArcMap 及 ArcGIS PRO 專案，進行資料的查詢、展示及林業圖資套疊分析。ArcMAP 以平面（2D 環境）作業為主，是林務局經常使用的 GIS 軟體，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。



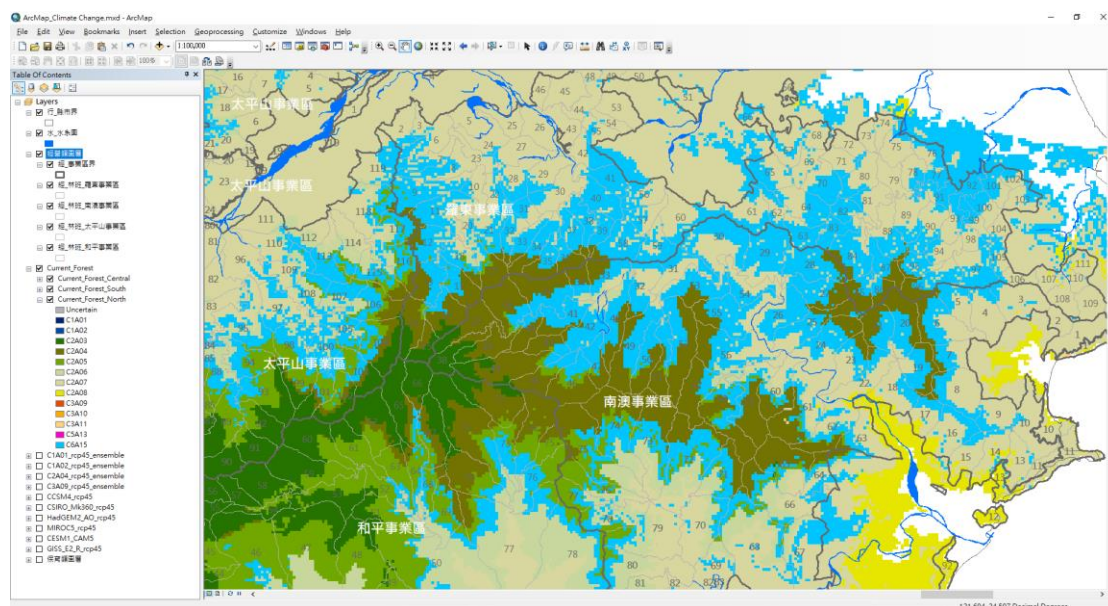


圖2.33 利用ESRI ArcMAP呈現成果資料庫。以銅山、大白山、蘭崁山各森林類型及臺灣水青岡森林為例，可快速瞭解臺灣水青岡在羅東事業區、南澳事業區、太平山事業區及和平事業區的潛在分布，以及水青岡森林鄰近地區的其他森林適生分布概況。

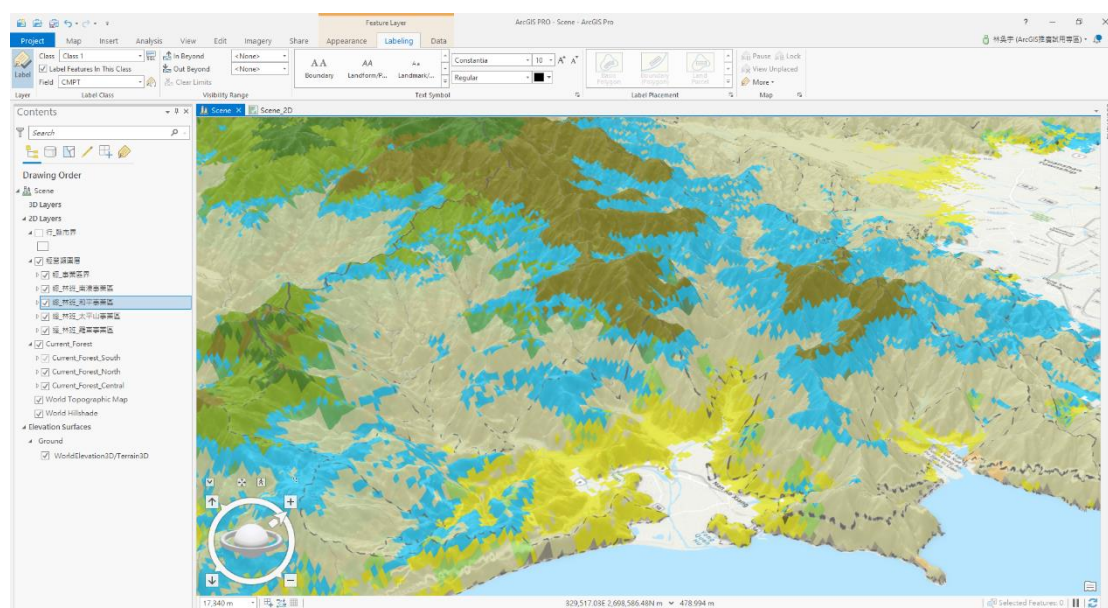


圖2.34 與圖2.31相同地點，由ArcGIS PRO呈現結果。利用3D場景可瞭解各森林類型潛在分布與地形的關係，以及各事業區、林班地形特性。亦可將各林班單元內不同海拔段的森林適生情形進行視覺化呈現。

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」	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。 2.文字檔 clim.regression.R：氣候降尺度主程式，以 R 軟體為執行平台。 3. 文字檔 example.txt：clim.regression 的使用說明與指令範例。
		資料夾「TCCIP_5km」	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。 2.做為 clim.regression 的輸入背景資料。
		資料夾「TCCIP_5km_future」	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。 2.做為的輸入背景資料。
生物分布預測工具	UTF-8 文字檔	資料夾「VEG_modeling」	1.本計畫建立之植群分布預測工具。 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。 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。
氣候圖層	Geodatabase, point	Baseline_Taiwan_North	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。 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。 3.因資料龐大達 270 萬餘點位，切分為北、中、南三區段儲存。
		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	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_2035	
	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、審查意見回應

1. 期中審查

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	(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。	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) 建議增加一段文字，說明計畫執行期間，各模式的比較。	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。
	(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。	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。





審查委員	審查意見	回復說明
	(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。	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。
	(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





審查委員	審查意見	回復說明
		充說明。
	(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。	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。
	(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，但操作上是以現存棲地的實際生態區位	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。



1101115



審查委員	審查意見	回復說明
	realized niche 進行評估，不等於真正的生態區位 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。	
	(4) 森林類型是否相等於群團或其他階層，應該明確表示。	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。





審查委員	審查意見	回復說明
		已修正於「2.3 隨機森林 (Random Forests) 生態棲位模型建立方法」第一段文字。
	(5) 期中評核無異議通過。	無。

2. 期末審查

審查委員	審查意見	回復說明
林宜靜委員	(1) 建議提供具體保育建議，尤其針對熱帶霧林的保育建議。	有關保育建議部分，已依據過去各年度成果，擬定三項保育建議並條列於「3.3.2未來預測圖資在森林經營與保育的應用」章節內。分別針對「應加強監測的森林類型」、「降水及大氣含水量監測的強化方式」、以及「研究成果與政府政策整合」三面向提出建議。
	(2) 請強化與其他子項計畫間的整合。	遵照辦理，將於第一章補強說明。
劉和義委員	(1) 本計畫成果豐碩，可於討論提供進一步的保育措施建議（特定或一般性）。	感謝委員肯定，本計畫已根據過去六年的執行成果與經驗，擬定三點保育建議，並納入「3.3.2未來預測圖資在森林經營與保育的應用」章節。





審查委員	審查意見	回復說明
	(2) 另外為了驗證模型，是否需 要做降水的監測，監測點會 在哪裡？	降水監測是必要的工作，確實 可提高我們對於熱帶森林這 類對水分敏感生態系的未來 變遷掌握。已於成果報告內建 議，除加強與氣象局及國家災 害防救科技中心的聯繫外，並 可在霧林帶山區補設測站，著 重降水量與雲霧的監測，應可 大幅提昇我們對於熱帶霧林 生態系的瞭解。
	(3) 另建議統籌計畫之第一章需 要重新修改，以能跟各子項 計畫串連。	遵照辦理，將於第一章補強說 明。
業務單位	(1) 後續將資料庫移轉至本局 後，不知道屆時是否可以在 本局 FGIS 系統上直接套疊 使用。	本計畫成果資料庫係以ESRI ArcGIS為平台，與林務局圖資 平台採用相通的座標系統，整 合上應無問題。此外，用於期 末報告展示之林業圖資（如事 業區圖、林小班圖、森林資源 調查成果圖等）均來自林務局 GIS圖庫，經測試與本計畫成 果可順利整合無虞。
	(2) 本計畫成果良好，後續將規 劃辦理成果發表，除了在林 業經營及學術界研究上的使 用外，也可以以貼近一般人 生活應用上的例子來展示其 用途。	遵照辦理，本團隊將把研究成 果轉換為科普化內容，投稿至 林務局刊物發表，讓社會大眾 瞭解氣候變遷對於森林的可 能影響。





審查委員	審查意見	回復說明
林 副 局 長 皓 貞	(1) 本計畫成果可先安排向本局各業組室同仁簡報說明林業經營上的應用面向，再請團隊屆時協助。	遵照林務局後續安排辦理，可採會議簡報或工作坊形式，向局內同仁介紹計畫成果的應用方式。
	(2) 對於監測上的建議，再請補充加強。	已於「3.3.2未來預測圖資在森林經營與保育的應用」章節補充監測建議供林務局參採。





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 clim.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]
```



1101115



```

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 # Percipitation of Febuary
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]
}

```



1101115



```

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")

```



1101115



```
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$Name)
    rf.data=rf.data[,c(1,RF.varpred.selected+1)]
    # let m equals to p^0.5, p=number of variables.
    rf.pred=randomForest(Name~.,data=rf.data,subset=c(1:nrow(rf.data)),
      mtry=ceiling(length(RF.varpred.selected)^0.5),ntree=500)
    err[j]=mean(rf.pred$serr[,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)){
```



1101115



```
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. Hsieh 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>

