

# 模擬氣候變遷影響台灣常見花蜂 之分佈範圍

## Modeling effects of climate change on common pollen bees' range in Taiwan

呂明倫 黃靜宜\*

Ming-Lun Lu 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

野生花蜂在食物鏈中常扮演著重要的能量推動角色，所提供的授粉服務，能幫助植物繁衍與作物生產，是建構陸域生態系完整性與維持人類社會發展的核心物種。氣候變遷被認定是威脅花蜂族群減少的原因之一，本研究以台灣本島 10 種常見花蜂為目標，運用物種點位資料與集成式生態棲位建模，研究結果顯示，所建構的預測模型具備良好的性能，進一步推估代表濃度途徑 (representative concentration pathway, RCP) 情境下，物種適宜棲地之時空動態，研究發現，高排碳的情境 (RCP 8.5)，將導致花蜂的適宜棲地發生明顯改變，有 6 種花蜂呈現減少，4 種具擴張趨勢，位於高緯度及高海拔的物種皆有適宜棲地縮減的可能，反觀，適於低緯度及低海拔區域的耐熱物種會增加。因此，未來有關因應氣候變遷的保育策略，建議考量這兩種不同的環境做分區規劃。

**關鍵詞：**授粉、生態棲位建模、適宜棲地、時空動態、保育

## **Abstract**

Wild pollen bees often play an important energy-promoting role in the food chain. The pollination services they provide can help plant reproduction and crop production. They are the keystone species that contribute to the integrity of the terrestrial ecosystem and maintain the development of human society. Climate change is identified as one of the reasons that threaten the reduction of pollen bee populations. In this study, an ecological niche model was “assembled” for 10 common pollen bee species in Taiwan based on species occurrence records. The results showed that our model has good performance, and further estimated the spatiotemporal dynamics of suitable habitats under the representative concentration pathway (RCP). The study found that the high carbon emission situation scenario (RCP 8.5) may cause significant changes to suitable habitats of pollen bees. Among them, six species showed a decrease in population and four species had a trend of expansion. Species located at high latitudes and altitudes may experience possible loss of suitable habitat, while heat-resistant species that prefer low latitudes and altitude areas may increase in population. Therefore, we recommend to consider these two different environments for zone planning in future conservation strategies in response to climate change.

**Key words:** pollination, ecological niche modeling, suitable habitat, spatiotemporal dynamics, conservation

## 緒言

自 19 世紀以來世界人口數持續攀升，同一時期，人類過度依賴石化燃料並破壞生態環境，使二氧化碳等溫室氣體在大氣中的濃度大幅提高，全球的平均溫也隨之上揚，政府間氣候變遷專門委員會 (The Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC) 預測，與 1986~2005 年相比，到 21 世紀末 (2081~2100 年)，全球平均溫度最低會升高 0.3°C，最高將升高到 4.8°C (IPCC 2013)。暖化會對生物多樣性會造成重大影響，由於氣候與生物之分佈及生存密切相關，情況持續惡化將可能導致某些物種消失 (Schloss *et al.* 2012, Randall and Woesik 2015)。

花蜂 (pollen bees) 因以植物的花粉及花蜜為糧食，故會頻繁的訪花，間接幫助作物或植物授粉，是自然界中最重要的授粉昆蟲之一，在食物鏈中常扮演著重要的能量推動角色，所提供的授粉服務，對植物繁衍起相當關鍵的傳遞作用 (Potts *et al.* 2016, Puffal *et al.* 2017)。就人類社會而言，野生花蜂參與了全球約 1/3 農作物的授

粉工作 (Kremen *et al.* 2007, Klatt *et al.* 2014)，在授粉效率的表現上比會釀蜜的蜜蜂 (honeybees) 更加優越 (Garibaldi *et al.* 2013)，因此，維持其物種多樣性不僅可確食物的供應 (Winfrey *et al.* 2018)，亦可穩定地方的經濟收入 (Giannini *et al.* 2017)，由此顯示，野生蜂是建構陸域生態系完整性與維持人類社會發展的核心物種。

近代全球蜂類數量大幅減少，成因雖眾說紛紜，惟氣候變遷被認定是 21 世紀的主要威脅之一 (Kerr *et al.* 2015, Papanikolaou *et al.* 2016, Aguirre-Gutiérrez *et al.* 2017)，因環境或物候的改變，會迫使野生花蜂須另尋其他適合的生存棲地。Nemésio *et al.* (2016) 就指出，暖化使巴西大西洋森林的平均氣溫升高，北方的特有蘭花蜂 (orchid bee) 可能會因此向南遷移，但因森林砍伐形成的地景破碎化會阻斷蜂群的路徑；同樣在巴西，Giannini *et al.* (2020) 針對亞馬遜森林東部 5 科 216 種花蜂，評估暖化對分佈的影響，發現 95% 的物種，適宜棲地面積將會縮減；在東亞地區，Naeem *et al.*

(2019) 評估 29 種特有熊蜂 (bumblebee) 對未來氣候變遷的分佈影響，並發現超過一半的物種呈現面積縮小狀態；Gonzalez *et al.* (2021) 則指出，哥倫比亞 9 種常見能幫助作物授粉的無螫蜂 (stingless bee) 中，有 7 種氣候適宜區顯著減少，從而影響到當地農村的經濟。

生態棲位建模 (ecological niche modeling, ENM) 是根據目標物種存在的環境條件，預測適宜的棲地範圍，其整合物種出現所在的背景資料 (環境因子)，經過演算獲取未知點的分佈可能性。國內外將 ENM 應用於氣候變遷對物種分佈影響的研究方興未艾，因所建構之模型再搭配氣候變遷情境，有助預測出未來的時空動態資訊，這其中也包含許多花蜂的研究 (呂等 2019, Marchioro *et al.* 2020, Giannini *et al.* 2020, Gonzalez *et al.* 2021)。為提升 ENM 的準確性和可靠性，集成式生態棲位建模 ('ensemble' ecological niche modeling, EENM) 受到廣泛的應用，其利用不同的演算法建構多模型，並將各模型預測結果結合為一，

以達到共識的效果 (Araújo and New 2007)，常見的演算法如廣義相加模型 (generalized additive model, GAM) 與多變量適應迴歸 (multivariate adaptive regression splines, MARS) 屬非線性迴歸之統計模型；增強迴歸樹 (boosted regression tree, BRT)、隨機森林 (random forest, RF)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 與支援向量機 (support vector machine, SVM) 等屬機器學習演算法，近年這些方法常被用於 EENM，做為推估物種適宜棲地的工具 (Naimi and Araújo 2016, Hao *et al.* 2019)，也有被應用於蜂類的研究 (Elias *et al.* 2017, Giannini *et al.* 2020, Lu *et al.* 2021)。

目前台灣預測氣候變遷對花蜂影響的研究仍屬少數，本研究便採用生物調查資料與 EENM 為基礎，模擬 10 種常見花蜂的適宜棲地，進一步配合近期發展的氣候變遷情境，預測時空動態，研究成果期能有助推動生物多樣性保育和永續利用工作。

## 材料與方法

### 一、研究區概述

臺灣位於歐亞大陸與太平洋的交界處，西隔臺灣海峽與中國大陸相望 (圖 1a)，土地面積約 36,000 km<sup>2</sup>，為世界第 38 大島嶼，島內多為山地與丘

陵，地形起伏變化大，平均海拔高約 660 m，最高山為玉山，標高 3,952 m，平原主要分佈於西部沿海 (圖 1b)，人口約 2,300 萬人，大多數集中於西部平原的都會區。氣候方面，因北回歸線貫穿，以北為亞熱帶季風氣候，以南則為熱帶季風氣候，另由於高山林

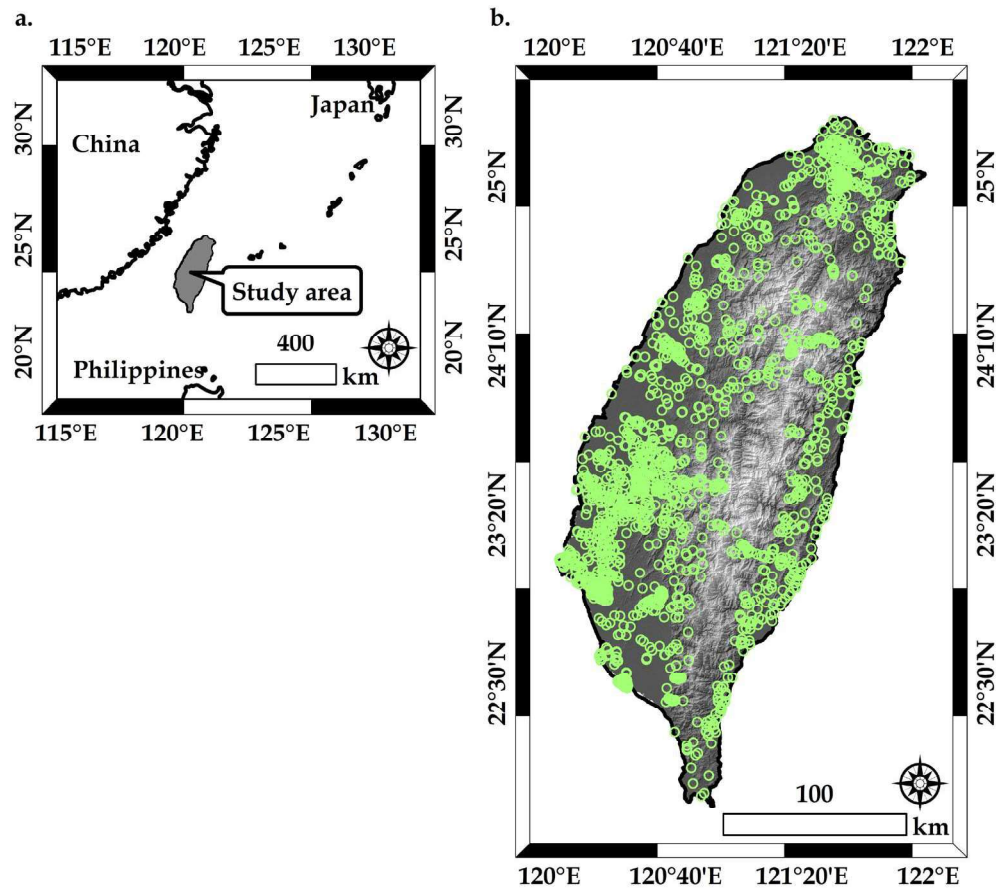


圖 1. (a) 研究區地理位置圖；(b) 物種出現點位 (綠色標記) 及數值高程模型 (digital elevation model)，顏色愈亮，表示海拔愈高。

Fig. 1. (a) Geographical location of the study area; (b) Species occurrence records (green circle) and digital elevation model, where darker colors indicate higher elevations.

立，隨著海拔的落差，構成熱帶、亞熱帶、溫帶及寒帶等複雜的氣候類型。

## 二、研究方法

### (一) 物種資料

蒐集了無墊蜂 (*Amegilla*)、蜜蜂 (*Apis*)、熊蜂 (*Bombus*) 與木蜂 (*Xylocopa*) 等 4 屬共 10 種常見的花蜂出現點位 (圖 1b)，來源包括林務局生態調查資料庫系統 ([ecollect.forest.gov.tw](http://ecollect.forest.gov.tw))，該批資料整合台灣近 20 年的全國生物調查成果；其次，整理林業試驗所昆蟲標本館之標本採集紀錄；此外，也納入 Global Biodiversity Information Facility

的資料，其中的 iNaturalist 數據僅使用研究等級。所有數據的座標僅保留 3 位小數以上，像元的空間解析力設定為 1×1 km，並排除網格內重複記錄點位，可減少空間自相關及地理取樣偏差的影響，整理後計有 1465 筆資料 (表 1)。

### (二) 環境資料

針對現時的氣候資料，從 WorldClim 資料庫收集了 19 個生物氣候變項 (Hijmans *et al.* 2005)；地形方面，從內政部取得數值高程模型 (digital elevation model)，進一步利用 ArcGIS

表 1. 物種的調查紀錄筆數，符合 1×1 km 的空間解析力

**Table 1.** Occurrence records of the study species and were georeferenced to the spatial resolution of the 1×1 km.

Species	Chinese name	Record
<i>Amegilla calceifera</i>	鞋斑無墊蜂	27
<i>Amegilla urens</i>	螫無墊蜂	22
<i>Apis mellifera</i>	西方蜜蜂	976
<i>Bombus bicoloratus</i>	雙色熊蜂	73
<i>Bombus flavescens</i>	黃色熊蜂	63
<i>Bombus formosellus</i>	信義熊蜂	33
<i>Bombus trifasciatus</i>	威氏熊蜂	45
<i>Xylocopa collaris</i>	白領帶木蜂紹德亞種	84
<i>Xylocopa rufipes</i>	紅胸木蜂	42
<i>Xylocopa tranquebarorum</i>	銅翼皆木蜂	100

10.6 軟體製作坡度與坡向；另由 Socioeconomic Data and Applications Center 獲得人類影響指數 (human influence index)，所有圖層的空間解析力重取樣為 1×1 km，總計有 23 個預測變項供建構模型。為克服變項在統計上的多重共線性問題，以 R (3.6.3 版本) 的 usdm 軟件包 (Naimi *et al.* 2014) 計算變異數膨脹因子 (variance inflation factor, VIF)，僅保留 VIF<5 的預測變項，該標準下，篩選出 8 個變項建構模型 (表 2)。

對於未來的模型，本研究假設氣候因子會隨著氣候變遷情境發生變化，其餘的變項則保持恆定，因此，選擇了 3 種碳排放情境，即 Intergov-

ernmental Panel on Climate Change 第 5 次評估報告所發布之代表濃度途徑 (representative concentration pathway, RCP)，RCP 2.6、4.5 和 8.5 各表示輻射驅動力 (radiative forcing) 於 1750~2100 年間增加了 2.6、4.5 及 8.5 Wm<sup>-2</sup>，平均溫度的預期變化範圍各為 0.3~1.7 °C、1.1~2.6 °C 與 2.6~4.8 °C，分別代表輕度、中度和重度等暖化情境 (IPCC 2013)。可從 WorldClim 各別獲得 2070 年 (2061~2080 年的平均值) 3 種情境下，藉由統計降尺度產生 1×1 km 解析力的生物氣候變項，選擇適用於預測台灣氣候的全球氣候模式 (global climate model, GCM)，包括 CESM1-CAM5、CSIRO-Mk3-6-0、

表 2. 模擬花蜂分佈的預測變量

**Table 2.** Predictor variable to model the distribution of pollen bees.

Variable	Source
Temperature seasonality	
Maximum temperature of the warmest month	
Annual precipitation	WorldClim dataset
Precipitation seasonality (coefficient of variation)	
Precipitation of warmest quarter	
Slope	Ministry of the Interior
Aspect	
Human influence index	SDAC

SDAC=Socioeconomic Data and Applications Center

GISS-E2-R 與 MIROC5 (Lin and Tung 2017)，使用這 4 個 GCM 生產的未來生物氣候，各別為每個物種建模，並取平均獲得棲地適宜性，可消彌 GCM 間的不確定性 (Araujo and New 2007)。

### (三) 生態棲位建模

藉由 R 平台的 sdm 軟件包 (Naimi and Araújo 2016) 執行 EENM，預測各種花蜂的適宜棲地，使用的演算法包括了 GAM、MARS、BRT、RF、MaxEnt 與 SVM 等 6 種，由於所有演算法都需要背景點位 (偽無出現點)，因此，每一物種在研究區內生逢機產生 10000 個點位。將各物種出現的點位逢機選取 70% 做為訓練資料集，剩餘 30% 做為測試資料集，每種演算法使用 bootstrap 抽樣法來評估模型性能，進行 10 次的重複運算，10 種花蜂 × 6 種演算法 × 10 次重複，總共建構 600 個模型。

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)，以及真實技能統計值 (true

skill statistics, TSS) 評估模型的性能，其中 AUC 值域介於 0.5~1，當值愈高代表模式預測出來的準確性愈佳，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 以上即為良好的標準 (Swets 1988, Ben Rais Lasram *et al.* 2010)。模型的集成方法是留 TSS>0.6 之模型，再基於 TSS 做加權平均，產生各物種的集成概率圖，概率愈大者，愈有可能是其適宜的棲地，故可表示棲地適宜性。

各物種的適宜棲地範圍，參考靈敏度 (sensitivity) 和特異性 (specificity) 相加後的最大值，取該值對應的概率做為閾值，並轉換為二位元 (binary) 的適宜 (1) 和非適宜 (0) 棲地圖。現時與 2070 年代 3 種氣候變遷情境下，10 種蜂種各別可產生 4 種適宜棲地面積，以現時為基期，可獲得現時至未來之面積增減率，即 (未來 - 現時) / 現時 × 100。此外，將研究區各種蜂種之適宜棲地累加，可獲得物種數目分佈圖，僅保留物種數 ≥ 1 之網格，可獲取整

體花蜂適宜棲地範圍，並瞭解從現時至未來(3種氣候變遷情境)之空間轉移與面積變化情形。

## 結果

利用6種演算法各別獲得10種花蜂的預測模型，藉由測試資料集計算出來的平均AUC與TSS如表3，除*A. mellifera*僅有RF較佳外，多數物種在各演算法下的擬合結果皆表現良好，又以RF的表現最佳，由於每種花蜂都有模型達到性能良好的標準，為獲得高準確的預測結果，後續僅保留292個高性能的模型(TSS>0.6)進行集成運算。

使用EENM模擬各花蜂的適宜棲地，結果發現，無墊蜂、蜜蜂與木蜂等3屬多分佈於平地至低海拔山區，除*A. mellifera*外，多數座落在北部地區，中南部較為零散，另熊蜂屬適宜棲地的海拔分佈較高，主要在中央高山帶(圖2)。以現時的適宜棲地面積為基礎，隨著氣候變遷的發展，發現大多數的花蜂會受到影響，10種物種中，6種花蜂的適宜棲地面積會縮

減，而*A. calceifera*、*B. flavescens*與*B. formosellus*等3種的面積消失40%以上，另外3種相對影響幅度較小；適宜棲地面積擴增者計有4種，*A. mellifera*、*B. bicoloratus*與*X. tranquebarorum*在RCP 8.5的情境增加最明顯，均超過100%，*X. collaris*則較為穩定(圖3)。

從現時至2070年代，整體花蜂適宜棲地的範圍變化如圖4及圖5，3種氣候變遷情境下，空間分佈型態隨著暖化的現象提升，變動程度也愈劇烈(圖4)。面積經計算後可知，適宜棲地擴增的比縮減的現象明顯，RCP 2.6與RCP 4.5情境下，適宜棲地增加面積分別為4645 km<sup>2</sup>與5283 km<sup>2</sup>，RCP 8.5情境更突增了8228 km<sup>2</sup>，另一方面，該情境減少的面積約5856 km<sup>2</sup>(圖5)。就空間分佈而言(圖4)，適宜棲地擴增的範圍以低海拔地區為主，東、西兩側平原大多由*A. mellifera*所貢獻，南部的山區為*B. bicoloratus*，尤其是RCP 8.5情境可看出明顯的趨勢；適宜棲地縮減則位於中至高海拔山區，該區物種則以熊蜂為主(補

表 3. 廣義相加模型 (generalized additive model, GAM)、多變量適應迴歸 (multivariate adaptive regression splines, MARS)、增強迴歸樹 (boosted regression tree, BRT)、隨機森林 (random forest, RF)、最大熵 (maximum entropy, MaxEnt) 與支援向量機 (support vector machine, SVM) 所獲得之接受者操作特徵曲線面積及真實技能統計值

**Table 3.** Scores collected from the area under the receiver operating characteristic Curve (AUC) and true skill statistic (TSS) to boosted regression tree (BRT), generalized additive model (GAM), multivariate adaptive regression splines (MARS), maximum entropy (MaxEnt), random forest (RF), and support vector machine (SVM).

Species		BRT	GAM	MARS	MaxEnt	RF	SVM
<i>A. calceifera</i>	AUC	0.90	0.86	0.89	0.87	0.90	0.86
	TSS	0.71	0.71	0.72	0.68	0.75	0.70
<i>A. urens</i>	AUC	0.90	0.90	0.85	0.87	0.90	0.86
	TSS	0.74	0.73	0.68	0.72	0.74	0.66
<i>A. mellifera</i>	AUC	0.78	0.79	0.79	0.79	0.91	0.78
	TSS	0.41	0.43	0.43	0.44	0.68	0.44
<i>B. bicoloratus</i>	AUC	0.76	0.77	0.78	0.85	0.85	0.83
	TSS	0.49	0.46	0.60	0.62	0.64	0.62
<i>B. flavescens</i>	AUC	0.89	0.86	0.88	0.87	0.90	0.88
	TSS	0.67	0.63	0.66	0.68	0.70	0.66
<i>B. formosellus</i>	AUC	0.92	0.93	0.91	0.93	0.95	0.94
	TSS	0.78	0.80	0.76	0.78	0.84	0.83
<i>B. trifasciatus</i>	AUC	0.91	0.91	0.89	0.89	0.92	0.90
	TSS	0.72	0.75	0.72	0.72	0.73	0.69
<i>X. collaris</i>	AUC	0.87	0.85	0.86	0.86	0.92	0.86
	TSS	0.67	0.64	0.67	0.64	0.73	0.68
<i>X. rufipes</i>	AUC	0.92	0.91	0.90	0.91	0.95	0.92
	TSS	0.77	0.77	0.76	0.75	0.82	0.76
<i>X. tranquebarorum</i>	AUC	0.89	0.78	0.86	0.88	0.87	0.84
	TSS	0.67	0.47	0.62	0.64	0.67	0.65

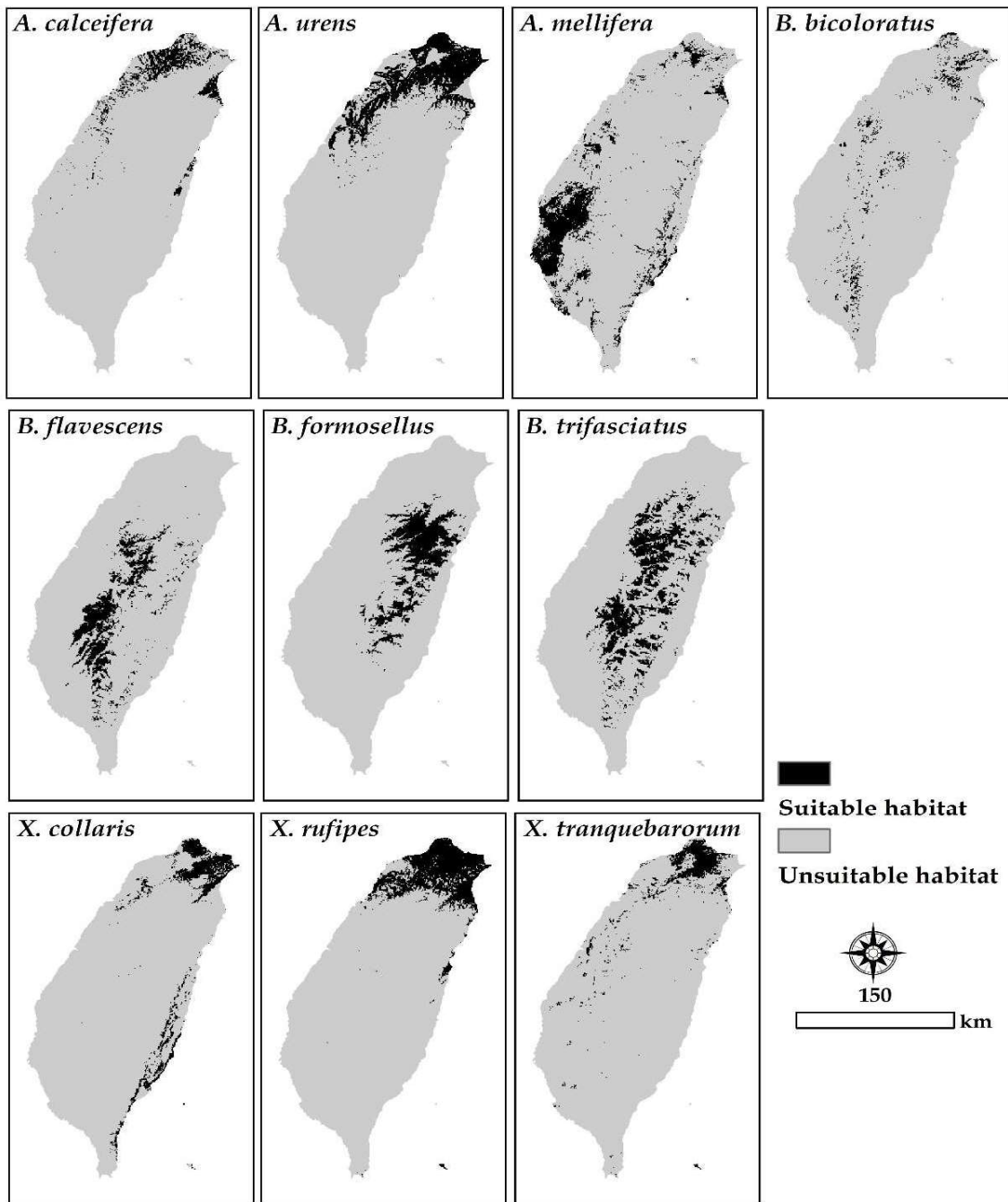


圖 2. 各花蜂物種現時的預測分佈範圍

Fig. 2. Predicted current distribution of pollen bee species.

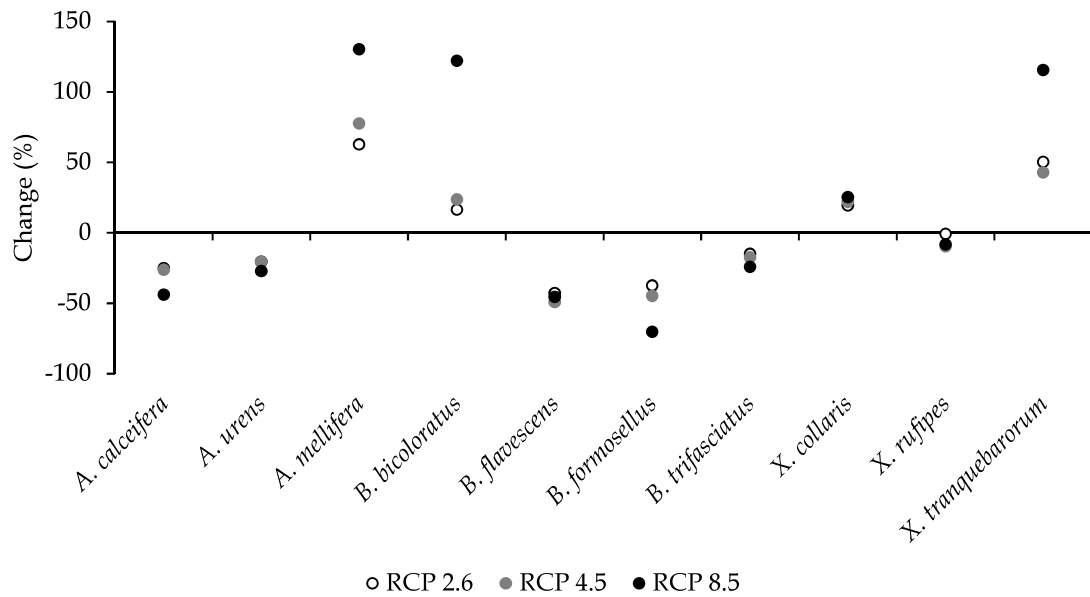


圖 3. 10 種蜂種在現時和未來 RCP 2.6、RCP 4.5 和 RCP 8.5 氣候變遷情境 (2070 年代) 的適宜棲地面積變化。

Fig. 3. Shifts in suitable habitat areas of 10 bee species in a RCP 2.6, RCP 4.5, and RCP 8.5 scenario of future climate change for the 2070s, respectively.

充圖 3)。

## 討論

EENM 為預測氣候變遷對物種適宜棲地影響之利器，透過多模型的整合可提升預測的準確性 (Araújo and New 2007, Marmion *et al.* 2009)。本研究結果證實，該種方式的建模，對於花蜂的分佈預測也可獲得良好的效果，然而，集成建模的缺點，即在於需要歷經長時間的訓練過程，就單一的演算法而言，本研究發現 RF 的

表現最理想 (表 3)，這與過去探討多種蜂類的研究結果一致 (Elias *et al.* 2017)，因此，欲提升運算效能，單獨使用 RF 建模是一種可考慮的選項。

蜂類本身對氣候的反應相當敏感，因此，氣候因子常被做為觀察生物習性的重要指標 (Dew *et al.* 2016, Shell and Rehan 2016)，本研究用於建構模型的變項也以氣候類為多數 (表 2)，因此，預測出來的花蜂適宜棲地，會明顯受到氣候特徵的影響。關

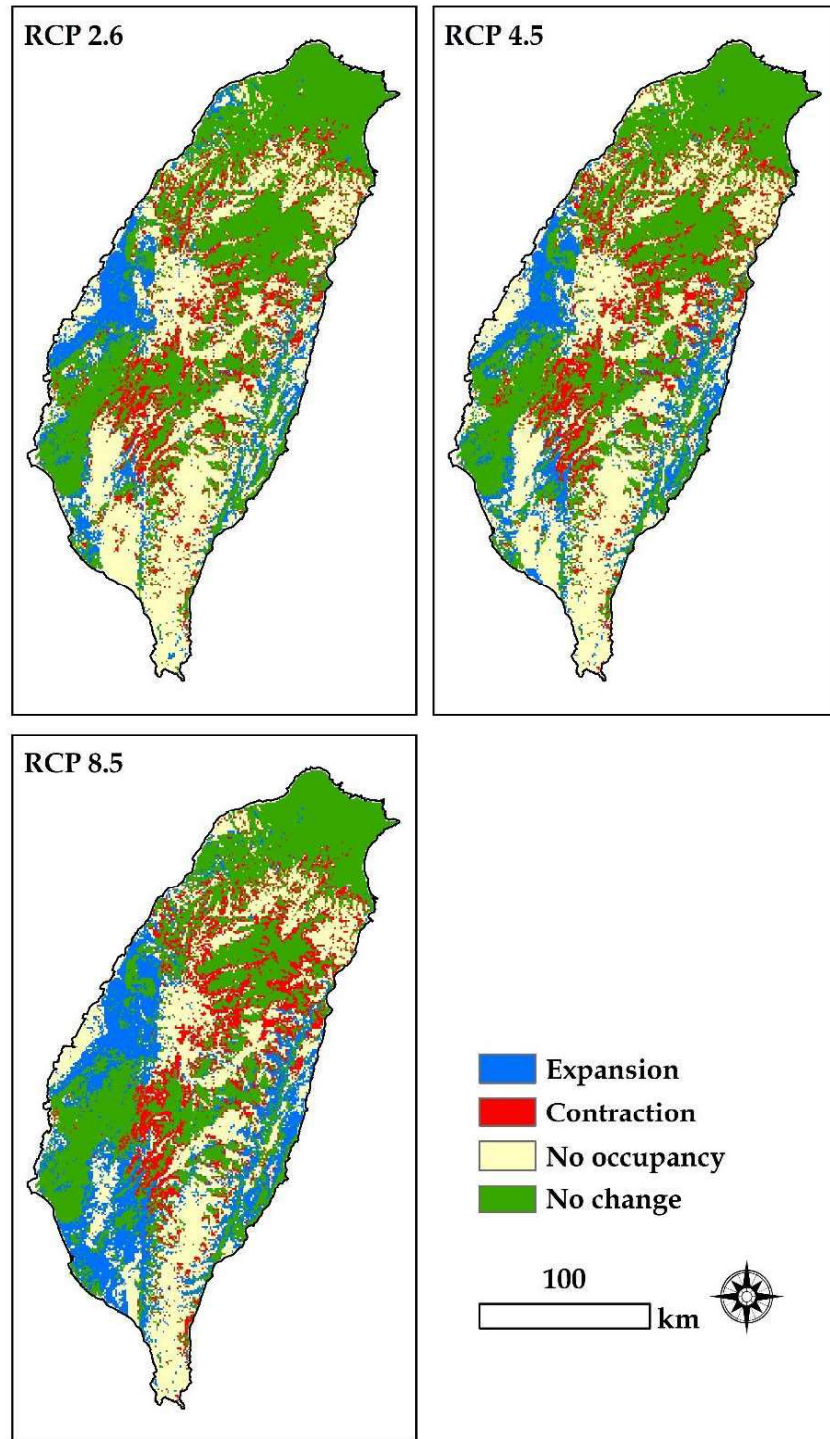


圖 4. 現時至 2070 年代間常見花蜂在不同氣候變遷情景下，適宜棲地之時空動態。

**Fig. 4.** Spatiotemporal dynamics of suitable habitat for the common pollen bee in different climate change scenarios from present to 2070s.

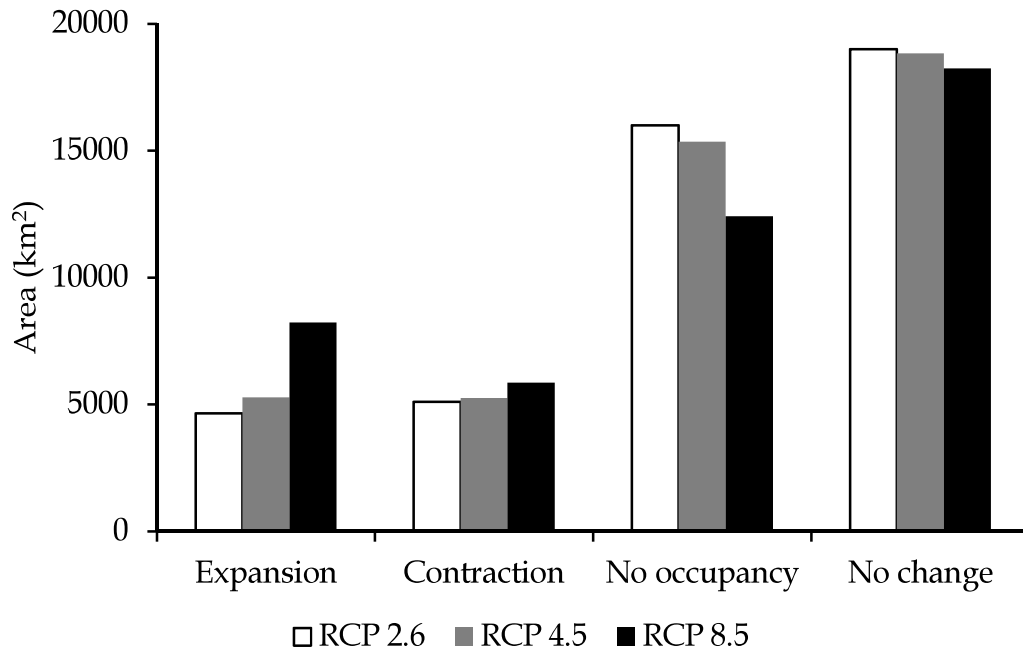


圖 5. 現時至 2070 年代間常見花蜂在不同氣候變遷情景之面積變化計算。

Fig. 5. Histogram of area changes of common pollen bees in different climate scenarios from the present to the 2070s.

於各花蜂分佈特性的文獻，國內除熊蜂屬外，其他類群較為缺乏，參考國外的研究可知，無墊蜂與木蜂屬是廣泛分布於低中海拔和溫度偏高的環境 (Karunaratne and Edirisinghe 2009)，但本研究的結果明顯集中於北部地區，中南部顯得非常零星，這與過往的研究有些落差，應有可能是物種本身的調查點位不均，造成預測結果有明顯的空間異質性。相較於廣泛分佈

於低海拔的 *A. mellifera* (Ruttner *et al.* 1978)，適宜棲地主要在中南部，但其他各地也有存在一些小區塊的面積，較符合應有的認知，由此可知，目前國內可利用的資料庫中，無墊蜂與木蜂屬的調查點位仍有缺口有待補充。熊蜂偏好於冷涼的氣候條件 Williams (1998)，本研究探討的 4 種熊蜂，*B. formosellus* 較侷限於高海拔，其餘為常見種且海拔分佈較廣，適宜棲地的

預測結果與過往的研究相去不遠，主要都分佈於山區 (宋等 2011)。

關於台灣的氣候變遷預測，前人的研究顯示，無論是過去及未來，所有 GCM 的預測結果顯示，台灣各地受全球暖化影響甚鉅，平均溫度都往升高的走向發展 (Hsu and Chen 2002, Lin *et al.* 2015; 2017)。在空間格局上，高山升溫的幅度會比平原地區明顯，緯度方面則是北部比南部地區明顯，這將對生態系和物種分佈產生重大影響 (Lin *et al.* 2015)。正如本研究以現有資料基礎所建構的模型，未來 RCP 8.5 氣候變暖的情境下，適宜棲地位於北部地區 (高緯度) 的物種，皆有縮減的可能，變化較明顯者為 *A. calceifera*，垂直梯度方面，則以 *B. flavescens* 與 *B. formosellus* 兩種高山熊蜂的減少幅度較大 (圖 3)。相反地，部分可調適暖化的花蜂面對氣候變遷卻能保持穩定發展，並擴張其族群勢力 (Giannini *et al.* 2013, Silva *et al.* 2015, 2017)，本研究的結果即發現，*A. mellifera*、*B. bicoloratus* 和 *X. tranquebarorum* 的適宜棲地都可能因

暖化往低海拔及低緯度區域擴增。參考相關的研究中，呂等 (2019) 預測與 *A. mellifera* 親緣關係相當接近的 *Apis cerana*，同樣發現該蜂種的適宜棲地不減反增，這兩種物種本身皆有耐高溫的能力 (Li *et al.* 2019)。至於 *B. bicoloratus* 方面，其雖偏好冷涼氣候，惟宋等 (2011) 的調查指出，該種熊蜂於低海拔的分佈比其他種多，可能具有較佳的耐熱性，由此顯示，這些物種未來皆具備調適暖化的潛能。

集合 10 種花蜂的適宜棲地，觀察受氣候變遷驅動之時空動態，發現 RCP 8.5 情境會使整體適宜棲地擴增的現象大於縮減，範圍以平地及低海拔山區為主 (圖 4 及 5)，然而，僅由少數物種所貢獻，這樣的結果將不利於生物多樣性。另一方面，臺灣地狹人稠，低海拔環境藏有高度的干擾壓力，本研究僅基於氣候變遷情境的預測，縱使某些適應力強的物種會受惠，未來若受到人為干擾的影響，物種分佈的發展可能不如預期。以上多強調高碳排放情境的預測結果，相反，與低碳排放相比，花蜂受影響的程度相

對緩和，因此，要維持生物多樣性及族群的穩定發展，追根究底，應在於人類能否建構低排碳的經濟活動與生活模式。

### 結 論

本研究首次提出了預測氣候變遷對臺灣常見花蜂的影響，主要結果發現，未來輕度與中度暖化的情境下，受影響的程度相對較小，但重度暖化的情境，將導致花蜂的適宜棲地發生明顯改變，位於高緯度及高海拔的物種皆有縮減的可能，反觀，適於低緯度及低海拔區域的耐熱物種會增加。因此，未來有關因應氣候變遷的保育策略，建議針對這兩種不同的環境做分區規劃，此外，控制碳的排放，盡可能讓人為活動符合輕度或中度暖化情境的發展，是讓物種分佈維持穩定的關鍵課題。

### 謝 誌

本研究承行政院科技部專題研究計畫「MOST109-2628-M-329-001-MY2」之經費補助；林業試驗所陸聲山博士及嘉義大學植物醫學系宋一鑫副教授

提供物種調查資訊供參考，特此致謝。

### 引用文獻

- 呂明倫、黃靜宜、宋一鑫。2019。使用 MaxEnt 模擬氣候變遷對東方蜜蜂潛在分布之影響。台灣生物多樣性研究 21: 27-39。
- 宋一鑫、陸聲山、詹美鈴、林明瑩、江敬皓、李青珍、楊平世。2011。臺灣產四種熊蜂(膜翅目：蜜蜂科)之族群形質比較、季節性發生及分佈特性之研究。臺灣昆蟲 31: 309-323。
- Aguirre-Gutiérrez, J., W. D. Kissling, J. C. Biesmeijer, M. F. WallisDeVries, M. Reemer *et al.* 2017. Historical changes in the importance of climate and land use as determinants of Dutch pollinator distributions. *Journal of biogeography* 44: 696-707.
- 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.
- Ben Rais Lasram, F., F. Guilhaumon, C. Albouy, S. Somot, W. Thuiller *et al.* 2010. The Mediterranean Sea as a “cul-de-sac” for endemic fishes facing climate change. *Global Change Biology* 16: 3233-3245.
- Dew, R. H., S. M. Rehan, and M. P. Schwarz. 2016. Biogeography and demography of an Australian native bee *Ceratina australensis* (Hymenoptera, Apidae) since the last glacial maximum. *Hymenoptera Research* 49: 25-41.
- Elias, M. A., F. J. Borges, L. L. Bergamini, E. V. Franceschinelli, and E. R. Sujii. 2017. Climate change threatens pollination services in tomato crops in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 239: 257-264.
- Garibaldi, L. A., I. Steffan-Dewenter, R. Winfree, M. A. Aizen, R. Bommarco *et al.* 2013. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* 339: 1608-1611.
- Giannini, T. C., A. L. Acosta, C. I. da Silva, P. E. A. M. de Oliveira, V. L. Imperatriz-Fonseca *et al.* 2013. Identifying the areas to preserve passion fruit pollination service in Brazilian Tropical Savannas under climate change. *Agriculture, ecosystems and environment* 171: 39-46.
- Giannini, T. C., W. F. Costa, G. D. Cordeiro, V. L. Imperatriz-Fonseca, A. M. Saraiva *et al.* 2017. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. *PloS one* 12: e0182274.
- Giannini, T. C., W. F. Costa, R. C. Borges, L. Miranda, C. P. W.da Costa *et al.* 2020. Climate change in the Eastern Amazon: crop-pollinator

- and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Regional Environmental Change* 20: 1-12.
- Gonzalez, V. H., M. E. Cobos, J. Jaramillo, and R. Ospina. 2021. Climate change will reduce the potential distribution ranges of Colombia's most valuable pollinators. *Perspectives in Ecology and Conservation* 19: 195-206.
- Hao, T., J. Elith, G. Guillera-Arroita, and J. J. Lahoz-Monfort. 2019. A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. *Diversity and Distributions* 25: 839-852.
- Hijmans, R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones, and A. Jarvis. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology* 25: 1965-1978.
- Hsu, H. H. and C. T. Chen. 2002. Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorology and Atmospheric Physics* 79: 87-104.
- IPCC 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Karunaratne, W. and J. Edirisinghe. 2009. Diversity of bees at different altitudes in the Knuckles Forest Reserve. *Ceylon Journal of Science (Biological Sciences)* 37: 61-72.
- Kerr, J. T., A. Pindar, P. Galpern, L. Packer, S. G. Potts, *et al.* 2015. Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science* 349: 177-180.
- Klatt, B. K., A. Holzschuh, C. Westphal, Y. Clough, I. Smit, *et al.* 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B*

- 281: 0132440.
- Kremen, C., N. M. Williams, M. A. Aizen, B. Gemmill-Herren, G. LeBuhn, *et al.* 2007. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecology Letters* 10: 299-314.
- Li, X., W. Ma, J. Shen, D. Long, Y. Feng *et al.* 2019. Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PloS one* 14: e0217921.
- Lin, C. Y. and C. P. Tung. 2017. Procedure for selecting GCM datasets for climate risk assessment. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 28: 43-55.
- 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 Climatolog* 35: 1800-1809.
- Lin, C. Y., Y. Y. Chien, C. J. Su, M. T. Kueh, and S. C. Lung. 2017. Climate variability of heat wave and projection of warming scenario in Taiwan. *Climatic Change* 145: 305-320.
- Lu, S. S., J. Takahashi, W. C. Yeh, M. L. Lu, J. Y. Huang *et al.* 2021. Evidence for Range Expansion and Origins of an Invasive Hornet *Vespa bicolor* (Hymenoptera, Vespidae) in Taiwan, with Notes on Its Natural Status. *Insects* 12: 320.
- Marchioro, C. A., V. P. Lima, and C. R. Sales. 2020. Climate change can affect the spatial association between stingless bees and *Mimosa scabrella* in the Brazilian Atlantic Forest. *Api-dologie* 51: 689-700.
- Marmion, M., M. Parviainen, M. Luoto, R. K. Heikkinen, and W. Thuiller. 2009. Evaluation of consensus methods in predictive species dis-

- tribution modelling. *Diversity and distributions* 15: 59-69.
- Naeem, M., M. Liu, J. Huang, G. Ding, G. Potapov *et al.* 2019. Vulnerability of East Asian bumblebee species to future climate and land cover changes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 277: 11-20.
- Naimi, B., and M. B. Araújo. 2016. sdm: a reproducible and extensible R platform for species distribution modelling. *Ecography* 39: 368-375.
- Naimi, B., N. A. Hamm, T. A. Groen, A. K. Skidmore, and A. G. Toxopeus. 2014. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling? *Ecography* 37: 191-203.
- Nemésio, A., D. P. Silva, J. C. Nabout, and S. Varela. 2016. Effects of climate change and habitat loss on a forest-dependent bee species in a tropical fragmented landscape. *Insect Conservation and Diversity* 9: 149-160.
- Papanikolaou, A. D., I. Kuhn, M. Frenzel, and O. Schweiger. 2016. Semi-natural habitats mitigate the effects of temperature rise on wild bees. *Journal of Applied Ecology* 54: 527-536.
- Potts, S. G., V. Imperatriz-Fonseca, H. T. Ngo, M. A. Aizen, J. C. Biesmeijer *et al.* 2016. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature* 540: 220-229.
- Pufal, G., I. Steffan-Dewenter, and A. M. Klein. 2017. Crop pollination services at the landscape scale. *Current opinion in insect science* 21: 91-97.
- Randall, C. J. and R. van Woesik. 2015. Contemporary white-band disease in Caribbean corals driven by climate change. *Nature Climate Change* 5: 375-379.
- Ruttner, F., L. Tassencourt, and J. Louveaux. 1978. Biometrical-statistical analysis of the geographic variability of *Apis mellifera* LI Material and methods. *Apidologie* 9: 363-381.
- Schloss, C. A., T. A. Nuñez, and J. J.

- Lawler. 2012. Dispersal will limit ability of mammals to track climate change in the Western Hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 8606-8611.
- Shell, W. A. and S. M. Rehan. 2016. Recent and rapid diversification of the small carpenter bees in eastern North America. *Biological Journal of the Linnean Society* 117: 633-645.
- Silva, D. P., A. C. Macêdo, J. S. Ascher, and P. De Marco. 2015. Range increase of a Neotropical orchid bee under future scenarios of climate change. *Journal of insect conservation* 19: 901-910.
- Silva, D. P., S. V. C. Groom, C. R. B. Da Silva, M. I. Stevens, and M. P. Schwarz. 2017. Potential pollination maintenance by an exotic allodapine bee under climate change scenarios in the Indo-Pacific region. *Journal of Applied Entomology* 141: 122-132.
- Swets, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240: 1285-1293.
- Williams, P. H. 1998. An annotated checklist of bumble bees with an analysis of patterns of description (Hymenoptera: Apidae, Bombini). *Bulletin-Natural History Museum Entomology Series* 67: 79-152.
- Winfree, R., J. R. Reilly, I. Bartomeus, D. P. Cariveau, N. M. Williams *et al.* 2018. Species turnover promotes the importance of bee diversity for crop pollination at regional scales. *Science* 359: 791-793.