

研究報告

應用物種分布模式推估台灣東方蜜蜂之授粉服務

呂明倫¹⁾ 黃靜宜¹⁾ 陳志輝¹⁾ 宋一鑫^{2,3)}

摘 要

無論是野生植物繁衍或農作物收穫，蜜蜂無疑是最有效率的授粉昆蟲之一，然而，近代蜜蜂數量大幅減少已經成為關注的議題。本研究以東方蜜蜂(*Apis cerana*)為目標物種，整合物種調查點位、環境因子與土地覆蓋類型等圖資，應用最大熵物種分布模式模擬物種的適宜棲地分布，進而建立適於推估台灣本島東方蜜蜂之授粉服務空間模式。研究結果顯示，東方蜜蜂之適宜棲地明顯趨向低至中海拔一帶的地區，即以天然林和人工林所形成的林木與果樹等植被為其授粉服務對象，農業發展為主的平原地區則較少。結果亦說明，東方蜜蜂分布可能受到人為干擾，如農業活動使棲地受到改變與大量飼養西方蜜蜂(*Apis mellifera*)造成物種間食物資源競爭的機率提高。總結而言，藉由本研究之空間模式運算，可瞭解授粉昆蟲對環境之貢獻度與授粉服務供給之熱點範圍，將有助於土地經營管理與物種保育相關工作的進行。

關鍵詞：授粉昆蟲、生態系服務、東方蜜蜂、最大熵、物種保育。

呂明倫、黃靜宜、陳志輝、宋一鑫。2019。應用物種分布模式推估台灣東方蜜蜂之授粉服務。台灣林業科學34(1):29-41。

¹⁾ 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, 1 Mingsheng East Rd., Chichi Township, Nantou 55244, Taiwan.

²⁾ 國立嘉義大學植物醫學系，60004嘉義市學府路300號 Department of Plant Medicine, National Chiayi Univ., 300 Syuefu Rd., Chiayi City 60004, Taiwan.

³⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: ihsinsung@mail.ncyu.edu.tw

2018年3月送審 2018年11月通過 Received March 2018, Accepted November 2018.

Research paper

Modeling the Pollination Service of *Apis cerana* in Taiwan Based on the Species Distribution Model

Ming-Lun Lu,¹⁾ Jing-Yi Huang,¹⁾ Chih-Hui Chen,¹⁾ I-Hsin Sung^{2,3)}

【 Summary 】

Bees may be one of the most efficient insects for pollinating both wild plants and cultivated crops. Nevertheless, drastic declines in wild bee populations have become an environmental issue which has recently garnered much attention. In this study, we collected occurrence records of the Asian honeybee species, *Apis cerana*. We then combined data of environmental factors and land cover types to generate a simulation of suitable habitat distributions for the species using a maximum entropy species distribution model. In addition, we established a spatial model of the species' pollination services in Taiwan based on the distribution of suitable habitats. We found that *A. cerana* preferred habitats at low to medium elevations compared to agricultural areas of the plains. Thus it provides much more pollination services to natural forests, planted forests, and orchards than to lowland paddy fields. This might be due to greater disturbances by human development and competition from the introduced exotic bee species, *Apis mellifera*, in agricultural areas of the plains. Based on results of this study, we were able to determine areas where *A. cerana* can provide pollination services. This knowledge should be helpful in promoting better land management and species conservation.

Key words: insect pollinator, ecosystem service, Asian honeybee, maximum entropy, species conservation.

Lu ML, Huang JY, Chen CH, Sung IH. 2019. Modeling the pollination service of *Apis cerana* in Taiwan based on the species distribution model. *Taiwan J For Sci* 34(1):29-41.

緒言

生態系能量流動與物質循環的過程中，常具備許多對人類有益的功能，這些生態過程的產出和衍生的服務統稱為生態系服務(Costanza et al. 1997, Daily 1997)，它可直接提供維持人類生存的必需品，或間接提升人類的生活品質。生態系服務的種類中，授粉對植物繁衍起相當關鍵的傳遞作用，根據調查，溫帶及熱帶地區分別有78%和94%的已知植物需仰賴動物授粉(Ollerton et al. 2011)，此外，授粉也被認為是保全食物正常供應的重要進程，全球1/3的農作物，如具高營養價值的蔬菜及水果，收穫

量多寡皆取決於動物授粉之良窳(Kremen et al. 2007, Klatt et al. 2014)。

全球大約有25,000種蜂可幫助顯花植物傳播花粉(Michener 2007)，並且參與了75%重要栽培作物的授粉工作(Klein et al. 2007)，因此，蜂無疑是自然界中最有效率的授粉昆蟲之一。廣義來說，蜜蜂(bee)是指蜜蜂總科(Apoidea)底下的蜂種，所有的蜜蜂都以花蜜和花粉為食，對維持食物鏈運轉與作物生產扮演著重要的傳媒角色，然而，近代全球蜜蜂數量大幅減少，成因眾說紛紜，諸如棲地破壞、農藥、病菌體、外來物

種、氣候變遷等，以及上述諸多因素之交互作用 (Aizen and Harder 2009, Potts et al. 2010, Goulson et al. 2015)，造成的影響即是授粉受阻，從而導致作物生產與生物多樣性銳減。目前蜜蜂的保育已經成為全球關注的議題，尤其美國於2015年起，由白宮主導「促進蜜蜂與其他媒介建康的國家策略」(National Strategy to Promote the Health of Honey Bees and Other Pollinators)，欲拯救數量日益衰退的蜜蜂和其他授粉生物族群。

為確保蜜蜂授粉服務之品質，量化空間分布資訊係研擬經營管理策略之首要，現歐美地區已有許多學者提出相關的推估模式，如Lonsdorf et al. (2009)以地景要素為單元，依據專家知識賦予各種蜜蜂築巢，以及蜜粉源取用之相對可能性加以推導；Polce et al. (2013)和Nogué et al. (2016)在同樣的概念下加入物種分布模式(species distribution model, SDM)，應用各物種的分布資訊與行為特性，發展各種蜜蜂之授粉服務模式。台灣為島嶼地形，島內人口稠密，土地資源有限，中至低海拔的山區及平原呈現破碎且高異質性地景系統，與國外相異，因此，應有必要發展適於評估台灣蜜蜂之授粉服務空間模式。

東方蜜蜂(*Apis cerana*)分布範圍廣，自然分布橫跨亞洲的熱帶與溫帶地區，西至阿富汗、東到日本、北至喜馬拉雅山、南到印尼，並形成數個亞種(Koetz 2013)，其在台灣係蜜蜂屬(*Apis*)底下唯一之原生物種，由於不易馴養，族群大多以野生為主，故為生態系中的重要授粉昆蟲。本研究目的即選擇東方蜜蜂為目標物種，探討議題包含：一、以SDM為基礎，模擬物種潛在分布範圍；二、參考前人所發展授粉服務推估模型(Lonsdorf et al. 2009, Polce et al. 2013)，整合SDM之潛在分布資訊，建立適用於高異質性地景之授粉效率推估模式，三、瞭解東方蜜蜂對環境之授粉貢獻度，以利推動台灣生物多樣性保育工作。

材料與方法

一、研究區概述

台灣位於亞洲東部、太平洋西北側，西

側緊鄰台灣海峽(Fig. 1a)，土地面積約36,000 km²，島內人口約2300萬人；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3952 m；河川多發源於中央山脈，水系密布，大多分布於西部，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℃，年雨量約2500 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；據國土測繪中心於2006~2008年國土利用調查成果，土地覆蓋型態以天然和人工林為主(Fig. 1b)；現今的行政區劃共分6個直轄市、11個縣及3個市，可區分為北北基宜(North 1)、桃竹苗(North 2)、中彰投(Center)、雲嘉南(South 1)、高屏(South 2)與花東(East)等6大地區(Fig. 1c)。

二、物種資料

東方蜜蜂分布資料之來源共有二，一為林務局跨單位物種查詢平台，所蒐集的資料調查期間為1999~2003年，座標格式為經緯度，本研究僅保留3位小數之資料，計有188筆；另一來源為本研究通訊作者於1994~2009年間之標本採集紀錄，標本存放於台南區農業改良場，計有174筆，兩種來源累計共檢視362筆資料。所有資料彙整後，座標點位統一轉換為1997台灣大地基準座標系統(Taiwan Datum 97)及橫麥卡托二度分帶座標格式，後續所採用之相關地理圖資也以此系統及格式儲存，網格基本運算單元設定為1 km²，若一個網格內有重複記錄者將之剔除，經篩選後，來源一有128筆，來源二則有89筆，共計217筆點位做為模式建構之核心材料(Fig. 2)。

三、環境資料

環境資料為建構SDM之預測變項，包含氣候、地形與土地利用等類型，其中，氣候類乃從Hijmans et al. (2005)建立的全球氣候資料庫(WorldClim database vers. 1.4)下載，該作者

依據50年全球各地氣象站的雨量及溫度歷史資料，經過內插轉換產生最小空間尺度近1 km²的氣候網格，本研究採用資料庫中含有適用於預測物種分布之19種生物氣候資料(Hijmans and Graham 2006)；地形類由美國國家地質調查所網站(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)下載30 m解析力之數值高程模型(海拔高)，並以ArcGIS 10.6軟體製作坡度與坡向，3種地形資料再依1

km²網格製作最大、最小、平均、中位數和標準偏差等圖資，共計15個變項；土地利用類則依國土利用調查成果，第一級分類之9種土地利用類型為基礎，先將其轉換為5 m解析力之網格資料，並以ArcGIS10.6之焦點統計工具(focal statistics)進行移動視窗運算，考量東方蜜蜂約1900 m的覓食距離(Dyer and Seeley 1991)，視窗大小取500、1000、1500及2000 m等4種半

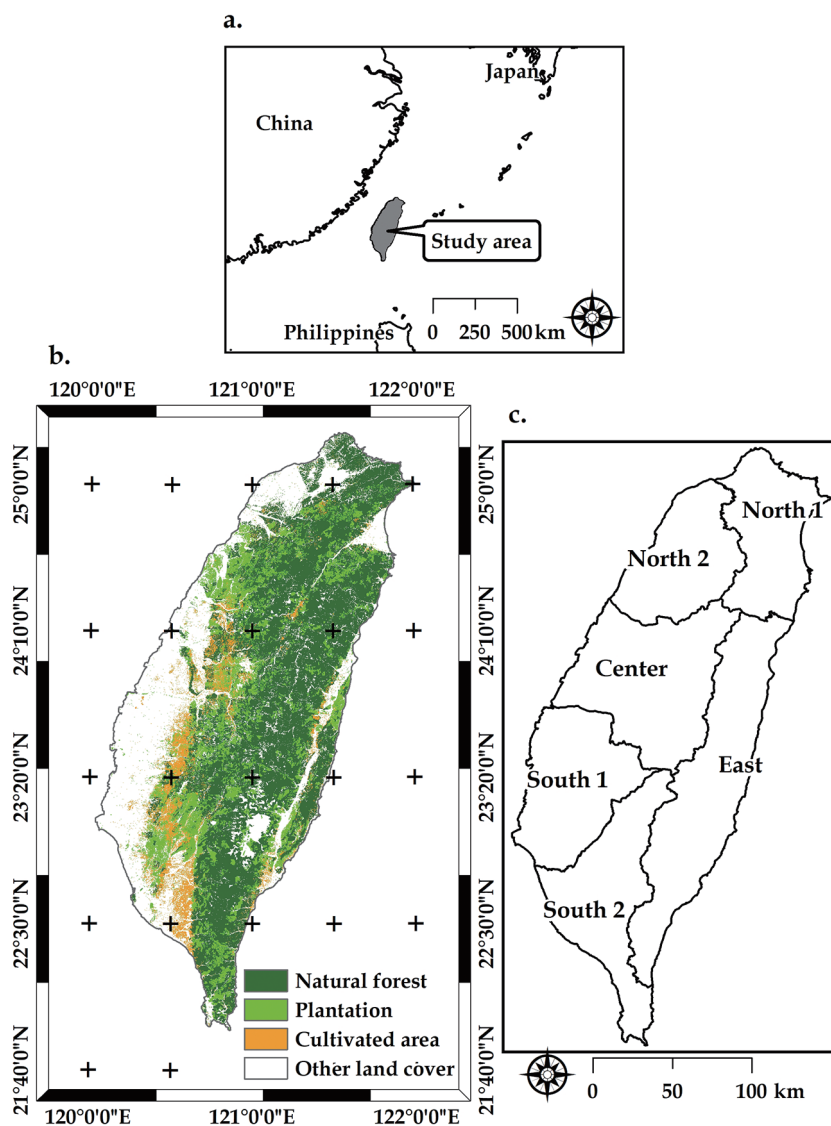


Fig. 1. (a) Location of study area. (b) Land cover data of the sites. (c) Administrative districts.

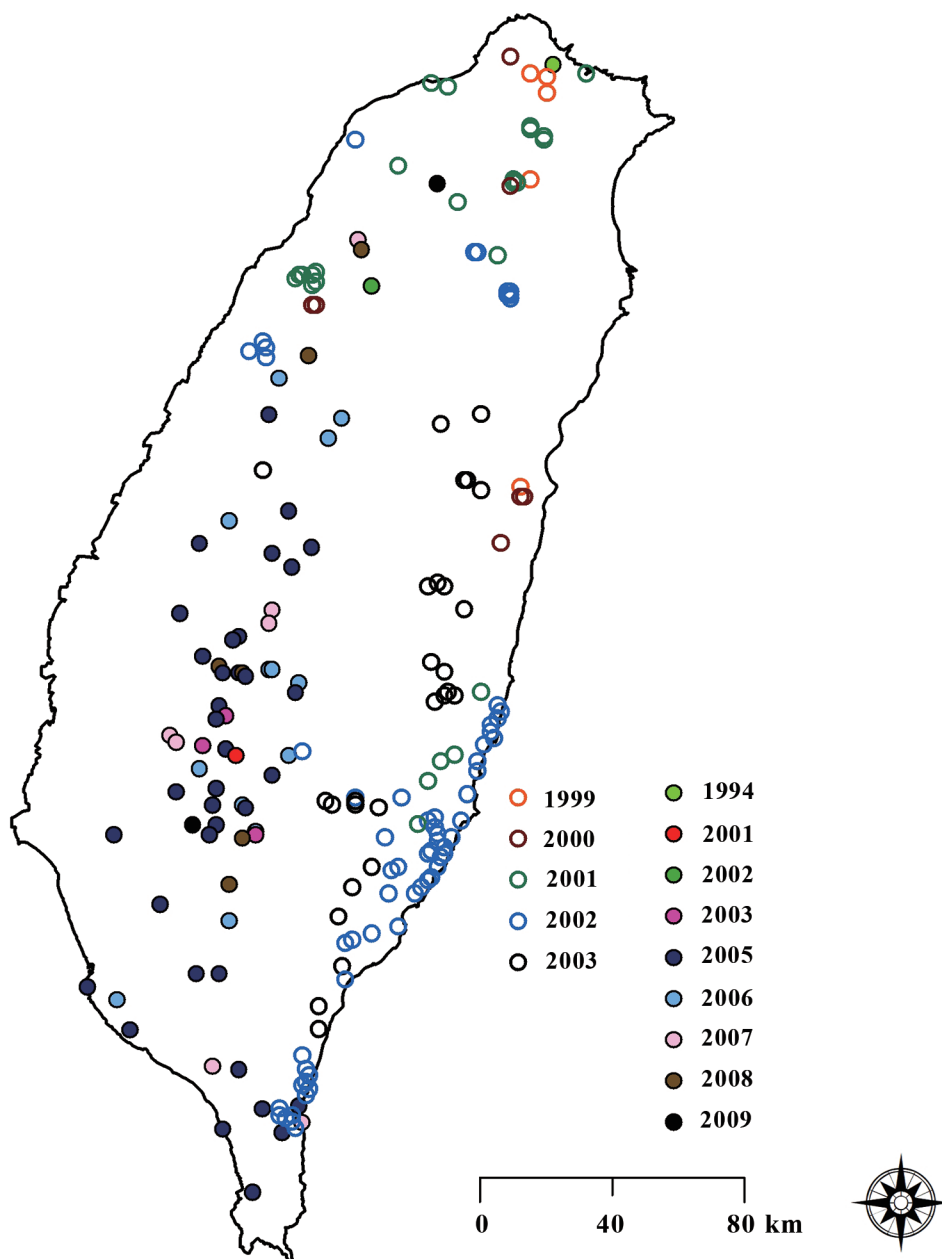


Fig. 2. Number of modeling occurrences in 1-km² cells for *Apis cerana* gathered between 1994 and 2009 (bright and filled circles are from the Forestry Bureau and our collection, respectively).

徑，產生9種土地利用類型的面積與離各土地利用類型歐基里得(Euclidean)距離之累加圖資，再藉最近相鄰法(nearest neighbor assignment)重新取樣為1 km²網格，共計72個變項，最終，

3種類型的預測變項累計共106個。為避免變項間因共線性造成模式過度擬合(over-fitting)，透過IBM SPSS 20.0進行主成分分析(principal component analysis, PCA)，所有原變項將被

整合為新的主成分，並以累積解釋變異量達95%水準做為標準，決定主成分的數目(Cruz-Cárdenas et al. 2014)，最後再利用迴歸分析法獲得各新成分的得點。

四、最大熵運算

利用Phillips et al. (2006)所開發的最大熵(maximum entropy)「MaxEnt 3.3.3k」建構SDM，該工具係將有限的訓練資料集，透過機械學習(machine learning)理論建立機率分布函數，進而模擬物種的分布，為現今最廣泛使用，也曾被認證優於其他SDM (Elith et al. 2006, Kumar and Stohlgren 2009)。物種資料先逢機選取75%做為訓練資料集，重複運算10次，取其平均值，輸出結果設定邏輯斯分布，使預測值域介於0~1，愈接近1者，代表該網格的物種出現機率愈高，再依據MaxEnt所提供的閾值計算法「10th percentile of training presence」(Pearson et al. 2007, Soley-Guardia et al. 2014, Carvalho and Del Lama 2015)，萃取適宜棲地範圍，並保留範圍內之機率值。另一方面，將剩餘25%的物種資料做為驗證資料集，並依接受者操作特徵(receiver operating characteristic)所產生之曲線面積(area under the curve, AUC)，評估模式的有效性，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，而高於0.7以上則達優良之標準(Fielding and Bell 1997, Pearce and Ferrier 2000)。所建立的SDM可透過Jackknife檢驗，瞭解各主成分對模式的貢獻比，針對貢獻度高之主成份，可觀察其與原預測變項之負荷量，用以瞭解相關性，本研究設定0.32為高相關性閾值，表示主成份可解釋原預測變項10%的變異量(Dormann et al. 2013, Fatima et al. 2016)。

五、授粉服務推估

有關授粉服務空間模式建立之程序，包括圖資轉換、整合、運算及展示等，均使用ArcGIS 10.6附屬之工具進行(Table 1S)。參考Lonsdorf et al. (2009)與Polce et al. (2013)所提出之授粉服務推估原理，將SDM模擬結果進行

結合，基本公式如下：

$$P_{os} = \frac{\sum_{m=1}^M P_{sm} e^{-\frac{D_{om}}{a_s}}}{\sum_{m=1}^M e^{-\frac{D_{om}}{a_s}}}; \quad (1)$$

式中 P_{os} 為蜜蜂物種 s (即東方蜜蜂)為作物 o 所提供之授粉服務相對豐度， P_{sm} 為潛在授粉源，以SDM模擬出的物種機率代入， D_{om} 為網格 m (1, 2, ..., M)與 o 作物(以土地覆蓋類型各別代入)網格之歐基里得距離， a_s 為蜜蜂物種 s 之平均覓食距離，東方蜜蜂約1900 m (Dyer and Seeley 1991)。

為瞭解東方蜜蜂對台灣各種地景要素之授粉服務效率，根據國土利用調查成果向量圖，建置蜜蜂訪花率高之土地覆蓋類型(Lonsdorf et al. 2009, Kennedy et al. 2013, Cunningham et al. 2018)，包含天然、人工林與耕地(果園與廢耕地為主)等3類(Fig. 1b)，各類型依1 km²的運算單元產生網格覆蓋比例，做為模式建構之基礎圖資。本研究整合式1推估結果，建立適於量化各種土地覆蓋類型與某一特定範圍之授粉效率指標，相仿的概念可參考Nogué et al. (2016)，運算式如下：

$$PE_o = \frac{\sum_{n=1}^N C_{on} P_{os}}{\sum_{n=1}^N C_{on}}; \quad (2)$$

式中 PE_o 為土地覆蓋類型 o 之授粉效率，值域介於0~1，值愈大代表授粉效率愈高， C_{on} 為 o 於網格 n (1, 2, ..., N)所占比例。

將所有土地覆蓋類型之授粉效率加總，即可獲得每一網格之總體授粉效率，適於觀察東方蜜蜂對整體環境的授粉貢獻度，如式3：

$$O_{PE} = \frac{\sum_{o=1}^O C_o P_{os}}{\sum_{o=1}^O C_o}; \quad (3)$$

式中 O_{pe} 值域介於0~1，愈接近1的網格，代表蜜蜂所提供的授粉品質愈佳，進一步應用Jenks自然間斷法(Jenk natural break method)劃分為高、中與低等3級，有助於瞭解熱點的空間分布情形(Reyers et al. 2009, O'Farrell et al. 2010, Onaindia et al. 2013)。

結果

預測變項經PCA運算後，原106個變項被整合為11個新的主成分，特徵值皆大於1，整體解釋變異量為95.22% (Table 1)，據此利用這11個主成分得點及MaxEnt建立東方蜜蜂之SDM。由運算結果可知，10次重複運算，訓練與驗證資料集之平均AUC各別為0.83和0.82，標準偏差皆低於0.03。各主成分對模式的貢獻度如Fig. 3所示，前5高的主成分累計超過75%，由高至低依序為主成分3、7、5、6及2，針對這5個主成

分與原預測變項構成之負荷量，計算閾值0.32 (10%的變異量)之變項數量結果，貢獻度最高的主成分3有17個變項屬氣候類、10個屬地形類、9個屬土地利用類，主成分5~7各有3個變項歸屬氣候或地形類，貢獻度相對較低之主成分2則與土地利用類較為相關(Table 2)。

利用MaxEnt建構東方蜜蜂的SDM，依據「10th percentile of training presence」閾值計算法，機率0.26以上為適宜棲地門檻，輸出結果如Fig. 4所示，適宜的棲地多座落於低至中海拔一帶，平原與高山處分布較為零星，東半側的網格數量高於西半側。就機率而言，高機率分布範圍(Fig. 4趨向紅色系)明顯集中於北北基宜、桃竹苗和花東地區，又以花東的涵蓋範圍最廣，其餘高屏、雲嘉南與中彰投分布機率均其他地區低。

以6個行政區域做為單元，比較東方蜜蜂對於三種土地覆蓋類型的授粉效率，由式2推估

Table 1. Summary of the principal component analysis which generated the principal components (PCs) used as environmental data

Principal component	Eigenvalue	Variance (%)	Cumulative variance (%)
PC1	37.64	35.51	35.51
PC2	25.06	23.64	59.15
PC3	15.85	14.95	74.11
PC4	9.66	9.11	83.22
PC5	2.75	2.59	85.81
PC6	2.26	2.13	87.94
PC7	1.96	1.85	89.79
PC8	1.87	1.76	91.55
PC9	1.63	1.54	93.09
PC10	1.21	1.14	94.23
PC11	1.05	0.99	95.22

Table 2. Numbers of variables with loadings of > 0.32 (10% of the variance) for 3 categories. Loading factors of the predictive variables used in the principal component analysis

Principal component (PC)	Climate	Topography	Land use
PC2	15	0	43
PC3	17	10	9
PC5	3	0	0
PC6	0	3	0
PC7	0	3	0

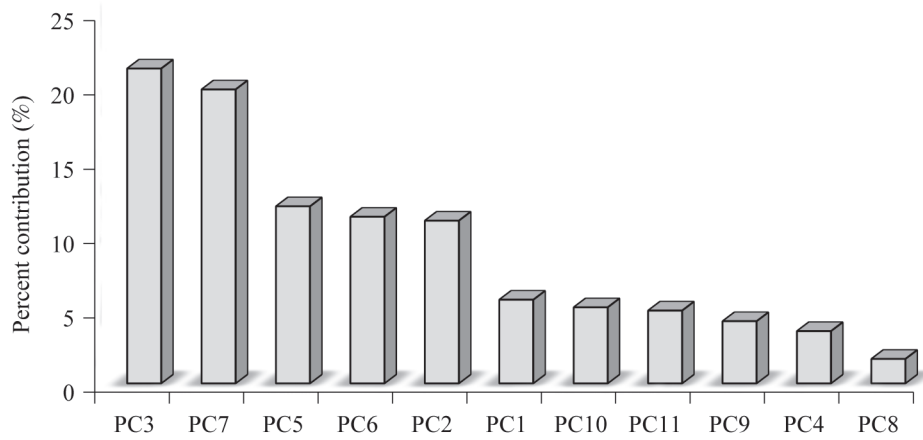


Fig. 3. Contribution to the species distribution model made by each principal component (PC).

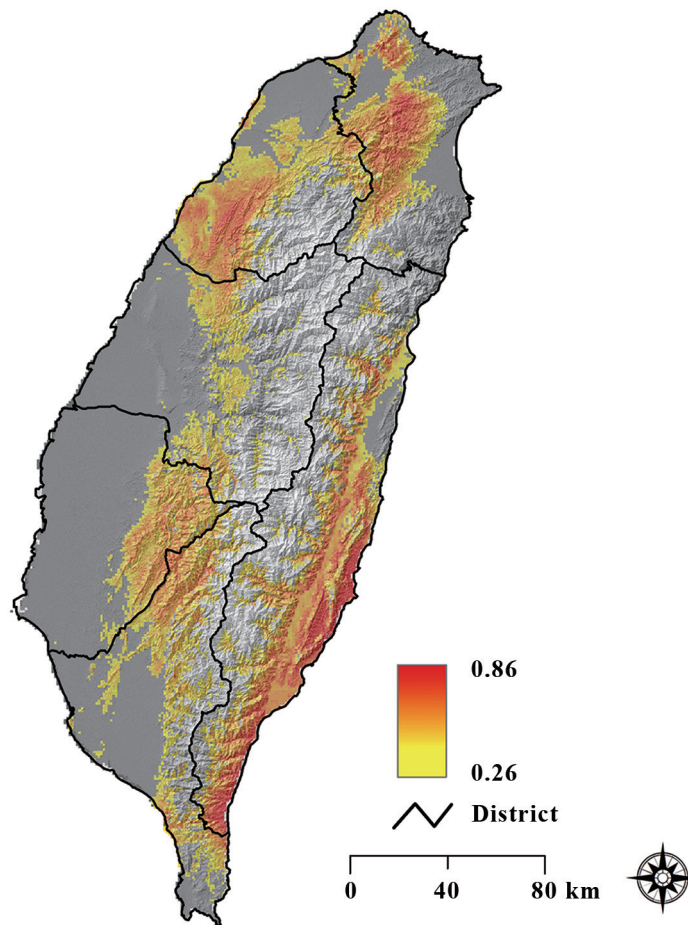


Fig. 4. Predicted range and probability of suitable habitat for *Apis cerana*. The background is a shaded relief topographic layer derived from a digital elevation model.

之結果可知，各地區天然及人工林明顯高於耕地，顯示東方蜜蜂對於森林環境的植被提供了重要的服務與貢獻(Fig. 5)。總體授粉效率的推估結果，網格為0表示座落於天然、人工林與耕地之外，即無授粉服務，大於0以上之網格藉由Jenks 自然間斷法分為3級後如Fig. 6，高授粉服務網格(紅色)可視為熱點，各行政區域中，北北基宜、桃竹苗及花東地區皆有大量面積的熱點群聚，反觀，雲嘉南與高屏地區僅於交界處有小範圍的分布，另中彰投地區的授粉品質相較最不理想。

討論

SDM為本研究推估授粉服務供給之重要基礎，利用MaxEnt建構模式，模擬東方蜜蜂的適宜棲地，其準確度可達理想標準，顯示所建立的模式具備良好的預測能力。建構模式所採用的11個主成分中，貢獻度多集中於其中5個(Fig. 3)，而貢獻度高的主成分和氣候類變項較有相關，其次為地形類(Table 2)，為預測東方蜜蜂分布之關鍵要素。此乃因台灣地形起伏明顯，造就的氣候類型多樣，涵蓋熱帶、亞熱帶、溫帶及寒帶等型態，加上蜜蜂本身又對氣候的變異敏感(Brown and Paxton 2009, Kuhlmann et al. 2012)，致使物種分布受氣候及地形的影響甚鉅，相關的研究中，Huang et al. (2017)與Lu and Huang (2017)分別模擬台灣單食性蝴蝶和特

有猛禽的分布亦有類似的結果。

據MaxEnt模擬結果，台灣東方蜜蜂的適宜棲地呈現廣泛分布，並明顯趨向低至中海拔一帶，高山相對零星，整體集中於北部與東南等地區；另平原地區，特別是中彰投、雲嘉南與高屏等農業發展大宗之地區，適宜棲地卻為數不多(Fig. 4)。就以上結果分析，平原與農業地區適宜棲地偏少的原因有三種可能性：一、東方蜜蜂採集資料尚有空白區有待補強，以致於影響模擬結果；二、農業區地景變化頻繁，常面臨築巢棲地不足，且長期暴露於農業藥劑下等問題，造成野生族群衰退(Bai and Reddy 1977, Sharma and Abrol 2005, Stanley et al. 2015)；三、因日治時代引進台灣的西方蜜蜂(*A. mellifera*)為養蜂業之主要飼養對象，依行政院農業委員會統計數據，全台近數十年間經常飼養的最低箱數超過70,000箱，基於養蜂在操作上，例如蜂箱、蜂蜜等重物的搬運、移動等限制，西方蜜蜂飼養仍集中於平地至低山麓為主，因此，這些地區可能會出現食物資源的競爭，過去曾有文獻指出，當物種的訪花時間重疊，西方蜜蜂對於蜜粉源的競爭較其他蜂種具侵略性(Sakagami 1959, Yang et al. 2011)。

本研究參考Polce et al. (2013)的作法，將SDM的模擬結果整合至授粉服務空間模式，獲取授粉服務相對豐度，進一步以此做為變項，建立授粉效率指標(式2)，適用於推估某一區域不同授粉對象所獲得的授粉效率，結果顯示，

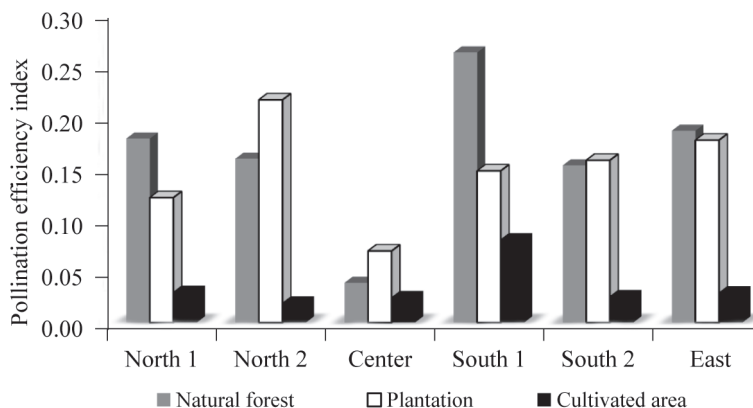


Fig. 5. Pollination efficiency indexes of *Apis cerana* in the six administrative districts.

各行政區中，東方蜜蜂對於森林的授粉貢獻度尤佳(Fig. 5)。由於東方蜜蜂的生態幅度廣，對低溫的耐受能力強(Abrol 1988)，可生存於海拔梯度較高的森林(Ruttner 1988, Salmah et al. 1990)與未經干擾之原始林相(Seeley et al. 1982, Corlett 2004)，由此可知，該物種為森林環境的重要授粉昆蟲之一。此外，總體授粉效率空間模式(式3)可產生空間分布資訊，對於土地經營管理單位而言，若熱點位處敏感地，如重要生育地、文化景觀及保護區周邊等，可規劃保育策略，確保族群的安定與植被授粉的品質，反觀，敏感地以外的熱點，即為提升農業生產之潛在區位，而位處冷點的敏感地也需特別重視，應優先考量營造蜜粉源植物為主體之地

景，吸引更多的蜜蜂前來(Fig. 6)。

基於SDM所發展之授粉服務空間模型，經本研究整理應具備以下優勢：一、藉由物種的點位紀錄加以產生，相較於以往的專家知識評分方法(Lonsdorf et al. 2009)，應更能反映實際現況並保有客觀性，再者，台灣授粉蜂種類多樣，並非所有蜂種的授粉習性均適用專家評分；二、本研究所建立之授粉服務空間模式，在演算過程中，會隨土地覆蓋比例大小而調整，可涵蓋各種面積小而破碎的地景要素，若有作物之地理資訊圖資，亦可取代土地覆蓋類型，用於評估作物的授粉服務供給率，相較Polce et al. (2013)及Nogué et al. (2016)的大尺度推估方法，更適合應用於結構複雜之農業

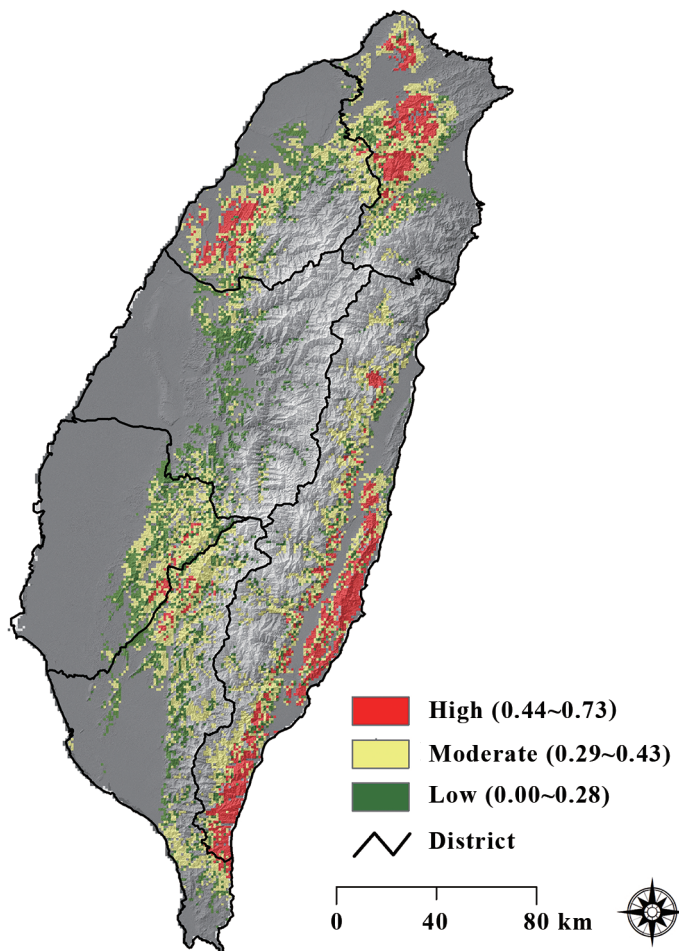


Fig. 6. Geographical distribution of the overall pollination efficiency of *Apis cerana*.

地景；三、由於東方蜜蜂對氣候較為敏感，因此，未來SDM的建構可參考全球氣候模式(global climate model)，加入未來暖化情境的氣候變項，模擬氣候變遷下，物種可能遷移的路徑及授粉效應的影響。有鑑於以上優勢，本研究陸續將會針對其他授粉蜂種進行嘗試，在台灣，有助農業發展之潛力蜂種除蜜蜂科外，尚有切葉蜂和隧蜂科等蜂類，皆是生態系之高效率授粉昆蟲(Dubitzky et al. 2008)，因此，建置各蜂種的基礎資料，並推估其授粉服務的供給率，將是本研究未來之重點目標。

結論

本研究之目標是利用授粉服務空間模式，瞭解研究區東方蜜蜂授粉服務的概況，研究成果可獲得以下主要結論：一、利用物種點位與環境資料所建構之SDM，可有效預測東方蜜蜂之適宜棲地，由模擬結果可知，氣候與地形為預測物種分布之重要關鍵，低至中海拔地帶均有東方蜜蜂偏好之適宜棲地；二、基於前人發展之模式，進而建立之授粉效率指標計算結果顯示，東方蜜蜂為天然與人工林的重要授粉昆蟲；三、總體授粉效率而言，台灣北部與東半地區有較多的授粉服務熱點散布其中。綜合以上之成果，可供相關經營管理單位之土地規劃參考，另除東方蜜蜂外，本研究運用之空間模式未來可應用於其他授粉蜂種及重要作物，俾創造物種保育與農業發展之雙贏局面。

謝誌

本研究承蒙台南區農業改良場，陳副研究員昇寬、特有生物研究保育中心(特生中心)中海拔試驗站與經營管理組同仁，林明璋、張仁川先生和林碧如小姐共同協助。研究經費由特生中心科技計畫支援，在此一併致謝。

引用文獻

Abrol DP 1988. Ecology and behaviour of

three bee species pollinating loquat (*Eriobotrya japonica* Lindley). Proc Indian Natl Sci Acad B Biol Sci 54(2/3):161-3.

Aizen MA, Harder LD. 2009. The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination. Curr Biol 19(11):915-8.

Bai ARK, Reddy CC. 1977. Laboratory toxicity of some insecticides to *Apis cerana indica*. J Api Res 16(3):161-2.

Brown MJF, Paxton RJ. 2009. The conservation of bees: a global perspective. Apidologie 40(3):410-6.

Carvalho AF, Del Lama MA. 2015. Predicting priority areas for conservation from historical climate modelling: stingless bees from Atlantic forest hotspot as a case study. J Insect Conserv 19(3):581-7.

Corlett RT. 2004. Flower visitors and pollination in the Oriental (Indomalayan) Region. Biol Rev 79(3):497-532.

Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387(6630):253-60.

Cruz-Cárdenas G, López-Mata L, Villaseñor JL, Ortiz E. 2014. Potential species distribution modeling and the use of principal component analysis as predictor variables. Rev Mex Biodivers 85(1):189-99.

Cunningham C, Tyedmers P, Sherren K. 2018. Primary data in pollination services mapping: potential service provision by honey bees (*Apis mellifera*) in Cumberland and Colchester, Nova Scotia. Int J Biodivers Sci Ecosyst Serv Manage 14(1):60-9.

Daily GC. 1997. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Washington, DC: Island Press. 412 p.

Dormann CF, Elith J, Bacher S, Buchmann C, Carl G, Carré G, et al. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and

a simulation study evaluating their performance. *Ecography* 36(1):27-46.

Dubitzky A, Yang JT, Schönitzer K. 2008. Historical and recent investigations on the bee fauna of Taiwan (Hymenoptera, Apoidea). *Mitt Dtsch Ges Allg Angew Entomol* 16:105-8.

Dyer FC, Seeley TD. 1991. Dance dialects and foraging range in three Asian honey-bee species. *Behav Ecol Sociobiol* 28(4):227-33.

Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, et al. 2006. Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29(2):129-51.

Fatima SH, Atif S, Rasheed SB, Zaidi F, Hussain E. 2016. Species distribution modelling of *Aedes aegypti* in two dengue-endemic regions of Pakistan. *Trop Med Int Health* 21(3):427-36.

Fielding AH, Bell JF. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environ Conserv* 24(1):38-49.

Goulson D, Nicholls E, Botías C, Rotheray EL. 2015. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347(6229):1255-57.

Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int J Climatol* 25(15):1965-78.

Hijmans RJ, Graham CH. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Glob Chang Biol* 12(12):2272-81.

Huang JY, Lu ML, Wang SF. 2017. Modelling spatial and temporal distribution of four monophagous butterfly species under climate change scenarios in Taiwan. *Q J For Res* 39(4):279-92. [in Chinese with English summary].

Kennedy CM, Lonsdorf E, Neel MC, Williams NM, Ricketts TH, Winfree R, et al.

2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecol Lett* 16(5):584-99.

Klatt BK, Holzschuh A, Westphal C, Clough Y, Smit I, Pawelzik E, et al. 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proc R Soc B* 281(1775):20132440.

Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, et al. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc R Soc B* 274(1608):303-13.

Koetz AH. 2013. Ecology, behaviour and control of *Apis cerana* with a focus on relevance to the Australian incursion. *Insects* 4(4):558-92.

Kremen C, Williams NM, Aizen MA, Gemmill-Herren B, LeBuhn G, Minckley R, et al. 2007. Pollination and other ecosystem services produced by mobile organisms: a conceptual framework for the effects of land-use change. *Ecol Lett* 10(4):299-314.

Kuhlmann M, Guo D, Veldtman R, Donaldson J. 2012. Consequences of warming up a hotspot: species range shifts within a centre of bee diversity. *Divers Distrib* 18(9):885-97.

Kumar S, Stohlgren TJ. 2009. Maxent modelling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *J Ecol Nat Environ* 1(4):94-8.

Lonsdorf E, Kremen C, Ricketts T, Winfree R, Williams N, Greenleaf S. 2009. Modelling pollination services across agricultural landscapes. *Ann Bot* 103(9):1589-600.

Lu ML, Huang JY. 2017. Spatial assessments of potential threats of endemic raptor subspecies in Taiwan. *Taiwan J Biodivers* 19(4):215-27. [in Chinese with English summary].

Michener CD. 2007. The bees of the world, 2nd ed. Baltimore, MD: Johns Hopkins Univ Press. 992 p.

- Nogué S, Long PR, Eycott AE, de Nascimento L, Fernández-Palacios JM, Petrokofsky G, et al. 2016.** Pollination service delivery for European crops: challenges and opportunities. *Ecol Econ* 128:1-7.
- O'Farrell PJ, Reyers B, Le Maitre DC, Milton SJ, Egoh B, Maherry A, et al. 2010.** Multi-functional landscapes in semi arid environments: implications for biodiversity and ecosystem services. *Landsc Ecol* 25(8):1231-46.
- Ollerton J, Winfree R, Tarrant S. 2011.** How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos* 120(3):321-6.
- Onaindia M, Fernández de Manuel B, Madariaga I, Rodríguez-Loinaz G. 2013.** Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *For Ecol Manage* 289:1-9.
- Pearce J, Ferrier S. 2000.** Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecol Model* 133(3):225-45.
- Pearson RG, Raxworthy CJ, Nakamura M, Peterson AT. 2007.** Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *J Biogeogr* 34(1):102-17.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE. 2006.** Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecol Model* 190(3-4):231-59.
- Polce C, Termansen M, Aguirre-Gutiérrez J, Boatman ND, Budge GE, Crowe A, et al. 2013.** Species distribution models for crop pollination: a modelling framework applied to Great Britain. *PLoS ONE* 8(10):e76308.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE. 2010.** Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol Evol* 25:(6)345-53.
- Reyers B, O'Farrell PJ, Cowling RM, Egoh BN, le Maitre DC, Vlok JHJ. 2009.** Ecosystem services, land-cover change, and stakeholders: finding a sustainable foothold for a semiarid biodiversity hotspot. *Ecol Soc* 14(1):38.
- Ruttner F. 1988.** Biogeography and taxonomy of honeybees. Heidelberg: Springer. 284 p.
- Sakagami SF. 1959.** Some interspecific relations between Japanese and European honeybees. *J Anim Ecol* 28(1):51-68.
- Salmah S, Inoue T, Sakagami SF. 1990.** An analysis of apid bee richness (Apidae) in central Sumatra. In: Sakagami SF, Ohgushi R, Roubik DW, editors. Natural history of social wasps and bees in equatorial Sumatra. Sapporo, Japan: Hokkaido Univ Press. p 139-74.
- Seeley TD, Seeley RH, Akrotanakul P. 1982.** Colony defense strategies of the honeybees in Thailand. *Ecol Monogr* 52(1):43-63.
- Sharma D, Abrol DP. 2005.** Contact toxicity of some insecticides to honeybee *Apis mellifera* (L) and *Apis cerana* (F.). *J Asia Pac Entomol* 8(1):113-5.
- Soley-Guardia M, Radosavljevic A, Rivera JL, Anderson RP. 2014.** The effect of spatially marginal localities in modelling species niches and distributions. *J Biogeogr* 41(7):1390-401.
- Stanley J, Sah K, Jain SK, Bhatt JC, Sushil SN. 2015.** Evaluation of pesticide toxicity at their field recommended doses to honeybees, *Apis cerana* and *A. mellifera* through laboratory, semi-field and field studies. *Chemosphere* 119:668-74.
- Yang MX, Tan K, Radloff SE, Hepburn HR. 2011.** Interspecific Interactions among Asian honeybees. In: Hepburn HR, Radloff SE, editors. Honeybees of Asia. Heidelberg: Springer. p 445-72.

