

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

ANAMMOX 体系中氨与硫酸盐的同步转化条件

董石语^{1,2}, 毕贞^{1,2}, 张文静^{1,2}, 黄勇^{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: 在 CFSTR (continuous flow stirred tank reactor) 反应器中接种混合污泥 (ANAMMOX 污泥与污水厂浓缩污泥按 1:1 混合) 研究 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化, 通过不断投加污泥令体系内 ORP 值稳定在 $(-200 \pm 50) \text{ mV}$, 同步转化现象持续 42 d, NH_4^+ 平均转化 $14.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 平均转化 $8.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在批试实验中通过溶液是否充满玻璃瓶来控制体系内厌氧条件, 不充满组 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 均降低, 但两者的转化不同步; 在完全充满组中 NH_4^+ 不转化, SO_4^{2-} 浓度下降明显, 实验后期检测到 S^{2-} . 分析认为同步转化现象产生的一般条件为 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 基质充足, 接种浓度适量的混合污泥, 体系漏氧且 ORP 检测值在 $-150 \sim -300 \text{ mV}$ 范围内. 同时认为本文及相关研究中所使用的实验条件均不能证明 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化是两者相互转化的结果, 相反实验条件更利于 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 各自独立转化.

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 硫酸盐与氨的同步去除 (SRAS); 硫酸盐还原氨氧化 (SRAO); 硫酸盐型厌氧氨氧化; 氧化还原电位 (ORP)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3691-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201902082

Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems

DONG Shi-yu^{1,2}, BI Zhen^{1,2}, ZHANG Wen-jing^{1,2}, HUANG Yong^{1,2*}

(1. School of Environment 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: A continuous flow stirred tank reactor (CFSTR) was used to inoculate mixed sludge (with an ANAMMOX sludge to sewage concentrate sludge ratio of 1:1) to study the simultaneous conversion of NH_4^+ and SO_4^{2-} . The ORP value in the system was stabilized at $(-200 \pm 50) \text{ mV}$ by continuously adding sludge. The simultaneous conversion lasted for 42 days. The average conversion of NH_4^+ -N was $14.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ while that of sulfate-sulfur was $8.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the batch experiment, the anaerobic conditions were influenced by whether the solution was filled with glass bottles. Both NH_4^+ and SO_4^{2-} in the non-filled group were reduced, but their transformation was not simultaneous. In the fully filled group, NH_4^+ was not transformed, the concentration of SO_4^{2-} decreased significantly, and S^{2-} was detected in the later stages of the experiment. It is indicated that the general conditions for the phenomenon of simultaneous conversion are: ① sufficient NH_4^+ and SO_4^{2-} , ② inoculating mixed sludge with appropriate concentration, ③ leaking oxygen, ④ the detection value of ORP within the range of -150 to -300 mV . At the same time, the experimental conditions used in this paper and in other related literature cannot prove that the simultaneous conversion of NH_4^+ and SO_4^{2-} is the result of mutual transformation; on the contrary, observations are more conducive to the independent transformation of NH_4^+ and SO_4^{2-} .

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); simultaneous removal of ammonium and sulfate (SRAS); sulfate-reducing ammonia oxidation (SRAO); sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation; Oxidation-Reduction Potential (ORP)

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX) 自被发现以来, 因其无需有机碳源、污泥产量低, 能在实际污水处理大大减少费用而受到国内外学者的广泛关注^[1~4]. 随着人们对这一现象的研究不断深入, 研究者们发现 ANAMMOX 菌可以利用 Fe^{3+} ^[5]、 Mn^{4+} ^[6] 和 NO_3^- ^[7] 等多种电子受体氧化 NH_4^+ , Strous 等^[8] 通过热力学反应式推算认为可能存在 SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 进行的生物反应. 如果能够证实 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 可以发生硫酸盐型厌氧氨氧化反应, 必然能为一些工业高硫酸盐高氨氮废水处理工艺的改进提供指导.

2001 年, Fdz-Polanco 等^[9] 通过厌氧流化床反应器处理糖蜜酒精废水时发现 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 发生

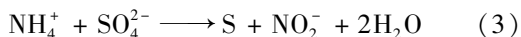
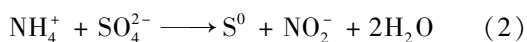
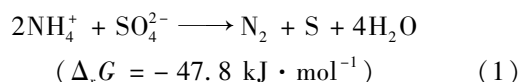
了同步转化 (simultaneous removal of ammonium and sulfate, SRAS), 推断该反应器中发生了以 SO_4^{2-} 为电子受体的 ANAMMOX 反应 (sulfate-reducing ammonia oxidation, SRAO), 在该过程中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 首先生成中间产物 S^{2-} 、 NO_2^- ; 随后 NO_2^- 分别与 S^{2-} 和 NH_4^+ 进行硫自养反硝化和常规 ANAMMOX, 反应终产物为 N_2 和 S^0 [式(1)]:

收稿日期: 2019-02-22; 修订日期: 2019-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0401108); 国家自然科学基金项目 (51478284, 51408387); 江苏省特色优势学科二期立项项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目; 苏州科技学院科研基金项目 (341410031); 苏州科技学院人才引进科研项目 (331411202)

作者简介: 董石语 (1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向是水污染控制, E-mail: 838664306@qq.com

* 通信作者, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn



由于有机条件下 SO_4^{2-} 会发生异养还原, 为了对 SRAS 现象有进一步地了解, 更多学者着重于在无机条件下进行研究^[10~25]. Liu 等^[10] 首次以 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为唯一基质, 通过接种 ANAMMOX 菌研究 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的转化机制, 在实验过程中并未检测到 S^{2-} , 因此认为 SO_4^{2-} 还原的中间产物是 S^0 , 而不是 Fdz-Polanco 等^[9] 所推测的 S^{2-} [式(2)], 即总反应式(1)不变, 由反应式(3)生成中间产物, 随后进行常规 ANAMMOX 反应. 后续研究者在无机条件下进行的研究^[11~24] 中也均未检测到 S^{2-} , Liu 等^[10] 所提出的反应机制被大多数学者延用.

随着对 SRAS 研究的深入, 人们发现了一些新的问题. 多数研究者实验过程中都观察到氨氮过量转化的现象^[12~25], 实验过程中的氮硫摩尔转化比 $[n(\text{NH}_4^+)/n(\text{SO}_4^{2-})]$ 明显大于理论推测值 2. 同时部分研究者^[12, 14, 17] 在实验过程中检测到的 SO_4^{2-} 转化量过低, 或者出现 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的转化不完全同步的现象. 多位研究者^[14, 16, 20, 23] 在连续流实验后期 SO_4^{2-} 停止转化, 但 NH_4^+ 的转化量并未减少. 在这一基础上, 2017 年完颜德卿等^[25] 通过在批次实验中进行除氧水封, 发现在严格厌氧环境 (ORP = -490 mV) 下 NH_4^+ 不转化, 且推算体系中虽然没有额外添加有机物, 但接种污泥衰亡释放出的有机物已经足够造成 SRAS 现象中的 SO_4^{2-} 转化量. 因此文献^[25] 认为 SRAS 现象是 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 各自独立转化所造成, 反应条件不符合前期研究者所认为的无机、厌氧条件, 其中 NH_4^+ 在体系内氨氧化菌 (AOB) 的作用下由泄漏进入反应器的氧气氧化, SO_4^{2-} 在硫酸盐还原菌 (SRB) 的作用下由污泥衰亡释放出的有机物还原. 由于其缺少同步转化过程中的 TOC 和 S^{2-} 的检测数据, 也没有总结 SRAS 现象的一般性实验条件, 因此文献^[25] 所提出的独立转化的观点虽然能够解释前人研究 SRAS 过程中的独立转化以及 N/S 摩尔转化比差异较大等现象, 但还缺乏更丰富的数据支撑.

为了更加合理地阐释在 ANAMMOX 体系中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的转化机制, 本文通过研究不同实验条件下氨与硫酸盐同步转化现象, 丰富实验过程中的 TOC 和 S^{2-} 检测数据, 确定 SRAS 现象产生的一般条件, 进而与已有研究对比揭示 ANAMMOX 体系中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的转化机制.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验分为 CFSTR1 (continuous flow stirred tank reactor)、CFSTR2、Batch 1 (batch experiment). CFSTR1 与 CFSTR2 采用发酵罐 (No. Labfors 5 Bacteria, Switzerland), 总体积 3.8 L, 反应器设有机械搅拌装置、水浴夹套、pH 及 ORP 在线监测探头 (图 1). Batch 1 采用玻璃瓶, 总体积 0.148 L, 瓶口用橡胶塞加铝盖保持密闭, 置于恒温摇床中. 所有反应器外部用遮光布遮盖, 避免光照对 ANAMMOX 菌活性的抑制.

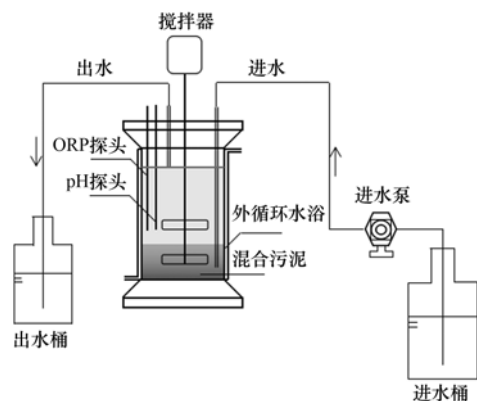


图 1 连续流装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the continuous flow stirred tank reactor

1.2 接种污泥及配水

接种污泥为本课题组培养成熟的亚硝酸盐型 ANAMMOX 培养物与污水厂浓缩污泥 1:1 构成的混合污泥. 进水采用人工配水, NH_4^+ 以 NH_4Cl 形式提供, SO_4^{2-} 以 Na_2SO_4 形式提供, 另外添加浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 、 KHCO_3 , 维持 pH 在 7.60 ~ 7.90.

1.3 实验条件控制

本实验接种污泥初始浓度 MLSS 为 $1.88 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $1.21 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 进水通入 99.99% 纯氮除氧 15 min, 反应器接口处涂蜡密封. 运行温度保持 35°C , 进水 NH_4^+ 浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 SO_4^{2-} 浓度为 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. CFSTR1、2 均采用发酵罐运行, 发酵罐总体积 3.8 L, 有效体积 3.8 L. CFSTR2 通过不断投加污泥维持 ORP 处于 -150 ~ -250 mV 范围内. Batch1 采用玻璃瓶运行, 总体积 0.148 L, 通过改变有效体积来改变瓶内的厌氧条件, 有效体积分别为 0.148 L 和 0.1 L.

1.4 测定指标和方法

运行过程中反应器进出水 pH 值、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、ORP 按照文献^[26] 的方法进行测

定, 如表 1 所示. 所有测定数据值均为 3 次平行测量取平均值, 误差小于 $\pm 5\%$.

2 结果与分析

2.1 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化

CFSTR1 在主要基质为 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 的无机环境下, 通过模拟前期研究者^[19~24]的实验条件对 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同步转化过程中反应特性进行研究. 实验结果如图 2 所示. 1~7 d 为反应器启动过程, NH_4^+ -N 转化量逐渐增加, 随后稳定在 $15.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 而此阶段 SO_4^{2-} 没有明显转化, 这与大多数研究者实验启动过程的现象是一致的^[12~15], 同时在这一阶段中, ORP 从 -224 mV 上升至 -92 mV ,

此时进出水 pH 相差较小, 平均进水 pH 为 7.63, 平均出水 pH 为 7.50; 在 8~19 d 阶段出现 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 浓度同时降低的现象, SO_4^{2-} -S 平均转化量约 $2.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 平均转化 $18.23 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 S^{2-} 均低于检测限, 在此阶段中, ORP 在线监测值为 $(-80 \pm 10) \text{ mV}$, 进出水 pH 相差增大, 平均进水 pH 为 7.69, 平均出水 pH 为 7.25; 在 20~25 d 阶段 SO_4^{2-} -S 出水浓度略大于进水, 而 NH_4^+ 的转化量略有降低, 平均转化量为 $14.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这种 NH_4^+ 独立转化的现象在相关报道中曾多次出现^[10, 14, 16, 20, 23], 此时 ORP 检测值由 -60 mV 上升至 -10 mV , 进出水 pH 差值进一步增大, 平均进水 pH 为 7.74, 平均出水 pH 为 6.95.

表 1 测定项目与方法
Table 1 Measurement variables and methods

测定项目	测定方法	仪器
NH_4^+ -N	纳氏试剂分光光度法	岛津 UVmini-1240
NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 SO_4^{2-} -S	离子色谱法	Thermo Fisher ICS900/AS22
MLSS、MLVSS	重量法	分析天平
TOC	TOC 检测仪	德国耶拿 MultiN/C3100
ORP、pH		发酵罐在线监测探头

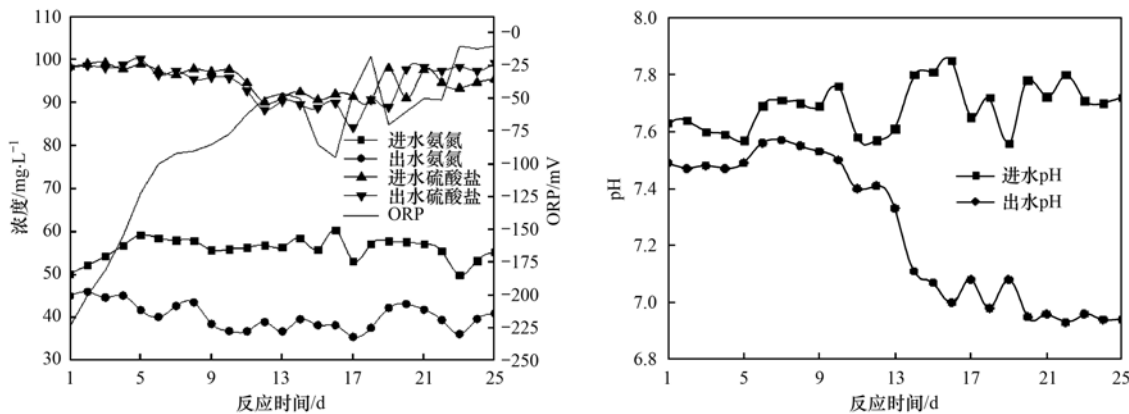


图 2 CFSTR 1 中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 浓度及体系内 ORP、pH 变化

Fig. 2 Variations in ammonium nitrogen concentrations, sulfate concentrations, ORP, and pH in CFSTR 1

从 CFSTR 1 的实验结果中可以看出, 同步转化现象随着 ORP 检测值的升高而消失. 通过对本实验条件和过程以及完颜德卿等^[25]的研究推论进行分析, 笔者认为本实验中 ORP 的影响因素主要为蠕动泵进水时带入氧气、 NH_4^+ 转化消耗溶解氧、污泥衰亡释放出的 TOC 消耗溶解氧. 而在实验过程中, 由于进水泵速不变, 可近似认为由进水带入的氧气量不变, 且从实验结果中可以看出 NH_4^+ 转化量较为稳定, 可近似认为转化 NH_4^+ 所需要的溶解氧也几乎不变. 因此推论实验中 ORP 检测值的不断上升是由体系内可衰亡的污泥量随实验时间延长逐渐减少, 进而导致体系内 TOC 逐渐减少所造成.

这为控制实验中 ORP 的稳定提供了一种新的思路, 即采取连续投加污泥方式维持实验过程中 ORP 值的稳定, 投加污泥与实验接种污泥相同.

2.2 控制 ORP 条件下 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化

CFSTR 2 通过不断投加污泥的方式来维持 ORP 检测值的稳定, 投加污泥与实验初始接种污泥相同, 其余实验条件均与 CFSTR 1 相同, 结果如图 3 所示. CFSTR 2 实验分为 4 个阶段, 其中 1~3 d 为投加过量污泥阶段, 4~12 d 中减少污泥投加量以保持 ORP 值位于 $(-200 \pm 50) \text{ mV}$, 13~18 d 为停止投加污泥阶段, 19~50 d 为恢复投加适量污泥阶段. 在阶段 1 中, 体系内 ORP 值较低, 平均值为

-477 mV, 此时 NH_4^+ 几乎不转化, SO_4^{2-} 平均转化量为 $14.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进出水 pH 差值较小, TOC 和 S^{2-} 平均浓度为 $28.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在 4~12 d (阶段 2) 中减少污泥投加量, ORP 检测值逐渐上升, 进出水 pH 差值增大, 反应器中观察到了 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 浓度同时降低的现象, 但两者转化量变化趋势并不一样, NH_4^+ -N 转化量由 $8.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $20.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 转化量由 $22.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $8.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时体系中依然能检测到少量的 TOC, 但没有检测到 S^{2-} . 阶段 3 停止

添加污泥, 对比投加污泥阶段, ORP 检测值在 24 h 内从 -200 mV 上升至 -100 mV, NH_4^+ -N 转化量仍然保持稳定, 平均转化量为 $16.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 出水浓度高于进水, 与 CFSTR 1 中的后期实验状况基本相同. 阶段 4 恢复投加污泥, 使 ORP 平均值稳定于 $(-200 \pm 50) \text{ mV}$, 此阶段中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 浓度同时降低的现象再次出现且保持稳定, NH_4^+ -N 平均转化量为 $15.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} -S 平均转化量为 $6.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, S^{2-} 浓度低于检测限, 反应后期检测到了少量的 TOC.

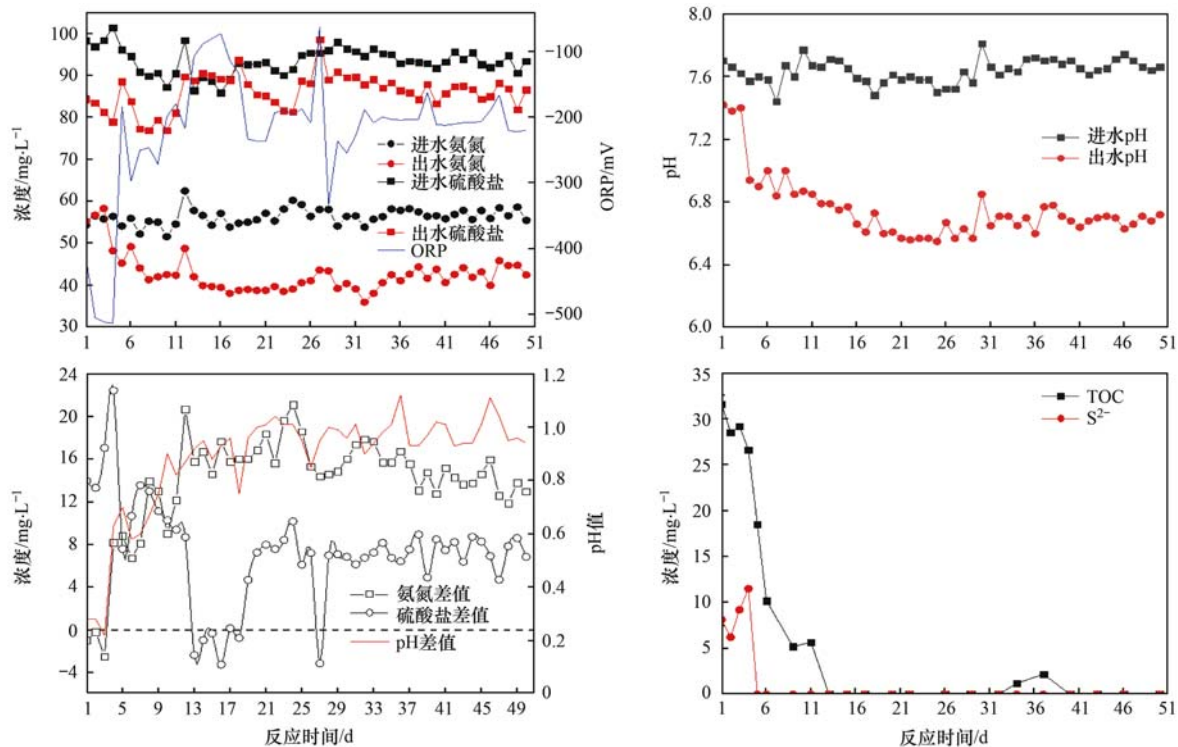


图 3 CFSTR 2 中 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、TOC、 S^{2-} 浓度及体系内 ORP、pH 变化

Fig. 3 Variations in ammonium nitrogen concentrations, sulfate concentrations, TOC concentrations, sulfide sulfur concentrations, ORP, and pH in CFSTR 2

2.3 改变厌氧条件下 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化

由于连续流中的进水条件在实验过程中易形成漏氧, 因此 Batch 1 采用批次方式进行实验, 通过改变瓶内溶液体积 (充满/不充满) 来控制反应过程中的厌氧条件, 实验结果如图 4 所示. 充满组中 ORP、pH 和 SO_4^{2-} 浓度逐渐下降, 而 NH_4^+ 浓度呈上升趋势, 最高浓度为 $59.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随后保持不变. 在第 5 d 中, 瓶内检测到少量的 S^{2-} , 浓度为 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这一变化可能是由于瓶内污泥衰亡过程中释放出 NH_4^+ 和 TOC, 且瓶内 ORP 值较低, 厌氧条件利于硫酸盐异养还原. 不充满组中 NH_4^+ 浓度和 SO_4^{2-} 浓度均有所降低, 但在过程中不同步, 表明两者没有发生相互反应. 在 1~2 d 中, NH_4^+ 浓度降低, SO_4^{2-} 浓度和 ORP 值增高. 随后由于瓶

内原有氧气含量被消耗, ORP 值迅速降低, 基质的变化趋势与充满组相似. 在第 5 d 中检测到 S^{2-} , 浓度为 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

3 讨论

3.1 本实验中 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同步转化现象的产生条件与转化机制

CFSTR2 是在 CFSTR1 的基础上, 通过不断向发酵罐内添加新鲜污泥, 延长了同步转化现象的持续时间. 尽管在 CFSTR2 实验过程中不断添加新鲜污泥, 但由于在同步转化过程中 TOC 检测值一直处于较低水平, 且本实验中污泥浓度与其他无机条件下的研究相比仍较低, 因此本实验条件依然符合前期研究者所认为的无机运行条件.

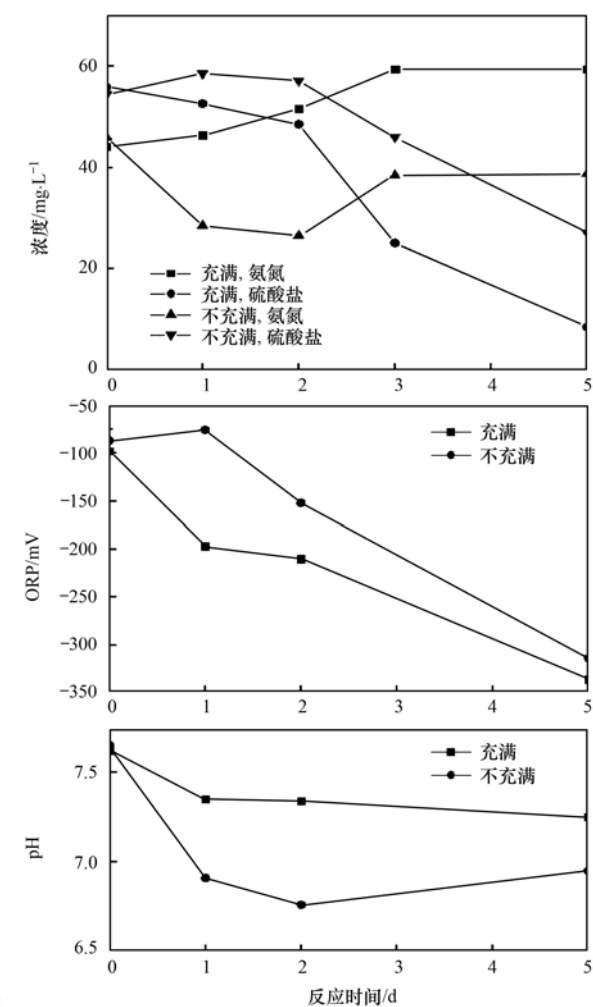


图4 Batch 1 中氨氮、硫酸盐浓度及体系内 ORP、pH 变化
Fig. 4 Variations in ammonium nitrogen concentrations, sulfate concentrations, ORP, and pH in Batch1

对比 CFSTR1 与 CFSTR2 的实验条件及现象可以看出,连续流实验中进水泵进水时带入了氧气,这使得反应器内呈现微氧环境,当这部分氧气的补充与体系内 NH_4^+ 、TOC 消耗的氧气达到一定平衡,此时体系内 ORP 处于合适范围内 ($-200\text{ mV} \pm 50\text{ mV}$),能够观察到 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同步转化的现象.从 CFSTR2 实验结果可以看出,进出水 pH 的变化与氨氮的转化量有关,ORP 的变化和 SO_4^{2-} 的转化量变化并未对 pH 值产生较大影响,因此 NH_4^+ 被

AOB 氧化是实验中 NH_4^+ 转化机制的合理解释.对比阶段 1 和阶段 2、4 可以发现,过量的污泥投加量会导致体系内 ORP 值迅速下降, NH_4^+ 在这一情况下不发生转化,推测 AOB 对于体系内氧气的竞争力弱于有机物,这为同步转化现象持续过程中体系内 TOC 低于检测限提供了合理的解释.

Batch1 实验通过玻璃瓶内溶液体积来改变瓶内的厌氧条件,充满组中 SO_4^{2-} 独立转化,不充满组内出现了 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同步转化现象.结果表明 NH_4^+ 转化过程中的电子受体为 O_2 ,而不是 SO_4^{2-} .从 SO_4^{2-} 转化的角度推论,充满条件下体系中剔除了气相的干扰,液相中仅含有 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} ,但实际检测发现 NH_4^+ 不转化,因此只有固相中存在 SO_4^{2-} 转化的电子供体.在实验后期,体系内检测到了 S^{2-} ,这与硫酸盐异养还原反应的产物一致,因此认为 SO_4^{2-} 转化的电子供体为污泥衰亡释放出的有机物.

3.2 氨与硫酸盐独立转化的条件分析

如果 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的同步转化是两者各自独立转化的结果,则反应所需条件为:AOB、氧气、 NH_4^+ (氨转化) 和 TOC、SRB、 SO_4^{2-} 和 ORP 低于 -100 mV ^[27] (硫酸盐转化).

部分研究者在进行硫酸盐型厌氧氨氧化研究前首先对污泥进行了常规 ANAMMOX 培养.对比本实验接种污泥的前期 ANAMMOX 培养数据可以看出 (表 2),在培养过程中均存在氨氮的过量转化,且多数实验数值与 SRAO 过程中的氨氮转化量接近.Zhang 等^[29] 认为在 ANAMMOX 过程中,体系中 AOB 和菌体内活性氧的存在导致了氨的过量转化.在 ANAMMOX 培养过程中, AOB 菌与 ANAMMOX 菌共存是一种普遍现象.同时刘正川等^[15]、Prachakittikul 等^[16] 和王慧^[24] 在其 SRAO 系统中均检测到 AOB 的存在,这表明大部分研究者的研究体系内普遍存在 AOB 菌.

从表 3 中可以看出,近半数研究者所使用污泥并不是 ANAMMOX 污泥^[11, 14~18, 24],缺少长期的

表 2 ANAMMOX 阶段氨氮过量转化量与 SRAO 过程氨氮转化量的对比/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$
Table 2 Comparison of excess ammonium conversion in the ANAMMOX and SRAO process/ $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$

NH_4^+ -N 转化量	NO_2^- -N 转化量	NO_3^- -N 实际产生量	NO_3^- -N 理论产生量	NH_4^+ -N 过量转化量	同步转化过程 NH_4^+ -N转化量	文献
1 708	1 512	448	298	563	644	[10]
110	125	/	24.6	15	13	[11]
768	770	123	152	165	140	[12]
56.1	30	18	5.9	33.4	64	[14]
82.4	70	18	13.8	29.4	77	[15]
768	769	111	151	186	84	[28]
120	126	18.5	21.2	20	14.7	本研究

ANAMMOX 培养来筛选污泥内的菌落组成, 污泥中可能含有硫酸盐还原菌(SRB). 而在使用 ANAMMOX 污泥的研究者中, Liu 等^[10]使用的 ANAMMOX 污泥在前期常规厌氧氨氧化培养中添加的基质为 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 为污泥中可能存在的 SRB 提供了充足的 SO_4^{2-} ; 实际培养过程中对于污泥的 ANAMMOX 驯化时间较短, 可能没有完全淘汰污泥中的 SRB^[19~23, 25].

关于实验体系内是否为严格厌氧条件, 只有文献[14, 25]在连续流实验过程中采用 ORP 监测值来表征, 其中赖杨岚监测到同步转化现象稳定时的

ORP 值为 $(-150 \pm 25) \text{ mV}$, 完颜德卿监测到同步转化现象稳定时的 ORP 值为 $(-300 \pm 10) \text{ mV}$, 两者 ORP 数值范围在本文 CFSTR2 实验中均有检测到. 文献中出现的最低 ORP 为完颜德卿在批次实验中监测到的 -490 mV , 本实验中监测到的最低 ORP 为 -510 mV , 在此条件下氨氮均未发生转化. 这表明体系内存在氧气进入时, ORP 值仍有可能为负值, 前述的同步转化稳定时所得的 ORP 监测值并不能说明体系内为严格厌氧环境, 氨氮的转化与实验过程中体系内进入氧气有关.

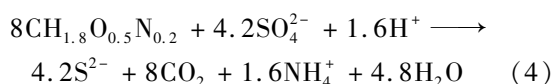
表 3 氨与硫酸盐同步转化研究中的反应器运行特征¹⁾

Table 3 Characteristics of reactor operation in studies of simultaneous conversion of ammonia and sulfate

接种污泥	运行时间 /d	同步转化现象出现时间/d	反应器	有效体积 /L	长期厌氧监控 ORP /mV	$\Delta\text{N}/\Delta\text{S}$	检测产物			文献
							NO_2^-	NO_3^-	S^{2-}	
ANAMMOX	80	1	生物转盘	1.7	/	1.7	✓	/	/	[10]
硝化污泥	120	3	UASB	2	/	2.1	—	—	—	[11]
ANAMMOX	120	13	UASB	10	/	5.8	/	/	/	[12]
ANAMMOX	45	1	UASB	1.57	/	14.4	✓	✓	—	[13]
二沉池污泥	240	117	UASB	2	-150 ± 25	11.4	/	✓	—	[14]
厌氧颗粒污泥	180	19	流化床	6.3	/	6.7	✓	✓	—	[15]
消化污泥	1080	200	AnSBR	1.5	/	4.6	/	—	/	[16]
消化污泥	129	5	生物膜	1.5	/	8.7	—	—	—	[17]
ANAMMOX	300	65	ASBR	0.45	/	3.3	/	✓	/	[19~21]
ANAMMOX	200	1	生物膜	2.2	/	4.6	✓	✓	/	[22]
ANAMMOX	350	15	ASBR	0.45	/	5.2	✓	✓	/	[23]
厌氧颗粒污泥 + 反硝化泥	103	25	生物膜	3	/	2.6	✓	✓	—	[24]
ANAMMOX	40	1	发酵罐	3.8	-300 ± 10	2.7	—	—	—	[25]
ANAMMOX + 污水厂浓缩污泥	50	4	发酵罐	3.8	-200 ± 50	9.6	—	—	—	本研究(CFSTR 2)

1) ✓: 检测到; —: 没有检测到; /: 文献中没有说明

在本文 CFSTR2 实验过程中, 实际污泥每次投加量为 20 g , 平均每次投加间隔约为 7 d , 以实验后期 SO_4^{2-} 平均转化量按照 $(\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2})$ 为微生物组分的分子式) 式(4), 计算出一次投加污泥周期内 SO_4^{2-} 异养还原反应过程所需要的生物量约为 $35.87 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由式(5)计算出本实验污泥衰减常数为 0.011 . 对比表 4 中可以看出, 本实验与大多数研究者在同步转化阶段 SO_4^{2-} 转化所需要的生物量占接种生物量的比例(理论需要衰亡率)与活性污泥模型中自养菌、异养菌的内源代谢呼吸速率以及衰减常数^[30~32]都很接近, 说明在相关文献以及本实验中所发生的 SO_4^{2-} 转化是来源于微生物衰亡释放的有机物提供的电子供体进行的异养还原, 体系内存在足够 SO_4^{2-} 转化量的 TOC.



$$\text{污泥衰减常数} = \frac{M_{\text{异养还原所需生物量}} \times V_{\text{有效}} \times \frac{\text{MLSS}}{\text{MLVSS}}}{M_{\text{投加污泥量}}} \quad (5)$$

表 4 SO_4^{2-} 异养还原需要的微生物量

Table 4 Amount of microbial biomass required for sulfate heterotrophic reduction

初始污泥浓度 / $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	所需生物量 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	污泥理论衰亡率	文献
3.22	1 171	0.364	[10]
1.56	22	0.014	[11]
8.665	82	0.009	[12]
0.241	32	0.134	[13]
4.354	38	0.009	[15]
0.5	15	0.029	[16]
14.9	28	0.002	[17]
14.015	15	0.001	[22]
1.65	6.6	0.004	[25]
1.88	5.12	0.011	本研究

3.3 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的生物反应存在可能性分析

Liu 等^[10] 认为 SRAS 过程中存在一种 *Anammoxoglobus sulfate* 的优势种群, 是催化 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 反应产生 S^0 和 NO_2^- [式(2)] 的功能菌, 但是从热力学角度可以推算出 *Anammoxoglobus sulfate* 所催化的式(2)是一个 $\Delta_r G$ 为正值 ($317.4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) 的反应, 而微生物不可能单一地进行吉布斯自由能为正的耗能反应, 这与热力学定律相悖. 王慧^[24] 通过对实验污泥进行高通量基因测序, 在污泥菌种中未检测到 SRB, 因此认为同步转化过程中的 SO_4^{2-} 转化不是硫酸盐异养还原反应, 但其测序范围较小, 仅测量了 V4 区. 刘建丽等^[33] 通过检测硫酸盐还原菌的功能基因 *aspA*, 发现基因序列在着色菌目 (Chromatiales) 中也有分布. 这为同步转化现象中 SRB 的检测提供了新的思路, 即通过对功能基因 *aspA* 的检测来表征 SRB 是否存在于体系中.

尽管本实验从实验条件及现象中推论 SRAS 现象为两者间独立转化的结果, 但在微生物学上还缺乏直接证据, 后续实验可以考虑在微生物种群变化、相关酶及功能基因的表达等方面做进一步研究.

4 结论

(1) NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 同步转化产生条件为接种混合污泥, 体系内基质充足, ORP 值处于合适的范围内 ($-150 \sim -250 \text{ mV}$). ORP 的影响因素为蠕动泵进水时带入氧气、 NH_4^+ 转化消耗溶解氧、污泥衰亡释放出的 TOC 消耗溶解氧.

(2) 严格厌氧环境下 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 之间不会发生同步转化现象, NH_4^+ 转化的电子受体为 O_2 , SO_4^{2-} 转化的电子供体为有机物, NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 之间不发生相互转化.

参考文献:

- [1] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, et al. Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1995, **16**(3): 177-183.
- [2] van de Graaf A A, Mulder A, de Bruijn P, et al. Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(4): 1246-1251.
- [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] Tang C J, Zheng P, Wang C H, et al. Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 135-144.
- [5] Yang W H, Weber K A, Silver W L. Nitrogen loss from soil through anaerobic ammonium oxidation coupled to iron reduction [J]. Nature Geoscience, 2012, **5**(8): 538-541.
- [6] Javanaud C, Michotey V, Guasco S, et al. Anaerobic ammonium oxidation mediated by Mn-oxides: from sediment to strain level [J]. Research in Microbiology, 2011, **162**(9): 848-857.
- [7] Sumino T, Isaka K, Ikuta H, et al. Nitrogen removal from wastewater using simultaneous nitrate reduction and anaerobic ammonium oxidation in single reactor [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, **102**(4): 346-351.
- [8] Strous M, Kuenen J G, Fuerst J A, et al. The anammox case - a new experimental manifesto for microbiological eco-physiology [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 2002, **81**(1-4): 693-702.
- [9] Fdz-Polanco F, Fdz-Polanco M, Fernandez N, et al. New process for simultaneous removal of nitrogen and sulphur under anaerobic conditions [J]. Water Research, 2001, **35**(4): 1111-1114.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 秦永丽, 蒋永荣, 刘成良, 等. 硫酸盐型厌氧氨氧化反应器的启动特性 [J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 5849-5854.
- [12] Qin Y L, Jiang Y R, Liu C L, et al. Starting characteristics of sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation reactor [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(12): 5849-5854.
- [13] 马文娟, 赵东风, 刘春爽, 等. pH 值促进硫酸盐型厌氧氨氧化的快速启动 [J]. 化学与生物工程, 2015, **32**(10): 17-20.
- [13] Ma W J, Zhao D F, Liu C S, et al. Fast start-up of sulfate ANAMMOX promoted by pH value [J]. Chemistry & Bioengineering, 2015, **32**(10): 17-20.
- [14] 赖杨岚, 周少奇. 硫酸盐型厌氧氨氧化反应器的启动特征分析 [J]. 中国给水排水, 2010, **26**(15): 41-44.
- [14] Lai Y L, Zhou S Q. Start-up characteristics of sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation reactor [J]. China Water & Wastewater, 2010, **26**(15): 41-44.
- [15] 刘正川, 袁林江, 周国标, 等. 从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 [J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3345-3351.
- [15] Liu Z C, Yuan L J, Zhou G B, et al. Achievement of sulfate-reducing anaerobic ammonium oxidation reactor started with nitrate-reducing anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Science, 2015, **36**(9): 3345-3351.
- [16] Prachaitikul P, Wantawin C, Noophan P, et al. ANAMMOX-like performances for nitrogen removal from ammonium-sulfate-rich wastewater in an anaerobic sequencing batch reactor [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2016, **51**(3): 220-228.
- [17] 张蕾, 郑平, 何玉辉, 等. 硫酸盐型厌氧氨氧化性能的研究 [J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2008, **38**(12): 1113-1119.
- [17] Zhang L, Zheng P, He Y H, et al. Performance of sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation [J]. Science in China Series B: Chemistry, 2009, **52**(1): 86-92.
- [18] 蒋永荣, 秦永丽, 刘可慧. 粉煤灰对硫酸盐型厌氧氨氧化驯化过程的影响 [J]. 生态环境学报, 2016, **25**(8): 1387-1394.

- Jiang Y R, Qin Y L, Liu K H. The effect of fly ash on domestication of sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(8): 1387-1394.
- [19] 李祥, 黄勇, 袁怡, 等. 自养厌氧硫酸盐还原/氨氧化反应器启动特性[J]. *化工学报*, 2012, **63**(8): 2606-2611.
Li X, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Starting characteristics of a reactor for simultaneous reduction of sulfate and oxidation of ammonium [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(8): 2606-2611.
- [20] 袁怡, 黄勇, 李祥, 等. 硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4362-4369.
Yuan Y, Huang Y, Li X, *et al.* Characteristics of sulfate reduction-ammonia oxidation reaction [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4362-4369.
- [21] Yuan Y, Huang Y, Li X, *et al.* Characteristics of sulfate reduction-ammonia oxidation under anaerobic conditions [J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 2015, **12**: 115-121.
- [22] 张丽, 黄勇, 袁怡, 等. 硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4356-4361.
Zhang L, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Study on the biotransformation of sulfate and ammonia in anaerobic conditions [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4356-4361.
- [23] 刘福鑫, 黄勇, 袁怡, 等. 厌氧硫酸盐还原-氨氧化的研究[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(2): 699-704.
Liu F X, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Study of anaerobic sulfate-reducing ammonium oxidation reaction [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(2): 699-704.
- [24] 王慧. 硫酸盐型厌氧氨氧化同步脱氮除硫实验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
Wang H. Study on sulfate-reducing ANAMMOX reaction for synchronizing ammonia and sulfate removal [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [25] 完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 等. 硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3406-3414.
Wanyan D Q, Huang Y, Bi Z, *et al.* Conversion pathways of substrates in sulfate-reducing ammonia oxidation system [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3406-3414.
- [26] 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.
- [27] 闵航, 陈美慈, 赵宇华, 等. 厌氧微生物学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1993. 164-166.
- [28] 蒋永荣, 秦永丽, 刘可慧. 粉煤灰对硫酸盐型厌氧氨氧化驯化过程的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(8): 1387-1394.
Jiang Y R, Qin Y L, Liu K H. The effect of fly ash on domestication of sulfate-dependent anaerobic ammonium oxidation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(8): 1387-1394.
- [29] Zhang Z, Liu S. Insight into the overconsumption of ammonium by ANAMMOX consortia under anaerobic conditions [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2014, **117**(6): 1830-1838.
- [30] 国际水协(IWA)良好建模实践工作组(GMP). 活性污泥模型应用指南[M]. 施汉昌, 胡志荣, 杨殿海, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 201-202.
- [31] 孙培德, 宋英琦, 王如意. 活性污泥动力学模型及数值模拟导论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010. 44-45.
- [32] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制工程-下册[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2007. 124-173.
- [33] 刘建丽, 赵吉, 武琳慧. 乌梁素海湖滨湿地硫酸盐还原菌群落多样性及系统发育分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(3): 343-348.
Liu J L, Zhao J, Wu L H. Analysis for the sulfate-reducing bacteria in the littoral wetland around the beach area of Wuliangsuhai Lake [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(3): 343-348.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)