中華水土保持學報, 57(3):125-137(2026)
Journal of Chinese Soil and Water Conservation, 57 (3)*: 125-137* (2026)
DOI: 10.29417/JCSWC.202609_57(3).0003

以情境模擬評估蘭陽溪流域生態系服務價值的時空動態

周敬雯　廖學誠*

摘　　要　土地利用變遷對流域生態系服務功能具有顯著影響，尤其鄰近都會區的郊區流域受到都市蔓延影響，使自然土地轉為建成地，進而降低生態系服務價值。本研究以宜蘭縣蘭陽溪流域為研究區，整合 1995、2007 及 2020 年土地利用資料，分析歷史土地利用變遷，並推估 2045 年未來情境。本研究設計自然發展情境與最佳化情境，並利用生態系服務評估與權衡模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST) 評估碳儲存量、年度產水量及棲地品質之變化。結果顯示，自然發展情境下建成地擴張，導致碳儲存量與棲地品質下降；最佳化情境則透過擴增草地提升碳儲存量與棲地品質，但年度產水量略低。整體而言，發展具植生覆蓋之草地有助兼顧多項生態系服務功能，研究成果可供郊區流域土地規劃與水土保持管理參考。
關鍵詞：生態系服務價值、土地利用變遷、情境模擬、InVEST 模型。

Assessing Spatio-temporal Changes in Ecosystem Service Values in the Lanyang River Basin through Scenario-Based Simulations

Ching-Wen Chou　Shyue-Cherng Liaw*

ABSTRACT　Land use change significantly influences ecosystem services, particularly in suburban watersheds adjacent to metropolitan areas. This study investigates the spatio-temporal dynamics of ecosystem service values (ESVs) in the Lanyang River Basin, Yilan County, Taiwan. Land use data from 1995, 2007, and 2020 were analyzed to characterize historical land use changes and to simulate future land use patterns for 2045. Two future scenarios were developed: a regular growth scenario based on historical land use transition trends, and an optimization scenario designed to enhance ecosystem service performance through land use reallocation. The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST) model was applied to assess three key ecosystem services: carbon storage, annual water yield, and habitat quality. The spatial distribution and monetary values of ecosystem services were analyzed and compared across scenarios. The results indicate that under the regular growth scenario, continuous expansion of built-up land leads to a decline in carbon storage and habitat quality. In contrast, the optimization scenario improves both carbon storage and habitat quality by increasing grassland area and adjusting land use configurations, although annual water yield is slightly lower than that under the regular growth scenario. Overall, the findings suggest that moderate expansion of vegetated grassland can serve as an effective land use strategy to balance multiple ecosystem service functions in suburban watersheds. This study provides a quantitative basis for evaluating land use strategies in watershed-scale planning and offers practical implications for soil and water conservation and sustainable land management in suburban regions.
Key Words: Ecosystem service value, land-use change, scenario simulation, InVEST model.

一、前　　言

生態系服務 (Ecosystem Services, ES) 是指自然所提供並支持人類生存與發展的各項效益 (Millennium Ecosystem Assessment, 2005)。但隨著社會和經濟的快速發展，都市也快速蔓延至鄰近大都會的市郊地區，使得原先具有豐富自然生態系統的市郊地區，所能提供的生態系服務日益受到壓力 (Guo et al., 2010；Kreuter et al., 2001)，這是全球永續發展的一大挑戰 (Burton, 1987)。過去研究多聚焦於生態系服務的定量評估方法上 (Bagstad et al., 2013)，但針對不同服務功能的評估方法較難以有統一基準供利害關係人參考。Costanza et al. (1997) 提出開創了量化全球生態系服務價值 (Ecosystem Services Value, ESV) 的方法，以貨幣價值為單位的生態系服務價值評估，能使政策規劃者及非相關領域人士更容易接納自然生態系統提供的環境效益 (Turner et al., 2003)，同時也能突顯研究區域特徵，具有較高的比較性 (Chivulescu et al., 2024)。

市郊地區經常面臨都市發展和環境保護的權衡。近幾十年來因快速的都市化，道路及建成區擴張，可能導致市郊地區物種可用棲息地流失 (Wu et al., 2014)、碳儲存量減少

國立臺灣師範大學地理學系
Department of Geography, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan, R.O.C.
* Corresponding Author. E-mail: liaw@ntnu.edu.tw

(Kombate et al., 2022)，農地轉為建成區也可能導致糧食生產量顯著下降 (Eigenbrod et al., 2011) 等。這些區域原本能提供的生態系服務價值因此逐漸減少，這一趨勢可能延續至全球實現淨零排放目標的 2050 年之前，對永續發展目標產生不利影響 (Fankhauser et al., 2022)。隨著空間量化與分析技術的進步 (Bagstad et al., 2013；Sharp et al., 2018)，結合生態系服務價值評估與情境模擬的方法被廣泛應用 (Li et al., 2021；Lou et al., 2022；Zhang et al., 2018；Zhao et al., 2021)。透過評估土地利用變遷對於區域生態系服務帶來的危害，及模擬未來土地利用變遷情境下的生態系服務價值損益，有助於為決策者提供有價值的管理參考，以有效配置土地利用資源 (Carpenter et al., 2009)。

以流域為單位的生態系服務價值空間量化評估，更能完整考量水資源相關的生態系服務貢獻 (Lin et al., 2007)。以鄰近大臺北都會區的蘭陽溪流域為例，近三十年間受到雪山隧道通車及農地開放條例生效影響，許多農地快速受到開墾轉為建成區。但目前仍少有研究完整評估蘭陽溪流域受到土地利用變遷影響後的整體生態系服務價值，及應如何妥善調配土地利用的情境模擬研究，尤其是針對提供重要淨零目標解方的碳儲存服務 (Babbar et al., 2021)、支持區域水力發電及農業用水需求的年度產水量服務 (Yang et al., 2019)，與支持生態完整性的棲地品質服務 (Yang et al., 2023)。透過研究上述問題，能確認如何保護蘭陽溪流域的重要區域，是一項有利經濟的規劃參考 (Chen et al., 2024)。

本研究聚焦於探討區域層級土地利用的時空變遷與調整，如何對生態系服務價值產生影響，並藉由模擬未來生態系服務價值的變化，以提供適當的管理策略，並支持蘭陽溪流域或類似氣候及社會發展條件之區域的永續發展。基於上述，本研究想探討以下三點問題：(一) 評估土地利用變遷對蘭陽溪流域生態系服務價值的時空動態。(二) 透過比較自然發展與最佳化調整後的未來情境模擬，評估土地利用的調整是否能顯著改善區域的生態系服務價值。(三) 評估蘭陽溪流域在未來情境下需要關注的行政分區特徵，以利於分區土地利用管理。

二、材料及方法

1. 研究區域

研究區位於臺灣蘭陽溪流域 (Lanyang River Basin，位於 24.3°- 24.8°N 和 121.3°- 121.9° E 間)，涵蓋平原、淺山及高山地區，總面積約 978 平方公里 (本研究由水利空間資訊服務平台取得河川流域範圍圖資，經計算後作為本研究區域的蘭陽溪流域面積則共約 1015 平方公里)，位於副熱帶氣候，夏季經常受颱風等極端天氣事件干擾 (Chen et al., 2022)，全年則雨水不斷。蘭陽溪流域也位於大臺北都會區的鄰近處，更於 2006 年連結宜蘭對外的雪山隧道通車後，因交通易達性的提升，使得宜蘭縣成為輔助大臺北都會區居住及遊憩功能重要的衛星城市。該流域生物多樣性豐富，是農業生產和生態觀光等休閒活動的重要區域。但氣候變遷及極端天氣事件等可能導致水土資源流失和山坡地動植物棲地的破壞，對居住安全及生態系統構成潛在威脅 (Chen et al., 2022)。因此，蘭陽溪是評估在未來不同氣候變遷及社會發展情境下，生態系服務價值變化的代表性研究區域。

2. 評估模型

綜合生態系服務評估與權衡模型 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs, InVEST) 是一種基於空間技術的生態系服務量化模型，主要考慮能提供生態系服務的土地利用類型、地理空間特徵及經驗模型參數 (Mukhopadhyay et al., 2024；Sharp et al., 2018)，適合在區域層級進行生態系服務評估使用，過去已有諸多研究證實 InVEST 模型在區域規劃評估的功能性 (Li et al., 2021；Lou et al., 2022；Zhang et al., 2018；Zhao et al., 2021)。本研究使用的 InVEST 版本為 3.14.1。

本研究主要針對碳儲存、年度產水量及棲地品質三項生態系服務進行評估。首先，大面積的碳匯量通常透過每種土地利用類型於不同氣候區域平均所能存儲的碳量來計算 (Babbar et al., 2021)。InVEST 的碳儲存模型 (Carbon Storage and Sequestration) 計算同一時期區域內總碳儲存量的方法，是由不同土地利用能存儲之地上生物量、地下生物量、土壤有機質和枯落物質四個碳庫統計而成 (Babbar et al., 2021；Sharp et al., 2018)。

再來，年總產水量可以根據氣候條件、地質特徵和土地利用類型推估得知，以提供人類重要的淡水資源 (Yang et al., 2019)。InVEST 的年度產水量模型 (Annual Water Yield) 建立在 Budyko 曲線 (Budyko and Miller, 1974) 和年平均降水量的基礎上 (Sharp et al., 2018；Yang et al., 2019)。每個網格 x 上的年產水量 $Y(x)$由年實際蒸發散量 $AET(x)$及年降水量 $P(x)$推算 (如公式 1)；對於有植被的土地利用類型之水平衡以公式 2 計算，其中，參數 $\omega(x)$以經驗常數 Z、植物可利用水分含量 $AWC(x)$計算 (如公式 3)，潛在蒸發散量 $PET(x)$則由土地利用之植被蒸散係數 $K_c\ (l_x)$及參考蒸散量 $ET_0(x)$計算 (如公式 4)。

$$Y(x)=\left(1-\frac{AET(x)}{P(x)}\right)\cdot P(x) \tag{1}$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)}=1+\frac{PET(x)}{P(x)}-\left[1+\left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega} \tag{2}$$

$$\omega(x)=Z\frac{AWC(x)}{P(x)}+1.25 \tag{3}$$

$$PET(x)=K_c(\ell_x)\cdot ET_0(x) \tag{4}$$

最後，棲地品質透過距離等因子，計算威脅因子對棲息地的負面影響，以獲得棲息地退化程度，再根據退化程度和棲息地適宜性計算棲地品質分數 (Sharp et al., 2018；Yang et al., 2023)。InVEST 的棲地品質模型 (Habitat Quality) 最終計算出的棲地品質分數會介於 0 至 1 間，每網格上分數若是 1 為最高，意即提供最完整的棲地品質狀況。公式 5、6 表示威脅因子對於不同距離棲息地的影響估算，有呈指數型或線型的估算差異。其中，i_{rxy}表示威脅係數，d_{xy}表示網格 x 及威脅因子 y 間的距離，$d_{r\ \max}$ 表示威脅因子 r 的最大影響距

離。而公式 7 代表特定土地利用類型的總威脅等級 D_{xj}，由威脅因子個數 R、所有 r 網格集合 Y_r、相對破壞力 W_r、二元變數的威脅相對影響 r_y、可接近性 B_x 及棲息地類型 j 對威脅因子 r 的敏感性 S_{jr}等推估而成。最終棲地品質 Q_{xj}由棲地適宜性 H_j、總威脅等級 D_{xj}、等級常數 k (預設值 30) 及常數 z (預設值 2.5) 計算而成 (如公式 8)。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}} \right) \text{ if linear} \tag{5}$$

$$i_{rxy} = exp\left(-\left(\frac{2.99}{d_{r\,max}} \right) d_{xy} \right) \text{ if exponential} \tag{6}$$

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^{R} \sum_{y=1}^{Yr} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R} w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{7}$$

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z} \right) \right) \tag{8}$$

為確保 InVEST 模型輸出的可靠性，不同生態系服務因其性質差異，本研究採用相應台灣官方資料來驗證。碳儲存量方面，使用各年度中華民國國家溫室氣體排放清冊報告之二氧化碳吸收量驗證；年度產水量方面，使用各年度水文年報之年逕流量驗證；棲地品質方面，則使用台灣生物多樣性網路 (Taiwan Biodiversity Network, TBN) 資料驗證。

3. 研究資料

(1) 國土利用現況調查資料

針對蘭陽溪流域土地利用情況，本研究採用國土測繪中心 (National Land Surveying and Mapping Center，MOI，https://whgis-nlsc.moi.gov.tw/) 的國土利用現況調查資料，並將 1995 年國土利用現況調查資料 (意即民國 84 年完成之第一次國土利用現況調查)、2007 年國土利用現況調查資料 (意即民國 96 年產製之第二次國土利用現況調查圖資) 以及 2020 年國土利用現況調查資料 (意即民國 109 年產製之國土利用現況調查圖資)，參考 Chu et al. (2018)；Eggleston et al. (2006)；Liu et al. (2022)，依據各土地利用類型對生態系服務影響之相似性，重新調整合併為農地、森林地、草生地、水體、建成地及裸露地等六類 (如表 1)。其中，1995 年國土利用現況調查資料在蘭陽溪流域有部分區域無供應圖資，但因為缺幅之圖資大部分屬於森林地帶，在 25 年間土地利用類型改變幅度低。因此，本研究以 2007 年國土利用現況調查資料彌補 1995 年圖資缺幅之區域。

表 1 蘭陽溪流域土地利用分類調整合併表

Table 1 Re-classification of the land use data

本研究土地利用分類	國土利用現況調查資料類別概述
農地	農作
森林地	林業、森林使用土地
草生地	廢耕地、公園綠地、草生地、灌木地
水體	水利使用土地
建成地	住宅、商業、工業、公用
裸露地	空置地

(2) 評估模型參數

本研究使用之碳儲存模型參數參考 Eggleston et al. (2006) 的計算方法，估算出副熱帶濕潤地區 (Subtropical humid) 森林的年碳匯量，同時也引用 Liu et al. (2022) 對於濕潤稻米生產地區的農地與草地之年碳儲存量參數。

年度產水量模型之使用參數引用過去研究文獻及公家機關提供的開放資料。年降雨量使用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台 (Taiwan Climate Change Projection Information and Adaptation Knowledge Platform，簡稱 TCCIP，https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/) 所提供的 0.05 度網格化 AR6 統計降尺度月資料，並採用社會經濟發展路徑為中等排放情況的 SSP245 資料，而歷年 (1995 年、2007 年、2020 年) 觀測降雨量月資料則用於驗證模型的可靠性。年蒸發散量引用吳治達等 (2008) 對臺灣北部區域之不同土地利用類型的推估平均日蒸發散量，再轉換為年蒸發散量。植物最大根系埋藏深度依據研究區的土壤類型對應 Wu et al. (2022) 提供的臺灣六龜土系剖面深度資料。植物可利用水分含量引用柯佑霖、黃文政 (2016) 的有效含水量參數，該參數是透過 Saxton and Rawls (2006) 的植物可利用水分含量公式轉換而成的。集水區範圍圖來自水利空間資訊服務平台 (https://gic.wra.gov.tw/)，子集水區範圍圖則來自農業資料開放平台 (https://data.moa.gov.tw/)。生物物理參數表引用 Yang et al. (2019)。Z 參數參考 Donohue et al. (2012) 的計算方式得出 30。

棲地品質模型之使用參數，包括威脅因子表與敏感性表等，引用同樣林地及農地為主要景觀的 Chu et al. (2018) 之棲地品質研究，並依據本研究的土地利用分類，提取其中相關的六種土地利用參數使用，包括稻田、茂密林地、中等覆蓋度草地、湖、都市用地及裸露地等。

(3) 生態系服務價值轉換依據

過去有許多生態系服務價值的轉換方法 (Costanza et al., 1997；De Groot et al., 2012；Xie et al., 2017)，但本研究考量臺灣地理區位的獨特性，及蘭陽溪流域大多屬於森林生態系統的範疇，因此參考 Lin et al. (2021) 對於臺灣森林生態系統的估值方法，該研究經過專家會議評估而成。首先，森林碳匯價值採用歐洲銀行碳減量融資影子價格來估算，以每年每噸多少新台幣計算。根據前述轉換方法，本研究推算出 2020 年固碳價值約為每年每噸 39.42 歐元。其次，產水量價值則採用工業用影子價格法，價格為每立方公尺新台幣 40.81 元。最後，棲地品質價值以單位面積保護區效益作為棲地保育價值計算，約為每公頃新台幣 79,075 元。

另外，因為生態系服務轉換價值的單位，如單位面積保護區效益以公頃計算，所以本研究皆將原始國

土利用現況調查資料之向量檔案，藉由細胞中心法 (Cell center) 轉換為一公頃面積之網格檔案，以利於後續空間量化生態系服務使用。

4. 情境模擬

InVEST 基於鄰近性的情境產生器 (Scenario Generator: Proximity Based) 提供政策規劃者一項能更自由調配土地利用配置、同時符合土地利用變遷自然規則的工具，它主要考慮地理位置上的鄰近性，僅需調整所需轉用土地利用的最大面積及轉置規則，能模擬出較符合現實變動狀況的情境模擬結果 (Aryal et al., 2023；Zarandian et al., 2023)。關於此情境模擬工具的設置，主要包含五項設定參數：最大轉換面積 (Maximum Area To Convert)、焦點土地利用 (Focal Landcover)、可轉換土地利用 (Convertible Landcover)、替代土地利用 (Replacement Landcover)，及轉換方式是屬於從焦點土地利用的最近開始 (Convert Nearest To Edge) 或從最遠開始 (Convert Farthest From Edge)。「焦點土地利用」意為作為鄰近性距離計算的基準土地利用類型，用以決定轉換優先順序；「可轉換土地利用」意為被允許進行土地利用轉換的原始土地利用類型；「替代土地利用」意為最終被替換成為的目標土地利用類型。本研究使用的詳細參數設定如表 2。

本研究根據蘭陽溪流域的地理特徵、經濟發展趨勢和歷史土地利用轉移模式，設定 2045 年蘭陽溪流域兩種不同的土地利用情境。兩種未來情境的描述與設定如下：

(1) 自然發展情境 (Regular growth scenario)

參考 Hu et al. (2023)；Li et al. (2022)；Zhao et al. (2021)，自然發展情境設定為不受政策干預、以目前趨勢持續發展下去的假設場景 (Hamad et al., 2018)，能作為其他情境的比較基準。近年來，蘭陽溪流域的農地快速受開發轉為建成區，生態旅遊等產業也蓬勃發展，導致自然資源不斷減少，建設用地不斷增加。同時，觀光果園及茶園等生態旅遊的經濟價值增加，導致農地可能擴大至應保護的山林地帶，而危及山林地區原先能提供的生態系服務價值。在自然發展情境下，2020 年至 2045 年的土地利用變遷趨勢應與 1995 年至 2020 年的土地利用轉移速率類似。因此，本研究採用 1995 年至 2007 年、2007 年至 2020 年各類土地利用轉移到其他類型土地利用的加權平均轉移機率，作為歷史轉移速率，並根據合理的土地利用轉移順序，設定自然發展情境。

為了使得 2045 年自然發展情境與蘭陽溪流域的歷史土地利用變遷概況相似，參考相關文獻 (Aryal et al., 2023) 與本研究各年期的轉移矩陣可知，森林地、農地與草生地之間存在一定的互相轉移特性。一般而言，森林地向建成區的轉換經歷以下過程：先因其他土地利用開發導致森林破碎化，轉換為農地，隨後農地直接轉換為建成區 (Aryal et al., 2023)。本研究最終使用的自然發展情境之設定參數如表 2。

(2) 最佳化情境 (Optimization scenario)

土地資源是有限的，但透過適當的土地利用管理，可以創造多種生態系服務都增加的最佳化目標，以保障區域的多功能生態系服務價值 (Hao and Yu, 2018；Mohammadyari et al., 2023)。Yang et al. (2023) 認為可以透過合理化農耕地面積，增減森林地及灌木林地，以平衡區域的糧食供應服務及其他生態系服務。Wu et al. (2014) 也認為保護農地和森林地，可以改善棲地品質服務並保護稀有棲息地。Bengtsson et al. (2019)；Dubeux et al. (2022)；Huber et al. (2022) 認為草原地提供的生態系服務包括原物料生產、供水、流量調節、碳儲存、淨化水源及維持生物多樣性等服務。Pradhan et al. (2020) 認為在已開發的城鎮地區，增加非森林的綠地也能提供棲地保護及水源涵養等價值。Pergola et al. (2024) 則從經濟學角度，估算草生地能提供的生態系服務價值包括碳儲存及生物多樣性支持等，但目前無太多證據顯示草生地提供多功能生態系服務價值。

同一土地利用能提供多種生態系服務，但對每種生態系服務的貢獻程度不同，可以透過線性規劃，找到多種生態系服務價值都能提升的土地利用調配方式。但進行情境模擬仍需考量土地利用規劃的經濟可行性 (Huber et al., 2022)。根據上述文獻，考慮到發展中的蘭陽溪流域需具有基本社會經濟要求及符合自然現實狀況，本研究將最佳化情境設定為農地、水體及裸露地面積不低於 1995 年、2007 年及 2020 年的最小值，建成區面積則與 2020 年相當，並將碳儲存、年度產水量及棲地品質服務價值皆設定達到大於或盡量趨近於歷史最高值，藉由改變六種土地利用面積，制定最佳化土地利用規劃。在 2045 年的最佳化情境下，根據本研究的線性規劃求解結果顯示，草生地取代部分森林地及大部分閒置之裸露地及水體，能得到將碳儲存、年度產水量及棲地品質服務價值皆盡量最大化之結果。本研究最終使用的最佳化情境之設定參數如表 2。

5. 空間分析

在本研究中，國土利用現況調查資料的土地利用分類調整與合併之前處理工作，以及後續的空間分析及視覺化，皆使用 ArcGIS Pro 3.0.0.工具。在空間分析方法部分，過去研究使用熱點分析 (Hot spot analysis) 空間量化生態系服務價值的熱點區域 (Li et al., 2016；Zhang et al., 2022)，但該方法容易使得空間分析的聚焦重點為整個區域的空間趨勢。若需更精細的分區規劃考量，集群分析 (Cluster analysis) 是可用的模式 (鄒克萬、黃書偉，2007)。因此，本研究使用集群分析探討以村里為單位的生態系服務價值變遷特徵，以利整體土地利用規劃政策的考量。

關於集群分析方法，本研究使用 K-means 集群分析，將兩種情境及 2020 年的生態系服務價值變化量與村里面積相除，以計算每村里每公頃生態系服務價值變化量。接著，進行村里層級的集群分析，以探討不同生態系服務價值變遷的分區特色。最後，將每村里每公頃生態系服務價值變化量，以自然斷點 (Natural breaks) 的方式分成四個集群。

表 2 情境模擬設定表

Table 2 Scenario simulation settings

自然發展情境					
步驟	最大轉換面積	焦點土地利用	轉換方式	可轉換土地利用	替代土地利用
1	387 (ha)	森林地	從最近開始	森林地	農地
2	74 (ha)	森林地	從最近開始	森林地	草生地
3	208 (ha)	森林地	從最近開始	森林地	建成區
4	48 (ha)	森林地	從最近開始	森林地	裸露地
5	602 (ha)	農地	從最近開始	農地	建成區
6	90 (ha)	建成區	從最近開始	草生地	建成區
7	308 (ha)	水體	從最近開始	水體	農地
8	142 (ha)	水體	從最近開始	水體	裸露地
最佳化情境					
步驟	最大轉換面積	焦點土地利用	轉換方式	可轉換土地利用	替代土地利用
1	185 (ha)	森林地	從最遠開始	森林地	草生地
2	414 (ha)	水體	從最近開始	水體	草生地
3	429 (ha)	裸露地	從最近開始	裸露地	草生地

三、結果及討論

1. 蘭陽溪流域 1995 年至 2045 年的土地利用時空變遷特徵

從 1995 年至 2020 年間，蘭陽溪流域的土地利用類型主要為森林地，農地次之 (如表 3)。而從 2007 年開始，建成區的面積取代水體成為第三位，而草生地及裸露地的面積一直居於末兩位。由空間分布來看 (如圖 1)，蘭陽溪流域的土地利用呈現明顯的空間異質性，蘭陽溪流域的農地主要分布在東北側下游處，並與建成區相間，農地類型以水田為主。除了位於下游的農地與建成區相間區域外，森林地主要佔據蘭陽溪流域的上游地區，在森林地帶也可以發現有零星的農地存在，大多為果園、茶園等土地利用，同時能作為觀光遊憩場所使用。

從土地利用的變化趨勢來看，蘭陽溪流域是典型在近三十年間，受到如雪山隧道通車的聯外交通改善，與鄰近大臺北都會區相連接後，快速受到開發的市郊地區，尤其從位於下游的已開發宜蘭市、羅東鎮可觀察出上述推論，從 1995 年大面積農地 (圖 1，橘黃色區域) 到 2020 年已開墾為建成區 (圖 1，灰色區域) 而破碎化。本研究將過去 25 年間土地利用轉移概況以表 3 呈現，表 3 左側欄位代表前一年期之土地利用，轉移到右側第一列所代表土地利用之面積，單位為公頃及面積佔比 (%)。

本研究其後依據表 3 的土地利用轉移矩陣，以模擬 2045 年的土地利用變遷狀況，結果如表 4 所示。最終模擬結果亦顯示，在自然發展情境下，森林地和建成區面積變化幅度最大；在最佳化情境下，草生地面積變化幅度最大，並得到表 4 之各土地利用類型情境模擬後的最終面積。從兩種情境的土地利用面積來看，2020 年至 2045 年的森林地、農地、建成區仍是主要土地利用類型。其中，森林地面積在 2020 年時最大，農地及建成區面積在 2045 年自然發展情境下最大，草生地面積則在最佳化情境下最大。自然發展情境中，建成區大幅占用由森林地轉換而來之農地等土地利用，最佳化情境的草生地則由森林邊緣開始改變土地利用，以盡可能維持原先連續且大面積之森林地的生態功能。

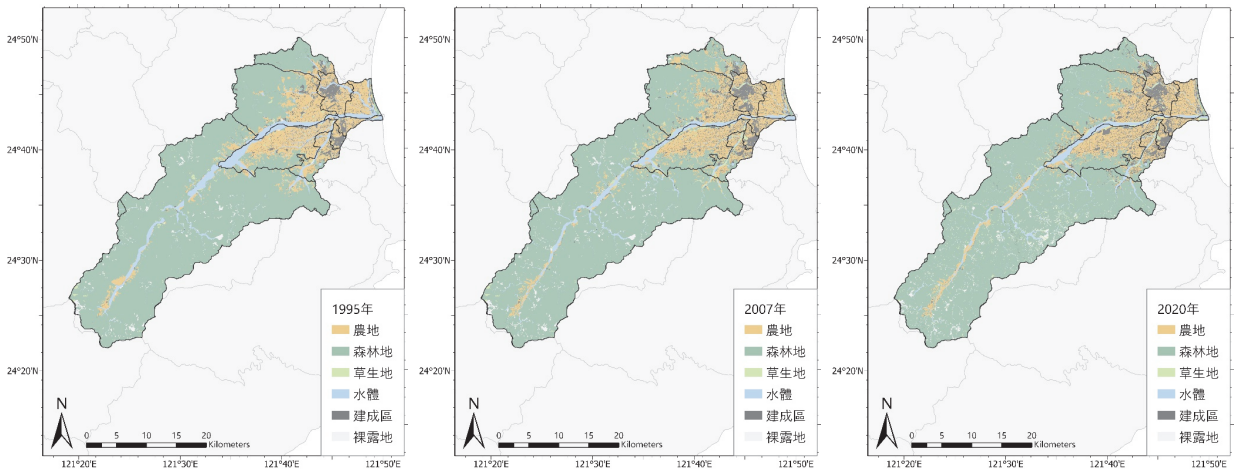


圖 1 蘭陽溪流域 1995 年、2007 年、2020 年土地利用分布圖

Fig.1 Land use maps of the Lanyang River Basin for 1995, 2007, and 2020

表 3 土地利用轉移面積與機率表

Table 3 Land use transition area and probability table

		轉移面積 (單位：公頃) 轉移機率 (單位：%)					
		農地	森林地	草生地	水體	建成區	裸露地
農地	1995-2007	9857.60	2027.76	559.84	261.28	1826.48	4.88
		67.81%	13.95%	3.85%	1.80%	12.56%	0.03%
	2007-2020	11033.76	1306.76	231.52	328.28	1111.72	2.32
		78.73%	9.32%	1.65%	2.34%	7.93%	0.02%
森林地	1995-2007	1706.36	68972.32	262.92	789.76	334.32	526.76
		2.35%	95.01%	0.36%	1.09%	0.46%	0.73%
	2007-2020	767.76	67659.08	1121.56	1055.84	454.32	1152.56
		1.06%	93.70%	1.55%	1.46%	0.63%	1.60%
草生地	1995-2007	357.68	246.20	283.00	45.84	125.56	1.48
		33.75%	23.23%	26.70%	4.33%	11.85%	0.14%
	2007-2020	528.24	449.08	491.92	389.08	304.12	17.52
		24.23%	20.60%	22.57%	17.85%	13.95%	0.80%
水體	1995-2007	1445.36	633.76	839.48	4187.76	539.32	40.96
		18.80%	8.24%	10.92%	54.48%	7.02%	0.53%
	2007-2020	742.16	195.52	405.32	3895.96	128.68	36.44
		13.73%	3.62%	7.50%	72.09%	2.38%	0.67%
建成區	1995-2007	630.24	305.12	203.24	103.08	3117.16	1.56
		14.45%	7.00%	4.66%	2.36%	71.49%	0.04%
	2007-2020	426.16	158.16	99.72	70.08	5198.28	0.24
		7.16%	2.66%	1.68%	1.18%	87.33%	0.00%
裸露地	1995-2007	17.08	25.84	31.48	16.32	9.72	1162.84
		1.35%	2.05%	2.49%	1.29%	0.77%	92.05%
	2007-2020	9.96	952.36	188.56	98.64	7.44	481.52
		0.57%	54.78%	10.85%	5.67%	0.43%	27.70%

表 4 土地利用於各情境下之面積表

Table 4 Land use area under different scenarios

單位：公頃

	1995年	2007年	2020年	2045年自然發展情境	2045年最佳化情境
農地	14,607	13,995	13,453	13,546	13,453
森林地	72,609	72,261	70,745	70,028	70,560
草生地	1,089	2,199	2,579	2,563	3,607
水體	7,683	5,407	5,821	5,371	5,407
建成區	4,267	5,937	7,230	8,130	7,230
裸露地	1,251	1,709	1,680	1,870	1,251

2. 蘭陽溪流域 2020 年至 2045 年的生態系服務價值空間動態

根據 InVEST 評估的不同生態系服務量值，先由概況闡述，碳儲存服務方面，森林地每年每公頃可儲存 169.01 公噸的碳匯量；農地次之，每年每公頃可儲存 105.61 公噸的碳匯量；草生地則最低，每年每公頃可儲存 99.10 公噸的碳匯量，其餘三種土地利用類型不儲存碳匯量。在年度產水量部分，根據經驗模型表明，一般建成區會產生最多的地表逕流量，裸露地次之，水體位於第三位，而森林地產水的效益最低。但實際情況仍主要依年降雨量的分布而定 (Yang et al., 2019)。在棲地品質評估方面，一般具有大片且連續面積的森林地，該區域具有越高的棲地品質效益，而本研究所設定之草生地及水體具有同等能力之棲地品質提供能力，在離已開發城鎮較近的區域是可以考慮的高生態系服務價值提供之土地利用 (Pradhan et al., 2020)。

為了使政策規劃者更易清楚瞭解生態系服務在不同地理區位上的價值，並且使三項生態系服務有統一的標準可以呈現，本研究將原始 InVEST 評估之生態系服務量值，轉換為生態系服務價值，單位為新台幣。參考 Lin et al. (2021)，2020 年蘭陽溪流域總固碳量約為 1,363 萬公噸，總固碳價值約為 180 億元；在自然發展情境下，碳匯量約為 1,352 萬公噸，總固碳價值下降約 1.5 億元；在最佳化情境下，碳匯量約為 1,370 萬公噸，總固碳價值則上升約 0.9 億元。在自然

發展情境下，因為建成區的擴張，壓縮原先森林地及草生地能儲存的碳量，因此下降的碳匯價值最多。而在最佳化情境下，雖然森林地的面積相比於 2020 年基準年為下降，但因為大量的草生地取代了部分森林地，同時也取代部分無儲存碳量的水體及裸露地，因此使得研究區總碳儲存量上升。

2020 年基準年的總產水量約為 6.3 億立方公尺，總產水價值約為 259 億元。自然發展情境的總產水量約為 8.2 億立方公尺，總產水價值相較於 2020 年基準年，上升約 74 億元；最佳化情境的總產水量約為 8.0 億立方公尺，總產水價值上升約 69 億元。整體而言，最佳化情境的總產水價值約低於自然發展情境 5 億元。最佳化情境的建成區與 2020 年相當，但僅是增加較多草生地，將能產生與建成區大幅增加的自然發展情境相當的產水量價值。增加草生地或灌木林等水分涵養能力較低的植被區，可能是一項最佳化生態系服務的解方。

棲地品質的計算方法為保護區面積與單位面積保護區效益相乘，因本研究區域在不同空間上具有不同的棲地品質，考慮到空間差異性，以權重方式重新調整價格計算，最後再總算出整個研究區的棲地品質價值。研究區域的平均棲地品質分數，從 2020 年基準年的 0.6985，到 2045 年自然發展情境時下降為 0.6930；而若調整為最佳化情境，則能上升至 0.7034。從棲地品質價值來看，2020 年基準年時，整個研究區的棲地價值約為 56.0 億元，若在 2045 年自然發展情境下，則約為 55.6 億元，共下降約 4,386 萬元；若調整為最佳化情境時，則上升至約 56.5 億元，共上升約 3,934 萬元。上述三項生態系服務價值的詳細數值如表 5。

表 5 生態系服務價值變化量表

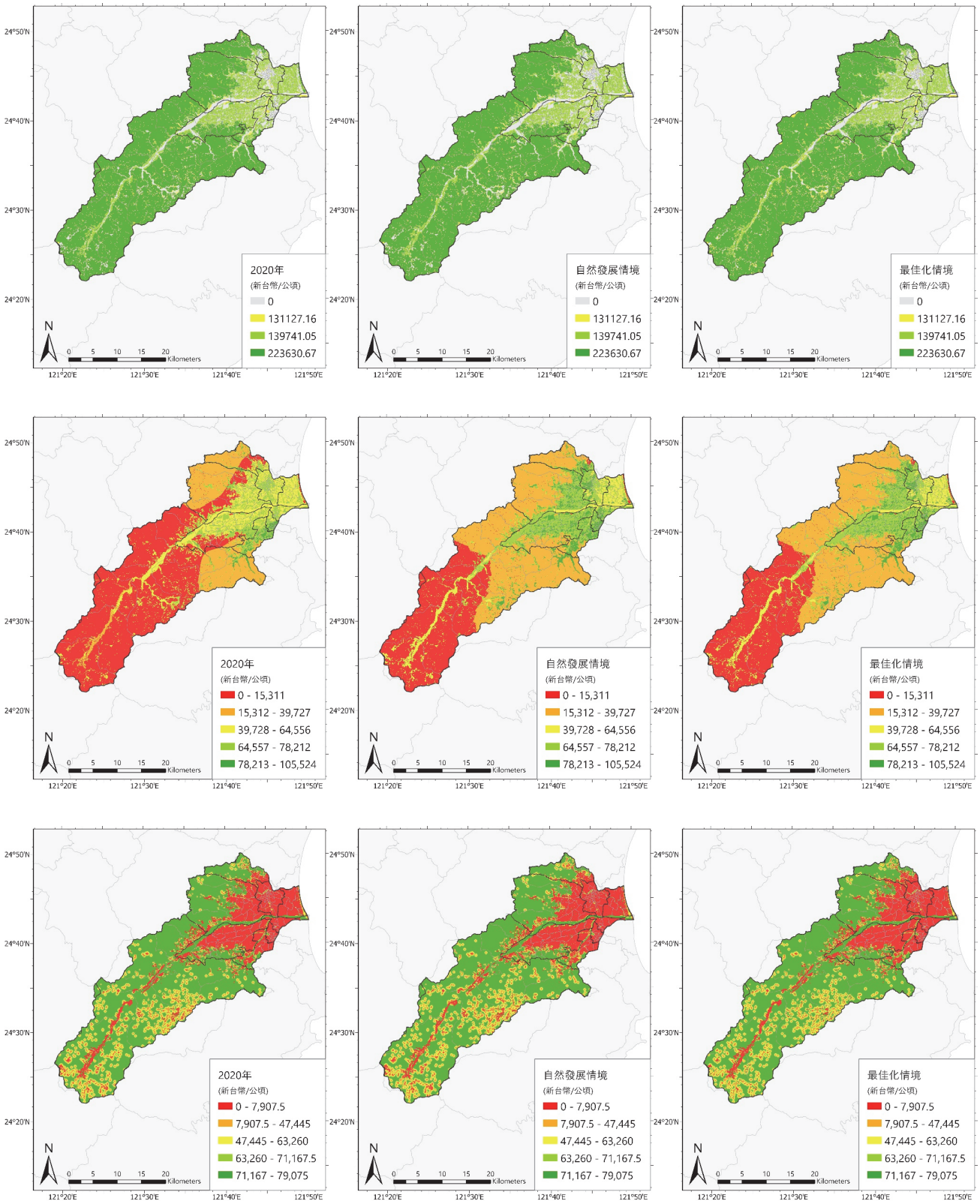
Table 5 Changes in ecosystem service values

生態系服務	生態系服務價值	生態系服務價值	生態系服務價值
	2020年	自然發展情境	最佳化情境
碳儲存 (t)	13,632,963.39	13,520,019.35	13,703,571.35
碳儲存價值 (NTD)	18,038,864,498.38	17,889,419,203.53	18,132,291,538.89
年度產水量 (m^3)	634,613,830.65	816,422,796.36	804,053,599.04
產水量價值 (NTD)	25,898,590,428.83	33,318,214,319.45	32,813,427,376.82
平均棲地品質	0.6985	0.6930	0.7034
棲地品質價值 (NTD)	5,606,667,776	5,562,807,296	5,646,009,344
總價值 (NTD)	31,505,258,204.83	56,770,440,818.98	56,591,728,259.71

根據上述生態系服務價值在研究區中各地理空間的分布狀況，本研究以自然斷點將碳儲存及年度產水量服務價值劃分為五個等級，棲地品質價值則參考 Chu et al. (2018) 的分級數值，將品質狀況分成五個等級。這五個等級分別為高 (High) 服務價值、相對較高 (Relatively high) 服務價值、中等 (Medium) 服務價值、相對較低 (Relatively low) 服務價值及低 (Low) 服務價值。詳細數值與分布如圖 2。由圖 2 可以發現，碳儲存、棲地品質服務兩者與年度產水量服務間具有明顯相反的空間趨勢，因為下游地區的建成區開發較為密集，較難涵養水份而使得地表產水量較多，所以於下游區的年度產水量服務價值在 2020 年及兩個情境下皆大多處於中等以上的服務價值，相反其他區域則處於相對較低以下的服務價值。而棲地品質價值最高處存在於上游地區的森林地及草生地，而下游的人類居住區，因多威脅因子，棲地品質整體幾乎處於低服務價值的狀態。在 2045 年最佳化情境下，大多數遠離森林地區的閒置空地如水體及裸露地，被轉置為草生地，而森林地也由邊緣開始被取代為草生地，能維持原先具有完整大面積的森林地，再加上因草生地的增加彌補了部分生態服務損失，使得棲地品質價值能較 2020 年基準年增加，而碳匯價值也在同樣能儲存一定程度碳匯量的草生地大幅增加後，使得碳匯價值也相較 2020 年基準年增加。

因為不同土地利用類型對於碳儲存、年度產水量及棲地品質服務具有不同程度的貢獻 (Mohammadyari et al., 2023)，使得蘭陽溪流域的生態系服務價值在不同情境下具有顯著的空間差異。其中，森林地對於碳儲存及棲地品質的貢獻度最高，適合為實現 2050 年淨零碳排路徑提供高度貢獻 (Fankhauser et al., 2022)，也適合為受到人為開發嚴重的區域提供生物多樣性支持的價值 (Pradhan et al., 2020)；但考慮到其他類型的生態系服務，尤其是年度產水量供應服務，森林地卻提供最低的貢獻；蘭陽溪流域其實已具有福山試驗林區、濕地保護區等具有完整面積的森林園區，在已開發或開發中的城鎮地區繼續種植大面積林地可能不是最佳解方。考慮到對於碳儲存、年度產水量及棲地品質服務皆具有貢獻的土地利用，草生地可能提供三者皆具的折衷方案。在碳儲存方面，草生地的碳匯量位居第三；而若種植物種多樣性豐富 (Pradhan et al., 2020) 的草生地帶，則也能提供與森林地相當的棲地品質價值 (Chu et al., 2018)；草生地也因為根系較淺之緣故，較不會產生與森林地相當的水源涵養量 (Yang et al., 2019)，利於下游的產水量供應。

整體來說，受到年度產水量價值顯著提升影響，自然情境下的生態系服務總價值最高；然而，最佳化情境下的生態系服務總價值，僅小於自然發展情境約 1.8 億元。根據 Lin et al. (2021)，碳匯價值在未來每年都會成長為原先的 1.02%，預期 2045 年自然發展情境因為土地利用改變所損失的碳匯價值，將會遠高於產水量服務能帶來的價值。同時，因為都市化而增加的降水量是地表侵蝕的重要驅動因素，也可能進一步加劇氣候變遷背景下的地球系統複雜性，加大總降雨量和最大日降雨量 (Chen et al. 2020)，對區域規劃產生不利影響。因此，就長遠發展的價值來看，自然發展情境似乎不是最佳的生態系服務發展方案。



註：由上而下分別為碳儲存價值、年度產水量價值及棲地品質價值。

圖 2 蘭陽溪流域碳儲存、年度產水量、棲地品質價值分布圖

Fig.2 Maps of carbon storage, annual water yield, and habitat quality values

3. 生態系服務價值空間分析與分區土地利用管理策略

本研究依據兩種情境、三種生態系服務價值變化量的數值進行集群分析，並最終依自然斷點分成四個特徵集群。本節將討論集群分析的結果，及集群相應的土地利用分區管理策略。四個集群之特徵，包含四分位數及平均數等的盒狀圖如圖 3 所示，而村里界的劃分則如圖 4 所示。

首先，第一集群主要位於蘭陽溪流域下游的中心城鎮地帶，共包含 45 個村里，包括宜蘭市、三星鄉及員山鄉等多個中心城鎮 (如圖 4)。該集群的生態系服務價值變化特徵為：在自然發展情境下，每公頃的平均碳匯價值減少，但變化幅度不大，但在最佳化情境下，碳匯價值則幾乎無增加；年度產水量價值變化在四個集群中表現次佳；而有趣的是，在自然發展情境下，棲地品質價值變化趨勢不一致，平均來說呈現些微上升，但在最佳化情境下，則些微下降。原因大致歸咎於在最佳化情境下，由於森林邊緣受到擾動，反而使得棲地品質整體降低。根據此區的特徵，土地利用管理策略為：需控制建成區的擴張、集聚建設用地 (Zhang et al., 2022)，制定合理的都市發展規劃 (Sun et al., 2018)，避免對於農地和森林地的開發，以保障基本的碳匯及棲地品質服務。

第二集群包括已幾乎開發為建成區的宜蘭市孝廉里、菜園里與小東里，及有類似變化特徵的員山鄉同樂村與三星鄉天山村。該集群的特徵為：年度產水量價值增加為最高者、碳匯價值及棲地品質價值下降最多，但在最佳化情境下，碳匯價值與棲地品質價值則幾乎不變。探究其原因，建成區佔據該集群大部分地區，且不論於自然發展情境或是最佳化情境，在 2045 年總雨量增加的情況下，這幾區的年度產水量價值皆會大幅增加。然而，建成區所帶來的產水量服務效益並不能完全使用，例如水質不佳 (Ávila-García et al., 2020)。為最佳化使用這些豐沛的水源，蘭陽溪流域無水庫，主要供水來源為地表水源，若要增強水利使用，則考慮增加下游的微水力發電措施 (Paish, 2002)。另外，因為此集群的土地利用幾乎不變，碳匯及棲地品質儘管在最佳化情境下，皆變動程度較低。若要維持社會經濟發展，可以適度在建成區內建置都市綠色基礎設施 (Barrios-Crespo et al., 2021；Wang et al., 2022)，或實行低碳土地利用 (Liu et al., 2025)，以盡量為此集群的村里增加碳匯及棲地品質保護效益。

第三集群包含壯圍鄉永鎮村、東港村與冬山鄉柯林村。該集群的年度產水量價值增加幅度是所有集群中最小的；但碳匯價值卻是增加幅度最大的；而棲地品質價值皆為下降趨勢。針對上述特徵之土地利用管理策略為：促進草生地發展，在城鎮邊緣地區或低生態價值的土地上，可以實施生態友善的土地利用 (Zhang et al., 2018)，多種植適宜當地且物種多樣性豐富的草生地 (de la Barrera et al., 2016；Pradhan et al., 2020)，能增強整體生態系服務價值 (Augeraud-Véron et al., 2019)。

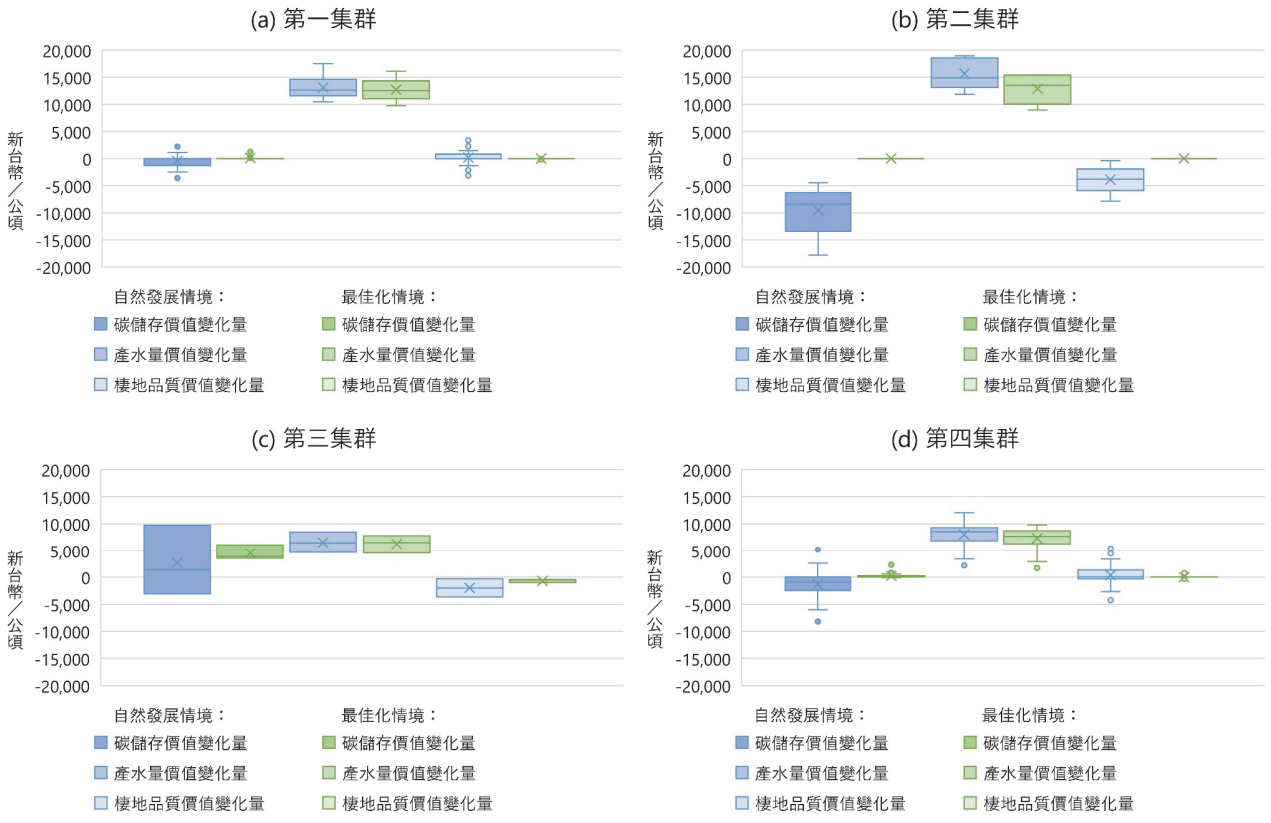


圖 3 蘭陽溪流域生態系服務價值變遷之集群特徵盒狀圖

Fig.3 Box plot of cluster features for changes in ecosystem service values

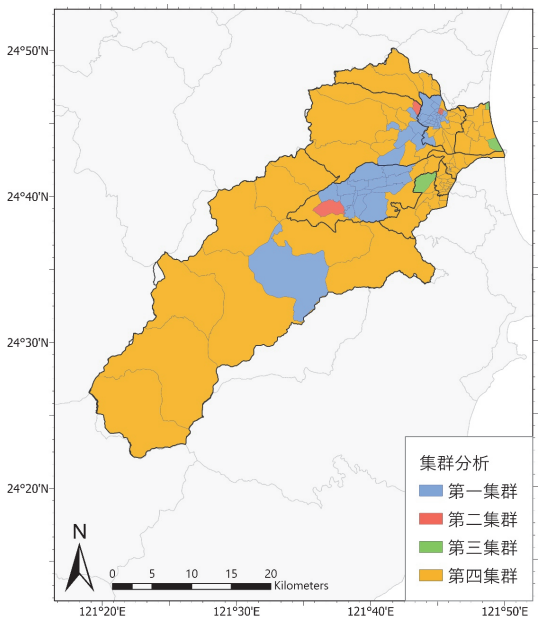


圖 4 蘭陽溪流域生態系服務價值變遷之集群分布圖

Fig.4 Cluster analysis of ecosystem service value changes

第四集群主要包括蘭陽溪上游的森林地帶及已開發城鎮的周圍地區，共包含 74 個村里，主要包括礁溪鄉、員山鄉、大同鄉、冬山鄉、五結鄉與壯圍鄉的部分森林地區 (如圖 4)。該集群生態系服務價值變化特徵為：在最佳化情境下，棲地品質是四個集群中最明顯價值增加者，但在自然發展情境下，村里在棲地品質價值增減上的差異也較明顯；然而，受到較多森林地面積被轉置為其他土地利用影響，在自然發展情境下，碳匯價值減少幅度最大，在最佳化情境下，碳匯價值增加幅度也偏低；且因為該集群大部分面積為森林地帶，年度產水量價值增加幅度偏低。針對整體生態表現較佳的第四集群之土地利用管理策略為：盡量保護成片的核心森林區 (Fedele et al., 2021；Zhao et al., 2021)，如限制觀光果園等農地及建成區的開發等，確保其在碳儲存和棲地品質方面的核心功能。

透過模擬土地利用的調配，以達成最佳化生態系服務價值，及依分區特徵探討管理策略，能提供更符合自然現況的土地利用規劃政策參考。本研究結合情境模擬與空間分析，發現以社會經濟發展為主的自然發展情境，容易對碳儲存及棲地品質價值產生負面影響，且不論於哪個集群，棲地品質效益皆大部分為下降，碳儲存效益也僅在第三集群的少數村里產生些微的上升。而最佳化情境下的碳儲存及棲地品質效益整體皆明顯提升，且在以森林地為主的第四集群之棲地品質也能有明顯的上升，碳匯效益則在第一集群、第三集群及第四集群皆有明顯提升。但本研究設定之草生地的棲地品質與森林地具有相當貢獻，Sun et al. (2018) 在都會區的研究認為恢復森林地比恢復草生地較有效，因此在執行改置草生地之土地利用規劃時，需考慮種植之植被的碳儲存與棲地品質提供能力。而由於蘭陽溪流域各區的土地利用條件、特徵與限制不同，因此未來可以再針對分區土地利用特徵，進行情境模擬與實證分析，以提出有針對性的區域性經濟發展和生態保護政策。

4. 研究限制與不確定性

本研究的生態系服務價值評估結果存在研究限制與不確定性。首先，土地利用情境模擬的現實情況準確性，取決於歷史土地利用變遷資料、社會經濟發展數據、現實政策規劃與土地利用適宜性等。而本研究採用趨勢一致性檢視方法，以驗證土地利用模擬結果的可靠性，首先檢視 1995 年至 2020 年間農地與森林面積呈現逐漸減少、建成區面積則持續增加，此特徵與蘭陽溪流域實際發展情形一致，顯示自然發展情境的模擬結果具有合理性。但在空間分布的模擬上，本研究的情境模擬僅考慮了 1995 年至 2020 年土地利用的平均轉移速率，因橫跨的時間斷面大，再加上無其他社會經濟數據輔助推估，如人口變遷、國內生產毛額等，或是基於政策規劃土地利用的適宜性評估 (Albert et al., 2016) 等，因為欠缺自然與社會實際發展情況的考量，使得最終模擬結果可能與現實情況不符。鑒於上述，考量自然與社會發展條件的系統動力學模型 (System dynamics) 可能是未來可以發展的模擬模式 (Barrios-Crespo et al., 2021；Zhao et al., 2022)。然而，考量本研究目的在於以 InVEST 模型為基礎的土地利用面積調整之情境分析，而非精確預測土地利用位置變化，故該方法足以支撐後續生態系服務價值評估。

其次，生態系服務評估模型的參數選擇存在主觀性 (Zhang et al., 2022)，如棲地品質服務的鄰域權重選擇等，都會影響最終評估的整體棲地品質。同時，InVEST 有其模擬限制，它主要針對空間特徵進行模擬，但像是碳匯量可能會因為不同年度間土地利用形式的轉變而改變碳匯量，但此模型僅能依據土地利用平均年碳儲存量推估，可能高估碳匯效益。在年度產水量模型的部分，產水量受到年降雨量的影響很大 (Yang et al., 2019；Yang et al., 2023)，本研究已將 2020 基準年與 2045 目標年兩個情境的降雨量資料來源，統一皆使用 TCCIP 提供之 AR6 SSP245 情境的降雨量資料，以消除觀測值與推估值間的誤差。但在產水量價值變化的評估上，可能仍產生降雨量帶來的產水量推估結果不確定性，例如較難確認改置為草生地後，2045 年最佳化情境的產水量效益也能相較於 2020 年為提升。建議後續結果應消除降雨量對於評估模型的敏感性，以更精確評估土地利用改置帶來的效益。

第三，在以 InVEST 為基礎的生態系服務評估結果之驗證方面，本研究使用台灣官方資料驗證 1995 年、2007 年及 2020 年的模擬結果，以評估該模型的可靠性。在碳儲存驗證方面，由於缺乏蘭陽溪流域尺度之長期碳儲存觀測資料，本研究參考國家溫室氣體清冊報告中之全臺二氧化碳吸收量變化趨勢進行比較，顯示全臺碳吸收量自 1995 年至 2020 年間呈現逐漸下降趨勢，與本研究模擬結果中森林面積減少及碳儲存下降之變化方向一致；本研究之碳儲存空間分布結果亦符合一般森林高、建成區低之碳儲存特性，顯示模型結果具有合理性。在產水量驗證方面，本研究蒐集蘭陽溪流域的蘭陽大橋測站之水文年報資料，並將原始年逕流量資料 (單位：cms-day) 轉換為年總逕流量 (單位：m^3/year) 以進行比較，發現實測年逕流量於 1995 年、2007 年及 2020 年分別約為 16.4 億、29.4 億及 21.7 億立方公尺，而 InVEST 模擬則分別為 5.7 億、17.5 億及 10.3 億立方公尺，顯示模型於各

年度均呈低估 (誤差在 40%至 65%間)；但模擬結果能合理反映不同年度間之變化趨勢，例如三個年度之觀測值與模擬值的大小排序一致，顯示模型具有良好的趨勢捕捉能力，並適用於情境比較分析。而本研究原嘗試利用 TBN 資料進行棲地品質驗證，惟分析結果顯示物種紀錄點高度集中於都市及人口密集區域，推測與公民科學資料之採樣努力差異有關，可能產生空間偏差，最終本研究未直接採用 TBN 物種出現頻率作為棲地品質之定量驗證依據；考量棲地品質為相對指標，本研究改採空間合理性檢視方法，發現高棲地品質區主要分布於森林覆蓋區域，而低值區則集中於建成區，與一般生態分布特性一致。綜上所述，驗證結果雖無法直接反映實測值，但證實 InVEST 模型之輸出與觀測資料的整體一致性，這能支持將此模型用於台灣生態系統服務評估和空間規劃的決策支援工具，尤其在區域尺度上，廣泛的趨勢一致性較精細性更為重要。

四、結　　論

總結來說，本研究的評估結果認為，增加草生地可能是改善多功能生態系服務價值的一種解方，但仍需考量要轉置的土地利用類型、增加的草生地植被種類，及依據地理空間特徵進行分區管理。本研究以鄰近大臺北都會區的蘭陽溪流域為研究對象，提供一種鄰近大都會之流域的多功能生態系服務價值最佳化方式之一，並以具體價值量化在村里行政區上的生態系服務價值變化，能提供土地利用規劃者一項明確的參考基準。研究結果顯示，草生地的增加在提供多功能生態系服務方面具有明顯的效益，包括碳儲存及棲地品質的提升，但年度產水量服務主要受制於降雨量的影響，轉置為草生地的正面影響並不明顯。然而，年度產水量的增加並不能完全帶來正向的生態系服務效益，仍需考量整個研究區的土地利用分配，如過多的建成區反而使得增加的產水量無法使用。未來研究建議考量現實社會經濟發展狀況及現行政策規劃，針對分區特徵進行生態系服務效益的情境模擬與實證分析，並考量生態系服務評估模型結果的不確定性，以更精確評估各項土地利用配置執行後的生態系服務效益，同時平衡社會與環境生態的永續發展。

參考文獻

[1] 吳治達、鄭祈全、羅漢強 (2008)，「土地利用型與空間尺度對蒸發散量影響之研究」，中華林學季刊，41(2)，211-219。(Wu, C.D., Cheng, C.C., and Lo, H.C. (2008). "Effects of Land-Use Types and Spatial Scales on Evapotranspiration." *Quarterly Journal of Chinese Forestry*, 41(2), 211-219. (in Chinese))

[2] 柯佑霖、黃文政 (2016)，「以 InVEST 模式評估水庫集水區農業非點源污染之防治效益」，水土保持學報，48(2)，1733-1748 。(Ke, Y.L., and Huang, W.C. (2016). "Evaluation of Treatment Efficiency for Agriculture Non-point Source Pollution in Reservoir Watershed Using InVEST Model." *Journal of Soil and Water Conservation*, 48(2), 1733-1748. (in Chinese))

[3] 鄒克萬、黃書偉 (2007)，「都市土地利用變遷對自然環境衝擊之空間影響分析」，地理學報，48，1-18。(Tsou, K.W., and Huang, S.W. (2007). "The Impact Assessment of Urban Land-use Change on Natural Environment by Spatial Analysis." *Journal of Geographical Science*, 48, 1-18. (in Chinese))

[4] Albert, C., Galler, C., Hermes, J., Neuendorf, F., Von Haaren, C., and Lovett, A. (2016). "Applying ecosystem services indicators in landscape planning and management: The ES-in-Planning framework." *Ecological Indicators*, 61, 100-113.

[5] Aryal, A., Bhatta, K.P., Adhikari, S., and Baral, H. (2022). "Scrutinizing Urbanization in Kathmandu Using Google Earth Engine Together with Proximity-Based Scenario Modelling." *Land*, 12(1), 25.

[6] Augeraud-Véron, E., Fabbri, G., and Schubert, K. (2019). "The value of biodiversity as an insurance device." *American Journal of Agricultural Economics*, 101(4), 1068-1081.

[7] Ávila-García, D., Morató, J., Pérez-Maussán, A.I., Santillán-Carvantes, P., Alvarado, J., and Comín, F.A. (2020). "Impacts of alternative land-use policies on water ecosystem services in the Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello watershed, Mexico." *Ecosystem Services*, 45, 101179.

[8] Babbar, D., Areendran, G., Sahana, M., Sarma, K., Raj, K., and Sivadas, A. (2021). "Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India." *Journal of Cleaner Production*, 278, 123333.

[9] Bagstad, K.J., Semmens, D.J., Waage, S., and Winthrop, R. (2013). "A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation." *Ecosystem services*, 5, 27-39.

[10] Barrios-Crespo, E., Torres-Ortega, S., and Díaz-Simal, P. (2021). "Developing a dynamic model for assessing green infrastructure investments in urban areas." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(20), 10994.

[11] Bengtsson, J., Bullock, J.M., Egoh, B., Everson, C., Everson, T., O'connor, T., O'Farrell, P.J., Smith, H.G., and Lindborg, R. (2019). "Grasslands—more important for ecosystem services than you might think." *Ecosphere*, 10(2), e02582.

[12] Budyko, M.I., and Miller., D.H. (1974). *Climate and life*, Academic Press, New York, USA.

[13] Burton, I. (1987). "Report on reports: Our common future: The world commission on environment and development." *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 29, 25-29.

[14] Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Díaz, S., Dietz, T., Duraiappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J., and Whyte, A. (2009). "Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium

Ecosystem Assessment." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305-1312.

[15] Chen, C.J., Chen, C.C., Lo, M.H., Juang, J.Y., and Chang, C.M. (2020). "Central Taiwan's hydroclimate in response to land use/cover change." *Environmental Research Letters*, 15(3), 034015.

[16] Chen, W.J., Jan, J.F., Chung, C.H., and Liaw, S.C. (2022). "Resident willingness to pay for ecosystem services in hillside forests." *International journal of environmental research and public health*, 19(10), 6193.

[17] Chen, W.J., Jan, J.F., Chung, C.H., and Liaw, S.C. (2024). "Navigating Land Conservation, Utilization, and Market Solutions: Insights from the Lanyang River Watershed, Taiwan." *Sustainability*, 16(11), 4326.

[18] Chivulescu, S., Hapa, M., Pitar, D., Lorenţ, A., Marmureanu, L., Leca, S., Radu, R., Cazacu, R., Dobre, A.C., Pascu, I.S., Marcu, C., Verghelet, M., Vezeanu, C., Racoviceanu, T., and Badea, O. (2024). "Integrating monetary and non-monetary valuation for ecosystem services in Piatra Craiului national park, Southern Carpathians: a comprehensive approach to sustainability and conservation." *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1280793.

[19] Chu, L., Sun, T., Wang, T., Li, Z., and Cai, C. (2018). "Evolution and prediction of landscape pattern and habitat quality based on CA-Markov and InVEST model in Hubei section of Three Gorges Reservoir Area (TGRA)." *Sustainability*, 10(11), 3854.

[20] Costanza, R., d'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P., and Van Den Belt, M. (1997). "The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature*, 387(6630), 253-260.

[21] De Groot, R., Brander, L., Van Der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., and Van Beukering, P. (2012). "Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units." *Ecosystem services*, 1(1), 50-61.

[22] De la Barrera, F., Rubio, P., and Banzhaf, E. (2016). "The value of vegetation cover for ecosystem services in the suburban context." *Urban forestry & urban greening*, 16, 110-122.

[23] Donohue, R.J., Roderick, M.L., and McVicar, T.R. (2012). "Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model." *Journal of Hydrology*, 436, 35-50.

[24] Dubeux Jr, J.C., Jaramillo, D., Santos, E.R., Garcia, L., and Queiroz, L. D. (2022). "Invited Review: Ecosystem services provided by grasslands in the Southeast United States." *Applied Animal Science*, 38(6), 648-659.

[25] Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., and Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*.

[26] Eigenbrod, F., Bell, V.A., Davies, H.N., Heinemeyer, A., Armsworth, P.R., and Gaston, K.J. (2011). "The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1722), 3201-3208.

[27] Fankhauser, S., Smith, S.M., Allen, M., Axelsson, K., Hale, T., Hepburn, C., Kendall, J.M., Khosla, R., Lezaun, J., Mitchell-Larson, E., Obersteiner, M., Rajamani, L., Rickaby, R., Seddon, N., and Wetzer, T. (2022). "The meaning of net zero and how to get it right." *Nature climate change*, 12(1), 15-21.

[28] Fedele, G., Donatti, C.I., Bornacelly, I., and Hole, D.G. (2021). "Nature-dependent people: Mapping human direct use of nature for basic needs across the tropics." *Global Environmental Change*, 71, 102368.

[29] Guo, Z., Zhang, L., and Li, Y. (2010). "Increased dependence of humans on ecosystem services and biodiversity." *PLOS ONE*, 5(10), e13113.

[30] Hamad, R., Balzter, H., and Kolo, K. (2018). "Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios." *Sustainability*, 10(10), 3421.

[31] Hao, R., and Yu, D. (2018). "Optimization schemes for grassland ecosystem services under climate change." *Ecological Indicators*, 85, 1158-1169.

[32] Hu, N., Xu, D., Zou, N., Fan, S., Wang, P., and Li, Y. (2023). "Multi-scenario simulations of land use and habitat quality based on a PLUS-InVEST model: A case study of baoding, China." *Sustainability*, 15(1), 557.

[33] Huber, R., Le'Clec'h, S., Buchmann, N., and Finger, R. (2022). "Economic value of three grassland ecosystem services when managed at the regional and farm scale." *Scientific Reports*, 12(1), 4194.

[34] Kombate, A., Folega, F., Atakpama, W., Dourma, M., Wala, K., and Goïta, K. (2022). "Characterization of land-cover changes and forest-cover dynamics in Togo between 1985 and 2020 from Landsat images using Google Earth Engine." *Land*, 11(11), 1889.

[35] Kreuter, U.P., Harris, H.G., Matlock, M.D., and Lacey, R. E. (2001). "Change in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas." *Ecological economics*, 39(3), 333-346.

[36] Li, C., Wu, Y., Gao, B., Zheng, K., Wu, Y., and Li, C. (2021). "Multi-scenario simulation of ecosystem service value for optimization of land use in the Sichuan-Yunnan ecological barrier, China." *Ecological Indicators*, 132, 108328.

[37] Li, G., Fang, C., and Wang, S. (2016). "Exploring spatiotemporal changes in ecosystem-service values and hotspots in China." *Science of the Total Environment*, 545, 609-620.

[38] Li, Y., Liu, Z., Li, S., and Li, X. (2022). "Multi-scenario simulation analysis of land use and carbon storage changes in changchun city based on FLUS and InVEST model." *Land*, 11(5), 647.

[39] Lin, J.C., Chiou, C.R., Chan, W.H., and Wu, M.S. (2021). "Valuation of forest ecosystem services in Taiwan." *Forests*, 12(12), 1694.

[40] Lin, Y.P., Hong, N.M., Wu, P.J., Wu, C.F., and Verburg, P.H. (2007). "Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan." *Landscape and urban planning*, 80(1-2), 111-126.

[41] Liu, K., Cheng, P., Zhang, A., Qin, S., and Zhang, X. (2025). “Beyond environmental sustainability: Low-carbon land use policies can contribute to the realization of comprehensive sustainable development.” *Sustainable Development*, 33(1), 1315-1332.

[42] Liu, Q., Yang, D., Cao, L., and Anderson, B. (2022). “Assessment and prediction of carbon storage based on land use/land cover dynamics in the tropics: a case study of Hainan Island, China.” *Land*, 11(2), 244.

[43] Lou, Y., Yang, D., Zhang, P., Zhang, Y., Song, M., Huang, Y., and Jing, W. (2022). “Multi-scenario simulation of land use changes with ecosystem service value in the Yellow River Basin.” *Land*, 11(7), 992.

[44] Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*, World Resources Institute.

[45] Mohammadyari, F., Tavakoli, M., Zarandian, A., and Abdollahi, S. (2023). “Optimization land use based on multi-scenario simulation of ecosystem service for sustainable landscape planning in a mixed urban-Forest watershed.” *Ecological Modelling*, 483, 110440.

[46] Mukhopadhyay, A., Hati, J.P., Acharyya, R., Pal, I., Tuladhar, N., and Habel, M. (2024). “Global trends in using the InVEST model suite and related research: A systematic review.” *Ecohydrology & Hydrobiology*, 25(2), 389-405.

[47] Paish, O. (2002). “Small hydro power: technology and current status.” *Renewable and sustainable energy reviews*, 6(6), 537-556.

[48] Pergola, M., De Falco, E., and Cerrato, M. (2024). “Grassland ecosystem services: their economic evaluation through a systematic review.” *Land*, 13(8), 1143.

[49] Pradhan, R., Manohar, A., Sarkar, B.C., Bhat, J.A., Shukla, G., and Chakravarty, S. (2020). “Ecosystem services of urban green sites-A case study from Eastern Himalayan foothills.” *Trees, Forests and People*, 2, 100029.

[50] Saxton, K.E., and Rawls, W.J. (2006). “Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions.” *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

[51] Sharp, R., Chaplin-Kramer, R., Wood, S., Guerry, A., Tallis, H., Ricketts, T., Nelson, E., Ennaanay, D., Wolny, S., Olwero, N., Vigerstol, K., Mendoza, G., Aukema, J., Foster, J., Forrest, J., Cameron, D.R., Arkema, K., Lonsdorf, E., and Douglass, J. (2018). *InVEST User’s Guide*, The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, USA.

[52] Sun, X., Lu, Z., Li, F., and Crittenden, J.C. (2018). “Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs to support the supply of multiple ecosystem services in Beijing, China.” *Ecological indicators*, 94, 117-129.

[53] Turner, R.K., Paavola, J., Cooper, P., Farber, S., Jessamy, V., and Georgiou, S. (2003). “Valuing nature: lessons learned and future research directions.” *Ecological economics*, 46(3), 493-510.

[54] Wang, S., Hu, M., Wang, Y., and Xia, B. (2022). “Dynamics of ecosystem services in response to urbanization across temporal and spatial scales in a mega metropolitan area.” *Sustainable Cities and Society*, 77, 103561.

[55] Wu, C.F., Lin, Y.P., Chiang, L.C., and Huang, T. (2014). “Assessing highway's impacts on landscape patterns and ecosystem services: A case study in Puli Township, Taiwan.” *Landscape and Urban Planning*, 128, 60-71.

[56] Wu, S.W., Lin, C.Y., Sun, M.Y., and Lu, S. Y. (2022). “Estimation of soil depth in the Liukuei Experimental Forest by using conceptual model.” *CATENA*, 209, 105839.

[57] Xie, G., Zhang, C., Zhen, L., and Zhang, L. (2017). “Dynamic changes in the value of China’s ecosystem services.” *Ecosystem services*, 26, 146-154.

[58] Yang, D., Liu, W., Tang, L., Chen, L., Li, X., and Xu, X. (2019). “Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model.” *Landscape and Urban Planning*, 182, 133-143.

[59] Yang, J., Li, J., Fu, G., Liu, B., Pan, L., Hao, H., and Guan, X. (2023). “Spatial and temporal patterns of ecosystem services and trade-offs/synergies in Wujiang River Basin, China.” *Remote Sensing*, 15(16), 4099.

[60] Zarandian, A., Mohammadyari, F., Mirsanjari, M.M., and Visockiene, J.S. (2023). “Scenario modeling to predict changes in land use/cover using Land Change Modeler and InVEST model: a case study of Karaj Metropolis, Iran.” *Environmental monitoring and assessment*, 195(2), 273.

[61] Zhang, H., Liao, X., and Zhai, T. (2018). “Evaluation of ecosystem service based on scenario simulation of land use in Yunnan Province.” *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts a/b/c, 104, 58-65.

[62] Zhang, X., Ren, W., and Peng, H. (2022). “Urban land use change simulation and spatial responses of ecosystem service value under multiple scenarios: A case study of Wuhan, China.” *Ecological Indicators*, 144, 109526.

[63] Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Liu, Y., Zhang, G., and Chen, Y. (2018). “On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China.” *Science of the total environment*, 637, 780-790.

[64] Zhao, B., Li, S., and Liu, Z. (2022). “Multi-scenario simulation and prediction of regional habitat quality based on a system dynamic and patch-generating land-use simulation coupling model—a case study of Jilin Province.” *Sustainability*, 14(9), 5303.

[65] Zhao, D., Xiao, M., Huang, C., Liang, Y., and Yang, Z. (2021). “Land use scenario simulation and ecosystem service management for different regional development models of the Beibu Gulf Area, China.” *Remote Sensing*, 13(16), 3161.

2026 年 01 月 29 日　收稿
2026 年 04 月 25 日　修正
2026 年 07 月 03 日　接受