

利用 MaxEnt 模型預測氣候變遷情境下短柱山茶的潛在分布

Predicting potential distribution of *Camellia brevistyla* under climate change scenarios using MaxEnt model

黃靜宜、呂明倫*

Jing-Yi Huang and Ming-Lun Lu*

農業部生物多樣性研究所 552005 南投縣集集鎮民生東路 1 號

Taiwan Biodiversity Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

* 通訊作者：alan@tbri.gov.tw

*Corresponding author: alan@tbri.gov.tw

摘要

氣候變遷正在重塑全球物種分布格局，為具經濟或生態價值的原生物種帶來嚴峻的挑戰，精準掌握其潛在分布與動態發展，可為制定調適與保育策略提供基礎資訊。本研究以臺灣原生油料樹種短柱山茶 (*Camellia brevistyla*) 為目標種，整合物種出現紀錄與氣候、土壤、地形、土地覆蓋等環境變項，利用 MaxEnt 模型預測現時與 21 世紀末 (2071-2100 年) 兩種氣候情境 (SSP126 與 SSP585) 下的適宜生育地範圍，並進一步藉由交集分析，將時空動態劃分為脆弱生育地、新增適宜生育地與氣候庇護所等 3 種類型。研究結果顯示，氣候為影響短柱山茶生育地分布的主要因子，其中季節性溫度變異愈明顯，愈適合該物種生存，相反地，平

均日較差愈大與最冷月溫度愈高則相對不適宜。從空間分布來看，現時適宜生育地多集中於北部與東北部，兩種情境的預測結果顯示，SSP126 情境下，北部區塊的部分生育地將轉為脆弱生育地，但仍可維持一定面積的氣候庇護所；而 SSP585 情境下，大多數生育地可能轉為脆弱狀態，僅存少數氣候庇護侷限於東北部區塊。綜合上述結果，本研究提出了幾點有關該物種在保育與經營管理面上的調適建議供參。

Abstract

Climate change is reshaping global species distribution patterns, posing profound challenges to native species of economic or ecological importance. Accurately characterizing their potential ranges and spatiotemporal dynamics provides essential baseline information for developing effective adaptation and conservation strategies. This study focuses on *Camellia brevistyla*, a native oil-bearing tree species in Taiwan. Species occurrence records and environmental predictors, including climate, soil, topography, and land cover, were integrated into a MaxEnt model to project suitable habitats under current conditions and two future climate scenarios (SSP126 and SSP585) for the late 21st century (2071-2100). A spatiotemporal overlay analysis was performed to classify habitat dynamics into vulnerable habitats, increased suitable habitats, and climate refugia. Results indicate that climatic variables are the primary drivers of habitat suitability. The species shows higher habitat suitability in areas with greater temperature seasonality, whereas suitability declines with increasing mean diurnal range and higher minimum temperatures of the coldest month. Spatially, suitable habitats are primarily concentrated in northern and northeastern Taiwan. Under the SSP126 scenario, while portions of northern habitats are projected to become vulnerable, substantial climate refugia are ex-

pected to persist. In contrast, under the SSP585 scenario, most suitable habitats are likely to transition into vulnerable habitats, with only limited refugia remaining in the northeastern region. Based on these findings, we propose adaptive strategies to support the conservation and sustainable management of *C. brevistyla* under future climate change.

關鍵詞：經濟樹種、共享社會經濟途徑、脆弱生育地、氣候庇護所、調適

Keywords: economic tree species, shared socio-economic pathway, vulnerable habitat, climate refugia, adaptation

收件日期：2025 年 8 月 6 日

Received: August 6, 2025

接受日期：2026 年 1 月 6 日

Accepted: January 6, 2026

緒言

氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的報告顯示，2011 至 2020 年全球地表溫度比 1850 至 1900 年高出 1.09°C，其中陸域的升溫幅度約 1.59°C，明顯超過海域的 0.88°C (IPCC 2021)。氣候變遷會使許多物種的原生棲地或生育地環境發生變化，影響現有的生物多樣性分布與組成，甚至導致一些脆弱物種的滅絕 (Urban *et al.*

2015; Pecl *et al.* 2017)，除受脅物種外，另有學者更專注於具備生態系服務價值 (ecosystem services) 的重要物種，這些物種群族的衰退，將對人類的日常生活造成更直接的影響 (Mooney *et al.* 2009; Warren *et al.* 2013; Soroye *et al.* 2020)。

山茶科 (Theaceae) 的山茶屬 (*Camellia*) 為常綠灌木或小喬木，在全球有 200 餘種，主要分布於東亞地區，本屬植物的種子可透過物理壓榨或化

學浸出獲取油脂，俗稱苦茶油，也被譽為「東方橄欖油」，由於富含對人體健康有益的單元不飽和脂肪酸，故是具有經濟潛力的食用油作物 (Su *et al.* 2014)。不僅如此，茶籽榨油後產生的副產品苦茶粕，亦含茶皂素、多醣體等功能性成分，除可作為農工業中的乳化劑、天然清潔劑、殺蟲劑和殺菌劑等使用外 (Zhao *et al.* 2011)，也具備抗腫瘤、抗氧化、延緩老化和降低心血管疾病等保健潛力 (Chen *et al.* 2009; Jin and Ning 2012; Wei *et al.* 2014; Chiang *et al.* 2019)，利用層面廣泛。基於氣候變遷對生物多樣性的影響，近代世界各地的研究發現，茶樹屬的物種也面臨了威脅，並可能導致相關產品的質與量雙雙受損 (Ahmed *et al.* 2018; Jayasinghe and Kumar 2021)。

為因應氣候變遷所帶來的衝擊，預測物種的潛在分布被視為是擬定調適策略的首要任務 (Thomas 2010)。隨著統計方法和地理資訊科學的快速發展，物種分布模型 (species distribution models, SDM) 已被廣泛應用於預測物種的分布格局，並評估氣候變遷對物

種分布的影響 (Newbold 2018)。透過 SDM 預測生育地適宜性，不僅有助於劃定脆弱物種保育和經營管理的關鍵區位，並可針對物種的生態生理或習性行為提出具體的調適方案。在各種 SDM 中，最大熵模型 (Maximum Entropy, MaxEnt) 是基於資訊熵理論所發展的一種機器學習演算法，具有預測性能好、運算效率佳與模擬精度高等優點 (Phillips *et al.* 2006)，過去也曾受學者青睞，用以預測肯亞、斯里蘭卡、中國和土耳其等地山茶屬物種受氣候變遷的影響，同時提出有些物種確實存在生育地限縮的潛在風險 (Jayasinghe and Kumar 2021; İzmirli and Gül 2023)。

臺灣的原生山茶屬植物約有 12 種，其中短柱山茶 (*C. brevistyla*) 為常綠小喬木，主要分布於中低海拔山區 (蘇 2015)，目前也有做經濟栽培，一般樹齡需達 4 年才有種子收穫，種植 6 年以上才開始有較佳的產量，栽培至 10 年後可達穩定的產量，主要栽培於苗栗以北，俗稱小果油茶，屬高經濟價值的樹種，此外，其植株根系深

且廣，具有保水作用，故近年的調整耕作制度活化農地計畫和檳榔廢園轉作計畫，均將油茶列為獎勵栽植樹種(林等 2019)。

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，根據百年以上的資料(1911-2009年)顯示，臺灣增溫約 1.4°C，遠高於全球平均值，足見氣候暖化趨勢已相當明顯(盧等 2012)。有鑑於此，瞭解氣候變遷對短柱山茶適宜生育地的影響至關重要，然而，目前國內外均尚未有相關的研究報告，本研究即鎖定該物種為目標種，應用 SDM 探究影響物種空間潛在分布的主要因子，進一步搭配 IPCC 最新的第 6 次評估報告所提之氣候情境，預測適宜生育地範圍的動態發展，研究成果可提供未來經營管理或研擬調適策略之參考。

材料與方法

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(圖 1)，

土地面積約 36,000 km²。地形以山地與丘陵為主，地勢起伏陡峭，平原與都市用地則集中於西部沿海，整體地勢呈現東高西低的格局，主要山脈有中央、玉山、阿里山、雪山及海岸等 5 大山系；河川大多發源於中央山脈，水系密布，主要分布於西半部。據中央氣象署網站(<https://www.cwa.gov.tw/>)顯示，臺灣橫跨熱帶與副熱帶季風氣候區，因地形阻隔與天氣系統交互作用，各區域氣候特徵具明顯差異。冬季受東北季風主導，北部及東半部氣溫降幅較顯著，降雨亦較頻繁；夏季轉由西南季風與太平洋高壓控制，中南部常有局地性強降雨發生。全年最低溫在 1 月下旬至 2 月初，平均為 18°C，最高溫發生在 7 月，平均約 33°C；每年 12 月至翌年 1 月是全臺雨量最少的月份，主要降雨來源集中於 5、6 月梅雨季與 7-9 月颱風季。

物種出現紀錄

物種調查資料取自生態調查資料庫系統(ecollect.forest.gov.tw)，資料範

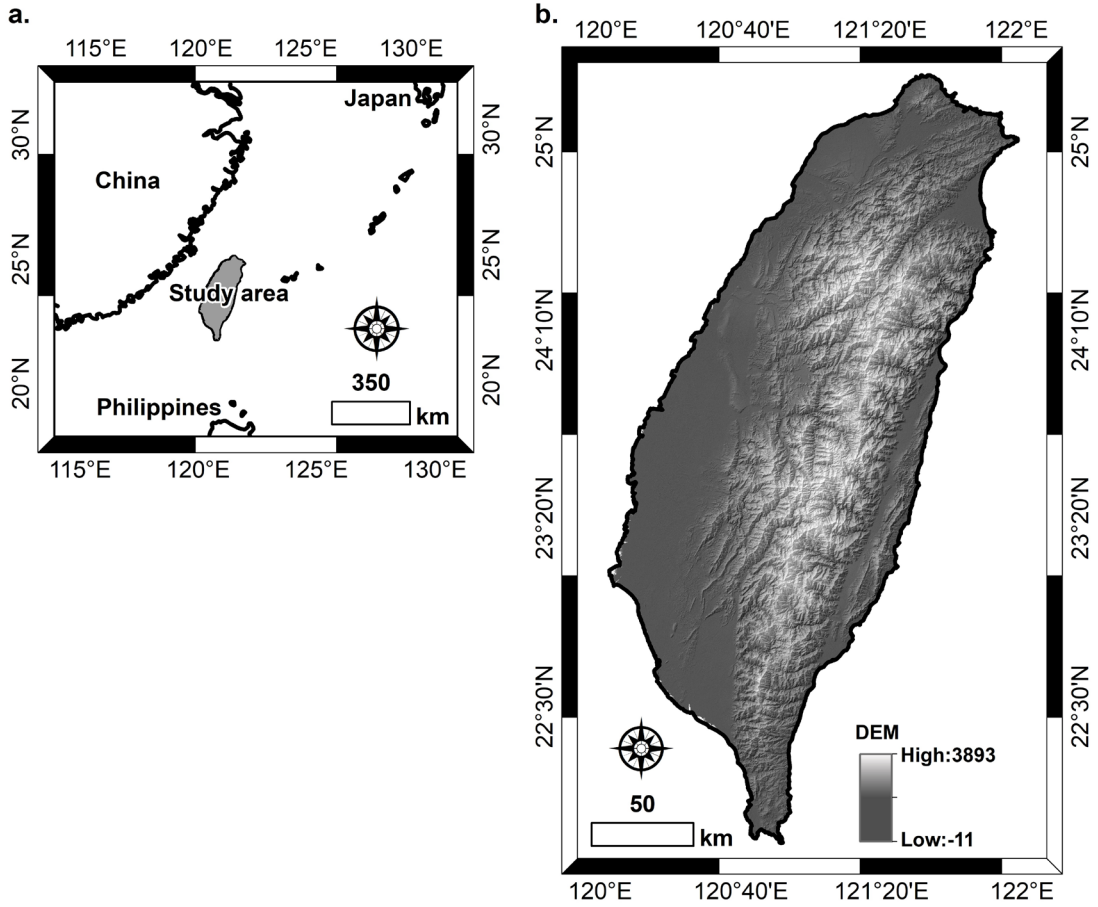


圖 1 研究區之 (a) 地理位置與 (b) 數位高程模型。
Fig. 1 (a) Geographic location and (b) digital elevation model (DEM) of the study area.

圍涵蓋林業及自然保育署發布的「生物資源資料庫」、「森林永久樣區調查」與「國家植群多樣性調查及製圖」等資料集，係屬政府主導之全國性自然資源普查計畫成果。所有資料皆由該署依政府資料開放授權條款公開釋出，屬合法且可自由取得的生態基礎資訊，可確保研究數據之可靠性與應用正當性。本研究抽取短柱山茶的出現紀錄，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相匹配。考量到地理座標的精確度，先刪除小數點不足 3 位，或座標錯誤（如位於水域）等不合理紀錄，並進一步在 R 4.1.3 平台上，以套件「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，設定各出現紀錄間的鄰近距離至少在半徑 1 km，經處理後留下 279 筆的出現紀錄 (圖 2a)。

環境資料與變遷情境

氣候、土壤、地形與土地覆蓋

通常被認為是評估植物生育地適宜性的重要因子 (Titeux *et al.* 2016; Hageer *et al.* 2017; Esen 2022)，因此，本研究所使用的預測變項即圍繞在這 4 類因子。現時的氣候資料是由 CHELSA V2.1 (chelsa-climate.org) 取得，涵蓋 1981-2010 年的全球氣象資料，共獲取 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)；土壤資料是從 ISRIC-World Soil Information (isric.org) 下載，包括與土壤質地有關的砂粒、粉粒及粘粒含量，另有土壤 pH 值和陽離子交換能力等 5 個變項。數位高程模型則由政府資料開放平臺 (data.gov.tw) 取得，並使用 ArcGIS 10.8 (ESRI Inc.) 軟體中的 Surface Tool 工具進行處理，產生坡度和坡向等變項。土地覆蓋方面是取自 Chen *et al.* (2022) 基於 Land-Use Harmonization 2 (Hurt *et al.* 2020) 及 ESA-CCI 資料集 (www.esa-landcover-cci.org) 所建構的 2015

年全球土地覆蓋圖，包含森林、草地、農地、都市、荒地與水體等 6 種類別。所有變項的空間解析力使用 ArcGIS 10.8 的 Resample Tool 工具重取樣為 1×1 km。為克服統計上的多重共線性問題，除土地覆蓋變項外，以 R 軟體套件「virtual species」執行 Pearson 相關分析 (Leroy *et al.* 2016)，排除相關性高的連續性變項，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，本研究假設氣候與土地覆蓋變項會隨 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 pathways, SSPs) 發生改變。本研究採用 SSP126 和 SSP585 兩種途徑，也分別代表低度與高度碳排放情境，氣候類變項由前述 CHELSA V2.1 獲取 21 世紀末 (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土地覆蓋變項，SSP126 與 SSP585 情境分別根據 IMAGE 和 REMIND-MAGPIE 兩種預測土地覆蓋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 為短柱山茶建模，並取其結果之平均數作為最終生育地適宜性，這種方式可排除模型間的不確定性 (Araújo and New 2007)。此外，由於土壤和地形因子的相對穩定性，假設這些相關變項維持恆定。

潛在生育地預測

為預測短柱山茶的適宜生育地，使用 MaxEnt 軟體 (版本 3.4.3) 進行演算，首先，將該物種的出現紀錄隨機分為兩部分，其中 80% 的資料用於模型訓練，其餘 20% 作為測試資料集，用來評估最終的預測模型。訓練資料集被隨機分成 10 折進行交叉驗證，並隨機選擇 10,000 個背景點位來訓

練模型，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) 與真實技能統計值 (true skill statistics, TSS) 評估模型的性能。其中 AUC 值域介於 0.5-1，當值愈高代表模型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。當 AUC 與 TSS 分別高於 0.8 及 0.6 以上時，可表示預測達「良好」水準，若高於 0.9 及 0.8 以上即達「優越」水準 (González-Ferreras *et al.* 2016)。

為避免模型過度擬合，利用 R 軟體套件「SDMtune」(Vignali *et al.* 2020) 的「gridSearch」函數判別 MaxEnt 超參數的最佳組合，其中考量超參數包含「regularization multiplier (範圍為 0.5 到 5，增量為 0.5)」、「maximum number of iterations (範圍為 300 到 900，增量為 200) 以及「feature classes (l、h、lq、lp、hp、lqt、lqp、lqpt，其中的 l 為 linear，h 為 hinge，q 為 quadratic，p 為 product

和 t 為 threshold)。最佳模型是根據交叉驗證過程中的 TSS 來決定，可用於預測短柱山茶的生育地適宜性。最後，藉由獨立的測試資料集，再一次計算 TSS，瞭解最佳模型的預測能力。此外，MaxEnt 的內建工具可獲得預測變項在模型擬合過程中的重要性，以及生育地適宜性與變項間之反應曲線 (response curves)。

時空動態分析

MaxEnt 的預測結果為值域介於 0-1 的連續概率值，其值愈高代表環境條件愈適合該物種生存，可用以表示物種的生育地適宜性。適宜生育地範圍的劃定是採用靈敏度 (sensitivity) 和特異性 (specificity) 之和達到最大值時 (即最大 TSS)，所對應的概率作為閾值，據此將連續性的適宜性圖轉換為二元地圖 (適宜 / 非適宜生育地)，並進一步估算適宜生育地面積。隨後，根據 Dai *et al.* (2019) 評估生育地動態的方法，使用 ArcGIS 的 Combine 工具進行空間交集分析，產生 3 種生育

地動態類型，即「脆弱生育地」：現時為適宜生育地，預計未來氣候情境將轉為非適宜生育地；「新增適宜生育地」：現時為非適宜生育地，但未來氣候情境將轉為適宜生育地；「氣候庇護所」：現時與未來氣候情境皆維持適宜生育地狀態。

結果

以 Pearson 相關係數 < 0.7 為標準，可保留溫度季節性、平均日較差、最冷月最低溫、降水季節性、坡度、坡向、年降水量、土地覆蓋、粉粒含量、陽離子交換能力與砂粒含量等 11 個預測變項 (圖 3)，用於建構預測模型。從 10 折交叉驗證的總體平均測試 AUC 為 0.89 ± 0.01 ，依常用的標準，所建構的模型達「優越」水準的性能。根據 MaxEnt 最佳化超參數組合的判別結果，regularization multiplier 設定為 1，maximum number of iterations 設定為 900，feature classes 指定為 lqt。該最佳模型根據測試資料集計算出的 TSS 為 0.72，由此顯示，無論是訓練

資料集或測試資料集的準確度評估結果，本研究所建構的模型都具備良好的預測能力。利用最佳 MaxEnt 模型預測短柱山茶的適宜生育地，研究結果顯示，該物種的適宜生育地多集中於北部與東北部，形成兩大區塊，南部則較為零星 (圖 2b)，面積估算約 $5,479 \text{ km}^2$ ，占全島面積 15% 左右。

MaxEnt 模型擬合過程中，各變項的重要性如圖 3 所示，前 3 個氣候類的變項明顯高於其他，依序為溫度季節性 (31%)、平均日較差 (30%) 和最冷月最低溫 (23%)，累計達 84%，其餘各變項皆不足 6%，對模型的影響力相對較小。進一步觀察 3 個主要影響模型變項與生育地適宜性構成的反應曲線 (圖 4) 可發現，溫度季節性的提升，將同時伴隨短柱山茶生育地適宜性的增加 (圖 4a)；相反地，平均日較差則呈現負相關的趨勢，並且適宜性的峰值落在 $2-3^\circ\text{C}$ ，隨後便呈現快速下降 (圖 4b)；此外，最冷月最低溫的適宜性峰值落在 $1-5^\circ\text{C}$ ，超過該範圍都呈現下降趨勢 (圖 4c)。

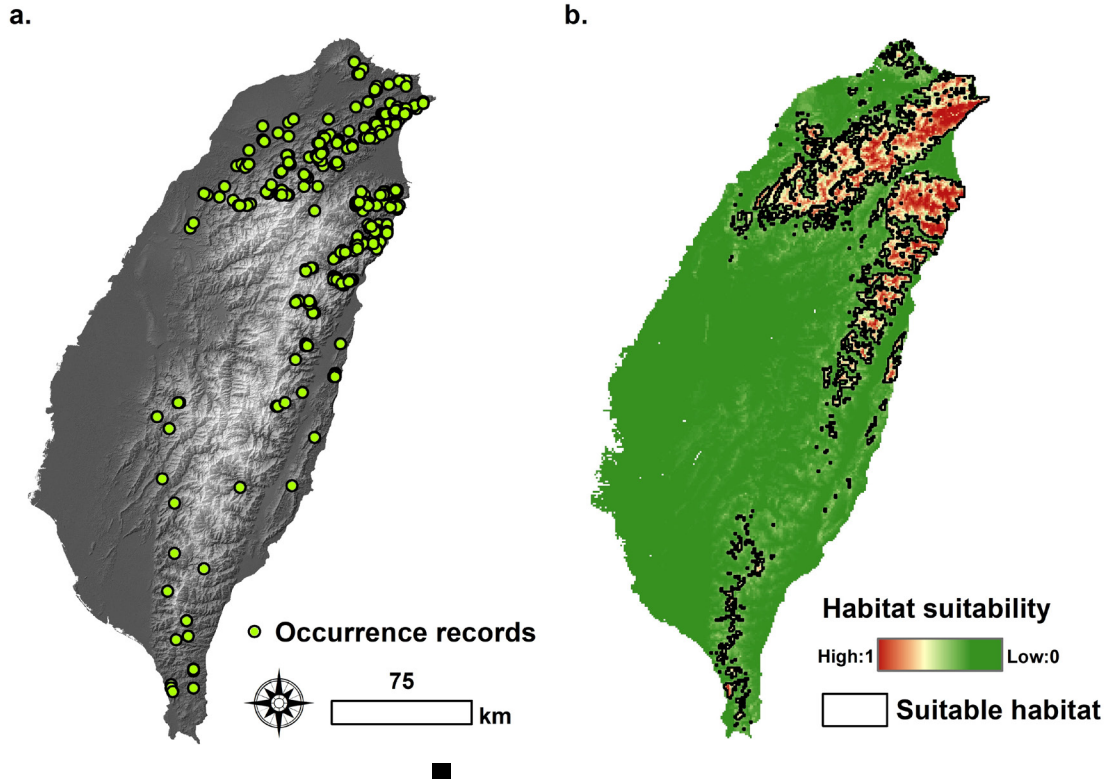


圖 2 (a) 短柱山茶的出现紀錄；(b) 根據最佳化 MaxEnt 模型所預測的結果。

Fig. 2 (a) Occurrence records of *C. brevistyla*; (b) predicted distribution based on the optimized MaxEnt model.

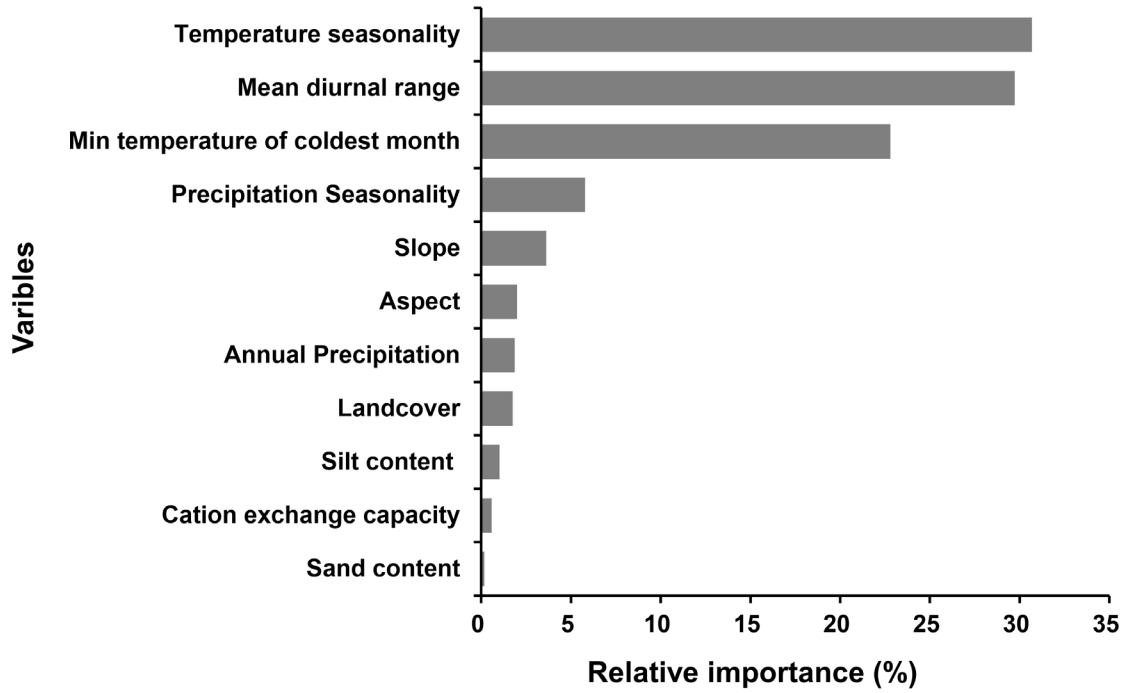


圖 3 各預測變項對 MaxEnt 模型之相對重要性 (%)。

Fig. 3 Relative importance (%) of predictor variables in the MaxEnt model.

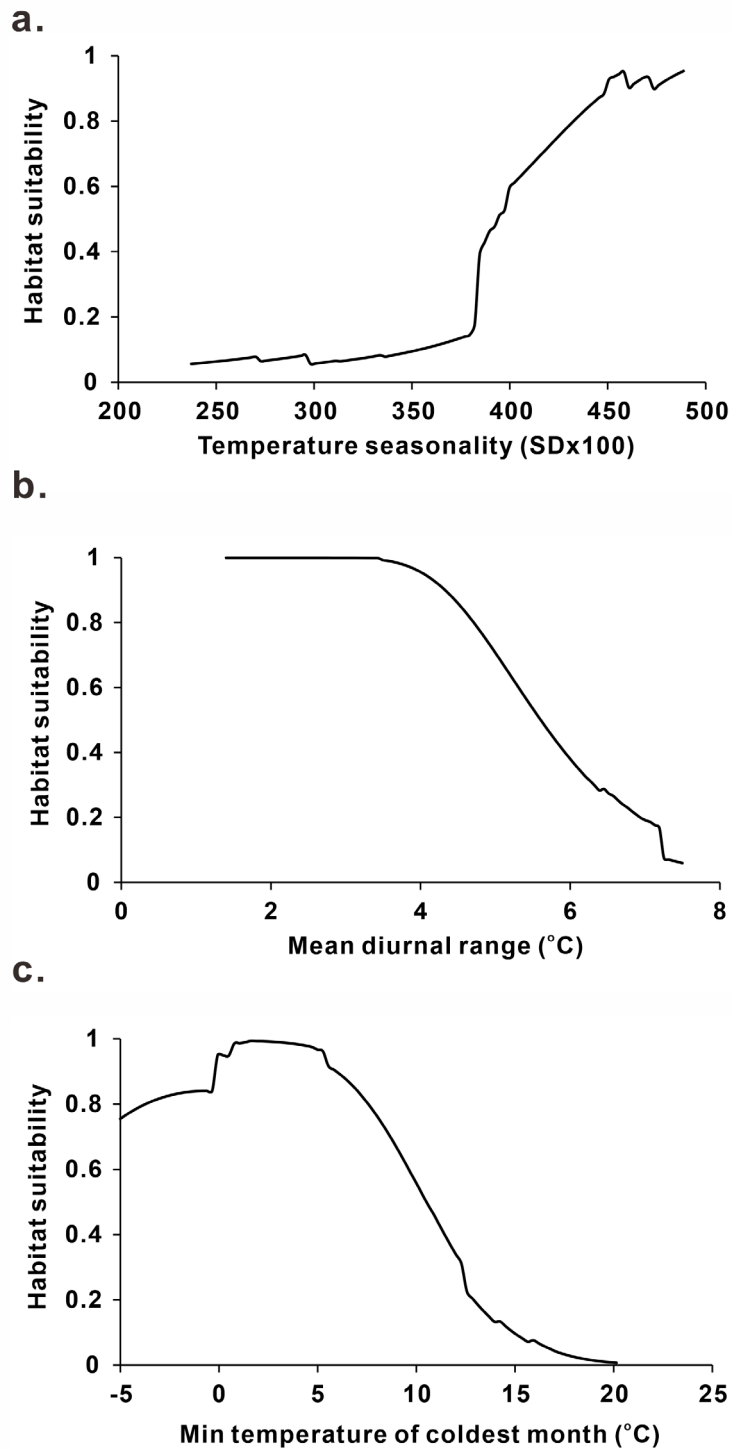


圖 4 主要影響模型變項之反應曲線。

Fig. 4 Response curves of the primary variables influencing the model.

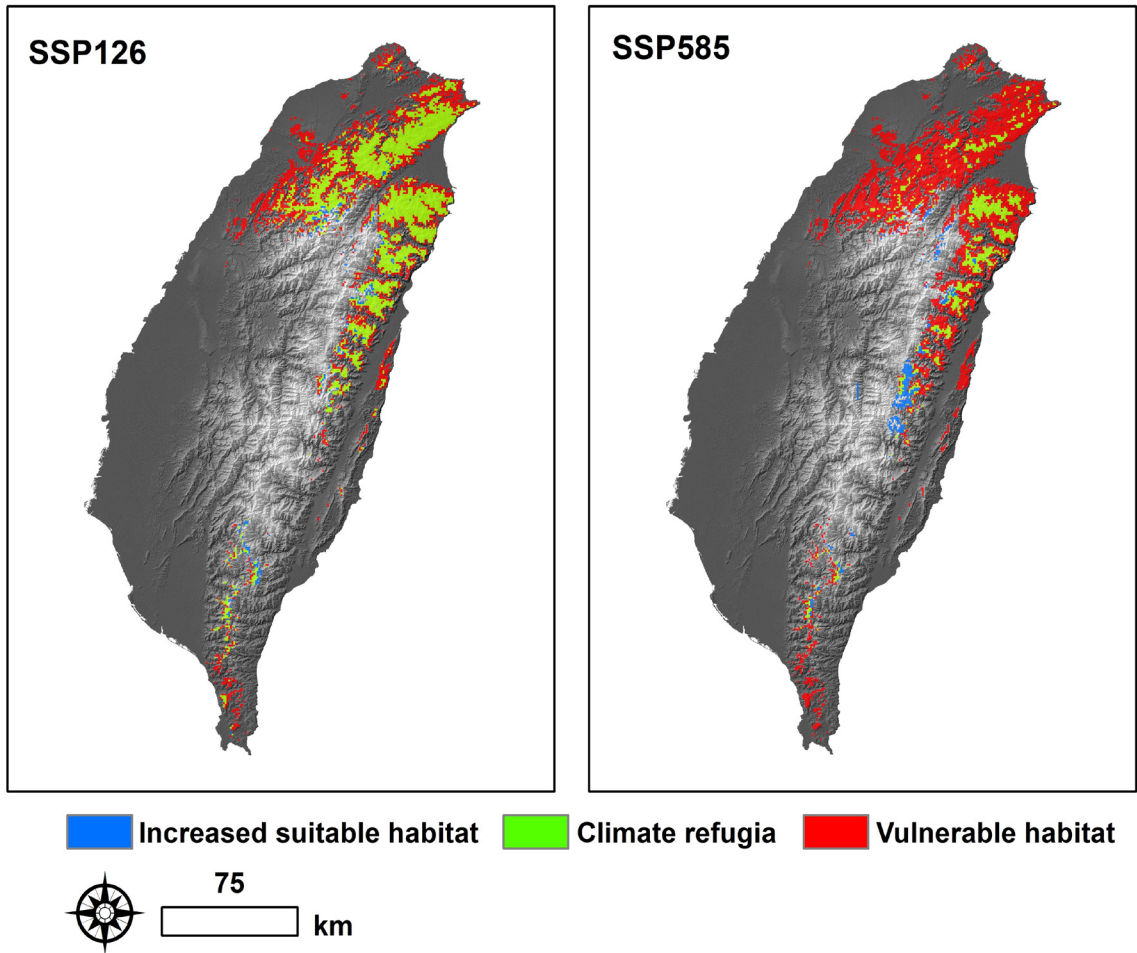


圖 5 兩種碳排情境下現時至 21 世紀末短柱山茶的適宜生育地動態。

Fig. 5 Projected dynamics of suitable habitats for *C. brevistyla* from the current to the end of the 21st century under two carbon emission scenarios.

短柱山茶的生育地動態分析結果顯示（圖 5），無論是低碳排或高碳排放情境，直至 21 世紀末，均以氣候庇護所與脆弱生育地為主要型態，可新增適宜生育地相當少數。就低碳排的 SSP126 情境而言，估計有 2,893 km² 的範圍可為氣候庇護所，而幾乎所有的邊緣生育地，都被預測轉為脆弱狀態，面積約為 2,586 km²。相形之下，高碳排放的 SSP585 情境，適宜生育地將產生劇烈變動，脆弱生育地可能在北部區塊大幅增加，估計面積達 4,583 km²，氣候庇護所則明顯縮減至 896 km²，且僅侷限分布在東北部區塊。

討論

氣候變遷是改變許多物種地理分布的關鍵因素 (Bellard *et al.* 2012)，因此，預測物種對氣候變遷的反應，尤其是適宜生育地的分布，有助預先規劃調適策略 (Teixeira *et al.* 2013)。MaxEnt 是預測氣候變遷對物種生育地分布影響最常用的工具之一，本研究開發了最佳超參數組合之 MaxEnt 模型用於預測短柱山茶的適宜生育地，

在模型訓練過程中，經交叉驗證所建構之模型，雖 AUC 均達「良好」性能的水準 (AUC > 0.8)，惟僅依訓練資料集進行內部測試，仍可能存在過度參數化的問題 (Lobo *et al.* 2008)，故進一步計算獨立測試資料集之 TSS，以確認此最佳化模型確實具備高性能表現，由此顯示，本研究中擬合出的模型並未受到過度擬合的影響，也確保了後續的氣候情境模擬是建立在穩固的科學基礎上。

氣候向來是驅動植物生長、發育與地理分布的關鍵因子，本研究的結果亦顯示，溫度季節性、平均日較差和最冷月最低溫等氣候類變項，對短柱山茶的適宜生育地分布具顯著影響，此與過往山茶屬栽培物種的研究結果相互應，顯示氣候不僅影響物種空間分布，更直接牽動其產量與品質 (Jayasinghe and Kumar 2019; Jayasinghe and Kumar 2021)。回顧與山茶屬植物 SDM 有關的研究，氣候因子的重要性屢獲驗證，如 Zhao *et al.* (2021) 指出溫度年較差為影響 *C. sinensis* 適宜生育地的最關鍵變項；Liu *et al.* (2023)

預測中國4大油茶植物的適宜生育地，強調不同物種對預測變項的反應存在差異性，其中與短柱山茶應用性質較相近的 *C. oleifera*，主要受最冷季均溫與溫度季節性所支配；Gu *et al.* (2025) 在中國山茶組 (sect. *Camellia*) 55 物種的大規模研究更進一步指出，最冷月最低溫是驅動其分布範圍的重要因子；Xu *et al.* (2025) 對 15 種山茶亞屬植物的分析亦顯示，最冷季降水量與溫度季節性為相對重要的環境變項，短柱山茶的分布更同步受到平均日較差的顯著影響。綜合上述研究結果可見，儘管不同研究在預測變項的選擇上略有差異，但普遍共識認為溫度變異性（溫度年較差、日較差或季節性）與冬季氣候（最冷月或最冷季溫度）為決定山茶屬植物分布格局的核心因子。

細部的氣候棲位特徵顯示（圖 4），短柱山茶偏好季節性溫度變異明顯的環境，且變異愈大適宜性愈高，顯見四季分明的溫度型態，更有利其生長。相對的，平均日較差愈大或最冷月溫度愈高的環境則較不適宜，這也反映出該物種偏好日夜溫差穩定的

冷涼環境。與多數溫帶木本植物相同，山茶屬植物具備以芽休眠越冬的適應性機制，日本山茶 (*C. japonica*) 與短柱山茶在系統發育上關係密切 (Yin *et al.* 2021)，其研究案例已證實了低溫對其休眠解除具關鍵作用，晚秋與冬季氣候過暖，可能導致開花不穩定或延遲 (Berruti *et al.* 2012; Berruti *et al.* 2015)。此外，楊及郭 (2017) 的研究中也指出，短柱山茶種子能耐 1-4°C 溫度，屬於溫帶異儲型，其種子經 3 個月低溫層積處理，可完全打破休眠並促進發芽，進一步佐證其生理機制與冷涼環境相互契合，由此推論，若氣候暖化持續加劇，導致冬季低溫不足或日夜溫差擴大，勢必對短柱山茶族群的更新與存續構成潛在威脅。

根據模型預測結果（圖 2）顯示，短柱山茶適宜生育地主要分布於臺灣北部山區，此分布格局與過去的植群調查報告（楊 1997；陳 2004）所記錄的實際分布範圍大體一致。然臺灣未來氣候不僅朝暖化加劇的方向發展，且山區、北部的升溫幅度，預期將高於平地、南部地區 (Lin *et al.* 2015)，

此暖化空間特徵恰與短柱山茶現有的核心適宜生育地高度重疊，勢必加劇脆弱生育地的擴增；此外，未來熱浪頻率增加，可能導致日較溫差擴大 (Kueh *et al.* 2017)；旱澇災害風險的提升，也將致使降水型態變得更趨極端 (Huang *et al.* 2012)。從這些氣候變遷特徵看來，臺灣未來的氣候條件恐不利短柱山茶的存續，誠如本研究模型所預測，低碳排 (SSP126) 情境下，生育地的脆弱化仍以邊緣區位為主，至 21 世紀末，尚能維持一定面積的氣候庇護所；但對高碳排情境而言 (SSP585)，退化趨勢顯著加劇，多數現存生育地都將轉為脆弱狀態，尤以北部區塊最為明顯，僅存少數氣候庇護所侷限於東北部。值得注意的是，幾項研究對氣候變遷下山茶屬的分布預測提出了不同觀點，如 Xu *et al.* (2025) 指出短柱山茶在中國仍有機會於 SSP126 情境下擴張生育地範圍，但在 SSP585 情境下，則將面臨大幅生育地縮減；Jiang *et al.* (2025) 則認為 *C. oleifera* 可在未來氣候條件下，往北擴張其適宜生育地範圍，顯示同屬

不同物種在不同地理區域或排放情境下，其分布動態可能存在差異 (Liu *et al.* 2023; Gu *et al.* 2025)。然無論如何，臺灣北部與東北部受限於地理空間條件，即便在低碳排情境下，短柱山茶亦難發生生育地擴張的現象，反而更傾向於持續面臨生育地退化的風險。

為因應氣候變遷對短柱山茶的衝擊，本研究提出幾點調適建議：第一、目前臺灣現行的保育評估系統及國際自然保育聯盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 的標準，該物種被列為「無危 (Least Concern)」(IUCN 2001，臺灣植物紅皮書編輯委員會 2017)，然而，該物種可能是容易受到氣候變遷影響的「脆弱物種」，故有必要強化其保育意識。第二、由於臺灣山區已有完善的保育網絡，調整自然保護區以維持適宜生育地的空間自是有限，因此，建議加強氣候庇護所的長期監測工作，以防止族群面臨衰退。第三、由於北部區塊在高碳排情境下 (SSP585)，適宜生育地有大幅衰退的風險，未來苦油茶的栽培區可考慮著重在東部的氣候庇

護所範圍，蘇 (2014) 的培育試驗中也曾證實過，東部為短柱山茶最佳的栽植區域。最後，除了物種保育與產業經營模式的調整外，本研究也建議同步投入其他物種的研究與開發，以消彌因氣候變遷所造成的損失。

引用文獻

- 林俊成、陳溢宏、王培蓉、吳孟珊。2019。小果油茶經營成本效益調查與分析。台灣林業科學 34: 1-11。
- 陳子英。2004。蘭陽溪的植群分類系統之研究。國立臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 18: 171-206。
- 楊正釧、郭幸榮。2017。短柱山茶種子的發芽與儲藏性質。台灣林業科學 32: 267-81。
- 楊正釧。1997。台北縣烏來鄉桶后溪濱溪植群之研究。台灣林業科學 12: 335-346。
- 臺灣植物紅皮書編輯委員會。2017。臺灣維管束植物紅皮書名錄。特有生物保育中心、林務局、台灣植物分類學會。
- 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。
- 蘇夢淮。2014。臺灣原生山茶屬植物培育技術及種原庫建立 (2/2)。行政院農業委員會林務局 103 年度科技計畫研究報告。
- 蘇夢淮。2015。臺灣原生山茶屬分類概述。林業研究專訊 22: 11-16。
- Ahmed, S., T. Griffin, S. B. Cash, W. Y. Han, C. Matyas, C. Long, C. M. Orians, J. R. Stepp, A. Robbat and D. Xue. 2018. Global climate change, ecological stress, and tea production. pp. 1-23. In: W. Y. Han and G. J. Ahammed (eds). *Stress Physiology of Tea in the Face of Climate Change*. Springer, Singapore.
- Aiello-Lammens, M. E., R. A. Boria, A. Radosavljevic, B. Vilela and R. P. Anderson. 2015. spThin: an

- R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography* 38: 541-545.
- Araújo, M. B. and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 42-47.
- Bellard, C., C. Bertelsmeier, P. Leadley, W. Thuiller and F. Courchamp. 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters* 15: 365-377.
- Berruti, A., A. Christiaens, E. D. Keyser, M. C. V. Labeke and V. Scariot. 2015. Cold treatment breaks dormancy but jeopardizes flower quality in *Camellia japonica* L. *Frontiers in Plant Science* 6: 983.
- Berruti, A., V. Scariot, A. Christiaens and M. C. Van Labeke. 2012. Changes in ABA levels in vegetative and flower buds during dormancy in *Camellia*. *Acta Hort* 953: 247-254.
- Chen, G., X. Li and X. Liu. 2022. Global land projection based on plant functional types with a 1-km resolution under socio-climatic scenarios. *Scientific Data* 9: 1-18.
- Chen, J. H., B. C. Liao, T. T. Jong and C. M. J. Chang. 2009. Extraction and purification of flavanone glycosides and kaemferol glycosides from defatted *Camellia oleifera* seeds by salting-out using hydrophilic isopropanol. *Separation and Purification Technology* 67: 31-37.
- Chiang, S. S., F. L. Hsu, C. K. Hsu, C. F. Liu and C. Y. Chu. 2019. Role of *Camellia brevistyla* (Hayata) Coh. Stuart seed pomace extract on hypertension and vascular function in L-NAME-treated mice. *Journal of Food Science* 84: 3555-3564.
- Dai, Y., C. E. Hacker, Y. Zhang, W. Li, Y. Zhang, H. Liu, J. Zhang, Y. Ji, Y. Xue and D. Li. 2019. Identifying climate refugia and its potential impact on Tibetan brown bear

- (*Ursus arctos pruinosus*) in San-jiangyuan National Park, China. *Ecology and Evolution* 9: 13278-13293.
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl, G. Carré, J. R. G. Marquéz, B. Gruber, B. Lafourcade, P. J. Leitão, T. Münkemüller, C. McClean, P. E. Osborne, B. Reineking, B. Schröder, A. K. Skidmore, D. Zurell and S. Lautenbach. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36: 27-46.
- Esen, F. 2022. Determining the effects of geomorphological factors on the distribution of land use and plant cover by different statistical methods. *Environmental Monitoring and Assessment* 194: 465.
- González-Ferreras A. M., J. Barquín and F. J. Peñas. 2016. Integration of habitat models to predict fish distributions in several watersheds of Northern Spain. *Journal of Applied Ichthyology* 32: 204-216.
- Gu, W., X. Xiao, Z. Ran, C. Yan, D. Jiang, L. Zhou and Z. Li. 2025. Distribution prediction and adaptability analysis of section *Camellia* Plants (*Camellia* Genus) in China based on the MaxEnt Model. *Ecology and Evolution* 15: e71365.
- Hageer, Y., M. Esperón-Rodríguez, J. B. Baumgartner and L. J. Beaumont. 2017. Climate, soil or both? Which variables are better predictors of the distributions of Australian shrub species? *PeerJ* 5: e3446.
- Huang, W. C., Y. Chiang, R. Y. Wu, J. L. Lee and S. H. Lin. 2012. The impact of climate change on rainfall frequency in Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 23: 553-564.
- Hurt, G. C., L. Chini, R. Sahajpal, S. Frolking, B. L. Bodirsky, K. Calvin, J. C. Doelman, J. Fisk, S. Fu-

- jimori, K. K. Goldewijk, T. Hasegawa, P. Havlik, A. Heinemann, F. Humpeöder, J. Jungclaus, J. O. Kaplan, J. Kennedy, T. Krisztin, D. Lawrence, P. Lawrence, L. Ma, O. Mertz, J. Pongratz, A. Popp, B. Poulter, K. Riahi, E. Shevliakova, E. Stehfest, P. Thornton, F. N. Tubiello, D. P. van Vuuren and X. Zhang. 2020. Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. *Geoscientific Model Development* 13: 5425-5464.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, USA.
- International Union for Conservation of Nature, IUCN. 2001. Red list categories and criteria: version 3.1. International Union for Conservation of Nature, Gland, Switzerland and Cambridge.
- İzmirli, Ş. G. and S. Gül. 2023. Modeling of current and future distributions of *Camellia sinensis* in Türkiye under climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 154: 1323-1332.
- Jayasinghe, S. L. and L. Kumar. 2019. Modeling the climate suitability of tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze] in Sri Lanka in response to current and future climate change scenarios. *Agricultural and Forest Meteorology* 272: 102-117.
- Jayasinghe, S. L. and L. Kumar. 2021. Potential impact of the current and future climate on the yield, quality, and climate suitability for tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze]: A systematic review. *Agronomy* 11: 619.
- Jiang, Z., Y. Zhang, Q. Su, Q. Gan, Q. Zhou, Y. Guo, Z. Liu, Y. Zhang, B. Zhou, T. A. Y. Asseri and M. U. Hassan. 2025. MaxEnt mod-

- eling for predicting the potential geographical distribution of *Camellia oleifera* Abel under climate change. *Forests* 16: 1026.
- Jin, X. and Y. Ning. 2012. Antioxidant and antitumor activities of the polysaccharide from seed cake of *Camellia oleifera* Abel. *International Journal of Biological Macromolecules* 51: 364-368.
- Karger, D. N., O. Conrad, J. Böhrer, T. Kawohl, H. Kreft, R. W. Soria-Auza, N. E. Zimmermann, H. P. Linder and M. Kessler. 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4: 170122.
- Kueh, M. T., C. Y. Lin, Y. J. Chuang, Y. F. Sheng and Y. Y. Chien. 2017. Climate variability of heat waves and their associated diurnal temperature range variations in Taiwan. *Environmental Research Letters* 12: 074017.
- Leroy, B., C. N. Meynard, C. Bellard and F. Courchamp. 2016. virtual-species, an R package to generate virtual species distributions. *Ecography* 39: 599-607.
- Lin, C. Y., Y. J. Chua, Y. F. Sheng, H. H. Hsu, C. T. Cheng and Y. Y. Lin. 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, S., T. Chen, D. Ye, Q. Chen, J. Ni and M. Rao. 2023. Prediction of distributional patterns of four major *Camellia* oilseed species in China under climate and land use changes. *Ecological Indicators* 155: 110996.
- Lobo, J. M., A. Jiménez-Valverde and R. Real. 2008. AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography* 17: 145-151.

- Mooney, H., A. Larigauderie, M. Cesario, T. Elmquist, O. Hoegh-Guldberg, S. Lavorel, G. M. Mace, M. Palmer, R. Scholes and T. Yahara. 2009. Biodiversity, climate change, and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1: 46-54.
- Newbold, T. 2018. Future effects of climate and land-use change on terrestrial vertebrate community diversity under different scenarios. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 285: 20180792.
- Pecl, G. T., M. B. Araújo, J. D. Bell, J. Blanchard, T. C. Bonebrake, T. D. Clark, R. K. Colwell, F. Danielson, B. Evengård, L. Falconi, S. Ferrier, S. Frusher, R. A. Garcia, R. B. Griffis, A. J. Hobday, C. Janion-Scheepers, M. A. Jarzyna, S. Jennings, J. Lenoir, H. I. Linnetved, V. Y. Martin, P. C. McCormack, J. McDonald, N. J. Mitchell, T. Mustonen, J. M. Pandolfi, N. Pettorelli, E. Popova, S. A. Robinson, B. R. Scheffers, J. D. Shaw, C. J. B. Sorte, J. M. Strugnell, J. M. Sunday, M. N. Tuanmu, A. Vergés, C. Villanueva, T. Wernberg, E. Wapstra and S. E. Williams. 2017. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science* 355: eaai9214.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Soroye, P., T. Newbold and J. Kerr. 2020. Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents. *Science* 367: 685-688.
- Su, M. H., M. C. Shih and K. H. Lin. 2014. Chemical composition of seed oils in native Taiwanese *Camellia* species. *Food Chemistry*

- 156: 369-373.
- Teixeira, E. I., G. Fischer, H. Van Velthuizen, C. Walter and F. Ewert. 2013. Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 170: 206-215.
- Thomas, C. D. 2010. Climate, climate change and range boundaries. *Diversity and Distributions* 16: 488-495.
- Titeux, N., K. Henle, J. B. Mihoub, A. Regos, I. R. Geijzendorffer, W. Cramer, P. H. Verburg and L. Brotons. 2016. Biodiversity scenarios neglect future land-use changes. *Global Change Biology* 22: 2505-2515.
- Urban, M. C. 2015. Accelerating extinction risk from climate change. *Science* 348: 571-573.
- Vignali, S., A. G. Barras, R. Arlettaz and V. Braunisch. 2020. SDMtune: An R package to tune and evaluate species distribution models. *Ecology and Evolution* 10: 11488-11506.
- Warren, R., J. VanDerWal, J. Price, J. A. Welbergen and I. Atkinson. 2013. Quantifying the benefit of early climate change mitigation in avoiding biodiversity loss. *Nature Climate Change* 3: 678-682.
- Wei, C. C., C. W. Yu, P. L. Yen, H. Y. Lin and S. T. Chang. 2014. Antioxidant activity, delayed aging, and reduced amyloid-beta toxicity of methanol extracts of tea seed pomace from *Camellia tenuifolia*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 62: 10701-10707.
- Xu, Y., B. Q. Guan, R. Chen, R. Yi, X. L. Jiang and K. Q. Xie. 2025. Investigating the distribution dynamics of the *Camellia* subgenus *Camellia* in China and providing insights into *Camellia* resources management under future climate change. *Plants* 14: 1137.
- Yin, X., B. Huang, B. Wang, L. A. Xu and Q. Wen. 2021. The complete

chloroplast genome of *Camellia brevistyla* (Hayata) Coh. St. (Theaceae: Ericales) from China based on PacBio and Illumina data. Mitochondrial DNA Part B 6: 2246-2248.

Zhao, P., D. F. Gao, M. Xu, Z. G. Shi, D. Wang, C. R. Yang and Y. J. Zhang. 2011. Triterpenoid Saponins from the Genus *Camellia*. Chemistry and Biodiversity 8: 1931-1942.

Zhao, Y., M. Zhao, L. Zhang, C. Wang and Y. Xu. 2021. Predicting possible distribution of tea (*Camellia sinensis* L.) under climate change scenarios using MaxEnt model in China. Agriculture11: 1122.