

DOI: 10.5846/stxb201303230496

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.

Ji D Q, Wen Y, Wei J B, Wu Z F, Liu Q, Cheng J. Relationships between landscape spatial characteristics and surface water quality in the Liu Xi River watershed. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 246-253.

流溪河流域景观空间特征与河流水质的关联分析

吉冬青^{1,2}, 文雅², 魏建兵^{3,*}, 吴志峰⁴, 刘庆¹, 程炯¹

1 广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650

2 华南农业大学信息学院, 广州 510642

3 沈阳大学区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 沈阳 110044

4 广州大学地理科学学院, 广州 510006

摘要: 人类活动影响或改变流域景观空间结构, 并有可能对河流水质产生不同程度的影响, 以流溪河流域为研究区, 分析流域景观空间格局特征与水质指数之间的相关关系。将流域划分为 27 个子流域, 采集水样分析水质状况, 所选用的水质指标有氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮-亚硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD_{Cr})。结果表明: (1) 该流域土地利用结构与水质具有显著相关性, 其中居住用地对水质的影响作用最强, 林地对河流水质具有净化功能, 与水质指标之间的关系表现为负相关, 园地与水质指标关系具有不确定性; (2) 流域景观特征从上游到下游之间表现为城市化增强的梯度, 水质状况响应这个梯度变化表现为上游优于下游, 人类活动及城市化发展引起的土地利用变化及土地管理方式对水质变化有显著影响; (3) 景观破碎度与水质呈现显著正相关性, 是影响水质的重要指标, 景观聚集程度和斑块形状复杂程度与水质有负相关关系; 子流域尺度和河岸带尺度景观空间特征对水质的影响差异不明显。

关键词: 土地利用; 景观空间特征; 河流水质; spearman 相关分析; 流溪河流域

Relationships between landscape spatial characteristics and surface water quality in the Liu Xi River watershed

Ji Dongqing^{1,2}, WEN Ya², WEI Jianbing^{3,*}, WU Zhifeng⁴, LIU Qing¹, CHENG Jiong¹

1 Guangdong Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China

2 College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3 Key Laboratory of Regional Environment and Eco-Remediation, (Ministry of Education), Shenyang University, Shenyang 110044, China

4 School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: In recent years, the risk assessment of changes in land use with respect to their ecological impact is still an unsolved problem. The water quality of rivers is influenced by the natural environment and human activities in the river basin. The latter of these two factors, especially change in land use, is the major factor in the deterioration of water quality. Therefore, the management of river pollution and water protection has significant academic and practical implications in terms of investigating any change in water quality relating to aspects of land use and changes in its appearance. We conducted a case study in the Liu Xi River watershed in Guangzhou city to examine the correlation between watershed landscape pattern characteristics and water variables. The basin was divided into 27 sub-watersheds and water samples were collected for monitoring of water quality. Water variables include COD_{Cr} , TP, $\text{NH}_3\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$. The values of these variables represent the degree of eutrophication and the content of organic matter, which are the characteristics of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171399, D011001, C030701, 31170445); 国家科技支撑计划项目 (2012BAH32B03)

收稿日期: 2013-03-23; **网络出版日期:** 2014-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oliver1208@sina.com

deteriorated water. We believe that a decrease in these variables results from the impact of human activities on water bodies. The choice of landscape indices was based on previous research, and included three scales. We used Fragstas3.3 software to obtain landscape indices of every watershed, then performed a correlation analysis. Spearman correlation and redundancy analysis (RDA) methods were used to analyze the relationship between water quality and land use patterns. Correlation analysis was made at buffer zone and sub-basins using three spatial scales. The buffer zone included a 30 m buffer and a 61 m buffer. Results showed that the land use structure of the Liu Xi River watershed had a great impact on water quality parameters. Residential land strongly affected water quality, and was the strongest impact factor for river pollution in the Liu Xi River watershed. In other words, if residential land increases, then the water quality will worsen. Forest constitutes a natural water purification system, so forestland exhibited a significant negative correlation with water quality. Orchards play a complex role in water quality, with an uncertain correlation between orchard and water variables. From upstream to downstream, urbanization gradually increased the watershed landscape features; the water quality also changed in response to this gradient. Water quality upstream is better than water quality downstream. The change in land use and land management practices caused by human activities and urbanization changes had a significant influence on water quality. The former brings more contaminants into the surrounding environment, while the latter increases the amount of impervious surface area. The results showed a strong correlation between water quality and landscape indexes. Landscape fragmentation and water quality showed a significant positive correlation, while landscape aggregation and patch shape complexity were negatively correlated; the differences between riparian and sub-watershed scale landscape spatial characteristics' effects on water quality were not obvious. The result of RDA revealed that water quality showed an obvious trend with the varying area percentage and edge density of the residential land. The correlation between water quality and landscape structure is insignificant with both scales. Based on our survey, land use change is a consequence of human activities, and changes the ecosystem status of the river and watershed. This could explain why water quality varies as the watershed landscape structure changes.

Key Words: land use; landscape spatial characteristics; water quality; spearman correlation analysis; Liu Xi River

景观空间格局包括景观要素的组成及空间配置。景观格局与生态过程关系的研究一直是景观生态学研究的关键论题^[1]。河流是景观的重要组成类型,其水质受到流域景观格局的重要影响^[2]。对河流水体造成污染的类型主要有点源污染和非点源污染,在许多地区点源污染得到有效控制的情况下,非点源污染成为影响河流水质的重要原因之一,几乎所有的非点源污染来源都和土地利用/土地覆被变化联系紧密^[3]。流域内土地利用/土地覆被变化可以影响该区域的生态功能和入河污染物的排放量和种类,是影响河流水质安全的主导因素^[4]。近年来,单纯的水质监测评价和点源污染控制管理措施已不能满足解决城市化带来的水环境恶化问题,与非点源污染控制密切相关的流域景观格局与水质的相关关系成为国内外研究的热点。对于景观格局与河流水质空间耦合关系的研究主要有景观组成属性,即土地利用类型百分比与河流水质之间的关系^[5-7];景观空间结构,即应用景观指数研究不同土地利用方式的布局特点与水质间的关系^[8-9];不同景观空间尺度,涉及流域、河岸带等尺度景观格局对水质的影响^[7,10]。目前,景观格局与水质关系研究采用的方法包括相关分析、主成分分析、多元线性回归分析、典范对应分析和模型模拟分析等^[9,11-12],但研究结论在不同的地区,不同的景观指标和水质指标相关关系方面仍存在不确定性,需要在更广泛的地区针对所存在的问题展开更多的研究,为进一步理解二者之间关系机制和构建景观-水质模型奠定基础。

我国华南的珠三角地区土地利用集约程度高,人口密集,地表水污染严重,而这类地区针对中尺度流域景观特征与河流水质的关系主题研究尚较缺乏^[13]。本文选取广州市的水源保护区-流溪河流域为研究区,在流域和河岸带两个尺度上开展相关研究,主要探讨以下问题:1)不同土地利用类型对河流水质的影响如何?2)景观指数与水质指标之间有怎样的相关关系?是否显著?3)河岸带和子流域两种不同尺度景观组成和景观

指数对河流水质影响的差异性如何? 4) 这些问题产生的原因有哪些? 目的是为亚热带地区城市化流域土地利用与水质关系机制等相关基础研究积累数据和经验, 也为当地基于水环境保护的流域景观格局优化和土地利用合理布局提供规划依据。

1 研究区概况

流溪河是珠江的一条支流, 位于广州市北部, 是广州市重要的水源河流, 供应广州 60% 的饮用水源, 具有重要的资源和战略价值。发源于从化市吕田镇桂峰山, 另一条主要支流发源于新丰县七星顶, 两支流汇合成为流溪河, 最后在南岗口与白泥河汇合注入珠江。全长 171 km, 流域面积约 2300 km²。地处东亚大陆边缘, 属于华南亚热带湿润地区, 气候温和, 雨量丰沛, 流域多年平均降雨量为 1823.6 mm, 每年 4—9 月为雨季, 雨季降雨量占全年的 81.3%。流域上游以种植水源林和用材林为主, 森林茂密, 绿化率较高; 中游以蔬菜、花卉、水果等生产和开发温泉等旅游区为主; 近年来下游地区城镇化、工业化发展迅速, 整个流域生态环境恶化、生态安全 and 水质有不断下降的趋势^[14]。

2 数据与方法

2.1 流域划分

依据流域子流域划分原则, 采用 1:5 万地形图数据在 Arcgis 软件 Spatial Analyst Tools 中 Hydrology 模块对流溪河流域进行子河网提取和流域划分, 对提取到的子流域边界进行修饰, 共划分了 27 个子流域 (图 1)。

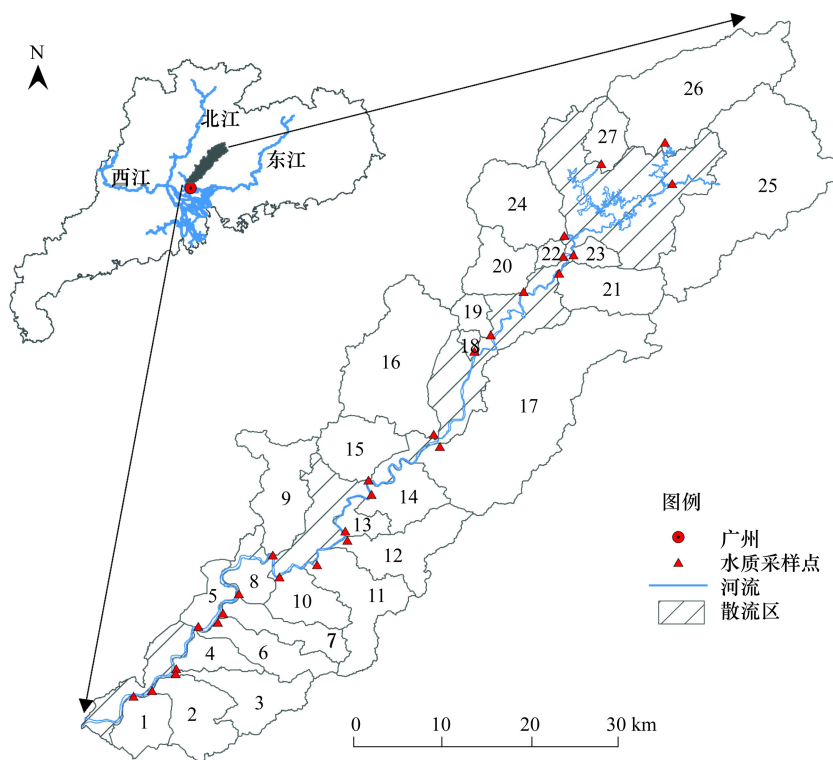


图 1 流溪河流域位置、水质监测断面所在的子流域

Fig.1 Location of Liu Xi River Watershed, sub-watersheds of monitoring sections

2.2 水质监测

小流域出口监测反映汇流的最终产出^[15], 因此在每个子流域出口处设置监测采样点。根据流溪河流域雨季时间分布, 在 2012 年 4—9 月之间每月对水样进行采集和实验室分析。本次研究针对研究区面源污染特征, 选择氨氮 (NH₃-N)、硝态氮-亚硝态氮 (NO₃-N+NO₂-N)、总磷 (TP)、化学需氧量 (COD_{Cr}) 作为水质指标。

水质测试采用国家标准水质监测分析方法。以地表水环境质量标准(GB3838—2002)中 III 类水质标准评价,27 个监测点共 162 个水样,其中 COD_{Cr} 超标率为 48.77%,TP 为 56.79%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 66.05%, $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 为 0.6%(表 1)。

表 1 水质数据描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of water quality parameters

水质指标 Water quality index	样本 Samples/个	最小值 Minimum/(mg/L)	最大值 Maximum/(mg/L)	平均值 Mean value/(mg/L)	标准差 Standard Deviation
$\text{NH}_3\text{-N}$	162	0.067	18.70	3.89	4.28
$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$	162	0.154	10.35	1.87	1.50
TP	162	0.009	3.66	0.47	0.56
COD_{Cr}	162	2.26	249.00	25.63	25.32

2.3 景观组成与景观指数

利用广州市 2009 年 1:1 万土地调查变更数据和 2011—2012 年野外调查获取研究区的土地利用空间信息,将研究区域的土地利用类型分为林地、居住用地、交通用地、工矿用地、耕地、园地、水域和裸地共 8 类。河岸带尺度选取依据我国饮用水源保护区划分技术规范选择采样点上游区域自河岸陆向划分 30 m 和由美国农业部自然资源保护中心推荐的有效河岸带宽度为 61 m 的缓冲带。

在研究区各子流域及各缓冲区内,使用 Fragstats3.3 软件计算景观水平和类型水平上的景观指数^[16]。基于前人的研究结论^[2,8,17-20]并结合研究区的实际情况及变量自相关性分析结果,景观组成主要选取居住用地比例(Red%)、交通用地比例(Tra%)、林地比例(For%)、耕地比例(Cul%)和园地比例(Ord%),景观指数主要选取 30 m 宽河岸带蔓延度指数(30 m_CONTAG)和园地面积加权平均分形维数(30 m Ord_AWMPFD)、61 m 宽河岸带斑块密度(61 m_PD)和面积加权平均分形维数(61 m_AWMPFD)、子流域尺度主要选取最大斑块指数(LPI)、景观多样性指数(SHDI)、居住用地边缘密度(Red_ED)、林地斑块密度(For_PD)、耕地聚合度指数(Cul_AI)。蔓延度指数、聚合度指数和最大斑块指数是景观斑块聚集程度及优势景观类型的表征,面积加权平均分形维数反映人类活动对景观格局的影响程度,而斑块密度、边缘密度及景观多样性指数都是景观破碎程度的表征。

2.4 统计分析

水质监测数据监测频率为每月 1 次,雨季采样共 6 次,取各监测点平均值进行分析。分别对各小流域与各河岸带尺度的景观指数和 4 种水质指标进行相关分析。各数据序列之间的相关性系数在 SPSS17.0 中完成,由于个别景观类型不满足正态分布,采用 Spearman 秩相关分析。另一种是冗余分析方法(Redundancy analysis, RDA),这种方法既可以揭示单个景观变量对河流水质变化的贡献率,又可以用二维排序图直观展示景观指数与水质参数之间的关系^[21]。冗余分析方法(RDA)在 CANOCO4.5 中进行。

3 研究结果

3.1 流域和河岸带土地利用结构

以各监测点所在子流域及河岸带尺度分别计算土地利用结构特征,按下游到上游方向命名子流域。由图 2 可以看出,子流域、30 m 河岸缓冲带、61 m 河岸缓冲带的土地利用具有相似的结构特征,中上游地区以林地、园地为主要用地类型,居住用地面积所占比例较少,下游地区的居住用地面积高于中上游地区。子流域林地所占面积比例在 3.8%—89.1%之间,园地面积百分比平均为 19.4%,其中 11 个子流域的园地面积比例大于 20%,多分布于流域中游地区;居住用地面积比例大于 20%的子流域共有 6 个,个别小流域超过 50%,位于城市化程度较高的下游地区;交通用地是各类景观斑块连接的廊道,在中下游城市地区所占面积较大,最大面积百分比为 12.0%。这 5 种土地利用类型的总面积比例接近于 90%或者更高。流溪河流域从上游到下游各土

地利用类型差异较大,景观空间特征复杂,总体上呈现出从下游到上游城市化程度降低的趋势。

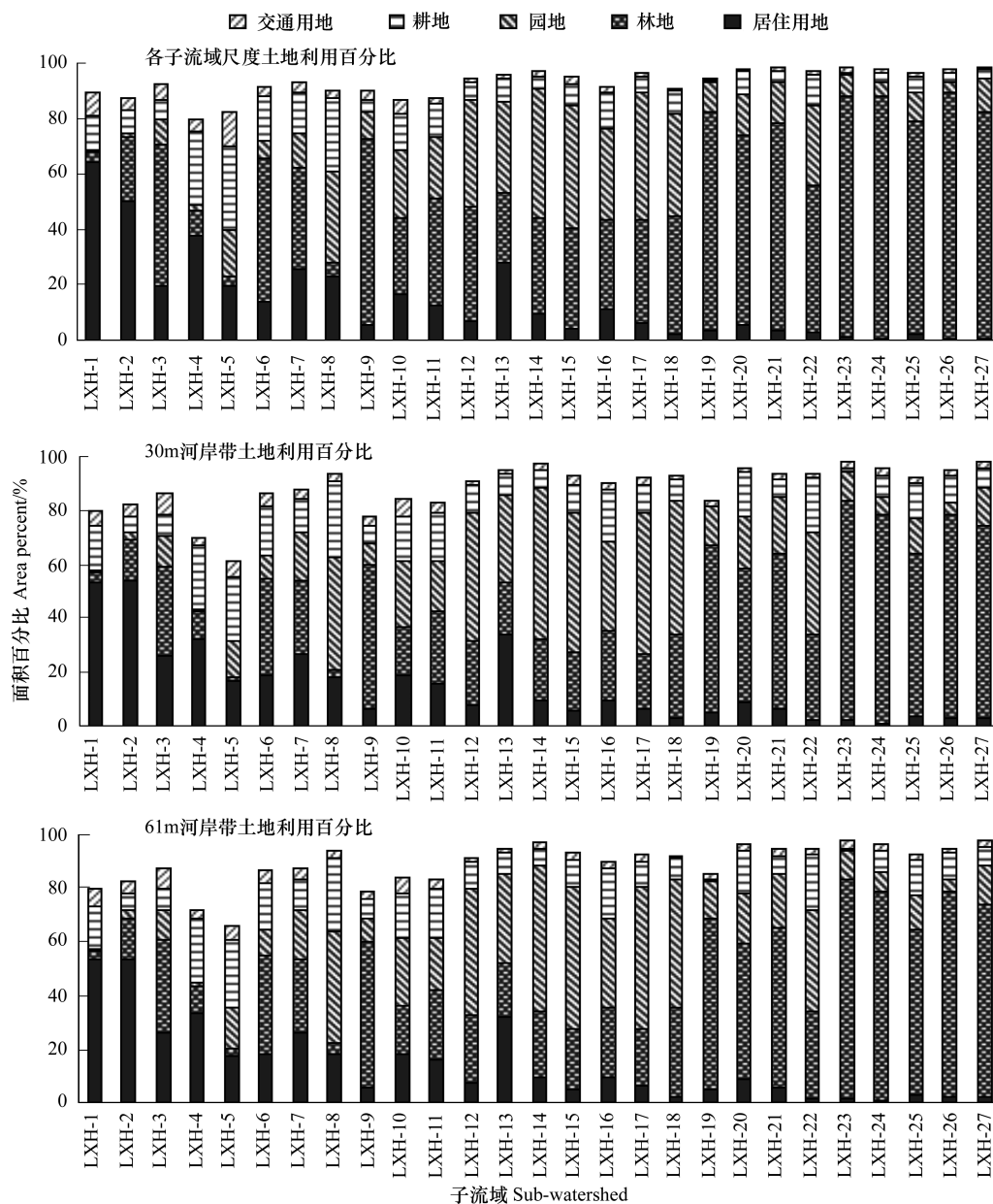


图2 各流域土地利用结构

Fig.2 Land use composition in each Watershed

3.2 流域景观格局与水质关联分析

3.2.1 景观结构与河流水质之间的关系

3 种尺度土地利用均以居住用地、林地、园地和耕地为主要景观类型,另外道路交通用地也是对水环境作用较明显的用地类型^[5],因此仅选取这 5 种土地利用类型与水质污染指数进行相关分析(表 2)。

从相关分析结果可以看出,居住用地、交通用地、耕地与 4 项水质指标都呈现显著正相关性,林地与水质指标之间具有极显著负相关关系,园地比例与水质指标的相关性不显著。景观水平指数 LPI、30 m_CONTAG、61 m_AWMPFD 与水质指标之间表现为极显著负相关性,SHDI 与河流水质之间有显著正相关关系,但 61 m_PD 与 TP、NO₃-N+NO₂-N 有显著正相关关系,与 COD_{Cr}、NH₃-N 的相关性不显著;类型水平 Red_ED、Cul_AI 与非点源污染物水质指标具有显著正相关关系,除 NH₃-N 外,其余三项水质指标都与 For_PD 呈现显著正相关

性,30 m Ord_AWMPFD 与 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 之间有显著负相关关系,与其他两项水质指标相关性不显著。

3.2.2 水质参数与景观结构关系的冗余分析

为了更直观的显示景观变量对水质变化的解释能力,以 27 个监测点的水质数据和 14 个景观变量为样本,对其进行冗余分析(图 3)。通过水质参数的 DCA 分析和梯度计算,选择适合的排序轴模型。根据计算结果,选取 RDA 线性模型进行冗余分析,得到前两个排序轴的特征根分别为 0.867 和 0.004,水质和景观变量的相关系数分别为 0.937 和 0.564,模型满足显著性条件。由 RDA 排序图可以看出, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 位于第一象限, COD_{Cr} 、 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 位于第四象限,其中 COD_{Cr} 、TP 贴近于与第一排序轴。当各景观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 度则不存在相关,图 3 的结果与表 2 中水质指标与各景观指数相关性一致。另外,景观指标箭头的长度可以说明该景观特征对水质的影响程度,箭头越长影响程度越高,可看出 Red% 和 Red_ED 对水质的影响程度较其他景观指数略高,30 m _CONTAG、For%、Tra%、SHDI、Cul_AI 和 Cul%、61 m_AWMPFD、61 m_PD 和 LPI 次之。

4 讨论

通过 Spearman 秩相关分析和 RDA 排序图的直观展示,发现居住用地和居住用地边缘密度对水质指标有很强的影响作用,即城市面积越大、越分散分布,排入河流的非点源污染物越多,水质越差。居住用地增加使生活污水、生活垃圾等堆积造成非点源污染物增加,另一方面是不透水地表面积增加,降雨时污染物会迅速进入河流造成污染。林地对水质恶化有很好的削减作用,植

被的根系及枯枝落叶对污染物有较强的截留、吸收作用^[22],林地斑块密度与水质表现为正相关关系是因为破碎后较小的林地斑块对非点源污染物的截留吸收作用降低,使得部分污染物通过林地进入水体。居住用地和林地对水质的作用与前人研究结果相一致,即水质较好的流域具有较高的森林覆盖率和较低的城市化程度^[2,5,23]。园地与 COD_{Cr} 、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 之间呈负相关,与 $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$ 呈正相关关系,但 3 种尺度上相关性均不显著。30 m 宽河岸带园地面积加权平均分形维数与水质均表现为负相关,综合前人研究成果发现园地对水质影响具有不确定性^[5,10,24-25],这主要是由于园地使用的化肥、农药通过地表径流进入河流会使河流营养盐增加,但其地表植被又对污染物有吸附、吸收和滞留的作用,在建设用地为主要污染源的流域对水质具有正效应,而在园地大片集中分布且靠近水体的流域内则表现为负效应,流域管理方式、化肥农药投入强度以及水质监测频次等都是产生这种不确定性的主要原因。

景观多样性指数 SHDI 是表征景观破碎程度重要景观指标之一,与水质表现为显著正相关关系。景观破碎度增加,使得林地等对非点源污染的“汇”景观分割成较小斑块,不能够吸收截留邻近“源”景观输出污染物,导致水质恶化。张大伟^[10]研究发现 SHDI 与水质指标 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈负相关关系,认为 SHDI 值增加说

表 2 景观格局与水质污染指数的相关性

Table 2 Correlation coefficients between indicators of water pollution and landscape pattern

景观指数 landscape metrics	COD_{Cr}	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$
Red/%	0.669 **	0.679 **	0.673 **	0.499 **
Tra/%	0.676 **	0.676 **	0.677 **	0.451 *
For/%	-0.497 **	-0.563 **	-0.536 **	-0.509 **
Cul/%	0.719 **	0.790 **	0.671 **	0.686 **
Ord/%	-0.086	-0.015	-0.156	0.288
LPI	-0.706 **	-0.763 **	-0.746 **	-0.713 **
SHDI	0.730 **	0.809 **	0.719 **	0.787 **
30 m_CONTAG	-0.720 **	-0.756 **	-0.632 **	-0.697 **
61 m_PD	0.321	0.390 *	0.275	0.609 **
61 m_AWMPFD	-0.757 **	-0.792 **	-0.709 **	-0.598 **
Red_ED	0.891 **	0.916 **	0.883 **	0.664 **
For_PD	0.438 *	0.440 *	0.379	0.503 **
Cul_AI	0.690 **	0.723 **	0.668 **	0.388 *
30 m Ord_AWMPFD	-0.428 *	-0.336	-0.488 **	-0.032

* 表示显著性 $P<0.05$,显著相关; ** 表示显著性 $P<0.01$,极显著相关;景观指数:居住用地比例 (Red%),交通用地比例 (Tra%),林地比例 (For%),耕地比例 (Cul%),园地比例 (Ord%),最大斑块指数 (LPI),景观多样性指数 (SHDI),30 m 宽河岸带蔓延度指数 (30 m _CONTAG),61 m 宽河岸带斑块密度 (61 m_PD),61 m 宽河岸带面积加权平均分形维数 (61 m_AWMPFD),居住用地边缘密度 (Red_ED),林地斑块密度 (For_PD),耕地聚合度指数 (Cul_AI),30 m 宽河岸带园地面积加权平均分形维数 (30 m Ord_AWMPFD);水质指标:化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD_{Cr}),总磷 (total phosphorus, TP),氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$),硝氮氮-亚硝氮 ($\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}$)

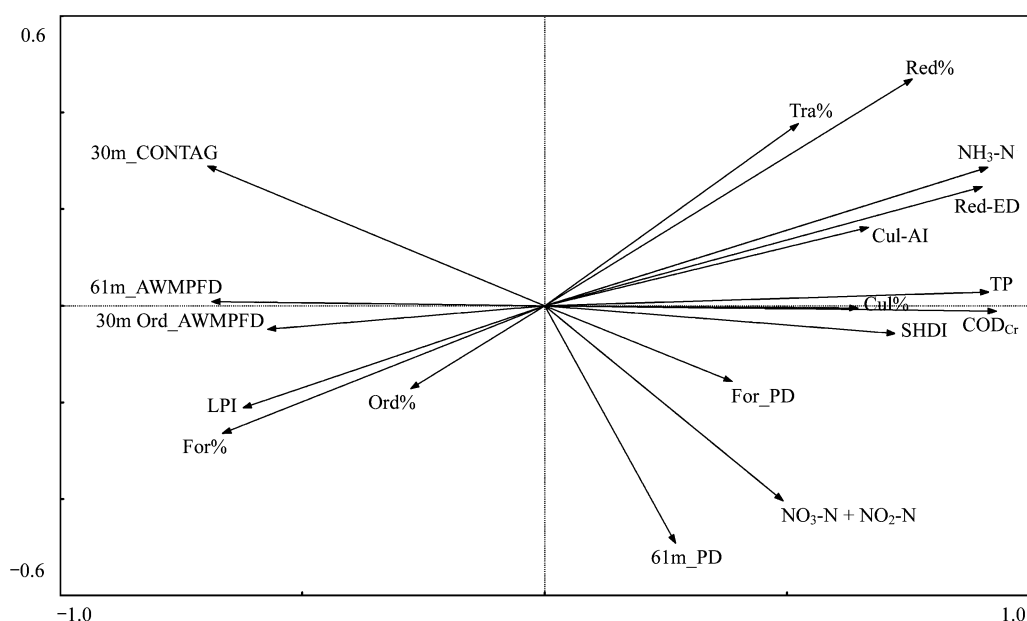


图3 景观指数与水质指标的 RDA 排序图

Fig.3 RDA ordination plot of landscape metrics and water quality indices

明景观异质性增加,建设用地、耕地等主要污染输出类型在景观中的优势度降低,因而会减缓污染物对水质的影响。产生这样不同结果可能与研究区主要景观类型有关,在作者的研究区是以建设用地、水田为主要景观类型,而本文的研究区以林地和耕地、园地用地为主要景观类型。而表征景观聚集程度的最大斑块指数 LPI、30 m_CONTAG 与水质之间表现为负相关关系,景观聚集度值越大说明各类型景观集中连片分布,流域中较大的“汇”景观斑块可以较好的减少污染物进入水体,对河流水质具有保护作用。斑块形状越复杂,污染物流出斑块的难度会越大,在斑块内部就进行了吸收转化等,因此面积加权平均分形维数与水质呈负相关性。前人研究中,面积加权平均分形维数(AWMPFD)与水质指数之间关系未呈现明显的相关性^[10,26]。

从已有的报道和本文的研究结果看景观空间特征与水质间关系还具有不确定性,但景观空间属性对水质存在较为明显的影响这一观点已得到普遍认同。城市化发展及景观破碎度是水质变化的重要影响因素。Tu^[27]研究发现人口与土地利用方式离河流越近对水质的影响越强,赵鹏^[9]和张殷俊^[24]的研究结果是大尺度景观格局对水质的影响强于小尺度,而本研究则表现为子流域和河岸带两个尺度景观特征对水质变化的影响差异不大,产生这种现象主要是由于流溪河流域人为干扰严重,河岸区多开发为娱乐休憩场所,人类活动影响较大,遗留的自然植被很少,不能体现出河岸带对非点源污染所起到的天然屏障作用。

5 结论

本研究以流溪河流域的 27 个子流域为研究对象,结合实地调研与水质采样,通过 Spearman 秩相关分析和 RDA 梯度分析,定量并直观的体现景观空间格局对水质的影响。主要结论:

(1) 居住用地比例对水质的影响作用强于其他用地类型,是引起非点源污染物浓度升高的主要原因,林地对水质有净化作用,与水质呈负相关性。园地对水质的作用具有不确定性,需要更进一步的深入研究。

(2) 流域景观特征从上游到下游之间表现为农村—城乡交错—城市的梯度变化,水质也表现为上游优于下游。景观破碎化程度与水质呈正相关性,是水质变化的重要影响因素;景观聚集度指数和斑块形状复杂程度与水质指标之间表现为负相关关系。

(3) 子流域尺度和河岸带尺度景观特征对水质的影响作用差异不明显。这些结果对于指导流域生态修复实践具有积极的参考价值。

参考文献 (References):

- [1] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2007: 16-17.
- [2] Lee S W, Hwang S J, Lee S B, Hwang H S, Sung H C. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80-89.
- [3] Mander Ü, Kull A, Tamm V, Kuusemets V, Karjus R. Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 1998, 41(3/4): 229-238.
- [4] 朱红云, 杨桂山, 董雅文. 江苏长江干流饮用水源地生态安全评价与保护研究. *资源科学*, 2004, 26(6): 90-96.
- [5] 张殷俊, 陈爽, 彭立华. 平原河网地区水质与土地利用格局关系——以江苏吴江为例. *资源科学*, 2009, 31(12): 2150-2156.
- [6] Li S Y, Gu S, Tan X, Zhang Q F. Water quality in the upper Han River basin, China: The impacts of land use/land cover in riparian buffer zone. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1/3): 317-324.
- [7] Uriarte M, Yackulic C B, Lim Y, Arce-Nazario J A. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: a multi-scale analysis. *Landscape Ecology*, 2011, 26(8): 1151-1164.
- [8] Gergel S E, Turner M G, Miller J R, Melack J M, Stanley E H. Landscape indicators of human impacts to riverine systems. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(2): 118-128.
- [9] 赵鹏, 夏北成, 秦建桥, 赵华荣. 流域景观格局与河流水质的多变量相关分析. *生态学报*, 2012, 32(8): 2331-2341.
- [10] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 张方山, 朱红兴, 刘毅, 张英, 庄敏, 朱晓东. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析. *环境科学*, 2010, 31(8): 1775-1783.
- [11] Lam Q D, Schmalz B, Fohrer N. Assessing the spatial and temporal variations of water quality in lowland areas, Northern Germany. *Journal of Hydrology*, 2012, 438-439: 137-147.
- [12] 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.
- [13] 周婷, 彭少麟, 任文韬. 东江河岸带各区段景观格局对水体恢复的影响. *中山大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(4): 78-83.
- [14] 吉冬青, 文雅, 魏建兵, 吴志峰, 程炯, 刘庆. 流溪河流域土地利用景观生态安全动态分析. *热带地理*, 2013, 33(3): 299-306.
- [15] 李恒鹏, 黄文钰, 杨桂山, 刘晓玫. 太湖地区蠡河流域不同用地类型面源污染特征. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 243-247.
- [16] McGarigal, K., Cushman S A, Neel M C, Ene E. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, 2002 [2013-03-25]. <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- [17] Kearns F R, Kelly N M, Carter J L, Resh V H. A method for the use of landscape metrics in freshwater research and management. *Landscape Ecology*, 2005, 20(1): 113-125.
- [18] 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.
- [19] 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, 263-263.
- [20] 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.
- [21] Johnson L B, Richards C, Host G E, Arthur J W. Landscape influences on water chemistry in midwestern stream ecosystems. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 193-208.
- [22] 荣琨, 陈兴伟, 陈志彪. 植被恢复对非点源污染影响的 SWAT 模拟. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 52-55.
- [23] Miserendino M L, Casaux R, Archangelsky M, Di Prinzio C Y, Brand C, Kutschker A M. Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(3): 612-624.
- [24] 张殷俊, 陈爽, 相景昌. 河流近域土地利用格局与水质相关性分析——以巢湖流域为例. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(9): 1054-1061.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Tu J, Xia Z G. Assessing the impact of land use changes on water quality across multiple spatial scales in eastern Massachusetts. *Middle States Geographer*, 2006, 39: 34-42.