

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化	薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)
北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源	周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)
利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布	刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)
兰州城区大气 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)
成都市西南郊区春季大气 PM _{2.5} 的污染水平及来源解析	林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晚芬(1629)
中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征	刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)
固定源排放污染物健康风险评价方法的建立	陈强,吴焕波(1646)
北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试	胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)
南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价	王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金花(1662)
CoCuMnO ₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学	孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)
大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化	张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)
典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征	史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)
利用δ ¹⁵ N-NO ₃ ⁻ 和 δ ¹⁸ O-NO ₃ ⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源	赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)
柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析	王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)
三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响	陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)
亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究	王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)
平原河网典型污染物生物降解系数的研究	冯帅,李叙勇,邓建才(1724)
沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例	张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)
苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素	任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)
河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价	王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)
顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价	蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)
台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险	陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)
乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芳宁,张连凯,苏春田(1779)
岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例	王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)
广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素	黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)
基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(<i>Bacteroides</i>) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例	张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)
典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征	梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)
钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成	刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)
天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究	丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)
臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素	董秉直,张佳丽,何畅(1837)
污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析	程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)
HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学	郭俊元,王彬(1852)
放射性废水处理中吸附铀的优势藻种筛选	李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)
微米 Fe ₃ O ₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究	钱旭,王毅力,赵丽(1864)
间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能	宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)
不同灌溉方式对华北平原冬小麦田土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放通量的影响	郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)
卫河新乡市区段春季溶解 CH ₄ 与 N ₂ O 浓度特征	侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)
模拟氮沉降对内蒙古克什克腾草原 N ₂ O 排放的影响	杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)
土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制	曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)
黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局	高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)
耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响	史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)
北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险	赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)
准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析	刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)
纳米 TiO ₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响	张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)
纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学	马少云,祝方,商执峰(1953)
低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响	宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)
粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响	黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)
萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析	王亚男,程立娟,周启星(1978)
高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响	郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)
磺胺抗性消长与堆肥进程交互特征	林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)
《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)	

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响

陈成龙¹, 高明^{1,2,3*}, 倪九派^{1,2,3}, 谢德体^{1,2,3}, 邓华¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715; 3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 作为一个独立汇水单元, 小流域是三峡库区面源污染源头。在三峡库区涪陵段王家沟小流域内选择最具有代表性 3 种土地利用类型布设地表径流监测点, 利用 2014 年 5 ~ 12 月 12 场自然降雨采集地表径流样品, 分析不同土地利用类型及其构成的坡面、子流域氮素流失浓度时空变化特征, 揭示三峡库区小流域不同土地利用类型与氮素流失关系。结果表明, 不同土地利用类型春季作物时期 TN 平均流失浓度差异最大, 旱地分别是桑树套种地、水田的 1.61、6.73 倍; 水田 3 个时期 TN 流失浓度变化最显著。氮素流失以 NO_3^- -N 为主, TN 与 NO_3^- -N 存在显著的线性相关关系。TN、 NO_3^- -N 流失浓度与坡面旱地作物玉米、榨菜面积比显著正相关, 与水稻、桑树面积比显著负相关; NH_4^+ -N 流失浓度与坡面榨菜面积比显著正相关。不同土地利用类型组成坡面中, 桑树套种地与水田组成的坡面 3 个时期 TN 地表径流平均流失浓度最低, 分别为 2.55、11.52 和 8.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 玉米榨菜轮作旱地坡面最高, 分别为 27.51、25.11 和 27.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。子流域不同土地类型和空间组合方式对其 TN 流失浓度影响较大, 合理调整流域土地利用结构和空间布局是三峡库区面源污染源头控制有效措施。

关键词: 小流域; 土地利用类型; 地表径流; 氮素; 流失浓度

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1707-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.015

Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region

CHEN Cheng-long¹, GAO Ming^{1,2,3*}, NI Jiu-pai^{1,2,3}, XIE De-ti^{1,2,3}, DENG Hua¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China; 3. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

Abstract: As an independent water-collecting area, small catchment is the source of non-point source pollution in Three Gorges Region. Choosing 3 kinds of the most representative land-use types and using them to lay monitoring points of overland runoff within the small catchment of Wangjiagou in Fuling of Three Gorges Region, the author used the samples of surface runoff collected through the twelve natural rainfalls from May to December to analyze the feature of spatial-temporal change of Nitrogen's losses concentrations under the influence of different land use types and the hillslopes and small catchments composed by those land use types, revealing the relation between different land-use types and Nitrogen's losses of small catchments in Three Gorges Region. The result showed: the average losses concentration of TN showed the biggest difference for different land use types during the period of spring crops, and the average value of dry land was 1.61 times and 6.73 times of the values of interplanting field of mulberry and paddy field, respectively; the change of the losses concentration of TN was most conspicuous in the 3 periods of paddy field. The main element was NO_3^- -N, and the relation between TN and NO_3^- -N showed a significant linear correlation. TN's and NO_3^- -N's losses concentrations were significantly and positively correlated with the area ratio of corn and mustard, but got a significant negative correlation with the area ratio of paddy and mulberry; NH_4^+ -N's losses concentrations got a significant positive correlation with the area ratio of mustard. Among all the hillslopes composed by different land use types, TN's average losses concentration of surface runoff of the hillslope composed by interplanting field of mulberry and paddy land during the three periods was the lowest, and the values were 2.55, 11.52, 8.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; the hillslope of rotation plough land of corn and mustard had the maximum value, and the values were 27.51, 25.11, 27.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; different land use types and spatial combination ways of subcatchment had a greater influence on TN's losses concentrations, so using a reasonable way to adjust land use structure and spatial arrangement of whole catchment was an effective measure to control the source of non-point source pollution of Three Gorges Region.

Key words: small catchment; land use type; surface runoff; nitrogen; losses concentrations

小流域地表径流和土壤侵蚀引起的氮磷流失是导致水体水质恶化的重要原因, 也是面源污染的重点控制目标^[1,2]。影响面源污染因素很多, 如土壤理化性质、地形地貌、植被覆盖、降雨类型等^[3~6], 在相同母质和气候条件下, 土地利用方式是影响面源

收稿日期: 2015-11-01; 修订日期: 2015-12-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B18); 中央高校基本业务费专项(XDJK2015D020)

作者简介: 陈成龙(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为面源污染、土地利用与生态环境, E-mail: swcel@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoming@swu.edu.cn

污染的主要因素. 近年来, 国内外学者通过人工模拟^[7-9]、径流小区实验^[10-12]以及不同尺度流域观测^[13,14]、模型模拟^[15,16]等方法对土地利用与面源污染关系进行了研究. 这些研究中人工模拟、径流小区实验居多, 自然降雨条件下流域内长期定位观测研究相对较少. 随着我国面源污染控制从过去单一末端治理向源头控制、过程阻截结合技术方式的转变, 流域尺度面源污染研究成为热点. 三峡库区人口多, 耕地少, 土地垦殖率高, 降雨集中, 农业面源污染物极易伴随降雨过程进行迁移、转化, 农业面源污染问题突出^[17]. 作为一个相对独立的汇水单元, 小流域是面源污染发生发展的源头, 研究小流域氮磷流失规律, 从源头控制农田氮磷流失^[18,19], 可有效遏制小流域面源污染在整个流域的蔓延和扩散. 因此, 本研究选取三峡库区涪陵段王家沟小流域为对象, 基于流域内不同土地利用类型的多个坡面地表径流监测点、部分干渠节点和两个子流域出口 2014 年 12 场自然降雨采集数据, 按照春季作物、夏季空闲、秋季作物这 3 个时期对不同土地利用类型及其组合而成的坡面、子流域氮素流失规律进行分析, 探讨三峡库区小流域不同土地利用类型与氮素流失浓度变化关系及其随时间变化规律特征, 以期对三峡库区小流域面源污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于三峡库区涪陵段珍溪镇王家沟小流域 ($E107^{\circ}30'$, $N29^{\circ}54'$), 系长江一级支流. 流域内以低山丘陵为主, 海拔高度 186 ~ 317 m. 属亚热带季风气候, 年均气温 22.1°C , 多年平均降雨量 1 011 mm, 雨季为每年 4 ~ 10 月. 土壤类型主要是紫色土, 土层较厚. 研究区域的气象数据来源于流域西侧 3 km 处重庆市气象局建立的标准气象观测站. 研究区域由有 A、B 两个树状结构子流域组成, 两个出口集水区域面积共 82.34 hm^2 , 其中: 子流域 A 面积 47.21 hm^2 , 子流域 B 面积 35.13 hm^2 . 依据 2012 年 1:1 000 土地利用现状图, 结合 2014 年流域内土地利用变更实地调查, 利用 ArcGIS 10.2 软件, 绘制王家沟小流域 2014 年土地利用现状图 (图 1). 流域内土地垦殖率高, 农作物种植模式较单一, 旱地春季种植玉米秋季轮种榨菜, 水田秋季多轮种榨菜, 桑园春季套种玉米秋季套种榨菜. 根据 2015 年 3 月对王家沟流域问卷调查, 2014 年主要农作物种植、收获及氮肥施用情况分别为: 玉米 3 月中下旬

播种, 播种期间施少量种肥, 4 月中下旬追肥, 氮肥施用量约 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 7 月中旬完成收割; 水稻 4 月底前插秧结束, 氮肥施用量约 $40\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 8 月上旬收割; 榨菜移栽时间为 9 月底到 10 月初, 氮肥施用量约 $220\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 收获时间为次年 1 月底.

1.2 不同坡面的选取及其地表径流监测点布设方法

1.2.1 不同坡面的选取

王家沟小流域由地形自然形成以及人工修筑道路、排水干渠分割而成大小不同集水坡面几十个, 这些坡面多由旱地、水田、桑园及少部分灌木林地组成. 按照坡面不同土地利用类型构成方式大致可分为两类: 一类是复合型坡面, 即由两种或两种以上土地利用类型构成; 另一类是单一型坡面, 即坡面只有一种土地利用类型. 选取坡面集水区相对独立, 坡面不同土地利用类型集水界线易区分, 同一种植模式分布均匀的 7 个不同坡面布设地表径流监测点. 从不同坡面土地利用类型、坡度、地类的代表性考虑, 在 7 个坡面中分别选取 2 个复合型和 2 个单一型坡面, 比较其氮素流失浓度变化规律.

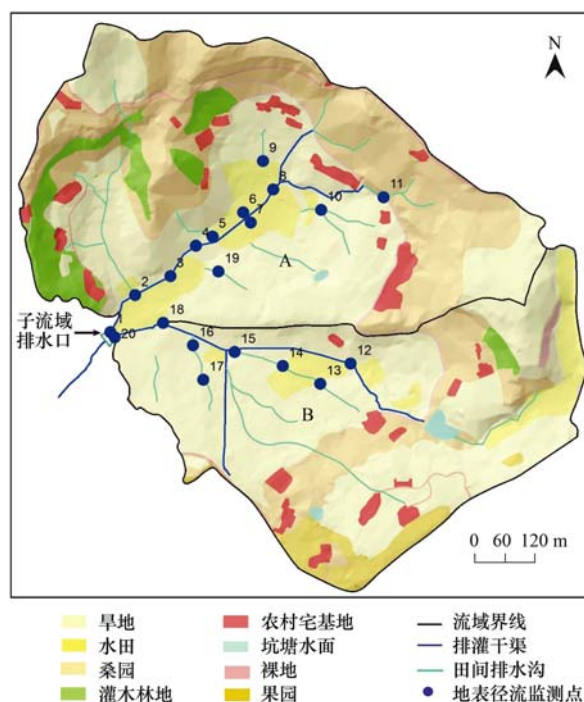


图 1 2014 年王家沟小流域土地利用现状与地表径流监测点布设示意

Fig. 1 Map showing land use status and water sample observation points of the Wangjiagou Catchment (2014)

1.2.2 地表径流监测点布设方法

(1) 单一型坡面 一种为坡面集水区域内由地形自然形成的仅有一个排泄口, 此类坡面监测点布设在坡底排泄口 (11、19); 另一种为倾斜矩形坡

面,几条水系平行分布,选择坡中或坡底由人工修筑田间道将坡面水系拢聚的主要集水排泄口布设监测点(16、17)。

(2)复合型坡面 坡面不同土地利用类型变换布设监测点时,选择贯穿不同土地利用类型的同一条主要水系,在土地利用类型变换前布设监测点(13、14、15);旱地排入水田前监测点布设在坡面中间径流量最大排水沟(9、10);水田多同时分布几个排泄口,选择田埂中间或最大排泄口布设监测点(6、7)。

(3)干渠节点布设 流域内 2 条水泥排水干渠分别处在 A、B 两个子流域集水线上,依据排水干渠两侧集水坡面土地利用方式差异和集水区面积大小在干渠主要地表径流汇水节点下端 5~10m 处布设 6 个监测点(2、5、8、12、18 等)。

1.3 样品采集与测定方法

1.3.1 样品采集时间选取

根据研究区域种植制度和年度月降雨量分布特点,将样品采集时间大致划分为 3 个时期:春季作物时期(春季作物追肥结束到收割完成)、夏季空闲时期(春季作物收割完成到秋季作物种植前)、秋季作物时期(秋季作物施肥结束到收割完成)。研究区域 1~2 月降雨量非常少,2014 年累计只有 8 mm,很难形成地表径流。3 月中旬旱地作物玉米播种期间,由于施肥方式不统一,部分农户不施种肥,流域内玉米地施肥不均匀。玉米、水稻施肥主要集中在 4 月中下旬,4 月底基本结束,且同一农作物亩均施肥量相当。因此,本研究样地表径流样品采集时间选择从 5 月初开始,秋季作物榨菜临近收获时结束。样品采集的频率同时考虑两次采样时间间隔和降雨量

变化:当降雨量较为集中时,依据两次样品采集累计降雨量间隔(50~60 mm)采集下一次样品;当降雨量较少时,依据时间间隔(30~40 d)采集下一次样品。

1.3.2 样品采集方法

根据每场降雨历时,分别采集 0.5、1、2、4、8 h 和降雨结束后 1 h 地表径流水样 4~6 个,并根据降雨历时增长适当增加采集频率,每个样品 200 mL,再将这些样品混合后取 250 mL 作为本次降雨采样点测试水样,4℃ 保存,并在 48 h 内完成测试。

1.3.3 样品测定方法

水样原液测定总氮(total nitrogen, TN),另一部分水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后,测定铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)。水样中 TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(GB 11894-89)测定;NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 使用 DX-120 型离子色谱仪(Dionex 公司,美国)测定。

1.4 数据统计与分析

2014 年 12 次自然降雨 20 个地表径流监测点共采集样品 240 个(表 1)。其中:利用 SPSS 21 软件对春季作物时期 5 次、夏季空闲时期 4 次和秋季作物时期 3 次自然降雨采集 144 个坡面地表径流样品的 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 流失浓度值进行统计与分析,研究这些样品氮素不同形态组成及其线性关系;依据一定时间间隔,选取每个时期 3 次自然降雨采集的 162 个坡面和干渠地表径流样品 TN 流失浓度值,利用 ArcGIS 10.2 软件进行空间插值分析;分别选取 2 个单一型和复合型坡面,对 3 个时期不同坡面组合下 84 个地表径流样品 TN 流失浓度值差异进行分析。

表 1 样品采集 12 场次自然降雨特征
Table 1 Characteristics of the 12 rainfall events during which samples were collected

项目	采样日期(月-日)											
	05-11	05-21	06-15	06-19	07-03	08-11	08-27	09-02	09-18	10-28	11-08	12-11
降雨量/mm	12.8	19.2	4	12.8	14.3	53.9	35.6	28	122.4	18.4	15.9	6
降雨历时/h	18	10	8	4	11	18	18	14	24	12	13	9

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型地表径流水样氮素流失特征

利用所选 7 个坡面布设 5 个旱地、3 个桑树套种地、3 个水田地表径流监测点 2014 年 5~12 月 12 次自然降雨采集 144 地表径流样品,比较 3 个时期不同土地利用类型地表径流氮素流失浓度特征(表 2)。

从不同时期比较来看,春季作物时期 3 种土地利用类型 TN、NO₃⁻-N 地表平均流失浓度差异最显著,旱地 TN、NO₃⁻-N 平均流失浓度分别是桑树套种地的 1.61、1.56 倍,是水田的 6.73、17.74 倍;夏季空闲期 3 种土地利用类型 TN、NO₃⁻-N 地表平均流失浓度相差在 3 mg·L⁻¹ 左右,差异较小,NO₃⁻-N 占 TN 比重略低于其它两个时期;秋季作物时期,由于整个流域均种植榨菜,不同地类氮素平均流

失浓度主要受坡面榨菜种植面积比影响而表现出一定差异. 春季作物时期 3 种土地利用类型 NH_4^+ -N 平均流失浓度均显著高于夏季空闲和秋季作物时期; 秋季作物时期不同土地利用类型 NH_4^+ -N 平均流失浓度在 $0.16 \sim 0.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间, 差异最大. 3 个时期水田 TN、 NO_3^- -N 离散系数均高于其它 2 种土地利用类型, 这是因为春季作物时期水田易受降雨类型影响, 夏季空闲时期水田轮作旱地, 秋季作物时期不同空间布局的水田榨菜种植面积比差异较大.

从不同土地利用类型比较来看, 春季作物时期水田 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度最低. 水稻田作为一种环境友好的人工湿地生态系统, 其根系的反硝化细菌可以在缺氧条件下还原硝酸盐, 并且水稻田田埂基本处于封闭状态, 土壤侵蚀现象远比坡耕地轻^[20]. 从研究区内布设的 6 个水稻田入口、出口监测点氮素流失浓度变化来看, 水稻田出口 TN 流失浓度平均值为入口处 21%, NO_3^- -N 流失浓度仅为入口处 9%, 水稻田表现出极强的氮素拦截净化能力.

但水稻田由于受其所占坡面面积比、空间布局、降雨类型等因素影响较大, 其 TN、 NO_3^- -N 离散系数春季作物时期也表现为最高. 水田轮作旱地后, TN、 NO_3^- -N 流失浓度迅速升高, 并逐渐趋近与旱地水平. 虽然旱地春、秋两季作物时期 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度差异很小, 但受不同时期降雨特点影响, TN、 NO_3^- -N 流失浓度变化过程不同. 春季作物时期降雨量大, 氮素易流失, 5 月旱地春季作物玉米追肥完成后, TN 流失浓度高达 $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比秋季作物榨菜施肥后 TN 流失浓度平均高出 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 但 6 月 TN 流失浓度平均降低约 48%, 而秋季作物榨菜 TN 流失浓度月平均降幅只有 14%. 春季作物时期, 桑树套种地 TN 平均流失浓度为 $15.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 比旱地平均流失浓度 $24.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减少 39%, 其原因: 一方面桑树套种减少了单位面积施肥量; 另一方面桑树能够显著减少地表径流含沙量^[24]. 夏季空闲时期, 流域内地表覆被迅速减少, 地面裸露程度增高, 大雨和暴雨事件增多, 氮素地表径流含量迅速提高^[25].

表 2 3 个时期不同土地利用类型地表径流氮素平均浓度与离散系数统计

Table 2 Statistics of coefficient of dispersion and the average concentration of nitrogen in overland runoff of different land use types in the 3 periods										
项目	参数	春季作物时期			夏季空闲时期			秋季作物时期		
		TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N
旱地	均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	24.09	21.65	0.65	22.31	19.82	0.33	23.98	22.62	0.42
	离散系数/%	52	51	52	26	30	54	22	21	75
水田	均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.58	1.22	0.62	16.07	13.39	0.31	15.51	14.41	0.23
	离散系数/%	78	71	45	70	74	55	73	75	84
桑树套种	均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	15.03	13.82	0.57	18.45	16.47	0.27	16.11	15.02	0.16
	离散系数/%	58	56	39	48	52	31	23	15	109

利用 ArcGIS 10.2 软件, 选取每个时期一定时间间隔 3 次自然降雨采集样品, 对各个坡面、干渠 18 个地表径流监测点 TN 流失浓度进行空间插值, 如图 2 所示.

从坡面地表径流监测点 TN 流失浓度不同时期变化来看, 春、秋两季作物期间旱地、桑树套种地 TN 流失浓度峰值均出现在施肥刚结束采集的样品中, 但春季作物时期 TN 流失浓度呈迅速下降趋势, 秋季作物时期则缓慢下降. 由于春季作物时期研究区域降雨比较集中, TN 径流浓度随降雨量、施肥时间间隔的增加而减少^[21,22]. 农作物快速生长对氮素的吸收以及农作物枝叶对地面覆盖度增大^[23], 也降低了地表径流 TN 流失浓度. 此期间, 坡面不同土地利用类型监测点 TN 流失浓度空间上差异非常显著. 夏季空闲期, 研究区域降雨多为大雨或暴雨事件. 8 月中上旬, 由于流域内玉米收割后大量秸秆覆盖地

面, 有效地减弱地表产流和土壤侵蚀, 各个坡面监测点 TN 流失浓度浮动不大; 8 月底, 农作物秸秆燃烧后地表裸露, 强降雨条件下 TN 流失浓度升高; 9 月 18 日大暴雨事件中, 各监测点 TN 流失浓度分布最均匀. 此期间, 不同土地利用类型坡面监测点 TN 流失浓度逐渐趋近. 秋季作物时期, 研究区域降雨量减少, 降雨强度减小, 氮素流失相对缓慢. 此期间, 不同土地利用类型均种植经济作物榨菜, 坡面不同土地利用类型监测点 TN 流失浓度差异不大.

干渠监测点 8 汇水区域土地利用类型主要为桑树套种地, 向下流经水田排水口(监测点 6、7)并与水田地表径流相混合, 干渠监测点 4 采集水样即为上游监测点 8 与水田混合样品. 通过对比干渠监测点 8 与监测点 4 地表径流水样 TN 流失浓度变化来看, 春季作物时期水稻田显著降低了干渠汇水节点(监测点 8) TN 流失浓度; 夏季空闲时期由于地表

覆被变化和水田对氮素拦截净化能力减弱,干渠节点 TN 流失浓度开始逐渐升高并与坡面监测点趋近;秋季作物时期,由于子流域 A 部分坡底分布的水田不适宜轮种榨菜,且桑园面积比高,其干渠节点 TN 流失浓度略低于子流域 B,而子流域 B 干渠节点 TN 流失浓度与坡面监测点已无明显差异.

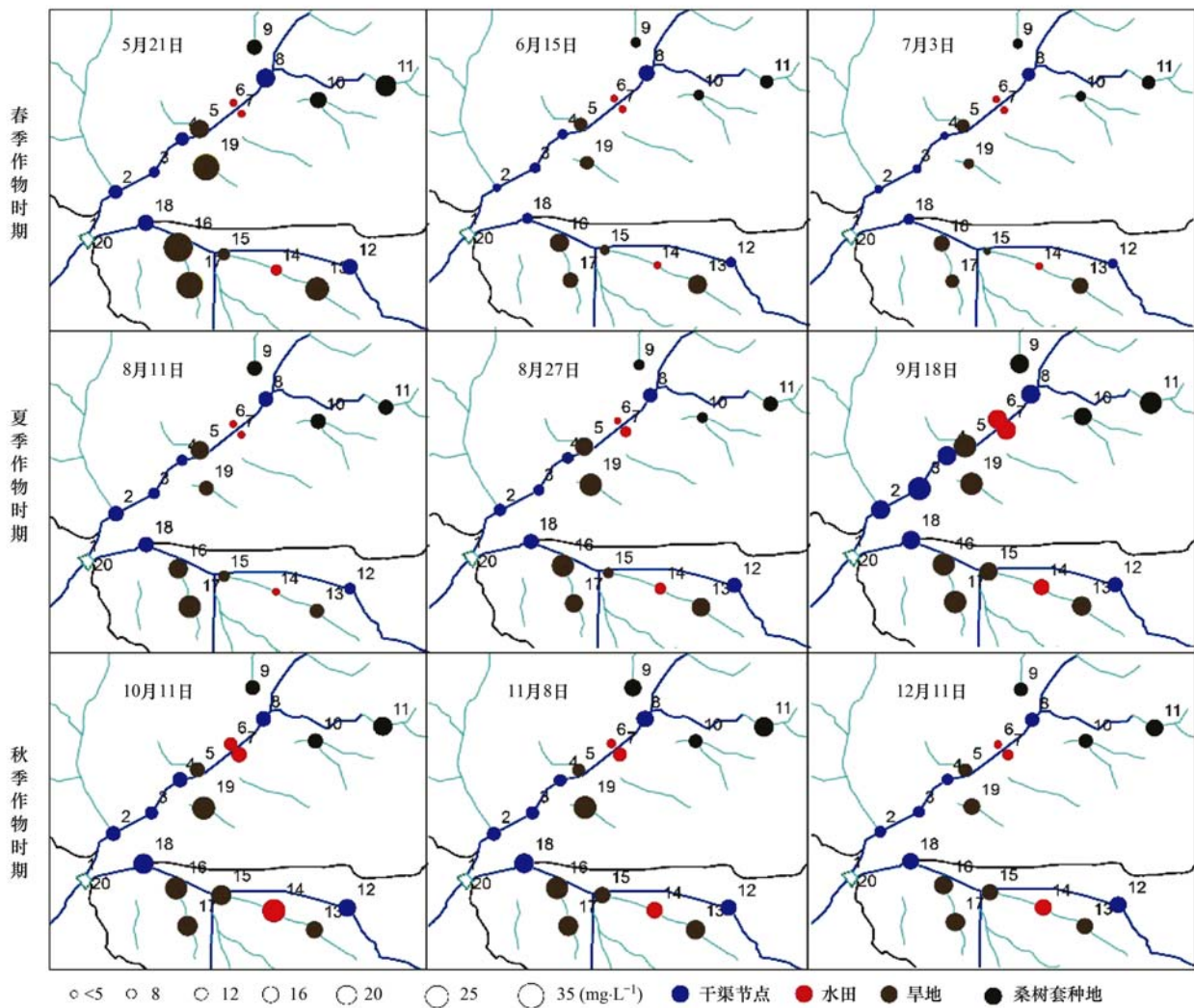


图 2 3 个时期干渠、坡面地表径流监测点 TN 流失浓度空间插值

Fig. 2 Spatial interpolation map showing TN's losses concentrations of observation points of surface runoff of main channel and hillslopes of 3 periods in 2014

利用坡面地表径流监测点采集的 144 样品,分析氮素不同形态氮素组成. 结果表明:不同土地利用方式下氮素流失以 NO_3^- -N为主,这与曾立雄等^[26]在三峡库区研究结论相同. 其中, TN 和 NO_3^- -N 流失浓度存在显著线性相关性 ($R^2 = 0.941$, $N = 144$),而且随着地表径流样品 TN 浓度升高,样品中 NO_3^- -N占 TN 的质量分数增加(图 3); NH_4^+ -N占 TN 比重很小,与 TN 浓度变化也无明显相关性 ($R^2 = 0.054$, $N = 144$).

2.2 土地利用类型与氮素流失浓度偏相关性分析

与径流小区实验研究不同,坡面尺度上研究不同土地利用类型对地表径流氮素流失影响需要考虑

坡面面积、坡度空间差异的影响. 本研究选取的 7 个坡面总面积都在 $1.7 \sim 2 \text{ hm}^2$ 间,差异较小,但坡面平均坡度差异较大. 因此,在研究土地利用类型与地表径流氮素流失浓度关系时,对坡面坡度产生的影响进行控制. 偏相关分析就是在研究两个变量之间的线性相关关系时控制可能对其产生影响的其它变量,研究其中两个变量之间线性相关程度的一种方法^[27].

由于各个坡面监测点的汇水区域内土地利用类型并不一致,而不同土地利用类型春、秋两季轮作农作物不同,本研究依据实地调绘的各坡面监测点汇水区域内不同时期不同地类农作物所占汇水区面

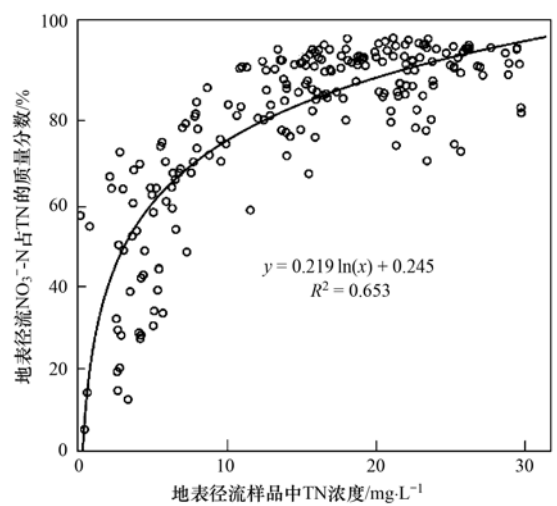


图3 径流样品 TN 浓度与NO₃⁻-N/TN 变化拟合

Fig. 3 Fitting picture showing the change of TN concentrations and NO₃⁻-N/TN in runoff samples

积比赋值. 水稻田构成的复合型坡面,其氮素流失浓度同时还受上坡流入稻田氮素浓度影响,因此,在偏相关分析时,需将其进行控制. 各坡面监测点汇水区平均坡度利用 ArcGIS 10.2 在1:1 000实测地形图提取. 利用 SPSS 21 软件,以各坡面监测点汇水区平均坡度为控制变量,输出不同时期汇水区农作

物面积比与氮素流失浓度偏相关系数(表3).

从表3 可以看出:春季作物时期,TN、NO₃⁻-N流失浓度与旱地作物玉米面积比极显著正相关,与水稻面积比极显著负相关;秋季作物时期,TN、NO₃⁻-N流失浓度与不同土地利用类型种植榨菜面积比极显著正相关;3 个时期 TN、NO₃⁻-N流失浓度与桑树面积比极显著负相关. NH₄⁺-N与秋季作物榨菜面积比显著正相关. 从偏相关系数 *R* 值看,水稻面积比与NO₃⁻-N流失浓度偏相关系数略高于 TN,而桑树面积比与 TN 流失浓度偏相关系数略高于 NO₃⁻-N. 这表明,春季作物期间稻田拦截净化地表径流中NO₃⁻-N能力更强,而桑树显著减少了地表径流中颗粒态氮素流失. 王娇等^[28]选取京津地区 11 个小流域为研究对象,研究认为水体污染物的浓度与土地利用类型具有显著的相关性;罗璇等^[29]在胡家山小流域 15 个集水区研究也得出不同土地利用类型与 TN、NO₃⁻-N流失浓度显著相关.

由此可见,流域土地利用类型结构对三峡库区农业小流域氮素流失影响较大,合理的增加流域水田数量、旱地配置桑树篱,既符合三峡库区传统耕作习惯,又能增加农民收入,是三峡库区面源污染源头控制的有效措施.

表3 不同农作物面积比与氮素流失浓度偏相关性分析¹⁾

Table 3 Analysis of partial correlation of the area ratio of different crops and nitrogen losses concentration							
项目/%	<i>N</i>	TN		NO ₃ ⁻ -N		NH ₄ ⁺ -N	
		<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>R</i>
玉米面积比	60	0	0.703	0	0.702	0.382	0.102
水稻面积比	60	0	-0.674	0	-0.712	0.231	-0.192
榨菜面积比	36	0	0.647	0	0.651	0.012	0.405
桑树面积比	108	0	-0.422	0	-0.392	0.119	-0.156

1) 以坡面平均坡度为控制变量;采用双侧 *t* 检验; *N* 为样本数; *P* 为显著性水平, *P* < 0.05, 显著相关; *P* < 0.01, 极显著相关; *R* 为偏相关系数

2.3 不同土地利用类型组成的坡面氮素流失浓度变化规律分析

选取 2 个复合型坡面和 2 个单一型坡面,比较 3 个时期不同土地利用类型组成坡面、同一土地利用类型不同地带氮素流失浓度变化规律. 4 个坡面地带组成方式及其面积比如图 4 所示.

根据图 5,从坡面不同土地利用类型组成来看,坡面 a 上坡缓坡旱地 5~7 月 TN 流失浓度从 33.86 mg·L⁻¹ 逐渐下降到 17.21 mg·L⁻¹, 月平均降幅 28%; 而坡腰水稻田从 5 月平均流失浓度 8.81 mg·L⁻¹ 迅速下降到 6、7 月 3 mg·L⁻¹ 左右. 上坡旱地与坡腰水稻田面积接近 1:1 坡面组合使旱地 TN 流失浓度平均降低 79%. 8~9 月,上坡缓坡旱地 TN 流失浓度呈小幅波动;水稻收割后,坡腰水田

TN 流失浓度从 8.23 mg·L⁻¹ 逐步上升到 18.54 mg·L⁻¹, 秋季轮种榨菜施肥后达到峰值 32.94 mg·L⁻¹,超过了上坡缓坡旱地 TN 流失浓度. 11~12 月,坡面 3 个监测点 TN 流失浓度已无显著差异. 坡底旱地由于坡面面积比小,与坡腰水田 TN 流失浓度呈大致相同的变化趋势,TN 流失浓度始终处于上坡旱地与坡腰水田之间.

坡面 b 桑树玉米套种地 TN 流失浓度从 5 月平均 17.42 mg·L⁻¹ 迅速下降到 6 月平均 8.26 mg·L⁻¹,降幅为 53%; 坡底水稻田占坡面面积 58%,5~7 月 TN 平均流失浓度都在 2.5 mg·L⁻¹ 左右,浮动小. 这表明,坡面水稻田面积比越高,坡底水稻田 TN 流失浓度受上坡影响越小. 8~9 月受强降雨影响,桑树套种地 TN 流失浓度波动较为强烈;

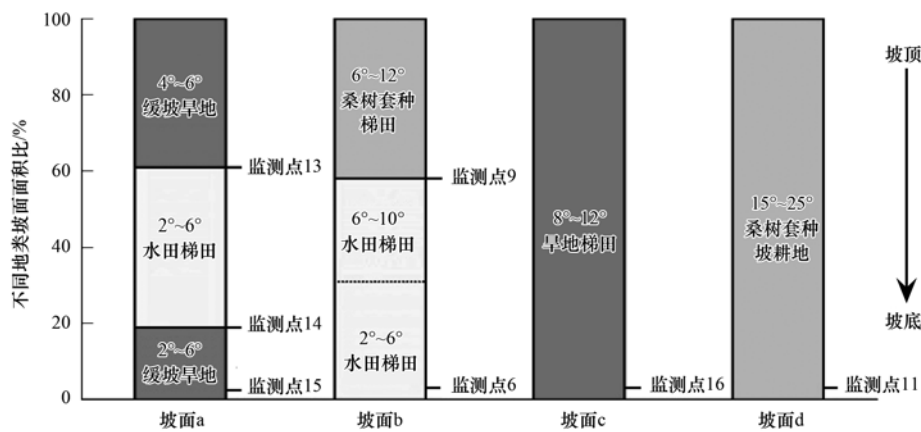


图4 4个坡面不同地类组成及其面积比示意

Fig. 4 Schematic diagram showing the combination and area ratio of different land types of the 4 hillslopes

水田 TN 流失浓度一直上升,在 9 月 18 日大暴雨事件中,两个监测点 TN 流失浓度同时达到峰值 $23.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $20.70 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。10~12 月,两个监测点 TN 流失浓度均缓慢同步降低,但由于坡底约有 52% 水田未轮种榨菜,坡底 TN 平均流失浓度只有上坡桑树榨菜套种地的 57%,而同期坡面 a 坡腰水田全部轮种榨菜后 TN 平均流失浓度与旱地相当。

坡面 c、d 是单一型坡面。从两个坡面 TN 流失浓度值变化来看:5~6 月,坡面 c、d 地表径流 TN 平均流失浓度分别从 $40.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $28.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 迅速下降到 $21.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $13.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,降幅分别为 48%、52%;8~9 月,坡面 c 地表径流 TN 流失浓度基本都在 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,坡面 d 一般都低于 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但在 9 月 18 日大暴雨事件中,坡面 d 又出现新的峰值 $25.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而坡面 c 新峰值出

现在榨菜施肥结束后。

就同一土地利用类型而言:坡面 a 上坡 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 缓坡旱地与坡面 c 的 $8^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 旱地梯田相比,无论春季种植玉米或是秋季轮作榨菜, $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 缓坡旱地 TN 流失浓度峰值低,下降速度慢,3 个时期 TN 平均流失浓度也低;坡面 b 上半坡 $6^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 桑树套种梯田 TN 流失浓度 3 个时期均低于 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 桑树套种坡耕地;与坡面 a 坡腰水稻田相比,坡面 b 坡底水稻田由于地势平坦、田块大,上坡径流进入水稻田后流速放慢,更容易被稀释冲淡,加之坡面 b 水稻田坡面面积比高,水稻种植期间坡面 b 坡底水田 TN 流失浓度较为稳定,TN 平均流失浓度比坡面 a 坡腰水田低 46%。

从 4 个坡面最终汇入干渠地表径流 TN 平均浓度比较来看(图 6),2 个复合型坡面 3 个时期 TN 平

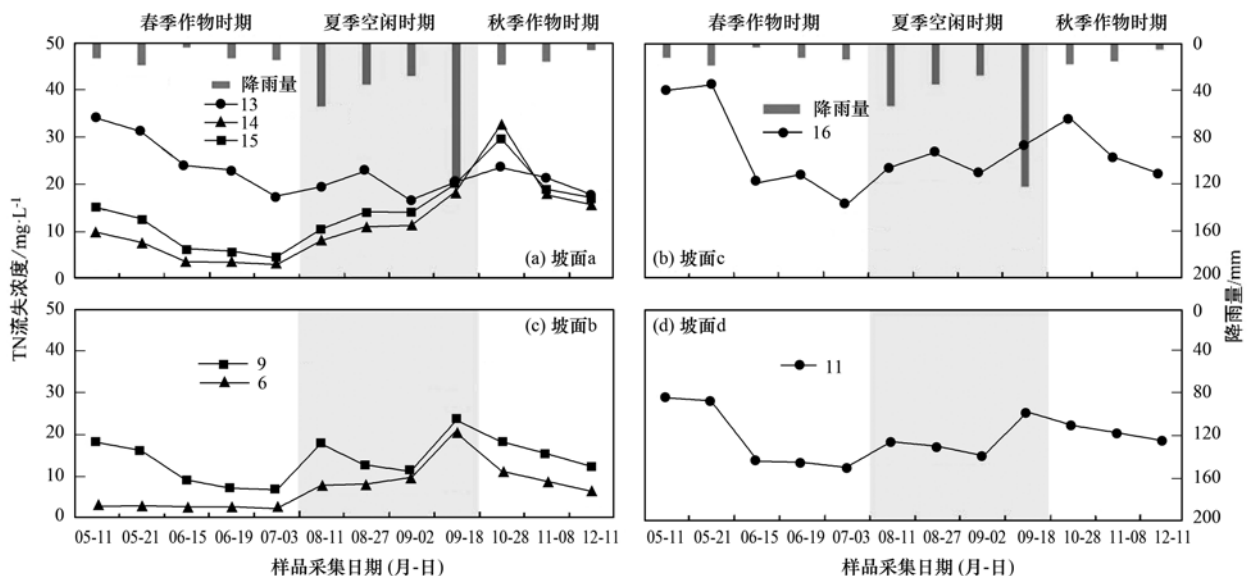


图5 4个坡面3个时期地表径流监测点 TN 流失浓度变化

Fig. 5 Map showing the change of TN's losses concentrations of observation points of surface runoff for 3 periods of the 4 hillslopes

均流失浓度均低于 2 个单一型坡面. 复合型坡面 b 的 3 个时期 TN 平均流失浓度分别为 2.55、11.52 和 8.58 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均为最低; 单一型坡面 c 分别为 27.51、25.11 和 27.11 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均为最高. b、c 两个坡面坡度相似, 但由于坡面土地利用类型差异, 3 个时期两者排入干渠 TN 平均流失浓度最大相差 10 倍. 比较 a、b 两个坡面, 坡底布设水田和增加水田坡面面积比能显著降低整个坡面 TN 流失浓度. 由此, 合理调整坡面土地利用结构、优化空间布局, 可显著减小氮素流失浓度^[30].

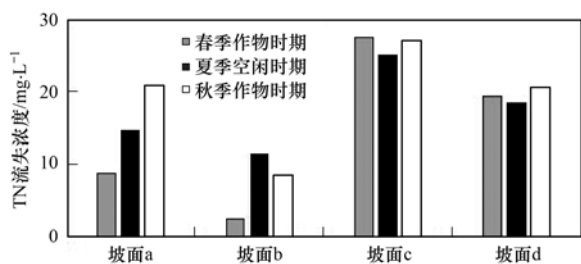


图 6 4 个坡面 3 个时期排入干渠 TN 平均浓度对比

Fig. 6 Comparison diagram of TN's average concentrations discharged into main channel of 3 periods of the 4 hillslopes

2.4 不同土地利用类型组成的子流域氮素流失浓度变化规律分析

研究区域可分为 A、B 两个子流域 (图 1), 不同土地利用类型所占子流域面积如图 7 所示. 比较来看, 子流域 A 园地、灌木林地面积比分别比子流域 B 高出 15% 和 5%, 旱地面积比减少 19%, 水田、农村宅基地等地类所占子流域面积比差别不大.

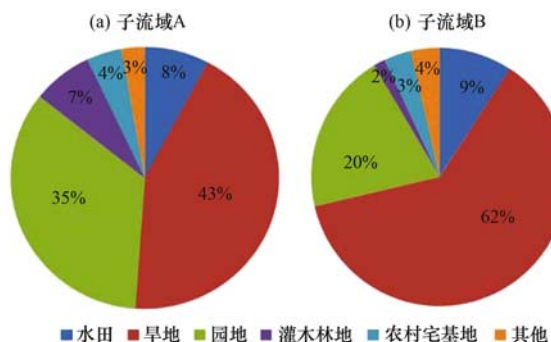


图 7 A、B 两个子流域不同土地利用类型面积比

Fig. 7 Area ratio of different land use types of the two subcatchments A and B

根据图 8, 3 个不同时期 A、B 两个子流域出口 TN、 NO_3^- -N 流失浓度变化规律大致相同, 但春、秋两个时期 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度值却存在显著差异.

从同一时期 A、B 两个子流域比较来看: 春季

作物时期子流域 B 出口 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度分别是子流域 A 的 1.56、2.09 倍; 秋两季作物时期分别是子流域 A 出口的 1.76、1.69 倍. 由于子流域 A 的旱地面积比低、桑园面积比高, 根据 TN、 NO_3^- -N 流失浓度与不同土地利用类型偏相关性分析, TN、 NO_3^- -N 流失浓度与春季旱地作物玉米面积比显著正相关, 桑树面积比显著负相关, 因此, 春季作物时期, 子流域 B 出口 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度高于子流域 A; 秋季作物时期, 子流域 B 榨菜种植面积比要高于子流域 A, TN、 NO_3^- -N 流失浓度与榨菜面积比显著正相关, 因此, 秋季作物时期子流域 B 出口 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度也要高于子流域 A.

从同一子流域春、秋两个时期比较来看: 子流域 A 秋季作物时期 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度分别是春季作物时期的 1.88、3.03 倍; 子流域 B 秋季作物时期 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度分别是春季作物时期的 1.99、2.44 倍. 虽然旱地、桑树套种地春秋轮作期间 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度差异不显著, 但水田轮作旱地后春、秋两季差异非常显著 (表 2). 从 4 个坡面定量分析和图 2 空间插值比较可知, 春季作物期间水稻田显著降低了坡面和干渠节点 TN 流失浓度, 且春季作物时期降雨量大, 氮素流失浓度下降迅速. 秋季作物期间, 整个流域旱地和多数水旱轮作地均种植榨菜, 土地利用方式较为单一, 不同坡面和干渠 TN 流失浓度相当, 加之此期间降雨量少, TN、 NO_3^- -N 流失浓度减小速度变慢. 因此, 秋季作物期间 A、B 两个子流域出口 TN、 NO_3^- -N 平均流失浓度要高于春季作物时期.

A、B 两个子流域 NH_4^+ -N 流失浓度 3 个时期变化规律基本相同, 春秋两季施肥后同时各出现一次峰值, 其他时间变化不大, 这与桑蒙蒙等在长江中下游地区研究结果相似^[31].

根据子流域氮素流失浓度不同时期动态变化特征, 可分别采取相应的阻控措施减少面源污染物排放量. 春季作物时期通过施用缓释肥或减量多次施肥可明显降低施肥初期氮流失浓度, 减少氮素排放量. 秋季作物榨菜属区域性经济作物, 氮肥施用量高, 从施肥管理模式上控制是目前主要研究方向. 一些学者通过研究提出了有机无机配施、施用缓释肥等方法, 既保证了榨菜产量和品质又降低了施肥量^[32]. 榨菜季降雨量少, 地表径流量小, 加之近些年政府对库区农业水利设施资金扶持, 可以通过修建堰塘或蓄水池方式蓄水, 利用水生植物去除氮素, 也可为春耕提供水源保障.

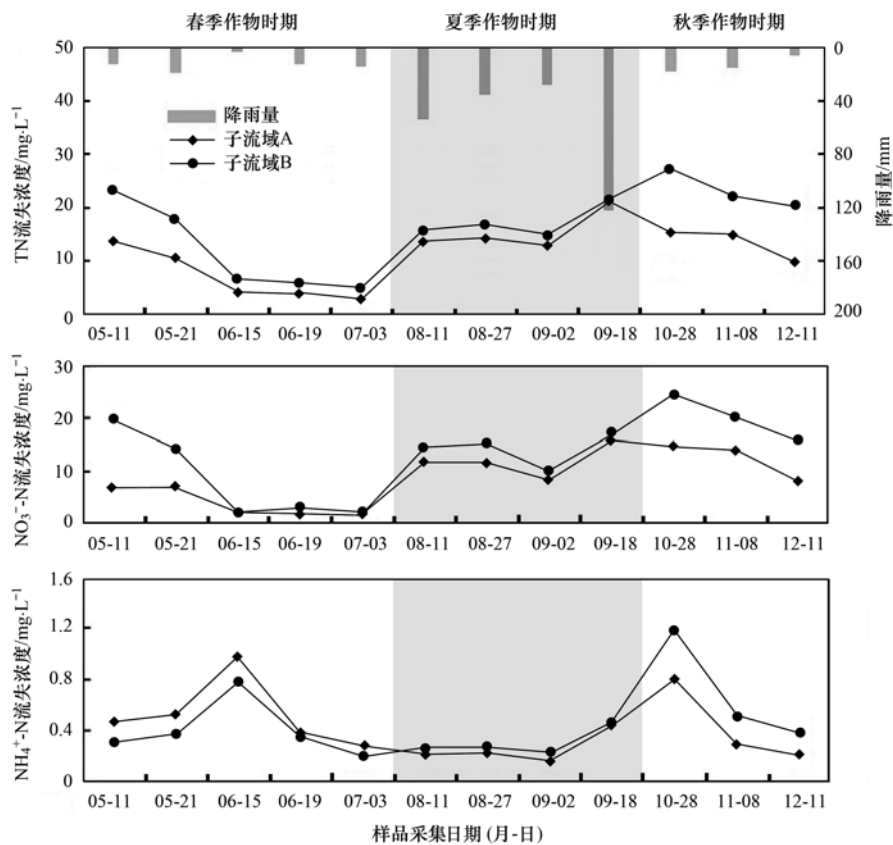


图8 A、B子流域出口不同采集时间氮素流失浓度变化

Fig. 8 Map showing the change of nitrogen losses concentrations of different acquisition time of exports of subcatchments A and B

3 结论

(1)春季作物时期不同土地利用类型地表径流TN平均流失浓度差异最显著,旱地(24.09 mg·L⁻¹)是桑树套种地(15.03 mg·L⁻¹)的1.61倍,是水田(3.58 mg·L⁻¹)的6.73倍。3个时期不同土地利用类型TN流失浓度都呈一定规律性变化:春、秋两季作物施肥结束后,TN流失浓度均呈下降趋势,但春季作物期间降速快,秋季降速缓慢;夏季空闲期旱地、桑树套种地TN流失浓度上下波动,水田则一直上升。

(2)地表径流中氮素流失以NO₃⁻-N为主,不同形态氮素流失浓度与坡面不同土地利用类型作物面积比显著相关。其中:TN、NO₃⁻-N流失浓度与旱地作物玉米、榨菜面积比显著正相关,与水稻、桑树面积比显著负相关;NH₄⁺-N流失浓度与榨菜面积比显著正相关。

(3)由水田组合而成的复合型坡面TN平均流失浓度都低于单一型坡面。比较4个典型坡面,上坡桑树套种地与下坡水田组合的坡面3个时期TN平均流失浓度最低,分别为2.55、11.52和8.58

mg·L⁻¹;玉米榨菜轮作旱地坡面最高,分别为27.51、25.11和27.11 mg·L⁻¹。两个坡面春季作物时期TN平均流失浓度相差近10倍。

(4)流域不同土地利用类型构成及其空间布局对氮素流失影响较大,不同时期氮素流失浓度特征明显,坡底布设水田、旱地配置桑树篱、优化农作物施肥模式均可减少流域氮素排放量。

参考文献:

- [1] 井光花,于兴修,刘前进,等.沂蒙山区不同强降雨下土壤的氮素流失特征分析[J].农业工程学报,2012,28(6):120-125.
- [2] Tim U S, Jolly R. Evaluating agricultural nonpoint-source pollution using integrated geographic information systems and hydrologic/water quality model[J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(1): 25-35.
- [3] 陈炎辉,陈明华,王果,等.不同坡度地表径流中污泥氮素流失规律的研究[J].环境科学,2010,31(10):2423-2430.
- [4] Nadal-Romero E, Regüés D, Latron J. Relationships among rainfall, runoff, and suspended sediment in a small catchment with badlands[J]. CATENA, 2008, 74(2): 127-136.
- [5] Butler D M, Ranells N N, Franklin D H, et al. Ground cover impacts on nitrogen export from manured riparian pasture[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(1): 155-162.
- [6] 冯源嵩,林陶,杨庆媛.百花湖周边城市近郊小流域氮、磷

- 输出时空特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4537-4543.
- [7] Cogle A L, Keating M A, Langford P A, *et al.* Runoff, soil loss, and nutrient transport from cropping systems on Red Ferrosols in tropical northern Australia [J]. Soil Research, 2011, **49**(1): 87-97.
- [8] Davis R L, Zhang H L, Lee Schroder J, *et al.* Soil characteristics and phosphorus level effect on phosphorus loss in runoff[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, **34**(5): 1640-1650.
- [9] Luo C Y, Gao Y, Zhu B, *et al.* Sprinkler-based rainfall simulation experiments to assess nitrogen and phosphorus losses from a hillslope cropland of purple soil in China. Sustainability of Water Quality and Ecology, 2013, **1-2**: 40-47.
- [10] 夏立忠, 马力, 杨林章, 等. 植物篱和浅垄作对三峡库区坡耕地氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, **28**(14): 104-111.
- [11] 焦平金, 王少丽, 许迪, 等. 次暴雨下作物植被类型对农田氮磷径流流失的影响[J]. 水利学报, 2009, **40**(3): 296-302.
- [12] 赵伟, 杨培岭, 李海山, 等. 呼伦湖流域3种利用方式草场水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, **27**(9): 220-225.
- [13] Fang N F, Shi Z H, Li L, *et al.* The effects of rainfall regimes and land use changes on runoff and soil loss in a small mountainous watershed[J]. CATENA, 2012, **99**: 1-8.
- [14] 李瑞玲, 张永春, 刘庄, 等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1220-1226.
- [15] 张展羽, 司涵, 孔莉莉. 基于SWAT模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报, 2013, **29**(2): 93-100.
- [16] 邓欧平, 孙嗣阳, 吕军. 基于ArcSWAT模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1284-1290.
- [17] 阎建忠, 卓仁贵, 谢德体, 等. 不同生计类型农户的土地利用——三峡库区典型农村的实证研究[J]. 地理学报, 2010, **65**(11): 1401-1410.
- [18] Vagstad N, Jansons V, Loigu E, *et al.* Nutrient losses from agricultural areas in the Gulf of Riga drainage basin [J]. Ecological Engineering, 2000, **14**(4): 435-441.
- [19] Steegen A, Govers G, Takken I, *et al.* Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments [J]. Journal of Environmental Quality, 2001, **30**(4): 1249-1258.
- [20] 高超, 朱继业, 朱建国, 等. 不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1543-1549.
- [21] 梁新强, 陈英旭, 李华, 等. 雨强及施肥降雨间隔对油菜田氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(6): 14-17.
- [22] 黄云凤, 张珞平, 洪华生, 等. 小流域氮流失特征及其影响因素[J]. 水利学报, 2006, **37**(7): 801-806, 812.
- [23] Girmay G, Singh B R, Nyssen J, *et al.* Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2009, **376**(1-2): 70-80.
- [24] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(3): 75-79.
- [25] Puustinen M, Tattari S, Koskiahio J, *et al.* Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland [J]. Soil and Tillage Research, 2007, **93**(1): 44-55.
- [26] 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.
- [27] 刘宪锋, 任志远, 林志慧, 等. 2000-2011年三江源区植被覆盖时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, **68**(7): 897-908.
- [28] 王娇, 马克明, 张育新, 等. 土地利用类型及其社会经济特征对河流水质的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(1): 57-65.
- [29] 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.
- [30] 孟晓云, 于兴修, 泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1789-1794.
- [31] 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 等. 常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3358-3364.
- [32] 王菲, 王正银, 赵欢, 等. 缓释复合肥料对茎瘤芥产量、品质和养分含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2012, (20): 68-72.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojinggong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorffii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 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	欧 阳 自 远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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