

都市生態研究的演進與展望

◎林業試驗所植物園組・范素璋 (swfan@tfri.gov.tw)

◎林業試驗所副所長・邱祈榮

都市裡的生態研究不再迴避人為因子，相反的更加重視人的影響，因此被視為達成人類與自然共存發展的有效方法。都市長期生態研究擴大了我們對都市物種的生態學知識。例如：外來物種如何改變當地物種的優勢情形，衝擊物種多樣性？都市化土地利用方式改變如何造成植群形相與組成的轉變，如何影響原有的營養階層關係？本文中我們挑選了一些都市生態研究案例來說明生物多樣性如何受到都市化的影響，並於最後陳述都市生態學的轉變及近年來的發展趨勢。

都市化對營養階層動態的影響

由於都市化對「環境的改良」及外來物種引入，植物、植食性及捕食性節肢動物及分解者的物種數一般會持平或增加，而脊椎動物，如：鳥類、兩棲動物、爬蟲類及哺乳動物種數多半會下降(Sullivan and Flowers 1998)。但由於營養階層間會產生反饋作用而相互影響，各階層的數量是變動的。鳳凰

城生態研究對鳥類、植食性昆蟲及植物做調查，發現因為沙漠土壤缺乏水分與養分，各營養階層的物種數量受到限制，是自下而上的控制(bottom-up or resource control)。當沙漠轉變為都市後，由於養分供給無虞，生物與生物間的交互作用顯得更為重要。在比較鳳凰城不同環境下鳥類及植食性昆蟲數量變化的操控實驗中，顯示在都市環境中，架設網子排除鳥類後昆蟲密度會增加，但沙漠則無影響。食物網中階層的植食性昆蟲，儘管透過自下而上的資源提升而有較高的數量，但隨著鳥類密度增加，會受到自上而下的控制(top-down control)約制其數量(圖1)。

學者也發現郊區庭園與都市入侵後殘存沙漠的結果相似(圖2)，這意味著在都市裡劃設保留區，雖能保存相似的植群，卻不一定能將相關的昆蟲保存起來。相似的殘留沙漠生物相已然不同，可能原因包括：來自周圍

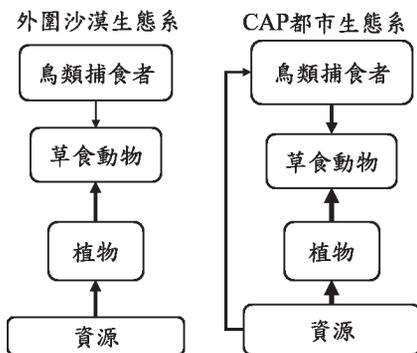


圖1 鳳凰城(CAP)外圍沙漠地區及都市生態系的營養階層動態。(翻譯自Faeth et al. 2005)

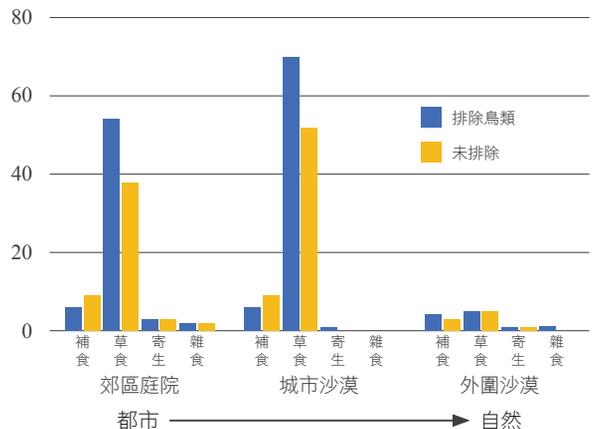


圖2 不同都市化程度下昆蟲數量受生物因子影響的情況。(修改翻譯自Faeth et al. 2005)

表1 都市生態系統的共同特徵及其對食物網的預期後果。

特徵	預期變化
破碎化(包括殘餘物或重建的原始棲息地)	物種組成快速變化 都市食物網動態的空間異質性增加 與原棲息地不同的殘餘食物網
減少頂級捕食者	食物網下階層釋放 增加競爭及中階層食蟲動物自下而上的控制 由於中階層食蟲動物的控制，強化了草食動物的自下而上控制
生產力改變*	自下而上控制的增加或減少 減低族群在時間上波動
環境逆境因子的變化*(如溫度、養分)	增加或減少由逆境因子所引導的控制 轉向更抗壓或更不抗壓的生產者和消費者
物種組成變化	自下而上和自上而下控制的增加或減少 改變營養階層的數目 區域滅絕或相關物種增加
人類活動(由社會、制度過程和價值觀所導致)	改變食物網結構、操控和動態 時間及空間的尺度可能取代部分生態過程

*表示根據都市所在的環境(沙漠、溫帶森林、熱帶雨林、草原等)所有的生物相而不同(翻譯自Faeth et al. 2005)

區域的都市特徵種(例如：食草蚜蟲和雜食性鳥類)不斷湧入、原生物對都市熱島效應的敏感性，以及氮和二氧化碳的增加改變了植物的物候和養分等等。

表1羅列了一些都市特性對食物網的影響，調控方式似乎如前述般大致有一定的方向，卻十分複雜，而且特性間並非互不干擾。例如，提高生產力可能降低捕食者間或草食動物間的競爭，增加兩者的數量；生產力的提高可能來自頂級捕食者減少引發食物網朝下的梯瀑效應，而使草食動物減少時發生。再者人為與非人為因子的重要程度可能轉換。當沙漠或森林開闢為停車場轉化成草坪，當地原有的食物網結構則立即消失。隨公園綠地和市郊地區的老化，其營養階層結構可能重新發展，生態演化過程又變得比人類活動更為重要。從事都市生態研究還有一個重要的意義，當生態現象被揭示後也可能來引發人類活動的反饋，使個人和社會組織採取行動來保持當地食物網的多樣性。

人類對於都市植物多樣性的影響

在森林生態系中，物種歧異度在中度都市化時最高，那時森林相對應的面積比例仍是高的，森林的物種得以保存下來且增加了都市物種。在高度都市化環境下原有森林物種消失，種類為較少的都市物種取代，因此總物種數較低。而在未開發的沙漠生態系中，多樣性通常受生物物理因素控制，主要是降水、土壤質地和營養含量。實驗發現增加水分供給，沙漠中的生物密度及種類均增加，單位面積下沙漠的物種豐富度通常高於都市地區；但透過苗木的貿易引進，都市生態系的總物種庫數量(species pool)可能高於沙漠。

都市地區的植物多樣性更受到人的影響，如家庭收入和景觀美學觀點等。學者們發現鳳凰城的三種地景形式隨科技發展而轉變(Martin 2001, Martin et al. 2003)。在空調設備出現之前，最常見的庭園景觀是草坪上種植有特色的遮蔭樹和開花灌木，目的是減少活動空間周圍的熱量。這種景觀類型由灌溉

系統所支持，樣貌模仿美國東部的景觀美學，但不一定是相同物種。一旦空調變得普遍，居民轉而營造碎石乾生景觀，特色是在無機覆蓋物上種植低耗水植物(Martin 2001)。Martin等人(2003)認識到第三種常見的景觀美化類型，稱作綠洲，它融合了乾燥和中性景觀的元素，在一個景觀中同時包含無機覆蓋物和草坪。當地景觀美學差異主要是房主選擇的結果，在都市生態系中產生植物組成明顯差異。

有關於都市植物多樣性的控制概念如下圖3，透過鄰里屋主協會(HOAs)來調控總物種庫的多樣性是自上而下的人為調控(top down regulation)。所謂的「Luxury effect」發現有錢人傾向種植多年生的植物，可以使用額外的可支配所得來加以支應，此為自下而上的人為力量(bottom-up anthropogenic forces) (Hope et al. (2003))。

社會經濟資料與植群資料的整合分析

人類對於生物的感知可能影響植栽樣貌及都市植群的存續，確定都市生態系統時空變化與鄰里社會經濟因子之間的連結，對於都市動植物群體的管理及人與其他物種生存平衡至關重要。以下面的例子用來說明社會-生態的整合分析。

這個研究是著眼於人類對植物的感知，以了解樹木在都市生態系統中扮演的角色。一般認為樹冠覆蓋與搶劫、盜竊和槍擊等暴力犯罪有關。然而，Troy等人(2012)卻發現這種關係其實是負向的，樹木並未隱匿罪犯、違禁品或非法活動。他們發現當巴爾的摩地區的樹冠增加10%，犯罪率下降了12%。即使在控制收入、房屋年齡、農村、種族，房屋

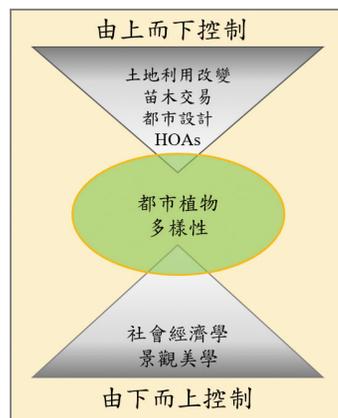


圖3 都市植物多樣性的人為控制概念。(翻譯自Walker et al. 2009)

類型、使用長短、鄰境地區農業或受保護土地數量等等社會經濟變數的情況下，犯罪率與樹冠覆蓋率仍呈負相關。在公共土地上的樹木覆蓋效果更好，似乎表示在公共土地上植樹將比私人土地更能減少犯罪。仔細探究分析結果，卻有幾個街坊顯示樹冠覆蓋與犯罪增加有關：這些街坊出現在住宅和廢棄工業土地區之間的接觸地帶；相對較低的街坊監視可能導致犯罪的存在。

都市生態學的躍進，由 Ecology in, of, 至 for cities

Ecology in cities是使用傳統野外生態學方法，在都市地區進行研究，了解都市化與發展如何影響都市生態環境的生態學，是探索都市生態問題的經典。例如，了解都市化如何影響生物多樣性、檢驗多個分類群及其相互作用。如同我們之前提的第一個例子，設計實驗探查都市生物現象的格局、過程，以及與非都市系統的差異。儘管越來越多人透過跨領域的學科合作將社會經濟因子如：社會結構、偏好和組織如何影響都市空間的生態動態放入研究，但Ecology in cities仍然偏好都市生態系的生物物理動態(表2)。

為了擴大都市生態系概念，並表明都

表2 都市研究中仍然需要透過生態學來解決的關鍵問題。

- ▶ 生態群落結構如何影響不同棲息地類型的生態系統功能？
- ▶ 不同程度的生物多樣性，在不同氣候，多空間尺度如何影響生態功能和服務？
- ▶ 非原生物種的作用是什麼？它們如何影響群落動態，生態系統結構和功能以及生物多樣性和生態系統服務？
- ▶ 競爭，捕食和寄生等生物機制如何解釋都市生物多樣性的變化，以及它們如何與人為的傳播或管理有關？
- ▶ 土壤和介質異質性與微生物和植物群落結構的相互關係是什麼？設計的異質性如何長期影響這些關係？
- ▶ 微生物多樣性如何影響營養循環和生物多樣性的格局？
- ▶ 養分動態，特別是硝酸鹽和磷，如何在不同的都市環境和多種棲息地類型中有所不同？
- ▶ 生物地球化學模式和過程，包括藥物和其他污染物質在各種棲息地類型和都市環境中有何不同？
- ▶ 都市與非都市植物的特徵有何不同，影響植物表現和生態恢復力？
- ▶ 綠地的片段化和大小如何影響其生物多樣性，更新能力和提供生態系統服務的能力？
- ▶ 複合種群的動態(metapopulation dynamics)對都市生物多樣性的作用是什麼？這與都市生態系中的人類活動如何相互作用？
- ▶ 都市環境壓力和擾動如何影響生物地球化學過程，植物生產力，土壤呼吸以及動物行為和生理？
- ▶ 干擾制度及其對都市生態模式和過程的影響如何由人改變？

請注意，列表僅舉例而非完整。(翻譯自McPhearson et al. 2016)

市本身是一個生態系統，Ecology of cities將ecology in cities與許多學門結合在一起(圖4)。其一是明確地將人類視為都市系統動態的驅動因子及反應者，其二是強調人類因子能與非人類物種和其他組成成分因子共同作用。例如，我們在前面所提到的庭園景觀及樹冠犯罪關聯等兩個例子。人類這個組成成分還包括他的生活方式和生計安排、所形成的官方和非官方機構，以及許多其他社會屬性的經濟和政治進程。Ecology of cities是一個系統科學，必須整合多種學科的方法，如生態學和社會學，並以跨學科的觀點，如複雜性、系統思維和永續性，來研究都市這個複雜、高度互動的社會生態系統。

在ecology of cities觀點下，都市系統的格局過程突顯社會和生態組成成分間的交互作用和反饋。近十年的發展，都市生態學漸漸地擴充將基礎建設(infrastructure)納入都市系統，以基礎建設作為橋樑探索社會和生態兩大組成成分如何相互作用。將更多的學科整合到都市生態方法，是建立更全面的都市科學的重要途徑，也是將ecology of cities轉移到ecology for cities的重要方法。例如：生態足



圖4 ecology of cities方法是融合ecology in cities、多學科的方法和實務、跨學科的觀點，以及與其他生態系統的交互作用。(修改翻譯自McPhearson et al. 2016)

跡(ecological footprint)的概念已經成為都市規劃者的啟發式工具。這個概念側重人類活動如何影響都市系統，並受到外部資源庫的影響。Ahern等人(2014)也透過實驗、生態、「安全失敗」(safe-to-fail)的規劃方法來顯示都市規劃如何變得更加跨學科與包容。在這樣的方法中，將生態系服務視為一個綜合概念，以指導都市規劃並監測其成效。這種方法強調ecology for cities必須要將研究引導進入都市規劃、治理和建築管理、工程和設計等各種程度的實作中(圖5)。

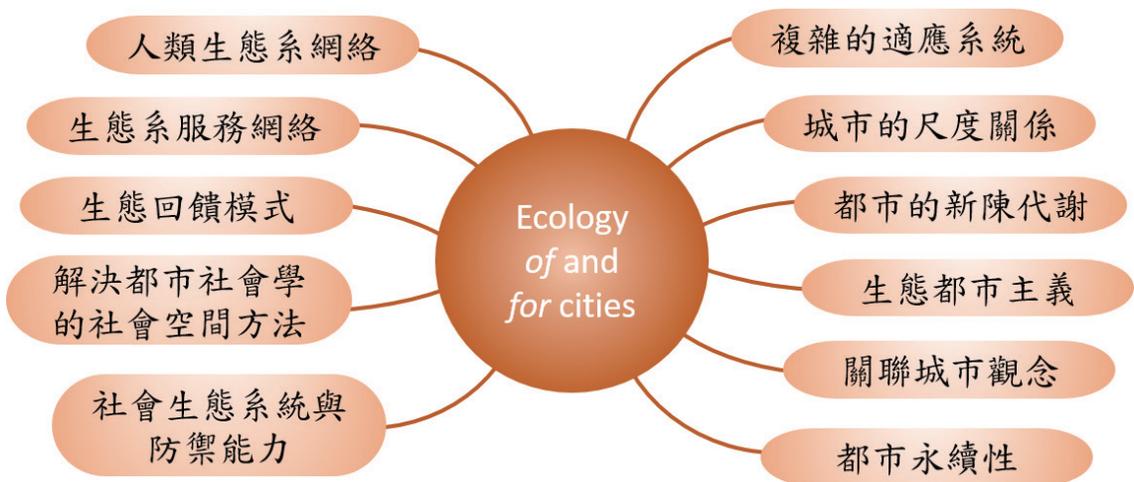


圖5 ecology of cities和ecology for cities方法的關鍵特徵，包括明確識別並納入精進都市生態學和其他學科整合的歷史軌跡。此圖並未詳盡列出研究都市系統的所有方法，僅是簡單地指出可進行的工作及如何開始連結與檢驗。(翻譯自McPhearson et al. 2016)

McPhearson等人提出了五項對都市生態學的深刻理解，來引導未來的研究。這些以「必須」為用語的聲明，反映了對基礎和應用都市生態學精進的共識。urban ecological science of and for cities必須符合以下五個準則：(1)必須以系統為重點，從而考慮社會、生態、技術基礎建設及特定都市次系統之間的關係和反饋。(2)因此，它必須真正的跨學科，而不是嵌入到任何單一的學科視角或傳統的概念框架中，從而擴張更明確地包括政治、技術、健康和治理。(3)必須是參與式的，包含規劃者、管理者、公民和其他利益相關者，以確保研究及其施行的相關性。(4)必須調查多個空間和時間尺度，以及跨尺度的交互作用。(5)必須朝向新的方法、模式和工具推進，以處理各種形式的都市複雜性，結合多種領域的新資料(包括「大數據」)和方法，整合都市系統過程和動態的知識。

催生臺灣都市長期生態研究

我們無法排除自身於都市化及極端氣候異常的全球趨勢之外，臺灣在27年前也陸續成立了數個長期生態研究基地，以因應氣候

變遷；除了農業長期生態研究外，其他均以自然生態系為監測對象，將人的影響排除於外，實難以因應大多數都市地區所產生及關注的生態議題。臺灣在都市生態學的研究上僅有少數的生態學者願意關切進行零星的計畫，撰寫本文的目的即在於快速回顧國際上都市生態學的發展，並列舉一些都市生態研究案例，希望藉由大家所關注且熟悉的生物多樣性議題，引發臺灣更多野外生態學者投身於與我們連結更深的都會環境研究。

都市生態學已經發展了將近一世紀，都市長期生態研究也進展了20年，臺灣擁有跨越到都市生態研究新階段的資源，如：臺灣對於颱風及暴雨等極端氣候觀測資料豐富、資通訊基礎建設普及，相關產業人才眾多，且社群發展蓬勃，因此對於具備使用新方法(如公民科學)和工具(如微型觀測器與APP的開發)測試所謂Ecology for cities的方法，我們深具優勢。在此林業試驗所已準備好推動臺灣都市長期生態研究，並呼籲生態學者攜手合作，期能促進都市永續發展，提升臺灣對於氣候及人口壓力的防禦力。⊕