

三岔河流域不同尺度土地利用对水质的影响

段少琼¹ 安艳玲^{1#} 苏孝良² 吴起鑫^{1,3} 金桃¹ 侯祎亮¹ 吴旌滔¹

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550003;

2. 贵州省科学技术厅, 贵州 贵阳 550002;

3. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要 以 2013 年 8 月的三岔河流域水体采样数据为基础, 结合土地利用数据, 利用地理信息系统(GIS)技术, 分别从子流域和缓冲区尺度分析河流水质指标与土地利用之间的关系。结果表明, 在子流域尺度上, 水质对土地利用类型的响应更加显著。林地、草地对水质起“汇”的作用, 耕地和建设用地主要起“源”的作用, 其中氮氮与耕地、林地、建筑用地面积比例显著相关, 总磷与未利用地、水域面积比例显著相关。冗余分析进一步表明, 耕地是氮素的主要来源, 未利用地是磷素的主要来源。

关键词 土地利用 水质 尺度 冗余分析 三岔河

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.05.013

Effects of multi-scale land use on water quality in Sancha River DUAN Shaoqiong¹, AN Yanling¹, SU Xiaoliang², WU Qixin^{1,3}, JIN Tao¹, HOU Yiliang¹, WU Jingtao¹. (1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550003; 2. Science and Technology Department of Guizhou Province, Guiyang Guizhou 550002; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550002)

Abstract: The relations between land use and water quality were analyzed on the sub-basin scale and riparian buffer zone scale by using geographic information system (GIS) technique based on water sampling data collected in the Sancha River basin in August 2013. Land use data were also obtained. Results showed that the water quality were significantly affected by land use in a sub-basin scale. The forest-land and grass-land were the sources of the water quality. Conversely, the farm-land and the building-land mainly were the sinks. The ammonia nitrogen was significantly influenced by area ratios of farm-land, forest-land and building-land, while the total phosphorus was significantly influenced by area ratios of unused-land and water-land. The result of redundancy analysis further demonstrated that the farm-land was the main source of nitrogen, and the unused-land was the main source of phosphorus.

Keywords: land use; water quality; scale; redundancy analysis; Sancha River

随着流域范围内人类活动的加剧, 全球水环境污染问题日益突出。人为活动引起的土地利用变化是造成水体污染的主要因素之一^{[1]93-94}。流域内土地利用与水质关系的研究, 可以为流域内土地利用方式优化提供科学依据, 为流域内非点源污染的深入研究提供借鉴^[2]。

目前, 国内外学者对土地利用与水质的关联性的研究, 主要从汇水区^[3]、子流域^{[4]287-288}、河岸缓冲区^[5-6]等尺度, 采用对比分析、统计分析、空间分析和模型分析等方法, 从而定量研究两者之间的相关性以及尺度效应和距离效应。SLIVA 等^[7]采用汇水区与 0.1 km 河岸缓冲区尺度, 研究安大略湖北部 3 个子流域在 3 个季度内土地利用变化对河流水质的影响。曹芳芳等^[8]和於梦秋等^{[9]1025-1026}分别采用子

流域和圆形缓冲区尺度, 研究新安江上游流域和太湖流域入湖河流乌溪港、武进港土地利用与水质之间的相关关系, 结果表明, 土地利用类型对水质具有显著影响。然而, 由于每个流域的自然属性不尽相同, 利用流域尺度还是缓冲区尺度分析土地利用类型对水质影响更有效仍存在争论^[10-11]。

三岔河作为长江重要支流乌江的正源, 流域内碳酸盐岩广布, 喀斯特地貌发育典型, 石漠化强烈, 植被覆盖率低, 生态本底脆弱^[12]。近些年, 随着流域内人为活动逐年加强, 一些生态环境问题(如水土流失、陡坡垦荒、山地石漠化、乡镇企业污染等)更加突出, 直接影响河流水质^[13]。关注三岔河水质、改善水环境质量, 对乌江水质保护也至关重要。因此, 本研究以三岔河为研究区, 通过设置 8 个监测点, 结合

第一作者: 段少琼, 女, 1989 年生, 硕士研究生, 研究方向为生态环境。# 通讯作者。

地理信息系统(GIS)和遥感(RS)技术,分别从子流域和缓冲区尺度分析土地利用对水质的影响,为三岔河流域水污染控制以及水环境管理提供科学依据。

1 研究区概况

乌江源区三岔河流域地处云南高原向贵州高原过渡的乌蒙山区,由西向东逐渐倾斜,呈现西北高、东南低走势,河流源头自河口自然落差 1 397.91 m,平均比降 0.429%,流域总面积 7 264 km²,河流全长 325.6 km,流经毕节市、六盘水市和安顺市。流域经纬度为 104°18'E ~ 106°18'E、26°10'N ~ 27°0'N,除西北部威宁县地势较高地区属暖温带气候外,其余地区均属亚热带季风气候,全年气候温和湿润,雨量充沛,年降水量为 833.3~1 480.0 mm。流域内的土地利用类型主要以耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地为主;未利用地主要是裸露地以及石漠化的土地。三岔河干流水质总体为中度污染,其中非点源总氮、总磷负荷分别占整个乌江流域的 14.70%、15.73%^[14]。

2 研究方法

2.1 流域监测点设置及水质测定

基于三岔河流域 1 : 100 000 数字高程模型 (DEM)图(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站,像元分辨率为 30 m × 30 m),在 ArcGIS 10.1 的 Hydrology 中提取流域的河网水系并将整个流域划分为 8 个子流域。

在三岔河流域干流及主要支流上共布设 8 个监测点(见图 1),各监测点污染物浓度对应其所在子

流域污染物的输出强度。其中,1#~4# 监测点位于三岔河主干流上,从上游布设至下游,因为河流干流监测点水质会受到河流上游整个汇水区影响,因此干流上监测点的污染物浓度代表河流上游整个汇水区污染物的输出强度;5#~8# 监测点位于主要支流的 4 个出口处,其污染物浓度代表整个支流污染物的输出强度。三岔河流域处于亚热带,大部分降雨集中在 5—10 月,非点源污染也主要发生在该时段,因此最终选择 2013 年 8 月(丰水期)进行野外实地水样采集。采样过程中每个监测点所在的子流域均设置 2~3 组重复,每组均取 3 个平行样品。

综合考虑三岔河流域水环境主要污染因子,选取总氮、总磷、氨氮和正磷酸盐作为关键水质指标。各指标均在实验室内按照文献[15]进行测定,取各个指标平均值作为监测点的水质数据。

2.2 土地利用类型的确定及各子流域和缓冲区土地利用结构分析

本次研究采用 2013 年的 4 幅 Landsat 8 陆地成像仪(OLI)影像图,轨道号分别为 127/41、127/42、128/41 和 128/42。选择其中的 2、3、4、5、6、7 波段,在 Erdas Imagine 9.2 的支持下进行校正、配准、镶嵌、裁剪等预处理后得到三岔河流域的影像图,运用监督分类和目视解译相结合的方法提取研究区土地利用信息,将土地利用类型分为林地、草地、耕地、建筑用地、水域和未利用地 6 类(见图 2)。为确保土地分类精度,在影像上选取 150 个控制点,进行野外校验。分类精度评价结果的 Kappa 系数为 0.86,符合本研究精度要求。应用 ArcGIS10.1,统计 8 个子

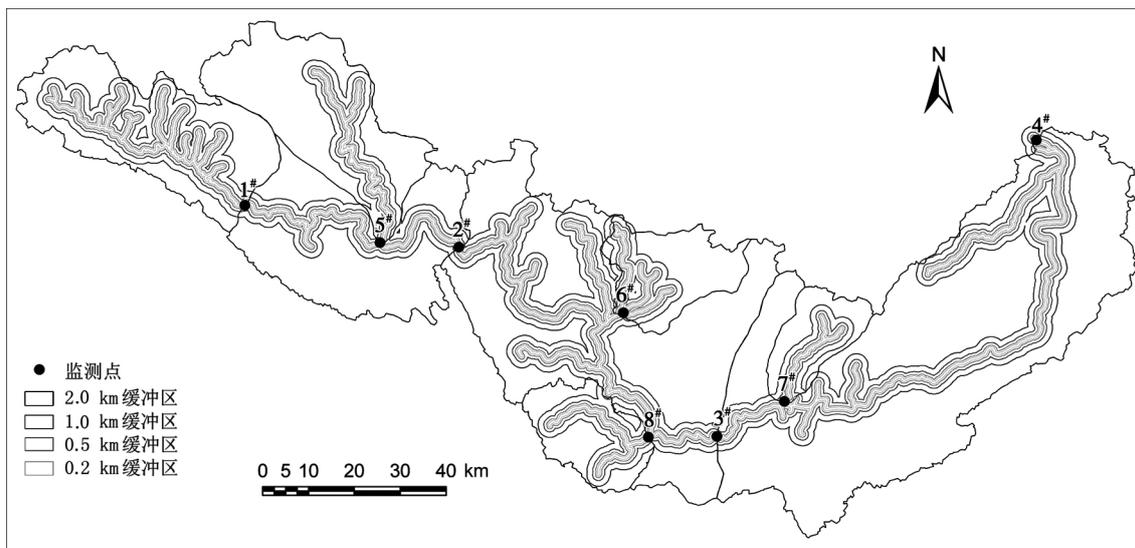


图 1 监测点分布和缓冲区分割
Fig.1 Location of monitoring sites and segmentation of buffer zones

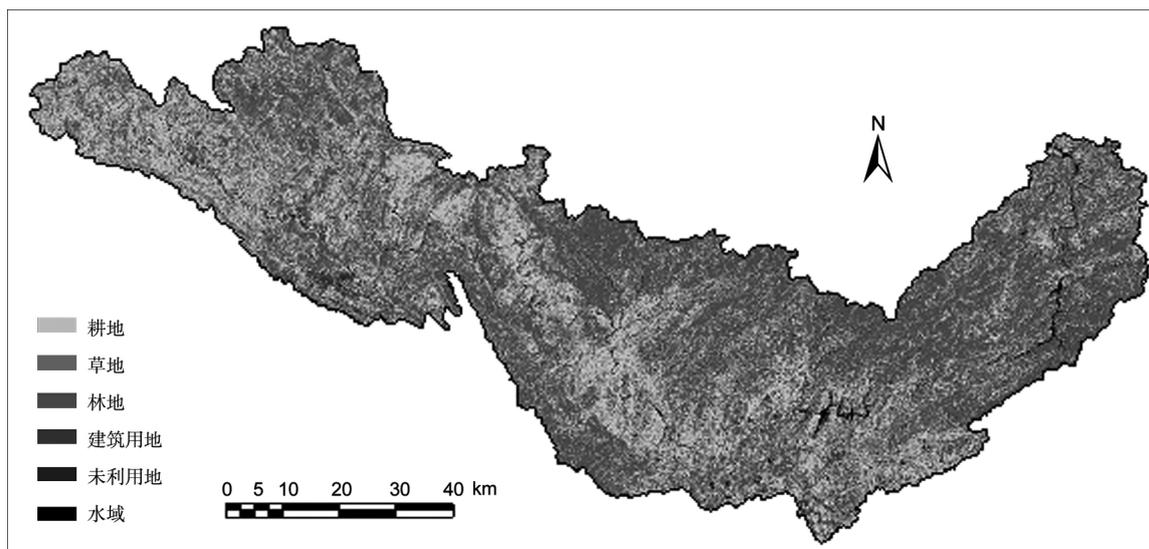


图2 三岔河流域土地利用类型
Fig.2 Land use types in Sancha River basin

流域土地利用类型的面积,又以8个子流域内水系为中心在垂直河道的方向上设置0.2、0.5、1.0、2.0 km缓冲区(见图1),获得各缓冲区内土地利用类型的面积比例,作为进一步分析土地利用对三岔河水水质影响的基础。

2.3 统计分析

本研究主要采用相关分析和冗余分析,分别借助于SPSS 15.0和Canoco for Windows 4.5进行数据分析处理。进行相关分析前采用K-S检验,判断数据是否满足正态分布,发现有不满足的变量存在,因此采用Spearman秩相关分析判断土地利用类型与水质指标之间的相关性。冗余分析直观展现解释变量与响应变量之间的关系,反映众多土地利用类型对水质指标的综合作用,本研究通过对水质指标的去趋势分析和梯度计算,选择冗余分析线性模型分析影响水质的关键因子。

3 结果与分析

3.1 水质状况

在2013年丰水期,三岔河流域8个监测点的水质指标统计结果如图3所示。由图3可以看出,干流的磷素浓度总体较高,其中总磷在空间上表现为干流监测点的浓度高于支流监测点,正磷酸盐在1[#]、2[#]、4[#]和7[#]监测点浓度较高。总氮在4[#]、5[#]和8[#]监测点的浓度较高。氨氮在2[#]、3[#]、4[#]、5[#]和8[#]监测点浓度较高。

3.2 土地利用状况

以各监测点上游汇水区为作用区,分别计算其

子流域和缓冲区两个尺度的土地利用类型覆盖面积。由图4可以看出,三岔河流域整体土地利用类型以林地和耕地为主,约占总面积的80%。在子流域尺度上,土地利用类型也以耕地和林地为主,其次是草地,这3类土地利用类型占总面积的90%以上。在缓冲区尺度上,耕地、林地和草地3类土地利用类型也占主导地位,且随着缓冲区半径增大,耕地和建筑用地面积比例逐渐减少,而林地和草地的面积比例呈增加趋势。

3.3 土地利用对水质的影响

土地利用类型面积比例与水质指标的相关分析结果如表1所示。由表1可以看出:缓冲区尺度上,耕地面积比例与总氮和氨氮均呈正相关,当缓冲半径为0.2 km时,与氨氮呈显著正相关;林地面积比例与总氮和氨氮均呈负相关,当缓冲半径分别为0.5、1.0、2.0 km时,与氨氮呈显著负相关;耕地面积比例与总磷和正磷酸盐均呈负相关,而林地面积比例与总磷和正磷酸盐均呈正相关,这与於梦秋等^{[9]1029}的研究结果不一致,可能是因为三岔河上游存在磷素的点源污染。在缓冲区尺度,随着缓冲半径的变化,草地、建筑用地、未利用地和水域面积比例与水质指标的相关性也发生改变。草地面积比例与总磷、正磷酸盐大体呈负相关,但在0.2 km缓冲区,与总磷和正磷酸盐均呈现正相关;未利用地面积比例与总磷在0.5、1.0 km缓冲区均呈显著正相关,而在其他缓冲区的相关性不显著。

在子流域尺度上,耕地和建设用地面积比例与水质指标大体呈正相关,林地和草地面积比例与水

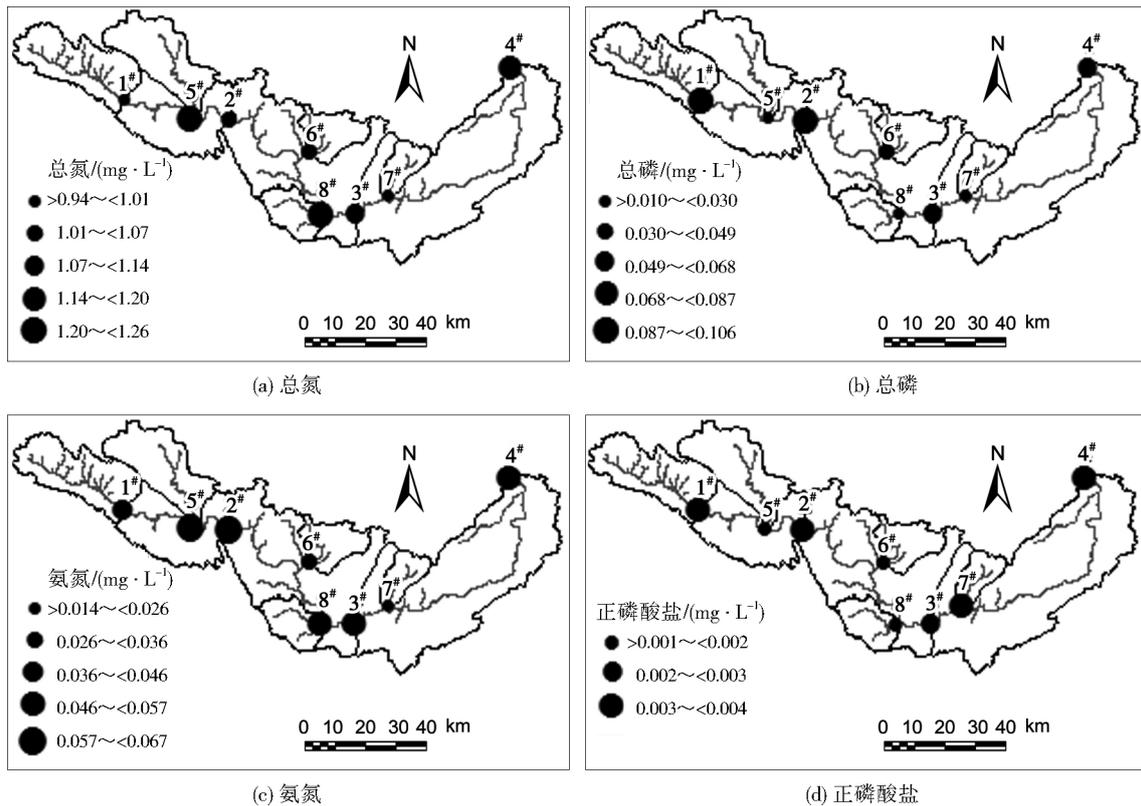
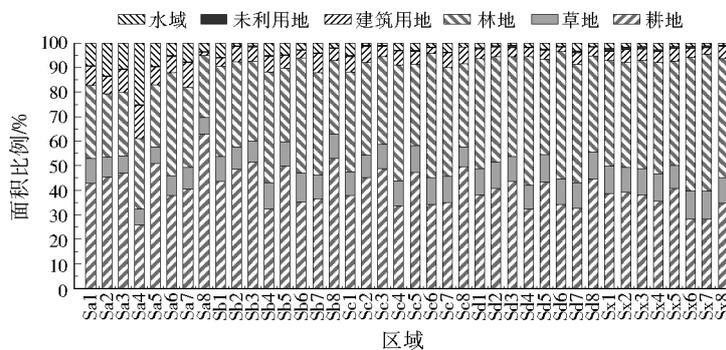


图 3 三岔河流域水质指标的空间分布
 Fig.3 Spatial distribution of water quality indicators in Sancha River basin



注：Sa、Sb、Sc 和 Sd 分别代表 0.2、0.5、1.0、2.0 km 缓冲区；Sx 代表子流域；1~8 分别代表 1#~8# 监测点。例如，Sa1 代表 1# 监测点的 0.2 km 缓冲区。

图 4 缓冲区和子流域内土地利用类型面积比例
 Fig.4 Proportion of land use types of the sub-basin and buffer zones

质指标大体呈负相关；耕地、林地和建设用地面积比例均与氨氮相关显著，未利用地和水域面积比例与总磷相关显著。这与 COLLIER^[16]的研究结果一致，表明耕地和建设用地对水质有“源”作用，林地和草地对水质有“汇”作用。

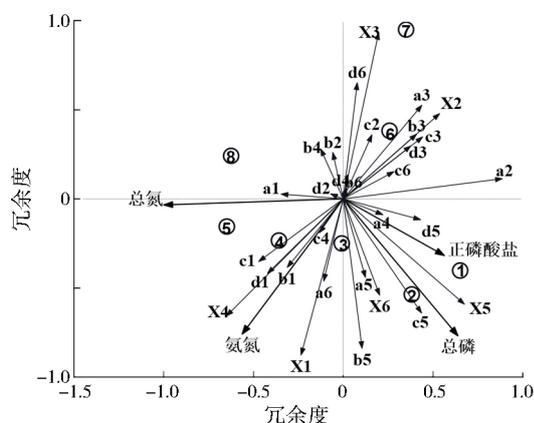
图 5 反映了各监测点水质指标与土地利用类型面积比例的关系。由图 5 可以看出，三岔河流域的 4#、5# 监测点对氮素的贡献最大，可能因为 4#、5# 监测点所在子流域的耕地面积比例相对较高(见图 4)，在子流域尺度上，耕地面积比例与总氮、氨氮呈

正相关(见表 1)，耕地可能是氮素的主要来源；且正值雨季，耕地中因施肥过量而未被作物利用的氮素可能随着土壤流失到河流中。1#、2# 监测点对磷素的贡献最大，1#、2# 监测点所在子流域的未利用地面积比例较高(见图 4)，磷素可能主要受到未利用地的影响。一方面，研究区域喀斯特地貌显著，未利用地的主要类型包括石漠化土地以及裸露地，风化现象明显，随着矿物的风化，磷素进入土壤^[195-96]。赵海东等^[17]研究表明，裸露地的正磷酸盐流失量大于其他的土地利用类型。因此，未利用地中的磷素会

表 1 不同尺度下土地利用类型面积比例与水质指标的相关性¹⁾
Table 1 Correlation coefficients between area ratios of land-use types and water quality indicators

水质指标	区域	土地利用类型面积比例					
		耕地	草地	林地	建筑用地	未利用地	水域
总氮	0.2 km 缓冲区	0.452	-0.905**	-0.690	-0.214	0.021	0.048
	0.5 km 缓冲区	0.381	0.238	-0.500	-0.048	-0.071	-0.095
	1.0 km 缓冲区	0.381	0.095	-0.524	-0.167	-0.476	-0.333
	2.0 km 缓冲区	0.429	0.238	-0.476	-0.619	-0.524	-0.143
	子流域	0.214	-0.595	-0.214	0.643	-0.524	-0.429
总磷	0.2 km 缓冲区	-0.262	0.429	0.167	0.238	0.405	0.595
	0.5 km 缓冲区	-0.190	-0.167	0.238	-0.095	0.810*	0.071
	1.0 km 缓冲区	-0.190	-0.214	0.190	-0.048	0.786*	-0.048
	2.0 km 缓冲区	-0.143	-0.214	0.214	0.119	0.405	-0.310
	子流域	0.524	0.024	-0.524	0.024	0.810*	0.929**
正磷酸盐	0.2 km 缓冲区	-0.500	0.405	0.262	0.667	-0.262	0.643
	0.5 km 缓冲区	-0.476	-0.095	0.381	0.381	0.381	0.452
	1.0 km 缓冲区	-0.476	-0.167	0.333	0.190	0.643	0.405
	2.0 km 缓冲区	-0.548	-0.357	0.452	0.429	0.333	0.214
	子流域	0.286	0.143	-0.286	-0.214	0.690	0.833*
氨氮	0.2 km 缓冲区	0.714*	-0.452	-0.652	-0.357	0.286	0.333
	0.5 km 缓冲区	0.643	-0.214	-0.762*	-0.024	0.476	-0.333
	1.0 km 缓冲区	0.643	-0.357	-0.810*	0.238	0.262	-0.429
	2.0 km 缓冲区	0.667	0.524	-0.762*	-0.167	-0.143	-0.357
	子流域	0.786*	-0.676	-0.786*	0.967**	0.167	-0.071

注: ¹⁾采用 Spearman 秩相关分析; * 表示在 $\alpha=0.05$ 水平显著相关, ** 表示在 $\alpha=0.01$ 水平显著相关。



注: ①~⑧分别代表 1#~8# 监测点; a、b、c 和 d 分别代表 0.2、0.5、1.0、2.0 km 缓冲区; X 代表子流域; 1~6 依次代表耕地、草地、林地、建筑用地、未利用土地和水域。例如, a1 代表耕地的 0.2 km 缓冲区。

图 5 土地利用类型面积比例与水质指标的冗余分析排序
Fig.5 Redundancy analysis ordination plot of area ratios of land use types and water quality indicators

随着土壤流失更多进入河流中。

与缓冲区相比,在子流域尺度上,水质对土地利用类型的响应更加显著,该结果和蔡宏等^{[4]289-290}在赤水河的研究结果相一致,而於梦秋等^{[9]1029-1031}在太湖流域入湖河流土地利用类型对水质影响的研究发现,河流近域的土地利用对水质有更大影响。研究结果的差异可能是因为流域所处的自然环境不同:三岔河和赤水河都位于西南山区,而太湖流域位于

平原地区。此外,每个流域特征污染物的迁移转化过程不同,结果可能也会有所不同。

4 结论与建议

(1) 与缓冲区尺度相比,在子流域尺度上水质对土地利用类型的响应更为明显。在子流域尺度上,林地、草地与总氮、总磷、氨氮和正磷酸盐呈大体负相关,而耕地、建设用地与总氮、总磷、氨氮和正磷酸盐呈大体正相关。从削减非点源污染出发,建议在流域范围内实行退耕还林还草,建设防护林效果。

(2) 在缓冲区尺度,缓冲半径不同,草地、建筑用地、未利用地和水域面积比例与水质指标的相关性也会发生变化。

(3) 耕地是丰水期河流中氮素的主要来源,未利用地是河流中磷素的主要来源,随着流域内耕作施肥和裸露地风化,氮素、磷素随着土壤流失进入到河流。因此,在喀斯特地貌为主导的流域内,合理规划和开发土地资源,是改善流域内生态环境的有效措施。

参考文献:

- [1] 窦培谦,王晓燕,王丽华.非点源污染中氮磷迁移转化机理研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2006,27(2).

(下转第 533 页)

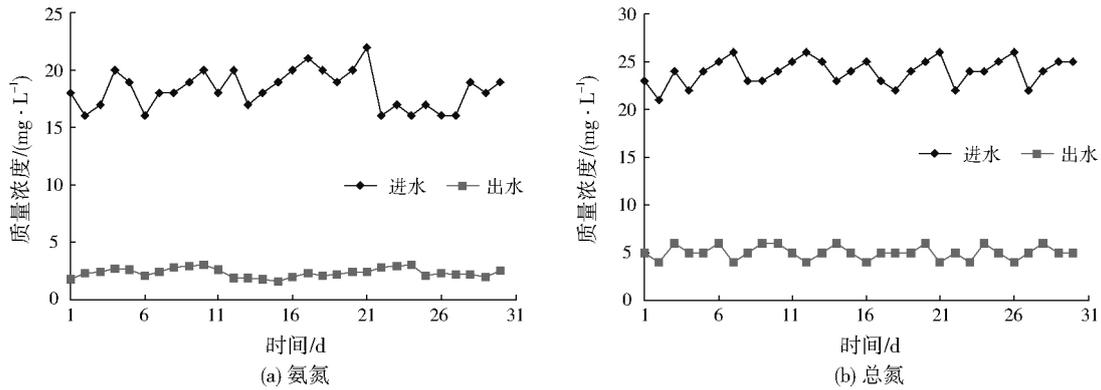


图5 第3阶段运行结果
Fig.5 Results of the third phase

(2) 以体积比为 1[#] : 2[#] : 3[#] = 3 : 2 : 5 配成青霉菌混合液,可以大幅度提高青霉菌的同步硝化反硝化功能。

(3) 在实际工程应用中验证,3株青霉菌确实具有促进同步硝化反硝化的功能,出水的氨氮和总氮均可以达到 GB 21905—2008。

参考文献:

[1] 刘欢,骆灵喜,李旭宁,等.膜生物反应器好氧反硝化菌的筛选与鉴定[J].环境污染与防治,2015,37(4):26-29.
 [2] LUKOW T, DIEKMANN H. Aerobic denitrification by a newly isolated heterotrophic bacterium strain TL1[J]. Biotechnology Letters, 1997, 19(11): 1157-1159.
 [3] 毛熙彦,蒙吉军.土地利用变化的水文效应研究进展[J].北京大学学报(自然科学版),2013,49(5):928-936.
 [4] 韩黎阳,黄志霖,肖文发,等.三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J].环境科学,2014,35(3):1091-1097.
 [5] 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).
 [6] 郎海鸥,王文杰,王维,等.基于土地利用变化的小河流域非点源污染特征[J].环境科学研究,2010,23(9):1158-1166.
 [7] 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.
 [8] SLIVA L, WILLIAMS D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality[J]. Water Research, 2001, 35(14): 3462-3472.
 [9] 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.
 [10] 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[J].农业环境科学学报,2014,33(5).
 [11] BUCK O, NIYOGI D K, TOWNSEND C R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural

catchments[J]. Environmental Pollution, 2004, 130(2): 287-299.
 [12] HEFTING M, BELTMAN B, KARSSSENBERG D, et al. Water quality dynamics and hydrology in nitrate loaded riparian zones in the Netherlands[J]. Environmental Pollution, 2006, 139(1): 143-156.
 [13] 刘方,王世杰,刘元生,等.喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J].生态学报,2005,25(3):639-644.
 [14] 刘继文,陈安宁.三岔河流域生态现状及污染防治的探索[J].城市建设理论研究(电子版),2012(16):1-6.
 [15] 唐从国.基于GIS的乌江流域(贵州境内)非点源污染评价[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2006.
 [16] 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[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:244-248.
 [17] COLLIER K J. Linking multimetric and multivariate approaches to assess the ecological condition of streams[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 157(1/2/3/4): 113-124.
 [18] 赵海东,赵小敏,方少文,等.鄱阳湖区坡耕地水土流失对土壤养分的影响[J].江西农业大学学报,2014,36(1):225-229,242.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2016-06-29)

(上接第 529 页)

[1] 刘欢,骆灵喜,李旭宁,等.膜生物反应器好氧反硝化菌的筛选与鉴定[J].环境污染与防治,2015,37(4):26-29.
 [2] LUKOW T, DIEKMANN H. Aerobic denitrification by a newly isolated heterotrophic bacterium strain TL1[J]. Biotechnology Letters, 1997, 19(11): 1157-1159.
 [3] CHEN Fan, XIA Qing, JU L K. Aerobic denitrification of *Pseudomonas aeruginosa* monitored by online NAD(P)H fluorescence[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(11): 6715-6722.
 [4] 周云云,黄少斌.好氧反硝化菌 TADI 的同步硝化反硝化性能[J].环境工程学报,2013,7(6):2160-2166.
 [5] 陈岫圳,王立钢,王迎春,等.异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮性能的实验研究[J].环境科学,2009,30(12):3614-3618.
 [6] 乔森,刘雪洁,周集体.异养硝化-好氧反硝化在生物脱氮方面的研究进展[J].安全与环境学报,2014,14(2):128-135.
 [7] 赵中艳.一株青霉菌异养硝化和好氧反硝化特性的研究[J].水资源保护,2008,24(2):73-75.

编辑:徐婷婷 (收稿日期:2016-04-07)