

森林生態系服務效益評估 —InVEST之運用

詹為巽¹、盧學甫¹、林俊成²

人類自生態系中直接或間接獲得各種有形或無形的效益稱之為「生態系服務(ecosystem services)」，其中森林為重要的陸域生態系之一，自古至今人類有許多資源是自森林生態系取得，例如木材、竹材等森林主產物，以及如竹筍、蕈菇類及精油等主要做為為食材或藥用的副產物等等「有形」的效益。另有許多因有森林的存在而產生之「無形」的效益，例如大家熟知的淨化空氣、涵養水源、水土保持、碳吸存、提供其他生物之棲息環境等等。隨著全球人口的成長，世界各國都面臨因區域發展開發所導致之都市快速擴張，使得森林生態系面臨開墾、破碎化等威脅，因此透過評估及量化各種有形與無形的生態系服務價值，已經成為決策者用於權衡開發行為所帶來之效益與造成之衝擊的工具之一。其中森林所產生「有形」的效益可以透過市場機制評估其價值，然而各種「無形」的效益則必須透過將其量化與價值化的方式讓各界更容易理解，因此目前已發展出各種評估工具用以協助研究人員或政府官員進行評估，或是做為生態系服務支付(Payment of Ecosystem Services, PES)之參考基準，本文以目前已被許多研究應用之InVEST評估工具為例，介紹其評估生態系服務之項目與方式。

什麼是InVEST?

InVEST為生態系服務綜合評價與權衡

工具(The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool)之簡稱，是由美國史丹佛大學、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)」於2007年聯合開發而成，其目的是使經濟與保護力量相結合，給予各國家及各領域生態系服務評估使用以作為決策參考資訊。InVEST發展至今已為一套相當成熟之工具，同時具有下列幾項特性與優勢：

1. InVEST各模組可根據使用者所擁有之資料量進行模式參數設定，各項資料與參數可以透過自訂或參考官方之建議數值進行設定，依不同地區因地制宜調整參數，因此相當具有彈性可應用於各個不同國家環境。
2. 可透過模擬未來情境之數據的設定(如土地利用型不同年度間之變化)，或使用其開發之情境模擬功能，進行未來情境模擬分析以進行比較。
3. 透過結合地理資訊系統(geographic information system, GIS)，利用空間化及視覺化的方式呈現生態系服務評估結果，並可以地圖形式呈現，彌補過去生態系服務評估模型所欠缺的價值評估法與空間特徵解釋，也因此InVEST與其他模型相比更能廣泛應用於環境相關決策。

^{1,2} 林業試驗所·林業經濟組、主任秘書室

表1 InVEST 3.6.0版本分析模型

生態系分類	評估項目
陸地生態系	年產水量 (水源涵養效益) Annual Water Yield
	季節產水量 Seasonal water yield
	碳吸存與儲存 Carbon Storage and Sequestration
	森林碳邊緣效應 Forest Carbon Edge Effect
	泥沙遞移率 (水土保持效益) Sediment Delivery Ratio
	棲地風險 Habitat Risk Assessment
	棲地品質 Habitat Quality
	授粉 Crop Pollination
	作物生產 Crop Production
	營養鹽遞移率 (水質淨化效益) Nutrient Delivery Ratio
	全球生物多樣性 GLOBIO(Global Biodiversity)
海洋生態系	波能評估 Wave Energy
	海上風力發電 Offshore Wind Energy
	海洋魚類水產養殖 Marine Finfish Aquaculture
	漁業 Fisheries
	藍碳 Coastal Blue Carbon
	沿海脆弱性 Coastal vulnerability
其他跨系統	美感評估 Scenic Quality Provision
	休閒娛樂 Recreation and Tourism

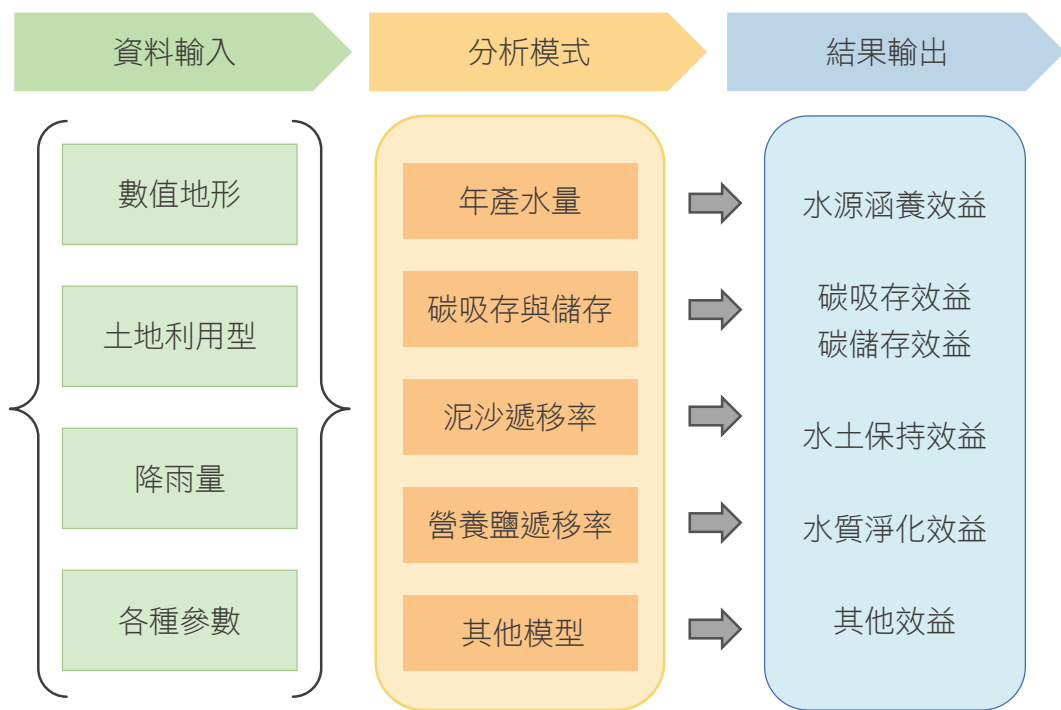
表2 2012~2018年間運用InVEST分析森林生態系服務效益研究之項目與篇數

評估項目	研究篇數
水源涵養效益	13
碳吸存與儲存	10
水土保持效益	11
水質淨化效益	4

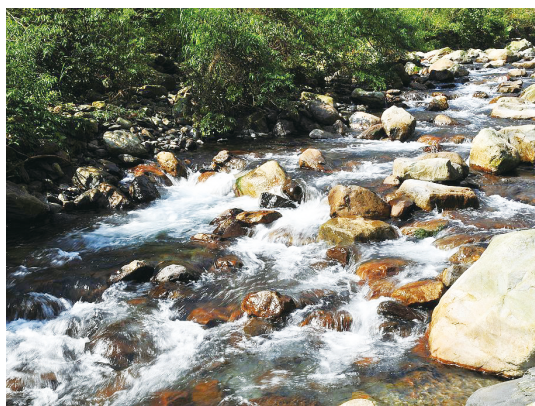
InVEST分析模組

目前InVEST已發展至3.6.0版本，共有超過19種計算模組，可針對陸地生態系、海洋生態系及其他系統之生態系服務所帶來的各種效

益進行評估，各類型生態系之評估項目模組詳如表 1。而國際上亦有相當多研究應用InVEST進行分析，自2012~2018年間共有38篇研究文獻分析森林生態系服務(表2)，較常運用之模組包含如年產水量(水源涵養)、碳吸存與儲存、泥沙遞移率(水土保持)、營養鹽遞移率(水質淨化)等，其中又以探討森林生態系水源涵養效益之研究最多。由於InVEST之評估模組眾多，本文後續將針對森林生態系常用之四項模組進行介紹，如欲詳細了解其他對各個生態系統評估模組可參考InVEST官方網站或使用手冊，同時目前已有簡體中文之操作手冊供參考。



InVEST模型分析森林生態系服務流程。



水源涵養為森林生態系服務重要的效益之一。(詹為巽 攝)

(一)年產水量 (水源涵養效益)

InVEST年產水量模組係根據降水量、蒸散量和各種土地利用型(land use/land cover,

LULC)之植物用水量等資訊進行每年可以產出之水量評估，為一個簡化之水文循環模型。透過分析森林生態系土地利用之年產水量，以及模擬土地利用型轉變後之年產水量差異，即可了解森林生態系所帶來的水源涵養效益。實際進行評估時，需要輸入分析範圍內之土地利用型、降雨量、蒸散量、植物可利用水含量、土壤最大根系埋藏深度、分析區域內之集水區與次集水區劃分以及季節常數等資料，分析結果提供以集水區與次集水區為單元之產水量資訊。

(二)碳吸存與儲存

本模組將生態系分為地上部生物量、地下部生物量、土壤以及死有機物質(枯木及枯

落物)等共4個碳庫進行碳吸存與儲存之估算。分析時是藉由輸入分析範圍之土地利用型現況以及未來土地利用型網格、不同土地利用型各碳庫之儲存量與年變化量數據表格，其中土地利用型之分類多寡由使用者自訂，以森林為例，如擁有各種不同林型之各碳庫數據，便可將森林再細分為多種林型分別估算，而若缺乏不同林型詳細之碳庫資料時，亦可僅以森林一組數據進行估算。各碳庫隨著土地利用型不同，其儲存量與年變化量數據可由使用者所擁有之調查資訊進行設定，同時InVEST亦提供聯合國氣候變遷政府間專家委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)發布之各種土地利用型碳庫資料讓使用者參考使用。

(三)泥沙遞移率(水土保持效益)

此模型計算是根據修正通用土壤流失公式(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)以及泥沙遞移率(Sediment Delivery Ratio, SDR)，估計分析範圍每年所輸出之泥沙總量，並且提供分析所使用之土地利用型與假定土地利用型皆為裸露地之泥沙輸出量差異，因此應用於森林生態系時模式之計算結果即為森林可提供減少泥沙輸出量，亦即森林之水土保持效益。分析時需輸入數值高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、土地利用型、降雨沖蝕指數(R)、土壤沖蝕指數(K)與集水區範圍等圖資，以及不同土地利用型之覆蓋與管理因子(C)以及水土保持因子(P)等數據進行估算，結果將依據集水區為單位提供分析使用之土地利用型年泥沙輸出量以及與裸露地相比之輸出量差異。

(四)營養鹽遞移率(水質淨化效益)

透過本模形估計營養鹽因降雨而移出集水區進入河川之總量，藉以比較森林生態系與不同土地利用型之變化即可估計森林提供的水質淨化效益。分析時需輸入土地利用型、數值高程模型(DEM)、降雨量、蒸散量、植物可利用水量以及不同土地利用型之植物根系深度與營養鹽保留能力等數據，相關數據可由使用者依據區域研究自行設定或使用InVEST之預設值進行估算。計算結果提供不同土地利用型之營養鹽承載量、植被類型對營養鹽的保留率以及營養鹽輸出佔總量比例等數值供後續評估使用。

結語

臺灣擁有豐富的森林資源，依據第四次全國森林資源調查結果，全島有超過60%面積由森林所覆蓋，如能透過本文所介紹已相當成熟且有許多研究應用之InVEST等各式生態系服務效益評估工具，將森林所提供之各種生態系服務效益量化，進而轉化為市場貨幣價值，可以讓大眾更容易理解森林對於環境保護之價值以及重要性。另外，近來因國內經濟發展及土地開發等需求使森林面對極大的開發壓力，因此在決策程序中除了提供開發森林所造成之生態衝擊評估資訊外，如能提供量化之森林開發前後之生態系服務效益差異，更可以提供為決策者進行權衡之重要參考資訊。⊗