

DOI: 10.5846/stxb202110303050

赵银军, 梁日梅, 丁爱中, 蓝文陆. 不同空间尺度景观特征对南流江水质的影响差异. 生态学报, 2023, 43(12): 4954-4964.

Zhao Y J, Liang R M, Ding A Z, Lan W L. Differences in the influence of landscape features on river water quality at different spatial scales. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(12): 4954-4964.

不同空间尺度景观特征对南流江水质的影响差异

赵银军^{1,2}, 梁日梅², 丁爱中³, 蓝文陆^{4,*}

1 南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室/广西地表过程与智能模拟重点实验室, 南宁 530100

2 南宁师范大学地理科学与规划学院, 南宁 530100

3 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875

4 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 北海 536000

摘要:流域景观特征决定了非点源污染物来源与地表景观削减消纳能力,但尚缺乏全流域不同空间尺度对二者关联性的认识。以广西北部湾南流江为例,分别在子流域、河岸缓冲带以及监测点圆形缓冲区三种尺度上,基于 2020 年 Landsat 8 OLI 遥感影像解译的土地利用类型特征,结合水质监测数据,运用数理统计和 GIS 空间分析方法,探讨了流域景观特征在不同空间尺度上对河流水质的影响。结果表明:(1)在子流域尺度,土地利用类型以林地为主,而在河岸缓冲带与监测点圆形缓冲区均以耕地为主;(2)水质指标高锰酸盐指数、生化需氧量与景观特征相关性最为显著,耕地、建设用地、其他用地和园地与其呈正相关,是南流江水质污染负荷的重要来源区;景观格局指数中,斑块密度、蔓延度指数、多样性指数、均匀度指数是引起河流水质指标变化的主要景观因子;(3)受流域内或不同子流域间景观特征差异,景观组成面积占比和景观格局指数均在河岸缓冲带尺度对水质状况影响最大,分别可解释 57.0%和 64.7%的水质指标变化;子流域尺度次之,圆形缓冲区尺度最小,且景观格局指数对水质状况的影响大于景观组成面积占比。建议在河岸带 50 m 范围内严格控制耕地面积,建设河岸缓冲带并优化景观结构提升污染物削减能力,从而保护南流江水环境。

关键词:空间尺度;景观特征;冗余分析;南流江

Differences in the influence of landscape features on river water quality at different spatial scales

ZHAO Yinjun^{1,2}, LIANG Rimei², DING Aizhong³, LAN Wenlu^{4,*}

1 Key Laboratory of Environmental Change and Resources Use in Beibu Gulf of Ministry of Education/Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning 530100, China

2 School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning 530100, China

3 College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000, China

Abstract: Watershed landscape characteristics determine the sources of pollutants and the absorption potential of the surface landscape, but we still lack the knowledge of their relation from different spatial scales in the whole watershed. Based on the land use type interpreted by Landsat 8 OLI remote sensing image in 2020 and combined with the water quality index data of monitoring points, the influence of landscape characteristics on river water quality at different spatial scales including sub-watershed, river buffer zone and circular buffer zone of monitoring points was discussed using mathematical statistics and GIS spatial analysis method. The results show that: (1) the landscape composition is different at different

基金项目:国家自然科学基金项目(42161005,41866001);广西重点研发计划(桂科 AB22035035,桂科 AB20297037)

收稿日期:2021-10-30; **网络出版日期:**2023-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dr.lan@139.com

spatial scales. At sub-watershed scale, forest land is the main land use type. At river buffer zone and circular buffer zone, cultivated land are the main land use type. (2) The cultivated land, construction land, other land and garden land are positively correlated with water quality index COD_{Mn} , BOD_5 , which are the contribution sources of water quality pollution in the Nanliu River Basin. The increase of grassland, forest land and water area is generally beneficial to the improvement of river water quality, especially at the scale of river buffer zone. PD, CONTAG, SHDI and SHEI are the main factors causing river water quality change. (3) Landscape characteristics of river buffer zone had the greatest impact on water quality, followed by sub-watershed scale and circular buffer scale according the total explanation rate of redundancy analysis. To economically protect water quality in the Nanliu River, we should focus on riparian zone within 50 m and decrease the cultivated land area and optimize its landscape structure.

Key Words: spatial scale; landscape features; Redundancy analysis; Nanliu River

全球人口持续增长引起食物、基础设施、能源等需求增加对水环境产生了巨大的压力^[1]。清洁用水(SDG6)是联合国设定的2030年17个可持续发展目标(SDGs)中的重要一项。水环境危机已成为人类当前面临的一大挑战,严重威胁着人类的生存和可持续发展。目前我国各类点源污染已得到了有效治理,而非点源污染由于涉及范围广、负荷大、潜伏周期长、控制难度大,已成为流域水环境治理的重点。研究表明流域非点源污染与其景观组成及景观格局变化密切相关^[1-5],而人类活动引起的流域景观格局变化显著影响污染物迁移转化过程,是河流水质变化的主要影响因素^[1-5]。

景观格局与水质关联研究已成为国内外研究热点^[5-8],将景观生态学中的空间格局引入到土地利用对水质的影响机制中,重点关注了不同空间尺度下的景观组成、景观指数与水质之间的量化关系。Xu等^[8]在多尺度上建立了景观格局对季节水质的实证模型,结果表明流域的自然特征与土地利用交互对水质产生影响,景观格局指数能够较好地解释水体理化参数的整体变化,不同尺度上景观格局与水质关系的效应有所不同。岳隽等^[9]分析了深圳市西丽水库流域“源”、“汇”景观在不同尺度上对非点源污染输出和削减的贡献率之间的对比关系,发现景观空间负荷对比指数随着高度、坡度和距离增加方向上的变化表现出“汇”景观贡献逐渐增加的特征。景观特征对水质的影响还表现出了空间尺度景观特征对水质的影响还表现出了空间尺度上的依赖性。杨洁等^[10]探究城镇化进程中水质与景观格局的关系发现太湖流域苏州市的水质受到城镇用地、旱地及水田的影响,斑块数目(NP)、斑块密度(PD)、多样性指数(SHDI)、均匀度指数(SHEI)与水质有正相关关系,而蔓延度指数(CONTAG)、最大斑块指数(LPI)与水质有负相关关系,并表现出尺度效应。Li等对汉江的襄阳城市段研究发现300 m河岸缓冲带的景观对水质的影响程度最大,500 m—8 km范围内景观对水质的影响存在差异^[11]。Shen等则发现在高度城市化流域100 m河岸缓冲带相比其他尺度对地表水质影响最大^[4]。受景观特征及其变化的复杂性与异质性影响,景观特征对水质影响的共性认识有待进一步深入研究^[12]。此外从研究的空间尺度来看,对河岸带和河段关注较多,但全流域不同空间尺度的综合分析尚不多见。

广西北部湾被誉为我国最后一片“洁海”,海水水质整体优良。2008年《广西北部湾经济区发展规划》、2017年《北部湾城市群发展规划》国家批复同意后,北部湾成为国家战略格局中的重要组成部分,在保障地区安全、海洋强国战略以及提升我国国际影响力方面具有至关重要的意义。随着区域经济社会高速发展,流域环境污染和生态退化风险加剧。陆源污染是造成海洋环境污染的首要因素,占海洋污染的70%—80%,而南流江是广西北部湾最大的独流入海河流,流域人口密度大、水质污染、森林转型等问题历来比较突出。据统计2015年南流江流域人工桉树林总面积2227 km²,约占流域总面积的24%。随着南流江流域城镇化进程以及2000亿产值冶金精深产业、石油化工产业等聚集,陆地景观格局发生了显著变化,入海污染物总量逐年升高,已成为北部湾最大的陆域污染输入源^[13]。

因此,本文以南流江流域作为研究对象,利用2020年LC8遥感影像和DEM数据,获取子流域、河岸缓冲带、圆形缓冲区3种尺度下各景观类型面积比以及景观格局指数,与水质指标数据进行综合分析,从景观生态

学的角度研究不同空间尺度下景观空间异质性对河流水质的影响差异,探索对河流水质影响的关键尺度及区域,为流域非点源污染防治和科学分配有限的修复资金提供科学支撑。

1 研究区概况

南流江流域位于广西壮族自治区东南部,地处北纬 $21^{\circ}34'$ — $22^{\circ}52'N$,东经 $108^{\circ}51'$ — $110^{\circ}22'E$ 之间,干流全长 285 km,流域面积 9232 km^2 。南流江发源于玉林市与北流市交界的大容山南麓三叉水仙女桥,纵穿玉林市、钦州市和北海市,最终注入北部湾(图 1)。流域内以低山丘陵和冲积平原为主,东部、西部和北部地势相对较高,中部和南部地势偏低^[13]。流域气候湿润,年降雨量达 1760 mm,年平均气温 21.5 — $22.4^{\circ}C$,属亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温凉少雨,丰水期集中在 4—10 月,年均流量约 $166 \text{ m}^3/\text{s}$,水力资源丰富。

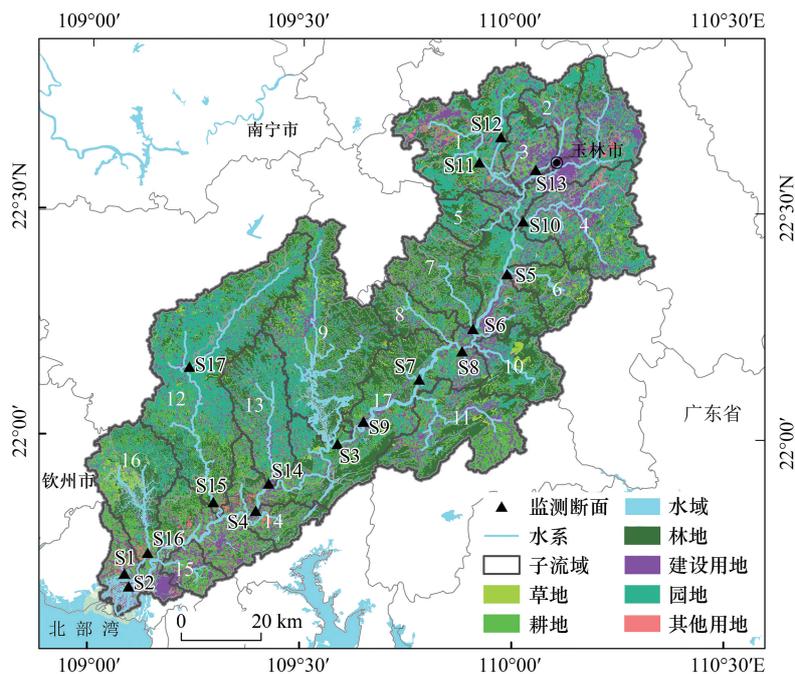


图 1 研究区土地利用类型、监测点分布以及子流域划分

Fig.1 Map of land use types, distribution of sampling points and sub-basin division

S1—S17 为监测点,数字为子流域代码

2 数据来源与方法

2.1 空间尺度的建立

本文建立子流域、河岸缓冲带、圆形缓冲区 3 种空间尺度,探讨不同尺度下南流江流域景观特征对河流水质的影响。经文献调研与实地考察,河岸带 50 m 范围内的缓冲区可能很好地预测水质的状况^[14];以采样点上游 500 m 为圆心建立半径 500 m 的圆形缓冲区具有较好的预测水质的效果^[6]。因此,本文应用 ArcGIS 10.2 软件对研究区 30 m DEM 数据进行水文分析,提取河网并结合流域干支流水系特点,最终划分了 17 个子流域;使用空间分析工具以线状水系为基准向河流两岸生成 50 m 的河岸缓冲带尺度;通过将采样点向上游平移 500 m,以平移后的点为地理中心,生成半径为 500 m 的圆形缓冲区尺度。

2.2 水质指标的选取及测定

依据流域干支流水系特征以及水质自动监测站分布,在南流江的 17 个子流域出口附近分别布设监测断面(图 1),于 2020 年 5 月进行了水质监测分析,并取月均值。根据前人研究成果,选取 pH、溶解氧(DO)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD_5)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、总磷(TP)6 个南流江水质主要超标指标来反

映其水质状况^[15]。水质监测数据由广西壮族自治区生态环境监测中心提供。

2.3 土地利用类型的划分

获取南流江流域 2020 年 LC8 遥感影像,运用软件 ENVI 5.3 对影像进行预处理,采用监督分类与目视解译结合的方法对流域土地利用类型进行解译,得到耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域和其他用地 7 种土地利用类型图(图 1)。将流域土地利用类型图与 3 种尺度的矢量数据进行相交操作,统计分析得到不同尺度下的各个景观类型的面积占比,并以此来表征区域景观特征^[16]。

2.4 景观格局指数

景观指数是对景观格局特征的定量表征^[17],能够高度浓缩景观格局信息^[18],通过景观指数反映景观格局的空间异质性特征,是景观生态学中广泛运用的定量研究方法^[19]。基于景观格局指数的生态学意义,优先考虑那些在文献中被证明对河流水质有重大影响的景观变量^[20-21]。通过 Fragstats5 软件来计算 NP(反映景观的空间特征)、PD(反映人类活动对景观的影响)、LPI(反映人类活动的方向和强弱)、边界密度(ED,反映景观被边界的分割程度)、CONTAG(反映拼块类型聚集度)、SHDI(反映景观的异质性)和 SHEI(反映景观受到优势拼块类型支配的程度)。所选取的景观格局指数从景观的蔓延度、破碎度和多样性等方面描述了流域内景观格局的空间特征。

2.5 景观特征与水质相关性分析

Spearman 秩相关分析原理是由小及大将两个因子的样本值按次序编排,对各因子样本值的位次进行演算^[22]。本文基于 SPSS 25 软件,对不同尺度下的景观特征与水质指标之间进行两两相关分析,采用 Spearman 相关系数来衡量景观特征与河流水质之间关联的强度。其计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{N^3 - N}$$

$$d_i = x_i - y_i$$

式中: r_s 为秩相关系数; x_i 为周期按浓度值从小到大排列的序号; y_i 为按时间排列的序号; d_i 为变量 x_i 和变量 y_i 的差值; N 为时间周期数。 $-1 \leq r_s \leq 1$, r_s 为正时,表示正相关。本文中 r_s 值越大表示景观特征对水质污染贡献越大; $r_s=0$,无相关性; r_s 为负时,数值越小表示景观特征对水质的改善贡献越大。

冗余分析(Redundancy analysis, RDA)是一种约束性排序方法,它可以将样点投射到一个由两个排序轴组成的二维平面上,通过样点的散集模式在象限的分布等来反映研究区的特点^[23]。RDA 的分析结果可以用来确定影响水质变化的关键因子,也可以从整体上分辨景观特征对水质的影响大小^[24]。景观特征与水质的影响大小通常是通过箭头的长短来反映,箭头离坐标轴原点越远,影响越大。景观特征与水质的关系由它们之间的夹角大小来判断,夹角大于 90° 相关性为负;夹角等于 90° ,两者不相关;夹角小于 90° ,呈正相关。本文基于 Canoco 5,以水质指标为因变量,以景观特征要素为自变量,建立线性回归模型来分析景观特征对水质指标的影响。

3 结果与分析

3.1 水质空间变化特征

对 17 个监测断面 2020 年 5 月水质指标平均浓度进行统计并按照《地表水环境质量标准》(GN3838—2002)评价(表 1)。从整体来看,17 个监测断面中位于玉林市城区的 5 个断面(S8—S11、S13)水质超出了地表水Ⅲ类标准,超标水质指标为 TP、DO 和 $\text{NH}_3\text{-N}$,超标频次依次为 4、3 和 1 次。各监测断面水质 pH 均位于 6—9 区间符合地表水水质标准要求,DO 除超标的 S9—S11 断面外其余均达到了地表水Ⅱ类以上标准, BOD_5 均达到了地表水Ⅰ类标准。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 指标的变异系数明显高于其他水质指标,达到了 0.5 以上,说明二者空间离散程度较大,分布极为不均。

表 1 南流江水质平均浓度统计特征

Table 1 Description statistics of average concentration of water quality

水质指标 Water quality index	最小值/(mg/L) Minimum	最大值/(mg/L) Maximum	均值/(mg/L) Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Variable coefficient
pH*	6.34	8.47	7.30	0.58	0.08
溶解氧 DO	3.80	9.70	6.64	1.39	0.21
高锰酸盐指数 COD _{Mn}	3.00	3.90	3.56	0.33	0.09
五日生化需氧 BOD ₅	0.70	1.40	1.16	0.27	0.23
氨氮 NH ₃ -N	0.04	1.04	0.36	0.26	0.72
总磷 TP	0.05	0.38	0.17	0.09	0.51

DO:溶解氧 Dissolved oxygen; COD_{Mn}:高锰酸盐指数 Permanganate index; BOD₅:五日生化需氧量 Biochemical oxygen demand; NH₃-N:氨氮 Ammonia nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus; *表示无量纲

3.2 不同空间尺度陆地景观组成差异

南流江不同空间尺度的景观组成类型有所不同,但整体上以林地和耕地为主(图2)。在子流域尺度,景观组成面积占比表现为林地>耕地>园地>建设用地>水域>草地>其他用地,其中94%的子流域的林地面积占比大于20%,林地为主导用地类型,耕地次之,其他用地面积最少,不足流域的1%。在圆形缓冲区尺度,景观组成面积占比表现为耕地>林地>水域>建设用地>园地>草地>其他用地,其中耕地面积平均占比为38%,76%的圆形缓冲区内耕地面积比例大于20%,耕地为主导用地类型,林地次之,其他用地面积占比最少。在河岸缓冲带尺度,景观组成面积占比表现为耕地>水域>林地>建设用地>园地>草地>其他用地,其中耕地与水域土地利用类型分别最广,平均面积占比分别为32%和31%,76%的河岸缓冲带耕地面积比例大于20%,耕地为主导用地类型。

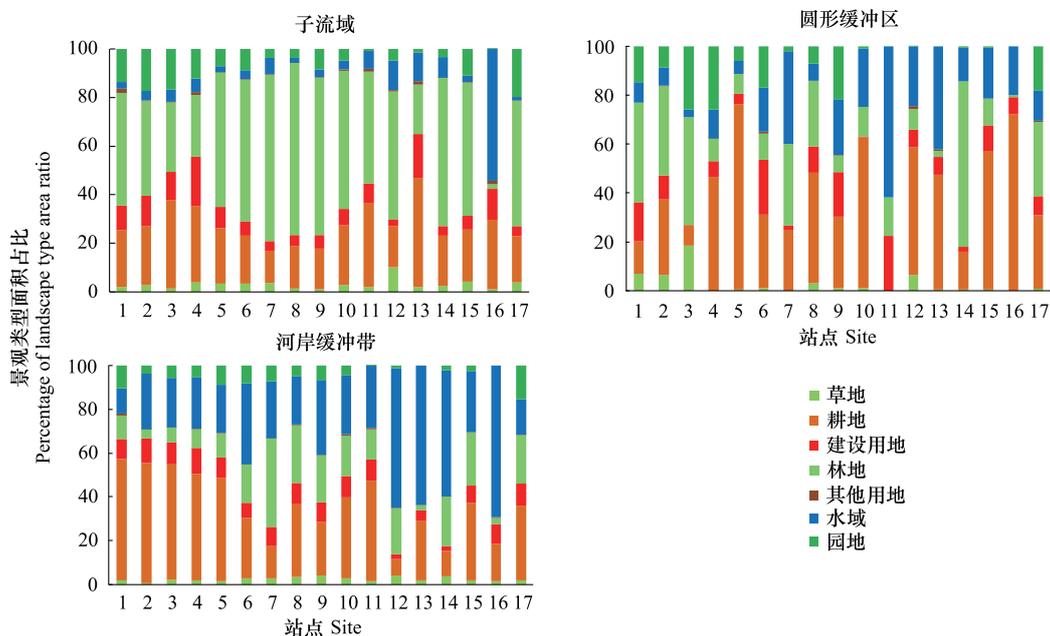


图 2 不同空间尺度样本的景观组成面积占比

Fig.2 The proportion of landscape composition area under different spatial scales

3.3 景观特征与水质指标的 Spearman 秩相关分析

由表 2 可知,林地面积占比仅在河岸缓冲带尺度与 pH 呈显著负相关;耕地面积占比在子流域尺度与 pH 呈显著正相关,在河岸缓冲带尺度与 COD_{Mn}、BOD₅ 也呈显著的正相关;建设用地占比仅在子流域尺度与 pH、COD_{Mn} 呈显著正相关;水域面积在河岸缓冲带与 BOD₅ 呈显著负相关,在圆形缓冲区尺度与 COD_{Mn}、BOD₅ 呈显

著负相关;园地在子流域尺度与 COD_{Mn} 、 BOD_5 呈正相关。草地在河岸缓冲带尺度与 BOD_5 呈负相关;其他用地在河岸带缓冲区尺度与 TP 呈正相关。各土地利用类型面积占比在三种尺度上均与 DO、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈不显著关系,而 COD_{Mn} 、 BOD_5 最为相关。具体来看,林地面积占比与水质指标关系不大,而耕地面积占比与水质污染关联最为显著,尤其是在河岸带耕地面积越大可能对附近水体的 COD_{Mn} 、 BOD_5 负荷贡献也越大,其 r_s 分别达到了 0.708 和 0.764。而水域面积大小在小尺度上与水质改善关联最为显著,例如在采样点附近的圆形缓冲区内水域面积占比与 COD_{Mn} 和 BOD_5 的 r_s 分别达到了 -0.562 和 -0.618,说明水域面积越大可能会显著改善附近水体的 COD_{Mn} 和 BOD_5 。建设用地面积增加可能在较大尺度对水体中的 COD_{Mn} 负荷有显著贡献。总的来看,耕地、建设用地、其他用地、园地的面积与水质指标 COD_{Mn} 、 BOD_5 有显著正相关关系,而草地、水域的面积与其有显著的负相关关系,随着不同土地利用类型面积增加可能对附近水体水质状况产生不同程度的污染或改善。

表 2 景观组成与水质的 Spearman 秩相关性

Table 2 Spearman rank correlation between landscape composition and water quality

景观组成 Landscape composition	空间尺度 Spatial scale	水质指标 Water quality index					
		pH	DO	COD_{Mn}	BOD_5	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
林地 Forest	子流域	-0.403	-0.315	-0.336	-0.277	0.081	0.267
	河岸缓冲带	-0.564 *	-0.308	-0.295	-0.320	0.152	0.119
	圆形缓冲区	-0.232	-0.080	0.077	0.192	0.012	-0.037
耕地 Agriculture land	子流域	0.576 *	0.087	0.333	0.282	-0.103	-0.157
	河岸缓冲带	0.133	-0.291	0.708 *	0.764 **	-0.142	0.071
	圆形缓冲区	0.423	0.126	0.169	0.076	-0.169	-0.243
建设用地 Urban land	子流域	0.522 *	0.096	0.493 *	0.442	-0.211	-0.080
	河岸缓冲带	-0.211	-0.353	0.410	0.302	-0.096	0.137
	圆形缓冲区	-0.235	-0.104	-0.141	-0.60	0.333	0.281
水域 Water	子流域	0.314	0.375	-0.284	-0.369	0.078	-0.147
	河岸缓冲带	0.203	0.309	-0.459	-0.549 *	0.076	-0.258
	圆形缓冲区	-0.058	-0.244	-0.562 *	-0.618 **	0.409	0.171
园地 Garden	子流域	-0.359	-0.055	0.579 *	0.585 *	-0.255	-0.200
	河岸缓冲带	-0.299	-0.136	0.215	0.38	-0.391	0.072
	圆形缓冲区	-0.374	-0.030	0.405	0.346	-0.388	-0.006
草地 Grassland	子流域	-0.244	0.010	0.264	0.121	-0.145	-0.288
	河岸缓冲带	-0.285	0.119	-0.479	-0.485 *	0.118	0.075
	圆形缓冲区	-0.094	0.005	0.124	0.299	0.160	0.133
其他用地 Other	子流域	0.458	0.200	0.189	0.204	0.00	-0.098
	河岸缓冲带	0.104	-0.352	-0.072	0.065	0.282	0.585 *
	圆形缓冲区	-0.242	0.279	-0.212	-0.290	0.126	0.012

* 在 0.05 级别(双尾)相关性显著, ** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著

景观格局指数与水质指标的相关性(表 3)可以看出,景观格局指数与水质指标中的 COD_{Mn} 、 BOD_5 在不同空间尺度呈现出了较多的显著性相关关系。在子流域尺度,CONTAG 与 COD_{Mn} 、 BOD_5 均呈显著负相关, r_s 分别为 -0.617 和 -0.586;SHDI 与 COD_{Mn} 、 BOD_5 均呈显著正相关, r_s 分别为 0.565 和 0.516;SHEI 与 COD_{Mn} 、 BOD_5 均呈显著正相关, r_s 分别为 0.611 和 0.587。在河岸缓冲带尺度,PD 与 TP 呈显著正相关, r_s 为 0.544;SHEI 与 COD_{Mn} 、 BOD_5 均呈显著负相关, r_s 分别为 -0.611 和 -0.697。在圆形缓冲区尺度,SHDI、SHEI 与 pH 均呈显著负相关, r_s 分别为 -0.490 和 -0.534。可见,PD、CONTAG、SHDI 和 SHEI 可能是引起南流江水质状况变化的主要景观影响因子。

表 3 景观格局指数与水质的相关性

Table 3 Correlation between landscape pattern index and water quality

空间尺度 Spatial scale	景观格局指数 Landscape pattern index	水质指标 Water quality index					
		pH	DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP
子流域 Sub-watershed	NP	-0.393	-0.256	0.178	0.030	-0.059	-0.064
	PD	0.240	0.335	0.402	0.329	-0.343	-0.422
	LPI	-0.146	-0.216	-0.439	-0.412	0.135	0.178
	ED	-0.103	-0.129	0.376	0.246	0.150	-0.098
	CONTAG	-0.254	-0.347	-0.617 **	-0.586 *	0.191	0.252
	SHDI	0.126	0.277	0.565 *	0.516 *	-0.162	-0.250
	SHEI	0.269	0.383	0.611 **	0.587 *	-0.257	-0.264
河岸缓冲带 River buffer	NP	-0.057	-0.243	0.045	-0.096	-0.146	0.104
	PD	-0.231	-0.308	-0.026	-0.054	0.390	0.544 *
	LPI	0.141	0.239	0.099	0.267	0.082	-0.123
	ED	-0.036	-0.139	-0.256	-0.180	-0.153	0.154
	CONTAG	0.030	0.189	0.238	0.280	0.109	-0.093
	SHDI	-0.311	-0.096	-0.206	-0.325	-0.172	0.126
	SHEI	-0.379	-0.022	-0.611 **	-0.697 **	0.145	0.065
圆形缓冲区 Circular buffer	NP	0.218	0.105	0.137	0.132	-0.199	-0.239
	PD	-0.204	0.136	0.134	0.080	0.338	0.121
	LPI	0.050	-0.230	-0.233	-0.228	-0.031	0.096
	ED	-0.236	-0.147	-0.140	-0.031	0.048	0.061
	CONTAG	-0.280	-0.163	0.304	0.177	0.289	0.224
	SHDI	-0.490 **	-0.150	0.163	0.254	0.112	-0.026
	SHEI	-0.534 **	-0.300	0.190	0.224	0.303	0.199

* 在 0.05 级别(双尾)相关性显著, ** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著; NP: 斑块数目 Number of patches; PD: 斑块密度 Patch density; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; ED: 边缘密度 Edge density; CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index; SHDI: 多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: 均匀度指数 Shannon's evenness index

3.4 景观特征与水质指标的冗余分析

景观组成和景观格局指数对水质指标变化的解释能力如表 4 所示。景观组成面积占比在子流域、河岸缓冲带和圆形缓冲区尺度的总解释率分别为 51.3%、57.0%和 40.9%;景观格局指数在子流域、河岸缓冲带和圆形缓冲区尺度的总解释率分别为 57.2%、64.7%和 43.9%。景观组成和景观格局指数对河流水质指标的影响空间尺度依赖均表现为河岸带>子流域>圆形缓冲区。反映在河岸缓冲带尺度上,景观特征对附近水体水质指标影响最为显著,其次是子流域尺度,圆形缓冲区尺度影响程度最小,且在三种空间尺度上景观格局指数比景观组成面积占比对水质的影响大。

景观组成面积占比和景观格局指数与不同尺度的水质指标 RDA 排序图(图 3 和图 4)显示,在子流域尺度,水质指标 COD_{Mn}、BOD₅与耕地占比、建设用地占比、园地占比、PD、NP、ED、SHDI 和 SHEI 呈正相关,NH₃-N、TP 与林地占比、CONTAG、LPI 和 NP 呈正相关,pH、DO 与水域占比、草地占比、建设用地占比、PD、SHDI、SHEI 与呈正相关,其余景观特征参数与其余水质指标呈负相关。在河岸缓冲带尺度,COD_{Mn}、BOD₅与耕地占比、建设用地占比、园地占比、CONTAG 和 LPI 呈正相关,pH、DO 与水域占比和 CONTAG 呈正相关,NH₃-N 与林地占比、水域占比、其他用地占比、ED、SHDI 和 SHEI 呈正相关,TP 与其他用地占比、建设用地占比、林地占比、PD、NP、ED、SHDI 和 SHEI 呈正相关,其余景观特征参数与其余水质指标呈负相关。在圆形缓冲区尺度,COD_{Mn}、BOD₅与园地占比、草地占比、林地占比、CONTAG、PD、NP、SHDI 和 SHEI 呈正相关,pH、DO 与林地占比、草地占比和 NP 呈正相关,NH₃-N、TP 与水域占比、建设用地占比、ED、LPI、SHDI 和 SHEI 呈正相关,其余景观特征参数与其余水质指标呈负相关。这与景观特征与水质指标的 Spearman 秩相关分析(表 2 和表 3)结果一致。

表 4 冗余分析的各排序轴的解释率

Table 4 Redundancy analysis results of the interpretation rate of each sorting axis

景观特征要素 Landscape characteristics	空间尺度 Spatial scale	参数 Parameters	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	总解释率 / % Total explanation rate
景观组成面积占比 Landscape composition	子流域	特征值	0.3756	0.1200	51.3
		相关性累计百分比	73.01%	69.32%	
	河岸带	特征值	0.4426	0.1104	57.0
景观格局指数 Landscape index	子流域	特征值	0.3889	0.1677	57.2
		相关性累计百分比	74.53%	81.35%	
	河岸带	特征值	0.5425	0.0925	64.7
	圆形缓冲区	特征值	0.2824	0.0964	40.9
		相关性累计百分比	67.46%	54.97%	
	圆形缓冲区	特征值	0.2681	0.1508	43.9
		相关性累计百分比	63.26%	72.88%	

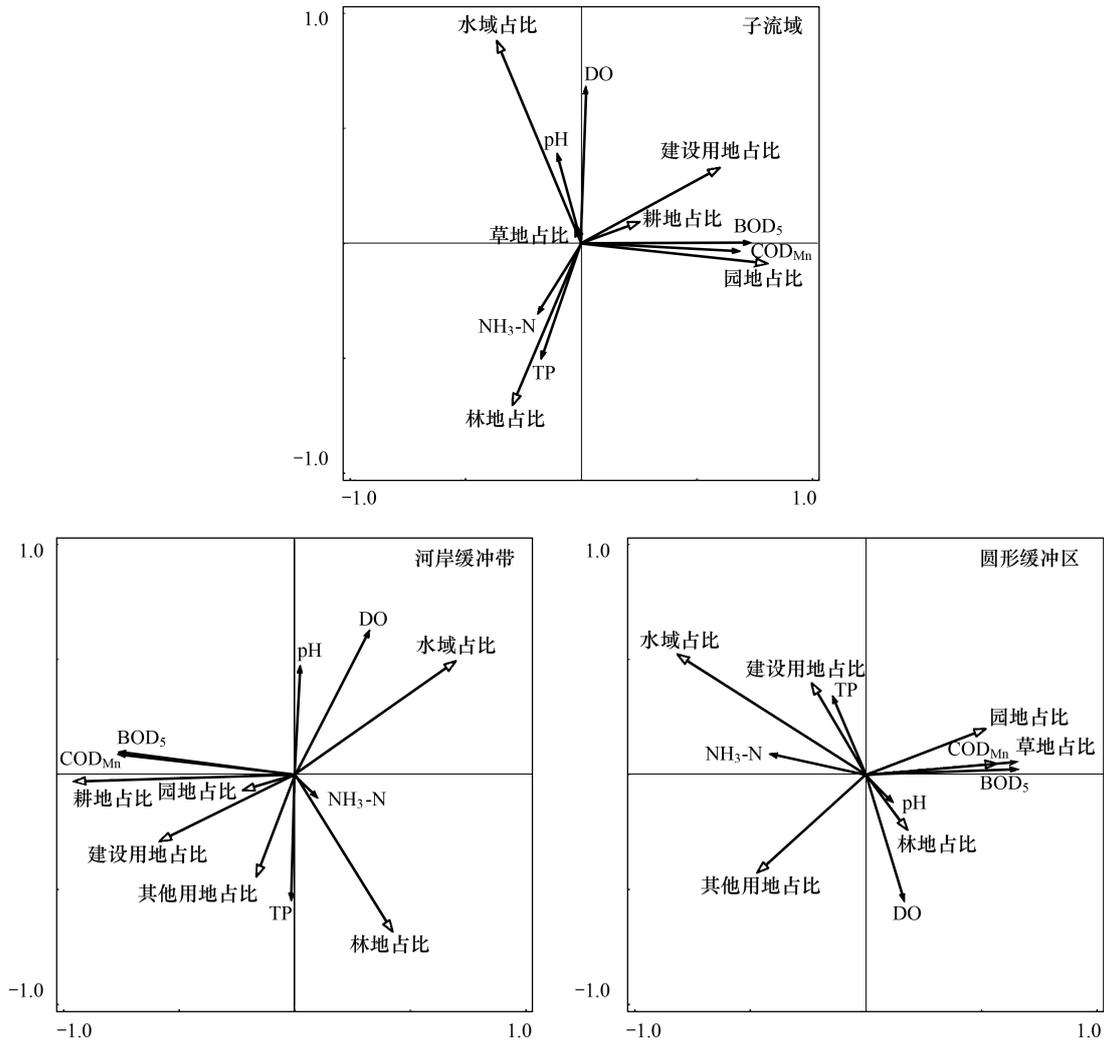


图 3 景观组成面积占比与不同尺度的水质指标冗余分析排序图

Fig.3 Sequence Layers of redundancy analysis of landscape composition area proportion and water quality index at different scales

DO:溶解氧 Dissolved oxygen; COD_{Mn}:高锰酸盐指数 Permanganate index; BOD₅:五日生化需氧量 Biochemical oxygen demand; NH₃-N:氨氮 Ammonia nitrogen; TP:总磷 Total phosphorus

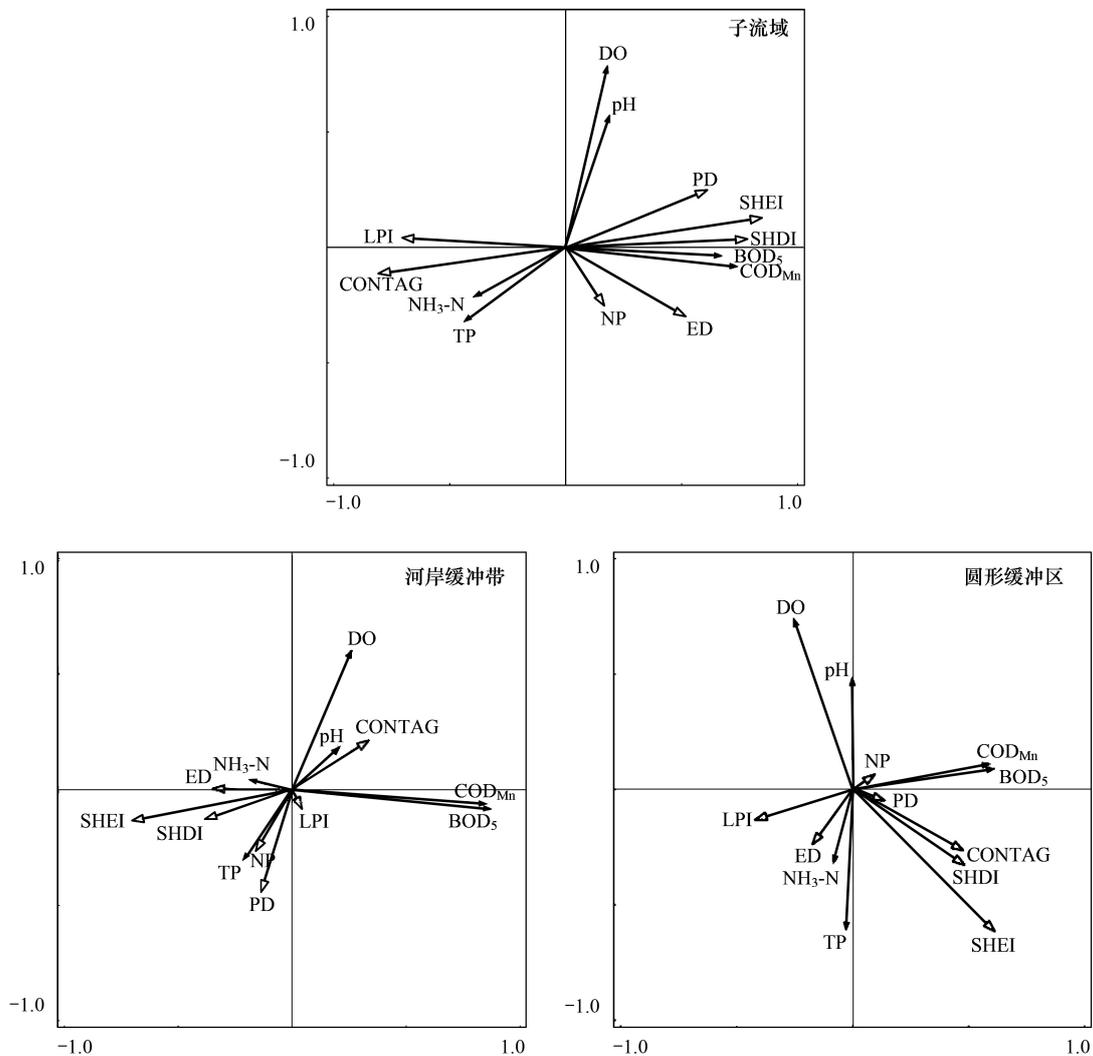


图4 景观格局指数与不同尺度的水质指标冗余分析排序图

Fig.4 Sequence Layers of redundancy analysis of landscape pattern index and water quality index at different scales

PD: 斑块密度 Patch density; ED: 边缘密度 Edge density; SHEI 均匀度指数 Shannon's evenness index; SHDI: 多样性指数 Shannon's diversity index; CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; NP: 斑块数目 Number of patches

4 讨论

4.1 景观特征对水质影响

流域内景观格局演变会改变水沙迁移过程对污染物的吸附、贮存和解吸等环境行为,利用景观特征与水质指标之间存在的相关性,可很好地解释水质状况变化,有助于对水质指标变化进行快速预测^[25]。研究发现耕地、建设用地、其他用地和园地的面积占比与水质指标有正相关关系,对水质指标污染负荷贡献大,其中耕地表现最为显著。耕地耕作过程使用的农用化学品以及未被利用的养分随径流进入附近水体引起水质变差。例如流域总磷负荷的75%以泥沙吸附的颗粒态磷进行迁移。建设用地增加了不透水面面积且人口与产业聚集,生活污水和工业废水集中大量排放,致使水体污染物浓度升高^[26]。其他用地和园地大多也受到人类活动的干扰,也存在污染物的输出效应^[27]。此外,草地、林地、水域与水质指标有负相关关系,其面积增加可减少地表径流对土壤的侵蚀程度,降低污染物输出负荷,滞留进入河流中的污染物,从而对水质有净化作用。研究发现林地面积占比较大的流域,河流水质往往也较好^[28]。

4.2 景观格局对水质影响

景观格局指数和水环境污染之间存在很大的相关性,且表现出了尺度差异。CONTAG 在子流域尺度上与水质指标有负相关关系,表明该尺度各斑块间的粘合度好,水质受到人类活动的影响较小。PD 在河岸带缓冲区尺度与水质指标有正相关关系,表明南流江河岸带耕地斑块密度较大增加了水体污染负荷。SHDI 在子流域尺度上与水质指标有正相关关系,SHDI 值越大景观越破碎,降低了景观的吸收截留作用,水质污染越严重。SHDI 在圆形缓冲区尺度上与水质指标有负相关关系,SHDI 值越大,景观多样性和异质性越大,景观类型中以建设用地和耕地为主的低植被的优势程度和主导作用下降,减轻了对水质的影响,这与王瑛等研究一致^[29]。SHEI 子流域尺度上与水质指标有正相关关系,其值越大,景观越破碎,增加了斑块与周围环境接触面积,接收污染物质的可能性也随之增加。在河岸带缓冲区和圆形缓冲区尺度,SHEI 与水质指标有负相关关系,其值越大,各景观组成类别分布越匀和,水体污染程度相对较轻。SHDI、SHEI 水质的相关性在不同尺度上存在差异,这两种不同结果的出现可能与不同尺度上景观组成类型有关,呈正相关区域受到耕地、建设用地等引起河流水质退化;呈负相关区域林地、水域降低了进入河流中的污染物负荷。

4.3 不同空间尺度景观特征对水质影响

在不同尺度下景观特征对河流水质影响具有差异性。不同土地利用类型主导的流域其景观格局与水质指标的关系不同,由于空间范围的变化,在同一流域的景观格局与水质指标的关系也会发生变化^[11]。本研究表明河岸带缓冲区尺度景观特征对水质影响最大,子流域尺度次之,圆形缓冲区尺度最小。这与胡琳和李思悦^[26]对龙川流域以及康文华对赤水河流域喀斯特地貌景观区的研究结论一致^[6]。李艳利等对浑太河流域的研究表明土地利用类型在子流域尺度与水质的相关性更显著,而景观格局指数在河岸带尺度对水质的解释能力更强^[14]。上述研究结果差异可能来源于不同流域甚至流域内自然属性、人类活动以及景观格局的差别,也可能与所在尺度大小有关。本文对比了南流江河岸带 50 m、100 m、200 m、300 m 和 400 m 景观格局指数对水质指标的解释程度,总解释率依次为 64.7%、31.5%、48.1%、45.7% 和 49.3%,说明南流江 50 m 河岸缓冲带景观格局是对水质指标影响的最有效区域。南流江属山区型河流,城镇、村庄多沿河分布、人口密度大,50 m 河岸缓冲带耕地占比最大,人类活动胁迫强烈,是未来水环境保护的关键区域,建议加强河岸带耕地面积管控、建立河岸缓冲带并进行景观结构优化进行水环境保护。

5 结论

本文以广西北部湾独流入海南流江流域为研究区,应用 Spearman 秩相关分析和 RDA 分析比较了子流域、河岸带缓冲区及圆形缓冲区 3 种空间尺度景观特征对水质的影响差异。结果表明:

(1) 流域内不同空间尺度景观组成有所差别,景观组成面积占比以林地和耕地为主,其他用地最少。在子流域尺度,林地是主要的土地利用类型;在河岸缓冲区尺度和圆形缓冲区尺度,耕地是主要的土地利用类型。

(2) 耕地、建设用地、其他用地、园地与水质指数呈负相关,不同程度的增加了水体污染负荷,而草地、林地、水域面积增加总体上有利于河流水质改善,特别是在河岸带缓冲区尺度上的表现最好。

(3) PD、CONTAG、SHDI 和 SHEI 是造成南流江流域水质变化的主要景观格局指标,其中,SHEI 对水质指标的影响最大。

(4) 流域内或不同子流域间景观特征差异,对附近水体水质指标影响存在空间尺度效应。在南流江河岸带缓冲区尺度景观特征对水质指标影响最大,子流域尺度次之,圆形缓冲区尺度最小。

参考文献(References):

- [1] Giri S, Qiu Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: a review. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173: 41-48.
- [2] Wu J H, Lu J. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes. *Water Research*, 2021, 191: 116811.

- [3] Ruan X F, Huang J Y, Williams D, Harker K, Gergel S. High spatial resolution landscape indicators show promise in explaining water quality in urban streams. *Ecological Indicators*, 2019, 103(2): 321-330.
- [4] Shen Z Y, Hou X S, Li W, Aini G, Chen L, Gong Y W. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 417-427.
- [5] 朱磊, 李怀恩, 李家科, 秦耀民. 考虑非点源影响的水源地水库水质预测研究. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 111-115.
- [6] 康文华, 蔡宏, 林国敏, 吴愈锋, 王跃跃. 不同地貌条件下景观对河流水质的影响差异. *生态学报*, 2020, 40(3): 1031-1043.
- [7] Rajaei F, Sari A E, Salmanmahiny A, Delavar M, Bavani A R M, Srinivasan R. Surface drainage nitrate loading estimate from agriculture fields and its relationship with landscape metrics in Tajan watershed. *Paddy and Water Environment*, 2017, 15(3): 541-552.
- [8] Xu S, Li S L, Zhong J, Li C. Spatial scale effects of the variable relationships between landscape pattern and water quality: example from an agricultural Karst River Basin, Southwestern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300: 106999.
- [9] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 吴健生, 谢苗苗. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例. *生态学报*, 2007, 27(12): 5271-5281.
- [10] 杨洁, 许有鹏, 高斌, 王跃峰, 徐羽, 马倩. 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. *湖泊科学*, 2017, 29(4): 827-835.
- [11] Li K, Chi G Q, Wang L, Xie Y J, Wang X R, Fan Z Q. Identifying the critical riparian buffer zone with the strongest linkage between landscape characteristics and surface water quality. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 741-752.
- [12] 李雪, 张婧, 于婉晴, 范雅双, 李小玉. 京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响. *生态学报*, 2021, 41(13): 5242-5253.
- [13] Zhao Y J, Zeng L, Wei Y P, Liu J M, Deng J M, Deng Q C, Tong K, Li J X. An indicator system for assessing the impact of human activities on river structure. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124547.
- [14] 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. *地球与环境*, 2012, 40(4): 573-583.
- [15] 黄王, 赵银军, 蓝文陆. 南流江全流域水质空间分布特征及年际变化. *广西科学院学报*, 2021, 37(4): 331-338.
- [16] 张勇荣, 周忠发, 蒋翼, 尚梦佳. 筑坝河流不同尺度土地利用结构对库区水质的影响——以平寨水库为例. *水利水电技术*, 2019, 50(4): 138-145.
- [17] 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. *环境科学学报*, 2013, 33(8): 2296-2306.
- [18] 王明浩, 王文杰, 冯宇, 吴棣, 吴坤. 湖南水府庙水库流域景观格局与水质特征关系分析. *环境工程技术学报*, 2015, 5(4): 333-340.
- [19] 伍恒赞, 张起明, 齐述华, 胡梅. 土地利用景观格局对信江水质的影响. *中国环境监测*, 2014, 30(3): 166-172.
- [20] 夏琳琳, 刘仁志, 张珂. 基于 GIS 的白洋淀流域景观格局对水质的影响研究. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(S1): 87-95.
- [21] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 谢慧君, 宋爱云. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为例. *生态学报*, 2017, 37(7): 2437-2446.
- [22] 杨盼, 卢路, 王继保, 陈和春. 基于主成分分析的 spearman 秩相关系数法在长江干流水质分析中的应用. *环境工程*, 2019, 37(8): 76-80.
- [23] 张茜, 周国英, 董文统, 杨蕾, 杨菁, 吴毅. 基于冗余分析的降香黄檀人工林叶部病害与土壤因子的关系研究. *植物保护*, 2016, 42(3): 36-44, 51.
- [24] 李昆, 王玲, 孙伟, 王祥荣, 李兆华. 城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 343-352.
- [25] 张微微, 李晓娜, 王超, 赵春桥, 史瑞双. 密云水库上游白河地表水质对不同空间尺度景观格局特征的响应. *环境科学*, 2020, 41(11): 4895-4904.
- [26] 胡琳, 李思悦. 不同空间尺度土地利用结构与景观格局对龙川江流域水质的影响. *生态环境学报*, 2021, 30(7): 1470-1481.
- [27] Meneses B M, Reis R, Vale M J, Saraiva R. Land use and land cover changes in Zêzere watershed (Portugal)—Water quality implications. *The Science of the Total Environment*, 2015, 527/528: 439-447.
- [28] 郝敬锋, 刘红玉, 胡俊纳, 李玉凤, 郑囡. 城市湿地小流域尺度景观空间分异及其对水体质量的影响——以南京市紫金山东郊典型湿地为例. *生态学报*, 2010, 30(15): 4154-4161.
- [29] 王瑛, 张建锋, 陈光才, 单奇华, 李泽波, 徐永辉, 陈云. 太湖流域典型入湖港口景观格局对河流水质的影响. *生态学报*, 2012, 32(20): 6422-6430.