

# 模擬氣候變遷下臺灣原生生質能潛力樹種 無患子的分布動態

## Modelling range dynamics for native bioenergy potential tree species *Sapindus mukorossi* in Taiwan under climate change

黃靜宜 \*

Jing-Yi Huang \*

農業部生物多樣性研究所 55244 南投縣集集鎮民生東路 1 號

Taiwan Biodiversity Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

\* 通訊作者：lily@tbri.gov.tw

\*Corresponding author: lily@tbri.gov.tw

### 摘 要

生質能的擴大使用與開發為我國邁向淨零排放的關鍵策略之一，進一步瞭解暖化對生物質潛在分布構成的影響，有助未來資源利用的空間規劃與配置。本研究以具生質能潛力之原生樹種無患子 (*Sapindus mukorossi*) 為例，運用集成生態棲位模型，進行無患子適宜生育地分布的模擬，並搭配政府間氣候變遷專門委員會所發布的共享社會經濟途徑 (shared socio-economic pathways, SSPs) 暖化情境，分析該物種現時至 21 世紀末 (2071~2100 年代) 適宜生育地的分布動態。研究結果顯示，與溫度相關的氣候變項是驅使無患子生育地適宜性發生改變的主因，未來無患子將可受益於輕度暖化 (SSP126)，擴張其適宜生育地範圍；重度暖化 (SSP585)

則不利西南側適宜生育地的維持，雖適宜生育地範圍朝高海拔擴張，不致削弱總體分布面積，然生育地空間分布型態的改變，可能影響未來資源利用的可行性，建議及早擬定或調整栽植計畫，以提供氣候變遷下相對應的經營管理策略。

## Abstract

Expanding and developing the use of bioenergy is one of the key strategies for Taiwan to achieve net-zero emissions. Further understanding the impact of global warming on the potential distribution of biomass significantly informs future resource spatial planning and allocation. This study focused on *Sapindus mukorossi*, a potential biomass species, we applied the ensemble ecological niche model to simulate the species range dynamic under the shared socio-economic pathways (SSPs) warming scenario, spanning from the current time to the end of the 21st century (2071-2100). The results show that temperature-related climate variables are the primary drive shifts in habitat suitability for *S. mukorossi*. In a low emission scenario (SSP126), *S. mukorossi* is anticipated to benefit, leading to an expansion of its suitable habitat range. However, under a high emission scenario (SSP585), the maintenance of suitable habitats on the southwestern is constricted. Although suitable habitat ranges may expand towards higher altitudes without reducing the overall habitat area, changes in habitat spatial patterns could potentially affect the availability of future resource utilization. We recommend early formulation or adjustment of planting plans to provide corresponding operational and management strategies for climate change.

關鍵詞：共享社會經濟途徑、生質能資源、永續性、生態棲位模型

**Keywords:** shared socio-economic pathways, bioenergy resource, sustainability, ecological niche model

## 緒 言

鑑於化石燃料資源日益枯竭，以及溫室氣體高度排放，導致氣候變遷與生態環境損害等問題，逐步降低並淘汰化石燃料的使用，以及積極尋求清潔且具永續性的替代能源，儼然是近代能源發展的重要趨勢 (Chang *et al.* 2012, Sahoo *et al.* 2022)。生質能 (bio-energy) 是由生物質 (biomass) 所提取的能源，使用生質能可視為封閉式的碳循環，即總體能源轉換達到零碳排，為一兼顧環保與永續經營的能源型態 (張 2016)。在謹慎合宜的規範與管理下，提升生質能的利用占比，可望減緩氣候變遷帶來的威脅，並健全社會生態環境 (Souza *et al.* 2017, Von Cossel *et al.* 2019)。在眾多不同形式的生質能資源中，又以木本油料樹種的利用較受矚目 (Papini and Simeone 2010)，它們通常可在 6~20 年間開始結果，並持續保持數十年的生產力 (Dai *et al.* 2017)，在不影響森林蓄積的前提下，由此類非木材的森林副產物獲取生質能原料，應能降低因能源需求對環境所造成的衝擊，可謂具前瞻性的一種

再生能源。

植物生長與收穫很大程度取決於適宜氣候條件的存在與否，氣候變遷已被證實會改變生質能植物的生育地適宜性 (habitat suitability)，並使其空間分布發生再分配 (Hu 2017, Liu *et al.* 2021)。為確保生質能原料供給的永續性，有必要進一步瞭解氣候變遷對其適宜生育地空間分布帶來的影響，據以制訂相關的因應對策。生態棲位模型 (ecological niche model, ENM) 可基於物種存在位置與其對應環境變量間的關聯性，預測物種潛在分布或生育地適宜性 (Guisan *et al.* 2013)，搭配未來氣候資料，更有助理解氣候變遷情境下的空間分布動態 (Elith and Leathwick 2009)。生態棲位模型多樣，然迄今尚未有任何單一模型具通用性 (Segurado and Araujo 2004)，集成式的 ENM 是依據多種演算法構建多模型，再藉由共識原則進行整合，獲取最終的預測結果 (Araújo and New 2007)，如此不僅可消彌各種模型間的不確定性，並可提供更穩健、可靠的性能 (Marmion *et al.* 2009)，近來集成模型

已廣泛應用於植物生態的研究 (Ardestani *et al.* 2021, Rahmanian *et al.* 2021, Kunwar *et al.* 2023)。

臺灣高度倚賴化石燃料，據統計近百年來增溫約 1.4°C，遠高於全球平均值 (盧等 2012)，足見受氣候變遷影響甚鉅。為呼應全球「2050 淨零排放」的趨勢，我國政府自 111 年陸續公布「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」及「12 項關鍵戰略行動計畫」與「淨零排放路徑 112-115 年綱要計畫」，並於 112 年 2 月公布施行《氣候變遷因應法》，展現邁向淨零排放目標之決心。其中，2050 淨零排放的路徑規劃及關鍵戰略中，均明確提出擴大使用生質能、以生質能取代化石燃料等新潔淨或前瞻能源的開發指引。無患子是臺灣重要的原生園林與造林樹種，該物種不僅固碳能力強，其種仁油脂含量豐富且優質 (Zhang *et al.* 2012, Chhetri *et al.* 2008)，兼具對環境友善與可再生特性，極具生質能源料開發與利用潛力 (Jia and Sun 2012, Chakraborty and Baruah 2013, Liu *et al.* 2017)。有鑑於此，本研究以無患子做

為目標種，整合物種存在紀錄與環境資料，並搭配政府間氣候變遷專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第 6 次評估報告所提出之氣候變遷情境，進行生態棲位建模，研究目的在於 (1) 瞭解影響無患子生育地適宜性的重要環境因子，並模擬其適宜生育地潛在分布；(2) 探討不同程度的暖化情境下，無患子現時至 21 世紀末 (2071~2100 年代) 的潛在分布動態，期研究成果可作為氣候變遷下生質能源資源開發與利用，以及空間調適策略擬定之參考資訊。

## 材料與方法

### 研究區概述

臺灣位處歐亞大陸與菲律賓海板塊交會處，西側毗鄰臺灣海峽，東面臨太平洋。臺灣地狹人稠，面積約 36,000 km<sup>2</sup>，人口數約 2,300 萬。地勢東高西低，地形陡峭，多由山地與丘陵組成，據林業及自然保育署第 4 次森林資源調查報告顯示，島內約有 6 成土地為森林所覆蓋；非森林土地利用類型，以農業用地為大宗 (約

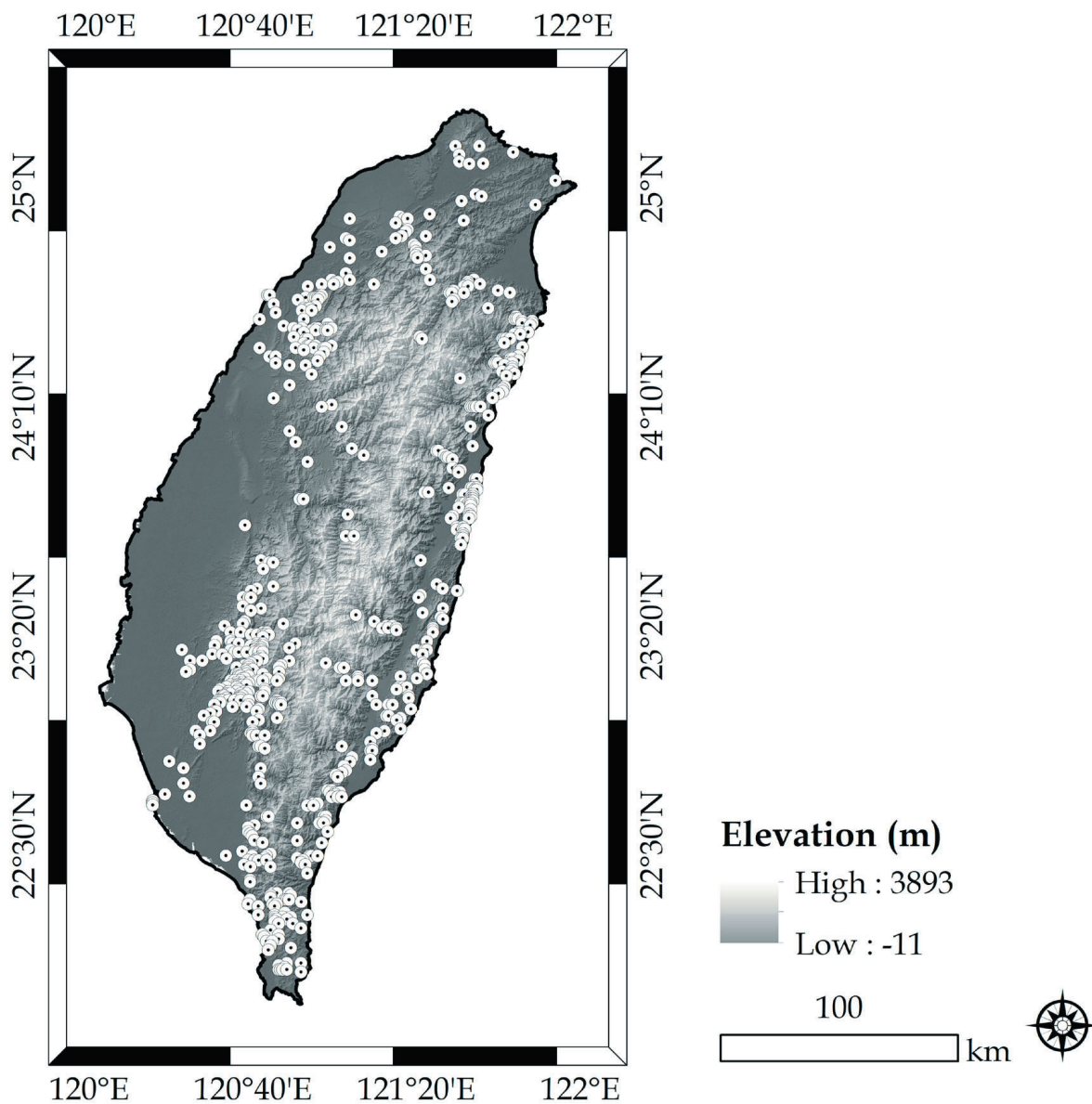


圖 1. 研究區地理位置與目標種發生紀錄 (圓形標記)。

**Fig. 1** Geographical location of the study area and the species occurrence records (circular markers).

22%)、建築用地次之(約6%)，多分布於西部平原至沿海一帶(如圖1)。臺灣氣候東西向介於季風西風帶與貿易東風帶之間，南北向受中緯度與熱帶天氣系統的雙重影響，全境可歸類為副熱帶季風氣候，然受複雜地形所影響，氣候隨區域不同而有顯著的差異(林2010)，而在全球暖化的大趨勢下，臺灣過去百年暖化現象亦十分明顯，增溫速率相當於每10年上升0.14°C(盧等2012)。臺灣自產能源匱乏，高度倚賴進口，據111年能源統計資料(經濟部能源局2022)顯示，以化石燃料(含煤及煤產品、原油及石油產品、天然氣)做為能源供給的占比高達92.5%、核能4.9%，具再生性能源(含生質能及其廢棄物、慣常水力、地熱、太陽光電及風力)為2.6%，其中生質能及其廢棄物僅1.21%。

## 研究方法

### (一) 物種存在資料

無患子存在紀錄下載自林業及自然保育署生態調查資料庫系統([https://](https://ecollect.forest.gov.tw/)

[ecollect.forest.gov.tw/](https://ecollect.forest.gov.tw/))所收錄的「生物資源資料庫」資料集，該資料集為該署主導之多年期全國性自然資源普查成果，所獲取紀錄計有1,164筆，調查期間為1998-2007年，座標格式為經緯度(WGS84)，為確保地理坐標的精確度，先刪除小數點不足3位的資料，接續配合生態棲位模型所使用預測變項之空間解析力，設定各存在紀錄間的鄰近距離至少大於1 km，以R套件“spThin”(Aiello-Lammens *et al.* 2015)進行存在紀錄的空間篩選與剔除，以減少空間自相關及地理取樣偏差的影響，最後保留存在紀錄計607筆(圖1)。另以相同的方法，在同一資料集下抽取非目標種存在紀錄，並在剔除與目標種共存同一分析單元之紀錄後，將其視為偽非存在紀錄(或背景點)，計9,502筆，供後續生態棲位建模使用。

### (二) 環境資料與變遷情境

氣候與土壤變項可謂預測植物生育地適宜性的良好變項(Hageer *et al.* 2017, Wan *et al.* 2019)，同時地形所導

致的環境異質性，意味生育地條件的不同 (Dubayah and Rich 1995)，而土地利用 / 覆蓋亦直接影響生育地的品質和數量 (Titeux *et al.* 2016)，為生態棲位不可切割的一部份，有必要一併納入建模與未來預測的考量。因此，生態棲位建模所使用之預測變項包含氣候、土壤、地形、土地利用 / 覆蓋等 4 類 29 項。其中，19 項現時生物氣候變項 (Bio1-BIO19)，乃自 CHELSA V2.1 資料庫 (<https://chelsa-climate.org/>) 取得，其資料生成期間涵蓋 1979-2013 年，空間解析度近 1×1 km (Karger *et al.* 2017)。土壤類變項，則從 ISRIC 資料庫 ([www.isric.org/explore/soilgrids](http://www.isric.org/explore/soilgrids)) 下載粗碎屑含量、粘粒含量、砂粒含量、粉粒含量、土壤 pH 值、陽離子交換能力等 6 項。地形類變項，除由內政部取得數值高程模型 (digital elevation model, DEM) 外，並以 ArcGIS 10.8 軟體產製獲取坡向、坡度等變項。土地利用 / 覆蓋變項，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](http://www.esa-landcover-cci.org)) 所建構

的 2015 年全球土地利用 / 覆蓋圖資，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)。由於各預測變項資料來源與空間解析力略有不同，本研究將上述 29 個預測變項 (表 1) 統一重取樣為 1×1 km，另為克服變項在統計上的多重共線性問題，以 R 套件 “*virtualspecies*” 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，擇一與生物學關連性高者予以保留 (Dormann *et al.* 2013)。

對於未來的預測，本研究假設氣候及土地利用 / 覆蓋兩類變項會隨 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，其餘則維持不變。本研究採用其中的 SSP126 和 SSP585 等 2 種碳排放情境，各別代表輕度和重度暖化，其中 SSP126 情境為永續導向的綠色途徑，相較於基準年 (1850~1900 年)，21 世紀末全球增溫可望在控制在 2°C 以下；SSP585 情境則是假設社會經濟發展仍

表 1. 生態棲位建模所使用之預測變項

**Table 1.** Predictor variables used in ecological niche modeling.

Category	Variable	Code
Bioclimatic	Annual mean temperature	BIO1
	Mean diurnal range (mean of monthly (max temp - min temp))	BIO2
	Isothermality (BIO2/BIO7) (×100)	BIO3
	Temperature seasonality (standard deviation×100)	BIO4
	Maximum temperature of warmest month	BIO5
	Minimum temperature of coldest month	BIO6
	Temperature annual range (BIO5-BIO6)	BIO7
	Mean temperature of wettest quarter	BIO8
	Mean temperature of driest quarter	BIO9
	Mean temperature of warmest quarter	BIO10
	Mean temperature of coldest quarter	BIO11
	Annual precipitation	BIO12
	Precipitation of wettest month	BIO13
	Precipitation of driest month	BIO14
	Precipitation seasonality (coefficient of variation)	BIO15
	Precipitation of wettest quarter	BIO16
	Precipitation of driest quarter	BIO17
	Precipitation of warmest quarter	BIO18
	Precipitation of coldest quarter	BIO19
Soil	Coarse fragments volumetric	CRF
	Soil texture fraction clay	CLY
	Soil texture fraction sand	SND
	Soil texture fraction silt	SLT
	Soil pH x 10 in KCl	pH
	Cation exchange capacity	CEC
Topography	Elevation	ELEV
	Slope	Slope
	Aspect	ASP
Land-use/Land-cover	Land-use/Land-cover	LULC

由化石燃料所驅動，全球增溫將達到 3.3~5.7°C 間 (IPCC 2021)。未來的氣候資料自前述 CHELSA v2.1 下載 21 世紀末 (2071~2100 年的平均值) 兩種情境下可使用之生物氣候資料 (Karger *et al.* 2017)，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利用 / 覆蓋變項，SSP126 與 SSP585 情境分別根據 IMAGE 和 REMIND-MAGPIE 兩種預測土地利用 / 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 2 種 IAM 為無患子未來的生育地適宜性進行預測，並取其結果之平均數做為最終結果。

### (三) 生態棲位建模

藉由 R 套件 “sdm” 執行 ENM (Naimi and Araújo 2016)，推估無患子的生育地適宜性，使用 5 種常見的演算法，包括廣義線性模型 (generalized

linear model, GLM)、廣義相加模型 (generalized additive model, GAM) 等 2 種迴歸統計模型，以及增強迴歸樹 (boosted regression tree, BRT)、隨機森林 (random forest, RF)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 等 3 種機器學習演算法。首先，分別就物種存在與非存在紀錄 (或背景點) 兩類點位逢機選取 80% 做為訓練資料集，剩餘 20% 做為測試資料集。接續，演算過程採 10 折交叉驗證法 (10-fold cross-validation) 進行模型建構與驗證，5 種演算法共可建構 50 個模型。準確度評估以接受者操作特徵 (receiver operating characteristic) 曲線下面積 (area under the curve, AUC) 與真實技能統計值 (true skill statistics, TSS) 兩個常見指標進行，其中 AUC 值域介於 0.5~1，當值愈高代表模型預測之準確性愈佳，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 0.7 及 0.4 以上，即達合理之可接受標準 (Swets 1988, González-Ferreras *et al.* 2016)。最終，本研究僅選擇保留

AUC 高於 0.8 且 TSS 高於 0.5 的模型，並以各模型 TSS 做為權重，計算加權平均數，產製集成概率圖，用以表示無患子之生育地適宜性，當概率愈大，愈適宜無患子生存，反之則不適宜。

各預測變項對模型的重要性是透過 R 套件“sdm”中的“getVarImp”函數來衡量，它是比較所建構的模型在各別排除某一變項後，其 AUC 與原模型間的落差，亦即該變項改進 AUC 的程度；另反應曲線 (response curves) 是觀察適宜性集成概率與變項間之關係。待求得全區現時生育地適宜性後，以最大 TSS 所對應的適宜性做為閾值 (Liu *et al.* 2016)，並轉換獲取適宜 (1) 與非適宜 (0) 的二元化 (binary) 生育地圖，接續將此劃定標準套用於未來變遷情境下之生育地適宜性預測結果，以利後續動態分析與比較。

#### (四) 生育地分布動態分析

參照 Kumari *et al.* (2022) 對生育地動態的歸類法，以 ArcGIS 10.8 軟體之“Spatial Analyst Tools”模組獲取現時與未來情境之生育地分布動態圖，

其中型態屬擴增 (gain) 者，代表該像元現時狀態係非適宜生育地，但未來情境下可轉為適宜生育地 (0, 1)；反之，現時狀態為適宜生育地，但未來情境下轉為非適宜生育地之像元 (1, 0)，則定義為損失 (loss)。穩定 (stable) 是現時與未來均為適宜生育地者 (1, 1)；而現時與未來均屬非適宜生育地者 (0, 0)，則歸屬為不存在 (absence)。擴增與損失像元數除以現時適宜生育地像元數，可分別獲得擴增率 (percentage gain) 與損失率 (percentage loss)，而擴增率減去損失率，可表示總體生育地範圍變化 (range change)。

## 結 果

由相關分析保留預測變項計 12 個，據此以 5 種運算法建構無患子 ENM，結果顯示除 GLM 的 TSS 指標 (0.42) 表現略低外，其餘 4 種演算法獲取模型之性能相對優良，並以 RF、MaxEnt 表現更佳 (圖 2)。進一步僅保留模型性能達預設標準之模型 (即 AUC>0.8 且 TSS>0.5)，計有 40 個，可用以做為後續模型集成使用，其平

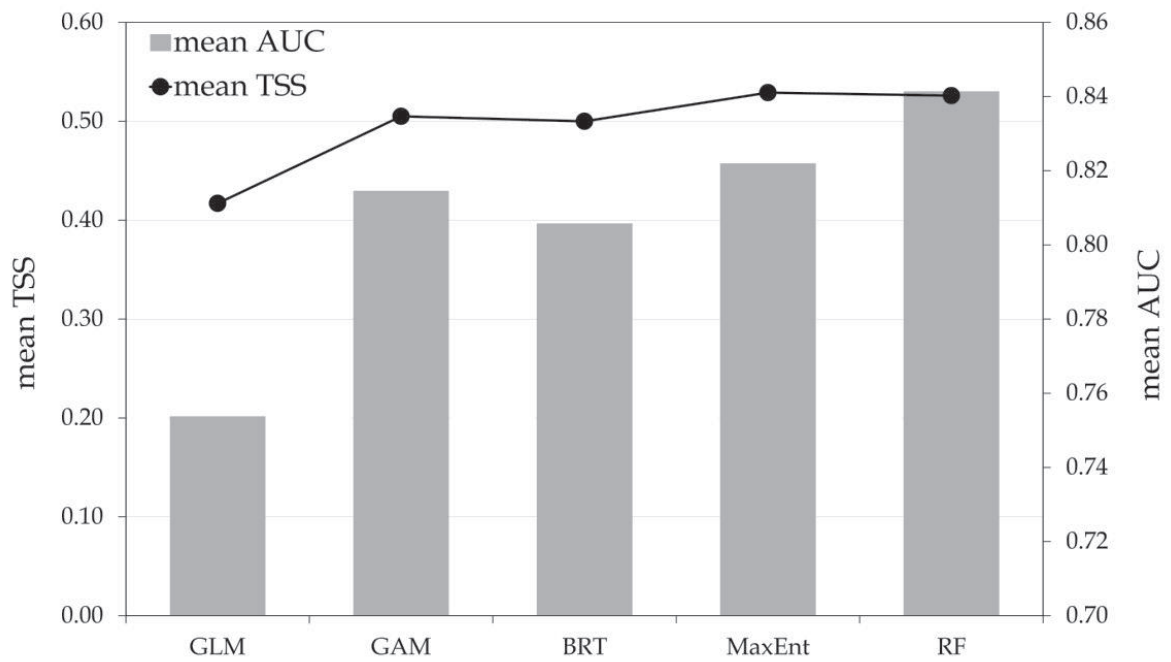


圖 2. 各演算法獲取模型之接受者操作特徵曲線面積 (area under a ROC curve, AUC)、真實技能統計值 (true skill statistic, TSS)。

Fig. 2. The area under the receiver operating characteristic curve (AUC) and the true skill statistic (TSS) obtained by each algorithm for the model.

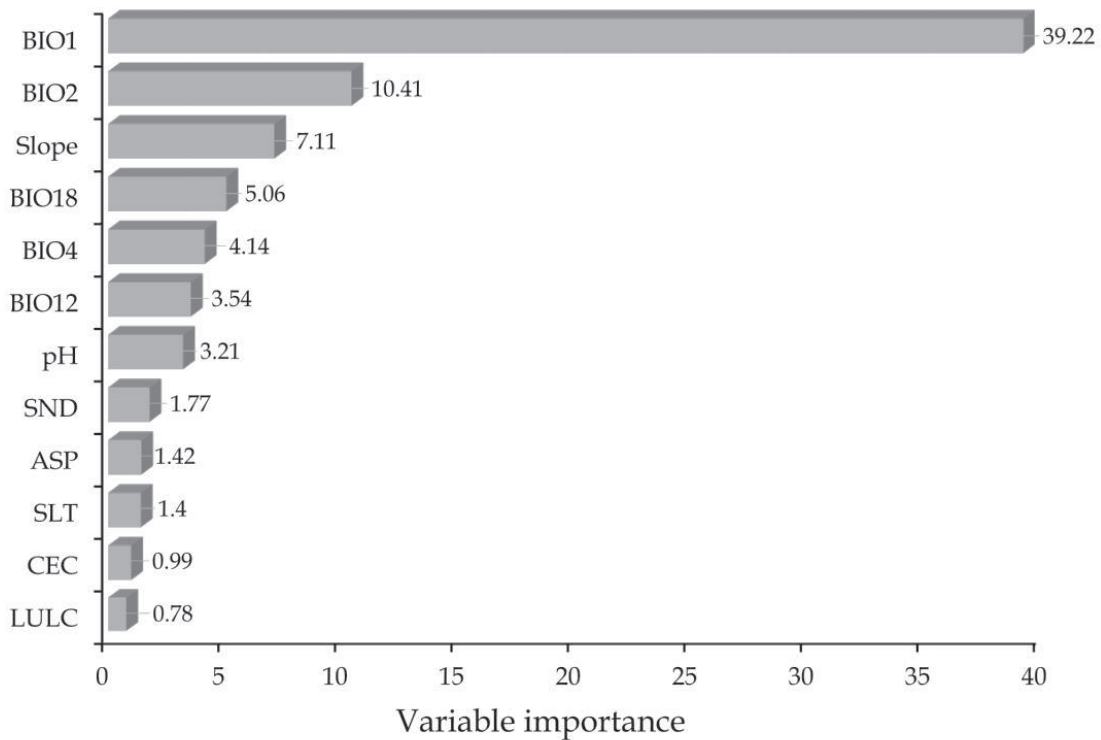


圖 3. 各預測變項對集成模型的重要性。

Fig. 3. Importance of each predictive variable to the ensemble model.

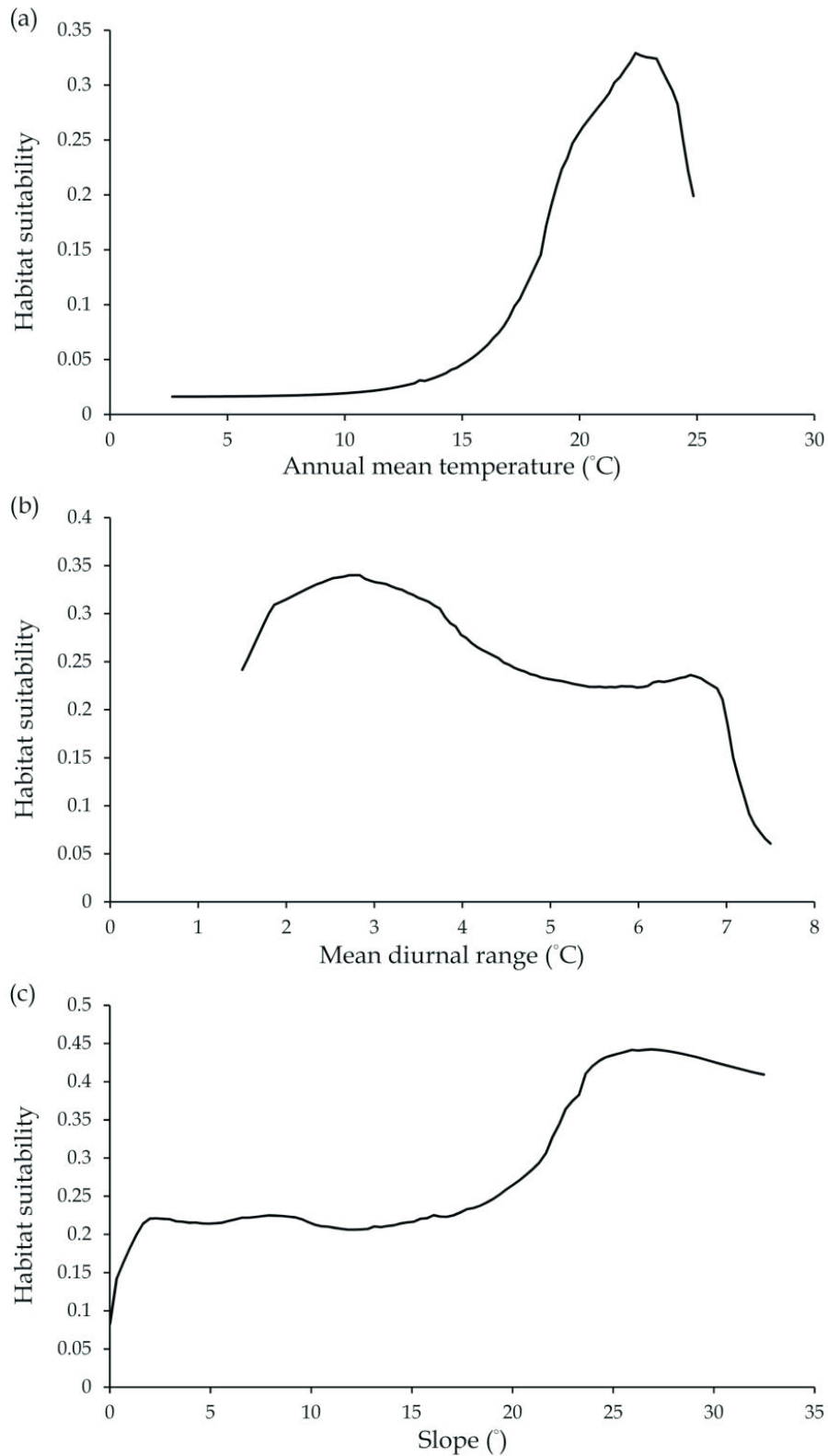


圖 4. 無患子對集成模型主要變項之反應曲線，(a) 為年均溫；(b) 平均溫度日較差；(c) 坡度。  
Fig. 4. Response curves for the topmost important variables in an ensemble model; (a) annual mean temperature; (b) mean diurnal range, and (c) slope.

均 AUC 為 0.82、平均 TSS 為 0.51。

各預測變項對集成模型的重要性如圖 3 所示，圖 3 顯示重要性最大者為年均溫 (39.22)，其次為平均溫度日較差 (10.41)，再者為坡度 (7.11)。相較於氣候類變項，除坡度外，其餘非氣候類變項重要性大多低於 4，對模型的影響力相對較小。進一步觀察集成模型所推導生育地適宜性對主要影響變項的反應曲線 (圖 4) 可發現，無患子生育地適宜性將隨年均溫上升而提升，並在 22.4~23.3 °C 間達到最適範圍，隨後適宜性急遽下降 (圖 4a)；而最適宜無患子生存之溫度日較差範圍介於 1.9~3.7 °C 間，隨後緩慢下降並持平，直至日較差大於 6.9 °C 後，適宜性快速驟降 (圖 4b)，不利其生存；此外，相較於平地，具適當坡度的生育地環境，更適宜無患子生存，其生育地適宜性可在坡度 25° 左右達到最高 (圖 4c)。

集成模型最大 TSS 所對應之生育地適宜性閾值為 0.22，依該閾值獲取之適宜生育地分布 (圖 5) 來看，無患子適存範圍多位處淺山地區，現

時除主要分布於阿里山山脈、玉山山脈、中央山脈南緣，以及海岸山脈等地帶外，竹苗地區丘陵亦有較大範圍的局部分布，估算面積約為 7,663 km<sup>2</sup>，ENM 為預測氣候變遷對物種適宜生育地影響的有效工具，在本研究所執行的 5 種演算法中，以基於機器學習演算法的 RF 與 MaxEnt 兩種模型模擬性能最佳，此與過往許多研究結果一致 (Kaky *et al.* 2020, Ardestani and Ghahfarrokhi 2021)，其中 RF 由多棵決策樹的共識預測所獲得 (Mi *et al.* 2017)，而 MaxEnt 具正則化 (regularization) 程序，本質上均能避免模型複雜化所造成的過度擬合 (Phillips and Dudík 2008)，進而提升模型的通用性 (generality) 或移轉性 (transferability)。最終生育地適宜性模型，本研究選擇僅保留高性能模型，以 TSS 做為權重，採加權平均進行集成預測，有助降低單一模型預測差異性與不確定性，並提升準確度與穩健性 (Araújo and New 2007, Marmion *et al.* 2009)，如此對後續分布動態的模擬，應足具說服力。

以預測變項對模型影響力來說，

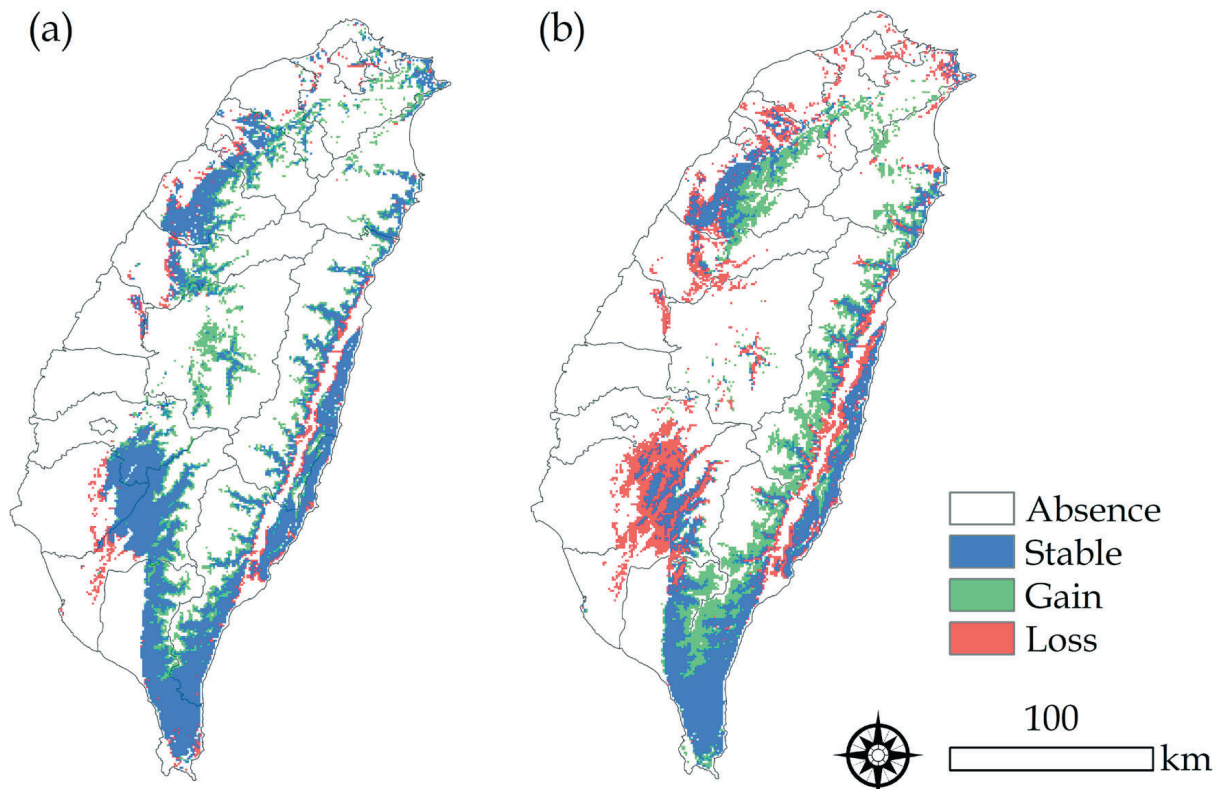


圖 5. 無患子在未來氣候變遷情境下的適宜生育地分布動態，(a) SSP126、(b) SSP585。

Fig. 5. Climate-related range shift of *Sapindus mukorossi* under future climatic scenarios. (a) SSP126, (b) SSP585.

表 2. 現時至未來氣候變遷情境下無患子的適宜生育地分布動態統計

Table 2. Summary of the range change statistics for *Sapindus mukorossi* under future climatic scenarios compared to current climatic conditions.

Scenarios	Area (km <sup>2</sup> )				Species range change (%)		
	Absence	Stable	Gain	Loss	Percent gain	Percent loss	Range change
SSP126	25,681	6,875	2,529	789	33.00	10.29	22.70
SSP585	25,107	4,698	3,103	2,966	40.49	38.70	1.79

氣候類明顯大於非氣候類變項，尤其與溫度相關的年均溫、平均日較差兩變項 (圖 3)，更是決定無患子生育地適宜性的關鍵因素。由詳細的生態棲位特徵 (圖 4) 可歸納出，無患子偏好相對溫暖、日夜溫差小，以及適當坡度的生育地環境，故未來暖化所促使山區環境的增溫與日較差的縮減 (Lin *et al.* 2015, Tsai *et al.* 2023)，有機會為無患子創造新的適宜生育地 (Dai *et al.* 2017)，致整體適宜生育地有朝高海拔方向微幅擴張的趨勢，惟過高的年均溫仍將逾越其生態耐受性，進而限縮緯度或海拔相對低的原有生育地 (圖 5)，尤以重度暖化的 SSP585 情境更為明顯，類似的生育地分布模擬研究 (Li *et al.* 2021, Liu *et al.* 2022) 亦提出相同的論點，其中 Li *et al.* (2021) 更強調無患子僅能在 SSP126 情境下增加適宜生育地，再進一步的暖化皆不利其生存，並對未來栽植或利用的空間配置增加不確定性。

相較喪失或遭受限縮的生育地，可穩定維持並持續擴張生育地的區位，更有利於物種的栽植與多樣性的

保存。然重度暖化下，緯度或海拔相對低的西南側適宜生育地顯著受到限縮 (圖 5)，推測可能與高溫對光合作用的抑制有關 (Yue *et al.* 2019)，這意味該區位可能不再適合無患子的生存與繁殖，該區位有必要優先強化這些損失區內的種原採集及保存工作 (Liu *et al.* 2022)。此外，當前若有栽植或計畫栽植無患子，建議及早規劃轉植其他可受惠於該暖化情境之樹種，抑或積極選育更為耐熱的品種 (Wang *et al.* 2014)，避免未來出現生長不良、收穫不佳，或衍生更多必要的撫育成本。

## 結 論

本研究集成多種演算法，建構無患子生態棲位模型，藉以模擬氣候變遷下的適宜生育地分布動態。基於研究結果可獲得以下結論：一、無患子適宜生育地特徵包含相對溫暖、日夜溫差小及適當坡度等，未來氣候條件的改變，將有利於山區適宜生育地範圍的擴張；二、大部分的現時適宜生育地範圍，在輕度暖化情境 (SSP126) 下，可望持續維持，並朝高海拔方向

微幅擴張，然重度暖化 (SSP585) 恐明顯限縮西南側的適宜生育地範圍，改變其既有的空間分布型態，故當前的栽植或利用計畫，有必要將氣候變遷併同納入考量，據以調適氣候變遷所帶來的影響。最後，生質能原料的生產與利用，仍須建構在合理空間規劃下，可能涉及環境影響、社會經濟，以及資源利用等層面，決策者須權衡其中的利弊 (Dale *et al.* 2011)。本研究基於 ENM 所推估的適宜生育地分布動態資訊，可供選擇栽植區位時之參考，至於進一步發展為生質能原料供應鏈系統，亦即收穫、運輸、儲存與分配等一系列過程 (Nunes *et al.* 2020)，則須考量到地形特徵、交通運輸、人力調度、以及與既有土地利用的衝突等諸多因素 (Immerzeel *et al.* 2014, Gasparatos *et al.* 2022)，這些均有待更深入的分析、整合與探討。

### 引用文獻

張揚狀。2016。21 世紀能源革命—生質能。科學發展 520: 46-50。  
盧孟明、卓盈旻、李思瑩、李清勝、

林昀靜。2012。臺灣氣候變化：1911~ 2009 年資料分析。大氣科學 40: 297-321。

經濟部能源局。2022。中華民國 111 年能源統計手冊。經濟部能源局。

林聖欽。2010。臺灣全志一卷二、土地志·氣候篇。國史館臺灣文獻館。

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.

Allouche, O., A. Tsoar, and R. Kadmon. 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 M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 42-47.

Ardestani, E. G., H. Rigi, and A. Honarbakhsh. 2021. Predicting optimal

- habitats of *Haloxylon persicum* for ecosystem restoration using ensemble ecological niche modeling under climate change in south-east Iran. *Restoration Ecology* 29: e13492.
- Ardestani, E. G. and Z. H. Ghahfarrokhi. 2021. Ensemble species distribution modeling of *Salvia hydrangea* under future climate change scenarios in Central Zagros Mountains, Iran. *Global Ecology and Conservation* 26: e01488.
- Chakraborty, M. and D. C. Baruah. 2013. Production and characterization of biodiesel obtained from *Sapindus mukorossi* kernel oil. *Energy* 60: 159-167.
- Chang, S., L. Zhao, G. R. Timilsina, and X. Zhang. 2012. Biofuels development in China: Technology options and policies needed to meet the 2020 target. *Energy Policy* 51: 64-79.
- 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: 125.
- Chhetri, A. B., M. S. Tango, S. M. Budge, K. C. Watts and M. R. Islam. 2008. Non-edible plant oils as new sources for biodiesel production. *International Journal of Molecular Sciences* 9: 169-180.
- Dai, G., J. Yang, C. Huang, C. Sun, L. Jia *et al.* 2017. The effects of climate change on the development of tree plantations for biodiesel production in China. *Forests* 8: 207.
- Dale, V. H., K. L. Kline, L. L. Wright, R. D. Perlack, M. Downing *et al.* 2011. Interactions among bioenergy feedstock choices, landscape dynamics, and land use. *Ecological Applications* 21: 1039-1054.
- Dormann, C. F., J. Elith, S. Bacher, C. Buchmann, G. Carl *et al.* 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study

- evaluating their performance. *Ecography* 36: 27-46.
- Dubayah, R. and P. M. Rich. 1995. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*. 9: 405-419.
- Elith, J. and J. R. Leathwick. 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 40: 677-697.
- Gasparatos, A., S. Mudombi, B. S. Balde, G. P. Von Maltitz, F. X. Johnson *et al.* 2022. Local food security impacts of biofuel crop production in southern Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 154: 111875.
- 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.
- Guisan, A., R. Tingley, J. B. Baumgartner, I. Naujokaitis-Lewis, P. R. Sutcliffe *et al.* 2013. Predicting species distributions for conservation decisions. *Ecology Letters* 16: 1424-1435.
- 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.
- Hu, J. 2017. Decreasing desired opportunity for energy supply of a globally acclaimed biofuel crop in a changing climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 857-864.
- Hurt, G. C., L. Chini, R. Sahajpal, S. Frolking, B. L. Bodirsky *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.
- Immerzeel, D. J., P. A. Verweij, F. Van

- Der Hilst, and A. P. Faaij. 2014. Biodiversity impacts of bioenergy crop production: A state-of-the-art review. *Gcb Bioenergy* 6: 183-209.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Summary for policymakers. *In: Climate Change 2021 – The physical science basis: Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Jia, L. and C. Sun. 2012. Research progress of biodiesel tree *Sapindus mukorossi*. *Journal of China Agricultural University* 17: 191-196.
- Kaky, E., V. Nolan, A. Alatawi, and F. Gilbert. 2020. A comparison between Ensemble and MaxEnt species distribution modelling approaches for conservation: A case study with Egyptian medicinal plants. *Ecological Informatics* 60: 101150.
- Karger, D. N., O. Conrad, J. Böhner, T. Kawohl, H. Kreft *et al.* 2017. Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data* 4: 1-20.
- Kumari, P., I. A. Wani, S. Khan, S. Verma, S. Mushtaq *et al.* 2022. Modeling of *Valeriana wallichii* habitat suitability and niche dynamics in the Himalayan Region under anticipated climate change. *Biology* 11: 498.
- Kunwar, R. M., K. B. Thapa-Magar, S. C. Subedi, D. H. Kutal, B. Baral *et al.* 2023. Distribution of important medicinal plant species in Nepal under past, present, and future climatic conditions. *Ecological Indicators* 146: 109879.
- Leroy, B., C. N. Meynard, C. Bellard, and F. Courchamp. 2016. virtualspecies, an R package to generate virtual species distributions. *Ecography* 39: 599-607.
- Li, Y., W. Shao, and J. Jiang, 2021. Pre-

- dicting the potential global distribution of *Sapindus mukorossi* under climate change based on MaxEnt modelling. *Environmental Science and Pollution Research* 29: 21751-21768.
- Lin, C. Y., Y. J. Chua, Y. F. Sheng, H. H. Hsu, C. T. Cheng *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., G. Newell, and M. White. 2016. On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution* 6: 337-348.
- Liu, J., C. Sun, Q. He, L. Jia, X. Weng *et al.* 2017. Research progress in *Sapindus* L. germplasm resources. *World Forestry Research* 30: 12-18.
- Liu, J., L. Wang, C. Sun, B. Xi, D. Li *et al.* 2021. Global distribution of soapberries (*Sapindus* L.) habitats under current and future climate scenarios. *Scientific Reports* 11: 19740.
- Liu, J., Y. Xu, C. Sun, X. Wang, Y. Zheng *et al.* 2022. Distinct ecological habits and habitat responses to future climate change in three east and southeast Asian *Sapindus* species. *Forest Ecology and Management* 507: 119982.
- Marmion, M., M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen, and W. Thuiller. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species distribution modelling. *Diversity and Distributions* 15: 59-69.
- Mi, C., F. Huettmann, Y. Guo, X. Han, and L. Wen. 2017. Why choose Random Forest to predict rare species distribution with few samples in large undersampled areas? Three Asian crane species models provide supporting evidence. *PeerJ* 5: e2849.
- Naimi, B. and M. B. Araújo. 2016. sdm:

- a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography* 39:368-375.
- Nunes, L. J. R., T. P. Causer, and D. Ciolkosz. 2020. Biomass for energy: A review on supply chain management models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120: 109658.
- Papini, A. and M. C. Simeone. 2010. Forest resources for second generation biofuel production. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 126-133.
- Phillips, S. J. and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- Rahmanian, S., H. R. Pourghasemi, S. Pouyan, and S. Karami. 2021. Habitat potential modelling and mapping of *Teucrium polium* using machine learning techniques. *Environmental Monitoring and Assessment* 193: 1-21.
- Sahoo, G., A. Sharma, and A. C. Dash. 2022. Biomass from trees for bioenergy and biofuels—A briefing paper. *Materials Today: Proceedings* 65: 461-467.
- Segurado, P. and M. B. Araujo. 2004. An evaluation of methods for modeling species distributions. *Journal of Biogeography* 31: 1555-1568.
- Souza, G. M., M. V. R. Ballester, C. H. de Brito Cruz, H. Chum, B. Dale *et al.* 2017. The role of bioenergy in a climate-changing world. *Environmental Development* 23: 57-64.
- Swets, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240: 1285-1293.
- Titeux, N., K. Henle, J. B. Mihoub, A. Regos, I. R. Geijzendorffer *et al.* 2016. Biodiversity scenarios neglect future land-use changes. *Global Change Biology* 22: 2505-2515.
- Tsai, I. C., P. R. Hsieh, C. T. Cheng, Y. S. Tung, L. Y. Lin *et al.* 2023. Impacts of 2 and 4°C global warmings on

- extreme temperatures in Taiwan. *International Journal of Climatology* 43: 702-719.
- Von Cossel, M., M. Wagner, J. Lask, E. Magenau, A. Bauerle *et al.* 2019. Prospects of bioenergy cropping systems for a more social-ecologically sound bioeconomy. *Agronomy* 9: 605.
- Wan, J. Z., J. H. Yu, G. J. Yin, Z. M. Song, D. X. Wei *et al.* 2019. Effects of soil properties on the spatial distribution of forest vegetation across China. *Global Ecology and Conservation* 18: e00635.
- Wang, W., X. Tang, Q. Zhu, K. Pan, Q. Hu *et al.* 2014. Predicting the impacts of climate change on the potential distribution of major native non-food bioenergy plants in China. *PLoS ONE* 9: e111587.
- Yue, J., Q. Tian, J. Wu, L. Gao, W. Zhang *et al.* 2019. Response of seedling growth and photosynthetic characteristics of *Sapindus mukorossi* to different habitats in low mountainous upland region of Chongqing, southwestern China. *Journal of Beijing Forestry University* 41: 75-85.
- Zhang, J., H. Li, Y. Shi, M. Li, Y. Zhang *et al.* 2012. Photosynthesis and carbon sequestration characteristics of thirty afforestation arbor species in plain area. *Journal of Southwest Forestry University* 32: 6-24.