

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浞江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析

赵晴¹, 刘梦莹¹, 吕慧^{2,3*}, 梁俊宇¹, 刁兴兴⁴, 张鑫⁵, 孟了⁶

(1. 广州大学土木工程学院, 广州 510006; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 3. 中山大学深圳研究院, 深圳 518057; 4. 深圳市利赛实业发展有限公司, 深圳 518029; 5. 黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 哈尔滨 150050; 6. 深圳市下坪固体废弃物填埋场, 深圳 518047)

摘要: 本研究从某垃圾填埋场计划将现有的垃圾渗滤液短程硝化反硝化脱氮工艺改造为短程硝化反硝化耦合厌氧氨氧化工艺的实际需求入手, 以短程硝化反硝化污泥作为接种污泥, 在上流式厌氧污泥床反应器(UASB)中完成厌氧氨氧化启动. 探究反应器运行中的脱氮效能、氮容积负荷和氮去除负荷情况, 并利用 16S rRNA 基因序列分析技术对长期运行条件下系统中微生物群落结构演变进行分析. 结果表明, 反应器经历了 149 d 后成功启动厌氧氨氧化, 稳定运行后的进水总氮容积负荷达到 4 000.00 mg·(L·d)⁻¹, 总氮容积平均去除速率达到 3 885.76 mg·(L·d)⁻¹, 系统氨氮和亚硝酸盐氮的平均去除率均超过了 95%. 运行第 250 d 时, 系统的生物多样性减少, 门水平上厌氧氨氧化主要菌群 Planctomycetes 的丰度达到了 54.94%; 属水平上 *Candidatus Kuenenia* 为主要菌属, 其相对丰度达到了 49.66%. 结果证明, 在短程硝化反硝化基础上耦合厌氧氨氧化实现垃圾渗滤液深度处理的升级改造工艺具有可行性.

关键词: 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 垃圾渗滤液; UASB 反应器; 微生物群落结构; 16S rRNA

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-4195-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901247

Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process

ZHAO Qing¹, LIU Meng-ying¹, LÜ Hui^{2,3*}, LIANG Jun-yu¹, DIAO Xing-xing⁴, ZHANG Xin⁵, MENG Liao⁶

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Shenzhen Research Institute of Sun Yat-sen University, Shenzhen 518057, China; 4. Shenzhen Lisai Development Co., Ltd., Shenzhen 518029, China; 5. School of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 6. Shenzhen Xiaping Municipal Solid Waste Landfill Site, Shenzhen 518047, China)

Abstract: In order to upgrade the current shortcut nitrification and denitrification process for landfill leachate treatment and to stimulate nitrification-denitrification coupled with anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) at a landfill, an ANAMMOX process was started using an up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor seeded with nitrification and denitrification sludge. The performances of the reactor were investigated, including the nitrogen loading and nitrogen removal rates. Moreover, Illumina Miseq sequencing was conducted to analyze the microbial community dynamics under long-term operation on a molecular level. The results showed that the ANAMMOX reactor was successfully started in 149 days. The total nitrogen loading rate reached 4 000.00 mg·(L·d)⁻¹, and the total nitrogen removal rate reached 3 885.76 mg·(L·d)⁻¹ after stable operation. The average ammonium and nitrite removal efficiencies were more than 95%. In 250 days, the Planctomycetes in the reactor experienced rapid growth, and its abundance reached 54.94%. The abundance of *Candidatus Kuenenia* reached 49.66%. The upgrading process of landfill leachate treatment by coupling ANAMMOX based on short-cut nitrification and denitrification was confirmed to be feasible.

Key words: anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX); landfill leachate; UASB reactor; microbial community structure; 16S rRNA

垃圾渗滤液是生活垃圾在堆放或填埋过程中产生的高氨氮高有机物废水. 在利用传统生物脱氮工艺处理过程中, 具有水力停留时间长, 外加碳源成本高等缺点^[1,2]. 厌氧氨氧化(anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX)细菌在厌氧的条件下利用 NH₄⁺-N 作为电子供体, NO₂⁻-N 为电子受体生成 N₂, 实现高效自养脱氮^[3,4]. 近年来利用短程硝化反硝化耦合厌氧氨氧化自养脱氮技术处理垃圾渗滤液逐渐成为行业及学界的热点^[5,6]. 短程硝化反硝化耦

合厌氧氨氧化技术, 不仅无需外加碳源, 而且可大量节省曝气能耗, 具有脱氮负荷高、运行费用低、

收稿日期: 2019-01-29; 修订日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508115); 黑龙江省自然科学基金项目(QC2017060); 广州市珠江科技新星项目(201610010165); 深圳市科技计划项目(JSGG20170824101458515); 哈尔滨市科技创新人才研究专项(2017RAQXJ020); 广州大学仪器设备开放共享基金项目

作者简介: 赵晴(1983~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: gzdx_zq@163.com

* 通信作者, E-mail: lvhui3@mail.sysu.edu.cn

占地面积小等优点^[7-9]. 垃圾渗滤液低 C/N 比, 高氨氮的特点, 可以较容易地实现短程硝化, 厌氧氨氧化反应所需要的基质 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$) 可以从短程硝化反应中获得. 一般来说, 短程硝化反硝化耦合厌氧氨氧化工艺可以实现垃圾渗滤液的高效脱氮^[10]. 然而, 作为新型的废水脱氮技术, 目前厌氧氨氧化工艺控制技术尚不成熟. 厌氧氨氧化菌生长缓慢, 细胞产率低, 易受水质和运行条件影响, 从而导致了厌氧氨氧化工艺在实际废水处理中呈现启动缓慢、稳定性欠缺等问题^[11, 12], 影响了组合工艺在工程上的广泛应用.

本研究以某垃圾填埋场将现有垃圾渗滤液短程硝化反硝化脱氮工艺改造为短程硝化反硝化耦合厌氧氨氧化工艺的实际需求为背景, 开展实验室可行性研究. 主要分析耦合短程硝化反硝化的厌氧氨氧化垃圾渗滤液处理系统的启动过程、运行控制条件和运行效果. 因此, 本实验选用渗滤液处理厂短程硝化反硝化污泥作为接种污泥, 启动厌氧氨氧化反应器, 在系统启动稳定后, 逐渐提高系统氮负荷, 使之贴近渗滤液原水的氨氮浓度. 通过考察系统长期运行下脱氮效能及微生物群落变化, 以期为垃圾渗滤液等高氨氮废水脱氮的实际工程应用提供相关实验基础和技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究中采用 UASB 反应器进行厌氧氨氧化小试, 实验装置如图 1 所示. 反应器采用有机玻璃制作, 反应区内径 6 cm, 高度 40 cm, 有效容积为 1 L. 反应器整体置于遮光保温的环境中, 利用带温度控制的循环水浴装置保持温度在 30 ~ 35℃. 原水通过蠕动泵以连续流形式进入反应器底部, 通过污泥层后再经反应器顶端的三相分离器实现泥、水、

气分离, 最后在顶端溢流出反应器进入出水池.

1.2 实验用水

本研究采用模拟垃圾渗滤液废水, 其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 分别由 NH_4Cl 和 NaNO_2 按需添加. 其余主要成分为: NaHCO_3 ($1\,250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), KH_2PO_4 ($100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{CaCl}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ ($4.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 微量元素浓缩液 I ($1.25\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$) 和微量元素浓缩液 II ($1.25\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$). 微量元素浓缩液 I 组成为: EDTA ($5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), FeSO_4 ($5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 微量元素浓缩液 II 组成为: EDTA ($1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), H_3BO_3 ($14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ($430\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NaSeO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ ($210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), $\text{NaMoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ($220\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

1.3 接种污泥

厌氧氨氧化系统中接种的污泥取自某垃圾填埋场渗滤液处理车间中的短程硝化反硝化池. 该污泥的 MLSS、MLVSS 质量浓度分别为 $5\,396\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3\,342\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 颜色呈棕黄色.

1.4 分析项目和方法

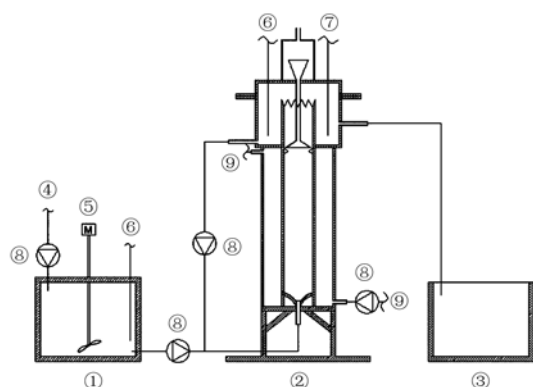
实验期间定期采样, 水样沉淀 30 min 后取上清液用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤, 再测定相关水质指标. 常规指标检测方法均按照文献[13]操作. $\text{NH}_4^+\text{-N}$: 纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^-\text{-N}$: N-(1-萘基)-乙二胺光度法; $\text{NO}_3^-\text{-N}$: 紫外分光光度法; MLVSS/MLSS: 重量法. pH 值由 pH 计 (JENCO 3675, 美国) 测定, DO 含量采用溶解氧仪 (JENCO 6308DT, 美国) 检测.

微生物群落多样性的样品分别取自接种后第 50 d 和 250 d 反应器内的混合污泥. 利用 Illumina MiSeq PE300 测序平台对样品中的 16S rRNA 局部区域进行高通量的扩增子测序, 完成微生物群落结构及多样性研究. 包括 DNA 提取、PCR 扩增、MiSeq 文库构建和 MiSeq 测序^[14].

2 结果与讨论

2.1 厌氧氨氧化系统启动

根据脱氮规律, 可将 UASB 反应器内厌氧氨氧化的启动分为 3 个阶段 (图 2): 菌体自溶阶段、活性迟滞阶段和活性提高阶段. 在整个启动期内, 反应器内保持 $\text{HRT} = 12\text{ h}$. 进水总氮浓度从菌体自溶阶段的 $70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NH}_4^+\text{-N} = 1:1$); 逐渐提升至活性迟滞阶段的 100、150 和 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}:\text{NH}_4^+\text{-N}$ 比值保持 1:1; 在活性提高阶段, 对



①进水池; ②厌氧氨氧化反应器; ③出水池; ④pH 调节瓶; ⑤搅拌器; ⑥pH 计; ⑦温度计; ⑧蠕动泵; ⑨恒温水浴锅

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of ANAMMOX-UASB reactor

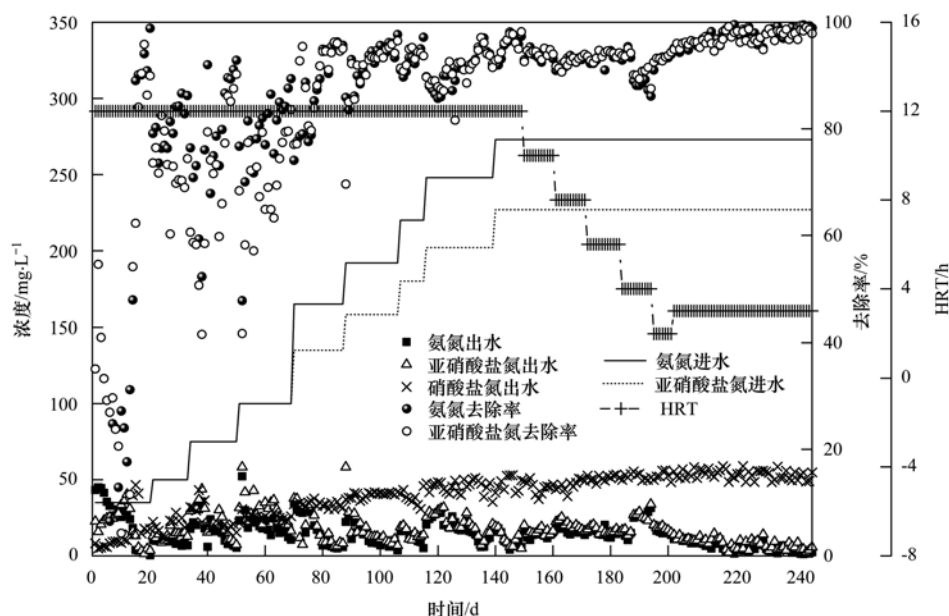


图2 UASB 厌氧氨氧化反应器启动及长期运行性能(1~250 d)

Fig. 2 Start-up and long-term performance of ANAMMOX-UASB reactor(1-250 d)

进水总氮浓度进行 300、350、400、450 和 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的推进 ($\text{NO}_2^- - \text{N}:\text{NH}_4^+ - \text{N} = 1.2:1$)。每个负荷阶段在系统出水氨氮或亚硝酸盐氮的浓度稳定低于 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 进入下一阶段。

2.1.1 菌体自溶阶段

由于接种的短程硝化反硝化原污泥中有较多的氨氧化细菌和反硝化异养菌^[15], 对反应器内黑暗且厌氧的新环境极为敏感而发生自溶解, 释放出氨和有机物。所以反应器启动初期(1~4 d)出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度高于进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, 接种污泥中的反硝化菌消耗 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 利用菌体自溶提供的有机物进行反硝化脱氮反应。但随着菌体自溶强度减弱, 厌氧氨氧化细菌活性逐渐变强, 反硝化作用由于反硝化菌缺少有机物和反应底物而逐渐减弱, 因此出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度出现上升情况^[16]。在第 11~12 d 时, 出现了出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度高于进水的情况。第 13 d 时, 系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度均低于进水值, 可认为此时菌体自溶的高峰期已过, 系统开始脱离短程硝化反硝化状态。

2.1.2 活性迟滞阶段

由于此阶段(14~69 d)进水总氮负荷的逐渐增加, 且反应器内厌氧氨氧化菌的活性也有明显增强。负荷每一次提升后, 由于初期微生物对环境的改变还未适应, 致使脱氮效率短暂降低, 但经过 10 d 左右 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率即可达到 80% 以上, 对应总氮去除负荷也随之增大。系统的容积氨氮去除负荷、容积亚硝酸盐氮去除负荷、容积总氮去除负荷分别由第 14 d 的 33.53、37.89 和 71.42 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 达到了第 69 d 的 175.27、159.09 和

334.36 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 提升倍数分别为 4.2、3.2 和 3.6。这一变化规律与汪瑶琪等^[17]的研究相一致, 在反应器容积负荷提高的同时, 氮素去除负荷也对应地提高。

待负荷提高后氮素去除达到稳定, 计算系统中亚硝酸盐氮去除量/氨氮去除量 ($\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝酸盐氮生成量/氨氮去除量 ($\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 的平均值。当系统容积负荷提高时, 氮素去除比例也随之发生变化。由图 3 和图 4 可知, 系统 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均值从启动初期的波动状态逐渐趋于稳定。其中, $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 由 2.37(第 14 d)基本稳定至本阶段后期的 0.30 左右。此时系统内的短程硝化反硝化反应逐渐减弱, 厌氧氨氧化反应已经较为稳定, 且已经占据主导地位, 系统且具有了一定的脱氮能力。

2.1.3 活性提高阶段

虽然系统进水已经通过曝氮气脱氧至 $\text{DO} < 0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但反应器连续进水过程中难免会有溶解氧的增加, 系统内不可避免地会存在硝化反应。考虑到系统内并不是单一的进行厌氧氨氧化反应, 未被厌氧氨氧化反应消耗的基质会被系统中存在的硝化细菌所消耗, 且系统内可能对厌氧氨氧化菌产生抑制的有机物可以被反硝化菌消耗, 因此, 将此阶段的进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 值调整为 1.2 左右, 略低于厌氧氨氧化反应中的理论值 1.32。

此阶段(70~149 d)系统内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 实现同步高效去除(图 2), 脱氮效果良好, 系统平均

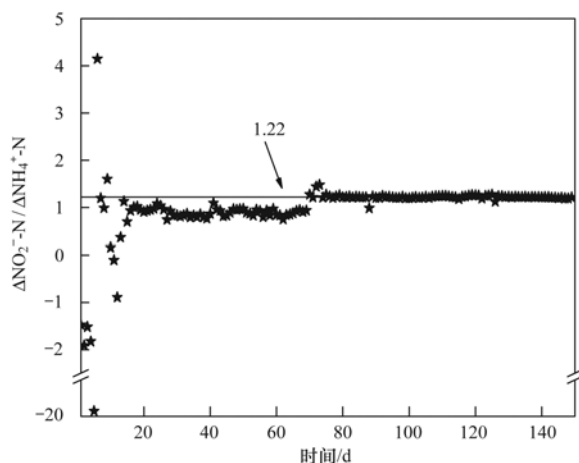


图3 UASB 厌氧氨氧化反应器第 1~149 d 的
亚硝酸盐氮去除量/氨氮去除量

Fig. 3 Value of $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the
ANAMMOX-UASB reactor(1-149 d)

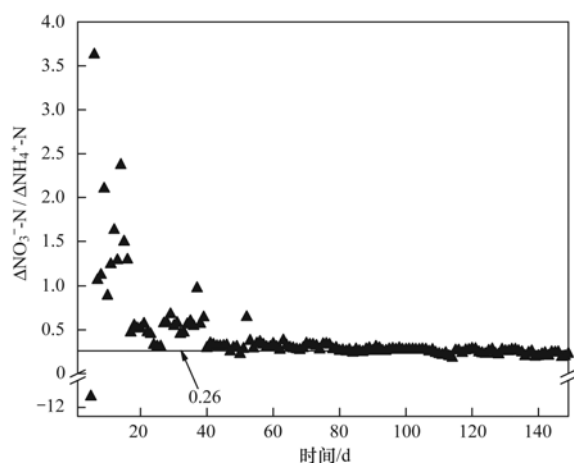


图4 UASB 厌氧氨氧化反应器第 1~149 d 的
硝酸盐氮生成量/氨氮去除量

Fig. 4 Value of $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the
ANAMMOX-UASB reactor(1-149 d)

$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率为 91%，平均 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率为 92%。从图 3 和图 4 可看出，将进水 $\text{NO}_2^- \text{-N} / \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值进行调整之后，系统的 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均值 (1.22) 及 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均值 (0.26) 接近厌氧氨氧化反应的理论值 1.32 和 0.26。对于不同的接种污泥、原水水质和实验方法，学者们启动成功的厌氧氨氧化反应器具有不同的 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ [17, 18]，主要因为不同的条件下，系统内与厌氧氨氧化共存反应不同所致 [19]。

第 149 d 时，系统的容积氨氮去除负荷、容积亚硝酸盐氮去除负荷、容积总氮去除负荷分别为 442.09、536.24 和 978.33 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，与第 70 d 时的 200.08、254.39 和 454.46 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 相比均提高了 1 倍以上。可见此时 UASB 反应器的厌氧氨氧化特性已经全部显现，由此判断厌氧氨氧化系统

启动成功。

2.2 HRT 调整

在保证厌氧氨氧化系统运行稳定的前提下，UASB 反应器内 ANAMMOX 启动成功后第 150 d 时，对反应器的 HRT 进行梯度调整，保持进水 TN 浓度和 $\text{NO}_2^- \text{-N} / \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值不变。与此同时，系统的进水总氮负荷得到提升，也使反应器上部的污泥可以获得足够的反应基质，促进系统成熟。在第 150~250 d，系统经历了 6 个阶段的 HRT 调整，依次为 10、8、6、4、2 和 3 h。

由图 2 可见，每次缩短 HRT 后，系统中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的出水浓度略有波动，呈现先上升后下降的趋势，但总体上 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率均在 80% 以上，系统的去除效果相对稳定。在 HRT 为 10、8、6 和 4 h 时，系统的容积总氮平均去除速率分别达到了 1 123.63、1 409.85、1 890.62 和 2 748.69 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。但是当 HRT 调到 2 h 时，系统 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的出水浓度明显上升，处理效果出现恶化趋势。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 去除率处于持续下降的状态，均降至 70% 以下。尽管此时系统的 TN 去除率有一定的提高，但是容积总氮去除负荷随着系统的恶化而下降至 3 887.03 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 。由于系统内存在与厌氧氨氧化共存的反硝化反应，随着 HRT 的逐渐缩短，厌氧氨氧化对脱氮的贡献率降低 [20]。魏琛等 [21] 的研究也证明系统 HRT 过短会导致含氮污染物去除不完全。

第 203 d 时将反应器的 HRT 调回至 3 h，以避免系统继续恶化。随后，系统的脱氮性能得到逐渐恢复，氮去除率达到 80% 以上。随着反应的继续运行，系统的进水总氮容积负荷提高到 4 000.00 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，接近垃圾渗滤液原水的氮浓度，容积总氮平均去除负荷达到 3 885.76 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ， $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的平均去除率均达到 95% 以上。系统脱氮效果较好且稳定。

2.3 系统中微生物群落结构分析

2.3.1 系统微生物群落多样性变化分析

本实验选取的污泥样品分别来自低负荷启动初期 (50 d) 与高负荷稳定运行期 (250 d) 时的系统， α 多样性参数分析结果如表 1 所示。 α 多样性统计中 Chao1 指数和 OTUs 指数是表征菌群丰富度的关键指标，指数值越高表明物种数越多 [22]。与启动初期相比，系统在完全成熟的反应后期时 Chao1 指数和 OTUs 数有所下降，可见随着反应器负荷的不断提高，微生物种类呈现下降趋势。Simpson 指数和 Shannon 指数受样品群落中物种丰富度和物种均匀度的影响，可用来表征菌群的多样性。群落多样性

越高，则 Simpson 指数越大；而 Shannon 指数越高则表明群落复杂程度越大。由表 1 数据可见，250 d 时的样品 Shannon 指数减小，Simpson 指数也同步地减小，即在系统稳定运行后期，污泥群落结构复杂性降低，优势菌群比例增大。

表 1 样品的 α 多样性参数
Table 1 The α diversity index of microbial communities in the samples

样品	OTUs	Chao1 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
50 d	653	932	0.90	4.47
250 d	518	741	0.78	3.66

2.3.2 微生物群落门水平结构分析

对各样品进行门水平上的分析，探究不同时期系统中微生物群落组成情况，统计结果见表 2。在启动初期和完全成熟的反应后期，系统中微生物群落结构的多样性比较丰富。系统微生物在门水平上主要有浮霉菌门 (Planctomycetes)、变形菌门 (Proteobacteria)、绿菌门 (Chlorobi)、绿弯菌门 (Chloroflexi) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 等，其中脱氮功能菌主要有浮霉菌门和变形菌门^[17]。

厌氧氨氧化菌主要属于浮霉菌门^[23]。由表中数据可知，随着厌氧氨氧化反应器的成功启动和稳定运行，浮霉菌门丰度大幅提高，在第 250 d 时丰度达到 54.94%。对应反应器的氨氮和亚硝酸盐氮平均去除率均达到 95% 以上，与微生物变化规律相一致。反硝化菌属在门水平上属于变形菌门和拟杆菌门^[24~26]，他们的丰度在第 250 d 时较第 50 d 时明显减少。异养菌所属的绿弯菌门丰度变化不大。绿菌门的丰度则从 30.51% 减少到 10.87%。可见在系统启动后的长期稳定运行条件下，微生物群落结构发生了显著变化，厌氧氨氧化菌得到了富集。

2.3.3 脱氮相关的微生物群落属水平结构分析

为了对反应器内的脱氮功能菌进行详细分析，

在 16S rRNA 高通量测序所得的数据当中，挑选出与系统脱氮相关的主要菌属进行分析比对 (表 3)。从启动初期到系统完全成熟的反应后期运行过程中，系统中的脱氮功能菌主要有厌氧氨氧化细菌、反硝化细菌、氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝氮氧化细菌 (NOB)，这证实了该反应系统是一个同时具有厌氧氨氧化、硝化和反硝化的综合脱氮系统。

表 2 微生物群落的相对丰度 (门水平)

Table 2 Abundance of microbial community at phylum level					
微生物门	相对丰度/%		微生物门	相对丰度/%	
	50 d	250 d		50 d	250 d
Planctomycetes	2.50	54.94	Firmicutes	0.12	0.07
Proteobacteria	9.31	6.52	OD1	18.77	1.28
Bacteroidetes	7.82	2.12	Spirochaetes	0.03	<0.01
Chlorobi	30.51	10.87	Verrucomicrobia	0.41	0.07
Chloroflexi	18.88	17.67	WWE1	0.00	<0.01
Parvarchaeota	7.18	0.00	Thermi	0.16	0.49
Acidobacteria	0.97	0.66	others	1.92	1.11
Armatimonadetes	1.43	0.17			

在第 50 d 和 250 d 时，厌氧氨氧化菌属的相对丰度分别为 1.97% 和 49.70%。在运行中，厌氧氨氧化菌得到了很好地富集，可知厌氧氨氧化为系统脱氮的主要途径。虽然进水中含有少量未能完全消除的溶解氧，这为 AOB 菌属的存活提供了条件，但厌氧氨氧化细菌在反应过程中的大量增殖，使得 AOB 菌在基质争夺上处于劣势。因此，AOB 菌属的相对丰度由 0.27% (第 50 d) 减弱为 0.03% (第 250 d)。而 NOB 菌属在第 250 d 的相对丰度仅为 0.01% 以下，最终被淘汰出本系统。由于反硝化细菌可以在厌氧条件下利用细菌死亡释放的有机物发生反硝化反应，因此反硝化菌属的相对丰度较为稳定，由 0.37% (第 50 d) 增至 0.88% (第 250 d)，仅有小幅增加。这种情况可能是作为一种好氧反硝化细菌如 *Diaphorobacter* 属，可以消耗反应器中残留的溶解氧，从而提升厌氧氨氧化系统的脱氮能力^[27]。

表 3 脱氮相关的微生物群落序列数及相对丰度 (属水平)

菌属	序列数 (相对丰度/%)	
	50 d	250 d
<i>Candidatus Kuenenia</i> (厌氧氨氧化菌属)	1 189 (1.97)	30 012 (49.66)
<i>Candidatus Jettenia</i> (厌氧氨氧化菌属)	1 (<0.01)	21 (0.03)
<i>Candidatus Brocadia</i> (厌氧氨氧化菌属)	1 (<0.01)	1 (<0.01)
<i>Rubrivivax</i> (反硝化菌属)	145 (0.24)	504 (0.73)
<i>Hylemonella</i> (反硝化菌属)	33 (0.05)	59 (0.09)
<i>Diaphorobacter</i> (反硝化菌属)	44 (0.07)	37 (0.05)
<i>Pseudomonas</i> (反硝化菌属)	5 (0.01)	6 (0.01)
<i>Nitrosomonas</i> (AOB 菌属)	161 (0.27)	19 (0.03)
<i>Nitrospira</i> (NOB 菌属)	36 (0.06)	2 (<0.01)

目前研究的厌氧氨氧化菌共有 5 个菌属^[28, 29]，属于浮霉菌门。本系统中浮霉菌门检测到了

Candidatus Kuenenia、*Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Brocadia* 属等。随着系统的负荷提高和

稳定运行, *Candidatus Kuenenia* 属的富集程度最为明显, 其相对丰度由第 50d 的 1.97% 增至 250 d 的 49.66%. 而第 250d 时, *Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Brocadia* 属的相对丰度仅为 0.03% 和 0.01% 以下, 数量极微. 这是由于本实验的 UASB 厌氧氨氧化系统进水中含有大量亚硝酸盐, 而 *Candidatus Brocadia* 属对亚硝酸盐的存在极为敏感, 因此该菌属难以富集成功^[30]. 与 *Candidatus Kuenenia* 属相比, *Candidatus Brocadia* 属对反应基质的亲和力和耐受性都差得多^[31].

在经历了 250 d 的运行过程之后, UASB 厌氧氨氧化系统内生物多样性呈现逐渐减少的现象, 结合门水平和属水平上的群落结构分析, 说明了系统内厌氧氨氧化细菌成功富集, 为系统内的优势群落, 而接种污泥中的硝化细菌和其他微生物均有明显减少, 降低了对系统厌氧氨氧化性能的抑制影响.

3 结论

(1) 以短程硝化反硝化污泥为 UASB 厌氧氨氧化工艺的接种污泥, 以人工配水的方式, 系统在 149 d 成功启动了厌氧氨氧化. 后期阶段通过缩短 HRT 方式提高负荷, 进水总氮容积负荷达到 $4\,000.00\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 接近垃圾渗滤液原水的氮浓度. 总氮容积平均去除速率达到 $3\,885.76\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{d})^{-1}$, 系统氨氮和亚硝酸盐氮的平均去除率均超过 95%. 说明本系统已经可以稳定且长期运行厌氧氨氧化, 在短程硝化反硝化基础上耦合厌氧氨氧化实现垃圾渗滤液深度处理的升级改造工艺具有可行性.

(2) 经过 250 d 的运行之后, 系统中生物多样性逐渐减少, 厌氧氨氧化细菌占据了主要菌群的位置. 在门水平上厌氧氨氧化主要菌群为 Planctomycetes, 其相对丰度达到了 54.94%. 在属水平上 *Candidatus Kuenenia* 为厌氧氨氧化主要菌属, 其相对丰度达到了 49.66%.

参考文献:

- [1] Shalini S S, Joseph K. Nitrogen management in landfill leachate: application of SHARON, ANAMMOX and combined SHARON-ANAMMOX process[J]. Waste Management, 2012, **32**(12): 2385-2400.
- [2] Jokela J P Y, Kettunen R H, Sormunen K M, et al. Biological nitrogen removal from municipal landfill leachate: low-cost nitrification in biofilters and laboratory scale in-situ denitrification[J]. Water Research, 2002, **36**(16): 4079-4087.
- [3] Kartal B, Maalcke W J, de Almeida N M, et al. Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation[J]. Nature, 2011, **479**(7371): 127-130.
- [4] Ali M, Chai L Y, Tang C J, et al. The increasing interest of ANAMMOX research in China: bacteria, process development, and application[J]. BioMed Research International, 2013, **2013**: 134914.
- [5] Wen X, Gong B Z, Zhou J, et al. Efficient simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) system equipped with a real-time dissolved oxygen (DO) intelligent control system and microbial community shifts of different substrate concentrations[J]. Water Research, 2017, **119**: 201-211.
- [6] Azari M, Walter U, Rekers V, et al. More than a decade of experience of landfill leachate treatment with a full-scale anammox plant combining activated sludge and activated carbon biofilm[J]. Chemosphere, 2017, **174**: 117-126.
- [7] Jetten M S M, Cirpus I, Kartal B, et al. 1994-2004: 10 years of research on the anaerobic oxidation of ammonium[J]. Biochemical Society Transactions, 2005, **33**(1): 119-123.
- [8] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, et al. Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitritation and anammox in one SBR[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [9] Ma B, Wang S Y, Cao S B, et al. Biological nitrogen removal from sewage via anammox: recent advances[J]. Bioresource Technology, 2016, **200**: 981-990.
- [10] Wang G, Xu X C, Zhou L, et al. A pilot-scale study on the start-up of partial nitrification-anammox process for anaerobic sludge digester liquor treatment[J]. Bioresource Technology, 2017, **241**: 181-189.
- [11] 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.
- [12] Miao L, Yang G Q, Tao T, et al. Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments - A review[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **235**: 178-185.
- [13] 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. 88-284.
- [14] 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [15] Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, et al. Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [15] 梁俊宇, 周鸿, 赵晴, 等. 垃圾渗滤液部分亚硝化的启动运行及菌群分析[J]. 水处理技术, 2018, **44**(3): 99-103, 108.
- [16] Liang J Y, Zhou H, Zhao Q, et al. Analysis of start-up, operation and microbial community during landfill leachate partial nitritation[J]. Technology of Water Treatment, 2018, **44**(3): 99-103, 108.
- [16] Wang T, Zhang H M, Gao D W, et al. Enrichment of anammox bacteria in seed sludges from different wastewater treating processes and start-up of Anammox process[J]. Desalination, 2011, **271**(1-3): 193-198.
- [17] 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 等. 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5184-5191.
- [17] Wang Y Q, Zhang M, Jiang Y, et al. Start-up and characteristics of the microbial community structure of ANAMMOX[J]. Environmental Science, 2017, **38**(12): 5184-5191.

- [18] 陈胜, 孙德智, 遇光禄. 填充床快速启动厌氧氨氧化反应器及其脱氮性能研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 691-696.
Chen S, Sun D Z, Yu G L. Rapid startup and nitrogen removal characteristic of anaerobic ammonium oxidation reactor in packed bed biofilm reactor with suspended carrier [J]. Environmental Science, 2010, **31**(3): 691-696.
- [19] 黄曦, 张雁秋, 李开奎. 浅谈 ANAMMOX 反应的启动研究[J]. 污染防治技术, 2010, **23**(1): 74-77.
Huang X, Zhang Y Q, Li K L. Studies on the start-up of ANAMMOX [J]. Pollution Control Technology, 2010, **23**(1): 74-77.
- [20] 安芳娇, 赵智超, 黄利, 等. HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4302-4309.
An F J, Zhao Z C, Huang L, et al. Effect of HRT on nitrogen removal using ANAMMOX and heterotrophic denitrification [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4302-4309.
- [21] 魏琛, 陆天友, 钟仁超, 等. HRT 及氮素负荷对厌氧氨氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 749-755.
Wei C, Lu T Y, Zhong R C, et al. Influence of HRT and nitrogen load on an ANAMMOX system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(4): 749-755.
- [22] Ma J X, Wang Z W, Yang Y, et al. Correlating microbial community structure and composition with aeration intensity in submerged membrane bioreactors by 454 high-throughput pyrosequencing [J]. Water Research, 2013, **47**(2): 859-869.
- [23] 王亚宜, 黎力, 马骁, 等. 厌氧氨氧化菌的生物特性及 CANON 厌氧氨氧化工艺[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1362-1374.
Wang Y Y, Li L, Ma X, et al. Bio-characteristics of anammox bacteria and CANON anammox process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(6): 1362-1374.
- [24] Luo J H, Liang H, Yan L J, et al. Microbial community structures in a closed raw water distribution system biofilm as revealed by 454-pyrosequencing analysis and the effect of microbial biofilm communities on raw water quality [J]. Bioresource Technology, 2013, **148**: 189-195.
- [25] Xia Y, Kong Y H, Thomsen T R, et al. Identification and ecophysiological characterization of epiphytic protein-hydrolyzing *Saprospiraceae* ("Candidatus *Epiflobacter*" spp.) in activated sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(7): 2229-2238.
- [26] Lu H J, Chandran K, Stensel D. Microbial ecology of denitrification in biological wastewater treatment [J]. Water Research, 2014, **64**: 237-254.
- [27] 曹雁. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮及微生物特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
Cao Y. Study on performance and microbial characteristics of co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen removal [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [28] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, **6**(4): 320-326.
- [29] Kartal B, van Niftrik L, Keltjens J T, et al. Anammox—growth physiology, cell biology, and metabolism [J]. Advances in Microbial Physiology, 2012, **60**: 211-262.
- [30] Gaul T, Märker S, Kunst S. Start-up of moving bed biofilm reactors for deammonification: the role of hydraulic retention time, alkalinity and oxygen supply [J]. Water Science & Technology, 2003, **52**(7): 127-133.
- [31] 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.

CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)