

氣候變遷對高山受威脅植物川上氏忍冬地理分佈的潛在影響

Potential effects of climate change on the geographic distribution of the threatened alpine plant *Lonicera kawakamii*

呂明倫 黃靜宜*

Ming-Lun Lu and Jing-Yi Huang*

行政院農業委員會特有生物研究保育中心 55244 南投縣集集鎮民生東路 1 號

Endemic Species Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

* 通訊作者：lily@tesri.gov.tw

*Corresponding author: lily@tesri.gov.tw

摘要

氣候變遷對高山的受威脅植物物種構成嚴重危機，川上氏忍冬 (*Lonicera kawakamii*) 為分佈在臺灣高山 (海拔 3,000-3,900 m) 的特有種植物，根據最新的“臺灣維管束植物紅皮書名錄”，其被列為易危物種。本研究使用近年發展出的小模型集成法，預測川上氏忍冬的潛在分佈，以政府間氣候變化專門委員會第 6 次評估報告中的共享社會經濟途徑 (shared socio-economic pathway, SSP) 做為未來氣候變遷情境 (2085 年代)，預測適宜棲地之時空動態。研究結果顯示，氣候為影響川上氏忍冬分佈的主要因子，並且其適宜的氣候棲位包含低溫、日較差大和適度的降水量。根據輕度 (SSP126) 與重度 (SSP585) 暖化情境下的預測結果顯示，臺

灣的高山地區因氣候變暖，川上氏忍冬的適宜棲地大幅縮小，因此，該物種可能存在滅絕風險。本研究結果有助於鑑定未來適宜棲地的轉移，並提供因應氣候變遷的保育方針。

Abstract

Climate change leads to significant impacts on threatened plant species in mountainous regions. *Lonicera kawakamii* (*L. kawakamii*) is an endemic plant distributed across middle- to high-altitudes (3,000-3,900 m) in the mountainous Taiwan. This species has been currently listed as vulnerable in “The Red List of Vascular Plants of Taiwan.” In this study, a recently-developed ensemble of small models was used to predict the potential distribution of *L. kawakamii*. In order to project the spatiotemporal dynamics of suitable habitats, the shared socio-economic pathways (SSPs) from the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change was considered as various future climate change scenarios (in 2085). The results show that the geographic distribution of *L. kawakamii* was mainly affected by climatic factors, including low temperature, large diurnal range, and moderate precipitation. According to our predictions under mild (SSP126) and severe (SSP585) warming scenarios, the range of suitable habitat of *L. kawakamii* shrank significantly due to climate warming in the alpine regions of Taiwan. Therefore, the species may be at risk of extinction. These outcomes help to identify future shifts of suitable habitats and could provide reference for conservation strategies in response to climate change.

關鍵詞：特有種、易危、小模型集成、共享社會經濟途徑、滅絕風險

Keywords: endemic species, vulnerable, ensembles of small model, shared socio-economic pathway, extinction risk

緒 言

氣候變遷已被認為是本世紀無可避免的全球化現象，也可能是地球生物多樣性必須面對的最大威脅 (Warren *et al.* 2013, Urban *et al.* 2015)。氣候條件的改變與頻繁的人為活動，正驅動生態系中許多物種的地理分佈重新配置 (Pecl *et al.* 2017)，據 Román-Palacios and Wiens (2020) 的分析，未來 50 年內全球大約有 1/3 的物種，都可能籠罩在滅絕的危機中。尤其長年生活在低溫環境的高山植物，若全球溫度持續暖化，恐對物種帶來巨大威脅 (Thuiller *et al.* 2005, Chou *et al.* 2011, Pauli *et al.* 2012)，因此，有必要瞭解這些高山受威脅植物的地理分佈轉移，以識別其風險區及避難所的時空變化 (Baumgartner *et al.* 2018, Graham *et al.* 2019)。

為因應氣候變遷可能帶來的物種滅絕危機，預測受威脅種可能的潛在分佈，被視為是執行保育策略的首要任務 (Thomas 2010)。物種分佈模擬 (species distribution modeling, SDM) 可依據受威脅種存在位置與

環境因子間的關聯性，預測潛在分佈範圍，配合氣候變遷情境更有助於瞭解動態發展，並制定適當的保育計畫 (Dhyani *et al.* 2021, Hoveka *et al.* 2022, Ceccarelli *et al.* 2022)。由於許多受威脅種通常也是族群數量相對稀少的物種，因此，SDM 的過程中，稀有種常因樣本數不足，使模型建構過程受到阻礙，另一方面，少量的樣本若配合多數的預測變項，可能導致模型過度擬合，從而影響預測的準確度 (Vaughan and Ormerod 2005)。為因應這些問題，近年研發出的小模型集成法 (ensemble of small models, ESM)，便是專為改善稀有物種分佈預測的新穎方法，其策略是將預測變項拆分成各種可能的雙變項配對組合，藉由這些小子集來構建以雙變項為主體的大量小模型，當有 n 個變項時，利用公式 $n(n-1)/2$ ，便可得知可生成的小模型數，每一模型經過測試後，再根據準確度進行加權平均，產生最終的集成預測結果。ESM 不僅能有效排除過度擬合問題，與標準的 SDM 方式相比，物種的樣本數量愈少，愈能突顯

準確度改善的程度 (Lomba *et al.* 2010, Breiner *et al.* 2015)。

忍冬屬 (*Lonicera*) 為忍冬科 (Caprifoliaceae) 下的一個屬，大概分佈於北半球溫帶與亞熱帶地區。目前為止，鑑定為臺灣原生的忍冬屬植物計有 7 種，其中，川上氏忍冬 (*Lonicera kawakamii*) 為落葉性的直立灌木，是分佈在臺灣高山 (海拔 3,000-3,900 m) 的特有種植物，目前野生的族群量不多，根據臺灣區域尺度的保育評估系統，將其列為受威脅種類中的“易危級 (Vulnerable)” (臺灣植物紅皮書編輯委員會 2017)。

臺灣是位處東亞太平洋上的亞熱帶島嶼，受氣候變遷影響甚鉅，根據 1911~2009 年統計，氣溫增溫約 1.4°C，遠高於全球平均值，足見臺灣的氣候暖化趨勢已相當明顯 (Shiu *et al.* 2009, 盧等 2012)。有鑑於此，原本就處於受威脅狀態的川上氏忍冬，正面臨嚴格的考驗，本研究即鎖定該物種為目標種，應用 ESM 建構預測模型，並從中瞭解影響物種潛在分佈的主要因子，進一步搭配政府間氣候變

化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 最新的第 6 次評估報告中，所提出之氣候變遷情境，預測適宜棲地範圍的動態發展，研究成果可提供生態保育與經營管理之參考。

材料與方法

一、研究區概述

臺灣本島位於亞洲東部、太平洋西北側，西側緊鄰臺灣海峽，土地面積約 36,000 km²。地形陡峭，多為山地與丘陵，平原及都市用地主要集中於西部沿海，形成東高西低的地勢，主要山脈有中央、玉山、阿里山、雪山及海岸等 5 大山脈，其中，玉山主峰為最高峰，標高 3,952 m；河川多發源於中央山脈，水系密布，大多分佈於西半部，流域長度最長的為濁水溪，面積最廣的為高屏溪；據中央氣象局資料顯示，年均溫約 21°C，年雨量約 2,500 mm，冬季有來自西伯利亞的大陸冷高壓，以東北季風為主，夏季則有來自太平洋的海洋高壓，以西南季風為主；據林務局第 4 次森林資源調

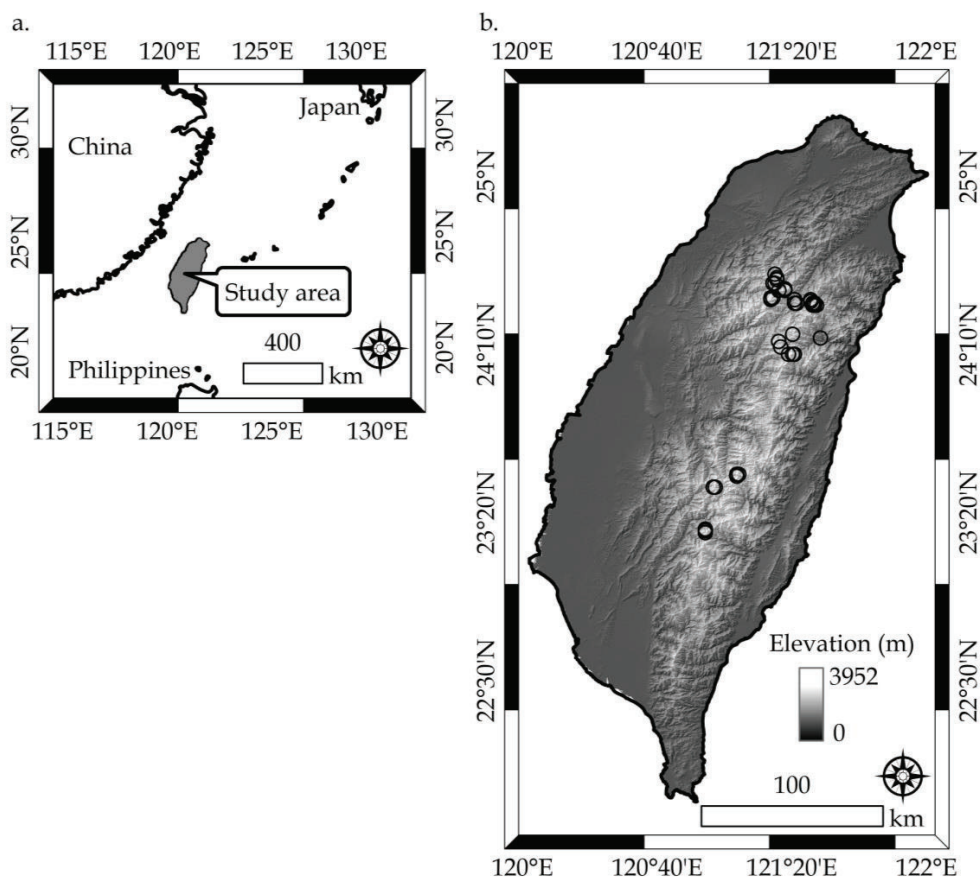


圖 1. (a) 研究區地理位置圖；(b) 物種出現點位 (黑色標記；n=36) 及數值高程模型 (digital elevation model)。

Fig. 1. (a) Geographical location of the study area; (b) Species occurrence records (black circle; n=36) and digital elevation model.

查報告，土地覆蓋型態以森林為主，占全島近 61% (圖 1)。

二、研究方法

(一) 物種存在資料

物種調查資料是來自生態調查資料庫系統 (ecollect.forest.gov.tw)，該

批資料集是由林務局委託各大學院校和研究機構的專家及學者共同執行，屬全國性的官方自然資源普查計畫成果，本研究抽取忍冬屬物種的存在紀錄，座標格式為經緯度，僅使用 1981-2015 年期間的資料，以盡可能與環境資料的時間間隔匹配。考量到地理座

標的精確度，先刪除小數點不足 3 位的資料，進一步在 R 3.6.3 平台上，以軟件包 ”spThin” 進行空間過濾 (Aiello-Lammens *et al.* 2015)，減少空間自相關及地理取樣偏差的影響，為符合預測變項之空間解析力，設定各發生紀錄間的鄰近距離至少在半徑 1 km，經處理後剩下 36 筆的川上氏忍冬存在紀錄 (圖 1b)，另有 526 筆的非川上氏忍冬紀錄。

(二) 環境資料與變遷情境

氣候會影響生物的生理耐受性，土地利用與覆蓋 (land-use/land-cover, LULC) 則攸關其覓食、棲息或繁殖等行為，此外，由於地形對於高山植物的影響較不明顯 (黃 2019, Lu and Huang 2021)，因此，建模所使用之預測變項僅包含氣候和 LULC 兩類。現時的氣候資料是從 CHELSA V2.1 資料庫取得，涵蓋 1981-2010 年的全球氣象資料，本研究從中獲取 19 個 (BIO1-BIO19) 近 1×1 km 空間解析力之生物氣候變項 (Karger *et al.* 2017)，其源自每月的溫度 (°C) 和降水量 (mm)，

包括年度趨勢、季節性變化及極端氣象特徵 (worldclim.org/data/bioclim.html)；LULC 方面是取自 Chen *et al.* (2022) 基於 Land-Use Harmonization 2 (Hurtt *et al.* 2020) 及 ESA-CCI 資料集 (www.esa-landcover-cci.org) 所建構的 2015 年全球 LULC 圖，包含森林、草地、農地、都市、荒地與水體等 6 種類別 (1×1 km 空間解析力)。由於植物在棲地間的傳播大多由動物所引導，常見的傳播距離約 1-10 km (Corlett 2009, Crossman *et al.* 2012)，考量到影響植物傳播的潛在範圍，本研究設定半徑 5 km 的移動窗，計算各 LULC 類別在移動窗內的覆蓋占比。總計共有 25 個預測變項，並將解析力重取樣為 1×1 km，為克服變項在統計上的多重共線性問題，以 R 軟件包 “virtual-species” 執行 Pearson 相關分析 (Leroy *et al.* 2016)，排除相關性高的變項，當相關係數大於 0.7 以上時擇一保留 (Dormann *et al.* 2013)。

對於未來的預測，本研究假設所有預測變項會隨 2021 年 IPCC 第 6 次

評估報告所發布的共享社會經濟途徑 (shared socio-economic pathway, SSP) 發生改變。本研究採用 SSP126 和 SSP585 兩種碳排放情境，也分別代表輕度和重度暖化情境，氣候類變項自前述 CHELSA V2.1 獲取 2085 年代 (2071~2100 年的平均值) 兩種情境的生物氣候資料，包含 GFDL-ESM4、IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-HR、MRI-ESM2-0 與 UKESM1-0-LL 等 5 種之大氣環流模型 (general circulation model, GCM)；另從 Chen *et al.* (2022) 取得相同年代的未來 LULC 變項，SSP126 與 SSP585 情境分別根據 IMAGE 和 REMIND-MAGPIE 兩種預測 LULC 變遷的綜合評估模型 (integrated assessment model, IAM) 所產製。本研究使用 5 種 GCM 各別搭配兩種 IAM 為川上氏忍冬建模，並取其結果之平均數做為最終棲地適宜性，這種方式可排除模型間的不確定性 (Araújo and New 2007)。

(三) 小模型集成

ESM 是透過 R 軟件包 “ecospat” (Di

Cola *et al.* 2017) 與 “biomod2” (Thuiller *et al.* 2009) 共同執行，用來預測川上氏忍冬的適宜棲地。使用的演算法包括常見的彈性判別分析 (flexible discriminant analysis)、廣義相加模型 (generalized additive model, GAM)、廣義線性模型 (generalized linear model, GLM)、多變量適應迴歸 (multivariate adaptive regression splines, MARS) 和等 4 種統計迴歸模型；類神經網絡 (artificial neural networks, ANN)、增強迴歸樹 (boosted regression tree, BRT)、分類樹分析 (classification tree analysis, CTA)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 與隨機森林 (random forest, RF) 等 5 種機器學習演算法，由於所有演算法都需要背景點位 (或偽缺失點)，本研究將非川上氏忍冬的存在紀錄指定為背景點位，這是一種客觀的方法，可避免誤將未調查區視為非適合目標種棲息的點位 (Marshall *et al.* 2018, Williams *et al.* 2020)。模型性能使用 bootstrap 取樣法來評估，先隨機選取 70% 川上氏忍冬的存在紀錄做為訓練資料集，剩餘 30% 則做為測試資

料集，本研究使用 8 個預測變量，故在 ESF 的架構下，每一種演算法皆可產生 28 個小模型，進行 10 次的重複運算。

準確度評估依接受者操作特徵 (receiver operating characteristic) 所產生之曲線面積 (area under the curve, AUC)、真實技能統計值 (true skill statistics, TSS) 及 Boyce 指數 (Boyce index, BI, Boyce *et al.* 2002, Hirzel *et al.*, 2006) 評估模型的性能。其中 AUC 值域介於 0.5~1，當值愈高代表模式推估出來的準確性愈佳，TSS 則落於 +1 至 -1，接近 1 表示模型幾乎完美，反之亦然 (Allouche *et al.* 2006)，當 AUC 與 TSS 分別高於 0.8 及 0.6 以上即達良好標準，若達 0.9 及 0.8 以上即達優越標準 (González-Ferreras *et al.* 2016)，BI 介於 -1 到 1 之間，正值表示預測模型與存在紀錄的分佈一致，接近零表示預測模型與隨機模型差距不大，負值表示預測結果不佳，即無物種出現的區域含有存在紀錄 (Hirzel *et al.* 2006)。所有小模型利用 Somers'D 進行加權，

公式為 $2 \times (AUC - 0.5)$ ，表現良好的模型將被賦予更高的權重，Somers' D 低於 0 ($AUC < 0.5$) 的小模型則被排除 (Breiner *et al.* 2015)，最終，計算加權平均數後即可獲得介於 0-1000 的棲地適宜性圖。接著，參考最大 TSS 對應的適宜性做為閾值 (Liu *et al.* 2016)，並轉換為二位元 (binary) 的適宜 (1) 和非適宜 (0) 棲地圖，可用於觀察現時與未來之適宜棲地範圍變化。各預測變項對模型的重要性是透過 R 軟件包 *ecospat* 中的 “*ecospat.ESM.VarContrib*” 函數來衡量，其是將任一含有目標變項的模型，從所建構的 ESF 中抽離，計算抽離前後權重 (Somers'D) 加總的比值，當值大於 1 表示目標變項的貢獻度高於平均值。另反應曲線 (response curves) 則是觀察物種的適宜性與變項間之關係 (Elith *et al.* 2005)。

結 果

經相關分析後篩選出 8 個變項進行建模，模型性能的測試結果如 Table 1，所有演算法的 AUC 和 TSS 都達良好標準，其中 BRT、GAM 與 RF 更

表 1. 類神經網絡 (artificial neural networks, ANN)、增強迴歸樹 (boosted regression tree, BRT)、分類樹分析 (classification tree analysis, CTA)、彈性判別分析 (flexible discriminant analysis)、廣義相加模型 (generalized additive model, GAM)、廣義線性模型 (generalized linear model, GLM)、多變量適應迴歸 (multivariate adaptive regression splines, MARS)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 與隨機森林 (random forest, RF) 所獲得之接受者操作特徵曲線面積 (receiver operating characteristic, AUC)、真實技能統計值 (true skill statistic, TSS) 及 Boyce 指數 (Boyce index, BI)

Table 1. The area under the curve for the receiver operating characteristic (AUC), true skill statistic (TSS), and Boyce index (BI) generated by the artificial neural networks (ANN), boosted regression tree (BRT), classification tree analysis (CTA), flexible discriminant analysis (FDA), generalized additive model (GAM), generalized linear model (GLM), multivariate adaptive regression splines (MARS), maximum entropy (MaxEnt), and random forest (RF).

Algorithm	AUC	TSS	BI
ANN	0.93	0.76	0.95
BRT	0.96	0.85	0.98
CTA	0.93	0.78	0.93
FDA	0.87	0.66	0.92
GAM	0.95	0.82	0.96
GLM	0.89	0.67	0.94
MARS	0.89	0.65	0.93
MaxEnt	0.90	0.70	0.97
RF	0.98	0.94	0.81

表 2. 各預測變項對於集成模型之貢獻度

Table 2. Contribution of each predictive variable to the ensemble model.

Variable	Contribution
Min temperature of coldest month (BIO6)	2.09
Mean diurnal range (BIO2)	1.45
Precipitation of coldest quarter (BIO19)	1.11
Precipitation of wettest quarter (BIO16)	0.89
Urban	0.85
Water	0.80
Grass	0.69
Barren	0.60

達優越標準，就 BI 的表現來看，以 BRT 最佳，GAM 也屬相對較佳，RF 則為所有演算法之末。經由 ESM 處理後，僅保留性能相對佳的模型進行加權平均，獲取川上氏忍冬的棲地適宜性。

由 ESM 生成的模型評估各變項的貢獻度，結果如 Table 2 所示，貢獻度高於 1 的計有 3 個氣候類變項，由高至低依序為最冷月最低溫 (2.09)、平均日較差範圍 (1.45) 與最冷季降水 (1.11)，其餘低於 1 的變項大多為 LULC 類，對模型的影響力相對較小。進一步觀察由 ESM 推導出的棲地適宜性與主要貢獻變項間的反應曲線 (圖 2)，本研究發現，當最冷月最低溫增加，川上氏忍冬的適宜性隨之降低 (圖 2a)；平均日較差範圍約在 6°C 以上，適宜性明顯上升 (圖 2b)；當最冷季降水介於 300-500 mm 時，適宜性維持高峰，但雨量低於 300mm 或高於 500mm，適宜性皆快速下降 (圖 2c)。

空間分佈的預測結果顯示，川上氏忍冬的適宜棲地主要位於高海拔山

區，面積估算約 1192 km²，占臺灣本島面積約 3%(圖 3)。以現時的適宜棲地做為基礎，分別與 2085 年輕度 (SSP126) 與重度 (SSP585) 暖化情境的預測結果套疊，預計可能減少的面積各為 677 km² 和 871 km²，反觀，可維持適宜棲地的面積各僅 544 km² 及 350 km²，另兩種情境可新增的適宜棲地則微乎其微。由此顯示，無論何種情境，未來氣候暖化將不利於川上氏忍冬，且隨暖化情勢的加劇，適宜棲地縮減的情況愈明顯。

討 論

SDM 為預測氣候變遷對受威脅種潛在分佈影響和保育規劃的有效工具，但前提是必須建立在高準確的模型基礎上 (Hernandez *et al.* 2006, Liu *et al.* 2011)。本研究建構過程採用 9 種演算法，由性能的表現來看，無論是機器學習或統計迴歸的演算法，各評估指標都呈現良好 (Table 1)，由此顯示，縱然演算法的原理有差異，但建構出的模型性能一致性高，應是穩定且無過度擬合的問題。為維持模型的穩定

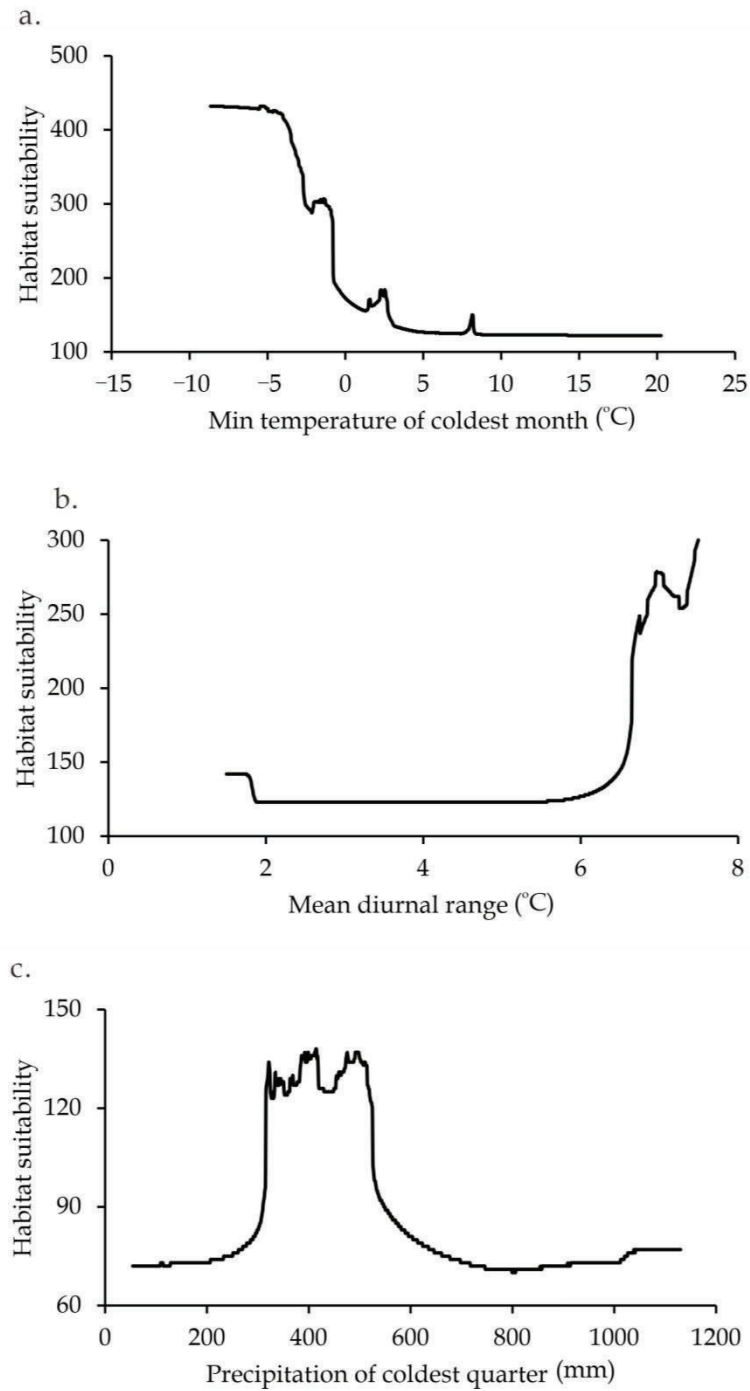


圖 2. 依據集成預測結果顯示主要貢獻變項之反應曲線；a、b 和 c 分別代表最冷月最低溫、平均日較差範圍與最冷季降水。

Fig. 2. Response curves of the primary contribution variables according to the ensemble prediction (a, b, and c represent the min temperature of coldest month, mean diurnal range, and precipitation of coldest quarter, respectively).

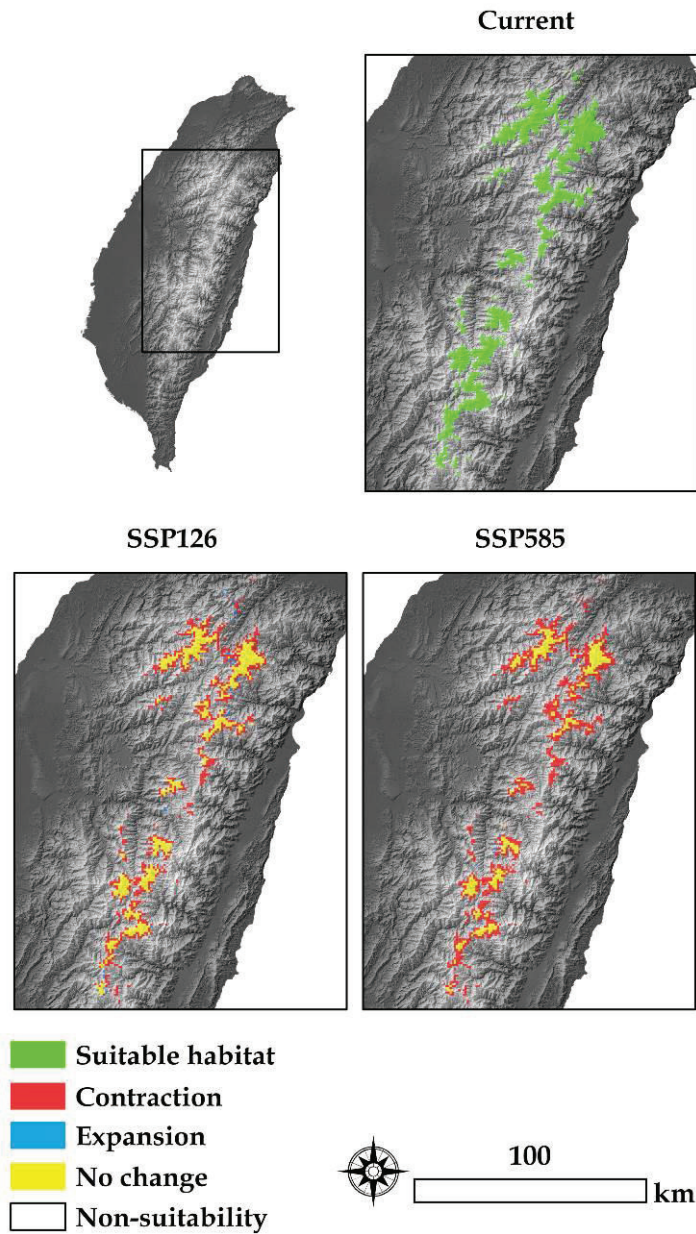


圖 3. 川上氏忍冬的適宜棲地預測。右上圖為現時分佈，下圖為 2085 年代兩個不同的氣候變遷情境輕度 (SSP126) 及重度 (SSP585) 碳排放預測分布結果。

Fig. 3. Prediction of the current suitable habitat for *Lonicera kawakamii*. The upper right panel shows the current distribution, and the bottom-left and bottom-right panels stand for SSP126 and SSP585 emission scenarios, respectively, in 2085.

性，僅保留高性能的模型進行ESM，可提升後續動態預測的說服力，因此，本研究因應氣候變遷所建置的物種潛在分佈資訊，對於往後的保育計劃上提供了有效的科學依據。

預測變項對模型的影響力而言，氣候類明顯大於LULC類，因此，本研究以ESM構建的預測模型主要是由氣候因子所驅動，貢獻最大者為最冷月最低溫、平均日較差範圍與最冷季降水等3個變項(Table 2)，是決定川上氏忍冬在空間上存在與否的關鍵。詳細的棲位特徵顯示(圖2)，該物種偏好0°C以下的低溫及日較差明顯的寒冷環境，這也反映出其潛在分佈受限的原因，相反地，高溫環境非其適宜棲位，故暖化持續可能會造成巨大的衝擊。除了溫度外，高山地區的降水也是一個重要因子，不僅會關係著植物的生長，還會影響遺傳變異(Chaves *et al.* 2003, Manel *et al.* 2012)，本研究發現，冬季適度的降水有利於川上氏忍冬，大約300-500 mm範圍間最佳，超過該範圍反而會帶來

負面影響。有關LULC類變項的貢獻相對低，應是臺灣的高海拔以天然林為主，自然就無法反映其他土地利用類型對模型模擬的效應，過往也有相似的研究結果可尋(Eskildsen *et al.* 2013, Chitungo *et al.* 2022)。

由於植物生理和物候特徵上的差異，地理分佈狹窄的高山物種受到的潛在威脅會比廣泛種更大(Thuiller *et al.* 2005, Pauli *et al.* 2012)。誠如前段所述，川上氏忍冬的適宜棲地屬條件較嚴苛的環境，根據模型所預測的分佈結果發現，該物種的適宜棲地面積不大，並分佈在臺灣海拔最高的山區，如雪山、南湖大山及玉山等，比對過去的植群調查報告，所預測的分佈與實地現況大體一致(呂及林 1990；歐等 2003；王等 2010)。然而，未來全球暖化恐導致高山生態系的溫度異常，有關臺灣氣候變遷的預測，大體是往暖化加劇的走向發展，與川上氏忍冬偏好低溫、日較差大和特定範圍的降水量等氣候棲位大相逕庭，如暖化的特徵會反映在空間格局，高山升

溫的幅度會比平原地區明顯 (Lin *et al.* 2015)；不僅如此，大部分地區的夜間溫度變暖，導致日較差減弱 (Tsai *et al.* 2022)；此外，乾濕季節的比例發生明顯變化，發生旱澇災害的風險增加，故降水的變異趨於極端 (Huang *et al.* 2012)。種種氣候變遷的跡象看來，臺灣未來的氣候型態將愈來愈不利川上氏忍冬，正如本研究的預測模型所示，SSP126 和 SSP585 兩種情境的預測結果，物種適宜棲地的面積都會大幅縮小 (圖 3)，殘存下來的零散棲地，則成了為數不多的避難所，故存在滅絕的風險。

生物多樣性面臨的最大威脅為棲地喪失，因此，保育行動最關鍵與最直接的方式便是保護棲地 (Pardini *et al.* 2017)。在本研究的研究結果基礎下，川上氏忍冬的保育策略可朝以下面向進行，第一，目前既有的就地保育系統，包括雪霸、太魯閣、玉山國家公園和丹大野生動物重要棲息環境等，皆是主要適宜棲地，可加強這些地區的氣候監測，必要時可根據物

種適宜的氣候棲位輔助其引入到避難所。另一建議是加強遺傳面的試驗計畫，相關部門可配合宣揚忍冬屬植物的種質資源價值，以提升民眾的保育意識。

謝 誌

本研究承行政院農業委員會科技計畫「111 農科 -7.2.2- 生 -W2」之經費補助，特此致謝。

引用文獻

- 王偉、邱清安、蔡尚、許俊凱、曾喜育、呂金誠。2010。雪山主峰沿線植物社會調查研究。林業研究季刊 32: 15-33。
- 呂勝由、林則桐。1990。南湖大山植群生態之研究。林業試驗所研究報告季刊 5: 121-133。
- 黃靜宜。2019。應用物種分布模式評估氣候變遷對臺灣受威脅植物之影響。台灣生物多樣性研究 21: 131-147。
- 臺灣植物紅皮書編輯委員會。2017。2017 臺灣維管束植物紅皮書名

- 錄。行政院農業委員會特有生物研究保育中心、行政院農業委員會林務局、臺灣植物分類學會。南投。
- 歐辰雄、呂金誠、林鴻志。2003。大雪山地區植群生態之調查研究。國家公園學報 13: 33-61。
- 盧孟明、卓盈旻、李思瑩、李清騰、林昀靜。2012。臺灣氣候變化：1911~2009年資料分析。大氣科學 40: 297-321。
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., and Anderson, R. P. 2015. spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* 38: 541-545.
- Allouche, O., Tsoar, A., and Kadmon, R. 2006. Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology* 43: 1223-1232.
- Araújo, M. B. and New, M. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in ecology and evolution* 22: 42-47.
- Baumgartner, J. B., Esperón-Rodríguez, M., and Beaumont, L. J. 2018. Identifying in situ climate refugia for plant species. *Ecography* 41: 1850-1863.
- Boyce, M. S., Vernier, P. R., Nielsen, S. E., and Schmiegelow, F. K. 2002. Evaluating resource selection functions. *Ecological modelling* 157: 281-300.
- Breiner, F. T., Guisan, A., Bergamini, A., and Nobis, M. P. 2015. Overcoming limitations of modelling rare species by using ensembles of small models. *Methods in Ecology and Evolution* 6: 1210-1218.
- Ceccarelli, V., Ekué, M., Fremout, T., Gaisberger, H., Kettle, C. *et al.* 2022. Vulnerability mapping of 100 priority tree species in Central Africa to guide conservation and

- restoration efforts. *Biological Conservation* 270: 109554.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., and Pereira, J. S. 2003. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional plant biology* 30: 239-264.
- Chen, G., Li, X., and Liu, X. 2022. Global land projection based on plant functional types with a 1-km resolution under socio-climatic scenarios. *Scientific data* 9: 1-18.
- Chen, S. T., Kuo, C. C., and Yu, P. S. 2009. Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological sciences journal* 54: 430-441.
- Chitungo, B., Manyangadze, T., and Ndlela, S. 2022. Potential effects of changes in climate, population density and land use land cover on spatial distribution of *Adansonia digitata* suitable habitats in Africa. *African Journal of Ecology* 60: 691-701.
- Chou, C. H., Huang, T. J., Lee, Y. P., Chen, C. Y. *et al.* 2011. Diversity of the alpine vegetation in central Taiwan is affected by climate change based on a century of floristic inventories. *Botanical Studies* 52: 503-516.
- Corlett, R. T. 2009. Seed dispersal distances and plant migration potential in tropical East Asia. *Biotropica* 41: 592-598.
- Crossman, N. D., Bryan, B. A., and Summers, D. M. 2012. Identifying priority areas for reducing species vulnerability to climate change. *Diversity and Distributions* 18: 60-72.
- Dhyani, A., Kadaverugu, R., Nautiyal, B. P., and Nautiyal, M. C. 2021. Predicting the potential distribution of a critically endangered medicinal plant *Lilium polyphyllum* in Indian Western Himalayan Region. *Regional Environmental Change* 21: 1-11.
- Di Cola, V., Broennimann, O., Petit-

- pierre, B., Breiner, F. T., d'Amen, M. *et al.* 2017. ecospat: an R package to support spatial analyses and modeling of species niches and distributions. *Ecography* 40: 774-787.
- Elith, J., Ferrier, S., Huettmann, F., and Leathwick, J. 2005. The evaluation strip: a new and robust method for plotting predicted responses from species distribution models. *Ecological modelling* 186: 280-289.
- Eskildsen, A., le Roux, P. C., Heikkinen, R. K., Høye, T. T., Kissling, W. D. *et al.* 2013. Testing species distribution models across space and time: high latitude butterflies and recent warming. *Global Ecology and Biogeography* 22: 1293-1303.
- Ghisbain, G., Michez, D., Marshall, L., Rasmont, P., and Dellicour, S. 2020. Wildlife conservation strategies should incorporate both taxon identity and geographical context-further evidence with bumblebees. *Diversity and Distributions* 26: 1741-1751.
- González-Ferreras, A. M., Barquín, J., and Peñas, F. J. 2016. Integration of habitat models to predict fish distributions in several watersheds of Northern Spain. *Journal of Applied Ichthyology* 32: 204-216.
- Graham, V., Baumgartner, J. B., Beaumont, L. J., Esperón-Rodríguez, M., and Grech, A. (2019). Prioritizing the protection of climate refugia: designing a climate-ready protected area network. *Journal of Environmental Planning and Management* 62: 2588-2606.
- Hernandez, P. A., Graham, C. H., Master, L. L., and Albert, D. L. 2006. The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods. *Ecography* 29: 773-785.
- Hoveka, L. N., van der Bank, M., and Davies, T. J. 2022. Winners and losers

- ers in a changing climate: how will protected areas conserve red list species under climate change? *Diversity and Distributions* 28: 782-792.
- Hsu, H. H. and Chen, C. T. 2002. Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorology and Atmospheric Physics* 79: 87-104.
- Huang, W. C., Chiang, Y., Wu, R. Y., Lee, J. L., and Lin, S. H. 2012. The Impact of Climate Change on Rainfall Frequency in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 23: 553-564.
- Hurt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frolking, S., Bodirsky, B. L. *et al.* 2020. Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* 13: 5425-5464.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H. *et al.* 2017. Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data* 4: 170122.
- Lin, C. Y., Chua, Y. J., Sheng, Y. F., Hsu, H. H., Cheng, C. T. *et al.* 2015. Altitudinal and latitudinal dependence of future warming in Taiwan simulated by WRF nested with ECHAM5/MPIOM. *International Journal of Climatology* 35: 1800-1809.
- Liu, C., Newell, G., and White, M. 2016. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and evolution* 6: 337-348.
- Liu, C., White, M., and Newell, G. 2011. Measuring and comparing the accuracy of species distribution models with presence–absence data. *Ecography* 34: 232-243.
- Lomba, A., Pellissier, L., Randin, C., Vicente, J., Moreira, F. *et al.* 2010. Overcoming the rare species modelling paradox: A novel hierarchical framework applied to an Iberian

- endemic plant. *Biological conservation* 143: 2647-2657.
- Lu, M. L. and Huang J. Y. 2021. Modeling the effect of climate change on suitable habitats for threatened medicinal plant, *Mahonia oiwakensis* Hayata in Taiwan. *Taiwan Journal of Biodiversity* 23: 1-16.
- Manel, S., Gugerli, F., Thuiller, W., Alvarez, N., Legendre, P. *et al.* 2012. Broad-scale adaptive genetic variation in alpine plants is driven by temperature and precipitation. *Molecular ecology* 21: 3729-3738.
- Marshall, L., Biesmeijer, J. C., Rasmont, P., Vereecken, N. J., Dvorak, L. *et al.* 2018. The interplay of climate and land use change affects the distribution of EU bumblebees. *Global change biology* 24: 101-116.
- Pardini, R., Nichols, E., and Püttker, T. 2017. Biodiversity response to habitat loss and fragmentation. *Encyclopedia of the Anthropocene* 3: 229-239.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., Abdaladze, O., Akhalkatsi, M. *et al.* 2012. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science* 336: 353-355.
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C. *et al.* 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355: eaai9214.
- Román-Palacios, C. and Wiens, J. J. 2020. Recent responses to climate change reveal the drivers of species extinction and survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117: 4211-4217.
- Shiu, C. J., Liu, S. C., and Chen, J. P. 2009. Diurnally asymmetric trends of temperature, humidity, and precipitation in Taiwan. *Journal of climate* 22: 5635-5649.
- Sohl, T. L. 2014. The relative impacts of climate and land-use change on

- conterminous United States bird species from 2001 to 2075. *PLoS One* 9: e112251.
- Thomas, C. D. 2010. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions* 16: 488-495.
- Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., and Araújo, M. B. 2009. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography* 32: 369-373.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., and Prentice, I. C. 2005. Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102: 8245-8250.
- Tsai, I. C., Hsieh, P. R., Cheng, C. T., Tung, Y. S., Lin, L. Y. *et al.* 2022. Impacts of 2 and 4°C global warmings on extreme temperatures in Taiwan. *International Journal of Climatology* (DOI: 10.1002/joc.7815).
- Urban, M. C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348: 571-573.
- Vaughan, I. P. and Ormerod, S. J. 2005. The continuing challenges of testing species distribution models. *Journal of applied ecology* 42: 720-730.
- Warren, R., VanDerWal, J., Price, J., Welbergen, J. A., Atkinson, I. *et al.* 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change* 3: 678-682.