

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240123

基于 InVEST 模型云南省生态系统服务功能综合评估

王卓尧¹ 任宇飞^{1,2} 姜群鸥^{1,2} 甄子云¹ 解晨¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】评估云南省生态系统服务价值, 探究生态系统服务空间分布与时间变化特征, 旨在为云南省的生态保护和可持续发展提供科学依据和决策支持。【方法】基于 InVEST 模型, 对云南省 2010 和 2020 年土壤保持、碳储量、水源涵养和水质净化服务进行评估, 全面解析生态系统服务功能时空演变特征。采用分位数分割法确定各类生态系统服务边界点, 拟合这些生态系统服务之间的约束关系。采用成本替代方法, 定量估算云南省生态系统服务价值。【结果】(1)除水质净化服务外, 其他 3 项服务质量整体上呈西高东低的格局; 全区大部分为低氮磷负荷区, 氮磷负荷量高值区较为分散。(2)在垂直分布上, 除水质净化服务, 其他 3 项服务高值区主要分布在海拔 2 400 ~ 2 800 m 区间范围内。(3)相较于 2010 年, 2020 年云南省土壤保持、碳储量服务得到改善, 水源涵养与水质净化服务出现退化。(4)除 2010 年水质净化服务氮负荷对土壤保持服务的约束关系呈现负凸曲线, 其余生态系统服务之间的约束关系为驼峰型或双驼峰型。2020 年阈值较 2010 年整体呈现左移趋势。(5)2010—2020 年, 云南省综合生态系统服务价值有所下降, 主要体现在水源涵养服务。2010 年云南省生态系统服务总价值为 1.79×10^{12} 元, 平均价值 4.54×10^6 元/km²。2020 年下降至 1.71×10^{12} 元, 平均价值 4.33×10^6 元/km²。【结论】云南省生态系统服务价值较高, 2010—2020 年, 土壤保持与碳储量服务得到改善, 水源涵养与水质净化服务出现退化。

关键词: 土地利用; 土壤保持; 碳储量; 产水量; 水质净化; 云南省; 生态系统

中图分类号: Q148; X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)11-0103-10

引文格式: 王卓尧, 任宇飞, 姜群鸥, 等. 基于 InVEST 模型云南省生态系统服务功能综合评估 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 103-112. Wang Zhuoyao, Ren Yufei, Jiang Qunou, et al. Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 103-112.

Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model

Wang Zhuoyao¹ Ren Yufei^{1,2} Jiang Qunou^{1,2} Zhen Ziyun¹ Xie Chen¹

(1. School of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to evaluate the ecosystem service values in Yunnan Province of southwestern China and examine their spatial distribution and temporal changes. [Method] Utilizing the InVEST model, we evaluated soil conservation, carbon storage, water conservation, and water purification services in Yunnan Province for year 2010 and 2020. Quantile segmentation was employed to identify service boundaries, and fitting methods were used to determine constraints between services. Space scale, time scale were analyzed to comprehend the spatiotemporal evolution of ecosystem functions. The value of these services was estimated using cost replacement and other methods. [Result] (1) Except for water

收稿日期: 2024-04-22 修回日期: 2024-06-07

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (BLX202213), 国家自然科学基金项目 (42101190)。

第一作者: 王卓尧. 主要研究方向: 3S 技术集成应用与开发. Email: 1173170393@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 任宇飞, 讲师, 硕士生导师. 主要研究方向: 城镇化的资源环境效应与区域可持续发展. Email: renyf@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

purification, ecosystem services in Yunnan Province generally exhibited a west-high-east-low quality pattern. Most areas had low nitrogen and phosphorus outputs, with high-output zones being sporadically distributed. (2) High-quality service areas, excluding water purification, were predominantly located at altitudes between 2 400–2 800 m. (3) Compared with 2010, soil conservation and carbon storage were improved in 2020, whereas water retention and purification services were degraded. (4) In 2010, except for a negative linear relationship between nitrogen load and soil conservation concerning water purification, other service constraints displayed hump-shaped and double camel-hump patterns with increased sensitivity to constraint variables. The overall threshold showed a left shift trend. (5) From 2010 to 2020, the overall value of ecosystem services in Yunnan Province decreased, mainly due to water retention. In 2010, the total service value was 1.79×10^{12} CNY (4.54×10^6 CNY/km²), dropping to 1.71×10^{12} CNY (4.33×10^6 CNY/km²) in 2020. [Conclusion] Ecosystem service value in Yunnan Province is substantial. Over the past decade, soil conservation and carbon storage have improved, water retention and purification have declined.

Key words: land use; soil conservation; carbon storage; water yield; water purification; Yunnan Province; ecosystem

生态系统服务不仅为人类的生产和建设提供了必要的物质资源,还通过水质净化、空气净化、土壤保持和生物多样性维护等环境调节功能,为人类社会提供了基础性的支撑。然而人类社会迅速发展,土地利用方式的急剧变化,导致生态系统作为发展代价,常常遭受破坏。随着我国经济转型,生态系统服务重要性受到越来越多学者和当地政府部门重视。对生态系统服务评估有助于理解生态系统与人类社会之间相互关系,为生态环境发展规划与决策提供科学依据,进而促进人与自然和谐共生^[1]。

20世纪90年代, Costanza等^[2]对生态系统做出了细致的分类。相关概念被欧阳志云^[3]、谢高地等^[4-5]引入国内,并将生态系统服务归并为食物生产、原材料生产、气体调节、水源涵养、废物处理、土壤形成与保护、生物多样性保护和娱乐文化9类。在此基础上,后人通过相应的方法量化各项生态系统服务的价值,比如肖强等^[6]利用市场价值法与生产成本法对重庆市森林生态系统服务进行定量评价。在区域尺度上,生态系统服务评估常用模型有ARIES^[7]、InVEST^[8]、soVES模型^[9-10]等。与其他评价方法相比,InVEST模型具有更强的空间分析能力,且操作简便,适宜性广泛^[11]。许多学者将InVEST模型与PLUS、FLUS模型进行耦合,对研究区的土地利用、生态系统服务变化进行预测模拟^[12-14]。

云南横跨青藏高原与云贵高原,横断山脉南北贯穿而过,全省最大海拔高度差达到6 660 m,不同海拔间生态系统服务存在明显地理差异。其次,作为众多河流上游地区,云南省水资源相对匮乏,水质净化服务对水资源保障具有重要意义。再者,喀斯特地貌是云南典型地貌之一,该地貌生态脆弱,山地坡地较多,加之长期过度开发和掠夺式的生产经营,

土壤侵蚀严重、土壤肥力下降,区域生态系统对水资源的调蓄能力减弱^[15-16]。综合考虑云南省地理特征,系统分析云南省生态系统服务时空变化特征,可为云南省植被群落优化提供科学依据。

本研究基于InVEST模型,对云南省2010年和2020年的生态系统服务进行了综合评估。通过市场价值法、成本替代法和影子工程法量化土壤保持、碳储量、水源涵养和水质净化服务价值,得出生态系统综合服务价值。进一步运用分位数分割法确定各类生态系统服务边界点,拟合生态系统服务间的约束关系。系统分析云南省生态系统服务时空变化特征,为当地生态保护和可持续发展提供科学依据和决策支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

云南省位于中国西南地区(21°08′~29°15′N, 97°31′~106°11′E),包括16个下辖行政区,总面积约39.41万km²(图1)。属亚热带季风气候和热带季风气候^[17],多年平均降水量1 000 mm以上,降水存在地域性差异,分配极其不均匀。海拔总体上呈北高南低的阶梯式分布特征。

云南省土地利用类型主要为林地、草地和耕地,林地占据全省面积57%以上,林地、草地和耕地共占据全省面积97%以上。2010—2020年间云南省林地小幅增长,增加比例为0.37%,耕地和草地小幅减少,耕地面积减少了1.94%,草地减少了2.67%。

1.2 数据来源

2010、2020年云南省土地利用数据和DEM来源于中国科学院资源环境科学与数据平台(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率分别为1 km和90 m;

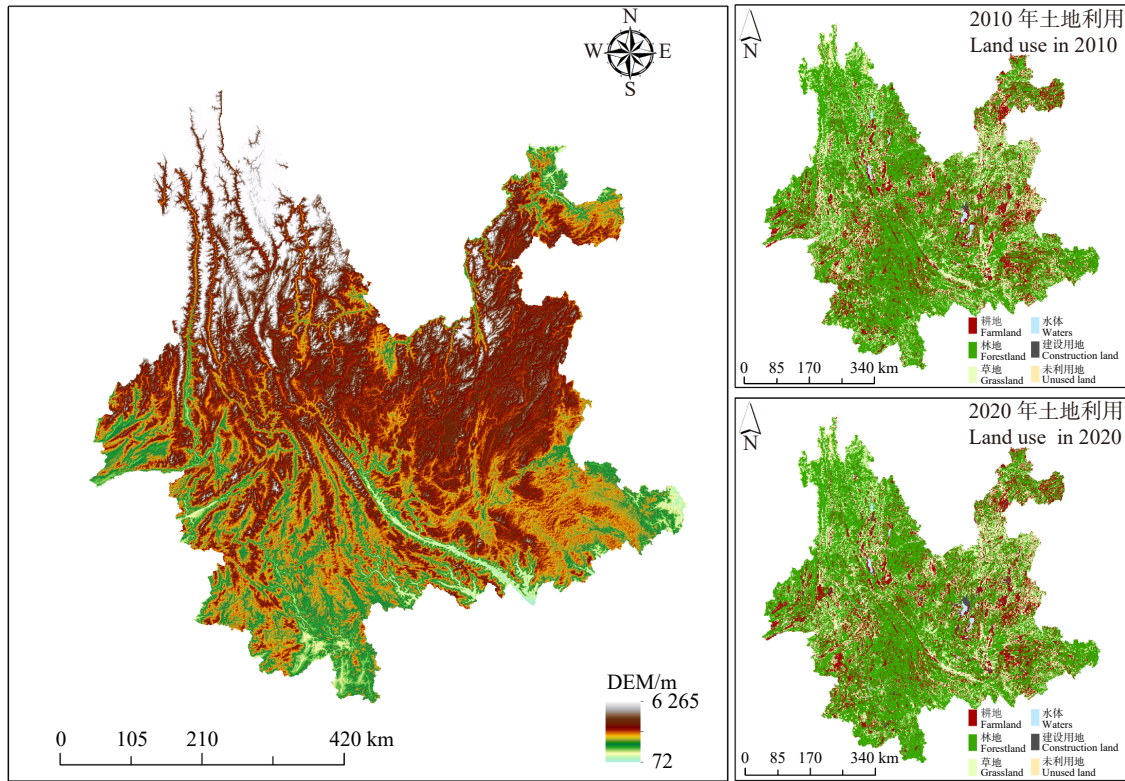


图 1 云南省高程与土地利用

Fig. 1 Elevation and land use of Yunnan Province

降水数据来源于中国科学院资源环境科学与数据平台、NOAA 官方网站(<https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/>); 植被数据和潜在蒸发数据来源于 NASA 数据库 (<https://www.earthdata.nasa.gov/>)中 mod16a3 数据, 空间分辨率均为 500 m; 土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>), 分辨率为 3.6 km。为便于分析计算, 本研究将所有空间数据重新转换到 1 km 空间尺度。InVEST 模型参数水土保持因子、碳密度、季节常数等借鉴前人研究^[18], 水质净化生物物理相关常数参考 InVEST 模型数据库生物物理表。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务功能估算

生态系统服务包括土壤保持、碳储量、水源涵养

和水质净化服务。为了能更好地探究研究区各项生态系统服务时空差异性, 本研究运用专家打分的方式, 对生态系统服务功能划分了不同等级(表 1)。

(1)土壤保持服务: 以土壤保持量表表征土壤保持服务, 通过土壤流失方程计算得到^[19]。

$$R_{KLS} = RKLS \quad (1)$$

$$U_{SLE} = RKLSCP \quad (2)$$

$$S_C = RKLS(1 - CP) \quad (3)$$

式中: R_{KLS} 为土壤潜在侵蚀量($t/(hm^2 \cdot a)$), U_{SLE} 为土壤实际侵蚀量($t/(hm^2 \cdot a)$), S_C 为土壤保持量($t/(hm^2 \cdot a)$), R 为降水侵蚀因子($MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$), K 为土壤侵蚀因子($t \cdot h/(MJ \cdot mm)$), L 为坡长因子, S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子。

表 1 2010—2020 年生态系统服务变化等级

Tab. 1 Ranking of ecosystem service changes from 2010 to 2020

指标 Index	单位 Unit	变化状况 Situation of change				
		显著减少 Significant reduction	减少 Reduce	不变 No change	增加 Increase	显著增加 Significant increase
土壤保持量 Soil conservation	$t/(hm^2 \cdot a)$ $t/(ha \cdot year)$	$(-\infty, -2\ 000)$	$[-2\ 000, -200)$	$[-200, 200)$	$[200, 2\ 000)$	$[2\ 000, +\infty)$
碳储量 Carbon storage	t	$(-\infty, -2\ 000)$	$[-2\ 000, -200)$	$[-200, 200)$	$[200, 2\ 000)$	$[2\ 000, +\infty)$
产水量 Water yield	mm	$(-\infty, -100)$	$[-100, -50)$	$[-50, 50)$	$[50, 100)$	$[100, +\infty)$
氮负荷量 Nitrogen load	kg	$(-\infty, -1.5)$	$[-1.5, -0.5)$	$[-0.5, 0.5)$	$[0.5, 1.5)$	$[1.5, +\infty)$
磷负荷量 Phosphorus load	kg	$(-\infty, -0.5)$	$[-0.50, 0.25)$	$[-0.25, 0.25)$	$[0.25, 0.50)$	$[0.5, +\infty)$
综合生态系统服务价值 Integrated ecosystem service value	元 CNY	$(-\infty, -1\ 000\ 000)$	$[-1\ 000\ 000, -100\ 000)$	$[-100\ 000, 100\ 000)$	$[100\ 000, 1\ 000\ 000)$	$[1\ 000\ 000, +\infty)$

(2)碳储量服务:生态系统碳储量(C_{total})包括地上生物量(C_{above})、地下生物量(C_{below})、土壤碳储量(C_{soil})与死亡有机物(C_{dead})^[20]。

$$C_{total} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (4)$$

(3)水源涵养服务:以产水量表征水源涵养服务。根据水量平衡原理,产水量为单位面积降水量减去实际蒸散量,且不考虑地下水与地表水之间相互作用^[8]。

$$Y = \left(1 - \frac{A}{P}\right) \times P \quad (5)$$

式中: Y 为年产水量(mm); A 为年实际蒸散量(mm); P 为年降水量(mm)。

(4)水质净化服务:InVEST模型忽略其他污染源,只考虑非点源污染中的全氮(total nitrogen, TN)和全磷(total phosphorus, TP),二者负荷量越高,表明水质净化服务越低^[21]。

$$A_x = H_x p_x \quad (6)$$

式中: A_x 为 x (氮、磷)调整负荷量, p_x 为 x 负荷系数, H_x 为 x 水文敏感度评分。

1.3.2 综合生态系统服务价值估算

运用成本替代法量化土壤保持服务价值,根据我国主要流域泥沙运移的经验规律,选取24%作为泥沙淤积在水库、河流、湖泊等水域占总泥沙流失量的比例^[22]。

$$V_{in} = \left(\frac{24\% S_C C_0}{\rho}\right) / 10\,000 \quad (7)$$

式中: V_{in} 为土壤保持服务的经济成本(CNY), C_0 为单位库容的建设成本(CNY/m³), ρ 为土壤密度(t/m³)。本文参考三峡大坝假设成本, C_0 取值9.46元/m³。

参考云南省周边地区碳排放交易价格^[23],2021年3月23日重庆碳价24.75元/t,计算云南省碳储量价值。

运用影子工程法^[24],即假设修一个和整个云南省生态系统具有一样水源涵养能力水库,估算修建该水库成本,得到云南省水源涵养服务价值(V_w , CNY)。

$$V_w = Q C_0 \quad (8)$$

式中: Q 为体积产水量(m³)。

利用生物物理属性表得到氮、磷负荷量。假设所有土地类型净化能力都为0,即截留效率为0,生成生物物理属性表,带入InVEST模型,得到土地类型净化能力为0时氮、磷负荷量,将此结果与正常氮、磷负荷量相减得到氮、磷净化量^[25]。运用替代成本法,总氮净化成本为1.5元/kg,总磷净化成本为0.7元/kg。

1.3.3 生态系统服务约束关系量化

采用分位数分割法提取土壤保持、产水量、水质

净化的氮负荷量与磷负荷量的空间分布特征。选取限制变量作为横坐标,按限制变量值域顺序分成100份,每份选取超过99%分位数的点作为边界点。利用Origin2022工具对边界点进行拟合,从而得到限制变量与响应变量的约束关系^[26]。

2 结果与分析

2.1 云南省生态系统服务时空演变特征

2.1.1 云南省生态系统服务空间分布

云南省主要用地类型为林地,水土保持功能较好,土壤保持服务水平整体较高。较高区域多分布在云南省西部怒江、保山、临沧和普洱等地以及东北部昭通市。东部地区如文山、红河曲靖等地土壤保持量相对较低。与土壤保持服务相似,云南省碳储量也比较丰富,但东西分布差异较大。碳储量较高区域主要分布在西北怒江、迪庆、丽江等地以及西部德宏、普洱等地。西北部高碳储量分布集中,而西部较为分散,东部地区碳储量普遍低于西部地区,东部曲靖市平均碳储量仅为西部较高区域的43%~45%(图2、3)。

受降水分布影响,云南省产水量较高的区域集中在西部、西北部和南部。水质净化服务受氮、磷负荷和截留效率影响,林地和草地的氮磷负荷低、截留效率高,而农田和建设用地的氮磷负荷高、截留效率低。全省整体氮磷负荷量较低,氮负荷量高的区域集中在曲靖、昭通、德宏和临沧;而氮负荷量、磷负荷量较低的区域主要集中在中部和西北部山区,如迪庆、红河、怒江等地。

根据《云南省种植业区划》^[27],将云南省海拔分为6个等级,海拔 $\leq 2\,000$ m为“低”、 $2\,000$ m < 海拔 $\leq 2\,400$ m为“较低”、 $2\,400$ m < 海拔 $\leq 2\,800$ m为“中”、 $2\,800$ m < 海拔 $\leq 3\,300$ m为“较高”、 $3\,300$ m < 海拔 $\leq 4\,000$ m为“高”、海拔 $> 4\,000$ m为“极高”,对云南省生态系统服务功能进行分级统计(图4)。

云南省土壤保持量和碳储量随海拔上升整体先增大后减小。海拔 $2\,400$ m以下,随着海拔升高,适宜人类开发活动土地越少,土壤保持量逐渐提升;在海拔 $2\,400$ ~ $3\,300$ m间,存在针阔混交林大范围覆盖,增强了土壤保持服务,土壤保持量达到最大值;海拔 $3\,300$ m以上,气温骤降、地势崎岖,土壤保持量逐渐减少(图4)。

碳储量主要集中在海拔 $2\,800$ ~ $3\,300$ m区域,主要因为该海拔范围内林地面积占全省45.90%;海拔 $2\,800$ m以下,人类开发导致林地面积占比低,碳储量相对较少;海拔 $3\,300$ m以上,因气候与地形限

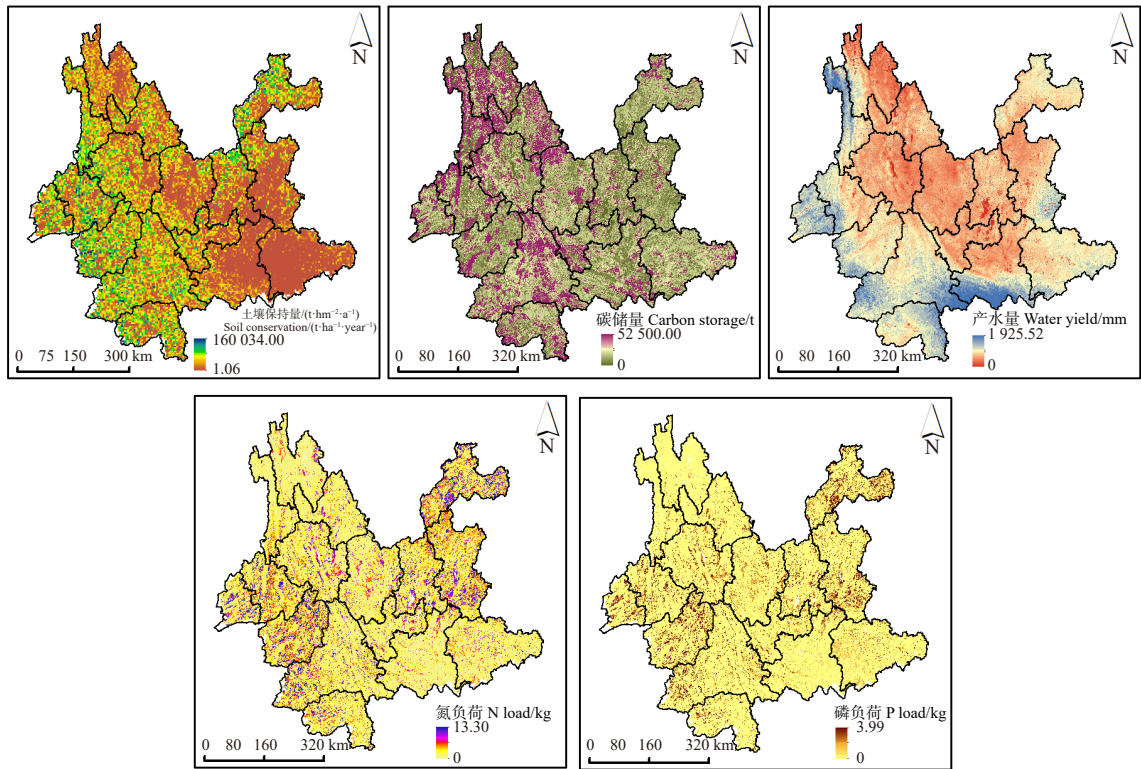


图 2 2010 年云南省土壤保持、碳储量、水源涵养和水质净化空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil conservation, carbon storage, water source conservation, and water purification in Yunnan Province in 2010

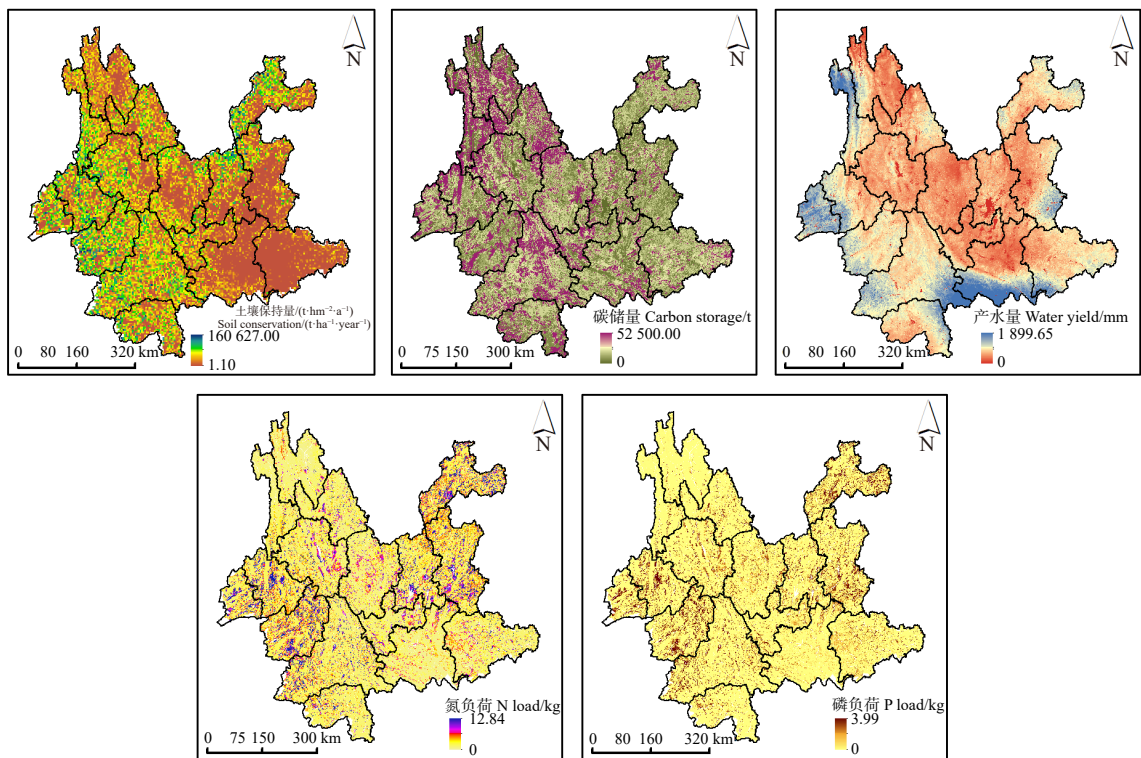


图 3 2020 年云南省土壤保持、碳储量、水源涵养和水质净化空间分布

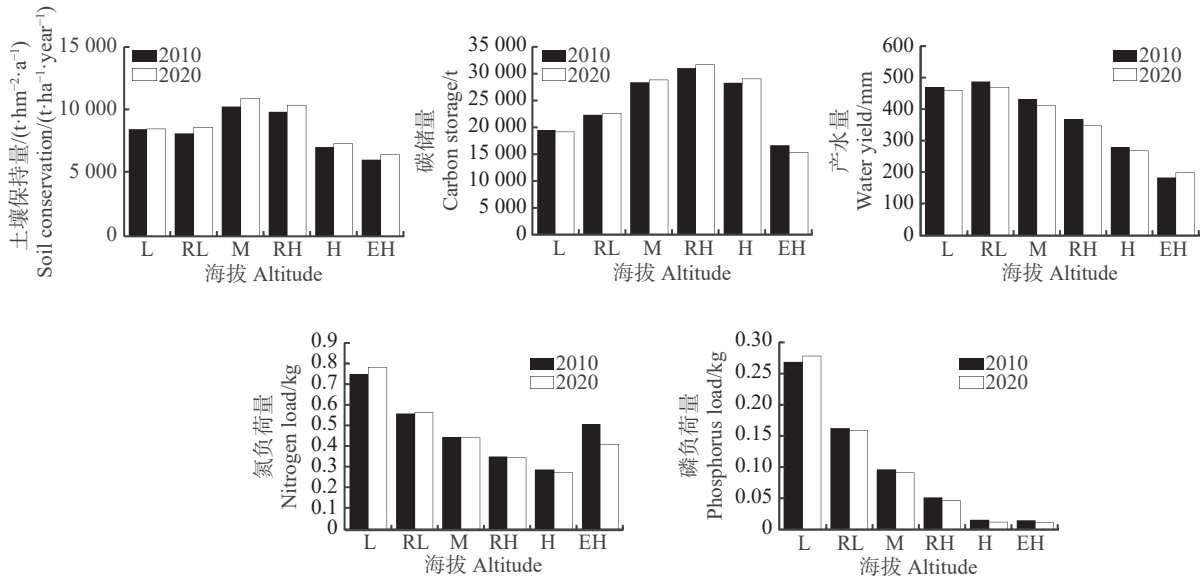
Fig. 3 Spatial distribution of soil conservation, carbon storage, water source conservation, and water purification in Yunnan Province in 2020

制, 碳储量较少(图 4)。

产水量最高的区域集中在海拔 2 000 ~ 2 400 m 区间, 在云南西南和南部地区, 受季风影响, 降水充沛。海拔 > 2 400 m 时, 产水量随海拔的升高逐渐降

低(图 4)。

在海拔 4 000 m 范围内, 氮、磷负荷量随海拔升高而减少。该区间内, 随海拔升高, 人为扰动减少、植被覆盖度上升, 氮磷负荷量减少; 4 000 m 以上区



L. 海拔 ≤ 2 000 m; RL. 2 000 m < 海拔 ≤ 2 400 m; M. 2 400 m < 海拔 ≤ 2 800 m; RH. 2 800 m < 海拔 ≤ 3 300 m; H. 3 300 m < 海拔 ≤ 4 000 m; EH. 海拔 > 4 000 m. L, altitude ≤ 2 000 m; RL, 2 000 m < altitude ≤ 2 400 m; M, 2 400 m < altitude ≤ 2 800 m; RH, 2 800 m < altitude ≤ 3 300 m; H, 3 300 m < altitude ≤ 4 000 m; EH, altitude > 4 000 m.

图4 云南省生态系统服务功能垂直梯度统计

Fig. 4 Vertical gradient statistics of ecosystem service functions in Yunnan Province

域氮、磷负荷量略有增加, 该区间处于河流上游, 径流量相对较小, 能带走的氮磷负荷有限(图4)。

2.1.2 云南省生态系统服务功能时间变化特征

图5展示了云南省生态系统服务功能空间变化。土壤保持量从2010年的 1.08×10^8 t 增加至2020年的 1.25×10^8 t, 增长 1.62×10^7 t。土壤保持质量提升区域面积为 1.35×10^5 km², 占全省面积的

35.36%; 退化面积为 0.99×10^5 km², 占25.87%, 集中在西部、南部和东北部。

碳储量从2010年的 8.25×10^9 t 增加至2020年的 8.26×10^9 t, 增加 1.19×10^7 t。碳储量显著增长的城市包括玉溪、思茅和临沧, 减少城市主要为西双版纳。10年间碳储量减少的面积为 8.74×10^4 km², 占全省面积的22.85%, 增加面积为 8.63×10^4 km²。

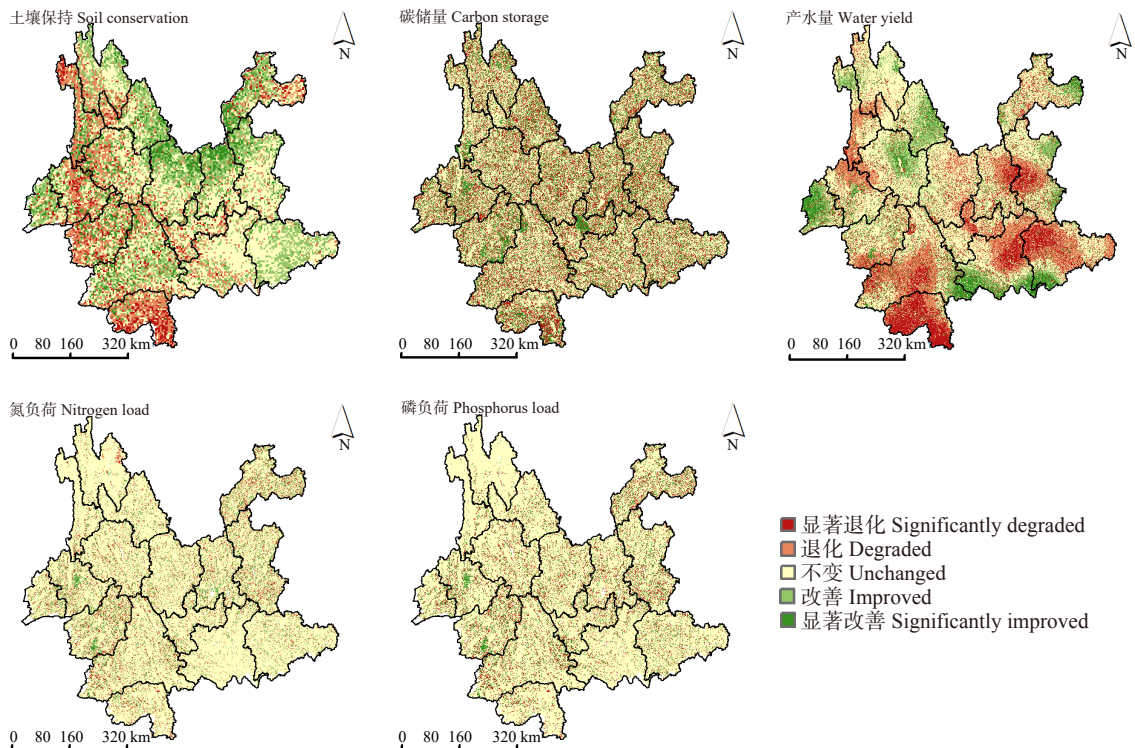


图5 2010—2020年云南省生态系统服务功能变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of changes in ecosystem service functions in Yunnan Province from 2010 to 2020

2010 年全省平均产水量 444.73 mm, 2020 年降至 424.67 mm, 产水量减少面积为 $1.32 \times 10^5 \text{ km}^2$, 增加面积为 $7.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。减少区域集中分布在东部昆明、曲靖、文山、红河及西南部西双版纳、普洱等城市, 增加区域主要分布于普尔、红河、文山南部以及德宏等城市。

氮负荷量从 2010 年的 $2.74 \times 10^7 \text{ kg}$ 增加到 2020 年的 $6.29 \times 10^7 \text{ kg}$; 磷负荷量从 $8.90 \times 10^6 \text{ kg}$ 增加到 $1.65 \times 10^7 \text{ kg}$ 。氮负荷量增加面积为 $5.06 \times 10^4 \text{ km}^2$, 减少面积为 $4.77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 磷负荷量增加面积为 $4.41 \times 10^4 \text{ km}^2$, 减少面积为 $4.65 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。氮磷负荷增加区域主要分布于保山和临沧等地区, 减少区域主要分布于迪庆东北部。

2010—2020 年, 土壤保持与碳储量服务提升可能与云南省整体林地面积增加有关。而灌木林面积与降水量的减少, 可能是导致水源涵养与水质净化服务退化主要影响因素(图 5)。

2.1.3 云南省生态系统服务约束关系量化

对 2010、2020 年云南省土壤保持、水源涵养服务与水质净化服务之间约束关系进行量化, 得出各生态系统服务之间约束关系主要表现为双驼峰型、驼峰型、负凸曲线等(图 6)。

土壤保持服务与水源涵养服务之间呈驼峰型曲线。当 2010、2020 年产水量分别位于阈值 640.78、593.41 mm 时, 土壤保持量达到最大值, 即 $61\ 664.16$ 、 $60\ 995.34 \text{ t}(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。当产水量小于阈值, 水源涵养服务对土壤保持服务的约束力减弱; 当产水量大于

阈值, 水源涵养服务对土壤保持服务约束力增强。

氮负荷与产水量关系曲线呈现驼峰型。2010、2020 年氮负荷的峰值(4.81、4.58 kg)对应的产水量分别为 745.82、834.93 mm。当产水量小于阈值时, 水源涵养服务对氮负荷的约束力减弱; 当产水量大于阈值时, 水源涵养服务对氮负荷的约束力增强。

磷负荷与产水量关系曲线呈现驼峰型。2010、2020 年磷负荷的峰值(2.93、2.96 kg)对应的产水量分别为 881.63、811.62 mm。当产水量小于阈值时, 水源涵养服务对磷负荷的约束力减弱; 当产水量大于阈值时, 水源涵养服务对磷负荷的约束力增强。

2010 年氮负荷与土壤保持量呈负凸曲线, 2020 年为驼峰型。2020 年土壤保持量峰值为 $60\ 087.12 \text{ t}(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 对应的氮负荷为 3.00 kg。当氮负荷量小于阈值时, 氮负荷对土壤保持量的约束力减弱; 当氮负荷量大于阈值时, 氮负荷对土壤保持量的约束力增强。

磷负荷与土壤保持量呈双驼峰型, 且 2020 年阈值较 2010 年整体左移。2010、2020 年土壤保持量最大值对应的氮负荷分别为 3.00、2.49 kg, 对应的土壤保持量分别为 7.06×10^4 、 $6.65 \times 10^4 \text{ t}(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

2.2 云南省生态系统服务价值综合评估

生态系统服务价值较高区域主要分布在西部、西南部、南部邻近行政边界区域, 较低区域主要分布在中部与北部地区(图 7)。2010 年生态系统服务价值量为 1.79×10^{12} 元; 而 2020 年降为 1.71×10^{12} 元, 减少了 8.00×10^{10} 元(表 2), 土壤保持和碳储量服务

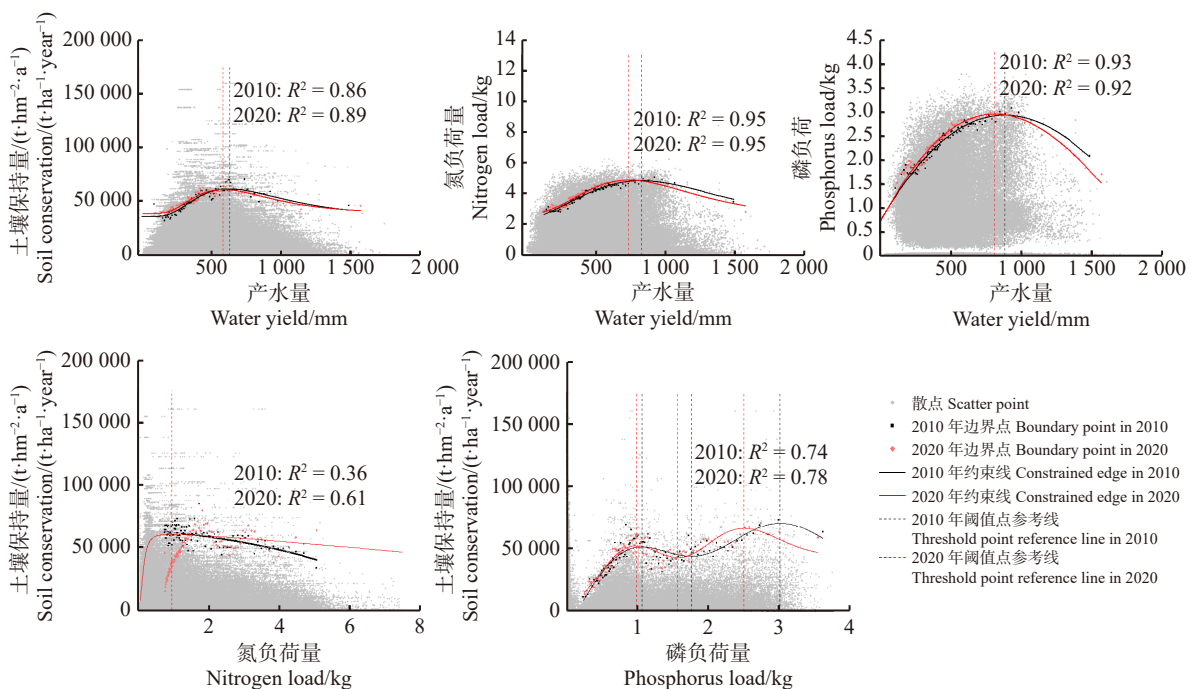


图 6 2010、2020 年各类生态系统服务之间的约束关系

Fig. 6 Constraints between various ecosystem services in 2010 and 2020

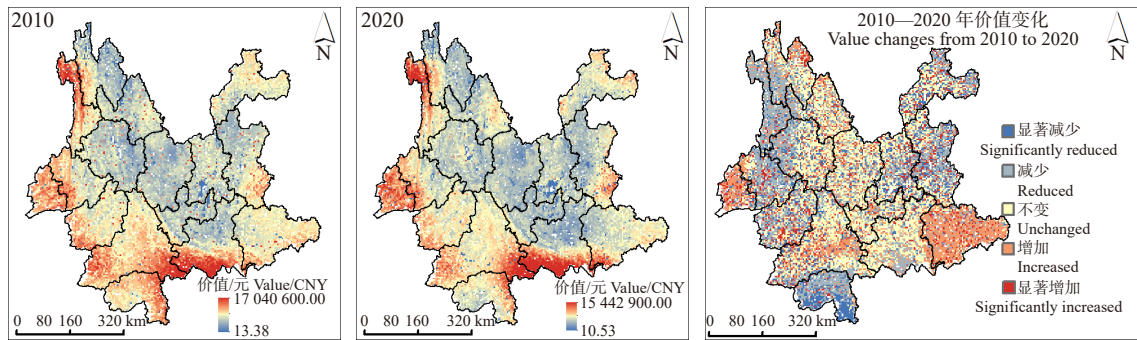


图7 2010、2020年云南省生态系统服务价值与变化空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of ecosystem service value and changes in Yunnan Province in 2010 and 2020

表2 2010、2020年生态系统服务指标与综合生态系统服务价值

Tab. 2 Ecosystem service indicators and comprehensive ecosystem service value in 2010 and 2020

指标 Index	2010			2020		
	总价值/元 Total value/CNY	占比 Proportion/%	平均价值/(元·km ⁻²) Average value/(CNY·km ⁻²)	总价值/元 Total value/CNY	占比 Proportion/%	平均价值/(元·km ⁻²) Average value/(CNY·km ⁻²)
土壤保持服务 Soil conservation service	2.58×10^8	0.01	655.65	2.85×10^8	0.02	722.70
碳储量服务 Carbon storage service	2.041×10^{11}	11.42	5.18×10^5	2.044×10^{11}	11.99	5.19×10^5
水源涵养服务 Water conservation service	1.58×10^{12}	88.56	4.02×10^6	1.50×10^{12}	87.99	3.81×10^6
水质净化服务(氮) Water purification service (nitrogen)	5.30×10^7	0.00	134.47	5.20×10^7	0.00	132.04
水质净化服务(磷) Water purification service (phosphorus)	5.44×10^6	0.00	13.81	5.20×10^6	0.00	13.21
总价值 Total value	1.79×10^{12}	100.00	4.54×10^6	1.71×10^{12}	100.00	4.33×10^6

价值有所提升,但水源涵养和水质净化服务价值下降。

与2010年相比,2020年服务价值量增加的区域主要在文山、德宏、普洱中部和迪庆东北部;减少区域主要在南部西双版纳和东部昭通、昆明、曲靖等地,其中西双版纳生态系统服务价值降幅最大。

3 讨 论

InVEST模型通过土地利用和生物属性表评估生态系统服务,适用于大空间和长时序的研究。本研究采用高分辨率数据和本地化参数,参考邻近区域的研究^[18, 28-29],以确保模型的可靠性。与前人邻近区域的相关研究进行比较^[29-31],模型结果可靠。

2010、2020年云南省综合生态服务价值分别为 1.79×10^{12} 、 1.71×10^{12} 元,有一定程度退化,这与张钰莹等^[30]研究结果相近。土壤保持服务和碳储量服务很大程度上取决于土地利用与植被覆盖。云南省自2010年以来,实施“退耕还林还草”政策,林地面积和植被覆盖度增加,从而提升了土壤保持服务和碳储量服务价值。水源涵养服务主要受降水量的影响,云南省的降水主要受印度洋西南季风和南海东南季风的影响。由于云南省地形自西南向东北呈阶

梯式升高,水汽难以向云南省中部和北部输送,进而导致了西南部地区水源涵养能力较强。2010、2020年云南年降水量为1119.04、1097.45 mm,降水量下降可能是云南省产水量减少的主要原因。云南省的产水量在退化区域呈现出点状分布,这可能与土地利用的变化有关。由于建设用地导致降水难以渗透,同时伴随着热岛效应,使得蒸散量增加。与2010年相比,2020年云南省的氮磷负荷量有所增加,这导致了水质净化服务的退化。氮磷负荷量的变化主要是由于旱地、林地和草地转变为耕地所引起的,而农业生产活动使得耕地的氮磷负荷量显著高于其他土地利用类型。

云南省生态系统服务的整体退化,导致了部分服务之间存在的驼峰型约束关系阈值向左偏移(图6)。这一现象表明,在整体生态系统服务退化的情况下,土壤保持服务和水质净化服务对限制变量可能更为敏感,进一步体现当前云南省生态系统的脆弱性。本研究仅对3类生态系统服务之间的约束关系进行了探讨,约束关系的规律性相对笼统,未能深入探讨气候、植被、地形和土壤等要素对生态系统服务的具体影响。

本文从空间分布、垂直分布和时间变化特征 3 个纬度,对云南省 2010 和 2020 年生态系统服务进行了分析。通过价值量评估法标准化各生态系统服务,得出综合生态系统服务价值。2010—2020 年,云南省土壤保持、碳储量服务得到改善。然而,InVEST 模型生物属性表的设置相对单一,参数仅凭单一土地利用类型决定,未能充分考虑同一土地利用类型,不同空间分布所存在的空间异质性^[30]。且本研究涉及年份较少,对云南省土地利用和生态系统服务的未来变化缺乏预测性分析。因此,未来研究应综合考虑区位条件、气候、人类活动等因素,细化生物属性表,结合区域特点进行分区评价,选择适宜评价模型,着眼于生态系统服务时间特征及预测分析,收集实地观测数据,进一步提高结果的可靠性。

4 结 论

(1)在空间分布上,除水质净化服务外,云南省各项生态系统服务质量整体上呈现出西高东低的格局;全区大部分为低氮磷负荷区,氮磷负荷量高值区较为分散。

(2)在垂直分布上,除水质净化服务,各项服务质量较高区域主要分布在海拔 2 400~2 800 m 区间范围内;高质量水质净化服务的区域主要分布于海拔 3 300~4 000 m 区间内。

(3)从时间变化特征看,2010—2020 年云南省土壤保持服务、碳储量服务得到改善;水源涵养服务与水质净化服务退化。

(4)各生态系统服务之间约束关系主要表现为双驼峰型、驼峰型、负凸曲线。约束作用强弱变化随着阈值区间的变化而变化。与 2010 年相比,2020 年阈值整体呈现左移趋势。

(5)2010—2020 年云南省综合生态系统服务价值有所下降。2010 年云南省生态系统服务总价值为 1.79×10^{12} 元,平均价值量 4.54×10^6 元/km²,2020 年下降至 1.71×10^{12} 元,平均价值量 4.33×10^6 元/km²。

参 考 文 献

- [1] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等. 中国森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2096–2102.
Yu X X, Lu S W, Jin F, et al. Assessment of the value of forest ecosystem services in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2096–2102.
- [2] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3–15.
- [3] 欧阳志云. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 607–613.
Ouyang Z Y. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(5): 607–613.
- [4] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, 37(9): 1740–1746.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740–1746.
- [5] 谢高地,张钰铨,鲁春霞,等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 47–53.
Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 47–53.
- [6] 肖强,肖洋,欧阳志云,等. 重庆市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 216–223.
Xiao Q, Xiao Y, Ouyang Z Y, et al. Value assessment of the function of the forest ecosystem services in Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 216–223.
- [7] Vigerstol K L, Aukema J E. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(10): 2403–2409.
- [8] Zhang C Q, Li W H, Zhang B, et al. Water yield of Xitiao River Basin based on InVEST modeling[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(1): 50–54.
- [9] Sherrouse B C, Semmens D J, Ancona Z H, et al. Analyzing land-use change scenarios for trade-offs among cultural ecosystem services in the Southern Rocky Mountains[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 26: 431–444.
- [10] 时光. 基于 SoIVES 模型下岳麓山风景名胜区生态系统服务社会价值评估[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
Shi G. Evaluation of social value of ecosystem service in Yuelu Mountain scenic area based on soIVES model[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
- [11] 唐尧,祝炜平,张慧,等. InVEST 模型原理及其应用研究进展[J]. 生态科学, 2015, 34(3): 204–208.
Tang Y, Zhu W P, Zhang H, et al. A review on principle and application of the InVEST model[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(3): 204–208.
- [12] 刘涛,张雪梅,林长存. 基于 InVEST 与 FLUS 模型的准格尔旗水源涵养功能分析[J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3831–3840.
Liu T, Zhang X M, Lin Z C. Functional analysis of water conservation in Zhungeer Banner based on InVEST and FLUS models[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3831–3840.
- [13] 许澳康,胡梦珺,石晶,等. 基于 PLUS-InVEST 模型的石羊河流域生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J/OL]. 中国环境科学, 2023: 1–11[2024-01-23]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231211.016>.
- Xu A K, Hu M J, Shi J, et al. Spatial and temporal variability of ecosystem carbon storages and multi-scenario simulation Based on the PLUS-InVEST model in the Shiyang River Basin[J/OL]. *China Environmental Science*, 2023: 1–11[2024-01-23]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231211.016>.
- [14] 吴则禹,刘星根,曾金凤. 基于 InVEST-PLUS 模型的东江源流域碳储量时空演变与预测[J]. 环境科学学报, 2024, 44(3): 419–430.

- Wu Z Y, Liu X G, Zeng J F. Spatio-temporal change and prediction of carbon storage in Dongjiang River source watershed based on InVEST-PLUS model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(3): 419–430.
- [15] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 等. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究 [J]. *生态学报*, 2021, 41(9): 3368–3380.
- Zhang X R, Wang X F, Cheng C W, et al. Ecosystem service flows in karst area of China based on the relationship between supply and demand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9): 3368–3380.
- [16] 张钰莹, 孙美莹, 杨荣金, 等. 西南地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 207–214.
- Zhang Y Y, Sun M Y, Yang R J, et al. Impact of land-use change on ecosystem service value in Southwest China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 207–214.
- [17] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价 [J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2253–2260.
- Yang Y Y, Wang J L, Yang B F. Eco-sensitivity assessment of land in Yunnan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2253–2260.
- [18] 孙兴齐. 基于 InVEST 模型的香格里拉市生态系统服务功能评估 [D]. 昆明: 云南师范大学, 2017.
- Sun X Q. Evaluation of ecosystem services in Shangri-La based on InVEST model[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2017.
- [19] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 19–24.
- Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 19–24.
- [20] Zhu E, Deng J, Zhou M, et al. Carbon emissions induced by land-use and land-cover change from 1970 to 2010 in Zhejiang, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 646: 930–939.
- [21] 吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(3): 406–414.
- Wu R, Liu G H, Wen Y H. Spatiotemporal variations of water yield and water quality purification service functions in Guanting Reservoir Basin based on InVEST model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(3): 406–414.
- [22] 黄和平, 杨劫, 智颖颢. 皇甫川流域封育植被土壤保持功能及服务价值研究 [J]. *水土保持通报*, 2008, 28(3): 173–177.
- Huang H P, Yang J, Zhi Y B. Assessment for soil conservation functions and service values of afforested vegetation by enclosure in Huangfuchuan Watershed[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(3): 173–177.
- [23] 伍格致, 周妮笛. 湖南省森林碳储量及其经济价值测算研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(8): 127–132.
- Wu G Z, Zhou N D. Forest carbon reserves and its economic value estimation in Hunan Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(8): 127–132.
- [24] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 等. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 577–585.
- Liu J, Fu B, Zhang C H, et al. Assessment of ecosystem water retention and its value in the upper reaches of Minjiang River based on InVEST Model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 577–585.
- [25] 陈映. 基于 InVEST 模型的舟山群岛生态系统服务能值研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- Chen Y. An emergy research on Zhoushan Archipelago ecosystem services based on the InVEST model[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2020.
- [26] 官冬杰, 李子辉, 周李磊, 等. 生态系统服务约束关系界定及影响机制分析 [J]. *中国环境科学*, 2021, 41(12): 5837–5848.
- Guan D J, Li Z H, Zhou L L, et al. The definition of ecosystem service constraint relations and analysis of influence mechanism [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(12): 5837–5848.
- [27] 潘炳猷, 姚宗文. 云南省种植业区划 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1992: 26–35.
- Pan B Y, Yao Z W. Yunnan Province planting division [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1992: 26–35.
- [28] 张秀, 张璇, 崔磊, 等. 金沙江中游水电开发区生态系统服务综合功能时空变化与归因 [J/OL]. *环境科学*, 2024[2024-07-21]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202402105>.
- Zhang X, Zhang X, Cui L, et al. Comprehensive ecosystem service changes and their drivers in the middle reaches of Jinsha River[J/OL] *Environmental Science*, 2024[2024-07-21]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202402105>.
- [29] 李子辉, 张亚, 巴永, 等. 云南省植被固碳能力与产水、土壤保持服务冷热点识别 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 1007–1019.
- Li Z H, Zhang Y, Ba Y, et al. Cold and hot spots identification for carbon sequestration capacity, water yield and soil conservation services of vegetation in Yunnan Province[J]. *Chinese Environmental Science*, 2024, 44(2): 1007–1019.
- [30] 张钰莹. 西南地区景观生态风险与生态系统服务价值综合分区研究 [D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- Zhang Y Y. Comprehensive partitions based on landscape ecological risk and ecosystem service value in Southwest China[D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2021.
- [31] 郭佳晖, 刘晓煌, 张文博, 等. 基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的云贵高原产水量时空变化特征分析 [J]. *现代地质*, 2024, 38(8): 624–635.
- Guo J H, Liu X H, Zhang W B, et al. Characterization of spatial and temporal variations in water yield on the Yunnan-Guizhou Plateau based on the InVEST and PLUS models[J]. *Geoscience*, 2024, 38(8): 624–635.

(责任编辑 孟瑶
责任编辑 臧润国)