

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

School of Forestry and Resource Conservation

College of BioResources and Agriculture

National Taiwan University

Master's Thesis

以植物功能性狀評估氣候變遷對高山植群造成之影響

— 以大水窟山及雪山山域為例

Impact Assessment of Climate Change on Alpine Plant

Communities Based on Plant Functional Traits — A Case

Study of Mountain Dashueiku and Hsuehshan Areas

黃奕儒

I-Ju Huang

指導教授:林政道 博士

Advisor: Cheng-Tao Lin, Ph.D

中華民國 一一四 年 七 月

July 2025



謝誌

「出發其實就是成功了，因為你勇敢的跨出了你生命的邊界」——詹偉雄

寫出碩士論文就跟攀登一座困難的山一樣，一路上會遭遇許多難題、挫折，也會得到許多人的幫助，更重要的是，從中使自己進步，變得更好，結果是什麼不重要，旅途中的風景才是真正的意義，出發，就是成功了。

完成這本碩士論文，首先要感謝的是政道老師和礎嘉學長，會進來讀碩士也是各種機緣巧合，感謝政道老師給我這個機會加入植群生態研究室，並且在出野外調查和撰寫論文時給予非常大的幫助與鼓勵，在 2024 翠池三叉山調查，扭傷腳時其實壓力很大，很感謝政道老師冒雨在稜線上處理好讓我下山的事情，也一直安撫我叫我好好回去休息。也非常感謝礎嘉學長陪著我們上山調查，學長總是很耐心的開導我，也常常給予我許多思考的方向和技術救援，並不厭其煩地提醒我各種事情，沒有政道老師和礎嘉學長，我不可能寫得出這本論文。

接著想感謝研究室的夥伴，謝謝榮田大哥，總是在各方面幫助我很多，也在我碩士論文最後卡住的時候推了我一把，讓我順利把初稿寫完。謝謝慎雯、立越、亞碩、群庭、蘇昱、榮田、景淮、又綾、晏如在我擔任助教和上山調查的時候給我的幫助，在山上花大量的時間調查還常常淋雨，真的非常辛苦。謝謝學弟妹宥任、聿軒、昭穎、采潔、金裕昌讓我在研究室的日常不那麼枯燥乏味。

在研究室以外，謝謝澤禹、念恩、佳榮幾個摯友在這兩年給我的許多支持與建議。謝謝同甘共苦的幾個研究生成嘉、仲緯、美吟，希望大家都可以順利的畢業。謝謝阿盧、龍誼、忠楷，沒有你們我不知道怎麼撐過這兩年，我會繼續努力成為一個厲害的 bass 手。感謝天母角。藍色的各位，大家都給了我很多的支持與啤酒讓我有靈感順利寫出論文。謝謝中興生態研究室以前的夥伴，我敬愛的學長姐和同學柏安哥、阿之哥、佩樺、嘉言、芷寧、姿宜、盈安、育霖、家秀、承翰、雋義、高山鄭、舒廷，是你們帶著我走入高山生態的世界。謝謝小曾老師與王老師擔任我的口試委員，給我許多建議與指導。謝謝所有參與 GLORIA 計畫的朋友，也謝謝林保署、雪霸國家



公園提供的協助。謝謝我的家人，沒有阻止我去做我喜歡的事情，我才能順利完成這本論文。

在兩年碩士生涯中學到一件最重要的事情，無關任何知識或技術，而是對得起自己，對事情盡力而為。我要感謝我自己從抗拒，到願意盡力去把所有該做的事情做好，只要盡力了，無愧於心，晚上就可以安心睡覺，我想這就是我學到所謂洪申豪所說的“生活的答案”，也許還有許多幫助過我但我沒有提到的人，我在此由衷的感謝所有這些幫助過我的人，最後，將這本論文獻給所有關心我、愛我的人。

黃奕儒 謹致

國立台灣大學森林環境暨資源學系

2025 年 7 月 24 日



摘要

氣候變遷導致高山地區升溫及極端乾旱事件增加，對高山生態系統造成植群生產力下降及特有物種減少等負面影響。高山植物因應逆境演化出如葉片增厚、具毛葉表及發達地下根莖等功能性狀。本研究假設，隨乾旱逆境加劇，具降低水分散失及地下存活策略的物種在高山植群中將增加。

本研究分析 2008 至 2024 年間臺灣大水窟與雪山區域的監測樣區之植群資料，探討氣候變遷對高山植群組成結構的改變的影響。此外透過文獻建構臺灣高山植物功能性狀資料庫結合植物分布、氣候區位和 4 次調查的物種豐度數據，使用典型對應分析並建立植物抗性評分系統以評估氣候變遷對於高山植群功能群之影響。結果顯示兩個區域均經歷顯著升溫（每年 $0.042-0.066^{\circ}\text{C}$ ）及 2019 年後的持續水分不足。草本植物可分為 4 個功能群，木本植物分為 2 群，對乾旱的反應各異。葉緣反捲、葉質和葉表毛狀體等功能性狀與年均溫、年降水量、季節降水標準差等特定氣候因子存在相關性。研究證實具有耐旱及耐熱功能性狀的物種在面對乾旱時豐度波動較小，而生長在低溫區位的木本物種，如玉山杜鵑 (*Rhododendron pseudochrysanthum*) 則大量枯死。本研究顯示植物功能性狀是預測高山植群對氣候變遷反應的有效指標，強調以功能群為單位反映植群結構動態的重要性，可為高山生態系保育提供科學依據。

關鍵字：氣候變遷、高海拔山區、植物功能性狀、逆境、乾旱、全球高山觀測研究

計畫 (GLORIA)



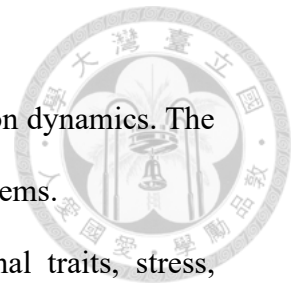
Abstract

Climate change has led to rising temperatures and increased extreme drought events in alpine regions, resulting in negative impacts such as reduced plant productivity and a decline in endemic species. Alpine plants have evolved functional traits to cope with harsh conditions, such as thicker leaves, hairy leaf surfaces, and well-developed underground rhizomes. This study hypothesizes that as drought stress intensifies, species with traits that reduce water loss and enhance underground survival will become more prevalent in alpine plant communities.

This research analyzes vegetation data from monitoring plots in the Dashueiku and Hsuehshan regions of Taiwan, collected between 2008 and 2024, to investigate the effects of climate change on the composition and structure of alpine plant communities. In addition, a database of functional traits of Taiwan's alpine plants was constructed through literature review, and combined with data on plant distributions, climatic niches, and species abundance from four surveys. Canonical correspondence analysis and a plant resistance scoring system were used to assess the impact of climate change on functional groups within alpine plant communities. The results indicate that both regions have experienced significant warming ($0.042\text{--}0.066^{\circ}\text{C}$ per year) and persistent water deficits since 2019. Herbaceous plants were classified into four functional groups and woody plants into two, each responding differently to drought. Traits such as leaf margin curling, leaf texture, and leaf pubescence were found to correlate with specific climatic factors, including mean annual temperature, annual precipitation, and the standard deviation of seasonal precipitation. The study confirms that species with drought- and heat-resistant traits exhibited less fluctuation in abundance during drought events, while woody species occupying colder niches (e.g., *Rhododendron pseudochrysanthum*) experienced significant dieback. This research demonstrates that plant functional traits are effective indicators for predicting alpine plant community responses to climate change, and

highlights the importance of using functional groups to reflect vegetation dynamics. The findings provide a scientific basis for the conservation of alpine ecosystems.

Keywords: climate change, high-elevation mountains, plant functional traits, stress, drought, Global Observation Research Initiative in Alpine Environments (GLORIA)





目次

謝誌	i
摘要	iii
Abstract	iv
目次	vi
表次	viii
圖次	ix
第一章、前言	1
第二章、文獻回顧	4
一、 氣候變遷及對於高山植群之影響	4
二、 適應高山環境之植物功能性狀	5
第三章、材料與方法	10
一、 研究區域選擇與位置	10
二、 GLORIA 多峰調查法 (multi summit approach) 區域樣區設置	
11	
三、 GLORIA 區域樣區調查方法	12
四、 氣象資料	13
五、 分析方法	13
(一) 植群與生物多樣性指數分析	13
(二) 植物功能性狀表	13
(三) 物種抗性評分	14
(四) 物種氣候區位	15
第四章、結果與討論	16
一、 氣候變遷趨勢	16
二、 植群組成變化	17



三、	物種功能性狀表	19
四、	以典型對應分析分群	20
五、	物種抗性評分分群	22
第五章、結論		24
第六章、參考文獻		25
圖表		38



表次

表 1、大水窟區域與雪山區域六座山峰在 2010 - 2024 年間年均溫線性迴歸	38
表 2、大水窟與雪山區域 2008-2024 間四次複查物種名錄表	38
表 3、2008-2024 間四次調查大水窟與雪山區域目標山峰區域樣區物種多樣性指數	43
續表 4、2008-2024 間四次調查大水窟與雪山區域目標山峰區域樣區物種多樣性指數	44
表 5、CCA 草本物種分群與氣候區位表	45
表 6、CCA 木本物種分群與氣候區位表	47
表 7、石松類功能性狀表	48
表 8、蕨類功能性狀表	48
表 9、草本植物功能性狀表	49
表 10、功能性狀對 bio1 (年均溫)之迴歸分析結果表	59
表 11、功能性狀對 bio4 (季節氣溫標準差)之迴歸分析結果表	59
表 12、功能性狀對 bio12 (年降雨量)之迴歸分析結果表	59
表 13、功能性狀對 bio15 (季節降雨量標準差)之迴歸分析結果表	60
表 14、物種抗性評分表	61





圖次

圖 1 GLORIA 目標區域樣區山峰選定與其海拔分布規範(修改自劉和義等， 2010；Pauli et al., 2015).....	65
圖 2、樣區位置圖	66
圖 3、多峰調查法之樣區設置圖(摘自劉和義等，2010).....	67
圖 4、大水窟與雪山區域年均溫度變化趨勢圖	68
圖 5、大水窟與雪山區域年 1974-2024 年總雨量圖	69
圖 6、大水窟與雪山區域年 1974-2024 年總潛在蒸發散量圖	70
圖 7、雪山區域 SPEI 指標	71
圖 8 大水窟區域 SPEI 指標	71
圖 9、大水窟及雪山區域各山峰 1974-2024 年總雨量圖	72
圖 10、草本 CCA 分析分群圖	73
圖 11、木本 CCA 分析分群圖	73
圖 12、草本植物分群豐度變化趨勢圖	74
圖 13、木本植物分群豐度變化趨勢圖	74
圖 14、乾旱抗性評分分組豐度變化圖	75
圖 15、升溫抗性評分分組豐度變化圖	75





第一章、前言

近年來，由於人類活動使大氣中的溫室氣體快速增加，造成全球性的氣候變遷，全球地表溫度在 2011–2020 年間比 1850–1900 年上升了 1.1°C ，且預測 21 世紀 CO_2 的大氣濃度可能增加為過去的兩倍 (IPCC, 2023)。氣候變遷對生態系統產生廣泛的影響，氣溫及雨量趨向極端的狀況下導致全球生態系的分布、物種組成、交互作用、生理生態機制等改變 (Hoffmann & Sgrò, 2011; Parmesan & Yohe, 2003; Thomas et al., 2004; Walther et al., 2002)。

在不同生態系中，高山植群生態系是由低溫、強風、土壤養分缺乏等特殊環境構成的生態系，在其中生存的物種多是具有耐寒特性的特有物種，這些物種對於氣候變遷帶來的溫度變化較為敏感，可以做為升溫的指標之一 (Gottfried et al., 2012)。高山區域的升溫速度預計將比全球平均速度快三倍 (Pepin et al., 2015)，高山的植群可能在升溫的狀況下被改變 (Gallagher et al., 2019)，高山上的植物會往較高的海拔或是利用周遭的微棲地 (microhabitat) 作為避難所 (Johnstone, 2021; Pauchard et al., 2016; Steinbauer et al., 2016)。為了解氣候變遷對於高山植群的影響，歐洲聯盟 (The European Union) 自 2000 年起，成立探討高山植群變化的「全球高山環境觀測研究計畫」 (GLObal Observation Research Initiative in Alpine Environments, 簡稱 GLORIA)。此計畫使用多峰調查法 (multi-summit approach)，長期監測森林線到高山頂區域之草本與小灌木，並建立國際性之調查標準及資料網路，蒐集並分析全球尺度的氣候變遷對高山植群組成的影響。根據功能性狀建立氣候變遷對於植群的影響指標，對於氣候變遷的影響進行風險評估，制訂高山植群保護策略並提供警示，目前全球共有 40 個國家針對 130 個高山區域進行監測 (GLORIA, 2024)。而臺灣也在 2008 開始依照 GLORIA 計畫的多峰法建立五個高山監測的目標樣區，包含雪山山脈的雪山樣區 (TW-SYU)、中央山脈北段至南段的南湖鈴鳴樣區 (TW-NAH)、合歡奇萊樣區 (TW-HQM)、大水窟樣區 (TW-DAS) 與三叉山樣區 (TW-SAC) 等山峰樣區。目前已完成第三次複查，第四次複查預計 2026 年完成。



在 1994 年，有初步證據表明高海拔山區的物種數量正在增加，暖化效應已經在生態上可測量 (Grabherr et al., 1994)，後續在歐洲阿爾卑斯山的研究發現，高海拔植物分布海拔有上移的現象 (Abdaladze, 2015)，目前世界上的地區性調查多以種間關係、物種消長變化為主。近年來，生態學家採用一種關注生物體功能性狀多樣性的方法，這種方法通過關注定義生物體如何與周圍的物理、化學和生物環境互動的特徵來深入了解生態 (Hooper et al., 2005)。在 Violle et al. (2007) 的研究中顯示，以性狀 (trait) 為基礎的方法在生態學和演化研究中被廣泛使用。「性狀」的概念從日常語言自然演變到科學語言，並在不同學科中得到應用，例如量化遺傳學、生理生態學、功能生態學、種群生態學、演化生物學等。生物學家們在嘗試建立生物體的功能性分類 (Lavorel et al., 1997; Noble & Gitay, 1996; Woodward & Cramer, 1996)、定義族群的功能多樣性 (Mason et al., 2005; Petchey & Gaston, 2002; Walker et al., 1999) 以及評估物種對生態系統的影響 (Eviner & Chapin, 2003; Lavorel & Garnier, 2002) 上，都提倡使用「功能性狀 (functional trait)」。在氣候變遷改變高山環境的情況下，植物的功能性狀在氣候變遷下對於物種的存續扮演了很重要的角色，植物功能性狀具有良好的環境指示性，可以依據植物體所擁有的功能性狀推測植物可能的生存環境、或主要可能面對的生存逆境 (Wigley et al., 2021)。在臺灣的高山生態研究中，非常少以植物功能性狀為主題探討整體高山植群面對氣候變遷的反應，植物功能性狀多為輔助論點的角色；因此，本研究希望嘗試使用功能性狀作為主體來分析，希望能了解臺灣高山植群在氣候變遷下的變動並提出以下的研究假說：

H1: 在乾旱壓力較高的環境中，具備降低水分散失功能性狀以及能透過地下器官渡過地上部枯萎階段的物種，在高山植群組成中的覆蓋度與出現頻度增加。為便於分析檢驗，將細分為兩個子假說：

H1a. 功能性狀上適應乾旱與高溫的物種增加：在近年臺灣高山區秋冬季氣溫顯著上升、夏季頻現高溫以及溼度下降 (IPCC, 2023; 林政道等, 2024) 的情境下，具有降低水分散失功能性狀例如：葉部具毛狀物、革質、蠟質等，以及能夠在極端環



境下利用地下器官例如：具有根莖、萌蘖能力等，渡過地上部枯萎期的物種，預期將在覆蓋度與頻度上顯著增加。這些物種藉由其生理調適機制取得在升溫及乾旱環境中的生存優勢 (Gallagher et al., 2019; Johnstone, 2021)。

H1b.功能性狀上耐寒與需高水分物種減少：依賴較多水分且耐寒特性的物種，將在氣候極端條件下受到更大競爭壓力，可能出現覆蓋度與頻度下降，甚至在部分區域逐步消失。這種物種組成的轉變可作為高山植群因全球氣候變遷而重組的重要指標 (Gottfried et al., 2012; Pepin et al., 2015)。

為檢驗上述假設，本研究將利用 2008 至 2024 年間在 GLORIA 雪山樣區及大水窟樣區 (TW-SYU、TW-DAS)所累積的物種與功能性狀數據，透過重新分群與結合樣區植物豐度資料的典型對應分析 (Canonical Correlation Analysis, CCA)方法，探討各功能性狀對於植群變動的貢獻，從而評估高山植群因氣候變遷而產生的結構性調整。功能性狀更適應高溫及乾旱的物種可能會得到優勢而增加，相反的，耐寒及需要較多水分以生存的物種可能面對更大的競爭而減少甚至消失，為驗證此假設是否實際在臺灣的高山發生，希望利用團隊自 2008–2024 年間高山調查的物種資料，分析這段期間內植群物種的組成及植物多樣性的改變，並統整樣區中有出現植物之功能性狀，將植物的根據其擁有的功能性狀使用量化評分的方式進行重新分群，將功能性狀結合樣區之植物出現豐度資料進行 CCA 分析，用以理解各功能性狀是否能反映植物分布及植群結構的動態變化，期望能利用此分群進行分析出高山的植群變動狀況是否和研究假說相符。



第二章、文獻回顧

一、氣候變遷及對於高山植群之影響

氣候變遷的觀察證據顯示，人類活動導致的溫室氣體排放已經導致全球平均溫度上升。人類活動導致的溫室氣體排放是全球變暖的主要原因，尤其是二氧化碳的排放。根據 IPCC (2023) 的第六次氣候變遷評估報告 (The 6th Assessment Report, AR6) 評估報告顯示，全球表面溫度在 2011–2020 年已經比 1850–1900 年上升了 1.1°C ，且，2016 年至 2020 年更成為 1850 年至 2020 年之間最熱的 5 年，這種暖化現象主要由於二氧化碳和甲烷等氣體的排放所致，並且受到人類活動的影響。

氣候變遷導致極端天氣事件的增加，包括極端高溫、熱浪、乾旱、極端降水及洪水等，這些事件對生態系統和人類社會都有顯著影響 (Blenkinsop et al., 2021; IPCC, 2023; Weiskopf et al., 2020)。全球暖化下，高溫空氣中可容納較多的水氣量，但空氣中的水氣壓增加速度小於飽和水氣壓增加的速度，相除之下，全球地表相對濕度仍為減少趨勢，尤其是 2000 年以後 (IPCC, 2023)。

在歐洲、美洲、亞洲大陸上都可以觀察到氣候變遷帶來氣溫升高、雪季縮短的現象 (Abdaladze, 2015)，氣候變遷也導致物種遷移和滅絕，特別是在山區和山地生態系統中，這些地區的物種對氣候變化的適應能力有限 (Parmesan & Yohe, 2003)。喜馬拉雅山區的研究顯示在山區，樹木和灌叢的分布正在向更高海拔移動、冰川正在融化且高山草原的面積正在減少 (Moseley, 2011; Salick et al., 2014; Salick et al., 2005); 有研究觀察到低海拔物種正往上遷移 (Lawlor et al., 2024; Salick et al., 2019)，位於山頂之物種對較為溫度敏感且無法向更高海拔處繼續拓殖，因此在高山氣候變遷的趨勢下，使得位於山頂之物種必須和原本生存於較低海拔物種競爭，可能會減少或甚至區域滅絕的情況發生，導致高海拔山區植群組成改變。

根據許晃雄等 (2024) 在國家氣候變遷科學報告中提到臺灣近年來的氣候變遷趨勢，氣溫方面，近百年來全臺平均氣溫上升 1.3°C ，且近 50 年、近 10 年有加速的趨勢，由近 30 年、近 50 年及長期 (1900 年至 2022 年) 的趨勢值來看，分別是每



10 年升溫 0.27°C 、 0.25°C 及 0.15°C ，可以發現近年的溫度上升趨勢越靠近現代越明顯。年均溫百餘年來呈現階段性上升現象，在冬半年(11 月–至翌年 4 月)此現象特別明顯。同時，臺灣近百年高溫日數 (當日最高溫超過 30°C) 平均增加 28 天，近 50 年低溫日數 (當日最低溫低於 10°C) 山區減少 19 天，平地減少 1 天。降水方面，臺灣地區的降水並沒有顯著的趨勢，但近年有多次極端乾旱及降雨事件，北部至中部近 30 年的春季雨量有較大的減少趨勢。在 1960 年後中南部的氣象乾旱事件發生頻率明顯增多，季節也多發生於春季，於 2000 年後在豪雨與大豪雨日數的分析上，可以發現山區的年際變化較為顯著；因此可以說，臺灣近年的氣候趨勢為升溫、且降水偏向極端化。在林政道等 (2024) 的研究中也表明，目前臺灣雪山區域在 2016 年後，各季節都呈現相對缺水的狀態。其中更以 2021 年夏季至 2022 年梅雨季最嚴重。

在臺灣近年氣候偏向升溫、極端降水與季節性乾旱更頻繁發生的情況下，林政道等 (2024) 的高山監測報告也指出極端氣候事件正在加劇臺灣高山植群的改變，特別是在乾旱和高溫的雙重壓力下，特定高山植物的存續面臨挑戰，而在持續的氣候變化下，植群的變動仍需持續觀察，期望能以功能性狀將高山植群重新分群後，觀察是否植群朝著特定功能群變化。

二、適應高山環境之植物功能性狀

植物物種在氣候變遷下的存亡可能取決於形態和生理上的表型可塑性，植物對全球暖化有 3 種主要機制的反應：它們可以透過：1. 表型可塑性進行適應性調節，從而增加其適應能力；2. 遺傳性基因變異以適應於新的氣候因素組合—這種可塑性機制將使它們能夠保持在原本的地理位置上；3. 遷徙到更適合的地點，使其能夠定殖，生存和繁殖 (Heilmeier, 2019)。從葉、根至莖上的性狀可從葉大小、葉表面、葉質地、不定根、地下根莖等形態特徵來進一步剖析可適應各種逆境，如高溫、極端降雨或乾旱下的功能性狀。

而氣候變遷使溫度異常，對植物之葉功能性狀會造成各種影響，在 Moles et al. (2014) 的研究中提到，溫度是最顯著影響植物功能性狀的環境因子。



Wright et al. (2017)在對全球的葉面積研究中指出與葉片大小最強的關係是與以生長季為基礎的氣候變量有關，例如生長季平均溫度，生長季最冷月份的平均溫度等，在越炎熱且潮濕的區域可以發現植物的葉面積變大，而相對的在極區或是山區可以發現葉子的大小明顯較小。

在越冷的生態區位，面對寒冷的生態逆境時則葉面積 (Leaf Area, LA)和葉厚度 (Leaf Thickness, LT)會呈現較小的葉面積和較厚的葉厚度讓植物在低溫下保護葉片生存，也會使葉子的生活周期拉長，同時較小較厚的葉子會具有較高的單位面積葉重 (Leaf Mass per Area, LMA)，這代表較低的溫度下植物會有更高的葉乾物質含量 (Leaf Dry Matter Content, LDMC)，使葉片更能抵禦寒冷的氣溫，並傾向增加獲取資源的能力，增加葉子中儲存的營養物質。若以寒冷做為植物之限制因子，可以看出植物在較有生存壓力的狀況下會更傾向保守，以植物體本身的耐受性抵禦外界逆境的生存策略，而這種生存策略在氣候暖化下，在向上遷移時可能可以幫助植物在較嚴峻的環境下存活。反之，在溫度上升的情況下，不以遷移為策略，留在原地的植物會使葉片呈現較大的葉面積以及更薄的葉厚度以適應高溫而使植物的狀態呈現更佳的競爭狀態 (Basnett & Devy, 2021; Cui et al., 2018; Dong et al., 2020; Gong et al., 2020; Henn et al., 2018; Llerena-Zambrano et al., 2021; Wright et al., 2017)

但這些也會因植群類型而會有一些特例，例如：多肉植物和硬葉植物就選擇了兩種截然不同的生存方式，卻能生存在類似的環境中 (Llerena-Zambrano et al., 2021)，因此並沒有一個絕對的結果，而是應該以各地植群類型的不同的生存策略去進行相對應的分析。

在降雨上，氣候變遷常導致乾旱或是極端降雨的狀況，水分的利用對於植物的生存是非常重要的因子，雖然在 Moles et al. (2014)的研究中指出，溫度對於植物功能性狀的影響遠大於降水，在 De Boeck et al. (2016)的研究中，藉由觀察同一區域的綠色覆蓋度並比對氣候資料發現，若同時出現升溫和乾旱，比起單純升溫將對植物的生產力造成更顯著的下降，因此可以說水分也是對植物功能性狀影響非常大的因子之一。



植物在面對氣候變遷帶來的乾旱時會有兩種不同的策略，一種是較為保守，傾向保守的植物具有在較為乾旱的條件下處理有限資源的一些功能性狀，例如：較小的 LA、較高的 LDMC 及較低的比葉面積 (Specific Leaf Area, SLA)、較窄的導管及較短比根長 (Specific Root Length, SRL)，且在相同的 SLA 下，抗旱耐受物種的 SRL 低於敏感物種，且有更高的根密度，較窄的導管直徑可以減緩蒸散，而較高的 LDMC 可以儲存水分在葉中，較高的 LDMC 會進而影響比 SLA，有較高的 LDMC 的葉子在單位面積會有更大的重量，造成 SLA 的數值較低。這些功能性狀會使植物在生長潛勢和獲取資源方面較為保守、物理抗性較強，從而形成一種緩慢但安全的生長模式。另外一種生存策略則截然不同，是較為競爭性的策略，這些類群的植物會具有較長的 SRL、較粗的根平均直徑 (Mean Root Diameter, MRD)、較高的 SLA 及較低的 LDMC，且在乾旱條件下，部分植物可以透過根莖 (Rhizome) 儲存水分，並在面對逆境時轉移水分至需要的器官中以延後植物體的衰敗。這些性狀使這類型的物種擁有較好的短期水分儲存能力，這類型的植物也會透過使葉片凋落來躲避乾旱，這類型的性狀常出現在禾本科植物或一年生物種，使這些物種可以更好的生存於更乾燥的地方，且對降雨波動的耐受性較好，而利用兩種不同策略的植物可以共存在廣泛的乾旱梯度中，進而覆蓋整個生態系 (Lubbe et al., 2023; Luo et al., 2019; Madsen-Hepp et al., 2023; Rodríguez-Alarcón et al., 2022)。

近年研究指出，各物種在面對乾旱時的功能性狀變異以自身策略為主，競爭型的物種變異出更大的葉面積、葉片中的葉乾物質含量降低，且投資更多資源在加粗根系。這類型植物在面對乾旱時，利用將氣孔關閉減少水分散失或提早落葉的方式來度過乾旱 (Rodríguez-Alarcón et al., 2022)。保守型的物種具有較小的葉面積、較高的葉乾物植含量及較低的比葉面積，利用本身的耐受性度過極端乾旱，在處於極端乾旱的物種中，種內變異成為了決定這些物種存亡的重要關鍵 (Blumenthal et al., 2020; Madsen-Hepp et al., 2023; Rodríguez-Alarcón et al., 2022)。

在高海拔植群生態系這個特殊的生態系，植物活在高山的寒冷、強風、高蒸散量的環境，其展現出的功能性狀大多與耐寒、耐旱、抗機械損傷等為主，Wright



et al. (2004)的研究中提到革質葉可以使植物在高海拔、高緯度具備抗寒的能力，並且減少水分的散失。而革質葉在功能性狀上有一些明顯的特徵為低比葉面積 (SLA) 和高葉乾物質含量 (LDMC)，較高的 LDMC 會使葉片的結構增強，從而可以抵抗外界的機械性損傷 (Silveira et al., 2021)，跟革質葉有相似作用的是葉表的蠟質，葉表的蠟質保護葉片和莖幹免受真菌和細菌的侵入，利用角質層密封葉片來減少蒸散，同時蠟質也反射和減弱陽光照射的強度，從而減少過度輻射造成的損害 (Domínguez et al., 2011)。植物葉片上的毛狀體具有兩種不同的功能：它們作為一種結構性防禦機制抵禦草食性動物，並保護植物免受環境因素的影響，如太陽輻射 (包括紫外線) 和高溫、強風帶來的低溫等 (Soheili et al., 2023)，而葉緣反捲被廣泛認為是植物適應乾旱或高蒸散環境的形態特徵。根據 Yavas et al. (2023) 研究發現，植物可以透過反捲葉緣改變葉片邊緣的氣孔分佈與暴露面積，有效降低水分蒸散速率，這樣的功能性狀在乾燥且降水季節性強烈的氣候中尤為顯著。Zhou and Zhao (2004) 的研究也顯示，高海拔草本植物地上部，在冬季使乾枯，以宿根方式可以有效地使植物度過寒冷的冬天，且解釋植物體內酵素系統會如何隨著季節性進行改變。根系在面對乾旱時，部分植物有根莖構造，並且利用根莖中儲存的水分及營養物質去度過乾旱逆境 (Lubbe et al., 2023)，並且水分壓力通常會降低植物生長，減少 SLA，而低 SLA 的葉片通常具有較厚的細胞壁和更密集的組織，並增加根部生物量，這有助於緩衝溫度波動和極端情況的影響 (Lambers, 2008; Li et al., 2020; Sandel & Low, 2019)。因此根莖的構造及植物體對於根系投資的資源是面對乾旱逆境的重要功能性狀，可能會使有根莖或是根系特別深入土壤或是分布廣泛的功能群度過局部乾旱的時期。

此外，通常植物的革質、臘質葉片不會與有毛的葉片同時出現，這顯示植物在選擇策略上不同，大部分具宿根的植物不會在葉片浪費過多的資源，而是在冬季將地上部凋萎，利用根系渡過冬天；少數生長在強風或高日照地區的宿根性的植物，會以革質葉或是在葉片披毛狀物，用以保護葉片。禾本科和莎草科則採用了和其他物種不一樣的生存策略，一些根莖的功能性狀可能會使禾本、莎草科的植物更能面

對環境中缺水的逆境，且部分禾本、莎草科對溫度相對不敏感，分布海拔跨域大，或許會使這類型植物在氣候變遷下有增加的趨勢。





第三章、材料與方法

一、研究區域選擇與位置

根據最新之 GLORIA 計畫野外調查規範的 GLORIA 工作手冊第五版 (Pauli et al., 2015)，其中定義出目標區域與樣區山峰之選定標準、樣區架設方法與樣區調查方法。其中目標區域為一個包含 3-4 座相同地理區中樣區山峰之區域，而區域中之目標山峰海拔分布需代表從樹線交錯帶到維管束植物分布上限之地區，可細分為亞高山/下部高山過渡帶 (lower alpine/subalpine ecotone)、下部高山/上部高山過渡帶 (upper-lower alpine ecotone)、亞積雪帶至上部高山 (subnival-upper alpine ecotone) 及亞積雪-積雪帶 (subnival-nival ecotone)(圖 1)，且樣區山峰不可有人為活動。臺灣位處於副熱帶區域，無終年覆雪區域，且地狹人稠，多數山峰有人為活動痕跡，因此在臺灣一目標區域僅選定 3 座樣區山峰，以符合 GLORIA 樣區設置標準。本研究延續劉和義等 (2010) 依據 GLORIA 規範所設置之樣區。其中 2 個目標區域，雪山 (GLORIA 編碼 TW-SYU，以下簡稱 SYU) 以及大水窟 (GLORIA 編碼 TW-DAS)，以下簡稱 DAS 區域作為本研究樣區，截至 2024 年 8 月，已完成雪山及大水窟區域共六座山峰的第四次監測週期之複查工作 (圖 2)，資料橫跨 16 個年度。

本研究包含 2 個目標區域，為雪山區域以及大水窟區域，兩者分屬不同地理區，各有 3 座目標樣區山峰。雪山區域在行政區劃上分屬苗栗縣、臺中縣、新竹縣 3 個縣市，位於雪霸國家公園之生態保護區。雪山山脈受歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊交界處擠壓之造山運動作用，造就許多高山峻嶺，由東北向西南延伸達 180 餘公里，又受到大漢溪、大安溪、大甲溪的侵蝕，將此地區切割成北部的阿玉山階段山地、中部的雪山地塊及南部的埔里陷落區 (歐辰雄，2002)。氣候區方面位在西北內陸區，此區氣候型態降水主要集中於夏季，在夏季由於水氣常伴隨氣流自大甲溪與大安溪流域上升，形成對流雨，以及因西南季風造成的鋒面雨，在冬季因位置處於東北季風迎風面，相比其他地區會有較多積雪的情形發生 (Su, 1985)。地質屬中



央山脈地質區之西部亞區中的雪山山脈帶，出露的岩層為第三紀始新世至漸新世輕度變質岩，多屬泥質為主的沉積物 (何春蓀，1986)。變質程度由東南向西北漸減，岩類包括砂岩、頁岩及頁岩變質後的板岩為主。在山系上屬於雪山山脈中段以雪山主峰為中心之雪山西稜與雪山西南稜上 (張石角，1995)。

雪山目標區域的三座山峰分別為：海拔高度 3,524 m 之 TSW 山峰 (雪山 1)，位於雪山西南方延伸之稜線上之翠池東南峰；海拔 3,509 m 之 DSH 山峰 (雪山 2)，位於大雪山向南延伸之支稜上；海拔高度 3,299 m 之 JNJ 山峰 (雪山 3)，位於大劍山東南之劍南尖山。

大水窟目標區域在行政區劃上屬於南投縣與花蓮縣，位於玉山國家公園之生態保護區。氣候區方面屬於東區南段，主氣候型為夏雨型氣候，降水集中在五至九月，來自西南季風帶來之豐沛降雨、夏季熱對流之對流雨以及颱風西南季風帶來之豐沛降雨、夏季熱對流之對流雨以及颱風 (Su, 1985)。因位處中央山脈，也成為西部濁水溪、高屏溪兩東部秀姑巒溪之主要分水嶺。地質方面以為西部濁水溪、高屏溪兩東部秀姑巒溪之主要分水嶺。地質方面以板岩、千枚岩、變質砂岩板岩、千枚岩、變質砂岩為主為主 (黃明萬等，2014)。

大水窟目標區域的三座山峰分別為海拔 3,610m 之 SEN 山峰 (大水窟 1)，位於大水窟山東南側；海拔 3,363m 之 YAT 山峰 (大水窟 2)，位於南大水窟山向北延伸的稜線上；海拔 3,255 m 之 SUN 山峰 (大水窟 3)，位於大水窟池東側。

二、GLORIA 多峰調查法 (multi summit approach) 區域樣區設置

本研究使用之數據來自臺灣 GLORIA 調查中之區域樣區，根據 GLORIA 工作手冊，每座山峰會有 8 個山峰區域分區 (summit area section)。以一細繩把四個 3 m × 3 m 樣區網格下方頂點以直線方式相互連接起來，以此界定 5 m 山峰區域 (5 m summit area section) 的下方邊界；採用相同的方法將主測量線上 10 m 等高線測量點以直線方式連接起來，可以確定 10 m 山峰區域 (10 m summit area section) 的下方邊界。再用 4 條細繩從 HSP 分別沿 4 個二級地理方位 (東北、東南、西南、西北) 向下坡拉，直線會連接到上述兩個山峰區域的邊界，由此將 5 m 及 10 m 山峰



區域再各劃分為 4 個分區。山峰區域分區的大小取決於坡面結構與坡度，因此每個區域分區的面積大小並不固定。

三、GLORIA 區域樣區調查方法

在 GLORIA 每座山峰有 8 個區域分區，5-m 及 10-m 山峰區域分區各自有四個，設置在東南西北四個方位，其設置的主要目的在於監測物種豐度 (abundance) 以及物種遷移的變化。在每個分區中觀測並記錄不同地表類型的覆蓋度百分比，以及完整的維管束植物名錄及其豐富度，以豐度目測法 (visual abundance estimation) 來估計每種植物的豐度，此法是以 Braun-Blanquet 的等級分級，將物種依照豐富度分為 5 個等級，分別為優勢 (d)：覆蓋度高，占整體植群的大部分，形成斑塊狀或茂密的植被，物種覆蓋面積超過總面積的 50%；常見 (c)：在區域樣區中頻繁可見，視覺上可明顯看到，覆蓋度少於 50%；分散 (s)：在樣區中雖分布廣泛，但較不容易直接明顯可見，且不一定在整個區域中均勻分布；稀少 (r)：在樣區中的某些區域有少數個體，且仔細觀察不會忽略；非常稀少 (r!)：在樣區中僅有少數或一兩株個體。另外，對只在分區內少數地點出現的物種作地點附註。

而地表類型估算是是在區域樣區當中，目測確定各類地表類型的投影覆蓋度並紀錄之。投影覆蓋度是各地表類型在地面上的垂直投射 (即垂直於坡面) 比例，其總和為 100 %。地表類型的區分，簡述如下：

A. 維管束植物 (vascular plants)：所有維管植物的總投影覆蓋度；

B. 岩石 (solid rock)：裸露岩石，特指不會輕易發生移動的穩固岩石 (如用踢推也不會發生移動)；不能移動的大石頭也應視為岩石而非碎石 (若有疑問，則統一將其視為岩石)；

C. 碎石 (scree)：碎石包括穩定或不穩定的碎石地，並且每個石頭都大小不一，在土壤表面或陷入其中；大小比沙粒要大 (與裸地相反)；

D. 地衣 (lichen on soil)：生長在沒有維管植物覆蓋的土壤表面之地衣；

E. 苔蘚 (bryophytes on soil)：生長在沒有維管植物覆蓋的土壤表面之苔蘚；

F. 裸地 (bare ground)：裸露的土壤，也就是不被植物覆蓋的泥土或砂土；



G.凋落物 (litter)：死亡的植物組織。

四、氣象資料

本研究使用了 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)的氣溫、雨量及蒸散量資料，以檢視目標區域的氣候變化，並且利用雨量及蒸散量資料計算出標準化降水蒸散指數 (SPEI)以做為區域濕潤或是乾旱的指標，本文 SPEI 計算參考 Vicente-Serrano et al. (2010)提出的計算方法，並利用其研究中開發之 SPEI Calculator R package 進行計算。

五、分析方法

(一) 植群與生物多樣性指數分析

除了植群組成分析之外，為了瞭解目標區域四次調查間的植群組成變化，比較各目標山峰的物種組成增減，使用物種豐富度 (species richness)了解樣區物種的數量變化，Shannon 多樣性指數 (Shannon diversity index) 了解樣區中物種多樣性變化以及物種覆蓋度比較四次調查間的變化。其中 Shannon 多樣性指數公式如下：

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln(P_i)$$

公式中，H 為該樣區之 Shannon 生物多樣性指數，S 為該樣區中之總物種數， P_i 為 i 物種之個體數量佔總物種個體數量的比例各物種的豐富度變化計算，以區域樣區之 Braun Blanquet 等級資料為基礎，統計三次監測周期間等級產生變化的物種數量，由多至少依序為優勢 (d)、常見 (c)、分散 (s)、稀少 (r)、非常稀少 (r!)，為有效量化分析物種在樣區中優勢度之變化，本研究將其等級依據其定義之覆蓋程度轉換成數字，d 轉換為 75、c 轉換為 50、s 轉換為 25、r 轉換為 5、r!轉換為 1，並以此數字做為前述各項計算。

(二) 植物功能性狀表

功能性狀是指可在個體層面測量的任何形態、生理或物候學特徵，從細胞到整個有機體的層級，不涉及環境或任何其他組織 (Violle et al., 2007)，在文獻回顧中提到，植物功能性狀可能為高山植物在氣候變遷下存活的重要關鍵，因此以表格形



式建構樣區中植物之完整功能性狀，本研究參考了臺灣大學植物標本館 (TAI)之數位化標本影像、臺灣植物誌第二版、臺灣生命大百科網站 (<https://taicol.tw/>)、日本莎草科植物圖鑑 (日本カヤツリグサ科植物図譜，星野卓二、正木智美，2011)、臺灣原生植物全圖鑑第三卷：禾本科——溝繁縷科 (陳志輝等，2017)等資料，從中取得文獻中外觀性狀至生理性狀之描述，利用對固定性狀的描述進行分類整理後，製成類別資料表格。本研究建構的性狀以植物生長型來區分，分成：石松類、蕨類、草本植物、木本植物、莎草科植物、禾本科植物，因莎草科及禾本科和大部分草本植物性狀差異甚大，因此獨立區分以便後續分析，以下列出性狀表內各類型植物所包含之性狀。而本研究後續使用此表的一部份性狀作為 CCA 的矩陣資料以及後續物種抗性評分之依據標準。

(三) 物種抗性評分

為了更進一步單純以功能性狀作為評分依據分群，本研究以最主要的草本植物類別進行物種抗性評分的分析，以此評分依據觀察是否以功能性狀上來看抗性較好的物種豐度會上升。本評分依據選取了宿根、葉毛狀體的有無、葉緣是否反捲以及葉質作為評分依據。

本評分機制根據文獻所述各性狀對耐熱及耐旱的貢獻，分別給予不同權重。宿根性、葉毛狀體、葉緣反捲皆以 0 或也就是有無此性狀來表示，葉質則以 1 (紙質)、2 (革質)、3 (肉質) 表示。升溫與乾旱耐受性評分公式如下：

$$E_t = 0.1 \cdot P + 0.3 \cdot T_r + 0.2 \cdot R + 0.4 \cdot (L_T \div 3)$$

$$E_d = 0.1 \cdot P + 0.3 \cdot T_r + 0.3 \cdot R + 0.3 \cdot (L_T \div 3)$$

其中 E_t 為升溫耐受評分、 E_d 為乾旱耐受評分、 P 為宿根性、 T_r 為毛狀體、 R 為葉緣反捲、 L_T 為葉質

每個分數範圍 0~1，分數越高代表該物種對升溫或乾旱的適應能力越強。這樣的量化方法能有效結合不同性狀的生態功能，提升物種適應力評估的準確性。



(四) 物種氣候區位

利用全球生物多樣性資訊機構 (Global Biodiversity Information Facility, GBIF) 的開源資料，擷取各個物種在世界上的已知分布位置。本研究自 GBIF 資料庫中分別擷取各物種紀錄後，篩選掉無空間資訊的資料，保留物種的座標資訊以及各筆紀錄的辨識碼 (primary key; UUID 格式)，便於追溯資料來源。篩選資料後，進行對各物種 1/10 的資料進行隨機取樣，結合文獻資料檢查點位分布的合理性。若發現不合理點位的比例過高，再依照資料性質擴大檢查，並同時篩除不合理的點位。處理原始資料後，從開放的氣候資料庫—CHELSA (Karger et al., 2017) 來獲得高解析度地面氣候圖層，利用 QGIS 3.42.3 (2025) 擷取物種生育地的年均溫與年降雨量。各項氣候因子為 1979–2013 年的長期平均值，圖層解析度為 30 弧度秒 (在赤道約為 1km，在臺灣約為 800 m)。

獲得各物種生育地的各項氣候因子後，為了減少極端值影響，以四分位數的第一四分位數 (Q1) 與第三四分位數 (Q3) 作為物種氣候區位主要範圍，再進行後續分析。本研究以功能性狀結合氣候區位去判斷不同氣候是否具有偏向某些功能性狀的趨勢，再結合 1–4 次調查之樣區資料判斷臺灣高山植群之功能性狀群是否受到氣候變遷影響而改變。



第四章、結果與討論

一、氣候變遷趨勢

大水窟及雪山區域 2010 至 2024 的 15 年年均溫變化如圖 4，各樣區的年均溫度起始值和變化幅度略有不同，有可能是地理上或是微氣候的差異所造成，6 個樣區的年均溫度皆呈現明顯上升趨勢，DAS 區域部分：SEN 樣區年均溫上升 0.042 °C/年、SUN 樣區年均溫上升 0.065 °C/年、YAT 樣區年均溫上升 0.065 °C/年；SYU 區域部分：DSH 樣區年均溫上升 0.052 °C/年、TSW 樣區年均溫上升 0.066 °C/年、JNJ 樣區年均溫上升 0.060 °C/年，上升幅度最大為 TSW、最小為 SEN，年均上升幅度介於 0.042 °C-0.066 °C 間，每個樣區的迴歸模式都呈現顯著 (表 1)，顯示 6 個樣區在 15 年間均有顯著的升溫現象 (表 1)。

1974—2024 年間的年總降雨量 (圖 5)，大水窟區域 (3,357 mm)高於雪山區域 (2623 mm)，檢視長期降水及潛在蒸散發現(圖 6)，大水窟區域 2017 年後，僅 2018 和 2024 年的降雨量達到長期平均值，而雪山區域 2016 年後，僅 2019 年的降雨達到長期平均值，其他年份的降雨皆低於平均。此外，大水窟區域在 2019 至 2024 的年潛在蒸散量都超過長期平均值，雪山區域則是在 2019 至 2021、2023 年的年潛在蒸散量都超過長期平均值，在兩個區域都有顯著升溫的情境下，潛在蒸散量上升，降雨減少時，便會使得區域水分不足。本研究再以 SPEI 指數檢視 6 座山峰的年尺度 (SPEI-12)水分平衡情形 (圖 7)，大水窟區域和雪山區域的水分變化有些許不同。大水窟區域在 2003 到 2019 年間，偶爾有部分年度水分略少 (SPEI-12<0)的情況發生，其餘多數年份的水分平衡或達到濕潤程度。自 2019 夏季後至 2024 年春季，SPEI-12 大部分都維持在負值的狀態，在 2021 年春季時達到極端乾旱 (SPEI-12<-2)的程度，僅有 2022 的梅雨季至夏季短暫有水分平衡回復至正值的時期，而隨後直至 2024 夏季 SPEI-12 都維持在負值。雪山區域在 2003 年到 2017 年間，偶爾有部分年度水分略少 (SPEI-12<0)的情況發生，其餘多數年份的水分平衡或達到濕潤程度。而自 2018 夏季後至 2024 年底，SPEI-12 幾乎都維持在負值的狀態，跟大水



窟區域一樣，在 2021 年春季時達到極端乾旱 ($SPEI - 12 < -2$) 的程度。雖然在 2022 年夏季水分平衡轉為正值，然而隨即再次進入水分匱乏的情況，直至 2024 年的冬天都處於缺水的狀況，而兩區域的各山峰位處降雨 (圖 8) 因位於相同氣候區系，大致都呈現類似的變化。

大水窟與雪山區域溫度近 15 年來明顯升高，且降水趨向不平衡的狀態，常有局部性乾旱的發生，此趨勢與一些 GLORIA 樣區的觀察相同，在歐洲阿爾卑斯山區有數個 GLORIA 樣區皆發現由於溫度上升造成高山地區積雪期縮短，以及發生降水量減少的現象，影響植群組成變化 (Abdaladze, 2015; Steinbauer et al., 2019)，而這樣同時發生升溫及乾旱的綜合效應可能導致草本植物的生產力下降且生物量被抑制，並降低了整體的物種豐富度 (De Boeck et al., 2018)。

二、植群組成變化

大水窟和雪山的第一次調查分別在 2008 年和 2009 進行，於 2013 年、2014 年、2019 年、2020 年進行第二、三次複查，分別於 2023 年及 2024 年的 7 月中旬進行第四次複查；4 次調查中，兩個區域總共調查到 34 科、68 屬、92 種物種 (表 2)，其中石松類植物有 5 種，蕨類植物 4 種，裸子植物 5 種，被子植物有 78 種。在物種組成當中，最多為禾本科 (Poaceae) 和菊科 (Asteraceae)，各有 14 種，而特有種佔全部種類的 45 種，其餘皆為原生種；特有種比例大約為 49%，顯示大水窟區域及雪山區域的特有種比例相當高，佔了將近一半的種數。接著以山峰為單位，檢視物種數在 4 次調查間的變化，結果顯示，在第四次調查時，大水窟區域的所有山峰物種數量都是顯著上升的，物種數接近第二次調查的數量，雪山區域本次調查總計調查到 60 種物種，過去前三次調查，物種數為 52–56 種之間，2024 年度調查的總物種數增加。較特別的是有一些物種是過去 3 次調查未調查到的，而在第四次調查出現的物種，分別為小穎溝稈草 (*Aniselytron agrostoides*)、厚唇粉蝶蘭 (*Platanthera pachyglossa*)、玉山菝葜 (*Smilax vaginata*)、亞毛無心菜 (*Arenaria subpilosa*)、高山露珠草 (*Circaea alpina*)、細川氏薊 (*Cirsium hosokawae*)、黃菀 (*Senecio nemorensis*)、玉山抱莖籜簫 (*Anaphalis morrisonicola*) 等 7 種物種，其中小



穎溝稈草與高山露珠草更是在過去其他區域的調查中從未出現的物種。然而前述物種在樣區中都是少量分布或僅有單一植株，因此可能是偶發的隨機事件。物種數的變化在各山峰不盡相同，JNJ 與 TSW 山峰的變化較為類似，在第三次調查時，物種數顯著下降，而在第四次調查時物種數回升，而 DSH 山峰則無顯著變化。在 Shannon 多樣性指數方面 (表 3)，大水窟區域有較明顯的變化，幾乎每個樣區的多樣性指數都是上升的，而雪山區域的多樣性指數則在不同樣區之間有上升或下降，整體而言變化並沒有太大。

其中大水窟區域在第四次調查時所有山峰物種數顯著回升至接近第二次調查數量，而雪山區域則出現 60 種的總物種數新高，包含 7 個新記錄物種的零星分布，可能反映微棲地的氣候或環境變化，此現象與 Stein et al. (2013) 在加州草原觀察到的物種遷移模式相似，顯示暖化可能促使低海拔物種向高海拔擴散，但高海拔環境對於物種的限制因子不僅僅只有溫度，土壤基質、水分環境以及微氣候等等條件，都可能有所差異，因此還需進一步的調查才能得知物種數量的上升是否為暖化效應所引發亦或是偶發事件。

關於 Shannon 多樣性指數的空間差異，大水窟區域多數樣區指數上升，大致符合 Elmendorf et al. (2012) 在北極與北方森林研究中提出的「升溫促進高緯度/高海拔地區生物多樣性」的假說，而雪山區域的波動可能受局部因子調控，例如土壤異質性與種間競爭的交互作用 (Pugnaire et al., 2019)。

Colwell et al. (2008) 的研究中也指出短期物種數增加可能反映遷移補償效應。儘管第四次調查顯示物種數回升，但需注意短期波動與長期趨勢的差異性，因短期波動可能為暫時的極端氣候，如 2019 年開始之乾旱事件，但長期趨勢在雨量回復後可能會和乾旱事件時期之物種變動有所差異。如 Harrison et al. (2015) 在加州草原生態系的研究指出，極端氣候事件可能引發群落組成快速更替，但長期多樣性變化仍需 20 年以上的連續監測數據方能確立趨勢。建議後續研究可結合微氣候監測數據，分析月累積溫度與物種出現頻度的關聯性以了解暖化效應對於植群組成的影響，並納入功能性狀分析以區分氣候影響與隨機的遷移事件 (Kraft et al., 2015)。



三、物種功能性狀表

本研究希望以植物功能性狀來檢視植物組成變動。將大水窟與雪山區域四次調查出現物種依據過去文獻、標本與植物誌整理之植物功能性狀表，因各物種的功能性狀差異性相對較大，因此將功能性狀表格區分為：石松類性狀表 (表 4)、蕨類性狀表 (表 5)、草本性狀表 (表 6、表 7)、木本性狀表 (表 8、表 9)、莎草科性狀表 (表 10)、禾本科性狀表 (表 11)，由於石松類與蕨類基礎性狀資料匱乏，物種間環境適應機制尚未系統量化，加上研究資源限制，後續分析聚焦於草本、木本及獨立區分的禾本科與莎草科植物。Kluge and Kessler (2007)與 Nitta et al. (2017)均指出蕨類功能多樣性分析需高解析度形態與生理性狀數據，而野外調查常受限於分類群性狀測量技術，因此才有此取舍。

而在性狀篩選上，優先採用具明確逆境適應機制的指標：

1. 葉片結構性狀：革質葉與蠟質葉被證實可減少水分散失並增強紫外線防護，此特性在葉經濟型譜 (Leaf Economics Spectrum)中被歸類為保守資源策略，並於臺灣高山植物的乾旱與強光適應中具關鍵作用，並且具有有效的機械性防禦，使擁有這類型性狀的物種葉片更加強韌，可以抵禦強風、低溫 and 食草動物及昆蟲的啃食 (Domínguez et al., 2011; Reich et al., 1992; Silveira et al., 2021)，而葉的毛狀體也同樣具有結構性防禦以及保護植物免受環境因素的影響之功能，如太陽輻射(包括紫外線)和高溫、強風帶來的低溫等 (Soheili et al., 2023)

2. 宿根特性：Freschet et al. (2010)指出宿根植物透過地下儲存器官調節資源分配，此策略在寒冷環境、養分限制與季節性降雪壓力下尤為重要，植物體內酵素系統會如何隨著季節性進行改變，藉此方式可以有效的使植物度過寒冷的冬天 (Zhou & Zhao, 2004)。

而本研究特別將禾本科與莎草科與其他草本植物區隔進行獨立分析，是因其葉功能性狀及根系構型對相較其他物種的獨特性，且禾本科及莎草科也互不相同，因此將兩個分類群分開討論。此分類架構呼應 Díaz et al. (2016)提出的植物功能型譜全球標準化框架中，植物之資源競爭-保守的權衡策略，同時考量臺灣高山植被



所擁有地被以高山箭竹為主的特殊環境，兩個分類群的根系狀況可能受到玉山箭竹的競爭所影響。

在未來研究可結合植物生理生態學及分子生物學的研究，例如：水分利用效率、氣孔導度、孢子傳播形式、光合途徑分化等，以補足石松、蕨類、禾本科、莎草科中的性狀數據缺口，已證明其功能多樣性與環境變化之關聯。

四、以典型對應分析分群

為了解氣候變遷是否對特定功能群發生影響，本研究先對部分功能性狀：葉有毛、宿根、葉緣反捲、葉質，對物種氣候區位進行迴歸分析（表 12、表 13、表 14、表 15），用以確定功能性狀是否對特定氣候有趨勢性。結果顯示葉緣反捲對年均氣溫、季節氣溫標準差具有負相關性，對年降雨量具有正相關，而葉質的線性趨勢對年降雨量有正相關性，葉有毛則對季節降水標準差具有正相關性，其他的性狀則並無對特定氣候區位具有特別顯著的結果。葉緣反捲在部分時間乾燥且降水季節性強烈的氣候區中，可以有效降低水分蒸散速率 (Yavas et al., 2023)，因此較有可能出現在季節性降水且年降雨量高並蒸發強烈的氣候區位，且在 Nilsen et al. (2014) 和 Wang et al. (2020) 的研究中顯示杜鵑花屬 (*Rhododendron*) 的葉片在氣溫降低時會顯著反捲，這種性狀被認為有助於減少葉片表面積，降低水分散失，並減輕寒冷與強光對葉片的傷害。葉質的部分，厚葉結構被認為能有效減少水分散失，並在降雨量高但具季節性乾旱的區域維持較高的水分利用效率，這類結構性性狀有助於植物在乾旱壓力下維持葉片水勢並促進水分利用效率 (Fang & Xiong, 2015)。葉上的毛狀體可透過反射過量太陽輻射降低葉片溫度，從而減少水分蒸散需求 (Moles et al., 2020)，在乾濕季交替環境中，此機制能協調水分保存與光合作用效率的動態平衡 (Perez-Estrada et al., 2000)。

本研究發現大部分性狀與氣候區位並無顯著相關，Wigley et al. (2020) 的研究中指出，某些功能性狀可能受多重環境因子或生物交互作用共同影響，單一氣候因子難以解釋其變異，因此可能後續需要同時針對多重的環境因子進行分析比對。

在進行功能性狀對氣候區位的迴歸後，使用樣區物種豐度資料對功能性狀的



典型對應分析 (CCA)，分析草本與木本植物 (圖 10、圖 11)，而在分析禾本科及莎草科時，因基礎性狀資料不足及樣本數不足的問題，無法進行有效的分群，因此將禾本科及莎草科歸納回草本植物進行分析。

草本植物總共分出 4 個群集，第一群以宿根比例及葉具有毛狀體的比例較高，第二群的葉緣反捲性狀較為突出，且葉質地較厚，第三群的宿根比例最高，第四群的性狀則是平均分布，但由於單就功能性狀方面並無法看出較為顯著的趨勢，因此加入物種氣候區位來進行探討豐度變化的差異(圖 12、圖 13)。

值得注意的是第二群和第四群的物種，第二群的物種在 bio15 (季節降水標準差)，能容許的差異值是最小的，而在第三次調查，也就是 SPEI 指數顯示乾旱的時期，這群物種的豐度顯著的下降，而在第四次調查，也就是 SPEI 指數稍微回升後，其豐度也跟著上升，也就是說這個分群中的物種對於水分變化較為敏感，需要穩定的降水以維持一定的族群數量，而第四群的物種則是生存在 bio1 (年均溫度)較低及 bio12 (年降雨量)較高的物種區位，在第三次調查，也就是 SPEI 指數顯示乾旱的時期，且伴隨著升溫，其豐度顯著的降低，並且在第四次調查中也並未回升，因此在氣候變遷降水異常的狀況下，這兩群物種可能是較脆弱的族群，而其他兩群的豐度則較為穩定，在豐度變化上並未特別受到影響。

在木本植物方面則分出明顯的兩個群集，兩群在性狀上雖並未展現出明顯的差異，但在檢視物種氣候區位後發現，第一群的植物明顯生長在較第二群年均氣溫及最乾季均溫更低的氣候區位，而在兩群的豐度變化中可以明顯看到第一群的物種在第三次調查面臨乾旱時，顯著的降低，而我們在調查中也發現屬於第一群的玉山杜鵑在大水窟區域有大量乾枯死亡的現象，而第二群的灌木物種也有受到乾旱的影響而導致的豐度下降，實地也觀察到部分紅毛杜鵑、臺灣二葉松或華山松乾枯凋萎的現象，這符合 De Boeck et al. (2016)及 De Boeck et al. (2018)兩篇研究顯示，升溫和乾旱所造成的共同效應可能會引起更加嚴重的植物生產力衰退，而升溫可能導致這些高山灌木物種在面臨極端降雨的情況下引起族群減少的狀況。



五、物種抗性評分分群

典型對應分析是以物種豐度資料對應功能性狀分群後再進行各群集的豐度變化比較，本研究希望更進一步單純以功能性狀作為評分依據分群，以最主要的草本植物類別進行分析嘗試，再以此評分依據觀察是否以功能性狀上來看抗性較好的物種豐度會上升。本評分依據選取冬枯、葉毛狀體的有無、葉緣是否反捲以及葉質作為評分依據。宿根 (herbaceous perennial)代表多年生植物能夠透過地下部位的儲存與休眠機制，順利度過不利季節並在環境回暖時迅速恢復生長。這種生活型提供了物種對氣候波動的緩衝，有助於維持族群穩定與基因多樣性 (Zhou & Zhao, 2004)，葉毛狀體 (trichome)則在調節葉片溫度與水分流失上扮演關鍵角色。研究指出，當水分可用性降低時，葉毛密度會顯著增加，這不僅提升葉片反射率，減少過度日照造成的過熱，同時也有助於減緩水分蒸散，提升植物對乾旱的耐受力 (Chen et al., 2022)。此外，毛狀體還可作為物理屏障，減少草食性動物的危害 (Domínguez et al., 2011)。葉緣反捲 (leaves recurved)是植物對乾旱和高蒸散壓力的另一種典型適應。葉緣反捲能有效縮小葉片暴露面積，降低氣孔直接暴露於乾燥空氣中的比例，進而減少水分散失。這種形態特徵在乾旱季節性強烈的地區尤為常見，並且與植物整體的乾旱耐受策略協同作用 (Yavas et al., 2023)，至於葉質 (leaf texture)，從紙質、革質到肉質的變化，反映植物對水分與熱能管理的不同策略。革質與肉質葉片通常具有較高的葉乾物質含量和較低的比葉面積，這些特性有助於提升葉片的機械強度、減少水分流失，同時提升對高溫與乾旱的耐受性 (Silveira et al., 2021; Valliere et al., 2023; Wright et al., 2004)。

將評分結果 (表 16)結合四次調查的豐度資料，可以發現所有類別都在第三次調查中有豐度減少的趨勢 (圖 14、圖 15)，但對乾旱和升溫較低適應性的兩個類別相對較有適應性的類別，下降幅度較為顯著。可以推測，具有耐旱及適應升溫功能性狀的物種群雖然在無乾旱的時期豐度較低，但在第三次調查也就是較長期的乾旱早期時，其豐度變化波動較小，受到升溫及乾旱的影響較低，但此討論指基於地上的特徵進行討論，在文獻回顧中也提到許多與水分相關之性狀與根部相關，基於

高山調查無法在短時間內收集所有物種之根系資料，且人力資金的限制使目前無法取得較高精度的根系資料，因此認為此分析為一個實驗性之分析，待後續有更詳細之根系資料，可以將其完善。





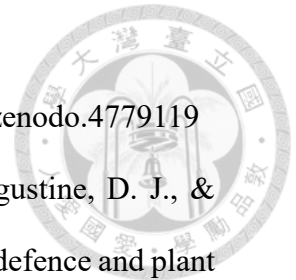
第五章、結論

本研究以 GLORIA 高山監測樣區長期調查資料，結合植物功能性狀分析，探討氣候變遷對臺灣大水窟及雪山山域高山植群的影響。氣候結果顯示，2010 至 2024 年間，兩區域年均溫皆呈現顯著上升，且自 2019 年起長期出現水分不足與極端乾旱現象。植群組成方面，第四次調查時物種數雖有回升，但多樣性變化呈現空間差異，大水窟區域多樣性提升，雪山區域則波動較大，反映微棲地與局部因子的影響。物種功能性狀分析發現，葉緣反捲、葉質厚實與葉表毛狀體等性狀與特定氣候因子具顯著相關，顯示這些性狀有助於植物適應升溫與乾旱環境。進一步以典型對應分析分群，發現草本及木本植物各功能群對乾旱與升溫的反應不一，部分對水分變化敏感的群組在乾早期豐度顯著下降，尤其生長於較低溫區位的木本植物(如玉山杜鵑)出現大量枯死。抗性評分系統進一步證實，具備耐旱及耐熱功能性狀的物種群在極端氣候下豐度波動較小，顯示這些性狀為高山植群調適氣候變遷的重要機制。整體而言，臺灣高山植群正經歷以功能群組為單位的結構性調整，功能性狀的變化成為預測未來植群動態與生態系服務穩定性的關鍵。建議未來高山生態系保育與管理，應持續監測功能性狀變化，並強化對特有種及脆弱功能群的保護，以因應持續加劇的氣候變遷壓力。

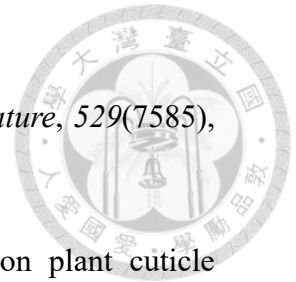


第六章、參考文獻

- 何春蓀 (1986)臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書
- 林政道、劉以誠、郭礎嘉 (2024) 臺灣高海拔山區草原生態系調查與監測-第4次調查(2/4) 農業部林業及自然保育署 113 年度科技計畫研究報告
- 星野卓二、正木智美 (2011)日本カサツリグサ科植物図譜。平凡社
- 陳志輝、廖顯淳、林哲宇、葉修溢、吳聖傑 (2017) 台灣原生植物全圖鑑第三卷：禾本科—溝繁縷科
- 張石角 (1995)雪霸國家公園武陵地區災害敏感區之調查與防範之研究。國家公園學報 6(1): 1-24。
- 許晃雄、王嘉琪、陳正達、李明旭、詹士樑 (2024)國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適[許晃雄、李明旭 主編]。國家科學及技術委員會與環境部。
- 黃明萬、潘以文、廖志中 (2014)玉山國家公園玉山地體構造與地質演變-第1年地質地層與區域構造調查。內政部營建署玉山國家公園管理處。
- 劉和義、劉以誠 (2010)高海拔山區草原生態系動態調查。行政院農業委員會林務局。
- 歐辰雄. (2002)雪霸國家公園植群生態調查—大雪山地區。內政部營建署雪霸國家公園管理處九十一年度研究報告。
- Abdaladze, O. (2015). Sensitive alpine plant communities to the global environmental changes (Kazbegi Region, the Central Great Caucasus). *American Journal of Environmental Protection*, 4(3). <https://doi.org/10.11648/j.ajep.s.2015040301.25>
- Basnett, S., & Devy, S. M. (2021). Phenology determines leaf functional traits across species in the Sikkim Himalaya. *Alpine Botany*, 131(1), 63–72. <https://doi.org/10.1007/s00035-020-00244-5>
- Blenkinsop, S., Alves, L. M., & Smith, A. J. P. (2021). Climate change increases extreme



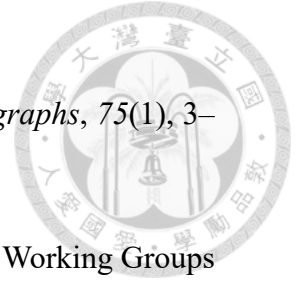
- rainfall and the chance of floods. *Zenodo*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4779119>
- Blumenthal, D. M., Mueller, K. E., Kray, J. A., Ocheltree, T. W., Augustine, D. J., & Wilcox, K. R. (2020). Traits link drought resistance with herbivore defence and plant economics in semi-arid grasslands: The central roles of phenology and leaf dry matter content. *Journal of Ecology*, 108(6), 2336–2351. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13454>
- Chen, J.-J., Sun, Y., Kopp, K., Oki, L., Jones, S. B., & Hipps, L. (2022). Effects of water availability on leaf trichome density and plant growth and development of *Shepherdia×utahensis*. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.855858>
- Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelús, C. L., Gilman, A. C., & Longino, J. T. (2008). Global warming, elevational range shifts, and lowland biotic attrition in the wet tropics. *Science*, 322(5899), 258-261. <https://doi.org/10.1126/science.1162547>
- Cui, H. J., Töpper, J. P., Yang, Y., Vandvik, V., & Wang, G. X. (2018). Plastic population effects and conservative leaf traits in a reciprocal transplant experiment simulating climate warming in the Himalayas. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/ARTN 106910.3389/fpls.2018.01069>
- De Boeck, H. J., Bassin, S., Verlinden, M., Zeiter, M., & Hiltbrunner, E. (2016). Simulated heat waves affected alpine grassland only in combination with drought. *New Phytologist*, 209(2), 531–541. <https://doi.org/10.1111/nph.13601>
- De Boeck, H. J., Hiltbrunner, E., Verlinden, M., Bassin, S., & Zeiter, M. (2018). Legacy effects of climate extremes in alpine grassland. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/ARTN 158610.3389/fpls.2018.01586>
- Díaz, S., Kattge, J., Cornelissen, J. H. C., Wright, I. J., Lavorel, S., Dray, S., Reu, B., Kleyer, M., Wirth, C., Colin Prentice, I., Garnier, E., Bönisch, G., Westoby, M., Poorter, H., Reich, P. B., Moles, A. T., Dickie, J., Gillison, A. N., Zanne, A. E., Gorné,



- L. D. (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529(7585), 167–171. <https://doi.org/10.1038/nature16489>
- Domínguez, E., Cuartero, J., & Heredia, A. (2011). An overview on plant cuticle biomechanics. *Plant Science*, 181(2), 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.04.016>
- Dong, N., Prentice, I. C., Wright, I. J., Evans, B. J., Togashi, H. F., Caddy-Retalic, S., McInerney, F. A., Sparrow, B., Leitch, E., & Lowe, A. J. (2020). Components of leaf-trait variation along environmental gradients. *New Phytologist*, 228(1), 82–94. <https://doi.org/10.1111/nph.16558>
- Elmendorf, S. C., Henry, G. H. R., Hollister, R. D., Björk, R. G., Bjorkman, A. D., Callaghan, T. V., Collier, L. S., Cooper, E. J., Cornelissen, J. H. C., Day, T. A., Fosaa, A. M., Gould, W. A., Grétarsdóttir, J., Harte, J., Hermanutz, L., Hik, D. S., Hofgaard, A., Jarrad, F., Jónsdóttir, I. S., Wookey, P. A. (2012). Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: Heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 15(2), 164–175. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x>
- Eviner, V. T., & Chapin, F. S. (2003). Functional matrix: A conceptual framework for predicting multiple plant effects on ecosystem processes. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 34, 455–485. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132342>
- Fang, Y. J., & Xiong, L. Z. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 72(4), 673–689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- Gallagher, R. V., Allen, S., & Wright, I. J. (2019). Safety margins and adaptive capacity of vegetation to climate change. *Scientific Reports*, 9 <https://doi.org/ARTN 8241> 10.1038/s41598-019-44483-x



- Gong, H. D., Cui, Q. J., & Gao, J. (2020). Latitudinal, soil and climate effects on key leaf traits in northeastern China. *Global Ecology and Conservation*, 22. <https://doi.org/ARTN e0090410.1016/j.gecco.2020.e00904>
- Gottfried, M., Pauli, H., Futschik, A., Akhalkatsi, M., Barancok, P., Alonso, J. L. B., Coldea, G., Dick, J., Erschbamer, B., Calzado, M. R. F., Kazakis, G., Krajci, J., Larsson, P., Mallaun, M., Michelsen, O., Moiseev, D., Moiseev, P., Molau, U., Merzouki, A., Grabherr, G. (2012). Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. *Nature Climate Change*, 2(2), 111–115. <https://doi.org/10.1038/Nclimate1329>
- Grabherr, G., Gottfried, M., & Pauli, H. (1994). Climate effects on mountain plants. *Nature*, 369(6480), 448–448. <https://doi.org/DOI 10.1038/369448a0>
- Harrison, S. P., Gornish, E. S., & Copeland, S. (2015). Climate-driven diversity loss in a grassland community. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(28), 8672–8677. <https://doi.org/10.1073/pnas.1502074112>
- Heilmeyer, H. (2019). Functional traits explaining plant responses to past and future climate changes. *Flora*, 254, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.04.004>
- Henn, J. J., Buzzard, V., Enquist, B. J., Halbritter, A. H., Klanderuds, K., Maitner, B. S., Michaletz, S. T., Potschs, C., Seltzer, L., Telford, R. J., Yang, Y., Zhang, L., & Vandvik, V. (2018). Intraspecific trait variation and phenotypic plasticity mediate alpine plant species response to climate change. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/ARTN 154810.3389/fpls.2018.01548>
- Hoffmann, A. A., & Sgrò, C. M. (2011). Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, 470(7335), 479–485. <https://doi.org/10.1038/nature09670>
- Hooper, D. U., Chapin, F. S., Ewel, J. J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J. H., Lodge, D. M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstad, A. J., Vandermeer, J., & Wardle, D. A. (2005). Effects of biodiversity on ecosystem

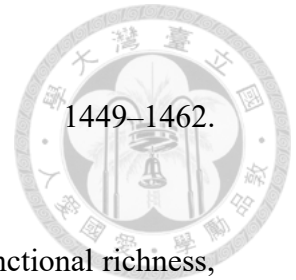


- functioning: A consensus of current knowledge. *Ecological Monographs*, 75(1), 3–35. [https://doi.org/Doi 10.1890/04-0922](https://doi.org/Doi%2010.1890/04-0922)
- IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 35–115. <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>
- Johnstone, J. (2021). Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems. *Mountain Research and Development*, 41(4), M1–M2. <https://doi.org/10.1659/mrd.mm265.1>
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Kluge, J., & Kessler, M. (2007). Morphological characteristics of fern assemblages along an elevational gradient: Patterns and causes. *Ecotropica*, 13, 27–44.
- Kraft, N. J. B., Adler, P. B., Godoy, O., James, E. C., Fuller, S., & Levine, J. M. (2015). Community assembly, coexistence and the environmental filtering metaphor. *Functional Ecology*, 29(5), 592–599. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12345>
- Lambers, H. (2008). *Plant Physiological Ecology*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>
- Lavorel, S., & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: Revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16(5), 545–556. [https://doi.org/DOI 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x](https://doi.org/DOI%2010.1046/j.1365-2435.2002.00664.x)
- Lavorel, S., McIntyre, S., Landsberg, J., & Forbes, T. D. A. (1997). Plant functional classifications: From general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution*, 12(12), 474–478. <https://doi.org/Doi>



10.1016/S0169-5347(97)01219-6

- Lawlor, J. A., Comte, L., Grenouillet, G., Lenoir, J., Baecher, J. A., Bandara, R. M. W. J., Bertrand, R., Chen, I. C., Diamond, S. E., Lancaster, L. T., Moore, N., Murienne, J., Oliveira, B. F., Pecl, G. T., Pinsky, M. L., Rolland, J., Rubenstein, M., Scheffers, B. R., Thompson, L. M., Sunday, J. (2024). Mechanisms, detection and impacts of species redistributions under climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(5), 351–368. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00527-z>
- Li, H. L., Li, X. L., & Zhou, X. L. (2020). Trait means predict performance under water limitation better than plasticity for seedlings of Poaceae species on the eastern Tibetan Plateau. *Ecology and Evolution*, 10(6), 2944–2955. <https://doi.org/10.1002/ece3.6108>
- Llerena-Zambrano, M., Ordoñez, J. C., Llambí, L. D., van der Sande, M., Pinto, E., Salazar, L., & Cuesta, F. (2021). Minimum temperature drives community leaf trait variation in secondary montane forests along a 3000 m elevation gradient in the tropical Andes. *Plant Ecology & Diversity*, 14(1-2), 47–63. <https://doi.org/10.1080/17550874.2021.1903604>
- Lubbe, F. C., Bitomský, M., Bartoš, M., Marešová, I., Martínková, J., & Klimešová, J. (2023). Trash or treasure: Rhizome conservation during drought. *Functional Ecology*, 37(9), 2300–2311. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14385>
- Luo, W. T., Zuo, X. A., Griffin-Nolan, R. J., Xu, C., Ma, W., Song, L., Helsen, K., Lin, Y. C., Cai, J. P., Yu, Q., Wang, Z. W., Smith, M. D., Han, X. G., & Knapp, A. K. (2019). Long term experimental drought alters community plant trait variation, not trait means, across three semiarid grasslands. *Plant and Soil*, 442(1-2), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04176-w>
- Madsen-Hepp, T. R., Franklin, J., McFaul, S., Schauer, L., & Spasojevic, M. J. (2023). Plant functional traits predict heterogeneous distributional shifts in response to



- climate change. *Functional Ecology*, 37(5), 1449–1462.
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.14308>
- Mason, N. W. H., Mouillot, D., Lee, W. G., & Wilson, J. B. (2005). Functional richness, functional evenness and functional divergence: the primary components of functional diversity. *Oikos*, 111(1), 112–118. <https://doi.org/DOI 10.1111/j.0030-1299.2005.13886.x>
- Moles, A. T., Laffan, S. W., Keighery, M., Dalrymple, R. L., Tindall, M. L., & Chen, S. C. (2020). A hairy situation: Plant species in warm, sunny places are more likely to have pubescent leaves. *Journal of Biogeography*, 47(9), 1934–1944.
<https://doi.org/10.1111/jbi.13870>
- Moles, A. T., Perkins, S. E., Laffan, S. W., Flores-Moreno, H., Awasthy, M., Tindall, M. L., Sack, L., Pitman, A., Kattge, J., Aarssen, L. W., Anand, M., Bahn, M., Blonder, B., Cavender-Bares, J., Cornelissen, J. H. C., Cornwell, W. K., Díaz, S., Dickie, J. B., Freschet, G. T., Bonser, S. P. (2014). Which is a better predictor of plant traits: temperature or precipitation? *Journal of Vegetation Science*, 25(5), 1167–1180.
<https://doi.org/10.1111/jvs.12190>
- Moseley, R. K. (2011). *Revisiting Shangri-La: Photographing a Century of Environmental and Cultural Change in the Mountains of Southwest China*. China Intercontinental Press. <https://books.google.com.tw/books?id=3MhAMwEACAAJ>
- Nilsen, E. T., Arora, R., & Upmanyu, M. (2014). Thermonastic leaf movements in *Rhododendron* during freeze–thaw events: Patterns, functional significances, and causes. *Environmental and Experimental Botany*, 106, 34–43.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.01.005>
- Nitta, J. H., Meyer, J. Y., Taputuarai, R., & Davis, C. C. (2017). Life cycle matters: DNA barcoding reveals contrasting community structure between fern sporophytes and gametophytes. *Ecological Monographs*, 87(2), 278–296.



<https://doi.org/10.1002/ecm.1246>

Noble, I. R., & Gitay, H. (1996). A functional classification for predicting the dynamics of landscapes. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 329–336. <https://doi.org/10.2307/3236276>

Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>

Pauchard, A., Milbau, A., Albiñ, A., Alexander, J., Nun, M. A., Daehler, C., Englund, G., Essl, F., Evengård, B., Greenwood, G. B., Haider, S., Lenoir, J., McDougall, K., Muths, E., Nuñez, M. A., Olofsson, J., Pellissier, L., Rabitsch, W., Rew, L. J., . . . Kueffer, C. (2016). Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: New challenges for ecology and conservation. *Biological Invasions*, 18(2), 345–353. <https://doi.org/10.1007/s10530-015-1025-x>

Pauli, H., Gottfried, M., Lamprecht, A., Niessner, S., Rumpf, S., Winkler, M., Steinbauer, K., & Grabherr, G. (2015). *The GLORIA field manual – Standard Multi-Summit Approach, Supplementary Methods and Extra Approaches*.

Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraer, M., Caceres, E. B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M. Z., Liu, X. D., Miller, J. R., Ning, L., Ohmura, A., Palazzi, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M. B., . . . Grp, M. R. I. E. W. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5), 424–430. <https://doi.org/10.1038/Nclimate2563>

Perez-Estrada, L. B., Cano-Santana, Z., & Oyama, K. (2000). Variation in leaf trichomes of *Wigandia urens*: Environmental factors and physiological consequences. *Tree Physiology*, 20(9), 629–632. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.9.629>



- Petchey, O. L., & Gaston, K. J. (2002). Functional diversity (FD), species richness and community composition. *Ecology Letters*, 5(3), 402–411. <https://doi.org/DOI10.1046/j.1461-0248.2002.00339.x>
- Pugnaire, F. I., Morillo, J. A., Peñuelas, J., Reich, P. B., Bardgett, R. D., Gaxiola, A., Wardle, D. A., & Van Der Putten, W. H. (2019). Climate change effects on plant-soil feedbacks and consequences for biodiversity and functioning of terrestrial ecosystems. *Science Advances*, 5(11), eaaz1834. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1834>
- Reich, P. B., Walters, M. B., & Ellsworth, D. S. (1992). Leaf life-span in relation to leaf, plant, and stand characteristics among diverse ecosystems. *Ecological Monographs*, 62(3), 365–392. <https://doi.org/10.2307/2937116>
- Rodríguez-Alarcón, S., Tamme, R., & Carmona, C. P. (2022). Intraspecific trait changes in response to drought lead to trait convergence between-but not within-species. *Functional Ecology*, 36(8), 1900–1911. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14099>
- Salick, J., Fang, Z., & Hart, R. (2019). Rapid changes in eastern Himalayan alpine flora with climate change. *American Journal of Botany*, 106(4), 520–530. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1263>
- Salick, J., Ghimire, S. K., Fang, Z. D., Dema, S., & Konchar, K. M. (2014). Himalayan Alpine Vegetation, Climate Change and Mitigation. *Journal of Ethnobiology*, 34(3), 276–293. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-34.3.276>
- Salick, J., Yang, Y. P., & Amend, A. (2005). Tibetan land use and change near Khawa Karpo, Eastern Himalayas. *Economic Botany*, 59(4), 312–325. [https://doi.org/DOI10.1663/0013-0001\(2005\)059\[0312:Tluacn\]2.0.Co;2](https://doi.org/DOI10.1663/0013-0001(2005)059[0312:Tluacn]2.0.Co;2)
- Sandel, B., & Low, R. (2019). Intraspecific trait variation, functional turnover and trait differences among native and exotic grasses along a precipitation gradient. *Journal of Vegetation Science*, 30(4), 633–643. <https://doi.org/10.1111/jvs.12756>



- Silveira, M. F., da Silva, A. C., Duarte, E., Muzeka, L. M., Larsen, J. G., dos Santos, V., Lovatel, Q. C., & Higuchi, P. (2021). Functional composition of subtropical highland forests in different successional stages in southern Brazil. *Bosque*, 42(3), 333–341. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000300333>
- Soheili, F., Heydari, M., Woodward, S., & Naji, H. R. (2023). Adaptive mechanism in *Quercus brantii* Lindl. leaves under climatic differentiation: morphological and anatomical traits. *Scientific Reports*, 13(1), 3580. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30762-1>
- Stein, B. A., Staudt, A., Cross, M. S., Dubois, N. S., Enquist, C., Griffis, R., Hansen, L. J., Hellmann, J. J., Lawler, J. J., Nelson, E. J., & Pairis, A. (2013). Preparing for and managing change: Climate adaptation for biodiversity and ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(9), 502–510. <https://doi.org/10.1890/120277>
- Steinbauer, K., Lamprecht, A., Semenchuk, P., Winkler, M., & Pauli, H. (2019). Dieback and expansions: Species-specific responses during 20 years of amplified warming in the high Alps. *Alpine Botany*, 130. <https://doi.org/10.1007/s00035-019-00230-6>
- Steinbauer, M. J., Field, R., Grytnes, J. A., Trigas, P., Ah-Peng, C., Attorre, F., Birks, H. J. B., Borges, P. A. V., Cardoso, P., Chou, C. H., De Sanctis, M., de Sequeira, M. M., Duarte, M. C., Elias, R. B., Fernández-Palacios, J. M., Gabriel, R., Gereau, R. E., Gillespie, R. G., Greimler, J., Beierkuhnlein, C. (2016). Topography-driven isolation, speciation and a global increase of endemism with elevation. *Global Ecology and Biogeography*, 25(9), 1097–1107. <https://doi.org/10.1111/geb.12469>
- Su, H. J. (1985). Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan. (III). A scheme of geographical climatic regions. *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 18:3, 33–44.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L.,



- Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145–148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>
- Valliere, J. M., Nelson, K. C., & Martinez, M. C. (2023). Functional traits and drought strategy predict leaf thermal tolerance. *Conservation Physiology*, 11(1) <https://doi.org/10.1093/conphys/coad085>
- Vicente-Serrano, S., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Violle, C., Navas, M. L., Vile, D., Kazakou, E., Fortunel, C., Hummel, I., & Garnier, E. (2007). Let the concept of trait be functional! *Oikos*, 116(5), 882–892. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0030-1299.15559.x>
- Walker, B., Kinzig, A., & Langridge, J. (1999). Plant attribute diversity, resilience, and ecosystem function: The nature and significance of dominant and minor species. *Ecosystems*, 2(2), 95–113. <https://doi.org/DOI 10.1007/s100219900062>
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389–395. <https://doi.org/DOI 10.1038/416389a>
- Wang, H., Nilsen, E. T., & Upmanyu, M. (2020). Mechanical basis for thermonastic movements of cold-hardy *Rhododendron* leaves. *Journal of The Royal Society Interface*, 17(164), 20190751. <https://doi.org/10.1098/rsif.2019.0751>
- Weiskopf, S. R., Rubenstein, M. A., Crozier, L. G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J. E., Hyde, K. J. W., Morelli, T. L., Morisette, J. T., Muñoz, R. C., Pershing, A. J., Peterson, D. L., Poudel, R., Staudinger, M. D., Sutton-Grier, A. E., Thompson, L., Vose, J., Weltzinn, J. F., & Whyte, K. P. (2020). Climate change effects on



- biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, 733. <https://doi.org/ARTN13778210.1016/j.scitotenv.2020.137782>
- Wigley, B. J., Charles-Dominique, T., Hempson, G. P., Stevens, N., te Beest, M., Archibald, S., Bond, W. J., Bunney, K., Coetsee, C., Donaldson, J., Fidelis, A., Gao, X., Gignoux, J., Lehmann, C., Massad, T. J., Midgley, J. J., Millan, M., Schwilk, D., Siebert, F., Kruger, L. M. (2021). A handbook for the standardised sampling of plant functional traits in disturbance-prone ecosystems, with a focus on open ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 69(2),. https://doi.org/10.1071/Bt20048_Co
- Wigley, B. J., Charles-Dominique, T., Hempson, G. P., Stevens, N., TeBeest, M., Archibald, S., Bond, W. J., Bunney, K., Coetsee, C., Donaldson, J., Fidelis, A., Gao, X., Gignoux, J., Lehmann, C., Massad, T. J., Midgley, J. J., Millan, M., Schwilk, D., Siebert, F., Kruger, L. M. (2020). A handbook for the standardised sampling of plant functional traits in disturbance-prone ecosystems, with a focus on open ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 68(8), 473–531. <https://doi.org/10.1071/Bt20048>
- Woodward, F. I., & Cramer, W. (1996). Plant functional types and climatic change: Introduction. *Journal of Vegetation Science*, 7(3), 306–308. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.1996.tb00489.x>
- Wright, I. J., Dong, N., Maire, V., Prentice, I. C., Westoby, M., Díaz, S., Gallagher, R. V., Jacobs, B. F., Kooyman, R., Law, E. A., Leishman, M. R., Niinemets, Ü., Reich, P. B., Sack, L., Villar, R., Wang, H., & Wilf, P. (2017). Global climatic drivers of leaf size. *Science*, 357(6354), 917. <https://doi.org/10.1126/science.aal4760>
- Wright, I. J., Reich, P. B., Westoby, M., Ackerly, D. D., Baruch, Z., Bongers, F., Cavender-Bares, J., Chapin, T., Cornelissen, J. H. C., Diemer, M., Flexas, J., Garnier, E., Groom, P. K., Gulias, J., Hikosaka, K., Lamont, B. B., Lee, T., Lee, W., Lusk, C., Villar, R. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428(6985), 821–



827. <https://doi.org/10.1038/nature02403>

Yavas, I., Jamal, M. A., Ul Din, K., Ali, S., Hussain, S., & Farooq, M. (2023). Drought-induced changes in leaf morphology and anatomy: Overview, implications and perspectives. *Polish Journal of Environmental Studies*.
<https://doi.org/10.15244/pjoes/174476>

Zhou, R., & Zhao, H. (2004). Seasonal pattern of antioxidant enzyme system in the roots of perennial forage grasses grown in alpine habitat, related to freezing tolerance. *Physiologia Plantarum*, 121(3), 399–408. <https://doi.org/10.1111/j.0031-9317.2004.00313.x>



圖表

表 1、大水窟區域與雪山區域六座山峰在 2010 - 2024 年間年均溫線性迴歸

樣區	趨勢率	p 值	顯著性 ¹⁾
DSH	0.052 °C/年	0.0019	**
JNJ	0.060 °C/年	0.0009	***
SEN	0.042 °C/年	0.0058	**
SUN	0.065 °C/年	0.0001	***
TSW	0.066 °C/年	0.0002	***
YAT	0.065 °C/年	0.0001	***

¹⁾ **: $p\text{-value} < 0.01$; ***: $p\text{-value} < 0.001$

表 2、大水窟與雪山區域 2008-2024 間四次複查物種名錄表

中文俗名	科名	學名	code	瀕危等級 ¹⁾	來源
小杉葉石杉	Lycopodiaceae	<i>Huperzia selago</i> (L.) Bernh. ex Schrank & Mart.	SP001	VU	原生
石松	Lycopodiaceae	<i>Lycopodium clavatum</i> L.	SP002	LC	原生
玉山地刷子	Lycopodiaceae	<i>Lycopodium complanatum</i> L.	SP003	LC	原生
玉柏	Lycopodiaceae	<i>Lycopodium obscurum</i> L.	SP004	LC	原生
玉山石松	Lycopodiaceae	<i>Lycopodium veitchii</i> Christ	SP005	LC	原生
逆羽蹄蓋蕨	Athyriaceae	<i>Athyrium oppositipennum</i> Hayata var. <i>pubescens</i> Tagawa	SP006	LC	原生
腺鱗毛蕨	Dryopteridaceae	<i>Dryopteris alpestris</i> Tagawa	SP007	LC	原生

廣布鱗毛蕨	Dryopteridaceae	<i>Dryopteris expansa</i> (C.Presl) Fraser-Jenk. & Jermy	SP008	LC	原生
玉山蕨	Polypodiaceae	<i>Selliguea quasidivariata</i> (Hayata) H.Ohashi & K.Ohashi	SP009	LC	原生
刺柏	Cupressaceae	<i>Juniperus formosana</i> Hayata var. <i>formosana</i>	SP010	LC	原生
香青	Cupressaceae	<i>Juniperus squamata</i> Lamb.	SP011	LC	原生
臺灣冷杉	Pinaceae	<i>Abies kawakamii</i> (Hayata) T. Itô	SP012	LC	特有
臺灣華山松	Pinaceae	<i>Pinus armandii</i> var. <i>mastersiana</i> (Hayata) Hayata	SP013	LC	特有
臺灣二葉松	Pinaceae	<i>Pinus taiwanensis</i> Hayata	SP014	LC	特有
臺灣鹿藥	Asparagaceae	<i>Maianthemum formosanum</i> (Hayata) La Frankie	SP015	LC	原生
垂穗薹	Cyperaceae	<i>Carex brachyanthera</i> Ohwi	SP016	LC	特有
短莖宿柱薹	Cyperaceae	<i>Carex breviculmis</i> R. Br.	SP017	LC	原生
黃花薹	Cyperaceae	<i>Carex chrysolepis</i> Franch. & Sav.	SP018	LC	原生
紅鞘薹	Cyperaceae	<i>Carex filicina</i> Nees	SP019	LC	原生
南投薹	Cyperaceae	<i>Carex oxyandra</i> Kudo	SP020	LC	原生
抱鱗宿柱薹	Cyperaceae	<i>Carex tristachya</i> var. <i>pocilliformis</i> (Boott) Kük.	SP021	LC	原生
玉山針蘭	Cyperaceae	<i>Trichophorum subcapitatum</i> (Thwaites & Hook.) D.A.Simpson	SP022	LC	原生
中國地楊梅	Juncaceae	<i>Luzula effusa</i> Buchenau	SP023	LC	原生
臺灣地楊梅	Juncaceae	<i>Luzula taiwaniana</i> Satake	SP024	LC	特有
臺灣藜蘆	Melanthiaceae	<i>Veratrum formosanum</i> Loes.	SP025	LC	特有
南湖雛蘭	Orchidaceae	<i>Amitostigma alpestre</i> Fukuy.	SP026	LC	特有
短距粉蝶蘭	Orchidaceae	<i>Platanthera breviculcarata</i> Hayata	SP027	LC	原生
玉山翦股穎	Poaceae	<i>Agrostis infirma</i> Buse var. <i>infirma</i>	SP028	LC	原生
小穎溝稈草	Poaceae	<i>Aniselytron agrostoides</i> Merr.	SP029	LC	原生
川上短柄草	Poaceae	<i>Brachypodium kawakamii</i> Hayata	SP030	LC	特有



曲芒髮草	Poaceae	<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Trin.	SP031	LC	原生
水山野青茅	Poaceae	<i>Deyeuxia suizanensis</i> (Hayata) Ohwi	SP032	NT	特有
臺灣披鹼草	Poaceae	<i>Elymus formosanus</i> (Honda) Á. Löve	SP033	LC	特有
日本羊茅	Poaceae	<i>Festuca japonica</i> Makino	SP034	EN	原生
羊茅	Poaceae	<i>Festuca ovina</i> L.	SP035	LC	原生
紫羊茅	Poaceae	<i>Festuca rubra</i> L.	SP036	LC	原生
冷杉異燕麥	Poaceae	<i>Helictotrichon abietetorum</i> (Ohwi) Ohwi	SP037	LC	特有
芒	Poaceae	<i>Miscanthus sinensis</i> Andersson	SP038	LC	原生
臺灣三毛草	Poaceae	<i>Trisetum spicatum</i> var. <i>formosanum</i> (Honda) Ohwi	SP039	LC	原生
玉山箭竹	Poaceae	<i>Yushania niitakayamensis</i> (Hayata) Keng f.	SP040	LC	原生
玉山菝葜	Smilacaceae	<i>Smilax vaginata</i> Decne.	SP041	LC	特有
阿里山天胡荽	Araliaceae	<i>Hydrocotyle setulosa</i> Hayata	SP042	LC	原生
臺灣鬼督郵	Asteraceae	<i>Ainsliaea latifolia</i> (D.Don) Sch.Bip.	SP043	LC	原生
玉山抱莖籜簫	Asteraceae	<i>Anaphalis morrisonicola</i> Hayata	SP044	LC	原生
尼泊爾籜簫	Asteraceae	<i>Anaphalis nepalensis</i> (Spreng.) Hand.-Mazz.	SP045	LC	特有
山艾	Asteraceae	<i>Artemisia kawakamii</i> Hayata	SP046	LC	特有
阿里山薊	Asteraceae	<i>Cirsium arisanense</i> Kitam.	SP047	LC	特有
細川氏薊	Asteraceae	<i>Cirsium hosokawai</i> Kitam.	SP048	LC	特有
玉山薊	Asteraceae	<i>Cirsium kawakamii</i> Hayata	SP049	LC	原生
細葉鼠麴草	Asteraceae	<i>Gnaphalium involucratum</i> var. <i>simplex</i> DC.	SP050	LC	特有
森氏山柳菊	Asteraceae	<i>Hieracium morii</i> Hayata	SP051	LC	特有
玉山薄雪草	Asteraceae	<i>Leontopodium microphyllum</i> Hayata	SP052	LC	原生
矮菊	Asteraceae	<i>Myriactis humilis</i> Merr.	SP053	LC	特有



玉山毛蓮菜	Asteraceae	<i>Picris hieracioides</i> subsp. <i>morrisonensis</i> (Hayata) Kitam.	SP054	LC	特有
玉山黃菀	Asteraceae	<i>Senecio morrisonensis</i> Hayata	SP055	LC	原生
一枝黃花	Asteraceae	<i>Solidago virgaurea</i> var. <i>leiocarpa</i> Miq.	SP056	LC	特有
臺灣小檗	Berberidaceae	<i>Berberis kawakamii</i> Hayata	SP057	NT	特有
玉山小檗	Berberidaceae	<i>Berberis morrisonensis</i> Hayata	SP058	LC	原生
玉山筷子芥	Brassicaceae	<i>Arabidopsis lyrata</i> (L.) O'Kane & Al-Shehbaz	SP059	LC	特有
玉山山蘿蔔	Caprifoliaceae	<i>Scabiosa lacerifolia</i> Hayata	SP060	LC	特有
亞毛無心菜	Caryophyllaceae	<i>Arenaria subpilosa</i> (Hayata) Ohwi	SP061	LC	特有
高山無心菜	Caryophyllaceae	<i>Arenaria takasagomontana</i> (Masam.) S.S.Ying	SP062	LC	特有
玉山石竹	Caryophyllaceae	<i>Dianthus pygmaeus</i> Hayata	SP063	VU	特有
玉山佛甲草	Crassulaceae	<i>Sedum morrisonense</i> Hayata	SP064	LC	原生
高山白珠樹	Ericaceae	<i>Gaultheria itoana</i> Hayata	SP065	LC	原生
臺灣馬醉木	Ericaceae	<i>Pieris taiwanensis</i> Hayata	SP066	LC	特有
玉山杜鵑	Ericaceae	<i>Rhododendron pseudochrysanthum</i> Hayata	SP067	LC	特有
紅毛杜鵑	Ericaceae	<i>Rhododendron rubropilosum</i> Hayata var. <i>rubropilosum</i>	SP068	LC	特有
阿里山龍膽	Gentianaceae	<i>Gentiana arisanensis</i> Hayata	SP069	LC	特有
臺灣龍膽	Gentianaceae	<i>Gentiana davidii</i> var. <i>formosana</i> (Hayata) T.N. Ho	SP070	LC	特有
黃斑龍膽	Gentianaceae	<i>Gentiana flavomaculata</i> Hayata var. <i>flavomaculata</i>	SP071	LC	特有
玉山龍膽	Gentianaceae	<i>Gentiana scabrida</i> Hayata	SP072	LC	原生
大籽當藥	Gentianaceae	<i>Swertia macrosperma</i> C.B. Clarke	SP073	LC	特有
單花牻牛兒苗	Geraniaceae	<i>Geranium hayatanum</i> Ohwi	SP074	LC	特有
臺灣茶藨子	Grossulariaceae	<i>Ribes formosanum</i> Hayata	SP075	LC	特有
玉山金絲桃	Hypericaceae	<i>Hypericum nagasawae</i> Hayata	SP076	LC	原生



野薄荷	Lamiaceae	<i>Origanum vulgare</i> L.	SP077	LC	原生
高山露珠草	Onagraceae	<i>Circaea alpina</i> L.	SP078	LC	原生
丁座草	Orobanchaceae	<i>Boschniakia himalaica</i> Hook. f. & Thomson	SP079	LC	特有
玉山小米草	Orobanchaceae	<i>Euphrasia transmorrisonensis</i> Hayata var. <i>transmorrisonensis</i>	SP080	LC	特有
玉山水苦蕒	Plantaginaceae	<i>Veronica morrisonicola</i> Hayata	SP081	LC	原生
瓜子金	Polygalaceae	<i>Polygala japonica</i> Houtt.	SP082	LC	原生
繡球藤	Ranunculaceae	<i>Clematis montana</i> Buch.-Ham. ex DC.	SP083	LC	原生
玉山金梅	Rosaceae	<i>Potentilla leuconota</i> D.Don	SP084	LC	特有
雪山翻白草	Rosaceae	<i>Potentilla tugitakensis</i> Masam.	SP085	EN	原生
高山薔薇	Rosaceae	<i>Rosa transmorrisonensis</i> Hayata	SP086	LC	原生
高山懸鉤子	Rosaceae	<i>Rubus rolfei</i> S. Vidal	SP087	NT	特有
臺灣繡線菊	Rosaceae	<i>Spiraea formosana</i> Hayata	SP088	LC	特有
假繡線菊	Rosaceae	<i>Spiraea hayatana</i> H.L. Li	SP089	LC	特有
玉山繡線菊	Rosaceae	<i>Spiraea morrisonicola</i> Hayata	SP090	LC	特有
高山柳	Salicaceae	<i>Salix taiwanalpina</i> var. <i>takasagoalpina</i> (Koidz.) S.S.Ying	SP091	LC	特有
喜岩堇菜	Violaceae	<i>Viola adenothrix</i> Hayata var. <i>adenothrix</i>	SP092	LC	特有

1) 瀕危等級依照 2017 臺灣維管束植物紅皮書



表 3、2008-2024 間四次調查大水窟與雪山區域目標山峰區域樣區物種多樣性指數

		H'			
		mcy1	mcy2	mcy3	mcy4
TSW(雪山 1)	E05	2.4967	2.3395	1.9200	1.9309
	E10	2.7069	2.7394	2.0059	1.9343
	N05	2.2189	1.8515	2.0017	1.7695
	N10	2.4165	2.2668	2.1121	1.6852
	S05	2.1449	1.9244	1.3476	1.5511
	S10	2.0878	2.1868	1.6992	1.9356
	W05	2.1249	1.9073	1.8566	1.7499
	W10	2.3411	2.1636	1.8690	1.9268
DSH(雪山 2)	E05	2.5096	2.6342	2.1876	2.2792
	E10	2.6650	2.8513	2.4053	2.0485
	N05	2.4332	2.4590	2.1664	2.1212
	N10	2.7605	2.3942	2.0902	2.3085
	S05	2.5364	2.7889	2.2505	2.4483
	S10	3.1032	3.1147	2.6128	2.4378
	W05	2.5859	2.9498	2.4066	2.4911
	W10	3.3968	2.9964	2.2079	2.5094
JNJ(雪山 3)	E05	2.4967	2.4060	1.7843	2.1113
	E10	2.5190	2.3313	2.1676	2.3207
	N05	2.3300	2.4175	2.0993	1.7583
	N10	2.6685	2.3204	2.1184	2.1087
	S05	2.6698	2.8991	2.0273	2.0942
	S10	2.6504	2.8523	2.1058	2.2267
	W05	2.5734	2.4414	2.0629	1.8816
	W10	2.8557	2.5840	2.1423	2.1404
YAT(大水窟 1)	E05	2.6711	2.8244	2.4996	2.6154
	E10	2.5223	2.7902	2.2883	2.4346
	N05	2.2658	2.8115	2.4625	2.4622
	N10	2.5408	3.1060	2.4551	2.5705
	S05	2.2777	2.7992	1.9746	2.5051
	S10	2.5083	2.6890	2.2360	2.4109
	W05	2.3212	2.7783	2.0740	2.2739
	W10	2.6276	2.9805	2.3121	2.7219



續表 4、2008-2024 間四次調查大水窟與雪山區域目標山峰區域樣區物種多樣性指數

		H'			
		mcy1	mcy2	mcy3	mcy4
SEN(大水窟 2)	E05	2.2195	2.6219	2.2952	1.9553
	E10	2.2666	2.6286	2.0270	2.4890
	N05	1.9854	2.3791	1.6928	2.0426
	N10	1.8990	2.3872	2.0118	2.1672
	S05	2.3045	2.7191	2.3985	2.2978
	S10	2.4660	2.7954	2.3864	2.6934
	W05	1.9089	2.2883	1.9641	2.0228
	W10	1.9939	2.3466	1.6742	1.8538
SUN(大水窟 3)	E05	3.1172	3.1662	2.3669	2.5863
	E10	3.1329	3.0604	2.5282	2.7985
	N05	2.6917	3.1049	2.3633	2.8213
	N10	2.6971	2.8785	2.3470	2.4477
	S05	3.2214	3.0418	2.4040	2.6273
	S10	3.0159	3.0900	2.1608	2.7251
	W05	2.6350	2.8320	2.5605	2.8387
	W10	2.6369	2.7443	2.4872	2.2378

註：S 為物種數，H' 為 Shannon 多樣性指數，mcy1、mcy2、mcy3、mcy4 分別代表 2008-2009、2013-2014、2019-2020、2023-2024 四次複查



表 5、CCA 草本物種分群與氣候區位表

物種	物種分群	bio1	bio4	bio9	bio12	bio15	bio17
垂穗薹	1	74.702	2940.614	41.158	2936.596	39.439	416.561
南湖雛蘭	1	65.633	3838.867	16.033	2635.067	42.667	325.933
水山野青茅	1	105.956	918.368	94.456	3121.956	42.294	431.353
日本羊茅	1	99.877	7625.141	0.626	1560.258	53.828	140.902
阿里山天胡荽	1	126.443	4060.679	85.802	2973.566	54.208	308.840
玉山抱莖籜簫	1	97.762	3859.636	55.087	2783.064	55.356	267.717
阿里山薊	1	89.504	3763.684	48.872	2884.504	57.090	252.064
細葉鼠麴草	1	109.594	3995.500	69.594	2578.219	55.469	245.656
矮菊	1	107.608	3748.178	68.527	2851.439	55.734	280.543
一枝黃花	1	70.327	8205.757	-1.561	1737.682	36.262	252.056
玉山山蘿蔔	1	54.282	3704.000	8.380	2748.796	44.155	330.669
高山無心菜	1	98.464	4014.643	51.321	2447.964	52.929	243.393
玉山佛甲草	1	72.269	3796.916	26.510	2693.454	50.976	279.161
玉山龍膽	1	78.283	3992.637	30.056	2619.746	52.635	258.156
大籽當藥	1	111.414	4604.063	52.826	1888.947	65.505	152.935
玉山小米草	1	73.352	3773.497	26.308	2625.599	55.666	276.528
玉山水苦蕒	1	144.964	3821.866	78.194	1365.512	49.223	154.655
瓜子金	1	111.535	6385.215	50.433	1021.577	46.698	82.525
繡球藤	1	106.362	5562.160	34.539	1211.367	61.683	82.920
高山懸鉤子	1	117.140	4187.913	89.611	2392.220	52.156	243.517
玉山針蘭	2	138.566	4265.645	92.450	2419.818	46.289	297.299
川上短柄草	2	71.815	3789.802	25.605	2685.914	48.963	290.815
紫羊茅	2	87.004	5597.310	59.563	810.674	21.038	146.934
高山白珠樹	2	95.729	3895.958	49.669	2620.822	53.131	269.419
臺灣龍膽	2	113.263	4025.559	72.204	2986.012	50.801	335.329
玉山金絲桃	2	81.556	3759.151	37.609	2860.093	55.031	257.978
野薄荷	2	96.847	6111.342	72.071	847.499	19.231	159.982
玉山繡線菊	2	68.176	3887.634	28.322	2586.771	45.659	296.420
臺灣鹿藥	3	89.480	3919.752	43.827	2757.401	48.505	312.470
紅鞘薹	3	145.325	3490.193	108.034	2611.325	49.783	320.460
南投薹	3	75.409	8162.846	-11.307	1640.329	39.055	217.647
中國地楊梅	3	115.052	5100.698	47.736	1558.578	63.776	137.684
臺灣藜蘆	3	84.776	4009.294	33.365	2716.969	41.478	344.918
曲芒髮草	3	51.737	6388.788	34.906	990.746	21.110	174.478
玉山菝葜	3	88.925	4663.290	34.624	2218.323	55.935	216.688



細川氏薊	3	92.000	4073.600	44.250	2597.200	40.200	349.450
玉山毛蓮菜	3	78.095	3787.610	32.010	2744.190	53.000	262.924
玉山筷子芥	3	37.438	7790.034	1.929	1418.882	43.151	171.939
亞毛無心菜	3	86.393	3822.446	40.464	2581.929	54.214	248.893
短莖宿柱薹	4	123.342	5179.446	113.678	1217.148	29.707	178.538
黃花薹	4	78.862	4753.713	23.815	2642.579	45.795	306.108
抱鱗宿柱薹	4	153.194	6233.114	84.674	2161.802	42.963	276.106
臺灣地楊梅	4	63.093	3769.565	18.068	2711.894	47.770	302.578
短距粉蝶蘭	4	79.446	3918.312	31.572	2668.051	45.888	310.504
玉山翦股穎	4	111.581	3011.945	79.184	2881.588	41.029	389.333
臺灣披臉草	4	79.038	3842.225	36.344	2729.556	50.975	292.388
羊茅	4	74.761	6137.257	39.650	822.808	24.657	143.823
冷杉異燕麥	4	65.804	3793.413	18.435	2630.283	47.239	302.848
芒	4	135.423	6929.959	63.716	1490.408	43.493	178.908
臺灣三毛草	4	58.464	3767.111	11.850	2645.386	46.281	302.281
臺灣鬼督郵	4	112.003	4603.040	56.173	2237.981	62.081	199.757
尼泊爾籜簫	4	60.939	5992.951	0.701	1134.937	74.315	73.312
山艾	4	72.851	3811.590	25.022	2668.970	46.097	308.567
玉山薊	4	66.926	3757.926	22.583	2695.435	49.093	294.426
森氏山柳菊	4	70.271	3763.354	24.000	2656.646	49.333	275.208
玉山薄雪草	4	58.121	3740.371	11.903	2678.379	47.218	293.895
玉山黃菀	4	93.947	3619.860	53.737	2736.825	61.000	231.509
玉山石竹	4	92.041	3960.669	43.838	2560.351	48.561	283.000
阿里山龍膽	4	67.713	3847.980	19.332	2630.555	45.217	300.579
黃斑龍膽	4	109.208	3840.610	70.500	3021.775	59.767	263.157
單花牻牛兒苗	4	65.892	3766.513	19.159	2667.159	49.822	280.283
丁座草	4	88.647	4090.711	45.981	2825.644	53.921	261.649
玉山金梅	4	49.818	5359.016	0.443	2554.443	72.092	333.716
臺灣繡線菊	4	99.048	3895.204	56.284	2761.099	56.808	255.438
假繡線菊	4	78.104	4031.731	44.164	2476.104	46.791	266.134
喜岩堇菜	4	117.987	3989.488	75.519	2838.515	56.337	275.232

註：分群僅為初步辨識物種組成與環境因子關聯，代號 bio1、bio4、bio9、bio12、bio15、bio17 分別代表年均氣溫、季節性氣溫標準差、最乾季每日均溫、年降雨量、季節性降雨標準差、最乾季日均降雨量



表 6、CCA 木本物種分群與氣候區位表

物種	物種分群	bio1	bio4	bio9	bio12	bio15	bio17
刺柏	2	131.238	5345.050	67.525	2069.554	63.604	191.050
香青	1	83.053	5402.499	22.542	1208.176	69.659	104.435
臺灣冷杉	1	92.211	3941.167	48.100	2555.659	51.433	259.652
臺灣華山松	2	113.377	3927.110	73.192	2758.699	59.863	227.890
臺灣二葉松	2	137.565	5010.371	83.093	2268.037	53.998	220.321
臺灣小檗	2	95.180	3880.133	51.703	2716.847	54.293	268.603
玉山小檗	1	62.517	3754.321	18.130	2662.965	49.075	282.876
臺灣馬醉木	2	134.955	4156.244	93.388	2927.794	47.897	355.380
玉山杜鵑	1	86.324	3835.131	44.266	2764.563	52.890	283.267
紅毛杜鵑	2	101.534	4086.420	49.960	2453.455	45.097	294.108
臺灣茶藨子	1	82.953	3840.730	36.377	2680.935	51.200	269.214
高山薔薇	2	86.770	3836.665	40.945	2681.978	53.141	258.388

註：分群僅為初步辨識物種組成與環境因子關聯，代號 bio1、bio4、bio9、bio12、bio15、bio17 分別代表年均氣溫、季節性氣溫標準差、最乾季每日均溫、年降雨量、季節性降雨標準差、最乾季月均降雨量



表 7、石松類功能性狀表

物種	生長型	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式 ¹⁾	光合作用(固碳循環)	生態位置	孢子/果實	分布下限	分布上限	著生方式
小杉葉石杉	石松類	地上芽植物	s	CAM	岩屑地	孢子	NA	NA	地生型
石松	石松類	地上芽植物	s	CAM	岩屑地	孢子	200	3706	長橫軸型
玉山地刷子	石松類	地上芽植物	s	CAM	岩屑地	孢子	NA	NA	長橫軸型
玉柏	石松類	地上芽植物	s	CAM	岩屑地	孢子	1500	3885	長橫軸型
玉山石松	石松類	地上芽植物	s	CAM	岩屑地	孢子	1500	3755	長橫軸型

¹⁾繁殖形式：s (sexual only; 僅有性生殖), ssv (mainly sexual, rarely vegetative; 主要有性繁殖，可用無性生殖), sv (sexual and vegetative; 有性及無性繁殖), vvs (mainly vegetative, rarely sexual; 主要無性繁殖，少數有性繁殖)

表 8、蕨類功能性狀表

物種	生長型	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式 ¹⁾	光合作用 (固碳循環)	生長地	莖披鱗片	葉有毛	孢子/果實	孢膜形狀	分布下限	分布上限
逆羽蹄蓋蕨	蕨類	地上芽植物	s	C3	灌叢下空曠處	1	0	孢子	腎形、J 形或短線形	1000	3000
腺鱗毛蕨	蕨類	地上芽植物	s	C3	岩屑地	1	1	孢子	齒裂	1300	3900
廣布鱗毛蕨	蕨類	地上芽植物	s	C3	林下遮蔭處	1	0	孢子	圓腎形	50	3650
玉山蕨	蕨類	地上芽植物	s	C4	林下遮蔭處	1	0	孢子	圓形	NA	NA

¹⁾繁殖形式：s (sexual only; 僅有性生殖), ssv (mainly sexual, rarely vegetative; 主要有性繁殖，可用無性生殖), sv (sexual and vegetative; 有性及無性繁殖), vvs (mainly vegetative, rarely sexual; 主要無性繁殖，少數有性繁殖)，莖披鱗片：有披鱗片填 1，否填 0；葉有毛：有毛填 1，否填 0



表 9、草本植物功能性狀表

物種	生長型	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式 ¹⁾	光合作用 (固碳循環)	冬枯	葉有毛	葉形	葉緣	葉序
臺灣鹿藥	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	長橢圓形	全緣	單葉互生
中國地楊梅	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	全緣	叢生
臺灣地楊梅	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	全緣	叢生
臺灣藜蘆	草本	地面芽植物	s	C3	1	0	披針	全緣	叢生
南湖離蘭	草本	地上芽植物	ssv	CAM	0	0	倒披針形	全緣	單葉互生
短距粉蝶蘭	草本	一年生植物	ssv	CAM	0	0	卵形	微波狀	單葉互生
玉山菝葜	草本	地面芽植物	s	C3	0	0	卵形	全緣	單葉互生
阿里山天胡荽	草本	地面芽植物	s	C3	0	1	心形	圓鋸齒狀單葉	單葉互生
臺灣鬼督郵	草本	地上芽植物	s	C3	0	1	卵形	細毛(刺)	單葉互生
玉山抱莖籜簫	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	全緣	單葉互生
尼泊爾籜簫	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	全緣	單葉互生
山艾	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	橢圓形	全緣	二回羽狀複葉
阿里山薊	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	細毛(刺)	單葉互生
細川氏薊	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	細毛(刺)	單葉互生
玉山薊	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	披針形	細毛(刺)	叢生
細葉鼠麴草	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	線形	全緣	叢生
森氏山柳菊	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	倒披針形	細毛(刺)	叢生
玉山薄雪草	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	披針形	細毛(刺)	叢生
矮菊	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	長橢圓形	齒狀	叢生

玉山毛蓮菜	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	倒披針形	微波狀	近輪生
玉山黃菟	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	長橢圓形	深鋸齒	叢生
一枝黃花	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	披針形	鋸齒狀	基生葉叢生、莖生葉單葉互生
玉山筷子芥	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	倒披針形	細毛(刺)	基生葉叢生、莖生葉單葉互生
玉山山蘿蔔	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	線狀披針形	鈍鋸齒狀	基生葉叢生、莖生葉單葉互生
亞毛無心菜	草本	一年生植物	s	C2	0	1	線形	全緣	單葉對生
高山無心菜	草本	一年生植物	s	C3	0	1	倒披針形	全緣	基生葉叢生、莖生葉單葉互生
玉山石竹	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	線形	全緣	對生
玉山佛甲草	草本	地面芽植物	s	CAM	0	1	長橢圓形	全緣	單葉互生
高山白珠樹	草本	高位芽植物	s	C3	0	0	倒卵形	鋸齒狀	單葉互生
阿里山龍膽	草本	地上芽植物	s	C3	0	0	線形	全緣	十字對生
臺灣龍膽	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	線形	全緣	十字對生
黃斑龍膽	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	線形	全緣	十字對生
玉山龍膽	草本	一年生植物	s	C3	0	0	披針形	全緣	十字對生
大籽當藥	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	披針形	全緣	單葉對生
單花牻牛兒苗	草本	地面芽植物	s	C3	0	1	闊圓形	缺刻狀	叢生
玉山金絲桃	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	卵形	全緣	單葉對生
野薄荷	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	卵形	疏鋸齒狀	單葉對生
高山露珠草	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	卵形	鋸齒狀	十字對生
丁座草	草本	著生植物	s	C3	0	0	針形	全緣	螺旋排列
玉山小米草	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	倒卵形	鋸齒狀	單葉對生
玉山水苦蕒	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	卵形	全緣	單葉對生
瓜子金	草本	地面芽植物	s	C3	0	1	橢圓形	全緣	單葉互生





繡球藤	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	卵形	疏鋸齒狀	三出複葉
玉山金梅	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	卵形	鋸齒狀	叢生奇數羽狀複葉
雪山翻白草	草本	地面芽植物	s	C3	1	1	卵形	鋸齒狀	叢生奇數羽狀複葉
高山懸鉤子	草本	高位芽植物	s	C3	0	1	心形	微波狀	單葉互生
臺灣繡線菊	草本	地上芽植物	s	C3	0	1	披針形	鋸齒狀	單葉互生
假繡線菊	草本	地上芽植物	s	C3	1	0	卵形	鋸齒狀	單葉互生
玉山繡線菊	草本	高位芽植物	s	C3	0	0	卵形	鋸齒狀	螺旋排列
喜岩堇菜	草本	地上芽植物	s	C3	1	1	心形	鋸齒狀	叢生

註：¹⁾繁殖形式：s (sexual only; 僅有性生殖), ssv (mainly sexual, rarely vegetative; 主要有性繁殖，可用無性生殖), sv (sexual and vegetative; 有性及無性繁殖), vvs

(mainly vegetative, rarely sexual; 主要無性繁殖，少數有性繁殖)，冬枯：會冬枯填 1，否填 0；葉有毛：有毛填 1，否填 0



續表 6、草本植物功能性狀表

物種	葉質	葉緣反捲	開花季節	果實類型	分布下限	分布上限
臺灣鹿藥	紙質	0	春、夏	漿果	2200	3900
中國地楊梅	紙質	0	夏	蒴果	NA	NA
臺灣地楊梅	紙質	0	夏	蒴果	1600	3740
臺灣藜蘆	紙質	0	夏	蒴果	2500	3700
南湖雛蘭	肉質	0	夏	蒴果	3000	3800
短距粉蝶蘭	紙質	1	夏、秋	蒴果	1400	3755
玉山菝葜	紙質	0	春、夏	漿果	NA	NA
阿里山天胡荽	紙質	0	全年	離果	NA	NA
臺灣鬼督郵	革質	0	夏	瘦果	1700	3400
玉山抱莖籜簫	肉質	1	夏	瘦果	2200	3600
尼泊爾籜簫	肉質	1	夏	瘦果	1000	3950
山艾	紙質	0	夏、秋	瘦果	2700	3900
阿里山薊	肉質	1	夏	瘦果	1000	3950
細川氏薊	肉質	0	夏	瘦果	NA	NA
玉山薊	革質	0	夏	瘦果	1300	3500
細葉鼠麴草	紙質	0	春	瘦果	NA	NA
森氏山柳菊	肉質	1	夏	瘦果	1700	3755
玉山薄雪草	肉質	1	夏	瘦果	3200	3800



矮菊	紙質	0	夏	瘦果	2500	3600
玉山毛蓮菜	紙質	0	秋	瘦果	1500	3600
玉山黃菀	紙質	0	夏、秋	瘦果	1600	3800
一枝黃花	紙質	0	夏、秋	瘦果	0	3750
玉山筷子芥	紙質	0	春、夏、秋	角果	2000	3900
玉山山蘿蔔	紙質	1	夏、秋	瘦果	2500	3900
亞毛無心菜	紙質	0	夏	蒴果	3000	3900
高山無心菜	紙質	0	夏	蒴果	2500	3000
玉山石竹	紙質	0	春、夏、秋	蒴果	130	3900
玉山佛甲草	肉質	1	夏	蓇葖果	2500	3900
高山白珠樹	紙質	1	全年	蒴果	500	3750
阿里山龍膽	肉質	1	春、夏、秋	蒴果	2000	3861
臺灣龍膽	肉質	1	春、夏	蒴果	400	3950
黃斑龍膽	肉質	1	春、夏	蒴果	NA	NA
玉山龍膽	肉質	1	夏	蒴果	1947	3900
大籽當藥	肉質	0	春、夏	蒴果	1500	3500
單花牻牛兒苗	紙質	0	夏	蒴果	2000	3800
玉山金絲桃	紙質	1	夏、秋	蒴果	1500	3950
野薄荷	肉質	0	春、夏	堅果	2600	3800
高山露珠草	紙質	0	夏	蒴果	3000	3900
丁座草	鱗片質	0	夏	蒴果	700	3885
玉山小米草	紙質	0	春、夏	蒴果	2500	3900
玉山水苦蕒	紙質	0	夏、秋	蒴果	2600	3800



瓜子金	肉質	0	春	蒴果	NA	NA
繡球藤	紙質	0	夏	瘦果	NA	NA
玉山金梅	肉質	0	夏	瘦果	1800	3950
雪山翻白草	肉質	0	夏	瘦果	NA	3950
高山懸鉤子	革質	0	夏、秋	核果	300	3797
臺灣繡線菊	紙質	0	夏	瘦果	1200	3500
假繡線菊	革質	0	夏	蓇葖果	NA	NA
玉山繡線菊	革質	1	夏	瘦果	2600	3886
喜岩堇菜	紙質	0	春、夏	蒴果	400	3020

註：葉質：紙質、革質、肉質、鱗片質，葉緣反捲：會反捲填 1，否填 0

表 7、木本植物功能性狀表

物種	生長型	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式 ¹⁾	光合作用 (固碳循環)	落葉性	莖有刺	葉有毛	針/闊葉	葉序	葉質
刺柏	喬木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	針葉	輪生	NA
香青	喬木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	針葉	輪生	NA
臺灣冷杉	喬木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	針葉	螺旋狀著生	NA
臺灣華山松	喬木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	針葉	叢生	NA
臺灣二葉松	喬木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	針葉	叢生	NA
臺灣小檗	灌木	高位芽植物	s	C3	1	1	0	闊葉	單葉互生	革質
玉山小檗	灌木	高位芽植物	s	C3	1	1	0	闊葉	單葉互生	革質
臺灣馬醉木	灌木	高位芽植物	s	C3	0	0	0	闊葉	單葉互生	革質
玉山杜鵑	灌木至小喬木	高位芽植物	s	C3	1	0	1	闊葉	單葉互生	革質



紅毛杜鵑	灌木	高位芽植物	s	C3	1	0	1	闊葉	單葉互生	紙質
高山柳	喬木	高位芽植物	s	C3	1	0	1	闊葉	單葉互生	紙質
臺灣茶藨子	灌木	高位芽植物	s	C3	1	0	1	闊葉	單葉 1-3 片簇生	膜質
高山薔薇	草本	高位芽植物	s	C3	1	1	1	闊葉	羽狀複葉互生	紙質

註：¹⁾繁殖形式：s (sexual only; 僅有性生殖), ssv (mainly sexual, rarely vegetative; 主要有性繁殖，可用無性生殖), sv (sexual and vegetative; 有性及無性繁殖), vvs (mainly vegetative, rarely sexual; 主要無性繁殖，少數有性繁殖)，落葉性：會落葉填 1，否填 0；莖有刺：有刺填 1，否填 0；葉有毛：有毛填 1，否填 0



續表 7、木本植物功能性狀表

物種	葉有蠟質	葉緣反捲	開花季節	花序	花粉傳播方式	果實型態	分布下限	分布上限
刺柏	0	0	春	單生花序	風媒	漿果	150	3600
香青	0	0	春	葉葇花序	風媒	漿果	2000	3861
臺灣冷杉	0	0	春	毬花	風媒	毬果	NA	NA
臺灣華山松	0	0	春、夏	毬花	風媒	毬果	2200	3000
臺灣二葉松	0	0	春、夏	毬花	風媒	毬果	NA	NA
臺灣小檗	1	0	春、夏	圓錐花序	蟲媒	漿果	NA	NA
玉山小檗	1	0	夏	圓錐花序	蟲媒	漿果	2500	3950
臺灣馬醉木	0	0	冬、春	圓錐花序	蟲媒	蒴果	1000	3300
玉山杜鵑	1	1	春、夏	繖房花序頂生	蟲媒	蒴果	350	3900
紅毛杜鵑	0	1	春、夏	繖形花序	蟲媒	蒴果	250	3600
高山柳	0	0	春、夏	葉葇花序	蟲媒	蒴果	1600	3000
臺灣茶藨子	0	0	春	頭狀花序	蟲媒	漿果	3000	3900
高山薔薇	1	0	夏	繖房花序	蟲媒	瘦果	1500	3500

註：葉有蠟質：有蠟質填 1，否填 0；葉緣反捲：有反捲填 1，否填 0



表 8、莎草科植物功能性狀表

物種	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式	光合作用 (固碳循環)	開花季節	果實型態	冬枯	葉有毛	根莖樣態	走莖	分布下限	分布上限
垂穗薹	地上芽植物	ssv	C3	夏	堅果	0	0	短匍匐式(shortly creeping)	1	NA	NA
短莖宿柱薹	地上芽植物	ssv	C3	NA	堅果	0	0	短根莖(rhizome short)	1	0	3529
黃花薹	地上芽植物	ssv	C3	夏	堅果	0	0	短根莖(rhizome short)	1	524	3861
紅鞘薹	地上芽植物	ssv	C4	夏	堅果	0	0	短根莖(rhizome short)	0	NA	
南投薹	地上芽植物	ssv	C3	NA	堅果	0	0	直立式或短匍匐式(ascending or shortly creeping rhizomes)	1	NA	NA
抱鱗宿柱薹	地上芽植物	ssv	C3	NA	堅果	0	0	短根莖(rhizome short)	0	0	3529
玉山針蘭	地上芽植物	ssv	C3	NA	瘦果	0	0	短斜根莖(short oblique rhizome)	0	1300	3755

註：冬枯：會冬枯填 1，否填 0；葉有毛：有毛填 1，否填 0，根莖特指專有名詞 Rhizome，走莖特指專有名詞 stolen



表 9、禾本科植物功能性狀表

物種	Raunkiaer's 生活型	繁殖形式	光合作用 (固碳循環)	開花季節	孢子/果實	葉正披毛	葉背披毛	根莖	分布下限	分布上限
玉山翦股穎	地上芽植物	s	C3	夏、秋、冬	穎果	0	0	1	1860	3750
小穎溝稈草	地上芽植物	s	C3	NA	穎果	0	0	0	NA	NA
川上短柄草	地上芽植物	s	C3	夏、秋	穎果	0	1	0	2300	3800
曲芒髮草	地上芽植物	s	C3	夏、秋	穎果	0	0	1	200	3884
水山野青茅	地上芽植物	s	C3	NA	穎果	0	0	0	NA	NA
臺灣披臉草	地上芽植物	s	C3	NA	穎果	0	0	0	NA	NA
日本羊茅	地上芽植物	s	C3	夏、秋	穎果	0	0	1	NA	NA
羊茅	地上芽植物	s	C3	夏、秋	穎果	0	0	1	100	3900
紫羊茅	地上芽植物	s	C4	夏、秋	穎果	0	0	1	NA	NA
冷杉異燕麥	地上芽植物	s	C3	NA	穎果	0	0	0	2350	3830
芒	地上芽植物	s	C4	春、夏	穎果	1	0	1	0	3571
臺灣三毛草	地上芽植物	s	C3	秋	穎果	1	1	0	1700	3858
玉山箭竹	高位芽植物	vvs	C3	春、夏、秋	穎果	0	0	0	700	3650

註：葉正披毛：葉正披毛填 1，否填 0；葉背披毛：葉背披毛填 1，否填 0；根莖：有根莖填 1，否填 0



表 10、功能性狀對 bio1 (年均溫)之迴歸分析結果表

變數	估計值	標準誤差	t 值(統計量)	p 值
截距	93.544	6.782	13.793	$2.89 * 10^{-20}$
宿根	2.434	6.717	0.362	0.718
葉有毛	0.254	6.291	0.040	0.968
葉緣反捲	-15.595	7.660	-2.036	0.046
葉質(線性趨勢)	5.209	5.853	0.890	0.377
葉質(二次曲線趨勢)	2.190	6.550	0.334	0.739

表 11、功能性狀對 bio4 (季節氣溫標準差)之迴歸分析結果表

變數	估計值	標準誤差	t 值(統計量)	p 值
截距	4622.816	350.154	13.202	$2.11 * 10^{-20}$
宿根	32.784	346.799	0.095	0.925
葉有毛	296.798	324.824	0.915	0.365
葉緣反捲	-676.841	395.472	-1.711	0.092
葉質(線性趨勢)	564.167	302.175	1.867	0.067
葉質(二次曲線趨勢)	4.434	338.190	0.013	0.990

表 12、功能性狀對 bio12 (年降雨量)之迴歸分析結果表

變數	估計值	標準誤差	t 值(統計量)	p 值
截距	2221.346	168.156	13.210	$2.06 * 10^{-19}$
宿根	16.738	166.545	0.101	0.920
葉有毛	-142.059	155.992	-0.911	0.366
葉緣反捲	329.880	189.919	1.737	0.088
葉質(線性趨勢)	-369.120	145.115	-2.543	0.014
葉質(二次曲線趨勢)	-45.693	162.411	-0.281	0.779

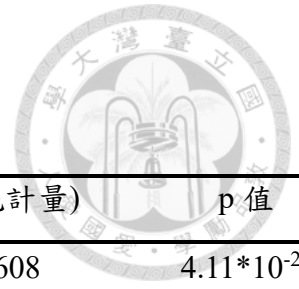


表 13、功能性狀對 bio15 (季節降雨量標準差)之迴歸分析結果表

變數	估計值	標準誤差	t 值(統計量)	p 值
截距	46.103	2.776	16.608	4.11×10^{-24}
宿根	-0.704	2.749	-0.256	0.799
葉有毛	4.662	2.575	1.810	0.075
葉緣反捲	1.178	3.135	0.376	0.709
葉質(線性趨勢)	-3.597	2.396	-1.501	0.138
葉質(二次曲線趨勢)	-3.502	2.681	-1.306	0.196



表 14、物種抗性評分表

code	物種俗名	宿根	葉毛狀體	葉緣反捲	葉質	升溫耐受性	升溫適應等級	乾旱耐受性	乾旱適應等級
SP015	臺灣鹿藥	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP016	垂穗薹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP017	短莖宿柱薹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP018	黃花薹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP019	紅鞘薹	1	0	0	3	0.5	中低適應性	0.4	中低適應性
SP020	南投薹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP021	抱鱗宿柱薹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP022	玉山針蘭	1	0	0	3	0.5	中低適應性	0.4	中低適應性
SP023	中國地楊梅	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP024	臺灣地楊梅	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP025	臺灣藜蘆	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP026	南湖雛蘭	0	0	0	2	0.267	中低適應性	0.2	低適應性
SP027	短距粉蝶蘭	0	0	1	1	0.333	中低適應性	0.4	中低適應性
SP028	玉山翦股穎	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP030	川上短柄草	1	1	1	3	1	高適應性	1	高適應性
SP031	曲芒髮草	1	0	0	3	0.5	中低適應性	0.4	中低適應性

SP032	水山野青茅	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP033	臺灣披鹼草	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP034	日本羊茅	0	0	0	3	0.4	中低適應性	0.3	中低適應性
SP035	羊茅	0	0	0	3	0.4	中低適應性	0.3	中低適應性
SP036	紫羊茅	0	0	1	3	0.6	中高適應性	0.6	中高適應性
SP037	冷杉異燕麥	0	0	0	1	0.133	低適應性	0.1	低適應性
SP038	芒	1	1	0	3	0.8	高適應性	0.7	中高適應性
SP039	臺灣三毛草	1	1	1	1	0.733	中高適應性	0.8	高適應性
SP041	玉山菝葜	0	0	0	1	0.133	低適應性	0.1	低適應性
SP042	阿里山天胡荽	0	1	0	1	0.433	中低適應性	0.4	中低適應性
SP043	臺灣鬼督郵	0	1	0	3	0.7	中高適應性	0.6	中高適應性
SP044	玉山抱莖籜簫	1	1	1	2	0.867	高適應性	0.9	高適應性
SP045	尼泊爾籜簫	1	1	1	2	0.867	高適應性	0.9	高適應性
SP046	山艾	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP047	阿里山薊	1	1	1	2	0.867	高適應性	0.9	高適應性
SP048	細川氏薊	1	1	0	2	0.667	中高適應性	0.6	中高適應性
SP049	玉山薊	1	0	0	3	0.5	中低適應性	0.4	中低適應性
SP050	細葉鼠麴草	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性



SP051	森氏山柳菊	1	1	1	2	0.867	高適應性	0.9	高適應性
SP052	玉山薄雪草	1	1	1	2	0.867	高適應性	0.9	高適應性
SP053	矮菊	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP054	玉山毛蓮菜	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP055	玉山黃菀	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP056	一枝黃花	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP059	玉山筷子芥	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP060	玉山山蘿蔔	1	0	1	1	0.433	中低適應性	0.5	中低適應性
SP061	亞毛無心菜	0	1	0	1	0.433	中低適應性	0.4	中低適應性
SP062	高山無心菜	0	1	0	1	0.433	中低適應性	0.4	中低適應性
SP063	玉山石竹	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP064	玉山佛甲草	0	1	1	2	0.767	高適應性	0.8	高適應性
SP065	高山白珠樹	0	0	1	1	0.333	中低適應性	0.4	中低適應性
SP069	阿里山龍膽	0	0	1	2	0.467	中低適應性	0.5	中低適應性
SP070	臺灣龍膽	1	0	1	2	0.567	中高適應性	0.6	中高適應性
SP071	黃斑龍膽	1	0	1	2	0.567	中高適應性	0.6	中高適應性
SP072	玉山龍膽	0	0	1	2	0.467	中低適應性	0.5	中低適應性
SP073	大籽當藥	1	0	0	2	0.367	中低適應性	0.3	中低適應性



SP074	單花牻牛兒苗	0	1	0	1	0.433	中低適應性	0.4	中低適應性
SP076	玉山金絲桃	1	0	1	1	0.433	中低適應性	0.5	中低適應性
SP077	野薄荷	1	1	0	2	0.667	中高適應性	0.6	中高適應性
SP079	丁座草	0	0	0	2	0.267	中低適應性	0.2	低適應性
SP080	玉山小米草	1	0	0	1	0.233	低適應性	0.2	低適應性
SP081	玉山水苦蕒	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP082	瓜子金	0	1	0	2	0.567	中高適應性	0.5	中低適應性
SP083	繡球藤	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性
SP084	玉山金梅	1	1	0	2	0.667	中高適應性	0.6	中高適應性
SP087	高山懸鉤子	0	1	0	3	0.7	中高適應性	0.6	中高適應性
SP088	臺灣繡線菊	0	1	0	1	0.433	中低適應性	0.4	中低適應性
SP089	假繡線菊	1	0	0	3	0.5	中低適應性	0.4	中低適應性
SP090	玉山繡線菊	0	0	1	3	0.6	中高適應性	0.6	中高適應性
SP092	喜岩堇菜	1	1	0	1	0.533	中高適應性	0.5	中低適應性



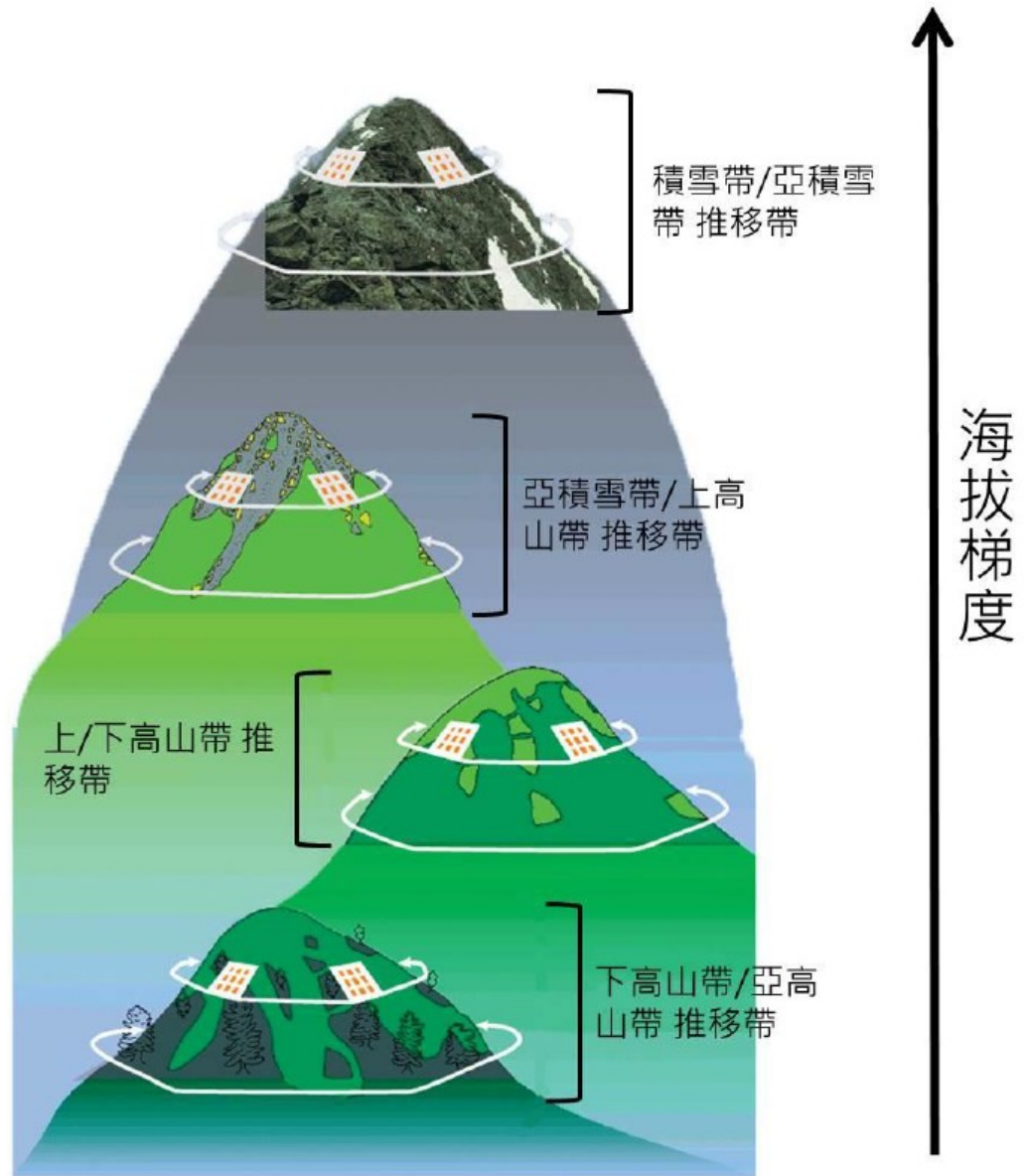


圖 1 GLORIA 目標區域樣區山峰選定與其海拔分布規範(修改自劉和義等，2010；Pauli et al., 2015)

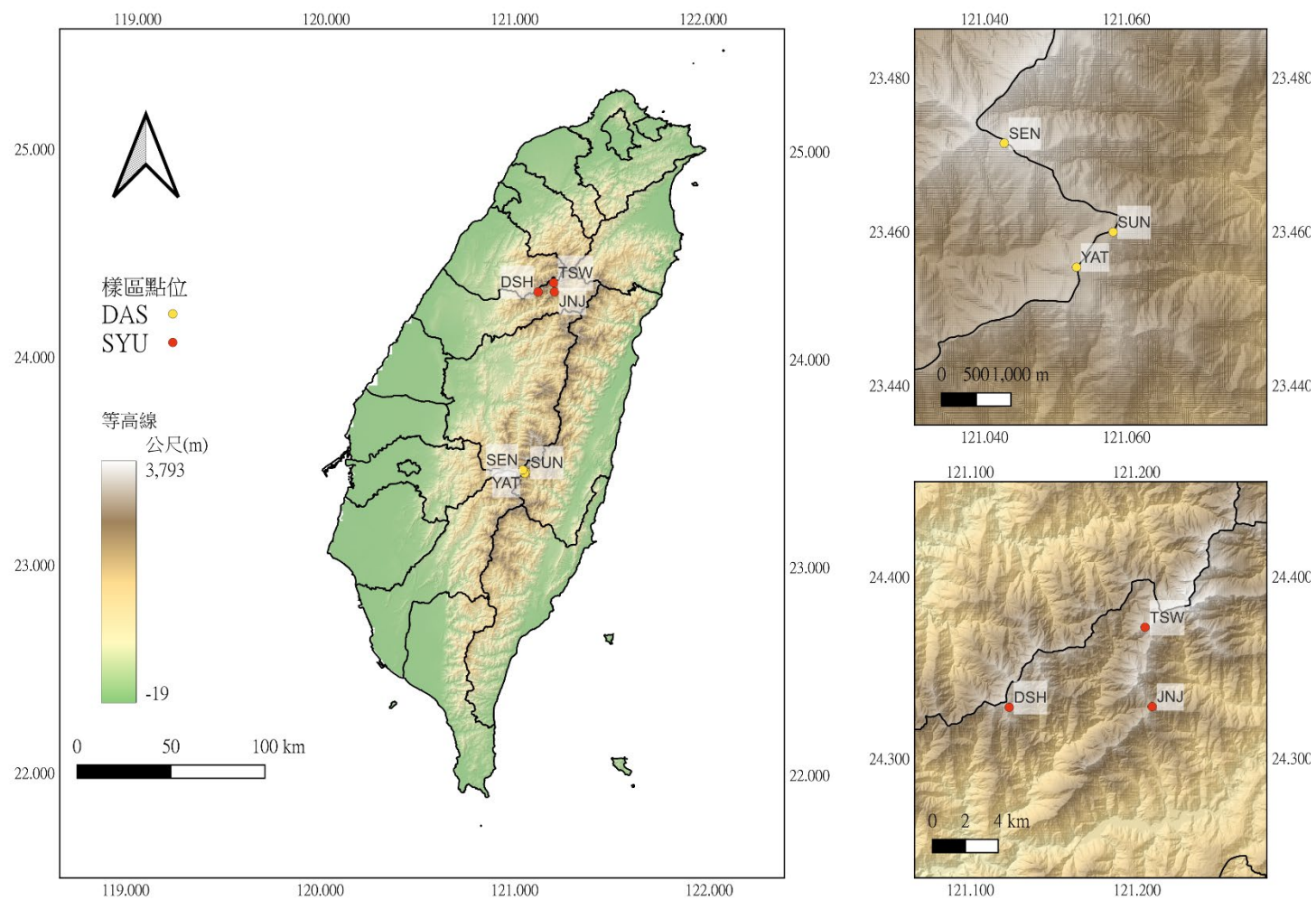


圖 2、樣區位置圖

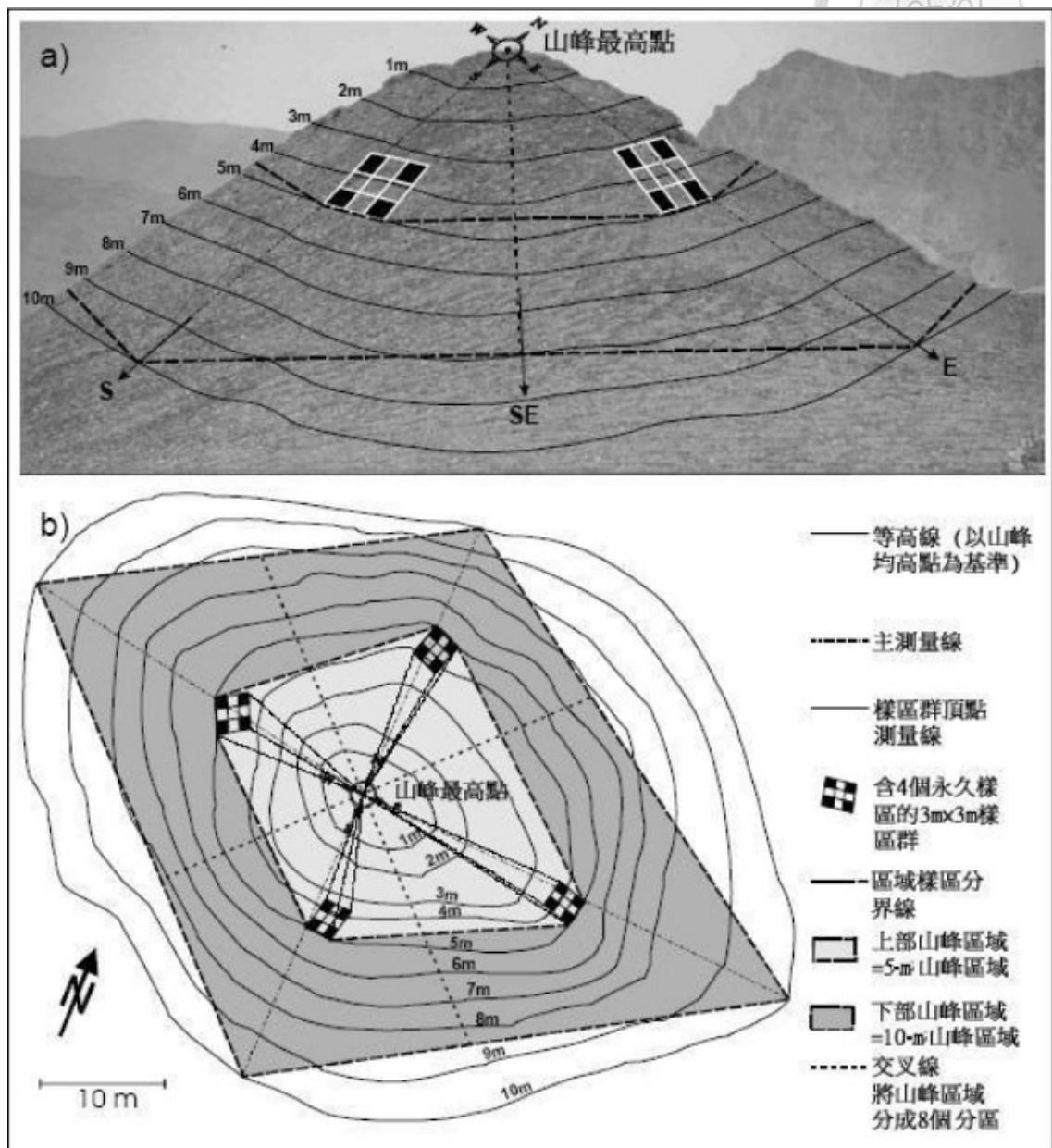


圖 3、多峰調查法之樣區設置圖(摘自劉和義等，2010)

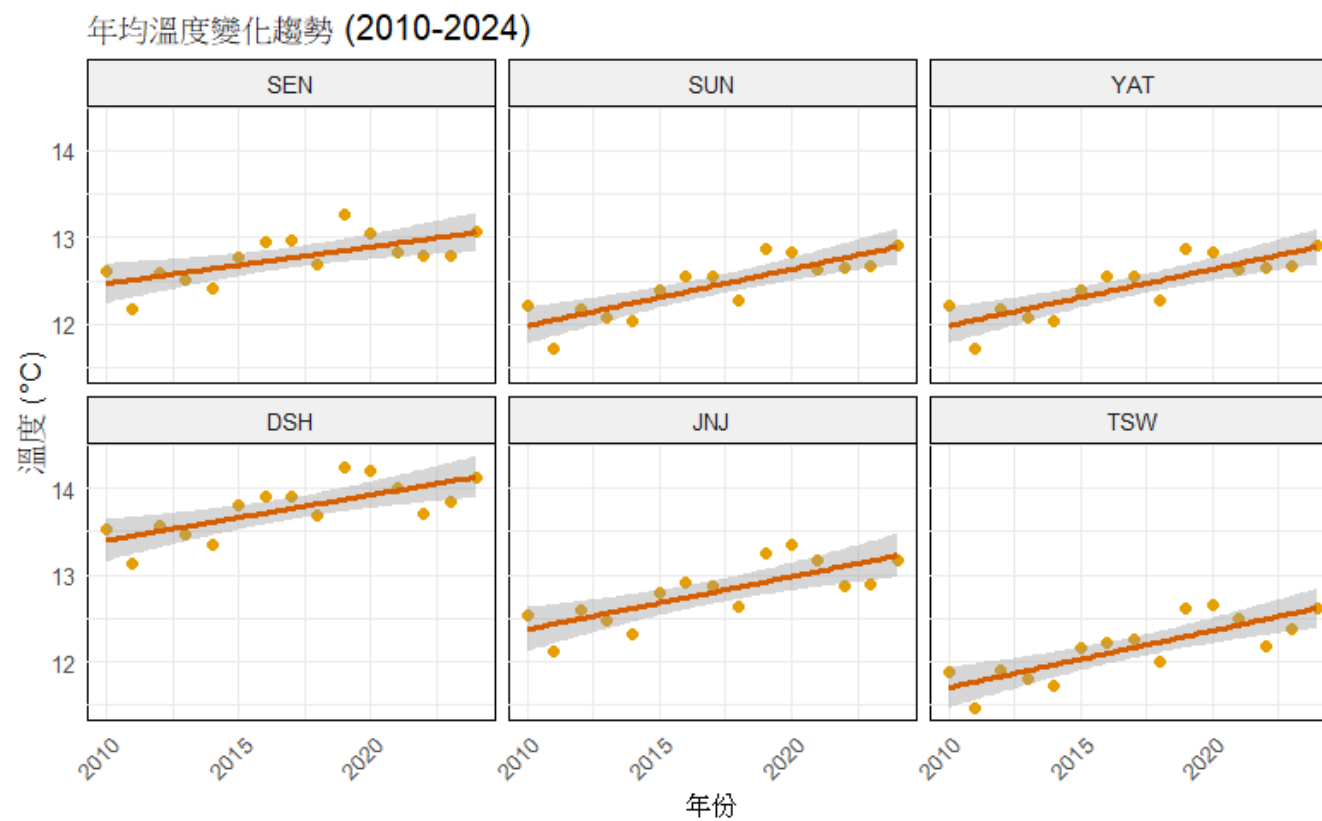


圖 4、大水窟與雪山區域年均溫度變化趨勢圖

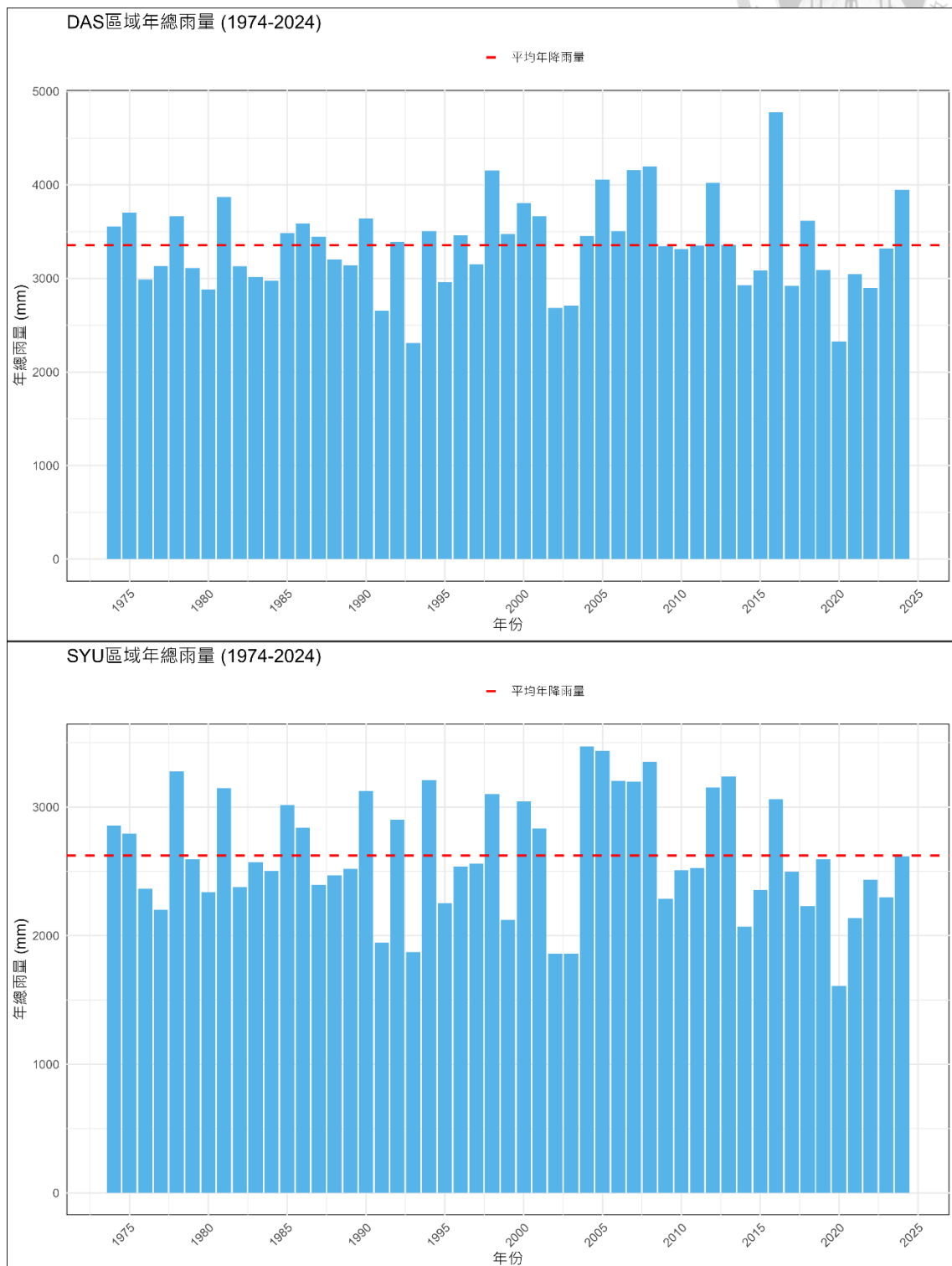
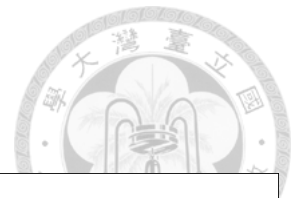


圖 5、大水窟與雪山區域年 1974-2024 年總雨量圖

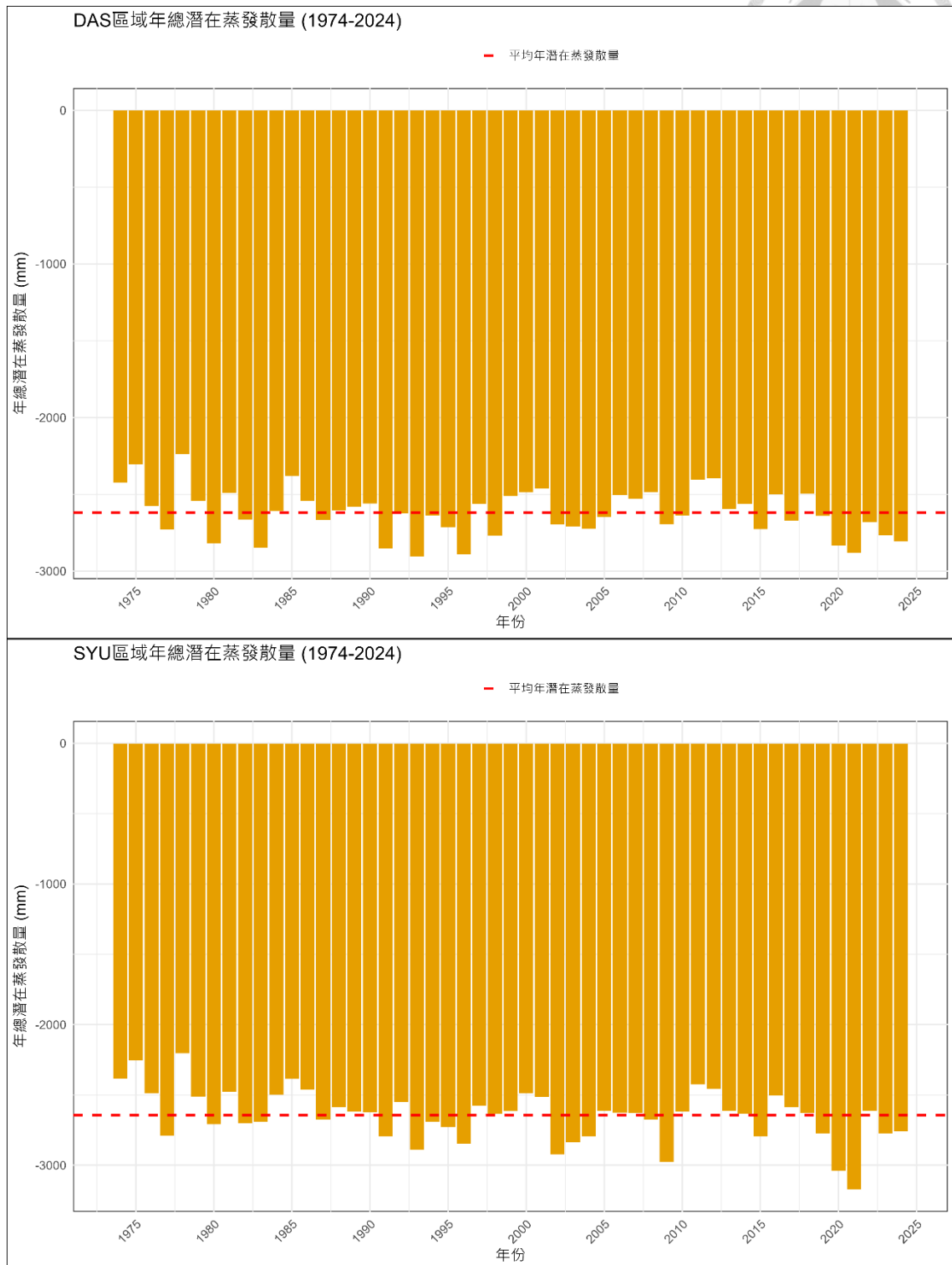
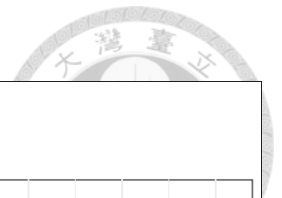


圖 6、大水窟與雪山區域年 1974-2024 年總潛在蒸發散量圖

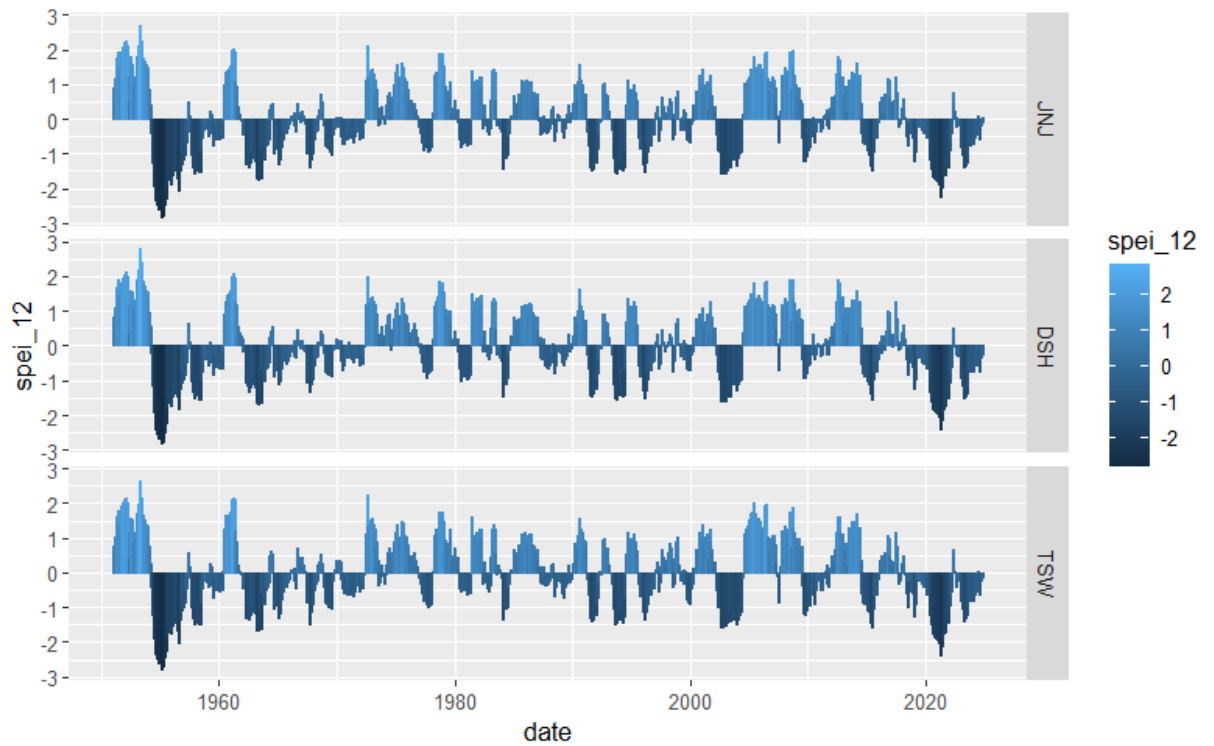


圖 7、雪山區域 SPEI 指標

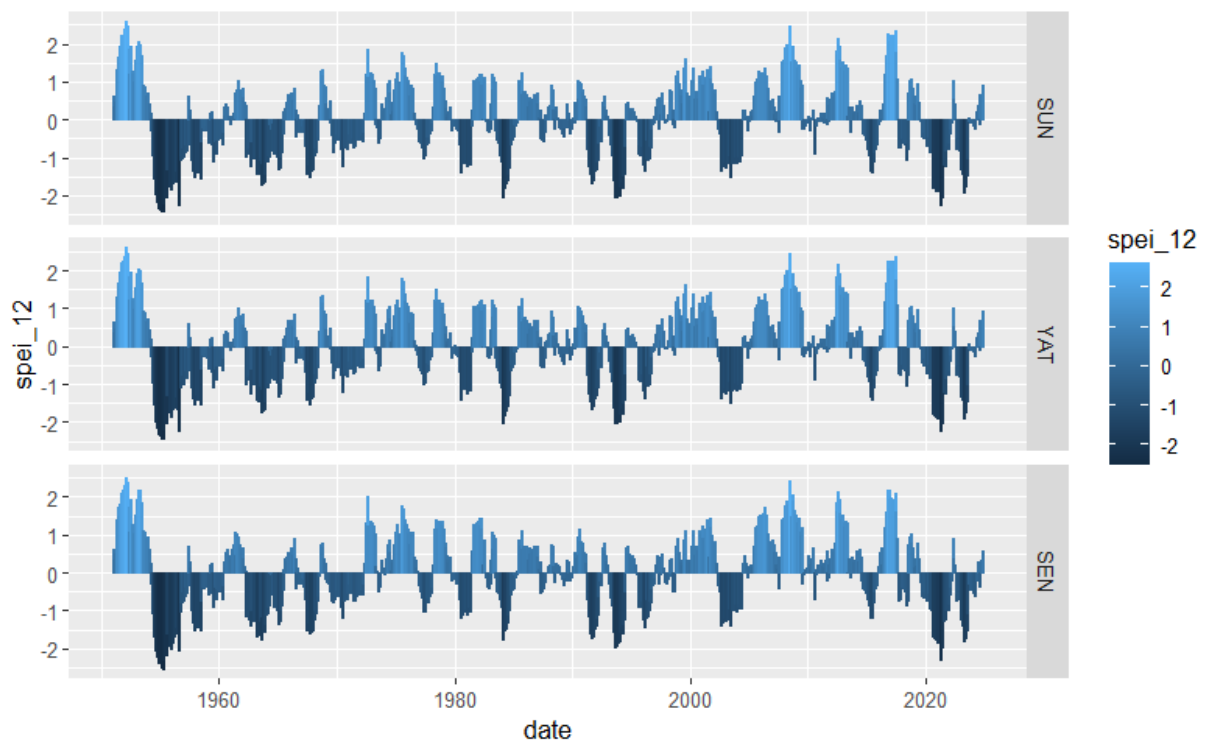


圖 8 大水窟區域 SPEI 指標

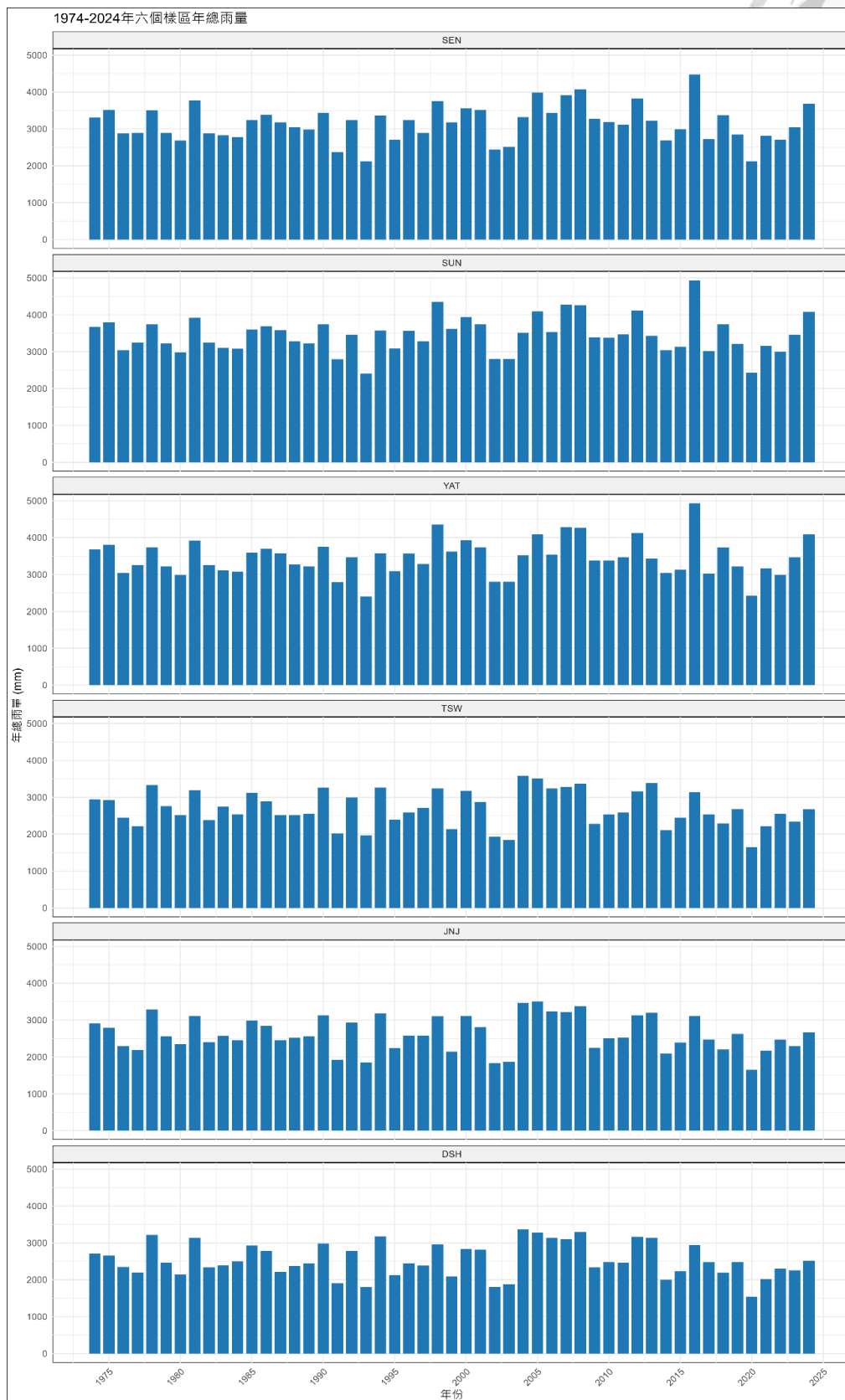


圖 9、大水窟及雪山區域各山峰 1974-2024 年總雨量圖

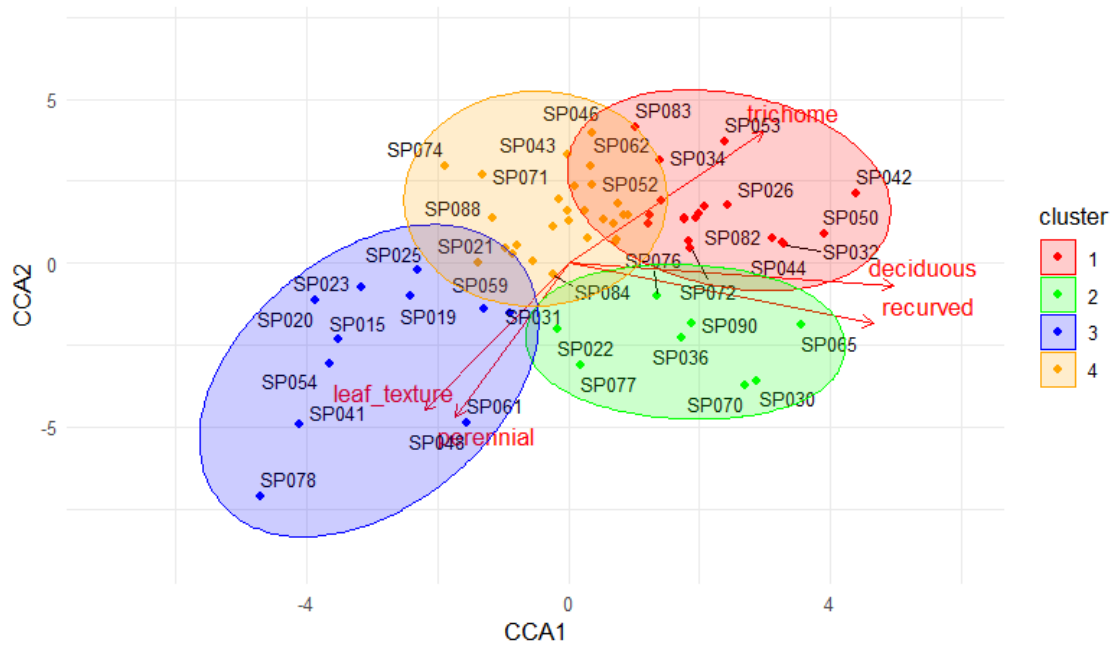


圖 10、草本 CCA 分析分群圖

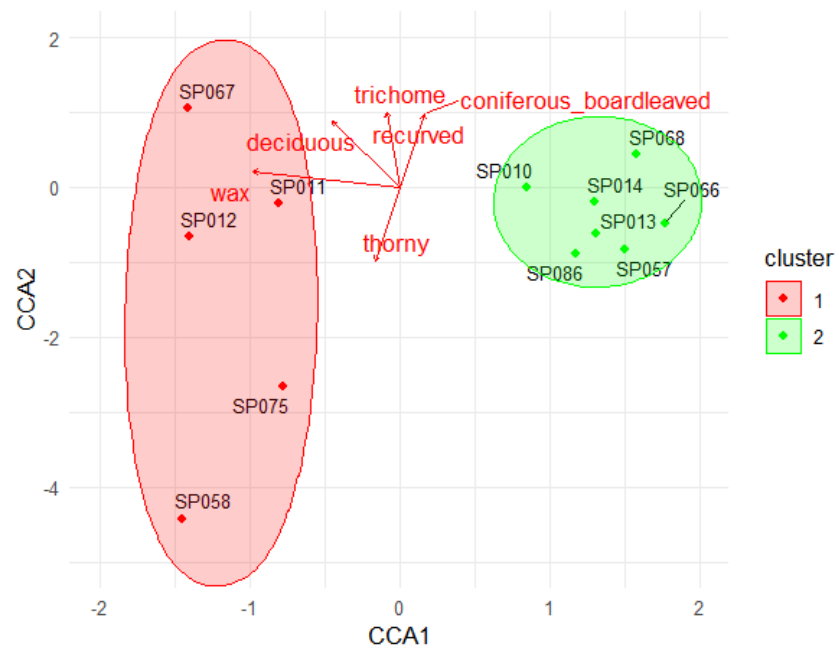


圖 11、木本 CCA 分析分群圖

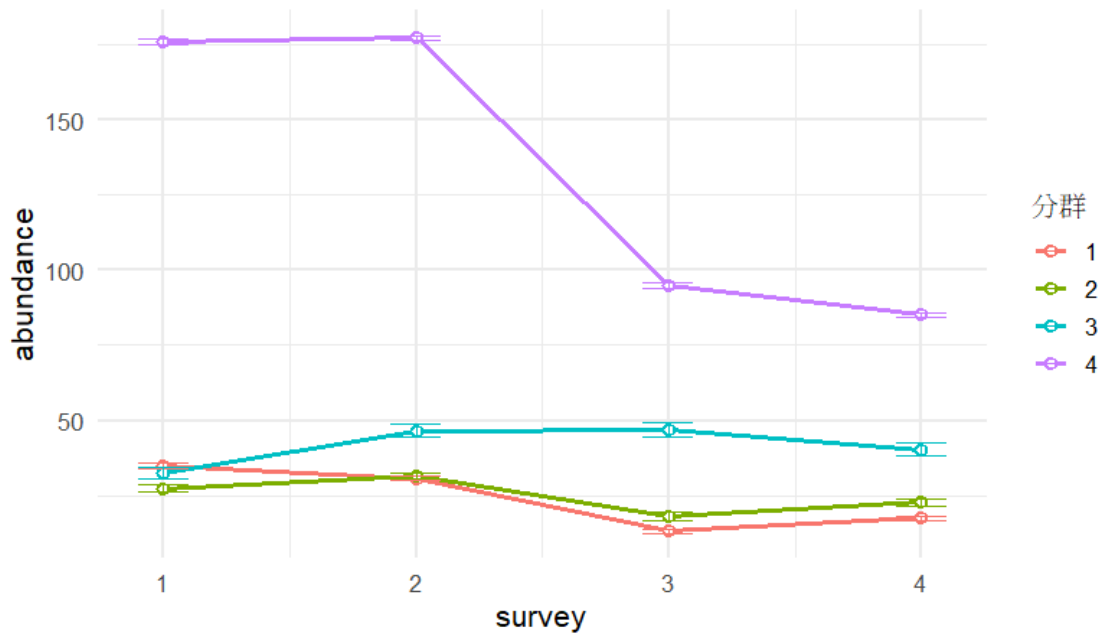


圖 12、草本植物分群豐度變化趨勢圖

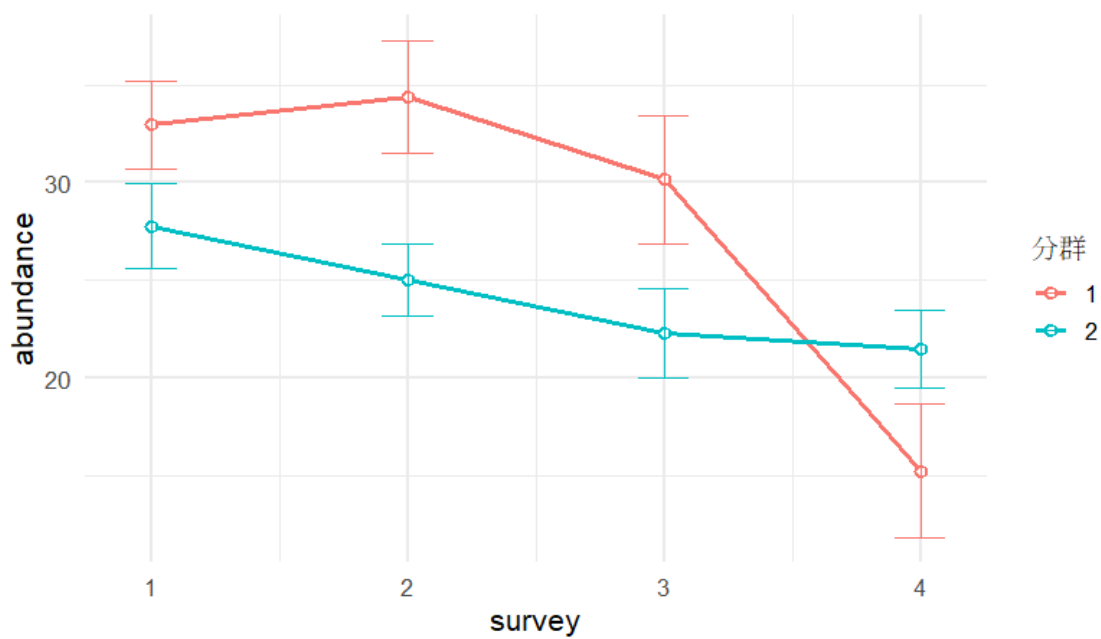


圖 13、木本植物分群豐度變化趨勢圖

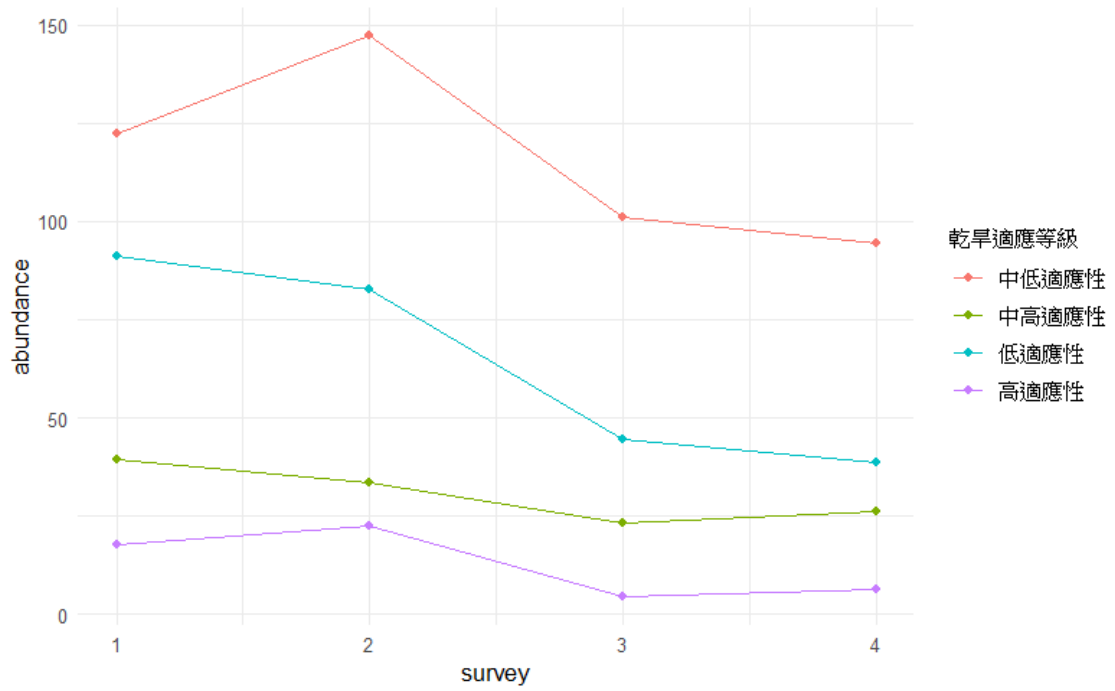


圖 14、乾旱抗性評分分組豐度變化圖

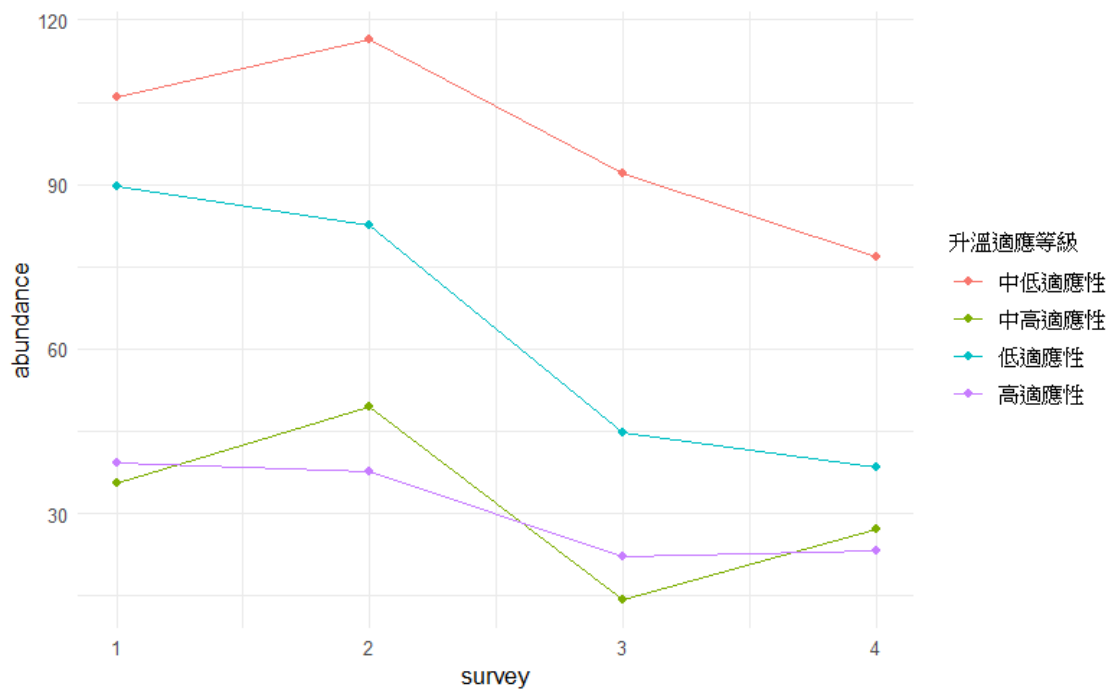


圖 15、升溫抗性評分分組豐度變化圖