

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水

吕恺^{1,2}, 邵贤明^{1,2}, 王康舟^{1,2}, 姚雪薇^{1,2}, 彭党聪^{1*}, 韩芸¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 在常温条件下, 采用一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低氨氮浓度废水. 结果表明, 在进水氨氮浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解氧为 $0.4 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 负荷(以 N 计)为 $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 去除率可达 $(51.58 \pm 6.80)\%$, 实现了一段式亚硝化厌氧氨氧化的稳定运行. AOB、ANAMMOX 和 NOB 活性分别稳定在 (2253.21 ± 502.10) 、 (4847.46 ± 332.89) 和 $(1455.17 \pm 473.83) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, AOB 和 ANAMMOX 菌之间形成了良好的协同作用. 高通量结果显示, *Ca. Brocadia* (ANAMMOX)、*Nitrosomonas* (AOB) 和 *Nitrospira* (NOB) 占比分别为 11.57%、1.01% 和 0.94%. 一段式部分亚硝化厌氧氨氧化工艺的稳态运行为厌氧氨氧化技术处理中低浓度氨氮废水提供了参考.

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 部分亚硝化; 一段法; 移动床生物膜反应器 (MBBR); 生物脱氮

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3385-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011258

Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitritation-ANAMMOX SMBBR

LÜ Kai^{1,2}, SHAO Xian-ming^{1,2}, WANG Kang-zhou^{1,2}, YAO Xue-wei^{1,2}, PENG Dang-cong^{1*}, HAN Yun¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

Abstract: A SMBBR was established to treat medium ammonium under room temperature. Results showed that TN load can reach $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the average TN removal efficiency was $(51.58 \pm 6.80)\%$ in the SMBBR with an influent ammonia concentration of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and DO of $0.4 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. AOB, ANAMMOX, and NOB activity reached $(2253.21 \pm 502.10) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, $(4847.46 \pm 332.89) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, and $(1455.17 \pm 473.83) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, and ANAMMOX and AOB bacteria were found to develop a good collaborative relationship. Quantitative PCR results showed that the relative abundance of ANAMMOX, AOB and NOB were 11.57%, 1.01% and 0.94%, respectively. The stable operation of single stage partial nitritation-ANAMMOX process provide an alternative technology for medium ammonia wastewater.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); partial nitritation; single stage; moving-bed biofilm reactor (MBBR); biological nitrogen removal

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 工艺相较于传统硝化-反硝化脱氮工艺, 具有曝气量少、不消耗有机物及污泥产率低等特点^[1,2], 并且已成功应用于城市污水处理厂污泥水及与此类含有高浓度氨氮的工业废水^[3-5]. 一段式部分亚硝化厌氧氨氧化工艺是将氨氮的氧化和厌氧氨氧化过程集合在一个反应器内, 从而一步实现氨氮的高效去除.

截至 2014 年, 全球已有 100 座以厌氧氨氧化工艺运行的污水处理工程, 其中约 88% 采用一段式部分亚硝化厌氧氨氧化工艺^[6], 但其大多数用于处理低 C/N 的高浓度含氮废水. 一段式部分亚硝化厌氧氨氧化工艺稳定运行的关键在于维持系统内亚硝酸盐氧化菌 (nitrite oxidation bacteria, NOB) 数量或活性维持在较低的水平^[7,8]. 有研究表明, 在高氨氮环境下, 通过控制溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、游离氨 (free ammonia, FA) 和游离亚硝酸 (free nitrite

acid, FNA) 等^[9-11] 可实现抑制或淘汰 NOB, 从而达到稳定的高效脱氮. 然而, 在中低氨氮浓度条件下, 可获得的 FA 或 FNA 浓度较低, 对 NOB 的抑制减弱或消失. 而有研究发现, 仅通过低 DO 浓度难以实现对 NOB 的长限制. 因此, 探究在中低氨氮浓度条件下一段式亚硝化厌氧氨氧化工艺的稳态运行具有重要的研究价值.

本文以序批式移动床生物膜反应器 (sequencing moving bed biofilm reactor, SMBBR) 为研究对象, 在常温条件下以一段式亚硝化厌氧氨氧化工艺处理中低浓度氨氮废水. 通过控制 DO 浓度, 探讨在中低氨氮浓度条件下能否实现稳定脱氮, 同时对 AOB、ANAMMOX 及 NOB 活性进行测定, 并采用高通量测

收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2021-01-06

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2019ZDLSF06-05, 2020SF-357); 国家自然科学基金项目 (52070153)

作者简介: 吕恺 (1993 ~), 男, 博士, 主要研究方向为污水生物处理. E-mail: 2488495040@qq.com

* 通信作者, E-mail: dcpeng@xauat.edu.cn

序对生物膜中的功能微生物进行分析,以期为一段式部分亚硝化厌氧氨氧化技术处理中低浓度氨氮废水提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 SMBBR 运行及接种填料

SMBBR 有效容积为 5 L,水力停留时间(HRT)为 12~18 h,温度为室温,pH 值控制在 7.5~8.2.反应器以序批式模式运行,进出水及搅拌均由自控系统控制.反应器进水为人工配水,各实验阶段进水氮组分浓度见表 1,其它成分为 KHCO_3 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 $0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,微量元素^[12]为 $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$.接种生物膜为稳定运行的处理高浓度氨氮废水的一段式亚硝化厌氧氨氧化反应器,填料型号为 K3 (比表面积: $500 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$),填充率为 25%.

表 1 各实验阶段进水氮组分浓度

Table 1 Concentration of nitrogen components in each phase

阶段	天数/d	进水 NH_4^+ 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	进水 NO_2^- 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
阶段 I	0~51	200	120
	51~93	150	80
	93~114	150	50
阶段 II	114~180	100	0

1.2 水质指标测定

NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N 的测定参照标准分析方法^[13]. NH_4^+ -N的测定采用纳氏试剂分光光度法, NO_2^- -N的测定采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, NO_3^- -N 的测定采用紫外分光光度法, MLSS 和 MLVSS 的测定采用重量法. pH 值由在线式 pH 计(Inpro 4010, 梅特勒)测定. 溶解氧(DO)由在线式溶氧仪(Inpro 6050, 梅特勒)测定.

1.3 活性的测定

ANAMMOX 菌活性测定方法如下:取出若干填料,用无氧水淘洗 2~3 次后,置于 600 mL 的反应瓶中,同时加入 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4^+ -N、 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NO_2^- -N及微量元素,然后通入氮气 5 min,使 DO 降低至 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,最后加入 KHCO_3 ($0.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$).在测定过程中,反应瓶置于恒温摇床上以保证基质混合均匀,温度设定为 35°C ,定期从反应瓶中取出水样,通过分析水样中的 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 浓度变化以确定 ANAMMOX 活性.

AOB 和 NOB 活性测定方法如下:取出若干填料,用纯水淘洗 2~3 次后,置于 600 mL 的反应瓶中,分别加入 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ NH_4^+ -N、 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

NO_2^- -N及微量元素等,然后曝入空气,控制 DO 浓度在 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上.在测定过程中,温度控制为室温,定期从反应瓶中取出水样,通过分析水样中的 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N 浓度变化以确定 AOB 和 NOB 活性.

1.4 NO_3^- -N 生成贡献估算

反应中产生的 NO_3^- -N 由 NOB 和 ANAMMOX 两部分构成(图 1),NOB 对 NO_3^- -N 的贡献 X_{NOB} 和 ANAMMOX 的贡献 X_{ANAMMOX} 分别定义为:

$$X_{\text{NOB}} = \frac{\Delta\text{NO}_3^-(\text{NOB})}{\Delta\text{NO}_3^-(\text{NOB}) + \Delta\text{NO}_3^-(\text{ANAMMOX})} \quad (1)$$

$$X_{\text{ANAMMOX}} = \frac{\Delta\text{NO}_3^-(\text{ANAMMOX})}{\Delta\text{NO}_3^-(\text{NOB}) + \Delta\text{NO}_3^-(\text{ANAMMOX})} \quad (2)$$

其关系符合式(3)和式(4):

$$X_{\text{ANAMMOX}} + X_{\text{NOB}} = 1 \quad (3)$$

$$\Delta\text{NO}_3^-(\text{NOB}) + \Delta\text{NO}_3^-(\text{ANAMMOX}) = c_{\text{NO}_3^-}^{\text{Eff}} \quad (4)$$

式中, X_{NOB} 和 X_{ANAMMOX} 分别为 NOB 和 ANAMMOX 对 NO_3^- -N 的生成贡献占比,%; $\Delta\text{NO}_3^-(\text{NOB})$ 为 NOB 的 NO_3^- -N 生成量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\Delta\text{NO}_3^-(\text{ANAMMOX})$ 为 ANAMMOX 的 NO_3^- -N 生成量, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_{\text{NO}_3^-}^{\text{Eff}}$ 为出水 NO_3^- -N, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

由于进水中不含有机物,因此,反应器中的氮损失 ΔTN (ANAMMOX)全部由厌氧氨氧化贡献,即:

$$\Delta\text{TN}(\text{ANAMMOX}) = c_{\text{TN}}^{\text{Inf}} - c_{\text{TN}}^{\text{Eff}} \quad (5)$$

式中, ΔTN (ANAMMOX) 为反应器中的氮损失, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_{\text{TN}}^{\text{Inf}}$ 为进水 TN, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_{\text{TN}}^{\text{Eff}}$ 为出水 TN, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

依据厌氧氨氧化分解代谢过程的化学计量关系^[14],ANAMMOX 菌以 1:1 消耗 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 生成 N_2 ,因此,ANAMMOX 反应消耗的 NH_4^+ -N 按式(6)计算.

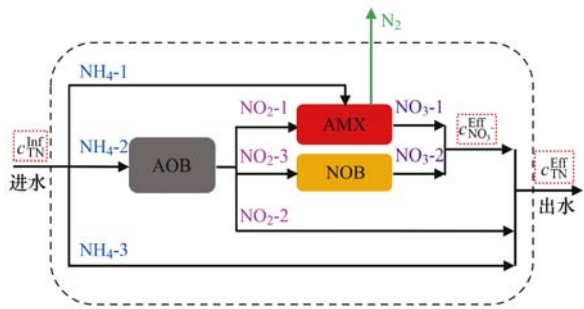


图 1 一段式亚硝化厌氧氨氧化氮组分转化关系

Fig. 1 Nitrogen conversion of single partial nitritation-ANAMMOX process

$$\Delta \text{NH}_4^+ (\text{ANAMMOX}) = \frac{\Delta \text{TN} (\text{ANAMMOX})}{2} \quad (6)$$

在进行厌氧氨氧化过程中,每消耗 1 g 的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 理论上要产生 0.26 g 的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 因此 ANAMMOX 生成的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 量按式(7)进行计算.

$$\Delta \text{NO}_3^- (\text{ANAMMOX}) = 0.26 \cdot \Delta \text{NH}_4^+ (\text{ANAMMOX}) \quad (7)$$

将式(7)代入式(2),可得式(8),即通过测定进出水 TN 和出水 $\text{NO}_3^- \text{-N}$, 依据式(8)和式(3),可确定 NOB 和 ANAMMOX 各自对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的贡献.

$$X_{\text{ANAMMOX}} = 0.13 \times \frac{c_{\text{TN}}^{\text{Inf}} - c_{\text{TN}}^{\text{Eff}}}{c_{\text{NO}_3^-}^{\text{Eff}}} \quad (8)$$

1.5 高通量测序

从生物填料上取下一定数量的生物膜,经去离子水淘洗离心后按照试剂盒 E. Z. N. A.® soil DNA Kit (Omega Bio-tek, Norcross GA, U. S.) 规定的方法对 DNA 进行提取. 以提取的 DNA 为 PCR 模板, 采用 V3-V4 引物 (序列 338F: 5'-ACTCCTACGGG AGGCAGCAG-3' 和 806R: 5'-GGACTACHVGGGTWT ATAAT-3'), 在 ABI Gene Amp® 9700 PCR thermocycler (ABI, CA, USA) 上进行 PCR 反应. 所获数据均在上海美吉生物云在线平台进行分析.

2 结果与分析

2.1 SMBBR 运行效果

SMBBR 运行效果见图 2, 根据有无外源 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 将整个启动过程分为 2 个阶段, 分别为阶段 I 和阶段 II.

在阶段 I (0~115 d) 中, 由于起始 AOB 活性较低, 不能为 ANAMMOX 菌提供足够的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 因此, 在进水中配有一定浓度的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以维持

ANAMMOX 活性. 在此阶段中, 进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度从 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值也从 0.60 先降至 0.53, 再降至 0.33. 当进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 去除负荷为 $(0.33 \pm 0.01) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 当进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度降至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值为 0.53 时, 去除负荷为 $(0.27 \pm 0.03) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 随着进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度的降低 ($\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值为 0.33), 去除负荷进一步降至 $(0.20 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 综上, 随着进水 $\text{NO}_2^- \text{-N}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 比值的降低, 去除负荷呈下降趋势, 这主要和 ANAMMOX 菌不能获得足够的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 有关. 当进水中含有较高浓度 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 时, ANAMMOX 菌能以最大速率进行厌氧氨氧化反应, 而当进水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度较低时, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的主要来源为 AOB 的氧化, 考虑到 AOB 氧化能力有限, ANAMMOX 菌受到限制.

在阶段 II (115~180 d) 中, 进水中不含 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 且 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度从 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时 ANAMMOX 菌所用 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 全由 AOB 提供. 在此阶段中, 负荷为 $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 去除率为 $(51.58 \pm 6.80)\%$, 表明 ANAMMOX 和 AOB 菌之间形成了良好的协同关系. Qiao 等^[15] 的研究显示, 当仅进行亚硝化和厌氧氨氧化过程时, $\Delta \text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 应为 0.11 [见式(9)], 当进行完全硝化过程时, $\Delta \text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 应为 1.00 [见式(10)]. 在本阶段中, 生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和去除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的比值变化见图 3. 生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和去除 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的比值为 0.52 ± 0.11 , 此数值高于 0.11, 但又小于 1.00 (完全硝化), 表明除厌氧氨氧化过程外, 还存在完全硝化过程. 根据式(8)和式(3)对生成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的贡献占比

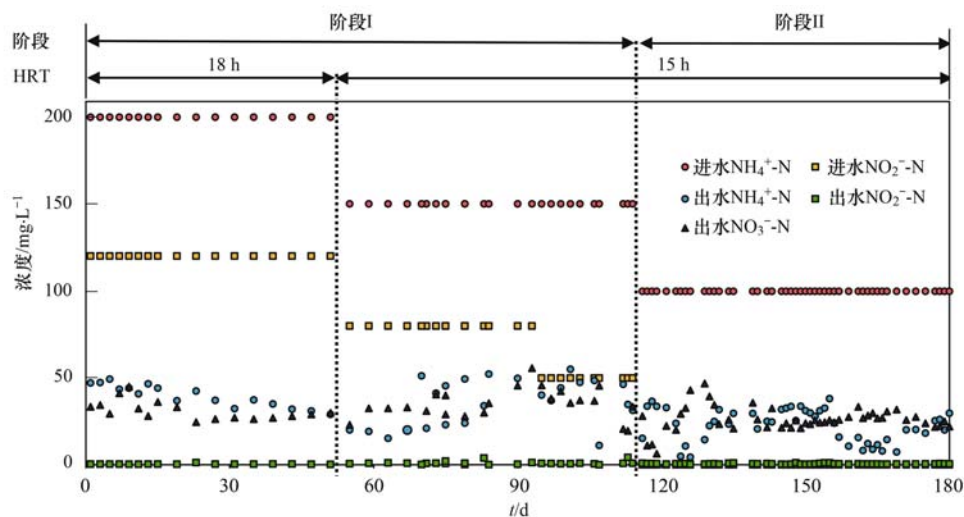
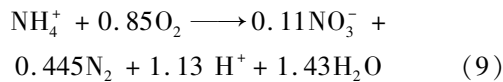


图2 SMBBR 运行效果

Fig. 2 Performance of SMBBR

进行核算, ANAMMOX 和 NOB 的贡献分别为 $(28.53 \pm 16.42)\%$ 和 $(71.47 \pm 16.42)\%$, 约有 $17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N 被 NOB 直接氧化为 NO_3^- -N. 因此如何提高此部分 NO_2^- -N 的利用率是提高反应器脱氮效率的关键.

PN/A:



完全硝化过程:

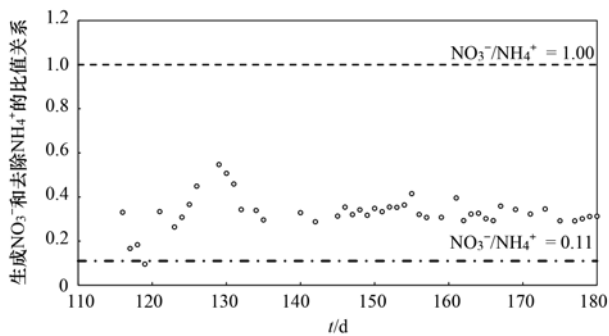
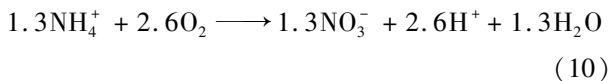


图3 阶段II 生成 NO_3^- -N和去除 NH_4^+ -N的比值

Fig. 3 Ratio of produced NO_3^- -N to removed NH_4^+ -N in phase II

2.2 典型周期

图4为阶段II典型周期内DO、pH及氮组分变化情况. 在进水结束后, 由于进水中含有较高浓度的DO, DO浓度可达 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 随后DO浓度快速下降并稳定在 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 这为同步亚硝化厌氧氨氧化创造了良好的条件. 从图4(b)中可以看出, 整个周期内的 NH_4^+ -N 浓度呈现出下降的趋势, 从进水结束时的 $49.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $19.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FA 浓度分别为 $1.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 整个周期内, FA 浓度仅有约 90 min 大于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 大于 FA 对 NOB 的抑制阈值 ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[16]. NO_2^- -N 浓度在进水结束时达到 $2.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而其余阶段均低于 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FNA 浓度远低于 NOB 抑制阈值 ($0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[17]. NO_3^- -N 浓度在进水结束后开始上升, 浓度从 $17.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $26.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 NH_4^+ -N 减少量远大于 NO_3^- -N 增加量, 表明发生了同步亚硝化厌氧氨氧化过程. 对周期内每小时基质变化情况进行分析(图5), 发现周期内 ANAMMOX 和 NOB 对 NO_3^- -N 生成贡献维持恒定, 平均分别为 32.61% 和 67.39%, 表明 ANAMMOX 和 NOB 菌活性保持恒定.

一段式亚硝化厌氧氨氧化工艺处理高浓度氨氮废水过程中, 通过 FA 或 FNA 可实现对 NOB 的抑

制, 从而可避免 NO_2^- -N 被进一步氧化为 NO_3^- -N. 而本实验中, FA 浓度最高仅为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 此数值接近 NOB 阈值下限, 而 NOB 活性始终维持在较低水平, 因此, 有必要探究其背后机制, 这也是后期的研究重点.

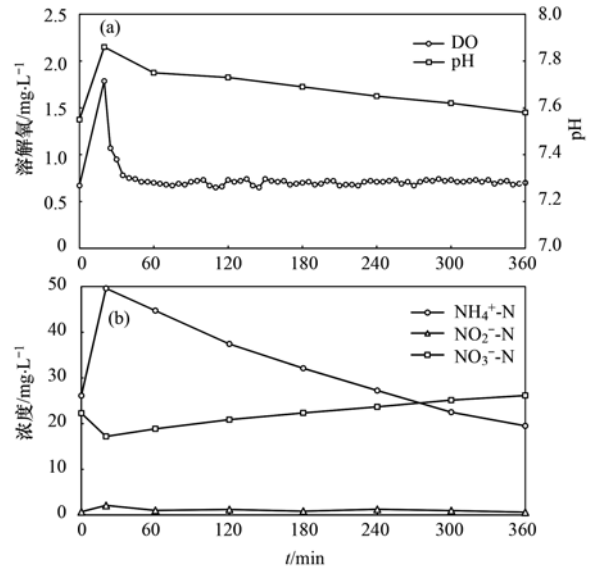


图4 SMBBR 典型周期内氮组分、DO 及 pH 变化

Fig. 4 Variations of nitrogen components, DO, and pH in typical cycle

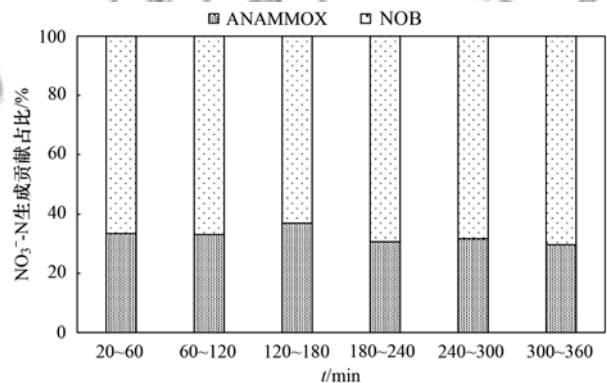


图5 典型周期内 NO_3^- -N生成贡献

Fig. 5 Contribution of produced nitrate in a typical cycle

2.3 活性变化

由测定结果可知(图6), 在阶段I中, 由于 ANAMMOX 菌在进水中获得一定量的 NO_2^- -N, 其增殖量大于衰减量, 活性从 $3987.54 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $5132.89 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 而 AOB 和 NOB 趋于稳定, 其分别为 $(1537.25 \pm 163.81) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(678.29 \pm 132.61) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$.

进入阶段II后, 由于进水中不含 NO_2^- -N, ANAMMOX 活性在小幅度下降后趋于稳定, 平均为 $(4847.46 \pm 332.89) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. AOB 和 NOB 活性在前 20 d 有明显增加, 后期趋于稳定, 平均值分别为 $(2253.21 \pm 502.10) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 和

($1\,455.17 \pm 473.83$) $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 本研究中 ANAMMOX 活性远大于 NOB, ANAMMOX 和 NOB 在竞争 NO_2^- -N时具有优势,在一定程度上有利于一段式亚硝化厌氧氨氧化反应的稳定运行.

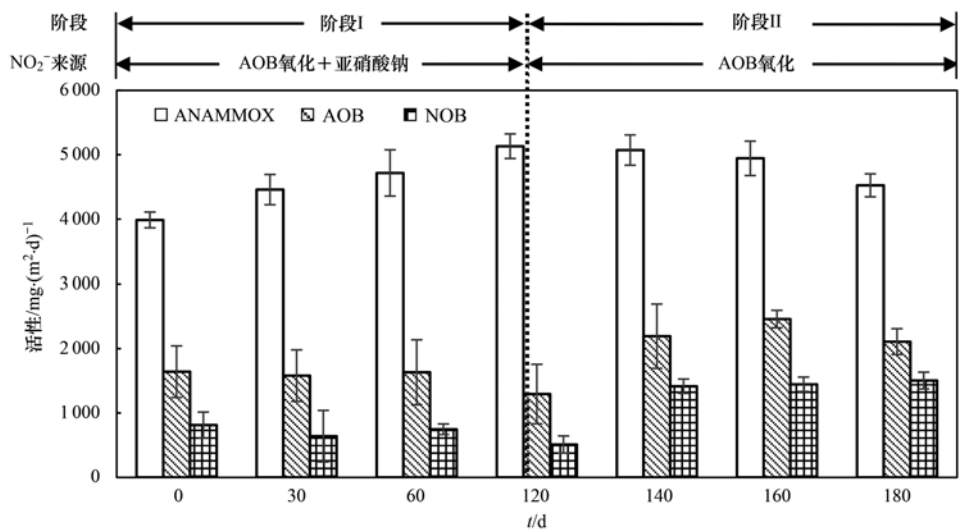


图 6 各功能微生物活性变化
Fig. 6 Variation in ANAMMOX, AOB, and NOB activity

2.4 微生物种群结构

高通量结果显示[图 7 (a)],在启动前后, Chloroflexi、Planctomycetota 和 Proteobacteria 仍为主

要微生物. Chloroflexi 普遍存在于 ANAMMOX 反应器中^[18~20], Planctomycetota 和 Proteobacteria 分别包括 ANAMMOX 和 AOB 菌. 从属水平可知[图 7 (b)],本实验中的 ANAMMOX 菌为 *Ca. Brocadia*, 此结果和其它主流系统内已探明的典型种属一致^[21,22], 其占比从 20.85% 降至 11.57%, 这主要是 ANAMMOX 菌衰减和其它微生物增殖所致. 对 AOB 和 NOB 而言, 本实验探明的 AOB 主要为 *Nitrosomonas*, 占比从 0.24% 增至 1.01%, NOB 主要为 *Nitrospira*, 占比从 0.03% 增加至 0.94%. 在本实验中, ANAMMOX 菌所占份额远高于 NOB, 表明 ANAMMOX 菌和 NOB 菌竞争 NO_2^- -N 的时候具有优势.

3 讨论

赵良杰等^[23]和 Chen 等^[24]以 ANAMMOX 颗粒污泥运行一段式亚硝化厌氧氨氧化 SBR, 负荷分别为 $0.24 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.60 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 去除率分别达到 75.84% 和 71.80%. De 等^[25,26]在两种条件下以生物转盘运行 OLAND 工艺, 负荷为 $0.85 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1.1 \sim 1.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 去除率达到 50%~60%. Zhang 等^[27]在进水 NH_4^+ -N 浓度为 $88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下以 CANON 工艺运行 MBR 反应器时, 负荷为 $1.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 去除率达到 70%. 综上所述, 以一段式亚硝化厌氧氨氧化工艺处理中低浓度氨氮废水要取得较高的 TN 去除率比较困难. 本实验中, 在负荷为 $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下, 去除率仅有 $(51.68 \pm 6.80)\%$, 此数值低于上述研究, 而这主要和系统内的 NOB 种属有关. 高通量结果

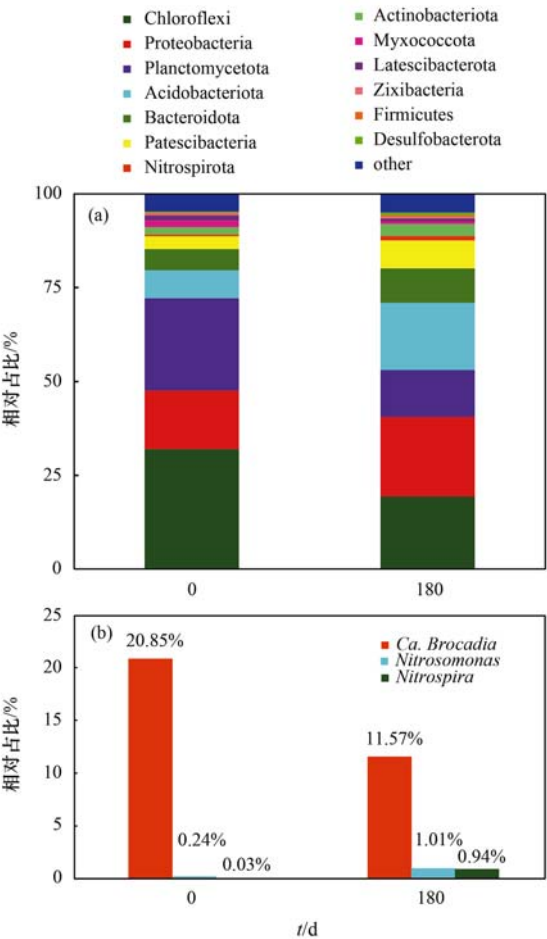


图 7 生物膜种群结构组成
Fig. 7 Compositions of bacterial community in biofilm

显示,实验所得 NOB 为 *Nitrospira*, 其起源于厌氧或微需氧菌,对 DO 的亲合力较强^[28],尤其在 FA 抑制作用较弱的情况下,*Nitrospira* 将氧化所得的部分 NO_2^- -N 进一步氧化为 NO_3^- -N (完全硝化),这是造成总氮去除偏低的主要原因,但目前又无可行的办法解决此问题. 通过比较 ANAMMOX、AOB 和 NOB 的实际发挥活性和最大活性,发现其实际发挥活性仅为最大活性的 8%、30% 和 18%,表明该 SMBBR 并未发挥全部脱氮能力,而这与其运行条件有关. 为限制 NOB 将过多的 NO_2^- -N 氧化为 NO_3^- -N 和避免 DO 对 ANAMMOX 产生抑制^[29], DO 浓度需控制在较低水平,但这又限制了 AOB 将 NH_4^+ -N 氧化为 NO_2^- -N 的能力,而 NO_2^- -N 的产出直接影响反应器的脱氮效果. 因此,如何发掘该 SMBBR 的脱氮潜力是后期的研究重点.

4 结论

(1) 在常温条件下,进水 NH_4^+ -N 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 浓度为 $0.4 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 负荷为 $0.16 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,去除率可达 $(51.58 \pm 6.80)\%$,实现了一段式亚硝化厌氧氨氧化的稳定运行.

(2) 稳定运行阶段, AOB、ANAMMOX 和 NOB 活性分别为 $(2\,253.21 \pm 502.10)$ 、 $(4\,847.46 \pm 332.89)$ 和 $(1\,455.17 \pm 473.83) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,分子生物检测结果显示, *Ca. Brocadia* (ANAMMOX)、*Nitrosomonas* (AOB) 和 *Nitrospira* (NOB) 占比分别为 11.57%、1.01% 和 0.94%.

(3) 生物膜上的 AOB 和 ANAMMOX 菌形成了良好的协同作用并有效抑制 NOB,一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 具有较好的运行稳定性.

参考文献:

- [1] Kartal B, Kuenen J G, Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. Science, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [2] Zhang L, Narita Y, Gao L, et al. Microbial competition among anammox bacteria in nitrite-limited bioreactors[J]. Water Research, 2017, **125**: 249-258.
- [3] 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.
- [4] Zhang L, Narita Y, Gao L, et al. Maximum specific growth rate of anammox bacteria revisited[J]. Water Research, 2017, **116**: 296-303.
- [5] 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.
- [6] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey[J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.
- [7] Hu Y S, Zhao X H, Zhao Y Q. Achieving high-rate autotrophic nitrogen removal via CANON process in a modified single bed tidal flow constructed wetland[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **237**: 329-335.
- [8] Zhang Z J, Chen S H, Wu P, et al. Start-up of the CANON process from activated sludge under salt stress in a sequencing batch biofilm reactor (SBBR)[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(16): 6309-6314.
- [9] Yue X, Yu G P, Liu Z H, et al. Fast start-up of the CANON process with a SABF and the effects of pH and temperature on nitrogen removal and microbial activity[J]. Bioresource Technology, 2018, **254**: 157-165.
- [10] Poot V, Hoekstra M, Geleijnse M A A, et al. Effects of the residual ammonium concentration on NOB repression during partial nitrification with granular sludge[J]. Water Research, 2016, **106**: 518-530.
- [11] Cui H H, Zhang L, Zhang Q, et al. Stable partial nitrification of domestic sewage achieved through activated sludge on exposure to nitrite[J]. Bioresource Technology, 2019, **278**: 435-439.
- [12] 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.
- [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.
- [14] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [15] Qiao S, Tian T, Duan X M, et al. Novel single-stage autotrophic nitrogen removal via co-immobilizing partial nitrifying and anammox biomass[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **230**: 19-26.
- [16] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1976, **48**(5): 835-852.
- [17] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, et al. The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [18] Kindaichi T, Yuri S, Ozaki N, et al. Ecophysiological role and function of uncultured *Chloroflexi* in an anammox reactor[J]. Water Science & Technology, 2012, **66**(12): 2556-2561.
- [19] Bhattacharjee A S, Wu S, Lawson C E, et al. Whole-community metagenomics in two different anammox configurations: process performance and community structure[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(8): 4317-4327.
- [20] Gonzalez-Martinez A, Osorio F, Morillo J A, et al. Comparison of bacterial diversity in full scale anammox bioreactors operated under different conditions[J]. Biotechnology Progress, 2015, **31**(6): 1464-1472.
- [21] Reino C, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, et al. Stable long-term operation of an upflow anammox sludge bed reactor at mainstream conditions[J]. Water Research, 2018, **128**: 331-340.
- [22] Laurenzi M, Falås P, Robin O, et al. Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures[J]. Water Research, 2016, **101**: 628-639.
- [23] 赵良杰, 彭党聪, 吕恺, 等. 一段式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理中低浓度模拟氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2021,

- 15(1): 143-151.
- Zhao L J, Peng D C, Lv K, *et al.* Treatment of simulated medium and low-strength ammonia wastewater by single-stage partial nitrification-anammox process [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 143-151.
- [24] 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.
- [25] De Clippeleir H, Yan X, Verstraete W, *et al.* Oland is feasible to treat sewage-like nitrogen concentrations at low hydraulic residence times[J]. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, 2011, 76(1): 163-166.
- [26] De Clippeleir H, Vlaeminck S E, De Wilde F, *et al.* One-stage partial nitrification/anammox at 15°C on pretreated sewage: feasibility demonstration at lab-scale[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(23): 10199-10210.
- [27] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from domestic sewage in MBR-CANON system and the biodiversity of functional microbes[J]. Bioresource Technology, 2013, 150: 113-120.
- [28] Regmi P, Miller M W, Holgate B, *et al.* Control of aeration, aerobic SRT and COD input for mainstream nitrification/denitrification[J]. Water Research, 2014, 57: 162-171.
- [29] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, 50(5): 589-596.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2020 年 12 月 29 日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2019 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2019 年度总被引频次 12 057,影响因子 2.256,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)