

森林生態系服務效益評估工具

- ◎文、圖/林業試驗所林業經濟組·詹為巽 (HYPERLINK "mailto:frog@tfri.gov.tw" frog@tfri.gov.tw)、吳若穎
- ◎林業試驗所主任秘書室·林俊成
- ◎國立臺灣大學森林環境暨資源學系·邱祈榮

聯合國千禧年生態系統評估報告(Millennium Ecosystem Assessment, MEA)將生態系服務定義為「人類可從生態系中得到的益處」，並且將其依屬性區分為四大類，分別為提供人類所需直接的資源，例如提供食物、木材、水源以及基因資源等的「供給服務」；提供如氣候與水資源調節等減少災害對人類造成衝擊與威脅的「調節服務」；提供精神層面如休閒娛樂、美學及教育等價值的「文化服務」；最後是屬於生態系服務的基礎，為產出其他三項服務所需的條件的「支持服務」等。近年來由於氣候變遷以及人類開發行為對環境所造成的影響等議題漸受關注，學界針對生態系服務產生之效益所進行的研究也日益增加，因此目前透過評估各種不同生態系服務所產生的效益已經成為一種遊說工具，越來越多環境開發或是會對生態造成衝擊的決策，都利用生態系服務效益來做為權衡。圖 1 為生態系服務效益評估應用於決策支援之回饋循環，當一地區規劃進行開發或人為干預等活動時，透過將生態系所提供各種服務效益以評估工具量化後，提供相關單位生態系服務的價值資訊，藉以作為決策者進行各項決策時的參考依據及完成行動決策等。

國際上已發展出許多評估工具協助計算各種生態系服務效益。生態系服務效益評估工具為藉由電腦分析運算各種地理空間資訊、環境變數以及經濟評估參數的系統，可透過分析現實的情況以及模擬預測未來結果

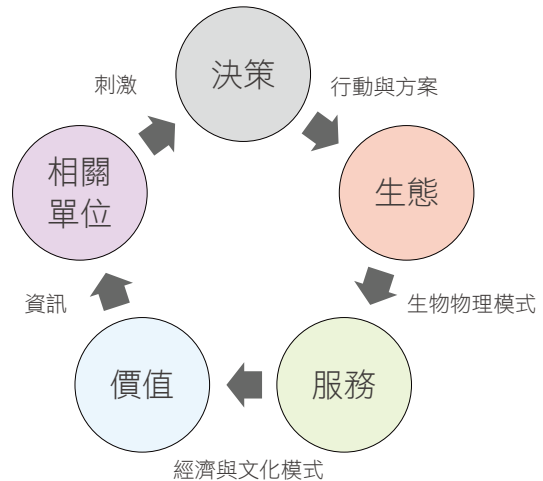


圖1 生態系服務效益評估工具應用於決策支援之循環。

等，提供客觀資訊給使用者進行決策參考。目前國際上已經有各國組織、公司或大學所開發超過20種生態系服務效益評估工具，可以藉由單機軟體、GIS程式套件或直接於網頁進行分析，其中大多數工具係將效益進行量化的評估，以具體量化數據呈現客觀的生態系服務效益結果，有部分工具則是透過定性的方式對生態系服務效益進行描述。由於部分生態系服務評估工具僅適用於特定地區範圍、屬於專利獨賣之商業軟體工具、須簽訂共同合作契約才可使用，或者與森林生態系服務效益並無直接相關等原因，故非全數皆可適用於臺灣森林生態系服務之分析，因此本文選擇可能應用於臺灣之五種生態系服務效益評估工具InVEST、TESSA、Co\$ting Nature、ARIES以及i-Tree ECO進行介紹。

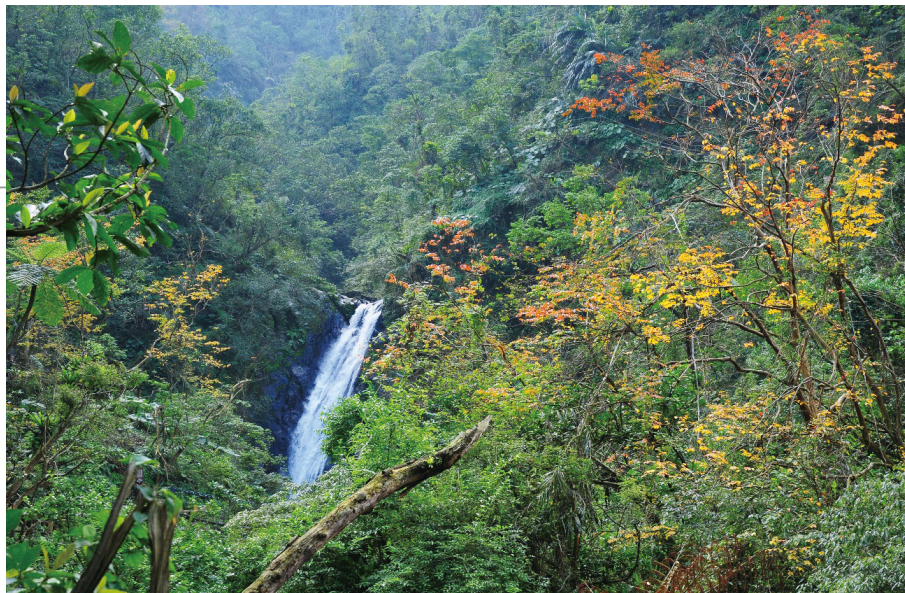


圖2 藉由各式評估工具可將森林生態系服務進行量化使各界容易了解。

InVEST

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)為美國史丹佛大學、明尼蘇達大學、美國民間保育組織大自然保護協會(The Nature Conservancy)和世界自然基金會(World Wildlife Fund, WWF)等共同進行之「自然資本計畫(The Natural Capital Project)」所研發，主要目的是為了提供自然資源管理者進行決策的參考資訊。InVEST為一套發展已相當成熟之軟體，相當具有彈性可應用於各個不同國家環境，可用於繪製和評估陸地以及海洋所提供的生態系服務，並且可以進行現況以及未來情境模擬分析，因此目前國際上已有相當多研究應用InVEST進行分析。InVEST共包含超過15個子模組，分別用於評估不同之生態系服務效益，其中與森林生態系服務相關的有碳匯、水質淨化、水土保持、水源涵養、棲地品質、景觀品質以及遊憩等效益。InVEST分析流程是由使用者依照需求輸入空間資訊、各種基本資訊以及分析參數等資料後進行評估，也因此使用InVEST需要具備中等程

度以上的基本知識以及GIS工具操作能力。

TESSA

TESSA (Toolkit for Ecosystem Service Site-based Assessment)是由英國劍橋大學等單位共同開發，目前亦主要被應用於英國地區。TESSA為用於評估陸地及濕地生態系統服務的工具包，它並不是利用空間資料進行分析的應用程式，而是引導使用者完成各項所需步驟的指引工具，並且強調結合當地知識以及利益關係人的參與。TESSA應用方式是根據不同的生態系服務類型挑選適用方法，包括利益關係人工作坊、專家諮詢、製圖、數據收集、實地測量、問卷調查、建模和分析等等，以完成最終的生態系服務效益的評估。TESSA發展的目的是幫助「非專家」可以快速、低成本卻穩健地完成生態系服務效益評估，讓沒有深入專業知識和技術的利益關係人可以相對容易的參與評估過程。而TESSA可用於評估與森林生態系相關的服務有如氣候調節、水質淨化、水源涵養、洪水調節及遊憩效益等。

Co\$ting Nature

Co\$ting Nature由英國倫敦國王學院等單位共同開發，為免費的網頁介面決策支援工具，其開發主要目的為讓一般大眾能更容易了解複雜的生態系服務效益評估，透過其網頁版之空間分析工具以及其全球尺度的資料庫，可直接查詢、規劃分析及輸出結果，但由於Co\$ting Nature是以1公頃或1平方公里為等較大的空間尺度為單位進行分析，因此如需要較細緻之區域分析結果則可能無法精準的呈現。Co\$ting Nature可以分析當前土地利用及覆蓋情形所提供之各種生態系服務效益，以及因人類開發等行為使土地利用及覆蓋改變過程的情境分析，動態呈現不同情景變化下的生態系服務效益分析結果，以協助進行相關規劃之決策支援。Co\$ting Nature可評估之森林生態系相關服務有碳匯、水源涵養、生物多樣性、災害減緩及遊憩等。

ARIES

ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services)是由美國佛蒙特大學開發，為提供學術及非營利免費使用之生態系服務效益評估工具。ARIES藉由空間化的方式進行陸地、淡水及海洋生態系之生態系服務效益評估，其可分析不同空間和時間動態變化下的生態系服務效益轉變，但全球模型尚在開發中，因此目前只適用於研究模型有涵蓋區域進行評估。ARIES為可一個透過網路協作之整合開發環境(Integrated Develop Environment, IDE)，藉由收集世界各地由人工智慧引擎運作之各種生態系統服務機率模

型，希望促進各國科學家的合作以及數據和模型的共享，以完整進行全球之評估。然而因ARIES運用龐大且複雜的模式，因此需要具有相當之專業知識以及技術尚能運用其進行分析。ARIES可評估之森林生態系相關服務有碳匯、洪水調節、水土保持、水源涵養、美學價值及遊憩等。

i-Tree Eco

i-Tree Eco為美國林務署(U.S. Forest Service, USFS)所開發之i-Tree系統其中一個模組，為一相當完整的都市林效益評估模型，目前已在全球應用於超過50個城市，為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，其運作原理是假設都市林結構將影響其功能及各種效益價值，因此是藉由分析目標都市林之樹種組成與結構，再結合其他相關資訊進行生態系服務效益評估。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，利用各種模型計算其生態系服務效益，其運作方式為安裝單機之應用程式，使用者於輸入樣區或者普查之都市林資料後，將回傳至伺服器進行各項效益的計算，再將運算結果回傳由單機程式端下載及解讀。i-Tree Eco提供了五項都市林生態系服務效益的推估，包括空氣汙染移除、碳匯、洪水調節、建築物節能效益及樹木生物排放(指樹木所釋放之揮發性物質)等。

五種工具比較

針對上述五種生態系服務效益評估工具，進一步挑選彙整11種特性比較，以了解

各種不同工具的優點及限制等。首先「分析森林生態系服務類型」部分，以InVEST可分析七項服務為最多，其餘工具則分別可分析五至六項服務，其中碳匯、水源涵養、水質淨化與遊憩效益是大多數工具均可評估之項目；「可取得性」是指使用者取得各種工具之難易度以及應用之自由度，此五種工具僅Co\$ting Nature為付費軟體，其他皆為免費使用之工具軟體或網頁應用程式等，而InVEST及ARIES同時為開源軟體；「執行介面」為評估工具執行的環境，其中InVEST及i-Tree Eco為單機軟體，TESSA則為使用者指引手冊及網頁工具，Co\$ting Nature為可直接操作之網頁應用程式，ARIES則為整合開發環境(IDE)，需要具有一定之電腦技能才能進行分析；「分析規模」根據各工具可應用之範圍，由小至大區分為地方、區域以及全球範圍，InVEST、ARIES以及i-Tree Eco均可應用於自地方至全球之分析；「分析尺度」以i-Tree Eco最細緻，可分析至單木尺度之生態系服務效益，而大部分評估工具均是以地景或集水區為分析單元；「使用者輸入資料需求」部分區分為低至高三個等級，越高表示使用者可以自行輸入越多自訂之資料或參數，模型自由度越高，但相對而言也需要具有更完整的生態系服務相關背景知識以及分析基礎資料，本文介紹五項工具中僅Co\$ting Nature因屬於網頁應用程式，其相關參數需由線上資料庫匯入，其餘工具均可由使用者進行不同程度的自訂資料輸入；「評估單位」是指該工具係以貨幣化或非貨幣化的方式提供分析結果，以供決策者相關參考依據；「是否能產製地圖」為工具分析過後是否能

產生地理資訊圖資，或者僅能提供使用者所分析範圍之數據或質化結果；「工具需求」是除了評估工具本身外，使用者是否需要其他的相關工具協助，以進行分析資料準備或者結果判讀；「使用者支援程度」為評估工具開發單位所提供之使用者支援，如是否有完整的操作文件、官方教學，或者是有相關論壇作為使用者討論交流的平臺；最後「技術需求程度」是指使用者是否需要具備相當之生態系服務效益先備知識，或即使是初學者亦能依具評估工具之指引即完成分析。

最後，透過各項工具比較結果可以發現，InVEST具有較齊全的森林生態系服務分析項目、資料需求量以及分析範圍具有彈性、分析結果能將效益貨幣化並透過製圖視覺化展示等特點，且具有完整的使用者支援並已有相當多研究文獻採用其進行分析；而i-Tree Eco所針對之對象為都市林，且是以單株樹木尺度進行分析，與本文介紹其餘四項工具有一定之區別，而其模型同樣具有相當之彈性，可根據不同國家地區輸入分析所需之資料，亦有完整的使用者支援且已被世界多國城市用於評估其都市林之生態系服務效益。因此，未來各項評估工具於實際應用時，InVEST非常具有潛力用於評估臺灣森林生態系服務效益，而i-Tree Eco則可用於評估都市林環境之生態系服務效益，

結語

近年來隨著各界對於生態系服務效益概念的興起，以及各種生態系服務效益之評估工具的發展，將生態系服務效益價值化或是結合空間資料呈現，已是重要的決策支援模式。然而因生態系服務類型以及評估方式眾

表1 五種生態系服務效益評估工具比較

	InVEST	TESSA	Co\$ting Nature	ARIES	i-Tree Eco
分析森林生態系服務類型	碳匯 水質淨化 水土保持 水源涵養 棲地品質 景觀品質 遊憩	氣候調節 水質淨化 水源涵養 洪水調節 遊憩	碳匯 水源涵養 生物多樣性 災害減緩 遊憩	碳匯 洪水調節 水土保持 水源涵養 美學價值 遊憩	碳匯 空氣汙染 洪水調節 建築節能 生物排放
可取得性	免費 開源軟體	免費 非開源軟體	付費 非開源軟體	免費 開源軟體	免費 非開源軟體
執行介面	單機軟體	使用手冊及網頁工具	網頁應用程式	整合開發環境 (IDE)	單機軟體
分析規模	地方至全球	地方	區域	地方至全球	地方至全球
分析尺度	集水區 地景	地景	地景	集水區 地景	單木
分析類型	定量	定性、定量	定性	定量	定量
使用者輸入資料需求	低至高	低至中	低	低至高	低至高
評估單位	貨幣化 非貨幣化	貨幣化 非貨幣化	非貨幣化	非貨幣化	貨幣化
是否能產製地圖	是	否	是	是	否
工具需求	需GIS軟體展示結果	野外調查工具	具網路連線之電腦	ArcGIS軟體	具網路連線之電腦
使用者支援程度	高	中	中	低	高
技術需求程度	中至高	低	低	中至高	中至高

多，並沒有一個工具能面面俱到完整包含所有的評估，於進行生態系服務效益評估時可視需求搭配各種不同工具，而複雜的模式也不一定最能有效評估生態系服務，必須衡量時間及經費以選用最有效率的工具，例如本文所介紹五種評估工具適合之分析範圍、應備基礎資料以及使用者需具備的能力等各有不同，以TESSA及Co\$ting Nature而言，因模式分析之空間尺度較大，且需要使用者自行輸入及設定之分析資料與參數需求較低，因此適合於大範圍初步評估使用；InVEST及

ARIES則可以集水區為範圍進行評估，同時各種模式資料及參數需由使用者自行輸入與設定，使其模式較為靈活並可達成較細緻之評估，但適合已具有相當生態系服務效益知識與概念的使用者使用；i-Tree Eco則因模式應用對象為都市林且可評估至單株樹木尺度，適合進行公園、行道樹或都市環境林的評估使用。因此，未來應用各種生態系服務評估工具時可依目標分析之生態系服務類型、基礎資料多寡以及個人技術能力等條件，挑選合適之評估工具協助完成分析工作。♻️