

2012—2022 年长江经济带土地利用变化对水生生态系统服务的影响

耿 秘, 刘 艳, 吴 冉, 覃文艺, 郑朋飞
(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: [目的] 分析 2012—2022 年长江经济带土地利用变化对水生生态系统服务影响情况, 为探寻长江经济带水生生态服务的提升提供科学参考。[方法] 利用 InVEST 模型计算了产水量、水质净化、碳固定等指标值, 并结合 ESV 价值当量表, 评价水生生态系统服务价值, 并通过 Dagum 基尼系数对长江经济带不同区域间的生态系统服务进行差异分析, 采用生态敏感指数验证了结果的可靠性。[结果] ①长江经济带土地利用类型以林地和耕地为主, 2012—2022 年土地利用类型面积变化显著, 建设用地土地利用动态度变化最大, 但仅为 2.99%, 增速温和。②长江经济带水生生态服务呈现显著的时空差异, 空间上表现出西高东低的特征, 随时间变化整体上呈现减弱趋势。③长江经济带水生生态服务综合值整体上差异扩大, 区域间差异明显, 上下游差异是区域间差异的主要缘由。④各土地利用类型的生态敏感性指数均小于 1, 说明所得生态系统服务结果可靠。[结论] 2012—2022 年, 长江经济带水生生态系统服务能力总体增强, 而在局部如草地、水域等地类却呈现一定的减弱趋势。根据研究建议长江经济带城市群响应绿色发展理念, 合理优化土地格局, 加强保护措施, 以促进生态安全和持续发展。

关键词: 土地利用; 水生生态系统服务; InVEST 模型; 长江经济带

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0343-10

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 耿秘, 刘艳, 吴冉, 等. 2012—2022 年长江经济带土地利用变化对水生生态系统服务的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 343-352. Geng Mi, Liu Yan, Wu Ran, et al. Effects of land-use change on aquatic ecosystem services in Yangtze River economic belt during 2012—2022 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 343-352. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.025; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.03.025.

Effects of land-use change on aquatic ecosystem services in Yangtze River economic belt during 2012—2022

Geng Mi, Liu Yan, Wu Ran, Qin Wenyi, Zheng Pengfei

(School of Geography & Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

Abstract: [Objective] The effects of land-use change on aquatic ecosystem services in the Yangtze River economic belt (YREB) from 2012 to 2022 were analyzed to provide scientific reference for exploring the improvement of aquatic ecosystem services in the YREB. [Methods] The InVEST model was used to calculate water yield, water purification, and carbon sequestration. The value of aquatic ecosystem services was evaluated using the ESV value equivalent table. The Dagum method was applied to analyze differences in ecosystem services among different regions of the YREB, and the reliability of the results was verified using the ecological sensitivity index. [Results] ① The main land-use types in the YREB were forest land and cultivated land. From 2012 to 2022, significant changes in land-use types were observed, with construction land showing the highest degree of land-use change, but only at 2.99%, indicating a moderate growth rate. ② Aquatic ecosystem services in the YREB exhibited significant spatial and temporal differences, with higher values in the west and lower values in the east. Over time, the overall trend was for a weakening of aquatic ecosystem services. ③ The comprehensive value of aquatic ecosystem services in the YREB exhibited an overall expansion of differences, with significant regional disparities.

收稿日期: 2024-11-04

修回日期: 2025-01-22

采用日期: 2025-01-22

资助项目: 国家社会科学基金项目“精准扶贫政策对岩溶山区农户土地流转行为影响及其响应机制研究”(19BGL180)

第一作者: 耿秘(1999—), 男(汉族), 贵州省毕节市人, 硕士研究生, 研究方向为城镇化与乡村振兴。Email: 823462883@qq.com。

通信作者: 刘艳(1977—), 女(汉族), 贵州省贵阳市人, 博士, 教授, 主要从事农村与区域发展研究。Email: liuyan2007gznu@126.com。

The differences between upstream and downstream regions were the main reasons for regional variations. ④ The ecological sensitivity index of all land-use types was less than 1, indicating the reliability of these results. [Conclusion] From 2012 to 2022, the aquatic ecosystem service capacity of the YREB improved. However, in some areas, such as grasslands and water bodies, a weakening trend was observed. Based on these research findings, it is recommended that urban clusters in the YREB respond to the concept of green development, rationally optimize land-use patterns, and strengthen measures to protect and promote ecological security and sustainable development.

Keywords: land-use; aquatic ecosystem services; InVEST model; Yangtze River economic belt

土地利用/土地覆盖变化(LUCC)是导致全球生态环境引起变化的重要驱动因素之一^[1]。土地利用活动是人类社会生活的产物,土地利用变化是人与自然环境相互联系及作用所产生的重要表现形式,也是自然环境发生变化的重要内容^[2]。区域内不同的土地利用方式势必会导致区域内自然环境的变化有所差异,同时也会引起区域内土壤水分的流失、地表土壤侵蚀等现象的发生,甚至导致生态环境问题^[3]。分析土地利用变化对不同区域内造成的影响差异,需要进一步了解和认识生态系统服务。生态系统服务是指生态系统为人类提供的各种自然环境和效用,包括了食物、水及气候调节、土壤保持等服务功能,是人类生存和发展的基础^[4]。生态系统服务中的重要要素之一是水,在生态系统中与水文过程密切相关的那部分称为水生态系统。水生态系统对于生态环境的保持,对人类的生存、生产及生活具有重要意义。水生态系统服务的主要内容包括水源涵养、水质净化、水生态景观等,为人类的水资源提供了重要的安全保障,同时对于维护生态环境的稳定,保障人类的生存、生产和生活具有重要意义。

土地利用变化可以显著改变生态系统的结构和功能,被认为是推动生态系统服务变化的主要因素^[5]。一些人类活动如围垦会使水质净化能力呈现出下降的趋势,农业和城镇化的发展虽然会提高一部分粮食产量与经济发展水平,但会降低流域整体水质净化服务的能力^[6]。当前全球城市化正在极速发展,土地利用面积和类型发生的急剧变化对生态系统服务产生了剧烈影响,近年来,随着土地利用对水生态系统的影响越发突出,人们也逐渐意识到水生态系统服务的重要性,揭示人类活动与生态环境之间关系的研究,也逐渐成为了国内外生态学研究的热点话题,并为此进行了大量研究。学者针对不同地域、不同尺度对土地利用和生态系统之间开展了众多研究,早期时对生态系统服务的相关研究主要还是生态系统服务价值^[7]、对于水生态的研究则主要集中在水源涵养^[8]、水质净化^[9]、区域产水量^[10]、土壤保持等^[11]方面。总的来看,目前对于土地利用对

水生态系统服务的影响等相关方面的研究还稍显不足,已有的研究大部分也还停留在土地利用对水源涵养或土地利用对水质净化的影响等单方面,对长江经济带土地利用变化对水生态系统服务或价值等的影响研究也鲜有涉及,尤其是对区域内整个水生态系统服务的影响或者水生态系统服务所涵盖的内容及相互关系也尚不清晰。

长江经济带是中国经济发展的重要引擎,也是生态系统服务的关键区域,承载着重要的生态保障功能^[12],其水生态系统服务不仅为当地居民提供了生活用水,还为农业、工业、生态系统提供了重要支撑^[13]。然而,随着城市化、工业化进程的加速,长江经济带土地利用发生了巨大变化,对水生态系统服务产生了深远的影响,一方面土地利用变化直接影响了地表水资源的地表径流和地下水资源,从而影响了水源涵养功能,另一方面土地利用变化改变了地表覆盖状况,进而影响了水质净化和水生态景观等等,对整个长江经济带的可持续发展带来严峻挑战。基于以上原因,本研究将以长江经济带各市州2012,2017和2022年的土地利用数据为基础,首先借助InVEST模型初步评估研究区内的产水量及水质净化等功能,同时结合ESV模型定量分析研究区内水生态服务产生的价值情况,通过熵值法计算水生态系统服务综合值,并分析其时空变化,其次使用Dagum基尼系数分析上下游之间的服务差异,最后通过生态敏感性指数分析不同地类对生态系统的敏感情况以判断生态系统服务最终结果的可靠性,以期为长江经济带的水生态系统保护和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江经济带横跨我国的东中西3个大区,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州等11省市,总长度大约为6 300 km,总面积为 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,占中国国土面积的21.35%,是中国最为重要的经济发展区域之一^[14]。长江经济带地

形复杂多样,自西向东依次为高原、山地、丘陵、平原,地势呈现西高东低的格局。该区域气候类型丰富,从西部的亚热带高原气候向东逐渐过渡为亚热带季风气候和温带季风气候,气候温暖湿润,雨量充沛。区域内具有人口数量多、产业规模大、经济实力强等特点,其人口总量和生产总值均超过全国40%,经济发达,城市化程度高,是中国最为重要的经济发展引擎之一^[15]。长江流域作为中国最大的流域之一,其流域面积广阔,拥有丰富的水资源和生物资源,是中国最重要的水资源涵养区之一,承担了我国39.2%的水源涵养功能^[16]。而长江经济带作为长江流域的重要组成部分,不仅包含了长江流域的核心

区域,还涵盖了与之紧密相连的经济社会活动。作为重要生态保护屏障,其发展对长江流域的生态环境产生重要影响,因此选择长江经济带作为研究区域,研究长江经济带土地利用对水生态系统服务的影响,对于维护国家生态安全和推动长江经济带的可持续发展具有重要意义。

1.2 数据来源

由于InVEST模型所需数据均需投影,数据均通过ArcGIS进行裁剪投影操作,均转换为Albers Equal Area Conic投影参与空间计算,分辨率均统一转换为1 km进行计算处理,研究所需数据类型及来源详见表1。

表1 数据类型及来源
Table 1 Data types and sources

数据类型	年份	数据来源	处理方法
DEM高程数据	2000	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn)	ArcGIS裁剪投影
土地利用数据	2012—2022	武汉大学遥感院黄昕 & 李家艺团队(whu.edu.cn)	ArcGIS裁剪投影
降水量及蒸发量数据	2012—2022	国家地球系统科学数据中心共享服务平台(http://www.geodata.cn)	ArcGIS裁剪投影
根系限制层深度数据	2020	主要来源于学者Yan的相关文献(https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6)	ArcGIS裁剪投影
植物可用水分含量数据	2017	主要来源于ISRIC全球数据集(https://data.isric.org)	ArcGIS裁剪投影
社会经济数据	—	来源于11个省市2012—2022年的《统计年鉴》《水资源公报》《全国农产品收益价格汇编》	Excel处理汇总
Zhang系数	—	模型手册及文献	参考InVEST模型手册及文献
年产水量	—	模型手册及文献	参考InVEST模型手册及文献
养分输送比	—	模型手册及文献	参考InVEST模型手册及文献
碳库	—	模型手册及文献	参考InVEST模型手册及文献
价值当量表	—	参考相关学者制定的单位面积价值当量因子表得到	参考已有研究成果得到

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用类型划分及动态度分析 文中土地利用类型划分主要参考国家标准《土地利用现状分类(GB/T 21010—2017)》以及研究区现况将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地6类,其中未利用地包括了裸土地等。

土地利用动态度(K)可反映一定时间段内土地利用类型变化的程度,计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_a 、 U_b 分别是两个时间段前后的土地利用类型面积; T 为间隔的时间。

1.3.2 水生态系统服务价值评估指标体系 由于本研究主要针对水生态系统服务进行分析,因此将整个水生态系统影响作为目标层,将水生态系统所包含的多方面服务作为准则层,根据研究区长江经济带的概况,结合水生态系统服务功能的内涵、机

制和效用^[17-20],针对水生态的多方面服务功能,从InVEST模型和ESV价值量两个模型出发,分别考虑研究区内的生态系统服务及相应的价值情况,因此构建了长江经济带水生态系统服务评价指标体系(表2)。此外,在计算服务价值时,鉴于数据获取、量化及客观性,本研究对评价指标进行了筛选或调整,以确保评价结果的精确性与科学性。

1.3.3 InVEST模型构建

(1) 产水量模块。利用InVEST模型的产水模块(water yield)评估产水量,该方法基于Budyko^[21]水热平衡理论。定义为用研究区内的栅格单元上的降水量(P)减去实际蒸散量(AET)后剩下的水量,利用Budyko水热耦合平衡假设和降水量数据计算即可得到栅格单元上的产水量(WY)。

(2) 水质净化模块。水质净化模块(nutrient delivery ratio)是用于评估生态系统对氮、磷等营养物质净化功能的工具。该模块通过模拟不同土地用途

和土地覆盖类型对水质的影响,帮助理解和管理流域内的水质问题,通过输入土地利用、降水量等相关数

据并输入相应参数即可计算出营养物质氮和磷的输运率,以此来评估氮和磷从土地到水体的输运情况。

表 2 长江经济带水生态系统服务指标体系

Table 2 Indicator system for aquatic ecosystem services in Yangtze River economic zone

项目	类型	指标层	指标释义
水生态系统综合服务	InVEST 模型	产水量/mm	即区域内产水能力的大小
		水质净化/t	河流、水库中所具有的能够净化排入水体污染物的自净能力
		固碳释氧/t	湿地泥炭层及水生植物对地表碳的富集和对氧气的释放能力
	ESV	供给服务/亿元	生态系统产生的具体供给价值
		调节服务/亿元	生态系统服务调节过程中所产生的具体价值量
		支持服务/亿元	区域内提供其他服务的基础,如预防土壤侵蚀和退化、保持土壤的生产力、维持生物多样性的价值量
		文化服务/亿元	区域内水域文化景观所带来的旅游经济价值量

(3) 碳储存模块。碳储存模块(carbon storage and sequestration),主要用于估算生态系统碳储量,涵盖地上($C_{地上}$)、地下($C_{地下}$)、土壤($C_{土壤}$)及死亡有机质($C_{死亡有机质}$)这 4 个碳库,第 5 库数据缺乏,未纳入计算。

通过统计各地类碳密度并乘以面积,累计 4 大碳库储存量,得到研究区总碳储存量($C_{总}$)。总碳储存量计算公式为:

$$C_{总} = C_{地上} + C_{地下} + C_{土壤} + C_{死亡有机质} \quad (2)$$

式中: $C_{总}$ 为总碳储量; $C_{地上}$ 为地上碳储量; $C_{地下}$ 为地下碳储量; $C_{土壤}$ 为土壤碳储量; $C_{死亡有机质}$ 为死亡有机质碳储量。

1.3.4 ESV 价值量计算 研究区内水土保持、生物多样性、休闲娱乐等指标可通过当量因子法进行估算,具体可参考 2015 年谢高地等^[22]制定的单位面积价值当量因子表。其计算公式为:

$$ESV = \sum_i^n VC_i \cdot A_i \quad (3)$$

$$C = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n m_j p_j q_j / M \quad (i = 1 \dots n) \quad (4)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值总量; VC_i 为第 i 种土地单位面积服务价值系数(元/hm²); A_i 为第 i 种土地面积; C 为农田食品供应价值(元/hm²); i 为服务类型; j 为作物种类; p_j 为作物 j 的平均售价(元/t); q_j 为作物 j 的单产(t/hm²); m_j 为作物 j 种植面积(hm²); M 为作物总种植面积(hm²)。

结合研究区各地类实际情况,主要参照谢高地等^[24]相关学者制定的单位面积价值当量表,得到研究区内单位面积水生态系统服务价值当量表(表 3),通过查阅长江经济带各省市《统计年鉴》及《全国农产品收益情况汇编》等相关数据,采用公式(4),最终计算出研究区内单位面积水生态系统服务价值当量 C 值为 1 653.79 元/hm²。

表 3 单位面积水生态系统服务价值当量

Table 3 Aquatic ecosystem service value equivalent per unit area

水生态服务类型	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分	生物多样性	美学景观
耕地	1.105	0.245	-1.305	0.890	0.465	0.135	1.495	0.520	0.155	0.170	0.075
林地	0.252 5	0.580 0	0.300 0	1.907 5	5.708 0	1.673 0	3.735 0	2.322 5	0.1780	2.115 0	0.927 5
草地	0.38	0.56	0.31	1.97	5.21	1.72	3.82	2.40	0.18	2.18	0.96
水域	0.400	0.115	5.225	0.475	1.415	2.855	54.690	0.465	0.035	1.280	0.990
建设用地	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
未利用地	0.01	0.03	0.02	0.13	0.10	0.41	0.24	0.15	0.01	0.14	0.06

1.3.5 熵权法 熵权法是基于信息论,通过指标信息熵衡量信息量,低熵指标信息量大,权重高,用于综合评价权重分配的一种方法。根据该方法得出水生态服务系统各项指标的相应权重,然后采用线性

加权,即可得出长江经济带内每一个指标的权重及相应市的水生态服务系统综合值,再通过 ArcGIS 进行重要性分级,得到长江经济带 2012, 2017 和 2022 年的水生态服务系统重要性分级空间分布图。

(1) 标准化处理

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为标准化处理后的值; x_{ij} 为指标数据原始值; x_{\min} 为数据中的最小值; x_{\max} 为数据中的最大值。

(2) 熵值(e_j)计算公式为:

$$e_j = \frac{-\sum_{i=1}^n \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}} \ln\left(\frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^n X_{ij}}\right)}{\ln(n)} \quad (6)$$

式中: e_j 为第 j 个指标的熵值。

(3) 权重(w_j)计算公式为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (7)$$

式中: w_j 为第 j 个指标的权重。

(4) 水生态系统服务综合评价价值(S_i)计算公式为:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot X_{ij} \quad (8)$$

式中: S_i 为第 i 个样本的综合评价价值。

1.3.6 Dagum 基尼系数 Dagum 基尼系数通过引入超密度贡献的方式,能够有效剔除子样本之间的交叉重叠对区域间差异评价的干扰,提高对区域间差异评价的准确性。本文采用 Dagum 基尼系数可以更好地去分析评价长江经济带上中下游之间的水生态系统综合功能的差异性,同时也可以为之前的结果分析做进一步验证,计算公式为:

$$G = \frac{\sum_{a=1}^k \sum_{c=1}^k \sum_{b=1}^{n_c} \sum_{d=1}^{n_c} |e_{ab} - e_{cd}|}{2\mu n^2} \quad (9)$$

式中: G 为基尼系数; k 为地区个数; n 为所有城市数; $e_{ab}(e_{cd})$ 表示 $a(c)$ 地区内 $b(d)$ 的水生态系统综合值。

1.3.7 生态敏感性指数 敏感性指数用于评价生态系统服务敏感度,主要方法为对生态系数及生态系统服务总值上下调整 50%,以反映生态系统服务对其系数的敏感情况,计算公式为:

$$CS = \frac{(ESV_b - ESV_a)/ESV_a}{(SV_{bi} - SV_{ai})/SV_a} \quad (10)$$

式中: CS 为敏感性指数; ESV_a, ESV_b 分别为调整前后的生态系统服务值; SV_{ai}, SV_{bi} 则为调整前后的生态价值系数。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

2.1.1 土地利用类型变化 由图 1 及表 4 可知,2012—2022 年期间,长江经济带的土地利用类型主要以耕地和林地为主,耕地面积所占比例为 33.25%, 33.04%, 32.76%; 林地比例为 52.08%, 51.9% 和 52.42%。10 a 间土地利用类型面积变化规律耕地及林地呈现为先减后增,草地和水域面积有逐渐减少的趋势,而建设用地和未利用地面积比例则是逐渐增加,其中变化幅度最大的为建设用地面积,面积比例增量达到了 0.8%,揭示了长江经济带在经济发展和城市化进程中服务业、工业、新兴产业迅速发展,产业结构不断优化和转型,并推动城镇建设用地的面积极速增长。

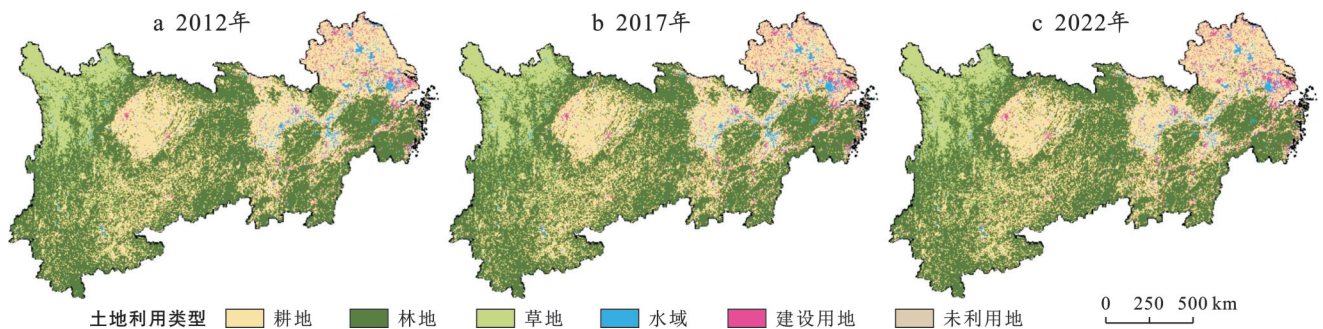


图 1 长江经济带土地利用类型变化

Fig.1 Change of land-use type in Yangtze River economic zone

2.1.2 土地利用动态度分析 根据表 5 所示,在不同时间段长江经济带土地利用类型动态度具有一定差异性。在 2012—2017 年,耕地、林地及草地变化均为负值,而水域、建设用地及未利用地变化则均为正值,尤其是建设用地和未利用地变化最大,分别为 3.55% 和 4.66%;而在 2017—2022 年,林地动态度呈

现正值,水域则为 -2.46%;2012—2022 年土地利用动态度变化综合来看,耕地、草地及水域变化均为负值,分别为 -0.15%, -0.46% 和 -1.11%,林地、建设用地及未利用地则为正值,建设用地整体变化较大,达到了 2.99%。结合图 1 可以看出,建筑面积变化最显著区域主要集中于省会城市和周边地区,如

成都市、合肥市、南京市、贵阳市等,形成“网状型”空间拓展结构。

表4 长江经济带土地利用类型面积比例
Table 4 Proportion of land-use type area in Yangtze River economic zone

年份	面积比例/%					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2012	33.25	52.08	9.42	2.40	2.68	0.17
2017	33.04	51.90	9.26	2.43	3.16	0.21
2022	32.76	52.42	8.99	2.13	3.48	0.22

2.2 水生态系统服务时空变化特征

2.2.1 基于InVEST模型的水生态系统服务的时空变化 基于InVEST模型对产水量、水质净化及碳储存等方面进行评估。由图2可知,生态系统服务空间格局相似。在产水量方面,空间分布上,可以明显看到高值区主要分布于东部及东南部方向,2012—

2022年,产水量最高值从3 002.7 mm降至1 986.41 mm,下降幅度达33.85%;水质净化主要通过氮输出(NE)及磷输出(PE)来体现,在空间上明显呈现出西部低、东北部高的分布特征。2012—2022年,TN输出量从282.300 t降至222.800 t后增至233.756 t,TP输出量从62.524 t降至49.345 t后增至51.772 t,两者均是呈现出了先减后增的趋势,表明水质净化服务效果虽然在后5 a内有增强的趋势,但整体上还是减弱;固碳释氧功能方面,2012—2022年,固碳量最大值没有发生波动,均保持在26 566 t左右,但在局部空间分布上,可以明显看出固碳高值区主要流向高森林覆盖率、生态系统完整的西南部地区,如四川省的阿坝藏族羌族自治州、云南省和贵州省的部分地区,年均固碳量超过20 000 t。而低值区位于工业化和城市化程度较高的东北部和中西部城市,如淮安市、扬州市、成都市等,均固碳量不足15 000 t。整体来看,随时间变化,研究区内产水量及水质净化服务均呈现下降趋势。

表5 长江经济带土地利用动态度
Table 5 Dynamics of land-use change degree in Yangtze River economic zone

时段	土地利用动态度/%					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2012—2017年	-0.12	-0.07	-0.34	0.28	3.55	4.66
2017—2022年	-0.17	0.20	-0.59	-2.46	2.06	1.03
2012—2022年	-0.15	0.07	-0.46	-1.11	2.99	2.97

2.2.2 基于ESV的水生态系统服务价值的时空变化 由图3可知,2012—2022年期间长江经济带各州市生态系统服务价值量整体空间差异显著,空间特征为西高东低。从局部进行分析,2012,2017和2022年最大值均为甘孜藏族自治州,具体价值量分别为4 941.29,4 911.43和4 870.29亿元,分别占总值的9.73%,9.71%,9.74%;而最低值则为湖北省潜江市,价值量均低于19亿元,比例仅在0.03%~0.04%。除甘孜州、阿坝州、重庆市、赣州市等,其余中部东部城市其价值量均低于1 000亿元,尤其是东北部的连云港市、宿州市、上海市等,其价值量甚至不到100亿元,其中潜江市经济主要以工业为主,较高的工业化和城市化程度也一定程度上导致各州市较低的服务价值量;随时间变化,2012,2017和2022年价值总量分别为50 772.7,52 579.7和50 019.5亿元,其生态系统服务价值量呈现出明显的下降趋势,与InVEST模型结果一致。

2.2.3 水生态系统服务综合功能变化评估 由于所选取的指标量纲不同,需在统一划分标准下进行综合评价,因此对选取的多个指标分别进行归一化处理后将两个模型中的多个指标进行加权求和。在ArcGIS中通过自然断点法将其分为:一般重要(0~

0.25)、中等重要(0.25~0.5)、重要(0.5~0.75)、非常重要(0.75~1)等4类。如图4所示,2012—2022年,水生态系统服务重要性分级空间上呈现散点型分布、差异明显、分布不均衡的特点,其中130个市州达到了非常重要评级的为阿坝州、甘孜州及重庆市,而其余127个市州评级均在重要及以下。2012年整体评级普遍偏低,一般以上城市评价仅仅在中等重要及以下,其中最低值为淮北市,2012,2017和2022年的综合值分别为0.008 7,0.009 1和0.008 7,均不足0.01;2017—2022年重要及以上分级城市数量减少了4个。从流域来看,2012—2022年,水生态系统综合均值从高到低排列为:上游(0.177)>中游(0.103)>下游(0.064)。随时间变化,2012—2022年水生态系统服务总值由16.886降为13.660,整体呈现出下降趋势,与InVEST及ESV时间变化一致。

2.3 水生态系统服务区域差异水平分析

表6表明2012—2022年长江经济带上中下游区域之间的生态系统服务存在着显著差异性。首先从区域内差异来看,上游差异最大,2012,2017和2022年分别为0.445,0.441和0.448,年均比例为39.5%,其次是中游,比例为34.7%,下游再次之,仅为25.8%;从区域间差异看,上游与中游、中游与下游之

间差异系数均在 0.4~0.46,而上游与下游间差异均大于 0.5,上下游之间的巨大差异是主要的贡献来源;整体上来看,各年间的水生态系统服务的基尼系数

差异不大,在 0.440~0.445 间浮动,区域间差异的贡献率是主要贡献率的来源,均在 37.595% 以上,其余区域内差异及超变密度贡献均呈现下降趋势。

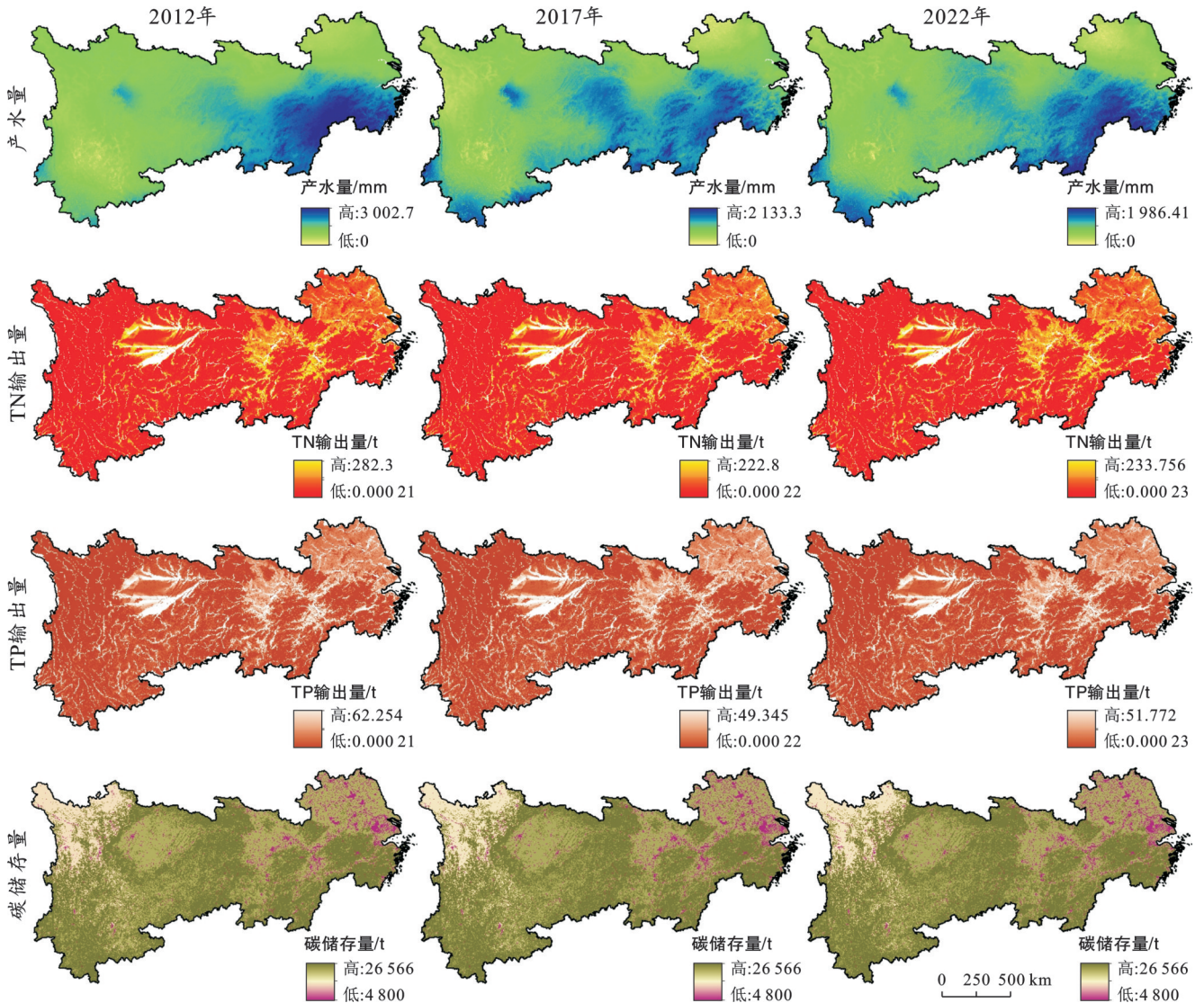


图 2 长江经济带水生态服务时空变化

Fig.2 Spatial and temporal changes in aquatic ecological services in Yangtze River economic zone

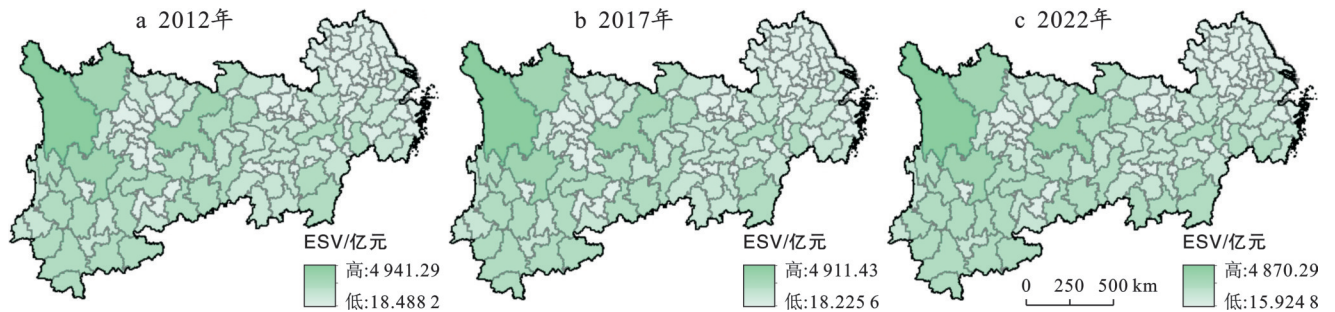


图 3 长江经济带生态系统服务价值总量(ESV)时空分布

Fig.3 Spatiotemporal distribution of total value of ecosystem services (ESV) in Yangtze River economic zone

结合上文分析,上游区域具有较高的水生态系统服务功能,但变化差异不显著;下游区域水生态系统服务功能较低,评级为重要的城市数量在急剧减

少,这也意味着整体上生态系统服务综合能力呈现出下降趋势,且下游区域下降趋势更为显著,尤其是沿海地带,其水生态系统服务能力普遍较低。

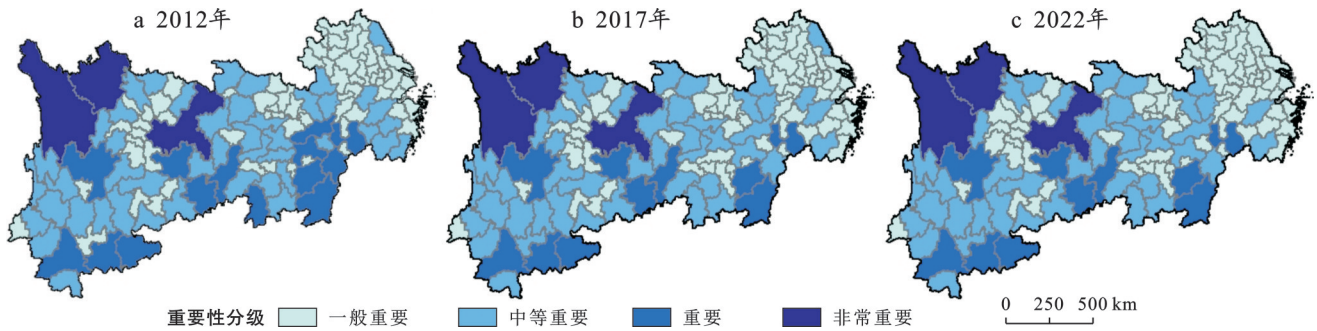


图 4 长江经济带水生态系统服务重要性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of importance of aquatic ecosystem services in Yangtze River economic zone

表 6 长江经济带水生态系统服务基尼系数分解结果及贡献率

Table 6 Decomposition results and contribution rates of Gini coefficient of aquatic ecosystem services in Yangtze River economic zone

年份	区域	区域内差异			区域间差异			超变密度	贡献率/%		
		上游	中游	下游	上一中	上一下	中一下		区域内	区域间	超变密度
2012	0.440	0.445	0.401	0.315	0.446	0.507	0.418	0.117	35.760	37.595	26.645
2017	0.445	0.441	0.393	0.277	0.455	0.538	0.413	0.094	34.805	44.170	21.025
2022	0.443	0.448	0.379	0.280	0.455	0.539	0.401	0.092	34.748	44.522	20.731

2.4 生态系统敏感性分析

如表 7 所示,长江经济带各土地利用类型,其生态系统敏感性指数在不同年份变化较小,其中林地敏感性指数最为显著,达到了 0.681 2 以上,而未利用地敏感性指数最低,仅为 0.000 2 以下。2012,2017 和 2022 年各土地利用类型的水生态系统生态敏感度指数均小于 1,说明本研究采用的生态系数不敏感,且适合研究区的实际情况,其生态系统服务的最终结果具有可靠性。

表 7 长江经济带不同土地利用类型生态系统敏感性指数
Table 7 Ecosystem sensitivity index of different land-use types in Yangtze River economic zone

土地利用类型	不同地类敏感性指数		
	2012 年	2017 年	2022 年
耕地	0.087 2	0.087 0	0.087 2
林地	0.681 2	0.681 2	0.695 7
草地	0.123 2	0.121 5	0.119 2
水域	0.108 2	0.110 1	0.097 7
建设用地	0.000 0	0.000 0	0.000 0
未利用地	0.000 1	0.000 2	0.000 2

3 结论

本研究量化评估了对于长江经济带较为关键的多种生态系统服务(产水量、水质净化和碳固定等),其他生态服务如粮食生产、生物多样性等对于区域发展和生态安全同样有着重要影响的指标也通过 ESV 价值量得以体现。基于 InVEST 模型及 ESV 当

量因子表,分析长江经济带近 2012—2022 年土地利用变化情况及水生态服务系统各指标的时空格局特征,探究了长江经济带内水生态服务系统的重要性空间分布情况,并通过 Dagum 基尼系数分析了上中下游区域间的差异情况,借助生态敏感性指数验证了结果的准确性,其中生态系统服务价值呈现先增后减的趋势,与刘雅杰^[23]和李悦等^[24]研究结果一致。

(1) 长江经济带土地利用类型以林地和耕地为主。2012—2022 年土地利用类型面积变化显著,耕地和林地先减后增,草地和水域面积逐渐减少,而建设用地和未利用地面积比例则是逐渐增加;各地类相比,建设用地土地利用动态变化最大(2.99%),但增速相对温和。

(2) 长江经济带水生态服务显现出明显的时空差异。在空间上呈现出西高东低的特征,且随时间变化整体上呈现减弱趋势。其中基于 InVEST 进行分析的产水量和水质净化能力明显减弱,基于 ESV 的生态价值量在 2012,2017 和 2022 年分别为 50 772.7, 52 579.7 和 50 019.5 亿元,虽然在一定时间范围内有所回暖,但整体上还是有所降低。

(3) 长江经济带水生态服务综合值整体上差异扩大。其中,区域内差异不断降低,区域间差异不断增强,区域间差异明显,上下游之间差异较大,也是整个区域间差异中最主要的贡献来源。

(4) 各土地利用类型的生态敏感性指数均小于 1,说明在研究范围内所选择的土地利用类型对生态系统服务系数不敏感,且符合研究区实际情况,所得

的生态服务价值结果可靠。

长江大保护的总体目标是保护和修复长江生态环境,推动长江经济带高质量发展,实现人与自然是和谐共生的绿色发展示范带。而本研究结果显示,研究期间内长江经济带内草地及水域面积减少,建设用地面积逐渐增加,生态系统服务整体呈现减弱趋势,生态系统服务价值先增后减。如王德旺等^[25]就在其研究中明确提到了近5a内耕地和林草地等转为建设用地的变化趋势,也与本研究结果一致。这主要与生态保护工程建设、经济快速发展、城市化等多种因素有关。

4 相关建议

(1) 优化土地利用格局。针对土地利用变化趋势,应优化土地利用格局,特别是在城市化快速发展的地区。应合理规划城市可持续发展布局,提高城市绿化率,将水生态系统服务纳入国土空间规划评价指标体系,引导区域可持续发展。

(2) 提升水源涵养能力。水生态供给服务的逐渐减弱表明需要加强水源涵养区的保护和恢复。建议在长江经济带的重要水源涵养区实施水土保持、植被恢复和湿地保护等措施,以提高水源涵养能力。

(3) 增加生态补偿机制。长江经济带水生态的综合服务在区域间差异较大,尤其是上下游区域,建议增加生态补偿机制,鼓励上游地区保护生态环境,下游地区通过生态补偿机制向上游地区提供经济补偿,以促进全流域的生态保护和可持续发展。

(4) 制定水生态服务功能分级政策。根据重要性分级,制定区域性政策,优先保护和支撑高重要性区域,同时改善中等和一般重要区域的环境状况,以提升整个长江经济带水生态系统服务的安全性和可持续发展水平。

参考文献(References)

[1] 何凡能,李美娇,刘浩龙.北宋路域耕地面积重建及时空特征分析[J].地理学报,2016,71(11):1967-1978.
He Fanneng, Li Meijiao, Liu Haolong. Reconstruction of cropland area at Lu scale and its spatial-temporal characteristics in the Northern Song Dynasty [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11):1967-1978.

[2] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress [J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(4):441-446.

[3] 高星,刘泽伟,李晨曦,等.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究[J].生态学报,

2020,40(20):7113-7122.

Gao Xing, Liu Zewei, Li Chenxi, et al. Land use function transformation in the Xiongan New Area based on ecological-production-living spaces and associated eco-environment effects [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(20):7113-7122.

- [4] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.
Fu Bojie, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, et al. The main terrestrial ecosystem services and ecological security in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(6):571-576.
- [5] 刘浩,孙丽慧,吕文魁,等.基于土地利用变化的洱海流域生态系统服务价值评估与变化分析[J].生态经济,2022,38(1):147-152.
Liu Hao, Sun Lihui, Lv Wenkui, et al. Evaluation and change analysis of ecosystem service value in Erhai Lake basin based on land use change [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(1):147-152.
- [6] Liang Jie, Li Shuai, Li Xiaodong, et al. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279:123851.
- [7] Meyer W. Human population growth and global land-use/cover change [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1992, 23:39-61.
- [8] 吕明轩,张红,贺桂珍,等.黄河流域水源涵养服务功能动态演变及驱动因素[J].生态学报,2024,44(7):2761-2771.
Lü Mingxuan, Zhang Hong, He Guizhen, et al. Dynamic evolution and driving factors of water conservation service function in the Yellow River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(7):2761-2771.
- [9] 李威,吕思思,赵祖伦,等.土地利用对流域水源涵养及水质净化的影响:以乌江流域为例[J].生态学报,2023,43(20):8375-8389.
Li Wei, Lü Sisi, Zhao Zulun, et al. Impact of land use change on watershed water conservation and water quality purification service: A case study of Wujiang River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8375-8389.
- [10] 伍堂银,周忠发,张露,等.基于InVEST模型的南北盘江流域产水量时空变化研究[J].水土保持通报,2023,43(3):129-138.
Wu Tangyin, Zhou Zhongfa, Zhang Lu, et al. Spatial-temporal variation of water yield in Nanbeipanjiang River basin based on InVEST model [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3):129-138.
- [11] 吴常雪,翁学先,徐瑞瑞,等.退耕还林前后渭河流域土壤保持功能变化[J].中国水土保持科学(中英文),

- 2024, 22(4):102-108.
- Wu Changxue, Weng Xuexian, Xu Ruirui, et al. Changes in soil conservation function before and after the Grain for Green project in the Weihe River basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(4):102-108.
- [12] 郭宇, 姚亦锋, 王振波, 等. 基于主体功能区的长江经济带绿色发展评价与问题区域识别[J]. *生态学报*, 2023, 43(7):2569-2582.
- Guo Yu, Yao Yifeng, Wang Zhenbo, et al. Green development evaluation and problem areas identification of the Yangtze River economic belt from the perspective of major function oriented zones [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7):2569-2582.
- [13] 孙静静, 王卿, 王敏, 等. 长江经济带生态系统格局演变及其驱动力分析[J]. *人民长江*, 2022, 53(6):83-89.
- Sun Jingjing, Wang Qing, Wang Min, et al. Ecosystem spatial pattern evolution characteristics and its driving forces in Yangtze River economic belt [J]. *Yangtze River*, 2022, 53(6):83-89.
- [14] 吴冉, 刘艳, 孔涵, 等. 长江经济带耕地利用效率与生态系统服务耦合关系研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(2):300-309.
- Wu Ran, Liu Yan, Kong Han, et al. Coupling study of farmland utilization efficiency and ecosystem services in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(2):300-309.
- [15] 王维. 长江经济带“4E”协调发展时空格局研究[J]. *地理科学*, 2017, 37(9):1354-1362.
- Wang Wei. Spatio-temporal pattern of ‘four-E’ in the Yangtze River economic zone [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(9):1354-1362.
- [16] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法: 以长江流域为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(3):835-843.
- Kong Lingqiao, Wang Yaqing, Zheng Hua, et al. A method for evaluating ecological space and ecological conservation redlines in river basins: A case of the Yangtze River basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3):835-843.
- [17] Van Houtven G, Mansfield C, Phaneuf D J, et al. Combining expert elicitation and stated preference methods to value ecosystem services from improved lake water quality [J]. *Ecological Economics*, 2014, 99:40-52.
- [18] 邓灵稚, 杨振华, 苏维词. 城市化背景下重庆市水生态系统服务价值评估及其影响因子分析[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4):208-216.
- Deng Lingzhi, Yang Zhenhua, Su Weici. Valuing the water ecosystem service and analyzing its impact factors in Chongqing City under the background of urbanization [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(4):208-216.
- [19] 魏强, 佟连军, 杨丽花, 等. 三江平原湿地生态系统生物多样性保护价值[J]. *生态学报*, 2015, 35(4):935-943.
- Wei Qiang, Tong Lianjun, Yang Lihua, et al. The biodiversity conservation value of wetland ecosystem in the Sanjiang Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4):935-943.
- [20] 李景保, 代勇, 殷日新, 等. 三峡水库蓄水对洞庭湖湿地生态系统服务价值的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3):809-817.
- Li Jingbao, Dai Yong, Yin Rixin, et al. Effects of Three Gorges reservoir impoundment on the wetland ecosystem service value of Dongting Lake, south-central China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):809-817.
- [21] Redhead J W, Stratford C, Sharps K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 569:1418-1426.
- [22] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8):1243-1254.
- Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8):1243-1254.
- [23] 刘雅杰. 长江上游流域土地利用变化及生态系统服务价值研究[D]. 广东 东莞: 东莞理工学院, 2023.
- Liu Yajie. Study on land use change and ecosystem service value in the upper reaches of Yangtze River basin [D]. Dongguan, Guangdong: University of Technology, 2023.
- [24] 李悦, 李晓青. 长江经济带生态系统服务时空变化及权衡/协同关系研究[J]. *人民黄河*, 2024, 46(5):104-110.
- Li Yue, Li Xiaoqing. Study on spatiotemporal changes of ecosystem services and trade-off/synergy relationships in the Yangtze River economic belt [J]. *Yellow River*, 2024, 46(5):104-110.
- [25] 王德旺, 何萍, 徐杰, 等. 长江大保护5年来流域土地利用和生态系统服务变化[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(2):408-416.
- Wang Dewang, He Ping, Xu Jie, et al. Changes of land use and ecosystem service in the Yangtze River basin after five years' general protection [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(2):408-416.