

DOI: 10.5846/stxb201409221870

王鹏, 齐述华, 陈波. 赣江流域土地利用方式对河流水质的影响. 生态学报, 2015, 35(13): 4326-4337.

Wang P, Qi S H, Chen B. Influence of land use on river water quality in the Ganjiang basin. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4326-4337.

赣江流域土地利用方式对河流水质的影响

王 鹏^{1,2,*}, 齐述华¹, 陈 波¹

1 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 南昌 330022

2 江西省水土保持科学研究院江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029

摘要: 赣江是鄱阳湖的最大支流, 是鄱阳湖水污染物的主要来源, 查明流域土地利用方式对赣江水质的影响和鄱阳湖的水环境保护具有重要意义。基于 2012 年对赣江 7 个主要支流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 和 DO 浓度的每月测定结果, 通过不同空间尺度和土地类型等级划分, 利用相关分析和冗余分析研究土地利用方式对赣江流域河流水质的影响。研究表明, 子流域的土地利用方式对 TP 的影响大于缓冲区; 对 COD_{Mn} 的影响在丰水期大于缓冲区, 在枯水期小于缓冲区; 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响在丰水期与缓冲区接近, 在枯水期小于缓冲区; DO 受土地利用方式的影响较小。水田中的丘陵水田是赣江水体 TP 和丰水期 COD_{Mn} 的主要来源; 平原水田是枯水期 COD_{Mn} 的主要来源。居民建设用地中的城镇用地是赣江水体 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和丰水期 COD_{Mn} 的主要来源, 农村用地是 COD_{Mn} 的主要来源。水域中的水库坑塘是赣江水体 TP 和丰水期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 的主要来源。

关键词: 赣江; 河流水质; 土地利用; 空间尺度; 分类等级

Influence of land use on river water quality in the Ganjiang basin

WANG Peng^{1,2,*}, QI Shuhua¹, CHEN Bo¹

1 Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

2 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China

Abstract: The global transition from undisturbed to human-dominated landscapes has impacted river water quality worldwide and made the quantification of land use a valuable indicator of water pollutant. The Ganjiang River, as the largest tributary of the Poyang Lake Basin, is the main pollution source of the Poyang Lake. Identifying the influence of land use on water quality in the Ganjiang River has great significance for water environment protection in the Poyang Lake. In this study, we investigated the monthly concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP, COD_{Mn} and DO in seven major tributaries of the Ganjiang River in 2012 and analyzed the influence of land use on river water quality by the methods of correlation analysis and redundancy analysis. Two spatial scales, the sub-basin and buffer zone, and two levels of land use classification were considered. The first level of land use classification was paddy field, dry farm, forest land, grass land, water area, resident construction land and unused land, resulting from remote sensing image interpretation. The second level of land use classification was obtained from the first level based on different geomorphology, canopy density, grass coverage and other factors. The results showed that forest was the largest land use pattern in the study area, followed by paddy field and dry farm. The concentration of TP had a significant positive correlation with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in wet season, while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ had a significant negative correlation with DO in dry season. The pollution sources of TP both in wet season and dry season were from hill paddy field, urban land, reservoir and pond. The pollution sources of COD_{Mn} were from paddy field, urban land,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41201033, 41261069); 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室 (江西师范大学) 主任开放基金项目 (ZK2013009); 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室开放研究基金项目 (JXSB201302); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心资助项目 (JXS-EW-00)

收稿日期: 2014-09-22; 网络出版日期: 2015-01-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangpengjlu@outlook.com

reservoir and pond, and rural residential land in wet season, while from plain paddy field and rural residential land in dry season. The pollution sources of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were from urban land, reservoir and pond in wet season, while from urban land, mountainous dry farm, riparian forest land and low coverage grassland in dry season. Additionally, different spatial scales of land use had different impacts on water quality indicators. The land use in sub-basin had more influence on TP and wet seasonal COD_{Mn} than that in buffer zone, while it had less influence on dry seasonal COD_{Mn} than that in buffer zone. For $\text{NH}_4^+\text{-N}$, the land use in sub-basin had similar influence as that in buffer zone in wet season, while less influence than that in buffer zone in dry season. The impact of land use on DO was not significant. Moreover, we found that it was more helpful to study the source of the river water pollutant based on the second level of land use classification than the first level of land use classification. Among the paddy field, hill paddy field was the main source of TP and wet seasonal $\text{NH}_4^+\text{-N}$; while plain paddy field was the main source of dry seasonal COD_{Mn} . Among the residential construction land, urban land was the main source of TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and wet seasonal COD_{Mn} , while rural residential land was the main source of COD_{Mn} . Among the water area, reservoir and pond were the main source of TP, wet seasonal $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and wet seasonal COD_{Mn} .

Key Words: the Gangjiang River; river water quality; land use; spatial scale; classification level

土地利用方式影响污染物的排放和传输过程,对河流水质具有重要影响^[1-2]。但土地利用方式的多尺度性和分布格局差异^[3-5],给基于土地利用方式的河流水质研究带来不确定性。研究表明相对于河岸缓冲区尺度,土地利用类型在子流域尺度上对水质的影响更为显著^[6-8],也有研究得出相反的结论^[9-10]。土地利用分类方式也影响流域土地利用和河流水质的关系,目前研究多是直接分析农田、居民用地等土地利用方式与河流水质的相关性^[8, 11-12],或是在坡地尺度内研究不同地形、植被对水质输出的影响^[13-14],缺乏在流域尺度上分析不同类型农田、居民用地等土地利用方式对河流污染物的影响。

鄱阳湖是我国第一大淡水湖,也是生态多样性丰富的淡水湿地系统。随着鄱阳湖流域的经济发展,鄱阳湖近年来水质呈逐年恶化趋势,面临富营养化的威胁^[15-16]。赣江是鄱阳湖的第一大支流,径流量约占鄱阳湖水系总径流量的 46.6%,是鄱阳湖污染物的主要来源^[17-19]。研究赣江水质的分布特征及其与土地利用方式的关系对赣江流域的水环境保护和鄱阳湖水质的监控具有重要意义。

本次研究通过不同空间尺度划分和土地利用类型划分,分析土地利用方式对赣江流域河流 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (氨氮)、TP (总磷)、 COD_{Mn} (高锰酸钾指数) 和 DO (溶解氧) 的影响。

1 数据来源与分析

1.1 数据来源

2012 年在赣江主要支流(平江、贡水、桃江、章水、禾水、恩江和锦河)下游设置采样点(各采样点分别用 S1, S2, ..., S7 表示),作为子流域的控制断面。水样在河中心 50 cm 深度每月采集 1 次。利用容积 4 L 有机玻璃采样器采集水样,取出后现场利用便携式水质分析仪(哈纳 HI 91410)测定 DO 含量,然后将水样装入取样瓶,并加 H_2SO_4 酸化,密封,在 0—4℃ 温度下冷藏,其中用于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测定的水样通过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 浓度利用全自动间断化学分析仪(SmartChem 200)测定; COD_{Mn} 通过滴定实验测定。

基于 Aster 30 m 精度的 DEM 数据,利用 Arcgis 的 Hydrology 模块划分 7 个采样点对应的子流域和河流缓冲区(图 1),采样点的流域控制面积为 $4.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,占赣江流域总面积的 56.1%,具有较全面的代表性。

赣江流域土地利用数据利用 2010 年秋季获取的无云 Landsat 卫星遥感影像,经过几何纠正,参照《环境状况评价技术规范》(HJ/T 192—2006)中土地利用分类方法,基于 ArcInfo Workstation,并结合人工目视解译获得。该土地利用体系的一级分类划分为林地、草地、居民建设用地、水域、旱地、水田和未利用地等 7 种类型,根据地形地貌、林地郁闭度和草地覆盖度等条件建立二级分类体系(图 2)。该数据库经过内业校核和外业核

查,一级分类的总体精度达到 90%以上,二级分类精度大于 85%。

1.2 数据分析

为研究不同尺度和土地利用类型划分对河流水质的影响,对以下两种分类条件下的土地利用方式分别进行 Pearson 相关分析和冗余分析计算。

(1) 将采样点控制的区域分为子流域和缓冲区两种空间尺度。子流域指某采样点的流域汇水范围;参考相关文献^[6-7, 20-21]缓冲区半径的划分,并考虑流域的实际面积,缓冲半径分别设为 200、500、1000、2000、5000 m(图 1)。

(2) 对比分析一级土地利用分类和二级土地利用分类两种方式下,土地利用类型对河流水质的影响。

利用 ArcGIS 统计分析子流域和各缓冲区内土地利用类型面积,并计算百分比;利用 SPSS 计算研究区子流域土地利用类型和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 、DO 浓度的 Pearson 相关系数;利用 Canoco for Windows 进行冗余分析,将采样点 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 COD_{Mn} 和 DO 浓度视为物种变量(响应变量),将相应子流域和缓冲区土地利用类型比例视为环境变量(解释变量),分析结果在 Canodraw 中生成排序图。

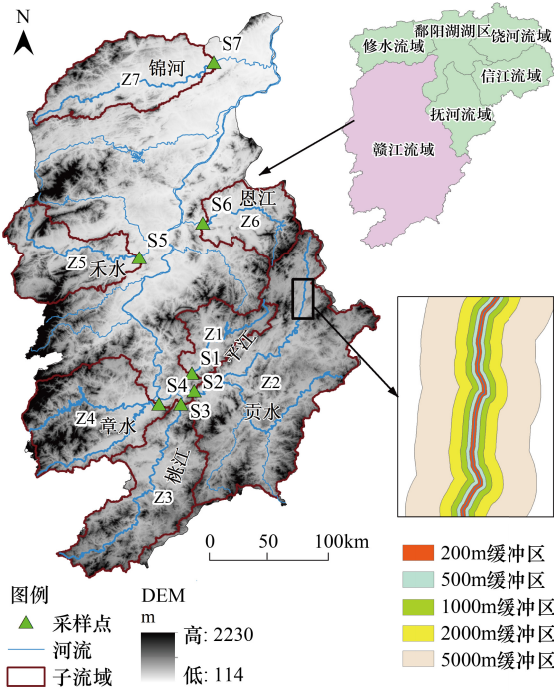


图 1 赣江流域采样点与子流域划分

Fig. 1 Sample sites and sub-basins in the Ganjiang basin (S represents sample site, and Z represents sub-basin)
S 表示采样点, Z 表示子流域

表 1 土地利用分类及代码

Table 1 Classifications and codes of Land use

一级分类(代码) First level of land use classification (Code)	二级分类(代码) Second level of land use classification (Code)
水田 Paddy	山区水田(111), 丘陵水田(112), 平原水田(113), 大于 25 度坡地水田(114)
旱地 Dryfarm	山区旱地(121), 丘陵旱地(122), 平原旱地(123), 大于 25 度坡地旱地(124)
林地 Forest	有林地(21): 郁闭度>50%的天然林和人工林、灌木林(22): 郁闭度>40%、高度在 2m 以下的矮林地和灌丛林地, 疏林地(23): 郁闭度为 10%—30%, 其它林地(24): 未成林造林地、迹地、苗圃及各类园地
草地 Grass	高覆盖度草地(31): 覆盖度>50%, 中覆盖度草地(32): 覆盖度在 20%—50%, 低覆盖度草地(33): 覆盖度在 5%—20%
水域 Water	河渠(41), 湖泊(42), 水库坑塘(43), 滩地(46)
居民建设用地 Resident	城镇用地(51), 农村居民用地(52), 其它工矿建设用地(53)
未利用土地 Unused	沼泽地(64), 裸土地(65), 裸岩石砾地(66)

2 结果与讨论

2.1 土地利用组成

7 个子流域以及 200、500、1000、2000、5000 m 缓冲区的一级土地利用类型和二级土地利用类型所占比例如图 3 所示。在子流域一级土地分类中,林地所占比例最高,平均为 64.0%;二级分类中有林地面积最多,其次为疏林地、灌林地和其它林地。水田占流域总面积的 18.5%,是仅次于林地的土地利用类型;二级分类中丘陵水田面积最大,其次为山区水田、平原水田和坡地水田。旱地面积为第三大土地利用类型,占流域总面积的 9.1%;二级分类中丘陵旱地面积最大,其次为山区旱地、平原旱地和坡地旱地。居民建设用地占流域总面积

3.7%,二级分类中独立于城镇以外的厂矿、大型工业区、采石场、交通道路、机场等其它工矿建设用地面积最大,其次为农村居民用地和城镇用地。水域占总流域的2.5%,二级分类中湖泊面积最大,其次为河渠、水库坑塘和滩地。草地占总流域的2.0%,二级分类中以高覆盖度草地为主,其次为中覆盖度草地和低覆盖度草地。

缓冲区土地利用类型与子流域有明显区别,主要体现在水田和水域面积较大,林地和旱地面积较小。随着缓冲区半径的扩大,各类土地利用类型比例逐渐与子流域接近。在二级土地利用类型中,缓冲区的水田以丘陵水田和平原水田为主,水域以湖泊和河渠为主。随着缓冲区半径的扩大,二级土地利用类型比例也逐渐与子流域接近。

2.2 水质参数浓度分布特征

图4为S1—S7采样点2012年的水质浓度分布。在所测82个水样中,根据地表水环境质量标准(GB 3838—2002),COD_{Mn}和DO浓度均符合Ⅰ类和Ⅱ类水标准,TP有2个水样为Ⅲ类水,其余为Ⅰ类和Ⅱ类,NH₄⁺-N有3个水样为Ⅲ类水,其余为Ⅰ类和Ⅱ类。赣江7个子流域水质较好,氮磷营养盐为潜在污染物。

表2为7个采样点丰水期(4—9月)和枯水期(10—3月)水质的相关矩阵和统计量。丰水期TP和NH₄⁺-N具有显著正相关关系,枯水期NH₄⁺-N和DO有显著负相关关系。NH₄⁺-N在丰水期的平均浓度为0.25 mg/L,显著小于枯水期的0.38 mg/L($P=0.046$);水体中DO受温度影响,丰水期DO显著小于枯水期($P<0.000$);TP和COD_{Mn}在丰水期的平均浓度分别为0.061 mg/L和2.19 mg/L,在枯水期分别为0.079 mg/L和2.34 mg/L,没有显著性差异。用变异系数(CV)描述水质浓度的动态变化程度,NH₄⁺-N浓度的动态变化最大,丰水期和枯水期的C_v值分别为0.80和0.90,其次为TP,丰水期和枯水期分别为0.77和0.73;COD_{Mn}和DO的动态变化较小,丰水期C_v值分别为0.35和0.14,枯水期分别为0.33和0.19。

表2 丰水期和枯水期水质参数的相关矩阵和统计量

Table 2 Correlation matrix and statistics of water quality parameters in wet season and dry season

参数 Parameters	丰水期 Wet season				枯水期 Dry season			
	TP	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	DO	TP	COD _{Mn}	NH ₄ ⁺ -N	DO
TP	1.00	0.73	0.84 *	-0.60	1.00	0.50	0.25	-0.48
COD _{Mn}		1.00	0.57	-0.05		1.00	-0.31	0.40
NH ₄ ⁺ -N			1.00	-0.51			1.00	-0.76 *
DO				1.00				1.00
平均值 Mean	0.061	2.19	0.25	6.70.079	2.34	0.38	8.4	
变异系数 CV	0.77	0.35	0.80	0.14	0.73	0.33	0.90	0.19

* 在0.05水平(双侧)上显著相关

2.3 土地利用方式与水质参数的相关分析

表3和表4分别为丰水期和枯水期,赣江7个子流域一级土地利用类型和二级土地利用类型与水质浓度的相关性。一级土地利用类型中,TP与草地负相关,与水域正相关。在二级土地利用类型中,丘陵水田与TP

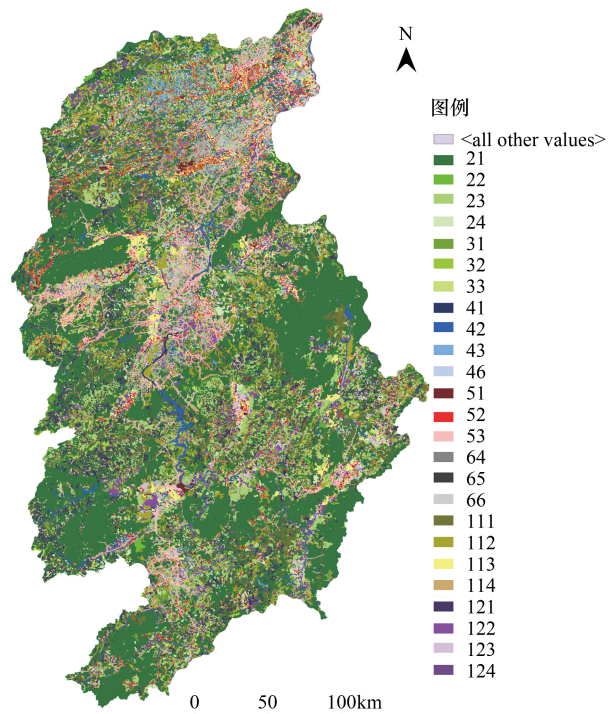


图2 赣江流域土地利用类型

Fig.2 Land use patterns in the Ganjiang Basin

图例代码见表1

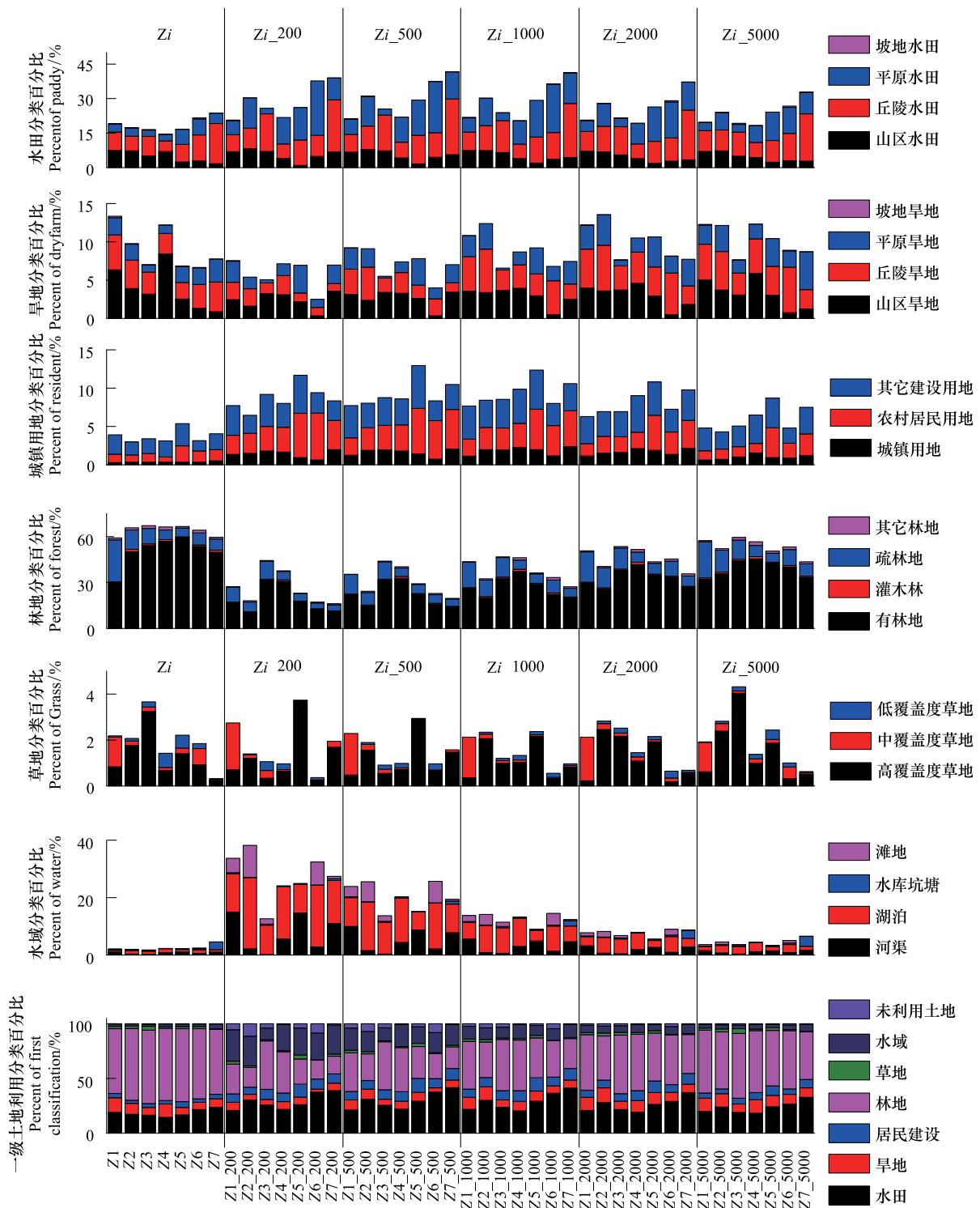


图3 子流域土地利用类型特征

Fig.3 Land use characteristics in sub-basins

Zi_200, Zi_500, ..., Zi_5000 分别表示子流域 Zi 中 200, 500, ..., 5000 m 缓冲区; $i = 1, 2, \dots, 7$

显著正相关,是 TP 的重要污染源。地形控制了径流速度和侵蚀能力,对流域污染物的输出具有重要影响^[22]。坡度大的丘陵地区汇流速度快,形成的地表径流冲刷更强烈,将更多的污染物输入河流,使土地利用对河流水质的负效应更突出^[23]。流域内坡地旱地面积较小(图 3),对河流污染影响不明显;平原地形平坦,

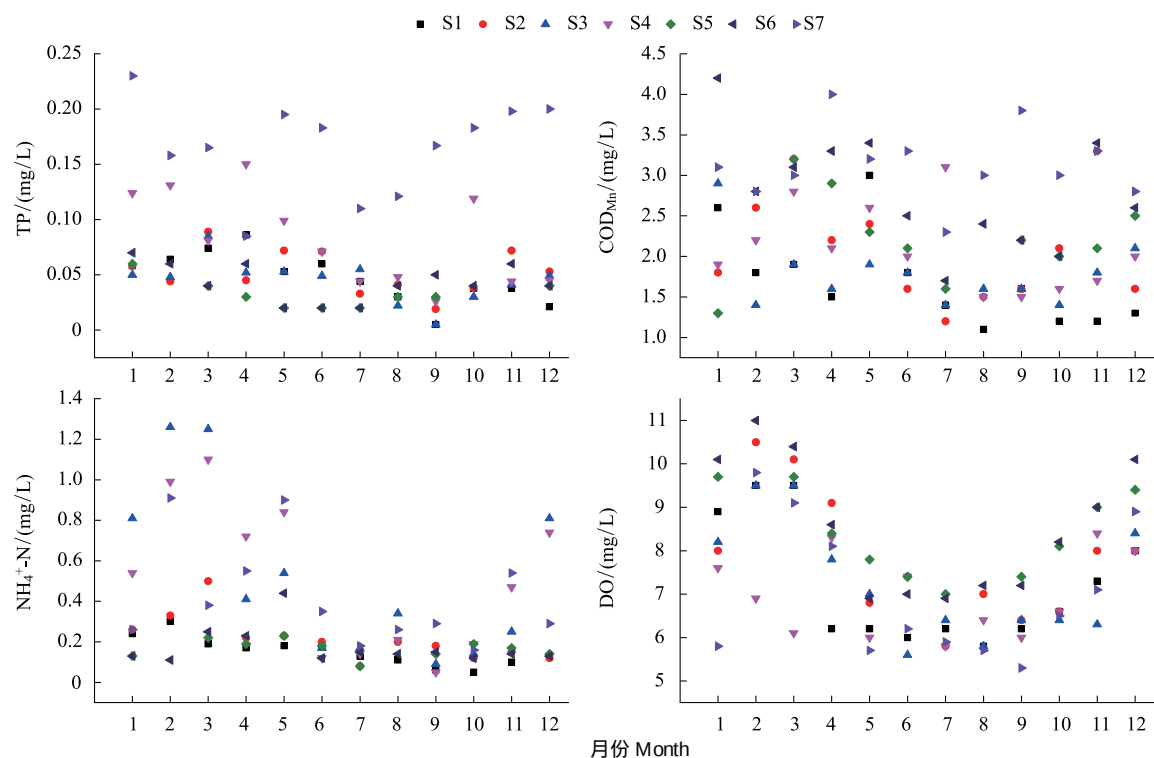


图 4 2012 年采样点 TP、COD_{Mn}、NH₄⁺-N 和 DO 浓度

Fig.4 TP、COD_{Mn}、NH₄⁺-N and DO concentrations of samples in 2012

其中 S5 采样点在 2 月和 8 月数据缺失

地表径流冲刷较弱,TP 在长时间的径流运移中容易被土壤吸附、植被吸收,对河流 TP 的影响也不明显;山区农田散布于面积广阔的林地间,流失的 TP 经林地吸收缓冲后,较少进入河流。居民建设用地中,TP 与城镇用地显著正相关,与农村居民用地没有显著相关性。水库坑塘与 TP 显著正相关,可能是受到了水产养殖的影响。

表 3 丰水期土地利用类型与水质浓度的相关性

Table 3 Correlation coefficients between land use pattern and water quality concentration in flood season			
水质参数 Water quality parameters	区域 Area	一级土地利用类型 First level of land use classification	二级土地利用类型 First level of land use classification
TP	子流域	草地 -0.79 [*] , 水域 0.92 ^{**}	丘陵水田 0.70 [*] , 城镇用地 0.91 ^{**} , 水库坑塘 0.90 ^{**}
	200 m 缓冲区		水库坑塘 0.73 [*]
	500 m 缓冲区		丘陵水田 0.71 [*] , 水库坑塘 0.86 [*]
	1000 m 缓冲区		丘陵水田 0.71 [*] , 水库坑塘 0.86 [*]
	2000 m 缓冲区	草地 -0.79 [*] , 水域 0.92 [*]	城镇用地 0.91 ^{**} , 水库坑塘 0.90 ^{**}
	5000 m 缓冲区	水域 0.94 ^{**}	丘陵水田 0.77 [*] , 水库坑塘 0.89 ^{**}
COD _{Mn}	子流域	水田 0.74 [*] , 草地 -0.82 [*] , 水域 0.92 ^{**}	山区水田 -0.78 [*] , 丘陵水田 0.82 [*] , 城镇用地 0.86 [*] , 水库坑塘 0.84 [*]
	200 m 缓冲区	水田 0.77 [*]	疏林地 -0.77 [*]
	500 m 缓冲区	水田 0.82 [*]	农村居民用地 0.73 [*]
	1000 m 缓冲区	水田 0.82 [*] , 林地 -0.71 [*]	丘陵水田 0.72 [*] , 水库坑塘 0.81 [*] , 农村居民用地 0.72 [*]
	2000 m 缓冲区	水田 0.74 [*] , 草地 -0.82 [*] , 水域 0.91 [*]	山区水田 -0.78 [*] , 丘陵水田 0.82 [*] , 城镇用地 0.86 [*]

续表

水质参数 Water quality parameters	区域 Area	一级土地利用类型 First level of land use classification	二级土地利用类型 First level of land use classification
NH ₄ ⁺ -N	5000 m 缓冲区	水田 0.87 [*] , 林地 -0.84 [*] 草地 -0.78 [*] , 水域 0.89 ^{**}	丘陵水田 0.82 [*] , 水库坑塘 0.85 [*]
	子流域		城镇用地 0.86 [*]
	200 m 缓冲区		城镇用地 0.72 [*]
	500 m 缓冲区		水库坑塘 0.70 [*]
	1000 m 缓冲区		城镇用地 0.71 [*]
	2000 m 缓冲区		城镇用地 0.86 [*] , 水库坑塘 0.84 [*]
	5000 m 缓冲区	水域 0.82 [*]	城镇用地 0.78 [*]
DO	子流域		
	200 m 缓冲区		水库坑塘 -0.88 ^{**} , 城镇用地 -0.74 [*]
	500 m 缓冲区		
	1000 m 缓冲区		
	2000 m 缓冲区		
	5000 m 缓冲区		低覆盖度草地 0.79 [*]

* * 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

COD_{Mn} 体现了水体中的有机污染,一级土地利用类型中,子流域范围内,丰水期与水田和水域显著正相关,与草地显著负相关;枯水期只与水田显著正相关。二级土地利用类型中,丰水期与山区水田显著负相关,与丘陵水田、城镇用地和水库坑塘显著正相关;枯水期只存在与平原水田的显著正相关和与山区旱地的显著负相关。子流域土地利用类型在丰水期对 COD_{Mn} 的影响大于枯水期。一些研究也表明丰水期土地利用方式对水质的影响大于枯水期^[10, 24],这与丰水期植被生长旺盛,农业活动较多,以及降雨产流丰沛等原因有关。

NH₄⁺-N 与土地利用类型的相关性较弱,一级土地利用类型中,在丰水期只有 5000 m 缓冲区存在与水域的显著正相关,在枯水期只在 200 m 缓冲区内存在与林地的显著正相关。相对于 TP 和 COD_{Mn},带正电荷的 NH₄⁺ 更容易被土壤颗粒吸收和植被利用,或在微生物作用下发生反硝化等反应,使 NH₄⁺-N 与土地利用类型的相关性较差。李艳利等^[6]分析了浑太河流域的土地利用与河流水质相关性,结果显示 NH₄⁺-N 与土地利用类型的相关性明显小于 TP 和 COD_{Mn}。Huang 等^[25]在九龙江流域建立了土地利用类型与水质的回归模型,认为模型对 COD_{Mn} 的预测效果好于 NH₄⁺-N。在二级土地利用类型中,丰水期 NH₄⁺-N 在子流域和缓冲区内与城镇用地、水库坑塘显著正相关;枯水期只在 200 m 和 500 m 缓冲区内存在 NH₄⁺-N 与土地利用类型的显著相关。枯水期 NH₄⁺-N 在 200 m 和 500 m 缓冲区与有林地、低覆盖草地显著正相关,体现了林地、草地土壤氮素流失的影响。

洪超等^[21]在江苏北部的灌河流域通过分析不同观测尺度上的土地利用和河流水质发现,TN、TP 等营养盐浓度多与较大尺度上的土地利用构成相关,而化学需氧量(COD)与较小尺度上的土地利用构成相关。本次研究中 TP 与较大尺度的子流域土地利用方式相关性好于较小尺度的缓冲区;COD_{Mn} 在枯水期与较小尺度的缓冲区土地利用方式相关性更好,丰水期则相反;NH₄⁺-N 在枯水期也与较小尺度的缓冲区土地利用方式相关性更好,丰水期在子流域和缓冲区的差别不大,与洪超等^[21]研究中的 TN 与土地利用的相关性有明显区别。

DO 与土地利用类型的相关性很弱。一级土地利用类型中只在枯水期 2000 m 缓冲区存在水域与 DO 的显著负相关;二级分类中土地利用类型与 DO 的相关性也较差。DO 与土地利用类型的弱相关性可能是由于流域水质较好,水体 DO 消耗后可以很快从大气中得到补充,受土地利用类型的影响较小。在 4 个水质参数中,DO 在丰水期和枯水期的动态变化(Cv 值)最小(表 2)也体现了这点。

2.4 土地利用方式与水质参数的冗余分析

图 5 和图 6 分别为一级土地利用类型和二级土地利用类型与水质参数冗余分析的排序图,可以直观反映

出两者的相关性。排序图中土地利用类型箭头的长度表示各土地利用方式对水质指标的影响程度,箭头越长影响越大;土地利用类型箭头方向与水质指标浓度方向夹角的余弦代表两者的相关程度。

表 4 枯水期土地利用类型与水质浓度的相关性
Table 4 Correlation coefficients between land use pattern and water quality concentration in flood season

水质参数 Water quality parameters	区域 Area	一级土地利用类型 First level of land use classification	二级土地利用类型 First level of land use classification
TP	子流域	草地 -0.80 *, 水域 0.95 **	丘陵水田 0.73 *, 城镇用地 0.95 **, 水库坑塘 0.93 *
	200 m 缓冲区		丘陵水田 0.71 *
	500 m 缓冲区		丘陵水田 0.75 *, 水库坑塘 0.86 *
	1000 m 缓冲区		丘陵水田 0.77 *, 水库坑塘 0.90 **
	2000 m 缓冲区	水域 0.86 *	丘陵水田 0.81 *, 水库坑塘 0.91 **
	5000 m 缓冲区	水域 0.96 **	丘陵水田 0.81 *, 水库坑塘 0.93 **
COD _{Mn}	子流域	水田 0.71 *	山区旱地 -0.76 *
	200 m 缓冲区	水田 0.96 **, 林地 -0.74 *	疏林地 -0.81 *
	500 m 缓冲区	水田 0.96 **, 林地 -0.86 *	平原水田 0.76 *, 有林地 -0.73 *, 疏林地 -0.77 *
	1000 m 缓冲区	水田 0.95 **, 林地 -0.87 *	平原水田 0.82 *, 山区旱地 -0.80 *
	2000 m 缓冲区	水田 0.88 *, 林地 -0.78 *	平原水田 0.81 * 山区旱地 -0.87 *
	5000 m 缓冲区	水田 0.90 **, 林地 -0.78 *	平原水田 0.75 *, 山区旱地 -0.85 *
NH ₄ ⁺ -N	子流域		
	200 m 缓冲区	林地 0.78 *	城镇用地 0.73 *, 有林地 0.82 *, 低覆盖度草地 0.85 *
	500 m 缓冲区		城镇用地 0.71 *, 有林地 0.73 *
	1000 m 缓冲区		
	2000 m 缓冲区		
	5000 m 缓冲区		
DO	子流域		平原水田 0.87 *
	200 m 缓冲区		山区旱地 -0.81 *, 城镇用地 -0.89 **, 农村居民用地 0.79 *
	500 m 缓冲区		山区旱地 -0.79 *, 城镇用地 -0.74 *
	1000 m 缓冲区		
	2000 m 缓冲区	水域 -0.75 *	
	5000 m 缓冲区		

林地在丰水期与 TP、COD_{Mn} 和 NH₄⁺-N 都为负相关关系,体现了林地对各污染物的“汇”作用。枯水期林地与 TP、COD_{Mn} 仍为负相关关系,但与 NH₄⁺-N 有较弱的正相关性,并且随缓冲区半径的减小正相关增强。在二级分类中,灌木林和包含园地的其它林地正相关性明显,体现了林地土壤氮的流失。草地也对各污染物主要起“汇”的作用,但在缓冲区内,草地对水质参数的影响较小,在枯水期还存在高覆盖草地和低覆盖草地与 NH₄⁺-N 的正相关性。多数研究结果显示林地、草地对污染物起“汇”的作用^[4, 26-28],但于松延等^[29]在北洛河流域发现 NH₄⁺-N 与草地呈显著正相关关系,并认为是由于流域草地管理不当引起土壤侵蚀所致。水域在丰水期与 TP、COD_{Mn} 和 NH₄⁺-N 都为正相关关系,枯水期仍与 TP、COD_{Mn} 正相关,与 NH₄⁺-N 只在 1000 m 缓冲区正相关,表明水域是赣江流域 TP、COD_{Mn} 和 NH₄⁺-N 的重要污染来源。李艳利等^[6]在浑太河流域的研究显示水域在缓冲区内与 COD_{Mn} 显著正相关,与 NH₄⁺-N、TP 分别为较弱的正相关和负相关关系,在子流域范围内都为较弱的负相关关系;黄金良等^[9]在九龙江流域研究发现水体与 COD_{Mn} 在部分缓冲区内有显著相关性,与 NH₄⁺-N、TP 没有显著相关性。与浑太河流域和九龙江流域相比,赣江流域水域对河流水质的污染更为严重,可能与大量存在的渔业养殖有关。

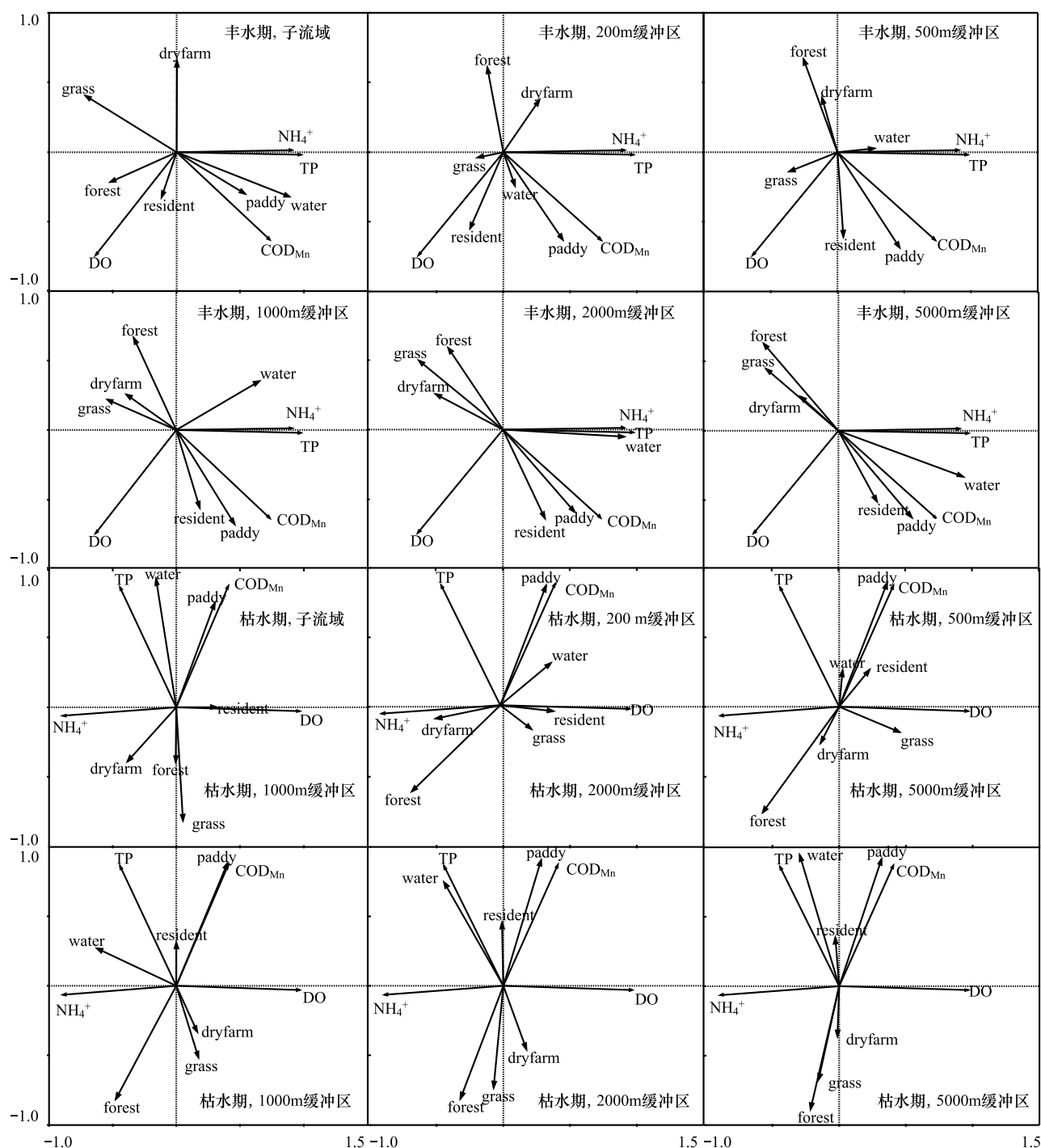


图5 一级土地利用类型与水质浓度冗余分析排序图

Fig.5 RDA ordination plot of the first classification of land use and water quality concentration

水田在丰水期与 TP、 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都为正相关关系,并且水田与 COD_{Mn} 的相关性明显高于与 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的相关性。二级分类中丘陵水田与 TP、 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 都为正相关关系;平原水田与 COD_{Mn} 正相关,与 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关性很弱。枯水期水田仍与 TP、 COD_{Mn} 正相关,但与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 没有正相关性。二级分类中丘陵水田 TP、 COD_{Mn} 正相关,与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关性很弱;平原水田与 COD_{Mn} 正相关,与 TP 相关性很弱,与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负相关。水田,特别是丘陵水田是赣江流域 TP、 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的重要污染源。旱地在丰水期与 TP、 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相关性较弱,或呈负相关关系;枯水期与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 正相关,与 COD_{Mn} 和 TP 负相关。二级分类中山区旱地与

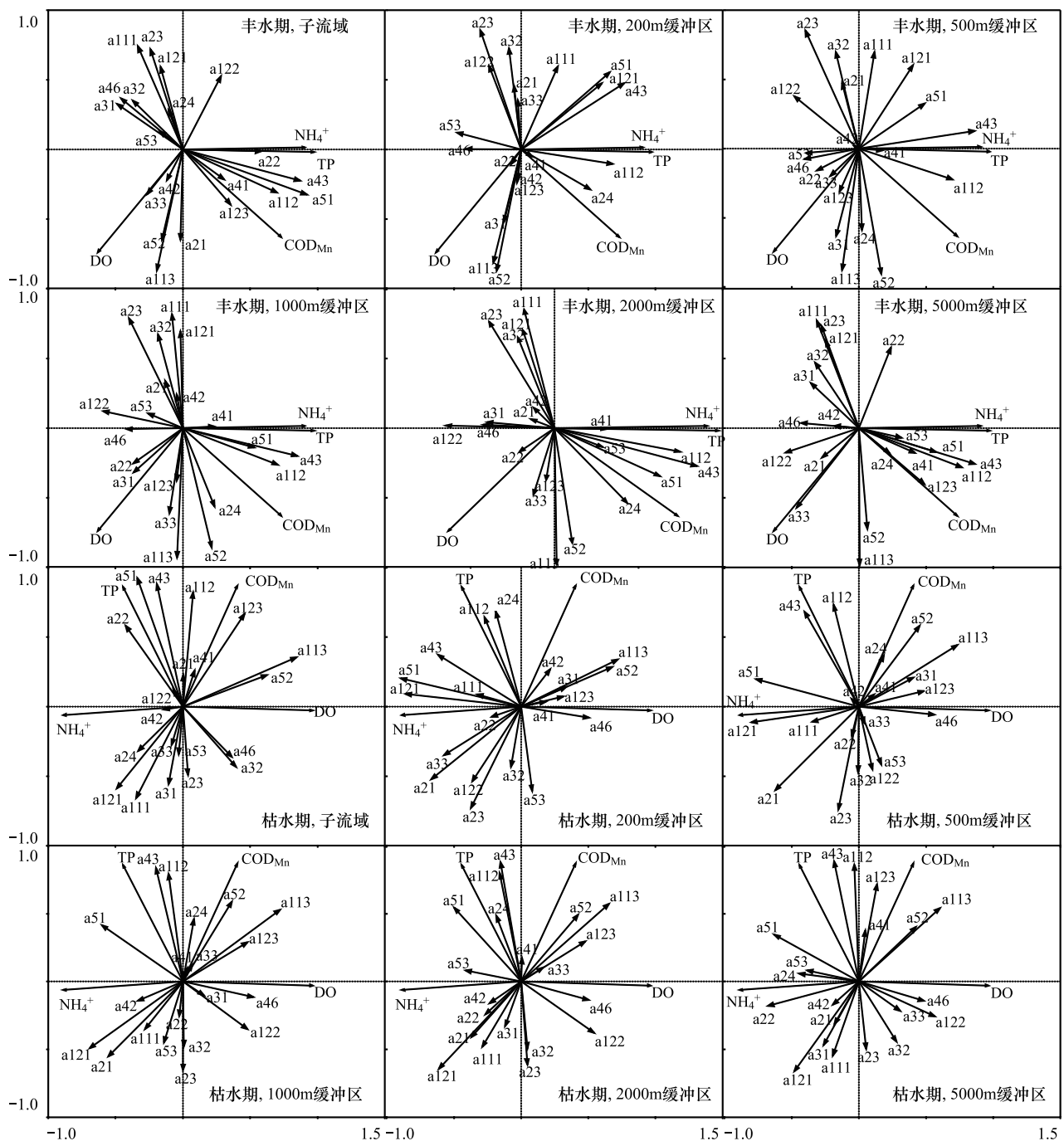


图6 二级土地利用类型与水质浓度冗余分析排序图

Fig.6 RDA ordination plot of the second classification of land use and water quality concentration

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 正相关关系比较明显。与水田相比,旱地对河流污染的贡献明显偏少。於梦秋等^[30]分析太湖流域土地利用类型对水质的影响时发现,水田与 TP、TOC (总有机碳) 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著正相关,旱地则与 TP、TOC 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 显著负相关,与本次研究结果相近。黄金良等^[9]在福建九龙江流域的研究结果显示耕地与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 COD_{Mn} 都为负相关关系,没有体现出农业对河流水质的污染;赵鹏等^[31]在广州淡水河流域也得到类似结论;这可能与研究中没有将耕地细分为水田和旱地有关。

居民建设用地与 COD_{Mn} 正相关,与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 负相关或相关性很弱;丰水期居民建设用地与 TP 为负相关关系,枯水期在子流域和 200 m 缓冲区内与 TP 负相关,在 500—5000 m 缓冲区内与 TP 正相关。二级土地利用

分类中,城镇用地与 TP 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的相关性大于农村居民用地,这是由于城镇多不透水地面,污水通过排水管网直接进入河流,成为河流 TP 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的重要来源;农村生活污水中的 TP 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在运移过程中容易被土壤植被吸附利用,进入河流的量较少。与张殷俊等^[23]、赵鹏等^[31]、Huang 等^[25]的研究结果不同,本次研究中居民建设用地没有明显体现出对河流 TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的污染,这可能与研究区城镇用地面积相对较少有关。丰水期城镇用地和农村居民用地都与 COD_{Mn} 呈正相关关系,枯水期则是农村居民用地的影响大于城镇用地。Wang 等^[32]模拟了长江流域污染物的输入负荷,认为农村地区的牲畜养殖是流域 COD 负荷的主要来源。丰水期城市降雨径流由于对地表和排水系统的冲刷含有较多的 COD 负荷^[33-34],城镇用地也成为 COD 污染物的重要来源。

3 结论

(1)空间尺度的土地利用方式划分对不同水质指标相关性的影响具有较大差异。子流域的土地利用对 TP 的影响大于缓冲区;丰水期子流域土地利用对 COD_{Mn} 的影响大于缓冲区,枯水期则是缓冲区大于子流域;丰水期子流域和缓冲区内土地利用对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响差别不大,枯水期则是缓冲区大于子流域。

(2)较细的土地利用类型分类可更好的体现土地利用类型对河流水质的影响。水田中的丘陵水田是赣江水体中 TP 和丰水期 COD_{Mn} 的主要污染源;平原水田是枯水期 COD_{Mn} 的主要污染源。居民建设用地中的城镇用地是赣江水体 TP 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和丰水期 COD_{Mn} 的主要来源,农村用地是 COD_{Mn} 的主要来源。

(3)赣江 TP 的污染源主要为丘陵水田、城镇用地和水库坑塘; COD_{Mn} 的污染源在丰水期主要为丘陵水田、城镇用地、水库坑塘、农村居民用地,枯水期主要为平原水田、农村居民用地; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在丰水期的主要污染源为城镇用地和水库坑塘,枯水期主要为城镇用地、山区旱地、河岸两侧有林地和低覆盖度草地。

参考文献 (References):

- [1] Thomas A R C, Bond A J, Hiscock K M. A multi-criteria based review of models that predict environmental impacts of land use-change for perennial energy crops on water, carbon and nitrogen cycling. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(3): 227-242.
- [2] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(3-4): 323-349.
- [3] 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.
- [4] 周文,刘茂松,徐驰,何舸,王磊,杨雪姣.太湖流域河流水质状况对景观背景响应. *生态学报*, 2012, 32(16): 5043-5053.
- [5] 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.
- [6] 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. *地球与环境*, 2012, 40(4): 573-583.
- [7] Zhou T, Wu J G, Peng S L. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 166-175.
- [8] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. *Water Research*, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wang G Q, A Y L, Xu Z X, Zhang S R. The influence of land use patterns on water quality at multiple spatial scales in a river system. *Hydrological Processes*, 2014, 28(20): 5259-5272.
- [12] Wear D N, Turner M G, Naiman R J. Land cover along an urban-rural gradient: implications for water quality. *Ecological Applications*, 1998, 8(3): 619-630.
- [13] 吴建强.不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除量化. *水科学进展*, 2011, 22(1): 112-117.
- [14] 刘泉,李占斌,李鹏,李婧,彭圆圆,张翔.模拟降雨条件下坡地氮素流失特征试验分析. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 6-10.
- [15] Wu Z S, Cai Y J, Liu X, Xu C P, Chen Y W, Zhang L. Temporal and spatial variability of phytoplankton in Lake Poyang: The largest freshwater lake in China. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(3): 476-483.

- [16] 胡春华, 周文斌, 王毛兰, 魏志巍. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价. 湖泊科学, 2010, 22(5): 723-728.
- [17] 王毛兰, 周文斌. 鄱阳湖水体无机氮时空分布特征研究. 人民长江, 2010, 41(1): 88-91.
- [18] 罗定贵, 吴学文, 李述, 胡春华, 周文斌. 基于水、盐均衡的鄱阳湖 TP 负荷探究. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(2): 337-343.
- [19] 刘发根, 王仕刚, 郭玉银, 曹美. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008—2012 年). 湖泊科学, 2014, 26(5): 641-650.
- [20] Carey R O, Migliaccio K W, Li Y C, Schaffer B, Kiker G A, Brown M T. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1093-1104.
- [21] 洪超, 刘茂松, 徐驰. 河流干支流水质与土地利用相关关系的比较分析. 生态学报, 2014, 34(24): 7271-7279.
- [22] Young W J, Marston F M, Davis R J. Nutrient Exports and Land Use in Australian Catchments. Journal of Environmental Management, 1996, 47(2): 165-183.
- [23] 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.
- [24] Bu H M, Meng W, Zhang Y, Wan J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. Ecological Indicators, 2014, 41: 187-197.
- [25] Huang J L, Li Q S, Pontius R G Jr, Klemes V, Hong H S. Detecting the dynamic linkage between landscape characteristics and water quality in a subtropical coastal watershed, Southeast China. Environmental Management, 2013, 51(1): 32-44.
- [26] Li S Y, Gu S, Liu W Z, Han H Y, Zhang Q F. Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China. Catena, 2008, 75(2): 216-222.
- [27] Dunn S M, Sample J, Potts J, Abel C, Cook Y, Taylor C, Vinten A J A. Recent trends in water quality in an agricultural catchment in Eastern Scotland: elucidating the roles of hydrology and land use. Environmental Science: Processes & Impacts, 2014, 16(7): 1659-1675.
- [28] 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋. 新安江流域土地利用结构对水质的影响. 环境科学, 2013, 34(7): 2582-2587.
- [29] 于松延, 徐宗学, 武玮, 李艳利. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应. 环境科学学报, 2014, 34(5): 1309-1315.
- [30] 於梦秋, 蔡颖, 刘华, 龚蕾婷, 冷欣, 安树青. 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.
- [31] 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.
- [32] Wang X, Hao F H, Cheng H G, Yang S T, Zhang X, Bu Q S. Estimating non-point source pollutant loads for the large-scale basin of the Yangtze River in China. Environmental Earth Sciences, 2011, 63(5): 1079-1092.
- [33] 张千千, 李向全, 王效科, 万五星, 欧阳志云. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展. 生态环境学报, 2014, 23(2): 352-358.
- [34] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 孔玲莉. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展. 水科学进展, 2006, 17(2): 288-294.