

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 Bio-resources and Agriculture

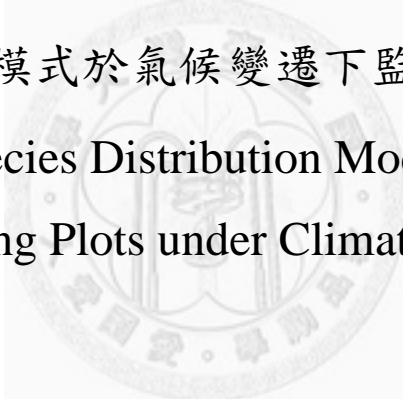
National Taiwan University

Master Thesis

應用物種分布模式於氣候變遷下監測樣區之篩選

Applying Species Distribution Modeling to Find

Monitoring Plots under Climate Change



孫世鐸

Shih-To Sun

指導教授：邱祈榮 博士

Advisor: Chyi-Rong Chiou, Ph. D.

中華民國 100 年 2 月

February, 2011


國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

應用物種分布模式於氣候變遷下監測樣區之篩選

Applying Species Distribution Modeling to Find
Monitoring Plots under Climate Change

本論文係孫世鐸君 (R97625026) 在國立臺灣大學森林
環境暨資源學系、所完成之碩士學位論文，於民國一百年一
月二十五日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：


邱祈寧 (簽名)
(指導教授)

邱清安
賴彥任

系主任、所長

鄭秉泉 (簽名)

謝誌

光陰飛逝，在台大七年多的時間忽爾行過。在森林系的這段日子，首要感謝的是恩師 邱祈榮老師。自大學時代受到老師對林業研究與實務工作的熱情感召，進入研究室學習以來，始終受到老師多方面的照顧。老師雖然極為忙碌，卻總是能夠給予學生適時的指導，以宏觀的眼光思考問題，直指研究議題的核心，給我思考上的刺激和啟發。而老師從不吝惜在經濟上支持學生的研究，也總是耐心給我時間等候我的成長，讓天賦有限的我能以自己緩慢的步調工作而生活不虞匱乏，這點更令我懷抱無窮謝意。老師對林業工作的無私奉獻令人難以企及，但願這段時間的學習能讓我具備同樣強大的熱情與力量。

論文得以順利完成，必須感謝兩位口試委員邱清安博士與賴彥任博士的斧正，因為有他們在百忙中撥冗參與口試，並對論文無論在資料分析或寫作呈現上給予許多寶貴的意見，才能讓論文以目前的樣貌呈現。論文中使用的物種資料，承蒙行政院農委會林務局自民國九十二年至九十七年間推動「國家植群多樣性調查及製圖計畫」，台大生演所謝長富老師、師大生科系王震哲老師、宜大自資系陳子英老師、東華自資所夏禹九老師、中興生科系陳明義老師、中山生科系劉和義老師、屏科大森林系葉慶龍老師等工作團隊進行辛苦的長期野外調查工作，提供了質量均優的資料，在此必須致上最高的敬意與謝意。氣象資料的部分，承蒙台灣大學全球變遷研究中心柳中明老師與林淑華博士慷慨提供，並給予許多資料處理上的指導，另外加州大學柏克萊分校動物學博物館推動 WORLDCLIM 網路氣象資料庫的建立與流通，無私提供免費下載且高品質的氣象資料，嘉惠世界各地的研究者，在此也要一併致謝。

為研究計畫前往日本參訪期間，受到日本林業總合研究所（Forest & Forest Products Research Institute, FFPRI）溫暖化響應研究室主持人田中信行博士（Dr. Nobuhiro Tanaka）及協同研究員津山幾太郎博士（Dr. Ikutaro Tsuyama）、中尾勝洋博士（Dr. Katsuhiko Nakao）、比嘉基紀博士（Dr. Motoki Higa）與研究室許多先進的照顧與指導。論文的分析方法承蒙中尾博士提供建議，寫作上則受到津山博士及比嘉博士的協助，在此必須表達深深感謝。論文得以順利前往墨西哥參與第五十三屆國際植群學會年會發表，承蒙國科會給予補助，學術處周小姐與國際處陳先生協助送件與報帳等行政事宜，在此一併致謝。在墨西哥參與會議期間，論文得到許多研究前輩寶貴的意見，野外行程則受到加州大學 Monterey 灣校區 Ernesto Franco Vizcaino 博士及河濱校區 Richard Minnich 博士的照顧與生態思想上的啟發，是一次難得而幸運的機緣。

會一頭栽進植物生態研究的領域，不外是大二時修習蘇鴻傑老師的植物地理學課程的影響。老師對森林與植物無窮無盡的好奇，對教學與研究永不懈怠的熱

誠，是我永不可能相比卻又必須時時仰慕追隨的。雖然我並不是老師出色的學生，還是要感謝老師引領我走進這塊樂趣永不枯竭的領域。另外，大學時代修習生科系丘臺生老師系統分類學與演化學的課程，讓我對生物學研究有了基礎的認識，雖然並不一定直接與我的研究相關，卻影響我看待研究的方式，是令我收穫良多的課程。研一時修習數學系江金倉老師的統計推論課，每個禮拜大量的轟炸時時刻刻逼迫我不斷從統計的角度思考問題，老師上課時的投入與勉勵也將是我受用一生的資產。儘管到現在我仍然只懂得統計的皮毛，但那一年每周一早上在舊數館討論統計的時光將成為研究生涯中永難磨滅的記憶。此外，在森林系這麼長的一段時間，受到許多老師無論在生活或研究無私地照顧與指導，我必須在此感謝羅漢強老師、王立志老師、鹿兒陽老師以及鄭智馨老師。最後，還有幾位並非我專業領域的老師，卻因為他們對研究工作的熱情與投入，而感染激勵了我。感謝外文系王文興老師、法律系李茂生老師、哲學系苑舉正老師和王榮麟老師、銘傳建築系徐明松老師、淡江建築系王俊雄老師以及北藝大藝跨所黃建宏老師。

在研究工作的學習過程中，給予我最大幫助的無疑是建融、政道以及國彰三位學長。從進入研究室毫無基礎開始，建融帶著我整理文獻，熟悉軟體操作，進行初階的分析練習與結果判讀，直到對植群研究有基本的認識。建融不僅是良師，也是益友，總是能找到有趣的議題，發現研究中新的可能性，又總是不吝給我鼓勵，和我分享生活種種，能結交到這樣的朋友是我一生的幸運。而總是一邊抱怨一邊把所有事情完成的政道，是和我一起走過捷克的丘陵、颱風襲擊的富士山、令人震撼落淚的加利福尼亞半島沙漠的戰友，是對世界有著強大感應與愛的詩人，是有任何問題好像只要交到他手上就會迎刃而解的靠山，因為有他在，我們似乎從不用擔心工作可能面臨的任何困難。更重要的是，我們總是能夠一同談論赫拉巴爾的前進與回歸，並為著山風海雨迷信感激不已。年紀比我們大上一截的國彰從不把我們當成晚輩，總是辛勤熱切地教我們如何讀文獻、如何整理資料、如何分析與呈現、如何寫成好的文字，與我們一起玩笑，又和我們分享所學與所知，帶給我們新的力量。如果沒有三位學長的引領與陪伴，我永遠不可能繼續在這條道路上前進、追求。

資源調查與分析研究室是一個龐大的家庭，這裡總是熱鬧地歡迎所有人的加入。在研究室的這段日子以來，必須感謝非常非常多人。從初入研究室受到許多學長姐的照顧：五木、惇淳、惇為、孝隆、愷茹、玉琦、Kiki、阿邱、台哥、小紅、維倫、阿喵、瑞閔、姚強、麻吉、美瑤、昱光、俊廷，到一起奮戰的同學夥伴：文韡、錦淑、睿涵、嫵翔、青蛙、向廷、佐辰、玉瑋，再到總是給我許多支持鼓勵的學弟妹：馬來、幸耘、點狗、楊熊、大寶，和非森林系的夥伴們：安君、亦筑、菡芝。因為有你們，才讓我在研究室的這段時光精彩無比。

在建中的日子，受到許多老師的啟蒙，影響了我對世界的觀點和看法。在此

必須感謝呂榮華老師、周志宇老師、簡易老師、文士豪老師以及游森棚教官，你們的叮嚀與提醒始終都在我的耳邊。而紅樓詩社是我永遠的家，永遠的歸屬，無論去到世界的任何一個角落，我都不會忘記這裡還有我偉大的夥伴，他們都和我一樣在人生的道路上勇敢前行。而從小到大，身邊總是有許多的朋友相互關心、分享生活與共同努力，我必須感謝這些朋友讓我始終擁有源源不絕的力量：郁珊、士綱、偉力、馬兒、申翰、建鳴、Allen、金鼎、佳彥、坤珀、古人、傑文、毓嘉、三撇、心機、阿邦、書偉、嗣軒、王雄、書豪、賢璋、豬腦、雅倫、馨儀、楨理、怡禎、孔爺、柏因、賴佩、fish、建元、易澄、俊欽、新源、王珞、二寶、阿草、禹璇、筠浩、威力、卓哥、志奮、包子、毓靜。因為有你們，我的生命才得以完整、豐富。感謝所有曾給予我最大的愛與包容的女孩，是你們讓我能夠變成一個更好的人。

一日之所需，百工斯為備，研究自不例外。一個實驗完成，寫成一篇文章，引用更多其他的文章。投稿，審核，刊登，放進資料庫，無償提供下載。有人寫好程式和軟體，設計電腦，讓我們不用動手算，速度快得難以想像，踩在前人的努力上，分析方法的嘗試與改進，一點一點的累積，一點一點的靠近，所有工作都是所有人共同的努力。我必須感謝論文中所有參考文獻的作者，所有應用軟體與程式的設計者，踩在他們的肩膀上讓我可以看得更遠，擁有更狂野豐富的想像。能夠無憂慮地從事自己喜歡的工作，我也必須感謝所有讓這個社會得以安定的力量，在每個角落努力付出的人們，讓學院裡的研究者能更勇敢地往前探詢。

感謝寬闊無窮的大地，向我們展示神秘、提供材料，慷慨地讓我們動手動腳。天地有大美而不言，萬物在複雜深邃中透露著最簡單的純潔。感謝台灣這片不可思議的土地上曾予我深刻感動的每一片森林：鴛鴦湖的雲霧林、合歡山的冷杉林、塔塔加的雲杉林，還有這世上永無止盡的美麗地景。我知道窮盡一生的追逐也不能理解你們的身世於萬一，但能身在你們之中卻總是令我喜悅不已。

最後，也最重要的，謝謝我摯愛的家人。總是問我吃飽了沒的奶奶，如今我終於能不顯羞澀地用台語和你交談，逗你發笑，儘管你的時間漸漸地停下了。謝謝辛苦養育我長大的爸爸媽媽，你們總是包容我的任性，給予我無論在物質或精神上永無止盡的支持，讓我能夠無後顧之憂地專注於自己喜歡的工作。你們從來不曾要求、禁止或規定我任何事情，我卻總是看著你們而知道自己應該更努力做得更好。謝謝老哥，雖然我們很少講什麼正經事，但我知道從小到大你總是挺我，永遠站在我後面給我靠，讓我不用害怕，也謝謝瑞君，你也和我們一樣，彼此間不用多說卻能夠相互理解。謝謝 m，我要說的你都知道。

要謝的人太多了卻不能只謝天就好，僅以哥倫布的航海日誌作結，與所有我愛和愛我的人共勉：「方向西南西，我們繼續向前航行。」

摘要

物種分布模式目前是廣泛應用於植物生態學的方法，但在台灣尚欠缺與傳統植群調查資料的整合。本研究嘗試整合模式預測、現生植群圖以及樣區調查資料，以評估物種潛在分布在氣候變遷下的變化，並藉現生棲地脆弱度評估的機制，篩選出適於長期生態監測的調查樣區。在比較基礎不同的模式／尺度不同的氣象資料組合的表現後，我們使用統計模式分類與迴歸樹（classification and regression tree, CART）與全球尺度的 WORLDCLIM 氣象資料，建立台灣冷杉（*Abies kawakamii*）、台灣鐵杉（*Tsuga chinensis* var. *formosana*）及兩種檜木屬（*Chamaecyparis*）植物等數種台灣地區針葉林優勢樹種，在現生氣候下的分布模式，發現在四個氣候因子中熱量因子比水分因子更為重要。模式結果可以投影到兩種氣候變遷情境下三個不同時期，並與現生植群圖套疊，以評估物種現生棲地的可能位移與脆弱度，而脆弱度較高的調查樣區將可作為我們未來的監測對象。結果顯示各目標物種的潛在棲地會在每個時期間向上移動約兩百到三百公尺，同時會逐漸分化使交錯帶減縮。整體而言，氣候變遷對台灣冷杉的影響會大於對台灣鐵杉和檜木的影響，儘管台灣冷杉在交錯帶內仍能保有相當的競爭力。脆弱度評估顯示台灣北部對氣候變遷較為敏感，大部分的監測樣區也集中在此，顯示此區域的物種棲地遷移速率較高，同時也符合歷史文獻中提及植物物種與植群在此區域的海拔壓縮現象。

關鍵字：物種分布模式、台灣冷杉、台灣鐵杉、檜木、分類迴歸樹、脆弱度、監測樣區。

Abstract

Species distribution modeling (SDM) is now widely applied in plant ecology but still lack of integration with traditional vegetation survey data in Taiwan. In this study, we try to integrate model prediction, current vegetation map, and survey plots data to evaluate the transition of species potential habitats under climate change. Moreover, we expect to find survey plots that would be appropriate for long term ecological monitoring based on the vulnerability evaluation on species current habitats. After comparing the performance of each set of different based models and climate datasets within different scale, we treat WORLDCLIM data which is within global scale to build the statistical model classification and regression tree (CART) on *Abies kawakamii*, *Tsuga chinensis* var. *formosana*, and two *Chamaecyparis* species which are dominance in coniferous forest in Taiwan under current climate. Four bioclimatic variables are treated in the model and we find that thermal factors are more important than moisture ones. The model results would be able to be projected into two different climate change scenarios within three periods, and combined with current vegetation map to evaluate the potential shift and vulnerability for each species and their ecotones. Moreover, survey plots that are vulnerable would be the long term monitoring targets. The results show that the potential habitats of each target species would shift upward about 200 to 300 m between each period, and their habitats would differentiate gradually, causing ecotones narrower. Generally speaking, the impact of climate change on *Abies* would be stronger than on *Tsuga* and *Chamaecyparis*, though *Abies* would have competitive force within ecotone areas in future. The vulnerability evaluation told that northern Taiwan is more sensitive to climate change, and most of monitoring plots would fall within, revealing the shifting speed of species under

climate change in the part would be faster. The trend corresponds to the literatures that indicated the altitudinal depression of plant species and vegetation within the region.

Keywords: species distribution modeling (SDM), *Abies kawakamii*, *Tsuga chinensis* var. *formosana*, *Chamaecyparis*, CART, vulnerability, monitoring plots.



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iv
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
壹、序言.....	1
貳、文獻回顧.....	3
一、氣候變遷衝擊評估.....	3
二、物種分布模式.....	7
三、針葉林與交錯帶.....	11
參、材料與方法.....	14
一、研究區域.....	14
二、資料抽取.....	14
(一) 氣象資料.....	14
(二) 物種資料.....	17
三、資料分析.....	17
(一) 物種分布模式／氣象資料比較評估.....	17
(二) 空間分布樣式分析.....	19
(三) 脆弱度評估及監測樣區篩選.....	23
肆、結果.....	25
一、物種分布模式／氣象資料比較評估.....	25
二、空間分布樣式.....	28
三、脆弱度評估及監測樣區篩選.....	46
伍、討論.....	60
一、物種分布模式／氣象資料比較評估.....	60
二、空間分布樣式.....	62
三、脆弱度評估及監測樣區篩選.....	66
陸、結論.....	69
柒、參考文獻.....	70

圖目錄

圖 1	21 世紀歐洲氣候因子變化的預測:(a)平均氣溫;(b)平均年累積雨量(IPCC, 2007)	4
圖 2	台灣木本植物垂直分帶的樣區分布圖(林建融等, 2007)。	12
圖 3	兩種不同氣象資料及兩條故事線中四個氣象因子在不同時期的變化: (a)WI; (b)TMC; (c)PRS; (d)PRW	16
圖 4	假想的物種耐性曲線, 藉以說明各預測林型的分布區間.....	22
圖 5	台灣地區垂直剖面圖.....	22
圖 6	研究流程圖.....	24
圖 7	台灣冷杉的 CART 模式.....	27
圖 8	台灣鐵杉的 CART 模式.....	27
圖 9	檜木的 CART 模式.....	28
圖 10	調查樣區實際林型的空間分布.....	29
圖 11	CART 模式預測林型在現生氣候下的空間分布圖	30
圖 12	CART 模式預測林型的台灣全島分布圖	31
圖 13	CART 模式預測林型在 2020 年 A2a 的空間分布圖	33
圖 14	CART 模式預測林型在 2020 年 B2a 的空間分布圖.....	33
圖 15	CART 模式預測林型在 2050 年 A2a 的空間分布圖	34
圖 16	CART 模式預測林型在 2050 年 B2a 的空間分布圖.....	34
圖 17	CART 模式預測林型在 2080 年 A2a 的空間分布圖	35
圖 18	CART 模式預測林型在 2080 年 B2a 的空間分布圖.....	35
圖 19	台灣冷杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布: (a)現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年	40
圖 20	台灣冷杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布: (a)現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年	41
圖 21	台灣鐵杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布: (a)現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年	42
圖 22	台灣鐵杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布: (a)現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年	43
圖 23	檜木優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布:(a) 現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年.....	44
圖 24	檜木優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布:(a) 現生氣候;(b)2020 年;(c)2050 年;(d)2080 年.....	45
圖 25	台灣冷杉優勢群系的脆弱度分布:(a)2020 年 A2a;(b)2020 年 B2a;(c)2050 年 A2a;(d)2050 年 B2a;(e)2080 年 A2a;(f)2080 年 B2a.....	47
圖 26	台灣鐵杉優勢群系的脆弱度分布:(a)2020 年 A2a;(b)2020 年 B2a;(c)2050	

	年 A2a ; (d)2050 年 B2a ; (e)2080 年 A2a ; (f)2080 年 B2a.....	50
圖 27	檜木優勢群系的脆弱度分布 : (a)2020 年 A2a ; (b)2020 年 B2a ; (c)2050 年 A2a ; (d)2050 年 B2a ; (e)2080 年 A2a ; (f)2080 年 B2a.....	53
圖 28	2020 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	56
圖 29	2020 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	56
圖 30	2050 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	57
圖 31	2050 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	57
圖 32	2080 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	58
圖 33	2080 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖.....	58



表目錄

表 1	各種量化評估脆弱度的方法.....	6
表 2	模式預測的誤差矩陣 (Fielding, 1999)	10
表 3	由誤差矩陣推導的模式表現評估因子 (Fielding, 1999)	10
表 4	台灣地區蘇氏山地木本植物垂直分帶 (修改自蘇鴻傑, 1992)	12
表 5	預測林型區分的標準.....	20
表 6	調查樣區實際林型區分的標準.....	21
表 7	各模式/氣象資料組合在各物種預測的生產者/使用者精度矩陣.....	26
表 8	各物種 CART 模式的概要資料.....	26
表 9	不同氣候下各預測林型在各優勢群系內的覆蓋面積 (單位: 平方公里)	37
表 10	現生台灣冷杉優勢群系內 A_{so} 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	46
表 11	現生台灣冷杉優勢群系內 AT_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	47
表 12	現生台灣鐵杉優勢群系內 AT_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	49
表 13	現生台灣鐵杉優勢群系內 TC_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	50
表 14	現生檜木優勢群系內 TC_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	52
表 15	現生檜木優勢群系內 C_{so} 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位: 平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)	53
表 16	現生氣候下調查樣區預測林型與實際林型的比較.....	59
表 17	2080 年 A2a 時監測樣區在現生氣候下預測林型與實際林型的比較.....	59
表 18	2080 年 B2a 時監測樣區在現生氣候下預測林型與實際林型的比較.....	59

壹、序言

氣候變遷目前已是全球趨勢，且受到普遍認定會對生物的生存產生影響。在傳統生態學的觀點，物種有其潛在生境（potential niche），所指的是物種在不同環境梯度上可能耐受範圍的總和。相對來說，實際生境（realized niche）代表的則是物種實際分布的範圍。當氣候變遷造成全球性與區域性的影響，並在特定的區域形成新的氣候狀況時，物種的潛在生境在空間上的分布便會產生相應的位移與變化。運用物種目前實際的分布情形以及適當的環境因子建立物種分布模式（species distribution modeling, SDM），將能描繪出現生氣候下物種的潛在棲地。此外，由於現在已有許多模擬的氣候變遷情境，將模式的結果和這些情境結合，將有助於觀察物種潛在棲地的變化。

事實上，全球尺度和區域尺度下的氣象模擬資料，可能會造成模式建立時表現的差異，而以統計方法為基礎和以機器學習方法為基礎的模式所預測的結果間也會有所出入。因此，為驗證其有效性，即需要比對模式預測的結果與物種的實際分布。在過去，台灣由於欠缺全島尺度且在統一標準下進行調查的物種分布資料，所以既無法以足夠的樣區數量來建立物種分布模式，也沒有驗證模式有效性的機制。

近年來，由於「國家植群多樣性調查及製圖計畫」的推動，我們不但得到調查區域跨越全島且基於統一標準的大量樣區資料，也有了完整的現生植群圖。在這樣的背景下，本研究首先針對台灣地區數種高山優勢針葉樹種，分別以兩種不同尺度下的氣象模擬資料建立兩種不同的物種分布模式，並以現生植群圖中各目標物種優勢群系的分布進行驗證，以找出最理想的模式／氣象資料組合。

其次，我們可以藉由模式的結果定義出純林與交錯帶（ecotone）等不同預測林型，並觀察各預測林型在各優勢群系內的分布狀況以及在氣候變遷影響下可能的位移。最後，我們將能評估現生氣候下各優勢群系在氣候變遷衝擊下的脆弱度，並重新將用於建立模式的樣區，篩選出位在脆弱度較高區域者，作為長期生態監測的目標，以理解樣區內的目標物種，在氣候變遷下生長可能發生的改變。文獻指出台灣植群沿海拔梯度的帶狀分化，在空間分布樣式上有區域性差異，因此我們可以預期這些差異會表現在上述包含預測林型位移、脆弱度以及監測樣區的部份，進而協助我們發現台灣對氣候變遷反應較為敏感的区域。



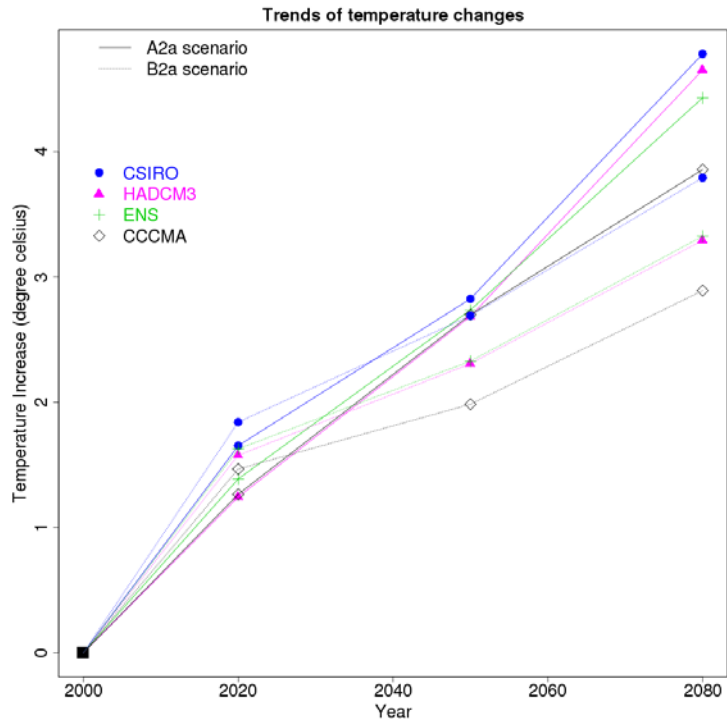
貳、文獻回顧

一、氣候變遷衝擊評估

全球氣候變遷在 21 世紀的第一個十年受到越來越多注意，一般認為我們的世界正在逐漸變暖。圖 1 顯示了不同模式與 IPCC 溫室氣體排放情境下，對 21 世紀歐洲平均氣溫以及平均年累積雨量的預測 (IPCC, 2007)。這些模式 (CCCMA: 加拿大氣候模擬與分析中心；HADCM3: Hadley 耦合模式中心版本三；CSIRO: 聯邦科學與產業研究組織；ENS: 上列的平均) (Gordon & O'farrell, 1997; Collins *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2003) 皆發展自全球環流模式 (global circulation model, GCM)。在溫室氣體排放情境的兩種不同故事線中，A2a 描繪了高度異質化的未來世界，其主要元素包含高人口成長，嚴重的能源消耗與土地利用變遷，以及緩慢的技術變遷。相對的，B2a 則具有較好的環境保護，較低的人口成長，較多樣化的技術變遷以及較緩和的土地利用變遷。

從圖 1 我們可以發現，在 2020 年時，B2a 的平均氣溫會比 A2a 略高，但在 2050 年和 2080 年時，A2a 則都較 B2a 為高，顯示兩種不同故事線對環境衝擊的差異。值得注意的是，以 CCCMa 情境來看 2080 年時的 A2a，其均溫會近似於 2050 年時的 B2a，顯示了長期而言，B2a 對環境衝擊較緩和的趨勢。但無論模式與情境間的差異，2020 年時歐洲的平均氣溫會比現在高攝氏 1 到 2 度，而 2080 年會比現在高攝氏 3 到 4 度的趨勢是十分明顯的。相較之下，雨量的變化趨勢則較難有一致的預測。事實上，全球暖化會導致大氣具有較高的溼度負荷，因此會讓蒸發量和降水量產生較大的變異 (Allen & Ingram, 2002; Held & Soden, 2006)。此外，模式本身的不確定性也讓降雨的估計變得更困難 (Meehl *et al.*, 2005)。整體而言，降雨的

(a)



(b)

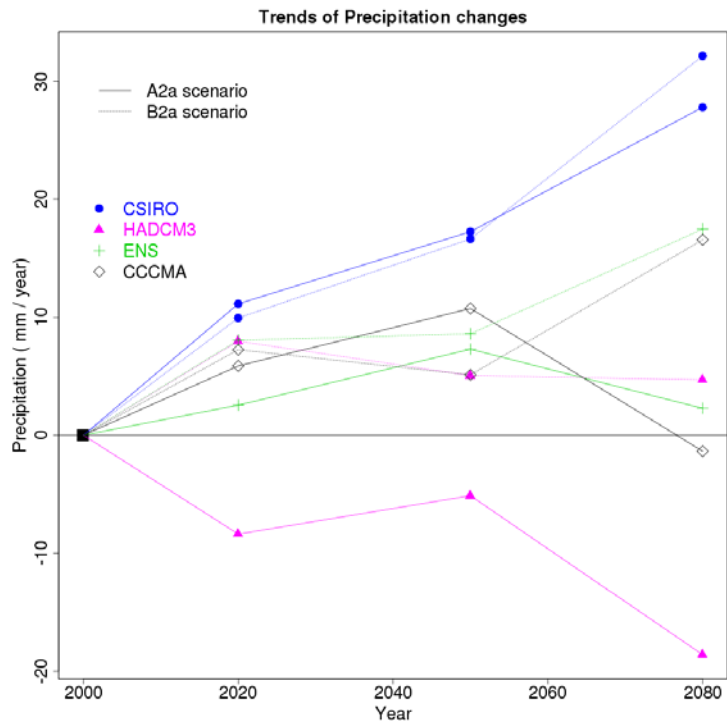


圖 1 21 世紀歐洲氣候因子變化的預測：(a)平均氣溫；(b)平均年累積雨量 (IPCC, 2007)

預測在不同氣候變遷情境間會有很大的差異。

上述預測針對的是歐洲的部份，但氣候變遷的影響並不僅止於區域性而可能及於全球性。從系統的階層性質來看，氣候變遷的影響可能產生在生態系尺度或物種尺度上 (Walther *et al.*, 2002; Parmesan & Yohe, 2003)。當不同尺度間的影響互相作用，會使我們較難發掘環境與生物間特定的互動關係。傳統觀點認為物種演化的速率遠較氣候變化為低 (Bennett, 1997)，但 Davis *et al.* (2005)認為，無論維持現有棲地、分布位移或者是滅絕，物種對環境變化的反應都牽涉到演化的過程。這種適應性的變異在草本植物可能發生於十年的時間尺度，而在木本植物則可能到達百年甚至千年的尺度。無論如何，以物種分布與環境因子建立的分布模式能夠描述它們之間的平衡，我們也可以藉此來觀察在長期氣候變遷下，這種平衡的改變是否涉及適應的過程 (Davis & Shaw, 2001; Hannah *et al.*, 2002)。

對氣候變遷下物種分布變化的評估並不僅止於其適應的過程，也包含了棲地的脆弱度 (vulnerability)，IPCC(2001)將脆弱度定義為在面對極端或高異質性的氣候變遷情況所造成的負向效應時，一個系統容易受到影響或無法抵抗的程度。以此定義為基礎，學者發展出若干量化方法來評估脆弱度。Metzger & Schroter (2006)即呈現了一個整合生態系可能受到氣候變遷的衝擊及其適應能力的函數，來評估生態系的脆弱度。此外，評估物種的脆弱度也逐漸成為生態學中的重要議題，因為它將能協助我們發現物種的現生棲地有哪些區域會受到氣候變遷較嚴重的威脅，進而擬定適當的保育策略。Broennimann *et al.* (2006)的研究認為物種分布範圍在氣候變遷下的改變能夠代表物種的脆弱度，而這種改變則涉及包含生境寬度及海拔位移等許多生態與地理上的特性。這個方法的主要目標在於理解地理特性和物種脆弱度之間的關係，而沒有評估特定棲地的脆弱度。為理解棲地的脆弱度，最簡單的方式就是建立物種分布模式，並計算出現生的適存棲地在未來會消失的

數量或面積 (Berry *et al.*, 2002; Iverson *et al.*, 2007; Casalegno *et al.*, 2010) 這個方法的基本概念是消失的棲地較為脆弱，而失去越多棲地的物種則越脆弱，但並無法表現出棲地受到衝擊的程度。所以 Matsui *et al.* (2004) 選擇以模式預測的物種出現機率的倒數來代表脆弱度，當出現機率越小則脆弱度會越高。但由於這個評估方式並未處理到物種出現機率在現在與未來之間的變化，因此仍需要修正。表 1 整理了上述的方法。

表 1 各種量化評估脆弱度的方法

評估準則	階層	參考文獻
f (PI, AC)*	生態系	Metzger & Schroter, 2006
物種分布範圍的變化量	物種	Broennimann <i>et al.</i> , 2006
適存棲地的消失量	物種／棲地	Berry <i>et al.</i> , 2002 Iverson <i>et al.</i> , 2007 Casalegno <i>et al.</i> , 2010
物種出現機率之倒數	物種／棲地	Matsui <i>et al.</i> 2004

* PI: 潛在衝擊 (potential impact), AC: 適應能力 (adaptive capacity)。

二、物種分布模式

理解植物分布與環境之間的關係一直是生態學中重要的課題 (Cox *et al.*, 1973; Woodward, 1987)。傳統方法偏好使用多變量分析來描繪不同環境因子對植群構造的影響力 (Legendre & Legendre, 1998; Ewald, 2003)，而近年來由於計算技術的進步，從線性模式或機器學習方法發展而來的各種物種分布模式，包含線性加成模式 (generalized additive model, GAM)、分類回歸樹 (classification and regression tree, CART)、最大熵模式 (maximum entropy, MAXENT) 等等，都已廣泛應用於預測物種的潛在棲地 (Guisan & Zimmermann, 2000; Austin, 2007)。藉由物種分布模式，我們可以獲得更多環境如何影響物種分布的資訊，而模式預測的結果也可以協助我們從機率觀點擬定適當的保育決策。因此，理論生態學的學術典範正逐漸由「以物種偵測環境」轉移到「以環境預測物種」(Wildi, 2010)。

物種分布模式同時使用物種出現與不出現 (presence/absence) 的資料來測試物種對環境的反應，並能夠描述物種的潛在棲地。顯示物種分布模式能有效地幫助我們理解氣候變遷下物種分布可能的位移和有機會避難的位置，進而擬定適當的保育策略 (Root *et al.*, 2003; Parmesan, 2006)。也因此，利用物種分布模式來描繪物種分布的變化目前已成為生態學中常見的方法 (Bartlein *et al.*, 1997; Iversen & Prasad, 1998; Thuiller *et al.*, 2005; Schrag *et al.*, 2008; Matsui *et al.*, 2009)。建立物種分布模式，首先必須選擇適當的環境因子，這個工作可以參考文獻或是依照野外經驗來判斷，重要的是必須找到對物種的生存的確可以構成限制的因子。如同上述，物種分布模式假設了環境和特定物種間存在一種平衡關係，而這種平衡關係是由單一物種目前實際的棲地推論到各種不同的環境梯度，因此較難以反映出物種之間的互動關係 (Pearson & Dawson, 2003; Cairns & Moen, 2004)。

在傳統以迴歸分析為基礎的線性模式中，反應與預測因子間的關係是預先假定的（例：直線、拋物線），模式的測試是為了驗證這種關係。相對於此，CART 模式的建立是將母資料集迭代切割成不同的類群，切割的準則則是經過雙因化（大於或小於）的預測因子（Verbyla, 1987）。由於反應和預測因子間並不存在預先假定的關係，所以 CART 能夠容忍預測因子間的交互作用或線性相關（Moore *et al.*, 1991）。由是，我們可以在不假定任何先設的配適函數（fitting function）的情況下，藉由簡單的因子將物種的棲地區分成幾種類型，具有不同的物種出現機率（occurrence probability），而此機率代表的即是在該種氣候條件下物種出現的期望值。此外，CART 也會定義出物種出現機率的門檻值（物種出現樣本數／全部樣本數），出現機率超過門檻值的棲地類型即為物種的適存棲地，因此我們將能理解物種在哪些類型的棲地會有較高的出現機會（Breiman *et al.*, 1984; Iverson & Prasad, 1998）。

目前還有例如包裹樹（bagging trees, BT）和隨機森林（random forest, RF）等在 CART 的基礎上加入重覆取樣技術的新模式，由於能夠提升預測的精度而逐漸受到廣泛的應用（Breiman, 1996）。但由於這些模式的結果是每次重複取樣後建立的分類樹的平均，所以並不能提供一個確切的機率門檻值來判斷物種對棲地的適存性，也因此被認為是較難以詮釋環境因子重要性與影響力的「黑盒子」模式（Breiman, 2001）。因此，如果希望在預測以外，能夠對環境因子如何影響物種分布有更完整的理解，CART 仍是值得採用的模式，目前也已有許多研究應用 CART 得到良好的結果（Matsui *et al.*, 2004; Yagihashi *et al.*, 2007; Horikawa *et al.*, 2009）。

另一方面，像 MAXENT 這樣的機器學習模式，其概念則是在一群限制因子的集合中，試圖藉由找到最大熵（maximum entropy, 即最大資訊量）的機率分布，來估計目標的機率分布。舉例來說，假設我們希望得知定溫下氣體速率的機率分

布，我們可以先找出定溫下最大熵的分布。若應用於物種分布預測，則整個研究區域即被視為最大熵分布的範圍，再透過目標物種出現的點位與研究區域內環境因子的網格圖層建立模式，即能估計目標物種在研究區域內的機率分布 (Philips *et al.*, 2006)。

為了評估模式的表現，原始的資料集通常會被切分為訓練資料與檢核資料，前者用於建立模式而後者用於驗證模式。事實上，也有學者指出，切分後的子資料集之間並不是互相獨立的，因此資料集的分切並不能提升模式的有效性 (Chatfield, 1995)。由是，統計學家遂發展出交錯驗證 (cross-validation) 的技術來處理這個問題，即使直接將整組原始資料作為建模的訓練資料，模式表現的評估仍然可以透過接收者操作特徵 (receiver operating characteristic, ROC) 分析來進行 (Fielding, 1999)。這個方法的基礎是建立在預測資料與實際資料間的對錯關係：「真肯定」(true positive) 指的是模式正確地預測出物種的出現，而「錯肯定」(false positive) 則代表模式預測物種出現但實際上未出現；「真否定」(true negative) 表示模式正確地預測出物種的未出現，而「錯否定」(false negative) 則代表模式預測物種未出現但實際上有出現。表 2 呈現了描述這四種情形的誤差矩陣，表 3 則在誤差矩陣的基礎上提供若干指標。在 ROC 分析中，曲線下面積 (area under curve, AUC) 代表評估模式表現的指標。一般而言，模式的 AUC 值若在 0.5 至 0.7 間，顯示預測力弱 (poor)，若在 0.7 至 0.9 間則顯示預測力好 (good)，若大於 0.9 則顯示預測力非常好 (excellent) (Swets, 1988)。有許多不同的因素會影響到模式的表現，研究顯示由於對環境因子較為敏感，稀有種會比廣泛分布種容易預測 (Araujo & Williams, 2000)。此外，較大的樣本也能產生較好的預測 (Hernandez *et al.*, 2006)。

表 2 模式預測的誤差矩陣 (Fielding, 1999)

		實際	
		出現	不出現
預測	出現	真肯定 (a)	錯肯定 (b)
	不出現	錯否定 (c)	真否定 (d)

表 3 由誤差矩陣推導的模式表現評估因子 (Fielding, 1999)

評估因子	算子／敘述
敏感度	$a/(a+c)$
專一性	$d/(b+d)$
肯定預測力	$a/(a+b)$
否定預測力	$d/(c+d)$
ROC 曲線	X 軸：1-專一性 Y 軸：敏感度
AUC 值	ROC 曲線下面積

三、針葉林與交錯帶

針葉林在世界各地的高海拔與高緯度區域都有大面積的覆蓋，也因此在此氣候變遷下，會面臨較大的環境壓力 (Lloyd & Graumlich, 1997; Cairns, 2001)。事實上，針葉林的海拔上限時常與樹木線 (tree line) 重合，普遍受到溫度因子的限制 (Korner, 1998; Jobbagy & Jackson, 2000; Korner & Paulsen, 2004)。另一方面，許多研究也顯示雨量會對樹木線區域的樹種生長產生影響 (Germino *et al.*, 2002; Daniels & Veblen, 2004)。

在台灣，帶狀植群沿海拔梯度的分化受到許多研究的關注 (Wang, 1962; 蘇鴻傑, 1992; 宋永昌, 2001)。表 4 是蘇鴻傑 (1992) 依照海拔、年均溫以及溫量指數 (warmth index, WI) (Kira, 1977) 等因子所區分的木本植物垂直分帶。其中較優勢的針葉樹包含了台灣冷杉 (*Abies kawakamii*)、台灣鐵杉 (*Tsuga chinensis* var. *formosana*)、台灣雲杉 (*Picea morrisonicola*)、紅檜 (*Chamaecyparis obtusa*)、台灣扁柏 (*Chamaecyparis formosensis*) 以及台灣二葉松 (*Pinus taiwanensis*) 等。除了台灣二葉松是次生林的優勢種以外，其他種則沿著海拔梯度構成了帶狀分化的植群。冷杉林帶主要分布在海拔 3,100 至 3,600 公尺，鐵杉雲杉林帶則分布在海拔 2,500 至 3,100 公尺，台灣扁柏以及紅檜則主要分布在上部櫟林帶，海拔 2,000 至 2,500 公尺。林建融等 (2007) 分析了調查樣區的資料，以驗證蘇氏木本植物垂直分帶 (圖 2)，結果顯示各分帶間確有明顯的海拔分化，但也有分布重疊的交錯帶區域。

植群帶之間的交錯帶通常是對氣候改變較為敏感的區域 (Hogg & Schwarz, 1997; Messaoud *et al.*, 2007)。因此，溫度與雨量因子在時間或空間尺度的變異都

表 4 台灣地區蘇氏山地木本植物垂直分帶 (修改自蘇鴻傑, 1992)

Altitude	Vegetation	Alt. (m)	Tm(°C)	WI(°C)	Climate
Alpine	Alpine vegetation	> 3600	< 5	< 12	Subarctic
Subalpine	<i>Abies</i> zone	3100 – 3600	5 – 8	12 – 36	Cold-temperate
Upper montane	<i>Tsuga-Picea</i> zone	2500 – 3100	8 – 11	36 – 72	Cool-temperate
Montane	Upper <i>Quercus</i> zone	2000 – 2500	11 – 14	72 – 108	Temperate
	Lower <i>Quercus</i> zone	1500 – 2000	14 – 17	108 – 144	Warm-temperate
Submontane	<i>Machilus-Castanopsis</i> zone	500 – 1500	17 – 23	144 – 216	Subtropical
Foothill	<i>Ficus-Machilus</i> zone	< 500	> 23	> 216	Tropical

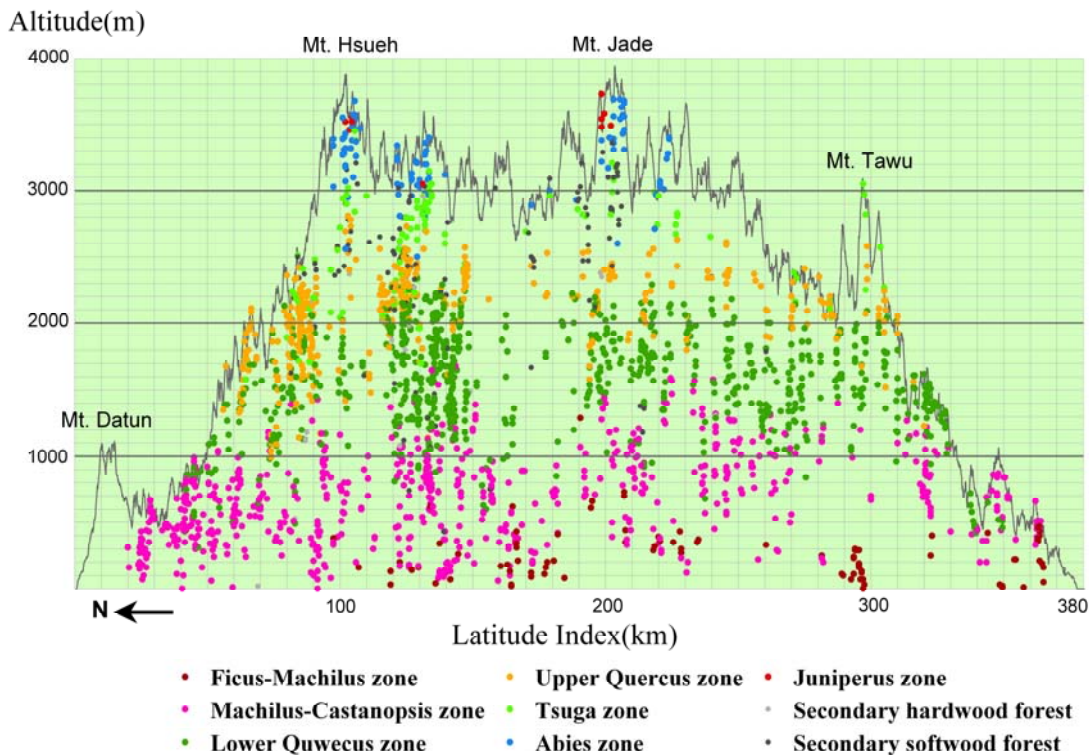


圖 2 台灣木本植物垂直分帶的樣區分布圖 (林建融等, 2007)。

可能導致交錯帶區域的位移 (Noble, 1993)。蘇鴻傑 (1992) 的研究不止指出台灣地區植群帶狀分化的現象，也發現在台灣南北部，帶狀植群間會產生海拔壓縮的現象。也就是說，和台灣中部比較起來，南北部的植群帶界線會較為模糊，而有較大面積的交錯帶。此外，植群帶在中部的分布也會較南北部為高。這個現象主要是受到海拔梯度上氣溫遞減率的影響，由於台灣南北部的氣溫遞減率高於中部，換句話說，相同海拔的區域在台灣中部會比南北部具有更高的氣溫，這可能是導因於貫穿整個台灣島而在中部有最大覆蓋面積的中央山脈，這個現象也就是通稱的「大山塊加熱效應」(Massenerhebung effect) (Collinson, 1988)。謝長富等 (1996) 也指出物種和植群在南北部會分布在比中部低的海拔，而 Chiou *et al.* (2010) 則認為這種現象是導因於冬季的東北季風而非大山塊加熱效應。在上述的討論脈絡下，我們能夠預期在台灣，針葉林帶優勢種與交錯帶的棲地，在氣候變遷影響下的位移與變化，將會有區域性的差異。

目前對於交錯帶的研究較多集中在森林—草原交錯帶 (Luckman & Kavanagh, 2000; Rupp *et al.*, 2000; Sankey *et al.*, 2006) 而較少處理森林—森林交錯帶的問題 (Loehle, 2000)。事實上，交錯帶指示了在特殊環境梯度上優勢物種之間的競爭與分布上的過渡 (Peters, 2002)，因此，交錯帶對氣候變遷的反應亦可以代表在相互競爭的物種間優勢地位改變的情形。儘管木本植物的遷移速率遠低於草本植物 (Grabherr *et al.*, 1994)，我們仍可以預期在交錯帶區域內，優勢物種的頻度或優勢度會在氣候變遷的影響下產生一定程度的改變。也因為這樣，如何模擬交錯帶在不同氣候條件下的動態目前已成為生態學中廣受注目的議題 (Pellatt *et al.*, 2000)。此外，研究指出全球暖化將會使樹木線向更高的海拔位移 (Camarero *et al.*, 2000; Gansert, 2004)，而由於上述台灣針葉林帶與交錯帶特殊的分布樣式，我們可以假設氣候變遷在台灣將會造成針葉林帶的海拔上移與壓縮，並使交錯帶區域縮小，同時這種壓縮的現象在南北部將會比在中部更加明顯。

參、材料與方法

一、研究區域

台灣島（東經 119.3 至 122 度，北緯 21.55 至 25.2 度）位於太平洋西側邊緣，在中國東南方 150 公里，菲律賓北方 300 公里，島東西向最長達 140 公里，南北向最長達 394 公里，總面積約 35,800 平方公里。台灣全島約四分之三面積受山地地形覆蓋，海拔高從 0 至 3,952 公尺，氣候主要受到夏季西南季風與冬季東北季風的調節，尤其冬季降水受到東北季風影響甚深。由於中央山脈的阻擋，使台灣西南部在冬季時常面臨乾旱，降雨的季節性更形明顯。春夏兩季時常有發軔自西太平洋或南中國海的颱風進入台灣，是降水的主要來源（Lin & Jeng, 2000; Yu *et al.*, 2006），同時也對森林與植群造成程度不一的擾動（Mabry *et al.*, 1998）。

二、資料抽取

（一）氣象資料

根據 Matsui *et al.* (2004)，有四個氣象因子對溫帶植物的分布較具影響力：溫
量指數計算自月均溫高於 5°C 的月份其均溫與 5°C 之差的總和，指示了物種的累積
生長溫度（Kira, 1977）；最冷月最低溫（minimal temperature of the coldest month,
TMC）提供了物種對寒冷的極限耐受指數（Sakai, 1975）；夏降水量（summer
precipitation, PRS）和冬降水量（winter precipitation, PRW）則分別指示了生長季的
水分需求以及冬季水分（包含降雪）在來春的累積（Kozlowski, 1976; Woodward,

1987; Lin *et al.*, 2003)。

為了比較不同尺度氣象資料在模式建立時表現的差異，我們在初步分析中使用了兩種不同尺度的氣象資料。全球尺度的部份，加州大學柏克萊分校脊椎動物學博物館 (Museum of Vertebrate Zoology, University of California, Berkeley) 建立的 WORLDCLIM 氣象資料庫，目前已能夠提供多種不同解析度的網格氣象資料，包含了平均海拔高，12 個月份的最高溫、最低溫、降水，以及其他 19 個不同的變數 (Hijmans *et al.*, 2005)。我們選擇了 30 x 30 弧秒的解析度，每個網格投影在台灣的大小約 0.694 平方公里。WORLDCLIM 提供的現生氣象資料是內插自全球超過一千個氣象站 1950 至 2000 年的平均，未來的氣象資料則包含我們上述的各種氣候變遷情境及溫室氣體排放的故事線。我們選擇了 CCCMa 的 A2a 與 B2a 故事線在 2020 年、2050 年以及 2080 年的情境，作為預測的背景。區域尺度的部份，台灣大學全球變遷研究中心也提供了台灣尺度下一公里網格解析度的氣象資料 (Lin *et al.*, 2010)。為了在相同的基準下比較，我們利用了空間抽樣方法將其一公里網格降尺度至 30 x 30 弧秒。其現生氣象資料是內插自中央氣象局 25 個氣象站 1960 年至 2005 年的平均，氣候變遷情境的部份，我們同樣選擇了 CCCMa 的 A2a 與 B2a 故事線在 2020 年、2050 年以及 2080 年的情境，作為預測的背景。

藉由地理資訊系統軟體 Quantum GIS 的操作 (Quantum GIS development team, 2009)，我們能將 WORLDCLIM 與台大全變中心所提供的資料計算抽取出需要的因子。由於台灣有較長的夏季，所以 PRS 累積了五至九月的降水量，PRW 則包含一至三月及十二月的降水量，WI 和 TMC 則依照定義計算。必須注意的是，由於台大全變中心的資料欠缺 TMC 的部份，所以我們以一月均溫取代之。抽取出的台灣氣象因子圖層包含 46,065 個 30 x 30 弧秒大小的網格，每個網格都具有獨特的辨識碼 (key code)，便於將樣區資料引入網格系統。

觀察圖 3 可以發現，在 WI 的部份，兩種資料的預測趨勢相近，只是台大全變中心的值略低於 WORLDCLIM；TMC 的部份由於台大全變中心的資料以一月均溫替代，所以整體趨勢會有些差異；PRS 的部分兩種資料都顯示 A2a 會先上升再下降，B2a 則反之，但和 WI 同樣地，台大全變中心的值會比 WORLDCLIM 低出甚多；至於 PRW 的部分，WORLDCLIM 會有較大的起伏，而台大全變中心的變化則較和緩。

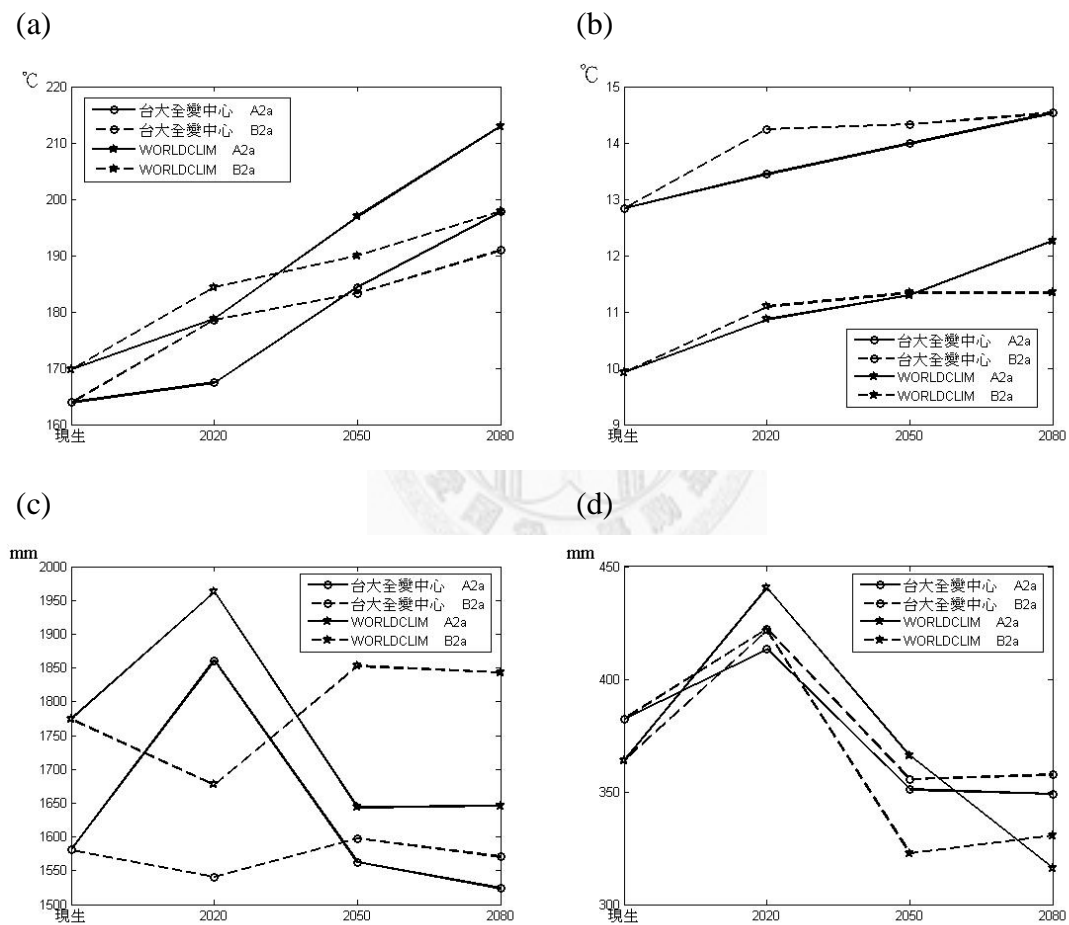


圖 3 兩種不同氣象資料及兩條故事線中四個氣象因子在不同時期的變化：
(a)WI；(b)TMC；(c)PRS；(d)PRW

(二) 物種資料

自 2003 年起，行政院農委會林務局推動「國家植群多樣性調查及製圖計畫」，由八個研究團隊投入野外調查及資料庫建立工作，所有調查樣區資料皆導入「台灣植群資訊系統」。資料包含物種名，胸高直徑（僅記錄大於 1 公分者），樣區座標及若干環境因子。如同前述，物種分布模式的建立只需要物種的出現／不出現資料而不需要數量化資料，因此我們抽取出所有樣區內包含台灣冷杉、台灣鐵杉，以及將台灣扁柏與紅檜併為「檜木」擬種（pseudo species）後的出現／不出現資料，並依據其空間分布找到所屬的 WORLDCLIM 及台大全變中心網格，而得到兩個氣象資料集內四個氣象因子在各樣區內的值，進而建立模式。換言之，落在相同網格內的樣區具有相同的網格辨識碼和氣象因子的值。合計共有 3,069 個樣區用於建模。

三、資料分析

(一) 物種分布模式／氣象資料比較評估

為了選擇出適當的氣象資料與模式組合，我們分別以 WORLDCLIM 和台大全變中心兩種氣象資料集建立 CART 和 MAXENT 兩種模式。首先在 CART 模式的部份，操作環境為統計軟體 R 2.10.1 版（R Development Core Team, 2008）下的套件 **tree**(Ripley, 2009)。在建立模式前，我們先以 ROC 分析評估不同訓練樣區數對模式表現的影響，操作以套件 **ROCR**(Sing *et al.*, 2009) 進行。由於沒有顯著的差異，我們選擇以所有樣區建立模式。研究指出未經處理的 CART 模式會產生最大化的

分類樹而可能導致過度配適 (overfitting) 的現象，故而可利用交錯驗證技術將分類樹「修剪」至最適當的大小 (Munoz & Felicísimo, 2004)。由是，我們對利用各目標物種出現／不出現資料建立的 CART 模式分別進行 10 次交錯驗證，以建立最佳化的模式。修剪過後的模式可以表現出較簡潔的分類，利於對氣象因子重要性的解釋。MAXENT 模式的部份，則以套裝軟體 MAXENT 進行 (Philips et al., 2004)。

在比較評估的部份，我們將兩種模式以兩種氣象資料預測各目標物種，在現生氣候下出現機率大於 0.5 的棲地與台灣現生植群圖中各目標物種的優勢群系 (formation) 套疊，以評估其表現。依照台灣現行的植群分類系統 (行政院農委會林務局, 2010)，台灣冷杉優勢的林型主要出現在亞高山針葉林群系 (sub-alpine needle-leaved forest)，台灣鐵杉優勢的林型主要出現在上部山地針葉林群系 (upper montane needle-leaved forest) 及上部山地針闊葉混淆林群系 (upper montane mixed needle-broad-leaved forest)，而檜木優勢的林型則主要出現在山地針葉林群系 (montane needle-leaved forest) 及山地針闊葉混淆林群系 (montane mixed needle-broad-leaved forest)。預測結果與實際情形可依前文所述區分為真肯定、真否定、錯肯定及錯否定，我們可再依照這四個參數區分出各模式／氣象資料組合在各物種預測的生產者精度 (producer's accuracy, 真肯定／(真肯定+錯否定)) 與使用者精度 (user's accuracy, 真肯定／(真肯定+錯否定)) (Congalton, 1991)。前者指示了模式是否能確實地預測出物種出現的區域，後者則指示模式會多大程度地將物種未出現的區域預測為出現。藉由此比較，我們將能找到最適當的模式／氣象資料組合。在確定選用的模式／氣象資料組合後，會再以 ROC 分析來評估模式的表現。

(二) 空間分布樣式分析

我們可以將台灣冷杉、台灣鐵杉以及檜木的適存棲地依據出現機率大小區分為八種不同預測林型(表 5)，並給予簡化的林型名，圖 4 中假想的耐性曲線則描繪了不同林型在環境梯度上的分布區間(冷杉—鐵杉—檜木交錯帶較為特殊，未在此假想圖上表現)。在台灣的垂直剖面圖(圖 5)上繪出不同林型的分布位置將能夠協助我們理解它們在空間上的重疊以及氣候變遷下的位移情形。為了理解預測林型在空間分布上的合理性，我們也將調查樣區依據物種的出現及優勢情形分成八種實際林型(表 6)，並繪出在台灣垂直剖面圖上的分布，以和現生氣候下各預測林型的分布對照。此外，現生氣候下各預測林型在台灣全島的分布圖也能夠和現生植群圖對照。

以現生植群圖為基礎，我們可以進一步將預測的結果與前述的優勢群系套疊，計算在現生氣候條件下，現生台灣冷杉、台灣鐵杉及檜木優勢群系內各預測林型或預測為非棲地(non-habitats)區域的覆蓋面積，以及在未來不同時期的增減，因此也同時能理解交錯帶內優勢的變化情形。此外，現生植群圖也可以重繪成預測林型的分布圖，協助我們觀察空間上的分布樣式與未來的改變趨勢。

表 5 預測林型區分的標準

預測林型	P(台灣冷杉)	P(台灣鐵杉)	P(檜木)
台灣冷杉純林 (<i>Abies suitable only</i> , A _{so})	大於門檻值	小於門檻值	小於門檻值
台灣冷杉優勢冷杉－鐵杉交錯帶 (<i>Abies dominated A-T ecotone</i> , A _d AT _e)	大於門檻值且 大於 P(台灣鐵杉)	大於門檻值	小於門檻值
台灣鐵杉優勢冷杉－鐵杉交錯帶 (<i>Tsuga dominated A-T ecotone</i> , T _d AT _e)	大於門檻值	大於門檻值且 大於 P(台灣冷杉)	小於門檻值
台灣鐵杉純林 (<i>Tsuga suitable only</i> , T _{so})	小於門檻值	大於門檻值	小於門檻值
台灣鐵杉優勢鐵杉－檜木交錯帶 (<i>Tsuga dominated A-T ecotone</i> , T _d TC _e)	小於門檻值	大於門檻值且 大於 P(檜木)	大於門檻值
檜木優勢鐵杉－檜木交錯帶 (<i>Chamaecyparis dominated A-T ecotone</i> , T _d AT _e)	小於門檻值	大於門檻值	大於門檻值且 大於 P(台灣鐵杉)
檜木純林 (<i>Chamaecyparis suitable only</i> , T _{so})	小於門檻值	小於門檻值	大於門檻值
台灣冷杉－台灣鐵杉－檜木交錯帶 (<i>A-T-C ecotone</i> , ATC _e)	大於門檻值	大於門檻值	大於門檻值

表 6 調查樣區實際林型區分的標準

樣區實際林型	台灣冷杉	台灣鐵杉	檜木
台灣冷杉純林 (<i>Abies suitable only</i> , A _{so})	出現	不出現	不出現
台灣冷杉優勢冷杉－鐵杉交錯帶 (<i>Abies dominated A-T ecotone</i> , A _d AT _e)	出現且 IVI 值大於 台灣鐵杉	出現	不出現
台灣鐵杉優勢冷杉－鐵杉交錯帶 (<i>Tsuga dominated A-T ecotone</i> , T _d AT _e)	出現	出現且 IVI 值大於 台灣冷杉	不出現
台灣鐵杉純林 (<i>Tsuga suitable only</i> , T _{so})	不出現	出現	不出現
台灣鐵杉優勢鐵杉－檜木交錯帶 (<i>Tsuga dominated A-T ecotone</i> , T _d TC _e)	不出現	出現且 IVI 值大於 檜木	出現
檜木優勢鐵杉－檜木交錯帶 (<i>Chamaecyparis dominated A-T ecotone</i> , T _d AT _e)	不出現	出現	出現且 IVI 值大於 台灣鐵杉
檜木純林 (<i>Chamaecyparis suitable only</i> , T _{so})	不出現	不出現	出現
台灣冷杉－台灣鐵杉－檜木交錯帶 (<i>A-T-C ecotone</i> , ATC _e)	出現	出現	出現

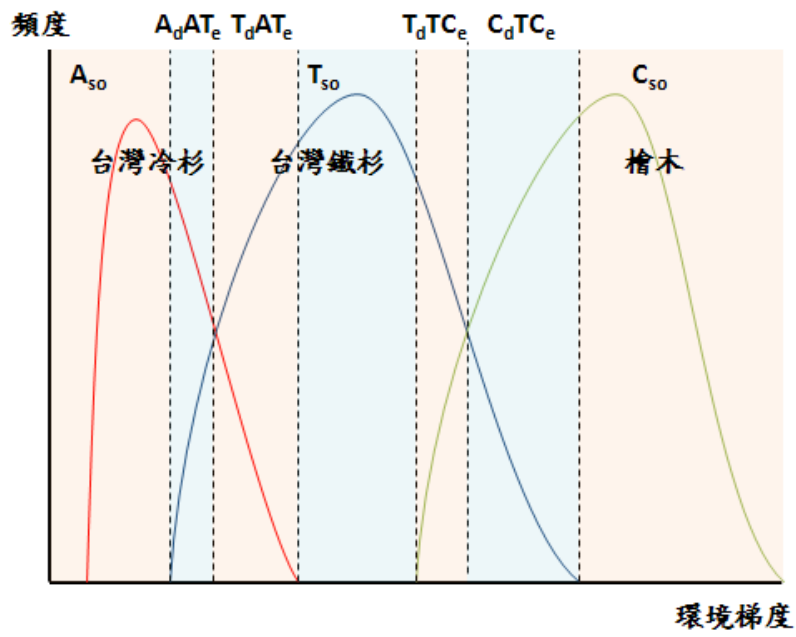


圖 4 假想的物種耐性曲線，藉以說明各預測林型的分布區間

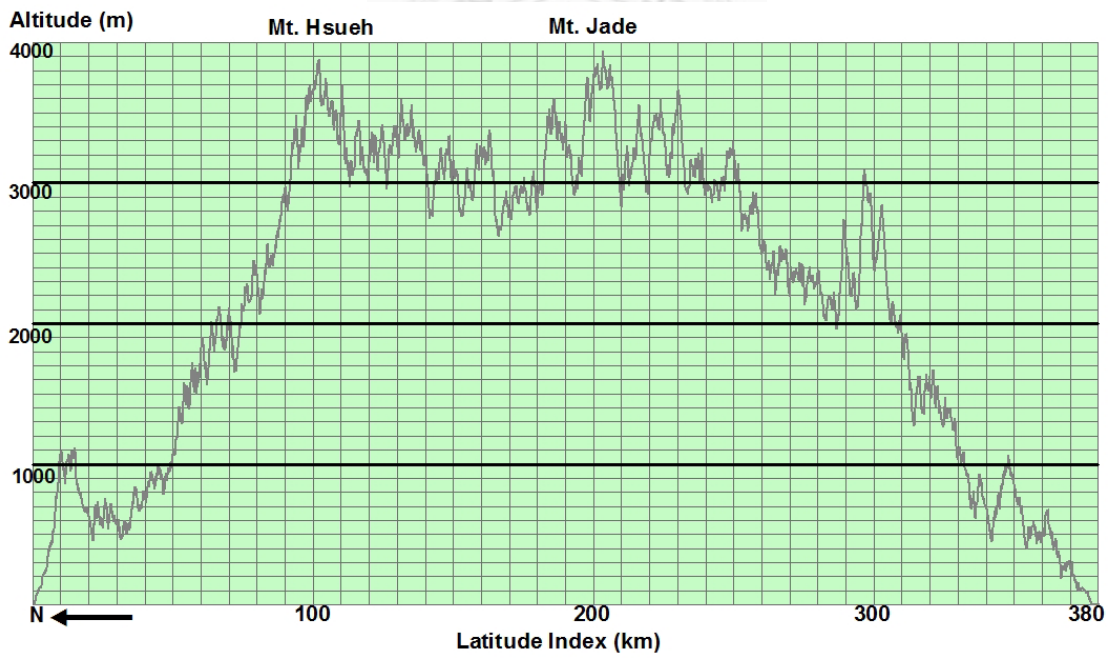


圖 5 台灣地區垂直剖面圖

(三) 脆弱度評估及監測樣區篩選

上文曾提及經由出現機率的倒數此算子作為脆弱度的代表，並不足以表現物種在不同類型棲地的分布可能從現在到未來的變化。因此，我們將脆弱度指數 (vulnerability index, VI) 定義為物種在現生氣候下出現機率與未來氣候下出現機率的比率：

$$VI(\text{台灣冷杉} \mid A2a_{2020}) = P(\text{台灣冷杉} \mid \text{current}) / P(\text{台灣冷杉} \mid A2a_{2020}) \text{---}(1)$$

此算子強調了出現機率的改變，而更能呈現棲地的脆弱度。舉例來說，假設現有一個網格物種出現機率為 1，若出現機率在未來下降到 0.1 則 VI 為 10，若下降到 0.01 則為 100。相對而言，如果網格的 VI 為 1，則顯示氣候的改變並不會對物種在該網格的分布造成影響，而如果 VI 小於 1，則表示氣候的改變會使物種更適合在該網格分布。為了便於討論，我們將 VI 大於 100 的網格定義為「極端脆弱」，介於 10 至 100 者為「中度脆弱」，介於 1 至 10 者為「輕度脆弱」，等於 1 者為「不變」，小於 1 者則為「增長」。在監測樣區篩選的部份，我們則以調查樣區的分布位置所屬的預測林型與實際群系將其區分為屬於特定優勢群系內的特定預測林型，交錯帶內不再區分不同優勢的林型則是考量到樣區的數量，並且排除目標物種未出現的樣區。此外，為了驗證預測類型的合理性，我們也將樣區依照物種的出現與否以及分布所屬群系區分成實際類型，並和預測類型比對參照。

最後，我們即可計算出現生各目標物種優勢群系內，純林林型和交錯帶林型依不同脆弱度級在未來各時期的覆蓋面積和樣區數量，並繪出三種優勢群系內不同脆弱度級的台灣全島分布圖。脆弱度大於 1 的樣區即視為未來的監測對象，監測樣區的空間分布亦可以透過台灣垂直剖面圖呈現。圖 6 是本研究的流程圖。

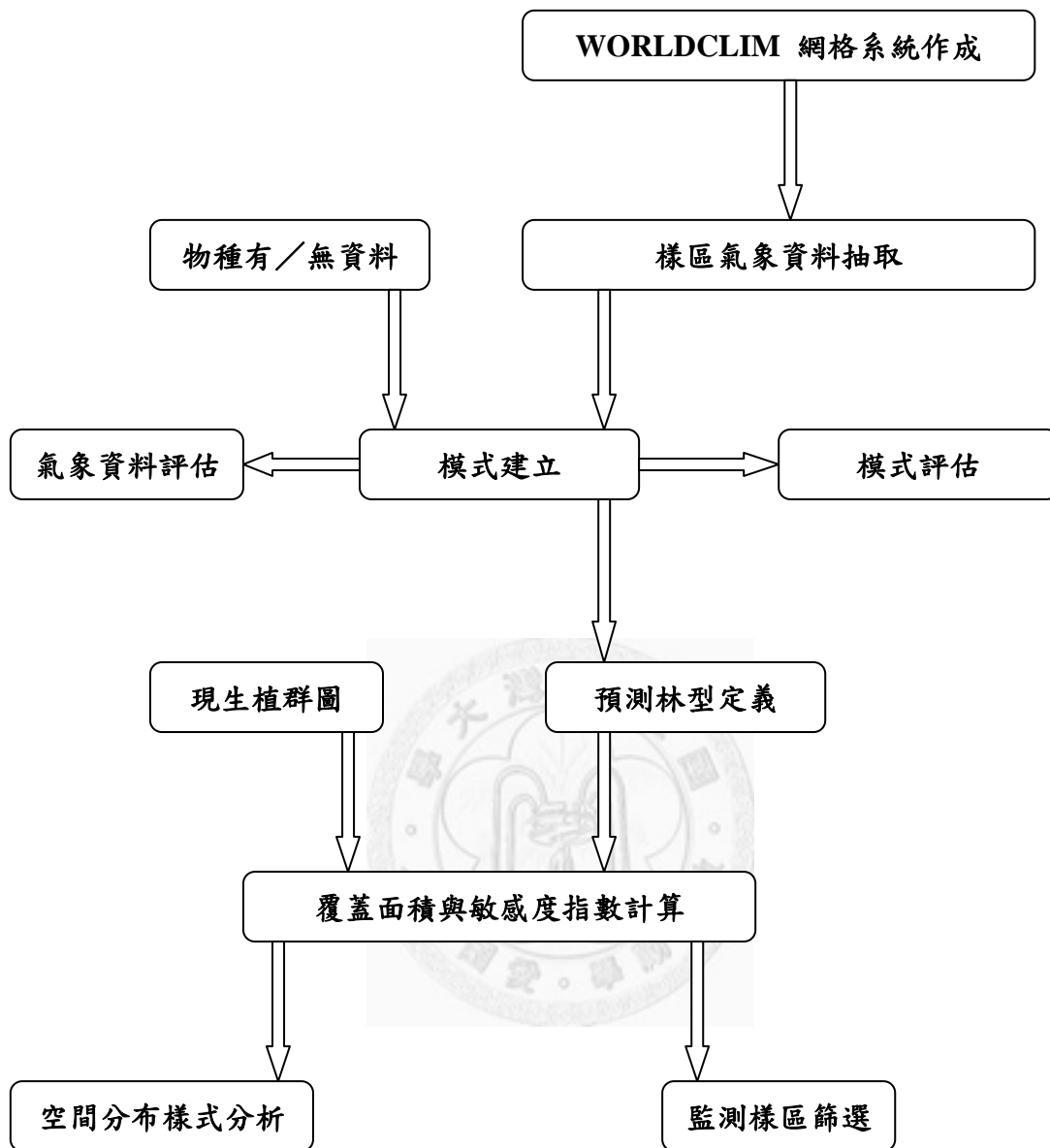


圖 6 研究流程圖

肆、結果

一、物種分布模式／氣象資料比較評估

表 7 呈現了不同的模式／氣象資料組合在各物種預測的生產者與使用者精度。我們可以發現 CART／全變中心的組合普遍是較不理想的，而剩下三種組合中，除了在台灣冷杉的表現差異不大外，MAXENT 模式搭配兩種資料在台灣鐵杉和檜木的表現，皆有使用者精度較低，也就是容易超估物種棲地的缺點。考量到這樣的差異，我們選擇 CART／WORLDCLIM 的組合繼續進行後續的分析。

表 8 呈現了模式預測的概要，從 AUC 值可以發現台灣冷杉及台灣鐵杉的模式預測力非常好，而檜木的模式預測力好。台灣冷杉由於出現樣區數量最少（204 個），所以判定是否為適生棲地的機率門檻值最低，分類樹的根條件發生在 $TMC < -0.55^{\circ}\text{C}$ 。其次，台灣鐵杉由於出現樣區數量最多（445 個），所以機率門檻值最高，而分類樹的根條件則發生在 $WI < 92.75^{\circ}\text{C}$ 。最後，檜木的出現樣區數量居中（330 個），所以機率門檻值亦居中，分類樹的根條件發生在 $TMC < 6.85^{\circ}\text{C}$ 。整體來看，主要控制針葉樹分布的仍是熱量因子，但在台灣冷杉和檜木，代表耐寒極限的 TMC 會較具決定性。相對而言，代表累積生長的 WI 則對台灣鐵杉的分布較具決定性。

表 7 各模式／氣象資料組合在各物種預測的生產者／使用者精度矩陣

	台灣冷杉	全變中心	WORLDCLIM
生產者精度	CART	28.66	66
使用者精度		8.87	16.92
生產者精度	MAXENT	73.34	68.67
使用者精度		10.77	19.29
	台灣鐵杉	全變中心	WORLDCLIM
生產者精度	CART	5.59	88.01
使用者精度		19.07	23.36
生產者精度	MAXENT	72.34	84.88
使用者精度		15.3	20.21
	檜木	全變中心	WORLDCLIM
生產者精度	CART	12.92	66.5
使用者精度		38.03	50.99
生產者精度	MAXENT	83.74	81.83
使用者精度		22.61	29.04

表 8 各物種 CART 模式的概要資料

	AUC 值	機率門檻值	根條件
台灣冷杉	0.946	0.066	TMC < -0.55
台灣鐵杉	0.908	0.145	WI < 92.75
檜木	0.888	0.108	TMC < 6.85

圖 7 至圖 9 呈現出三個模式的結果，由於分類樹已經經過修剪，所以不致複雜到難以解釋。台灣冷杉的部份（圖 7），在根條件區分出的兩大類群中，TMC < -0.55°C 的類群再被 PRW 區分為三個類群，而 TMC > -0.55 的類群則再被 WI 區分為兩個類群，而前者會較後者適合台灣冷杉生存。唯一區分為不適生的類群發生在 TMC > -0.55°C 且 WI > 51.85°C 的區域，而出現機率最高的類群則發生在 TMC < -0.55°C 且 PRW < 541mm 的區域。

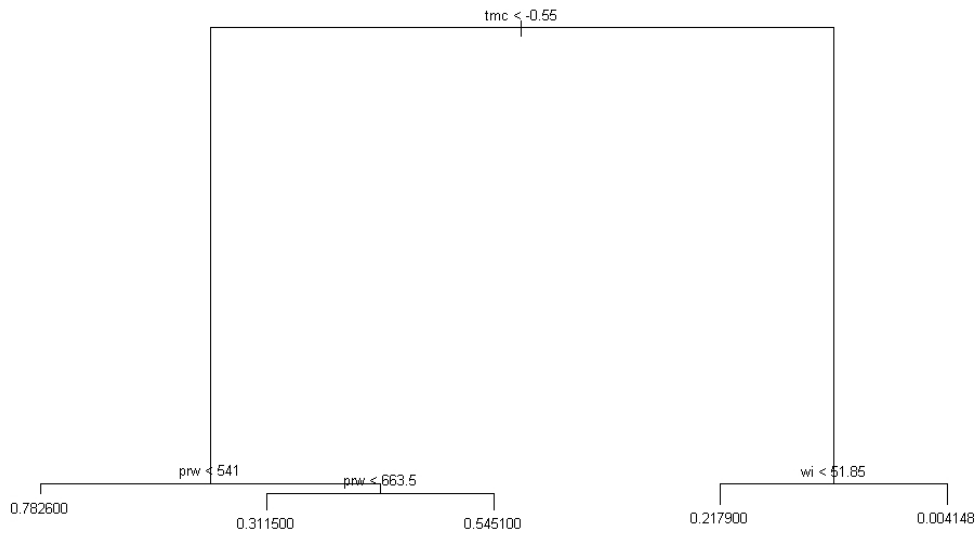


圖 7 台灣冷杉的 CART 模式

台灣鐵杉的部份 (圖 8)，WI $> 92.75^{\circ}\text{C}$ 的類群普遍不適合台灣鐵杉生存，僅有 WI 介於 105.8°C 和 106.25°C 間的區域有較高的出現機率。而在 WI $< 92.75^{\circ}\text{C}$ 的類群中，會由 WI $< 27.75^{\circ}\text{C}$ 再切出決定適生與否的兩個類群。換句話說，WI 在 27.75°C 至 92.75°C 區間的區域較適於台灣鐵杉的生存，但在此區間仍有 WI 介於 27.75°C 與 76.55°C 間，且 PRS 介於 1801.5mm 與 1882.5mm 間的區域較不適合台灣鐵杉生存。整體而言，在適存的大類群中，水分因子會扮演較精細的區分角色。

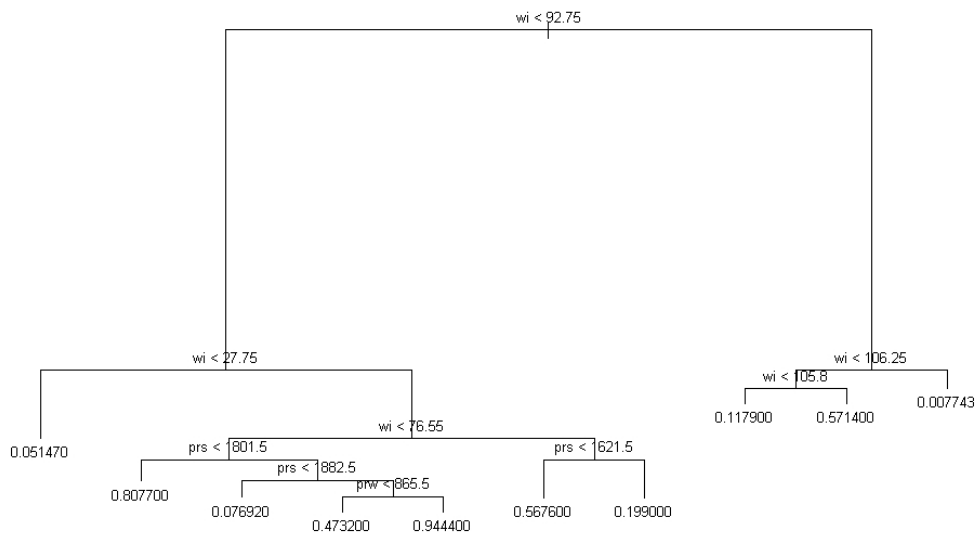


圖 8 台灣鐵杉的 CART 模式

檜木的部份（圖 9），和台灣鐵杉相似的是，除了 $TMC > 6.85^{\circ}\text{C}$ 的區域不適生以外， $TMC < 6.85^{\circ}\text{C}$ 的類群也會再被區分成兩大類群，其中 $TMC < 0.05^{\circ}\text{C}$ 的區域同樣不適合檜木的生存，顯示過高或過低的 TMC 都是不利於檜木分布的條件。而在 TMC 介於 0.05°C 與 6.85°C 間的大類群中，會再由 PRS 切分出兩個類群，並且由不同因子再做出較精細的區分，使檜木的棲地類型較為複雜。

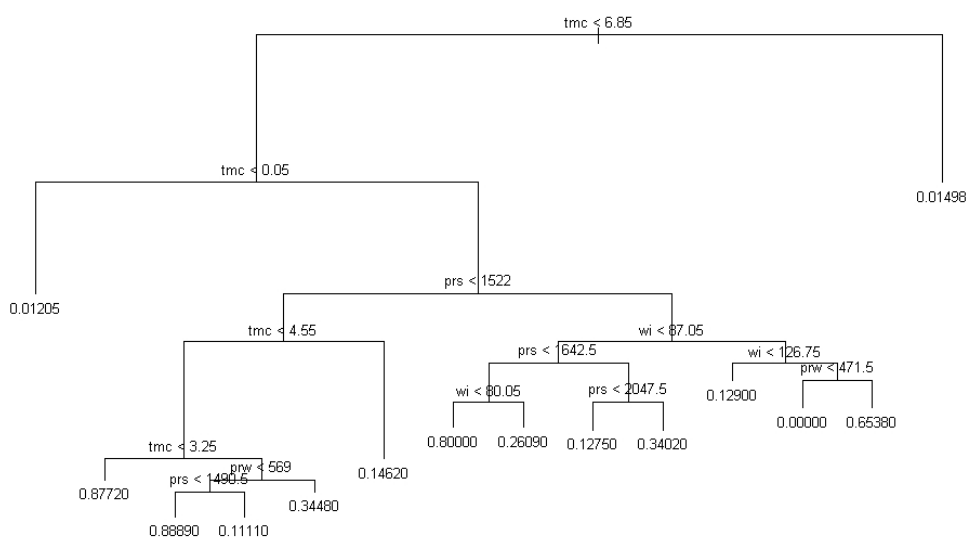


圖 9 檜木的 CART 模式

二、空間分布樣式

圖 10 呈現了以物種的出現與 IVI 值分類後的調查樣區在台灣垂直剖面圖上的分布情形。首先我們可以發現較多的樣區是屬於純林林型，而交錯帶林型的樣區數量較少。其次，北部的樣區數量與密度皆比中南部高出甚多，交錯帶林型的樣區也大多集中在北部，除了牽涉到調查強度的區域差異以外，前述北部林帶界線較為模糊的情況也在此顯現。此外，整體而言各林型樣區的分布呈現明顯的北降趨勢，並且普遍在北部具有比中南部更寬的海拔生態幅度。

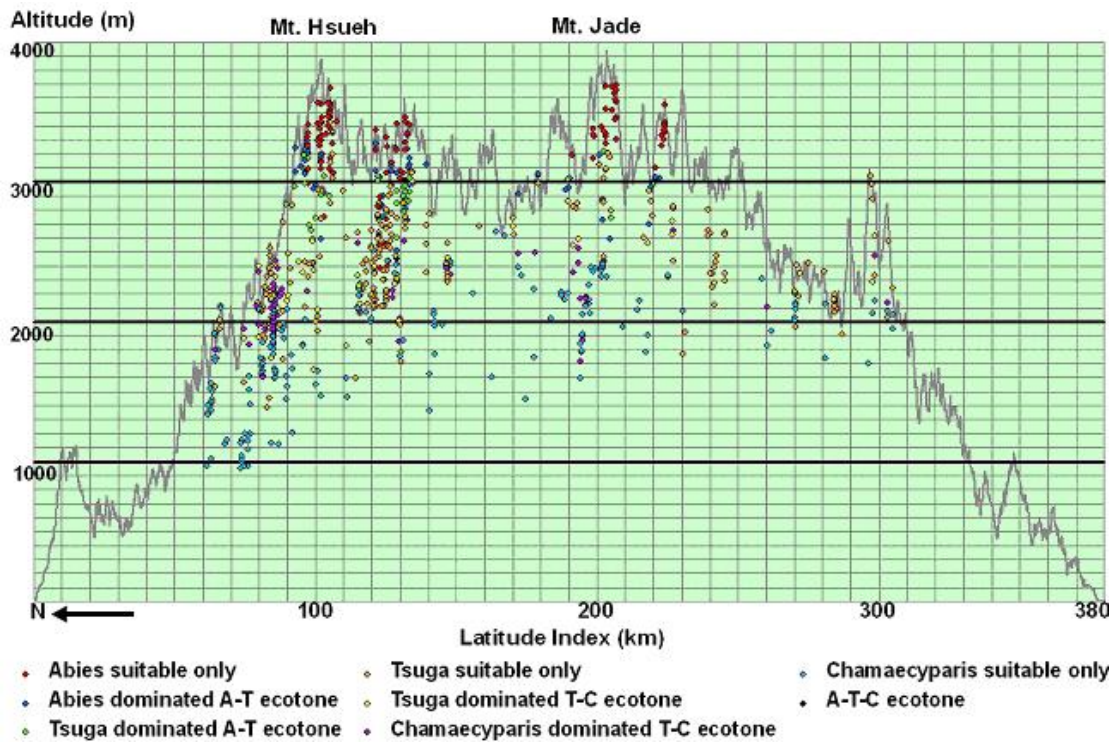


圖 10 調查樣區實際林型的空間分布

圖 11 則呈現了現生氣候下以 CART 模式預測的出現機率分類的各林型在台灣垂直剖面圖上的分布情形。我們可以發現，無論哪一種林型，都有明顯的北降趨勢。冷杉純林 (A_{so}) 在南部分布在 3,200 公尺以上，而在北部下限則降到約 3,100 公尺；冷杉—鐵杉交錯帶 (AT_e) 的下限從南部的 2,800 公尺北降到約 2,600 公尺；鐵杉—檜木交錯帶 (TC_e) 的下限從南部的 2,200 公尺北降到約 1,800 公尺；檜木純林 (C_{so}) 的下限則由南部的 1,700 公尺北降到約 1,100 公尺，甚至出現在實際上並無分布的海拔約 1,000 公尺的台北山區。整體來說，海拔分布越低的林型北降的幅度越大。值得注意的是，鐵杉純林 (T_{so}) 的面積相當小，不同於包括野外經驗與上述調查樣區的分類所指示的實際情形，這牽涉到前述物種分布模式的預測產物是物種的潛在而非實際棲地。也就是說，由於模式所預測的物種分布範圍會較實際為寬，可能從生態適合幅度 (ecological amplitude) 達到生理適合幅度 (physiological amplitude)，所以當我們的三個目標物種都具有比實際上來得寬的海拔分布範圍時，分布海拔居中的台灣鐵杉被預測為純林的面積便會受到壓縮。

事實上，在我們的三個目標物種中，具有最大面積純林的即為台灣鐵杉，所以我們應將模式預測的結果考慮為在僅受到我們所使用的四個氣候因子限制下，物種分布所能達到的最大潛在極限。由是，我們不妨將包含預測為純林和交錯帶的林型都涵概為物種的分布區域，如此即可理解在現生的氣候下，台灣冷杉的海拔生態幅度最寬可達約 1,100 公尺，台灣鐵杉最寬可達約 1,300 公尺，檜木最寬則可達約 1,400 公尺，但在海拔最高點不同的各區域間則會有所差異。此外，對照圖 10 可以發現，被預測為鐵杉優勢交錯帶林型 (T_dAT_e 或 T_dTC_e) 的區域內確實有較多實際上為鐵杉純林的樣區，因此也可以將這些林型未來分布的變化視為鐵杉純林的代表。有趣的是，在 AT_e 中，冷杉優勢的 A_dAT_e 大多集中在中北部，而鐵杉優勢的 T_dAT_e 則多集中在南部，從樣區來看我們也可以發現北部確實具有更多屬於 A_dAT_e 的樣區。此外，預測的 T_{so} 也僅出現在北部，而在其相對的中南部區域則有一條狹長帶狀的冷杉—鐵杉—檜木交錯帶 (ATC_e) 出現。如果對照所有林型的台灣全島分布圖 (圖 12) 則可以發現，除了 A_{so} 的分布限縮在幾個山頭 (雪山、南湖大山、合歡山、玉山及向陽山) 外，其他林型沿中央山脈表現出明顯的帶狀垂

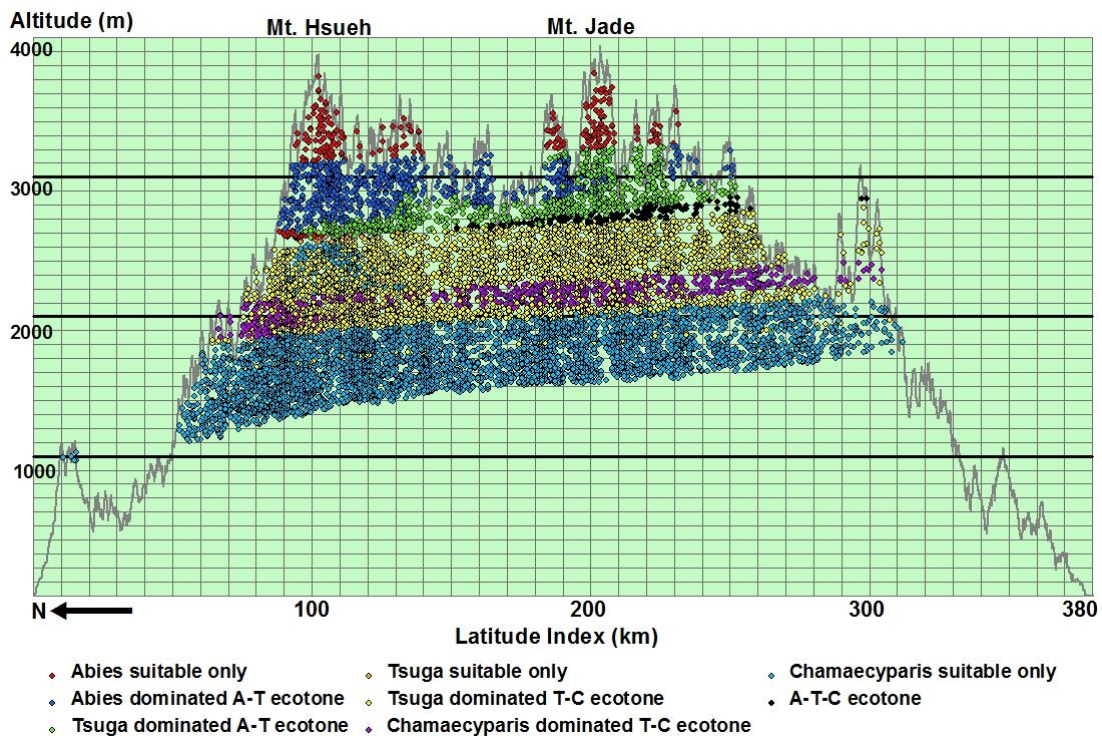


圖 11 CART 模式預測林型在現生氣候下的空間分布圖

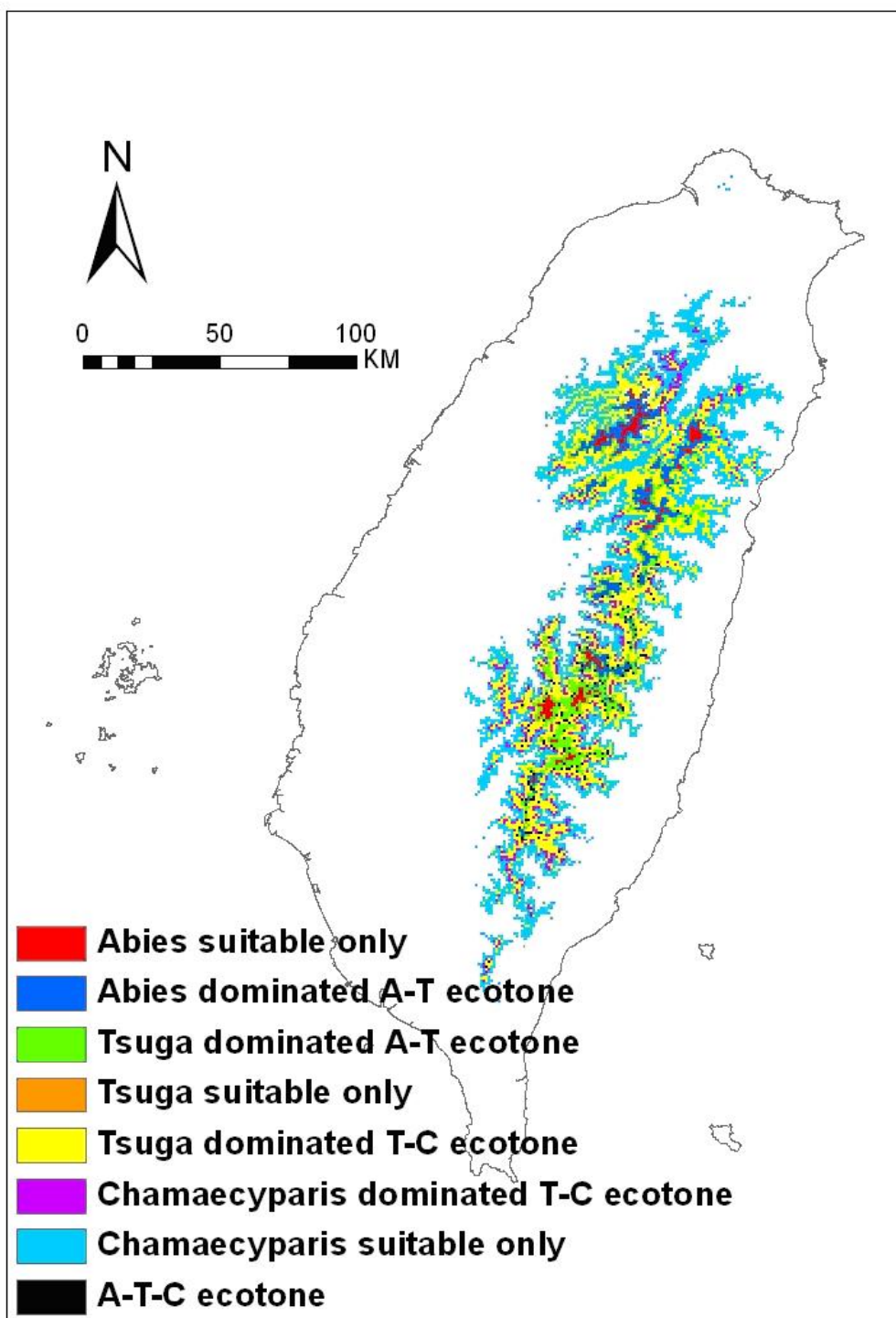


圖 12 CART 模式預測林型的台灣全島分布圖

直分化，但 ATC_c 則呈現較為分散的分布狀態。事實上，被分類為 ATC_c 的樣區相當少（4 個，圖 10），因此我們可以理解在實際的情況下三物種同時出現的機會不高，但分布模式的預測則可以顯示在中南部海拔高約 2,600 至 2,800 公尺的區域，

會讓三個物種都有機會在現生的氣候條件下生存。

如同前述，在 A2a 和 B2a 兩條故事線中，B2a 會在近期的未來對環境有較大的衝擊。我們可以發現在 2020 年，各林型海拔分布的壓縮與上移在 B2a (圖 14) 都會比在 A2a (圖 13) 更加明顯，尤其是台灣冷杉的部份。若以林型的界線來看，大致會上移約 200 至 300 公尺。值得注意的是， A_dAT_e 和 T_dAT_e 主要的分布區域會呈現和現生氣候下相反的趨勢，也就是 A_dAT_e 將會進入南部而 T_dAT_e 則會進入中北部。另外， ATC_e 的分布範圍在 A2a 會略為變寬，在 B2a 則會略為變窄。

到 2050 年，A2a 對環境的衝擊將會大於 B2a。在 A2a (圖 15)， A_{so} 將僅剩 3,600 公尺以上的零星分布，而 T_{so} 會開始形成較明顯的林帶， ATC_e 則會完全消失，另外各林型間的界線也會上移約 500 至 600 公尺。但在 B2a (圖 16)， T_{so} 還沒有像在 A2a 明顯， ATC_e 也保留了零星的分布，林型界線上移的程度則較和緩。而無論在 A2a 或 B2a 都可以發現， A_dAT_e 和 T_dAT_e 主要的分布區域將會再一次改變，回到和現生氣候下近似的情況，同時 TC_e 的壓縮將會比 2020 年時明顯許多。

到 2080 年，在 A2a (圖 17)，各林型間的界線會上移約 700 至 800 公尺，而在 B2a (圖 18)，上移的幅度則相近於 2050 年時 A2a 的情形。而無論在 A2a 或 B2a， A_{so} 都幾乎完全消失。但就整體趨勢而言，我們可以發現在其他幾種林型中，交錯帶林型受到的影響比純林林型來得大，同時 T_{so} 會逐漸增加並擴大，而 ATC_e 會逐漸減少以至完全消失，顯示氣候變遷會使各物種的潛在棲地之間的分化愈形明顯，且各物種海拔分布範圍的壓縮到 2080 年時也會十分清楚。

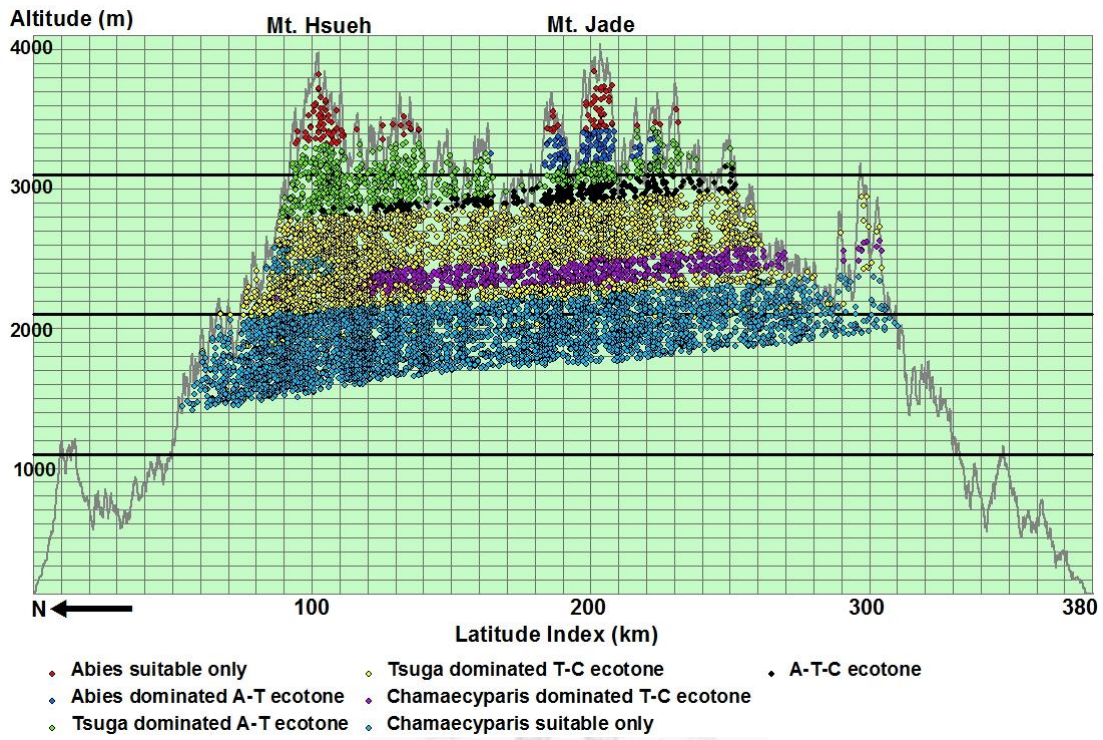


圖 13 CART 模式預測林型在 2020 年 A2a 的空間分布圖

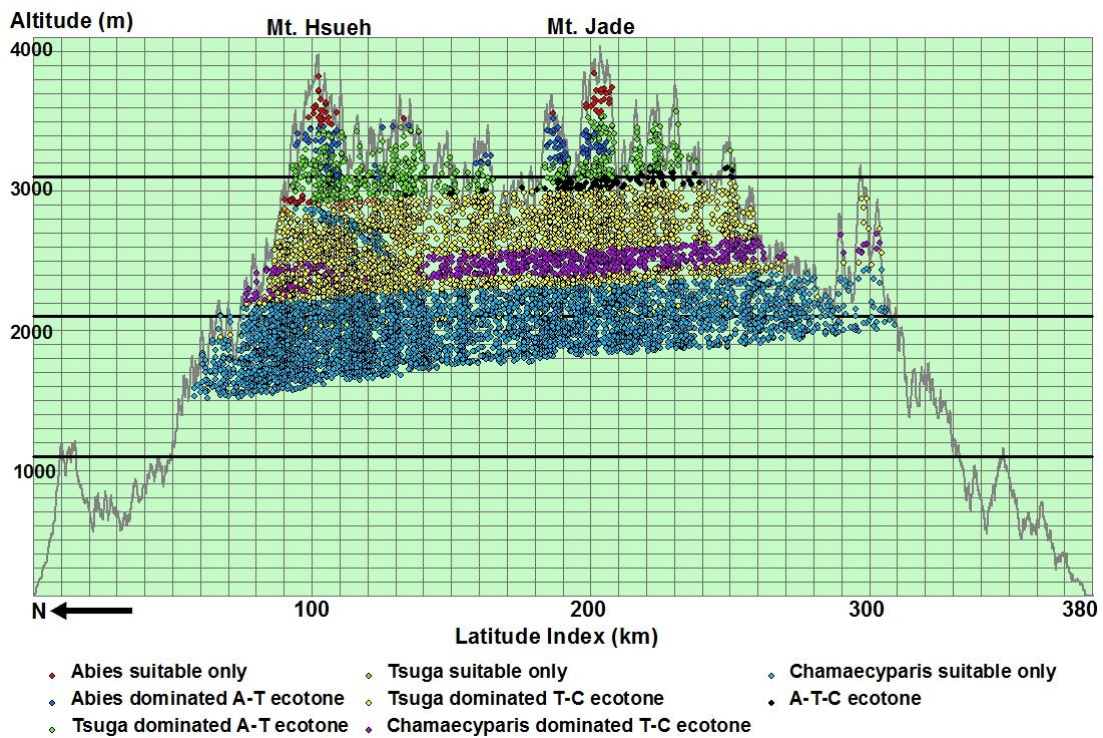


圖 14 CART 模式預測林型在 2020 年 B2a 的空間分布圖

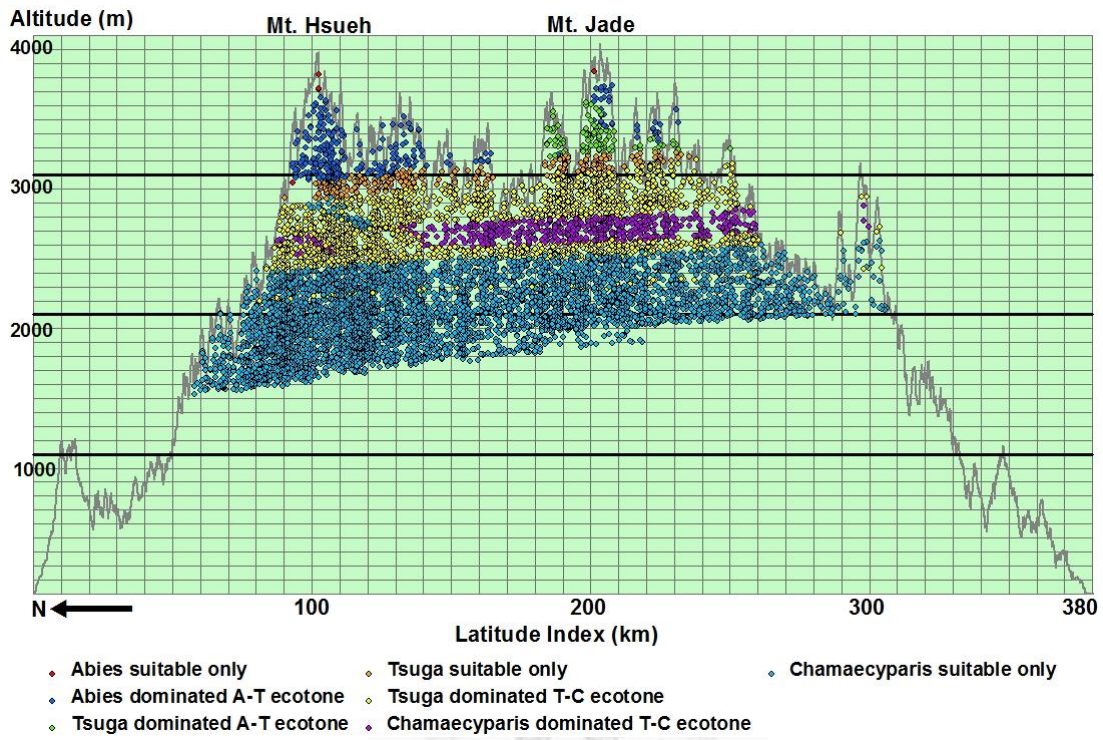


圖 15 CART 模式預測林型在 2050 年 A2a 的空間分布圖

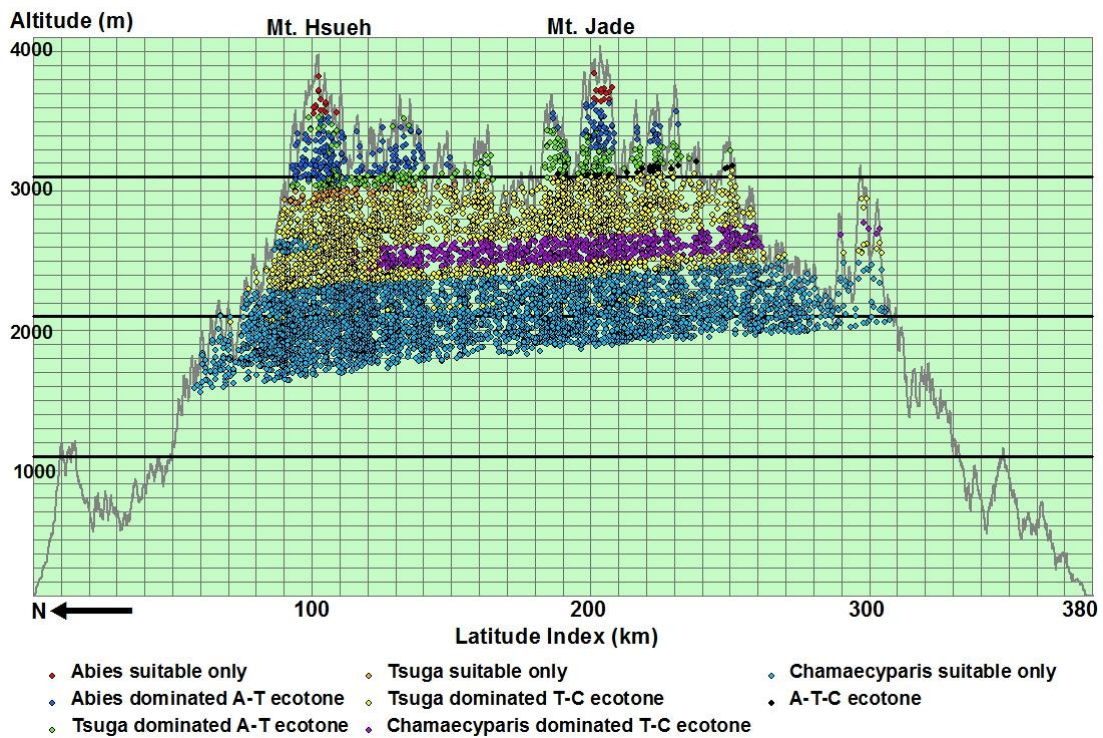


圖 16 CART 模式預測林型在 2050 年 B2a 的空間分布圖

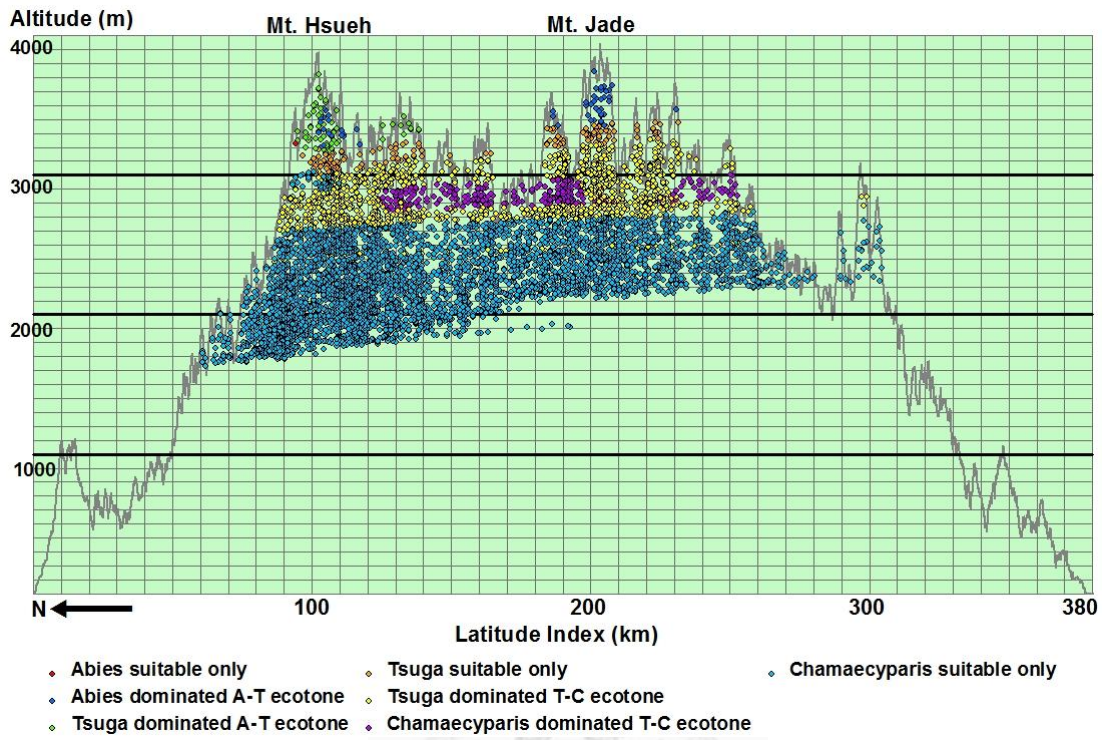


圖 17 CART 模式預測林型在 2080 年 A2a 的空間分布圖

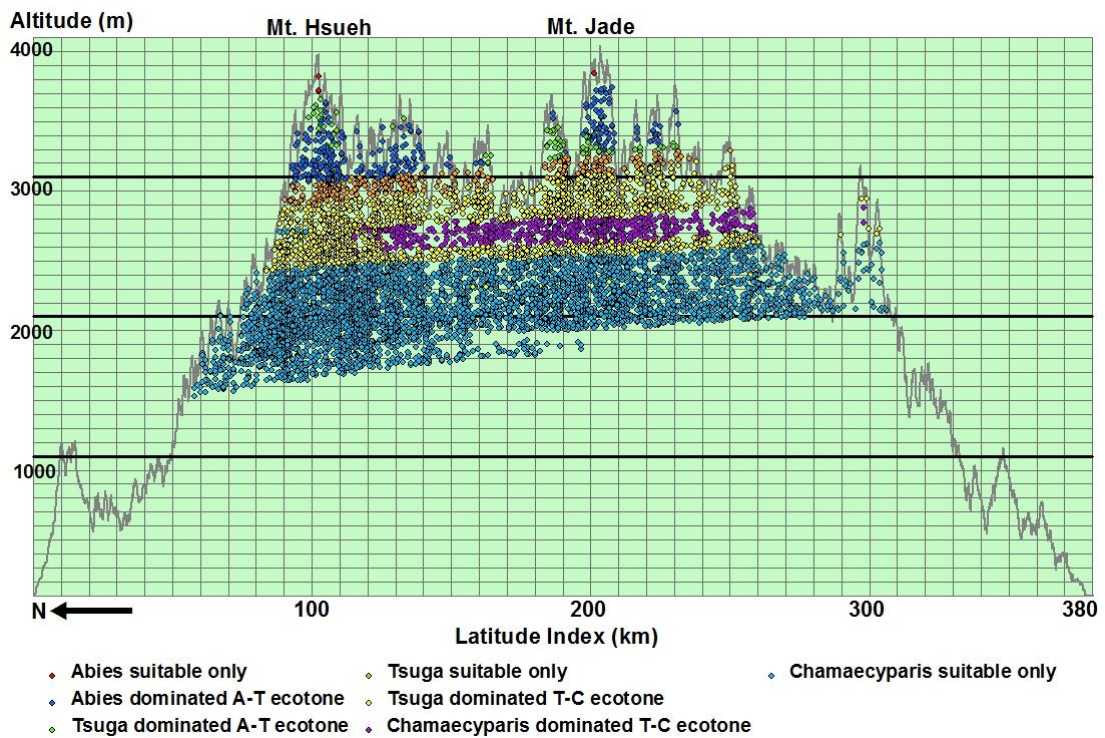


圖 18 CART 模式預測林型在 2080 年 B2a 的空間分布圖

表 9 顯示了各預測林型在各實際植群系內的覆蓋面積，我們可將現生氣候下預測為非棲地的區域視為模式未能準確預測的部份，其中台灣冷杉約佔 3.38%，台灣鐵杉約佔 9.07%，而檜木約佔 13.5%。此外，因為 ATC_e 在台灣冷杉優勢群系和檜木優勢群系內的覆蓋面積都相當少，所以我們僅計算 ATC_e 在台灣鐵杉優勢群系的覆蓋面積，同時並不扣除 AT_e 和 TC_e 內可能和 ATC_e 重複的部份。

在台灣冷杉優勢群系內，在現生氣候下， A_{so} 和 A_dAT_e 覆蓋了大部份的區域。但 2020 年時，無論在 A2a 或 B2a， T_dAT_e 的覆蓋面積都會大幅提升。到 2050 年時， A_dAT_e 會再得到較多的覆蓋面積。到 2080 年時， A_dAT_e 會在 B2a 持續具有高佔比但在 A2a 則否， T_dAT_e 則會減少到現生氣候下的約一半左右。此外， A_{so} 會在未來迅速地消失，同時目前台灣冷杉優勢群系內約有 77% 的面積會在 2080 年時的 A2a 下成為非棲地。

在台灣鐵杉優勢群系內， T_dTC_e 是現生氣候下最主要的覆蓋林型。2020 年時，大部份的 A_dAT_e 會消失， T_dAT_e 則會同時失去許多原有的和得到許多新的棲地，同時 T_dTC_e 的佔比會持續提升。到 2050 年時， T_dAT_e 會大量減少，而 T_{so} 和 C_dTC_e 則會小幅增加。到 2080 年時， T_dTC_e 仍是最主要的覆蓋，另外 T_{so} 和 C_dTC_e 的覆蓋將完全都是新的棲地。而在衝擊最嚴重的 2080 年 A2a 下，目前台灣鐵杉優勢群系內約有將近一半的面積會成為非棲地。

在檜木優勢群系內， C_{so} 和 T_dTC_e 目前各覆蓋了約五分之二的面積，但 C_{so} 將在未來持續增加而 T_dTC_e 則會相對地持續減少。 C_dTC_e 始終保持不高的佔比，且多數未來的覆蓋面積是新的棲地。和台灣鐵杉的情形相近，在 2080 年 A2a 下，目前檜木優勢群系內約有將近一半的面積會成為非棲地。

表 9 不同氣候下各預測林型在各優勢群系內的覆蓋面積（單位：平方公里）

台灣冷杉	非棲地		<i>Abies</i> suitable only (A_{so})				<i>Abies</i> dominated A-T ecotone (A_dAT_e)				<i>Tsuga</i> dominated A-T ecotone (T_dAT_e)			
現生氣候	面積	%	面積		%		面積		%		面積		%	
	5.00	3.38	52.98	35.81	55.98	37.84	33.99	22.98						
			獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計
<u>A2a_2020</u>	<u>17.99</u>	<u>12.16</u>	<u>0.00</u>	<u>21.99</u>	<u>30.99</u>	<u>20.95</u>	<u>13.99</u>	<u>53.98</u>	<u>15.99</u>	<u>10.81</u>	<u>67.97</u>	<u>18.99</u>	<u>82.97</u>	<u>56.08</u>
B2a_2020	30.99	20.95	1.00	37.98	15.99	10.81	17.99	50.98	22.99	15.54	65.97	21.99	77.97	52.70
<u>A2a_2050</u>	<u>67.97</u>	<u>45.95</u>	<u>1.00</u>	<u>51.98</u>	<u>2.00</u>	<u>1.35</u>	<u>41.98</u>	<u>33.99</u>	<u>63.97</u>	<u>43.24</u>	<u>11.00</u>	<u>30.99</u>	<u>13.99</u>	<u>9.46</u>
B2a_2050	46.98	31.76	0.00	44.98	8.00	5.41	32.99	38.98	49.98	33.78	30.99	21.99	42.98	29.05
<u>A2a_2080</u>	<u>113.95</u>	<u>77.03</u>	<u>0.00</u>	<u>52.98</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>14.99</u>	<u>55.98</u>	<u>14.99</u>	<u>10.14</u>	<u>18.99</u>	<u>33.99</u>	<u>18.99</u>	<u>12.84</u>
B2a_2080	68.97	46.62	0.00	51.98	1.00	0.68	38.98	33.99	60.98	41.22	13.99	30.99	16.99	11.49
台灣鐵杉	非棲地		<i>Tsuga</i> suitable only (T_{so})				<i>Abies</i> dominated A-T ecotone (A_dAT_e)				<i>Tsuga</i> dominated A-T ecotone (T_dAT_e)			
現生氣候	面積	%	面積		%		面積		%		面積		%	
	65.97	9.07	5.00	0.69	188.92	25.96	214.91	29.53						
			獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計
<u>A2a_2020</u>	<u>32.99</u>	<u>4.53</u>	<u>0.00</u>	<u>5.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>12.00</u>	<u>185.93</u>	<u>14.99</u>	<u>2.06</u>	<u>183.93</u>	<u>143.94</u>	<u>254.90</u>	<u>35.03</u>
B2a_2020	55.98	7.69	8.00	5.00	8.00	1.10	14.99	176.93	26.99	3.71	119.95	183.93	150.94	20.74
<u>A2a_2050</u>	<u>115.95</u>	<u>15.93</u>	<u>62.97</u>	<u>5.00</u>	<u>62.97</u>	<u>8.65</u>	<u>23.99</u>	<u>148.94</u>	<u>63.97</u>	<u>8.79</u>	<u>5.00</u>	<u>209.92</u>	<u>10.00</u>	<u>1.37</u>
B2a_2050	51.98	7.14	31.99	5.00	31.99	4.40	20.99	159.94	49.98	6.87	46.98	194.92	66.97	9.20
<u>A2a_2080</u>	<u>337.86</u>	<u>46.43</u>	<u>21.99</u>	<u>5.00</u>	<u>21.99</u>	<u>3.02</u>	<u>4.00</u>	<u>188.92</u>	<u>4.00</u>	<u>0.55</u>	<u>10.00</u>	<u>214.91</u>	<u>10.00</u>	<u>1.37</u>
B2a_2080	101.96	14.01	76.97	5.00	76.97	10.58	22.99	152.94	58.98	8.10	9.00	211.92	12.00	1.65

台灣鐵杉		A-T-C ecotone (ATC _e)				Tsuga dominated T-C ecotone (T _d TC _e)				Chamaecyparis dominated T-C ecotone (C _d TC _e)					
現生氣候	面積	%	面積			面積			面積			%			
			獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計				
			38.98		5.36	277.89		38.19	13.99		1.92				
A2a_2020	<u>72.97</u>	<u>38.98</u>	<u>72.97</u>	<u>10.03</u>	<u>228.91</u>	<u>48.98</u>	<u>457.82</u>	<u>62.91</u>	<u>36.99</u>	<u>11.00</u>	<u>39.98</u>	<u>5.49</u>			
B2a_2020	23.99	38.98	23.99	3.30	244.90	76.97	445.82	61.26	63.97	13.99	63.97	8.79			
A2a_2050	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>257.90</u>	<u>171.93</u>	<u>363.85</u>	<u>50.00</u>	<u>110.96</u>	<u>13.99</u>	<u>110.96</u>	<u>15.25</u>			
B2a_2050	5.00	38.98	5.00	0.69	280.89	106.96	451.82	62.09	79.97	13.99	79.97	10.99			
A2a_2080	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>245.90</u>	<u>245.90</u>	<u>277.89</u>	<u>38.19</u>	<u>75.97</u>	<u>13.99</u>	<u>75.97</u>	<u>10.44</u>			
B2a_2080	0.00	0.00	0.00	0.00	267.89	186.93	358.86	49.31	118.95	13.99	118.95	16.35			
檜木		非棲地		Chamaecyparis suitable only (C _{so})				Tsuga dominated T-C ecotone (T _d TC _e)				Chamaecyparis dominated T-C ecotone (C _d TC _e)			
現生氣候	面積	%	面積			面積			面積			%			
			獲得	失去	合計	獲得	失去	合計	獲得	失去	合計				
	260.90	13.50	710.72		36.78	774.69		40.09	185.93		9.62				
A2a_2020	<u>323.87</u>	<u>16.76</u>	<u>284.89</u>	<u>185.93</u>	<u>809.68</u>	<u>41.90</u>	<u>214.91</u>	<u>387.84</u>	<u>601.76</u>	<u>31.14</u>	<u>165.93</u>	<u>154.94</u>	<u>196.92</u>	<u>10.19</u>	
B2a_2020	381.85	19.76	421.83	236.05	895.64	46.35	144.94	440.82	478.81	24.78	175.93	185.93	175.93	9.11	
A2a_2050	<u>486.81</u>	<u>25.19</u>	<u>723.71</u>	<u>320.87</u>	<u>1113.55</u>	<u>57.63</u>	<u>94.96</u>	<u>622.75</u>	<u>246.90</u>	<u>12.78</u>	<u>84.97</u>	<u>185.93</u>	<u>84.97</u>	<u>4.40</u>	
B2a_2050	470.81	24.37	564.77	323.87	951.62	49.25	116.95	528.79	362.85	18.78	146.94	185.93	146.94	7.60	
A2a_2080	<u>854.66</u>	<u>44.23</u>	<u>853.66</u>	<u>563.77</u>	<u>1000.60</u>	<u>51.78</u>	<u>50.98</u>	<u>760.70</u>	<u>64.97</u>	<u>3.36</u>	<u>12.00</u>	<u>185.93</u>	<u>12.00</u>	<u>0.62</u>	
B2a_2080	572.77	29.64	745.70	404.84	1051.58	54.42	93.96	642.74	225.91	11.69	81.97	185.93	81.97	4.24	

圖 19、20 顯示了不同氣候條件下現生台灣冷杉優勢群系內各預測林型在全島的分布。如同前述，在現生氣候下， A_{so} 僅分布於若干山頭，而 A_dAT_e 和 T_dAT_e 則分別佔據了中北部及南部。2020 年時，大部份原為 A_dAT_e 的區域被 T_dAT_e 所取代，但到 2050 年時則會出現相反的趨勢，到 2080 年時大多數的區域會成為非棲地，而只剩下目前屬於 A_{so} 的幾個山頭由 A_dAT_e 或 T_dAT_e 覆蓋。

圖 21、22 則顯示了台灣鐵杉優勢群系的情形。 A_dAT_e 和 T_dAT_e 間的區域差異也十分明顯，而 T_dTC_e 則佔據了大部份群系外圍（較低海拔）的區域，另外 ATC_e 在南部有分散的分布。2020 年時，同樣地，大部份 A_dAT_e 會被 T_dAT_e 取代，到 2050 年時， T_{so} 會開始出現，且各林型的分布會愈加分散，這種分散的趨勢在 2080 年會更明顯。

圖 23、24 所顯示的檜木優勢群系的變化則顯得相對單純，也就是 C_{so} 會持續侵入目前由 T_dTC_e 覆蓋的區域，而 C_dTC_e 始終維持小面積的覆蓋。

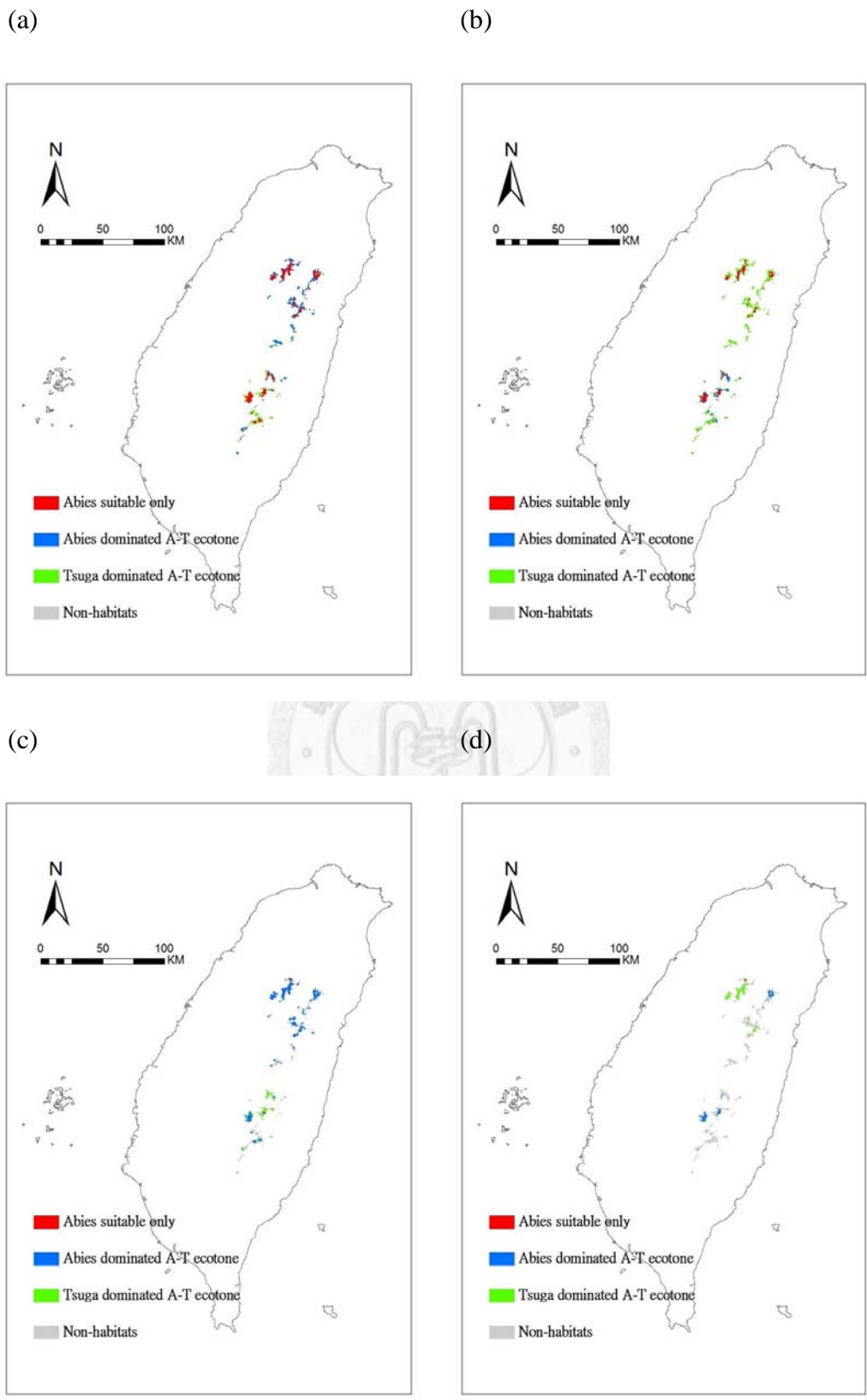
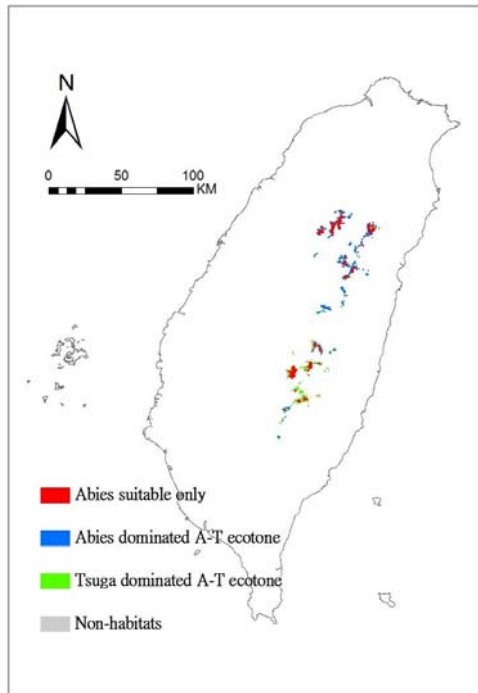
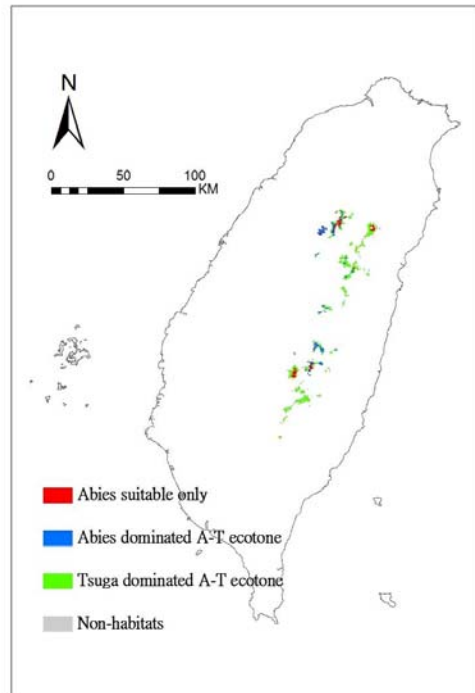


圖 19 台灣冷杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布：
 (a)現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

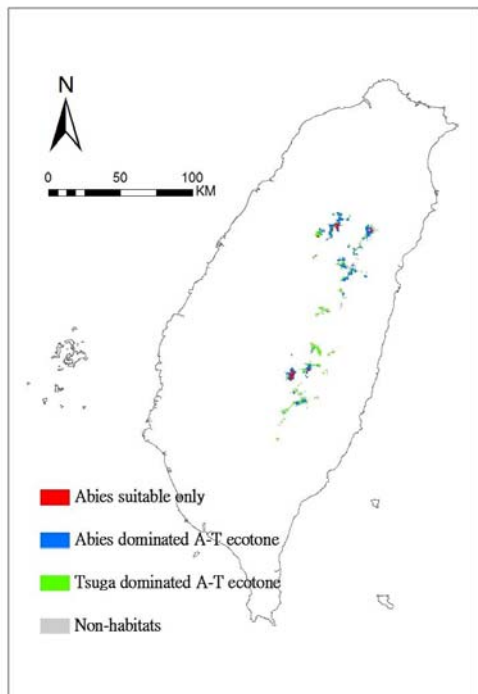
(a)



(b)



(c)



(d)

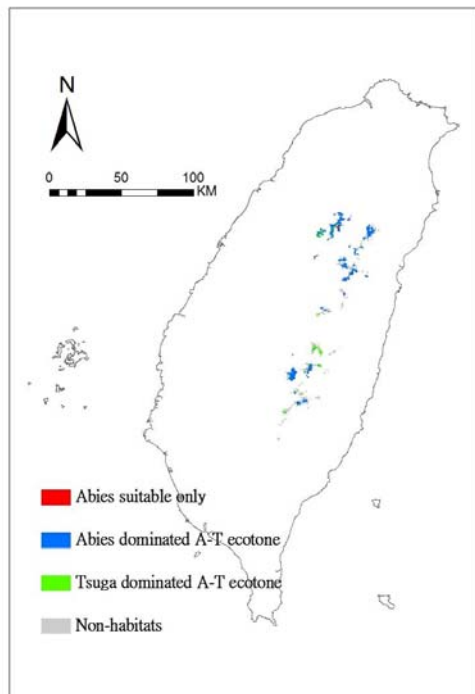
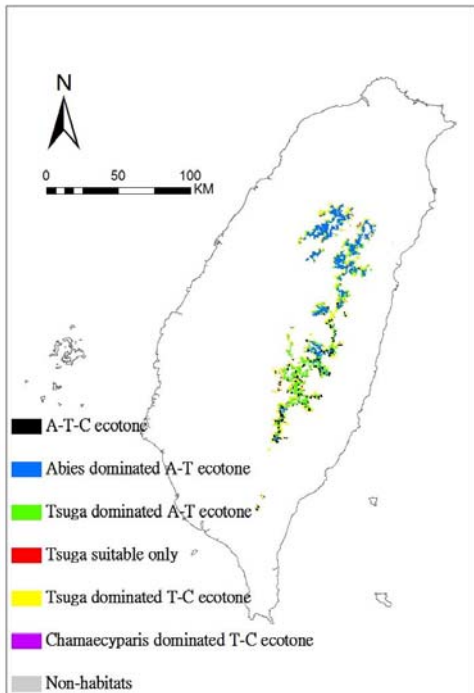
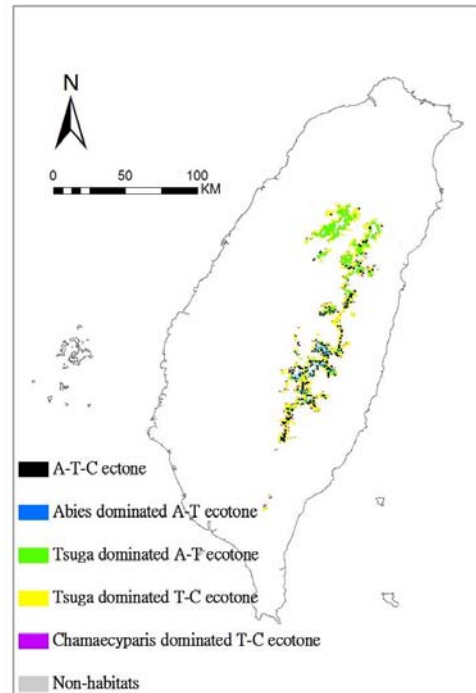


圖 20 台灣冷杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布：
(a)現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

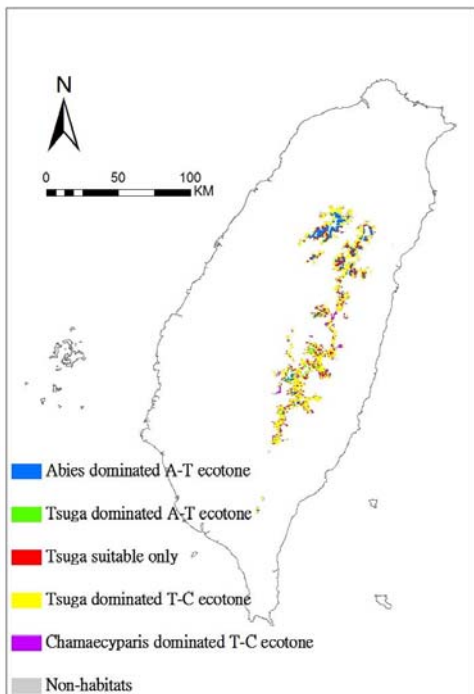
(a)



(b)



(c)



(d)

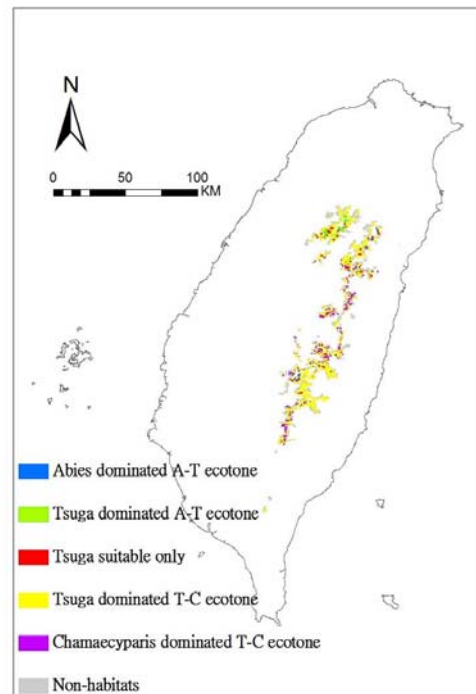
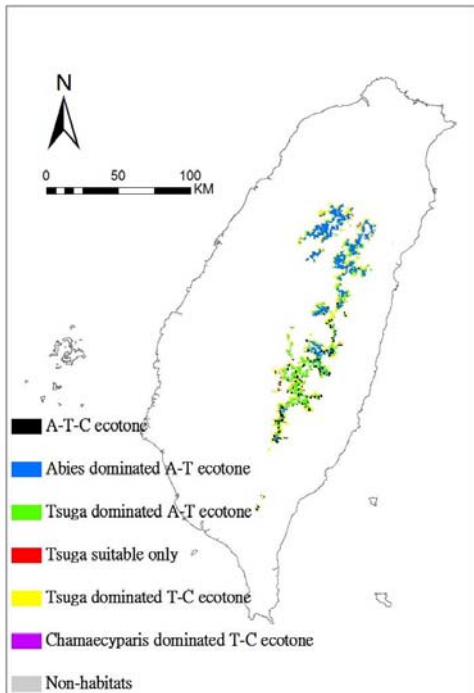
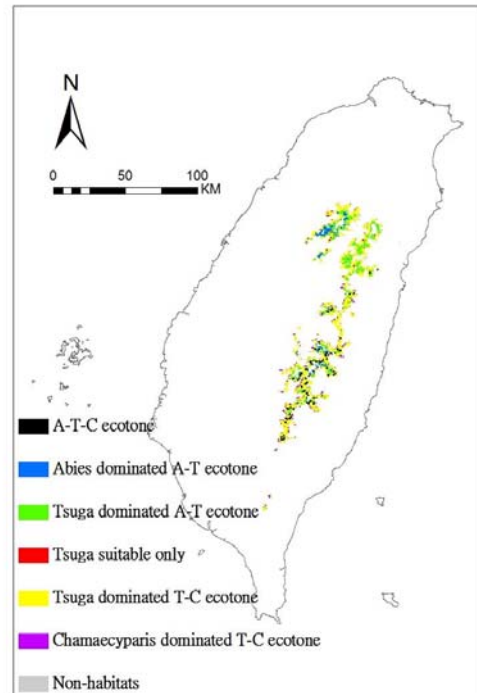


圖 21 台灣鐵杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布：
(a)現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

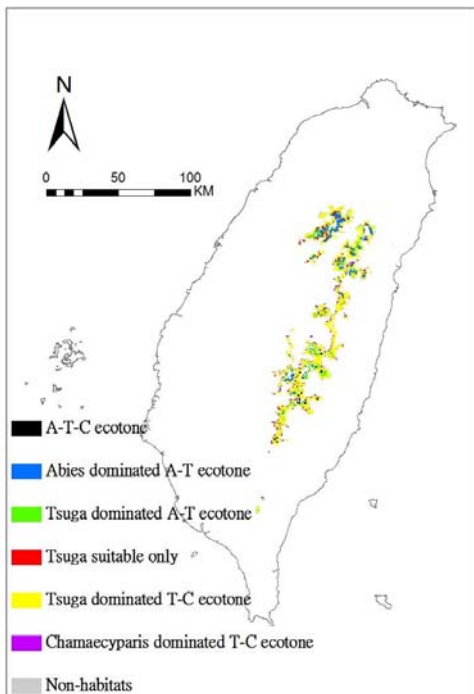
(a)



(b)



(c)



(d)

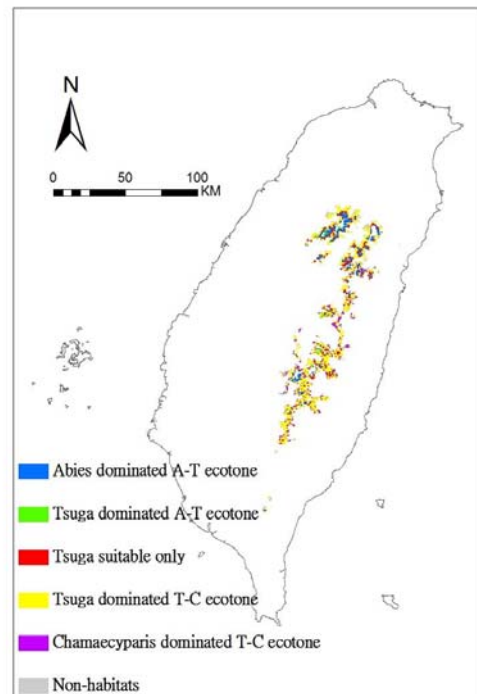
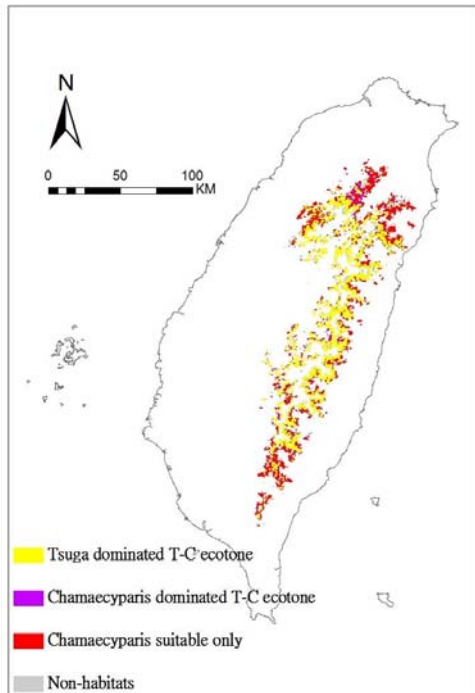
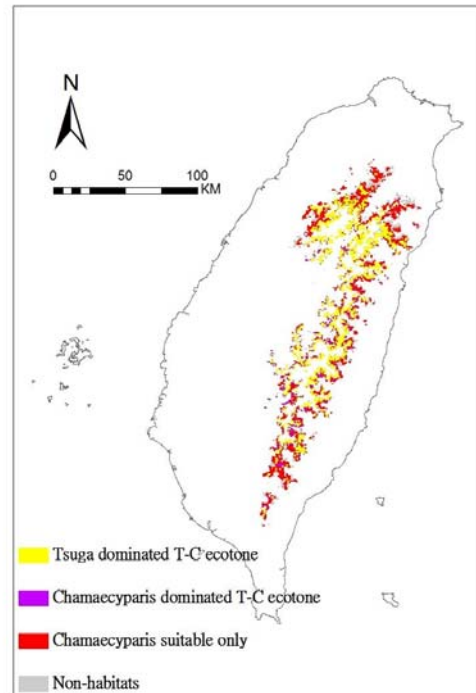


圖 22 台灣鐵杉優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布：
(a)現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

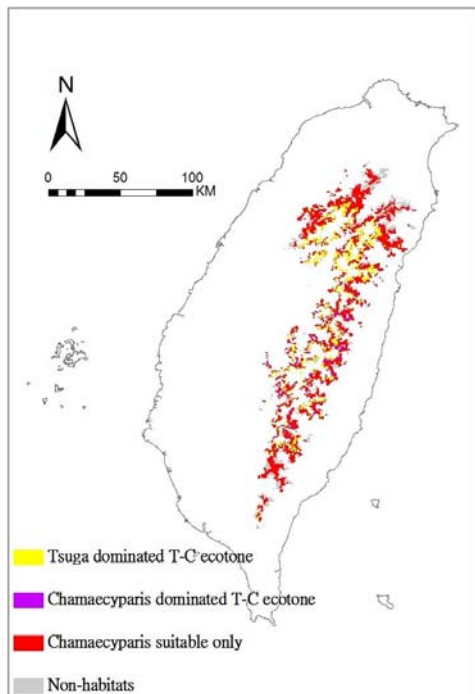
(a)



(b)



(c)



(d)

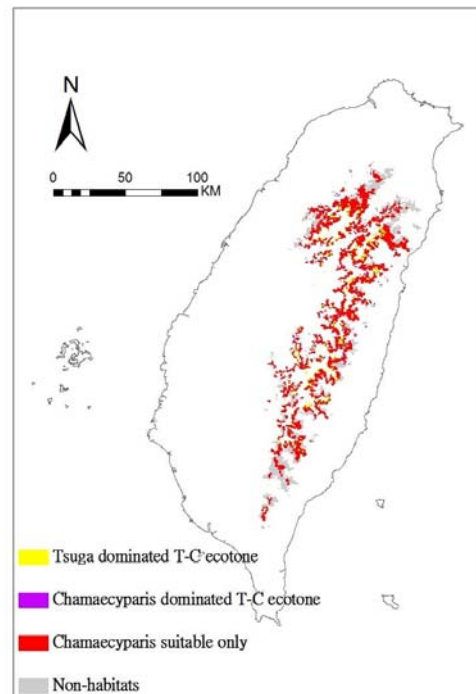
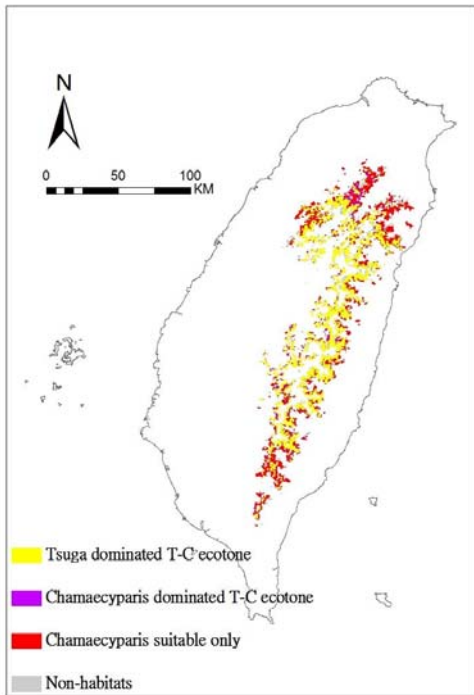
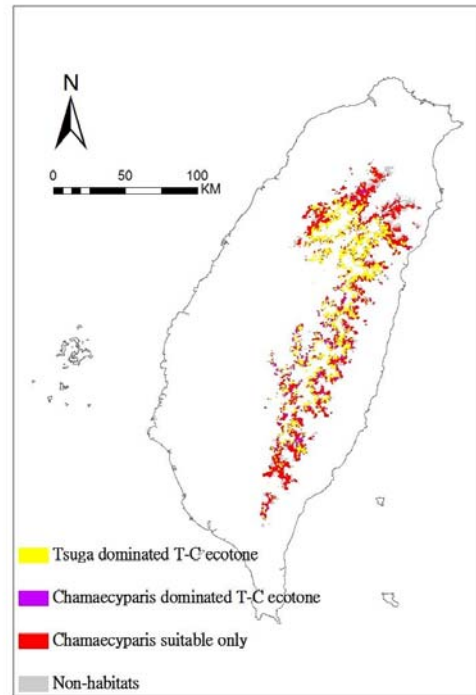


圖 23 檜木優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 A2a 情境的分布：(a) 現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

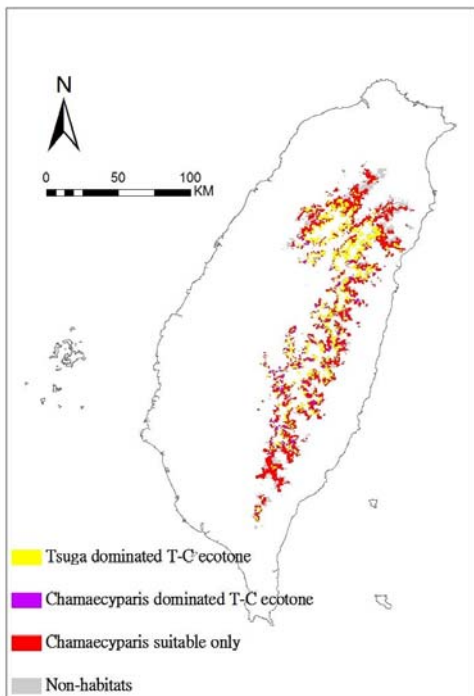
(a)



(b)



(c)



(d)

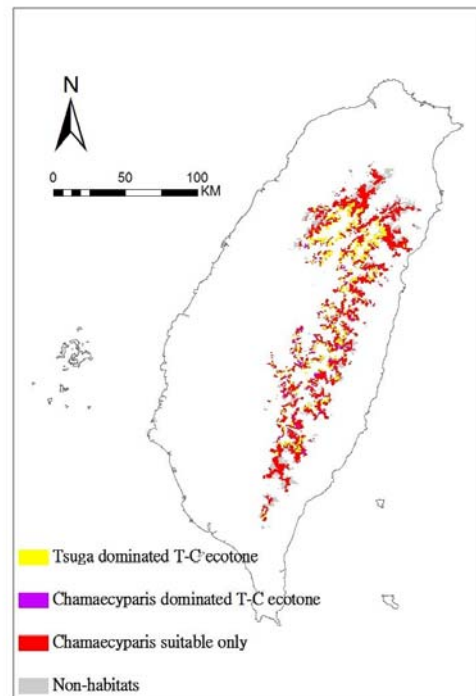


圖 24 檜木優勢群系內各預測林型在現生氣候及不同時期 B2a 情境的分布：(a) 現生氣候；(b)2020 年；(c)2050 年；(d)2080 年

三、脆弱度評估及監測樣區篩選

表 10 及表 11 分別顯示了在台灣冷杉優勢群系內，依脆弱度指數 (VI) 級， A_{so} 和 AT_e 的覆蓋面積及樣區數量的變化，其中樣區脆弱度大於 1 者會以粗體字標明，顯示為我們的監測對象。我們可以發現直到 2050 年為止，大部份 A_{so} 的棲地都還不會非常脆弱，而普遍屬於不變及增長的等級。即使到了 2080 年，在 A2a，也僅有各約將近 20% 的面積分別屬於中度脆弱及極端脆弱的棲地。但 AT_e 則表現出截然不同的趨勢，從 2020 年開始即出現一定比例的脆弱棲地，且會隨著時間逐漸增加。圖 25 顯示了不同脆弱度棲地的分布，我們可以發現在 2050 年之後有一明顯的趨勢區分出極端脆弱的棲地主要分布在中北部，而中度脆弱的棲地則主要分布在南部，只有前述的若干山頭有不變的棲地。

表 10 現生台灣冷杉優勢群系內 A_{so} 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積 (單位：平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)

	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數
VI	A2a_2020			A2a_2050			A2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	10.00	18.87	12
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	10.00	18.87	3
1-10	9.00	16.98	16	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	33.99	64.15	21	51.98	98.11	40	31.99	60.38	25
< 1	10.00	18.87	3	1.00	1.89	0	2.00	3.77	0
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1-10	9.00	16.98	16	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	39.98	75.47	23	43.98	83.02	38	43.98	83.02	38
< 1	4.00	7.55	1	9.00	16.98	2	9.00	16.98	2

表 11 現生台灣冷杉優勢群系內 AT_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積
(單位：平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)

VI	面積 % 樣區數			面積 % 樣區數			面積 % 樣區數		
	A2a_2020	A2a_2050	A2a_2080	B2a_2020	B2a_2050	B2a_2080	B2a_2020	B2a_2050	B2a_2080
> 100	0.00	0.00	0	33.99	37.78	17	56.98	63.33	28
10-100	12.00	13.33	0	29.99	33.33	3	32.99	36.67	5
1-10	20.99	23.33	6	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1	48.98	54.44	25	24.99	27.78	13	0.00	0.00	0
< 1	7.00	7.78	2	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	9.00	10.00	3	20.99	23.33	6	34.99	38.89	17
10-100	17.99	20.00	0	20.99	23.33	2	29.99	33.33	4
1-10	19.99	22.22	4	15.99	17.78	13	0.00	0.00	0
1	37.98	42.22	25	30.99	34.44	12	24.99	27.78	12
< 1	3.00	3.33	1	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0

(a)

(b)

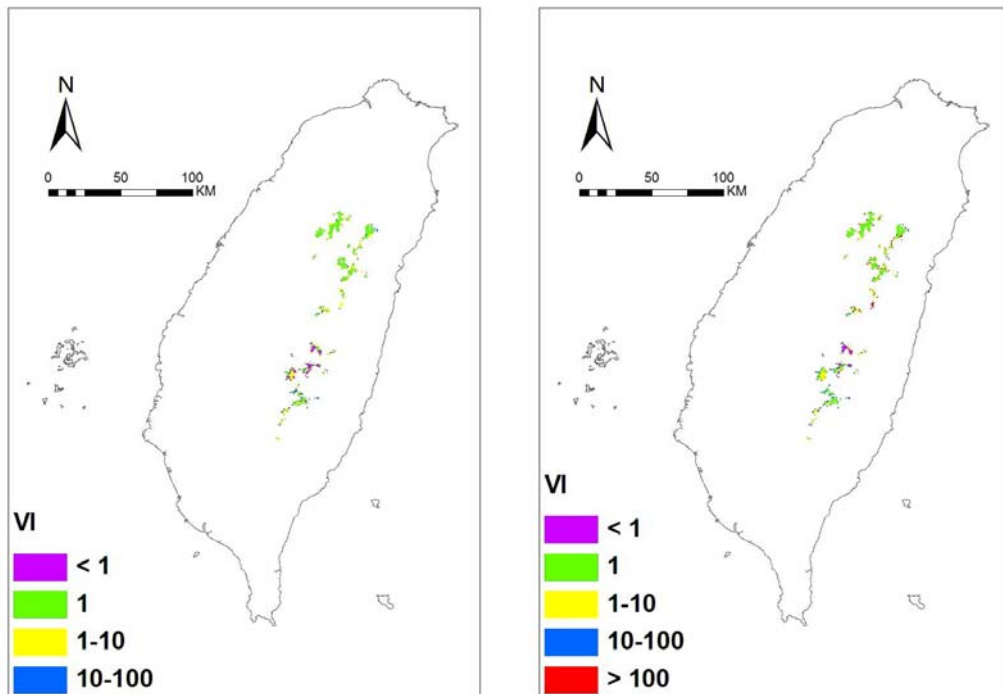
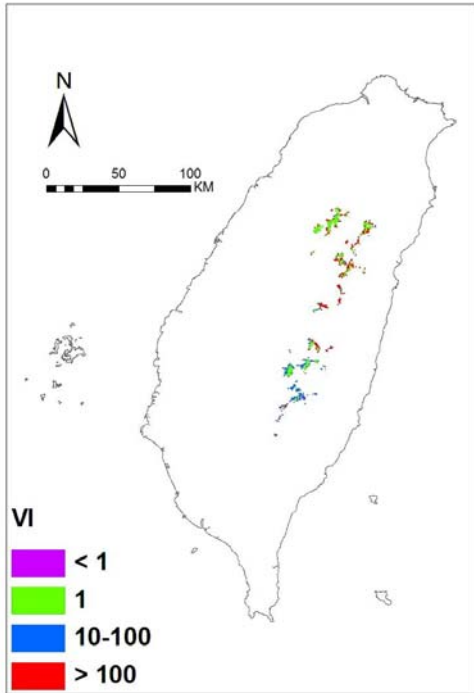
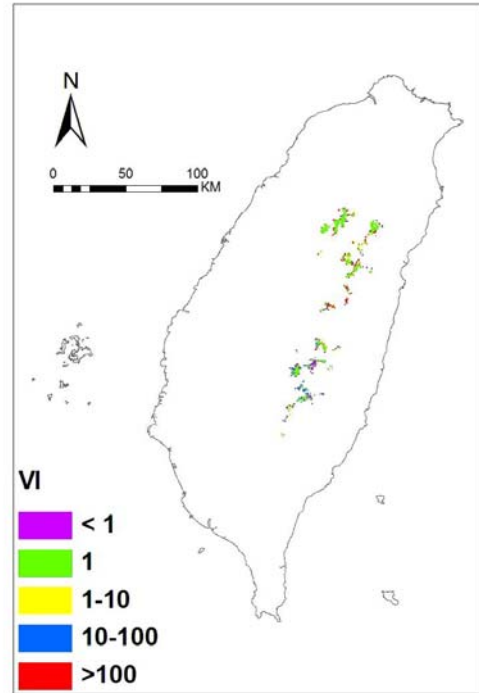


圖 25 台灣冷杉優勢群系的脆弱度分布：(a)2020 年 A2a；(b)2020 年 B2a

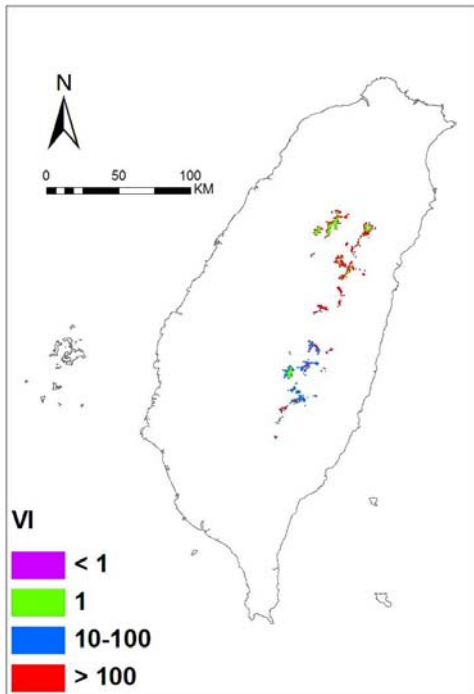
(c)



(d)



(e)



(f)

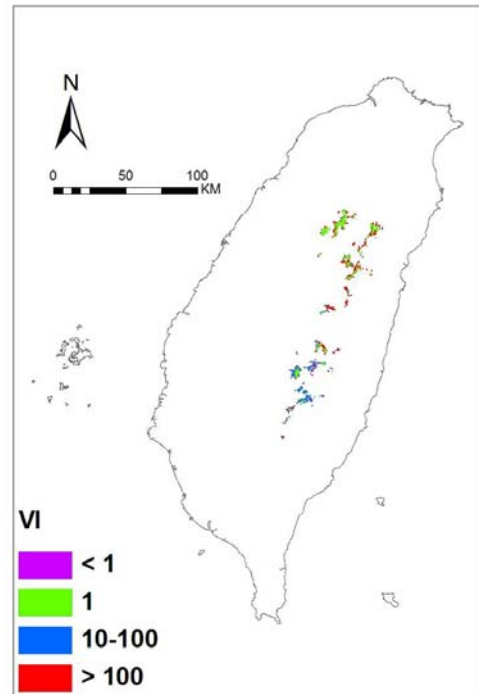


圖 25 (續) 台灣冷杉優勢群系的脆弱度分布：(c)2050 年 A2a；(d)2020 年 B2a；
(e)2080 年 A2a；(f)2080 年 B2a

表 12 及表 13 分別顯示台灣鐵杉優勢群系內 AT_e 和 TC_e 的結果。如同前述，由於預測為 T_{so} 的區域極小且並沒有樣區屬於此類型，所以我們並未列入計算，但其脆弱度的變化仍有被加入圖 26 中呈現。整體而言， TC_e 比 AT_e 來得脆弱。我們可以發現，無論在任何時期， AT_e 都完全不會出現任何中度脆弱或極端脆弱的區域，而且僅有 2080 年時在 A2a 下，輕度脆弱的棲地才會佔大部份的面積。相對來說， TC_e 的脆弱棲地則會逐漸增加。從全島分布來看（圖 26），則可以發現在 2020 年時，增長棲地主要分布在中北部而不變棲地主要分布在南部，到 2050 以後增長棲地則會幾乎完全消失。

表 12 現生台灣鐵杉優勢群系內 AT_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積（單位：平方公里）與樣區數量（粗體字為監測樣區）

	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數
VI	A2a_2020			A2a_2050			A2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1-10	0.00	0.00	0	55.98	13.86	15	309.88	76.73	53
1	184.93	45.79	18	312.87	77.48	41	93.96	23.27	13
< 1	218.91	54.21	48	34.99	8.66	10	1.00	0.25	0
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1-10	23.99	5.94	3	0.00	0.00	0	44.98	11.14	9
1	210.92	52.23	24	403.84	100.00	66	358.86	88.86	57
< 1	168.93	41.83	39	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0

表 13 現生台灣鐵杉優勢群系內 TC_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積
(單位：平方公里) 與樣區數量 (粗體字為監測樣區)

VI	面積 % 樣區數			面積 % 樣區數			面積 % 樣區數		
	A2a_2020	A2a_2050	A2a_2080	B2a_2020	B2a_2050	B2a_2080	B2a_2020	B2a_2050	B2a_2080
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	21.99	7.53	2
10-100	7.00	2.40	1	16.99	5.82	0	89.96	30.82	9
1-10	50.98	17.47	2	234.91	80.48	21	174.93	59.93	16
1	164.93	56.51	14	36.99	12.67	5	0.00	0.00	0
< 1	68.97	23.63	10	3.00	1.03	1	4.00	1.37	0
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
10-100	2.00	0.68	0	6.00	2.05	0	19.99	6.85	1
1-10	94.96	32.53	14	151.94	52.05	20	248.90	85.27	25
1	149.94	51.37	12	132.95	45.55	7	21.99	7.53	1
< 1	44.98	15.41	1	1.00	0.34	0	0.00	0.00	0

(a)

(b)

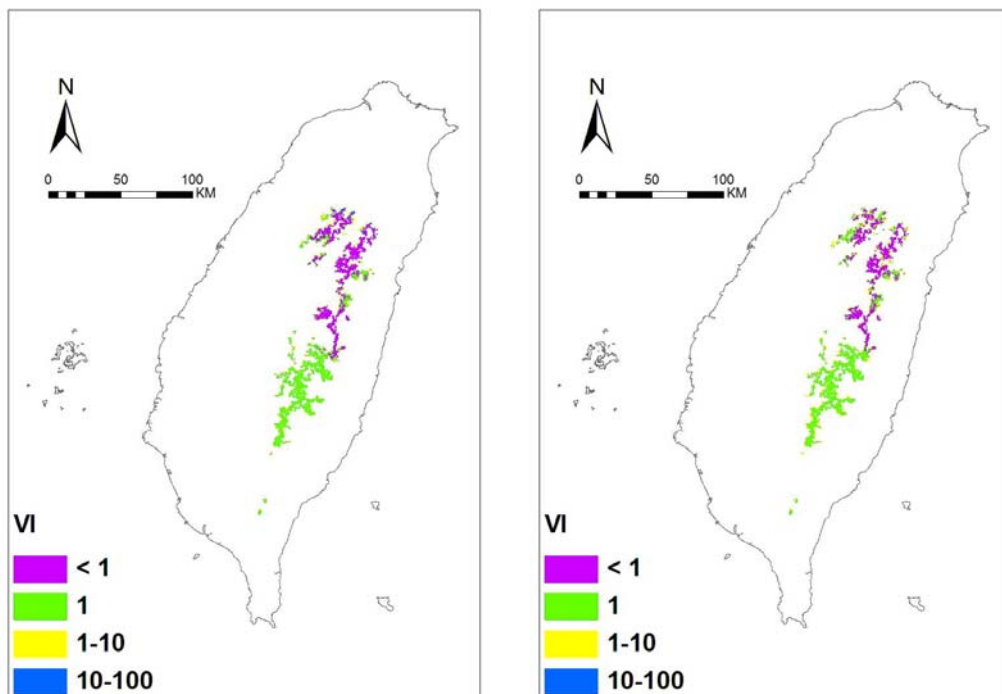
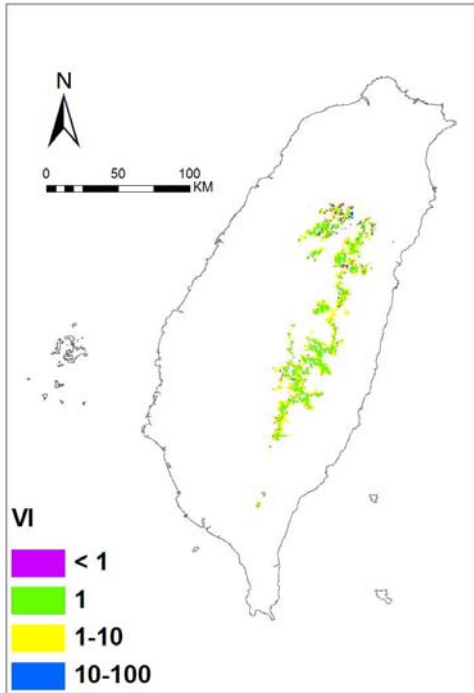
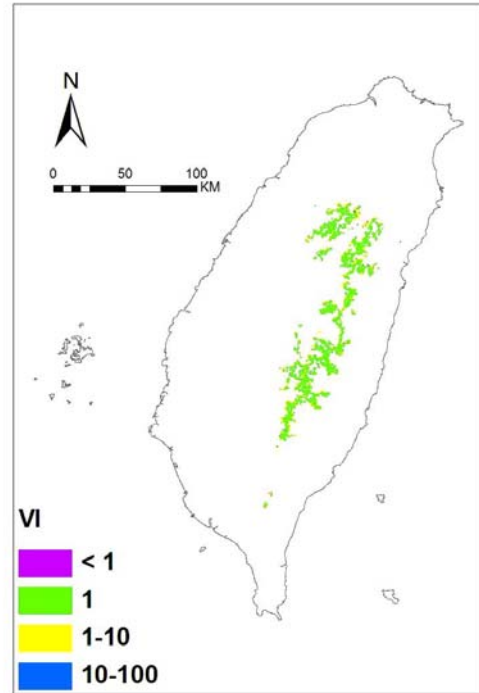


圖 26 台灣鐵杉優勢群系的脆弱度分布：(a)2020 年 A2a；(b)2020 年 B2a

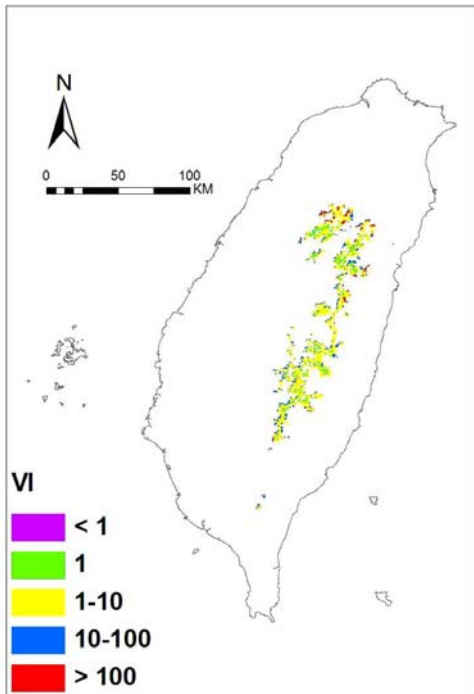
(c)



(d)



(e)



(f)

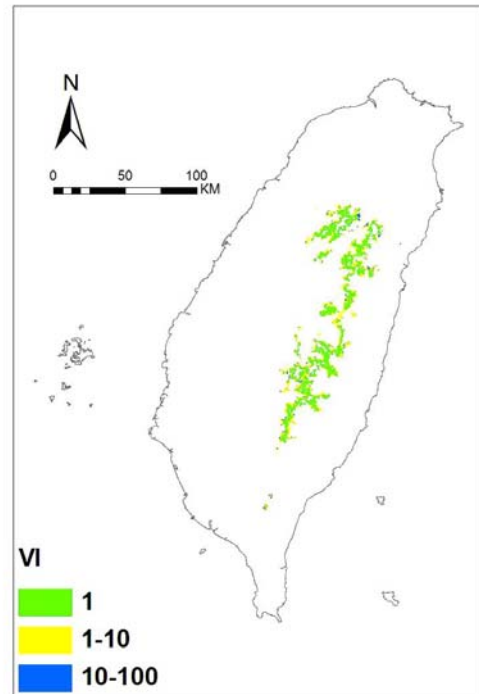


圖 26 (續) 台灣鐵杉優勢群系的脆弱度分布：(c)2050 年 A2a；(d)2020 年 B2a；
(e)2080 年 A2a；(f)2080 年 B2a

表 14 及表 15 分別顯示了檜木優勢群系內 TC_e 和 C_{so} 的結果，TC_e 有較多的增長棲地且始終保持一定比例，但不變棲地會逐漸減少而輕度脆弱棲地則會逐漸增加並在 2050 年後成為主要的覆蓋。類似的發展趨勢也在 C_{so} 出現，但 C_{so} 會有較多的極端脆弱棲地。從圖 27 可以發現，增長棲地會一直集中在北部，而中南部的次要覆蓋則會從 2020 年的不變漸漸轉換為輕度脆弱。整體而言，脆弱度也會依等級呈現出垂直分化。

表 14 現生檜木優勢群系內 TC_e 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積（單位：平方公里）與樣區數量（粗體字為監測樣區）

	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數
VI	A2a_2020			A2a_2050			A2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	6.00	0.62	0	94.96	9.89	2
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1-10	222.91	23.20	80	472.81	49.22	90	539.78	56.19	79
1	608.76	63.37	24	212.91	22.16	2	45.98	4.79	4
< 1	128.95	13.42	8	268.89	27.99	20	278.89	29.03	27
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	6.00	0.62	0
10-100	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0
1-10	295.88	30.80	76	405.84	42.25	91	520.79	54.21	94
1	434.83	45.27	8	375.85	39.13	9	226.91	23.62	3
< 1	229.91	23.93	28	178.93	18.63	12	206.92	21.54	15

表 15 現生檜木優勢群系內 C_{so} 預測林型在不同時期依脆弱度級的覆蓋面積（單位：平方公里）與樣區數量（粗體字為監測樣區）

	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數	面積	%	樣區數
VI	A2a_2020			A2a_2050			A2a_2080		
> 100	0.00	0.00	0	57.98	8.17	5	100.96	14.23	9
10-100	10.00	1.41	9	10.00	1.41	9	23.99	3.38	14
1-10	204.92	28.87	28	313.87	44.23	29	502.80	70.85	36
1	461.82	65.07	22	203.92	28.73	9	0.00	0.00	0
< 1	32.99	4.65	1	124.95	17.61	8	82.97	11.69	1
VI	B2a_2020			B2a_2050			B2a_2080		
> 100	1.00	0.14	0	44.98	6.34	0	143.94	20.28	8
10-100	10.00	1.41	9	10.00	1.41	9	10.00	1.41	9
1-10	265.89	37.46	29	314.87	44.37	31	295.88	41.69	18
1	345.86	48.73	17	307.88	43.38	16	195.92	27.61	19
< 1	86.97	12.25	5	31.99	4.51	4	64.97	9.15	6

(a)

(b)

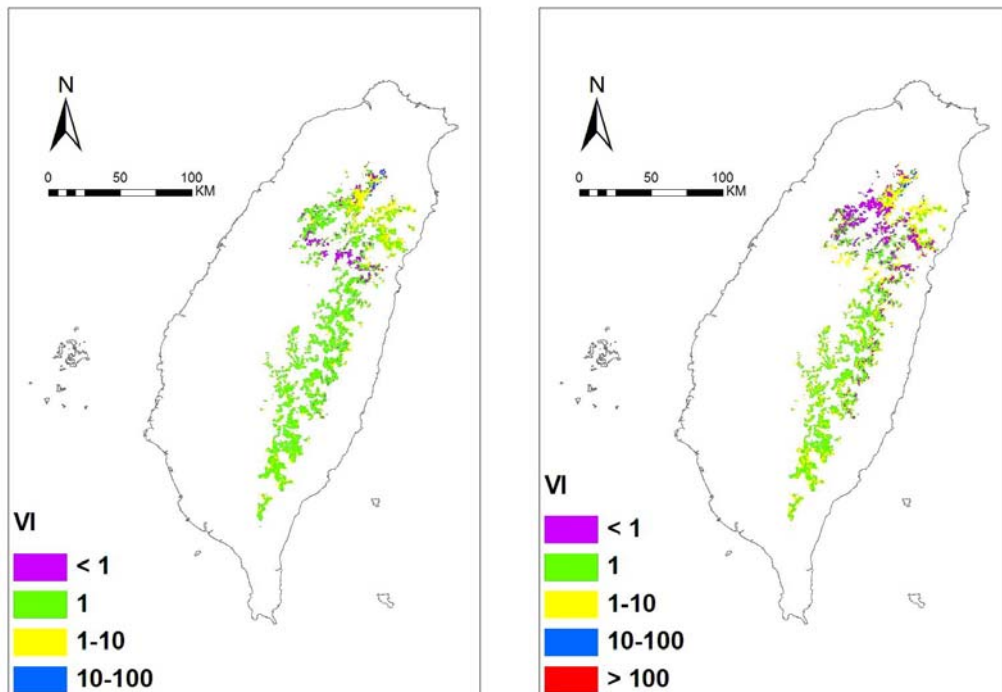
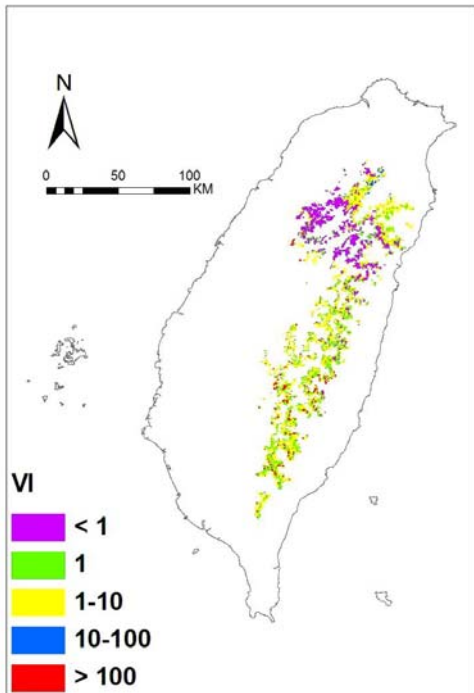
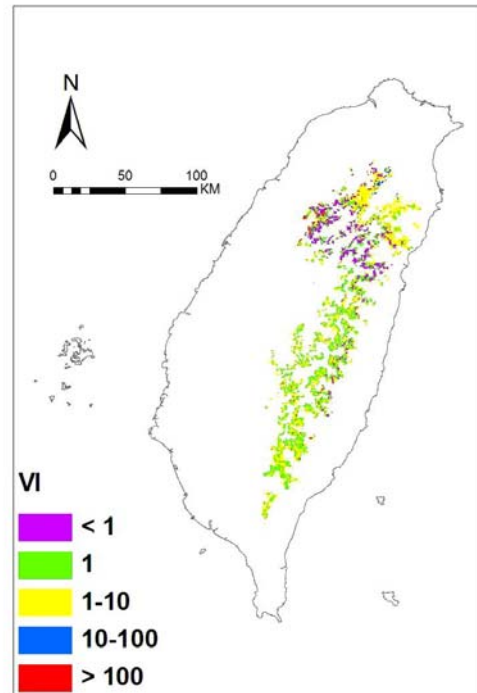


圖 27 檜木優勢群系的脆弱度分布：(a)2020 年 A2a；(b)2020 年 B2a

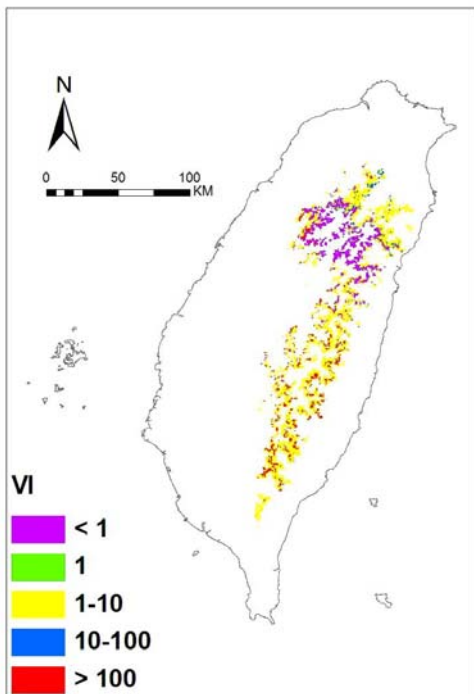
(c)



(d)



(e)



(f)

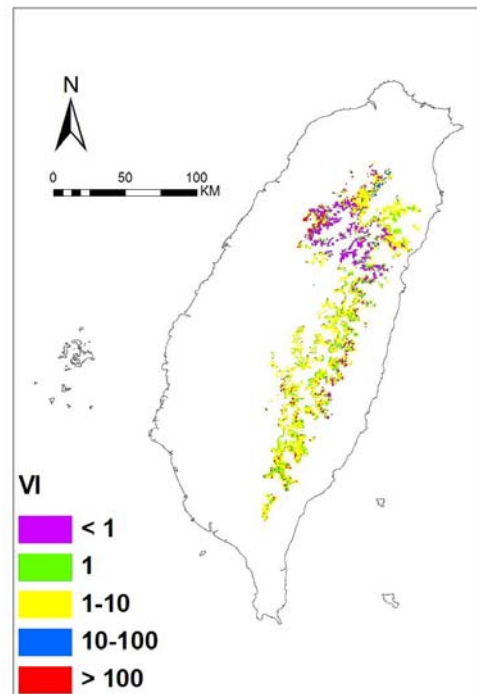


圖 27(續) 檜木優勢群系的脆弱度分布：(c)2050 年 A2a；(d)2020 年 B2a；(e)2080 年 A2a；(f)2080 年 B2a

圖 28 至 33 呈現了不同時期監測樣區在台灣垂直剖面圖上的分布情形，樣區的海拔高是來自台灣植群資訊系統的調查紀錄而非 WORLDCLIM 網格系統。在 2020 年（圖 28、29），屬於 A_{so} 的監測樣區會集中在玉山區域，而 AT_e 的監測樣區數量則較少。在台灣鐵杉優勢群系內， TC_e 的監測樣區在 B2a 會較 A2a 為多。而在檜木優勢群系內， TC_e 的監測樣區則密集地出現在北部海拔高 1,800 至 2,300 公尺的區域。另外 C_{so} 的監測樣區有更加明顯的北降趨勢，甚至在北部能夠出現在海拔高 1,000 公尺的區域。

在 2050 年（圖 30、31）， A_{so} 的監測樣區皆消失，而 A2a 和 B2a 間主要的差異是前者會有較多鐵杉優勢群系內的 AT_e 樣區而後者則否，其他整體的分布趨勢是大致相似的。到 2080 年（圖 32、33），在 A2a， A_{so} 會再出現若干監測樣區，此外 AT_e 也會比在 B2a 具有更多監測樣區。整體而言，除了 A_{so} 以外，各林型的監測樣區都會在北部有較高的密度及較寬的海拔分布範圍，而監測樣區的分布也沒有特殊的區域性，而會呈現分散的分布樣式。

在排除掉目標物種未出現或未落入目標物種優勢群系的樣區後，共有 338 個調查樣區被納入我們的監測篩選機制（表 16），比對它們的實際林型與預測林型，可以發現許多預測為交錯帶林型的樣區實際上屬於純林林型，如同圖 10 的呈現。事實上，透過這樣的比對，可以補正前述預測為 T_{so} 的區域過小導致沒有樣區屬於該林型的缺失，我們可以發現預測為 AT_e 或 TC_e 的樣區其實有相當數量屬於 T_{so} ，因此這些樣區實質上亦能作為 T_{so} 的代表。換句話說，這種比對可以協助我們理解樣區內物種可能的分布與目前實際的分布。同時亦可以對任何一個時期的監測樣區進行，我們以 2080 年為例（表 17、18），即可以區分出這些脆弱度較高的樣區在預測中及實際上分別屬於哪一種林型。

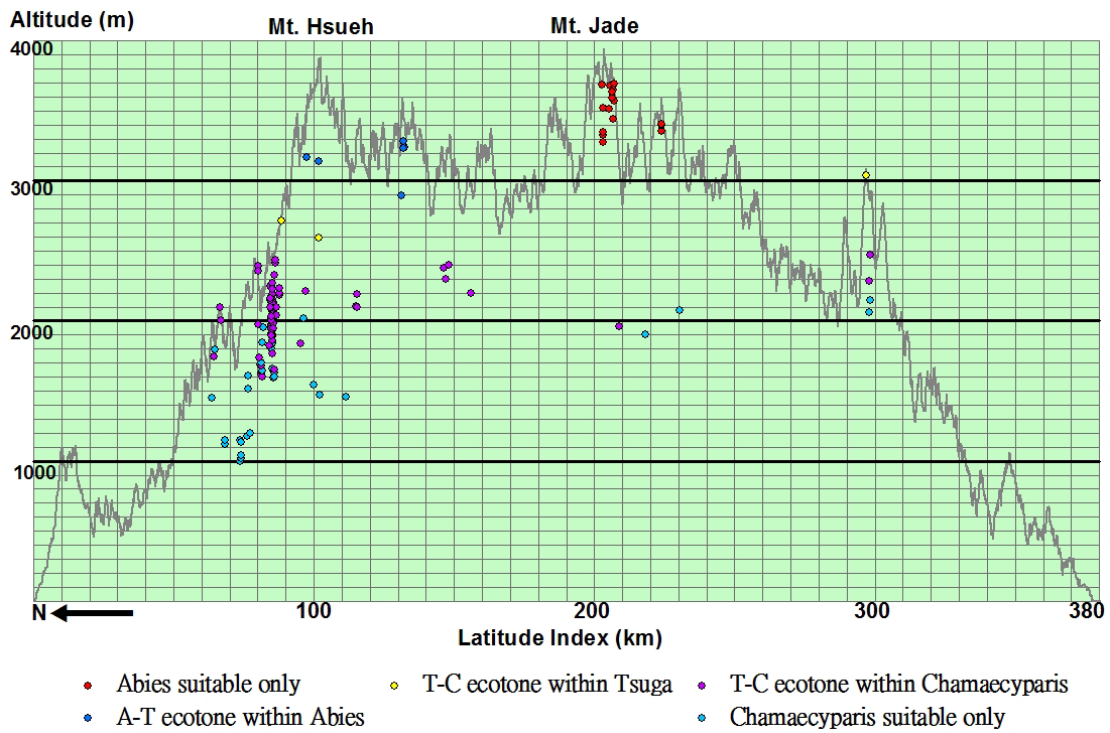


圖 28 2020 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

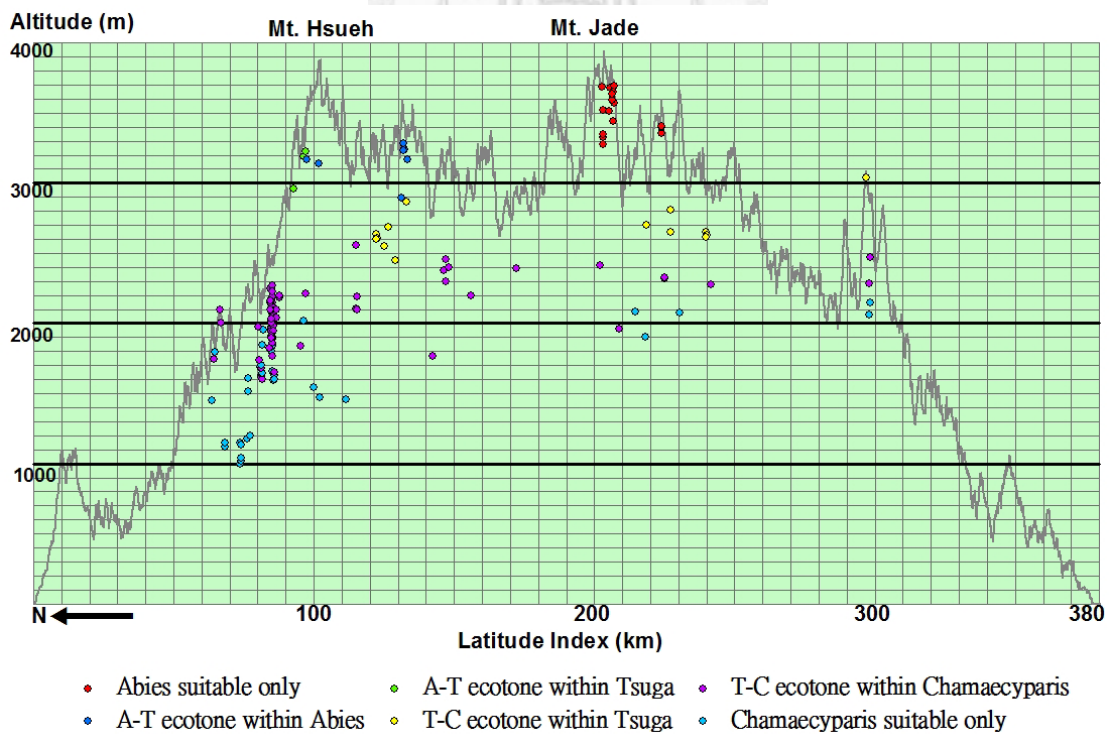


圖 29 2020 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

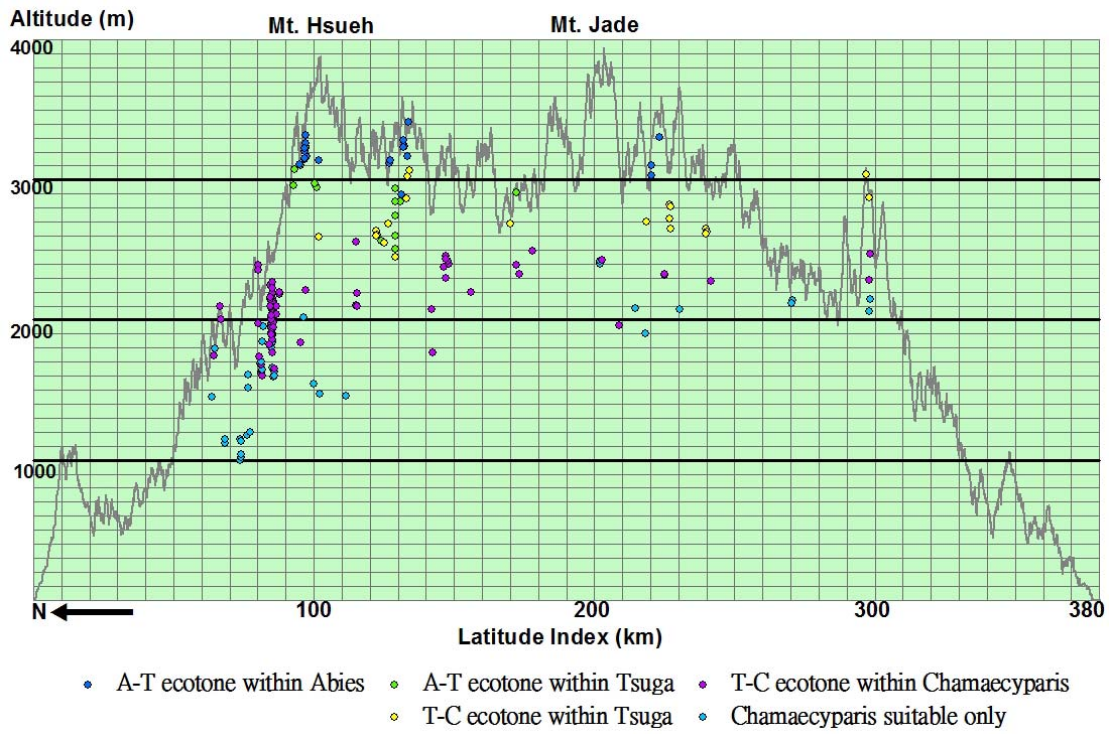


圖 30 2050 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

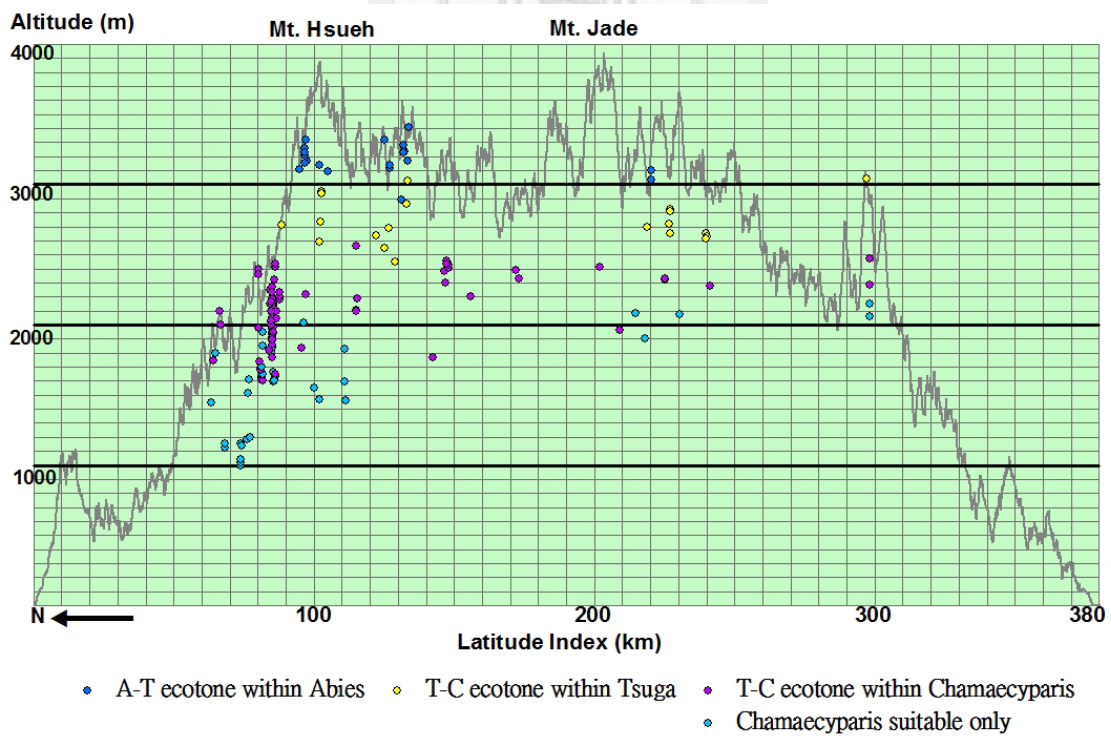


圖 31 2050 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

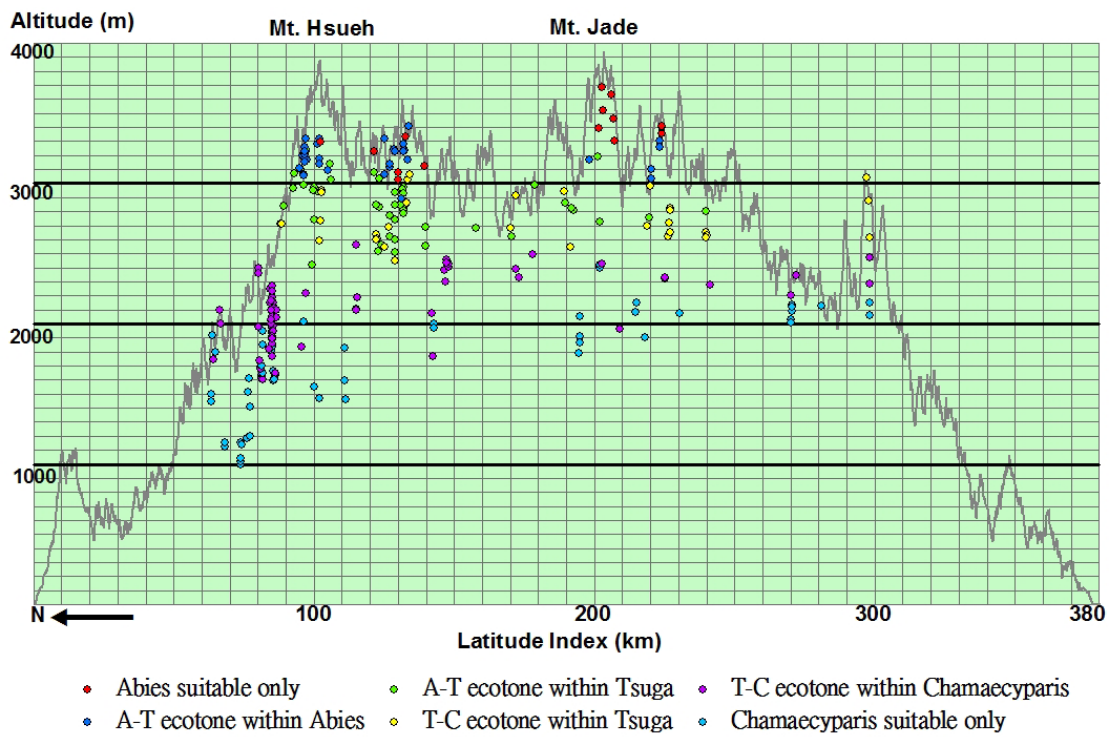


圖 32 2080 年 A2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

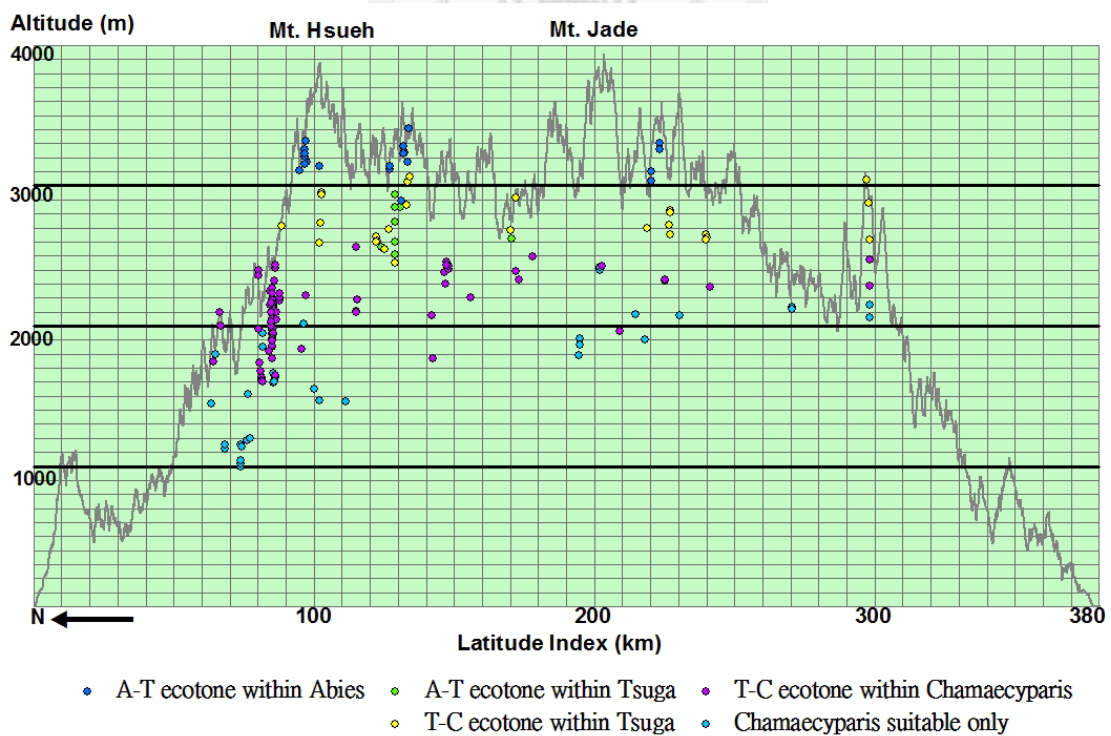


圖 33 2080 年 B2a 時各優勢群系內各預測林型監測樣區的空間分布圖

表 16 現生氣候下調查樣區預測林型與實際林型的比較

實際／預測	A _{so}	AT _e (冷杉群系)	AT _e (鐵杉群系)	TC _e (鐵杉群系)	TC _e (檜木群系)	C _{so}	合計
A _{so}	39	18	0	0	0	0	57
AT _e (冷杉群系)	1	15	0	0	0	0	16
AT _e (鐵杉群系)	0	0	37	4	0	0	41
T _{so}	0	0	27	18	0	0	45
TC _e (鐵杉群系)	0	0	2	5	0	0	7
TC _e (檜木群系)	0	0	0	0	64	6	70
C _{so}	0	0	0	0	48	54	102
合計	40	33	66	27	112	60	338

表 17 2080 年 A2a 時監測樣區在現生氣候下預測林型與實際林型的比較

實際／預測	A _{so}	AT _e (冷杉群系)	AT _e (鐵杉群系)	TC _e (鐵杉群系)	TC _e (檜木群系)	C _{so}	合計
A _{so}	14	18	0	0	0	0	32
AT _e (冷杉群系)	1	15	0	0	0	0	16
AT _e (鐵杉群系)	0	0	31	4	0	0	35
T _{so}	0	0	20	18	0	0	38
TC _e (鐵杉群系)	0	0	2	5	0	0	7
TC _e (檜木群系)	0	0	0	0	42	6	48
C _{so}	0	0	0	0	39	53	92
合計	15	33	53	27	81	59	268

表 18 2080 年 B2a 時監測樣區在現生氣候下預測林型與實際林型的比較

實際／預測	A _{so}	AT _e (冷杉群系)	AT _e (鐵杉群系)	TC _e (鐵杉群系)	TC _e (檜木群系)	C _{so}	合計
A _{so}	0	11	0	0	0	0	11
AT _e (冷杉群系)	0	10	0	0	0	0	10
AT _e (鐵杉群系)	0	0	5	2	0	0	7
T _{so}	0	0	4	18	0	0	22
TC _e (鐵杉群系)	0	0	0	4	0	0	4
TC _e (檜木群系)	0	0	0	0	53	3	56
C _{so}	0	0	0	0	41	32	73
合計	0	21	9	24	94	35	183

伍、討論

一、物種分布模式／氣象資料比較評估

過去，台灣的植群調查資料一直缺乏妥善的整合，許多區域性調查的資料因為調查方式與標準的差異，而無法結合應用於全島尺度的分析。由於「國家植群多樣性調查及製圖計畫」的執行，我們第一次有機會獲得在統一的標準與跨全島的尺度下調查的資料，並且有足夠的樣區數量來建立可信的物種分布模式。一般而言，為了確保樣本的均質性，在建立物種分布模式時往往採用以網格或系統取樣為基礎的物種資料 (Matsui *et al.*, 2004; Yagihashi *et al.*, 2007; Schrag *et al.*, 2008; Horikawa *et al.*, 2009)。本研究中，因為我們的物種資料是非系統取樣的點樣本，所以嘗試了利用可從網路免費下載的全球氣象資料來建立網格系統，再將樣區結合進入系統，即可形成類似系統取樣的樣本。此外，前人研究指出將母資料集切割為訓練資料與檢核資料能更有效地評估模式的表現 (Liaw & Wiener, 2002; Lawrence *et al.*, 2006)，但在本研究中並未發現切割後的資料與母資料集直接建模的表現有明顯的差異，因此我們仍然以整個母資料集直接作為訓練資料建立模式，並透過交錯驗證的方式來評估模式表現。

此外，觀察表 7 我們可以發現，區域尺度的資料如果解析度較差或資料母樣本數較少，表現也可能較全球尺度的資料來得差。這牽涉到台灣較缺乏具有足夠時間跨距的氣象觀測資料的氣象站，因此在資料的品質上可能會有較大的缺陷。而在模式比較的部份，MAXENT 雖然普遍可以得到比 CART 略高的生產者精度，但在使用者精度的表現方面卻較差，顯示它的預測可能會比實際分布超出甚多。考量到物種分布模式本身的產出已是大於物種實際分布的潛在棲地，如果再採用

高估較多的模式，可能會在分類林型時嚴重失真，所以我們選擇 CART 繼續進行後續的分析。

從模式的結果來看，我們可以發現台灣冷杉的棲地相對簡單(圖 7)，除了 TMC 為主要的控制因子外，在較適存與較不適存的兩大類群內，則分別受到 PRW 和 WI 的控制。而在台灣鐵杉的部分(圖 8)，我們則可以發現過高或過低的 WI 都會抑制其生存，而在較適存的大類群中，水分因子扮演了比較複雜的區分機制。事實上，我們可以發現在 CART 模式中，很多時候預測對象並不會對因子呈現一般認定的鐘型曲線的反應。舉例來說，台灣冷杉在 $TMC < -0.55^{\circ}\text{C}$ 時，出現機率會從 $PRW < 541\text{ mm}$ 時的 0.7826，隨著 PRW 提升而先下降再上升；或者台灣鐵杉在 WI 介於 27.75°C 和 76.55°C 時，出現機率會從 $PRS < 1801.5\text{ mm}$ 時的 0.8077，隨著 PRS 提升而先下降再上升。如同上述，CART 並不是一個在預測對象和因子間有明確先驗關係的函數，而是將資料迭代切割後產生的分類機制，因此它能夠協助我們發現，以我們所提供的因子建立的模式中，會有若干特殊的棲地可能只存在於因子某個短小的區間內，而這些棲地其實可能是受到其他我們未納入模式中的因子控制，不過這並不影響我們對因子如何控制物種分布的解釋，因為我們主要的目標還是在於找到主要的影響因子以及巨觀地描繪物種潛在分布的趨勢。有別於台灣鐵杉主要受到 WI 的控制，也就是其分布主要受到累積溫度對生長的影响，檜木則主要受到 TMC 的控制(圖 9)，也就是其分布主要受到寒冷極限溫度的影响。事實上，由於檜木主要的棲地是在上部櫟林帶中，與許多闊葉樹混生，而使得生育地條件與台灣冷杉及台灣鐵杉比較之下，顯得相對複雜。觀察檜木的分類樹模式，確實可以發現在 TMC 介於 0.05°C 與 6.85°C 間的大類群中，其他因子進行了比較複雜的區分。如同前述，某些較為特殊的棲地可能是受到其他我們未納入模式中的因子控制，因此這個部份是本研究較大的限制。

二、空間分布樣式

以模式結果為基礎，我們定義了不同的林型並描繪它們的空間分布樣式。第一個重要的特徵是所有林型的分布都呈現明顯的海拔北降趨勢，但在前文中我們曾提及，台灣的帶狀植群分化在空間上的分布是呈現「中部高於南北部」的弧形（圖 2）。換句話說，預測林型的空間分布和實際上有所落差。事實上，這種差異亦曾在過去受到討論（Yen, 2007）。主要的問題關鍵在於包含 WORLDCLIM 氣象資料庫所提供的資料在內，一直以來研究者所使用的氣象資料大多是統計內插的產物，所以在氣溫相關的因子上，等溫線必然會呈現北降的趨勢（相同溫度在緯度愈高的區域分布海拔愈低）。因此，我們採用這種類型的氣溫資料所建立的物種分布模式，也會生產出類似的空間分布樣式。未來，我們應可嘗試使用不同的氣象資料，比方說由美國太空總署提供，直接量測地面溫度的 MODIS 衛星資料（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer），應能適度地改善模式預測的結果。

另外一個重要的特徵是我們在前文中曾經提及的，模式預測為 T_{so} 的面積相當小，也就是由於物種分布模式的預測產物是物種的潛在而非實際棲地，而造成當三個目標物種都具有比實際寬的海拔分布範圍時，分布海拔居中的台灣鐵杉被預測為純林的面積便會相對縮小。從圖 2 和圖 10 的樣區分布圖來看，台灣鐵杉林帶（或優勢樣區）的分布主要是介於 2,500 至 3,100 公尺，在北部可能降到約 2,000 公尺，而從圖 11 的預測來看，則可以發現所有 AT_e 分布的區域以及 TC_e 在北部分布區域都和上述台灣鐵杉林帶的分布有一定重合，所以我們也可以經過評估 AT_e 和 TC_e 的分布樣式，特別是台灣鐵杉優勢的 T_dAT_e 以及 T_dTC_e ，來理解台灣鐵杉分布的變化。值得注意的是，我們可以發現除了在南部以外， T_dAT_e 普遍比 A_dAT_e 來

得窄，而事實上， A_dAT_e 主要分布的北部海拔高 2,600 至 3,100 公尺區域，是許多不同林型或林帶交會的區域（圖 2 及圖 10），指示了就潛在而言台灣冷杉能取得優勢的棲地在目前實際上是競爭強烈的區域。

特別的是，在 2020 年時， A_dAT_e 和 T_dAT_e 主要的分布區域會在 A2a 幾乎完全交換（圖 13），而在 B2a 則產生強烈的競爭（圖 14）。另一方面， A_{so} 受到的壓縮在 B2a 則會比 A2a 強烈許多。前文曾經提及，在 A2a 和 B2a 兩條故事線中，B2a 會在近期的未來對環境有較大的衝擊。也就是相對來說，在衝擊較為嚴重的情境中，台灣冷杉在交錯帶區域仍能保有一定的競爭力，但純林林型就會受到明顯的威脅，特別在 2020 年時其他林型僅表現出海拔上移而尚未有明顯的壓縮。

到 2050 年時（圖 15、16），台灣冷杉會重新取回在 AT_e 內在北部的優勢，顯示其確實表現了和台灣鐵杉間足夠的競爭潛力，尤其是此時 A_{so} 已經大量地消失。除此之外， T_{so} 會開始出現，而 C_{so} 會開始變寬，因此 TC_e 會相應地壓縮，這也顯示了檜木的分布雖然也會海拔上移，但仍有足夠的空間可以避難。

在 2050 年和 2080 年，A2a 對環境的衝擊會比 B2a 強烈許多，而我們可以從圖 1 與圖 3 發現，2050 年時的 A2a 和 2080 年時的 B2a 有著近似的氣溫條件，也因此兩者的林型分布情形會較為類似。到環境衝擊最嚴重的 2080 年 A2a 時（圖 17）， AT_e 會完全取代現生氣候下 A_{so} 的分布，但整體而言，交錯帶林型會受到比純林林型來得嚴重的衝擊，顯示在氣候變遷下，各物種的潛在棲地除縮小外，亦會逐漸分化。此外，各林型的界限在不同時期間，皆會有約 200 至 300 公尺的海拔上移。

過去，我們並沒有完整的植群圖可作為量化評估模式預測結果的基準，由於

台灣目前已完成現生植群圖的繪製，我們便能藉由植群圖和模式預測圖的套疊，在實際的群系內，各預測林型的覆蓋程度與未來可能的變化情形。

在前文針對各林型空間分布樣式的討論中，我們曾提及台灣冷杉在交錯帶區域能保有和台灣鐵杉間一定的競爭力，林型對群系覆蓋面積的計算足以驗證此現象（表 9）。特別是在 2050 年及 2080 年時，我們會發現無論在台灣冷杉優勢或台灣鐵杉優勢的群系中， A_dAT_e 都能取得接近甚至大於 T_dAT_e 的面積。整體而言，在 AT_e 中，台灣鐵杉能在近期的未來取得競爭優勢，但在長期的未來則會由台灣冷杉重新取回。在衝擊最嚴重的 2080 年 A2a 時， AT_e 會進入現生氣候下 A_{s0} 分布的區域，其中台灣冷杉優勢的區域主要在南湖大山及玉山，而台灣鐵杉優勢的區域主要在雪山（圖 19、20）。此外，約有 77% 現生氣候下台灣冷杉優勢群系內的棲地會不再適合台灣冷杉生存，目前也已有研究針對一種歐洲的優勢冷杉屬物種 *Abies alba* 發現類似的結果（Benito Garzon *et al.*, 2008; Anic *et al.*, 2009），他們分別發現在 2100 年時，克羅埃西亞境內的 *Abies alba* 棲地將會減少 85%，以及在 2080 年 A2a 時，伊比利半島內的 *Abies alba* 棲地將會減少 91%。

如同各林型在不同時期之間分布的逐漸上移，台灣鐵杉優勢群系內的主要覆蓋也逐漸從 AT_e 轉變為 TC_e （圖 21、22）。在現生氣候下， AT_e 主要覆蓋在群系較內部（海拔較高）的區域而 TC_e 則主要覆蓋在群系較外部（海拔較低）的區域。此外， ATC_e 呈現了在海拔上為帶狀但在水平梯度上十分分散的散布，顯示其在分布的海拔帶內隨機出現的情形。在未來， TC_e 向上擴張的趨勢會十分明顯，尤其是 C_dTC_e 會失去大部份現生的棲地但新得到更大的面積。而 ATC_e 會在 2050 年後快速的消失，取而代之的是 T_{s0} ，意味著各物種間的逐漸分化。整體而言，台灣鐵杉優勢群系內各預測林型的分布在未來會逐漸的破碎化而不會形成特定的分布中心，這也意味著此群系所在的區域有較強烈的種間競爭。

事實上，鐵杉屬的物種比冷杉屬少相當多，世界上大多數針葉林的優勢屬都屬於冷杉屬、雲杉屬以及松屬，所以一般物種分布模式的研究鮮少將焦點置於鐵杉屬物種。然而在台灣，台灣鐵杉是相當重要的物種，除了具有大面積的純林與寬廣的分布範圍外，在海拔梯度上分別和台灣冷杉及檜木接壤，這些交錯帶區域對於生態監測都具有相當的重要性。儘管本研究並未納入種間競爭的因子，我們仍然可以藉由交錯帶區域中優勢程度的轉換，理解在氣候變遷之下，各物種對於棲地可能的競爭關係。

檜木優勢群系內各預測林型的變化樣式就顯得相對簡單（圖 23、24），我們曾提及 C_{so} 雖然也會有海拔上移的趨勢，但其海拔分布範圍會逐漸變寬，因此在檜木優勢群系內的分布面積也會逐漸增加。相應的則是 TC_e ，特別是 T_dTC_e 的快速減少。整體而言， C_{so} 向內（海拔向上）進入取代 T_dTC_e 的趨勢十分明顯，而 C_dTC_e 則一直維持少量且較邊緣的分布。

綜合上述，氣候變遷對台灣鐵杉與檜木的衝擊在近期的未來較不會像對台灣冷杉如此明顯，然而會隨著時間逐漸顯明，尤其是當各物種的棲地逐漸分化，使交錯帶區域縮小時，我們也會發現各現生優勢群系內將會有大量的棲地消失，特別是在環境衝擊最嚴重的 2080 年 A2a 下。在隨後的討論中，我們將藉由脆弱度的評估，更清晰地理解整體趨勢。

三、脆弱度評估及監測樣區篩選

近來已有許多研究指出在氣溫上升的情況下，分布於中高海拔的針葉樹會再向上遷徙 (Lloyd & Graumlich, 1997; Millar *et al.*, 2004)，這意味著原有的棲地可能處於不同的脆弱程度，而我們能夠藉由模式預測的出現機率，在不同時期的差異對其進行評估。由於能夠提供管理與保育決策參考，評估物種棲地的脆弱度目前已成為生態學中重要的議題 (Casalegno *et al.*, 2010)。由是，本研究不只希望理解目標物種在特定區域，於氣候變遷下棲地海拔上移的程度，也企圖量化描述物種棲地的脆弱度，並引入調查樣區資料以篩選適當的長期監測對象。

在台灣冷杉優勢群系內，我們可以發現 AT_e 的棲地比 A_{s0} 脆弱 (表 10、11)，但值得注意的是前文中曾提及 A_{s0} 的棲地將以很快的速度消失。也就是說，在現生的 A_{s0} 裡，台灣冷杉的出現機率在未來不會降低的非常快，然而其棲地會讓台灣鐵杉大量的進入，而使得 A_{s0} 逐漸被 AT_e 取代。 AT_e 的部份 (表 11)，脆弱區域將在未來逐漸擴大，顯示在交錯帶區域內台灣冷杉將面臨日漸增強的競爭。觀察空間分布 (圖 25)，可以發現在 2020 年，增長棲地會集中在玉山周圍，而在 B2a，會開始有極端脆弱棲地散布在群系較為外部 (海拔較低) 的區域。到 2050 年，極端脆弱棲地和中度脆弱棲地會開始分別佔據北部和南部。到 2080 年 A2a 時，只剩雪山、南湖大山以及玉山仍會有不變棲地，而極端脆弱棲地和中度脆弱棲地的分化趨勢將會愈見明顯。整體而言，台灣冷杉優勢群系內的棲地在北部受到氣候變遷的衝擊會大於南部。

在台灣鐵杉優勢群系內，我們同樣可以發現分布於較低海拔的 TC_e 會比 AT_e 來得脆弱 (表 12、13)。 AT_e 在 2020 年甚至會有大面積的增長棲地，而在 2050 年

之後，大部份的 AT_e 會變為不變棲地，到 2080 年 A2a 時，主要的覆蓋則會變成輕度脆弱棲地。比較之下，2020 年時 TC_e 的增長棲地就相對少而輕度脆弱棲地則多出許多，2050 年之後， TC_e 主要的覆蓋將會變成輕度脆弱棲地，並且開始會有中度脆弱與極端脆弱棲地出現。觀察空間分布（圖 26），可以發現在 2020 年時，增長棲地與不變棲地間的地理分隔十分明顯，顯示此時台灣鐵杉在中北部可以取得更多的生存機會。到 2050 年時，增長棲地會消失得非常快，大部份區域將被不變棲地覆蓋，輕度脆弱棲地則在群系外部（海拔較低）包圍。在 2080 年 A2a 時，我們可以發現開始有許多中度脆弱與極端脆弱棲地在群系邊緣的區域散布。

在檜木優勢群系內， TC_e 和 C_{so} 的脆弱度在 2020 年時還沒有很明顯的差異（表 14、15），主要覆蓋皆是不變棲地，另外有若干增長及輕度脆弱棲地。到 2050 年時，兩者的主要覆蓋都會轉為輕度脆弱棲地，且 C_{so} 將會開始出現少許中度脆弱或極端脆弱棲地。到 2080 年時，會有更多極端脆弱棲地開始出現，同時也仍保留若干增長棲地。值得注意的是，在 2020 年時增長棲地在 B2a 的比例會高於 A2a，在 2050 年和 2080 年則反之，顯示檜木在比較艱困的環境中會有更多的生存機會。從空間分布來看（圖 27），可以發現增長棲地始終集中在北部圍繞著台灣鐵杉優勢群系的區域，也就是說在這裡會有更多機會向上遷移。而其他不同脆弱度級的棲地則顯示了清晰的垂直分化，越靠近群系外部（海拔較低）的區域越脆弱。

在監測樣區篩選的部份（圖 28 至圖 33），我們可以發現整體而言，在檜木優勢群系內的 TC_e 會比其他林型有更多的篩選樣區，這主要涉及到此林型具有最大的面積（表 9），而且其分布區域內本來也就具有最多樣區（112 個，表 14）。值得注意的是，舉例來說，即使在 2020 年的 A2a，輕度脆弱棲地僅佔檜木優勢群系內的 TC_e 約 23.2% 面積時，仍有高達 80 個樣區屬於此脆弱度級（表 14），類似的情形也發生在 C_{so} ，顯示我們的調查樣區確實集中在若干環境條件相近的區域。事實

上，圖 10 已經顯示北部具有更高的調查密度與更多的交錯帶類型樣區，而在檜木優勢群系內，無論屬於 TC_e 或 C_{so} 的監測樣區，也都顯示出隨著分布區域往北，數量逐漸增加而分布範圍逐漸變寬的趨勢。整體而言，可以發現北部的中海拔山區應對氣候變遷具有更敏感的反應。

在台灣冷杉優勢群系內，A_{so} 只有在 2020 年以及 2080 年 A2a 時會有監測樣區，前者皆集中在玉山區域，後者則散佈在海拔高 3,000 公尺以上的區域。另外 AT_e 的部份則無論在任何時期或情境皆集中在北部。而在台灣鐵杉優勢群系內，監測樣區並未表現出特定的空間分布樣式。綜合上述，在任何優勢群系內的任何預測林型中，監測樣區的出現是具有高度隨機性的，但在北部仍會有較高的密度，顯示在此區域內，物種確實較有可能得到或失去棲地，此現象亦符合北部具有較多交錯帶類型樣區的現況。而比對監測樣區的預測林型和實際林型（表 16 至 18）將能協助我們補正預測林型可能有的缺失，並區分篩選機制本身是基於物種的潛在或實際棲地。

陸、結論

本研究整合了台灣現生植群圖、調查樣區資料以及物種分布模式，是我們第一次有機會結合大量的台灣全島資料與模式預測，以探索其中可能的生態意義與決策參考。我們嘗試了使用調查樣區資料與不同尺度的氣象資料來建立物種分布模式，儘管基於統計迴歸與內插技術的氣象資料並不能完全忠實反應現況，但模式的結果仍能提供我們在氣候變遷下，各預測林型如何位移的資訊。大致上，各物種的潛在棲地會在未來每個時期間海拔上移約 200 至 300 公尺，並且會逐漸分化，導致交錯帶區域的面積縮小。此外，儘管台灣冷杉在交錯帶區域仍能保持一定的競爭力，但氣候變遷對其分布的衝擊明顯會大於對台灣鐵杉與檜木的衝擊。脆弱度評估則顯示台灣北部對氣候變遷更加敏感，且大部份監測樣區會落在此區域。未來，我們將能透過對這些監測樣區的持續複查，量理解其中優勢物種生長的變化。

柒、參考文獻

行政院農委會林務局 (2010), 台灣現生天然植群圖集。林務局, 台北市。419 頁。

宋永昌 (2001), 植被生態學。華東師範大學出版社, 上海市。673 頁。

林建融、林逸盈、林聖峰、謝長富、邱祈榮 (2007), 台灣植群多樣性先驅分析—木本植物垂直分帶之探討。第五屆台灣植群多樣性研討會論文集: 頁 68-88。

謝長富、廖啟政、賴宜鈴 (1996), 墾丁國家公園熱帶雨林永久樣區之調查。保育研究報告第94 號。墾丁國家公園管理處。

蘇鴻傑 (1992), 台灣之植群: 山地植群帶與地理氣候區, 中央研究院植物研究所專刊: 頁 39-53。

Allen, M.R. & Ingram, W.J. (2002) Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, **419**, 224-+

Anic, I., Vukelic, J., Mikac, S., Baksic, D. & Ugarkovic, D. (2009) Effects of global climate change on the ecological niche of silver fir (*Abies alba* mill.) in Croatia. *Sumarski List*, **133**, 135-144

Araujo, M. & Williams, P. (2000) Selecting areas for species persistence using occurrence data. *Biological Conservation*, **96**, 331-345

Austin, M. (2007) Species distribution models and ecological theory: A critical assessment and some possible new approaches. *Ecological Modelling*, **200**, 1-19

Bartlein, P.J., Whitlock, C. & Shafer, S.L. (1997) Future climate in the Yellowstone national park region and its potential impact on vegetation. *Conservation Biology*, **11**, 782-792

Benito Garzon, M., Sanchez De Dios, R. & Sainz Ollero, H. (2008) Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. *Applied Vegetation Science*, **11**, 169-178

- Bennett, K.D. (1997) *Evolution and ecology: The pace of life*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Berry, P.M., Dawson, T.P., Harrison, P.A., Pearson, R.G., 2002. Modelling potential impacts of climate change on the bioclimatic envelope of species in Britain and Ireland. *Global Ecology and Biogeography*, **11**, 453–462.
- Breiman, L. (1996) Bagging predictors. *Machine Learning*, **24**, 123-140
- Breiman, L. (2001) Random forests. *Machine Learning*, **45**, 5-32
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. & Stone, C. (1984) *Classification and regression trees*. Wadsworth, Belmont (CA).
- Broennimann, O., Thuiller, W., Hughes, G., Midgley, G.F., Alkemade, J.M.R., & Guisan, A. (2006) Do geographic distribution, niche property and life form explain plants' vulnerability to global change? *Global Change Biology*, **12**, 1079-1093.
- Cairns, D.M. (2001) A comparison of methods for predicting vegetation type. *Plant Ecology*, **156**, 3-18
- Camarero, J.J., Gutierrez, E. & Fortin, M.J. (2000) Spatial pattern of subalpine forest-alpine grassland ecotones in the Spanish Central Pyrenees. *Forest Ecology and Management*, **134**, 1-16
- Casalegno, S., Amatulli, G., Camia, A., Nelson, A. & Pekkarinen, A. (2010) Vulnerability of *pinus cembra* l. In the alps and the carpathian mountains under present and future climates. *Forest Ecology and Management*, **259**, 750-761
- Chatfield, C. (1995) Model uncertainty, data mining and statistical-inference. *Journal of the Royal Statistical Society Series a-Statistics in Society*, **158**, 419-466
- Chiou, C.R., Song, G.Z.M., Chien, J.H., Hsieh, C.F., Wang, J.C., Chen, M.Y., Liu, H.Y., Yeh, C.L., Hsia, Y.J. & Chen, T.Y. (2010) Altitudinal distribution patterns of plant species in Taiwan are mainly determined by the northeast monsoon rather than the heat retention mechanism of Massenerhebung. *Botanical Studies*, **51**, 89-97

- Collins, M., Tett, S. & Cooper, C. (2001) The internal climate variability of HADCM3, a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* **17**, 61-68
- Collinson, A.S. (1988) *Introduction to world vegetation*, second edn. Unwin Hyman Ltd., London, UK.
- Congalton, R.G. (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing Environments* **37**, 35-46
- Cox, C.B., Healey, I.N. & Moore, P.D. (1973) *Biogeography: An ecological and evolutionary approach*. Wiley, New York
- Daniels, L.D. & Veblen, T.T. (2004) Spatiotemporal influences of climate on altitudinal treeline in northern Patagonia. *Ecology*, **85**, 1284-1296
- Davis, M.B. & Shaw, R.G. (2001) Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science*, **292**, 673-679
- Ewald, J. (2003) A critique for phytosociology. *Journal of Vegetation Science*, **14**, 291-296
- Fielding, A.H. (1999) How should accuracy be measured. *Machine learning methods for ecological applications* (ed. by A.H. Fielding), pp. 209-223. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Gansert, D. (2004) Treelines of the Japanese alps - altitudinal distribution and species composition under contrasting winter climates. *Flora*, **199**, 143-156
- Germino, M.J., Smith, W.K. & Resor, A.C. (2002) Conifer seedling distribution and survival in an alpine-treeline ecotone. *Plant Ecology*, **162**, 157-168
- Gordon, H. & O'farrell, S. (1997) Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. *Monthly Weather Review* **125**, 875-907
- Grabherr, G., Gottfried, M. & Pauli, H. (1994) Climate effects on mountain plants. *Nature*, **369**, 448-448

- Guisan, A. & Zimmermann, N.E. (2000) Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*, **135**, 147-186
- Hannah, L., Midgley, G.F. & Millar, D. (2002) Climate change-integrated conservation strategies. *Global Ecology and Biogeography*, **11**, 485-495
- Held, I.M. & Soden, B.J. (2006) Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, **19**, 5686-5699
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G. & Jarvis, A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* **25**, 1965-1978
- Hernandez, P.A., Graham, C.H., Master, L.L. & Albert, D.L. (2006) The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography*, **29**, 773-785
- Hogg, E.H. & Schwarz, A.G. (1997) Regeneration of planted conifers across climatic moisture gradients on the Canadian prairies: Implications for distribution and climate change. *Journal of Biogeography*, **24**, 527-534
- Horikawa, M., Tsuyama, I., Matsui, T., Kominami, Y. & Tanaka, N. (2009) Assessing the potential impacts of climate change on the alpine habitat suitability of Japanese stone pine (*Pinus pumila*). *Landscape Ecology*, **24**, 115-128
- IPCC (2001) *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC (2007) *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press Edition, Cambridge, UK.
- Iverson, L.R. & Prasad, A.M. (1998) Predicting abundance of 80 tree species following climate change in the eastern United States. *Ecological Monographs*, **68**, 465-485

- Iverson, L.R., Prasad, A.M., Matthews, S.N., Peters, M., 2007. Estimating potential habitat for 134 eastern us tree species under six climate scenarios. *Forest Ecology and Management*, **254**, 390–406.
- Jobbagy, E.G. & Jackson, R.B. (2000) Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. *Global Ecology and Biogeography*, **9**, 253-268
- Kim, S.-J., Flato, G. & Boer, G. (2003) A coupled climate model simulation of the last glacial maximum. Part 2. Approach to equilibrium climate. *Dynamics*, **20**, 635-661
- Kira, T. (1977) A climatological interpretation of Japanese vegetation zones. *Vegetation science and environmental protection* (ed. by A. Miyawaki and R. Tuxen), pp. 21-30. Maruzen, Tokyo, JP.
- Korner, C. (1998) A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, **115**, 445-459
- Korner, C. & Paulsen, J. (2004) A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, **31**, 713-732
- Kozlowski, T.T. (1976) Water supply and leaf shedding. *Water deficits and plant growth* (ed. by T.T. Kozlowski), pp. 191-231. Academic Press, New York, US.
- Lawrence, R.L., Wood, S.D. & Sheley, R.L. (2006) Mapping invasive plants using hyperspectral imagery and Breiman Cutler classifications (randomforest). *Remote Sensing of Environment*, **100**, 356-362
- Legendre, P. & Legendre, L. (1998) *Numerical ecology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam.
- Liaw, A. & Wiener, M. (2002) Classification and regression by randomforest. *R news*, **2/3**, 18-22
- Lin, K.C., Hamburg, S.P., Tang, S., Hsia, Y.J. & Lin, T.C. (2003) Typhoon effects on litterfall in a subtropical forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **33**,

- Lin, M.L. & Jeng, F.S. (2000) Characteristics of hazards induced by extremely heavy rainfall in central Taiwan - typhoon Herb. *Engineering Geology*, **58**, 191-207
- Lin, S.H., Liu, C.M., Huang, W.C., Lin, S.S., Yen, T.H., Wang, H.R., Kuo, J.T. & Lee, Y.C. (2010) Developing a yearly warning index to assess the climatic impact on the water resources of Taiwan, a complex-terrain island. *Journal of Hydrology*, **390**, 13-22
- Lloyd, A.H. & Graumlich, L.J. (1997) Holocene dynamics of treeline forests in the Sierra Nevada. *Ecology*, **78**, 1199-1210
- Loehle, C. (2000) Forest ecotone response to climate change: Sensitivity to temperature response functional forms. *Canadian Journal of Forest Research*, **30**, 1632-1645
- Luckman, B. & Kavanagh, T. (2000) Impact of climate fluctuations on mountain environments in the Canadian Rockies. *Ambio*, **29**, 371-380
- Mabry, C.M., Hamburg, S.P., Lin, T.C., Horng, F.W., King, H.B. & Hsia, Y.J. (1998) Typhoon disturbance and stand-level damage patterns at a subtropical forest in Taiwan. *Biotropica*, **30**, 238-250
- Matsui, T., Takahashi, K., Tanaka, N., Hijioka, Y., Horikawa, M., Yagihashi, T. & Harasawa, H. (2009) Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan. *Applied Vegetation Science*, **12**, 328-339
- Matsui, T., Yagihashi, T., Nakaya, T., Tanaka, N. & Taoda, H. (2004) Climatic controls on distribution of *Fagus crenata* forests in Japan. *Journal of Vegetation Science*, **15**, 57-66
- Meehl, G.A. & Coauthors (2007) Global climate projections. *Climate change 2007: The physical science basis* (ed. by S.E.A. Solomon), pp. 747-846. Cambridge University Press, Cambridge.
- Meehl, G.A., Washington, W.M., Collins, W.D., Arblaster, J.M., Hu, A.X., Buja, L.E., Strand, W.G. & Teng, H.Y. (2005) How much more global warming and sea

level rise? *Science*, **307**, 1769-1772

- Messaoud, Y., Bergeron, Y. & Leduc, A. (2007) Ecological factors explaining the location of the boundary between the mixedwood and coniferous bioclimatic zones in the boreal biome of Eastern North America. *Global Ecology and Biogeography*, **16**, 90-102
- Metzger, M., Schroter, D., Leemans, R., Cramer, W., 2008. A spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of ecosystem service change in Europe. *Regional Environmental Change* **8**, 91–107.
- Millar, C.I., Westfall, R.D., Delany, D.L., King, J.C. & Graumlich, L.J. (2004) Response of subalpine conifers in the Sierra Nevada, California, USA, to 20th-century warming and decadal climate variability. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, **36**, 181-200
- Moore, D.M., Lees, B.G. & Davey, S.M. (1991) A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a geographic information-system. *Environmental Management*, **15**, 59-71
- Munoz, J. & Felicísimo, A.M. (2004) Comparison of statistical methods commonly used in predictive modelling. *Journal of Vegetation Science*, **15**, 285-292
- Noble, I.R. (1993) A model of the responses of ecotones to climate-change. *Ecological Applications*, **3**, 396-403
- Parmesan, C. (2006) Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, **37**, 637-669
- Pearson, R.G. & Dawson, T.P. (2003) Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, **12**, 361-371
- Pellatt, M.G., Smith, M.J., Mathewes, R.W., Walker, I.R. & Palmer, S.L. (2000) Holocene treeline and climate change in the subalpine zone near Stoyoma Mountain, Cascade Mountains Southwestern British Columbia, Canada. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, **32**, 73-83

- Peters, D.P.C. (2002) Plant species dominance at a grassland-shrubland ecotone: An individual-based gap dynamics model of herbaceous and woody species. *Ecological Modelling*, **152**, 5-32
- Philips, S.J., Anderson, R.P., & Schapire, R.E. (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, **190**, 231-259
- Philips, S.J., Dudik, M., & Schapire, R.E. (2004) A maximum approach to species distribution modeling. In *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, pp.472-486. ACM press, New York.
- Quantum GIS development team (2009) *Quantum GIS geographic information system* In. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Ripley, B. (2009) **Tree**. In, p. Classification and regression trees
- Root, T.L., Price, J.T., Hall, K.R., Schneider, S.H., Rosenzweig, C. & Pounds, J.A. (2003) Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, **421**, 57-60
- Rupp, T.S., Starfield, A.M. & Chapin, F.S. (2000) A frame-based spatially explicit model of subarctic vegetation response to climatic change: Comparison with a point model. *Landscape Ecology*, **15**, 383-400
- Sakai, A. (1975) Freezing resistance of evergreen and deciduous broad-leaf trees in Japan with special reference to their distributions. *Japanese Journal of Ecology*, **25**, 101-111 (In Japanese with English synopsis)
- Sankey, T.T., Montagne, C., Graumlich, L., Lawrence, R. & Nielsen, J. (2006) Twentieth century forest-grassland ecotone shift in Montana under differing livestock grazing pressure. *Forest Ecology and Management*, **234**, 282-292
- Schrag, A.M., Bunn, A.G. & Graumlich, L.J. (2008) Influence of bioclimatic variables on tree-line conifer distribution in the greater Yellowstone ecosystem: Implications for species of conservation concern. *Journal of Biogeography*, **35**, 698-710
- Sing, T., Sander, O., Beerenwinkel, N. & Lengauer, T. (2009) **ROCR**. In, p. Visualizing

the performance of scoring classifiers

Swets, J. (1988) Measuring the accuracy of diagnostic system. *Science*, **240**, 1285-1293

Thuiller, W., Lavorel, S. & Araujo, M.B. (2005) Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, **14**, 347-357

Verbyla, D.L. (1987) Classification trees - a new discrimination tool. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, **17**, 1150-1152

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**, 389-395

Wang, C.K. (1962) Some environmental conditions and responses of vegetation on Taiwan. *Biological Bulletin of Tunghai University*, 11: 1-19.

Wildi, O. (2010) *Data analysis in vegetation ecology*. John Wiley & Sons, New York.

Woodward, F.I. (1987) *Climate and plant distribution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Yagihashi, T., Matsui, T., Nakaya, T., Tanaka, N. & Taoda, H. (2007) Climatic determinants of the northern range limit of *Fagus Crenata* forests in Japan. *Plant Species Biology*, **22**, 217-225

Yen, S. M. (2007) *Modeling species distributions of three coniferous forest types in Taiwan*. The Master Thesis of Department of Geography, National Taiwan University, Taipei.

Yu, F.C., Chen, T.C., Lin, M.L., Chen, C.Y. & Yu, W.H. (2006) Landslides and rainfall characteristics analysis in Taipei City during the typhoon Nari event. *Natural Hazards Observer*, **37**, 153-167