

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

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(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响

张泽文¹, 李冬^{1*}, 张杰^{1,2}, 郭跃洲¹, 李帅^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 在两组 SBR 反应器 R0、R1 中分别接种单一类型反硝化颗粒污泥和反硝化颗粒污泥与好氧硝化污泥的混合污泥(体积比为 2:1)来启动厌氧氨氧化, 旨在探求不同接种污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响。结果表明, R0 用时 64 d 成功启动厌氧氨氧化, 总氮去除负荷为 $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, R1 用时 47 d, 总氮去除负荷为 $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 比 R0 缩短了 17 d; 在富集培养阶段, R1 中红色污泥大量出现, 系统厌氧氨氧化特征比 R0 更加明显; 反应器启动成功后, R0 的化学计量比为 1.20 和 0.34, R1 的化学计量比为 1.26 和 0.21, 比 R0 更接近理论值 1.32 和 0.26, R0 中污泥的 MLSS 和 MLVSS 分别恢复到初始种泥的 51% ($4.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 38% ($2.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), R1 中污泥的 MLSS 和 MLVSS 分别恢复到初始种泥的 54% ($4.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 42% ($2.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), 高于 R0, 可以推测, R1 驯化过程中厌氧氨氧化菌(AnAOB)增殖速率比 R0 更快。采用混合污泥作为接种污泥能够加速厌氧氨氧化的启动进程, 且启动成功之后系统的脱氮性能更加稳定。

关键词: 厌氧氨氧化; 快速启动; 混合污泥; 化学计量比; 混合液悬浮固体浓度; 混合液挥发性悬浮固体浓度

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5215-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705289

Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor

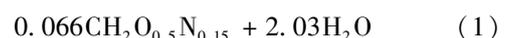
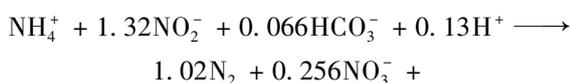
ZHANG Ze-wen¹, LI Dong^{1*}, ZHANG Jie^{1,2}, GUO Yue-zhou¹, LI Shuai^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The experiment explored the effect of different seeding sludge on the rapid start-up of an anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) reactor by seeding a single type of denitrified granular sludge and a mixed sludge composed of denitrified granular sludge and aerobic nitrification sludge (the volume ratio of the mixed sludge was 2:1) in two sequencing batch reactors (SBR), R0 and R1, respectively. The results indicated that R0 was started up successfully on day 64 with a nitrogen removal rate (NRR) of $0.26 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, while R1 was started up by day 47 with a NRR of $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, which was shorter than R0 by 17 d. In the enrichment stage, reddish sludge appeared in R1, and the characteristics of anaerobic ammonium oxidation of the system were more obvious than in R0. After the reactor was started up successfully, the stoichiometric ratio of R0 was 1.20 and 0.34, respectively, and the stoichiometric ratio of R1 was 1.26 and 0.21, which was closer to the theoretical values of 1.32 and 0.26. The mixed liquor suspended solids (MLSS) and mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) of R0 were restored to 51% ($4.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) and 38% ($2.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) of the initial seeding sludge, respectively, while the MLSS and MLVSS of R1 were restored to 54% ($4.4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) and 42% ($2.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), which was higher than R0. It can be speculated that the proliferation rate of AnAOB in R1 was faster than in R0. Seeding mixed sludge can accelerate the start-up process of anaerobic ammonium oxidation with more stable N-removal performance.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); rapid start up; mixed sludge; stoichiometric ratio; MLSS, MLVSS

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)是荷兰 Delft 工业大学于 20 世纪末开始研究,并于 21 世纪初成功开发的一种新型废水生物脱氮工艺^[1]。相比传统的硝化-反硝化生物脱氮工艺,厌氧氨氧化工艺具有耗氧量少、污泥产量低、无需外加有机碳源和无二次污染等优势^[2]。其生物脱氮反应式为^[3]:



然而,厌氧氨氧化菌生长速率极慢,世代时间大约为 7~20 d,且对外界环境非常敏感^[4],导致厌氧氨氧化的启动时间较长,极大地限制了其在实

收稿日期: 2017-05-30; 修订日期: 2017-06-09

基金项目: 北京市优秀青年拔尖团队项目(2014000028833TD02)

作者简介: 张泽文(1992~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水处理技术、水环境恢复理论及关键技术, E-mail: 1551040167@qq.com

* 通信作者, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

际工程中的应用. 优化厌氧氨氧化工艺快速启动策略将加速该工艺的工业化进程.

接种污泥的性质、种类和数量直接影响反应器的启动时间^[5-7]. 丛岩等^[8]以好氧硝化生物膜为接种污泥, 在缺氧条件下采用 EGSB 反应器连续培养 90 d 后成功启动厌氧氨氧化; 唐崇俭等^[9]以硝化污泥作为种泥进行驯化, 在 20~25 d 出现厌氧氨氧化活性, 并在第 90 d 成功启动厌氧氨氧化; Tsushima 等^[10]采用反硝化絮状污泥启动厌氧氨氧化反应器用时 60 d. 这些研究表明, 采用不同接种污泥均可成功启动厌氧氨氧化, 但启动时间存在较大差异, 探究不同接种污泥对厌氧氨氧化快速启动的影响将有助于最优种泥的选取. 鉴于反硝化颗粒污泥与厌氧氨氧化菌同为厌氧菌属, 代谢类型一致^[11,12], 且在系统中滞留能力强, 生长较快^[13,14], 是启动厌氧氨氧化的优良种泥; 另外, 好氧硝化污泥作为种泥可以有效去除水中携带的溶解氧, 营造出有利于厌氧氨氧化菌出现和生长的环境^[15], 采用上述两种污泥耦合的混合污泥系统作为接种污泥有望进一步加速厌氧氨氧化反应器的启动.

本试验在两组 SBR 反应器 R0、R1 中分别接种单一类型反硝化颗粒污泥和反硝化颗粒污泥与好氧硝化污泥的混合污泥进行对比, 探究不同接种污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验在两组相同的 SBR 反应器中进行, 如图 1 所示. 反应器由有机玻璃制成, 内径 100 mm, 高 700 mm, 有效容积 10.6 L; 在反应器壁上垂直设有一排取样口, 外壁用黑色材料进行包裹, 避免反应器中藻类增殖以及阳光对厌氧氨氧化菌的影响, 进水由蠕动泵从反应器底部打入; 水力停留时间控制在 8 h, 容积交换率为 2/3, 为了保证厌氧氨氧化反应器启动成功之后能够在常温下稳定运行, 驯化期间将反应器运行温度控制在 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

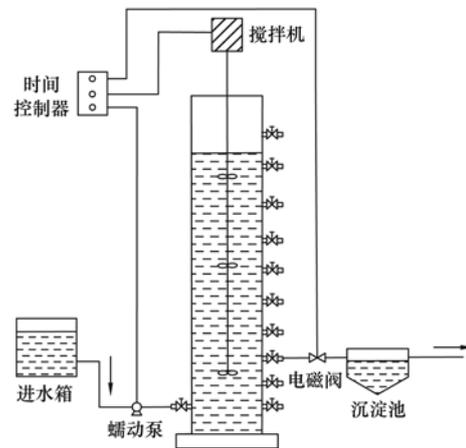


图 1 反应器装置示意

Fig. 1 Experimental reactor

1.2 接种污泥和模拟废水

接种污泥有反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥, 反硝化颗粒污泥取自硝氮质量浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的人工配水水质条件下稳定运行的 SBR 反应器, 好氧硝化污泥取自氨氮质量浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的人工配水水质条件下稳定运行的 SBR 反应器. R0 中接种 10.6 L 反硝化颗粒污泥, R1 中接种含有 7.0 L 反硝化颗粒污泥和 3.6 L 好氧硝化污泥的混合污泥; R0 和 R1 初始种泥的 MLSS 分别为 $8.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8.07 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 两组反应器中接种污泥的具体参数见表 1.

试验进水为人工模拟废水, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 质量浓度比为 1:1, 起始浓度分别为 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据驯化过程中厌氧氨氧化菌的活性和脱氮效率同步提高 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度, 进行厌氧氨氧化菌的批次富集; 无机碳由 NaHCO_3 提供, C/N 为 5:1, KH_2PO_4 为 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 为 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及 $1.00 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的微量元素; 微量元素成分为: EDTA ($15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($0.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($0.42 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ($0.24 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($0.98 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), H_3BO_4 ($0.015 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($0.020 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NaWO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($0.060 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$).

表 1 接种污泥参数

Table 1 Parameters of the seeding sludge

接种污泥	MLSS/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	MLVSS/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	MLVSS/MLSS/%	脱氮负荷/ $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$
反硝化颗粒污泥	8.05	6.16	76.52	0.35
好氧硝化污泥	8.10	5.98	73.83	0.42

1.3 测定项目及方法

氨氮测定采用纳氏试剂光度法; 亚硝酸盐氮测

定采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; 硝酸盐氮测定采用紫外分光光度法; pH、溶解氧 (DO) 以及温度

测定采用便携式的 WTW pH/Oxi 340i 及在线式的 WTW pH296 Oxi296 测定; MLSS 和 MLVSS 采用质量法进行测定; 污泥性状采用 OLYMPUS 显微镜进行观察.

1.4 试验内容

试验期间每天对反应器进出水的氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮浓度进行检测, 根据各类氮素的去除率变化以及化学计量比分析反应器中厌氧氨氧化菌的活性以及富集情况; 通过显微镜观察污泥的形态, 并且定期测定污泥的 MLSS、MLVSS 来分析厌氧氨氧化菌理化特性的变化.

2 结果与讨论

根据两组 SBR 反应器氨氮、亚硝酸盐氮和总氮的去除率变化, 将厌氧氨氧化的启动过程大致分为 4 个阶段: 细胞裂解期、活性迟滞期、活性提高期和活性稳定期^[6].

2.1 反应器脱氮性能

R0、R1 进水中初始 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度分别为 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 比例为 1:1. 如图 2 所示, 驯化初期, 由于外部环境的骤变, 导致 R0 和 R1 种泥中的微生物大量死亡, 细胞裂解, 胞内有机氮扩散引起出水 NH_4^+ -N 浓度高于进水; 此外, 由于细胞自溶会释放出大量的 COD 被反硝化菌当做碳源利用, 所以, 驯化初期, R0 和 R1 中都存在着明显的反硝化作用^[14], 加之 R0 的接种污泥全部为反硝化污泥, 其数量明显多于 R1, 导致 R0 的反硝化效率要高于 R1, 其反硝化脱氮效率分别为 23.2% 和 10.6%. 随着生物群落对环境的逐渐适应, 溶胞现象减少, 出水 NH_4^+ -N 浓度降低, 由于碳源的减少, 反硝化菌的异养反硝化作用减弱, 出水 NO_2^- -N 浓度升高. 当反应器运行至第 18 d 时, 实现了 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的同步去除, 去除率分别为 13.7% 和 14.4%, 同时出水的 NO_3^- -N 浓度也开始高于进水, 这是厌氧氨氧化现象发生的重要标志^[16,17]; 由于 R1 的接种污泥为反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥, 在驯化初期, 好氧硝化污泥可以快速去除进水中携带的溶解氧, 营造出有利于厌氧氨氧化菌出现的厌氧环境, 所以, R1 仅历时 12 d 便出现了厌氧氨氧化现象, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除率分别达到了 14.7% 和 15.1%.

进入到活性迟滞期之后, 为了避免 NO_2^- -N 过剩对厌氧氨氧化菌的抑制作用^[18], 以 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的增

幅每 5 d 同步提升一次进水中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度, 逐步实现对厌氧氨氧化菌的富集培养. 如图 2 所示, 由于基质浓度提高, 驯化过程不断深入, 所以厌氧氨氧化特征更加明显, R0、R1 的 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 同步去除率稳步上升, 厌氧氨氧化菌生物量逐渐增多; 但是由于该阶段厌氧氨氧化菌基数较少, 所以 R0 和 R1 的总氮去除率增长较为缓慢, R0 在第 19 d 和第 43 d 的总氮去除率分别仅有 13.1% 和 32.3%, 平均增长速率仅为 $0.77\% \cdot \text{d}^{-1}$; R1 中由于存在好氧硝化过程, 系统中营造的厌氧环境更有利于厌氧氨氧化菌的增殖, 所以, 活性迟滞期内, R1 中厌氧氨氧化菌的活性高于 R0, R1 在第 13 d 和第 33 d 的总氮去除率分别为 13.5% 和 32.6%, 平均增长速率为 $0.96\% \cdot \text{d}^{-1}$, 是 R0 的 1.25 倍.

在活性提高期, 厌氧氨氧化菌以指数级的增长速率快速增殖, 为了满足厌氧氨氧化菌快速增殖所需的营养物质, 以 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的增幅每 5 d 同步提升一次进水中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度来提高系统容积负荷, 刺激厌氧氨氧化菌快速增殖. 该阶段, 由于基质浓度较高、厌氧氨氧化菌基数较活性迟滞期大, 所以厌氧氨氧化菌快速增殖, 逐渐成为系统的优势菌种, 由于反硝化菌代谢类型与厌氧氨氧化菌一致^[11,12], 所以种泥中的反硝化菌在厌氧氨氧化菌的诱导下更有利于发生转变, 进而提高厌氧氨氧化菌的增殖速率, 如图 2 所示, R0 和 R1 总氮去除率的平均增长速率分别增大至 $1.01\% \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.31\% \cdot \text{d}^{-1}$, 较活性迟滞期有了明显提升. R0 运行至第 64 d 时, 总氮去除率达到了 50.7%, 总氮去除负荷为 $0.26 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 厌氧氨氧化反应器启动成功^[19], 与 R0 相比, 由于 R1 中的厌氧环境更有利于厌氧氨氧化菌的增殖和脱氮, 所以 R1 仅历时 47 d 即成功启动厌氧氨氧化, 总氮去除率和总氮去除负荷分别达到了 51.1% 和 $0.30 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 启动历时比 R0 缩短了 17 d.

厌氧氨氧化启动成功之后, 微生物进入活性相对稳定的时期. 在本阶段, 厌氧氨氧化菌趋于成熟, 系统的脱氮负荷基本保持稳定^[14]. R0 的平均总氮去除负荷为 $0.41 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, R1 的平均总氮去除负荷高于 R0, 为 $0.45 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 该试验结果表明, 接种混合污泥不仅有利于缩短厌氧氨氧化启动周期, 而且系统的脱氮效果更加良好.

R0 和 R1 反应器启动厌氧氨氧化过程中, 各个阶段的持续时间如表 2 所示. 从中可知, R1 在细胞裂解期、活性迟滞期和活性提高期阶段的持续时间

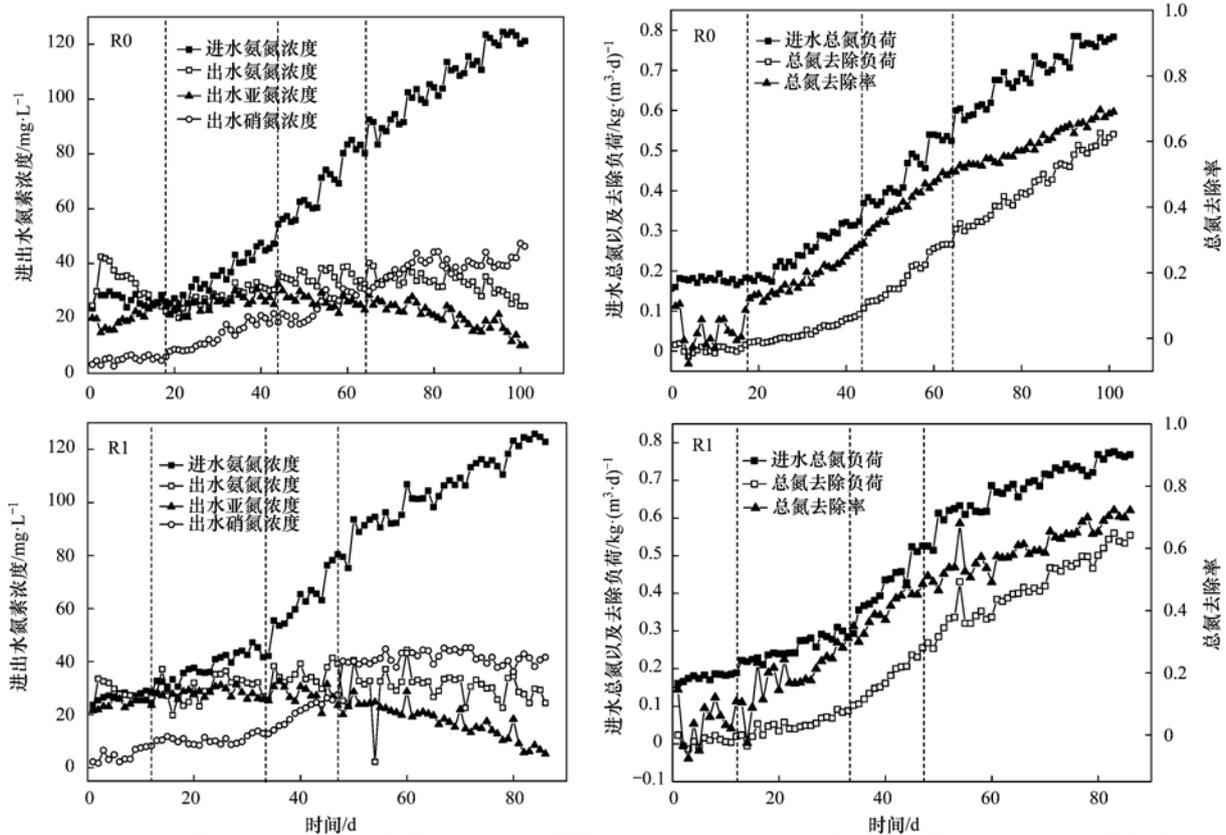


图2 启动阶段R0和R1的脱氮性能

Fig. 2 Nitrogen removal performance of R0 and R1 during the start-up stage

显著少于R0。其原因在于,选择反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥作为接种污泥可以有效解决启动过程中厌氧氨氧化菌驯化困难、增殖速率较慢以及溶解氧对厌氧氨氧化菌的抑制等各种问题,加速反应器的启动;反硝化颗粒污泥沉降性能较好,在系统中的持留能力较强^[13,14],可以避免细胞裂解期和活性迟滞期微生物的大量流失,保持系统中的微生物量;另外,它和厌氧氨氧化菌同为厌氧菌属^[11,12],更有利于被诱导驯化,进而加速活性迟滞期和活性提高期厌氧氨氧化菌的出现和增殖;好氧硝化污泥的存在可以及时去除进水中携带的溶解氧,营造出有利于厌氧氨氧化菌生长的环境,同时好氧污泥产率系数较高间接加快了厌氧氨氧化菌的增殖速率^[15],有效缩短活性迟滞期和活性提高期的时间,进一步加速厌氧氨氧化的启动。

表2 R0和R1各个阶段持续时间/d

Table 2 Duration of R0 and R1 in each stage/d

驯化阶段	起止时间	
	R0	R1
细胞裂解期	1 ~ 18	1 ~ 12
活性迟滞期	19 ~ 43	13 ~ 33
活性提高期	44 ~ 64	34 ~ 47
活性稳定期	65 ~ 101	48 ~ 86

2.2 化学计量比

化学计量比是衡量厌氧氨氧化生化反应的一个重要指示参数^[6]。根据式(1)可知^[3], R_s (NO_2^- -N与 NH_4^+ -N消耗量之比)和 R_p (NO_3^- -N的产量与 NH_4^+ -N的消耗量之比)的理论值分别为1.32和0.26。反应器R0、R1在各个驯化阶段的 R_s 和 R_p 的平均值如表3所示。

据2.1节可知,在细胞裂解期,由于系统中发生溶胞现象和反硝化作用^[14], R_s 和 R_p 与理论值相差甚远,甚至 R_s 出现负值;经过一段时间的培养驯化后,厌氧氨氧化菌开始出现,在活性迟滞期,由于R1接种污泥中含有好氧硝化污泥,其中的好氧氨氧化细菌(AOB)能够通过亚硝化作用消耗掉进水中携带的溶解氧,产生 NO_2^- -N^[20],导致 R_s 降低,所以,该阶段内,R1中 R_s 平均值为1.20,小于R0的1.24;进入活性提高期之后,R0和R1中的厌氧氨氧化菌快速增殖,逐渐成为系统中的优势菌群,总氮去除率快速增大,但是相比而言,R1中厌氧氨氧化菌增殖速率明显高于R0,且化学计量比相对R0也更接近理论值,如图3所示,厌氧氨氧化启动成功之后,R0的 R_s 和 R_p 分别为1.20和0.34,R1

表 3 R0 和 R1 化学计量比平均值

Table 3 Average value of stoichiometry in R0 and R1

阶段	反应器	R_s	R_p
细胞裂解期	R0	-4.22	0.65
	R1	-3.79	0.58
活性迟滞期	R0	1.22	0.37
	R1	1.20	0.24
活性提高期	R0	1.24	0.34
	R1	1.26	0.27
活性稳定期	R0	1.26	0.30
	R1	1.29	0.29

的 R_s 和 R_p 分别为 1.26 和 0.21, R1 的化学计量比比 R0 更接近理论值 1.32 和 0.26; 进入活性稳定期之后, 系统中的厌氧氨氧化菌趋于成熟, 化学计量比较稳定, R0 和 R1 的化学计量比与理论值接近, 表明厌氧氨氧化已成为系统的主导反应^[21], 厌氧氨氧化活性较好, 这也说明, 接种单一类型反硝化颗粒污泥和接种反硝化颗粒污泥与好氧硝化污泥的混合污泥均可成功启动厌氧氨氧化, 但是接种混合污泥启动厌氧氨氧化历时更短, 系统稳定性更高.

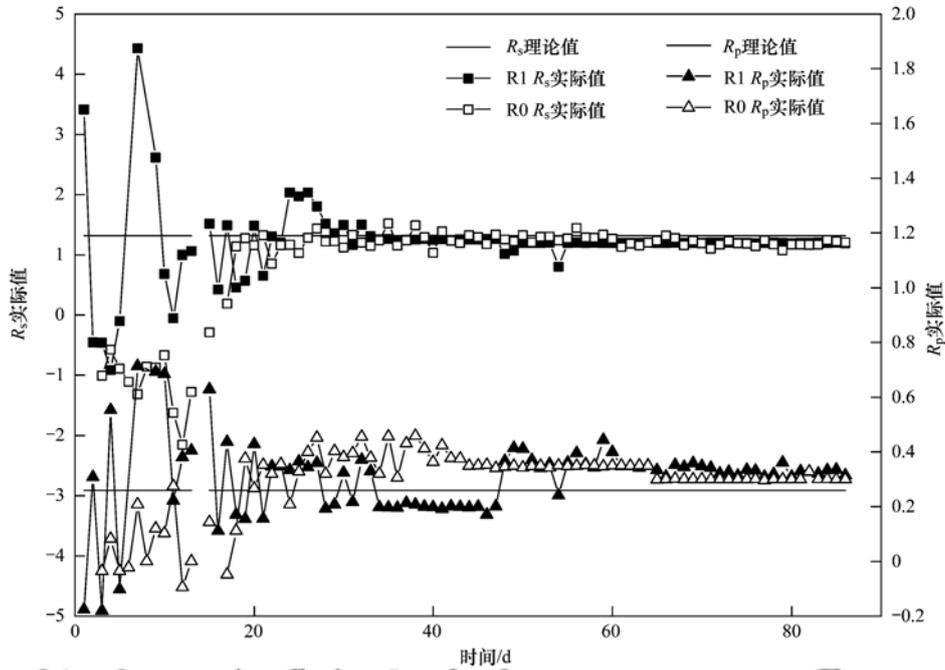


图 3 R0 和 R1 化学计量比变化情况

Fig. 3 Variation of stoichiometry in R0 and R1

2.3 MLSS、MLVSS 以及污泥性状变化情况

试验过程中对反应器 R0 和 R1 中污泥的 MLSS 和 MLVSS 进行了定期测量, 以明晰厌氧氨氧化启动过程中微生物量的变化规律^[16], 结果如图 4 和

图 5 所示.

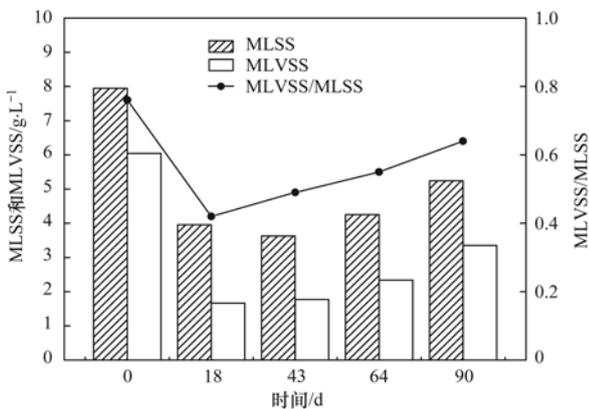


图 4 R0 生物量变化情况

Fig. 4 Variation of R0 biomass

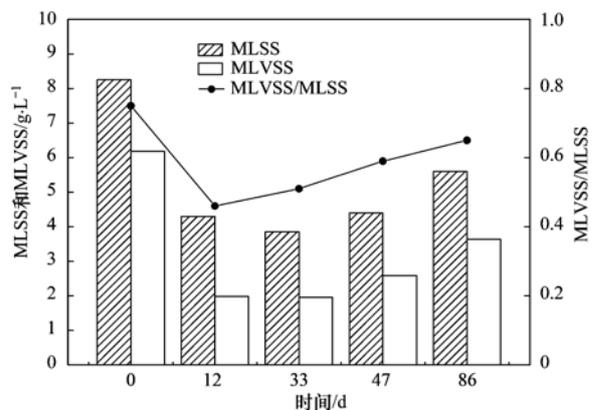


图 5 R1 生物量变化情况

Fig. 5 Variation of R1 biomass

在细胞裂解期内, 由于接种污泥中的微生物难以快速适应新的环境, 大量死亡, 导致系统中的生物量锐减^[16], 所以反应器 R1 中污泥的 MLSS 和

MLVSS 急剧降低,如图 5 所示,细胞裂解期末,反应器中的 MLSS 和 MLVSS 分别降低到初始种泥的 52% 和 32%;进入活性迟滞期后,细胞死亡现象大量减少,此外,由于接种污泥中有大量反硝化颗粒污泥,沉降性能较好,能够有效截留微生物,所以,活性迟滞期结束时,MLSS 和 MLVSS 仅比细胞裂解期末降低了 5% 和 1%;进入活性提高期之后,厌氧氨氧化菌大量出现,MLSS 和 MLVSS 开始回升,第 47 d, R1 厌氧氨氧化启动成功,MLSS 和 MLVSS 分别为 $4.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别恢复到了初始种泥的 54% 和 42%. 反应器 R0 中污泥的 MLSS 和 MLVSS 变化趋势与 R1 相似,但开始回升历时明显长于 R1,且 R0 启动成功之后 MLSS 和 MLVSS 分别仅恢复到初始种泥的 51% 和 38%,少于 R1,据此可以推测 R1 在驯化期间厌氧氨氧化菌增殖速率更高,接种反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥更有利于快速启动厌氧氨氧化. 在活性稳定期, R1 系统中的生物量仍然有所上升,但是,由于此时的厌氧氨氧化菌趋于成熟,增殖速率较为稳定,反应器运行至第 86 d 时,MLSS 和 MLVSS 分别达到了

$5.65 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.64 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别恢复至初始种泥的 70% 和 59%.

本试验对 R0 和 R1 厌氧氨氧化启动过程中各阶段的污泥性状进行了观测,发现反应器启动前后污泥形态以及颜色发生了较大的变化,结果如图 6 和图 7 所示.

启动初期, R0、R1 接种污泥的性状如图 6(a) 和 7(a) 所示,种泥以颗粒污泥的形式存在,颜色整体呈现棕色;进入细胞裂解期之后,由于外界环境和营养物质的突变,微生物大量死亡,颗粒污泥发生解体,生物量锐减,细胞裂解期结束时,两组反应器污泥性状如图 6(b) 和 7(b) 所示;随着微生物对新环境逐渐适应,厌氧氨氧化菌开始在活性迟滞期出现并在活性提高期快速增殖,系统中污泥的颜色也发生了显著的变化,红色污泥逐渐出现,厌氧氨氧化启动成功后,污泥性状如图 6(c) 和 7(c) 所示,相比而言, R1 中红色污泥的数量明显多于 R0,且 R1 中的红色污泥出现了颗粒化的倾向,这也说明接种反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥启动过程中,厌氧氨氧化特征更加显著.

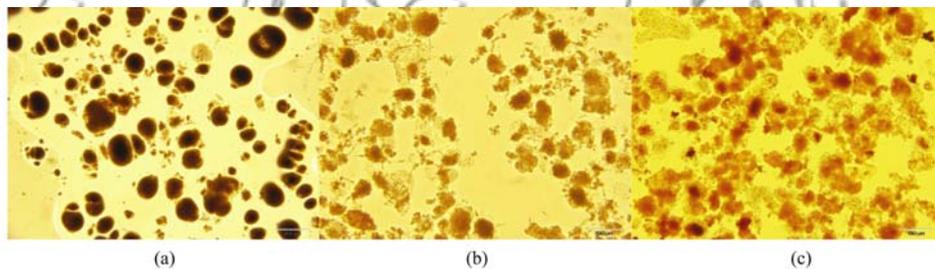


图 6 R0 污泥性状

Fig. 6 Sludge traits in R0

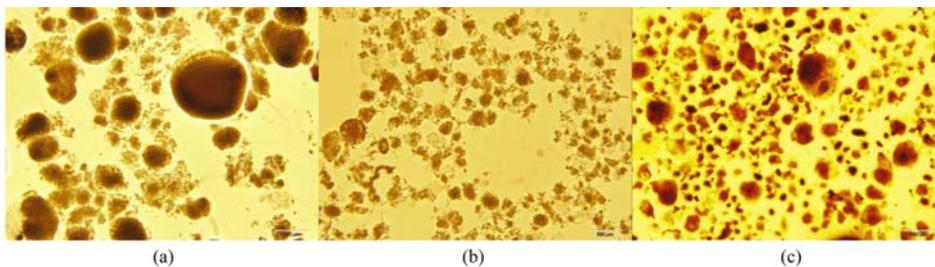


图 7 R1 污泥性状

Fig. 7 Sludge traits in R1

3 结论

(1) 采用单一类型反硝化颗粒污泥作为接种污泥用时 64 d 成功启动厌氧氨氧化,总氮去除负荷达到 $0.26 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$;采用反硝化颗粒污泥与好氧硝化污泥的混合污泥作为接种污泥,仅用时 47 d 即

可成功启动厌氧氨氧化,总氮去除负荷可达 $0.30 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

(2) 接种反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥启动过程中,厌氧氨氧化菌出现时间较早,增殖速率更快,反应器启动成功后,化学计量比更接近理论值,系统的 MLSS 和 MLVSS 能够恢复到较

高的水平。

(3) 接种反硝化颗粒污泥和好氧硝化污泥的混合污泥驯化过程中, 污泥颜色由棕色逐渐变为红色, 且有颗粒化的倾向, 厌氧氨氧化特征更加显著。

参考文献:

- [1] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 任玉辉, 王科, 李相昆, 等. 常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4218-4223.
Ren Y H, Wang K, Li X K, *et al.* Influence of alkalinity and DO on ANAMMOX bioreactor at normal temperature and low substrate concentration[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4218-4223.
- [3] 李冬, 田海成, 梁瑜海, 等. 水质条件对厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 含量的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, **49**(2): 6-12.
Li D, Tian H C, Liang Y H, *et al.* Effect of water quality of influent on the content of extracellular polymeric substances in anammox granule sludge[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, **49**(2): 6-12.
- [4] 曾涛涛, 李冬, 谢水波, 等. 厌氧氨氧化菌微生物特性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20**(6): 1111-1116.
Zeng T T, Li D, Xie S B, *et al.* A review on microbial properties of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) bacteria[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, **20**(6): 1111-1116.
- [5] 金仁村, 郑平, 陈旭良, 等. 厌氧氨氧化反应器快速启动方法的探讨[J]. 化工进展, 2005, **24**(6): 629-631.
Jin R C, Zheng P, Chen X L, *et al.* Rapid start-up technique of Anammox reactor[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2005, **24**(6): 629-631.
- [6] Chen H, Hu H Y, Chen Q Q, *et al.* Successful start-up of the anammox process: influence of the seeding strategy on performance and granule properties[J]. Bioresource Technology, 2016, **211**: 594-602.
- [7] 唐晓雪, 彭永臻, 徐竹兵, 等. 低基质浓度厌氧氨氧化颗粒污泥反应器的快速启动[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, **45**(12): 4445-4451.
Tang X X, Peng Y Z, Xu Z B, *et al.* Fast start-up of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) granular reactor treating low-strength wastewater[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, **45**(12): 4445-4451.
- [8] 丛岩, 黄晓丽, 王小龙, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速形成[J]. 化工学报, 2014, **65**(2): 664-671.
Cong Y, Huang X L, Wang X L, *et al.* Faster formation of anammox granular sludge[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(2): 664-671.
- [9] 唐崇俭, 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化反应器的接种污泥和启动策略[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(14): 15-20.
Tang C J, Zheng P, Zhang L. Seeding sludge and start-up strategy for Anammox bioreactor[J]. China Water & Wastewater, 2008, **24**(14): 15-20.
- [10] Tsushima L, Kindaichi T, Okabe S. Quantification of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in enrichment cultures by real-time PCR[J]. Water Research, 2007, **41**(4): 785-794.
- [11] Wang S H, Guo J B, Lian J, *et al.* Rapid start-up of the Anammox process by denitrifying granular sludge and the mechanism of the anammox electron transport chain[J]. Biochemical Engineering Journal, 2016, **115**: 101-107.
- [12] Connan R, Dabert P, Khalil H, *et al.* Batch enrichment of Anammox bacteria and study of the underlying microbial community dynamics[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **297**: 217-228.
- [13] 金仁村, 郑平, 胡宝兰, 等. 污泥颗粒化快速启动厌氧氨氧化反应器的探讨[J]. 环境污染与防治, 2006, **28**(10): 772-775.
Jin R C, Zheng P, Hu B L, *et al.* Methods for rapid start-up of the anaerobic ammonium oxidation process[J]. Environmental Pollution and Control, 2006, **28**(10): 772-775.
- [14] 刘晓宇, 王思慧, 薛耀琦, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速培养与形成机理[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(3): 1223-1227.
Liu X Y, Wang S H, Xue Y Q, *et al.* Rapid cultivation and formation mechanism of ANAMMOX granular sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(3): 1223-1227.
- [15] 张沙, 汪涛, 黄超, 等. 常温条件下接种 OLAND 污泥启动 Anammox 反应器的研究[J]. 现代化工, 2017, **37**(2): 169-172.
Zhang S, Wang T, Huang C, *et al.* Study on the start-up of Anammox reactor inoculated with OLAND sludge at room temperature[J]. Modern Chemical Industry, 2017, **37**(2): 169-172.
- [16] 李宁宁, 于德爽, 李津, 等. 城市污水条件下 ASBR 厌氧氨氧化的启动与脱氮性能[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(5): 1689-1694.
Li N N, Yu D S, Li J, *et al.* Start up of anaerobic ammonium oxidation process and nitrogen removal performance in anaerobic sequencing batch reactor for municipal sewage[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(5): 1689-1694.
- [17] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯, 等. 常温低基质厌氧氨氧化反应器启动及其稳定性[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(3): 981-986.
Bao L L, Zhao J G, Li X K, *et al.* Start-up and stability of Anammox bioreactor at normal temperature and low substrate concentration[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(3): 981-986.
- [18] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟, 等. 基于基质浓度的厌氧氨氧化工艺运行策略[J]. 化工学报, 2009, **60**(3): 718-725.
Tang C J, Zheng P, Chen J W, *et al.* Performance of ANAMMOX process with different operation strategies based on substrate concentration[J]. CIESC Journal, 2009, **60**(3): 718-725.
- [19] Jin R C, Zheng P, Hu A H, *et al.* Performance comparison of two anammox reactors: SBR and UBF[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **138**(1-3): 225-230.
- [20] 李冬, 陶晓晓, 李占, 等. 常温 SBR 亚硝化快速启动及优化试验研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1653-1659.
Li D, Tao X X, Li Z, *et al.* Research on the rapid start-up and optimization of parameters for nitrosation at room temperature[J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1653-1659.
- [21] 李祥, 黄勇, 袁怡. 厌氧氨氧化菌活性恢复及富集培养研究[J]. 环境污染与防治, 2010, **32**(1): 61-66.
Li X, Huang Y, Yuan Y. The reactivation and enrichment of ANAMMOX bacteria[J]. Environmental Pollution and Control, 2010, **32**(1): 61-66.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)