

文章编号: 1000-5854(2026)03-0314-11

北运河流域景观格局对水质变化影响的空间尺度效应

丁 林, 郑子英, 刘 瑾, 王凤花

(河北师范大学 地理科学学院, 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 河北 石家庄 050024)

摘 要: 城市化改变景观格局, 影响污染物的产生与传输过程, 进而影响流域水环境质量. 以北京市北运河流域为研究区, 基于 2014 年 7 月~2015 年 7 月的水质监测数据与土地利用数据, 设置流域及 100、300、500、1 000、1 500 m 河岸带缓冲区共 6 个空间尺度, 采用冗余分析、多元逐步回归分析等方法, 探究城市景观格局对水质变化影响的空间尺度效应. 结果表明, 城市景观格局对水质的影响存在显著的空间尺度效应. 1 000 m 河岸带缓冲区是影响最大的空间尺度, 其对水质变化的解释度为 72.42%. 类型水平上的景观指数对城市河流水质的影响程度高于景观水平上的景观指数. 在 1 000 m 河岸带缓冲区内, 农业用地的斑块密度与景观形状指数 (PDagr, LSIagr) 对河流水质的负面影响最为显著. 因此, 在 1 000 m 河岸带缓冲区内优化农业用地空间布局、降低其景观破碎度与边界复杂度, 有利于改善河流水质.

关键词: 北运河; 缓冲区; 景观格局; 空间尺度

中图分类号: X 522 **文献标志码:** A **doi:** 10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202505007

Spatial Scale Effect of Landscape Pattern on Water Quality Change in North Canal Watershed

DING Lin, ZHENG Ziying, LIU Jin, WANG Fenghua

(Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024, China)

Abstract: Urbanization leads to changes in landscape patterns and alters pollutant production and transport, which in turn affects water environment quality. In this study, based on land use maps and water quality monitoring data from July 2014 to July 2015, six spatial scales, including watershed, 100, 300, 500, 1 000 and 1 500 m riparian buffer zones, were selected in North Canal Watershed of Beijing. Redundancy analysis and multiple stepwise regression analysis were used to study the effect of urban landscape patterns on water environment quality variations at different spatial scales. The results indicated that urban landscape patterns have a significant effect on river water quality, with the 1 000 m riparian buffer zone having the most substantial impact, accounting for 72.42% of the variation in water quality. The impact of landscape metrics at class level on water quality was higher than that at landscape level. The patch density and landscape shape index of agricultural land (PDagr, LSIagr) had the most significant negative effect on riverine water quality in the 1 000 m riparian buffer zone. Therefore, in the 1 000 m riparian buffer zone, the rational layout of agricultural land is emphasized to reduce the fragmentation and boundary complexity of agricultural land, which is beneficial to the improvement of urban river water quality.

收稿日期: 2024-03-24; **修回日期:** 2024-09-23

基金项目: 国家自然科学基金 (41901223); 河北省自然科学基金 (D20205021); 河北师范大学科技类研究基金 (L2020B25, L2022B20)

作者简介: 丁 林 (1999-), 男, 回族, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为流域水环境污染控制.

通信作者: 刘 瑾 (1986-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为流域水环境污染控制. E-mail: bjfulj0522@163.com

Key words: North Canal; buffer zones; landscape patterns; spatial scale

随着全球城市化进程加快,城市人口急剧增长、景观格局剧烈变化,大量污染物排入水体,严重威胁着水生生态系统和人体健康^[1].近年来,随着对工业污水和生活污水等点源污染控制水平的提高,非点源污染已成为城市水环境恶化和水生生态系统退化的主要原因^[2-3].景观格局是影响非点源污染产生、传输和转化过程的重要因素之一^[4].城市化引起的景观格局改变,主要表现在道路、建筑用地等不透水地面增加,而绿地、水体等自然景观减少并日益破碎化,从而对城市水文过程产生影响,增加了降雨径流量和峰值,最终形成严重的城市非点源污染问题^[5-7].因此,研究景观格局与水环境质量的关系,对综合治理城市流域水环境污染问题具有重要意义.

国内外已有众多学者对景观格局与水环境质量的关系进行研究,并证明景观格局与水环境质量之间存在一定的空间尺度效应.王小平等^[8]以新疆艾比湖区域为研究对象,研究 5 种河岸带缓冲区尺度下土地利用/覆被-景观格局对河流水质的影响,结果表明 4 km 河岸带缓冲区内的土地利用/覆被-景观格局对区域水质解释度最高.徐启渝等^[9]探讨了袁河流域不同空间尺度下景观格局对水体营养盐的影响,结果表明 100 m 河岸缓冲带是景观结构影响水体营养盐的最佳空间尺度.项颂等^[10]以洱海西部入湖河流及其小流域为例,分别在小流域及 30、60、90 m 河岸带缓冲区尺度下建立景观组成与入湖河流水质的关系,结果表明景观组成对河流水质影响最大的空间尺度为小流域尺度.方娜等^[11]研究认为,1 000 m 河岸带缓冲区内的景观格局对鄱阳湖水质变异的解释度最大.因此,景观格局对水质影响的空间尺度效应具有区域性和非稳态性,景观格局影响水质分异性的最优空间尺度仍存在争议,有必要对景观格局与水质的空间尺度效应做进一步研究.

北运河是北京市重要的排水通道,承担着北京市中心城区(6 城区)90%的排水任务,其水环境质量对城市环境有着重要的影响,其治理与完善将非常重要^[12].本文中,笔者以北京市北运河为研究区域,选取 25 个水质监测断面,通过实地监测获得水质数据,建立北运河流域不同空间尺度下的河岸带缓冲区,采用冗余分析探讨城市景观格局对水质影响的空间尺度效应,识别影响最大的空间尺度.基于层次分割分析及多元逐步回归分析,进一步筛选影响水质空间变异的显著景观变量,从而为北运河流域的综合治理提供理论依据.

1 研究方法

1.1 研究区概况

北运河水系是北京市五大水系之一,上游温榆河发源于燕山南麓,水系干流经通州杨洼闸流出北京市境.北京境内流域面积 4 423 km²,河道总长 89.4 km.北运河以通州北关闸为界,上游为温榆河,下游始称北运河,其主要支流包括清河、坝河、小中河、凉水河、凤河及凤港减河.研究区属温带季风气候,夏季炎热多雨、冬季寒冷干燥,年平均气温 10~12 °C,降雨主要集中于 6~8 月.北运河承担北京市 90%的排洪任务^[13],其水质状况可反映北京市河流的基本污染状况.

1.2 数据采集与处理

1.2.1 河流水质监测

北运河流域河网密布,为充分揭示城市景观格局与水质的相关关系,本文综合考虑河流水文特征及河流流经区域景观格局差异,在干流及一级支流上共选取 25 个代表性监测断面,具体分布如图 1 所示.2014 年 7 月~2015 年 7 月,在 25 个监测断面采集河水水样,采样频次为 1 次/月.水样贮存于 600 mL 聚乙烯瓶中,4 °C 保存,用于后续水样分析.选取总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、化学需氧量(COD)、溶解性反应性磷(SRP)共 6 项水质指标进行测定,各项指标均按照国家标准方法进行分析测定^[14].根据北京市气候特点,将 2014 年 10 月~2015 年 5 月划分为干季,将 2014 年 7~9 月、2015 年 6~7 月划分为湿季.

1.2.2 河网提取

基于数字高程模型(DEM)数据(30 m 精度,地理空间数据云下载 <http://www.gscloud.cn/>),利用 SWAT 模型划定流域边界并进行河网提取.由于研究区域处于平坦的华北平原,河流的具体提取方法采用平原地区河网信息提取方法^[15-16].

1.2.3 缓冲区的建立与景观格局指数的计算

不同空间尺度下城市景观对水环境的影响存在显著差异,流域尺度与河岸带缓冲区被广泛用于分析景观格局对水质影响的尺度效应^[17-18].北运河流域位于城市区域,景观变化较为强烈,在缓冲区划分时,结合文献[8,19-21]及北运河流域的现状,借助 ArcMap 10.8 软件,以河流为中心,分别建立北运河流域 100、300、500、1 000、1 500 m 河岸带缓冲区.

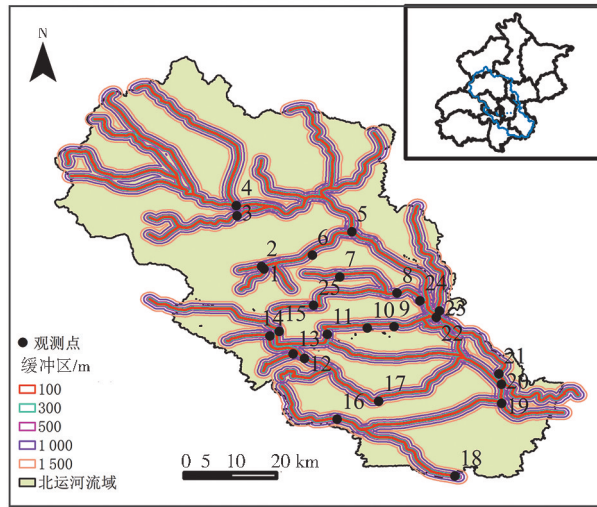


图 1 北运河流域观测点及不同尺度的缓冲区示意图

Fig.1 Location of North Canal Watershed Showing the Monitoring Sites and the Buffer Zones with Different Widths

将河流缓冲区矢量数据与土地利用矢量数据相叠加,获得不同缓冲区下的土地利用数据.借助 Fragstats 4.2 软件计算得出不同空间尺度下的景观指数,即景观水平上的斑块密度(patch density, PD)、边缘密度(edge density, ED)、最大斑块指数(largest patch index, LPI)、景观形状指数(landscape shape index, LSI)、周长-面积分维数(perimeter-area fractal dimension, PAFRAC)、蔓延度指数(contiguity index, CONTAG)、散布与并列指数(interspersion and juxtaposition index, IJI)、景观分割度(landscape division index, DIVI)和香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI);类型水平上的斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、最大斑块指数(LPI)、散布与并列指数(IJI)、景观分割度(DIVI)与景观形状指数(LSI).具体计算方法及生态学意义见表 1.

表 1 景观水平与斑块类型水平的景观指数汇总

Tab.1 Landscape Metrics at Landscape and Class Levels Used in This Study

景观指数	生态学意义
PD	单位面积内斑块个数,反映景观破碎度及某一景观类型的破碎度
LPI	反映景观的优势斑块类型,间接反映人类活动方向和强度
ED	景观中所有斑块边界总长度除以景观总面积,反映景观格局的边缘效应
LSI	反映斑块形状复杂度,LSI 越大,说明斑块形状变化越快,形状越不稳定
PAFRAC	反映景观形状复杂程度,指数值越接近 1,景观斑块形状越简单,越接近 2 则越复杂
CONTAG	反映景观不同斑块类型的聚集程度,值越大说明该斑块类型连接性较好,值越小则景观破碎度较高
IJI	反映斑块类型的散布程度,当某斑块类型与其他斑块类型均匀连接时值最大
DIVI	反映景观的分异程度,值越大分布越分散
SHDI	反映景观中斑块多样性,值越大景观中各斑块类型分布越均衡

1.2.4 冗余分析与回归分析

使用 RStudio 4.2.1 软件对北运河 TP、TN 等水质指标进行去趋势对应分析(detrended corresp analysis, DCA),得到最长梯度长度为 0.9(<3),因此选用冗余分析(redundancy analysis, RDA)方法探究景观格局对水质总体分异的影响^[10,22].将北运河水质指标作为响应变量,各空间尺度景观指数作为解释(环境)

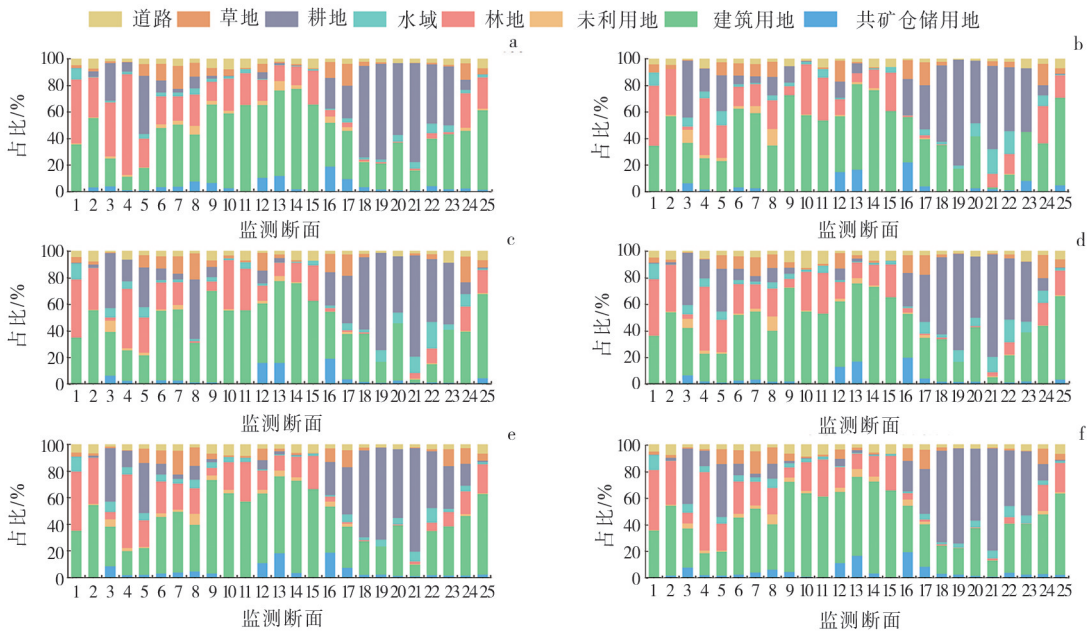
变量,基于 R 4.2.1 软件进行冗余分析及层次分割分析.由于干季水质指标与景观指数的相关性较小,因此采用湿季数据进行冗余分析.为消除景观指数间的多重共线性,剔除方差膨胀因子(VIF) >10 的景观指数,然后使用前向选择法筛选对水质具有显著影响的景观指数^[23].为解析各景观指数的相对重要性,采用层次分割法分析景观指数与水质指标之间的关系.去趋势对应分析(DCA)与冗余分析(RDA)使用 R 语言 vegan 包,层次分割分析采用 rdacca.hp 包^[24].

采用 Shapiro-Wilk 检验对水质指标与景观指数进行正态性检验,并对不符合正态分布的部分数据进行 Box-Cox 变换,以满足正态分布要求.采用逐步线性回归方程分析景观格局与单个水质指标间的相关关系,将显著性水平 $p < 0.05$ 的景观指数纳入回归方程.上述分析均在 SPSS 26.0 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 不同空间尺度下土地利用类型分析

如图 2 所示,不同尺度河岸带缓冲区的土地利用类型占比不同.随着空间尺度的增大,水域、草地和道路面积占比呈逐渐下降趋势,均在流域尺度达到最低.各河岸带缓冲区建筑用地面积占比均高于流域尺度,在 1 000 m 缓冲区达到峰值,为 32.66%.林地面积占比在 100 m 河岸带缓冲区最小,在流域尺度最大.林地通常被认为是城市非点源污染的汇景观,通过截留、吸附污染物等方式净化水质.林地面积占比的空间变化特征表明,北运河流域河岸带林地建设有待进一步加强.



a.流域; b~f.分别为 100、300、500、1 000、1 500 m 缓冲区.

图 2 北运河流域不同尺度缓冲区景观类型占比

Fig.2 Proportions of Landscape Types in Different Scales of North Canal Watershed

2.2 不同空间尺度下景观指数分析

景观指数是高度浓缩景观格局信息,反映景观组成和空间配置特征的定量指标^[25].不同河岸带缓冲区在景观水平上的景观指数差异显著,具体如图 3 所示.PD 在 100 m 缓冲区最大(19~121 个/km²),并随缓冲区宽度增加呈下降趋势;PD 在 1 500 m 缓冲区及流域尺度时较小,分别为 10~68、8~66 个/km²,说明距离河流越近,景观破碎程度越高.CONTAG、IJI 与 SHDI 指数呈波动变化.CONTAG 与 IJI 均在 100 m 缓冲区最小,而在流域尺度最大.SHDI 在 1 000 m 缓冲区最大,说明该缓冲区内景观异质性较高.LSI 与 PAFRAC 反映了景观形状的复杂度.LSI 随缓冲区宽度增加呈上升趋势,在 1 500 m 缓冲区达峰值.PAFRAC 波动幅度较 LSI 小,在 1 000 m 缓冲区达峰值,说明离河流越远,景观形状越复杂.

2.3 河流水质分析

北运河流域 25 个监测点的水质指标数据如表 2 所示.COD、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TN、TP 与 SRP 浓

度平均值均呈干季大于湿季的趋势,干季水质指标含量空间变化幅度较湿季更大.对照地表水环境质量标准(GB 3838—2002),TP与 NH_4^+-N 浓度超过V类水质标准的监测点达67%以上,TN浓度超V类水质标准的监测点达97%,说明北运河流域水环境质量总体较差,而且氮磷污染较重,需进行综合治理与改善.

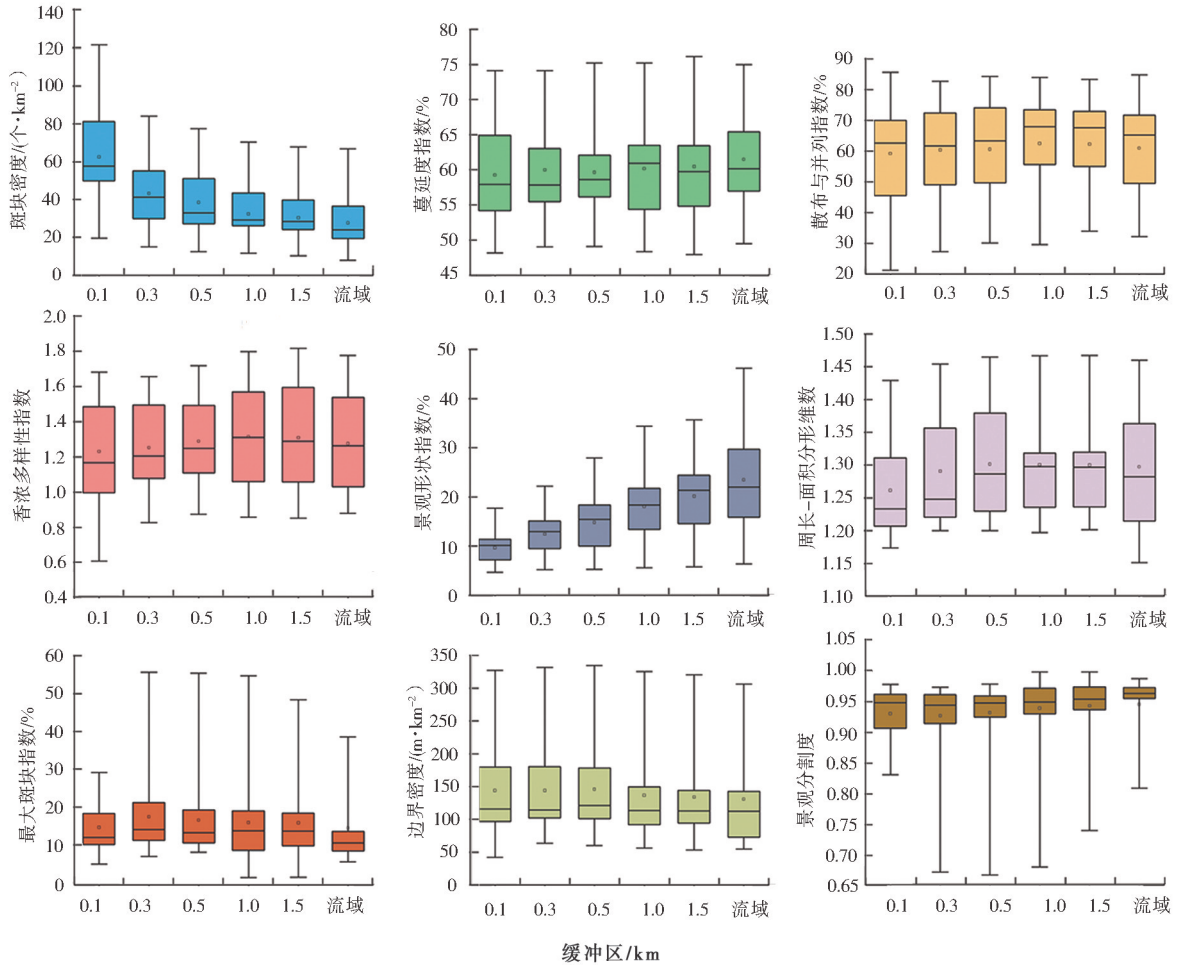


图3 不同缓冲区内景观水平指数统计

Fig.3 Statistics of Landscape Pattern Indexes in Different Buffers

表2 北运河流域水质指标的描述性统计特征

Tab.2 Descriptive Statistics of Water Quality Indicators of North Canal Watershed

水质指标	干/湿季	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	偏度	峰度
COD	干	1.00	335.00	47.80	42.00	37.45	3.16	18.19
	湿	2.00	112.00	27.25	34.00	22.72	0.97	1.02
NO_3^--N	干	0.01	25.00	5.19	4.07	5.34	1.33	1.54
	湿	0.01	17.10	3.83	1.59	4.59	1.28	0.68
NH_4^+-N	干	0.03	57.70	9.53	7.48	8.57	1.57	0.34
	湿	0.03	31.60	6.62	4.27	6.75	1.24	1.54
TN	干	0.11	136.00	17.30	16.90	11.84	5.11	50.22
	湿	1.52	52.30	14.98	9.36	12.69	1.16	1.58
SRP	干	0.01	17.20	2.86	1.76	3.14	1.47	2.37
	湿	0.03	15.30	2.65	1.76	2.66	1.64	3.81
TP	干	0.03	7.09	1.29	0.89	1.56	1.32	1.99
	湿	0.03	6.10	1.16	0.82	1.08	1.58	3.25

mg/L

2.4 北运河流域水质指标与景观指数冗余分析

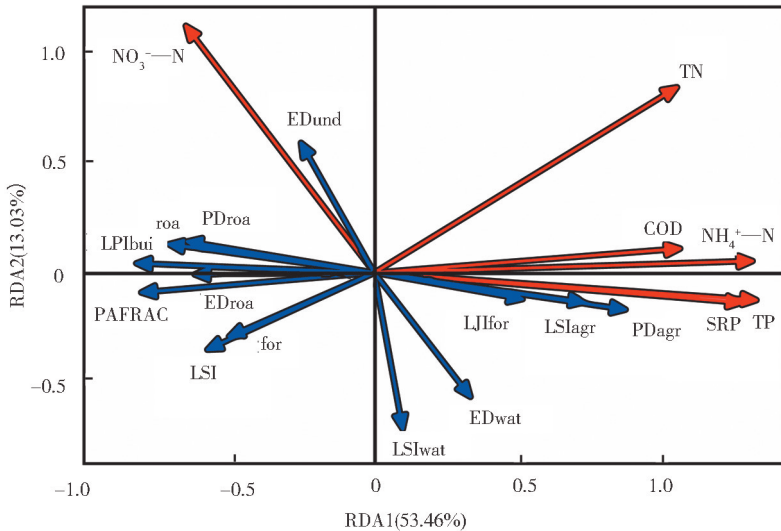
结合文献[19]及北运河流域景观格局的特点,选择湿季水质指标进行后续分析.由冗余分析结果(见表3)可知,全流域及各缓冲区尺度下景观指数对水质指标变化的解释率均高于50%,前2轴的累积解释率占总解释率的90%以上,表明景观格局是影响湿季北运河水质变异性的的重要因素,且RDA二维排序轴可有效反映景观格局与水质的关系.不同空间尺度上的景观指数对水质指标的影响存在差异性.流域尺度上,景观指数对水质指标的解释率为60.67%;河岸带缓冲区尺度中,500 m缓冲区的解释率最低,为52.27%,1 000 m缓冲区的解释率最高,为74.22%.这表明该空间尺度的景观格局对水质指标的影响最大,需进一步对该空间尺度进行探讨.

表3 水质指标与景观变量冗余分析结果

Tab.3 Results of Redundancy Analysis of Water Quality Indicators and Landscape Variables

缓冲区/m	特征值		水质指标与景观变量相关性的累积百分比/%		解释率/%	p 值
	轴 1	轴 2	轴 1	轴 2		
流域	0.453	0.102	74.74	91.59	60.67	0.001
100	0.419	0.096	82.05	92.14	58.12	0.001
300	0.455	0.125	82.05	92.14	63.10	0.001
500	0.429	0.053	82.05	92.14	52.27	0.002
1 000	0.535	0.130	77.59	90.71	72.41	0.001
1 500	0.414	0.070	77.59	90.71	53.40	0.001

二维 RDA 排序结果(见图4,RDA1和RDA2的解释率分别为53.46%和13.03%,累积解释率达66.49%)表明,在1 000 m河岸带缓冲区,景观水平上表征景观形状特征的PAFRAC和LSI,均与TN、NH₄⁺-N、COD、SRP、TP呈负相关.在斑块类型水平上,耕地斑块密度(PDagr)、耕地景观形状指数(LSIagr)和林地散布并列指数(IJIfor),均与TN、NH₄⁺-N、COD、TP、SRP呈正相关,与NO₃⁻-N呈负相关.而未利用地边界密度(EDund)、建筑用地最大斑块指数(LPIbui)、道路斑块密度(PDroa)和道路边界密度(EDroa)与上述水质指标的关系相反.此外,水域边界密度(EDwat)和水域景观形状指数(LSIwat)与NO₃⁻-N呈负相关.



agr.耕地; for.林地; wat.水域; roa.道路; bui.建筑用地; und.未利用地.

图4 1 000 m 河岸带缓冲区水质指标与景观指数二维排序图

Fig.4 RDA Ordination Chart of Landscape Indexes and Water Quality Indicators of 1 000 m Buffer Zone

2.5 北运河流域景观指数对水质指标影响的层次分割分析

采用层次分割法量化分析 1 000 m 缓冲区单项景观指数对水质指标空间分异的影响,结果如表 4 所示.总体而言,斑块类型水平上的景观指数对水质分异的解释率达 72.19%,对水环境质量影响较大.不同土地利用类型的最大斑块指数 LPI、斑块密度 PD、景观形状指数 LSI 和边界密度 ED 的解释力显著,其中 LPIbui 和 PDagr 的解释率较高,分别为 16.51% 和 13.78%,合计占总解释率的 41.83%.引入 PAFRAC 与 LSI 后,景观指数对水质分异的累积解释率达到 43.70%,占总解释率的 60.35%.

表 4 景观指数对水质指标变异的相对贡献率

Tab.4 Relative Contributions of Landscape Metrics to the Variation of Water Quality Parameters

解释变量	<i>p</i> 值	贡献率/%
LPIbui	0.001	16.51
PDagr	0.001	13.78
PAFRAC	0.001	7.21
LSI	0.008	6.20
LSIagr	0.001	4.91
EDund	0.011	3.96
roa	0.001	3.92
PDroa	0.003	3.91
EDwat	0.018	3.19
for	0.023	2.82
LSIwat	0.017	2.74
EDroa	0.004	2.20
IJIfor	0.033	1.07

2.6 北运河流域景观指数与水质指标的逐步线性回归分析

采用逐步线性回归方程进一步分析 1 000 m 缓冲区尺度下景观格局对各水质指标的影响,结果表明(见表 5),湿季各水质指标与景观指数均呈较强的相关性($R^2 > 0.62$).景观水平上的景观指数均未进入回归方程,进入方程的多为类型水平上表征景观破碎度的 PD、LPI 及 ED 等指数,说明该空间尺度下,景观破碎度对水质影响较大,其中 LPIagr 与 COD 呈正相关.PDagr 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈负相关,而与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈正相关.SRP 及 TP 则主要受 EDagr 和 LPIbui 的影响,与 EDagr 呈正相关,而与 LPIbui 呈负相关.此外,EDbui 和 PDroa 均与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈负相关;而未利用地的景观指数 LPIund 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈负相关,DIUIund 与 TN 呈正相关.在研究中林地对 TN 影响较大,LSIfor 与 TN 呈负相关.

表 5 景观指数与水质指标的逐步回归分析结果

Tab.5 Stepwise Multiple Regression Analysis Results of Water Quality Indicators and Landscape Metrics

水质指标	回归方程	R^2	调整 R^2	<i>p</i> 值
COD	$\text{COD} = 2.602 + 1.116\text{LPIagr}$	0.740	0.729	***
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N} = 3.188 - 1.955\text{PDagr} - 2.467\text{LPIund}$	0.662	0.632	***
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N} = 12.73 - 2.185\text{EDbui} + 1.757\text{PDagr} - 3.722\text{PDroa}$	0.875	0.857	***
TN	$\text{TN} = 5.685 - 0.11\text{LSIfor} + 1.663\text{DIUIund}$	0.654	0.622	***
SRP	$\text{SRP} = 0.333\text{EDagr} - 0.062\text{LPIbui}$	0.858	0.846	***
TP	$\text{TP} = -1.008 + 0.255\text{EDagr} - 0.033\text{LPIbui}$	0.868	0.856	***

注:*.在 0.05 水平上显著;**.在 0.01 水平上显著;***.在 0.001 水平上显著.

3 讨论与结论

3.1 讨论

目前,对于城市景观格局与水质关系的尺度依赖性问题尚未有定论.有研究表明,不同河岸带缓冲区与子流域尺度下景观指数对水质指标的解释能力无显著差异^[26-27].而一些研究认为在100、300、400 m等小空间尺度下景观格局对河流水质的影响最大^[9,28-29].由研究可知,北运河流域景观格局对水质变异解释程度最高的空间尺度为1 000 m河岸带缓冲区,解释率为72.42%.文献[30-32]对上海、惠州、福州等城市景观格局空间变异特征的研究均表明,相较于更小空间尺度,1 000 m尺度更适宜用于景观格局研究,这与本研究结果相一致.因此,在北运河1 000 m河岸带范围内设计汇景观,强化缓冲区对污染物的截留与净化能力,将成为城市河流水质治理与改善的重要途径.

景观指数可在一定程度上反映研究区的社会及经济状况,进而揭示人为因素在景观格局中的作用^[22].由研究可知,PDagr、LSIagr及EDagr等表征农业用地破碎度的景观指数均与 NH_4^+-N 、SRP、TP水质指标呈正相关,表明破碎化的农业用地会促进氮、磷进入河流,农业用地化肥的过度施用造成的氮、磷等营养物淋失可能是其主要原因之一^[33].建筑用地对水质的影响是复杂的,有研究表明,随着建设用地的增加,污染物会随着雨水冲刷到河流,造成河流水质下降^[34-36].本研究中,LPIbui与SRP、TP等多数水质指标呈负相关,说明大面积的建筑用地并未对水环境产生较大的负面影响.原因可能为大面积的建筑用地主要分布在主城区,污水处理效率较高,并且街道清扫等城市管理措施较为完善,从而降低了进入河流的污染物质^[37-38].

3.2 结论

以北京市北运河为研究区域,基于水质数据及土地利用数据,通过冗余分析、层次分割分析以及逐步线性回归分析,研究流域尺度及不同河岸带缓冲区下城市景观格局对河流水质的影响.

1) 城市景观格局对水质的影响存在明显的空间尺度效应,1 000 m河岸带缓冲区是影响最大的空间尺度,对水质变异的解释度为72.42%.

2) 在反映景观组成及空间配置的景观指数中,类型水平上的景观指数对水质的影响(56.19%)高于景观水平上的影响(13.41%),不同土地利用类型的合理空间配置可能有利于减少迁移至河道的污染物质.

3) 1 000 m河岸带缓冲区内,PDagr、LSIagr对河流水质的负面影响最为显著.因此,在1 000 m河岸带缓冲区内,重视农业用地的合理布局、降低农业用地的破碎度及边界复杂度有利于河流水质的改善.

参考文献:

- [1] 宋治清,王仰麟.城市景观及其格局的生态效应研究进展[J].地理科学进展,2004,23(2):97-106.doi:10.11820/dlkxjz.2004.02.012
SONG Zhiqing, WANG Yanglin. Progress in Research on Ecological Impact of Urban Landscape Structure[J]. Progress in Geography, 2004, 23(2): 97-106.
- [2] LEOPOLD L B. Hydrology for Urban Land Planning: A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use[J]. US Geological Survey, 1968, 554: 1-18.
- [3] DODDS W K, OAKES R M. Headwater Influences on Downstream Water Quality[J]. Environmental Management, 2008, 41(3): 367-377. doi: 10.1007/s00267-007-9033-y
- [4] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39. doi: 10.13227/j.hjkx.2004.06.007
YANG Liu, MA Keming, GUO Qinghai, et al. Impact of the Urbanization on Waters Non-point Source Pollution[J]. Environmental Science, 2004, 25(6): 32-39.
- [5] ARNOLD C L, GIBBONS C J. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator[J]. Journal of the American Planning Association, 1996, 62(2): 243-258. doi: 10.1080/01944369608975688
- [6] 徐涵秋. 城市不透水面与相关城市生态要素关系的定量分析[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2456-2462. doi: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2009.05.032

- XU Hanqiu, Quantitative Analysis on the Relationship of Urban Impervious Surface with Other Components of the Urban Ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2456-2462.
- [7] 谢慧君, 李崇巍, 张亚娟, 等. 基于光谱混合分解的流域不透水面提取及其动态分析: 以于桥水库为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(10): 34-37. doi: 10.3969/j.issn.1672-5867.2015.10.011
- XIE Huijun, LI Chongwei, ZHANG Yajuan, et al. Dynamic Analysis of Impervious Surface Based on Spectral Mixture: Taking the Yuqiao Watershed as an Example[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2015, 38(10): 34-37.
- [8] 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. doi: 10.5846/stxb201701100078
- 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.
- [9] 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. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0347
- XU Qiyu, WANG Peng, SHU Wang, 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.
- [10] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 等. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 876-885. doi: 10.5846/stxb201612192610
- XIANG Song, PANG Yan, DOU Jiashun, et al. Impact of Land Use on the Water Quality of Inflow River to Erhai Lake at Different Temporal and Spatial Scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 876-885.
- [11] 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. doi: 10.13227/j.hjkk.201903267
- 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.
- [12] 郭婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(5): 1511-1518. doi: 10.13227/j.hjkk.2012.05.025
- GUO Jing, JING Hongwei, LI Jinxiang, et al. Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1511-1518.
- [13] 孙迪. 推进北运河综合治理, 构建优美宜居水环境[J]. *中国水利*, 2010(12): 18-19. doi: 10.3969/j.issn.1000-1123.2010.12.009
- SUN Di. Promote the Comprehensive Management of the North Canal to Build a Beautiful Livable Water Environment[J]. *China Water Resources*, 2010(12): 18-19.
- [14] 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 1-836.
- State Environmental Protection Administration, Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods Editorial Board. *Analytical Methods for Water and Wastewater Monitoring*[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Press, 2002: 1-836.
- [15] 罗运祥, 苏保林, 李卉, 等. 平原河网地区 SWAT 模型子流域概化方法[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(4): 415-418.
- LUO Yunxiang, SU Baolin, LI Hui, et al. Sub-basin Delineation Methods for SWAT Model in Plain River Network Region[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2011, 47(4): 415-418.
- [16] HUA Z, HUANG G. Building Channel Networks for Flat Regions in Digital Elevation Models[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 23(20): 2879-2887. doi: 10.1002/hyp.7378
- [17] 李昆, 谢玉静, 孙伟, 等. 农业主产区湖泊水质对湖滨带多尺度景观格局的空间响应[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(6): 2057-2066. doi: 10.13287/j.1001-9332.202006.036
- LI Kun, XIE Yujing, SUN Wei, et al. Spatial Response of Lake Water Quality to Multi-scale Landscape Pattern of Lakeside Zone in Agricultural Watershed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(6): 2057-2066.
- [18] 黄金良, 李青生, 洪华生, 等. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析[J]. *环境科学*, 2011, 32(1): 64-72. doi: 10.13227/j.hjkk.2011.01.009

- HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HONG Huasheng, et al. Preliminary Study on Linking Land Use & Landscape Pattern and Water Quality in the Jiulong River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(1): 64-72.
- [19] SHEN Z, HOU X, 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. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.019
- [20] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2296-2306. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2013.08.031
- LI Mingtao, WANG Xiaoyan, LIU Wenzhu. Relationship Between Landscape Pattern and Non-point Source Pollution Loads in the Chaohe River Watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2296-2306.
- [21] 李艳利, 徐宗学, 李艳粉. 浑太河流域多尺度土地利用/景观格局与水质响应关系初步分析[J]. *地球与环境*, 2012, 40(4): 573-583. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2012.04.010
- LI Yanli, XU Zongxue, LI Yanfen. A Preliminary Study on the Relationship Between Multi-scale Land Use & Landscape and River Water Quality Response in the Huntai Watershed[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(4): 573-583.
- [22] 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*, 2020, 40(24): 9048-9058. doi: 10.5846/stxb202003090448
- 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*, 2020, 40(24): 9048-9058.
- [23] 陈历睿, 林佳妮, 沈蓉, 等. 三峡库区马尾松林土壤真菌群落特征及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2397-2404. doi: 10.13287/j.1001-9332.200209.032
- CHEN Lirui, LIN Jiani, SHEN Rong, et al. Characteristic of Soil Fungal Community and Its Impact Factors of Pinus Massoniana Forests in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2397-2404.
- [24] LAI J, ZOU Y, ZHANG J, et al. Generalizing Hierarchical and Variation Partitioning in Multiple Regression and Canonical Analyses Using the Rdacca hp R Package[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(4): 782-788. doi: 10.1111/2041-210X.13800
- [25] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2007: 1-266.
- WU Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Grade*[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2007: 1-266.
- [26] 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. doi: 10.1016/j.watres.2022.119280
- [27] CHENG X, SONG J P, YAN J Z. Influences of Landscape Pattern on Water Quality at Multiple Scales in an Agricultural Basin of Western China[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 319: 120986. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120986
- [28] LIU H Y, MENG C, WANG Y, et al. Multi-spatial Scale Effects of Multidimensional Landscape Pattern on Stream Water Nitrogen Pollution in a Subtropical Agricultural Watershed[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115962. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115962
- [29] 李昆, 王玲, 孙伟, 等. 城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 343-352. doi: 10.13671/j.hjkxxb.2019.0330
- LI Kun, WANG Ling, SUN Wei, et al. Spatial Effect of Landscape Pattern on River Water Quality Under Urbanization [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 343-352.
- [30] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华, 等. 不同尺度下城市景观综合指数的空间变异特征研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2053-2059. doi: 10.3321/j.issn:1001-9332.2005.11.2053
- YUE Wenze, XU Jianhua, XU Lihua, et al. Spatial Variance Characters of Urban Synthesis Pattern Indices at Different Scales[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2053-2059.
- [31] 邬紫荆, 李枝坚, 曾辉. 惠州市景观格局空间分异特征的梯度分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(2): 490-500. doi: 10.13292/j.1000-4890.202102.049
- WU Zijing, LI Zhijian, ZENG Hui, et al. A Gradient Analysis of Urban Landscape Pattern in Huizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(2): 490-500.
- [32] 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. doi: 10.13292/j.1000-4890.202310.011
- LIN Jiayuan, ZHANG Fan, QIU Liping, et al. Effects of Landscape Pattern on Water Quality Under Different Spatial Characteristic Scales[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(12): 2998-3007.

- [33] 焦胜,杨娜,彭楷,等.汾河流域土地景观格局对河流水质的影响[J].地理研究,2014,33(12):2263-2274.doi:10.11821/dlyj201412005
JIAO Sheng, YANG Na, PENG Kai, et al. The Effects of Land-use and Landscape Pattern on Water Quality in Weihe River Watershed[J]. Geographical Research, 2014, 33(12): 2263-2274.
- [34] SHI P, ZHANG Y, LI Z, et al. Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Seasonal Water Quality at Multi-spatial Scales[J]. Catena, 2017, 151: 182-190. doi: 10.1016/j.catena.2016.12.017
- [35] DING J, JIANG Y, LIU Q, et al. Influences of the Land Use Pattern on Water Quality in Low-order Streams of the Dongjiang River Basin, China: A Multi-scale Analysis[J]. Science of the Total Environment, 2016(551/552): 205-216. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.162
- [36] GALBRAITH L M, BURNS C W. Linking Land-use, Water Body Type and Water Quality in Southern New Zealand[J]. Landscape Ecology, 2007, 22(2): 231-241. doi: 10.1007/s10980-006-9018-x
- [37] 王杰,李鹏,高海东,等.丹江上游土地利用/景观指数与水质关系初探[J].水土保持研究,2018,25(6):383-389.doi:10.13869/j.cnki.rswc.20180919.001
WANG Jie, LI Peng, GAO Haidong, et al. Preliminary Study on the Relationship Between Land Use/Landscape Index and Water Quality in the Upper Reaches of Danjiang River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 383-389.
- [38] 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.doi:10.18307/2021.0310
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.

(责任编辑 柴 键)