

不同空间尺度景观格局对环鄱阳湖城市群地表水质影响差异

吕雯珺¹, 徐 晶¹, 李 静², 梁昌梅³, 金 业⁴, 郭昌陇¹, 陶士勇¹

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室; 2. 中南安全环境技术研究院股份有限公司;
3. 湖北省水利水电科学研究院; 4. 长江水利委员会水文局)

摘要: 基于 2021 年环鄱阳湖城市群 26 个监测断面水质数据, 结合 GlobeLand30 数据集, 提取 200~2 000 m 河岸带缓冲区和子流域共 6 个空间尺度下的景观格局信息, 利用冗余分析等方法分析了景观格局与地表水质的多尺度关联关系。结果表明: 监测断面水质均达良好及以上, 河岸带缓冲区尺度下的主要土地利用类型为水体和耕地, 子流域尺度下林地和耕地占比最大; 建设用地、耕地和湿地表现为“源”景观特征, 林地对维持水质具有正面作用, 多数情景下最大斑块指数和蔓延度指数对水质变化的影响强度最大, 景观人为转化带来的破碎化潜在增加了污染入河风险; 1 000 m 河岸带缓冲区景观格局与地表水质的相关性最强, 建议在该尺度下优化景观格局配置, 加强排污管控与污水处理, 并重视优势斑块的生态功能。

关键词: 景观格局; 空间尺度; 地表水质; 冗余分析; 环鄱阳湖城市群

Differences in impacts of landscape patterns on surface water quality across multiple spatial scales in Poyang Lake urban agglomeration//Lyu Wenjun¹, Xu Jing¹, Li Jing², Liang Changmei³, Jin Ye⁴, Guo Changlong¹, Tao Shiyong¹
(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 2. Central-Southern Safety & Environment Technology Institute Co., Ltd.; 3. Hubei Water Resources Research Institute; 4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission)

Abstract: Based on the water quality monitoring data from 26 monitoring sections of Poyang Lake urban agglomeration in 2021, this study extracted landscape pattern metrics under six spatial scales, including riparian buffer zones ranging from 200 m to 2 000 m and corresponding sub-watersheds, using the GlobeLand30 dataset. Redundancy analysis and other statistical approaches were adopted to explore multi-scale correlations between landscape patterns and surface water quality. The results showed that the water quality at all monitoring sections met the good grade or above. Water bodies and cultivated land constituted the dominant land use types across riparian buffer zones, while forestland and cultivated land occupied the largest proportions at sub-watershed scale. Construction land, cultivated land and wetland exhibited source-landscape characteristics, whereas forestland exerted positive effects on water quality conservation. In most scenarios, the largest patch index and contagion index had the strongest impact on water quality variations. Human-induced landscape transformation and resultant landscape fragmentation potentially elevated the risk of pollutant transport into rivers. Landscape pattern within 1 000 m riparian buffer zone presented the strongest correlation with surface water quality. Accordingly, this study proposes optimizing landscape pattern allocation at 1 000 m riparian scale, strengthening pollutant discharge regulation and sewage treatment, and prioritizing the ecological functions of dominant landscape patches.

Key words: landscape pattern; spatial scales; surface water quality; redundancy analysis; Poyang Lake urban agglomeration

地表水质对饮用水安全和周边生态环境至关重要,其恶化是全球性突出的环境问题^[1-2]。景观格局表征景观组成单元的类型、数量及其空间分布与配置模式,是区域自然、人文因素共同作用的综合性体

现^[3]。非点源污染是影响地表水质的关键因素^[4],景观格局通过调控地表径流与生物地球化学循环,对非点源污染物的产生、迁移和转化具有决定性作用^[5]。因此,流经人类活动密集区域的地表水受周

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2024M752475); 国家自然科学基金项目(42501035)

作者简介: 吕雯珺(2002—),女,硕士研究生,主要从事水环境化学研究。E-mail: Arielly@whu.edu.cn

通信作者: 陶士勇(1995—),男,博士,主要从事生态水文学研究。E-mail: taoshiyong@whu.edu.cn

边土地景观格局变化的影响显著^[6-7]。

近年来,国内外学者通过模拟试验^[8]、水文模型^[9]、统计分析^[10-11]等方法,证实景观格局对地表水质具有重要影响。但现有研究多以自然流域为研究对象,不同空间尺度下影响效应的差异规律尚未形成统一认知^[12-15]。例如: Xu 等^[16]发现在赤水河流域,流域尺度能更好地解释景观格局指数与水质之间的响应关系; Sliva 等^[12]的研究则表明河岸带和流域尺度对河流水质的影响无显著差异。

随着城市化进程的加速,土地利用方式变化和人类活动加剧了地表水污染^[17],城市景观格局与水质的相互关系逐渐成为研究热点。杨洁等^[18]对苏州太湖流域的研究表明,大范围缓冲区景观格局对水质的影响更为显著,建设用地、旱地及水田作为主要污染输出源,对水质产生了负面影响;周石松等^[19]以郴州市郴江流域为研究区,发现耕地、草地和建设用地是对水质影响最显著的土地利用类型,景观形状指数、最大斑块指数与水质指标呈负相关关系。

在经济全球化与区域一体化快速发展的背景下,城市群的重要性日益凸显^[20],作为新型城镇化的主体形态,城市群在优化资源配置和促进区域协调可持续发展等方面发挥了关键作用^[21],但现阶段围绕城市群开展的相关研究仍存在明显空白。

环鄱阳湖城市群地处长江中游,作为长江经济带的重要生态节点,在我国城市群发展中具有较强的代表性。当前,该区域面临湿地萎缩、重金属污染及水体富营养化等问题^[22]。2022 年江西省公布的地表水环境质量排名中,环鄱阳湖城市群的组成城市(抚州、上饶、九江、南昌)排名靠后。因此,本文基于历史公开水质监测数据,结合土地利用和 DEM 遥感数据,分析环鄱阳湖城市群地表水质和景观格局的空间变化特征,以期为环鄱阳湖城市群城镇化背景下土地利用规划和水资源保护提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

环鄱阳湖城市群位于江西省北部,是长江中游重要的城市群之一,包括南昌、九江、景德镇、上饶、鹰潭、宜春、新余、萍乡 8 个地级市,以及抚州、吉安的部分县(区),总面积约 6.98 万 km²,占江西省面积的 41.81%^[23]。城市群以鄱阳湖为核心,涵盖赣江、抚河、信江、饶河与修河五大水系,湿地资源和水资源丰富,形成较为完整的河流-湖泊汇流网络和生态系统。研究区属亚热带湿润季风气候,四季分明、雨量充沛;地貌以湖泊、丘陵和平原为主,地势总体呈现西南高、东北低,地表径流汇聚性强,易受非点

源污染累积影响。截至 2021 年末,区域内常住总人口约为 2 277.88 万人,约占江西省总人口的 50.42%,地区生产总值达 14 021.17 亿元,占全省的 47.34%。伴随着快速的城镇化和人口增长,区域内土地利用结构发生剧烈变化,水环境生态安全问题凸显。

基于湖泊效应假设与城市空间结构理论,肖长江等^[24-26]指出,湖泊可通过气候调节、水文联系及资源辐射等机制,对周边城市的经济与生态格局产生分级影响。因此,结合环鄱阳湖流域的自然地理与水系分布特征,将研究区划分为环湖核心区、环湖边缘区和两区域交界处。其中,环湖核心区指鄱阳湖主体水体及其沿岸约 10 km 范围内的滨湖带,水系密集,受湖泊水文气候直接调节最为强烈,承载了密集的经济、技术及政策资源,工业及第三产业高度集中;环湖边缘区涵盖主要支流上游,以及生态功能与湖泊紧密联系的外围地域,拥有丰富的矿产与旅游资源,产业形态以加工制造等第二产业为主;两区域交界处则为湖体与主要支流(如赣江、抚河、信江等)汇合的过渡带,承担物质交换与能量输送的关键功能。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土地利用类型及景观格局指数计算

本文使用的土地利用类型数据来源于国家地理信息公共服务平台“天地图”提供的 2020 年全球地表覆盖数据集(GlobeLand30)(<https://www.tianditu.gov.cn>)。该数据集包含耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪共 10 种地表覆盖类型。基于环鄱阳湖城市群土地利用特点,利用 ArcGIS 10.8.2 软件对原始数据进行重分类,得到耕地、林地、草地、湿地、水体、建设用地、未利用地共 7 种土地利用类型,结果如图 1(a)所示。景观格局主要通过土地利用斑块面积、形状、优势度及多样性等特征影响地表水质。因此,基于 Fragstats 4.2 软件,计算以下景观格局指数:①斑块面积百分比,即各类型景观斑块面积所占研究区面积的比例,可用于确定主要景观;②斑块密度(PD),即研究区单位面积的斑块数,可反映景观的破碎度和异质性;③最大斑块指数(LPI),用于确定景观中的优势斑块类型,反映人类活动的干扰方向和强度,LPI 值越小,指示人类活动强度越大;④景观形状指数(LSI),衡量斑块的边界特征和形状复杂程度,较高的 LSI 值表示斑块形状复杂、边界不规则;⑤蔓延度指数(CONTAG),用于描述景观中不同斑块类型的团聚程度和延展趋势,高蔓延度指数值反映某种优势斑块形成了良好的连通性;⑥香

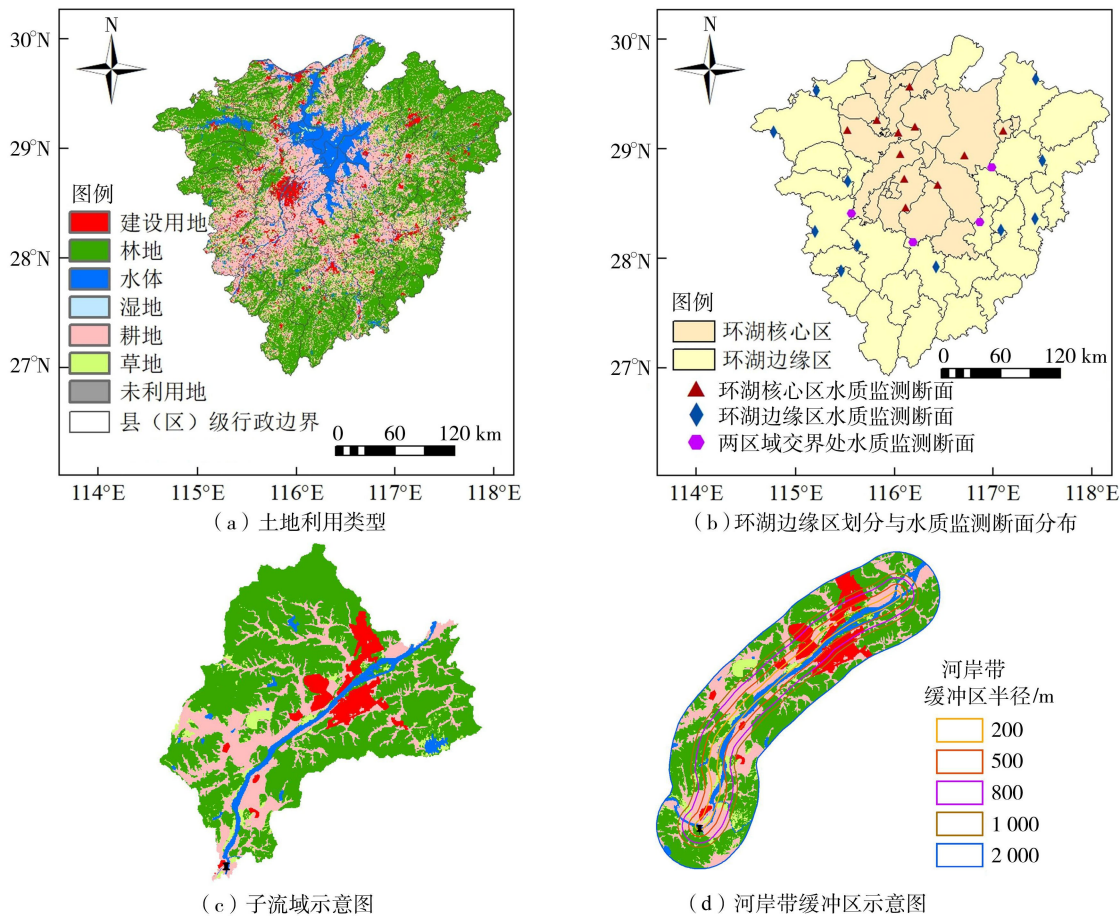


图 1 环鄱阳湖城市群土地利用类型与空间尺度划分

Fig. 1 Land use types and spatial scale division of Poyang Lake urban agglomeration

农多样性指数(SHDI),反映景观异质性,强调稀有景观斑块类型的贡献,土地利用类型越丰富,破碎程度越高,香农多样性指数值越大。其中,仅斑块面积百分比在类型水平上计算,其余指数均在景观水平上完成。

1.2.2 水质数据

水质数据来源于国家地表水质自动监测实时数据发布系统(<https://szzdj.cnemc.cn:8070/GJZ/Business/Publish/Main.html>),该系统每4h自动更新实时数据。根据环湖核心区、环湖边缘区以及两区域交界处共26个监测断面的数据收集与整理(图1(b)),选用2021年溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、总氮(TN)进行分析。对于各水质指标,取前1天20:00至当天20:00的数据均值作为当日日均值。参考水质指数(WQI)计算方法^[27]及GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,计算各监测断面的WQI值。为消除水质指标在评估中的量纲与影响差异,对其赋值相应权重进行归一化处理(其中DO为正向指标,COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN为负向指标),WQI计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n C_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

式中: I 为WQI值; C_i 为水质指标 i 的归一化参数; w_i 为水质指标 i 的权重; n 为水质指标的总数量。

根据WQI评分信息,将水质划分为5个等级:优秀(>90~100)、良好(>70~90)、中等(>50~70)、较低(>25~50)和极差(0~25),见表1,其中 C_i 和 w_i 的取值参考Kocer等^[28-29]的研究成果,其准确性已在多项研究中得到验证^[30-31]。DO、COD_{Mn}、NH₃-N、TP、TN的权重分别为4、3、3、1、2。

1.2.3 空间尺度选取

DEM数据源自ALOS_PALSAR卫星,空间分辨率为12.5m,用于提取环鄱阳湖城市群的河流水系及其子流域,见图1(c)。采用ArcGIS的ArcSWAT扩展模块,以水质监测断面为流域出口提取子流域,同时使用空间分析工具,以提取的线状水系为基准向河流两岸生成河岸带缓冲区。

已有研究广泛采用圆形缓冲区、河岸带缓冲区和子流域3种空间尺度探究景观格局与地表水质的

表 1 环鄱阳湖城市群地表水质指标分级标准
Table 1 Scoring standards of surface water quality indicators in Poyang Lake urban agglomeration

C_i	水质指标质量浓度/(mg/L)				
	DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
100	≥7.5	<1	<0.15	<0.01	<0.2
90	>7~<7.5	1~<2	0.15~<0.3	0.01~<0.02	0.2~<0.3
80	>6.5~7	2~<3	0.3~<0.4	0.02~<0.05	0.3~<0.4
70	>6~<6.5	3~<4	0.4~<0.5	0.05~<0.1	0.4~<0.5
60	>5~<6	4~<5	0.5~<0.75	0.1~<0.15	0.5~<0.75
50	>4~<5	5~<6	0.75~<1	0.15~<0.2	0.75~<1
40	>3.5~<4	6~<10	1~<1.25	0.2~<0.25	1~<1.25
30	>3~<3.5	10~<12	1.25~<1.5	0.25~<0.3	1.25~<1.5
20	>2~<3	12~<14	1.5~<1.75	0.3~<0.35	1.5~<1.75
10	>1~<2	14~<15	1.75~<2	0.35~<0.4	1.75~<2
0	≤1	≥15	≥2	≥0.4	≥2

关联^[32]。相较于子流域和河岸带缓冲区,圆形缓冲区忽略了远处土地利用类型对水质的作用,在具有明确流向与上下游关系的河流系统中适用性较为有限。100 m 河岸带缓冲区常被用作研究水环境与景观格局关系的最小单元^[33],但鉴于城市区域不透水面等建设用地密集,会强化暴雨径流并加速污染物运移,因此选择 200 m 作为最小河岸带缓冲区尺度,以完整涵盖主要人类活动的干扰范围。多地研究发现,800~1 000 m 缓冲区对水质指标的解释率较高^[14,34-35],基于此,设置 2 000 m 作为最大缓冲区尺度,以探究更大空间范围景观格局对地表水质的影响。综合考虑不同空间尺度的生态效应,选取 200、500、800、1 000、2 000 m 河岸带缓冲区(图 1(d))和子流域共 6 种空间尺度,探讨环鄱阳湖城市群景观格局对地表水质的影响差异。

1.3 分析方法

冗余分析被广泛应用于探究景观格局对水质变化的影响。基于 Canoco 5.0 软件,将地表水质指标作为响应变量,土地利用类型和景观格局指数作为解释变量,并结合方差膨胀因子剔除多重共线性变量,评估不同空间尺度下水质指标与景观格局的关系。在冗余分析结果图中,箭头长度代表变量影响强度,箭头越长,影响越大;箭头夹角代表变量间的影响关系,锐角时,夹角越小正相关性越强,钝角时,夹角越大负相关性越强。冗余分析解释率是衡量解释变量重要性的关键指标,解释率越高,表明其对响应变量的影响越大。

由于土地利用类型、景观格局指数与水质指标之间存在多重共线性,采用偏最小二乘回归(PLSR)量化最佳空间尺度下景观格局对地表水质的线性影响。基于 Python 中的 sklearn 库,将土地利用类型和景观格局指数作为自变量,水质指标作为因变量,计算回归系数及变量投影重要性(variable importance

in projection,VIP)。回归系数表示自变量对因变量影响的大小,VIP 体现自变量在解释因变量变异时的重要性,通常以 VIP 大于 1 作为影响显著的判断标准^[36]。与 PLSR 相比,随机森林算法采用基于决策树的集成学习策略评估变量对模型的贡献度,不依赖线性假设,且对多重共线性不敏感,可有效提升关键影响变量识别的可靠性。因此,利用随机森林算法对最佳空间尺度下的景观格局因子进行重要性排序,并与 PLSR 结果进行比较。

2 结果与分析

2.1 地表水质空间变化特征

基于各项水质指标计算水质监测断面的 WQI 值,结果如图 2 所示。各监测断面的 WQI 值在 70~100 之间,根据 WQI 水质分级标准,监测断面水质均达到良好及以上水平。空间上,环湖边缘区与两区域交界处多数监测断面的 WQI 值在 80~90 之间,而在环湖核心区,WQI 值低于 80 的断面占比相对较高,反映其水质在良好等级中处于较差的位置。

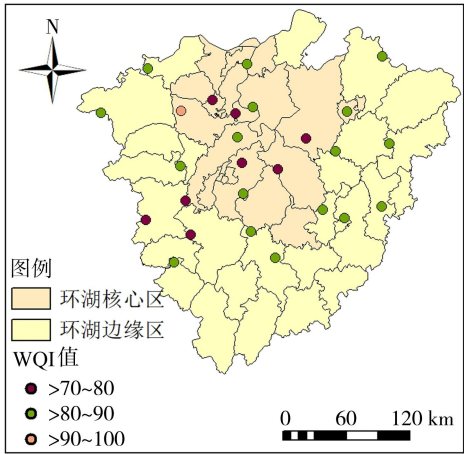


图 2 水质监测断面 WQI 值

Fig. 2 WQI values of water quality monitoring sections

各水质指标在环湖核心区、两区域交界处与环湖边缘区的变化情况如图 3 所示(图中各组数据间相同字母代表差异不显著,无相同字母代表差异显著)。DO 质量浓度总体呈现由环湖核心区向环湖边缘区递增的变化趋势,均值分别为 7.9、8.3、8.4 mg/L,均值达到国家地表水Ⅰ类水标准。NH₃-N 的空间离散程度最大,两区域交界处 NH₃-N 质量浓度水平显著高于环湖核心区及环湖边缘区,各区域内 NH₃-N 质量浓度变异系数的变化范围为 74.8%~135.8%。COD_{Mn} 在环湖边缘区(变异系数 46.6%)的波动范围大于环湖核心区(变异系数 38.6%)和两区域交界处(变异系数 33.4%),表明环湖边缘区有机污染受到外界因素的影响变化更为

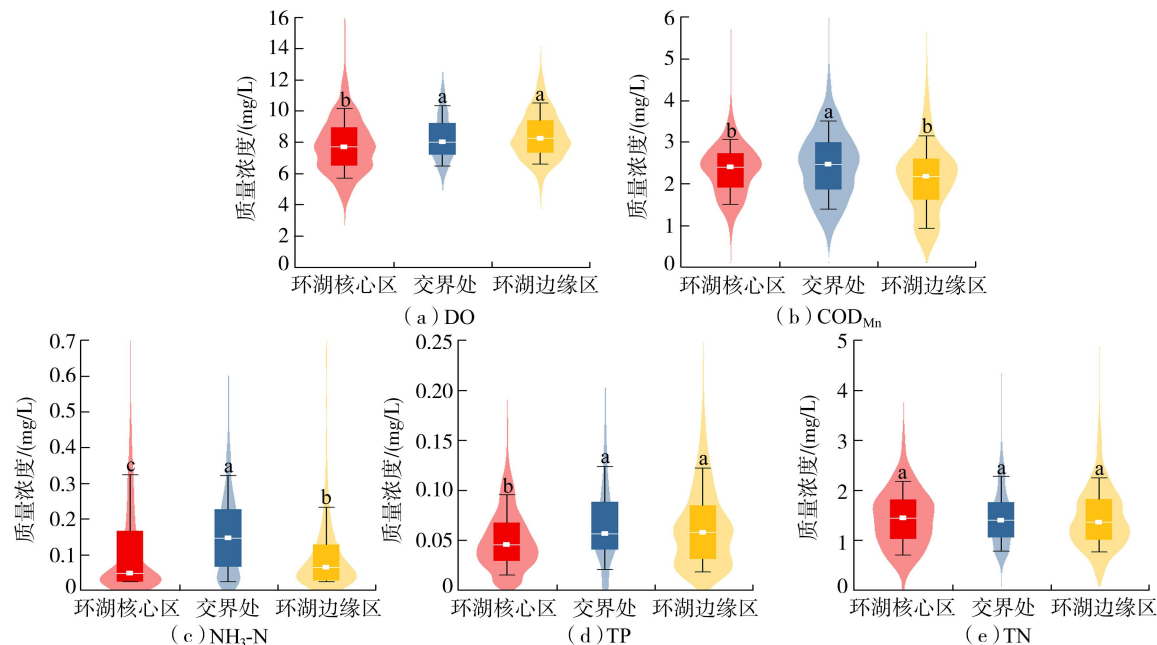


图3 各水质指标变化情况

Fig. 3 Variations of various water quality indicators

显著。3 个区域 TP 和 TN 污染均较严重,仅达国家地表水Ⅳ类水标准,需重点关注氮、磷污染问题。

2.2 土地利用类型及景观格局指数空间变化特征

统计分析不同空间尺度下(河岸带缓冲区与子流域)水质监测断面周边的土地利用类型组成,结果如图 4 所示。

环湖核心区、两区域交界处及环湖边缘区土地利用类型构成相似,均以耕地、水体和林地为主,其次为

草地、建设用地,湿地和未利用地面积占比较低,基本维持在 1%~2%之间。总体上,环湖核心区的水体占比最高,环湖边缘区次之;林地在环湖边缘区的面积占比最大,明显高于环湖核心区和两区域交界处;耕地是两区域交界处最具优势的土地利用类型。从环鄱阳湖城市群整体来看,河岸带缓冲区尺度下的主要土地利用类型为水体和耕地,耕地占比呈现随河岸带缓冲区半径增加不断增大的变化趋势;在子流域尺度

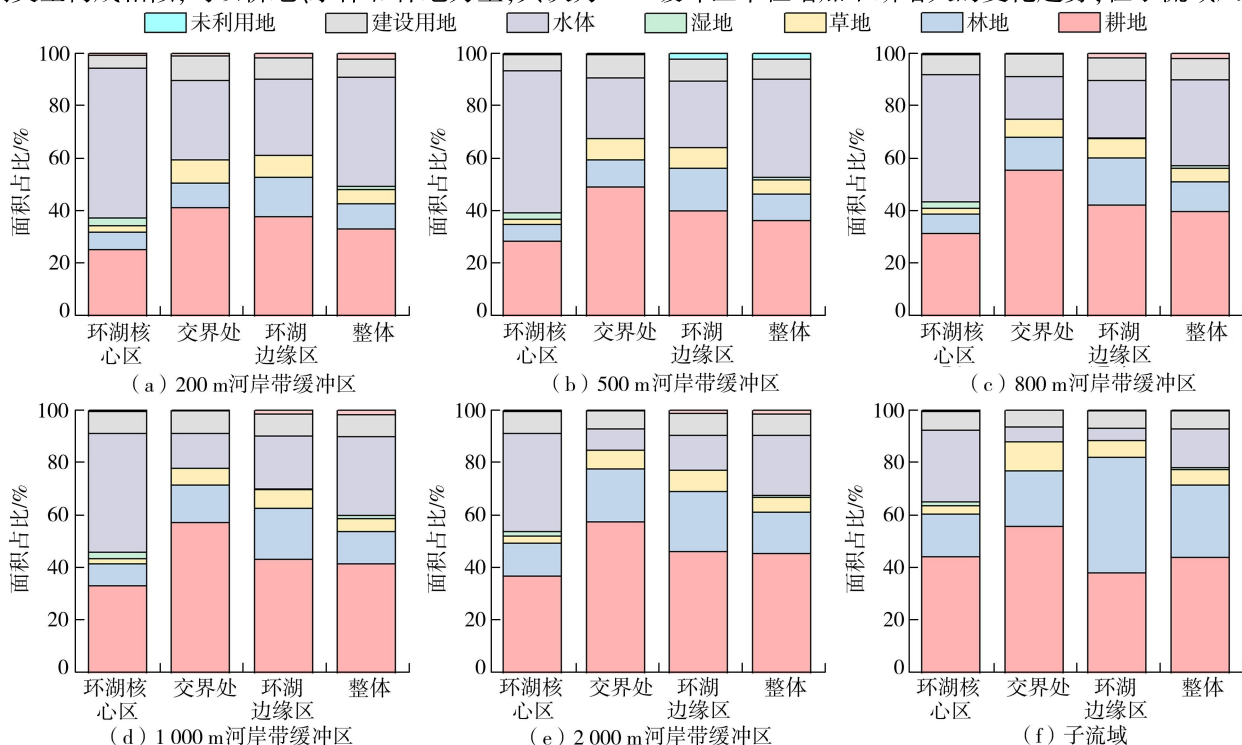


图4 不同空间尺度下水质监测断面周边土地利用类型组成

Fig. 4 Land use types surrounding water quality monitoring sections at different spatial scales

下,林地和耕地则是面积占比最大的土地利用类型。下的景观连通性和丰富度较为接近。

对 200~2 000 m 河岸带缓冲区及子流域尺度下的景观格局指数进行统计,得到环湖核心区、两区域交界处及环湖边缘区的景观格局指数变化情况,如表 2 所示。总体上,随着空间尺度的增加,3 个区域的斑块密度变化趋势相似,均呈现先减小后增大的变化趋势。在环湖核心区,斑块密度随河岸带缓冲区半径的增加持续减小,反映其景观破碎度降低,至子流域尺度回升;在环湖边缘区和两区域交界处,斑块密度则在 200~1 000 m 河岸带缓冲区降低,在 2 000 m 河岸带缓冲区开始增大。最大斑块指数整体在子流域尺度达到最大值;景观形状指数在环湖核心区、环湖边缘区同样于子流域尺度达到最大,两区域交界处最大值则出现在 2 000 m 缓冲区,表明在较大空间尺度下,景观优势度与形状复杂性更为显著,可能是由于大尺度整合了更多自然地貌单元,在一定程度上弱化了人类活动干扰导致的景观破碎化效应。此外,不同河岸带缓冲区尺度间的香农多样性指数和蔓延度指数差异不明显,子流域的蔓延度指数整体略高于河岸带缓冲区,表明不同空间尺度

2.3 不同空间尺度景观格局与水质的关系

土地利用类型和景观格局指数对水质指标的解释能力如表 3 所示。置换检验表明,所有冗余分析模型及其第一排序轴均达到统计显著性水平($p<0.05$)。可见,总解释率在 1 000 m 河岸带缓冲区最大(86.6%),在其余空间尺度下,景观格局对水质指标的总解释率介于 69.5%~81.2%。对水质指标变化贡献最大的解释变量在不同空间尺度下存在差异。

土地利用类型和景观格局指数对水质指标的冗余分析结果如图 5 所示(解释变量为红色空心箭头,响应变量为蓝色实心箭头)。总体上,水体、林地面积占比与 DO 呈正相关关系,与负向指标 NH₃-N、COD_{Mn}、TP、TN 呈负相关关系。建设用地、耕地、湿地与 NH₃-N、COD_{Mn}、TP、TN 表现为正相关关系;草地在 200 m 和 1 000 m 河岸带缓冲区对水质指标的影响较弱,在其他尺度下表现出与 DO 的负相关关系。2010—2020 年环鄱阳湖城市群的观测结果显示,建设用地面积持续扩张,尤其在包含南昌、九江等地的环湖核心区更为显著,而林地与水体

表 2 不同空间尺度景观格局指数统计

Table 2 Statistical analysis of landscape pattern at different spatial scales						
空间尺度	区域	斑块密度/(个/hm ²)	最大斑块指数/%	景观形状指数	蔓延度指数/%	香农多样性指数
200 m 河岸带缓冲区	环湖核心区	9.68±5.56	36.19±19.14	7.82±1.43	57.13±13.88	1.07±0.33
	两区域交界处	12.91±1.54	32.69±22.65	7.48±2.59	50.16±3.75	1.25±0.13
	环湖边缘区	15.60±6.76	28.38±23.44	9.07±3.13	50.34±13.17	1.20±0.26
500 m 河岸带缓冲区	环湖核心区	6.21±3.44	39.17±23.75	7.62±1.50	58.47±12.39	1.07±0.31
	两区域交界处	9.68±1.25	20.54±6.66	8.50±2.23	49.86±5.57	1.26±0.08
	环湖边缘区	11.09±4.95	29.24±13.80	10.08±3.27	50.16±9.07	1.26±0.21
800 m 河岸带缓冲区	环湖核心区	5.30±2.70	43.25±23.04	8.04±1.50	59.15±11.95	1.09±0.28
	两区域交界处	8.30±0.59	34.80±20.27	8.99±1.99	53.67±6.73	1.17±0.11
	环湖边缘区	9.37±4.76	28.09±11.96	10.91±3.24	51.59±9.51	1.26±0.25
1 000 m 河岸带缓冲区	环湖核心区	4.95±2.53	40.45±23.54	10.40±5.14	60.44±10.14	1.09±0.26
	两区域交界处	8.15±0.56	23.29±4.37	12.65±7.47	52.33±1.00	1.21±0.05
	环湖边缘区	9.05±4.88	29.10±16.89	11.50±3.44	52.20±10.16	1.25±0.27
2 000 m 河岸带缓冲区	环湖核心区	4.78±2.60	37.58±16.78	10.26±2.51	60.47±10.10	1.10±0.21
	两区域交界处	8.45±0.58	41.67±20.45	12.61±1.79	56.17±6.46	1.10±0.10
	环湖边缘区	9.21±5.67	28.35±24.42	15.11±4.88	54.08±10.45	1.19±0.29
子流域	环湖核心区	5.22±3.02	46.01±18.40	11.66±2.58	63.01±8.98	1.04±0.17
	两区域交界处	11.38±0.38	33.39±15.43	23.23±6.70	50.39±4.00	1.24±0.05
	环湖边缘区	9.97±5.69	35.94±24.63	17.79±5.48	56.77±12.45	1.12±0.37

注:表中数据为均值±标准差。

表 3 不同空间尺度景观格局对水质指标的解释率

Table 3 Explanatory rates of water quality indicators for landscape patterns at different spatial scales							
空间尺度	解释率/%				总解释率/%	主要解释变量	贡献率/%
	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴			
200 m 河岸带缓冲区	48.81	10.48	6.39	3.86	69.5	耕地、蔓延度指数	22.9
500 m 河岸带缓冲区	60.45	8.91	8.05	3.75	81.2	建设用地、湿地	31.8
800 m 河岸带缓冲区	55.47	9.42	6.99	2.75	74.6	最大斑块指数、林地	30.8
1 000 m 河岸带缓冲区	63.02	10.98	8.75	3.84	86.6	湿地、建设用地	31.8
2 000 m 河岸带缓冲区	53.44	8.28	7.57	3.04	72.3	最大斑块指数、耕地	23.7
子流域	58.12	7.93	5.67	2.58	74.3	林地、最大斑块指数	23.5

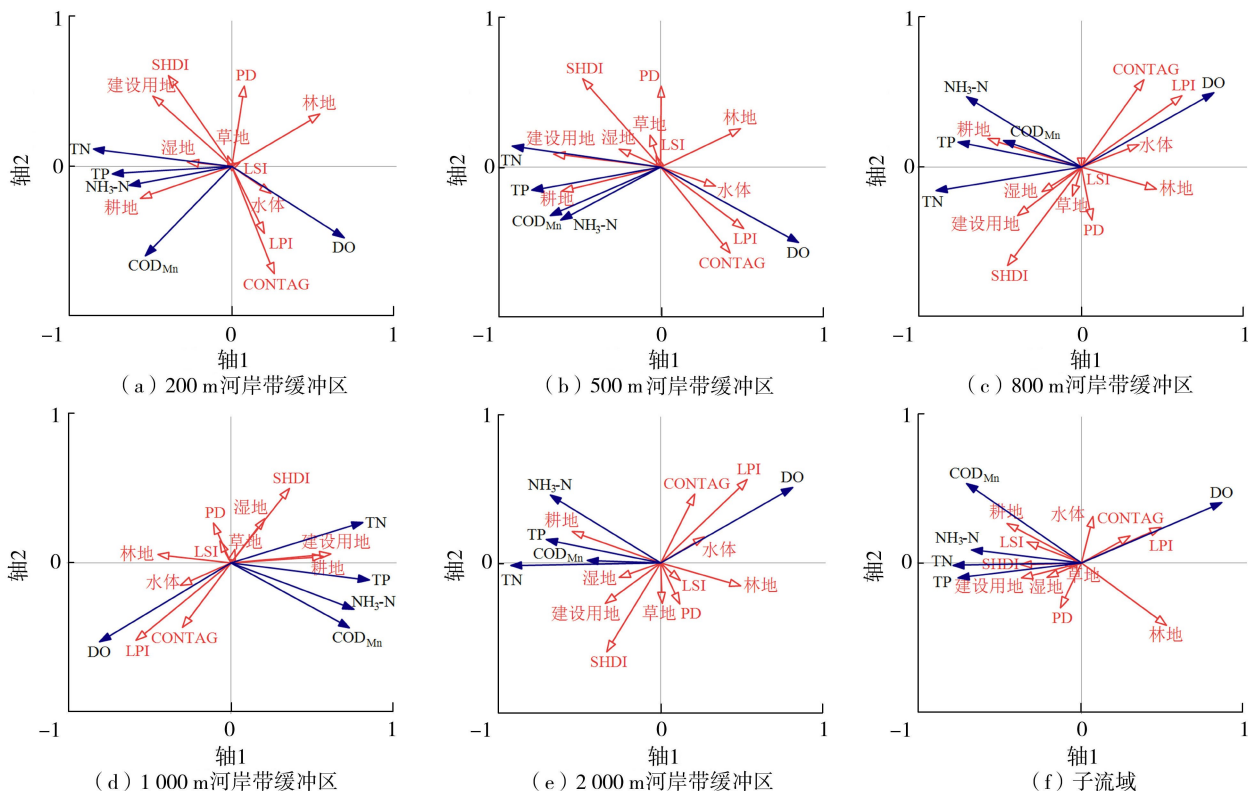


图5 不同空间尺度下景观格局与水质指标冗余分析结果

Fig. 5 Results of redundancy analysis between landscape patterns and water quality indicators at different spatial scales

面积有所减少,并伴随出现以 TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 为代表性指标的水体富营养化加重现象^[37-38]。这一变化格局与冗余分析排序揭示的水质响应关系一致。

对于景观格局指数,在多数空间尺度下,最大斑块指数、蔓延度指数与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、TP、TN 表现出明显的负相关关系,与 DO 呈正相关关系,且子流域尺度下的相关性显著高于河岸带缓冲区。在河岸带缓冲区,斑块密度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 表现出负相关关系;在子流域尺度下,斑块密度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 的相关性明显减弱;香农多样性指数对水质指标的影响较为稳定,与负向指标保持正相关关系;而景观形状指数在不同空间尺度下对水质指标的影响均较弱。

3 讨论

3.1 景观格局与水质的空间差异

鄱阳湖周期性水位变化形成大面积的洲滩湿地,环湖核心区受其影响,水体和湿地面积占比明显高于较远的两区域交界处与环湖边缘区。受自然地理条件及生态保护要求限制,湖区周边不适宜进行大规模开发,导致在河岸带缓冲区宽度小于 1000 m 范围内,建设用地占比明显低于其他区域。城市群景观格局指数未表现出显著的空间差异,主要归因

于趋同的城市扩张模式,反映出城市群协同发展的政策成效。水质方面,环湖核心区多数监测断面 WQI 值在 70~80 之间,可能与南昌、九江构成的“昌九核心区”工业集中、经济发达有关,人类活动产生的面源污染导致地表水质下降。

环湖边缘区以轻型加工制造业为主,污染排放强度相对较低,且人口密度小于环湖核心区,生活污水负荷较小;加之区域内婺源、资溪等地推行生态旅游并实施生态修复政策,有效控制了面源污染。

两区域交界处既远离环湖核心区的高强度污染,又受益于环湖边缘区的生态保护,因此 WQI 值高于 80 的监测断面占比偏高。

3.2 景观格局对水质的影响

流域土地利用方式演变显著影响水体污染物的吸附、贮存和解析过程,其与水质指标的相关性可用于揭示水质变化的内在规律^[39]。林地与水质指标呈负相关关系,反映出林地作为污染“汇”景观,对污染物的截留和吸收作用^[40]。Wu 等^[2]也发现森林植被覆盖对维持水质具有关键作用,建议在河岸带缓冲区提升林地种植密度以改善水质。耕地、建设用地在多尺度下均与 TP、TN 呈正相关关系,这与二者在非点源污染模型中通常被赋予较高输出系数的特征相符。其中,耕地对地表水质产生负面影响可能与农业化肥和农药使用有关,尤其在降雨径流

驱动下更易导致污染物输出^[36];建设用地则因人类活动密集、不透水面占比较高,增强了污染物迁移能力,导致其与污染物指标显著正相关^[27]。此外,本文发现湿地与 TP、TN 呈显著的“源”关系,与其通常被视为污染物净化载体的认识存在差异。该现象可能与环鄱阳湖城市群部分湿地受周边农业、生活污水等面源输入影响有关,加之水体流动性差、交换能力弱,导致污染物易累积并发生内源释放。方娜等^[41-42]也曾发现湿地生态功能的条件依赖性,即在特定情景下,湿地可能发生由污染物“汇”向“源”的转化。

地表水质不仅受土地利用类型的影响,也受景观空间格局的调控。景观格局指数浓缩了景观空间结构信息,可有效解释水体污染通量^[43]。本文蔓延度指数与污染性水质指标呈负相关关系,显示高连通性有利于水质改善。但是,赵灿等^[44]在针对三峡库区的研究中,发现蔓延度对水质具有负面影响,推测是因为库区优势景观为耕地(“源”景观),高连通性可能增强了污染物的迁移能力。因而,在分析蔓延度指数与水质的关系时,需结合优势景观类型与整体景观分布特征^[45]。香农多样性指数与 NH₃-N、COD_{Mn}、TP、TN 呈正相关关系,表明自然景观向人为景观转化过程中加剧的破碎化潜在增加了污染物入河风险,这可能与下垫面变化引起的降雨径流过程改变有关。

3.3 空间尺度对水质的影响作用

已有研究广泛探讨了景观格局对水质变化影响

的尺度效应。刘可暄等^[46]和 Tran 等^[10]分别发现,在密云水库和纽约哈德逊河流域,200 m 河岸带缓冲区的景观格局可有效解释大部分水质变化。王小平等^[43]指出,在新疆艾比湖流域,4 000 m 河岸带缓冲区对水质的影响最为显著。这些结果表明,最佳空间尺度并不统一,但存在景观格局和水质相关性最为显著的临界缓冲区^[34]。本文识别出 1 000 m 河岸带缓冲区景观格局与地表水质的相关性最强(总解释率最大),故将其确定为最佳空间尺度。

为进一步定量分析最佳空间尺度下景观格局对地表水质的影响,对 1 000 m 河岸带缓冲区的土地利用类型、景观格局指数、水质指标进行 PLSR 分析,得到回归系数和关键变量(VIP 大于 1)如表 4 所示。可见,耕地、建设用地及最大斑块指数为主要影响变量,其中,耕地和建设用地与负向水质指标呈正相关关系,最大斑块指数表现出对水质净化的促进作用,与冗余分析结果一致。

在 PLSR 基础上,采用随机森林算法对 1 000 m 河岸带缓冲区的主要影响变量进行判别,结果如表 5 所示。可以看出,不同水质指标的主要影响变量与 PLSR 分析高度一致:建设用地始终位于各水质指标重要性排序的前 1~3 位,最大斑块指数和耕地整体具有较高的重要性,而水体与斑块密度的重要性相对偏后。随机森林算法的非线性建模进一步验证了 PLSR 的线性排序结果,增加了主要影响变

表 4 1000 m 河岸带缓冲区景观格局与水质指标的 PLSR 回归系数

水质指标	回归系数										
	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地	斑块密度	最大斑块指数	景观形状指数	蔓延度指数	香农多样性指数
DO	-0.147	0.143	0.126	-0.374 **	0.075	-0.273 *	0.144	0.332 **	-0.003	0.109	-0.196
COD _{Mn}	0.162	-0.244 *	0.016	0.086	-0.016	0.256 **	-0.227 *	-0.060	-0.118	0.005	0.079
NH ₃ -N	0.216	-0.145	-0.124	0.084	-0.101	0.225	-0.130	-0.143 *	0.004	0.035	-0.096
TP	0.213	-0.165	-0.071	0.190	-0.121	0.273	-0.106	-0.144	-0.117	-0.073	0.054
TN	0.271	-0.255	-0.145	0.244	0.068	0.181 *	-0.214 *	-0.226 *	-0.193	-0.078	0.114

注:蓝色字体为关键变量,红色字体为 VIP 值最大的关键变量;*、** 分别表示差异显著($p<0.05$)和极显著($p<0.01$)。

表 5 基于随机森林算法 1000 m 河岸带缓冲区景观格局对水质指标重要性排序

Table 5 Ranking of importance of landscape patterns in 1000 m riparian buffer zone to water quality indicators based on random forest algorithm

序号	DO	COD _{Mn}	NH ₃ -N	TP	TN
1	建设用地	耕地	建设用地	建设用地	建设用地
2	最大斑块指数	景观形状指数	最大斑块指数	水体	耕地
3	蔓延度指数	建设用地	蔓延度指数	最大斑块指数	林地
4	草地	林地	耕地	香农多样性指数	蔓延度指数
5	香农多样性指数	香农多样性指数	水体	湿地	草地
6	湿地	湿地	香农多样性指数	蔓延度指数	最大斑块指数
7	景观形状指数	斑块密度	林地	林地	香农多样性指数
8	耕地	草地	湿地	草地	景观形状指数
9	林地	蔓延度指数	草地	耕地	湿地
10	水体	水体	景观形状指数	景观形状指数	斑块密度
11	斑块密度	最大斑块指数	斑块密度	斑块密度	水体

量识别的可靠性。为改善环鄱阳湖城市群水环境与生态功能,建议加强 1 000 m 河岸带缓冲区的景观规划;优化耕地结构,推广绿色耕种与水土保持技术以减少面源污染;限制建设用地过度扩张,加强排污控制与污水处理能力;提升林草覆盖度,强化“汇”景观的净化作用。

4 结 论

- a. 环鄱阳湖城市群地表水质总体处于良好及以上水平,环湖边缘区与两区域交界处的水环境质量优于环湖核心区。环湖核心区、两区域交界处及环湖边缘区的土地利用类型构成相似,均以耕地、水体和林地为主,其次为草地、建设用地。
- b. 林地与 DO 呈正相关关系,与负向指标 NH₃-N、COD_{Mn}、TP、TN 呈负相关关系,表现出对维持水质的正面作用,建设用地、耕地和湿地呈现“源”景观特征,对地表水质产生负面影响。在多数空间尺度下,最大斑块指数、蔓延度指数对水质变化的影响强度最大,且与负向指标表现出负相关关系;香农多样性指数与负向指标呈正相关关系,表明景观人为转化过程中的破碎化潜在增加了污染入河风险。
- c. 1 000 m 河岸带缓冲区是景观格局对水质指标解释率最高的关键尺度,其中耕地、建设用地及最大斑块指数为主要影响变量。

参考文献:

[1] Alcamo J. Water quality and its interlinkages with the sustainable development goals [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 36: 126-140.

[2] Wu Jianhong, Lu Jun. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes [J]. Water Research, 2021, 191: 116811.

[3] 吕乐婷, 乔皓, 郑德凤, 等. 太子河流域景观格局时空演变及其对水源涵养的影响 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 111-120. (Lyu Leting, Qiao Hao, Zheng Defeng, et al. Spatial-temporal evolution of landscape pattern in the Taizi River Basin and its impact on water conservation [J]. Water Resource Protection, 2023, 39 (6): 111-120. (in Chinese))

[4] 姜和震, 吴习锦, 郝芳华, 等. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨 [J]. 环境科学学报, 2020, 40 (5): 1535-1549. (Lou Hezhen, Wu Xijin, Hao Fanghua, et al. Research progress of non-point source pollution in China over past 30 years and discussion of the future direction development [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (5): 1535-1549. (in Chinese))

[5] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观

格局的关系 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (5): 78-85. (Zheng Yu, Cheng Xiangju, Wang Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its relation with landscape pattern [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 78-85. (in Chinese))

[6] 刘旭华, 刘华民, 马林芊, 等. 基于气候、土地利用方式及水环境变化的乌梁素海水质驱动因素研究 [J]. 水资源保护, 2026, 42 (1): 243-251. (Liu Xuhua, Liu Huamin, Ma Linqian, et al. Study on driving factors of water quality in the Ulansuhai Lake based on climate, land use patterns, and water environment changes [J]. Water Resources Protection, 2026, 42 (1): 243-251. (in Chinese))

[7] 王华, 徐浩森, 邓燕青, 等. 流域土地利用类型变化对鄱阳湖入湖水质的驱动特征 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (4): 244-252. (Wang Hua, Xu Haosen, Deng Yanqing, et al. Driving characteristics of watershed land use type changes on water quality of inflow rivers to the Poyang Lake [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (4): 244-252. (in Chinese))

[8] Rohde W A, Asmussen L E, Hauser E W, et al. Trifluralin movement in runoff from a small agricultural watershed [J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 9 (1): 37-42.

[9] 刘怡娜, 孔令桥, 肖懿, 等. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系 [J]. 生态学报, 2019, 39 (3): 844-852. (Liu Yina, Kong Lingqiao, Xiao Yi, et al. Relationships between landscape pattern and ecosystem water purification service in the Yangtze River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (3): 844-852. (in Chinese))

[10] Tran C P, Bode R W, Smith A J, et al. Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA) [J]. Ecological Indicators, 2010, 10 (3): 727-733.

[11] Ai Lei, Shi Zhihua, Yin Wei, et al. Spatial and seasonal patterns in stream water contamination across mountainous watersheds: linkage with landscape characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2015, 523: 398-408.

[12] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, 35 (14): 3462-3472.

[13] 张鹏, 刘慧, 王为木, 等. 东南山丘区水库流域多空间尺度景观格局对水质的影响 [J]. 水生态学杂志, 2023, 44 (3): 17-25. (Zhang Peng, Liu Hui, Wang Weimu, et al. Effects of multi-spatial scale landscape patterns on water quality in the reservoir basin of the southeastern hilly region [J]. Journal of Hydroecology, 2023, 44 (3): 17-25. (in Chinese))

[14] 徐明珠, 徐国策, 乔海亮, 等. 秦岭南麓小流域不同空间尺度景观格局对水质的影响分析 [J]. 环境科学学报,

- 2023, 43 (10): 396-406. (Xu Mingzhu, Xu Guoce, Qiao Hailiang, et al. Influence of different spatial scale landscape patterns on water quality in a small watershed at the southern foot of the Qinling Mountains [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43 (10): 396-406. (in Chinese))
- [15] 陈启慧,纪璐,李琼芳,等.伊犁河三角洲水资源条件变化对景观格局演变的影响[J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 90-99. (Chen Qihui, Ji Lu, Li Qiangfang, et al. Influence of water resources condition changes on landscape pattern evolution in the Ili River Delta [J]. Water Resource Protection, 2024, 40 (2): 90-99. (in Chinese))
- [16] Xu Sen, Li Siliang, Zhong Jun, et al. Spatial scale effects of the variable relationships between landscape pattern and water quality: example from an agricultural karst river basin, southwestern China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 300: 106999.
- [17] 沈菊琴,武钰荣,李淑琴,等.太湖流域水环境治理工程土地节约集约利用评价研究[J]. 水利经济, 2024, 42 (2): 7-13. (Shen Juqin, Wu Yurong, Li Shuqin, et al. Evaluation of land conservation and intensive utilization of water environment management projects in the Taihu Lake Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (2): 7-13. (in Chinese))
- [18] 杨洁,许有鹏,高斌,等.城镇化下河流水质变化及其与景观格局关系分析:以太湖流域苏州市为例[J]. 湖泊科学, 2017, 29 (4): 827-835. (Yang Jie, Xu Youpeng, Gao Bin, et al. River water quality change and its relationship with landscape pattern under the urbanization: a case study of Suzhou City in the Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29 (4): 827-835. (in Chinese))
- [19] 周石松,汤玉奇,程宇翔,等.郴州市郴江河流域水质与土地利用关联的空间异质性分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35 (3): 230-240. (Zhou Shisong, Tang Yuqi, Cheng Yuxiang, et al. Spatial heterogeneity of the correlation between water quality and land use in the Chenjiang River Basin, Chenzhou City [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35 (3): 230-240. (in Chinese))
- [20] 王东,李小娃.黄河流域城市群生态韧性时空差异及障碍因子识别[J]. 水利经济, 2025, 43 (6): 81-89. (Wang Dong, Li Xiaowa. Spatio-temporal differences in ecological resilience of urban agglomerations in the Yellow River Basin and the identification of obstacle factors [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43 (6): 81-89. (in Chinese))
- [21] 朱政,朱翔,李霜霜.长江中游城市群空间结构演变历程与特征[J]. 地理学报, 2021, 76 (4): 799-817. (Zhu Zheng, Zhu Xiang, Li Shuangshuang. Evolution process and characteristics of spatial structure of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76 (4): 799-817. (in Chinese))
- [22] 刘耀彬,邱浩,戴璐.生态安全约束下城市群空间网络结构动态演变及关联特征分析:以环鄱阳湖城市群为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54 (4): 522-535. (Liu Yaobin, Qiu Hao, Dai Lu. Spatial network structure dynamic evolution and correlation characteristics analysis of urban agglomeration under ecological security constraint: a case of urban agglomeration around the Poyang Lake [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2020, 54 (4): 522-535. (in Chinese))
- [23] 骆康,郭庆宾.不同尺度下环鄱阳湖城市群生态安全格局变化与优化[J]. 经济地理, 2024, 44 (7): 78-86. (Luo Kang, Guo Qingbin. Pattern evolution and optimization of ecological security in Poyang Lake urban agglomeration at different scales [J]. Economic Geography, 2024, 44 (7): 78-86. (in Chinese))
- [24] 肖长江,石雨鑫,刘涛,等.基于生态系统服务流的环鄱阳湖城市群的横向生态补偿研究[J]. 生态学报, 2025, 45 (24): 1-15. (Xiao Changjiang, Shi Yuxin, Liu Tao, et al. Ecological compensation in Poyang Lake urban agglomeration based on ecosystem services flow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (24): 1-15. (in Chinese))
- [25] 刘耀彬,王鑫磊,刘玲.基于“湖泊效应”的城市经济影响区空间分异模型及应用:以环鄱阳湖区为例[J]. 地理科学, 2012, 32 (6): 680-685. (Liu Yaobin, Wang Xinlei, Liu Ling. The spatial distribution model of urban economic potential zones and its application based on the hypothesis of “lake effect”: the area around the Poyang Lake as a case [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32 (6): 680-685. (in Chinese))
- [26] 刘耀彬,戴璐,张桂波.水环境胁迫下的环鄱阳湖区城市化格局响应[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23 (1): 81-88. (Liu Yaobin, Dai Lu, Zhang Guibo. Response of urbanization pattern surrounding the Poyang Lake to aquatic environment stress [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23 (1): 81-88. (in Chinese))
- [27] 易帆,陈旻,何晓枫,等.流域土地利用分析中空间尺度对水质的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43 (8): 4280-4291. (Yi Fan, Chen Min, He Xiaofeng, et al. Effect of spatial scale on water quality in watershed land use analysis [J]. China Environmental Science, 2023, 43 (8): 4280-4291. (in Chinese))
- [28] Kocer M A T, Sevgili H. Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms [J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 672-681.
- [29] Sun Wei, Xia Chunyu, Xu Meiyang, et al. Application of

- modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 306-312.
- [30] 叶焰中,陈凡,黄廷林. 基于水质综合指数法的亚热带水源型水库水质评价[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 116-124. (Ye Yanzhong, Chen Fan, Huang Tinglin. Water quality evaluation of subtropical water source reservoir using water quality index method[J]. *Water Resource Protection*, 2022, 38(6): 116-124. (in Chinese))
- [31] 孙祖佑,陶士勇,林丽芳,等. 多时空尺度下武汉市景观格局与地表水质的关系[J]. *中国农村水利水电*, 2025(2): 7-16. (Sun Zuyou, Tao Shiyong, Lin Lifang, et al. The relationship between landscape pattern and surface water quality at multiple spatial and temporal scales in Wuhan[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2025(2): 7-16. (in Chinese))
- [32] Allan J D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems[J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2004, 35: 257-284.
- [33] 赵军,杨凯,邹俊,等. 河网城市不透水面的河流水质响应阈值与尺度效应研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(2): 136-142. (Zhao Jun, Yang Kai, Tai Jun, et al. Threshold and scaling effect of impervious surface impact on stream water quality in city with river networks[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(2): 136-142. (in Chinese))
- [34] 王一舒,吴仁人,荣楠,等. 西江下游流域水质与不同空间尺度土地利用的响应关系[J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 97-104. (Wang Yishu, Wu Renren, Rong Nan, et al. Response relationship between water quality in the lower reaches of Xijiang River Basin and land use at different spatial scales[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 97-104. (in Chinese))
- [35] 郭羽羽,李思悦,刘睿,等. 黄河流域多时空尺度土地利用与水质的关系[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 737-748. (Guo Yuyu, Li Siyue, Liu Rui, et al. Relationship between landscape pattern and water quality of the multi-scale effects in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 737-748. (in Chinese))
- [36] 张志敏,杜景龙,陈德超,等. 典型网状河网区域土地利用和景观格局对地表季节水质的影响:以江苏省溧阳市为例[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(5): 1524-1540. (Zhang Zhimin, Du Jinglong, Chen Dechao, et al. Effects of land use and landscape pattern characteristics on seasonal surface water quality in a typical reticulated river network area: a case study of Liyang City, Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(5): 1524-1540. (in Chinese))
- [37] 刘耀彬,戴璐,董玥莹. 环鄱阳湖区分区土地利用景观格局变化模拟研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(10): 1762-1770. (Liu Yaobin, Dai Lu, Dong Yueying. Simulation of landscape pattern change of Poyang Lake area partition[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(10): 1762-1770. (in Chinese))
- [38] 谢慧钰,胡梅,嵇晓燕,等. 2011—2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5585-5597. (Xie Huiyu, Hu Mei, Ji Xiaoyan, et al. Water quality evolution characteristics and pollution factor analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(12): 5585-5597. (in Chinese))
- [39] 赵银军,梁日梅,丁爱中,等. 不同空间尺度景观特征对南流江水质的影响差异[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4954-4964. (Zhao Yinjun, Liang Rimei, Ding Aizhong, et al. Differences in the influence of landscape features on river water quality at different spatial scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4954-4964. (in Chinese))
- [40] 周俊菊,向鹃,王兰英,等. 祁连山东部冰沟河流域景观格局与河流化学特征关系[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(12): 3779-3788. (Zhou Junju, Xiang Juan, Wang Lanying, et al. Relationship between landscape pattern and hydrochemical characteristics of the Binggou River Basin in eastern Qilian Mountains[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(12): 3779-3788. (in Chinese))
- [41] 方娜,刘玲玲,游清徽,等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(12): 5348-5357. (Fang Na, Liu Lingling, You Qinghui, et al. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5348-5357. (in Chinese))
- [42] 郭玉静,王妍,刘云根,等. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1711-1721. (Guo Yujing, Wang Yan, Liu Yungen, et al. The effects of landscape pattern evolution in Puzhehei karst lake wetland littoral zone on water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1711-1721. (in Chinese))
- [43] 王小平,张飞,李晓航,等. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7438-7452. (Wang Xiaoping, Zhang Fei, Li Xiaohang, et al. Correlation analysis between the spatial characteristics of land use/cover-landscape pattern and surface-water quality in the Ebinur Lake area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7438-7452. (in Chinese))
- [44] 赵灿,李毅,吴雷祥,等. 三峡库区多时空尺度土地利用和景观格局对水质的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(2): 48-59. (Zhao Can, Li Yi, Wu Leixiang, et al. Impact of land use and landscape pattern on water quality on multiple temporal and spatial scales in the

Three Gorges Reservoir area [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2024, 35(2): 48-59. (in Chinese))

[45] 杨强强,徐光来,杨先成,等. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响[J]. 生态学报, 2024, 40(24): 9048-9058. (Yang Qiangqiang, Xu Guanglai, Yang Xiancheng, et al. Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang River Watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 40(24): 9048-9058 (in Chinese))

+++++

(上接第 250 页)

[20] Rodriguez-Galiano V F, Ghimire B, Rogan J, et al. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 67: 93-104.

[21] Abedi R, Costache R, Shafizadeh-Moghadam H, et al. Flash-flood susceptibility mapping based on XGBoost, random forest and boosted regression trees[J]. Geocarto International, 2022, 37(19): 5479-5496.

[22] Tan Xuezhi, Li Yi, Wu Xinxin, et al. Identification of the key driving factors of flash flood based on different feature selection techniques coupled with random forest method [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 51: 101624.

[23] 潘伯宁,李文轩,徐力刚,等. 苏州河湖系统浮游植物完整性指数构建及水生态健康评价[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53(05): 73-80. (Pan Boning, Li Wenxuan, Xu Ligang, et al. Construction of phytoplankton index of biotic integrity and evaluation of water ecological health of lake and river systems in Suzhou City [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(05): 73-80. (in Chinese))

[24] 李晓瑛,王华,王屹晴,等. 基于机器学习的长江口溶解氧预测模型与评估[J]. 环境科学, 2024, 45(12): 7123-7133. (Li Xiaoying, Wang Hua, Wang Yiqing, et al. Machine learning-based dissolved oxygen prediction modeling and evaluation in the yangtze river estuary[J]. Environmental Science, 2024, 45(12): 7123-7133. (in Chinese))

[25] 杜云彬,陈求稳,王智源,等. 江苏省典型湖泊饮用水源地安全综合评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 71-78, 92. (Du Yunbin, Chen Qiwen, Wang Zhiyuan, et al. Safety evaluation of typical lake drinking water sources in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 71-78, 92. (in Chinese))

[46] 刘可暄,王冬梅,常国梁,等. 多空间尺度景观格局与地表水质响应关系研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 23-31. (Liu Kexuan, Wang Dongmei, Chang Guoliang, et al. Study on the relationship between landscape pattern and surface water quality at multiple spatial scales[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(2): 23-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 09 - 29 编辑: 胡新宇)

+++++

[26] 樊贤璐,徐国宾. 基于生态-社会服务功能协调发展度的湖泊健康评价方法[J]. 湖泊科学, 2018, 30(5): 1225-1234. (Fan Xianlu, Xu Guobin. Lake health assessment method based on the coordinated development degree of ecology and social service function[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(5): 1225-1234. (in Chinese))

[27] 薛联青,朱祎真,王思琪,等. 基于投影寻踪的湖泊生态健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 67-72. (Xue Lianqing, Zhu Yizhen, Wang Siqi, et al. Lake ecosystem health assessment based on projection pursuit[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 67-72. (in Chinese))

[28] 陈星,许钦,何新玥,等. 城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 77-81. (Chen Xing, Xu Qin, He Xinyue, et al. Research on health evaluation and protection of urban shallow lake ecosystem [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 77-81. (in Chinese))

[29] Murtagh F, André H. Multivariate data analysis [J]. Technometrics, 2006, 19(3): 549-563.

[30] Fawcett T. An introduction to ROC analysis [J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(8): 861-874.

[31] Sokolova M, Lapalme G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks [J]. Information Processing & Management, 2009, 45(4): 427-437.

[32] 陈文龙,吴琼,李一平. 城市河流低水位运行生态修复机制与实践效果[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 16-22. (Chen Wenlong, Wu Qiong, Li Yiping. Ecological restoration mechanism and practical effects of low water level operation in urban rivers [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 16-22. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 11 - 06 编辑: 彭桃英)