

## 氣候變遷下入侵雜草與農業生產的空間衝突性評估

# Assessing the spatial conflict of invasive plant and agricultural production under climate change in Taiwan

黃靜宜 呂明倫\*

Jing-Yi Huang and Ming-Lun Lu\*

行政院農業委員會特有生物研究保育中心 55244南投縣集集镇民生東路1號

Endemic Species Research Institute, Jiji, Nantou, Taiwan

\*通訊作者：alan@tesri.gov.tw

\*Corresponding author: alan@tesri.gov.tw

### 摘要

生物入侵是造成農業環境劣化與經濟損耗的主要原因，瞭解入侵生物可能構成威脅的空間資訊，有助於入侵問題的預防與管理。本研究挑選具高度侵略潛力之5種外來入侵雜草作為目標種，運用生態棲位模式預測各物種當前及未來氣候變遷情境下(RCP2.6與RCP8.5，2060~2080年)的棲地適宜性，並透過與農業生產價值圖資的空間交集分析，評估兩者的潛在空間衝突性。研究結果顯示，溫度變項是驅使入侵雜草改變地理分布範圍的主因，所分析之5種入侵雜草未來皆將受益於氣候變遷，除增加整體的適宜棲地範圍外，亦將對農業生產帶

來程度不一的影響，其中合果芋、大花咸豐草與落葵等3種當前之明顯衝突區，在未來將往北發生轉移，應可將防治重點調整至高緯度的衝突區；相反地，美洲含羞草與含羞草等2種，則須持續關注當前的明顯衝突區。總結而言，本研究透過空間交集分析，可明確指出入侵雜草與農業生產價值的潛在的空間衝突區位與程度，得以為防治優先性的規劃提供具體的參考資訊。

**關鍵詞：**生物入侵、生態棲位模式、氣候變遷、空間交集分析、防治優先性

## Abstract

Biological invasion is the main cause of agricultural environmental degradation and economic loss. Understanding the spatial information that invading organisms may pose a threat is helpful to the prevention and management of invasion problems. In this study, five invasive weed species with high aggressive potential were selected as target species, and the ecological niche model was used to predict the habitat suitability for current and future climate change scenarios (RCP2.6 and RCP8.5, 2060~2080). Through the spatial intersection analysis with the agricultural production value map, the potential spatial conflicts between the two are identified. The results showed that temperature variables are the main cause of changes for geographic distribution of invasive weeds. All five invasive weed species will benefit from climate change in the future. They not only increase the range of suitable habitats, but also have varying degrees of impact on agricultural production. We found that the conflicts among the three species, such as *Synгонium podophyllum*, *Bidens pilosa* var. *radiata*, and *Basella alba*, will shift to the north. We therefore considered that it should be possible to adjust the effort to high-latitude conflict zones. On the contrary, for *Mimosa diplotricha* and *Mimosa pudica*, we must continue to pay attention to the current locations where have conspicuous conflicts. In conclusion, this study can clearly express the extent of potential spatial conflicts between invasive weeds and agricultural production value using spatial intersection analysis to aid the prioritizing management.

**Key words:** biological invasion, ecological niche model, climate change, spatial intersection, prioritization

收件日期：2021年05月18日

Received: May 18, 2021

接受日期：2021年06月04日

Accepted: June 04, 2021

## 前言

農業生態系是陸域生態系的重要組成分，約占全球1/3土地總面積(The World Bank Group 2018)，直接供給人類所需糧食、飼料、生質能源、藥材等基本需求，對人類生活福祉至關重要(Power 2010)。然頻繁干擾與過度施肥的集約化經營，促使農地成為容易遭受生物入侵的土地利用型態(Fried *et al.* 2017)，入侵雜草通常透過資源競爭、毒他作用與寄生(Fried *et al.* 2017)，甚至作為病蟲害媒介(Klein and Smith 2020)等機制，對作物的品質與產量造成直接或間接的損失(Oerke 2006; Rockwell-Postel *et al.* 2020)，且其衍生的防治與控制成本更甚其他有害生物(Pimentel *et al.* 2000; Pimentel *et al.* 2005; Williams *et al.* 2010)。

近代更受矚目的議題是氣候變遷所帶來的衝擊，入侵雜草與許多原生種相同，兩者皆可能受氣候變遷的影響，改變其空間分布(Bradley *et al.* 2010; Koncki and Aronson 2015; Bellard *et al.* 2018)，但相較於原生植物，其生態幅度廣且對環境的適應力佳，經常能跨越原本的地理侷限，將分布範圍擴張至以往無法生存或繁衍的地區(Walther *et al.* 2009; Bradley *et al.* 2010; Carboni *et al.* 2018)，進而增強對農業生產的負面影響。因此，在氣候變遷與入侵雜草雙重威脅下，如何有效掌握其對原生生

態系可能構成威脅的空間資訊，將是防治策略施行成功與否之關鍵過程(Long *et al.* 2017; Rockwell-Postel *et al.* 2020)。

生態棲位模式(ecological niche model, ENM)係基於物種出現的位置與其對應環境變量間的關聯性，預測物種潛在空間分布或評估其棲地適宜性的有效工具(Phillips *et al.* 2006)，目前廣泛應用於生物地理、氣候變遷、保育生物、演化生物學等領域(Williams *et al.* 2009; Shrestha and Shrestha 2019; Guisan *et al.* 2013)，而高度棲地適宜性經常可導致生物入侵，許多入侵生物學家也嘗試利用ENM所推導的之棲地適宜性，作為預測入侵成功與否的重要指標(Crall *et al.* 2013; Thuiller *et al.* 2005; Wan *et al.* 2018)，用以評估較大空間尺度的潛在入侵範圍與風險(Bradley *et al.* 2009; Allen and Bradley 2016; Slodowicz *et al.* 2018; Panda *et al.* 2018)，然而入侵生物對原生生態系所造成的影響評估，尚需考量空間相互作用(spatial interaction)。

過去的研究，除以入侵種出現與否的二元化圖資(binary)套疊欲關注的原生種棲地或地景要素，找出兩者共存的空間區位(Kariyawasam *et al.* 2017; Santana *et al.* 2019)外，亦有計算棲位相似性指數者(Baskaran *et al.* 2016; Holt *et al.* 2018)，惟兩方法往往過於粗略，以致無從明確得知入侵影響程度與區位；Vicente *et al.* (2013)基於兩物種空間衝突條件與動態，進

一步以組合模型的方法，獲取更詳細的入侵分布與動態訊息；Alaniz *et al.* (2018)則是將兩物種棲地適宜性資料適度分級後，直接導入交集分析模型內，因而得以確立詳細的空間衝突資訊，相較於Vicente *et al.* (2013)的組合模型法，此方法可說更為快速簡便，亦成功應用於生物防治、傳染病風險評估(Alaniz *et al.* 2017; Alaniz *et al.* 2020)等領域的空間防治規劃。儘管如此，目前尚無研究針對入侵雜草適宜性與農業生產潛力的空間衝突性進行分析者，無法為氣候變遷下農業地景的入侵防治提供有力的參考資訊。

臺灣位處歐亞大陸與菲律賓海板塊的交會處，地理位置特殊，以全球的視角來看，本質上即存在高度的生物入侵風險(Pyšek *et al.* 2012; Russell *et al.* 2017)，加上地狹人稠，島內生態系無可避免地會受外來雜草的入侵威脅。根據林業試驗所建置的「台灣外來入侵種資料庫」資料顯示，目前列屬入侵植物共計76種，在未來氣候變遷的影響下，其入侵熱點將有朝向高緯度或高海拔推移的趨勢(黃及呂 2018)，至於對農業生態系的具體影響則尚不明確。有鑒於此，本研究以臺灣本島為研究區，在先前研究的基礎下(Huang *et al.* 2020)，選擇5種在氣候變遷影響下，具高侵略潛力之外來入侵雜草為研究對象，運用ENM與地理資訊系統，進行空間分析與整合，評估瞭解氣候變遷對入侵雜草適宜棲地分布的影響，以及未來可能與農業生產構成空間衝突的區位，期研究結果能提供外來入侵雜草防治之參考。

## 材料與方法

### 一、研究區概述

臺灣本島位處位於太平洋海域西側及亞洲大陸邊緣，土地面積約36,000 km<sup>2</sup>，島內人口約2,300萬人。橫跨熱帶及亞熱帶氣候，境內高溫多雨，年均溫約21°C，年雨量約2,500 mm，具適宜農作物生長之優越氣候條件，惟因地形複雜，且地理位置特殊，氣候多變，每年農作遭受氣象災害之損失亦多(Lur *et al.* 1998)。區內地形陡峭，全島面積的2/3為山地及丘陵所覆蓋，地殼被擠壓抬升而形成的山脈，南北縱貫全臺，除最高峰玉山主峰(3,952 m)外，標高3,000m以上的高山有超過300座。在農業生產方面，依據農委會農業統計資料查詢系統顯示，農耕土地面積僅約79萬ha，雖不及全島1/4，然實際上有些耕地是屬集約化耕作，一年內可種植2~3種作物(Neszmelyi 2017)。整體農業部門生產之初級產品，以及所帶動相關產業之總產值與附加價值，約占全國國內生產毛額13%(林及張 2004)。

### 二、研究方法

#### (一) 入侵雜草資料

以未來氣候變遷情境下，選擇可能持續維持高度侵略性或大幅提升侵略性入侵雜草為目標種，包含合果芋(*Syngonium podophyllum*)、落葵(*Basella alba*)、大花咸豐草(*Bidens pilosa* var. *radiata*)、美洲含羞草(*Mimosa diplotricha*)及含羞草(*Mimosa pudica*)等5種(Huang *et al.* 2020)。物種調查點位來源為林務局生態調查資料庫系統，

調查期間為1998~2008年，座標格式為經緯度，本研究僅保留3位小數之資料，並統一將格式轉換為1997臺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，後續所採用之相關環境資料也以此系統與格式儲存，網格基本運算單元配合取得的環境資料，設定為1×1 km，若一個網格內有重複記錄者以單筆計算，各物種整理過後的資料筆數如表1，供後續生態棲位建模使用。

## (二) 環境資料

生態棲位模式之預測變項包含氣候、地形及土地覆蓋等3類，其中，氣候類乃從Hijmans *et al.* (2005)建立的全球氣候資料庫(WorldClim)，下載專為預測物種分布所產製之19種生物氣候變項(Hijmans and Graham 2006)；地形類由內政部取得數值高程模型(海拔高)，利用ArcGIS 10.6軟體製作坡度圖資，並參考Gessler *et al.* (1995)與McCune and Keon (2002)的方法，分別產製代表濕度的複合地形指標(compound topographic index, CTI)及太陽輻射強度的熱負荷指標(heat load index, HLI)，共計4個變項。土地覆蓋類由美國Land Processes Distributed Active Archive Center取得2000~2009年Terra-MODIS衛星影像產品「MOD13Q，增揚植生指標(enhanced vegetation index, EVI)」，進一步製作該期間最大、最小、平均、中位數、全距和標準偏差等6種圖資，相較於常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index)，EVI對於樹冠層的變異更為敏感(Huete *et al.* 2002)，最終，累計全部預測變

項共有29個，經最近相鄰法進行重取樣後，所有變項的空間解析力為1×1 km。

為避免變項的多重共線性，以Pearson相關分析進行預測變項篩選，當兩變項相關係數大於0.7以上者，考量研究目的、與生物的關聯性及後續容易解讀等因素擇一適當變項(Kumar and Stohlgren 2009, Padalia *et al.* 2014)。

## (三) 氣候變遷情境

假設所有被採用之氣候類變項，會隨聯合國氣候變遷政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第5次評估報告所發布之氣候變遷情境而改變，其餘變項則保持恆定，據此模擬未來入侵雜草在不同情境下之棲地適宜性。IPCC第5次評估報告以代表濃度途徑(representative concentration pathway, RCP)定義變遷情境，其中RCP 2.6和8.5各表示輻射驅動力(radiative forcing)於1750~2100年間增加了2.6及8.5 Wm<sup>-2</sup>，換言之，RCP 2.6為暖化減緩之理想情境，RCP 8.5則是暖化加劇的情境(IPCC 2013)。未來的氣候資料是由全球氣候模式(global climate model, GCM)產生，前述的WorldClim資料庫，提供2050(2041~2060年的平均值)與2070年(2061~2080年的平均值)兩種時段的氣候資料，為突顯氣候變遷的影響程度，本研究選擇2070年適用於預測台灣氣候的CESM1-CAM5、CSIRO-Mk3-6-0、GISS-E2-R與MIROC5等4個GCM(Lin and Tung 2017)，生產的資料是藉由統計降尺度產生1×1 km解析力的生物氣候變項，供預測入侵雜草未來之棲地適宜

性，每個GCM所獲得的預測結果取平均值，以消彌不確定性(Araújo and New 2007)。

#### (四) 生態棲位建模

生態棲位建模是依據最大熵(maximum entropy)理論，使用Phillips *et al.* (2006)所開發的MaxEnt (3.4.1版)，預測5種入侵雜草適宜棲地，該軟件為一種機器學習演算法，至今仍受到廣泛的應用。先將物種出現點位資料集逢機選取75%做為訓練集，25%為測驗集，並於研究區內產生10,000個逢機的背景點(background points)共同運算，採用bootstrap來測試模型性能，每物種重複運算10次，最終取平均值，輸出結果設定邏輯斯概率(logistic probability)轉換，使預測值域介於0~1，愈接近1者，代表入侵雜草於該網格出現的概率愈高，愈有可能為其適宜棲地。另模型的準確性評估應用接受者操作特徵(receiver operating characteristic)所產生之曲線面積(area under the curve, AUC)，AUC值域介於0.5~1，當值愈高代表模型預測出來的準確性愈佳，而高於0.7以上則達可接受標準(Swets 1988; Pearce and Ferrier 2000)。

#### (五) 空間衝突性分析

針對入侵雜草之適宜棲地性，採用MaxEnt所提供的「10th percentile of training presence」，即針對一組訓練集對應的概率，取概率分布低於10%的點位做為閾值，大於閾值的像元視為適宜棲地(Pearson *et al.* 2007; Koncki and Aronson 2015)，非適宜棲地網格視為無效，而適宜棲地範圍內之概率依據等距區分為低、中

及高等3類，並將網格重新配分，即無效=0、低=1、中=2、高=3，產生4種等級之離散圖，將此劃分標準套用於未來氣候情境下之適宜棲地性預測結果，以利後續比較分析。

本研究以具生產力之耕地，做為入侵雜草空間衝突性的分析對象，耕地範圍是參考台灣的農業發展條例第3條第10款所定義之耕地：依區域計畫法劃定為特定農業區、一般農業區、山坡地保育區及森林區之農牧用地。各分區的向量圖資由內政部營建署城鄉發展分署申請，並藉由以下公式計算每一1×1 km網格內之生產價值(P)：

$$P = \sum_{i=1}^m A_i \times S_i$$

式中 $A_i$ 為分區 $i$ 之面積大小， $m$ 為分區總數， $S_i$ 為分區 $i$ 之配分，其中，特定農業區以優良農地為主，故設定為3，一般農業區為2，山坡地保育區及森林區為1，因這兩分區非以農業生產為主要目的。將上式計算結果，等距區分為低(1)、中(2)及高(3)，非耕地範圍則視無效(0)，產生耕地生產價值等級圖(補充圖1)。

為瞭解氣候變遷下，入侵雜草與耕地生產價值的空間衝突性，參考Alaniz *et al.* (2017)的空間交集方法，各別將當前與未來兩種氣候情境(RCP 2.6和RCP 8.5)的入侵雜草棲地適宜性等級圖與耕地生產價值等級圖相乘，獲取無效(0)、非常低(1)、低(2)、中(3及4)、高(6)與非常高(9)等6種衝突程度，其值愈高者，入侵雜草入侵的風險愈高，耕地生產受到的影響也愈大。

## 結果

### 一、模式性能與重要變數

由Pearson積差相關分析與相關係數小於0.7之門檻，可自29項環境因子中，選出年均溫(Annual mean temperature, BIO1)、平均氣溫日較差(Mean diurnal range, BIO2)、溫度季節性(Temperature seasonality, BIO4)、年降雨量(Annual precipitation, BIO12)、最暖季降雨量(Precipitation of warmest quarter, BIO18)、坡度、CTI、HLI、EVI最小值、EVI平均數、EVI標準偏差等11項做為MaxEnt模式之預測變項，以此所建立之入侵雜草ENM，其AUC介於0.74~0.91，平均值為0.84，標準偏差為0.02，模擬成效良好(表1)。

表1顯示，5種入侵雜草均以BIO1為最大貢獻量之變數，貢獻量落在49.20~69.38%之間。所有物種之前3項重要變項均為氣候因子，顯見氣候類變項，尤其溫度是驅動外來入侵雜草棲地適宜性變化的主要原因，所有物種將隨BIO1升高，提升其棲地適宜性，當BIO1介於24.4~25.2°C時，棲地適宜性可達到最高，隨後則持平或下降(補充圖2)。

### 二、適宜棲地範圍的變化

生態棲位模式的模擬結果(圖1)顯示，不論是當前氣候條件或未來氣候變遷情境下，均以大花咸豐草之適宜棲地分布最廣，其次為落葵。在未來兩種氣候變遷情境下，所有的物種除維持現有適宜棲地外，均將持續擴張其範圍，只是相較

RCP2.6情境，RCP8.5情境的擴張狀況更顯嚴峻。以當前適宜棲地面積為基礎，分別計算未來氣候情境下之棲地範圍變化率可以發現，當前分布最廣的大花咸豐草與落葵兩種物種升幅較小；而當前分布較為狹隘的合果芋、含羞草與美洲含羞草等3種升幅相對較高，其增幅在RCP8.5情境的情境下，均達80%以上。就擴張棲地的空間特徵而言，所有物種多為往高緯度或往高海拔方向擴張，惟在海拔的分布上似乎存在擴張侷限。

### 三、空間衝突性

由當前及氣候變遷情境下，入侵雜草適宜棲地與耕地生產等級的空間交集分級結果(圖2~4)可發現，所有物種在氣候變遷的影響下，與耕地產生衝突的強度與範圍皆有提升，其中較大程度增加適宜棲地的合果芋、含羞草與美洲含羞草等3種，雖在未來可能受益於新的氣候環境，提升棲地適宜性(圖1)，但新增棲地之適宜性尚不足以對耕地構成大規模的空間衝突，可能構成空間衝突的區位較侷限(圖2~4)。

當前氣候條件下，所有物種的主要衝突區位皆集中於屏東平原，而隨氣候暖化的情勢加劇，該些物種空間衝突性皆有往北伸張的趨勢，以致整個西部平原、淺山丘陵，甚至桃園台地將新增許多程度不一的衝突區位。將高度(high)與非常高度(very high)衝突兩等級，視為明顯衝突區，並就其在空間配置上的變化來看，大致呈現兩種型態，其一為：當前明顯衝突區衝突性逐漸減弱，並往高緯度大幅提升者，如合果芋、大花咸豐草、落葵等3種；其二為：當前明顯衝突區衝突性持續維持或增強，

表1. 入侵雜草生態棲位建模之參數統計

Table 1. Parameter statistics of niche modeling for invasive weed species

Species	Occurrences	AUC	SD	Contribution of the three important variables (%)					
				Variable 1		Variable 2		Variable 3	
<i>Syngonium podophyllum</i>	133	0.90	0.04	BIO1	49.20	BIO4	11.89	BIO18	11.30
<i>Basella alba</i>	618	0.81	0.02	BIO1	69.38	BIO4	13.12	BIO12	8.29
<i>Bidens pilosa</i>	1870	0.74	0.02	BIO1	67.46	BIO12	10.54	BIO4	9.59
<i>Mimosa diplotricha</i>	376	0.91	0.01	BIO1	61.73	BIO18	14.33	BIO2	9.57
<i>Mimosa pudica</i>	859	0.84	0.02	BIO1	62.93	BIO4	22.53	BIO12	6.33

AUC: area under the receiver operating characteristic curve

SD: standard deviation

僅往高緯度略為提升者，如同屬含羞草屬的美洲含羞草與含羞草等2種。

計算各物種明顯衝突區之面積與變化率(表2)，結果顯示不論當前或未來何種氣候變遷情境下，大花咸豐草與落葵兩物種，均為明顯衝突區分布面積最廣泛的物種；而相較於RCP8.5的情境，恐使5種入侵雜草分別再新增76.04~404.95%不等的明顯衝突面積，若將暖化情勢控制在RCP2.6情境，則可望將明顯衝突面積的增幅維持在20.25~215.92%。

## 討論

### 一、預測模式與重要變數

入侵雜草的潛在空間分布資訊是執行防治工作之重要依據，本研究利用氣候、地形與植被狀態等環境資料建立5種外來入侵ENM，預測結果皆達可接受標準。建模過程中所挑選的11個預測變項，有5個屬氣候

類因子，其中又以與溫度相關的變項對5種入侵雜草ENM貢獻度最高(表1)，為決定棲地適宜性的關鍵因子，此結果與許多外來入侵雜草研究的結果類似(Padalia *et al.* 2014; Wan and Wang 2019; Sintayehu *et al.* 2020)，事實上氣候狀態的改變，確實將影響入侵雜草種子萌芽、生長與繁殖等物候過程(Kathiresan *et al.* 2016; March-Salas and Pertierra 2020; Howell *et al.* 2020)，這也代表入侵雜草潛在空間分布，極可能受到氣候變異的影響，促使入侵範圍發生轉移(range shift)，讓原來未被入侵的區位遭到入侵，進而對當地的農業環境與社會經濟構成威脅(Ziska *et al.* 2011; Sintayehu *et al.* 2020)。

### 二、適宜棲地分布

適宜棲地將為外來植物提供適當的環境條件，有助於擴張潛在分布範圍。研究中

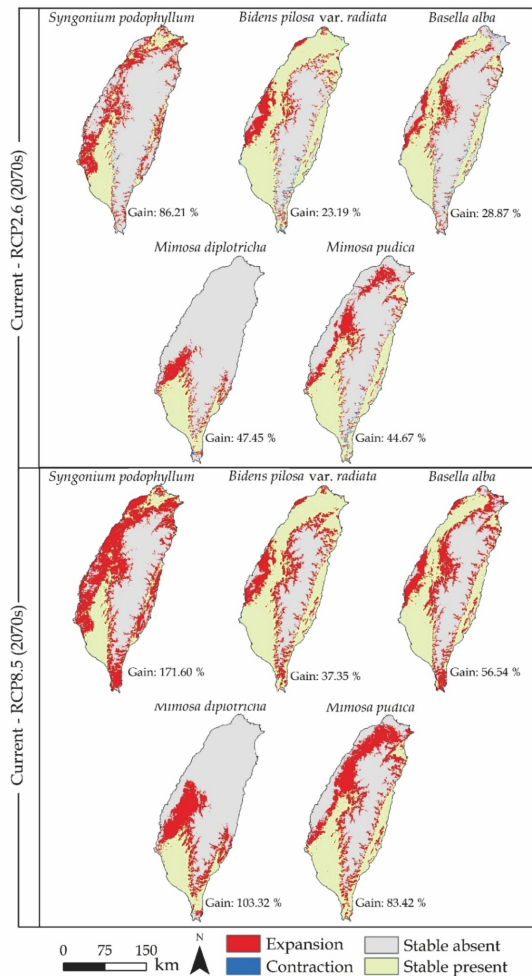


圖1. 未來氣候情境下5種入侵雜草適宜棲地的分布變化。

Fig. 1. Distribution changes of suitable habitat for five invasive weed species under future climate scenarios.

5種入侵雜草均將受益於新的氣候條件，除維持當前的適宜棲地外，亦以不同的擴張速率，持續增加未來適宜棲地範圍(圖1)。

合果芋是增幅最大的物種，概因這該物種在當前空間上的分布較為狹隘，推論未來的氣候條件，將處於有利生長與繁衍的範圍(Mortensen 1992)，因而得以大幅擴張其適宜棲地；至於大花咸豐草及落葵兩種，對溫度具有極大的耐受極限(Grubben *et al.* 1977; Reddy *et al.* 2014; Hou *et al.* 2014)，未來氣候仍將為其提供有利條件，只是可由不適宜轉為適宜棲地之區位所剩不多，以致面積增幅最少，即便如此，該兩物種無論在當前或未來均為適宜棲地分布最廣泛之物種。

從5種入侵雜草適宜棲地的空間擴張型態來看(圖1)，有朝向高緯度或高海拔擴張的趨勢，此與許多研究有一致的結果(Wasowicz *et al.* 2013; Pauchard *et al.* 2016; Shrestha and Shrestha 2019)，不過相較於緯度梯度，入侵雜草在海拔梯度上的擴張似乎進展緩慢，存在某種程度的侷限性，顯示海拔是入侵雜草擴張未來適宜棲地的限制因子，儘管氣候變遷可能加速入侵分布的進程(Petitpierre *et al.* 2016; Alexander *et al.* 2016)，但山區相形惡劣的環境條件，與短距離內迅速變化的多維環境梯度，仍將促使多數入侵雜草入侵山區的進程變緩，並在這些梯度上的某個位置，達到其分布極限(Becker *et al.* 2005)。

### 三、空間衝突

入侵雜草對耕地所構成的空間衝突，確實將在氣候變遷的影響下有所改變(圖2~4)，且改變的範圍或強度將無法單就適宜棲地範圍或增幅(圖1)進行推論。合果芋、大花咸豐草與落葵等3種，其主要衝突

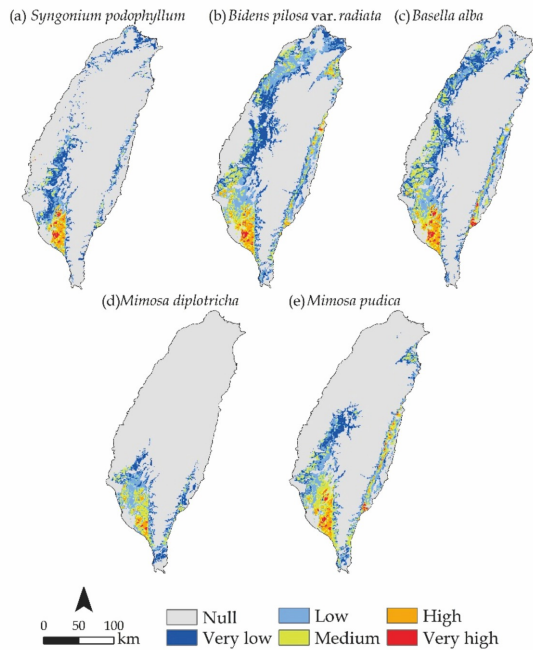


圖2. 當前氣候條件下入侵雜草對耕地產生的空間衝突性。

Fig. 2. Spatial conflicts of invasive weeds on cultivated land under current climate conditions.

區(屏東平原)之氣候條件在未來情境下，可能接近或逾越耐受極限，致衝突性稍有減弱，因此可將防治資源調控至嘉南平原等其他明顯衝突區位；相反地，美洲含羞草與含羞草兩種則在則應持續關注原明顯衝突區位。

值得一提的是，本研究係以棲地適宜性推論其空間衝突性，明顯衝突區可能存在尚未遭受入侵的極適宜棲地，在實務防治工作上，應積極防堵入侵者進駐，同時可選植親源或功能性狀相近的作物，使其優先成為優勢物種，從而成功抑制入侵者建

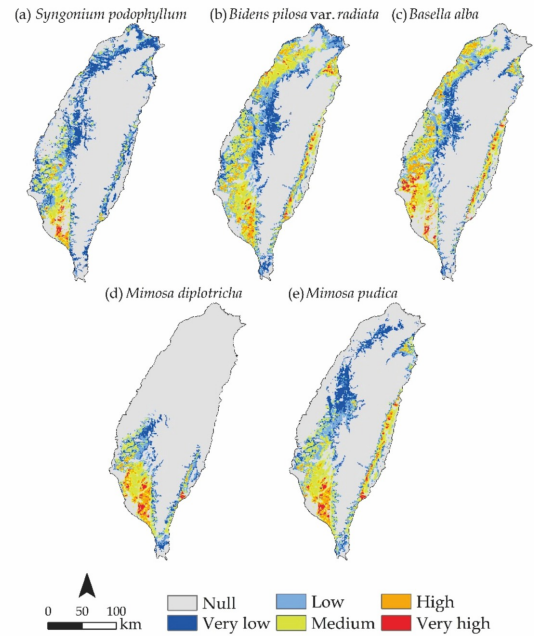


圖3. RCP2.6情境(2070年代)下入侵雜草對耕地產生的空間衝突性。

Fig. 3. Spatial conflicts of invasive weeds on cultivated land under the scenario RCP2.6 (2070s).

立群族(Emery 2007; Zheng *et al.* 2018; Fagúndez and Lema 2019)；至於已遭受入侵之區位，則儘可能將入侵者控制在已形成的範圍內，優先挹注防治資源，移除或控制景觀中連接度差的孤立或小型嵌塊體(Rohal *et al.* 2019; Eppinga *et al.* 2020)，隨後透過完善復育計畫，填補衝突區內的潛在生態棲位，重建能夠抵禦入侵的植物社會(Funk *et al.* 2008)。

#### 四、研究方法的優勢與限制

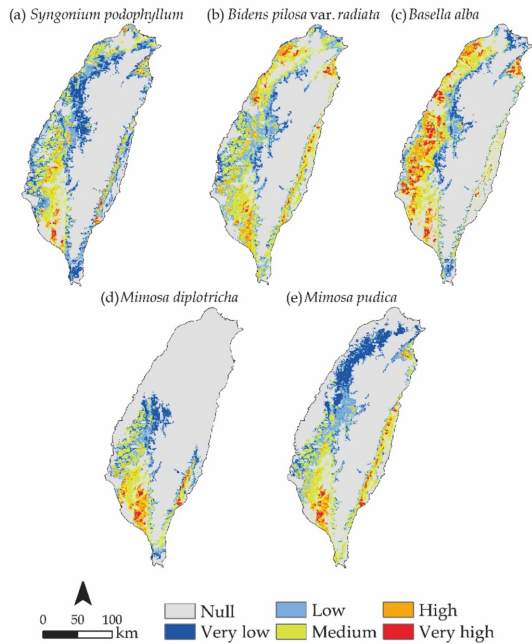


圖4. RCP8.5情境(2070年代)下入侵雜草對耕地產生的空間衝突性。

Fig. 4. Spatial conflicts of invasive weeds on cultivated land under the scenario RCP8.5 (2070s).

ENM所推導的棲地適宜性，具有物種出現機率的生態意涵，在有害生物危害或入侵風險的應用層面上，多以評估種間生態棲位匹配或重疊的研究為主(Alaniz *et al.* 2018; Naeem *et al.* 2018; Negrini *et al.* 2020)，較少著墨於對具高度功能價值土地利用的影響，尤其在農業生產系統上。本研究基於棲地適宜性與農地生產價值等級所建立的交集分析框架，可明確地提供兩衝突元素間的空間關聯訊息(圖2~4)，有助於突顯入侵雜草對具高生產價值區位的影響。儘管如此，由ENM獲取的結果未將擴散限制、生物相互作用，以及入侵雜草本身的進化潛力等生態過程納入考量，且未來氣候參數亦可能超出建模時的數據範圍，這些尚未突破的研究限制，皆可能為適宜性的推估增添不確定性(Phillips *et al.* 2006; Clements and Ditommaso 2011; Srivastava *et al.* 2019)，但研究架構至少可具體指出未來可能遭受入侵並構成威脅的位置與程度，得以作為防治優先性規劃的

表2. 氣候變遷情境下，5種入侵雜草與耕地產生明顯衝突之範圍變化

Table 2. Predicted range changes of conspicuous conflict for invasive weeds and cultivated land based on scenario RCP 2.6 and RCP 8.5, respectively

Species	Current Range	RCP 2.6 (2070s)		RCP 8.5 (2070s)	
		Range	Change (%)	Range	Change (%)
<i>Syngonium podophyllum</i>	647	778	20.25	1,408	117.62
<i>Basella alba</i>	1,110	2,507	215.92	3,730	404.95
<i>Bidens pilosa var. radiata</i>	1,130	2,068	144.98	2,295	180.06
<i>Mimosa diplotricha</i>	366	1,236	134.47	1,302	144.67
<i>Mimosa pudica</i>	954	1,493	83.31	1,446	76.04

Range: Number of grid cells (1 km resolution) for high and very high levels

參考資訊，從而提高入侵防治的成本效益。

## 結論

本研究是台灣首次針對入侵雜草對農業生產的潛在空間衝突性進行評估，主要結果發現，氣候變暖情境下，所探討的5種入侵雜草未來的適宜棲地範圍皆會擴增，然就衝突強度來說，當前合果芋、大花咸豐草與落葵等3種之明顯衝突區，在未來可能轉移至較高緯度的耕地；而美洲含羞草與含羞草等2種，雖適宜棲地有往北擴張的趨勢，但適宜性尚不足以對耕地構成明顯衝突，未來明顯衝突區仍將維持在當前區位。因此，有關因應氣候變遷的防治策略，建議無論是當前或未來可能發生的高衝突地區，都有必要做進一步的控制與監測。

## 引用文獻

林幸君、張靜貞。2004。台灣農業與相關產業之附加價值與投入產出分析。農業經濟叢刊 10: 1-24。

黃靜宜、呂明倫。2018。氣候變遷情境下臺灣外來入侵植物之時空動態與潛在風險評估。作物、環境與生物資訊 15: 34-46。

Alaniz, A. J., A. A. Grez and T. Zaviezo. 2018. Potential spatial interaction of the invasive species *Harmonia axyridis* (Pallas) with native and endemic coccinellids. *Journal of Applied*

*Entomology* 142: 513-524.

Alaniz, A. J., A. Bacigalupo and P. E. Cattan. 2017. Spatial quantification of the world population potentially exposed to Zika virus. *International Journal of Epidemiology* 46: 966-975.

Alaniz, A. J., I. Núñez-Hidalgo, M. A. Carvajal, T. M. Alvarenga, P. Gómez-Cantillana *et al.* 2020. Current and future spatial assessment of biological control as a mechanism to reduce economic losses and carbon emissions: the case of *Solanum sisymbriifolium* in Africa. *Pest Management Science* 76: 2395-2405.

Alexander, J. M., J. J. Lembrechts, L. A. Cavieres, C. Daehler, S. Haide *et al.* 2016. Plant invasions into mountains and alpine ecosystems: current status and future challenges. *Alpine Botany* 126: 89-103.

Allen, J. M. and B. A. Bradley. 2016. Out of the weeds? Reduced plant invasion risk with climate change in the continental United States. *Biological Conservation* 203: 306-312.

Araújo, M. B. and M. New. 2007. Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology and Evolution* 22: 42-47.

Baskaran, N., K. Ramkumaran and G. Karthikeyan. 2016. Spatial and dietary

- overlap between blackbuck (*Antelope cervicapra*) and feral horse (*Equus caballus*) at Point Calimere Wildlife Sanctuary, Southern India: Competition between native versus introduced species. *Mammalian Biology* 81: 295-302.
- Becker, T., H. Dietz, R. Billeter, H. Buschmann and P. J. Edwards. 2005. Altitudinal distribution of alien plant species in the Swiss Alps. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 7: 173-183.
- Bellard, C., J. M. Jeschke, B. Leroy and G. M. Mace. 2018. Insights from modeling studies on how climate change affects invasive alien species geography. *Ecology and Evolution* 8: 5688-5700.
- Bradley, B. A., D. S. Wilcove and M. Oppenheimer. 2010. Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. *Biological Invasions* 12:1855-1872.
- Bradley, B. A., M. Oppenheimer and D. S. Wilcove. 2009. Climate change and plant invasions: restoration opportunities ahead? *Global Change Biology* 15: 1511-1521.
- Carboni, M., M. Guéguen, C. Barros, D. Georges, I. Boulangeat *et al.* 2018. Simulating plant invasion dynamics in mountain ecosystems under global change scenarios. *Global Change Biology* 24: 289-302.
- Clements, D. R. and A. Ditommaso. 2011. Climate change and weed adaptation: Can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research* 51: 227-240.
- Crall, A. W., C. S. Jarnevich, B. Panke, N. Young, M. Renz *et al.* 2013. Using habitat suitability models to target invasive plant species surveys. *Ecological Applications* 23: 60-72.
- Emery, S. M. 2007. Limiting similarity between invaders and dominant species in herbaceous plant communities? *Journal of Ecology* 95: 1027-1035.
- Eppinga, M. B., M. Baudena, E. A. Haber, M. Rietkerk, M. J. Wassen *et al.* 2020. Spatially explicit removal strategies increase the efficiency of invasive plant species control. *Ecological Applications* e02257.
- Fagúndez, J. and M. Lema. 2019. A competition experiment of an invasive alien grass and two native species: are functionally similar species better competitors? *Biological Invasions* 21: 3619-3631.
- Fried, G., B. Chauvel, P. Reynaud and I. Sache. 2017. Decreases in crop production by non-native weeds, pests,

- and pathogens. pp. 83-101. In: M. Vilà and P. E. Hulme (eds.) *Impact of biological invasions on ecosystem services*. Springer, Cham.
- Funk, J. L., E. E. Cleland, K. N. Suding and E. S. Zavaleta. 2008. Restoration through reassembly: plant traits and invasion resistance. *Trends in Ecology and Evolution* 23: 695-703.
- Gessler, P. E., I. D. Moore, N. J. McKenzie and P. J. Ryan. 1995. Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9: 421-432.
- Grubben, G. J. H., H. D. Tindall and J. T. Williams. 1977. *Tropical vegetables and their genetic resources*. International Board for Plant Genetic Resources, FAO, Rome.
- 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.
- Hijmans, R. J. and C. H. Graham. 2006. The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions. *Global change biology* 12: 2272-2281.
- 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.
- Holt, C. D. S., O. T. Nevin, D. Smith and I. Convery. 2018. Environmental niche overlap between snow leopard and four prey species in Kazakhstan. *Ecological Informatics* 48: 97-103.
- Hou, Q. Q., B. M. Chen, S. L. Peng and L. Y. Chen. 2014. Effects of extreme temperature on seedling establishment of nonnative invasive plants. *Biological Invasions* 16: 2049-2061.
- Howell, A., D. E. Winkler, M. L. Phillips, B. McNellis and S. C. Reed. 2020. Experimental warming changes phenology and shortens growing season of the dominant invasive plant *Bromus tectorum* (cheatgrass). *Frontiers in Plant Science* 11: 570001.
- Huang, J. Y., S. F. Wang and M. L. Lu. 2020. Assessment of the effects of climate change on the invasiveness of invasive alien plant in Taiwan. *Taiwan Journal of Biodiversity* 22: 267-291.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao *et al.* 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment* 83: 195-213.
- Intergovernmental Panel on Climate Change,

- 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, NT, USA.
- Kariyawasam, C., H. Kadupitiya, R. Ratnayake, A. Hettiarchchi and R. Ratnayake. 2017. Identification of high-risk agro-ecological regions using species distribution modeling of priority invasive species in Sri Lanka. *Indian Journal of Plant Genetic Resources* 30: 228-231.
- Kathiresan, R. and G. Gualbert. 2016. Impact of climate change on the invasive traits of weeds. *Weed Biology and Management* 16: 59-66.
- Klein, P. and C. M. Smith. 2020. Invasive Johnsongrass, a threat to native grasslands and agriculture. *Biologia* 76: 413-420.
- Koncki, N. G. and M. F. J. Aronson. 2015. Invasion risk in a warmer world: modeling range expansion and habitat preferences of three nonnative aquatic invasive plants. *Invasive Plant Science and Management* 8: 436-449.
- Kumar, S. and T. J. Stohlgren. 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and the Natural Environment* 1: 94-98.
- 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.
- Long, A. L., K. M. Kettenring and R. Toth. 2017. Prioritizing management of the invasive grass common reed (*Phragmites australis*) in Great Salt Lake Wetlands. *Invasive Plant Science and Management* 10: 155-165.
- Lur, H. S., C. Chu, C. Y. Wang and T. M. Chu. 1998. Effect of meteorological disaster on production in Taiwan and prevention strategy against the changing agrometeorological environment. pp. 87-108. In: C. Y. Lin and C. M. Yang (eds). *Potential Effects of Global Climate Change on Crop Production*. Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan.
- March-Salas, M. and L. R. Pertierra. 2020. Warmer and less variable temperatures favour an accelerated plant phenology of two invasive weeds across sub-Antarctic Macquarie Island. *Austral Ecology* 45: 572-585.
- McCune, B. and D. Keon. 2002. Equations for potential annual direct incident

- radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science* 13: 603-606.
- Mortensen, L. M. 1992. Growth responses of three foliage plant species to temperature and photon flux density. *Scientia Horticulturae* 49: 159-166.
- Naeem, M., X. Yuan, J. Huang and J. An. 2018. Habitat suitability for the invasion of *Bombus terrestris* in East Asian countries: A case study of spatial overlap with local Chinese bumblebees. *Scientific Reports* 8: 11035.
- Negrini, M., E. G. Fidelis, M. C. Picanço and R. S. Ramos. 2020. Mapping of the *Stenotarsonemus spinki* invasion risk in suitable areas for rice (*Oryza sativa*) cultivation using MaxEnt. *Experimental and Applied Acarology* 80: 445-461.
- Neszmelyi, G. I. 2017. The Challenges of Economic and Agricultural Developments of Taiwan: Comparison with South Korea. *Tribun EU s. r. o., Brno*.
- Oerke, E. C. 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* 144:31-43.
- Padalia, H., V. Srivastava and S. P. S. Kushwaha. 2014. Modeling potential invasion range of alien invasive species, *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. in India: Comparison of MaxEnt and GARP. *Ecological Informatics* 22: 36-43.
- Panda, R. M., M. D. Behera and P. S. Roy. 2018. Assessing distributions of two invasive species of contrasting habits in future climate. *Journal of Environmental Management* 213: 478-488.
- Pauchard, A., A. Milbau, A. Albiñ, J. Alexander, T. Burgess *et al.* 2016. Non-native and native organisms moving into high elevation and high latitude ecosystems in an era of climate change: new challenges for ecology and conservation. *Biological Invasions* 18: 345-353.
- Pearce, J. and S. Ferrier. 2000. Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling* 133: 225-245.
- Pearson, R. G., C. J. Raxworthy, M. Nakamura and A. T. Peterson. 2007. Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography* 34: 102-117.
- Petitpierre, B., K. McDougall, T. Seipel, O. Broennimann, A. Guisan *et al.* 2016. Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains? *Ecological Applications* 26:530-544.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson and R. E.

- Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Pimentel, D., L. Lach, R. Zuniga and D. Morrison. 2000. Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United States. *BioScience* 50: 53-65.
- Pimentel, D., R. Zuniga and D. Morrison. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics* 52: 273-288.
- Power, A. G. 2010. Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences* 365: 2959-2971.
- Pyšek, P., V. Jarošík, P. E. Hulme, J. Pergl, M. Hejda *et al.* 2012. A global assessment of invasive plant impacts on resident species, communities and ecosystems: The interaction of impact measures, invading species' traits and environment. *Global Change Biology* 18: 1725-1737.
- Reddy, M. T., H. Begum, N. Sunil, P. S. Rao, N. Sivaraj and S. Kumar. 2014. Preliminary characterization and evaluation of landraces of Indian spinach (*Basella* spp. L.) for agro-economic and quality traits. *Plant Breeding and Biotechnology* 2: 48-63.
- Rockwell-Postel, M., B. B. Laginhas and B. A. Bradley. 2020. Supporting proactive management in the context of climate change: prioritizing range-shifting invasive plants based on impact. *Biological Invasions* 22: 2371-2383.
- Rohal, C. B., C. Cranney and K. M. Kettenring. 2019. Abiotic and landscape factors constrain restoration outcomes across spatial scales of a widespread invasive plant. *Frontiers in Plant Science* 10: 481.
- Russell, J. C., J. Y. Meyer, N. D. Holmes and S. Pagad. 2017. Invasive alien species on islands: impacts, distribution, interactions and management. *Environmental Conservation* 44: 359-370.
- Santana, P. A., L. Kumar, R. S. D. Silva, J. L. Pereira and M. C. Picanço. 2019. Assessing the impact of climate change on the worldwide distribution of *Dalbulus maidis* (DeLong) using MaxEnt. *Pest Management Science* 75: 2706-2715.
- Shrestha, U. B. and B. B. Shrestha. 2019. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal. *Diversity and Distributions* 25:1599-1612.
- Sintayehu, D. W., G. Dalle and A. F. Bobasa.

2020. Impacts of climate change on current and future invasion of *Prosopis juliflora* in Ethiopia: environmental and socio-economic implications. *Heliyon* 6: e04596.
- Slodowicz, D., P. Descombes, D. Kikodze, O. Broennimann and H. Müller-Schärer. 2018. Areas of high conservation value at risk by plant invaders in Georgia under climate change. *Ecology and Evolution* 8: 4431-4442.
- Srivastava, V., V. Lafond and V. C. Griess. 2019. Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. *CAB Reviews* 14: 1-13.
- Swets, J. A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240:1285-1293.
- The World Bank Group. 2018. The World Bank Group World Bank open data: agricultural land <https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AG.RI.ZS>. Accessed 31st Mar. 2021.
- Thuiller, W., D. M. Richardson, P. Pyšek, G. F. Midgley, G. O. Hughes *et al.* 2005. Niche-based modelling as a tool for predicting the risk of alien plant invasions at a global scale. *Global Change Biology* 11: 2234-2250.
- Vicente, J. R., R. F. Fernandes, C. F. Randin, O. Broennimann, J. Gonçalves *et al.* 2013. Will climate change drive alien invasive plants into areas of high protection value? An improved model-based regional assessment to prioritise the management of invasions. *Journal of Environmental Management* 131: 185-195.
- Walther, G. R., A. Roques, P. E. Hulme, M. T. Sykes, P. Pyšek *et al.* 2009. Alien species in a warmer world: risks and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution* 24: 686-693.
- Wan, J. Z. and C. J. Wang. 2019. Contribution of environmental factors toward distribution of ten most dangerous weed species globally. *Applied Ecology and Environmental Research* 17: 14835-14846.
- Wan, J. Z., Z. X. Zhang and C. J. Wang. 2018. Identifying potential distributions of 10 invasive alien trees: implications for conservation management of protected areas. *Environmental Monitoring and Assessment* 190: 739.
- Wasowicz, P., E. M. Przedpelska-Wasowicz and H. Kristinsson. 2013. Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends, and the impact of climate change. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208: 648-673.
- Williams, F., R. Eschen, A. Harris, D.

Djeddour, C. Pratt *et al.* 2010. The economic cost of invasive non-native species on Great Britain. CABI Publishing, Wallingford.

Williams, J. N., C. Seo, J. Thorne, J. K. Nelson, S. Erwin *et al.* 2009. Using species distribution models to predict new occurrences for rare plants. *Diversity and Distributions* 15: 565-576.

Zheng, Y. L., J. H. Burns, Z. Y. Liao, Y. P. Li, J. Yang *et al.* 2018. Species composition, functional and phylogenetic distances correlate with success of invasive *Chromolaena odorata* in an experimental test. *Ecology Letters* 21: 1211-1220.

Ziska, L. H., D. M. Blumenthal, G. B. Runion, E. R. Hunt and H. Diaz-Soltero. 2011. Invasive species and climate change: An agronomic perspective. *Climatic Change* 105: 13-42.