

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征

程建华, 窦智勇, 孙庆业*

(安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601)

摘要: 矿区河流不仅受到矿业活动带来污染物的影响, 还受到区域内生活污水及农田退水中氮、磷和有机物的污染. 本研究以铜陵市河流表层沉积物为研究对象, 采用荧光定量 PCR 技术分析季节和污染类型对沉积物样品中硝化(*amoA*)和反硝化(*nirS*和*nirK*)功能基因丰度的影响. 结果表明, 沉积物样品中氨氧化古菌(AOA)和细菌(AOB)基因丰度变化范围分别为 $1.74 \times 10^5 \sim 1.45 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.39 \times 10^5 \sim 3.39 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, AOA 平均丰度是 AOB 的 4.39 倍; 反硝化基因(*nirS*和*nirK*基因)丰度变化范围分别为 $1.69 \times 10^7 \sim 8.55 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.45 \times 10^6 \sim 1.51 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, *nirS* 基因平均丰度为 *nirK* 基因的 28.35 倍. 沉积物 AOA 丰度呈现春季和秋季较高, 夏季和冬季较低的趋势, 而 AOB 在春季和冬季沉积物中的丰度高于夏季和秋季; 反硝化基因丰度则表现为春季(*nirS*)/秋季(*nirK*) > 夏季 > 冬季 > 秋季(*nirS*)/春季(*nirK*). 矿区周围以重金属为主要污染物的河流沉积物中两种 *amoA* 和 *nirS* 基因的丰度高于毗邻农田区域主要受到氮、磷及有机物污染的河流, 后者的 *nirK* 基因丰度更高.

关键词: 沉积物; 硝化; 反硝化; 荧光定量; 重金属

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1362-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.022

Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City

CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye*

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Rivers in mining areas were influenced by contaminants such as nitrogen, phosphorus and organic matter due to domestic and agricultural wastewater discharge in addition to pollutants caused by mining activities. In this study, surface sediment samples of rivers in Tongling city were collected to address the effect of season and pollution type on the abundance of nitrifiers and denitrifiers using quantitative polymerase chain reaction (QPCR) technique targeting at the ammonia monooxygenase (*amoA*) and nitrite reductase (*nir*) genes. The results showed that the average abundance of ammonia oxidizing archaea (AOA) (ranging from 1.74×10^5 to $1.45 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$) was 4.39 times that of ammonia oxidizing bacteria (AOB) (ranging from 1.39×10^5 to $3.39 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$); and the average abundance of *nirK* gene (ranging from 4.45×10^6 to $1.51 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$) was almost a thirtieth part of *nirS* gene (ranging from 1.69×10^7 to $8.55 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$). The abundance of AOA was higher in spring and autumn, and lower in summer and winter. And sediment AOB abundance was higher in spring and winter than in summer and autumn. Meanwhile, the abundance of *nir* genes was in the order of spring (*nirS*)/autumn (*nirK*) > summer > winter > autumn (*nirS*)/spring (*nirK*). Moreover, the abundance of bacterial and archaeal *amoA* and *nirS* genes in sediments influenced by mine pollution was generally higher than that in sediments influenced by agricultural non-point pollution, whereas the abundance of *nirK* gene showed an opposite trend.

Key words: sediment; nitrification; denitrification; fluorescent quantitative; heavy metal

现代工农业的快速发展导致大量废水排入周围水体,使得水体中氮、磷和重金属等污染物含量逐渐升高,造成严重的水环境问题^[1]. 进入水体的污染物不仅会导致水质恶化还会以颗粒或者可溶污染物的形式转移到沉积物中^[2],影响底栖微生物的生长和分布,其中硝化和反硝化功能微生物活性决定了过量氮素的转化和去除,对改善水质,降低水体富营养化程度具有重要作用^[3]. 有研究表明重金属污染物会抑制硝化和反硝化微生物的生长^[4,5],但痕量浓度的重金属也可能会促进氮转化^[5],这是因为一些催化硝化和反硝化过程的酶是金属酶^[6~8]. 也有研究表明沉积物氨氮、硝氮和有机质含量对氮转

化功能微生物的活性和丰度有重要影响^[5,9~12]. 因此对受重金属以及氮、磷和有机物污染的河流沉积物中氮转化微生物丰度的研究具有重要的意义.

铜陵是我国重要的有色金属矿业基地,已有 3 000 多年的铜矿开采和冶炼历史. 长期的矿山开采活动不仅对矿区陆地生态环境造成破坏,还给周围河流带来较为严重的重金属污染问题. 研究发现铜陵杨山冲尾矿库废水导致了周围河流沉积物的 Fe、

收稿日期: 2015-07-03; 修订日期: 2015-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171418)

作者简介: 程建华(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境修复技术, E-mail: lm334723460@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunqingye@ahu.edu.cn

As、Cu、Pb 和 Zn 污染,且 As、Fe、Cu 的含量显著影响细菌群落结构^[13]. 叶宏萌等^[14]发现,铜陵市新桥至顺安河沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd 的平均含量远超长江下游沉积物背景值,其中以 Cu 和 Cd 最显著. 同时,也有研究表明铜陵市河流也受到较为严重的氮、磷和有机质污染,如魏伟等^[1]的研究发现,铜陵市河流上覆水中营养盐含量普遍偏高,其中总氮的最高质量浓度达到 V 类水质标准的 7.3 倍,而且大部分沉积物样品的总氮和总磷含量分别超过 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,均已能引起生态毒性效应. 王丽等^[15]的研究表明钟仓河河水总氮和 COD 质量浓度均值分别为 $6.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $43.17\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均属于劣 V 类水质. 由此可见,矿山开采活动、农业面源污染和生活污水排放是导致铜陵地区河流生态系统退化的主要原因^[1,14,15]. 目前,对铜陵市河流生态系统的研究很多,但大多集中在重金属污染状况评价^[1,14]、重金属对细菌多样性^[13]和浮游植物群落结构^[1,15]的影响等方面,而对沉积物中氮转化功能微生物丰度的研究还鲜有报道. 本文以铜陵市矿区和农田周围的河流沉积物为研究对象,探讨季节变化和污染类型对河流沉积物中硝化和反硝化微生物丰度的影响,以期矿业城市河流生态保护提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

铜陵市 ($30^{\circ}45'12''\sim 31^{\circ}07'56''\text{ N}$, $117^{\circ}42'00''\sim 118^{\circ}10'06''\text{ E}$) 位于安徽省中南部,长江下游南岸,属亚热带湿润季风气候. 年降雨量为 $1\,390\text{ mm}$,降雨

主要集中在夏季,年平均湿度为 $75\%\sim 81\%$,年平均气温为 16.2°C . 无霜期为 $237\sim 258\text{ d}$. 铜陵矿产资源丰富,是长江中下游著名的矿业城市,主要矿种有铜、硫、铁、金、银、煤、石灰石等,其中铜、金、银、硫铁矿和石灰石储量均在全省名列前茅. 金属矿产地主要在铜官山、鸡冠山、狮子山、新桥和凤凰山这 5 个矿田. 铜陵地区水资源比较丰富,主要包括顺安河、新桥河、钟仓河、红星河、黄浒河等. 由于长期受到酸性矿山废水、工农业废水和生活污水影响,铜陵市河流生态系统的污染状况严重.

研究区内共设 6 个采样点(图 1),按照受到的污染类型不同分成矿区周围的矿业污染组(MP 组)和生活区的农业面源污染组(AP 组),并将各区域采样点编号和主要污染源在表 1 列出. 分别在 2011 年 11 月及 2012 年 2、4 和 7 月期间对以上 6 个采样点采集,24 组沉积物样品(每组样品由 3 个平行样品混合而成)用外径为 40 mm 的 PVC 管^[1]采集(采集深度为表层 10 cm). 用于微生物分析的样品在 PVC 管中心区域用灭菌的镊子采集并放入灭菌袋内置于 4°C 冰盒中,其余样品放入密封袋混匀后置于 4°C 冰盒用于理化性质分析. 其中用于理化性质分析的样品用冷冻干燥机(FD-1A-50,中国)冻干后研磨、过筛,用密封袋密封、 -20°C 冷冻保存.

1.2 上覆水和沉积物理化性质分析

上覆水 pH(pH_w)和温度(T_w)用便携式仪器(HQ30d,USA)原位测定. 沉积物含水量用单位质量沉积物鲜样经 105°C 烘干后损失的质量来表示; pH(pH_s)用酸度计测定($M_{\text{沉积物}}:V_{\text{水}}=1\text{ g}:5\text{ mL}$);有机

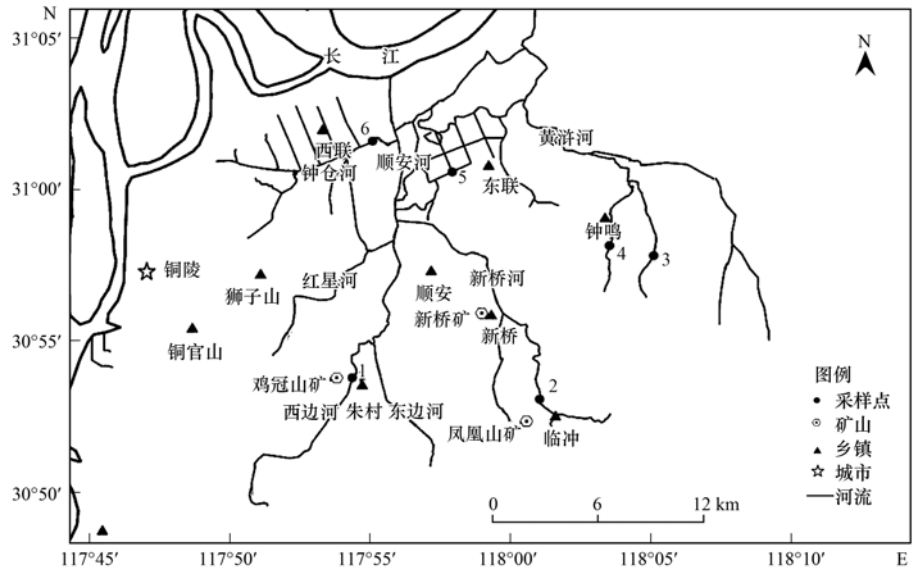


图 1 铜陵市采样点分布图示意
Fig. 1 Distribution of the sampling sites in Tongling City

质含量用烧失量 (LOI) 法测定并采用转换系数 0.58^[16] 将其换算成有机碳 (TOC) 含量; 总氮 (TN) 含量用元素分析仪 (Elementar Vario MACRO) 测定; 碳氮比 (C/N) 用 TOC 与 TN 的比值表示; 氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 含量经 NaCl 提取后分别用苯酚-次氯酸钠比色法和紫外分光光度法测定; 总量重金属元素 As、Cu、Fe、Pb 和 Zn 含量经三酸 (HNO_3 、HF 和 HClO_4) 消解后用 ICP-AES 测定。

表 1 2 个研究区的采样点设置和主要污染源

Table 1 Sample collection sites and main pollution

sources of the two studied regions

研究区域	样品编号	主要污染源
矿业污染组 (MP)	1, 2, 3	矿业活动
农业面源污染组 (AP)	4, 5, 6	农业面源污染、生活污水

1.3 沉积物基因组 DNA 提取

称取 0.25 g 沉积物鲜样按照 PowerSoil DNA Isolation Kit (MoBio Laboratories Inc. CA, USA) 试剂盒的操作步骤提取沉积物基因组 DNA。DNA 样品用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测后置于 -20°C 冷冻保存。

表 2 PCR 引物

Table 2 Primers used in this study

目的基因	引物名称	碱基序列 (5'-3')	片段大小/bp	文献
Arch- <i>amoA</i> ¹⁾	Arch-amoAF	STAATGGTCTGGCTTAGACG	635	[4]
	Arch-amoAR	GCGGCCATCCATCTGTATGT		
Beta- <i>amoA</i> ²⁾	amoA-1F	GGGTTTCTACTGCTGCT	491	[4]
	amoA-2R	CCCCTCKGSAAGCCCTTCTTC		
<i>nirS</i>	cd3aF	GTSAACTSAAGGA4ACSGG	425	[9]
	R3cd	GASTTCGGRTGSGTCTTGA		
<i>nirK</i>	FlaCu	ATCATGCTGCTGCCGCG	472	[9]
	R3Cu	GCCTCGATCAGRTTGTGTT		

1) Arch-*amoA*: 古菌 *amoA* 基因; 2) Beta-*amoA*: 细菌 *amoA* 基因, 下同

qPCR 扩增得到的基因拷贝数 (copy number) 和沉积物的湿重及其含水量用于计算单位质量干重的沉积物中目的基因的丰度 ($\text{copies} \cdot \text{g}^{-1}$)。

1.5 统计分析

利用 SPSS 20.0 软件进行数据分析, 其中 one-way ANOVA (Fisher's least significant difference test) 被用于不同季节的沉积物理化性质和功能基因丰度的均值比较 ($P < 0.05$), AP 组和 MP 组间的差异采用独立样本 *t* 检验进行分析, 相关性利用 Pearson 相关系数表示。

2 结果与分析

2.1 上覆水和沉积物理化性质

本研究中 4 个季节 MP 组和 AP 组上覆水温度

1.4 沉积物硝化和反硝化功能基因丰度测定

沉积物中硝化、反硝化功能基因的丰度用荧光定量 PCR 仪 (ABI step-one system) 测定, 引物见表 2。PCR 反应条件为: 95°C 热启动 3 min, 随后 40 个循环, 包括 95°C 3 s, 60°C 30 s。

定量 PCR 的标准曲线采用含有 4 个目的基因的克隆进行制备。将含有目的基因的克隆在 LB 培养液中过夜培养, 根据 EasyPure Plasmid MiniPrep Kit (全式金) 质粒提取试剂盒说明书提取质粒纯化并测定质粒浓度, 根据摩尔常数计算目的基因的拷贝数, 并将质粒连续稀释至 $10^6 \sim 10^2$ 。

QPCR 扩增反应体系为: 10 μL KAPA SYBR FAST qPCR Kit Master Mix (KAPA Biosystems, USA), 上、下游引物 ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 各 0.4 μL , 6 μL 沉积物 DNA 模板, 2.8 μL 无菌水以及 0.4 μL ROX High, 反应体系总体积为 20 μL 。阴性对照采用无菌水代替 DNA 作为反应模板, 产物的特异性用溶解曲线以及凝胶电泳确定。QPCR 的扩增效率为 80% ~ 90%, 标准曲线 $R^2 > 0.99$ 。

随季节变化明显, T_w 以夏季最高, 冬季最低。pH_w 均值变化范围为 5.95 ~ 7.95, 沉积物平均 pH 值范围为 6.81 ~ 7.90, 上覆水和沉积物 pH 总体上表现为中性或弱碱性。沉积物 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 LOI 含量及 C/N 均值范围分别为 1.20 ~ 5.40 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、5.68 ~ 39.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、2.14 ~ 21.48 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、18.37 ~ 91.41 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 8.79 ~ 14.20。重金属 As、Cu、Fe、Pb 和 Zn 平均含量分别为 58.75 ~ 162.86、61.51 ~ 1290.02、33377.53 ~ 79637.51、44.10 ~ 440.64 和 150.83 ~ 996.66 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

不同季节和组别上覆水和沉积物理化性质见表 3。ANOVA 分析表明沉积物理化性质的季节变化并不明显, 但 4 个季节 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 LOI 平均含量均以秋季最低, 其中 TN 和有机质最高含量均出现在

春季, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量以夏季最高. 沉积物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均含量以秋季最高, 冬季最低, C/N 以冬季最高, 秋季最低. 沉积物中 5 种重金属的平均含量均表现为春季和冬季高于秋季和夏季.

t 检验表明不同污染类型沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 LOI 、 TN 、 Cu 、 Fe 、 Pb 和 Zn 含量的差别明显. MP 组沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 LOI 和 TN 平均含量均远低于 AP 组, AP 组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 LOI 和 TN 含量分别为 MP 组的 3.84、2.19 和 2.23 倍. 两组 5 种重金属的平均含量则均表现为: $\text{MP} > \text{AP}$, MP 组 As 、 Cu 、 Fe 、 Pb 和 Zn 含量分别为 AP 组的 1.67、6.13、1.79、3.62 和 3.62 倍. 由此可见, 矿区周围河流重金属污染严重, 营养盐和有机质含量较低而毗邻农田的河流氮和有机物的污染比较严重.

2.2 沉积物硝化作用功能基因丰度

所有沉积物样品都能检测到古菌和细菌 amoA 基因. 沉积物中 AOA 和 AOB 丰度的变化范围分别为

$1.74 \times 10^5 \sim 1.45 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.39 \times 10^5 \sim 3.39 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$. 除样品夏季 6 号、冬季 2 号和 6 号样外, 沉积物中 AOA 的丰度均高于 AOB 的丰度.

不同季节和组别沉积物中 amoA 基因的丰度见图 2(a) 和 2(b). 尽管统计检验表明 AOA 和 AOB 丰度的季节变化并不显著, 但夏季沉积物中两种 amoA 基因平均丰度均低于春季和秋季, AOB 丰度甚至表现出: 冬季 $>$ 春季 $>$ 秋季 $>$ 夏季的变化趋势, 说明温度并不是影响沉积物中硝化功能基因丰度的主要因素. 与季节变化相同, 污染类型对 AOA 和 AOB 丰度的影响也不显著, 但 4 个季节沉积物 AOB 丰度均表现为: $\text{MP} > \text{AP}$. 虽然 MP 组和 AP 组 AOA 平均丰度分别为 $7.46 \times 10^6 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.69 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, AP 组是 MP 组的两倍多, 但这是由于秋季 AP 组极高的氨氧化古菌数量 (接近细菌的 10 倍). 而除秋季外, 沉积物中 AOA 丰度均表现为: $\text{MP} > \text{AP}$.

表 3 不同季节铜陵市河流上覆水和沉积物理化性质

项目	Table 3 Physic-chemical properties of overlying water and sediment in different seasons in Tongling City							
	春季		夏季		秋季		冬季	
	MP	AP	MP	AP	MP	AP	MP	AP
$T_w/^\circ\text{C}$	16.17 $\pm$ 0.76	16.67 $\pm$ 2.31	30.50 $\pm$ 0.87	32.33 $\pm$ 0.76	16.00 $\pm$ 0.87	16.00 $\pm$ 2.00	9.17 $\pm$ 0.29	7.00 $\pm$ 2.65
pH_w	6.37 $\pm$ 3.14	7.43 $\pm$ 0.41	5.95 $\pm$ 2.70	7.35 $\pm$ 0.23	6.19 $\pm$ 2.86	7.48 $\pm$ 0.18	6.47 $\pm$ 3.12	7.95 $\pm$ 0.67
pH_s	6.81 $\pm$ 2.10	7.38 $\pm$ 0.42	7.13 $\pm$ 1.14	7.78 $\pm$ 0.22	7.72 $\pm$ 0.35	7.76 $\pm$ 0.31	7.90 $\pm$ 0.18	7.49 $\pm$ 0.28
$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.63 $\pm$ 1.86	35.20 $\pm$ 15.12	13.89 $\pm$ 9.64	39.24 $\pm$ 40.04	9.07 $\pm$ 5.00	26.52 $\pm$ 10.76	5.68 $\pm$ 2.26	34.33 $\pm$ 34.57
$\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	7.22 $\pm$ 3.50	12.20 $\pm$ 8.77	21.48 $\pm$ 14.70	2.60 $\pm$ 4.01	10.78 $\pm$ 17.31	17.87 $\pm$ 27.40	2.14 $\pm$ 3.70	2.67 $\pm$ 2.81
$\text{LOI}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	35.34 $\pm$ 20.61	91.41 $\pm$ 59.69	24.34 $\pm$ 2.71	62.02 $\pm$ 29.41	18.37 $\pm$ 5.13	36.14 $\pm$ 8.89	33.14 $\pm$ 22.40	54.29 $\pm$ 22.87
$\text{TN}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	1.53 $\pm$ 0.46	5.40 $\pm$ 3.93	1.33 $\pm$ 0.21	2.57 $\pm$ 1.33	1.20 $\pm$ 0.10	1.80 $\pm$ 0.50	1.33 $\pm$ 0.40	2.30 $\pm$ 0.70
C/N	12.60 $\pm$ 4.80	9.93 $\pm$ 2.24	10.72 $\pm$ 1.95	14.20 $\pm$ 0.56	8.79 $\pm$ 1.74	11.97 $\pm$ 2.93	13.55 $\pm$ 5.92	13.27 $\pm$ 2.16
$\text{As}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	86.94 $\pm$ 35.65	66.90 $\pm$ 5.82	97.04 $\pm$ 29.69	58.75 $\pm$ 13.03	67.69 $\pm$ 24.27	59.81 $\pm$ 7.95	162.86 $\pm$ 173.63	63.39 $\pm$ 3.50
$\text{Cu}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	1 290.02 $\pm$ 744.41	152.32 $\pm$ 148.05	520.58 $\pm$ 253.76	61.51 $\pm$ 9.48	764.39 $\pm$ 204.74	72.94 $\pm$ 23.97	809.70 $\pm$ 542.31	264.98 $\pm$ 227.21
$\text{Fe} \times 10^3/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	72.74 $\pm$ 51.09	38.43 $\pm$ 4.38	57.58 $\pm$ 15.01	33.38 $\pm$ 11.38	69.63 $\pm$ 21.29	39.20 $\pm$ 6.78	79.64 $\pm$ 54.99	45.25 $\pm$ 5.36
$\text{Pb}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	195.48 $\pm$ 192.73	125.44 $\pm$ 116.88	179.85 $\pm$ 143.28	44.10 $\pm$ 11.79	170.61 $\pm$ 103.33	54.09 $\pm$ 7.29	440.64 $\pm$ 456.17	49.16 $\pm$ 7.74
$\text{Zn}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	996.66 $\pm$ 478.46	296.92 $\pm$ 127.44	668.21 $\pm$ 297.35	150.83 $\pm$ 18.51	819.94 $\pm$ 340.32	204.95 $\pm$ 39.30	962.59 $\pm$ 352.12	299.18 $\pm$ 154.53

2.3 沉积物反硝化作用功能基因丰度

所有沉积物样品都能检测到 nirS 和 nirK 基因. 沉积物中 nirS 和 nirK 基因的变化范围分别为 $1.69 \times 10^7 \sim 8.55 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $4.45 \times 10^6 \sim 1.51 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$. 除春季 6 号、夏季 4 号和 5 号样外, 沉积物中 nirS 基因的丰度均高于 nirK 基因.

不同季节和组别沉积物中 nirS 和 nirK 基因丰度见图 2(c) 和 2(d). 与硝化功能基因相同, 差异分析表明不同季节和不同污染类型沉积物中 nirS 和 nirK 基因丰度也不存在显著差异, 但两种反硝化基因丰度的季节变化表现为春季 (nirS)/秋季 (nirK) $>$ 夏季 $>$ 冬季 $>$ 秋季 (nirS)/春季 (nirK), nirS 和 nirK 基因的最高和最低丰度分别出现在相反的季

节. 同时, 两组沉积物中 nirS 和 nirK 基因的平均丰度分别为: MP 组, $1.46 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $3.08 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$; AP 组, $9.05 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $5.25 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中 nirS 基因丰度表现为: $\text{MP} > \text{AP}$, 而 nirK 基因则与之相反.

3 讨论

3.1 不同污染类型沉积物的理化性质差异

来自金属矿山尾矿库、采石场和废石堆的废水中通常含有大量的硫化物, 其氧化会产生富含金属元素的酸性矿山废水 (AMD), 成为矿区河流重金属重要来源之一^[17]. 尽管有研究指出铜陵市河流重金属含量较高且偏酸性^[14,17,18], 而本次所调查的研究

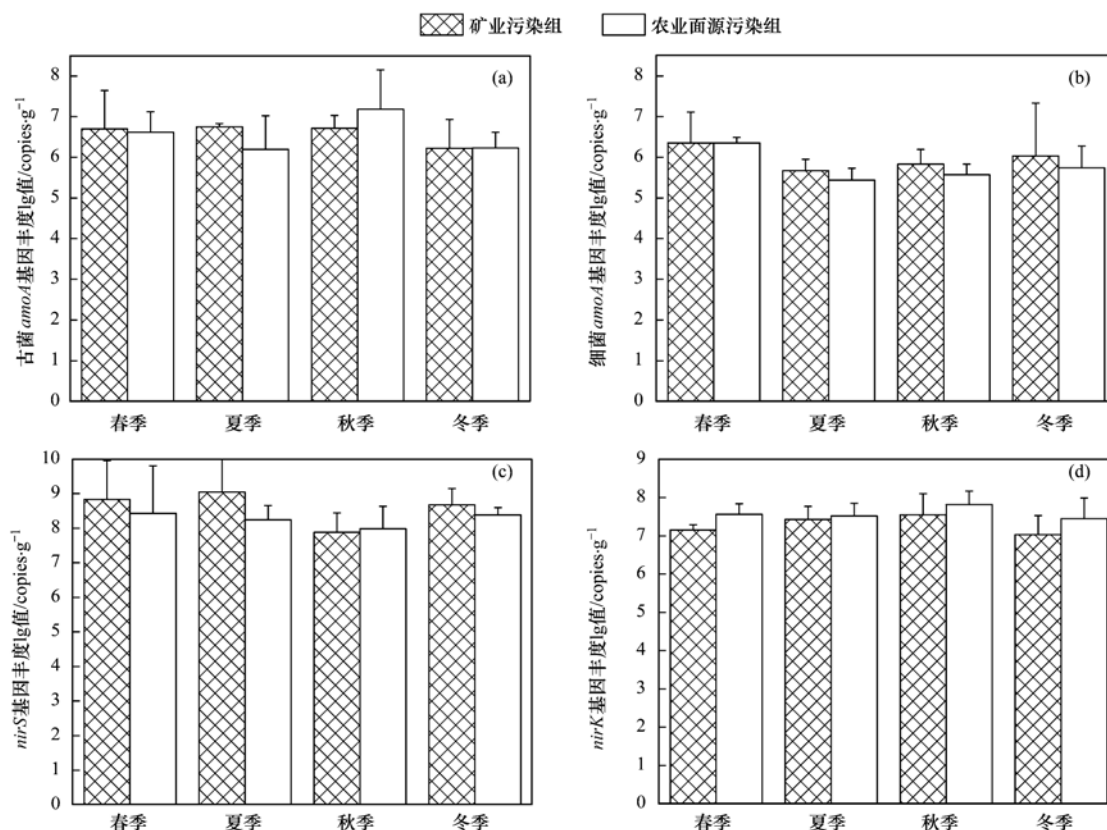


图2 不同季节沉积物中氨氧化古菌和细菌 *amoA*、*nirS* 和 *nirK* 基因的丰度

Fig. 2 Quantification of Arch-*amoA*, Bact-*amoA*, *nirS* and *nirK* genes in sediments in different seasons

区内河流上覆水和沉积物总体上表现为中性或弱碱性,这与王丽等^[15]对铜陵市冬季河流上覆水的研究结果相似,也与贺梦醒等^[13]对杨山冲尾矿库周围河流沉积物的研究结果一致.尾矿和废石的产酸能力及酸中和潜力是影响酸性废水形成的重要因素,当产酸能力大于酸中和潜力,才有可能产生酸性排水.而当酸中和能力比较强(如凤凰山铜矿废石中CaO含量较高)则能够中和硫化物矿物产生的酸性废水,所以凤凰山铜矿的废石较少或者不产生酸性排水^[17].

矿山废水一般对矿山周围和河流下游的影响较大,距矿山远近对不同区域河流重金属污染性质有重要影响.矿山周围河流沉积物通常含有较高的重金属元素,之后随着与矿山距离增加而逐渐降低且沉积物pH值会有所升高^[13].对比所调查的两种污染类型河流上覆水和沉积物理化性质(表4)可以看出,矿山周围MP组沉积物pH值低于距矿山较远的AP组,而MP组5种重金属元素的平均含量均远高于AP组,这与叶宏萌等^[14]和陈莉薇等^[17]的研究结果相似.研究区内河流沉积物中As、Cu、Pb和Zn平均含量均超过铜陵地区水系沉积物的元素背景

值^[17](表4),其中MP组As、Cu、Pb、Zn平均含量分别为背景值的5.76、14.39、4.35和7.29倍,AP组重金属含量较MP组已明显下降,但其As、Cu、Pb、Zn平均含量仍为背景值的3.46、2.35、1.2和2.01倍,说明铜陵市矿区周围河流已受到严重的重金属污染.AP组河流由于承接较多的农田排水和生活污水,其沉积物氮和有机质含量均高于MP组,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、LOI和TN平均含量分别是MP组的3.84、2.19和2.23倍.而且AP组多数沉积物的TN含量超过 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,生态毒性效应已达到严重级别^[1],表明农业面源污染及生活污水排放已造成比较严重的生态危害.

3.2 污染类型和季节对硝化功能基因丰度的影响

已有的研究表明,在大多数环境中AOA丰度高于AOB,在氨氧化过程中起主导作用^[4,10,19,20].所调查的河流沉积物中两种氨氧化微生物丰度大体表现为:AOA > AOB,这与对受到重金属污染的酸性淋溶土^[4]和河口沉积物^[9]的研究结果相似,说明铜陵市河流沉积物中氨氧化古菌在数量上占优势,是驱动氨氧化作用的主导微生物,而且AOA对重金属胁迫条件的耐受性可能比AOB高^[4,9].氨氮作为氨氧化

表 4 不同污染类型河流上覆水和沉积物理化性质

项目	元素/mg·kg ⁻¹					pH _w	pH _s	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	LOI /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	C/N
	As	Cu	Pb	Zn	Fe×10 ³							
MP	103.63	846.17	246.64	861.85	69.90	6.25	7.39	8.81	10.40	27.80	1.35	11.42
AP	62.21	137.94	68.20	237.97	39.07	7.55	7.60	33.82	8.83	60.97	3.02	12.34
背景值 ¹⁾	18	58.8	56.7	118.15								

1) 背景值:铜陵地区沉积物元素背景值^[17]

微生物的能量来源,其含量对 AOA 和 AOB 丰度有重要影响. 由于 AOA 对铵离子的吸收能力比 AOB 强,因此在低氨氮环境中一般以氨氧化古菌为主^[12,20]. 有研究表明高浓度氨氮会抑制 AOA 同化 CO₂ 的能力从而抑制古菌生长^[21]. Verhamme 等^[22]的研究结果表明 AOB 在 200 mg·kg⁻¹ 的氨氮条件下生长显著. 因此,在氨氮富集的环境中 AOB 丰度一般高于 AOA^[12, 23]. pH 值也是影响氨氧化微生物丰度的主要因素. 已有研究表明, AOB 适宜生长的 pH 范围为 7.0 ~ 8.5, 低 pH 值条件会抑制 AOB 生长^[12], 而 AOA 在 pH 为 3.7 ~ 8.7 的范围内均能生长^[24]. 因此,在酸性环境中一般以 AOA 为主^[4], 而碱性环境中两种氨氧化微生物丰度大小目前尚无定论. 有研究表明 AOA 在碱性沙壤土 (pH 8.34 ~ 8.65) 中的丰度高于 AOB^[25], 也有研究表明在碱性稻田土 (pH = 8.20) 中 AOB 的丰度更高^[26]. 综上所述,春季和冬季 6 号样极高的氨氮含量 (分别为 82.51 mg·kg⁻¹ 和 73.70 mg·kg⁻¹) 和冬季 2 号样偏碱性的 pH 条件 (8.10) 可能是导致这些沉积物中 AOB 丰度高于 AOA 的主要原因.

尽管河流沉积物中 MP 组样品重金属含量显著高于 AP 组 (表 3), 但两组 *amoA* 基因丰度差别并不明显, 这与王超等^[12] 对子牙河水系沉积物的研究结果相似, 其原因可能是 AOA 和 AOB 对重金属的耐受性较强^[27]. 同时, 沉积物氨氧化微生物丰度大体

表现为: MP > AP, 重金属含量较高的河流沉积物中的丰度反而更高, 这可能与 AP 组沉积物相比于 MP 组明显高的有机质含量有关. 本研究中河流沉积物 AOA 和 AOB 都与 LOI 含量有一定的负相关关系 (表 5), 即有机质含量升高可能导致沉积物中氨氧化微生物丰度降低. 据报道, 有机物能增强异养微生物的活性, 形成与硝化微生物对氧^[28] (O₂) 和氨^[29] 的竞争从而抑制硝化菌的生长, 也有研究表明有机质有对 AOA 生理上的抑制作用^[30]. 因此, 高浓度有机质对氨氧化微生物生长的抑制作用可能是造成细菌和古菌 *amoA* 基因在 AP 组沉积物中的丰度低于 MP 组的原因. Erguder 等^[24] 认为 AOA 可能是兼养菌, 不以氨氧化为唯一能量来源, 可以利用有机质异养生长, 因此导致秋季 AP 组 AOA 丰度高于 MP 组的原因可能是秋季 AP 组沉积物较低的 NH₄⁺-N、LOI 和重金属含量.

温度是影响微生物生长的重要因子. Sims 等^[19,20] 的研究表明夏季湿地沉积物的 *amoA* 基因丰度要高于冬季, 但本研究中夏季沉积物样品 *amoA* 基因丰度大多低于其他季节 (图 2). 这可能是因为水温降低会增加 O₂ 的饱和浓度从而促进沉积物中硝化微生物的生长^[31]. 此外, Kemp 等^[32,33] 的研究表明沉积物中过饱和的 O₂ 以及随水温升高而降低的 O₂ 扩散量也可能是夏季硝化菌生长受到抑制的原因.

表 5 功能基因丰度与环境因子的相关系数¹⁾

项目	T _w	pH _w	pH _s	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	LOI	TN	C/N	As	Cu	Fe	Pb	Zn
Arch- <i>amoA</i>	-0.036	0.167	0.177	-0.016	-0.053	-0.039	-0.043	0.099	-0.105	-0.136	-0.072	-0.049	-0.114
Beta- <i>amoA</i>	-0.217	0.209	0.176	-0.197	-0.094	-0.106	-0.064	-0.180	-0.019	0.091	0.121	0.063	0.184
<i>nirS</i>	0.187	0.310	-0.010	0.000	-0.044	0.360	0.517 **	-0.139	0.066	0.213	-0.055	0.164	0.192
<i>nirK</i>	-0.039	-0.322	0.119	0.523 **	0.212	0.027	-0.005	0.053	-0.265	-0.368	-0.282	-0.165	-0.326

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.3 污染类型和季节对反硝化功能基因丰度的影响

与氨氧化功能基因相同, 研究区内矿业污染型河流与农业面源污染型河流沉积物中两种反硝化功能基因丰度的差异也不显著, 并且沉积物样品中

nirS 和 *nirK* 基因丰度的数量级范围分别为 10⁷ ~ 10⁹ 和 10⁶ ~ 10⁸, 与未受重金属污染的湿地基质^[34,35] 中的数量接近, 表明所调查的河流沉积物中较高的重金属含量并未对这两个功能基因的丰度产生明显影

响,其原因可能是亚硝酸还原微生物有适应重金属胁迫环境的代谢机制^[36].与 *amoA* 基因不同,沉积物中两种反硝化基因丰度的季节变化均表现为夏季高于冬季,说明温度也是影响反硝化菌生长的重要因素,这与 Jung 等^[37]的研究结果相似.

对比研究区内两种污染类型沉积物 *nirS* 和 *nirK* 基因丰度[图 2(c)和(d)]可以看出,4 个季节两组 *nirS* 基因丰度大小基本表现为:MP > AP,而 *nirK* 基因在 MP 组样品中丰度均低于 AP,两种反硝化微生物的分布规律相反.这种差别可能与两种反硝化微生物的生态位分离有关^[34,38].研究区内大多数沉积物样品中 *nirS* 基因丰度高于 *nirK* 基因,这与湿地^[34]、河口^[5]沉积物和污灌土^[11]的研究结果一致,然而也有研究表明 *nirK* 基因在稻田土^[38]和河口^[9]、湿地^[39]沉积物中丰度高于 *nirS* 基因.此外,大部分反硝化菌是异养微生物,有机质除了能作为微生物生长的碳和能量来源影响反硝化菌生长^[35],还能通过降低沉积物可利用的 O_2 量间接促进反硝化菌生长^[28],这与本研究中两种 *nir* 基因丰度均与沉积物 LOI 含量正相关(表 5)的结果一致.但 *nirS* 和 *nirK* 基因丰度与沉积物 LOI 含量的相关系数及显著度分别为:*nirS*(0.360, 0.084)和 *nirK*(0.027, 0.902),*nirS* 基因与 LOI 的关系远比 *nirK* 基因显著,即沉积物有机质含量变化对 *nirS* 基因丰度的影响可能更大,这与 Guo 等^[11]的研究结果相似.此外,沉积物重金属含量与 *nirS* 和 *nirK* 基因丰度的相关性也不同(表 5).*nirS* 基因丰度与重金属 As、Cu、Pb 和 Zn 含量呈正相关,而全部 5 种重金属均负相关于沉积物 *nirK* 基因. Mosier 等^[5]的研究发现 *nirS* 基因丰度极显著正相关于沉积物 Pb 含量.因此,秋季 MP 组沉积物 *nirS* 基因丰度低于 AP 组的原因可能是秋季沉积物较低的 LOI 和重金属含量.综上所述,虽然由 *nirS* 和 *nirK* 基因编码的蛋白酶功能相同,但具有不同 *nir* 基因的反硝化微生物对某种特殊环境的偏好程度不同^[11,34,38]. Cole 等^[40]的研究表明稍高的 O_2 和较低的有机质含量对 *nirK* 反硝化微生物的生长有利, Yan 等^[41]则认为两种类型反硝化微生物对硝态氮的需求存在差异.因此,春季极高的沉积物 LOI 和重金属含量、较低的 NO_3^- -N 含量和秋季最高的 NO_3^- -N 和最低的 LOI 含量、较低的重金属含量可能是导致所调查的沉积物样品 *nirS* 基因丰度春季最高、秋季最低而 *nirK* 基因丰度秋季最高、春季最低的原因.

4 结 论

(1) 铜陵市河流沉积物样品总体上呈弱碱性,位于矿区周围的河流 Cu、Fe、Pb 和 Zn 含量明显高于毗邻农田的河流,而后的 NH_4^+ -N、TN 和 LOI 含量更高;重金属 As、Cu、Pb 和 Zn 平均含量均远超过铜陵市水系沉积物背景值,矿山开采已对铜陵市河流造成严重污染.

(2) 河流沉积物中硝化微生物以 AOA 为主,其平均丰度为 AOB 的 4.39 倍;反硝化功能基因以 *nirS* 基因为主,其丰度平均值为 *nirK* 基因的 28.35 倍.

(3) 矿区周围河流沉积物 *amoA* 和 *nirS* 基因的丰度高于毗邻农田的河流,而后的 *nirK* 基因丰度更高;夏季和冬季沉积物 AOA 丰度低于春季和秋季,而 AOB 在春季和冬季沉积物中的丰度高于夏季和秋季.*nirS* 和 *nirK* 基因的最高和最低丰度分别出现在相反的季节,具体表现为春季(*nirS*)或秋季(*nirK*)最高,夏季、冬季次之,秋季(*nirS*)或春季(*nirK*)最低.

参考文献:

- [1] 魏伟,王丽,周平,等.安徽铜陵地区河流生态系统健康的多指标评价[J].中国环境科学,2013,33(4):691-699.
- [2] Ma Y Q, Lu W Z, Lin C X. Downstream patterns of bed sediment-borne metals, minerals and organic matter in a stream system receiving acidic mine effluent: A preliminary study[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 110(2): 98-106.
- [3] 马涛,张振华,易能,等.凤眼莲及底泥对富营养化水体反硝化脱氮特征的影响研究[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2451-2459.
- [4] Subrahmanyam G, Hu H W, Zheng Y M, et al. Response of ammonia oxidizing microbes to the stresses of arsenic and copper in two acidic alfisols[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 77: 59-67.
- [5] Mosier A C, Francis C A. Denitrifier abundance and activity across the San Francisco Bay estuary [J]. Environmental Microbiology Reports, 2010, 2(5): 667-676.
- [6] Morel F M M, Price N M. The biogeochemical cycles of trace metals in the oceans[J]. Science, 2003, 300(5621): 944-947.
- [7] Yu R, Lai B, Vogt S, et al. Elemental profiling of single bacterial cells as a function of copper exposure and growth phase [J]. PLoS One, 2011, 6(6): e21255.
- [8] Nojiri M, Xie Y, Inoue T, et al. Structure and function of a hexameric copper-containing nitrite reductase[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(11): 4315-4320.
- [9] Zhang X L, Agogué H, Dupuy C, et al. Relative abundance of

- ammonia oxidizers, denitrifiers, and anammox bacteria in sediments of hyper-nutritified estuarine tidal flats and in relation to environmental conditions[J]. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(6): 815-823.
- [10] Hou J, Song C L, Cao X Y, *et al.* Shifts between ammonia-oxidizing bacteria and archaea in relation to nitrification potential across trophic gradients in two large Chinese lakes (Lake Taihu and Lake Chaohu)[J]. *Water Research*, 2013, **47**(7): 2285-2296.
- [11] Guo G X, Deng H, Qiao M, *et al.* Effect of long-term wastewater irrigation on potential denitrification and denitrifying communities in soils at the watershed scale[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(7): 3105-3113.
- [12] 王超, 单保庆. 子牙河水系水和沉积物好氧氨氧化微生物分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(12): 2943-2950.
- [13] 贺梦醒, 高毅, 孙庆业. 尾矿废水对河流沉积物和稻田土壤细菌多样性的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1778-1785.
- [14] 叶宏萌, 袁旭音, 赵静, 等. 铜陵矿区河流沉积物重金属的迁移及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(10): 1853-1859.
- [15] 王丽, 魏伟, 周平, 等. 铜陵市河流冬季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(1): 243-250.
- [16] Page A L, Miller R H, Keeney D R. *Methods of soil analysis: part 2, chemical and microbiological properties* [M]. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1982: 539-579.
- [17] 陈莉薇, 徐晓春, 王军, 等. 铜陵相思河流域重金属分布特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2967-2973.
- [18] 李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 等. 典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1067-1075.
- [19] Sims A, Gajaraj S, Hu Z Q. Seasonal population changes of ammonia-oxidizing organisms and their relationship to water quality in a constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 100-107.
- [20] Sims A, Horton J, Gajaraj S, *et al.* Temporal and spatial distributions of ammonia-oxidizing archaea and bacteria and their ratio as an indicator of oligotrophic conditions in natural wetlands[J]. *Water Research*, 2012, **46**(13): 4121-4129.
- [21] Hatzenpichler R, Lebedeva E V, Spieck E, *et al.* A moderately thermophilic ammonia-oxidizing crenarchaeote from a hot spring[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(6): 2134-2139.
- [22] Verhamme D T, Prosser J I, Nicol G W. Ammonia concentration determines differential growth of ammonia-oxidising archaea and bacteria in soil microcosms[J]. *The ISME Journal*, 2011, **5**(6): 1067-1071.
- [23] Wang S Y, Wang Y, Feng X J, *et al.* Quantitative analyses of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria in the sediments of four nitrogen-rich wetlands in China[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(2): 779-787.
- [24] Erguder T H, Boon N, Wittebolle L, *et al.* Environmental factors shaping the ecological niches of ammonia-oxidizing archaea[J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2009, **33**(5): 855-869.
- [25] Shen J P, Zhang L M, Zhu Y G, *et al.* Abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea communities of an alkaline sandy loam [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(6): 1601-1611.
- [26] Jiang X J, Hou X Y, Zhou X, *et al.* pH regulates key players of nitrification in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 9-16.
- [27] 陈素华, 孙铁珩, 周启星, 等. 微生物与重金属间的相互作用及其应用研究[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**(12): 239-243.
- [28] Jäntti H, Stange F, Leskinen E, *et al.* Seasonal variation in nitrification and nitrate-reduction pathways in coastal sediments in the Gulf of Finland, Baltic Sea[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2011, **63**(2): 171-181.
- [29] Strauss E A, Mitchell N L, Lamberti G A. Factors regulating nitrification in aquatic sediments: effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, **59**(3): 554-563.
- [30] Könneke M, Bernhard A E, de La T, *et al.* Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon [J]. *Nature*, 2005, **437**(7058): 543-546.
- [31] Kadlec R H, Knight R L. *Treatment wetlands*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.
- [32] Kemp M J, Dodds W K. Comparisons of nitrification and denitrification in prairie and agriculturally influenced streams [J]. *Ecological Applications*, 2002, **12**(4): 998-1009.
- [33] Kemp M J, Dodds W K. Centimeter-scale patterns in dissolved oxygen and nitrification rates in a prairie stream[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, **20**(3): 347-357.
- [34] Ligi T, Truu M, Truu J, *et al.* Effects of soil chemical characteristics and water regime on denitrification genes (*nirS*, *nirK*, and *nosZ*) abundances in a created riverine wetland complex[J]. *Ecological Engineering*, 2014, **72**: 47-55.
- [35] Chen Y, Wen Y, Zhou Q, *et al.* Effects of plant biomass on denitrifying genes in subsurface-flow constructed wetlands[J]. *Bioresour Technol*, 2014, **157**: 341-345.
- [36] Hemme C L, Deng Y, Gentry T J, *et al.* Metagenomic insights into evolution of a heavy metal-contaminated groundwater microbial community[J]. *The ISME Journal*, 2010, **4**(5): 660-672.
- [37] Jung J, Yeom J, Han J, *et al.* Seasonal changes in nitrogen-cycle gene abundances and in bacterial communities in acidic forest soils[J]. *Journal of Microbiology*, 2012, **50**(3): 365-373.
- [38] Yoshida M, Ishii S, Otsuka S, *et al.* Temporal shifts in diversity and quantity of *nirS* and *nirK* in a rice paddy field soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(10): 2044-2051.

- [39] García-Lledó A, Vilar-Sanz A, Trias R, *et al.* Genetic potential for N₂O emissions from the sediment of a free water surface constructed wetland [J]. *Water Research*, 2011, **45** (17): 5621-5632.
- [40] Cole A C, Semmens M J, LaPara T M. Stratification of activity and bacterial community structure in biofilms grown on membranes transferring oxygen [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(4): 1982-1989.
- [41] Yan T F, Fields M W, Wu L Y, *et al.* Molecular diversity and characterization of nitrite reductase gene fragments (*nirK* and *nirS*) from nitrate-and uranium-contaminated groundwater [J]. *Environmental Microbiology*, 2003, **5**(1): 13-24.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102, 010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjks@rcees.ac.cn;网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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