

山地城市河流土地利用结构对水质的影响——以重庆市为例*

吕志强¹, 庆旭瑶^{1,2}, 任玉芬^{2**}, 王效科², 庞容¹

(1: 重庆工商大学旅游与国土资源学院, 重庆 400067)

(2: 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 以重庆主城区 6 条次级河流为研究区域, 运用遥感和地理信息系统计算研究区土地利用构成, 借助相关性分析和冗余分析等数理统计手段, 分析监测断面汇水区不同尺度土地利用结构与水质指标间的相关关系。结果表明: 研究区土地利用结构以建设用地和林地为主, 未利用地和农业用地所占面积比例较少; 研究区土地利用结构对各水质指标有重要影响, 其中建设用地和农业用地对河流水质恶化具有明显的作用, 河流沿岸林地布局能显著改善水质, 但随着雨季的到来林地将成为硝态氮的来源。冗余分析进一步证实土地利用类型对水环境有一定影响。研究成果对重庆市河流水环境管理具有重要的实际指导意义, 并可为山地城市河流环境研究提供借鉴。

关键词: 土地利用; 河流水质; 地理信息系统; 冗余分析; 重庆市

Effects of land use pattern on water quality in mountainous city — a case study of Chongqing City

LÜ Zhiqiang¹, QING Xuyao^{1,2}, REN Yufen^{2**}, WANG Xiaoke² & PANG Rong¹

(1: *Department of Land Resource Management, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, P.R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P.R. China*)

Abstract: The main area of this study focused on the six secondary river districts of Chongqing City. The study utilizes the remote sensing and GIS to calculate the area of study's land use structures, as well as analyzing the relationship between the land use and the water quality indications at different levels in the section of the catchment area based on several statistical analysis methods such as correlation analysis and redundancy analysis (RDA). The result shows that construction and forest land use occupied the most proportions of the studied area while unused land and agricultural land occupied a relatively small percentage; the land use pattern played an important role on the water quality in the area of study, while the construction and the agricultural land use had a great impact on the deterioration of water quality, the strategic layout of forest land use along the river banks can improve water quality significantly under normal circumstances, but would be the root cause of nitrate nitrogen in the upcoming rainy season. The RDA analysis further confirmed the fact that different land use patterns had certain influence on the water quality. This study had set an important and practical guideline for the river water environmental management of Chongqing City, and at the same time, provided an useful reference on the study of river water environment in hilly cities.

Keywords: Land use; river water quality; GIS; redundancy analysis; Chongqing City

随着城市化进程的加快, 城区可渗透地表面积的比例越来越小, 由雨水径流产生的突发性高、冲击性强

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07307-002)、国家自然科学基金重点项目(41030744, 41230633)、重庆市社会科学规划培育项目(2014PY63)、国家自然科学基金项目(41101155, 41301351)、重庆市教委科技项目(KJ1400623)、教育部人文社科项目(12XJCZH005)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(2011)和重庆工商大学研究生“创新型科研项目”(yiscxx2015-41-23)联合资助。2014-12-04 收稿; 2015-07-02 收修改稿。吕志强(1978~), 男, 博士, 副教授; E-mail: lvzhiqiang@ctbu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: yfren@rcees.ac.cn.

的非点源污染已成为水环境恶化的重要原因之一^[1];加之,公路总量的持续增长以及汽车拥有量的迅速增大,可以预见,城市非点源污染问题将日益突出.城市河流作为城市的景观廊道不仅发挥着重要的生态功能,而且为城市的稳定性、舒适性和可持续性提供一定的基础^[2],成为人类活动与自然过程共同作用最为强烈的地带之一^[3],普遍受到严重污染.许多学者对不同城市区域河流水环境污染问题进行大量的研究,结果表明从城市河流水质恶化的过程来看,城市土地利用变化对城市水环境的影响最显著^[4].官宝红等^[5]通过杭州市城市土地利用对河流水质的研究发现,工业用地、农业用地等往往导致水环境质量下降;林地、草地与污染物浓度存在负相关关系^[6];城镇用地、耕地与水体污染物浓度存在负相关关系^[7],耕地与水体污染物浓度呈负相关或没有明显相关性^[5,8].以上研究结论的差异说明研究区内土地利用对水质的关系与区域内土地利用结构组成和空间分布特征相关.因此,可以通过改变区域内土地利用方式来控制非点源污染^[9],这样,不仅可以制定有效的土地管理措施,还可以改善水质状况.目前,关于城市土地利用与河流水质间关系的研究主要集中在平原河网地区^[10]、密云水库流域^[11]、太湖流域^[12],而针对山地城市河流的相关报道较少.重庆市在过去20年里经历了快速城市化过程,城市土地利用通过改变物质能量的流动而使城市地表水环境发生改变,其发展演变对水环境产生深远的影响.

本研究以重庆市主城区的朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河、跳蹬河和清水溪流域为研究对象,采用影像解译数据和水质监测数据,利用GIS空间分析法和相关分析法,揭示重庆市土地利用结构对城市地表水的响应,研究不同土地利用类型的面积变化对地表水主要污染物浓度的影响,以期为该地区迅速发展的城市化背景下水环境安全的保障提供建议.

1 材料与方法

1.1 研究区

重庆主城区地处青藏高原与长江中下游平原过渡地带的四川盆地东南部,居于川东平行岭谷与川中丘陵、川南山地的结合部.属中亚季风区,冬季受偏北季风控制,夏季受偏南季风影响,平均气温多在16~18℃之间,年降雨量大部分地区为1000~1200 mm,75%~80%以上的雨量主要集中在5—10月.主城区共有14条次级河流,其中,朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河、跳蹬河和清水溪主要位于重庆绕城高速以内,是城市不透水率最高区域内的主要河流.朝阳河位于重庆市渝北区境内,全长约45 km,发源于古路镇新桥水库,流经王家镇、石坪镇、铁山坪镇,于唐家沱汇入长江;伏牛溪位于重庆市大渡口区,全长15.3 km,发源于大渡口简家岩,于伏牛溪火车站汇入长江;盘溪河是嘉陵江的支流,全长约11 km,流域地跨重庆市江北区和渝北区,总汇水面积29.12 km²,上游主要是几个水库、公园和商业区,中游以商业区为主,下游以居民住宅区和工业区为主;花溪河发源于南泉镇,流经南彭镇、界石镇、南泉镇、花溪镇,最后于李家沱街道汇入长江,位于重庆市巴南区境内,流域面积268.46 km²,河道总长63.62 km;跳蹬河发源于九龙坡区,流经华岩镇、跳蹬镇,于大渡口区土地岚汇入长江,全长约47 km;清水溪位于重庆市沙坪坝区,全长15.88 km,发源于歌乐山山洞龙井,流经上桥镇、天星桥、杨公桥,于瓷器口古镇汇入嘉陵江.

1.2 数据来源

1.2.1 野外采样与分析 于2013年4月—2014年4月每月2次对朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河、跳蹬河和清水溪进行为期1年的定点监测,从河流上游到与长江或嘉陵江交汇处共设30个采样点,分别为朝阳河(C1~C5)、伏牛溪(F1~F5)、盘溪河(P1~P5)、花溪河(H1~H5)、跳蹬河(T1~T5)和清水溪(Q1~Q5),采样点具体分布见图1.所选取的点覆盖整个河流,包含整个研究区河流的水文特征.选用1000 ml清洁聚乙烯瓶在水下30~50 cm深度处进行水样采集(3个平行),样品采集后用硫酸酸化保存,1 d内带回实验室完成分析.选取具有代表意义的水质要素,包括总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)浓度和高锰酸盐指数(COD_{Mn}).水质指标参照文献[13]测定.重庆1—3月为枯水期降雨较少,而2013年4月重庆持续降雨数天,且4月30日重庆遭遇强暴雨事件,降雨量为45.6 mm,因此在对多次样品进行收集和分析的基础上,选取2013年4月1日和5月1日作为典型事件,以各监测点为中心,分别作为100、300、500 m的缓冲区,得到各缓冲区内的土地利用状况,进行水质要素和土地利用的相关分析,再以各监测断面主要水质指标浓度作为响应变量,监测点对应作用区内的土地利用类型面积比为解释变量,将30个河道断面在3种

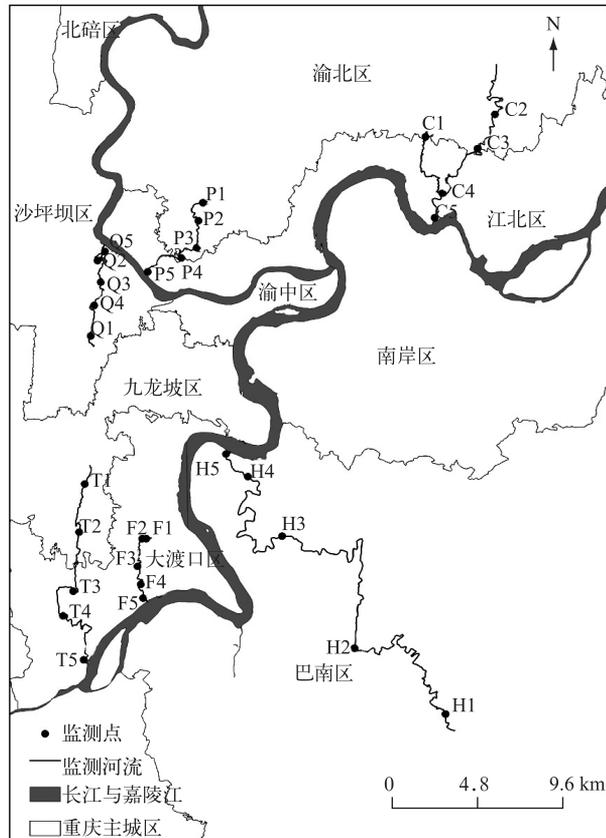


图1 重庆主城区河流采样点位置分布

Fig.1 Sampling sites of the tributaries in the main urban districts, Chongqing City

尺度下进行冗余分析. 冗余分析具体定义及步骤见文献[14].

1.2.2 遥感数据及处理 选取研究区2010年5月23日美国陆地卫星Landsat TM遥感影像,结合1:50000 DEM数据,对遥感影像进行辐射校正和正射纠正,根据研究目的以及遥感影像的精度,将土地利用类型分为耕地、林地、建设用地和未利用地4类,最终生成研究区土地利用矢量数据图,利用ArcGIS 9.3中Clip操作,获取各个监测断面不同缓冲区范围(100、300和500 m)的土地利用矢量数据.

1.3 数据分析

本文缓冲区土地利用获取在ENVI5.2和ArcGIS 9.3中完成;冗余分析(RDA)在CANOCO 5.0软件中完成. 数据制图采用Origin 9.0软件完成.

2 结果与讨论

2.1 土地利用类型结构

100 m缓冲区内各监测点的土地利用类型较为单一,其中F5、P3、P4、H4、H5、T1、Q2、Q3和Q5点缓冲区内都是建设用地,朝阳河C1~C4点以林地和农业用地为主,其余各点均为建设用地所占比例较大;300 m缓冲区内各监测点土地利用类型较为丰富,C1、C2、H2、T2、T4、T5和Q1点用地类型以林地为主,平均为35%,C5、F3、F4、P2、P3、P4、H4、T1、Q2和Q3点以建设用地为主,平均为50%,其余各点农用地比例逐渐增加,林地逐渐减少,建设用地所占比例在20%以上;500 m缓冲区内朝阳河的C1~C4点林地减少,农业用地和建设用地逐渐增加,清水溪河流的Q1~Q5点林地有所增加,不再是单一的建设用地类型,其余河流的各监测点

均以建设用地为主,各河流的下游监测点未利用地面积有所增加(图2).

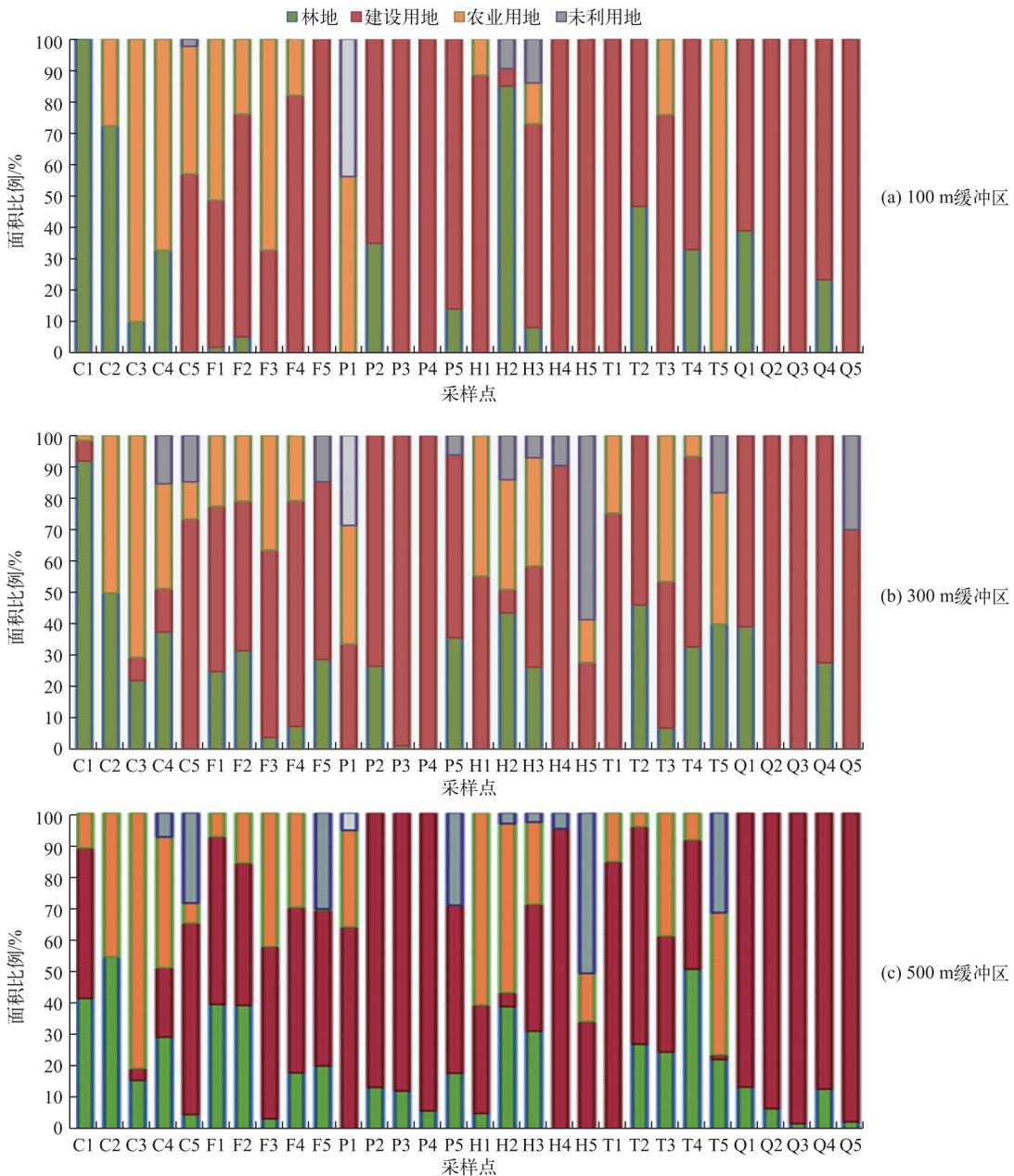


图2 各缓冲区土地利用结构

Fig.2 The land use structure in the buffer

2.2 各河流典型降雨前后污染物变化规律

2.2.1 污染指标综合评价 总体上,重庆市河流污染较为严重,水质检测指标表现为受营养盐输入影响显著(表1). 无机氮(NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N)、TP 和 COD_{Mn} 浓度均值分别为 10.59、6.84、0.97 和 97.77 mg/L,均劣于国家《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V 类水最小允许值,其中 TN 浓度最大值达到 27.45 mg/L,接近于 V 类水质的 14 倍. 与北京主要河流的河段相比,TN、TP 和 NH_4^+ -N 浓度劣于运河北京市中心河段的 2~

7倍^[15]. 检测指标的空间变异特征上,4月各监测指标变异系数大于5月,其中4月监测指标中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP浓度和 COD_{Mn} 变异显著,变异系数均在70%以上,5月TN空间变异系数最小为26%变异,变异性高低的变化反映出降雨过程导致地表径流的加速,使得采样点污染物浓度更为均质,空间差异降低.

表1 水质指标描述性统计(mg/L)*
Tab. 1 Descriptive statistics of water quality parameter

监测指标	最小值	最大值	平均值	变异系数	IV类标准	V类标准
TN ^{q)}	1.54	27.45	12.30	0.62	1.50	2.00
TN ^{h)}	4.71	14.61	8.87	0.26	1.50	2.00
$\text{NH}_4^+\text{-N}^{\text{q)}$	0.78	23.33	9.03	0.72	1.50	2.00
$\text{NH}_4^+\text{-N}^{\text{h)}$	1.74	13.09	4.64	0.61	1.50	2.00
$\text{NO}_3^-\text{-N}^{\text{q)}$	0.03	11.98	1.95	1.24	—	—
$\text{NO}_3^-\text{-N}^{\text{h)}$	0.17	8.60	3.89	0.48	—	—
TP ^{q)}	0.22	4.22	1.22	0.70	0.30	0.40
TP ^{h)}	0.14	2.00	0.71	0.66	0.30	0.40
$\text{COD}_{\text{Mn}}^{\text{q)}$	1.86	272.40	80.50	0.86	30.00	40.00
$\text{COD}_{\text{Mn}}^{\text{h)}$	34.08	281.90	115.04	0.50	30.00	40.00

* q)代表降雨前(4月1日)监测数据,h)代表降雨后(5月1日)监测数据;—代表无数据.

2.2.2 典型降雨前、后河流水体中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和 COD_{Mn} 分布特征 典型降雨前后河流水体中TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TP和 COD_{Mn} 浓度空间变化显著(图3). 总体上,4月TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP浓度高于5月,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 浓度为降雨后高于降雨前. 典型降雨前河流水体TN平均浓度为12.30 mg/L,TN浓度在朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河和跳蹬河均表现为自上游向下游平缓上升的趋势,而在清水溪河流表现出迥异,Q2点为清水溪河流TN浓度最小的监测断面;为9.64 mg/L;典型降雨后河流水体TN平均浓度为8.87 mg/L,所有河流表现为自上游向下游上升的趋势. 典型降雨前后河流水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TN浓度变化趋势一致,河流水体 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为1.98和3.89 mg/L,朝阳河、伏牛溪、盘溪河、花溪河和跳蹬河降雨前后变化趋势一致,而清水溪表现出迥异,降雨前后清水溪Q2点变化明显, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别为6.89和0.72 mg/L,相差较大. 典型降雨前后河流水体TP浓度变化趋势无明显特征(除T5点). COD_{Mn} 浓度降雨前后变化趋势基本表现为增减交替的趋势,降雨后 COD_{Mn} 浓度远远高于降雨前,平均浓度分别为80.50和115.04 mg/L,均为劣V类水质,建设用地比例过大,会导致 COD_{Mn} 浓度上升,水质变差^[16-17].

2.3 土地利用类型与水质关联分析

2.3.1 水质-土地利用的相关性分析 从相关性分析结果(表2)可以看出,各缓冲区内土地利用类型面积的比例与水质污染物浓度之间呈现出显著相关性,就林地而言,在降雨前仅与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在500 m缓冲区内存在显著负相关($P<0.05$),与其他指标在各缓冲区内均无显著相关,降雨后林地与TP浓度在100 m缓冲区内呈现显著负相关($P<0.05$),且在500 m缓冲区内与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在100 m缓冲区内分别表现出显著正相关和显著负相关($P<0.05$);建设用地在降雨前与TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在300 m缓冲区内均为显著正相关($P<0.01$),在500 m缓冲区内与TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈显著正相关($P<0.01$),而与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在500 m缓冲区内呈显著负相关($P<0.05$),降雨后建设用地在100 m缓冲区内与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别呈显著负相关($P<0.05$)和显著正相关($P<0.01$),而在300 m缓冲区内与TN浓度无显著相关性,与TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均呈显著正相关($P<0.01$),在500 m内仍然与TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈显著正相关($P<0.05$),与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈显著负相关性;降雨前农业用地与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在500 m缓冲区内呈显著负相关($P<0.05$),其余无显著相关性,而在降雨后与 COD_{Mn} 和TP浓度分别在100 m和500 m缓冲区内呈显著负相关($P<0.05$),而500 m与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的显著负相关性消失,未利用地在降雨前在100 m缓冲区内与TP和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别呈显著正相关和显著负相关($P<0.05$),而在降雨后与TN浓度呈显著负相关($P<0.01$),与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的负相关性更加显著($P<0.01$),在500 m缓冲区内与TN和TP浓度分别表现出显著正相关($P<0.01$).

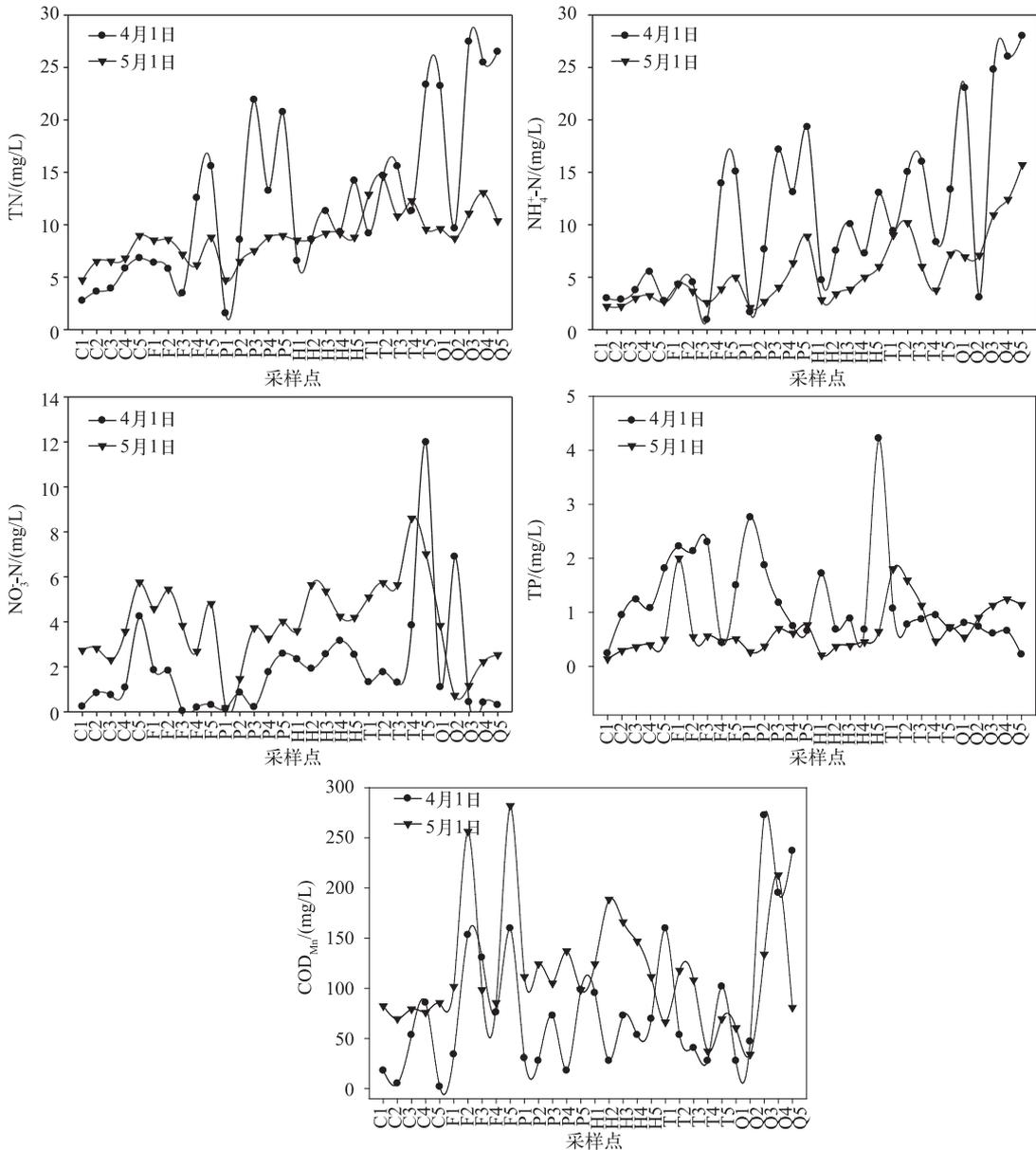


图3 降雨前(4月1日)、后(5月1日)水质指标变化

Fig.3 The changes of water quality indexes before and after the rain

空间格局会影响土地利用与水质指标之间的关系,距离监测点最近的土地利用情况对水质的影响要比整个流域的综合土地利用情况对水质的影响更大^[18];也有研究指出土地利用对水质影响的尺度效应并不明显^[19].对重庆河流样本的相关分析结果表明,在河流断面的缓冲作用区,土地利用构成对水质指标的影响程度随着缓冲半径增大而增大;其中林地的影响500 m缓冲半径作用区达到最大;农业用地和建设用对作用区距离增长敏感,降雨后半径500 m作用区的影响较高,而未利用地在100 m作用区影响较高.据此可推断,在清水通道两侧建设防护林,当林带宽度小于500 m时的排污效果会较好.

表2 降雨前、后土地利用结构与水质指标的相关性¹⁾
 Tab. 2 The relation between land use structure and water quality parameters

各缓冲区 水质指标	林地 ^{q)}	林地 ^{h)}	建设 用地 ^{q)}	建设 用地 ^{h)}	农业 用地 ^{q)}	农业 用地 ^{h)}	未利 用地 ^{q)}	未利 用地 ^{h)}
TN(100 m)	-0.487	-0.333	0.391	-0.029	-0.266	-0.139	0.955 *	-0.987 **
TP(100 m)	-0.300	-0.518 *	0.190	0.181	-0.345	0.270	-0.939	-0.903
NO ₃ ⁻ -N(100 m)	-0.456	-0.211	-0.267	-0.493 *	0.357	-0.145	-0.972 *	-0.978 **
NH ₄ ⁺ -N(100 m)	-0.290	-0.400	0.385	0.567 **	-0.53	-0.099	-0.800	-0.597
COD _{Mn} (100 m)	-0.211	0.061	-0.141	-0.158	-0.258	-0.696 *	0.800	-0.157
TN(300 m)	-0.130	-0.145	0.498 **	0.222	-0.174	-0.160	0.109	0.178
TP(300 m)	-0.177	-0.277	0.319	0.428 **	-0.142	-0.162	-0.255	0.247
NO ₃ ⁻ -N(300 m)	0.093	0.210	0.047	0.234	0.050	-0.310	-0.273	-0.336
NH ₄ ⁺ -N(300 m)	-0.167	-0.219	0.512 **	0.518 **	-0.354	-0.098	-0.100	0.187
COD _{Mn} (300 m)	-0.145	-0.208	0.065	-0.283	-0.122	0.059	0.202	-0.419
TN(500 m)	-0.372	-0.149	0.329	0.04	-0.377	-0.374	0.588	0.688 *
TP(500 m)	-0.201	-0.288	0.440 *	0.475 *	-0.429	-0.445 *	0.283	0.866 **
NO ₃ ⁻ -N(500 m)	0.120	0.475 *	-0.430 *	-0.453 *	0.157	-0.354	0.277	0.268
NH ₄ ⁺ -N(500 m)	-0.477 *	-0.448 *	0.601 **	0.544 **	-0.544 *	-0.328	0.353	0.566
COD _{Mn} (500 m)	-0.204	0.197	-0.920	-0.256	0.347	-0.244	-0.248	-0.407

1) * 表示在 0.05 水平显著相关, ** 表示在 0.01 水平显著相关(置信度=95%);q)代表降雨前(4月1日)监测数据,h)代表降雨后(5月1日)监测数据。

2.3.2 水质-土地利用的冗余分析 为定量研究各水质指标与土地利用的相关性,对5种水质指标和4种土地利用3种尺度排序图进行分析(图4),结果表明不同水质指标与土地利用的相关性及强度在降雨前、后变化显著。降雨前,TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP和COD_{Mn}浓度与林地呈不同程度的负相关,表明降雨前这些指标总体上有利于河流水质改善,而其他指标则相对复杂。其中建设用地是TN、NH₄⁺-N和COD_{Mn}的正相关因子,未利用地与NO₃⁻-N与TP浓度均呈正相关,农业用地与各水质指标相关性较弱。降雨后,林地与NO₃⁻-N浓度呈正相关,建设用地与TN与NH₄⁺-N浓度均呈正相关,农业用地与未利用地与各水质指标呈不同程度的正负相关。总体上,降雨前未利用地与建设用地不利于河流水质改善,林地利于河流水质的改善;降雨后各类土地利用与不同水质指标表现出正相关性,不利于河流水质的改善。

通过对不同区域水环境的研究,学者们认为建设用地、耕地、林地是向河流中输入污染物的主要土地利用类型^[20],但污染物输出能力有一定的差别^[21],未利用地对污染物的影响在不同地方不同尺度下表现不同。本研究中,农业用地在降雨前、后与TP、NH₄⁺-N和COD_{Mn}浓度均呈正相关,证实了农业活动导致面源污染是目前水环境的主要威胁之一。林地在降雨前与水质有较好的负相关,这是由于林地一方面可以通过植物根部的截留作用来减少污染物的地表径流,在这一过程林地、草地对水质指标起汇的作用,另一方面,林地和草地面积的增加反而引起耕地和建设用地的减少,污染物经过陆域传输衰减之后也相应减少^[8,22-23];然而降雨后,林地与NO₃⁻-N浓度呈显著正相关,这与於梦秋等^[24]的研究一致,NO₃⁻-N可能来自于林地区域的土壤氮素淋洗。建设用地与污染物的输出贡献较大,降雨后建设用地与各污染物的相关性更加显著,对水质存在负效应^[25],城市化使得不透水区和建设用地面积增加,道路、广场、屋面等不透水面的污染物随着暴雨径流的冲刷进入水体,导致水体中有机物和营养盐浓度增加,水质下降^[26],城镇建设用地的比重越大,水质往往越差。未利用地与建设用地类似,在降雨前、后与不同水质指标均呈正相关,研究区内未利用地大多分布在河流沿岸,其表面植被覆盖较少,在雨季,未利用地表面缺少植被截留而增加地表径流,并将周边泥沙带入河流中,是造成河水浑浊的主要原因^[27]。

3 结论

1)对重庆市降雨前、后6条河流进行检测,TN、TP、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和COD_{Mn}浓度均为劣V类标准,在降

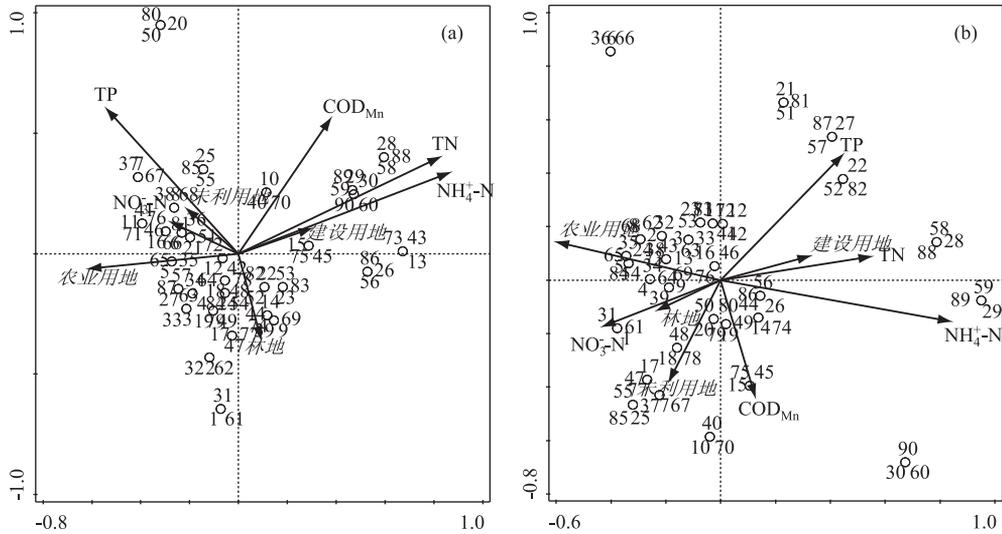


图 4 降雨前(a)、后(b)土地利用类型与水质指标 RDA 排序图

Fig.4 The land use types and quality index of RDA ordination diagram before(a) and after(b) the rain

雨前、后各水质指标变化范围均有差异,且不同河流不同采样点在降雨前后的水质差异也较大,故可以根据水质时空变化特征,结合实地情况制定出综合效益最大化的雨水利用方案,对污染物排放进行控制。

2) 将重庆市河流监测点不同缓冲区的土地利用类型分为 4 类,发现 100 m 缓冲区内土地利用类型较为单一,以建设用地和林地为主,300 m 和 500 m 缓冲区土地利用类型较为丰富,林地减少,农业用地增加。

3) 以 6 条河流的 30 个监测点为研究对象,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,定量并直观的体现土地利用类型对水质的影响,林地与水质指标主要呈负相关,对水质有净化作用,但降雨使林地成为 NO_3^--N 的主要来源;建设用地与水质呈正相关,农用地对水质有净化作用,未利用地

在不同缓冲区对水质有不同的影响,相关研究需要更进一步的深入研究探讨土地利用与水质的尺度效应。

致谢:庆旭瑶及其他人员协助野外采样工作,庞容、邓睿、卿姗姗等参与测定化学数据,任玉芬、王效科对本文的修改提出宝贵意见。在此,向他们表示衷心的感谢。

4 参考文献

- [1] Joong GL, Lai FH. Optimization of integrated urban wet-weather control strategies. *Journal of Water Resource Planning and Management*, 2005, **131**(4): 307-315.
- [2] 杨士弘. 城市生态环境学. 北京: 科学出版社, 2003: 103-111.
- [3] 岳 隽, 王仰麟, 彭 建. 城市河流的景观生态学研究: 概念框架. *生态学报*, 2005, **25**(6): 1422-1429.
- [4] 杜习乐, 吕昌河, 王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展. *土壤*, 2011, **43**(3): 350-360.
- [5] 官宝红, 李 君, 曾爱斌等. 杭州市城市土地利用对河流水质的影响. *资源科学*, 2008, **30**(6): 857-863.
- [6] Tong STY, Chen WL. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management*, 2002, **66**: 377-393.
- [7] Moreno JL, Navarro C, Delas Heras J. Abiotic ecotypes in south-central Spanish rivers: Reference conditions and pollution. *Environmental Pollution*, 2006, **143**: 388-396.
- [8] 夏 翥, 李云梅, 王 桥. 基于遥感的无锡市土地利用与过境水质的响应关系研究. *地理科学*, 2010, **30**(1): 130-133.
- [9] 孟晓云, 于兴修, 白雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1789-1794.
- [10] Chattopadhyay S, Rani LA, Sangeetha PV. Water quality variations as linked to landuse pattern: A case study in Cha-

- lakudy river basin, Kerala. *Current Science*, 2005, **89**(12): 2163-2189.
- [11] 欧 洋. 密云水库上游流域多尺度景观与水质响应关系研究[学位论文]. 北京: 首都师范大学, 2011.
- [12] 周 文, 刘茂松, 徐 驰等. 太湖流域河流水质状况对景观背景的影响. *生态学报*, 2012, **32**(6): 5043-5053.
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法; 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [14] Ter Braak CJF, Prentice IC. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 1988, **18**: 271-317.
- [15] 荆红卫, 张志刚, 郭 婧. 北京北运河水系水质污染特征及污染来源分析. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 319-327.
- [16] Zhang DW, Li YF, Sun X *et al.* Relationship between landscape pattern and river water quality in Wujingang region, Taihu lake watershed. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [17] Guan BH, Jun LI, Zeng AB *et al.* Impacts of urban land use on water quality in Hangzhou. *Resources Science*, 2008, **30**(6): 857-863.
- [18] King RS, Baker ME, Whigham DF *et al.* Spatial considerations for linking watershed land cover to ecological indicators in streams. *Ecological Applications*, 2005, **15**(1): 137-153.
- [19] Zampella RA, Procopio NA, Lathrop RG *et al.* Relationship of land use/land cover patterns and surface-water quality in the Mullica river basin. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**(3): 594-604.
- [20] Paul MJ, Meyer JL. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, **32**(1): 333-365.
- [21] Jordan TE, Correll DL, Weller DE. Effects of agriculture on discharges of nutrients from coastal plain watersheds of Chesapeake Bay. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(3): 836-848.
- [22] Moreno JL, Navarro C, De las Heras J. Abiotic ecotypes in south-central Spanish rivers: reference conditions and pollution. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(3): 388-396.
- [23] 孙金华, 曹晓峰, 黄 艺. 滇池流域土地利用对入湖河流水质的影响. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 2052-2057.
- [24] 於梦秋, 蔡 颖, 刘 华等. 太湖流域入湖河流土地利用类型对水质的影响——以乌溪港、武进港为例. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 1024-1032.
- [25] 岳 隽, 王仰麟, 李贵才等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响——以深圳市西丽水库流域为例. *生态学报*, 2007, **27**(12): 5271-5281.
- [26] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度和等级. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [27] 杨莎莎, 汤萃文, 刘丽娟等. 流域尺度上河流水质与土地利用的关系. *应用生态学报*, 2013, **24**(7): 1953-1961.