

## 生物多樣性指數—Shannon 公式探源

# A Review of Shannon Formula as Diversity Index Measurement in Ecology

林朝欽 陸聲山\*

Chau-Chin Lin and Sheng-Shan Lu\*

林業試驗所森林保護組，台北市南海路 53 號

Division of Forest Protection, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei, Taiwan

\*通訊作者：sslu@tfri.gov.tw

\*Corresponding author: sslu@tfri.gov.tw

### 摘要

生物多樣性及其量測雖是生態學長久以來的核心研究議題，但也借助其他學科如統計學與數學理論來輔助，資訊理論就是其中之一。它是 Claude Shannon 在 1948 年發表的理論，原先只是為了解決通信工程上如何在不受雜訊影響下傳送資料的問題。1955 年資訊理論被介紹到生態研究上，並成為生物多樣性指數量測的計算式之一，現被普遍使用，但在使用此一指數上產生的問題，例如就指數的名稱來說，就出現三種不同的名稱：Shannon、Shannon-Wiener、Shannon-Weaver，此外公式本身亦有引用疑慮的問題。本文就這些問題以文獻回顧與分析的方式，將 Shannon 生物多樣性指數的數學式背景、生態學引用的過程與意義、以及適當的指數名稱加以討論。

### Abstract

Biodiversity and its measurement are one of the core research topics in ecology for quite a long time. They have been aided by other disciplines such as statistic and mathematic theories. Information theory founded by Claude Shannon in 1948 is one of the mathematic theories. It was developed primarily

for solving communication affected by noise problem. It was introduced into ecological research in 1955 and has become a popular measurement for biodiversity index. However, there were some problems: suitability for its use and confusion in its names, Shannon, Shannon-Wiener, or Shannon-Weaver, in citations. This paper discusses the problems and traced them back to the origin of the theory, the history, and the meaning in ecology, and suggests its proper name to be used in the citation.

關鍵詞：資訊理論、生物多樣性、多樣性指數、保育

Key words: information theory, biodiversity, diversity index, conservation

收件日期：2012 年 3 月 9 日

接受日期：2012 年 6 月 11 日

Received: March 9, 2012

Accepted: June 12, 2012

## 緒言

生物多樣性在生態學教科書中的定義，係指各不同層級生態系中物種的變化，簡單說也就是指地球上不同的生命形式 (Ricklefs 2010)。從人類為主的價值觀看待地球上不同的生命形式，生物多樣性對人類就具有不同價值，例如提供食、衣、住、行、醫藥、工業原料等。由於人類活動，例如土地轉為農用，造成物種基因多樣性之減少及物種瀕臨滅絕危機 (CBD 2010)，為了維護人類生活品質與利益，生物多樣性保育成了重要的議題，也發展量測生物多樣性以作為生態系結構與功能是否健全的衡量標準。為了共同維護與永續利用生物多樣性，1992 年在巴西召開的世界高峰會開始推動全球「生物多樣性公約」，其目的為達成保育、永續利用、及公平分享生物多樣性。在這樣的國際趨勢之下，台灣於 2001 年由行政院核定通過「生物多樣性行動方案」，進行交流、研究、教育及保育生物多樣性。在

此行動方案下，國內對於生物多樣性研究也如火如荼展開，齊等(2003)針對台灣生物多樣性已發表的研究進行分析，發現許多論文都會計算生物多樣性指數，其中之一是引用資訊理論 (Information Theory) 的 Shannon 生物多樣性指數，但在使用此一指數上卻產生一些問題，例如就指數的名稱來說，就出現三種不同的名稱：Shannon、Shannon-Wiener、Shannon-Weaver，齊等(2003)認為 Shannon-Weaver 是誤用的名稱，並指出國外許多教科書早已提出此種誤用。但這種名詞誤用或混淆的情形也見諸國外文獻，Spellerberg and Fedor(2003)也針對此現象提出討論。不過上述兩篇論文都沒有詳細討論名詞誤用或混淆的原因、背景、以及生態學應用資訊理論的發展過程，基於正本清源，本文就此問題以文獻回顧與分析的方式，將 Shannon 生物多樣性指數的數學式背景、生態學引用的過程與意義、以及適當的指數名稱加以討論。

## 資訊理論

生物多樣性及其量測研究之所以讓生態學家青睞，乃基於三個原因：1.生物多樣性議題一直是生態學領域的熱門研究；2.生物多樣性的量測值是生態系結構與功能是否健全的衡量標準；3.如何量測生物多樣性一直是生態學者論辯的問題(Magurran 1988)。生物多樣性及其量測雖然是生態學長久以來的核心研究議題，但卻是借助其他學科來輔助研究，資訊理論就是其中之一(Magurran 2004)。它是 Claude Shannon 在 1948 年發表的理論，原先只是為了解決通信工程上如何在不受雜訊影響下傳送資料的問題(Shannon 1948)。然而當這個理論提出後，卻影響深遠且成為其他學科引用的理論。

何謂資訊理論？簡單的說是運用機率論與數理統計的方法，研究通信過程中訊息(message)傳輸與訊息處理系統中一般規律的理論。它源於通信工程並具有狹義與廣義的概念：1.狹義的資訊理論，指應用統計方法研究通訊系統中訊息傳遞和訊息處理的共同規律；2.廣義的資訊理論，則指應用數學和其他有關科學方法研究現實系統中一切訊息傳遞和處理、訊息識別和利用的共同規律(Shannon 1948)。資訊理論的內容主要是探討訊息量及其量測、傳輸模式、資訊源編碼、通道編碼(channel coding)。首先，資訊理論定義了資訊這個詞，在Shannon的資訊理論中資訊的定義與一般認知的語意不同，資訊的定義專指通信中一個訊息可以自由選擇的量測，與這個訊息的內容及意義完全無關。因為它必須可以量化，所以需有單位，這個單位以訊息可以自由選取狀態的數量來表示。Shannon在1948年的論文中，首次使用「位元」(bit) 這個詞作為資

訊計量時要用到的單位，這個詞其實是貝爾實驗室同事John Tukey在1947年建議的，當時Tukey使用「二進位數字」(binary digit)，這兩個字縮寫成位元這個更簡單的字(Shannon and Weaver 1949)。如果以投擲一枚硬幣來看，我們可以處理或預測出現正反當中任何一面的資訊量是1位元，因為一枚硬幣正反面出現的機率相等，各為1/2，以Shannon公式計算 $H=1$ 。如果是32個英文字母，要逢機選取其中一個字，我們就面臨處理較大的資訊量，由Shannon的公式計算 $H=5$ ，比預測一枚硬幣出現正反面所要處理的資訊量來得多。有了這個資訊單位之後，Shannon討論到通信過程中資訊源在隨機過程(stochastic process)中產生訊息的特點是：下一個訊息產生決定於上一個訊息或前面已出現訊息的機率，這樣的過程也就是數學模式的馬可夫過程(Markoff process)，或稱為馬可夫鏈(Markoff chain)(郭1992)。這是收集時間序列資料時要知道的統計均衡狀態的問題，如果收集到的時間序列分成不同時段來觀察，則在不同時段中所對應的隨機過程，如果其統計性質幾近相同，這樣的隨機過程所呈現的統計均衡狀態稱為穩定的過程，如果馬可夫鏈是遍歷的(ergodic)，也就是若一開始就遵循一個起始分布出發，則它所衍生的過程將會是穩定的(郭1992)。在資訊源是馬可夫過程的前提下，Shannon要解決的是量測在這樣的過程下產生資訊量或者說資訊產生率，Shannon認為這具有隨機的不確定性(uncertainty)的一種量測，可以透過機率的統計方法對資訊源的資訊量進行計算，據此概念Shannon於是推導出數學式  $H(X) = -\sum_{i=1}^{k} p(X_i) \log p(X_i)$  處理資訊量。其中 $p(X_i)$ 為事件X的機率，Shannon公式所表示的資訊量是指資訊的統計平均不確定性的量。Shannon完成這個數學式

後，更進一步發現這個公式與統計力學(Statistical Mechanics)中對應的熵(entropy)的表示法相似，因此資訊量概念與熵可以聯接起來。

熵是法國物理學家 Rudolf Clausius 在 1862 年提出的名詞，此中譯字熵的由來，係 1923 年胡剛復教授為赴大陸講學的外國學者翻譯時所用，其認為 S 為熱量與溫度之商，且此概念與火有關，故於商加上火字旁而成一新字(馮及馮 2005)，其概念是一個不受外部干擾的系統向內部最穩定狀態發展的特性。以數學式  $dS=dQ/T$  表示在一個可逆性的過程中，被使用在恆溫(T)的熱量的總數(Guizzo 2003)，其中 dS 為系統熱量變化，dQ 為流入系統的熱量，T 則為熱力學溫度。此數學式其實是熱力學中用以量測無法提供轉換成有用功的熱能的一個物理量，1800 年代蘇格蘭物理與數學家 James Maxwell 與統計學家 Ludwig Boltzmann 等人將古典的熱力學理論延伸並發展出統計力學，它屬於物理學的一個分支(胡 1986)。統計力學研究分子與原子集合的規律行為，使用的方法是統計，討論系統與粒子間關係可對應到熱力學的熵。Shannon 透過數學推導證明資訊量與統計力學所論述的熵之間結構相似，統計力學熵是個別粒子(particle)在某一微觀狀態(microstate)的機率，而所有的粒子是在同一個巨觀狀態(macrosate)下進行評估，可以說是在量測隨機程度(degree of randomness)一個狀況，與前述的資訊源發出訊息是具有隨機的不確定性，在結構上是相似的。如果以紙牌遊戲來看，按照牌面依序排列後，洗牌代表其結果使牌趨向無規律，亦即無規律排列的機會比有規律排列多。因此，如果要對一副任意排列的牌進行描述，需對 52 張牌中每一張位置能具體確定，如此

做需要更大的資訊量，這符合系統由不太可能狀態變成更加可能狀態是熵增加過程，因而從數學的推導，可以把熵、資訊量、規律、無規律的概念聯繫在一起。

## 資訊理論發展的謎團

因為 Shannon 的資訊理論是建構在適用於通信上傳輸的各種資料，包括離散(discrete)資料如書寫型態的講稿信息、連續(continuous)資料如口語的演講，音樂等信息以及兩種混合，例如混合有書寫與口語的信息等三種類型，Shannon 資訊理論的數學式推導包括了這三種類型資料的傳輸，但在連續資料傳輸上，麻省理工學院教授 Norbert Wiener 已解決信號接收後的雜訊濾除數學上的問題，並在 1948 年稍後於 Shannon 發表他的論文幾個月，Wiener 也出版一本有關控制理論(cybernetics)的書，這本書副題為動物與機器的控制和通訊，該書第三章討論時間序列、資訊與通信，與 Shannon 的理論一樣也把資訊與熵連結在一起(Wiener 1948)。因為這樣的巧合，所以引發了科學界對於資訊理論，到底是 Shannon 單獨或 Wiener 和 Shannon 共同有貢獻的爭論。

在統計學或數學領域中論及連續性的資訊量測時通常把 Shannon-Wiener 或 Wiener-Shannon 並列(Fano 1950; Ikeda 1960)；引用這個數學式或資訊理論的人也有認為這個理論是兩人各自研究發展出來的(Krebs 1985; Magurran 1988)。持這種看法的理由有下列幾項：首先是 1948 年 Shannon 自己在他的論文誌謝中特別感謝 Wiener 在通信理論基本哲學上的貢獻與啟發，並認為也該歸功於 Wiener。其次從 1949 年 Shannon 與 Warren Weaver 共同列名作者的書，Weaver 在論文中

也提到Wiener的貢獻，這本書由伊利諾大學出版社刊印 (Shannon and Weaver 1949)，之後成爲通信工程上極重要的一本書。Weaver不但是數學家，也是科學研究管理者，1940年美國羅斯福總統成立國家防衛研究委員會(National Defense Research Committee, NDRC)，由麻省理工學院教授Vannevar Bush領導這個委員會，Shannon曾在攻讀碩士學位時爲Bush工作過，國家防衛研究委員會結合了大學與工業研究單位進行軍事相關問題的研究，其中有一項是研究預測機槍對飛機射擊的問題，Bush於是邀請在洛克斐勒基金會工作的Weaver來主持這項工作，Weaver把與控制理論有關的計畫交給了Wiener及貝爾實驗室，後來Wiener完成了一份機密報告，Shannon在貝爾實驗室工作期間推測應該讀過那本報告，因此Wiener被認爲是此理論共同發展者(Guizzo 2003)。另外是Wiener自己在1956年公開宣稱過資訊理論是Shannon與他各自有貢獻所發展出來的(Wiener 1956)。還有1945年Shannon曾發表過一篇與密碼有關的論文，其中有一節標題爲「機率、資訊與不確定性」，這一節的內容重現於它1948年的論文，但標題改爲「機率、不確定性與熵」，可見Shannon把資訊與熵連結在一起是1945年以後的事，Shannon更改這個標題的背景雖是個謎，但Shannon承認是有人建議他的(Guizzo 2003)。最後是1948年Wiener的控制論出版後，Shannon發現Wiener也提出資訊就是熵的看法，並曾寫信給Wiener討論書中有關資訊與熵連結在一起的相似看法與數學推導問題。

雖然因上述的理由認爲Wiener也是資訊理論創建者之一，但Wiener在麻省理工學院的同事Robert Fano認爲Shannon才是資訊理論發展關鍵的人(Guizzo 2003)；其次在1998年

一篇名爲「Shannon理論 50年回顧」的論文中認爲：Shannon與Wiener在資訊與熵連結是不同的觀念，資訊理論是Shannon完成的(Verdu 1998)。另外Shannon自己在1982年接受口述歷史學者Robert Price訪問(Price 1982)時也宣稱：雖然在麻省理工學院求學時修過Wiener一門課，但就資訊理論本身Wiener並沒有很重要的影響，反而是貝爾實驗室發表在1924年(Nyquist 1924)與1928年(Hartley 1928)的兩篇論文才是主要的影響；除此，Shannon並詳細說明了資訊理論其實早在1940-1941年間他在普林斯頓大學任研究員時就構思及進行研究，在1948年論文中對Wiener的誌謝是針對他解決通信雜訊問題的貢獻。因此，資訊理論是誰所創？雖有爭論，也避免不了各領域研究者引用資訊理論時的個人認定，但Shannon站在過去許多數學家所建構的基礎上，集其大成完成的資訊理論似乎是科學界的定論。

## 資訊理論在生態學上的應用

資訊理論被介紹到生態研究上首推美國生態學家Robert MacArthur，他具有數學碩士的背景，他把馬可夫鏈套用在食物鏈中能量流的關係上，並指出如果食物鏈的所有連結循環達於穩定，也就是Shannon資訊理論訊息傳輸過程中馬可夫鏈的遍歷狀態(MacArthur 1955)。MacArthur把Shannon的資訊理論中訊息產生機率 $P_i$ 當成生態系中所有活動(能量流)的成份加以應用，但他的介紹並未獲得後續的發展，其原因或許是系統能量流的量測不易，而生態學家則習慣於傳統數學研究生態群聚中族群大小與物種的量。1957年西班牙巴塞隆納大學生態學家Ramon Margalef轉而把 $P_i$ 當成是

族群中包含的個體數的比例(或者是生物量的比例)來看待(Margalef 1957),所以有了Shannon生物多樣性指數的產生。Margalef在他的論文中特別提到統計是提供生態研究上精確發展、描述、解釋觀測的工具,而數學則是讓生態研究具有數量佐證的語言,資訊理論就是他認為具有這樣特性的工具與語言。他認為一個具有許多物種的群聚或混合族群,不論使用樣區、穿越線去進行物種調查,當我們鑑定了不同物種後,我們便獲得一系列名稱,這樣的名稱系列似乎類似我們獲得一系列的訊息,這樣的一系列訊息有它的值與結構,代表了每一物種分離的關係以及其空間上與其他眾物種的關係,而每一個訊息所攜帶的資訊如年齡、活動力等就是這個群聚的描述。特別是生物多樣性的研究, Margalef認為可以引進資訊理論的數學式來描述群聚。但眾所週知生物多樣性研究從名詞、概念內涵到量測一直是生態學上沒有定論的議題(Hurlbert 1971; Peet 1974; Magurran 2004),例如Shannon公式是否適用於不同取樣方法的調查或樣本太小的研究(Pielou 1966);又如Magurran (2004)在他第一本有關生物多樣性量測的書(Magurran 1988)出版15年後,出版了更新版,不但書名改了,生物多樣性量測方法的歸類也變換。尤其在第一章詳論了生物多樣性文獻使用上的三個名詞: biodiversity、biological diversity、ecological diversity, Magurran統計了1986-2001年間的文獻顯示這三個名詞的主流使用是biodiversity這個詞,它進一步被定義為與物種豐富度(species richness)及相對豐量(abundance)是同義詞(Hubbell 2001)。另外Magurran也發現biodiversity這個詞具有生態學與環境運動兩層概念,並特別提出釐清這兩層概念的必要性,他認為與政治、環境倫理、環境經濟、瀕危物種保

育、農藥使用等有關的生物多樣性議題屬於生物多樣性運動(biodiversity movement),而生物多樣性的科學概念(concept of biodiversity)則是物種變化與豐量的探討。它可以分為兩個部份:物種豐富度與物種勻度(evenness),它們代表了群聚的形塑與大小,混合物種豐富度與物種勻度用另外一個簡單的詞異質度(heterogeneity)來表示(Magurran 2004)。雖然物種豐富度與物種勻度分別可以用來解釋生物多樣性,但要表示混合兩者的概念仍然需要一個量測後的值。因此,所謂的生物多樣性指數的建構是必要的,可是顯而易見的是不可能有一個完美的指數可以量測到既強調物種豐富度又強調物種勻度。所以生態學界有多種生物多樣性指數出現,例如Simpson生物多樣性指數便是其中也被廣泛使用的(Peet 1974), Shannon生物多樣性指數不過是其中之一,只不過是它在Margalef把資訊理論介紹到生態學界後被普遍使用,但也造成一些混淆不清的用法與討論。

## Shannon 生物多樣性指數之使用

生物多樣性可以量測是基於三個假設前提:1.所有物種都平等的;2.所有個體是平等的;3.物種豐富量以適當且可以比較的單位表示(Peet 1974)。據此假設前提引用Shannon資訊理論來量測異質度就像在量測不確定性,這種量測是逢機從族群中選取某一個體而得(Pielou 1966),可以說是統計學上的一個方法。因此, Magurran(2004)把生物多樣性指數計算的各個方法歸納成兩類:1.具統計分布假設的有母數計算;2.不具嚴格統計分布假設的無母數計算。引用Shannon資訊理論的生物多樣性指數屬於無母數這一類方法,

Magurran(2004)討論了引用資訊理論在解釋生態現象上的困難問題，例如如果要比較兩地的生物多樣性分別為  $H' = 2.35$  與  $H' = 2.47$ ，到底是差別很大還是沒什麼差別，雖然有些研究把這個值轉成  $e^{H'}$  的方式來作比較，如  $H' = 2.35$  為  $e^{H'} = 10.49$ ，而  $H' = 2.47$  為  $e^{H'} = 11.82$ ，但這種轉換方式仍難以說明差異。另外 Pielou(1966)認為引用 Shannon 資訊理論來量測有其限制；齊等(2003)也指出這種限制，他們認為 Shannon 資訊理論的數學式使用條件是  $P_i$  需確為群聚中相對豐度，否則會產生生物多樣性指數隨調查年度逐年增加的現象。雖然如此，但 Shannon 生物多樣性指數將仍然是生態學家引用的一個傳統計算式。

至於指數的名稱問題雖與生物多樣性的實質或科學性無關，但卻涉及到專有名詞的統一性與標準性，另外還涉及到文獻的引用問題。首先，就名稱問題來看，Spellerberg and Fedor(2003)從 BIOSIS 文獻資料庫統計 1993-2002 年間具有生物多樣性指數的論文中共有 1,105 次使用 Shannon、214 次使用 Shannon-Wiener、165 次使用 Shannon-Weaver。本文也針對台灣特有生物研究保育中心所發行的「台灣生物多樣性研究」、及其前身「特有生物研究」進行統計，2003-2011 年間共有 6 篇論文提到生物多樣性指數，其中 2 次使用 Shannon、3 次使用 Shannon-Wiener、1 次使用 Shannon-Weaver。Krebs(1985、1999)的生態學教科書以註記的方式指出：資訊理論的數學式是 Shannon、Wiener 各自推導完成，但目前多以 Shannon 指數或 Shannon 資訊指數稱之，Shannon-Weaver 書寫方式是一種錯誤的標題。Krebs 並未說明或提供引用文獻作為錯誤原因的佐證；齊等(2003)也提到國外教科書早已指出 Shannon-Weaver 是錯誤的用法，但他們

並未指出是那幾本教科書，在他們的論文中傾向使用 Shannon-Wiener 這個名稱。Magurran 在其 2004 年出版的書中除引用 Krebs 1999 年的說法外，他認為錯誤可能的原因是因為 Shannon 和 Weaver 在 1949 年共同出版的書，加上 Weaver 與 Wiener 拼音近似而造成混淆，他則傾向使用 Shannon 指數。顯然 Magurran 在他的新書出版前並未看到 Spellerberg and Fedor 2003 年的論文與名詞統計，Spellerberg and Fedor 認為不論 Shannon 指數或 Shannon-Wiener 指數均可接受，因為 Shannon 在他的 1948 年的論文的誌謝中提到他的理論也應歸功於 Wiener，因此認為資訊理論的數學式似乎是兩人共同完成，而 Shannon-Weaver 指數是不正確的，雖然 1949 年 Shannon 的論文重印並與 Weaver 的解說性論文放在一起成為共同作者的一本書，因為 Weaver 除把資訊理論作了深入的文字解說外，與數學式本身毫無關係 (Spellerberg and Fedor 2003)。但事實上如本文前面「資訊理論發展的謎團」一節的歷史回顧，使用 Shannon-Wiener 這個名詞似乎也不恰當。因此，本文認為如果是提及資訊理論的數學式宜只使用 Shannon，所以使用 Shannon 數學式當成生物多樣性指數計算式時，宜稱 Shannon 生物多樣性指數。

其次文獻的引用問題，論文中列出 Shannon 數學式時是否需要加註引用文獻？如果使用，應該用 Shannon(1948)或是 Shannon and Weaver(1949)或是某一篇論文曾經使用過此數學式？從網際網路國內外的論文檢索所得分析大概有三種類型出現：沒有出處、引用 Shannon(1948)或 Shannon and Weaver(1949)、引用其他論文或書籍，其中以引用 Shannon and Weaver(1949)居多(例如 Pielou 1966; Ulanowicz 2002; 陳及李 2004; 邱等 2011)。上述的結果

顯示：在論文中使用數學式時的引用似乎沒有一定的標準。但如果以原始引用 (primary reference) 慣例，Shannon(1948)比較符合學術論文的一般慣用方式。然而Shannon 1948 年的論文，在同卷分兩期的出版總頁數達 79 頁，隔年修正並重印為單行本也達 55 頁，其中包含 23 個定理及 7 個附錄的數學證明，且這些數學式所討論的內容與生態學毫無關係，它的數學式名稱也非Shannon生物多樣性指數，而是定理二(Theorem 2)，任何人要如此引用至少要讀過原文 11 頁才能看到定理二的數學式，很難相信寫生物多樣性論文的人會仔細讀它。因此，本文認為使用Shannon論文中的數學式並不需要引用，如認為必須引用則以Shannon(1948)較為合適。

## 結論

全球物種數最新的估計約有 8.7 百萬種 (Strain 2011)，但全球生物多樣性消失的速度也持續增加，就種的數量而言，從 1970 年到 2006 年脊椎動物物種豐度平均減少三分之一，聯合國生物多樣性公約原定 2010 年底之前大幅降低生物多樣性喪失的速度，這個目標在 2010 年 5 月已正式宣佈失敗(CBD 2010)，並在 2010 年 10 月於日本名古屋生物多樣性高峰會重新訂定 21 世紀的新目標。可見生物多樣性議題與研究的重要與迫切，其中監測生物多樣變化所需的指數是關鍵的工具，無論是要了解物種層次的生物多樣性、物種多樣性的時空變化、還是評估物種多樣性在干擾後的改變，引用Shannon資訊理論的生物多樣性指數，已普遍見諸於生態學界。但在統計與數學理論上仍需加強其引用適宜性的辯證，且由於使用此數學式對於調查或監測的物種的樣本大小的敏感

性，引用時仍需有所考慮。除此，引用此理論的數學式時對其名稱、理論來源與內容的了解，均有助於更適切使用此理論的真正內涵。

## 引用文獻

- 邱英哲、沈子耘、黃家勤、王一匡、許晉榮、葉信利。2011。七股瀉湖潮間帶底棲多毛類群聚及其與環境因子之關係。台灣生物多樣性研究 13(2): 135-151。
- 胡進錕。1986。見微知著：統計力學發展概況。科學月刊 17(3): 166-169。
- 馮端、馮少彤。2005。溯源探幽—熵的世界。科學出版社，北京。293 頁。
- 陳高松、李英周。2004。台灣東北部卯澳灣海域之海膽生物多樣性研究。特有生物研究 6(1): 1-16。
- 郭美惠。1992。時間序列模型的定長分配。數學傳播 16(4): 1-5。
- 齊心、黃玉冰、戴佑達、吳宜穎、劉人瑋。2003。由國內生物多樣性論文談生物多樣性研究。生態系經營-永久樣區理論與實務探討研討會論文集，335-360 頁。行政院農業委員會林務局。
- Convention of Biological Diversity (CBD). 2010. Secretariat of the Convention on Biological Diversity. Global Biodiversity Outlook 3. Montréal, 94 pages.
- Fano, R. M. 1950. The information theory point of view in speech communication. The Journal of the acoustical Society of America 22(6): 691-696.
- Guizzo, E. M. 2003. The essential message: Claude Shannon and the making of information theory. Massachusetts Institute of Technology.

- Hartley, R. V. L. 1928. Transmission of information. *Bell System Technical Journal* V7(i3):535-562.
- Hubbell, S. P. 2001. *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Hurlbert, S. H. 1971. The nonconcept of species diversity: a critique and alternative parameters. *Ecology* 52(4): 577-586.
- Ikeda, S. 1960. Continuity and characterization of Shannon-Wiener information measure for continuous probability distributions. *Mathematics and Statistics* 11 Supplement 1: 131-144.
- Krebs, C. J. 1985. *Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance* (3e). Happer and Row, Publishers. New York, USA.
- Krebs, C. J. 1999. *Ecological methodology*. Harper and Row, Publishers. New York, USA.
- MacArthur, R. 1955. Fluctuations of animal population and a measure of community stability. *Ecology* 36(3): 533-536.
- Magurran, A. E. 1988. *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA.
- Magurran, A. E. 2004. *Measuring biological diversity*. Blackwell Publishing. Oxford, UK.
- Margalef, D. R. 1957. Information theory in ecology. *General Systems Year Book* 3: 36-71.
- Nyquist, H. 1924. Certain factors affecting telegraph speed. *Bell System Technical Journal* V3(i2): 324-346.
- Peet, R. K. 1974. The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics* 5: 285-307.
- Pielou, E. C. 1966. Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse. *The American Naturalist* 100(914): 463-465.
- Price, R. 1982. Oral-history: Claude E. Shannon. Interview #423 for the IEEE History Center, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Ricklefs, R. E. 2010. *The economy of nature* (6e). W. H. Freeman and Company, New York.
- Shannon, C. E. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27: 379-423 and 623-656.
- Shannon, C. E. and W. Weaver. 1949. *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press, Urbana, USA.
- Spellerberg, I. F. and P. J. Fedor. 2003. A tribute to Claude Shannon (1916-2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity, and the 'Shannon-Wiener' Index. *Global Ecology and Biogeography* 12: 177-179.
- Strain, D. 2011. 8.7 million: a new estimate for all the complex species on earth. *Science* 333:1083.
- Ulanowicz, R. E. 2002. Information theory in ecology. *Computers and Chemistry* 25: 393-399.
- Verdu, S. 1998. Fifty years of Shannon theory. *IEEE Transactions of Information Theory* 44(6): 2057-2078.
- Wiener, N. 1948. *Cybernetics: Or control and*

communication in the animal and the machine. John Wiley and Sons, INC., New York, USA.

Wiener, N. 1956. Editorial: What is information theory. IEEE Transactions on Information Theory 2(2): 48.