



公開

密件、不公開

執行機關(計畫)識別碼：100901e604

行政院農業委員會林務局109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 (2/4) (第2年/全程4年)
(英文名稱) Construction of high-resolution climate
downscaling model and its application
in the projections of vegetation
distribution and future changes (2/4)

計畫編號： 109農科-10.9.1-務-e6(4)

全程計畫期間：自 108年1月1日 至 111年12月31日

本年計畫期間：自 109年1月1日 至 109年12月31日

計畫主持人： 謝長富

研究人員： 葉昱君、林耕堯、呂佳陵、魯丁慧、楊綉玉、林奐宇、徐佳容

執行機關： 台灣生物多樣性保育學會



1091661



一、執行成果中文摘要：

我國科技部2011年發佈之「臺灣氣候科學變遷報告」，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；大致顯示將朝濕季更濕，乾季更乾的方向變化，降雨量的空間分布則以臺灣西南部減少的最嚴重。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，可確定水青岡山地落葉霧林、亞高山針葉灌叢及森林為易受氣候變遷衝擊的森林生態系。此外，從極端的情境來看，柯屬-杜英屬山地霧林及八角茴香-桐屬熱帶季風林這二類熱帶森林亦可能面臨極高的氣候變遷衝擊。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。

在前述背景下，本計畫將以108年至111年為期推動下列研究工作，加強我國森林保育工作對於氣候變遷的因應與調適能力：

1. 以國家植群多樣性調查成果為基礎，建構細緻的植群分類架構與潛在氣候植被的預測模型。依據TCCIP提供之氣候變遷情境，對高易危地點進行動態變化模擬，提升氣候變遷下細緻化經營與保育台灣森林的能力。
2. 配合其他計畫對高易危生態系的監測，調校植被預測與動態變遷模型，提高對於小尺度植被變化趨勢的掌握能力。
3. 強化已開發之clim. regression統計降尺度模型，產製與農林及生物高度相關的氣候因子，提升國產圖資在農林領域的應用價值。
4. 配合IPCC及TCCIP的氣候變遷資訊更新時程，檢討臺灣森林變遷預測研究的準確性並進行必要修正，使我國森林保育政策與全球氣候變遷趨勢迅速接軌。

二、執行成果英文摘要：

The Scientific Report of Climate Change in Taiwan has mentioned a significant trend of warming during the past 100 years. It also revealed that more precipitation could be concentrated in the wet season inducing an extreme allocation of rainfalls especially in the southwest of Taiwan. According to the study on the impacts of climate change that sponsored by the Forestry Bureau, it clearly stated that two forests, the subalpine coniferous woodland and *Fagus* forest, could be the most vulnerable ecosystems under the impact of climate change. The other two forests in tropical Taiwan, the tropical montane evergreen broad-leaved cloud forest and the tropical winter monsoon forest, could be also highly risked under some extreme warming scenarios. In order to enhance abilities of forest





ecosystems to adapt and mitigate the impacts of climate change, this study will not only focus on the establishment of long-term monitoring networks for vulnerable forest ecosystems but also construct high-resolution and accurate statistical equipment to model the dynamics of forests under future scenarios.

The main goals of this study are stated as follows:

- To construct a fine scheme on vegetation classification of Taiwan. Ecological niche model and potential habitat projection for each vegetation unit will be also included.
- To validate and calibrate ecological niche models based on field survey and monitoring.
- To improve the statistical functions of the published climate downscaling model 'clim.regression'. More bioclimate factors will be incorporated into this program to enhance its ability and applicability on ecological researches.
- If IPCC Sixth Assessment Report was announced, we would adjust and update the projections of forest ecosystems based on the latest released climate change scenarios.

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108年度彙整完畢之植群分類架構及樣區資料，建構現有已獲得的21種森林植被類型以下的細部分類，並產製植群單元（植物社會或群叢等級）之氣候幅度資訊，包含月氣溫、月降水、月生長積溫、月冷積溫、乾旱耐受度等因子。
 - (2) 利用機器學習法，進行各植群單元之重要氣候變量篩選及權重分析。並依據 Lin et al. (2020)發表之植被分布預測架構，建構臺灣地區潛在氣候植被預測工具雛形。
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：
 - (1) 完成clim.regression降尺度模型改良，增納推估生物氣候因子功能，包含月生長積溫（GDD）、月冷積溫度（CDD）及連續不降雨日數等資料項目。
 - (2) 利用TCCIP日尺度資料及中央氣象局測站歷史觀測資料，進行 clim.regression之氣候推估準確度驗證，並將結果整理為科學報告形式。
3. 配合高易危生態系監測資料，修正植被預測與動態變遷模型：
 - (1) 依據108年度完成之臺灣水青岡及周邊植被動態變遷預測架構，另選取一處高易危地點（預定為亞高山針葉林或熱帶季風林），進行細部植群之動態變遷分析。
 - (2) 持續收集臺灣水青岡森林及其周邊植被監測資料，進行既有模型工具之修正。





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) 植群分類架構部分，將以Li et al. (2013) 採用的Cocktail method (Bruehlheide 1997, 2000; Bruehlheide & Chytry 2000; Koci et al. 2003) 為主要分類方法。該方法係類似數學邏輯多項式結構，將物種（典型種或特徵種）的出現與否作為自變量，建構出植群類型（應變量）與典型種及特徵種的數學對應關係。此方法優點為每個植群樣區可成為單獨的訓練或驗證樣本，經由重複抽樣訓練與反覆驗證，使分類架構趨於穩健；此外，當植群研究者取得新的樣區資料，可將新樣區的物種組成表送入本分類架構流程，即可判定該樣區歸屬的植群類別。Li et al. (2013) 已利用此方法確定臺灣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。

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) 目前已取得TCCIP提供之5公里網格日尺度資料，包含歷史階段（1986-2009年）及AR5的未來日尺度模擬數據，內容為逐日之均溫、高溫、低溫及降水量。預計利用日尺度資料及中央氣象局實際觀測資料，計算各網格及測站地點的歷史積溫、持續不降水日等，作為後續統計預測的真值；另一方面將日尺度網格升尺度（upscale）至月尺度網格，再以升尺度後之月均溫及月降水作為應變量，以日觀測獲得之歷史積溫、持續不降水日作為自變量，求取升尺度後月介量與各種日尺度衍生介量間的統計關係。國外相關研究顯示，月尺度介量與日尺度生物氣候衍生介量間通常為非線性關係，可利用分段的線性與非線性迴歸組合方法(Wang et al., 2017)或直接利用非線性的樹狀迴歸方法求取兩者的數學關係。由於日尺度觀測數據龐大，本研究預定採用tree-based的隨機森林方法，經由大量資料的反覆訓練，找出月尺度與日尺度生物氣候衍生介量的關





係；再將機器學習獲得之模型，納入clim.regression原始程式，使clim.regression獲得推估生物氣候衍生介量的能力。

3. 森林植被適生分布預測及未來變遷分析：

- (1) 前期計畫已從Li et al. (2013)指出的21種森林類型中，選出與氣候高相關的13類森林，以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) 本計畫將延續該分析流程，將原有應變量（13種森林類型）置換為新產出的植群分類細緻單元，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，經由隨機森林分析後，嘗試達成建構各植群單元生態氣候棲位模型的目標，進而可利用棲位模型，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：

如附件報告書。

六、結論：

如附件報告書。

七、參考文獻：

如附件報告書。





第二章 高解析度氣候模型建置及其在預測植群分佈與未來變遷之應用

摘要

精確而高解析度的氣候圖資，以及完整而明確的生物調查資料，是氣候變遷研究最重要的兩個主體，經由統計預測方法的搭配，才能瞭解生物與氣候的關係，進而推估暖化情境下的可能變化與預擬對策。前期計畫已於 107 年度完成臺灣地區氣候降尺度推估軟體 *clim.regression* 的開發，可針對臺灣全島產製無固定尺度 (scale-free) 的氣候資料，涵蓋 1960–2100 年期，作為氣候變遷研究的基礎工具。同時也利用 *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。本期計畫 108 年度引入植群計畫的階層式分類架構，並完成資料收集與整理，預期從既有的 13 種森林類型 (群團階層) 發展出更細緻的植群分類單元 (群叢階層) 分布預測能力。

109 年為本期計畫第 2 年度。本年共完成 *clim.regression* 降尺度模型改良，增納生物氣候及地形因子推估能力，並延續 108 年度成果，針對群叢階層植群單元進行重要環境與氣候因子分析，完成潛在分布預測模型與預測圖的建置，並就各植群單元的棲位因子與模型準確率，與相關前人研究進行比較討論。本計畫亦配合羅東林管處水青岡保育平台會議之決定，針對宜蘭銅山、大白山、蘭崁山台灣水青岡森林進行棲位模型調整與三維空間模擬，提供臺灣水青岡適生地點及栽種區域等參考資訊；另針對恆春半島臺灣石櫟族群提出區域內的適生狀況分析，以及未來變遷情境下的族群變動模擬，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 RCP 8.5 情境下，全臺平均氣溫上升將超過 2°C，甚至有一半的模式推估臺灣各地區的增溫在世紀末將超過 3°C。對於雨量預測則與溫度不同，該報告指出，臺灣地區年平均降雨變化在四個不同未來情境下，從近未來、世紀中、世紀末三個時段，對於全年平均降雨改變量的模式系集中位數而言，並沒有顯而易見的系統性變化型態，模式系集變化量的中位數都在 -5%~+5% 之間，並沒有顯著增加或減少的趨勢。也就是說，諸多 CMIP5 氣候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 擬解決問題

林務局 105–107 年度「因應氣候變遷生物多樣性回復力之研究」計畫（前期計畫），已指出多處可能遭受暖化衝擊之森林社會。例如已確定亞高山植群、臺灣水青岡森林、南仁山熱帶季風林及大漢山柳葉柯植物社會為高易危地點，並經由多情境模擬，找出高易危生態系的可能遷徙路徑與避難地點。然而，前期計畫以類似群團（alliance）概念將臺灣與氣候因子有關的森林分為 13 種類型，尺度較為粗放。若可針對高易危地點發展更細緻的植被動態之預測技術，將更有利於細緻化的保育與經營管理。因此，本計畫擬以前期成果為基礎，解決以下問題：

1. 利用更細緻的植群分類架構（以群團或群叢為原則），經由前期計畫建立的機器學習流程，建構細緻的潛在氣候植被預測模型。並依據 TCCIP 之變遷情境，對高易危地點進行動態變化模擬，提出氣候變遷下臺灣森林細緻化經營與保育建議。
2. 配合高易危生態系的監測資料，調校植被變遷與預測模型，提高對於小尺度植被變化趨勢的掌握能力。
3. TCCIP 的 5 公里網格化氣候資料涵蓋期間雖廣（1960–2100），但以基本氣候因子如月均溫及月累積降水為主，無法完全符合農林及生態研究需求。本計畫擬以 TCCIP 數據為基礎，強化 *clim.regression* 統計降尺度程式功能，獲得與生物相關的氣候因子如 GDD（growing degree days）、CDD（chilling degree days）、





霜雪日、連續不降雨日等，提升國產圖資的應用價值。

4. IPCC 將於 2021 年完成第六次評估報告 (AR6) 發布。本計畫擬配合 IPCC 及 TCCIP 的氣候變遷資訊更新時程，檢討臺灣森林變遷預測研究的準確性並進行必要修正，使我國森林保育政策與全球氣候變遷趨勢迅速接軌。

1.3 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。

1.4 計畫目標

本計畫預定期程 4 年(108-111 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、積雪日數、雪線海拔、生長積溫、熱濕指數、無霜日等，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. 配合 IPCC 及 TCCIP 氣候變遷資訊更新，發展臺灣森林變遷預測研究的更新機制，使我國森林保育政策與全球氣候變遷趨勢迅速接軌。
 4. 針對高易危程度的生態系，發展區域性的監測與復育模式，以區域的小尺度修正植被預測與動態變遷模型的成果。

1.5 本（109）年度目標

依據全程目標，訂定本（109）年度目標如下：

1. 建構已知的 13 種森林類型以下的細部分類，並分析各細部植群單元（群叢等級）之環境與氣候因子幅度，包含月氣溫、月降水、月生長積溫、月冷積溫、乾旱耐受度等因子。





2. 完成植群細部單元之重要環境與氣候變量權重分析，建構潛在氣候植被預測工具雛形。
3. 完成 *clim.regression* 降尺度模型改良，增納推估生物氣候因子功能。
4. 選取一處高易危地點(亞高山針葉林、熱帶季風林或櫟櫟森林)，完成細部植群動態變遷分析。

二、材料及方法

2.1 臺灣地區氣候資料與環境因子產製

前期計畫已取得 TCCIP 提供之 5 公里網格月尺度氣候資料，包含月均溫度、月平均高溫、月平均低溫及月累計降水，配合 2018 年建置之 *clim.regression* 降尺度模型，可依使用者設定之空間點位產生自由尺度 (scale-free) 的 73 種氣候因子圖層 (Lin et al., 2018)。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 2.1)。



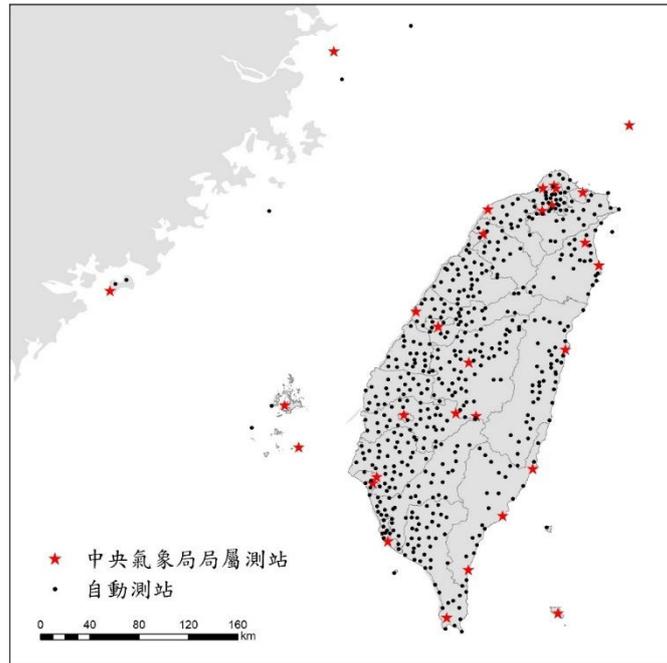


圖 2.1 本計畫已收集之歷史觀測資料 543 處測站位置。

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 2.2)。

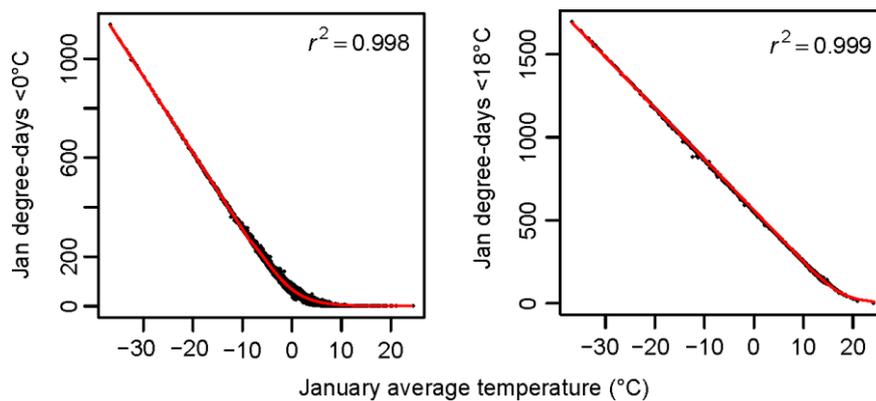


圖 2.2 以一月氣溫為例，利用 piecewise function 求取 0°C 及 18°C 以下日積溫與當月平均氣溫之迴歸關係 (Wang *et al.*, 2016a)。





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 2.3)；據以分析森林植群的地形特性。



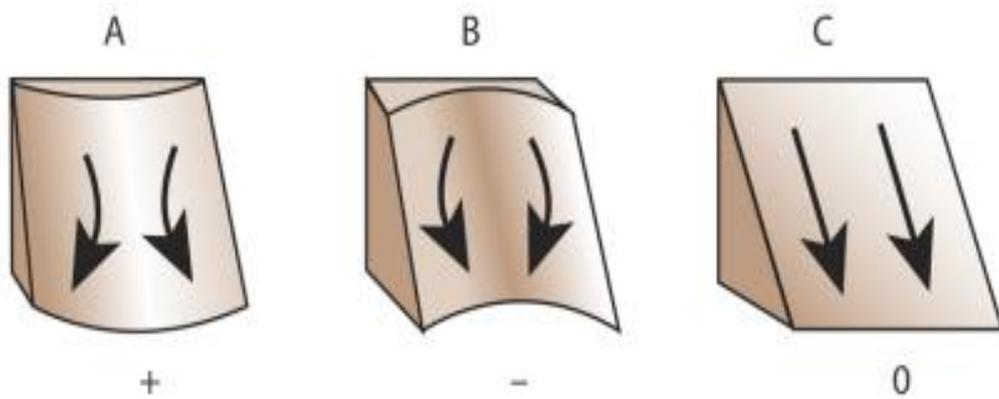


圖 2.3 地形凹凸度因子 (planform) 示意圖。本因子係利用數值表面模型 (DSM) 計算而來，對於位於突出而暴露的凸稜，以正值表示，且數值越大代表相對突出程度越高 (A)；若為兩側凹陷的溪谷或山谷地形，則以負數代表其相對凹陷程度 (B)；若地形無凹凸現象，則數值為零 (C)。

綜上各項來源，本計畫合計採用 105 種氣候與環境因子，作為本年度建構物種分布統計模型之預測變量 (predictors) (表 2.1)。





表 2.1 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 <i>et al.</i> , 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

2.2 植群樣區資料與分類架構之整理

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。本計畫篩選植群計畫 3348 個樣區資料，並依物種組成，分類為 7 群級、





21 群團、91 群叢。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 2.2。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。

表 2.2 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	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-Juniperus squamata</i>
29			WO10010200	<i>Aconitum fukutomei-Juniperus squamata</i>
47			WO10010300	<i>Cystopteris fragilis-Abies kawakamii</i>
241		C1A02	冷杉-鐵杉上部山地針葉林	
28			FO10020100	<i>Yushania niitakayamensis-Abies kawakamii</i>
79			FO10020200	<i>Tsuga formosana-Abies kawakamii</i>
37			FO10020300	<i>Yushania niitakayamensis-Tsuga formosana</i>
27			FO10020400	<i>Pinus armandii-Tsuga formosana</i>
54			FO10020500	<i>Rhododendron pseudochrysanthum-Tsuga formosana</i>
16			FO10020600	<i>Photinia niitakayamensis-Picea morrisonicola</i>
1561	CLA20	Subtropical mountain zonal forests		
564		C2A03	檜木山地霧林	
14			FO20030100	<i>Machilus thunbergii - Chamaecyparis formosensis</i>
19			FO20030200	<i>Pasania hancei v. ternaticupula - Picea morrisonicola</i>
50			FO20030300	<i>Rhododendron formosanum - Chamaecyparis obtusa v. formosana</i>
94			FO20030400	<i>Rhaphiolepis indica v. tashiroi - Rhododendron formosanum</i>
69			FO20030500	<i>Vaccinium japonicum v. lasiostemom - Tsuga chinensis v. 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 irisana</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





2.3 棲位模型建立與分布預測方法：隨機森林(Random Forest)

棲位模型 (niche modeling) 是利用數學或統計過程，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 (圖 2.4)。



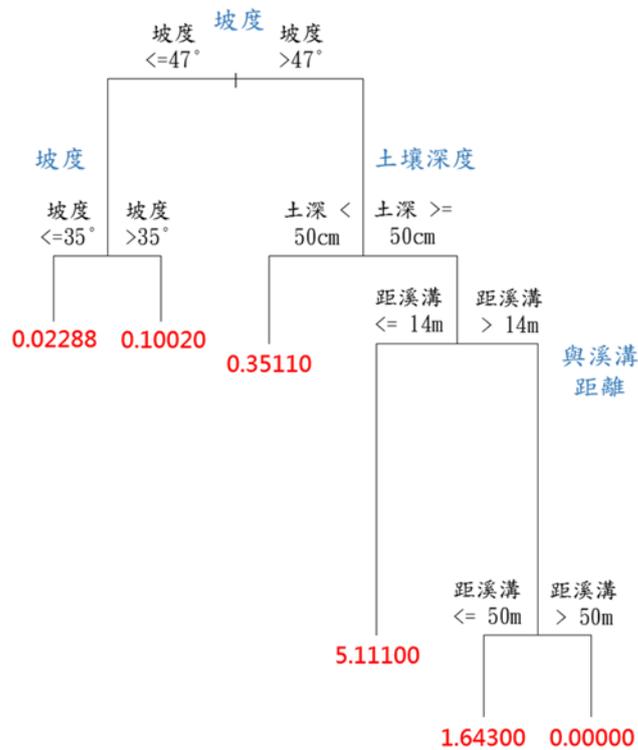


圖 2.4 決策樹的應用案例。利用 14 個不同年期崩塌地監測資料與地形因子，探討崩塌頻度與地形的關係。根據決策樹各節點的因子及門檻，可以直覺地描述出不同地形條件下的崩塌頻度差異：例如坡度 47° 以上、土深較深、距溪溝較近的區位，是崩塌最為頻繁的位置，平均可觀測到 5.11 次的崩塌事件(林, 2016)。

隨機森林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。針對單一群團單元，分別建立「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。樣本平衡原則在某些案例內會進行微調，尤其是 absence/presence 比例極端懸殊的稀有種或窄域分布物種，相關細節將於研究結果章節內說明。圖 2.5 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，平衡取樣僅涵蓋總體樣本的一小部分，故憑單一次隨機森林結果，可能難以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 2.6 流程進行多重隨機森林的集成 (ensemble)，利用集成的結果，得到與訓練樣本相近的分布預測，並建立各預測點位的機率分布。



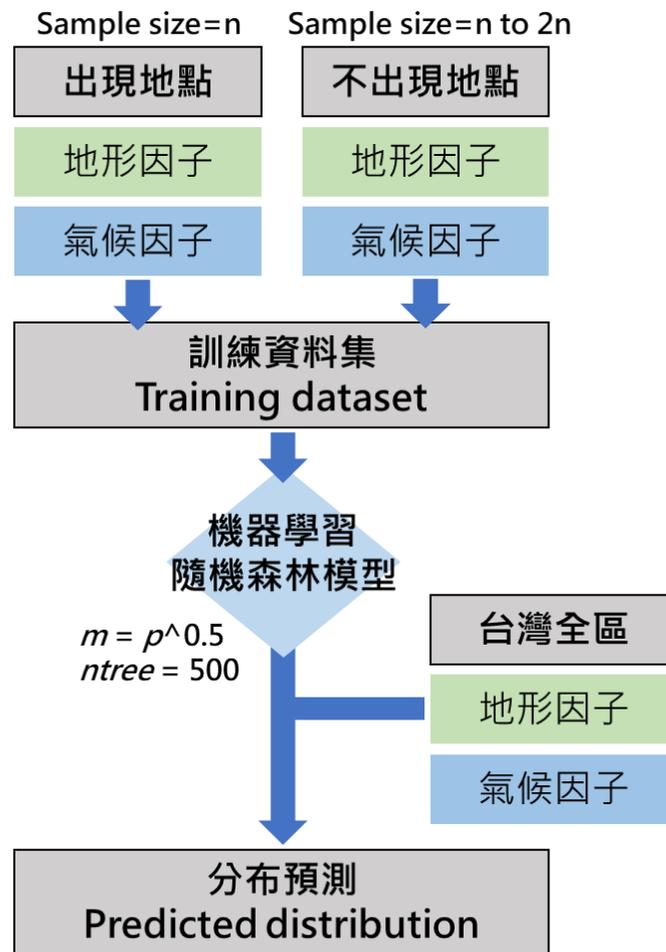


圖 2.5 本研究建立之隨機森林架構，包含模型訓練與分布預測過程。本流程輸出為單一隨機森林的預測結果，該結果再納入圖 2.5 流程，成為多重隨機森林總和評斷的來源資料。



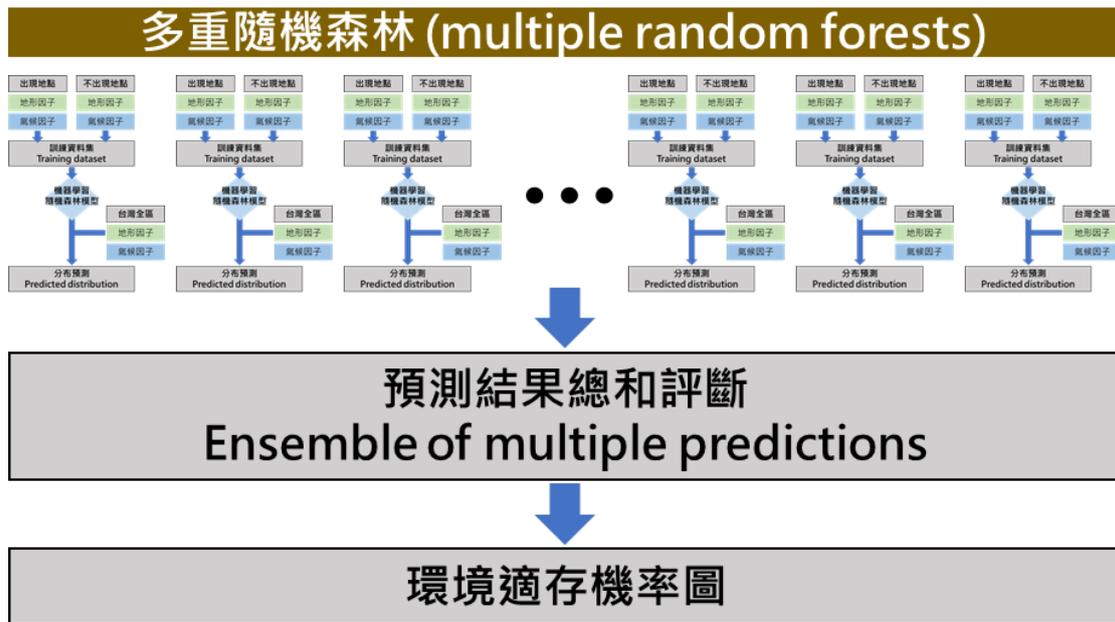


圖 2.6 本研究建立之多重隨機森林架構。本流程以平均權重進行多組隨機森林輸出集成，據以形成預測結果的機率分布。以生物分布預測而言，即獲得該物種在地理空間內的環境適存機率分布圖。

三、結果與討論

3.1 群團層級之分布預測及環境因子分析

依據多重隨機森林架構（圖 2.6），以表 2.1 所列的 105 個環境與氣候因子對每一群團建立隨機森林模型，再以前期計畫發展之模型合併流程，判別各空間點位之最適森林類型及機率值（Lin *et al.*, 2020，圖 2.7），完成全臺群團層級之森林分布預測，並以銅山至南湖大山，以及蘭陽河流域兩側範圍為例，顯示群團層級分布預測結果如表 2.3 及圖 2.8。

於上述 22 萬公頃範圍內，單一植群型 (pure stand) 面積約佔 90%，混淆植群型 (mixed stand) 面積則約佔 10%。以雅楠屬-楨楠屬亞山地闊葉林 (*Phoebe-Machilus*) 所佔面積最大 (22.31%)，檜木山地霧





林 (*Chamaecyparis*) 及烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林 (*Pyrenaria-Machilus*) 分佔 20.55% 及 17.66% 次之。在海拔 800 公尺以下區域，雅楠屬-槲楠屬亞山地闊葉林與烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林呈現高度鑲嵌，約有 5500 公頃區域呈現兩群團混淆共存狀態。本區域內水青岡山地落葉霧林適生區域約 13567 公頃，主要分佈在蘭陽溪南側的翠峰湖以東至銅山、下銅山、蘭炭山、大白山一帶，以及蘭陽溪北側的阿玉山一帶。模擬顯示，水青岡山地落葉霧林主要與檜木山地霧林 (67%) 及櫟屬山地闊葉林 (24%) 混生為主，少部分與烏皮茶-槲楠屬亞熱帶季風林 (9%) 混淆分布 (表 2.3)。

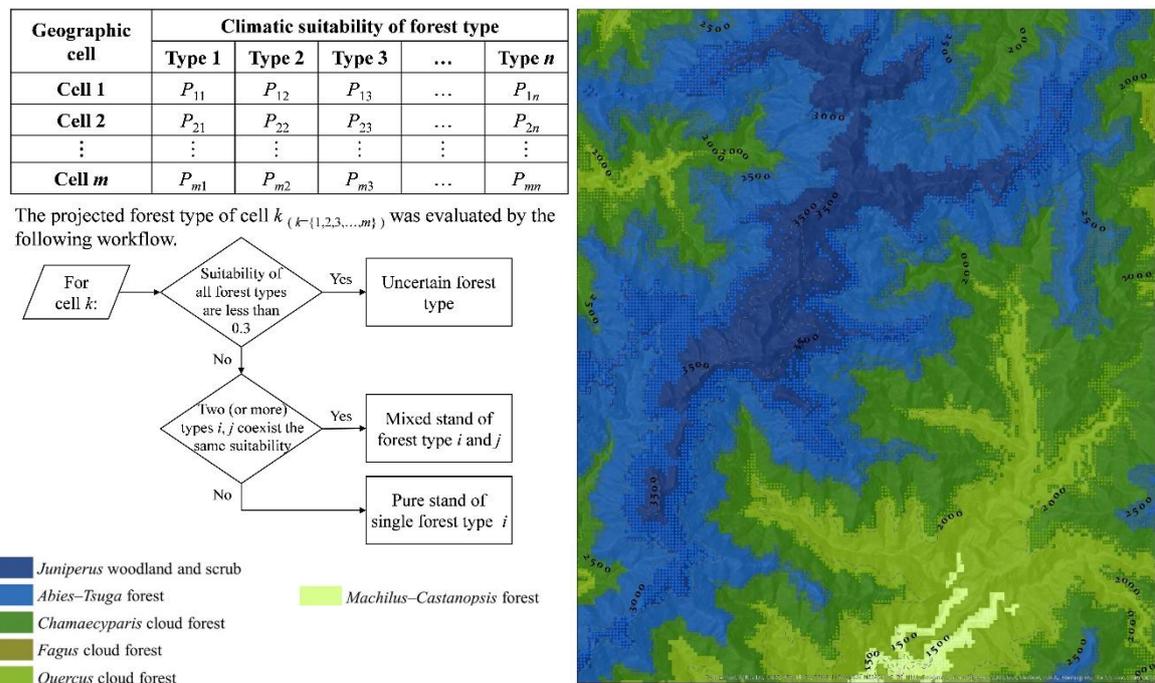


圖 2.7 前期計畫發展之群團模型合併流程。針對各預測網格進行 13 個群團模型預測值比較，若為單一群團呈現最高機率值者，則定義為單一植群型 (pure stand，右圖純色區域)，若為多群團呈現相同機率者，則認定為混淆植群型 (mixde stand，右圖點狀區域) (圖表摘錄自 Lin *et al.*, 2020)。





表2.3 利用植群計畫樣區資料及環境氣候因子，推估銅山至南湖大山，以及蘭陽溪流域兩側各森林群團之適生面積。

Predicted alliance	Total area (ha)	%	Pure stand		Mixed stand		Coexisted alliance(s) within mixed stands and its proportion
			Area	%	Area	%	
<i>Juniperus</i>	2432	1.10%	2318	1.05%	114	0.05%	<i>Abies-Tsuga</i> (1.00)
<i>Abies-Tsuga</i>	11970	5.42%	11530	5.22%	440	0.20%	<i>Juniperus</i> (0.25), <i>Chamaecyparis</i> (0.75)
<i>Chamaecyparis</i>	45679	20.68%	44106	19.97%	1573	0.71%	<i>Abies-Tsuga</i> (0.26), <i>Fagus</i> (0.58), <i>Quercus</i> (0.09), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.07)
<i>Fagus</i>	14726	6.67%	13186	5.97%	1540	0.70%	<i>Chamaecyparis</i> (0.67), <i>Quercus</i> (0.24), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.09)
<i>Quercus</i>	24457	11.07%	23425	10.61%	1032	0.47%	<i>Chamaecyparis</i> (0.10), <i>Fagus</i> (0.23), <i>Machilus-Castanopsis</i> (0.18), <i>Phoebe-Machilus</i> (0.07), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.42)
<i>Machilus-Castanopsis</i>	7303	3.31%	7065	3.20%	238	0.11%	<i>Quercus</i> (0.63), <i>Phoebe-Machilus</i> (0.25), <i>Ficus-Machilus</i> (0.05), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.07)
<i>Phoebe-Machilus</i>	47055	21.30%	40142	18.17%	6913	3.13%	<i>Quercus</i> (0.01), <i>Machilus-Castanopsis</i> (0.01), <i>Ficus-Machilus</i> (0.18), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.80)
<i>Ficus-Machilus</i>	23134	10.47%	20898	9.46%	2236	1.01%	<i>Phoebe-Machilus</i> (0.62), <i>Pyrenaria-Machilus</i> (0.38)
<i>Dysoxylum-Machilus</i>	16	0.01%	6	0.00%	10	0.00%	<i>Ficus-Machilus</i> (1.00)
<i>Pyrenaria-Machilus</i>	44101	19.97%	37327	16.90%	6774	3.07%	<i>Chamaecyparis</i> (0.02), <i>Fagus</i> (0.02), <i>Quercus</i> (0.07), <i>Phoebe-Machilus</i> (0.79), <i>Ficus-Machilus</i> (0.10)
Total	220873	100%	200003	90.55%	20870	9.45%	



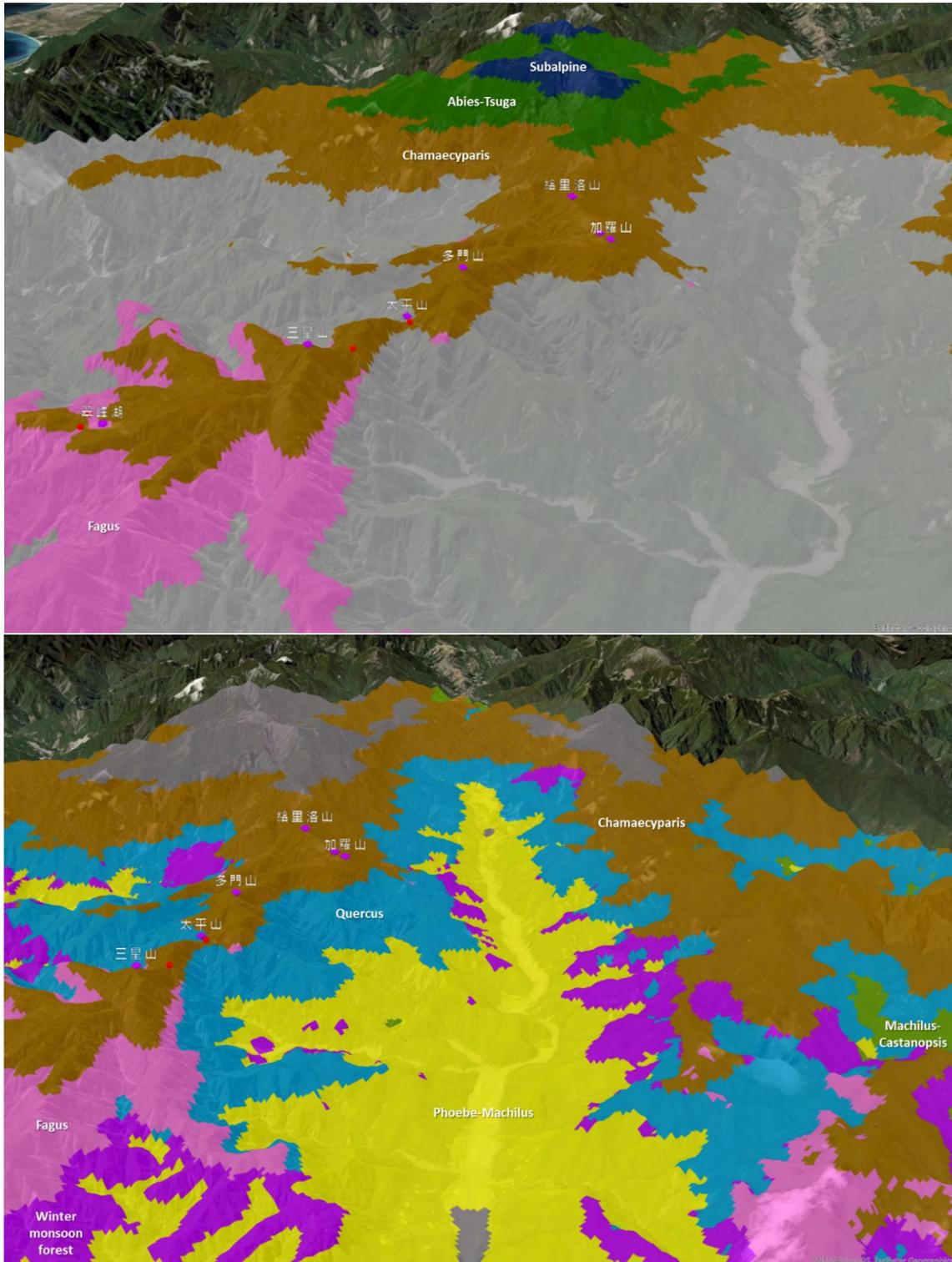


圖 2.8 以銅山至南湖大山範圍，呈現 4 群團（亞高山、鐵冷杉、檜木、水青岡）的分布預測。下圖：以蘭陽溪流域，呈現 6 群團（檜木、水青岡、櫟林、楠櫟、槲楠、季風林）的分布預測。





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、貢獻度及模型預測袋外錯誤率等，詳列如表 2.4。

根據重要因子組成表，對亞高山灌叢及鐵冷杉群團而言，溫度是決定群團空間分布的主要因子，受到降水因子的影響則極輕微：亞高山灌叢的分布，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 2000 公尺處，本群團的分布與降水呈現極高相關性 (84.99%)，溫度限制則來自於 1 月氣溫與 1 月生長積溫，反映出該地區較多的熱帶來源植物，以及充沛地形抬升成霧降水的環境特徵。烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林為臺灣東北部特有的群團類型，重要因子組成表顯示，本群團受降水因子的影響程度較高，可達 56.7%，主要集中在 9 月至次年 1 月，氣溫因子的影響則僅佔 29.81%，且主要受年溫差 (TD, 25.05%) 影響，充分反映出冬季季風區的降水與低溫特色；此外，本型係 13 種群團中唯一與地形因子相關者，呈現出季風植被鄰近稜線、凸坡、東北向的地理特徵。





表2.4 群團層級隨機森林模型之前20名重要因子、重要值、貢獻度及模型預測袋外錯誤率（OOB error rate）。

群團	ALL01(C1A01) Error rate=4.32%			ALL01(C1A02) Error rate=5.12%			ALL03(C2A03) Error rate=10.13%			ALL04(C2A04) Error rate=2.45%		
	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群團之 環境 因子	Tmax_may	7.22	6.78%	Tmax_jun	53.41	22.22%	Tmax_may	41.80	7.42%	TD	7.65	13.53%
	Tmin_dec	6.97	6.55%	Tmax_sep	27.25	11.34%	GDD5	41.63	7.40%	precip_jan	7.61	13.47%
	Tmax_jun	6.97	6.54%	Tmax_aug	26.45	11.00%	Tave_jun	41.03	7.29%	CDD12	6.07	10.75%
	CDD3	6.66	6.25%	Tmax_feb	19.81	8.24%	Tave_may	39.85	7.08%	precip_dec	4.10	7.26%
	Tave_apr	6.34	5.96%	Tmax_may	17.33	7.21%	Tmax_jun	38.73	6.88%	precip_sep	4.00	7.08%
	Tmin_may	5.90	5.54%	Tave_jun	15.80	6.57%	GDD6	35.30	6.27%	WPR	2.76	4.89%
	GDD4	5.82	5.47%	GDD6	13.46	5.60%	Tave_sep	33.57	5.96%	precip_nov	2.70	4.79%
	Tmin_feb	5.67	5.33%	Tmax_apr	10.28	4.28%	GDD4	27.94	4.96%	CDD1	2.38	4.21%
	GDD3	5.53	5.19%	Tmax_jul	5.90	2.45%	Tave_apr	26.40	4.69%	ACDD12	2.30	4.07%
	CDD11	5.25	4.93%	GDD3	5.54	2.30%	AGDD12	26.10	4.64%	Tmax_dec	2.29	4.06%
	Tmin_nov	5.21	4.89%	precip_nov	5.51	2.29%	MSP	24.58	4.37%	Tmax_jan	1.90	3.37%
	Tmin_apr	5.10	4.79%	Tave_sep	5.46	2.27%	GDD9	24.00	4.26%	Tmax_feb	1.88	3.33%
	CDD2	5.04	4.73%	GDD9	5.28	2.20%	precip_aug	22.18	3.94%	Tmax_nov	1.77	3.14%
	Tave_mar	4.91	4.61%	Tmax_jan	5.10	2.12%	precip_jan	21.41	3.80%	Tmax_apr	1.48	2.62%
	Tmax_apr	4.75	4.46%	GDD10	4.82	2.01%	WPR	20.34	3.61%	Tmax_aug	1.37	2.42%
	Tmin_mar	4.71	4.42%	GDD5	4.45	1.85%	Tmax_jul	20.30	3.61%	Tmax_may	1.36	2.41%
	Tmin_jan	4.20	3.94%	Tmax_mar	3.99	1.66%	WI	19.85	3.53%	Tmax_jul	1.35	2.39%
	Tmin_sep	3.88	3.64%	GDD7	3.89	1.62%	MAT	19.48	3.46%	Tmax_sep	1.28	2.26%
	Tmin_oct	3.40	3.19%	TD	3.45	1.43%	Tmax_apr	19.31	3.43%	precip_oct	1.25	2.21%
	Tmin_jun	2.97	2.79%	Tmax_oct	3.22	1.34%	Tmax_mar	19.11	3.40%	precip_jun	0.98	1.74%
群團	ALL05(C2A05) Error rate=11.99%			ALL06(C2A06) Error rate=11.90%			ALL07(C2A07) Error rate=11.27%			ALL08(C2A08) Error rate=7.73%		
	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群團之 環境 因子	Tmin_oct	27.32	8.53%	precip_sep	25.22	8.10%	Tave_aug	19.48	9.34%	Tmax_sep	10.60	10.88%
	CDD11	25.09	7.83%	Tave_nov	22.48	7.22%	GDD8	17.88	8.58%	Tmax_aug	8.15	8.36%
	CDD12	22.35	6.97%	Tmin_jan	19.18	6.16%	precip_mar	16.32	7.83%	Tmax_jul	6.68	6.85%
	Tmax_jan	17.71	5.53%	GDD11	18.50	5.94%	Tave_jul	13.98	6.70%	GDD10	6.42	6.59%
	Tmax_nov	17.42	5.44%	GDD10	17.47	5.61%	GDD7	13.69	6.57%	Tmax_oct	6.14	6.30%
	precip_oct	16.03	5.00%	Tmax_oct	17.12	5.50%	Tave_sep	11.54	5.53%	Tave_jun	5.79	5.94%
	Tmax_oct	16.03	5.00%	Tmin_dec	15.90	5.11%	precip_apr	11.20	5.37%	Tave_oct	5.69	5.84%
	GDD10	16.02	5.00%	precip_oct	15.85	5.09%	Tmin_jan	11.04	5.30%	SHM	5.09	5.22%
	AGDD12	15.54	4.85%	Tave_oct	15.71	5.05%	Tmin_feb	10.29	4.93%	Tave_may	4.62	4.74%
	Tmax_dec	15.19	4.74%	precip_jun	15.43	4.96%	GDD9	9.89	4.74%	Tmax_jun	4.49	4.60%
	precip_sep	15.14	4.72%	precip_may	15.36	4.94%	Tmin_oct	9.07	4.35%	GDD9	4.32	4.43%
	precip_apr	14.36	4.48%	Tave_dec	15.22	4.89%	Tmin_sep	8.90	4.27%	GDD6	4.04	4.14%
	Tmin_may	14.20	4.43%	precip_dec	13.72	4.41%	GDD6	8.22	3.94%	GDD5	4.01	4.11%
	CDD3	13.35	4.17%	precip_apr	13.12	4.22%	precip_nov	8.04	3.86%	Tmax_may	3.85	3.95%
	precip_mar	13.34	4.16%	precip_nov	12.61	4.05%	Tmin_aug	7.15	3.43%	Tave_sep	3.53	3.62%
	Tmax_feb	12.92	4.03%	Tmax_dec	12.34	3.97%	Tave_jun	6.72	3.22%	Tmax_nov	3.41	3.50%
	Tave_oct	12.76	3.98%	Tave_jan	12.28	3.97%	Tmin_jun	6.44	3.09%	GDD8	2.88	2.95%
	precip_feb	12.00	3.75%	GDD1	11.59	3.72%	Tmax_sep	6.36	3.05%	Tave_jul	2.62	2.68%
	MAT	11.88	3.71%	Tmin_feb	11.24	3.61%	Tmin_jul	6.33	3.03%	Tave_aug	2.60	2.67%
	WI	11.73	3.66%	GDD12	10.87	3.49%	Tmax_aug	5.98	2.87%	GDD7	2.58	2.64%
群團	ALL09(C3A09) Error rate=4.89%			ALL10(C3A10) Error rate=3.41%			ALL11(C3A11) Error rate=6.56%			ALL13(C3A13) Error rate=6.66%		
	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群團之 環境 因子	precip_mar	7.94	20.11%	precip_mar	41.09	19.90%	Tave_feb	7.23	10.40%	Tmin_jan	5.65	14.31%
	precip_apr	7.83	19.83%	TD	37.16	18.00%	GDD2	7.10	10.21%	Tmin_dec	4.51	11.41%
	precip_feb	7.53	19.08%	precip_jul	25.46	12.33%	Tave_jan	6.11	8.79%	Tmin_feb	3.75	9.49%
	WPR	2.61	6.62%	Tave_jan	13.43	6.51%	Tmax_feb	5.49	7.90%	Tmin_mar	2.51	6.36%
	ACDD12	1.72	4.36%	Tmin_jan	9.94	4.81%	GDD1	5.32	7.65%	precip_mar	2.33	5.89%
	precip_jul	1.63	4.14%	GDD1	8.70	4.21%	Tmax_jan	4.91	7.07%	precip_jul	1.79	4.52%
	precip_dec	1.42	3.60%	precip_aug	8.29	4.02%	GDD3	4.49	6.46%	Tave_jan	1.78	4.51%
	precip_jan	1.07	2.71%	precip_oct	6.66	3.23%	Tave_mar	3.77	5.42%	TD	1.68	4.27%
	CDD3	1.07	2.70%	Tmin_feb	6.10	2.95%	Tmin_mar	3.48	5.01%	GDD1	1.68	4.25%
	precip_may	0.95	2.41%	Tave_dec	5.98	2.89%	Tave_dec	2.70	3.89%	precip_aug	1.54	3.91%
	SHM	0.79	2.01%	Tmax_aug	5.63	2.73%	Tmin_feb	2.45	3.53%	SHM	1.53	3.88%
	AHM	0.79	2.01%	Tave_aug	5.31	2.57%	precip_mar	2.42	3.48%	Tmin_nov	1.49	3.78%
	precip_nov	0.77	1.95%	GDD8	5.04	2.44%	GDD12	2.37	3.42%	AHM	1.45	3.68%
	precip_aug	0.60	1.53%	GDD12	4.60	2.23%	Tmax_mar	2.11	3.03%	MSP	1.20	3.05%
	CDD1	0.59	1.50%	GDD7	4.49	2.17%	Tmax_dec	1.94	2.80%	precip_may	1.20	3.03%
	precip_sep	0.56	1.41%	Tave_feb	4.17	2.02%	TD	1.77	2.55%	Tmin_jun	1.20	3.03%
	CDD2	0.52	1.31%	precip_feb	3.85	1.86%	Tmin_apr	1.57	2.26%	Tmin_apr	1.17	2.97%
	TD	0.44	1.12%	Tmin_dec	3.72	1.80%	Tmin_jan	1.52	2.18%	GDD2	1.06	2.69%
	MAP	0.33	0.83%	Tmax_jan	3.61	1.75%	AHM	1.51	2.17%	Tave_dec	1.01	2.55%
	MSP	0.30	0.77%	GDD2	3.22	1.56%	precip_may	1.24	1.79%	GDD12	0.95	2.41%





群團			
ALL15(C6A15)			
Error rate=10.42%			
項目	Variable	Gini value	Contribution
判別 群團 之環 境因 子	TD	44.22	25.05%
	precip_nov	23.85	13.51%
	precip_dec	16.20	9.18%
	precip_oct	16.10	9.12%
	precip_sep	8.77	4.97%
	precip_jan	6.78	3.84%
	NEAR_DIST	6.67	3.78%
	precip_jun	6.15	3.48%
	SHM	5.79	3.28%
	CDD12	4.76	2.70%
	AHM	4.52	2.56%
	WPR	4.48	2.54%
	precip_jul	4.01	2.27%
	precip_apr	3.87	2.19%
	planform	3.66	2.08%
	CDD11	3.63	2.05%
	precip_aug	3.31	1.88%
	MSP	3.30	1.87%
	precip_may	3.26	1.85%
	aspect_adj	3.16	1.79%

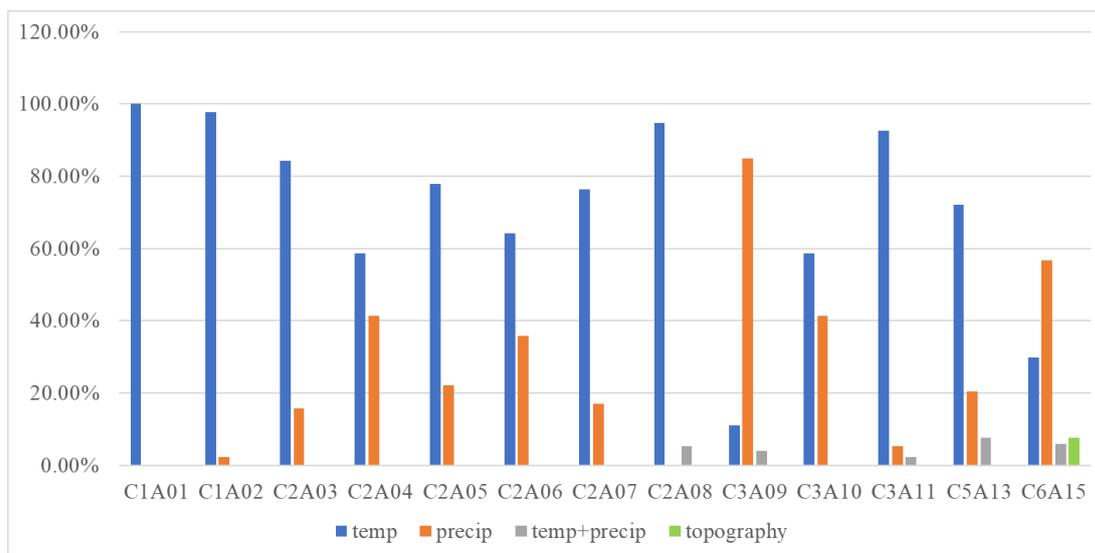


圖2.9 將環境與氣候因子分為溫度、降水、溫度-降水、地形等4類，進行各群團隨機森林模型前20名因子的屬性統計。





3.2 群叢層級之分布預測及環境因子分析

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 2.5 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，不易成圖顯示。故以銅山至南湖大山、蘭陽溪流兩側為例，摘錄群叢層級模型的預測結果 (圖 2.10)。與圖 2.8 群團層級模型比較，原判定的 7 群團分布圖可進一步細分為 21 群叢。





表2.5 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）。

群團	ALL01(C1A01) Error rate=4.14%			ALL01(C1A02) Error rate=5.09%			ALL03(C2A03) Error rate=10.23%			ALL04(C2A04) Error rate=2.51%		
群叢	WO10010100, WO10010200, WO10010300 Error rate=36.24%			FO10020100, FO10020200, FO10020300, FO10020400, FO10020500, FO10020600 Error rate=57.16%			FO20030100, FO20030200, FO20030300, FO20030400, FO20030500, FO20030600, FO20030700, FO20030800, FO20030900, FO20031000, FO20031100, FO20031200 Error rate=43.85%			FO20040200, FO20040300, FO20040400 Error rate=46.12%		
項目	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群叢之 環境因 子	precip_dec	4.42	7.76%	AHM	6.11	7.72%	TD	12.21	7.98%	precip_sep	1.77	9.14%
	NEAR_DIST	3.42	6.00%	Tmin_may	5.34	6.75%	precip_jul	10.55	6.90%	NEAR_DIST	1.38	7.12%
	precip_may	3.16	5.55%	precip_may	4.68	5.91%	precip_jun	9.61	6.28%	precip_jul	1.18	6.13%
	aspect_adj	3.05	5.36%	precip_nov	4.48	5.66%	precip_sep	8.89	5.81%	Tmin_jun	1.08	5.59%
	CDD12	2.97	5.21%	precip_sep	4.29	5.42%	precip_nov	8.37	5.47%	Tmin_oct	1.01	5.20%
	GDD10	2.92	5.12%	CDD3	4.09	5.17%	MSP	8.00	5.23%	Tmin_feb	0.97	5.04%
	precip_apr	2.87	5.03%	aspect_adj	4.07	5.14%	precip_feb	7.62	4.98%	MSP	0.94	4.84%
	CDD3	2.84	4.98%	SHM	3.86	4.87%	precip_jan	7.59	4.96%	CDD3	0.91	4.71%
	precip_nov	2.75	4.83%	precip_apr	3.85	4.86%	precip_mar	7.28	4.76%	precip_jun	0.89	4.60%
	precip_sep	2.73	4.79%	precip_dec	3.76	4.75%	MAP	7.13	4.66%	Tmin_nov	0.88	4.57%
	precip_jun	2.69	4.72%	precip_oct	3.56	4.50%	precip_oct	6.91	4.51%	aspect_adj	0.88	4.55%
	GDD6	2.67	4.69%	TD	3.53	4.46%	AHM	6.88	4.50%	Tmin_mar	0.88	4.55%
	precip_oct	2.65	4.65%	WPR	3.52	4.45%	CDD12	6.85	4.48%	Tmin_jan	0.86	4.45%
	planform	2.65	4.65%	NEAR_DIST	3.51	4.43%	WPR	6.72	4.39%	Tmax_sep	0.84	4.33%
	precip_mar	2.61	4.57%	precip_mar	3.47	4.39%	precip_aug	6.67	4.36%	Tmin_may	0.84	4.33%
	precip_feb	2.60	4.56%	Tmin_apr	3.47	4.38%	Tmax_jul	6.48	4.24%	Tmax_aug	0.83	4.31%
	GDD12	2.57	4.50%	precip_aug	3.44	4.35%	NEAR_DIST	6.43	4.20%	Tmin_apr	0.80	4.16%
	Tmin_nov	2.51	4.41%	Tmin_jun	3.39	4.28%	precip_may	6.34	4.14%	Tmax_jul	0.80	4.15%
	Tmin_apr	2.47	4.33%	planform	3.38	4.27%	ACDD12	6.29	4.11%	GDD3	0.80	4.12%
	GDD3	2.44	4.28%	precip_jun	3.37	4.25%	precip_dec	6.24	4.08%	Tmax_jun	0.80	4.12%
群團	ALL05(C2A05) Error rate=11.83%			ALL06(C2A06) Error rate=12.32%			ALL07(C2A07) Error rate=10.90%			ALL08(C2A08) Error rate=7.47%		
群叢	FO20050100, FO20050200, FO20050300, FO20050400, FO20050500, FO20050600, FO20050700, FO20050800, FO20050900 Error rate=31.78%			FO20060100, FO20060200, FO20060300, FO20060400, FO20060500, FO20060600, FO20060800 Error rate=23.72%			FO20070100, FO20070200, FO20070300 Error rate=23.65%			FO20080100, FO20080200 Error rate=25.48%		
項目	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群叢之 環境因 子	precip_nov	8.60	7.74%	precip_jun	4.72	7.97%	precip_oct	11.10	16.48%	precip_jan	3.30	12.01%
	precip_jul	7.73	6.96%	precip_oct	4.08	6.91%	precip_nov	9.81	14.57%	precip_feb	2.66	9.67%
	precip_sep	7.36	6.63%	precip_dec	3.78	6.39%	precip_dec	5.88	8.73%	TD	2.31	8.40%
	precip_oct	6.78	6.11%	WPR	3.56	6.01%	NEAR_DIST	4.37	6.49%	ACDD12	2.02	7.35%
	TD	6.44	5.80%	precip_mar	3.35	5.66%	planform	3.49	5.19%	precip_mar	1.81	6.58%
	Tmin_dec	6.22	5.60%	precip_nov	3.19	5.40%	precip_jun	3.03	4.50%	precip_apr	1.63	5.93%
	NEAR_DIST	5.85	5.27%	precip_sep	3.07	5.19%	Tmax_nov	2.76	4.10%	GDD8	1.48	5.37%
	precip_mar	5.57	5.01%	MSP	2.92	4.93%	precip_sep	2.57	3.81%	CDD12	1.34	4.88%
	WPR	5.27	4.74%	TD	2.78	4.70%	CDD12	2.43	3.62%	precip_may	1.21	4.41%
	precip_jun	5.21	4.69%	precip_feb	2.65	4.49%	WPR	2.33	3.46%	Tave_aug	1.14	4.15%
	MAP	4.97	4.47%	GDD8	2.62	4.42%	precip_jul	2.26	3.36%	precip_nov	1.06	3.85%
	MSP	4.83	4.35%	CDD12	2.61	4.41%	precip_aug	2.16	3.21%	MAP	1.01	3.67%
	precip_dec	4.73	4.26%	precip_jan	2.56	4.32%	ACDD12	2.10	3.12%	precip_jun	0.94	3.44%
	planform	4.69	4.23%	MAP	2.52	4.25%	precip_feb	2.03	3.01%	WPR	0.89	3.23%
	Tmin_jan	4.61	4.15%	Tave_aug	2.50	4.23%	precip_jan	2.02	3.00%	precip_aug	0.87	3.15%
	SHM	4.61	4.15%	Tmax_aug	2.46	4.16%	TD	1.90	2.83%	Tmin_aug	0.83	3.01%
	precip_apr	4.48	4.03%	Tmax_jul	2.46	4.16%	SHM	1.87	2.77%	GDD7	0.79	2.88%
	precip_may	4.44	3.99%	precip_apr	2.46	4.16%	CDD2	1.80	2.67%	Tave_jul	0.76	2.78%
	Tmax_aug	4.35	3.91%	precip_may	2.44	4.13%	precip_may	1.74	2.58%	NEAR_DIST	0.73	2.65%
	GDD5	4.33	3.90%	SHM	2.43	4.10%	Tmax_dec	1.69	2.51%	precip_dec	0.72	2.60%





群團	ALL09(C3A09) Error rate=4.65%			ALL10(C3A10) Error rate=3.43%			ALL11(C3A11) Error rate=6.24%			ALL13(C5A13) Error rate=6.70%		
群叢	FO30090100, FO30090200 Error rate=45.88%			FO30100100, FO30100200, FO30100300, FO30100400, FO30100500, FO30100600, FO30100700 Error rate=23.53%			FO30110100, FO30110200, FO30110300 Error rate=19.72%			FO50130200, FO50130300 Error rate=14.94%		
項目	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution	Variable	Gini value	Contribution
判別 群叢之 環境因 子	planform	1.01	8.05%	precip_may	5.99	9.19%	precip_nov	3.55	12.97%	precip_aug	2.22	21.17%
	precip_oct	0.86	6.89%	precip_nov	5.20	7.98%	precip_oct	2.53	9.25%	WPR	1.61	15.36%
	TD	0.79	6.34%	precip_jul	4.58	7.03%	precip_aug	2.02	7.41%	precip_sep	1.07	10.18%
	ACDD12	0.74	5.93%	ACDD12	4.17	6.41%	WPR	1.80	6.59%	SHM	0.83	7.90%
	CDD3	0.70	5.63%	TD	4.01	6.15%	precip_may	1.73	6.34%	precip_dec	0.65	6.23%
	NEAR_DIST	0.67	5.39%	precip_apr	3.74	5.74%	precip_dec	1.72	6.30%	NEAR_DIST	0.56	5.35%
	precip_apr	0.66	5.29%	CDD2	3.60	5.53%	precip_jun	1.67	6.10%	precip_apr	0.50	4.79%
	precip_mar	0.63	5.08%	CDD3	3.48	5.35%	Tmax_dec	1.64	6.00%	precip_jan	0.42	3.97%
	Tmax_jun	0.61	4.89%	precip_jun	3.36	5.16%	precip_jul	1.60	5.87%	Tmax_jul	0.38	3.61%
	AHM	0.59	4.73%	precip_mar	3.10	4.75%	precip_mar	1.42	5.21%	precip_nov	0.34	3.22%
	CDD1	0.58	4.61%	MSP	3.03	4.65%	MSP	1.15	4.21%	Tmax_jun	0.30	2.82%
	CDD12	0.56	4.49%	WPR	2.88	4.42%	CDD12	0.96	3.50%	aspect_adj	0.26	2.49%
	MAP	0.55	4.37%	Tmin_jan	2.64	4.05%	precip_jan	0.85	3.10%	TD	0.23	2.16%
	Tmax_apr	0.54	4.31%	MAP	2.46	3.78%	Tmax_nov	0.79	2.90%	planform	0.21	2.01%
	aspect_adj	0.52	4.14%	Tmin_dec	2.43	3.73%	precip_apr	0.72	2.64%	precip_mar	0.19	1.82%
	precip_aug	0.51	4.07%	CDD1	2.28	3.49%	Tmax_mar	0.68	2.48%	Tmin_aug	0.17	1.61%
	precip_sep	0.50	4.01%	precip_feb	2.16	3.32%	Tmax_jan	0.65	2.37%	Tmax_aug	0.15	1.45%
	precip_dec	0.50	3.97%	SHM	2.05	3.15%	NEAR_DIST	0.63	2.31%	precip_feb	0.15	1.40%
	Tmax_jul	0.50	3.97%	AHM	2.03	3.12%	precip_feb	0.63	2.29%	Tmin_sep	0.13	1.27%
	Tmax_aug	0.48	3.86%	aspect_adj	1.94	2.98%	Tmax_feb	0.59	2.17%	Tmin_jun	0.12	1.19%

群團	ALL15(C6A15) Error rate=10.62%		
群叢	FO60150100, FO60150200, FO60150300, FO60150400, FO60150500, FO60150700 Error rate=19.72%		
項目	Variable	Gini value	Contribution
判別 群叢之 環境因 子	precip_mar	7.62	8.09%
	precip_apr	6.55	6.95%
	precip_jul	5.93	6.29%
	precip_feb	5.42	5.76%
	Tmin_jun	5.14	5.46%
	precip_aug	4.98	5.29%
	MSP	4.88	5.18%
	precip_oct	4.85	5.15%
	precip_jan	4.74	5.03%
	AHM	4.70	4.99%
	precip_dec	4.37	4.64%
	TD	4.23	4.49%
	WPR	3.98	4.23%
	CDD12	3.94	4.19%
	precip_may	3.94	4.18%
	CDD3	3.86	4.10%
	Tmin_jul	3.80	4.03%
	MAP	3.79	4.03%
	ACDD12	3.76	4.00%
	aspect_adj	3.68	3.91%



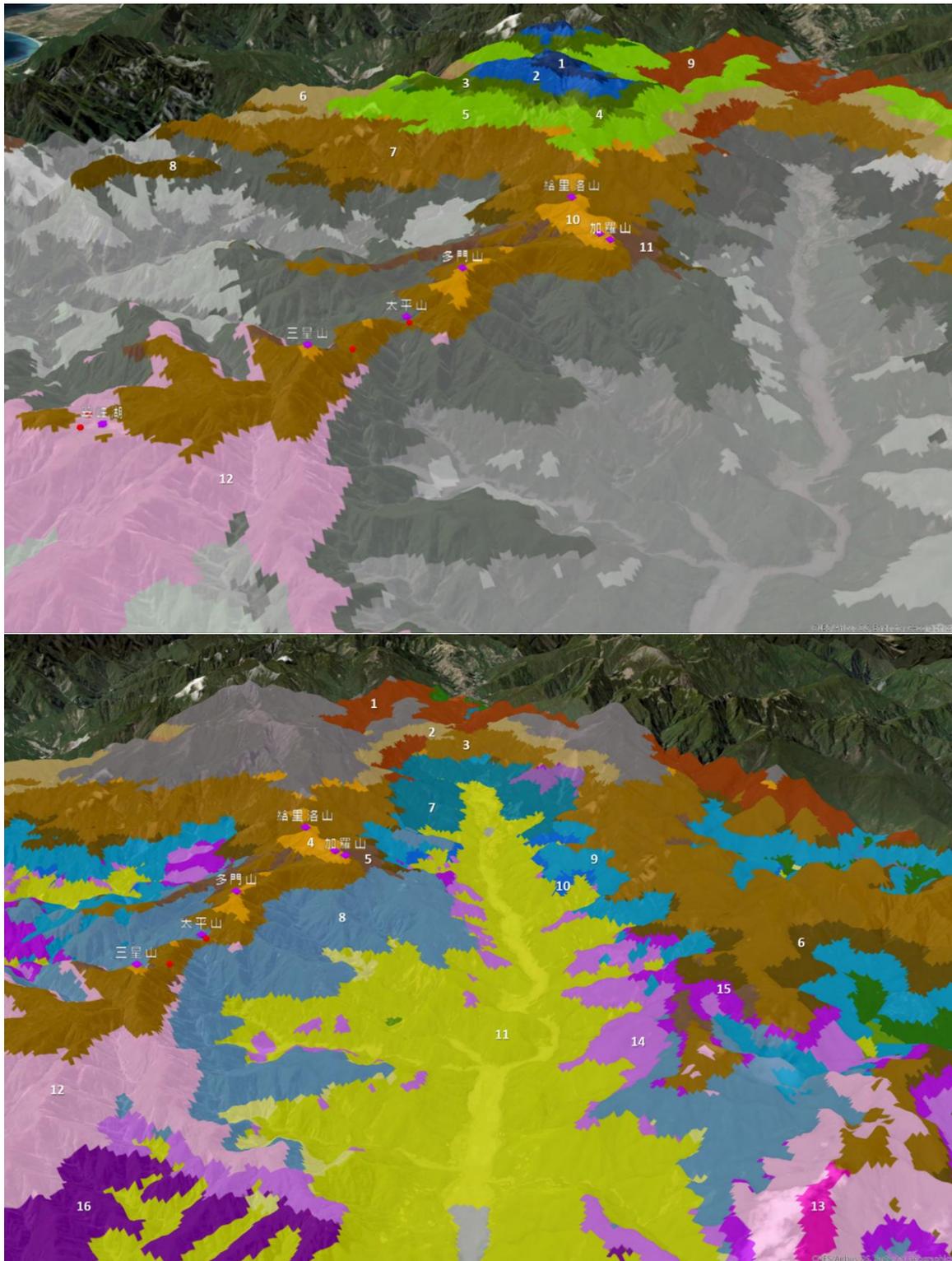


圖 2.10 以銅山至南湖大山呈現 4 群團（亞高山、鐵冷杉、檜木、水青岡）12 群叢的分布預測。下圖：以蘭陽溪流域呈現 5 群團（檜木、水青岡、櫟林、楨楠、季風林）16 群叢的分布預測。





圖2.10 (上) 4群團12群叢的名稱：

- 1: C1A01: *Dryopteris alpestris*-*Juniperetum squamatae*
- 2: C1A01: *Cyspterio fragilis*-*Abietetum kawakamii*
- 3: C1A02: *Yushanio niitakayamensis*-*Abietetum kawakamii*
- 4: C1A02: *Rhododendro pseudochrysanthum*-*Tsugetum formosanae*
- 5: C1A02: *Photinio niitakayamensis*-*Piceetum morrisonicolae*
- 6: C2A03: *Litsea elongata* v. *mushaensis* - *Cyclobalanopsis morii*
- 7: C2A03: *Rhododendron formosanum* - *Chamaecyparis obtusa* v. *formosana*
- 8: C2A03: *Machilus thunbergii* - *Chamaecyparis formosensis*
- 9: C2A03: *Cyclobalanopsis sessilifolia* - *Chamaecyparis formosensis*
- 10: C2A03: *Vaccinium japonicum* v. *lasiostemom* - *Tsuga chinensis* v. *formosana*
- 11: C2A03: *Sassafras randaiense*
- 12: C2A04: *Carex filicina* - *Fagus hayatae*

圖2.10 (下) 5群團16群叢的名稱：

- 1: C2A03: *Cyclobalanopsis sessilifolia* - *Chamaecyparis formosensis*
- 2: C2A03: *Litsea elongata* v. *mushaensis* - *Cyclobalanopsis morii*
- 3: C2A03: *Rhododendron formosanum* - *Chamaecyparis obtusa* v. *formosana*
- 4: C2A03: *Vaccinium japonicum* v. *lasiostemom* - *Tsuga chinensis* v. *formosana*
- 5: C2A03: *Sassafras randaiense*
- 6: C2A03: *Machilus thunbergii* - *Chamaecyparis formosensis*
- 7: C2A05: *Alnus formosanum* - *Machilus japonica*
- 8: C2A05: *Camellia brevistyla* - *Machilus japonica*
- 9: C2A05: *Machilus japonica* - *Chamaecyparis formosensis*
- 10: C2A05: *Lithocarpus lepidocarpus* - *Machilus zuihoensis* v. *mushaensis*
- 11: C2A07: *Turpinia ternata* - *Machilus japonica* v. *kusanoi*
- 12: C2A04: *Carex filicina* - *Fagus hayatae*
- 13: C2A04: *Chamaecyparis obtusa* v. *formosana* - *Fagus hayatae*
- 14: C6A15: *Symplocos glauca* - *Castanopsis cuspidata* v. *carlesii*
- 15: C6A15: *Cyclobalanopsis sessilifolia* - *Litsea acuminata*
- 16: C6A15: *Pyrenaria shinkoensis* - *Machilus thunbergii*



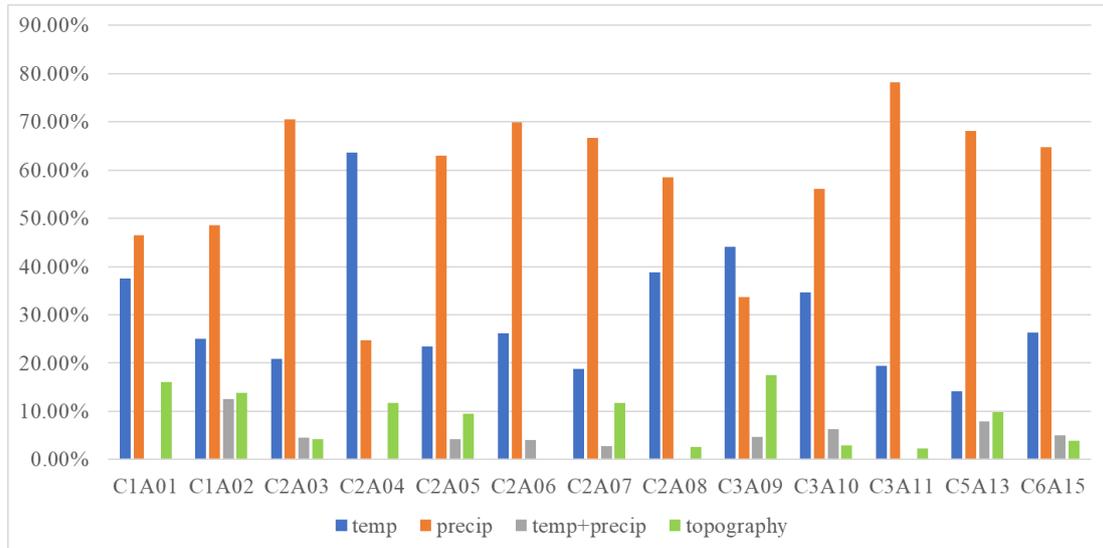


圖2.11 將環境與氣候因子分為溫度、降水、溫度-降水、地形等4類，進行各群叢隨機森林模型前20名因子的屬性統計。與群團模型（圖2.9）相比，群叢模型的溫度因子重要性大幅下降，降水因子的重要性則大幅提升；此外，地形因子在群叢模型裡亦佔有相當的比例。

3.3 群團與群叢層級模型的比較

從前兩節的分析結果，歸納出群團層級及群叢層級模型主要的差異如下：

1、群團模型與群叢模型的判別因子顯著不同。

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。降水因子對預測模型的貢獻度則隨群團類型而異，其中「柯屬-杜英屬山地霧林」群團、「烏皮茶-槿楠屬亞熱帶季風林」





群團、「水青岡山地落葉霧林」群團及「鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林」群團的分布，受降水因子影響程度較大。至於本年度引入的地形因子，除「烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林」群團確實具有明顯的鄰近稜線、偏好凸坡與東北向棲地特色，而在隨機森林訓練過程中被篩選為預測因子外，地形因子在其餘 12 群團的分布預測模型中完全不發揮作用（圖 2.9）。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，至於地形作用的影響，在這樣的尺度層級下是可以被忽略的。

相較於群團層級的植群分布預測結果，群叢層級模型可提供較詳細的地理分布界線，此外，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（圖 2.11）。

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。例如前一節分析獲得亞高山灌叢、冷杉-鐵杉上部山地針葉林群團、檜木山地霧林帶群團等，其分布與界線與溫度因子緊密相關，且分別受到冬季低溫與夏季生長溫度的影響。然而，當我們的分析單元限縮到單一群團內，例如聚焦探討鐵冷杉群團內「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」的棲位差異時，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。利用這樣的方法，即可針對海拔帶與氣溫環境相近的森林群團，再依降水與地形特性，進行更細微的群叢分布預測。

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。

2、群團模型與群叢模型的袋外預測錯誤率 (OOB error rate)。

除了判別因子的不同以外，群團與群叢模型的預測錯誤率也有顯著的差異 (表 2.6 及圖 2.12)：前者的預測錯誤率明顯較後者為低。換句話說，利用環境及氣候因子進行森林分布判定與預測時，採用的尺度層級越高，判定的準確率也越高；當判別對象限縮到同一群團內的不同群叢時，準確率可能會大幅降低。以鐵冷杉群團為例，隨機森林模型可以在很高的準確率水準下 (錯誤率 5.12%)，預測出鐵冷杉森林的地理分布；然而，當我們利用隨機森林方法對鐵冷杉群團分布範圍進一步劃分所屬 6 群叢 (「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」) 的潛在生育地時，模型判定錯誤率卻高達 57.16%！

研究結果也發現，隨著群團類型的改變，群叢層級模型的錯誤率亦有不同。整體而言，霧林帶以上 (亞高山針葉灌叢及森林 C1A01、冷杉-鐵杉上部山地針葉林 C1A02、檜木山地霧林 C2A03、水青岡山地落葉霧林 C2A04、櫟屬山地闊葉林 C2A05、柯屬-杜英屬山地霧林 C3A09) 的群叢模型錯誤率較高，均在 30% 以上；而群叢層級模型在中低海拔森林及季風林 (楨楠屬-栲屬亞山地闊葉林 C2A06、雅楠屬-楨楠屬亞山地闊葉林 C2A07、榕楠山麓闊葉林 C2A08、鐵色屬-山龍眼屬亞山地闊葉林 C3A10、控木屬-楨楠屬山麓闊葉林 C3A11、八角茴香-桐屬熱帶季風林 C5A13、烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林 C6A15) 的表現較佳，錯誤率均約在 25% 以下。





表2.6 各群團層級模型的袋外預測錯誤率，以及該群團以下各群叢判別模型的袋外預測錯誤率。

	C1A01	C1A02	C2A03	C2A04	C2A05	C2A06	C2A07	C2A08	C3A09	C3A10	C3A11	C5A13	C6A15
群團層級	4.32%	5.12%	10.13%	2.45%	11.99%	11.90%	11.27%	7.73%	4.89%	3.41%	6.56%	6.66%	10.42%
群叢層級	36.24%	57.16%	43.85%	46.12%	31.78%	23.72%	23.65%	25.48%	45.88%	23.53%	19.72%	14.94%	19.72%

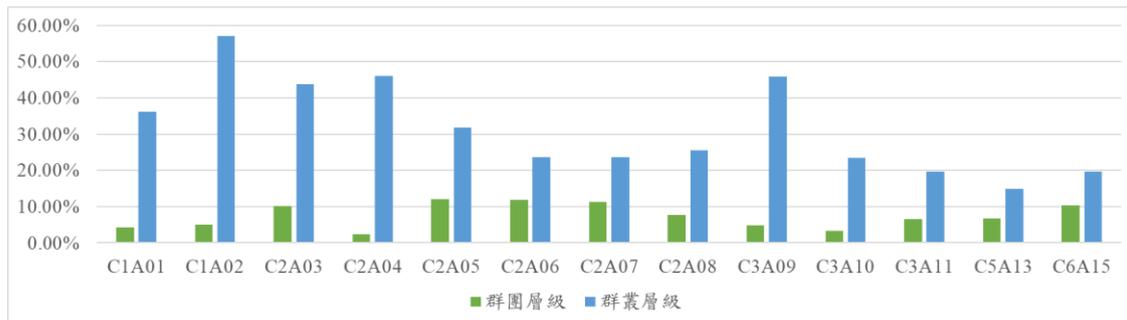


圖 2.12 群團層級與群叢層級模型的袋外預測錯誤率比較圖。

為細究群叢層級模型預測錯誤率差異的原因，本研究對各群叢層級模型的前 20 名因子進行皮爾遜相關係數 (Pearson's correlation coefficient) 計算，剔除相關性 0.8 以下因子以排除共線性因素後，對樣區及其環境氣候因子進行主成分分析，得結果如圖 2.13 (摘錄檜木山地霧林群團、雅楠屬-楨楠屬亞山地闊葉林群團、烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林群團為例)。結果發現，不管採用 2 個主成分軸或 3 個主成分軸的 PCA 分析，霧林帶以上的森林群團，各群叢樣區均不易在 PCA 內呈現理想的分群結果 (如圖 2.13a)；但中低海拔森林群團，例如雅楠屬-楨楠屬亞山地闊葉林 (圖 2.13b) 或烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林 (圖 2.13c)，則在 PCA 呈現較清楚的資料分群結果。隨機森林的本質是高效率的統計分類器，當資料點在多重因子維度下具有一定的分離特性時，隨機森林即可依據既有訓練樣本，找出一到多個線性或非線性的切面，作為最適的分類模型。然而，當資料樣點環境因子相近或不足以構成良好的分類特徵時 (如圖 2.13a 的檜木山地霧林樣本)，隨機森林法亦難產生理想的分類結果，在交叉驗證時自然產生





較高的錯誤率。(3D PCA 結果請參見網址 <https://reurl.cc/ldKrd6>)

在蘇鴻傑教授提出的臺灣山地森林垂直分帶架構中，認為臺灣亞高山及山地針葉林植群帶的物種相對單純、森林組成差異較小：例如在冷杉林帶僅依濕生、乾生環境，區分為冷杉針葉林及玉山箭竹草原 2 類。在鐵杉、雲杉帶則按潮濕至中生環境梯度，大致形成從鐵杉、雲杉至華山松的過渡變化，而未劃定顯著的森林社會界線，乾生環境則為臺灣二葉松與草生狀態。降至楠櫨或榕楠林帶，隨著物種多樣性提高，依據濕度梯度與地形條件，蘇氏提出較複雜的森林社會區劃：例如楠櫨林帶從濕生至乾生環境，可細分為楠木型 (*Machilus type*)、苦櫨型 (*Castanopsis type*)、落葉闊葉型 (黃連木、榆、栲、楓香等)、松林、臺灣赤楊等不同植物社會，顯示水分梯度在中低海拔扮演著較重要的森林分化角色。

根據蘇氏的理論，可印證並解釋本節 PCA 結果。對霧林帶以上的森林而言，因氣候環境的相對一致，即令國家植群多樣性調查計畫完成群團及其下群叢的分類，但可發現群叢間的環境與氣候因子相似程度仍高。中低海拔森林則不然，受到中央山脈阻隔、流域地形及臺灣東西部氣候差異影響，使降水特徵具有明顯的不同，較易透過隨機森林法獲得各種植物社會 (或群叢) 的棲位特徵與統計預測模型，並使各群叢在 PCA 各主成分軸上投射至較分離的位置，呈現較理想的氣候與環境特色分群結果。

綜上結果，建議實務應用時可採群團與群叢模型並行方式，以求兼顧植群類型的解析度與預測準確率：在霧林帶以上，以群團層級模型進行現生與未來分布預測，確保預測圖的準確度；至中低海拔森林則可增納群叢層級模型，在較細緻的植被類型分布資訊下，探討氣候與氣候變遷對森林的影響。



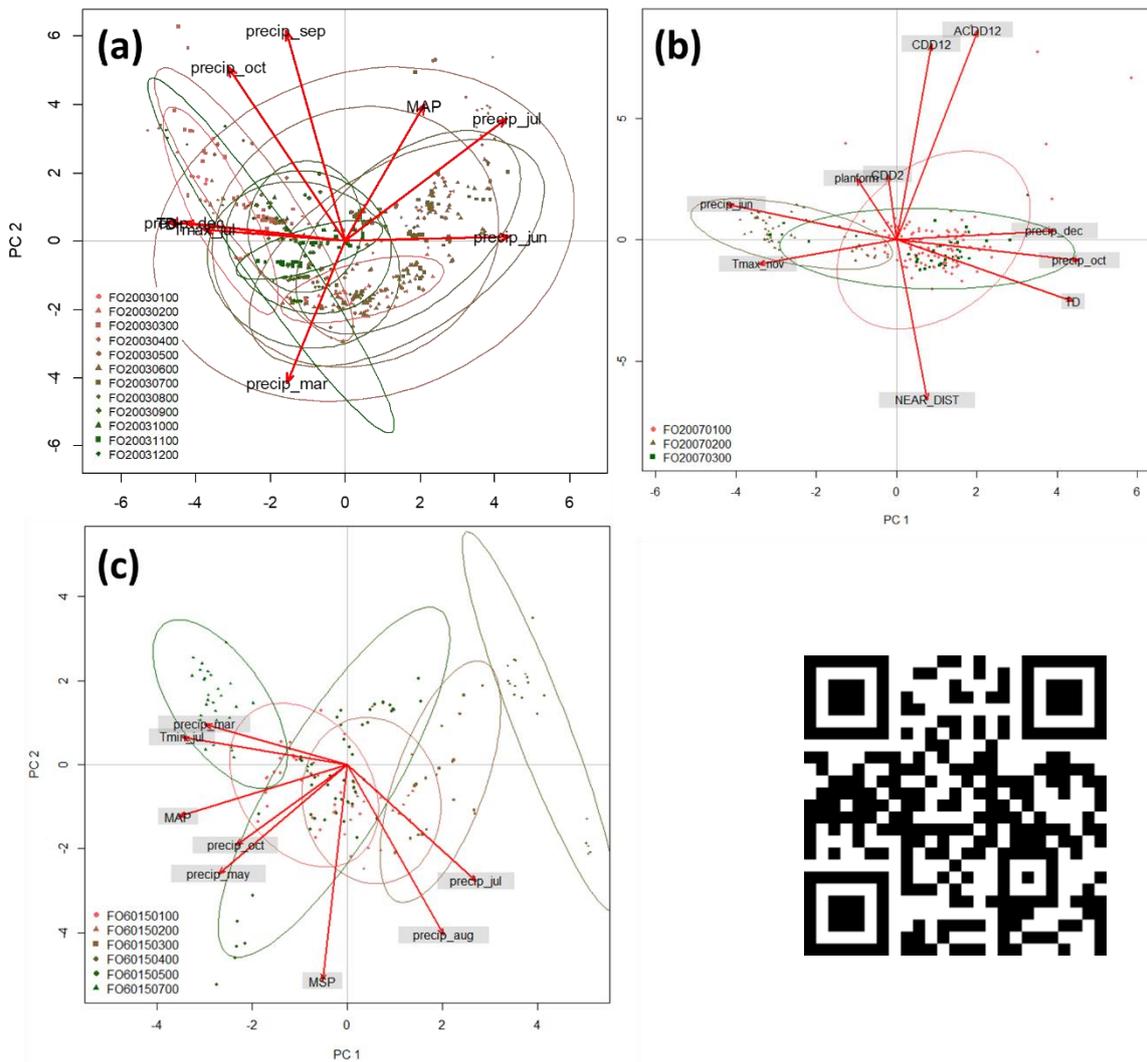


圖 2.13 利用 PCA 呈現群團下各群叢樣區在第一、第二主成分軸上的分布情形：(a) 檜木山地霧林群團，下分 12 群叢；(b) 雅楠屬-楨楠屬亞山地闊葉林，下分 3 群叢；(c) 烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林，下分 6 群叢。橢圓表示涵蓋該群叢 95% 樣區之主成分空間，利用 R 軟體 `pca3d` 工具計算。3D PCA 結果請利用二維條碼連結瀏覽。





3.4 植群分布預測模型在羅東林區臺灣水青岡保育之應用

羅東林管處水青岡保育平台會議參考前期計畫成果，選定原生地以外的 5 處適合地點，進行銅山種源之臺灣水青岡栽植與復育，並持續監測苗木的適應與生長情形。其中 4 處地點及栽植數量如表 2.7，另有 1 處地點為山毛櫸步道口 100 公尺處。

利用本年度調整後之隨機森林模型（增納冷積溫度、生長積溫及地形因子），並以核心生育地（pure stand）及混淆生育地（mixed stand）並列方式，檢視表 2.7 四處栽植地點的環境與氣候適宜性（圖 2.13），三維空間模擬如 <https://www.youtube.com/watch?v=Mm3ckU3s2Dg>。

依據 30 年期歷史平均氣候（1986-2015）分析結果，發現「翠峰環山步道側」、「翠峰環山步道口停車場旁」兩處地點位於水青岡山地落葉霧林核心區的海拔上限；「翠峰林道 0+200 公尺左側雜木林空隙地」及「4 公里左側崩塌治理過之草生地」則屬於檜木山地霧林核心區，但對水青岡群團棲位特性而言，仍保有 50% 以上的適存度。由模擬結果觀察，羅東林管處選定栽植地點的環境與氣候特性，均屬適存度高、但略偏向臺灣水青岡生態棲位的寒冷端，即令在大尺度氣候漸趨暖化趨勢下，仍可保持較長期的環境適存度；若能施以適當撫育管理，降低其餘樹種競爭影響，應有相當高的存活機會。

此外，觀察群團層級模型的三維空間模擬結果，水青岡山地落葉霧林群團在本區域的分布，以大白山、蘭崁山為最東端的孤立適存地點，稍南的飯包山亦屬面積狹小且孤立的適存地點，自下銅山起，沿銅山往翠峰湖則形成連續的適存區域。空間模擬發現一個特殊的現象：水青岡霧林與其下緣森林群團（「櫟屬山地闊葉林群團」與「烏皮茶-楨楠屬亞熱帶季風林群團」）呈現極為清晰的轉換界線，且交界處幾無混淆生育地出現，此特徵在銅山以東、大白山及蘭崁山一帶尤為明顯，可能是山勢地形陡峭、或臨海氣候梯度明顯所致，顯示水青岡森林下界的環境適存度遞減極為迅速，在很短的空間距離裡，臺灣水青岡即失去適合生存的環境與氣候條件。





翠峰湖約屬於水青岡山地落葉霧林群團核心區上界，與其上部群團（檜木山地霧林群團）的交界區則呈現與大白山、蘭崁山相反的情形。模擬結果顯示，水青岡霧林群團與檜木霧林群團間，存在極長的混淆生育區（mixed stand），起自翠峰湖、向西經三星山下部海拔 1800-2000 公尺處、太平山森林遊樂區、及至多門山、加羅湖、加羅山下部海拔 1850-2000 公尺區域，均屬檜木霧林帶及水青岡霧林帶共同適存的環境氣候條件。就地形而言，翠峰湖以西至太平山、加羅湖一帶，其海拔變化確實不若大白山、蘭崁山以東直降至海平面般陡峻，因而形成較緩長的氣候梯度，使水青岡及檜木群團間存在較長的混淆及森林類型轉換帶。實務而言，翠峰湖、太平山、多門山現況多為伐木後之造林區域，即使模擬發現至本世紀末臺灣水青岡適生地點可能止於加羅湖一帶（謝等人，2018），但若將臺灣水青岡納為本區造林地更新的備選樹種，或可藉由協助遷移及人為輔助等方式，減緩氣候變遷對於臺灣水青岡的衝擊。

表2.7 羅東林管處於翠峰林道及翠峰湖周邊栽植臺灣水青岡的地點及株數。

X	Y	栽種地點	植株數
311863	2712221	翠峰環山步道側	200
311682	2711726	翠峰環山步道口停車場旁	50
304461	2710073	翠峰林道 0+200 公尺左側雜木林空隙地	40
306070	2711167	4 公里左側崩塌治理過之草生地	70



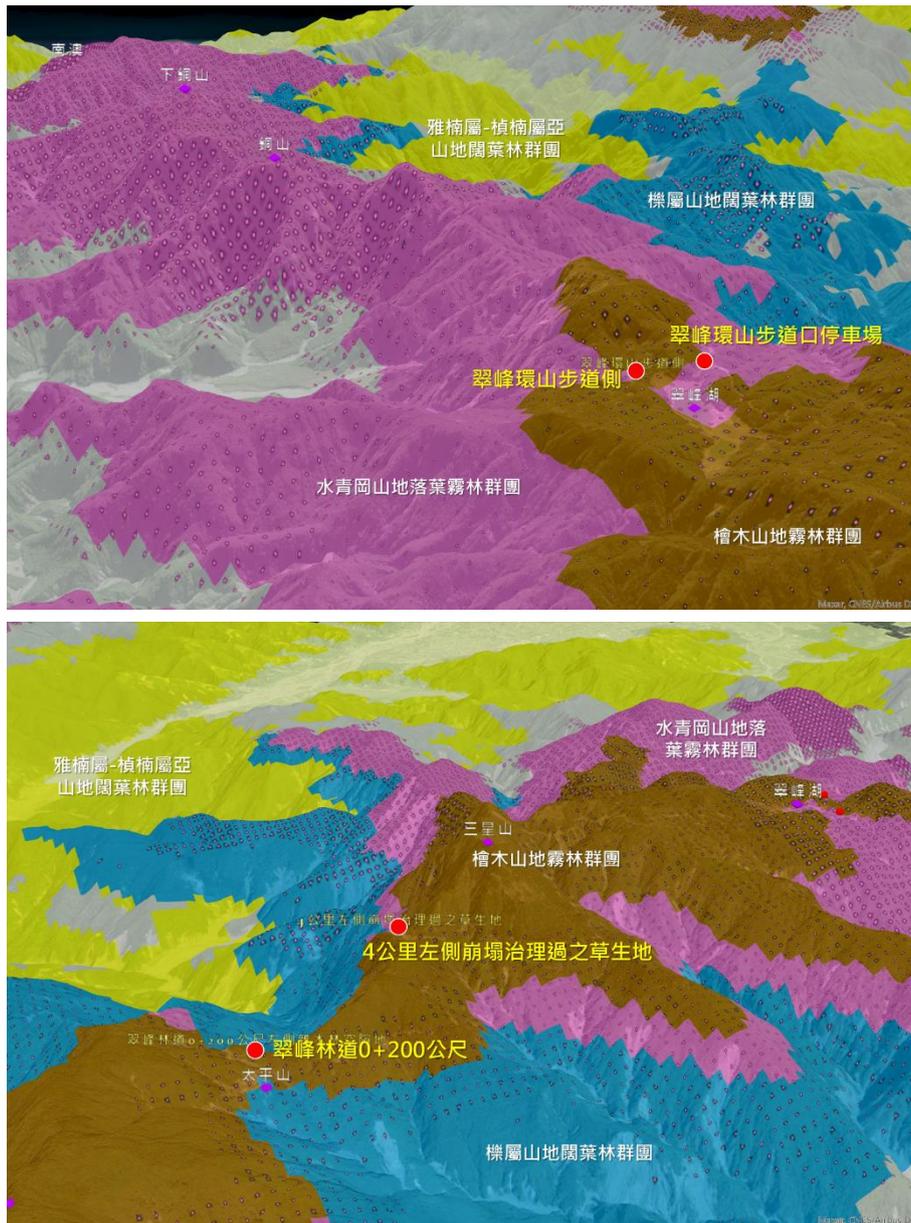


圖2.14 羅東林管處4處臺灣水青岡栽植地點與群團層級模型預測圖的套疊結果。色塊標示為4種森林群團的核心區位置，點狀區域則為適存度50%以上的水青岡山地落葉霧林群團與周邊群團混淆生育地。三維模擬結果如右側二維條碼（網址 <https://reurl.cc/Kj1W5e>）。





3.5 建立稀有及窄域分布物種的最適棲位模型：以臺灣石櫟為例

為建立氣候變遷敏感物種適用的棲位模型與分布預測流程，協助現地監測及推動後續保育工作，本計畫選定臺灣石櫟 (*Pasania formosana*) 進行棲位模型建置、現況分布預測與驗證、以及氣候變遷情境下的未來適應性分析等研究。相關成果提供予國立嘉義大學團隊，做為推動野外族群監測、輔助繁殖培育、異地栽植保存之參考；並希望以此為基礎，推展至其他敏感物種的棲地變遷分析及異地保育決策使用。

臺灣石櫟為臺灣特有種，僅分布於恆春半島低海拔山區如南仁山、萬里得山、高士佛、出風鼻、埤亦山等地，族群稀少，被臺灣維管束植物紅皮書列為國家瀕危 (Critical Endangered, CR) 物種。欖仁溪森林動態樣區涵蓋了本物種的一處主要族群，分布於面臨東北季風吹拂的迎風生育地，由國立嘉義大學團隊持續進行複查與族群監測。恆春半島的季風被認為可能是氣候變遷下的敏感生態系之一，故前期計畫將臺灣石櫟列入應積極推動輔助繁殖與復育的對象物種。

本研究目前收集的臺灣石櫟野外分布紀錄僅有 9 處 (圖 2.15 點位所示)，全數做為隨機森林模型的「出現」訓練樣本。另參考 Wang *et al.* (2016) 的方法，將出現樣本周圍 10 公里以外範圍 (圖 2.15 藍色曲線範圍外)，設定為「不出現」區域，並以 1 公里等距設置點位，每次建立模型時從中隨機抽取一定數量做為「不出現」訓練樣本。至於出現樣本周圍 10 公里內區域，不進行取樣訓練。

物種分布模型 (Species Distribution Modeling, SDM) 研究領域通常認為稀少種的棲位模型建立與分布預測是困難的，主要原因是訓練樣本太少，導致環境變數估計值不確定性增加，進而使得模型預測表現不穩定。相關研究建議，以最大熵物種分布模式 (MaxEnt) 進行物種分布預測時，應以 50 個出現樣本 (陳等人, 2012) 或 35-99 個出現樣本 (江等人, 2014) 為宜，以求較為穩定的預測精度。隨機森林方法則尚無查得最小訓練樣本之研究文獻，但一般經驗以 20-30 個





出現樣本並搭配一定數量的不出現樣本，為最基本的模型建立要求。其中，有關不出現樣本的搭配比例，則認為以出現樣本的 1 倍 (Chen *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2016b) 至 2 倍 (Evans *et al.*, 2011) 為最適組合。

出現與不出現樣本合併組成的訓練資料集，在決策樹及隨機森林方法內的作用，在於計算類別標籤間（出現 vs. 不出現）的群內與群間變異，以決定結構節點進行資料分群的最適門檻，使分群後數值維持群內變異最小、群間變異最大的狀態。因此，在一般情況下，平衡取樣 (balanced sampling) 是建構隨機森林模型的重要原則，亦即控制出現樣本與不出現樣本的數量接近，確保每一組決策樹對出現與不出現的樣本，均能在環境因子維度內取得數量相近、且涵蓋大多數的環境狀態的特徵值。在這樣的條件下，決策樹與隨機森林方能對訓練資料集做出最穩健的樹狀分類器，並能依訓練資料集以外的樣本，獲得最適且最穩定的「出現」與「不出現」預測。

然而，本研究發現欲利用隨機森林法分析臺灣石櫟的現行與未來適存氣候區時，平衡取樣原則無法產出最穩定的棲位模型。以臺灣石櫟而言，僅有的 9 處出現紀錄集中於恆春半島東側低海拔山區，就出現資料集而言，9 筆資料足以建構集中且明確的環境因子分布值域；然而，若以等量原則，從不出現範圍（恆春半島南端以外）隨機抽取 9 筆點位組成不出現資料集，極難代表臺灣石櫟不出現地點的環境狀態；在模型取樣無法有效涵蓋不出現地點的環境變異狀況下，可能導致對「不出現」地點預測的高度誤判。

為測試不出現樣點取樣數量對模型準確度的影響，本研究使用 9 筆出現紀錄建立出現資料集，並分別以出現紀錄的 1 倍至 30 倍（亦即以 9 筆、18 筆、27 筆...至 270 筆）隨機抽取不出現範圍之點位資料，構成不同取樣比例 (a/p ratio) 之訓練資料集。在每一種 a/p ratio 下，進行 1000 次的訓練資料集與隨機森林模型建置，並將模型預測結果及錯誤率估算結果進行集成 (ensemble) 計算，獲得結果如圖 2.16、圖 2.16 及表 2.8。



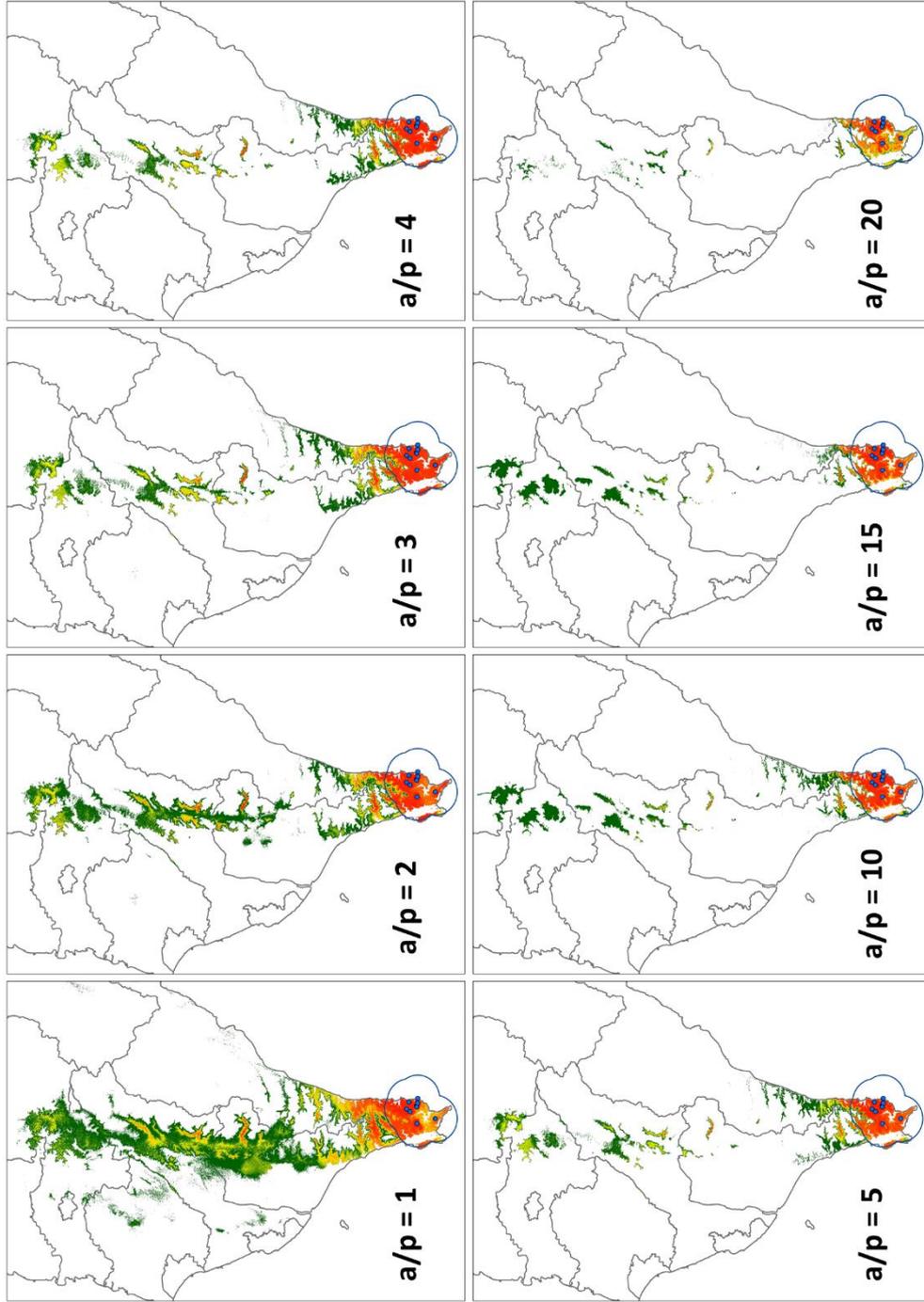


圖2.15 隨機森林模型採用不同的「不出現」/「出現」樣本配比，並經100次的多重隨機森林輸出結果進行平均權重評斷，獲得臺灣石櫟的環境適存機率分布圖。當a/p ratio低於4，西部山區預測為適存地點之變動程度較大；隨a/p ratio提高後（5-15），預測結果漸趨穩定。然而當a/p ratio提升極高（例如a/p=20）時，恆春半島的適存區域反而有明顯縮減，合理懷疑為過度訓練造成的偏誤結果。





表2.8 隨機森林訓練資料集的「不出現」/「出現」樣本配比對於模型預測誤判率的影響。本研究擇定a/p ratio=5為最適a/p配比。

a/p ratio	Absence 誤判率 (ErrA)	Presence 誤判率 (ErrP)	OOB 袋外錯誤 率	對 ErrA 的 改善率 =(1)-(2)	對 ErrP 的 改善率 =(3)-(4)	總改善率 =(5)+(6)
1	12.03% ⁽¹⁾	12.73% ⁽³⁾	12.38%	0.00% ⁽⁵⁾	0.00% ⁽⁶⁾	0.00%
2	3.89% ⁽²⁾	12.17% ⁽⁴⁾	6.65%	8.14%	0.57%	8.71%
3	2.55%	12.21%	4.96%	9.49%	0.52%	10.01%
4	2.07%	12.74%	4.20%	9.97%	-0.01%	9.96%
5	1.68%	13.51%	3.65%	10.35%	-0.78%	9.57%
6	1.49%	14.62%	3.37%	10.54%	-1.89%	8.65%
7	1.33%	15.13%	3.06%	10.70%	-2.40%	8.30%
8	1.22%	15.89%	2.85%	10.81%	-3.16%	7.66%
9	1.14%	17.64%	2.79%	10.90%	-4.91%	5.99%
10	1.06%	18.31%	2.63%	10.97%	-5.58%	5.40%
11	0.95%	19.82%	2.52%	11.09%	-7.09%	4.00%
12	0.84%	21.06%	2.40%	11.19%	-8.32%	2.87%
13	0.80%	22.10%	2.32%	11.23%	-9.37%	1.86%
14	0.78%	23.28%	2.28%	11.26%	-10.54%	0.71%
15	0.66%	23.16%	2.07%	11.37%	-10.42%	0.95%
16	0.65%	24.37%	2.04%	11.39%	-11.63%	-0.25%
17	0.61%	25.80%	2.01%	11.42%	-13.07%	-1.64%
18	0.55%	26.04%	1.89%	11.49%	-13.31%	-1.82%
19	0.54%	27.16%	1.87%	11.49%	-14.42%	-2.93%
20	0.50%	28.56%	1.83%	11.54%	-15.82%	-4.29%
21	0.48%	28.38%	1.75%	11.55%	-15.64%	-4.09%
22	0.41%	29.37%	1.67%	11.63%	-16.63%	-5.01%
23	0.42%	30.39%	1.66%	11.62%	-17.66%	-6.04%
24	0.39%	30.40%	1.59%	11.65%	-17.67%	-6.02%
25	0.36%	31.71%	1.57%	11.67%	-18.98%	-7.30%
26	0.34%	32.20%	1.52%	11.69%	-19.47%	-7.78%
27	0.32%	32.54%	1.47%	11.71%	-19.81%	-8.10%
28	0.28%	33.36%	1.43%	11.75%	-20.62%	-8.87%
29	0.27%	33.71%	1.38%	11.77%	-20.98%	-9.21%
30	0.25%	33.50%	1.33%	11.78%	-20.77%	-8.99%



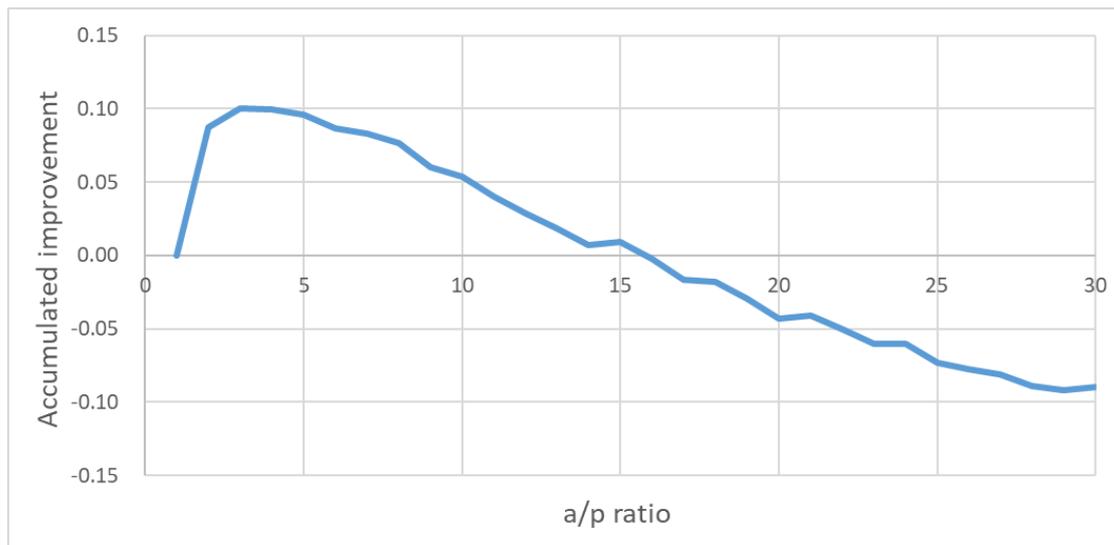


圖2.16 隨機森林訓練資料集的「不出現」/「出現」樣本配比，對「不出現誤判」及「出現誤判」總體改善率的關係。

分析結果顯示，隨機森林在進行臺灣石櫟棲位模型建構及分布預測時，若依平衡取樣原則，確實有不出現地點誤判率偏高的情形。以表 2.8 為例，當 a/p ratio 為 1 時，模型對於不出現的誤判率可達 12.03%；當 a/p ratio 增加，則該誤判率將獲得高度改善，並於 a/p ratio=6 以後漸趨穩定。相對的，a/p ratio 增加過程中，出現樣本占比的逐次下降，亦造成出現地點誤判率的升高，但影響相對輕微。本研究依 a/p ratio 逐次增加過程，將各階段的出現與不出現誤判率進行累加，並以「總改善率」評估各階段模型對臺灣石櫟分布預測的適用程度。

整體而言，利用 3 至 5 倍的 a/p ratio 建立訓練資料集，可以獲得最適的臺灣石櫟棲位模型。亦即犧牲少量的出現預測準確度（約犧牲 0.5-0.8%），換得對於不出現點位預測準確率的大幅提昇（約提升 9.5-10.3%）。

將各階段隨機森林模型預測結果投射至地圖上，亦可發現 a/p ratio=1 時，模型判定中央山脈西側大面積的中低海拔山區為臺灣石櫟的適存氣候區；然而，隨著 a/p ratio 的漸次提高，原本判定的多數適存範圍迅速消失，代表這些區域可能是隨機森林模型訓練不足而形成





的誤判，而非真正的適存地點。隨著 a/p ratio 提升至 5 倍以後，適存範圍的預測漸趨穩定，可視為模型達穩健階段(a/p ratio 5-15)。然而，當 a/p ratio 超過 15 後，除了不出現地點的判定持續降低，原判定出現之地點亦出現明顯縮減（圖 2.15）；表 2.3 亦顯示當 a/p ratio 超過 15 後，模型總改善率為負值，亦即失去調整 a/p ratio 改善原模型之意義，並出現對於不出現預測過度擬合的缺陷。

綜上分析，本研究認為 a/p ratio=5 為隨機森林法應用於臺灣石櫟棲位模型建構及分布預測的最適訓練資料集取樣比例。後續則依此一方式，進行臺灣石櫟重要環境因子、現生與未來分布預測之探討。

3.6 國家極危物種臺灣石櫟的現生分布與未來預測

延續上一節方法，利用 105 種氣候與環境因子（表 2.1）建立臺灣石櫟的棲位模型。經隨機森林對各環境因子進行重要值排序，取前 10 重要因子如表 2.9。研究發現，相對於全台各地而言，臺灣石櫟生育地的環境特徵是：穩定的年溫差（約 7.8°C）、冬季（12 月、1 月、2 月）介於 14-15°C 的月均低溫、略充沛的夏季降雨、突稜地形、以及距離稜線 60 公尺左右的範圍（圖 2.17）。前 10 名因子的累積重要值占全部 59 種環境因子的 79.93%，顯示表 2.9 所列因子及值域範圍已可代表臺灣石櫟的生育地環境條件。

有關臺灣石櫟適存氣候區預測圖部分，就現行氣候狀態而言，恆春半島所有出現點位均座落於機率高於 80% 的適存範圍。主要適存範圍以港口溪東側的南仁山、萬里德山至出風鼻一帶山區為主，次要範圍則包含老佛山山塊、門馬羅至社頂山區、台 26 線以西大平頂等三處區域（圖 2.18, Present）。準確率評估結果顯示，整體袋外錯誤率為 3.65%，其中對於不出現地點的誤判率約 1.68%，對出現地點的誤判率則為 13.51%（表 2.10）。





表2.9 在a/p ratio=5狀況下，臺灣石櫟隨機森林模型的重要因子及其值域範圍。

模型前 10 名 重要因子	重要值 Gini	佔全模型 比例	值域下界	均值	值域上界	單位
TD	5.00	33.99%	7.72	7.87	8.09	°C
Tmin_jan	1.82	12.39%	11.52	14.39	16.50	°C
Tmin_dec	1.38	9.34%	12.83	15.76	17.95	°C
Tmin_feb	1.13	7.68%	12.00	14.95	17.19	°C
percip_jul	0.49	3.33%	399.60	509.60	569.60	mm
percip_aug	0.46	3.10%	485.40	606.20	720.20	mm
planform	0.40	2.74%	0.28	1.38	2.37	純數值
NEAR_DIST	0.39	2.62%	15.44	60.08	152.48	meter
MSP	0.35	2.38%	1764.00	2257.00	2664.00	mm
Tave_jan	0.35	2.36%	14.70	17.47	19.66	°C
累計重要值	11.77	79.93%				

表2.10 對a/p ratio=5的臺灣石櫟隨機森林模型，以三分之一袋外樣本準確率評估結果。

Estimation based on 1000 random forests under a/p ratio of five.		Observation (54000 samples in total)		
		absence	presence	subtotal
prediction	absence	44243 (98.32%)	757 (1.68%)	45000
	presence	1216 (13.51%)	7784 (86.49%)	9000
	OOB			3.65%



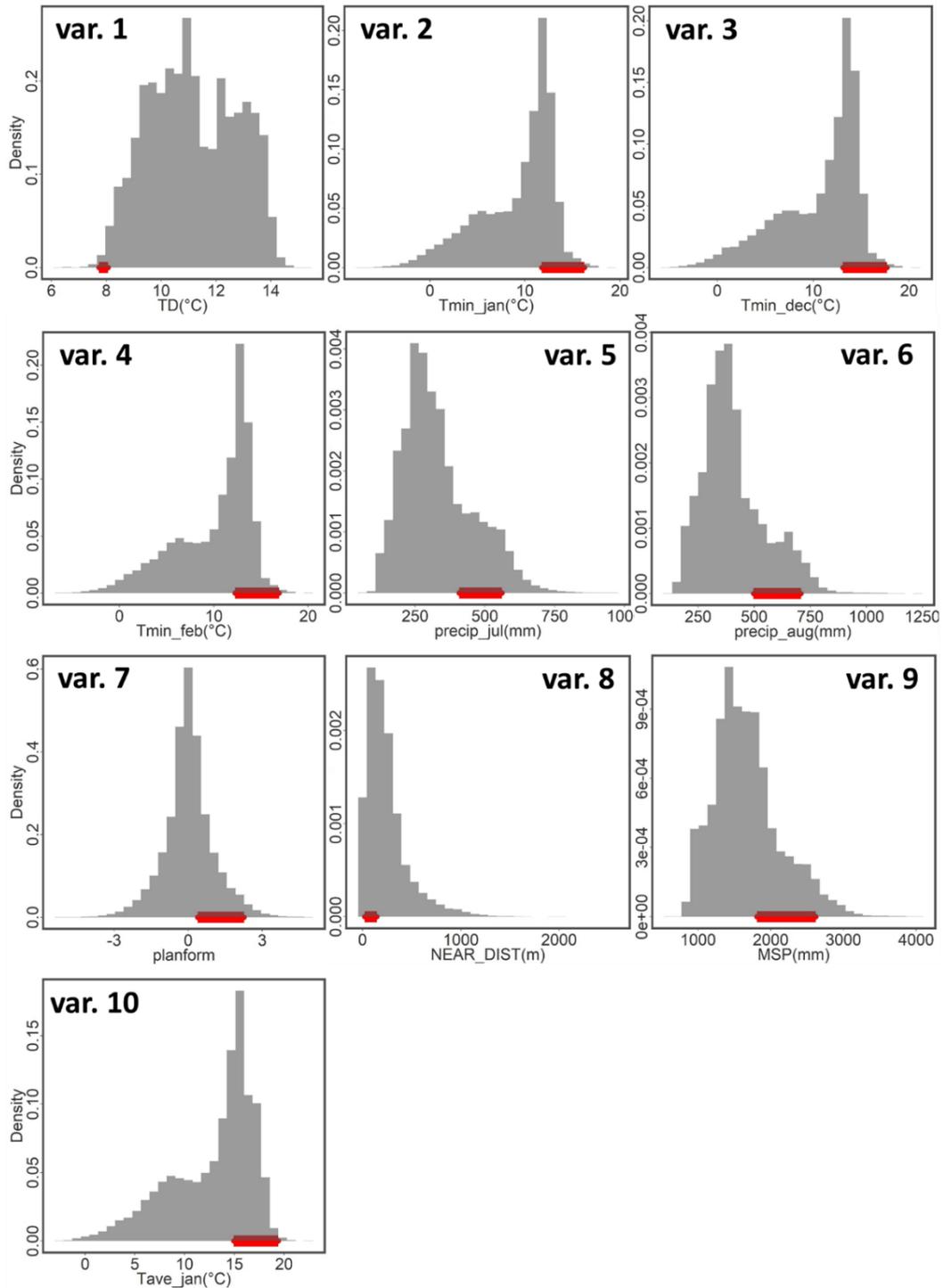


圖2.17 隨機森林模型前10名重要環境因子，在不出現樣本（灰色）的密度分布，以及出現樣本（紅色）的值域範圍。





有關未來適存地點分布預測部分，期中階段共使用 3 種大氣環流模型，於 RCP 4.5 情境下進行未來三階段（2030、2065、2090）的適存區域推估。氣候資料來源為臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台（TCCIP）提供的 AR5 未來氣候推估 5 公里網格資料，經 *clim.regression* 降尺度至 100 公尺解析度後，提供隨機森林模型進行預測使用。

三種大氣環流模型提供之未來氣候資料中，HadGEM2-AO 模型顯示臺灣石櫟適存的生育範圍沒有明顯的變化（圖 2.20）。而 CSIRO MK3-6-0 模型（圖 2.18）及 CESM1-CAM5 模型（圖 2.19）顯示臺灣石櫟的適生範圍雖不至於劇烈消失，但均可能出現縮減的情況。此二模型一致顯示，恆春半島現存的北緣族群（南仁山頂及埤亦山）的環境適存度可能略微下降；萬里德山、港口溪以南至社頂山區、老佛山西側、大平頂一帶等，則可能維持較中長期的穩定適存環境。此外，三種模型均顯示牡丹可能是現生地點以外較適宜的氣候環境，亦可納入異地栽植與遷地保育的選點考量。



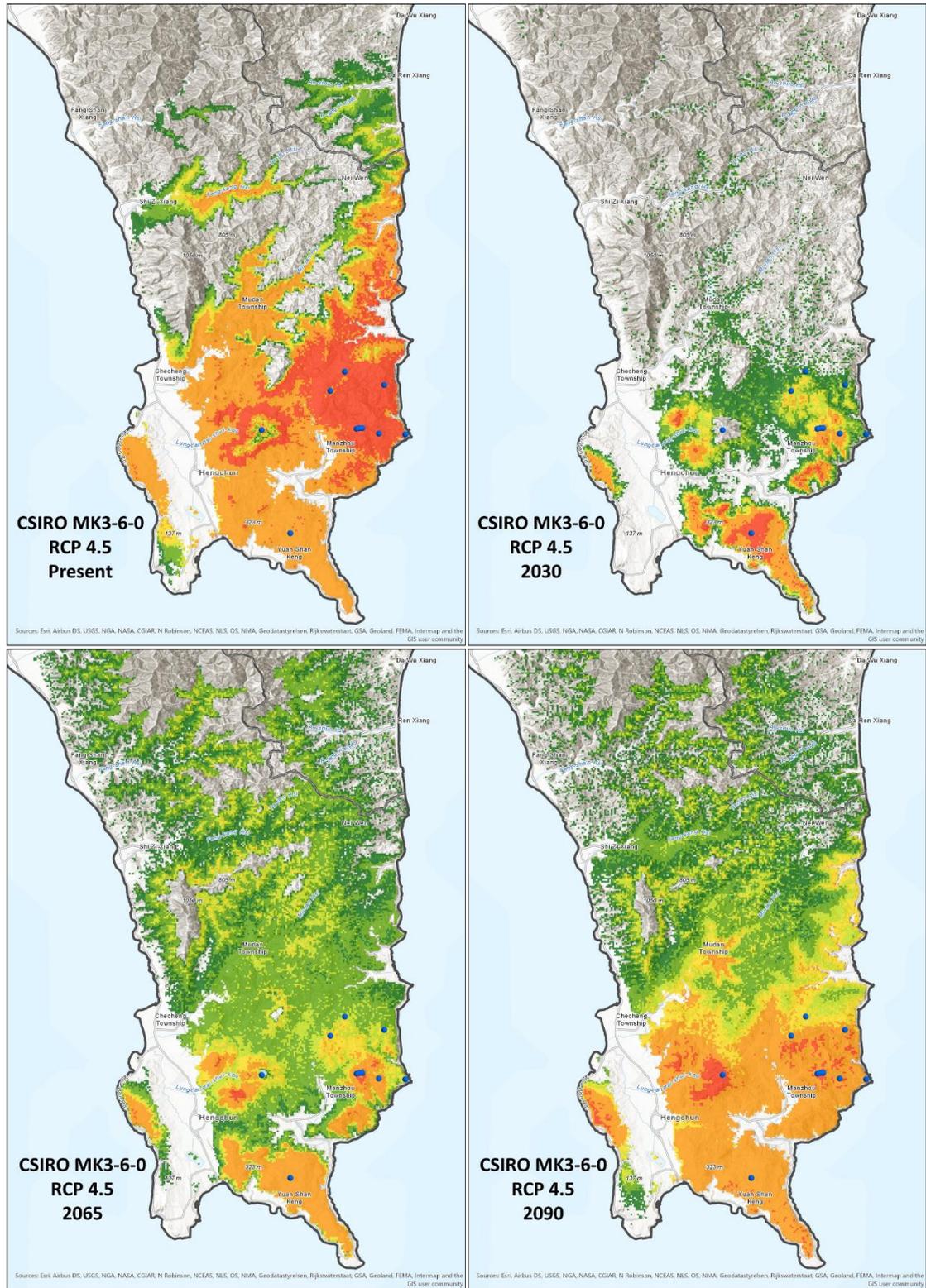


圖2.18 依據CSIRO MK3-6-0模型的RCP4.5情境，推測臺灣石櫟未來70年在恆春半島的適存區域變化。



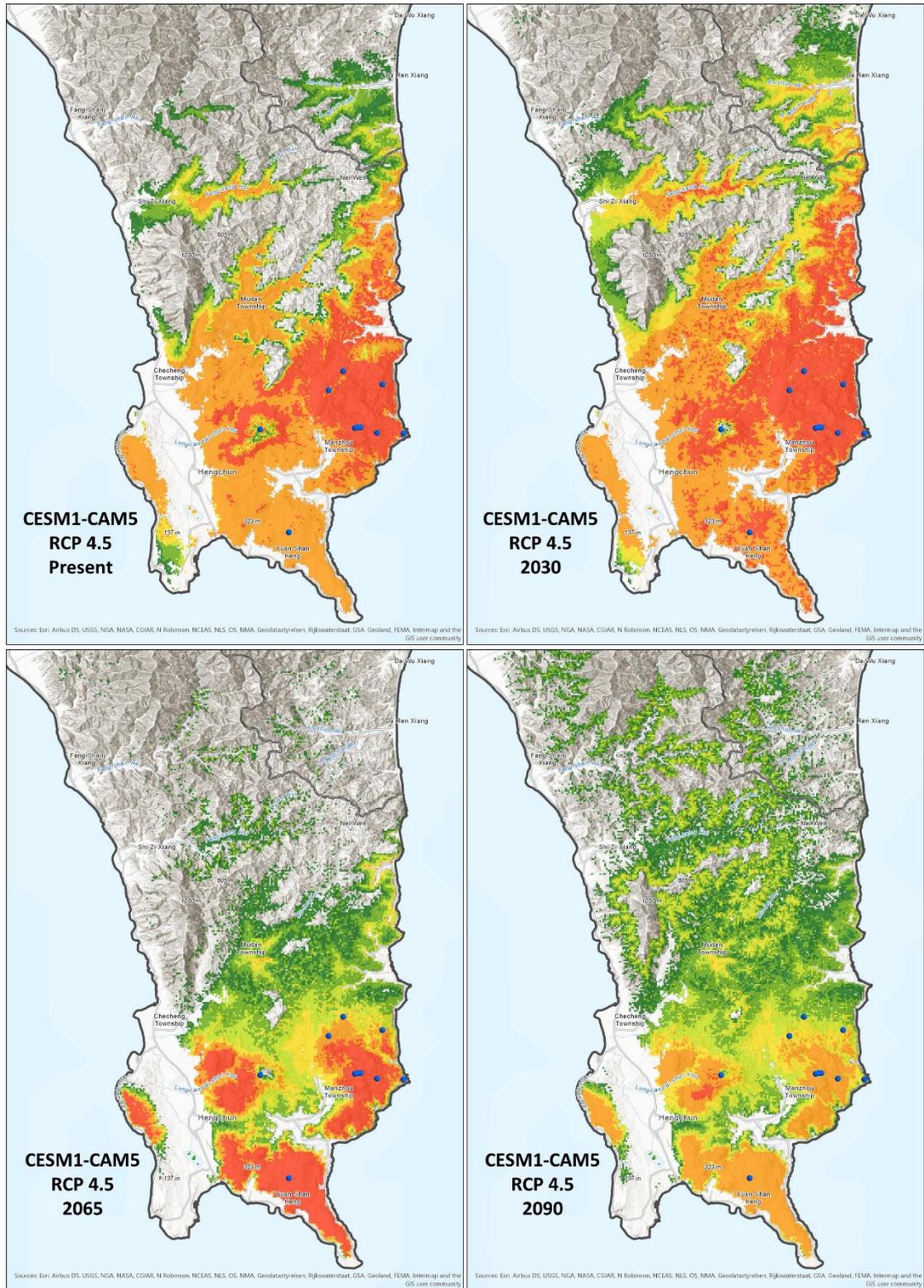


圖2.19 依據CESM1-CAM5模型的RCP4.5情境，推測臺灣石櫟未來70年在恆春半島的適存區域變化。



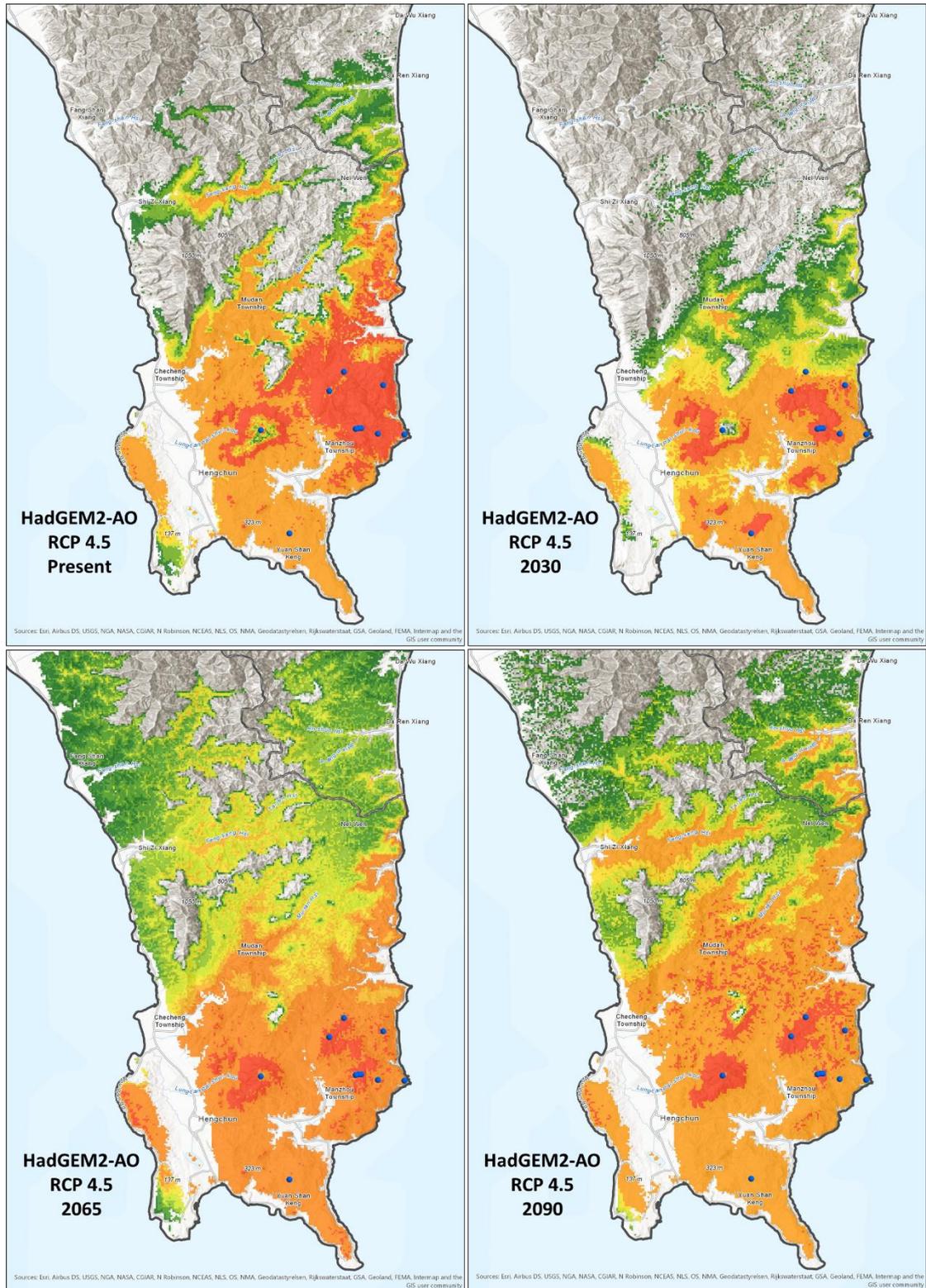


圖2.20 依據HadGEM2-AO模型的RCP4.5情境，推測臺灣石櫟未來70年在恆春半島的適存區域變化。





3.7 未來展望與執行重點

本計畫 109 年度主要重點為完成 *clim.regression* 降尺度模型改良，增納推估生物氣候因子功能，以及完成植群細部單元（群叢層級）之重要環境與氣候變量權重分析，建構潛在氣候植被預測工具雛形。上述工作均已如期完成，並已具備建構群叢尺度的預測模型的能力，亦針對前述模型完成準確度驗證及重要因子分析，瞭解群團層級與群叢層級模型的優缺點及應用性。

依據本年度研究結論，具體建議實務應用時可採群團與群叢模型並行方式，以求兼顧植群類型的解析度與預測準確率：在霧林帶以上，以群團層級模型進行現生與未來分布預測，確保預測圖的準確度；至中低海拔森林則可增納群叢層級模型，在較細緻的植被類型分布資訊下，探討氣候與氣候變遷對森林的影響。

因此，110 年度將依據原訂分年目標，將群團與群叢模型整合運用，配合 TCCIP 公布之未來氣候變遷情境資料，完成群叢尺度的潛在植被預測與動態變遷分析。預期 110 年度可完成較細微植群尺度單元變遷與動態分析，據以探討氣候變遷的衝擊與可能影響。本年度委員建議之溫帶與亞高山的植群，將列入 110 年度植群變遷分析的關注重點。

此外，本年度改良的 *clim.regression* 降尺度模型將於 110 年度以科學報告形式進行發表，使外界瞭解本計畫研究成果，並有利於林業及氣候變遷相關領域的資料流通與技術應用。





四、績效指標與期末評核標準達成情形

(一) 績效指標：

	細項指標	預估 量化 值	實際 達成 數	說明
學術 著作 發表	國內期刊 論文	1	1	1.本年3月一篇論文獲得 Applied Vegetation Science 刊登 (DOI:10.1111/avsc.12485)。 2.本年3月另投稿一篇論文至 Applied Vegetation Science。5月收到退稿及審查意見。依審查意見修正中。
	國內研討 會論文	1	1	已發表「以氣候資料為基礎的臺灣山地森林植群分布模型」於林業試驗所2020年集水區經營研討會。
	研究報告	1	1	農委會科技計畫研究報告1式。

(二) 期末評核標準：

評核標準	達成情形
完成植群細部分類單元之重要氣候變量篩選及權重分析，建構臺灣地區潛在氣候植被預測工具雛形。	已完成。詳期末報告「3.2 群叢層級之分布預測及環境因子分析」。
完成 <i>clim.regression</i> 降尺度模型改良，增納推估生物氣候因子功能，並將結果整理為科學報告形式。	已完成。詳期末報告「2.1 臺灣地區氣候資料與環境因子產製」。
選取一處高易危地點（亞高山針葉林、熱帶季風林或櫛欏森林），完成細部植群動態變遷分析。	已完成。詳期末報告採用群團層級預測模型於羅東林區臺灣水青岡異地栽植復育之應用。





五、參考文獻

江鴻猷、曾喜育、邱清安、曾彥學 (2014) 樣本數量對最大熵物種分佈模式(MaxEnt) 準確度之影響：以臺灣水青岡為例。林業研究季刊，36(2)：101-114。

林奐宇 (2016) 氣象災害影響下山村區域土地承載力及產業資源空間配置整合研究。行政院農業委員會農業科技計畫研究報告。

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。

周佳等 (2017) 臺灣氣候變遷科學報告 2017。科技部。

陳新美、雷淵才、張雄清、賈宏炎 (2012) 樣本量對 MaxEnt 模型預測物種分佈精度和穩定性的影響。林業科學，48(1)：53-59。

郭華仁 (2017) 農作物採收期的預估。觀點種子網。

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。

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>

Chen, C., A. Liaw and L. Breiman (2004) Using random forest to learn imbalanced data. University of California, Berkeley. Retrieved from <https://statistics.berkeley.edu/sites/default/files/tech-reports/666.pdf>

Evans, J.S., M.A. Murphy, Z.A. Holden and S.A. Cushman (2011)





- Modeling species distribution and change using random forest. In: Drew, A. C., Y. Wiersma, F. Huettmann, eds. *Predictive Species and Habitat Modeling in Landscape Ecology*. New York, NY: Springer. p.139-159.
- 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.
- Genuer, R., J.M. Poggi and C. Tuleau-Malot (2015) VSURF: an R package for variable selection using random forests. *The R Journal*, 7(2), 19–33.
- 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.
- 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, M.-H., S.-C. Wu, C.-F. Hsieh, S.-I Chen and K.-C. Yang (2003)
Rediscovery of *Quercus aliena* Blume (Fagaceae) in Taiwan.
Taiwania, 48(2), 112–117.
- 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.
- Su, H.-J. (1985). Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (III). A scheme of geographical climatic regions. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 18, 33–44.
- 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.
- 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]
- 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>

