

# 都市林生態系服務效益如何評估

◎文、圖/林業試驗所林業經濟組·詹為巽 (frog@tfri.gov.tw)、林俊成、李宥妍

## 都市林生態系服務效益評估的重要性

都市雖然只佔地球表面的2%，但都市中的居民卻使用了75%的自然資源(Pacione 2009)。同時目前世界仍持續快速都市化之中，預計到了2050年全球將有70%的人口生活在都市裡，因此都市的環境永續發展對於確保世界人民的生活品質至關重要 (Salbitano et al. 2016)。而都市中的森林及樹木對改善都市環境品質與人類健康具有重要的影響，一般而言森林具有如調節氣候、涵養水源、減碳、淨化空氣、水土保持與美化環境等生態系服務功能，然而這些通常是以郊外及山區之森林為對象進行，評估森林所提供的各種生態系服務效益。但都市中之樹木生長及分布特性與一般森林不同，所提供之生態系服務功能重點項目亦不同，舉例來說，如果管理適宜，位於都市中的森林和樹木具有可以減少暴雨逕流、風沙、改善空氣品質、減緩熱島效應以及促進氣候變遷的調適和減緩等，讓生活於都市的人類更舒適與安全。

都市林可以被定義為包含所有位於都市和城郊地區的林地區、樹木群和個體樹木所構成的網絡或系統，包含了樹林、行道樹、公園和花園裡的樹木，以及任何位在城市角落裡的樹木等。透過讓大眾了解認識都市林與都市樹木所帶來的生態系服務效益，可以提高公眾對都市林的理解和認識，提升當政府進行都市林的管理和宣傳工作時大眾的認同感，並提供都市規劃人員和決策者相關科學之參考，防止許多未來可能發生的管理問題



都市林可以提供許多生態系服務功能。

(Escobedo & Seitz 2009, Wyman et al. 2012)。實際作法方面，可以藉由將都市林的生態系服務效益量化，計算樹木所提供的各種服務功能價值及所產生的效益，再將各種效益轉換為貨幣價值，讓各界更容易了解樹木與都市森林所提供之價值與重要性。

## 都市林生態系服務效益評估工具~i-Tree

2000年由美國林務署(U.S. Forest Service, USFS)所發展之「都市林效益模型(Urban Forest Effects Model, UFORE)」為一相當完整的都市林效益評估模型，並且在全球應用於超過50個城市。2006年同樣由美國林務署開發之i-Tree系統，是用於進行都市林生態系服務效益評估與管理的軟體，其核心工具包括i-Tree Eco、i-Tree Landscape、i-Tree Design和i-Tree Hydro等四大模組，以及i-Tree MyTree、i-Tree Canopy、i-Tree Species、i-Tree Database及i-Tree Glossary等五個應用工

具。其中i-Tree Eco模組即是根據UFORE模型所發展的評估模組，也是目前廣為世界多國使用於評估都市樹木效益以及價值的工具之一。因此，本文後續將以i-Tree Eco模組所估算之都市林生態系服務項目為例進行介紹。

### i-Tree Eco評估項目

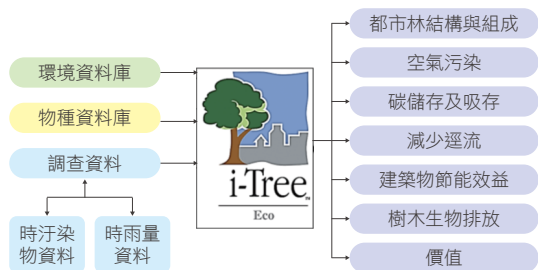
i-Tree Eco是透過將使用者所輸入之野外調查資料，結合美國林務署建立之樹種資料庫與區域環境資料，透過各種模型計算其生態系服務效益。其基本假設為都市林結構將影響其功能及價值，因此是透過分析使用者所感興趣之目標都市林結構與組成(Structure and compositional analyses)後，利用各種結構與組成資訊進行其他生態系服務效益評估，其提供了五項都市林生態系服務效益推估，

包括空氣汙染移除與人類健康衝擊(Pollution removal and human health impacts)、碳儲存及吸存(Carbon sequestration and storage)、減少逕流(Avoided runoff)、建築物節能效益(Building energy effects)及樹木生物排放(Tree bioemissions)等，最後可將各種效益轉換為貨幣價值資訊，下列針對各項目之運作方式分別說明。

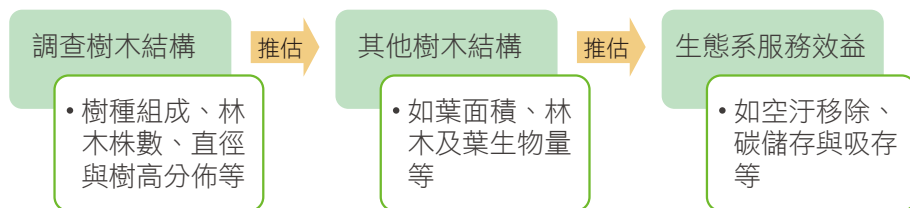
#### (一)都市林結構與組成

##### (Structure and compositional analyses)

要了解一都市林所帶來之效益，首先需了解都市空間中植被與其他物體的空間排列或特徵關係的都市林結構，因此推估都市林的結構與組成是i-Tree Eco模組運作的基礎。首先使用者可透過普查或抽樣調查的方式，取得基本資訊、灌木資訊、樹木資訊及地面覆蓋等資訊，並蒐集都市樹木可直接測量的結構屬性(例如樹種組成、株數、直徑與樹高分布等)，再使用前述直接測量的結構屬性資訊，推估較不易直接測量的其他結構屬性(例如葉面積、林木及葉生物量等)，最後結合調查地區當地之氣象資料及空氣汙染物濃度等環境資料，估算各種都市林生態系服務效益之量與價值。



i-Tree Eco運作概念。(修改自<https://www.itreetools.org/eco/overview.php>)



i-Tree Eco都市林生態系服務效益推估流程。

## (二)空氣汙染移除與人類健康衝擊 (Pollution removal and human health impacts)

空氣汙染與生活於都市中的人們的健康息息相關，最初空氣汙染主要是因為工業化城市中煙囪排放汙染物質所造成的後果，然而現今繁忙的都市街道上各種汽、機車交通工具所排放的汙染物質為更不容忽視之來源之一。都市林對於空氣汙染移除的效益部分，是因為樹木可以直接或間接的改善空氣品質，例如直接移除空氣汙染物質(如 $O_3$ 、 $SO_2$ 及 $CO$ 等)、吸收或截取空氣中懸浮微粒(如 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ )；並可藉由降低氣溫減少都市降溫設備之使用，間接降低發電廠排放出之 $CO_2$ 等其他效果。本模型透過前項都市林結構資料，配合蒐集目標地區之逐日逐時降雨資料，以及空氣汙染物質質量資料( $O_3$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$ 、 $PM_{10}$ 及 $PM_{2.5}$ )等，依據各種空氣汙染物質於不同樹種的乾沉降量，計算都市林於非降雨時段可攔截各種空氣汙染物質的總量，最後再乘上移除各種汙染物質的外部價值金額，即可計算出都市林所帶來的空氣汙染移除效益價值。

## (三)碳儲存及吸存(Carbon sequestration and storage)

一般認為，大氣中二氧化碳及其他溫室氣體濃度增加是導致溫室效應加劇以及全球氣溫上升的原因之一，如何透過減少二氧化碳排放以及將大氣中的二氧化碳捕捉為近年有關氣候變遷減緩重要的課題。樹木約有50%為碳所組成，因此是一豐富的碳匯(Carbon Sink)，又可將其區分為已經保存固定於林木

組織中的碳儲存(Carbon Storage)，以及樹木隨著在一段時間內的生長所吸收固定大氣中之碳吸存(Carbon Sequestration)，年度碳吸存即為樹木每年移除之碳量，與樹木生長速率有關，生長速率則又與樹種、樹齡、生長環境等因子有關。本模組可計算都市林各樹木的碳儲存以及碳吸存量，碳儲存量部分是根據推估都市林樹木的全株乾生物量資料後，乘上樹木之碳含量即可得到總儲存碳量。碳吸存量則是利用平均之年生長量，並根據樹木所處之環境、生長季長度等進行加權計算各樹木的年生長量及 $x+1$ 年之碳儲存量，再將 $x+1$ 年與 $x$ 年之碳儲存量相減後即可得出1年間之碳吸存量，最後將碳量轉換為二氧化碳並乘上減少二氧化碳之外部價格，即可求出都市林的碳效益價值。

## (四)減少逕流(Avoided runoff)

一般位於山區的森林最廣被認知的功能即為水土保持的效益，而都市林生長之環境雖然多位於較平緩之地區，但其同樣也具有抵禦降雨沖刷地表以及減少地面逕流的功能。調節洪水逕流對於許多都市地區為一重要的議題，其受以下因素影響，例如降雨事件的強度和時間、樹種為落葉或常綠，闊葉或針葉、單株樹木結構(大小、葉片多寡與枝葉排列等)、天氣(溫度、濕度、淨太陽輻射與風速等)。本模組透過上述相關因子，計算都市林植被冠層所攔截的雨水、蒸散作用及地表儲水量等，推估有植被時因降雨而產生之逕流量，再計算如沒有植被的情況所產生的逕流量，最後將兩者相減即可得出都市林對於減少逕流的總量。

### (五)建築物節能效益(Building energy effects)

都市林對城市的遮蔽效果可以減少陽光直接照射在建築物的表面，避免建築物內之氣溫因此上升，減少建築使用冷氣等降溫設備之頻率，或者於寒冷季節提供保溫的效果，降低暖房設備的使用，都可以產生節能減碳的效果。而影響都市林對建築物溫度效果的因素包含了樹木大小、與建築物的距離和方位、所處之氣候區、屬落葉或常綠樹種以及該地樹木和建築的遮蔽百分比等。本模組將調查區域內距離建築物18.3 m內之每株樹木，紀錄其相對建築之距離及方位，另外樹木高度小於6.1 m或距離建築物大於18.3 m者被視為對建物能量利用無影響，透過上述因子以計算因都市林效應減少之冷、暖房設備使用而未被發電廠所排放出的二氧化碳，作為量化都市林在建築物節能之效益。

### (六)樹木生物排放(Tree bioemissions)

植物本身會產生如異戊二烯及萜類化合物等揮發性有機排放(Volatile organic compound, VOC)，又稱為生物排放(Biogenic emissions)，而VOC之排放會受到樹種、葉生物量、氣溫和其他環境因子影響，這些VOC除本身會使影響空氣品質外，也會導致O<sub>3</sub>和CO等空氣污染物質形成。另外，由於樹木蒸散作用會使周遭葉溫與周遭之氣溫降低，進而使VOC排放減少，因此提升都市林覆蓋度亦可以使氣溫降低以及減少VOC之排放。本模組藉由前述都市林結構模型計算而得之樹木葉生物量以及環境資料，依樹種推估每一類

土地利用及整座城市中的VOC逐時排放量。

### 倫敦都市林的生態系服務效益

英國於2014年利用i-Tree Eco計算倫敦地區的都市林生態系服務效益與價值。該次評估於倫敦地區約15.9萬公頃之面積中共調查721個樣區，推算出倫敦地區共有約842萬株樹木，樹木密度平均為每公頃53株。樹種調查方面共有126種樹木，其中數量最多並影響都市林生態效益之樹種為楓樹、英國橡樹、銀樺、樺樹、酸橙、蘋果及山楂等。最後利用i-Tree Eco模組評估倫敦地區的都市林所帶來四項生態系服務效益總價值共計約2.85億英鎊，價值由高至低依序為：碳儲存與吸存(1.47億)、空氣汙染移除(1.26億)、減少逕流(0.12億)及建築物節能效益(0.003億)。

#### (一)空氣汙染移除

空氣污染物質移除效益部分，每年可移除2,241噸空氣汙染物質，效益約1.26億英鎊，其中以移除臭氧(O<sub>3</sub>)之移除量最高，達到997噸，但移除效益價值則以移除懸浮微粒PM10的6,300餘萬英鎊最高，其餘空氣汙染物移除效益及價值詳如表1。

#### (二)碳儲存及吸存

倫敦地區都市林所儲存之二氧化碳量共計236.7萬噸，相當於將一個直徑1.3公里的巨大氣球內全數充滿二氧化碳，吸存量方面則約每年7.7萬噸，換算為價值共約1.47億英鎊。其中碳儲存最多之樹種依序為英國橡樹、楓樹、樺樹及柳屬等，而較特別的是數量最多之樹種為楓樹，但其並非碳儲存量最高的樹種。



表1 倫敦地區都市林空氣汙染移除效益及貨幣價值

| 汙染物                    | 年移除量(噸) | 價值(英鎊)     | 百分比(%) |
|------------------------|---------|------------|--------|
| 一氧化碳(CO)               | 32      | 29,921     | 0.02   |
| 二氧化氮(NO <sub>2</sub> ) | 698     | 54,954,727 | 43.61  |
| 臭氧(O <sub>3</sub> )    | 997     | 6,511,718  | 5.17   |
| PM10                   | 299     | 63,268,423 | 50.21  |
| PM2.5                  | 153     | 1,149,480  | 0.91   |
| 二氧化硫(SO <sub>2</sub> ) | 62      | 102,179    | 0.08   |

### (三)減少逕流

由於都市地區地表鋪面不透水，因此當大雨來襲時經常處於水患的風險中。倫敦地區之都市林貢獻了約每年340萬立方公尺的逕流量，這些水量相當於1,365個奧運標準泳池的水量，價值約1,200萬英鎊。

### (四)建築物節能效益

一般而言，建築物周邊的樹木具有熱天遮陽，冷天擋風的效果，進而減少因使用空調設備所導致的碳排放。然而倫敦地區因緯度較高使情況在冷天卻有不同，因樹木遮蔽了冷天時的太陽輻射，反而需要額外的暖房設備來維持室溫導致於冷天更為耗能，因此與熱天時之節能相抵後，樹木對倫敦地區的節能效益換算後僅約882噸碳排放，價值約31.5萬英鎊。

### 結語

都市林擁有許多不同的生態系服務效益，本文以i-Tree Eco的評估項目為例，介紹五種常被量化估計之都市林生態系服務效

益，透過量化估算這些較具體的效益總量並轉化為貨幣價值後，除了能讓大眾更容易理解都市林的重要性，並且可以結合都市林發展、維護等管理成本進行整體之經濟效益分析，將是決策者重要的參考資訊之一。我國於都市林生態系服務效益評估尚屬起步階段，多是使用國際目前已發展的評估模型進行，然而例如本文所介紹i-Tree Eco，其引用之UFORE模型內相關參數預設是以北美洲之樹種及氣候環境等進行設定，所計算出的結果可能會有偏誤。因此短期我國可先參考基本條件相近的國家地區所建立的參數進行評估。長期發展而言則應依據各種效益評估模型所需建立適用國內之參數，舉例來說，都市林樹木之結構推估模式為各種效益推估模型的最基礎資訊，即為首要應加強發展之項目之一，以期透過各種本土化參數推算出國內都市林的效益。⊗