

太湖流域江苏片区水质时空特征及其与 景观格局的关联机制

蒋小雨, 杜倩雯, 黄萱, 余冬立

(河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100)

摘要: [目的] 为探究太湖流域汛期和非汛期水质对不同空间尺度土地利用和景观格局的响应关系。[方法] 基于太湖流域江苏片区 2020—2023 年 31 个断面的水质数据和 2020 年土地利用数据, 选取高锰酸钾、溶解氧、氨氮、总磷、总氮及浊度 6 个水质指标和水质污染指标并提取多尺度圆形缓冲区 (100、300、500、1 000、1 500、2 000 m) 内土地利用和景观格局特征。结合冗余分析方法, 确定汛期和非汛期下解释水质的最佳空间尺度和关键影响因子。[结果] 研究区汛期水质整体上优于非汛期, 但溶解氧在非汛期显著高于汛期 ($p < 0.05$)。研究区水质空间分布呈现太湖湖区及其周边水质相对较好, 而东部和南部地区水质较差的整体格局。可能与区域经济活跃度呈现的“南高北低、东强西弱”的发展特征密切相关。300 m 缓冲区为汛期和非汛期景观指数对水质解释能力最强的空间尺度, 并且汛期解释率强于非汛期, 达到 55.9%。类型水平中建设用地的聚合度、耕地的面积占比和破碎度及景观水平中蔓延度、香农多样性指数和边缘密度是影响太湖流域江苏片区水质的主要影响因子。在最佳缓冲区 300 m 范围内, 平均斑块面积、建设用地的聚合度及耕地的面积占比与高锰酸钾、总氮、总磷浓度和浊度呈负相关, 表明景观越破碎, 建设用地斑块越分散, 耕地不存在优势斑块时, 更容易导致水质的恶化。[结论] 研究结果为科学制定土地利用规划和景观格局优化策略提供理论支撑, 有助于提升水质管理的科学性与针对性。特别是在不同季节条件下, 动态调控措施的实施可有效改善水体水质。

关键词: 太湖流域; 水质; 景观格局; 空间尺度; 冗余分析

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0361-10

Temporal and Spatial Characteristics of Water Quality in the Taihu Basin Jiangsu Section Linkage with Landscape Patterns

JIANG Xiaoyu, DU Qianwen, HUANG Xuan, SHE Dongli

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the response of water quality to land use and landscape patterns at different scales during the flood and non-flood seasons in the Taihu Basin. [Methods] Based on water quality data from 31 monitoring sites in the Jiangsu section of the Taihu basin from 2020 to 2023 and land use data in 2020, six water quality and pollution indicators were selected, including potassium permanganate, dissolved oxygen, ammonia nitrogen, total phosphorus, total nitrogen, and turbidity. Then land use and landscape pattern characteristics within multi-scale circular buffer zones (100, 300, 500, 1 000, 1 500 and 2 000 m) were extracted. Finally, redundancy analysis was employed to determine the optimal spatial scale and key influencing factors that explain water quality during the flood and non-flood seasons. [Results] Water quality was generally better during the flood season than during the non-flood season. However, dissolved oxygen levels were significantly higher in the non-flood season than in the flood season ($p < 0.05$). The spatial distribution of water quality within the study

收稿日期: 2025-01-22

修回日期: 2025-02-25

录用日期: 2025-03-01

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-05-13

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700802); 国家自然科学基金项目 (42177393)

第一作者: 蒋小雨 (2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业水土资源保护研究。E-mail: jiangxiaoyu0621@163.com

通信作者: 余冬立 (1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态与水土过程模拟研究。E-mail: shedongli@hhu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

area revealed relatively good water quality in and around Taihu Lake, while water quality was relatively poor in the eastern and southern regions. This spatial variation in water quality was likely associated with the region's uneven economic development, which was characterized by "higher in the south and lower in the north, stronger in the east and weaker in the west". The 300-m buffer zone explained the strongest relationship between landscape metrics and water quality during both the flood and non-flood seasons, with the explanation rate for the flood season reaching 55.9%. The aggregation index of construction land, the percentage and division of farmland at the class level, along with Shannon's diversity index and edge density at the landscape level, were the principal factors influencing water quality in the Jiangsu section of the Taihu basin. Within the optimal 300-m buffer zone, the mean patch area, the aggregation index of construction land, and the percentage of farmland were negatively correlated with water quality and pollution indicators, including potassium permanganate, total nitrogen, total phosphorus, and turbidity. This suggests that more fragmented landscape, more dispersed patches of construction land, and the absence of dominant farmland patches, are associated with the deterioration of water quality. [Conclusion] The findings of this research provide theoretical support for the scientific formulation of land use planning and landscape pattern optimization strategies, thereby enhancing the scientific basis and precision of water quality management. In particular, the implementation of dynamic regulatory measures under varying seasonal conditions can significantly improve water quality.

Keywords: Taihu basin; water quality; landscape pattern; spatial scale; redundancy analysis

Received: 2025-01-22

Revised: 2025-02-25

Accepted: 2025-03-01

Online(www.cnki.net): 2025-05-13

水环境污染问题与人类活动密切相关^[1]。在快速城镇化进程中,土地利用和景观格局的变化已成为影响水环境问题的关键因素。居民住宅区、交通网络、基础设施和工业用地等城镇用地面积持续扩张^[2],不仅显著增加面源污染强度^[3],还重塑景观结构和生态连通性,进而改变河流系统输送污染物的能力,对河流水质产生重要影响。然而,传统的研究方法往往局限于探讨单一土地利用类型与河流水质之间的关系,难以反映土地利用的组合效应和空间结构特征对水质的综合影响。因此,深入理解土地利用和景观格局对河流水质的综合作用可以为制定更有针对性的管理策略提供科学依据。

景观格局与河流水质关系存在明显的尺度依赖性。景观的结构、生态功能在不同空间尺度下表现出明显差异。大量研究探讨了河岸、子流域、流域等不同空间尺度下景观格局对水质的影响^[4-5],但关于最佳研究尺度尚未达成一致。ZHOU等^[6]研究表明,景观类型在小尺度上与水质的相关性更强,而赵鹏^[7]等则发现,流域尺度上的景观指数影响较大。与此同时,污染物的流失强度、形态、分布等特征,随着时间尺度的变化呈现出不同的特征^[8-11]。SHEN等^[12]研究发现,雨季景观特征与流域水质存在更强的相关性;LI等^[13]则指出,长期气候变化通过改变陆地景观格局与河流连通性,导致年际尺度的水质波动加剧。太湖流域作为典型的平原河网区域,其复杂的水系条件和独特的水文特征,

使得尺度效应研究面临更加严峻的挑战。首先,太湖流域的水系结构复杂,汇水边界模糊,对流域、汇水区等传统水文单元划分方法的适用性提出挑战。此外,太湖流域水网密布且河流多向流动的地理特性,加之汛期与非汛期水文条件的显著差异,为流域内水质的季节性变化提供独特的背景^[14]。在汛期,降水量骤增通常引发水位升高、河道流量增大,造成局部洪涝灾害。太湖流域的平缓地势更是导致洪水出路不足,水位易涨难消,加重洪涝影响^[15]。此期间,地下水位上升,水生态系统活性增强,大量降雨可能将陆地污染物冲刷进入水体,同时水体扰动增强可能导致底泥再悬浮。这些因素综合作用,可能引起总氮、总磷等营养物质浓度短期内急剧上升。相比之下,非汛期降水量减少,水位相对稳定且偏低,河道流量减小,洪水风险降低。然而,在流速缓慢、水体交换不畅的局部区域,污染物的滞留现象较为明显,往往导致水质的恶化^[16]。

太湖流域的特殊水文条件和显著的季节性变化为研究水质与景观格局的关系提供独特视角。然而,现有研究多忽视季节性水文特征对水质的影响,特别是汛期和非汛期水文条件差异可能导致景观格局对水质影响机制的季节性变化。虽然已有研究关注土地利用类型与水质的关系,但对景观格局特征如何在不同季节影响水质的理解仍然不足。鉴于此,本研究选取太湖流域江苏片区作为研究区域,基于太湖流域 2020—2023 年 31 个国控断面的水质数

据和2020年土地利用数据,采用以水质监测断面为中心的圆形缓冲区作为水文单位,利用景观格局分析和冗余分析的方法来探索汛期和非汛期水质在不同空间尺度下对土地利用和景观格局的响应关系,旨在找出影响汛期和非汛期水质的最佳空间尺度及关键影响因子,以期为太湖流域的水质保护和土地利用提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的太湖流域江苏片区位于长江下游、江苏省南部($31^{\circ}08'04''\sim 32^{\circ}08'45''N$, $119^{\circ}13'01''\sim 121^{\circ}17'06''E$),涵盖太湖流域北部的武澄锡虞区、阳澄淀泖区、湖西区及太湖湖区(图1)。研究区总面积约19 400 km²,约占太湖流域总面积的52.6%^[17]。该区以平原为主,地势平缓,水网密布,水资源丰富。研究区土壤较为肥沃,灌溉条件便利,光热资源充足,是我国著名的高产稳产地区。主要栽培作物为水稻、小麦、玉米、油菜及棉花,普遍实行稻麦轮作,形成一年两熟的种植制度。该区地理位置优越,交通便利,城镇化水平较高,经济快速发展,工业、农业、公共服务业水平发达,人类活动频繁。土地利用类型以农田、城镇用地和水体为主,草地和林地面积较少。

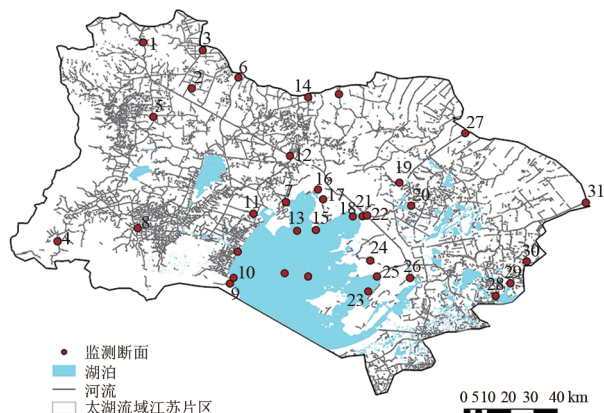


图1 研究区概况及监测断面分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of monitoring sites

研究区属于亚热带季风气候,特点为雨热同期,热量充裕,气象灾害频繁,多年平均气温为15~17℃,多年平均降水量约为1 050~1 200 mm,空间特征为西南多、东北少。多年平均年水面蒸发量为821.7 mm,天然年径流量为160.1亿m³,年径流深438 mm,年径流系数为0.37。根据《太湖流域及东南诸河水情年报》(<https://www.tba.gov.cn>),5—9月为汛期,受梅雨、暴雨、台风影响,降水量多。夏季主要受海洋气团的影响,盛行东南风,气候炎热多雨。冬季受大陆冷气团的控制,盛行偏北风,气候寒冷,降水量相对较少。

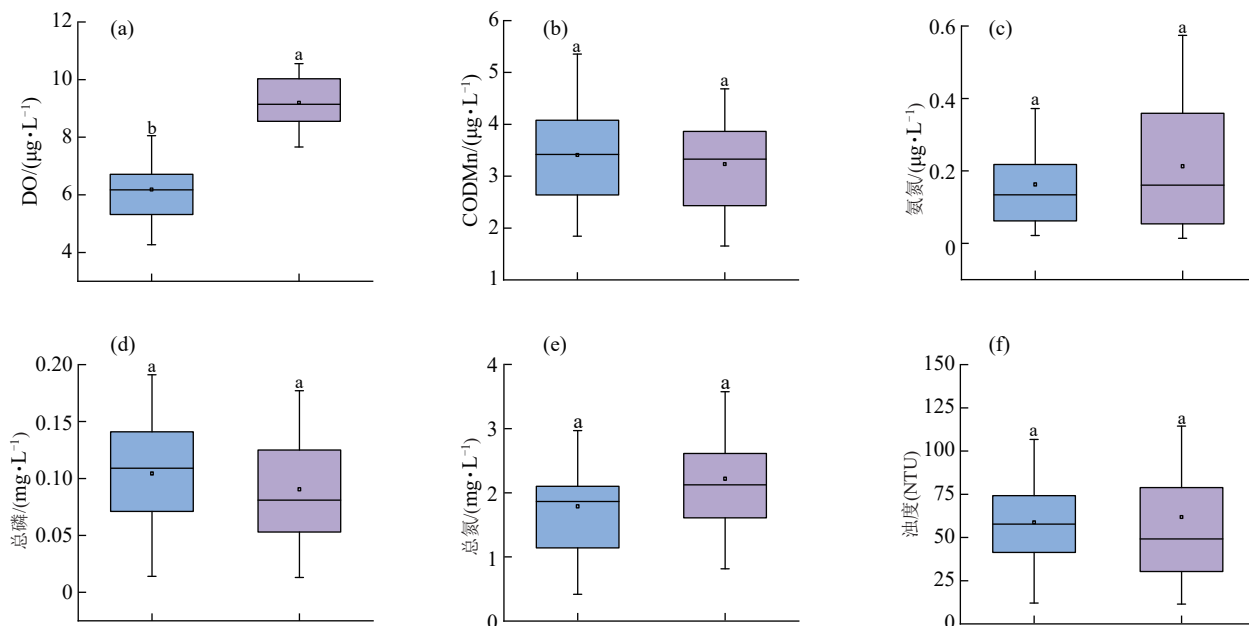
1.2 数据来源

本研究所用水质数据来源于国家水质自动综合监管平台(<https://szzdjc.cnemc.cn:8070/GJZ/Business/Publish/>),选取的监测时间为2020年5月至2023年4月,监测频率为4 h/次。本研究选取太湖流域江苏片区进行分析,共选取31个国控监测断面(图1)。选取的水质指标包括溶解氧和浊度,而水污染指标包括高锰酸钾、氨氮、总磷和总氮^[18]。这些指标能全面反映水体的污染负荷和生态健康状况。具体来说,溶解氧是水生生物维持生命活动的基本条件,若水中溶解氧浓度过低,将威胁水生生物的生存,破坏水体生态平衡。高锰酸钾则反映有机污染的程度,浓度较高通常意味着水体受到较严重的有机物污染。氨氮、总氮和总磷是衡量水体营养水平的关键指标,三者共同决定水体的富营养化程度,过高的浓度可能导致水华等水质问题。浊度则反映水体中悬浮颗粒物的浓度,较高的浊度可能会降低水体透明度,从而影响水生生物的栖息环境。

研究区土地利用数据来源于2020年中国土地利用类型空间分布图(空间分辨率30 m)。经分析,2020—2023年太湖流域各类型土地利用的年际变化幅度均<1%。因此,2020年的土地利用数据可有效反映整个研究期间土地利用状况。同时本研究将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6类。根据国内外关于不同尺度下景观格局对水质响应关系的研究,通常采用100 m作为最小单元,最大空间尺度一般在1 000~2 000 m^[19-20]。结合太湖流域江苏片区的实际情况,本研究以监测点为圆心建立100、300、500、1 000、1 500、2 000 m 6个不同尺度的圆形缓冲区。在此基础上,计算并分析不同空间尺度下各缓冲区的景观组成面积占比和景观指数。为研究景观格局对生态过程的影响,研究人员提出多种景观指数。然而,这些指数之间往往存在多重线性关系,可能导致指标冗余。因此,本研究首先对所有景观指数之间进行Spearman相关性分析,以筛选出不存在显著相关性关系($p<0.05$)的景观指数。之后,将选出来的景观指数和水质进行相关性分析,筛选出与水质存在显著相关性关系($p<0.05$)的景观指数。最终,在景观水平上选择的指数为LPI、ED、MPS、FRAC_AM、CONTAG、SHDI。在类型水平上,针对耕地选择的指数为PLAND_1、CIRCLE_MN_1、DIVISION_1,针对建设用地选择的指数为PLAND_5、CIRCLE_MN_5、AI_5。

1.3 数据处理

为揭示汛期和非汛期水质的变化特征,本研究对 2 个时期的水质指标进行平均值比较,并采用独立样本 t 检验分析 2 个时期水质指标的显著性差异。为明确各影响因子对水质变化的解释贡献率,本研究采用冗余分析(RDA)探讨各因子之间的相关关系^[8]。作为一种多变量统计方法,冗余分析在水环境研究领域得到广泛应用。该方法结合多元回归分析和主成分分析(PCA)的直接梯度排序技术,用于探索响应变量与解释变量之间的复杂关系。本研究使用 CANOCO5.0 软件进行分析,将水质指标浓度值设为响应变量,将土地利用和景观格局指数作为解释变量。通过“前向选择”方法筛选变量,累计解释率用于表征核心指数对水质的影响程度,从而确定最佳缓冲范围并筛选出最具解释力的指标。生成的二维排序图直观表征自变量和因变量之间的关系,其中解释变量箭头的长度表示该变量对水质的影响程度,各影响因子与水质指标夹角小于 90° 为锐角时,表示二者之间呈正相关,夹角大于 90° 为钝角时,则呈负相关,夹角为 90° ,则表示二者之间不存在相关关系。



注:不同字母表示季节之间该指标的差异具有统计学显著性($p < 0.05$);箱体的上下边缘为分位数,箱体实线为中位数,正方形为平均值,箱体外的上短横线为最大值,下短横线为最小值。

图 2 研究区河流水质季节差异特征

Fig. 2 Seasonal variations in water quality of rivers in the study area

2.2 太湖流域江苏片区水质空间变化特征

研究区水质指标同样具有空间分异的特征(图 3)。DO、COD_{Mn}、氨氮、总磷、总氮和浊度的平均值分别为 7.643、3.290、0.198、0.100、2.071 mg/L 和 58.406 NTU。位于太湖湖内及附近的监测断面水质较好,表现为较高的 DO 浓度和较低的氨氮、总磷、总

2 结果与分析

2.1 太湖流域江苏片区水质季节性变化

为探究太湖流域江苏片区水质季节性变化特征,本研究对 31 个监测断面汛期和非汛期的水质进行差异分析(图 2)。结果显示,高锰酸钾(COD_{Mn})和总磷浓度呈现汛期大于非汛期的变化趋势,汛期平均值分别为 3.404、0.107 mg/L,非汛期分别为 3.176、0.092 mg/L。相反,溶解氧(DO)、氨氮、总氮浓度及浊度则呈现非汛期大于汛期的特征。其中 DO 浓度在非汛期(9.135 mg/L)显著高于汛期(6.151 mg/L) ($p < 0.05$)。氨氮、总氮和浊度在非汛期的平均值分别为 0.224、2.292 mg/L 和 59.497 NTU,高于汛期的 0.172、1.850 mg/L 和 57.315 NTU。总体而言,汛期水体主要受磷营养盐和有机物污染,非汛期则以氮营养盐污染为主,且水体较为浑浊。这种季节性差异可能与研究区的气候特征密切相关。该区域属亚热带季风气候,汛期降水量大,导致径流量增加、流速加快,从而增强河流对污染物的稀释能力。

氮浓度和浊度,其平均值分别为 7.852、0.160、0.090、1.939 mg/L 和 47.835 NTU。这一现象凸显湖泊对水质的净化作用。相比之下,位于研究区东部的监测断面水质较差,呈现 DO 浓度较低、COD_{Mn}、氨氮浓度较高的特征,平均值分别为 7.434、3.646、0.240 mg/L。氨氮浓度在研究区呈东高西低分布的格局,东

部监测断面的平均值为0.240 mg/L,明显高于西部的0.156 mg/L。COD_{Mn}浓度则表现为南高北低的分布特征,南部监测断面平均值为3.550 mg/L,北部为2.652 mg/L。值得注意的是,高浓度磷污染在整个太湖流域江苏片区普遍存在。综合分析表明,研究区水质

空间分布呈太湖湖区内及其周边水质相对较好,而东部和南部地区水质较差的整体格局。具体而言,南部地区面临较大的有机物污染风险,东部存在一定程度的氮污染隐患,而整个研究区域普遍存在磷污染风险。

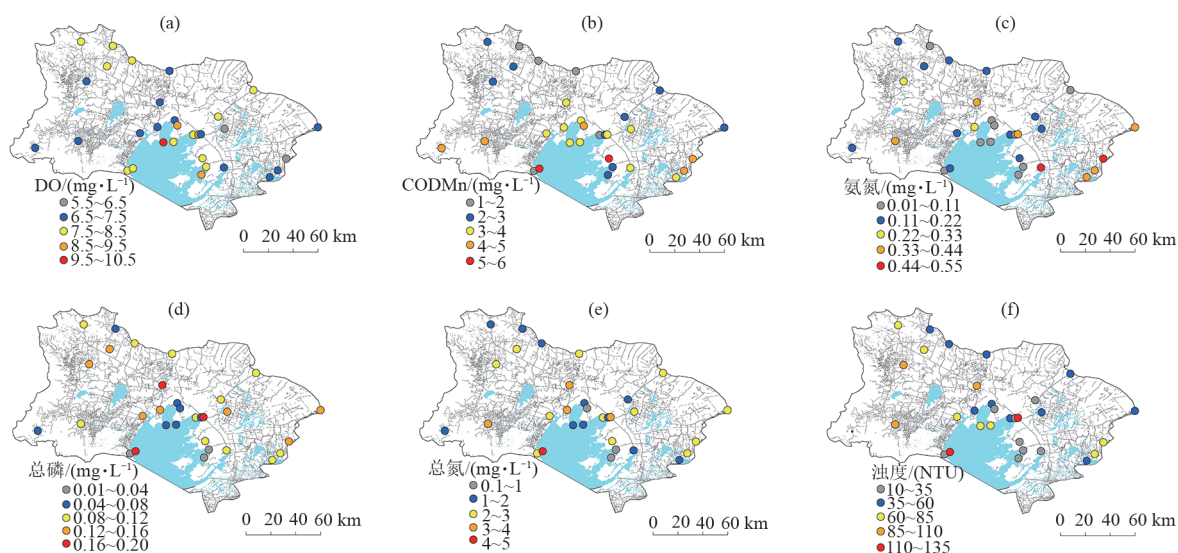


图3 研究区河流水质空间差异特征

Fig. 3 Spatial variations in water quality of rivers in the study area

2.3 太湖流域江苏片区土地利用及其景观格局特征分析

太湖流域江苏片区土地利用类型以耕地、水域、建设用地为主,林地、草地等自然景观所占比例较小,未利用地占比最少,表明该区域以人为活动为主的景观类型占主导地位(图4)。其中,监测断面13、15和23由于位于太湖中,周围土地利用类型以水体为主,且在不同空间尺度的缓冲区内占比均在85%以上;监测断面14、16、18、26和31及监测断面2、7、8、11和2周围则分别以建设用地、耕地为主,在不同空间尺度缓冲区内占比均在50%以上。在不同空间尺度下,缓冲区内的土地利用类型表现出显著差异。随着缓冲区尺度的增加,耕地的面积占比呈现先下降再上升最后再次下降趋势,并在1 000 m缓冲区内达到峰值,达38.7%。建设用地的面积占比则呈现与耕地完全相反的变化趋势,先上升再下降最后再度上升,并在300 m处达到最大值35.9%。水域面积占比则随着缓冲区尺度的增大而持续下降,由100 m处的35.9%降至2 000 m处的25.4%。而林地和草地2种自然土地利用类型总体呈上升趋势,分别从100 m处的0.28%、0增长到2 000 m处的3.4%、0.4%。总体来看,1 000 m缓冲区内人类活动主导的景观比例较高。

不同空间尺度景观指数也呈现差异(表1)。从景观水平分析,随着缓冲区尺度增大,最大斑块指数(LPI)、边缘密度(ED)均呈递减趋势。100 m缓冲区

内的LPI和ED最高,表明该尺度下景观边缘效应最强,且存在明显的优势斑块。与之相反,平均斑块面积(MPS)、蔓延度(CONTAG)和香农多样性指数(SHDI)均随缓冲区尺度扩大而增加,反映出较大尺度范围内斑块间的聚集性和连通性更佳,景观结构更为完整统一,同时呈现更高的复杂性和多样性。加权平均分维数指数(FRAC_AM)在100~2 000 m缓冲区内稳定在1.1,且变异系数较小,说明总体上斑块形状较为规则,该研究区受人为活动的影响较大。从类型水平分析,随着缓冲区尺度的增大,面积-边缘类别方面,耕地的景观类型比例(PLAND_1)和建设用地的景观类型比例(PLAND_5)则呈现相反的变化趋势。随着缓冲区空间尺度的增加,耕地的面积占比先下降再上升最后再次下降;而建设用地的面积占比则呈现与耕地完全相反的变化趋势。总体而言,2种以人类活动为主导的土地利用类型在区域内占据明显优势。形状类别方面,耕地、建设用地的平均相关外接圆指数(CIRCLE_MN_1、CIRCLE_MN_5)平均值均在0.5~0.6,说明斑块形状较为固定,进一步证实人为活动的深刻影响。聚集度类别方面,耕地的景观分离度(DIVISION_1)呈微弱上升趋势,表明随着空间尺度范围的扩大,耕地斑块趋于分散;建设用地的聚集度指数(AI_5)平均值均超过99%,在100 m及300 m缓冲区内最低,说明建设用地普遍高度聚集。

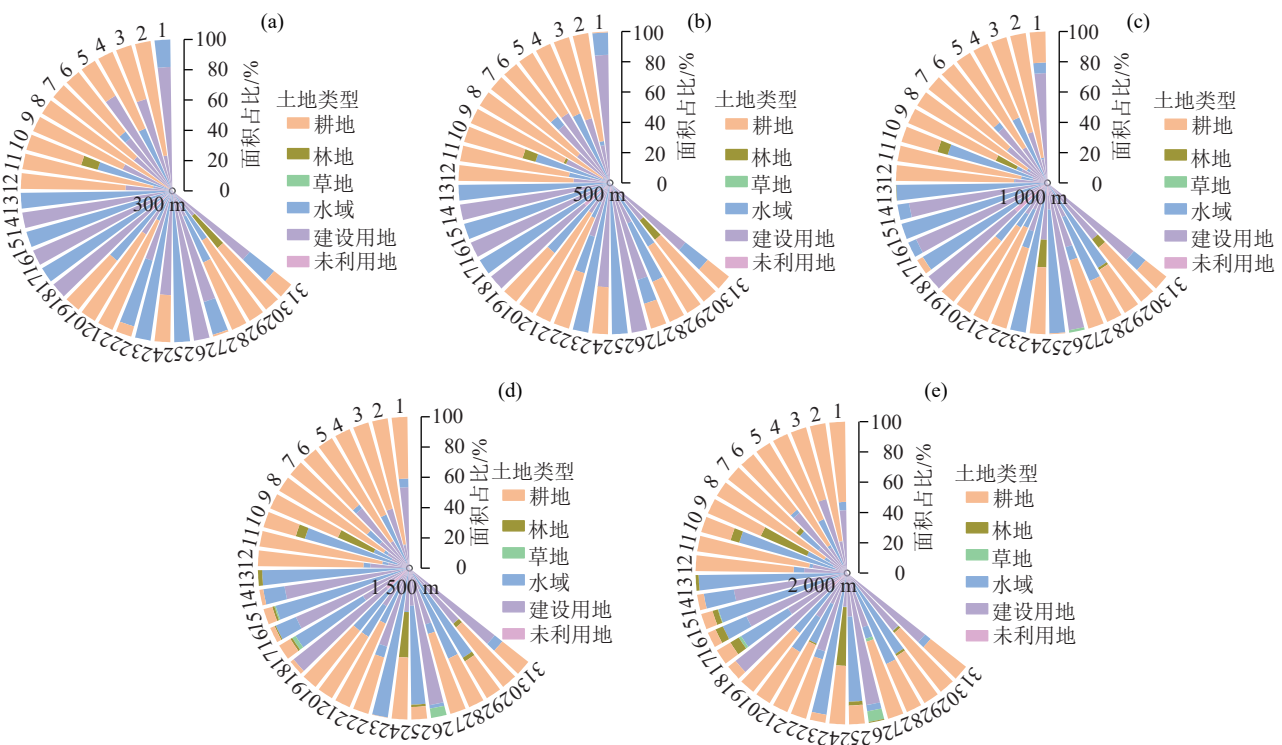


图 4 不同空间尺度土地利用类型面积占比

Fig. 4 Proportional area of different land use types at different spatial scales

表 1 不同空间尺度景观指数统计描述

Table 1 Statistical description of landscape metrics at different spatial scales

类别	景观指数	100 m	300 m	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m
景观水平	最大斑块指数 LPI/%	73.0	71.0	67.5	65.8	60.8	55.8
	边缘密度 ED/(m·hm ⁻²)	112.1	38.7	35.3	29.2	27.5	27.3
	平均斑块面积 MPS/hm ²	1.4	13.1	31.1	66.0	77.9	96.2
	加权平均分维数指数 FRAC_AM	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	蔓延度 CONTAG/%	41.4	44.1	46.8	62.4	67.0	66.7
	香农多样性指数 SHDI	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8
类型水平	景观类型比例 PLAND_1/%	36.1	34.5	36.0	38.7	38.4	37.8
	平均相关外接圆指数 CIRCLE_MN_1	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6	0.6
	景观分离度 DIVISION_1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
	景观类型比例 PLAND_5/%	27.7	35.9	34.8	32.5	32.1	32.5
	平均相关外接圆指数 CIRCLE_MN_5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
	聚合度 AI_5/%	99.2	99.2	99.6	99.5	99.6	99.6

2.4 不同缓冲区景观格局对水质的影响

为探究汛期和非汛期河流水质对土地利用和景观格局响应的最佳空间尺度,本研究对不同特征尺度下景观指数对水质的影响进行冗余分析。RDA 结果表明,景观指数对于汛期水质的解释率排序为 300 m>500 m>100 m>1 000 m>2 000 m>1 500 m, 对非汛期水质的解释率排序为 300 m>100 m>2 000 m>500 m>1 000 m>1 500 m。由此可以得出,300 m 是本研究中所划分的 6 个尺度中解释河流水质的最佳缓冲区尺度,其在汛期和非汛期对水质的解释率分别为 55.9% 和 55.1%(表 2)。同时研究发现,在 1 000 m 范围以内,汛期的景观指数对水质

的解释能力比非汛期更强,而缓冲区尺度超过 1 000 m 时则反之。

核心解释变量分析结果(表 2)显示,AI_5 在汛期 300、500 m 及非汛期 300 m 缓冲区尺度下是对水质影响最显著的变量,贡献率分别达 35.1%,25.3% 和 22.8%。DIVISION_1 在汛期 2 000 m 及非汛期 100、1 000、2 000 m 缓冲区尺度下对水质影响最大,贡献率分别为 38.9%,27.9% 和 42.9%。SHDI 在汛期和非汛期 1 500 m 缓冲区尺度下影响最为突出,贡献率高达 45.8% 和 53.7%。CONTAG、PLAND_1 和 ED 分别在汛期 100、1 000 m 和非汛期 500 m 缓冲区尺度下对水质影响最大,贡献率分别达到 17.7%,39.8%

和 21.9%。表明相较于景观水平,景观格局在类型水平上对研究区水质的影响更为显著。为进一步探讨土地利用和景观格局对水质的影响,本研究在最佳缓冲区 300 m 尺度下作进一步探讨。在最佳缓冲区 300 m 范围内,景观水平上的平均斑块面积 MPS 以及类型水平上的建设用地聚合度 AI_5、耕地景观类型比例 PLAND_1 为主要解释因子,汛期 AI_5 和 MPS 均与 CODMn、总氮、总磷浓度与浊度呈负相关,非汛期 AI_5 和 PLAND_1 也均与 CODMn、总氮、总磷浓度与浊度呈负相关。

表 2 基于冗余分析的不同尺度下景观格局对水质的解释量

Table 2 Explanatory power of landscape patterns on water quality at different scales based on redundancy analysis						
时期	空间尺度/m	解释率/%			主要解释变量	贡献率/%
		第 1 轴	第 2 轴	所有轴		
汛期	100	47.38	0.08	47.5	CONTAG	17.7
					CIR_MN_1	13.2
	300	55.84	0.05	55.9	AI_5	35.1
					MPS	19.4
	500	55.51	0.08	55.6	AI_5	25.3
					PLAND_5	24.8
	1 000	38.96	0.09	39.1	PLAND_1	39.8
					FRAC_AM	13.1
	1 500	22.80	0.09	22.9	SHDI	45.8
					PLAND_5	16.5
	2 000	24.49	0.07	24.6	DIVISION_1	38.9
					MPS	27.5
非汛期	100	43.49	0.04	43.6	DIVISION_1	27.7
					FRAC_AM	24.5
	300	55.05	0.02	55.1	AI_5	22.8
					PLAND_1	21.6
	500	40.21	0.04	40.3	ED	21.9
					PLAND_1	17.5
	1 000	37.09	0.04	37.2	DIVISION_1	27.9
					CONTAG	27.0
	1 500	28.76	0.03	28.8	SHDI	53.7
					PLAND_5	27.2
	2 000	43.33	0.03	43.4	DIVISION_1	42.9
					MPS	20.2

3 讨论

3.1 太湖流域水质时空变化原因

研究区水质的空间分布呈现太湖湖区及其周边水质较好,而东部和南部水质较差的格局。太湖及其周边地区水质较好,主要得益于湖泊的净化作用。相比之下,东部和南部的水质较差,与区域经济活跃度呈现的“南高北低、东强西弱”的发展特征密切相关。东部地区的氨氮浓度较高,主要是由于该区域农业集约化程度较高,化肥施用量大,导致大量氮通过径流进入水体。南部地区水质差主要受到工业聚集的影响。该区域化工、纺织等高污染行业密集,排放的废水中富含有机物和氮污染物,导致 COD_{Mn} 浓度较高。鉴于东部和南部地区面临严重的农业和工业污染问题,恢复和保护湿地及河岸缓冲带将成为改善水质的关键生态修复策略。同时太湖流域江苏

片区的水质在汛期和非汛期存在明显差异,汛期受磷营养盐和有机物污染程度较高,而非汛期受氮营养盐污染更为显著且水体较为浑浊。总体而言,汛期水质总体上优于非汛期,与其他已有研究^[21-22]结果一致。相关研究^[14]指出,太湖流域江苏片区的气候特性,特别是年内降雨量的不均匀分布,是导致水质产生季节性差异的主要原因。在汛期,虽然降雨量骤增,使地表径流汇入水体的各种污染物总量增加,但降雨同时对污染物浓度起到稀释作用。因此,在本研究中,汛期水质总体上优于非汛期,降雨的稀释效应显然超过其冲刷作用。此外,由于汛期水温较高,水体中微生物作用,尤其是反硝化作用得到促进,加速水体中氮的去除,汛期氨氮、总氮的平均浓度低于非汛期。而对于磷污染物而言,总磷在汛期的平均浓度高于非汛期。主要归因于汛期的蓝藻爆发,导致较高的 TP 浓度,而磷是影响太湖

流域藻类异常增殖和水华发生的关键因素^[23]。另一方面,磷在河流中主要以难以被植物和微生物吸收利用的颗粒形态存在,导致微生物对磷的转化和去除量较少。

3.2 土地利用和景观格局对水质影响的尺度效应

景观格局对地表水质存在显著影响,其影响随着尺度的不同而变化,具有显著的尺度效应。在这一问题上,不同学者在不同研究区域下得出不同的结论。徐启渝等^[24]研究表明,针对重金属的变化特征,圆形缓冲区的解释率优于河岸缓冲带,100 m 河岸缓冲带和子流域尺度分别是景观结构影响水体营养盐、重金属变化的最佳空间尺度;王昭擎等^[25]研究表明,土地利用方式在 250 m 缓冲区范围内对辽河保护区水质的解释率最高。在本研究中,不同缓冲区尺度下景观指数对汛期水质变化的总解释率为 22.9%~55.9%,对非汛期水质变化的总解释率为 28.8%~55.1%,其中,300 m 缓冲区尺度下景观指数对汛期和非汛期水质变化的总解释率最大,分别为 55.9% 和 55.1%。由此可知,300 m 缓冲区尺度为太湖流域江苏片区解释水质变化的关键空间尺度。可能是由于在 300 m 缓冲区尺度下,污染的排放距离短,景观与水质存在更为直接的相互作用^[23]。景观所产生的污染物,尤其是由农业活动和城市引起的非点源污染,可以通过地表径流迅速地进入水体,从而对水质产生显著影响。同时,虽然 100 m 缓冲区下雨水的冲刷作用更为直接,但其解释率却低于 300 m 的原因可能是当缓冲区过小时,缓冲区内土地利用类型的异质性较低,无法充分体现土地利用的多样性和复杂性,从而降低对水质的解释力。

本研究表明,在 1 000 m 范围内,汛期景观指数对水质的解释能力优于非汛期,而当缓冲区尺度超过 1 000 m 时,非汛期的解释能力则更强。这种季节性差异主要受降水季节性差异影响。由于汛期降水强度大,径流量高,靠近河道产生的农药、肥料及生产生活废水等污染物更容易随着降雨径流进入河流,导致面源污染的加剧^[7],因此在 1 000 m 范围内,汛期对于水质的解释能力非汛期。相比之下,非汛期降水量减少,径流量较低,此时,1 000 m 范围以外的景观格局更加完整,更能有效反映物质传输过程,从而增加对水质的解释能力。因此,本研究除关注最佳缓冲区 300 m 尺度内景观格局的调整,同时也应关注汛期 1 000 m 范围内的小尺度景观格局,以及非汛期 1 500 m 范围以外的大尺度景观格局的合理规划与管理。

3.3 土地利用和景观格局对水质季节性变化影响程度的差异性分析

RDA 研究结果表明,类型水平中 AI_5、PLAND_1 和 DIVISION_1 及景观水平中 CONTAG、SHDI 和 ED 是影响太湖流域江苏片区水质的主要影响因子。建设用地和耕地作为“源”型景观,是造成水质污染的主要用地类型,与吕乐婷^[23]、朱颖等^[26]的结果一致。建设用地的开发增加不透水面的比例,加速地表径流,削弱土壤和植被对污染物的净化作用^[27],大量污染物通过地表径流进入河流,导致水质恶化;而耕地作为水质非点源污染的重要来源,农药和化肥的过度使用,往往对水质造成负面影响^[28]。

对于 300 m 最佳缓冲区而言,在汛期,MPS、AI_5 为主要的解释因子,且二者均与 COD_{Mn}、总氮、总磷浓度与浊度呈负相关。表明景观破碎度越高,建设用地斑块越分散,将有利于污染物的迁移,加剧水质恶化^[29]。可能是因为汛期强降雨与高破碎度景观、城市斑块共同作用,导致“源景观”之间汇流时间缩短,污染物迁移加速^[27]。然而,破碎化的影响并非绝对还需要与空间位置和自然缓冲带相结合来综合考虑。靠近河道的区域,景观破碎化往往加强对水质的负面影响。同时,河岸缓冲带可以通过物理截留、生物吸收和化学吸附,能够有效减少污染物的迁移。在该研究区,300 m 缓冲区紧邻河道,且区域发展迅速、用地紧张,生态缓冲带极度有限,使得景观破碎化对水质的负面影响被显著放大,最终导致水质恶化。在非汛期,AI_5、PLAND_1 为主要的解释因子,二者同样与 COD_{Mn}、总氮、总磷浓度与浊度呈负相关,表明建设用地斑块集聚程度越高,耕地斑块具有优势斑块类型时,更有利于水环境的治理。与汛期一样,在非汛期,AI_5 依然是主要因素。可能是因为非汛期降雨量较少,点源污染的影响更为突出。随着城市聚集度的提高,污水处理设施逐渐完善,能够有效减少污染物的排放,从而有助于水质的改善。在非汛期,耕地作为“源景观”,其占比增加时水质反而改善,与其他研究^[30]结果不符。主要与污染源的季节性特征和土地利用格局的动态变化有关。具体来说,在非汛期,农业活动相对较少,降雨量较低,农业面源污染的产生和迁移大幅降低。与此相比,尽管城镇地区面源污染有所减少,但由于点源污染(工业废水、生活污水排放等)依然持续存在,并对水质产生较大的影响。在 300 m 缓冲区内,耕地和城镇用地呈现“此消彼长”的变化特征($R^2=-0.423$)。因此,尽管耕地面积的增加可能带来一定的面源污染,但其对水质的负面影响远小于城市点源污染的减少。总体而言,耕地占比的增

加有助于减少区域的整体污染负荷,从而有助于水质的改善。

4 结论

1)水质具有明显的时空分异特征。受降雨的影响,研究区域汛期水质总体上优于非汛期,而DO在非汛期显著高于汛期($p < 0.05$)。研究区水质空间分布呈现太湖湖区及其周边水质相对较好,而东部和南部地区水质较差的整体格局。具体而言,南部地区面临较大的有机物污染风险,东部地区存在一定的氮污染隐患,而整个研究区域普遍存在磷污染风险。可能与区域经济活跃度呈现的“南高北低、东强西弱”的发展特征密切相关。

2)景观格局对水质的影响具有明显的尺度效应。本研究中景观对水质的影响程度最大的尺度为300 m,其对汛期和非汛期水质的解释率分别为55.9%和55.1%。同时管理者需重视汛期1 000 m范围以内小尺度及非汛期1 500 m范围以外大尺度景观格局的合理规划和管理,建议实施河流缓冲区的季节性动态管理。

3)类型水平中建设用地的聚合度、耕地的面积占比和破碎度及景观水平中蔓延度、香农多样性指数和边缘密度是影响研究区域水质的主要影响因素。在最佳缓冲区300 m范围内,景观越破碎,建设用地斑块越分散,耕地不存在优势斑块时,更容易导致水质的恶化,需要更好地优化景观格局以改善水质和防治面源污染。

参考文献:

- [1] XU S, LI S L, ZHONG J, 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: e106999.
- [2] 万荣荣, 杨桂山. 太湖流域土地利用与景观格局演变研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(3): 475-480.
WAN R R, YANG G S. Changes of land use and landscape pattern in Taihu Lake basin [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 475-480.
- [3] 于兴修, 杨桂山. 典型流域土地利用/覆被变化及对水质的影响: 以太湖上游浙江西苕溪流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(3): 211-217.
YU X X, YANG G S. Land use/cover change of catchment and its water quality effects: A case of Xitiaoqi catchment in Zhejiang Province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(3): 211-217.
- [4] 林嘉源, 张帆, 丘丽萍, 等. 不同空间特征尺度下景观格局对水质的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(12): 2998-3007.
- LIN J Y, ZHANG F, QIU L P, et al. Effects of landscape pattern on water quality under different spatial characteristic scales [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(12): 2998-3007.
- [5] 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 Y Y, LI S Y, LIU R, 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.
- [6] ZHOU T, WU J G, PENG S L. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 166-175.
- [7] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 等. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2331-2341.
ZHAO P, XIA B C, QIN J Q, et al. Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [8] SHI P, ZHANG Y, LI Z B, et al. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales [J]. *Catena*, 2017, 151: 182-190.
- [9] PARK J H, INAM E, ABDULLAH M H, et al. Implications of rainfall variability for seasonality and climate-induced risks concerning surface water quality in East Asia [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 323-332.
- [10] ALLAFTA H, OPP C. Spatio-temporal variability and pollution sources identification of the surface sediments of Shatt Al-Arab River, Southern Iraq [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): e6979.
- [11] STETS E G, SPRAGUE L A, OELSNER G P, et al. Landscape drivers of dynamic change in water quality of U.S. rivers [J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(7): 4336-4343.
- [12] SHEN Z Y, HOU X S, LI W, et al. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China [J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 417-427.
- [13] LI L, KNAPP J L A, LINTERN A, et al. River water quality shaped by land-river connectivity in a changing climate [J]. *Nature Climate Change*, 2024, 14: 225-237.
- [14] 连慧姝. 太湖平原水网区氮磷流失特征及污染负荷估算[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
LIAN H S. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss and estimation of pollution load in Taihu Plain water network area [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [15] 吴娟, 林荷娟, 吴志勇, 等. 厄尔尼诺事件对太湖流域降

- 水的影响[J].水文,2017,37(5):60-65.
- WU J, LIN H J, WU Z Y, et al. Influence of El Nino events on rainfall in Taihu basin [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 60-65.
- [16] 范雅双,于婉晴,张婧,等.太湖上游水源区河流水质对景观格局变化的响应关系:以东苕溪上游为例[J].湖泊科学,2021,33(5):1478-1489.
- FAN Y S, YU W Q, ZHANG J, et al. Response of water quality to landscape pattern change in the water source area of upper reaches of Lake Taihu: A case study in the upper reaches of Dongtiaoxi River [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(5): 1478-1489.
- [17] 卞华民.江苏太湖流域水环境时空分异特征及水质预测研究[D].南京:东南大学,2022.
- BIAN H M. Temporal and spatial differentiation characteristics of water environment and water quality prediction in Taihu Lake basin, Jiangsu Province [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [18] 高斌,许有鹏,王强,等.太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1186-1191.
- GAO B, XU Y P, WANG Q, et al. Effects of land use changes on water quality of the plain area in Taihu basin [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(6): 1186-1191.
- [19] 赵军,杨凯,邵俊,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 J, YANG K, TAI J, 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.
- [20] KING R S, BAKER M E, WHIGHAM D F, et al. Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams [J]. Ecological Applications, 2005, 15(1): 137-153.
- [21] 何效婷.太湖西部入湖河道水质对上游流域土地利用/覆被的响应研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- HE X T. Study on the response of water quality in the western Taihu Lake to land use/cover in the upper reaches [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [22] GERGEL S E, TURNER M G, MILLER J R, et al. Landscape indicators of human impacts to riverine systems [J]. Aquatic Sciences, 2002, 64(2): 118-128.
- [23] 吕乐婷,郑晓宇,刘琦,等.非点源污染对景观格局响应的空间尺度效应:以东北太子河流域为例[J].应用生态学报,2024,35(4):1112-1122.
- LYU L T, ZHENG X Y, LIU Q, et al. Spatial scale effects of landscape patterns on non-point source pollution: A case study of Taizi River basin in northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1112-1122.
- [24] 徐启渝,王鹏,舒旺,等.不同空间划分方式下袁河流域景观结构对水质的影响[J].环境科学学报,2020,40(12):4325-4337.
- XU Q Y, WANG P, SHU W, et al. Impacts of landscape structure on water quality under different spatial scales in the Yuan River basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(12): 4325-4337.
- [25] 王昭擎,王育鹏,徐笠,等.辽河保护区不同缓冲区尺度土地利用与水质的响应关系[J].安徽农业大学学报,2023,50(1):137-144.
- WANG Z Q, WANG Y P, XU L, et al. Response relationship between land use and water quality at different buffer scales in Liaohe conservation area [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2023, 50(1): 137-144.
- [26] 朱颖,王怡,贺凤春,等.景观格局对阳澄湖小流域水质变化影响的空间尺度效应[J].水土保持通报,2021,41(2):105-113.
- ZHU Y, WANG Y, HE F C, et al. Spatial scale effect of landscape pattern on water quality change in Yangcheng Lake watershed [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 105-113.
- [27] 顾洋,张平究,秦风约,等.多时空景观格局对南淝河水质的影响[J].农业环境科学学报,2024,43(7):1580-1589.
- GU Y, ZHANG P J, QIN F Y, et al. Impact of multi-temporal and spatial landscape patterns on the water quality of the Nanfei River [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(7): 1580-1589.
- [28] 夏品华,孔祥量,喻理飞.草海湿地小流域土地利用与景观格局对氮、磷输出的影响[J].环境科学学报,2016,36(8):2983-2989.
- XIA P H, KONG X L, YU L F. Effects of land-use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Caohai wetland watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(8): 2983-2989.
- [29] 米秋菊,边玉明,甄立鹏,等.土地利用结构与景观格局对黎河水质的影响[J].水生态学杂志,2024,45(3):78-85.
- MI Q J, BIAN Y M, ZHEN L P, et al. Impacts of land use structure and landscape pattern on water quality in Lihe River [J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(3): 78-85.
- [30] 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 Y J, LIANG R M, DING A Z, 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.