

DOI: 10.5846/stxb202003090448

杨强强, 徐光来, 杨先成, 李爱娟, 陈晨. 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响. 生态学报, 2020, 40(24): 9048-9058.

Yang Q Q, Xu G L, Yang X C, Li A J, Chen C. Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang River watershed. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9048-9058.

## 青弋江流域土地利用/景观格局对水质的影响

杨强强<sup>1,2</sup>, 徐光来<sup>1,2,\*</sup>, 杨先成<sup>1,2</sup>, 李爱娟<sup>1,2</sup>, 陈 晨<sup>3</sup>

1 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241003

2 安徽省江淮流域地表过程与区域响应重点实验室, 芜湖 241003

3 安徽师范大学生态与环境学院, 芜湖 241003

**摘要:** 研究不同空间尺度的景观组成与结构对水质的影响对于水质保护具有重要意义。青弋江为长江下游最长的支流, 人类活动可能通过多种方式对水质产生影响。以青弋江流域为研究对象, 基于 Google Earth 遥感数据和水质实测数据, 采用冗余分析 (RDA) 和 Spearman 相关性分析, 探讨了土地利用/景观格局对水质的影响。研究结论为: (1) 以采样点为中心建立的 100、200、500、1000、2000 m 5 种尺度缓冲区中, 500 m 半径圆形缓冲区景观组成对水质的解释率最高, 枯水期与丰水期对水质的解释率分别为 46.30% 和 43.10%。(2) 土地利用类型中, 耕地和建设用地面积与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、EC 呈正相关, 对水质具有负面效应; 林地面积与 DO 呈正相关, 对污染物起到净化作用; 土地利用综合程度指数与污染指标呈正相关, 表明人类活动强的区域, 水质变差。(3) 景观格局指数中, PRD 在丰水期与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 浓度为负相关, 相关系数分别为 -0.656、-0.540, 表明随斑块丰富度密度的增大, 流域生态系统更加稳定; LPI 与 DO 浓度在枯水期为显著负向相关, 相关系数为 -0.653, SHAPE\_AM 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 呈显著正向相关, 表明随人类活动强度的增大, 水质恶化; FRAC\_AM 与水质的关系无法得到合理的解释。通过多角度分析, 在一定程度上揭示了青弋江流域的生态水文过程, 有利于土地利用管理和水质保护, 进而促进资源的可持续利用。研究结果可为政府相关部门进行决策时提供参考。

**关键词:** 景观格局; 水质; 冗余分析; 青弋江流域

## Responses of water quality to land use & landscape pattern in the Qingyijiang River watershed

YANG Qiangqiang<sup>1,2</sup>, XU Guanglai<sup>1,2,\*</sup>, YANG Xiancheng<sup>1,2</sup>, LI Aijuan<sup>1,2</sup>, CHEN Chen<sup>3</sup>

1 School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2 Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Prevention, Wuhu 241003, China

3 School of Ecology and Environment, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

**Abstract:** It's great significance for water quality protection to figure out the effects of landscape composition and configuration in different spatial scales. The Qingyijiang River is the longest branch of lower Yangtze River, the water quality of rivers is influenced by human activities in variety of ways. Taking the Qingyijiang River basin as the research objective, this paper adopted the redundancy analysis (RDA) and Spearman correction analysis to initially explore the impacts of the land utilization and landscape pattern on the water quality, which based on the Google Earth remote sensing data and water quality measurement data. The results are: (1) Among the five buffer scales of 100, 200, 500, 1000 and 2000 m established based on sampling point, the landscape composition of the 500 m radius circular buffer zone had the highest interpretation rate of water quality, and the interpretation rates of the low flow period and the high flow period were

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (41301029)

收稿日期: 2020-03-09; 网络出版日期: 2020-11-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guanglaixu@163.com

46.30% and 43.10%, respectively. (2) In land use types, farmland area and building land area were positively correlated with ammonia nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), total phosphorus (TP) and electrical conductivity (EC) and produced negative effect on water quality. However, forest land area was positively related to dissolved oxygen (DO), which played a vital role in purifying pollutants. Comprehensive index of the land use was positively related to the polluted indicator, which meant the water quality was increasingly deteriorating in the area with highly intensive human activities. (3) The landscape pattern indexes suggested that patch richness density (PRD) was negatively related to the density of the  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TP. The relative indexes were  $-0.656$  and  $-0.540$  respectively, which indicated that the watershed ecosystem became more stable with the increase of PRD. The density of the largest patch index (LPI) was negatively associated with the density of DO in the low flow period, the relative index was  $-0.656$ , while area-weighted mean shape index (SHAPE\_AM) was positively related to the density of the  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TP. The above-mention demonstrated that the growing intensity of human activities would result in the deterioration of water. The relationship between area-weighted mean patch fractal dimension (FRAC\_AM) and water quality can not be well described. Through multi-angle analysis, this study revealed the eco-hydrological processes in the Qingyijiang River watershed, and thus is beneficial to land use management and water quality protection, and sustainable use of resources. This may be useful for the relevant functional departments of the government to make decisions.

**Key Words:** landscape pattern; water quality; redundancy analysis; Qingyijiang River watershed

景观格局是指类型、大小、形状不同的景观要素在空间的分布与配置<sup>[1]</sup>。景观指数是对景观格局特征的定量表征,反映土地利用构成和空间配置信息,多用来描述土地利用类型特征<sup>[2-3]</sup>。景观类型中,“源”景观指能促进生态过程发展的景观,“汇”景观与其作用相反<sup>[4]</sup>。水质对土地利用/景观格局变化非常敏感<sup>[5-7]</sup>。人类活动强烈的影响当地的景观结构,促使土地利用方式变化<sup>[8]</sup>,是水污染主要来源<sup>[9]</sup>,已导致全球半数以上的水库及湖泊水质恶化<sup>[10]</sup>。河流作为重要景观类型构成<sup>[11]</sup>,其水质受点源污染和非点源污染控制<sup>[12]</sup>,而景观格局与流域非点源污染过程关系密切<sup>[13]</sup>,受到众多学者的关注。Sliva 和 Williams<sup>[14]</sup>使用次级数据库、GIS 及多元分析工具探讨了安大略省南部三个流域景观特征与水质的相关性,认为流域景观特征对水质的影响大于 100 m 缓冲区;李昆等<sup>[15]</sup>认为 300 m 河岸带缓冲区能够更好的解释汉江流域水质对襄阳市城区景观格局变化的响应;Hu 等<sup>[12]</sup>通过逐步多元回归模型以山东省为研究对象,发现景观指数与水质具有较好的关联性;朱珍香等<sup>[16]</sup>从源汇景观指数、斑块密度以及香浓多样性指数三种景观指数角度分析了厦门后溪水质与流域景观特征之间的关系;彭勃等<sup>[5]</sup>选取蔓延度、斑块密度、香浓多样性指数、最大斑块指数、破碎度五种景观指数探讨了

小流域土地利用景观格局对水质的影响。土地利用方式及景观格局变化可通过下垫面的改变、坡度的增减、改变生物作用与非生物作用的强弱等<sup>[7,14]</sup>方式对水质产生影响,但究竟何种空间尺度上土地景观格局以及哪些景观指数对水质的影响最大,仍莫衷一是。因此,进一步研究土地利用/景观格局对流域水质的影响,对土地利用的综合管理与水质保护具有重要意义。

选取土地利用类型百分比、土地利用程度综合指数和景观指数,采用冗余分析和 Spearman 等级相关性分析探讨了青弋江流域土地利用、景观格局对水质的影响,意在分析何种尺度景观格局对水质的影响最大;景观组成及土地利用强度对水质的影响;景观指数与水质指标之间的关系。研究结果以期政府相关职能部门进行水资源和土地利用管理决策提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

青弋江源于安徽黟县黄山北麓,是长江下游最长的一条支流,在芜湖市与长江相汇。青弋江流域介于

29.91°—34.43°N、117.64°—118.85°E 之间,总面积 8487 km<sup>2</sup>;属亚热带湿润季风气候,平均气温 16℃,年降雨量 1500 mm<sup>[17]</sup>,夏季炎热多雨,冬季温和少雨,降雨年内波动大,水位在春夏季(3—8 月)较高,为丰水期,秋冬季为枯水期<sup>[18]</sup>。本研究共设 18 个采样点,各点位分布如图 1 所示,其中南部山区的土地利用方式以林地为主,下游平原区以建设用地、耕地、林地为主。

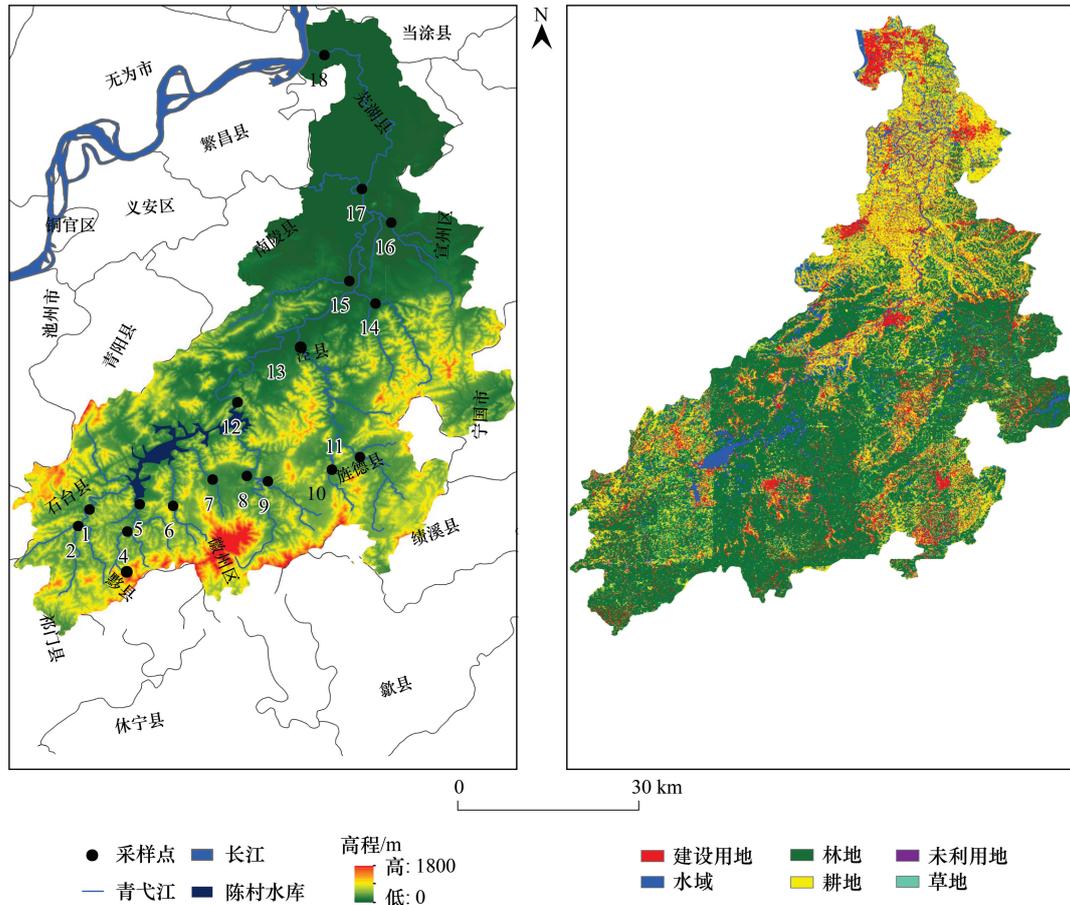


图 1 采样点与研究区土地利用空间分布图

Fig.1 The water sampling sites and the spatial distribution of land use in study area

水质采样点:1. 黄河村;2. 小河口;3. 余溪水库;4. 毛岔;5. 杨家寨;6. 毛坦;7. 太平;8. 仙源;9. 洪家湾;10. 管家桥;11. 仙人谷;12. 陈村;13. 上桥;14. 爱皖;15. 河沿马家;16. 寒亭;17. 西河;18. 大磬坊

### 1.2 数据来源与数据处理

从 Google Earth 获取 2.05 m 高精度卫片(无偏移),以此作为基础数据源,借助 ENVI 5.3 特征提取模块,运用基于样本面向对象的监督分类进行土地利用信息的提取,参照国家土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)并结合青弋江流域土地利用实况及解译的可操作性,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 类。借助野外采集记录的实际土地利用方式数据,利用混淆矩阵法进行精度分析,多次重新选取或增补训练样本,最终 kappa 系数达到 0.742,符合本文研究需求。DEM 数据为 Google Earth 4.11 m 分辨率高程数据。

依据《国家水质采样技术指导》(HJ494-2009)和水域生态系统长期监测规范<sup>[19]</sup>并结合研究目的,于 2019 年对 18 个采样点的表层(0.5 m)水体每月中旬进行采样,每个点位采集 3 个平行样本。利用 DZB-718 型便携式多参数分析仪现场测定 pH 值、溶解氧(DO)、电导率(EC)。取已用纯水处理的洁净聚乙烯塑料瓶采集水样,低温保存并尽快带回实验室,运用 5B-2H 型(V8)便携式多参数水质测定仪测定总磷(TP)、化学需氧量

(COD)、氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )等指标浓度。

景观格局是自然因素和人为因素共同作用的结果,一般指空间格局<sup>[20]</sup>。而景观指数高度浓缩景观格局信息<sup>[21]</sup>,能够定量反映空间异质性。基于景观水平选取的景观指数包括斑块丰富度密度(PRD)、最大斑块指数(LPI)、面积加权平均斑块分维数(FRAC\_AM)、面积加权平均斑块形状指数(SHAPE\_AM)、蔓延度指数(CONTAG)、香浓多样性指数(SHDI),反映了景观的丰富度、优势度、破碎度及多样性等特性,景观指数含义<sup>[22-24]</sup>如表1所示。缓冲区土地利用栅格大小为2.2 m × 2.2 m,各指数的计算均在FRAGSTATS 4.2软件上进行。

表1 选取的景观指数及生态学意义

Table 1 Landscape pattern index and its ecological meaning

景观指数 Landscape index	生态学含义 Ecological significance
斑块丰富度密度 Patch richness density (PRD)	单位面积上的斑块丰富度,反映斑块类型的多样性。斑块越丰富,景观越稳定,抵抗外界干扰的能力越强
最大斑块指数 Largest patch index (LPI)	有助于确定景观的模地或优势类型等。其值的大小决定着景观中的优势种、内部种的丰度等生态特征;其值的变化可以反映人类活动的方向和强弱
面积加权平均斑块分维数 Area-weighted mean patch fractal dimension (FRAC_AM)	在一定程度上反映了人类活动对景观格局的影响,受人类干扰程度小的景观分维数值高,受人为干扰程度越大的景观分维数值越低(趋近1)
面积加权平均斑块形状指数 Area-weighted mean shape index (SHAPE_AM)	SHAPE_AM最小值为1,并随着景观形状不规则性的增加而增加。当其值增大时,表明斑块形状变得更复杂,更不规则。是度量景观格局复杂性的指标之一
蔓延度指数 Contagion index (CONTAG)	高蔓延度值说明景观中的某种优势斑块类型形成了良好的连接性;反之则表明景观是具有多种要素的密集格局,景观的破碎化程度较高
香浓多样性指数 Shannon's diversity index (SHDI)	SHDI是一种基于信息理论的测量指数,能反映景观异质性。如一个景观系统中,土地利用越丰富,破碎化程度越高,其不定性的信息含量也就越大,SHDI也就越高

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 空间分析

参考前人的研究思路及方法<sup>[25-27]</sup>并结合青弋江流域实况,以18个采样点为圆心,分别建立100、200、500、1000、2000 m的缓冲区,将其与遥感数据相结合,进而获取各缓冲区内的土地利用数据。土地利用程度综合指数数值的大小反映土地利用程度的强弱,揭示景观受人类干扰程度的大小<sup>[28]</sup>。计算公式如下<sup>[29]</sup>:

$$L_a = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i, \quad L_a \in [100, 400] \quad (1)$$

式中, $L_a$ 为土地利用程度综合指数, $A_i$ 为研究区域内第*i*级土地利用程度分级的分级指数, $C_i$ 为区域内第*i*级土地利用程度分级的面积百分比, $n$ 为土地利用分级数(从土地利用程度分级赋值表<sup>[30]</sup>(表2)中获取)。

表2 土地利用程度分级赋值表

Table 2 The classification values of land use degree

土地利用类型 Land use type	未利用地 Unused land	林地、草地、水域 Forest land, grassland, water	耕地 Agricultural land	城镇、农村居民用地、 工矿、交通 Towns, rural residential land, industry and mining, roads
分级指数 Grading index	1	2	3	4

#### 1.3.2 统计分析

借助Canoco 5软件对不同空间尺度的土地利用面积分别与枯水期和丰水期的水质进行相关性分析。在相关性分析之前,首先对水质数据进行降趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)。结果显示,枯水期与丰水期的Gradient length的第一轴分别为0.27和0.37,均小于3,故选择线性模型能更好的拟合

土地利用类型面积(解释变量)与水质数据(响应变量)之间的关系<sup>[31]</sup>。RDA(Redundancy analysis)能较好的反映景观指数与水质之间的关系<sup>[11]</sup>,因此选择 RDA<sup>[32]</sup>。

基于 SPSS Statistics 24.0 软件平台,因流域水质与土地利用综合指数或景观指数均不满足线性关系,故采用双变量 Spearman 双尾相关性分析<sup>[33]</sup>,探讨水质与其他指标之间的关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 水质时空分布特征

流域水质特征在枯水期、丰水期分异明显(图 2)。pH 波动范围为 7.1—9.5,所有点位均偏碱性且波动较小,除 1 号点位外丰水期均高于枯水期,可能是由于丰水期水生植物与藻类大量繁殖,光合作用增强,河流中溶解的 CO<sub>2</sub>浓度降低,致使 pH 升高<sup>[34]</sup>。枯水期在多数点位(14 个)的电导率均高于丰水期,结合研究区气候特点分析,枯水期降雨多是绵绵细雨,能够充分与土壤接触,经过地表径流与地下径流注入河流,河流溶解的离子浓度升高,致使电导率增大。水中的含盐成分或杂质偏多,耗氧量增大<sup>[35]</sup>,但 DO 浓度的变化规律与电

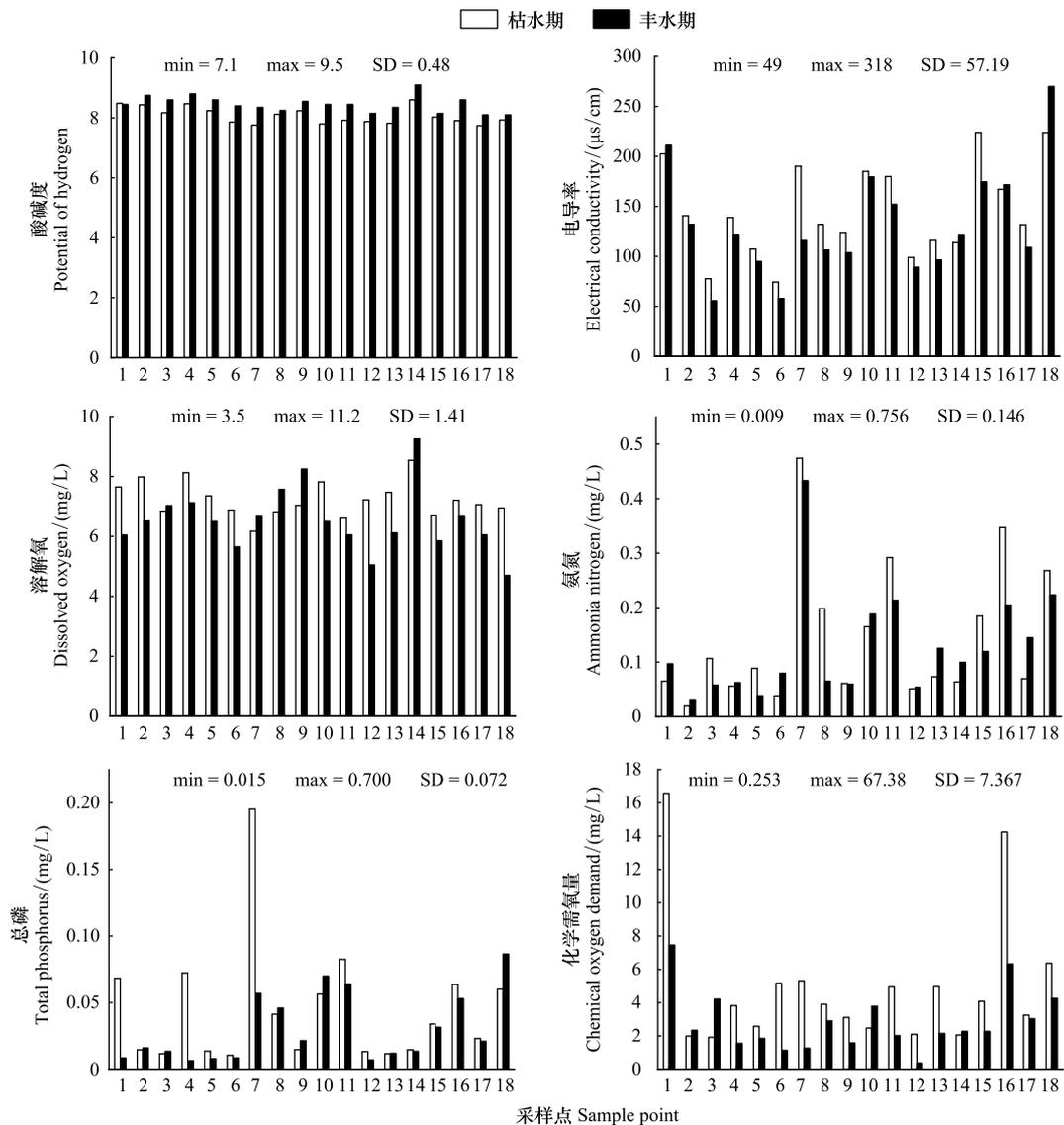


图 2 水质时空分布图

Fig.2 Spatial and temporal distribution of water quality

min: 最小值;max: 最大值;SD: 标准差;

导率一致,表明丰水期对水中  $O_2$  浓度的稀释强度大于枯水期消耗强度;其均值为 7.04 mg/L,达到 II 类水质标准,整体水质偏好。 $NH_4^+-N$  与 TP 浓度除总体上呈现出枯水期高于丰水期,另一个较为突出的特点是在 7 号点位处均出现较高的峰值,对 100、200、500、1000、2000 m 各缓冲区内土地利用类型定量分析发现,各缓冲区内建设用地与耕地之和占比分别为 98%、95%、93%、90%、77%,除 2000 m 缓冲区处两者之和仅次于 18 号点位的 88%外,其余各尺度缓冲区两种土地利用类型之和均居于首位,因此可能是人类活动致使该点位污染物浓度较高<sup>[36]</sup>。TP 与 COD 浓度在部分点位为劣 V 类水质,是该流域主要的潜在污染物。

## 2.2 土地利用对流域水质影响的缓冲区半径分析

不同尺度土地利用类型面积占比如图 3 所示。整体而言,未利用地与草地面积比重较低,且随缓冲区半径变化的波动性较小;水域面积占比随缓冲区半径的扩大有下降趋势;林地、耕地、建设用地是各尺度主要的景观组成类型。受人为及自然因素影响,不同尺度各采样点土地利用占比各不相同。通过冗余分析,筛选对流域水质产生影响最大的空间尺度<sup>[31]</sup>。由表 3 可知,在枯水期与丰水期均是 500 m 半径缓冲区的土地利用方式对水质的解释率最高,分别为 46.30%和 43.10%,表明该空间尺度的景观格局对水质的影响最大。

表 3 冗余分析各排序轴方差解释率

Table 3 Total variance explained by the ordination axis

水期 Water period	缓冲区 Buffer/m	参数 Parameters	第一轴 Axis 1	第二轴 Axis 2	第三轴 Axis 3	第四轴 Axis 4	总解释率/% Total explained variance
枯水期 Low flow period	100	E	0.3592	0.0011	0	0	36.00
		CP	99.67	99.99	100	100	
		SEC	0.6029	0.3136	0.3561	0.2316	
	200	E	0.3663	0.0009	0	0	36.70
		CP	99.74	99.99	100	100	
		SEC	0.6084	0.3053	0.2532	0.2963	
	500	E	0.4615	0.0015	0.0001	0	46.30
		CP	99.67	99.99	100	100	
		SEC	0.6828	0.3805	0.4786	0.3563	
	1000	E	0.3781	0.0013	0	0	38.00
		CP	99.64	99.99	100	100	
		SEC	0.6182	0.3573	0.3924	0.5370	
2000	E	0.4244	0.001	0	0	42.50	
	CP	99.75	99.99	100	100		
	SEC	0.6549	0.3159	0.3053	0.3491		
丰水期 High flow period	100	E	0.3926	0.0005	0.0001	0	39.30
		CP	99.86	99.98	100	100	
		SEC	0.6270	0.7848	0.4212	0.5639	
	200	E	0.3559	0.0001	0.0001	0	35.60
		CP	99.95	99.99	100	100	
		SEC	0.5970	0.5676	0.2457	0.1872	
	500	E	0.4307	0.0002	0	0	43.10
		CP	99.94	99.99	100	100	
		SEC	0.6567	0.6783	0.2161	0.2724	
	1000	E	0.2588	0.0002	0.0001	0	25.90
		CP	99.89	99.97	100	100	
		SEC	0.5090	0.7210	0.3243	0.3471	
2000	E	0.3446	0.0002	0.0001	0	34.50	
	CP	99.93	99.98	100	100		
	SEC	0.5874	0.6706	0.2703	0.5475		

E:特征值 Eigenvalues; CP:物种-环境关系变化累积百分率 Cumulative percentage variance of species-environment relation; SEC:物种环境相关系数 Species-environment correlations

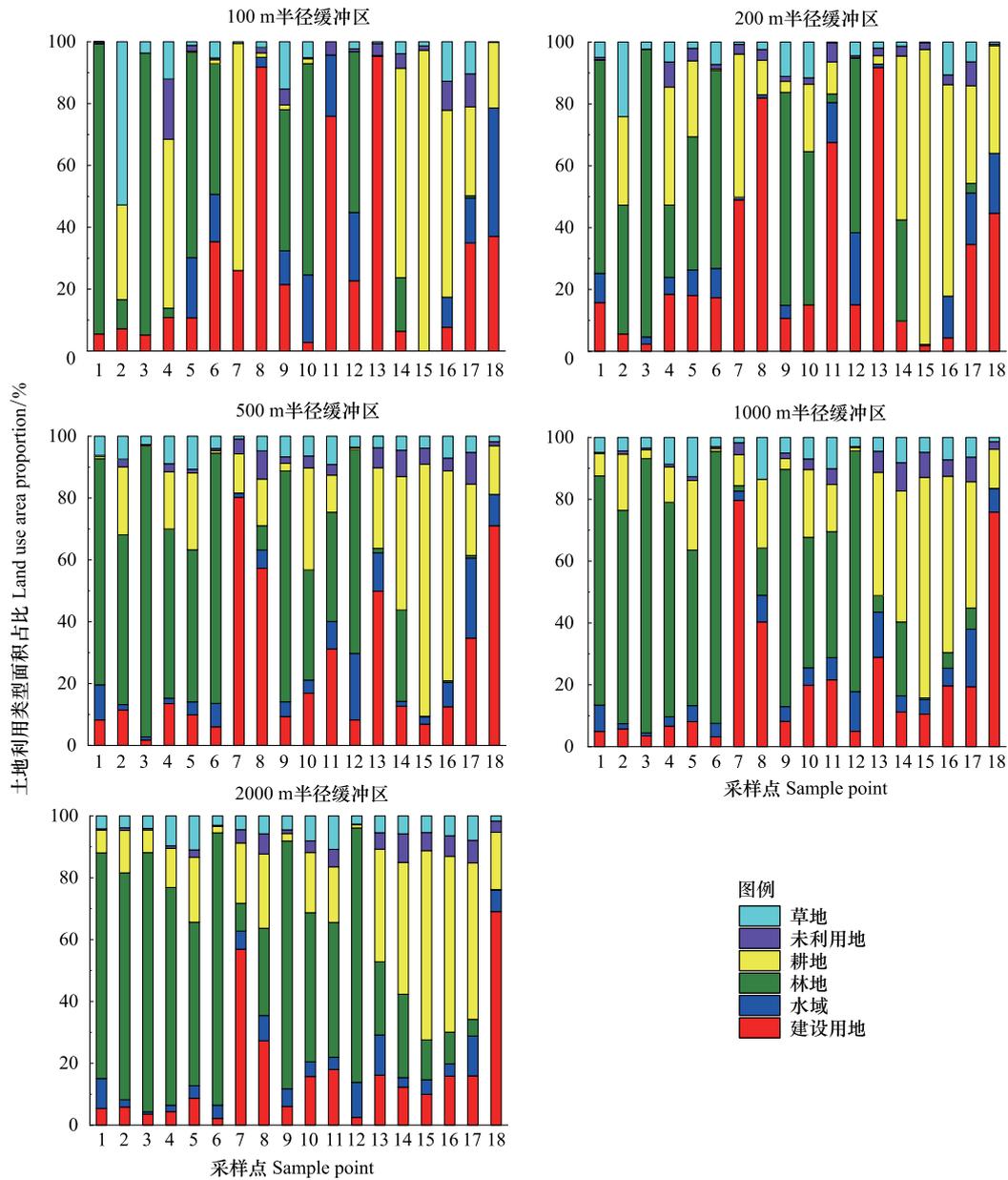


图3 不同空间尺度下土地利用面积比例

Fig.3 Land use area proportion under multiple scales

### 2.3 土地利用/景观格局对水质的影响分析

#### 2.3.1 土地利用类型对水质的影响

通过 RDA 分析,500 m 半径缓冲区土地利用方式对流域水质的解释率最高,需进一步对该空间尺度进行探讨。由表 3 可知,枯水期与丰水期第一轴特征值分别为 0.4615、0.4307,土地利用与水质数据的排序轴相关系数达到 0.6828 和 0.6567,说明排序图能够较好地反映土地利用与水质指标之间的关系<sup>[37]</sup>。图 4 为不同土地利用类型对各水质参数影响的二维排序图,其中各土地利用方式箭头的长短代表对水质指标的影响程度,而土地利用方式与水质指标两者之间形成的夹角代表了相关性,夹角越小,相关性越强,当夹角小于 90°,两者为正相关,接近或等于 90°,两者相关性较小或者不相关,大于 90°为负相关<sup>[38-39]</sup>。枯水期,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、EC、TP 与耕地和建设用地呈正相关,与林地、草地、水域呈负相关;DO 与林地、草地、水域呈正相关,与耕地、建设用地呈负相关;COD 与草地、耕地、水域呈正相关,与林地呈负相关;pH 受林地和耕地的影响较大。丰水期,

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、EC、TP、COD 与耕地和建设用地呈正相关,与林地表现为负相关;DO、pH 与草地呈正相关,与建设用地呈负相关。由此可知,耕地和建设用地是主要污染输出源,林地对保护水质具有积极作用,可能因为建设用地下垫面硬化明显,弱化对污染物的截留与吸收作用,耕地大量施用化肥与农药,造成水质污染,而林地则可有效滞留与吸收污染元素,间接净化水质<sup>[22]</sup>;草地对水质的影响随时间变化,在枯水期与多数污染元素呈负相关,而丰水期则相反;水域与多数水质指标(COD 除外)为负相关或未表现出显著相关性。

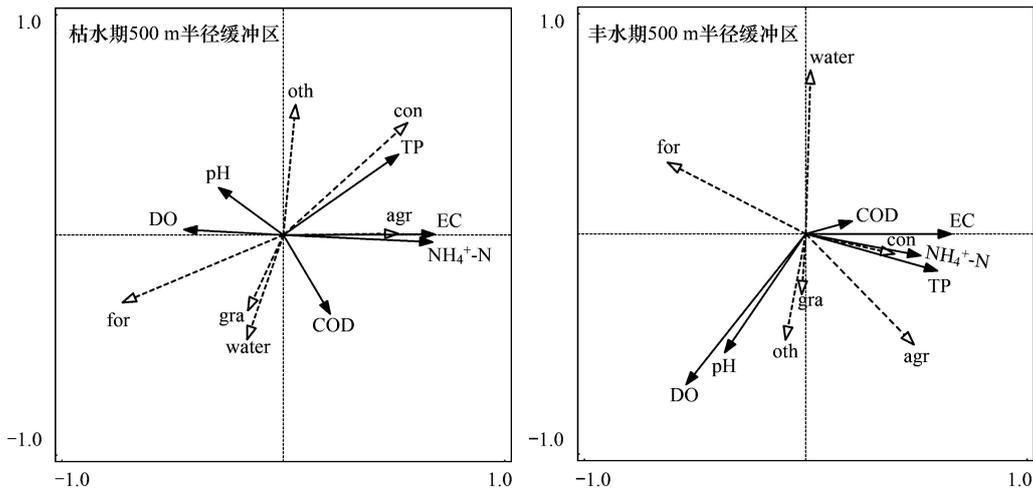


图4 土地利用与流域水质关系的冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis between land use and watershed water quality

agr:耕地 Agricultural land; for:林地 Forest land; gra:草地 Grass land; con:建设用地 Construction land; water:水域; oth:未利用地 Other land

### 2.3.2 土地利用程度综合指数与水质的相关性

通过 Spearman 相关性分析,土地利用程度综合指数( $L_a$ )与水质浓度的相关性如表4所示: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP浓度在枯水期、丰水期均与 $L_a$ 呈显著正向相关,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP的来源可能为农村生活、工业点源、畜禽养殖及农业种植等<sup>[40]</sup>,则强烈的人类活动可能导致水质的恶化。电导率基本代表水中的总离子浓度<sup>[41]</sup>,在枯水期表现出与 $L_a$ 之间显著正向相关,丰水期两者之间未表现出相关性,表明在枯水期土地利用的程度与结构对电导率影响更大。

表4 土地利用程度综合指数与水质浓度的相关性

Table 4 Correlation between comprehensive index of land use degree and water quality concentration

指标 Index	DO	EC	COD	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP	pH
土地利用程度综合指数(枯水期) Comprehensive index of land use degree (Low flow period)	-0.337	0.589 *	0.432	0.703 **	0.478 *	-0.368
土地利用程度综合指数(丰水期) Comprehensive index of land use degree (High flow period)	-0.018	0.432	0.129	0.707 **	0.629 **	-0.448

DO:溶解氧含量 Dissolved oxygen; EC:电导率 Electrical conductivity; COD:化学需氧量 Chemical oxygen demand;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ :氨氮浓度 Ammonia nitrogen; TP:总磷浓度 Total phosphorus; pH:酸碱度 Potential of hydrogen; \* 在 0.05 水平(双侧)显著相关, \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

### 2.3.3 景观格局指数与水质的相关性

Spearman 相关性分析结果如表5所示。PRD 在丰水期与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 呈显著负相关,相关系数分别为 -0.656、-0.540,即单位面积斑块越丰富,以上两种污染物浓度越低,生态系统越稳定。LPI 与 DO 浓度在枯水期为显著负向相关,相关系数为 -0.653,另外,SHAPE\_AM 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 呈显著正向相关,表明随人类活动强

度的增大,可能导致水体恶化,特别是有机污染加重<sup>[29]</sup>。值得注意的是 FRAC\_AM 与水质指标之间的关系较难被合理的解释,比如在丰水期 FRAC\_AM 与 TP 呈显著正向相关,即人为活动干扰程度越强,FRAC\_AM 越小,TP 浓度越低,不能作为有效的水质预测指标<sup>[23]</sup>。而代表景观破碎度的 CONTAG 与景观多样性指标 SHDI 未表现出与水质指标的显著相关性,尚需进一步探讨。

表 5 500m 半径缓冲区水质指标与景观指数相关性分析结果

Table 5 Correlation analysis results between water quality indexes and landscape indexes of 500m radius buffer zone

		景观指数 Landscape pattern index					
		PRD	LPI	FRAC_AM	SHAPE_AM	CONTAG	SHDI
枯水期 Low flow period	DO	0.151	-0.653 **	-0.271	-0.558 *	-0.354	0.459
	EC	-0.129	0.090	0.422	0.426	-0.150	-0.073
	COD	-0.211	0.249	0.228	0.276	0.201	-0.257
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.406	0.251	0.385	0.486 *	-0.057	-0.024
	TP	-0.142	-0.120	0.322	0.259	-0.138	0.083
	pH	0.435	-0.240	-0.344	-0.441	0.051	0.117
丰水期 High flow period	DO	0.223	-0.150	0.121	0.001	-0.174	0.256
	EC	-0.321	-0.141	0.276	0.179	-0.201	0.133
	COD	-0.192	0.095	0.055	0.109	-0.140	-0.012
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.656 **	0.125	0.420	0.449	-0.158	-0.007
	TP	-0.540 *	0.256	0.655 **	0.712 **	-0.179	0.033
	pH	0.421	-0.430	-0.401	-0.539 *	-0.078	0.307

\* 在 0.05 水平(双侧)显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用对流域水质的影响

土地利用方式对水质的影响具有尺度依赖性,但由于各流域的特殊性及研究者使用的数据集分辨率存在差异,得出的结果也可能不同<sup>[42]</sup>。通过 RDA 研究发现 500 m 半径缓冲区的土地利用/景观格局对水质的解释率最高,而方娜等<sup>[43]</sup>通过研究鄱阳湖湿地水质发现 1000 m 半径缓冲区土地利用方式对水质影响最大。这主要是因为采样点周边典型地类的差异所致。本研究也存在着自身的局限性。康文华等<sup>[44]</sup>经过对碳酸盐和碎屑岩两大地貌区的水质研究发现河岸带尺度的土地利用格局对水质影响最大;于磊等<sup>[45]</sup>认为亚流域尺度与水质的相关性较河岸带尺度更强。而本文未对流域尺度与河岸带尺度土地利用/景观格局对水质的影响进行探究。合理的尺度规划,对水质的改善具有积极作用,而复杂的尺度效应表明单一尺度控制大量水质参数也非常困难<sup>[46]</sup>。因此,随后有必要从流域、河岸带缓冲区和圆形缓冲区三种空间尺度,通过更长期的水质监测,尝试作进一步的分析。

就景观组成对水质的影响而言,建设用地和耕地作为“源”景观,加剧了非点源污染,致使水质恶化,许多学者的研究与此类似<sup>[5,12]</sup>;林地多体现“汇”作用,通过截留、吸收污染物,净化水质<sup>[3,11,44]</sup>;李明涛等<sup>[2]</sup>认为草地能有效控制污染,而欧洋等<sup>[13]</sup>发现草地面积的增加会导致水质恶化,草地对水质的影响仍存在争议;未利用地因植被稀少或易受降雨和径流影响,其对水质的影响具有不确定性<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 景观格局对流域水质的影响

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。PRD 代表单位面积的斑块类型数,主要用于反映生态系统的稳定性与抗干扰性。LPI 反映最大斑块占整个景观面积的比例,传达出优势类的信息。在对以林地为主的碎屑岩地区进行研究,康文华等<sup>[44]</sup>发现 LPI 与污染物浓度呈负相关,而郭玉静等<sup>[24]</sup>研究以农地和湿地为优势景观的湖泊湿地,发现 LPI 与水质的恶化有显著关系,表明当优势景观类型为“源”景观,则 LPI 可能与水质污染程度呈正相关,若为“汇”景观,则有利于水质的提

高。LPI 主要与 DO 呈负相关关系,说明采样点周围受到“源”景观作用更强。SHAPE\_AM 值越大,斑块形状越不规则,与污染指标的相关性越强,折射出人为干扰的力度。CONTAG 和 SHDI 与 LPI 类似,不能简单的从 CONTAG 和 SHDI 的数值大小判断其对水质的影响,更重要的是关注优势景观类型,例如在某一研究区中,景观多样性丰富,若“源”景观(建设用地等)具有较高蔓延度且为优势类型,则往往导致水质下降。本文仅对选取景观指数(景观水平)进行了探讨,下一步将增加类型水平上的景观指数,从而更好的揭示景观格局对水质的影响。

#### 4 结论

在借助 ENVI 5.3 完成对土地利用解译的基础上,结合 ArcGIS 10.2 软件建立了青弋江流域 18 个采样点不同半径的圆形缓冲区,运用冗余分析和 Spearman 相关性分析尝试探究了土地利用/景观格局对水质的影响,结果如下:

(1)在 100、200、500、1000、2000 m 5 种空间尺度的圆形缓冲区中,500 m 半径缓冲区景观组成对水质的解释率最高,枯水期与丰水期对水质的解释率分别为 46.30%和 43.10%。

(2)景观类型中,耕地、建设用地面积比例的增加可导致水质的恶化,林地对水质的净化起到积极作用。土地利用程度综合指数与水质污染指标呈正相关,表明人类活动强的区域,土地利用程度越高,水质越差。

(3)景观指数中,PRD 与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 表现出负相关,随斑块丰度密度的增大,流域生态系统更加稳定;LPI 与 DO 为负相关,SHAPE\_AM 与污染指标呈现出正相关性,表明随人类活动强度的增大,水质恶化。

以青弋江流域为研究对象,初步分析了圆形缓冲区尺度上景观格局对水质的影响,可能对土地利用规划和水质保护有一定的积极作用。但因资料有限,景观格局年际变化对水质影响的研究略有欠缺,随后将结合流域、河岸带及圆形缓冲区 3 种空间尺度作进一步研究。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 宁立新,周云凯,白秀玲,徐珊珊,张启斌,李培君. 鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究. 自然资源学报, 2018, 33(3): 439-453.
- [ 2 ] 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, 3(8): 2296-2306.
- [ 3 ] Huang Z L, Han L Y, Zeng L X, Xiao W F, Tian Y W. Effects of land use patterns on stream water quality: a case study of a small-scale watershed in the Three Gorges Reservoir Area, China. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(4): 3943-3955.
- [ 4 ] 陈利顶,傅伯杰,赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [ 5 ] 彭勃,付永胜,赵君凤,周高峰. 小流域土地利用景观格局对水质的影响. 生态科学, 2019, 38(3): 90-99.
- [ 6 ] Xia L L, Liu R Z, Zao Y W. Correlation analysis of landscape pattern and water quality in Baiyangdian Watershed. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2188-2196.
- [ 7 ] 王鹏,齐述华,陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响. 生态学报, 2015, 35(13): 4326-4337.
- [ 8 ] Plexida S G, Sfougaris A I, Ispikoudis I P, Papanastasis V P. Selecting landscape metrics as indicators of spatial heterogeneity—A comparison among Greek landscapes. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 26-35.
- [ 9 ] Bu H M, Meng W, Zhang Y, Wan J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River Basin, China. Ecological Indicators, 2014, 41: 187-197.
- [ 10 ] Dai X Y, Zhou Y Q, Ma W C, Zhou L G. Influence of spatial variation in land-use patterns and topography on water quality of the rivers inflowing to Fuxian Lake, a large deep lake in the plateau of southwestern China. Ecological Engineering, 2017, 99: 417-428.
- [ 11 ] Bian Z Q, Liu L Y, Ding S Y. Correlation between spatial-temporal variation in landscape patterns and surface water quality: a case study in the Yi River Watershed, China. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1053.
- [ 12 ] Hu X Q, Wang H Q, Zhu Y, Xie G, Shi H J. Landscape characteristics affecting spatial patterns of water quality variation in a highly disturbed region. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(12): 2149.
- [ 13 ] 欧洋,王晓燕,耿润哲. 密云水库上游流域不同尺度景观特征对水质的影响. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1219-1226.
- [ 14 ] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. Water Research, 2001, 35(14): 3462-3472.

- [15] 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.
- [16] 朱珍香, 高肖飞, 彭凤, 陈辉煌, 唐立娜, 杨军. 厦门后溪水质与流域景观特征沿城乡梯度的变化分析. 生态学报, 2019, 39(6): 2021-2033.
- [17] Hu C S, Hu C Q, Liu S C, Xu G L, Wu L, Yang L H. Dating of the topmost terrace in the Jingxian Basin, Anhui Province; an indication of the establishment of the Qingyijiang River. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(3): 549-557.
- [18] 朱仁, 司春, 储玲, 芮明, 吴添天, 严云志. 基于栖息地斑块尺度的青弋江河源溪流鱼类群落的时空格局. 水生生物学报, 2015, 39(4): 686-694.
- [19] 蔡庆华. 水域生态系统观测规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [20] 徐延达, 傅伯杰, 吕一河. 基于模型的景观格局与生态过程研究. 生态学报, 2010, 30(1): 212-220.
- [21] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [22] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. 生态学报, 2019, 39(3): 844-852.
- [23] 黄金良, 李青生, 洪华生, 林杰, 曲盟超. 九龙江流域土地利用/景观格局-水质的初步关联分析. 环境科学, 2011, 32(1): 64-72.
- [24] 郭玉静, 王妍, 刘云根, 郑毅, 张超, 侯磊. 普者黑岩溶湖泊湿地湖滨带景观格局演变对水质的影响. 生态学报, 2018, 38(5): 1711-1721.
- [25] 蔡宏, 何政伟, 安艳玲, 张聪, 邓辉. 基于遥感和GIS的赤水河水质对流域土地利用的响应研究. 长江流域资源与环境, 2015, 24(2): 286-291.
- [26] Xiao R, Wang G F, Zhang Q W, Zhang Z H. Multi-scale analysis of relationship between landscape pattern and urban river water quality in different seasons. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 25250.
- [27] 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. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 166-175.
- [28] 李雪瑞, 王秀兰, 冯仲科. 基于土地利用程度的北京城市扩展特征. 地理科学进展, 2009, 28(3): 398-402.
- [29] 焦胜, 杨娜, 彭楷, 郭谋达, 李振民, 周怀宇. 汾水流域土地景观格局对河流水质的影响. 地理研究, 2014, 33(12): 2263-2274.
- [30] 王权, 李阳兵, 刘亚香, 胡先培. 基于地形梯度的岩溶槽谷区土地利用空间格局分析[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7866-7880.
- [31] 项颂, 庞燕, 窦嘉顺, 吕兴菊, 薛力强, 储昭升. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响. 生态学报, 2018, 38(3): 876-885.
- [32] Morris C. Multivariate analysis of ecological data using canoco 5, 2nd edition. *African Journal of Range & Forage Science*, 2015, 32(4): 289-290.
- [33] Xiao C W, Ye J Q, Esteves R M, Rong C M. Using Spearman's correlation coefficients for exploratory data analysis on big dataset. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*, 2016, 28(14): 3866-3878.
- [34] 冯泽波. 滇池主要入湖河流pH值特征及其变化机制研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
- [35] 吕琳莉, 李朝霞, 崔崇雨. 高原河流溶解氧变化规律研究. 环境科学与技术, 2018, 41(7): 133-140.
- [36] 庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价. 环境科学, 2015, 36(7): 2446-2452.
- [37] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, 36(1): 94-106.
- [38] 王小平, 张飞, 李晓航, 曹灿, 郭苗, 陈丽华. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7438-7452.
- [39] 周俊菊, 向鹏, 王兰英, 种国双, 朱国锋, 魏伟, 冯炜, 黄美华. 祁连山东部冰沟河流域景观格局与河流水化学特征关系. 生态学杂志, 2019, 38(12): 3779-3788.
- [40] 翟敏婷, 辛卓航, 韩建旭, 张璐, 张弛. 河流水质模拟及污染源归因分析. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3457-3464.
- [41] 范宁江, 刘玉虹, 安树青, 王中生, 杨海波, 吴春, 詹季华. 电导率作为流域水文变化指标初探. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2127-2131.
- [42] 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.
- [43] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响. 环境科学, 2019, 40(12): 5348-5357.
- [44] 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.
- [45] 于磊, 赵彦伟, 汪思慧, 田竹君. 不同时空尺度下流域景观格局与水质的相关性研究——以嫩江右岸典型子流域为例. 水土保持通报, 2011, 31(5): 254-258.
- [46] Ding J, Jiang Y, Liu Q, Hou Z J, Liao J Y, Fu L, Peng Q Z. Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: a multi-scale analysis. *Science of the Total Environment*, 2016, 551-552: 205-216.