

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

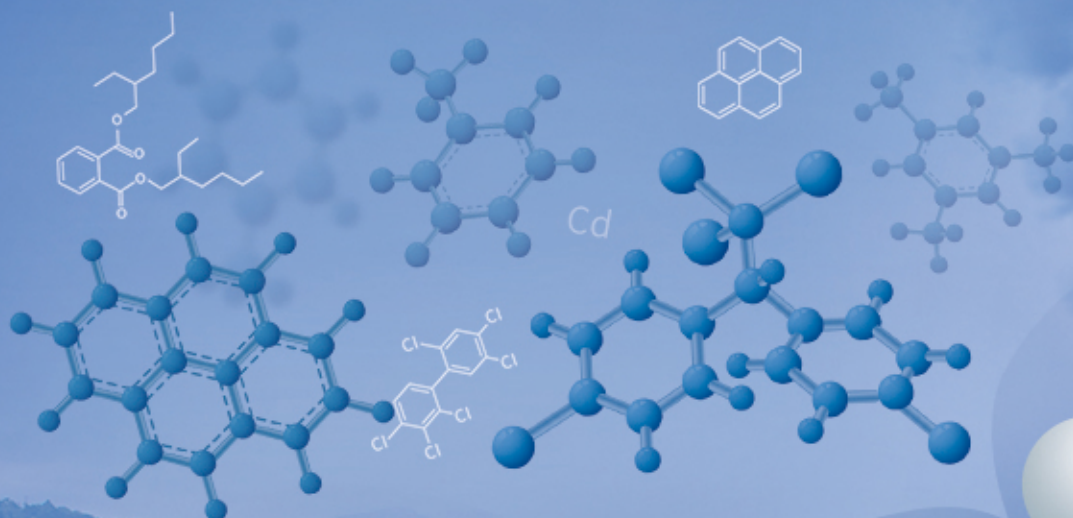
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

PAEs

OCPs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期
Vol.42 No.10

目次

PM _{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用	蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)
汾渭平原 PM _{2.5} 空间分布的地形效应	黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)
华中地区冬季灰霾天气下 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例	李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)
华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性	黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)
成都市春季 O ₃ 污染特征及关键前体物识别	韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)
基于边界观测的长三角某工业区 O ₃ 来源特征	黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)
廊坊开发区 8~9 月 O ₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析	张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)
广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响	曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)
厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应	徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)
北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响	吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖若, 朱晓娟 (4660)
两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响	朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)
燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律	杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)
长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响	王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)
土地利用对太湖入流河道营养盐的影响	连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)
基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征	梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡恒, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)
三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价	任丙南, 耿静 (4717)
升金湖水体优先污染物筛选与风险评价	龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)
天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素	杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)
华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素	张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)
快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)
盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析	王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)
基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度	周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)
硼酸和磷酸对 PMS/Co ²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制	万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 文刚 (4789)
磁性生物炭负载 α-MnO ₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚	李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)
紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制	张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)
铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性	王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)
低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制	李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)
我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价	耿源濂, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝晓, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)
不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较	杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)
部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳	秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)
同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能	周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)
多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用	赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)
柴达木盆地表土重金属污染与来源分析	陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)
快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险	李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)
广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素	刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)
炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害	邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)
海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险	杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)
环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索	苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)
银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估	张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)
施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响	李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)
我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析	吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)
青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)
松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构	王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)
不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征	南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)
稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应	罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)
铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析	曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)
有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响	周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)
水稻产量、稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对长期大气 CO ₂ 浓度升高的响应	于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)
原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响	闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)
中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素	李宇, 周德成, 闫章美 (5037)
室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展	张万众, 张彭义 (5046)
《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)	

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能

周锋¹, 刘勇弟^{1,2,3}, 厉巍^{1,2,3*}

(1. 华东理工大学资源与环境工程学院, 高浓度难降解有机废水处理技术国家工程实验室, 上海 200237; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 国家环境保护化工过程环境风险评价与控制重点实验室, 上海 200237; 3. 上海污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 本研究以低碳氮比废水为基质, 厌氧氨氧化污泥优选普通活性污泥为接种物, 在新型气升式内循环反应器中培育同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥。结果表明, 经过 225 d 的连续运行可培育成熟稳定的颗粒污泥, 其总氮去除率高达 91.4%。相较于絮状污泥, 颗粒污泥中厌氧氨氧化活性显著增加, 并且厌氧氨氧化活性在 4 个脱氮过程中活性最大, 其次是短程硝化, 且短程反硝化比活性是亚硝酸盐还原比活性的 2.1 倍。高通量测序结果表明, 颗粒污泥中短程硝化和厌氧氨氧化的优势菌分别为 *Nitrosomonas* 和 *Candidatus_Brocadia*, 并相较于絮状污泥, 它们的丰度分别增加至 0.70% 和 0.57%。 *Thauera* 可能是颗粒污泥中潜在的短程反硝化优势菌, 其丰度达到 0.26%。RT-qPCR 分析结果表明, 相比接种阶段, 短程硝化的功能基因 *amoA* 和 *hao* 转录水平分别增加了 3.5 和 1.5 倍, 厌氧氨氧化功能基因 *hzsA* 转录水平增加了 2.1 倍, 短程反硝化过程中 *napA* 和 *narG* 转录水平增加的倍数之和是 *nirK* 和 *nirS* 的倍数之和的 4.8 倍。本研究结果将为处理低碳氮比废水提供新的思路。

关键词: 颗粒污泥; 短程硝化; 厌氧氨氧化; 短程反硝化; 微生物群落结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4864-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202103029

Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge

ZHOU Feng¹, LIU Yong-di^{1,2,3}, LI Wei^{1,2,3*}

(1. National Engineering Laboratory for Industrial Wastewater Treatment, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Risk Assessment and Control on Chemical Process, School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: We cultivated simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX), and denitrification granular sludge in a novel air-lift internal circulation reactor using low C/N wastewater as the substrate and ANAMMOX sludge matched with ordinary activated sludge as the inoculum. The results showed that the mature and stable granular sludge could be cultivated after 225 d of continuous operation, and the total nitrogen removal rate was as high as 91.4%. Compared with flocculated sludge, the ANAMMOX activity in the granular sludge increased significantly, and the ANAMMOX activity was highest among the four nitrogen removal processes followed by partial nitrification, and the specific denitrification activity was 2.1-times higher than the specific nitrite reduction activity. High-throughput sequencing results showed that the dominant bacteria in partial nitrification and ANAMMOX were *Nitrosomonas* and *Candidatus_Brocadia*, respectively, compared to flocculated sludge, with abundances increasing to 0.70% and 0.57%, respectively. *Thauera* may also be the potential dominant bacteria for denitrification, with an abundance of up to 0.26%. RT-qPCR analysis showed that compared to the inoculation stage, the transcript levels of the *amoA* and *hao* genes for partial nitrification increased 3.5- and 1.5-fold, respectively, and the transcript levels of the *hzsA* gene for ANAMMOX increased 2.1-fold. During denitrification, the overall abundance of *napA* and *narG* transcript levels was 4.8-times higher than that of *nirK* and *nirS*. The results of this study provide new insights for the treatment of low C/N wastewater.

Key words: granular sludge; partial nitrification; ANAMMOX; denitrification; structure of microbial community

开发结构紧凑, 占地面积小的高效生物反应器是未来污水处理领域的重要研究方向^[1]。同普通絮体污泥相比, 颗粒污泥具有密度大、强度高和沉降性突出等优点^[2,3]。这使得基于颗粒污泥的反应器可保有较高的生物量, 因而能够承受较高浓度的污染物和有毒物质的冲击, 同时能够使水处理构筑物具有紧凑的结构, 较小的体积和占地面积^[4,5]。因此, 基于颗粒污泥的废水生物处理技术一直是环境工程水处理领域的研究热点。

自 20 世纪 70 年代, 厌氧颗粒化技术已经在许

多污水处理厂中应用, 并已成功证明其去除有机物的可行性和高效性^[6]。基于序批式反应器技术的发展, 为好氧脱氮颗粒污泥的研发带来革新动力。大量研究证明, 好氧脱氮颗粒污泥能够实现同时降解有机底物、营养物和磷^[7]。厌氧氨氧化 (anaerobic

收稿日期: 2021-03-04; 修订日期: 2021-03-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0408202); 上海市科学技术委员会启明星计划项目 (20QC1400500); 上海市教育发展基金会“晨光计划”项目 (18CG34)

作者简介: 周锋 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物脱氮技术, E-mail: zf_zheng@163.com

* 通信作者, E-mail: wei_li@ecust.edu.cn

ammonium oxidizing, ANAMMOX) 的发现刺激了第 3 种重要的颗粒污泥技术的发展. ANAMMOX 是以氨为电子供体、亚硝酸盐为电子受体产生氮气的微生物反应^[8]. 以该反应为基础的 ANAMMOX 工艺是一种崭新的废水生物脱氮工艺, 可同时去除氨和亚硝酸两种氮素污染物^[9]. 有研究发现 ANAMMOX 颗粒污泥的 UASB 反应器中, 脱氮负荷可达到 $77 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[5]. 另外, 该技术由于其具有能耗低、无需外加有机碳源、污泥产量低等优势被誉为最具前景的污水处理工艺^[10]. 然而, 工业废水往往具有高浓度氨氮 ($200 \sim 5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[11] 会使 ANAMMOX 过程的硝酸盐副产物浓度过高, 占进水总无机氮 10%^[12], 无法满足总氮的纳管标准 ($70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 因此, 对于具有低碳高氮(氨氮)特征的工业废水完全脱氮的要求, 单一 ANAMMOX 工艺往往无法满足废水处理总氮达标的要求, 它不仅依赖亚硝氮供应源且会产生硝氮副产物. 因此, 研发配套工艺是实现 ANAMMOX 工艺应用的必由之路.

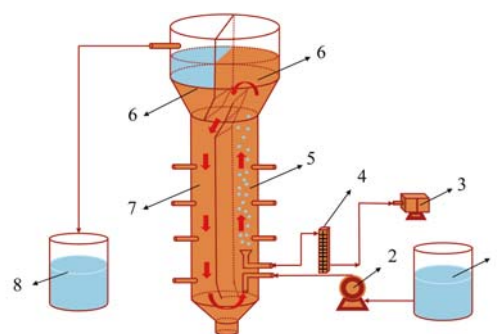
短程硝化-厌氧氨氧化工艺和短程反硝化-厌氧氨氧化工艺是两种基于 ANAMMOX 典型的脱氮工艺, 但它们仍存在着硝态氮副产物导致总氮超标和工艺流程复杂等问题^[12~14]. Li 等^[15] 在 2020 年首次证明了在单个反应器中实现短程硝化-厌氧氨氧化耦合短程反硝化-厌氧氨氧化工艺的可行性. 但其在序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)中运行仍存在自动化控制要求高以及操作流程复杂等问题. 因此, 本研究在连续流态下, 以低碳氮比废水为基质, 厌氧氨氧化污泥优选普通活性污泥为接种物, 在新型气升式内循环反应器中培育同步短程硝化(提供亚硝氮)、短程反硝化(消除硝氮)和厌氧氨氧化这 3 种过程的颗粒污泥, 并解析其污泥特性及微生物群落结构, 以期对颗粒污泥技术处理低碳氮比废水提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验装置和运行条件

本实验装置是由聚乙烯复合材料制成的新型气升式内循环生物反应器(自主研发), 有效体积 11 L (高度为 1 m, 直径为 0.13 m), 其装置如图 1 所示. 通过蠕动泵连续进水, 通过曝气来提供溶解氧(dissolved oxygen, DO)和带动基质向上运动, 其中废水由微好氧区进入, 经上部的沉淀区再到限氧区, 反应液自循环, 最后从上部的沉淀区出水.

该反应器接种污泥为 200 mL 厌氧氨氧化污泥(本实验室稳定运行 ANAMMOX 反应器^[16])和 1 000 mL 活性污泥(长桥污水处理厂)的混合污泥(图



1. 进水桶; 2. 进水泵; 3. 空气泵; 4. 气体流量计;
5. 微好氧区; 6. 沉淀区; 7. 限氧区; 8. 出水桶
图 1 新型气升式内循环生物反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the novel air-lift internal circulation reactor

2). 进水采用模拟废水, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、COD(醋酸钠)和 KHCO_3 浓度分别维持在 100 、 300 和 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此外其他的矿物盐培养基和适量微量元素配方见文献^[17]. 污泥浓度大约为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度控制为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, 进水 pH 为 $7.0 \sim 8.0$, 水力停留时间(HRT)为 6.6 h , 微好氧区和限氧区的 DO 分别在 $0.5 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此外, 反应器运行分为两个阶段, 阶段 I 为污泥驯化阶段($1 \sim 109 \text{ d}$)和阶段 II 为颗粒成型阶段($110 \sim 245 \text{ d}$), 其对应两个阶段的曝气强度分别在 $0.2 \sim 0.9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1.0 \sim 1.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. 定期采集进出水, 测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 COD 浓度. 使用注射器采集混合液样品, 并立即通过一次性 Millipore 过滤膜(孔径为 $0.22 \mu\text{m}$)过滤, 其测定方式依照标准方法^[18].



图 2 接种的混合污泥形态

Fig. 2 Morphology of the inoculated sludge

1.2 污泥形貌特性和比活性实验

污泥的粒径采用马尔文粒度测定仪器(Malvern 3000)测定. 污泥的形态采用 Hitachi SU-8010 型扫描电镜观察. 为了获得不同阶段的污泥脱氮速率, 对阶段 I 中絮状污泥(第 65 d)和阶段 II 中的颗粒污泥(第 225 d)做比活性实验. 分别测定两个阶段中的短程硝化比活性(SAOA)、亚硝酸盐氧化比活性(SNOA)、厌氧氨氧化比活性(SAA)、短程反硝化

比活性(SDAA)和亚硝酸盐还原比活性(SNRA),其方法见文献[19,20].

1.3 微生物分析

使用 FastDNA® SPIN 试剂盒(MP Biomedicals, 美国)和 RNAiso Plus 试剂盒(Takara, 中国)分别从污泥样品中提取 DNA 和 RNA. 然后分别使用 QuantiFluor™-ST 荧光仪(Promega, 美国)和 Quawell Q3000 紫外分光光度计(Quawell, 美国)评估提取的总 DNA 和 RNA 的质量和数量. 纯化的总 RNA 用于 cDNA 合成, 并使用 PrimeScript™ RT Master Mix

(Takara, 中国)进行合成. 表 1 列出了用于扩增 16S rRNA 基因和脱氮功能基因的引物. 所有 PCR 反应均在 10 μ L 反应混合物中进行, 其中包括 5 μ L 的 2 $\times$ TB Green Premix Ex Taq II (Tli RNaseH Plus), 0.4 μ L 的每种引物, 0.2 μ L 的 50 $\times$ ROX 参考染料, 1 μ L 的模板 DNA 和 3 μ L 的蒸馏水. 循环参数如下: 95 $^{\circ}$ C 变性 3 min, 95 $^{\circ}$ C 变性 20 s, 55 $^{\circ}$ C 变性 30 s, 72 $^{\circ}$ C 变性 30 s, 循环 40 次. 将 PCR 扩增子发送至上海美吉生物医药科技有限公司(中国, 上海)进行 Illumina 高通量测序和 QIIME 分析^[21].

表 1 引物的寡核苷酸序列

Table 1 Oligonucleotide sequences of the primers

基因	引物名	序列(5'-3')	文献
16S	338F; 806R	ACTCCTACGGGAGGCAGCA; GGACTACHVGGGTWTCTAAT	[22]
<i>amoA</i>	<i>amoA</i> Fq; <i>amoA</i> Rq	GGACTTCACGCTGTATCTG; GTGCCTTCTACAACGATTGG	[22]
<i>hao</i>	HAO1Fq; HAO1Rq	TGAGCCAGTCCAACGTGCAT; AAGGCAACAACGCTGCCTCA	[22]
<i>nxrB</i>	<i>nxrB</i> -F; <i>nxrB</i> -R	TACATGTGTGGAACA; CGGTTCTGGTCRATCA	[22]
<i>hzsA</i>	<i>hzsA</i> 1597F; <i>hzsA</i> 1857R	WTYGGKTATCARTATGTAG; AAABGGYGAATCATARTGGC	[23]
<i>napA</i>	<i>napA</i> 1; <i>napA</i> 2	TCTGCACCATGGGCTTCAACCA; ACGACGACCGCCAGCGCAG	[22]
<i>narG</i>	<i>narG</i> 1960m2f; <i>narG</i> 2050m2r	TAYGTSGGGCAGGARAACCTG; CGTAGAAGAAGCTGTGCTGTT	[22]
<i>nirS</i>	<i>nirS</i> sh2F; <i>nirS</i> sh4R	ACCGCCGCCAACAACCTCCAACA; CCGCCCTGGCCCTTGAGC	[22]
<i>nirK</i>	<i>nirK</i> 876; <i>nirK</i> 1040	ATYGGCGGVAYGCCGA; GCCTCGATCAGTTRTGGTT	[22]

2 结果与讨论

2.1 颗粒污泥培育过程

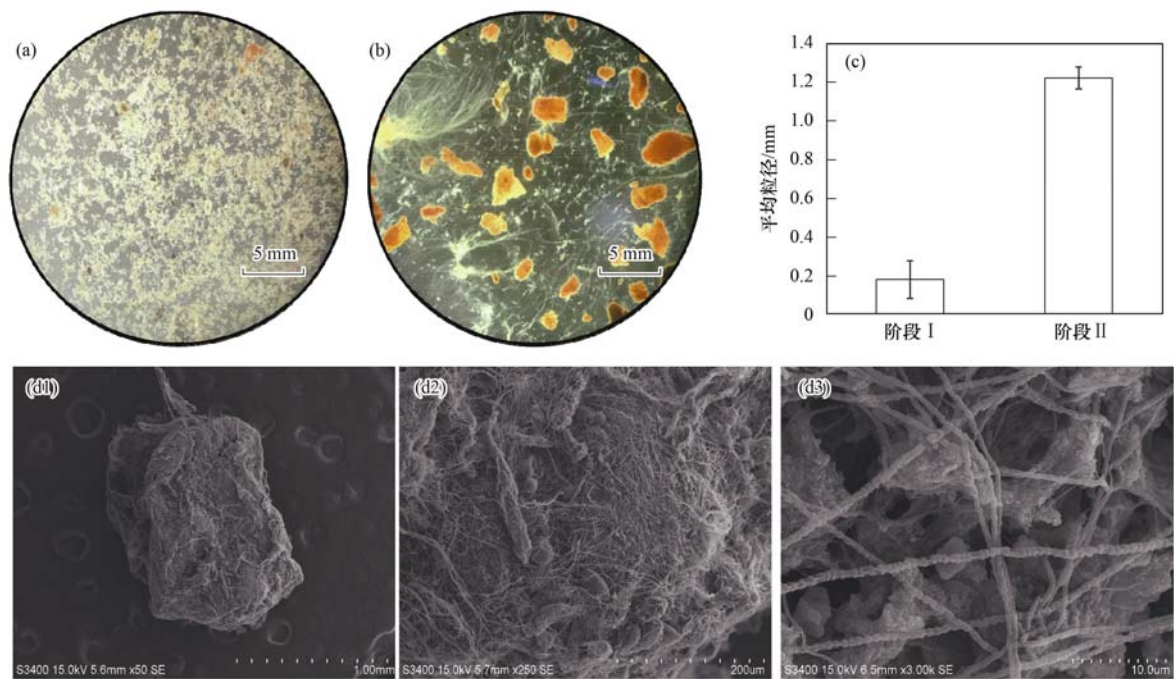
本文采用絮状普通活性混合厌氧氨氧化污泥作为接种物(图 2), 进行驯化培育历经两个阶段, 阶段 I 为驯化阶段(1 ~ 109 d)和阶段 II 为稳定阶段(110 ~ 245 d). 采用光学显微镜和粒径分析仪观察到了阶段 I (第 65 d)和阶段 II (第 225 d)的污泥样品的颗粒污泥形态, 结果如图 3 所示. 阶段 I 污泥呈现絮体状态[图 3(a)], 通过 160 d 的运行培育后, 可观察到污泥表面存在丝状物并形成轮廓清晰的成熟颗粒[图 3(b)]. 同时阶段 I 中污泥的平均粒径为 0.18 mm, 阶段 II 污泥的平均粒径高达 1.22 mm, 已经远远大于 0.20 mm[图 3(c)], 表明此阶段已形成颗粒污泥^[24]. 采用扫描电镜(SEM)进一步地观察阶段 II 的污泥形貌, 发现颗粒污泥表面结构致密[图 3(d1)], 且丝状细菌紧密包裹在颗粒表面[图 3(d2)], 并且增加放大倍率后可观察到颗粒污泥出现了形似火山口状的微生物[图 3(d3)], 该形貌被认为是厌氧氨氧化细菌特有的特征^[25, 26]. 同时颗粒表面有大量缠结的丝状菌, 其可能在颗粒结构中起骨架作用^[27]. 有研究发现丝状菌的缠绕可以促进颗粒污泥的形成^[28]. 此外, 合理的曝气强度、好氧缺氧交替运行模式和反应器合理的高径比对颗粒污泥的形成有着重要的意义. He 等^[29]的研究发现, 在曝

气强度为 0.9 ~ 1.5 L $\cdot$ min⁻¹的环境下是利于好氧颗粒污泥的形成. 李冬等^[30]采用缺氧/好氧交替连续流运行模式, 好氧颗粒污泥可实现稳定运行, 并且李冬等^[31]的研究中发现当反应器高径比从 3:1 增加至 6:1 时, 将更有利于加速颗粒污泥形成以及增大其粒径. 而本研究在曝气强度为 1.0 ~ 1.1 L $\cdot$ min⁻¹时, 观察到颗粒污泥的形成, 同时新型反应器具备了微好氧(DO: 1.0 mg $\cdot$ L⁻¹)和限氧(DO: 0.5 mg $\cdot$ L⁻¹)交替运行的优势, 且其高径比更是高达 8:1. 因而上述条件和措施均成为本研究能够实现成功培育颗粒污泥的重要措施.

通过反应器效能可发现, 在絮状污泥的阶段 I 中, 其出水的平均 TN 高达 48.5 mg $\cdot$ L⁻¹, 而在颗粒成型的阶段 II 出水 TN 浓度低至 8.6 mg $\cdot$ L⁻¹, 该出水浓度已满足当前中国最严格的污水综合排放标准(DB31/199-2018), 且出水 COD 也始终小于 1.0 mg $\cdot$ L⁻¹(表 2). 综上所述, 在长达 245 d 的连续流态运行下, 本文首次在单个反应器中成功培育出具备高效同步脱氮除碳的颗粒污泥且呈现较高的去除效率, 其 TN 去除率高达 91.6% 且 COD 去除率约为 100%, 同时相较于其他不同类型反应器的效能, 本文所培育的颗粒污泥脱氮除碳效能是处于领先地位的(表 3).

2.2 污泥比活性分析

为了进一步探析该反应器中颗粒污泥的脱氮速



(a) 显微镜观察阶段 I 颗粒的大小; (b) 显微镜观察阶段 II 颗粒的大小;
(c) 不同阶段的污泥平均粒径; (d1) ~ (d3) 阶段 II 成熟颗粒的 SEM 图像

图 3 污泥的形貌特性

Fig. 3 Profiles of sludge indices

表 2 新型反应器的运行性能

Table 2 Performance indicators of the novel reactor

时间/周	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹		出水NO ₂ ⁻ -N	出水NO ₃ ⁻ -N	COD/mg·L ⁻¹		TN 去除率/%
	进水	出水	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	进水	出水	
2	93.6	66.3	9.3	3.8	300.0	<1.0	15.3
4	97.8	48.3	10.5	21.9	300.0	<1.0	17.6
6	92.5	54.6	9.2	8.0	300.0	<1.0	22.4
8	95.4	50.3	10.9	7.1	300.0	<1.0	28.4
10	98.5	42.2	17.1	6.8	300.0	<1.0	32.9
12	98.9	42.5	4.7	17.3	300.0	<1.0	35.3
14	98.2	19.6	4.3	19.2	300.0	<1.0	56.0
16	97.7	7.7	8.6	10.2	300.0	<1.0	72.6
18	98.3	5.8	5.1	0.6	300.0	<1.0	88.2
20	100.4	6.5	3.5	0.3	300.0	<1.0	90.0
22	96.7	6.5	2.7	1.0	300.0	<1.0	89.2
24	96.1	8.3	0.9	0.3	300.0	<1.0	90.4
26	96.5	5.7	0.5	0.1	300.0	<1.0	93.4
28	97.7	7.9	1.1	0.1	300.0	<1.0	90.6
30	99.0	2.2	0.3	0.2	300.0	<1.0	97.3
32	99.0	7.1	0.6	0.1	300.0	<1.0	92.6
34	98.6	4.6	0.1	0.4	300.0	<1.0	94.8

表 3 比较不同反应器的脱氮除碳性能

Table 3 Comparisons of different reactors in nitrogen removal performance and COD removal performance

序号	生物类型	反应器 ¹⁾	TN 去除率/%	COD 去除率/%	文献
1	絮状污泥	ALR + CSTR	81.3	—	[32]
2	絮状污泥	SBR	86.1	77.0	[33]
3	生物膜	MBBR + MBBR	82.0	>82.0	[34]
4	絮状污泥 + 生物膜	SBR + SBR	91.2	>40.0	[35]
5	颗粒污泥	ALR	71.8	—	[36]
6	颗粒污泥	ALMR	91.4	≈100	本研究

1) ALR (airlift reactor) 表示气升式反应器, CSTR (continuous stirred tank reactor) 表示完全混合连续式反应器, MBBR (moving bed biofilm reactor) 表示移动床生物膜反应器, ALMR (airlift inter-circulation modified reactor) 表示新型气升式自循环反应器

率,分别对阶段 I 和阶段 II 中的污泥进行了比活性实验,其结果如图 4 所示. 结果发现阶段 II 的颗粒污泥的 SAA 远远大于阶段 I 的絮状污泥,并且阶段 II 的 SAA 是阶段 I 的 3.8 倍,同时阶段 II 中 SAA 也是显著大于阶段 I 的 SAA. 有研究表明,厌氧氨氧化功能微生物是倾向于自团聚,易形成颗粒污泥而不是絮状污泥^[37]. 而颗粒污泥不仅可以承受高负荷,而且可以帮助积累和保持高生物量浓度^[1]. 因此,颗粒污泥的成功培育将有助于功能菌的持留,并保持其稳定的脱氮性能. 同时,通过阶段 II 颗粒污泥的比活性结果分析,发现其厌氧氨氧化活性在 4 个主要脱氮过程中最大,其次为短程硝化,亚硝酸盐还原的活性最小,且短程反硝化比活性是亚硝酸盐还原比活性的 2.1 倍(图 4). 上述结果表明该反应器培育的污泥可能是以短程硝化和厌氧氨氧化的协同作用为主,短程反硝化作用为辅的颗粒污泥.

2.3 微生物群落分析

为了探析在颗粒污泥培育过程中微生物群落组成及其变化情况,本研究对 3 组污泥样品[接种;阶段 I (65 d); 阶段 II (225 d)]进行了 16S rRNA 基因高通量测序及分析,其结果如表 4. 在属水平上发现发硫菌(*Thiothrix*)是该反应器中主要的优势菌,其丰度高达 41.11%,而该种微生物鉴定为丝状菌,并有研究报道其可能在颗粒污泥中起骨架作用,且在自凝聚和形态保持方面起到重要作用^[38,39]. 该结

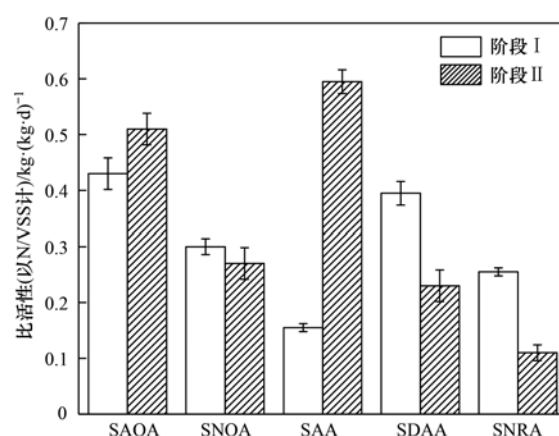


图 4 在不同阶段的短程硝化比活性(SAOA)、亚硝酸盐氧化比活性(SNOA)、厌氧氨氧化比活性(SAA)、短程反硝化比活性(SDAA)和亚硝酸盐还原比活性(SNRA)

Fig. 4 Specific activities of partial nitrification, nitrite oxidation, ANAMMOX, denitrification, and nitrite reduction during different stages

果与观察到的污泥形貌特性结果一致. 此外,对颗粒污泥中的相关脱氮微生物分析发现,对于短程硝化,亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas*)被鉴定为主要的氨氧化细菌,并相较接种物(0.13%),其在阶段 II 中的丰度增加至 0.70%. 对于厌氧氨氧化,结果表明 *Candidatus_Brocadia* 是反应器中唯一被鉴定的厌氧氨氧化菌,其原因可能是在有机物存在的情况下, *Candidatus_Brocadia* 比其他类型的厌氧氨氧化菌更加具有竞争力^[40,41],且相较接种物(0.01%)和阶段 I (0.002%),其在阶段 II 中的丰度增加至 0.59%.

表 4 反应器运行过程中菌群结构组成(属水平)

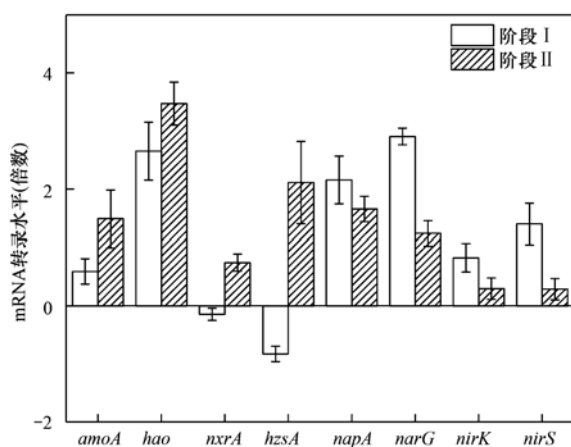
Table 4 Bacterial abundance in the reactor(genus level)

门	属	丰度/%		
		接种物	阶段 I (65 d)	阶段 II (225 d)
γ -Proteobacteria	<i>Thiothrix</i>	<0.001	<0.001	41.11
γ -Proteobacteria	<i>Pseudomonas</i>	39.01	3.58	2.09
β -Proteobacteria	<i>Denitratisoma</i>	0.002	1.30	4.70
β -Proteobacteria	<i>Thauera</i>	0.85	5.82	0.26
β -Proteobacteria	<i>Nitrosomonas</i>	0.13	2.06	0.70
β -Proteobacteria	<i>Candidatus_Nitrotoga</i>	0.00	0.41	0.91
γ -Proteobacteria	<i>Acinetobacter</i>	0.01	0.33	0.53
β -Proteobacteria	<i>Comamonas</i>	0.57	0.27	0.05
α -Proteobacteria	<i>Paracoccus</i>	0.002	0.00	0.37
Planctomycetes	<i>Candidatus_Brocadia</i>	0.01	0.002	0.59
Planctomycetes	<i>SM1A02</i>	6.86	0.02	0.19
Planctomycetes	<i>norank_c_OM190</i>	0.22	1.72	0.25
Chloroflexi	<i>OLB15</i>	2.92	0.02	0.002
Chloroflexi	<i>OLB13</i>	0.11	0.54	0.40
Chloroflexi	<i>norank_f_Anaerolineaceae</i>	0.40	0.19	0.16
Bacteroidetes	<i>OLB8</i>	0.00	26.29	0.76
Bacteroidetes	<i>norank_o_OPB56</i>	0.12	0.82	3.81
Bacteroidetes	<i>norank_f_Saprospiraceae</i>	0.01	0.98	1.11
Bacteroidetes	<i>norank_f_Chitinophagaceae</i>	0.003	0.29	2.00
Bacteroidetes	<i>Lewinella</i>	0.00	0.08	1.08
Bacteroidetes	<i>Flavobacterium</i>	0.00	0.54	0.17
Nitrospirae	<i>Nitrospira</i>	0.37	0.01	0.04

对于短程反硝化,有研究发现陶厄氏菌(*Thauera*)可实现 NO_3^- -N还原为 NO_2^- -N的功能^[42],并在阶段Ⅱ中的丰度达到0.26%,因而其可能是颗粒污泥中潜在的短程反硝化菌,并在其中起到为厌氧氨氧化提供 NO_2^- -N从而提高脱氮效率的作用。此外,假单胞菌(*Pseudomonas*)和*Denitratisoma*是主要的反硝化菌^[43,44],并在颗粒污泥中的丰度分别高达2.09%和4.70%,其值显著大于*Thauera*的丰度值,这与比活性中短程反硝化活性大于亚硝酸盐还原活性的结果不一致,因而该微生物可能在颗粒污泥中实现短程反硝化功能的表达活性更强,因此,仍需要进一步对颗粒污泥中的短程反硝化功能基因转录水平进行研究。

2.4 功能基因转录分析

为了进一步探究颗粒污泥形成后的功能基因转录水平的变化情况,本文采用荧光定量PCR(RT-qPCR)技术对其进行分析(图5),发现相较于接种阶段时,在阶段Ⅱ中的短程硝化的功能基因*amoA*和*hao*转录水平分别增加了3.5和1.5倍,厌氧氨氧化功能基因*hzsA*转录水平增加了2.1倍。此外,短程反硝化的功能基因*napA*和*narG*转录水平相较于接种阶段时增加了1.7和1.2倍,而亚硝酸盐还原基因*nirK*和*nirS*转录水平仅分别增加了0.3和0.3倍,且*napA*和*narG*的增加倍数之和是*nirK*和*nirS*之和的4.8倍。反观,在阶段Ⅰ中厌氧氨氧化功能基因*hzsA*转录水平相比接种阶段时减少了0.8倍。因此,该结果也进一步验证,阶段Ⅱ中的颗粒污泥能实现同步短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化的完全脱氮功能。



其中 mRNA 转录水平是指相比接种阶段时的转录水平

图5 功能基因在阶段Ⅰ和阶段Ⅱ中的 mRNA 转录水平

Fig. 5 The mRNA transcription levels of functional genes at stage I and II

3 结论

(1)新型反应器在连续流态下运行245 d,以厌氧氨氧化污泥优选普通活性污泥为接种物,运行条

件为微好氧区和限氧区的DO浓度分别控制为1.0和0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和HRT为6.6 h,本研究成功培育了同步短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化高效脱氮除碳的颗粒污泥,其TN去除率高达91.4%且COD的去除率约100%。

(2)采用16S rRNA高通量测序对微生物多样性分析,发现*Nitrosomonas*、*Candidatus_Brocadia*和*Thauera*可能分别是短程硝化、厌氧氨氧化和短程反硝化的优势菌,其丰度分别为0.70%、0.59%和0.26%。

(3)采用RT-qPCR分析表明,发现相比接种阶段时,短程硝化功能基因*amoA*和*hao*转录水平分别增加了3.5和1.5倍,厌氧氨氧化功能基因*hzsA*转录水平增加了2.1倍,短程反硝化过程中*napA*和*narG*转录水平增加的倍数之和是*nirK*和*nirS*的倍数之和的4.8倍。

参考文献:

- [1] Baeten J E, Batstone D J, Schraa O J, et al. Modelling anaerobic, aerobic and partial nitrification-anammox granular sludge reactors-A review[J]. Water Research, 2019, **149**: 322-341.
- [2] Winkler M K H, Meunier C, Henriot O, et al. An integrative review of granular sludge for the biological removal of nutrients and recalcitrant organic matter from wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **336**: 489-502.
- [3] Wang Z Y, Shan X Y, Li W, et al. Robustness of ANAMMOX granule sludge bed reactor: effect and mechanism of organic matter interference[J]. Ecological Engineering, 2016, **91**: 131-138.
- [4] Lotti T, Kleerebezem R, Hu Z, et al. Simultaneous partial nitrification and anammox at low temperature with granular sludge[J]. Water Research, 2014, **66**: 111-121.
- [5] 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.
- [6] Lettinga G, Van Velsen A F M, Hobma S W, et al. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment[J]. Biotechnology and Bioengineering, 1980, **22**(4): 699-734.
- [7] Corsino S F, Capodici M, Morici C, et al. Simultaneous nitrification-denitrification for the treatment of high-strength nitrogen in hypersaline wastewater by aerobic granular sludge[J]. Water Research, 2016, **88**: 329-336.
- [8] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application[J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, **6**(4): 320-326.
- [9] Kartal B, Kuenen J G, Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. Science, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [10] Li W, Zhuang J L, Zhou Y Y, et al. Metagenomics reveals microbial community differences lead to differential nitrate production in anammox reactors with differing nitrogen loading rates[J]. Water Research, 2020, **169**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115279.
- [11] Rongwong W, Goh K. Resource recovery from industrial wastewaters by hydrophobic membrane contactors: a review[J].

- Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, **8**(5), doi: 10.1016/j.jece.2020.104242.
- [12] Arora A S, Nawaz A, Qyyum M A, *et al.* Energy saving anammox technology-based nitrogen removal and bioenergy recovery from wastewater: Inhibition mechanisms, state-of-the-art control strategies, and prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, **135**, doi: 10.1016/j.rser.2020.110126.
- [13] Li W, Li H, Liu Y D, *et al.* Salinity-aided selection of progressive onset denitrifiers as a means of providing nitrite for anammox[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(18): 10665-10672.
- [14] Cao Y S, Van Loosdrecht M C M, Daigger G T. Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(4): 1365-1383.
- [15] Li J L, Peng Y Z, Zhang L, *et al.* Improving efficiency and stability of anammox through sequentially coupling nitrification and denitrification in a single-stage bioreactor [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(17): 10859-10867.
- [16] Zhuang J, Zhou Y Y, Liu Y D, *et al.* Flocs are the main source of nitrous oxide in a high-rate anammox granular sludge reactor: insights from metagenomics and fed-batch experiments[J]. Water Research, 2020, **186**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116321.
- [17] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [18] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.) [M]. Washington: American Public Health Association, 2005.
- [19] Chen R, Takemura Y, Liu Y, *et al.* Using partial nitrification and anammox to remove nitrogen from low-strength wastewater by co-immobilizing biofilm inside a moving bed bioreactor[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2019, **7**(1): 1353-1361.
- [20] Li W, Zheng P, Wu Y L, *et al.* Sludge bulking in a high-rate denitrifying automatic circulation (DAC) reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **240**: 387-393.
- [21] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [22] Wang J P, Liu Y D, Meng F G, *et al.* The short-and long-term effects of formic acid on rapid nitrification start-up [J]. Environment International, 2020, **135**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105350.
- [23] Harhangi H R, Le Roy M, Van Alen T, *et al.* Hydrazine synthase, a unique phylomarker with which to study the presence and biodiversity of anammox bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(3): 752-758.
- [24] Zhu G B, Peng Y Z, Li B K, *et al.* Biological removal of nitrogen from wastewater [A]. In: Whitacre D M (Ed.). Reviews of Environmental Contamination and Toxicology [M]. New York, NY: Springer, 2008.
- [25] Chen G H, Li J, Tabassum S, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge immobilized by waterborne polyurethane and its nitrogen removal performance-a lab scale study[J]. RSC Advances, 2015, **5**(32): 25372-25381.
- [26] Zheng Z M, Li J, Ma J, *et al.* Nitrogen removal via simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process under high DO condition[J]. Biodegradation, 2016, **27**(4-6): 195-208.
- [27] Sezgin M, Jenkins D, Parker D S. A unified theory of filamentous activated sludge bulking [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1978, **50**(2): 362-381.
- [28] Mishima K, Nakamura M. Self-immobilization of aerobic activated sludge-a pilot study of the aerobic upflow sludge blanket process in municipal sewage treatment[J]. Water Science and Technology, 1991, **23**(4-6): 981-990.
- [29] He Q L, Chen L, Zhang S J, *et al.* Hydrodynamic shear force shaped the microbial community and function in the aerobic granular sequencing batch reactors for low carbon to nitrogen (C/N) municipal wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2019, **271**: 48-58.
- [30] 李冬, 杨敬畏, 李悦, 等. 缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2385-2395.
- Li D, Yang J W, Li Y, *et al.* Aerobic granular sludge operation and nutrient removal mechanism from domestic sewage in an anaerobic/aerobic alternating continuous flow system [J]. Environmental Science, 2021, **42**(5): 2385-2395.
- [31] 李冬, 王樱桥, 张杰, 等. 高径比对生活污水好氧颗粒污泥系统的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 141-148.
- Li D, Wang Y Q, Zhang J, *et al.* The impact of height/diameter ratio on aerobic granular sludge (AGS) system in domestic sewage [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 141-148.
- [32] Liu W R, Yang D H, Shen Y L, *et al.* Two-stage partial nitrification-anammox process for high-rate mainstream deammonification[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, **102**(18): 8079-8091.
- [33] Ding S Z, Bao P, Wang B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **339**: 180-188.
- [34] Ma B, Qian W T, Yuan C S, *et al.* Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(15): 8405-8413.
- [35] Ji J T, Peng Y Z, Li X Y, *et al.* A novel partial nitrification-synchronous anammox and endogenous partial denitrification (PN-SAEPD) process for advanced nitrogen removal from municipal wastewater at ambient temperatures[J]. Water Research, 2020, **175**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115690.
- [36] Chen R, Ji J Y, Chen Y J, *et al.* Successful operation performance and syntrophic micro-granule in partial nitrification and anammox reactor treating low-strength ammonia wastewater [J]. Water Research, 2019, **155**: 288-299.
- [37] Wang Y Y, Xie H C, Wang D L, *et al.* Insight into the response of anammox granule rheological intensity and size evolution to decreasing temperature and influent substrate concentration [J]. Water Research, 2019, **162**: 258-268.
- [38] 季斌, 陈威, 樊杰, 等. 好氧颗粒污泥的微生物研究进展[J]. 科学通报, 2017, **62**(23): 2639-2648.
- Ji B, Chen W, Fan J, *et al.* Research progress on microbes in aerobic granular sludge[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, **62**(23): 2639-2648.
- [39] Figueroa M, Val Del Río A, Campos J L, *et al.* Filamentous bacteria existence in aerobic granular reactors [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2015, **38**(5): 841-851.
- [40] Jin P F, Li B K, Mu D Y, *et al.* High-efficient nitrogen removal from municipal wastewater via two-stage nitrification/anammox process: long-term stability assessment and mechanism analysis

- [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **271**: 150-158.
- [41] Jenni S, Vlaeminck S E, Morgenroth E, *et al.* Successful application of nitrification/anammox to wastewater with elevated organic carbon to ammonia ratios[J]. *Water Research*, 2014, **49**: 316-326.
- [42] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Mechanisms and microbial structure of partial denitrification with high nitrite accumulation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(4): 2011-2021.
- [43] 侯爱月, 李军, 卞伟, 等. 不同短程硝化系统中微生物群落结构的对比分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 428-436.
- Hou A Y, Li J, Bian W, *et al.* Analysis of microbial community structure in different partial nitrification system [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 428-436.
- [44] 杨娅男, 李彦澄, 李江, 等. 基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1787-1793.
- Yang Y N, Li Y C, Li J, *et al.* Construction and mechanism of methanotroph-based ultimate denitrification system for tailwater of urban sewage plants[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1787-1793.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System: Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)