

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_{2.5}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(NH₃和N₂O)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CO₂、CH₄和N₂O通量的观测 吴建国,周巧富 (2914)

三峡库区香溪河秋末至中冬CO₂和CH₄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)

甯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的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)

Ce³⁺与Cu²⁺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-TiO₂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)

聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu²⁺、Zn²⁺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)

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¹, 黄志霖^{1,2*}, 肖文发¹, 曾立雄¹, 韩黎阳¹

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: 基于三峡库区兰陵溪小流域退耕还林后土地利用结构变化分析, 结合 2015 年汛期流域氮素养分输出监测数据, 利用逐步回归定量分析土地利用结构特征对氮素输出的控制效应. 结果表明: ①退耕还林工程小流域土地利用结构发生改变, 林地、园地面积比例分别增加到 76.85% 和 13.87%, 园地多以茶园单一类型片状分布, 耕地面积比例锐减至 1.16%, 且零星分布于林地、园地之间. ②小流域部分监测点总氮浓度超过国家 V 类地表水水质标准, 各监测点铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)和总氮(TN)输出浓度分别为 0.089~0.214 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2.925~13.203 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以及 3.561~14.572 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 硝态氮输出浓度占总氮比例超过 80%. ③集水区氮素输出浓度与园地和住宅用地极显著正相关, 与林地、未利用地则成极显著负相关, 住宅用地和园地类型是主要的氮素输出源. ④小流域土地利用结构调整应优先增加林地, 适当控制园地发展, 且将住宅用地面积比例控制在 5% 以下, 并通过林茶、林果间作等方式改变小流域部分园地单一类型片状分布格局.

关键词: 三峡库区; 退耕还林; 土地利用; 面源污染; 氮素输出

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-2940-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.015

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 Dong¹, HUANG Zhi-lin^{1,2*}, XIAO Wen-fa¹, ZENG Li-xiong¹, HAN Li-yang¹

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The nitrogen (N) output in Lanlingxi watershed of Three Gorges Reservoir Area in 2015 was monitored and the current land use map was investigated. Cluster analysis and correlation analysis were used to identify the major sources of pollutants and to discriminate the source and the sink land use types. The effects of land use on N exports were quantitatively analyzed by stepwise regression analysis. The results showed that: ① After the returning farmland to forest project the land use structure of this area changed dramatically. The area proportions of forest land and garden plot increased to 76.85% and 13.87% respectively, and the proportion of cultivated land dropped to 1.16%. Cultivated lands were stellate distributed and garden plots in some catchments were flake distributed. ② The content of TN in some monitoring points surpassed the Class V standard of the national groundwater environmental quality. The ammonium-N (NH_4^+-N) concentrations ranged 0.089-0.214 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2.925-13.203 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for nitrate-N (NO_3^--N) and 3.561-14.572 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for total-N (TN). And NO_3^--N accounted for more than 80% of TN. ③ There were significant positive correlations between garden plot, residential land and N loss, and negative correlations between forest land, unutilized land and N export, which indicated that the former were N sources and the latter were sinks. ④ Forest land area should be increased and garden plot should be controlled, and the area ratio of residential land should be kept below 5% when adjusting land use structure of this watershed. Moreover, forest-tea and forest-fruits modes should be applied to change single land use type of garden plot in some catchments.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; returning farmland to forest; land use; non-point pollution; nitrogen output

三峡库区是我国生态环境敏感区和脆弱区, 被列为全国水土保持极重要区域和重要水源涵养区^[1-3]. 2000 年以来三峡水库库区范围内实施退耕还林工程和库周绿化等工程, 原来以坡耕地为主体转变为耕地、园地(茶园、果园)和林地等多种土地利用类型坡面空间配置镶嵌景观. 2002 年兰陵溪小

流域开始实施坡耕地退耕还林工程, 坡改梯、免耕、

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B04); 国家自然科学基金项目(31370481)

作者简介: 吴东(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用及其生态环境效应, E-mail: wudong901116@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hzlin66@163.com

缓冲带等生态防护工程也得以逐步实施,流域自上而下逐步形成生态公益林带、生态经济林带和沿江景观防护林带的“三带”分布模式,小流域土地利用结构发生显著改变.面源污染物输出与土地利用存在密切关系,流域土地利用结构改变对径流氮磷养分输出具有重要影响,氮磷输出负荷与土地利用方式紧密相关^[4-7],土地利用不同所造成的农业面源污染差异巨大^[8,9].

兰陵溪小流域为全国退耕还林科技支撑试验示范区,在三峡库区沿江低山丘陵区退耕还林土地利用变化具有典型代表意义.三峡库区主要土地利用类型的养分输出特征等已有较为系统的样地监测与分析,研究结果表明,林地、园地和耕地的土壤养分流失量存在显著性差异,总磷主要以颗粒态输出,随地表径流输出总磷量所占比例只有 1.6%,氮素输出中硝态氮占主要部分,且硝态氮主要流失途径为地表径流,通过径流输出的硝态氮所占比例高达 91.4%^[10,11].本研究利用 ArcGIS 空间分析在集水区尺度上通过监测不同土地利用结构模式下的土壤养分输出特征分异,揭示小流域氮素输出与土地利用结构之间的关系,对进入流域水体污染物的主要来源加以识别,以期为库区小流域土地利用结构调整以及农业面源污染控制提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域兰陵溪小流域(110°56'E, 30°50'N)位于湖北省秭归县境内,距离三峡大坝 17 km 左右,面积 144 hm².亚热带大陆季风气候,近 50 年平均降水量为 991.90 mm,年际差异较大,季节分布不均,降雨主要集中在 5~9 月,约占全年降雨量的 70%^[12].小流域土壤多为花岗岩母质出露发育而成的石英砂土,保水保肥性较差.

小流域地势西高东低,最高海拔 2 056 m,最低 40 m.海拔 500 m 以上生态公益林带植被覆盖率为 72.5%,以马尾松(*Pinus massoniana*)次生林和松栎(*Pinus* and *Quercus*)混交林等为主,间有灌木林、荒草地夹杂.中部生态经济林带(海拔 200~500 m)地势较为平缓,用地类型多样,以园地和耕地为主,多种植茶(*Camellia sinensis*)、柑橘(*Citrus reticulata* Blanco)等经济作物,少量花生(*Arachis hypogaea*)和玉米(*Zea mays*)等农作物间作,形成区域特色的农林景观间作地带,居民宅基地主要分布于此区域.海拔 200 m 以下沿江景观防护林带多为刺槐

(*Robinia pseudoacacia*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柏木(*Cupressus funebris*)等树种,低山缓坡台地以植茶为主.

1.2 研究方法

1.2.1 集水区划分及监测点布设

采用 2014 年兰陵溪小流域 1:1 万 5 m 等高距地图作为基本地形信息数据源,按照相关技术规程对等高线高程进行赋值,利用 ArcView GIS 双线性内插重采样法生成 5 m × 5 m 格网 DEM,并通过 ArcGIS 水文分析模块对小流域集水区进行划分^[13,14],划分结果如图 1 所示.在小流域干流及 6 条支流共布设 9 个集水区监测点,其中 S2、S3、S4、S5、S6、S7 位于各支流出水口处,S9 为小流域出水口控制整个流域.考虑到流域的“三带”分布模式,在干流增设 S1 和 S8 两个监测点,分别位于生态公益林带和生态经济林带下游.

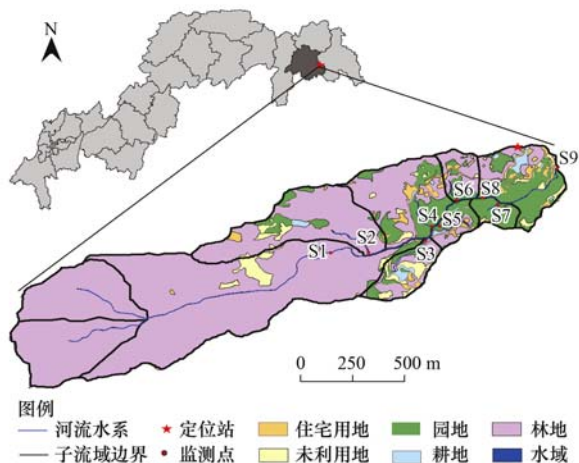


图 1 兰陵溪小流域采样点分布及土地利用分类

Fig. 1 Distribution of sampling sites and classifications of land use in the Lanlingxi watershed

1.2.2 土地利用获取及各集水区土地利用结构分析

以分辨率为 0.65 m 的 QUICK BIRD 数据(时相:2014 年 9 月)为底图,利用 ERDAS 9.2 对影像进行辐射校正、几何校正、影像配准,并进行人机交互解译,按照《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2007)将小流域划分 6 大类,即林地、园地、耕地、住宅用地、水域和未利用地.在影像上均匀选取了涵盖各土地利用类型的 50 个控制点进行野外效验以保证分类精度.评价结果 Kappa 系数为 0.85,满足本试验要求.

1.2.3 水样采集与分析

水样采集时间为 2015 年 5 月~9 月,每次各监测点均采集水样 3 瓶(每瓶 500 mL),S3 等采样点

共发生流降雨 15 次, 共计采集水样 405 个. S9 为流域出口, 设置水位自动监测仪以记录实时水位变化, 每日采集水样并分析以获得养分日变化数据. 用聚乙烯瓶(稀酸浸泡、蒸馏水洗净)将水样带回秭归生态定位站实验室, 及时测定水样中总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)质量浓度. TN 测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, 水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后通过意大利产 Smartchem140 型化学间断分析仪测定 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 质量浓度, 所有测定方法均参照标准方法进行^[15].

1.2.4 数据分析

以集水区各次水样养分测定结果均值作为该集水区汛期养分输出特征值, 比较各集水区之间氮素养分输出差异(LSD 法), 将各监测点养分指标浓度进行聚类分析(Ward's 法和 squared Euclidean distance 法), 识别各集水区养分输出特征空间差异及氮素养分输出的主要来源, 并对聚类后各类集水区土地利用结构在氮素养分控制方面的作用加以分析.

对集水区氮素养分指标与土地利用类型面积比例进行相关分析(Pearson 相关分析), 探索养分输出与土地利用结构间的相关关系, 根据相关系数正负划分氮素养分输出的“源”、“汇”土地利用类型.

以氮素养分质量浓度为因变量, 以 6 种不同土地利用面积比例为自变量进行逐步回归分析, 筛选变量建立最优回归模型, 进一步确认小流域氮素养分输出主要来源. 本文采用指数模型来表征土地利用结构对氮素养分输出的影响^[16,17] [式(1)], 即:

$$\text{NPS}_i = \alpha \times \exp(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6) \quad (1)$$

式中, α 为系数, $\beta_1 \sim \beta_6$ 分别为各种土地利用类型面积比例与相应养分指标间的相关性, 若 β_i 为正或负, 则表示该土地利用类型为养分输出过程的“源”或“汇”, $X_1 \sim X_6$ 分别表示林地、耕地、园地、住宅用地、未利用地和水域面积比例. 在利用多元逐步回归分析计算土地利用结构对氮素养分输出浓度影响时, 影响最大的用地类型率先进入方程, 且只有具有统计显著性的变量才会进入模型.

本研究应用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件统计与分析数据, 并使用 Sigmaplot 12.5 软件作图.

2 结果与分析

2.1 土地利用结构状况

多种土地利用类型构成异质景观对土壤养分的

分布和迁移产生影响^[18]. 兰陵溪小流域各集水区内土地利用类型面积比例如图 2 所示. 退耕还林工程以前, 小流域土地利用以耕地为主, 类型单一, 退耕后林地成为流域内最大面积的地类, 占流域总面积的 76.85%, 园地是第二大用地类型, 面积比例为 13.87%, 耕地面积锐减, 仅占总面积的 1.16%. 未利用地、住宅用地和水域分别占流域总面积的 4.54%、2.85% 和 0.73%.

S1 集水区内林地面积比例最大(97.05%), 无耕地和园地类型, 可被视作单一林地类型, 该区域以亚热带常绿和落叶阔叶混交林等自然植被为主, 郁闭度高于 95%. S2 集水区内林地占较高比例, 住宅用地、耕地和荒地面积较小且零星分布, 园地面积占一定比例, 为 9.86%. S3 集水区土地利用类型较多且交错分布, 林地面积比例相对较小(43.50%), 园地和未利用地占比较大(分别为 19.66% 和 24.75%), 流域内未利用地以草地为主, 包括少量裸地. S4 和 S5 集水区有较多的住宅用地分布且靠近溪流, S5 住宅用地比例较高(20.78%), S4 集水区园地面积比例相对较大(20.91%). S6 和 S7 集水区内园地比例较大, S7 几乎可以认为是单一的园地类型(园地面积比例高达 87.16%, 且多为茶园地), 且呈明显的片状分布格局. S8 集水区土地利用结构由上到下依次为林地、居民住宅用地和园地, S9 为流域出口, 土地利用结构与 S8 相似, 只是在下游耕地面积和斑块数量上有所增加.

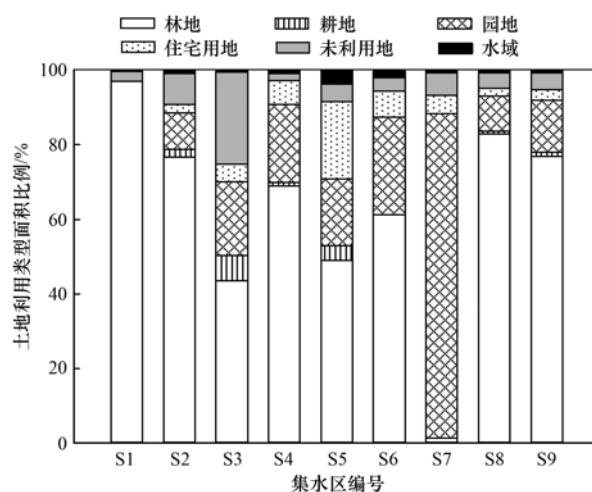


图 2 集水区各种土地利用类型的面积比例

Fig. 2 Area proportions of various types of land use in each catchment

2.2 集水区氮素养分输出特征

小流域各监测点汛期氮素养分质量浓度状况如图 3 所示, 养分输出差异较大. NH_4^+ -N 浓度变化范围

在 $0.089 \sim 0.214 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 位于溪流下游的 S5 ~ S9 明显高于上游的 S1 ~ S4, S5、S6 浓度远高于其他监测点, 分别为 $0.214 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.212 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。住宅用地和园地面积比例较大的 S5 集水区 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最高, 为 $13.203 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远高于其他集水区浓度, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度最低出现在 S1 集水区, 为 $2.925 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。TN 浓度变化规律与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 基本一致, S1 最小, S5 最大, 变化范围为 $3.561 \sim 14.572 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。小流域 TN 输出浓度偏高, 部分监测点甚至超过国家规定的 V 类地表水水质标准^[19]。各监测点氮素流失过程中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占 TN 的绝大部分, 变动范围为 $80.23\% \sim 90.61\%$, 因此可以认为该流域水体中氮素主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 形式输出。

2.3 集水区土地利用结构对氮素养分输出影响

对小流域氮素输出浓度与各种土地利用类型面积比例进行 Pearson 相关分析 ($n = 405$), 结果见表 1。林地、未利用地面积比例与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN 呈负相关关系, 其中林地与 3 种养分浓度之间、未利用地与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TN 间相关性达到极显著水平 ($P < 0.01$), 园地、住宅用地和水域与 3 种氮素养分相关性极显著, 相关系数大小关系均为住宅用地最大, 园地最小, 水域居中, 这表明居民区对小流域氮素输出贡献最大。林地和未利用地表现为氮素输出“汇”, 住宅用地和园地表现为氮素输出“源”。

氮素养分输出浓度与各种土地利用类型面积比例逐步回归分析结果见表 2, 住宅用地和园地地类面积所占比例是控制氮素输出的主要因素。对于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TN 而言, 住宅用地和园地对其输出浓度都有显著影响, 与兰陵溪小流域主要氮素源为居民生活污水和园地耕作施肥一致。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 输出浓度与住宅用地和园地面积比例显著相关, 但调整后 R^2 为各回归方程的最低值 (0.112), 二者对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 输出的解释程度小, 方程拟合效果较差。

表 1 土地利用类型与氮素输出浓度相关分析¹⁾

Table 1 Pearson correlation analysis between land use types and nitrogen output concentration

养分指标	林地	耕地	园地	住宅用地	未利用地	水域
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	-0.271 **	0.006	0.228 **	0.311 **	-0.055	0.307 **
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	-0.457 **	0.048	0.357 **	0.696 **	-0.172 **	0.654 **
TN	-0.481 **	0.047	0.384 **	0.676 **	-0.153 **	0.630 **

1) ** 表示显著性水平为 0.01

2.4 集水区氮素输出差异

对各集水区氮素浓度进行差异性分析, 多重比较 (LSD 法) 结果显示 TN 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 规律一致, 除 S4 与 S8 差异不显著、S6 与 S7 差异不显著之

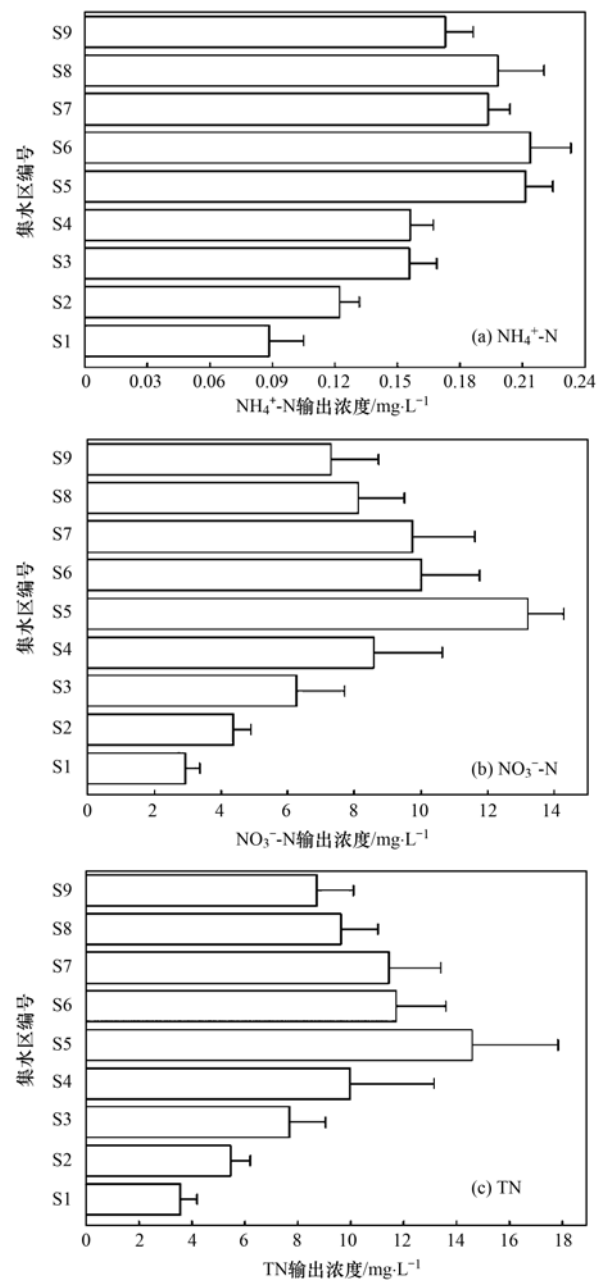


图 3 各监测点氮素输出浓度特征

Fig. 3 Nitrogen output concentration characteristics of each monitoring point

外, 其他各处间养分浓度均呈现出显著差异 ($P < 0.05$), 而 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 分析结果更为复杂, 对集水区各项氮素指标空间聚类分析和各类别的总体分析。

表 2 土地利用类型与氮素养分输出的逐步回归分析

Table 2 Stepwise multiple linear regression analysis between land use types and nitrogen concentration

养分指标	回归方程	R^2	P
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\ln(\text{NH}_4^+ - \text{N}) = -2.109 + 0.026X_4 + 0.003X_3$	0.112	<0.001
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\ln(\text{NO}_3^- - \text{N}) = 1.507 + 0.50X_4 + 0.007X_3$	0.536	<0.001
TN	$\ln(\text{TN}) = 1.713 + 0.045X_4 + 0.007X_3$	0.521	<0.001

树状图清晰反映了集水区分类情况,总体上,9个集水区大致可以分为3类,且3类间各种氮素养分浓度均有显著差异,依照组别间受人为活动影响程度的差异对各类别加以定义(图4、表3)。第I类土地利用结构方面林地面积超过85%,耕地和园地面积小,园地和住宅用地面积之和在5%左右,其他用地类型面积不足10%(表4)。受人为活动影响小,氮素养分输出浓度低;第II类园地面积比例相比于第I类有较大增加,林地比例约70%,园地和住宅用地约为20%且住宅用地面积小于5%,其他地类约占10%,该类受到一定农事活动和居民生活的影响,氮素养分输出浓度较第I类高;第III类住宅用地和园地面积比例较前两类有较大增加,该类林地面积比例小于40%,园地和住宅用地比例超过50%,其他类型占比仍维持在10%左右,受农事活动以及居民生活影响最大,氮素输出最为严重, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度超过集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值,TN浓度超过V类地表水水质标准^[19]。

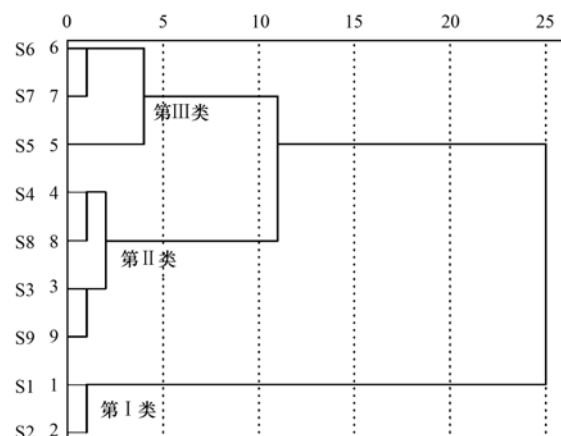


图 4 各集水区养分指标空间聚类分析结果

Fig. 4 Spatial cluster analysis of nutrient index of all catchments

表 3 3类集水区的氮素输出平均浓度¹⁾

Table 3 Mean concentrations of nitrogen output in three types of catchments

类别	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
第I类	0.105 ± 0.024a	3.647 ± 1.021a	4.503 ± 1.333a
第II类	0.171 ± 0.020b	7.565 ± 1.016b	8.999 ± 1.022b
第III类	0.206 ± 0.011c	10.988 ± 1.923c	12.578 ± 1.733c

1) 同一列不同字母表示相同处理间差异显著, $P < 0.05$, LSD 检验

表 4 3类集水区不同土地利用类型的面积比例

Table 4 Area proportions of different types of land use in three types of catchments

类别	林地/%	耕地/%	园地/%	住宅用地/%	未利用地/%	水域/%
第I类	86.840	1.035	4.930	1.155	5.375	0.665
第II类	68.063	2.415	15.990	4.048	8.775	0.710
第III类	37.167	1.307	43.767	10.877	4.720	2.163

3 讨论

3.1 流域土地利用类型源汇功能分析

小流域未利用地包含草地和少量裸地,受人为干扰程度小,草地与林地改善水质方面起到重要作用,能够有效减少氮磷养分输出,有利于控制流域水体富营养化和水环境的修复与保护^[20-23]。各种氮素输出浓度与未利用地类型呈负相关且达到极显著水平,未利用地是氮素输出“汇”功能类型。林地、未利用地与氮素输出浓度负相关,且相关性极显著,但是在逐步回归时却未能进入回归方程,与罗璇等^[24]在丹江口市胡家山小流域的研究结果相似。这可能与小流域土地利用空间结构有关,小流域内

林地、未利用地等汇用地类型大多分布于离河岸较远的位置以及河流的上游地带,河岸两边多为居民住宅住地以及便于灌溉和管理的园地、耕地等源类型,因此导致源用地类型的氮素输出占据主导地位。

由于农耕地人为管理活动频繁,施肥量大,地块尺度上,农耕地单位面积氮磷养分年输出量远超其他土地利用类型^[11]。但在集水区尺度,氮素输出浓度与耕地面积比例间相关性较弱,退耕还林工程后耕地面积大幅度缩减及耕地零星分布可能是导致这一结果的原因。退耕还林后,大面积坡耕地转变为茶园、果园和林地等多种类型,剩余耕地点状分布于林地、园地之间,形成镶嵌分布格局^[25],因此弱化了农耕地面源污染输出,导致耕地对小流域氮素

输出贡献值降低。流域内园地主要包括茶园和柑橘园两种, 面积较大, 且多为片状分布(以 S7 为代表)。园地农药化肥施用量大, 但作物对氮肥的利用率低^[26], 导致园地成为除住宅用地以外最大的氮素输出源类型。在推广精准化施肥降低氮素输入量之外, 应通过林茶、林果间作等方式改变部分园地单一类型片状分布, 从源头上有效控制面源污染物的产生^[27,28]。

小流域氮素输出与住宅用地极显著正相关, 逐步回归分析显示住宅用地是小流域面源污染的重要污染源, 这与於梦秋等^[29]研究结果相似。居民区生活污水以及禽畜养殖粪便等的直接排放进入水体是直接原因, 应加强农村生活污水处理以及禽畜粪便处理技术的应用。氮素养分输出与土地利用类型逐步回归分析时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 输出方程拟合度低, 拟合效果差, 这与前期研究结果小流域氮素输出以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度极小一致^[11]。

3.2 流域土地利用结构与氮素输出

自 2000 年退耕还林以来, 柑橘和茶叶收入成为当地居民主要经济来源, 更多的农耕地甚至板栗林地被改造为园地^[30]。退耕还林工程实施后形成的“三带”分布模式中, 生态公益林带和沿江景观防护林带并不会为居民带来直接经济收入, 只有生态经济林带能够产生经济效益, 因此园地面积比例决定了小流域的经济收益高低。从第 I 类到第 III 类园地面积比例由低到高排列, 经济收益也按此顺序排列。

根据聚类分析结果, 第 I 类土地利用结构对氮素输出控制效应最好, 能最大程度减少汇入小流域的氮素负荷, 生态效益最高。第 III 类氮素控制效应最差, 氮素输出浓度超标, 面源污染风险高。第 II 类氮素养分浓度控制在相对较低水平, 小流域生态效益得到较好的保证。

综合考虑小流域生态效益和当地居民经济收益, 结合土地利用类型的源汇分析结果, 第 II 类应成为小流域土地利用结构调整所追求的方向。由表 4 可以看出, 第 II 类林地面积约占 70%, 园地和住宅用地面积比例约为 20%, 其他地类总共占 10%, 且作为流域最大氮素源类型的住宅用地面积比例不足 5%, 即林地、园地和住宅用地、其他用地类型面积比例大约维持 7:2:1, 由于住宅用地是流域最大的氮素源类型, 其面积比例应控制在 5% 以下。

4 结论

(1) 退耕还林工程实施以来兰陵溪小流域土地

利用结构发生改变, 林地和园地面积比例显著增加, 且园地多以茶园单一类型片状分布, 耕地面积锐减, 多零星分布于林地、园地之间。

(2) 小流域部分监测点总氮浓度超过国家 V 类地表水水质标准, 其中又以硝态氮为主要输出形式, 其输出浓度占总氮输出的 80% 以上, 在面源污染防治过程中应以控制硝态氮输出为重点。

(3) 集水区氮素输出浓度与园地和住宅用地极显著正相关, 与林地、未利用地则成极显著负相关, 住宅用地和园地类型是主要的氮素输出源。

(4) 小流域土地利用结构调整模式应优先增加林地, 适当控制园地发展, 且将住宅用地面积比例控制在 5% 以下, 并通过林茶、林果间作等方式改变小流域部分园地单一类型片状分布格局。

参考文献:

- [1] 金慧芳, 韦杰, 贺秀斌. 三峡库区面向水土保持的土地利用模式[J]. 中国水土保持, 2011, (10): 36-38.
- [2] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 三峡库区蓄水运行前后水土流失时空变化模拟及分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 429-434.
- [3] 吴炳方, 刘远新, 臧小平, 等. 三峡工程建设期库区生态环境保护措施及效果评价[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 276-282.
- [4] 陈利顶, 李俊然, 郭旭东, 等. 蜀运河流域地表水质时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 61-64.
- [5] Castillo M M, Allan J D, Brunzell S. Nutrient concentrations and discharges in a Midwestern agricultural catchment[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4): 1142-1151.
- [6] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 129-138.
- [7] Zhu B, Wang Z H, Wang T, et al. Non-point-source nitrogen and phosphorus loadings from a small watershed in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 10-15.
- [8] Carey R O, Migliaccio K W, Li Y C, et al. Land use disturbance indicators and water quality variability in the Biscayne Bay Watershed, Florida [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(5): 1093-1104.
- [9] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2013-2021.
- [10] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3390-3396.
- [11] 吴东, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3825-3831.
- [12] 曾立雄. 三峡库区兰陵溪小流域养分的分布、迁移与控制研

- 究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [13] CH/T 1015.2-2007, 基础地理信息数字产品 1: 10 000 1: 50 000生产技术规程 第2部分: 数字高程模型(DEM)[S].
- [14] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 等. DEM 网格尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(4): 846-853.
- [15] US EPA. Environmental indicators of water quality in the United States [R]. EPA 841-R-96-002. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1996.
- [16] 郭青海, 马克明, 杨柳. 城市非点源污染的主要来源及分类控制对策[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2170-2175.
- [17] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, *et al.* Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries [J]. *Environmental Management*, 1999, **23**(4): 539-549.
- [18] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 946-954.
- [19] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [20] 王琼, 姜德娟, 于靖, 等. 小清河流域氮磷时空特征及影响因素的空间与多元统计分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(2): 137-145.
- [21] 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 等. 南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2920-2927.
- [22] 周林飞, 郝利朋, 孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 737-742.
- [23] Miserendino M L, Casaux R, Archangelsky M, *et al.* Assessing land-use effects on water quality, in-stream habitat, riparian ecosystems and biodiversity in Patagonian northwest streams[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(3): 612-624.
- [24] 罗璇, 史志华, 尹炜, 等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 58-62.
- [25] 潘磊, 唐万鹏, 肖文发, 等. 三峡库区不同退耕还林模式林地水文效应[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(5): 103-106, 112.
- [26] 崔玉亭. 化肥与生态环境保护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 25-30.
- [27] 阴晓路, 许昌敏, 张梦娇, 等. 贵州红枫湖大冲小流域农业面源污染负荷特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 349-354.
- [28] 陈玉东, 陈梅, 张龙江, 等. 基于 GIS 的龙墩水库典型小流域面源污染氮磷负荷研究[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(4): 492-499.
- [29] 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): 1024-1032.
- [30] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区不同退耕还林模式水土流失特征及其影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 2014, **23**(1): 146-152.

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 _{2.5} 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 ₃ and N ₂ 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 ₂ , CH ₄ and N ₂ 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 ³⁺ and Cu ²⁺ 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 ₂ 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 ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -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