

子流域景观格局对丹江口水库营养状态的影响分析

余 祺^{1,2}, 时晨焱², 庄娜娜², 刘 海^{2,3*}

- 武汉智汇元环保科技有限公司, 湖北 武汉 430079
- 湖北大学资源环境学院, 湖北 武汉 430062
- 湖北大学, 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430062

摘要: 探究子流域景观格局与水体富营养化空间异质性间的关系对水源地保护具有重要意义。本文通过遥感影像和半解析方法揭示 2013—2023 年丹江口水库营养状态的时空变化格局, 并利用 SHAP 机器学习解释方法, 量化分析土地利用组成和景观格局指数与水体营养状态间的关系。结果表明: ①丹江口水库营养状态指数呈现明显的空间异质性, 以中营养为主, 富营养化区域主要分布在岸线库湾区及支流附近。泄洪期水体营养状态相对优于蓄水期。②子流域的土地利用和景观格局存在明显的空间差异, 在汉江上游和库区南部支流地区斑块密度 (PD)、景观形状指数 (LSI) 和香农多样性指数 (SHDI) 呈低值聚集, 而最大斑块指数 (LPI) 和蔓延度指数 (CONTAG) 呈现高值聚集。③土地利用组成和景观格局指数在不同时期对富营养化的影响程度不同, 景观格局指数在全年、蓄水期和泄洪期的贡献度分别达到 49.31%、50.99% 和 57.41%。其中斑块密度、林地、草地和不透水面在各时期均具有较高的影响贡献度, 而蔓延度指数和香农多样性指数在蓄水期和泄洪期分别具有较高的影响。研究显示, 保持子流域自然地表优势景观, 降低耕地和不透水面的破碎度有助于改善水库富营养问题。

关键词: 营养状态指数; 流域; 土地利用; 景观格局; SHAP

中图分类号: X524

文章编号: 1001-6929(2024)08-1714-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.06.04

Analysis of Impact of Sub-Watersheds Landscape Patterns on Trophic State of Danjiangkou Reservoir

YU Qi^{1,2}, SHI Chenyi², ZHUANG Nana², LIU Hai^{2,3*}

- Wuhan Zhihuiyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Wuhan 430079, China
- Faculty of Resources and Environment Science, Hubei University, Wuhan 430062, China
- Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Investigating the impact mechanism of land use and landscape pattern on the spatial heterogeneity of water eutrophication in sub-watersheds is of great significance for water source protection. This study aimed to use remote sensing imagery and semi-analytical methods to delineate the spatiotemporal trophic status pattern of Danjiangkou Reservoir from 2013 to 2023. The SHAP machine learning method was utilized to quantitatively analyze the impact of land use composition and landscape pattern indices on water eutrophication in sub-watersheds. The research results are as follows: (1) The trophic status index of Danjiangkou Reservoir exhibits significant spatial heterogeneity, with mesotrophic conditions prevailing and eutrophication mainly located in the shoreline bay areas and tributaries. The trophic status of water body during the flood discharge period is relatively better than during the water storage period. (2) Significant spatial disparities in land use and landscape patterns are observed in sub watersheds. The aggregation of patch density (PD), landscape shape index (LSI), and Shannon diversity index (SHDI) are lower in the upstream areas of the Hanjiang River and the southern tributaries of the reservoir, while high-value aggregation of largest patch index (LPI) and contagion index (CONTAG) are evident. (3) Land use composition and landscape pattern indices show different levels of contribution in different periods. The overall contribution of the landscape pattern indices during the entire year, water storage period, and flood discharge period reached 49.31%, 50.99% and 57.41%, respectively. The patch density, forest land, grassland, and impervious surface show substantial contributions across all periods, while

收稿日期: 2024-01-10 修订日期: 2024-05-09

作者简介: 余祺 (1982-), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水环境保护研究, 76404071@qq.com

* 责任作者: 刘海 (1982-), 男, 湖北襄阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事景观生态研究, liuhai11191@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.42271318)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42271318)

contagion index and Shannon diversity index show higher contributions during the water storage and flood discharge periods. Maintaining the main natural landscape features in sub-watersheds and mitigating fragmentation of arable land and impervious surfaces can aid in alleviating eutrophication problem of reservoirs.

Keywords: trophic state index; sub-watershed; land use; landscape pattern; SHAP

湖泊和水库是地表重要的水资源,为人类提供稳定和清洁的饮用水,同时支持农业和工业的发展^[1]。然而,随着城市化和农业活动的不断增加,大量营养物质通过地表径流等途径输送到水体中,导致水体中营养物质的浓度上升,引起藻类的过度生长,破坏了水生态系统的平衡,对其他生物和人类健康构成威胁^[2-3]。当前,全球水华风险总体呈增加趋势,尤其在发展中地区更为显著^[4],在气候变化的背景下,预计到2050年,全球四分之一的人口将面临由氮或磷过量引起的水体富营养化风险威胁^[5]。

氮、磷营养盐外源输入及其导致的内源负荷的快速汇集是水体富营养化的关键因素^[6]。叶绿素 a 浓度通常用于评估水体的初级生产力,其浓度变化是反映水体富营养化程度的主要指标^[7]。基于叶绿素 a、总磷、总氮、透明度等水体理化指标的综合营养状态指数法 (Trophic state index, TSI) 被广泛应用于评估内陆水域的营养状态^[8],而传统的原位采样水质数据的空间密度和时间频率限制了对内陆水域营养状态进行快速评估的能力^[9]。通过卫星遥感技术可以发现不同营养状态水体的光谱特征差异,进而直接或间接获取水体的理化性质或富营养化指数等各类监测参数^[10-11]。

富营养化是一个复杂、全球性的环境问题,但水质恶化通常是在局部范围内(如岸线带、流域等尺度)进行改善和解决。通过水体水质理化参数表征水体富营养化特征,未充分考虑水体与其所处流域的整体关系和相互影响^[12]。流域内的气象、水文、社会经济、种植结构以及土地利用特征等因素是水体富营养化的驱动因素或响应指标^[13-17]。在农业活动和快速城市化等强烈人为干预下,流域内的土地覆盖逐渐从自然植被景观向农业和城市景观转变,并通过面源与点源污染对水环境产生影响^[18]。较多研究采用相关分析、冗余分析、地理加权回归模型和多元线性回归等方法研究景观格局对水质变化的影响,并进一步探讨空间尺度效应、气候变化以及地形地貌等因素的作用机制^[19-20]。周添红等^[21]研究表明,林地、香农多样性指数和景观形状指数与总氮这一水体富营养化的重要指标均存在负相关关系,而耕地、建设用地和最大斑块指数等指标则均与总氮浓度存在正相

关关系。夏明珠等^[22]研究发现,受土地利用结构的复杂组成以及变化的影响,水质对土地利用的响应存在季节性差异。已有研究表明,景观格局与水质之间存在着复杂的非线性关系^[23-25],然而鲜有研究关注子流域景观格局特征与水体富营养化空间异质性之间的联系。

丹江口水库是中国南水北调中线工程水源地,库区流域面积广阔,景观复杂多样,营养物质输入分布不均,导致水体营养状态在空间上存在显著差异。本研究通过遥感数据结合半解析方法分析丹江口水库营养状态时空变化特征,利用机器学习算法和 SHAP (Shapley Additive exPlanations) 解释方法从子流域的角度探讨景观格局对水体富营养化的响应关系,以期对丹江口水库水源保护以及流域水污染防治与管理提供科学参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

丹江口水库 (32°36'N~33°48'N、110°59'E~111°49'E)(见 图 1) 主要位于湖北省十堰市和河南省淅川县,水库于 2014 年完成大坝加高工程,正常蓄水水位由 157 m 提至 170 m,水面面积达 1 050 km²,库容为 290.5×10⁸ m³。作为南水北调中线工程水源地,丹江口水库水质变化对调水沿线地区水环境产生重要影响。尽管丹江口水库水质总体良好,但流域内的非点源污染仍对水库水质产生威胁,部分支流和库湾区水体营养化程度较高并存在水华暴发的风险。

1.2 数据集

遥感影像来自美国地质调查局 (<https://glovis.usgs.gov>), 本文获取了 2013—2023 年覆盖丹江口水库范围 52 景 1 级处理的 Landsat8 OLI 影像,空间分辨率为 30 m,重访周期为 16 d,并使用 ACOLITE 软件进行预处理。

地形数据来源于 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程模型 (<https://www.gscloud.cn>),通过 ArcSWAT 水文分析模块确定库区子流域边界。2013—2022 年土地利用数据来源于中国逐年土地覆盖数据集 (CLCD)(<http://irsip.whu.edu.cn/resources/CLCD.php>),结合实地情况选择耕地、林地、草地和不透水面四种主要土地利用类型。丹江口水库营养状态等级

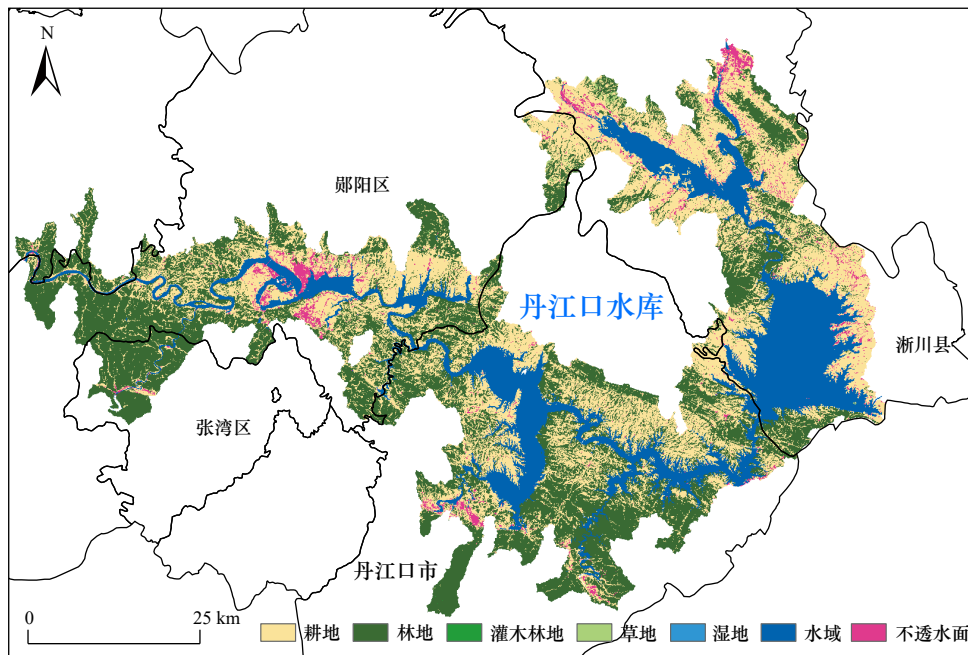


图 1 丹江口水库地理位置

Fig.1 Geographic location of Danjiangkou Reservoir

来源于《全国地表水水质月报》和《十堰市环境质量报告》。

1.3 研究方法

1.3.1 营养状态指数

卡尔森于 1977 年提出的营养状态指数 (Trophic State Index, TSI) 是一种用于评估内陆湖泊、河流和其他水体营养状况的指标, 使用叶绿素 a (Chla)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 浓度及透明度 (SD) 作为评价湖泊富营养化的基准参数^[26]。根据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规范》对营养状态指数进行分级(见表 1)。

表 1 营养状态分级方法

Table 1 Methods of trophic state category

等级	TSI
贫营养	<30
中营养	[30,50]
轻度富营养	(50,60]
中度富营养	(60,70]
重度富营养	>70

Shi 等^[27] 提出了一种基于中国各类水域大量实测数据和 Landsat8 OLI 遥感影像的半解析方法, 用于估算内陆水域的营养状态指数, 在不同富营养状态的内陆水域表现出较好且稳健的性能。计算公式如下:

$$TSI = 12.14 \ln a_t(\lambda) + 45.69 \quad (1)$$

$$a_t(\lambda) = a(\lambda) - a_w(\lambda) \quad (2)$$

式中, $a_w(\lambda)$ 为纯水的吸收系数, $a(\lambda)$ 为利用 ACOLITE 软件 QAA_V6 模块得到的 OAC 的总吸收系数, $a_t(\lambda)$ 是除纯水外 OAC 的总吸收系数。依据已有研究^[28] 使用 443 nm 波段进行具体计算, $a(443) = 0.00696$ 。

1.3.2 景观格局

景观格局基于景观单元的类型、组成、数量等综合展现景观的空间特征, 景观格局分析主要包括土地利用组成和景观配置两部分^[29]。土地利用组成主要描述景观的类型和丰富度, 主要包括林地、草地、耕地和不透水面。景观配置通过景观格局指数定量反映景观的空间分布和组合信息, 选取斑块密度 (PD)、最大斑块指数 (LPI)、景观形状指数 (LSI)、香农多样性指数 (SHDI) 和蔓延度指数 (CONTAG) 共计 5 个景观指数(见表 2), 从密度、形状、优势、多样性和分散性等方面分析景观配置^[30]。

1.3.3 SHAP 解释方法

采用可解释机器学习方法, 通过构建极限梯度提升树 (XGBoost) 模型^[31] 并结合 SHAP 解释方法, 量子流域内土地利用组成与景观格局对水体营养状态变化的影响与贡献度。SHAP 通过计算每个特征子集中全部特征值来衡量该特征对最终输出结果的影响^[32]。计算公式如下:

$$y = \varphi_0 + \sum_{j=1}^m SHAP(x_{pq}) \quad (3)$$

式中, x_{pq} 为第 p 个特征的第 q 个特征值, y 为营养状态

表 2 景观指数及生态学意义

Table 2 Landscape indices and ecological significance

名称	计算公式	描述
耕地面积占比	$P_i = \frac{1}{A} \sum_{j=1}^{n_i} a_{i,j}$	耕地面积比例
林地面积占比		林地面积比例
草地面积占比		草地面积比例
不透水面面积占比		不透水面面积比例
斑块密度	$PD = \frac{N}{A}$	单位面积上的斑块数量, PD值越大, 景观破碎程度越高
最大斑块指数	$LPI = \frac{1}{A} \max a_{i,j}$	反映景观的丰富度、优势种, LPI值越大, 人类干扰程度越高
景观形状指数	$LSI = \frac{0.25E}{\sqrt{A}}$	描述景观的形状特征, LSI值越大, 形状越不规则
香农多样性指数	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)$	反映景观的异质性SHDI值越大, 景观类型越丰富, 空间异质特征越强
蔓延度指数	$CONTAG = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left(P_i \frac{g_{i,k}}{\sum_{k=1}^m g_{i,k}} \right) \ln \left(P_i \frac{g_{i,k}}{\sum_{k=1}^m g_{i,k}} \right)}{2 \ln m}$	反映景观的聚集程度, CONTAG值越大, 景观的连接性越好

注: n_i 为 i 类土地利用类型中斑块的数量; P_i 为 i 类土地利用类型面积占比, %; PD 为斑块密度, 个/ hm^2 ; LPI 为最大板块指数, %; LSI 为景观形状指数; SHDI 为香农多样性指数; CONTAG 为蔓延度指数, %; A 为区域内景观总面积, hm^2 ; m 为景观中不同类型斑块的数量, 个; $a_{i,j}$ 为 i 类土地利用类型 j 斑块的面积, hm^2 ; N 为斑块数量, 个; E 为景观边界长度, m ; $g_{i,k}$ 为 i 类土地利用类型与第 k 类景观之间的接触长度, m 。

指数模拟值, φ_0 为营养状态指数模拟平均值, $SHAP(x_{pq})$ 为特征变量 q 对 y 的影响贡献值。SHAP 的绝对值反映了特征变量对目标变量的影响程度, 绝对值越大, 说明该特征变量对水体营养状态的影响越大^[33]。当 $SHAP(x_{pq}) > 0$ 时, 说明该特征因素值增大会促进营养状态指数的增大; 反之, 当 $SHAP(x_{pq}) < 0$ 时, 影响因素值增大会导致营养状态指数的减小。

2 结果与讨论

2.1 丹江口水库水体营养化时空变化特征

采用遥感半解析方法获得 2013—2023 年丹江口水库的营养状态指数 (TSI) 的空间分布情况 (见图 2), 并根据水库运行调度情况, 将一年时间划分为泄洪期 (6—10 月) 和蓄水期 (11 月—翌年 5 月) 对水体营养状态指数的空间分布进行分级 (见图 3)。

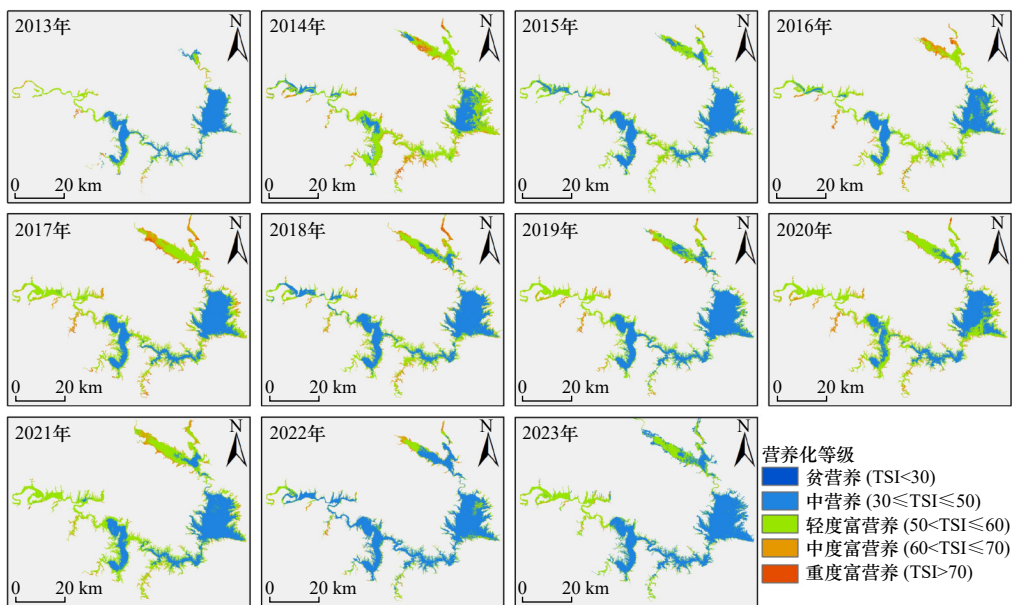


图 2 2013—2023 年库区营养状态等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of trophic state category in the reservoir area, 2013-2023

由图 2 可见,在研究期内,水库营养状态空间分布呈现明显差异。北部丹江、西部汉江以及其他支流入库口附近水域是富营养化程度严重的区域,东部及库区中心的富营养化程度相对较低,大部分水域为中营养或贫营养状态。2014 年汉江库区与丹江库区出现了较大面积的轻度富营养水域,且从岸线库湾区域向中心水域扩展,富营养水域总面积达 572 km²,占总水域面积的 72.24%。随后,库区营养化情况趋于稳定,整体水质条件良好,营养化水平较低,而库湾和支流处的狭窄水面则一直保持较高的营养状态水平。

由图 3 可见,在研究时段内贫营养水域仅出现在 2013 年、2019 年、2021 年及 2022 年的泄洪期,2013 年泄洪期贫营养水域面积最大,为 42 km²,占库区总面积的 8.7%;库区水体营养状态以中营养为主,平均面积为 517 km²,最大面积出现在 2021 年,为 599 km²。在不同时期,库区的营养状态表现出明显的差异,在 2013—2022 年间的泄洪期,贫营养和中营养的平均水域面积分别为 8.3 和 517 km²;而蓄水期无贫营养情况的出现,中营养水域的面积为 311 km²,

轻度富营养为蓄水期的主要富营养化等级。

2.2 景观格局时空特征

丹江口水库库区流域景观背景复杂多样。整体而言,土地利用类型主要以耕地和林地为主,2013—2022 年间,耕地面积占比由 49.57% 降至 46.92%,而林地面积占比则从 45.48% 增至 49.08%;不透水面面积占比从 2.93% 增至 3.5%,草地的面积相对较小且逐年下降(见表 3)。

利用 ArcSWAT 水文分析,将库区流域划分为 444 个子流域,并将每个子流域视作独立的单元,统计其土地利用类型组成。这些子流域的面积在 1.02~55.11 km² 之间,平均值为 6.46 km²,变异系数为 86.53% (见表 4)。在全部子流域中,耕地在 4 种土地利用类型中分布最广,其面积占比在 0.14%~99.45% 之间,平均值为 52.07%,变异系数最小为 81.94%。林地、草地和不透水面在个别子流域中没有分布,最大面积占比分别为 99.52%、31.22% 和 83.61%。

过去 10 年间,库区流域的景观特征发生了明显变化。PD 从 2013 年的 27.57 个/hm² 降至 21.58 个/hm²,

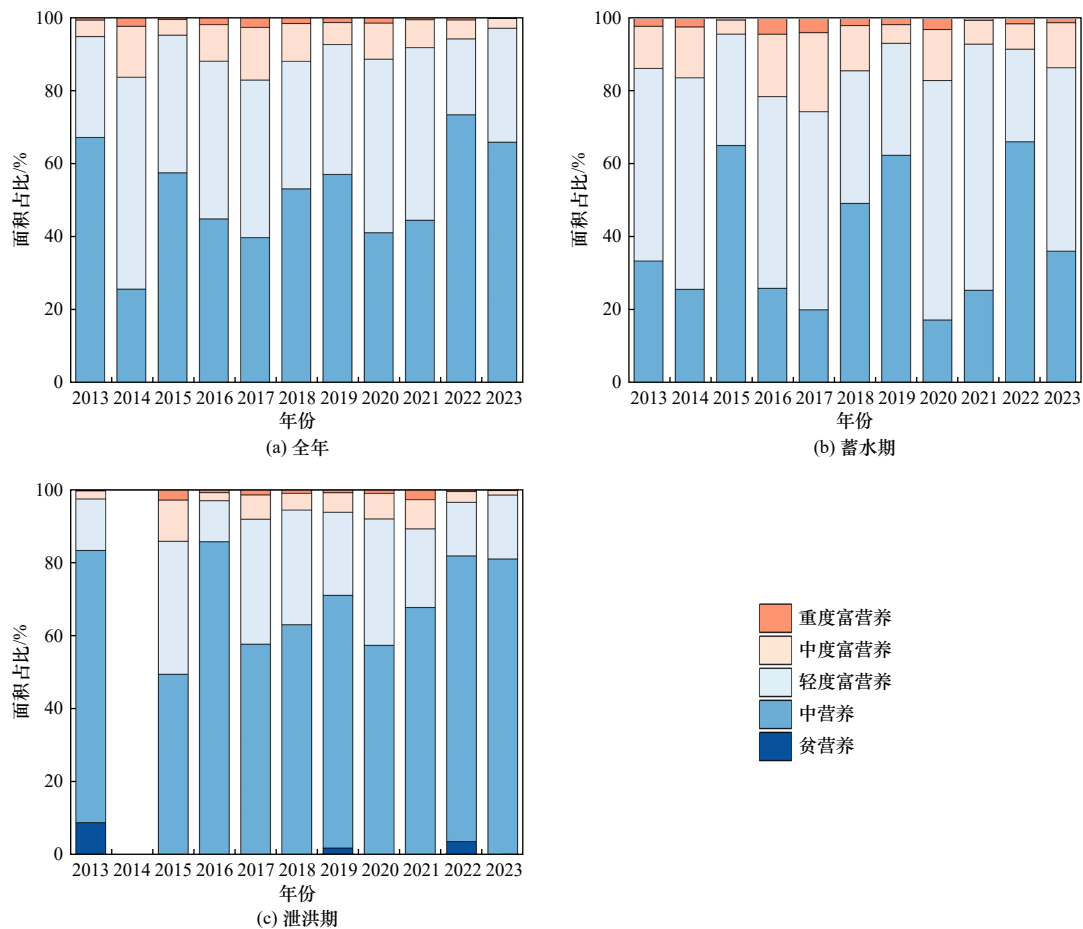


图 3 各营养状态等级面积占比的变化

Fig.3 Change in proportion of area in each trophic state category

表 3 库区流域土地利用类型组成和景观格局指数

Table 3 Land use composition and landscape pattern indices in reservoir watershed

年份	耕地面积占比/%	森林面积占比/%	草地面积占比/%	不透水面面积占比/%	PD/(个/hm ²)	LPI/%	LSI	SHDI	CONTAG/%
2013	49.57	45.48	2.01	2.93	27.57	7.92	138.40	0.90	65.37
2014	49.40	45.50	2.06	3.04	27.57	8.02	138.88	0.90	65.32
2015	49.05	45.75	2.03	3.17	27.81	7.92	138.96	0.91	65.10
2016	49.18	45.87	1.67	3.28	27.18	7.86	137.15	0.90	65.39
2017	48.42	46.80	1.45	3.33	27.32	5.85	137.20	0.90	65.42
2018	47.85	47.70	1.08	3.37	26.46	5.88	135.06	0.90	65.72
2019	47.73	48.12	0.74	3.41	25.54	5.88	132.94	0.89	66.11
2020	47.61	48.36	0.58	3.44	24.83	7.48	131.68	0.88	66.36
2021	47.42	48.59	0.53	3.45	24.14	7.44	129.59	0.88	66.55
2022	46.92	49.08	0.50	3.50	21.58	7.38	121.55	0.88	67.22

呈逐渐下降趋势。LPI 在研究时期内先下降后上升。LSI 和 SHDI 逐年下降,反映了景观形状复杂度和空间异质性的减弱,而 CONTAG 的增加表明景观变化

趋向于聚集,景观的连通性得到了改善。PD 在各子流域之间的差异最为明显,分布范围为 2.08~90.05 个/hm²,变异系数最大为 50.69%。

表 4 子流域土地利用类型组成和景观格局指数

Table 4 Land use composition and landscape pattern indices in sub-watershed

类别	变量	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数(%)
子流域	面积(km ²)	1.02	55.11	6.46	5.59	86.53
土地利用类型组成	耕地面积占比(%)	0.14	99.45	52.07	27.05	51.94
	林地面积占比(%)	0	99.52	42.46	29.51	69.50
	草地面积占比(%)	0	31.22	1.35	2.96	219.62
	不透水面面积占比(%)	0	83.61	3.47	7.46	214.71
景观格局指数	PD(个/hm ²)	2.08	90.05	21.77	11.03	50.69
	LPI(%)	12.19	99.52	65.32	20.02	30.65
	LSI	2.03	18.47	7.18	2.82	39.29
	SHDI	0.02	1.23	0.64	0.22	34.72
	CONTAG(%)	25.67	98.02	65.90	11.29	17.14

在淅川县沿岸和丹江上游地区,耕地面积占比高达 75.29%,汉江库区西侧和鄢阳区附近的耕地面积占比为 67.5%。林地主要集中分布在库区西部和南部山区,草地总体面积较小且分布分散,不透水面主要分布在沿岸村镇的居民点以及鄢阳区、淅川县的建成区。景观格局指数显示了相似的特征,汉江上游和库区南部支流子流域的 PD、LSI、SHDI 均呈现低值聚集,而 LPI 和 CONTAG 呈现高值聚集(见图 4)。低值聚集的 PD 和 LSI 代表着较为连续的自然景观,对水质具有保护作用。相反,高值聚集的 LPI 和 CONTAG 表示人类活动频繁的建成区,其水体污染风险较高。

2.3 景观格局特征贡献度

为探究不同时期子流域土地利用组成和景观格局指数对水体富营养化水平的影响,使用 XGBoost

模型结合 SHAP 方法计算了全年、蓄水期和泄洪期子流域土地利用类型组成和景观格局指数对近岸水体营养状态指数(TSI)的贡献度(见图 5)。

在全年尺度上,土地利用类型组成对水体富营养化的贡献总体略高于景观格局指数,分别为 50.69% 和 49.31%。其中,PD 在全年尺度上表现出最高的贡献度(17.56%),其次是草地面积占比、林地面积占比、不透水面面积占比、LSI、耕地面积占比、LPI、CONTAG 和 SHDI。通过对特征值结果的分析,发现草地、林地和不透水面面积占比对水体营养状态指数存在显著的正向影响,PD 和 LSI 则表现出负向影响。耕地面积占比、LPI、CONTAG 与 SHDI 对营养状态指数的影响相对较弱,未表现出明显的影响方向。

在蓄水期,林地面积占比呈现出显著的正向影响,为贡献度(19.44%)最大的指标。PD、草地面积占比

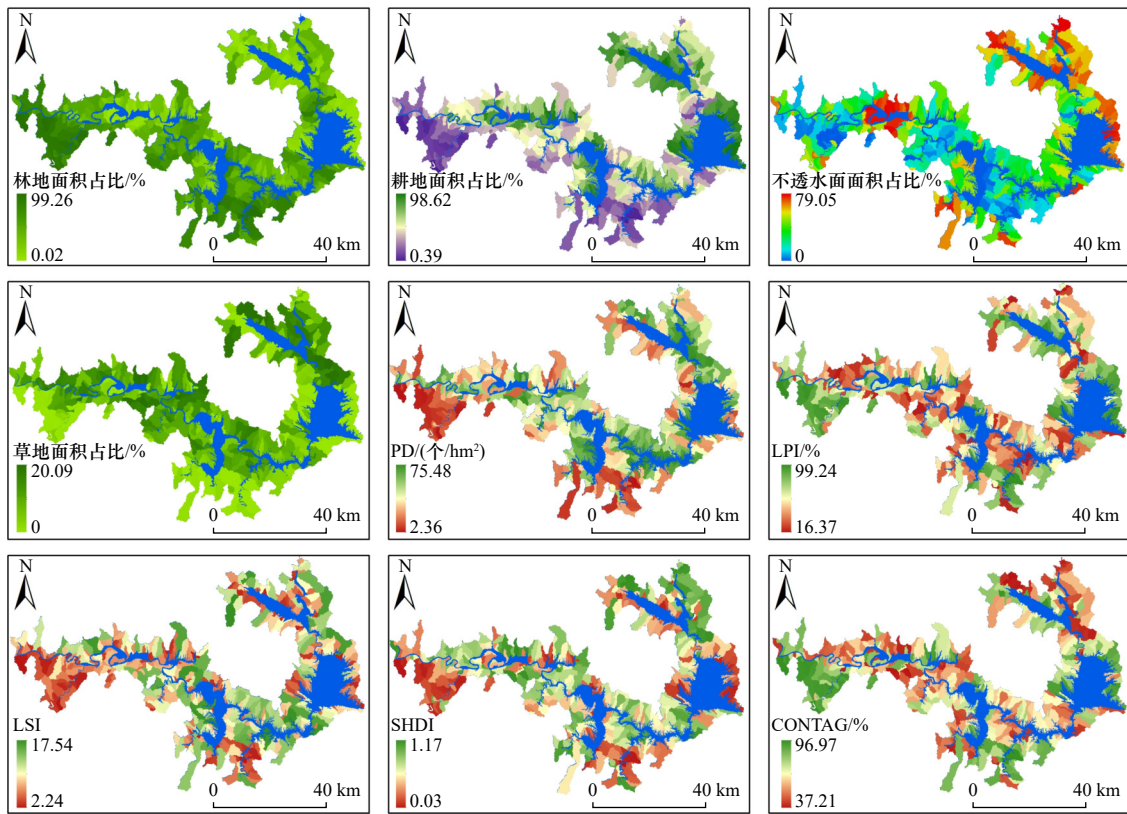


图4 子流域各指标平均值空间分布

Fig.4 Spatial distribution of sub-basin averages for each indicator

和不透水面面积占比同样具有较高的贡献度,分别为17.04%、12.68%和9.86%。景观格局指数在蓄水期的整体贡献度为50.99%,而在泄洪期达到57.41%,全部指标贡献度从高至低依次是PD、不透水面面积占比、SHDI、LSI、草地面积占比、林地面积占比、CONTAG、耕地面积占比和LPI,其中PD、LSI均表现为明显的负向影响,而不透水面面积占比与SHDI均表现为正向影响。在不同时期,PD、林地面积占比、草地面积占比、不透水面面积占比始终是影响营养状态指数变化的关键指标。

2.4 营养状态季节性差异影响因素分析

2013—2023年间,丹江口水库的营养状态主要为中营养,与生态环境部《全国地表水水质月报》和《十堰市环境质量报告》中每月对丹江口水库营养状态的监测结果基本一致。

流域中氮、磷等物质通常通过地表径流过程被输送到水体中,且降水加速了这一过程^[34]。研究^[35]表明,暴雨可能在短时间内显著增加水库中的营养物质浓度和藻类生物量,甚至导致水库水华的出现。丹江口水库位于亚热带季风区,6—10月降水量占全年的80%以上,这导致地表径流及上游入库流量增加,水位逐渐上升,直至10月底达到最高水位。在气候

变化和水库运行的影响下,泄洪期水库中水体的运动速度相对较快,持续流动性有助于减少水体中营养物质的停留时间,从而减轻富营养化程度。而蓄水期由于入库流量的减少,水动力较弱,水体停留时间较长,总氮、总磷等物质难以在库湾内扩散、降解和转化,容易造成营养物质的积累^[36]。尽管暴雨天气可能会暂时增加水库营养物质浓度,但泄洪期相对蓄水期更有利于维持水库良好的营养状态。

2.5 营养状态对景观格局的响应关系

已有研究^[37]显示,流域景观的土地利用类型组成对水体中氮、磷等水质指标具有显著的影响。利用泄洪期与蓄水期土地利用类型的SHAP值依赖图(见图6、图7)进一步量化影响因素与其相应重要性之间的关系。耕地、林地、草地和不透水面面积占比在全年、蓄水期和泄洪期对营养状态指数的影响贡献度分别为50.69%、49.01%和42.59%。土地利用类型组成决定流域所产生的非点源污染的种类和负荷,在农业活动中被过度使用的肥料和农药通过地表和地下水过程输入到库区水体中,形成农业面源污染^[38]。子流域耕地面积增加将加剧水体富营养化,这可能是泄洪期降雨将耕地中化肥残余输送至水体中导致的^[39];而城市地区由于人口密度高、污水处理基础设施不

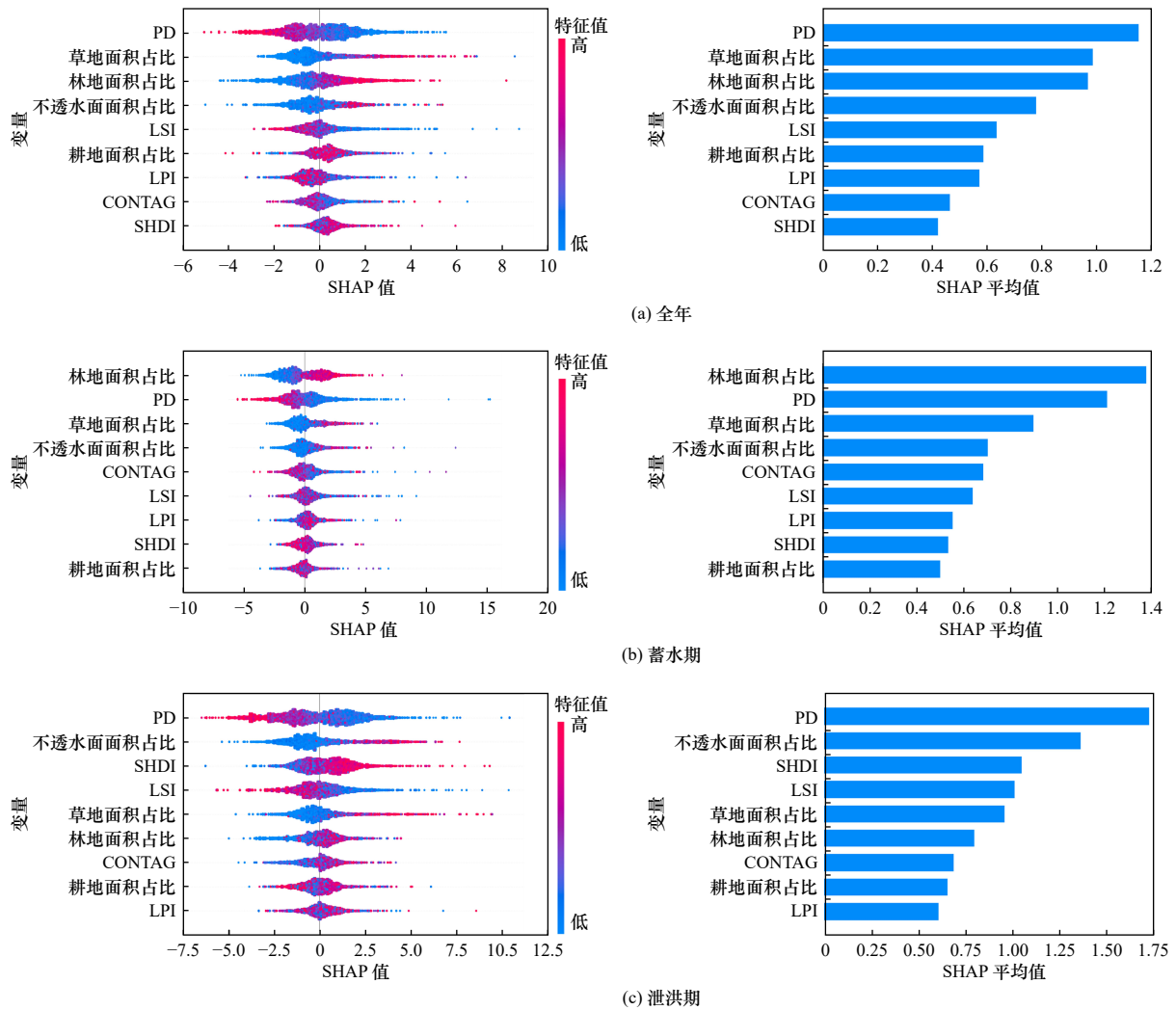


图 5 土地利用类型组成和景观格局指数对营养状态指数影响贡献度排序

Fig.5 Rank of contribution of land use composition and landscape pattern indices to the effect of trophic state indices

足,加之地表不透水面对污染物质拦截效果被削弱,成为水体中污染物质的主要点源。城镇化的推进使得潜在非点源污染高风险区由旱地和园地逐渐演变为城镇用地、农村居民地和建设用地^[40]。库区不透水面主要为村镇居民点分散分布,大多数子流域不透水面面积占比低于 10%,而不透水面面积占比高于 10% 将对营养状态产生更显著的影响,同时较高的连通性会缩短径流汇入受纳水体的时间,加速水质恶化。在蓄水期林地面积占比为 50% 时为一个明显的转折点,而泄洪期则未表现出明显的转折。在蓄水期,林地和草地对营养状态有改善效果,能有效防止水土流失和污染物迁移,丰富的林地结构对面源污染的净化效果更显著。

景观配置在流域生态水文过程、物质循环和能量转换过程中发挥着重要作用^[41]。景观密度、形状、优势种、异质性和多样性影响着污染物的拦截、吸附

和净化过程,最终对水体营养状态产生影响^[42]。PD 在水库的各时期均对营养状态产生重要影响,而 LSI 对营养状态的影响在泄洪期较蓄水期更为显著。PD 和 LSI 分别表示景观的破碎程度和斑块形状的复杂性^[43],当流域内存在过多的小景观斑块时,地表径流和土壤侵蚀增加,更多的营养物质被输送到水体中,而复杂的景观斑块形状可以减缓营养物质的传输;在泄洪期 SHDI 表现出了显著的正向影响,这说明景观多样性对岸线和库湾区营养状态指数具有显著贡献^[44];较高的 CONTAG 表示某一类型的优势斑块形成了良好的连通性,景观连通性越高,越有利于污染物汇集路径的缩短和速度加快,从而加速水体富营养化^[45];在研究中 LPI 在各时期对营养状态的影响贡献度均较低,通常认为 LPI 间接反映了人类活动的强度和方向,在不同的优势斑块下对水质表现出不同方向的影响^[46]。

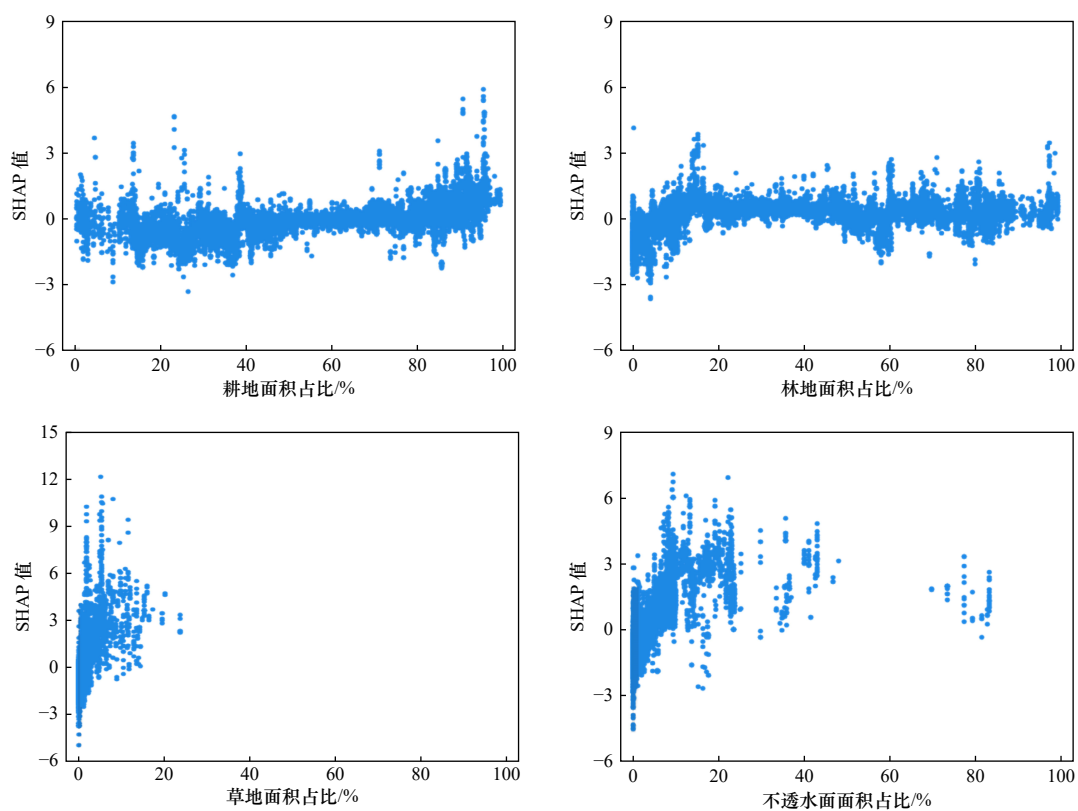


图6 泄洪期土地利用类型组成的特征依赖图

Fig.6 Dependency plots of land use composition in FDPs

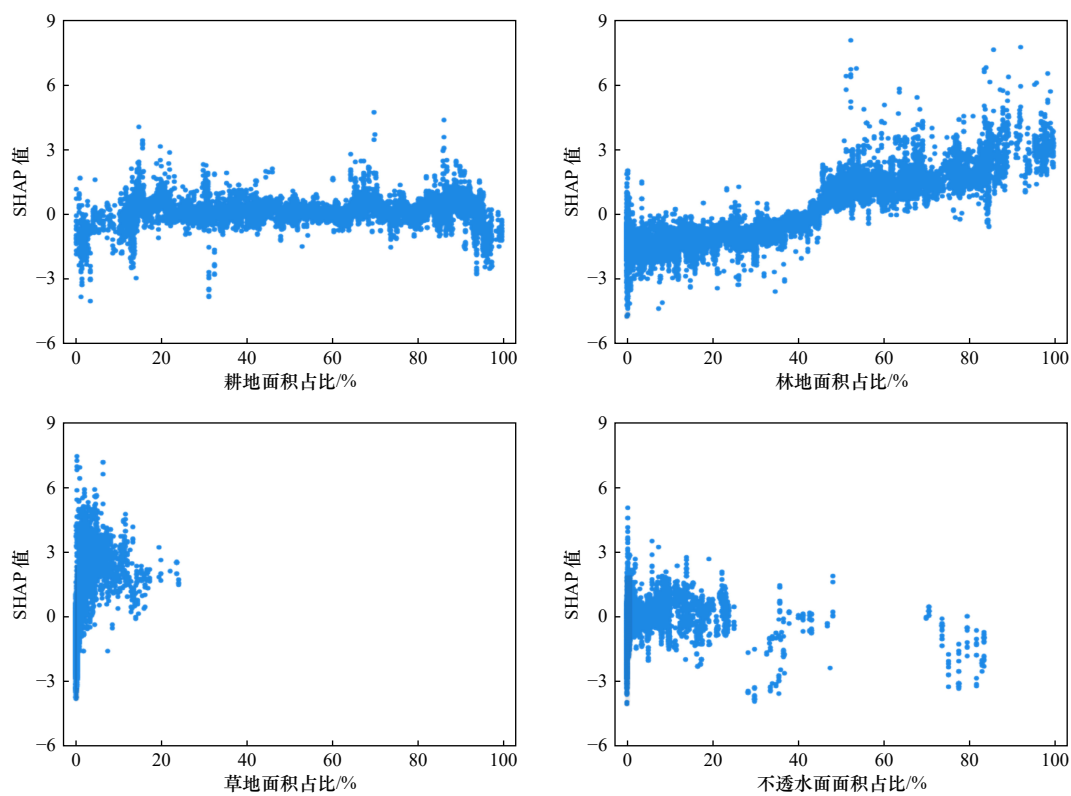


图7 蓄水期土地利用类型组成的特征依赖图

Fig.7 Dependency plots of land use composition in WSPs

3 结论

a) 利用遥感数据和半解析方法揭示了 2013—2023 年间丹江口水库营养状态指数的时空变化特征。水库的营养状态呈现出明显的空间异质性, 整体以中营养为主, 富营养化区域主要分布在岸线库湾区及支流附近。水库的营养状态与季节变化和流域景观条件密切相关, 泄洪期的水体营养状态相对优于蓄水期。

b) 土地利用组成和景观格局指数在不同时期对营养状态的影响贡献度不同。斑块密度、林地、草地和不透水面在各时期均具有较高的影响贡献度, 而蔓延度指数和香农多样性指数在蓄水期和泄洪期分别具有较高的影响。为改善水库岸线及库湾的富营养化问题, 有必要保持较大面积的自然地表优势景观, 降低耕地和不透水面的破碎度。

参考文献 (References):

- [1] YAN X C,XU X G,WANG M Y,et al.Climate warming and cyanobacteria blooms:looks at their relationships from a new perspective[J].*Water Research*,2017,125:449-457.
- [2] MA J G,LOISELLE S,CAO Z G,et al.Unbalanced impacts of nature and nurture factors on the phenology,area and intensity of algal blooms in global large lakes:MODIS observations[J].*Science of the Total Environment*,2023,880:163376.
- [3] XIA R,WANG G S,ZHANG Y,et al.River algal blooms are well predicted by antecedent environmental conditions[J].*Water Research*,2020,185:116221.
- [4] HOU X J,FENG L,DAI Y H,et al.Global mapping reveals increase in lacustrine algal blooms over the past decade[J].*Nature Geoscience*,2022,15:130-134.
- [5] SURESH K,van VLIET M T H,BIERKENS M F P,et al.Recent advancement in water quality indicators for eutrophication in global freshwater lakes[J].*Environmental Research Letters*,2023,18(6):063004.
- [6] 吴锋,战金艳,邓祥征,等.中国湖泊富营养化影响因素研究:基于中国 22 个湖泊实证分析 [J].*生态环境学报*,2012,21(1):94-100.
- WU F,ZHAN J Y,DENG X Z,et al.Influencing factors of lake eutrophication in China:a case study in 22 lakes in China[J].*Ecology and Environmental Sciences*,2012,21(1):94-100.
- [7] LI N X,WANG J,YIN W,et al.Linking water environmental factors and the local watershed landscape to the chlorophyll a concentration in reservoir bays[J].*Science of the Total Environment*,2021,758:143617.
- [8] 崔扬,朱广伟,张运林,等.湖库富营养化指标的高频监测方法研究 [J].*环境科学学报*,2014,34(5):1178-1185.
- CUI Y,ZHU G W,ZHANG Y L,et al.Estimation of lake trophic level index with high-frequency sensor parameters[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*,2014,34(5):1178-1185.
- [9] WANG S Q,ZHANG X,WANG C,et al.Multivariable integrated risk assessment for cyanobacterial blooms in eutrophic lakes and its spatiotemporal characteristics[J].*Water Research*,2023,228:119367.
- [10] 周博天,张雅燕,施坤.湖泊营养状态遥感评价及其表征参数反演算法研究进展 [J].*遥感学报*,2022,26(1):77-91.
- ZHOU B T,ZHANG Y Y,SHI K.Research progress on remote sensing assessment of lake nutrient status and retrieval algorithms of characteristic parameters[J].*National Remote Sensing Bulletin*,2022,26(1):77-91.
- [11] 段洪涛,曹志刚,沈明,等.湖泊遥感研究进展与展望 [J].*遥感学报*,2022,26(1):3-18.
- DUAN H T,CAO Z G,SHEN M,et al.Review of lake remote sensing research[J].*National Remote Sensing Bulletin*,2022,26(1):3-18.
- [12] ATIQUE U,AN K G.Landscape heterogeneity impacts water chemistry,nutrient regime,organic matter and chlorophyll dynamics in agricultural reservoirs[J].*Ecological Indicators*,2020,110:105813.
- [13] WOOLWAY R I,JENNINGS E,SHATWELL T,et al.Lake heatwaves under climate change[J].*Nature*,2021,589:402-407.
- [14] MAAVARA T,CHEN Q W,van METER K,et al.River dam impacts on biogeochemical cycling[J].*Nature Reviews Earth & Environment*,2020,1:103-116.
- [15] FANG C,SONG K S,PAERL H W,et al.Global divergent trends of algal blooms detected by satellite during 1982-2018[J].*Global Change Biology*,2022,28(7):2327-2340.
- [16] SPRINGMANN M,CLARK M,MASON-D'CROZ D,et al.Options for keeping the food system within environmental limits[J].*Nature*,2018,562:519-525.
- [17] ZHANG X,DAVIDSON E A,ZOU T,et al.Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management[J].*Global Biogeochemical Cycles*,2020,34(3):e2018GB006060.
- [18] NJAGI D M,ROUTH J,ODHIAMBO M,et al.A century of human-induced environmental changes and the combined roles of nutrients and land use in Lake Victoria catchment on eutrophication [J].*Science of the Total Environment*,2022,835:155425.
- [19] 刘成建,夏军,宋进喜,等.汉江中下游水质时空特征与土地利用类型响应识别研究 [J].*环境科学研究*,2021,34(4):910-919.
- LIU C J,XIA J,SONG J X,et al.Spatial and temporal characteristics of water quality and response identification of land use patterns in middle and downstream of Hanjiang River[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(4):910-919.
- [20] 宋卓远,李华林,于佩丹,等.北运河上游非点源污染负荷模拟与最佳管理措施评估研究 [J].*环境科学研究*,2023,36(2):334-344.
- SONG Z Y,LI H L,YU P D,et al.Simulation of non-point source pollution load and evaluation of best management practices in the upper Beiyun River watershed[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(2):334-344.
- [21] 周添红,苏思霖,马凯,等.典型区域土地利用/景观格局对黄河上游水体 TN 的影响 [J].*环境科学*,2024.doi:10.13227/j.hjxx.202310025.
- ZHOU T,SU S,MA K,et al.Influence of typical regional land use/landscape pattern on water TN of the upper Yellow River[J].*Environmental Science*,2024.doi:10.13227/j.hjxx.202310025.
- [22] 夏明珠,薛万来,黄俊雄,等.北京白河流域不同空间尺度下水质对土地利用的响应关系 [J].*环境科学研究*,2023.doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.19.

- XIA M,XUE W,HUANG J,et al.Relationships between water quality and land use responses at different spatial scales in the White River Basin in Beijing[J].*Research of Environmental Sciences*,2023.doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2023.11.19.
- [23] 徐娟,李秋艳,林巧云,等.土地利用/覆盖对华南地区感潮河流碳分布格局的影响[J].*环境科学研究*,2023,36(6):1147-1155.
- XU J,LI Q Y,LIN Q Y,et al.Land use drives the spatial patterns of carbon in a Tidal River in southern China[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(6):1147-1155.
- [24] 黄益平,王鹏,徐启渝,等.袁河流域土地利用方式对河流水体碳、氮、磷的影响[J].*环境科学研究*,2021,34(9):2132-2142.
- HUANG Y P,WANG P,XU Q Y,et al.Influence of land use on carbon,nitrogen and phosphorus in water of Yuan River Basin[J].*Research of Environmental Sciences*,2021,34(9):2132-2142.
- [25] 吕乐婷,高晓琴,刘琦,等.东江流域景观格局对氮、磷输出的影响[J].*生态学报*,2021,41(5):1758-1765.
- LÜ L T,GAO X Q,LIU Q,et al.Influence of landscape pattern on nitrogen and phosphorus output in the Dongjiang River Basin[J].*Acta Ecologica Sinica*,2021,41(5):1758-1765.
- [26] 杨梅玲,胡忠军,刘其根,等.利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水水质变化(2007—2011年)[J].*上海海洋大学学报*,2013,22(2):240-245.
- YANG M L,HU Z J,LIU Q G,et al.Evaluation of water quality by two trophic state indices in Lake Qiandaohu during 2007-2011[J].*Journal of Shanghai Ocean University*,2013,22(2):240-245.
- [27] SHI K,ZHANG Y L,SONG K S,et al.A semi-analytical approach for remote sensing of trophic state in inland waters:Bio-optical mechanism and application[J].*Remote Sensing of Environment*,2019,232:111349.
- [28] CHEN N C,WANG S Q,ZHANG X,et al.A risk assessment method for remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters[J].*Science of the Total Environment*,2020,740:140012.
- [29] ZHOU J J,LUO C Y,MA D F,et al.The impact of land use landscape pattern on river hydrochemistry at multi-scale in an inland river basin,China[J].*Ecological Indicators*,2022,143:109334.
- [30] WEI W,GAO Y N,HUANG J C,et al.Exploring the effect of basin land degradation on lake and reservoir water quality in China[J].*Journal of Cleaner Production*,2020,268:122249.
- [31] WANG M,LI Y X,YUAN H J,et al.An XGBoost-SHAP approach to quantifying morphological impact on urban flooding susceptibility[J].*Ecological Indicators*,2023,156:111137.
- [32] DAHAL K,SHARMA S,SHAKYA A,et al.Identification of groundwater potential zones in data-scarce mountainous region using explainable machine learning[J].*Journal of Hydrology*,2023,627:130417.
- [33] LIU Z H,FU L Z,WU C F,et al.Spatialized importance of key factors affecting park cooling intensity based on the park scale[J].*Sustainable Cities and Society*,2023,99:104952.
- [34] SHI P C,ZHU M Y,YOU R F,et al.Rainstorm events trigger algal blooms in a large oligotrophic reservoir[J].*Journal of Hydrology*,2023,622:129711.
- [35] WANG J,YIN W,WANG L X,et al.Unraveling the effects of hydrological connectivity and landscape characteristics on reservoir water quality[J].*Journal of Hydrology*,2022,613:128410.
- [36] XU Q Y,YAN T Z,WANG C Y,et al.Managing landscape patterns at the riparian zone and sub-basin scale is equally important for water quality protection[J].*Water Research*,2023,229:119280.
- [37] GIRI S,QIU Z Y.Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century:a review[J].*Journal of Environmental Management*,2016,173:41-48.
- [38] WU J H,LU J.Landscape patterns regulate non-point source nutrient pollution in an agricultural watershed[J].*Science of the Total Environment*,2019,669:377-388.
- [39] 郑清,黎云祥,朱广伟,等.夏季强降雨期间千岛湖有机碳的时空分布特征及影响因素[J].*环境科学研究*,2022,35(4):896-907.
- ZHENG Q,LI Y X,ZHU G W,et al.Spatio-temporal distribution and driving factors of organic carbon in Qiandaohu Reservoir during summer storm[J].*Research of Environmental Sciences*,2022,35(4):896-907.
- [40] STOKAL M,KROEZE C,WANG M R,et al.The *MARINA* model (Model to Assess River Inputs of Nutrients to seAs):model description and results for China[J].*Science of the Total Environment*,2016,562:869-888.
- [41] HAN Y Y,ZHANG K,LIN Q,et al.Assessing lake ecosystem health from disturbed anthropogenic landscapes:spatial patterns and driving mechanisms[J].*Ecological Indicators*,2023,147:110007.
- [42] XU Q Y,GUO S F,ZHAI L M,et al.Guiding the landscape patterns evolution is the key to mitigating river water quality degradation [J].*Science of the Total Environment*,2023,901:165869.
- [43] 王飞,陶芹,程宪波,等.快速城镇化地区景观格局变化对水生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 landscape pattern change on water ecosystem service in rapidly urbanization areas[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(1):159-167.
- [44] 张旭达,韩谓,孙长顺,等.无定河及延河流域不同时空尺度下土地利用对水质的影响[J].*环境科学*,2023.doi:10.13227/j.hjkk.202307031.
- ZHANG X,HAN X,SUN C,et al.Effects of landscape pattern on water quality at different spatial and temporal scales in Wudinghe River Basin and Yanhe River Basin[J].*Environmental Science*,2023.doi:10.13227/j.hjkk.202307031.
- [45] 陈优良,邹文敏,刘星根,等.东江源流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析[J].*环境科学*,2022,43(11):5053-5063.
- CHEN Y L,ZOU W M,LIU X G,et al.Scale effects of landscape pattern on water quality in Dongjiang River source watershed[J].*Environmental Science*,2022,43(11):5053-5063.
- [46] 刘凯,杨琰瑛,师荣光,等.1990—2020年于桥水库流域景观格局时空演变及驱动力[J].*农业资源与环境学报*,2023,40(1):154-164.
- LIU K,YANG Y Y,SHI R G,et al.Spatiotemporal changes and driving forces of landscape patterns in the Yuqiao Reservoir watershed during 1990-2020[J].*Journal of Agricultural Resources and Environment*,2023,40(1):154-164.