

臺灣氣候變遷衝擊指標之研發－以蝴蝶為例

臺灣大學生態學與演化生物學研究所 李依紋、李培芬

前言

台灣的生態研究資料向來不多，能夠用來作為氣候變遷研究的資料更少。除了國家科學委員會視情形需要，酌予補助一些研究計畫外，許多的經費補助機關鮮少補助氣候變遷相關的研究，國科會的永續會是我國補助氣候變遷計畫最為多的單位，但是，2008年開始，永續會也被併入自然處內，相關計畫也逐漸萎縮。

即使是 1992 年開始的長期生態研究，雖然在觀念和作法上，可以作為我國氣候變遷生態研究的主力資料，但是受限於人力、物力與財力，目前這項計畫不僅瀕臨滅絕，許多的資料也因為計畫無法延續、時程太短、資料收集方法不一致、缺乏全面性等課題，也無法作為支援氣候變遷的研究，非常可惜。

蝴蝶易受自然環境與人為干擾影響，且具有色彩鮮豔、日行性活動的特徵、便於觀察與研究，是適合作為監測環境變遷的指標生物 (Indicator Species) (Ehrlich *et al.*, 1972; Singer 1972; Feltwell, 1986; Weiss *et al.*, 1988; Harding *et al.*, 1995; New, 1995; Thomas *et al.*, 1998; Schultz and Dlugosch 1999)。影響蝴蝶族群動態的因素，有氣候變化、動植物相改變以及天敵影響等自然因子，而棲地破壞、過度採集與外來種入侵等的人為干擾，更是導致蝶類面臨生存威脅的原因 (Rands and Sotherton, 1986; 何健鎔、顏聖紘, 1994; New, 1995; 陳建志, 1999)。在台灣，由於歷史上的因素，台灣的蝴蝶採集記錄最早可從 1850 年開始，中間有世界各國人士的採集紀錄，成為探討氣候變遷對台灣生態衝擊的指標。

本研究針對氣候變遷對生物造成的衝擊，以蝴蝶做為例子，進行進一步的探討與分析。蒐集 150 年間蝴蝶的分布，利用台灣蝴蝶分布資料庫的建置與分析，從物種分布的變化情形與環境因子之間的關係，作為生態指標，探討氣候變遷對於台灣生態的衝擊。

一、資料蒐集

本研究所有資料庫利用 GIS 最為資料庫建置的平台，使用 1×1 公里網格系統建立每一種蝴蝶的分布圖。

(一) 蝶類資料庫建置

蒐集過去研究文獻，整理各報告的研究地點、時間、發現種類、數量等調查結果，建立台灣蝴蝶分布資料庫。台灣蝶類的分布資料，1970 年以前的研究報告，以日本人山中正夫整理的資料較為齊全，故本資料庫以其發表的《台灣產蝶類の分布》(1)-(6) (山中正夫, 1971-1980) 為主要資料來源。1970 年後的資料較為散亂，資料來源包含各地(如國家公園、自然保留區、野生動物保護區) 調查報告、研討會論文、研究報告及期刊等。

(二) 蝶類資料庫建立

■ 資料庫欄位

以物種學名、物種代碼、地點、數量、時間為資料庫的主要欄位 (表 1)。

■ 物種名稱

為避免物種俗名間的混淆與新舊學名的混用，蝴蝶中文名稱以國家生物多

表 1 資料庫建立欄位範例

Auto No.	編號	蝶種學名	蝶種代碼	區域	網格代碼	相對數量	日期 (年)	日期 (月)	日期 (日)
1	1	<i>Leptosia nina niobe</i> (Wallace)	I2799030	3	1701-1	1	1952	9	5
2	1	<i>Leptosia nina niobe</i> (Wallace)	I2799030	6	1840-2	2	1930	10	26
3	1	<i>Leptosia nina niobe</i> (Wallace)	I2799030	12	2201-2	-9	1999	12	-9
4	2	<i>Talbotia naganum karumii</i> (Ikeda)	I2799032	12	2201-2	1	2000	7	12
5	2	<i>Talbotia naganum karumii</i> (Ikeda)	I2799032	12	2254-3	1	2002	-9	-9

「-9」表示資料內未記錄的值

樣性資訊網 (<http://taibnet.sinica.edu.tw>) 公佈的蝴蝶名錄資料為標準，學名資料以《台灣鱗翅目名錄》(Heppner and Inoue, 1992) 為依據，並參考《台灣蝶圖鑑》(一)-(三) 內之「台灣產蝴蝶名錄」、「新增台灣蝴蝶名錄及學名變更一覽表」(徐培峰, 1999、2002、2007a)，整理出蝴蝶新舊學名、俗名對照表，並給予每一蝶種固定的物種代碼。

■ 新舊地名、地點

各鄉鎮內地名重複：受歷史因素的影響，各地方地名有重複的情況發生，故需要將地點分區標示。參考《台灣產蝶類の分布》(1)(山中正夫, 1971a) 內之分區編號，使台灣每一區域地名都有其特定的編號，可避免不同區域地名相同，而使資料誤用的情況發生。

1. 地名對照：各地地名因歷史因素而演變，導致新舊地名的位置有所出入，1970 年以前的地點地名，主要依據「台灣昆蟲採集新舊地名對照表」(朱耀沂、山中正夫, 1973-1975) 為主。1970 年以後的地名資料則配合中央研究院研發團隊開發的「台灣歷史文化系統」(<http://thcts.asc.net>)，統一轉換為內政部出版最新圖籍之地名。

2. 地名轉換：使用 IDRISI GIS 平台，將台灣劃分成 1×1 公里的網格格式，可得到 35928 個網格資料(李培芬等, 1997)。分別將轉換過後的分布資料地名、配合 1×1 公里網格系統，對照出所屬網格編號，進行空間上的分析與地圖呈現。

■ 物種數量 (Abundance)

本研究物種數量使用代碼如下：1-9 的相對數量記為 1，10-99 記為 2，100-999 記為 3，1000-9999 記為 4，數量不明者記為-9。

■ 時間的記錄

本研究在物種分布時間記錄上，建立物種發現時間的詳細年、月、日資料，缺乏資料的欄位以「-9」代替。

以往在與建動物資料庫時，並不會使用時間選項「月」或「日」的欄位，但考慮不同蝶類在不同時期會有大發生的狀況出現，故設定此項欄位。而長時期、含有時間選項欄位的物種分布資料，更有利於後續較精確的資料分析。

(三) 環境因子資料庫

本研究所需之環境因子資料，取自台灣地區之生態與環境因子地理資訊資料庫(李培芬等, 1997; 2005 年更新版)，所選用的

環境因子包含自然與人為環境因子，共有 9 個，包括自然環境因子：年均溫、年總降雨量、植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、森林密度與海拔高度；非自然環境因子：道路密度、建物面積、距主要道路 (國道、省道、縣市道路) 最近距離、距離主要城市最近距離。以下對各環境因子做簡單介紹。

■ 年均溫 Annual Temperature (°C) 與年總降雨量 Annual Precipitation (公釐)

由中央氣象局出版的中華民國臺灣地區氣候圖集第一冊 (中央氣象局 1990 年出版)，數化成 GIS 圖層，再與網格系統疊圖，計算每網格內以面積加權的平均值而得。年均溫為全年 12 個月月均溫的平均值；年總降雨量為全年 12 個月每月降雨量之加總值。

■ 植生指標 NDVI

即 Normalized Difference Vegetation Index，植生指標乃依據 SPOT 影像資料計算而得。許多研究顯示 NDVI 與生態系的狀態有明顯的關係，可反應植物生長參數 (Running and Nemani, 1988)，NDVI 指數越高，代表該區域基礎生產力越高。

■ 森林密度 Forest Density (%)

由台灣衛星影像圖，判讀出森林的面積區塊，轉換成網格資料，並計算每網格內的森林密度值。

■ 海拔高度 Elevation (公尺)

使用農航所解析度 40×40 公尺之 DTM 衛星影像圖，數化每 100 公尺之等高線，轉換成網格資料，計算每網格內以面積加權的平均海拔高度。

■ 道路密度 Road Density (公里/平方公里)

由農航所發行之 1：5000 相片基本

圖，判讀每網格內之道路分布，並計算每網格內的道路總長。

■ 建物面積 Building Area (%)

由農航所發行之 1：5000 相片基本圖，判讀出每網格內之建物面積，包含住宅、商業以及工業區的建築，並計算每網格內建物面積所占比例。

■ 距主要道路最近距離 Nearest Distance to Roads (公里)

採用「距主要道路 (國道、省道、縣市道路) 最近距離」環境因子，數化 1986 年農委會編製的「臺灣地區道路交通圖」，包括鐵路、國道、省道、縣市道路等主要道路，數化轉為網格式資料後，載入 IDRISI 作距離分析所得。

■ 距主要城市之最近距離 Nearest Distance to Major Cities (公里)

以 1986 年農委會編製的「臺灣地區道路交通圖」城市分布為基礎，轉為網格式資料，載入 IDRISI 計算距離。

三、整合指標

台灣蝴蝶分布資料庫的蝶種記錄時間自 1840 年~2006 年，採用分析的分佈資料共有 144, 545 筆，涵蓋 389 種蝶類，包含弄蝶科 Hesperidae 59 種 (占台灣所有蝴蝶的 15%)、灰蝶科 Lycaenidae 113 種 (29%)、蛺蝶科 Nymphalidae 147 種 (37.8%)、鳳蝶科 Papilionidae 38 種 (10%) 以及粉蝶科 Pieridae 32 種 (8%)。使用在時空變遷分析上的三時期分別為：

Period I：1840~1945 年台灣光復前，

Period II：1946~1984 年台灣第一座國家公園成立，

Period III：1985~2006 年；

蝴蝶種豐富度在第一、二、三時期內與年均溫以及年總降雨量的關係趨勢圖大致相同。蝶種數在 17~22°C 的分布較高、並隨著兩端遞減，26°C 以上並無蝶種分布 (圖 1)。年總降雨量在 1500~2500 公釐區域蝶種數較多，並隨著兩端遞減，年總降雨量在 4500 公釐以上時，並無蝶種分布 (圖 2)。

由蝴蝶種豐富度在第三時期與 NDVI 的關係可見，多數蝶種喜好生活在 NDVI 0.2~0.5 的區域，蝶種豐富度並隨著兩端遞減，而 NDVI 為 0 的區域，仍有蝶種的存在 (圖 3)。蝴蝶種豐富度在第一、二、三時期內與海拔高度關

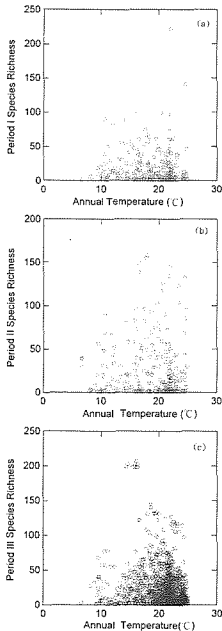


圖 1 各時期蝴蝶種豐富度與年均溫關係趨勢圖：(a) 第一時期蝴蝶種豐富度與年均溫關係趨勢圖、(b) 第二時期蝴蝶種豐富度與年均溫關係趨勢圖、(c) 第三時期蝴蝶種豐富度與年均溫關係趨勢圖。

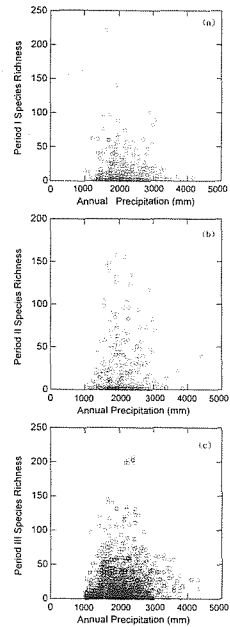


圖 2 各時期蝴蝶種豐富度與年總降雨量關係趨勢圖：(a) 第一時期蝴蝶種豐富度與年總降雨量關係趨勢圖、(b) 第二時期蝴蝶種豐富度與年總降雨量關係趨勢圖、(c) 第三時期蝴蝶種豐富度與年總降雨量關係趨勢圖。

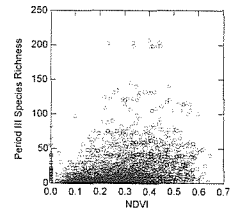


圖 3 第三時期蝴蝶種豐富度與 NDVI 的關係趨勢圖



係趨勢圖有明顯的改變。在第一時期，蝴蝶種豐富度最高有 221 種，並隨著海拔上升而有遞減的趨勢；在第二時期，蝴蝶種豐富度最高有 158 種，在海拔 500 公尺處開始上升，在海拔 624 公尺達到最高，之後隨著海拔上升而遞減；在第三時期，蝴蝶種豐富度最高 207 種，在海拔 200 公尺處開始上升，並在海拔 674 公尺處達到 145 種的種豐富度，之後隨著隨著海拔上升而遞減，並在海拔 1000 公尺到 2000 公尺區域有最高數量蝶種的出現（圖 4）。蝴蝶種豐富度與森林密度的趨勢，並無明顯絕對的關係，森林密度為 0 % 時，蝴蝶種豐富度可達 100 種，而森林密度為 100 % 時，蝴蝶種豐富度可達最高 207 種（圖 5a）。

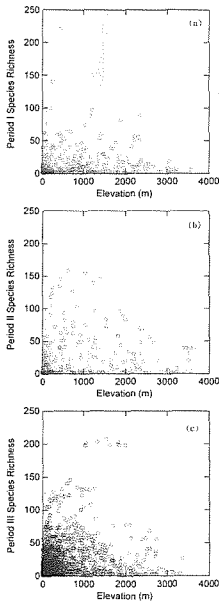


圖 4 各時期蝴蝶種豐富度與海拔高度關係趨勢圖：(a) 第一時期蝴蝶種豐富度與海拔高度關係趨勢圖、(b) 第二時期蝴蝶種豐富度與海拔高度關係趨勢圖、(c) 第三時期蝴蝶種豐富度與海拔高度關係趨勢圖。

(一) 蝴蝶種豐富度與非自然環境因子

蝴蝶種豐富度在第三時期與道路密度的關係呈現負相關的趨勢，道路密度越高，蝴蝶種豐富度越低（圖 5b）。蝴蝶種豐富度在第三時期與建物面積的關係呈現負相關的趨勢，建物面積越低，蝴蝶種豐富度越高（圖 5c）。蝴蝶種豐富度在第三時期與距主要城市最近距離沒有絕對的關係，距離主要城市 5 公里，蝴蝶種豐富度仍達到 131 種；而距離主要城市 78 公里之遠，蝴蝶種豐富度也有 105 種（圖 5d）。由蝴蝶種豐富度在第一、二、三時期與距主要道路最近距離的關係趨勢圖，發現第三時期距主要道路最近距離與蝴蝶種豐富度有明顯負相關的趨勢，然而在距主要道路較遠（約 14 公里）處，蝴蝶種豐富度仍可達到 76 種（圖 6）；距主要道路最近距離大於 10 公里的區域，其內環境因子平均值分別為：年均溫 17.4°C、年降雨量 2520 公釐、NDVI 為 0.4、海拔高度 1084 公尺、建物面積 0.06 % 以及距主要城市最近距離 29 公里，且在其中有 85 % 的區域，森林密度大於 80 %。

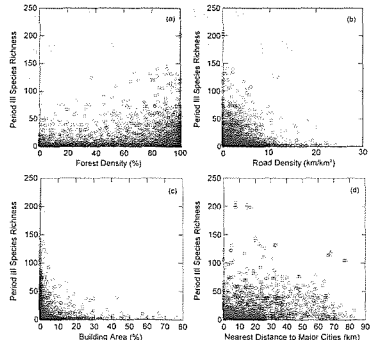


圖 5 第三時期蝴蝶種豐富度與環境因子的關係趨勢圖：(a) 蝴蝶種豐富度與森林密度的關係趨勢圖、(b) 蝴蝶種豐富度與道路密度的關係趨勢圖、(c) 蝴蝶種豐富度與建物面積的關係趨勢圖、(d) 蝴蝶種豐富度與距主要城市最近距離的關係趨勢圖。

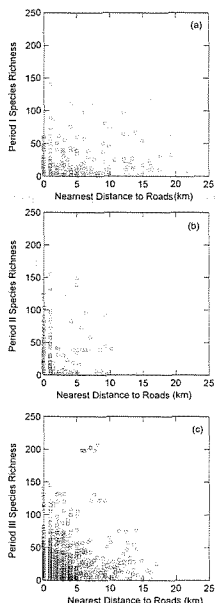


圖 6 各時期蝴蝶種豐富度與距主要道路最近距離關係趨勢圖：(a) 第一時期蝴蝶種豐富度與距主要道路最近距離關係趨勢圖、(b) 第二時期蝴蝶種豐富度與距主要道路最近距離關係趨勢圖、(c) 第三時期蝴蝶種豐富度與距主要道路最近距離關係趨勢圖。

(二) 蝴蝶種豐富度與都市化環境因子間的關係

NDVI 與建物面積的關係呈現負相關的趨勢，NDVI 值為 0.1 時，建物面積達到最高為 75.9%，而 NDVI 為 0.6 最高時，建物面積為 0% (圖 7a)。而 NDVI 與道路密度的關係呈現負相關的趨勢，NDVI 值為 0.06 時、道路密度達到最高為 20.05 公里 (圖 7b)。由建物面積與距主要城市最近距離的關係趨勢圖可見，建物面積與距主要城市最近距離呈現負相關的趨勢 (圖 8a)；但仍有 455 個網格，建物面積低 (低於 10%) 且距主要城市

距離近 (2 公里內)，約占第三時期蝶種分布資料的 15% (圖 8c)，由道路密度與距主要城市最近距離的關係趨勢圖可見，道路密度與距主要城市最近距離呈現負相關的趨勢 (圖 8b)；但仍有 424 個網格，道路密度較低 (低於 7 公里)、距主要城市距離近 (2 公里內)，約占第三時期蝶種分布資料的 14% (圖 8d)。

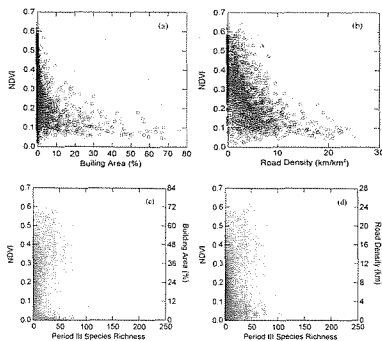


圖 7 第三時期 NDVI、建物面積、道路密度與蝶種豐富度的關係趨勢圖：(a) NDVI 與建物面積的關係趨勢圖、(b) NDVI 與道路密度的關係趨勢圖、(c) NDVI、建物面積與蝶種豐富度關係趨勢圖、(d) NDVI、道路密度與蝶種豐富度關係趨勢圖 (橘色：NDVI，綠色：建物面積，紫色：道路密度)。

挑選出蝶種數為 58 種以上 (本研究蝶類生物多樣性熱點定義)、且距離主要城市 2 公里以內的區域，發現這些蝶種分布較高的區域，其建物面積在 15% 以下、道路密度介於 0~13 公里之間；其中有 56% 的區域，道路密度低於 7 公里 (在距離主要城市 2 公里以內的區域，其道路密度為 7 公里以下者，蝶種數可達 61 種以上，然而在道路密度為 7 公里以上的區域，蝶種數驟降，最高只有 40 種蝶種)。其中 (距主要城市距離在 2 公里以內，道路密度低於 7 公里，且建物面積低於

10%) 有 20 個網格，仍有蝴蝶種豐富度高於 58 種的分布 (圖 8)。

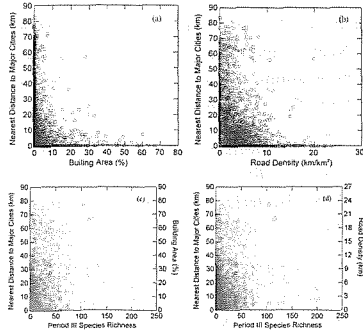


圖 8 第三時期距主要城市最近距離、建物面積、道路密度與蝶種豐富度關係趨勢圖：(a) 距主要城市最近距離與建物面積的關係趨勢圖、(b) 距主要城市最近距離與道路密度的關係趨勢圖、(c) 距主要城市最近距離、建物面積與蝶種豐富度的關係趨勢圖、(d) 距主要城市最近距離、道路密度與蝶種豐富度的關係趨勢圖 (紅色：距主要城市最近距離，綠色：建物面積，紫色：道路密度)。

四、未來規劃建議

由於在較高海拔處，其降雨量、雲覆蓋度以及風速增加、氣溫降低，蝴蝶發生期隨著海拔高度上升而縮短，蝶類繁殖力與族群數量隨著海拔高度上升而下降，海拔高度在時間、空間上尤其能影響蝴蝶的分布 (Fleishman *et al.*, 1998)。因此，未來可以蝶類分布在海拔高度上的時空變異，作進一步的比較分析。

蝶種往較高海拔分布的情形，可能與台灣溫度上升的狀態有關，當棲地溫度上升、蝴蝶也許會有往較高海拔移動的趨勢。目前台灣雖然沒有針對氣候變遷的議題，對於蝶

種分布狀態改變，做進一步闡釋的研究，然而二十世紀全球氣候的改變情形，使得很多物種都受到影響 (McCarty, 2001; Walther *et al.*, 2002)。蝴蝶分布範圍往較高緯度移動的最佳例子，即為歐洲非遷移性蝴蝶中，有 63% 的種類，在本世紀平均氣溫上升 0.8°C 的狀況下，分布範圍向北移動 35~240 公里 (Parmesan *et al.*, 1999)；而在大尺度、擁有較精細蝴蝶分布資料的捷克共和國中也發現，有 12~15 種的蝶種在平均分布海拔段上，往較高海拔區域移動，且最大的移動海拔高度為 148 公尺 (Konvicka, 2003)。

雖然台灣土地面積較小、分布的緯度範圍僅達到緯度 3 度，在蝶種分布往較高緯度移動的趨勢較難以監測，然而台灣的海拔變化高，在這 100 年間，整體平均溫度就上升了 1.5°C 左右，若能將受到人為干擾、寄主植物改變影響分布情形的蝶種找出，再進一步探討氣候變遷對台灣蝶種分布的影響情形，應為可行的方式。

同時，本項資料庫由於涵蓋時間長，也非常值得進行持續性的資料庫建置工作。如果有政府單位願意出資，台灣蝴蝶分布資料庫將值得進一步做為我國在氣候變遷研究上的主力生態資料之一。因此，未來的發展值得期待。

引用文獻

Ehrlich, P. R., Breedlove, D. E., Brussard P. F., and Sharp M. 1972. Weather and the regulation of subalpine populations. *Ecology* 53: 243-247.

Feltwell, J. 1986. *The Natural History of Butterflies*. Croom Helm, London.

Fleishman, E., Austin, G. T., and Weiss, A.D. 1998. An empirical test of Rapoport's rule: elevational gradients in montane butterfly

- communities. *Ecology* 79: 2482-2493.
- Harding, P. T., Asher, J., and Yates, T. J. 1995. Butterfly Monitoring I-recording the changes. 3-22pp. in A. S. Pullin, ed. *Ecology and Conservation of Butterflies*. Chapman and Hall, London.
- Heppner JB, Inoue H. (eds.). 1992. *Lepidoptera of Taiwan*. Vol. 1. Part 2: Checklist. Gainesville, FL: Association for Tropical Lepidoptera/ Scientific Publishers.
- Konvicka, M., Maradova, M., Benes J., Fric, Z., and Kepka, P. 2003. Uphill shifts in distribution of butterflies in the Czech Republic: effects of changing climate detected on a regional scale. *Global Ecology and Biogeography* 12: 403-410.
- McCarty, J. P. 2001. Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology* 15: 320-331.
- New, T. R., Pyle, R. M., Thomas, J. A., Thomas, C.D., and Hammond, P. C. 1995. Butterfly conservation management. *Annual Reviews of Entomology* 40: 57-83.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Steganescu, C., Hill, J. K., Thomas, C. D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W. J., Thomas, J. A., and Warren, M. 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* 399: 579-583.
- Rand, M.R.W. & Sotherton, N. W. 1986. Pesticide use on cereal crops and changes in the abundance of butterflies on farmland. *Biological Conservation*, 36, 71-82.
- Running, S. W., and Nemani, R. R. 1988. Relating seasonal patterns of the AVHRR vegetation index to simulated photosynthesis and transpiration of forests in different climates. *Remote Sensing of Environment* 24:347-367.
- Schultz, C. B., and Dlugosch, K. M. 1999. Nectar and hostplant scarcity limit populations of an endangered Oregon butterfly. *Oecologia* 119, 231-238.
- Thomas, C. D., Jordano, D., Lewis, O. T., Hill, J. K., Sutcliffe, O. L., and Thomas, J. A. 1998. Butterfly distributional patterns, processes and conservation. 107-138pp.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebeeg, T. J. C., Fromentin, J. M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.
- Weiss, S. B., Murphy, D. D., and White, R. R. 1988. Sun, slope, and butterflies: topographic determinants of habitat quality for *Euphydryas editha*. *Ecology* 69: 1486-1496.
- 山中正夫, 1971a。台灣產蝶類の分布 (1)。日本鱗翅學會特別報告 5 : 115-193。
- 山中正夫, 1971b。台灣產蝶類の分布 (2)。蝶與蛾 23 : 1-48。
- 山中正夫, 1972。台灣產蝶類の分布 (3)。蝶與蛾 23 : 1-13。
- 山中正夫, 1973。台灣產蝶類の分布 (3) 續。蝶與蛾 24 : 1-31。
- 山中正夫, 1974。台灣產蝶類の分布 (4)。蝶與蛾 25 : 1-60。
- 山中正夫, 1975。台灣產蝶類の分布 (5)。蝶與蛾 26 : 1-100。
- 山中正夫, 1980。台灣產蝶類の分布 (6)。蝶與蛾 30 : 1-143。
- 中央研究院國家生物多樣性資訊網, <http://taibnet.sinica.edu.tw>

台灣歷史文化系統 <http://thcts.ascc.net>

朱耀沂、山中正夫，1973。台灣昆蟲採集新舊地名對照表。省立博物館科學年刊 16：31-72。

朱耀沂、山中正夫，1974。台灣昆蟲採集新舊地名對照表(續)。省立博物館科學年刊 17：51-120。

朱耀沂、山中正夫，1975。台灣昆蟲採集新舊地名對照表(續)。省立博物館科學年刊 18：121-150。

何健銘、顏聖紘，1994。台灣蝴蝶與植物間之生態關係。自然保育季刊 6：10-17。

李培芬、廖倩瑜、李玉琪、潘彥宏、傅維馨、陳宣汶，1997。台灣地區生態與環境因子地理資訊資料庫。行政院農業委員會，台北。

徐堉峰，1999。台灣蝶圖鑑-第一卷。台灣省立鳳凰谷鳥園，南投。

徐堉峰，2002。台灣蝶圖鑑-第二卷。台灣省立鳳凰谷鳥園，南投。

徐堉峰，2007a。台灣蝶圖鑑-第三卷。台灣省立鳳凰谷鳥園，南投。

陳建志，1999。臺灣昆蟲的生態教育。環境教育季刊 39：54-61。