

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

外加微量 N_2H_4 下 SBR 中硝化微生物特性

肖芃颖¹, 张代钧², 卢培利²

(1. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054; 2. 重庆大学资源及环境科学学院, 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 运行实验室规模单级硝化序批式反应器(SBR), 研究长期外加微量 N_2H_4 (约 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对硝化污泥中功能微生物好氧氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂)的影响。结果表明, 外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中, AOB 主要属于亚硝化球菌(*Nitrosococcus*)属和亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)属, 另有少部分属于亚硝化螺旋菌(*Nitrospira*)属, NOB 属于硝化杆菌(*Nitrobacter*)属。外加微量 N_2H_4 前后, AOB *amoA* 基因拷贝数(以干污泥计)由 $1.0 \times 10^9\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ 减少为 $2.09 \times 10^4\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, NOB *nxrB* 基因拷贝数由 $1.28 \times 10^7\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ 减少为 $2.56 \times 10^5\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ 。AOB 对环境因素较 NOB 相比更为敏感, N_2H_4 对硝化微生物的抑制与毒性作用使外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中 AOB 流失幅度大于 NOB, 但定量 PCR 方法无法准确比较 N_2H_4 对 AOB 与 NOB 活性抑制的强弱。长期外加微量 N_2H_4 破坏硝化微生物活性, 使反应器崩溃。因此没有厌氧氨氧化菌(AnAOB)消耗 N_2H_4 的亚硝化系统中, 企图通过调控外加 N_2H_4 浓度水平抑制 NOB 活性, 从而进一步洗脱 NOB 提高脱氮性能可能无法实现。

关键词: N_2H_4 ; SBR; 硝化微生物; *amoA*; *nxrB*

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4734-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201601196

Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N_2H_4 Addition

XIAO Peng-ying¹, ZHANG Dai-jun², LU Pei-li²

(1. School of Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, College of Resources and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A sequencing batch reactor (SBR) was conducted to perform nitrification process. The influence of long-term trace hydrazine (N_2H_4) addition (about $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) on ammonium oxidizing bacteria (AOB) and nitrite oxidizing bacteria (NOB) in nitrifying sludge was investigated. The result indicated that *Nitrosococcus*, *Nitrosomonas* and *Nitrospira* were related to AOB, and *Nitrobacter* was related to NOB in nitrifying sludge with N_2H_4 addition, respectively. The estimates of AOB population (in dry sludge) with N_2H_4 addition decreased from 1.0×10^9 to $2.09 \times 10^4\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, and those of NOB decreased from 1.28×10^7 to $2.56 \times 10^5\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$. AOB was more sensitive to environmental factors than NOB, the effect of inhibition and toxicity on nitrobacteria caused more loss of AOB abundances than that of NOB, but quantitative real-time PCR could not determine the inhibition of N_2H_4 on microbial activity of AOB and NOB. The nitrobacteria activity was destroyed with long-term trace N_2H_4 addition, and the reactor collapsed. Consequently, it was possibly unable to inhibit NOB activity by controlling the added N_2H_4 concentration, and further take off NOB in nitrification process for improving nitrogen removal.

Key words: N_2H_4 ; SBR; nitrobacteria; *amoA*; *nxrB*

联氨(N_2H_4)作为厌氧氨氧化菌(AnAOB)代谢中间产物能够强化厌氧氨氧化^[1,2], 但是对好氧氨(NH_4^+)氧化及亚硝酸盐(NO_2^-)氧化存在一定抑制作用^[3]。 N_2H_4 抑制好氧氨氧化及亚硝酸盐氧化动力学类型分别为竞争性与非竞争性^[4]。添加 N_2H_4 抑制纯培养硝化细菌菌株发现, 抑制 75% 好氧氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂)活性的 N_2H_4 浓度分别为 $1.8 \times 10^{-3}\text{ mol}$ 和 $1.5 \times 10^{-3}\text{ mol}$, N_2H_4 对 NOB 的毒性作用较 AOB 相比更为强烈^[5]。目前国内外关于 N_2H_4 对硝化过程的影响鲜见报道。

分子生物学技术被广泛运用于废水生物处理过

程的微生物生理生态特性研究^[6~10], 在硝化微生物群落结构及多样性分析等领域的应用已十分成熟^[11~16]。本研究运行实验室规模单级硝化序批式反应器(SBR), 结合克隆文库、系统发育树的构建, 实时定量 PCR 等分子生物学方法, 分析外加微量 N_2H_4 对硝化污泥中功能微生物好氧氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂)的影响, 以期为

收稿日期: 2016-01-31; 修订日期: 2016-07-26

基金项目: 重庆市教委科技研究项目(KJ1600905); 重庆理工大学星火计划项目(2015XH22); 重庆理工大学科研启动项目(2014ZD36)

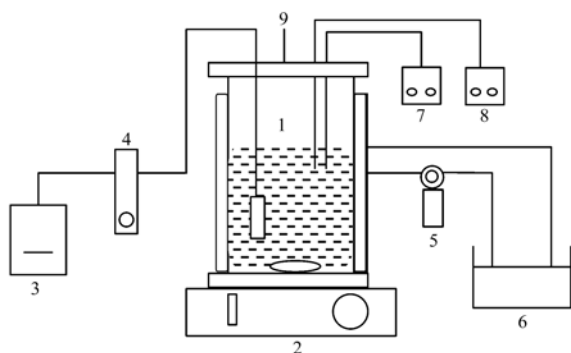
作者简介: 肖芃颖(1987~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为废水处理技术, E-mail: xiaopengying36@163.com

N_2H_4 抑制好氧氨氧化及亚硝酸盐氧化动力学特性提供分子生物学证据,以及考察亚硝化系统通过 N_2H_4 途径洗脱 NOB 提高脱氮性能的可行性。

1 材料与方法

1.1 硝化污泥的富集

实验室平行运行 2 个硝化 SBR. 反应器装置为圆柱形有机玻璃材质,内径 11 cm,高 50 cm,有效体积 3 L. 硝化 SBR 装置示意图 1 所示. 反应器运行周期为 6 h,好氧曝气 5.55 h(包括 0.2 h 进水)、沉淀 0.25 h、出水 0.2 h. 反应器以 $(NH_4)_2SO_4$ 为基质、 $NaHCO_3$ 为无机碳源,C:N:P 比为 65:5:1^[17] 配制合成废水. 1 L 合成废水加入 1 mL 微量元素液,微量元素液主要组分为: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.43 $g \cdot L^{-1}$; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$, 0.24 $g \cdot L^{-1}$; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 5.0 $g \cdot L^{-1}$; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, 4.2 $g \cdot L^{-1}$; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, 0.99 $g \cdot L^{-1}$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 0.25 $g \cdot L^{-1}$; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 5.0 $g \cdot L^{-1}$; $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, 1.1 $g \cdot L^{-1}$; $NiSO_4 \cdot 6H_2O$, 0.21 $g \cdot L^{-1}$; H_3BO_3 , 0.014 $g \cdot L^{-1}$; EDTA, 15.0 $g \cdot L^{-1}$. 硝化 SBR 运行过程 pH 只通过在配水中加入 $NaHCO_3$ 控制在 7.0 ~ 8.5 范围内,DO 浓度通过转子流量计控制空气曝气速率保持在 2 ~ 4 $mg \cdot L^{-1}$ 的浓度范围内,水浴加热使反应器内温度保持在 $25^\circ C \pm 1^\circ C$.



1. 反应器; 2. 磁力搅拌器; 3. 空气压缩机; 4. 气体流量计;
5. 热力循环泵; 6. 恒温水浴装置; 7. pH 电极;
8. DO 电极; 9. 泥样采集口

图 1 硝化反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of nitrifying reactor

1.2 硝化污泥中功能微生物的 DNA 提取及 PCR 扩增

将外加微量 N_2H_4 前后采集的硝化污泥样品 ($0.1 g \cdot g^{-1}$) 加入无菌 EP 管中,滴入 1.5 mL DNA 裂解缓冲液(配制: 100 $mmol \cdot L^{-1}$ Tris-HCl; 100 $mmol \cdot L^{-1}$ sodium EDTA; 1.5 $mol \cdot L^{-1}$ NaCl; 2%

CTAB; 100 $mmol \cdot L^{-1}$ 磷酸缓冲液,上述溶液 pH 均为 8.0),通过 DNA 提取装置(OMEGA BIO-TEK, Norcross, GA, USA),参照文献[18]报道的方法提取硝化污泥中功能微生物(AOB、NOB) DNA. 然后,分别用 1% 琼脂糖电泳与微量紫外分光光度计定性定量检测 DNA 样品浓度和纯度. 提取的 DNA 样品用于功能微生物的功能基因扩增及量化。

AOB 功能基因 *amoA* 进行扩增的编码基因引物组为 *amoA1F/amoA2R*^[19],其碱基序列为(5' GGGGTTTCTACTGGTGGT-CCCCTCKGSAAAGCCCTTC TTC 3'),于 $95^\circ C$ 进行 5 min 30 个循环的反应($94^\circ C$ 变性 1 min; $56^\circ C$ 退火 1 min; $72^\circ C$ 延伸 3 min). NOB 功能基因 *nxB* 进行扩增的编码基因引物组为 *nxB1F/nxB1R*^[20],其碱基序列为(5' ACGTGG AGACCAAGCCGGG-CCGTGCTG TTGAYCTCTGTGA 3'),同样于 $95^\circ C$ 进行 5 min 30 个循环的反应($94^\circ C$ 变性 1 min; $65^\circ C$ 退火 1 min; $72^\circ C$ 延伸 3 min)。

1.3 硝化污泥中功能微生物的系统发育树建立

将纯化后的 AOB、NOB 功能基因 PCR 扩增片段插入到 pMD19-T 载体的多克隆酶切位点中,转化成大肠杆菌 DH-5 α 感受态细胞,送往上海生工生物工程股份有限公司进行测序. 利用 MEGA 4.1 软件^[21]对测序处理后的功能基因有效序列依据 Neighbor-Joining (NJ) 法构建硝化污泥中功能微生物 AOB、NOB 的系统发育树。

1.4 硝化污泥中功能微生物的定量分析

采用荧光实时定量 PCR 法定量分析外加微量 N_2H_4 对硝化污泥中功能微生物的影响. AOB 功能基因 *amoA* 进行扩增的编码基因引物组同样为 *amoA1F/amoA2R*^[19],于 $95^\circ C$ 进行 30 s 40 个循环的反应($95^\circ C$ 变性 5 s; $60^\circ C$ 退火 34 s),NOB 功能基因 *nxB* 进行扩增的编码基因引物组同样为 *nxB1F/nxB1R*^[20],于 $95^\circ C$ 进行 30 s 40 个循环的反应($95^\circ C$ 变性 5 s; $68^\circ C$ 退火 34 s)。

于 ABI 7500Q-PCR 仪 (Applied Biosystems, Carlsbad, USA) 上 25 μL 反应体系中进行实时定量 PCR 测定. 提取扩增后的 *amoA* 与 *nxB* 基因片段质粒,按照 $10 \sim 10^7$ copies $\cdot \mu L^{-1}$ 的浓度梯度连续稀释质粒 DNA 制备标准. 通过溶解曲线分析与琼脂糖凝胶电泳检验扩增产物的特异性. 实时定量 PCR 测定过程中,每组 DNA 样品的 3 次重复测定均在两个独立的定量 PCR 仪上进行,根据阈值循环 (Ct) 值与基因拷贝数对数 (lg) 之间的关系绘制标准曲线^[22]。

2 结果与讨论

2.1 硝化 SBR 运行性能及污泥性质分析

平行运行实验室规模硝化 SBR 1 号和 2 号. 未添加 N_2H_4 条件下的硝化 SBR1 号反应器运行性能和污泥性质分别见图 2(a)、2(c) 所示; 硝化 SBR2 号在启动运行 50 d 后, 于反应器内加入约 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ N_2H_4 持续运行 25 d, 反应器运行性能和污泥性质分别见图 2(b)、2(d) 所示.

硝化 SBR1 号和 2 号启动运行阶段(图 2 阶段 1), 受进水氨氮 (NH_4^+-N) 浓度递增带来的负荷冲击, 出水 NH_4^+-N 波动明显. 特别是阶段 1 中第 3 个进水 NH_4^+-N 浓度递增时期(第 15~20 d), 由于进水 NH_4^+-N 浓度增加幅度较大(由 $105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 直接增加至 $233 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), DO 仍保持在初始浓度范围(约 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 未相应升高, 且该时期没有及时对反应器进行排泥, 致使硝化 SBR1 号和 2 号中出现 NH_4^+-N 的短暂累积(出水 NH_4^+-N 浓度最高达到 $127.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 表征污泥生物量浓度的挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 分别由初始的 $2.33 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 1.77

$\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $3.13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.49 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 其后, 将反应器氧曝气量增大(由初始 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步提高至约 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 并及时排泥, 持续运行一段时间后, 硝化污泥活性逐渐恢复(图 2 阶段 2), 出水 NH_4^+-N 浓度随着 DO 浓度的提高逐步递减至 $0 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围波动. 硝化 SBR1 号和 2 号从启动到稳定运行阶段(阶段 1 和阶段 2), 出水亚硝态氮 (NO_2^--N) 浓度分别在 $0 \sim 1.48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $0 \sim 1.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内波动, 未出现明显积累; 出水硝态氮 (NO_3^--N) 浓度则随着进水 NH_4^+-N 基质浓度的递增(图 2 阶段 1 与阶段 2 中, 进水 NH_4^+-N 浓度由初始的 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步增加至 $536.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别由初始的 $42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $49.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 累积至 $527.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $525.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 好氧氨氧化菌 (AOB) 对环境因素较亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 相比更为敏感. 两个反应器中污泥体积指数 (SVI) 在阶段 1 和阶段 2 中均持续减少至 $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右, 反应器稳定运行至阶段 2 中取样测得 MLVSS 逐渐降低且维持在 $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 硝化 SBR1 号和 2 号中 AOB 与 NOB 富集成功且生长良好. 向稳定运行 50 d 后的硝化 SBR2 号中加入

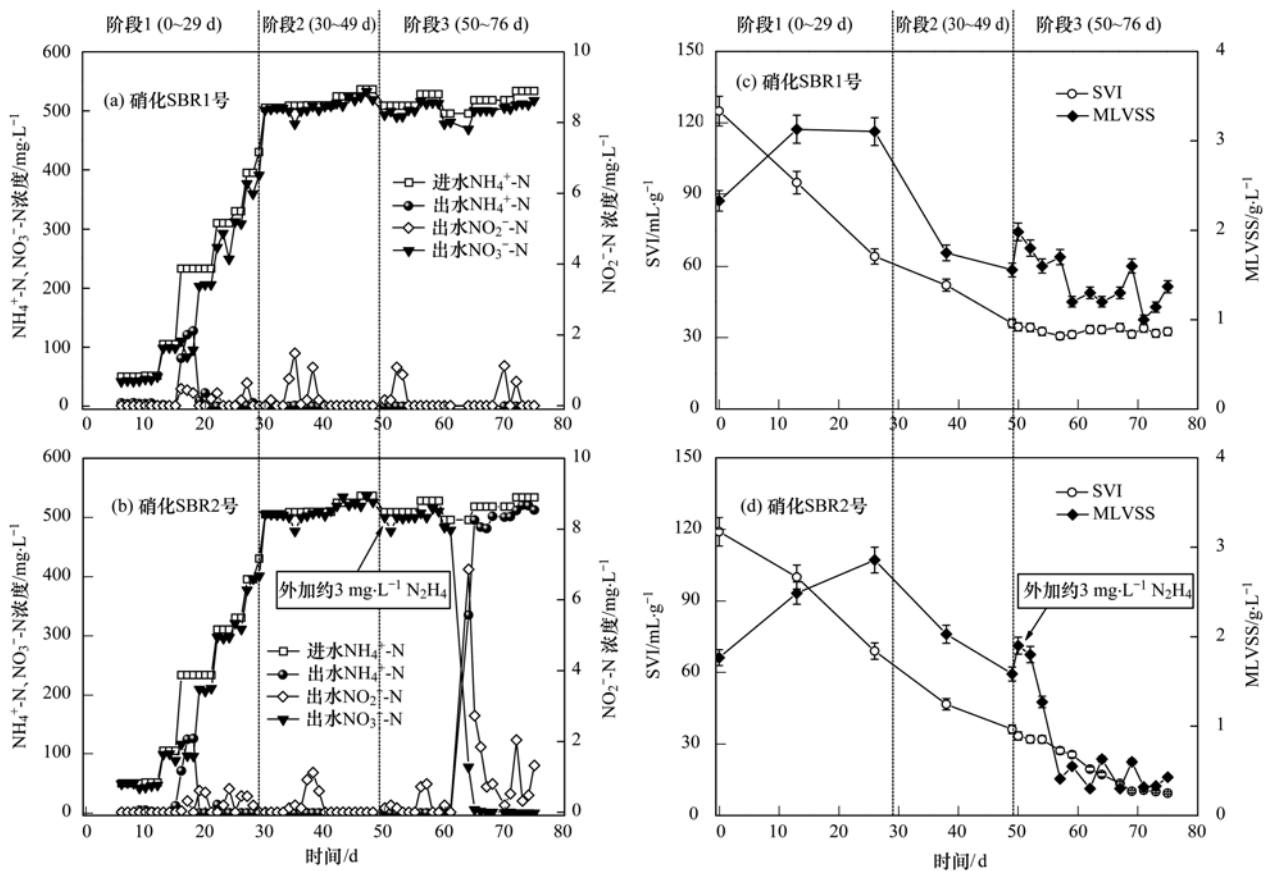


图 2 硝化 SBR 运行性能及污泥性质

Fig. 2 Operational performance and sludge activity of nitrifying SBR1 and SBR2

约 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}N_2H_4$, 连续运行 25 d[见图 2(b)、2(d) 阶段 3]。反应器运行至第 63 d 后出水 NH_4^+-N 和 $NO_2^- -N$ 明显积累, 反应器性能呈现恶化趋势。第 65 d 开始, 出水 $NO_3^- -N$ 显著减少, 直至反应器运行至第 75 d, 仅有少量 $NO_2^- -N$ 生成, 未检测到明显的出水 $NO_3^- -N$ 累积, N_2H_4 对 NOB 抑制作用强于其对 AOB, 这与文献[4,5]报道的结论一致。硝化 SBR2 号中 MLVSS 与 SVI 从第 50 d 加入微量 N_2H_4 后迅速变化。反应器运行至第 57 d 时, MLVSS 已快速降低至 $0.41\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 但是硝化 SBR2 号运行性能在添加微量 N_2H_4 后的前 12 d 内未出现明显变化, 所以仍然在该时段内对反应器进行间歇排泥, 导致实际已受 N_2H_4 抑制影响的硝化污泥中生物量浓度明显减少。反应器运行至第 63 d 开始停止排泥, 此后 MLVSS 值维持在 $0.3\sim0.6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内。SVI 则在添加 N_2H_4 后持续降低至 $9.4\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 此时硝化细菌已基本停止生长, 硝化 SBR2 号在添加微量 N_2H_4 持续运行 25 d 后崩溃。而未添加 N_2H_4 的硝化 SBR1 号运行稳定[见图 2(a)、2(c) 阶段 3]。外加微量 N_2H_4 对 AOB 与 NOB 具有一定毒性作用, 在没有 AnAOB 消耗 N_2H_4 的亚硝化系统中可能无法通过添加适量浓度 N_2H_4 抑制 NOB 活性来实现 NOB 的洗脱。

2.2 硝化污泥中功能微生物的群落结构分析

于硝化 SBR2 号运行阶段不同时期(启动期、未加 N_2H_4 的运行中期、添加 N_2H_4 的运行后期)分别采集污泥样品 XH1、XH2 和 XH3。在样品 XH3 中挑取 50 个富含 *amoA* 和 *nrxB* 功能基因的阳性克隆样品进行测序, 分别得到 19 个 *amoA* 基因有效序列和 20 个 *nrxB* 基因有效序列, 对其随机编码为 XHA1-19 和 XHB1-20, 采用 MEGA4.1 软件通过 Neighbor-joining(NJ)法构建硝化污泥中功能微生物的功能基因进化关系。详见图 3 所示, 其中图 3(a) 为 AOB *amoA* 功能基因进化关系, 图 3(b) 为 NOB *nrxB* 功能基因进化关系。

AOB *amoA* 功能基因序列经克隆测序处理后聚类得到的 19 个操作单元(OTU)与非培养的 *amoA* 基因高度相似, 主要分布于亚硝化球菌属(*Nitrosococcus*)和亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*), 另有少部分属于亚硝化螺菌属(*Nitrospira*)。外加微量 N_2H_4 的硝化反应器中 AOB 群落组成较丰富。NOB *nrxB* 功能基因序列经克隆测序处理聚类得到的 20 个 OUT 分布于硝化杆菌属(*Nitrobacter*)。外加

微量 N_2H_4 的硝化反应器中 NOB 群落组成较 AOB 相比略显单一。本研究报道的 AOB 与 NOB 群落结构分析结果与文献[23,24]报道的相关研究结论相近。

2.3 硝化污泥中功能微生物的定量分析

为了从微观角度定量说明外加微量 N_2H_4 对硝化污泥中 AOB、NOB 的影响, 本研究定量测定添加微量 N_2H_4 前后的硝化污泥样品 XH1、XH2 和 XH3 中 AOB 与 NOB 的数量变化, 结果如图 4 所示。

未添加微量 N_2H_4 时, 硝化 SBR 2 号中总细菌 16S rRNA 基因拷贝数(以干污泥计)在启动初期为 $11.2\times10^{13}\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 运行稳定时期为 $3.24\times10^{13}\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 添加 N_2H_4 后的运行后期为 $2.31\times10^{13}\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$ 。反应器启动初期 XH1 中 AOB 的 *amoA* 基因拷贝数为 $2.01\times10^6\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, NOB 的 *nrxB* 基因拷贝数为 $4.20\times10^5\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$; 富集培养 50 d 后运行中期的 XH2 中 *amoA* 基因拷贝数为 $1.0\times10^9\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 比启动初期增长近 3 个数量级, *nrxB* 基因拷贝数为 $1.28\times10^7\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 比启动初期增长了近 2 个数量级; 添加微量 N_2H_4 后, XH3 中 *amoA* 基因拷贝数仅为 $2.09\times10^4\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 比 XH2 中 *amoA* 基因拷贝数减少近 5 个数量级、启动初期 XH1 中减少近 2 个数量级, *nrxB* 基因拷贝数为 $2.56\times10^5\text{ copies}\cdot\text{g}^{-1}$, 比 XH2 中 *nrxB* 基因拷贝数减少近 2 个数量级、是启动初期 XH1 中的一半。外加微量 N_2H_4 前后 AOB *amoA* 基因拷贝数占各阶段总细菌 16S rRNA 基因拷贝数的 1.89×10^{-8} 、 3.1×10^{-5} 和 9.02×10^{-10} , NOB *nrxB* 基因拷贝数占各阶段总细菌 16S rRNA 基因拷贝数的 3.74×10^{-9} 、 3.95×10^{-7} 和 1.11×10^{-8} 。分子生物学定量分析表明微量 N_2H_4 显著抑制硝化污泥中 AOB 与 NOB 的生物量, 与外加微量 N_2H_4 的硝化 SBR 2 号运行结果基本一致, 即添加 N_2H_4 后硝化细菌数量减少, 对应反应器中微生物基质利用速率降低。

外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中 AOB *amoA* 基因拷贝数绝对值略少于 NOB *nrxB* 基因拷贝数, 添加 N_2H_4 前后 AOB *amoA* 基因拷贝数变化幅度大于 NOB *nrxB* 基因拷贝数的, AOB *amoA* 基因拷贝数占总细菌 16S rRNA 基因拷贝数的相对比值小于 NOB *nrxB* 基因拷贝数的。AOB 对环境因素较 NOB 相比更为敏感, 硝化 SBR 2 号运行过程外部控制条件的不稳定性以及 N_2H_4 对 AOB 与 NOB 的抑制与毒性作用导致外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中 AOB 流失幅度大于 NOB; 此外, 即使微生物细胞死亡已久, 仍能

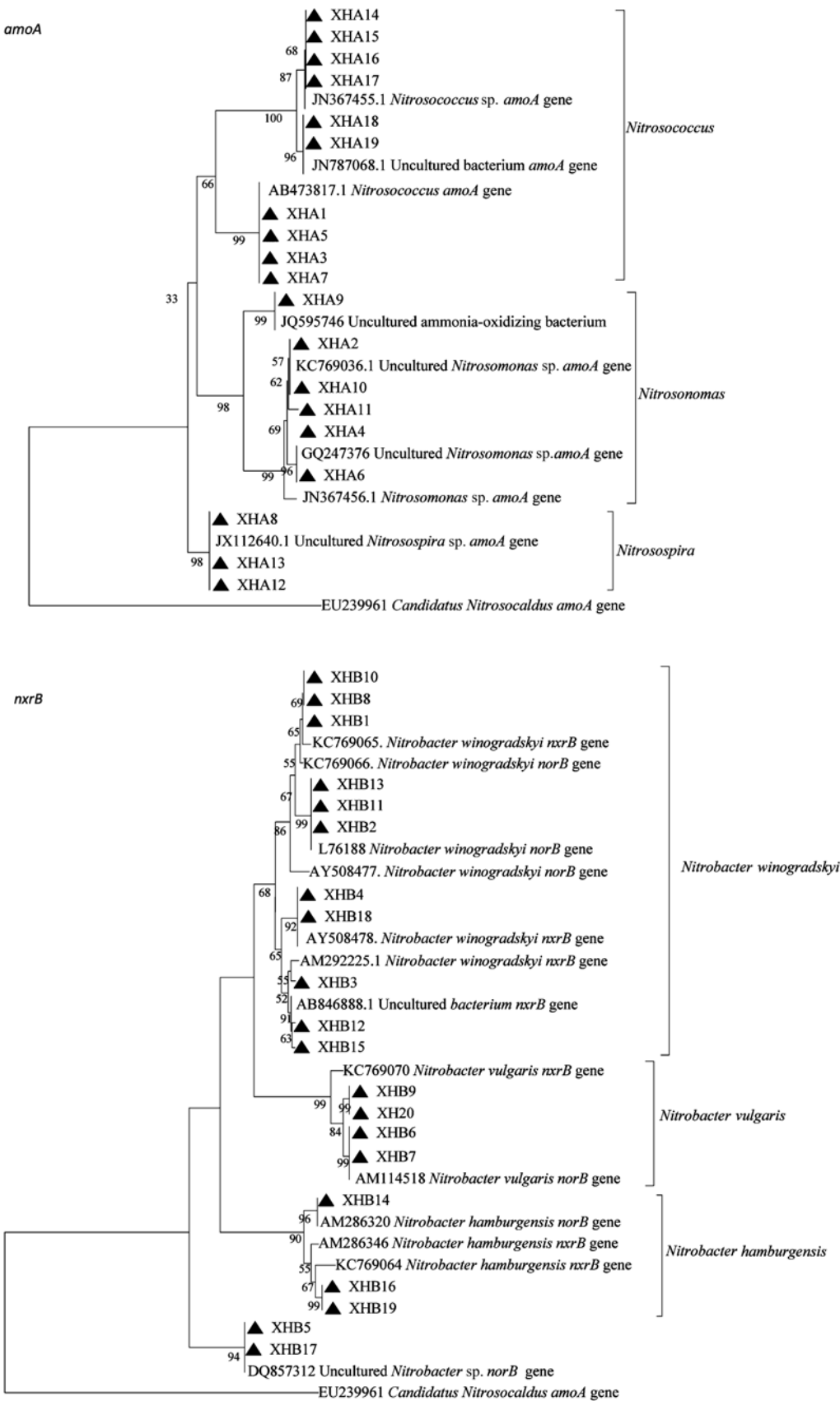


图 3 外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中 AOB 与 NOB 功能基因进化关系

Fig. 3 Diverse evolutionary relationship between the functional genes of AOB and NOB in nitrifying sludge with trace N_2H_4 addition

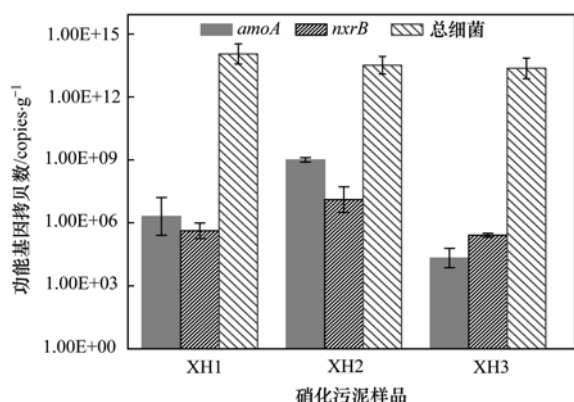


图4 添加微量 N_2H_4 前后硝化污泥样品 XH1、XH2 和 XH3 中功能微生物及总细菌的定量分析

Fig. 4 Quantitative analysis for functional microorganisms and total bacteria in nitrifying sludge samples XH1, XH2 and XH3 before and after trace N_2H_4 addition

提取其 DNA 得到基因拷贝数,功能微生物基因拷贝数只能间接表征微生物存在的数量,基因拷贝数出现明显变化也只能表明微生物是否生长或者死亡,不能准确表征微生物活性^[25]。所以,本研究外加微量 N_2H_4 前后硝化污泥中 AOB 与 NOB 的定量分析结果只能说明 N_2H_4 影响 AOB 与 NOB 在硝化污泥中的微生物量,为准确表征 N_2H_4 对 AOB 与 NOB 活性抑制的强弱,需进一步从活性表达水平上进行研究。

3 结论

(1) 本研究外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中, AOB 主要属于 *Nitrosococcus* 和 *Nitrosomonas* 属,少量属于 *Nitrosospira* 属; NOB 属于 *Nitrobacter* 属。外加微量 N_2H_4 的硝化污泥中 AOB 与 NOB 的功能基因拷贝数均显著减少,从分子生物学角度证明长期外加微量 N_2H_4 明显抑制硝化微生物的生长。

(2) 本研究长期添加微量 N_2H_4 ($3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的硝化系统出现崩溃, N_2H_4 对功能微生物具有毒性作用。所以在没有 AnAOB 消耗 N_2H_4 的亚硝化系统,无法通过调控外加 N_2H_4 浓度水平,抑制 NOB 活性来实现 NOB 洗脱,从而提高亚硝化生物脱氮性能。

(3) AOB 对环境因素较 NOB 相比更为敏感,本研究外加微量 N_2H_4 对功能微生物的抑制及毒性作用促使硝化 SBR 中 AOB 流失幅度大于 NOB,但是定量 PCR 方法无法准确比较 N_2H_4 对两者活性抑制的强弱。

致谢: 本研究分子生物学检测与分析得到河南师范大学杨清香教授课题组的大力帮助,在此表示

感谢。

参考文献:

- [1] Zakker I, Kroon K, Rikmann E, et al. Accelerating effect of hydroxylamine and hydrazine on nitrogen removal rate in moving bed biofilm reactor [J]. *Biodegradation*, 2012, **23** (5): 739-749.
- [2] Yao Z B, Zhang D J, Xiao P Y, et al. Long-term addition of micro-amounts of hydrazine enhances nitrogen removal and reduces NO and NO_3^- production in a SBR performing Anammox [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2016, **91** (2): 514-521.
- [3] Yao Z B, Cai Q, Zhang D J, et al. The enhancement of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) by N_2H_4 addition [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **146**: 591-596.
- [4] 肖芃颖, 张代钧, 姚宗豹, 等. N_2H_4 抑制好氧氨氧化及亚硝酸盐氧化动力学类型 [J]. *环境工程学报*, 2015, **9** (2): 513-518.
- Xiao P Y, Zhang D J, Yao Z B, et al. Inhibition types of kinetics for aerobic ammonia oxidation and nitrite oxidation by N_2H_4 [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9** (2): 513-518.
- [5] Tomlinson T G, Boon A G, Trotman C N A. Inhibition of nitrification in the activated sludge process of sewage disposal [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1966, **29** (2): 266-291.
- [6] Kwon S, Kim T S, Yu G H, et al. Bacterial community composition and diversity of a full-scale integrated fixed-film activated sludge system as investigated by pyrosequencing [J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2010, **20** (12): 1717-1723.
- [7] Lee T K, Doan T V, Yoo K, et al. Discovery of commonly existing anode biofilm microbes in two different wastewater treatment MFCs using FLX Titanium pyrosequencing [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **87** (6): 2335-2343.
- [8] Liu Z H, Huang S B, Sun G P, et al. Diversity and abundance of ammonia-oxidizing archaea in the Dongjiang River, China [J]. *Microbiological Research*, 2011, **166** (5): 337-345.
- [9] Liu T, Li Dong, Zeng H P, et al. Biodiversity and quantification of functional bacteria in completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite (CANON) process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **118**: 399-406.
- [10] 于皓, 陈川, 张莉, 等. 溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (6): 2368-2374.
- Yu H, Chen C, Zhang L, et al. Effect of dissolved oxygen on microbial community in simultaneous removal of carbon, nitrogen and sulfur process [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (6): 2368-2374.
- [11] 高景峰, 李婷, 张树军, 等. 两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (8): 2939-2946.
- Gao J F, Li T, Zhang S J, et al. Abundance and community composition of ammonia-oxidizing archaea in two completely autotrophic nitrogen removal over nitrite systems [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (8): 2939-2946.
- [12] 程建华, 窦智勇, 孙庆业. 铜陵市河流沉积物中硝化和反硝

- 化微生物分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1362-1370.
- Chen J H, Dou Z Y, Sun Q Y. Distribution characteristics of nitrifiers and denitrifiers in the river sediments of Tongling city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1362-1370.
- [13] 何势, 顾超超, 魏欣, 等. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1485-1491.
- He S, Gu C C, Wei X, *et al.* Effect of low-concentration ciprofloxacin on the nitrification and nitrifying microorganisms of biofilms in biological aerated filter[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1485-1491.
- [14] Xiao P Y, Lu P L, Zhang D J, *et al.* Effect of trace hydrazine addition on the functional bacterial community of a sequencing batch reactor performing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite [J]. Bioresource Technology, 2015, **175**: 216-223.
- [15] Sonthiphand P, Limpiyakorn T. Change in ammonia-oxidizing microorganisms in enriched nitrifying activated sludge [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **89**(3): 843-853.
- [16] Gao J F, Luo X, Wu G X, *et al.* Abundance and diversity based on *amoA* genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in ten wastewater treatment systems [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(7): 3339-3354.
- [17] Bollmann A, French E, Laanbroek H J. Chapter three-isolation, cultivation, and characterization of ammonia-oxidizing bacteria and archaea adapted to low ammonium concentrations [J]. Methods in Enzymology, 2011, **486**: 55-88.
- [18] Zhou J, Bruns M A, Tiedje J M. DNA recovery from soils of diverse composition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(2): 316-322.
- [19] Purkhold U, Pommerening-Röser A, Juretschko S, *et al.* Phylogeny of all recognized species of ammonia oxidizers based on comparative 16S rRNA and *amoA* sequence analysis: implications for molecular diversity surveys[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(12): 5368-5382.
- [20] Pester M, Maixner F, Berry D, *et al.* *NxrB* encoding the beta subunit of nitrite oxidoreductase as functional and phylogenetic marker for nitrite-oxidizing *Nitrospira* [J]. Environmental Microbiology, 2014, **16**(10): 3055-3071.
- [21] Tamura K, Dudley J, Nei M, *et al.* MEGA4: molecular evolutionary genetics analysis (MEGA) software version 4.0[J]. Molecular Biology and Evolution, 2007, **24**(8): 1596-1599.
- [22] Gutiérrez R A, Green P J, Keegstra K, *et al.* Phylogenetic profiling of the *Arabidopsis thaliana* proteome: what proteins distinguish plants from other organisms? [J]. Genome Biology, 2004, **5**(8): R53.
- [23] Shi X Y, Sheng G P, Li X Y, *et al.* Operation of a sequencing batch reactor for cultivating autotrophic nitrifying granules[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(9): 2960-2964.
- [24] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor[J]. Water Research, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [25] Lü F, Hao L P, Guan D X, *et al.* Synergetic stress of acids and ammonium on the shift in the methanogenic pathways during thermophilic anaerobic digestion of organics [J]. Water Research, 2013, **47**(7): 2297-2306.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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