

## 結合 GBIF 與 MaxEnt 預測臺灣赤楊之適宜生育地

邱清安<sup>[1][2]</sup> 徐憲生<sup>[1]</sup> 林信輝<sup>[3]\*</sup>

**摘要** 選擇合宜的植物種類是植生復育的關鍵第一步，利用新興的物種分布模擬 (SDM) 將有助於正確選擇樹種及確定適宜生育地以提供科學決策。本文以臺灣赤楊為例，使用免費易得的全球生物多樣性資訊機構 (GBIF) 物種資料庫、最大熵 (MaxEnt) 物種分布軟體進行其生育地適宜度分析，結果顯示預測模型之準確度評估屬於良好等級 (AUC = 0.842)，所得之預測出現機率可加以繪製臺灣赤楊之生育地適宜度 (HSI) 分布圖，經 9 處崩塌地鄰近區域植群調查資料驗證十分吻合，同時本文對未來物種分布模擬尚待解決之相關議題加以討論，期使本地原生植物在水土保持植生復育中更具科學基礎與發揮其應用潛力。

**關鍵詞：**物種分布模擬、臺灣赤楊、生育地適宜度、植生復育。

## Combining GBIF and MaxEnt to Predict the Suitable Habitat of *Alnus formosana*

Ching-An Chiu<sup>[1][2]</sup> Hsien-Sheng Hsu<sup>[1]</sup> Shin-Hwei Lin<sup>[3]\*</sup>

**ABSTRACT** Selecting appropriate species is the first key step for vegetation rehabilitation. Novel species distribution modeling (SDM) can assist in making scientific decisions to support species selection and predict suitable habitat. In this paper, we combine the open-access Global Biodiversity Information Facility (GBIF) database and MaxEnt modeling software to predict *Alnus formosana* distribution. The results reveal that the accuracy assessment of our model is good within an area of 0.842 according to the receiver operating characteristic curve. We transform the predicted occurrence probability, through ArcGIS, to map the habitat suitability index (HSI) of *Alnus formosana* that approximately corresponds with the observed vegetation in 9 nearby landslide areas. Based on our findings, we discuss the future challenges related to SDM. The proposed approach can be used in the future to facilitate proper application of native plants in soil and water conservation.

**Key Words :** Species distribution modeling, *Alnus formosana*, habitat suitability index, vegetation rehabilitation.

### 一、前言

崩塌地植生工程復育之目標，除了重視初期的地被草本植物覆蓋以求坡面穩定及減少沖蝕，也期望重建林木幼苗儘早完成崩塌地之森林化 (林德貴、林信輝，2010)，其中，臺灣赤楊 (*Alnus formosana*) 在中海拔的崩塌地植生重建常被廣泛的應用。臺灣赤楊為本土原生樹種 (Liao, 1996)，常見於河床地及崩塌地等干擾破壞後之跡地，屬於樺木科 (Betulaceae) 演替早期的陽性先驅 (pioneer) 樹種之一，由於其根部可與固氮菌共生形成根瘤 (Anderson et al., 2013)，故早期原住民常於廢耕地上撒播臺灣赤楊種子，以求儘早恢復地力。近年來許多中海拔崩塌地植生工程中也常在水土保持草種中混入臺灣赤楊種子，對於該地是否適合臺灣赤楊生育則多憑野外經驗及週邊

植群觀察，若能應用目前正方興未艾的物種分布模擬 (Species Distribution Modeling, SDM) 來預測臺灣赤楊的適合生育地，則可事先客觀的評估其合適生育地。

SDM 可藉由物種出現點與環境變數圖層來量化物種與環境間的關係 (species - environment relationship)，並對未調查點之物種適宜度機率進行全面化的空間推估 (Franklin, 2009)，近 20 多年來，SDM 之相關研究正急速增加中 (Lobo et al., 2010; Newbold, 2010; Guisan et al., 2013)，廣泛應用於氣候變遷影響、生態理論研究、外來種入侵評估、保育計畫擬定等範疇 (Elith and Leathwick, 2009; Gallien et al., 2012; Forester et al., 2013)。對此，免費開放存取 (free and open-access) 之資料庫與軟體更促使 SDM 快速發展，其中，最常被應用者為全球生物多樣性資訊機構 (Global Biodiversity Information Facility,

[1] 國立中興大學實驗林管理處

Experimental Forest, National Chung Hsing University, Taichng, Taiwan, R.O.C.

[2] 國立中興大學森林學系

Department of Forestry, National Chung Hsing University, Taichng, Taiwan, R.O.C.

[3] 國立中興大學水土保持系

Department of Soil and Water Conservation, National Chung Hsing University, Taichng, Taiwan, R.O.C.

\* Corresponding Author. E-mail : shlin@nchu.edu.tw

GBIF) 物種資料庫、最大熵 (Maximum Entropy, MaxEnt; Phillips et al., 2006; Phillips and Dudík, 2008) 物種分布軟體。本文為瞭解可應用臺灣赤楊為植生材料之適宜生育地, 結合 GBIF 資料庫與 MaxEnt 軟體分析及製作臺灣赤楊之適宜生育分布圖, 以供未來植生工程復育之參考及應用。

## 二、材料與方法

SDM 主要由三大要項所組成 (Moudrý and Šimová, 2012; Sangermano and Eastman, 2012): (1) 物種出現點資料—即反應變數 (species occurrence data, i.e. response variable)、(2) 環境預測圖層—即解釋變數 (environmental layer, i.e. explanatory variable)、(3) 物種-環境關係之演算法或函數的建構—即模擬方法 (algorithm or function, i.e. modeling method) :

### 1. 物種出現點資料

於 GBIF 資料庫中擷取臺灣赤楊之出現點資料, 共計有 448 筆, 經參酌 Yesson et al., 2007 所提之物種座標須經檢查的情況, 本研究亦針對座標點可信度較低之臺灣赤楊記錄予以刪除, 包含: 採集地之國家非標示為 Taiwan 者 (共 10 筆)、經緯度太粗糙 (僅列至小數點以下 2 位者, 共 90 筆)、採集座標回溯 (西元 2000 年之前的記錄因 GPS 尚不十分普及, 故本研究認定為有可能係由採集地名稱回溯採集座標, 共 115 筆)、標示座標未落入臺灣範圍之內 (共 2 筆) 等, 剩餘座標可信之臺灣赤楊記錄共 231 筆, 再將其於 ArcGIS 轉入於 40-m 網格中, 整併重複及落入同一網格者, 僅餘 185 筆臺灣赤楊分布記錄, 此即為本研究使用之物種出現點資料。圖 1A 為臺灣數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 及臺灣赤楊之出現點。

### 2. 環境預測變數圖層

本研究預先評估可使用 10 項環境預測變數, 包含氣候變數及地理地形變數; 其中, 氣候變數係以 Chiu et al. (2009) 所得之各月 40-m 解析度氣候圖層為材料, 再依 Hijmans et al. (2005) 方法計算出年均溫 (annual mean temperature, Bio1)、最冷月最低溫 (min temperature of coldest month, Bio6)、年降水量 (annual precipitation, Bio12)、降水季節性 (precipitation of seasonality, Bio15), 依 Holdridge (1967) 方法計算潛在蒸發散率 (Potential Evapotranspiration Ratio, PER), 依 Chiu et al. (2012) 方法計算有效溫量指標 (Effective Warmth Index, EWI)。另外, 地理地形變數則是以臺灣 40-m 網格的 DEM 為材料, 利用 ArcGIS 10.1 Spatial Analyst (<http://resources.arcgis.com/>) 計算太陽輻射值 (Solar Radiation, SR), 利用 Evans (2011) 方法計算複合地形指標 (Compound Topographic Index, CTI)、地形輻射坡向指標 (Topographic Radiation Aspect Index, TRAI), 同時採用 Lai et al. (2010) 所計算之全天空域 (Whole Light Sky Space, WLS)。以上之 Bio1、Bio6、Bio12、Bio15、PER、EWI、SR、CTI、TRAI、WLS 等 10 項環境變數圖層之空間解析度均為 40-m 網格, 其範圍亦與臺灣 40-m DEM 相同。

為避免環境變數之共線性 (collinearity) 問題 (Peterson et al., 2007; Tyberghein et al., 2012), 經計算各變數圖層兩兩間之相關係數, 去除  $|r| > 0.8$  之變數 (Young, 2010), 以保留的 Bio15、PER、EWI、SR、CTI、TRAI、WLS 等 7 項變數為本研究使用之環境預測變數圖層, 各圖層展示於圖 1B~圖 1H。

### 3. 物種分布模擬方法

本研究以 SDM 中甚常被採用且表現較為穩健的 MaxEnt 為模擬方法 (Elith and Leathwick, 2009), 採用軟體為 MaxEnt 3.3.3k (Phillips et al., 2006; Phillips and Dudík 2008; <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>), 設定迭代次數上限 (iteration limitation) 為 5000 次、最大背景值點位 (max number of background points) 為 10000、重複運行次數 (replicates) 為 20 次、輸出類別選擇 logistic output 之 ASCII 格式檔; 其他設定依照軟體之預設值 (Phillips et al., 2006)。將模擬結果所得之 ASCII 格式檔, 於 ArcGIS 轉換為 grid, 並製作臺灣赤楊之出現機率 (occurrence probability) 或生育地適宜度 (Habitat Suitability Index, HSI) 分布圖。

### 4. 模擬準確度評估

模擬準確度評估採用非閾值依賴評估 (threshold-independent evaluation), 亦即計算接收者操作特徵曲線下面積 (Area Under the receiver operating characteristic Curve, AUC; Fielding and Bell, 1997; Thuiller, 2003), 依據 Swets (1988) 及 Araújo et al. (2005) 之建議, 可將比較物種出現之實測值與模擬值之間的 AUC 分為 5 級, AUC > 0.9 表示模擬成效為傑出 (excellent)、AUC = 0.8 ~ 0.9 : 良好 (good)、AUC = 0.7 ~ 0.8 : 尚可 (fair)、AUC = 0.6 ~ 0.7 : 低劣 (poor)、AUC = 0.5 ~ 0.6 : 失敗 (fail)。

### 5. 臺灣赤楊分布與否之崩場地植群驗證

為瞭解臺灣赤楊於崩場地是否出現, 本研究調查 9 處崩場地之植物社會, 其崩場地範圍之內及其鄰近的植物種類組成如附表 1 所示, 將可用於對照在此 9 處崩場地臺灣赤楊之適生機率與是否出現。附表 1 崩場地範圍之內的植物種類組成資料取自林信輝 (2009) 之報告, 而崩場地鄰近區域的植物種類組成, 則是本研究於此 9 處崩場地鄰近區域 (距離崩場地 1 km 以內, 且海拔落差小於 200 m 之範圍內) 勘查並現地記錄出現的植物種類。

## 三、結果與討論

### 1. 模擬準確度

重複運行 20 次之模擬結果的 AUC 準確度介於 0.700 ~ 0.945, 如圖 2 所示, 平均 AUC 為 0.842, 依據 Swets (1988) 及 Araújo et al. (2005) 之準則, 本研究之模擬準確度屬於良好等級, 故對於臺灣赤楊的分布機率圖或適生機率圖可進一步採信及分析。

## 2. 臺灣赤楊之生育地適宜度分布圖

以取自 GBIF 資料庫 185 筆臺灣赤楊出現點，及 Bio15、PER、EWI、SR、CTI、TRAI、WLS 等 7 項環境變數，經 MaxEnt 進行模擬後之分布機率值，可匯入 ArcGIS 將 ASCII 轉換為 grid 網格值，即可進一步製作臺灣赤楊之 HSI 分布圖，如圖 3A 所示，臺灣赤楊之出現機率介於 0.003 ~ 0.9826，主要分布區域為中海拔山區，且北部之分布海拔較低。若採用 Liu et al. (2013) 之建議，以敏感值及特異值最大總和為閾值 (maximizing the sum of sensitivity and specificity as the threshold)，本研究之 20

次運行模擬之平均閾值為 0.3424，據此可進一步將臺灣赤楊出現機率值進行轉換為出現或不出現 (0 or 1; present or absent, P/A)，如圖 3B 所示，則臺灣赤楊出現之位置主要為中海拔山區，在全臺 22,534,428 個 40-m 網格中共有 4,670,175 (20.73%) 網格屬於適宜臺灣赤楊生育的潛在分布區。在此，北臺灣的西部丘陵區亦屬於出現機率較高處 (Figure 3A) 或屬於出現 (Figure 3B)，可能為 SDM 模擬結果之不確定性 (uncertainty, 見 Elith and Leathwick, 2009; Franklin, 2009; Peterson et al., 2011) 所產生。另外須特別注意的是，MaxEnt 係利用物種出

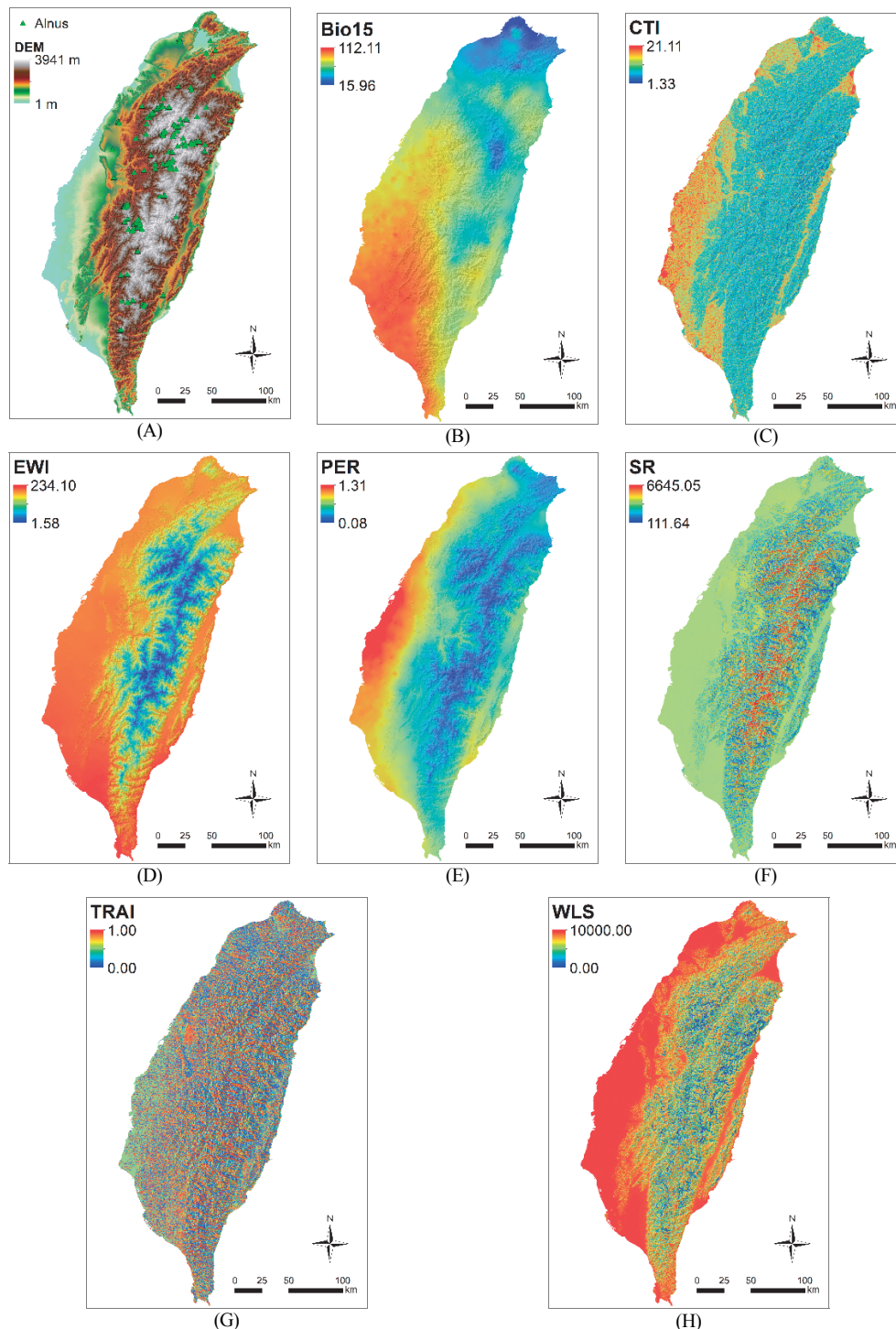


圖 1 本研究所使用的臺灣赤楊出現點 (A) 及 7 項環境變數的圖層 (B~H)

Fig.1 *Alnus formosana* occurrence data (A) and 7 environmental layers (B) used in this study



現點與環境預測變數來模擬物種之出現機率，其結果可視為物種之潛在分布或生育地適宜度 (potential distribution or habitat suitability, Araújo and Guisan, 2006; Franklin, 2009)，但其實際是否出現則是進一步受到生物間交互作用 (biotic interactions, 如競爭、捕食)、散播限制 (dispersal limitation)、擾動 (disturbance) 等影響 (Elith and Leathwick, 2009; Boulangeat et al., 2012)。

### 3. 環境因子之重要性

圖 4 為本研究預測臺灣赤楊分布之環境因子的重要性，其中，當單獨使用 EWI 為預測因子時，模型之表現獲益 (gain) 是最高的，且若不使用 EWI 為預測因子時，模型之表現獲益將下降，因此可知 EWI 為最重要的環境預測因子，而 EWI 主要代表的是植物可利用的熱量總和及季節分配 (temperature sum and thermal seasonality)，顯示臺灣赤楊之分布強烈受到熱量的影響，熱量與植物分布常用的海拔高度具有顯著之負相關 (Chiu et al., 2014)，就圖 1 之全臺灣的 DEM 與 EWI 而言，二者之相關係數 (r) 高達 -0.9784；圖 4 也顯示模型中最不具影響力的環境因子為 TRAI，其表現獲益是最低的。表 1 進一步分析各環境因子之影響力，亦可知 EWI 之貢獻百分率 (percent contribution) 達 78.8%，其餘依次為 Bio15 > PER > WLS > TRAI > CTI > SR，另外分析各環境因子之置換重要性 (permutation importance, 亦即移除此變數後模型表現下降之程度)，結果顯示 EWI > Bio15 > PER > WLS > SR > TRAI > CTI，與貢獻百分率呈現大約一致之表現。綜合圖 4 及表 1 之結果，可推論臺灣赤楊之分布主要受到熱量及水分境制 (thermal and moisture regimes) 影響，但 WLS、TRAI、CTI、SR 等地形相關的因子亦能於小尺度生育地中左右臺灣赤楊之適宜度。

### 4. 臺灣赤楊分布圖之實務驗證

表 2 為以南投林區管理處所轄 9 處崩塌地為例來進行驗證，由崩塌地內部的植群樣區之實際調查資料 (observed P/A in site) 比對 SDM 預測資料 (predicted P/A in site) 之結果來看，共有 5 處崩塌地調查與預測結果二者一致，亦即樣區內實際有調查到臺灣赤楊出現且 SDM 預測亦為出現，或樣區內臺灣赤楊不出現且 SDM 預測亦為不出現，然另有 4 處崩塌地二者不一致，亦即實際出現但預測不出現、實際不出現但預測出現，此種不一致的現象主要是因為 SDM 所預測之結果為物種的潛在分布或適宜生育環境，然在適宜環境中物種是否真正出現仍會受到物種間競爭、種子可否散播到此處、生育地是否受到擾動、甚至是機遇 (chance) 等因素而影響。由於崩塌地屬於擾動後之生育地，可能適於臺灣赤楊生長之環境，會因為植群演替階段的不同 (如崩塌地尚處於演替初期的草本植群階段) 或種子未散播進入 (如崩塌地周邊無臺灣赤楊母樹) 等因素而未出現於崩塌地之內，故再進一步比對附表 1 崩塌地鄰近植群之實際調查資料 (observed P/A near site) 與 SDM 預測資料 (predicted P/A in site)，則如表 2 所示，高達 8 處崩塌地調查與預測結果二者具有一致性，唯一不一致之崩塌地為 NO. 6 奧萬大聯外道路，但此處之 HSI 為 0.2333，已較他處接近本

表 1 各環境因子對臺灣赤楊分布預測模型之貢獻百分率及置換重要性

**Table 1 Percent contribution and permutation importance of each environmental predictor to *Alnus formosana* distribution modeling**

| Variable | Percent contribution | Permutation importance |
|----------|----------------------|------------------------|
| EWI      | 78.8                 | 71.3                   |
| Bio15    | 10.0                 | 11.5                   |
| PER      | 5.1                  | 7.0                    |
| WLS      | 2.3                  | 5.8                    |
| TRAI     | 1.5                  | 1.1                    |
| CTI      | 1.2                  | 1.3                    |
| SR       | 1.1                  | 2.0                    |

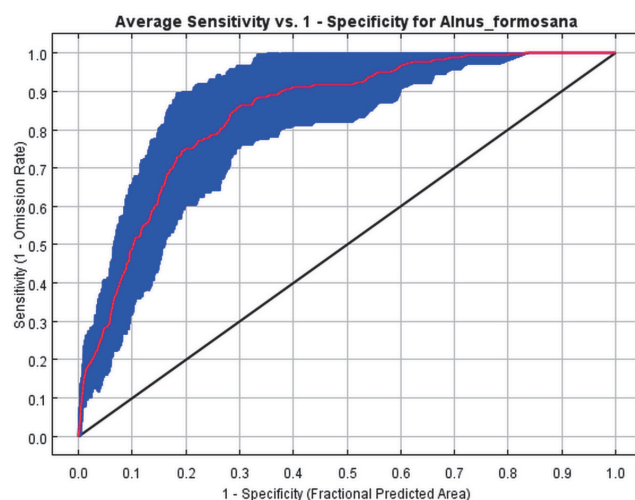


圖 2 模擬臺灣赤楊分布之準確度評估，平均 AUC = 0.842，屬於良好等級 (■表示：mean AUC；■表示：mean +/- one std. dev.；■表示：random prediction)

**Fig.2 Accuracy assessment of *Alnus formosana* distribution modeling is good degree based on mean AUC = 0.842 (■ mean AUC ; ■ mean +/- one std. dev. ; ■ random prediction)**

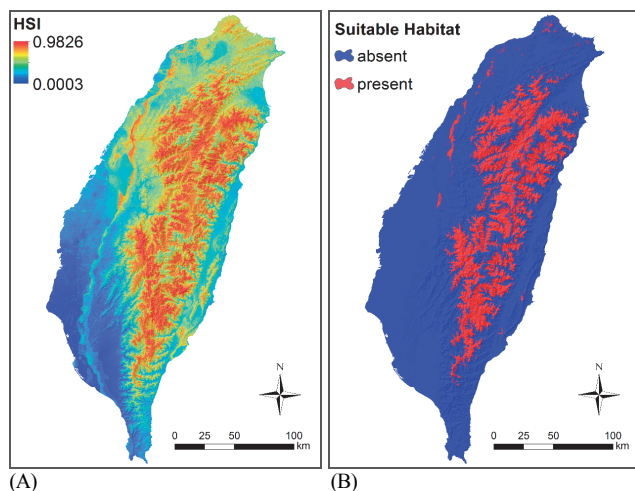


圖 3 臺灣赤楊分布預測：(A) 生育地適宜度分布圖—連續機率值、(B) 出現或不出現—0 或 1

**Fig.3 Distribution modeling of *Alnus formosana*: (A) habitat suitability index map — continuous probability, (B) present or absent — 0 or 1**

研究所使用之 P/A 閾值 0.3424，此一驗證可呼應前述模型之準確度評估屬於良好等級之結果。因此，SDM 之預測結果雖然是物種的潛在分布或適宜生育環境，有時與物種的真實分布有所差異，但對崩塌地植生復育樹種選擇等應用而言，本研究之模擬結果已然具有相當的參考價值，能夠提供決策者瞭解在該處崩塌地中有那些樹種是可以用來當做復育的對象，以及其適宜生育的程度為何。

5. 未來研究改進之展望

本研究利用十分簡便易得的 GBIF 物種資料庫、MaxEnt 軟體進行臺灣赤楊之生育地適宜度分析，其準確度雖已達良好等級的 AUC = 0.842，但由 SDM 之預測的不確定性來源中仍有許多將來可再改進之處，謹配合 SDM 之反應變數、解釋變數、模擬方法等 3 大組成要項討論如下。

- (1) 物種出現點之數量與空間偏差 (sample size and spatial bias of species occurrence data) :

物種出現點為 SDM 之反應變數，其取樣不確定性主要源自於物種出現點之樣本大小 (sample size)、位置錯誤或空間偏差 (positional error or spatial bias) (Gra-

ham et al., 2008; Feeley and Silman, 2011; Moudrý and Šimová, 2012)。不同研究所使用的樣本數量可能從數點至數千點，SDM 之可靠性與穩定度 (reliability and stability) 會隨著樣本大小增加而提升 (Guisan et al., 2007; Franklin, 2010; Peterson et al., 2011)。其次，物種出現點之位置錯誤或偏差在 SDM 計算過程中將被用於擷取環境變數資訊，造成物種-環境之關係的不正確推導，致使產生錯誤的模擬預測結果 (Naimi et al., 2011) 而且很難從預測結果中去檢測出物種點位是否有誤 (Osborne and Leitão, 2009)，雖然大部分的 SDM 研究都假定物種之點位是正確的，但事實上物種點位卻是經常有誤的 (Osborne and Leitão, 2009)。就本研究而言，僅是利用取自 GBIF 資料庫 185 筆臺灣赤楊出現點且尚無法保證其空間位置之正確性，故可確知其為模型不確定性的來源之一。然而多量且正確的物種出現點也意味著成本的增加，因此未來如何兼顧節省調查成本 (小樣本) 與良好預測結果 (高準確) 之雙重要求，找出最適的物種樣本大小將是在應用 SDM 時所直接面臨的問題。

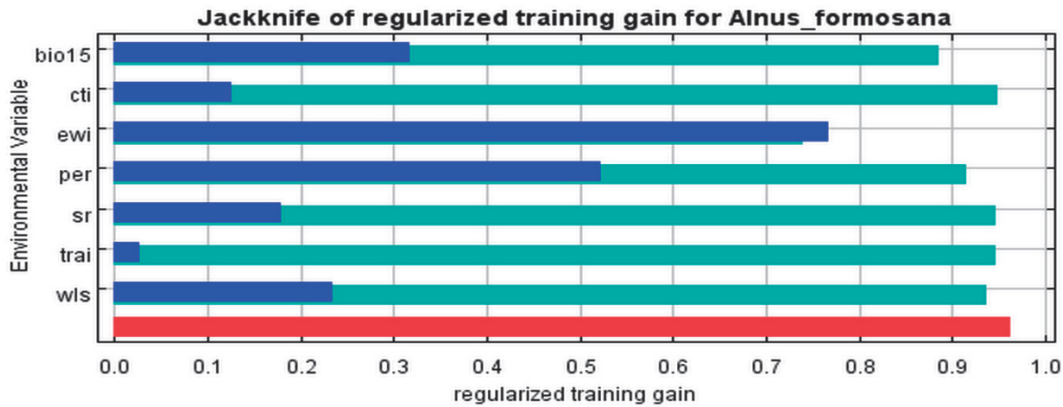


圖 4 各環境因子對台灣赤楊分布預測之獲益表現 (■表示：without variable；■表示：with only variables)

Fig.4 Gain of each environmental predictor to *Alnus formosana* distribution modeling (■ without variable ; ■ with only variable ; ■ with all variables)

表 2 9 處崩塌地之臺灣赤楊分布的植群調查與SDM預測之比較

Table 2 Comparisons of *Alnus formosana* occurrence between observed vegetation and predicted SDM in 9 landslide sites

| landslide name | X      | Y       | DEM (m) | HSI <sup>1</sup> | observed P/A in site | observed P/A near site | predicted <sup>2</sup> P/A in site |
|----------------|--------|---------|---------|------------------|----------------------|------------------------|------------------------------------|
| 彰化調查站          | 204573 | 2664017 | 79      | 0.0750           | Absent               | Absent                 | Absent                             |
| 八卦山保安林         | 210525 | 2636083 | 114     | 0.0753           | Absent               | Absent                 | Absent                             |
| 草嶺大飛山          | 217605 | 2608722 | 831     | 0.0785           | Absent               | Absent                 | Absent                             |
| 卓社林道一          | 251701 | 2644116 | 1166    | 0.3577           | Absent               | Present                | Present                            |
| 卓社林道二          | 251800 | 2643617 | 1256    | 0.3554           | Absent               | Present                | Present                            |
| 奧萬大聯外道路        | 265868 | 2650359 | 1174    | 0.2333           | Present              | Present                | Absent                             |
| 大坑區外保安林        | 228404 | 2674204 | 458     | 0.0842           | Absent               | Absent                 | Absent                             |
| 臺14線-98k       | 271304 | 2659101 | 1653    | 0.5463           | Absent               | Present                | Present                            |
| 能高越嶺           | 272016 | 2660836 | 2034    | 0.6296           | Present              | Present                | Present                            |

<sup>1</sup> habitat suitability index (HSI), obtained from Figure 3A.

<sup>2</sup> predicted present or absent (P/A), obtained from Figure 3B.

(2) 環境預測變數之可得性與選用 (availability and selection of environmental predictors) :

Araújo and Guisan (2006) 認為適合使用於 SDM 的預測變數應著重於環境變數的解釋力及生態基礎 (explanatory power and ecological basis), 其應用在 SDM 的優先順序為資源變數 > 直接變數 > 間接變數 (Austin and Van Niel, 2011; Dormann, 2011), 然而在現實上 SDM 使用的預測變數完全受限於資料的可得性 (availability), 許多與植物生理有關的變數由於不易量測或取得, 而常以另一可得的變數來估計或做為代用品 (Williams et al., 2012), 例如, 氣象站稀少的山區, 可基於溫度遞減率 (temperature lapse rate), 而常以海拔高度來代表山地氣溫 (Rolland, 2003)。在儘可能蒐集與物種分布可能有關的環境變數之後, 接下來之挑戰為如何選擇及減少真正應用於 SDM 的變數, 以避免過度參數化 (over-parameterization) 及多重共線性 (multi-collinearity) (Guisan and Zimmermann, 2000; Tyberghein et al., 2012), 因為若有愈多變數, 則變數間愈可能相關、其中某變數愈可能對 SDM 有偽貢獻 (Dormann, 2011), 多重共線性變數也容易對 SDM 過度擬合 (over-fitting) (Peterson et al., 2007)。為鑑別出冗餘的環境變數, Williams et al. (2012) 認為其過程須同時包含: (1) 先驗的生態考慮 (a priori ecological considerations); (2) 每一環境變數之來源與準確度; (3) 察覺變數之間的關係; (4) 以統計嚴密測試不同變數組合的效用。

(3) 不同模擬方法之比較與集成 (comparison and ensemble of modeling methods) :

許多報告針對不同的 SDM 方法進行了整理與比較 (Heikkinen et al., 2006; Elith and Leathwick, 2009; Araújo and Peterson, 2012; Roberts and Hamann, 2012), 在 Yates et al. (2010) 回顧 10 餘篇關於植物分布的報告, 也發現模擬方法之優劣均各有異同, 因此並沒有單一的 SDM 方法對所有的物種與環境都是最佳的 (Guisan et al., 2007), 因此選用那一種模擬方法應取決於研究的目標與限制 (Heikkinen et al., 2006; Elith and Leathwick, 2009)。Thuiller et al. (2009) 發表之 BIOMOD (BIODiversity MODelling) 套件是在 R 語言上整合 9 種 SDM 方法的平臺, 最新版本 BIOMOD2 已可同時完成人工神經網路 (Artificial Neural Networks, ANN)、分類樹分析 (Classification Tree Analysis, CTA)、彈性判別分析 (Flexible Discriminant Analysis, FDA)、廣義加法模型 (Generalized Additive Models, GAM)、廣義助推模型 (Generalized Boosting Model, GBM)、廣義線性模型 (Generalized Linear Models, GLM)、隨機森林 (Breiman and Cutler's Random Forest for classification and regression, RF)、多適迴歸樣條 (Multiple Adaptive Regression Splines, MARS)、最大熵模擬 (MaxEnt)、表域包絡 (Surface Range Envelope, SRE) 等 10 種模擬方法之分析, 甚便於比較不同 SDM 之模擬成效。

對照上述 SDM 不確定性來源之討論, 為了再提升 SDM 之準確度, 本研究未來有以下可改進之處: (1) 目前 GBIF 中之臺灣赤楊出現點資料過少, 且其空間位置雖經本研究刪除座標點可信度較低之記錄, 但未來仍可藉由全球衛星定位系統 (Global Positioning System, GPS) 進行野外現地調查, 藉以取得數量較多且位置更精確、分布較均勻的臺灣赤楊出現點資料; (2) 目前以經驗判斷臺灣赤楊適宜生育地大多是依據海拔高度, 但海拔高度為一影響植物分布的間接因子 (Austin, 1980), 熱量才是決定植物分布的直接因子 (Su, 1984), 目前本研究雖以利用氣候變數及地理地形變數來預測臺灣赤楊之潛在分布, 但未來仍可蒐集更多環境圖層, 並篩選出影響臺灣赤楊分布的關鍵環境預測因子; (3) 目前已發展出多種的 SDM 方法, 未來可逐一測試各方法模擬臺灣赤楊之適用性, 並將高準確度的結果進行集成預測 (assemble prediction, 亦即疊合準確度高於某值之多個預測模型) (Araújo and New, 2007), 以減少單一模擬方法之不確定性。

## 四、結 論

SDM 是近年來快速發展的新興科學, 廣泛地被使用在環境與物種之研究及應用中, 本研究以免費易得的 GBIF 及 MaxEnt 對臺灣赤楊之分布進行初步的模擬, 並以崩塌地之植群資料加以驗證, 顯示臺灣赤楊之生育地適宜度分布圖等資料具有一定的參考應用價值。本文同時對未來 SDM 尚待解決之相關議題加以討論, 期能逐步建立重要原生植物之生育地適宜度分析, 使本土植物在水土保持植生復育中更具科學基礎與發揮其應用潛力。

## 參考文獻

- [1] 林信輝 (2009), 南投處轄內崩塌地處理案例調查暨植生生態復育評估作業。行政院農業委員會林務局南投林區管理處。Lin, S.H. (2009). "Landslide Cases and Vegetation Survey for Ecological Restoration of assessment tasks in Nantou Forest District Office Area." Nantou Forest District Office, Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (in Chinese)
- [2] 林德貴、林信輝 (2010), 國有林崩塌地森林化之研究。行政院農業委員會林務局。(Lin, D.G., and Lin, S.H. (2010). "Study on the Reforestation of Landslide Areas in National Forest." Forestry Bureau, Council of Agriculture, Executive Yuan. (in Chinese))
- [3] Anderson, M.D., Taylor, D.L., and Ruess, R.W. (2013). "Phylogeny and assemblage composition of Frankia in *Alnus tenuifolia* nodules across a primary successional sere in interior Alaska." *Molecular Ecology*, 22(14), 3864-3877.
- [4] Araújo, M.B., and Guisan, A. (2006). "Five (or so) challenges for species distribution modelling." *Journal of Biogeography*, 33, 1677-1688.

- [5] Araújo, M.B., and New, M. (2007). "Ensemble forecasting of species distributions." *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 42-47.
- [6] Araújo, M.B., Pearson, R.G., Thuiller, W., and Erhard, M. (2005). "Validation of species-climate impact models under climate change." *Global Change Biology*, 11, 1504-1513.
- [7] Araújo, M.B., and Peterson, A.T. (2012). "Uses and misuses of bioclimatic envelope modelling." *Ecology*, 93, 1527-1539.
- [8] Austin, M.P. (1980). "Searching for a model for use in vegetation analysis." *Vegetatio*, 42, 11-21.
- [9] Austin, M.P., and Van Niel, K.P. (2011). "Improving species distribution models for climate change studies: variable selection and scale." *Journal of Biogeography*, 38, 1-8.
- [10] Boulangeat, I., Gravel, D., and Thuiller, W. (2012). "Accounting for dispersal and biotic interactions to disentangle the drivers of species distributions and their abundances." *Ecology Letters*, 15(6), 584-593.
- [11] Chiu, C.A., Lin, P.H., and Lu, K.C. (2009). "GIS-based tests for quality control of meteorological data and spatial interpolation of climatic data: a case study in mountainous Taiwan." *Mountain Research and Development*, 29(4), 339-349.
- [12] Chiu, C.A., Lin, P.H., Hsu, C.K., and Shen, Z.H. (2012). "A novel thermal index improves prediction of vegetation zones: Associating temperature sum with thermal seasonality." *Ecological Indicators*, 23, 668-674.
- [13] Chiu, C.A., Lin, P.H., and Tsai, C.Y. (2014). "Spatio-temporal variation and monsoon effect on the temperature lapse rate of a subtropical island." *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 25, 203-217.
- [14] Dormann, C.F. (2011). "Modelling species' distributions." In: Jopp F, Reuter H, Breckling B (eds) *Modelling Complex Ecological Dynamics*, 179-196. Springer-Verlag, Berlin.
- [15] Elith, J., and Leathwick, J.R. (2009). "Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time." *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697.
- [16] Evans, J. (2011). "Geomorphometry and Gradient Metrics Toolbox." <http://conserveonline.org/workspaces/emt/documents/arcgis-geomorphometrics-toolbox/view.html>.
- [17] Feeley, K.J., and Silman, M.R. (2011). "Keep collecting: accurate species distribution modelling requires more collections than previously thought." *Diversity and Distributions*, 17, 1132-1140.
- [18] Fielding, A.H., and Bell, J.F. (1997). "A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models." *Environmental Conservation*, 24, 38-49.
- [19] Forester, B.R., DeChaine, E.G., and Andrew, G.B. (2013). "Integrating ensemble species distribution modelling and statistical phylogeography to inform projections of climate change impacts on species distributions." *Diversity and Distributions*, 19(12), 1480-1495.
- [20] Franklin, J. (2010). "Moving beyond static species distribution models in support of conservation biogeography." *Diversity and Distributions*, 16, 321-330.
- [21] Franklin, J. (2009). *Mapping Species Distributions: Spatial Inference and Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [22] Gallien, L., Douzet, R., Steve, P., Niklaus, E.Z., and Wilfried, T. (2012). "Invasive species distribution models – how violating the equilibrium assumption can create new insights." *Global Ecology and Biogeography*, 21(11), 1126-1136.
- [23] Graham, C.H., Elith, J., Robert, J.H., Antoine, G., Townsend, P.A., Bette, A.L., and the Nceas Predicting Species Distributions Working Group (2008). "The influence of spatial errors in species occurrence data used in distribution models." *Journal of Applied Ecology*, 45, 239-247.
- [24] Guisan, A., Tingley, R., John, B.B. Ilona, N., Patricia, R.S., Ayesha, I.T.T., Tracey, J.R., Lluis, B., Eve, M., Chrystal, M., Tara, G.M., Jonathan, R.R., Ramona, M., Samantha, A.S., Jane, E., Mark, W.S., Brendan, A.W., Olivier, B., Mike, A., Simon, F., Michael, R.K., Hugh, P.P., and Yvonne, M.B. (2013). "Predicting species distributions for conservation decisions." *Ecology letters*, 16(12), 1424-1435.
- [25] Guisan, A., and Zimmermann, N.E. (2000). "Predictive habitat distribution models in ecology." *Ecological Modelling*, 135, 147-186.
- [26] Guisan, A., Zimmermann, N.E., Elith, J., Graham, C.H., Phillips, S., and Peterson, A.T. (2007). "What matters for predicting the occurrences of trees: Techniques, data, or species' characteristics?" *Ecological Monographs*, 77, 615-630.
- [27] Heikkinen, R.K., Luoto, M., Miguel, B.A., Raimo, V., Wilfried, T., and Martin, T.S. (2006). "Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change." *Progress in Physical Geography*, 30(6), 751-777.

- [28] Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., and Jarvis, A. (2005). "Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas." *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978.
- [29] Holdridge, L.R. (1967). *Life Zone Ecology*, Tropical Science Center, San Jose, Costa Rica.
- [30] Lai, Y.J., Chou, M.D., and Lin, P.H. (2010). "Parameterization of topographic effect on surface solar radiation." *Journal of Geophysical Research*, 115, D01104.
- [31] Liao, J.C. (1996). "Betulaceae." In: *Editorial Committee of the Flora of Taiwan, Flora of Taiwan, 2nd edition*, 2, 44-50.
- [32] Liu, C., White, M., and Newell, G. (2013). "Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data." *Journal of Biogeography*, 40, 78-789.
- [33] Lobo, J.M., Jiménez-Valverde, A., and Joaquín, H. (2010). "The uncertain nature of absences and their importance in species distribution modelling." *Ecography*, 33, 103-114.
- [34] Moudrý, V., and Šimová, P. (2012). "Influence of positional accuracy, sample size and scale on modeling species distributions: a review." *International Journal of Geographical Information Science*, 26(11), 2083-2095.
- [35] Naimi, B., Skidmore, A.K., Thomas, A.G., and Nicholas, A.S.H. (2011). "Spatial autocorrelation in predictors reduces the impact of positional uncertainty in occurrence data on species distribution modelling." *Journal of Biogeography*, 38, 1497-1509.
- [36] Newbold, T. (2010). *The value of species distribution models as a tool for conservation and ecology in Egypt and Britain*. Ph.D. Dissertation, University of Nottingham, UK.
- [37] Osborne, P.E., and Leitão, P.J. (2009). "Effects of species and habitat positional errors on the performance and interpretation of species distribution models." *Diversity and Distributions*, 15(4), 671-681.
- [38] Peterson, A.T., Papeş, M., and Eaton, M. (2007). "Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent." *Ecography*, 30, 550-560.
- [39] Peterson, A.T., Soberón, J., Pearson, R.G., Anderson, R.P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., and Araújo, M.B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [40] Phillips, S.J., and Dudík, M. (2008). "Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation." *Ecography*, 31(2), 161-175.
- [41] Phillips, S.J., Anderson, R.P., and Schapire, R.E. (2006). "Maximum entropy modeling of species geographic distributions." *Ecological modeling*, 190(3), 231-259.
- [42] Roberts, D.R., and Hamann, A. (2012). "Method selection for species distribution modelling: are temporally or spatially independent evaluations necessary?" *Ecography*, 35(9), 792-802.
- [43] Rolland, C. (2003). "Spatial and seasonal variations of air temperature lapse rates in alpine regions." *Journal of Climate*, 16, 1032-1046.
- [44] Sangermano, F., and Eastman, J.R. (2012). "A GIS framework for the refinement of species geographic ranges." *International Journal of Geographical Information Science*, 26, 39-55.
- [45] Su, H.J. (1984). "Studies on the climate and vegetation types of the natural forests in Taiwan (II). Altitudinal vegetation zone in relation to temperature gradient." *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 17, 57-73.
- [46] Swets, J.A. (1988). "Measuring the accuracy of diagnostic systems." *Science*, 240, 1285-1293.
- [47] Thuiller, W., Lafourcade, B., Robin, E., and Miguel, B.A. (2009). "BIOMOD – A platform for ensemble forecasting of species distributions." *Ecography*, 32, 369-373.
- [48] Thuiller, W. (2003). "BIOMOD – optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change." *Global Change Biology*, 9, 1353-1362.
- [49] Tyberghein, L., Verbruggen, H., Pauly, K., Troupin, C., Mineur, F., and De Clerck, O. (2012). "Bio-ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modelling." *Global Ecology and Biogeography*, 21, 272-281.
- [50] Williams, K.J., Belbin, L., Austin, M.P., Stein, J.L., and Ferrier, S. (2012). "Which environmental variables should I use in my biodiversity model?" *International Journal of Geographical Information Science*, 26, 2009-2047.
- [51] Yates, C.J., Elith, J., Andrew, M.L., David, L.M., Guy, F.M., Frank, M.S. and Adam, G.W. (2010). "Projecting climate change impacts on species distributions in megadiverse South African Cape and Southwest Australian Floristic Regions: opportunities and challenges." *Austral Ecology*, 35(4), 374-391.
- [52] Yesson, C., Brewer, P.W., Sutton, T., Cairness, N., Pahwa, J.S., Burgess, M., Gray, W.A., White, R.J.,



Jones, A. C., Bisby, F. A., and Culham, A. (2007). "How global is the global biodiversity information facility?" *PLoS ONE*, 2(11), e1124.

- [53] Young, N.E. (2010). *Regional Data Refine Local Abundance Models: Modeling Plant Species Abundance Distributions on the Central Plains*. Master thesis, Department of Forest, Rangeland, and Watershed Stewardship, Colorado State University, US.

---

2014 年 05 月 08 日 收稿

2014 年 06 月 19 日 修正

2014 年 07 月 08 日 接受

(本文開放討論至 2015 年 3 月 31 日)