

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发	张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟	彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)
鄂东典型工业城市大气 PM ₁₀ 中元素浓度特征和来源分析	占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)
常州夏秋季 PM _{2.5} 中碳质气溶胶特征及来源	叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析	范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源	刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布	李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征	唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价	张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究	李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)
尼洋河流域水化学特征及其控制因素	张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征	杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估	张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响	何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响	肖丽微, 朱波 (4580)
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系	滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析	李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律	蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响	王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V)	周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳听义, 王中良 (4623)
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除	蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)
流态对生物添加强化硝化效果的影响	于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 渭思思, 冯云堂 (4641)
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响	刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力	马娟, 王瑾, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)
污水处理厂 CANON 工艺小试	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)
SBR 加载不同粒径磁性活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制	信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复	黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化	高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析	张玉, 万方, 周集体 (4706)
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响	耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落	杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响	王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响	刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性	牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素	杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO ₂ 、CH ₄ 排放通量的短期影响	李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	石将来, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价	周燕, 卢新卫 (4800)
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征	代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响	蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 郭磊, 胡荣桂 (4819)
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因子	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果	段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)
反复冻融与高温老化对神污染土壤固化稳定化效果的影响	杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征	叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性	王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险	印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁凌刚, 唐铭 (4868)
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响	陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产气的影响	李标, 孔晓英, 李连华, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)
环境模型中敏感性分析方法评述	陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)
《环境科学》征稿简则 (4462) 《环境科学》征订启事 (4672) 信息 (4647, 4705, 4789)	

人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析

李如忠¹, 郑侠¹, 高苏蒂², 叶舟¹

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽新华学院土木与环境工程学院, 合肥 230031)

摘要: 2016年5月至2017年1月,在合肥城区东北部边缘某一溪流的自然状态段(情形1)、点源排污段(情形2)和水土流失段(情形3)设置6个采样点位,逐月采集水样和表层底质样,解析不同情形下溪流底质硝化-反硝化潜力及其变化特征,并进行差异性和影响因素分析。结果表明:① 溪流底质硝化活性均值为0.381%,并以情形2底质硝化活性最高,情形1的夏季硝化活性相对最强、冬季最弱,情形2、3硝化活性高低排序为:春季>夏季>秋季>冬季;② 溪流底质硝化速率均值为0.364 mg·(kg·d)⁻¹,其中以情形2底质硝化速率最高,情形2、3的各采样点春季硝化速率显著最高,其它季节相差不大,情形1的各季节变化不很明显;③ 溪流底质反硝化活性为37.25%,反硝化速率为57.68 mg·(kg·d)⁻¹,其中情形2底质反硝化活性和反硝化速率都高于相同季节的其他情形,情形1、2的反硝化活性和反硝化速率高低排序均为:夏季>春季>秋季>冬季,情形3的反硝化活性和反硝化速率排序均为:春季>夏季>秋季>冬季;④ 差异性分析表明,情形1、2在硝化速率方面存在极显著差异性,情形1、3在反硝化活性、反硝化速率方面存在极显著差异性,而情形2、3在硝化速率、反硝化活性和反硝化速率方面均呈现极显著差异性;⑤ 偏最小二乘回归分析表明,3种情形在硝化活性和硝化速率方面重要贡献因素差异较大。

关键词: 硝化-反硝化潜力; 硝化速率; 反硝化速率; 溪流底质; 城市边缘溪流; 人为干扰情景

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4598-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201704201

Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios

LI Ru-zhong¹, ZHENG Xia¹, GAO Su-di², YE Zou¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Civil and Environmental Engineering, Anhui Xinhua University, Hefei 230031, China)

Abstract: Water and benthic sediment samples were collected monthly from six sites over a 2-km reach in a first-order stream located in the northeastern rural-urban fringe of Hefei City, from May 2016 to January 2017. These sites were scattered in three stream reach types as natural pattern sections (Scenario 1), point source pollution sections (Scenario 2), and severe soil erosion sections (Scenario 3). The potential rates of nitrification and denitrification in the sediments were measured and variable characteristics were evaluated quarterly. Moreover, a difference analysis of each of the three scenarios and an influencing factor analysis for nitrification and denitrification potentials were subsequently conducted. Our results show that: ① the mean value of the nitrification ratios for total sediment samples is 0.381%, of which the maximum nitrification ratio emerged in Scenario 2. As for Scenario 1, the nitrification ratio in summer is the larger than in winter. The nitrification ratios for Scenarios 2 and 3 rank from largest to smallest as spring > summer > autumn > winter. ② The mean value of the nitrification rate of the total sediment samples is 0.364 mg·(kg·d)⁻¹, of which the maximum nitrification rate is associated with in Scenario 2. The nitrification rate is highest in winter, while similar for all other seasons in Scenarios 2 and 3. There is not much difference all year round for Scenario 1. ③ Average values for the denitrification ratio and denitrification rate for all sediment samples are 37.25% and 57.68 mg·(kg·d)⁻¹, respectively. Both of these are higher for Scenario 2 than the other two scenarios for the same season. The ranking for denitrification for Scenarios 1 and 2 is summer > spring > autumn > winter, and spring > summer > autumn > winter in Scenario 3. ④ According to the difference analysis, significant differences not only exist between the nitrification rates between Scenarios 1 and 2 but also for the denitrification ratios and denitrification rates between Scenarios 1 and 3. In addition, there is an obvious difference in the nitrification ratio between Scenarios 2 and 3. ⑤ Partial least-squares regressive analysis indicates that there is significant difference between the important influencing factors related to the nitrification ratio and nitrification rate for each of the three scenarios.

Key words: nitrification and denitrification potential; nitrification rate; denitrification rate; benthic sediment; suburban stream; human disturbance

硝化-反硝化作用是沉积物中氮的地球生物化学循环的一个重要过程,也是水体氮滞留的重要作用机制。近30年来,有关水体沉积物硝化-反硝化

收稿日期: 2017-04-20; 修订日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061, 51179042)

作者简介: 李如忠(1970~),男,博士,教授,主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: lrz1970@163.com

潜力、作用机制及影响因素的研究,一直都是环境科学、环境地球化学、水生态学等学科领域的热点^[1-4]. 总的来看,尽管针对溪流等小河流水体沉积物硝化-反硝化潜力的研究已有一些^[5,6],但相对于海湾、湖库、河口等大尺度水域,现有研究还显得很不充分. 源头溪流不仅是河流水系统的重要组成部分,也是汇流区养分传输、转化的重要场所和通道,因此在削减和调控入河氮素负荷向下游水体传输方面,有着举足轻重的地位^[7-9]. 尽管沉积物的硝化-反硝化过程也是溪流氮素滞留的重要机制,但由于对源头溪流等小尺度河流水体养分滞留重要性的认识起步较晚,致使对溪流沉积物硝化-反硝化潜力、特征和贡献水平的定量刻画,都还存在很多深层次问题需要进一步探究^[10,11].

在城市化进程中,城郊地区土地利用类型、强度等都发生了巨大变化,导致了城郊河流水环境质量状况往往呈现明显的下降态势^[12,13]. 由人为扰动带来的大量水土流失,以及生活污水和工业废水的无序排放,改变了城郊地区溪流水相和底质的物质组成和微生物群落结构,使得表层沉积物的硝化-反硝化作用表现出一定的复杂性与特殊性^[14]. 合肥市地处富营养化严重的巢湖西半湖北侧,横穿城区的南淝河将大量氮素养分负荷直接输入巢湖,成为巢湖流域最大的氮磷污染负荷输入通道. 本研究拟以合肥城区东北部的一条城郊溪流为对象,针对土地利用变化引发的多种人工扰动效应,根据溪流底质污染来源和理化性质的不同,设置多种情形,就表层沉积物的硝化-反硝化

潜力及其变化特征和影响因素进行分析,以期为巢湖入湖河流水污染控制和氮素污染负荷削减提供依据.

1 研究区概况

本研究选定的溪流靶区位于合肥东北部城区边缘的职教城境内,为南淝河主要支流二十埠河的重要源头之一. 该溪流属于自然冲刷形成,全长约 4.0 km,水面宽度约 0.6 ~ 2.5 m,水深约 0.1 ~ 0.6 m,流速约 0.09 ~ 0.35 m·s⁻¹,溪流两侧为明显的低矮丘陵岗地特征. 由于城市建设的快速推进,汇流区中、下部岗坡土地正逐步向住宅、工业用地过渡,而在汇流区左侧的岗坡顶部已建成多所高校新校区,并逐步成为合肥市职业教育中心. 目前汇流区内多条城市道路开始修建,特别是在溪流左侧不远处,与溪流走向平行的前岭路正处于施工阶段,几场强降雨将道路施工中新翻的深层土壤冲刷进入溪流,并形成厚厚的淤积层.

实地调查发现,在与溪流垂直交叉的淮海大道桥涵内有一污水排放口,来自安徽大学艺术与传媒学院的少量生活污水通过道路雨水管直接排入溪流水体,使得部分溪流段水质污染严重. 除此之外,溪流上没有其他明显的污染点源存在. 正是由于来自高校校园,污水出流流量、水质受高校教学活动影响很大,特别是寒暑假期间几乎没有污水排入. 2016 年 5 月至 2017 年 1 月,按每月一次的频率开展水样采集(水质与沉积物的采样点一一对应),统计结果见表 1.

表 1 溪流水质统计结果

Table 1 Physiochemical parameters of water quality of the study stream reach									
采样点	TN /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	SRP /mg·L ⁻¹	COD /mg·L ⁻¹	EC /μS·cm ⁻¹	ORP /mV	pH
1	3.54	1.74	0.492	0.092	0.041	31.77	401	129	7.87
2	3.72	1.62	0.532	0.093	0.054	33.03	367	123	7.78
3	21.92	15.82	0.917	1.217	0.930	92.39	550	66	7.53
4	19.70	14.22	0.779	1.079	0.834	75.43	514	83	7.54
5	15.46	10.60	0.688	0.885	0.597	62.58	518	96	7.61
6	14.50	9.89	0.648	0.706	0.501	48.01	503	104	7.60

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

沿溪流水流方向设置 6 个采样点位,其中 1、2 号采样点位于溪流上游且在污水排放口的上方,两侧主要为抛荒农田、林地; 3 号采样点位于排污口下方 30 m,该水域是因修建桥涵而形成的面积约 70 m² 浅水塘; 4 ~ 6 号采样点位于一般溪流沟渠段,且

在 4 号点上方不远处有明沟与左侧 80 ~ 100 m 外正在修建的道路排水沟相通. 采样点分布大体情况,见图 1.

2016 年 5 月至 2017 年 1 月按照每月一次的采样频率,采集表层 5 ~ 10 cm 底质,并在实验室将其置于阴凉通风处自然风干,去除根茎、落叶等,研磨过 100 目筛后用于测定硝化速率、反硝化速率以及底质基本理化性质分析. 由于合肥地区 2016 年 7

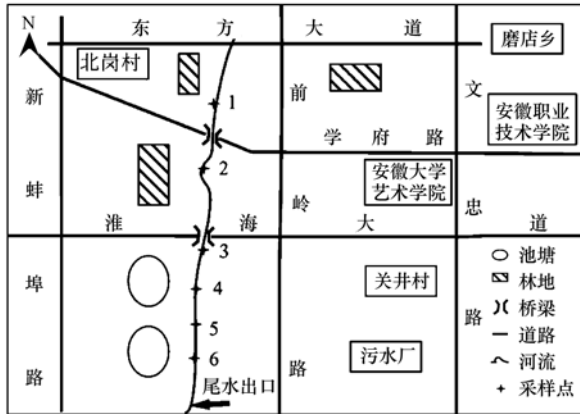


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Sketch-map of the distribution of the sampling sites

月发生多场大暴雨,使得道路施工中新挖掘的深层土壤被雨水冲刷到溪流中,导致4~6号采样点河床被厚厚的细质黏土覆盖。在此后的数月,虽有生活污水带来的污染物沉积,但至2017年1月,4~6号采样点依旧明显表现为土壤冲刷淤积特征,即不再是一般意义的水土流失或污水携带污染物缓慢沉积形成的污染物聚集,带有剧烈的人为扰动色彩。

2.2 样品分析测试

沉积物TN采用过硫酸钾消解法测定;硝态氮(NO_3^- -N)经KCl溶液浸提后用紫外分光光度计测定;铵态氮(NH_4^+ -N)采用KCl溶液浸提后用可见分光光度计测定;沉积物有机质含量采用烧失量(LOI%)进行估算;pH值采用pH计测定(水土比=5:1);称取0.2 g土样于坩埚中放置于马弗炉在450℃下煅烧3 h,土样冷却至室温后移至离心管,加入20 mL $3.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl溶液后恒温振荡(25°C , $220 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)16 h,离心过滤后取适量上清液测总磷(TP)含量;利用TOC分析仪测定底质中总有机碳(TOC)。

2.3 硝化-反硝化潜力测定

2.3.1 硝化潜力测定

称取10 g过100目筛的6个采样点位供试土样各4份(共24份),分别放入150 mL培养瓶中,加适量去离子水并置于 35°C 培养箱中预培养3 d。然后,将每个点位各取出1份,分别加入25 mL $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl浸提液,振荡1 h,将滤液移入带刻度的平底塑料管用于测定 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量,并将其作为初始值。其余18份样品分别加入10 mL $2.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (含有2.50 mg N)的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,考虑到沉积物的淹水胁迫效应,使沉积物处于淹没状态。利用保鲜膜封住瓶口,并扎出孔洞通气,继续恒温培

养7 d。每个点位各为3个重复,分别加入25 mL $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl浸提液,振荡过滤后测定滤液的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N含量。

不妨以 $[\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{NO}_3^- \text{-N} + \text{NH}_4^+ \text{-N})] \times 100\%$ 表征沉积物的硝化活性,而以硝态氮的净产生量除以培养时间计算潜在硝化速率^[15,16]。

2.3.2 反硝化潜力测定

采用加入 KNO_3 在恒温条件下厌氧淹水培养法测定反硝化潜力。称取10 g过100目筛的6个点位供试土样各4份(共24份),分别放入150 mL培养瓶中,加适量去离子水置于 35°C 培养箱中预培养3 d,然后取出所有培养瓶。每个点位各取出1份,分别加入25 mL $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl溶液,振荡1 h,将滤液盛入带刻度的平底塑料管,测定 NO_3^- -N含量作为初始量。其他18份样品分别加入10 mL $3.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (含有5.00 mg N)的 KNO_3 溶液,并使沉积物土样完全淹没。瓶口以橡胶塞密封封口,继续恒温培养,3 d后取出培养瓶,分别加25 mL $2.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的KCl溶液,每个点位各取3瓶作为3个重复,振荡过滤后测定 NO_3^- -N含量。

将初始值减去培养期内 NO_3^- -N测定值作为硝态氮变化量,并以 $(\text{NO}_3^- \text{-N变化量}/\text{NO}_3^- \text{-N初始量}) \times 100\%$ 表征沉积物反硝化活性,而以硝态氮的变化量除以培养时间计算反硝化速率^[16]。

2.4 数据分析

Mann-Whitney U检验法是一种非参数检验法。当样本数量较少、不满足正态分布时,可采用该方法检验两个独立样本是否来自一个总体。通常认为 $P < 0.05$ 意味着两个样本呈显著差异, $P < 0.01$ 呈极显著差异。偏最小二乘回归分析(PLSR)是一种集主成分分析、典型相关分析和多元线性回归分析优点于一体的新型多元统计分析方法^[17]。回归分析生成的 F_{VIP} 参数反映出自变量对因变量的贡献水平, f_{VIP} 值越大,自变量对因变量的贡献能力越大。一般认为,生成的 F_{VIP} 大于1的自变量重要,在0.8~1的自变量比较重要,小于0.8的自变量则不重要^[18]。

借助Excel 10.0软件,完成相关分析结果的图形绘制及其它数据处理。

3 结果与讨论

3.1 沉积物的理化性质

6个采样点位的春季(5、6月)、夏季(7、8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月~翌年1月)表层底质氮形态及基本理化特性,见表2。

表 2 沉积物基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of the sediments

采样点	季节	TN /mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	LOI /%	pH	TOC ¹⁾ /g·kg ⁻¹
1 号	春	1 360.88	428.56	37.50	360.33	9.27	5.55	1.97
	夏	1 169.53	313.51	26.35	338.74	5.75	6.25	
	秋	1 216.22	301.74	37.80	278.31	4.23	6.96	
	冬	1 514.55	385.53	47.67	198.43	3.81	7.50	
2 号	春	1 302.74	428.78	37.92	451.61	5.44	6.66	2.65
	夏	1 237.94	342.09	24.43	267.31	4.99	7.09	
	秋	1 227.45	296.08	37.53	289.23	5.01	7.02	
	冬	1 531.46	399.34	50.68	333.77	5.65	7.36	
3 号	春	2 394.29	753.37	65.69	970.93	7.29	6.93	10.34
	夏	1 886.02	532.50	49.92	758.28	11.62	6.74	
	秋	1 935.04	599.01	46.79	886.31	7.22	7.04	
	冬	2 307.61	675.49	60.91	814.76	6.95	7.22	
4 号	春	2 170.52	626.52	55.70	528.17	6.48	6.45	— ²⁾
	夏	1 345.04	310.44	41.34	157.91	4.21	7.48	
	秋	792.38	148.77	37.78	197.86	2.80	7.65	
	冬	1 003.35	290.86	41.85	168.26	3.66	7.96	
5 号	春	2 027.52	547.47	46.53	454.27	5.43	5.93	—
	夏	1 293.76	291.79	33.32	204.40	3.65	7.61	
	秋	771.02	140.55	36.08	180.04	2.98	7.80	
	冬	973.29	279.78	44.87	130.33	3.27	7.77	
6 号	春	1 938.25	486.66	42.81	442.94	5.72	5.96	—
	夏	1 202.82	272.66	31.69	274.14	5.27	7.74	
	秋	748.79	130.95	35.41	181.20	2.90	7.95	
	冬	945.11	275.43	36.81	153.61	2.53	8.21	

1) 仅测定了秋季溪流底质 TOC 含量; 2) 低于检测限

可以看出,3 号采样点沉积物 NH₄⁺-N、TN、TP 含量和 LOI 值均明显高于相同季节的其余 5 个采样点,而且 4~6 号采样点位春季的氮、磷含量基本也都高于 1、2 号采样点。但从夏季开始,4~6 号采样点位 TN、NH₄⁺-N、TP 含量开始呈现断崖式下降,且几乎所有指标均在秋季时达到最低水平,随后又有所上升。4~6 号采样点位氮、磷含量的起伏变化,与 2017 年 7 月多场暴雨将道路施工中新挖掘的深层土壤冲刷覆盖 4~6 号采样点位河床有直接关系。进入秋季后,随着高校暑假结束,生活污水携带的一部分颗粒态污染物开始在 4~6 号采样点的淤积物表面沉积下来,这是该 3 个点位冬季氮、磷含量回升的主要原因。实际上,3 号采样点位夏季沉积物的 TN、NH₄⁺-N 和 TP 含量低于秋季,也是受到 7、8 月高校放假带来的入河生活污水量减少的影响。

显然,6 个采样点位的溪流底质,无论是污染源还是理化性质都存在较为明显的不同,即存在 3 种人为干扰情形后果。其中,采样点 1、2 为自然状态段,代表自然状态下非点源流失逐步聚集形成的溪流沉积物(情形 1); 3 号采样点位于点源污染影响显著段,代表生活污水排入形成的污染底质(情

形 2); 4~6 号采样点位于水土流失段,代表了强降雨冲刷导致的水土流失淤积底质(情形 3)。

3.2 硝化潜力分析

3.2.1 硝化活性

6 个采样点底质硝化活性的季节变化情况见图 2。可以看出,3 种干扰效应对溪流底质硝化活性影响有所不同。其中,3 号采样点(情形 2)底质硝化活性相对最高,明显高于相同季节的其他各采样点。究其原因,可能因为 3 号采样点紧邻排污口下方,沉积物中生源物质 TN、NH₄⁺-N、TP、TOC 和有机质等含量明显高于情形 1 和情形 3 的各采样点,使得生物活性相对较强,硝化活性相对也较大。牟晓杰等^[16]在对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力研究中发现,沉积物 TN、TP、DOC 含量相对较高的养殖塘、水稻田底质硝化活性最高。春季时采样点 4~6 与采样点 3 底质同为受生活污水污染影响的水体沉积物。显然,越靠近生活污水排放口,底质硝化活性越强,且基本都高于情形 1 的两个采样点,但从夏季开始,情况发生了显著变化,4~6 号采样点的硝化活性甚至较相同季节采样点 1、2 略低一些,这可能与冲刷淤积堆积物中氮、磷、碳等生源物质含量低

使得生物活性不强有关. 3 种情形的溪流底质硝化活性变化似乎表现出底质氮磷污染越重, 硝化活性相对越大的特点.

从季节变化方面看, 情形 1 的两个采样点都表现为夏季硝化活性相对最强、冬季最弱; 而情形 2、3 的各采样点则呈现出另类变化特征, 即均表现为: 春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季. 总的来看, 该溪流段硝化活性变化范围为 0.170% ~ 0.829%, 均值为 0.381%, 与闽江河口芦苇湿地、排污闸口沉积物十分接近^[16].

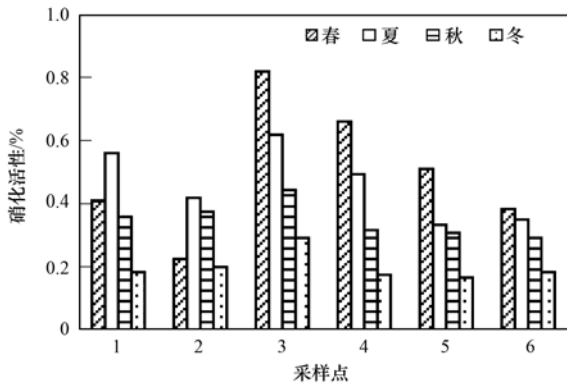


图 2 各采样点底质硝化活性的季节变化性

Fig. 2 Seasonal variations of the nitrification ratio for sediment at each sampling sites

3.2.2 硝化速率

3 种情形的底质硝化速率季节变化情况见图 3. 不难看出, 情形 2 (3 号采样点) 底质硝化速率高于相同季节的其他各采样点. 情形 2 底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 (均值为 $635.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最大, 情形 1 (均值为 $361.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 其次, 情形 3 (均值为 $316.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最低, 表现出底质 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量越高的采样点硝化速率也越高的特点. 王玉萍等指出^[19], $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对氨氧化细菌生长有促进作用, 底质氨氮作为硝化作用的底物, 其含量大小直接或间接地影响着硝化速率的大小. 春季时情形 3 底质硝化速率虽低于情形 2, 但仍明显高于情形 1, 而且在空间层面呈现出沿水流方向逐步降低的变化态势. 另外, 情形 2、3 的春季硝化速率都显著最高, 其它季节则基本相差不大; 情形 1 的两个采样点各季节变化则不是很明显. 总体上, 3 种情形基本上都表现为春季硝化速率最高, 冬季最低, 且情形 1、3 除春季外, 各采样点位对应季节的硝化速率较为接近. 沉积物硝化过程往往受到溶解氧条件的限制, 夏季水温过高, 上覆水中溶解氧浓度降低, 使得沉积物的硝化过程受到限制^[20], 这或许正是 3 种情形中春季硝化速率

高于夏季的主要原因. 当然, 冬季气温低, 生物活性弱, 使得该季节硝化速率降低.

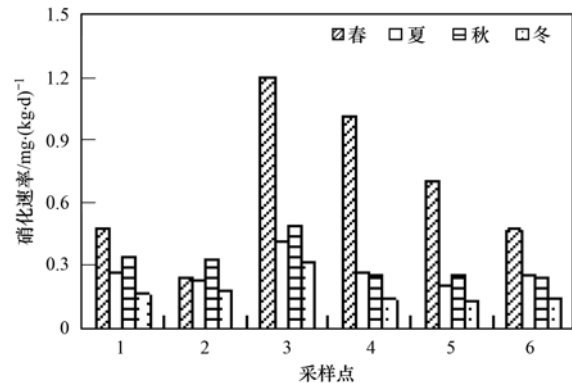


图 3 各采样点底质硝化速率的季节变化性

Fig. 3 Seasonal variations in the nitrification rate of each of the sediments at each sampling sites

总体上, 溪流底质硝化速率呈现明显的时空变化性特征, 变化范围为 $0.135 \sim 1.20 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 均值为 $0.364 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 秦如彬等^[14]以新鲜沉积物对本研究渠段上方溪流段的硝化速率进行测试, 得到潜在硝化速率均值为 $1.68 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 明显高于本文所得结果, 这可能与本研究的底质样品在暴露风干过程中, 一部分氨氮、有机质被空气氧化有一定的关系. Groffman 等^[21]在对两条城市小河流不同地貌单元沉积物硝化潜力的研究中, 得到 Minebank Run 深潭、浅滩、砾石堆区的净硝化潜力分别为 0.20 、 0.70 、 $1.40 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$; Baisman Run 深潭、浅滩、砾石堆区的净硝化潜力分别为 0.08 、 0.16 、 $0.16 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 带有水生植物的砾石堆区为 $0.25 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 基本与本研究各情形的大部分季节较为接近. 牟晓杰等^[16]采用与本研究相同方法, 得到闽江河口芦苇湿地、排污闸口沉积物的硝化速率变化范围分别为 $0 \sim 0.35$ 、 $0 \sim 0.89 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 与该溪流底质十分接近. Bai 等^[15]采用与本研究相同的方法, 对向海自然保护区两块盐碱湿地表层沉积物硝化潜力进行测定, 得到硝化速率均值分别高达 $167.39 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $69.61 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 显著高于本研究溪流段硝化水平.

3.3 反硝化潜力分析

3.3.1 反硝化活性

3 种情形的 6 个采样点底质反硝化活性的季节性变化情况见图 4. 不难看出, 3 号采样点 (情形 2) 底质反硝化活性都高于相同季节的其他各采样点, 均值为 48.17% , 情形 1 和情形 3 均值分别为 36.97% 、 30.42% . 尽管情形 3 的春季反硝化活性较情形 1 高一些, 但其另外 3 个季节反硝化活性则

低于情形1,特别是秋、冬季,说明氮、磷、碳等生源物质含量较少的深层土壤反硝化活性弱于一般沉积物类型。反硝化微生物活性对反硝化作用有重要影响,当底质中硝态氮、氨氮含量升高时,微生物活性将会提高,反硝化作用也将随之增强^[22]。有机质和碳源是反硝化作用需要的物质和能源条件^[6,23,24],情形3可能由于有机质含量低、碳源较为缺乏,导致4~6号采样点位夏、秋和冬季的反硝化活性偏低。

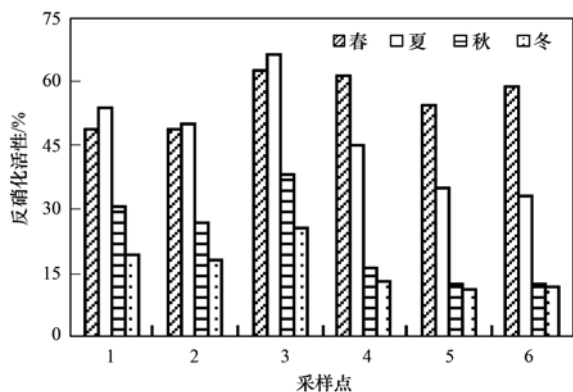


图4 各采样点底质反硝化活性的季节变化性

Fig. 4 Seasonal variations of the denitrification ratio of the sediment at each sampling sites

总体上,该溪流反硝化活性变化范围为11.39%~66.21%,均值为37.25%。其中,情形1、2的反硝化活性高低排序为:夏季>春季>秋季>冬季;情形3的高低排序则为:春季>夏季>秋季>冬季。就情形3而言,从夏季开始来水和底质中 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 等含量明显减少,微生物活性也降低,反硝化活性随之减弱。

3.3.2 反硝化速率

3种情形的6个采样点底质反硝化速率季节变化情况见图5。不难看出,情形2(3号采样点)底质反硝化速率都较相同季节其他采样点更高一些,均值为 $79.78 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,情形1和情形3底质反硝化速率均值分别为 $60.81 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 、 $48.22 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,表现出氮素污染程度越高,反硝化速率越大的特点。俞琳等^[22]对上海市苏州河与崇明岛河流沉积物反硝化速率的研究也表明,城市区域污染河流沉积物反硝化速率明显高于清洁的农村河流。

与反硝化活性一样,情形1、2的反硝化速率高低排序也表现为:夏季>春季>秋季>冬季;情形3的高低排序则为:春季>夏季>秋季>冬季,而且除春季外,情形3的各季节反硝化速率都低于情形1、

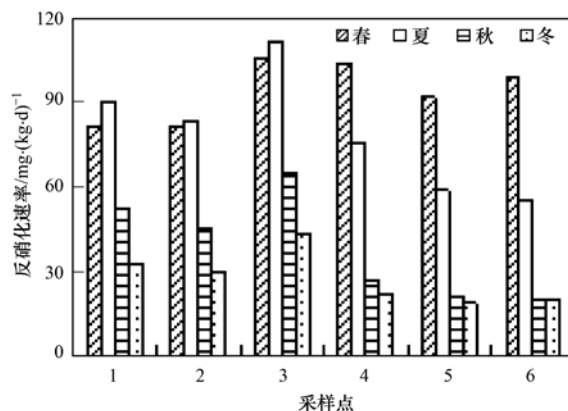


图5 各采样点底质反硝化速率的季节变化性

Fig. 5 Seasonal variations in the denitrification rate of each sediment at each of the sampling sites

2。总体上,该溪流底质反硝化速率变化范围为 $16.77 \sim 123.52 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $57.68 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。秦如彬等^[14]采用硝酸盐剩余量法,利用新鲜沉积物测定了本研究所在渠段上方溪流段的反硝化速率,得到变化范围为 $49.44 \sim 140.16 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,均值为 $80.40 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,与本研究各情形的春、夏季水平大体相当。Groffman等^[21]在对城市小河流 Glyndon 不同地貌单元沉积物反硝化潜力的研究中,得到浅滩、深潭和有机质残体堆积区反硝化潜力分别高达 1.75 、 5.26 和 $110.38 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,表现出了相当大的数值差异。牟晓杰等^[16]得到闽江河口芦苇湿地、排污闸口沉积物、水稻田和养殖塘底质反硝化速率范围分别为 $17.72 \sim 64.48$ 、 $11.63 \sim 45.51$ 、 $-4.09 \sim 44.47$ 和 $-2.6 \sim 88.45 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,总体上与本研究较为接近。Forshay等^[25]分别对水生植物丛生区和无水生植物区的沉积物反硝化潜力进行分析,经换算得到水生植物丛生区反硝化速率均值高达 $376.32 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,但其无水生植物区仅为 $97.44 \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,与本研究各情形的春季水平相当。实际上,本研究在反硝化潜力测定过程中,由于未能将培养瓶中空气全部排出,即瓶中存在氧气残留,致使反硝化过程也伴有一定的硝化反应发生,从而给反硝化潜力测定带来一定的影响。

3.4 多元统计分析

3.4.1 差异性分析

采用 Mann-Whitney U 检验法,从硝化活性、硝化速率、反硝化活性和反硝化速率等方面分析3种情形的差异性,结果见表3。这里情形1、2采用2016年5月至2017年1月全部实验数据信息,而情形3则不包括2016年5、6月溪流底质数据。

表 3 溪流底质 3 种情形的差异性

Table 3 Differences between the three human disturbance scenarios			
项目	情形比较	P 值	差异性
硝化活性	1 和 2	0.176	否
	1 和 3	0.297	否
	2 和 3	0.125	否
硝化速率	1 和 2	0.009	极显著差异
	1 和 3	0.055	否
	2 和 3	0.000	极显著差异
反硝化活性	1 和 2	0.059	否
	1 和 3	0.000	极显著差异
	2 和 3	0.001	极显著差异
反硝化速率	1 和 2	0.053	否
	1 和 3	0.000	极显著差异
	2 和 3	0.001	极显著差异

从表 3 可见,情形 1、2 仅在硝化速率方面存在极显著差异性($P < 0.01$),而在其他 3 个方面并没有显著差异($P > 0.05$),这可能与两者之间显著差

表 4 影响因素对硝化/反硝化作用的 F_{VIP} 参数值

Table 4 The F_{VIP} values of factors affecting nitrification and denitrification							
项目	情景	NH_4^+-N	NO_3^--N	TN	TP	LOI	pH
硝化活性	情形 1	1.252	1.424	1.402	0.371	0.566	0.417
	情形 2	1.404	2.313	1.013	1.202	1.035	0.908
	情形 3	0.725	1.493	0.256	0.554	1.505	1.020
硝化速率	情形 1	0.220	0.906	0.817	0.758	1.426	1.383
	情形 2	1.987	2.404	0.457	1.680	1.169	0.816
	情形 3	0.587	1.421	0.692	0.505	1.335	1.343
反硝化活性	情形 1	0.613	1.422	0.940	0.860	0.929	1.081
	情形 2	0.779	0.672	0.765	1.133	1.135	1.620
	情形 3	1.704	0.819	1.885	0.710	1.060	0.810
反硝化速率	情形 1	0.604	1.424	0.947	0.858	0.925	1.078
	情形 2	0.781	0.678	0.764	1.159	1.143	1.603
	情形 3	1.706	0.827	1.890	0.713	1.062	0.812

从硝化活性来看,情形 1 中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN 的 F_{VIP} 值均大于 1,即对硝化活性有显著贡献(即重要性大),其它因素对硝化活性贡献水平较低(即较不重要);情形 2 中几乎所有影响因素都对硝化活性具有重要贡献,即几乎所有指标都很重要;而情形 3 则仅有 NO_3^--N 、有机质和 pH 具有显著贡献,其它指标都不重要。总的来看,该溪流底质硝化活性与 NO_3^--N 呈显著相关性, NO_3^--N 是反映该溪流硝化活性共同的重要指标。牟晓杰等^[16]的研究发现,土壤硝化速率与土壤硝态氮含量呈极显著相关性,土壤中硝态氮含量越高,硝化潜力也越强。

从硝化速率来看,情形 1 中硝化速率与有机质含量和 pH 值呈显著相关,与 NO_3^--N 、TN 有较强相关性,与 TP 和 NH_4^+-N 无显著相关性;情形 2 中除 TN 不重要、pH 较为重要外,其它指标都对硝化速

率的溶解氧水平(以表 1 中 ORP 代表)有很大关系。情形 1、3 在涉及反硝化作用的反硝化活性、反硝化速率方面存在极显著差异性($P < 0.01$),而在硝化活性和硝化速率方面彼此差异并不显著($P > 0.05$)。情形 2、3 仅在硝化活性方面没有表现出显著差异性,而在硝化速率、反硝化活性和反硝化速率方面均呈现极显著差异性($P < 0.01$),这或许与两种情形之间溶解氧水平(以表 1 中 ORP 代表)较为接近,而底质要素差异较为显著密切相关。

3.4.2 影响因素分析

采用偏最小二乘回归分析方法,利用上述差异性分析相同的原始数据信息,分别对 3 种情形下硝化活性、硝化速率、反硝化活性和反硝化速率与影响因素 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、TP、有机质含量及 pH 值进行重要性分析,得出影响因素(自变量)对硝化/反硝化作用(因变量)的 F_{VIP} 参数值,见表 4。

率有很高的贡献水平;情形 3 中 NO_3^--N 、有机质和 pH 对硝化速率具有显著贡献,其它指标都不重要。总体上, NO_3^--N 、有机质和 pH 是影响该溪流硝化速率的最为重要指标。

显然,情形 1 中对反硝化活性、反硝化速率具有显著贡献的都是 NO_3^--N 和 pH,重要性较低的是 NH_4^+-N ;情形 2 中对反硝化活性、反硝化速率具有显著贡献的都是 TP、有机质和 pH,其它指标均不重要;情形 3 中 NH_4^+-N 、TN、有机质属于对反硝化活性、反硝化速率具有显著影响的指标, NO_3^--N 和 pH 同为较为重要指标。

4 结论

(1)不同人为扰动效应带来的溪流底质硝化/反硝化作用效果差异显著。其中,点源排污段底质

硝化活性和硝化速率相对最高,明显高于相同季节的自然状态段和水土流失段,且自然状态情形表现为夏季硝化活性相对最强、冬季最弱,点源排污段和水土流失段的硝化活性则表现为:春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季;排污段和水土流失段各采样点春季硝化速率都显著最高,其它季节则相差不大,自然状态河段底质的各季节变化则不是很明显。

(2)点源排污段底质的反硝化活性、反硝化速率高于相同季节的其他两种河段;自然状态段和点源排污段的反硝化活性和反硝化速率高低排序均为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季,水土流失段的反硝化活性和反硝化速率排序均为:春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季。

(3)差异性分析表明,自然状态段和点源排污段仅在硝化速率方面存在极显著差异性,自然状态和水土流失段仅在涉及反硝化作用的反硝化活性、反硝化速率方面存在极显著差异性,而点源排污段和水土流失段则仅在硝化活性方面没有表现出显著差异性,在硝化速率、反硝化活性和反硝化速率方面均呈现极显著差异性。

(4)偏最小二乘回归分析表明,在对硝化活性、硝化速率影响方面,3 种情形的重要贡献因素差异较大;自然状态段中对反硝化活性、反硝化速率具有显著贡献的是 NO_3^- -N和pH,点源排污段为TP、有机质和pH,水土流失段则为 NH_4^+ -N、TN、有机质。

参考文献:

- [1] Holmes R M, Jones Jr J B, Fisher S G, *et al.* Denitrification in a nitrogen-limited stream ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 1996, **33**(2): 125-146.
- [2] Smith R L, Böhlke J K, Repert D A, *et al.* Nitrification and denitrification in a midwestern stream containing high nitrate: in situ assessment using tracers in dome-shaped incubation chambers [J]. *Biogeochemistry*, 2009, **96**(1): 189-208.
- [3] Bellinger B J, Jicha T M, Lehto L P, *et al.* Sediment nitrification and denitrification in a lake superior estuary [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(2): 392-403.
- [4] Granger J, Prokopenko M G, Sigman D M, *et al.* coupled Nitrification-denitrification in sediment of the eastern Bering Sea shelf leads to ^{15}N enrichment of fixed N in shelf waters [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**(C11): C11006.
- [5] Starry O S, Valett H M, Schreiber M E. Nitrification rates in a headwater stream: influences of seasonal variation in C and N supply[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, **24**(4): 753-768.
- [6] Strauss E A, Lamberti G A. Effect of dissolved organic carbon quality on microbial decomposition and nitrification rates in stream sediments [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(1): 65-74.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李如忠, 杨继伟, 钱靖, 等. 合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3365-3372.
- Li R Z, Yang J W, Qian J, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus retention in two different channel forms in a typical headwater stream in the suburb of Hefei City, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3365-3372.
- [10] Austin B J, Strauss E A. Nitrification and denitrification response to varying periods of desiccation and inundation in a western Kansas stream[J]. *Hydrobiologia*, 2011, **658**(1): 183-195.
- [11] Beaulieu J J, Tank J L, Hamilton S K, *et al.* Nitrous oxide emission from denitrification in stream and river networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108**(1): 214-219.
- [12] Feminella J W, Walsh C J. Urbanization and stream ecology: an introduction to the series [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, **24**(3): 585-587.
- [13] Covino T, McGlynn B, McNamara R. Land use/land cover and scale influences on in-stream nitrogen uptake kinetics [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(G2): G02006.
- [14] 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 等. 城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 936-945.
- Qin R B, Li R Z, Gao S D, *et al.* Pollution characteristics and nitrification and denitrification potential of superficial sediments from streams in an urban-rural fringe [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 936-945.
- [15] Bai J H, Gao H F, Deng W, *et al.* Nitrification potential of marsh soils from two natural saline-alkaline wetlands[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, **46**(5): 525-529.
- [16] 牟晓杰, 刘兴士, 仝川, 等. 人为干扰对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
- Mou X J, Liu X S, Tong C, *et al.* Effects of human disturbance on nitrification and denitrification potential in the Min River estuarine wetland [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
- [17] Carrascal L M, Galván I, Gordo O. Partial least squares regression as an alternative to current regression methods used in ecology [J]. *Oikos*, 2009, **118**(5): 681-690.
- [18] Diemer L A, McDowell W H, Wymore A S, *et al.* Nutrient uptake along a fire gradient in boreal streams of Central Siberia [J]. *Freshwater Science*, 2015, **34**(4): 1443-1456.
- [19] 王玉萍, 王立立, 李取生, 等. 珠江河口湿地沉积物硝化作用强度及影响因素研究[J]. *生态科学*, 2012, **31**(3): 330-334.
- Wang Y P, Wang L L, Li Q S, *et al.* Study on nitrification and impact factors in Pearl River estuarine wetlands [J]. *Ecological Science*, 2012, **31**(3): 330-334.
- [20] 王超, 单保庆, 赵钰. 淦阳河水系沉积物硝化速率分布及溶解氧的限制效应[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- Wang C, Shan B Q, Zhao Y. Spatial distribution of nitrification

- rate and the restriction effect of oxygen in the Fuyang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- [21] Groffman P M, Dorsey A M, Mayer P M. N processing within geomorphic structures in urban streams[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, **24**(3): 613-625.
- [22] 俞琳, 王东启, 邓焕广, 等. 上海市苏州河与崇明岛河流沉积物反硝化速率及其影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(1): 100-105.
- Yu L, Wang D Q, Deng H G, *et al.* Denitrification rates in sediments of Suzhou River and Rivers in Chongming Island of Shanghai and their affecting factors[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(1): 100-105.
- [23] Barnes R T, Smith R L, Aiken G R. Linkages between denitrification and dissolved organic matter quality, Boulder Creek watershed, Colorado [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, **117**(G1): G01014.
- [24] Ragab M, Aldag R, Mohamed S, *et al.* Denitrification and nitrogen immobilization as affected by organic matter and different forms of nitrogen added to an anaerobic water-sediment system [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1994, **17**(3): 219-224.
- [25] Forshay K J, Dodson S I. Macrophyte presence is an indicator of enhanced denitrification and nitrification in sediments of a temperate restored agricultural stream[J]. *Hydrobiologia*, 2011, **668**(1): 21-34.



CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM ₁₀ Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} Measurements During Summer and Fall in Changzhou	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR)	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II) EDTA-NO ₃ /Fe(III) EDTA	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR)	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO ₂ and CH ₄ Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)