

由國內生物多樣性論文談生物多樣性研究

齊 心、黃玉冰、戴佑達、吳宜穎、劉人璋

國立中興大學昆蟲學系理論生態學研究室

電子郵件：hsinchi@dragon.nchu.edu.tw

通訊處：台中市國光路 250 號國立中興大學昆蟲學系

摘 要

自國科會推動長期生態研究起，國內生物調查工作已積極進行多年。其後之生物多樣性研究亦積極對各特定地區生物進行調查與分類，並計算多樣性指數或比較不同地區之相似度。部分作者對所使用之公式並未完全了解，而有解釋錯誤之情形。部分論文在描述與解釋研究資料方面仍有待加強。我們參考國內生物多樣性論文，提出對生物多樣性取樣、多樣性之生態系統研究與永久樣區等建議，供研究人員參考。由於不同生物之行為與棲所時空尺度不同，各種取樣方法採得不同生物之機率亦不同。因此，生物多樣性研究中，首先應了解調查地區中各種生物棲所之分布，再依據各種生物之生活史及其在棲所內之空間分布，訂定適當的取樣方法並估算所需樣本數，其取樣結果才能確實反映田間生物種數與密度，也才能計算多樣性指數。計算多樣性指數時，若取樣所得種數與實際總種數仍有相當差異，則多樣性指數會逐次改變，便無意義。事實上，目前常用的各種生物多樣性指數均缺乏生態學理論論證，使用時應深思熟慮。就生態系而言，生物多樣性研究若僅調查種類與密度，則僅了解生態系的組成份子，不足以永續經營生態系。生態系研究除了必須調查系統組成（即一般人所稱之「生物多樣性」）之外，另一方面更必須深入研究系統結構（即食物鏈（網）中各族群之關係）與動態（各族群之生長、繁殖、捕食、競爭、共生或人為收穫等）。而生態系中生物多樣性隨季節之變化亦實即食物鏈各階層之各族群生長率、繁殖率、捕食率、競爭情形等隨季節變化與綜合作用的結果，這些研究必須以生命表、捕食、競爭與收穫等生態學理論為基礎。由於生態系之因子繁多且作用複雜，電腦模擬為生態系研究之重要工具。「管理」具生態系代表性之永久樣區時，若能使「人為干擾」遠離樣區，而且研究方法與理論正確，則其研究結果經分析論證而發展之理

論便可以普遍應用，並為生物多樣性保育與永續利用建立基礎。至於個別之永久樣區是否能「永久」存在，則應歸諸 ecological succession。

關鍵詞：生態系、生命表、取樣、生物多樣性

On a Biodiversity Study Based on Papers of Taiwan's Biodiversity

Hsin Chi, Yu-Bin Huang, Yu-Da Dai, Yi-Ying Wu and Jen-Wei Liu
Laboratory of Theoretical Ecology, Department of Entomology,
National Chung Hsing University

Abstract

Since the funding of a long-term ecological study by the National Science Council, an intensive biological inventory has been carried out in Taiwan over several years. There were follow up projects on biodiversity targeted by the survey and classification in some specific areas as well. Biodiversity indices were calculated and the similarities between different areas were studied. Because some authors did not fully understand the formulae they were using, there were some errors in interpretation. The description and interpretation of the data needs to be improved. We reviewed papers on biodiversity in Taiwan and propose the following suggestions for sampling for biodiversity, for ecosystem studies of biodiversity, and for permanent sampling plots. Because of differences in the behavior and temporal and spatial scale of habitats between species, organisms of different species would be collected with differing probabilities by the various sampling methods. Therefore, in biodiversity studies, it is necessary to identify the distribution of habitats of the various organisms. Proper sampling methods and sample sizes can then be planned and calculated based on the spatial distribution pattern and the life history of the respective organisms in the habitat. Only then, can the number of species and their densities be estimated with confidence, and the diversity index calculated accordingly. In calculating the diversity indices, if there are still significant differences between the observed number and the actual total number of species, the calculated diversity indices will change from time to time with the accumulation of data. This will make the indices meaningless. Because of the deficiencies in abstract reasoning underlying the definition of most well-known biodiversity indices, they should be used with caution. From an ecosystem viewpoint, knowledge of species number and their abundances are only constitutive elements of the system. This is not sufficient for a sustainable management of the ecosystem. For an ecosystem study, not only the composition of a system (the general meaning of

“biodiversity”) should be studied, but also the system structure (the relationships between members in the food-chain or food-web) and the dynamics (the growth, reproduction, predation, competition, mutualism, or human harvesting, etc.). The seasonal change of biodiversity of an ecosystem results from the changes of growth rate, reproduction rate, predation rate and competition of all species and their interactions. All of these should be studied, based on ecological theories such as life tables, predation, competition and harvesting. Because of the numbers of components and the complexity of their interactions, computer simulation is a necessary tool. If the management of representative permanent sampling plots of an ecosystem is able to minimize human influence, and if the methods of study and theories are correct, then the theory derived from abstract reasoning from the data can be confidently used. Robust methods for conservation and sustainable biodiversity can then be undertaken. Using these methods, the existence of individual permanent sampling plots can be left to ecological succession.

Key words: ecosystem, life table, sampling, biodiversity.

緒 言

自國科會推動長期生態研究起，國內生物調查工作已積極進行多年。其後之生物多樣性研究亦積極對各特定地區生物進行調查與分類。政府投入大量經費研究生物多樣性；各種有關生物多樣性之研討會也不斷舉行：例如「台灣生物資源調查及資訊管理研習會」（1991年2月）、「生物多樣性前瞻研討會」（1998）、「1999生物多樣性研討會」、「2000年海峽兩岸生物多樣性與保育研討會」、「2000生物多樣性保育展望大會」（2000年12月）、「台灣生物多樣性願景國際研討會」（2000年5月）、「台灣生物資源調查研討會」（2001年11月）、「2002年生物多樣性保育研討會」（2002年7月）等等。國科會完成了「國家生物多樣性研究之規劃報告」。行政院第二七四七次院會也通過了「生物多樣性推動方案」。出版之研討會論文集與專刊很多，發表於正式學術期刊的論文也不少，有些期刊之單篇論文甚至厚達三、四十頁。許多論文都計算各種多樣性指數，或計算不同地區之相似度指數並據以比較相似度。「生物多樣性」似乎已成為流行之名詞，亦可視為「hot science」。然而，部分作者或許對所使用之公式未完全了解，而有解釋錯誤之情形；部分論文則在描述與解釋研究資料方面仍有待加強。我們參考國內生物多樣性論文，提出常見的問題供研究人員參考。為方便讀者對照閱讀，引用文獻時仍採用原作者所使用之名詞。我們也就生物多樣性研究工作中之取樣調查、多樣性指數、生物多樣性之生態系統研究與永久樣區等提出我們的建議。

國內生物多樣性論文

鄭明倫等（1999）之論文「臺灣六座國家公園螢火蟲相概要（鞘翅目：螢科）」中以 Jaccard coefficient 比較各國家公園螢火蟲相之相似性。張念台等（2000）指出鄭明倫等（1999）論文中計算之 Jaccard coefficient 有錯誤，且認為這些錯誤會影響相關之解釋。事實上，生物多樣性研究無論在理論上或方法上很多方面都仍在摸索階段。周文豪等（2002）報導台灣中部亞熱帶山地森林地棲脊椎動物之相對數量分布模式近似對數常態分布，但若就其圖形判斷，則與 log series 亦十分相似；若原作者列出分布模式之相關介量，讀者便可以驗算證明。

顏重威（1997）研究鳳凰谷鳥園鳥類群聚時，將 1995 至 1997 之觀察紀錄相加計算合計，並計算 diversity index。若鳥的壽命超過一年，則觀察紀錄可能有重複之處，因此不宜將不同時間的紀錄相加；正如我們不可以將 2001 與 2002 年的台灣人口相加一樣，當然也不宜用這種結果來計算 diversity index。Yang et al. (1994) 計算在 Nursery of *Paulownia fortunei* 中 cricket community 之 Simpson's index 時，其結果為 -0.287。依據 Simpson's index 公式之定義，不可能有負值。楊正澤等（2001a）之「關刀溪森林生態系著生植物基質中無脊椎動物群聚之生物多樣性」論文中，共調查四個樣區，分別為天然林樣區（13 個樣品）、次生林樣區（細分為三種海拔高度，共 10 個樣品）、火燒跡地樣區（5 個樣品）與溪岸樣區（3 個樣品）。作者分別計算各樣品之生物歧異度指數，其圖八中樣品 EP20 之辛浦森歧異度指數與夏農歧異度指數均為 0。因為自然界很少只有一種生物的棲地，生態學論文中報導歧異度指數（即多樣性指數）為 0 的情形極為少見。依據統計學概念與種的多樣性概念“Diversity of species: the different species in a given area or habitat”，計算多樣性指數時應以棲地為計算單位，不宜以棲地中之單一產品為單位。因此，我們建議為每一個樣品分別計算歧異度指數的分析方法必須謹慎使用。以灌木叢為例，雖然草原上之灌木叢類似島嶼，似乎各自獨立。但是同一地區各灌木叢間物種組成之變化宜視為該種灌木叢棲地之變異性。除非有明確理由，不宜將各個灌木叢視為不同之棲地。陳子浩等（1999）於溪頭研究七種林相之土壤動物，將各林相之資料分別計算多樣性指數，這是正確的做法。楊正澤等（2001a）文中又敘述「辛浦森歧異度指數均小於夏農歧異度指數」；其實，楊正澤等（2001a）之辛浦森歧異度指數小於夏農歧異度指數乃公式本身定義使然，無須經實驗證明。唯有幾種特例例外，例如：當棲地只有一種生物時，兩者均為 0。另外也決定於使用的對數函數種類： \log_2 、 \log_e 或 \log_{10} 。楊正澤等（2001a）第 107 頁之圖三分析著生植物基質含葉鮮重與螞蟻個體數之關係，依據其方程式當 $x = 0$ 時， y 應為 20.91，但其圖上卻明顯小於零。楊正澤等（2001b）將相同之圖另發表於林業研究季刊時，其直線則較為正確。劉雨芳等（2002）研究稻田生態系統，並計算每一種捕食性天敵之 Berger-Parker 優勢度指數。依據

Berger-Parker dominance index $d = N_{\max}/N_T$ ，只有一個 d 值。劉雨芳等（2002）所計算之 D 值實際上卻是 p_i （各種之相對豐度）。

生物多樣性研究之採集與分類費時，資料雖多卻不易解釋論證，許多論文之討論有大部分均為重述圖表之資料而已。因此相關論文多為描述性，與早期生態學教科書相似。1983 出版之 CBE style manual 中指出“Numerical data presented in tables usually need not be restated in detail in the text, but mean values for group data may be restated to emphasize the evidence on which conclusions are based.”。重複敘述圖表中之資料並非“解釋(interpretation)”，對讀者幫助不大。

科學論文必須嚴謹，不僅內容不可有錯誤，排版也應注意。就論文印刷與排版而言，「台灣昆蟲」、「農林學報」、「中華林學季刊」、「國立臺灣大學農學院實驗林研究報告」、「林業研究季刊」等許多期刊都應注意公式之寫法。以 Shannon-Wiener index 公式為例，其正確形式應為

$$H' = -\sum_{i=1}^s p_i \ln p_i \quad (1)$$

其中 i 應用下標， \ln 則一般不用斜體字。若寫成 $H = -\sum p_i \times \ln(p_i)$ 或 $Diversity = -\sum P_i \ln P_i$ 都不妥。建議作者使用微軟的文書處理軟體 Word 中之方程式編輯器，未來便可避免這些錯誤。

生物多樣性中的「指數」

陳朝圳等（2001）計算地景之 Shannon 多樣性與最大多樣性（ H_{\max} ）等。然而，最大多樣性實際上只是 $\log s$ 而已，並無特別計算之公式，只要總種數 s 相同，任何地區之“最大多樣性”都相同。原則上， H_{\max} 只是用來計算均勻度（Evenness），不宜單獨使用。蘇明洲（2001）研究校園木本植物多樣性。校園與公園都不是天然環境，若為教育目的，多種植些常見植物或特有植物就可以，計算 diversity index 並無意義。彭仁君等（2000）研究小雨蛙的食性，並依據胃含物計算食餌物種多樣性。研究青蛙的胃含物，可以知道其主要食物種類。但是，因許多生物並非其食餌，其胃含物並不一定反映其棲所物種多樣性，計算 diversity index 也無意義。就生物地理而言，一地區現有的生物種類與各種間之關係乃環境的歷史與長時間演化而形成的。同樣屬昆蟲綱的種類，有些是捕食者，

有些是植食者，有些是腐食者。各種的相對數量也往往決定於其在食物鏈中之地位。因此，計算棲地中特定一類生物的 diversity index，忽略其中食物鏈之關係的做法其生態意義值得檢討。以下僅就常用的 Shannon-Wiener index 與 Simpson's index 稍加討論：

1. Shannon-Wiener index

Shannon-Wiener index (Shannon 1948) 之公式如(1)式所示。此式在化學熱力學中的歷史更久，例如：如果我們參考 McQuarrie (1973)的“Statistical Thermodynamics”一書第一章的習題 1-15 就會了解 Shannon-Wiener index 最大值的條件，也就會了解為何 Shannon-Wiener index 的使用一直有爭議（該書的作業 2-5 與 2-6 也值得參考）。公式 1 中 s 為總種數， p_i 為第 i 種之個體數在所有種之個體數總和中所佔之比率。利用此公式之條件為： s 為已知，且任何一種的每一個體被發現之機率均相同。然而，大多數作者在計算 Shannon-Wiener index 時都無法確定 s 即棲地之所有種數，也無法保證所計算之 p_i 確實為棲地中之相對豐度。若再進行一年的調查，又發現不少新採集種，則 s 與 p_i 均改變，Shannon-Wiener index 自然不同。這種「生物多樣性指數逐年增加」的現象，如果不是因為「生物多樣性逐年增加」，而是由於先前調查的 s 與實際之數值仍有相當差距，則是一種錯誤。因此，在 s 之值趨近穩定之前，亦即棲地中大多數的種類都已採到之前，不宜計算 Shannon-Wiener index。若棲地中大多數的種類都已採到，則應進一步採用正確的取樣方法，估計各個種類的相對豐度。當然不可能對每一種類都作精確的採樣，但是至少應針對主要種類採樣，因其影響最大。許多作者將 Shannon-Wiener index 誤為 Shannon-Weaver index，雖然國外許多教科書早已指出這種錯誤，但國內仍有許多論文使用錯誤的名稱，例如：陳子浩等（1999）、黃耀通等（2000）、陳朝圳等（2001）、馮豐隆等（1998）。讀者若能閱讀化學熱力學的教科書(例：McQuarrie 1973)與 Shannon (1948)原文（其 Appendix 2 有詳細的推導過程），詳細了解其理論背景，可以確實了解用於解釋生態學 information 之條件。

2. Simpson's index

Legendre and Legendre (1983) 在其書中寫道 “*The probability that two randomly chosen specimens belong to the same species is the measure of concentration proposed by Simpson, i.e., the sum of these combined probabilities for the different species.*”

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i(N_i-1)}{N(N-1)} \quad (2)$$

其中 n 為種數， N_i 為第 i 種之個體數， N 為所有種之個體數之和。Magurran (1988) 在其書中第 39 頁寫道 “*Simpson (1949) gave the probability of any two individuals drawn at random from a infinitely large community belonging to different species as:*

$$D = \sum p_i^2 \quad (3)$$

where $p_i =$ the proportion of individuals in the i th species. In order to calculate the index the form appropriate to a finite community is used.”

$$D = \sum \left(\frac{n_i(n_i-1)}{N(N-1)} \right) \quad (4)$$

依據機率理論，公式 2 與 4 都是自有限之群聚隨機取到兩個個體“屬於同種的機率”，公式 3 則是自無限之群聚隨機取到兩個個體“屬於同種的機率”。因此，Legendre and Legendre (1983) 的解釋才是正確的。Ludwig and Reynolds (1988) 的解釋與 Legendre and Legendre (1983) 相同。再依據機率理論，取到兩個個體“屬於不同種的機率”當然就是：

$$D_2 = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)} = 1 - D \quad (5)$$

公式 5 常用來表示 diversity。雖然有些文獻（例如：MacArthur 1972，Magurran 1988）認為 $1/D$ 也可以用來表示 Simpson's index，但是 $1/D$ 並沒有任何理論依據。而且， D 與 D_2 （即 $1 - D$ ）呈直線關係，但 D 與 $1/D$ 則為倒數函數之曲線關係； D 值為 0 時， $1 - D = 1$ ， $1/D$ 則無意義。所以，我們認為不宜使用 $1/D$ 表示 Simpson's index。國內也有用 $1/D$ 的論文，例如：黃耀通等（2000）之著作。

然而，根本問題在於：目前常用的各種生物多樣性指數與相似性指數均缺乏生態學理論論證，使用時應深思熟慮。科學家遭遇問題時，常常利用現成的「指數」或乾脆創立新「指數」試圖解釋一些現象。MacArthur (1972) 寫道 “*Those*

who have used diversity to mean a number combining aspects of both the number of species and the evenness of their abundances have wasted a great deal of time in polemics about whether $1/\sum_i p_i^2$ or $-\sum_i p_i \log_e p_i$ or $N!/(N_1!N_2!\cdots N_n!)$ or some other measure is "best." ”。這多少也說明了使用「指數」的困境。很多教科書與網路資料都對「生物多樣性指數」有深入的討論，值得讀者參考。由於 diversity index 本身問題仍多，自然不宜再依據 diversity index 進一步作其他統計分析。

生物多樣性調查取樣

我們認為，生物多樣性調查工作應先由物種調查開始，除了一般常用方法外，一定要用目視觀察搜尋生物。不要一開始就大量殺生。最好在調查地點宿營，隨時調查。然後再依據初步研究針對主要生物或特定生物進行有系統的取樣調查密度。由於所有 diversity indices 均假設棲地中每個族群的每個個體被採到的機率都相同（所以才將各種生物之數量相加而得 N ），因此若取樣方法不能保證每個個體都是隨機取得，就不能應用這些公式。Magurran (1988)的書中也討論到 diversity 研究中 sampling 的重要性。（國內許多論文都將 Magurran (1988) 列為引用文獻，但是由論文中的錯誤卻可知許多作者尚未確實閱讀該書）。由於不同生物之行為與棲所時空尺度不同，各種取樣方法採得不同生物之機率亦不同。因此針對不同生物需要用不同的取樣方法與範圍，昆蟲可能一平方公尺即可，鳥類可能要數百平方公尺到幾平方公里。因此，生物多樣性研究中，首先應了解調查地區中各種生物「棲所之分布」，再依據各種生物之生活史及其在棲所內之空間分布，訂定適當的取樣方法並估算所需樣本數，其取樣結果才能確實反映田間生物種數與密度，也才能計算多樣性指數。但是，計算各種生物多樣性指數時，必須先了解總種數，否則發現的種數若逐年增加，每年發表的 diversity index 也逐年改變。在比較棲地間之相似性時，每年發表的 similarity index 也會改變。有關於種數的問題將於後文討論。此外，生物多樣性取樣調查工作中，若忽略族群生長過程中年齡或齡期結構之變化，調查所得之密度則可能無法正確反映實際田間密度，若據以計算之多樣性指數亦不可信。因此，也必須依據生物的生活史，選擇適當的調查時間。杜銘章與王緒昂（2000）在塔塔加以慢車搜尋道路和步行檢視

並翻覆掩體的方式調查兩生爬行動物。葛兆年、鄭建昌（1994）於早上 6:00 至 10:00 以及傍晚 16:00 至 18:00 以八倍望遠鏡觀察並紀錄路線兩旁所見、所聽之鳥種類、數量、時間及所在棲地類別。袁孝維（1998）調查南投縣沙里仙自然教育中心預定地鳥類相，則從日出後半小時內開始，以穿越線法步行 3-4 小時，用七倍望遠鏡及聽鳥音的方式調查，每月各鳥種之相對數量則取當月之最高數。由許多論文中都可發現，調查不同生物時各有其特殊之難處。調查大地區時，應先將大地區依照溫度、高度、氣候等條件區分為棲地。再於棲地中依據寄主植物、土壤劃定各種生物之棲所之分布。然後自棲所中進行初步隨機取樣，估計該生物在棲所中之分布型式並估計所需樣本數。最後再正式執行取樣工作。有關一般取樣的教科書相當多，例如：Southwood (1978)，Kershaw and Looney (1985)，Moore and Chapman (1985)，Ludwig and Reynolds (1988)，Krebs (1999)。有些書中有錯誤，讀者必須仔細判斷。最好比較不同教科書，找出正確的方法。參考翻譯的書籍時，應加倍謹慎，因為翻譯錯誤的情形相當普遍。有關取樣理論方面，則應該參考以統計學為基礎之書籍，例如：Cochran (1977) 與 Thompson (1992) 就是兩本值得閱讀的書。（本文中各公式之詳細說明均請參閱原著或教科書，以便深入了解相關學理。）

決定調查之棲地範圍後，原則上應了解生物的空間分布，才能決定取樣方式與估算所需樣本數。在空間分布方面，最常見的是隨機型分布與聚集型分布。隨機型分布即為 Poisson distribution，其公式為：

$$P(x) = e^{-\mu} \frac{\mu^x}{x!} \quad (6)$$

其平均值 (μ) 與變方 (σ^2) 之關係為 $\mu = \sigma^2$ 。

聚集型分布在昆蟲研究中常用的是 negative binomial distribution (負二項分布)，其公式為：

$$P(x) = \frac{\Gamma(k+x)}{x!\Gamma(k)} \left(\frac{\mu}{k+\mu}\right)^x \left(\frac{k}{k+\mu}\right)^k \quad (7)$$

其平均值 (μ) 與變方 (σ^2) 之關係為

$$\sigma^2 = \mu + \frac{\mu^2}{k} \quad (8)$$

Negative binomial distribution 中之 $\Gamma(x)$ 為 gamma 函數：

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (9)$$

當 x 是整數的時候， $\Gamma(x) = (x-1)!$ 。如果 x 不是整數， $\Gamma(x)$ 不可以寫成階乘。因為階乘函數必須是整數，而生物的空間分布資料所估計之 k 值一般卻不是整數，因此下式是錯誤的形式。

$$P(x) = \frac{(k+x-1)!}{x!(k-1)!} \left(\frac{\mu}{\mu+k} \right)^x \left(\frac{k+\mu}{k} \right)^{-k} \quad (10)$$

Ludwig and Reynolds (1988) 與國內的數本書籍都有相同的錯誤。其實，Poisson distribution 與 negative binomial distribution 不但和取樣有關，也和 Simpson's index 有關。Simpson (1949) 的論文中就用到了這兩種分布。

決定調查之棲地範圍後，例如在草地調查某種彈尾目昆蟲（俗稱跳蟲），可以先隨機設置 30 個直徑 10 cm 的土壤陷阱。取樣後，以陷阱為單位，分別計算這種跳蟲的樣本平均值 (\bar{x}) 與樣本標準偏差 (s)（此處之 s 與前文中之種數不同），再依據 11 式估計樣本數 (n)

$$n = \left(\frac{ts}{D\bar{x}} \right)^2 \quad (11)$$

其中 D 為容許之相對誤差，一般而言 $D = 0.2$ 即可（農業生態系一般用 0.1，自然生態系之取樣容許較大誤差）； t 為 Student's t 分布之值， $t_{0.05[\infty]} = 1.96$ ，亦可以 2 取代。公式 11 為 Southwood (1978) 所使用者。在不同教科書中雖有不同的形式，但因都是由中央極限定理倒推而得，均大同小異。 n 即為依據初步取樣之平均值、標準偏差、與相對誤差而估算之樣本數 (sample size)（即 n 個土壤陷阱）。Krebs 則針對隨機分布與負二項分布分別提出估計樣本數之公式：

$$n = \left(\frac{200}{r} \right)^2 \cdot \frac{1}{\bar{x}} \quad (\text{用於隨機分布}) \quad (12)$$

$$n = \frac{(100t_{\alpha})^2}{r^2} \left(\frac{1}{\bar{x}} + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{用於負二項分布}) \quad (13)$$

此二式是依據 Poisson distribution 之定義 $\sigma^2 = \mu$ 與 negative binomial distribution 之定義 $\sigma^2 = \mu + \mu^2/k$ 分別代入 11 式的結果。若所調查之草地面積有限，估計所需

之樣本數時，便應考慮有限族群校正（Finite population correction）（Cochran 1977，Thompson 1992）：

$$n^* = \frac{n}{1 + \frac{n}{N}} \quad (14)$$

其中 n^* 為利用有限族群校正之樣本數， N 為樣本空間母族群總數（此處係指取樣地區之總取樣單位數，即草地總面積除以 $25\pi \text{ cm}^2$ ）。當 $n/N > 0.05$ 時，便應採用該校正公式。由於自然環境一般均為 heterogeneous，取樣時考慮之因素可能各不相同。若未能依據正確取樣方法估計族群密度，其所計算之多樣性指數亦無意義，這是大家都認同的觀念。Legendre and Legendre (1983) 也寫道 “As a final caution, the reader should be warned that a meaningful interpretation of a data matrix presupposes a correct sampling design”。若調查的對象屬於 r -selection 則應至少每季調查一次，以了解族群隨季節之變動。

估計棲所中之總種數

計算多樣性指數時，若取樣所得種數與實際總種數仍有相當差異，則多樣性指數會逐次改變，便無意義。張念台等（2000）亦考慮到此問題，其論文中提到「影響不同生態區域間物種相似係數值高低的原因，除物種特性與環境諸因子造成物種豐富度不同外，是否完成全面調查與完整登錄發生種類，亦相當重要」。張念台等（2000）並利用 Colwell and Coddington (1995) 的方法估測本省國家公園螢火蟲種數為 53。然而，這種方法究竟可不可以用？

假設一地區之生物總種數為 s ，各種之相對豐度為 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_s$ 。依據先前調查之結果可以計算調查結果之涵蓋率（coverage）：

$$c = \sum_{j=1}^s p_j i_j \quad (15)$$

其中若第 j 種已採到則 $i_j = 1$ ，若第 j 種尚未採到則 $i_j = 0$ 。依據先前調查的涵蓋率，利用二項定理可以計算下次調查時採樣 m 個個體時，其中有 k 個屬於新採到種之機率為：

$$\Pr(K = k) = \binom{m}{k} (1 - c)^k c^{m-k} \quad (16)$$

其中新採到種之期望值為：

$$E(S') = \sum E(S'|k) \Pr(K = k) \quad (17)$$

其中

$$E(S'|k) = \sum_{j=1}^s (1 - (1 - q_j)^k) \quad (18)$$

q_j 為第 j 種在未採到種中之相對豐度，亦即

$$q_j = (1 - i_j) p_j / (1 - c) \quad (19)$$

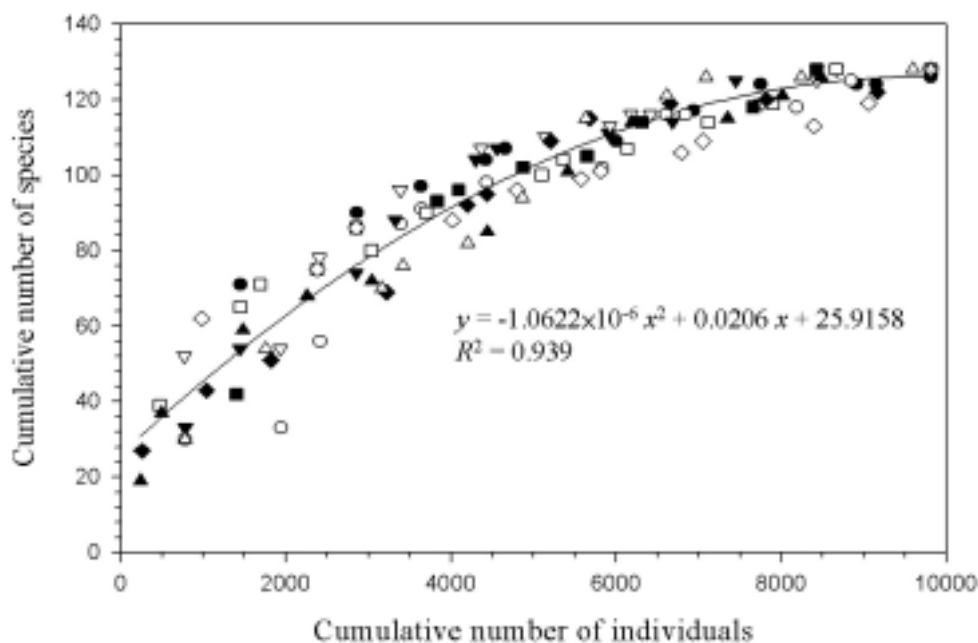
上述的討論主要參考 Solow and Polasky (1999) 的論文，其主要依據就是一般機率理論而已；許多類似的論文都有十分相似的討論。由於 s 與 c 一般都屬未知，Solow and Polasky (1999) 乃參考 Good (1953) 的方法估計 c ，並參考 Chao (1984) 的論文根據已採到的種數 s_0 與樣本中只有一個個體的種數 (r_1) 與只有兩個個體的種數 (r_2) 估計 s ，然後再依據這些估計值計算新採到種數目之期望值。Colwell and Coddington (1995) 則是將類似概念直接延伸應用到估計生物種在不同樣本中之分布。由於他們沒有提出理論論證，我們認為這種做法還有待檢驗。

由於估計總種數的相關理論目前仍未臻完善，實際應用價值有限。例如：在多樣性調查中如果沒有只有一個個體的種或只有兩個個體的種，上述的方法就不能使用。那麼，永遠不知道一地區的總種數時，又很想計算「指數」時，該怎麼辦？就實用上而言，如果經過多次採樣後，依據累計種數隨樣本個體數增加的曲線可以判斷已調查到該地區中大多數的生物，未來發現新採到種的機率相當低，而且對 s 的影響不大。此時計算的多樣性指數就不會有太大的變化。例如：圖一即為將野外調查之連續 12 次土壤陷阱採樣資料隨機排列而得「累計種數」隨「累計樣本個體數」增加之情形（黃玉冰 2002）。事實上，文獻中早已有許多類似的圖，例如：Fisher et al. (1943) 之 Fig. 4。

生物多樣性資料庫與地理資訊系統

早期尚須學者呼籲建立資料庫（Raven 1992，Morin 1992）。現今資料庫建立之重要性不必贅言，政府目前每年也投入很多經費。資料庫種類涵蓋魚類、鳥類、昆蟲、菌類、兩棲及爬蟲類等各類生物。十年前建立資料庫時所使用之系統

與資料庫程式為 MS-DOS、文星中文系統、dBase III Plus 等。這些資料庫若不能隨著軟體的進步而更新，其中有些可能早已不能使用，當初投入之人力與經費則甚為可惜。資料庫為常規性之技術性工作，研究人員若投入心力建立與維持資料



圖一、將 12 次採樣隨機排列之累計種數隨累計樣本個體數增加之情形(黃玉冰 2002)。

庫，則必然影響學術研究。若學者專家對電腦與資料庫並無充分概念，卻承接計畫再轉包民間電腦公司，亦非正確做法。我們建議，生物多樣性資料庫的工作必須在學者專家組成的委員會指導下由公立博物館單位（例如國立自然科學博物館）之專任技術人員永久維持，並開放學術界上網使用。凡是政府補助經費的生物資源調查或多樣性計畫，均應規定將調查結果與標本提供國立自然科學博物館統一保存、建檔、上網。如此，一方面可以為研究人員提供完善的電腦建檔服務，一方面可以建立完整的資料庫將研究成果提供學術界使用，更能有效運用政府經費。台灣是個小地方，標本若能統一館藏，不但方便學者專家核對標本，亦有利於名稱的整合。例如：何健鎔等（1998）與鄭明倫等（1999）兩篇論文中相同學名的螢火蟲，中文名稱卻不同。生物多樣性研究也必須利用地理資訊系統，生物多樣性資料庫與地理資訊系統結合為必然之趨勢。此外，資料庫中也必須包含生態資料。此項工作亦應由上述單位負責。電子地圖資料原則上宜由政府統一

製作，免費提供公立單位使用。若分別由各教授或研究人員之計畫繪製，不但錯誤多，不易整合，且用途有限。未來若能由研究人員自行透過 Internet 輸入、維護個別的研究成果，不但可以使資訊透明化，亦可增進流通效率，例如: Databank of FRRN (Databank of Forest Reserves Suitable for Research, http://www.efi.fi/Database_Gateway/FRRN/)就是採用這種做法。

由「生態系」觀點研究「生物多樣性」 - 生態系統之組成與動態研究

就生態系而言，生物多樣性研究若僅調查種類與密度，則僅了解生態系的組成份子，不足以永續經營生態系。「生物多樣性研究」除了物種調查外，更重要的是「如何維持生物多樣性」。這是一般人都認同的概念，就像「地球村」或「我們只有一個地球」一樣，人人都知道的。在 1992 年的「台灣生物資源調查及資訊管理研習會」之綜合討論中即有許多類似的意見（彭鏡毅（編））。我們認為，研究生態系除了必須調查系統組成（即一般人所稱之「生物多樣性」）之外，另一方面更必須深入研究系統結構（即食物鏈（網）中各族群之關係）與動態（各族群之生長、繁殖、捕食、競爭、共生或人為收穫等）。而生態系中生物多樣性隨季節之變化亦實即食物鏈各階層之各族群生長率、繁殖率、捕食率、競爭情形等隨季節變化與綜合作用的結果。這些研究必須以生命表、捕食、競爭與收穫等生態學理論為基礎。如果要保育櫻花鉤吻鮭與珠光鳳蝶，就必須了解他們族群的年齡結構，以及各年齡的個體在各種環境條件下的存活率、發育速率、繁殖率，這些實際上就是「生命表」。依據生命表，也可以了解並估算其所需的環境資源量。可惜許多國內保育生物的生命表資料仍十分缺乏。

簡單的族群生長理論如 exponential growth 僅能用於單細胞生物。Logistic model 雖然介紹了重要的 carrying capacity 概念，但是該模式僅是簡單的數學理論，並不能實際應用。由於，絕大多數的生物都是有年齡結構的，因此必須利用生命表理論，才能正確描述族群的存活率與繁殖率隨年齡的變化。具年齡結構之族群增長模式主要為 Lotka (1922)之貢獻

$$\sum e^{-rx} l_x m_x = 1 \quad (20)$$

其中 x 為年齡， l_x 與 m_x 則分別為 age-specific survival rate 與 age-specific fecundity。利用上式可以計算族群的 intrinsic rate of increase。若利用 Lewis-Leslie matrix (Lewis 1942, Leslie 1945 & 1948) 的矩陣模型，則須利用族群矩陣之特性方程式

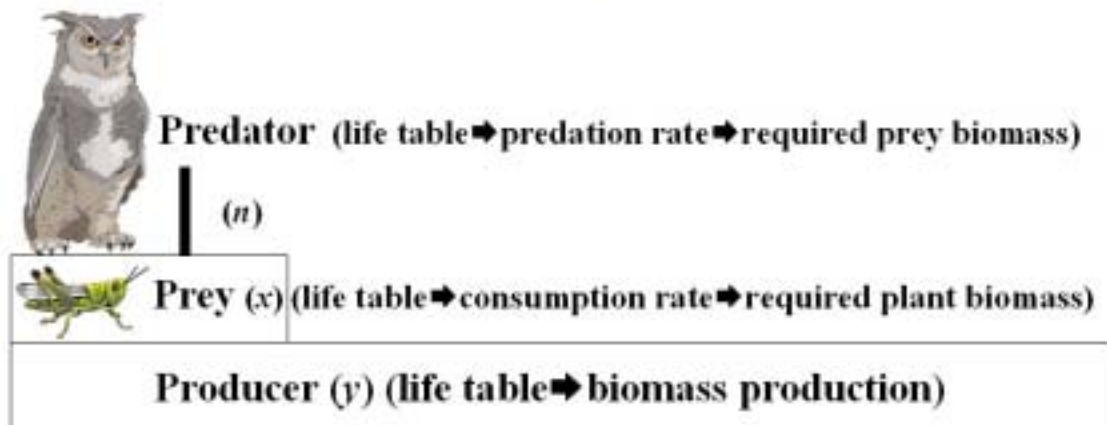
$$|M - \lambda I| = 0 \quad (21)$$

其展開式為：

$$\lambda^n - f_1 \lambda^{n-1} - s_1 f_2 \lambda^{n-2} - s_1 s_2 f_3 \lambda^{n-3} - \dots - s_1 \dots s_{n-2} f_{n-1} \lambda - s_1 \dots s_{n-1} f_n = 0 \quad (22)$$

其中 s_i 為年齡 i 的個體存活到 $i+1$ 的機率， f_i 則為為年齡 i 的個體的繁殖率。該式之唯一正根即為 finite rate of increase。Intrinsic rate of increase 與 finite rate of increase 之關係為 $\lambda = e^r$ 。如果要考慮雌雄兩性與齡期結構，也可以用 Chi and Liu (1985) 與 Chi (1988) 的兩性生命表。實際利用上， l_x 與 m_x 或 s_i 與 f_i 比 r 與 λ 有用。由於，生命表可以描述族群的詳細存活率與繁殖率隨年齡的變化，蒐集野生動物的生命表十分重要。雖然野生動物的生命表不易蒐集，可參考生態學教科書中的各種估計方法(例: Ricklefs and Miller 1999)。研究人員當然必須針對個別生物的生活習性設計適當的調查方法。再由食物鏈的角度而言，則必須收集各階層生物的生命表。許多論文都提到 r -selection 或 K -selection，如果能確實計算 r 或 K 更好。

Ecosystem Food-Chain Study Based on Life Tables



圖二、以生命表為基礎之生態系食物鏈研究。

圖二為以生命表為基礎的生態系食物鏈研究示意圖。一般而言，捕食者之生物量遠小於食餌（獵物）之生物量，即 $n \ll x$ 。而食餌之生物量則又遠小於生產者，即 $x \ll y$ 。由於生命表才能正確考慮 predation 與 consumption 隨年齡改變之情形，因此實際的數量關係必須以生命表為基礎；也唯有如此才能進一步了解生態系的穩定性。

依據劉小如等（2000）之研究已知蘭嶼角鴉獵物有 39 種。若能估計蘭嶼角鴉生命表、調查實際野外角鴉之族群密度與族群之年齡結構、估計角鴉對主要獵物之捕食率，並配合主要獵物之生命表研究、主要獵物對食物之 consumption rate，未來或能了解其食物鏈之結構與動態，並進一步估計蘭嶼的 carrying capacity，或估計人為開發對角鴉的影響，而能進一步規劃適當的保育措施。將生命表應用於 predation 研究的見解，並非我們的創見，Hassell 早於 1978 年便已提出。對於明顯受季節影響的族群，亦應分別研究不同季節的生命表。對於水中鹽分濃度敏感之水生生物，則應研究不同鹽分濃度的生命表。Wang et al. (2002) 研究不同溫度與鹽度下之 copepods 生命表，未來便可進一步研究其與魚類族群的動態。以「生命表」為基礎研究“predation”與“competition”是未來必然的趨勢。

由於生態系之因子繁多且作用複雜，電腦模擬為生態系研究之重要工具。Chi (2000)的論文“Computer simulation models for sustainability”中指出，電腦模擬的主要三個條件為：理論、資料與電腦程式。電腦模擬若無生態學理論基礎，其模擬與電玩無異。資料若不完整，無法模擬。電腦程式則必須針對系統設計，並無現成商品化之軟體可用。目前有些商業化的軟體號稱能模擬族群變動或可作風險分析，由於這些軟體多以統計學為主，缺乏生態學理論基礎，應用上仍須謹慎。

淺談「永久樣區」

Pennings and Callaway (1996)研究寄生性植物對自然植物之結構與動態之影響，並於永久樣區驗證。雖然由於植物大多固著於其生長地點，植物 diversity 的調查比動物方便，亦較可利用永久樣區研究。但仍有許多問題待解決。Phillips et al. (1994) 研究熱帶森林動態與種豐富度。Sheil (1996)的論文對 Phillips et al.的研

究提出一些評論，其中一點為「永久樣區無法提供無偏之樣本」。Phillips et al. (1997)則提出反駁。Sheil (1997)承認其 1996 之評論有部分為誤解，但是又進一步提出更深入的問題討論。Phillips et al. (1997)也同意 Sheil (1996)所指出之「一地點之植物多樣性與當地之歷史有關，不能僅以目前之環境條件解釋」，是正確的。這些辯論反映「永久樣區」不是「找一塊固定的地區作調查」就可以了。永久樣區可以用來驗證假說，但應注意樣區是否能反映相同棲所之變異性。就物種調查而言，不宜限於永久樣區。如果「永久樣區」變成「實驗室」一樣的限制環境，其研究結果應用範圍自然受限。永久樣區也必須考慮「重複取樣」與「重複測量」的問題。Synnott (1979) 的「A manual of permanent plot procedures for tropic forests」目前仍受重視。Whitmore (1989)發表之「Guidelines to avoid remeasurement problems in permanent sample plots in tropical rain forests」亦可供參考。「永久樣區」的設置雖然仍有許多待研究的問題，已應用於森林的永續經營上（例如：Australian Greenhouse Office 1998，CCAB-AP, FAO and CCAD 2003）。當然，我們不但要研究自然樣區，也要研究人為干擾的系統，或嚴重污染的系統。如本文之前所述，不同生物其棲所時空尺度不同，樣區大小也不同，對不同的生物，「樣區」的設置要考慮的因素也不同。基本上，「管理」具生態系代表性之永久樣區時，若能使「人為干擾」遠離樣區，而且研究方法與理論正確，則其研究結果經分析論證而發展之理論便可以普遍應用，並為生物多樣性保育與永續利用建立基礎。至於個別之永久樣區是否能「永久」存在，並不重要，應可歸諸 ecological succession。

結 語

目前，國內生物學之相關研究在微觀方面以 DNA 為主，在宏觀方面則以生物多樣性最熱門。與生物技術工作比較，生物多樣性的研究工作所需時間以年計，又得上山下鄉、渡河下海，工作遠較生物技術繁重。以趙榮台等(1999)的論文為例，調查三年餘，採得蛾類 24 科 956 種，僅標本製作與分類鑑定就得花費極多時間。此外，必須蒐集並閱讀分類資料，學習各種形態特徵。非有相當耐力，否則無法完成。但是，無論微觀的 DNA 定序或宏觀的生物多樣性 inventory 兩項

工作，現在投入大量的經費與人力，其累積的資料未來可能需要數十年或上百年的時間進一步解讀。如果現在的研究方法錯誤、資料庫管理不當、資料未能公開，而使研究資料隨時間而 perish，則實在可惜。本引用的論文，或許原作者不同意我們的意見，如果能提出來討論，相信有助於提升國內學術討論的風氣，畢竟真理愈辨（辯）愈明。發表的論文，以書面公開討論會比私下討論更有多重效果。我們並無意和任何人競爭研究經費，只是從學術上提出我們的淺見，供大家參考。

由「國家生物多樣性研究之規劃報告」（國立台灣大學生物多樣性研究中心，2002）的會議紀錄也可以看出許多學者都有不同的意見。其中，第 95 頁金恆鑣先生提到「事實上我是贊成（成）立一個生態學研究機構，把 biodiversity 納進去，....」。我們贊成金先生的意見。我們認為「生物多樣性」不能算是一個學門，而是一個議題或問題。生物多樣性研究主要為系統分類學與生態學的工作，研究重點則應為系統生物學與系統生態學。生物多樣性能夠成為熱門研究題目，政府投入的研究經費增加，對研究人員固然是「好事」。但是，若經過十多年的研究，始終停留在「物種調查」或簡單的「生活史觀察」，則只是假「生物多樣性」之名，而從事簡單的分類學或生態學研究而已。生態學至今仍為一門 young science。正如生態系統 complexity 所反映之 difficulty，無論在研究方法、統計分析、學術理論等各方面都仍有許多問題等待生態學家深入研究。但是，國內生態學理論基礎不足，研究人員又因升遷與獎助費而須在短短數年內累積論文篇數，因此論文水準不易提升；呼籲重視生物多樣性的通俗科學文章遠多於學術期刊論文。目前，國內生態學研究亟需教授與研究人員專心研讀書籍與論文，學習實驗設計、統計分析與生態學理論。常規性的工作當然可以請助理或學生協助，實驗設計、資料分析與學術理論研究則仍須計畫主持人全心投入。若教授將工作完全交由學生負責，靠學生寫論文，可能浪費公帑並影響學術的進步。在林曜松教授多年辛苦推動「生物多樣性」研究有初步成果之後，現在除了「觀察、紀錄、描述」的 routine 工作需繼續進行外，我們是否可以從生態系統的角度研究生物多樣性？是否從計算生物多樣性指數，進一步到計算 extinction probability？從以 Euclidean distance 為基礎的簡單統計方法，進一步去研究系統動態的原理？在花費大量經費進行明星野生動物復育的同時，可否考慮研究它們的生命表？執行

monitoring 時，不再只是調查單一物種，而是針對其食物鏈？其實，許多論文的題目若能回歸「基本面」，用「xxx 地區之昆蟲種類與數量調查」為題目，也不會降低論文的水準。

就實際之生物多樣性保育目的而言，我們建議：目前生物多樣性的工作應以國家公園與自然保護區的「管理」為最重要的工作。以袁孝維（1998）論文中之敘述「...曾眼見一輛小貨車載了一箱鳥由沙里仙林道駛出，其中亦包含了屬於珍貴稀有之小剪尾及屬於其他應予保育類之白頭鵝及栗背林鴿。」為證，無論政府投入多少學術研究經費，若不能確實「管理」保護區，也無法保育生物多樣性。學術研究需要長時間建立基礎與培育人才，短時間內即使投入大量經費，可能炒熱了題目，增加學者上媒體的機會，也不會有很好的成效；倒不如長期穩定的經費支援。但是，國家公園與自然保護區的「管理」卻能對保護生物多樣性有「立竿見影」的效果。周文豪等（2002）在論文最後提到「研究團隊必須包含昆蟲等無脊椎動物專業人才，因為此法採得的無脊椎動物數量驚人，這樣的研究結果是全面的，而且研究者也有義務去分析這些資料才不枉費生命。」若他們所指的是「被研究人員採集殺害的動物生命」，我們當然同意他們的看法。我們不妨換個角度思考：如果研究工作重視學術理論、研究方法、實驗設計、統計分析與論文寫作，就不會浪費研究人員本身的生命與閱讀論文的研究人員的生命。豈不更好？

誌 謝

本文以數篇國內的研究論文作為實例，我們衷心感謝部分原作者持著包容的態度，認真、誠懇、熱心地和我們討論問題，交換意見。這些作者認真追求學術真理的態度，可以作為年輕一輩學生的榜樣。我們感謝 Dr. Malcolm Cunningham 與 Dr. Cecil L. Smith 費心為我們修改英文摘要。

引用文獻

杜銘章、王緒昂。2000。塔塔加高山生態系研究--兩生爬行動物群聚組成之探討。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 14(2): 77-83。

- 何健鎔、林春基、顏仁德。1998。臺南縣螢火蟲資源調查。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 12(2): 121-127。
- 周文豪、李敏嘉、于宏燦。2002。臺灣中部亞熱帶山地森林地棲脊椎動物的群落結構--兼論攔截籬掉落桶研究法的應用。特有生物研究 4(1): 1-11。
- 周延鑫、謝豐國、吳聲華、周文豪(編)。2000。2000年海峽兩岸生物多樣性與保育研討會論文集。國立自然科學博物館，台中，台灣。
- 袁孝維。1998。南投縣沙里仙自然教育中心預定地鳥類相調查。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 12(3): 181-188。
- 黃玉冰。2002。估計昆蟲種數之調查與理論研究。國立中興大學昆蟲學系碩士論文。台中，台灣。
- 黃耀通、蔡淳淳、徐歷鵬、張朝欽、陳錦生。2000。塔塔加高山生態系昆蟲相初報。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 14(2): 85-90。
- 張念台、陳仁昭、許文綺。2000。南仁山長期生態研究區螢火蟲調查--並論生態區之相似性比較。中華昆蟲 20(1): 57-61。
- 陳子浩、王亞男、姜家華、羅志義、張國楨、陳放生。1999。溪頭不同林相土壤動物之初步研究。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 13(4): 303-316。
- 陳朝圳、陳正華、吳守從。2001。人為干擾對南仁山生態保護區地景之影響。林業研究季刊 23(2): 25-34。
- 國立台灣大學生物多樣性研究中心。2002。國家生物多樣性研究之規劃報告。國立台灣大學生物多樣性研究中心編印，第二版。
- 彭鏡毅(編)。1992。台灣生物資源研究現況。中央研究院植物研究所，台北，台灣。
- 彭仁君、徐詩燕、鍾兆晉。2000。小雨蛙食性之研究。中華林學季刊 33(2): 169-178。
- 馮豐隆、楊正澤、蔡尚惠。1998。以東北角海岸國家風景特定區之植生與昆蟲為例探討整合性森林資源調查與監測系統之建立。農林學報 47(3): 67-87。
- 葛兆年、鄭健昌。1994。四角林場生態教育示範區鳥類調查。中華林學季刊 27(1): 3-14。

- 楊正澤、陳明義、江英煜。2001a。關刀溪森林生態系著生植物基質中無脊椎動物群聚之生物多樣性。臺灣昆蟲 21(2): 99-117。
- 楊正澤、陳明義、江英煜。2001b。關刀溪森林生態系著生植物基質蟻客昆蟲群聚之多樣性。林業研究季刊 23(4): 31-44。
- 趙榮台、范義彬、袁艾倫、莊鈴木、陳一銘。1999。福山試驗林的大型蛾類（鱗翅目：蠶蛾總科、天蛾總科）。台灣林業科學 14(4): 469-478。
- 鄭明倫、賴郁雯、楊平世。1999。臺灣六座國家公園螢火蟲相概要（鞘翅目：螢科）。中華昆蟲 19(1): 65-91。
- 劉小如、楊曼妙、楊正澤、孫義方、謝宗欣。2000。蘭嶼森林生物多樣性。2000年海峽兩岸生物多樣性研討會論文集（周延鑫等編）。國立自然科學博物館，台中，台灣。
- 劉雨芳、古德祥、張古忍。2002。稻田生態系統中捕食性天敵節肢動物種類調查分析。昆蟲天敵 24(4): 145-153。
- 顏重威。1997。鳳凰谷鳥園鳥類群聚的組成與結構。國立臺灣大學農學院實驗林研究報告 11(4): 49-66。
- 蘇明洲。2001。屏東市國民中學校園木本植物多樣性調查與分析。林業研究季刊 23(2): 47-62。
- Australian Greenhouse Office. 1998. Greenhouse challenge vegetation sinks workbook: A summary. Forestry Technical Services, AACM International, and Clean Commodities Inc.
- CBE Style Manual Committee. 1983. CBE style manual: a guide for authors, editors, and publishers in the biological sciences, 5th ed. rev. and expanded. Bethesda, MD: Council of Biology Editors, Inc.
- CCAB-AP, FAO and CCAD. 2003. Sustainable forest management in Central America: Proposal of criteria and indicators at the forest management unit (FMU). <http://www.iucn.org/places/orma/pdfs/umfi.pdf>. 2003.01.23.
- Chao, A. 1984. Nonparametric estimation of the number of classes in a population. Scandinavian Journal of Statistics 11: 265-270.
- Chi, H. 1988. Life-table analysis incorporating both sexes and variable development rate among individuals. Environmental Entomology 17(1): 26-34.

- Chi, H. 2000. Computer simulation models for sustainability. *International Journal of Sustainability in Higher Educations* 1(2): 154-167.
- Chi, H. and H. Liu. 1985. Two new methods for the study of insect population ecology. *Bulletin of the Institute of Zoology, Academia Sinica* 24(2): 225-240.
- Cochran, W. G. 1977. *Sampling techniques*. John Wiley & Sons, New York.
- Colwell, R. K. and J. A. Coddington. 1995. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. P. 101-118. In: Hawksworth, ed. *Biodiversity: Measurement and estimation*. Chapman & Hall, London.
- Fisher, R. A., A. S. Corbet and C. B. Williams. 1943. The relation between the number of species and the number of individuals in a random sample of an animal population. *Journal of Animal Ecology* 12: 42-58.
- Good, I. J. 1953. Population frequencies of species and the estimation of population parameters. *Biometrika* 40: 237-264.
- Hassell, M. P. 1978. *The dynamics of arthropod predator-prey system*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Kershaw, K. A. and J. H. H. Looney. 1985. *Quantitative and dynamic plant ecology*. Arnold, London.
- Krebs, C. J. 1999. *Ecological methodology*. Addison Wesley Longman, New York.
- Legendre, L. and P. Legendre. 1983. *Numerical ecology*. Elsevier, New York.
- Leslie, P. H. 1945. On the use of matrices in certain population mathematics. *Biometrika* 33: 183-212.
- Leslie, P. H. 1948. Some further notes on the use of matrices in population mathematics. *Biometrika* 35: 213-245.
- Lewis, E. G. 1942. On the generation and growth of a population. *Sankhya* 6: 93-96.
- Lotka, A. J. 1922. The stability of the normal age distribution. *Proceedings of National Academy of Science, USA* 8: 339-345.
- Ludwig, J. A. and J. F. Reynolds. 1988. *Statistical ecology*. John Wiley & Sons, New York.
- MacArthur, R. H. 1972. *Geographical ecology: Patterns in the distribution of species*. Harper & Row, New York.
- Magurran, A. E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

- McQuarrie, D. A. 1973. *Statistical thermodynamics*. University Science Books, Mill Valley, CA.
- Morin, N. R. 1992. The importance of computerization in national biological surveys. 楊遠波(譯)：國家生物資源普查電腦化之重要性。台灣生物資源研究現況 (彭鏡毅編) 第 13-23 頁，中央研究院植物研究所，台北，台灣。
- Moore, P. D. and S. B. Chapman. 1985. *Methods in plant ecology*. Blackwell, Oxford.
- Pennings, S.C. and R. M. Callaway. 1996. Impact of a parasitic plant on the structure and dynamics of salt marsh vegetation. *Ecology* 77 (5): 1410-1419.
- Phillips, O. L., P. Hall, A. H. Gentry, S. A. Sawyer and R. Vásquez. 1994. Dynamics and species richness of tropical rain forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 91: 2805-2809.
- Phillips, O., P. Hall, S. Sawyer and R. Vásquez. 1997. Species richness, tropical forest dynamics, and sampling: response to Sheil. *Oikos* 79(1): 183-187.
- Raven, P. H. 1992. The importance of national biological inventory. 彭鏡毅(譯)：建立國家生物資源資料庫的重要性。台灣生物資源研究現況 (彭鏡毅編) 第 1-12 頁，中央研究院植物研究所，台北，台灣。
- Ricklefs, R. E. and G. L. Miller. 1999. *Ecology*, 4th ed. W. H. Freeman and Company, New York.
- Shannon, C. E. 1948. The mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27: 379-423, 623-656. July and October, 1948. Reprinted in: Shannon, C. E. and W. Weaver. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana and Chicago. 1963: p. 29-125,
- Sheil, D. 1996. Species richness, tropical forest dynamics and sampling: questioning cause and effect. *Oikos* 76(3): 587-590.
- Sheil, D. 1997. Further notes on species richness, tropical forest dynamics and sampling - a reply to Phillips et al. *Oikos* 79(1): 188-190.
- Simpson, E. H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163: 688.
- Solow, A. R. and S. Polasky. 1999. A quick estimator for taxonomic surveys. *Ecology* 80(8): 2799-2803.
- Southwood, T. R. E. 1978. *Ecological methods*. Chapman and Hall, London.

- Synnott, T. J. 1979. A manual of permanent plot procedures for tropical rain forests. Tropical Forestry Papers 14. Department of Forestry, Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford.
- Thompson, S. K. 1992. Sampling. John Wiley & Sons, New York.
- Wang, J. P., M. H. Lin, Y. L. Tsao, Y. T. Kao, and H. Chi. 2002. Life Tables of *Schmackeria dubia* (Kiefer) (Copepoda: Calanoida) at Different Temperatures and Salinities. The 8th International Conference On Copepoda. July 21~26, 2002, Keelung, Taiwan. (Abstract no. 134).
- Whitmore, T. C. 1989. Guidelines to avoid remeasurement problems in permanent sample plots in tropical rain forests. *Biotropica* 21(3): 282-283.
- Yang, J. T., J. T. Chao and W. Y. Liu. 1994. Collecting crickets (Orthoptera: Gryllidae) using peanut butter bait traps. *Journal of Orthoptera Research* 3: 87-89.