太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫（一）

受委託者：國立東華大學

研究主持人：夏禹九

協同主持人：陳毓昀

太魯閣國家公園管理處委託辦理報告

中華民國 101 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

目次

表次 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・Ⅲ

圖次 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・Ⅴ

摘要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・Ⅶ

第一章 緒論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

第一節 研究緣起與背景 ・・・・・・・・・・・・1

第二節 蒐集之資料、文獻分析 ・・・・・・・・4

第二章 研究方法及過程 ・・・・・・・・・・・・・・ 21

第一節碧綠神木及蓮華池固定式氣象站設施維護及資料檢核・・・・・・・・・・・・21

第二節氣象資料分析・・・・・・・・・・・・・23

第三節高山樹線之調查與分析・・・・・・・・24

第三節植物繁殖物候調查・・・・・・・・・・31

第三章 研究成果・・・・・・・・・・・・・・・・・・35

第一節氣候區與氣象分析・・・・・・・・・・35

第二節高山樹線調查與分析・・・・・・・・・49

第三節植物繁殖物候調查・・・・・・・・・・56

第四章 結果與建議・・・・・・・・・・・・・・・・・63

第一節 討論與結論・・・・・・・・・・・・・・63

第二節 建議・・・・・・・・・・・・・・・・・・66

附錄 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 69

附錄一 十六種樹種之開花與結實時間序列圖・・・ 69

附錄二「太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫（一）」期中簡報會議紀錄 ・・・・ 77

附錄二「太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫（一）」期末簡報會議紀錄 ・・・・ 78

參考書目 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 79

表次

表 1. 立霧溪流域內現有之氣象站及雨量站・・・・・9

表 2. 氣候測站觀測項目及儀器・・・・・・・・・・・13

表 3. 各氣象站設站起始迄 2012 年 10 月逐日資料檔缺失之數目・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 16

表 4. 立霧溪流域高山植被分類系統・・・・・・・・ 27

表 5. 本研究使用的地文要素與其代表生態過程與影響因子・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29

表 6. 太魯閣國家公園植物物候調查樣樹及計量・・・32

表 7. 太魯閣國家公園立霧溪沿線植物物候調查表・・33

表 8. 立霧溪流域內現有氣象站及中央氣象局花蓮市測站之氣溫統・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38

表 9. 立霧溪流域內現有雨量站之月雨量統計・・・・44

表 10. 立霧溪流域蓮華地、碧綠、南湖測站之土壤溫度統計・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48

表 11. 針葉林與非針葉林植被區塊之地文要素分佈表・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51

表 12. 逐步二元邏輯斯線性迴歸共變異分析模型・・52

表 13. 二元邏輯斯線性迴歸共變異分析模型係數表・53

表 14. 開花時間重疊性配對檢測結果・・・・・・・57

表 15. 結實時間重疊性配對檢測結果・・・・・・・58

圖次

圖 1. 太魯閣國家公園地形圖・・・・・・・・・・・・6

圖 2. 太魯閣國家公園岩性分布圖・・・・・・・・・・6

圖 3. 立霧溪流域區域植被圖・・・・・・・・・・・・6

圖 4. 微氣候（M）、小氣候（L）、中氣候（S）、
大氣候（A）之層級概念・・・・・・・・・・・9

圖 5. 立霧溪流域各氣象、雨量、氣溫測站位置圖。・12

圖 6. 小奇萊移動式氣象站・・・・・・・・・・・・14

圖 7. 南湖圈谷移動式氣象站・・・・・・・・・・・14

圖 8. 太魯閣國家公園氣象即時查詢系統網・・・・・15

圖 9. 立霧溪流域高山樹線植被分佈區塊・・・・・・28

圖 10. 坡型分類方式。・・・・・・・・・・・・・・・ 28

圖 11. 坡位與地貌類型分析圖。・・・・・・・・・・ 30

圖 12. 昆欄樹種子之發芽實驗・・・・・・・・・・・ 33

圖 13. 水汽壓隨海拔高與季節的變化・・・・・・・・ 45

圖 14. 飽和水汽壓差的季節變化・・・・・・・・・・ 45

圖 15. 碧綠測站平均起霧時數。・・・・・・・・・・ 46

圖 16. 立霧溪流域年平均氣溫隨高度(a)及垂直遞減率
(b)的變化・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46

圖 17. 立霧溪流域 6 月至 10 月平均氣溫垂直遞減率
的變化・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47

圖 18. 南湖氣溫與（Tair）、土壤表面（Tsurface）及地下 10cm（Ts_10cm）之日平均溫度・・・ 47

圖 19. 地文分析要素圖(一)・・・・・・・・・・・・・ 54

圖 20. 地文分析要素圖(二)。・・・・・・・・・・・・ 55

圖 21. 調查樣區內青剛櫟開花照片・・・・・・・・ 59

圖 22. 調查樣區內石楠開花照片・・・・・・・・・ 60

圖 23. 山櫻花開花強度與海拔梯度之關係・・・・・ 61

圖 24. 山櫻花未熟果結實強度與海拔梯度之關係。・ 61

摘要

關鍵詞：山地氣候、溫度遞減率、樹線、物候

一、研究緣起

太魯閣國家公園為因應全球暖化、環境變遷及極端氣候等現象，自 2009 年開始以國家公園適應性經營為構想、應用性的國家公園適應性經營問題為導向，推動代表性生態系長期研究群體計畫，藉由長期生態研究和群體整合型研究，釐清衝擊對象和程度。本案期利用太魯閣國家公園新建制的固定氣象站(碧綠神木、蓮花池)和移動式的氣象站(小奇萊、南湖山)，延續建立即時查詢的資料庫，配合蘇花海岸生態系、雲霧帶及合歡山長期生態研究監測局部地區之氣象因子，以提供定期之氣象統計資料,並於生態敏感區設定固定樣區執行長期物候監測。而長期監測的環境與生態基本資料，不僅為本處經營管理重要依據，亦提供台灣地區評估環境變遷的基線資料，爰辦理四年期程之長期環境生態監測網計畫。

二、研究方法及過程

1. 執行中橫沿線氣象站設施之維護及氣象資料整理。
2. 針對立霧溪流域中、高海拔之氣候進行細部分析。
3. 立霧溪流域高山樹線之調查與分析。
4. 針對中橫沿線選定若干特定植物種類進行開花、結果與物候相關性之監測調查。

三、重要發現

立霧溪的氣候依 Köppen-Geiger 氣候分類法在低海拔小於 750m 屬於 Cfa 溫溼亞熱帶氣候，全年無旱季，夏季炎熱。海拔 750m~3100m 屬於 Cfb 暖溼溫帶氣候。樹線(tree line)以上，則屬於 ET 極地凍原氣候，因為緯度上並非極地，特別稱為亞熱帶高地氣候。氣溫垂直遞減率在低海拔地區為-0.6~0.7℃/100m，中海拔 1500m~2400m 為-0.4℃~0.3℃/100m，反應了立霧溪流域常年均有一深厚的雲霧帶存在。雲霧帶以上之高海拔空氣較乾燥，氣溫垂直遞減率則再增加為-0.54℃/100m 及-0.58℃/100m。氣溫垂直遞減率的季節性差異亦存在，不過在 1500~2400m 間其季節性變化不大，仍表示此一潮溼的雲霧帶全年均存在。

探討樹線如何反應環境條件的改變，因此需先明確界定樹線格局時間與空間尺度，再探求與其尺度相符的環境因子間的關係。在探討區域尺度樹線推移帶時，除了區域的地文、微氣候、土壤條件外，尚需考慮物種植物播遷、競爭、干擾與歷史事件的影響。在台灣確切影響樹線的因子與機制仍未有定論，地文要素與微氣候因子對於樹線分布間的關聯性少有討論與驗證。南湖至合歡山區（中氣候尺度）之樹線推移帶內，針葉林與非針葉林的「草本植群與灌叢」兩種植被區塊分佈之分析顯示，針葉林區塊分佈在平均海拔略低、坡度略陡、全天光空域略低於草本植群與灌叢之處，且針葉林不像草本植群與灌叢區塊，多分佈於東北至西南坡向、山脊坡位、台地與山頂山脊之處。研究中所建立之迴歸模型以海拔高度、百分比坡度、地形曲率、地形遮蔭、坡位與坡型等六項因子對於整體模型貢獻較佳，唯欲探討樹線推移帶內植被類型的變動與機制，則仍必須進一步考慮及研究微棲地的氣候條件與生物性的因子。

我們在未及一年的物候初窺中，發現植物的開花及結實物候與其花朵特徵及

果實傳播特徵分別有明顯的相關性。這樣的相關性可能由動物做為媒介，驅動了植物物種在繁殖物候上的演化，意味著本區植物與動物間可能曾有或仍持續有緊密的交互關係。當全球氣候變遷加劇，物種的時序變化可能產生變動，因而改變植物之間或動植物之間的交互關係。這些變動致使植物的繁殖成功率改變，影響植物社會組成及其他生存於當地的動物及微生物族群，也將無可避免的影響人類社會。

四、主要建議事項

1) 持續維護太魯閣國家公園內氣象站(立即可行建議)

2) 舉辦氣候變遷與高山生態系論壇(中長期建議)

3) 監測高山樹線推移帶地景動態 (中長期建議)

4) 藉助國外經驗結合跨單位與部門合作，持續長期生態觀察研究 (中長期建議)

Abstract

Keywords: mountain climate, temperature lapse rate, tree line, phenology

Two permanent climate stations, Lienhuachi (altitude 1050m) and Pilu (2110m), a light structured movable climate stations, Nanhu (3560m), and three simple air temperature monitoring station (380m, 910m, 1640m) have been deployed in the LiWu watershed of TLK National Park. With these climate and temperature monitoring stations, a more detailed description on the mountain climate in the Liwu watershed could be made. If these climate stations can be maintained, a valuable climatlogical database will be readily available for many ecological researches in the TLK National Park.

Following the climate classification scheme of Koppen-Geiger, mountain area below the altitude of 750m is classified as humid subtropical climate (Cfa). The climate in between of 750 to 3100m altitude is fully humid warm temperate (Cfb). For mountain ridge above the treeline, the climate can be described as subtropical highland climate similar to the tundra climate which occurred at the high latitude zone. Along the altitude, annual mean air temperature decreased from 23℃ (100m), 20℃ (500m), 15℃ (1000m), 12℃ (2000m), 7℃ (3000m), and drop to 4℃ (3500m). A gentle lapse rate (less than -0.4oC/100m) and prolong foggy period (averaged 3.77 hours/day, monitored with a visibility meter) both indicate a persistent heavy moist cloud belt between the elevation of 1500 ~ 2400m exists which matches very well with the cloud forest of Quercus forest formation in the Liwu watershed.

A preliminary tree line ecotone analysis focus on those alpine herbaceous and

broad-leaved thicket vegetation patches scattering above or among the subalpine needle-leaved forest zone at the HoHuan and NanHu mountain area indicated that the herbaceous and thicket patches are correlated with elevation, slopes (%), curvature, shade, position on the slope, slope type. However, in order to give a better description of the tree line dynamics at a local scale, micro-climate, plant functional traits such as seed dispersal, tree seedling competition, as well as the disturbance history are all contribute the tree line pattern. An approach combines with modeling and detail field survey will be needed to investigate the mechanisms of tree line dynamics at the alpine area in Taiwan.

In the short-term phenological study, we found various degrees of overlaps in flowering and fruiting period across pairs of species. The patterns are found to be correlated with pollination syndrome and seed dispersal mode, which implies strong plant-animal interaction in the region. When global climate change is strengthened, plant phenology may be altered, which influences plant-plant and plant-animal interactions. Such change could influence reproductive success of plants, thus impacts plant, animal and microbial communities and inevitably, the human society.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

近年來，全球暖化、環境變遷、生物多樣性喪失等議題已經成為政治、社經與環境上的熱門議題，這些議題亦給台灣未來永續發展帶來極大的不確定性。以台灣而言，過去幾十年來的經濟發展已使得原本未遭人為嚴重破壞的自然區域日益減少，棲地的減少可能是台灣生物多樣性面臨的最大危機。在這個發展趨勢下，國家公園所管理的相對自然、未遭人為干擾的區域，在台灣永續發展的功能上日形重要。近年來，國家公園與自然資源的經營管理認識到生態系統的複雜特性，亦與社會價值、經濟發展及人為活動的變動息息相關，因此逐漸由以往的「指令－控制」式的經營，轉而著重生態系服務（ecosystem services）的彈性（resilience），以因應不可預期的意外造成的衝擊。而長期生態系統結構與過程的研究，一方面可作為評估台灣環境變遷的基線資料，另一方面則提供了對生態系過程或機制的理解。這兩項資訊與知識提得以建構各項生態過程模式，以及模擬（simulate）不同經營策略選項的結果，以降低未來不確定性的風險（Kendall 2001）。

太魯閣國家公園內立霧溪流域涵蓋峽谷、雲霧帶及合歡山高海拔等地區，國家公園過去推動了許多相關的生態研究，為這個地區的生態系建立了重要的基礎資料。為了進一步瞭解生態系的過程與機制，太魯閣國家公園亦開始在有限的資源中，嘗試推動系統性的生態研究。氣象因子影響生態系統中的許多生態過程，不同的地理與氣候條件，反映著不同的能量收支、水文循環、土壤化育等生態過程。山地氣象的相關研究，不但提供完整的氣候資料做為其他許多生態系研究的基礎，在經營管理方面而言，氣象資料亦是區內遊憩規劃、災害警示等之重要依

據。

植物是所有陸域生態系統的基礎生產者，其生理變化，如光合與呼吸作用、生長與防禦機制、及繁殖生理學直接地影響植物族群及群落動態。由於植物的生理反應受環境因子甚巨，並直接或間接地影響其所在系統內的其他生物，許多動物研究也需要大量植物學基礎研究之支援。在台灣，最重要的例子為如台灣黑熊與其重要能量來源--青剛櫟果實（黃美秀等 2009）。儘管青剛櫟為台灣中低海拔山區重要的優勢樹種，棲地的破壞和氣候影響之下，櫟實的生產量有強烈豐欠年的差異（黃美秀等 2009）。然而台灣學界對野生樹種之果實豐欠年的詳細而長期觀測資料極少，是生態系研究中相當匱乏的領域。

由於植物的繁殖機制與環境條件關係密切，本團隊希冀在太魯閣國家公園開啟同步監測植物繁殖現象及氣象因子的監測，以期瞭解公園內植物物候的變化，並尋找相關因子，提供未來建立模式及模擬工作之基礎參數。本案預計利用太魯閣國家公園於 2009 年建置的兩個固定氣象站（碧綠神木、蓮花池），建立長期延續且可即時查詢的資料庫。由於本區的山地地形複雜，局部氣候變化甚大，對於某些特定地區的生態研究，將以移動式氣象站，針對特殊之氣象參數，進行較短時期之研究，以輔助局部氣候資料的不足之問題（夏禹九等 1989）。植物物候學的監測方面，本計畫沿著中橫公路畫分不同區段並選取並標定具代表性之樹木，進行花果等器官發育與成熟度之調查。此外，針對高海拔樹線區域，將利用海拔三千公尺以上的移動式氣象站（小奇萊、南湖站）之資料分析山地氣象，並配合地文分析、植被分佈與合歡山區相關長期生態研究進行分析。本案預期達成下列目標：

一、執行中橫沿線氣象站設施之維護及氣象資料整理。

二、針對立霧溪流域中、高海拔之氣候進行細部分析。

三、立霧溪流域高山樹線之調查與分析。

四、針對中橫沿線選定若干特定植物種類進行開花、結果與物候相關性之監測調查。

第二節 蒐集之資料、文獻分析

壹、立霧溪流域植群概述

立霧溪流域為太魯閣國家公園內的主要河川系統（圖 1），流域面積達 621 平方公里，約佔太魯閣國家公園範圍的三分之二。其中下游河段（天祥以下）流經變質石灰岩（大理石）區（圖 2），形成谷壁矗立高達千餘公尺聞名的太魯閣峽谷景觀。本流域西高東低，上游呈扇形，在天祥附近匯流後，湍急奔流東下於新城附近注入太平洋。主流全長 58 公里，在這極短的距離中，高程卻從河口的海平面急速拔升至 3000 餘公尺的合歡山與奇萊北峰之間，河川坡度陡峻為其特色。立霧溪流域之植被隨海拔由高山草本植群、針闊葉灌叢、亞高山針葉林、上部山地針葉林、山地針葉林、山地常綠至下部常綠闊葉林（圖 3），變化相當大。

立霧溪流域於天祥附近形成近似盆地（或漏斗）的地形，可能因海洋氣流受峽谷及兩側山脈阻隔，加上石灰岩地區土壤淺薄及水分容易流失的特性，造成天祥附近不若台灣其他溪谷地形般潮濕，再加上峽谷內多為陡峭的岩壁，崩塌頻繁，適合大型喬木生長的生育地有限。稜線及陡坡處受地形及土壤條件所限制多以青剛櫟、太魯閣櫟及阿里山千金榆為優勢的耐旱性植群，亦有櫸木、白雞油、黃連木及樟葉槭等落葉樹伴生。陡峭岩壁上則為落葉灌木所構成的低地岩壁及碎石坡植群，以台灣蘆竹為優勢的大面積草本植群為主，車桑子、雙花金絲桃、青桐及黃連木等灌木或小喬木，常零星分布於岩隙上。崩塌地上的次生林以血桐、構樹、山黃麻等先驅植物為常見。

海拔約 900 m 以上常綠闊葉林才陸續出現，櫟林帶為常綠闊葉樹林，常混入各類針葉樹，其上部亦常與針葉林之海拔分布重疊，代表台灣盛行雲霧帶的大略範圍(Su 1984)。櫟林帶常綠闊葉林的樹冠層植物，以樟科(青葉楠、假長葉楠及

長葉木薑子)及殼斗科（赤柯、大葉柯、錐果櫟及狹葉櫟）的植物為優勢，林下常見早田氏冬青、台灣灰木、細枝柃木及西施花等耐陰性的物種。櫟林帶亦常雜有台灣鐵杉、台灣雲杉及台灣黃杉等針葉樹，與闊葉樹形成具明顯上、下兩層樹冠的針闊葉混淆林。次生林以台灣赤楊為最常見，多分布在開闊的溪床及兩側的崩塌處，常形成純林，或與假長葉楠、青葉楠、長葉木薑子、尖葉槭等形成過渡類型的常綠、落葉闊葉混淆林；較高海拔處則常與台灣二葉松及台灣紅榨槭混生。立霧溪流域櫟林帶植群的特殊之處，在組成物種上無常見於東部其他流域的長尾尖葉櫧、星刺栲及台灣杉等大喬木，大量出現於其他流域的檜木林亦僅分布於少數地區（屏風山、研海林道及清水山區），然而卻有大面積的雲杉林和為數不少的台灣黃杉、南洋紅豆杉及台灣粗榧等珍稀植物。另外，本區常見的水絲梨優勢林分，亦少見於其他流域。櫟林帶以上的森林以針葉林為主，合歡山區幾乎可見台灣所有主要的針葉樹林型（台灣雲杉、台灣鐵杉及台灣冷杉林），從暖溫帶的針闊葉混淆林到亞寒帶的高山針闊葉灌叢，尚有大面積的台灣二葉松林、高山針闊葉灌叢及高山草本植群，可做為台灣高山生態系的代表。

不過如果由較小的尺度來檢視立霧溪的植被分布（圖 3），複雜鑲嵌的不同植群則並不能完全依據海拔高度來區分。當然土壤性質、日輻射、氣溫、溼度、干擾等及其他的生物因子（種間競爭、動物的取食與種子播遷等）都會使其變異很難解釋。然而日輻射、氣溫、溼度等比較容易有系統量測的氣象因子，可能是進一步生態過程研究較容易及必需的參考依據。

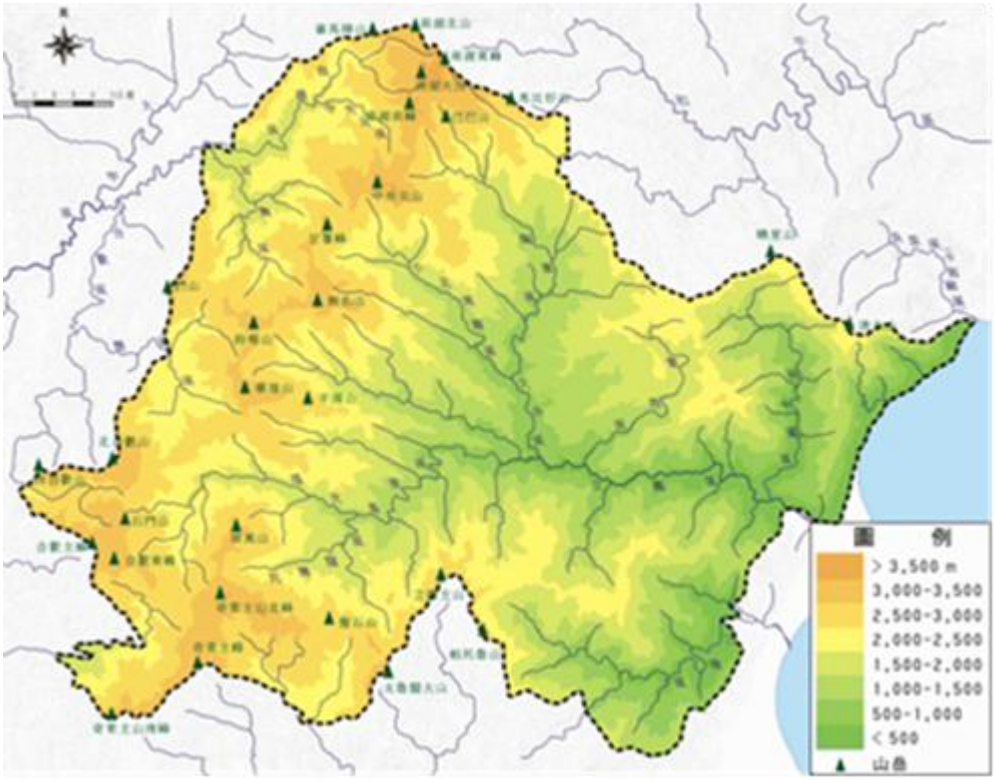

圖 1 太魯閣國家公園地形圖（資料來源：太魯閣國家公園網站）。

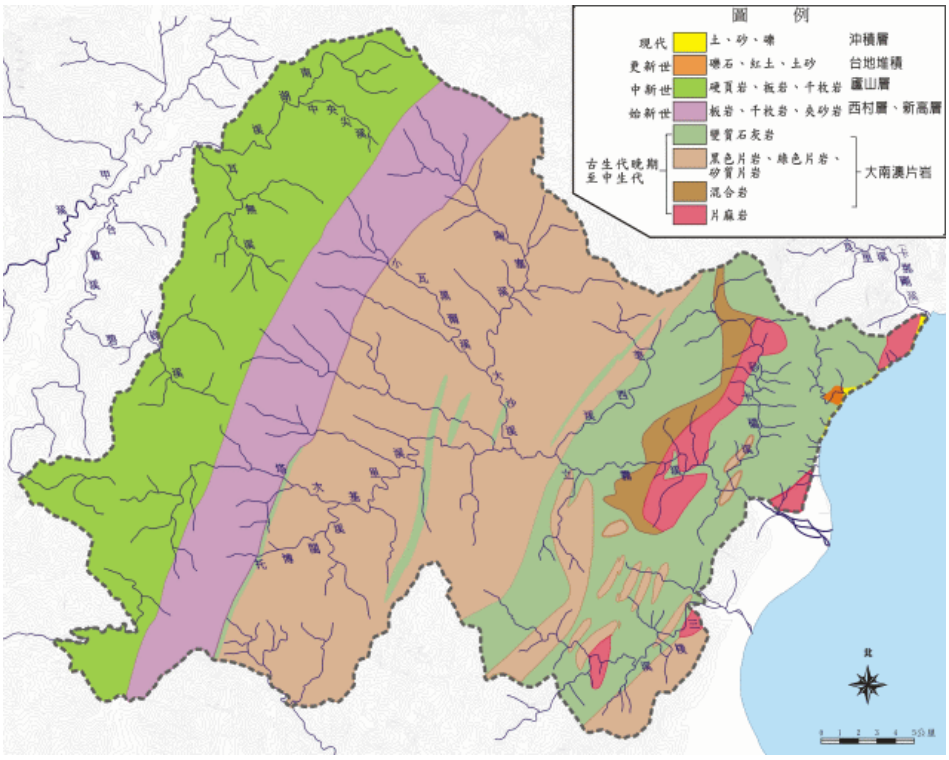

圖 2 太魯閣國家公園岩性分布圖（資料來源：太魯閣國家公園網站）。

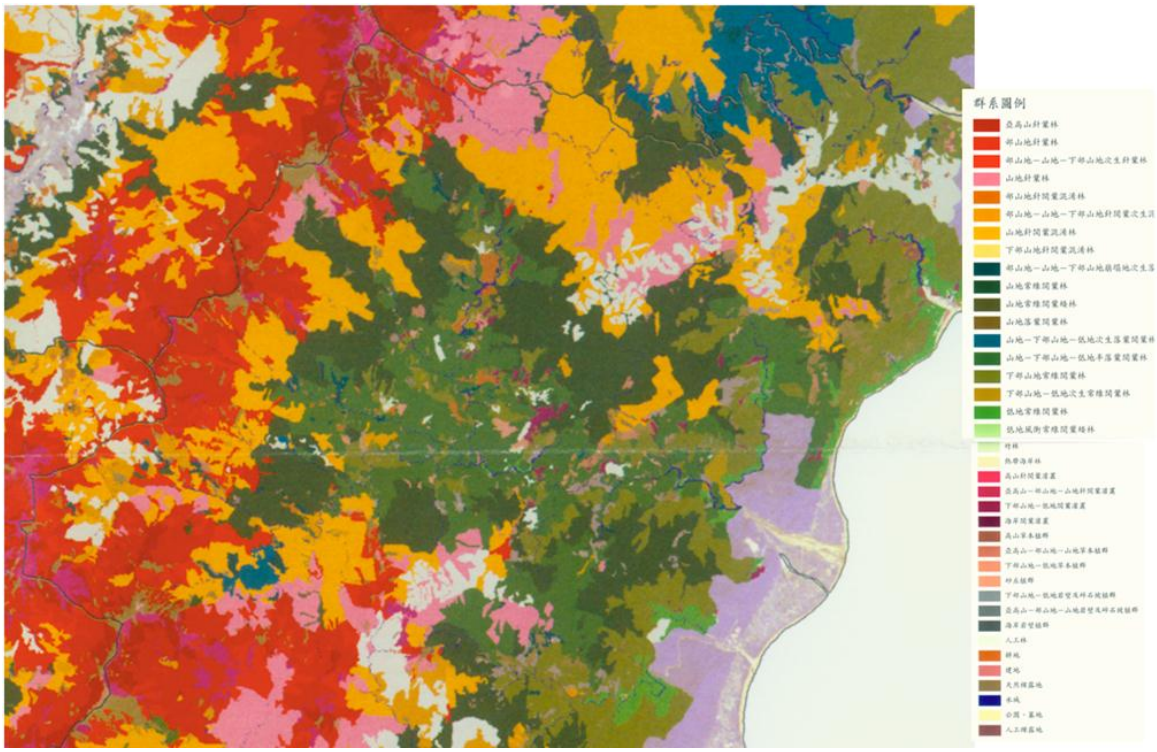

圖 3 立霧溪流域區域植被圖 （林務局 2009）。

貳、山地氣候的特性

氣候可依其所涵蓋的水平尺度分為大（105~107m）、中（103~2x105m）、小（101~104m）、微（10-2~102m）四個不同尺度（吉野正敏 1986）（圖 4）。當然此一層級的分析，蘊含由大至小的控制及由小影響上層特性的概念，由圖 4 可以清楚的呈現。不過不同學者因其研究的方向又有各種不同的分級，例如中氣候又稱局部氣候（local climate, Yoshino, 1975）或地形氣候（topoclimate, Barry 2008）。微及小氣候則通常又合併稱為微氣候或近地氣候（Geiger, 1965）。而山地氣象受到地形的影響，其氣候又與一般中尺度氣候不完全相同，Barry（2008）更認為應將山地氣候單獨分開。山地特殊的局部氣候主要的控制因素是緯度、高度與屬於大陸性或海洋性氣候，在這三個控制因子下，局部的坡度、坡向及山脈的走向則會造成不同的變化（Barry 2008）。

目前對台灣山地氣候有過系統性描述的是蘇鴻傑（Su 1984a, b），其分析將

台灣的山區依集水區為單元，處理水系如何影響台灣氣候最主要的東北季風與西南氣流，從而建立氣溫與海拔高的線性迴歸式，他認為在山區沒有氣象資料的地方使用這些線性迴歸式，不失為研究植群與氣候因子關係的一個依據。此方法也一直為後來植群研究沿用迄今。立霧溪流域的年平均溫度隨海拔高度的遞減率（lapse rate）為 0.36℃/100m，夏季（7 月）為 0.5℃/100m，而冬季（1 月）則為 0.3℃/100m（Su 1984a），季節性的差異反應了夏、冬二季不同的氣團特性。特別值得一提的是蘇鴻傑（Su 1984b）提到若以個別測站氣溫與海拔高度對應，則在西部許多淺山地區（foothill）會有一逆溫出現，其海拔高約為 300~500m，而東部立霧溪並無此現象。他又特別提到溫度隨海拔高度的遞減率在此區 1000~2600m 之間是較低的，可能是與此區常見有深厚的雲海有關。不過蘇鴻傑特別提到中央山脈以東氣象測站不多，所以分析時是包含了立霧溪以外的花蓮北區的一些測站。不論如何，以立霧溪集水區陡峻的地形與複雜的水系走向，局部氣候的變化（如氣溫）對陸地生態系的影響應該很難只以一個與海拔高度完全一致的關係來闡釋。

立霧溪流域內國家公園以外現存之氣象站與雨量站大多在低海拔區域。本計畫新設的測站加入後，由最低海拔的新城氣象站沿著立霧溪主流到合歡山附近的小奇萊氣象站與南湖圈谷氣象站共有 8 個氣象站，大致上沿著海拔梯度至少每 1000m 有一測候站，將有助於對立霧溪不同海拔高的局部氣候的了解。本年度為加強物候調查的氣溫資料，本計畫在中橫公路沿線慈母橋、新白楊及西寶增設了 3 個簡易氣溫、溼度觀測站（OnSet HOBO U23，精度±0.21℃; ±2.5% RH）。這 3 站的增加使得沿立霧溪河谷約每 500m 海拔高，均能有一氣溫的觀測，對本區隨海拔高的氣溫梯度能有更詳細的了解（表 1）。

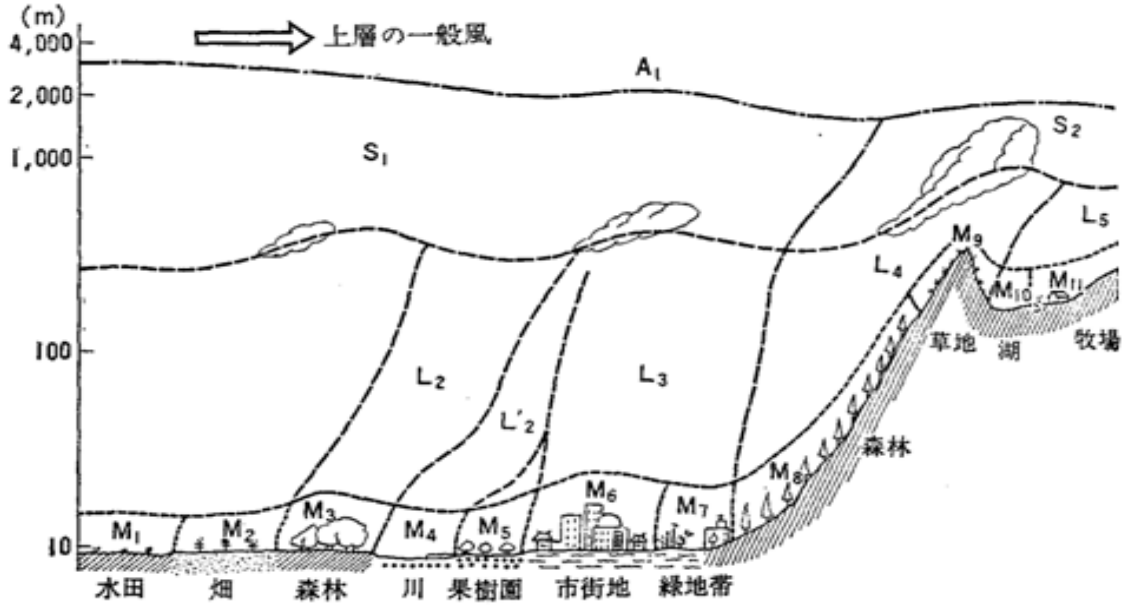

圖 4 微氣候（M）、小氣候（L）、中氣候（S）、大氣候（A）之層級概念（取自吉野正敏 1986）。

表 1 立霧溪流域內現有之氣象站及雨量站。

站名(代碼)	經度	緯度	海拔(m)	資料起迄
花蓮氣象站(466990)[a]	121˚36'18"	23˚58'37"	16	2005/01-2012/09
新城氣象站(C0T840)[a]	121˚35'51"	24˚00'02"	32	2009/01-2012/05
富世氣象站(C0T9C0)[a]	121˚37'19"	24˚08'59"	109	2009/01-2012/09
布洛灣雨量站(C1T830)[a]	121˚34'47"	24˚10'25"	200	2009/01-2012/09
慈母橋氣溫觀測站[c]	121˚31'02"	24˚10'38"	380	2012/06-2012/10
天祥氣象站(C0T820)[a]	121˚29'15"	24˚10'53"	550	2009/01-2012/09
西寶氣溫觀測站[c]	121˚29'05"	24˚12'07"	915	2012/06-2012/10
蓮花池氣象站[b]	121˚29'44"	24˚13'04"	1050	2009/11-2012/05
洛韶雨量站(C1T800)[a]	121˚26'45"	24˚12'23"	1260	2009/01-2012/09
新白楊氣溫觀測[c]	121˚25'59"	24˚11'52"	1644	2012/06-2012/10
慈恩雨量站(C1T810)[a]	121˚22'49"	24˚11'38"	2049	2009/01-2012/09
碧綠氣象站[b]	121˚24'20"	24˚10'39"	2212	2009/11-2012/05
大禹嶺氣象站(C0T790)[a]	121˚18'29"	24˚11'16"	2565	2009/01-2011/11
小奇萊氣象站[b]	121˚17'50"	24˚07'54"	3100	2009/11-2012/04
南湖氣象站[b]	121˚26'41"	24˚21'34"	3562	2010/10-2012/05

a 中央氣象局設置維護之測站。b 太魯閣國家公園設置維護之測站。c 本計畫裝設之簡易氣溫觀測站。

參、碧綠神木及蓮華池固定式氣象站設施維護及資料檢核

太魯閣國家公園已於2009年12月於碧綠神木附近及蓮華池二處設置了固定式的氣候站（表 2、圖 5）。站址的選擇最先是因碧綠神木附近有太魯閣國家公園過去設置之植被永久樣區，蓮華池則是未來擬設置之中低海拔生態試驗地。這些氣候站起初是以提供中尺度局部氣候資訊為目的來規劃的。山地因地形複雜，不可能尋到理想的中尺度氣候觀測位置，這是 Barry（2008）認為山地氣候應與中尺度局部氣候分開的原因之一。Barry 建議對於山地氣候的描述需基於兩種考慮：目的及能使用的技術、資源（包括已有的知識）。固定測站將需要長期維護，所以可及性與無線傳輸訊號的可能性均是考慮的重點。目前太魯閣國家公園已設置的蓮花池與碧綠神木固定氣候站在選定站址時已考慮這兩個因素，盡量避免受鄰近障礙物的遮蔽效應，但是山區局部地形的效應，仍不可避免（夏禹九、王文賢 1985）。各項觀測儀器的定期檢測是非常重要的工作（DeFelic 1998），本計畫每兩個月均依據各項觀測儀器之特性（Brock and Richardson 2001）至蓮花池與碧綠神木兩固定測站進行檢測工作，並及時通知相關單位或維修人員處理，以確保觀測儀器的正常運作。因地形因素，兩氣象站之長程資料傳輸可能受到阻礙。本團隊在檢測氣象站時，將同步進行資料儲存設備之更換，並檢驗資料的完整性及連續性。

山地氣候的描述受到局部地形的影響甚大，為探究集水區內北向坡之局部氣候，2010 年 4 月中旬，本計畫於小奇萊山附近設置一移動式氣象站（圖 6）。此一站設置之後，由蓮花池（1050m）、碧綠神木（2210m）至小奇萊（3100m），大致上沿著海拔梯度每 1000m 設有一測候站，有助於了解立霧溪不同海拔高的局部氣候。2010 年 10 月初則在南湖大山主峰與北峰間之鞍部（3562m）架設另

一移動式氣象站（圖 7），位於和平南溪與陶塞溪之分水嶺，除了可提供即時高山（Alpine）氣象資料外，此站為立霧溪集水區北坡唯一的一個氣候站。此二測站中，南湖圈谷測站路程相當長，為了減輕搬運負重，儀器支架全部重新以鋁材自行製作，而小奇萊測站則是由東華大學購置之國外原廠所製重量更輕之支架。缺點則是若下雨時無法於現場打開 data logger 以取回貯存資料之記憶卡或其他操作。小奇萊測站由奇萊登山口步行約一小時可達，維護上尚稱便利，目前至少兩個月維護一次。南湖測站則僅只能一年進行一次測站維護。

太魯閣國家公園之氣象測站網(http://210.241.8.189:8080/taroko/)規劃是以電信訊號傳輸回管理處電腦主機，自動建檔，且提供網頁介面具有即時查詢、線上資料補整及提供氣候資料檔等操作功能（圖 8）。原先儀器公司設計各測候站資料檔分為每 1、10、60 分鐘及每日 4 個資料檔。每 10 分鐘以 GPRS modem 無線傳輸回太管處之主機 10、60 分鐘及逐日 3 個資料檔案，此 3 個資料檔加上 1 分鐘資料檔亦儲存於測站資料處理機上之 CF 記錄卡備份。此一設想開始運作後發現無線傳輸訊號受山區地形及雨霧的影響，回傳資料並不順利，管理處電腦主機中之資料檔缺失資料甚多，必須經由人工取回儲存於 CF 記錄卡上之原始檔案，經過檔案轉換後，再透過網頁進行資料的補整。資料的補整程式運作緩慢，且常發生問題，對資料的整理造成困擾。經與翰昇公司的技術人員討論多次後，目前已修改其原先的設計，刪除 1 分鐘資料檔，以節省資料回傳的時間。且目前的設計是在信號可即時傳輸完當時的氣候資料檔後，會回溯未傳輸的資料檔。考慮到節省電源（傳輸時才打開 modem 之電源）與測站之訊號狀況，每 10 分鐘時僅傳輸一分鐘。這樣的設計已大幅改善資料的缺失，資料缺失的比例很低（表 3）。同時本計畫仍會於測站維護時讀取 CF 記錄卡上之原始檔案，進行資料的整

理。大致上經由 CF 卡取得的資料檔相當完整。缺失資料主要原因來自原先測站之取樣程式設計上有些問題，替換修改後之程式時遺失記錄資料。

線上管理及資料查詢是計畫的目標，目前所回傳之氣象資料並無線上檢核之功能，未來太管處若規劃提供即時旅遊氣象時，則需要訂定各項氣象參數之檢核標準。山地氣候的地形影響，局部變異很大，此一特性對資料的檢核工作特別困難，通常需要較長時間的統計資料才能訂定檢核標準。此外雨量資料不像氣溫有連續性，且非常態分布，通常需專業人員以鄰近之雨量站比較及以長期的記錄來檢查確認，開放網上雨量即時資料的查詢是相當困難的。

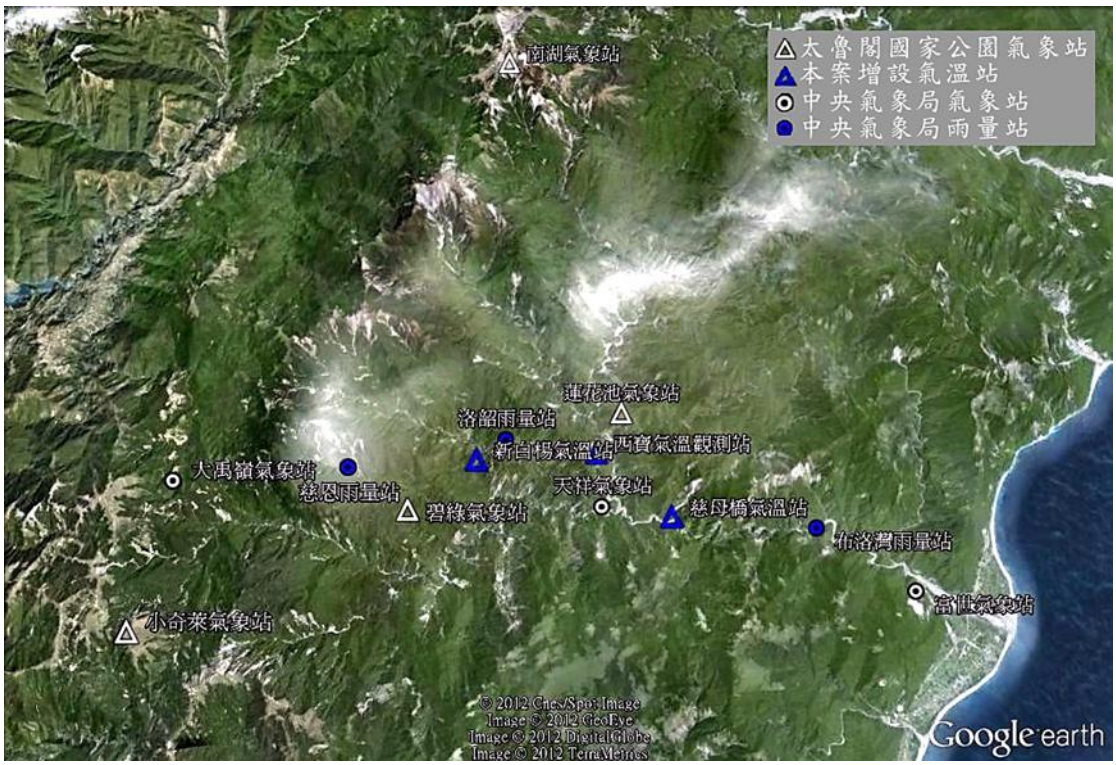

圖 5 立霧溪流域各氣象、雨量、氣溫測站位置圖。（底圖取自 Google Earth）

表 2 氣候測站觀測項目及儀器。

碧綠神木觀測站		
中文項目名稱	儀器	型號
1.氣壓	Vaisala	*WXT520
2.氣溫	Vaisala	WXT520
3.風速	Vaisala	WXT520
4.風向	Vaisala	WXT520
5.雨量	Vaisala	WXT520
6.氣溫	Vaisala	HMP155
7.濕度	Vaisala	HMP155
8.風速	Young	05103-45
9.風向	Young	05103-45
10.雨量**	竹田	TK-1
11.地表溫度	Vaisala	QMT103
12.地下 30cm 溫度	Vaisala	QMT103
13.地下 50cm 溫度	Vaisala	QMT103
14.全天日輻射	Middleton	SK-08
15.光合作用有效輻射	LiCor	190
16.能見度	Optical sensors	MiniOFS

*WXT520 為複合式氣象儀，內含氣壓、溫度、二維風速及感應式雨量計。
**倒杯式雨量筒。

蓮華池觀測站		
中文項目名稱	儀器	型號
1.氣壓	Vaisala	WXT520
2.氣溫	Vaisala	WXT520
3.風速	Vaisala	WXT520
4.風向	Vaisala	WXT520
5.雨量	Vaisala	WXT520
6.氣溫	Vaisala	HMP155
7.濕度	Vaisala	HMP155
8.地表溫度	Vaisala	QMT103
9.地下 30cm 溫度	Vaisala	QMT103
10.地下 50cm 溫度	Vaisala	QMT103
11 全天日輻射	Middleton	SK-08
小奇萊移動試驗站、南湖圈谷		
氣壓	Vaisala	WXT520
氣溫	Vaisala	WXT520
風速	Vaisala	WXT520
風向	Vaisala	WXT520
雨量	Vaisala	WXT520
氣溫	Vaisala	HMP155
濕度	Vaisala	HMP155
全天日輻射	Middleton	SK-08

圖 6 小奇萊移動式氣象站。

圖 7 南湖圈谷移動式氣象站。

圖 8 太魯閣國家公園氣象即時查詢系統網頁。於首頁將滑鼠指標點在站名上即可查看即時氣象資訊。或進入資料查詢，可依不同站名、時段分別查詢所需要的氣象項目。

表 3 各氣象站設站起始迄 2012 年 10 月逐日資料檔缺失之數目。

	資料缺失天數			
測站	蓮花池	碧綠神木*	小奇萊*	南湖圈谷+
2011				
Jan	0	0	1	1
Feb	0	0	0	6
Mar	0	0	0	2
Apr	0	1	5	2
May	8	0	3	1
Jun	4	2	5	0
Jul	1	0	1	0
Aug	1	1	2	0
Sep	1	0	0	0
Oct	3	2	1	0
Nov	1	0	1	0
Dec	2	0	1	0
2012				
Jan	1	0	0	0
Feb	2	0	3	0
Mar	1	0	0	0
Apr	1	0	17	0
May	0	0	-	0
Jun	0	0	-	0
Jul	0	0	-	0
Aug	0	0	-	0
Sep	0	0	-	0
Oct	0	0	-	0

*碧綠神木站因安裝時，未考慮電源限制，將霧水取樣器與氣象站共用電源，導致電源失效，至 2 月中始修改原設計。小奇萊站因數據傳輸器估障已於四月撤站。

+ 南湖測站資料統計至 2012 年 10 月 13 日止。

肆、高山樹線之調查與分析

在全球氣候變遷的議題下，氣候暖化造成的地球物理化學循環改變，可能使棲息地的環境劇烈變化。全球尺度下，氣溫與水分是決定動植物分布、成長、繁殖等關鍵因子，溫度與水循環的改變，可能使森林群聚、動態與結構的改變，造成生物多樣性負面影響。在氣溫上昇的情境下，高山生態系中的樹線生態推移帶的動態變化特別受到關注(Subedi 2009)。

「高山樹線」一詞在概念上描述是描述高山地區，森林與低矮、開闊植被群聚的交界線，以樹「線」稱之，是以較大的空間尺度來看，如以林份或植被群聚尺度角度來說，此一邊界並未容易清楚劃分。在樹線研究的相關文獻中，高山樹線係指是高山森林與草本植物共存之生態推移帶，其下界為連續森林邊界常稱之為林木線(timber line)，上界為樹木族群無法存續或零星分佈之樹種界線(tree species line)。在某些地區的樹線推移帶中，此一界線可能相當清楚，但在多數情況下，樹線泛指小片森林群聚以及草本植物或灌叢區塊所鑲嵌之區域。全球尺度的研究中為簡化樹線的概念，經常以樹高、樹木胸徑、草本植物密度等數值的變化，給予樹線操作型的定義，作為森林與草地群聚分佈格局之指標。

近年來的研究指出，全球樹線的海拔高度分布與雪線相仿，顯示樹線格局應受物理因子所限制(Körner 1998)，而平均氣溫的變動，特別是生長季節的大氣與土壤溫度，被視為影響樹線的重要因子(Körner and Paulsen 2004)。然而高山樹線形成的原因，普遍認為除了氣候之外，環境條件及生物群聚三者特性相互作用有關，其機制仍有待確認。環境低溫或結冰造成植物組織損傷、風雪堆壘造成之物理性傷害、低溫使植物生長期過短等假說，皆可能是區域尺度下樹線形成的原因。相關研究指出高山地區光合作用受到抑制、或低溫限制組織生長影響全球樹線

格局(Shi et al. 2008)，另有文獻指出高山地區缺乏傳粉者或種子播遷能力受限，以及其他生物或環境促進效用是影響樹線擴展的潛在機制(Smith et al. 2003)。

溫度變化是影響樹線動態格局的重要指標，但其僅是生態與環境因子中的一個面向而已，實際樹線推移帶的變動並不會依暖化增溫後所預測的情況改變。欲探討樹線如何反應環境條件的改變，需先界定各種樹線現象(如：樹線推移帶內森林的成長、生長型態、更新情況，或是空間結構或鑲嵌區塊)，在時間與空間尺度上的格局，之後再尋與此尺度相符的環境因子才有意義。例如在全球格局之下，樹線的高度與氣溫有關，而在討論區域尺度或微棲地時，其他各項氣候因子、地文要素皆須納入考量(Holtmeier and Broll 2005)。同理，當探討區域樹線推移帶時，不可忽略區域的地文、微氣候條件、土壤狀態、物種植物播遷、競爭、干擾與歷史事件的影響(Holtmeier and Broll 2007)。

全球高山樹線的相關研究多半奠基於歐美溫帶森林地區，亞熱帶與熱帶亞洲地區與島嶼的研究相對較少。在台灣，高山樹線推移帶已有相關的研究，早期植物學家的踏查與研究，便以鑑定推移帶內植群種類與特性，歸納出森林群聚多處於山谷蔭濕之地。賴國祥(1992) 更提出樹線推移帶內的機制，認為針葉森以透過長距離的種子傳播入侵推移帶，待結實或形成林緣效應後，才再次長距離入侵，而火災的發生使入侵回縮，是維持箭竹草本植群的重要因素。在植物群落與動態方面，隨森林長期動態樣區的設立，許多研究著眼於冷杉群落的更新與族群結構描述(高文靜 2010、古心蘭 1999、莊貴瑜 1998)，並延伸探討樣區內環境因子與群落動態的相關性(楊國禎與林笈克 2011)。在區域地景格局方面，王慈憶與陳朝圳(2009)曾以圖面分析玉山與合歡山冷杉森林面積於 25 年間分別擴展 28.28%與 6.31%，顯示台灣冷杉分布變化受到氣溫的上升有往高海拔地區推移之

趨勢。

雖然在台灣與樹線推移帶相關的研究很多，但如前所述影響樹線分布格局之因素複雜，確切影響樹線的因子與機制仍未有定論，特別是地文要素與微氣候因子對於樹線分布間的關聯性則少有討論與驗證。為此，我們著眼於中氣候尺度以立霧溪流域為範圍，蒐集植物群落分佈資料，搭配地文要素分析，探究南湖至合歡山區之樹線推移帶內，針葉林與草本植群區塊分佈之格局差異。

伍、植物繁殖物候調查

植物的繁殖物候學包括了植物的開花及結果在時間軸上的變化，這些生理變化雖是長期演化的結果（Janzen 1974，Herrera et al. 1998），但直接的影響因子往往來自氣象因子，如雨量或氣溫（Augspurger 1981, Yasuda et al. 1999）。立霧溪流域內之植被由低至高涵括了常綠闊葉林、針闊葉混淆林、針葉林、針闊葉灌叢、及高山草本植群等。其中中下游、低海拔的植被較少經歷低溫及霜期，中高海拔的植被則有較明顯的冬季低溫期。介於前述兩區之間的霧林帶植被則偶有低溫之經歷。全球氣候變動的趨勢報告指出，全球氣溫除了均溫的上升外，最重要的影響來自極端氣候。極低或極高溫常可控制蟲害，也影響動物的遷徙。對植物而言，低溫的出現可能成為生理階段（如開花）開始的信號，也可能破壞進行中的生理作用。加劇的極端氣候不但可能分別影響動物與植物的行為，也可能改變動植物之間的交互關係，對生態系中生物將有多面向的影響（Primack et al. 2009）。

目前全球最長的物候觀察來自日本。由於該民族喜好於櫻花盛開其舉辦賞櫻宴，自第九世紀即留下長期且廣泛的櫻花花期記錄，加以日本氣象廳長期的氣候資料，提供了分析物候與氣候關係的機會（Aono et al. 2008）。日本國土縱跨極大的緯度梯度，難以避免緯度帶來的其他共變因素，包括日照長度、濕度、溫度

等影響花、果物候的因子。要解析這些共變因子的重要性，仰賴長期的物候資料。台灣的高山地形則提供了另一種研究條件。在很短的水平距離內，植物族群面臨明顯的高度變化，這個變化帶來的溫度變化自然地與日照長度分立出來，使得研究人員可以專注研究物候與溫度的關係。

在台灣的物候研究中，目前僅有福山植物園區的十年連續調查工作最為連續。該研究指出，福山園區的樟科及殼斗科物種的繁殖物候在各年間有顯著的差異（王相華等 2011）。然而這些年間的變化是否由氣候因子變動所引起，則仍須更多資料及研究來佐證。此外，該研究的觀察侷限於園區收集之本地物種，其物候表現是否有異於野生族群仍屬未知。太魯閣國家公園在垂直方向上跨越自海平面至高山的地域，公園內野生物種之連續分佈隨海拔升高而漸有變化，是研究物候與氣候相關性的最佳處所。

第二章 研究方法及過程

第一節 碧綠神木及蓮華池固定式氣象站設施維護及資料檢核

太魯閣國家公園已於2009年12月於碧綠神木附近及蓮華池二處設置了固定式的氣候站（圖 1）。碧綠附近或有太魯閣國家公園過去設置之植被永久樣區，蓮華池則為擬設置之中低海拔生態試驗地。兩地之氣候觀測的參數目前包括氣溫、溼度、日輻射、風及雨量。測站記錄為連續監測，並輔以長程傳輸將資料送達太魯閣國家公園氣象系統中。

各項觀測儀器常因野外氣候變化，可能發生儀器失準、故障或是通訊障礙，因此定期檢測與資料正確性檢核是非常重要的工作（DeFelic T.P.,1998）。本計畫將依各項觀測儀器之特性（Brock and Richardson, 2001）每兩個月對上述兩地之氣象設施進行檢查，並及時通知相關單位或維修人員處理，以確保觀測儀器的正常運作，檢查方式包含：

(1)、檢測各項氣象參數值的資料數量是否漏失，如有缺漏，其比率與持續時間情況，藉以判斷儀器是否因氣候變化而有通訊失敗或供電異常之現象。

(2)、檢核各項氣象參數值每小時之變化，包含數值分佈範圍、平均數值、累積量等，並比較前後時間序列資料判斷各數值是否合理，藉以檢查儀器是否出現失準、故障等現象。

(3)、因地形因素兩氣象站之長程資料傳輸可能受到阻礙，本團隊將在現地檢測氣象站時，同步進行資料儲存設備之更換，並現場檢驗資料的完整性及連續

性。

(4)、氣象站資料出現異常時，將通知相關單位處理並提供相關協助。

第二節 氣象資料分析

目前太魯閣國家公園所設置的蓮花池與碧綠神木固定氣候站，以及南湖與小奇萊移動式測站（圖 1），已能對立霧溪流域的氣候提供初步的分析。例如其中一項重要的發現是霧林帶的氣溫垂直遞減率僅 0.4℃/100m，若依以往習用之 0.6℃/100m，則將低估高海拔地區的氣溫，但因為記錄的年數尚短，若能累積更長的氣候資料，對立霧溪流域的氣候應能有更確切的解讀。

本案利用氣象站資料，於計畫開始第四月後進行資料分析工作，以了解立霧溪流域的氣候變化，其工作內容包含：

(1)、氣象參數值之逐時或逐月分析。

(2)、降雨量、濕度、日輻射、土壤溫度等季節與海拔變化。

(3)、立霧溪流域生態氣候分區界定。

第三節 高山樹線之調查與分析

本研究探討之高山樹線區域，係以海拔 2500 公尺以上之山地，多半位處太魯閣國家公園之西側、立霧溪集水區上游地區。此研究區域範圍較大且多為不易抵達之高山，故植物群落分佈的資料以林務局(2009)發表之「台灣現生天然植群圖集」為基礎，再輔以現地勘查。該圖集乃農委會集結合多組植被群分類研究團隊，以 20m X 20 m 多樣區與單一樣區 Braun-Blanquette 之現地調查方式法，佐以航空照片判釋，繪製之全台灣現生天然植群圖。根據該分類系統，於 2500 公尺以上立霧溪流域內，排除人工造林、裸露地之外的自然高山植被，可劃分為針葉林、針闊葉混淆林、闊葉林、針闊葉灌叢、草本植群五大植物群系綱，共十五種群系(表 4)。在本研究範圍內共有 568 個植被區塊，以針葉林 353(62%)最多、針闊葉灌叢 142(25%)次之，相對少數則為草本植群 37(7%)、針闊葉混合林 30(5%)與闊葉林 6(1%)。為探討樹線推移帶內森林與非森林之特性，我們依植物群系之優勢木本與地被植物之差異(表 4)與區塊比率，將「針闊葉灌叢」與「草本植群」合併為「草本植群與灌叢」植被類型，用以對比於針葉森林進行後續資料分析。植群圖集中各植被區塊圖層使用 ArcMap™ 9.3 (ESRI 2009)，並取各區塊之重心代表該區塊空間位置來做後續資料分析(圖 9)。

地文要素反映不同生態過程或是氣候影響因子，本研究中我們使用 40m x 40m 網格大小為空間尺度的數值地形模型(Digital Terrain Model, DTM)來估算各項地文要素(列於表 5)。海拔、坡向、百分比坡度、地形遮蔭與地形曲率等，以

各個網格或(及)其相鄰 3 x 3 網格之高程數值計算之。坡型為土壤冲蝕與化育指標，沿其坡向與地形曲率變化大小，區分為 9 種坡型(圖 10)。坡位與地貌分類與空間尺度有關，小尺度下的山脊坡對比於周圍較大的空間尺度，仍可能隸屬於山谷地貌(圖 11)。透過這種對比的方式，我們以 3 x 3 網格大小為坡位分析單元，以 11 x 11 網格為大區域來分析地貌。各區塊的輻射與受熱情情形以 Beers 坡向指標表示，計算方式為：

$$\text{Beer's aspect (Heat Loading Index)} = 1 + \cos\left(\frac{45° - \text{aspect}}{\text{slope degree}}\right)$$

其數值範圍在 0-2 間，0 代表西南向、1 代表西北與東南向、2 代表東北向(Beers et al. 1996)。土壤水分含量以綜合地形指標為指標(Moore et al. 1991)，計算方式為：

$$\text{CTI} = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right)$$

α 為集水區內可集流的面積; β 為坡度。

上述地文要素分析使用 ArcMap™ 與其空間分析工具(patial analysts toolbox)，坡位、地貌分類與 Beer’s aspect 則使用 Dilts (2009)發佈之地理工具箱(Topography Tools for ArcGIS)之程序。

為呈現高山樹線植被與環境因子間之量化關係，我們以 Wilcoxon 符號等級檢定(Wilcoxon Sign-Rank Test)以及卡方檢定(Chi-square test) 測試針葉林區塊與非森林區塊(草本植群與灌叢)在各種地文要素上是否有所差異；再以二元邏輯斯線性迴歸共變異分析模型(binary logistic regression with ANCOVA)作為統計推論工

具。該模型推論森林區塊與非森林區塊之線性模型可表示為：

$$\text{logit}(\theta(x)) = \log\left(\frac{\theta(x)}{1-\theta(x)}\right) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_nx_n$$

式中θ(x)為森林區塊出現機率，a 與 b1,⋯,n 為各項地文要素 x1,⋯,n 之模型係數；模型中使用之解釋變數資料，是以在植被區塊所處環境相當均質的前提假設下，各區塊重心所處之地文要素數值。

線性模型採逐步迴歸(stepwise regression)進行以減少自變數相關性，變數篩選方式以赤池訊息量(Akaike's Information Criterion, AIC)為準則，而各迴歸係數之檢定以或然比(Likelihood-Ratio Test)檢測。上述統計量運算與檢測使用 R 統計軟體 2.5 版(R Development Core Team 2012)及 mgcv 程序(Wood 2011)。

表 4 立霧溪流域高山植被分類系統。

植物群系綱/群系 (Formation Class / Formation)	優勢木本植物	優勢地被植物
針葉林		
上部山地－山地－下部山地次生針葉林	台灣二葉松	玉山箭竹
	台灣鐵杉	芒
上部山地針葉林	台灣鐵杉	玉山箭竹
	狹葉櫟	
山地針葉林*	假長葉楠	玉山箭竹
	紅檜	台灣瘤足蕨
亞高山針葉林	台灣冷杉	玉山箭竹
	香青	
針闊葉混淆林		
上部山地－山地－下部山地針闊葉次生混淆林	台灣二葉松	芒
		玉山箭竹
上部山地針闊葉混淆林	台灣鐵杉	玉山箭竹
	台灣冷杉	
山地針闊葉混淆林*	紅檜	玉山箭竹
	台灣鐵杉	
闊葉林		
上部山地－山地－下部山地崩塌地次生落葉闊葉林*	台灣扁柏	玉山箭竹
	豬腳楠	冷清草
山地－下部山地－低地半落葉闊葉林*	青剛櫟	闊葉樓梯草
	青葉楠	
	大葉楠	
山地常綠闊葉林*	長尾尖葉櫧	冷清草
山地常綠闊葉矮林	台灣杜鵑	廣葉鋸齒雙蓋蕨
		玉山箭竹
		稀子蕨
針闊葉灌叢		
亞高山－上部山地－山地針闊葉灌叢	台灣冷杉	玉山箭竹
		芒
高山針闊葉灌叢		玉山箭竹
		香青
草本植群		
亞高山－上部山地－山地草本植群		玉山箭竹
		芒
		紅毛杜鵑
高山草本植群		香青
		羊茅
		川上短柄草

*僅列出優勢木本植物重要值(IVI100)、地被植物覆蓋百分比大於 10%者，山地針葉林、山地針闊葉混淆林列出優勢木本植物重要值(IVI100)大於 5%。

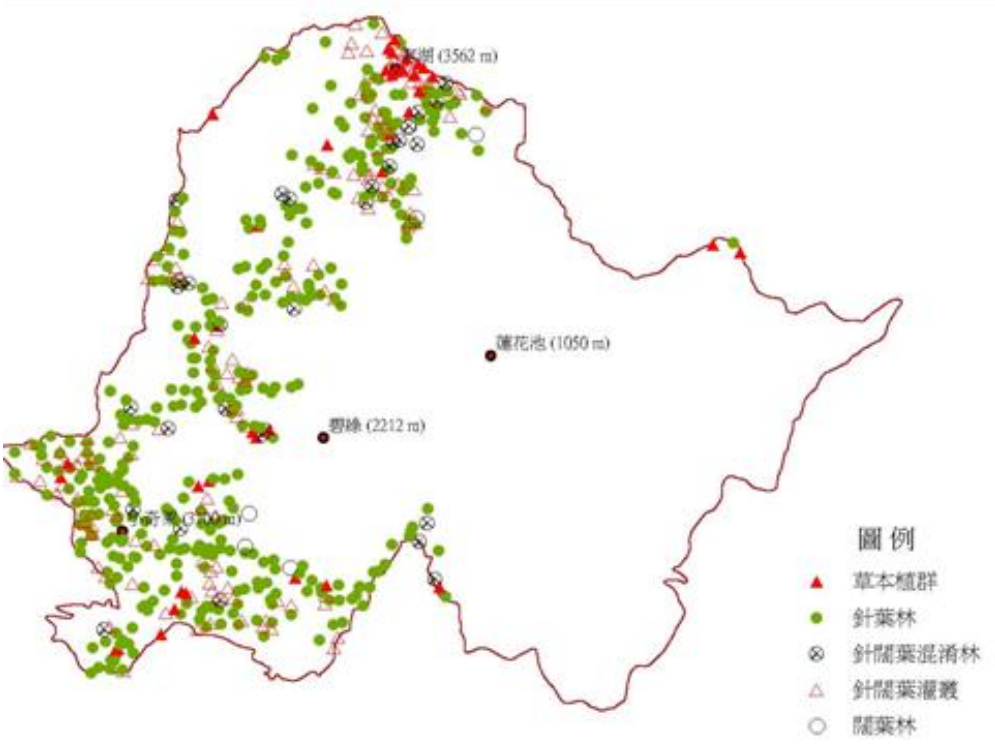

圖 9 立霧溪流域高山樹線植被分佈區塊。

Slope Shape - Slope shape is described in two directions: up-and-down slope (perpendicular to the contour), and across slope (along the horizontal contour); e.g., *Linear*, *Convex* or *LV*.

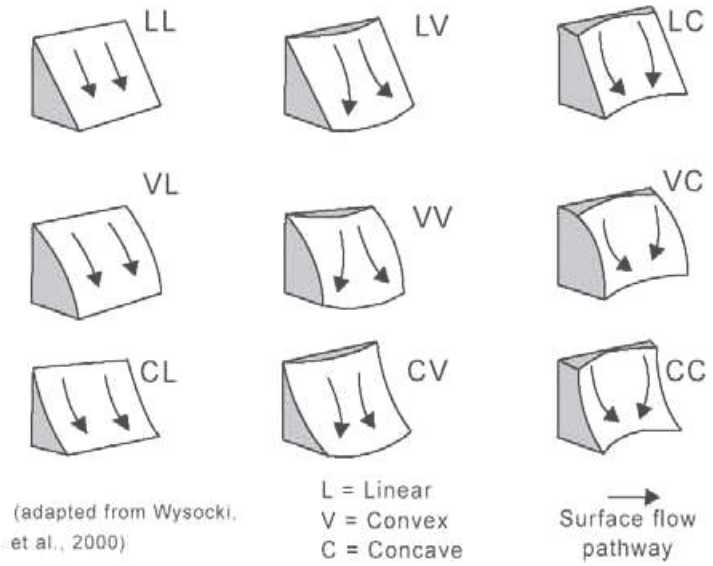

圖 10 坡型分類方式(Schoeneberger and Wysocki 1996)。

表 5 本研究使用的地文要素與其代表生態過程與影響因子

解釋變數	描述		所代表的生態過程或影響因子
海拔高度(m)	連續數值		溫度、濕度、二氧化碳分壓
百分比坡度(%)	連續數值		日輻射、穩定性、沖蝕、濕度
坡向	類別項目	北、東北、東、東南、南、西南、西、西北	輻射量、溫度
地形曲率	連續數值		日輻射、風、濕度、沖蝕
地形遮蔭	連續數值	0 - 254	日輻射、溫度
Beers 坡向	連續數值	0 - 2	日輻射
全天光空域	連續數值	0 - 1	能量收支、日輻射
綜合地形數值(CTI)	連續數值		地形變化程度
坡位(%)	類別項目	山脊處、上坡位、中坡位、下坡位、坡谷處	濕度、土壤化育、風
坡型(%)	類別項目	Concave-Cocave Concave-Convex Concave-Linear Convex-Concave Convex-Convex Convex-Linear Linear-Concave Linear-Convex Linear-Linear	濕度、土壤化育、沖蝕
地貌分類(%)	類別項目	峽谷 (受溪流深度切蝕)、淺谷、河源、U 型河谷、平原、開闊邊坡、台地、谷地處山丘、山腰處山丘、山頂山脊	風、濕度、日輻射、穩定性

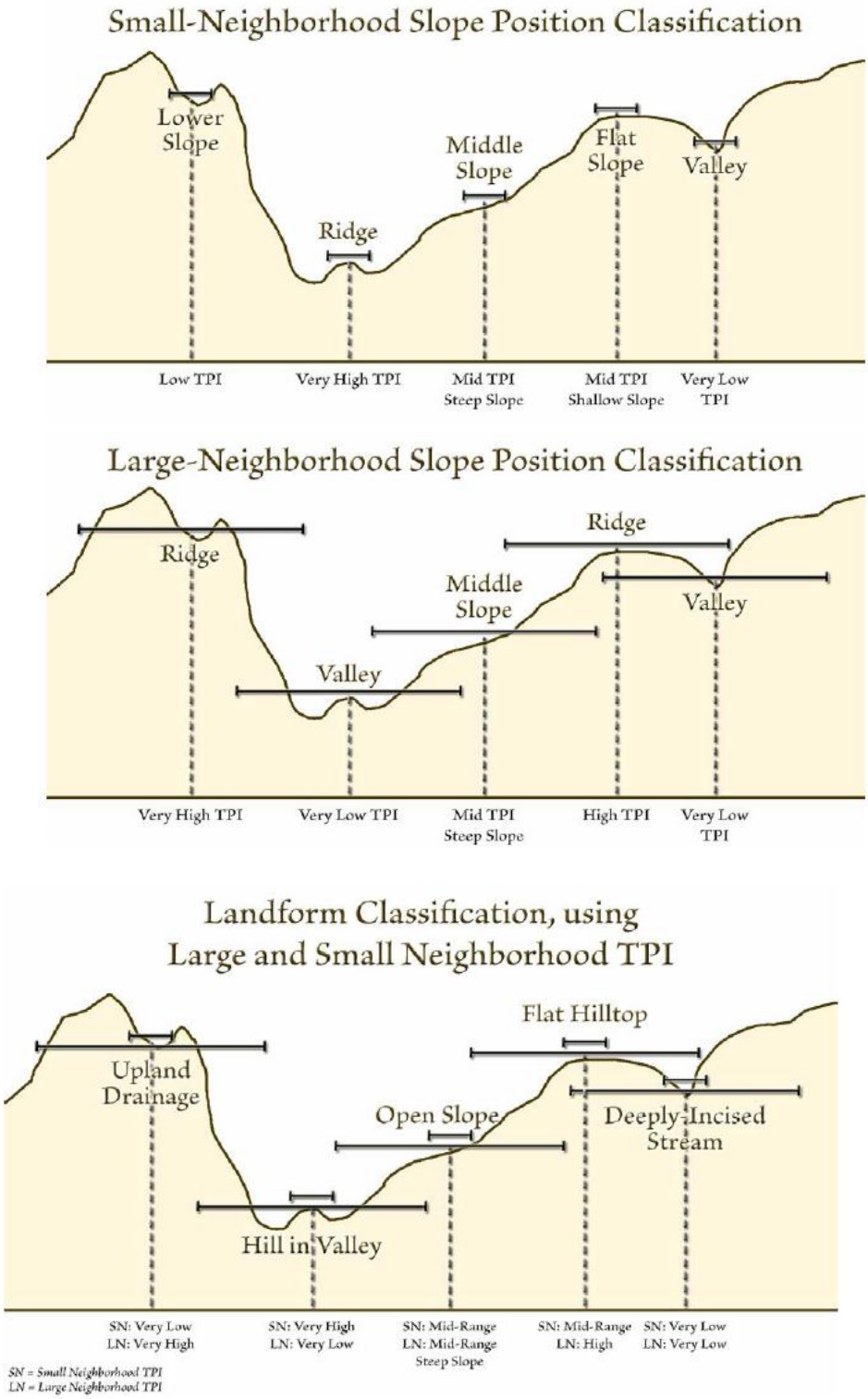

圖 11 坡位與地貌類型分析圖。透過不同尺度下坡位的對比，得以歸納不同的地貌類型(Jenness 2006)。

第四節 植物繁殖物候調查

為瞭解氣象變化的趨勢及植物繁殖物候之間的關係，本案在立霧溪流域（海拔 350-2300M 之間）選擇 14 個調查區段，標定 378 株樣樹，作為本年度物候調查之樣樹。目前標定的樹種分屬 21 種（表 6），每種各有 1 至 48 株不等之樹木。這些樹種多為常綠闊葉、霧林及混淆林等植被之常見物種。為瞭解沿海拔變化之溫度梯度對物候可能造成的影響，本案亦選擇了大量種植的山櫻花作為觀察對象，以瞭解物理因子對開花物候的影響程度。本年度一至四月間進行選樹、標記及初步物候記錄的工作，自五月開始正式進行雙週一次之繁殖物候調查。

物候調查項目包括花果兩器官之發育及其不同成熟度的記錄，記錄表格範例如表 7。每次調查時將記錄各個樣樹在下列四個發育階段：

1. 花序：含苞之花序，僅含未開花之花苞，以代號 9 表之。
2. 花朵：但凡花序上有開放之花朵，即將該花序定義為花朵狀態，以代號 6 表之。
3. 未成熟果：花序上的花朵若有凋謝、且子房膨大為果食者，及記錄為未熟果狀態，以代號 5 表之。
4. 成熟果：依照樹種的果實成熟特徵對植株上的果實分別進行判別，經判別為成熟果者以代號 1 表之。

除評估各種發育器官成熟度外，我們也將物候強度以下列指標進行記錄：0 表示未有任何繁殖器官之發育；1 表示花果量佔植株冠幅 1-25%面積；2 表示花果量佔植株冠幅 26-50%面積；3 表示花果量佔植株冠幅 51-75%面積；4 表示花果量佔植株冠幅 76-100%面積。由於未熟果與熟果的判定不甚容易，因此我們在夏季開始逐步採集各個種類之果實，利用發芽實驗（圖 12）檢視種子的成熟度。

表 6 太魯閣國家公園植物物候調查樣樹及計量。

物種	株數	中文科名	中文種名	科名（拉丁文）	種名（拉丁文）
山櫻花	145	薔薇科	山櫻花	Rosaceae	*Prunus campanulata*
青剛櫟	28	殼斗科	青剛櫟	Fagaceae	*Cyclobalanopsis glauca*
太魯閣櫟	20	殼斗科	太魯閣櫟	Fagaceae	*Quercus tarokoensis*
白雞油	16	木犀科	白雞油	Oleaceae	*Fraxinus griffithii*
假長葉楠	14	樟科	假長葉楠	Lauraceae	*Machilus japonica*
山枇杷	13	薔薇科	山枇杷	Rosaceae	*Eriobotrya deflexa*
西施花	13	杜鵑花科	西施花	Ericaceae	*Rhododendron ellipticum*
青桐	13	梧桐科	梧桐	Sterculiaceae	*Firmiana simplex*
阿里山千金榆	12	樺木科	阿里山千金榆	Betulaceae	*Carpinus kawakamii*
石朴	11	榆科	石朴	Ulmaceae	*Celtis formosana*
昆欄樹	11	昆欄樹科	昆欄樹	Trochodendraceae	*Trochodendron aralioides*
石楠	9	薔薇科	石楠	Rosaceae	*Photinia serratifolia*
臭蠟樹	9	芸香科	賊仔樹	Rutaceae	*Tetradium glabrifolium*
青葉楠	8	樟科	霧社楨楠	Lauraceae	*Machilus zuihoensis*
杜英	7	杜英科	杜英	Elaeocarpaceae	*Elaeocarpus sylvestris*
錐果櫟	6	殼斗科	錐果櫟	Fagaceae	*Quercus longinux*
烏心石	5	木蘭科	烏心石舅	Magnoliaceae	*Magnolia kachirachirae*
狹葉櫟	4	殼斗科	狹葉櫟	Fagaceae	*Quercus stenophylloides*
玉山杜鵑	3	杜鵑花科	玉山杜鵑	Ericaceae	*Rhododendron pseudochrysanthum*
阿里山榆	1	榆科	阿里山榆	Ulmaceae	*Ulmus uyematsui*
霧社山櫻花	1	薔薇科	霧社山櫻花	Rosaceae	*Prunus taiwaniana*

表 7 太魯閣國家公園立霧溪沿線植物物候調查表。

2012 太魯閣植物物候調查　　　　　　　　　　　　　調查人員：

loc#	location	side	tree#	species	date	code	intensity	note	date	code	intensity	note	date	code	intensity	note
1	碧峰1	谷	1	昆欄樹												
1	碧峰1	山	2	玉山杜鵑												
1	碧峰1	山	3	玉山杜鵑												
1	碧峰1	山	4	玉山杜鵑												
1	碧峰7	谷	5	假長葉楠												
1	碧峰8	谷	6	假長葉楠												
1	碧峰2	山	7	西施花												
1	碧峰3	山	8	西施花												
1	碧峰3	山	9	西施花												
1	碧峰3	山	10	西施花												
1	碧峰4	山	11	西施花												
1	碧峰5	山	12	西施花												
1	碧峰9	谷	13	霧社山櫻花												
1	碧峰6	谷	14	昆欄樹												
1	碧峰6	山	15	西施花												
1	碧峰涼亭	谷	16	山櫻花												
1	碧峰涼亭	谷	17	[illegible]果櫻												
1	碧峰涼亭	谷	18	西施花												
1	碧峰涼亭	谷	19	[illegible]果櫻												
1	碧峰涼亭	谷	20	山櫻花												
1	碧峰涼亭	谷	21	山櫻花												
1	碧峰涼亭		22	昆欄樹												
1	碧峰涼亭		23	昆欄樹												
1	碧峰涼亭		24	昆欄樹												
1	碧峰涼亭		25	昆欄樹												
1	碧峰小棧		26	[illegible]果櫻												
1	碧峰小棧		27	[illegible]果櫻												
1	碧峰小棧		28	山櫻花（單）												
1	碧峰小棧		29	山櫻花（單）												
1	碧峰小棧		30	山櫻花（單）												
1	碧峰小棧		31	山櫻花（單）												

圖 12　昆欄樹種子之發芽實驗。

第三章 研究成果

第一節 氣候區與氣象分析

壹、氣候分區

本研究整理了本區的各測站氣溫（表 8），立霧溪的氣候隨海拔高依 Köppen-Geiger 氣候分類法（Kottek et al. 2006; Peel et al. 2007），在低海拔小於 750m（富世、綠水、天祥測站）屬於 Cfa 溫溼亞熱帶氣候(humid subtropical climate) ，全年無旱季，夏季炎熱（hot summer）。海拔 750m~3100m（蓮華池、碧綠神木、小奇萊測站）則屬於 Cfb 暖溼溫帶氣候(warm temperate climate, fully humid) 。而到了樹線(tree line)以上（南湖測站），則屬於 ET 極地凍原氣候(Polar Tundra），因為緯度上並非極地，亦有特別稱為亞熱帶高地氣候（highland）。分述各區如下:

I) 750 公尺以下河谷（溫溼亞熱帶氣候 Cfa）

Cfa 氣候分區是台灣平地主要的氣候型，以綠水（海拔 413 公尺）、天祥（海拔 550 公尺）觀測資料為本區氣候分析之依據。天祥年平均氣溫在 20℃左右，最冷月（1 月）之平均氣溫 14℃，最熱月（7 月）平均氣溫 28℃（> 22℃，Cfa 氣候之門檻值）。夏季白天最高溫度超過 30℃（8 月還曾出現 38℃的極端高溫），而夜晚之最低溫仍高於 15℃。12～3 月，白天最高溫可達攝氏 25℃，但夜晚卻曾出現 5℃以下之低溫。綠水海拔僅低了 100 公尺，年平均氣溫為 21.7℃，較天祥高了 2.2℃。綠水最低溫仍高於 10℃，最高溫則未曾超過 33℃。天祥的特

殊河谷台階地形可能是造成這種極端氣溫出現的原因之一。

II) 750 公尺至 1500 公尺之山區（暖溼溫帶氣候 Cfb）

以蓮華池測站（海拔 1,050 公尺）觀測資料為本區氣候分析之依據。本區年平均氣溫在 16℃，最冷月（1 月）之平均氣溫接近 10℃，最熱月（7 月）平均則不超過 22℃（Cfb 氣候之門檻值之一）。因海拔較高，夏季白天最高溫度超過 30℃，而夜晚之最低溫則會降至 12 到 13℃。12～3 月，白天最高溫可達攝氏 20 到 24 度，但夜晚則會出現 5℃以下，甚至低於 0℃之極端最低溫，有降霜之可能。

III) 1500 公尺至 2,500 公尺之山區（暖溼溫帶氣候 Cfb）

依碧綠神木測站（海拔 2,210 公尺）之資料，本區年平均氣溫 12℃，最冷月（1 月）之平均氣溫 6℃，最熱月（7 月）平均 17.5℃，一年有 5 個月平均氣溫高於 15℃，夏季最高溫亦僅在 25℃左右，屬於涼爽舒適的地區。冬季之 12、1、2 月均有出現 0℃以下的記錄，偶有霜或甚至降雪之可能，如今年三月。

IV) 2,500~3200 公尺以上山區（樹線以下，Cfb）

依小奇萊測站（海拔 3,100 公尺）之資料，本區年平均氣溫 7℃，最冷月（1 月）之平均氣溫已低於 0℃（-0.3℃），最熱月（7 月）平均 12℃，全年僅有 4 個月平均氣溫高於 10℃。夏季最高溫亦僅在 20℃左右，11 月～4 月半年均有出現 0℃以下的低溫，在 Koppen 氣候分類中雖得屬於 Cfb 暖溼溫帶氣候，但其上緣應已為山地暖溼溫帶樹木分布之樹線。

V) 3200～3500 公尺（樹線以上，極地凍原氣候 ET）

台灣 3500 公尺以上之測站甚少，南湖圈谷測站（海拔 3,562 公尺）亦僅設置剛滿一年，依其記錄，本區屬於 ET 極地凍原氣候(Polar Tundra)，或稱為亞熱帶高地氣候。本區年平均氣溫不到 5℃，全年各月平均氣溫均在 10℃以下，冬季 3 個月（12、1、2 月）平均氣溫亦都在 0℃以下。夏季最高氣溫不超過 15℃，而 11～3 月均曾出現低於-5℃的低溫，冬天積雪，霧氣凝重，風力較強，雨量雖多，但已不適於樹木生長。

表 8 立霧溪流域內現有氣象站及中央氣象局花蓮市測站之氣溫統計。

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
花蓮	站號: 466990													
16 m	平均氣溫(℃)	18.1	19.3	19.9	22.3	25.2	27.1	28.6	28.3	27.1	25.2	22.7	19.2	23.6
	絕對最高溫度(℃)	26.5	28.7	29.8	31.8	32.9	34.1	34.8	34.8	33.7	37.0	30.8	28.0	37.0
	絕對最低溫度(℃)	8.7	11.2	10.1	13.9	17.2	20.0	23.0	23.6	20.9	17.6	12.6	10.5	8.7
新城	站號: C0T840													
32 m	平均氣溫(℃)	16.9	19.8	19.1	21.2	24.6	27.5	29.1	29.7	28.4	25.4	22.2	18.4	23.5
	絕對最高溫度(℃)	26.9	28.2	30.1	30.5	31.8	33.0	34.4	35.0	34.3	31.9	29.4	27.2	35.0
	絕對最低溫度(℃)	10.0	11.9	13.4	12.9	16.9	20.3	23.8	25.9	23.6	19.8	15.7	9.4	9.4
富世	站號: C0T9C0													
109 m	平均氣溫(℃)	16.9	18.9	19.3	21.2	24.1	26.1	27.6	27.7	26.2	23.9	21.6	18.0	22.6
	絕對最高溫度(℃)	25.9	28.1	29.0	30.4	32.6	33.6	33.6	35.1	33.6	31.5	29.7	27.0	35.1
	絕對最低溫度(℃)	9.4	10.8	9.9	14.0	18.2	19.6	22.7	22.5	20.2	18.2	15.7	11.1	9.4
慈母橋	平均氣溫(℃)						25.7	25.5	24.4	23.8	21.4			
380 m	絕對最高溫度(℃)						32.3	34.2	33.0	32.7	30.2			
	絕對最低溫度(℃)						22.3	19.3	19.7	19.2	13.3			
天祥	站號: C0T820													
550 m	平均氣溫(℃)	13.1	15.6	16.3	18.0	21.4	23.2	24.6	24.4	23.1	20.7	18.1	14.3	19.4
	絕對最高溫度(℃)	23.7	27.8	27.5	30.8	30.4	31.5	33.3	32.0	31.3	28.8	27.2	24.0	33.3
	絕對最低溫度(℃)	4.8	8.8	6.9	10.4	10.6	15.5	17.8	18.0	16.2	12.9	10.4	5.0	4.8
西寶	平均氣溫(℃)						22.9	23.0	22.5	20.7	17.9			
915 m	絕對最高溫度(℃)						28.2	31.9	31.9	29.0	26.0			
	絕對最低溫度(℃)						19.5	18.5	17.8	14.7	11.5			
蓮花池	平均氣溫(℃)	9.9	11.7	12.9	15.2	18.9	20.5	21.3	21.2	19.7	17.4	15.7	10.5	16.2
1050 m	絕對最高溫度(℃)	22.5	27.8	26.3	30.6	30.1	30.9	31.2	33.0	30.0	27.6	26.9	22.8	33.0
	絕對最低溫度(℃)	-0.1	3.4	2.5	4.8	6.8	12.0	12.7	11.7	10.4	5.4	4.3	-0.3	-0.3
新白楊	平均氣溫(℃)						18.9	19.5	18.9	16.7	14.4			
1644 m	絕對最高溫度(℃)						27.6	28.3	28.6	25.2	25.5			
	絕對最低溫度(℃)						16.0	14.5	14.6	11.5	7.8			
碧綠	平均氣溫(℃)	5.4	8.0	9.4	12.0	15.1	16.6	17.5	17.1	15.4	12.9	10.4	6.5	12.2
2212 m	絕對最高溫度(℃)	15.5	21.2	24.6	22.7	24.0	25.7	25.6	25.2	22.5	22.2	20.1	23.1	25.7
	絕對最低溫度(℃)	-3.6	-0.8	-0.8	2.6	8.1	10.1	12.6	13.0	8.6	4.8	1.8	-1.4	-3.6
大禹嶺	站號: C0T790													
2565 m	平均氣溫(℃)	3.6	6.4	8.1	9.2	11.8	13.0	14.3	13.8	12.9	11.2	8.3	4.7	9.8
	絕對最高溫度(℃)	18.1	22.7	24.3	22.6	25.3	25.1	29.8	23.8	24.3	22.6	20.2	18.2	29.8
	絕對最低溫度(℃)	-6.1	-2.3	-3.0	0.9	2.4	4.3	6.9	8.6	6.6	2.5	-0.2	-3.9	-6.1
小奇萊	平均氣溫(℃)	-0.3	2.2	3.4	6.4	9.4	10.7	11.9	11.6	10.9	9.2	6.7	2.3	7.0
3100 m	絕對最高溫度(℃)	9.6	15.8	14.2	16.6	20.0	20.7	20.5	21.3	20.3	17.9	16.2	14.8	21.3
	絕對最低溫度(℃)	-6.7	-3.8	-1.9	-1.9	2.6	5.3	0.6	6.6	5.9	2.6	-2.0	-6.3	-6.7
南湖	平均氣溫(℃)	-1.8	-0.2	2.0	3.6	7.0	8.6	8.8	8.4	7.8	7.4	4.0	0.6	4.7
3562 m	絕對最高溫度(℃)	11.4	9.6	11.4	10.4	14.1	14.2	14.2	13.9	15.6	13.8	11.7	10.0	15.6
	絕對最低溫度(℃)	-9.8	-10.0	-9.2	-4.2	1.3	3.7	3.5	3.7	1.9	-1.0	-6.1	-10.3	-10.3

貳、氣候初步分析

立霧溪流域內氣溫隨高度而遞減，乾燥空氣每 100 公尺減低 1℃；空氣中水汽含量愈高則垂直遞減愈緩。園區內沿著立霧溪年平均氣溫由海拔 100 公尺的 23℃（富世測站），海拔 500 公尺的 20℃（天祥測站），海拔 1,000 公尺的 15℃（蓮花池測站），海拔 2,000 公尺的 12℃（碧綠神木測站），海拔 2,500 公尺的 10℃（大禹嶺測站），海拔 3,100 公尺的 7℃（小奇萊測站），到南湖圈谷 3,500 公尺以上之高山地區，其年平均溫降為 4℃。3,500 公尺之高山地區冬季 12~2 月間，有 3 個月月均溫都在 0℃以下，而 3,000 公尺左右也有 1 個月（1 月）的月均溫在 0℃以下。極端最低溫在海拔 2,000 公尺處 12~2 月間的 3 個月曾出現 0℃以下的最低氣溫；海拔 2,500 公尺以上 11~3 月間的 5 個月出現 0℃以下的最低氣溫；海拔 3,000 公尺以上 11~4 月間的 6 個月亦曾出現 0℃以下的最低氣溫；3,500 公尺以上之高山地區，出現 0℃以下的最低氣溫的月數增至 7 個勻，更曾出現低至℃以下的氣溫。綜合而言，由低海拔往高海拔的極端最低氣溫漸增，生物在冬季的生長條件苛。

山地的雨量觀測受到局部及微地形的影響，空間變異極大。在鄰近並無其它雨量站可資比較的情況下，短期的自動觀測雨量記錄常常無法依水文分析的慣用方法(如雙累積曲線法)來確認。目前本區內的雨量站不多，新設的四個氣象站觀測記錄不長，都限制了雨量統計的可信度。在這種限制下，本文僅能夠以記錄較長的雨量資料做一概略性的描述(表 9)。

本區年雨量均在 2,000mm 以上，雨量集中於 5~10 月的對流性陣雨及颱風所帶來之豪雨，冬季略乾但月累積雨量低於 50mm 的月份除在 3500 公尺以上的高山區外的各站都只有一個月，並無明顯的旱季。低海拔的太魯閣峽谷區年雨量在 2000~2500mm 之間，降雨日數與中、高海拔較開闊的山區(洛韶以上降雨日超過 150 天)比起來都較少。500~1,000 公尺左右的區域年累積雨量較低，約在 2,000mm 左右，降雨日數卻較多。2,000 公尺左右之山區，雨量較高(慈恩年累積雨量達 2750mm)，全年月平均雨量均高於 100mm。2,500~3500 公尺以上山區，冬季已有降雪；合歡山區冬季積雪，降雪受地形影響極大，年雨量地區變異可能很大。3000 公尺以上的小奇萊及南湖雨站所使用的雨量儀器是雨滴衝擊壓力感應式的 WXT520，是首次使用。由資料來看雨量在某些月份偏高，似乎並不能完全符合台灣山地的降雨形態，尚需要進一步的測試。

與自由大氣相較，山區大氣中的水汽壓較高，因此若其他因子不變，較高的水汽壓會降低大氣中的凝結高度（condensation level），高山地區因此常常籠罩雲霧。因為近地的水汽高，吸收近紅外輻射較多，山區地面氣溫會較相同高度的自由大氣為高。在氣候上水汽壓（ea）有三個作用：1)水汽吸收近紅外輻射及一部分日輻射； 2)會影響飽和水汽壓差（saturation vapor pressure, vpd = es - ea）；飽和水汽壓差亦稱為乾燥能力（drying power），是生物氣候上一個重要的指標，飽和水汽壓差愈大，空氣愈乾燥；3)水汽壓與空氣密度成反比，與生物生理上對高海拔缺氧所造成的組織缺氧效應（hypoxic effect）有關係（Barry,

2008）。立霧溪流域內空氣中的水汽含量（以水汽壓力表示）隨海拔高的大氣壓力減低而遞減，1000 公尺處為 10~20 hPa，2200 公尺降到 5~12 hPa，超過 3200 公尺之上則降到 8 hPa 以下（圖 13）。本區 2 月到 6 月在 2200m 處飽和水汽壓差較 1000m 之低海拔還大，顯示空氣較乾燥，此與霧林帶之特性似不相符。不過植物的蒸散量是與葉溫的飽和水汽壓差（不是氣溫的飽和水氣壓差）有關，在相同輻射量、風速條件下反應乾燥能力飽和水汽壓差愈大則蒸發散之潛在需求量亦隨之增加。霧若是因山嶺抬昇氣流而形成，則空氣雖較乾燥，但植物所接收的輻射量較低，蒸發散之潛在需求量仍是不會太高的。綜合而言，植物的葉溫受到土壤水分、輻射量、風速、與植物的生活型的影響，得由能量收支來考慮，不是簡單的由海拔高及溼度即可得一通則（Körner, 2007）。就季節性的變異而言，在冬季東北季風較強烈的 11、12 月，立霧溪流域全區空氣都在飽和的狀態。隨著海拔高增加, 飽和水汽壓差的季節性變化很明顯(圖 14)。小奇萊站的飽和水汽壓差在夏季亦不超過 2 hPa，在冬、春兩季(11~5 月) 南湖圈谷空氣中的水汽幾乎達到飽和，非常的溼冷。

台灣山地雲霧帶大致和常綠闊葉櫟林、針闊葉混生林帶吻合 (Su 1984)。碧綠神木測站（2200m）的能見度記錄顯示全年平均每日有 3.77 小時的霧（能見度<1000m），冬季約 5~6 小時，夏季則有 2~3 小時（圖 15）。蘇鴻傑（1984a）的分析顯示氣溫與海拔高呈現相當好的線性關係，7 月均溫垂直遞減率為 -0.5℃/100m，而 1 月均溫遞減率為-0.3℃/100m。空氣中的氣溫垂直遞減率反應了

空氣層中的溼度，氣溫垂直遞減率愈緩，表示空氣中的溼度愈高。本計畫分析目前的資料顯示氣溫隨海拔高遞減的趨勢，在蓮花池測站（1050m）與碧綠神木測站（2212m）之間有一很明顯的轉折（圖 16a）。溫度遞減率亦明顯的隨海拔高而不同。氣溫垂直遞減率在低海拔地區較大（-0.6~0.7℃/100m），中海拔1000m~2500m 間最低（-0.3℃/100m）（圖 16b），反應了立霧溪流域常年均有一深厚的雲霧帶存在。雲霧帶以上之高海拔空氣較乾燥，氣溫垂直遞減率則再增加為-0.54℃/100m 及-0.58℃/100m。氣溫垂直遞減率的季節性差異亦存在，不過在 1000~2500m 間其季節性變化不大，仍表示此一潮溼的雲霧帶全年均存在。加入的新白楊測站 6 月至 10 月平均氣溫垂直遞減率的變化，可以辨識由1500m 問始雲霧漸增（垂直遞減率-0.4℃/100m），而潮溼雲霧帶的上限在 2400m 左右（圖 17）。因此在台灣山地的生態學研究中，若僅以一簡單的隨海拔高而線性遞減關係來推估立霧溪流域的山地氣溫分布，將容易忽略掉雲霧帶的特性。蘇鴻傑（1984b）亦提到台灣西部許多淺山地區（300~500m）有一逆溫出現，而立霧溪並無此逆溫層。本研究參考富世測站（109m）到天祥測站（550m）的資料顯示立霧溪在此一海拔高反而在冬季有一乾燥的空氣層存在（氣溫垂直遞減率高），不但沒有逆溫層，反而氣溫隨高度增加而急劇下降。可能的原因是天祥位於立霧溪的河谷，冬季冷空氣沿河谷下沈，造成天祥的氣溫較低，並不一定是有一乾燥的空氣層存在；這種局部氣候的變異，亦反應山地氣候的複雜性。

土壤溫度當然亦是隨著海拔高度的氣溫降低而降低。年平均土壤表面溫度在 1000m 處為 17 ℃，2200m 為 13 ℃，到 3550m 的南湖則為 6.9 ℃，均較氣溫為高。地表下的土壤溫度亦相同，只是受到土壤的緩衝，極端高、低溫的變異輻度較和緩許多（表 10）。在南湖土壤表面及地下 10cm 的年均溫度均約 7 ℃，較年平均氣溫 4.7 ℃為高，極端最低溫在土層中亦高於 0 ℃，因此在冬季植物的根部仍不至遭受凍害。由地表溫度接近 0℃，維持乎穩定，不隨氣溫變化，可約略顯示南湖測站周圍的地面積雪（圖 18， 圖中顯示 2010/12/29 ~ 2011/3/14, 2011/1/1 ~ 2012/2/20 為積雪的時間）。

表 9 立霧溪流域內現有雨量站之月雨量統計。

站名	海拔	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
花蓮	16 m	59	78	90	69	196	200	242	349	363	449	187	48	2329
新城	32 m	40	79	92	58	188	298	250	259	306	1071	10	29	2678
富世	109 m	36	93	98	74	200	232	241	391	260	788	202	81	2694
布洛灣	200 m	37	85	58	69	125	215	254	504	249	595	203	64	2457
天祥	550 m	42	86	61	74	88	189	191	451	216	416	120	54	1988
蓮花池+	1050 m	23	65	19	53	90	143	122	362	66	142	58	13	1154
洛韶	1260 m	75	83	92	108	116	188	177	427	169	363	110	89	1996
慈恩	2049 m	105	169	128	179	154	274	205	464	170	467	149	124	2588
碧綠	2212 m	82	190	68	137	178	271	177	382	158	180	97	97	2016
大禹嶺	2565 m	67	169	163	173	162	208	103	354	219	188	112	85	2001
小奇萊#	3100 m	84	183	177	195	608#	491	351	251	278	226	200	108	3153
南湖#	3562 m	40	116	50	153	212	411	436	1165#	132	333	185	70	3302

*為比較各站雨量，本表使用相同之雨量記錄時間，除花蓮站外，雨量記錄年數不足，僅能供參考。

+2011/4~2011/6 蓮華池之雨量計故障或資料缺失，雨量記錄有問題。

#小奇萊及南湖兩站採用的雨量感應器偶有異常情況。

資料來源: 1. 中央氣象局花蓮氣象站、台灣颱風洪水研究中心 大氣研究資料庫。

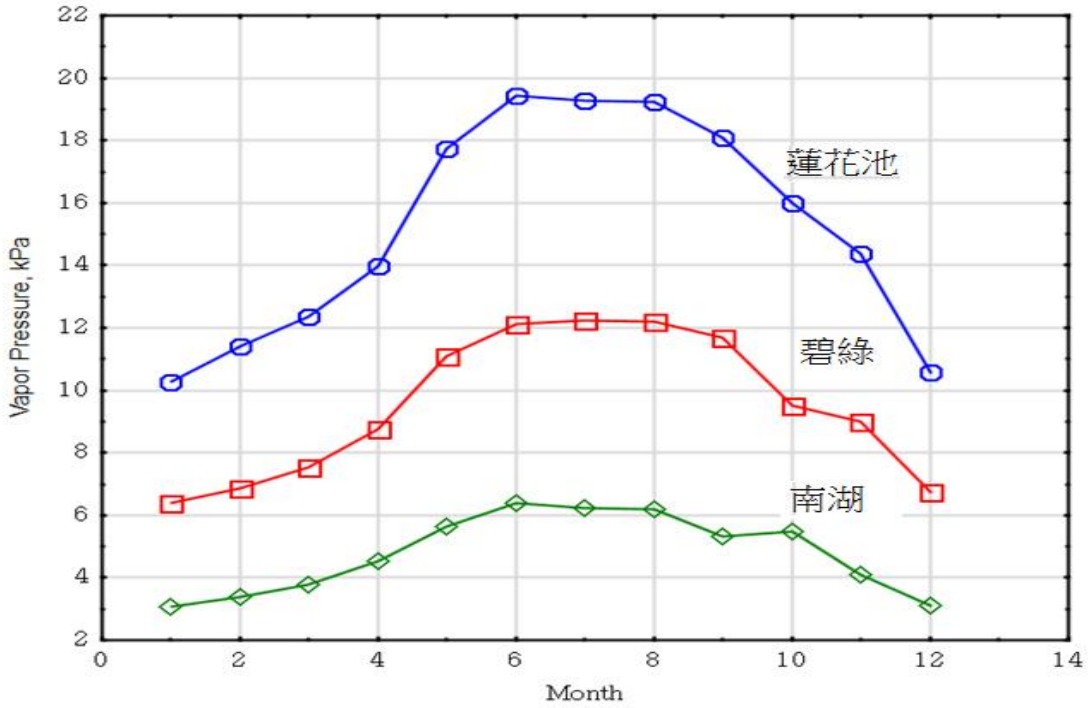

圖 13 水汽壓隨海拔高與季節的變化。

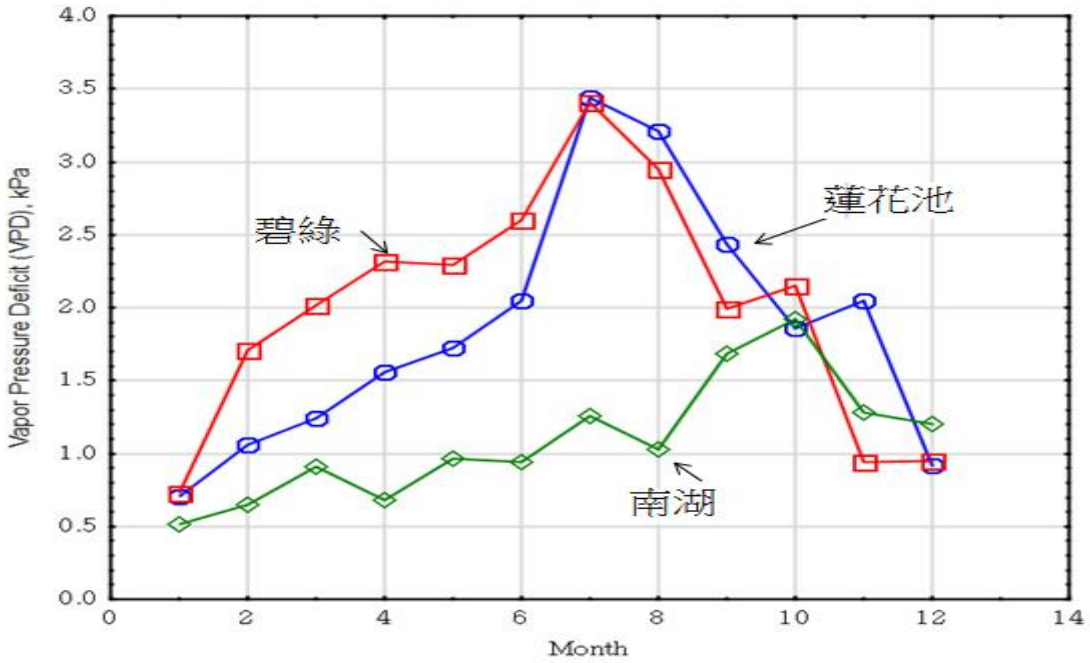

圖 14 飽和水汽壓差的季節變化。

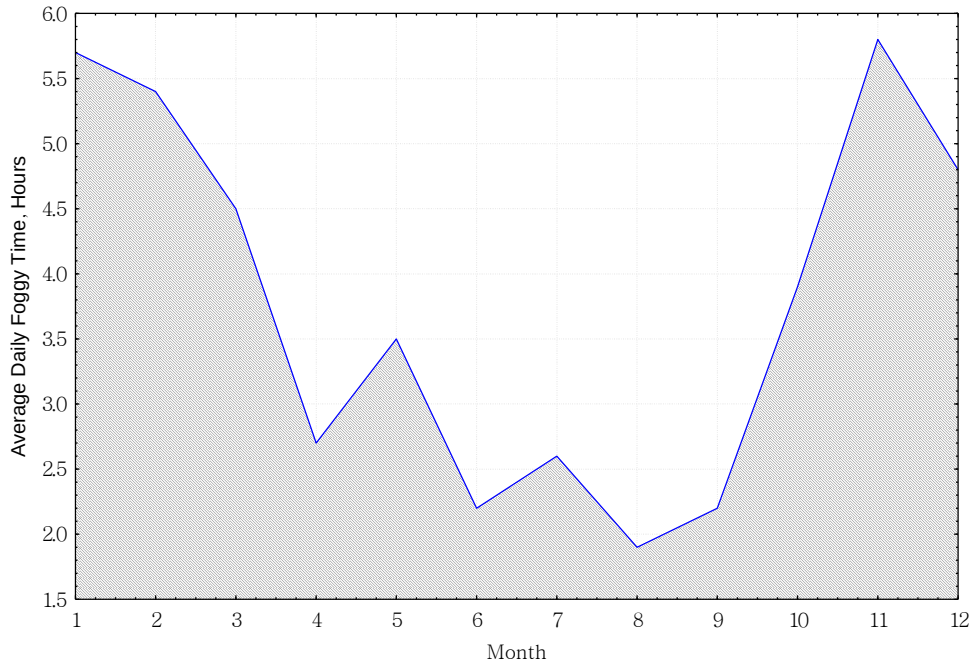

圖 15 碧綠測站平均起霧時數。

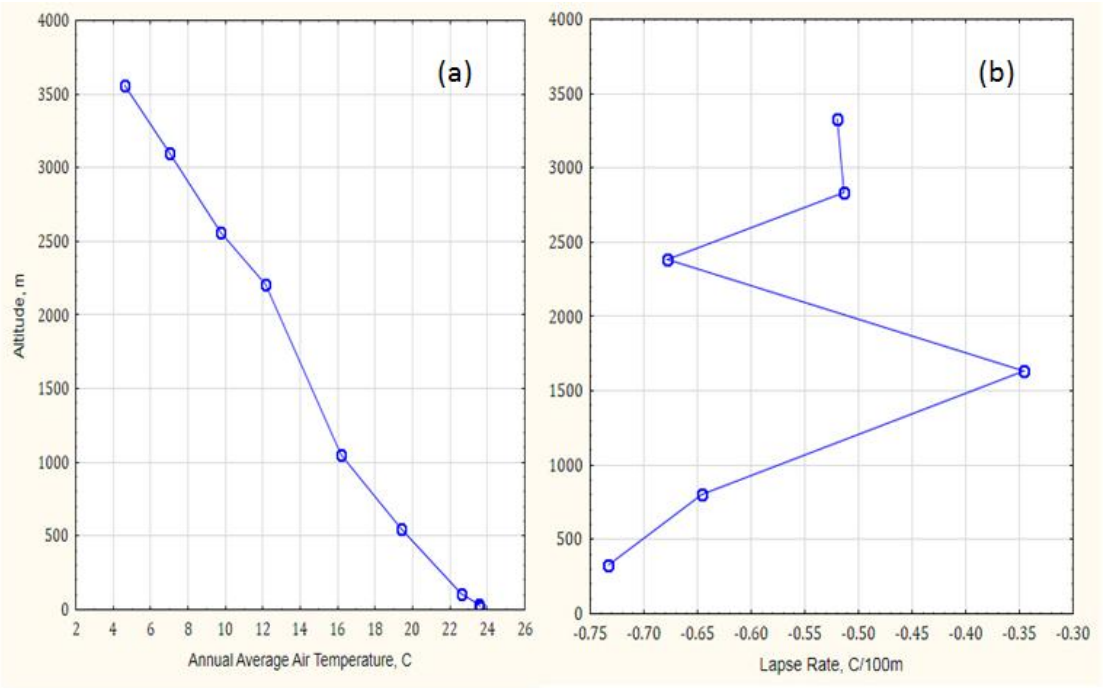

圖 16 立霧溪流域年平均氣溫隨高度(a)及垂直遞減率(b)的變化。

1000~2500m 間有一很明顯的轉折，對應的是全年均有的潮溼雲霧帶。

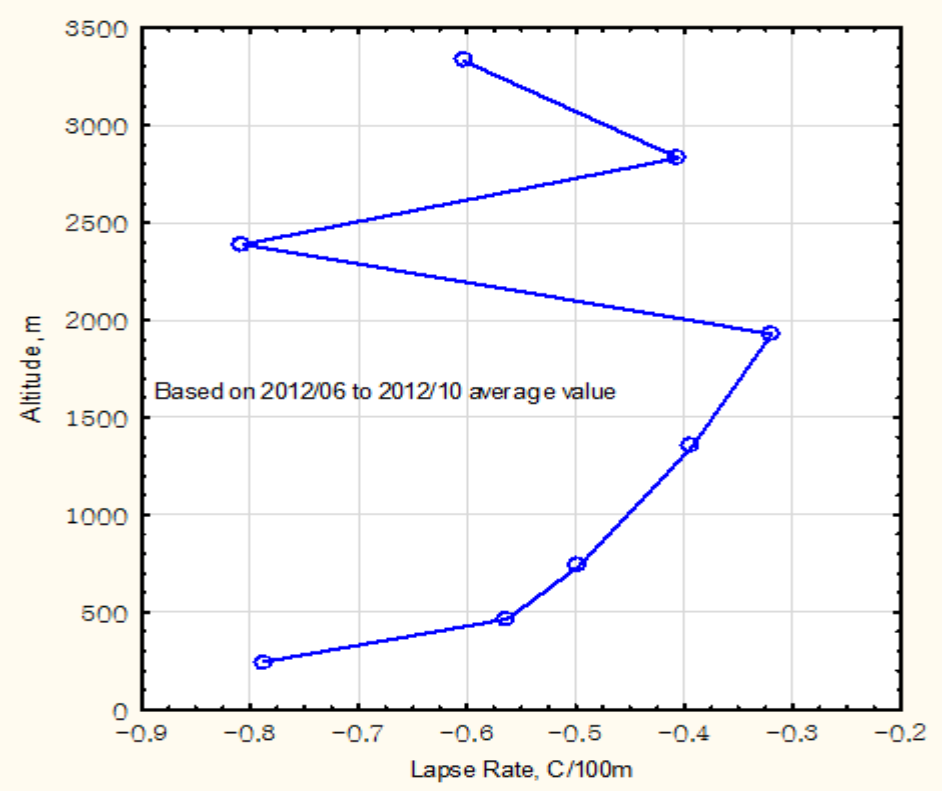

圖 17 立霧溪流域 6 月至 10 月平均氣溫垂直遞減率的變化。

新加入的新白楊測站可以辨識由 1500m 問始雲霧漸增，而潮溼雲霧帶的上限大約是在 2200m 左右。

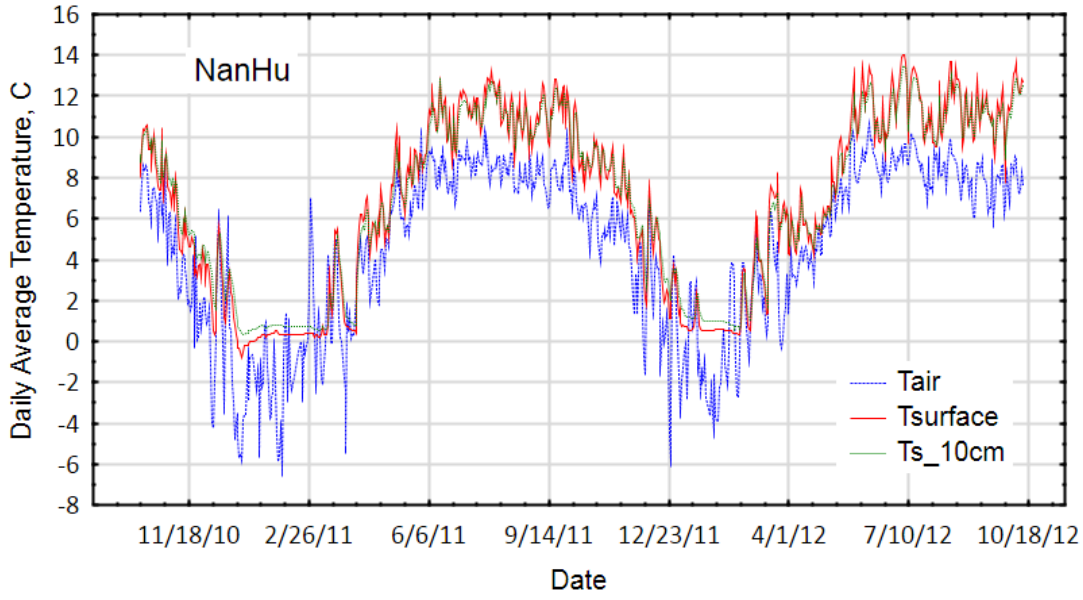

圖 18 南湖氣溫與（Tair）、土壤表面（Tsurface）及地下 10cm（Ts_10cm）之日平均溫度。2010/12/29 ~ 2011/3/14, 2011/1/1 ~ 2012/2/20 地面積雪。

表 10 立霧溪流域蓮華地、碧綠、南湖測站之土壤溫度統計。

	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
蓮花池													
地表均溫	11.3	12.8	14.6	16.6	19.7	20.6	21.4	20.8	20.3	18.4	16.9	12.3	17.1
地表絕對低溫	-0.8	3.1	4.6	7.7	8.2	14.2	14.8	13.7	11.5	7.4	6.7	0.5	-0.8
地表絕對高溫	26.2	30.1	33.0	32.0	31.9	28.9	37.7	35.8	35.2	33.1	40.2	30.6	40.2
土壤 30cm 均溫	13.4	14.1	15.4	16.6	19.0	20.3	21.2	20.9	20.7	19.3	18.2	15.4	17.9
30cm 絕對低溫	9.5	11.1	11.9	13.0	14.6	18.3	19.3	19.3	18.8	15.7	15.5	10.2	9.5
30cm 絕對高溫	18.3	18.2	19.6	20.9	22.6	23.3	26.8	26.1	23.8	23.2	29.7	20.9	29.7
50cm 均溫	13.9	14.2	15.2	16.2	18.4	19.8	20.7	20.6	20.4	19.3	18.3	15.9	17.8
50cm 絕對低溫	12.2	12.3	12.7	13.2	15.8	18.7	19.6	19.5	19.3	16.8	16.4	13.0	12.2
50cm 絕對高溫	16.5	16.8	18.1	19.1	20.9	21.6	22.9	22.8	21.9	21.8	35.1	19.2	35.1
碧綠													
地表均溫	6.8	8.7	11.2	13.5	16.6	18.1	20.0	18.9	17.3	14.5	11.5	7.6	13.7
地表絕對低溫	-0.7	0.8	0.8	2.4	5.2	10.5	12.8	12.6	10.5	8.3	3.2	-1.1	-1.1
地表絕對高溫	23.4	27.1	32.2	36.1	40.5	38.6	42.7	38.3	33.6	28.7	27.0	21.3	42.7
土壤 30cm 均溫	8.3	9.7	12.5	14.3	16.8	18.4	20.7	20.1	18.6	16.0	13.4	10.2	14.9
30cm 絕對低溫	0.0	5.7	6.9	9.3	12.7	14.8	17.3	15.8	16.2	14.1	11.1	6.1	0.0
30cm 絕對高溫	18.9	15.6	20.1	20.1	23.4	22.2	25.2	24.0	22.3	18.8	15.9	13.3	25.2
50cm 均溫	8.6	9.5	12.1	13.7	16.1	17.8	20.0	19.6	18.3	16.1	13.6	10.7	14.7
50cm 絕對低溫	0.0	6.6	8.3	9.4	13.4	15.8	17.9	15.9	16.5	14.7	11.8	7.5	0.0
50cm 絕對高溫	18.8	14.0	17.1	17.4	20.5	20.3	22.5	21.7	20.1	18.3	15.6	12.8	22.5
南湖													
地表均溫	0.4	0.7	3.5	5.1	8.6	11.0	11.9	11.2	11.2	10.2	6.1	2.9	6.9
地表絕對低溫	-2.0	0.3	0.2	0.3	3.6	5.7	6.3	4.7	5.5	3.3	1.2	-1.1	-2.0
地表絕對高溫	3.6	5.1	12.7	12.8	19.0	18.7	19.8	20.0	19.9	31.2	14.7	11.3	31.2
土壤 30cm 均溫	1.0	1.0	3.4	5.0	8.3	10.7	11.7	11.1	11.1	10.3	6.6	3.5	7.0
30cm 絕對低溫	0.3	0.6	0.5	0.7	5.1	7.4	8.6	7.3	7.8	6.0	3.1	0.5	0.3
30cm 絕對高溫	2.8	3.5	8.9	8.8	14.0	14.4	15.4	15.2	14.9	30.9	11.2	8.4	30.9

第二節、高山樹線調查與分析

經植被資料蒐集與地理高程計算，我們以地理資訊系統軟體呈現高山植被區塊與各項地文要素數值(圖 19、圖 20)，並藉此比較不同植被類型的區塊與地理環境間之關係。對比於「針葉林」與非針葉林的「草本植群與灌叢」兩種植被區塊，地形曲率、地形遮蔭、綜合地形指數、Beers 坡向指標四者無顯著差異，其餘地文要素則顯著不同(表 11)。在本研究樣區中，兩大類的植被區塊分布皆可見於海拔 2500 公尺左右，針葉林區塊最高至海拔 3500 公尺，草本植群與灌叢區塊可至 3600 公尺，以平均海拔高度來說針葉林區塊較低。針葉林區塊平均坡度約 68%，較草本植群與灌叢區塊 59%分布較陡。兩類型區塊在地形分布有所差異，草本植群與灌叢區塊多分佈於東北至西南坡向、山脊坡位處，並散佈地分於各種坡型；針葉林區塊則散布於各種坡向、山脊與坡谷坡位。地貌上兩者大致相同，除草本植群與灌叢區塊有較多的比率於台地地貌，而針葉林則在谷地山丘處。此分析結果大抵與植被學者所稱指之「森林多分布於南、北向坡山腹至山谷陰濕之處，草地在潮濕的南向坡山腹至陵線」之觀察結論相仿，但仍有不同之處。就本研究區資料顯示，針葉林在坡向上分布並未有明顯差異，且半數以上的區塊分布於山脊坡位、近四成的區塊位於山頂山脊之處。這一差異突顯了地文與環境因子在時間空間尺度上角色，如欲進行樹線推移帶內植物群聚與氣候環境機制之研究，在時間與空間尺度上須有更細緻的氣候與地文要素測量。

我們利用地文分析資料與植被類型區塊建立邏輯斯線性迴歸模型，以赤池訊息量準則逐步迴歸尋找貢獻較佳的因子。在後剔除五項要素後，海拔高度、百分比坡度、地形曲率、地形遮蔭、坡位與坡型等六項因子對於整體模型貢獻較佳(表 12)。地形曲率之對數勝算比(0.15)略高於海拔、百分比坡度與地形遮蔭(表 13)，如換算為勝算比(odds ratios)，意即地形曲率每增加一單位時，草本植群及灌叢區塊轉換為森林區塊的機率，增加 17%；而後三者增加 1%。在坡位要素中，對比於山脊坡位，除坡谷一項之外其餘坡位皆無差異，雖然上坡位與下坡位兩項係數值很大，但這與該類地形出現的比率過少有關。坡型要素中 CL、VC、VL、LV 類型不同於 CC，對數勝算比皆為負值，顯示該類坡型相對來說偏向生長為草本植群與灌叢區塊。上述的模型大致以量化方式呈現在較大的空間尺度下植被區塊如何反應不同的地文要素，唯該模型僅考慮地文要素，未來如欲探討樹線推移帶內植被類型的變動與機制，或將模型用以預測其他流域，則必須加入微棲地的氣候條件與生物性的因子修正之。

表 11 針葉林與非針葉林植被區塊之各種地文要素分佈表。

解釋變數	描述	針葉林	針闊葉灌叢及草本植群	Wilcoxon/Chi-squared test
海拔高度(m)	連續數值	2833 (2500 – 3522)	3025 (2505 – 3607)	W = 43864.5, p<0.01
百分比坡度(%)	連續數值	67.6 (7.4 – 175.2)	59.1 (1.8 – 220.6)	W = 24979.5, p<0.01
坡向	類別項目			X-squared = 27.3, df = 7, p<0.01
	北	10.8	3.9	
	東北	10.5	11.2	
	東	18.4	20.7	
	東南	16.7	19.0	
	南	12.7	15.1	
	西南	10.5	18.4	
	西	11.0	5.6	
	西北	9.3	6.1	
地形曲率	連續數值	0.28 (-6.0 – 7.7)	0.12 (-7.6 – 4.7)	W = 31197, p = 0.81
地形遮蔭	連續數值 (0–254)	140	126.6	W = 28655, p = 0.07947
Beers 坡向	連續數值 (0 - 2)	1.05	0.99	W = 29750, p = 0.2713
全天光空域	連續數值 (0 – 1)	0.89	0.92	W = 40187.5, p<0.01
綜合地形數值(CTI)	連續數值	5.2 (3.4 – 11.5)	5.4 (3.5 – 14.8)	W = 34299.5, p = 0.1063
坡位	類別項目 (%)			X-squared = 19.04, df = 4, p<0.01
	山脊處	56.4	72.1	
	上坡位	0.3	0.0	
	中坡位	2.3	0.6	
	下坡位	0.3	0.0	
	坡谷處	40.8	27.4	

表 11 針葉林與非針葉林植被區塊之各種地文要素分佈表(續)。

解釋變數	描述	針葉林 a	針闊葉灌叢及草本植群 b	Wald/Chi-squared test
坡型	類別項目(%)			X-squared = 38.56, df = 7, p<0.01
	Concave-Cocave	30.9	26.3	
	Concave-Convex	13.0	10.6	
	Concave-Linear	1.1	2.8	
	Convex-Concave	11.6	17.3	
	Convex-Convex	39.4	33.5	
	Convex-Linear	1.1	4.5	
	Linear-Concave	2.0	2.2	
	Linear-Convex	0.8	2.8	
	Linear-Linear	0.0	0.0	
地貌分類	類別項目(%)			X-squared = 32.34, df = 7, p<0.01
	峽谷(受溪流深度切蝕)	22.9	20.1	
	淺谷	1.4	1.1	
	河源	19.0	17.9	
	U 型河谷	2.3	2.8	
	平原	0.0	0.0	
	開闊邊坡	0.0	0.0	
	台地	4.5	10.6	
	谷地處山丘	10.5	2.2	
	山腰處山丘	1.4	0.0	
	山頂山脊	38.0	45.3	

表 12 逐步二元邏輯斯線性迴歸共變異分析模型。

逐步邏輯斯迴歸模型	AIC*
全模型解釋變數：海拔、地貌分類、全天光空域、Beers 坡向(受熱指標)、地形遮蔭、坡位、坡型、坡向、百分比坡度、地形曲率、綜合地形指標、地形濕度指標	611.52
地貌分類	607.17
Beers 坡向(受熱指標)	605.17
綜合地形指標	603.53
全天光空域	602.68
坡向	601.91

*移除該變相之後 AIC 之數值。

表 13 二元邏輯斯線性迴歸共變異分析模型係數表。

	對數勝算比 (log Odds Ratios)	Sig[1].	AIC	LRT	Sig[1].
海拔高度	0.00	***	659.73	60.038	***
百分比坡度	0.01	*	605.77	6.085	*
地形曲率	0.15	.	602.60	2.906	.
地形遮蔭	0.01	***	613.96	14.27	***
坡位			604.38	10.689	*
相對於山脊坡位：					
上坡位	13.32				
中坡位	1.39				
下坡位	11.78				
坡谷	0.70	**			
坡型			602.37	14.653	*
相對於 Concave-Conave(CC)：					
Concave-Convex(CV)	0.02				
Concave-Linear(CL)	-1.31	.			
Convex-Concave(VC)	-0.68	.			
Convex-Convex(VV)	-0.17				
Convex-Linear(CL)	-1.40	.			
Linear-Concave(LC)	0.27				
Linear-Convex(LV)	-1.77	*			

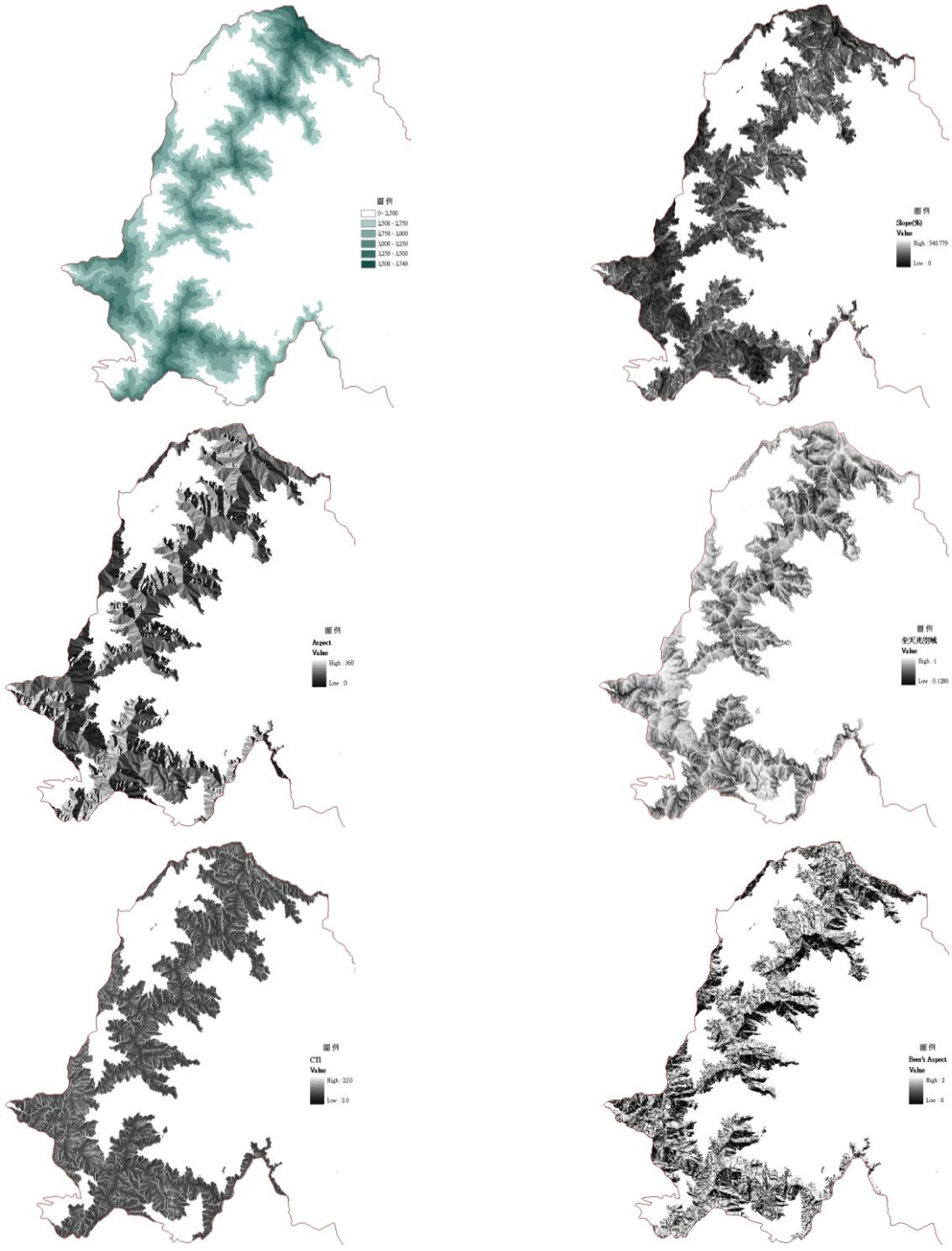

圖 19 地文分析要素圖(一)。上左:海拔高度、上右：百分比坡度、中左：坡向、中右：全天光空域、下左：綜合地形指數、下右：Beer’s Aspcet。

圖 20 地文分析要素圖(二)。上左:地形曲率、上右：地形遮蔭、中左：坡型、中右：坡位、下左：地貌分類。

第三節、植物繁殖物候調查

本年度二月開始，我們陸續記錄到 19 種樣樹之花朵及成熟或未成熟之果實（山櫻花、玉山杜鵑、霧社山櫻花、西施花、錐果櫟、昆欄樹、假長葉楠、阿里山榆、山枇杷、青葉楠、烏心石、狹葉櫟、杜英、阿里山千金榆、青剛櫟（圖 21）、石楠（圖 22）、太魯閣櫟、臭蘭樹、石扑）。在這些物種中，僅有山櫻花在六月之前完成開花、結果、及落果等階段（圖 A1-16）。其中玉山杜鵑、霧社山櫻花、阿里山榆、狹葉櫟等樹種因標定之個體數過少（<5 個個體），無法進行數量上之討論，忽略不談。

針對花朵功能性狀或傳粉模式相似的種類，我們進行配對並比較該配對物種間開花時間之重疊性。經過相關係數比較並使用隨機分佈檢測法後，有顯著時序重疊（$p<0.05$）之樹種配對如表 14。在蟲媒花物種配對及混合配對中，有 11 個配對展現顯著的時間重疊性。在風媒花的配對中則無顯著之開花時間重疊性。在種子傳播模式配對上，我們區分物種為依賴動物及不依賴動物兩大類。結實時間重疊性檢測顯示：依賴動物的配對少有重疊性的結實時間，以機械力量進行種子傳播或易遭動物掠食種以的配對則有多配對具有顯著的時序重疊性（表 15）。

表 14　開花時間重疊性配對檢測結果。＊表示該對物種的開花時間在今年內有顯著的重疊性；NS 表示開花時間重疊性不顯著。在表格下粗線三角形框內的配對為蟲媒花之物種；以灰底標示者則為風媒花物種之配對；未標示顏色者為混合傳粉模式之配對。

	山櫻花	山枇杷	石楠	西施花	杜英	烏心石	昆欄樹	青桐	石朴	白雞油	假長葉楠	青葉楠	阿里山千金榆	太魯閣櫟	青剛櫟
山櫻花															
山枇杷	NS														
石楠	NS	NS													
西施花	NS	NS	NS												
杜英	NS	NS	NS	NS											
烏心石	NS	NS	NS	NS	NS										
昆欄樹	NS	NS	NS	*	NS	NS									
青桐	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS								
石朴	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS							
白雞油	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS						
假長葉楠	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS					
青葉楠	*	NS	NS	*	NS	NS	*	NS	NS	NS	*				
阿里山千金榆	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
太魯閣櫟	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS		
青剛櫟	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	
錐果櫟	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

表 15　結實時間重疊性配對檢測結果。＊表示該對物種的結實時間在今年內有顯著的重疊性；NS 表示重疊性不顯著。在表格粗線三角形框內的配對物種主要依賴動物進行種子傳播；以灰底標示之物種配對則不依賴動物為種子進行傳播（但偶而會有動物為之傳播）；未標示顏色者為混合式種子傳播之配對。

	山櫻花	山枇杷	石楠	假長葉楠	青葉楠	西施花	杜英	烏心石	石扑	昆欄樹	錐果櫟	太魯閣櫟	青剛櫟	白雞油	青桐
山枇杷	NS														
石楠	NS	NS													
假長葉楠	NS	*	NS												
青葉楠	NS	NS	NS	NS											
西施花	NS	NS	NS	*	NS										
杜英	NS	NS	NS	NS	NS	NS									
烏心石	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS								
石扑	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS							
昆欄樹	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS						
錐果櫟	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*					
太魯閣櫟	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*				
青剛櫟	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*	*			
白雞油	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*	*	*		
青桐	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	
阿里山千金榆	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*	*	*	*	NS

在本年度調查中的樹種中，山櫻花所佔之比例最高（144 株），所含括的海拔亦為最廣（海拔 1000~2300 公尺）。這些山櫻花為公路局遍植於中橫沿線之園藝種。在開花期間可辨識出為吉野櫻或其他種類之櫻花者，則排除於以下之討論之外。本調查共標定 144 株山櫻花植株，在正式調查未開始前，山櫻花即已逐漸開放。成熟果實自五月開始出現，所有果實在一個月內完全消失（附錄一 圖 A1）。

圖 21 調查樣區內青剛櫟開花照片。

圖 22 調查樣區內石楠開花照片。

根據圖 23 所示，二月份（census 1）觀察所得的山櫻花開花比例由低海拔向高海拔遞減。三月份時（census 2）高海拔的山櫻花開花比例較之二月份有大幅提昇。至五月份時開花強度已降到近乎難以察得的程度。未熟果之發育和結實強度在海拔上的分布與開花的情形大致相同：高海拔的山櫻花結實有較晚的趨勢（圖 24）。果實發育至成熟果之前，曾有野生動物掠食及人為摘採的行為。因此對於成熟果期的評估難以客觀。

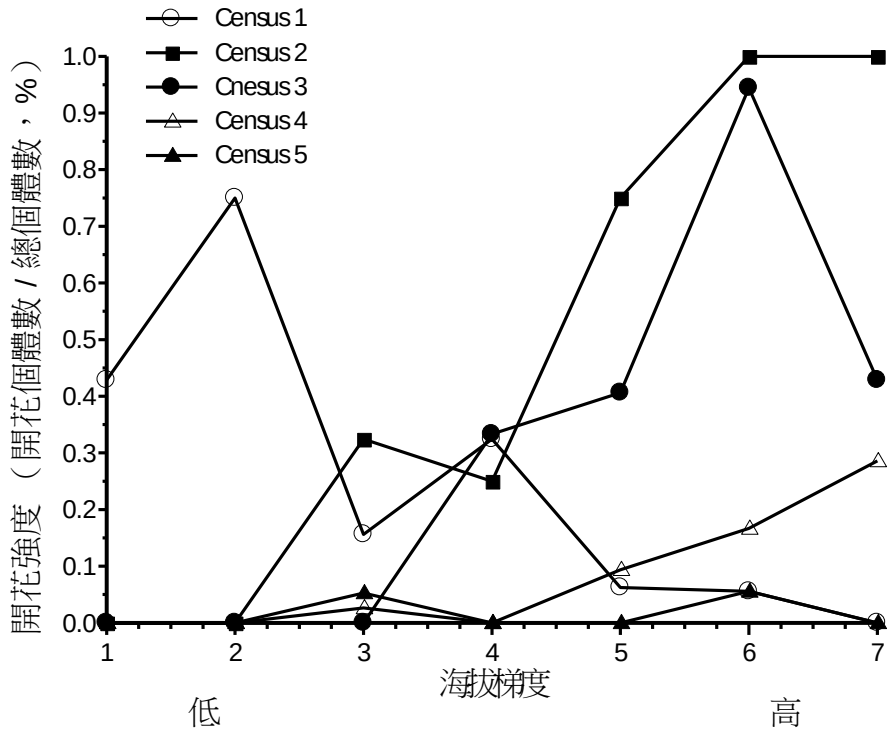

圖 23 山櫻花開花強度與海拔梯度之關係。

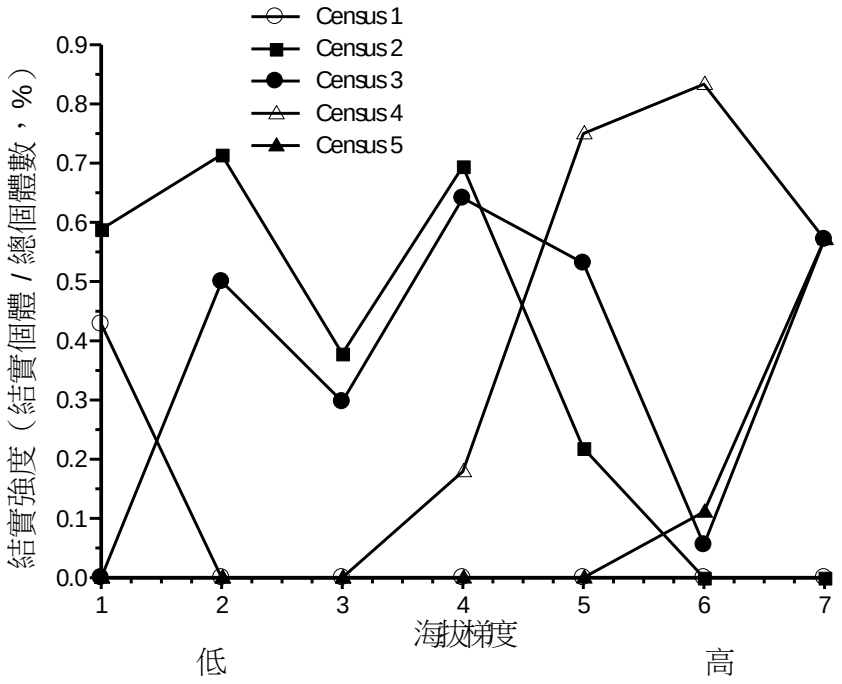

圖 24 山櫻花未熟果結實強度與海拔梯度之關係。

第四章 結論與建議

第一節 討論與結論

壹、氣候分析

立霧溪的氣候依 Köppen-Geiger 氣候分類法在低海拔小於 750m 屬於 Cfa 溫溼亞熱帶氣候，全年無旱季，夏季炎熱。海拔 750m~3100m 屬於 Cfb 暖溼溫帶氣候。樹線(tree line)以上，則屬於 ET 極地凍原氣候，因為緯度上並非極地，特別稱為亞熱帶高地氣候。沿著立霧溪年平均氣溫由海拔 100 公尺的 23℃，海拔 500 公尺的 20℃，海拔 1,000 公尺的 15℃，海拔 2,000 公尺的 12℃，海拔 2,500 公尺的 10℃，海拔 3,100 公尺的 7℃（小奇萊測站），到南湖圈谷 3,500 公尺以上為 4℃。氣溫垂直遞減率在低海拔地區為-0.6~0.7℃/100m，中海拔 1500m~2400m 為-0.4℃~0.3℃/100m，反應了立霧溪流域常年均有一深厚的雲霧帶存在。雲霧帶以上之高海拔空氣較乾燥，氣溫垂直遞減率則再增加為-0.54℃/100m 及-0.58℃/100m。氣溫垂直遞減率的季節性差異亦存在，不過在 1500~2400m 間其季節性變化不大，仍表示此一潮溼的雲霧帶全年均存在。雲霧帶亦反應在碧綠神木測站（2200m）的能見度記錄，全年平均每日有 3.77 小時的霧，冬季約 5~6 小時，夏季亦有 2~3 小時。

3,500 公尺之高山地區冬季 12~2 月間，有 3 個月月均溫都在 0℃以下，而 3,000 公尺左右也有 1 個月的月均溫在 0℃以下。極端最低溫在海拔 2,000 公尺處 12~2 月間的 3 個月曾出現 0℃以下的最低氣溫；海拔 2,500 公尺以上 11~3 月間的 5 個月出現 0℃以下的最低氣溫；海拔 3,000 公尺以上 11~4 月間的 6 個月亦曾出現 0℃以下的最低氣溫；3,500 公尺以上之高山地區，出現 0℃以下的最低氣溫的月數增至 7 個勻，更曾出現低至℃以下的氣溫，生物在冬季的生長條件苛。

貳、高山樹線的分析

在全球氣候變遷氣溫暖化的情境下，高山生態系中的樹線生態推移帶的動態變化便特別受到關注。回顧樹線相關研究顯示，樹線形成的原因與機制仍未有定論，但在格局上來說，生長季平均溫度的變化可能是影響全球樹線分布的重要指標，但以氣溫僅是生態與環境因子中的一個面向而已，實際樹線推移帶在森林生長、更新、地景鑲嵌等變化現象，與其尺度相符之氣候因子、地文要素等非生物因子，和物種間促進、競爭等生物因子相互作用有關。雖然台灣已累績許多與樹線相關的研究，但多數以植物群落的角度出發，尚未在區域尺度下以地文要素進行描述推移帶內針葉林與草本植群之差異。本研究以立霧溪流域為範圍，蒐集植物群落分佈資料，搭配地文要素分析，探究南湖至合歡山區之樹線推移帶內，針葉林與非針葉林的「草本植群與灌叢」兩種植被區塊分佈之格局差異。分析結果顯示，針葉林區塊分佈在平均海拔略低、坡度略陡、全天光空域略低於草本植群與灌叢之處，且針葉林不像草本植群與灌叢區塊，多分佈於東北至西南坡向、山脊坡位、台地與山頂山脊之處。研究中所建立之迴歸模型以海拔高度、百分比坡度、地形曲率、地形遮蔭、坡位與坡型等六項因子對於整體模型貢獻較佳，唯該模型僅考慮地文要素，未來欲探討樹線推移帶內植被類型的變動與機制，或將模型用以預測其他流域，則必須加入微棲地的氣候條件與生物性的因子修正之。

參、植物繁殖物候調查

儘管人類文明的發展與植物的花果生產息息相關，近代的植物生理學研究也有長足的進展，然而我們對與野生族群的瞭解仍屬有限，部分原因來自觀察上的誤導。由於近代人類文明高度發展的區域集中於近溫帶地區，該地區四季分明的氣候及大量育種並受到嚴格人為調控的作物影響了人們對植物繁殖現象的印

象。野生的族群較之作物植物，未受到嚴格的氣候、生物調控，加上野外環境中微氣候因子變異較大，即使在單一族群中，不同個體的表現亦可能有所不同。這些微氣候的變異與大尺度氣候變化（例如全球氣候變遷）的交互作用，究竟會對野生植物族群造成何種影響，在缺乏基礎記錄的狀況下，實難預測。

我們在未及一年的物候初窺中，發現植物的開花及結實物候與其花朵特徵及果實傳播特徵有明顯的相關性（配對後之時序重疊檢測）。這樣的相關性可能由動物做為媒介，驅動了植物物種在繁殖物候上的演化。由於擁有共同的傳粉者（風力），風媒花似有開花時間上的分化，以避免花粉的污染；蟲媒花可能因為擁有比較專一的傳粉者，免除了花粉污染的憂慮，並提高傳粉效率，而未發展出明顯分歧的花期。從種子傳播的角度來看，依賴動物傳播的物種往往提供較多的回饋（果肉），因此以分歧的果期來降低動物的餵食飽和現象，也提高動物來訪的頻率；經常遭受動物掠食種子的物種則應盡量同步結果，以降低掠食率。我們的分析似乎印證了這些推論，也暗示了動植物之間緊密的交互關係。

不同物種對於氣候變化的反應及敏感度不同，全球變遷可能使物種的時序變化產生變動，使的原本的同步性或時序分化產生變動。即使僅是數天的差異，也可能使原本的交互關係減弱，甚至錯失。這些變動如若發生，將嚴重影響植物的繁殖成功率。其後果不僅會影響植物社會的變動，最終將會影響其他生存於當地的動物及微生物族群，而與之為鄰的人類社會也將無可避免的受到影響。因此這些資訊的收集，對於動植物的保育工作將至關重要。

第二節 建議

建議一

持續維護太魯閣國家公園內氣象站(立即可行建議)

主辦單位：太魯閣國家公園

協辦單位：

氣象因子是影響生態系許多生態過程的重要因子。太魯閣國家公園內的立霧溪流域涵蓋峽谷、雲霧帶及合歡山高海拔等地區地形複雜，局部氣候變化甚大。本案利用太魯閣國家公園建置的兩個固定氣象站（碧綠神木站、蓮花池站）與中央氣象局原有 500m 以下低海拔的新城、富世及天祥等氣象站，建立立霧溪流域由平地至高山較完整的氣象監測系統，太魯閣國家公園之氣象站若能長期持續維持，將可補足過去台灣山地氣候分析中的不確定性。此外，氣象資料提供之山地氣象資料，使經營管理者能充分掌握天候的變化，有助於作出即時的應變措施。

建議二

舉辦氣候變遷與高山生態系論壇(中長期建議)

主辦機關：太魯閣國家公園管理處

協辦機關：相關國家公園管理處、林務局、林試所、進行高山生態研究之學校團體

氣候變遷所影響的尺度與層級廣泛，有賴誇區域與類型相互整合，舉辦論壇可使不同生態學門間的研究者有對談交流機會，藉此凝聚並整合不同研究主題，

有助於國家公園管理處在經營管理策略之制定。

建議三

監測高山樹線推移帶地景動態 (中長期建議)

主辦機關：太魯閣國家公園管理處

協辦機關：

目前全球研究顯示不同地區的高山樹線動態，各有其影響因子與機制，而定期持續監測推移帶內的森林與草本族群的動態、更新情形與地景變化，是觀測氣候變遷對生態系影響的重要方法。對於太魯閣國家公園內永久樣區的定時複查，可以了解群聚動態；定點種子網的設置與發芽試驗，可指引森林更新情形；定點、定角度的照片拍攝亦是監測地景變化方式之一。

建議四

藉助國外經驗結合跨單位與部門合作，持續長期生態觀察研究(中長期建議)

主辦機關：太魯閣國家公園管理處

協辦機關：

儘管我們簡短的觀察帶來一些有趣的結果，但是對於繁殖物候的同步性及分化現象的年間變化，以及植物繁殖物候與動物的關係，需要長期的觀察來確認。植物繁殖物候研究工作是漫長的過程，單憑一個研究人員的興趣，難以支持。歐美國家早有公民觀察員的 program，國家公園的參與，為這樣的長期監測帶來希望。我們建議，可以利用國外的經驗，評估公務單位、學界、志工單位等三向合

作的可能性及精確性。台灣目前並無長期、精細而精確的物候觀察資料，對於未來預測植物族群及群落動向的工作而言，是重要卻失落的一環。如此長期而基礎的工作，只有仰賴穩定的國家公園系統，才有持續的機會。

附錄一 十六種樹種之開花與結實時間序列圖

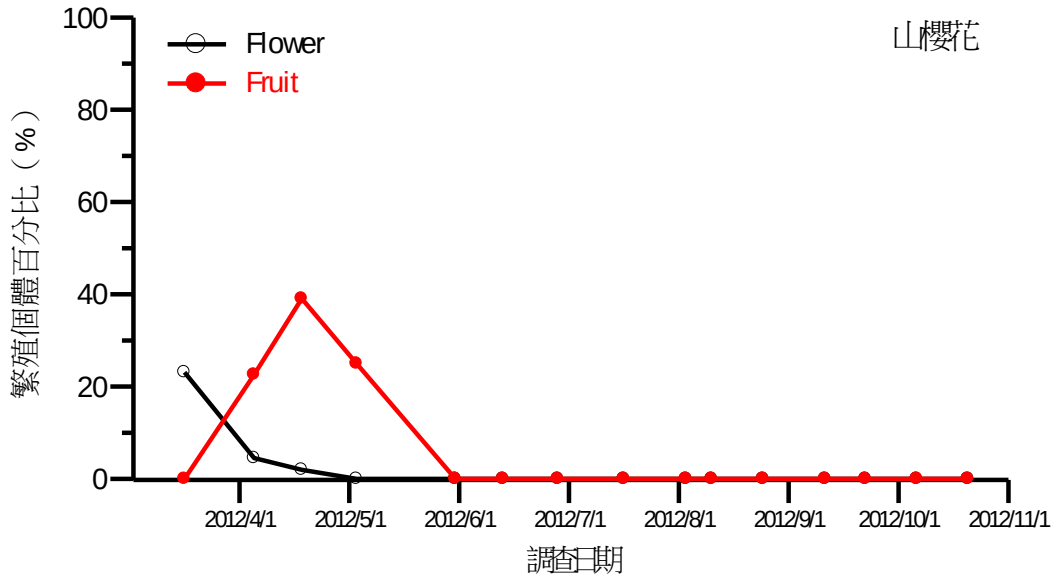

圖 A1　山櫻花的花及成熟果之生產個體比例。

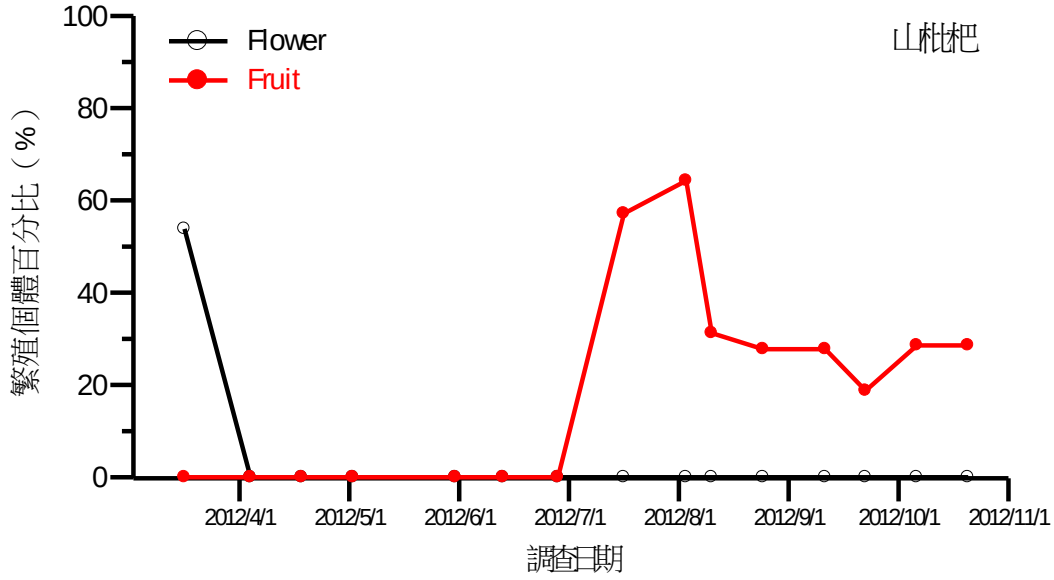

圖 A2　山枇杷的花及成熟果之生產個體比例。

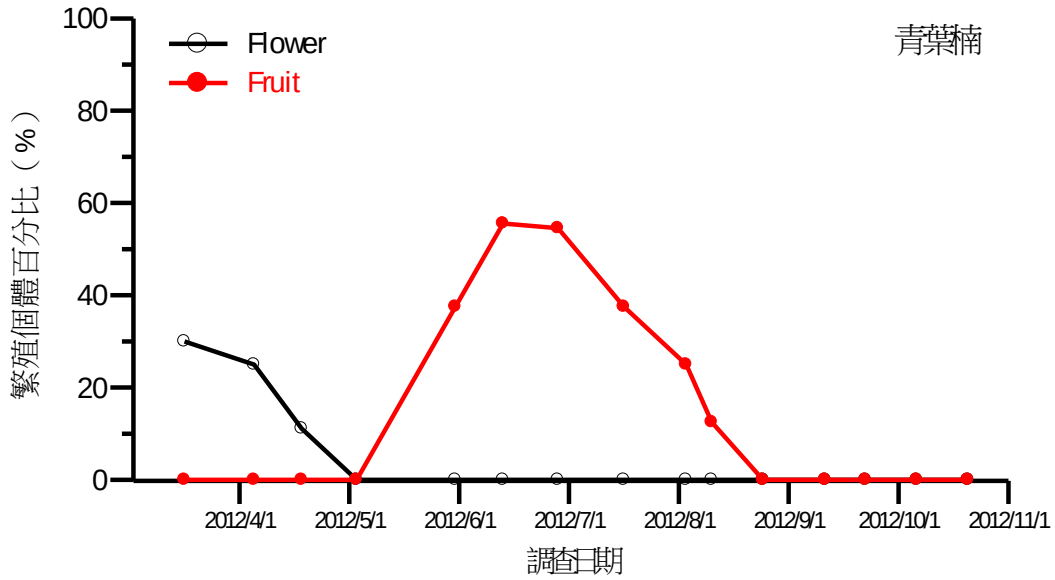

圖 A3　青葉楠的花及成熟果之生產個體比例。

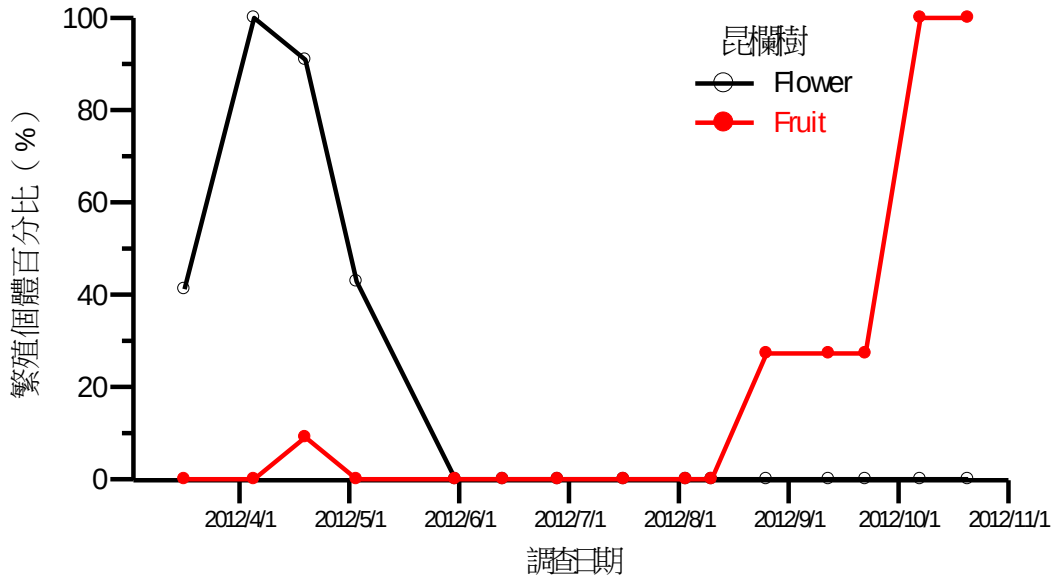

圖 A4　昆欄樹的花及成熟果之生產個體比例。

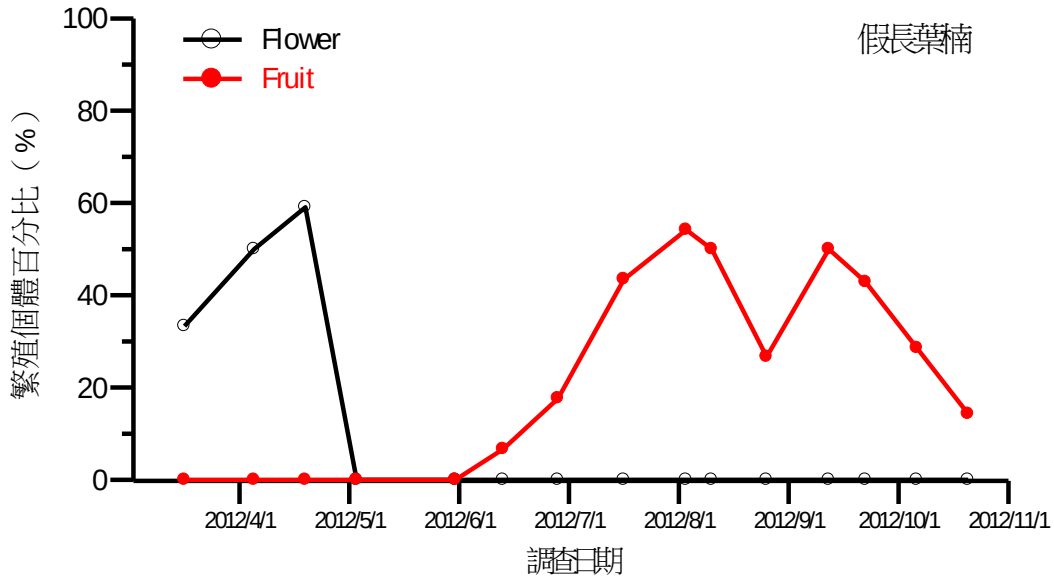

圖 A5　假長葉楠的花及成熟果之生產個體比例。

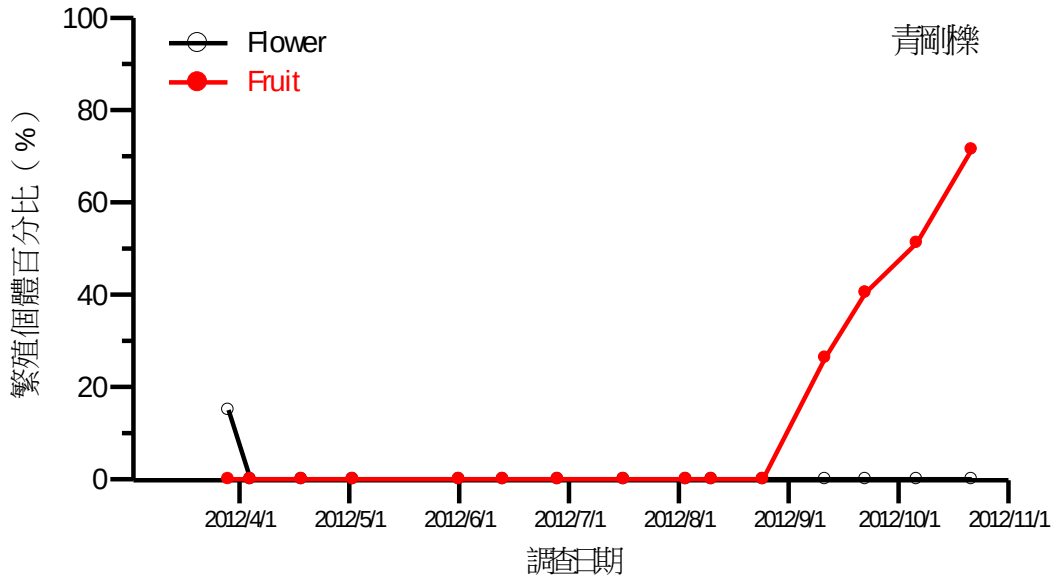

圖 A6　青剛櫟的花及成熟果之生產個體比例。

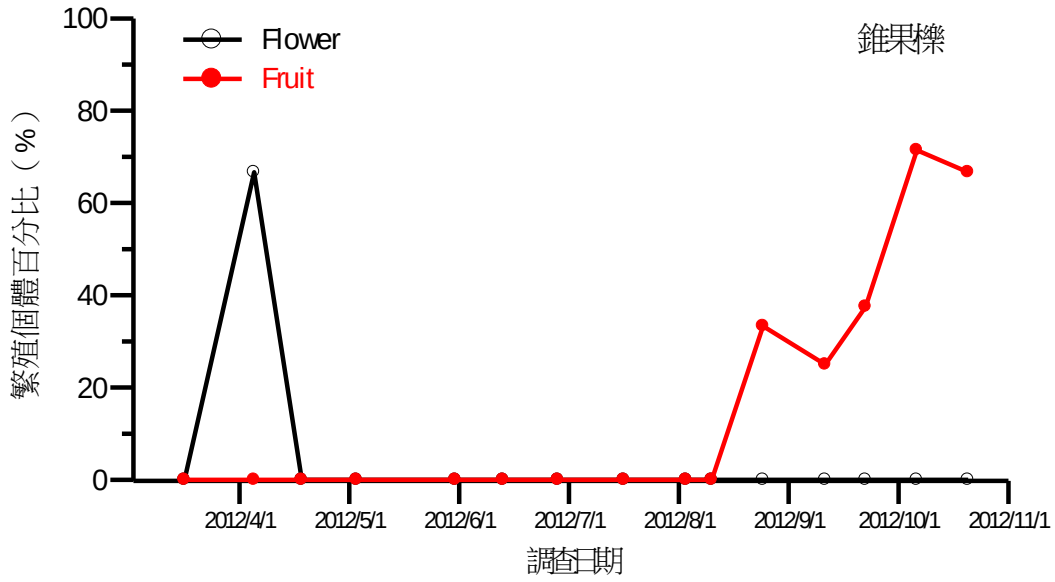

圖 A7　錐果櫟的花及成熟果之生產個體比例。

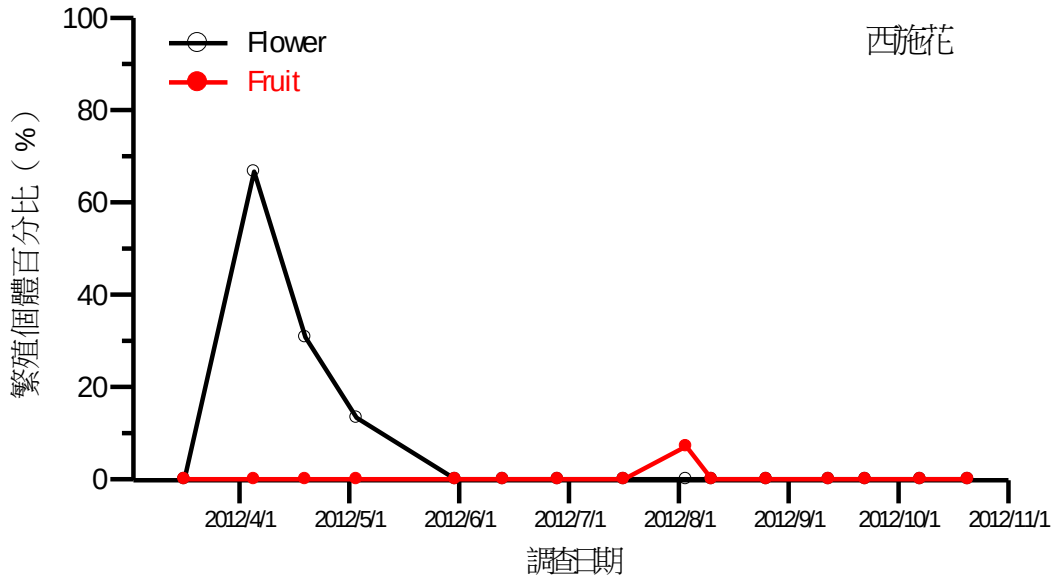

圖 A8　西施花的花及成熟果之生產個體比例。

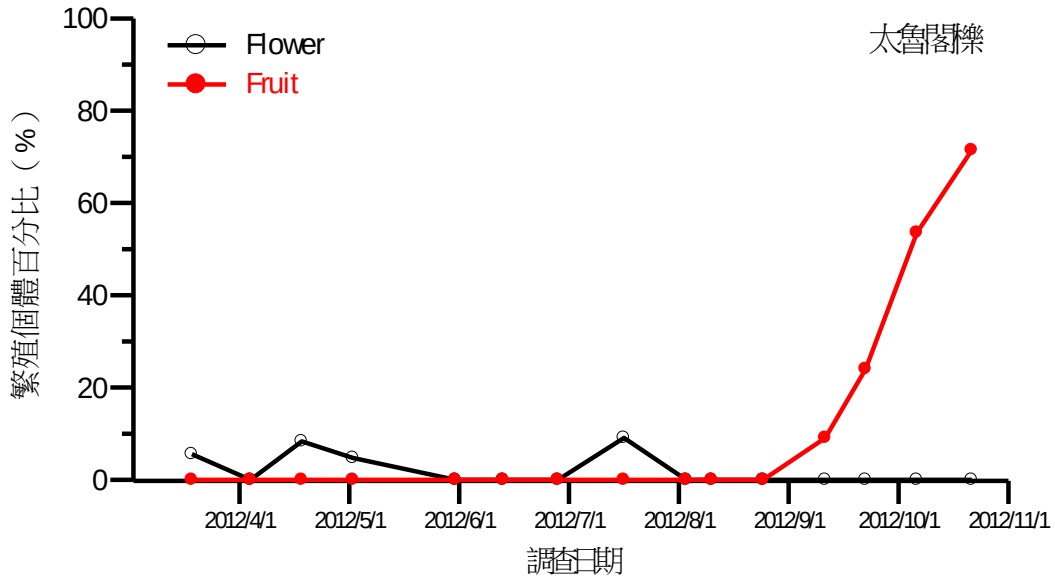

圖 A9　太魯閣櫟的花及成熟果之生產個體比例。

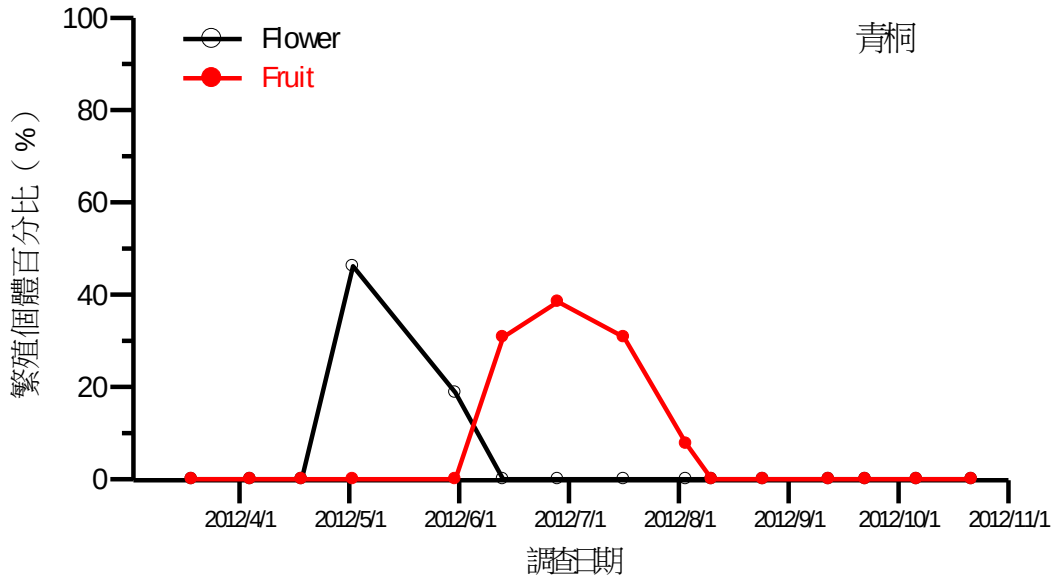

圖 A10　青桐的花及成熟果之生產個體比例。

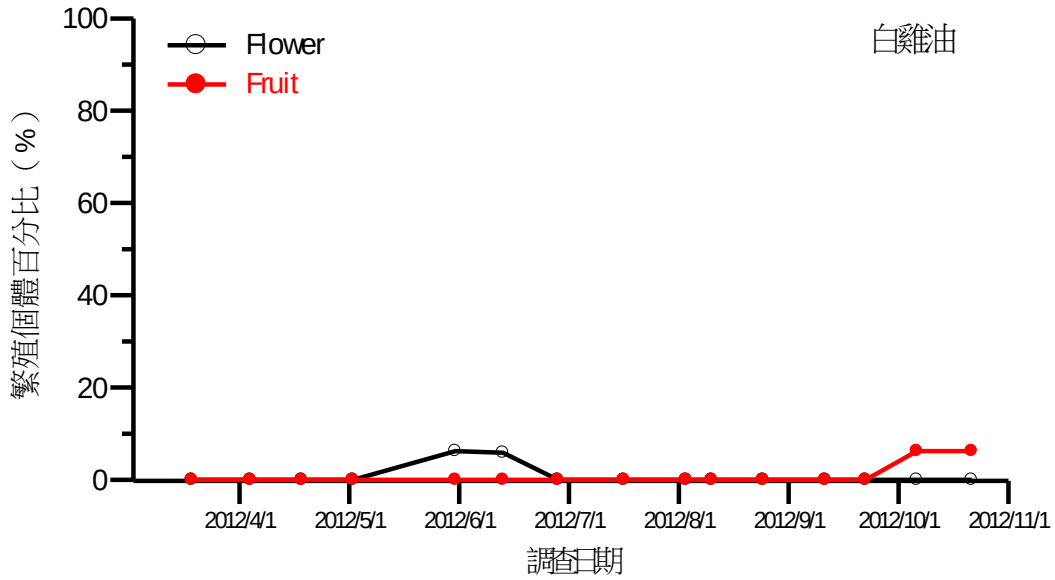

圖 A11　白雞油的花及成熟果之生產個體比例。

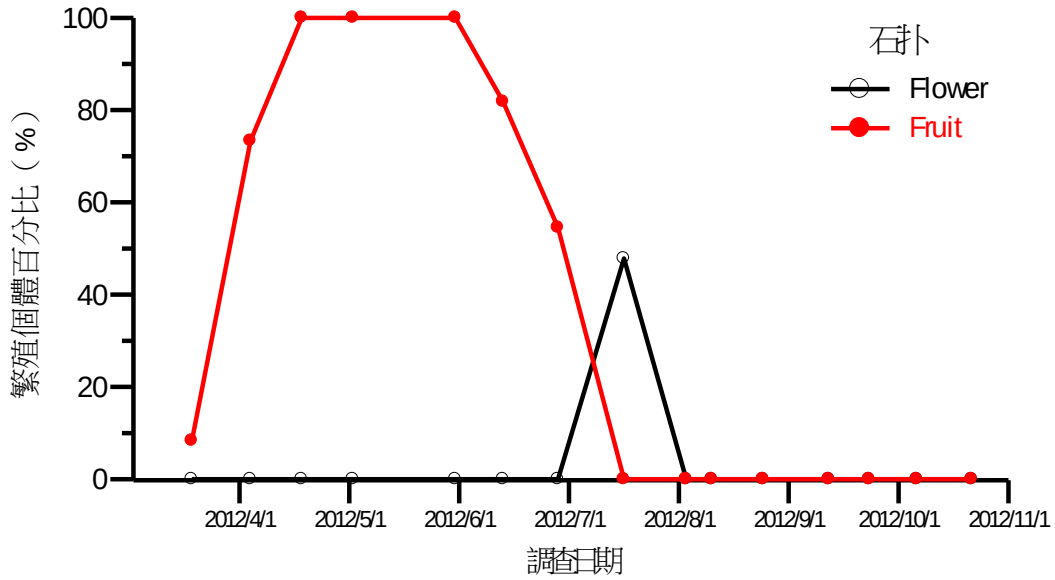

圖 A12　石扑的花及成熟果之生產個體比例。

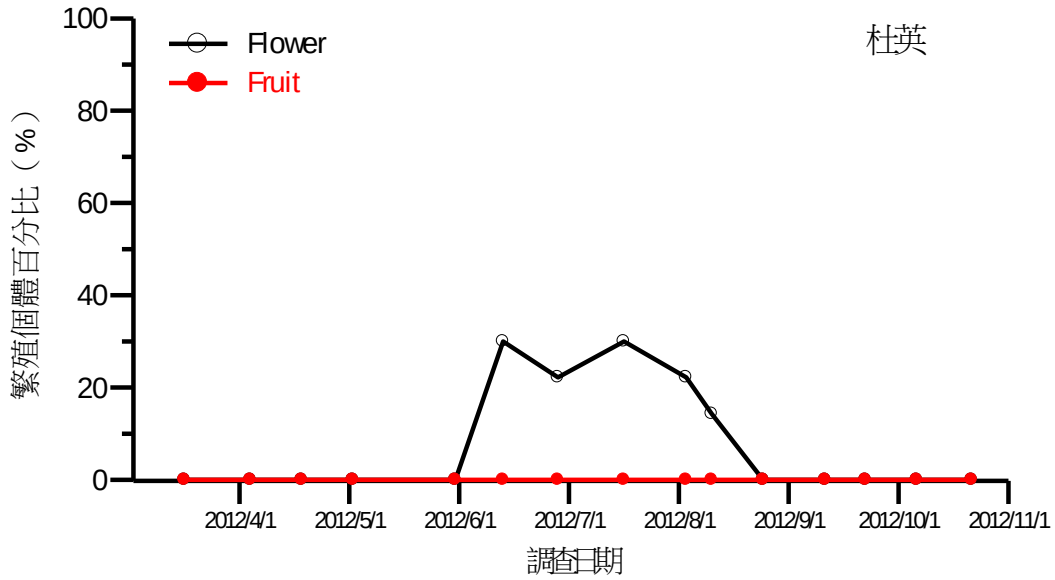

圖 A13　杜英的花及成熟果之生產個體比例。

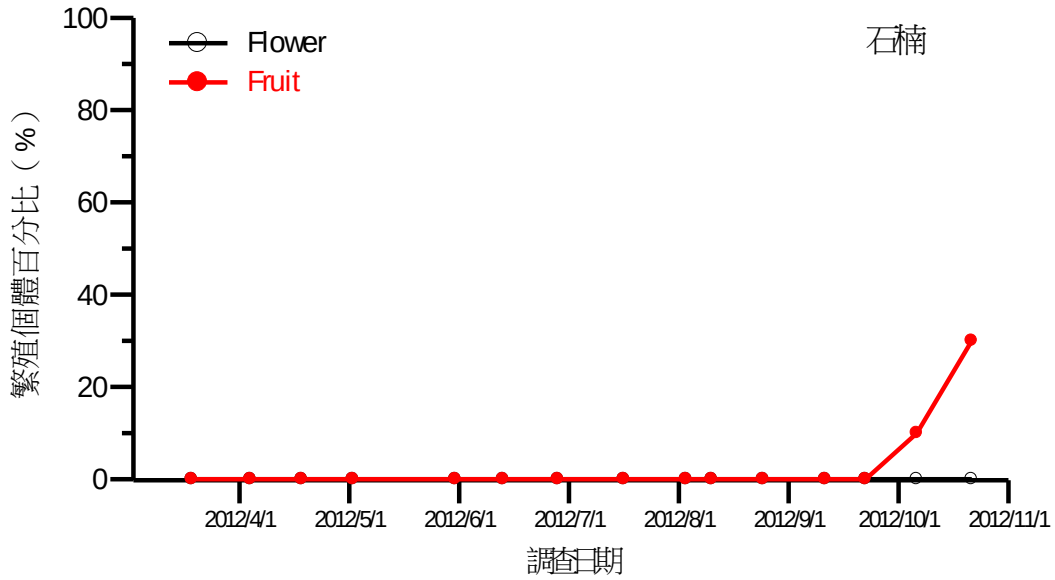

圖 A14　石楠的花及成熟果之生產個體比例。

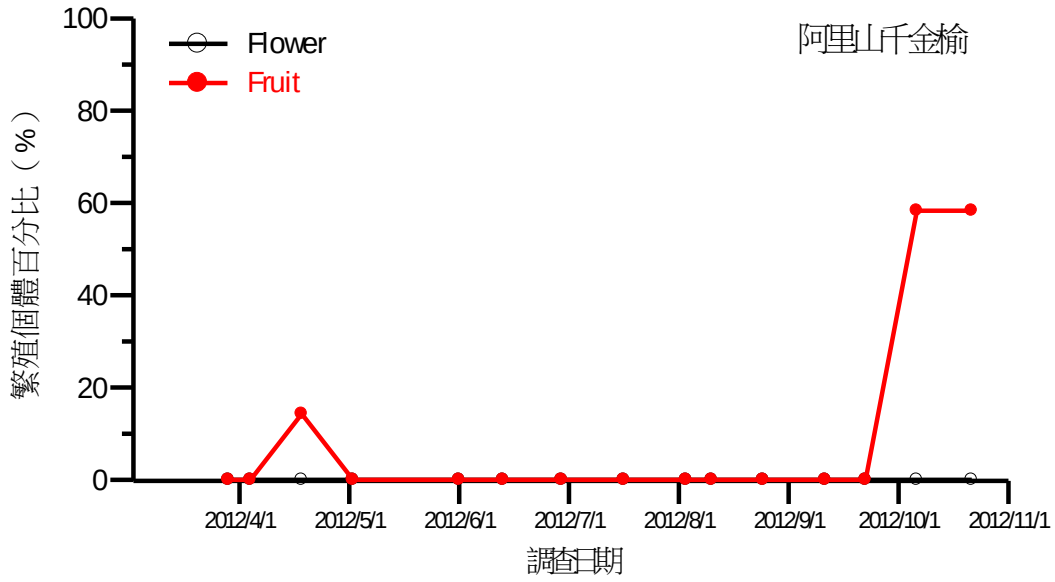

圖 A15　阿里山千金榆的花及成熟果之生產個體比例。

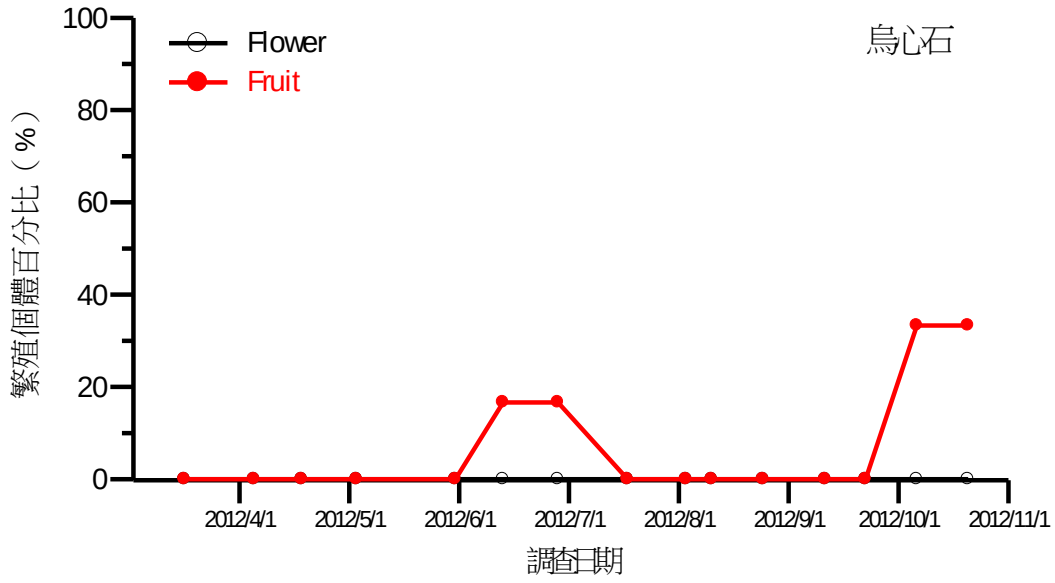

圖 A16　烏心石的花及成熟果之生產個體比例。

附錄二 「太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫（一）」期中簡報會議紀錄

『太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫(一)』

期中簡報會議紀錄

一、時間：101年7月5日上午9時30分

二、地點：本處大會議室

三、主持人：曾處長偉宏　　記錄：高 佽

四、與會人員：如簽到簿

五、主辦課室報告：依合約第二條規定應於101年6月25日前提出期中報告書，本案國立東華大學於101年6月19日送達，符合合約規定，並出席本處排定今日之期中審查會議。

六、討論（略）：

七、結論：

1. 有關101年度各委託（研究）辦理計畫簡報電子檔，會後保存於本處公用區U:\業務資料區\(04-簡報區)\保育課\101\期中簡報資料夾中，提供本處各業務課室經營管理參考運用。
2. 本案相關資料請研究團隊於年底結案時，提供較完整年度之氣象資料與各指標區域之物候相關資料，供本處經營管理規劃與各項保育研究調查計畫參考佐證依據。
3. 本案期中簡報同意通過，請依合約規定辦理第二期款款項請領程序作業，並持續辦理後續調查工作。

附錄三 「太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫（一）」期末簡報會議紀錄

『太魯閣國家公園長期生態物候監測計畫(一)』期末簡報會議紀錄

一、時間：101 年 12 月 4 日下午 15 時 10 分

二、地點：本處大會議室

三、主持人：曾處長偉宏　　記錄：高 佽

四、與會人員：如簽到簿

五、主辦課室報告：依合約第二條規定應於 101 年 11 月 25 日前提出期中報告書，本案國立東華大學於 101 年 11 月 22 日送達，符合合約規定，並出席本處排定今日之期末審查會議。

六、討論（略）：

七、結論：

1. 有關 101 年度各委託（研究）辦理計畫簡報電子檔，會後保存於本處公用區 U:\業務資料區\(04-簡報區)\保育課\101\期末簡報 資料夾中，提供本處各業務課室經營管理參考運用。
2. 本案研究團隊調查年度之氣象資料與各指標區域之關注物候相關資料，呈現生態系中氣候、植物與動物間微妙之聯結，初步成果可供本處面對環境變遷之經營管理規劃與未來各項保育研究調查計畫參考依據。
3. 本案期末簡報原則通過，請依合約規定辦理第三期款款項請領程序作業，並辦理後續結案事宜。

參考書目

王慈憶、陳朝圳 (2009) 全球暖化對台灣冷杉屬植群之時空變化研究。98年度中華林學會研討會，中興大學。

王相華、劉家如、林則桐、陳萬賓、李孟諭、蘇聲欣 (2011) 福山試驗林樟科及殼斗科植物的開花結實物候。中華林學季刊第44卷第3期。第349-362頁。

古心蘭 (1999) 合歡山台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，花蓮。

吉野正敏 (1986) 小氣候，地人書館，日本。

林務局 (2009) 台灣現生天然植群圖集，台灣生物多樣性保育學會編印。

夏禹九、王文賢 (1985) 坡地日輻射潛能的計算，台灣省林業試驗所試驗簡報，No.1。

夏禹九、黃正良、王立志 (1989) 太魯閣國家公園氣候調查及移動試測站規劃，內政部營建署太魯閣國家公園管理處。

夏禹九 (2011) 代表性生態系經營管理之峽谷生態系長期生態研究網計畫(二)—局部氣象監測及資料庫建置研究報告。太魯閣國家公園。

高文靜 (2010) 合歡山區亞高山針葉樹台灣冷杉林的族群結構與空間分布之研究，靜宜大學生態系碩士論文。

莊貴瑜 (1998) 合歡山台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，花蓮。

黃美秀、賴秀芬、林冠甫、葉慶龍 (2009) 玉山國家公園台灣黑熊重要棲息地—大分地區之植群生態及森林更新，國家公園學報第19卷第1期，第62-82頁。

楊國禎、林笈克 (2011) 合歡山台灣冷杉永久樣區地被植物組成與長期動態變化之研究。太魯閣國家公園管理處委託研究報告，國科會GRB計畫編號:100301020400G1001。

賴國祥(1992) 台灣亞高山針葉樹林與草生地間推移帶動態結構之探討。中興大學植物學研究所博士論文。

Aono, Y. and K. Kazui. 2008. phenological data series of cheery tree flowering in Kyoto, Japan, and its application to reconstruction of springtime temperatures since the 9th century. International Journal of Climatology. 28:905-914.

Barry, R. G. (2008) Mountain Weather and Climate. 3rd ed. CambridgeUniv Press, U.K.

Beers, T.W., Dress, P.E., and Wensel, L.C. 1996. Aspect transformation in site productivity research. J. For. 64:961

Brock, F. V. and Richardson, S. J. (2001) Meteorological Measurement Systems. Oxford Univ Press, U.K.

Carol K. Augspurger. 1981. Rperoductive synchrony of a tropical shrub: experimental studies on effects of pollinators and seed predators in Hybanthus prunifolius (Violaceae). 1981. Ecology. 62 (3): 775-788.

Curran, L. M. and Leighton, M (2000) Vertebrate responses to spatiotemporal variation in seed production of mast-fruiting Dipterocarpaceae. Ecological monographs. 70: 1018.

Daniel H. Janzen. 1974. Tropical blackwater rivers, animals, and mast fruiting by the dipterocarpaceae. Biotropica, 6 (2): 69-103.

DeFelic, T.P. (1998) An Introduction to Meteorological Instrumentation and Measurement. Printice Hall, USA.

Dilts (2009) Topography Tools for ArcGIS. Available on line, URL: http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15996%20.

ESRI (2009) ArcMap™ 9.3 Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

Geiger, R. (1965) The Climate Near the Ground. Cambridge, U.K.

Herrera, C.M., P. Jordano, J. Guitian, A. Traveset. 1998. Annual variability in seed production by woody plants and the masting concept: Reassessment of principles and relationship to pollination and seed dispersal. American Naturalist, 152 (4): 576-594.

Holtmeier, F-K and Broll G. (2005) Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. Global Ecology and Biogeography. 14:395-410.

Holtmeier, F-K and Broll G. (2007) Treeline advance – driving processes and adverse factors. Landscape Online. 1:1-33.

Jenness, J. (2006) Topographic Position Index (TPI). Available on line URL: http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm.

Kebdall, W. (2001) Using models to facilitate complex decisions. Ch.10 In: T.M. Shenk and A.B. Franklin eds., Modeling in Natural Resource Management, pp. 147-170, Island Press, Washington D.C., U.S.

Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf and Rube, F. (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift. 15:259-263.

Körner, C. (1998) A re-assessment of high elevation Treeline positions and their explanation. Oceologia, 115:445-459.

Körner, C. and Paulsen, J. (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography. 31:713-732.

Körner, C. (2007) The use of altitude in ecological research. Trends in Ecology and Evolution. 22:569-574.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A. (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 4:439-473.

Primack, R.B., H. Higuchi, A. Miller-Rushing. 2009. The impact of climate chinage on cherry trees and other species in Japan. Biological Conservation. 142: 1943-1949.

R Development Core Team (2012). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL http://www.R-project.org/.

Schoeneberger, P.J. and Wysocki, D.A. (1996) Geomorphic descriptors for landforms and geomorphic components: effective models and weaknesses. Agronomy abstracts, American Society of Agronomy Annual Meetings, 1996, Indianapolis, IN.

Shi, P., Körner, C. and Hoch, G. (2008) A test of the growth-limitation theory for alpine tree line formation in evergreen and deciduous taxa of the eastern Himalayas. Functional Ecology. 22(2):213-220.

Smith, W., Germino, M.J., Hancock, T.E. and Johnson, D.M. (2003) Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. 23:110112.

Subedi, M.R. (2009) Climate change and its potential effects on tree line position: an introduction and analysis. The Greenery- A Journal of Environment and Biodiverisity. 7(1).

Su, H.J. (1984a) Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan(I) Analysis of the variations in climatic factors. Quarterly Journal of Chinese Forestry. 17(3):1-14.

Su, H.J. (1984b) studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan(II) Altitudinal vegetation zones in relation to temperature gradient. Quarterly Journal of Chinese Forestry. 17(4):57-73.

Yasuda, M, J. Matsumoto, N. Osada, S. Ichikawa, N. Kachi, M. Tani, T. Okuda, A. Furukawa, A. Nik and N. Manokaran. 1999. The mechanism of general flowering in Dipterocarpaceae in Malay Peninsula. Journal of Tropical Ecology. 15: 437-499.

Yoshino, M.M. (1975) Climate in a Small Area: An Introduction to Local Climate, Univ. of Tokyo Press, Jap

Wood, S.N. (2011) Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. Journal of the Royal Statistical Society (B) 73(1):3-36.