

# 滇中高原湖泊流域景观格局变化及 生态系统服务价值响应

钱婷婷<sup>1</sup>, 刘凤莲<sup>2,3</sup>, 祁毅<sup>1</sup>, 姚伟<sup>1</sup>

(1. 云南财经大学 财政与公共管理学院, 昆明 650221; 2. 云南财经大学  
国土资源与持续发展研究所, 昆明 650221; 3. 云南财经大学 云南省服务计算重点实验室, 昆明 650221)

**摘要:** [目的] 滇中高原湖泊流域是云南省的生态核心区域, 对其景观格局变化和生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)展开研究, 能够进一步明晰西南生态安全屏障稳定程度以及推动区域可持续发展。[方法] 基于2003年、2008年、2013年、2018年、2023年五期土地利用数据, 利用ArcGIS 10.3和Fragstats 4.2软件, 研究滇中高原湖泊流域景观格局、生态系统服务价值及二者之间相关性。[结果] (1) 滇中高原湖泊流域景观类型以耕地、林地为主。2003—2023年期间, 建设用地面积增幅较大, 达180.43%, 主要由耕地和草地转入。(2) 滇中高原湖泊流域景观格局局部变化明显, 滇池北部区域呈现破碎化、异质性增强的趋势。(3) 滇中高原湖泊流域ESV总量呈现波浪式起伏, 整体变化不大。ESV总量贡献最大的景观类型为水域, 其贡献占比在60%以上。(4) 研究区内景观格局变化与ESV存在一定相关性。在水域等ESV高值区, CONTAG越高ESV越低; 在ESV负向供给的建设用地区域, CONTAG越高ESV越高。除水域要保持其单一类型的均质状态外, 其他地类SHDI越高ESV越高。[结论] 滇中高原湖泊流域景观格局指数变化对ESV分布情况存在明显的区域异质性, 保持该流域生态优势要因地制宜并实施分区差异化管控。

**关键词:** 土地利用; 景观格局; 生态系统服务价值; 滇中高原湖泊流域

中图分类号: P901; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0299-11

## Landscape pattern changes and response to ecosystem service value in plateau lake basin of central Yunnan

Qian Tingting<sup>1</sup>, Liu Fenglian<sup>2,3</sup>, Qi Yi<sup>1</sup>, Yao Wei<sup>1</sup>

(1. School of Public Finance and Management, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China;  
2. Institute of Land & Resources and Sustainable Development, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221,  
China; 3. Yunnan Key Laboratory of Service Computing, Yunnan University of Finance and Economics, Kunming 650221, China)

**Abstract:** [Objective] The plateau lake basin of central Yunnan is the ecological core area of Yunnan Province. Research on its landscape pattern changes and ecosystem service value (ESV) can further clarify the stability of the southwestern ecological security barrier and promote regional sustainable development. [Methods] Based on land use data from five periods (2003, 2008, 2013, 2018, and 2023), and utilizing ArcGIS 10.3 and Fragstats 4.2 software, the landscape patterns, ESV, and their correlation in the plateau lake basin of central Yunnan were analyzed. [Results] (1) The landscape types in the plateau lake basin were predominantly cultivated land and forest land. From 2003 to 2023, the area of construction land increased significantly by 180.43%, mainly converted from cultivated land and grassland. (2) The landscape pattern of the lake basin exhibited significant local

收稿日期: 2025-07-10

修回日期: 2025-08-03

接受日期: 2025-08-14

资助项目: 国家乡村振兴局委托项目(80026091881); 云南省服务计算重点实验室开放课题项目(YNSC24305); 云南省教育厅科学研究资助项目(2024J0634); 云南财经大学引进人才项目(2022D13); 国家社会科学基金一般项目(25BJY175); 云南财经大学科学研究基金项目(2025JD01)

第一作者: 钱婷婷(2001—), 女, 四川攀枝花人, 硕士研究生, 主要从事土地资源管理研究。E-mail: 3199647296@qq.com

通信作者: 刘凤莲(1981—), 女, 山东临清人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用与区域可持续发展研究。E-mail: zz2105@ynufe.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

changes, with the northern area of Dianchi Lake showing trends of fragmentation and increased heterogeneity. (3) The total ESV of the plateau lake basin of central Yunnan showed wave-like fluctuations, with little overall change. The landscape type contributing the most to the total ESV was water bodies, accounting for over 60% of the total contribution. (4) Changes in landscape patterns were correlated with ESV in the study area. In high-ESV areas such as water bodies, higher CONTAG was associated with lower ESV. In construction land areas with negative ESV supply, the higher the CONTAG, the higher the ESV. Except for water bodies, which should maintain a homogeneous state as a single type, other land types showed higher ESV with higher SHDI. [Conclusion] Changes in landscape pattern indices in the plateau lake basin of central Yunnan show significant regional heterogeneity in ESV distribution. To maintain the ecological advantages of this basin, site-specific and zoned differentiated management should be implemented.

**Keywords:** land use; landscape pattern; ecosystem service value; plateau lake basin of central Yunnan

生态系统服务(Ecosystem Services)是指生态系统与生态过程直接或间接为人类提供的各种惠益和自然环境条件<sup>[1-2]</sup>。关键环境问题研究小组(Study of Critical Environmental Problems, SCEP)于1970年在《人类对全球环境的影响报告》中首次系统阐述了“服务”理念,并详细阐释了生态系统所提供的气候调节、土壤形成、水土保持以及物质循环等关键服务功能,就此为这一理论研究奠定了基础<sup>[3-5]</sup>。1997年,生态学领域知名学者 Gretchen Daily 和 Robert Costanza 等通过其权威著作和学术论文,对该概念进行了系统性理论构建与分类研究,从而推动了该理论在学术界的广泛接受与应用<sup>[6-7]</sup>。谢高地等基于中国生态系统的区域特征,构建了本土化的单位面积生态系统服务当量因子体系,该指标体系具有操作简便、数据需求低且易于获取等技术优势,并因其本土适用性而在全国尺度的生态评估研究中得到普遍应用,这一方法论的创新不仅提升了评估效率,也为我国生态系统服务价值核算提供了标准化工具<sup>[8-9]</sup>。

景观格局变化及其对生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)的响应研究已成为当前景观生态学研究的重要议题<sup>[10-11]</sup>。全球城市化进程和人类活动加剧导致景观格局发生显著变化,进而深刻影响生态系统服务功能的供给能力<sup>[12-13]</sup>。现有研究主要采用遥感影像解译、景观格局指数分析和生态系统服务价值评估相结合的方法体系,通过 Landsat TM/ETM 等遥感影像获取土地利用/覆被变化数据,并利用 Fragstats 软件计算斑块密度(Patch Density, PD)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)、香农多样性指数(Shannon Diversity Index, SHDI)等景观格局指数<sup>[14-15]</sup>,并结合当量因子法评估 ESV。近年来相关学者研究表明,中国不同区域景观格局普遍呈现破碎化、异质性增强的趋势,如长江经济带 1980—2020 年景观破碎化、分散化程度加深,提出城市化会降低生

态生态系统服务总价值<sup>[16]</sup>;汉江生态经济带区域景观破碎度越强,相应的生态系统服务价值就越低<sup>[17]</sup>。景观格局变化对 ESV 的影响机制复杂,其中林地和湿地等关键景观类型对 ESV 贡献最大,如芜湖区段林地和湿地对 ESV 起主导作用<sup>[18]</sup>,赣南地区 2000—2018 年 ESV 减少主要原因是林地减少导致<sup>[19]</sup>。

云南省政府提出要推动完成生态文明体制改革、生态文明示范创建、生态产品价值实现等三项突破性任务。而滇中高原湖泊流域作为云南省生态安全屏障的重要区域以及滇中城市群建设的核心区,研究其生态系统服务功能及景观格局变化对于保障生态系统健康、维护生物多样性和区域可持续发展至关重要。

## 1 研究区概况与数据来源

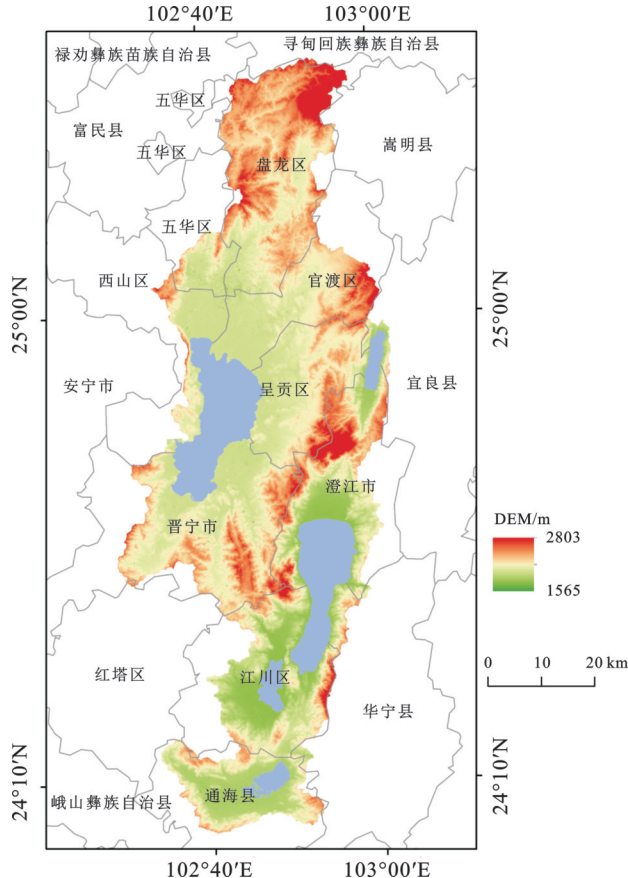
### 1.1 研究区概况

滇中高原湖泊流域(24°04'—25°27'N, 102°29'—103°02'E)位于云南省中部,涵盖滇池、阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖五大湖泊,地跨昆明市和玉溪市,面积为 4 560 km<sup>2</sup>(图 1)。该流域地势总体呈现西北高、东南低的特点,山地、丘陵与盆地、谷地相互交错为湖泊的形成与发展提供了基础条件。流域内的人口分布相对集中,当地居民依赖湖泊和周边的土地资源,发展了以农业、渔业为主的传统经济模式。近年来,随着区域经济的快速发展,工业和旅游业也在流域内逐渐发展,为当地居民带来了更多的就业机会和经济收入。该流域兼具生态脆弱性与资源富集性,是区域水资源供给、生物多样性维持和气候调节的核心载体,同时也是云南省经济—人口集聚区,面临开发与保护的突出矛盾。

### 1.2 数据来源

2003 年、2008 年、2013 年、2018 年、2023 年五期土地利用数据来自武汉大学发布的全国土地覆被数

据集<sup>[20]</sup>(<https://zenodo.org/>),并将其重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类<sup>[21-22]</sup>。行政边界数据来自国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn>),DEM数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn>)。农业统计数据来自云南省统计局、云南省国民经济与社会发展统计公报及全国农产品成本收益资料汇编。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 研究区区位示意图

Fig. 1 Location map of study area

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵是根据研究时段内土地利用数据得出的反映其各地类之间转换情况的二维矩阵<sup>[23]</sup>,其数学模型为:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $C_{ij}$ 为研究区*i*地类转变为*j*地类的面积;*n*为转移前后土地利用类型数目。

### 2.2 景观格局指数分析

根据不同景观指数的生态学意义并结合相关案

例<sup>[24-25]</sup>,选取斑块密度(PD)、最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、景观形状指数(LSI)以及聚集度指数(Aggregation Index, AI)分析研究区各景观类型及其变化;在景观水平上选取香农多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(Contagion Index, CONTAG)衡量研究区景观水平及其变化。通过Fragstats 4.2软件对研究区景观格局的破碎度和多样性等特征展开研究。

### 2.3 生态系统服务价值评估

以谢高地等相关研究为基础,参考邓舒洪对建设用地生态系统服务价值当量的考量<sup>[26]</sup>,结合研究区实际情况确定其生态服务价值当量表<sup>[9]</sup>。根据云南省2023年主要农作物(水稻、玉米、马铃薯)产量、种植面积及主要粮食收购价格,采用单量因子法,按1个当量因子的经济价值量等于平均粮食单产市场价值的1/7计算得出滇中高原湖泊流域生态系统服务价值当量为2720.27元/hm<sup>2</sup>,得到滇中高原湖泊流域单位面积ESV当量表,参考Costanza等<sup>[7]</sup>研究成果测算研究区生态系统服务价值,公式为:

$$ESV = \sum A_k \cdot V_{C_k} \quad (2)$$

式中:ESV为生态系统服务价值总量; $A_k$ ,  $V_{C_k}$ 分别代表第*k*类土地利用类型的面积和生态系统服务价值系数。

## 3 结果与分析

### 3.1 景观格局时空演变分析

3.1.1 景观类型转移特征 基于土地利用数据,使用ArcGIS 10.3提取相关信息整理得到研究区景观类型面积表(表1)和研究区各类景观类型转移弦图(图2)。滇中高原湖泊流域主要的景观类型为耕地和林地,两者占研究区总面积的70%以上,且林地面积不断扩张,超越耕地成为研究区内面积最大的地类。20年间草地及水域面积有所减少,2018—2023年草地面积减少尤为明显,减少了89.59 km<sup>2</sup>,水域在2008—2013年有明显的减少,由629.90 km<sup>2</sup>下降至612.75 km<sup>2</sup>。草地和水域面积分别在2013年和2018年期间有所增加,在此期间滇中高原湖泊流域开展了“四退三还”工程、生态湿地建设并推行河长制。建设用地面积持续扩张,20年间其增幅达到了180.43%。

近20年间,耕地主要流向林地和草地,同时也有大量的林地和草地转换为耕地,其中草地作为转换为耕地面积最大的地类在2018—2023年期间转换面积达到总转换面积的67.66%。水域多转化为耕地,在2008—2013年转化面积最大,达到了14.93 km<sup>2</sup>。未利用地面积持续增加,主要是草地退化而成。转化为建设用地的地类多为耕地和草地,前10 a多为耕地转化

为建设用地,后 10 a 耕地转化为建设用地的比例大幅下降,就 2018—2023 年而言,建设用地面积增加了 27.03 km<sup>2</sup>,其中 30.08% 来自耕地,69.26% 来自草地。

3.1.2 景观格局变化 利用 Fragstats 4.2 软件并采

用八邻域规则对滇中高原湖泊流域土地利用数据进行批量处理得到研究区各年对应的 PD, LSI, LPI, AI 景观指数值并对 CONTAG 和 SHDI 景观指数进行可视化处理。

表 1 研究区景观类型变化

Table 1 Changes in landscape types in study area

年份	2003年		2008年		2013年		2018年		2023年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
耕地	1777.56	38.98	1596.96	35.02	1554.23	34.08	1499.04	32.87	1496.70	32.82
林地	1386.62	30.40	1541.66	33.80	1536.30	33.68	1636.82	35.89	1703.15	37.34
草地	677.29	14.85	661.39	14.50	689.93	15.12	593.81	13.02	504.22	11.05
水域	634.04	13.90	629.90	13.80	612.75	13.43	623.57	13.67	622.22	13.64
未利用地	3.49	0.08	2.20	0.05	3.93	0.09	6.68	0.15	6.60	0.14
建设用地	80.99	1.77	127.90	2.80	162.86	3.57	200.09	4.38	227.12	4.98

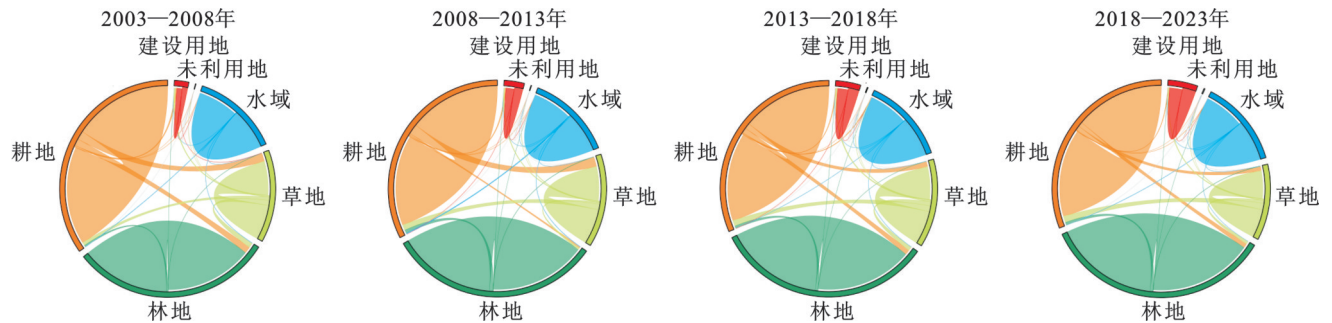


图 2 研究区各类景观类型转移弦

Fig. 2 Chord diagrams of transfer of various landscape types in study area

(1) 景观类型尺度分析。草地的斑块密度(PD)及景观形状指数(LSI)最大,近年来整体呈现上升趋势,表明其破碎化程度加深且景观形状最为复杂。水域 PD 有所下降,这与区域经济与农业发展导致湖泊周边零散的湿地被改作他用密切相关。近 20 年间,林地和未利用地的 PD 和 LSI 变化幅度相对较小。耕地和建设用地这两种景观类型的 PD 相对保持稳定,而 LSI 均有上升趋势,可见这两类景观地块并未被大量分割并由于面积的增减导致其斑块形状复杂化(图 3)。

2003 年,耕地的最大斑块指数(LPI)最大,表明当时耕地在所有景观类型中处于主要地位,且耕地的 LPI 逐年大幅下降,表明耕地景观类型面积被其他景观侵占。林地和建设用地 LPI 有所增加,这两类景观类型在一定程度上有所扩张。随着退耕还林工程的开展及城市开发建设,林地和建设用地面积不断扩大。水域的聚集度指数(AI)最高,其次是林地和耕地。草地的聚集度指数有所下降,表明草地斑块越发离散。2003—2023 年期间,建设用地和未利用地的聚集度指数明显上升,说明该景观类型斑块间的连通性更流畅,一方面表明随着城市发展建设用地不断扩张,另一方面表明研究区生态环境遭到一定破坏,未利用地面积有所扩大。

(2) 景观水平尺度分析。蔓延度指数(CONTAG)可用于衡量滇中高原湖泊流域景观斑块的聚集程度和空间配置(图 4)。研究区域的景观蔓延度指数整体较低且长期保持稳定状态,这表明该地区单一景观斑块的面积较大且形成严明的分区,景观的聚散程度变化较小。从局部分析来看,滇池以北及阳宗海以西地区的 CONTAG 变化较大且数值有所上升,该区域地形较为平坦且随着昆明市土地利用开发的强度加大导致大量耕地、未利用地用于建设住宅区、商业区和基础设施,表现为景观变化更强烈、各斑块更聚集。

通过滇中高原湖泊流域香农多样性指数(SHDI)分布示意图可见:2003—2023 年研究区香农多样性指数在 2008 年总体上有所上升后慢慢下降回归至一个相对稳定且整体水平较低的状态。SHDI 的高值区主要分布在滇池北部区域,该区域涵盖昆明市的呈贡区、西山区及五华区,且呈现出向东北方向扩散的趋势,可见城市化的快速推进使区域景观发生变化,景观多样性提高。2003—2008 年期间滇池北部 SHDI 变化最为明显,昆明市政府于 2003 年提出呈贡新城规划,规划内容包括建设大学城和市政府入驻呈贡,这一规划在 2007 年基本完成,极大程度上改变了呈贡区的景观类型、提高其景观多样性(图 5)。



情况密切相关。耕地 ESV 持续下降,从 2003 年的 19.27 亿元降至 2023 年的 16.23 亿元,近十年来耕地下降幅度有所减缓,由 2003—2013 年的 -12.56% 变为 2013—2023 年的 -3.70%。林地 ESV 持续增长,研究时段内其增值为 17.93 亿元。草地的生态系统服务价值在 2003—2013 年期间略有增长,但在 2013—2023 年期间显著下降,下降了 26.92%。水域对 ESV 总量贡献达 60% 以上,在研究时段内是各地类中 ESV 变化比例较小的地类。未利用地 ESV 值最小,2013—2023 年其变化幅度

最高,增幅达到 67.87%。研究时段内,研究区由于城市空间扩展、完善基础设施等需求,建设用地面积不断增加,硬化地表直接替代和侵占具备水源涵养、生物多样性保护等功能的自然景观,同时城市大量基础设施对自然循环的生态过程形成一定阻碍,造成生态功能受损甚至负向输出,致使建设用地的 ESV 不断下降。这表明不同地类对生态系统服务价值的影响存在显著差异,且在同时段内的变化趋势也有所不同,这对于合理利用土地和制定生态系统管理策略具有重要意义。

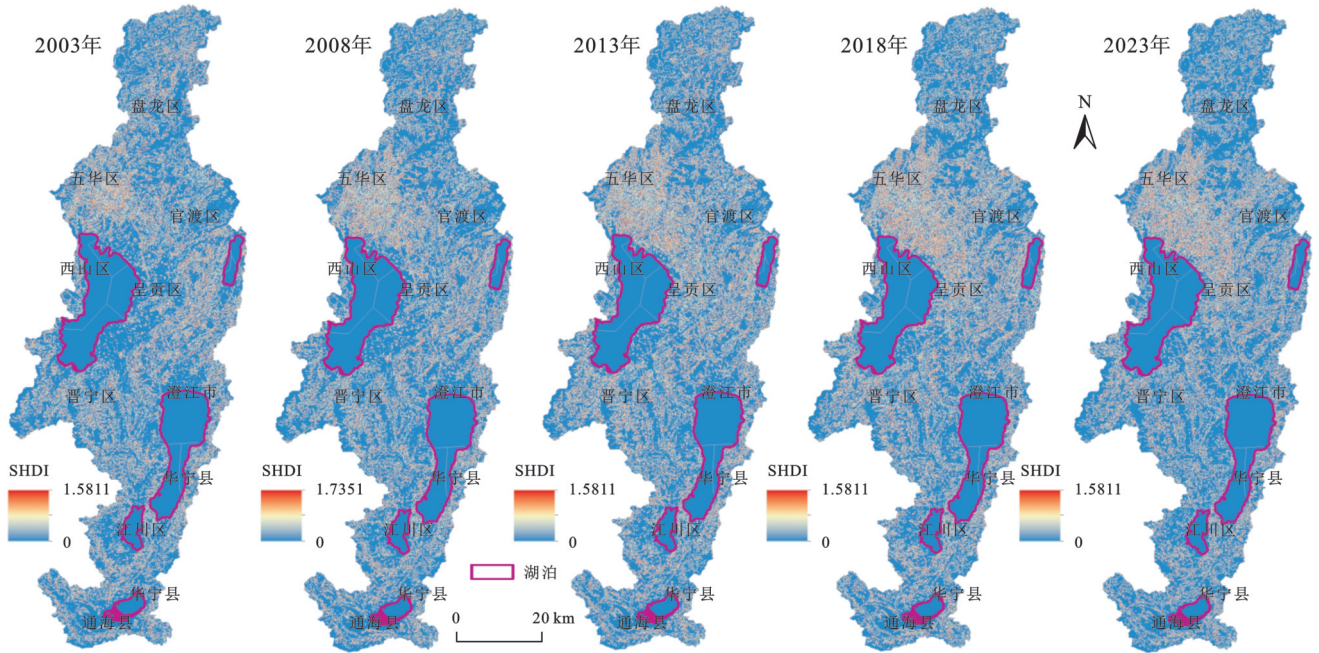


图 5 香农多样性指数 (SHDI) 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Shannon diversity index (SHDI)

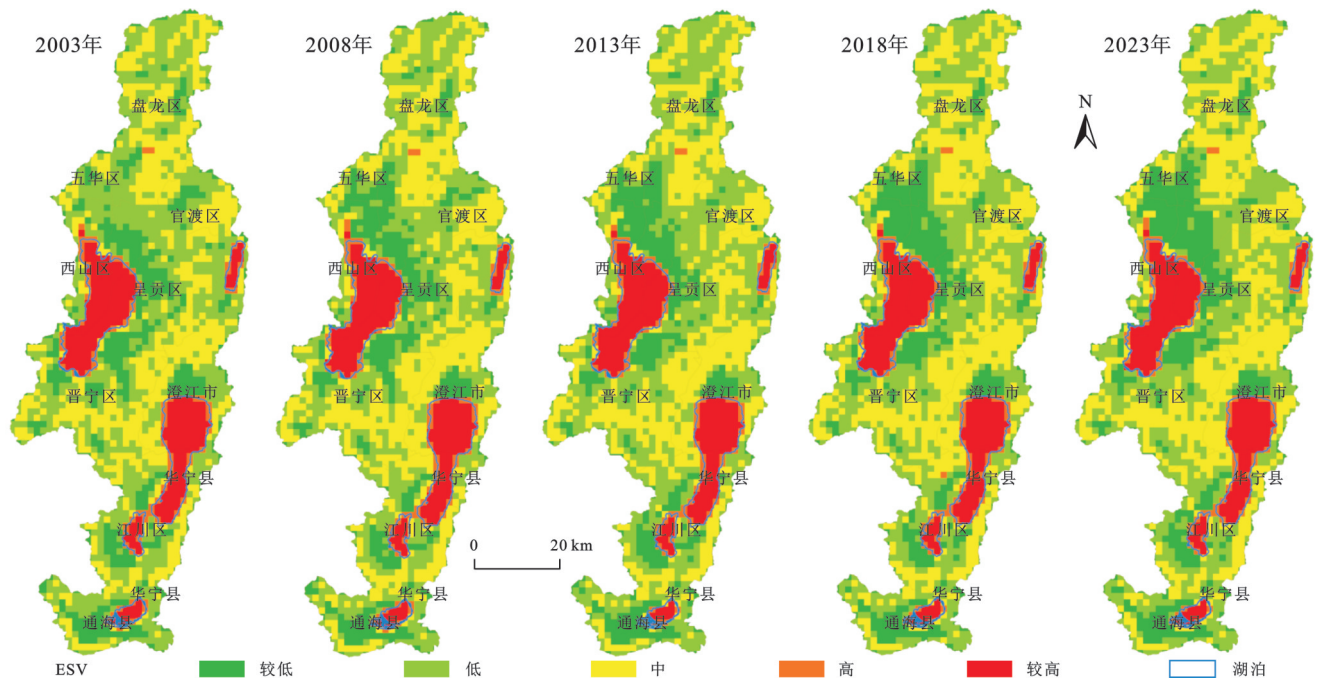


图 6 生态系统服务价值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of ecosystem service value

表2 各景观类型生态系统服务价值  
Table 2 Ecosystem service value of different landscape types

土地利用类型	ESV/亿元					变化比例/%	
	2003年	2008年	2013年	2018年	2023年	2003—2013年	2013—2023年
耕地	19.2741	17.3158	16.8525	16.2541	16.2287	-12.56	-3.70
林地	78.5595	87.3431	87.0394	92.7346	96.4928	10.79	10.86
草地	31.7117	30.9670	32.3036	27.8028	23.6083	1.87	-26.92
水域	216.6478	215.2338	209.3730	213.0682	212.6069	-3.36	1.54
未利用地	0.0019	0.0012	0.0021	0.0036	0.0036	12.46	67.87
建设用地	-2.6327	-4.1576	-5.2941	-6.5044	-7.3830	-101.09	-39.46

通过分析不同服务类型的ESV变化情况(表3)可知,供给服务中的食物生产呈现出先增后减的趋势,可见作为食物生产主要地类的耕地面积有所波动。随着建设用地面积不断扩张、人口不断集聚,水资源供给类的ESV逐年下降。研究区通过植树造林和绿化工程提高了森林覆盖率,且森林在所有调节服务中对气候调节贡献能力最大,因此该区域气候调节

ESV显著提高。而调节服务中气体调节、净化环境和水文调节的ESV整体上略有下降,这与建设用地面积增加以及草地、水域面积不断波动有关。支持服务中的生物多样性ESV稳步上升,林地、水域和建设用地均对其做出了一定贡献。文化服务中的美学景观价值在经历了初期的下降之后有所回升,这与城市化进程和环境美化政策的实施有一定联系。

表3 研究区各生态系统服务价值  
Table 3 Various ecosystem service values in study area

服务价值类型	ESV/亿元					变化比例/%		
	2003年	2008年	2013年	2018年	2023年	2003—2013年	2013—2023年	
供给服务	食物生产	7.59	7.22	7.09	6.96	6.92	-6.63	-2.46
	原料生产	5.23	5.30	5.28	5.28	5.26	0.89	-0.35
	水资源供给	11.88	11.21	10.19	9.77	9.18	-14.24	-9.84
调节服务	气体调节	15.18	15.26	15.01	14.77	14.53	-1.12	-3.21
	气候调节	36.86	38.97	39.08	39.54	39.50	6.01	1.06
	净化环境	19.00	19.25	18.83	18.82	18.57	-0.89	-1.40
	水文调节	201.52	201.57	196.91	200.04	199.58	-2.29	1.36
支持服务	土壤保持	18.66	19.18	19.17	19.20	19.12	2.75	-0.29
	维持养分循环	1.76	1.77	1.76	1.75	1.74	-0.24	-0.85
文化服务	生物多样性	17.06	17.86	17.87	18.07	18.02	4.74	0.82
	美学景观	8.80	9.12	9.08	9.17	9.13	3.16	0.63

### 3.3 生态系统服务价值对景观格局指数的响应

生态系统服务价值和景观格局指数的数据往往具有复杂性和不确定性,其分布形态可能难以满足传统参数检验的前提假设,参考岑晓腾对生态系统服务价值与土地利用景观格局关联分析的思考<sup>[25]</sup>,发现灰色关联度模型通过计算标准化序列间的几何相似度能够很好地处理非线性和复杂关系。本文借用该模型对生态系统服务价值和景观格局指数二者关联强弱程度进行探讨得出表4。在4个景观格局指数中,耕地的PD与其产生的ESV存在最大关联,反映耕地斑块破碎化程度对其生态系统服务价值产出

有一定影响。林地和草地的ESV与其景观格局聚集指数(AI)相关度最高,较高的AI值意味着各斑块之间有较好的连通性,有利于生物的迁移和生态过程的维持,表明林地和草地这两类景观类型的聚集程度在生态保持方面更应该得到重视。与水域ESV关联度较大的是LPI和AI,关联度分别为0.945 9, 0.913 1。LPI和AI同时较高的情况下,说明该区域受到的人类活动干扰相对较小,生态系统保持了较高的自然性。未利用地和建设用地除了LPI对景观类型ESV的相关度较小外,其余3个景观格局指数均对这两个景观类型表现出较高的关联度。

表4 景观格局指数与ESV关联度  
Table 4 Correlation between landscape pattern indices and ESV

景观格局指数	ESV					
	耕地	林地	草地	水域	未利用地	建设用地
PD	0.7296	0.8062	0.6191	0.5718	0.8898	0.9609
LPI	0.4924	0.6587	0.5135	0.9459	0.5961	0.6156
LSI	0.5597	0.8432	0.6980	0.7670	0.8543	0.9639
AI	0.7084	0.8871	0.8125	0.9131	0.8840	0.9634

以研究区蔓延度指数(CONTAG)和香农多样

性指数(SHDI)为解释变量,单位生态系统服务价值为因变量,先进行最小二乘法回归(Ordinary Least Squares Regression, OLSR),得到其 $p$ 值均小于0.01,然后使用地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)得出的拟合结果 $R^2$ 均大于0.9,与OLSR的 $R^2$ 相比较,且GWR的AICc相对较低,表明使用GWR具有较高的解释性且拟合优度更高。在GWR结果基础上采用克里金插值法对2242个网格评价单位进行处理得出图7和图8,分析可知景观格局指数对ESV在时间和空间上均存在一定异质性。

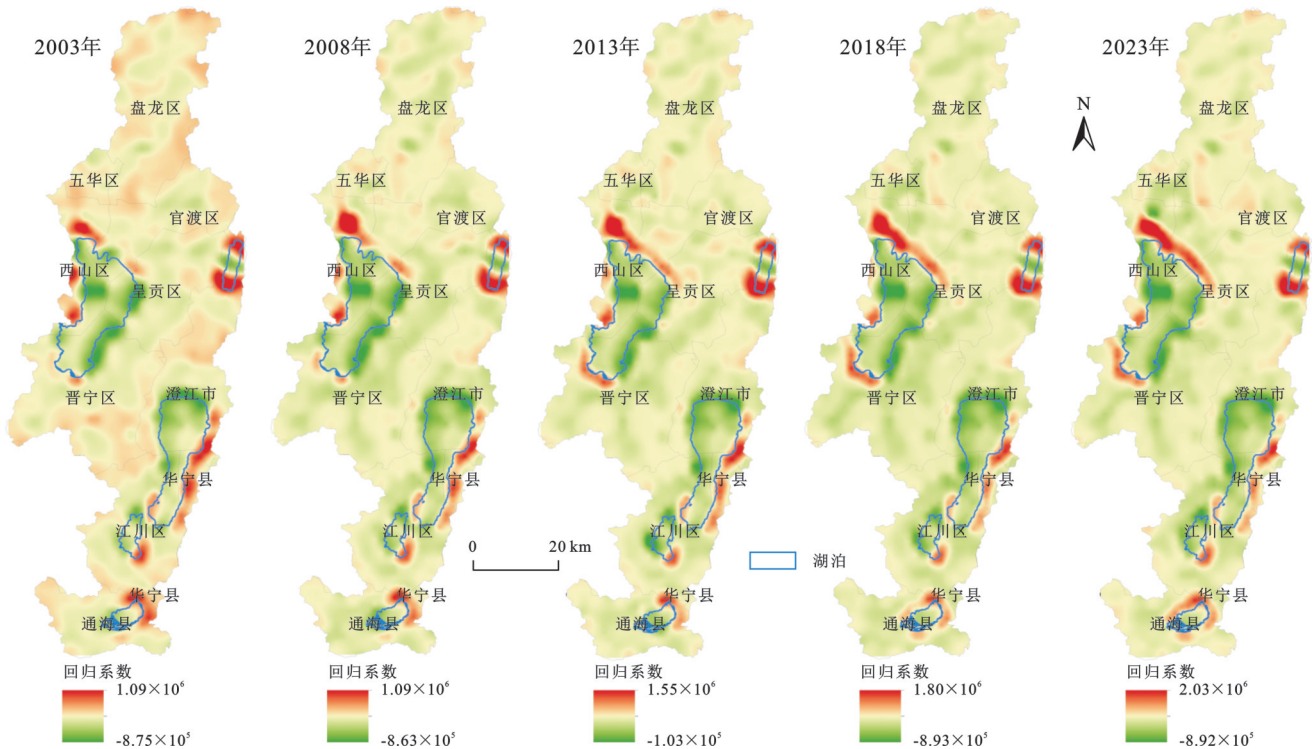


图7 蔓延度指数(CONTAG)对ESV变化的影响系数空间分布  
Fig. 7 Spatial distribution of regression coefficient of CONTAG on ESV changes

CONTAG与ESV之间的影响系数呈现负相关的区域景观类型主要为ESV较高的水域,水域主要集中于分区严明且存在一定距离的五大湖泊,表现出较低的蔓延性,因此水域这一景观类型的CONTAG始终对ESV产生负面影响。二者影响系数较高呈正相关的区域多分布在湖泊周边的区域,这些地方往往人类活动密集且景观变化较为繁杂,表现出较低的ESV。可见,在ESV较高的区域,CONTAG越低对ESV贡献越大;在ESV较低的地区,则是CONTAG越高对ESV贡献越大。并且随着时间的推移,CONTAG对ESV的正面影响范围伴随着城镇面积的扩张而有所扩大。

2003—2023年期间,SHDI对ESV的影响系数空间分布整体变化不大,除了在水域SHDI对ESV

产生负影响外,其余地区SHDI和ESV二者之间均表现出较高的正向影响。SHDI越高表明该区域物种越丰富且分布越均匀,能增强生态系统的抗干扰能力和维持服务功能的持续性。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

从研究区景观格局和生态系统服务价值看,滇池北部作为昆明城市扩展区域,建设用地持续侵占耕地和草地,导致景观破碎化(草地PD, LSI上升)和异质性增强(SHDI高值区扩散),这表明快速城市化带来一定程度的景观破碎化,这与长江经济带、汉江生态经济带的研究结论一致<sup>[16-17]</sup>。滇中高原湖泊流域建设用地面积扩大是导致其ESV有所减少的主要

原因,建设用地作为一种净生态负效应地类,其扩张对具有正生态功能的土地类型生态服务功能造成持续性的消耗,同时表明人类活动越发频繁的地区其ESV值越低,这与郑博福<sup>[19]</sup>和杨婉清<sup>[27]</sup>等研究相论证。水域和林地对ESV总值贡献较大,生态系统服务类型中调节服务值较大,这与谢梦<sup>[28]</sup>和文疆回<sup>[29]</sup>等的研究成果高度吻合。2003—2023年滇中高原湖泊流域景观格局受“退耕还林”“四退三还”等政策干预以及城镇化快速发展的双重驱动,建设用地急剧扩张、林地面积有所提升。水域作为生态系统服务价值贡献最大的地类但其变化幅度较小,对ESV总值的

波动影响不大,林地面积的增加为研究区带来了正向的ESV供给,有效弥补了建设用地不断扩张而导致研究区ESV总量下降的问题,这是随着经济发展滇中高原湖泊流域ESV总量呈现整体稳定、略有起伏的原因。具有正向供给的林地与负向供给的建设用地二者之间的博弈,导致研究区ESV总量波动起伏,这两类用地往往都受到人为因素的强烈影响,主要体现在政策导向和土地利用规划等方面。城镇化的发展带来经济繁荣的同时,也加剧了生态环境的压力,林地扩张虽在一定程度上缓解了这种压力,但整体生态平衡仍需更多综合性调控措施来维系。

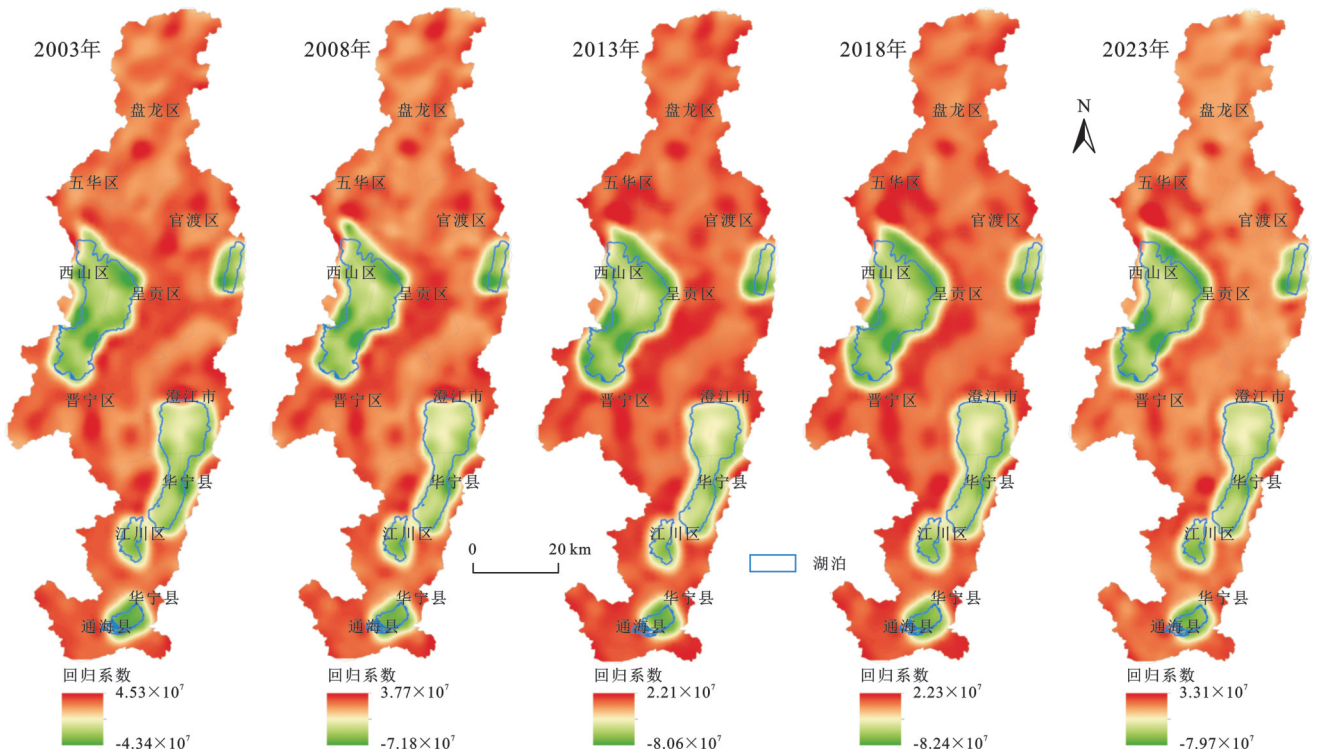


图 8 多样性指数 (SHDI) 对 ESV 变化的影响系数空间分布  
 Fig. 8 Spatial distribution of regression coefficient of SHDI on ESV changes

从景观格局指数和ESV相关性来看,二者之间存在较强的空间异质性。各类景观类型均与选取的景观格局指数存在一定关联,其中水域ESV与最大斑块指数LPI、聚集度指数AI强正相关,说明该景观类型高度依赖大面积的连续性和连通性。CONTAG与ESV的关系具有两面性:在天然蔓延性低且自然水域主导的高ESV区呈现负相关,而在人类活动密集的低ESV区却呈正相关,这一观点与胡玉雪等<sup>[30]</sup>的研究相论证,这一现象揭示了人工景观过度聚集对生态系统服务功能存在一定抑制效应。SHDI除对水域这一地类外,与其他地类ESV普遍呈现正相关,这与房子钰等<sup>[10]</sup>研究结果一致。促进滇中高原湖泊流域区域可持续发展,首先,严格保护水域生态空间、遏制湖滨带过度开发,水域作为研究区

ESV总量贡献最大的地类,保障其生态功能长期稳定是维系该区域生态质量的重中之重;其次,优化景观配置,提升林地和草地连通性,如建设生态廊道等,研究区ESV总量与各地类的PD, LSI, LPI, AI等景观指数值紧密关联,尤其是对ESV承担正向供给的地类如水域、林地、草地其连通性和聚集程度越高对ESV贡献就越大;再次,实施差异化管控,在城镇密集区降低景观聚集度(控制CONTAG),在生态核心区维持水域自然完整性(避免人为干扰提升SHDI),以协调生态保护与发展的矛盾。研究区人类活动密集的地区其ESV与CONTAG呈现正相关,表现为地表建筑物越密集其生态功能就越弱,在这些区域可以适当补充具有正向生态功能的地类,降低其单一建设用地的密度,缓解生态压力。针对水

域ESV与SHDI负相关的情况,要着重考虑保障水域这一地类的单一性,避免湖滨地带过度开发造成的“伪多样性”影响其生态服务功能。

## 4.2 结论

(1) 滇中高原湖泊流域景观类型由以耕地为主逐渐转变为以林地为主,退耕还林政策尤见成效。草地面积不断减少,且多转化为耕地和林地。研究区建设用地面积增幅较大,增幅达到180.43%。

(2) 研究区景观格局时空分异特征明显。草地PD和LSI上升,表明该地类破碎化加剧;耕地LPI大幅降低,显示其主导地位减弱;而林地和建设用地LPI增长,与退耕还林及城市化有一定联系。景观水平上,CONTAG整体相对稳定,但存在局部区域受人类活动景观聚集程度加强。SHDI先升后降,高值区集中于滇池北部,与新城建设导致的景观异质性增强一致。可见,政策驱动与城市扩张是研究区景观格局演变的关键驱动因素。

(3) 滇中高原湖泊流域ESV空间分布特征明显。ESV高值区集中分布于五大湖泊水域,水域为其贡献占比达60%以上,并主要承担气候调节、生境维持及水质净化等关键生态功能;低值区则主要分布于滇池周边等经济发展较快的平坦地带。不同土地利用类型对生态系统服务价值的影响存在显著差异,水域和林地的ESV总量较大,而建设用地的ESV始终保持负增长状态,2003—2023年其ESV总值达到-25.97亿元。

(4) 滇中高原湖泊流域景观格局指数与ESV存在一定关联。整体上看,景观格局指数PD, LPI, LSI和AI与各地类ESV存在较高关联。在ESV高值区,如水域分布的主要区域,CONTAG越高ESV则越低;在ESV低值区,如湖泊周边地势较为平坦且人类活动频繁的建设用地区域,CONTAG越高其ESV相应也会有所提高。在水域范围内SHDI对ESV产生反作用,水域是ESV贡献最高的景观类型,多样性越高反而会影其生态功能作用;其他景观类型的SHDI与ESV均表现出较强的正向作用,表现为区域景观多样性越高、土地利用类型越丰富,其ESV贡献越大。

## 参考文献(References):

[1] Gómez-Baggethun E, Barton D N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning[J]. *Ecological economics*, 2013, 86: 235-245.

[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 B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. *Progress in*

*Geography*, 2014, 33(4): 441-446.

[3] 曾瑜哲,钟林生,虞虎,等.生态系统游憩服务功能维度及其形成:以三江源国家公园为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5653-5664.

Zeng Y X, Zhong L S, Yu H, et al. The structure of recreational ecosystem services: a case study of the Sanjiangyuan National Park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5653-5664.

[4] Hare F K. Man's impact on the global environment[R]. *Journal Storage*, 1972.

[5] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(5): 798-808.

Wang J, Dun Y L. A review on the effects of land use change on ecosystem services[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(5): 798-808.

[6] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

[7] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global environmental change*, 2014, 26: 152-158.

[8] 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.

[9] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, (05): 911-919.

Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.

[10] 房子钰,丁宁,冯恒栋,等.景观格局对生态系统服务空间分异特征的影响:以东营市为例[J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(2): 86-96.

Fang Z Y, Ding N, Feng H D, et al. The impact of landscape patterns on the spatial differentiation characteristics of ecosystem services: a case study of Dongying City[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(2): 86-96.

[11] 石金鑫,梁小英,李辉蕾,等.陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(21): 8958-8972.

Shi J X, Liang X Y, Li H Q, et al. Impact of landscape pattern on ecosystem service trade-offs in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8958-8972.

[12] 王飞,陶芹,程宪波,等.快速城镇化地区景观格局变化对水生态系统服务的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 159-167.

Wang F, Tao Q, Cheng X B, et al. Influence of land-

- scape pattern change on water ecosystem service in rapidly urbanization areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):159-167.
- [13] 夏敏,季晓垭,邹伟,等.新农村建设中高速城镇化地区景观格局与生态系统服务的关联效应[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(5):982-992.  
Xia M, Ji X Y, Zou W, et al. Correlation effect between landscape pattern and ecosystem services in high-speed urbanization areas in new rural construction [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(5):982-992.
- [14] 袁静文,武辰,杜博,等.高分五号高光谱遥感影像的城市土地利用景观格局分析[J]. *遥感学报*, 2020, 24(4):465-478.  
Yuan J W, Wu C, Du B, et al. Analysis of landscape pattern on urban land use based on GF-5 hyperspectral data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2020, 24(4):465-478.
- [15] 朱明,濮励杰,李建龙.遥感影像空间分辨率及粒度变化对城市景观格局分析的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(6):2753-2763.  
Zhu M, Pu L J, Li J L. Effects of varied remote sensor spatial resolution and grain size on urban landscape pattern analysis [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2753-2763.
- [16] 贾路,于坤霞,李占斌,等.长江经济带景观格局对生态系统服务价值影响的概率评估[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15):217-227.  
Jia L, Yu K X, Li Z B, et al. Probability evaluation of the impact of landscape pattern on ecosystem service value in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(15):217-227.
- [17] 周婷,王强,梁加乐,等.景观格局对生态系统服务的影响研究:以汉江生态经济带为例[J]. *世界地理研究*, 2023, 32(8):152-165.  
Zhou T, Wang Q, Liang J L, et al. Impacts of landscape pattern on ecosystem services: a case study of the Hanjiang Eco-Economic Belt [J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(8):152-165.
- [18] 贾艳艳,唐晓岚,杨阳,等.长江沿岸芜湖区段景观格局演变及生态系统服务价值分析[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(6):249-258.  
Jia Y Y, Tang X L, Yang Y, et al. Landscape pattern changes and ecological service values in Wuhu section along the Yangtze River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(6):249-258.
- [19] 郑博福,黄琼瑶,陶林,等.赣南地区景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(15):5940-5949.  
Zheng B F, Huang Q Y, Tao L, et al. Landscape pattern change and its impacts on the ecosystem services value in southern Jiangxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(15):5940-5949.
- [20] Yang J, Huang X. 30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019 [R]. *Earth System Science Data Discussions*, 2021.
- [21] 王舒,刘凤莲,陈威廷,等.滇中高原湖泊流域景观生态风险评价及驱动因素识别[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(3):391-404.  
Wang S, Liu F L, Chen W T, et al. Landscape ecological risk evaluation and driving factors in the lake basin of Central Yunnan Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(3):391-404.
- [22] 李倩,王成军,冯涛,等.基于SD-PLUS耦合模型的陕西省土地利用变化及碳储量多情景预测[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3):195-206, 215.  
Li Q, Wang C J, Feng T, et al. Multi-scenario prediction of land use change and carbon storage in shaanxi province based on the SD-PLUS coupled model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3):195-206, 215.
- [23] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, (5):643-650.  
Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, (5):643-650.
- [24] 马晓帆,张海峰.湟水河流域景观格局变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(5):626-633.  
Ma X F, Zhang H F. Impact of landscape pattern change on ecosystem service value in Huangshui River Basin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(5):626-633.
- [25] 岑晓腾.土地利用景观格局与生态系统服务价值的关联分析及优化研究[D].杭州:浙江大学, 2016.  
Cen X T. Correlation analysis and optimization between land use landscape patterns and ecosystem service [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [26] 邓舒洪.区域土地利用变化与生态系统服务价值动态变化研究[D].杭州:浙江大学, 2012.  
Deng S H. Dynamic effects on ecosystem services value with regional land use change [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [27] 杨婉清,杨鹏,孙晓,等.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(16):6487-6498.  
Yang W Q, Yang P, Sun X, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16):6487-6498.