

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.014

西江下游流域水质与不同空间尺度 土地利用的响应关系

王一舒^{1,2,3}, 吴仁人^{1,2,3}, 荣楠^{1,2,3}, 王欣¹, 张杨^{1,2,3}

(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东 广州 510530; 2. 国家环境保护水环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 广州 510530; 3. 广东省水与大气污染防治重点实验室, 广东 广州 510530)

摘要:基于西江下游流域2005—2017年11个监测断面水质数据和2005年、2010年、2018年遥感影像数据,通过不同空间尺度和土地利用类型的划分,利用Spearman秩相关系数法、冗余分析等方法分析了不同空间尺度下土地利用结构对西江下游流域水质的影响。结果表明:2005—2017年西江干流、贺江及罗定江水质较为优良,新兴江、南山河水质恶化明显,西江干流汛期总磷浓度明显高于非汛期;流域尺度下,河流水质指标与城镇用地呈显著正相关关系,与水体呈显著负相关关系;河岸缓冲区尺度下,河流水质指标与林地、水体呈负相关关系,城镇用地对河流中COD解释度较高,800 m缓冲区域镇用地对氨氮和总磷解释度最高,河流水质指标与旱地相关性在缓冲区达到1 500 m后显著上升,800 m缓冲区内水田坑塘对河流水质指标影响较大。建议对西江下游流域河岸800 m宽度范围内城镇用地、水田坑塘以及1 500 m缓冲区外旱地加强污染管控。

关键词:水质;土地利用;Spearman秩相关系数法;冗余分析;西江下游流域

中图分类号:TV213.4;X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0097-08

Response relationship between water quality in the lower reaches of Xijiang River Basin and land use at different spatial scales // WANG Yishu^{1,2,3}, WU Renren^{1,2,3}, RONG Nan^{1,2,3}, WANG Xin¹, ZHANG Yang^{1,2,3} (1. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Water Environmental Simulation and Pollution Control, Guangzhou 510530, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Water and Air Pollution Control, Guangzhou 510530, China)

Abstract: Based on the water quality data of eleven monitoring sections in the lower reaches of Xijiang River Basin from 2005 to 2017 and remote sensing data in 2005, 2010 and 2018, the influence of land use structure at different spatial scales on the water quality in the lower reaches of Xijiang River Basin was analyzed by methods such as Spearman rank correlation coefficient method and redundancy analysis through different spatial scales and division of land-use types. The results show that from 2005 to 2017, the water quality of the main stream of Xijiang River, Hejiang and Luoding River was good in general, while water quality of Xinxing River and Nanshan River deteriorated significantly. Meanwhile, TP concentration in the main stream of Xijiang River in the flood season was obviously higher than that in the non-flood season. At the scale of river basin, the river water quality index was significantly positively correlated with construction land while significantly negatively correlated with water body. At the scale of river bank buffer zone, the river water quality index was negatively correlated with forest and water body. The interpretation of construction land to COD was relatively high, and the interpretation of construction land in 800 m buffer zone to TP and $\text{NH}_3\text{-N}$ was the highest. The correlation of river water quality index and dry land rose significantly when buffer zone reached 1 500 m, and the impact of paddy field in 800 m buffer zone on river water quality index was great. It is suggested to strengthen pollution control measures for construction land, paddy field within 800 m and dry land outside 1 500 m buffer zone.

Key words: water quality; land use; Spearman rank correlation coefficient method; redundancy analysis; the lower reaches of Xijiang River Basin

水质问题是当前及今后很长一段时间内困扰人类发展的重大问题^[1-3], 现已成为众多学者和各级政府关注的焦点。影响水质变化的因素非常多, 其中土地利用是水质变化最重要的驱动因素之一^[4-6]。土地是人类赖以生存的重要载体, 人类对自然资源的改造和利用直接表现为人类对土地利用方式^[7]。河流水质与土地利用的响应关系, 一方面表现在土地利用方式及其变化对流域水文过程有着显著影响^[8], 另一方面污染物进入河流前在地表迁移、转化过程中会受到土地利用空间组成及人类活动方式的影响, 如地表环境(土壤、植被)及城镇化、工业化等^[9]。

水质与土地利用结构响应关系研究方面, 杨琴等^[10]对淮河流域(河南段)的研究表明, 氮磷浓度与旱地和城镇面积呈正相关关系, 与林地、草地和荒地面积呈负相关关系; 曹芳芳等^[11]研究了新安江流域土地利用结构对水质的影响, 发现耕地对总氮、氨氮影响最大, 草地对总磷影响最大; 汪昱昆等^[12]针对上海地区河网水质空间分异性研究了不同缓冲区与水质类别的响应强度关系。此外, 也有一些研究表明, 土地利用对水环境影响从小尺度到流域等不同空间尺度上不尽相同, 如李昆等^[9]识别了景观格局对河流水质影响最有效的河岸带空间尺度; Ding等^[13]对东江流域的研究表明, 对河流水质影响程度, 流域尺度大于河岸缓冲区尺度; Xu等^[14]发现河岸缓冲区尺度土地利用对乌江流域河流水质保护作用较流域尺度更大。可见, 一方面由于流域的独特性, 不同流域水质与土地利用响应关系有所差异; 另一方面不同空间尺度土地利用对流域水质影响的有效性也不尽相同。

珠三角地区正面临着水质型缺水问题。随着珠三角区域经济的发展, 大量排放的废污水造成淡水资源受到污染, 尽管水量丰富, 但清洁水源严重不足, 水质型缺水进一步加大了城市的供水压力^[15]。西江是广东省最重要的饮用水源河流之一^[16], 惠及4000多万广东人民, 澳门居民用水99%源于西江。西江水环境质量受到多方关注, 开展西江流域水质与土地利用响应关系研究对流域水环境管理具有十分重要的意义。本文以西江下游(广东段)流域作为研究区域, 基于2005—2017年流域内11个监测断面水质数据以及2005年、2010年、2018年遥感影像数据, 利用Spearman秩相关系数法、冗余分析等方法, 开展全流域尺度和不同缓冲区尺度条件下土地利用结构对不同水期的水质响应关系研究, 以期以西江下游流域水环境保护与管理提供参考。

1 研究区概况

西江是珠江水系中最长的河流, 发源于云南省曲靖市乌蒙山余脉的马雄山东麓, 经贵州、广西流入广东, 全长2075 km。西江下游段位于广东省境内, 从广西梧州流入肇庆市封开县后, 自西向东流经封开、郁南、德庆、云安、高要、端州、鼎湖等3县4区, 全长约225 km, 主要支流包括贺江、罗定江、南山河和新兴江(图1)。该区域属于亚热带季风气候, 冬季干冷、夏季高温多雨, 年平均气温21.2℃, 年平均降水量约1650 mm, 降雨主要集中在4—10月^[17]。

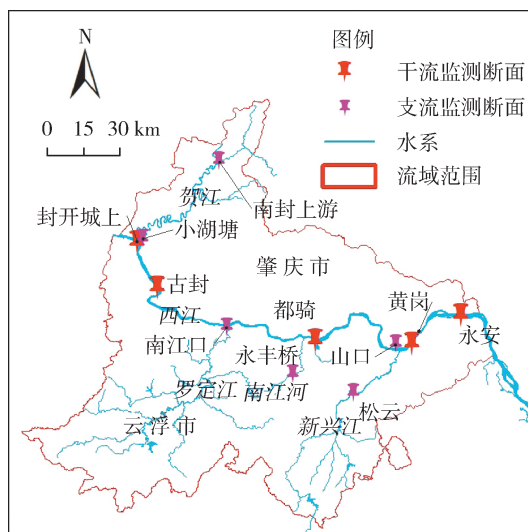


图1 西江下游流域水系及水质监测断面分布

Fig. 1 The distribution map of river and monitoring sections in the lower reaches of Xijiang River Basin

2 研究方法

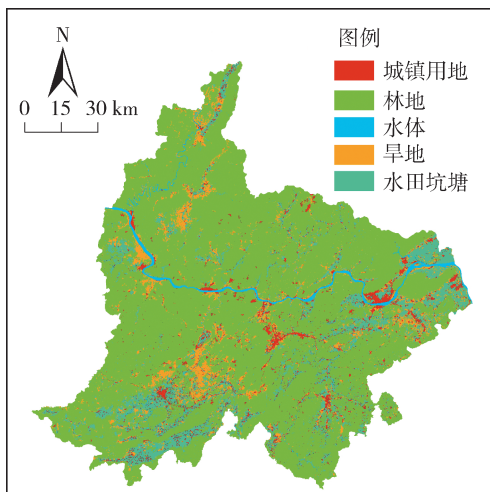
2.1 数据来源与处理

水质数据包括西江干流及主要支流贺江、罗定江、南山河和新兴江11个常规水质监测断面2005—2017年的年均值数据和2015—2017年的月均值数据。水质指标包括GB3838—2002《地表水环境质量标准》表1中规定的24项。

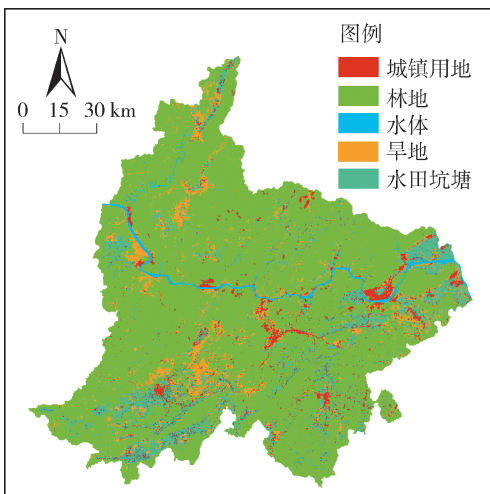
遥感影像数据选取覆盖研究区范围2005年、2010年和2018年的Landsat遥感影像, 经过融合、几何校正、镶嵌、裁剪等预处理后, 进行面向对象分类, 分类后处理得到最终土地利用数据。根据研究需要, 进一步将土地利用类型划分为城镇用地、林地、水体、旱地、水田坑塘5种类型(图2)。

2.2 水质评价及趋势分析方法

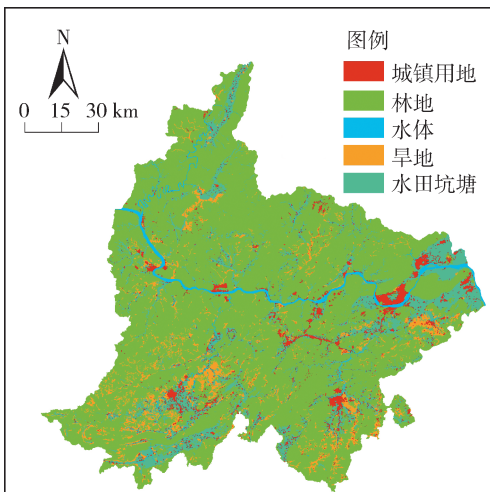
流域水质类别评价采用单因子指数法, 评价指标为24项水质指标中除水温、总氮和粪大肠菌群外



(a) 2005 年



(b) 2010 年



(c) 2018 年

图2 西江下游流域土地利用类型

Fig.2 Land-use types in the lower reaches of Xijiang River Basin

的 21 项。为进一步分析流域内整体水质状况,利用内梅罗污染指数法对断面 21 项指标污染指数进行计算,采用 Spearman 秩相关系数法对断面水质变化趋势进行分析。

2.3 土地利用类型与水质的相关性分析方法

2.3.1 空间分析

本文空间分析主要采用流域和河岸缓冲区两种尺度。利用 Arcgis10.2 将西江下游流域划分为 7 个子流域(图 3),将子流域边界与行政区边界进行配准,为流域尺度下土地利用与水质相关性分析提供基础数据。河岸缓冲区选用带状缓冲区法划分,以河流沿岸向两侧划分 100 m、200 m、400 m、800 m、1500 m、2000 m、3000 m、4000 m 和 5000 m 等 9 种尺度的带状缓冲区宽度(图 4),沿河流流向缓冲区长度主要参考 HJ 338—2018《饮用水水源保护区划分技术规范》中一、二级保护区及准保护区范围,以控制断面为中心,上游延伸 5000 m、下游延伸 500 m 范围。根据缓冲区宽度和长度以 11 个水质站点为中心最终划定 99 个空间单元。

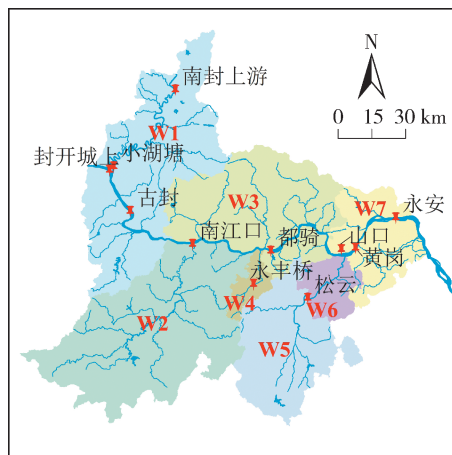


图3 子流域划分结果

Fig.3 Sub-basin division results

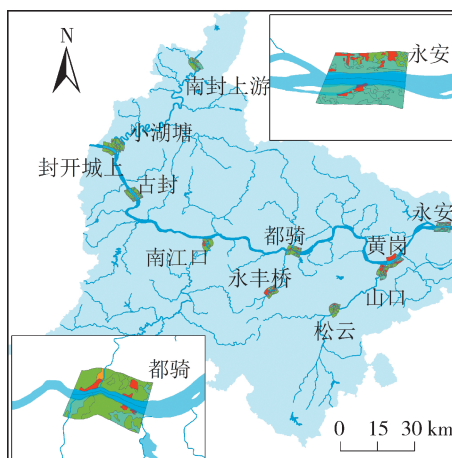


图4 1500 m 缓冲区范围

Fig.4 Schematic diagram of 1500 m bufferzone

2.3.2 统计分析

利用 SPSS22.0 统计软件,采用 Spearman 秩相关系数法定性分析土地利用类型与水质指标的相关性。采用约束排序分析法分析土地利用类型结构对

河流水质的解释能力,冗余分析(RDA)和典型对应分析(CCA)是约束排序分析的两种方法,两种方法均能获得响应变量与解释变量之间的关系,并能够计算解释变量对响应变量的贡献率。在采用约束排序法之前,需先通过除趋势对应分析(DCA)根据排序轴最大梯度选择约束排序分析的方法,当最大梯度小于3时,采用冗余分析法^[18]。本文将水质指标作为响应变量,将土地利用类型结构作为解释变量,可以计算出土地利用类型结构对水质指标的解释度,同时可用二维排序图直观展示响应变量与解释变量的关系。

3 结果与分析

3.1 水质时空变化特征

3.1.1 年际变化趋势

2005—2017年西江干流水质稳定保持在地表水Ⅱ类,其主要支流贺江水质稳定保持在Ⅱ类,罗定江水质优于Ⅲ类。南山河水质存在恶化趋势,2014年前一直稳定保持在Ⅱ类,2016年下降到Ⅳ类,到2017年恶化为劣Ⅴ类。新兴江2013年前水质保持在Ⅲ类,到2017年持续恶化为劣Ⅴ类。利用Spearman秩相关系数法对各断面主要水质指标变化趋势进行分析,结果见表1,西江干流封开城上、都骑断面21项指标内梅罗污染指数呈下降趋势,水质整体有所改善,但永安断面总磷存在上升趋势;贺江水质类别虽稳定保持在Ⅱ类,但氨氮浓度存在明显上升趋势;南山河、新兴江均存在总磷明显上升趋势,罗定江水质变化趋势不明显。

表1 主要水质指标 Spearman 秩相关系数

Table 1 Spearman rank correlation coefficient of key water quality index

河流	监测断面	COD	氨氮	总磷	21项指标内梅罗污染指数
西江	封开城上	-0.747 **	-0.09	0.28	-0.64 *
	古 封	-0.522	-0.46	0.17	-0.55
	都 骑	-0.577 *	-0.52	-0.03	-0.79 **
	黄 岗	-0.813 **	-0.27	0.11	-0.13
	永 安	-0.874 **	-0.42	0.62 *	-0.44
贺 江	南封上游	-0.083	0.99 **	-0.02	0.55
	小湖塘	-0.500	0.95 **	0.25	0.51
罗定江	南江口	-0.571	0.43	0.61	0.21
南山河	永丰桥	-0.107	0.39	0.86 *	0.43
新兴江	松 云	0.286	0.52	0.91 **	0.87 **
	山 口	0.143	-0.27	0.83 **	0.78 **

注: * 和 ** 分别表示通过了可信度为95%和99%的显著性检验。下同。

3.1.2 季节变化趋势

西江汛期一般为每年4—10月,其余为非汛期。将2015—2017年逐月氨氮、总磷浓度以及内梅罗指

数按照汛期和非汛期进行统计分析。西江干流不同水期内梅罗指数差异不大,未表现出明显规律。西江支流贺江、罗定江及南山河不同水期内梅罗指数差异较小,新兴江差异较大。西江干流封开城上、黄岗断面氨氮浓度汛期较非汛期高,古封、都骑和永安断面则表现为非汛期高于汛期。除黄岗断面外,西江干流断面总磷浓度汛期均较非汛期高,且汛期与非汛期之间的总磷浓度差值呈现出逐年增长趋势,表明西江干流总磷浓度的变化受面源影响较大,且面源影响在一定程度上持续加大。西江支流中贺江、罗定江氨氮、总磷浓度均表现为汛期高于非汛期,南山河则是非汛期高于汛期,这是因为南山河横穿人口密集的云浮城区,河流污染主要以生活源污染为主^[19]。新兴江氨氮浓度表现为汛期高于非汛期,总磷浓度表现为非汛期高于汛期。新兴江水质污染来源较为复杂,主要以生活源污染和农业畜禽养殖污染为主^[20]。

3.2 土地利用时空变化特征

西江下游流域面积约1.54万km²,主要以林地为主,占全流域面积70%以上,其次为水田坑塘、旱地、城镇用地和水体。2005—2018年城镇用地面积增加,占比从3.49%增长为3.96%,旱地面积占比从7.90%下降为6.71%,随着人口增长、城镇化率不断提高,城镇建设用地面积不断增加,甚至挤占部分旱地,使旱地面积减少。水田坑塘面积占比从12.75%上升为13.56%,主要是因为西江下游流域地区水产和畜禽养殖业发达,且畜禽养殖废水大多通过坑塘进行消纳处理。流域内水体和林地面积占比变化不大。

由于水质监测断面上游地区所有土地利用的组成和变化都对该位置的水质有直接或间接的影响,因此本文将每个监测断面上游符合产汇流机制的所有子流域之和作为该断面的子流域范围^[21-22]。基于2018年流域土地利用数据,各水质监测断面对应子流域土地利用均以林地为主,西江干流从上至下古封、都骑、黄岗和永安4个监测断面子流域城镇用地、水田坑塘、旱地面积占比逐渐增大,林地和水体面积占比逐渐减少。在支流子流域中,南山河永丰桥断面城镇用地面积占比比其他支流大,罗定江南江口断面旱地和水田坑塘面积占比相对较高(图5)。针对11个水质监测断面9种带状缓冲区宽度划定的99个空间单元,基于2018年土地利用类型进行统计分析,结果见图6。随着缓冲区宽度增大,城镇用地、水田坑塘面积占比呈现出逐渐下降的趋势,林地面积占比呈现出逐渐上升的趋势,旱地、水体面积占比变化趋势不明显。

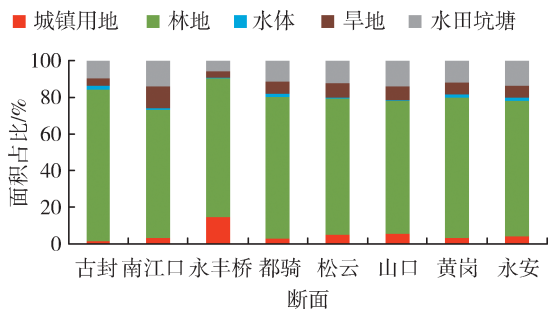


图5 2018年各断面子流域土地利用类型面积占比
Fig.5 Area proportion of land-use types in each section sub-basin in 2018

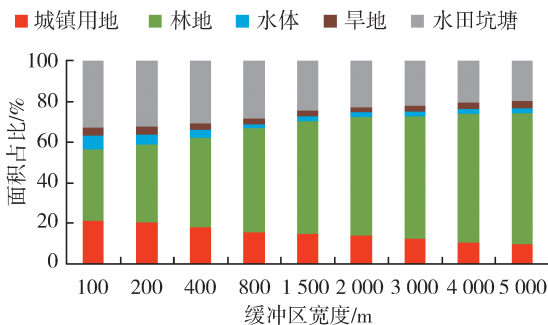


图6 2018年不同尺度缓冲区土地利用类型面积占比统计
Fig.6 Area proportion of land-use types in different buffer zones in 2018

3.3 水质对土地利用响应关系

由以上分析结果可知,河流水质在不同水期表现出明显差异,各子流域土地利用类型结构也不尽相同。考虑到西江流域氨氮和总磷浓度存在一定上升趋势,而 COD 是水污染总量控制的主要指标之一,因此将 COD、氨氮和总磷作为河流水质的代表性指标进行相关性分析。利用 2017 年监测断面水质指标年均值、汛期和非汛期水质与对应流域土地利用类型结构进行 Spearman 相关性分析,结果见表 2。从表 2 可见,水质指标与城镇用地、水体均呈现出显著相关性,其中水质指标与城镇用地呈显著正相关关系,与水体呈显著负相关关系,其余水质指标与林地主要呈负相关关系,与旱地呈正相关关系, COD、氨氮和总磷浓度与水田坑塘主要呈正相关关系,与水质整体状况呈负相关关系。城镇用地代表人类活动频繁区域,人类活动中工业废水和城镇市

政污水排放,均会给水体带来一定污染负荷,非汛期水质指标与城镇用地相关性高于年均值和汛期,进一步说明城镇用地主要给河流带来点源污染。水质指标与水体的负相关达到了显著水平,说明水域面积对水质具有明显正效应,水体有污染物自然降解作用,这个作用的强弱往往与流量、流速、水体背景水质状况有一定的相关性,随着污染物在水体中的迁移转化,污染物得到有效降解。水质指标与林地呈负相关关系,一方面林地的植被比较丰富,植被根系吸收和土壤截流过程可以有效减少污染物^[23-24];另一方面林地人类活动往往较弱,能达到减轻污染的效果^[25-26]。水质指标与旱地和水田坑塘主要表现为正相关关系,一方面农作物在耕作过程中往往需要大量的氮肥,另一方面水田坑塘涉及畜禽养殖和水产养殖,未被完全利用的营养元素随着降雨的冲刷与径流一同汇入河流,给水体带来污染。

通过 Canoco4.5 进行除趋势对应分析,排序轴最大梯度均小于 3,因此选取冗余分析法评估缓冲区土地利用类型结构对河流水质指标的影响。河流水质指标与土地利用的冗余分析统计结果表明,100 m 缓冲区土地利用结构与河流水质指标的相关系数在第一轴上为 0.869,在第二轴上为 0.617,第一轴对河流水质指标的解释度为 91.30%,累计解释率为 99.20%。随着缓冲区尺度的增大,第一轴解释率先增大后减小,1500 m 时达到最大 96.10%。

为更直观表示缓冲区土地利用结构对水质指标的解释能力,将不同尺度缓冲区土地利用结构与 11 个监测断面水质指标冗余分析结果作图,结果如图 7 所示,图中箭头线的长度代表土地利用对水质参数影响的大小,箭头线越长代表影响越大,土地利用箭头线方向与水质指标箭头线方向夹角的余弦代表两者的相关程度。不同尺度缓冲区土地利用类型对河流水质指标的解释度存在差异,缓冲区宽度小于 1500 m 时,城镇用地、林地和水田坑塘对水质指标解释度较高,缓冲区宽度大于 1500 m 后,城镇用地、旱地和水体对水质指标解释度较高。所有尺度缓冲区的水质指标都与水体和林地呈负相关关系,在 3 个指标中,COD 与林地的负相关程度最大,缓冲区

表2 土地利用类型面积占比与水质指标的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of area proportion of land-use type and water quality index

土地利用类型	COD			氨氮			总磷			21 项指标内梅罗污染指数		
	年均值	汛期	非汛期	年均值	汛期	非汛期	年均值	汛期	非汛期	年均值	汛期	非汛期
城镇用地	0.881 **	0.898 **	0.946 **	0.952 **	0.929 **	1.000 **	0.731 *	0.714 *	0.857 **	0.690	0.690	0.571
林地	-0.548	-0.587	-0.551	-0.381	-0.333	-0.476	-0.539	-0.524	-0.500	-0.286	-0.286	-0.214
水体	-0.833 *	-0.814 *	-0.731 *	-0.738 *	-0.762 *	-0.738 *	-0.790 *	-0.762 *	-0.857 **	-0.857 **	-0.857 **	-0.762 *
旱地	0.214	0.204	0.108	0.048	0.071	0.048	0.252	0.238	0.238	0.167	0.167	0.048
水田坑塘	0.143	0.168	0.120	0.000	-0.048	0.071	0.180	0.167	0.095	-0.071	-0.071	-0.143

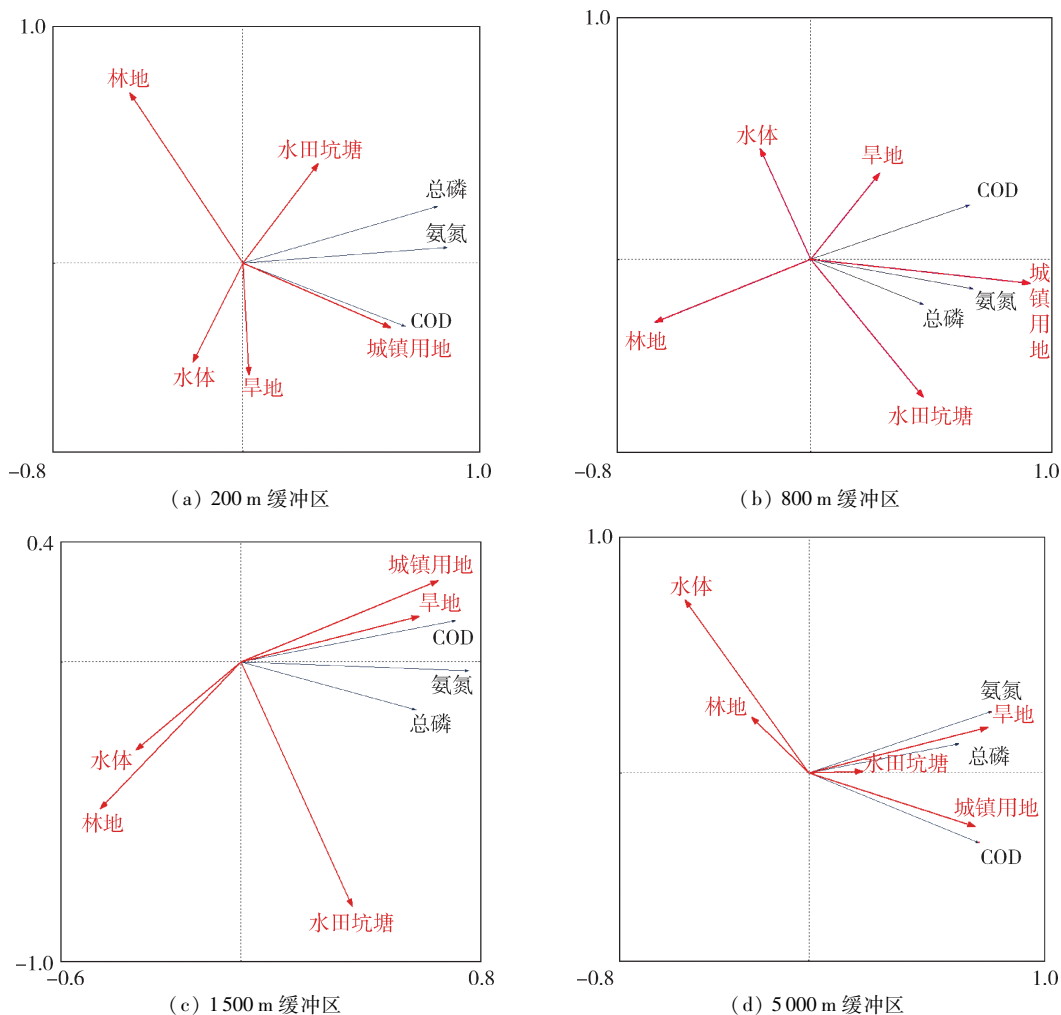


图7 不同尺度缓冲区土地利用类型与水质指标冗余分析

Fig. 7 Redundancy analysis of land-use type and water quality index in different buffer zone

宽度达到3000 m时,林地对水质的影响明显减弱。随着缓冲区范围增大,水体对水质的影响逐渐增大,水体能够缓解河流水质恶化。水质指标与城镇用地、水田坑塘和旱地呈正相关关系,缓冲区范围内城镇用地一直保持对水质指标较高的解释度,城镇用地主要对河流中COD浓度影响较大,在800 m缓冲区时与氨氮、总磷浓度呈现出显著相关性。旱地箭头线在100~800 m缓冲区段时,几乎与氨氮和总磷箭头线正交,说明在800 m宽度范围内水质指标与旱地相关性不强,当缓冲区宽度增大到1500 m时,水质指标与旱地相关性显著上升,5000 m时相关性达到最大。水田坑塘则表现出与旱地相反的情况,在100~800 m缓冲区段,氨氮和总磷浓度与水田坑塘的相关性较大,当缓冲区宽度增大到1500 m后,水田坑塘对水质的影响程度逐渐减弱。旱地和水田坑塘产生的污染物主要是随着降雨汇入河流,对水体造成污染。西江下游流域肇庆市和云浮市均为养殖大市,养殖方式主要以在鱼塘塘基上养殖为主,养殖废水直接冲入鱼塘后随着鱼塘换水排出,对周边

河流水体造成污染。建议对西江下游流域河岸800 m宽度范围内城镇用地、水田坑塘以及1500 m缓冲区外旱地加强污染管控。

4 结论

a. 2005—2017年西江干流水质稳定保持在地表水Ⅱ类,除永安断面总磷浓度呈显著上升趋势外,其他断面水质呈整体向好趋势。支流贺江、罗定江水质优良,其中贺江氨氮浓度呈显著上升趋势。南山河、新兴江水质恶化明显,总磷浓度呈明显上升趋势。从不同时期水质来看,西江干流总磷浓度汛期高于非汛期,贺江、新兴江氨氮浓度汛期明显高于非汛期。

b. 西江下游流域主要以林地为主,2005—2018年城镇用地、水田坑塘面积占比呈上升趋势,旱地面积占比呈下降趋势,林地、水体面积占比变化不大。从空间上来看,随着缓冲区宽度的增大,城镇用地、水田坑塘面积占比呈现出逐渐下降趋势,林地面积占比呈现出逐渐上升趋势,旱地、水体面积占比变化

趋势不明显。

c. 在流域尺度下,水质指标与城镇用地、水体显著相关,水质指标与城镇用地显著正相关,与水体显著负相关。在河岸缓冲区尺度下,水质指标与林地、水体负相关,水质指标与城镇用地、水田坑塘和旱地正相关。城镇用地对 COD 解释度较高,800 m 缓冲区城镇用地对氨氮和总磷解释度最高;水质指标与旱地相关性在缓冲区尺度达到 1 500 m 后显著上升;800 m 缓冲区内水田坑塘对水质指标影响较大。

参考文献:

- [1] ARYAL J, GAUTAM B, SAPKOTA N. Drinking water quality assessment[J]. Journal of Nepal Health Research Council, 2012, 10(22): 192-196.
- [2] BARBASH J E, THELIN G P, KOLPIN D W, et al. Major herbicides in ground water: results from the national water-quality assessment[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(3): 831-845.
- [3] 叶许春, 孟元可, 张永生, 等. 三峡库区香溪河回水区营养状态变化特征与驱动因子[J]. 水资源保护, 2018, 34(4): 80-85. (YE Xuchun, MENG Yuanke, ZHANG Yongsheng, et al. Variation characteristics of trophic states of Xiangxi River backwater area in Three Gorges Reservoir and its driving factors[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(4): 80-85. (in Chinese))
- [4] LI D D, LERMAN A, MACKENZIE F T. Human perturbations on the global biogeochemical cycles of coupled Si-C and responses of terrestrial processes and the coastal ocean[J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(3): 289-291.
- [5] YU Deyong, SHI Peijun, LIU Yupeng, et al. Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area[J]. Ecological Engineering, 2013, 53(3): 205-216.
- [6] CHANG H. Comparative streamflow characteristics in urbanizing basins in the Portland Metropolitan Area, Oregon, USA[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(2): 211-222.
- [7] 杨鑫. 松花江流域吉林市段土地利用与水质变化的关系研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [8] 邓睿, 张治意, 陈亚. 嘉陵江流域下游地表径流对土地利用变化的响应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 141-147. (DENG Rui, ZHANG Zhiyi, CHEN Ya. Responses of runoff to land use changes in lower Jialing River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 141-147. (in Chinese))
- [9] 李昆, 王玲, 孙伟, 等. 城市化下景观格局对河流水质变化的空间尺度效应分析[J]. 环境科学学报, 2020, 40(1): 343-352. (LI Kun, WANG Ling, SUN Wei, et al. Spatial effect of landscape pattern on river water quality under urbanization[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(1): 343-352. (in Chinese))
- [10] 杨琴, 汤秋鸿, 张永勇. 淮河流域(河南段)水质时空变化特征及其与土地利用类型的相关性分析[J]. 环境科学研究, 2011, 3(6): 1-5. (YANG Qin, TANG QiuHong, ZHANG Yongyong. Spatiotemporal changes of water quality in Huai River Basin(Henan section) and its correlation with land use patterns[J]. Research of Environmental Science, 2011, 3(6): 1-5. (in Chinese))
- [11] 曹芳芳, 李雪, 王东, 等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2582-2587. (CAO Fangfang, LI Xue, WANG Dong, et al. Effects of land use structure on water quality in Xin'anjiang River[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2582-2587. (in Chinese))
- [12] 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(7): 925-932. (WANG Yukun, CHENG Ruihui, ZENG Peng, et al. Spatial differentiation of water quality in river networks in Shanghai and its response to land use in riparian zones[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019(7): 925-932. (in Chinese))
- [13] 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: 205-216.
- [14] XU G, REN X, YANG Z, et al. Influence of landscape structures on water quality at multiple temporal and spatial scales: a case study of Wujiang River Watershed in Guizhou[J]. Water, 2019, 11(1): w11010159.
- [15] 徐林春. 人类活动影响下的珠江三角洲水安全研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [16] 袁永钦, 匡科, 沈军. 广州市西江引水工程水质预警系统研究与实践[J]. 中国给水排水, 2011, 3(6): 1-5. (YUAN Yongqin, KUANG Ke, SHEN Jun. Research and application of early-warning system for source water quality of Xijiang River Water Diversion Project[J]. China Water & Waste Water, 2011, 3(6): 1-5. (in Chinese))
- [17] 吴志勇, 林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 51-56. (WU Zhiyong, LIN Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1): 51-56. (in Chinese))
- [18] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 78-85. (ZHENG Yu, CHENG Xiangju, WANG Zhaoli, et al. Non-point source pollution in Hanjiang River Basin and its

- relation with landscape pattern [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 78-85. (in Chinese))
- [19] 陈思宁,王战勇. 云浮市南山河水环境综合整治措施及成效[J]. 环境, 2011 (增刊 1): 142-143. (CHEN Sining, WANG Zhanyong. Comprehensive improvement measures and effects of Nanshan River in Yunfu City [J]. Environment, 2011 (Supl): 142-143. (in Chinese))
- [20] 张鹏,逢勇,石成春,等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 64-69. (ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 64-69. (in Chinese))
- [21] 于松延,徐宗学,武玮,等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (5): 1309-1315. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei, et al. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (5): 1309-1315. (in Chinese))
- [22] 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 Sheng, YANG Na, PENG Kai, et al. The effects of land-use and landscape pattern on water quality in Weihe river watershed [J]. Geographical Research, 2014, 33 (12): 2263-2274. (in Chinese))
- [23] 吕唤春,薛生国,方志发,等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. 中国地质, 2004, 31 (增刊 1): 112-117. (LYU Huanchun, XUE Shengguo, FANG Zhifa, et al. Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qiandaohu drainage area [J]. Geology in China, 2004, 31 (Supl): 112-117. (in Chinese))
- [24] 蔡莹,杨旭,万鲁河,等. 北方寒冷地区冻融期河岸缓冲区土地利用结构对河流水质的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39 (3): 679-687. (CAI Ying, YANG Xu, WAN Luhe, et al. Influence of land use structure in riparian buffers on river water quality during the freezing and thawing period in Northern Cold Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39 (3): 679-687. (in Chinese))
- [25] 谢国清,鲁韦坤,杨树平,等. 阳宗海、松华坝和云龙水库流域土地利用与水质变化[J]. 水资源保护, 2007, 23 (5): 15-17. (XIE Guoqing, LU Weikun, YANG Shuping, et al. Land use and water quality changes in Yangzonghai Lake, Songhuaba Reservoir and Yunlong Reservoir Basins [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (5): 15-17. (in Chinese))
- [26] 李杨,马晓明. 深圳坪山河流域土地利用变化对流域非点源污染负荷的影响[J]. 水资源保护, 2012, 28 (2): 42-45. (LI Yang, MA Xiaoming. Impacts of land-use change on non-point source pollution load in Pingshan River Watershed in Shenzhen City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (2): 42-45. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-05-28 编辑:熊水斌)

(上接第 96 页)

- [33] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33 (2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2): 13-15. (in Chinese))
- [34] 住房和城乡建设部. 城市黑臭水体整治——排水口、管道及检查井治理技术指南[C]//中国土木工程学会全国排水委员会年会. 北京:中国土木工程学会, 2016.
- [35] 冯俊豪. 一体化泵站泵坑设计及流动数值分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (21): 108-110. (FENG Junhao. Design of pump sump and numerical analysis of flow at integrated pump station [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (21): 108-110. (in Chinese))
- [36] 蔡凌豪. 适用于“海绵城市”的水文水力模型概述[J]. 风景园林, 2016 (2): 33-43. (CAI Linghao. Introduction of hydrological and hydraulic models for “sponge city” [J]. Digital Landscape Architecture, 2016 (2): 33-43. (in Chinese))
- [37] 刘艳辉,陈明阔,刘媛,等. 超磁分离技术在矿井水处理中的应用[J]. 给水排水, 2015 (4): 55-57. (LIU Yanhui, CHEN Mingkuo, LIU Yuan, et al. Application of magnetic separation technology in underground water treatment of mine shaft [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (4): 55-57. (in Chinese))
- [38] 车生泉,谢长坤,陈丹,等. 海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J]. 中国园林, 2015, 31 (6): 11-15. (CHE Shengquan, XIE Changkun, CHEN Dan, et al. Development and constructive approaches for theories and technologies of sponge city system [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31 (6): 11-15. (in Chinese))
- (收稿日期:2019-04-19 编辑:王 芳)

