

DOI: 10.5846/stxb202007081781

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.

Li X, Zhang J, Yu W Q, Fan Y S, Li X Y. Impact of the urban landscape pattern in the Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal on the river aquatic environment. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5242-5253.

京杭运河杭州段城市景观格局对河网水环境的影响

李 雪,张 婧,于婉晴,范雅双,李小玉*

浙江农林大学林业与生物技术学院,杭州 311300

摘要:近年来人类活动显著改变了陆地生态环境,城市化作为人类活动的重要组成部分,对陆地生态环境中的水环境也产生了深刻的影响。以杭州市作为研究区,以京杭运河杭州段为研究对象,在对水质监测点建立不同半径缓冲区的基础上,分析了城市景观格局对河网水环境的影响。结果表明:(1)京杭运河杭州段城市景观和农村景观镶嵌分布,河网水系发达,景观破碎化程度高,斑块形状复杂多变,城乡交错带特征典型,人类活动强度高低分化明显;(2)各种景观类型沿河分布的空间特征明显,景观格局指数随缓冲半径的增大而变化,当缓冲半径达到 1000m 以后格局指数维持相对稳定状态;(3)京杭运河杭州段水系的氮源污染物含量整体处于较高水平,总磷含量处于低水平。水质受到建设用地和农业用地的影响较高;(4)不同的景观格局指数对不同的水质指标在不同的时期具有一定的解释能力,且同一景观指数在汛期和非汛期对水环境的影响作用差异较大甚至相反,景观格局在河网密集型城市区域对河流水环境影响的整体利弊还需进一步权衡量化。

关键词:景观格局;河流水质;缓冲区;京杭运河杭州段

Impact of the urban landscape pattern in the Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal on the river aquatic environment

LI Xue, ZHANG Jing, YU Wanqing, FAN Yashuang, LI Xiaoyu*

School of Forest and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China

Abstract: In recent years, human activities have significantly changed the terrestrial ecological environments. As an essential component of human activities, urbanization has a profound impact on the aquatic environment, which is one of terrestrial ecological environments. In this article, Hangzhou City was used as the research area, and the Hangzhou section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal was taken as the research object. Based on the establishment of buffer zones with different radii for water quality monitoring sites, the impact of urban landscape patterns on the aquatic environment of river networks was analyzed. The results indicate that: (1) the urban and rural landscapes in the Hangzhou section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal possess a mosaic structure, developed river network, high degree of landscape fragmentation, complex and diverse patch shape, typical characteristics of urban-rural fringe, and obvious differentiation of human activity intensity. (2) The spatial features of the various landscape types distributed along the river are very distinct. The landscape pattern index changes with the increase of the buffer radius. Once the buffer radius reaches 1000 meters, the landscape pattern index maintains a relatively stable state. (3) The content of nitrogen pollutants in the water system in the Hangzhou section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal is generally at a high level, and the total phosphorus (TP) content is at a low level. Lands for construction and agriculture have a relatively high influence on water quality. (4) Different landscape pattern indexes have certain explanatory power for different water quality indexes during different periods, and the

基金项目:国家自然科学基金项目(31870702,32071581)

收稿日期:2020-07-08; 网络出版日期:2021-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixy76@163.com

impact of the same landscape index on the aquatic environment in flood seasons and non-flood seasons is quite different and even opposite. The overall pros and cons of the impact of landscape pattern in dense river network urban areas on river aquatic environments need to be further weighted.

Key Words: landscape pattern; water quality; buffer zone; the Hangzhou section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

近年来中国城市化进程仍旧在不断推进,预计在 2030 年中国城镇化水平将达到 70.99%^[1-2]。城市化进程不但改变了原本自然或半自然下垫面的景观类型和布局,而且改变了自然生态系统水文和地球化学循环过程^[3-6]。中国城市水环境污染形势严峻,90%以上的城市河流受到不同程度污染,自然过程已经基本丧失了对城市水环境质量的调控能力,人类活动已经成为水环境及水质变化的主导要素,城市水环境的保护和治理引起了广泛关注^[7]。人类活动通过改变景观结构和空间格局,改变了水文过程和径流路径,从而影响了污染物的发生位置、迁移路径和转化过程,进而对河流水环境产生深刻影响^[8-9]。因此,从景观生态学的角度出发,探索景观内不同土地利用及其格局对河流水环境的影响,可为通过有目的地调节人类活动来调控景观空间格局、改善其服务功能提供重要的理论依据^[10-13]。

大量研究表明城市景观格局对于河流水环境存在不同程度的影响^[14-17]。如 Wang 等^[18]在上海城区、郊区和农村不同城市化梯度上应用综合污染指标比较了地表水质的变化,表明地表水质的空间格局取决于城市化水平;Tu^[19]在不同城市化梯度上选择了 129 个子流域进行分析表明土地利用对水质的解释能力随着城市化程度的不同而变化,如农业用地和居住用地比例与污染物浓度在城市化较低的区域呈正相关,而在高度城市化区域却呈负相关;Shen 等^[20]发现景观组成指标可解释 46.9%的水质变化,而如果加入景观构型指标,则可以解释水质变化的 60.3%,同时类型水平上的景观指数对水质的预测比景观水平上的指数更为有效;Hasenmuellerd 等^[21]在农村-城市的城乡梯度带上发现洪水事件中城市河流的水质特征变异程度更大,可达农村河流水质变异幅度的 5 倍,对环境质量有着较大的负作用;Deng^[22]发现水质与河网的结构和连通性具有显著的相关性,与以城市用地为主的区域与耕地为主的区域相比,在很大程度上减弱了这种相关性,耕地与城市用地的季节性作用则相反,认为河网结构和连通性有利于河流水质改善。

总体上,不同的景观指数对不同的水质指标在不同的缓冲区研究尺度上有着不同的解释能力。但是,由于景观的复杂性和异质性,一些共性规律亟待深入发掘。景观格局和水质关系的研究一直是景观生态学的一个热点和难点^[23-25]。不同景观类型和景观格局的变化对水质的影响存在差异性^[26]。

本文以京杭运河的起点杭州段及其相通相连河网水系区域作为研究区,河流总趋势为南北向^[27],南依钱塘江,北至杭州德清边界,以水质监测点为中心建立不同宽度的缓冲区,通过计算景观格局指数,并与不同的水质指标进行相关性分析、冗余分析等,定量分析不同空间尺度下景观格局与河流水质的关系,以探讨流域景观空间分布格局对水质状况的影响程度,为建立更为合理的景观结构,改善运河水系河流水环境提供依据。

1 研究区概况

杭州作为长江三角洲中心城市之一,总面积 16850 km²,建成区面积 559.2 km²,常住人口 1036 万人,城镇人口 813.26 万人,城镇化率 78.5%^[28]。京杭大运河是世界上里程最长、工程最大的运河,也是最古老的运河之一,南起杭州(余杭),北至北京(涿郡),贯通海河、黄河、淮河、长江和钱塘江五大水系,全长约 1794 km^[29]。杭州是京杭大运河的南端起点,京杭大运河从钱塘江配水自南往北穿越杭州城区,与之相通的河道纵横,水网发达,水文过程复杂多变^[27]。运河杭州段(图 1)是杭州主城区水位最低的地表河流,两侧支流众多,是市区各类河水、地表径流和众多支流的主要受纳水体,城区与运河相连的河道多达 33 条(除钱塘江外)^[30],每年进入运河的水量达到 4.5×10⁸ m³,对运河水质产生了巨大的负面影响^[31-32]。另外,运河杭州段从中心城区流经城乡交错带,景观类型复杂,人类活动强烈,对该区域河流水环境具有重要影响。

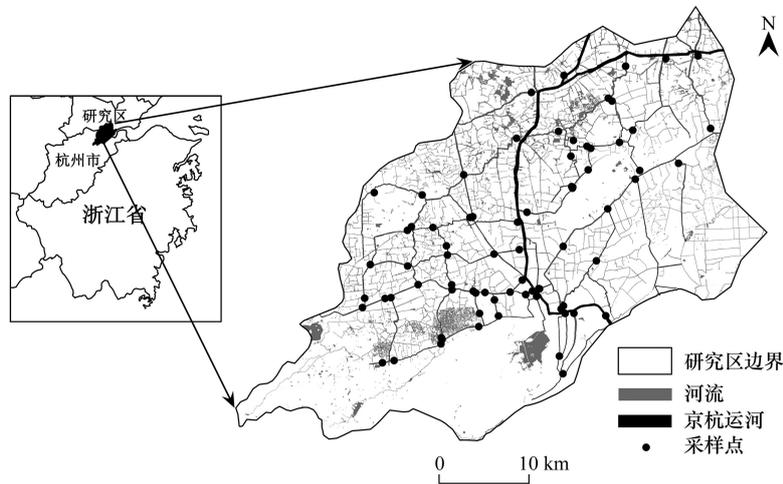


图1 京杭运河起始杭州段及其河渠水网分布图

Fig.1 Location map of the Hangzhou section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal

2 研究方法

2.1 主要数据采集及处理

(1) 遥感数据解译

以 2017 年高分二号 (GF-2) 影像为基础信息源, 依据京杭运河杭州段城市土地利用实地调查结果, 将景观类型划分为 10 个类型 (表 1); 利用 GF-2 遥感影像, 通过 eCognition 面向对象的分类法对遥感影像进行解译; 在此基础上, 为提高解译精度和分类的准确度, 消除时间差, 结合 2019 年谷歌实时地图和野外实地考察, 对分类结果进行修改和校正, 使得数据匹配。通过野外实地采集的 GPS 定点信息进行验证, 满足数据分析要求。

表 1 京杭运河杭州段景观类型分类标准

Table 1 Classification standard of landscape types in Hangzhou section of the Beijing Hangzhou Grand Canal

I 级分类 Class I	II 级分类 Class II	含义 Explanation
农业用地 Agricultural land	—	指种植农作物的土地, 包括熟地, 新开发、复垦、整理地, 休闲地。
林地 Woodland	—	指生长乔木、竹类、灌木的土地。包括城镇、村庄范围内的绿化林木用地, 铁路、公路征地范围内的林木, 以及河流、沟渠的护堤林。
草地 Grassland	—	指生长草本植物为主的土地。
水体 Water body	—	指陆地水域, 包括天然形成或人工开挖的有河流存在的用地。
湿地 Wetlands	—	指地表过湿或经常积水, 生长湿地生物的地区。
建设用地 Construction land	—	指城乡居民点以及工矿、交通等用地。
	道路 Road	是供各种无轨车辆和行人通行的基础设施。
	商业与工业用地 Commercial and industrial land	指主要用于商业、服务业的土地和用于工业生产、物资存放场所的土地。
	公共设施用地 Public facilities land	指用于机关团体、新闻出版、科教文卫、公用设施等的公共管理与公共服务用地。
	居民用地 Residential land	指城镇、农村主要用于人们生活居住的房基地及其附属设施的土地。
其他 Other		除以上各类之外的土地利用

通过河网提取、河流分割等步骤,并结合《浙江省河流手册》^[27]中的流域和河流水系分布图和杭州市行政边界,确定研究区边界范围(图1)。

(2) 河流水质监测

选择子流域界线相对清晰的支流作为监测河流,在汇入上级河道前且不受上一级河道影响的位置进行水质采样,共设置了72个具有代表性的水质监测点(图1),基本实现了监测点在研究区的均匀分布。分别在2019年3月、7月和11月进行了3次水样采集,采样选择当月中旬连续晴天且采样前三天无降水的时段,以消除降水对监测结果的影响;样品采集时保证采样位置处于河流中央且流速较大处,以保证样品的代表性;水样储存于预先处理过的500 mL聚乙烯瓶中。

综合考虑京杭运河杭州段水环境主要污染因子,本研究选取了氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、总氮(TN)和总磷(TP)4个水质指标,利用间断化学分析仪(BluVision™,Skalar)进行水质指标测定。

2.2 主要研究方法

(1) 缓冲区分析

由于研究区河渠交织密布,水网发达,河流人为调控程度高,水文过程复杂,河渠水流互通,汇水单元界线不明确,因此,本研究以水质监测点为中心建立圆形缓冲区,基于缓冲区分析景观格局对河流水质的影响。考虑到研究区位于杭州市的城乡过渡带,景观异质性程度极高,在缓冲半径划分时采用了200 m和500 m两种间隔距离,共设置了8个不同半径的缓冲区,缓冲半径依次为100、300、500、1000、1500、2000、2500、3000 m(图2)。

(2) 景观格局指数计算

选择的景观格局指数包括斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、边缘密度(ED)、景观形状指数(LSI)、周长—面积分维数(PAFRAC)、景观蔓延度指数(CONTAG)、散布与并列指数(IJI)、景观分割度(DIVISION)、香农多样性指数(SHDI)和聚集度(AI),以及各景观类型的面积百分比。通过Fragstats 4.2分别计算不同半径缓冲区内的格局指数。

(3) 统计分析

本文采用了Pearson's相关分析法对景观指标和水质指标进行分析,以探讨京杭运河杭州段不同尺度缓冲区上的景观类型及其空间格局与水质的相关性。一些研究已经将Pearson's相关分析法作为衡量任何两个变量之间联系强度的标准^[33-34]。为了确定景观格局与水质指标之间的关系,本文使用冗余分析对景观格局进行分析。为了定量研究京杭运河杭州段水质变化和景观格局之间的关系,因此使用多元逐步回归分析法来探讨京杭运河杭州段对不同缓冲区内景观格局和水质的响应关系。

本研究采用SPSS 25.0实现Pearson's相关分析和多元逐步回归分析,冗余分析则通过CANOCO 5.0软件实现。

3 结果与分析

3.1 研究区景观格局分析

京杭运河杭州段景观格局如图3所示,研究区总面积1509 km²,其中农业用地和林地是2种主要的景观类型,分别占研究区总面积的25.21%和24.87%,是由于研究区北部区域属于城乡过渡带,农业种植用地分布集中,而西部属于著名的西湖、灵隐寺和西溪湿地风景区,人类开发程度较低,林地成大面积连片分布;居民用地、道路和商业与工业用地等建设用地,分别占研究区总面积的18.74%、10.05%和9.24%,主要是位于研究区

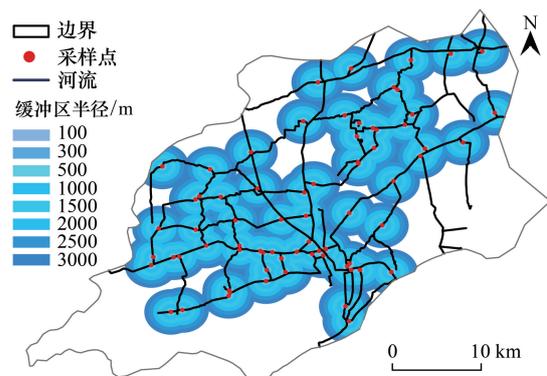


图2 基于水质监测点的圆形缓冲区划分

Fig.2 Schematic diagram of circular buffer

中南部钱塘江北岸的城市建成区,也是研究区中人类活动强度最高的区域;另外,研究区河网密布、水系发达,水体面积占到了 7.74%。

人类活动不仅增加了景观斑块的种类,而且使得斑块的形状更趋于多样化、复杂化,从而加剧了景观的破碎化程度^[35]。在整个研究区尺度上,边缘密度为 129.69 m/hm²,周长—面积分维数为 1.48,景观形状指数为 127.46,充分体现了区域城乡交错带的典型特征,斑块形状复杂多变,斑块破碎化程度高;散布与并列指数为 78.03,聚集度为 67.59,表明研究区斑块分布较为分散,聚集程度较低;香农多样性指数为 1.83,说明该区域景观类型复杂多样,景观异质性高,人类活动强度高变化明显。

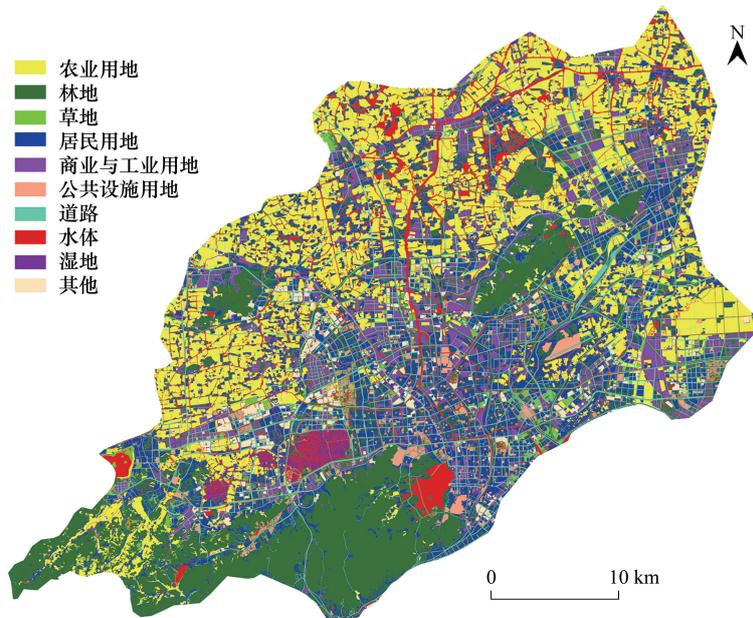


图3 京杭大运河杭州段景观格局图

Fig.3 Landscape map of the Hangzhou Section of The Beijing-Hangzhou Grand Canal

3.2 不同半径水质监测点缓冲区景观格局变化

图 4 为不同半径缓冲区的景观类型组成比例,可以看出不同缓冲区内景观组成差异明显。例如,农业用地所占比例在 100 m 缓冲区内最低,在 300 m 缓冲区内最高,说明农村近距离沿河两岸的农田分布模式最为广泛;道路所占比例却在 100 m 缓冲区内最高,充分表明了道路与河流堤岸并排相连分布的特征;居民用地比例在 500 m 缓冲区内最高,表明居民用地在河流周边地区分布较广泛。

景观格局指数随着缓冲半径的变化发生明显变化(图 5)。斑块密度(PD)与边缘密度(ED)具有相同变化趋势,在 1000 m 以内的缓冲区,均随着缓冲半径的增大而降低,且其中在 100 m 缓冲区中远高于其他缓冲区,但当缓冲半径超过 1000 m 后仅有小幅波动,基本维持稳定,这表明城市河流离岸越近,受人类活动的调控和干扰就越强烈,景观破碎化程度越高,特别是在近岸 100 m 的区域内尤为剧烈。周长—面积分维数(PAFRAC)和香农多样性指数(SHDI)与 PD 和 ED 的变化趋势正好相反,当缓冲半径小于 1000 m 时呈增加趋势,高于 1000 m 后基本稳定,这也是由于越靠近河流两侧的近岸区域受人类调控越强烈,使得斑块形状规则简单,但景观类型更加丰富多变。散布与并列指数(IJI)在 100 m 缓冲区最高,达到了 76.4%,表明景观类型的混合程度在邻接河岸的 100 m 区域内最高,而在其他缓冲区则相对稳定(68%左右)。聚集度指数(AI)随着缓冲半径的增大而呈逐步降低趋势,这主要是河流水体和沿河两侧道路增强了缓冲区内的景观聚集特征。

从景观格局指数在不同半径缓冲区内变化趋势来看,基于河流监测点的 100 m 和 1000 m 的缓冲半径是两个关键尺度,在 100 m 缓冲区内人类活动的干扰最为强烈,而这种干扰随着缓冲半径增大到 1000 m 后基

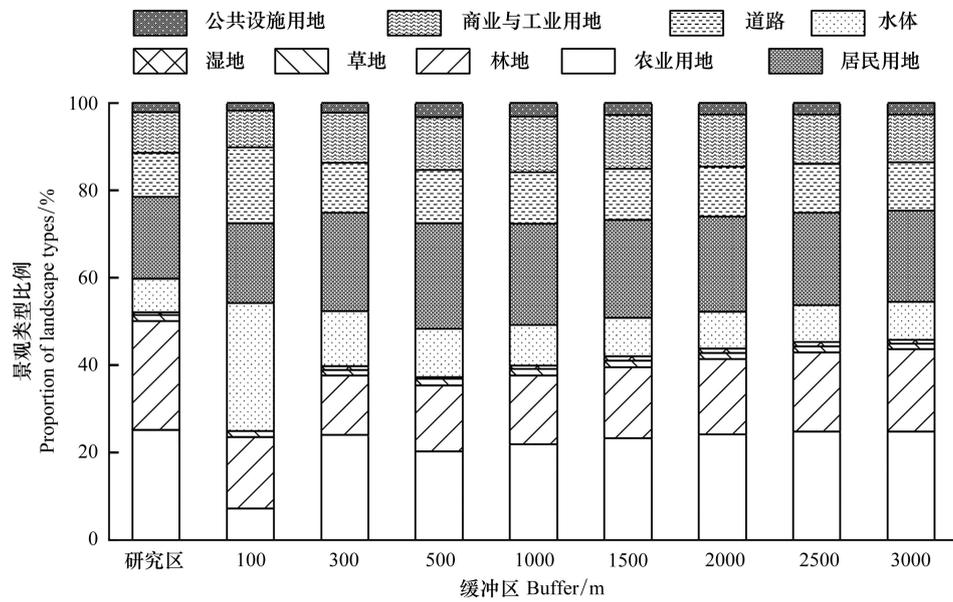


图 4 京杭运河杭州段不同半径圆形缓冲区内的景观类型比例

Fig.4 The composition of landscape types at different scales in the Hangzhou Section of The Beijing-Hangzhou Grand Canal

本进入稳定状态,缓冲距离对景观格局特征的影响不明显。

3.3 河流水质统计特征分析

京杭运河杭州段 72 个监测点的水质指标的描述性统计特征如表 2 所示。氨氮含量在 11 月份的变幅最大(0.05—8.97mg/L),变异系数达到了 0.96,从平均值来看,11 月最低(1.32 mg/L),3 月和 7 月较为接近,分别为 1.71 mg/L 和 1.77 mg/L;硝氮的平均含量在 7 月最低(1.14 mg/L),在 3 月和 11 月的含量较为接近,分别为 1.76 mg/L 和 1.68 mg/L;总氮含量的平均值在 3 月(7.57 mg/L)远高于 7 月(3.58 mg/L)和 11 月(3.45 mg/L);总磷含量呈逐步降低趋势。总体来看,研究区河流的氨氮和总氮含量整体处于较高水平,水体污染较为严重。因此,京杭运河杭州段水质污染主要属于氮源污染。

表 2 水质指标的描述性统计特征
Table 2 Descriptive statistics of water quality indicators

水质指标 Water quality index (mg/L)	时间 Month	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	中位数 Median	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
氨氮 NH ₄ ⁺ -N	3 月	0.01	7.47	1.71	1.29	1.39	0.81	1.90	4.78
	7 月	0.13	4.8	1.77	1.64	0.89	0.50	1.03	1.39
	11 月	0.05	8.97	1.32	0.97	1.28	0.96	3.59	18.07
硝氮 NO ₃ ⁻ -N	3 月	0.09	4.35	1.76	1.71	0.87	0.50	0.71	1.37
	7 月	0.04	2.99	1.14	1.06	0.6	0.53	0.76	0.78
	11 月	0.07	8.73	1.68	1.50	1.34	0.79	2.84	11.72
总氮 TN Total nitrogen	3 月	1.72	26.4	7.57	5.29	5.46	0.72	1.87	3.29
	7 月	0.86	8.34	3.58	3.53	1.28	0.36	0.86	2.11
	11 月	0.81	10.57	3.45	3.11	1.85	0.54	1.56	3.23
总磷 TP Total phosphorous	3 月	0.05	1.21	0.39	0.33	0.24	0.60	1.49	2.65
	7 月	0.11	0.7	0.32	0.29	0.12	0.38	1.26	2.05
	11 月	0.04	1.32	0.25	0.20	0.21	0.86	3.38	12.23

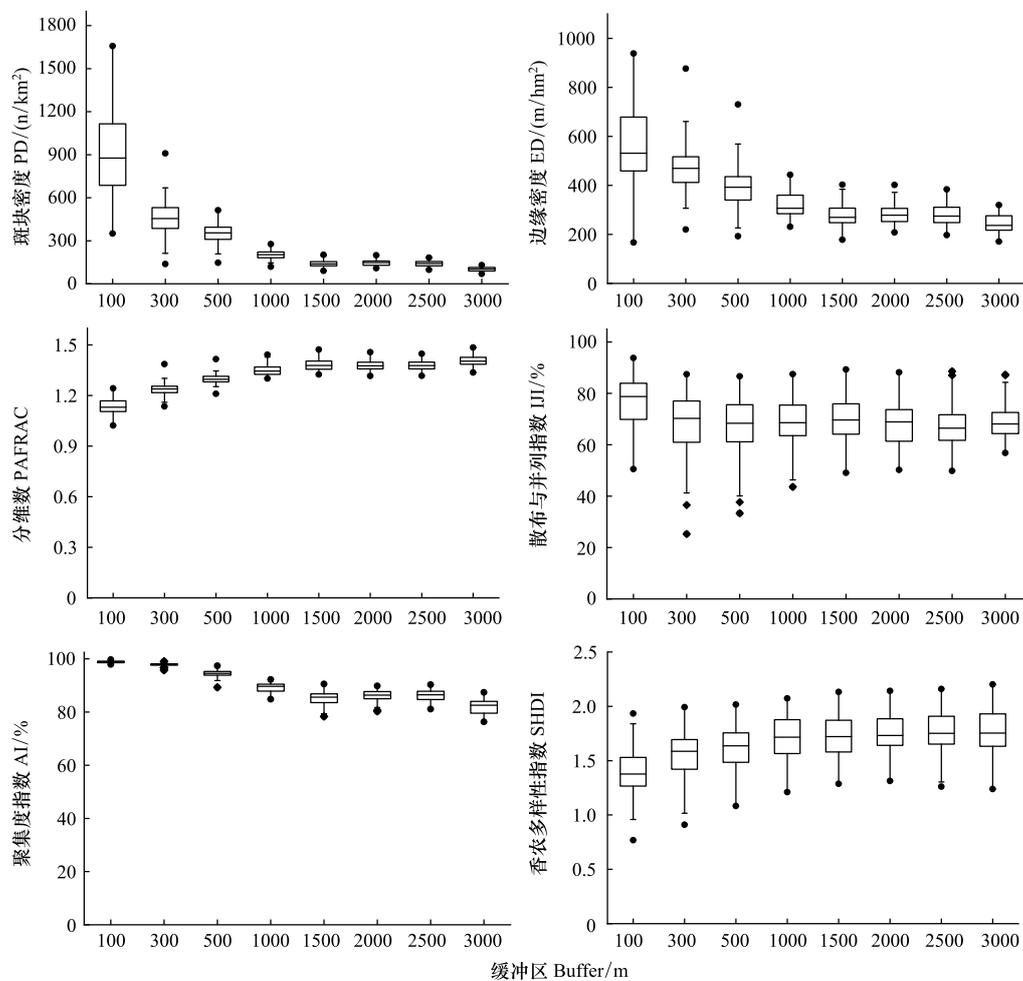


图5 景观格局指数随缓冲区半径的变化特征

Fig.5 Statistics of landscape level index in different buffer zones

PD: 斑块密度 Patch Density; ED: 边缘密度 Edge Density; PAFRAC: 分维数 Perimeter-Area Fractal Dimension; IJI: 散布与并列指数 Interspersion and Juxtaposition Index; AI: 聚集度指数 Aggregation Index; SHDI: 香农多样性指数 Shannon's Diversity Index

3.4 景观格局对河流水质的影响分析

3.4.1 景观类型与河流水质的相关性分析

通过对 72 个监测点不同半径缓冲区内的景观类型比例与水质指标的相关性分析(表 3),可以看出不同的景观类型对河流水质在不同的季节有着不同的影响。氨氮在汛期(7 月)与居民用地和公共设施用地等建设用地的相关性最显著,同时农业用地也对氨氮有着显著影响;而在非汛期(3 月和 11 月),氨氮与景观类型的相关性较低;氨氮与景观类型的关系呈现出了较强的季节性变化。硝氮与景观类型的关系最为密切,其中居民用地在 3 个时段都与硝氮存在显著相关性;农业用地对硝氮的贡献主要表现在非汛期,林地在 11 月份降雨量较低的情况下对硝氮有显著的消减作用。总氮含量受商业与工业用地的影响在 3 个时段都较为明显,同时在 7 月和 11 月受农业用地的影响显著,特别是 7 月份与公共设施用地的相关性极为显著;这也表明了工业和商业生产是总氮的主要来源,同时农业生产也对总氮有重要影响。总磷与景观类型的相关性整体较弱,仅 3 月份与草地和居民用地呈现相关性。京杭运河杭州段河流水质的污染源主要来自建设用和农业用地。

3.4.2 景观格局与河流水质的冗余分析

景观格局指数随缓冲半径的变化趋势表明,当缓冲半径大于 1000 m 时,缓冲区的景观格局指数趋于稳定,不再随缓冲半径的增大而发生较大变化,因此,本研究以 1500 m 缓冲区为重点,基于冗余分析(RDA)量

化景观格局指数对河流水质的解释能力排序(图 6),图中各个景观格局指标箭头与水质指标箭头之间夹角小于 90 度,两者关系为正相关,大于 90 度为负相关,等于 90 度则不相关;两者之间锐角越小或钝角越大,则正向或负向相关性越强^[36]。结果表明,散布与并列指数(IJI)与硝氮和总氮在 3 个月份都呈极强的正相关,表明景观类型的混合程度越高,河流硝氮和总氮含量也越高;周长—面积分维数(PAFRAC)、景观形状指数(LSI)和边缘密度(ED)与硝氮和总氮在非汛期(3 月和 11 月)呈负相关,在汛期(7 月)却呈明显正相关,说明相对复杂的斑块形状在非汛期有利于消减河流的硝氮和总氮污染,但在汛期增大了污染物经降水冲刷进入河流的可能性;聚集度指数(AI)对水质的影响趋势与形状指数相似,斑块的集中连片分布在非汛期增加了氮源污染,但在汛期有助于氮源污染削弱;香农多样性指数(SHDI)在 3 个时段都与总氮呈明显正相关,说明景观类型越复杂,对河流总氮的影响越大;斑块密度(PD)与硝氮在非汛期呈显著负相关,在汛期成极显著正相关,城市景观的破碎化程度在非汛期加剧了河流硝氮污染,但在汛期可以减少大面积连片斑块被降水冲刷从而有助于减缓硝氮污染。总磷含量在 3 个时段与景观格局指数的相关性均较低。

表 3 基于缓冲区的景观类型与水质指标的相关性

Table 3 Correlation between landscape types and water quality indicators

水质指标 Water quality index	月份 Month	商业与 工业用地 Commercial/ industrial land	农业用地 Agricultural land	林地 Forest land	草地 Grasslands	公共设施用地 Land for public facilities	居民用地 Residential land	道路 Road	水体 Water body	湿地 Wetlands
氨氮 NH ₄ ⁺ -N	3 月									
	7 月	+	---			+++	+++	+		
	11 月								-	
硝氮 NO ₃ ⁻ -N	3 月		+++				--			--
	7 月				++		---			++
	11 月	+	+++	---			---			
总氮 TN	3 月	++							-	
	7 月	+	-			+++				
	11 月	+	++	-						
总磷 TP	3 月				---		++			
	7 月								--	
	11 月									

注:在 8 个不同尺度的缓冲区中分别检验景观类型面积比与水质指标的相关性,+(-)表示在 3—4 个缓冲区中呈显著或极显著正(负)相关,++(--)表示在 5—6 个缓冲区中呈显著或极显著正(负)相关,+++(-)表示在 7—8 个缓冲区中呈显著或极显著正(负)相关

3.4.3 景观格局与河流水质的多元逐步回归分析

(1) 景观类型与水质之间的关系

表 4 为水质指标和景观类型占比之间的多元逐步回归分析结果,可以看出各个回归模型都达到显著水平($P < 0.05$),景观类型中商业与工业用地、居民用地、水体是主要影响水质指标的类型。在 1500 m 缓冲区,不同月份的水质受到不同景观的影响。3 月,硝氮受到了商业与工业用地和农业用地的影响,随着二者的增加硝氮浓度增加;总氮浓度是随着商业与工业用地的增加而增加,随着水体增加而减少,说明了城市的排水系统对水质指标有一定影响;总磷受到了居民用地和草地的影响。7 月,氨氮随着居民用地增加而增加,居民生活对氨氮影响明显;硝氮随着公共设施用地、草地和湿地增加而增加,居民用地的减少而减少;总氮随着商业与工业用地和公共设施用地增加而增加。11 月,氨氮随着水体的增加而减少;硝氮随着湿地和居民用地的增加而减少,与商业与工业用地则相反;总氮随着农业用地和商业与工业用地的增加而增加。

(2) 景观格局指数与水质的关系

逐步多元回归分析能够将回归方程中那些不重要的自变量因子排除,从而建立最佳模型。在 1500 m 的缓冲区尺度上,景观格局指数与水质的逐步多元回归分析结果如表 5 所示。3 月,硝态氮受到景观指数 IJI 的影响,随着 IJI 的增加而增加;总氮随着 PAFRAC 的增加而减少。7 月,氨氮随着 DIVISION 的增加而增加,随

着 IJI 的增加而减少;总氮随着 PAFRAC、IJI、PD、CONTAG 和 SHDI 的增加而增加。11 月,氨氮随 SHDI 的增加而增加;硝氮随着 CONTAG 和 IJI 的增加而增加;总氮随着 LPI 的增加而减少,随着 IJI 的增加而增加。

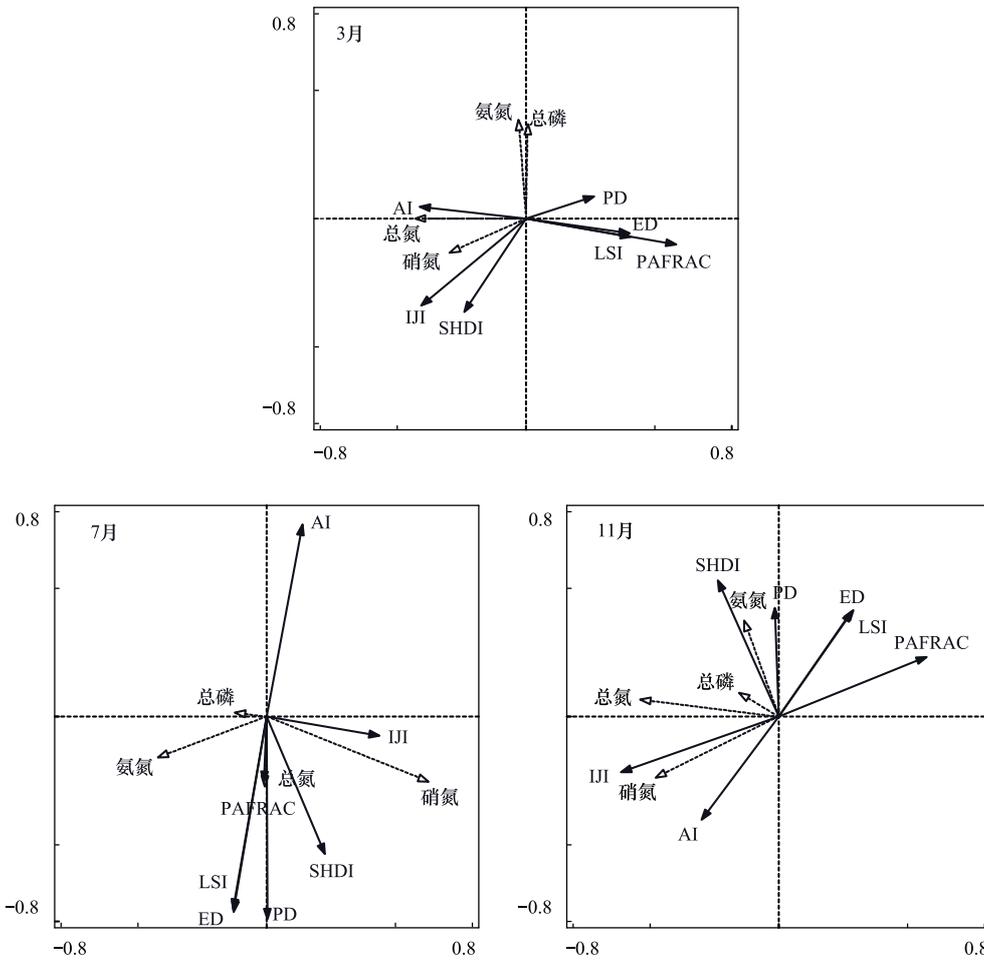


图 6 基于 1500 m 圆形缓冲区的景观指数与水质指标 RDA 排序图

Fig.6 RDA ordination chart of the area ratio (%) of landscape type and water quality index of 1500 m in circular buffer zone
LSI:景观形状指数 Landscape Shape Index

表 4 景观类型与水质的逐步多元回归分析结果

Table 4 Stepwise multiple regression analysis of landscape types and water quality indicators

时间 Month	水质指标 Water quality index	逐步回归方程 Multiple linear regression models with step-wise	R ²	P
3 月 March	氨氮	—		
	硝氮	硝氮 = 0.035A + 0.016B + 1.004	0.14	0.006
	总氮	总氮 = -0.269C + 0.296A + 6.911	0.181	0.001
	总磷	总磷 = 0.002D - 0.03E + 0.31	0.148	0.004
7 月 July	氨氮	氨氮 = 0.048D + 0.703	0.317	<0.001
	硝氮	硝氮 = 0.055E + 0.05F - 0.028D + 0.038G + 1.489	0.377	<0.001
	总氮	总氮 = 0.053A + 0.095F + 2.755	0.136	0.006
	总磷	总磷 = -0.007C + 0.380	0.081	0.016
11 月 November	氨氮	氨氮 = -0.066C + 1.885	0.057	0.044
	硝氮	硝氮 = -0.065G + 0.065A - 0.052D + 2.264	0.281	<0.001
	总氮	总氮 = 0.03B + 0.101A + 1.657	0.157	0.003
	总磷	—		

A 代表商业与工业用地(%);B 代表农业用地(%);C 代表水体(%);D 代表居民用地(%);E 代表草地(%);F 代表公共设用地(%);G 代表湿地(%)

表 5 景观格局指数与水质的逐步多元回归分析结果

Table 5 Stepwise multiple regression analysis results of landscape pattern indices and water quality indicators

时间 Month	水质指标 Water quality index	逐步回归方程 Multiple linear regression models with step-wise	R^2	P
3 月 March	氨氮	—		
	硝氮	硝氮 = 0.029IJI - 0.261	0.082	0.015
	总氮	总氮 = -42.473PAFRAC + 66.201	0.063	0.034
	总磷	—		
7 月 July	氨氮	氨氮 = -0.024IJI + 17.137DIVISION - 13.135	0.134	0.007
	硝氮	硝氮 = 8.31PAFRAC + 0.038IJI + 0.01PD + 0.142CONTAG + 2.938SHDI - 25.798	0.469	<0.001
	总氮	—		
	总磷	—		
11 月 November	氨氮	氨氮 = 1.524SHDI - 1.32	0.063	0.033
	硝氮	硝氮 = 0.062CONTAG + 0.063IJI - 5.525	0.175	0.001
	总氮	总氮 = -0.1LPI + 0.064IJI + 0.079	0.164	0.002
	总磷	—		

DIVISION:景观分割度;CONTAG:景观蔓延度指数;LPI:最大斑块指数

4 讨论

水质对于维持健康的河流生态系统的结构和功能至关重要,自然过程和人为活动的影响使得河流水质和环境健康发生变化。京杭运河杭州段总面积 1509 km²,城市景观和农村景观镶嵌分布,北部以农村景观为主,中南部为钱塘江北岸城市景观,西部则为风景名胜区,农业用地和林地分别占到了研究区总面积 1/4,居民用地、商业与工业用地等建设用地占 40%,水体面积占到了 7.74%,河网水系发达。本研究表明,京杭运河杭州段水质污染类型主要是氮源污染,污染源主要来自建设用地和农业用地。总氮与商业与工业用地之间存在着强烈的相关关系,这表明建设用地是京杭运河杭州段中氮素的主要来源。有研究表明,农业用地和城镇建设用地是河流水化学污染的重要来源^[37]。城市化进程突出表现在大面积的不透水硬表面取代了自然植被为主的透水软表面,不透水地面增加、绿地和水体景观减少、景观破碎和离散化加剧,由此引起了城市景观格局变化,导致降雨径流过程发生了质的变化,一定程度上造成了城市水体质量下降^[38-39],使得城市面临着愈加交织复杂的水环境危机^[38]。同时,城市排水系统干扰了自然排水过程,比如污水管网渗漏、地表水及地下水渗入、污水收集处理后异地排放等^[40-42],对河流水质影响严重。城市景观格局对河流氮磷污染物的发生、迁移和转化产生重要影响,人类活动干扰加剧了河流氮、磷污染,在很大程度上增加了河流污染的复杂性、随机性和空间分异性^[43]。本研究从逐步多元回归分析可以看出,IJI 是影响水质最重要的景观格局指数,同时,京杭运河 1000 m 缓冲区尺度的景观格局对水质影响最为显著,因此,在加强京杭运河杭州段水资源的保护与管理时,需要重点对此缓冲区尺度的景观格局进行优化与调整。

景观空间格局对进入河流污染物的吸收和降解过程的影响存在差异性^[26],不同土地利用类型对于降雨径流过程的影响也有所不同^[39]。城市景观格局的水环境效应存在时间尺度性,即在夏季丰水期、春秋平水期和冬季枯水期对水体污染的影响程度存在差异,例如在珠江、太湖和南京 28 处湿地等水体中,丰水期总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、叶绿素浓度最高,水环境污染程度最高^[14]。在本研究中京杭运河杭州段河流水质与 PD、ED、LSI、PAFRAC 和 AI 等景观格局指数的关系,在汛期和非汛期差异较大甚至相反,表明降水和径流等水文过程的关键性作用,而景观格局对河流水质的影响在很大程度上是通过径流的空间再分配等水文过程作用于河流水环境。因此,针对京杭运河杭州段的河流水质污染防治,需要结合运河两侧景观格局,因地制宜通过格局优化和空间配置强化城市景观对污染物的消减和拦截等功能。

5 结论

本文以京杭运河起点杭州段河网水道为研究对象,设置了 72 个河网水质监测点,以水质监测点为中心划分圆形缓冲区,在分别对该区域景观格局和河流水质监测分析的基础上,研究景观类型和景观格局特征对河流水质在不同时期的影响特征,结论如下:

(1)在研究区整体尺度上,景观破碎化程度高,斑块形状复杂多变,景观类型多样,异质性高,城乡交错带特征典型,人类活动强度高,分化明显。

(2)在缓冲区尺度上,景观格局指数随缓冲半径内的变化特征明显,100 m 缓冲区内的格局指数远高于或低于其他缓冲区,而当缓冲半径达到 1000 m 以后,格局指数则相对稳定,不再随缓冲半径的增加而发生明显变化,体现了人类活动沿河流两侧向外扩展的特征。

(3)京杭运河杭州段水系的氮源污染物含量整体处于较高水平,氨氮、硝氮和总氮的年均含量分别为 1.60、1.53、4.87 mg/L,总磷含量处于低水平,年均值为 0.32 mg/L。

(4)景观类型与河流水质的相关性在不同半径的缓冲区内表现较为一致,硝氮受景观类型的影响最为显著,氨氮仅在汛期与建设用地和农业用地的相关性较高,总氮与景观类型相关性的季节性差异最明显,而总磷与景观类型的相关性整体较弱。

(5)城市景观格局指数与河流水质参数的相关性较为明显,景观格局指数对不同的水质指标在不同的时期具有较好的解释能力,且同一景观指数在汛期和非汛期对水环境的影响作用差异较大甚至相反,景观格局在河网密集型城市区域对河流水环境影响的整体利弊还需进一步权衡量化。

参考文献 (References):

- [1] 聂高辉, 邱洋冬. 中国城镇化影响环境污染的预测与分析. 调研世界, 2017, (10): 10-16.
- [2] 踪家峰, 林宗建. 中国城市化 70 年的回顾与反思. 经济问题, 2019, (9): 1-9.
- [3] Pickett STA, Cadenasso ML, Grove JM, Boone C G, Groffman P M, Irwin E, Kaushal S S, Marshall V, McGrath B P, Nilon CH, Pouyat RV, Szlavecz K, Troy A, Warren P. Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 331-362.
- [4] McPhearson T, Pickett STA, Grimm NB, Niemelä J, Alberti M, Elmqvist T, Weber C, Haase D, Breuste J, Qureshi S. Advancing urban ecology toward a science of cities. *BioScience*, 2016, 66(3): 198-212.
- [5] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [6] 田富强, 程涛, 芦由, 徐宗学. 社会水文学和城市水文学研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(1): 46-56.
- [7] 曲久辉. 城市水环境与水质的演化及调控. 建设科技, 2009, (15): 62-63.
- [8] Carey RO, Hochmuth GJ, Martinez CJ, Boyer TH, Dukes MD, Toor GS, Cisar JL. Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: challenges and research opportunities. *Environmental Pollution*, 2013, 173: 138-149.
- [9] Gao H K, Sabo JL, Chen X H, Liu Z Y, Yang Z J, Ren Z, Liu M. Landscape heterogeneity and hydrological processes: a review of landscape-based hydrological models. *Landscape Ecology*, 2018, 33(9): 1461-1480.
- [10] 陈利顶, 李秀珍, 傅伯杰, 肖笃宁, 赵文武. 中国景观生态学发展历程与未来研究重点. 生态学报, 2014, 34(12): 3129-3141.
- [11] 孔佩儒, 陈利顶, 孙然好, 程先. 海河流域面源污染风险格局识别与模拟优化. 生态学报, 2018, 38(12): 4445-4453.
- [12] 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.
- [13] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 吴志峰, 刘庆, 程炯. 流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析. 生态学报, 2015, 35(2): 246-253.
- [14] 黄硕, 郭青海. 城市景观格局演变的水环境效应研究综述. 生态学报, 2014, 34(12): 3142-3150.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 刘丽娟, 李小明, 何兴元. 流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5460-5465.

- [18] Wang J Y, Da L J, Song K, Li B L. Temporal variations of surface water quality in urban, suburban and rural areas during rapid urbanization in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 387-393.
- [19] Tu J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. *Applied Geography*, 2011, 31(1): 376-392.
- [20] Shen ZY, Hou XS, Li W, Aini G. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 96-107.
- [21] Hasenmueller E A, Criss R E, Winston W E, Shaughnessy A R. Stream hydrology and geochemistry along a rural to urban land use gradient. *Applied Geochemistry*, 2017, 83: 136-149.
- [22] Deng X J. Correlations between water quality and the structure and connectivity of the river network in the Southern Jiangsu Plain, eastern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 583-594.
- [23] Feng Y J, Liu Y, Tong X H. Spatiotemporal variation of landscape patterns and their spatial determinants in Shanghai, China. *Ecological Indicators*, 2018, 87: 22-32.
- [24] Xu G Y, Ren X D, Yang Z H, Long H F, Xiao J. Influence of landscape structures on water quality at multiple temporal and spatial scales: a case study of Wujiang River watershed in Guizhou. *Water*, 2019, 11(1): 159.
- [25] Ruan X F, Huang J Y, Williams D A R, Harker K J, Gergel S E. High spatial resolution landscape indicators show promise in explaining water quality in urban streams. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 321-330.
- [26] 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.
- [27] 浙江省水利厅. 浙江省河流手册. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [28] 杭州市统计局. 杭州统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [29] 张志兵, 施心路, 杨仙玉, 刘桂杰, 赵元若, 刘晓江. 杭州西湖与京杭大运河杭州城区段水质对比研究. *杭州师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 10(1): 59-63.
- [30] 《苕溪运河志》编纂委员会. 苕溪运河志. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [31] 吴海霞, 戴成华, 张洪荣. 京杭运河杭州城区段水体景观效应改善研究. *中国给水排水*, 2014, 30(13): 84-87.
- [32] 戴成华, 吴海霞, 张洪荣. 京杭运河(杭州城区段)水环境现状及整治措施. *中国给水排水*, 2014, 30(9): 73-77.
- [33] Wang X H, Yin Z Y. Using GIS to assess the relationship between land use and water quality at a watershed level. *Environment International*, 1997, 23(1): 103-114.
- [34] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(4): 377-393.
- [35] 陈凌静. 基于 GIS 支持下的土地利用景观梯度分析——以重庆市合川区为例[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [36] 赖江山. 生态学多元数据排序分析软件 Canoco 5 介绍. *生物多样性*, 2013, 21(6): 765-768.
- [37] 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.
- [38] 陈希冀, 郭青海, 黄硕, 杨一夫, 孙艳伟, 肖黎娜. 厦门城市水环境景观格局调整与建设探讨. *生态科学*, 2018, 37(6): 97-105.
- [39] 戴莹, 陈磊, 沈珍瑶. 城市景观的水环境响应及景观调控研究综述. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(6): 696-704.
- [40] 樊玲凤, 胡家忠, 欧亮. 城市污水处理厂进水浓度偏低原因分析及对策研究. *环境科学与管理*, 2016, 41(3): 132-135.
- [41] 赵军, 单福征, 许云峰, 钱光人. 河网城市不透水面的河流生态系统响应: 方法论框架. *自然资源学报*, 2012, 27(3): 382-393.
- [42] 王强, 庞旭, 王志坚, 袁兴中, 张耀光. 城市化对河流大型底栖动物群落的影响研究进展. *生态学报*, 2017, 37(18): 6275-6288.
- [43] 张海艳. 流域城镇化格局与河流氮磷的空间关系. *环境与发展*, 2019, 31(7): 177-179.