ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 4 期
2016 年 4 月 15 日

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 $\delta^{13}C(CO_2)$ 本底变化 …… 夏玲君, 周凌晞, 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)
我国北方温带水库——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湖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)
锆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 $Fe_3O_4@SiO_2$ 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解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)
高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 …… 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)
新型污染物卤代咔唑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,李奇锋,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)

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[1],顾超超[1],魏欣[1],黄圣琳[2],刘振鸿[1],薛罡[1],高品[1]*

(1. 东华大学环境科学与工程学院,国家环境保护纺织工业污染防治工程技术中心,上海 201620; 2. 博天环境集团股份有限公司,上海 200120)

摘要: 以曝气生物滤池(BAF)作为研究对象,考察了低浓度环丙沙星(CIP)对其生物膜微生物硝化过程及其功能微生物的作用影响,采用荧光定量 PCR 方法定量检测分析了 4 种环丙沙星抗性基因(CIP-ARGs)在硝化作用过程中的丰度变化,并探讨了其与硝化微生物之间的相关关系. 结果表明,CIP 对生物膜氨氧化阶段影响较小,但对亚硝酸盐氧化阶段具有一定抑制作用. 通过对氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NOB,包括 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira*)的定量检测结果分析可知,CIP 对生物膜亚硝酸盐氧化转化过程的抑制主要是通过对 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 的抑制实现的. 此外,CIP 的加入对生物膜中 *aac* 和 *qepA* 抗性基因的变化影响较小,但对 *parC* 和 *oqxB* 的影响较大. 通过相关性分析可知,*Nitrobacter* 与 *parC* 之间具有显著相关性,*Nitrospira* 与 *oqxB* 之间同样具有显著相关性,推测生物膜中不同硝化微生物的遗传因子中可能携带有 CIP-ARGs.

关键词:环丙沙星; 生物膜; 硝化微生物; 抗药性基因; 曝气生物滤池

中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)04-1485-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.04.038

Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter

HE Shi[1], GU Chao-chao[1], WEI Xin[1], HUANG Sheng-lin[2], LIU Zhen-hong[1], XUE Gang[1], GAO Pin[1]*

(1. State Environmental Protection Engineering Center for Pollution Treatment and Control in Textile Industry, College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Poten Environment Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Effect of low-concentration ciprofloxacin (CIP) on nitrification and nitrifying microorganisms of biofilms was studied in biological aerated filters (BAF). Quantitative PCR (qPCR) was used to determine the abundance variance of four ciprofloxacin resistance genes (CIP-ARGs) during nitrification in biofilms. The correlations between the abundances of CIP-ARGs and nitrifying microorganisms were also discussed. The results showed that CIP had little influence on the ammonium oxidation process of biofilm microorganisms, whereas inhibition of the nitrite oxidation process was found. The quantitative results of ammonium-oxidizing bacteria (AOB) and nitrite-oxidizing bacteria (NOB) including *Nitrobacter* and *Nitrospira* indicated that the inhibition on the transformation of nitrite was resulted from the inhibition on *Nitrobacter* and *Nitrospira*. In addition, little influence of CIP on the relative abundance of *aac* and *qepA* in biofilms was found, but the influence on *parC* and *oqxB* was great. The abundance of *Nitrobacter* exhibited significant positive correlation with the abundance of *parC*. Similar significant correlation was also found between the abundances of *Nitrospira* and *oqxB*. It could be speculated that the genetic elements of different nitrifying microorganisms in biofilms possibly carried CIP-ARGs.

Key words: ciprofloxacin; biofilm; nitrifying microorganism; antibiotic resistance gene; biological aerated filter

环丙沙星(CIP)是一种喹诺酮类抗生素,被广泛应用于泌尿生殖系统等细菌感染疾病的治疗,通过影响细菌细胞 DNA 促旋酶和拓扑异构酶,从而抑制细胞 DNA 的复制[1]. 近年来,CIP 在城市污水和地表水中被频繁检出[2,3],对生态环境和人体健康造成潜在的危害影响. 有研究表明[4,5],CIP 能够改变现有微生物群落结构的组成,同时可以促使细菌抗药性的产生和散播.

微生物硝化反应通常包括两个步骤:氨氧化($NH_3 \rightarrow NO_2^-$)和亚硝酸盐氧化($NO_2^- \rightarrow NO_3^-$)阶段,分别由功能微生物氨氧化细菌(ammonium-oxidizing bacteria,AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria,NOB)所驱动,其中氨氧化阶段一般被认为是整个硝化过程的限速步骤. 在污水生物脱氮过程中,参与硝化反应的关键细菌微生物主要为 AOB,以及 NOB 中的硝化螺菌属(*Nitrospira*)和硝化杆菌属(*Nitrobacter*)[6,7]. 硝化微生物的生长速率非常缓

收稿日期: 2015-11-17; **修订日期**: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208086,51178093); 东华大学"励志计划"项目; 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 何势(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制及水质安全,E-mail:1075617292@qq.com

* 通讯联系人,E-mail:pingao@dhu.edu.cn

慢,而且对环境条件的变化也很敏感,如 pH[8,9]、温度[10,11]、溶解氧[12]和有毒物质[13,14]等. 尽管如此,目前关于 CIP 对硝化过程及其功能微生物变化影响方面的研究还很少.

本研究以曝气生物滤池(BAF)作为研究对象,考察低浓度 CIP 对硝化过程及硝化微生物的变化作用影响,同时采用实时荧光定量 PCR(qPCR)分析手段,检测分析 CIP 抗性基因(CIP-ARGs),包括 *parC*、*aac*、*oqxB* 和 *qepA* 在生物膜硝化过程中的变化情况,分析探讨硝化微生物与 CIP-ARGs 之间的相关关系,以期为通过调控硝化反应过程参数,减轻抗生素等新型污染物对硝化微生物的负面影响提供科学依据和数据支撑.

1 材料与方法

1.1 仪器及实验药品

分析仪器:SG6 型溶解氧仪(Mettler Toledo)、ICS-90 型离子色谱(Dionex)、恒温水浴氮气吹干仪(Organomation Associates)、Fresco 17 型台式高速离心机(Thermo Scientific)、T100 型普通 PCR 仪(Bio-rad)、LightCycle 96 型实时荧光定量 PCR 仪(Roche)、Qubit 2.0 型核酸蛋白测定仪(Invitrogen).

实验药品:本研究所使用的环丙沙星(CIP,纯度为 98%)购自百灵威(J&K)科技有限公司. 乙腈为色谱纯,购自美国 Sigma-Aldrich 公司; 其它化学试剂均为分析纯,除过硫酸钾(纯度为 99%)购自美国 Sigma-Aldrich 公司外,其余购自国药集团化学试剂有限公司.

1.2 实验装置及运行方式

本研究实验装置 BAF 为圆柱形有机玻璃柱,柱高1 200 mm,内径 80 mm. 滤池采用沸石作为填料,装填高度为 900 mm,装填密度为 1.40 $g\cdot cm^{-3}$,滤料比表面积为 500 $m^2\cdot g^{-1}$. 滤池上部设有溢流口和反冲洗排水口,原水和反冲洗进水口均设于滤池底部;距离滤池底端 100 mm 处设有穿孔曝气管. 滤池整体和硅胶水管均采用铝箔包裹遮光,以防止 CIP 发生光解及滋生藻类.

如图 1 所示,原水由蠕动泵从滤池底部进水口打入,采用上向流方式,流速控制在 125 $cm\cdot h^{-1}$,水力停留时间约为 5 h. 空气由气泵从滤池底部进气口鼓入,通过控制阀门调节进气强度,确保滤池内溶解氧质量浓度稳定在 2 ~ 3 $mg\cdot L^{-1}$之间. 此外,滤池中运行 pH 值约为 7.3,温度约为 25℃.

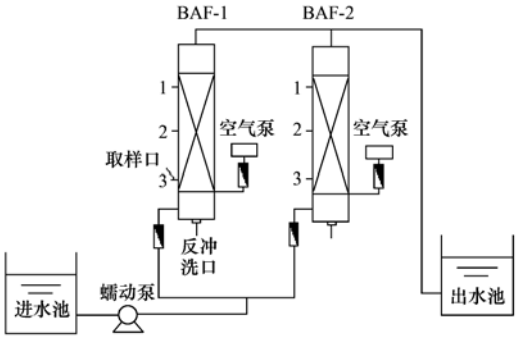

图 1 实验装置流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

在投加 CIP 之前,BAF 采用实验室长期稳定运行的好氧反应器中活性污泥进行接种挂膜,并稳定运行 7 d. 采用人工配水(见表 1)连续运行 60 d,使得生物膜可完全适应进水水质,且对进水 COD 和氨氮的去除率可分别稳定在 80% 和 40% 以上. 随后,在 2 号装置(BAF-2)进水中加入质量浓度为 50 $\mu g\cdot L^{-1}$的 CIP,而 1 号装置(BAF-1)仍以原水进水运行.

表 1 原水配水水质

Table 1 Compositions of the synthetic wastewater

组分1)	BAF-1	BAF-2
CIP	0	50
$CH_3COONa\cdot 3H_2O$	100	100
$CaCl_2$	20	20
$MgSO_4\cdot 7H_2O$	0.42	0.42
K_2HPO_4	10	10
$FeCl_3$	375	375
$MnCl_2\cdot 4H_2O$	30	30
H_3BO_3	37.5	37.5
$ZnSO_4\cdot 7H_2O$	30	30
$CuSO_4\cdot 5H_2O$	7.5	7.5
KI	45	45
$(NH_4)_2SO_4$	70	70

1)CIP 单位为$\mu g\cdot L^{-1}$,其余均为$mg\cdot L^{-1}$

1.3 检测分析方法

1.3.1 生物膜样品的采集和 DNA 提取

取一定量载有生物膜的滤料于 50 mL 离心管中,加入灭菌后的磷酸盐缓冲溶液,超声 5 min,然后在5 000 $r\cdot min^{-1}$条件下离心 10 min,过滤后将滤料表面上的生物膜洗脱下来,再次离心,收集沉淀固体进行 DNA 提取.

采用 PowerSoil DNA Isolation Kit (MoBio Laboratories,USA)抽提样品,提取步骤参照试剂盒说明书. 所提取的 DNA 使用 1% 琼脂糖凝胶电泳和 Qubit 2.0 核酸蛋白测定仪检测其纯度和浓度.

1.3.2　硝化微生物基因与 CIP-ARGs 检测方法的建立

目标硝化微生物基因序列片段和 CIP 抗性基因使用普通 PCR 和 qPCR 进行定性和定量分析，所用的扩增引物序列信息详见表 2. 其中，CTO 引物特异性较高，对 β-变形杆菌亚纲氨氧化细菌（β-AOB）扩增效果较好[15]. qPCR 反应体系如下：10 μL FastStart Green Master（Roche），上下游引物（10 μmol·L^{-1}）各 1 μL，DNA 模板 1 μL，7 μL ddH_2O，反应体系总体积为 20 μL. CIP 抗性基因的 qPCR 反应程序如下：95℃预变性 10 min，95℃变性 10 s，退火温度（*qepA*：61℃；*parC*：62℃；*oqxB*：60℃；*aac*：58℃）20 s，72℃延伸 30 s，共 40 个循环. 目标硝化微生物基因序列片段 qPCR 反应程序如下：95℃预变性 10 min，95℃变性 10 s，退火温度（AOB：57℃；*Nitrospira*：65℃；*Nitrobacter*：55℃）10 s，72℃延伸 30 s，共 45 个循环. 每组样品 3 个平行样，同时使用无菌水作为阴性对照.

在分析目标基因结果时，选择一个内参基因对目标基因的表达量进行校正，可以提高分析方法的准确性和重现性[16]. 16S rRNA 基因是细菌的保守基因片段，一般可用其浓度表示生物总量，将目标基因浓度同 16S rRNA 基因相比，可得各个目标基因在总菌群中的丰度（相对丰度）.

表 2　qPCR 所使用的基因引物信息

Table 2　Sequences of primers for qPCR reactions

目标物	引物	引物序列	产物大小/bp	文献
16S rRNA	121F 238R	AGGAAGGTGGGGATGAC CGGCTTTCTGGGATTGG	117	[17]
AOB	CTO189F CTO654R	GGAGRAAAGYAGGGGATCG CTAGCYTTGTAGTTTCAAACGC	465	[18]
Nitrobacter	FGPS872F FGPS1269R	CTAAAACTCAAAGGAATTGA TTTTTTGAGATTTGCTAG	397	[19]
Nitrospira	NSR1113F NSR1264R	CCTGCTTTCAGTTGCTACCG GTTTGCAGCGCTTTGTACCG	151	[20]
qepA	F R	CCAGCTCGGCAACTTGATAC ATGCTCGCCTTCCAGAAAA	570	[21]
parC	F R	CTGGATGCCGATTCCAAGCAC GAAGGACTTGGGATCGTCCGG	186	[22]
oqxB	F R	TCCTGATCTCCATTAACGCCCA ACCGGAACCCATCTCGATGC	131	[23]
aac	F R	TTGCGATGCTCTATGAGTGGCTA CTCGAATGCCTGGCGTGTTT	482	[24]

1.3.3　常规指标分析方法

进水和出水中亚硝酸根（NO_2^-）和硝酸根（NO_3^-）离子采用离子色谱仪（Dionex）测定；氨氮（NH_4^+-N）和化学需氧量（COD）的测定参照国家标准监测分析方法[25]进行测定.

1.4　数据分析

数据分析利用 SPSS 19.0 统计分析软件处理，计算因变量和自变量之间的皮尔逊相关系数（r）和 P 值，设置规定的统计检验显著性水平 $P=0.05$，若 $P\leqslant 0.05$ 认为具有显著相关性，反之则认为相关性不显著.

2　结果与讨论

2.1　BAF 中NH_4^+-N、NO_2^- 和 NO_3^- 的质量浓度变化特征

图 2 为 BAF 进、出水中NH_4^+-N、NO_2^- 和 NO_3^- 的质量浓度变化情况，其中进水中未检出 NO_2^- 和 NO_3^-. 从中可以看出，BAF-1 出水中NH_4^+-N、NO_2^- 和 NO_3^- 的平均质量浓度分别为 5.12、1.31 和 2.94 mg·L^{-1}. 在整个运行周期内，出水中NH_4^+-N、NO_2^- 和 NO_3^- 的质量浓度变化波动较小. BAF-2 出水中NH_4^+-N的平均质量浓度为 5.37 mg·L^{-1}，NO_2^- 和 NO_3^- 的平均质量浓度分别为 1.75 mg·L^{-1}和 2.56 mg·L^{-1}. 从图 2 中曲线变化情况可以看出，CIP 的加入对NH_4^+-N的去除变化影响不大，但对出水中 NO_2^- 和 NO_3^- 的质量浓度变化具有一定影响. 在投加 CIP 后的初始阶段，出水中 NO_2^- 和 NO_3^- 的质量浓度波动较大，在第 31 d 后趋于平缓.

从整体上看，BAF 对NH_4^+-N的去除效果相对稳定. 尽管如此，当加入 CIP 后，出水中 NO_3^- 的质量浓度有所降低，从 2.84 mg·L^{-1}降至 2.34 mg·L^{-1}，

而 NO_2^- 质量浓度相对有所上升,从 1.51 mg·L^{-1}升至 1.96 mg·L^{-1},一定程度上表明亚硝酸盐氧化细菌对 NO_2^- 的氧化作用受到抑制,这种抑制作用持续约 8 d 后,出水中的 NO_3^- 质量浓度开始逐渐升高,并保持相对稳定. 由此可以推断,亚硝酸盐氧化细菌在低浓度 CIP(50 μg·L^{-1})环境下具有一定的调节适应能力,尽管开始硝化反应受到抑制,但随后即可很快恢复. Gonzalez-Martinez 等[27]的研究同样表明,投加质量浓度为 100 ng·L^{-1}的 CIP 对微生物氨氧化过程具有短暂的抑制作用,同时伴随着微生物量的暂时降低.

此外,研究同样发现,生物膜微生物在硝化作用的同时对 COD 的去除较为稳定(数据未列出),BAF-1 和 BAF-2 中 COD 去除率范围分别为 61.0% ~70.3%和 60.4% ~70.7%,表明 CIP 的加入对微生物降解有机物影响较小.

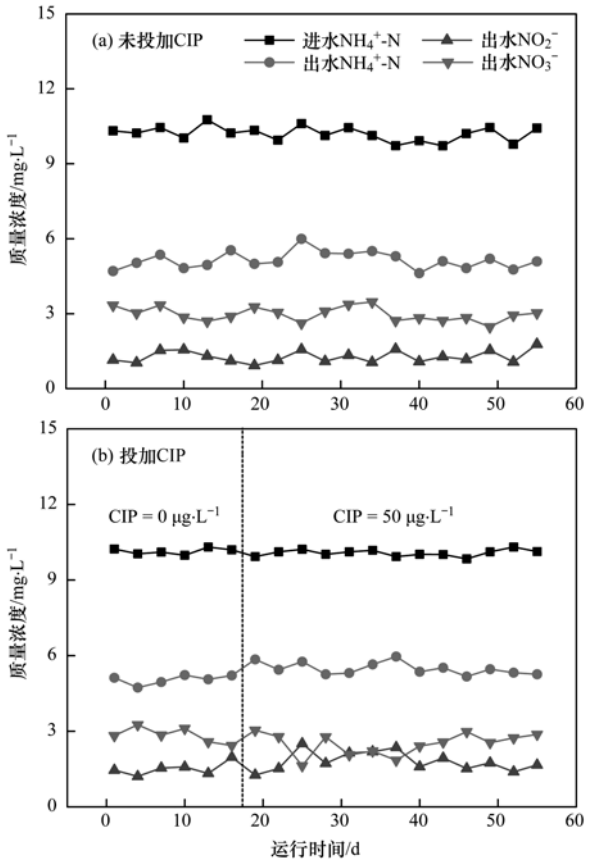

图 2 CIP 对 BAF 中NH_4^+-N、NO_2^- 和 NO_3^- 的浓度变化影响

Fig. 2 Effect of CIP on the variation of NH_4^+-N, NO_2^- and NO_3^- concentrations in BAF

2.2 CIP 对 BAF 中硝化微生物的作用影响

CIP 具有广谱杀菌作用,对细菌微生物的生长繁殖具有一定影响. Gonzalez-Martinez 等[27]发现在短程硝化过程中,质量浓度分别为 100 ng·L^{-1}和 350 ng·L^{-1}的 CIP 对氨氧化和亚硝酸盐氧化过程均具有一定的抑制作用,当 CIP 质量浓度为 350 ng·L^{-1}时,活性污泥系统内氨氧化细菌数量明显下降. Amorim 等[28]研究发现,在喹诺酮类抗生素(包括 CIP、氧氟沙星和诺氟沙星)混合质量浓度分别为 9 μmol·L^{-1}和 32 μmol·L^{-1}条件下,活性污泥系统中氨氧化细菌和亚硝化细菌的活性虽未受到明显抑制,但其整体微生物群落结构却发生了转移. 结合上述 CIP 对 BAF 中氮素形态变化的作用影响,本研究重点考察了 CIP 的加入对 BAF 中硝化微生物的变化影响,包括 AOB、*Nitrospira* 和 *Nitrobacter*.

图 3 为 CIP 的投加对 BAF 中 AOB、*Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 的浓度变化影响. 从中变化曲线可以看出,BAF-1 生物膜中硝化微生物的丰度变化较为稳定,AOB、*Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 的丰度水平分别为 6.5×10^3 ~ 1.3×10^4、4.8×10^3 ~ 1.1×10^4 和 6.5×10^6 ~ 1.3×10^7 copies·g^{-1},*Nitrobacter* 显著高于 AOB 和 *Nitrospira*. 相比之下,BAF-2 中硝化微生物的丰度在投加 CIP 之前均较为稳定,加入 CIP 后,其变化波动较大. AOB 丰度在投入 CIP 初始时出现一个短暂的下降,随后即恢复稳定,表明微量 CIP 对其影响较小. 尽管如此,CIP 的加入对 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 影响较大,当加入质量浓度为 50 μg·L^{-1}的 CIP 时,BAF-2 中 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 的丰度均呈现先急剧降低,随后又升高的变化趋势,但适应周期有所不同. *Nitrospira* 在投加 CIP 后第 9 d 时降至最低,降低幅度达 1 个数量级,而后开始不断升高,到第 24 d 时已超过未投加 CIP 时的丰度. 同样地,*Nitrobacter* 在投加 CIP 后第 9 d 时降至最低,约为 3.8×10^6 copies·g^{-1},随后虽略有升高,但幅度较小,并逐渐趋于稳定,均低于未投加 CIP 时的丰度,表明 CIP 对 *Nitrobacter* 的抑制作用影响更大. 除此之外,上述结果显示,CIP 在开始阶段对 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 均具有一定的抑制作用,但经一段时间适应后,其可在 CIP 存在的环境下进行生长繁殖,这与前述 NO_2^- 和 NO_3^- 在投加 CIP 后初始阶段出现波动,随后逐渐趋于稳定的变化现象是一致的,同时与 Gonzalez-Martinez 等[27]的研究结果相似.

2.3 CIP-ARGs 在 BAF 运行过程中的变化情况

有研究表明,细菌抗药性的出现是由于对应抗生素药物对其产生的选择性压力而引起的. 长期暴露在抗生素环境条件下,抗药性细菌会逐渐被选择成为优势菌群. 本研究选取在环境水体中普遍存在

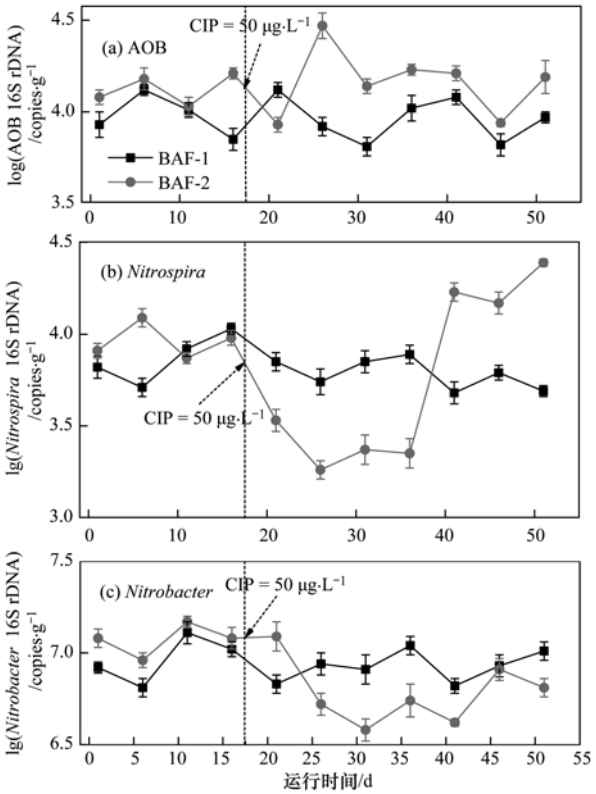

图 3　CIP 对 BAF 生物膜中硝化微生物的丰度变化影响

Fig. 3　Effect of CIP on the variation in abundance of nitrifying microorganisms in biofilm

的 CIP-ARGs，包括 *parC*、*aac*、*oqxB* 和 *qepA* 作为研究对象，其中 *aac* 为氨基糖苷修饰酶基因，*parC* 为拓扑异构酶基因，*qepA* 和 *oqxB* 为外排泵基因，考察这些 CIP-ARGs 在 BAF 生物膜硝化作用过程中的变化情况.

图 4 为 CIP-ARGs 在 BAF 中抗性基因的相对丰度变化情况，4 种抗性基因相对丰度有很大差异，其中 BAF-1 中 *aac* 相对丰度最高，达 $2.82 \times 10^{-3} \sim 8.51 \times 10^{-3}$，而 *qepA* 相对丰度最低，在 $8.51 \times 10^{-8} \sim 1.66 \times 10^{-7}$ 之间，*parC* 和 *oqxB* 的相对丰度分别在 $1.91 \times 10^{-4} \sim 4.90 \times 10^{-4}$ 和 $9.12 \times 10^{-5} \sim 2.57 \times 10^{-4}$ 范围内. 此外，对生物膜 16S rRNA 基因同样进行了检测分析，发现其在整个运行周期内较为稳定，绝对丰度在 $2.29 \times 10^{8} \sim 4.07 \times 10^{8}$ copies·g^{-1} 之间，同时结合图 4 中不同 CIP-ARGs 的曲线变化趋势可知，BAF-1 运行工况对生物膜的扰动影响较小.

尽管如此，CIP 的加入对生物膜微生物具有较为显著的影响，其中 16S rRNA 基因绝对丰度由 3.98×10^{8} copies·g^{-1} 降至 3.80×10^{6} copies·g^{-1} 之间，降低幅度达 2 个数量级. 此外，CIP 的出现除对 *aac* 和 *qepA* 抗性基因的变化影响较小[图 4(b)和 4(d)]外，对其余 2 种 CIP-ARGs 均具有一定的影响，如 *parC* 相对丰度呈现出先降低后升高的变化趋势，在投加 CIP 后第 19 d 时降幅最大，达 1 个数量级，这与硝化微生物 *Nitrobacter* 的变化趋势相类似；*oqxB* 相对丰度在初始阶段波动较小，在投加 CIP 后第 19 d 时开始逐渐升高，在运行周期结束时已超过其在未投加 CIP 时的相对丰度，这与硝化微生物 *Nitrospira* 的变化趋势是类似的.

生物膜细菌微生物对 CIP 的适应和代谢，决定

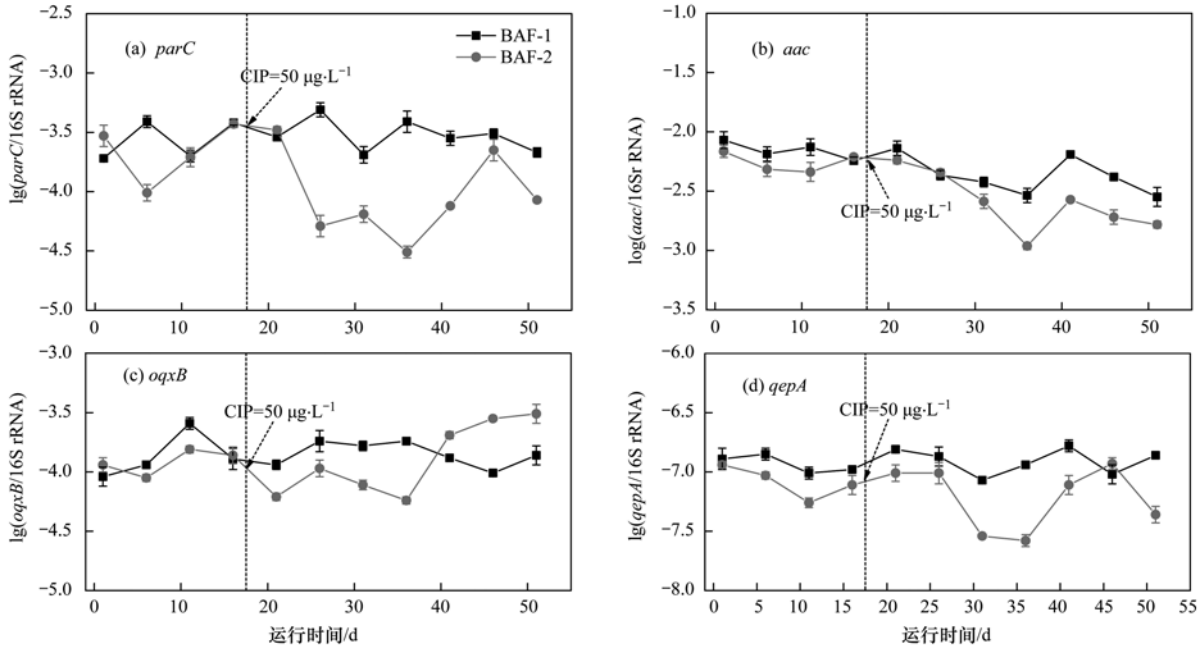

图 4　CIP-ARGs 在 BAF 运行过程中的波动变化

Fig. 4　Fluctuation of CIP-ARGs during the operation process of BAF

了其对 CIP 必须具有抵抗性. 由图 2(b)分析可知,CIP 的加入对 BAF 生物膜硝化过程开始阶段具有一定抑制作用,但随后又逐渐恢复,而硝化微生物丰度也相应地出现了波动变化(见图 3),这表明固定生物膜对低浓度的 CIP 具有一定的抵抗和适应能力,敏感的细菌微生物在 CIP 的作用下被杀灭,而携带有 CIP-ARGs 的细菌微生物在 CIP 存在环境中生存、适应和繁殖,逐渐成为生物膜优势菌群.

2.4 硝化微生物与 CIP-ARGs 相关性分析

由表 3 数据分析可知,BAF-1 生物膜中硝化微生物与 CIP-ARGs 之间无显著相关性. 尽管如此,研究发现 BAF-2 中生物膜 *Nitrobacter* 与 *parC* 抗性基因之间呈现出显著的正相关性($r = 0.895$, $P = 0.006$),并且 *Nitrospira* 与 *oqxB* 抗性基因之间同样具有非常高的正相关性($r = 0.907$, $P = 0.005$),推测不同硝化微生物的遗传因子中可能携带有 CIP-ARGs,同时也表明 CIP 的出现对 CIP-ARGs 的诱导、表达和散播具有一定的促进作用. 结合 2.3 节的分析结果可知,这种显著相关性与上述 BAF-2 生物膜中 *Nitrobacter* 与 *parC* 的变化趋势,及 *Nitrospira* 与 *oqxB* 的变化趋势是相一致的.

表 3 硝化微生物与 CIP-ARGs 相关性分析[1)]

Table 3 Correlation analysis between nitrifying microorganisms and CIP-ARGs

CIP-ARGs	类型	BAF-1 (CIP = 0 μg·L^{-1})			BAF-2 (CIP = 50 μg·L^{-1})		
		AOB	*Nitrobacter*	*Nitrospira*	AOB	*Nitrobacter*	*Nitrospira*
parC	*r*	0.444	−0.872	0.213	−0.634	**0.895**	−0.085
	P	0.556	0.128	0.787	0.126	**0.006**	0.851
aac	*r*	0.545	−0.357	0.276	0.130	0.596	−0.456
	P	0.455	0.643	0.724	0.781	0.157	0.303
oqxB	*r*	0.401	−0.799	−0.756	−0.005	0.079	**0.907**
	P	0.599	0.201	0.244	0.992	0.866	**0.005**
qepA	*r*	0.208	0.374	0.578	−0.02	0.597	0.064
	P	0.792	0.626	0.422	0.965	0.157	0.892

1)黑体字表示具有显著相关性

3 结论

(1)低浓度 CIP (50 μg·L^{-1}) 对 BAF 生物膜硝化反应具有一定抑制作用,但经一段时间适应后可逐渐恢复. 通过对硝化微生物的检测分析可知,CIP 对 AOB 作用影响较小,但对 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 具有抑制作用.

(2)通过对生物膜 CIP-ARGs 检测可知,CIP 除对 *aac* 和 *qepA* 抗性基因的变化影响较小外,对 *parC* 和 *oqxB* 的影响较大. 此外,实验结果发现,*parC* 相对丰度的变化趋势与 *Nitrobacter* 的变化趋势相类似,而 *oqxB* 相对丰度与 *Nitrospira* 的变化趋势相类似.

(3)CIP 对生物膜中 CIP-ARGs 的诱导、表达和散播具有一定促进作用. 此外,*Nitrobacter* 与 *parC* 之间具有显著正相关性,而 *Nitrospira* 与 *oqxB* 之间同样具有显著相关性,推测不同硝化微生物的遗传因子中可能携带有 CIP-ARGs.

参考文献:

[1] Kyung M S, Cheol-In K, Eun-Jeong J, *et al*. Epidemiology of ciprofloxacin resistance and its relationship to extended-spectrum β-lactamase production in *Proteus mirabilis* bacteremia [J]. Korean Journal of Internal Medicine, 2011, **26**(1): 89-93.

[2] 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 等. 河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 847-854.

[3] 崔皓, 王淑平. 环丙沙星在潮土中的吸附特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2895-2900.

[4] Wunder D B, Tan D T, LaPara T M, *et al*. The effects of antibiotic cocktails at environmentally relevant concentrations on the community composition and acetate biodegradation kinetics of bacterial biofilms [J]. Chemosphere, 2013, **90**(8): 2261-2266.

[5] Córdova-Kreylos A L, Scow K M. Effects of ciprofloxacin on salt marsh sediment microbial communities[J]. The ISME Journal, 2007, **1**(7): 585-595.

[6] Juretschko S, Timmermann G, Schmid M, *et al*. Combined molecular and conventional analyses of nitrifying bacterium diversity in activated sludge: *Nitrosococcus mobilis* and *Nitrospira*-Like bacteria as dominant populations [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(8): 3042-3051.

[7] Ge S, Wang S, Yang X, *et al*. Detection of nitrifier and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review[J]. Chemosphere, 2015, **140**: 85-98.

[8] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2834-

2842.

[9] Nicol G W, Leininger S, Schleper C, *et al*. The influence of soil pH on the diversity, abundance and transcriptional activity of ammonia oxidizing archaea and bacteria[J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(11): 2966-2978.

[10] Chen Y, Wang Y, Fan M, *et al*. Preliminary study of shortcut nitrification and denitrification using immobilized of mixed activated sludge and denitrifying Sludge[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, **11**(1): 1171-1176.

[11] Conrad M, Markus A, Peter K, *et al*. The adaptation of nitrifying microorganisms to inhibiting substances at meso-and psychrophilic temperature conditions[J]. Water Science and Technology, 2013, **68**(1): 83-90.

[12] Peng L, Ni B J, Erler D, *et al*. The effect of dissolved oxygen on N_2O production by ammonia-oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge[J]. Water Research, 2014, **66**: 12-21.

[13] 王峰, 刘易, 杨海真. 重金属抑制硝化过程的 *amoA* mRNA 作用途径[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(9): 1226-1229.

[14] Black G, Jones M, Vale P, *et al*. Biofilm responses to toxic shocks in closed pipes: using nitrous oxide emissions as an early warning of toxicity ahead of a wastewater treatment works[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2014, **225**(2): 1-10.

[15] 吴宇澄, 王建军, 吴庆龙. 基于引物的湖泊沉积物氨氧化细菌 PCR 扩增策略比较[J]. 环境科学, 2010, **9**(9): 2178-2183.

[16] Huggett J, Dheda K, Bustin S, *et al*. Real-time RT-PCR normalisation: strategies and considerations[J]. Genes & Immunity, 2005, **6**(4): 279-284.

[17] 邵军, 孙海美, 孙卫玲, 等. 垃圾渗滤液处理系统中微生物群落结构变化[J]. 北京大学学报, 2010, **46**(3): 435-441.

[18] Kowalchuk G A, Stephen J R, Boer W D, *et al*. Analysis of ammonia-oxidizing bacteria of the *beta* subdivision of the class *Proteobacteria* in coastal sand dunes by denaturing gradient gel electrophoresis and sequencing of PCR-amplified 16S ribosomal DNA fragments[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(4): 1489-1497.

[19] Freitag T E, Chang L, Clegg C D, *et al*. Influence of inorganic nitrogen management regime on the diversity of nitrite-oxidizing bacteria in agricultural grassland soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(12): 8323-8334.

[20] Dionisi H M, Layton A C, Harms G, *et al*. Quantification of *Nitrosomonas oligotropha*-like ammonia-oxidizing bacteria and *Nitrospira* spp. from full-scale wastewater treatment plants by competitive PCR[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(1): 245-253.

[21] Xia L N, Li L, Wu C M, *et al*. A survey of plasmid-mediated fluoroquinolone resistance genes from *Escherichia coli* isolates and their dissemination in Shandong, China[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2010, **7**(2): 207-215.

[22] Mouneimné H, Robert J, Jarlier V, *et al*. Type II topoisomerase mutations in ciprofloxacin-resistant strains of *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 1999, **43**(1): 62-66.

[23] Kim H B, Wang M, Park C H, *et al*. *oqx*AB encoding a multidrug efflux pump in human clinical isolates of *Enterobacteriaceae*[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2009, **53**(8): 3582-3584.

[24] Park C H, Robicsek A, Jacoby G A, *et al*. Prevalence in the United States of *aac*(6′)-Ib-cr encoding a ciprofloxacin-modifying enzyme[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2006, **50**(11): 3953-3955.

[25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[26] 张敏. 三种抗生素对淡水池塘底泥硝化作用及氨氧化微生物生长和群落结构的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.

[27] Gonzalez-Martinez A, Rodriguez-Sanchez A, Martinez-Toledo M V, *et al*. Effect of ciprofloxacin antibiotic on the partial-nitritation process and bacterial community structure of a submerged biofilter[J]. Science of the Total Environment, 2014, **476-477**(2014): 276-287.

[28] Amorim C L, Maia A S, Mesquita R B R, *et al*. Performance of aerobic granular sludge in a sequencing batch bioreactor exposed to ofloxacin, norfloxacin and ciprofloxacin[J]. Water Research, 2014, **50**(3): 101-113.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 4

Apr. 15, 2016

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, *et al.* (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, *et al.* (1188)

Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing ····· ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* (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, *et al.* (1219)

Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles ····· PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, *et al.* (1230)

Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen ····· HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, *et al.* (1240)

Monitoring Atmospheric CO_2 and $\delta^{13}C(CO_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China ····· XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1279)

Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS ····· LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, *et al.* (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, *et al.* (1295)

Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility ····· XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, *et al.* (1306)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan ····· LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, *et al.* (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, *et al.* (1321)

Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City ····· LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1345)

Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan ····· FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1389)

Effect of *Elodea nuttallii*-immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay ····· HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, *et al.* (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, *et al.* (1404)

Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae ····· CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, *et al.* (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, *et al.* (1427)

Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process ····· WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, *et al.* (1437)

Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured $Fe_3O_4@SiO_2$ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide ····· LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, *et al.* (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, *et al.* (1451)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants ····· NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, *et al.* (1460)

Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine ····· LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, *et al.* (1467)

Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor ····· WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1499)

Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppec ····· 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, *et al.* (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, *et al.* (1523)

Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with *Iris pseudacorus* 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, *et al.* (1539)

Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains ····· FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, *et al.* (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, *et al.* (1553)

Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock ····· JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, *et al.* (1562)

Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of *Vicia-faba* and Garlic ····· WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, *et al.* (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, *et al.* (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