

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,李晓芬(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,郭晓东,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 $\delta^{15}N-NO_3^-$ 和 $\delta^{18}O-NO_3^-$ 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,蓝芙宁,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氏针茅草原 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)	

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^{1,2}, 李红芳¹, 刘锋^{1*}, 王毅¹, 钟元春³, 何洋^{1,2}, 肖润林¹, 吴金水¹

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 湖南农业大学动物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 以我国亚热带农业面源污染防控工程——生态沟渠为研究对象, 在 2013 ~ 2014 年对其径流量和每月进出口水质中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 的质量浓度进行监测, 通过分析生态沟渠在不同时间段对不同形态氮素的去除差异, 探讨了生态沟渠对面源污染中氮素迁移的拦截效应。结果表明, 2 a 内生态沟渠对 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 的平均去除率分别为 77.8%、58.3% 和 48.7%; 拦截量分别为 38.4、59.6 和 171.1 $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; 进水中无机态氮 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 之和占 TN 质量分数的平均值为 47.5%, 出水中平均值为 33.6%, 比进水显著降低 ($P < 0.01$)。2014 年生态沟渠中水生植物全部改种为绿狐尾藻后, 对 NO_3^- -N 和 TN 的拦截率比 2013 年分别增加了 30.5% 和 18.2%, 表明种植绿狐尾藻进一步提升了生态沟渠对氮素的拦截能力。可见, 生态沟渠对农区地表径流中氮素迁移有较好的拦截作用, 可作为一项重要的农业面源氮污染防控技术。

关键词: 生态沟渠; 农业面源污染; 氮; 拦截; 绿狐尾藻

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1717-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.05.016

Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China

WANG Di^{1,2}, LI Hong-fang¹, LIU Feng^{1*}, WANG Yi¹, ZHONG Yuan-chun³, HE Yang^{1,2}, XIAO Run-lin¹, WU Jin-shui¹

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Interception effects of an ecological ditch, used to control agricultural non-point source pollution in subtropical China, on nitrogen transport in surface runoff were studied by monthly measuring the runoff volume and concentrations of ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), nitrate nitrogen (NO_3^- -N) and total nitrogen (TN) at the ditch inlet and outlet from 2013 to 2014. In addition, differences of NH_4^+ -N, NO_3^- -N and TN removal were compared between 2013 and 2014. The results showed that the study ecological ditch worked effectively in N removal with average NH_4^+ -N, NO_3^- -N and TN removal rates of 77.8%, 58.3%, and 48.7%; and their interception rates were 38.4, 59.6, and 171.1 $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The average proportion of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in TN was 47.5% at inlet, and 33.6% at outlet, which was significantly lower than that at inlet ($P < 0.01$). All hydrophytes in the ecological ditch were replaced by *Myriophyllum aquaticum* in 2014, which led to the increased average NO_3^- -N and TN removal rates of 30.5% and 18.2%, respectively. Compared to in 2013. The vegetation of *Myriophyllum aquaticum* was beneficial to the improvement of N interception in ecological ditch. These findings clearly demonstrated that ecological ditch can substantially reduce N loss from surface runoff and be used as an important technique to prevent agricultural non-point N pollution.

Key words: ecological ditch; non-point agriculture pollution; nitrogen; interception; *Myriophyllum aquaticum*

当前, 农业面源污染已成为世界各国水环境的主要污染源之一, 其输入水体的氮、磷营养盐能够导致大范围的水体富营养化, 严重破坏水体生态环境^[1,2]。近 30 年来我国农田的氮肥施用量增加了 4 倍, 但肥料利用率还不足 40%^[3~5], 农田中大量未被利用的养分元素流失进入水体, 以及养殖废水的排放加剧了水体环境污染。调查显示, 从 80 年代至今, 太湖、巢湖、滇池等农业高产区湖泊水体中总氮质量浓度增加了十几倍, 而这些湖泊中 50% 以上

的总氮来自于农业面源污染^[6~8]。可见, 农业面源污染的治理已成为水体富营养化治理中的重中之重。沟渠是农田系统中重要的排灌水设施, 既是农业面源污染物的最初汇集地, 也是农业面源污染物

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2015-12-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD14B01); 湖南省战略性新兴产业成果转化项目(2015GK1014); 湖南省科技支撑计划项目(2015NK3003)

作者简介: 王迪(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤环境与农业生态, E-mail: wang_d_123@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: liufeng@isa.ac.cn

向下游河流、湖泊迁移的重要通道^[9],其对下游水体环境有着重要的影响^[10,11]. 另一方面,沟渠因湿化而逐步演化成具有湿地生态性质的特殊类型湿地,将其改建为生态沟渠后可以作为一项新的“最佳管理措施(best management practices, BMPs)”用于控制农业面源污染^[12]. 生态沟渠构建的主要措施是在沟渠内种植水生植物,使其能够缓解水流流速、促进泥沙颗粒沉淀,增强生态沟渠对 N、P 的吸收和拦截作用^[13~15]. 另外,不同类型的水生植物在生态沟渠中发挥的作用也有很大差别^[16],通过优化沟渠内的植物配置可以增强生态沟渠对 N、P 的拦截能力;后续的植物管理也会明显影响生态沟渠的水质净化能力^[17]. 本研究通过分析连续 2 a 的监测数据,归纳不同季节时生态沟渠对农业面源中氮素污染的拦截特征,以及生态沟渠对几种形态氮素去除效果的差异,以期为合理评估生态沟渠对氮素的去除能力提供科学参考;同时,通过改变生态沟渠内水生植物的种类,分析不同植物配置时生态沟渠氮素拦截能力的改变,以期为优化生态沟渠水生植物配置提供了建议,并为加强生态沟渠管理、提升其对农业面源污染的防控效应提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验生态沟渠位于湖南省长沙县金井镇脱甲村(28°30′~28°39′ N, 113°18′~113°26′ E),属于亚热带季风气候,年平均降雨量 1 389 mm,主要集中在 5~7 月;年平均气温 16.5~20.5℃. 生态沟渠进水主要为农田排水和居民生活污水,其汇水面积为 0.29 km²,其中水田 0.12 km²,为双季稻种植区,主要施用肥料为尿素;林地 0.03 km²,居民 29 户. 试验生态沟渠是基于原有农田沟渠改造而来,生态沟渠长 200 m,呈倒梯形结构上口宽 4 m,下口宽 2.8 m,深 1 m,沟渠内每隔 15~20 m 设置溢流坝,利于减缓沟渠内水流速度. 该区域的主要土地利用状况和沟渠分布情况见图 1. 2011 年以来,生态沟渠内种植水生美人蕉(*Canna glauca*)、铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)、绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)等水生植物. 2013 年 12 月,除绿狐尾藻保留外,其它水生植物全部移除,并改种为绿狐尾藻.

1.2 实时数据观测与水样采集

通过生态沟渠出水口处安装的流量计实时获取

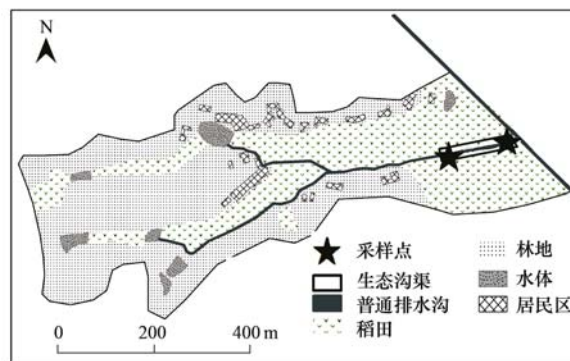


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Map of the research area

沟渠的径流量、水位、流速等水文学参数. 2013 年 1 月至 2014 年 12 月监测期间,在进出水横断面处设立固定水样采集点,并按每月 1 次的频次采集水样. 根据对该流域的长期观测,并结合该流域的土壤通透性等性质,判断流域中降雨-地表径流产流过程在降雨结束后 3 d 内停止^[18]. 为消除降雨-地表径流产流过程对生态沟渠氮素生态拦截效果的影响,降雨过程结束 3 d 后采样. 采样时用聚乙烯塑料瓶采集 500 mL 水样,水样采集后带回实验室,分析前在 4℃ 条件下保存.

1.3 测定指标与方法

水样测定指标主要包括铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、溶解态总氮(TN)质量浓度.

水样经前处理后直接用流动注射仪(AA3,德国 SEAL 公司)测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度;TN 质量浓度采用碱性过硫酸钾消解后用流动注射仪测定.

1.4 数据分析

根据每月监测生态沟渠进出水口中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的质量浓度,每月相应污染物的去除率(η ,%)采用公式(1)计算.

$$\eta = (c_0 - c_1) / c_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, c_0 为生态沟渠进水口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 或 TN 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_1 为生态沟渠出水口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 或 TN 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 的质量分数(α)采用计算公式(2)计算.

$$\alpha = c_x / c_{\text{TN}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, c_{TN} 为生态沟渠进出水中 TN 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); c_x 为相应 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 或 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 结合生态沟进出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的质量浓度和当月生态沟渠通过的径流量,生态

沟渠每月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的输入量(m)、输出量(n)以及拦截量(p)计算公式见式(3)~(5).

$$m(\text{g}) = c_0 \times Q \quad (3)$$

$$n(\text{g}) = c_1 \times Q \quad (4)$$

$$p(\text{g}) = m - n \quad (5)$$

式中, Q 为每月生态沟渠径流量(m^3).生态沟渠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的拦截率(k)计算公式(6).

$$k = (c_0 \times Q - c_1 \times Q) / (c_0 \times Q) \times 100\% \quad (6)$$

采用 Microsoft Excel 2013 作图,并用 SPSS 21 进行成对数据比较,统计分析进、出水氮的质量浓度差异显著性水平;相关分析进、出水氮的质量浓度之间显著性,统计检验的显著性水平 P 为 0.05 或 0.01.

2 结果与分析

2.1 进出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 质量浓度变化

图 2 (a) 为生态沟渠进出水口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度及其去除率变化.在 2013 和 2014 年,生态沟渠进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度在 $0.12 \sim 0.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,第二年平均质量浓度要高于第一年.经过生态沟渠处理,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度明显降低,其中有 20 个月份出水水质达到国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002) I 类水质标准($\leq 0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其他月份均达 II 类标准($\leq 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).监测期间, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率为 77.8%,其去除率随季节有所波动,最低值 58.7% 和最高值 97.0% 分别出现在第 2014 年 10 月和 6 月.

生态沟渠进出水口 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度及其去除率变化见图 2 (b).进水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度有明显的季节变化特征,春夏季进水质量浓度较高,夏秋时较低,质量浓度最低值 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 出现在第 2013 年 4 月,2014 年 2 月质量浓度最高为 $1.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.经过生态沟渠处理后,出水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度明显的低于进水中的质量浓度($P < 0.01$),且出水质量浓度受进水质量浓度影响,存在显著正相关关系($P < 0.01$).生态沟渠对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率在夏冬季节时较低,去除率最低值为 2013 年 12 月的 23.9%;春秋季节较高,第 2014 年 11 月出现去除率最高值 99.9%.2013~2014 年监测期间,生态沟渠对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均去除率为 58.3%.

图 2 (c) 显示的是生态沟渠进出水中 TN 质量浓度及其去除率变化趋势.进水中 TN 质量浓度范围为 $1.22 \sim 5.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中最小值和最大值分别出现在第 2014 年 11 月和 7 月.根据国家地

表水环境质量标准,19 个月进水未达到国家地表水 V 类标准($\leq 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其中只有 2 个月达到地表水 IV 类标准($\leq 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),3 个月达到 V 类标准.经过生态沟渠处理后,出水中 TN 质量浓度有显著降低($P < 0.01$)并和进水质量浓度有相同的变化趋势,其中有 5 个月达到地表水 III 类标准($\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),12 个月达到 IV 类水标准,5 个月达到 V 类水,只有 2 个月低于 V 类水标准.生态沟渠对 TN 的去除率受季节影响明显,夏季去除率较低,最小值为 18.3%,春秋季节去除率较高,最大值为第 1 年 11 月的 63.1%,监测期间对 TN 的平均去除率 48.7%.

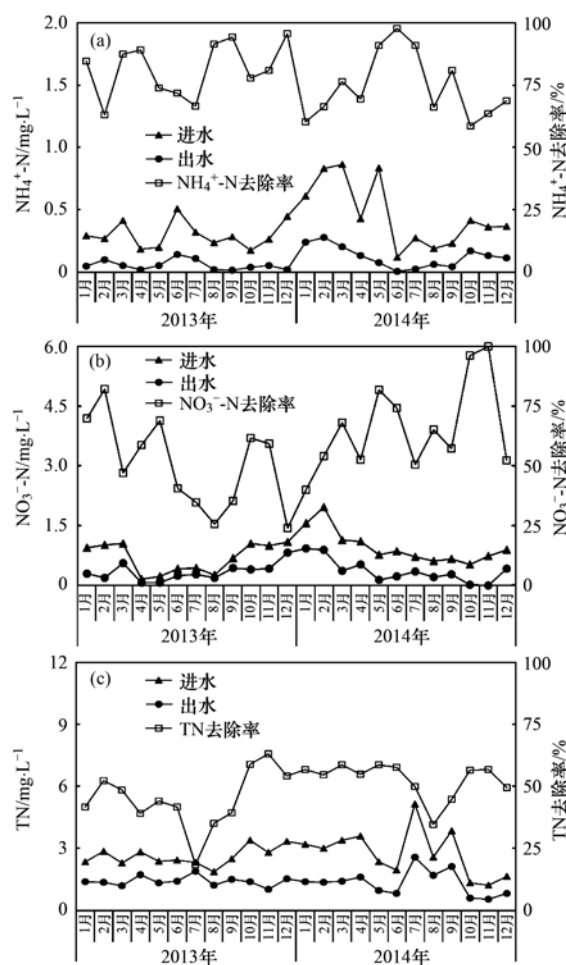


图 2 生态沟渠进、出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 质量浓度及其去除率变化

Fig. 2 Changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN concentrations in inlet, outlet and their removal rates in the ecological ditch

2.2 进出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例(质量分数)分析

生态沟渠进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例[图 3 (a)]和出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例[图

3(b)] 都有明显的季节性变化. 2013 ~ 2014 年, 进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占 TN 比例平均值为 15.3%, 春夏季时较低, 2013 年 4 月时最低为 5.1%; 秋冬季时较高, 2014 年 2 月时最高为 30.1%. 进水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例在 5.2% ~ 65.3% 范围内, 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有类似的随季节性变化规律. 进水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例平均值为 32.2%, 显著高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占 TN 比例 ($P < 0.01$). 出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占 TN 比例在 0.31% ~ 29.3% 间变动, 平均值为 8.0%, 显著低于进水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 占 TN 比例 ($P < 0.01$); 但与之显著正相关 ($P < 0.01$). 出水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例, 平均值为 25.7%, 略低于进水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 比例. 在进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之和占 TN 比例呈春夏季节低、秋冬季节高的特点, 进水中其所占比例最高可达 93.1%, 最低时为 11.6%, 平均为 47.5%; 出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之和占 TN 比例在 4.7% ~ 86.7% 范围内, 平均比例为 33.6%, 要显著低于在进水中比例 ($P < 0.05$), 其他形态氮占 TN 比例较进水显著增加, 可见氮素在生态沟渠的迁移和拦截中, 形态发生了变化.

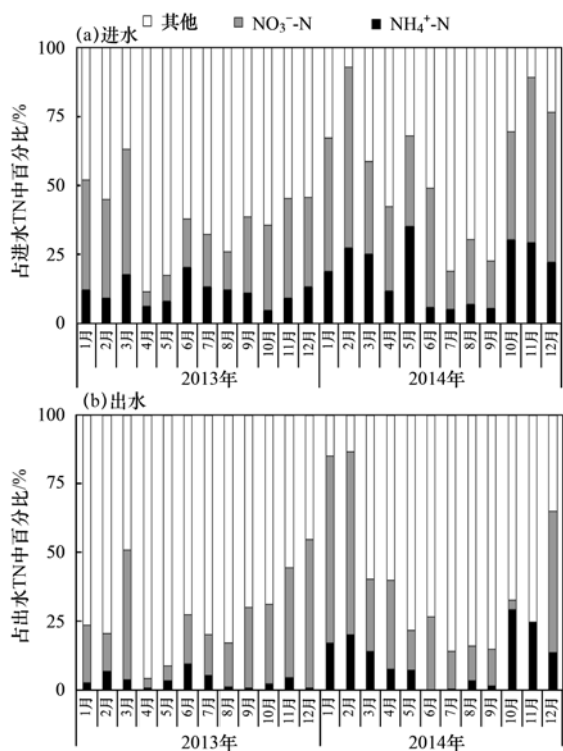


图3 生态沟渠进出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 占 TN 百分比

Fig. 3 Percentages of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in TN in inlet and outlet of the ecological ditch

2.3 生态沟渠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的拦截量

2013 ~ 2014 年流经生态沟渠的径流量按月统

计结果见图 4. 2013 年各月径流量在 1 682.5 ~ 15 141.0 m^3 范围内, 5 ~ 7 月径流量最大, 总径流量为 101 058.4 m^3 ; 2014 年的总径流量为 154 850 m^3 , 2014 年月径流量随月份变化趋势与 2013 年一致, 但各月径流量均高于 2013 年的相应月份径流量. 在 2013 ~ 2014 年 2 a 内, 生态沟渠对输入的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 拦截率分别为 76.8%、59.6% 和 48.6%, 共拦截的总氮量为 342.3 kg.

随径流迁移进出生态沟渠的氮量及其在生态沟中拦截量见表 1. 2013 年, 生态沟渠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 拦截量分别为 23.9、30.1 和 104.7 kg, 拦截率分别为 78.4%、52.8% 和 41.8%. 2014 年生态沟渠对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 TN 的拦截情况有所变化, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的拦截率为 76.1%、62.3% 和 52.3%, 拦截量分别为 52.9、89.0 和 237.6 kg. 2014 年较 2013 年拦截量均有所增加; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 的拦截量分别增加了 121.8%、195.3% 和 127.0%.

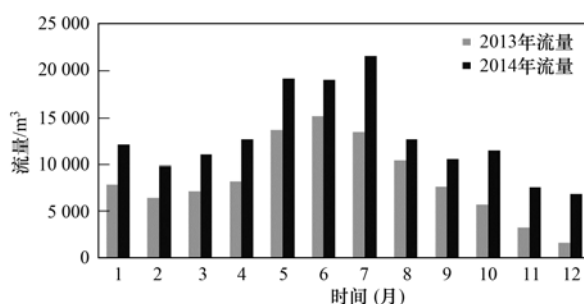


图4 2013、2014 年通过生态沟渠径流量

Fig. 4 Runoff volume per month of ecological ditch in 2013 and 2014

3 讨论

生态沟渠对氮素的拦截主要通过植物吸收、微生物硝化和反硝化作用以及底泥的吸附等过程实现^[19,20]. 其中微生物的硝化和反硝化作用是水体中氮素去除的最主要途径; 在污染负荷较低时, 水生植物的吸收作用也被认为是一种重要的去除方式, 且两种方式相互协调, 共同作用^[21~23]. 一方面, 氮素作为植物生长所必需的营养元素, 尤其是以离子形式存在的无机态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$) 能够被植物直接吸收利用而去除; 另一方面, 植物在生长过程中不断向根部输送氧气^[15], 而形成根区好氧微环境, 同时与根区以外的缺氧、厌氧环境相结合, 为硝化和反硝化细菌的附着和生长提供条件^[23~25]. 硝化细菌在好氧条件下将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化成为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 反

表 1 2013 年和 2014 年 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 TN 的输入量、输出量和拦截量
Table 1 Input, output and interception of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and TN in 2013 and 2014

年份	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$			$\text{NO}_3^- \text{-N}$			TN		
	输入量 /kg	输出量 /kg	拦截量 /kg	输入量 /kg	输出量 /kg	拦截量 /kg	输入量 /kg	输出量 /kg	拦截量 /kg
2013	30.4	6.6	23.9	57.0	26.9	30.1	250.4	145.8	104.7
2014	69.5	16.6	52.9	142.9	53.9	89.0	454.1	216.5	237.6
总计	99.9	23.2	76.8	199.9	80.8	129.1	704.5	362.3	342.3

硝化细菌则在缺氧或厌氧条件时将 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 最终转化为气态氮,而使得水体氮素得到去除。相比于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,狐尾藻等水生植物更加偏好于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ^[26];另外,由于底泥中土壤胶体颗粒带负电荷,能更好地吸附 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,促进 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 被吸附固定,因此,生态沟渠中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率要高于 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 。在研究区,水体中含氮污染物在浅水自然沟渠中迁移过程中易于氧化转换为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,这与生态沟渠进水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的含量要高于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 结果一致。经过生态沟渠处理后,尽管 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率低于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,但拦截量高于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。

生态沟渠中氮素污染物主要来源于周边农田的氮流失和上游居民点排放的生活污水,尽管有机态氮在迁移至生态沟渠过程中会矿化为无机态氮^[27],由于农田和居民点距离生态沟渠较近,生态沟渠进水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 之和占 TN 比例仅为 47.5%,因此,生态沟渠进水中主要以有机态氮为主。监测数据显示,生态沟渠出水中, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 之和占 TN 的比例平均值为 33.6%,表明出水中仍有很大比例的有机氮。这主要归因于:①与无机态氮相比,有机态氮被分解利用难度较大,随着无机态氮大量的去除,使得有机态氮的比例有所升高;②生态沟渠中水生植物在生长过程中,不断从水体或底泥中吸收氮素,同时某些部分又不断退化凋落并被微生物分解,分解作用会将水生植物吸收的部分无机态氮以有机态氮的形式再次释放到水体中^[28],使出水中仍有较大比例的有机态氮。在植物生长过程中,通过及时收割减少植物凋落物,控制二次污染,能提高生态沟渠对氮素的拦截能力。

在生态沟渠拦截氮素过程中,氮素去除率出现的季节性差异与植物和微生物的生长代谢活动同样密不可分,春季时,温度回升,生态沟渠中的水生植物逐渐生长茂盛,吸收氮素量较大;同时该季节温度适宜,有利于微生物硝化反硝化反应的进行,并且降雨少,沟渠内径流量较小,水力停留时间较长,有利于氮素去除,因此去除效果较好。而在夏季时,研究

区高温多雨,在高温和强光照时沉水植物的生长受到一定程度的抑制^[29~31],对氮素的吸收利用量减少;生态沟渠内水温升高,微生物的硝化反硝化作用也会受到一定的抑制^[32];较大的径流量使生态沟渠内水流速度较快,水力停留时间较短,使得该季节氮素去除率较低。

除上述因素,污染负荷、水力负荷、水力停留时间和植物种类等也会影响生态湿地系统的出水水质。污染负荷和水力负荷越大、水力停留时间越短,生态湿地系统出水水质就越差,反之出水水质越好^[33,34]。通过两年数据对比发现,2014 年生态沟渠各月经流量均比 2013 年多,年均增加了 53.3%,水力负荷增大,同时导致水力停留时间变短;TN 输入量由 250.4 kg 增加到 454.1 kg,增加了 81.3%,氮素污染负荷变大;2014 年生态沟渠对 TN 的去除率显著提高($P < 0.01$),由 44.7% 增加到 52.8%,拦截量和拦截率也分别由 104.7 kg 和 41.8% 增加到了 237.6 kg 和 52.3%。与 2013 年相比,2014 年生态沟渠污染负荷变大、水力停留时间变短,氮素的去除能力却有一定程度的提升。这可能与生态沟渠中种植植物的改变有关。在人工生态湿地系统中,水生植物具有十分重要的作用,不同种类的植物作用差异性也很大^[16]。本研究将生态沟渠内黑三棱、美人蕉、铜钱草等挺水植物全部改种为沉水植物绿狐尾藻后,生态沟渠的氮素拦截能力得到提高,表明绿狐尾藻更适合作为生态沟渠中种植植物。首先,绿狐尾藻根系发达且全部暴露在水体中,能在较短时间内吸收大量的氮素;其次,绿狐尾藻生物量较大且生长速度快,直接吸收利用的氮素变多,通过收割能带走更多的氮素;另外,绿狐尾藻发达的根系能有效调节水体微环境,形成有利于硝化反硝化反应的条件^[27],进一步促进氮素的去除。可见,通过对水生植物种类的筛选,有利于增强生态沟渠对氮素的去除能力,减少向下游水体的氮素输出量,使生态沟渠在农业面源污染防治中发挥更大作用。

4 结论

2013~2014 年期间,生态沟渠春秋季节时氮素拦截效率较高,夏季时较低, NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 的平均去除率分别为 77.8%、58.3% 和 48.7%,拦截量分别为 38.4、59.6 和 171.1 $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$,生态沟渠对上游输入的氮素能进行有效拦截,阻止其向下游水域迁移.通过对生态沟渠植物改种前后的监测数据对比发现,植物改种后, NO_3^- -N 和 TN 的去除率有显著的提高, NO_3^- -N 和 TN 的拦截率比第一年分别增加了 30.5% 和 18.2%.说明通过沟渠植物种植的筛选和后期管理有利于增强生态沟渠对 NO_3^- -N 和 TN 的去除能力,进一步提升生态沟渠对氮素的拦截能力.

参考文献:

- [1] Li X, Wellen C, Liu G X, *et al.* Estimation of nutrient sources and transport using Spatially Referenced Regressions on Watershed Attributes: a case study in Songhuajiang River Basin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(9): 6989-7001.
- [2] 欧阳威,蔡冠清,黄浩波,等.小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析[J].*环境科学*, 2014, **35**(6): 2411-2418.
- [3] Johnston A E, Trust L, Fellow S. Efficient use of nutrients in agricultural production systems [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, **31**(11-14): 1599-1620.
- [4] 崔力拓,李志伟,王立新,等.农业流域非点源磷素迁移转化机理研究进展[J].*农业环境科学学报*, 2006, **25**(Z1): 353-355.
- [5] 杨凤飞,刘锋,尹黎明,等.亚热带典型分散式养殖农区的环境污染特征研究[J].*农业现代化研究*, 2014, **35**(1): 113-117.
- [6] 欧阳威,黄浩波,蔡冠清.巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J].*环境科学学报*, 2014, **34**(4): 1024-1031.
- [7] 殷福才,张之源.巢湖富营养化研究进展[J].*湖泊科学*, 2003, **15**(4): 377-384.
- [8] 张树楠,肖润林,刘锋,等.生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J].*环境科学*, 2015, **36**(12): 4516-4522.
- [9] Needelman B A, Kleinman P J A, Strock J S, *et al.* Improved management of agricultural drainage ditches for water quality protection: an overview [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, **62**(4): 171-178.
- [10] Alexander R B, Boyer E W, Smith R A, *et al.* The role of headwater streams in downstream water quality[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**(1): 41-59.
- [11] Peterson B J, Wollheim W M, Mulholland P J, *et al.* Control of nitrogen export from watersheds by headwater streams [J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 86-90.
- [12] Cooper C M, Moore M T, Bennett E R, *et al.* Innovative uses of vegetated drainage ditches for reducing agricultural runoff[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(3): 117-123.
- [13] Sutcliffe A G. Modelling the effects of aquatic plant growth and management on the hydraulics of a chalk stream[D]. London: University of London, 2014.
- [14] 杨林章,周小平,王建国,等.用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J].*生态学报*, 2005, **24**(11): 1371-1374.
- [15] Greenway M. Suitability of macrophytes for nutrient removal from surface flow constructed wetlands receiving secondary treated sewage effluent in Queensland, Australia[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(2): 121-128.
- [16] Klomjek P, Nitisoravut S. Constructed treatment wetland: a study of eight plant species under saline conditions [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**(5): 585-593.
- [17] 张树楠,肖润林,余红兵,等.水生植物刈割对生态沟渠中氮、磷拦截的影响[J].*中国生态农业学报*, 2012, **20**(8): 1066-1071.
- [18] Tang J L, Zhang B, Gao C, *et al.* Hydrological pathway and source area of nutrient losses identified by a multi-scale monitoring in an agricultural catchment[J]. *CATENA*, 2008, **72**(3): 374-385.
- [19] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理[J].*生态学报*, 2006, **26**(8): 2670-2677.
- [20] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, **22**(1-2): 93-117.
- [21] Langergraber G. The role of plant uptake on the removal of organic matter and nutrients in subsurface flow constructed wetlands: a simulation study [J]. *Water Science and Technology*, 2005, **51**(9): 213-223.
- [22] 徐治国,何岩,闫百兴,等.湿地植物对外源氮、磷输入响应研究[J].*环境科学研究*, 2007, **20**(1): 64-68.
- [23] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(5): 11-17.
- [24] 徐光来,袁新田.人工湿地植物的作用与影响因素[J].*河北农业科学*, 2008, **12**(12): 63-65.
- [25] 罗专溪,朱波,唐家良,等.自然沟渠控制村镇降雨径流中氮磷污染的主要作用机制[J].*环境科学学报*, 2009, **29**(3): 561-568.
- [26] 金春华,陆开宏,胡智勇,等.粉绿狐尾藻和凤眼莲对不同形态氮吸收动力学研究[J].*水生生物学报*, 2011, **35**(1): 75-79.
- [27] 李强坤,胡亚伟,孙娟.农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J].*中国生态农业学报*, 2010, **18**(1): 210-214.
- [28] 张来甲,叶春,李春华,等.沉水植物腐解对水体水质的影响[J].*环境科学研究*, 2013, **26**(2): 145-151.

- [29] Huang J, Wang S H, Yan L, *et al.* Plant photosynthesis and its influence on removal efficiencies in constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(8): 1037-1043.
- [30] 李强. 环境因子对沉水植物生长发育的影响机制[D]. 南京: 南京师范大学, 2007. 2-8.
- [31] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 225-240.
- [32] 张婷婷, 张建, 杨芳, 等. 温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1283-1287.
- [33] Sim C H, Yusoff M K, Shutes B, *et al.* Nutrient removal in a pilot and full scale constructed wetland, Putrajaya city, Malaysia [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(2): 307-317.
- [34] Małoszewski P, Wachniew P, Czupryński P. Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds: constructed wetland in Nowa Słupia (Poland) [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **331**(3-4): 630-642.

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