

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 ..... 陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)

中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单 ..... 刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)

基于长时间序列的北京 PM<sub>2.5</sub>浓度日变化及气象条件影响分析 ..... 苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)

2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)

抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析 ..... 周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)

成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征 ..... 蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)

嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析 ..... 沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翡 (2871)

泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析 ..... 张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)

城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例 ..... 李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)

桂林市酸雨变化特征及来源分析 ..... 郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)

农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH<sub>3</sub>和N<sub>2</sub>O)减排效果比较:以夏玉米季为例 ..... 范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)

青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O通量的观测 ..... 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>分压特征分析 ..... 张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)

气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析 ..... 张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)

三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例 ..... 吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)

入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例 ..... 项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)

库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例 ..... 王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)

农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析 ..... 李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)

农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究 ..... 李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)

三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨 ..... 柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)

重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究 ..... 刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)

深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究 ..... 崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)

柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价 ..... 卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)

北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 ..... 陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)

昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义 ..... 王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)

甬醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示 ..... 廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)

漳沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征 ..... 昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,乔翠琴 (3041)

雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析 ..... 张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)

Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 ..... 张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)

Ce<sup>3+</sup>与Cu<sup>2+</sup>协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究 ..... 张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究 ..... 丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)

石墨烯-TiO<sub>2</sub>光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解 ..... 徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)

单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制 ..... 阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)

硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性 ..... 马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)

膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能 ..... 刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)

ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水 ..... 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)

活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探 ..... 李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)

低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动 ..... 顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)

超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能 ..... 马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 ..... 何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)

山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估 ..... 王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)

电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征 ..... 赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)

我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究 ..... 冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)

流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征 ..... 李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)

聚羟基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>的吸附特性 ..... 朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)

新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价 ..... 王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)

纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附 ..... 朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)

鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性 ..... 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)

不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响 ..... 景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)

中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究 ..... 王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)

贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响 ..... 林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)

不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响 ..... 吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)

《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)

# 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究：以洱海北部流域为例

项颂, 庞燕\*, 储昭升, 胡小贞, 孙莉, 薛力强

(中国环境科学研究院湖泊生态环境创新基地, 北京 100012)

**摘要:** 揭示土地利用与入湖河水质的内在联系是非点源研究的重要内容, 以洱海北部流域为研究对象, 从土地利用类型组成和空间格局入手, 综合空间分析和统计分析方法对两者响应关系进行研究. 结果表明, 研究区平均坡度 (SLOPE)、植被区面积百分比 (VEG) 作为表征土地利用类型组成的指标, 与入湖河流 TN 和 TP 的关系显著, 斑块密度 (PD)、农业用地斑块密度 (PD<sub>agr</sub>)、水体形状指数 (LSI<sub>wat</sub>) 作为表征土地利用空间格局的指标, 与 TP 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的关系显著; 类型水平下, 入湖河流水质对土地利用空间格局的响应关系较景观水平强, 水质响应指标为雨季 TP 和旱季 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 回归调整系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.761 和 0.978; 旱季, 入湖河流水质对土地利用的响应关系强于雨季, 水质响应指标为 TN、TP 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. 因此, 进行洱海北部流域非点源污染治理时可考虑提高植被覆盖率和农业用地集约化程度, 尽量避免旱季对自然水体的人为干扰, 后续进行土地利用空间格局与入湖河流水质关系研究建议选类型水平.

**关键词:** 洱海北部流域; 入湖河流水质; 土地利用; 逐步回归分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2947-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.08.016

## Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai

XIANG Song, PANG Yan\*, CHU Zhao-sheng, HU Xiao-zhen, SUN Li, XUE Li-qiang

(Research Center of Lake Eco-Environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The inherent relationship between land use pattern and inflow water quality is essential for nonpoint source pollution study. Response of inflow river quality to land use pattern in Northern part of Lake Erhai Watershed was analyzed in aspects of land use composition and configuration using spatial analysis and statistical analysis methods. The results indicated that as land use composition indexes, average slope and vegetation area percentage had significant relationship with TN and TP of inflow rivers. As land use configuration indexes, patch density, patch density of agriculture land and landscape shape index of water had significant relationship with TP and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N of inflow rivers. Response of inflow river quality to land use pattern was better at class level than at landscape level. Water quality response indicators were TP in rainy season and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in dry season, of which regression adjustment coefficient R<sup>2</sup> was 0.761 and 0.978, respectively. Response of inflow river quality to land use pattern was better in dry season than in rainy season, and the water quality response indicators were TN, TP and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. Improving vegetation coverage and agriculture land intensive degree and avoiding human disturb to natural water area especially in dry season were suggested in nonpoint source pollution control of northern watershed of Lake Erhai Watershed. Later research on relationship between land use configuration and inflow river quality should better be at class level.

**Key words:** northern watershed of Erhai; inflow river water quality; land use pattern; stepwise regression analysis

强烈的人类活动影响,使得土地利用发生变化,这种变化会引起流域水土流失并改变水文循环过程,进而加剧流域非点源污染<sup>[1-3]</sup>. 入湖河流作为外源汇入湖泊的重要通道,其水质变化直接影响湖泊水环境<sup>[4,5]</sup>. 探讨土地利用与入湖河流的内在联系,是非点源污染研究的热点,对流域非点源污染治理和湖泊水环境保护意义重大<sup>[6,7]</sup>.

目前关于土地利用与河流水质耦合关系的研究方向主要包括两方面:以土地利用的类型组成属性为基础,如研究综合土地利用类型<sup>[8]</sup>或某单一土地利用类型面积百分比与河流水质的关系,其中关注

最多的单一土地利用类型为建设用地<sup>[9]</sup>和农业用地<sup>[10]</sup>;以土地利用的空间格局属性为基础,如利用景观指数反映土地利用布局特点对河流水质的影响<sup>[11,12]</sup>,研究水平多以景观水平和类型水平为主<sup>[7,13,14]</sup>. 研究方法主要以多元统计分析方法如相关分析<sup>[15]</sup>、多元回归分析<sup>[6,13]</sup>等为主,还包括梯度

收稿日期: 2016-02-23; 修订日期: 2016-03-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07105-002)

作者简介: 项颂 (1988 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为水体污染控制与治理, E-mail: xs624834175@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: 190068749@qq.com

分析方法<sup>[7,14]</sup>、模型模拟<sup>[16,17]</sup>,及以上方法的综合应用<sup>[18]</sup>. 针对两者关系研究的尺度依赖性,现有的研究尺度涉及全流域尺度<sup>[19]</sup>、缓冲区尺度<sup>[20]</sup>、河岸带尺度<sup>[21]</sup>等. 此外,也有一些研究对两者关系的时间效应<sup>[22,23]</sup>进行了探讨.

洱海作为云南省第二大淡水湖泊,其水环境保护一直处于重中之重中的地位. 洱海流域基础产业为农业,流域内 65% 的农田分布在北部,农田化肥的氮磷经径流冲刷进入地表水体形成非点源污染,对流域水环境产生不利影响<sup>[4,24]</sup>. 目前针对此问题,研究多以水环境质量的验证问题的存在<sup>[4,5,24]</sup>,而很少考虑从土地利用的角度来揭示问题产生的原因. 基于以上背景,本文以洱海北部流域为研究区,以区域内主要入湖河流为研究对象,从土地利用类型组分和空间格局两方面入手,揭示土地利用与地表水环境的内在联系,以期为洱海流域非点源污染治理和水环境改善提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省大理州洱海流域北部,东经 99°32′~100°27′、北纬 25°50′~26°16′之间,地跨洱源县和大理市上关镇共 7 个乡镇,76 个村委会. 研究区气候属典型的低纬亚热带高原季风气候,干湿季分明,5~10 月为雨季,11 月~次年 4 月为旱季,多年年均温度和降雨量分别为 15.1℃和 1 048 mm. 研究区属洱海流域上游,面积 1 188.18 km<sup>2</sup>, 占流域面积的 46%,主要由弥茨河、凤羽河、弥苴河、罗时江、永安江等水系构成,多年年均径流量占洱海入湖河流年总径流量的 48.9%<sup>[4]</sup>,是补充洱海水量的重要贡献区(图 1).

### 1.2 水文气象数据及分析

洱海流域北部入湖河流水质数据为 2014 年全年水质数据,数据来源为现场监测和大理州环境监测站提供,监测点的布设综合河流水文及周边土地利用特征确定,监测频率均为每月一次,监测方法参照国家标准<sup>[25]</sup>. 本研究中选取 COD、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 为水质代表性参数,依据研究区季节性变化和人文特征,将参数划分为雨季(5~10 月)和旱季(1~4 月、11~12 月)进行分析. 研究区降雨量数据为多年(1994~2014 年)降雨量数据,数据来源为大理州气象局提供.

### 1.3 空间分析

遥感影像数据为 2012 年资源一号 02c 卫星拍



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

摄的 2.36 m 高精度卫片,DEM 为中国科学院计算机网络信息中心 ASTER GDEM 30 m 分辨率高程数据. 在 Arcgis 10.1 (ESRI) 平台上,基于流域 DEM 划分为 5 个小流域:罗时江、永安江、凤羽河、弥茨河、弥苴河干流(图 1);基于遥感影像,参照最新土地分类标准<sup>[26]</sup>,采用非监督分类法进行土地利用分类,并以流域第二次全国土地调查相关数据为参考进行修正,最终土地利用分为建设用地(CON)、农业用地(ARG)、植被(VEG)、水体(WAT)、其它用地(OTH)5 类(图 2);利用 ArcGIS 表面分析模块进行平均坡度提取和重分类,计算平均坡度<sup>[27]</sup>.

土地利用<sup>[28]</sup>包括组成变量和结构变量. 为开展流域土地利用与入湖河流水质的关系研究,选用面积百分比(Area%)和平均坡度(Slope)表征土地利用类型组分,选用斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观形状指数(LSI)、斑块凝聚度(COHES)、香农多样性指数(SHDI)和蔓延度指数(CONTAG)这 6 个景观指数表征土地利用空间格局(表 1),通过 Fragstats 4.2 得到各景观指数值<sup>[29]</sup>.

表 1 景观格局指标<sup>1)</sup>  
Table1 Landscape pattern indices

指标	尺度	计算方法	描述
斑块密度 (PD)	类型和景观	$PD = \frac{N}{A} \times 1000 \times 100$	景观异质性和破碎度
最大斑块指数 (LPI)	类型和景观	$LPI = \frac{\max(a_{ij})}{A} \times 100$	景观优势度
斑块凝聚度 (COHES)	类型和景观	$COHE = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{A}} \right]^{-1} \times 100$	景观自然连通度
香农多样性指数 (SHDI)	景观	$SHDI = - \sum_{i=1}^m P_i \times \ln P_i$	景观多样性
景观形状指数 (LSI)	类型和景观	$LSI = \frac{E}{\min E}$	景观聚集度和离散度
蔓延度指数 (CONTAG)	景观	$CONTAG = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[ P_i \left( \frac{g_{ij}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \times \left[ \ln P_i \left( \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right] \right\} \times 100$	景观聚集度和离散度

1)  $A$  为景观总面积,  $E$  为景观边缘总长度,  $m$  为景观类型数,  $N$  为斑块个数,  $a_{ij}$  为斑块  $ij$  的面积,  $P_{ij}$  为斑块  $ij$  的周长,  $P_i$  为斑块类型  $i$  在景观中的面积比重,  $g_{ik}$  为基于双倍法的斑块类型  $i$  和斑块类型  $k$  之间节点数

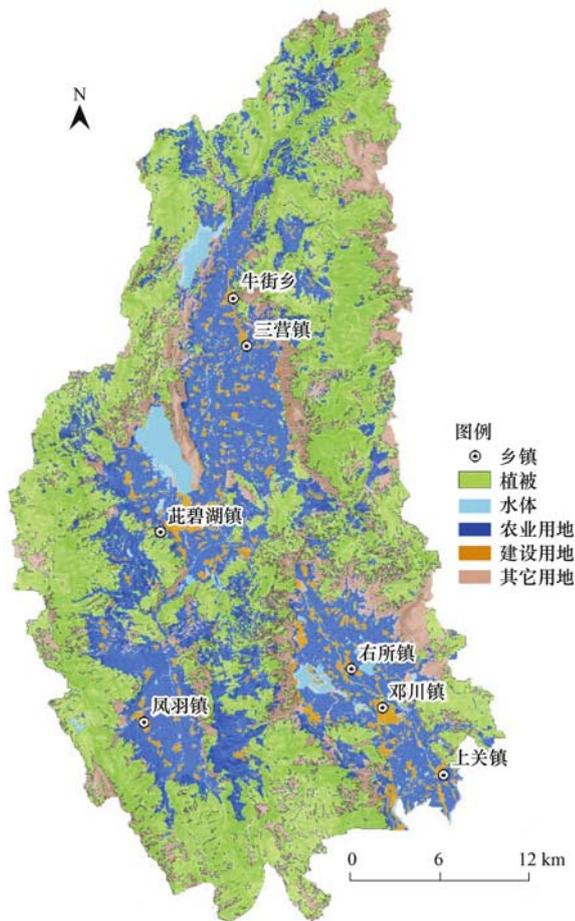


图 2 研究区土地利用分类  
Fig. 2 Land use classification of the study area

1.4 统计分析

数据分析之前,利用 SPSS 19 进行异常值排除

和标准化去量纲. 并在 0.05 的显著性水平下进行水质数据和景观变量的 K-S (Kolmogorov-Smirnov) 正态性检验,发现所有数据双尾渐进概率  $P$  均大于显著性水平 0.05,表明数据服从正态分布.

在 0.05 的显著性水平下,采用独立样本  $T$  检验分析 5 个小流域水质数据的季节性差异,采用单因素方差分析验证多重比较法验证 5 个小流域水质数据的空间差异性. 在 0.05 的显著性水平下进行土地利用与入湖河水质的 Pearson 相关性分析和逐步多元回归分析<sup>[15,30]</sup>.

2 结果与分析

2.1 入湖河流水质分析

在 0.05 的显著性水平下,采用独立样本  $T$  检验和单因素方差分析法验证数据的时空差异性,结果显示:选取的水质指标  $T$  检验双尾概率值均小于 0.05,表明研究区入湖河流 COD、TN、TP、 $NH_4^+ - N$  浓度存在显著的季节性差异;单因素方差分析表明罗时江流域 COD 和 TP 浓度与其它 4 个小流域存在显著空间差异,凤羽河流域 TN 与其它 4 个小流域存在显著空间差异,凤羽河流域  $NH_4^+ - N$  浓度与除永安江流域外的其它 3 个小流域存在显著空间差异. 因而就季节性特征而言,COD、TP、 $NH_4^+ - N$  (弥直河干流流域除外) 雨季浓度高于旱季浓度, TN 雨季浓度低于旱季浓度 (凤羽河流域除外);就空间特征而言,罗时江流域 COD 和 TP 浓度高于其它 4 个小流

域,风羽河流域 TN 和氨氮浓度低于其它 4 个小流

域,具体见图 3.

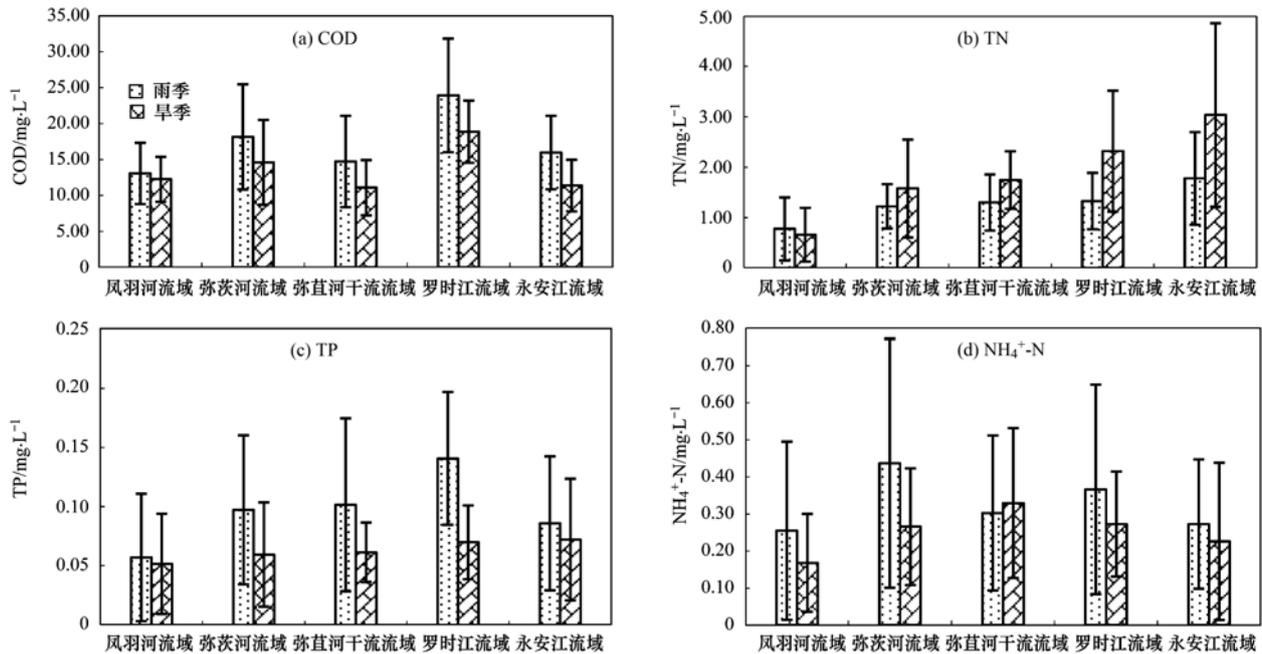


图 3 小流域入湖河流水质

Fig. 3 Water quality in inflow rivers of subcatchment

2.2 土地利用分析

2.2.1 土地利用类型组分

研究区 5 个小流域主要土地利用类型和平均坡度如图 4. 主要土地利用类型为植被、农业用地和其它用

地,3 种主要地类在各小流域面积占比均值分别为 49.25%、26.05% 和 17.20%. 5 个小流域平均坡度变化范围为 13.56° ~ 15.60°,以中坡为主,其中永安江流域整体坡度最平缓,风羽河流域整体坡度最陡.

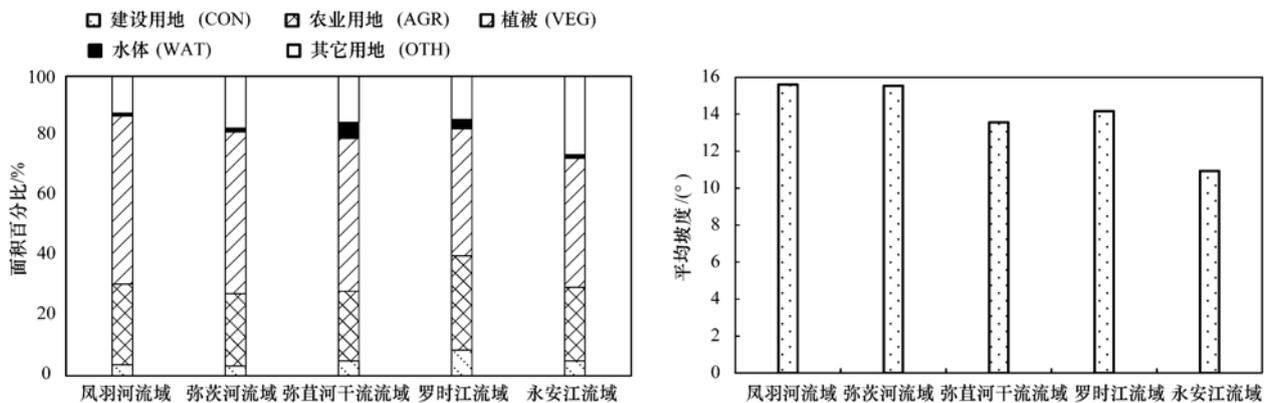


图 4 小流域土地利用类型组分

Fig. 4 Land use composition within the subcatchment

2.2.2 土地利用空间格局

景观水平下,5 个小流域 PD 值和 SHDI 值均以土地利用类型构成多样、分布零散的弥苴河干流流域最高,以土地利用构成相对简单、有连片农田和植被的风羽河流域最低; LSI 值和 LPI 值均以弥茨河流域最高,永安江流域最低, LPI 受土地利用类型直接影响,即弥茨河流域景观形状最复杂、景观优势度最高,永安江流域景观形状简单、景观构成较

均匀; COHES 值以土地利用类型优势度明显、景观连通性好的弥茨河流域最高,以土地利用布局零散、景观连通性差的弥苴河干流流域最低; CONTAG 值差异性不大,风羽河流域植被和农田连片分布其值相对高,罗时江不同地类分布零散其值相对低,具体见图 5.

类型水平下,建设用地、农业用地和其它用地的 PD 值比水体和植被高,主要是由于这 3 种地类

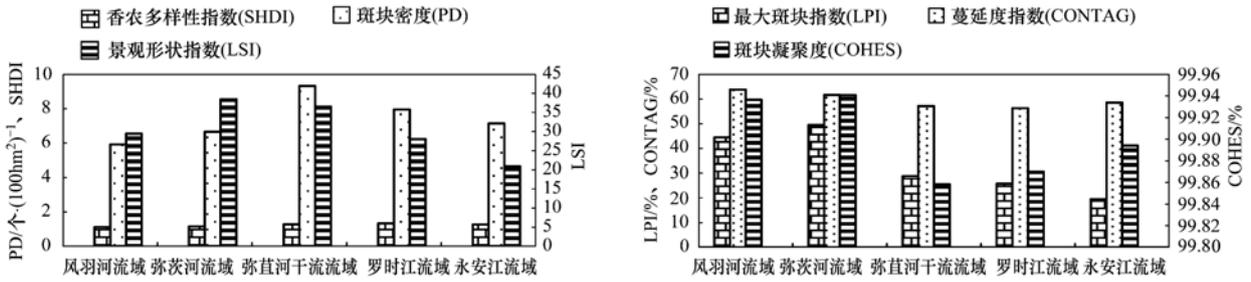


图5 景观水平下小流域土地利用空间格局

Fig. 5 Land use spatial pattern within the subcatchment in landscape level

受人为活动干扰多,破碎度高; LPI 值由高到低与流域土地利用构成相一致,植被是优势地类, LPI 值最高,其次为农业用地; LSI 值则表明流域除水体外,其它 4 种地类受人类活动影响都呈现一定程度离散

性; 流域植被区受人类干扰较小,保有较好的自然连通状态,其 COHES 值最高,其次为农业用地,而流域经济发展带动建设用地开发利用加剧,其 COHES 值最低,具体见图 6.

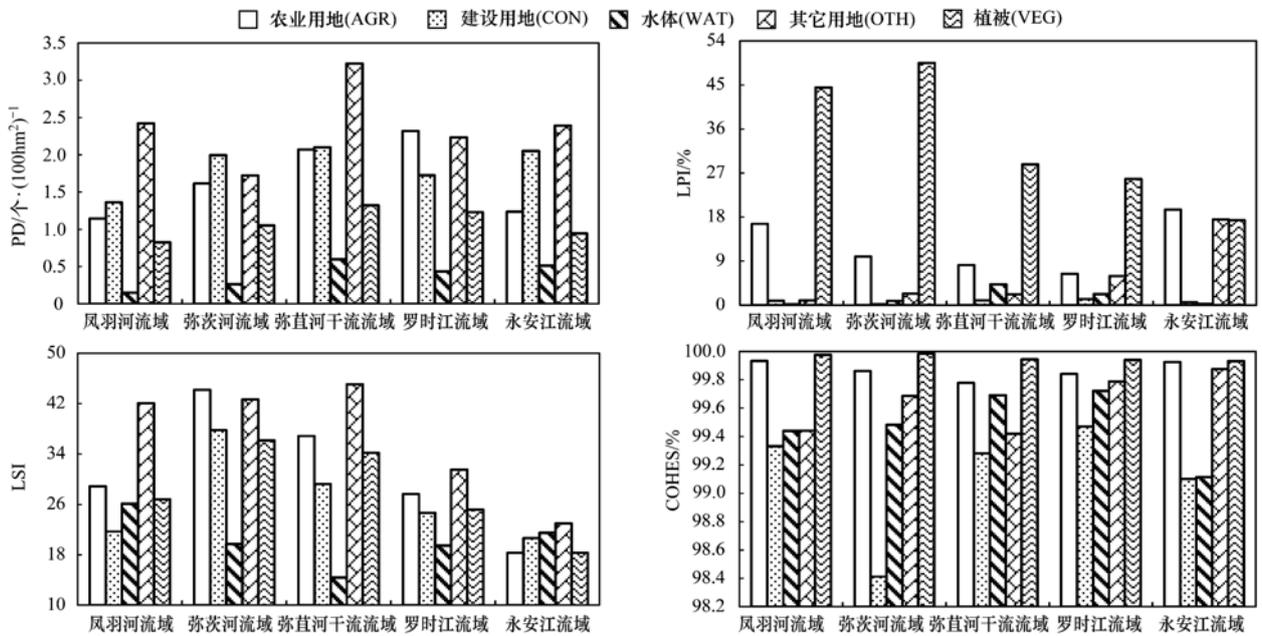


图6 类型水平下小流域土地利用空间格局

Fig. 6 Land use spatial pattern within the subcatchment at class level

### 2.3 入湖河流水质对土地利用的响应关系

#### 2.3.1 入湖河流水质与土地利用类型组分的关系

在 0.05 的显著性水平下,入湖河流水质与土地利用类型组分的 Pearson 相关性分析结果见表 2. 雨季,与流域土地利用类型组分存在显著相关性的水质指标为 TN; 入湖河流 TN 与其它用地类型面积百分比(OTH)呈显著正相关(相关系数  $r = 0.886$ ),与平均坡度(SLOPE)呈显著负相关( $r = -0.891$ ),表明流域其它用地类型面积越大、平均坡度越平缓,越不利于水质改善. 旱季,与流域土地利用类型组分存在显著相关性的水质指标为 TN 和 TP; TN 和 TP 均与植被区面积百

分比(VEG)呈显著负相关,相关系数分别为  $-0.912$  和  $-0.968$ ,这说明植被具有水源涵养和水质净化效果<sup>[13,21]</sup>. 研究区土地利用构成中植被为优势地类,建设用地和农业用地与入湖河流水质在全年相关性不显著,总体呈一定程度正相关<sup>[7,16,19,23]</sup>; 而水体这一用地类型与河流水质相关性不明显.

在 0.05 的引入概率下,入湖河流水质与土地利用类型组分的响应模型如表 3 所示,雨季 TN 对平均坡度的响应强,旱季 TN 和 TP 对植被区面积百分比响应强,其它水质指标与土地利用类型组分的响应关系不显著.

表 2 入湖河流水质与土地利用类型组分的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Pearson correlation analysis between land use composition and inflow river quality

季节	水质指标	CON	ARG	VEG	WAT	OTH	SLOPE
雨季	COD	0.790	0.718	-0.631	0.112	-0.049	0.025
	TN	0.300	-0.181	-0.795	0.103	0.886 *	-0.891 *
	TP	0.819	0.517	-0.651	0.501	-0.047	-0.105
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.068	0.095	0.022	0.010	-0.114	0.416
旱季	COD	0.700	0.838	-0.383	-0.018	-0.332	0.333
	TN	0.492	0.053	-0.912 *	0.085	0.811	-0.866
	TP	0.654	0.235	-0.968 **	0.144	0.682	-0.788
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.305	-0.208	-0.233	0.853	-0.010	-0.140

1) \* 代表在 0.05 的水平下显著相关, \*\* 代表在 0.01 的水平下显著相关

表 3 入湖河流水质对土地利用类型组分的响应模型

Table 3 Regression models between inflow river quality and land use composition

季节	水质指标	自变量	回归方程	R <sup>2</sup>	调整 R <sup>2</sup>	Sig.
雨季	TN	SLOPE	TN = 3.607 - 0.167SLOPE	0.793	0.724	0.043
旱季	TN	VEG	TN = 8.189 - 0.128VEG	0.831	0.775	0.031
	TP	VEG	TP = 0.126 - 0.001VEG	0.936	0.915	0.007

2.3.2 入湖河流水质与土地利用空间格局的关系

(1)景观水平下入湖河流水质与土地利用空间格局的关系

景观水平下,当显著性水平为 0.05 时,入湖河流水质与土地利用空间格局的 Pearson 相关性分析结果见表 4. 雨季,4 个水质指标与流域土地利用空

间格局的相关性均不显著. 旱季, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与斑块密度(PD)存在显著正相关( $r=0.9$ ).

景观水平下,引入概率为 0.05 时,入湖河流水质与土地利用空间格局的响应模型如表 5 所示,旱季 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 对斑块密度(PD)的响应强,其它水质指标与其响应不显著.

表 4 景观水平下入湖河流水质与土地利用空间格局的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson correlation analysis between land use spatial pattern and inflow river quality at landscape level

季节	水质指标	PD	LPI	LSI	COHES	CONTAG	SHDI
雨季	COD	0.214	-0.247	-0.065	-0.324	-0.570	0.597
	TN	0.391	-0.759	-0.464	-0.482	-0.650	0.676
	TP	0.601	-0.412	0.085	-0.635	-0.817	0.805
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.038	0.402	0.583	0.176	-0.094	0.043
旱季	COD	-0.006	0.023	0.029	-0.101	-0.307	0.337
	TN	0.371	-0.821	-0.565	-0.535	-0.716	0.762
	TP	0.413	-0.836	-0.557	-0.605	-0.792	0.841
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.900 *	-0.282	0.513	-0.687	-0.735	0.641

1) \* 代表在 0.05 的水平下显著相关

表 5 景观水平下入湖河流水质对土地利用空间格局的响应模型

Table 5 Regression models between inflow river quality and land use spatial pattern at landscape level

季节	水质指标	自变量	回归方程	R <sup>2</sup>	调整 R <sup>2</sup>	Sig.
旱季	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	PD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N = -0.053 + 0.041PD	0.81	0.747	0.037

(2)类型水平下入湖河流水质与土地利用空间格局的关系

类型水平下,当显著性水平为 0.05 时,入湖河流水质与土地利用空间格局的 Pearson 相关性分析结果见表 6. 雨季,TP 与农业用地斑块密度(PDagr)存在显著正相关( $r=0.906$ ). 旱季, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与农业

用地斑块凝聚度(COHEAgr)和水体形状指数(LSIwat)存在显著负相关( $r=-0.95$ 和 $r=-0.992$ ),与水体最大斑块指数(LPIwat)和植被最大斑块指数(PDveg)存在显著正相关( $r=0.881$ 和 $r=0.954$ ). 其它指标与入湖河流水质的关系不显著.

表 6 类型水平下入湖河流水质与土地利用空间格局的 Pearson 相关性分析<sup>1)</sup>

Table 6 Pearson correlation analysis between land use spatial pattern and inflow river quality at class level

季节	水质指标	PDagr	LPIagr	LSIagr	COHESagr	PDcon	LSIcon	COHEScon	LPIcon	PDwat	LPIwat
雨季	COD	0.701	-0.614	-0.001	-0.284	0.088	0.159	0.063	0.260	0.163	0.155
	TN	0.124	0.147	-0.430	-0.074	0.770	-0.116	-0.097	-0.188	0.748	0.067
	TP	0.906 *	-0.776	0.093	-0.625	0.349	0.229	0.152	0.363	0.500	0.534
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.467	-0.649	0.687	-0.388	0.319	0.845	-0.657	-0.413	-0.123	0.108
旱季	COD	0.610	-0.614	0.094	-0.169	-0.233	0.158	0.091	0.312	-0.156	0.038
	TN	0.212	0.089	-0.529	-0.043	0.638	-0.223	0.044	-0.027	0.716	0.047
	TP	0.356	-0.047	-0.526	-0.108	0.549	-0.241	0.151	0.123	0.702	0.112
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.806	-0.756	0.457	-0.950 *	0.741	0.528	-0.072	0.102	0.734	0.881 *
季节	水质指标	LSIwat	COHESwat	PDoth	LPIoth	LSIoth	COHESoth	PDveg	LPIveg	LSIveg	COHESveg
雨季	COD	-0.240	0.419	-0.427	0.108	-0.350	0.616	0.466	-0.224	-0.082	-0.276
	TN	-0.411	-0.420	0.041	0.865	-0.746	0.745	0.254	-0.780	-0.455	-0.748
	TP	-0.606	0.584	-0.069	0.064	-0.219	0.439	0.785	-0.379	0.071	-0.462
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.345	0.377	-0.631	-0.281	0.217	0.292	0.375	0.412	0.577	0.365
旱季	COD	-0.010	0.510	-0.521	-0.149	-0.157	0.426	0.303	0.049	0.008	-0.004
	TN	-0.342	-0.345	-0.008	0.875	-0.836	0.824	0.266	-0.837	-0.561	-0.810
	TP	-0.354	-0.193	-0.021	0.801	-0.827	0.829	0.351	-0.843	-0.557	-0.833
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.992 **	0.588	0.384	-0.137	0.237	-0.056	0.954 *	-0.251	0.512	-0.349

1) \* 代表在 0.05 的水平下显著相关, \*\* 代表在 0.01 的水平下显著相关

类型水平下,引入概率为 0.05 时,入湖河流水质与土地利用空间格局的响应模型如表 7 所示,雨

季 TP 对农业用地斑块密度 (PDagr) 响应关系强,旱季 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 对水体形状指数 (LSIwat) 的响应关系强。

表 7 类型水平下入湖河流水质对土地利用空间格局的回归模型

Table 7 Regression models between inflow river quality and land use spatial pattern at class level

季节	水质指标	自变量	回归方程	R <sup>2</sup>	调整 R <sup>2</sup>	Sig.
雨季	TP	PDagr	TP = 0.007 + 0.053PDagr	0.821	0.761	0.034
旱季	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	LSIwat	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N = 0.537 - 0.014LSIwat	0.983	0.978	0.001

## 2.4 入湖河流水质与降雨量的响应关系

入湖河流水质与土地利用类型的关系是通过降雨径流联系起来的,在上述入湖河流水质-土地利用研究的基础上,进一步探讨水质与降雨量的季节性关联(图 7). 罗时江 COD 和 TP 在全年均与降雨量呈正相关, TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在旱季与降雨呈负相关,雨季呈正相关; 凤羽河 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在全年均与降雨量呈负相关,其它 3 个指标与降雨量的关系在旱季和雨季相反,其中旱季 COD 和 TN 与降雨量呈负相关, TP 与降雨量呈正相关; 弥苴河雨季水质指标与降雨量均呈正相关,旱季除 TP 外的其它 3 个指标与降雨量呈负相关; 永安江水质指标在雨季和旱季与降雨量的关系相反,其中旱季 COD、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与降雨量呈负相关, TN 与降雨量呈正相关; 弥茨河除雨季 COD 外,其它指标在全年与降雨量均呈正相关,其中雨季 TP 与降雨量在 0.05 的显著性水平下呈显著正相关. 由图 7 可知,各水质指标与降雨量的回归方程斜率大小均为:旱季 > 雨季,表明水质受降雨量

的影响在旱季强于雨季,这同上述土地利用-水质关系的季节性效应一致。

## 3 讨论

### 3.1 土地利用类型组分与入湖河流水质的关系

不同的土地利用类型通过影响流域水文循环、水土流失及污染物迁移转化,最终影响水环境质量,河流水质与土地利用类型组分的响应关系在大量研究中已得到证实<sup>[1,3,16,18]</sup>. 研究表明表征土地利用类型组分的平均坡度(SLOPE)和植被区面积百分比(VEG),与入湖河流 TN、TP 存在显著负相关. 植被区面积(VEG)越大,越有利于水质净化<sup>[13,21]</sup>; 而农业用地(AGR)、建设用地(CON)等与水质关系密切的地类<sup>[19,23]</sup>并未出现在回归方程中,其原因是研究区土地利用类型的构成中植被面积比(VEG)接近 50%,为优势地类,掩盖了这两种地类的作用. 目前关于平均坡度(SLOPE)与水质的关系未形成统一认识<sup>[18,23,31,32]</sup>, Kang 等<sup>[18]</sup>和 Sliva 等<sup>[31]</sup>认为平均坡

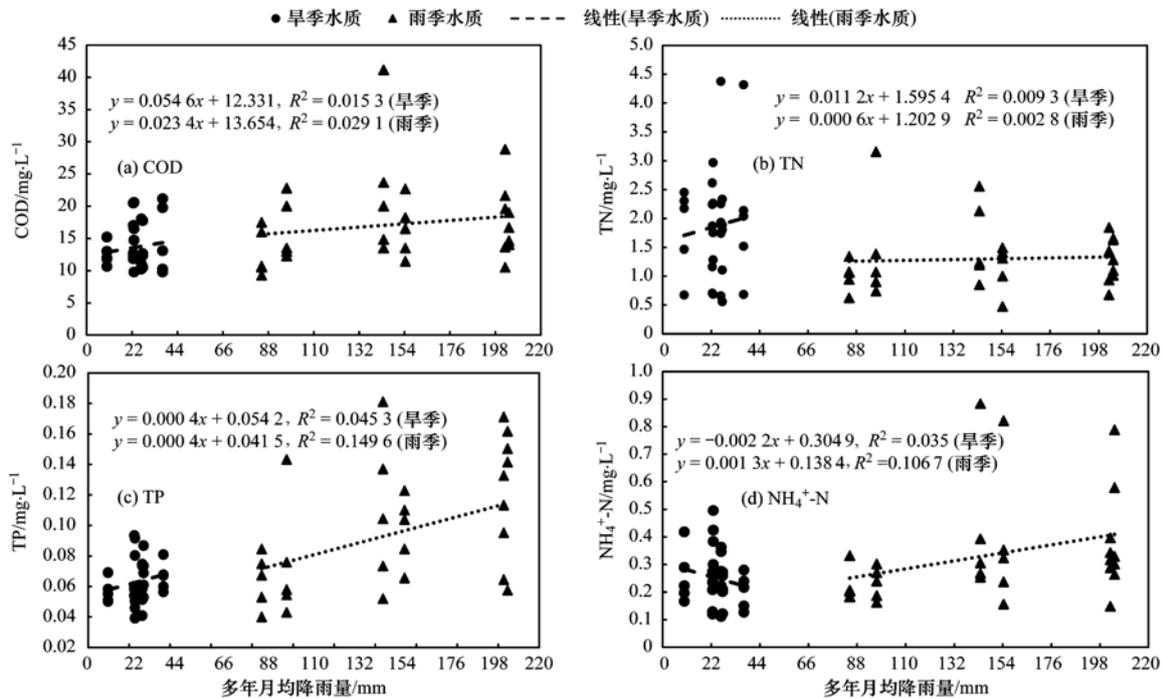


图 7 入湖河流水质与降雨量的季节性关联

Fig. 7 Relationship between in-flow water quality and precipitation in different seasons

度(SLOPE)越陡水土流失越严重,会导致更多污染物进入地表水体,对水质越不利; Yu 等<sup>[23]</sup>和 Chang 等<sup>[32]</sup>则发现当陡坡覆盖有植被时可成为耗氧物质、沉积物、营养盐的汇,有利于水质改善. 该研究则发现平均坡度大,对水质改善有利,这是由于研究区坡度变幅小,整体以小于 15°的中坡为主,水土流失发生率低,另外表 3 中回归方程表明与研究区入湖河流水质响应最强的为土地利用类型,其次为坡度,坡度大的区域土地利用类型多以植被为主(图 2),位于入湖河流的源头区,有利于水质改善,此外坡度大的区域人类活动相对少,水质受干扰小<sup>[23,32]</sup>. 可见为改善入湖河流水质,应提高研究区植被覆盖率,合理控制河流周边区域土地开发利用强度,减少人为活动干扰.

### 3.2 土地利用空间格局与入湖河流水质的关系

大量研究表明除土地利用组成外,河流水质对土地利用的空间分布也有响应<sup>[7,11,13]</sup>. 本研究发现入湖河流 TP 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  与斑块密度(PD)、农业用地斑块密度(PDagr)、水体形状指数(LSIwat)存在回归响应. PD 值反映单位面积上的斑块数量,其值越高,景观越破碎; LSI 值反映景观聚集度, LSI 越大,斑块越离散,形状越不规则<sup>[12,29]</sup>. 景观水平下,入湖河流旱季  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  对斑块密度(PD)存在正响应; 类型水平下,入湖河流雨季 TP 对农业用地斑块

密度(PDagr)存在正响应,旱季  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  对水体形状指数(LSIwat)存在负响应; 可见土地利用空间格局与入湖河流水质的回归关系存在水平差异<sup>[13]</sup>, 类型水平下其对河流水质的解释效应较景观水平好<sup>[7]</sup>. 两者的回归关系是由于农业用地是研究区农业污染的源,多分布在平坝区, PD 值越高农业用地分布越零散,与周边地类连通性越好,污染物进入水体的途径越多,对水质改善越不利; 水体则是污染物的汇,研究区水域包括小型湖泊和河流,分布较离散, LSI 值越高表明水体受人为破坏越小,自然净化能力越强<sup>[29]</sup>. 建议相关部门在进行土地利用规划与调控时,尽量提高农业用地集约化程度,同时避免对区域内水体,如河道和库塘等进行取直硬化等人为干扰.

### 3.3 土地利用与入湖河流水质关系的季节性效应

土地利用通过改变水文循环最终影响河流水质,目前的研究表明土地利用与入湖河流水质响应关系随季节变化而不同<sup>[7,14,22,23]</sup>. Shen 等<sup>[7,14]</sup>的研究认为对土地利用和入湖河流水质关系的研究应以雨季为主,此时因降雨作用土地利用与水体的联系更密切; Pratt 等<sup>[17]</sup>进行两者耦合关系的模拟研究,发现选取水质指标浓度值高的时段更具代表性; Ahearn 等<sup>[15]</sup>、Li 等<sup>[22]</sup>、Yu 等<sup>[23]</sup>对两者耦合关系在雨季和旱季均进行了研究,发现两者关系存在季节性差异. 该研究时段包括旱季和雨季,结果表明:

雨季 TN 与平均坡度(SLOPE)呈负相关, TP 与农业用地斑块密度(PDagr)呈正相关; 旱季 TN、TP 与植被区面积百分比(VEG)呈负相关,  $\text{NH}_4^+$ -N 与斑块密度(PD)和水体形状指数(LSIwat)呈正相关, 总体而言旱季入湖河流水质对土地利用的响应关系更强<sup>[24]</sup>, 这同其与降雨量的关系在旱季强于雨季一致, 是由于影响入湖河流水质的因素包括自然因素和人为因素<sup>[21,32]</sup>, 雨季降雨和地形因子等自然因素为主导, 旱季人类活动对土地利用格局的干扰占主导, 土地利用作为人类活动的产物之一, 其对河流水质的影响在旱季更显著, 可见进行非点源污染治理时尤其应加强旱季河流周边人类活动干扰管控。

#### 4 结论

(1) 土地利用类型组成与入湖河流 TN 和 TP 关系显著, 关键因子为平均坡度(SLOPE)、植被区(VEG)面积百分比; 土地利用空间格局与入湖河流 TP 和  $\text{NH}_4^+$ -N 关系显著, 关键因子为斑块密度(PD)、农业用地斑块密度(PDagr)、水体形状指数(LSIwat)。

(2) 相较于景观水平, 类型水平下入湖河流水质对土地利用空间格局响应关系更强。类型水平下对土地利用空间格局响应的水质指标为雨季 TP 和旱季  $\text{NH}_4^+$ -N, 而景观水平下与其响应的水质指标只有旱季  $\text{NH}_4^+$ -N。

(3) 就季节效应而言, 入湖河流水质对土地利用的响应关系在旱季较雨季强, 其受降雨量的影响在旱季更大。旱季 TN、TP、 $\text{NH}_4^+$ -N 均与土地利用存在响应关系, 而雨季只有 TN、TP 与土地利用存在响应关系。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Shen Z Y, Qiu J L, Hong Q, *et al.* Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2014, **493**: 138-146.
- [ 2 ] Ouyang W, Huang H B, Hao F H, *et al.* Synergistic impacts of land-use change and soil property variation on non-point source nitrogen pollution in a freeze-thaw area [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2013, **495**: 126-134.
- [ 3 ] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, *et al.* Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408** ( 8 ): 1971-1978.
- [ 4 ] 倪兆奎, 王圣瑞, 赵海超, 等. 洱海入湖河流水体悬浮颗粒物有机碳氮来源特征 [ J ]. *环境科学研究*, 2013, **26** ( 3 ): 287-293.
- [ 5 ] 张闻涛, 邢奕, 卢少勇, 等. 入洱海河流临湖段底泥氮的分布 [ J ]. *环境科学研究*, 2015, **28** ( 2 ): 213-218.
- [ 6 ] Zhou P, Huang J L, Pontius Jr P G, *et al.* New insight into the correlations between land use and water quality in a coastal watershed of China: does point source pollution weaken it? [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 591-600.
- [ 7 ] Shen Z Y, Hou X S, Li W, *et al.* Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing [ J ]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, **123**: 96-107.
- [ 8 ] Seeboonruang U. A statistical assessment of the impact of land uses on surface water quality indexes [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **101**: 134-142.
- [ 9 ] 孙芹芹, 黄金良, 洪华生, 等. 九龙江流域城镇建设用地与河流水质关系研究 [ J ]. *环境科学*, 2011, **32** ( 10 ): 2849-2854.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Uuemaa E, Mander Ü, Marja R. Trends in the use of landscape spatial metrics as landscape indicators: a review [ J ]. *Ecological Indicators*, 2013, **28**: 100-106.
- [ 12 ] Aguilera F, Valenzuela L M, Botequilha-Leitão A. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area [ J ]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, **99** ( 3-4 ): 226-238.
- [ 13 ] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响 [ J ]. *环境科学*, 2012, **33** ( 3 ): 794-801.
- [ 14 ] Shen Z Y, Hou X S, Li W, *et al.* Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China [ J ]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 417-427.
- [ 15 ] Ahearn D S, Sheibley R W, Dahlgren R A, *et al.* Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2005, **313** ( 3-4 ): 234-247.
- [ 16 ] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2002, **66** ( 4 ): 377-393.
- [ 17 ] Pratt B, Chang H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **209-210**: 48-58.
- [ 18 ] Kang J H, Lee S W, Cho K H, *et al.* Linking land-use type and stream water quality using spatial data of fecal indicator bacteria and heavy metals in the Yeongsan river basin [ J ]. *Water Research*, 2010, **44** ( 14 ): 4143-4157.
- [ 19 ] Wan R R, Cai S S, Li H P, *et al.* Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiaoxi River Watershed, China [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **133**: 1-11.
- [ 20 ] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 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[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [21] Li S Y, Gu S, Tan X, *et al.* Water quality in the upper Han River basin, China: the impacts of land use/land cover in riparian buffer zone[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **165**(1-3): 317-324.
- [22] Li S Y, Xia X L, Tan X, *et al.* Effects of catchment and riparian landscape setting on water chemistry and seasonal evolution of water quality in the upper Han River basin, China[J]. *PLoS One*, 2013, **8**(1): e53163.
- [23] Yu S Y, Xu Z X, Wu W, *et al.* Effect of land use types on stream water quality under seasonal variation and topographic characteristics in the Wei River basin, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **60**: 202-212.
- [24] 付斌, 刘宏斌, 鲁耀, 等. 高原湖泊典型农业小流域氮、磷排放特征研究——以凤羽河小流域为例[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2892-2899.
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 210-281.
- [26] 国土资发[2001]255号, 全国土地分类(试行)[S].
- [27] 王永信, 张成才, 刘丹丹, 等. 基于 ArcGIS 9.0 的 DEM 的生成及坡度分析[J]. 气象与环境科学, 2007, **30**(2): 48-51.
- [28] Meneses B M, Reis R, Vale M J, *et al.* Land use and land cover changes in Zêzere watershed (Portugal)-water quality implications[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 439-447.
- [29] 郑新奇, 付梅臣, 姚慧, 等. 景观格局空间分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. 203-206.
- [30] 张红兵, 贾来喜, 李璐. SPSS 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. 242-244, 277-282.
- [31] 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.
- [32] Chang H. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea[J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3285-3304.

## CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China .....	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China .....	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date .....	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang .....	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain .....	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City .....	..... SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case .....	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin .....	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH <sub>3</sub> and N <sub>2</sub> O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation .....	..... FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons .....	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir .....	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed .....	..... WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai .....	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River .....	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream .....	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	..... CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area .....	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region .....	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China .....	..... WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River .....	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland .....	WANG Qi-dong, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers .....	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands .....	..... ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce <sup>3+</sup> and Cu <sup>2+</sup> Ions .....	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor .....	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol .....	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO <sub>2</sub> in Aqueous Solution .....	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater .....	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor .....	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment .....	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia .....	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition .....	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid .....	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province .....	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics .....	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties .....	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method .....	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions .....	..... ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges .....	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions .....	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid .....	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization .....	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA .....	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance .....	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils .....	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行