

研究報告

## 氣候變遷情境下臺灣四種單食性蝴蝶之時空分布模擬

黃靜宜<sup>1</sup> 呂明倫<sup>1\*</sup> 王素芬<sup>2</sup>

【摘要】在氣候變遷的影響下，物種會自主性調整其適存環境，而蝴蝶對環境敏感，氣候改變勢必迫使改變其空間分布。本研究選擇無尾白紋鳳蝶 (*Papilio castor formosanus*)、白灰蝶 (*Neopithecops zalmora*)、黃蛺蝶 (*Polygonia c-aureum lunulata*) 及波蛺蝶 (*Ariadne ariadne pallidior*) 等臺灣4種單食性蝴蝶及其寄主植物做為目標種，運用物種調查資料及最大熵 (Maxent模式) 模擬各蝶種現生及未來氣候變遷情境下 (2061~2080) 之空間分布，另考慮生物相互作用，採模糊邏輯運算整合各蝶種及其寄主植物之空間分布機率，以確認各蝶種之空間分布及受氣候變遷的影響程度。研究結果顯示，在氣候變遷情境下，以全臺而言，各蝶種空間分布朝向高緯度或高海拔方向推移，不致滅絕；然以氣候區來看，黃蛺蝶未來在熱帶氣候區遭受區域滅絕的可能性相對較高。由本研究的架構上，可找出易受氣候變遷影響或須優先納入保護之受威脅物種，以提供未來制訂物種保育策略與經營管理工作之參考。

【關鍵詞】最大熵、寄主植物、分布、模糊邏輯理論、滅絕。

Research paper

## Modelling spatial and temporal distribution of four monophagous butterfly species under climate change scenarios in Taiwan

Jing-Yi Huang<sup>1</sup> Ming-Lun Lu<sup>1\*</sup> Su-Fen Wang<sup>2</sup>

【Abstract】Species currently track suitable environment conditions under ongoing climate change. Climate change forces to shift in pattern of butterfly natural distribution because of its sensitivity to environment. We therefore used the maximum entropy (Maxent model) to project species distribution of four monophagous butterfly species and their host plant species from presence-only data for the *Papilio castor formosanus*, *Neopithecops zalmora*, *Polygonia c-aureum lunulata* and *Ariadne ariadne pallidior* under present and future climate change scenarios (2061~2080) in Taiwan. To obtain more accurate

---

1. 行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

Endemic Species Research Institute.

2. 國立彰化師範大學地理學系。

Department of Geography, National Changhua University of Education.

\* 通訊作者，55244南投縣集集鎮民生東路1號。

Corresponding author. 1, Mingshen East Rd, Chichi Township, Nantou County 55244, Taiwan Email: alan@tesri.edu.tw.

distribution of butterfly species, the biotic interactions are taken into consideration, we utilized the fuzzy logic to combine predictions of butterfly and plant. The results showed four butterfly species will not be extinct that the spatial distribution is expected to shift towards more northern or higher locations in term of full scale, but the possibility of regional extinction for *Polygonia c-aureum lunulata* is relatively high in future in the case of tropical region. Our method is a methodology that can be found vulnerable species by climate change or protected priority species requiring planning for future protection and management.

【Key words】 maximum entropy, host plant, distribution, fuzzy logic, extinction.

## 一、前言

氣候變遷是指氣候平均狀態在統計學上有顯著的改變，或者持續較長一段時間的氣候變動，包含降水型態、大氣組成的改變、海平面的上升以及極端天氣事件的增加等 (IPCC 2007)，所衍生的不利影響與衝擊，除攸關災害防救、公共健康以及人類生活福祉等，對生物多樣性而言，更可能造成生物物候及組成結構的改變，迫使物種遷移原棲地，甚至導致物種滅絕 (Chou et al. 2011; Hwang & Koh 2013; Stefanescu et al. 2003; 張仲德等2011; 陳陽發等 2014; 謝東佑2016)。蝴蝶在食物鏈上屬於初級消費者，除為植物傳花授粉外，也提供肉食性或寄生性昆蟲的食物來源，在生態系的運作上占有重要的地位，且因生活史較短，對環境具有高度敏感性，是良好的環境監測指標物種 (Pollard 1977; Kremen 1992; Warren et al. 2001)，此外，蝴蝶賞心悅目，在人類歷史文化及經濟發展上，提供了許多生態系服務效益。惟近代受人為開發與氣候變遷影響之故，迫使蝴蝶資源遭受威脅，已有研究證實，若全球暖化現象持續進行，未來將會有許多蝶種的數量驟減，嚴重者可能走向滅絕的命運 (Heikkinen et al. 2010; Oliver et al. 2015)。

在生態系統中，每一物種都有屬於自己的生態棲位 (ecological niche)，即適合其生存的生態環境，在面對氣候或環境改變時，物種會自主性調整其分布區位 (Parmesan et al. 1999; Bakkenes et al. 2002)，以躲避環境帶來

的不利影響。就蝴蝶而言，大部分的物種對寄主植物具有專一性 (specificity)，僅取食單一物種或某些特定的植物，當兩者對氣候異常的調適未能同步時，則可能造成空間分布上的落差，進而提升蝴蝶滅絕的可能性，尤以單食性 (monophagous) 與高山型蝶種特別受到學者的關注，相關研究如Romo et al. (2014) 以多元邏輯斯迴歸 (multiple logistic regression) 預測不同氣候情境下，西班牙6種單食性蝶種及其寄主植物的空間分布變化，結果指出寄主植物為影響未來蝴蝶空間分布的重要因素，相較於寄主植物，未來蝴蝶對氣候的適應性較能有效提升；此外Descombes et al. (2016) 模擬氣候變遷情境下，瑞士西部60種高山蝴蝶與298種寄主植物的空間分布，嘗試評估蝴蝶可否因食性擴張，降低滅絕的可能性，研究結果發現蝴蝶擴大其寄主植物的選擇或範圍，確實可削減被滅絕的機率。由上述研究結果可知，出寄主植物是決定蝴蝶空間分布與能否生存的關鍵因素。因此，在保育的過程中，應將兩者視為互相演化的共存關係，然現今許多物種空間分布的模擬研究往往僅針對單一物種進行，忽略生物間的相互作用，使得研究結果很有可能與實際狀況有所出入 (Romo et al. 2014; 陳陽發等 2014)。

臺灣的地形與氣候多變，孕育的蝴蝶舉世聞名，目前雖已有5種被列為保育類，甚為保護寬尾鳳蝶 (*Papilio maraho*) 以及其唯一寄主植物臺灣檫樹 (*Sassafras randaiense*)，成立為「觀霧寬尾鳳蝶野生動物重要棲息環境」，然

臺灣為全球氣候變遷影響最敏感的區域之一，相較於歐美地區，有關於氣候變遷對蝴蝶影響的研究仍相當少見，就蝴蝶的保育工作而言，建立這些基本資訊實屬刻不容緩。有鑑於此，本研究以臺灣本島做為研究區，於現有政府開放資料中挑選資料質量足可進行分析之單食性蝴蝶4種做為目標種，並納入其寄主植物資料，以物種分布模式 (species distribution model, SDM) 與模糊邏輯理論 (fuzzy logic) 進行空間分析與整合，評估氣候變遷對各蝶種空間分布造成的影響，期研究結果能提供相關保育工作之參考。

## 二、材料與方法

### (一) 研究區概況

臺灣本島位處東北亞和東南亞交會處，東接太平洋，西隔臺灣海峽與歐亞大陸相望，土地面積約36,000 km<sup>2</sup>，島內人口約2,300萬人。因歐亞大陸板塊及菲律賓海板塊擠壓運動，致臺灣本島南北狹長，地形起伏變化大，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，主要山脈大致呈南北向，主要有中央、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 (3,952 m)；河川多發源於中央山脈，水系密布，大多分布於西半部，流域長度最長的為濁水溪，面積最廣的為高屏溪；氣候部分，以北回歸線 (23.5°) 為界，以北屬於亞熱帶氣候區，以南則屬熱帶氣候 (圖1)，依中央氣象局 (2017) 資料顯示，年均溫約21°C，年雨量約2,500 mm，主要集中於梅雨及颱風季節，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；依林務局第4次森林資源調查報告，土地覆蓋型態以森林為主，占全島近61% (林務局 2017)，隨海拔垂直分化，可將林相劃分為高山植群、冷杉林、鐵杉及雲杉林、櫟林、楠櫛林與榕櫛林等植群帶 (蘇鴻傑 1992)。

(二) 物種資料

蝴蝶與寄主植物調查資料乃源自林務局跨單位物種查詢平台資料庫，目標種計有4種單食性蝶種及3種寄主植物 (表1)，包括無尾白紋鳳蝶 (*Papilio castor formosanus*) 及白灰蝶 (*Neopithecops zalmora*)，對應寄主植物為石荳舅 (*Glycosmis citrifolia*)；黃蛺蝶 (*Polygonia c-aureum lunulata*) 之寄主植物為葎草 (*Humulus scandens*)；波蛺蝶 (*Ariadne ariadne pallidior*) 之寄主植物為蓖麻 (*Ricinus communis*) (林柏昌&林有義 2008；呂志堅&陳建仁 2014)。所蒐集的資料調查期間為1999~2007年，座標格式為經緯度，本研究僅保留3位小數之資料，並統一將其轉換為1997臺灣大地基準 (Taiwan Datum 97) 及橫麥卡托 (Transverse Mercator) 投影座標系統，分帶為2個經度，後續所採用之相關環境資料也以相同參數型式儲存，網格基本運算單元設定為1×1 km<sup>2</sup>，若一個網格內有同一物種重複記錄者則予剔除。

表1. 本研究分析之物種名錄與出現網格筆數  
Table 1. Selected species and their number of occurrence grids in this study

Species	Grid number
Host plants	
<i>Glycosmis citrifolia</i> <sup>a</sup>	295
<i>Humulus scandens</i> <sup>b</sup>	644
<i>Ricinus communis</i> <sup>c</sup>	673
Butterflies	
<i>Papilio castor formosanus</i> <sup>a</sup>	138
<i>Neopithecops zalmora</i> <sup>a</sup>	51
<i>Polygonia c-aureum lunulata</i> <sup>b</sup>	104
<i>Ariadne ariadne pallidior</i> <sup>c</sup>	256

<sup>a-c</sup> the same letter indicate the correspondence of butterfly species and its host plant species

### (三) 環境資料

環境資料為影響物種分布的重要因子，

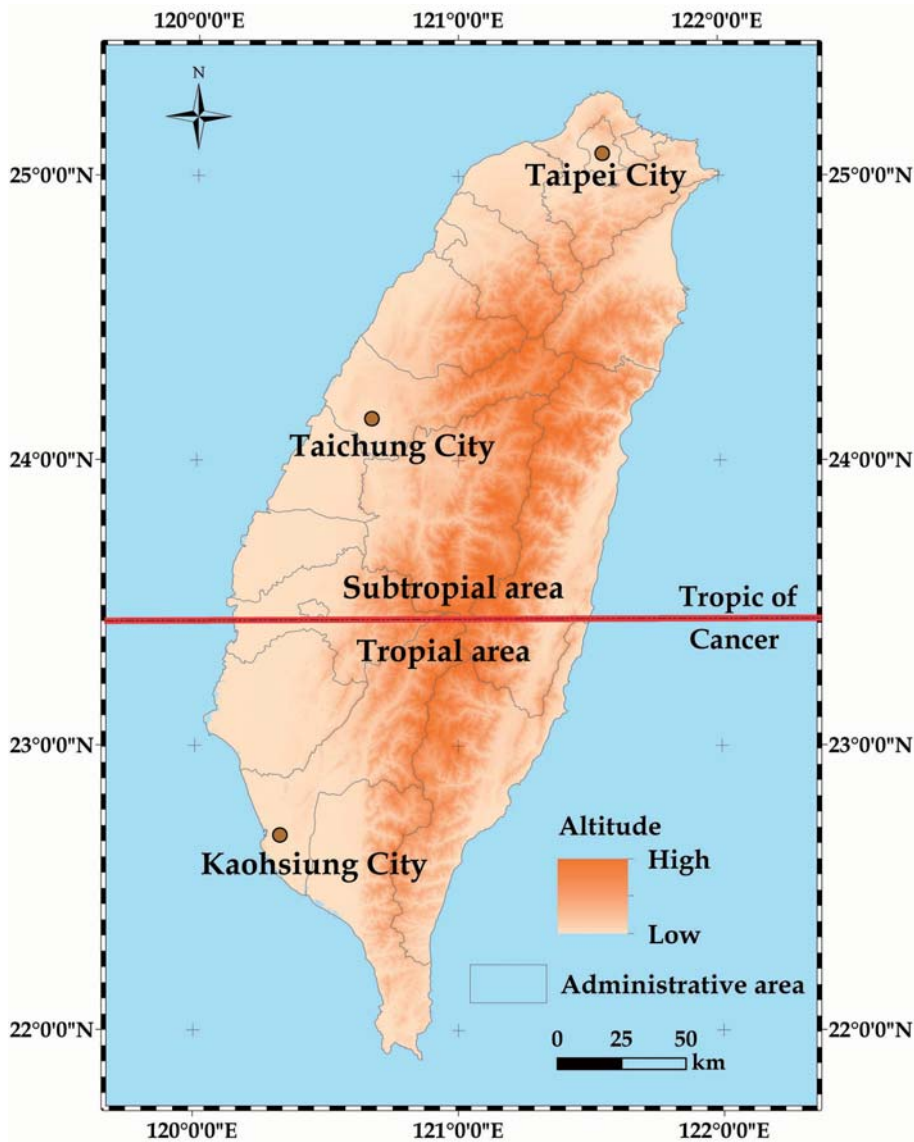


圖1. 研究區地理位置圖，背景為數值高程模型（海拔高）。

Figure 1. Location of study area and the background is a digital elevation model (altitude).

亦為本研究建構物種分布模式之預測變項，包含氣候、地形、地物、土壤及位置等5類。其中，氣候因子乃自Hijmans et al. (2005) 建立的全球氣候資料庫 (WorldClim database) 下載，該資料庫涵蓋全球，依據1950~2000年全球各地氣象站資料，經過內插轉換後，產生最小空間尺度近1 km<sup>2</sup>的氣候網格，資

料庫中生物氣候資料專為預測物種分布所產製，本研究共蒐集19個生物氣候圖資做為變項 (參閱www.worldclim.org)。地形因子亦由WorldClim database取得數值高程模型 (digital elevation model)，利用ArcGIS 10.0軟體製作海拔高、坡度與坡向，並參考Gessler et al. (1995)、McCune & Keon (2002) 與Evans



(2011) 的方法，分別產製代表濕度的複合地形指標 (compound topographic index) 及太陽輻射強度的熱負荷指標 (heat load index)，共計5個變項。土壤因子取自國際土壤參考資料中心 (International Soil Reference and Information Centre) 所開發之SoilGrids 土壤資料庫 (SoilGrids v0.5; www.soilgrids.org)，該土壤資料庫係依據全球各地所調查之土壤屬性及其類別等資料，以機械學習理論 (machine learning) 推導所得，空間解析力為1 km<sup>2</sup>，另由經濟部地質調查所開放資料取得地質圖資，共計12個變項。地物因子則依據瑞竣科技公司之雲端服務平臺 (RiChi GIS Cloud) 數化主要河流，並製作離河流距離圖資，另由美國NASA的Land Processes Distributed Active Archive Center取得2000~2007年的MODIS衛星影像產品「MOD17A3」與「MOD44B」，各別表示植被年平均淨生產力與樹木覆蓋度，同時從Numerical Terra dynamic Simulation Group取得同時距的「MOD16A3」，表示年均蒸發散量，共計4個變項。位置因子計有經度與緯度兩個變項，係記錄每一運算單元中心點的座標，最小單位為秒，累計全部預測變項共有42項。

#### (四) 氣候變遷情境

為模擬物種在氣候變遷情境下，自主性調適之分布區位，本研究假設除氣候因子以外的其他環境變項不變的情況下，進一步根據聯合國政府間氣候變化專業委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第5次評估報告所發布之氣候變遷情境進行模擬。氣候變遷情境採用代表濃度途徑 (representative concentration pathway, RCP) 定義，其中RCP 4.5與RCP 8.5各表示輻射驅動力 (radiative forcing) 於1750~2100年間增加了4.5與8.5 W m<sup>-2</sup>，換言之，RCP 4.5代表未來的溫室氣體排放量持平發展，RCP 8.5則顯示地球暖化現象持續攀升 (IPCC 2013)。前述的全球氣候資料庫中，Hijmans et al. (2005) 以1950~2000年的氣候資

料為基礎，採用第5階段耦合模式對比計畫 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) 提供的全球氣候模式 (global climate model, GCM; Taylor et al. 2012)，模擬未來的氣候變遷，本研究則採用RCP 4.5與RCP 8.5情境於2061~2080年的生物氣候模擬資料，共選用17個GCM的模擬結果，並取算術平均數，兩種情境可各獲得19個未來的生物氣候變項。

#### (五) 物種分布機率模擬

各物種分布模式建立前，均先以Spearman相關分析進行預測變項篩選，確保各變項的相關係數小於0.7，避免共線性問題，隨後逢機選取75%的資料做為訓練資料集，利用Phillips et al. (2006) 所開發的最大熵 (maximum entropy) 「Maxent 3.3.3k」，做為模擬現生與未來 (2061~2080年) 物種分布之預測模式。該工具係將有限的訓練集資料，透過機械學習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，也被認證過優於其他SDM (Elith et al. 2006; Kumar & Stohlgren 2009; Trisurat et al. 2011)。Maxent係應用Gibbs機率分布 ( $P$ )，推算物種在 $x$ 樣點的最大可能率，基本公式如下 (Phillips et al. 2006)：

$$P(x) = \frac{\exp(c_1 * f_1(x) + c_2 * f_2(x) + \dots + c_m * f_m(x))}{Z} \quad (1)$$

式中 $c_1, c_2, \dots, c_m$ 為常數， $f_1, f_2, \dots, f_m$ 為預測變項的函數， $Z$ 為標準化常數，確保 $P$ 加總後等於1。各物種的分布機率運算設定，以每一物種重複運算10次，取其平均值，輸出結果設定邏輯斯分布，使預測的值域介於0~1，愈接近1者，代表該網格的物種出現機率愈高，反之愈低。另將剩餘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 & Bell 1997; Pearce & Ferrier 2000)。

### (六) 蝴蝶與寄主植物擬合區位分析

通用模糊邏輯中的交集 (intersection) 運算方法 (Kuncheva 2001)，進行4種蝶種與其寄主植物現生與未來 (2061~2080年) 空間分布機率之擬合，交集運算式如下：

$$\text{Coincidence} = \text{Buf}_x \cap \text{Host}_x = \text{Min}(\text{Buf}_x, \text{Host}_x) \quad (2)$$

式中 *Coincidence* 為兩者之擬合值，*Buf<sub>x</sub>* 為 *x* 蝶種之空間分布機率，*Host<sub>x</sub>* 為其對應之 *x* 寄主植物空間分布機率。*Buf<sub>x</sub> ∩ Host<sub>x</sub>* 為交集運算子，即取兩者交集機率最小值，為有效並確實掌握各蝶種及寄主植物擬合區位，設定平均值為基準，將擬合值大於平均值1.5倍標準偏差 (standard deviation) 之像元視為擬合成功，即為該蝶種之分布區位，反之，則視為未擬合，予以排除，據此用於評估4種蝶種現生與氣候變遷情境下物種可能受到之影響。

### 三、結果

藉由 Spearman 相關分析與相關係數小於 0.7 之門檻，各物種可從 42 項環境因子中，選出 22~28 項做為後續 SDM 使用之預測變數，其中不論寄主植物或蝴蝶均以坡度對於模式的貢獻度最大 (介於 35~60.49%)，其次為年平均溫 (介於 7.45~26.48%)，其餘變數則不明顯 (低於 10%)，以此所建立之各物種 SDM，其 AUC 介於 0.93~0.97 左右，其中寄主植物平均值為 0.966，標準偏差為 0.009；蝴蝶平均值為 0.955，標準偏差為 0.028，模擬成效良好。藉由模糊交集將各蝶種及其寄主植物空間分布機率進行運算，結果如圖 2 所示，整體而言，在不同的氣候變遷情境下，各蝶種之空間分布型態並無明顯改變，惟略有朝向高緯度及高海拔移動的趨勢。無尾白紋鳳蝶及白灰蝶之空間分布型態類似，分布區位較為分散且廣泛於全臺，而黃蛺蝶與波蛺蝶則有明顯的群聚性，其中黃蛺蝶主要集中於北部丘陵、台地、花東縱谷平原及海岸山脈周邊；波蛺蝶則主要分布於南部平原、花東縱谷平原及海岸山脈周邊，北部則少見。分別計算各蝶種在現生氣候及不同

變遷情境下之分布面積可知 (表 2)，隨著暖化情勢加劇，波蛺蝶及黃蛺蝶分布面積皆有明顯增加，而以石荅舅為寄主植物的無尾白紋鳳蝶及白灰蝶變化甚小 (±3% 以下)。

為確切掌握氣候變遷對各蝶種空間分布的影響區位，將各蝶種於現生氣候與未來兩種假設情境之分布區位進行變異點分析，結果如圖 3、4 所示，圖中紅色部分代表限縮區位，綠色則為擴張區位。由圖 3、4 可發現，4 種蝶種在兩種不同氣候變遷情境下，其變異點分布特徵相似，限縮區位多集中於山脈與平原交接處，亦即淺山地帶且以熱帶氣候區為主要；擴張區位除波蛺蝶在熱帶地區有較大的擴張範圍外，餘大多分布於亞熱帶氣候區之山脈地形內。

以現生氣候之分布網格數量以基準，分別計算兩種變遷情境之限縮及擴張之網格數的變化率 (表 3) 可得知，不論熱帶或亞熱帶氣候，RCP8.5 情境的限縮率均高於 RCP4.5 情境；而熱帶氣候區的限縮率又顯著高於亞熱帶區，由此可知隨著暖化情勢的加劇，物種空間分布遭受的影響也漸趨嚴重，且以熱帶地區影響較大。就單一物種來看，黃蛺蝶在熱帶地區的限縮率達到最高 (56.2%)，在亞熱帶區的擴張率亦為最高，顯見其適存範圍有明顯由熱帶往亞熱帶推移的現象；有別於其他蝶種適存空間在熱帶氣候區有易遭限縮且不易擴張的情形，波蛺蝶反而可於此區擴張，卻無法北移往亞熱帶區擴張。

進一步萃取各蝶種及其寄主植物之擬合區位海拔高 (表 4)，結果顯示各蝶種區位皆如預期均往高海拔移動，其影響幅度與前述擬合區位數量變化 (表 3) 趨勢相同，在假設情境下，皆以 RCP8.5 較大；在氣候分區下，皆以熱帶氣候區較大。而由影響較大的 RCP8.5 熱帶氣候區情境下來看，以黃蛺蝶上升幅度達到最大 (65.37%)，攀升範圍約自 321 m 至 532 m；其次為波蛺蝶 (48.37%)，約自 248 m 提升至 368 m 左右。

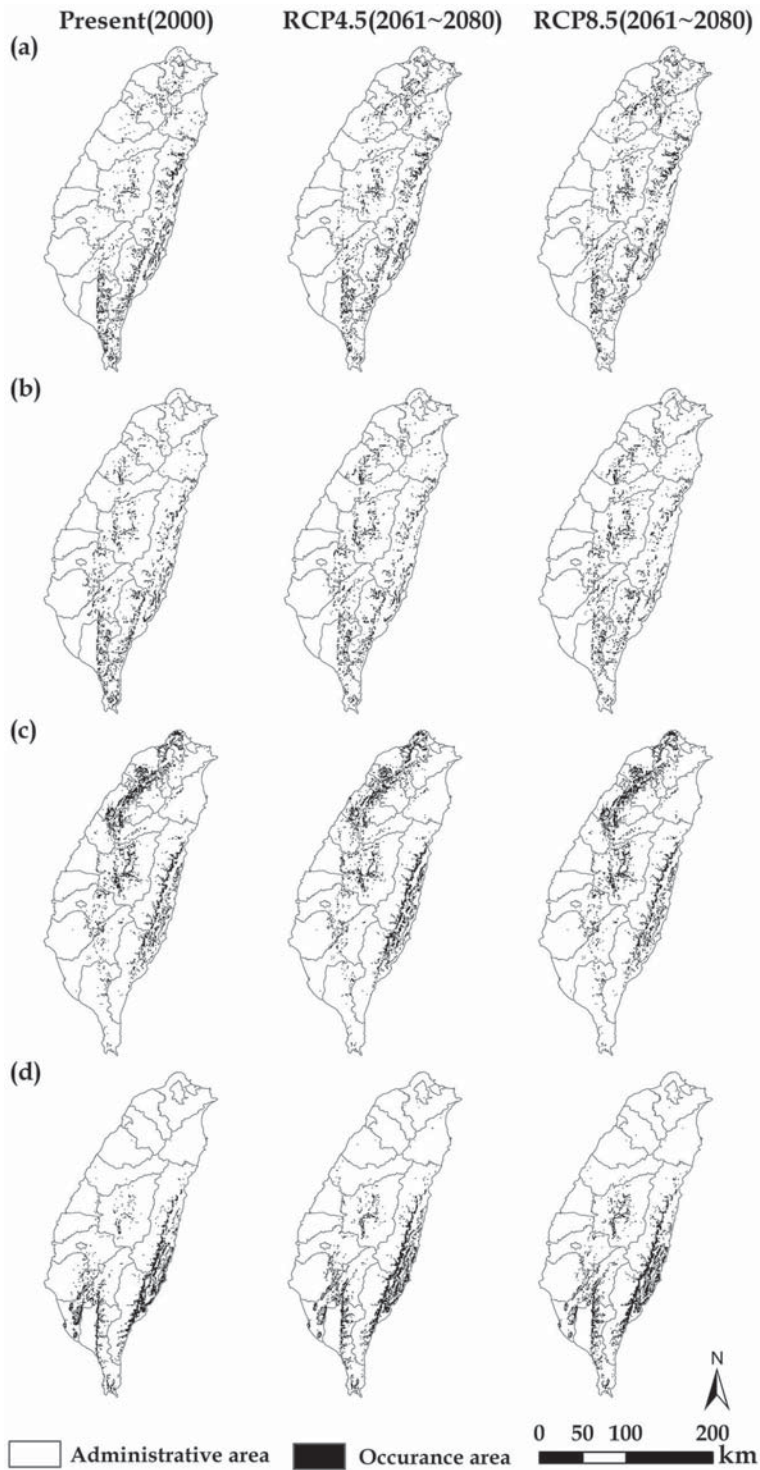


圖2. 現生與氣候變遷情境下各蝶種之分布區位圖，(a) 白紋無尾鳳蝶、(b) 白灰蝶、(c) 黃蛺蝶及 (d) 波蛺蝶。

Figure 2. Distribution maps of each butterfly species under present and climate change scenarios. (a) *P. castor formosanu*, (b) *N. zalmora*, (c) *P. c-aureum lunulata* and (d) *A. ariadne pallidior*.

表2. 現生與氣候變遷情境下各蝶種分布面積及變化率

Table 2. Occurrence area and change rate of 4 monophagous butterfly species under present and climate change scenarios

Species	Present	RCP 4.5		RCP 8.5	
	Area (km <sup>2</sup> )	Area (km <sup>2</sup> )	Change (%)	Area (km <sup>2</sup> )	Change (%)
<i>P. castor formosanu</i>	2715	2796	2.98	2766	1.88
<i>N. zalmora</i>	1985	1998	0.65	1971	-0.71
<i>P. c-aureum lunulata</i>	2890	3174	9.83	3201	10.76
<i>A. ariadne pallidior</i>	2369	2775	17.14	2843	20.01

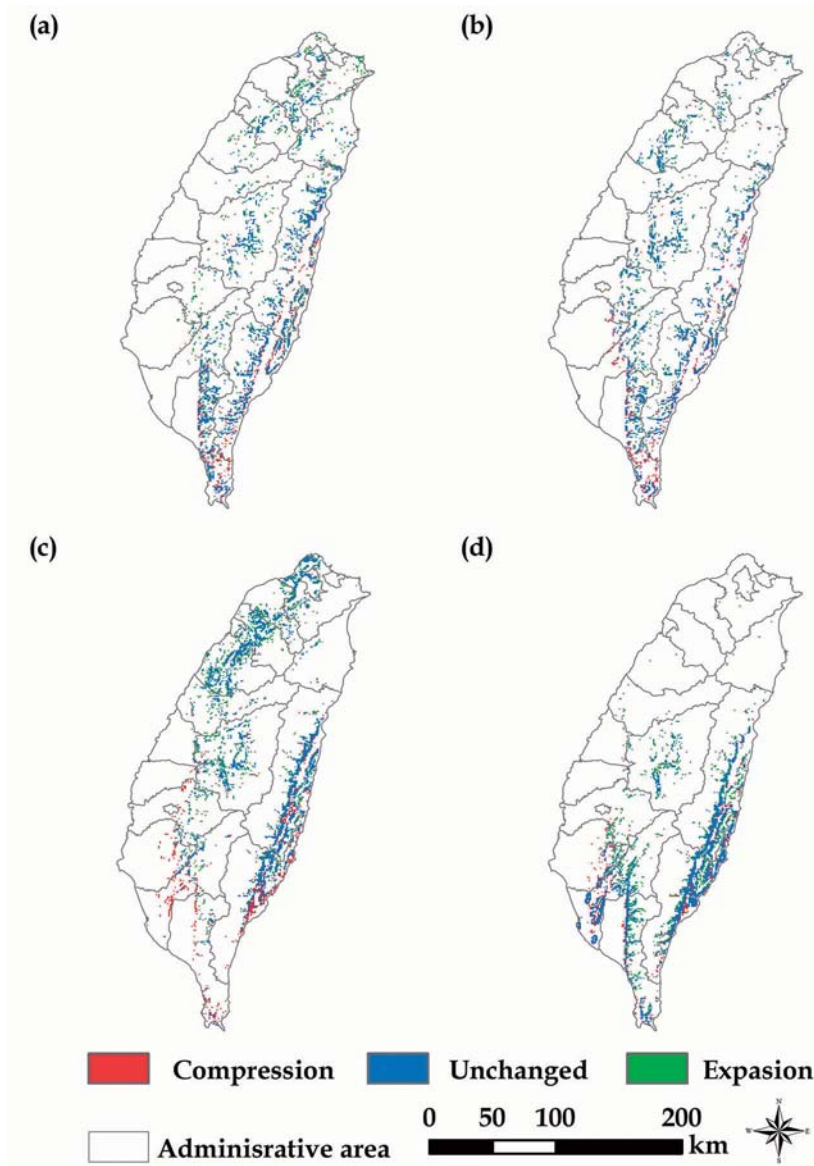


圖3. 氣候變遷情境 (RCP4.5) 下各蝶種分布區位的動態變化，(a) 白紋無尾鳳蝶、(b) 白灰蝶、(c) 黃蛺蝶及 (d) 波蛺蝶。

Figure 3. Occupancy dynamics of 4 monophagous butterfly species under climate change scenario (RCP4.5). (a) *P. castor formosanu*, (b) *N. zalmora*, (c) *P. c-aureum lunulata* and (d) *A. ariadne pallidior*.



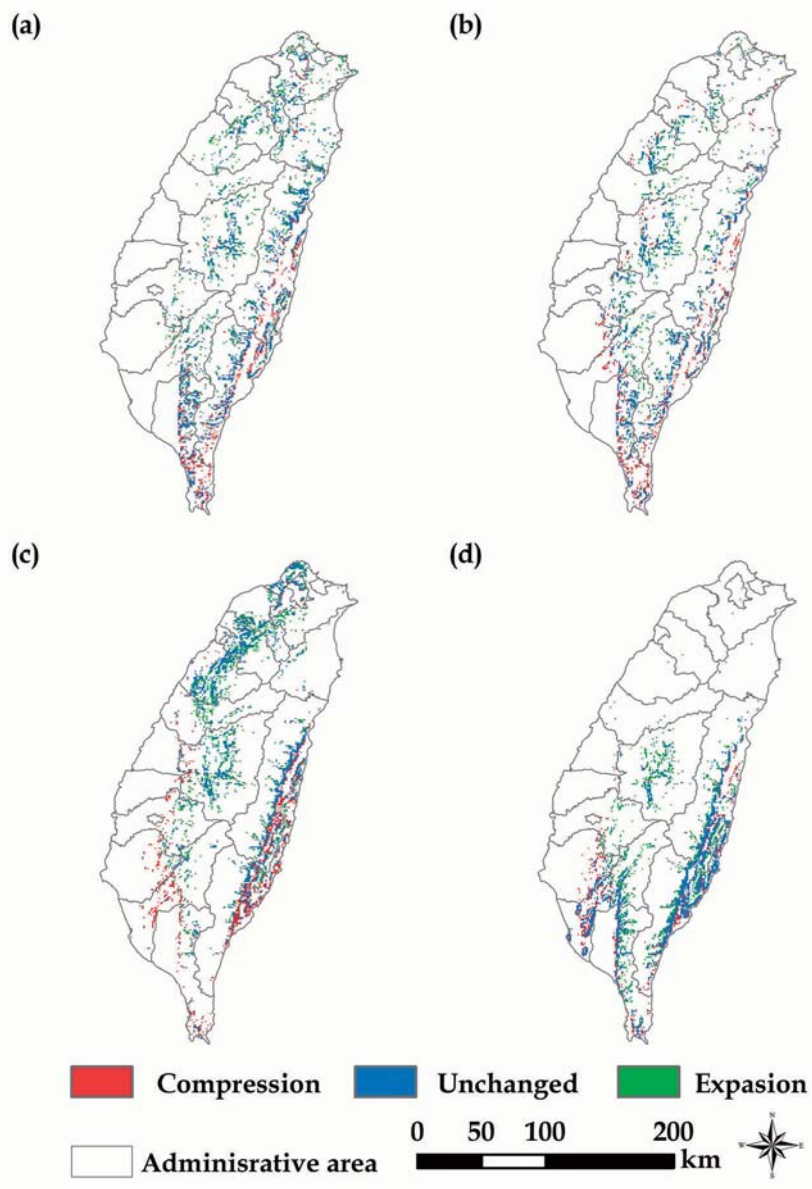


圖4. 氣候變遷情境 (RCP8.5) 下各蝶種分布區位的動態變化，(a) 白紋無尾鳳蝶、(b) 白灰蝶、(c) 黃蛺蝶及 (d) 波蛺蝶。

Figure 4. Occupancy dynamics of 4 monophagous butterfly species under climate change scenario (RCP8.5).  
(a) *P. castor formosanu*, (b) *N. zalmora*, (c) *P. c-aureum lunulata* and (d) *A. ariadne pallidior*.

表3. 氣候變遷情境下各蝶種分布區位之變化率 (單位：%)

Table 3. Change rate of 4 monophagous butterfly species under climate change scenarios (unit: %)

Species	Tropical		Subtropical		
	Expansion	Compression	Expansion	Compression	
RCP 4.5	<i>P. castor formosanu</i>	2.17	24.16	2.38	13.90
	<i>N. zalmora</i>	1.60	27.20	1.55	13.79
	<i>P. c-aureum lunulata</i>	1.34	40.84	3.69	9.66
	<i>A. ariadne pallidior</i>	4.81	19.01	1.33	14.29
RCP 8.5	<i>P. castor formosanu</i>	2.52	35.36	3.25	17.52
	<i>N. zalmora</i>	1.96	35.76	2.19	23.43
	<i>P. c-aureum lunulata</i>	2.11	56.20	4.98	18.85
	<i>A. ariadne pallidior</i>	5.66	22.60	1.61	18.76

表4. 現生與氣候變遷情境下各蝶種分布區位平均海拔 (單位：m)

Table 4. Average altitude of occurrence shifts for 4 monophagous butterfly species under present and climate change scenarios (unit: m)

Species	Present		RCP4.5		RCP8.5	
	Tropical	Subtropical	Tropical	Subtropical	Tropical	Subtropical
<i>P. castor formosanu</i>	592.27	694.68	701.11	750.53	753.84	814.37
<i>N. zalmora</i>	577.36	592.55	711.01	708.47	782.84	807.88
<i>P. c-aureum lunulata</i>	321.90	392.11	428.88	413.98	532.32	514.45
<i>A. ariadne pallidior</i>	248.16	430.94	316.26	495.63	368.86	594.83

#### 四、討論

物種空間分布資訊是從事保育研究和生態系經營的必要資訊。本研究採用氣候、地形、地物、土壤與位置等5類環境因子，建立4種單食性蝶種及其寄主植物之空間分布預測模式，各物種模擬準確度符合前人研究 (Fielding & Bell 1997; Pearce & Ferrier 2000) 建議標準，顯示該模式具備良好的預測能力，可進行後續研究與分析。由各物種被選入建模之變數貢獻度可以得知，坡度及年均溫是影響4種單食性蝴蝶及寄主植物分布機率的主要因素，尤其多變的地形造就多樣的微氣候，可使寄主或蜜源植物產生結構或物候上的差異，也會影響蝴蝶

生活史或發生週期，攸關蝴蝶族群量的維繫，是判定蝴蝶棲地品質的根本指標 (Weiss et al. 1988)。

從各蝶種空間分布型態與變化 (圖2、表2) 可發現，無尾白紋鳳蝶及白灰蝶屬於廣泛分布型，整體分布面積變化不大，相較於群聚分布型的黃蛺蝶與波蛺蝶而言，該兩種蝶種對溫度變異的適應性明顯較佳，本研究在國外幾篇食植性昆蟲或變溫動物 (ectothermic animals) 的研究中 (Bale et al. 2002; Calosi et al. 2008; Gaston et al. 2009) 亦發現類似的現象，這些研究皆認為廣泛分布的物種相較於分布侷限的物種，牠們在生理上對溫度通常具有較大耐受範圍。進

一步以變異區位及氣候分區統計資料(圖3、4及表3)來看,除波蚨蝶外,其他蝶種皆有由熱帶氣候區往亞熱帶地區推移的趨勢,究其原因可能是因熱帶地區終年處於相對穩定的氣候條件,間接使該區物種對於氣候異常的調適能力降低,因此,易受到暖化的衝擊(Deutsch et al. 2008; Watson et al. 2013)。相較於其他蝶種,波蚨蝶之動態較為特殊,即在熱帶氣候區擴張趨勢明顯大於緯度較高的亞熱帶區,族群往北遷移遭受限制,而其唯一寄主植物「蓖麻」在臺灣屬廣泛種,但實際上波蚨蝶卻少見於北部,顯見其北移限制並非寄主植物,應有其他未知的環境因子(林柏昌&林有義 2008),在本研究的假設情境下,波蚨蝶往高緯度移動的機率仍未因氣候變遷影響而有顯著提升,值得進一步關注。

在熱帶氣候區,黃蚨蝶有高比例的分布區位遭到限縮,經檢視本研究模擬葎草之空間分布,發現葎草在該氣候區並未因氣候變遷有明顯的改變,由此可知,暖化應是導致黃蚨蝶空間分布限縮的主因,此結果反映出,原就少見於南臺灣的黃蚨蝶,僅存的少數適存空間可能又因氣候變遷受到壓縮,致使在熱帶地區發生區域滅絕(local extinction)的機會明顯會比其他蝶種高出許多,未來可能與北美洲的愛得薩蚨蝶(*Euphydras editha*)面臨相同的遭遇(Parmesan 1996),亦即因無法適應氣候暖化,使得位處低緯度或低海拔的棲地,其族群滅絕率大幅提升。

由各蝶種分布區位之海拔變化(表4)顯示,暖化情勢愈劇烈,各蝶種朝向高海拔攀升的幅度就愈大,其中黃蚨蝶最高、波蚨蝶次之,推測黃蚨蝶本身生理對高溫的適應較差,族群須另闢適宜棲地;波蚨蝶因具北移限制,因此,為對抗暖化將優先選擇往高海拔地帶推移。整體而言,本研究挑選之4種單食性蝴蝶均偏好1,000 m以下之淺山林緣或森林底層,屬低海拔蝶種,其海拔分布雖受氣候變遷影響有所提升,然族群尚有足夠的空間可供遷移,

在臺灣應不致遭受滅絕。

## 五、結論

本研究運用SDM模擬臺灣4種單食性蝴蝶及其寄主植物在氣候變遷情境下之空間分布,並以模糊邏輯運算整合空間資訊,進而評估受氣候變遷的影響。研究成果可獲得以下重點結論:一、以全臺而言,各蝶種空間分布均朝向高緯度或高海拔方向推移,不致滅絕;二、以氣候區來看,黃蚨蝶在熱帶氣候區之限縮率及海拔上升幅度均屬最高,未來遭受區域滅絕的可能性相對提升。儘管氣候變遷對生物的影響不單單僅有空間分布上的改變,尚包生物生理、生物物候、行為模式等,然本研究就空間分布變化進行模擬分析,應可先行找出必須優先列為保護的可能受威脅物種,未來可再針對該些目標種進行更深入的調查與監測或制訂因應策略,以本研究結果為例,建議可於黃蚨蝶遭受壓縮的潛在區位進行該蝶種與其寄主植物族群量的長期監測,藉以瞭解兩者間的相互關係與變化趨勢,另嘗試在可能擴張區位建構生態廊道,提升棲地連結性,抑或進行棲地營造或改善計畫,維持其族群量,以降低氣候變遷對其所帶來得衝擊。

## 六、引用文獻

- Bakkenes MJ, Alkemade RM, Ihle F, Leemans R, Latour JB (2002) Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology* 8: 390-407.
- Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, Awmack C, Bezemer TM, Brown VK, Butterfield J, Buse A, Coulson JC, Farrar J, Good JEG, Harrington R, Hartley S, Jones TH, Lindroth RL, Press MC, Symrnioudis I, Watt AD, Whittaker JB (2002) Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores.

- Global Change Biology 8: 1-16.
- Calosi P, Bilton DT, Spicer JJ, Atfield A (2008) Thermal tolerance and geographical range size in the *Agabus brunneus* group of European diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae). *Journal of Biogeography* 35: 295-305.
- Chou CH, Huang TJ, Lee YP, Chen CY, Hsu WH, Chen CH (2011) Diversity of the alpine vegetation in central Taiwan is affected by climate change based on a century of floristic inventories. *Botanical Studies* 52: 503-516.
- Descombes P, Pradervand JN, Golay J, Guisan A, Pellissier L (2016) Simulated shifts in trophic niche breadth modulate range loss of alpine butterflies under climate change. *Ecography* 39: 796-804.
- Deutsch CA, Tewksbury JJ, Huey RB, Sheldon KS, Ghalambor CK, Haak DC, Martin PR (2008) Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 6668-6672.
- Elith J, Graham CH, Anderson RP, Dudik M, Ferrier S, Guisan A, Hijmans RJ, Huettmann F, Leathwick JR, Lehmann A, Li J, Lohmann LG, Loiselle BA, Manion G, Moritz C, Nakamura M, Nakazawa Y, Overton JMM, Peterson AT, Phillips SJ, Richardson K, Scachetti-Pereira R, Schapire RE, Soberón J, Williams S, Wisz MS, Zimmermann NE (2006) Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* 29: 129-151.
- Evans J (2011) ArcGIS Geomorphometry and Gradient Metrics Toolbox. Available at: <http://conserveonline.org/workspaces/emt/documents/arcgis-geomorphometrictoolbox/view.html>
- Fielding AH, Bell JF (1997) A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24: 38-49.
- Gaston KJ, Chown SL, Calosi P, Bernardo J, Bilton DT, Clarke A, Clusella-Trullas S, Ghalambor CK, Konarzewski M, Peck LS, Porter WP, Pörtner HO, Rezende EL, Schulte PM, Spicer JJ, Stillman JH, Terblanche JS, Van Kleunen M (2009) Macrophysiology: a conceptual reunification. *The American Naturalist* 174: 595-612.
- Gessler PE, Moore ID, McKenzie NJ, Ryan PJ (1995) Soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems* 9: 421-432.
- Heikkinen RK, Luoto M, Leikola N, Pöyry J, Settele J, Kudrna O, Marmion M, Fronzek S, Thuiller W (2010) Assessing the vulnerability of European butterflies to climate change using multiple criteria. *Biodiversity and Conservation* 19: 695-723.
- Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25: 1965-1978.
- Hwang W, Koh CN (2013) Application of Necrophilous Beetles to Long-term Monitoring of a Forest Ecosystem Associated with Climatic Change. *Taiwan Journal of Forest Science* 28: 83-96.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2007) *Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University



- Press, Cambridge, UK and New York, NT, USA.
- 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.
- Kremen C (1992) Assessing the indicator properties of species assemblages for natural areas monitoring. *Ecological Applications* 2: 203-217.
- Kumar S, Stohlgren TJ (2009) Maxent modelling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrica monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment* 1: 94-98.
- Kuncheva LI (2001) Using measures of similarity and inclusion for multiple classifier fusion by decision templates. *Fuzzy Sets and Systems* 122: 401-407.
- McCune B, Keon D (2002) Equations for potential annual direct incident radiation and heat load index. *Journal of Vegetation Science* 13: 603-606.
- Oliver TH, Marshall HH, Morecroft MD, Brereton T, Prudhomme C, Huntingford C (2015) Interacting effects of climate change and habitat fragmentation on drought-sensitive butterflies. *Nature Climate Change* 5: 941-945.
- Parmesan C (1996) Climate and species' range. *Nature* 382: 765-766.
- Parmesan C, Ryrholm N, Stefanescu C, Hill JK, Thomas CD, Descimon H, Huntley B, Kaila L, Kullberg J, Tammaru T, Tennent WJ, Thomas JA, Warren M (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399: 579-583.
- Pearce J, Ferrier S (2000) Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression. *Ecological Modelling* 133: 225-245.
- Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modelling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259.
- Pollard E (1977) A method for assessing changes in the abundance of butterflies. *Biological Conservation* 12: 115-134.
- Romo H, García-Barros E, Márquez AL, Moreno JC, Real R (2014). Effects of climate change on the distribution of ecologically interacting species: butterflies and their main food plants in Spain. *Ecography* 37: 1063-1072.
- Stefanescu C, Penuelas J, Filella I (2003) Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin. *Global Change Biology* 9: 1494-1506.
- Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93: 485-498.
- Trisurat Y, Shrestha R, Kjelgren R (2011) Plant species vulnerability to climate change in Peninsular Thailand. *Applied Geography* 31: 1106-1114.
- Warren MS, Hill JK, Thomas JA, Asher J, Fox R, Huntley B, Roy DB, Telfer MG, Jeffcoate S, Harding P, Jeffcoate G, Willis SG, Greatorex-Davies JN, Moss D, Thomas CD (2001) Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change. *Nature* 414: 65-69.
- Watson JE, Iwamura T, Butt N (2013) Mapping

- vulnerability and conservation adaptation strategies under climate change. *Nature Climate Change* 3: 989-994
- Weiss SB, Murphy DD, White RR (1988) Sun, slope, and butterflies: topographic determinants of habitat quality for *Euphydryas editha*. *Ecology* 69: 1486-1496.
- 中央氣象局 (2017) 台灣氣候。http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/climate\_info/taiwan\_climate/taiwan\_5.html。
- 呂志堅、陳建仁 (2014) 蝴蝶生活史圖鑑。晨星出版有限公司。
- 林柏昌、林有義 (2008) 蝴蝶食草圖鑑。晨星出版有限公司。
- 林務局 (2017) 第四次森林資源調查報告。https://www.forest.gov.tw/0002393。
- 張仲德、王素芬、林登秋 (2011) 氣候變遷與不同尺度植被物候研究之回顧。地理學報 63 : 1-33。
- 陳陽發、陳姿伶、楊平世 (2014) 氣候變遷對昆蟲的影響。臺灣大學生物資源暨農學院實驗林研究報告 28 : 195-209。
- 謝東佑 (2016) 氣候變遷對物種、生態系統影響及其管理策略之探討。臺灣林業科學 31 : 227-255。
- 蘇鴻傑 (1992) 台灣之植群：山地植群帶與地理氣候區。中央研究院植物研究所專刊 11 : 39-53。