

doi: 10.6046/zrzyyg.2022181

引用格式: 周石松, 汤玉奇, 程宇翔, 等. 郴州市郴江河流域水质与土地利用关联的空间异质性分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 230–240. (Zhou S S, Tang Y Q, Cheng Y X, et al. Spatial heterogeneity of the correlation between water quality and land use in the Chenjiang River basin, Chenzhou City[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 230–240.)

郴州市郴江河流域水质与土地利用 关联的空间异质性分析

周石松¹, 汤玉奇^{1,2}, 程宇翔¹, 邹滨^{1,2}, 冯微微^{1,2}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 有色金属成矿预测
与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 长沙 410083)

摘要: 为了研究郴州市郴江河流域水质与土地利用关联的空间异质性特征, 采集了2021年9月流域水质与高分遥感数据; 通过不同类型、不同尺度的流域缓冲区划分, 计算土地利用组分及各地类斑块形状、尺寸及分布等景观配置; 利用单因子、多因子相关性分析, 进行区域土地利用对水质的空间异质性影响分析。结果表明: ①在水质与土地利用单因子空间异质性关联分析中, 圆形缓冲区的普适性优于河岸缓冲区, 而河岸缓冲区在分析建筑用地占比对各水质参数的影响方面起补充作用。在多因子空间异质性关联分析中, 河岸缓冲区土地利用对水质参数的解释率普遍高于圆形缓冲区, 圆形缓冲区土地利用对水质参数的总解释率最大值出现在半径700 m尺度。②不同土地利用组分对水质的影响不同, 耕草地、林地、水域面积占比与水质呈正相关关系, 建筑物、裸地呈负相关关系, 其中耕草地与建筑用地对水质影响最大; 在进行土地利用规划时, 要考虑到土地利用组分的影响, 合理分配人工地物和自然地物面积占比。③不同土地利用景观配置对水质影响不同。其中反映斑块形状与尺寸的景观形状指数(landscape shape index, LSI)、最大斑块指数(largest patch index, LPI)对水质存在负面影响, 反映斑块分布的散布与并列指数(interspersion and juxtaposition index, IJI)和水体氨氮(ammonia nitrogen, NH₃-N)含量在小尺度内呈负相关。在进行土地利用规划时更要考虑到景观配置的合理性, 例如要控制缓冲区内优势地类斑块大小。研究结论找出了最能影响水质的缓冲区大小, 揭示了最能解释郴江河水质的土地利用组分及其景观配置, 为郴江河水质恶化的科学治理措施提供选择依据, 对水环境保护有一定意义。

关键词: 流域水质; 土地利用; 空间异质性分析; 郴州市郴江河

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0230-11

0 引言

水资源是人类社会生存发展的重要资源。2020年《全球风险报告》指出, 水资源相关环境问题是当前世界面临最严重的危机之一^[1]。随着中国工业化、城镇化的快速发展, 水质恶化和水资源短缺的现象日益严重^[2]。为了实现可持续发展目标, 我国有关部门做出巨大努力, 对重点河流断面进行定期水质监测并发布水质数据, 点源污染基本得到有效治理, 非点源污染逐渐成为影响水质的主要因素^[3]。流经人类活动区域的河流水质, 受到与人类活动密

切相关的土地利用模式的影响更为严重^[4]。土地利用对水质指标的影响机制一直是国内外研究的热点问题^[5]。已有研究表明, 土地利用组成及其景观配置在污染物的形成、释放、吸收、拦截中起着巨大作用, 进而影响水质^[6]。在研究方法上, 根据不同尺度的具体情况, 多使用典型关联分析(canonical correlation analysis, CCA)、冗余分析(redundancy analysis, RDA)和多元逐步回归模型等方法进行研究。张以晖^[7]在黄浦江河岸带利用回归分析法、RDA对河岸带景观格局与河流水质进行关联分析得出, 景观配置相较于土地利用组成更能解释黄浦江水质的变化; 赵鹏等^[8]以广东省淡水河流域为研

收稿日期: 2022-05-09; **修订日期:** 2021-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目“多时相视角差异下的高分辨率遥感影像城市建筑物变换检测研究”(编号: 41971313)、湖南省自然科学基金项目“基于全卷积网络弱监督学习与知识迁移的飞机目标检测研究”(编号: 2019JJ40372)和湖南省重点研发计划项目“黑臭水体水质监控、检测及综合治理关键技术”(编号: 2019SK2112)共同资助。

第一作者: 周石松(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事自然资源遥感方面研究。Email: 690426598@qq.com。

通信作者: 汤玉奇(1986-), 女, 副教授, 主要从事遥感影像处理的研究与教学工作。Email: yqtang@csu.edu.cn。

研究对象,利用多元线性逐步回归模型、Spearman 秩相关分析、CCA 对水质指标与景观格局指数之间的响应关系开展研究,得出流域缓冲区内的景观格局指数对水质的解释率较高;张志敏等^[9]则在典型网状河网区域利用偏最小二乘回归得出雨季大多数水质指标受到园地、林草地和香农均匀度指数(shannon's evenness index, SHEI)的重要影响。而现有的土地利用对水质的影响机制分析方法,大多基于较大缓冲区尺度内某些特定水质参数与土地利用之间的关联分析,其有效性已受到广泛认可;但不同区域之间由于地形地质、数据精度、气候条件差异较大,因此有必要针对水体保护典型区域展开进一步分析研究。

不同类型、不同尺度缓冲区内的土地利用是解释水质变化的主要因素^[10]。李艳利等^[11]设置以采样点为圆心的缓冲区,研究水质与土地利用之间的关系;陆君等^[12]、焦胜等^[13]和 Li 等^[14]将研究区流域划分为子流域来研究土地利用对水质的影响;汪昱昆等^[15]研究了上海市市内河岸带土地利用对水质的影响,发现土地利用在半径为 500 m 和 1 000 m 河岸缓冲区内能较好地解释水质;蔡宏等^[16]利用地理信息系统技术,得出在子流域缓冲区和河岸缓冲区内,水质指标对各土地利用类型响应规律一致的结论;黄金良等^[17]的研究表明,九江流域大部分水质参数与土地利用在河岸缓冲区尺度上相关性更强。本文研究区为复杂小流域,子流域划分不明显,采用圆形缓冲区与河岸缓冲区更能反映采样点周边土地利用状况。由此看出,从缓冲区类型、尺度上综合分析研究区水质与土地利用的空间异质性关联,对当地水资源保护和国土资源优化管理意义重大;而现有研究的缓冲区尺度间隔较大,导致对复杂小流域内土地利用对水质的影响分析不足。

综上所述,为了量化评估郴州市郴江河流域土地利用组分及其景观配置对水质的影响,开展顾及空间异质性特征的流域水质与土地利用相关性分析,本文分别采用多尺度圆形(半径 100 ~ 1 500 m)、河岸(离河岸的垂直距离 100 m 和 200 m)缓冲区进行流域水质与土地利用空间异质性关联分析;并综合单因子相关分析、多因子相关分析等方法,对该流域水质与土地利用进行关联分析,实现对复杂小流域范围内水质与土地利用关联的深入分析,为国家可持续发展议程创新示范区实现其生态文明建设等可持续发展战略目标提供技术支持。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

郴州市位于湖南省南部,与广东省交界,水域面积较小。郴州市支柱产业为采矿业和旅游业,是一个主要靠消耗自身矿产来加速经济发展的城市^[18]。21 世纪初污染较严重^[19-20],后经十余年治理,初见成效。作为湘江水系重要支流之一,郴江河贯穿郴州市,是郴州人民的母亲河。郴江河发源于宜章县骑田岭,干流全长 75.7 km,平均宽 50 m,流域总面积为 772 km²。郴江河流域年降水丰富,平均降水量为 1 750 mm,2000—2010 年地表水资源量约为 25.8 亿 m³。郴江河水流经郴州市区并流入东江,支撑着郴州市生活和灌溉用水。

自 20 世纪 80 年代开始,郴江河流域聚齐大量采矿基地及工业园区,同时,流域贯穿郴州市区,两岸遍布农业用地和居民生活用地等。工业废水、农业污水和生活用水排放进郴江河,导致污染严重^[21-22]。后经市委市政府大力推行郴江河综合治理工程,流域工业污染源明显减少,水质大为改善。然而随着城市高速发展,农业污水和生活用水逐渐成为主要污染源。2019 年郴州市被列为国务院批复同意的 6 个国家可持续发展议程创新示范区之一,2020 年入选全国文明城市,对水质污染治理提出了更高的要求,在郴州市复杂小流域内展开土地利用对水质影响的空间异质性关联分析十分必要。

1.2 数据获取

1.2.1 土地利用分类

为了定量评估郴州市郴江河复杂小流域内的土地利用组分及其景观配置对水质的影响,并考虑到现有土地利用产品不足以反映复杂小流域范围内的地物细节,本文在参考 30 m 空间分辨率土地利用产品的基础上,利用支持向量机(support vector machines, SVM)分类器对 2021 年 9 月获取的研究区哨兵 2 号卫星遥感数据(10 m 分辨率)进行土地利用分类。参考《土地利用现状分类》标准^[23]并结合郴江河流域低矮作物与草地混合分布等实际情况,本文将研究区土地利用类型分为建筑用地、裸地、林地、水域和耕草地 5 类,总体分类精度约 95%,Kappa 系数为 0.94,满足该区域分析需求。同时,利用 30 m 分辨率数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据划分研究区流域范围,并辅助水系提取。

1.2.2 水样采集

考虑到郴江河流域降水集中于每年 6—9 月,水体非点源污染也主要发生在此时段,本文研究团队

于2021年9月15日赴郴江河流域研究区内进行了水样采集。综合分层抽样、空间分布和交通可达性等因素,共选取14个点位进行采样,采样点分布如图1所示。

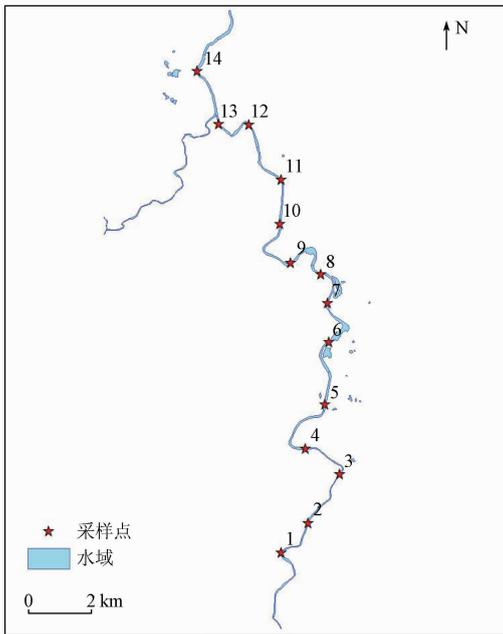


图1 郴州市郴江河流域水体采样点分布
Fig.1 Distribution of water sampling points in Chenjiang River basin, Chenzhou City

水体采样点的选取充分考虑了周围土地利用类型的多样性,并避开了生活污水及农业废水排放口。每个样点采集3份500 ml水样,为避免水样微生物繁殖及化学反应,水样采集后用冰袋冷藏保存并于当日送检。由于郴江河流域水体污染以非点源污染为主,生活污水和农业废水是主要污染源,本文选取总磷(total phosphorous, TP)、总氮(total nitrogen, TN)、氨氮(ammonia nitrogen, NH₃-N)和化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)等4种水质指标进行水样污染评估。其中:水体TP大多来源于农业废弃物、化肥和生活含磷洗涤剂;TN和NH₃-N是反映水体富营养化的主要指标;COD是反映水体有机污染的重要指标之一。当上述水质污染指标较高时,会对流域水生生物造成影响,对流域内居民健康造成极大危害。

2 数据处理分析流程

为了量化评估郴州市郴江河流域土地利用组分及其景观配置对水质的影响,开展顾及空间异质性特征的流域水质与土地利用相关性分析,本文在分别进行流域水质指标空间分布分析和土地利用空间异质性分析的基础上,最终实现对复杂小流域范围

内的水质与土地利用空间异质性关联分析(图2)。

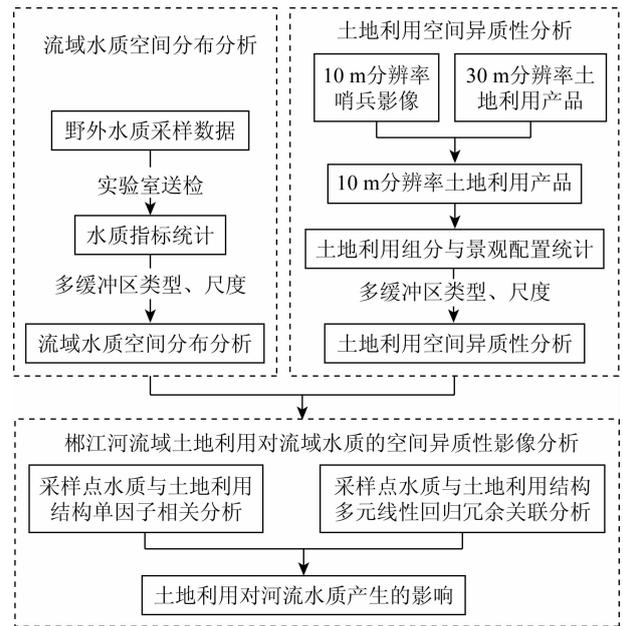


图2 流域水质与土地利用关联的空间异质性分析流程
Fig.2 Analysis process of spatial heterogeneity of water quality and land use in watershed

3 结果与分析

3.1 流域水质空间分布分析

根据《地表水环境质量标准》^[24],将研究区水质划分为源头水、生活饮用水、渔业用水、工业用水和农业用水5类(表1)。根据实地调查发现,1—6号采样点位于自然地表区域,7—14号位于人工不透水地表区域。

表1 水质项目含量分类标准

Tab.1 Standard of water

项目/ 分类	quality classification (mg·L ⁻¹)				
	I类 (源头水)	II类(生 活饮用水)	III类(渔 业用水)	IV类(工 业用水)	V类(农 业用水)
TN ≤	0.20	0.500	1.00	1.5	2.0
TP ≤	0.01	0.025	0.05	0.1	0.2
NH ₃ -N ≤	0.15	0.500	1.00	1.5	2.0
COD ≤	15.00	15.000	20.00	30.0	40.0

图3为研究区各水质参数浓度空间分布情况。从中可以看出,TN,TP和COD等水质指标均表现出人工地表区聚集性,且TN,TP和NH₃-N等水质参数出现部分超标的情况,在郴江河流域各水质采样点中,人工地表区域的采样点水质多为IV和V类水,而自然地表采样点水质多为III类或更优水质。其中,7—9号采样点的TP,TN和NH₃-N指标相比其他人工地表区域采样点稍低,可能由于附近有郴州市最大的公园——苏仙湖公园,污染排放较少且

公园绿地具有一定水质净化作用。郴江河流域水体主要污染包括 TP 和 TN,呈现多区域超标现象,浓度已超过可能发生水华的标准($TN > 0.20 \text{ mg/L}$ 和 $TP >$

0.02 mg/L)^[25],建议关注并预防水华等水体污染事件的发生,加强水体保护及治理措施,以保证流域内居民正常生产生活及生态资源保护利用。

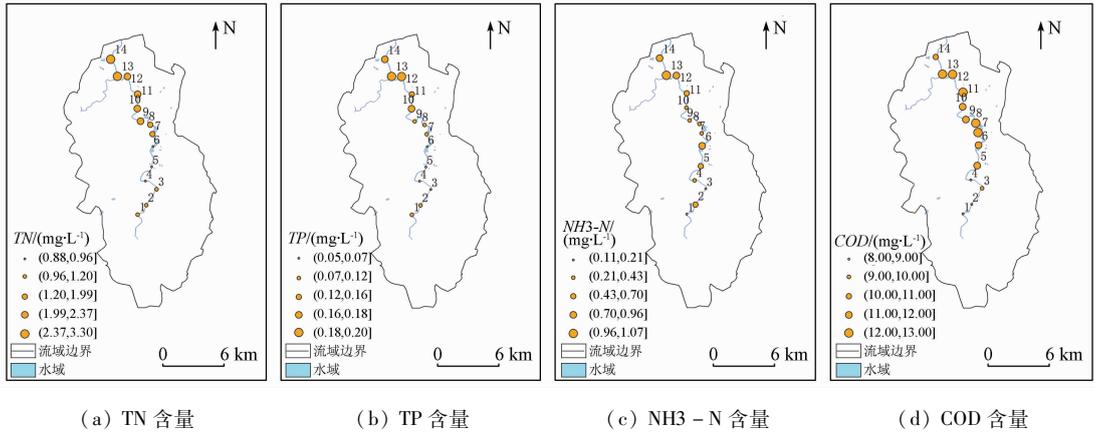


图 3 流域采样点水质参数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water quality parameters at sampling points in the watershed

3.2 土地利用空间异质性分析

如图 1 所示,本文选取的水质采样点遍及郴江河流域主干流域,包括郴州市及其周边的自然地表及人工地区域,河流宽度较窄,干流宽度多为 30 ~ 50 m 之间,周边土地利用组分及景观配置复杂多变。因此,在流域水质与土地利用关联分析中,合理的缓冲区类型及其尺度设置是分析的关键。

本文一方面采用圆形缓冲区^[26],以采样点为圆心,划分半径为 100 ~ 1 500 m 的圆形区域作为缓冲区;另一方面,为了顾及采样点水质受上游非点源污染的影响,同时采用河岸缓冲区,在以采样点为起点向上游延伸 1 000 m 的范围内,按离河岸的垂直距离划分宽度为 100 m 和 200 m 的带状区域作为缓冲区^[27]。

同时,为了进一步分析郴江河流域水质与土地利用景观配置的空间异质性关联,本文在计算各种类型、尺度缓冲区内土地利用组分的基础上,通过筛

选并定义景观格局特征指数集,对流域土地利用景观配置进行多类型、多尺度区域分析。考虑到郴江河流域土地利用类型复杂多样,各地类占比变化及其破碎化程度较大,因此本文结合现有研究中对水质影响较大的景观格局指数^[28],定义了郴江河流域土地利用景观格局特征指数集:景观形状指数(landscape shape index, LSI)、散布与并列指数(interspersion and juxtaposition index, IJI)和最大斑块指数(largest patch index, LPI)。其中,LSI 反映土地利用斑块形状复杂程度及分布离散程度;IJI 测算不同土地利用斑块类型之间的总体离散情况;LPI 为最大土地利用斑块类型在整体景观中的面积占比,一定程度上反映了缓冲区主体土地利用类型对水质的影响程度^[29]。

各采样点在不同类型、不同尺度缓冲区内土地利用类型占比如图 4 所示。从中可以看出:①在圆形缓冲区内,建筑用地、耕草地和林地是优势地

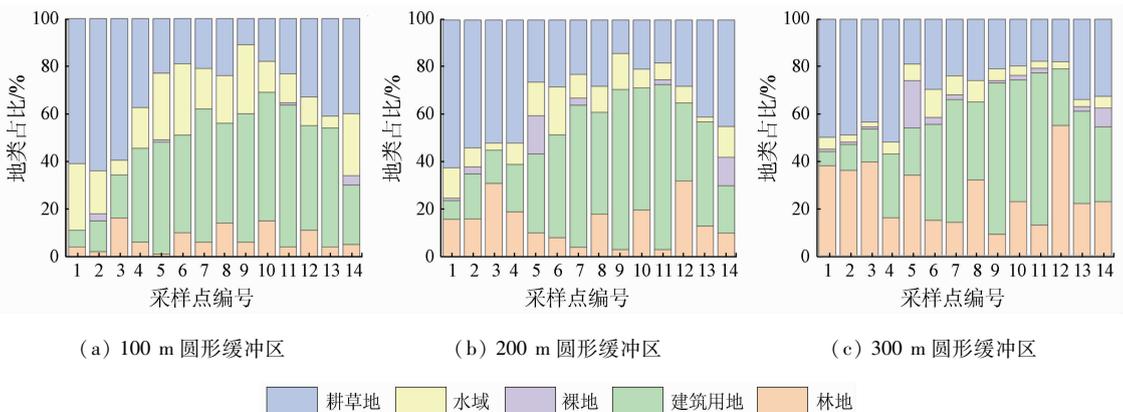


图 4-1 郴江河流域各空间尺度土地利用类型占比

Fig. 4-1 Proportion of land types at different spatial scales in the Chenjiang River basin

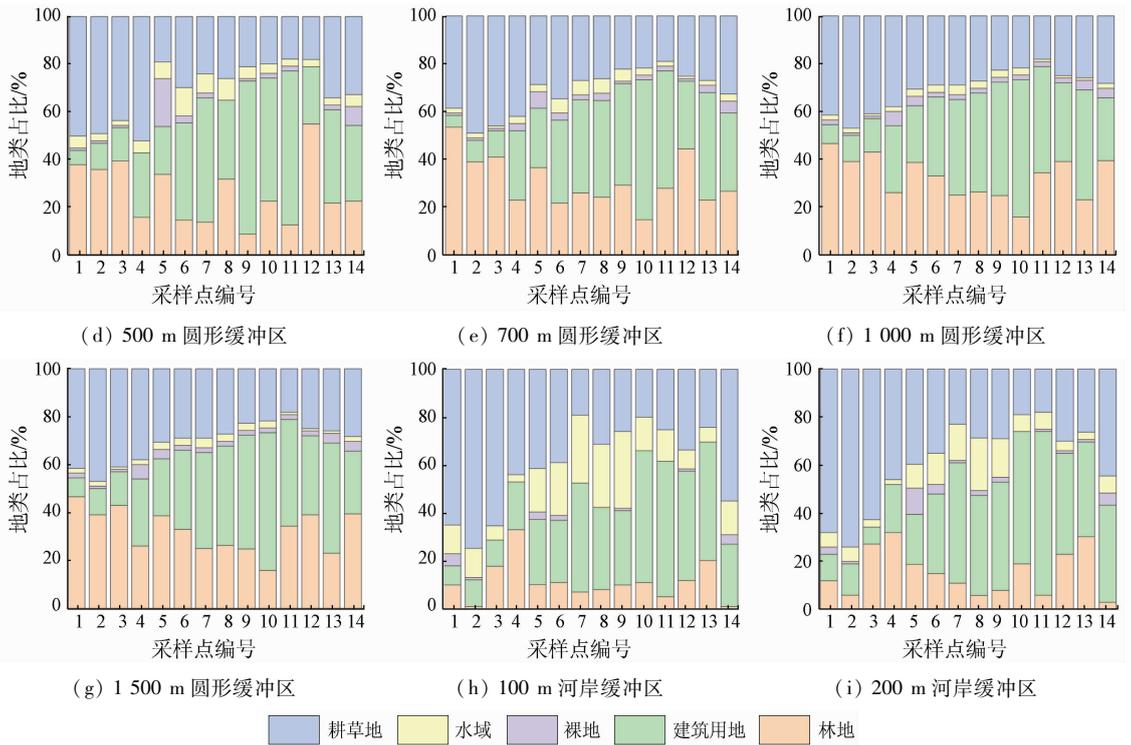


图 4-2 郴江河流域各空间尺度土地利用类型占比

Fig. 4-2 Proportion of land use types at different spatial scales in the Chenjiang River basin

类。在较小尺度圆形缓冲区内水域占比仅次于优势地类；在较大尺度圆形缓冲区内，水域占比最低。
 ②在河岸缓冲区内，耕草地和建筑用地是主要地类，各地类面积占比表现为耕草地 > 建筑用地 > 林地 > 水域 > 裸地。综上所述，郴江河小流域地类较为复杂，以及本文选取较为密集的缓冲区的必要性。

在多数采样点中，①LSI 表现为圆形缓冲区 > 河岸缓冲区，人工地表区 > 自然地表区；②IJI 表现为河岸缓冲区 > 圆形缓冲区，人工地表区 > 自然地表区；③LPI 表现为圆形缓冲区 > 河岸缓冲区，人工地表区 > 自然地表区。由此可见，3 种景观格局指数在不同缓冲区、不同地表区表现不尽相同，在对研究区土地利用景观配置对流域水质污染的影响分析中，需结合多类型、多尺度缓冲区进行空间异质性关联分析。

3.3 流域水质与土地利用的空间异质性关联分析

3.3.1 单因子关联分析

为了实现研究区不同类型、不同尺度缓冲区内 的水质与土地利用组分及其景观配置的时空异质性关联分析，本文首先通过单因子相关性分析，分别研究区各土地利用组分及其各景观格局特征对水质的影响。单因子相关性度量利用皮尔逊相关系数计算两变量之间的协方差和标准差之比^[30]，借助其在线性/非线性情景下均具有偏差较小、变化敏感性和递增线性变化下的高鲁棒性。由于利用皮尔逊相关系数进行双变量相似性度量时要求变量服从正态分布，本文利用 K-S 检验^[31]对变量分布进行初始化变换，使其在保留变量变化属性的同时服从正态分布。表 2 列出水质参数与土地利用单因子相关性分析的结果。

表 2 水质参数与土地利用单因子相关性分析结果^①

Tab. 2 Results of single factor correlation analysis between water quality parameters and land use

水质参数	缓冲区类型	缓冲区尺度/m	土地利用组分					土地利用景观配置		
			林地	建筑用地	裸地	水域	耕草地	LSI	IJI	LPI
TN	圆形缓冲区	100						0.64 *		
		200						0.56 *		
		300								
		500								
		700		0.56 *			-0.55 *			
		1 000	-0.52 *	0.61 *			-0.60 *	0.55 *	0.58 *	
	1 500	-0.51 *	0.60 *			-0.64 *	0.66 *	0.59 *		
	河岸缓冲区	100		0.66 *						
		200		0.65 *			-0.55 *	0.64 *		

(续表)

水质参数	缓冲区类型	缓冲区尺度/m	土地利用组分					土地利用景观配置			
			林地	建筑用地	裸地	水域	耕草地	LSI	IJI	LPI	
TP	圆形缓冲区	100				-0.51 *		0.65 *			
		200					-0.50 *	0.70 * *			
		300									
		500									
		700									
		1 000		0.58 *				-0.55 *		0.53 *	0.51 *
		1 500						-0.56 *		0.69 * *	0.55 *
河岸缓冲区	100		0.68 * *								
	200		0.61 *				0.61 *				
NH ₃ - N	圆形缓冲区	100				-0.53 *			-0.53 *		
		200						-0.63 *			
		300						0.61 *	-0.54 *		
		500									
		700									
		1 000			0.51 *						
		1 500									
河岸缓冲区	100							-0.67 * *			
	200						0.63 *	-0.56 *			
COD	圆形缓冲区	100		0.82 * *			-0.73 * *	0.71 * *			
		200		0.79 * *			-0.86 * *		0.52 *		
		300		0.73 * *			-0.84 * *		0.59 *		
		500		0.67 * *			-0.87 * *				
		700		0.67 * *			-0.87 * *	0.58 *			
		1 000	-0.53 *	0.72 * *			-0.84 * *	0.67 * *	0.71 * *		
		1 500	-0.57 *	0.74 * *			-0.83 * *	0.69 * *	0.56 *		
河岸缓冲区	100		0.84 * *			-0.85 * *	0.67 * *				
	200		0.79 * *			-0.88 * *	0.63 *				

①表中只列出了相关性显著的解释变量; * 表示 $P < 0.05$; * * 表示 $P < 0.01$ 。

1) 流域水质与土地利用组分的空间异质性关联分析。表 2 左侧所示为各水质指标在不同类型、不同尺度缓冲区内与土地利用组分的相关性(仅列出显著相关部分,即显著性水平 P 值小于 0.01 或 0.05)。可以看出:①采样点水体 TN 含量与耕草地、林地较大圆形缓冲区尺度(大于 700 m)呈显著负相关,而与建筑用地在较大圆形缓冲区尺度和河岸缓冲区尺度内呈显著正相关,其中与半径 1 000 m 圆形缓冲区内的建筑用地占比相关度最高($r = 0.61, P < 0.05$);②采样点水体 TP 含量与较大圆形缓冲区(半径大于 1 000 m)内的耕草地、较小圆形缓冲区(半径小于 200 m)内的水域呈显著负相关,与半径 1 000 m 圆形缓冲区及河岸缓冲区内建筑用地呈显著正相关,其中与 100 m 河岸缓冲区内建筑用地占比相关度最高($r = 0.68, P < 0.01$);③采样点水体 NH₃ - N 含量与小尺度圆形缓冲区(半径 100 m)内的水域呈显著负相关,与较大尺度圆形缓冲区(半径 1 000 m)内的裸地呈显著正相关。总体来看,合理规划郴江河流域内,特别是大范围流域内的植被及人工用地占比,将有利于对水体 TN, TP 和 COD 含量的有效抑制。同时,对未利用地的合理规划也是降低水体 NH₃ - N 污染的关键。

2) 流域水质与土地利用景观配置的空间异质性关联分析。表 2 右侧所示为各水质指标在不同类型、不同尺度缓冲区内与土地利用景观配置的相关性(同样仅列出显著性水平 P 值小于 0.01 或 0.05 的显著相关部分)。可以看出:①TN, TP 与较小圆形缓冲区(半径 100 ~ 200 m)和 200 m 河岸缓冲区内内的 LSI、与较大圆形缓冲区(半径 1 000 ~ 1 500 m)内的 IJI 和 LPI 呈显著正相关;②NH₃ - N 与半径 300 m 圆形缓冲区和 200 m 河岸缓冲区内内的 LSI 呈显著正相关,与较小圆形缓冲区(半径 100 m)和 300 m 河岸缓冲区内内的 IJI 呈显著负相关,地类分布越分散,越能有效抑制水体 NH₃ - N 的污染程度;③相较于其他水质参数, COD 与景观格局指数的显著相关性更强。总体来看,在主体地类显著相关的情况下,流域内各地类斑块越散布,越易加剧水体 TN, TP 和 COD 污染^[32];各地类分布越分散,越能有效抑制水体 NH₃ - N 的污染程度。因此,各土地利用类型空间分布的合理配置,对抑制郴江河流域水体污染至关重要。

3.3.2 多因子冗余关联分析

由于单因子分析无法反映多变量间的相互关系,为综合分析土地利用组分及其景观配置对郴江

河流域水体水质的空间异质性影响,定量评估土地利用组分和景观配置总体及个体对水质污染的解释率,本文进一步进行了流域水质与土地利用多元线性回归分析。RDA 作为经典的多因子相关性分析方法,既能得到单个环境因子对流域水质的方差贡献率,也能反映多个环境变量对所有水质指标的影响。因此,本文首先对流域水质指标进行趋势对应

分析(detrended correspondence analysis, DCA),其梯度长度(gradient length)第一轴较小,故选择 RDA 进行多元线性回归关联分析^[33]。

水质总体污染与各类型、各尺度缓冲区内的土地利用组分及其景观配置的冗余关联分析结果如表 3 所示。

表 3 水质与土地利用多因子相关性分析结果^①

Tab.3 Multi-factor correlation analysis results of water quality and land use

缓冲区类型	缓冲区尺度/m	土地利用组分					土地利用景观配置			总解释率
		林地	建筑用地	裸地	水域	耕草地	LSI	IJI	LPI	
圆形缓冲区	100		0.24 *				0.39 **			0.62 *
	200		0.25 *			0.21 *	0.27 *			0.71 **
	300		0.23 *			0.22 *	0.24 *			0.63 *
	500		0.24 *			0.28 *				0.69 *
	700		0.31 *			0.36 *				0.75 **
	1 000		0.37 **			0.39 **		0.31 *		0.63 *
	1 500		0.36 **			0.43 **	0.25 *	0.35 *	0.28 *	0.68 *
河岸缓冲区	100		0.46 **			0.31 *	0.27 *			0.76 **
	200		0.42 **			0.37 *	0.39 **			0.75 **

①表中只列出了相关性显著的解释变量; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

从表 3 可以看出,建筑用地、耕草地占比及斑块散布程度在多数尺度的圆形、河岸缓冲区内对水质总体污染状况均有影响,IJI 及 LPI 在较大缓冲区内对水体污染造成影响。因此,合理调控主体地类占比及各地类、斑块分布将有利于抑制郴江河流域水体污染。

在空间异质性多因子冗余关联分析中,随着圆形缓冲区尺度的扩大,各类土地利用组分及其景观配置对水体污染的总解释率呈现出先增大后减小的趋势,并在半径 700 m 尺度上达到最大解释率 75%。其中,建筑用地、耕草地占比对水质总体污染状况的影响随着圆形缓冲区尺度的扩大呈现增大趋势。在河岸缓冲区与圆形缓冲区内,其土地利用组分与其景观配置对水质总体污染的最优解释率相当,在多因子冗余关联分析中稳定性更高。

为了进一步可视化展示并分析研究区土地利用

组分及其景观配置对水体污染的空间异质性影响,图 5 示出各类型、各尺度缓冲区内土地利用组分及其景观配置对水体总体污染的贡献程度及其差异性。其中,箭头长度反映贡献程度大小,箭头越长,说明该土地利用组分或景观格局特征对水体污染的贡献程度越强;箭头间的夹角表示变量间的相关性,夹角余弦值越大,则两变量对水体污染的贡献越相关。从图 5 可以看出,在不同缓冲区类型及其空间尺度上,各土地利用组分及其景观格局特征与水体污染程度的相关性存在差异。在多数缓冲区类型及其空间尺度内,耕草地、建筑用地占比与水体污染相关性最强。其中,人工地物占比、主体地类占比和斑块散布程度对水质污染有加剧作用,而植被占比能在一定程度上抑制水体污染程度。进一步证明了人工地物与植被的合理配置对于郴州市郴江河流域水体污染治理的重要性。

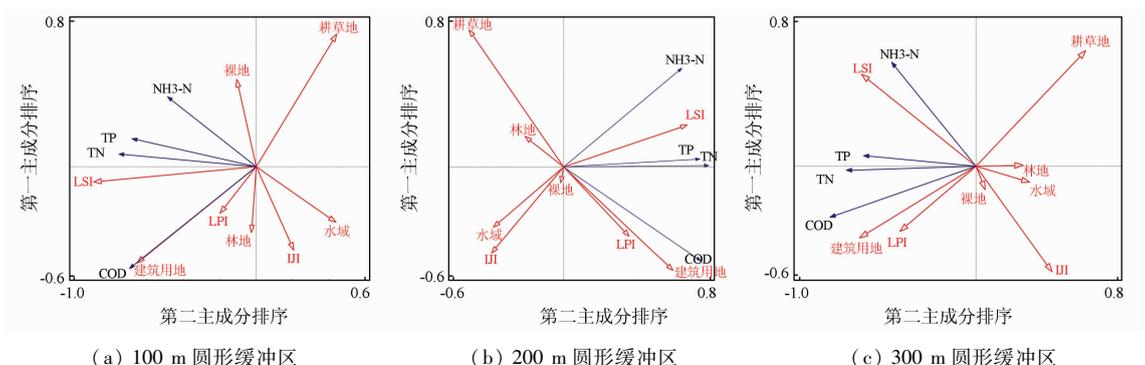


图 5-1 郴江河域 RDA 结果排序

Fig.5-1 Result ordering of RDA in Chenjiang River basin

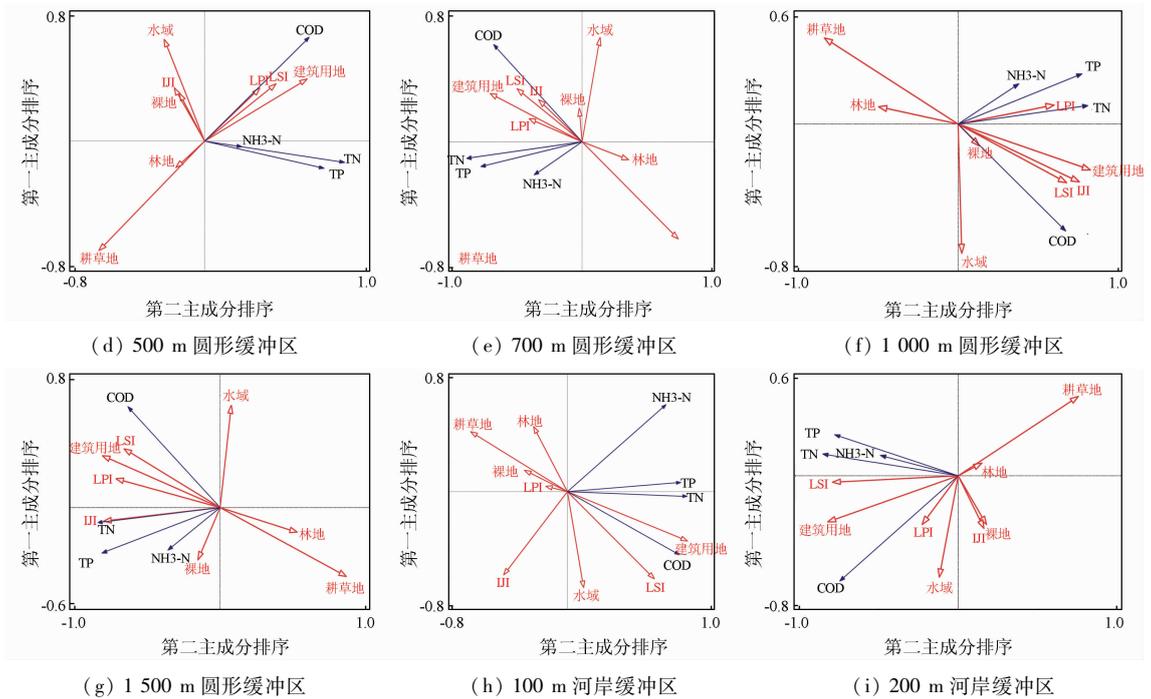


图 5-2 郴江流域 RDA 结果排序

Fig. 5-2 Result ordering of RDA in Chenjiang River basin

4 问题与讨论

4.1 郴江流域水质与土地利用空间异质性关联特征

在水质与土地利用组分的单因子空间异质性关联分析中,较大圆形缓冲区内各水质参数与土地利用组分显著相关项更多,但河岸缓冲区内水质与建筑用地占比相关性强于圆形缓冲区;圆形缓冲区的普适性优于河岸缓冲区,河岸缓冲区在对建筑用地占比、斑块及地类散布程度对下游水体污染的影响分析方面具有补充作用。

在水质与土地利用多因子空间异质性关联分析中,河岸缓冲区和较小的圆形缓冲区内建筑用地、耕草地和 LSI 是主要的水质影响因子,较大的圆形缓冲区内建筑用地、耕草地和各景观格局指数都是主要的水质影响因子。河岸缓冲区土地利用对水质参数的解释率普遍高于圆形缓冲区,圆形缓冲区土地利用对水质参数的总解释率最大值出现在半径 700 m 尺度。土地利用组分与景观配置对水质的总解释率最大值出现在 100 m 河岸缓冲区内(解释率达到了 76%),更能体现水质参数对土地利用的响应。该结论与周俊菊等^[33]关于近距离河岸缓冲宽度内草地、建成区和耕地具有较强水质解释能力的结论相符。

4.2 土地利用组分对水质的影响

水质与土地利用组分空间异质性关联分析显示:①在多数空间尺度上,建筑用地面积占比与

COD,TP 和 TN 浓度正相关性较大(图 5),体现了人为作用对水质的负面影响^[34]。人类生产生活导致林地、耕草地和水域等地类破碎化程度增大,生活垃圾堆积存放,地表污染物浓度增大,进而通过水土径流渗入河流中,使得各水质指标恶化。相较于圆形缓冲区,在河岸缓冲区尺度下水质与建筑用地的相关性更强,这是因为河岸两侧的生活污染更容易迁移进入河流,甚至直接排放进入河流^[2]。②在多数空间尺度上,耕草地与各水质参数呈负相关关系,这一结果与耕草地被认为是非点源污染源释放化肥中的氮磷元素,从而恶化水质的结论不同^[35]。其原因一方面可能与土地利用分类有关^[36],在耕草地中,可能更多的地类是不易与耕地区分但施肥量更少的草地;另一方面可能由于郴江河流域贯穿郴州市区,耕草地区域人类活动相对较弱,由此对水质带来的正面效应相比于耕草地所带来的污染更明显。③林地具有截留、吸收污染物从而改善水质作用^[25],本文在除半径 100 m 圆形和河岸缓冲区可能因区域内林地占比过小、影响不明显之外,林地都显示出与水质参数的负相关关系;水域面积在地表径流、降雨的作用下由于其对水质污染具有稀释作用^[37],与水质参数呈现负相关;而裸地由于占比较小,且多为废弃荒地,水土流失较严重,因此在多数空间类型、尺度内都与水质呈微弱负相关关系。

4.3 土地利用景观配置对流域水质的影响

水质与土地利用景观配置空间异质性关联分析显示:①各空间尺度下水质都与 LSI 参数呈正相关

(表 2),且其相关系数最大值均出现在圆形缓冲区内,由此可见斑块形状越复杂(间接反映人类活动越频繁),越容易造成水质污染^[38];②NH₃-N 含量与 LJI 在较小空间尺度内显著负相关,却在较大空间尺度内助长水体 TN,TP 和 COD 的污染程度,证实了焦欢^[32]关于渠溪河流域研究结论对于本文研究区域的适用性。③LPI 被认为对水质存在负面影响^[24],本文研究区分析结果基本证实了这一结论,缓冲区内某地类(多为建筑用地)面积优势越大,地类越单一,对水质产生的负面影响越严重。

5 结论

本文为了量化评估郴江河流域土地利用对水质的影响,划分 2 种缓冲区类型和多种缓冲区尺度,并在不同缓冲区内分别利用单因子相关分析、多因子相关分析等方法进行二者的空间异质性关联分析。实现对郴州市郴江河这一复杂小流域范围内水质与土地利用关联的深入分析,为郴州市建设国家可持续发展议程创新示范区、实现其生态文明建设等可持续发展战略目标提供技术支持,并得出如下结论:

1)在单因子空间异质性关联分析中,圆形缓冲区在水体污染含量与土地利用组分及其景观配置的单因子关联分析中的普适性优于河岸缓冲区,较大的圆形缓冲区水质各参数与土地利用更显著相关,河岸缓冲区起补充作用。

2)在多因子空间异质性关联分析中,不同缓冲区类型及其空间尺度上,各土地利用组分及其景观格局特征与水体污染程度的相关性、对水体污染的解释率存在较大差异,最能影响水质参数的土地利用是建筑用地和耕草地,林地、水域和耕草地对水质有正面作用,而建筑用地、裸地、LSI 和 LPI 对水质有负面作用。

3)建议发挥林地在较大圆形缓冲区范围内对水质的积极作用,通过植树造林、退耕还林还草等措施来保护水质。在进行土地利用规划时也要避免河流附近土地利用类型过于单一,尤其是建筑用地。建议严格管控近河岸区的生活污水排行,并合理规划对水质参数解释率较大的河岸缓冲区内地块形状与尺寸。

综上所述,通过对郴江河流域水质与土地利用关联的空间异质性分析,理清了流域水质与土地利用关联分析的缓冲区类型及尺度选择依据,并研究了不同土地利用指数对水质的影响。在未来的研究中,将进一步使用深度学习方法进行精确土地利用分类,并细化区分耕地与草地对流域水质的影响。

参考文献 (References):

- [1] Franco E G. The global risks report 2020[J/OL]. World Economic Forum (2020-01-28) [2022-05-09]. <https://www.weforum.org/reports/the-global-risks-report-2020>.
- [2] HHC S. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 12(6): 956-963.
- [3] 吕志强,庆旭瑶,任玉芬,等.山地城市河流土地利用结构对水质的影响——以重庆市为例[J].湖泊科学,2016,28(2): 319-327.
Lyu Z Q, Qing X Y, Ren Y F, et al. Effects of land use pattern on water quality in mountainous city: A case study of Chongqing City [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(2): 319-327.
- [4] 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[J].生态学报,2011,31(19): 5460-5465.
Liu L J, Li X Y, He X Y. Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(19): 5460-5465.
- [5] 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.
Wang J, Li P, Gao H D, et al. A 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.
- [6] Mitchell M G E, Bennett E M, Gonzalez A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: Current knowledge and research gaps [J]. Ecosystems, 2013, 16(5): 894-908.
- [7] 张以晖.黄浦江河岸带土地利用变迁及其水质响应关系研究[D].上海:华东师范大学,2015.
Zhang Y H. Study on land use change and water quality response relationship in the bank zone of Huangpu River [D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.
- [8] 赵鹏,夏北成,秦建桥,等.流域景观格局与河流水质的多变量相关分析[J].生态学报,2012,32(8): 2331-2341.
Zhao P, Xia B C, Qin J Q, et al. Multivariate correlation analysis between watershed landscape pattern and river water quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [9] 张志敏,杜景龙,陈德超,等.典型网状河网区域土地利用和景观格局特征对地表季节水质的影响——以江苏省溧阳市为例[J].湖泊科学,2022,34(5): 1524-1539.
Zhang Z M, Du J L, Cheng D C, et al. Effects of land use and landscape pattern characteristics on surface seasonal water quality in typical networked river networks: A case study of Liyang City, Jiangsu Province [J]. Journal of Lake Science, 2022, 34(5): 1524-1539.
- [10] Tu J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression [J]. Applied Geography, 2011, 31(1): 376-392.
- [11] 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.
Li Y L, Xu Z X, Li Y F. A preliminary analysis of the relationship between multi-scale land use/landscape pattern and water quality response in Huntai River basin [J]. Earth and Environment, 2012,

- 40(4):573-583.
- [12] 陆君,刘亚风,黄洪辉,等. 黄山市太平湖流域土地利用结构与河流水质相关性分析[J]. 复旦学报(自然科学版),2014,53(6):731-736,746.
- Lu J,Liu Y F,Huang H H,et al. Correlation analysis between land use structure and river water quality in Taiping Lake basin,Huangshan City[J]. Fudan Journal (Natural Science Edition),2014,53(6):731-736,746.
- [13] 焦胜,杨娜,彭楷,等. 汾水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.
- Jiao S,Yang N,Peng K,et al. Effects of land landscape pattern on river water quality in Shuishui basin[J]. Geographical Research,2014,33(12):2263-2274.
- [14] Li S,Xia X,Tan X,et al. Effects of catchment and riparian landscape setting on water chemistry and seasonal evolution of water quality in the upper Han River basin,China[J]. PLoS One,2013,8(1):e53163.
- [15] 汪昱昆,程锐辉,曾鹏,等. 上海地区河网水质空间分异及对河岸带土地利用的响应[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(7):925-932.
- Wang Y K,Cheng R H,Zeng P,et al. Spatial differentiation of water quality in river network in Shanghai and its response to land use in the riparian zone[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(7):925-932.
- [16] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等. 基于遥感和GIS的赤水河水质对流域土地利用的响应研究[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(2):286-291.
- Cai H,He Z W,An Y L,et al. Response of Chishui River water quality to land use in the basin based on remote sensing and GIS[J]. Resources and Environment of Yangtze River Basin,2015,24(2):286-291.
- [17] 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.
- Huang J L,Li Q S,Hong H S,et al. Preliminary correlation analysis of land use/landscape pattern-water quality in Jiulongjiang River basin[J]. Environmental Science,2011,32(1):64-72.
- [18] 罗贞礼,黄璜.“红三角”地区之郴州市的可持续发展评价研究——生态足迹法[J]. 湖南农业大学学报(社会科学版),2004(2):33-37.
- Luo Z L,Huang H. Research on sustainable development evaluation of Chenzhou City in the Red Triangle area:Ecological footprint method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Social Science Edition),2004(2):33-37.
- [19] 朱岗辉,孙璐,廖晓勇,等. 郴州工业场地重金属和PAHs复合污染特征及风险评价[J]. 地理研究,2012,31(5):831-839.
- Zhu G H,Sun L,Liao X Y,et al. Characteristics and risk assessment of heavy metal and PAHs composite pollution in industrial site in Chenzhou[J]. Geographical Research,2012,31(5):831-839.
- [20] 徐洪霞. 湖南省郴州市苏仙区矿区重金属污染综合治理措施研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
- Xu H X. Study on comprehensive treatment measures for heavy metal pollution in mining area of Suxian District,Chenzhou City,Hunan Province[D]. Yangling:Northwest A&F University,2014.
- [21] 蒲泽生,黄军,李平学. 为了郴州新世纪的明天[J]. 城乡建设,2002(5):17.
- Pu Z S,Huang J,Li P X. For the tomorrow of Chenzhou's new century[J]. Urban and Rural Construction,2002(5):17.
- [22] 徐庆利,兰国华. 郴州市主要河流水质评价和保护对策[J]. 绿色科技,2015(5):184-186.
- Xu Q L,Lan G H. Water quality evaluation and protection countermeasures of major rivers in Chenzhou City[J]. Green Science and Technology,2015(5):184-186.
- [23] 陈百明,周小萍.《土地利用现状分类》国家标准的解读[J]. 自然资源学报,2007(6):994-1003.
- Chen B M,Zhou X P. Interpretation of the national standard for classification of land use status[J]. Journal of Natural Resources,2007(6):994-1003.
- [24] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- State Environmental Protection Administration. GB 3838—2002 surface water environmental quality standard[S]. Beijing:China Standards Publishing House,2002.
- [25] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- Huang Y Y. Pollution ecology of inland waters[M]. Beijing:Science Press,2001.
- [26] 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.
- [27] Li S Y,Gu S,Tan X,et al. Water quality in the upper Han River basin,China:The impacts of land use/land cover in riparian buffer zone[J]. Hazard Mater,2009(165):317-324.
- [28] Maa D,Db B,Kh C,et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems:An empirical analysis in Puget lowland sub-basins[J]. Landscape and Urban Planning,2007,80(4):345-361.
- [29] 董小俊. 南方红壤丘陵区森林景观格局分析和优化研究[D]. 北京:首都师范大学,2014.
- Dong X J. Analysis and optimization of forest landscape pattern in red soil hilly area of southern China[D]. Beijing:Capital Normal University,2014.
- [30] 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.
- Fang N,Liu L L,You Q H,et al. Effects of different scales of land use patterns on water quality in Poyang Lake wetlands[J]. Environmental Science,2019,40(12):5348-5357.
- [31] 朱红兵,何丽娟. 关于用SPSS中单样本K-S检验法进行正态分布等的一致性检验时适用条件的研究[J]. 首都体育学院学报,2009,21(4):466-470.
- Zhu H B,He L J. Study on the applicable conditions for the consistency test of normal distribution and the like by single-sample K-S test in SPSS[J]. Journal of Capital University of Physical Education,2009,21(4):466-470.
- [32] 焦欢. 渠溪河流域土地利用及格局对河流水质影响研究[D]. 重庆:重庆工商大学,2016.
- Jiao H. Study on the impact of land use and pattern on river water quality in Quxi River basin[D]. Chongqing:Chongqing Technology and Business University,2016.
- [33] 周俊菊,向鹏,王兰英,等. 祁连山东部冰沟河流域景观格局与河流水化学特征关系[J]. 生态学杂志,2019,38(12):3779-3788.
- Zhou J J,Xiang J,Wang L Y,et al. Relationship between landscape pattern and river water chemistry characteristics of Binggou River basin in the eastern Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology

- gy, 2019, 38(12):3779–3788.
- [34] 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[J]. 生态环境学报, 2021, 30(7):1470–1481.
- Hu L, Li S Y. Effects of land use structure and landscape patterns at different spatial scales on water quality in Longchuan River basin[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2021, 30(7):1470–1481.
- [35] Guo Q H, Ma K M, Yang L, et al. Testing a dynamic complex hypothesis in the analysis of land use impact on lake water quality [J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(7):1313–1332.
- [36] Xu Q, Wang P, Shu W, et al. Influence of landscape structures on river water quality at multiple spatial scales: A case study of the Yuan River watershed, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121:107226.
- [37] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 等. 流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析[J]. 生态学报, 2015, 35(2):246–253.
- Ji D Q, Wen Y, Wei J B, et al. Correlation analysis between landscape spatial characteristics and river water quality in Liuxi River basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2):246–253.
- [38] Song M, Jiang Y, Liu Q, et al. Catchment versus riparian buffers: Which land use spatial scales have the greatest ability to explain water quality changes in a typical temperate watershed? [J]. *Water*, 2021, 13(13):1758.

Spatial heterogeneity of the correlation between water quality and land use in the Chenjiang River basin, Chenzhou City

ZHOU Shisong¹, TANG Yuqi^{1,2}, CHENG Yuxiang¹, ZOU Bin^{1,2}, FENG Huihui^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China)

Abstract: This study investigated the spatial heterogeneity of the correlation between water quality and land use in the Chenjiang River basin of Chenzhou City using the water quality and high-resolution remote sensing data of the river basin in September 2021. Based on the division of river basin buffer zones by different types and scales, this study calculated land use components and their landscape configurations, such as the shape, size, and distribution of patches. Then, this study analyzed the spatial heterogeneity effect of regional land use on water quality through single-factor and multi-factor correlation analyses. The results are as follows: ① In the single-factor correlation analysis of spatial heterogeneity between water quality and land use, circular buffer zones showed higher universality than riparian buffer zones, which played a complementary role in analyzing the effect of built-up land occupation on water quality parameters. In the multi-factor correlation analysis of spatial heterogeneity, the land use presented generally higher interpretation rates for water quality parameters in riparian buffer zones than in circular buffer zones, with the maximum total interpretation rate of land use for water quality parameters in circular buffer zones occurring on a scale of a radius of 700 m. ② Different land use components had different effects on water quality. The proportions of cultivated land, grassland, forest land, and water areas correlated positively with water quality, while those of building land and bare land correlated negatively with water quality. Among them, cultivated land, grassland, and building land had the most significant effects on water quality. Land use planning should consider the influence of land use components and reasonably allocate the proportions of artificial and natural features. ③ Different landscape configurations had different effects on water quality. The landscape shape index (LSI) and the largest patch index (LPI), which reflect the shape and size of patches, had negative effects on water quality. Furthermore, the interspersed and juxtaposition index (IJI), which reflects the distribution of patches, correlated negatively with the ammonia nitrogen (NH₃-N) content in water bodies on a small scale. Land use planning should consider the rationality of landscape configurations. For example, it is necessary to control the sizes of dominant land patches in the buffer zones. This study identified the buffer zone size that influences water quality the most and the land use components and landscape configurations that can explain the water quality of the Chenjiang River the best. Therefore, this study provides a basis for selecting scientific control measures for the deterioration of water quality in the Chenjiang River, showing certain significance for water environment protection.

Keywords: river basin water quality; land use; spatial heterogeneity analysis; Chenjiang River in Chenzhou City

(责任编辑: 李瑜)