

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8  
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM<sub>2.5</sub>污染特征与浓度控制效果 ..... 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 ..... 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中元素组成特征及重污染成因分析 ..... 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 ..... 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 ..... 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 ..... 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM<sub>2.5</sub>污染的影响 ..... 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM<sub>2.5</sub>排放的影响 ..... 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 ..... 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 ..... 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 ..... 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 ..... 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 ..... 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 ..... 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 ..... 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 ..... 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 ..... 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>化学特征及来源 ..... 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 ..... 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 ..... 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 ..... 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 ..... 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 ..... 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 ..... 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 ..... 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 ..... 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 ..... 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 ..... 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 ..... 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 ..... 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 ..... 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 ..... 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 ..... 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 ..... 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 ..... 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 ..... 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 ..... 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 ..... 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N<sub>2</sub>O产生特征 ..... 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 ..... 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 ..... 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 ..... 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 ..... 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 ..... 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 ..... 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 ..... 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 ..... 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 ..... 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 ..... 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提条件下生物炭解吸性有机物的浸出规律 ..... 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM<sub>2.5</sub>毒性 ..... 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

# 缺氧 MBBR 耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮

杨岚, 彭永臻\*, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀

(北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 缺氧 MBBR 是强化传统城市污水处理系统脱氮的一种方法, 本研究通过向城市污水后置反硝化 SBR 中投加填料构建了缺氧双污泥系统, 实现了城市生活污水部分厌氧氨氧化深度脱氮. 在 250d 的运行中脱氮性能逐渐提高并实现稳定, 出水总氮在  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右. 211 ~ 250 d 的平均硝氮、氨氮和总氮去除率分别为  $(97.7 \pm 2.9)\%$ 、 $(93.3 \pm 2.9)\%$  和  $(94.3 \pm 2.7)\%$ . 长期运行中观测到氨氮和硝氮的同步去除. 针对氨氮去除途径进行分析, 系统同化、硝化作用微弱. 缺氧 MBBR 中存在厌氧氨氧化活性且对脱氮有不可忽视的作用. 实时定量 PCR 结果进一步说明缺氧 MBBR 中厌氧氨氧化菌富集, 特别是缺氧填料生物膜中厌氧氨氧化菌丰度由初始的  $4.37 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  增长到了  $2.28 \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ . 本研究表明缺氧填料生物膜在厌氧氨氧化的富集强化城市污水深度脱氮中或许具有可应用的潜能.

**关键词:** 深度脱氮; 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 缺氧生物膜; 城市生活污水; 生物膜移动床反应器 (MBBR)

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3668-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901015

## Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR

YANG Lan, PENG Yong-zhen\*, LI Jian-wei, GAO Rui-tao, WANG Ming, LI Xi-yao

(National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Anoxic MBBR is a process to achieve advanced denitrification from municipal wastewater. Here, anoxic MBBR was applied as a post-denitrification SBR to achieve advanced denitrification by partial anammox (anaerobic ammonium oxidation). During a 250-day operation, denitrification performance gradually improved and the total nitrogen concentration of the effluent was approximately  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . The average nitrate, ammonia, and total inorganic nitrogen removal efficiencies were  $(97.7 \pm 2.9)\%$ ,  $(93.3 \pm 2.9)\%$ , and  $(94.3 \pm 2.7)\%$ , respectively, between day 211 and 250. The simultaneous removal of ammonia and nitrate was observed in the anoxic reactor. Analysis of the ammonia removal pathway revealed that assimilation and nitrification were poor in the anoxic MBBR. The anammox activity test and the denitrification performance showed that anammox occurred and played a not insignificant role in the anoxic MBBR. The results of real-time quantitative PCR showed that anammox bacteria enriched in anoxic MBBR, especially in the anoxic carrier biofilms, where the abundance of anammox bacteria increased from  $4.37 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  to  $2.28 \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ . This study demonstrates that anoxic carrier biofilms may have potential applications in anammox bacterial enrichment to enhance denitrification from municipal wastewater.

**Key words:** advanced denitrification; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); anoxic biofilm; municipal wastewater; moving bed biofilm reactor (MBBR)

我国城市生活污水处理厂多采用传统硝化反硝化工艺脱氮, 但由于城市生活污水中碳源有限, 需要投加外碳源确保出水氮素达标, 增加了处理成本<sup>[1]</sup>. 因此, 开发相对经济高效的城镇生活污水的脱氮技术具有重要意义.

在可将氨氮和亚硝氮转化为氮气自养厌氧氨氧化被发现<sup>[2, 3]</sup>前, 异养反硝化被认为是将硝氮/亚硝氮转化为氮气的唯一途径<sup>[4]</sup>. 相比反硝化, 厌氧氨氧化能减少能耗和污泥产量<sup>[5, 6]</sup>, 被视为低碳氮比污水 (如城市生活污水) 更经济高效的脱氮途径<sup>[7]</sup>. 虽然厌氧氨氧化在城市污水中的应用面临着诸多挑战<sup>[8]</sup>, 但厌氧氨氧化菌却广泛存在于城市生

活污水处理厂中, 我国北方的 5 座城市污水处理厂均检测到了厌氧氨氧化菌<sup>[9]</sup>. 此外, 在纽约一污水处理厂<sup>[10]</sup>中, 其缺氧段搅拌床上自发富集了大量的厌氧氨氧化菌, 该污水处理厂脱氮性能也明显变好. 厌氧氨氧化菌或具有在污水处理系统中自发富集从而强化污水处理系统脱氮性能的潜能. 因此, 富集城市污水处理系统中已存在的厌氧氨氧化菌, 部分总氮通过厌氧氨氧化去除 (部分厌氧氨氧化),

收稿日期: 2019-01-02; 修订日期: 2019-03-04

基金项目: 北京市科技计划项目 (D171100001017001); 北京市教委项目

作者简介: 杨岚 (1993 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为城镇污水深度处理, E-mail: gpel@qq.com

\* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

从而强化传统城市污水处理系统脱氮有潜在的可能性. 而目前也鲜少有利用城市生活污水处理厂中已存在的厌氧氨氧化菌强化脱氮的研究.

生长缓慢的厌氧氨氧化菌倾向于在聚集体中生长(如生物膜)<sup>[11, 12]</sup>, 投加填料(载体)是富集厌氧氨氧化菌的有效手段之一<sup>[13]</sup>. 因此, 向传统污水处理反应器中投加填料构成悬浮载体双污泥系统或具有富集厌氧氨氧化菌的潜能. 常见的悬浮载体双污泥反应器形式<sup>[14]</sup>有生物膜流化床反应器(BFB)<sup>[15]</sup>、生物膜升流式反应器(USB)<sup>[16]</sup>、生物膜气升式反应器(BAS)<sup>[17]</sup>和生物膜移动床反应器(MBBR)<sup>[18, 19]</sup>.

本研究通过向后置反硝化 SBR 中投加填料构建了缺氧 MBBR. 通过监测缺氧 MBBR 长期进出水氨氮、硝氮和亚硝氮, 分析其脱氮性能. 然后结合活性小试进一步分析厌氧氨氧化是否在缺氧 MBBR 中存在并对总氮去除有贡献. 最后通过实时定量 PCR 对絮体污泥及缺氧填料生物膜进行厌氧氨氧化菌的测定, 分析厌氧氨氧化菌丰度的动态变化.

## 1 材料与方法

### 1.1 缺氧 MBBR 反应器的装置及运行

缺氧 MBBR 反应器是由机玻璃制成的 SBR 反应器, 反应器包裹有黑色 PVC 材料进行避光, 是由缺氧填料生物膜和絮体污泥组成的反硝化双污泥系统(图1). 缺氧 MBBR 的有效容积为 9 L/10 L, 其

表1 缺氧 MBBR 运行参数

Table 1 Operational conditions of the anoxic moving bed biofilm reactor (MBBR)

时间 /d	排水比 /%	HRT /h	污泥浓度 /mg·L <sup>-1</sup>	污泥龄 /d	有效容积 /L	生活污水进水量 /L·周期 <sup>-1</sup>	A/O 硝化液进水量 /L·周期 <sup>-1</sup>
1~166	33.3	18	2 600	22	9	0.6	2.4
167~202	33.3	12	2 600	22	9	0.6	2.4
202~250	40	10	1 500	13	10	1.0	3.0

### 1.2 接种污泥和实验用水

缺氧 MBBR 是双污泥系统, 接种污泥包括絮体污泥和缺氧填料生物膜. 絮体污泥使用相同 A/O 反应器的硝化液培养并以乙酸钠为碳源. 缺氧填料生物膜来自于处理实际生活污水的 AAO 工艺的缺

表2 进水水质

Table 2 Characteristics of the influent wastewater

项目	氨氮 /mg·L <sup>-1</sup>	亚硝氮 /mg·L <sup>-1</sup>	硝氮 /mg·L <sup>-1</sup>	总氮 /mg·L <sup>-1</sup>	COD /mg·L <sup>-1</sup>	COD/TN	pH
生活污水	61.9 ± 5.0	0.3 ± 0.2	0.5 ± 0.2	62.7 ± 5.3	203.4 ± 24.7	3.2 ± 0.9	7.4 ± 0.2
A/O 硝化液	1.3 ± 2.0	0.8 ± 0.6	39.3 ± 7.6	41.4 ± 4.8	33.6 ± 4.1 <sup>1)</sup>	—	—

1) 不可生物降解

### 1.3 活性小试实验

#### 1.3.1 原位硝化活性小试

在缺氧 MBBR 中进行了原位硝化活性小试, 测

中 1 L 为填料的体积, 即有效液体容积为 8 L/9 L. 投加的填料为聚丙烯环, 直径为 25 mm, 密度为 0.98 ~ 1.00 g·cm<sup>-3</sup>, 孔隙率为 94% ~ 96%, 填充比为 33.3%. 配备两个进水箱分别盛放城市生活污水和 A/O 硝化液. 进水通过两个蠕动泵来完成, 排水由时控开关和电磁阀控制.

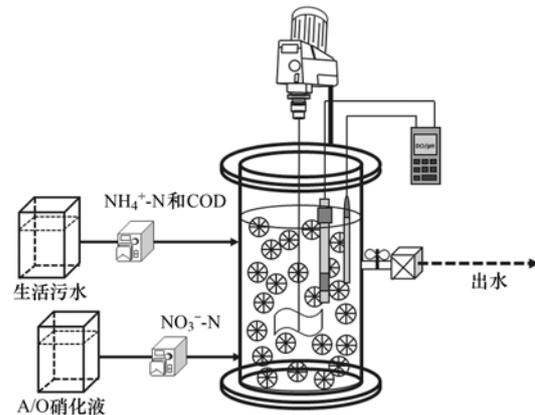


图1 缺氧移动床生物膜反应器(缺氧 MBBR)流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the anoxic moving bed biofilm reactor (anoxic MBBR)

缺氧 MBBR 在室温(16 ~ 25℃)下运行了 250 d, 处理实际生活污水和 A/O 硝化液, 运行参数如表 1 所示. 缺氧 MBBR 一天运行两个周期, 每周期包括 6 阶段: 进硝化液、进生活污水、缺氧搅拌反应、沉淀、排水和静置. 根据每周期实际生活污水 COD 投加乙酸钠, 调节反应器进水后混合初始碳氮比(COD/TN)约为 2.

氧区, 缺氧填料生物膜具有良好的完全反硝化性能.

实验用水为来自于北京某大学家属区的实际生活污水以及处理同一生活污水的 A/O 硝化液. 水质参数指标见表 2.

定在仅搅拌的条件下氨氮氧化活性, 分为两部分: 进水仅为生活污水的小试和进水中无可生化碳源的小试.

在进水仅为生活污水的小试中, 缺氧 MBBR 的进水为 0.6 L 生活污水和 2.4 L 蒸馏水(替代 A/O 硝化液). 在进水中无可生化碳源的小试中, 进水为 0.6 L 的  $65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  氯化铵溶液(替代生活污水)和 2.4 L 的 A/O 硝化液. 原位硝化活性小试缺氧搅拌 6 h, 小试过程中监测 DO 在  $0.0 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  变化, 取得的水样均测定氨氮、亚硝氮及硝氮.

### 1.3.2 异位厌氧氨氧化活性小试

缺氧 MBBR 反应器的厌氧氨氧化活性在 500 mL 的密封的棕色反应器中进行了 8 h, 按照缺氧 MBBR 的填充比, 取絮体污泥和反硝化填料. 厌氧氨氧化活性小试在  $30^\circ\text{C}$  的水浴中进行, 一次投加  $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的氨氮, 亚硝氮在 0 h 和 4 h 分两次投加, 每次投加  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 本实验用水均为曝氮气的无氧蒸馏水, 确保反应在密封无 DO 环境中进行, 所取水样测定氨氮、亚硝氮及硝氮.

### 1.4 分析方法

从缺氧 MBBR 中定期取得的水样, 用中速定性滤纸过滤后使用 Lachat QuikChem 8500 流动注射分析仪(Lachat QuikChem 8500, Lachant, USA)测定水中的氨氮、亚硝氮和硝氮. 本研究中总氮为氨氮、

亚硝氮和硝氮之和. COD 测定使用一种快速测定装置(Lianhua, China). 污泥浓度(MLSS)根据标准方法来测定<sup>[20]</sup>. 同时使用 WTW mult 340i 离子计(WTW, Germany)来监测水温、DO 和 pH. 缺氧填料生物膜的形态通过 OLYMPUS\_BX51 光学显微镜(Olympus, Japan)观察.

### 1.5 DNA 的提取和实时定量 PCR

分别取 0、64、100、211 和 246 d 的絮体污泥和缺氧填料生物膜泥样冻干后提取 DNA. 每个干污泥样品称取 0.05 ~ 0.10 g, 使用试剂盒(Fast DNA Spin kit for soil, MP, USA)对 DNA 进行提取, 提取后的 DNA 通过 Nanodrop Spectrophotometer ND-1000(Thermo Fisher Scientific, USA)测量核酸浓度及纯度. 提取后的 DNA 在  $-80^\circ\text{C}$  下储存.

采用特异性引物对全菌和厌氧氨氧化菌的 16S rRNA 进行 QPCR 扩增. 反应在 Mx3005P 实时定量 PCR 扩增仪(Agilent Technologies, USA)上进行, 采用试剂盒(SYBR Premix Ex Taq kit, TaKaRa, Japan)进行反应, 体系为 20  $\mu\text{L}$  包括 10  $\mu\text{L}$  的 SYBR 缓冲液, 正反向引物各 0.3  $\mu\text{L}$  (全菌 0.2  $\mu\text{L}$ ), 0.3  $\mu\text{L}$  ROX(全菌 0.4  $\mu\text{L}$ ), DNA 模板 2  $\mu\text{L}$ , 一定量的  $\text{ddH}_2\text{O}$ . 实时定量 PCR 程序见表 3.

表 3 实时定量 PCR 扩增程序及特异性引物

Table 3 Specific primers and PCR programs

菌群及目的基因	引物	序列	扩增长度 /bp	PCR 程序	文献
ANAMMOX	AMX 368F	TTCGCAATGCCCGAAAGG	478	$95^\circ\text{C}, 3 \text{ min}; 40 \text{ 循环}(95^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 56^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 72^\circ\text{C}, 45 \text{ s})$	[21]
16S rRNA	AMX 820R	AAAACCCCTCTACTTACTGTGCC	478	$95^\circ\text{C}, 3 \text{ min}; 40 \text{ 循环}(95^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 56^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 72^\circ\text{C}, 45 \text{ s})$	[22]
All bacteria	341F	CCTACGGGAGGCAGCAG	193	$95^\circ\text{C}, 3 \text{ min}; 40 \text{ 循环}(95^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 55^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 72^\circ\text{C}, 45 \text{ s})$	[23]
16S rRNA	534R	TTACCGGGCTGCTGGCAC	193	$95^\circ\text{C}, 3 \text{ min}; 40 \text{ 循环}(95^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 55^\circ\text{C}, 30 \text{ s}; 72^\circ\text{C}, 45 \text{ s})$	[23]

## 2 结果与讨论

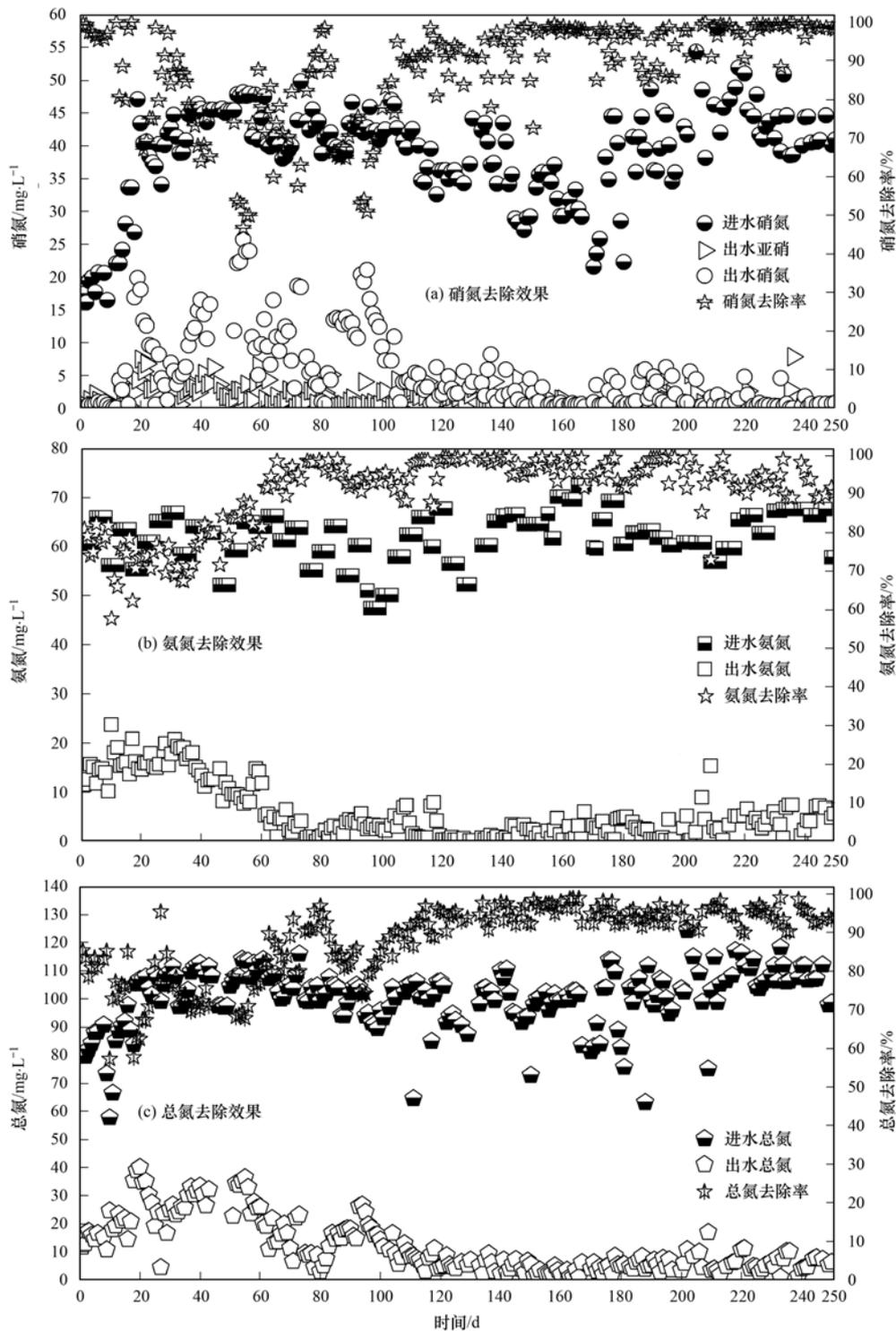
### 2.1 缺氧 MBBR 长期脱氮性能

缺氧 MBBR 在室温下( $16 \sim 25^\circ\text{C}$ )运行了 250 d, 处理实际生活污水和 A/O 反应器硝化液, 其脱氮性能如图 2 所示.

#### 2.1.1 硝氮去除性能

缺氧 MBBR 经过一段时间的运行后表现出了相对稳定且高效的硝氮去除性能[图 2(a)]. 1 ~ 31 d 进水硝氮浓度从  $16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐增长为  $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 起初出水中基本无硝氮, 但当进水硝氮浓度高于  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 出水硝氮不断积累. 32 ~ 106 d, 进水硝氮浓度稳定在  $(43.2 \pm 2.9) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水硝氮浓度不断增长并在 54 d 时达到峰值  $25.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 55 ~ 92 d 出水硝氮浓度逐渐降至  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下, 平均出水硝氮浓度为  $9.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 但由于季节原因遭遇了降温, 出水硝氮浓度由 83 d 时

的  $4.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  逐渐增长至 94 d 时的  $21.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在没有采取调控手段的情况下, 硝氮去除性能在 95 d 时开始好转, 逐渐恢复了较好的硝氮去除效果. 100 ~ 106 d 的出水平均硝氮浓度仅为  $(6.3 \pm 4.0) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 硝氮去除效率为  $(89.8 \pm 4.2)\%$ . 这表明缺氧 MBBR 具有对降温有一定的适应性. 从 107 d 起缺氧 MBBR 始终表现出稳定高效的硝氮去除性能. 107 ~ 166 d 的平均进水硝氮浓度为  $(35.5 \pm 4.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 出水中硝氮和亚硝氮浓度分别为  $(2.5 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(1.1 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均硝氮去除效率达到  $(92.8 \pm 5.9)\%$ . 从 167 d 起将反应时间缩短为 4 h, 硝氮去除性能基本没有被影响. 167 ~ 202 d 的平均进水硝氮浓度为  $(38.9 \pm 9.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水中硝氮和亚硝氮的浓度分别为  $(2.6 \pm 2.0) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(0.8 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均硝氮去除率为  $(93.5 \pm 4.9)\%$ . 203 ~ 250 d 提高了处理负荷, 增大污水处理量, 将排水比由 33.3% 提高为



总氮为氨氮、亚硝氮及硝氮之和

图2 反硝化 MBBR 长期脱氮性能

Fig. 2 Nitrogen removal performance of the anoxic MBBR during 250 days at ambient temperature

40% (表 1). 平均进水硝氮浓度为  $(44.1 \pm 4.5)$   $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 出水硝氮和亚硝氮的浓度分别降为  $(0.9 \pm 1.1)$   $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(0.5 \pm 1.4)$   $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均硝氮去除效率高达  $(97.7 \pm 2.9)\%$ .

在缺氧 MBBR 中, 通过投加乙酸钠调节混合初始碳氮比(COD/TN)约为 2, 而此碳氮比对于反硝化是不充足的. 在缺氧 MBBR 启动初期出水硝氮的

不断积累便是由于碳源的不足, 而硝氮的去除性能在没有增大碳氮比的情况下不断提高, 167 ~ 250 d 的平均硝氮去除率达到了  $(97.7 \pm 2.9)\%$ . 这说明缺氧 MBBR 中可能存在碳源需求少的其他脱氮途径.

### 2.1.2 氨氮去除性能

缺氧 MBBR 中的氨氮由生活污水提供, 在运行

一段时间后表现出高效稳定的氨氮去除性能. 运行中平均进水氨氮浓度为  $(61.9 \pm 5.0) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 1 ~ 31 d 出水氨氮逐渐积累, 31 d 时出水氨氮浓度达到了  $20.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 从 32 d 起出水氨氮浓度表现出稳定的下降趋势, 70 d 时出水氨氮浓度仅  $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 此后出水氨氮浓度均维持在一个较低的水平. 71 ~ 106 d 出水氨氮的浓度稳定在  $(2.7 \pm 1.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均氨氮去除率为  $(94.6 \pm 2.8) \%$ . 83 d 开始的降温使得出水氨氮有小幅上升, 但同硝氮去除性能一起最终得以恢复. 107 ~ 166 d 的平均出水氨氮浓度进一步降低到  $(1.9 \pm 2.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均氨氮去除率高达  $(97.1 \pm 3.3) \%$ . 缩短反应时间对氨氮的去除也基本无影响, 167 ~ 202 d 的平均出水氨氮浓度小幅上升为  $(2.2 \pm 1.7) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均氨氮去除率为  $(96.4 \pm 2.8) \%$ . 即使 203 ~ 250 d 提高负荷时, 平均出水氨氮浓度仍能维持在  $(4.5 \pm 1.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均氨氮去除率为  $(93.3 \pm 2.9) \%$ .

### 2.1.3 总氮去除性能

出水中的总氮主要为氨氮和硝氮, 其去除性能变化趋势与氨氮和硝氮变化趋势基本相同, 即出水总氮浓度先上升后下降, 遭遇降温后恶化并恢复, 最终维持在较低的浓度. 稳定后的总氮去除性能令人满意. 107 ~ 166 d 的平均出水总氮浓度和去除率分别为  $(5.3 \pm 2.8) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(94.6 \pm 3.0) \%$ ; 167 ~ 202 d 的平均出水总氮浓度和去除率分别为  $(4.9 \pm 2.6) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(94.4 \pm 1.8) \%$ ; 203 ~ 250 d 的平均出水总氮浓度和去除率分别为  $(5.9 \pm 2.7) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(94.3 \pm 2.7) \%$ .

缺氧 MBBR 经过一段时间的运行后获得了良好的脱氮性能, 出水的氨氮和总氮都达到了一级 A 排放标准 (GB 18918-2002), 出水总氮在  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 实现了城市生活污水深度脱氮.

### 2.2 氨氮去除途径分析

缺氧 MBBR 实现了氨氮和硝氮的同步去除. 硝氮主要通过缺氧反硝化去除, 而在反硝化的过程中还伴随着氨氮的同化作用. 根据乙酸钠为碳源的完全反硝化化学方程式<sup>[24]</sup>, 氨氮的同化量为硝氮反硝化量的 0.167. 以 107 ~ 202 d 为例, 其平均硝氮去除速率为  $(1.5 \pm 0.7) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , 则理论氨氮的同化速率为  $(0.2 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , 远小于 107 ~ 202 d 实际平均氨氮去除速率  $[(0.8 \pm 0.3) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}]$ . 因此, 同化作用不是缺氧 MBBR 中氨氮去除唯一途径, 还存在其他氨氮转化途径.

由于缺氧 MBBR 不密封, 难以避免搅拌带入水中的 DO, 所以硝化也可能是氨氮转化的途径. 于是在缺氧 MBBR 中进行了原位硝化活性小试(图

3), 但没有观察到明显的氨氮下降现象. 在进水仅为生活污水的硝化活性小试中[图 3(a)], 氨氮仅降低了不足  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ; 而在与实际运行状态更接近的进水中不含可生化碳源的硝化活性小试中[图 3(b)], 氨氮甚至出现了小幅的升高 ( $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ). 这说明缺氧 MBBR 中虽存在硝化反应但作用较为微弱. 此外, 考虑到同化作用造成的理论氨氮去除后, 107 ~ 202 d 的平均氨氮去除速率为  $(0.6 \pm 0.3) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ , 若全部通过硝化作用转化, 相应的平均理论氧气消耗量<sup>[25]</sup>为  $(2.6 \pm 1.3) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ . 然而缺氧 MBBR 反应阶段的 DO 是有限的 ( $\text{DO} \leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 部分异养菌也会和硝化细菌竞争氧气, 仅搅拌带入的 DO 难以满足上述的硝化反应. 因此, 推断硝化作用不是缺氧 MBBR 中氨氮去除现象的主要原因.

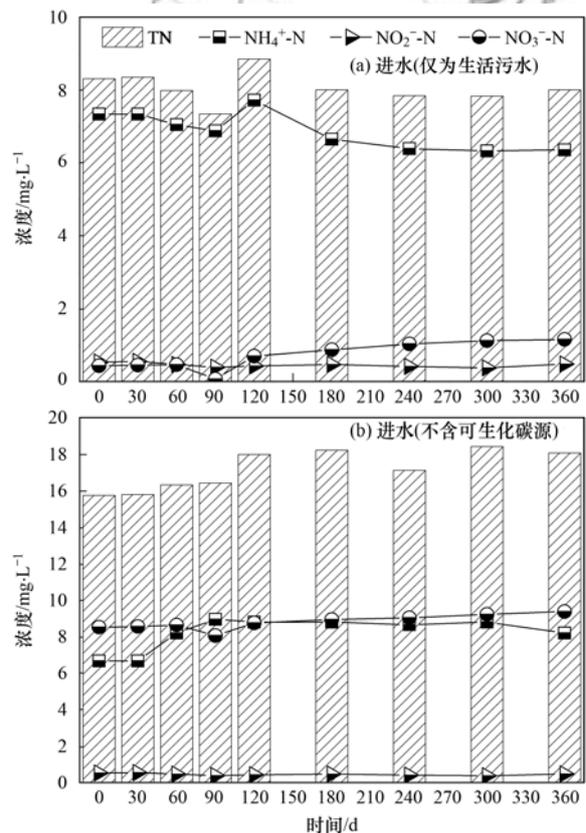


图 3 缺氧 MBBR 原位硝化活性

Fig. 3 The *in situ* nitrification activity tests in the anoxic MBBR

在硝氮去除性能的分析中推测缺氧 MBBR 中可能存在反硝化以外的脱氮途径, 结合氨氮去除现象, 推测缺氧 MBBR 中存在厌氧氨氧化反应. 为了验证厌氧氨氧化的存在, 取絮体污泥和缺氧填料生物膜混合进行了异位厌氧氨氧化活性小试, 结果如图 4 所示. 氨氮与亚硝氮同步减少, 当亚硝氮耗尽时氨氮也不变; 再次投加亚硝氮后氨氮重新开始随

亚硝氮一同减少. 以 240 ~ 300 min 的数据计算得  $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} / \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为 1.53 和 0.12, 与厌氧氨氧化反应的理论化学计量关系 1.32 和 0.26 相近<sup>[3]</sup>, 是比较典型的厌氧氨氧化现象. 厌氧氨氧化活性小试有力地支撑了缺氧 MBBR 中存在厌氧氨氧化反应. 此外, 在缺氧填料生物膜也观察到靠近载体的生物膜中分布有暗红色的颗粒, 而富含亚铁血红素 C 的厌氧氨氧化菌也呈暗红色<sup>[26]</sup>. 因此, 缺氧 MBBR 中氨氮的去除有厌氧氨氧化的作用, 即缺氧 MBBR 中存在部分厌氧氨氧化. 结合缺氧 MBBR 表现出的高效稳定的脱氮性能, 厌氧氨氧化对脱氮或有不可忽视的贡献.

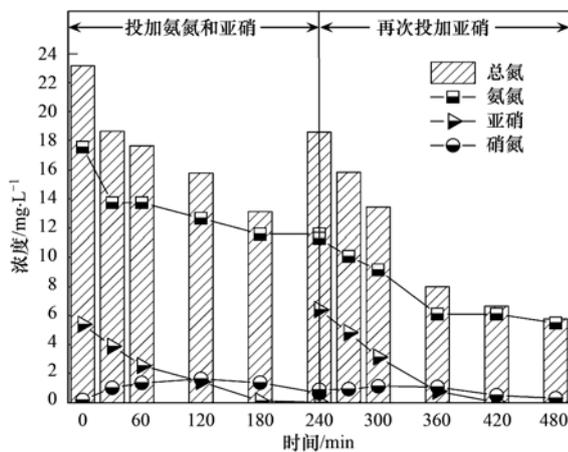


图4 缺氧 MBBR 异位厌氧氨氧化活性小试

Fig. 4 ANAMMOX activity batch test for the anoxic MBBR

### 2.3 厌氧氨氧化菌的实时定量 PCR 结果

缺氧 MBBR 中存在厌氧氨氧化反应, 而厌氧氨氧化由厌氧氨氧化菌参与完成<sup>[27]</sup>. 为了进一步了解缺氧 MBBR 中的厌氧氨氧化, 对 0、64、100、211 和 246 d 的絮体污泥和缺氧填料生物膜分别进行了总菌及厌氧氨氧化菌的 16S rRNA 实时定量 PCR, 结果如图 5 所示. 实时定量 PCR 结果表明, 厌氧氨氧化菌在缺氧 MBBR 中富集, 尤其是在缺氧填料生物膜中.

厌氧氨氧化菌在缺氧填料生物膜中富集. 厌氧氨氧化菌丰度由 0 d 的  $4.37 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  增长到了 246 d 的  $2.28 \times 10^{10} \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ , 相对丰度也由 0.01% 增至 7.21%. 缺氧填料生物膜的厌氧氨氧化菌丰度均呈增长趋势, 尤其是从 211 ~ 246 d 厌氧氨氧化菌相对丰度由 1.93% 增长至 7.21%. 在絮体污泥中也观察到了厌氧氨氧化菌的富集, 但絮体中厌氧氨氧化菌相对丰度始终较低, 且厌氧氨氧化丰度均大幅低于同一时间的缺氧填料生物膜. 211 d 时絮体污泥中厌氧氨氧化菌丰度最高, 厌氧氨氧化菌丰度及相对丰度分别为  $4.75 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  和

0.02%, 远低于此时缺氧填料生物膜中的  $6.86 \times 10^9 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$  和 1.93%. 此外, 由于絮体污泥龄由 22 d 减少为 13 d (表 1), 在 246 d 时絮体污泥中厌氧氨氧化菌丰度减少到了  $3.08 \times 10^7 \text{ copies} \cdot \text{g}^{-1}$ , 絮体污泥中世代周期长的自养细菌 (如厌氧氨氧化菌) 被淘汰, 但缺氧填料生物膜中厌氧氨氧化菌仍然继续增长. 生物膜具有独特分层结构能为不同生态生理特征的微生物提供生存机会<sup>[14]</sup>. 一般而言, 生长速率更快的微生物如异养菌会长在生物膜的外层, 而生长速率较慢的微生物例如厌氧氨氧化菌更偏向于生长于生物膜内层<sup>[28]</sup>. 内层细菌不易受外界剪切力影响和被淘洗, 有利于其持留. 无论从厌氧氨氧化菌的富集程度还是抗环境冲击能力, 缺氧填料生物膜在缺氧 MBBR 的厌氧氨氧化菌富集中起着重要作用.

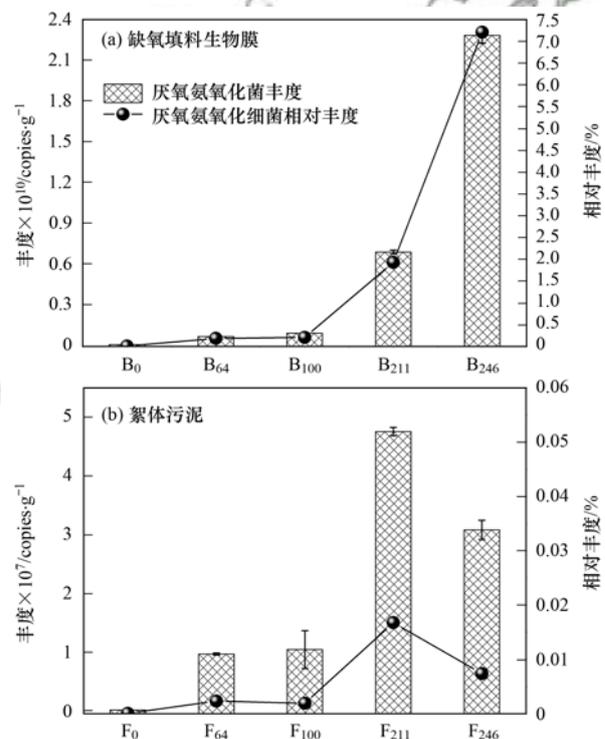


图5 缺氧填料生物膜和絮体污泥中厌氧氨氧化菌丰度变化

Fig. 5 Changes in ANAMMOX bacterial abundance in the anoxic carrier biofilms and flocs

### 3 结论

(1) 缺氧 MBBR 在 250 d 长期运行中表现出稳定高效的脱氮性能, 出水总氮在  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 实现了城市生活污水的深度脱氮.

(2) 缺氧 MBBR 中存在厌氧氨氧化反应, 结合长期脱氮性能与活性测试, 厌氧氨氧化有不可忽视的贡献, 实现了部分厌氧氨氧化脱氮.

(3) 厌氧氨氧化菌在缺氧 MBBR 中富集, 尤其是在缺氧填料生物膜中. 缺氧填料生物膜中厌氧氨

氧化菌相对丰度由 0.01% 增长到了 7.21%。缺氧填料生物膜在厌氧氨氧化菌富集中有重要作用。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Gong L X, Huo M X, Yang Q, *et al.* Performance of heterotrophic partial denitrification under feast-famine condition of electron donor: a case study using acetate as external carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 263-269.
- [ 2 ] Mulder A, Van De Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, **16**(3): 177-184.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] Burgin A J, Hamilton S K. Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, **5**(2): 89-96.
- [ 5 ] Kartal B, Kuenen J G, Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. *Science*, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [ 6 ] Van Dongen U, Jetten M S M, Van Loosdrecht M C M. The SHARON® -Anammox® process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. *Water Science & Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [ 7 ] Ma B, Zhang S J, Zhang L, *et al.* The feasibility of using a two-stage autotrophic nitrogen removal process to treat sewage [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(17): 8331-8334.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Wang S Y, Peng Y Z, Ma B, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation in traditional municipal wastewater treatment plants with low-strength ammonium loading: widespread but overlooked [J]. *Water Research*, 2015, **84**: 66-75.
- [ 10 ] Park H, Brotto A C, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Discovery and metagenomic analysis of an anammox bacterial enrichment related to *Candidatus "Brocadia caroliniensis"* in a full-scale glycerol-fed nitrification-denitrification separate centrate treatment process [J]. *Water Research*, 2017, **111**: 265-273.
- [ 11 ] Corbalán-Robles L, Picioreanu C, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Analysing the effects of the aeration pattern and residual ammonium concentration in a partial nitrification-anammox process [J]. *Environmental Technology*, 2016, **37**(6): 694-702.
- [ 12 ] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitrification and anammox [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 900-909.
- [ 13 ] Ibrahim M, Yusof N, Yusoff M Z M, *et al.* Enrichment of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria for short start-up of the anammox process: a review [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, **57**(30): 13958-13978.
- [ 14 ] Soliman M, Eldyasti A. Ammonia-oxidizing bacteria (AOB): opportunities and applications—a review [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2018, **17**(2): 285-321.
- [ 15 ] Shieh W K, Keenan J D. Fluidized bed biofilm reactor for wastewater treatment [A]. In: *Bioproducts* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1986, **33**: 131-169.
- [ 16 ] Beliaevski M, Meerovich I, Tarre S, *et al.* Biological denitrification of brines from membrane treatment processes using an upflow sludge blanket (USB) reactor [J]. *Water Science & Technology*, 2010, **61**(4): 911-917.
- [ 17 ] Kwok W K, Picioreanu C, Ong S L, *et al.* Influence of biomass production and detachment forces on biofilm structures in a biofilm airlift suspension reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, **58**(4): 400-407.
- [ 18 ] 李景贤, 罗麟, 杨慧霞. MBBR 法工艺的应用现状及其研究进展 [J]. *四川环境*, 2007, **26**(5): 97-101.
- Li J X, Luo L, Yang H X. Status quo of application and research progress of MBBR process [J]. *Sichuan Environment*, 2007, **26**(5): 97-101.
- [ 19 ] Aspegren H, Nyberg U, Andersson B, *et al.* Post denitrification in a moving bed biofilm reactor process [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(1): 31-38.
- [ 20 ] Walter W G. Standard methods for the examination of water and wastewater (11th ed.) [J]. *American Journal of Public Health and the Nations Health*, 1961, **51**(6): 940.
- [ 21 ] Schmid M, Twachtmann U, Klein M, *et al.* Molecular evidence for genus level diversity of bacteria capable of catalyzing anaerobic ammonium oxidation [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2000, **23**(1): 93-106.
- [ 22 ] Schmid M, Walsh K, Webb R, *et al.* *Candidatus "Scalindua brodae"*, sp. nov., *Candidatus "Scalindua wagneri"*, sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2003, **26**(4): 529-538.
- [ 23 ] Koike S, Krapac I G, Oliver H D, *et al.* Monitoring and source tracking of tetracycline resistance genes in lagoons and groundwater adjacent to swine production facilities over a 3-year period [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(15): 4813-4823.
- [ 24 ] Kalyuzhnyi S, Gladchenko M. DEAMOX-New microbiological process of nitrogen removal from strong nitrogenous wastewater [J]. *Desalination*, 2009, **248**(1-3): 783-793.
- [ 25 ] Van Kessel M A H J, Speth D R, Albertsen M, *et al.* Complete nitrification by a single microorganism [J]. *Nature*, 2015, **528**(7583): 555-559.
- [ 26 ] Jetten M S M, Van Niftrik L, Strous M, *et al.* Biochemistry and molecular biology of anammox bacteria [J]. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 2009, **44**(2-3): 65-84.
- [ 27 ] Falkowski P G, Tom F, Delong E F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles [J]. *Science*, 2008, **320**(5879): 1034-1039.
- [ 28 ] Heijnen J J, Mulder A, Enger W, *et al.* Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in waste-water treatment [J]. *The Chemical Engineering Journal*, 1989, **41**(3): B37-B50.

## CONTENTS

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