

雪山黑森林臺灣冷杉更新與物候調查 成果報告

委託單位：雪霸國家公園管理處

執行單位：國立中興大學

計畫主持人：曾喜育、邱清安

研究人員：李佩樺、楊佳蓉、廖敏君、林鼎宸
王偉、林嘉言、方韻茹

執行期間：民國 106 年 1 月至民國 108 年 12 月

中華民國 108 年 12 月

(本報告內容及建議純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

摘要

關鍵詞：雪山、高山生態系、臺灣冷杉、材積、生物量、碳吸存、氣候變遷

一、研究緣起與背景

植物處於高山生態系嚴苛的環境下，對氣候變化十分敏感，其生長、繁殖等可作為氣候變遷的間接生物學和生態學證據。全球暖化所造成的異常劇變天氣及氣候變遷現象，已對於陸地生態系統產生影響，其中以高山生態系的反應最為顯著。臺灣冷杉是臺灣特有的冰河孑遺針葉樹種之一，亦為臺灣森林界限的重要樹種組成，是最具代表性之臺灣亞高山植群優勢組成，雪山黑森林是臺灣冷杉重要之研究地點。由於臺灣冷杉分布海拔較高且不易到達，種子苗建立、植群動態監測、材積、生長收穫、碳吸存，以及其對氣候變遷之調適反應等相關研究較少；然而面對現今氣候變遷影響，臺灣冷杉有其研究之必要性。研究成果可為臺灣高山生態系森林保育重要參考資料，並提供雪霸國家公園管理處於雪山高山生態系臺灣冷杉林經營管理之建議。

二、研究方法與過程

本計畫為 2017-2019 年之 3 年期計畫，目的為研究雪山黑森林完整且具代表性的臺灣冷杉天然林其更新狀況。以雪山雪東線步道沿線受 2015 年蘇迪勒與杜鵑颱風危害的臺灣冷杉風倒木為材料，取得臺灣冷杉風倒木之樹根、樹幹、枝條及圓盤樣本；透過量測樣本其生長年齡、材積、木材密度、生物量等各項特性，建立臺灣冷杉單木生長模式；針對 2008 年設置的臺灣冷杉長期監測樣區進行複查，並結合單木生長材積式建立雪山東稜臺灣冷杉材積蓄積，作為林分健康狀態與碳吸存評估基本資料。此外，透過植物物候調查、推移帶和森林孔隙調查種子苗的建立、生長與存活監測，以及菌根菌研究，提供瞭解臺灣冷杉繁殖與更新。最後以物種分布模擬評估氣候變遷對臺灣冷杉分布之影響。

三、重要發現

臺灣冷杉長期監測樣區調查，在 7 個長期監測樣區總計調查臺灣冷杉 733 株、臺灣鐵杉 143 株、刺柏 1 株、玉山圓柏 36 株、巒大花楸 145 株、玉山杜鵑 94 株。與 2008 年調查結果比較，2017 年調查所有監測物種總數均為減少，各樣區臺灣冷杉變化狀況則是 1-4 樣區減少，5-7 樣區增加，雖各區都有臺灣冷杉立木死亡，但 5-7 樣區的冷杉晉級生長量多，而使該區整體臺灣冷杉立木數量增長。將 7 個臺灣冷杉長期監測資料彙整，並將 1-20 cm 徑級之株數合併計算視為稚樹。結果

顯示，臺灣冷杉以胸高直徑<20 cm 的株數最多，呈現負指數函數曲線。而臺灣鐵杉以 10-20 cm 數量最多，略呈反 J 型分布；玉山圓柏多出現在第 7 樣區，在 10 cm 以下的小苗數量較多；巒大花楸則以 6-9 cm 的徑為多；玉山杜鵑徑級結構則略呈鐘型分布。在臺灣冷杉長期監測樣區的地被調查中，可將植物主要分為玉山箭竹優勢類群，與非玉山箭竹優勢類群，兩類群前者除玉山箭竹為優勢地被，受玉山箭竹影響，在 P2、P3 樣區的小苗量不多，而 P7 樣區小苗量少，卻有較多的稚樹覆蓋度紀錄，顯示已有一定量的臺灣冷杉族群在該區建立。

本研究於2017-2018年採集臺灣冷杉風倒木，針對採集樣木的生長勢分析其與環境因子之關係，發現相較於大尺度的環境因子，臺灣冷杉在相同時期、空間下的生長差異極大，表現出不同的生長曲線，因而難以徑級實際反應相對的樹齡。造成臺灣冷杉生長表現不一致的原因，以鄰近樣木影響生長條件為主要因素，因距離相近的臺灣冷杉在生長過程中相互競爭，而取得優勢條件者則持續擁有較佳的生長表現；被壓者的生長反倒受到抑制。相同時間生長的臺灣冷杉在鄰近區域有著迥異的樣態，得以見得臺灣冷杉多樣的生長類型。

透過風倒樣木的樹幹解析資料，本研究亦即建立雪山地區臺灣冷杉材積式，並比較歷史資料，修正與驗證臺灣冷杉立木材積，所得最適材積式為 $V=0.000073087 D^{1.71399} H^{1.14667}$ ，並以之推估臺灣冷杉長期監測樣區材積量。從蓄積動態看雪山地區臺灣冷杉林10年的變化，發現蓄積量的變化以密度、伴生樹種，以及風災事件影響最大，地被的優勢植物反而並非主要影響因子。而當臺灣冷杉林分轉為老熟林時，死亡量為低且對蓄積的增量是上升的，而蓄積大量的減少部分則是來自風災致使青壯齡林分的林木死亡，10年間的林木材積生長量仍大於死亡樣木總和的材積量，整體而言，雪山地區的蓄積量持續上升。

結合本研究推估的材積式，推算雪山地區以及全台臺灣冷杉蓄積量，各林型換算每公頃蓄積量約 290-1130 m³ 不等，整體調查出兩年的平均蓄積量為 793.203 m³，另外推算 1 m³ 的臺灣冷杉能轉換約 357.96 kg 的固碳量，每年可以提供約 2.4 t / ha 的固碳量。結合 SDM 模擬潛在的臺灣冷杉生育地所得計算出的潛在分布範圍，以及現生植群的地面調查及遙測影像分析的真實的臺灣冷杉林面積，本研究轉換全國臺灣冷杉林的總二氧化碳儲存量約為 1755 萬公噸，如根據臺灣冷杉 SDM 模擬的潛在區域分布面積，臺灣冷杉二氧化碳儲存量潛值可達 7616 萬公噸。

為評估與預測臺灣冷杉分布地點，透過物種分布模擬技術，推算出臺灣冷杉

淺在分布區域，模擬結果顯示冷杉潛在分布區大於冷杉真實分布區，且模擬冷杉個體之 SDM 存在域大於冷杉優勢林帶&冷杉林植群，但有時土壤、避風處等因子的交互作用也會修改冷杉之實際分布，因此仍有少數的冷杉會超出 SDM 之預測範圍。本計畫亦以升溫 2.0°C 作為暖化的假想情況，討論當暖化發生，臺灣冷杉之適宜生育地的分布狀況。結果顯示臺灣冷杉在升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 暖化情境下，臺灣冷杉將逐漸減少 21,828、16,848、12,369、14,769 ha，適宜生育地僅為目前之 70.2%、47.1%、30.2%、10.0%。暖化影響下，臺灣冷杉面積不僅縮小，且呈逐步往高海拔遷移之趨勢，顯示現有的臺灣冷杉將遭遇嚴苛的環境考驗。

關於推移帶小苗更新狀況，本研究於三六九山莊後設置推移帶樣區，並將樣區類型分為森林、交界帶及草生地三種環境，分別調查開區之地被物種、臺灣冷杉小苗數量及小苗根部感染菌根菌狀況。發現臺灣冷杉小苗有跟內、外生菌根菌共生情形。而隨林帶推移，離母樹越遠或植被受玉山箭竹或高山芒覆蓋越多，則小苗數量越少。原應調查推移帶不同區位的感染狀況，但受 2019 年年初之火燒影響，我們改採樣於小苗量多的林下地區，經過分析發現臺灣冷杉小苗與內生菌根菌關係較密切，且暗色隔膜菌比例甚高。

臺灣冷杉物候周期約於前一年度即開始芽點生長，雄毬花及雌毬花的花芽亦開始分化，直至隔年 3-4 月，花芽逐漸形成花苞；4-5 月為雄、雌毬花的盛花期，即為授粉時期，5 月雄毬花開始凋謝；5-6 月授粉後的雌毬花開始發育成為紫藍色毬果。雌毬果生長 5-6 個月，到了 10-12 月，即為臺灣冷杉的果鱗脫落時期。比對過去 2013 年開始收集的物候資料，以及玉山地區的研究報告，大部分的年度皆依照此一生長繁殖發育周期發生物候相的變化，惟部分度開花期間限受到天氣劇烈變動，而影響結實成效，或為欠年，所以該年難以觀察到結實現象。臺灣冷杉結實每兩年為一豐年，目前氣候變化對臺灣冷杉的開花物候較無劇烈影響，惟降水量的多寡，對臺灣冷杉的展葉狀況有實際影響。

四、主要建議事項

根據本計畫調查，提出下列建議。

(一)立即可行的建議：

主辦機關：雪霸國家公園管理處

協辦機關：管理處志工

1. 本研究在進行臺灣冷杉圓盤及試材取樣過程雖設有解說牌等說明工作計畫內容與目標，提供民眾生態保育及正確林業觀念，但仍需建請管理處與高山保育志工在登山遊客入園前予以說明。
2. 雪山黑森林為主東線重點路線，而尤以沿途景觀能夠觀察到不同的林分演替階段，因而本研究建議往後能在較為明顯之景觀地區及適合民眾休憩之位置，設置解說牌，或在登山口展示，解釋該景觀之林分意義(如黑森林 8.8-9.0K 風倒木區)，達成寓教於樂之目的。
3. 本研究於監測樣區調查期間，亦有發現登山客於黑森林內搭帳篷宿營(黑森林 9.0-9.5K)，於森林內進行搭帳篷等活動會造成土壤壓實和植物受損，影響臺灣冷杉小苗或其他植物的更新，進而可能擾動黑森林生態系統的穩定性，因此建議管理處應加強宣導民眾對山林之愛護，或針對樣區、樣點附近設置解說牌，提醒登山客不要在黑森林搭帳宿營。
4. 研究採樣之風倒木有保留完整者，期望提供雪管處樣本及樹幹解析圖，作為教育解說之用。
5. 位於雪東線步道 5.7K 處的臺灣冷杉縮時攝影物候觀察樣株，是雪東線步道沿線臺灣冷杉物候觀察的適宜位置。但最近調查發現毬果有遭民眾採集的痕跡，建議未來針對該棵樣木能夠設立物候之解說牌，除介紹臺灣冷杉於不同季節的物候樣態，另達到加強宣導及提醒效果，藉此勸導民眾勿摘採國家公園內的植物。

(二)長期建議：

主辦機關：雪霸國家公園管理處

協辦機關：國立中興大學森林學系

1. 關於全球氣候變遷是否影響臺灣冷杉的林分結構與更新是應持續關注之重點，應持續觀測全球暖化與極端天氣對臺灣亞高山生態系的影響，包含臺灣冷杉林分結構、開花結實、小苗更新、林木生長、森林線變動，以及物種分布範圍等。本計畫雖獲得初步結果，但仍需要進一步且長期的研究與調查才能獲得答案，才能提供因應變化的經營管理與保育策略。
2. 為建立氣候變遷基礎資料，當發生極端天氣事件後，例如強烈颱風或極端

乾旱等，建議雪管處應即時進行調查，以了解其後續之影響，獲得即時資訊。

3. 自 2008 年起，雪山雪東線步道共架設 7 個臺灣冷杉長期監測樣區，這些樣區提供了解臺灣亞高山生態系臺灣冷杉對於氣候變遷反應的良好試驗場域，是臺灣極少數的高山長期研究樣區，為雪霸國家公園的研究特色。建議每 5-10 年進行複查，一方面建置臺灣亞高山森林的科學研究基礎，另一方面研究成果可提供管理處經營管理與保育策略擬訂的參考。
4. 目前雪山地區的臺灣冷杉林較無蟲害與臺灣水鹿啃咬之問題，因而本研究認為經營管理之方向，可酌加於與「遊客」之間之連結，另外建議以後的研究方針，雪山雪東線的臺灣冷杉林研究監測樣區資料，供未來比較中大型草食性動物對植群影響的基礎。
5. 臺灣冷杉林與玉山箭竹-高山芒灌叢草生地的相鑲植群，構成臺灣亞高山植群地景，火燒是擾動森林與灌叢草生地植群組成的最主要干擾因子；然而，臺灣冷杉如何在火燒擾動後生育地重新建立其族群是有趣的議題。未來應針對冷杉林內、推移帶和灌叢草生地的菌根菌組成、臺灣冷杉菌根菌感染率等進行更一步的比較，提供了解臺灣冷杉小苗後續生長、存活與菌根菌的關係。
6. 因未來事件難以評估，本研究僅就升溫後的情況評估臺灣冷杉的分布變化，因而在預期事件發生內，給予提供設立樣區位置之建議，能加強觀察臺灣冷杉在受衝擊區的實際變化。盡早觀察現象而能盡早對物種進行保育工作。

Abstract

Plants that live in the harsh environment of alpine ecosystems are very sensitive to climate change. Plant growth and reproduction would be used as an indirect biological and ecological evidence of climate change. Abnormal weather and climate change which caused by global warming have had an impact on terrestrial ecosystems, with alpine ecosystems responding most significantly. *Abies kawakamii* (kawakami fir) is one of the Taiwan's endemic glacial relict coniferous species, which build as an important species composition of sub-alpine vegetation in forest boundary of Taiwan. Among the kawakami fir forests of Taiwan, Xue Mountain Black Forest is the most representative forest. However, the researches of kawakami fir are relatively few. The project is a three-year program (2017-2019) aimed at preserving the kawakami fir in the Xue Mountain Black Forest. First, the trunk samples of kawakami fir were collected from the tree-fall which First, the trunk samples of kawakami fir was harvested from the tree-fall which disrupted by Typhoons Sudile and Dujan (2015). The Age, volume of timber, wood density, and biomass were measured to establishment of kawakami fir single-tree biomass growth model. The seven long-term monitoring plots of kawakami fir forest stand were resurvey, which are constructed in 2008. The tree height, DBH, and volume growth curve of kawakami fir can be conducted, and relationships between biomass (stem, branch, and leaf), DBH, volume, above ground biomass, carbon sequestration and were also explored. According to the plant phenology survey, the establishment, growth and survival monitoring of seed seedling in transition zones and forest gaps, and the relationships between mycorrhizal fungi and kawakami fir would provide understanding of kawakamii fir breeding and regeneration in Xue Mountain. And, the impact of climate change on distribution of *Abies kawakamii* is assessed by species distribution simulation. The research results are important information for conservation of high-altitude forest ecological system, which can be used for management of the kawakami fir forest in the alpine ecosystem.

目錄

摘要.....	3
Abstract.....	8
目錄.....	9
表目錄.....	10
圖目錄.....	11
一、計畫緣由.....	13
二、工作項目.....	14
三、前人研究.....	15
(一) 臺灣冷杉分類地位及地理分布.....	15
(二) 臺灣冷杉植群相關研究.....	15
(三) 臺灣冷杉生長與變遷相關研究.....	19
(四) 林木生長蓄積相關研究.....	20
(五) 臺灣冷杉菌根菌研究.....	24
(六) 高山植物物候.....	26
(七) 物種分布模擬.....	28
四、研究地區環境概況.....	29
(一) 地形、地質與土壤.....	30
(二) 氣候.....	30
(三) 雪山主峰線山地植群帶.....	30
五、研究方法.....	32
(一) 臺灣冷杉長期監測樣區複查.....	32
(二) 臺灣冷杉風倒木現勘及圓盤取樣工作.....	34
(三) 臺灣冷杉單木生長式與材積式建立.....	41
(四) 雪山地區臺灣冷杉林蓄積量與碳存量之評估.....	43
(五) 臺灣冷杉風倒木環境立地資料與生長樣態之分析.....	44
(六) 臺灣冷杉-玉山箭竹推移帶菌根菌調查.....	45
(七) 臺灣冷杉物候.....	46
(八) 以物種分布模擬評估氣候變遷對臺灣冷杉分布之影響.....	47
六、結果與討論.....	49
(一) 臺灣冷杉長期監測樣區修復及複查.....	49
(二) 臺灣冷杉樹幹解析及建立單株材積式.....	67
(三) 臺灣冷杉長期樣區蓄積與碳吸存推估.....	74
(四) 臺灣冷杉樹芯解析.....	83
(五) 臺灣冷杉風倒木環境立地資料與生長樣態.....	85
(六) 臺灣冷杉推移帶菌根菌調查.....	96
(七) 臺灣冷杉物候調查與監測.....	101
(八) 臺灣冷杉物種分布模擬.....	112
七、結論與建議.....	127
(一) 結論.....	127
(二) 研究限制.....	131
(三) 未來建議.....	132
八、發表成果.....	134
九、工作進度.....	140
十、參考資料.....	141
十一、附錄.....	153
(一) 審查會議回覆辦理情形.....	153
(二) 本計畫風倒木圓盤採集許可相關公文.....	171
(三) 2018年臺灣冷杉長期監測樣區地被調查植物名錄.....	181
(四) 縮時攝影指定樣株2017至2019年物候紀錄.....	184
(五) 計畫核心概念圖.....	194

表目錄

表 1. 本計畫研究地區範圍圖.....	31
表 2. 臺灣冷杉風倒木樣株選定及分析方法表.....	35
表 3. 可能影響臺灣冷杉分布的 21 項環境變數.....	48
表 4. 2017 年臺灣冷杉長期監測樣區資料、上層喬木種類及株數.....	51
表 5. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1 樣木增減表.....	55
表 6. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_2 樣木增減表.....	55
表 7. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_3 樣木增減表.....	56
表 8. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_4 樣木增減表.....	56
表 9. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_5 樣木增減表.....	56
表 10. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_6 樣木增減表.....	57
表 11. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_7 樣木增減表.....	57
表 12. 臺灣冷杉各徑級於 2008、2017 年之數量(比例)及年間死亡量.....	58
表 13. 2018 年雪山地區臺灣冷杉林型族群靜態生命表.....	66
表 14. 雪山地區臺灣冷杉 6 項材積式計算推估統計結果.....	68
表 15. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher 與算術公式 Generalized combined variable 之材積估計值與八谷正義於舊雪山山屋附近材積量測值對照表.....	70
表 16. 雪山地區臺灣冷杉樣木各生長階段胸高直徑、樹高之最大、最小、平均值、第 1 和第 3 四分位數與離群閾值.....	75
表 17. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區資料、上層喬木種類與株數及臺灣冷杉蓄積量變化一覽表.....	77
表 18. 臺灣中北部受颱風侵襲資料一覽表.....	80
表 19. 前人研究臺灣大面積森林、日本柳杉與扁柏人工林碳吸存估算.....	81
表 20. 臺灣地區主要林型碳吸存量.....	81
表 21. 本研究調查推估之全國臺灣冷杉林型固碳量及二氧化碳儲存量比較.....	82
表 22. 臺灣冷杉風倒木樣木樹芯特徵資料表.....	84
表 23. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒木年齡對應之累積生長量.....	89
表 24. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒木各徑級之生長年度.....	90
表 25. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長模式之 CCA 前三軸相關統計表.....	92
表 26. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長模式與環境因子間 CCA 前三軸相關統計表.....	92
表 27. 雪山地區臺灣冷杉各區風倒樣木年齡、胸高直徑、總平均生長量及生長類型比較.....	93
表 28. 雪山地區臺灣冷杉取樣風倒樣木之樣木細部資料.....	94
表 29. 臺灣冷杉推移帶樣區臺灣冷杉小苗標記資料與感染率.....	97
表 30. 臺灣冷杉推移帶之森林帶下小苗標記資料與感染率.....	100
表 31. 雪山東峰及圈谷 2016-2019 年月均溫一覽表.....	111
表 32. 雪山東峰及圈谷 2016-2019 年月降水量一覽表.....	111
表 33. 初步選擇 21 項環境變數之相關係數摘要表.....	113
表 34. 13 項環境變數之貢獻百分率與置換重要性.....	114
表 35. 5 組不同物種點位資料之內容及其模擬準確度、閾值.....	115
表 36. 臺灣冷杉空間分布圖層之摘要表.....	120
表 37. 升溫 0.5~2.0°C 暖化情境之減少面積與剩餘面積.....	124

圖目錄

圖 1. 雪山北坡黑森林內之臺灣冷杉純林.....	17
圖 2. 三六九山莊後方臺灣冷杉與玉山箭竹推移帶.....	18
圖 3. 本計畫研究地區範圍圖.....	29
圖 4. 臺灣冷杉長期監測樣位置圖.....	33
圖 5. 臺灣冷杉長期監測樣區示意圖.....	33
圖 6. 與東勢林區管理處工作人員現勘風倒木工作照.....	34
圖 7. 水源地 0.5K 處之倒木取樣上受地形及位置限制.....	34
圖 8. 2017 年 12 月 10 日臺灣冷杉取樣狀況.....	36
圖 9. 本計畫臺灣冷杉風倒木解說教育牌設置情形.....	37
圖 10. 樹幹圓盤取樣示意圖.....	38
圖 11. 臺灣冷杉風倒木圓盤取樣工作.....	39
圖 12. 臺灣冷杉風倒木圓盤搬運工作照.....	40
圖 13. 臺灣冷杉風倒木圓盤打印、放行工作照.....	40
圖 14. 臺灣冷杉圓盤斷面各方位量測示意圖.....	41
圖 15. 單株材積計算示意圖.....	42
圖 16. 臺灣冷杉推移帶樣區示意圖.....	46
圖 17. 臺灣冷杉長期監測樣區修復工作照.....	49
圖 18. 2008 年及 2017 年臺灣冷杉長期監測樣區 1-7 樣區臺灣冷杉之徑級分布圖.....	53
圖 19. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1-Plot_7 樣區徑級結構圖.....	59
圖 20. 雪山地區之臺灣冷杉循環式演替模式示意圖.....	59
圖 21. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1-Plot_7 樣區內伴生木本植物徑級分布圖.....	60
圖 22. 2018 年臺灣冷杉長期監測樣區 P1-P7 地被植群樹形圖.....	61
圖 23. 2018 年臺灣冷杉長期監測樣區地被調查樣區概況.....	62
圖 24. 臺灣冷杉長期監測樣區 P2 地被現況照.....	63
圖 25. 臺灣冷杉長期監測樣區 P4 地被現況照.....	63
圖 26. 2018 年臺灣冷杉小苗數量與重要值指數於各區之質量圖.....	64
圖 27. 臺灣冷杉與玉山箭竹於 10 年間(2008-2018 年)的相對覆蓋度差值.....	64
圖 28. 2018 年臺灣冷杉死亡率與致死率變化圖(上)與標準化存活率圖(下).....	65
圖 29. 2008 與 2018 年臺灣冷杉小苗、稚樹與各徑級株數比較.....	66
圖 30. 雪山地區臺灣冷杉 6 株樣木之樹幹解析圖.....	67
圖 31. 雪山地區臺灣冷杉 6 種材積式材積量推估值與樣本材積測量值比較.....	69
圖 32. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher(a 式)與算術公式之 Generalized combined variable(d 式)材積測量值與材積估計值相減差異.....	70
圖 33. 雪山地區臺灣冷杉樣木胸高直徑、樹高及材積分布圖.....	71
圖 34. 雪山地區臺灣冷杉大徑級樣木之樹幹解析圖.....	72
圖 35. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher (a 式)與算術公式 Generalized combined variable (d 式)及 1973 年林務局製臺灣冷杉材積式與實質比較.....	72
圖 36. 雪山地區臺灣冷杉樣木胸高直徑、樹高及材積分布圖.....	73
圖 37. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher (a 式)不同樣木數量配適之估計值與實際測量值之比較.....	73
圖 38. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區之樹高曲線圖.....	74
圖 39. 雪山地區臺灣冷杉樣木各生長階段每 10 年胸高直徑及樹高增長量分布圖.....	75
圖 40. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區 2017 年 P4(a)與 P5(b)的徑級結構及空間分布比較.....	76
圖 41. 雪山雪東線臺灣冷杉風倒木樣木生長錐樹芯鑽取工作照片.....	83

圖 42. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區各徑級區間每 10 年徑向(a)與樹高(b)生長變化.....	86
圖 43. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木各生長階段每 10 年胸高直徑及樹高增長量分布圖.....	87
圖 44. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木各生長階段之徑級對應年齡關係.....	87
圖 45. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒樣木之胸徑與年齡關係圖.....	88
圖 46. 雪山地區採集之 18 棵臺灣冷杉生長類型群團分析.....	91
圖 47. 雪山地區採集之 18 棵臺灣冷杉不同生長類型的年平均生長量.....	91
圖 48. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長類型與影響因子之 CCA 雙序圖.....	93
圖 49. 雪山地區臺灣冷杉鄰近相近林齡之風倒樣木之連年生長量比較.....	95
圖 50. 臺灣冷杉推移帶樣區調查工作照.....	96
圖 51. 臺灣冷杉推移帶樣區地被群團分析樹形圖.....	97
圖 52. 臺灣冷杉小苗之外生菌根菌觀察.....	98
圖 53. 臺灣冷杉小苗之內生菌根菌觀察.....	99
圖 54. 臺灣冷杉小苗之暗色隔膜菌觀察.....	99
圖 55. 雪山地區雪東線步道 2012-2019 年臺灣冷杉開花物候譜.....	102
圖 56. 玉山主峰沿線 2013 年及 2016 至 2018 年臺灣冷杉物候資料.....	102
圖 57. 雪山地區沿線拍攝之 2018 年 6 月臺灣冷杉結果及雄毬花凋謝.....	103
圖 58. 雪山地區沿線拍攝之臺灣冷杉 2018 年 10 月熟毬果與 11 月落果現象.....	103
圖 59. 臺灣冷杉物候示意圖.....	104
圖 60. 2017 及 2019 年雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影監測樣株毬果物候表現彙整.....	105
圖 61. 2017-2019 年夏季(7-8 月)雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株照.....	106
圖 62. 雪山地區臺灣冷杉 4-7 月縮時攝影物候調查樣株之樣枝毬果監測.....	108
圖 63. 雪山地區臺灣冷杉 7-11 月縮時攝影物候調查樣株之樣枝毬果監測.....	108
圖 64. 雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株之樣枝斷枝照.....	109
圖 65. 雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株之斷枝比對照.....	109
圖 66. 雪山地區臺灣冷杉小葉異常照.....	110
圖 67. 13 項環境變數重要性之折刀分析.....	114
圖 68. 採用 5 組不同物種點位資料所得之 SDM 模擬結果.....	116
圖 69. 以 SDM 預測臺灣冷杉之分布.....	118
圖 70. 臺灣冷杉之分布疊合圖.....	119
圖 71. 臺灣冷杉於升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現機率.....	123
圖 72. 臺灣冷杉在現今及升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現域.....	124
圖 73. 臺灣冷杉之適宜生育地喪失與獲得:左圖為冷杉於升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現機率， 右圖為出現機率再疊合現生冷杉 FC21 polygon.....	125
圖 74. 暖化後，現生臺灣冷杉 FC21 之分布變化.....	126
圖 75. 本研究主軸及結構圖.....	127
圖 76. 林分演替解說牌示意圖.....	132
圖 77. 臺灣冷杉風倒木 12 號樣木實體照與其樹幹解析.....	133
圖 78. Abies 2019 會議報告與野外議題討論.....	135
圖 79. 鹿科動物啃咬冷杉小苗出現側枝強勢的情形.....	136
圖 80. 鹿科動物啃咬銀冷杉小苗防治法試驗.....	136
圖 81. Babia Góra National Park 蟲害問題.....	137
圖 82. 廖敏君博士受南韓濟州島冷杉國際研討會邀請發表雪霸國家公園臺灣冷杉相關研究....	138
圖 83. 南韓濟州島漢拏山國家公園(Hallasan National Park)的朝鮮冷杉(<i>Abies koreana</i>)現況與復育 研究.....	139

一、計畫緣由

臺灣冷杉(*Abies kawakamii*)為臺灣特有之冰河孑遺針葉樹種，為臺灣森林界限(forest line)樹種組成之一，分布海拔介於 2,400~3,600 m (Liu 1971)，主要分布北起太平山、南湖大山，南迄卑南主山，大致呈連續性分布，常以純林型式群聚於臺灣亞高山生態環境，為最具代表性之臺灣亞高山植群(subalpine vegetation)，具有明顯的高山島嶼(mountain island)結構，在高山森林生態系扮演著重要角色，具物種保存及水土保持之功能，為相當獨特性之臺灣森林景觀。全世界冷杉屬(*Abies*)植物約 50 餘種，分布於歐洲、亞洲、北美洲、中美洲及非洲最北部的亞高山至高山地帶，大多分布於寒帶及溫帶氣候地區，僅臺灣冷杉、喜馬拉雅冷杉(*Ab. webbiana*)、墨西哥冷杉(神聖冷杉，*Ab. religiosa*)等 3 種分布於亞熱帶地區，為本屬分布南界生態指標(Liu 1971; 向小果等 2006)。

雪山是臺灣高山生態系相當重要的研究區域(呂金誠&歐辰雄 2009)，沿雪東線步道自武陵遊憩區隨海拔梯度蜿蜒而上，植物社會依序由臺灣二葉松(*Pinus taiwanensis*)、臺灣赤楊(*Alnus formosana*)形成次生林，部分區域為臺灣鐵杉(*Tsuga chinensis* var. *formosana*)與高山櫟(*Quercus spinosa* var. *miyabei*)等形成溫帶針闊葉林，臺灣冷杉、玉山圓柏(*Juniperus squamata*)、玉山杜鵑(*Rhododendron pseudochrysanthum*)等構成的亞寒帶針葉林；部分受火燒干擾地區則形成臺灣冷杉與玉山箭竹(*Yushania niitakayamensis*)、高山芒(*Miscanthus transmorrisonensis*)、玉山杜鵑、紅毛杜鵑(*Rh. rubropilosum*)、巒大花楸(*Sorbus randaiensis*)等組成的森林-灌叢草生地動態推移的地景，以及分布在雪山主峰下圈谷地形的玉山圓柏、玉山杜鵑矮盤灌叢(王偉等 2010)。

臺灣冷杉分布以雪山地區之黑森林最負盛名，雪山東稜的黑森林為臺灣冷杉純林，為保存完整且具代表性的臺灣冷杉天然林(廖敏君等 2013)。由於臺灣冷杉分布海拔較高且不易到達，材積、生長收穫及植群動態監測的相關研究較少，然面對現今氣候變遷影響，有其研究之必要性。本研究針對臺灣冷杉佐以前人研究，研究項目主要分為臺灣冷杉生長蓄積模式，族群垂直結構與水平結構及植群多樣性等方法，推測臺灣冷杉族群生物量以及碳吸存，並配合臺灣冷杉林帶的植物物候監測，以期建立臺灣冷杉族群動態模式。

本計畫為 2017-2019 年之 3 年度計畫，預定達成以下之目標：

- (一)運用單株材積式資料與臺灣冷杉林樣區資料，建立雪山地區臺灣冷杉之林分材積生長與蓄積推估。
- (二)推估大區域性的冷杉林蓄積量與碳吸存量。
- (三)瞭解氣候變遷可能對冷杉林分布之影響。
- (四)供雪霸國家公園生態系相關研究成果作為高山生態系經營管理規劃參考。

二、工作項目

(一)第一年工作項目(2017 年)

1. 臺灣冷杉長期樣區整理恢復、複查與初步分析。
2. 臺灣冷杉風倒木圓盤及木材性質試材取樣。
3. 臺灣冷杉圓盤整理與初步單木樹幹解析。
4. 臺灣冷杉物候調查。

(二)第二年工作項目(2018 年)

1. 臺灣冷杉長期樣區動態完成報告及發表。
2. 完成臺灣冷杉樹幹解析及單株材積式資料，建立樣區臺灣冷杉之林分材積生長與蓄積推估。
3. 臺灣冷杉推移帶樣區建立與調查。
4. 臺灣冷杉物候調查。

(三)第三年工作項目(2019 年)

1. 完成臺灣冷杉之林分材積生長與蓄積推估報告及發表。
2. 探討臺灣冷杉種子苗更新狀態以及臺灣冷杉共生菌根菌的影響。
3. 臺灣冷杉物種分布模擬。
4. 推估雪山地區的冷杉林蓄積量與碳吸存量。
5. 臺灣冷杉物候調查。

三、前人研究

(一) 臺灣冷杉分類地位及地理分布

松科(Pinaceae)植物分為 3 亞科，10 屬，約 212 種，多產於北半球(劉業經等 1994)，而冷杉屬植物為松科第 2 大屬，廣泛分布於亞洲、歐洲及美洲，是北半球陰暗針葉林的優勢種和建群種，全世界約有 52 種 1 亞種 12 變種，在北半球形成南歐、北美和東亞三個分布中心，主要集中在 1,000-2,000 m 和 2,500-4,000 m 等 2 個海拔區域(向小果等 2006)。臺灣冷杉屬植物最早由早田文藏(Bunzo Hayata)在 1908 年將臺灣冷杉命名為 *Ab. mariesii* Mast. var. *kawakamii* Hayata，亦指紀念川上瀧彌(Takiya Kawakami)；Liu (1971)認為川上氏是臺灣冷杉的發現者。1909 年 Ito 氏確認臺灣冷杉應該從變種階級提昇成種之階級，將學名提昇為 *Ab. kawakamii* (Hayata) Ito，成為臺灣特有種(柳楮 1966)。

早在第三紀末晚第三紀初時，全球溫度開始大幅下降，主要氣候帶的境界漸南移，此時分布於歐亞大陸的較高緯度的冷杉開始向南遷移，臺灣冷杉藉由臺閩陸橋通過臺灣海峽擴散到臺灣(向小果等 2006)。臺灣冷杉主要分布於雪山山脈、中央山脈及玉山山脈，海拔約在 3,000 m 左右，以雪山、南湖大山、合歡山、大雪山、玉山、秀姑巒山、關山等為分布地區；其外觀形態特徵為喬木；葉闊線狀，扁平，長 8-22 mm，寬 15-2.0 mm，基部狹，先端稍廣，圓形鈍頭。毬果直立，果鱗扇形，外方有不規則鋸齒，常於海拔 2,800-3,500 m 之陽光強烈乾燥地帶形成純林(呂福原等 2017)。

(二) 臺灣冷杉植群相關研究

自 1908 年 Hayata 發表臺灣冷杉後，關於臺灣冷杉之分布、生育地及形相等相關研究陸續發表出來。有關臺灣冷杉植群研究報告首見於 1922 年佐佐木舜一(Syuniti Sasaki)發表之新高山叢森林植物帶論，對於臺灣進行完整之生態帶報告(陳玉峰 1998)。八谷正義(1937)調查次高山(舊雪山線，即志佳陽線)附近之臺灣冷杉純林，因其多為林木密生環境，地被組成多為耐蔭或相對偏陰的苔蘚、臺灣鬼督郵(*Ainsliaea latifolia* subsp. *henryi*)、大霸尖山酢漿草(*Oxalis acetosella* subsp. *taimoni*)、蕨類等為主，在陽光較多的稜線處偶有玉山圓柏、玉山小蘗(*Berberis morrisonensis*)、玉山杜鵑和巒大花楸等灌木組成，植物組成調查有 43 種維管束植物；依林分構成型態區分成 4 型：

1. 由老齡木級樹木構成 1 段式林冠層.....第 I 型
2. 由老齡木級及壯齡木級(或幼齡木級)樹木構成二段式林冠層
 - A. 下層為壯齡木級，上層為老齡木級，兩者林冠層相接近.....第 II 型
 - B. 下層為幼齡木級，上層為老齡木級，兩者林冠層距離明顯
 - i. 下層的幼齡木級林冠層為單層林.....第 III 型
 - ii. 下層的幼齡木級林冠層非單層林.....第 IV 型

八谷正義(1937)認為這 4 種林分構成類型中的第 III 型和第 IV 型，其臺灣冷杉林應為一部分老齡木枯死倒壞後形成林冠稀疏，稚樹得以生長所造成；雖然第 III 型和第 IV 型的臺灣冷杉幼齡木級林冠層組成不同，構成不同的林貌差異，但第 IV 型幼齡木的樹齡大致相同，推測這些稚樹大約是同時期生長，後經競爭而形成個體間差異。比較老齡木級的存活立木株數發現，第 III 型存有許多老齡木，而第 IV 型則遠比第 III 型來得少；兩類型在原本型態並無差異，只是在稚樹長出後，受到老齡木株數稀疏程度不同，進而影響到稚樹生長，造成林分結構的不同。第 II 型為第 III 型與第 IV 型林分成長後形成的類型，即第 III 型與第 IV 型的幼齡木在老齡木在消退的同時逐漸成長形成壯齡木，而老齡木株數的減少使壯齡木成為林分中主要的構成要素，樹冠亦幾乎生長老齡木的高度；第 II 型林分更進一步生長後，最終會形成第 I 型林分。第 I 型林分為過熟林分，屬於森林移相的末期，更進一步的發展會進入更新期，形成第 III 型或第 IV 型；臺灣冷杉林應此而永久更新，不斷重覆變化其構成型態。

隨後森邦彥(1938a; 1938b)在雪山舊山屋附近(志佳陽線)設置 5 個樣區，樣區面積自 329.44 m²-1,382.40 m² 不等，進行臺灣冷杉族群結構及地被植物群落調查，總計有 25 科、38 屬、40 種植物名錄；柳楨(1961)將南坑溪上游海拔 2,700 m 分為臺灣冷杉與臺灣鐵杉混交林，2,900 m 以上為臺灣冷杉純林；柳楨(1968)處理臺灣植群分類時將臺灣冷杉林歸為亞高山針葉樹林群系，並指出其林相整齊、株間行距一致且幹直，圓錐形樹冠平整，枝下高一一致，是林相整齊之相近同齡林(圖 1)。

賴國祥(1992)於大霸尖山、雪山、大雪山、合歡山、奇萊南峰、八通關、秀姑坪、玉山西峰、鹿林山、七彩湖、關山嶺等地區進行臺灣冷杉與玉山箭竹交會帶(ecotone)之研究，發現火燒(fire)為兩者競爭生育地重要因子之一(圖 2)。基於交通便利因素，臺灣冷杉植群相關研究大多集中在合歡山山區，包括陳榮欽(1995)

於合歡山進行臺灣冷杉樹齡學之研究，結果顯示合歡山區之臺灣冷杉族群更新狀況良好；古心蘭(1998)利用胸高直徑、樹高及樹齡等數據探討冷杉林與草生地交會帶間植群動態結構；莊貴瑜(1998)利用樹木樹輪學來探討合歡山地區臺灣冷杉植群的樹齡齡級結構，並驗證冷杉與箭竹草生地間演替關係。黃凱易&李旻旻(1999)利用遙測與數值地形模型模擬方法研究臺灣冷杉生育地，發現臺灣冷杉對海拔的偏好明顯落在 2,700-3,300 m 之間，而對坡向明顯無偏好，進而提出屏障地形假說(shelter district terrain hypothesis)來解釋此一現象，即在屏障區內臺灣冷杉可以生長在任何坡向。臺灣 3,000 m 以上之生長環境極為嚴苛，凹凖式之局部(微)地形屏障可以改善高海拔嚴苛之生長條件，得讓臺灣冷杉成為生長在最高海拔的喬木，以上說明微地形可能對臺灣冷杉的分布具有一定之影響。



圖 1. 雪山北坡黑森林內之臺灣冷杉純林

廖敏君等(2012)以群團分析及降趨對應分析方法，將雪山地區臺灣冷杉林型地被植群型分為 5 型：1. 臺灣冷杉-臺灣鬼督郵型；2. 臺灣鬼督郵-玉山耳蕨型；3. 玉山當歸-臺灣繡線菊型；4. 玉山箭竹-臺灣鬼督郵型；5. 玉山箭竹-玉山杜鵑型。進一步將分析地被植群與環境關係，發現地被植物多樣性指數與全天光空域



圖 2. 三六九山莊後方臺灣冷杉與玉山箭竹推移帶

呈負相關，顯示臺灣冷杉林下地被植物組成與樣區受到地形遮蔽後光照範圍所影響。此外，廖敏君等(2012)認為林下玉山箭竹具有緻密的地下莖及密度極高的莖稈，是影響臺灣冷杉林下地被物種多樣性及臺灣冷杉天然更新的重要因素。

廖敏君等(2013)在 2009-2010 年間在雪山雪東沿線共設置 7 個 $40 \times 50 \text{ m}^2$ 的臺灣冷杉長期監測樣區，總共記錄臺灣冷杉 802 株，每公頃平均密度約 571 株，族群分布由徑級結構判斷屬於反 J 型分布。然於不同林分層級下，區分鐘型分布、雙峰型分布等類型，呈現冷杉演替階段因不同時期所形成的鑲嵌體。透過靜態生命表分析發現，臺灣冷杉小苗死亡率極高，約只有 10% 小苗得以成長為稚樹，而臺灣冷杉族群小苗受到玉山箭竹與孔隙影響甚大；地被植群若以玉山箭竹為主，不利於冷杉小苗成長；在孔隙較多之林分其小苗數量與枯立木相對較多。曾勝華 & 曾喜育(2016)透過地理資訊系統(ArcGIS)進一步研究雪山雪東線黑森林的臺灣冷杉林孔隙動態，判釋 2001-2013 年等 12 年間的航照影像，劃為兩個年度區間(2001-2009、2009-2013)進行比較，雪山黑森林觀測期內的平均孔隙面積介於 $59.27-105.07 \text{ m}^2$ ，孔隙面積覆蓋率介於 2.79-4.87%，中小型孔隙($<150 \text{ m}^2$) 約佔 90%，顯示黑森林為典型以小尺度干擾為主體的森林。2001-2013 年的孔隙形成率為 0.11%，孔隙鬱閉率 0.28%，孔隙有逐漸轉為鬱閉的現象，冠層轉換時間為 258 年；分析發現，2009-2013 年颱風的平均最大風速、平均最大陣風風速、平均累積雨量均高於 2001-2013 年，並造成較高的孔隙形成率(0.33%)，證實颱風干擾造成的孔隙影響臺灣亞高山冷杉森林的冠層動態變化。

曾勝華(2016)發現雪山黑森林臺灣冷杉孔隙形成原因以幹折比例(49.0%)最高，枯立(34.4%)次之；全區小苗生長至稚樹的存活率於非孔隙 0.58%、小孔隙 3.31%、中孔隙 6.24%、大孔隙 9.12%，證實森林孔隙可以提供臺灣冷杉小苗與稚樹適宜的生長發育環境；在孔隙內部區域調查，發現冷杉小苗於孔隙邊緣的密度高於中央；不同年齡的孔隙，小苗數量並無顯著的差異，但形成時間較久的孔隙才會有稚樹的分布，研究結果提供臺灣冷杉天然更新的重要參考資訊。

(三) 臺灣冷杉生長與變遷相關研究

陳朝圳&王慈憶(2009)發現臺灣冷杉林在 1962-2000 年間在高海拔山區受暖化影響有向上推移之趨勢，而臺灣冷杉分布面積亦有增加之情形。玉山地區臺灣冷杉其擴展面積為 92.01 ha，擴展率為 25.28%，年平均擴展面積為 2.42 ha、年平均擴展率為 0.74%。而合歡山地區之臺灣冷杉分布與玉山地區相同，亦有相同的現象，其擴展面積為 490.11 ha，擴展率為 6.31%，年平均擴展面積為 18.85 ha，年平均擴展率為 0.24%。曾彥倫(2015)針對合歡山地區的冷杉林研究發現臺灣冷杉植群於 1975-2001 年間有擴展的趨勢，擴展率為 0.59%、4.19-9.57%與 2.26-2.46%，顯示臺灣冷杉分布變化受到氣溫的上升有往高海拔地區推移趨勢，而 2001-2008 年間臺灣冷杉死亡之情形產生，結果顯示溫度升高，乾旱持續時間和濕度下降的影響下，造成冷杉死亡率增加。微環境與地形差異使得溪谷與稜線兩地區之林線推移與樹木死亡情形不同，顯示地文環境條件會影響冷杉植群消長的變化。

由於樹輪學利用樹輪來標定其年分並研究分析其物理、空間、時間等，擷取出早期樹木所經歷之歷史訊息，能夠提供長期當地氣候之資訊，樹輪學現在也被應用於環境變遷對林木的影響。陳建璋&詹明勳(2011)於南湖大山審馬陣山屋及南湖東北峰共計採取臺灣冷杉 30 株樹芯，發現樹輪徑向生長與年均溫、主要生長季節夏季溫度有正相關，特別是 6 月份溫度，顯示臺灣冷杉的生長與主要生長季節夏季氣溫有著極大的關係；另外高山地區 3 月份降水量也與生長呈正相關，尤其在生長季節開始的春季降雨有助於樹木生長。溫度與降雨等氣候因子反應在樹木生長上的初步訊息，顯示氣候暖化對於生長於亞高山地區樹種的生長有正向增加效應。但是氣候暖化也可能促成較低海拔樹種往較高海拔遷移，與原生育地的樹種競爭，對原來分布於較高海拔樹種產生影響。

王思皓(2013)分析合歡山臺灣冷杉樹輪學發現，樹輪寬度與穩定氧同位素分

別反映不同季節的氣候資訊。輪寬與生長季日照時數呈現正相關，與降雨呈現負相關。利用臺灣冷杉穩定氧同位素重建合歡山區過去 232 年氣候其解釋變異量分別為生長季溫度 33.1% ($r=0.575$)、降雨變異度 38.4% ($r=0.620$)、降雨 22.9% ($r=-0.479$)以及乾旱指標(Palmer Drought Severity Index, PDSI) 36.7% ($r=-0.606$)。透過重建的資料顯示出臺灣高山環境的氣候在 19 世紀並沒有顯著趨勢變化，直到 20 世紀的降雨顯著下降，溫度、降雨變異度、乾旱的發生頻率與時間長度出現顯著提高。

(四) 林木生長蓄積相關研究

生長蓄積是研究族群結構的重要指標，除了可以了解林分生長狀況，表現環境立地因子之外，也可了解林分中植物物種關係(陳鈺惠等 2010)，顯示森林植群的結構與機能，是森林植群的重要性態值。為瞭解林分中蓄積量，透過取得胸高直徑(diameter at breast height, DBH)、樹高(height)、形數(form factor)等形質資料，材積表(volume table)的建立能夠提供樹木材積的估計。然而材積表又可透過許多方法取得，大致分為圖解法技術(Graphic techniques)、共線圖表法技術(Alignment techniques)，以及最小平方法技術(Least-square techniques) (Spurr 1952；劉慎孝 1970)。

圖解法為最早的使用方法，其透過胸徑級(diameter class)或樹高級(height class)對應材積的散布圖資料，在組間內判釋最接近資料的位置繪製出調和曲線(harmonized-curve，又可稱 free-hand curve)，透過此一曲線對應之材積，來建木材積表；共線圖表法則是將胸高直徑、材積及樹高，分別由三條軸線所表示，所求則將左軸之胸高直徑數值，與右軸樹高數值相連，則會得到中間交會處之材積值(Bruce 1919)。然以上兩種方法都含有其缺點，前者雖不需太多的數理基礎，且方法簡單，唯在繪製時含有主觀成分(Grosenbaugh 1963)；後者繪製圖表技術過於繁重，易受表格尺寸改變，或修正軸線之偏差而導致最後對應的材積值有誤差。

電算技術的進步對於使用數理方法更易於編制材積表，因此關於選擇材積的建立方法的問題，就變成須尋找胸高直徑和樹高為直線關係的材積方程，此可以透過迴歸方程式來分析，即為使用最小平方法所提供顯著性的統計測試來解決，所選擇的考量，要以簡單和準確為目標(Honer 1965)。

最早建立材積式為 Schumacher 及 Hall 於 1933 年設計的對數方程式 (Schumacher formula)，認為體積是與胸高直徑和樹高成其他的指數關係，為使其成直線關係，將各等式取對數，所求則得一條直線方程。

$$V = a_1 D^{b_1} H^{c_1}$$

$$\log V = \log a_1 + b_1 \log D + c_1 \log H$$

V：材積，D：胸高直徑，H：樹高， a_1 、 b_1 、 c_1 ：係數(以下方程式之符號意思相同)。

然而，此種方程式估的標準差並非基於實際值，有必要將其轉換。另外，在材積值的推估上通常會小於實際值(Cunia 1964)。所以，Sperr (1952)指出對數方程式用於材積式比算術方程式更不為精確，並認為聯合式(Combined-variable formula)，為更適合的材積方程式，因為聯合式有最小的標準差。

$$V = a_2 + b_2 D^2 H$$

a_2 、 b_2 ：係數

Newham (1967)針對了原本的聯合式進行修改，將聯合式的胸高直徑與樹高指數替換成經由 Schumacher formula 所得的係數，並以此試測試 11 種物種，再與聯合式比較，發現相對於闊葉木，針葉木在準確度上有些微的改進，且在小徑級的樹木，高估材積的可能性較小。

$$V = a_3 + b_3 D^{b_1} H^{c_1}$$

a_3 、 b_3 ：係數

Honer (1965)指出樹木徑級越大，在體積的變異上就會越大，為了使體積誤差不受制於樹木大小，Honer 將回歸式加權或者轉換數值能讓差異較為一致。其測試了 9 種材積式，並找到以 D^2/V 為依變數， $1/H$ 為自變數之關係方程式，能夠均衡資料範圍內的變異數，最後得出能夠有最好的配適效果。

$$V = D^2 / [a_4 + (b_4/H)]$$

a_4 、 b_4 ：係數

還有將聯合式延伸之材積式，Stoate (1945)以澳洲南方的輻射松(*Pin. radiata*)為樣本，並以斷面積、樹高，和斷面積及高度的乘積設為自變數來求解材積，而得到相當好的配適效果。

$$V = a_5 + b_5 D^2 + c_5 H + d_5 D^2$$

a_5 、 b_5 、 c_5 、 d_5 ：係數

另外還有以 D^2H 為主體的對數方程式，

$$V = a_6(D^2H)^{b_6}$$

a_6 、 b_6 ：係數

綜上所述，根據式子形式，以及求係數解時之方法，可將其分為對數方程式(logarithmic formula)以及算數方程式(arithmetic formula) (Spurr 1952)。

另外，生物量是研究林木生長的方法之一，透過定期的蓄積量調查，可以推估林木蓄積與碳吸存量(carbon storage)，並從差值中獲得林分的淨生產力與淨生產量。生物量的量測方法眾多，在單木層級最普遍也最精確的方式是全木量測—即將全木伐倒，挖出後根系後，直接量測質量(李宣德&馮豐隆 2010)。在林分層級有 5 種主要調查方法(張愷玲 2010)，分述如下；

1. 平均木法(mean tree method)：選取林分中平均木乾重，作為推估依據(劉宣誠&高毓斌 1987；呂錦明&劉哲政 1982)。
2. 皆伐法(all-cutted method)：砍伐林分中所有林木，求取其乾重。
3. 分層平均木法(stratified mean tree method)：從各分層中選取平均木，在由各分層中推算平均木乾重，再將各分層平均木乾重乘上株數後，累加各分層的生物量及獲得林分生物量情形(劉宣誠&高毓斌 1987)。
4. 底面積比率法：選取平均木推算平均木乾重，再將平均木乾重乘上林分中各林木底面積(劉宣誠&高毓斌 1987)。
5. 生長關係式(allometric relationship; alloemetric equation)：採用逢機或分層取樣方式，選取樣木來配置樣木各部位生物量和 DBH 的關係式，求取關係式的參數，再以每木合計法(every-tree summation method)推算單位面積中的生物量。

國內外學者常用生長關係式求取林分生物量，因使用平均木法嚴重低估生物量之事實(劉宣誠&高毓斌 1987; 1988)，理論上以皆伐法，最為接近林地真實值，但過時費時耗力，鮮少學者使用(劉宣誠&高毓斌 1987)。現今研究以非破壞性的生長關係式為主要生物量推估方法(顏添明等 2008；李宣德&馮豐隆 2008；劉知好&王兆桓 2008；王亞男等 2011)。

生物量推估運用層面廣泛，李宣德&馮豐隆(2008)結合林分生物量與地面調查資料，推估臺灣樟樹國有林班人工林約有 7,722.66 ha，每公頃主幹生物量約 69.86 tons ha⁻¹，含碳量約 32.84 tons ha⁻¹；每公頃全株生物量平均約 92.52 tons ha⁻¹，含碳量約 43.48 tons ha⁻¹，碳量年增長率約為 6%。劉知妤&王兆桓(2008)應用林務局森林資源調查及永久樣區的資料，以林齡為基礎，發展各區域柳杉(*Cryptomeria japonica*)及檜木(*Chamaecyparis* spp.)人工林的蓄積量模式，並推估各林齡的森林蓄積量，進一步求得各林齡之生長率與碳吸存量。結果顯示從 1995-2005 年，以國內轉換係數去估算柳杉林型年平均的碳吸存量為 95.85×10³ Mg (1 Mg = 106 g:公噸)，檜木則為 52.64×10³ Mg；亦即柳杉林型平均每公頃一年的碳吸存量為 2.07 Mg ha⁻¹ y⁻¹，檜木林型則為 2.10 Mg ha⁻¹ y⁻¹。

王亞男等(2011)以臺大實驗林溪頭營林區觀音樹湖以及溪頭湖柳杉人工林生長量之歷年調查成果，分析其生長模式並探討在長輪伐期經營下的材積生長趨勢。結果顯示，最大材積收穫輪伐期分別為林齡 39 年及 55 年。由林分結構及歷年株數與每公頃胸高斷面積總和得知，林分密度會因自我疏伐而下降，但林分仍維持相當的鬱閉狀態。當林分逐漸進入衰老期且蓄積逐漸往大徑木集中時，老齡林枯損則會顯著影響林分蓄積量的變化，因此老齡林經營對於永續的森林資源利用有關鍵性影響。謝漢欽等(2011)應用福衛二號光譜輻射常態化後的土壤調整植生指標(SAVI)，對總面積達 168 ha 的光蠟樹(*Fraxinus griffithii*)純林區塊進行 SAVI 分級，參酌 SAVI 分級分布圖，以分層目的取樣法，計算樣區光蠟樹的蓄積量，估計平均每 ha 光蠟林蓄積量為 16.93 ± 1.16m³/ha，平均每 ha 吸存的碳量為 7.55 ± 0.52 ton/ha，全區的光蠟林總碳吸存量為 1,276.40 ± 87.28 ton。

早期對冷杉屬生長蓄積的研究主要以生物量做生產量推估，Fujimori *et al.* (1976)在美國俄勒岡州和華盛頓州針對 *Ab. amabilis* 林分進行研究，得到地上部生物量為 882 t/ha，而生產量為 17.5 t/ha，Grier *et al.* (1981)利用破壞性測量的方式，量測 23 年生與 180 年生的 *Ab. amabilis*，估算出幼齡林的生物量為 427.0 t/ha，每年有 18.3 t/ha 的淨初生產量(Net primary production, NPP)，成熟林的生物量為 1,247.1 t/ha，每年有 16.8 t/ha 的淨出生產量。Westman (1987)針對美國加州紅杉國家森林公園的 2 種冷杉屬喬木 *Ab. smagnified* 與 *Ab. concolor* 林分進行調查，比較其它研究後發現 *Ab. concolor* 在美國冷杉林中具有最高的生產力，且在分布海拔較高的 *Ab. smagnified* 生產量與植株高度較低。

因臺灣冷杉以生態保育為主低密度經營之因素，生產收獲的相關研究較少；臺灣冷杉的材積式建構於民國 52 年，由楊寶霖&石子材(1963)對臺灣東部的木瓜山、林田山等國有林地的冷杉林型所建，透過地面調查測量臺灣冷杉樹高、胸高直徑，利用望遠鏡量測其 5.3 m 處直徑與人為判釋形狀級，帶入針葉樹材積式進行單株立木材積評估；進而量測臺灣冷杉投影樹冠直徑，依垂直方向測定兩次平均以對應航空照片。最後利用航空照片判釋林分樹冠林分密度，視差法量測樹高，樹冠直徑則由微量測徑尺其最小單位為 2.5 m，作為臺灣冷杉林地的材積量蓄積估計。該林分之材積量，林分材積式如下：

$$\log Vf=1.270637+0.146572\log CD+0.900951\log H$$

式中 Vf 為材積；CD 為樹冠直徑；H 為樹高

葉楷勳(1973)以地面樣區取樣所得林木材積來推估臺灣冷杉與臺灣雲杉之材積式，此材積式運用於第 3 次及第 4 次森林資源調查的冷杉林型蓄積量推算，是為目前臺灣冷杉蓄積推估所採用的材積式：

$$V = 0.0001136D^{1.71018}H^{0.97120}$$

式中 V 為材積；D 為胸徑，H 為樹高

在第 4 次森林資源調查，調查到全國臺灣冷杉林總面積為 27,877 ha，總蓄積量達 $1,049 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，為全臺針葉樹林型中蓄積量排名第 5 的林型(林務局 2018)。

(五) 臺灣冷杉菌根菌研究

菌根(mycorrhiza)一詞由 Frank 於 1885 年所提出，是植物與真菌的共生關係(Mikola 1970; Meyer 1973; Trappe 2004)，依共生方式分為內生菌根(endomycorrhiza, EDM)及外生菌根(ectomycorrhiza, ECM)兩種型態(Pryor *et al.*, 1969)。內生菌根之主要特徵在其菌絲會進入植物細胞內，以菌絲捲(hyphal coil)或叢枝(arbuscule)構造等方式與植物細胞有較緊密之接觸(吳繼光&林素禎 1998)。ECM 由真菌菌絲體包圍宿主植物尚未木栓化之營養根所形成，並於表面形成一層由菌絲體緊密交織而成的菌毯(mantle)，此外，部分菌絲會進入到皮層細胞壁之間，延伸生長後形成類似網格狀之結構，稱為哈替式網 (Hartig nets)(高嘉鴻 2005)。

菌根對於植物生長、抗病蟲害或是逆境具有相當程度的效益(林子超 2009)，如叢枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)是內生菌根的一個類群，對磷有較高的吸收能力，可協助植物適應低有效磷的環境(Read 1991)，或是特定外生菌根菌

(ectomycorrhizal fungi, ECMF)的接種可增加植物對土壤重金屬的忍受能力(陳庭筠 2012),在苗木的接種試驗中也顯著促進了植物的生長狀況(朱君逸&李明仁 2004; 許崑衍&李明仁 2005)。

菌根真菌對其宿主(host)和土壤性質有選擇上的差別,宿主的挑選上,在科的層級,ECMF 幾可與殼斗科(Fagaceae)、松科、樺木科(Betulaceae)及楊柳科(Salicaceae)的多數植物共生,其他科的植物則僅有部分的屬會與之形成菌根(Meyer 1973)。土壤性質上,ECMF 多偏好腐植層(Meyer 1973; Baier *et al.* 2006)、有機酸含量較高、碳氮比 40-80 及 pH 介於 4.2-5.4 之土壤(Read 1991); 內生菌根菌(endomycorrhizal fungi, EDMF)則以草本植物為主要共生對象(Read 1991),如常見的經濟作物小麥、玉米等都包含於其中(Paul & Clark 1996),EDMF 以腐植層薄、有機酸較低、碳氮比 30-40 及 pH > 4.5 之土壤為主要分佈(Read 1991)。

另外, Meyer(1973)也指出刺柏屬(*Juniperus*)、柏木屬(*Cupressus*)、柳樹屬(*Salix*)、蘋果屬(*Malus*)、梨屬(*Pyrus*)、椴樹屬(*Tilia*)、桉樹屬(*Eucalyptus*)、漿果鵝屬(*Arbutus*)的植物可同時與 ECMF 及 EDMF 進行共生,由此可知,如果要了解菌根對一種植物的影響時,同時都要對兩者進行觀察,才能夠較為全面地了解不同菌根與植物之間所產生的互動。

Becklin *et al.*(2012)在美國洛磯山脈 Pennsylvania 山區的 krummholz-草地推移帶進行試驗,該地以灰藍柳(*Salix glauca*)及短果柳(*Sa. brachycarpa*)兩種柳樹為優勢,這些生長在高山上的柳樹屬植物在高山(alpine)及亞高山(subalpine)地區扮演重要的角色,會左右著周圍植物群落的分佈(Amy & Galen, 2007),同時也是與 ECMF 共生的主要樹種,他們將柳樹的枯落物移到開放的草地上,兩年的試驗下來,枯落物的沉積使 AM 的共生比率下降,同時 AM 和 ECM 的分佈也發生改變,這樣的變化改變其宿主對這些棲息地的適應性,進而影響推移帶的變動。

Neville 等人(2002)以一種可同時與內外生菌根菌共生的廣泛性分佈之顫楊(*Populus tremuloides*)為材料(Vozzo & HacsKaylo 1974),瞭解內外生菌根在同一個植株的根系內如何同時共存,發現內外生菌根在不同深度上其共生比率不同,這樣的差異來自於土壤性質(Read 1991; Baier *et al.* 2006),ECM 在有機酸較高之淺層土壤豐度較高,與深度呈負相關;AM 則呈相反趨勢,在較深的礦質土層擁有較高豐度,而中間的土層則是兩者的交會帶,是物種多樣性最高的地方。

枯落物的累積會改變土壤中的養分循環，ECMF 被認為能夠更好地降解有機物，對植物而言可以視為一種氮源的提供(Read & Perez-Moreno 2003)，而養分循環的改變會造成宿主對養分需求的轉變，進而形成一種枯落物對 ECMF 造成的一種正回饋；反之，若對枯落物的移除，也會有類似的正回饋發生在叢枝菌根菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)身上(Becklin *et al.* 2012)。這可以解釋在部分的研究中(Paul & Clark 1996)發現枯落物的累積常伴隨著 ECMF 的共生比率增加的情況。總結來說，森林的枯落物較多且容易累積，使得 ECMF 容易在森林表土與其特定宿主樹木形成共生；草原則相反，多以 EDMF 與草本植物共生為主。

高明脩(2011)調查臺灣亞高山地區臺灣鐵杉林與臺灣冷杉林交界帶混合林的外生菌根真菌多樣性，共調查到 42 個形態種，鑑定出 21 種，其餘 21 個形態種鑑定至屬。其中臺灣冷杉的外生菌根真菌有 20 種，且外生菌根真菌物種數及豐富度與宿主植物胸徑級呈正相關。顏江河(2012)研究雪山外生菌根林地土壤滲漏水陰、陽離子養分狀況結果發現，不論天然降雨或模擬降雨，有菌根土壤的陰陽離子養分濃度皆高於裸土壤的陰陽離子養分濃度，其表示菌根共生能有效吸收各種離子養分，對於土壤的養分流動具有攔截養分之作用，減少養分漏失，以提供此高山土壤養分缺乏的環境下，植物能適應生存之條件。

在高海拔嚴苛的環境下，菌根的共生對植物而言是一種重要的機制(林子超 2009)，且在這種礦化速度緩慢的地區植物會去選擇與適合的真菌進行共生，來獲得營養元素(Read & Perez-Moreno 2003)。菌根是一種植物與真菌的共生關係(Mikola 1970)，冷杉屬(*Abies*)的植物是個與外生菌根菌關係密切的類群，甚至有共同演化的趨勢(Oros-Ortega *et al.* 2017)，這也代表菌根在冷杉的生活史上可能扮演重要的角色；玉山箭竹則以內生菌根菌為主要共生對象。樹木的小苗於推移帶的存活率對於其在森林-草原推移帶的競爭中具有一定程度之重要性，主要影響因子包括了積雪深度、積雪期、競爭植被等(Germino 2002; Ferrar 1988)，這些因子是較容易被觀察到的，然菌根在推移帶的角色較少被探討，目前實驗多針對小苗在推移帶的存活率(Christopher & Shankman 1985; Ferrar 1988)，或是菌根對小苗的生長效益，因此本研究希望藉由在草生地-推移帶-森林下的一年生冷杉小苗分佈與菌根的共生狀況來了解菌根在冷杉的推移帶中可能扮演的角色。

(六) 高山植物物候

植物物候能及時反映陸地生態系統對氣候變化的動態適應過程，其現象可作

為氣候變化的生態指標(ecological indicators)；反過來說，氣候變化可以透過植物物候的年變化(如展落葉、開花時間)進行監測(Walther *et al.* 2002; Root *et al.* 2003; Rosenzweig *et al.* 2007; 李小豔等 2009; 潘振彰等 2013; 曾喜育等 2014)。物候變化是全球氣候變遷最重要而直接的獨立證據，致使物候學研究近年來逐漸被重視(Walther *et al.* 2002; Root *et al.* 2003; Rosenzweig *et al.* 2007; Cleland *et al.* 2007)。近年氣候變遷(climatic change)造成氣溫上升，高山和兩極地區所受影響最大(Körner 2003)。眾多的高山植物種類經過長期的適應進化形成了獨特的生命形式，形成的植物群落多樣性對維繫高山生態系統的穩定性起到了重要的作用(Körner 2003)事實上，氣候變遷影響高山植群的物種組成和群落結構，對高山生物多樣性的既有正面也有負面影響；一方面，溫度的升高可以導致更多的低地或低海拔的物種向高海拔區域遷移，從而在某種程度上增加了高海拔區域內物種多樣性。另一方面，氣候變暖使得土壤營養狀況發生改變，導致土壤有機質、有效性氮等營養成分增加，降低環境的限制因子，使得原先無法生存於高山區域的物種進入高山。而原先適應高山貧瘠環境的植物在物種入侵後，無法與其競爭，最終導致高山原生種或特有種的消失(Körner 2003)。此外，氣候變暖導致植物生長最適界的散失和破碎化，也是引起高山植物滅絕或被其它物種取代的主要因素之一(Thuiller *et al.* 2005)。氣候變遷對植物的影響最先反應在植物物候上，這種影響在極地和高山生態系中尤為突出和重要(陳建國等 2011)。

大多數物候研究結果顯示，植物物候變化主要受到氣溫影響(Walther *et al.* 2002; Root *et al.* 2003; Aono *et al.* 2008; Ghelardini *et al.* 2010; Kreyling 2010; Toledo *et al.* 2011)。Ram *et al.* (1988)在喜馬拉雅山中部地區(3,250-4,200 m)的研究中發現，植物生長季的開始與春季的氣溫密切相關，而在生長季末期，控制生長季結束的主要因素是為光週期，其次才為溫度(Körner 2003)。在高山生態系中，有一群具有休眠機制的物種，如百合科(Liliaceae)的百合屬(*Lilium*)、鹿藥屬(*Maianthemum*)、續斷科(Dipsacaceae)的山蘿蔔屬(*Scabiosa*)等，這些物種為打破休眠，會對溫度更加敏感，其生長季的調控主要取決於降雪出現的規律性(Körner 2003)。高海拔與高緯度生態系統對溫度升高的反應可能更加敏感而迅速(Grabherr *et al.* 1994; Pauli *et al.* 1996; Suzuki & Kudo 1997)。在極地與高山地區，低溫和短暫生長季是植物生長發育的兩個重要限制因子。升溫可能延長植物生長季，刺激高山地區物種營養生長；植物提早展葉可能有利於資源利用，隨葉片的展開，淨光合作用速率隨之增加，有利於乾物質累積與植物生長(Suzuki & Kudo 1997;

Loik *et al.* 2000; Wada *et al.* 2002)。在高山地區，受到低溫及短暫生長季節影響，植群之物種組成開花多集中在夏季較溫暖的季節，開花時序多呈單峰分布(邦卡兒-海放南 2007；李向前等 2009；曾喜育等 2014)。受到海拔上升、溫度遞減的影響，對大多數廣泛分布的植物而言，愈高海拔將愈晚開花，花期持續長度亦較短(吳佳穎等 2013；曾喜育等 2014；曾彥學&曾喜育 2016)。開花物候不僅是植物重要生活史特徵之一，亦是植物繁殖生態學研究的重要領域，開花物候研究一般涉及植物開花時間、開花峰值期和開花持續時間等(劉志民等 2006)。物種間的開花時間、開花峰值期和開花持續時間的差異會影響植物社會的組成、結構、功能和多樣性(Fenner 1998; 劉志民等 2006)；植物社會物種組成間的開花時序與模式特性是生態學研究的重點之一(Kochmer & Handel 1986; Inouye *et al.* 2003)。

(七) 物種分布模擬

物種分布模擬(species distribution modeling, SDM)係利用物種與環境間之關係(species-environment relationship)的量化，來對生物調查資料進行空間推估(Franklin 2009)。SDM 可藉由其 3 項要素—物種出現點、環境預測變數、連結二者關係之演算模擬方法(Moudrý & Šimová 2012; Sangermano & Eastman 2012)來建構物種與環境之關係，藉以模擬物種之可能分布，並可投射至不同的時間及空間(Guisan & Zimmermann 2000; Elith & Leathwick 2009b; Franklin 2010; Peterson *et al.* 2011)，其應用範疇包括氣候變遷影響、生態理論研究、外來種入侵評估、保育計畫擬定等多種目的(Guisan & Thuiller 2005; Hirzel & Le Lay 2008; Elith & Leathwick 2009a; Gallien *et al.* 2012; Forester *et al.* 2013)。郭嘉宜(2015)探討氣候變遷對臺灣水青岡(*Fagus hayatae*)之影響，發現隨著氣候暖化，臺灣水青岡適合生育地隨之壓縮變小，以分布機率分級來看，當溫度上升 1.5°C 後，阿玉山與烏嘴山潛在分布完全消失；溫度上升 2.0°C 後，大白山、蘭炭山、北插天山分布機率高的生育地面積消失。若未來溫度上升 0.5-2.0°C，臺灣水青岡森林在雪山山脈之潛在分布減少，退縮至塔曼山、巴博庫魯山海拔較高之山頂，而銅山地區的臺灣水青岡森林有往望洋山一帶遷徙的趨勢。

四、研究地區環境概況

本計畫調查地點在雪山雪東線步道沿線(圖 3)，主要重點調查研究區域為 3,000 m 以上。由登山口(2,150 m)，經七卡山莊(2,500 m)、哭坡(2,900 m)、雪山東峰(3,201 m)、三六九山莊(3,100 m)至雪山主峰(海拔 3,886 m)。研究區環境概況描述如下：

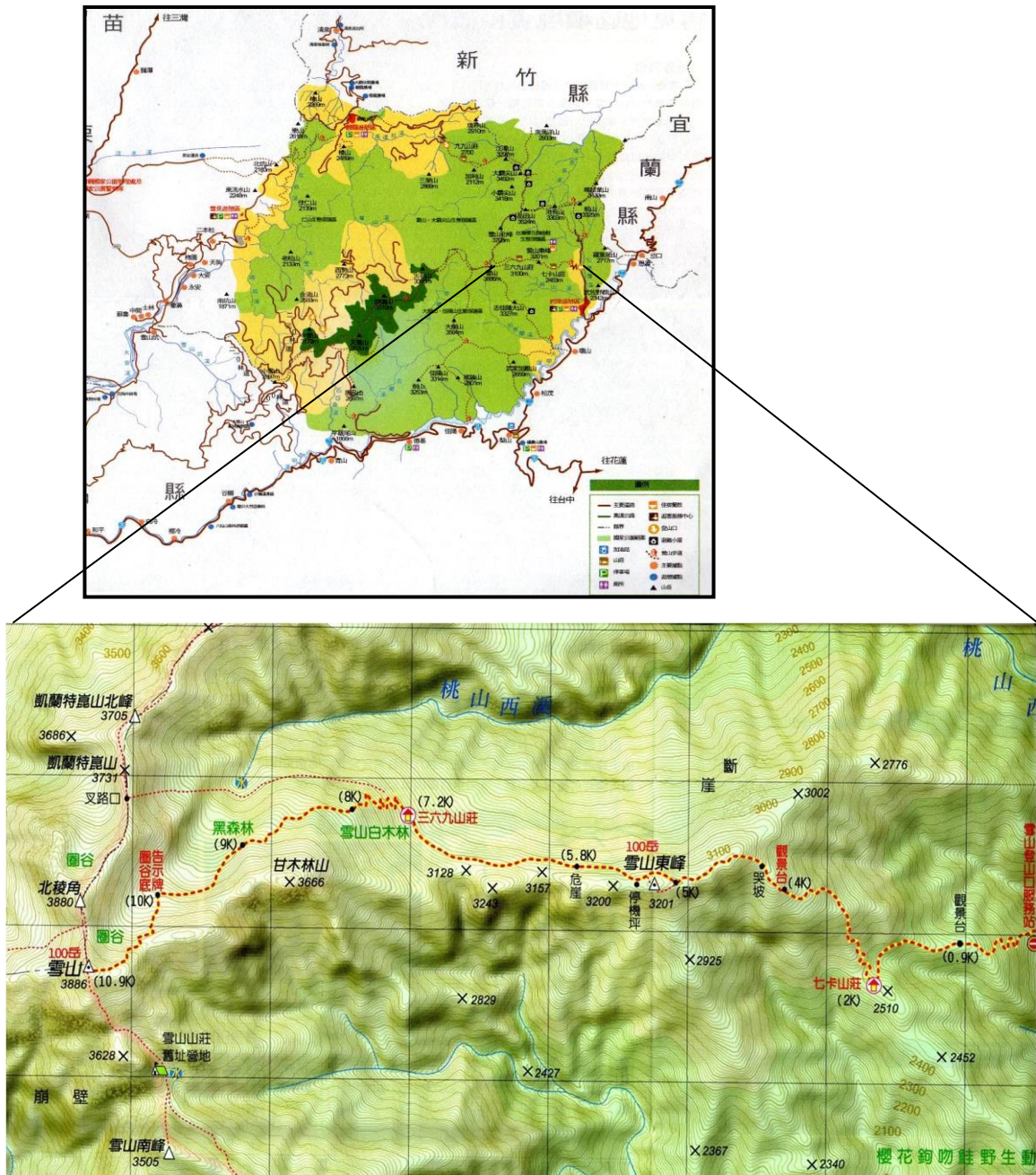


圖 3. 本計畫研究地區範圍圖

(一) 地形、地質與土壤

由武陵農場至雪山主峰的水平距離約 8,000 m 內爬升近 2,000 m，沿線多條溪谷貫穿，多懸崖、峭壁、險坡等自然景緻，區內邊坡陡峻，岩層破碎，加以凍裂等高山風化作用盛行，易崩與既崩的高敏感邊坡甚為普遍。圈谷是研究區非常重要的地形景觀之一，雪山地區有多達 35 個圈谷，圈谷是一開口向下坡，背後為極陡上坡的圓弧地形，日本學者鹿野忠雄博士為臺灣高山冰河的最早發現者(楊建夫 1999)。其中 1 號圈谷為臺灣最大的圈谷，位於雪山主峰的東北面，為雪山雪東線步道必經之路。

研究區內的地質屬於中央山脈地質區的西部亞區中的雪山山脈帶，由第三紀的亞變質岩所組成，地質帶中以深灰色的硬頁岩和板岩為主(何春蓀 1986)。高山土壤約可分成 2 種情況，在森林界限以上的地區，多為粘板岩風化而成的岩海地區，土壤淺薄，多為岩礫構成，而在森林地區或高山草原區，其土壤多以壤土、腐植土為主，其結合、含水量均適當，但在地形陡，表土層淺薄，多構成瘠土(應紹舜 1976)。顏江河(2009)於七卡、哭坡、火燒地、黑森林與圈谷等 5 個地區土壤研究發現，土壤皆呈極酸性，土壤 pH 隨土層深度增加而增高之趨勢。土壤中有機碳越向下層含量越低。土壤有效磷隨土壤深度上升而下降且呈現明顯缺乏現象；土壤陽離子置換能量(C.E.C.)高，但置換性鈉、鈣、鎂很低。土壤含石率以哭坡箭竹草生地(16.01%)與圈谷(17.75%)最高，七卡土壤總含石率僅 2.33%。土壤總含根量以圈谷 0.27 kg/m^3 (40 cm 土深)最低，七卡土壤總含根量 1.63 kg/cm^3 最高，黑森林 1.16 kg/cm^3 次之，哭坡與火燒地幾乎一樣，各為 0.74 與 0.75 kg/cm^3 。

(二) 氣候

雪山地區依陳正祥(1957)的臺灣氣候分類，研究區屬於寒帶重濕氣候(AC')，溫度低而濕度高，冬季有霧雪。此類又可分成 2 型：

AC'1ra'：冷而多溼，海拔 3,000 m 以上，僅只於玉山、雪山等山峰及其附近，冬寒，有積雪。

AC'2ra'：涼而多濕，全年不缺水，分布海拔 2,000 m 以上。

(三) 雪山主峰線山地植群帶

依 Su(1984)、邱清安(2006)海拔高度帶、植群帶與氣候帶之分類(表 1)，雪山主峰線植群依海拔高度劃分成 3,600 m 以上的高山植群帶(Alpine vegetation)、

3,100-3,600 m 的冷杉林帶(*Abies forest zone*)、2,500~3,100 m 的鐵杉雲杉林帶(*Tsuga-Picea forest zone*)與 1,800~2,500 m 的櫟林帶上層(Upper *Quercus forest zone*)。高山植群帶分布範圍為圈谷，主要以玉山圓柏、玉山杜鵑為優勢的矮盤灌叢，灌叢間或下間雜有冬枯或常綠的玉山薔薇(*Rosa sericea var. morrisonensis*)、玉山小蘗、玉山白珠樹(*Gaultheria itoana*)、雪山翻白草(*Potentilla tugitakensis*)、玉山當歸(*Angelica morrisonicola*)、高山艾(*Artemisia oligocarpa*)、羊茅(*Festuca ovina*)、曲芒髮草(*Deschampsia flexuosa*)等(王偉等 2010)。

冷杉林帶為臺灣冷杉最優勢，以黑森林最為典型，黑森林近圈谷附近有較多的玉山圓柏與臺灣冷杉混生，生活型為喬木型；林下優勢地被植物可大致分成 2 型，一型以玉山箭竹為近單一優勢地被，另一型為以苔蘚、蕨類、鬼督郵屬(*Ainsliaea*)、裂葉樓梯草(*Elatostema trilobulatum*)等較優勢，間雜臺灣茶藨子(*Ribes formosanum*)、玉山女貞(*Ligustrum morrisonense*)等灌木(廖敏君等 2012)。冷杉林帶常因火燒造成玉山箭竹或高山芒優勢的草原景觀，此等草原植物社會與臺灣冷杉形成動態推移，並存有巒大花楸、褐毛柳(*Sa. fulvopubescens var. fulvopubescens*)等小喬木組成之闊葉樹優勢之植物社會，下層數量較豐的灌木及草本組成尚有臺灣茶藨子(*Ribes formosanum*)、玉山小蘗、川上氏忍冬(*Lonicera kawakamii*)、高山芒、黃苑(*Senecio nemorensis*)、假繡線菊(*Spiraea hayatana*)等(王偉等 2010)。以上區域為本計畫主要重點調查研究範圍。

表 1. 本計畫研究地區範圍圖

雪山沿線 相對位置	Altitude zone 高度帶	Alt. (m) 海拔高度	Vegetatoin zone 植群帶	Dominant Taxa 優勢分類群	Tm(°C) 年均溫	Equivalent Climate 相當氣候帶
圈谷	Alpine 高山帶	>3,600	Alpine vetetation 高山植群帶	玉山圓柏 玉山杜鵑	<5	Subarctic 亞寒帶
東峰~黑森林		3,100~3,600	<i>Abies zone</i> 冷杉林帶	臺灣冷杉 玉山箭竹 高山芒	5-8	Cold-temperate 冷溫帶
七卡~東峰	Subalpine 亞高山帶	2,500~3,100	<i>Tsuga-Picea</i> zone 鐵杉雲杉林帶	臺灣鐵杉		
登山口~七卡	Upper montane 上層山地	1,800~2,500	Upper <i>Quercus</i> zone 櫟林帶上層	臺灣二葉松 高山櫟	8-11	Cool-temperate 涼溫帶
七家灣溪	中層山地	1,200~1,800	Under <i>Quercus</i> zone 櫟林帶下層	臺灣赤楊 新木薑子屬 臺灣黃杉 臺灣二葉松	11-14	Warm-temperate 暖溫帶

五、研究方法

本計畫期程為 2017 年至 2019 年，分 3 個年度進行，各年度工作項目如下：

(一) 第一年(2017 年)：

1. 完成長期監測樣區維護與複查。
2. 臺灣冷杉風倒木圓盤及木材性質試材取樣。
3. 臺灣冷杉物候調查。

(二) 第二年(2018 年)：

1. 完成臺灣冷杉單木樹幹解析、生長曲線、材積與生物量推估。
2. 完成長期監測樣區地被複查。
3. 完成臺灣冷杉樣區材積生長推估。
4. 建立臺灣冷杉林緣的推移帶樣帶，並完成植群調查。
5. 臺灣冷杉物候調查。

(三) 第三年(2019 年)：

1. 以物種分布模擬評估氣候變遷對臺灣冷杉分布之影響。
2. 探討臺灣冷杉種子苗更新狀態以及臺灣冷杉共生菌根菌的影響。
3. 結合長期監測樣區資料與單木材積、生物量之研究成果，推估雪山地區臺灣冷杉林地上部單位面積蓄積量、生物量並配合航照圖判識，估算雪山地區臺灣冷杉林的總生物量以及碳儲存量、碳吸存量。
4. 臺灣冷杉物候調查。

茲將各工作項目的研究方法分述如下：

(一) 臺灣冷杉長期監測樣區複查

雪霸國家公園管理處於 2008 年設置 7 個臺灣冷杉長期監測樣區(圖 4)，每樣區為 40 m × 50 m。至今相隔 10 年樣區邊界可能損壞之情形。因此本年度針對樣區內之樣木複查，調查項目包括：植物種類、胸高直徑、樹高、相對位置，並進行資料分析，藉以瞭解臺灣冷杉族群生長之情形。

地被層則在樣區中進行 2 條寬 10 m 的樣帶複查(圖 5)，記錄地被的覆蓋度，包括草本、灌木，及樹高小於 1.3 m 或胸高直徑小於 1 cm 的木本植物，並計數木本植物小苗。分析地被組成透過重要值(Important value index, IV)呈現各物種在樣

區中的重要程度，並進一步將地被資料分群。

另將資料與廖敏君(2016)於 2008 年調查的臺灣冷杉小苗資料比對，製作靜態生命表及繪製生存曲線，比較 10 年間臺灣冷杉之更新狀況。

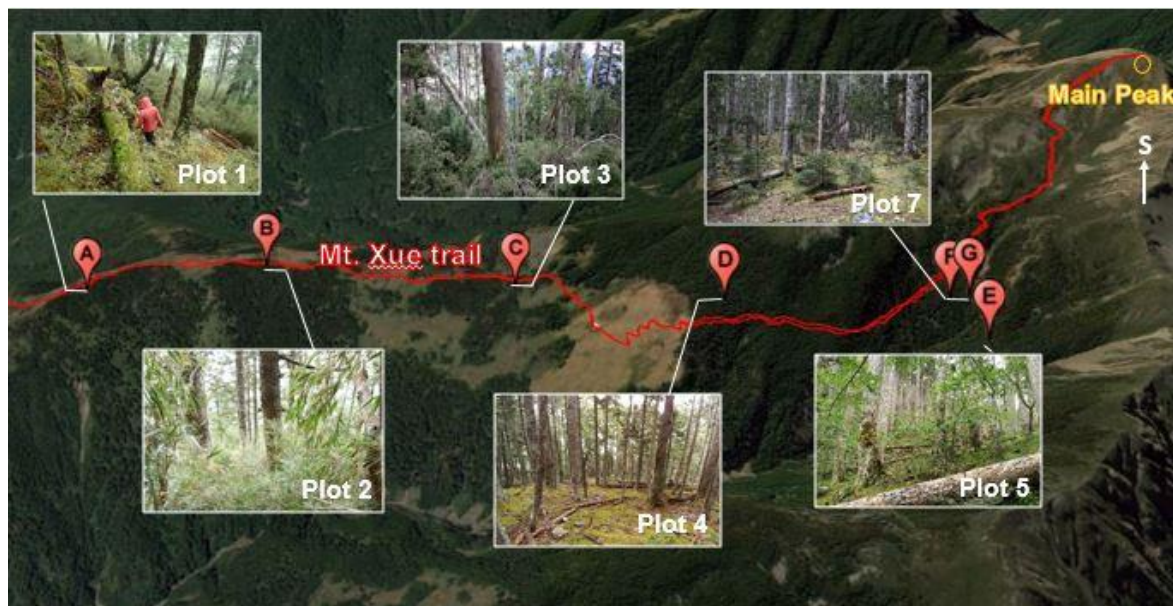


圖 4. 臺灣冷杉長期監測樣位置圖

1-4	2-4	3-4	4-4	5-4
1-3	2-3	3-3	4-3	5-3
1-2	2-2	3-2	4-2	5-2
1-1	2-1	3-1	4-1	5-1

圖 5. 臺灣冷杉長期監測樣區示意圖(灰色區域為地被調查樣帶)

(二) 臺灣冷杉風倒木現勘及圓盤取樣工作

1. 現地勘查

由於臺灣冷杉圓盤屬森林林產物，需經林業主管機關林務局及東勢林區管理處同意方可取出；經多次溝通協調，研究團隊於(106)年 6 月 27-30 日與東勢林管處梨山工作站廖學儀技士、王思皓技士等人前往現勘，現場確認樣木位置、尺寸等基本資料(圖 6)。原定申請公文係取 17 個樣株，然因現勘後發現部分樣木倒木位置、坡度，工作人員不易到達樣木位置(圖 7)，基於安全考量有更換樣木之必要(表 2)，刪去步道 6.5-6.8K 地區 3 棵、雪山水源地 4 棵，並新增雪山水源地 3 棵、步道 8.4-9.0K 地區 4 棵臺灣冷杉風倒木。



圖 6. 與東勢林區管理處工作人員現勘風倒木工作照



圖 7. 水源地 0.5K 處之倒木取樣上受地形及位置限制

表 2. 臺灣冷杉風倒木樣株選定及分析方法表

編號	胸徑 (cm)	樹高 (m)	地點	海拔 (m)	1.3 m 圓盤	樹幹解析	木材性質	取樣樣木	無法取樣原因
1	72.0	24.98	主峰線 8.4-9.0K	3,417	✓			✓	
2	36.5	21.75	主峰線 8.4-9.0K	3,415	✓			✓	
3	58.0	24.8	主峰線 8.4-9.0K	3,398					過於接近 步道
4	87.0	27.0	主峰線 8.4-9.0K	3,398					過於接近 步道
5	75.0	25.0	主峰線 8.4-9.0K	3,407	✓	✓	✓	✓	
6	83.0	22.2	主峰線 8.4-9.0K	3,411	✓	✓		✓	
7	48.0	21.1	水源地 0.5-0.9K	3,254					安全疑慮
8	56.0	19.7	水源地 0.5-0.9K	3,254					安全疑慮
9	37.7	17.7	水源地 0.5-0.9K	3,258	✓	✓		✓	
10	53.4	21.0	水源地 0.5-0.9K	3,258					安全疑慮
11	70.5	25.3	水源地 0.5-0.9K	3,266	✓	✓	✓	✓	
12	51.2	23.9	水源地 0.5-0.9K	3,271	✓	✓		✓	
13	80.0	26.0	主峰線 6.5-6.8K	3,189					安全疑慮
14	80.0	26.0	主峰線 6.5-6.8K	3,189	✓			✓	
15	60.0	24.0	主峰線 6.5-6.8K	3,189					安全疑慮
16	50.0	23.0	主峰線 6.5-6.8K	3,189					安全疑慮
17	46.0	22.0	主峰線 6.5-6.8K	3,189	✓			✓	
18	85.0	26.0	水源地 0.5-0.9K	3,254					安全疑慮
19	46.0	23.3	主峰線 8.4-9.0K	3,398	✓	✓		✓	
20	55.0	24.3	主峰線 8.4-9.0K	3,398	✓			✓	
21	51.0	22.8	主峰線 8.4-9.0K	3,411	✓			✓	
22	32.5	19.5	主峰線 8.4-9.0K	3,411	✓	✓		✓	
23	51.4	20.4	主峰線 8.4-9.0K	3,411	✓	✓	✓	✓	
24	39.5	23.0	主峰線 8.4-9.0K	3,398	✓			✓	
25	59.4	30.4	水源地 0.5-0.9K	3,266	✓	✓		✓	
26	80.0	35.8	水源地 0.5-0.9K	3,266	✓			✓	
27	50.7	27.7	水源地 0.5-0.9K	3,266	✓			✓	

本計畫於 2017 年 9 月進行臺灣冷杉樹幹及枝條等圓盤樣本的取樣，分別於 2017 年 9 月 4 日至 7 日、9 月 29 日至 10 月 2 日、11 月 16 日至 20 日、12 月 8 日至 11 日、2018 年 5 月 25 日至 28 日、8 月 6 日至 9 日進行取樣作業。因試驗地位處雪山 3,000 m 以上高山，樣區可及性與樣木試杉取樣不易，加上 2017 年颱風侵臺數量頻繁，致使臺灣冷杉圓盤及試杉取樣過程不順利，因此向林務局東勢林

區管理處申請同意臺灣冷杉圓盤試材取樣時間同意展延至 2017 年 11 月 2 日。本案僅能依賴人力背負方式運送材料，取樣過程受到展延期間天候不佳及委託布農卡里布灣企業社因人力調派問題，仍無法及時於核定展延期間內將試材取出，是故申請圓盤樣本試材取樣時間二次展延至 2017 年 12 月 31 日止。2017 年 12 月 8 日至 11 日調查遇雪(圖 8)，顧及天氣狀況與安全考量，為當年最後一次調查，因而另行向林務局東勢林區管理處提出申請(附錄二)，取樣及搬運日期延展至 2018 年 12 月 31 日。今(2018)年已於 8 月 6 日至 8 日將全數材料取樣完畢。



圖 8. 2017 年 12 月 10 日臺灣冷杉取樣狀況

2. 設置解說牌

基於樹木圓盤取樣需使用鏈鋸等工具，為減少登山遊客誤解，以及提供民眾生態保育及正確林業觀念，計畫執行期間設置解說牌 3 面(圖 9)，分別設置於步道 6.5-6.8K、雪山水源地樣木 11、12 位置處以及步道 8.4-9.0K 風倒木位置，以作為本計畫目標宣導和解說教育之用。

計畫名稱：雪山臺灣冷杉更新與物候調查

合作單位：國立中興大學森林學系

雪霸國家公園管理處

東勢林區管理處

執行期間：2017 年 5 月 2019 年 12 月

計畫目標：本試驗為了解氣候變遷下的雪山地區臺灣冷杉之物候、更新、生長、蓄積與健康的評估；其中，預計採取 2015 年強烈颱風蘇迪勒造成的臺灣冷杉風倒木的圓盤作為試驗材料，建立臺灣冷杉木材性質特性、單木材積與生物量，並整合臺灣冷杉林長期樣區資料，推估雪山地區臺灣冷杉之林分材積生長、蓄積、碳儲存量與每年碳吸存量。

溫馨提醒：臺灣冷杉試材取樣後剩餘放置林內之原木屬國有林產物，請勿徑自採取或攜帶下山，以免觸法。

聯絡電話：國立中興大學森林學系 04-22840347 ext.142

雪霸國家公園管理處武陵管理站 04-25901316

東勢林區管理處 04-25150855 ext.152



圖 9. 本計畫臺灣冷杉風倒木解說教育牌設置情形

3. 圓盤取樣過程

圓盤取樣前置作業(圖 10)，先將樣木鏈鋸位置標記，取 1.3 m 處之樣木則將 1.3 m 處噴漆，以利工作人員判斷下刀位置；取樹幹解析之圓盤則從 1.3 m 處開始，每隔 2 m 噴漆記位，並包含 0.3 m 處之圓盤；而木材性質木段，則是從 1.3 m 處開始，每隔 4 m 噴漆記位。另外，於現場測定倒木方向並以噴漆標記一側方位。其他形質量測，除主幹之樹高及材長等資料，須於現場進行側枝、根冠幅等測量工作。伐木工鏈鋸下刀處以噴漆位置中心處為主，單一只取 1.3 m 圓盤或取樹幹解析者則取 5-10 cm 之材長，取木材性質者(包含取樹幹解析)則以下刀面為基準，向上取 50 cm 之木段供木材性質使用，向下取 10 cm 圓盤供樹幹解析使用(圖 11)。因倒木放置時間過久，有些樣木已有腐朽之情形，所以視情況判定，裁切部分如已無法辨識，則選擇往上或往下取較為完整的部分，或者選擇不取。取得圓盤後，以噴漆下刀面為提供樹輪資訊面，而另一面則做編號標記，標記方式以「樣木編號-切面位置處」做紀錄，例如 11 號樣木的 5.3 m 處圓盤以「11-5.3」標記。紀錄完畢即可讓背工上架(圖 12)，待至登山口打印放行(圖 13)。

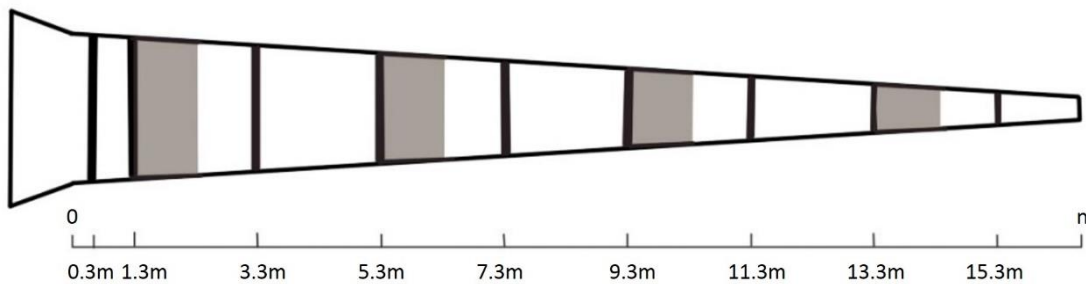


圖 10. 樹幹圓盤取樣示意圖(黑色段為樹幹解析之圓盤、灰色段為木材性質之木段)



圖 11. 臺灣冷杉風倒木圓盤取樣工作



圖 12. 臺灣冷杉風倒木圓搬運工作照



圖 13. 臺灣冷杉風倒木圓盤打印、放行工作照

4. 圓盤磨製與測量

將圓盤取下後立即進行後續的處理，為避免臺灣冷杉圓盤因水分蒸散太快而導致圓盤過快龜裂，先以白膠均勻塗抹裁切面，延緩圓盤龜裂狀況。等待 1-2 週風乾後，即可開始磨製的工作。磨製處裡分為三個步驟，為使圓盤表面方便磨製，第一步驟先以電刨機將表層上膠處刨削，均勻刨過後進行第二步驟，運用粒片板砂光機搭配 80 號砂紙磨製至臺灣冷杉圓盤心材與部分邊材年輪顯而易見，則可進行第三步驟，利用電動拋光機搭配 120、220 及 400 號砂紙，將更為細部的年輪磨至清晰，即可進入後續年輪資料建立工作。

取樣後的圓盤以稍端斷面(cross-section at small end) 進行風乾、打磨、拋光等步驟，而後進行年輪寬度量測。各段圓盤斷面使用單眼相機拍攝數化，參考鍾智昕(2006)利用 National Institute of health (NIH)開發的影像處理軟體 ImageJ 來進行測量，因有些影像並不完全清晰，例如磨痕、斑點、龜裂等干擾，可能會因圓盤本身的汙損而影響樹輪辨識，所以會以人工校正的方式將樹輪界線修正。每一斷面皆測定各方位所對應之半徑(圖 14)，並取平均值計算每連年生長量 (current annual increment)，將所得值以 MicroSoft Excel、SigmaPlot 12.5 軟體整理與繪製。

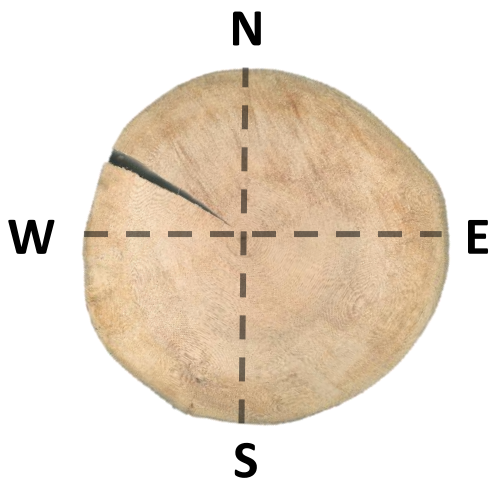


圖 14. 臺灣冷杉圓盤斷面各方位量測示意圖

(三) 臺灣冷杉單木生長式與材積式建立

1. 樹幹解析

透過樹幹解析，可以了解過去樹木生長的歷史。依據所採用的截面，可取得年輪數、年輪寬度、圓盤缺陷、樹型輪廓等資訊，以及重建過去生長樣貌。本次報告共取樣之 9 株樣木進行資料建置及分析(包含材積式之推估)。

2. 單株材積計算

單株材積的計算採用區分求積法(sectional measurement)，並將其由上而下分為三個部分：稍端材積、區分材積，以及幹足材積，並以以下幾何形狀及公式來計算各段之材積量（圖 15）。

(1) 稍端材積 (volume of the top, V_t)

以圓錐體 (cone) 計算，其公式為 $V_t = (1/3) \times A_u \times H_u$ ， A_u 為稍端材積之底面積(亦為區分材積之上部平截面)， H_u 為底面積至稍端之高。

(2) 區分材積 (volume of the middle, V_m)

以缺頂拋物線體 (frustum of paraboloid) 模擬中間部分之樹段，並以 Smalian 氏之公式計算： $V_m = H_m \times (A_m + A_u)/2$ ，其中 A_m 及 A_u 分別為區分材積之下部(亦為胸高斷面積)與上部平截面，而 H_m 則為兩截面之高。

(3) 幹足材積 (volume of the bottom, V_b)

以缺頂凹面體 (frustum of neiloid) 來模擬樹木的軛軛體 (neiloid) 部分，其公式為： $V_b = H_b/4 (A_m + \sqrt[3]{A_m^2 A_b} + \sqrt[3]{A_b^2 A_m} + A_b)$ ， A_m 及 A_b 分別代表缺頂凹面體之上部與下部平截面， H_b 則為兩截面之高。

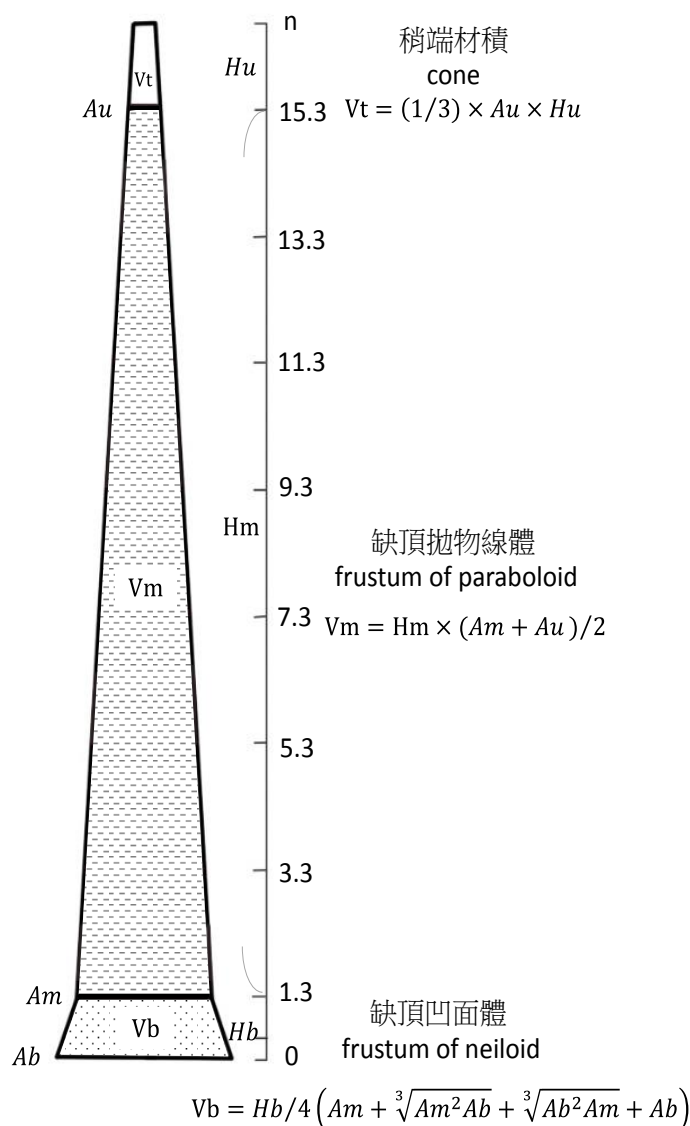


圖 15. 單株材積計算示意圖

3. 材積式推估

臺灣冷杉材積式的選擇將會對以下 6 種形數方程式做測試，包含 2 種對數公式，以及 4 種算術公式 (a、b、c、d：係數)：

(1) 對數公式 (Logarithmic formula)

a 式：Schumacher $V = aD^bH^c$

b 式：Logarithmic combined variable..... $V = a(D^2H)^b$

(2) 算術公式 (Arithmetic formula)

c 式：Combined-variable..... $V = a + bD^2H$

d 式：Generalized combined variable..... $V = a + bD^2 + cH + dD^2H$

e 式：Generalized logarithmic..... $V = a + bD^c + H^d$

f 式：Honer transformed variable..... $V = D^2/[a + (b/H)]$

材積式的選擇將透過 R languag 進行統計分析，判釋準則以殘差標準差 (Residual standard error, RSE) 之值越小；決定係數 (Coefficient of determination, R^2) 越接近 1，平均絕對誤差 (Absolute mean error, AME) 越接近 0 者為最佳材積式 (v ：觀察值， \hat{v} ：估計值， \bar{v} ：平均值， n ：樣本數， p ：參數數量)。

$$RSE = \sqrt{\frac{\sum(v - \hat{v})^2}{n - p}} \quad ; \quad R^2 = 1 - \frac{\sum(v - \hat{v})^2}{\sum(v - \bar{v})^2} \quad ; \quad AME = \frac{1}{n} \sum |v - \hat{v}|$$

本研究由 9 株臺灣冷杉風倒樣木隨機取 6 株作為最佳材積式之測試，透過樹幹解析所得 122 筆推估資料，帶入 6 項材積式配適，經 RSE、 R^2 ，及 AME 檢定後，以配適程度較佳者進行後續檢測；並利用 1937 年八谷正義於志佳陽線舊雪山山屋附近量測的臺灣冷杉材積值，作為材積式準確度的驗證。材積式的後續檢測。此外，以其他 3 株風倒木之樹幹解析資料進一步後續檢測，以用來比較本研究推算的最佳材積式和林務局 1973 年編製的臺灣冷杉材積式。若本研究結果較 1973 年材積式佳，則重新以 9 株風倒樣木所得之樹幹解析資料重新編列，作為長期監測樣區中臺灣冷杉蓄積量之推估式。

(四) 雪山地區臺灣冷杉林蓄積量與碳存量之評估

為探求臺灣冷杉長期監測樣區的蓄積變化，透過 2008 及 2017 年樣區調查的胸高直徑和樹高測量值，分別計算各年份蓄積量，以及兩時段間隔的差異材積量、死亡材積量、晉級生長材積量、樣木生長材積量，以及平均單木生長材積量。因

校正實地量測因樣區地形或植被阻撓而導致的誤差，2008 年紀錄之樹高與 2017 年樹高差值如有過度生長者，以 2017 年量測的資料所計算出的最佳樹高曲線式做為數值校正的依據進行換算，選用 2017 年樣區內為非枯立、斷梢、倒伏、幹折等直立活木建立。另外，為判斷是否有過度生長，並選擇林木合理的生長量，因此利用樹幹解析數據估計的每 10 年生長量，以每 100 年將該數據的年齡值域分為 0-100 歲、100-200 歲，及 200-300 歲等 3 個階段，透過這 3 個階段的生長量值域，將過度生長的判定方法界定為第 3 四分位數(Q3)加上 3 倍的 IQR 作為離群閥值(Tukey 1977)。因此，如計算出差值大於閥值，則將該年度生長量調整為閥值本身。後續討論各樣區間材積量與林分密度、地被植群等關係，以及預測臺灣冷杉長期監測樣區的碳吸存。

碳吸存的推估採用 Ahmad *et al.*(2015)、王裕仁(2008)之計算方式與參考值，所得全株材積(值透過 IPCC 所建議之 BEF(biomass expansion factor)轉換，平均全株材積為幹材材積的 1.65 倍。為求得生物量，則將臺灣冷杉的材積量乘以其絕乾比重(oven-dry specific gravity) 450 kg/m³(王松永 1988)，即為全株生物量(biomass)。另根據臺灣針葉樹平均碳含量比為 48.21% (Lin *et al.* 2002)推算臺灣冷杉的固碳量(carbon stock)，單株固碳量計算方法如下：

$$\text{Total tree volume (m}^3\text{)} = \text{stem volume (m}^3\text{)} * 1.65 \text{ (BEF)}$$

$$\text{Total tree biomass (kg)} = \text{Total tree volume (m}^3\text{)} * 450 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Total carbon stock (kg)} = \text{Total tree biomass (kg)} * 0.4821 \text{ (conversion factor)}$$

(五) 臺灣冷杉風倒木環境立地資料與生長樣態之分析

選擇臺灣冷杉長期監測樣區非死亡及非斷梢樣木，共 771 筆樹徑及樹高資料，計算 2008 至 2017 年各徑級區間在 10 年間的徑向與樹高生長變化量。風倒木部分選擇由根冠往上 1.3 m 處的圓盤作為樹輪資料，共 18 筆樹徑資料及 9 筆樹幹解析資料，計算斷面各方位所對應之半徑，並取平均值計算連年生長量，比較各樣木在不同年齡下的生長變化量與生長速率。

為求各樣木之生長模式，先計算每一樣木各 10 年的徑向生長量，再以每 10 cm 徑級作區分，在相同徑級區間以每 10 年計數，即可獲得各樣木在各級間所需的時間，即為生長速率之轉算，將轉換值透過群團分析分群，並以年平均生長量(mean annual increment, m.a.i.)繪出生長曲線，了解各樣木間的生長樣態。

另外分析臺灣冷杉的生長影響因子，將調查各樣木的海拔、坡度、坡向、及鄰木競爭影響等環境因子資料，以典型相關分析(canonical correlation analysis, CCA)解析資料，其中坡向轉換為水分梯度(Day and Monk 1974)；林木競爭分析透過Hegyi 於1974年設計的競爭指數模式，來計算相對的競爭影響量(Hegyi 1974)。(Sn: 鄰近木的尺寸介量, Sf: 目標木的尺寸介量 Distance nf :兩者間的距離)

$$CI = \sum_{n=1}^N \left(\frac{Sn/Sf}{distance\ nf} \right)$$

(六) 臺灣冷杉-玉山箭竹推移帶菌根菌調查

為了解臺灣冷杉與菌根菌共生關係，以三六九山莊周圍臺灣冷杉林-玉山箭竹推移帶為主要研究範圍，以王偉(2016)所設置於三六九山莊後的灌叢草生地系統樣區向上延伸4條樣線(圖16)，由灌叢草生地向臺灣冷杉林內部，於等距離間隔設置3×3 m²樣區，並將樣區劃分為地被調查存活監測區、菌根菌感染取樣區及小苗保留區。於編號1、3、7、9四個角落的小樣區進行地被調查並記錄其覆蓋度或胸徑；於編號2、4、6、8之小樣區隨機取三個樣區進行採土，土樣參照Neville等人(2002)每五公分取一層土，依其深度分別為0-5 cm、5-10 cm、>10 cm (max < 30 cm) 進行掘取，每份樣本至少挖取土壤600 g，以供土壤分析500 g及內生菌根孢子鑑定100 g使用；於編號2、4、6、8四個小樣區內觀察冷杉小苗之分佈並記錄位置與編號，接著隨機採集一半數量之一年生冷杉小苗，將其連同根系掘起，浸置於裝有50%酒精之菌根固定液之中，帶下山以進行後續觀察。小苗每年5月及10月調查一次，記錄死亡與新生臺灣冷杉小苗數量。在樣區四邊中央樣區為臺灣冷杉根部菌根菌感染取樣樣區，小心將根部取樣攜回，分析試驗其與菌根菌共生之情形。

1. 外生菌根菌觀察

臺灣冷杉小苗菌根菌觀察判示是否有外生菌根菌，以解剖顯微鏡觀察幼根有否菌套、菌絲，並記錄其在每一株小苗不同土壤深度的根尖共生比例。

2. 內生菌根菌觀察

依Neville *et al.* (2002)所列之步驟進行染根與觀察，取樣後浸泡於50%酒精的固定液中攜回，將根置於1M的氫氧化鉀，以80°C煮1小時，並放2-24小時軟化，後以自來水沖洗乾淨，並於0.25%次氯酸鈉漂白，染色前以1%鹽酸進行酸化20分鐘，後浸泡於0.05%台盼藍(Trypan blue)、甘油、水以及1%鹽酸的混

合液中染色 30 分鐘，後續則可浸置甘油、水及 1% 鹽酸中退染。將菌根壓製於玻片上，以光學複式顯微鏡進行觀察，並根據 McGonigle *et al.* (1990) 的 line intersect method 來進行內生菌根菌共生比例之計算。

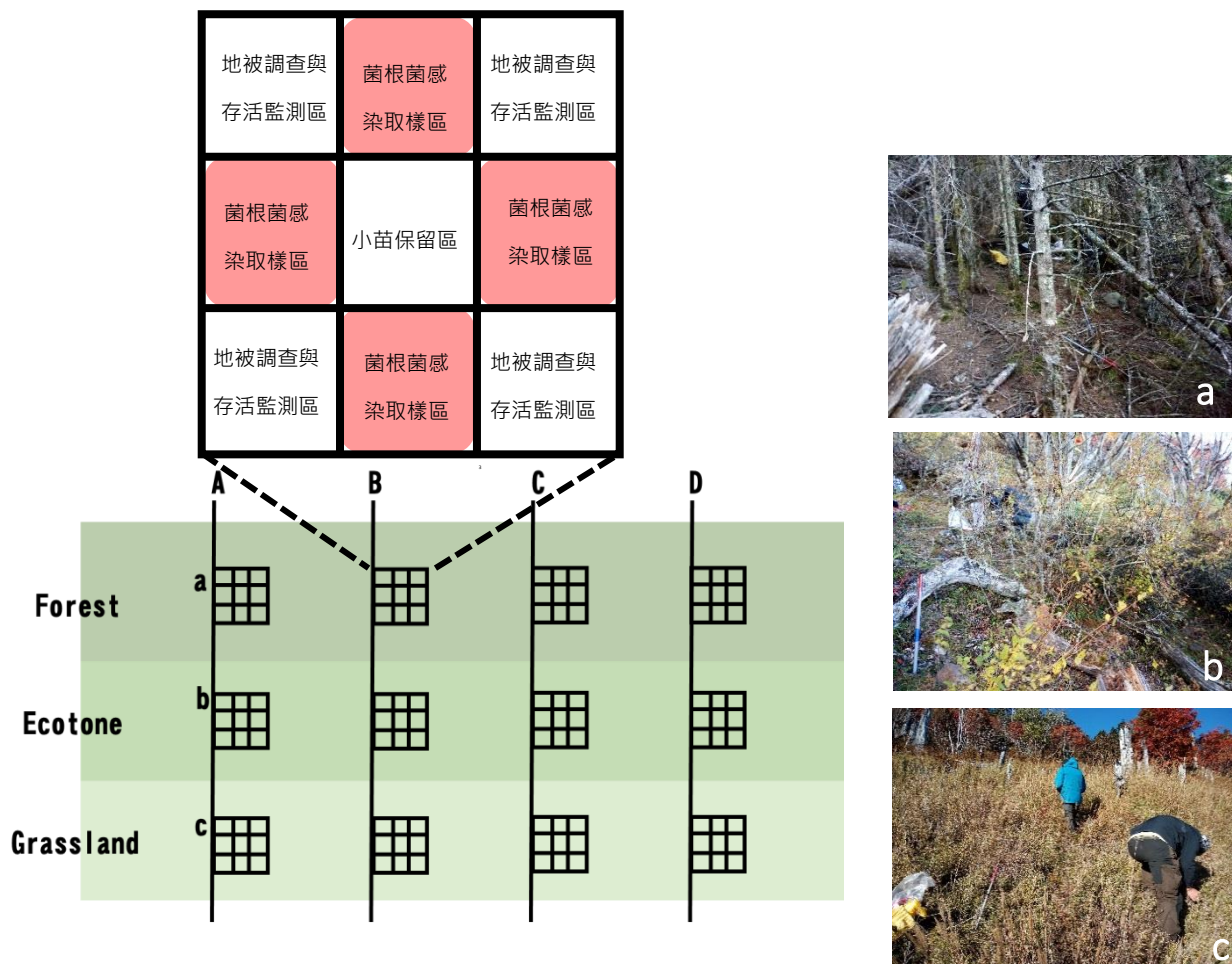


圖 16. 臺灣冷杉推移帶樣區示意圖

(七) 臺灣冷杉物候

本研究選取雪山主峰線臺灣冷杉樣木進行監測，每月至少進行 1 次觀察，選擇族群數量較穩定之物種觀察展葉期與花期，記錄各月分之開花物種。單一植株的展葉期以葉芽體綻放至葉成熟為準，而花期以花冠開放至凋謝期間為準，物種花期以族群內開花株數達 30% 以上為準(曾彥學&曾喜育 2013)。除上述物候調查方法外，進一步挑選適當樣株進行展葉、花候等物候狀態的每日定時自動相機拍攝記錄，自動相機採用 Reconyx HC500 自動縮時攝影機，預計觀察位於雪山主峰線步道 5.7K 處的臺灣冷杉樣株。

(八) 以物種分布模擬評估氣候變遷對臺灣冷杉分布之影響

物種分布模擬(species distribution modeling, SDM)係利用物種與環境間之關係(species-environment relationship)的量化，來對生物調查資料進行空間推估(Franklin 2009)；SDM 可藉由其 3 項要素—物種出現點、環境預測變數、連結二者關係之演算模擬方法(Moudrý & Šimová 2012; Sangermano & Eastman 2012)來建構物種與環境之關係，亦即由物種與環境之關係來建構物種的分布模型，然後再將模型投射至研究區。

1. 臺灣冷杉之出現點位資料

本計畫利用 2 種途徑來取得臺灣冷杉之物種分布點資料：

- (1) 彙整自行定位及既有資料庫之冷杉點位：整理過去本研究團隊在全台各地所定位之冷杉分布點座標，並彙整各大標本館臺灣冷杉標本點位，同時擷取 GBIF (Global Biodiversity Information Facility) 資料庫中之臺灣冷杉點位。經彙整上述來源之後，首先濾除座標有問題者或其 DEM (digital elevation model) 低於 2,600 m 之不合理點位，總計共取得 284 點位，然這些資料仍有許多座標重複之點位，經刪除後可得 230 點臺灣冷杉之座標點。
- (2) 由國家植群圖中擷取冷杉點位：以 ArcGIS 10 為操作平台，匯入臺灣之國家植群圖圖層(Chiou *et al.* 2009)，選取 FC21 polygon 另行匯出後，分別將之轉換為 40-m、200-m、500-m、1000-m 等網格，再將 raster 轉換為 points，並寫入其各點之座標；最後所得之點位數量分別為 40-m 網格取得 105,368 點、200-m 網格取得 4,251 點、500-m 網格取得 683 點、1000-m 網格取得 171 點。

2. 預測冷杉分布之環境圖層

為解釋及模擬臺灣冷杉之分布，依 Elith & Leathwick (2009)、Dormann (2011)、Watling *et al.* (2012) 之建議，可根據研究者對臺灣冷杉之先驗知識來優先考量具有生態意義之環境變數，因此本計畫初步選擇 21 項可能影響冷杉分布的環境變數(詳列於表 3)，包括代表地理地形變數的 ASP、SR、CTI、TRAI、WLS，代表熱量變數的 bio1、bio4、bio10、bio11、T1、T7、EWI，代表水分變數的 bio12、bio15、bio18、bio19、PS、PW、PSR、PWR，代表水熱綜合條件變數的 PER，同時所有圖層網格及模擬之尺度均統一為 40 m，座標統一採用 TWD97 二度分帶系統。

表 3. 可能影響臺灣冷杉分布的 21 項環境變數

圖層/縮寫	說明	Resource or reference
地理地形		
ASP	來自 dem40_97 之坡向 aspect 圖	ESRI (2010)
SR	太陽輻射 solar radiation (solar_2012day)	ESRI (2010)
CTI	複合地形指數 compound topographic index	Evans (2011)
TRAI	地形輻射坡向指數 topographic radiation aspect index	Evans (2011)
WLS	全天光空域 whole light sky space	Lai <i>et al.</i> (2010)
熱量		
bio1	年均溫，即 $bio1 = T_{year}$	Fick & Hijmans (2017)
bio4	溫度季節性=月均溫之標準差*100，即 $bio4 = T_{SD}$	Fick & Hijmans (2017)
bio10	最暖季溫度= $(T6+T7+T8)/3$ ，即 bio10	Fick & Hijmans (2017)
bio11	最冷季溫度= $(T12+T1+T2)/3$ ，即 bio11	Fick & Hijmans (2017)
T1	最冷月月均溫=T1 (Mean Temperature of Coldest Month)	Chiu <i>et al.</i> (2009)
T7	最暖月月均溫=T7 (Mean Temperature of Warmest Month)	Chiu <i>et al.</i> (2009)
EWI	有效溫量指標 effective warmth index，= $WI - 0.5 \times ATR$	Chiu <i>et al.</i> (2012)
水分		
bio12	年降水量，即 $bio12 = P_{year}$	Fick & Hijmans (2017)
bio15	P_CV 降水之季節性(變異係數)，即 bio15	Fick & Hijmans (2017)
bio18	P_6-8 最暖季降水量= $P6+P7+P8$ ，即 bio18	Fick & Hijmans (2017)
bio19	P_12-2 最冷季降水量= $P12+P1+P2$ ，即 bio19	Fick & Hijmans (2017)
PS	P_summer4-9 夏半年降水量= $P4+P5+P6+P7+P8+P9$	Su (1985)
PW	P-winter10-3 冬半年降水量= $P10+P11+P12+P1+P2+P3$	Su (1985)
PSR	pr_s-y 夏雨率= $P_{summer4-9} / P_{year}$	Su (1985)
PWR	pr_w-y 冬雨率= $P_{winter10-3} / P_{year}$	Su (1985)
水熱綜合		
PER	annual potential evapotranspiration = $(58.93 * BT) / P_{year}$	Holdridge (1967)

3. 模擬臺灣冷杉分布之軟體

目前有許多種不同的方法被用來模擬物種之空間分布(Mainali *et al.* 2015; 邱清安等 2013)，但其中以最大熵模型(Maximum Entropy) (MaxEnt; Phillips *et al.* 2006; Phillips & Dudík 2008; Phillips *et al.* 2017)最常被使用，其自 2006 年初次發表後，迄今在 Google Scholar 已有超過 1 萬篇報告引用(如：Abdelaal *et al.* 2019; Cobos *et al.* 2019; Ørsted & Ørsted 2019)，因此本計畫採用 Maxent 來探究臺灣冷杉之現今及未來的分布。

六、結果與討論

(一) 臺灣冷杉長期監測樣區修復及複查

由於長期監測樣區線及小區線極易受到風倒木影響，以致於樣區邊界繩索斷裂，本計畫於 2017 年 10 月底完成樣區邊界樁與繩索更新及修復(圖 17)及複查(表 4)。檢視各樣區樣木之鋁牌，存活樣木鋁牌大多保持完好，少部分樣株掉落並依 2008 年樣木資料完成修整補充。



圖 17. 臺灣冷杉長期監測樣區修復工作照

1. 上層喬木徑級結構及組成變化

7 個長期監測樣區總計調查臺灣冷杉 733 株、臺灣鐵杉 143 株、臺灣刺柏(*Ju. formosana*) 1 株、玉山圓柏 36 株、巒大花楸 145 株，以及玉山杜鵑 94 株等樣木。與 2008 年調查結果比較(廖敏君等 2012)，除了臺灣刺柏在兩年度間的株數沒有改變外，2017 年調查樣區內監測各樹種的株數均有減少(表 4)；進一步分析各樣區結果顯示，臺灣冷杉在各樣區增減不一(表 5-11)，臺灣冷杉在 Plot_1-Plot_4 的株數均發生減少狀態，其中 Plot_3 臺灣冷杉死亡株數最多；在 Plot_5-Plot_7，臺灣冷杉數量則有增加情形。樣區內樹木死亡的情形分為枯立、幹折、倒木、倒伏等狀態，各樣區喬木層調查結果如下：

Plot_1 樣區位於步道 4.6K 處，海拔高 3,010 m，為臺灣冷杉及臺灣鐵杉的推移帶，優勢樹冠層由臺灣鐵杉(136 株)與臺灣冷杉(71 株)組成，臺灣刺柏 1 株，

林分密度 1,040 株/ha。與 2008 年調查結果相比，臺灣冷杉減少 8 株，其中徑級 0-10 cm 減少 3 株、徑級 10-20 cm 減少 3 株、徑級 30-40 cm 減少 2 株，死亡狀態大多不明(表 5)。臺灣鐵杉晉級生長 3 株、減少 9 株，死亡植株大多為枯立木。

Plot_2 樣區位於步道 5.6 K 處，海拔高 3,166 m，2017 年調查有 219 株林木，林木垂直結構明顯可區分成 2 層；林木株數組成以臺灣冷杉 114 株數量最多，臺灣鐵杉(5 株)、玉山圓柏(3 株)零星分布，第 2 層樹冠層為玉山杜鵑(85 株)及巒大花楸(12 株)為主要組成。與 2008 年調查結果相比(表 4、表 6)，本區臺灣冷杉減少 7 株，減少狀態為枯立、倒木、幹折，新增 2 株為 1 株晉級生長和 2008 年漏查 1 株。玉山杜鵑的株數減少 17 株最多，徑級多為 10 cm 以下，樹木死亡狀態為不明、倒木及枯立；玉山圓柏及巒大花楸的株數減少均為枯立木造成。

Plot_3 樣區位於步道 6.6 K 處，海拔高 3,170 m，總計調查林木有 89 株；其中臺灣冷杉 73 株、臺灣鐵杉 2 株、巒大花楸 5 株、玉山杜鵑 9 株，林分密度為 445 株/ha。Plot_3 樣區是 7 個樣區中林木株數減少量最多的樣區，計有臺灣冷杉 43 株、玉山杜鵑 3 株、巒大花楸 1 株；死亡狀態多為枯立、倒木、幹折，其中以臺灣冷杉枯立及幹折數量最多(表 7)。

Plot_4 樣區位於步道 7.8 K 處，地被層為苔蘚植物，海拔高 3,352 m，位於黑森林步道入口處。2017 調查有臺灣冷杉 212 株、玉山圓柏 1 株、巒大花楸 1 株。2008 年調查時發現，Plot_4 樣區內有個較大的孔隙生成，並計有 84 株臺灣冷杉枯立木及數量豐富而未晉級的稚樹。本年度調查發現有 9 株臺灣冷杉晉級生長，並記錄 12 株臺灣冷杉死亡，死亡樣木以幹折形式居多(表 8)。

Plot_5 樣區位於步道 8.5K 下方，海拔高 3,313 m，2017 年調查時樣區內總計 182 株林木，其中臺灣冷杉 60 株、巒大花楸 122 株。與 2008 年調查結果相比較發現，本區臺灣冷杉晉級生長增加 4 株，幹折死亡減少 2 株(徑級約 50-60 cm)；有 2 株巒大花楸晉級生長，但死亡株數高達 23 株(表 9)。

Plot_6 樣區位於步道 9.0K 黑森林水源地附近，海拔高約 3,423 m，地勢相對平坦，地被以苔蘚及禾本科植物為主要組成。2017 年樣區調查有 135 株林木，其中臺灣冷杉 131 株、巒大花楸 4 株；與 2008 年調查結果相比，本區臺灣冷杉因晉級生長增加 21 株，死亡減少的林木有 6 株，以枯立木居多；巒大花楸減少 5 株(枯立 3 株、斷梢 1 株、幹折 1 株)(表 10)。

表 4. 2017 年臺灣冷杉長期監測樣區資料、上層喬木種類及株數

樣區編號	Plot_1	Plot_2	Plot_3	Plot_4	Plot_5	Plot_6	Plot_7	
海拔高度(m)	3,010	3,166	3,170	3,352	3,313	3,423	3,401	
步道位置	4.6 k	5.6 k	6.6 k	7.8 k	8.5 k	9 k	9 k	
GPS(TW97)	X: 278004 Y: 2698257	X: 277236 Y: 2698154	X: 276247 Y: 2698256	X: 275313 Y: 2698606	X: 274795 Y: 2698806	X: 274444 Y: 2698564	X: 274378 Y: 2698583	
優勢地被	苔蘚 玉山箭竹	玉山箭竹	玉山箭竹	苔蘚	苔蘚	苔蘚	苔蘚	
各樣區出現物種及株數(2008 年度調查之株數)								總計
臺灣冷杉	71(78)	114(119)	73(116)	212(215)	60(58)	131(116)	112(100)	773(802)
臺灣鐵杉	136(142)	5(5)	2(1)	0	0	0	0	143(148)
臺灣刺柏	1(1)	0	0	0	0	0	0	1(1)
玉山圓柏	0	3(4)	0	1(1)	0	0	32(35)	36(40)
巒大花楸	0	12(15)	5(6)	1(1)	122(143)	4(9)	1(2)	145(176)
玉山杜鵑	0	85(102)	9(12)	0	0	0	0	94(114)
總計(株數)	208(221)	219(245)	89(135)	214(217)	182(201)	135(125)	145(137)	1,192(1,281)
密度(株/ha)	1,040(1,105)	1,095(1,225)	445(675)	1,070(1,075)	910(1,005)	675(625)	725(685)	-

註：括弧為 2008 年調查結果。

Plot_7 樣區較鄰近 Plot_6 樣區，亦位於步道 9.0K 黑森林水源地附近，海拔 3,401 m 進入臺灣冷杉與玉山圓柏之推移帶；兩樣區位不同坡向，夏季時樣區間有溪水相隔。2017 年調查有臺灣冷杉 112 株、玉山圓柏 32 株、巒大花楸 1 株。與 2008 年調查結果相比，本區臺灣冷杉晉級生長增加 19 株、死亡 7 株多為枯立木狀態；玉山圓柏增加 1 株，死亡 4 株(倒木、幹折、不明等狀態)；巒大花楸死亡 1 株(倒木)(表 11)。

在 7 個臺灣冷杉長期監測樣區徑級結構圖，可以看出部分樣區 10 年間徑級分布類型略有所改變(圖 18)。2008 年與 2017 年比較發現，Plot_1 樣區的臺灣冷杉徑級結構仍維持鐘形分布，但徑級 0-20 cm 臺灣冷杉稚樹的株數有減少趨勢，此可能是臺灣冷杉更新受玉山箭竹地被抑制影響；另一方面此環境為臺灣冷杉與臺灣鐵杉之交錯帶，臺灣冷杉除了要與臺灣鐵杉競爭外，生育地環境亦可能不適臺灣冷杉更新(廖敏君等 2013)；再者，臺灣冷杉更新需較大孔隙環境(廖敏君等 2013；曾勝華 2016)，此區域缺乏臺灣冷杉小苗更新建立所需生育地。相較之下，比較 2017 年與 2008 年臺灣冷杉徑級超過 30 cm 以上株數顯示 2 者變化不大，顯示該樣區在 10 年間的臺灣冷杉族群有逐漸穩定的趨勢。

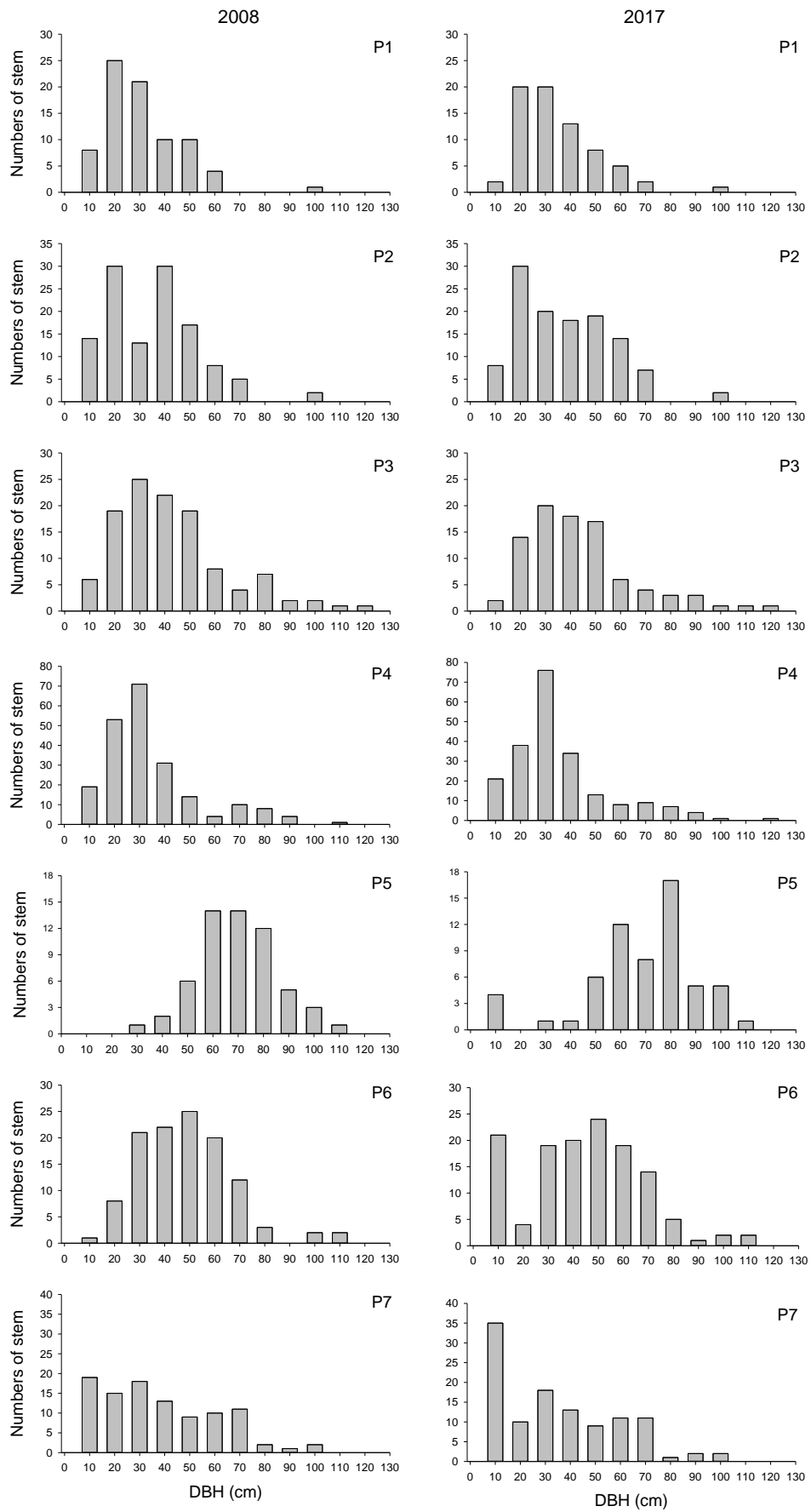


圖 18. 2008 年及 2017 年臺灣冷杉長期監測樣區 1-7 樣區臺灣冷杉之徑級分布圖

Plot_2 樣區的臺灣冷杉於 2008 年的徑級分布為雙峰分布型，直徑階 10-20 cm 及 30-40 cm 為株數主要高峰，但 2017 年樣區族群徑級結構發育有趨向鐘型分布的現象，此種徑級結構的改變主要因為徑級 40 cm 的株數大幅下降所致。其原因除了受到臺灣冷杉晉級生長而株數減少影響外，此徑級的林木死亡亦是造成株數下降的因素；加上 2008 年調查樣區內徑級 30 cm 的株數不多，且多為胸徑 25 cm 以下，進而未能在 10 年間晉級生長到徑級 40 cm。臺灣冷杉在 Plot_2 樣區的徑級結構類似 2008 年 Plot_1 樣區，短期若無重大干擾發生，族群徑級結構將朝向穩定趨緩變化。

Plot_3 樣區在 2008 年與 2017 年的徑級結構變化不大，皆為鐘型偏右的分布模式，主要由徑級 10-50 cm 的臺灣冷杉林木組成，但其區間的平均數量原本為 21.3 株，於 2017 年下降為 17.3 株，對照表 6 的死亡樣木各徑級數量，在徑級 10-20 cm 及 20-30 cm 分別有 9 株以及 11 株臺灣冷杉樣木死亡，對於本身區間的數量有減少的影響外，也間接影響進入下個直徑級的數量。

Plot_4 樣區於 2008 年及 2017 年的徑級分布大致上為鐘型分布，兩次調查主要變化為徑級 10-20 cm 的臺灣冷杉株數下降，以及徑級大於 60 cm 的臺灣冷杉數量有漸進增長的趨勢。徑級 20-30 cm 是 Plot_4 樣區臺灣冷杉的主要族群徑級結構組成。

Plot_5 樣區於 2008 年臺灣冷杉徑級結構為鐘型分布，徑級主要分布於 60-80 cm；相較於其他樣區，Plot_5 樣區臺灣冷杉的數量較少，鐘型徑級結構分布在大徑木的數量組成較多。在 2017 年的徑級結構圖相較於 2008 年更為波動，主要的變化為徑級 10 cm 以下的植株開始增長，可能顯示出樣區內數量豐富鬱大花楸死亡(表 9)，提供相對充分的光線使臺灣小苗得以晉級生長。對照長期監測樣區 Plot_5 臺灣冷杉樣木增減表發現(表 9)，臺灣冷杉主要死亡樣木為徑級 50-60 cm，徑級 60-70 cm 缺乏徑級 50-60 cm 晉級生長補充(recruitment)，反倒是徑級 70-80 cm 獲得徑級 60-70 cm 林木晉級生長補充成為樣區內株數最多的徑級。

Plot_6 與 Plot_7 樣區於 2008 年的徑級結構分別為鐘型分布及反 J 型分布，但這兩樣區的徑級分布在 2017 年變化均有相同的特色，即是徑級 0-10 cm 的臺灣冷杉數量增多；此結果顯示兩樣區的臺灣冷杉小苗有大量的晉級生長，補充及帶動此環境臺灣冷杉樹種之更新。

整體來看，可發現 Plot_1、Plot_2、Plot_3 樣區的稚樹在數量上都略為減少，反觀 Plot_5、Plot_6、Plot_7 樣區的臺灣冷杉分別晉級生長 4、20 和 19 棵(表 9、10、11)；此結果凸顯出玉山箭竹對臺灣冷杉小苗的生長與存活具影響力，數量豐富的竹桿、深厚的枯落物與緻密的根系環境致使臺灣冷杉小苗與稚樹更新數量不多(廖敏君等 2012；2013)，且在玉山箭竹為優勢的 Plot_1、Plot_2 樣區，10 年間死亡樣木的徑級也大多落在於 0-20cm 區間(表 5、表 6)。

表 5. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1 樣木增減表

Plot_1	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	0						8	不明(87.5) 倒木(12.5)	0-10	3	0-5	4
									10-20	3	5-10	1
									20-30	0	10-15	3
									30-40	2		
臺灣鐵杉	3	晉級生長 (100)	0-10	3	0-5	3	9	不明(55.5) 枯立(33.3) 倒木(11.1)	0-10	2	0-5	3
									10-20	6	5-10	3
									20-30	1	10-15	2
											15-20	0
											20-25	1

表 6. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_2 樣木增減表

Plot_2	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級(cm)	數量	樹高 (m)	數量			
臺灣冷杉	2	晉級生長 (50) 新增 (50)	0-10	1	0-5	1	7	枯立(57.1) 倒木(14.3) 幹折(14.3) 倒伏(14.3)	0-10	2	0-5	2			
									30-40	1	20-25	1			
												10-20	2	5-10	2
												20-30	0	10-15	3
												30-40	2		
												40-50	0		
玉山杜鵑	0						17	不明(70.6) 倒木(11.8) 消失(11.8) 枯立 (5.9)	0-10	11	0-5	14			
									10-20	6	5-10	3			
玉山圓柏	0						1	枯立(100)	10-20	1	0-5	1			
巒大花楸	1	晉級生長 (100)	0-10	1	0-5	1	4	枯立(100)	0-10	4	0-5	4			

表 7. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_3 樣木增減表

Plot_3	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	0						43	枯立(37.2)	0-10	3	0-5	10
									10-20	9	5-10	12
									20-30	11	10-15	12
									30-40	4	15-20	7
									40-50	6	20-25	2
									50-60	4		
									60-70	1		
									70-80	1		
									80-90	3		
									90-100	0		
								100-110	1			
玉山杜鵑	0						3	倒伏(33.3)	0-10	3	0-5	3
								消失(33.3)				
								不明(33.3)				
巒大花楸	0						1	壓倒(100)	0-10	1	0-5	1

表 8. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_4 樣木增減表

Plot_4	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	9	晉級生長 (100)	0-10	9	0-5	9	12	枯立(83.3)	0-10	4	0-5	5
									10-20	7	5-10	4
									20-30	0	10-15	2
									30-40	0		
									40-50	0	40-50	1
									50-60	1		

表 9. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_5 樣木增減表

Plot_5	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	4	晉級生長 (100)	0-10	4	0-5	4	2	幹折(100)	50-60	2	30-35	1
											35-40	1
巒大花楸	2	晉級生長 (100)	0-10	2	0-5	2	23	倒木(30.4)	0-10	23	0-5	20
											5-10	3
								幹折(30.4)				
								枯立(26.1)				
								消失 (8.7)				
								不明 (8.7)				
								斷梢 (4.3)				

表 10. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_6 樣木增減表

Plot_6	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	21	晉級生長 (95.5)	0-10	20	0-5	20	6	枯立(83.3)	10-20	4	5-10	3
			50-60	1	20-25	1			消失(16.7)	20-30	1	10-15
		新增 (4.5)							30-40	1	15-20	0
									40-50	1	20-25	1
巒大花楸	0					5	枯立(60.0)	0-10	5	0-5	5	
							斷梢(20.0)					
							幹折(20.0)					

表 11. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_7 樣木增減表

Plot_7	增加量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量	減少量	狀態(%)	徑級 (cm)	數量	樹高 (m)	數量
臺灣冷杉	19	晉級生長 (100)	0-10	19	0-5	19	7	枯立(57.1)	0-10	2	0-5	3
								不明(28.6)	10-20	4	5-10	4
								倒木(14.3)	20-30	1		
玉山圓柏	1	晉級生長 (100)	0-10	1	0-5	1	4	倒木(50.0)	0-10	4	0-5	4
								幹折(25.0)				
								不明(25.0)				
巒大花楸	0					1	倒木(100)	0-10	1	0-5	4	

統整各徑級數量，以及計算年間死亡數(表 12)，結果顯示 2008 年及 2017 年徑級分布，雪山地區是以徑級 20-30 cm 的臺灣冷杉數量最多，佔比為 21-22%，其次為 10-20 cm 以及 30-40 cm。死亡量則主要發生於 10-20 cm 區間，死亡率則是以 10-20 cm 及 100-110 cm 為最高(20%)，其次為 0-10 cm 的區間(13%)，以及 80-90 cm (12%)。

依廖敏君等(2013)臺灣冷杉族群結構研究方式，將 7 個臺灣冷杉林分的長期監測樣區資料彙整，並將 1-20 cm 徑級之株數合併計算視為稚樹，製作全區臺灣冷杉徑級結構圖(圖 19)，比較 2008 年與 2017 年雪山地區臺灣冷杉族群結構發現，經過 10 年的生長與更新，雪山主峰線臺灣冷杉的族群結構變化不大，臺灣冷杉仍以胸高直徑 < 20 cm 的稚樹最多。以負指數函數分析徑級結構分布趨勢，2017 年為 $y=396.6988e^{-0.0298x}$, $R^2=0.9840$ ，而 2008 年為 $y=415.2229e^{-0.0305x}$, $R^2=0.9861$ ，此結果與黃群修(1994)於本研究鄰近地點探討雪山北坡臺灣冷杉林族群結構，呈現負指數函數曲線相近。雖然 7 個樣區臺灣冷杉林分的族群結構有所不同，反應

各個樣區的環境特性與組成變成的差異性；但綜合分析結果顯示，雪山主峰線的臺灣冷杉族群目前處於一個穩定狀態，此結果與八谷正義(1937)推測結果相似。

臺灣冷杉於雪山東稜 3,100-3,400 m 形成幾近純林的林分結構，其更新方式是透過個體競爭、颱風擾動、火燒等方式造成林木死亡後的孔隙提供小苗及稚樹生長空間；這些大小不同與形成年齡差異的孔隙在臺灣冷杉林形成時空相鑲分布，且不斷重覆變化其構成狀態，此構成臺灣冷杉形成循環式演替(cyclic succession)，致使族群可以不斷更新而永續發展(圖 20)。然而，我們的監測調查發現，分布較低海拔樣區的臺灣冷杉株數補充緩慢且較少，分布較高海拔樣區的臺灣冷杉稚樹補充較多，此現象除了受到優勢地被植物玉山箭竹的抑制外，是否亦受到全球暖化的影響，致使臺灣冷杉向更高海拔擴張，而在較低海拔形成退縮的現象，這是我們下一步需要關注的議題。

表 12. 臺灣冷杉各徑級於 2008、2017 年之數量(比例)及年間死亡量

徑級 (cm)	年度				死亡量 (n)	死亡率 (%)
	2008		2017			
	數量 (n) / 比例(%)					
0-10	67	8%	93	12%	14	13%
10-20	150	19%	116	14%	29	20%
20-30	170	21%	174	22%	13	7%
30-40	130	16%	117	15%	8	6%
40-50	99	12%	96	12%	7	7%
50-60	68	8%	75	9%	7	9%
60-70	56	7%	55	7%	2	4%
70-80	32	4%	33	4%	2	6%
80-90	12	1%	15	2%	2	12%
90-100	12	1%	14	2%	0	0%
100-110	5	1%	4	0%	1	20%
110-120	1	0%	2	0%	0	0%

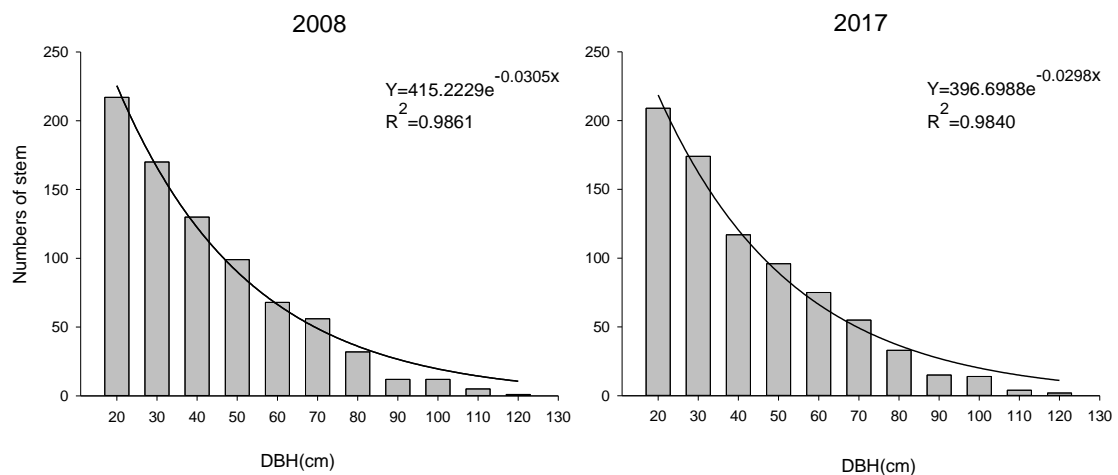


圖 19. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1-Plot_7 樣區徑級結構圖

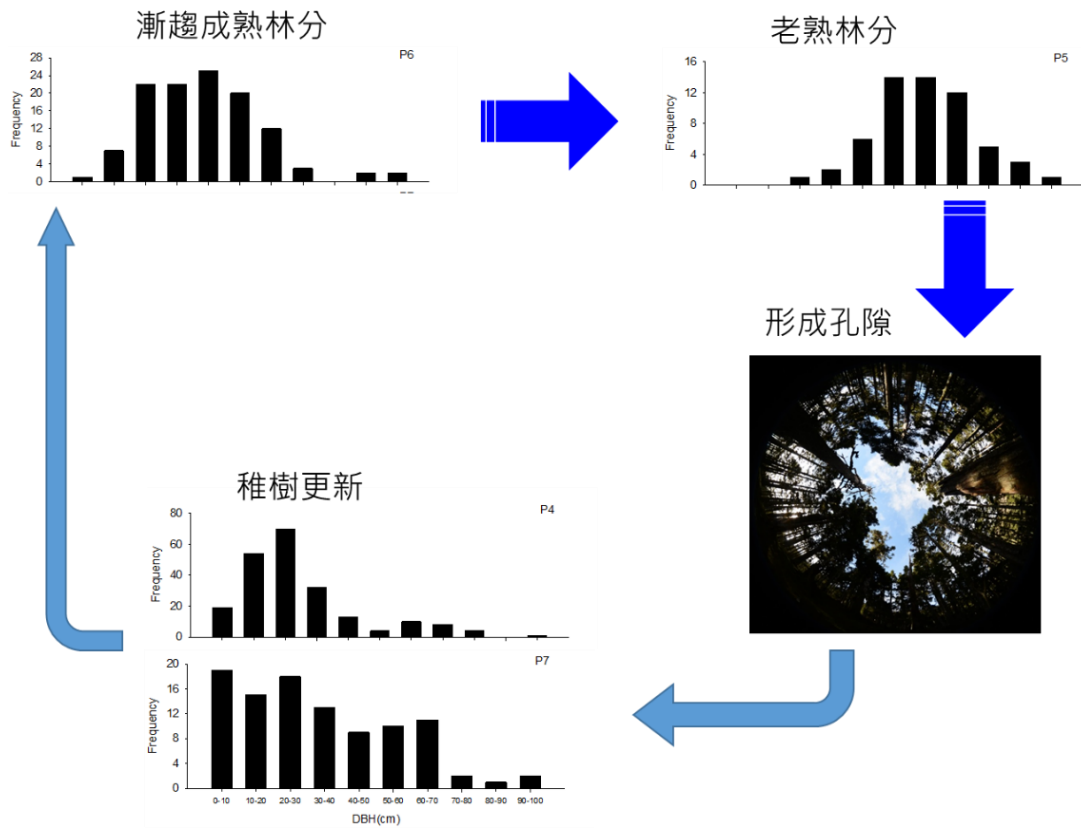


圖 20. 雪山地區之臺灣冷杉循環式演替模式示意圖

彙整各樣區與臺灣冷杉伴生物種之徑級分布圖(圖 21)，臺灣鐵杉徑級 10-20 cm 數量最多，略呈反 J 型分布；玉山圓柏多出現在 Plot_7 樣區，由於 Plot_7 樣區位於臺灣冷杉與玉山圓柏之交會帶，因此玉山圓柏小苗數量相對較其他區高；巒大花楸徑級 6 cm、9 cm 數量最多，稚樹補充樹(3 cm 以下)相對減少，主要組成臺灣冷杉林第二層冠層，徑級大於 15 cm 以上則零星出現。玉山杜鵑以 Plot_2 樣區數量最多，徑級結構略程鐘形分布，以徑級 9 cm 數量最多；然而與 2008 年相比，玉山杜鵑死亡計 31 株。

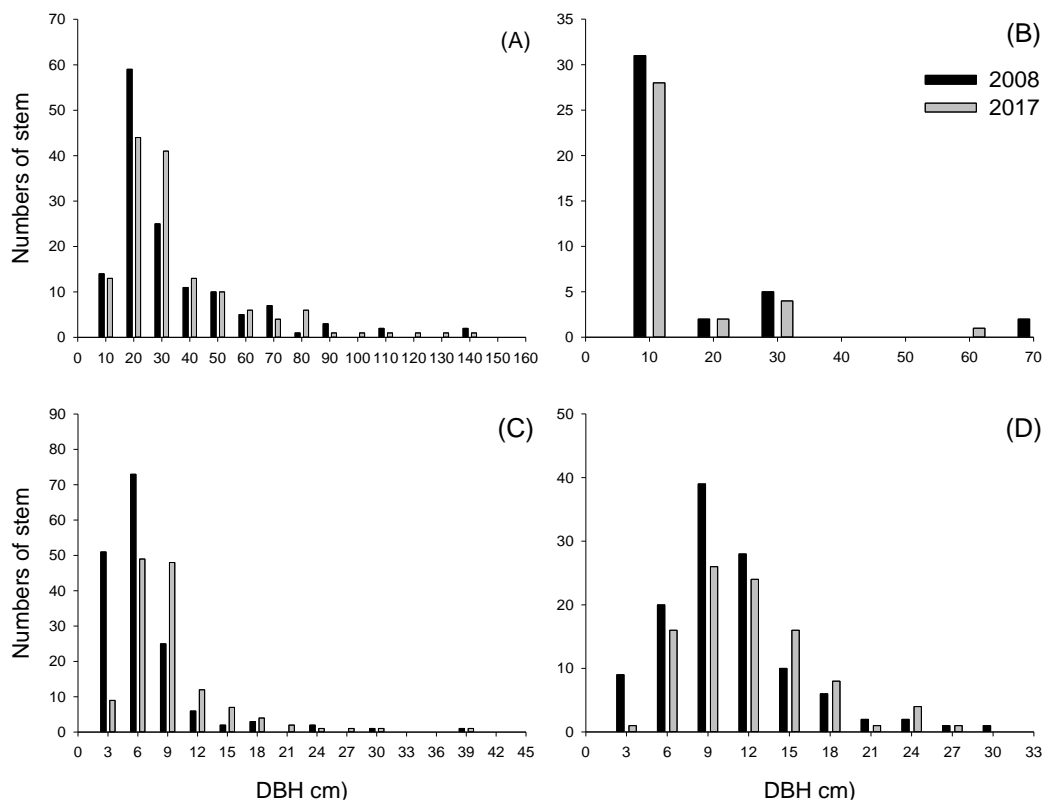


圖 21. 臺灣冷杉長期監測樣區 Plot_1-Plot_7 樣區內伴生木本植物徑級分布圖。
(A)臺灣鐵杉(B)玉山圓柏(C)巒大花楸(D)玉山杜鵑

2. 地被植群組成及臺灣冷杉小苗更新狀況

臺灣冷杉長期監測樣區共記錄 37 科、56 屬、70 種植物，其中蕨類植物佔 6 科 8 種，裸子植物(Gymnosperms) 2 科 3 種，被子植物(Angiosperms) 29 科 59 種；單子葉植物(Monocotyledons) 6 科 14 種、雙子葉植物(Dicotyledons) 23 科 45 種。菊科(Compositae)(8 種)、薔薇科(Rosaceae)及禾本科(Poaceae)(7 種)為樣區中物種數佔多數，其次為毛茛科(Ranunculaceae)、蓼科(Polygonaceae)、杜鵑花科(Ericaceae)、車前科(Plantaginaceae)、松科、茜草科(Rubiaceae)、莎草科(Cyperaceae)、酢漿草科(Oxalidaceae)、蕁麻科(Urticaceae)及蘭科(Orchidaceae)各佔有 2 至 3 種物種。

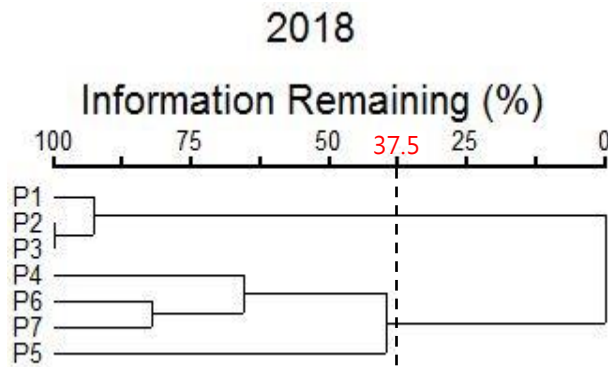


圖 22. 2018 年臺灣冷杉長期監測樣區 P1-P7 地被植群樹形圖

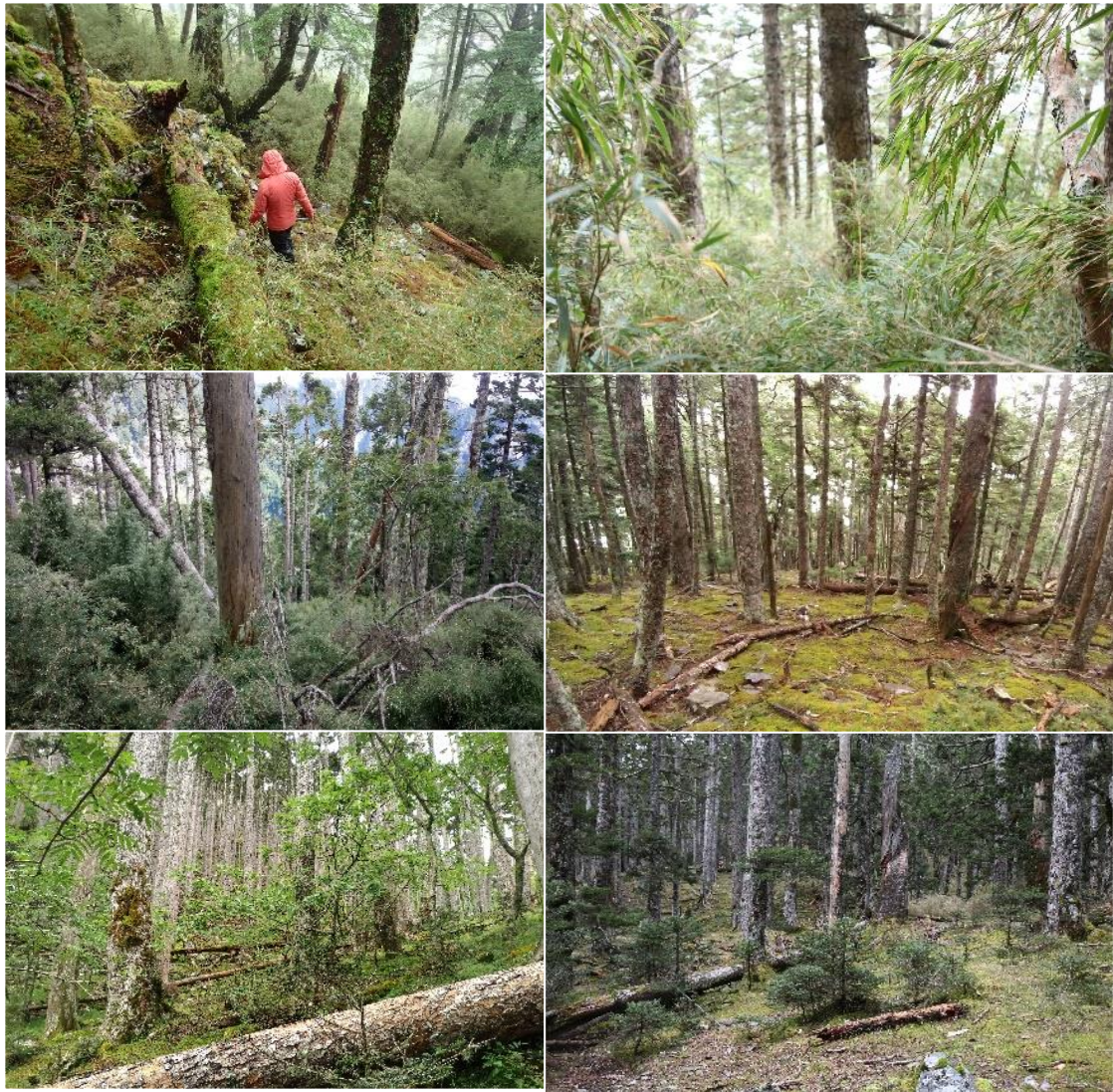


圖 23. 2018 年臺灣冷杉長期監測樣區地被調查樣區概況(因 P6、P7 樣區相接近，此以 P7 拍攝之環境照做為代表)

根據集群分析(cluster analysis)結果顯示，P1-P3 樣區相似度的訊息保持度(information remaining)達 85% 以上(圖 22)，根據樣區物種的重要值顯示，3 個樣區都是以玉山箭竹為優勢的地被類型，並含有 90% 以上的相對覆蓋度，玉山箭竹下方多為枯落物覆蓋，少數裸露處有苔蘚、蕨類生長；此外，裂葉樓梯草為箭竹下方主要優勢的被子植物(圖 24)，但臺灣冷杉小苗於箭竹林下數量相對稀少，除 P1 樣區非玉山箭竹林位置有調查到大量小苗外，P2 及 P3 樣區僅分別記錄 12 和 11 株的臺灣冷杉小苗(圖 26)。如將訊息保持度劃分於 37.5%，可將植群型區分為以玉山箭竹為主要地被的類群(P1、P2、P3)與非玉山箭竹為優勢的地被類群(P4、P5、P6、P7)，後者地被物種組成披覆大量苔蘚，臺灣鬼督郵是優勢被子植物，其次為臺灣冷杉、玉山箭竹、大霸尖山酢漿草、髮草(*Des. cespitosa* var. *festucifolia*)、寬葉冷蕨(*Cystopteris moupinensis*)亦為樣區中的優勢地被(圖 25)。



圖 24. 臺灣冷杉長期監測樣區 P2 地被現況照(攝於 2018/8/14)



圖 25. 臺灣冷杉長期監測樣區 P4 地被現況照(攝於 2018/8/24)

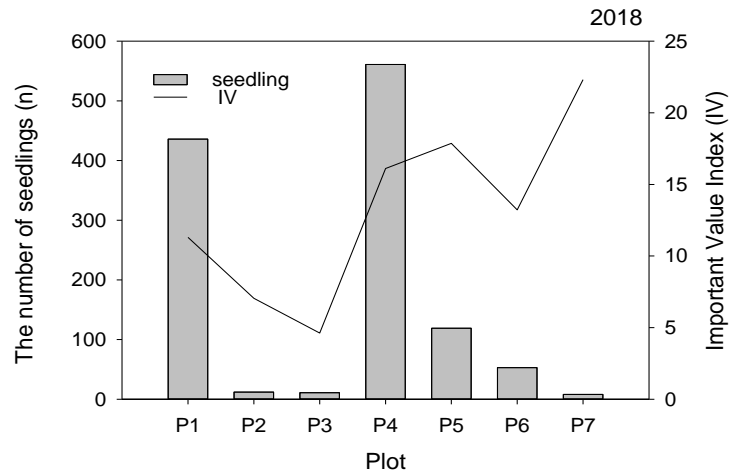


圖 26. 2018 年臺灣冷杉小苗數量與重要值指數於各區之質量圖

臺灣冷杉小苗數量在非玉山箭竹地被優勢的 P4-P7 樣區差異極大，P4 樣區發現大量臺灣冷杉小苗，但 P7 樣區僅 8 株小苗，但對照 IV 值在樣區上的呈現，最少臺灣冷杉小苗的 P7 樣區卻在樣區中取得極高的優勢度，可能顯示 P7 樣區於 2008 年調查的小苗在 10 年後成功發育的個體比例相當高所致(圖 26)。

比較玉山箭竹在 2008 與 2018 年在相對覆蓋度的變化(圖 27)，提供了解玉山箭竹在樣區相對覆蓋的消長是否影響臺灣冷杉更新狀況，結果發現僅 P5 樣區玉山箭竹的相對覆蓋量下降，而多數樣區有增加的趨勢；臺灣冷杉相對覆蓋度在 P1-P3 樣區的變化非常低，但在 P4-P7 的變化量相對較大。P1 樣區臺灣冷杉相覆蓋增加是因樣區內未被玉山箭竹覆蓋區域的小苗生長，而 P4 與 P6 樣區的臺灣冷杉相對覆蓋降低(圖 27)，可能受到玉山箭竹競爭影響；P5 樣區的玉山箭竹相對覆蓋度變化量為負，而臺灣冷杉的變化量為增加，顯示臺灣冷杉獲得資源所致。P7 樣區是 7 個樣區中臺灣冷杉小苗相對覆蓋度增加最大的，雖然玉山箭竹相對覆蓋有增加的趨勢，但其在 P7 分布面積相對較小，此對逐漸生長且佔有優勢的臺灣冷杉小苗而言，競爭影響相對減少所致。

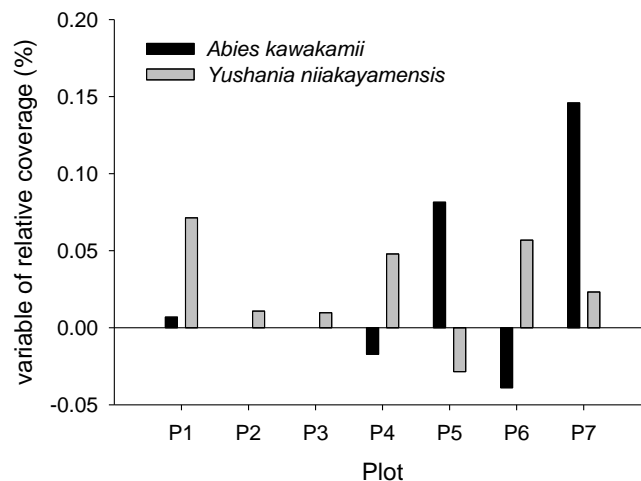


圖 27. 臺灣冷杉與玉山箭竹於 10 年間(2008-2018 年)的相對覆蓋度差值

觀察 2018 年的臺灣冷杉小苗死亡率與致死率，可發現高峰皆位於臺灣冷杉小苗形成稚樹時與與徑級為 90-100 cm 時(圖 28、表 13);從標準化存活率可發現，臺灣冷杉小苗成為稚樹至成樹時最為關鍵，一旦度過該生長時期，生存率下降變化趨緩。死亡率在 DBH 80-90 cm 生長晉級至 90-100 cm 突然下降，此可能因臺灣冷杉在 7 個樣區 2 個 DHB 徑級的株數僅差 1 株，致使分析結果發現有較高的生存期望(圖 28、表 13)。另一方面，由於 DBH 無法完成真正表示臺灣冷杉的樹齡，因此，在建置臺灣冷杉長期樣區之靜態生命表時並無法呈現臺灣冷杉族群在此年齡層的真实狀態，僅能進行族群動態推估。

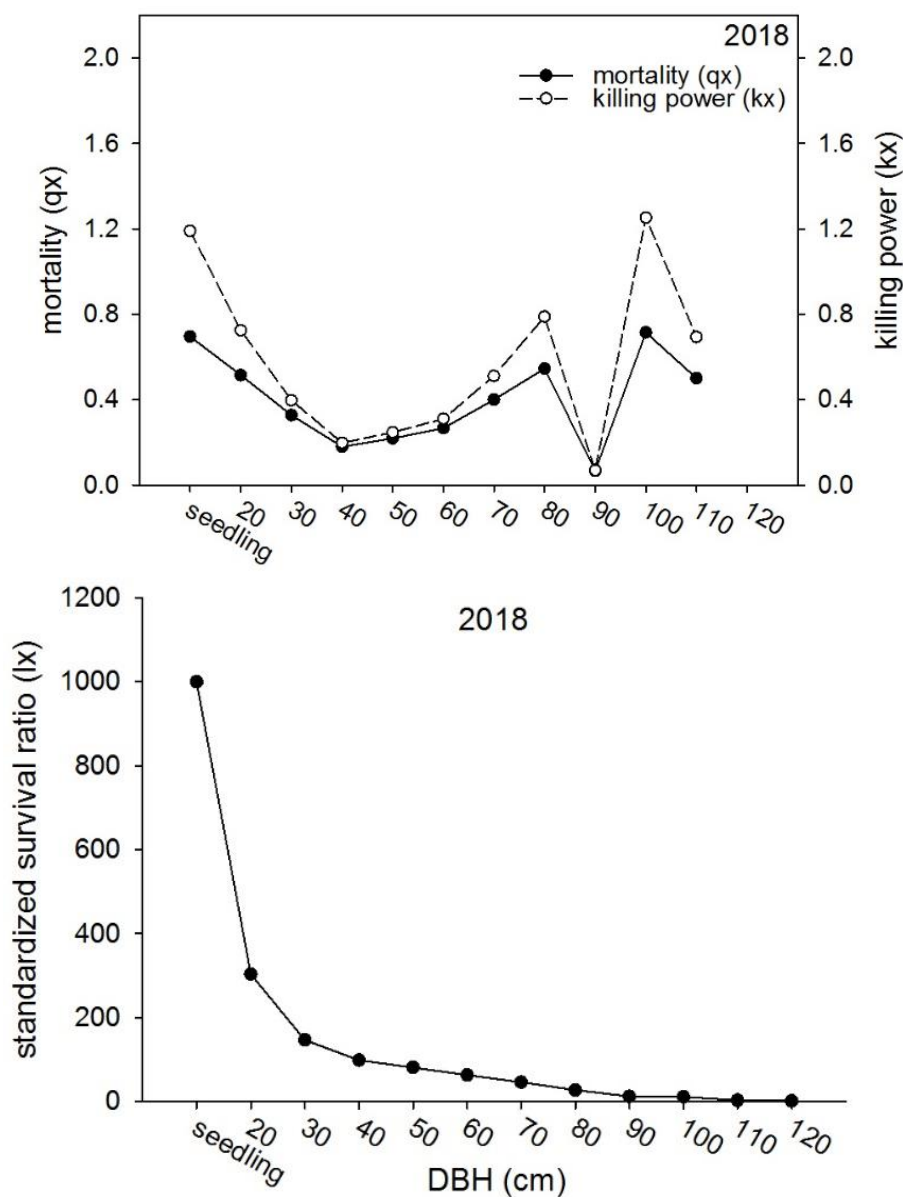


圖 28. 2018 年臺灣冷杉死亡率與致死率變化圖(上)與標準化存活率圖(下)

比較 2008 與 2018 年的小苗與各徑級之株數發現(圖 29)，2008 年的小苗數量較高，但徑級大於 30 cm 的株數變化則幾近重疊；兩年度的臺灣冷杉徑級結構比較差異不大(圖 19)，顯示研究區臺灣冷杉族群處於穩定狀態。雖然臺灣冷杉新增種子苗數受當年度結實率與環境影響大(賴國祥 1992)，但 2018 年小苗數絕大多數可能因小苗競爭或環境逆境壓力而死亡，只有極少數個體因晉級生長而減少。一旦臺灣冷杉小苗有機會成長至一定年齡大小之稚樹時，其死亡率會下降(圖 28)，致使兩年度間臺灣冷杉生長至 DBH 30 cm 成樹後的株數變化一致。

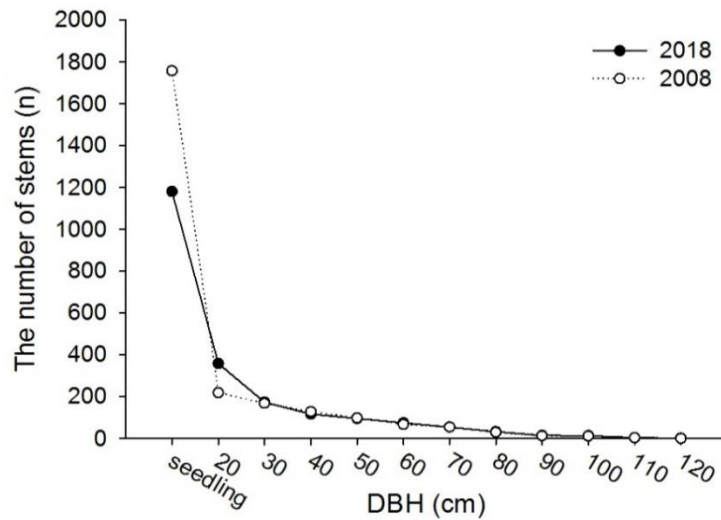


圖 29. 2008 與 2018 年臺灣冷杉小苗、稚樹與各徑級株數比較

表 13. 2018 年雪山地區臺灣冷杉林型族群靜態生命表

分級	徑級區間	調查株樹(ax)	標準化存活率(lx)	死亡數(dx)	死亡率(qx)	ln(ax)	ln(lx)	各齡級致死力(kx)	期望壽命(ex)
1	seedling	1181	1000.000	696.020	0.696	7.074	6.908	1.191	1.299
2	1-20	359	303.980	156.647	0.515	5.883	5.717	0.724	2.130
3	21-30	174	147.333	48.264	0.328	5.159	4.993	0.397	2.862
4	31-40	117	99.069	17.782	0.179	4.762	4.596	0.198	3.013
5	41-50	96	81.287	17.782	0.219	4.564	4.398	0.247	2.563
6	51-60	75	63.506	16.935	0.267	4.317	4.151	0.310	2.140
7	61-70	55	46.571	18.628	0.400	4.007	3.841	0.511	1.736
8	71-80	33	27.942	15.241	0.545	3.497	3.330	0.788	1.561
9	81-90	15	12.701	0.847	0.067	2.708	2.542	0.069	1.833
10	91-100	14	11.854	8.467	0.714	2.639	2.473	1.253	0.929
11	101-110	4	3.387	1.693	0.500	1.386	1.220	0.693	1.000
12	111-120	2	1.693	-	-	0.693	0.527	-	0.500

(二) 臺灣冷杉樹幹解析及建立單株材積式

1. 樹幹解析

透過樹幹解析，可以了解過去樹木生長的歷史。依據所採用的截面，可取得年輪數、年輪寬度、圓盤缺陷、樹型輪廓等資訊，以及重建過去生長樣貌。樣木之樹齡經計算介於 149-239 歲間，數據處理以每 10 年為單位，繪製成樹幹解析圖(圖 30)，含實體 6 株樣木值，共得 119 筆樹高及胸高直徑推估資料。並透過 119 個推估資料，計算六株樣木各生長階段(每隔 10 年)之單木材積值，作為後續材積式建立之樣本數值。

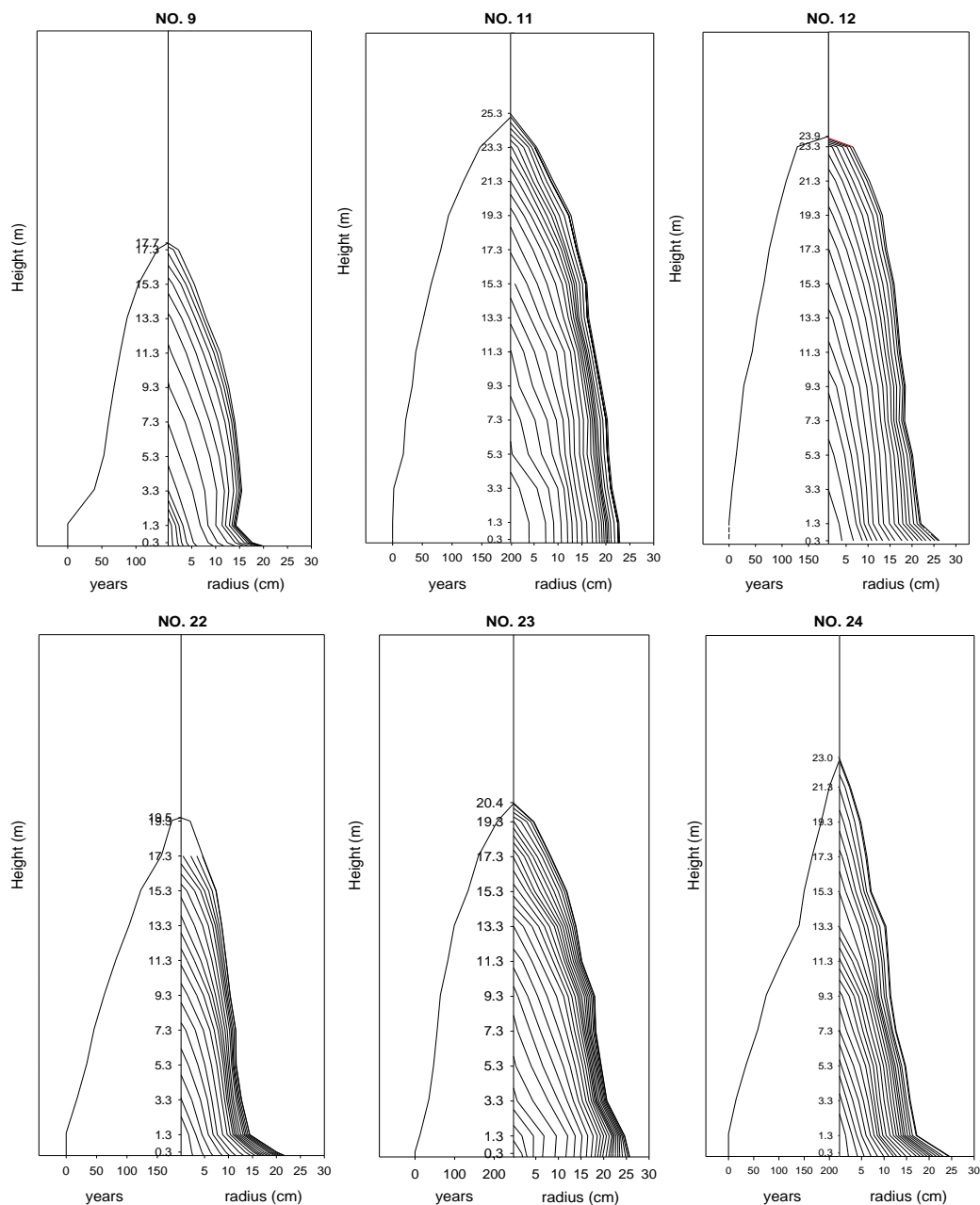


圖 30. 雪山地區臺灣冷杉 6 株樣木之樹幹解析圖

臺灣冷杉材積式的測試結果顯示(表 14)，6 個方程式的決定係數(R^2)都高於 0.9，其中以 a 式為最高值；殘差標準差(RSE)之值除了 f 式較大以外，其餘皆小於 0.05，又以 d 式為最小值；而平均絕對誤差(AME)則是以 c 式最接近 0，而 e 式因評估後的材積值在小徑級部分(DBH < 9 cm)有負值出現，所以以下討論將不評估 e 式。在各項統計值評估後，以 f 式之配適程度最低，先將其剔除。a、b 式為對數方程式，其在統計值上是以取對數後之值計算，所以 RSE 及 R^2 無法直接和 c、d 式的算術方程進行比較，因此先在對數與算數方程式中擇一，再做後續討論。

表 14. 雪山地區臺灣冷杉 6 項材積式計算推估統計結果

Function	N	R^2	RSE	AME
a 式	119	0.9971	0.04336	0.016615
b 式	119	0.9968	0.04529	0.016318
c 式	119	0.996	0.04094	0.0000397
d 式	119	0.9967	0.03795	0.0000653
e 式	119	0.9949	-	-
f 式	119	0.9949	516.3	0.0811873

對數方程式比較發現，a 式的 RSE 較小， R^2 大於 b 式，而 AME 的差距不大，故以 a 式作為優先考量；算數方程式中，d 式的 RSE 較小，而 R^2 大於 c 式，雖 c 式的 AME 極小，但差距不大，故以 d 式作為優先考量。a、d 兩式的 AME 值有明顯差距，AME 越接近 0，則代表估計值越接近測量實值。比較兩式的所得體積與實際估算體積(圖 31)，可看出對數方程式(a 式)在大體積的推估值都有偏低的趨勢，使其在數據上的整體材積量有低估的情況。檢視原始數據，將 a、d 兩式的量測值與估計值相減(圖 32)，並以胸高直徑做排序，如值大於 0，則代表數值低估；反之，小於 0 為高估。可以看出 d 式差值在小徑木(DBH 約 10 cm)的部分有稍微高估，而 a 式差值則是在大徑木(DBH 約 40-50 cm)的部分有低估的情況。

為求材積式更多的驗證與測試，本研究利用八谷正義(1937)在舊雪山山屋附近的臺灣冷杉資料來進行比較。該研究將冷杉林結構分為 4 種類型，分別為老齡木構成的第 I 型；含有壯齡木及老齡木的第 II 型；含有單層幼齡木及老齡木的第 III 型；以及含有非單層幼齡木的第 IV 型，並且記錄各類型各齡木級的直徑階、樹高、株樹與材積等資料。將以上資

料帶入 a、d 式與八谷正義紀錄之材積量對照(表 15)，徑級在中間值域的的預測以 d 式有較好的配適，但在小徑木及極大徑木(DBH 大於 50 cm)，d 式相對 a 式的預測較不準確，尤其越大的徑級有越高估的情況，例如第 I 型壯齡木級，含有較大的徑級木，d 式之預測材積與八谷正義量測之實值差異高達 10 m³，因而此式可能有徑級越大，預估越差的情況。比較 a 式雖然在中間值域預測沒有 d 式佳，但在整體預測上的差異並不大。顯示 a 式在小徑木及大徑木的配適較好，d 式則在中等徑木的配適上較有較佳的結果。

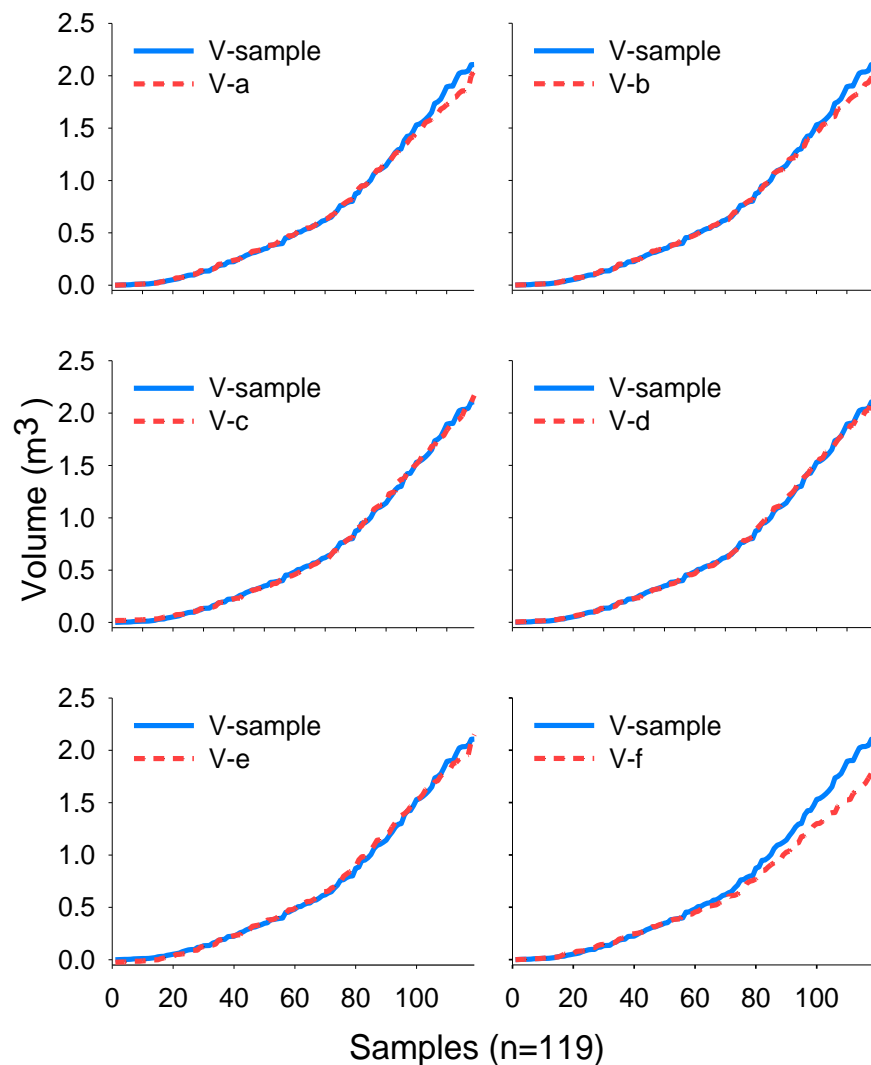


圖 31. 雪山地區臺灣冷杉 6 種材積式材積量推估值與樣本材積測量值比較(橫軸為樣本數量，排序由材積小至大；縱軸為單木材積量，V-sample 表樣本的量測材積，V-a 至 V-f 為各材積式估計值，a-f 材積式代號內文)

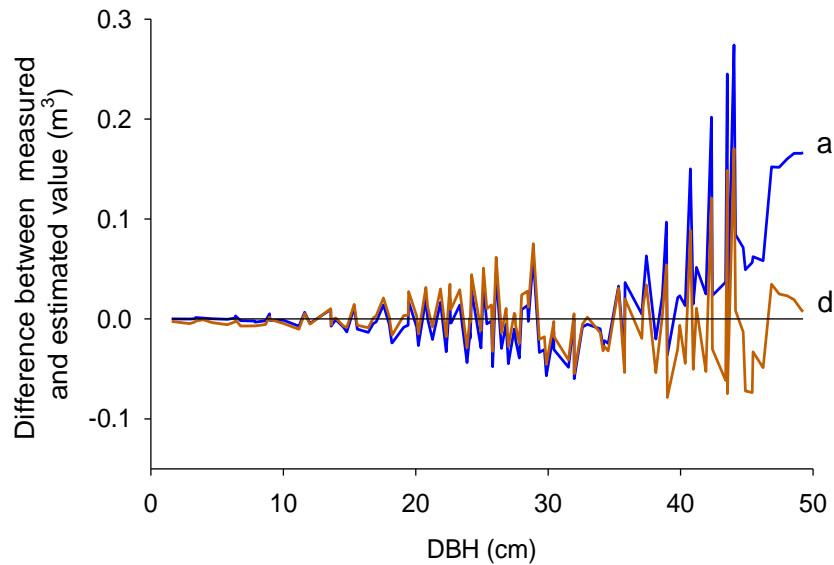


圖 32. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher(a 式)與算術公式之 Generalized combined variable(d 式)材積測量值與材積估計值相減差異(橫軸為胸高直徑大小，樣本數共 119 筆；縱軸為材積測量值與材積估計值之差值)

表 15. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher (V-a)與算術公式 Generalized combined variable (V-d)之材積估計值與八谷正義於舊雪山山屋附近材積量測值對照表(粗體為接近八谷正義測量，括弧內為兩材積推估值與八谷正義量測值差值)

齡木級	類型	樣本數	DBH (cm)	V-a (m ³)	V-d (m ³)	V-八谷正義 (m ³)
幼齡木級	III	404	2-19	5.464 (0.900)	7.225 (2.661)	4.564
	IV	248	2-27	5.574 (0.579)	6.102 (1.107)	4.995
壯齡木級	II	135	11-30	36.979 (4.725)	35.628 (3.374)	32.254
	I	87	18-99	128.476 (0.576)	138.262 (10.362)	127.900
老齡木級	II	10	35-80	17.061 (-4.516)	19.582 (-1.995)	21.577
	III	24	30-66	54.669 (-5.622)	60.373 (0.082)	60.291
	IV	10	40-65	19.798 (-0.016)	21.736 (1.9814)	19.814

綜觀整體，a 式於在整體上的差距，相較於 d 式小，以 a 式為目前較佳的材積式。但由數據的取得與分布可以得知 (圖 33)，除了取樣的 6 株材積值為隨機的樣本，其餘皆是推算過去生長量所得之值，使用此數據有兩點須考量：一為雖然可由過去生長量，找尋統計後的估計值，但生長形式必然受到樣本本身影響；二為大樹樣本的缺少，使的在大樣本的推估上較為不準確。解決方法以增加各大小樣本值，來減少統計上之誤差。

評估各項統計參照值，以及解析觀測值帶入材積式的數據分布，Schumacher formula 為目前採集數據所求之最佳材積式，其式如下：

$$V = 0.0001042D^{1.68943}H^{1.06495}$$

但如果檢視樣本在不同徑級上的材積式測定，在幼齡木(小徑木)和老齡木(大徑木)以 Schumacher formula 有較佳的配適；Generalized combined variable formula 則是在壯齡木(中等徑木)有較佳的配適。未來取得其他樣本後，可透過新樣本來測試最佳材積式的準確性，並加入新樣本，重新編列材積式，來對本次計算出的材積式進行驗證與改善。

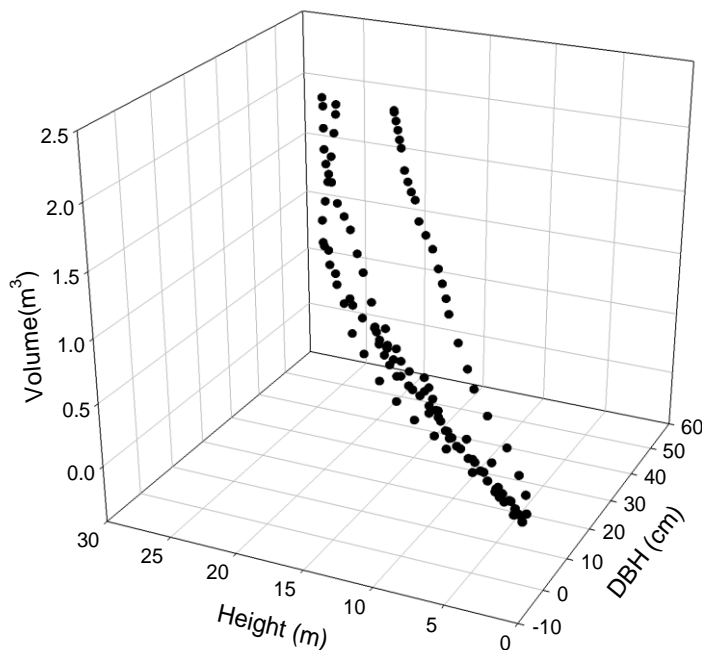


圖 33. 雪山地區臺灣冷杉樣木胸高直徑、樹高及材積分布圖(6 棵樣木值，及其過去每隔 10 年生長值)

4. 材積式測試與校正

本研究於今年 8 月將所有樣木取樣完畢，包含大徑級樣木 3 株(圖 34)，為測試推估之材積式在大徑級樣木預測的準確度，分別將大徑木所測得的胸高直徑及樹高帶入 Schumacher formula (a 式)、Generalized combined variable formula (d 式)，以及 1973 年林務局所建立的冷杉材積式，比較預測數值與實際測量值(圖 35)，發現各式徑級越大偏差越大，但 Schumacher formula 在預測值上較其他估計式準確，徑級 40 cm 以前的吻合度都高於其他估計式。Generalized combined variable formula 在推估的結果皆有高估的現象，林務局(1973)材積式較於本研究推估之材積式為低估。

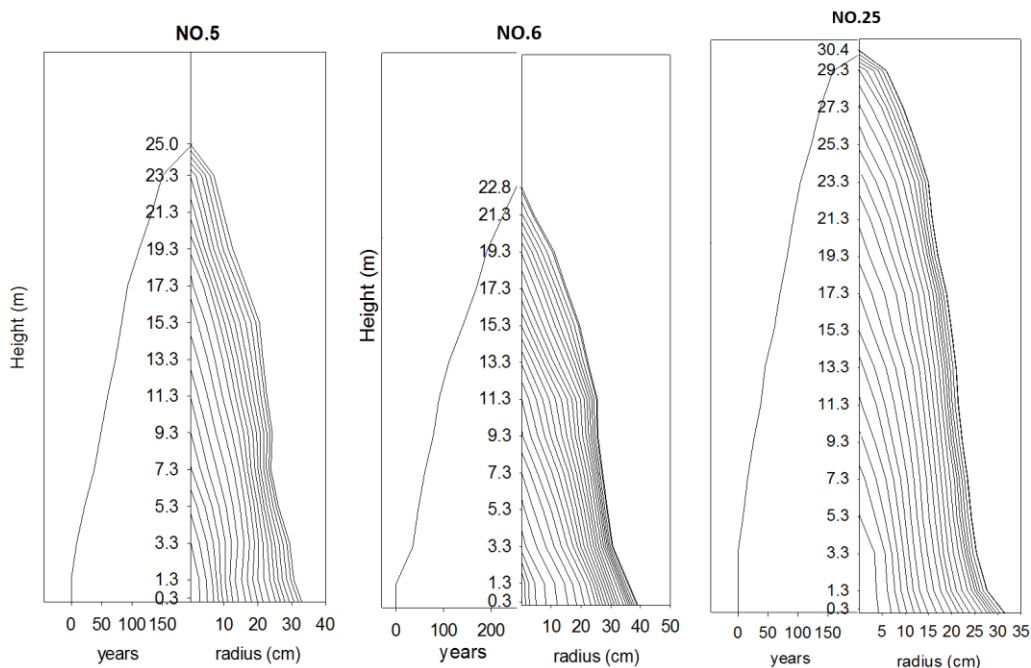


圖 34. 雪山地區臺灣冷杉大徑級樣木之樹幹解析圖

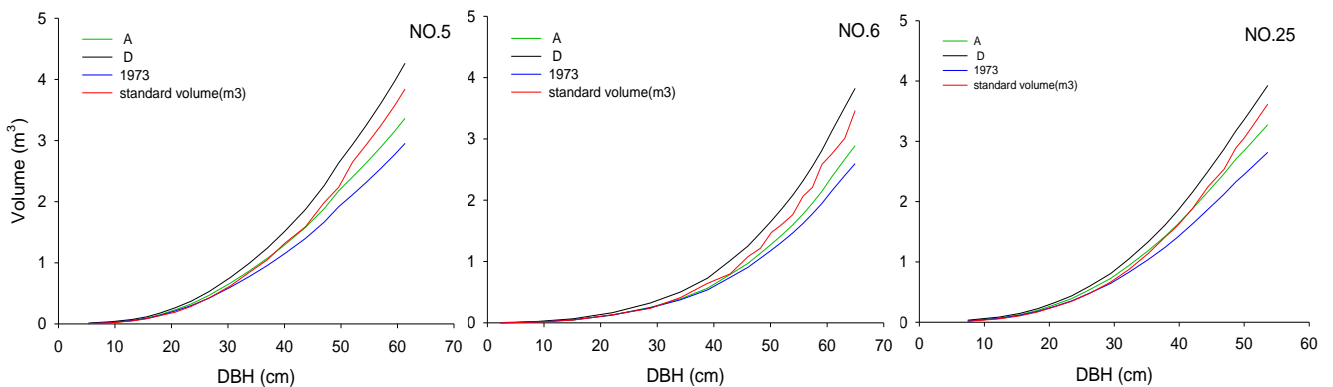


圖 35. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher (a 式)與算術公式 Generalized combined variable (d 式)及 1973 年林務局製臺灣冷杉材積式與實質比較

將新樣本參入重新配適，樣木之樹齡經計算介於 149-254 歲間，數據處理以每 10 年為單位，含實體 9 株樣木值，共計 187 筆樹高及胸高直徑推估資料(圖 36)。並透過 187 個推估資料，計算 9 株樣木各生長階段(每隔 10 年)之單木材積值，作為後續材積式建立之樣本數值。

經校正後，9 株樣木配適的材積式計算之估計值在大徑木的預測雖還有差距，但比較原 6 株樣木之材積值已較接近測量實值(圖 37)，經校正後，所求之最佳材積式如下將以該式做為雪山臺灣冷杉長期監測樣區之蓄積量的材積式： $V = 0.000073087D^{1.71399}H^{1.14667}$ 。

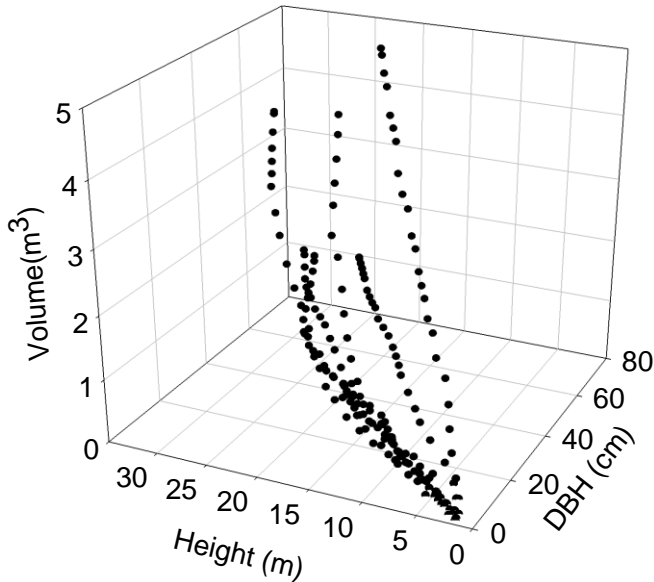


圖 36. 雪山地區臺灣冷杉樣木胸高直徑、樹高及材積分布圖(9 棵樣木值，及其過去每隔 10 年生長值)

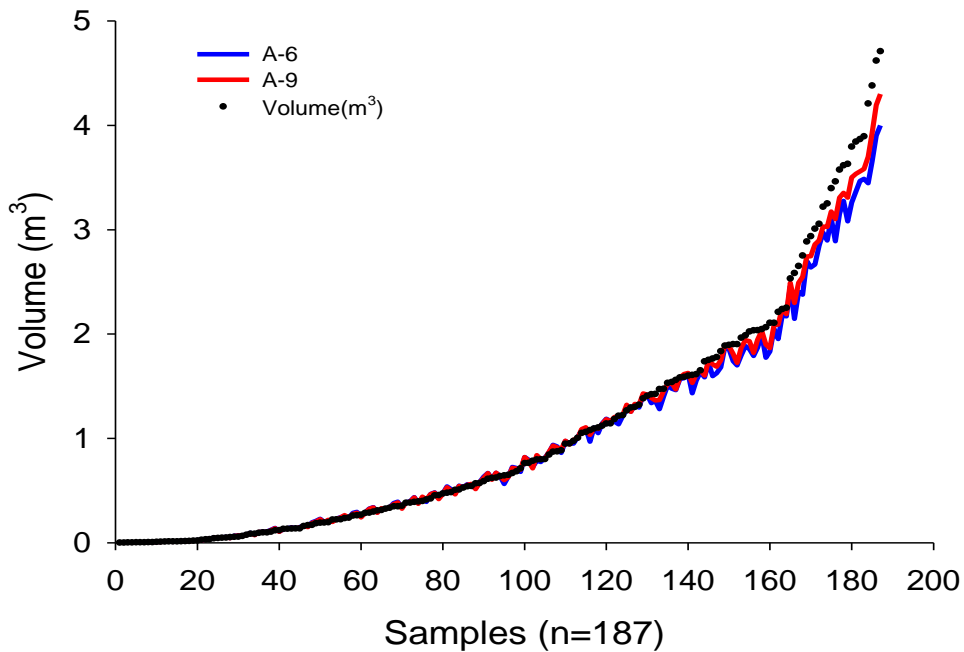


圖 37. 雪山地區臺灣冷杉對數公式 Schumacher (a 式) 不同樣木數量配適之估計值與實際測量值之比較(黑點表實際測量值，紅線為 9 株樣木配適之估計值；藍線為 6 株樣木配適之估計值。橫軸為樣本數量，排序由材積小至大)

(三) 臺灣冷杉長期樣區蓄積與碳吸存推估

本研究使用 9 株樣木推估之最佳材積式，作為長期監測樣區臺灣冷杉蓄積量的預測模型，透過 2008 及 2017 年對樣區調查之胸高直徑及樹高量測值，推估 10 年間的蓄積量變化。為改善因樣區受地形或植被阻饒而導致量測上的誤差，2008 年紀錄之樹高與 2017 年樹高差值如有過度生長者，以 2017 年量測的資料所計算出的最佳樹高曲線式做為數值校正的依據進行換算(圖 38)，選用 2017 年樣區內為非枯立、斷梢、倒伏、幹折等直立活木，共計 760 筆樣本數；分析結果顯示，樹高曲線式以 $H = [D/(a + bD)]^2$ 為配適情形最好，決定係數達 0.9052，因此選定該式計算。

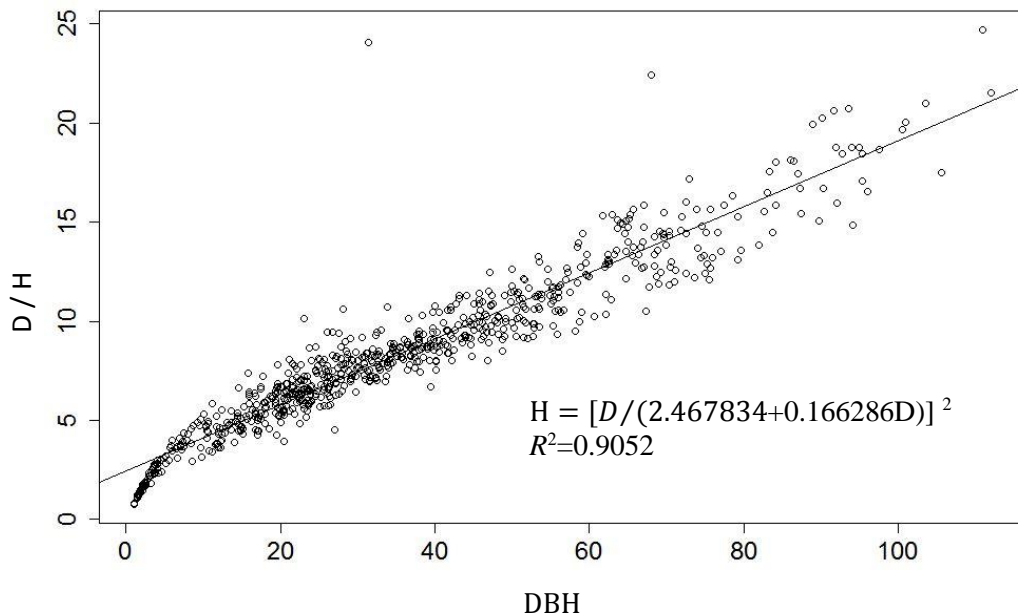


圖 38. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區之樹高曲線圖(數值取用 2017 年量測值)

為判定是否有過度生長，並選擇林木合理的生長量，本研究取用樹幹解析數據估計的每 10 年生長量，以每 100 年將該數據的年齡值域區分別為 0-100 歲、100-200 歲及 200-300 歲等 3 個生長階段，繪製材積生長量分布圖(圖 39)；結果發現，在 0-100 歲每 10 年的胸高直徑增長量介於約 0.9-7.0 cm 間，樹高增長量介於 0.5-2.8 m 間；100-200 歲在胸高直徑與樹高的每 10 年增長量分別為 0.4-2.3 cm 與 0.08-2.00 m；200-300 歲每 10 年的胸高直徑與樹高的增加量分別是 0.1-1.7 cm 與 0.05-0.80 m。本研究判定過度生長的界定為第 3 四分位數(Q3)加上 3 倍的 IQR 作為閾值(Tukey 1977)，因 200-300 歲樣本數過少，加上其生長值域與 100-200 歲部分重

疊($p = 0.11$)，故將 200-300 歲與 100-200 歲的樣本數合併成 100-300 歲。單因子變異數分析顯示，0-100 歲及 100-300 歲兩群的生長呈顯著差異($p < 0.05$)，計算其樹高的離群閥值分別為 3.775 及 2.066 m (表 16)

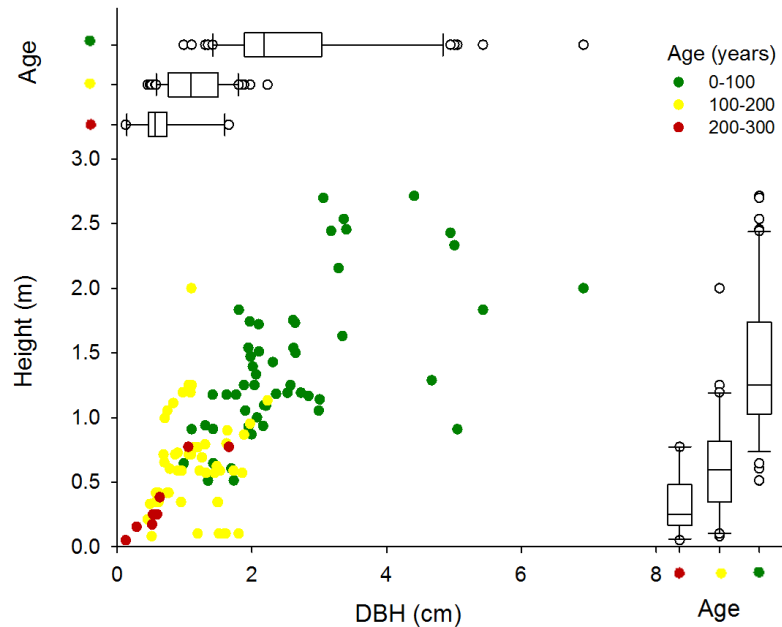


圖 39. 雪山地區臺灣冷杉樣木各生長階段每 10 年胸高直徑及樹高增長量分布圖(生長階段以每 100 年為單位)

表 16. 雪山地區臺灣冷杉樣木各生長階段胸高直徑、樹高之最大、最小、平均值、第 1 和第 3 四分位數與離群閥值

生長階段 (years)		Min	Q1	M	Q3	Max	IQR	離群閥值
0-100	DBH (cm)	0.990	1.902	2.180	3.007	6.920	1.105	6.322
	Height (m)	0.512	1.053	1.250	1.733	2.714	0.681	3.775
100-300	DBH (cm)	0.128	0.675	1.057	1.482	2.232	0.807	3.903
	Height (m)	0.050	0.341	0.588	0.773	2.000	0.431	2.066

經由 Schumacher formula 所推估出材積式，以及帶入校正後之樹高及胸高直徑生長量，7 個臺灣冷杉長期監測樣區於 2008 年以及 2017 年的臺灣冷杉蓄積變化分別以以下不同主題討論。

1. 從密度看各區材積變化

如不考慮不同地被類型，以及交會帶其他優勢物種的影響，從不同密度比較臺灣冷杉林平均單木生長量(average annual increment)，P5 樣區單木在 10 年間的單木年平均增長為 0.025m^3 ，較其他 6 個樣區約為 $0.008\text{-}0.015\text{m}^3$ 出甚多，檢視徑級分佈狀態(圖 18)，整體結構呈負偏歪，其餘樣區大多呈正偏歪，徑級較其他樣區結構大，屬偏老熟林分；另一方面發現死亡株數也相較其他樣區少；單位密度上較其他樣區低(圖 40b)。結果顯示，此徑級結構下，林木的個體存活相對穩定，於生長量也有良好的表現(表 17)。

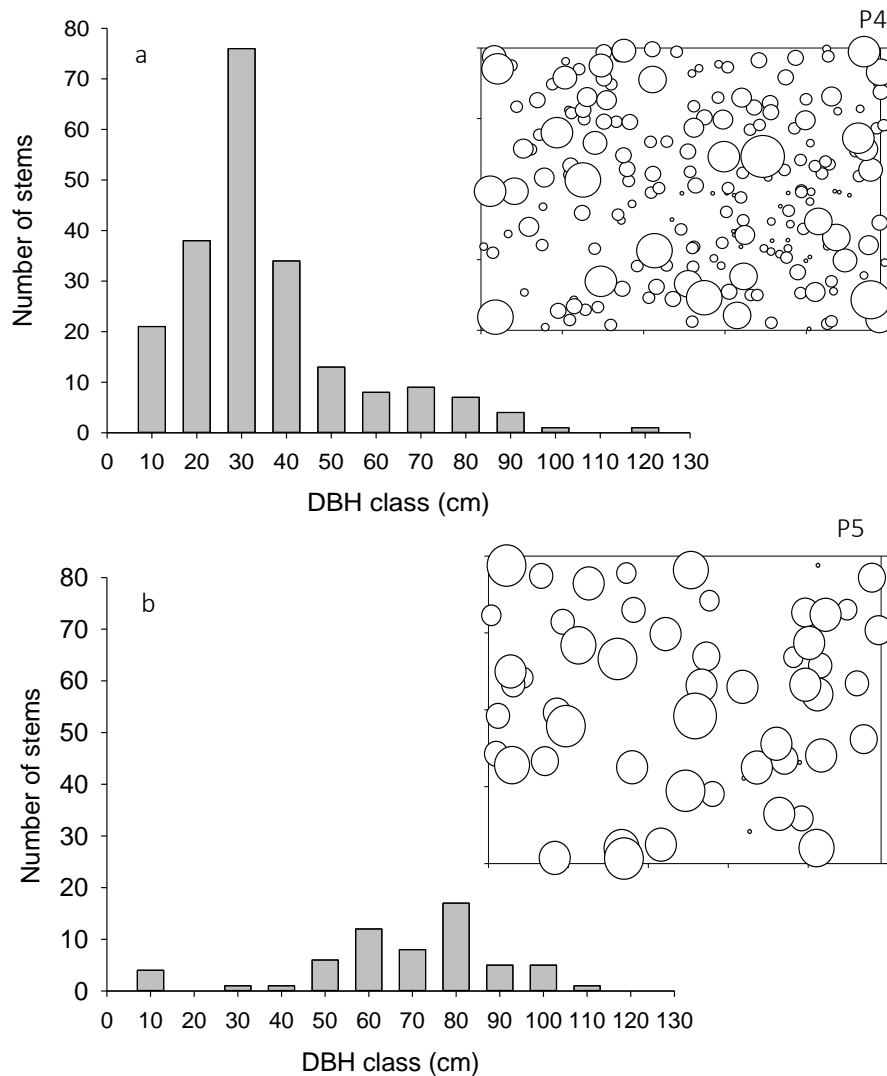


圖 40. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區 2017 年 P4(a)與 P5(b)的徑級結構及空間分布比較

表 17. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區資料、上層喬木種類與株數及臺灣冷杉蓄積量變化一覽表(修改自廖敏君，2016)

樣區(40m × 50m)	1	2	3	4	5	6	7	
海拔 (m)	3,010	3,166	3,170	3,352	3,313	3,423	3,401	
位置	4.6 k	5.6 k	6.6 k	7.8 k	8.5 k	9 k	9 k	
座標	24.3901	24.3892	24.3901	24.3933	24.3951	24.393	24.3931	
(WGS84)	121.2761	121.2685	121.2588	121.2496	121.2445	121.241	121.2403	
優勢地被	苔蘚 玉山箭竹	玉山箭竹	玉山箭竹	苔蘚	苔蘚	苔蘚	苔蘚	
雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區 2017 年各樣區每公頃物種數量 (%)								總體林分
臺灣冷杉	355 (34%)	570 (52%)	365 (82%)	1060 (99%)	300 (33%)	655 (97%)	560 (77%)	552 (65%)
臺灣鐵杉	680 (65%)	25 (2%)	10	0	0	0	0	102 (12%)
刺柏	5	0	0	0	0	0	0	1
玉山圓柏	0	15 (1%)	0	5	0	0	160 (22%)	26 (3%)
巒大花楸	0	60 (5%)	25 (4%)	5	610 (67%)	20 (3%)	1	104 (12%)
玉山杜鵑	0	425 (38%)	45 (10%)	0	0	0	0	67 (8%)
總數	1040	1095	89	1070	910	675	725	851
雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區 2017 年各樣區蓄積動態								總體林分
2008 年各樣區蓄積量 (m ³ /ha)	264.495	610.575	913.650	950.450	1134.950	1059.065	603.975	791.023
2017 年各樣區蓄積量 (m ³ /ha)	292.435	661.915	631.785	1019.765	1184.525	1123.990	653.265	795.383
10 年差異材積量 (m ³ /ha)	27.940	51.340	-281.865	69.315	49.575	64.925	49.290	4.360
死亡材積量 (m ³ /ha)	9.625	31.095	335.860	17.950	25.300	14.630	4.240	62.671
每公頃死亡數量	40	35	215	60	10	30	35	61
新晉級材積量 (m ³ /ha)	0	0	0	0.040	0.020	0.155	0.115	0.047
每公頃新晉級數量	0	10	0	45	20	105	95	39
增大生長 (m ³ /ha)	37.565	82.435	53.995	87.225	74.855	79.400	53.415	66.984
平均每木連年生長量(m ³)	0.011	0.014	0.015	0.008	0.025	0.012	0.010	0.012

P4 為臺灣冷杉株數最多的樣區，2017 年與 2008 年的差異材積量為 $69.315 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，檢視該樣區的死亡樣木最多，但死亡材積量僅 $17.950 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，平均每棵死亡樣木材積約 $0.300 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，表示死亡樣木多為小徑級木。比較不同其他樣區，P4 樣區在單木平均年增長量為最小值($0.008 \text{ m}^3/\text{ha}$)，該區徑級多落在 20-30 cm 上，顯示林分屬森林發育的前期，加上單位密度高(圖 40a)，推測該樣區受到林木間的競爭壓力，因而使其平均年生長量為最低(表 17)。

比較老熟林分在生長量上大於其他年輕的林分的現象，推論為臺灣冷杉林在幼齡林成為老熟林歷經自我疏伐(self-thinning)(廖敏君等 2013)，林分密度降低後，各個體因而有較佳的生長表現。另古心蘭(1999)對合歡山地區之臺灣冷杉林進行調查發現，從徑級結構比例變化顯示該林分有自我疏伐的現象。

2. 以不同伴生樹種看材積變化

臺灣冷杉長期監測樣區於 P1、P2、P5 及 P7 樣區分別有不同樹種伴生，依序為臺灣鐵杉、玉山杜鵑、巒大花楸，以及玉山圓柏(表 17)。如從樣區不同物種比例看增大生長的差異，分別位在與臺灣鐵杉交界的 P1 樣區(佔 65%的上層木比例)，以及與玉山圓柏交界的 P7 樣區(佔 22%的上層木比例)，相較於其他樣區(除 P4 密度較高者)，該兩區臺灣冷杉平均單木生長量較低(分別為 $0.011 \text{ m}^3/\text{ha}$ 及 $0.010 \text{ m}^3/\text{ha}$)；然與玉山杜鵑伴生的 P2 樣區($0.014 \text{ m}^3/\text{ha}$)，其平均單木生長量與近純冷杉林的 P3 樣區有相近的材積增長量($0.015 \text{ m}^3/\text{ha}$)，另與巒大花楸伴生的 P5 樣區，亦有 $0.025 \text{ m}^3/\text{ha}$ 的高材積增長量(表 17)。因此推論認為，臺灣冷杉在臺灣鐵杉與玉山圓柏交會地帶，受到相同生態地位的兩物種競爭影響，生長表現較差；但與巒大花楸及玉山杜鵑伴生的樣區無受影響，可能該樹種皆生長於冷杉林下，多以小喬木或灌木形式生長，因而臺灣冷杉在資源取得方面較不受其兩者限制有關。

3. 以不同植被類型看蓄積差異

如從玉山箭竹和苔蘚地被類型來看，主要的影響為是否有晉級生長的苗木出現，因此針對蘚苔地被的蓄積增長量，平均為 $0.0825 \text{ m}^3/\text{ha}$ ，佔總體蓄積增長量極小。但如果以一般樣木的增大生長來看，無受風災干

擾的 P2 箭竹地被樣區，與 P5 的蘚苔地被樣區，都有相近的平均年增長量，因此推斷在短期之內，地被對於臺灣冷杉蓄積生長無明顯的影響。雖然玉山箭竹對臺灣冷杉下種更新的成功率、小苗存活率，以及稚樹往後的晉級生長具有顯著的負相關(廖敏君等 2013)，但臺灣冷杉長期監測樣區的總體蓄積量變化顯示，不同地被類型的影響較小。

4. 從颱風事件看蓄積變化

颱風事件為臺灣森林的大型干擾因子，夏季頻繁的颱風侵襲，也成為許多森林孔隙形成的主要原因(曾勝華&曾喜育 2016)。彙整 2001 年至 2016 年間通過臺灣中北部地區的颱風歷史資料(表 18)，侵台路徑主要為第 3 及第 2 類型。透過現地觀察，在 2008-2017 年間影響雪山地區嚴重者有 2015 年的蘇迪勒颱風，並於長期監測樣區中的 P3 樣區造成大量風倒木，以致於 P3 樣區成為差異材積量最大者，並且為負成長。該區總林分死亡材積量達 335.860 m³/ha，檢視該樣區死亡樣木狀態，雖枯立木佔 37.2%，但其他可能受風災影響的死亡因素包括，倒木(30.2%)、幹折(23.3%)，壓倒(4.7%)、消失(2.3%)、斷梢(2.3%)，則佔死亡樣木狀態的一半以上(62.8%)，因而該樣區死亡量主要狀態，確實為颱風所致。綜觀整體，P3 樣區的死亡量佔全樣區 76.6%，亦即雪山地區臺灣冷杉林的整體死亡狀態，如有遭受颱風過境侵擾，則風災所致的枯損量，即為死亡成因的大宗。

5. 整體樣區的蓄積變化

7 個臺灣冷杉長期監測樣區於 2008 年以及 2017 年的臺灣冷杉蓄積量分別為 791.023 m³/ha 和 795.383 m³/ha，整體材積量上升。除了樣區 P3 因風災導致的風倒樹、枯損率極高，又死亡樣木包含許多大徑級木(DBH > 60cm)，造成材積從 913.650 m³/ha 降至 631.785 m³/ha，材積量大幅縮減；其餘 6 個樣區在 10 年間於各樣區的蓄積變化都有增加，且以 P4 的增大生長(accretion)材積量最為多(87.225 m³/ha)。整體來看各樣區雖然樹木數量減少，但整體林分的增大增長量(66.984 m³/ha)，還是大於總體樣區死亡樣木的材積量(62.671 m³/ha)。

表 18. 臺灣中北部受颱風侵襲資料一覽表(修改自曾勝華&曾喜育 2016)

颱風	英文名	年分	強度	路徑	平均最大 風速 (m/s)	瞬間最大 風速 (m/s)	累積雨量 (mm)
桃芝	TORAJI	2001	中度	3	17	29.6	75
海棠	HAITANG	2005	強烈	3	10.8	28.8	211.9
泰利	TALIM	2005	強烈	3	31.5	48.4	218.1
龍王	LONGWANG	2005	強烈	3	23.4	110	74.5
碧利斯	BILIS	2006	輕度	2	12	27.1	98.4
凱米	KAEMI	2006	中度	3	16.1	25.9	78.4
柯羅莎	KROSA	2007	強烈	2	31.9	52.7	198.5
梧提	WUTIP	2007	輕度	3	8.9	15.2	26.5
聖帕	SEPAT	2007	強烈	3	22	35.2	546.4
卡玫基	KALMAEGI	2008	中度	2	17.8	32.7	65.8
辛樂克	SINLAKU	2008	強烈	2	30.1	58.6	390.2
薔蜜	JANGMI	2008	強烈	2	37.2	62.4	283.1
鳳凰	FUNG-WONG	2008	中度	3	22	39	179.7
莫拉克	MORAKOT	2009	中度	3	19.6	32.4	116.2
蘇拉	SAOLA	2012	中度	2	21.1	41.9	579.4
蘇力	SOULIK	2013	輕度	2	19.6	37.9	115.5
麥德姆	MATMO	2014	中度	3	20.9	36.5	143.3
杜鵑	DUJUAN	2015	強烈	2	40.4	68.4	160.5
蘇迪勒	SOUDELOR	2015	中度	3	36.1	66.1	283
梅姬	MEGI	2016	中度	3	32.1	56.2	148.7

6. 臺灣冷杉碳吸存之推估

本研究將臺灣冷杉長期監測樣區所得材積值透過 IPCC 所建議之 BEF(biomass expansion factor)(IPCC 2003)，以及臺灣冷杉的絕乾比重(oven-dry specific gravity)計算(林裕仁 2008)，平均全株材積為幹材材積的 1.65 倍，臺灣冷杉的絕乾比重為 450 kg/m^3 (王松永 1988)，所得每 1 m^3 的臺灣冷杉約有 742.5 kg/m^3 的生物量(biomass)；另根據臺灣針葉樹平均碳含量比為 48.21% (Lin *et al.*, 2002)，可以推算 1 m^3 的臺灣冷杉能轉換約 357.96 kg 的固碳量，得以推算此雪山地區臺灣冷杉每年每公頃可以提供約 2.4 噸的固碳量。因臺灣冷杉還未有確切的碳轉換率，所以後續如能針對臺灣冷杉之生物量及含碳量有更準確的採樣，則能對臺灣冷杉於臺灣地區的碳吸存效益有更精確的計算。

比較不同樹種碳吸存量，劉知妤、王兆桓(2006)應用林務局森林永久樣區資料，IPCC 所建議或國內學者研究的轉換係數，估算臺灣地區柳杉人工林平均每年每公頃碳吸存量為 2.18 噸，紅檜人工林為 2.1 噸；2008

年調查柳杉人工林為每公頃 2.66 噸，扁柏人工林為 2.27 噸。因各研究估算的方法、年代、蓄積量、生長率，因此碳吸存結果不同(王瑞閔，2007)，但可大致彙整全島林地的碳吸存落在每公頃 2-2.8 噸之間(表 19)，本研究調查之臺灣冷杉碳吸存量，也落於此區間。如比較竹類的碳吸存量，竹類的碳吸存量明顯高於針葉林和闊葉林碳吸存量(洪千祐&顏添明 2015；王瑞閔，2007)(表 20)。

表 19. 前人研究臺灣大面積森林、日本柳杉與扁柏人工林碳吸存估算

作者	生長量估算方式	轉換係數	林地範圍	碳吸存
王立志(1996)	第二次森林資源調查及生長量資料	IPCC 係數	全島林地、所有林地	2.56
王裕仁等(2002)	第三次森林資源調查及第二次森林資源調查之生長量資料	生物量擴展係數	全島林地、所有林地	2.46
邱祈榮、王瑞閔(2006)	第三次森林資源調查及第二次森林資源調查之生長率資料	IPCC 係數	國有林事業區、所有林型	2.72
		國內係數	國有林事業區、所有林型	2.14
日本學者 Fukuda 等(2003)	日本森林資源調查資料	以林齡為基礎的擴展係數	日本	
劉知妤、王兆桓(2008)			柳杉人工林	2.66
			扁柏人工林	2.27

表 20. 臺灣地區主要林型碳吸存量 (資料來源：彙整自(王瑞閔，2007))

林型	單位碳吸存量(公噸/公頃/年)
臺灣二葉松	2.3-4.3
紅檜	2.1
柳杉	2.18
孟宗竹	10.5
桂竹	3.3

因此根據本研究對臺灣冷杉全臺分布的蓄積推估，比較第 4 次全國森林資源調查成果，結果如表 21，第 4 次全國森林資源調查所採用的調查方式是經由地面調查樣區取樣與航照樣點判釋，計算出空中林分材積式，推算各樣點的單位面積及蓄積量。而各林型的蓄積量，則是計算各

林型的單位面積蓄積量，再乘以各林型的面積求得。碳吸存計算方面，主要是採用 IPCC 的建議公式，並整合相關單位各林型的碳轉換係數、擴展係數、及材積之基礎密度。

本研究的全台臺灣冷杉林型的蓄積量計算，主要以雪山樣區調查資料推算單位面積的材積產量，臺灣冷杉全台分布面積則分別以 SDM 與遙測影像分析各代表潛在及實際的分布面積，透過 SDM 模擬潛在的臺灣冷杉生育地，可得 73,152 公頃的潛在分布範圍，而結合現生植群的地面調查及遙測影像分析的真實的臺灣冷杉林面積為 16,857 公頃(Chiou *et al.* 2009)。所求單位面積的臺灣冷杉蓄積量以 2008 年及 2017 年所調查之臺灣冷杉長期監測樣區的單位面積蓄積量之平均值，本研究雖樣區數不及全國森林資源調查之數量(全國森林資源調查臺灣冷杉林型樣區數共 47 個)，但所取林型包含冷杉-鐵杉林帶、冷杉-玉山圓柏帶，以及臺灣冷杉純林帶，各林型換算每公頃蓄積量約 290-1130 m³ 不等，整體調查出兩年的平均蓄積量為 793.203 m³，相較第 4 次全國森林資源調查，每公頃蓄積量高於約 300 m³。總體來看，本研究轉換全國臺灣冷杉林的總二氧化碳碳儲存量約為 1755 萬公噸，第 4 次全國森林資源調查為 1187 萬公噸，如根據臺灣冷杉 SDM 模擬的潛在區域分布面積，臺灣冷杉二氧化碳碳儲存量潛值可達 7616 萬公噸(表 21)。

表 21. 本研究調查推估之全國臺灣冷杉林型固碳量及二氧化碳儲存量比較

調查方式	全臺面積 (ha)	單位蓄積量 (m ³ /ha)	總蓄積量 (m ³)	單株固碳量 (kg/m ³)	單株 CO ² 儲存量(t)	總 CO ² 儲存量(t)	備註
SDM 潛在分布	73,152	793.203	58024385.856	357.960	1.313	76158166.924	採用本研究調查值推估
現生植群 FC21	16,857	793.203	13371022.971	357.960	1.313	17549735.070	採用本研究調查值推估
第 4 次全國森林資源調查	27,084	426.900	10490000.000	308.823	1.132	11878346.217	

(四) 臺灣冷杉樹芯解析

本研究首先針對臺灣冷杉風倒木編號第 3 號、風倒木編號第 4 號、及 3、4 號風倒木旁之立木試鑽樹芯(圖 41)，分別描述如下：

1. 樹芯試鑽 1 號：為風倒木編號第 3 號，樹高約 24.8 m，胸徑約 58.0 cm，分布海拔高度約 3,398 m，樹輪數為 130，樹輪平均寬(RW)約 1.47 ± 1.14 mm，樹輪平均密度(RD)約 485.5 ± 45.1 kg/m³，晚材率(LWP)約 $37.9 \pm 9.3\%$ 。
2. 樹芯試鑽 2 號：為風倒木編號第 4 號，樹高約 27.0 m，胸徑約 87.0 cm，分布海拔高度約 3,400 m，樹輪數為 222 (樹芯未達樣木髓心位置)，樹輪平均寬約 1.49 ± 0.88 mm，樹輪平均密度約 388.3 ± 44.0 kg/m³，晚材率約 $36.5 \pm 9.9\%$ 。
3. 樹芯試鑽 3 號：為 3、4 號風倒木旁之立木，樹高約 26.0 m，胸徑約 77.0 cm，分布海拔高度約 3,400 m，樹輪數為 195 (樹芯未達樣木髓心位置)，樹輪平均寬約 1.28 ± 0.76 mm，樹輪平均密度約 379.7 ± 42.5 kg/m³，晚材率約 $34.0 \pm 11.1\%$ (表 22)。



圖 41. 雪山雪東線臺灣冷杉風倒木樣木生長錐樹芯鑽取工作照片

表 22. 臺灣冷杉風倒木樣木樹芯特徵資料表

樹芯 樣株		RW (mm)	EW (mm)	LW (mm)	RD (kg/m ³)	ED (kg/m ³)	LD (kg/m ³)	MXD (kg/m ³)	MND (kg/m ³)	LWP (%)	
試鑽 1 號	風倒木 3 號	Average	1.47	0.93	0.54	485.5	424.1	590.5	660.2	363.7	37.9
		Sd	1.14	0.74	0.46	45.1	43.8	54.2	63.6	45.4	9.3
試鑽 2 號	風倒木 4 號	Average	1.49	0.99	0.50	388.3	339.6	481.6	536.4	291.7	36.5
		Sd	0.88	0.66	0.30	44.0	47.1	56.3	68.3	49.7	9.9
試鑽 3 號	風倒木 3、4 號旁 之立木	Average	1.28	0.84	0.44	379.7	332.9	484.5	549.2	277.0	34.0
		Sd	0.76	0.45	0.36	42.5	40.0	73.6	94.3	41.0	11.1

◆ 備註：RW 樹輪寬，EW 早材寬，LW 晚材寬，RD 樹輪平均密度，ED 早材平均密度，LD 晚材平均密度，MND 樹輪內最低密度，MXD 樹輪內最高密度，LWP 晚材率。

初步比較 11 種中國冷杉屬植物的樹輪特性發現(樊金拴 2007)，臺灣冷杉樹輪寬度屬於較窄的類型，而近 35% 晚材率是最大的，此是否為亞熱帶地區亞高山臺灣冷杉的樹輪特色有待更進一步探討。由於 Soft x-ray 掃描分析儀相對敏感，解析臺灣冷杉樹芯的樹輪構造及密度連續變異過程中，可能因樹輪狀態如不連續樹輪、偽樹輪(false ring)或重樹輪(double ring)、霜輪(frost ring)等一些變異現象而誤判(馮豐隆&詹明勳 2005)；因此風倒木之樹木圓盤資料可以提供更精準的樹輪結構推估樹木年齡。

(五) 臺灣冷杉風倒木環境立地資料與生長樣態

林木生長反應其在立地環境中受各種影響因子之表現，包含內在因素受到林齡或生長策略之調控，或者外在因不可預測之環境條件、立地條件所造成的影響。如從不同尺度探究，我們可發現較大空間尺度下的生長變異；又或者是較小空間的微環境，因樹木立地條件的不同，或林木間相互競爭所導致間接的資源掠奪，造成生長量的差異。過去對於臺灣冷杉的生長研究，多涉略於大環境變動對生長量的影響(徐國士 1997; 鄒佩珊 1998; 陳建璋 2011; 王思皓 2013)，本研究嘗試透過微環境資料的調查，了解雪山地區臺灣冷杉的生長狀況。

1. 從徑級及年齡看生長變化

由長期監測樣區調查每一徑級區間的 10 年徑向及樹高平均生長量(圖 42)，結果發現長期監測樣區採樣徑級 0-20 cm 者，平均生長數值變異大，顯示臺灣冷杉在小徑級者的生長幅度大；隨徑級增大至 20-40 cm，生長量漸少，但觀察徑級 60-120 cm 平均生長量發現，徑級於 60-100 cm 的平均生長量微幅度上升，而後在徑級 100-120 cm 下降。在大徑級的部分，每年平均生長量可達 0.2 cm；樹高隨徑級增大，年平均生長量由每年平均約 10 cm 逐漸減少(圖 42b)。

為了解不同林齡下的生長量，以及胸各胸徑對應的實際年齡，取用樹幹解析數據估計的每 10 年生長量，以每 100 年將該數據的年齡值域區分為 0-100 歲、100-200 歲及 200-300 歲等 3 個生長階段，繪製生長分布圖(圖 43)；結果顯示，在 0-100 歲每 10 年的胸高直徑生長量介於 0.9-7 cm 間，樹高增長量介於 0.5-2.8 m 間，100-200 歲的胸高直徑與樹高生長量介於 0.4-2.3 cm 與 0.08-2 m，而 200-300 歲生長量分別是 0.1-1.7 cm 與 0.05-0.8 m，顯示臺灣冷杉隨年齡增加，胸徑及樹高生長量逐年下降。

對應各徑級區間下的實際年齡，0-100 歲的臺灣冷杉胸徑約在 1-30 cm 間，100-200 歲約介於 30-60 cm 間，而 200-300 歲則大於 60 cm 以上；另外，徑級 30-60cm 區間的離群值較大，顯示相同徑級下，其年齡的值域的變異很大(圖 44)。以實際風倒木測得的樹齡及徑級進行相關分析，兩者間的關係並不顯著($R^2=0.1460$, $p=0.1302$)，相近年齡的兩棵樣木，其胸高直徑可差達約 40 cm (圖 45)。

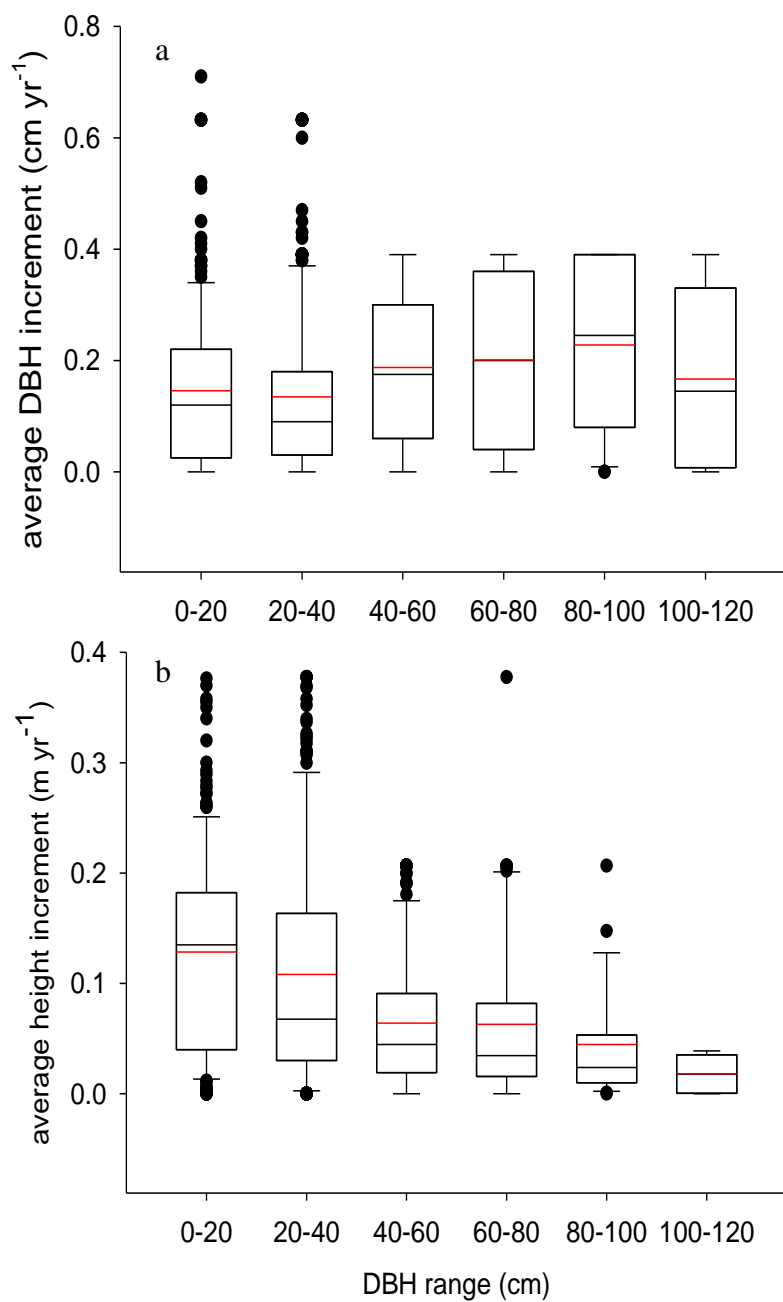


圖 42. 雪山地區臺灣冷杉長期監測樣區各徑級區間每 10 年徑向(a)與樹高(b)生長變化量(黑色線表中位數，紅色線表平均值)

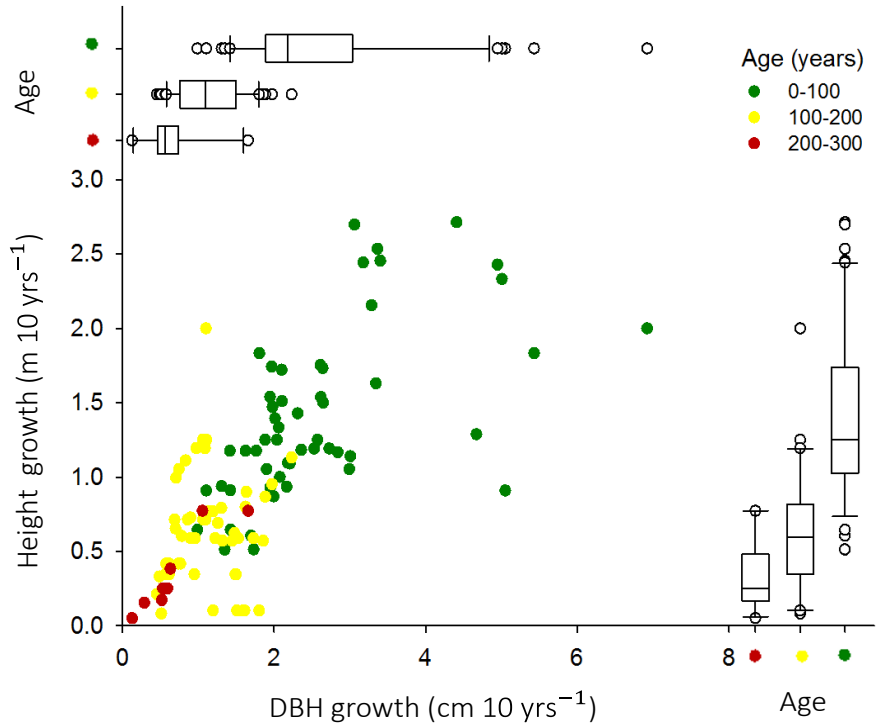


圖 43. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木各生長階段每 10 年胸高直徑及樹高增長量分布圖(生長階段以每 100 年為單位)

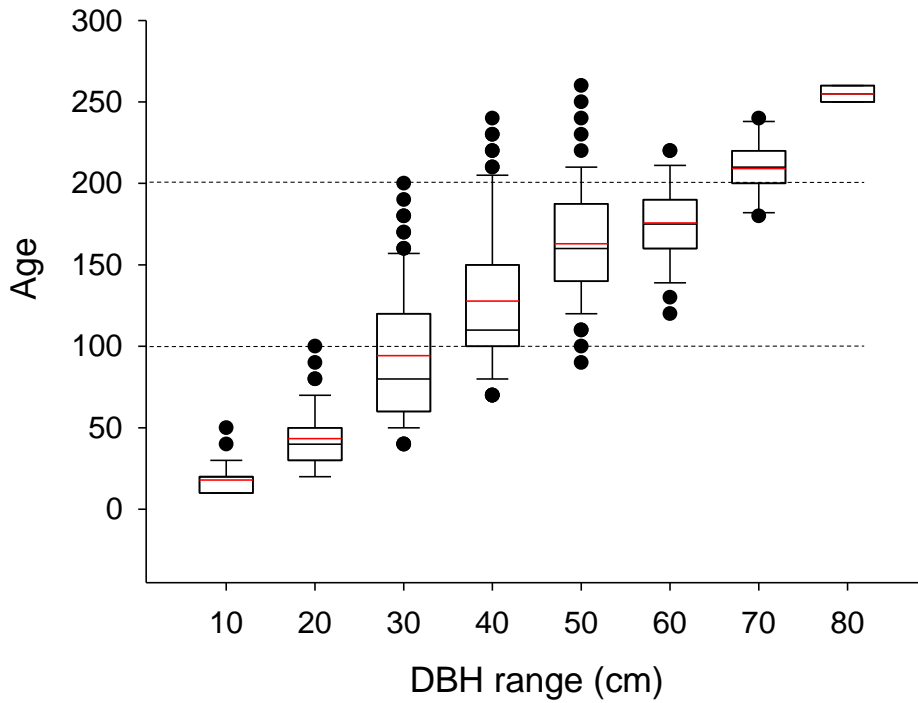


圖 44. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木各生長階段之徑級對應年齡關係(黑色線表中位數，紅色線表平均值)

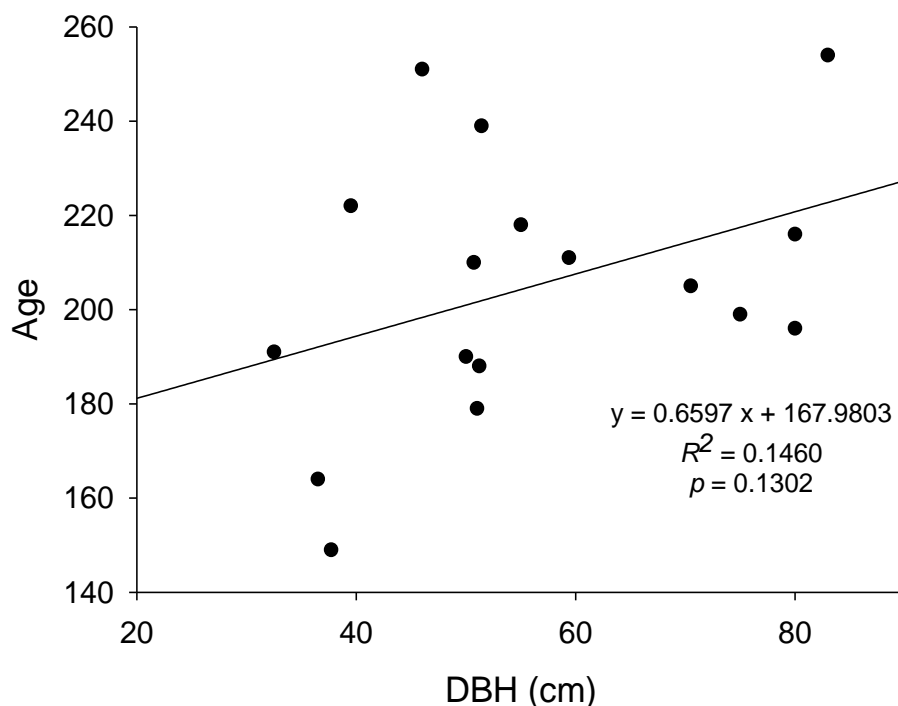


圖 45. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒樣木之胸徑與年齡關係圖

2. 臺灣冷杉的單株生長模式

為求雪山地區臺灣冷杉單株樣木之生長模式，先計算每一樣木各 10 年的徑向生長量，再以每 10 cm 徑級作區分(表 23)，在相同徑級區間以每 10 年計數，可獲得各樣木在各級間所需的時間(表 24)；即為生長速率之轉算，將轉換值透過群團分析分群，並以年平均生長量繪出生長曲線，了解各樣木間的生長樣態。

18 棵臺灣冷杉風倒樣木的生長模式群團分析結果顯示，將訊息保持度劃分於 62.5%，可將臺灣冷杉的生長樣態區分為 5 種類型(圖 46、47)，第一種類型特徵為幼年期生長率低、平均生長量高峰最晚、後期皆維持高生長量，以及年齡極大；第二、三類型幼年期生長率高、平均生長量高峰皆於幼年期、後期生長量居中，兩者差距主要為晚期生長率的多寡；第四類型有幼年期生長率居中、平均生長量高峰於幼年期發生、後期皆維持低生長量，以及年齡較大的特徵；第五類型則為幼年期生長率及晚年生長量皆為最低，並且平均壽命不長。根據調查資料顯示，大多數的樣木為第二、三類型的生長模式，即在早期有較高生長量，後期則逐漸減少。

表 23. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒木年齡對應之累積生長量

Age/No.	6	26	5	20	14	25	1	27	12	21	11	23	16	19	24	2	22	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2.319	6.159	5.314	5.528	3.462	6.839	2.781	5.336	6.763	4.706	7.872	5.591	5.394	3.964	2.927	4.755	3.375	1.569
20	4.777	12.386	9.445	11.520	6.222	11.286	7.150	9.802	11.172	9.226	14.792	10.157	9.506	9.434	5.768	8.815	6.381	3.300
30	8.866	16.225	12.983	18.125	9.437	14.190	11.516	13.144	14.535	13.074	18.193	15.361	13.746	14.318	7.845	12.190	8.954	4.649
40	15.167	19.206	15.624	22.502	12.485	16.701	17.208	15.682	16.416	17.302	21.253	20.737	18.008	18.946	10.011	14.476	11.602	6.344
50	22.102	22.159	17.946	25.751	14.912	19.262	21.394	17.852	18.222	19.522	23.869	25.365	22.466	23.006	12.005	17.022	13.581	8.656
60	28.735	24.972	20.617	28.574	19.340	21.541	25.252	20.336	20.190	21.856	25.815	28.459	26.770	25.992	13.955	20.030	15.346	13.604
70	34.115	27.268	23.484	30.955	23.406	24.045	28.112	22.906	22.291	23.842	27.827	31.315	30.812	27.484	15.579	22.620	17.554	16.779
80	38.898	29.933	26.624	32.679	27.752	27.034	31.202	25.510	24.933	26.720	29.865	33.581	34.510	28.920	17.003	24.636	19.456	20.065
90	42.865	32.243	30.440	34.736	31.603	29.593	33.886	27.302	26.995	30.202	31.969	36.020	37.448	30.044	17.993	25.900	20.763	22.677
100	46.013	35.236	33.742	37.490	35.665	32.360	35.960	29.396	29.722	33.084	34.149	37.652	39.720	30.978	19.419	26.503	21.868	24.093
110	48.227	38.831	36.991	39.750	38.873	34.674	37.630	31.654	31.954	36.004	35.770	39.054	41.256	31.528	20.898	27.207	22.575	25.727
120	50.140	41.776	40.078	41.708	41.944	36.474	39.376	33.832	33.927	37.916	37.077	40.308	42.546	31.988	22.624	28.041	23.320	26.825
130	52.031	44.441	43.701	43.690	44.524	38.612	41.238	36.502	35.811	39.616	38.137	41.610	43.706	32.442	24.152	28.721	24.217	27.513
140	53.939	47.205	47.028	45.462	46.728	40.829	43.260	38.910	37.422	41.264	38.998	42.785	44.522	32.680	25.376	29.426	25.117	28.002
150	55.756	50.129	49.606	47.292	48.802	43.034	45.128	41.480	38.934	42.980	39.781	43.779	45.136	32.924	26.477	30.305	26.074	28.454
160	57.422	52.715	52.082	49.096	50.878	44.716	47.374	43.942	40.738	44.526	40.347	44.335	45.722	33.180	27.536	31.426	26.772	
170	59.100	55.395	54.532	50.328	52.602	45.912	49.886	44.758	42.330	46.436	40.961	44.918	46.384	33.440	28.510	32.015	27.433	
180	60.819	57.674	57.111	50.988	55.142	46.898	52.212	45.520	43.526	48.028	41.910	45.632	47.218	34.050	29.343		28.089	
190	63.128	59.631	59.525	51.602	57.726	47.938	55.108	46.614	44.038		43.399	46.417	47.932	34.972	30.431		28.815	
200	64.953	61.515	61.345	52.181	59.026	49.234	57.738	47.602			44.896	47.029		35.610	31.539		28.876	
210	66.291	63.687		52.889		50.703		48.852			45.415	47.629		36.206	32.595			
220	67.399	64.438		53.589		50.859						48.202		36.988	34.251			
230	68.497											48.715		37.806	34.539			
240	69.788											49.249		38.644				
250	71.420													41.040				
260	72.017													41.446				

表 24. 雪山地區 18 棵臺灣冷杉風倒木各徑級之生長年度(以每 10 年計數 1 次)

DBH / NO.	6	26	5	20	14	25	1	27	12	21	11	23	16	19	24	2	22	9
0-10 cm	3	1	2	1	3	1	2	2	1	2	1	1	2	2	3	2	3	5
10-20 cm	1	3	3	2	3	4	2	3	4	3	2	2	2	2	7	3	5	2
20-30 cm	2	4	3	3	2	4	3	5	5	3	5	3	2	4	8	9	12	8
30-40 cm	2	3	3	5	3	4	5	4	5	5	7	5	4	16	5	3	0	0
40-50 cm	3	3	4	5	4	7	5	7	4	5	6	13	8	2	0	0	0	0
50-60 cm	6	5	4	6	5	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60-70 cm	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70-80 cm	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

此結果顯示，徑級大小無法確實反應臺灣冷杉的林分林齡，其原因來自單株樣木間生長速率的差異形成多樣的生長類型。陳添財(2019)的研究報告指出，以徑級對應齡級的方式，並不適用於臺灣冷杉。

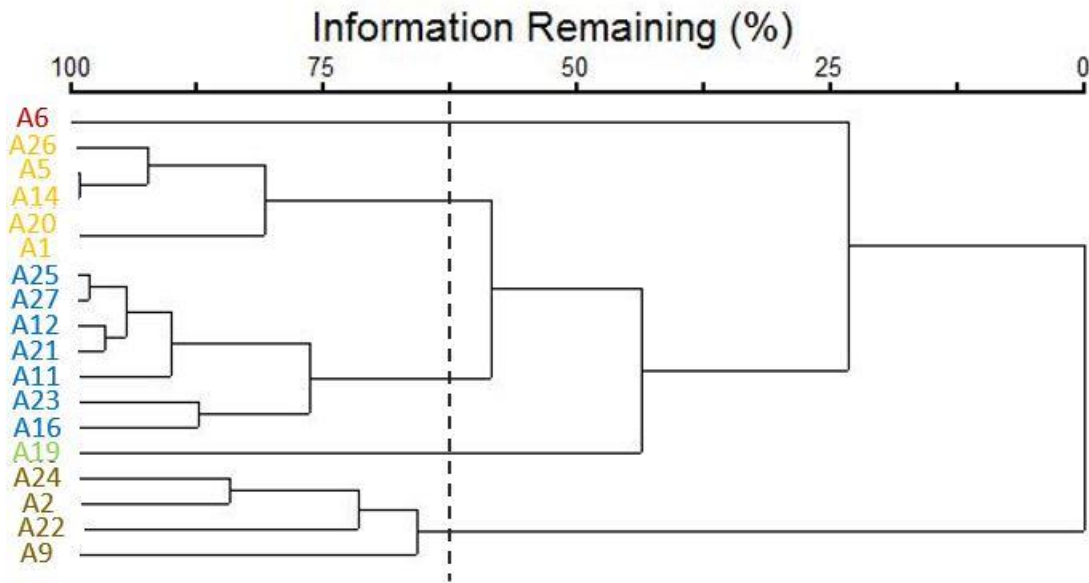


圖 46. 雪山地區採集之 18 棵臺灣冷杉生長類型群團分析

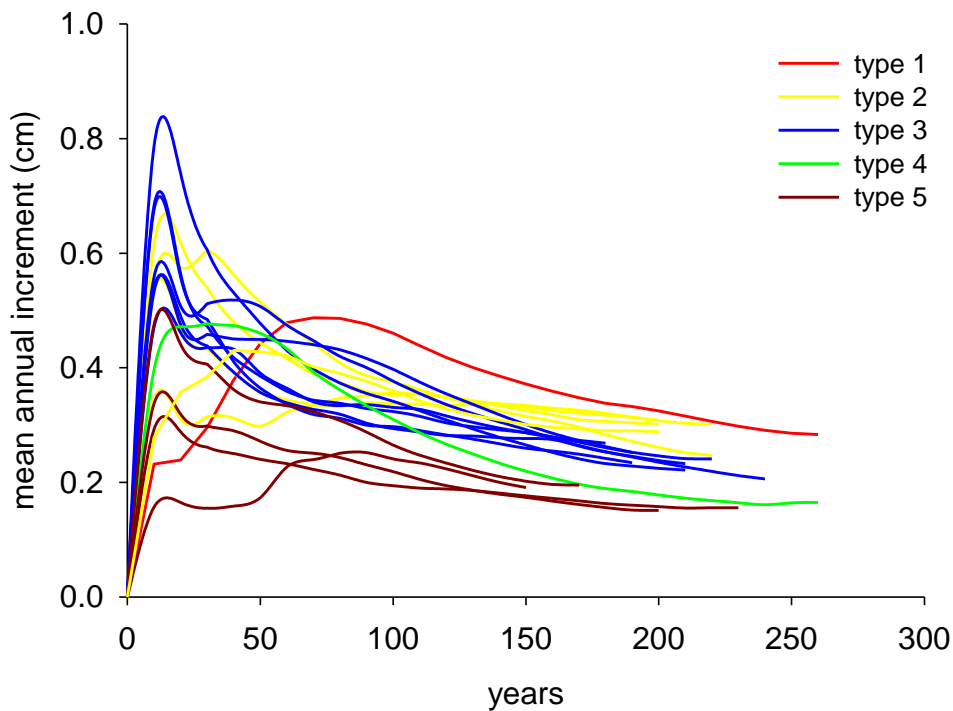


圖 47. 雪山地區採集之 18 棵臺灣冷杉不同生長類型的年平均生長量

3. 影響臺灣冷杉生長模式因子之探討

將不同生長類型樣木資料與環境因子進行典型相關分析(CCA)，結果顯示環境因子與各軸的相關關係，以第一軸及第二軸與有較高的變異解釋率(表 25)，因此選用第一、二軸作為雙序圖的呈現軸(圖 48)。分布序列結果，第一軸與競爭因子成負相關($R^2 = -0.923$)，第三軸與水分梯度成負相關($R^2 = -0.856$) (表 26)，顯示生長量較高的第 1、2 類型所受的競爭壓力較小，且相較於其他影響因子，競爭壓力為區分生長趨勢的主要原因。實際比較競爭指數(表 27)，大徑級者皆比小徑級樣木有較小值，顯示越多的競爭木且優勢木於周圍，越受到競爭壓力影響而明顯表現於生長上。

表 25. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長模式之 CCA 前三軸相關統計表

Total variance : 0.759	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Eigenvalue	0.127	0.025	0.007
% of variance explained	16.700	3.300	0.900
Cumulative % explained	16.700	20.000	20.900
Pearson Correlation	0.647	0.527	0.194

表 26. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長模式與環境因子間 CCA 前三軸相關統計表

Environmental factors	Correlations		
	Axis 1	Axis 2	Axis 3
Altitude (Alt.)	0.209	-0.660	-0.236
Slope	-0.195	0.284	-0.451
Moisture (Mos)	-0.394	-0.856	0.328
CI	-0.923	0.339	-0.181

為了解鄰近個體間是否存在競爭致使生長量發生變化，本研究細部比較 5 個地點的鄰近樣木，包含胸高直徑、總平均生長量、競爭指數，及生長類型(表 27、28)；研究發現鄰近個體樹齡相近，可推測為相近時間的下種更新林木，除步道 9K-A 外，各地點的鄰近樣木間胸徑差異皆可差達 20 cm 以上。大徑級樣木在晚期的連年生長量(current annual increment, c.a.i.)，表現皆較小徑級樣木佳(圖 49)；大徑級者總平均生長量值域介在 0.253-0.408 cm，相較小徑級樣木(0.170-0.282 cm)擁有較優勢的生長表現(表 27)。另以生長類型分類，大徑級者的類型以第一、二型為主，小徑級

者則以第三、四、五類型為主。鄰近木的生長表現不一致，因鄰近樣木的距離產生競爭，致使生長率有所差異，大徑木較小徑木擁有較低的競爭指，推測樣木附近的優勢樹種，根據其大小、遠近、及數量，使較小徑木的臺灣冷杉產生競爭壓力。

表 27. 雪山地區臺灣冷杉各區風倒樣木年齡、胸高直徑、總平均生長量及生長類型比較

地點	大徑級樣木						小徑級樣木					
	編號	年齡	年平 DBH	均增 生長量	競爭指數	生長類型	編號	年齡	年平 DBH	均增 生長量	競爭指數	生長類型
6.5K-A	14	196	80	0.408	1.656	Type2	16	190	50	0.263	2.816	Type3
9K-A	20	217	55	0.253	0.581	Type2	24	222	39.5	0.178	1.829	Type5
							19	251	46	0.183	1.636	Type4
9K-B	5	199	75	0.377	0.402	Type2	22	191	32.5	0.17	1.511	Type5
9K-C	6	254	83	0.327	0.197	Type1	23	239	51.4	0.215	1.954	Type3
W-B	26	214	80	0.374	0.200	Type2	25	211	59.4	0.282	1.833	Type3

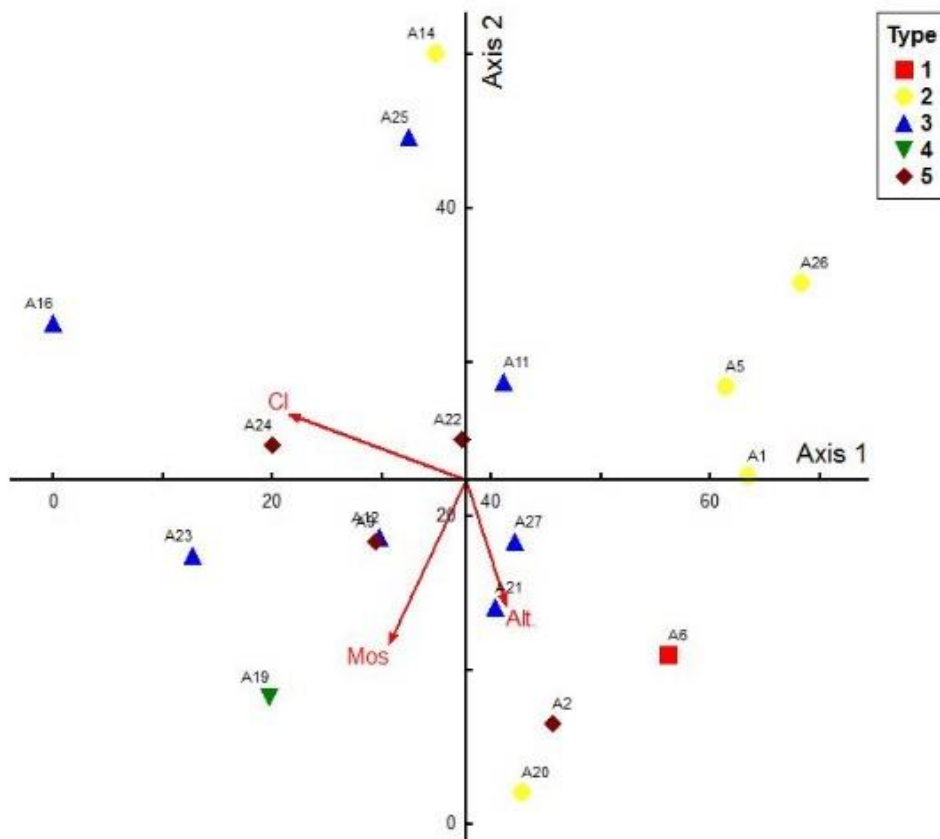


圖 48. 雪山地區臺灣冷杉風倒樣木生長類型與影響因子之 CCA 雙序圖

表 28. 雪山地區臺灣冷杉取樣風倒樣木之樣木細部資料

地點	樣區	編號	年齡 (年)	DBH(cm)	樹高(m)	座標 (WGS84)		海拔(m)	坡度 (°)	坡向 (°)	樹幹解析
雪山主東線 6.5 K	6.5K-A	14	196	80.0	26.00	24.3898	121.2588	3,189	30	330	
		16	190	50.0	23.00	24.3898	121.2588	3,189	48	0	
雪山水源地 0.5-0.9K	F-A	9	149	37.7	17.70	24.3951	121.2486	3,266	36	49	✓
		11	205	70.5	25.30	24.3954	121.2480	3,257	28	0	✓
		12	188	51.2	23.90	24.3953	121.2479	3,257	23	30	✓
	F-B	25	211	59.4	30.40	24.3954	121.2455	3,266	31	342	✓
		26	214	80	35.80	24.3954	121.2455	3,266	31	342	
		27	209	50.7	27.70	24.3957	121.2456	3,264	44	355	
雪山主東線 8.4-9.0K (黑森林)	9K-A	1	199	72.0	24.98	24.3923	121.2417	3,414	23	70	
		2	164	36.5	21.75	24.3924	121.2418	3,401	19	14	
	9K-A	5	199	75.0	25.00	24.3929	121.2417	3,407	15	63.5	✓
		22	191	32.5	19.50	24.3929	121.2417	3,407	31.5	65	✓
	9K-B	6	254	83.0	22.80	24.393	121.2417	3,404	20	34	✓
		23	239	51.4	20.40	24.3929	121.2416	3,404	15	25	✓
	9K-C	19	251	46.0	23.30	24.3927	121.2420	3,398	28	28	
		24	222	39.5	23.00	24.3928	121.2420	3,389	15	48	✓
		20	217	55.0	24.30	24.3928	121.2421	3,398	28	28	
			21	179	39.5	23.00	24.3928	121.2420	3,389	8.5	22

因此相較於大尺度的環境因子，臺灣冷杉鄰近木彼此的影響，更顯著反應於生長上的差異。在同一空間成長的林木，為獲取生長資源而彼此競爭，包括根冠對於養分和水分吸收，樹冠對於光線的擷取(Fraver *et al.* 2013; 李隆恩& 陳巧璋 2019)；本研究所採樣之樣本，確實表現被壓木在生長量上的劣勢。

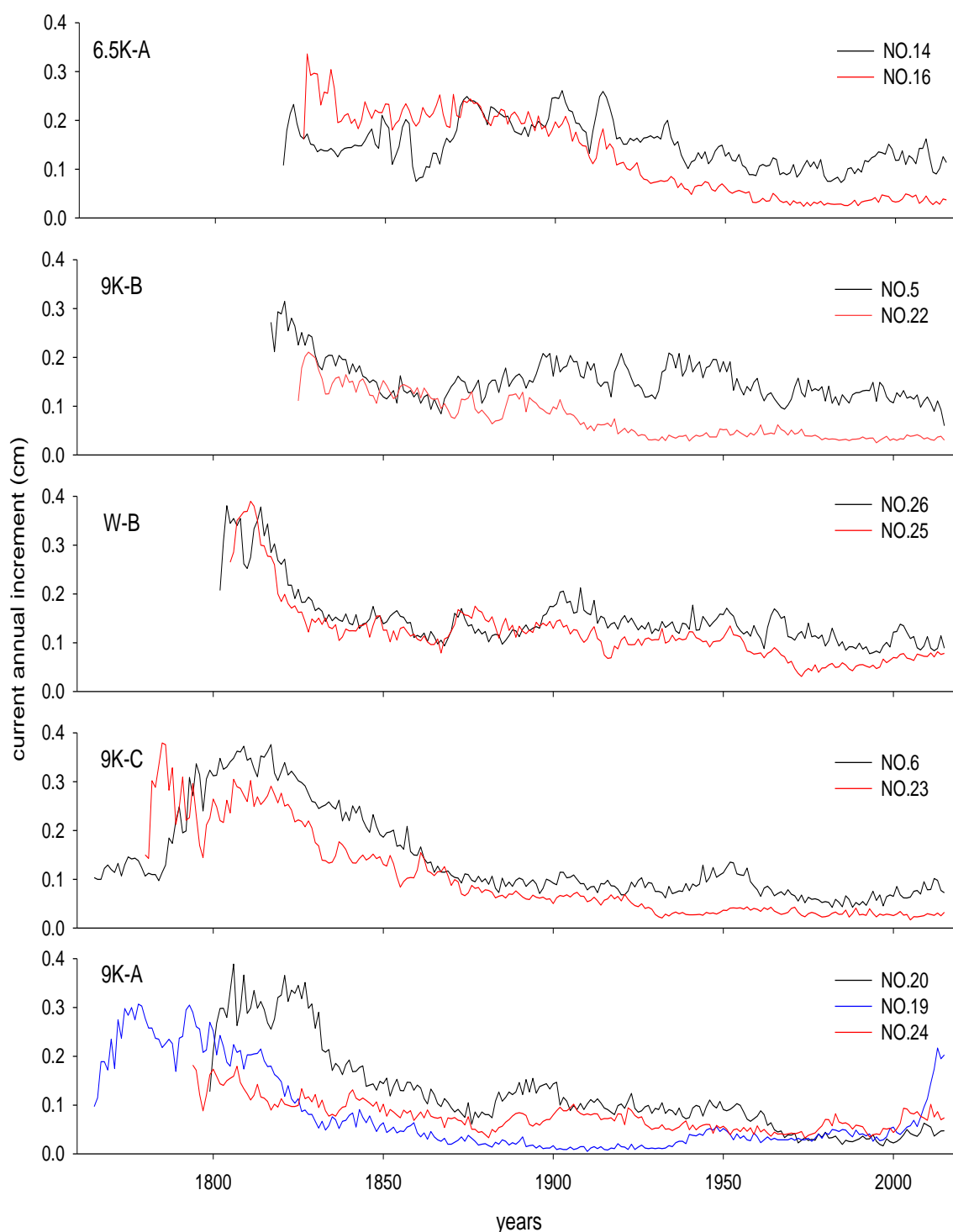


圖 49. 雪山地區臺灣冷杉鄰近相近林齡之風倒樣木之連年生長量比較

(六) 臺灣冷杉推移帶菌根菌調查

因 2018 年 8-9 月颱風影響，臺灣冷杉推移帶菌根菌調查於 2018 年 10 月 26-28 日進行推移帶樣區調查(圖 50)，分別紀錄樣 C、D 樣帶的 3 個類型地被資料、臺灣冷杉小苗數及採樣小苗根部與周圍土樣。3 類型地被差異大，草生地以玉山箭竹覆蓋為多；推移帶的物種多樣性較高，目前記錄到川上氏小蘗、玉山當歸、阿里山忍冬(*Lo. acuminata*)、玉山懸鉤子(*Rubus hayatakoidzumii*)等；而臺灣冷杉林以臺灣鬼督郵、山酢醬草(*Ox. acetosella* subsp. *griffithii* var. *formosana*)等與苔蘚為主要地被。

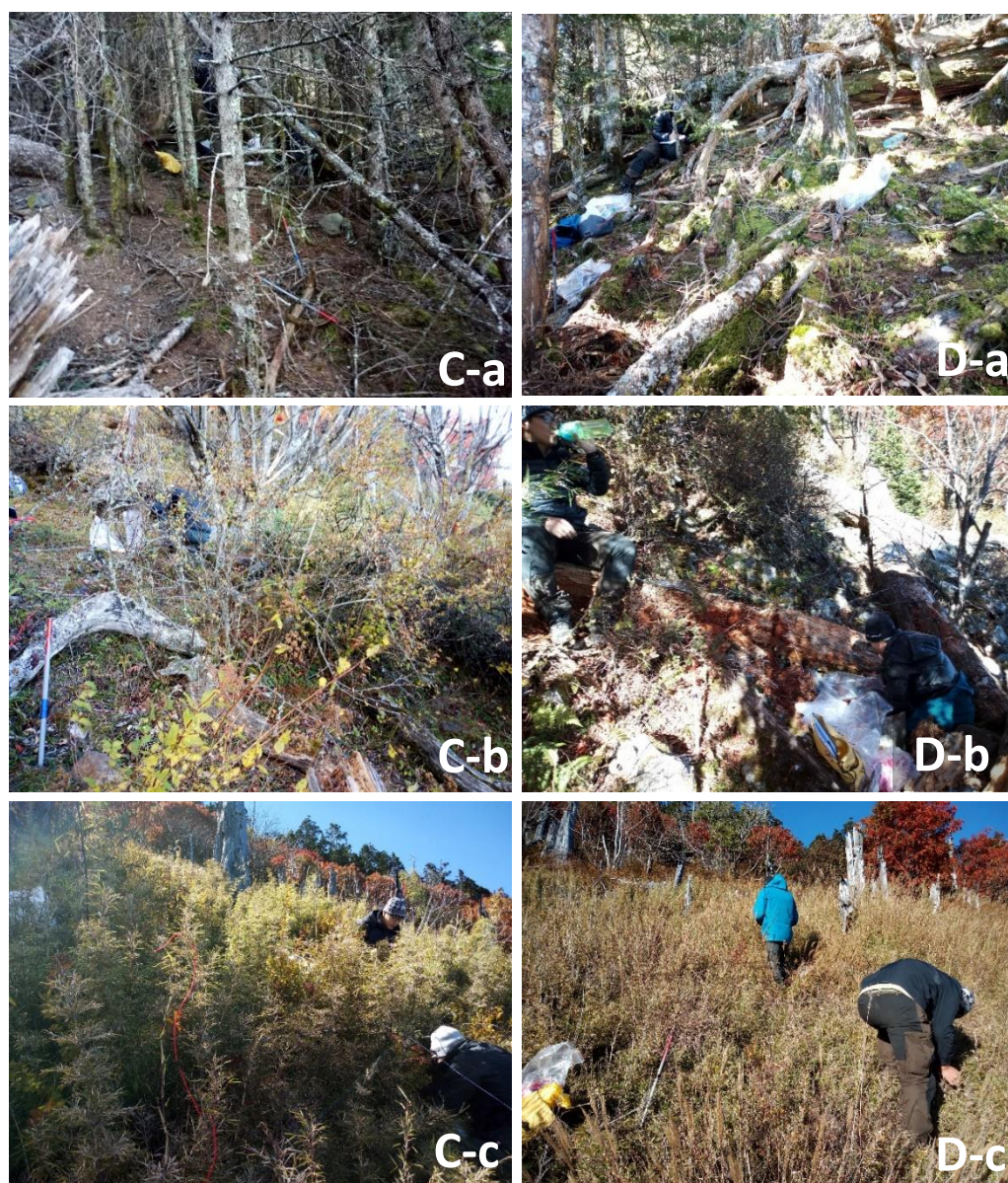


圖 50. 臺灣冷杉推移帶樣區調查工作照

經調查樣區的地被群團分析，雖以林緣距離區分不同樣區的環境梯度，即是將樣區分為森林帶、森林草原交界帶，以及草原帶，但部分樣區在同一樣帶還是有植被的差異，如 Ba 樣區位於森林帶上，但組成相似於草原帶(Cc)之樣區組成，因而如將訊息量(information remaining)設於 50%，可將地被類型分為 4 型(圖 51)，第 1 型是多分布於草原區的玉山箭竹-高山芒型(Ba、Cc、Bc、Dc)，第 2 類型為分布於林下的苔蘚-臺灣鬼督郵型(Ca、Da)，第 3 類型為位在森林與草原交界帶的川上氏小蘗-川上氏忍冬型，第 4 類型則為同在交界帶但以臺灣繡線菊為主的地被類型。根據各樣區的調查資料，僅有 Ba、Da、Cb 樣區有小苗出現，草原帶地區都沒有調查到小苗，然 Ba 為林下樣區，玉山箭竹覆蓋度高，卻也有小苗，顯示出與母樹距離和地被組成皆為影響小苗能否於此地生長之條件。臺灣冷杉小苗的菌根菌感染率檢測發現，大多的小苗皆有受外生菌根菌及內生菌根菌感染，且感染率皆達 70% 以上，顯示小苗與菌根共生的情況極高，唯發現這些樣本的內生菌根菌較多為暗色隔膜菌(dark septate endophytes, DSE)(表 29)。

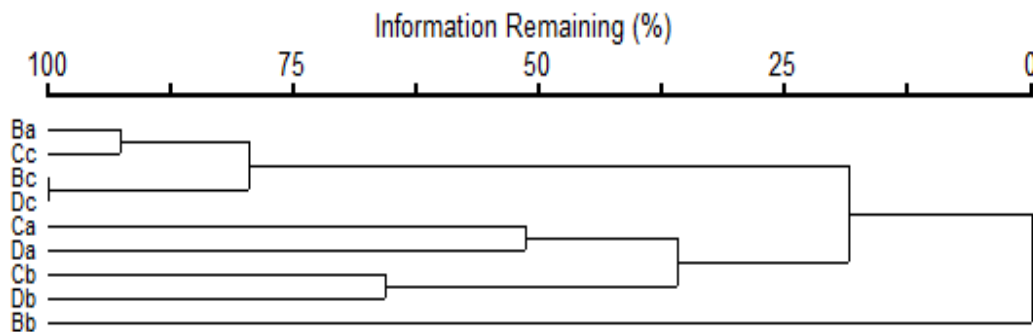


圖 51. 臺灣冷杉推移帶樣區地被群團分析樹形圖

表 29. 臺灣冷杉推移帶樣區臺灣冷杉小苗標記資料與感染率

樣帶	小苗編號	備註	外生菌根感染率	暗色隔膜菌感染率	叢枝菌根菌感染率
森林	Ba-4-1	兩年生	99.30%	96.55%	3.33%
森林	Ba-8-1	一年生		未取	
森林	Da-2-1	一年生	100%	100%	0%
森林	Da-6-1	一年生	94.12%	100%	0%
森林	Da-8-2	一年生	100%	73.68%	0%
森林	Da-2-2	一年生		未取	
森林	Da-8-1	兩年生		未取	
森林	Da-8-3	一年生		未取	
交界	Cb-6-2	兩年生		未取	

因 2019 年 2 月 3 日於三六九山莊附近發生火燒事件，致使大部分樣區(包括 A 樣帶)已受影響，因此本研究針對較多小苗分布的森林帶下採樣，主要採樣為 Ba 樣區與 Ca 樣區間；與 Ca 樣區及 Da 樣區間，分別以 BC 及 CD 樣帶為代表，採樣於 BC 樣帶間共 8 株、CD 樣帶間共 10 株小苗。

在菌根菌的觀察紀錄中，我們發現外生菌根菌感染臺灣冷杉小苗的比例並不一致，反而內生菌根菌皆可於小苗根系中發現，且比例甚高。另於先前的資料比較，臺灣冷杉小苗多與暗色隔膜菌共生，僅一株 2 年生小苗有與叢枝菌根菌的共生，進而本研究想探究小苗與菌根菌之間的關係是否與不同的小苗成長階段有關，是否隨著小苗增長而菌根菌相在不同階段有差異。

為量化小苗不同的生長階段，以量測根部長度來決定其生長大小，而目前調查結果顯示(表 30)，菌根菌的比例較不受不同根部長度大小而影響其感染的比例，菌根大小與外生及內生菌根菌的感染率關係並不顯著($R^2=0.020$, $p=0.586$ ； $R^2=0.055$, $p=0.364$)，但明顯皆能在小苗發現內生菌根菌，顯示臺灣冷杉在小苗時期與內生菌根菌的關係密切。過去研究也在 *Ab. Lasiocarpa* 的小苗中發現大量的囊叢枝菌根菌 (vesicular-arbuscular mycorrhizas, VAM) 與暗色隔膜菌 (Johnson 1998)，尤以暗色隔膜菌已被證實 DSE 能促進植物生長、提高抗病和生理的能力、及適應逆境能力(林瑞進 2018)；因此，對於冷杉屬小苗，受到此些菌根菌感染，應能有利於其後續生長。



圖 52. 臺灣冷杉小苗之外生菌根菌觀察

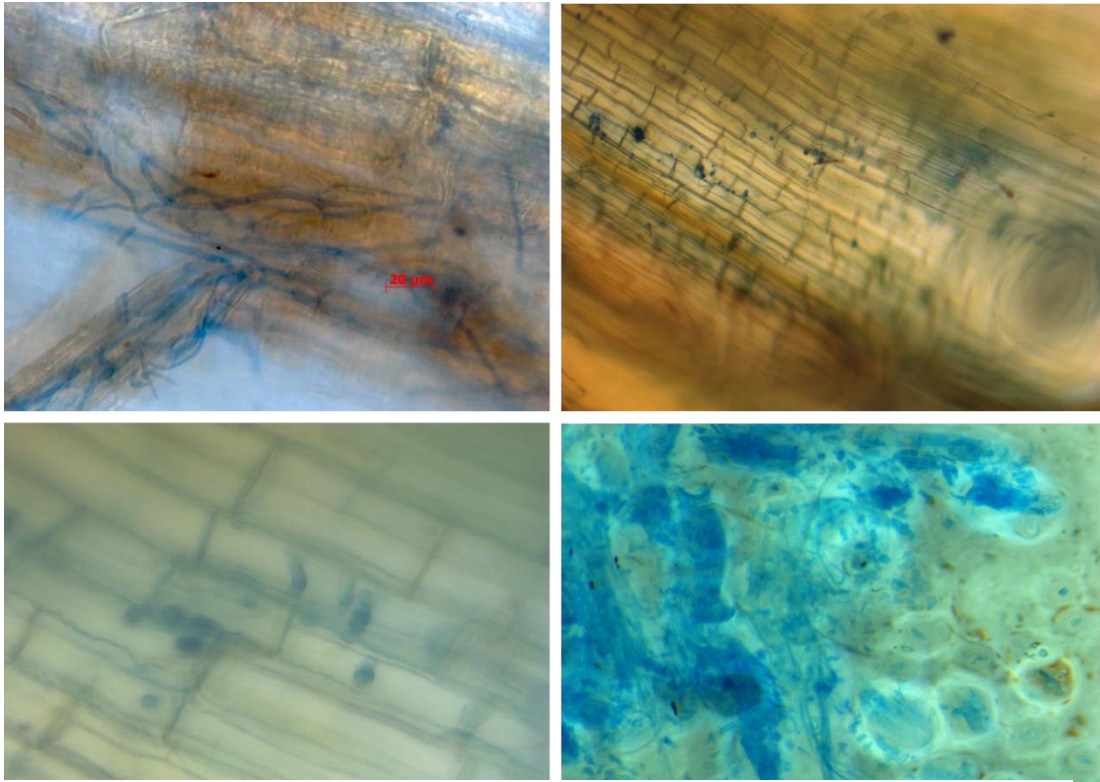


圖 53. 臺灣冷杉小苗之內生菌根菌觀察

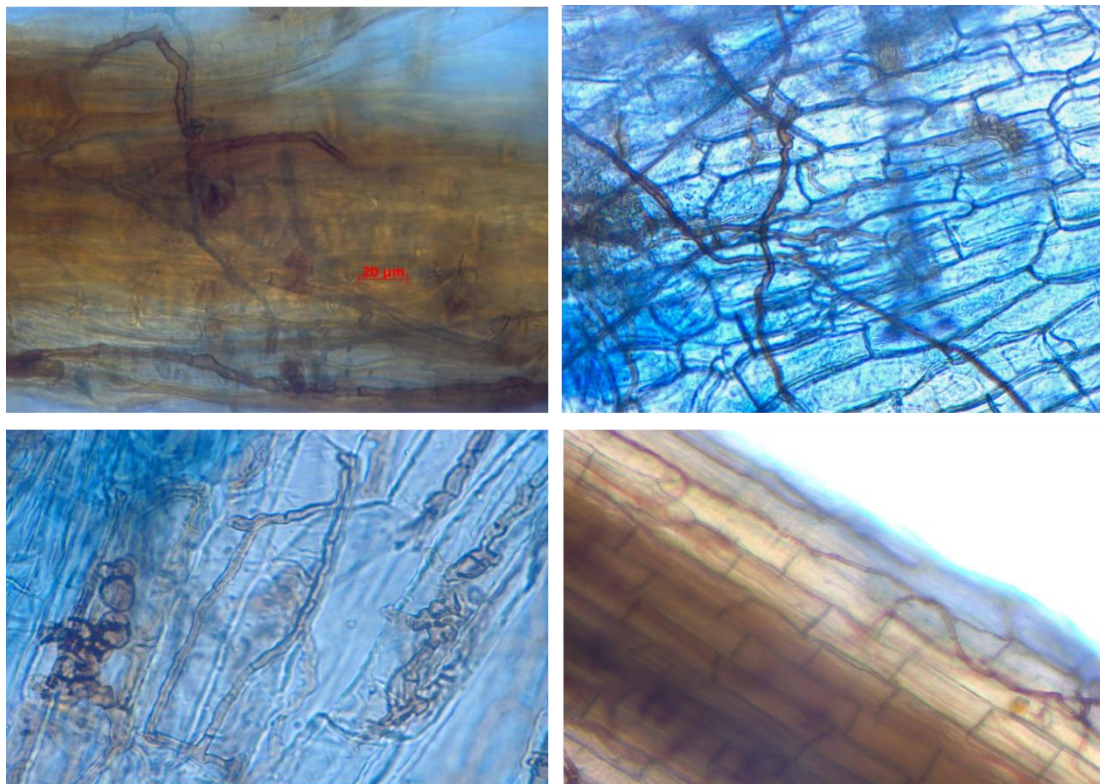


圖 54. 臺灣冷杉小苗之暗色隔膜菌觀察

表 30. 臺灣冷杉推移帶之森林帶下小苗標記資料與感染率

編號	根長	外生菌根菌 感染率(%)	内生菌根菌 感染率(%)	備註	x 座標	y 座標	環境備註
BC-1	1.80	88%	100%		275518	2698441	林緣孔隙
BC-2	8.34	65%	100%		275518	2698441	林緣孔隙
BC-3	3.96	74%	96%		275518	2698441	林緣孔隙
BC-4	5.52	81%	100%		275510	2698440	冷杉林緣孔隙，靠近 AB
BC-5	3.12	0%	100%		275518	2698442	冷杉林緣孔隙，靠近樹基，斷根
BC-6	3.17	15%	95%	叢枝菌根菌多	275531	2698447	林緣孔隙
BC-7	4.50	0%	91%		275543	2698458	林緣孔隙
BC-8	3.00	50%	100%	暗色隔膜菌多	275527	2698449	林緣孔隙，靠近樹基
CD-1	2.63	0%	75%		275485	2698475	冷杉林下
CD-2	10.73	67%	100%	暗色隔膜菌多	275481	2698475	冷杉林下，靠近樹基，二年生以上小苗
CD-3	2.18	70%	100%		275473	2698471	冷杉林下
CD-4	4.50	77%	95%	暗色隔膜菌多	275497	2698479	C 下方冷杉林緣孔隙
CD-5	4.46	50%	100%	全為暗色隔膜菌	275497	2698479	C 下方冷杉林緣孔隙
CD-6	4.30	100%	80%	全為暗色隔膜菌	275497	2698479	C 下方冷杉林緣孔隙
CD-8	2.03	30%	100%	全為暗色隔膜菌	275503	2698481	冷杉林緣孔隙，生長於半腐木上
CD-9	8.20	44%	87.5%	全為暗色隔膜菌	275478	2698475	冷杉林下，靠近樹基
CD-10	2.70	91%	100%	全為暗色隔膜菌	275490	2698466	二年生以上小苗

(七) 臺灣冷杉物候調查與監測

1. 每月臺灣冷杉物候調查

比較臺灣冷杉歷年開花物候發現，2012 年的臺灣冷杉花期最早，於 3-4 月即觀察到開花現象。2013 年在 2 月時有罕見高溫的氣象事件，3、4 月時又遭逢罕見的春雪，當年度未觀察到臺灣冷杉開花。2014-2016 年 5-6 月皆觀察到開花現象，並於雪山黑森林內觀察到 7-8 月較晚開花的植株。而 2019 年於 4 月及觀察到開花，直至 6 月花期結束。比較中國大陸冷杉屬植物，峨眉冷杉(*Ab. fabri*) 等 14 種冷杉屬植物絕大多數種類的開花盛期介於 4 月下旬至 5 月上旬，僅新疆冷杉(*Ab. sibirica*) 盛花期較晚，約在 5 月下旬(樊金拴，2007)，觀察臺灣冷杉在雪山及玉山之開花時段，主要開花時段為 5 月，使花期大致落在 3-4 月區間，而花謝狀態則由 5 月盛花直至 6 月。

較為特殊的開花時段紀錄為 2017 以及 2018 年，2017 年 6 月觀察到開花，但於該年 12 月至隔年 1 月也有紀錄到開花的現象(圖 55)，而 2018 年 10 月時亦有見到開花現象，因花期之紀錄包含花苞、盛花、花謝之狀態，推判此一現象可能為雄花花謝殘存枝條上的紀錄。

在歷年調查紀錄中，雪山地區的結果狀態始於 5 月，直至 10-11 月(圖 57、58)。中國地區之冷杉屬類群，種子散落盛期大致介在 10 月上旬至 11 月(樊金拴，2007)。觀察臺灣冷杉果期，合歡山地區的種子主要落果期介於 11 月至翌年 1 月(賴國祥，1992)，玉山地區的調查，分別於 2013 年及 2017 年紀錄到隔年 1-2 月為果期末期(圖 56)。雪山地區於 2018 年也有紀錄至隔年 1 月的落果期。

統整大部分的冷杉屬物種的開花結實物候週期約 1 年，包括 *Ab. pinsapo*、*Ab. pindrow*、*Ab. amabilis*、*Ab. balsamea*、*Ab. lasiocarpa*、*Ab. grandis*；以 *Ab. pinsapo* 為例，雄毬花與雌毬花在秋天分化，分別於隔年 2 月與 5 月打破休眠，行減數分裂，雄毬花的花粉發散期於 4 月底至 5 月初發生，雌毬花也於 4 月底開花，而在此時期授粉，授粉後雌毬花發展快速，於 6 月底後發展成毬果，並在秋季發散種子(Arista & Talavera, 1994)。因此綜觀臺灣冷杉歷年物候，2017 年的臺灣冷杉開花結實物候較為特異，但大致上臺灣冷杉於 8 月至隔年 3 月於枝條上可發現花芽，4-5 月為雄、雌毬花盛花期，5-9 月雄毬花謝；而雌毬花開始成熟為毬果，10-12 月即為落果期(圖 59)。

年份	雪山 物候	月份											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2012	花期			■	■								
	果期												
2013	花期												
	果期								■	■			
2014	花期					■	■						
	果期					■	■	■	■	■			
2015	花期					■	■						
	果期												
2016	花期					■	■	■	■				
	果期					■	■	■	■	■			
2017	花期						■						■
	果期						■	■	■	■	■	■	■
2018	花期	■				■	■			■			
	果期	■	■				■	■	■	■	■	■	■
2019	花期				■	■	■						
	果期						■	■	■	■	■	■	■

圖 55. 雪山地區雪東線步道 2012-2019 年臺灣冷杉開花物候譜(黑色表花期，灰色表果期)

年份	玉山 物候	月份											
		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2013	花期				■	■							
	果期		■	■						■	■	■	■
2016	花期												
	果期							■	■	■	■	■	■
2017	花期					■	■						
	果期	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■
2018	花期					■	■						
	果期					■	■	■	■	■	■	■	■

圖 56. 玉山主峰沿線 2013 年及 2016 至 2018 年臺灣冷杉物候資料(彙整自曾喜育、曾彥學(2013)、曾喜育、曾彥學(2018))



圖 57. 雪山地區沿線拍攝之 2018 年 6 月臺灣冷杉結果及雄毬花凋謝



圖 58. 雪山地區沿線拍攝之臺灣冷杉 2018 年 10 月熟毬果與 11 月落果現象



圖 59. 臺灣冷杉物候示意圖

2. 縮時攝影

雪山主峰線自哭坡頂開始即可觀察臺灣冷杉物候。而本研究就觀察地形分類，以哭坡頂至三六九山莊前為稜線步道；三六九山莊至黑森林為邊坡步道；黑森林內至圈谷底為林下步道。根據觀察樣株方便性以及彙整歷年物候觀測到結實之熱點，我們發現稜線步道的冷杉族群，有許多樣株皆長在邊坡上，而樹冠層即等高於步道，以觀察之便利性及架設相機的可行性，相對來說易於觀察。加上過去發現 5.7 K 為觀測臺灣冷杉結實之熱點，因而本研究就以上要點先做選擇。縮時攝影監測樣株僅單株拍攝，目前放置 1 臺拍攝相機，相機型號 HC500，座標(WGS84) N24.388888 E121.265555，安裝日期 2017 年 6 月 11 日，海拔 3,210 m，在雪山主峰線步道約 5.7K 處，相機每一小時拍一張，早上 6 點開始拍攝直到下午 5 點，夜間停止拍攝。

根據 3 年調查，擷取 2017-2019 年 7-8 月盛果時期的時段來比較，在縮時攝影的紀錄中，於 2017 年及 2019 年皆有拍攝到此臺灣冷杉樣株結果的盛況，惟 2018 年紀錄到的毬果狀況僅枝梢上一兩叢。可得知臺灣冷杉之物候周期為期約 1 年，但有豐欠年之分(圖 61)。由本計畫調查到的結果顯示，每兩年為一豐年，欠年並非全無結果。比較 3 個年度之結實狀況，2019 年在同一拍攝範圍內的枝梢結果量較 2017 年紀錄的多，此外，可觀察到 2017 年鏡頭右下角拍攝的枝條，果實生長較多且密集，2019 年的同一區塊雖有結果，但相較於 2019 年，此區結實量較為稀疏且零散(圖 61)。

彙整 2017 至 2019 年縮時攝影所拍攝之照片(附錄 4)，挑選每月月初較清晰之影像，並觀察雌毬花、毬果及落果的生長狀態，將調查記錄製作成圖 60，以顏色區分果期生長的過程，可明顯看出，4 月始即可觀察到粉紅色的雌毬花，5 月開始轉紫紅，此階段大小約 4-5 cm，而 6 月開始，毬果已膨大且呈藍紫色，毬果藍紫色階段為期 4-5 個月，10 月開始已有部分毬果開始落果，11 月則大致上已看不見藍紫色毬果宿存。

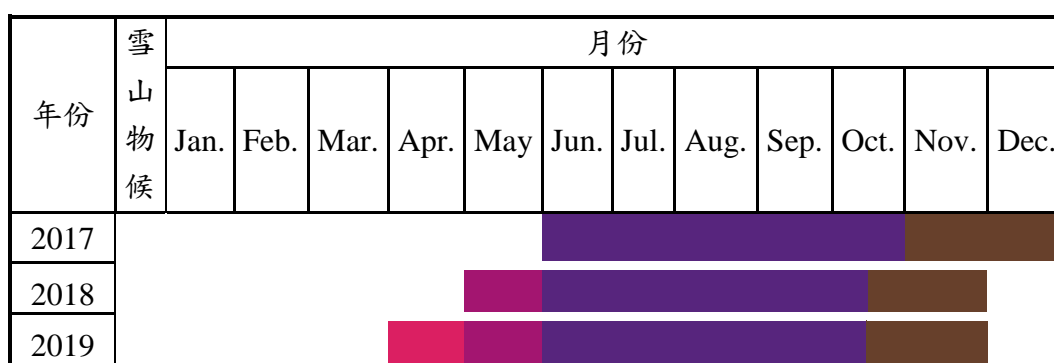


圖 60. 2017 及 2019 年雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影監測樣株毬果物候表現彙整 (以顏色表達不同接段的毬果生長過程)

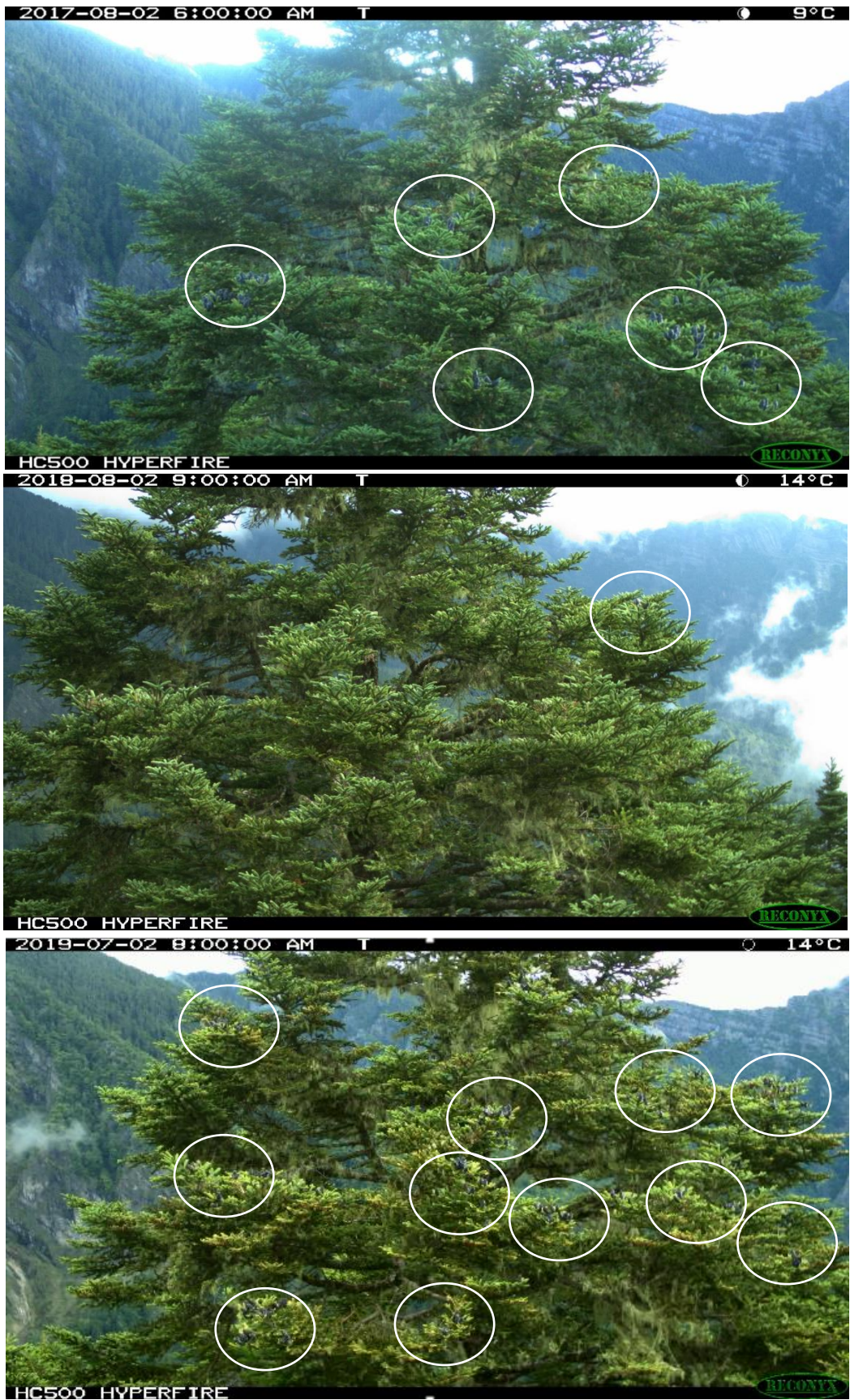


圖 61. 2017-2019 年夏季(7-8 月)雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株照

本研究另於 2019 年拍攝縮時攝影指定樣株標記樣枝，並結實近照，始於 4 月底至 11 月中，每月拍攝一次樣枝上的毬果生長狀況。可明顯觀察從雌毬花轉為毬果的時期大致為 5 月底左右(圖 62)。6 月開始，毬果顏色轉紫，且形狀已生長至一定大小，6-7 月毬果形態大致不變，但外表樹脂累積增多(圖 62)。

然發現該監測樣株在果期時有多處摘採痕跡(圖 64、65)，包含 2019 年 7 月 11 日於其中一樣枝枝條已發現毬果遭人摘取，該枝條的樹皮有明顯扯痕，於 8 月 21 日紀錄時觀察枝條已泛褐(圖 64 右下)。另 8 月 21 日同時發現周遭樣枝遭人截斷，切痕明顯，截斷樣枝即為圖 62 之監測樣枝，原監測的 5 顆毬果也遭人採集(圖 64 右上)。因而建議雪霸處，可於此點位設立解說牌，該樣株適合觀察物候結實，除介紹臺灣冷杉於不同季節的物候樣態，另達到提醒效果，藉此柔性勸導民眾勿摘採國家公園內的植物。

因此本研究改紀錄另外樣枝，呈現後半年(7-11 月)果熟時期的狀態，可發現 9 月開始，已有毬果落果，每樣枝可能僅有 1、2 顆為落果狀態，而 10-11 月為關鍵的落果時段，在本研究的調查記錄當中，10 月中旬樣叢還保有藍紫色毬果，但至 11 月中旬，絕大部分的毬果都為落果狀態，可見樣枝上僅宿存果梗(圖 63)。統整臺灣冷杉毬果變化，5 月底以及 10 月底為主要轉折點，前者為成熟階段，後者為種子傳播階段。



圖 62. 雪山地區臺灣冷杉 4-7 月縮時攝影物候調查樣株之樣枝毬果監測



圖 63. 雪山地區臺灣冷杉 7-11 月縮時攝影物候調查樣株之樣枝毬果監測

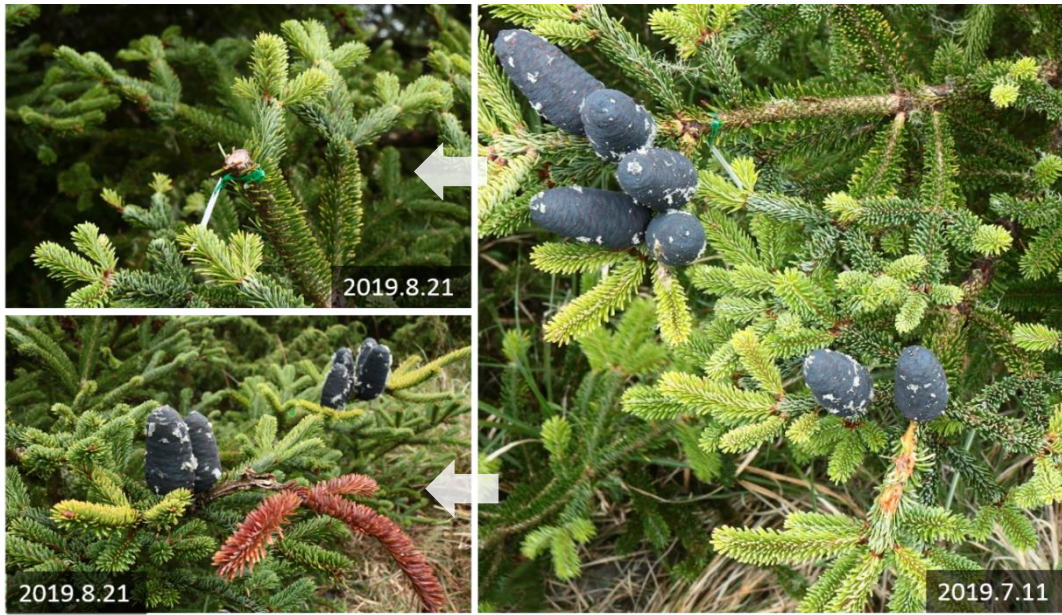


圖 64. 雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株之樣枝斷枝照



圖 65. 雪山地區臺灣冷杉之縮時攝影物候調查樣株之斷枝比對照

3. 臺灣冷杉葉片生長異常現象

2018年8月7日位於哭坡頂後、雪山東峰前的臺灣冷杉葉片發現植株枝條葉片有捲曲現象，除觀察到捲曲，另有葉片轉焦紅、葉芽萎縮、小枝膨大、葉面下有白點等異常狀況(圖 66)。檢視過去氣象資料發現，且於2018年2至5月降水量相較於往年(2017年)來的少(表 31、32)，推測降水量的不足致使新葉於展葉生長期缺水，造成葉片呈現捲曲的狀況而容易掉落，初步研判小葉捲曲的現象可能是生理上或是天氣變化的因素影響。



圖 66. 雪山地區臺灣冷杉小葉異常照(編號 a-d 依序為葉片捲曲、葉片焦紅、葉芽萎縮、葉下含有白點)

表 31. 雪山東峰及圈谷 2016-2019 年月均溫一覽表 (單位:°C)(- 表無資料顯示)(資料來源:中央氣象局 觀測資料查詢)(2019 年 11 月資料記錄至 20 日)

月份/年份	2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019
	雪山東峰				雪山圈谷			
1	-	4.4	3	4.7	-	1.2	0	1.5
2	-	2.8	3.2	5.9	-	-0.2	-0.3	3.1
3	-	4.5	4.5	5.1	-	1.2	0.5	1.6
4	-	7.5	7.8	8.4	-	4.1	4.7	5.1
5	11.4	9.1	11	9.2	9	6.4	8.1	6.7
6	11.3	11	11.2	11.1	8.6	8.4	8.5	8.8
7	11.9	11.8	11.4	11.9	8.9	8.6	8.2	9.4
8	11.3	12.3	11.3	11.7	8.6	8.9	8.2	8.8
9	10.5	12.1	10.5	10.8	8.1	8.8	7.4	7.9
10	10.4	10.7	7.8	9	7.4	7.2	4.9	5.6
11	7.3	7.9	6.7	8.6	4.2	4.9	3.4	5.2
12	5	4.1	6.1		2.1	1.4	3.7	

表 32. 雪山東峰及圈谷 2016-2019 年月降水量一覽表 (單位:mm)(- 表無資料顯示)(資料來源:中央氣象局 觀測資料查詢)(2019 年 11 月資料記錄至 20 日)

月份/年份	2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019
	雪山東峰				雪山圈谷			
1	-	29	323	78.5	-	47	0	101
2	-	68	72	44	-	88.5	-	56
3	-	209.5	83	379.5	-	309.5	-	395
4	-	255.5	73	174	-	377.5	-	219.5
5	-	265.5	70	547	-	326.5	95.5	693
6	-	721	215.5	492	-	1192.5	373.5	657
7	-	389	199.5	65.5	-	511.5	335	89.5
8	11.5	37	322.5	574.5	33	47.5	401	718
9	637	104	170	59.5	479.5	180.5	133	109.5
10	131.5	197.5	84	92.5	166.5	164.5	82	53.5
11	152.5	206.5	80	3.5	194	242.5	99	0
12	26	69.5	12.5		49	4	16	

(八) 臺灣冷杉物種分布模擬

1. 環境變數與物種點位之選用

良好的物種分布模擬取決於 2 大因素：找出可解釋物種分布之環境變數、數量適宜的物種點位，緣此，應先進行環境變數與物種點位之選用的評估。

(1) 環境變數之選用評估

本計畫已初步選擇 21 項可能影響冷杉分布的環境變數(表 3)，為了降低變數之冗餘(redundance)及共線性(collinearity) (Randin *et al.* 2009)，計算此 21 項變數之相關係數(表 33)，即可將相關係數絕對值大於 0.9 之變數擇較不具生態解釋性者予以刪除，並利用刪除後所餘環境變數進行 SDM 模擬測試。

表 33 的 21 項環境變數經刪減相關係數較高者(絕對值大於 0.9)之後，共餘 13 項相關係數較低的環境變數，即：ASP、SR、CTI、TRAI、WLS、EWI、Bio4、bio12、bio15、bio18、bio19、PWR、PER。將此 13 項變數於 Maxent 進行模擬測試，經重複運行 25 次之計算，模擬結果之 AUC (area under the receiver operating characteristic curve 接受者工作特徵曲線下的面積)為 0.962，顯示模擬之準確度屬於極好等級(excellent, Pearce & Ferrier 2000)，然再檢查表 34 及圖 67，可知 TRAI、CTI、ASP、SR、bio18 等環境變數的貢獻度與重要性非常低，故不予採用，最後採用貢獻度與重要性較高的 8 項環境變數(EWI、PER、bio15、WLS、PWR、bio12、bio4、bio19)來模擬臺灣冷杉之分布。

表 33. 初步選擇 21 項環境變數之相關係數摘要表(紅底及綠底者表示高度相關 $r > 0.9$ 或 $r < -0.9$)

	ASP	SR	CTI	TRAI	WLS	bio1	bio4	bio10	bio11	T1	T7	EWI	bio12	bio15	bio18	bio19	PS	PW	PSR	PWR	PER
ASP		-0.027	-0.195	0.361	-0.100	-0.073	-0.066	-0.077	-0.065	-0.066	-0.078	-0.072	0.099	-0.028	0.104	0.028	0.129	0.019	-0.007	0.006	-0.138
SR	-0.027		0.151	0.476	0.476	-0.154	-0.049	-0.155	-0.161	-0.164	-0.157	-0.154	-0.099	0.016	-0.024	-0.043	-0.059	-0.083	0.071	-0.076	0.028
CTI	-0.195	0.151		0.013	0.403	0.467	0.373	0.480	0.427	0.423	0.478	0.465	-0.464	0.245	-0.229	-0.221	-0.406	-0.267	0.224	-0.230	0.598
TRAI	0.361	0.476	0.013		0.087	0.025	-0.032	0.014	0.030	0.029	0.012	0.026	-0.022	0.079	0.062	-0.058	0.035	-0.063	0.078	-0.078	0.026
WLS	-0.100	0.476	0.403	0.087		0.494	0.383	0.508	0.456	0.452	0.505	0.492	-0.396	0.231	-0.177	-0.162	-0.350	-0.224	0.203	-0.213	0.536
bio1	-0.073	-0.154	0.467	0.025	0.494		0.463	0.985	0.987	0.986	0.981	1.000	-0.429	0.449	-0.065	-0.312	-0.303	-0.314	0.320	-0.319	0.735
bio4	-0.066	-0.049	0.373	-0.032	0.383	0.463		0.604	0.321	0.320	0.618	0.450	-0.336	-0.302	-0.698	0.287	-0.692	0.171	-0.295	0.269	0.527
bio10	-0.077	-0.155	0.480	0.014	0.508	0.985	0.604		0.949	0.948	1.000	0.983	-0.429	0.322	-0.201	-0.206	-0.402	-0.222	0.202	-0.205	0.744
bio11	-0.065	-0.161	0.427	0.030	0.456	0.987	0.321	0.949		1.000	0.942	0.990	-0.386	0.510	0.042	-0.366	-0.204	-0.344	0.370	-0.363	0.682
T1	-0.066	-0.164	0.423	0.029	0.452	0.986	0.320	0.948	1.000		0.942	0.988	-0.376	0.497	0.033	-0.356	-0.207	-0.328	0.351	-0.344	0.675
T7	-0.078	-0.157	0.478	0.012	0.505	0.981	0.618	1.000	0.942	0.942		0.978	-0.424	0.298	-0.224	-0.187	-0.416	-0.202	0.177	-0.180	0.739
EWI	-0.072	-0.154	0.465	0.026	0.492	1.000	0.450	0.983	0.990	0.988	0.978		-0.428	0.457	-0.054	-0.319	-0.294	-0.320	0.328	-0.327	0.733
bio12	0.099	-0.099	-0.464	-0.022	-0.396	-0.429	-0.336	-0.429	-0.386	-0.376	-0.424	-0.428		-0.378	0.334	0.671	0.688	0.747	-0.523	0.524	-0.861
bio15	-0.028	0.016	0.245	0.079	0.231	0.449	-0.302	0.322	0.510	0.497	0.298	0.457	-0.378		0.586	-0.782	0.241	-0.742	0.887	-0.868	0.436
bio18	0.104	-0.024	-0.229	0.062	-0.177	-0.065	-0.698	-0.201	0.042	0.033	-0.224	-0.054	0.334	0.586		-0.372	0.901	-0.366	0.604	-0.597	-0.346
bio19	0.028	-0.043	-0.221	-0.058	-0.162	-0.312	0.287	-0.206	-0.366	-0.356	-0.187	-0.319	0.671	-0.782	-0.372		-0.010	0.933	-0.851	0.825	-0.500
PS	0.129	-0.059	-0.406	0.035	-0.350	-0.303	-0.692	-0.402	-0.204	-0.207	-0.416	-0.294	0.688	0.241	0.901	-0.010		0.032	0.223	-0.216	-0.674
PW	0.019	-0.083	-0.267	-0.063	-0.224	-0.314	0.171	-0.222	-0.344	-0.328	-0.202	-0.320	0.747	-0.742	-0.366	0.933	0.032		-0.925	0.920	-0.568
PSR	-0.007	0.071	0.224	0.078	0.203	0.320	-0.295	0.202	0.370	0.351	0.177	0.328	-0.523	0.887	0.604	-0.851	0.223	-0.925		-0.998	0.454
PWR	0.006	-0.076	-0.230	-0.078	-0.213	-0.319	0.269	-0.205	-0.363	-0.344	-0.180	-0.327	0.524	-0.868	-0.597	0.825	-0.216	0.920	-0.998		-0.458
PER	-0.138	0.028	0.598	0.026	0.536	0.735	0.527	0.744	0.682	0.675	0.739	0.733	-0.861	0.436	-0.346	-0.500	-0.674	-0.568	0.454	-0.458	

表 34. 13 項環境變數之貢獻百分率與置換重要性

Variable	Percent contribution	Permutation importance
EWI	97.6	99.6
PER	1.0	0.0
bio15	0.4	0.0
WLS	0.4	0.1
PWR	0.2	0.1
bio12	0.2	0.0
bio4	0.1	0.0
bio19	0.0	0.1
TRAI	0.0	0.0
CTI	0.0	0.0
ASP	0.0	0.0
SR	0.0	0.0
bio18	0.0	0.0



圖 67. 13 項環境變數重要性之折刀分析(jackknife test)

(2) 物種點位之選用評估

通常要取得大量且高準確度的物種點位在實務上是很難達成的，然而 SDM 之模擬樣本(物種點位)數量不足時，將影響模擬之準確度，其結果也會有較大的不確定性(Wisz *et al.* 2008)，緣此，本計畫評估不同的物種點位資料對 SDM 之影響，評估之點位資料包括：前述自行彙整的 230 點臺灣冷杉之座標點，以及自

FC21 polygon 擷取的 40-m、200-m、500-m、1000-m 等網格之點位，共計有 5 組點位資料。

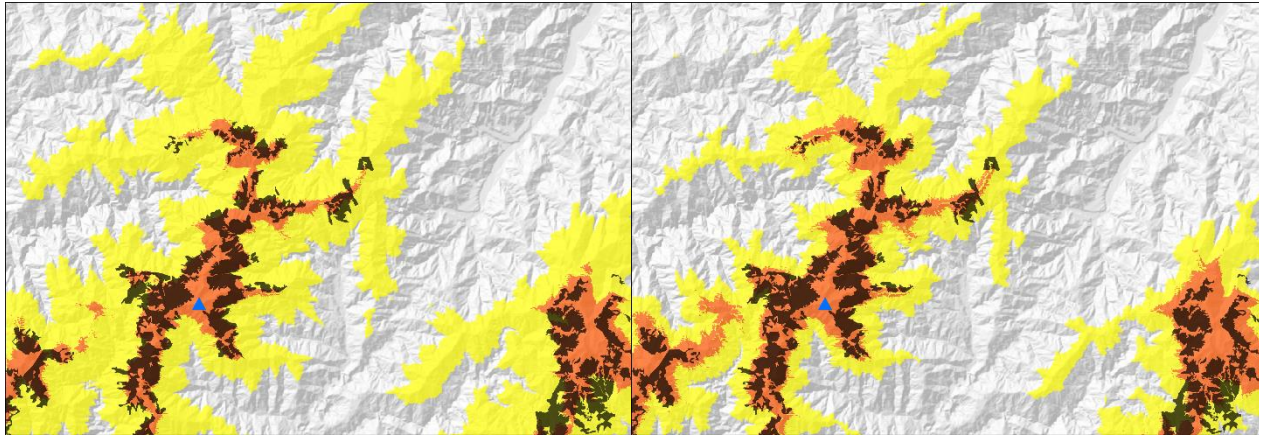
評估測試係於 MaxEnt 操作，環境圖層採用前述通過檢核的 8 項變數(EWI、PER、bio15、WLS、PWR、bio12、bio4、bio19)，表 35 為參與測試的 5 組物種點位檔及其所得結果的模擬準確度(AUC)和閾值(threshold 1 = Equal training sensitivity and specificity、threshold 2 = Maximum training sensitivity plus specificity)。將表 35 之模擬結果 ASCII 轉換為 raster 出現機率值，再以 threshold 1、threshold 2 將連續的出現機率值轉化為 0 (absence, 缺席) 或 1 (presence, 存在) (Liu *et al.* 2005; Cao *et al.* 2013; Shabani *et al.* 2018)，圖 68 為 5 組點位資料模擬結果之雪山及南湖大山的截圖，可與國家植群圖現生之 FC21 (Chiou *et al.* 2009, 亞高山針葉林，圖 68 之黑色部分)相比較。綜合表 35 之 AUC、圖 68 之比較圖，可知在 5 組點位資料中以 fc21-500m-683p.csv 表現最佳，且其切分閾值因 threshold 2 之值甚小與實際情況符合度較低，故宜設定 threshold 1 = 0.4046 為存在閾。

表 35. 5 組不同物種點位資料之內容及其模擬準確度、閾值

檔名	點位資料之內容	AUC	Threshold 1*	Threshold 2**
fc21-40m-105368p.csv	將 FC21 轉為 40-m 網格再取其中 心點座標，共 105368 點	0.5443	0.6366	0.5090
fc21-200m-4251p.csv	將 FC21 轉為 200-m 網格再取其中 心點座標，共 4251 點	0.8500	0.6412	0.2108
fc21-500m-683p.csv	將 FC21 轉為 500-m 網格再取其中 心點座標，共 683 點	0.9628	0.4046	0.0972
fc21-1000m-171p.csv	將 FC21 轉為 1000-m 網格再取其 中心點座標，共 171 點	0.9846	0.1445	0.0769
Abies-230p.csv	自行彙整並經檢核後之臺灣冷杉 分布點位，共 230 點	0.9844	0.2193	0.0997

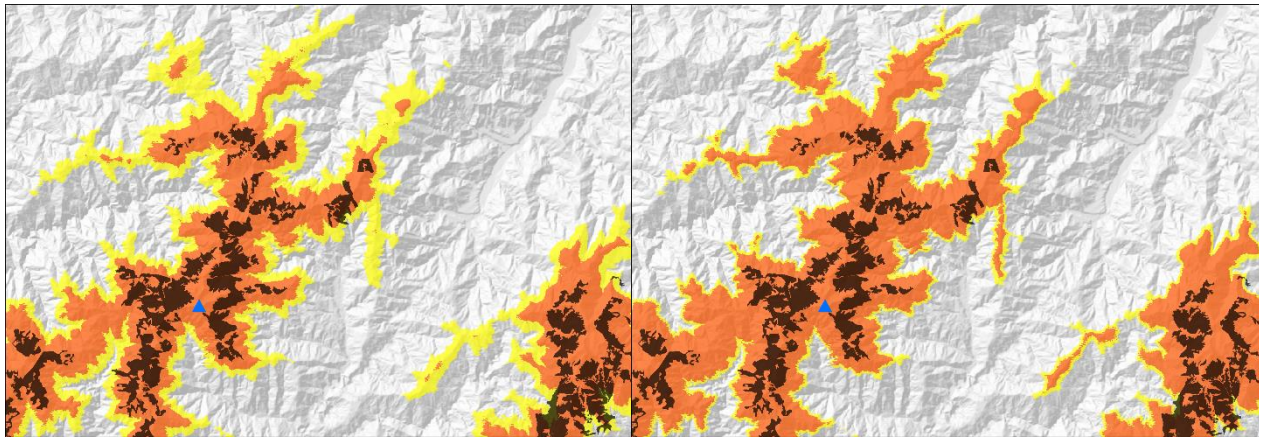
* Threshold 1 = Equal training sensitivity and specificity，即圖 ff 黃色區與橘色區之界線

** Threshold 2 = Maximum training sensitivity plus specificity，即圖 ff 灰色區與黃色區之界線



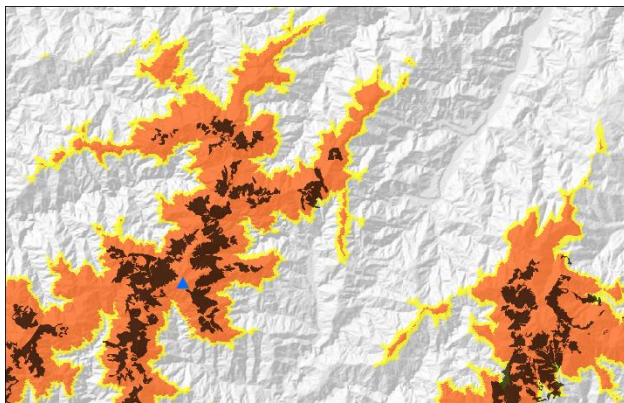
fc21-40m-105368p.csv

fc21-200m-4251p.csv



fc21-500m-683p.csv

fc21-1000m-171p.csv



Abies-230p.csv

註 1：本圖示將連續的出現機率值轉化為 0 (缺席，即灰色部分) 或 1 (存在)。

註 2：灰色部分為出現機率低於 Threshold 2。黃色部分為出現機率介 Threshold 1 ~ Threshold 2。橘色部分為出現機率大於 Threshold 1。黑色部分為國家植群圖之 FC21。

圖 68. 採用 5 組不同物種點位資料所得之 SDM 模擬結果(以雪山、南湖大山為例)

2. 模擬臺灣冷杉之現今分布

經前述的預備測試後，本計畫實際進行臺灣冷杉之 SDM 模擬操作如下：

- (1) 物種點位：683 點臺灣冷杉點位(fc21-500m-683p.csv)
- (2) 環境圖層：8 項環境圖層(EWI、PER、bio15、WLS、PWR、bio12、bio4、bio19)
- (3) 模擬軟體：Maxent (設定 Replicate = 25 次、Crossvalidate 驗證、Equal training sensitivity and specificity = 0.4046 存在閾)

圖 69A 為以 SDM 模擬臺灣冷杉之出現機率的潛在分布圖，其值介於 0.0000 ~ 0.8580，同時為瞭解潛在分布預測與 Su (1984)所提冷杉林帶介於海拔 3,100 ~ 3,600 m，故疊合 3,100 m 等高線(紅線)、3,600 m 等高線(藍線)，此外，亦疊合 FC21 現生植群以瞭解彼此之空間分布關係；臺灣冷杉在雪山、玉山附近之分布圖如 69A、圖 69B 所示。

Su (1984)曾以溫量指標(warmth index) $WI = 12 \sim 36$ 來界定冷杉林帶(面積 20,989 ha)，受到臺灣生態學界廣泛的運用，而 Chiu *et al.* (2012)進一步結合熱量的總和與季節性提出了新的有效溫量指標[effective warmth index, EWI，其計算式為 $EWI = WI - 0.5 \times ATR$ (in $^{\circ}C$, for monthly mean temperature > 5)、 ATR (annual temperature range) = (monthly mean temperature of the warmest month) - (monthly mean temperature of the coldest month)]，以 $EWI = 12 \sim 32$ 可更好的擬合冷杉林帶(面積 20,922 ha)，為了瞭解冷溫帶針葉純林(cold-temperate coniferous pure forest)之冷杉林帶的疊合關係，再進一步將相關圖層疊合，其在雪山、玉山附近之分布圖如 70A、圖 70B 所示，同時將這 4 類臺灣冷杉空間分布相關圖層及其屬性、內涵與相關文獻整理如表 36。

綜合檢視圖 63 與表 36 的 4 類冷杉分布圖層，有 3 項議題須進一步說明：

- (1) 潛在的冷杉分布 vs. 真實的冷杉分布：大部分的植物空間分布研究都是基於均衡假設(equilibrium assumption)，亦即分析物種天然分布以評估物種真正的生存氣候需求(Booth 2017)，然而由於機遇(chance)、隔離(isolation)、基礎生態位與真實生態位(fundamental niche and realized niche)等等問題(Barve *et al.* 2011; Peterson *et al.* 2011)，植物的真實分布常常會比潛在的適宜分布區更小，因此圖70與表36清楚顯示冷杉潛在分布區 > 冷杉真實分布區。

- (2) 冷杉優勢植群分布 vs. 冷杉單株分布：當某一物種形成優勢植群或純林時，通常是處於其最適生態幅度之內，而單株的植物個體有時也會出現於生態幅度之兩端，因此圖70與表36清楚顯示模擬冷杉個體之SDM存在域 > 冷杉優勢林帶 & 冷杉林植群。
- (3) 非氣候因子對冷杉分布之影響：雖然氣候極盛相觀點可解釋大部分或大尺度的植物分布，但有時土壤、避風處等因子的交互作用也會修改冷杉之實際分布，因此仍有少數的冷杉會超出 SDM 之預測範圍，例如在圖 63 玉山地區的左下方即有小部分的冷杉超出 SDM 存在域。

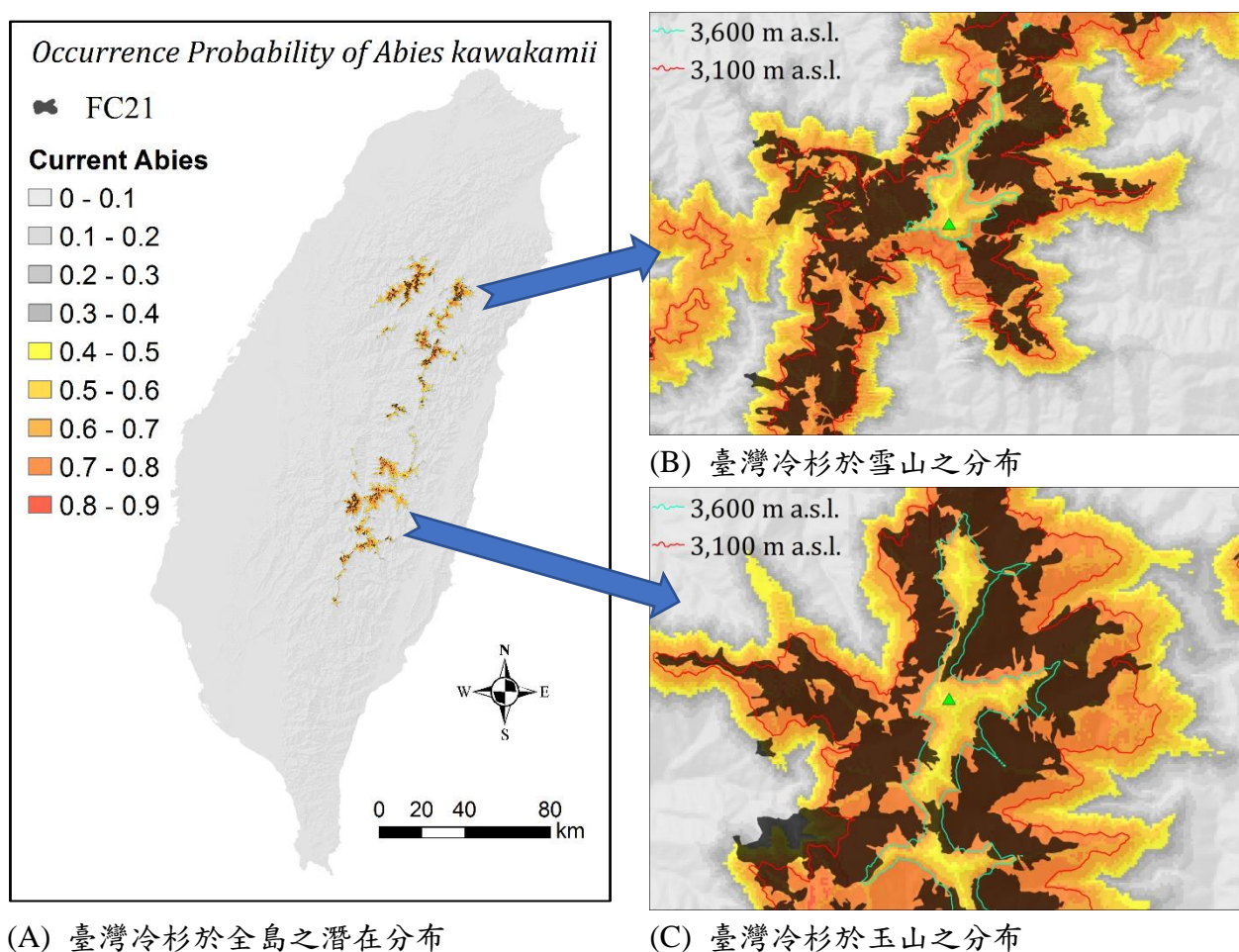
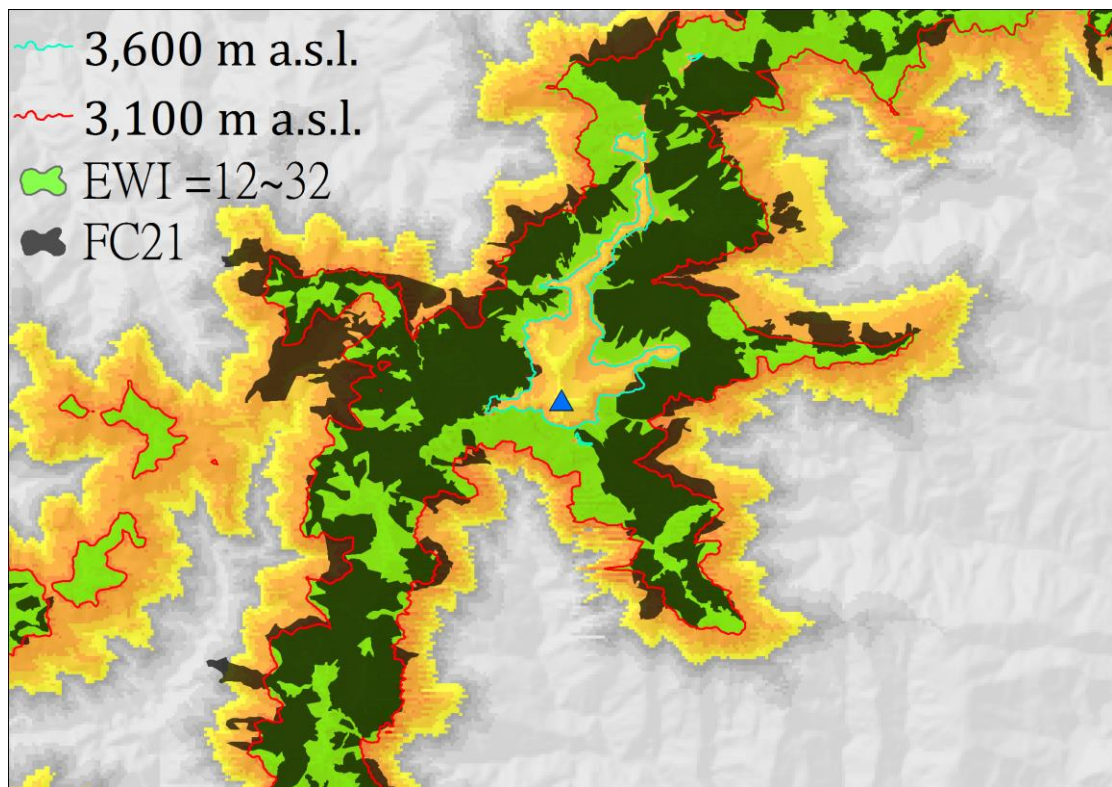


圖 69. 以 SDM 預測臺灣冷杉之分布(黃橘色系：SDM 潛在分布。黑色：FC21。紅線：海拔 3,100 m 等高線。藍線：海拔 3,600 m 等高線)

雪山



玉山

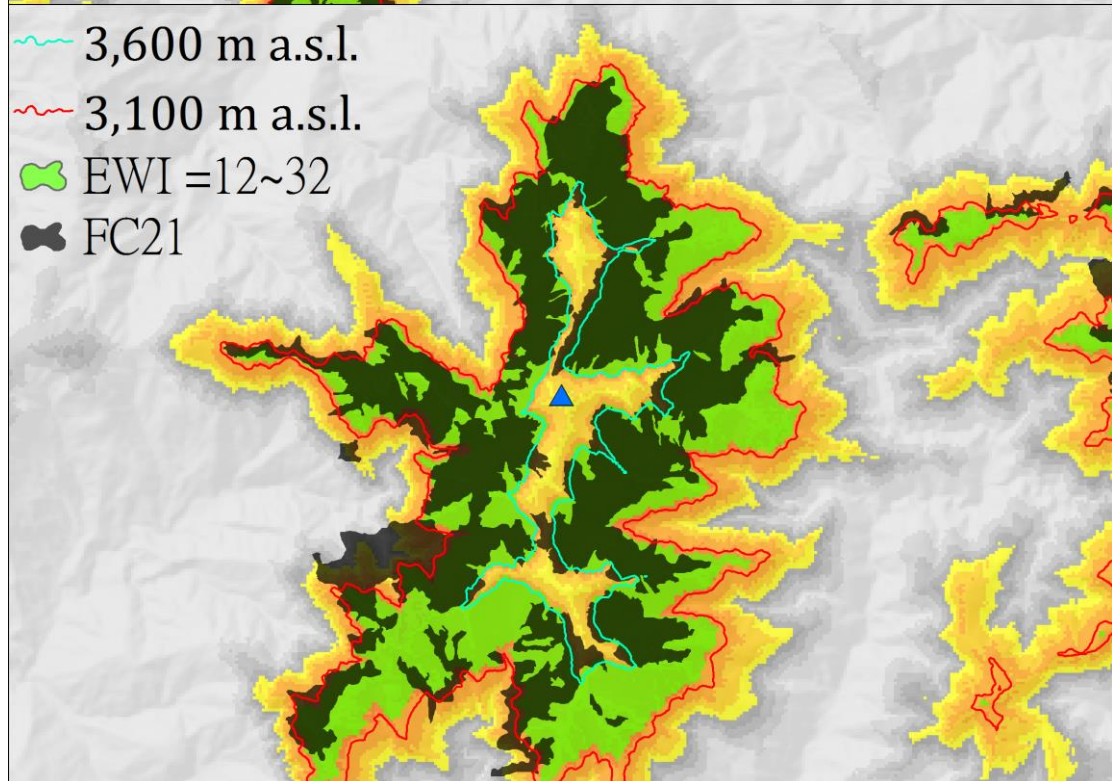


圖 70. 臺灣冷杉之分布疊合圖(黃橘色系：SDM 潛在分布。黑色：FC21。淡綠色：EWI = 12~32。墨綠色：FC21 與 EWI = 12~32 重疊區。紅線：海拔 3,100 m 等高線。藍線：海拔 3,600 m 等高線)

表 36. 臺灣冷杉空間分布圖層之摘要表

空間分布圖層	屬性	內涵與相關文獻	全臺之冷杉面積 (佔全臺之面積%)	雪山之冷杉面積 (佔全臺之冷杉面積%)
SDM 模擬冷杉之存在域	潛在的冷杉 生育地	可指示冷杉這一物種之單株出現在全臺灣每一網格的機率或生育地適合度(Franklin 2009)	73,152 ha (0.43%)	15,567 ha (21.28%)
3,100 ~ 3,600 m 等高線之範圍	潛在的冷杉 分布海拔	野外觀察冷杉林之分布海拔範圍(Su 1984)	25,571 ha (0.15%)	5,423 ha (21.21%)
EWI = 12 ~ 32 冷杉林帶	潛在的冷杉 優勢林帶	利用對物種更具生態意義的熱量範圍(相對於海拔高度而言)來估計冷杉林之熱量生態位分布帶(Chiu <i>et al.</i> 2012)	20,922 ha (0.15%)	5,495 ha (26.26%)
FC21 現生冷杉林植群	真實的冷杉 林植群	結合現生植群的地面調查及遙測影像調繪出目前冷杉林的分布多邊形(Chiou <i>et al.</i> 2009)	16,857 ha (0.12%)	4,232 ha (25.11%)

3. 氣候暖化對臺灣冷杉分布之影響

目前可取得有關全球氣候暖化的高解析圖層主要有 2 個資料庫：(1) CliMond (global climatologies for bioclimatic modelling; Kriticos *et al.* 2012); <https://www.climond.org/> 最高解析度 10 minutes \approx 18 km)、(2) WorldClim (Global Climate Data; Hijmans *et al.* 2005; <http://www.worldclim.org/> 最高解析度 30 seconds \approx 1 km)，其空間解析度對臺灣而言均過於粗略，因此本計畫以升溫 2°C 為氣候暖化假想情境 (climate warming scenario)，再針對前述的 8 項環境因子分別重新計算其升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 之 40-m 空間網格圖層，並將這些圖層做為暖化環境對臺灣冷杉影響的預測因子。

圖 71 為雪山地區臺灣冷杉於不同氣候暖化情境下的分布，顯示了冷杉在升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 的情境下逐漸喪失其海拔較低處的適宜生育地，若依據 Liu *et al.* 2005、Cao *et al.* 2013、Shabani *et al.* 2018 等研究，採用 Equal training sensitivity and specificity 為閾值 (threshold) 將出現機率值轉化為 0 (absence, 缺席) 或 1 (presence, 出現)，則可將圖 71 之各時期冷杉出現機率轉換為出現域，圖 72 即冷杉在現今及升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 情境的出現域，其面積分別為 73,151、51,323、34,476、22,106、7,338 ha，亦即當暖化升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 時，臺灣冷杉之適宜生育地將逐漸減少 21,828、16,848、12,369、14,769 ha。換言之，在升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 暖化情境下，臺灣冷杉適宜生育地僅為目前之 70.2%、47.1%、30.2%、10.0% (表 37)。

從圖 72 之疊合圖亦可明顯看出，在暖化情境下臺灣冷杉不僅面積縮小，且呈逐步往高海拔遷移之趨勢，為此，本計畫進一步分析暖化情境下，臺灣冷杉生育地之喪失 (loss)、獲得 (gain)，圖 73 左側為各暖化情境下冷杉分布之變化，圖 73 右側則再疊合現生冷杉分布範圍之 FC21 polygon，更清楚地顯示臺灣冷杉於不同氣候暖化情境下的生育地喪失 (暖色系) 與獲得 (藍色)，圖 73 表明的是冷杉適宜生育地在暖化時的變化，若進一步利用可代表臺灣冷杉現今之真實分布區的 FC21 來擷取各暖化期的變化，圖 74 即顯示暖化後，現生臺灣冷杉之分布變化 (喪失—暖色系、獲得—藍色)，表明了氣候暖化時，冷杉不只適宜生育地減少了，對於現今冷杉分布區將大幅縮減，特別是當升溫 2°C 時，現有的冷杉將遭遇嚴苛的環境考驗。

當溫度升高時，臺灣冷杉將呈現往更高海拔遷移之趨勢，雖然由 SDM 模擬結果可知，冷杉會喪失其在海拔較低處的生育地，而新增其在海拔較高處的生育地，但 SDM 為一靜態之物種分布模擬，其結果有 3 點值得注意：(1) SDM 所使用的預測因子為長期平均氣候因子，並未論及可能對冷杉造成更大衝擊的極端氣象事件；(2) 未來冷杉受氣候變遷之影響，尚無法考慮到不同環境因子間交互作用對冷杉之影響；(3) 暖化環境下，植物之真實遷移通常會有時滯(time-lag)現象 (Davis 1989; Wu et al. 2015)，依賴國祥(1992)估計臺灣冷杉之有效下種距離為離母樹 8–10 m，入侵推移帶之平均間隔年數為 36 年，顯示臺灣冷杉族群新增之困難，且再加上目前雪山、玉山等接近高山稜線之處，多為碎石坡且強風吹襲之嚴酷環境，因此在暖化情境下，冷杉可否順利往更高海拔處遷移將具有更多不確定性。

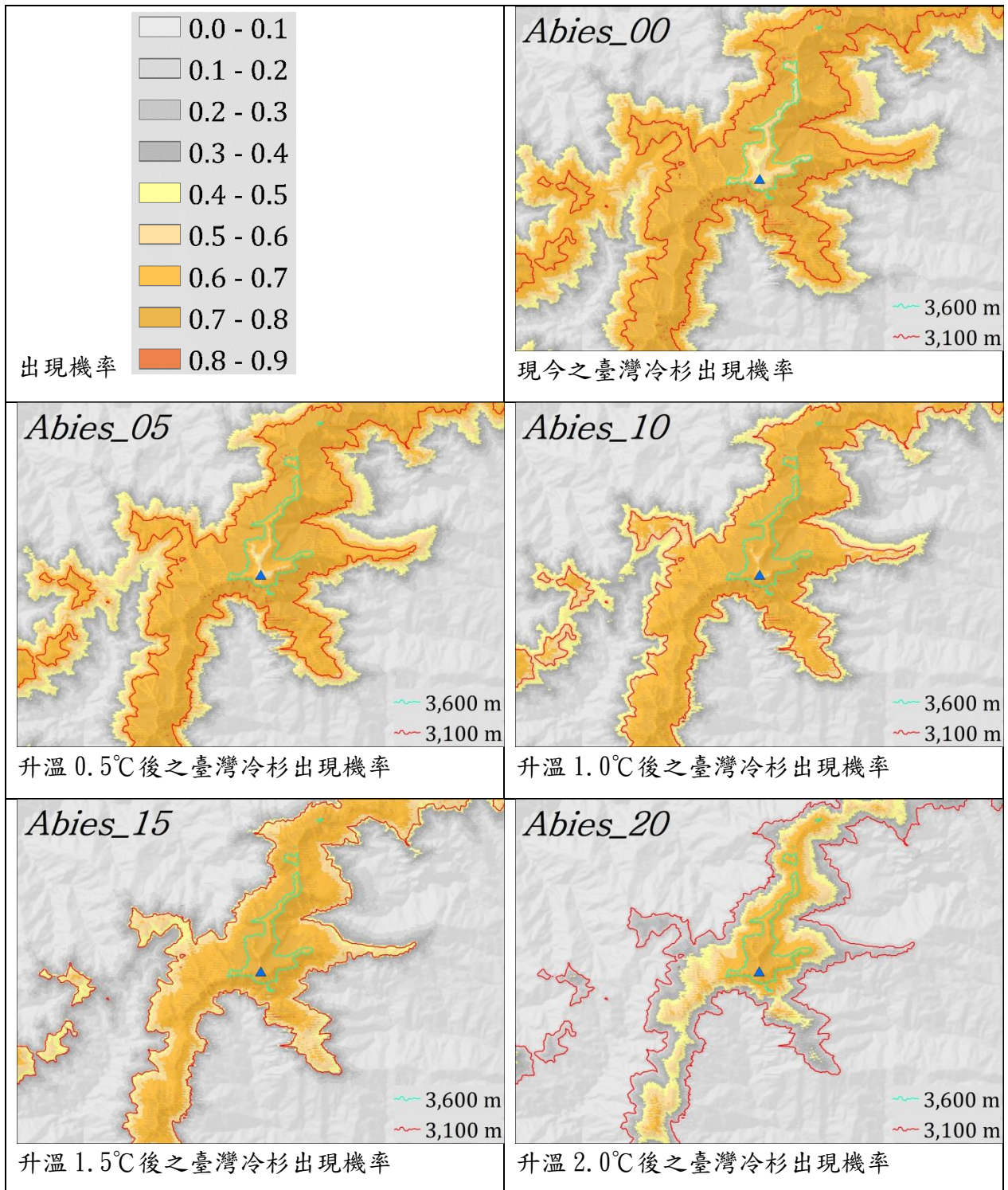


圖 71. 臺灣冷杉於升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現機率(以雪山為例)

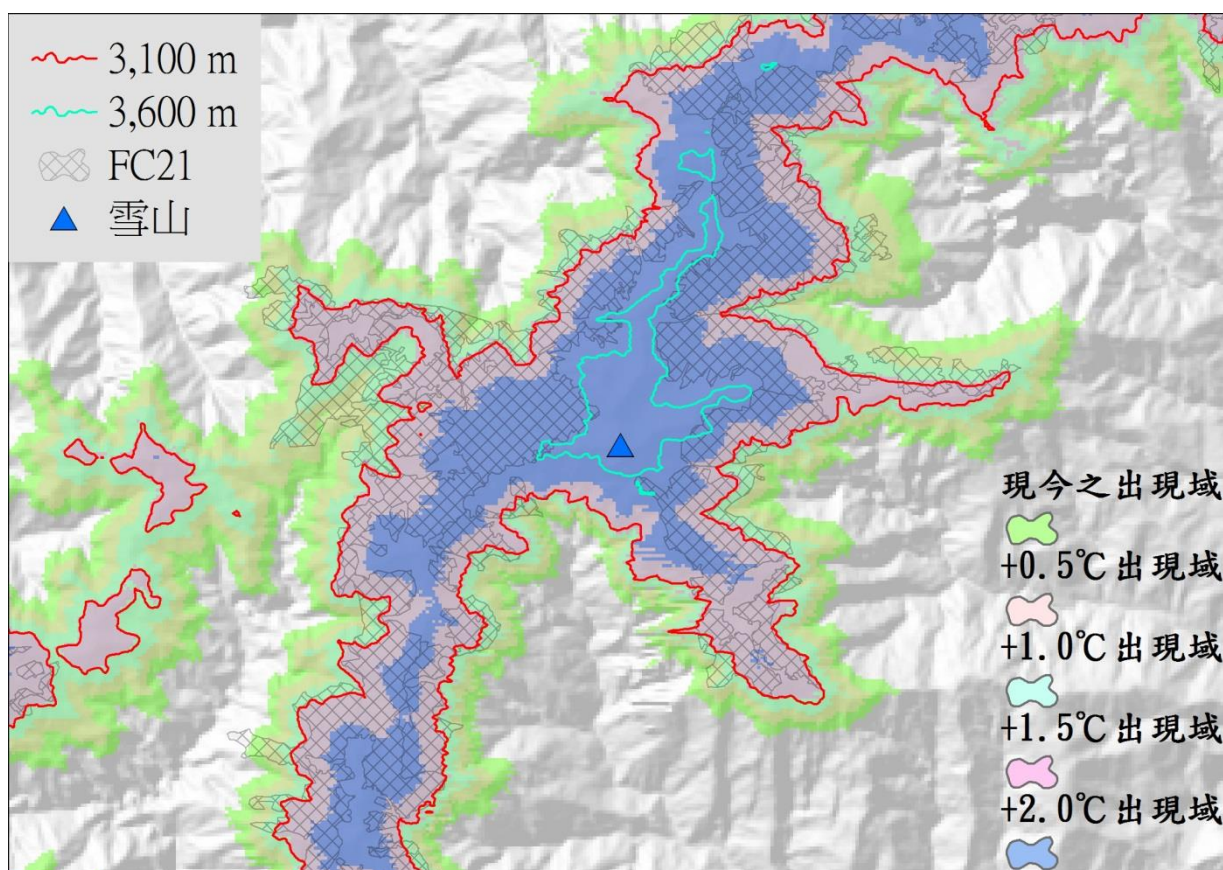


圖 72. 臺灣冷杉在現今及升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現域(以雪山為例)

表 37. 升溫 0.5~2.0°C 暖化情境之減少面積與剩餘面積

上升溫度(°C)	面積減少量(ha)	面積累積減少量(ha)	面積(ha)	剩餘面積比例(%)
0	0	0	73,151	100%
0.5	21,828	21,828	51,323	70.20%
1	16,848	38,676	34,478	47.10%
1.5	12,369	51,045	22,106	30.20%
2	14,769	65,814	7,338	10.00%

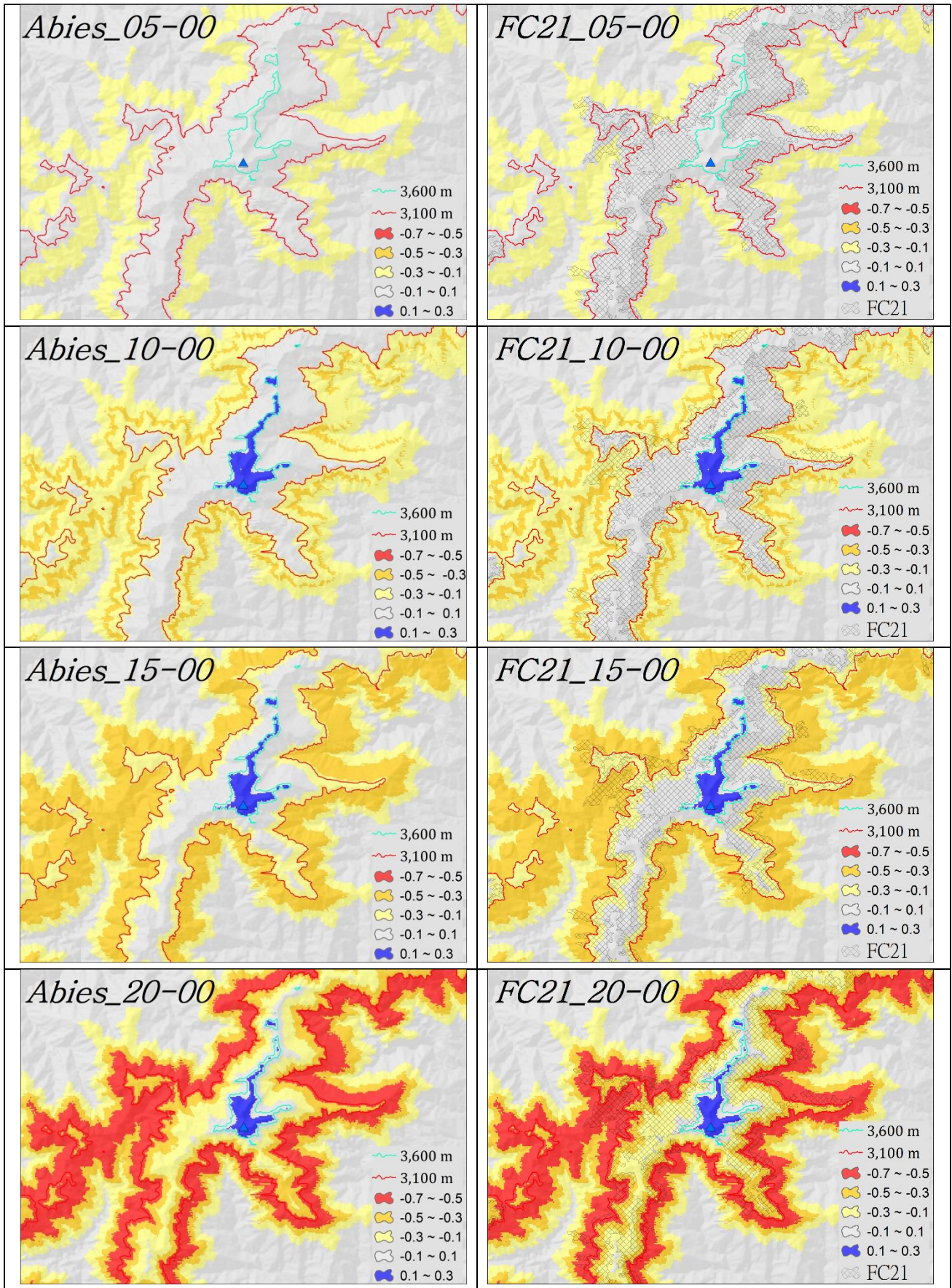


圖 73. 臺灣冷杉之適宜生育地喪失(暖色系)與獲得(藍色)(以雪山為例)：左圖為冷杉於升溫 0.5~2.0°C 暖化情境下的出現機率，右圖為出現機率再疊合現生冷杉 FC21 polygon

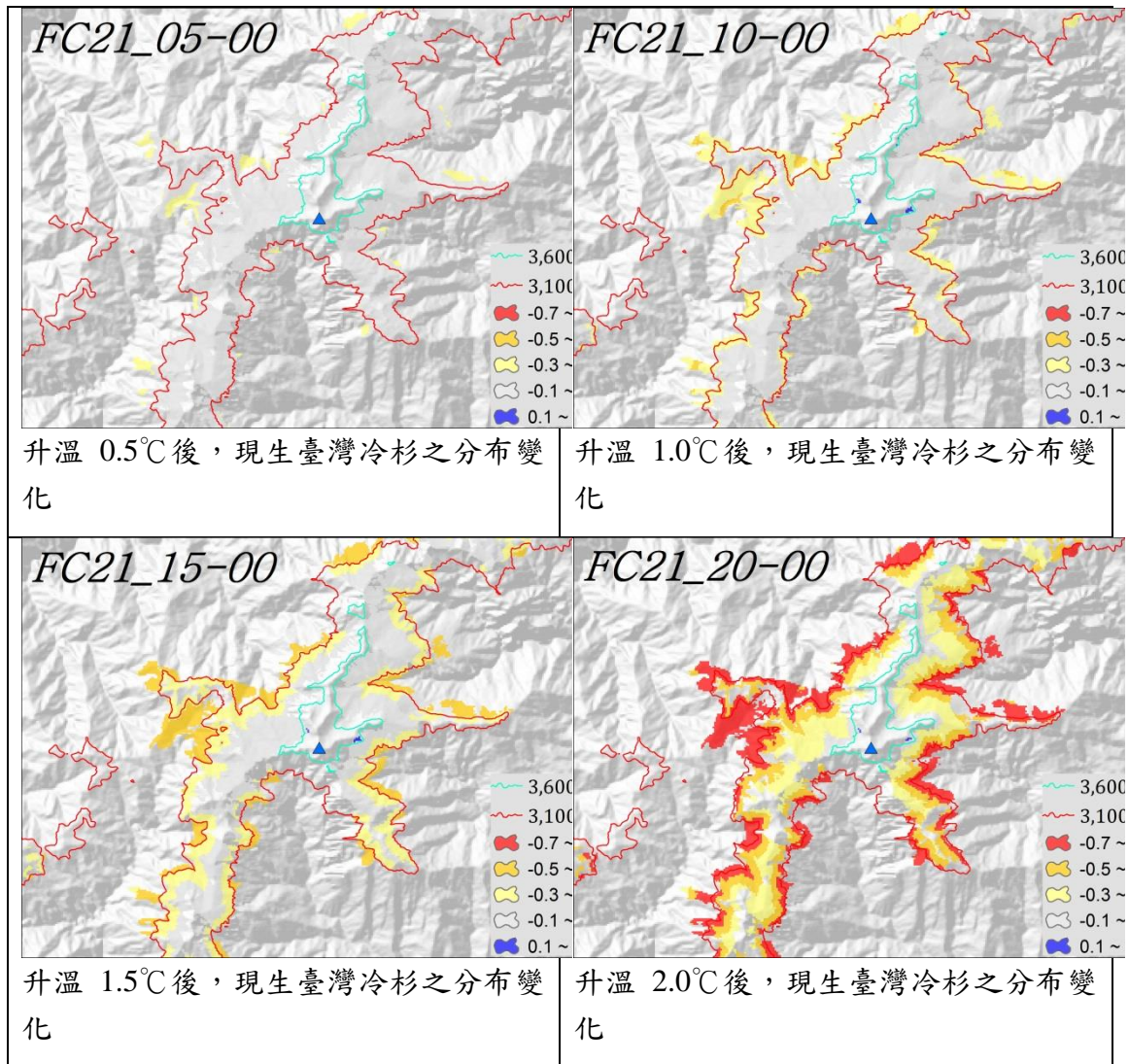


圖 74. 暖化後，現生臺灣冷杉 FC21 之分布變化(喪失—暖色系、獲得—藍色)(以雪山為例)

七、結論與建議

(一) 結論

本研究以臺灣冷杉更新為主軸，討論關於冷杉更新的不同面向(圖 75)，包含以「物候」層面，觀察臺灣冷杉開花、展葉、結實之現象；透過物候的調查紀錄，可以了解臺灣冷杉結實狀況，進而比對近年來臺灣冷杉在雪山地區所觀察到的物候狀態是否有異樣。另外從「演替」的層面，我們可以了解臺灣冷杉從小苗生長至成樹，從壯齡林生長成老熟林，再更新成新林相之循環。在此層面中，本研究以不同尺度討論了不同議題，包含從推移帶了解小苗更新與菌根菌之間的關係、從雪山黑森林地區架設之長期監測樣區討論短期生長動態、採集風倒樣木推估此地區的材積式及蓄積量，並從中了解臺灣冷杉的生長規律，此外亦從全台尺度，推估臺灣冷杉的蓄積量及碳吸存量，還有從物種分布模擬之技術中，推估臺灣冷杉潛在的分布範圍及討論氣候暖化對臺灣冷杉分布的影響。

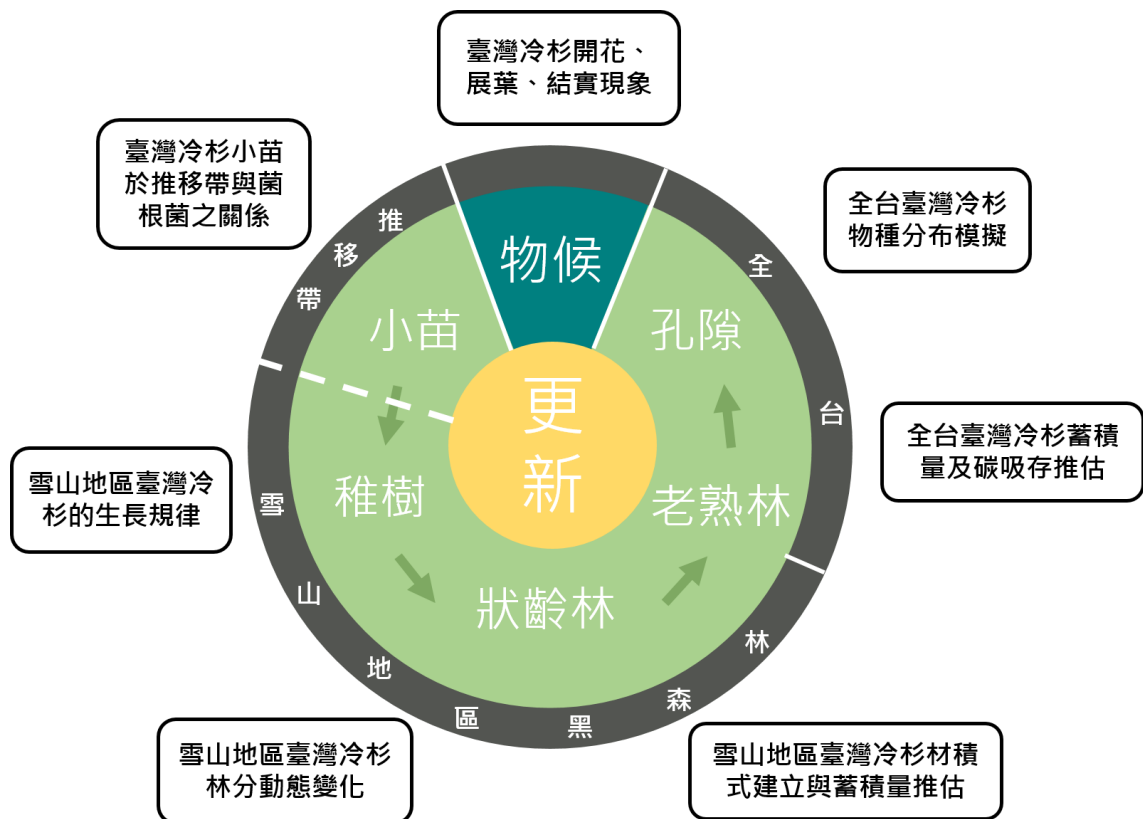


圖 75. 本研究主軸及結構圖

種子的發芽始於結實，臺灣冷杉的物候周期約於前年即開始生長芽點，並且雄毬花芽及雌毬花開始分化，直至 3-4 月，芽點開始轉為花苞，4-5 月為雄、雌毬花盛花期，此一階段開始有受粉機制，而過了授粉期，5-9 月雄毬則轉為花謝；5-6 月雌毬花開始成熟為紫藍色毬果，延續 5-6 個月，到了 10-12 月，即為臺灣冷杉的落果期。而比對過去 2013 年開始收集的物候資料，以及玉山地區的研究報告，大致年分皆依照此一周期發生物候狀態，惟部分年再開花期間限受到天氣劇烈變動，而影響結實成效，或為欠年，所以該年難以觀察到結實現象。臺灣冷杉結實每兩年為一豐年，目前氣候變化對臺灣冷杉的物候較無劇烈影響，惟降水量的多寡，對臺灣冷杉的展葉狀況有實際影響。

關於臺灣冷杉小苗在推移帶更新的狀況，本研究希望藉由在草生地-推移帶-森林下的一年生冷杉小苗分佈與菌根的共生狀況來了解菌根在冷杉的推移帶中可能扮演的角色，所以於在三六九山莊後設置推移帶樣區，並將樣區類型分為森林、交界帶及草生地三種環境，分別調查開區之地被物種、臺灣冷杉小苗數量及小苗根部感染菌根菌狀況。發現母樹距離和地被組成皆為影響小苗能否於此地生長之條件，離母樹越遠或植被受玉山箭竹或高山芒覆蓋越多，則小苗數量越少。而在林下調查採樣之臺灣冷杉小苗，其與菌根共生的情況極高，發現這些樣本皆有跟內、外生菌根菌共生情形，唯發現這些樣本的內生菌根菌較多為暗色隔膜菌(dark septate endophytes, DSE)。根據結果顯示，雖菌根大小與外生及內生菌根菌的感染率關係並不顯著，但不同於臺灣冷杉成木與外生菌根菌間緊密的共生關係，在小苗時期反倒與內生菌根菌的關係更為密切。

在雪山地區臺灣冷杉的短期生長動態方面，可以分為兩個尺度，從「大尺度的個體數量族群動態方面」來看，臺灣冷杉的更新與死亡，與該生育地的地被環境、颱風事件有較高的關聯。大量的個體更新，包括臺灣冷杉小苗和稚樹的出現，皆來自非玉山箭竹地被類型樣區的孔隙；而大量死亡的林木，則多來自風災後的影響。2008 至 2017 年的更新與演替過程，各樣區林分的徑級結構也逐漸改變，整體林分徑級結構未明顯改變而仍呈現穩定狀態；雪山地區之臺灣冷杉林就像多個不同演替階段的鑲嵌體，其演替過程從風災形成森林孔隙，而後小苗適地生長，在更新過程歷經競爭排除階段，取得優勢的臺灣冷杉持續生長，如無遇風災，則持續保有較佳的生長量；如林分受到干擾，孔隙形成後的場域又形成

新的更新區域，成為臺灣冷杉小苗建立的棲地。不同於臺灣冷杉林緣的更新方式，臺灣冷杉林內的消長形成循環式演替過程。

因而整體林分來看，10 年間反 J 型的徑級結構，表示雪山地區臺灣冷杉林持續有新晉級樣木穩定的更新。如果從林分蓄積量動態來看，各樣區臺灣冷杉林 10 年的林分蓄積變化與其林分徑級結構的表現不同，地被優勢植物反而對臺灣冷杉蓄積量較無影響，反而是林分密度、風災事件，以及伴生樹種的影響，才是改變臺灣冷杉蓄積生長的因素。

另從「小尺度的微環境看臺灣冷杉的生長變化」，鄰近臺灣冷杉個體在相近時期、鄰近空間建立後的生長差異極大，表現出不同的生長曲線，因而難以以徑級反應相對的樹齡。造成生長表現不一致的原因，以鄰近樣木間影響生長條件為主要因素，因距離相近的臺灣冷杉個體間在生長過程相互競爭，通常是樹齡較大而先建立的個體取得優勢，進而持續擁有較佳的生長表現，被壓者的生長則受到抑制；此現象造成各徑級與各年齡層的生長量，各有不同的生長差異。

從不同年齡階層，能明顯反應隨著樹齡增加，生長量逐漸減少；但如果從不同胸高直徑階層，則在 20-40 cm 及 80-100 徑級區間各反應出相對較少及較多的生長量。依據雪山地區臺灣冷杉的個體生長情況，20-40 cm 徑級的林木可能存在有不同樹齡的臺灣冷杉，樹齡小者，持續保有較佳的生長量；但樹齡大者，卻因受相近林木被壓，使其維持低生長率。後者雖有較高的樹齡，但胸高直徑只達約 20-40 cm，因而測得長期監測樣區樣木 10 年間的生長量較低。但臺灣冷杉胸高直徑一旦達到大徑級(70 cm 以上)，其生長表現於晚期皆表現優於被壓木，因此從臺灣冷杉長期監測樣區的數據看出，部分徑級 80-100 cm 的林木尚能擁有較佳的生長量。

本研究也透過風倒樣木的樹幹解析資料，建立雪山地區臺灣冷杉材積式，並比較歷史資料，修正與驗證臺灣冷杉立木材積，本研究所建立的最適材積式為 $V=0.000073087 D^{1.71399} H^{1.14667}$ 。透過地面調查資料，結合本研究推估的材積式，推算雪山地區以及全台臺灣冷杉蓄積量，各林型換算每公頃蓄積量約 290-1130 m³ 不等，整體調查出兩年的平均蓄積量為 793.203 m³，1 m³ 的臺灣冷杉能轉換約 357.96 kg 的固碳量，每年可以提供約 2.4 t/ha 的固碳量。結合 SDM 模擬潛在的臺灣冷杉生育地所得計算出的潛在分布範圍，以及現生植群的地面調查及遙測影像分析的真實

的臺灣冷杉林面積，本研究轉換全國臺灣冷杉林的總二氧化碳儲存量約為 1755 萬公噸，如根據臺灣冷杉 SDM 模擬的潛在區域分布面積，臺灣冷杉二氧化碳儲存量潛值可達 7616 萬公噸。

為評估與預測臺灣冷杉分布地點，透過物種分布模擬技術，本研究採用了最後採用貢獻度與重要性較高的 8 項環境變數(EWI、PER、bio15、WLS、PWR、bio12、bio4、bio19)，與最佳物種點位來模擬臺灣冷杉之分布，推算出臺灣冷杉潛在分布區域，模擬結果顯示冷杉潛在分布區大於冷杉真實分布區，且模擬冷杉個體之 SDM 存在域大於冷杉優勢林帶&冷杉林植群，但有時土壤、避風處等因子的交互作用也會修改冷杉之實際分布，因此仍有少數的冷杉會超出 SDM 之預測範圍。

本計畫亦以升溫 2.0°C 作為暖化的假想情況，討論當暖化發生，臺灣冷杉之適宜生育地的分布狀況。結果顯示臺灣冷杉在升溫 0.5、1.0、1.5、2.0°C 暖化情境下，臺灣冷杉將逐漸減少 21,828、16,848、12,369、14,769 ha，適宜生育地僅為目前之 70.2%、47.1%、30.2%、10.0%。暖化影響下，臺灣冷杉面積不僅縮小，且呈逐步往高海拔遷移之趨勢，顯示現有的臺灣冷杉將遭遇嚴苛的環境考驗。

本研究經由雪山地區臺灣冷杉推算該地以及全臺蓄積量，並推測其碳吸存含量，而總蓄積量及總 CO₂ 儲存量數據代表之意義，可提供臺灣冷杉單位產值之基礎資料，此產值雖未為本身存有之木材價值，但卻是以生態產值之角度，提供大氣循環上之固碳價值。此價值未實際估算，因選擇計算的方法不同，就難以有相同的立基點與其他樹種或是其他地區的資源比較。根據許多文獻顯示，目前尚無所謂最精準的估算方法，因此雖無法確切反應真實的生態系服務價值，但本研究評估出的基礎數值仍可作為參考用。

根據第四次森林資源調查，冷杉林型的面積佔全臺主要樹種的總面積僅 7%，臺灣冷杉雖僅提供小面積的森林覆蓋度，但經由其生長量、個體材積，以及生長密度等數值的推算，提供的單位面積蓄積量著實反應在生態效益上。雪山地區黑森林不同於其他地方之價值在於其完整性及可及性。黑森林地區的林相完整，除提供臺灣高山地區水保功能，亦提供野生動物完備的棲地環境。其森林之覆蓋面積，也為全臺臺灣冷杉之重鎮，因而黑森林提供之生態服務已為其重要的存在價值。另外，不同

於其他地區，唯有雪山之主峰線能以步行方式觀察不同海拔的林相變化，以及感受高山地區完整的冷杉林帶，其實屬珍貴，因而黑森林地區的臺灣冷杉林富有其不可取代的生態意義與存在價值。

(二) 研究限制

林木在徑向生長的變異包含樹齡、氣候因子、林地內局部的內在干擾、外在干擾，及其他無法解釋的因子組成。因而如要探究其中一項因子對樹輪寬度的影響，則必須對年齡造成生長趨勢的去趨勢化(detrend)，以及消除其他因子(Cook & Kairiukstis, 1990)。本研究此次探討方向主要為林地內局部的內在干擾對林木生長的影響，因而透過風木倒地區之坡度、坡向、海拔，鄰近樣木影響等因子探討。才得以發現，造成林木變異最大的原因為鄰近林木競爭壓力的影響。林木競爭壓力的影響為間接性的資源掠奪，包含光資源的攝取、生長空間，抑或是土壤養分的吸收。而如果要從氣溫或降雨來探討樹輪之寬度變化，則必須選擇非被壓木之樣材，才得以刪除被壓影響所造成的生長差異，且樣本數需充足，所以目前的材料，較無法從氣候因子推斷臺灣冷杉的輪寬變化。

因研究區地處偏遠，地勢陡峭險峻，樣木的伐採與搬運受到限制，造成材料取得的困難；故本研究取得樣木僅 18 株，以其中 9 株建立材積式。由於缺乏足量的樣本數和小徑級樣本，因而透過樹幹解析，擷取該 9 株過去每 10 年生長之材積量作為小徑級木的樣本，此做法難以避免後續共相關之疑慮。雖在選擇材積式形式的統計結果受到非常態性資料影響，而致使決定係數數值偏高，但還是可以選擇較適合的材積式結果，以進行後續檢測。為確保本研究建立之材積式的準確性，所以透過歷史資料的驗證，與未加入建立材積式的樣株來比較過去所使用的臺灣冷杉材積式，測試是否本研究的材積式再修正過後較過去的式子更接近實測值。實際觀察 9 棵樣株的生長資料，大多數的樣本在小徑級時的變化不大，主要的差距在於生長後期的差異，亦或是本身的生長差異，因而未來如能針對大徑級樣本的補充，更能較準確的預測臺灣冷杉單株的材積量。

另外在推估全臺蓄積量及碳吸存的部分，因取材受地方現制，加上不同階段的生長勢，林木提供的碳吸存量也不同，因此不排除各地之臺灣冷杉生長差異會造成實測資料上的偏差。比較不同地區、不同樹種的碳吸存，也應考量不同的估算方法、參數、年代、蓄積量、生長率，而

會有不同的基準點。因而雖本研究透過地面資料層級，推估雪山地區，甚至全臺蓄積量，但也需考量以上因子所產生的偏差，才能以相同立基點，判斷不同地區或不同樹種間的差異。

(三) 未來建議

雪山地區之臺灣冷杉林依目前調查結果，顯示該林分尚處於穩定階段，透過物候調查，結果發現年度間天氣對開花結實有一定程度影響，3-6月的降雨缺水會影響展葉。目前雪山地區的臺灣冷杉林較無蟲害與臺灣水鹿啃咬之問題，因而本研究認為經營管理之方向，可酌加於與「遊客」之間之連結。

雪山黑森林為主東線重點路線，而尤以沿途景觀能夠觀察到不同的林分演替階段，因而本研究建議往後能在較為明顯之景觀地區及適合民眾休憩之位置，設置解說牌(圖 76)，或在登山口展示，解釋該景觀之林分意義(如黑森林 8.8-9.0K 風倒木區)，達成寓教於樂之目的。另外，研究採樣之風倒木有保留完整者，期望提供雪管處樣本及樹幹解析圖(圖 77)，作為教育解說之用。

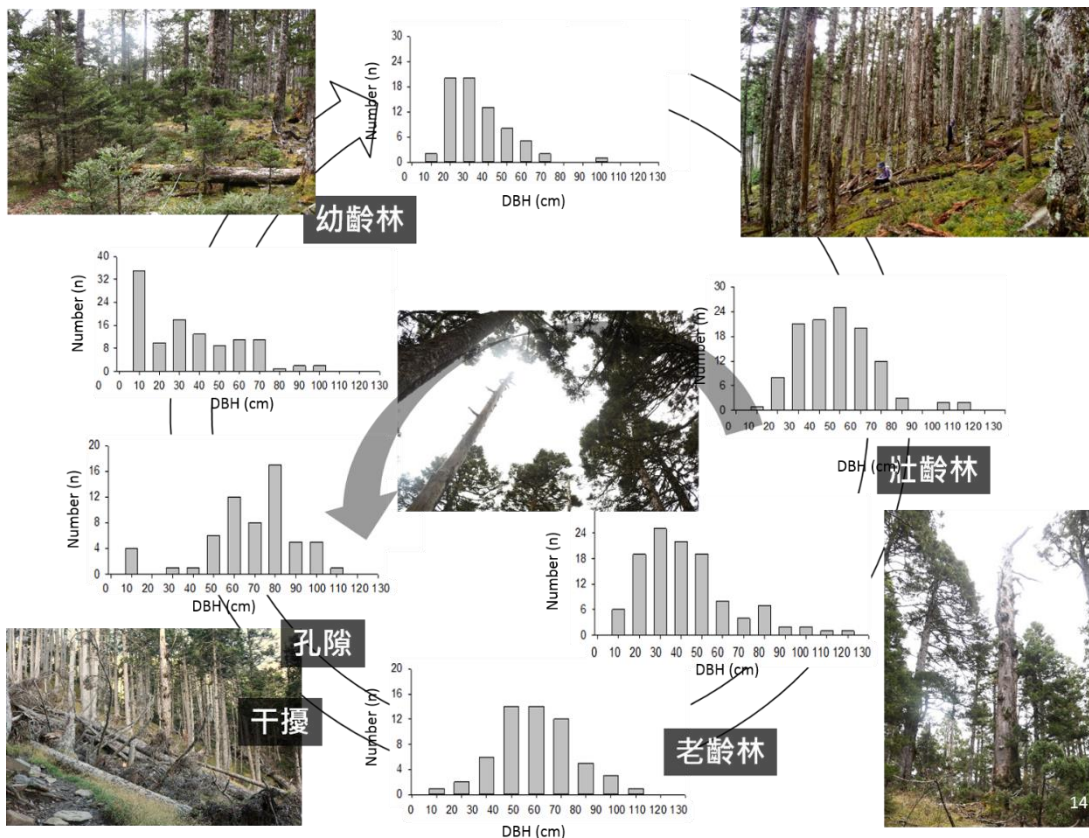


圖 76. 林分演替解說牌示意圖

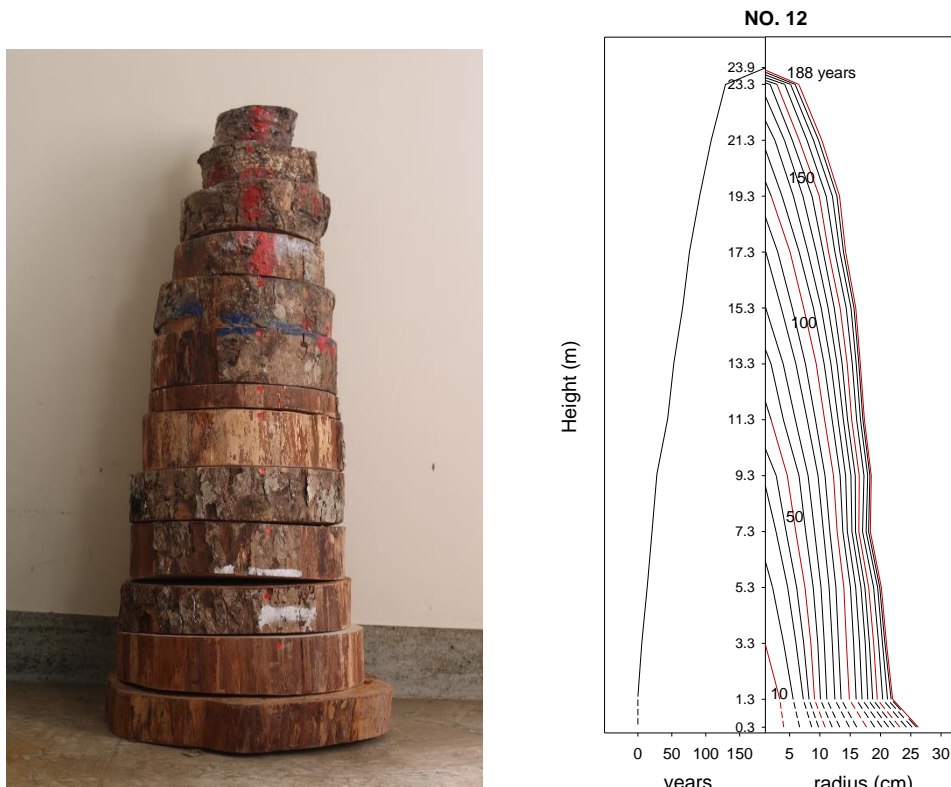


圖 77. 臺灣冷杉風倒木 12 號樣木實體照與其樹幹解析

位於雪東線步道 5.7K 處的臺灣冷杉縮時攝影物候觀察樣株，是雪東線步道沿線臺灣冷杉物候觀察的適宜位置。本研究調查發現，臺灣冷杉約每兩年為一豐年，但最近調查發現毬果有遭民眾採集的痕跡；因而本研究建議，未來針對該棵樣木能夠設立物候之解說牌，除介紹臺灣冷杉於不同季節的物候樣態，另達到加強宣導及提醒效果，藉此柔性勸導民眾勿摘採國家公園內的植物。

關於全球氣候變遷是否影響臺灣冷杉的林分結構與更新是應關注之重點，建議管理處應每 5-10 年針對長期監測樣區進行複查，以建立長期變遷資料；當發生極端天氣事件後，例如強烈颱風或極端乾旱等，應即時進行調查，以了解其後續之影響，獲得即時資訊。全球暖化下的極端天氣對臺灣亞高山生態系的臺灣冷杉林分結構、開花結實、小苗更新、林木生長、森林線變動，以及物種分布範圍等造成什麼樣的影響？本計畫進行調查並獲得初步結果，但仍需要進一步且長期的研究與調查才能獲得答案，才能提供因應變化的經營管理與保育策略。

八、發表成果

1. Abies 2019 - Prospects for Fir Management in a Changeable Environment

The 50th Anniversary of Abies IUFRO Unit (2019.5.28-30 Poland Krakow)



國際林學研究機構聯盟 (International Union of Forestry Research Organization, IUFRO) 冷杉研究部門今年與波蘭克拉科夫農業大學 (University of agriculture in Krakow) 合作，於其林業與多樣性研究部門舉辦每 3 至 4 年一次的冷杉林議題研討大會，此次會議主題關注於在全球氣候變遷的環境中，冷杉林如何有因應的經營管理與展望。與會的成員來自 3 大洲，共 21 國，包含美國、澳洲、加拿大、德國、日本、義大利、韓國、俄羅斯、波蘭等，也包含了此次新進的成員——臺灣。

本次研討會主題討論多樣，討論了氣候變遷下，是否銀冷杉林 (Silver fir) 有受影響，但目前大多報告顯示溫度的變化還未對林分的結構動態有負面影響。另有討論有蹄類動物啃咬對銀冷杉 (*Abies alba*) 小苗的防治，此問題反而為歐陸對於冷杉林分更新的阻礙；工業污染問題也成為影響歐洲地區銀冷杉林生長的原因之一。面對長期單一的林相經營，歐陸各國也開始注重混林經營，混林物種包含銀冷杉、挪威雲杉 (*Picea abies*)、歐洲山毛櫸 (*Fagus sylvatica*) 等，希望從較為單一樹種的林相朝向複層林經營，除了其較具有效益外，也能更佳的貼近天然林。此外，本次研討會的議題亦包括美國、土耳其的冷杉林介紹、冷杉林下的菌相改變，以及分子遺傳分析冷杉屬物種在全球的基因流動變化。

相較於臺灣的冷杉林，關注的議題則與其他國家不同，本研究團隊與林試所廖敏君研究員分別依序介紹雪山地區臺灣冷杉森林孔隙的地被多樣性、短期動態組成與結構變化，以及材積式建立與蓄積量動態。因臺灣冷杉林為低密度經營之森林，並非如同其他國家會伐材收穫，所以伐材造林與人工經營則非我國的目標策略。因而國外學者關注我國非商業用途經營，建立材積式估算蓄積量的主要意義於何者？雖此議題也論及臺灣森林的自給率甚低問題，但如放在臺灣亞高山臺灣冷杉林的生態面向，其意義與價值則為往後我們所想要關注的。臺灣冷杉於高山地帶富有水保價值；而固碳的功能也為此物種之效益，尤以老熟林帶來的大量的生長量，能提供高山地區碳吸存量。因而關注於臺灣冷杉林的結構林分及蓄積動態以及更新狀況，雖非營利目的取向，但卻是考量其生態價值所帶來之意義。

3 天的研討會行程除前後 2 天為口頭報告與壁報展示，另有安排我們前往波蘭的 *Abies alba* 人工林，討論了西喀爾巴阡山區銀冷杉林面對的經營問題，包含更新狀況、混林經營效果、老熟林的後續管理，以及水文問題等。實地的考察除了讓我們對於歐洲地區的森林地景大開眼界，其經營方法與面對的問題也讓我們值得思考。未來走向，則須思考往後在劇烈的天氣變化下，有因應變化的經營策略。



圖 78. Abies 2019 會議報告與野外議題討論



圖 79. 鹿科動物啃咬冷杉小苗出現側枝強勢的情形



圖 80. 鹿科動物啃咬銀冷杉小苗防治法試驗

1. 使用 Cervacol 藥劑，塗抹在 *Abies alba* 的頂芽上，讓野生動物吃起來覺得苦苦的(石英砂和天然矽酸鹽礦物)。照片中冷杉頂芽白色物質就是藥劑。



2. 建構鑲嵌式的圍籬防止大型草食動物進入，等圍籬內的 *Abies* 樹高長到不易被動物啃時(約 2-3 m)，就更換圍籬地點。每一個圍籬面積不會很大，但所費不貲。



圖 81. Babia Góra National Park 蟲害問題

2. 廖敏君博士與曾喜育教授代表臺灣參與韓國濟州島舉辦的冷杉國際研討會，以 *Current Status of the Abies in Taiwan* 為題，發表臺灣冷杉在雪霸國家公園的研究成果



圖 82. 廖敏君博士受南韓濟州島冷杉國際研討會邀請發表雪霸國家公園臺灣冷杉相關研究



圖 83. 南韓濟州島漢拏山國家公園(Hallasan National Park)的朝鮮冷杉(*Abies koreana*)現況與復育研究

九、工作進度

本研究調查工作進度如下：

2017 年月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作項目													
長期樣區修復及複查													
風倒木圓盤採集申請													
臺灣冷杉風倒木圓盤及木材性質試材取樣													
臺灣冷杉圓盤整理與初步單木樹幹解析													
臺灣冷杉物候調查													
報告撰寫													
期中報告													
2018 年月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作項目													
臺灣冷杉長期樣區動態報告撰寫及發表													
臺灣冷杉長期樣區地被植物複查													
臺灣冷杉樹幹解析及建立單株材積式資料													
建立臺灣冷杉林分材積生長與蓄積推估													
臺灣冷杉推移帶樣區建立與調查													
臺灣冷杉物候調查													
期中報告撰寫													
會議報告													
2019 年月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
工作項目													
臺灣冷杉林分材積生長與蓄積推估報告撰寫及發表													
探討臺灣冷杉種子苗更新狀態以及臺灣冷杉共生菌根菌的影響													
臺灣冷杉物種分布模擬													
推估雪山地區的冷杉林蓄積量與碳吸存量													
臺灣冷杉物候調查													
期中、期末會議報告、結案報告撰寫													
會議報告													

十、參考資料

- 王松永。1988。臺灣主要經濟樹種材質之基礎研究(3)：臺灣冷杉、臺灣雲杉及巒大杉之比重收縮纖維飽和點之變異性。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 2(2): 7-26。
- 王瑞閔。2007。臺灣國有林地森林碳吸存估算方法之探討。國立臺灣大學生物資源暨農學院森林環境暨資源學系碩士論文。共 148 頁。
- 王亞男、林金樹、馬曉恩、蔡明哲。2011。溪頭試驗地柳杉人工林材積生長的長期變化。臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 25(1): 67-80。
- 王思皓。2013。應用合歡山冷杉樹輪穩定氧同位素重建臺灣高山 232 年氣候。國立臺灣大學森林環境暨資源學系碩士論文。
- 王偉、邱清安、曾彥學、許俊凱、曾喜育、呂金誠。2010。雪山主峰沿線植物社會調查研究。林業研究季刊 32(3): 15-34。
- 古心蘭。1998。合歡山臺灣冷杉永久樣區之植群分析。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
- 向小果、曹明、周浙昆。2006。松科冷杉屬植物的化石歷史和現代分布。雲南植物研究 28(5): 439-425。
- 朱君逸、李明仁。2004。叢枝菌根菌(*Acaulospora scrobiculata*)對黃槿苗木生長之影響。中華林學季刊 37(1): 37-47。
- 何春蓀。1986。臺灣地質概論。經濟部中央地質調查所。共 153 頁。
- 吳繼光、林素禎。1998。囊叢枝內生菌根菌應用技術手冊。行政院農委會農業試驗所。共 232 頁。
- 吳佳穎、曾喜育、邱清安、王秋美、劉思謙、曾彥學。2013。雪山主峰線之植物物候研究。林業研究季刊 35(4): 223-240。
- 呂福原、歐辰雄、曾彥學、王秋美。2017。臺灣樹木誌。中華易之森林植物研究協會。第 49 頁。
- 呂錦明、劉哲政。1982。孟宗竹林分更新及改良栽培試驗(2)-林分構成與生長特性之研究。
- 李小豔、張遠彬、潘開文。2009。溫度升高對林線交錯帶西川韭與草玉梅生殖物候與生長的影響。生態學雜誌 28(1): 12-18。
- 李向前、賈鵬、章志龍、杜國禎。2009。青藏高原東緣高寒草甸植物群落的開花物候。生態學雜誌 28(11): 2202-2207。
- 李宣德、馮豐隆。2008。森林碳吸存資源調查推估模式系統-以臺灣樟樹為例。臺灣林業科學 23(Supplement): S11-22。
- 李宣德、馮豐隆。2010。臺灣地區樟樹生物量擴展係數之建立。林業研究季刊 32(3): 45-54。

- 李隆恩、陳巧璋。2019。淺談競爭作用對研究林木生長的重要性及其量測方式。林業研究專訊。26(1): 40-43。
- 邦卡兒·海放南。2007。塔塔加地區高山植物的物候期。林業研究專訊 14(5): 16-22。
- 林國銓、黃菊美、杜清澤。2008。櫟木人工林造林木碳貯存量和吸存量之估算。國家公園學報 18(2): 261-276。
- 林務局。1995。第三次臺灣森林資源及土地利用調查。臺灣省農林廳林務局。共 258 頁。
- 林務局。2018。第四次森林資源調查報告。<https://www.forest.gov.tw/0002393>，2018 年 6 月 28 日。
- 林裕仁。2008。森林減碳能力之推算方法。農政與農情 193: 77-81。
- 林子超。2009。靜默恆久的共生關係—菌根菌與植物。自然保育季刊 65: 41-43。
- 邱清安。2006。應用生態氣候指標預測臺灣潛在自然植群之研究。國立中興大學森林學系博士論文。
- 邱清安、陳子英、王志強、邱祈榮、賴彥任、蔡智勇。2013。應用 BIOMOD2 模擬臺灣水青岡之分布。林業研究季刊 35: 253-272。
- 洪千祐、顏添明。2015。以過去發表資料為基礎分析臺灣地區人工針葉樹林、闊葉樹林和竹林之碳吸存量。林業研究季刊 37(4): 259-268。
- 柳樞。1963。小雪山高山草原生態之研究。林試所報告第九十二號。
- 柳樞。1968。臺灣植物群落分類之研究(灣植：臺灣植物群系之分類。林試所報告第一六六號。
- 柳樞、葛錦昭、楊炳炎。1961。臺灣主要林型生態之調查。林試所報告第七十二號。
- 徐國士。1997。全球氣候變遷之樹木年輪指標。經濟部水資局。
- 高明脩。2011。臺灣鐵杉及臺灣冷杉的外生菌根真菌多樣性及生態研究。中華民國真菌學會 100 年度年會暨會員大會，臺中。
- 高嘉鴻 (2005) 中果塊菌(*Tuber mesentericum* Vitt.)之分離、菌落生長及半無菌菌根合成。國立臺灣大學森林學研究所碩士論文。共 74 頁。
- 張愷玲。2010。新化林場大葉桃花心木人工林蓄積量與碳吸存量之推估。國立中興大學森林學系所學位論文。
- 莊貴瑜。1998。合歡山臺灣冷杉群落樹齡結構與草原推移之研究。國立東華大學自然資源管理研究所碩士論文。
- 郭嘉宜。2015。以 BIOMOD2 模擬暖化對臺灣水青岡森林之影響。國立宜蘭大學森林暨自然資源學系學位論文。共 61 頁。
- 陳正祥。1957。氣候之分類與分區。國立臺灣大學農學院實驗林林業叢刊第七號。

- 陳玉峰。1998。臺灣植被誌-第三卷-亞高山冷杉林帶與高地草原(上)、(下)。前衛出版社。
- 陳建國。2011。植物物候對氣候變化的響應。應用與環境生物學報 17(3): 435-446。
- 陳建璋、詹明勳。2011。氣候變遷對於臺灣亞高山玉山圓柏與冷杉樹輪氣候學之研究—以太魯閣國家公園為例。太魯閣國家公園管理處研究報告。
- 陳朝圳、王慈憶。2009。氣候變遷對臺灣森林之衝擊評估與因應策略。林業研究專訊 16(5): 1-5。
- 陳鈺惠、楊銘鑫、王兆桓。2010。紅檜和臺灣杉人工林單木直徑生長與枯死模式之研究。宜蘭大學生物資源學刊 6(1): 71-77。
- 陳榮欽。1995。合歡山區臺灣冷杉樹齡學之研究。國立中興大學植物學系碩士論文。
- 陳建璋。2011。氣候變遷對於臺灣亞高山玉山圓柏與冷杉樹輪氣候學之研究—以太魯閣國家公園為例。太魯閣國家公園管理處研究生研究報告。
- 陳添財。2018。合歡山臺灣冷杉林線的 1/4 世紀變遷。2018 生物多樣性與氣候變遷研討會。共 37 頁。
- 陳庭筠。2012。添加鋁及菌根種接對臺灣五葉松(*Pinus morrissonicola*)苗木生長之影響。國立中興大學森林學研究所碩士論文。
- 許崑衍、李明仁。2005。叢枝菌根菌(*Acaulospora scrobiculata*)對羅氏鹽膚木苗木生長之效應。中華林學季刊 38(4): 425-435。
- 曾彥倫。2015。應用航空照片探討氣候變遷對合歡山地區臺灣冷杉植群消長之影響。國立屏東科技大學森林系碩士論文。
- 曾喜育、曾彥學。2013。玉山國家公園高山生態系統植物物候週期調查。玉山國家公園管理處委託辦理計畫。共 86 頁。
- 曾彥學、曾喜育。2013。氣候變遷對雪山高山生態系之衝擊研究。雪霸國家公園管理處委託辦理報告。
- 曾彥學、曾喜育。2016。雪山高山生態系指標植物物候調查。雪霸國家公園管理處委託研究報告。
- 曾勝華、曾喜育。2016。以正射航照影像評估雪山亞高山林孔隙動態。林業研究季刊 38(4): 227-240。
- 曾喜育、郭礎嘉、陳玟璇、湯冠臻、曾彥學。2014。玉山國家公園塔塔加-玉山主峰線步道開花與結實物候調查。國家公園學報 24(1): 58-75。
- 曾喜育、曾彥學。2018。玉山國家公園塔塔加—玉山主峰步道沿線高山植物物候與氣候變遷影響之報告。玉山國家公園管理處委託研究。共 111 頁。
- 馮豐隆、林子玉。1992。臺灣林分結構生長模擬模式系統的建立。興大實驗林研究報告 14(2): 55-58。

- 馮豐隆、詹明勳。2005。年輪學應用於森林與環境的關係。林業研究季刊 27(3): 37-50。
- 黃凱易、李旻旻。1999。協和遙測與數值地形模型於臺灣冷杉生育地之模擬。中華林學季刊 32(1): 91-107。
- 楊建夫。1999。雪山的圈谷是崩谷、冰斗還是雪蝕斗？地景保育通訊。
- 楊寶霖、林永煥。1961。空中照片判釋用林分材積表(一)。臺灣省農林航空測量隊叢刊第四號。
- 楊寶霖、石子材。1963。空中照片判釋用林分材積表(二)。臺灣省農林航空測量隊叢刊第十號。
- 鄒佩珊。1998。臺灣山區近五百年的氣候變化：樹輪寬度的證據。國立臺灣大學地質研究所博士論文。共 181 頁。
- 廖敏君、曾彥學、邱清安、曾喜育、呂金誠。2012。雪山地區冷杉林帶地被植物社會研究。林業研究季刊 34(3): 179-192。
- 廖敏君、蔡尚惠、王偉、曾喜育、歐辰雄。2013。雪山主峰線臺灣冷杉族群結構研究。林業研究季刊 35(1): 1-14。
- 劉志民、閻巧玲、馬君玲。2006。生植物候與草甸草地多年生植物的消長。生態學報 26(3): 773-779。
- 劉知好、王兆桓。2008。以林齡—蓄積量模式估算柳杉級檜木人工林的碳吸存量。宜蘭大學生物資源學刊 4(1): 35-45。
- 劉宣誠、高毓斌。1987。銀合歡人工林生物量估算方法之比較。林業試驗所研究報告季刊 2(1): 43-64。
- 劉宣誠、高毓斌。1988。孟宗竹與銀合歡人工林生物量之綜合關係式。林業試驗所研究報告季刊 3(1): 393-406。
- 劉崇瑞、呂福原、歐辰雄、賴國祥。1984。臺灣高山箭竹草生地之植物演替與競爭機制。中華林學季刊 17(1): 1-32。
- 劉慎孝。1970。材積表編制方法之比較研究。中華林學季刊 4(1): 1-14。
- 樊金拴。2007。中國冷杉林。北京，中國林業出版社。
- 歐辰雄、曾喜育。2008。雪山主峰線臺灣冷杉族群動態監測。雪霸國家公園管理處委託研究報告。
- 潘振彰、邱清安、曾彥學、曾喜育。2013。雪山地區玉山社鵝物候之研究。林業研究季刊 35(2): 71-86。
- 賴國祥。1992。臺灣亞高山針葉樹林與草生地間推移帶動態結構之探討。國立中興大學植物學研究所博士論文。
- 應紹舜。1976。雪山地區高山植群的研究。中華林學季刊 9(3): 119-135。

- 謝漢欽、汪大雄、王慈憶、張鈞媛、邱志明。2011。應用福衛二號影像與地面樣區資料於光蠟樹平地造林地之碳吸存推估。航測及遙測學刊 16(2): 79-99。
- 鍾智昕。2006。電腦影像處理在樹輪辨識上的應用。宜蘭大學生物資源學刊 1: 33-41。
- 顏江河。2009。高山地區土壤性質研究。雪霸國家公園管理處委託研究報告，共 48 頁。
- 顏江河。2012。雪山地區外生菌根共生關係之研究。收錄於雪山地區高山生態系長期生態調查研究。雪霸國家公園管理處委託研究報告。
- 顏添明、李久先、黃凱洛。2008。臺灣中部地區紅檜及柳杉人工林疏伐示範區生長收穫模式建立之研究。林業研究季刊 30(3): 31-40。
- 八谷正義。1937。次高山に於けるニヒタカトドマツ天然林の構成型に就て Über die Bestandsaufbauformen des Naturwaldes der Tannen (*Abies Kawakamii* Ito) an "Tugitakayama". 臺北農林學會報 2(2): 119-139。
- 森邦彦。1938a。次高山，山莊附近のニヒタカトドマツ(*Abies kawakamii* Ito.)林の下草の植物群落學的研究(I)。植物及動物-理論及應用 6(9): 60-70。
- 森邦彦。1938b。次高山，山莊附近のニヒタカトドマツ(*Abies kawakamii* Ito.)林の下草の植物群落學的研究(II)。植物及動物-理論及應用 6(10): 46-52。
- Arista, M. and S. Talavera. 1994. Phenology and anatomy of the reproductive phase of *Abies pinsapo* Boiss (Pinaceae). Botanical Journal of the Linnean Society 116(3): 223-243.
- Allouche O., A. Tsoar and R. Kadmon. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). Journal of Applied Ecology 43: 1223-1232.
- Amy J. D., C. Galen. 2007. Nurse effects of alpine willows (*Salix*) enhance over-winter survival at the upper range limit of fireweed. *Chamerion Angustifolium*. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 39(1): 57-64.
- Aono Y. and K. Kazui. 2008. Phenological data series of cherry tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. International Journal of Climatology 28(7): 905-914.
- Ahmad A., S. M. Nizami, K. B. Marwat and J. Muhammad. 2015. Annual accumulation of carbon in the coniferous forest of Dir Kohistan: An inventory based estimate. Pakistan Journal of Botany 47(SI): 115-118.
- Abdelaal M., Fois M., Fenu G. and G. Bacchetta 2019. Using MaxEnt modeling to predict the potential distribution of the endemic plant *Rosa arabica* Crép. in Egypt. Ecological Informatics 50: 68-75.
- Bruce D. 1919. Alinement charts in forest mensuration. Journal of Forestry 17: 773-801.
- Burkhart H. E. 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. South

Journal of Applied Forestry 1(2): 7-9.

- Baier R., J. Ingenhaag, H. Blaschke, A. Gottlein and R. Agerer. 2006. Vertical distribution of an ectomycorrhizal community in upper soil horizons of a young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) stand of the Bavarian limestone Alps. *Mycorrhiza* 16(3): 197-206.
- Becklin K. M., M. L. Pallo and C. Galen. 2012. Willows indirectly reduce arbuscular mycorrhizal fungal colonization in understory communities. *Journal of Ecology* 100: 343-351.
- Barve N., Barve V., Jimenez-Valverde A., Lira-Noriega A., Maher S. P., Peterson A. T., Soberón J. and F. Villalobos 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modelling and species distribution modelling. *Ecological Modelling* 222: 1810-1819.
- Beyer H. L. 2012. Geospatial Modelling Environment. Available at: <http://www.spataleecology.com>.
- Booth T. H. 2017. Assessing species climatic requirements beyond the realized niche: some lessons mainly from tree species distribution modelling. *Climatic Change* 145: 259-271.
- Cunia T. 1964. Weight least squares method and construction of volume tables. *Forest Science* 10(2): 180-191.
- Cleland E. E., I. Chuine, A. Menzel, H. A. Mooney and M. D. Schwartz. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution* 22(7): 357-365.
- Chiou C. R., Hsieh C. F., Wang J. C., Chen M. Y., Liu H. Y., Yeh C. L., Yang S. Z., Chen T. Y., Hsia Y. J. and G. Z. M. Song. 2009. The first national vegetation inventory in Taiwan. *Taiwan Journal of Forest Science* 24: 295-302.
- Chiu C. A., P. H. Lin and K. C. Lu. 2009. GIS-based tests for quality control of meteorological data and spatial interpolation of climate data: a case study in mountainous Taiwan. *Mountain Research and Development* 29(4): 339-349.
- Chiu C. A., Lin P. H., Hsu C. K. and Z. H. Shen 2012. A novel thermal index improves prediction of vegetation zones: associating temperature sum with thermal seasonality. *Ecological Indicators* 23: 668-674.
- Cao Y., de Walt R. E., Robinson J. L., Tweddale T., Hinz L. and M. Pessino. 2013. Using Maxent to model the historic distributions of stonefly species in Illinois streams: the effects of regularization and threshold selections. *Ecological Modelling* 259: 30-39.
- Cobos M. E., Peterson A. T., Barve N. and L. Osorio-Olvera 2019. Kuenm: An R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ* 7: e6281.

- Davis, M. B. 1989. Lags in vegetation response to greenhouse warming. *Climatic Change* 15(1-2): 75-82.
- Dormann C. F. 2011. Modelling species' distributions. In Jopp F., H. Reuter and B. Breckling Eds, *Modelling Complex Ecological Dynamics: An Introduction into Ecological Modelling for Students, Teachers & Scientists*. Springer, Berlin. pp. 179-196.
- Elith J. and J. R. Leathwick. 2009a. Conservation prioritisation using species distribution modelling. In Moilanen A., K. A. Wilson, H. Possingham Eds., *Spatial Conservation Prioritization: Quantitative Methods and Computational Tools*. Oxford University Press, Oxford, UK. pp. 70-93.
- Elith J. and J. R. Leathwick. 2009b. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677-697.
- Fujimori T., S. Kawanabe, H. Saito, C. C. Grier and T. Shidei. 1976. Biomass and primary production in forests of three major vegetation zones of the northwestern United States. *Journal of the Japanese Forestry Society* 58(10): 360-373.
- Ferrar P. J., P. M. Cochrane and R. O. Slatyer. 1988. Factors influencing germination and establishment of *Eucalyptus pauciflora* near the alpine tree line. *Tree Physiology* 4(1): 27-43.
- Fenner M. 1998. The phenology of growth and reproduction in plants. *Perspective in Plant Ecology. Evolution and Systematics* 1: 78-91.
- Franklin J. 2009. *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Franklin J. 2010. Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography. *Diversity and Distributions* 16: 321-330.
- Fraver S., A. W. D'Amato, J. B. Bradford, B. G. Jonsson, M. Jonsson and P. A. Esseen. 2013. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. *Journal of Vegetation Science* 25(2): 374-385.
- Forester B. R., E. G. DeChaine and A. G. Bunn. 2013. Integrating ensemble species distribution modelling and statistical phylogeography to inform projections of climate change impacts on species distributions. *Diversity and Distributions* 19: 1480-1495. DOI:10.1111/ddi.12098.
- Fick S. E. and R. J. Hijmans 2017. WorldClim 2: new 1- km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37: 4302-4315.
- Grosenbaugh L. R. 1963. Some Suggestions for Better Sample-Tree Measurements. *Proc. Society of American Foresters*. pp. 36-42.

- Germino, M. J., W. K. Smith, A. C. Resor. 2002. Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecology* 162: 157.
- Gallien L., R. Douzet, R. Douzet, S. Pratte, N. E. Zimmermann and W. Thuiller. 2012. Invasive species distribution models-how violating the equilibrium assumption can create new insights. *Global Ecology and Biogeography* 21(11): 1126-1136.
- Ghelardini L., A. Santini, S. Black-Samuelsson, T. Myking and M. Falusi. 2010. Buddormancy release in elm (*Ulmus* spp.) clones-a case study of photoperiod and temperature responses. *Tree Physiology* 30: 264-274-168.
- Grabherr G., M. Gottfried and H. Pauli. 1994. Climate effects of mountain plants. *Nature* 396: 448-450.
- Grier C. C., K. A. Vogt, M. R. Keyes and R. L. Edmonds. 1981. Biomass distribution and above-and below-ground production in young and mature *Abies amabilis* zone ecosystems of the Washington Cascades. *Canadian Journal of Forest Research* 11(1): 155-167.
- Guisan A. and W. Thuiller. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* 8: 993-1009.
- Guisan A. and N. E. Zimmermann. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling* 135: 147-186.
- Hegy F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In Fries J., Ed., *Proceeding in Growth Models for Tree and Stand Simulation*. Stockholm, Sweden: Royal College of Forestry. p 74-90.
- Honer T. G. 1965. A new total cubic foot volume function. *Forestry Chronicle* 41: 476-493.
- Hijmans R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hirzel A. H. and G. le Lay. 2008. Habitat suitability modelling and niche theory. *Journal of Applied Ecology* 45(5): 1372-1381.
- Inouye D., W. F. Saavedra and W. L. Yang. 2003. Environmental influences on the phenology and abundance of flowering by *Androsace septentrionalis* (Primulaceae). *American Journal of Botany* 90: 905-910.
- IPCC. 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies. 590 pp.
- Kochmer J. P. and S. N. Handel. 1986. Constraints and competition in the evolution of flowering phenology. *Ecological Monographs* 56: 303-325.

- Körner C. 2003. *Alpine Plant Life - Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2 edition. Springer, Heidelberg.
- Kreyling J. 2010. Winter climate change: a critical factor for temperate vegetation performance. *Ecology* 91: 1939-1948.
- Kriticos D.J., Webber B.L., Leriche A., Ota N., Macadam I., Bathols J. & Scott J.K. 2012. CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 3: 53-64.
- Liu C., Berry P. M., Dawson T. P and R. G. Pearson. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography* 28: 385-393.
- Liu C., M. White and G. Newell. 2009. Measuring the accuracy of species distribution models: a review. In Anderssen R. S., R. D. Braddock and L. T. H. Newham Eds., 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation, July 2009. pp. 4241-4247.
- Liu T. S. 1971. A Monograph of the Genus *Abies*. Department of Forestry. College of Agriculture National Taiwan University. pp. 127-131.
- Loik M. F, S. P. Redar and J. Hrte. 2000. Photosynthetic responses to a climate-warming manipulation for contrasting meadow species in the Rocky Mountains, Colorado, USA. *Functional Ecology* 14: 166-175.
- McGonigle T. P., M. H. Miller, D. G. Evans, G. L. Fairchild, J. A. Swan. 1990. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* 115:495-501.
- Meyer E. H. 1973. Distribution of ectomycorrhizae in native and manmade forests. In Marks G. C. and T. T. Kozlowski Eds., *Ectomycorrhizae: their Ecology and Physiology*, pp. 79-105. Academic Press, New York.
- Moudrý V. and P. Šimová. 2012. Influence of positional accuracy, sample size and scale on modelling species distributions: a review. *International Journal of Geographical Information Science* 26(11): 2083-2095.
- Mainali K. P., Warren D. L., Dhileepan K., McConnachie A., Strathie L., Hassan G., Karki D., Shrestha B. B. and C. Parmesan. 2015. Projecting future expansion of invasive species: comparing and improving methodologies for species distribution modeling. *Global Change Biology* 21: 4464-4480.
- Newnham R. M. 1967. A Modification to the combined-variable formula for computing tree volume. *Journal of Forestry* 65(10): 719-720.
- Neville J., J. L. Tessier, I. Morrison, J. Scarratt, B. Canning, J. N. Klironomos. 2002. Soil

- depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut. *Applied Soil Ecology* 19: 209-216.
- Oros-Ortega I., A. Andrade-Torres, L. A. Lara-Pérez, R. F. Guzmán-Olmos, F. Casanova-Lugo, L. A. Sáenz-Carbonell and I. Córdova-Lara. 2017. Ectomycorrhizal ecology, biotechnology and taxonomy for the conservation and use of *Abies religiosa* in temperate areas of Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3): 411-426.
- Ørsted I. V. and M. Ørsted. 2019. Species distribution models of the spotted wing *Drosophila* (*Drosophila suzukii*, Diptera: Drosophilidae) in its native and invasive range reveal an ecological niche shift. *Journal of Applied Ecology* 56: 423-435.
- Paul E. A. and F. E. Clark. 1996. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, New York.
- Pauli H., M. Gottfried and G. Grabherr. 1996. Effects of climate change on mountain ecosystems -upward shifting of alpine plants. *World Resource Review* 8(3): 382-390.
- Pearce J. L. and S. Ferrier. 2000. An evaluation of alternative algorithms for fitting species distribution models using logistic regression. *Ecological Modelling* 128: 127-147.
- Phillips S. J., Anderson R. P. and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Phillips S. J. and M. Dudík 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Peterson A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura and M. B. Araújo. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton University Press, Princeton.
- Phillips S. J., Anderson R. P., Dudík M., Schapire R. E. and M. E. Blair. 2017. Opening the black box: An open- source release of Maxent. *Ecography* 40: 887-893.
- Ram J., S. P. Singh and J. S. Singh. 1988. Community level phenology of grassland above treeline in Central Himalaya, India. *Arctic and Alpine Research* 20(3): 325-332.
- Read D. J. 1991. Mycorrhizas in ecosystems. *Experimenta* 47: 376-391.
- Randin C. F., G. Vuissoz, G. E. Liston, P. Vittoz and A. Guisan. 2009. Introduction of snow and geomorphic disturbance variables into predictive models of alpine plant distribution in the Western Swiss Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 41: 347-361.
- Root T. L., J. T. Price, K. R. Hall, S. H. Schneider, C. Rosenzweig and J. A. Pounds. 2003. "Fingerprints" of global warming on wild animals and plants. *Nature* 421: 57-60.

- Rosenzweig C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T. L. Root, B. Seguin and P. Tryjanowski. 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. In Parry M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson Eds., Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 79-131.
- Rötzer T., M. Wittenzeller and H. Haeckel. 2000. Phenology in central Europe-differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology* 44(2): 60-66.
- Schumacher F. X. and F. S. Hall. 1933. Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research* 47: 719-734.
- Stoate T. N. 1945. The use of a volume equation in pine stands. *Australian Forestry* 9: 48-52.
- Schumacher F. X. and D. Bruce. 1950. *Forest Measurements*, 3rd ed. McGraw-Hill. 483 p.
- Spurr S. H. 1952. *Forest Inventory*. New York : The Ronald Press Company. 476 p.
- Su H. J. 1984. Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (2): Altitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. *Quarterly Journal of Chinese Forestry* 17(4): 57-73.
- Suzuki S. and G. Kudo. 1997. Short-term effects of simulated environmental change on phenology, leaf traits, and shoot growth of alpine on a temperate mountain northern Japan. *Global Change Biology* 3: 108-118.
- Sangermano F. and J. R. Eastman. 2012. A GIS framework for the refinement of species geographic ranges. *International Journal of Geographical Information Science* 26: 39-55.
- Shabani F., L. Kumar and M. Ahmadi. 2018. Assessing accuracy methods of species distribution models: AUC, specificity, sensitivity and the true skill statistic. *Global Journal of Human-Social Science Research*. 18(1):
<https://socialscienceresearch.org/index.php/GJHSS/article/view/2469>
- Tukey J. W. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Reading, PA: Addison-Wesley.
- Thuiller W., S. Lavorel, M. B. Araújo, M. T. Sykes and I. C. Prentice. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 102: 8245-8250.
- Toledo M., L. Poorter, M. Peña-Claros, A. Alarcón, J. Balcázar, C. Leñaño, J. C. Licona, O. Llanque, V. Vroomans, P. Zuidema and F. Bongers. 2011. Climate is a stronger driver of tree and forest growth rates than soil and disturbance. *Journal of Ecology* 99: 254-264.

- Westman W. E. 1987. Aboveground biomass, surface area, and production relations of red fir (*Abies magnified*) and white fir (*A. concolor*). *Canadian Journal of Forest Research* 17(4): 311-319.
- Wada N., M. Shinomi, M. Miyamoto and S. Kojima. 2002. Warming effects on shoot developmental growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs *Empetrum nigrum* and *Loiseleuria procumbens*. *Ecological Research* 17: 125-132.
- Walther G. R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T. J. Beebee, J. M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389-395.
- Wisn M. S., R. J. Hijmans, J. Li, A. T. Peterson, C. H. Graham, A. Guisan, NCEAS Predicting Species Distributions Working Group. 2008. Effects of sample size on the performance of species distribution models. *Diversity and Distributions* 14: 763-773.
- Watling J. I., S. S. Románach, D. N. Bucklin, C. Speroterra, L. A. Brandt, L. G. Pearlstine and F. J. Mazzotti. 2012. Do bioclimate variables improve performance of climate envelope models? *Ecological Modelling* 246: 79-85.
- Wu, D., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Huang, K., Tang, B., & Zhao, W. 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology* 21(9): 3520-3531.

十一、附錄

(一) 審查會議回覆辦理情形

評選會議紀錄回應表

審查意見	受託單位回覆
<p>王志強委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本計畫針對雪山臺灣冷杉林進行研究，對氣候變遷及其物種反應之研究可以提供助益。 2. 關於工作項目之編配可以進行調整，樣區之設置可以參考之前設立之地區及樣點並優先於第一年實施。 3. 各項工作及研究方法之內容，建議於未來之內容進行補充。 4. 臺灣冷杉根部菌根菌感染之分析中，建議增列臺灣冷杉林下之種子苗根部之樣本，作為林緣推移帶樣本之比較。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員肯定。 2. 依委員建議辦理中，並於 6-8 月逐步完成長期樣區恢復與調查。 3. 此部分依委員建議於材料方法中逐步完善補充。 4. 此部分依委員建議辦理，增加臺灣冷杉種子苗根樣本分析。
<p>劉靜榆委員</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 前人研究建議詳細提供雪霸地區先前之相關成果，以利了解本計畫與先前執行之成果是否銜接或精進。 2. 調查方法中環境因子的項目建議明列，因為物候的結果亦受環境影響，如全天光空域，土壤含石率，樣區與稜線或溪谷之距離等，若有完整調查，更具參考價值。 3. 參考文獻與本文內容沒有完全符合，宜在校對修正。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 依委員建議，此部分在前人研究及結果討論逐漸補充完成。 2. 依委員建議辦理。有關調查方法部分，如推移帶菌根菌調查、臺灣冷杉林孔隙調查等環境因子都含蓋上述參數列入調查項目。 3. 參考文獻會再重新校對修正。

第一次審查意見回覆

審查意見	辦理情形
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期中報告調查資料詳實，符合調查進度成果。 2. 永久樣區調查資料，未來可與 2008 年資料比較。 3. 臺灣冷杉物候之觀察，宜將樣木之資料標註。 4. 可合併分析所有樣區之臺灣冷杉之直徑階分布狀態，以了解全林分之更新演替狀態。 5. 未來宜分規年度規劃工作項目及進度。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝王委員肯定。 2. 有關長期樣區部分資料建立完成後，將依委員建議與 2008 年資料進行比較。 3. 此部分將於第二次期中報告補充臺灣冷杉縮時攝影機觀察樣木資料。 4. 謝謝委員建議，待完成所有樣區資料後會整併所有樣區之臺灣冷杉直徑階分布狀態，提供全林分更新狀態。 5. 計畫年度規劃工作項目及進度將於第二次期中報告呈現。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案利用風倒木進行冷杉之生長探討為重要的基礎資料，肯定本次期中報告成果。 2. 請在期末報告中增列相關會議之建議及回應。 3. 本案之研究需與前研究相互比較分析，目前亦於報告中列舉多篇文獻，建議詳述前人研究成果為基礎作為本案之應用。另「木材狀況」請再說明研究目的與方法及預期成果。 4. 研究方法“三年期間”請列出年代，並述明各年代研究內容及成果之關聯。 5. 樣區複查之說明請加強當時之樣區設置計畫及時空背景，列出及其與目前現狀之差異。 6. P29 結果中 ST4-7 請說明與 ST1-3 之關係為何，各樣區完成時間、樣區間環境之異同，請於期末一併說明。 7. 本報告文字繕打錯誤，P7、P21、P29 及 P40，請修正。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 依委員建議辦理，於每次報告中增列前次報告建議及回應。 3. 依委員建議辦理。 4. 依委員建議辦理，將三年期間研究方法列出分年計畫項目。 5. 此部分已於第二次期中報告完成，並提供比較臺灣冷杉樣區前後期差異。 6. 樣區 4-7 為黑森林內，地表組成以蘚苔等為主，樣區 1-3 則以玉山箭竹為優勢；各樣區完成修復時間、環境特色已於本次期中報告完整說明。 7. 研究報告文字繕打錯誤處已完成修正。
<p>于課長淑芬</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書 P37 公告解說牌執行期間為 2017 年 5 月至 2018 年 12 月，文字中間少了「至」，請修正。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 教育解說牌執行期間會進行修正，相關內容修正後將一併送呈管理處審核確認。 2. 此部分已完成修改成「賴國祥(1992)調查

審查意見	辦理情形
<p>2. 報告書 P39 參考文獻中賴國祥於 1992 年調查臺灣冷杉與玉山箭竹推移帶之臺灣冷杉苗木發現，臺灣冷杉苗木 30cm 的年輪，請確認是 30cm 還是 3cm 的年輪，是高度還是粗細，請補充說明。</p>	<p>臺灣冷杉與玉山箭竹推移帶之臺灣冷杉苗木發現，臺灣冷杉苗木生長至 30 cm 高的年齡介於 4-27 年」。</p>
<p>陳秘書俊山</p> <p>1. 從臺灣冷杉年輪學是否能探討豐欠年的行為，若能推估近 200 年氣候的數值，可形成氣候變遷的故事題材供管處後續使用。</p>	<p>1. 臺灣冷杉樹輪學之資料能推估 200 年左右雪山高山氣候環境，並提供管理處作為氣候變遷解說資料，但可能難以提供作為臺灣冷杉豐欠年的探討。</p>
<p>鄭副處長瑞昌</p> <p>1. 評枯橫斷木是否有解說展示的價值，若可行請提供相關資料給本處，未來可做為本處或武陵站的解說教育題材。</p>	<p>1. 有關臺灣冷杉樹幹解析完成後之材料，待計畫完成後可提供完整的樹幹圓盤作解說教育題材。</p>
<p>鍾處長銘山</p> <p>1. 本計畫研究時程為三年，建議受託單位提列不同年度分項工作計畫，另提供詳實的背景資料進行比較，探討未來可行的相關延續性試驗。</p> <p>2. 計畫執行期間設置教育解說牌可針對臺灣冷杉做簡單介紹，將「敬告」強烈文字修正，並加註相關單位聯絡電話，解說牌修正後請先提送至本處進行審視。</p> <p>3. 本研究成果可做為森林生態系經營管理有效的參考價值，請將成果用淺顯易懂的文字方式進行敘述，俾供民眾了解。</p>	<p>1. 依管理處規定辦理。</p> <p>2. 謝謝處長指正，解說牌內容已修正。</p> <p>3. 感謝處長肯定，研究團隊會努力朝此目標完成。</p>

第二次審查意見回覆

審查意見	受託單位回覆
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 已順利完成圓盤取樣及初步分析。 2. 雪山地區之範圍宜加以說明及定義(冷杉為蓄積量之推估)。 3. 可以多關注永久樣區內物種消長的比較，作為植群帶推移的討論。 4. 報告書第 28 頁圖 7 關係式之 Y 及 X 代表的意義宜加以說明。 5. 關於臺灣冷杉物後部分，花芽是否於前一年就開始分化?開化的春化作用也是於前一年嗎? 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員的肯定。 2. 以推估本案研究範圍為主(P.13,圖 3)，如能與全國森林資源調查結合則進一步推估全台臺灣冷杉林分之材積。 3. 感謝委員建議，成果報告會納入探討。 4. 為 1-7 樣區整體的徑級結構圖，所以橫軸表示徑級尺度，縱軸則是該徑級之總和數量。 5. 冷杉花芽確實於前一年就開始分化，而春化作用則是在今年進行。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案第 2 次期中報告成果已依照前次一件逐條修正，計畫執行克服多重困難，未來成果預期應有 SCI 等級的報告，高度肯定本案執行成果。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定，我們會持續努力。
<p>鄭副處長瑞昌</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 目前樣區尚有 500-800kg 的樣木，請問能否如期順利運送下山，進行研究調查。 2. 本計畫研究時程為三年，目前執行第一年主要為現地勘查及取樣，未來二年研究調查資料統整時，建議能將雪山地區冷杉資料與其他區域(合歡山等)進行比較。 3. 目前研究調查資料以 2008-2016 年間資料為主，是否蒐集並彙整更早期關於雪山地區對植物相關的研究報告，作為歷史基礎資料使用。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究申請試材取樣二次展延至 106 年 12 月 31 日前，若天候及背負工情形良好，應可於今年年底前完成試材取樣。 2. 感謝副處長建議，會將雪山地區的研究資料與其他地區進行比較。 3. 日治時期八谷正義有對雪山地區一帶進行林分結構以及材積調查，會將此做為雪山地區的歷史資料參考。
<p>保育研究課</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 期待後續研究團隊能結合目前本區域與臺灣其他地區(如合歡山既有資料)進行分析比較(臺灣冷杉推移帶或物候與冷杉之間的比較)。 2. 關於樹輪學推估氣候變遷的資料，本處雪山氣象站資料於 2008 年之後才有統計數據，目前是有樹輪資料，請問如何 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝保育研究課建議，會將雪山地區的研究資料與其他地區進行比較。 2. 本研究將以置設較長時間的玉山氣象站資料與雪山圈谷氣象站資料進行模擬推估，再嘗試進行樹輪學推估氣候變遷。

審查意見	受託單位回覆
推估過往氣候變遷資料。	
<p>遊憩課張技士維仁</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究調查樣區風倒木壓破水管，造成 369 山莊缺水情形，請問目前步道邊坡樣木數有多少 2. 針對解說教育牌示建議設計可圖文並茂，更能使登山遊客一目了然，達到解說教育及宣導之目的(參考林務局解說教育牌示)。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 由於雪山地區地勢陡峭，在 11 月中旬試材取樣時因樣木巨大，加上土石鬆滑，致使風倒木壓迫水管，造成三六九山莊缺水，本研究團隊感到抱歉，滑落於步道上的樣木將於 12 月初完成處理。目前尚餘約近 10 株樣木在試區內，未來取樣時將會注意避免類似樣木壓破水管事件。 2. 感謝張技士建議，於計畫結束後會以圖示方式製作冷杉林結構變化解說牌，提供民眾對於高山冷杉林的認識。
<p>陳秘書俊山</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 目前國家公園推科研基地，請問本專案是否能提供想法，吸引國內外人才朝向往此集中。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 能設於雪山大眾路線地區，做為醫療站以及教育展示館，同時也可以做為研究員研究之處所；若能提供較完樣的住宿環境，並提供整合型雪山高山生態研究，則會加大吸引國內外學者參與研究。

第三次審查意見回覆

審查意見	辦理情形
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究案調查項目眾多，研究團隊克服許多工作，值得肯定。 2. 可再加以著墨關於不同徑級間之樹輪生長的模式及林木生長量的差異。 3. 永久樣區 1-3 之林下為箭竹區，4-7 為苔蘚類植物，可加以說明其更新模式的差異。 4. plot 6-7 可加以擴大或合併，比較其族群結構之特性。 5. 本年度臺灣冷杉萌發之新葉呈捲曲萎縮，於物候觀察中加述關注。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，因本次研究部分僅考慮中、小徑級，第四次期中報告將會加入大徑木討論。 3. 感謝委員建議，臺灣冷杉小苗在苔蘚地被較不易受其他植物而佔據生長位置，不同於箭竹地被，需要透大規模崩塌，有足夠透光量，才得以長大成稚樹，會再將兩者地被模式之更新比較加入後續報告中討論。 4. 感謝委員建議，plot 6-7 皆為臺灣冷杉不連續性更新的樣區，將可共同討論樣區植株分布對更新的影響。 5. 本團隊已於審查會議結束後上山觀察到臺灣冷杉葉不正常捲曲的現象，並發現有些捲曲的小葉上附有白點，且該小枝有膨大，判斷可能有蟲癭，或者為氣候因素致使，會再多加以觀察，並於後續討論。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案之物候調查及樣區之倒木、幹折等資料皆需與氣象資料及微棲地因子進行對應分析，建議蒐集氣象資料並記錄每月物候調查時的即時氣候及微棲地因子，以進行對應交叉分析。 2. 風倒木之立地環境，樹高之差異，建議可進一步探討。 3. 小徑木的資料目前沒有蒐集或許徑級與年齡不一定是正比，建議針對小徑級的年輪亦進行分析。 4. 本案工作內容極為辛苦且危險，已獲得初步成果予以高度肯定。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，本團隊會於後續收集大量倒木地區，包括 6.5K、水源地、8.9-9K 的微棲地資料，並討論倒木與坡向、坡度、海拔、根冠、樹高、胸高直徑、氣候等之間的關係。 2. 感謝委員建議，將進一步討論三區風倒木的環境與樹高差異。 3. 感謝委員建議，會再將徑及與年齡的部分參入討論，並分析如徑級與年齡非成正比，其原因為何。 4. 感謝委員肯定。
<p>潘技正振彰：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 胸高直徑的分布圖是以 100 年為單 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝潘技正建議，之後會將氣候因子

<p>位，趨勢為愈老生長愈慢，但發現在某些年齡階段會有較快或較密集之差異，建議可取得氣象局(溫度、雨量)的百年氣象資料進行分析。</p> <p>2. 物候調查時是否有分別記錄雌雄花之部分，兩者是否有差異。</p>	<p>加入討論，分析樹輪與氣候間的關係。</p> <p>2. 感謝潘技正建議，會在物候調查時個別註記雄花或雌花的開花時序。</p>
<p>于課長淑芬：</p> <p>1. 臺灣冷杉小苗更新部分，如何判定生長不佳，因冷杉為當地生長優勢種，另如何判斷更新有問題。</p> <p>2. P50 雪山臺灣冷杉果期延長，其他地區(玉山或太魯閣區域)是否有差異。</p>	<p>1. 如個別觀察樣區的小苗更新，因受地被影響，位於箭竹的冷杉小苗更新較為不易，但如將樣區整合，從徑級看臺灣冷杉整體的更新狀況，可顯示陸續有小苗朝向稚樹生長之趨勢，更新尚且良好。</p> <p>2. 感謝委員建議，會再查詢其他地區是否有果期延長之現象，並與雪山地區的狀況做比較。</p>
<p>陳秘書俊山：</p> <p>1. 臺灣冷杉能存活多少年?年齡 300 算是年輕株或是老化株?</p> <p>2. 目前取樣皆為風倒木，立地環境的條件(差或佳)是否影響臺灣冷杉的生長情形。</p>	<p>1. 目前記錄臺灣冷杉能夠生長至 600 多歲，但平均來說，300 歲的臺灣冷杉已為較老之植株。</p> <p>2. 雖風倒木可能會與立地條件差連結，但風倒木所形成的環境空間，另一面也為臺灣冷杉的生育地，足夠的擾動所形成的大孔隙，反而能讓臺灣冷杉於此重新建立。</p>
<p>鍾處長銘山</p> <p>1. 建議受託單位蒐集林務局歷史相關資料並與目前研究調查資料進行分析及比較。</p>	<p>1. 感謝處長建議，我們將會參照過去林務局資料，來與現況之資料進行分析與比較。</p>

第四次審查意見回覆

審查意見	辦理情形
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 第 4 次期中報告內容詳實，已依規劃內容完成相關調查。 未來物種分布模擬評估採用之氣候變項為何？ 2019 年是否仍持續進行長期樣區植被植物調查。 2018 年臺灣冷杉新葉異常現象，建議 2019 年仍持續觀察記錄。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝王委員肯定。 第 3 年會收集更多臺灣冷杉現生植株與標本館館藏之點位資料，並搭配溫度、降雨等氣候因子作為評估。 下年度會將目標放在小苗孔隙樣區，針對其小苗數量變化及植被變化進行複查。 有關臺灣冷杉展葉異常現象會持續觀察，以了解氣候變化影響葉部之現象。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 本報告內容詳實，符合契約要求，成果具參考價值，予高度肯定。 目前之採樣以風倒木為主(目前僅有一株的數據與倒木之年輪對應分析)，建議下年度之項目可增列立木之年輪(鑽取樹芯)採樣。 下年度建議將風倒木之環境微棲地的紀錄列為重點工作之一，以探討風倒原因。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝劉委員肯定。 若管理處同意，則可於下年度增列立木年輪之採樣，比對倒木與立木間之年輪。 本研究會針對臺灣冷杉倒木之微棲地因子(坡向、坡度、地被、海拔等)，以及搭配航照判釋，探討風倒木的立地環境。
<p>楊課長國華：</p> <ol style="list-style-type: none"> 請研究單位提供 3 年研究調查成果，針對冷杉林物種的部分取得確實定位圖資，本處將針對碳存量進行計算，以利現地苗木位置之對應。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝楊課長建議；此部分會在第 3 年之研究會將確實圖資與相關定位提供給管理處參考。
<p>潘技正振彰：</p> <ol style="list-style-type: none"> 今年度冬季觀察冷杉物種有開花情形，受託單位亦於玉山地區進行冷杉研究調查，調查過程中是否有發現冷杉開花，冬季開花是全面性或局部性地區發生。 在臺灣冷杉之調查，是否有文獻推估冷杉單位面積的整體材積，有無固定上限數值可參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝潘技正建議；此部分會再探論此一情形於玉山地區是否也有相同狀況並比較。 將會收集國外天然冷杉林相關文獻，比對臺灣冷杉與其他地區之冷杉有單位面積的上限材積量。
<p>于課長淑芬：</p>	

<p>1. 請受託單位於報告書中詳述取樣之風倒木的詳細立地資料(目前只提供地點及海拔，無環境描述)。</p>	<p>1. 感謝于課長建議，會再調查風倒木的立地環境以利環境背景描述。</p>
<p>陳秘書俊山</p> <p>1. 建議受託單位可參考本處今年 10 月辦理生物多樣性與氣候變遷研討會太管處委託陳添財助理教授之「合歡山臺灣冷杉森林線的 1/4 世紀變遷」相關資料，以使報告內容更豐富。</p>	<p>1. 感謝陳秘書建議；將會參考研討會陳助理教授相關研究，討論雪山與合歡山地區之臺灣冷杉林異同。</p>
<p>鄭副處長瑞昌</p> <p>1. 建議受託單位位於研究調查中有特殊發現或具參考價值成果時，提供新聞稿，以利本處使用。</p>	<p>1. 感謝鄭副處長建議；此部分會將研究過程中紀錄之特殊、重要發現撰寫新聞稿，提供管理處新聞發表。</p>
<p>鍾處長銘山</p> <p>1. 本計畫有 3 樣目標：分別為冷杉林木生長情形之調查、探討臺灣冷杉推移帶樣區、冷杉與物候之關係，請受託單位明確掌握，成果報告請著重上述三項目標焦點呈現(重要發現或環境異常)。</p> <p>2. 本研究推算之冷杉材積部分數據請明確詮釋數據意義並探究其原因。</p>	<p>1. 感謝處長建議，此部分會於成果報告會將焦點匯聚此 3 大項目標，並針對此 3 大項計畫目標統整臺灣冷杉於雪山地區的更新現況與未來展望。</p> <p>2. 有關臺灣冷杉數據呈現方式 會再與環境條件的背景資料與影響加入探論，了解該生育地的對臺灣冷杉生長的前因後果。</p>

第五次審查意見回覆

審查意見	辦理情形
<p>李佩如技士：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第 29、30 頁臺灣冷杉長期監測樣區複查，圖 4 的部分樣區地點為 7 個樣區，為何缺少 Plot 6 的照片，是否有特別的因素，請說明。 2. 報告書第 99 頁 2018 年臺灣冷杉新葉有出現異常小葉捲曲現象，請問今年野外調查，是否有類似情形發生。 3. 本研究調查成果資料豐碩，目前報告書撰寫只有結果與討論，建議期末報告及成果報告，能統一彙整增加結論及建議與未來施行方向，提供本處於雪山高山植物生態系經營管理之參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因 Plot 6 與 Plot 7 的兩樣區相近且組成相似，為排版之關係，所以無將 Plot 6 樣區之照片放上，感謝佩如技士提醒，我們會於期末報告中補上。 2. 今年觀察到哭坡至雪山東峰一帶的臺灣冷杉小葉捲曲之現象較去年少，推測去年之降水稀少確實影響臺灣冷杉的展葉狀況。 3. 感謝佩如技士建議，我們將會於期末報告及成果報告中提出建議與未來施行方向於管理處參考。
<p>于淑芬課長：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書內容提到目前臺灣冷杉族群呈現穩定的狀態，結論與八古谷正義推測相似，請問臺灣冷杉循環的演替方式有漸趨成熟林分、老熟林分及稚樹更新，所謂穩定的狀態是指那個階段，是稚樹更新嗎？ 2. 研究團隊有將樣區的蓄積量及碳吸存量計算出來，是否可推測或計算雪霸園區或黑森林的冷杉林蓄積量及碳吸存量，提供給本處未來經營管理參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究的樣區的結構變化顯示，雪山地區之臺灣冷杉林如同一個鑲嵌體，由不同階段的林分所組成，但如果以整體的結構來看，其形成反 J 型的徑級結構，表示此臺灣冷杉林持續有新晉級樣木穩定的更新。 2. 期末將會透過地面調查資料，以及後續物種分布模擬之臺灣冷杉分布資料，來推估雪霸地區及全島之蓄積及碳吸存量，但因取材受地方現制，不排除各地之臺灣冷杉生長差異會造成實測資料上的偏差。
<p>廖林彥主任：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 競爭壓力為造成冷杉生長類型的因 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 在樹輪學的範疇中，林木在徑向生

<p>素?請問是溫度嗎?會有所影響嗎?從樹輪的寬度是否能看的出來?整篇研究只看到歷年毬果物候(只是當年的毬果發育周期),有無其它可以跟物候學相關的訊息?建議從樹輪(250年)嘗試看看。</p>	<p>長上的變異包含樹齡、氣候因子、林地內局部的內在干擾、外在干擾,及其他無法解釋的因子組成。因而如要探究其中一項因子對樹輪寬度的影響,則必須消除其他因子,即去趨勢化。而本研究此次探討方向主要為林地內局部的內在干擾對林木生長上的影響,因而透過風木倒地區之坡度、坡向、海拔,鄰近樣木影響等因子探討。才得以發現,造成林木變異最大的原因為競爭壓力之影響。林木競爭壓力的影響為間接性的資源掠奪,包含光資源的攝取、生長空間,抑或是土壤養分的吸收。而如果要以氣溫或降雨來探討樹輪之寬度變化,則必須選擇非被壓木之樣材,才得以刪除被壓影響所造成的生長差異,且樣本數需充足,所以以目前之材料較無法從臺灣冷杉之樹輪推斷雪山地區的氣候歷史。</p>
<p>楊模麟處長</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究案目前執行3年,研究成果對於高海拔森林生態保育系重要參考資料,可供本處對雪山高山生態系臺灣冷杉林經營管理之需求。研究成果主要系物候關係,做為經營管理者在此區內,請問該如何執行,在經營管理又需要著墨那些部份。 2. 在宣導部份,需要能完整推估大區域性的冷杉林蓄積量與碳吸存量,以做為素材,供本處經營管理及解說教育會有實質的幫助。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 雪山地區之臺灣冷杉林依目前調查結果,顯示該林分為穩定成長階段,且目前雪山地區的臺灣冷杉林較無蟲害及水鹿啃咬之問題,因而本研究認為經營管理之方向,可酌加於與遊客之間之連結,雪山黑森林為主東線重點路線,而尤以沿途景觀能夠觀察到不同的林分演替階段,因而本研究建議往後能在較為明顯之景觀地區及適合民眾休憩之位置,設置解說牌,解釋該景觀之林分意義(如黑森林 8.8-9.0K 風倒木區),達成寓教於樂之目的。另 5.7K 處也是觀察臺灣冷杉結實物候的明顯地點,但於最近調查中發現有遭民眾採集的痕跡,因而本研

	<p>究建議，未來針對該棵樣木能夠設立物候之解說牌，另加強宣導及提醒作用。</p> <p>但後續關於全球氣候變遷下對於極端事件頻度的增加，是否影響臺灣冷杉林之更新，為往後關注之重點，建議後續陸續追蹤風災對冷杉更新之影響。</p> <p>2. 感謝楊處長之建議，本研究將會在期中報告中提供。</p>
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 第5次期中報告依據計量進度，完成各項項目之成果。 2. 目前設置之7個永久監測樣區，極具代表性，未來應可持續調查分析，並作為其他地區研究之比較。 3. P32，表2之樣示地點，建議統一為里程數標示。 4. P45，21項之環境變數可補充於成果報告書中。 5. P93，關於菌根菌之調查，未來可針對內文探討之目的加以闡明。 6. 建議未來可增設本研究相關內容之解說牌示或海報等保育成果。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝王委員的肯定。 2. 感謝王委員之建議，本研究於後續將會持續進行監測。 3. 感謝王委員之建議，將於期末報告中修正。 4. 感謝王委員之建議，將會列表補充，並提供計算式之來源。 5. 感謝王委員之建議，將於期末報告中詳加探討目的。 6. 感謝王委員之建議，本研究將會於期末報告中提供循環式演替之設計圖，亦或是物候圖譜，提供本處未來解說教育的成果展示。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究進行許多的項目，目前已獲得很好的成果，予以高度肯定。 2. 有關於冷杉的材積與碳吸存的成果，可以試著去推估全區的量，若推估的變異非常大，也可以採用另外一種呈現方式，由於這麼高海拔的木材利用，其實是非常沒有經濟效益，因此可計算冷杉的材積去換算一般認知的經濟效益，並對應冷杉林碳吸存對於氣候變遷之影響，如此在後續的解說上，更能夠讓大眾了解其效益與重要性。 3. 在冷杉物候學的部分，目前已有連 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝劉委員之肯定。 2. 感謝劉委員之建議，臺灣冷杉林之意義確實著點於生態、水保價值，因而本研究也願意於期末報告中推估雪霸地區之碳吸存量，提供未來管理處如需轉換碳匯價值之基礎資料。 3. 感謝劉委員之建議，針對5.7K處之臺灣冷杉如能持續觀察，在長時間的資料收集，即能更準確討論臺灣冷杉結實與維環境間之關係。 4. 感謝劉委員之建議，本研究會嘗試於期末報告中將樣區的不同屬性分

<p>續三年的資料，實屬難得，成果並呈現豐欠年的現象，若能對應微環境的分析，或許可獲得其他重要的訊息。</p> <p>4. 有關於更新的部分，目前分析的7個樣區，若依照樣區 1-3 與樣區 4-7 去比較，事實上是沒有顯著差異，但是如果把目前的大樣區再細分，依照當時林相演替過程，先將火災或是風倒等不同的機制分開後，或許就可以得到顯著的差異，後續的描述，才可以依照這個設定，得到更好的闡述。</p>	<p>開加以分析。</p>
---	---------------

第六次審查意見回覆

審查意見	辦理情形
<p>李佩如技士：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書第 118 頁研究結果顯示當氣候暖化情境下，溫度上升 2°C 時，臺灣冷杉適宜生育地僅存 10%，是否能提供經營管理單位有效可行之因應對策。 2. 報告書第 128 頁圖 76 林分演替解說牌示意圖中，請補充 X 軸及 Y 軸座標代表為何。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 因未來事件難以評估，本研究僅就升溫後的情況評估臺灣冷杉的分布變化，因而在預期事件發生內，給予提供設立樣區位置之建議，能加強觀察臺灣冷杉在受衝擊區的實際變化。盡早觀察現象，而能盡早對物種進行保育工作。 2. 感謝李技士提醒，X 軸及 Y 軸座標分別代表徑級以及數量，本研究將會再補充。
<p>于淑芬課長：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本究研究調查執行 3 年，本處希瞭解臺灣冷杉的價值，請受託單位提供相關資料。 2. 雪山地區蓄積材積量是 793 m³，但此調查數據只限於雪山地區(包含冷杉-鐵杉林帶、冷杉-玉山圓柏帶及臺灣冷杉-純林帶)，請將調查相關數據彙整以表格方式呈現會更清楚。 3. 有關碳吸存部分，報告書第 79 頁，表 20 調查方式以 SDM 潛在分析、現生植群及第 4 次全國森林資源調查分析「本研究調查推估之全國臺灣冷杉林型固碳量及二氧化碳儲存量比較」，在表中總 CO₂ 儲存量是 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究經由雪山地區臺灣冷杉推算該地以及全台蓄積量，並推測其碳吸存含量，此數據可提供台灣冷杉單位產值之基礎資料，此產值雖未為本身存有之木材價值，但卻是以生態產值之角度，提供台灣冷杉在大氣循環上之固碳價值。 2. 謝謝于課長建議，本研究將詳列在成果報告中。 3. 謝謝于課長建議，表中總 CO₂ 儲存量是表示全臺的部分，本研究會將資料詳述在成果報告中。 4. 此價值未實際估算，因選擇計算的方法不同，就難以有相同的立基點與其他樹種或是其他地區的資源做

<p>只全臺灣還是只限於雪山地區冷杉分析之數值，請補充說明。</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. 是否能針對碳吸存數據分析或計算其經濟價值，如國際間課徵碳稅等議題，能否針對雪霸目前保有的冷杉林面積(固碳的價值)來計算保育層面的費用是多少，以金錢數字量化，更具說服力。 5. 有關劉委員提出再結合碳吸存的推估，來評定森林健康狀況，請受託單位補充說明。 6. 針對雪山冷杉林目前那一種徑級的樹是最多的，百分比佔多少，請彙整表格補充說明，另是否有文獻紀錄臺灣冷杉年齡可存活之歲數?目前園區內的冷杉年紀最大是幾歲? 7. 氣候變遷對冷杉林的變化，目前報告書以圖的方式呈現在氣候變遷下對冷杉林的改變為生長區域範圍縮小，是否能將數據量化，以表格方式呈現。 	<p>比較。目前尚無所謂最精準的估算方法，因此雖無法確切反映真實的生態系服務價值，但本研究評估出的價值仍可作為參考用。</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. 因森林健康狀況的評判方式有很多，包括破壞性及非破壞性。本研究未針對此項項目做直接的監測動作，但透過我們 10 年之研究，由徑級結構的變化，可以推測本地之臺灣冷杉持續地穩定更新。碳吸存資料僅提供當今計算值的呈現，如要評定整體健康狀況，需要長期累積多年資訊，才能了解碳吸存量之波動。 6. 謝謝于課長建議，本研究會在彙整表格補充說明於成果報告。另根據研究報告指出，最大的臺灣冷杉樹齡可達 600 多歲。 7. 謝謝于課長建議，本研究會在彙整表格補充說明於成果報告。
<p>潘振彰技正：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 不同冷杉樣區有進行地被植群調查，報告書第 26、27、61 頁小苗生長是否有受玉山箭竹生長受排擠而影響，每個樣區是否就光度測量調查冷杉苗木生長之變化。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 確實小苗在成長過程中受玉山箭竹生長影響而在 10 年後之調查發現更新數量減低，本研究雖未為直接偵測各樣區的光度變化，但尤其其他樣區可見，冷杉稚樹生長，也會形成保護傘作用，當過於茂密時，該地區的小苗也難以存活，因此推論台灣冷杉小苗對於光度的需求強烈。
<p>廖林彥主任：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 臺灣黑森林存在的重要性及其價值，請扼要述明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 雪山地區黑森林不同於其他地方之價值在於其完整性及可及性。黑森林地區的林相完整，除提供該地水保功能，亦及提供野生動物完備的棲地環境，其森林之覆蓋面積，也為全臺臺灣冷杉之重鎮，因而黑森

	<p>林提供之生態服務已為其重要的存在價值。另不同於其他地區，能直接感受不同海拔的林相變化，唯有雪山之主峰線能夠以步行方式感受高山地區完整的冷杉林帶，其實屬珍貴，進而黑森林地區的台灣冷杉林富有其不可取代的價值。</p>
<p>鄭瑞昌副處長</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 模擬臺灣冷杉之現金分布中，報告書第 126 頁，當氣候變遷，隨著溫度上升，臺灣冷杉會逐漸減少，當溫度升溫 0.5、1、1.5 及 2 °C，冷杉減少的數量 21,828、16,848、12,369、14,769 ha，減少數據是累加計算嗎?請問目前全臺冷杉林的面積量。 2. 氣候模擬圖的數據是否能推估到小冰河時期，在 300-500 年前，適合臺灣冷杉生長的範圍面積有多大。 3. 本次報告缺少新聞稿會後請提供給管理處供參。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 此數值非為累加。目前全臺冷杉林的面積量以 FC21 現生冷杉林植群推算，約為 16,857 ha。 2. SDM 亦可回推過去分布，但需要當時氣候模擬之基礎資料。加上過去環境亦有影響冷杉分布之限制因子，需要更多當時環境訊息才可推算。 3. 感謝鄭副處長提醒，本研究將盡快提供給管理處。
<p>楊模麟處長</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 簡報第 25 頁總蓄積量、總 CO2 儲存量數字代表之意義，請補充說明。 2. 簡報第 19 頁縮時攝影監測樣株是拍攝單株或多株?如何選定拍攝樣株，請說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝楊處長之建議，本研究將會詳加數值之代表意義於期末報告中。總蓄積量及總 CO2 儲存量數據代表之意義，可提供臺灣冷杉單位產值之基礎資料，此產值雖未為本身存有之木材價值，但卻是以生態產值之角度，提供大氣循環上之固碳價值。 2. 雪山主峰線自哭坡頂開始即可觀察臺灣冷杉物候。而本研究就觀察地形分類，以哭坡頂至三六九山莊前為稜線步道；三六九山莊至黑森林為邊坡步道；黑森林內至圈谷底為林下步道。根據觀察樣株方便性以及彙整歷年物候觀測到結實之熱

	<p>點，我們發現稜線步道的冷杉族群，有許多樣株皆長在邊坡上，而樹冠層即等高於步道，以觀察之便利性及架設相機的可行性，相對來說易於觀察。加上過去發現 5.7 K 為觀測臺灣冷杉結實之熱點，因而本研究就以上要點先做選擇。</p>
<p>王志強委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案為三年之調查研究，成果評實豐碩，包含臺灣冷杉之林分材積生長及蓄積、分布模擬等珍貴資料。 2. 摘要內容建議事項，可酌予調整順序及項目。 3. 氣候暖化下，臺灣冷杉之分布區域明顯縮減，惟考量地形及土壤基質之因素，其分布範圍可能更小。 4. SDM 之 13 項及 8 項環境因子之變數意義建議加作說明。 5. 本項研究之監測樣區資料，可供未來監測比較之用，除環境變遷資料外，對有蹄類動物之影響益形重要。 6. 本案之調查原始資料，建議檢附供管理處存參，作為未來監測研究之用。 7. 植物名錄內之 ssp. 學名建議修改為斜體。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝王委員給予肯定。 2. 感謝王委員之建議，本研究將調整建議事項內容。 3. 受暖化影響，理論值上更高海拔之環境較為臺灣冷杉合適。但依照實際情況，如同委員所說，還有地形、土壤等因子為冷杉在新地域建立族群的考量，因而暖化下的情況，反倒對臺灣冷杉來說，死亡容易；生存困難。未來假如溫度上升，範圍確實會更小。 4. 感謝委員建議，已附加於報告書中的圖 3。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員建議，將會於成果報告中彙整資料提供。 7. 感謝委員建議，將會再報告書中修正。
<p>劉靜榆委員：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案之調查工作極為辛苦，獲得珍貴的高山資料，提供經營管理之參考，予以高度肯定。 2. 本案之物候成果，有整理前人研究之資料及本案選擇樣木進行每月觀察，另擇一株進行縮時攝影，建議將相關資料交叉比對後進步說明所選擇縮時攝影之樣木之代表性。 3. 材積的估算整理參考 1961、1963 以航照圖的計算方式，對應本案所 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝劉委員給予肯定。 2. 感謝劉委員之建議，本研究將補充資料於成果報告書中。 3. 感謝劉委員建議。 4. 感謝劉委員建議。 5. 感謝劉委員建議。

<p>執行之圓盤資料。計算本區及周邊類似森林之材積比較，再結合碳吸存的推估，來評定森林健康程度，可應用於後續科普教材中生態價值的呈現。</p> <p>4. 氣候變遷的計算成果主要以升溫為主，但目前之氣候的狀況是極端高低溫，且還有結實、更新等因素，另外菌根菌是否與溫度變化有關，建議都可以列入模擬的參數或補充說明，可讓結果更趨真實。</p> <p>5. 解說牌中除確導勿摘採，亦應列出罰則，以減少破壞。</p>	
--	--

(二) 本計畫風倒木圓盤採集許可相關公文

正本

發文方式：電子交換（第一類，不加密）

檔號：
保存年限：

農業暨自然
資源學院

行政院農業委員會林務局東勢林區管理處 函

40227
臺中市南區興大路145號

地址：42058臺中市豐原區南陽路逸仙莊1號

承辦人：彭馨慧
電話：04-25150855#152
傳真：04-25297230

受文者：國立中興大學

發文日期：中華民國106年8月10日
發文字號：勢作字第1063230733號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：如主旨及說明五

一、採樣送請曾喜育老師惠予辦理。
二、附件請由曾老師抽辦。
敬請
曾喜育老師

技士曾麗蓉 0814
11=42

主旨：有關貴校森林學系曾副教授彥學與曾副教授喜育為進行「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究」，申請專案採取冷杉，利用材積8.73立方公尺案，茲派本處技正廖錦偉辦理放行查驗，檢送本處106勢試運字第001號搬運許可證正本壹紙，請查照。

說明：

- 一、依據梨山工作站106年7月28日第1063502290號簽復貴校106年5月10日興農字第1061700477號函。
- 二、本案冷杉生長與健康研究可了解冷杉林木材積生長與蓄積推估，碳吸存等，可供本處臺灣亞高山森林經營管理之參考，同意共同合作計畫，惟本案亦為雪霸國家公園管理處委託計畫，本處無法再提供研究經費。
- 三、本件林產物搬運期間自106年8月20日起至106年10月8日止（計50日），請於期限內搬運。
- 四、請於搬運時洽本處梨山工作站領取搬運單並填寫以利受檢；搬運結束後，報請本處梨山工作站檢查。
- 五、副本抄送本處技正廖錦偉（檢附相關函件、甲種林產物查驗明細空白表各1份）、梨山工作站（請參照伐採查驗規則辦理）並派員辦理監裝，監裝人員務必要求得標人填寫搬運單受檢）

符合本校「文書處理要點」第18條
33條規定，以紙本公文辦理。

第1頁 共2頁

國立中興大學



1060052485

總文
106.8.11

國有林林產物搬運許可證

(106) 勢試運字第 001 號

茲依照國有林林產物處分規則許可
牌號：中興大學森林學系 負責人：教授顏添明
依照下列各項並遵守林產物採運契約規定搬運林產物。

林產物所在位置	大甲溪事業區第 28、30 林班
集運方式	人力搬運、機械裝卸、卡車運材
林產物來源	風倒木
林產物種類	冷杉
搬運數量	利用材積 8.73 立方公尺
林產物金額	依國有林產物處分規則第十五條規定無償
搬運期限	自民國 106 年 8 月 20 日起 共計 50 天 至民國 106 年 10 月 08 日止
備註	中興大學副教授曾彥學「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究」專案採取
(牌號) (負責人)	
本聯發給 中興大學森林學系 副教授曾彥學 收執	
發證機關：林務局東勢林區管理處	
中 華 民 國 106 年 8 月 7 日	

保存年限：

行政院農業委員會林務局東勢林區管理處 函

機關地址：42058臺中市豐原區南陽路逸仙
莊1號
承辦人：彭馨慧
電話：04-25150855#152
傳真：04-25297230

受文者：國立中興大學

發文日期：中華民國106年9月20日
發文字號：勢作字第1063164225號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：無

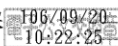
主旨：有關貴校為進行「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究」，申請專案採取冷杉，利用材積8.73立方公尺，因部份樣木無法取樣申請變更案，復如說明，請查照。

說明：

- 一、依據行政院農業委員會林務局106年9月19日106年9月19日林造字第1061664954號函復貴校106年9月11日興農字第1061701026號函。
- 二、本案經貴校表示因試驗地位處高山，地勢複雜且坡度陡，冷杉風倒木取樣困難，部份樣木在取樣過程撕裂，或滑下山谷而無法取樣，同意申請增加預備樣木以滿足試驗材料需求，並以樣木總株數不變，取樣總材積維持相或更低的取樣原則辦理。
- 三、副本抄送本處梨山工作站，請派員會同做成查驗、放行紀錄報處備查。

正本：國立中興大學

副本：本處梨山工作站、作業課



A09550000Q0000000_3164225A00.di

第1頁，共1頁

國立中興大學



1060016607 106/9/20

保存年限：

行政院農業委員會林務局東勢林區管理處 函

機關地址：42058臺中市豐原區南陽路逸仙
莊1號
承辦人：彭馨慧
電話：04-25150855#152
傳真：04-25297230

受文者：國立中興大學

發文日期：中華民國106年10月17日
發文字號：勢作字第1063164581號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：無

主旨：有關貴校曾副教授彥學與曾副教授喜育為進行「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究」專案採取冷杉，利用材積8.73立方公尺，申請延期案，復如說明，請查照。

說明：

- 一、復貴校106年10月11日興農字第1061701160號函。
- 二、本件原以106勢試運字第001號國有林林產物搬運許可證，許可於106年8月20日起至106年10月8日(計50日)期間搬運，貴校因本案位處雪山3000公尺以上高山，到達與取樣不易，需人力背負下山，又因多次海上颱風警報發布，工作人員需撤離下山，致使台灣冷杉圓盤取樣過程不順利，申請搬運期間展延壹事，查核准搬運期間有天鴿、谷超、泰利等颱風來襲，且本件核准搬運期間亦有辦理樣木變更，影響工作期程，同意展延至106年11月2日。
- 三、請將本函作為106勢試運字第001號國有林林產物搬運許可證附件，並請於期限內搬運。
- 四、副本抄送本處梨山工作站，請依本處106年8月8日勢作字第1063230733號前函辦理放行查驗及搬運檢查工作。



A09550000Q0000000_3164581A00.di

第1頁，共2頁

國立中興大學



1060018305 106/10/17

正本：國立中興大學

副本：本處廖技正錦偉、梨山工作站、林政課、作業課

106/10/17
10:41:49



訂

線

副本

檔 號：
保存年限：

國立中興大學 函

機關地址：40227臺中市南區興大路145號
承辦人：曾喜育
聯絡電話：04-22840345-142
電子郵件：erecta@nchu.edu.tw

受文者：森林學系曾副教授喜育

發文日期：中華民國106年11月6日
發文字號：興農字第1061701290號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：
附件：如文

主旨：本校森林學系曾副教授彥學和曾副教授喜育為執行「雪山地區臺灣冷杉生長與健康評估研究」合作計畫，懇請貴處惠予同意二次展延樣本材料取樣搬運時間至106年12月31日止，詳如說明，敬請俞予惠復。

說明：

- 一、依據106年8月10日勢作字第1063230733號函暨106年10月17日勢作字第1063164581號函辦理。
- 二、本合作案林產物搬運期間原核定自106年8月20日至106年10月8日止，因試驗地位處雪山3,000公尺以上高山，到達與取樣不易，需大量人力背負下山，又因多次海上颱風警報發布，人員撤離下山，致使臺灣冷杉圓盤取樣過程不順利，誠蒙貴處同意本案展延至106年11月2日。
- 三、然於展延期間又因天候不佳及委託背負運材之布農卡里布灣企業社人力調派問題(如附件)，致仍無法及時將試材取出，故擬向貴處申請二次展延試材取樣搬運時間至106年12月31日止，誠感公誼。

正本：行政院農業委員會林務局東勢林區管理處
副本：本校森林學系曾副教授彥學、本校森林學系曾副教授喜育

校長 薛富盛

本案依分層負責規定授權單位主管決行

第1頁共1頁

本企業社(布農卡里布灣企業社)於今年度(106 年)協助國立中興大學森林系之「雪山黑森林臺灣冷杉更新與物候調查」計畫之臺灣冷杉圓盤的伐鋸及搬運，因暑假期間至 11 月初為登山旺季而造成工作人員嚴重缺乏、人手調派不足，故需於 11 月中之後，才有足夠人力支援臺灣冷杉圓盤之採取。



正本

發文方式：電子交換（第一類，不加密）

檔 號：
保存年限：

暨自然
源學院 行政院農業委員會林務局東勢林區管理處 函
森林學系

40227
臺中市南區興大路145號

地址：42058臺中市豐原區南陽路逸仙莊1號

承辦人：彭馨慧
電話：04-25150855#152
傳真：04-25297230

受文者：國立中興大學

發文日期：中華民國107年4月19日
發文字號：勢作字第1073161839號
速別：普通件
密等及解密條件或保密期限：普通
附件：如主旨及說明五

本案搬運許可證壹紙，請由曾麗蓉
老師抽辦，文存查。
敬啟：
曾麗蓉老師

技士曾麗蓉
04-23
13-36

主旨：有關貴校森林學系曾副教授彥學與曾副教授喜育為進行「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究(2)」，申請專案採取冷杉，利用材積3.9立方公尺案，茲派本處技正廖錦偉辦理放行查驗，檢送本處107勢試運字第001號搬運許可證正本壹紙，請查照。

說明：

- 一、依據行政院農業委員會林務局107年4月13日林造字第1071655876號函復貴校107年3月2日興農字第1071700238號函。
- 二、本案冷杉生長與健康研究可了解冷杉林木材積生長與蓄積推估，碳吸存等，可供本處臺灣亞高山森林經營管理之參考，同意共同合作計畫。
- 三、本件林產物搬運期間自107年4月26日起至107年12月31日止(計250日)，請於期限內搬運。
- 四、請於搬運時洽本處梨山工作站領取搬運單並填寫以利受檢；搬運結束後，報請本處梨山工作站檢查。
- 五、副本抄送本處技正廖錦偉(檢附相關函件、甲種林產物查驗明細空白表各1份)、梨山工作站(請派員辦理監裝，監裝人員務必要求得標人填寫搬運單受檢)。

符合本校『文書處理要點』第18條、33條規定，以紙本公文辦理。



共2頁

國立中興大學



1070051124

總文
107.4.20

正本：國立中興大學

副本：臺中市政府警察局、臺中市政府警察局東勢分局、臺中市政府警察局和平分局、
內政部警政署保安警察第七總隊第五大隊東勢分隊、本處廖技正錦偉、梨山工作
站、林政課、作業課

處長蕭崇仁

裝

訂

線

國有林林產物搬運許可證

(107) 勢試運字第 001 號

茲依照國有林林產物處分規則許可
 牌號：中興大學森林學系 負責人：教授顏添明
 依照下列各項並遵守林產物採運契約規定搬運林產物。

林產物所在位置	大甲溪事業區第 28、30 林班
集運方式	人力搬運、機械裝卸、卡車運材
林產物來源	風倒木
林產物種類	冷杉
搬運數量	利用材積 3.9 立方公尺
林產物金額	依國有林產物處分規則第十五條規定無償
搬運期限	自民國 107 年 4 月 26 日起 共計 250 天 至民國 107 年 12 月 31 日止
備註	中興大學副教授曾彥學「雪山地區台灣冷杉生長與健康評估研究 2」專案採取
(牌號)	(負責人)
本聯發給 中興大學森林學系 副教授曾彥學 收執	
發證機關：林務局東勢林區管理處	
中 華 民 國 107 年 4 月 16 日	

(三) 2018 年臺灣冷杉長期監測樣區地被調查植物名錄

1. Dennstaedtiaceae 碗蕨科

1. *Dennstaedtia scabra* (Wall. ex Hook.) Moore 碗蕨

2. Davalliaceae 骨碎補科

2. *Davalia formosana* Hayata 大葉骨碎補

3. Adiantaceae 鐵線蕨科

3. *Adiantum capillus-veneris* L. 鐵線蕨

4. Dryopteridaceae 鱗毛蕨科

4. *Dryopteris expansa* (C. Presl) Fraser-Jenk. & Jermy 闊葉鱗毛蕨

5. *Dryopteris hypophlebia* Hayata 深山鱗毛蕨

6. *Dryopteris redactopinnata* S. K. Basu & Panigrahi 藏布鱗毛蕨

5. Woodsiaceae 蹄蓋蕨科

7. *Athyrium reflexipinnum* Hayata 逆羽蹄蓋蕨

6. Cystopteridaceae 冷蕨科

8. *Cystopteris moupinensis* Franch. 寬葉冷蕨

7. Pinaceae 松科

9. *Abies kawakamii* (Hayata) Ito 臺灣冷杉

10. *Tsuga chinensis* (Franchet) Pritz. Ex Diels var. *formosana* (Hayata) Li & Keng 臺灣鐵杉

8. Cupressaceae 柏科

11. *Juniperus squamata* Buch.-Ham. apud Lamb. 玉山圓柏

9. Urticaceae 蕁麻科

12. *Elatostema trilobulatum* (Hayata) Yamazaki 裂葉樓梯草

13. *Urtica thunbergiana* Sieb. & Zucc. 咬人貓

10. Polygonaceae 蓼科

14. *Koenigia yatagaiianum* (Mori) T.C.Hsu & S.W.Chung 雪山蓼

15. *Polygonum filicaule* Wall. ex Meisn. 高山蓼

16. *Polygonum runcinatum* Buch.-Ham. ex D. Don 玉山蓼

11. Caryophyllaceae 石竹科

17. *Arenaria subpilosa* (Hayata) Ohwi 亞毛無心菜

12. Ranunculaceae 毛茛科

18. *Anemone stolonifera* Maxim. 匍枝銀蓮花

19. *Ranunculus taisanensis* Hayata 鹿場毛茛

20. *Thalictrum urbaini* Hayata 傅氏唐松草

13. Berberidaceae 小蘗科

21. *Berberis morrisonensis* Hayata 玉山小蘗

14. Crassulaceae 景天科

22. *Sedum actinocarpum* Yamamoto 星果佛甲草

15. Grossulariaceae 茶藨子科

23. *Ribes formosanum* Hayata 臺灣茶藨子
- 16. Hydrangeaceae 八仙花科**
24. *Clematis montana* Buch.-Ham. Ex DC. 高山繡球藤
- 17. Rosaceae 薔薇科**
25. *Potentilla leuconota* D. Don 玉山金梅
26. *Rosa sericea* Lindl. var. *morrisonensis* (Hayata) Masam. 玉山薔薇
27. *Rosa transmorrisonensis* Hayata 高山薔薇
28. *Rubus croceacanthus* Lévl. 虎婆刺
29. *Rubus calycinoides* Hayata 玉山懸鈎子
30. *Rubus pungens* Camb. var. *oldhamii* (Miq.) Maxim. 毛刺懸鈎子
31. *Sorbus randaiensis* (Hayata) Koidz. 巒大花楸
- 18. Oxalidaceae 酢漿草科**
32. *Oxalis acetocella* L. ssp. *griffithii* (Edgew. & Hook f.) Hara var. *formosana* (Terao) Huang & Huang
臺灣山酢漿草
33. *Oxalis acetocella* L. ssp. *taemoni* (Yamamoto) Huang & Huang 大霸尖山酢漿草
- 19. Onagraceae 柳葉菜科**
34. *Circaea alpina* L. ssp. *imaicola* (Asch. & Mag.) Kitam. 高山露珠草
- 20. Umbelliferae 繖形科**
35. *Oreomyrrhis involucrata* Hayata K. F. Chung 山薰香
- 21. Pyrolaceae 鹿蹄草科**
36. *Cheilotheca humilis* (D. Don) H. Keng 水晶蘭
- 22. Ericaceae 杜鵑花科**
37. *Rhododendron oldhamii* Maxim. 金毛杜鵑
38. *Rhododendron pseudochrysanthum* Hayata 玉山杜鵑
- 23. Primulaceae 報春花科**
39. *Primula miyabeana* Ito & Kawakami 玉山櫻草
- 24. Rubiaceae 茜草科**
40. *Galium echinocarpum* Hayata 刺果豬殃殃
41. *Galium formosense* Ohwi 圓葉豬殃殃
- 25. Labiatae 唇形科**
42. *Clinopodium chinense* (Benth.) Kuntze 風輪菜
- 26. Plantaginaceae 車前科**
43. *Veronica morrisonicola* Hayata 玉山水苦蕒
44. *Veronica oligosperma* Hayata 貧子水苦蕒
- 27. Caprifoliaceae 忍冬科**
45. *Lonicera kawakamii* (Hayata) Masam. 川上氏忍冬
- 28. Adoxaceae 五福花科**
46. *Viburnum betulifolium* Batal. 樺葉莢蒾

29. Dipsacaceae 續斷科

47. *Triplostegia glandulifera* Wall. 三萼花草

30. Campanulaceae 桔梗科

48. *Peracarpa carnosus* (Wall.) Hook. f. & Thomson 山桔梗

31. Compositae 菊科

49. *Ainsliaea latifolia* (D. Don) Sch. Bip. ssp. *henryi* (Diels) H. Koyama 臺灣鬼督郵

50. *Cirsium arisanense* Kitam. 阿里山薊

51. *Cirsium hosokawae* Kitam. 細川氏薊

52. *Cirsium kawakamii* Hayata 川上氏薊

53. *Myriactis humilis* Merr. 矮菊

54. *Parasenecio hwangshanicus* (Ling) C.-I Peng & S. W. Chung 黃山蟹甲草

55. *Senecio morrisonensis* Hayata 玉山黃菀

56. *Senecio nemorensis* L. var. *dentatus* (Kitam.) H. Koyama 黃菀

32. Liliaceae 百合科

57. *Veratrum formosanum* Loes. 臺灣藜蘆

33. Asparagaceae 天門冬科

58. *Smilacina japonica* A. Gray 臺灣鹿藥

34. Juncaceae 燈心草科

59. *Luzula effusa* Buchen. 中國地楊梅

35. Cyperaceae 莎草科

60. *Carex baccans* Nees 紅果薹

61. *Carex fernaldiana* H. Lév. & Vaniot 線葉宿柱薹

36. Gramineae 禾本科

62. *Agrostis infirma* Büse 玉山翦股穎

63. *Brachypodium kawakamii* Hayata 川上短柄草

64. *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv. var. *festucifolia* Honda 髮草

65. *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin. 曲芒髮草

66. *Festuca ovina* L. 羊茅

67. *Helictotrichon abietetorum* (Ohwi) Ohwi 冷杉異燕麥

68. *Yushania niitakayamensis* (Hayata) Keng f. 玉山箭竹

37. Orchidaceae 蘭科

69. *Goodyera nankoensis* Fukuy. 南湖斑葉蘭

70. *Platanthera brevicarata* Hayata 短距粉蝶蘭

(四) 縮時攝影指定樣株 2017 至 2019 年物候紀錄

1. 縮時攝影指定樣株 2017 年 6 月至 12 月物候變化



2017-09-02 11:00:00 AM T 22°C



2017-10-02 10:00:00 AM T 13°C



2017-11-02 9:00:00 AM T 9°C



HC500 HYPERFIRE RECONYA

2017-12-01 8:00:00 AM T 7°C



2. 縮時攝影指定樣株 2018 年 1 月至 11 月物候變化



2018-04-02 12:00:00 PM T ● 17°C



2018-05-02 12:00:00 PM T ● 23°C



2018-06-02 6:00:00 AM T ● 9°C



HC500 HYPERFIRE RECONYA

2018-07-02 6:00:00 AM T 9°C



2018-08-02 9:00:00 AM T 14°C



2018-09-02 7:00:00 AM T 9°C



HC500 HYPERFIRE RECONYA

2018-10-01 11:00:00 AM T 12°C

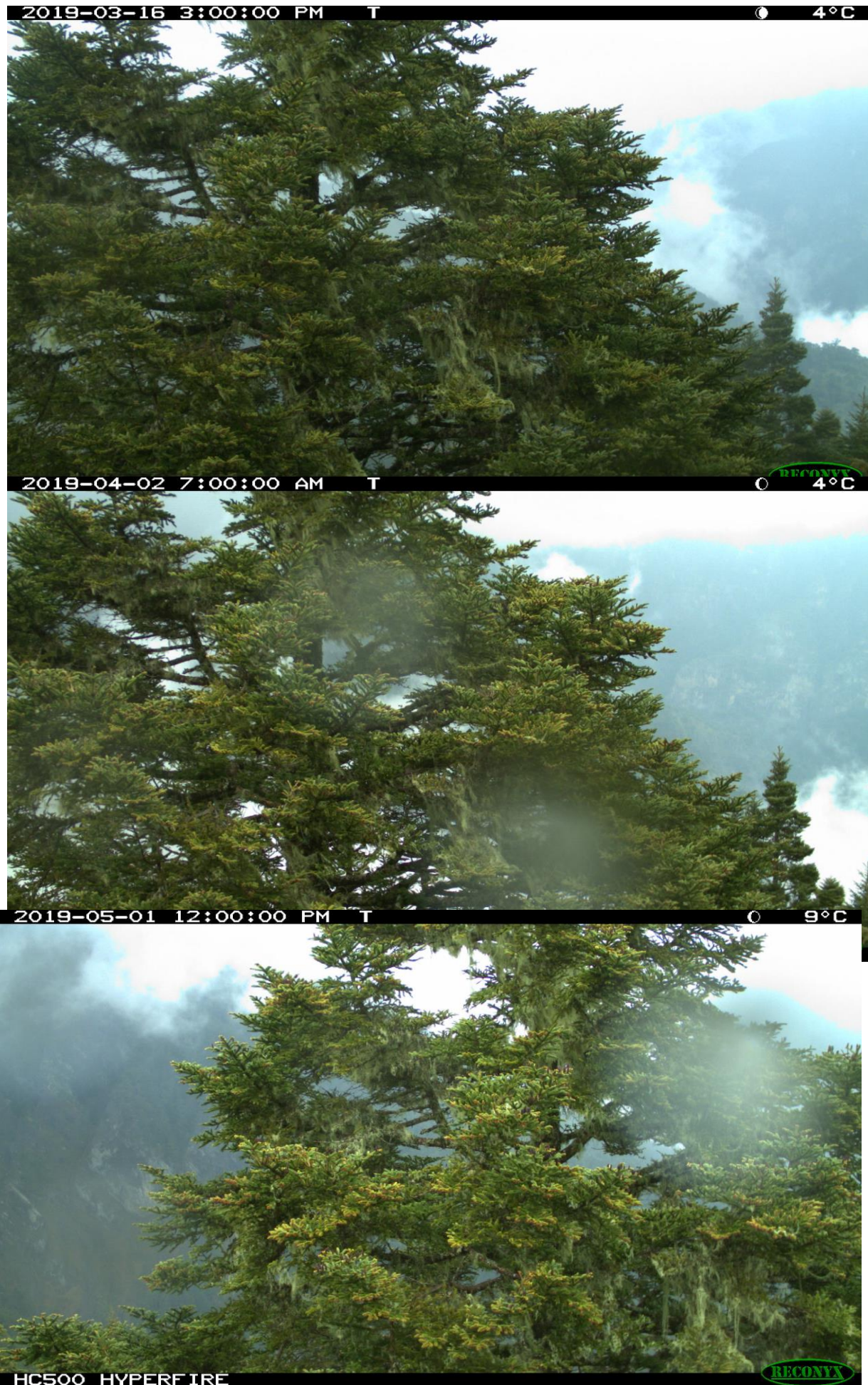


2018-11-04 11:00:00 AM T 13°C



HC500 HYPERFIRE RECONYX

3. 縮時攝影指定樣株 2019 年 3 月至 11 月物候變化



2019-06-02 11:00:00 AM T 15°C



2019-07-02 6:00:00 AM T 11°C



2019-08-01 11:00:00 AM T 16°C



HC500 HYPERFIRE



2019-09-02 1:00:00 PM T 30°C



2019-10-02 12:00:00 PM T 19°C



2019-11-02 11:00:00 AM T 13°C



HC500 HYPERFIRE



(五) 計畫核心概念圖

