

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体

李祥^{1,2}, 林兴^{1,2}, 王凡^{1,2}, 袁砚^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 袁怡^{1,2}, 毕贞^{1,2}, 刘忻^{1,2}, 杨朋兵^{1,2}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 通过接种亚硝酸盐型厌氧氨氧化污泥, 投加潜在电子受体(亚硝酸盐、 Fe^{3+} 和硫酸盐)研究了厌氧条件下氨氮氧化的潜在电子受体。结果表明, 亚硝酸盐是厌氧氨氧化最适合的电子受体, 能够与氨氮在短暂的时间内完全反应; 在亚硝酸盐缺乏的情况下, 厌氧氨氧化污泥中微生物利用自身细胞有机物将产物硝酸盐转化为亚硝酸盐参与氨氮转化; Fe^{3+} 与硫酸盐在氨氮氧化后期出现转化, 但是直接还是间接参与还需进一步研究。厌氧氨氧化污泥对氨氮产生过量氧化之前必须以亚硝酸盐为电子受体进行微生物活性激活, 并且好氧氨氧化菌和亚硝化菌出现增长, 推测微生物产生了 H_2O_2 。该现象并不可长久持续。虽然其氧化速率较慢, 但是过量氧化现象较为明显。因此厌氧氨氧化污泥中肯定存在氨氮过量氧化的现象。厌氧氨氧化污泥对电子的利用顺序是亚硝酸盐、硝酸盐、 Fe^{3+} 和硫酸盐。

关键词: 厌氧氨氧化; 电子受体; 氨氮氧化; 亚硝酸盐; 硝酸盐

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2941-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.201701163

Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge

LI Xiang^{1,2}, LIN Xing^{1,2}, WANG Fan^{1,2}, YUAN Yan^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, YUAN Yi^{1,2}, BI Zhen^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, YANG Peng-bing^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The ammonium oxidation by potential electron acceptors (NO_2^- , Fe^{3+} and SO_4^{2-}) in ANAMMOX sludge was studied by inoculating nitrite-dependent ANAMMOX sludge. The results showed that nitrite was the most suitable electron acceptor for ANAMMOX bacteria, which could completely react within a short time. Nitrate was converted into nitrite by ANAMMOX sludge using the organic as electron donor and then participated in ammonia conversion, in the absence of nitrite. Fe^{3+} and SO_4^{2-} conversion occurred at the end of ammonium oxidation, but its direct or indirect participation requires further study. Microbial activity must be activated through addition of nitrite as electron acceptor before ammonia excess oxidation occurred. Aerobic ammonia oxidizing bacteria and nitrite oxidizing bacteria grew during this period. This phenomenon did not last, and the microbial production of H_2O_2 was speculated. Although the oxidation rate was slow, the phenomenon of ammonium excess oxidation was obvious. Therefore, the oxidation of excess ammonia was for sure present in ANAMMOX sludge. The order of electron acceptor use by ANAMMOX sludge was NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} and Fe^{3+} .

Key words: ANAMMOX; electron acceptor; ammonia oxidation; nitrite; nitrate

氨氮是水体中主要的污染物之一。硝化反硝化生物脱氮途径的认识, 为人类强化水体中氮素转化提供了有效的手段。近年来, 人们发现在厌氧的条件下氨氮与亚硝态氮可以进行生化反应, 并将其命名为厌氧氨氧化^[1]。与传统硝化反硝化反应相比, 厌氧氨氧化脱氮过程减少了 62.5% 的供氧量^[2], 无需有机物参与, 并且具有较高的氮素转换速率, 为人类氮素转化途径的认识及新型工艺的研发提供了新的理论依据^[3]。

随着人们对厌氧氨氧化反应特性及功能微生物富集培养研究的不断深入, 研究者发现不仅亚硝酸盐可以作为厌氧条件下氨氮氧化的电子受体, 小分子有机酸^[4]、硫酸盐^[5,6]、锰盐^[7,8]、铁盐^[9~11]等均可作为氨氮氧化的电子受体。这为厌氧条件下氮素的转化和其他元素的转化建立了新的联系, 为自然

界氮素转换的认识打开新的思路。

本课题组在以亚硝酸盐为电子受体的亚硝酸盐型厌氧氨氧化污泥培养过程中也发现体系中存在部分氮素的过量转化^[12], 但是目前鲜有相关文献对此进行描述。为此, 本文将利用经过长期驯化培养的厌氧氨氧化污泥进行氨氮过量转化的研究, 其目的主要是进一步肯定厌氧氨氧化过程中存在的氨氮过量氧化现象, 并对其现象进行深入分析, 探讨氨氮可能的过量转化途径和可能存在的电子受体。

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-02-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 国家自然科学基金项目(51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州市分离净化材料与技术重点实验室项目(SZS201512)

作者简介: 李祥(1984~), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水脱氮处理理论及工艺, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

1 材料与方法

1.1 实验装置与控制条件

实验装置采用内径 16 cm、有效体积 4 L 的细胞培养罐 (INFORS Labfors 3), 由圆柱型玻璃制成, 如图 1 所示. 反应器外设有水浴夹套, 通过控制循环水的温度将反应控制在 $(32 \pm 1) ^\circ\text{C}$. 反应器内设置 DO 和 ORP 电极 (METTLER 4800) 用于监测反应器内的溶解氧环境; 设置 pH 电极 (METTLER 405) 在线实时监测反应过程中 pH 的变化, 在必要的情况下, 通过控制系统自动添加稀 HCl ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 或 NaOH 溶液 ($1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 调节反应器内的 pH 环境. 反应器顶端设有搅拌装置, 通过控制搅拌速度使得泥水充分混合, 有利于反应完全.

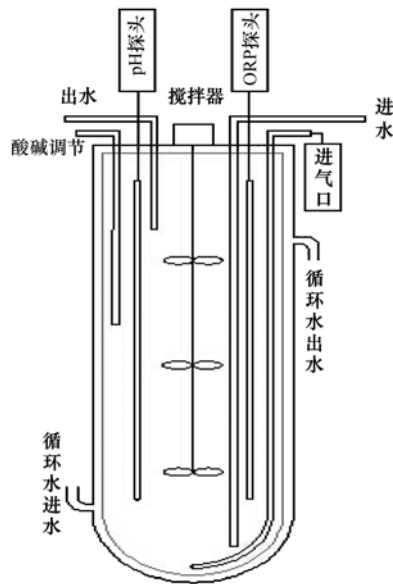


图 1 微生物培养装置示意
Fig. 1 Microorganism culturing device

1.2 接种污泥

接种污泥为以亚硝酸盐为电子受体并经过 10 a 培养的厌氧氨氧化污泥^[13], 外观为鲜艳的红色, 厌

氧氨氧化特征明显. 每个实验过程中厌氧氨氧化污泥接种量为 120 mL (量筒内 10 min 沉淀后的体积). 厌氧氨氧化污泥接种入反应器前经过超纯水清洗 3 次, 避免残留物对实验的影响.

1.3 模拟营养液

营养液的主要成分为 NH_4^+-N (由 NH_4HCO_3 按需配制)、 NO_2^--N (由 NaNO_2 按需配制)、 Fe^{3+} (FeCl_3 按需配制)、 $\text{SO}_4^{2-}-\text{S}$ (由 Na_2SO_4 按需配制)、 KH_2PO_4 $27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgCl}_2\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $16.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素浓缩液 $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$. 微量元素浓缩液组分为: EDTA $5\,000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_3BO_4 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.4 测定方法

分析方法参见文献[14]. NH_4^+-N : 纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N 和 NO_3^--N : 戴安 ICS900/AS23 离子色谱; pH 和 ORP 由在线监测探头测定; MLSS 和 MLVSS: 重量法; TN: 以 NH_4^+-N , NO_2^--N 和 NO_3^--N 三者之和表示 TN; Fe^{2+} 和 Fe^{3+} : 邻菲罗啉分光光度法.

1.5 微生物定量分析

采用基于 SYBR Green II 法的实时荧光定量 PCR 对反应器启动前后功能微生物群落进行了定量分析, 主要功能菌包括 AOB、NOB 及 ANAMMOX 菌. 定量 PCR 所采用的引物如表 1 所示. 采用 Eppendorf 扩增仪对上述功能菌群进行定量扩增. 扩增体系为 $10 \mu\text{L}$, 包括 $5 \mu\text{L}$ 2xSYBR Green ExTaq Mix, $0.25 \mu\text{L}$ 正反向引物 ($20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 $1 \mu\text{L}$ DNA 模板、 $3.5 \mu\text{L}$ ddH₂O. 实验步骤及操作参照文献[16]. 为了确保数据的可靠性, 每个污泥样品设置 3 组平行. 目标菌种的定量标准曲线 R^2 均大于 0.99, 扩增效率处于 90% ~ 110%.

表 1 亚硝化菌、硝化菌、厌氧氨氧化菌和全菌 PCR 扩增中采用的引物^[15]

Table 1 PCR primers targeting at AOB, NOB, ANAMMOX and the total bacteria

目标基因	引物	序列(5'-3')	退火温度/ $^\circ\text{C}$
全菌 (16S rRNA)	341f	CCTACGGGAGGCAGCAG	60
	518r	ATTACCGCGGCTGCTGG	
ANAMMOX (16S rRNA)	Amx809f	GCCGTAAACGATGGGCACT	60
	Amx1066r	AACGTCTCACGACACGAGCTG	
AOB (<i>amoA</i>)	amoAf	GCGGTTTCTACTGCTGCT	57
	amoAr	CCCCTCKGSAAAGCCTTCTTC	
NOB (<i>nxrA</i>)	F1norA	CAGACCGACGTGTGCGAAAG	57
	R1norA	TCYACAAGGAACGGAAGGTC	

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化污泥中氨氮过量氧化现象

在反应器 1 运行初期,进水氨氮浓度 $120.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝态氮浓度 $62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,恒定 pH 为 7.7,经过 144 h 培养后,氮素形态及浓度变化如图 2 所示. 运行 4 h 后,反应器 1 内的氨氮浓度降低到 $73.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐浓度下降到 $1.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝态氮浓度增加到 $11.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时亚硝酸盐消耗量与氨氮的消耗比为 1.28,硝酸盐的生成量与氨氮的消耗量比值为 0.22,表明接种污泥为典型的以亚硝酸盐为电子受体的厌氧氨氧化污泥,有明显的厌氧氨氧化特征^[16]. 当反应器 1 运行 24 h 后,氨氮浓度继续降低到 $60.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝态氮剩余浓度几乎为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝酸盐浓度出现了明显的下降,浓度为 $3.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝酸盐与氨氮的消耗量比为 0.56. 有趣的现象是随着反应器运行到 144 h,在无明显电子受体存在且 ORP 处于 -100 mV 的条件下,氨氮继续下降,最终氨氮浓度下降到 $0.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,转化率达到 99.5%,硝态氮浓度为 $0.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在此期间监测到少量亚硝酸盐的生产,浓度处于 $0\sim3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动,可能是因为接种污泥为厌氧氨氧化污泥,能够快速利用环境中的氨氮和亚硝酸盐进行厌氧氨氧化反应,导致亚硝酸盐无法累积. 因此从反应器 1 的运行结果可以看出厌氧氨氧化污泥中确实存在着氨氮的过量氧化.

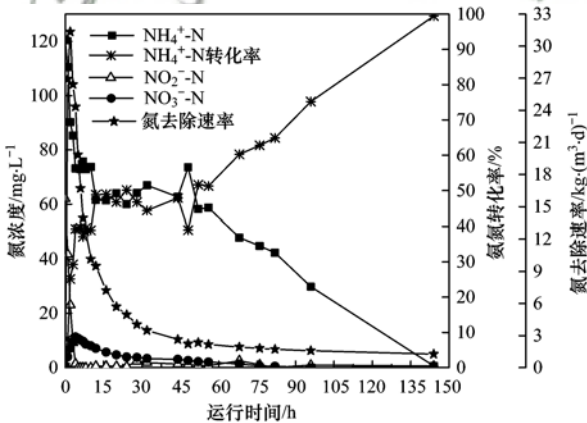


图 2 厌氧氨氧化污泥中氨氮的过量转化

Fig. 2 Ammonium excess oxidation in ANAMMOX sludge

2.2 多电子受体下厌氧氨氧化污泥中氮素及其他物质的转换

近年来一些研究者在不同的厌氧环境中发现不仅亚硝酸盐可以作为氨氮氧化的电子受体,硫酸盐^[5,6]、小分子有机酸^[4]、铁盐^[9~11]均可作为电子

受体. 在配制模拟废水时加入的微量元素和接种的污泥中也存在这类物质,因此推测这类物质可能参与了氨的过量氧化. 同时为了探讨接种污泥中本身存在的物质对氨氮过量氧化的影响,在 1 L 血清瓶中接种 120 mL 污泥,通过加纯水定容至 1 L,将厌氧氨氧化污泥经过相同环境下 126 h 饥饿衰减后对液相组分进行测定,液相中存在一定量的有机物、硫酸盐和铁盐(表 2). 为了进一步探讨这些物质是否参加氨氮转化的反应,采用反应器 2 和反应器 3 进行多种电子受体实验,从氨氮转化量及转化途径探讨其转化的途径.

表 2 污泥经饥饿后液相中物质的浓度

Table 2 Concentrations of the substances in liquid

phase after sludge starvation					
物质	氨氮	硫酸盐	Fe ²⁺	TOC	IC
浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	14.66	3.4	2.1	116	69

2.2.1 同时存在多电子受体时氨氮及其他物质的转化

在反应器 2 的运行初期,进水氨氮浓度 $95.81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝氮浓度 $42.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫酸盐浓度 $22.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Fe^{3+} 浓度 $24.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 为 7.3,经过 168 h 培养后,物质浓度变化如图 3 所示. 当反应器 2 运行 3 h 后,同样出现氨氮和亚硝酸盐浓度快速下降的现象,其浓度分别为 $63.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.89\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝酸盐生成浓度为 $8.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其他电子受体浓度未发生明显变化. 亚硝氮转化量、硝氮生成量与氨氮消耗量的比为 1.30 和 0.25,出水 pH 上升至 7.58,说明在厌氧氨氧化污泥中亚硝酸盐是最优的电子受体,优先被厌氧氨氧化菌利用.

在无亚硝酸盐作为电子受体的条件下,当反应器运行至 16 h,硝酸盐的浓度下降到 $2.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时氨氮浓度为 $57.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未发现亚硝酸盐的累积,硝酸盐与氨氮的消耗量比值为 0.85. 此时反应器内硫酸盐和 Fe^{3+} 离子浓度出现小幅波动,分别为 $23.94\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $21.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未发现 S^{2-} 的存在,但是发现少量 Fe^{2+} 的存在. 出水 pH 值下降至 7.5. 目前的研究结果表明厌氧氨氧化微生物无法直接利用硝酸盐作为电子受体与氨氮反应^[17]. 但是厌氧氨氧化菌体内含有硝酸盐还原酶^[18],因此在有一些其他电子供体存在的条件下,可将硝酸盐还原为亚硝酸盐,然后再与氨氮发生厌氧氨氧化反应^[11,19]. 目前,氨氮和硝酸盐同步去除方法主要是通过有机物^[20]、 Fe^{2+} ^[21] 和单质硫^[22] 等. 而反应器

2 内微生物自身存在部分死亡,会产生一定的有机物,所以此处硝酸盐应还原为亚硝酸盐,然后参与了氨氮的过量氧化。

在无亚硝酸盐和硝酸盐的情况下,随着反应器 2 的持续运行至 168 h 后,氨氮浓度下降到 $6.85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝酸盐浓度处于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以内波动,硝酸盐在运行后期累积到 $12.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,硫酸盐略有升高至 $26.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但是出现了 Fe^{2+} 的累积,此阶段基本处于 $5.59 \sim 6.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间。出水 pH 值下降到 6.85。说明反应器 2 运行后期还存在着其他的电子受体与氨氮反应导致其过量氧化,并且是一个产酸的过程。从物质的转化看,仅铁离子发生了价态的转化。近年来,Clément 等^[23]和 Shrestha 等^[24]均报道了在厌氧的条件下发生了 Fe^{3+} 还原氨氧化的现象,其产物可能是硝酸盐、亚硝酸盐或者氮气,并且也认为该反应是一个产酸的过程。本实验中的条件与其一致,因此该反应器中应该存在 Fe^{3+} 参与了氨氮的过量氧化。在反应后期氨氮的转化量明显大于铁离子的转化,因此还应该存在其他的电子供体。

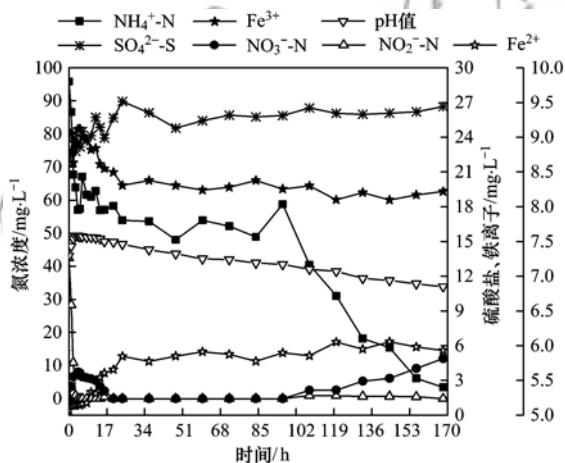


图3 同时多种电子受体存在时氨氮的转化

Fig. 3 Ammonia conversion with a variety of electron acceptors at the same time

2.2.2 不同电子受体先后存在的条件下氨氮的转化

为了进一步探讨氨氮转化过程潜在的电子受体,在反应器 3 运行的初期仅投加 $120.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氨氮,无微量元素,因此反应器内无其他电子受体。经过 7 d (约 168 h) 的运行,反应器内氨氮浓度未出现明显的下降,浓度维持在 $121.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 4)。由饥饿实验(表 2)可知,出现波动是因为部分微生物的死亡。TOC 浓度由 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $5.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 进一步证实了该推论。分别在反应器运行的第 8 d 和 11 d 向反应器内添加硫酸盐(浓度 23.7

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 Fe^{3+} (浓度 $12.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。然而当反应器运行至 13 d 时,氨氮浓度为 $118.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,未出现明显的下降,硫酸盐浓度 $27.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe^{3+} 浓度 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe^{2+} 浓度 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。说明此时硫酸盐未参与厌氧氨氧化反应,而 Fe^{3+} 参与量很少。此时的厌氧氨氧化污泥曾现出暗黄色。

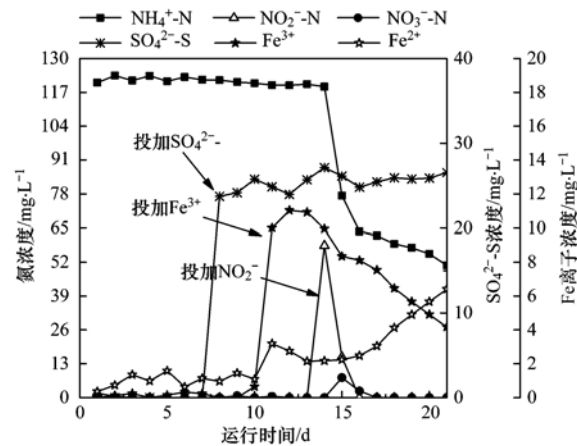


图4 不同电子受体不同时间存在时氨氮的转化

Fig. 4 Ammonia conversion with a variety of electron acceptors at the different time

考虑到长期未有适宜的电子受体存在,导致微生物因内源硝化而使得生物活性下降,在反应器运行的第 14 d,投加少量的亚硝酸盐,浓度为 $58.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,2 h 以内氨氮出现快速下降。当反应器运行至 15 d 时,氨氮浓度下降到 $63.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝酸盐浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,硝酸盐浓度从检测到的最高值 $7.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。更奇怪的是在随后没有亚硝酸盐和硝酸盐存在的情况下,氨氮继续出现下降。当反应器运行至 21 d 时,氨氮浓度下降到 $50.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,硫酸盐浓度为 $26.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,未出现明显的下降。 Fe^{3+} 浓度小幅下降,同时有少量 Fe^{2+} 的生成,浓度约 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。此时 ORP 为 $-100 \sim -50 \text{ mV}$,同时通过刃天青指示剂的投加进一步确定反应器不存在漏氧的现象。与反应器 2 对比分析可知,必须通过投加亚硝酸盐激活厌氧氨氧化菌的活性才能实现反应器 3 内出现明显的过量氧化,但是过量氧化氨氮的电子受体何来,尚未明确。Bodelier 等^[25]发现生物体内的氨氧化酶可以产生 H_2O_2 ,然后为环境中提供氧分子,并且该过程是一个 pH 值下降的过程。Sabumon 等^[26]研究也表明即使 ORP 在 $-185 \sim -275 \text{ mV}$ 的条件下, Fe^{2+} 可能与厌氧氨氧化菌细胞产生的 H_2O_2 发生芬顿反应。因此可以推测后期的氨氮的过量氧化极有可能是因此而发生。

2.3 多电子存在时,氨过量现象的持久性研究

为了进一步强化氨氮的过量氧化,在反应器 4 运行初期投入氨氮、亚硝酸盐、硫酸盐和 Fe^{3+} , 浓度分别为 90.58、43.3、25 和 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在反应器运行的前 120 h,反应器内发生的现象基本与反应器 2 中一样(图 5),首先出现发生以亚硝酸盐为电子受体的厌氧氨氧化反应,产物的硝酸盐不断积累。当亚硝酸盐去除后,硝酸盐浓度开始逐步降低。硝酸盐降低完成后,氨氮仍然持续降低。128 h 后,反应器内氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐和 Fe^{3+} , 浓度分别为 0、0.78、7.36、25.1 和 10.53 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。为了进一步探究氨氮的过量氧化,此时仅向反应器内投加 134 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮。随着反应器内的持续运行,反应器内氨氮仍然持续降低。当反应器运行至 470 h 时,反应器内氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐、硫酸盐和 Fe^{3+} , 浓度分别为 47.66、0、0、14.09 和 1.053 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时出现 11.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} ,无硫化物的产生。Liu 等^[5]和 Yang 等^[6]分别报道了在无机营养条件下,接种厌氧氨氧化污泥的反应器实现硫酸盐和氨氮去除的结果,但是具体的转化途径尚未明确。Sabumon 等^[26]认为厌氧氨氧化污泥中硫酸盐的降低是硫酸盐先与有机物反应生成硫化物,产生的硫化物再与硝酸盐和亚硝酸盐反应产生单质硫。不管其途径如何,但是其最终转化的产物与氨氮发生反应前,是氨氮过量氧化的一个潜在电子受体。

随着反应器后期持续的运行,反应器内无亚硝酸盐、硝酸盐、 Fe^{3+} 等电子受体的情况下,氨氮基本维持在 45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,未出现明显的降低,说明后期的氨氮过量氧化不能持续。推测其原因可能是在无电子受体存在的条件下,微生物的活性逐步降低,所产生的 H_2O_2 下降,导致氨氮不能持续的下降。

2.4 多电子存在时功能微生物群落的变化

将同时存在多电子的反应器 2 污泥进行了主要氮素转化微生物的分析,包括全菌、厌氧氨氧化菌、亚硝化菌和硝化细菌,如图 6 所示。接种污泥中基本以厌氧氨氧化菌为主(0 h),同时存在少量的亚硝化菌和硝化细菌。当反应器 2 内亚硝酸盐和硝酸盐完全去除时(16 h),反应器内的微生物拷贝数(以湿重计,下同)为 $1.32\text{E} + 10$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$,获得一定的增长,厌氧氨氧化菌拷贝数为 $3.62\text{E} + 09$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$,亚硝化菌拷贝数 $11.3\text{E} + 03$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$,均获得了增长。而硝化菌拷贝数为 $2.96\text{E} + 02$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$,出现小幅下降。当反应器内无亚硝酸盐和硝酸盐的情况下,氨氮降解缓慢。当反应器 2 运行至 170 h,反应

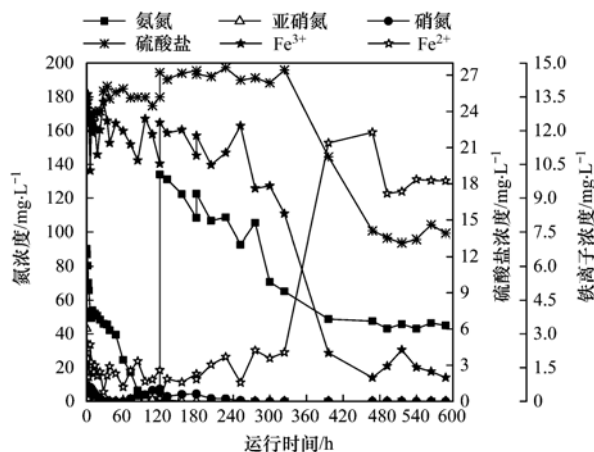


图 5 多电子存在时氨氮过量氧化持续性

Fig. 5 Duration of ammonia conversion with a variety of electron acceptors

器内微生物群落数量发生了巨大的变化,总细菌拷贝数为 $9.83\text{E} + 09$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$,出现明显的下降;厌氧氨氧化菌拷贝数下降到 $1.52\text{E} + 09$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$;亚硝化菌和硝化菌拷贝数分别增长到 $2.41\text{E} + 05$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.29\text{E} + 04$ 拷贝 $\cdot\text{g}^{-1}$ 。进一步说明后期的氨氮过量氧化是由亚硝化菌参与完成的,但是氧的来源是否是氨氧化酶产生还需要进一步深入研究。

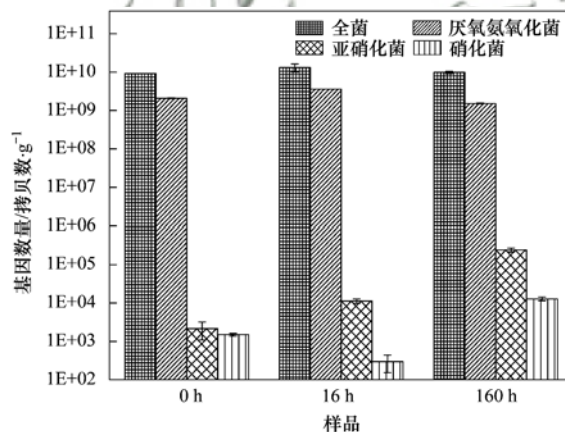


图 6 多电子存在时氨氮过量转化过程中微生物的变化

Fig. 6 Change of microbes during ammonia excess conversion with a variety of electron acceptors

3 结论

(1)在无亚硝态氮的情况下,4 个反应器内均出现氨氮浓度的下降,因此所接种的厌氧氨氧化污泥中确实存在着氨氮的过量氧化现象。

(2)所接种的污泥是以亚硝酸盐为电子驯化出的厌氧氨氧化污泥,所以亚硝酸盐成为最适合的电子受体,在参与氨氮转化过程被首先利用。随后硝酸盐、硫酸盐和 Fe^{3+} 等成为直接或者间接电子受体

参与氨氮的过量氧化反应,机理还需要深入分析。

(3)在保证厌氧氨氧化活性的条件下,除了硝酸盐、硫酸盐和 Fe^{3+} 之外,还存在着导致过量氨氮转化的物质,促使氨氮的氧化,伴随着氨氧化菌和硝化菌大量生长。

参考文献:

- [1] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [2] Van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **162**(1): 1-20.
- [3] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale ANAMMOX reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [4] Kartal B, Rattray J, van Niftrik L A, *et al.* *Candidatus* "Anammoxoglobus propionicus" a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2007, **30**(1): 39-49.
- [5] Liu S T, Yang F L, Gong Z, *et al.* Application of anaerobic ammonium-oxidizing consortium to achieve completely autotrophic ammonium and sulfate removal [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(15): 6817-6825.
- [6] Yang Z Q, Zhou S Q, Sun Y B. Start-up of simultaneous removal of ammonium and sulfate from an anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in an anaerobic up-flow bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 113-118.
- [7] Luther G W, Sundby B, Lewis B L, *et al.* Interactions of manganese with the nitrogen cycle: alternative pathways to dinitrogen [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, **61**(19): 4043-4052.
- [8] Hulth S, Aller R C, Gilbert F. Coupled anoxic nitrification/manganese reduction in marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(1): 49-66.
- [9] Yang W H, Weber K A, Silve W L. Nitrogen loss from soil through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction [J]. *Nature Geoscience*, 2012, **5**(8): 538-541.
- [10] Park W, Nam Y K, Lee M J, *et al.* Anaerobic ammonia-oxidation coupled with Fe^{3+} reduction by an anaerobic culture from a piggery wastewater acclimated to $\text{NH}_4^+/\text{Fe}^{3+}$ medium [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **14**(5): 680-685.
- [11] Waki M, Yasuda T, Fukumoto Y, *et al.* Effect of electron donors on anammox coupling with nitrate reduction for removing nitrogen from nitrate and ammonium [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 592-598.
- [12] 李祥, 黄勇, 巫川, 等. Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化污泥活性的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4224-4229.
Li X, Huang Y, Wu C, *et al.* Effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} on the activity of ANAMMOX [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4224-4229.
- [13] 李祥, 张大林, 黄勇, 等. 气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3449-3454.
Li X, Zhang D L, Huang Y, *et al.* Effect of gas-lift device on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3449-3454.
- [14] 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.
- [15] 储昭瑞. 厌氧氨氧化反应器启动及微生物群落结构解析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Chu Z R. Study on the start-up of ANAMMOX reactor and microbial community analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [16] Kallistova A Y, Dorofeev A G, Nikolaev Y A, *et al.* Role of anammox bacteria in removal of nitrogen compounds from wastewater [J]. *Microbiology*, 2016, **85**(2): 140-156.
- [17] van Niftrik L, Jetten M S M. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2012, **76**(3): 585-596.
- [18] Jetten M S M, van Niftrik L, Strous M, *et al.* Biochemistry and molecular biology of anammox Bacteria [J]. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 2009, **44**(2-3): 65-84.
- [19] Kartal B, de Almeida N M, Maalcke W J, *et al.* How to make a living from anaerobic ammonium oxidation [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, **37**(3): 428-461.
- [20] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [21] Oshiki M, Ishii S, Yoshida K, *et al.* Nitrate-dependent ferrous iron oxidation by anaerobic ammonium oxidation (Anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(13): 4087-4093.
- [22] Sahinkaya E, Yurtsever A, Aktaş Ö, *et al.* Sulfur-based autotrophic denitrification of drinking water using a membrane bioreactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **268**: 180-186.
- [23] Clément J C, Shrestha J, Ehrenfeld J G, *et al.* Ammonium oxidation coupled to dissimilatory reduction of iron under anaerobic conditions in wetland soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(12): 2323-2328.
- [24] Shrestha J, Rich J J, Ehrenfeld J G, *et al.* Oxidation of ammonium to nitrite under iron-reducing conditions in wetland soils: laboratory, field demonstrations, and push-pull rate determination [J]. *Soil Science*, 2009, **174**(3): 156-164.
- [25] Bodelier P L E, Libochant J A, Blom C, *et al.* Dynamics of nitrification and denitrification in root-oxygenated sediments and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria to low-oxygen or anoxic habitats [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(11): 4100-4107.
- [26] Sabumon P C. Effect of potential electron acceptors on anoxic ammonia oxidation in the presence of organic carbon [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(1): 280-288.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)