

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素; 以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 邓露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征

罗景文^{1,2}, 杨津津^{1,2}, 李绍康^{1,2}, 赵昕宇^{1,2}, 杨一飞^{1,2}, 韩嘉琛^{1,2}, 李翔^{1,2*}

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护地下水污染模拟与控制重点实验室, 北京 100012)

摘要: 为实现室温下长期储存的厌氧氨氧化污泥的活性快速恢复, 采用 3 组反应器分别对在室温 (15 ~ 30℃) 且无基质的条件下储存 9 个月的厌氧氨氧化污泥进行活性恢复, 其中 R2 和 R3 反应器分别添加彗星纤维填料和 K3 填料作为生物载体, 探究不同填料添加对厌氧氨氧化污泥活性恢复速率的影响. 结果表明, R2 和 R3 反应器分别在第 8 d 和第 10 d 开始出现厌氧氨氧化反应, TIN 去除率分别达 82.25% 和 80.92%, 明显优于未添加填料的 R1 反应器 (第 15 d 开始出现, TIN 去除率 80.26%). 经过 42 d 的运行, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 分别达 300 mg·L⁻¹ 和 396 mg·L⁻¹, 3 组反应器的 TIN 去除率分别为 78.96%、84.92% 和 84.66%. 微生物群落结构分析显示, R2 和 R3 反应器中厌氧氨氧化菌的相对丰度分别为 6.85% 和 6.06%, 是 R1 反应器的 2 ~ 4 倍, 污泥中主要的厌氧氨氧化菌属为 *Candidatus Jettenia*, 其在 3 组反应器中的相对丰度分别为 1.62%、5.74% 和 5.21%. 综上, 投加填料构建厌氧氨氧化生物膜-颗粒污泥复合系统, 可以显著缩短在室温且无基质条件下长期储存的厌氧氨氧化污泥的活性恢复时间, 填料有效促进了反应器中厌氧氨氧化菌相对丰度的提高, 且彗星纤维填料的促进作用略优于 K3 填料.

关键词: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX); 填料; 室温储存; 活性恢复; 菌群特征

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0424-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105271

Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics

LUO Jing-wen^{1,2}, YANG Jin-jin^{1,2}, LI Shao-kang^{1,2}, ZHAO Xin-yu^{1,2}, YANG Yi-fei^{1,2}, HAN Jia-chen^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Simulation and Control of Groundwater Pollution, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to realize the rapid recovery of ANAMMOX sludge bacterial activity after long-term room temperature storage, three groups of reactors were added to ANAMMOX sludge that had been stored without substrate at room temperature (15-30℃) for 9 months. Among the three groups of reactors, comet fiber carrier and K3 carrier were added to R2 and R3 reactors, respectively, as biological carriers. The effects of different carriers on the recovery rate of ANAMMOX sludge bacterial activity were investigated. The results showed that ANAMMOX reactions in the R2 and R3 reactors began taking place on the 8th and 10th day, respectively, with respective TIN removal rates of 82.25% and 80.92%, which were significantly improved compared with that in the R1 reactor, in which no carrier was added (ANAMMOX reaction started occurring on the 15th day with a TIN removal rate of 80.26%). After 42 days with influent, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ and $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ respectively increased to 300 mg·L⁻¹ and 396 mg·L⁻¹, and the TIN removal rates of the three groups of reactors were respectively 78.96%, 84.92%, and 84.66%. Microbial community structure analysis showed that the relative abundances of ANAMMOX bacteria in the R2 and R3 reactor were respectively 6.85% and 6.06%, two to four times that in the R1 reactor. The predominant ANAMMOX bacteria in the sludge was *Candidatus Jettenia*, whose relative abundances in the three groups of reactors were respectively 1.62%, 5.74%, and 5.21%. The results show that ANAMMOX biofilm-granular sludge complex systems constructed by adding carriers can considerably shorten the time for recovering ANAMMOX sludge bacterial activity after long-term room temperature storage without substrate. The carriers effectively promoted the relative abundances of ANAMMOX bacteria in the reactors, whereas the promoting effect of comet fiber carrier was slightly more significant than that of the K3 carrier.

Key words: anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX); carrier; room temperature storage; activity recovery; flora characteristics

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 是一种环境友好的新型生物脱氮工艺, 有效解决了传统生物脱氮工艺碳源需求大和能耗成本高的问题, 被认为是 21 世纪最具发展前景的生物脱氮工艺之一^[1]. 然而, 作为 ANAMMOX 工艺的关键功能菌, 厌氧氨氧化菌生长缓慢, 生长速率远低于其他脱氮细菌^[2], 且对温度、pH 和 DO 等外界环境的要求十分苛刻^[3, 4], 使其不得不面临工艺启动困难, 菌种来源匮乏等问题, 极大地限制了厌氧氨氧化成为污水处理的主流工艺^[5]. ANAMMOX 污泥的储存可有效保留厌氧氨氧化菌 (AnAOB), 活化后的

ANAMMOX 储存污泥是厌氧氨氧化工艺可靠的菌种来源之一^[6]. 因此, 在室温条件下对厌氧氨氧化污泥进行较长时间的储存, 并研究能在短期内使其脱氮活性快速恢复的方法, 对厌氧氨氧化工艺的工业化应用具有重要意义.

目前厌氧氨氧化污泥的活性恢复主要面临着 2 个方面的问题: 一是储存时间越长, 污泥的脱氮性能

收稿日期: 2021-05-26; 修订日期: 2021-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC1910403)

作者简介: 罗景文 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 13971650013@163.com

* 通信作者, E-mail: lixiang@cras. org. cn

越低,需要的恢复时间越长. 黄佳路等^[7]研究发现 ANAMMOX 污泥的比厌氧氨氧化活性随储存时间呈近乎线性下降(r^2 为 0.978). 二是厌氧氨氧化菌在恢复过程中容易被 N_2 气泡携带而从反应器中洗脱,导致生物质的漂浮^[8,9]. 有研究表明,AnAOB 分泌的胞外聚合物可以使其紧密附着在生物填料上,从而有效缓解反应器内部的细胞冲刷现象,增强系统的生态稳定性和机械稳定性^[10,11]. 然而,关于填料对长期储存后的 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响研究较为稀缺.

本研究将活性良好的厌氧氨氧化污泥置于室温($15 \sim 30^\circ\text{C}$)条件下进行为期 9 个月的长期储存,储存过程中不提供任何微生物生长所需的基质. 通过比较添加不同填料的厌氧氨氧化反应器的污泥颜色变化、脱氮效果和微生物群落特征等情况,探究长期室温储存后的厌氧氨氧化污泥的活性恢复能力,分析填料在恢复过程中发挥的作用,以期为长期室温储存后的 ANAMMOX 污泥的活性快速恢复提供理论依据和技术指导.

1 材料与方法

1.1 接种污泥

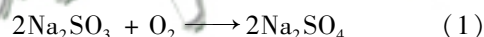
储存前的厌氧氨氧化污泥取自某工厂厌氧氨氧化脱氮装置,污泥浓度 $2\,250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈红褐色,有良好的沉降性能和厌氧氨氧化活性. 将该厌氧氨氧化污泥在室温条件下避光密封储存 9 个月,期间室内环境最高温度为 30°C ,最低温度为 15°C .

污泥活性恢复前,用氨氮和亚硝态氮浓度均为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的培养液清洗 3 遍,接着将污泥粉碎,使其粒径保持在 1 mm 左右,增大其与培养液的接触面积,强化污泥恢复过程中的生物反应.

1.2 实验用水

本实验采用人工配水,由 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaNO_2

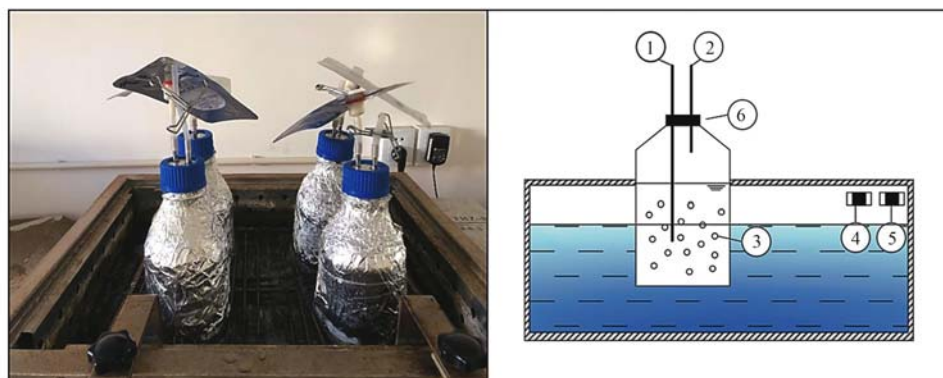
提供氮源,通过 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$ 控制 pH 在 $7.5 \sim 8.0$. 其他配水组分包括: $\rho(\text{NaHCO}_3)$ $1\,250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O})$ $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{CaCl}_2)$ $5.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 I $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素 II $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$. 微量元素 I 成分: $\rho(\text{EDTA})$ $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O})$ $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素 II 成分: $\rho(\text{EDTA})$ $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O})$ $990\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O})$ $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O})$ $430\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O})$ $240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O})$ $220\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O})$ $190\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{H}_3\text{BO}_4)$ $14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 本实验在进水中额外投加了 $\rho(\text{Ca}^{2+})$ $0.03\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,以促进厌氧氨氧化菌分泌胞外聚合物,帮助受损的厌氧氨氧化菌群附着在填料上并完成再生^[12,13]. 考虑到氮气脱氧需要配置减压阀、液氮钢瓶等相对复杂的曝气设备,每次脱氧需耗时 20 min 左右,而采用无水 Na_2SO_3 进行化学脱氧只需搅拌 15 s 即可达到目标脱氧效果^[14],且化学脱氧的成本远低于氮气脱氧,故本研究采用了操作更便捷、成本更低、脱氧更快的无水亚硫酸钠还原脱氧法. 本实验投加的无水 Na_2SO_3 浓度约为 $0.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,结合相关文献,该 SO_3^{2-} 浓度对微生物和基质浓度几乎不产生影响^[15],反应式见式(1).



活性恢复期间根据污泥脱氮效果,对进水浓度进行了 3 次提升,详见表 1.

1.3 实验装置

本实验装置如图 1 所示,反应器采用有机玻璃材质,有效容积 1.0 L ,其中,每组反应器污泥投加量为 0.3 L ,水体体积为 0.4 L ,容积交换率 50% ,水力停留时间 24 h . 装置接口处均采用硅胶密封,以保证反应器内的厌氧环境. 通过恒温水浴振荡器将装置温度控制在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$,并以 $120\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的频率



①表示进出水口;②表示集气袋;③表示填料;④表示温度控制开关;⑤表示振荡频率调节旋钮;⑥表示硅胶塞

图 1 实验装置示意

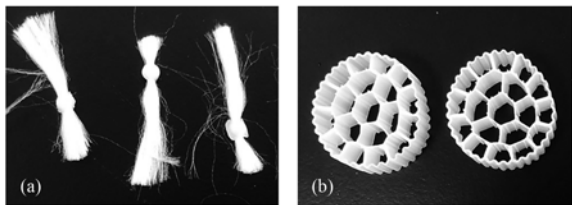
Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

振荡,使反应器内部培养液分布均匀. 反应器外部用锡纸包裹遮光,防止藻类滋生.

表 1 实验水质情况/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Characteristics of water for the experiment/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
阶段	进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	进水 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$
I (1 ~ 10 d)	50	66
II (11 ~ 15 d)	80	105.6
III (16 ~ 25 d)	200	264
IV (26 ~ 42 d)	300	396

如图 2 所示,R2 和 R3 反应器内分别填充彗星纤维填料(比表面积 $1\,100\,\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)和 K3 填料(比表面积约 $500\,\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$)作为生物载体.



(a) 彗星纤维填料(R2); (b) K3 填料(R3)

图 2 生物填料

Fig. 2 Biological carrier

1.4 检测项目与方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度分别采用纳氏试剂分光光度法、 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法和紫外分光光度法测定,总无机氮 $\text{TIN} = [\text{NH}_4^+-\text{N}] + [\text{NO}_2^--\text{N}] + [\text{NO}_3^--\text{N}]$. 污泥浓度采用重量法测定,pH 采用便携式 pH 计检测.

采用 16S rRNA 高通量测序技术来研究厌氧氨氧化系统中的微生物多样性和群落结构. 样品取自运行第 35 d 的 3 组反应器中的 ANAMMOX 污泥.

2 结果与讨论

2.1 恢复过程中污泥的颜色变化

红色是厌氧氨氧化菌(AnAOB)最显著的特征^[16],活性恢复过程中污泥的颜色变化见图 3. 厌氧氨氧化污泥在未补充基质的情况下经过 9 个月的室温保存,结构变得细碎,颜色发黑,散发臭味,这是由于在无基质添加的厌氧氨氧化污泥储存过程中,AnAOB 的胞内血红素不断衰减,同时由于菌体死亡水解,黑色硫化物的含量增加^[17],最终逐渐覆盖住污泥原本的红色外观,使污泥呈现黑色. 经过 42 d 的运行,AnAOB 利用包括细胞色素 c 在内的多种蛋白质,完成菌体的生长、繁殖和代谢,厌氧氨氧化活性明显提高. R2 和 R3 反应器中可看到明显的红色颗粒污泥以及红色生物膜,而 R1 反应器中的污泥总体颜色较恢复前虽然发生了变化,但几乎看不到红色颗粒污泥. Kang 等^[18]的研究发现色度与比厌

氧氨氧化活性显著相关($r = 0.940$),可以作为一种直观的厌氧氨氧化活性指标. 在本研究中,R2 和 R3 反应器内的厌氧氨氧化活性显然更高.

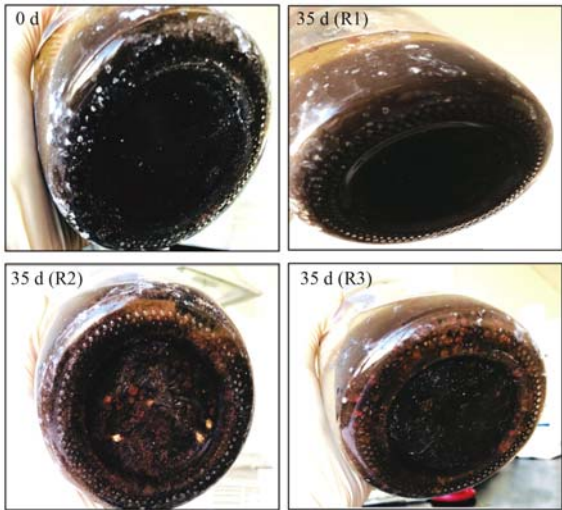


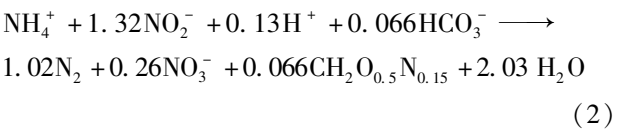
图 3 活性恢复过程中污泥的颜色变化情况

Fig. 3 Color change of sludge during activity recovery

2.2 活性恢复过程中污泥的脱氮效果

2.2.1 启动阶段

本研究采用低氮进水和较长水力停留时间来启动恢复实验,待污泥脱氮性能逐渐恢复后,再逐步提高进水基质浓度,提升系统脱氮负荷. 各阶段污泥脱氮效果和化学计量比变化见图 4. 根据 ANAMMOX 反应的化学方程式[式(2)]^[19],本实验各阶段进水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的化学计量比均采用 1: 1.32.



第 I 阶段(1 ~ 10 d),进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 分别为 $50\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $66\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水力停留时间 HRT 设定为 24 h. 3 组反应器经过短暂的适应之后脱氮性能均有提升,但处理效果不够稳定,化学计量比波动较大. 由图 4(d)可知,R2 和 R3 反应器的氮去除效果明显优于 R1 反应器. Zhang 等^[20]的研究发现填料可以为微生物生长提供不同的生态位,实现氨氧化菌(AOB)和 AnAOB 等不同菌种的协同脱氮,故 R2 和 R3 反应器获得了更高的氮去除率. 在第 8 d 和第 10 d 时,R2 和 R3 反应器内的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 同步去除率均达到 90% 以上,系统开始出现 ANAMMOX 反应, TIN 去除率分别达 82.25% 和 80.92%,R2 反应器的脱氮性能略优于 R3 反应器. 江宇勤等^[21]的研究指出生物膜的质量会受到载体的比表面积、生物亲和性和表面粗糙度等理化性质的影响. 相比于 K3 填料,彗星纤维填料具有更大的比表面积,且表面亲和性更强,有利于微

生物附着,故 R2 反应器的脱氮性能更佳。

第Ⅱ阶段(11~15 d),考虑到恢复初期反应器运行效果不稳定,易因为氮负荷的过大波动而造成基质浓度抑制现象,第Ⅱ阶段对进水基质浓度进行了小幅提升, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 分别提高到 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $105.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。图4(e)显示,该阶段未添加填料的R1反应器的化学计量比与理论值相差最大,且波动最为明显,原因系R1反应器中的AnAOB活性仍较低,尚未占据主导地位。

2.2.2 负荷提高和稳定运行阶段

随着ANAMMOX污泥脱氮性能的逐渐恢复,第Ⅲ阶段(16~25 d),进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 分别调整为 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $264\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水力停留时间HRT为24 h。图4(a)和图4(b)显示,氮负荷的

大幅提高使3组反应器的氮去除效果均受到影响而降低,但与R1相比,R2和R3反应器受到的波动要小得多,添加填料的ANAMMOX反应器具有更强的生态稳定性和耐冲击负荷能力。

为了进一步考察3组ANAMMOX反应器的脱氮稳定性,第Ⅳ阶段(26~42 d),进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 进一步提高到 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $396\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由图4(d)和图4(e)可知,与前几个阶段相比,第Ⅳ阶段中3组反应器的TIN去除率波动幅度明显减小,化学计量比逐渐趋近理论值($\text{NO}_2^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 等于1.32, $\text{NO}_3^--\text{N}/\text{NH}_4^+-\text{N}$ 等于0.26),ANAMMOX系统开始进入稳定运行阶段。3组反应器经过42 d的运行,脱氮性能均得到有效提升,TIN

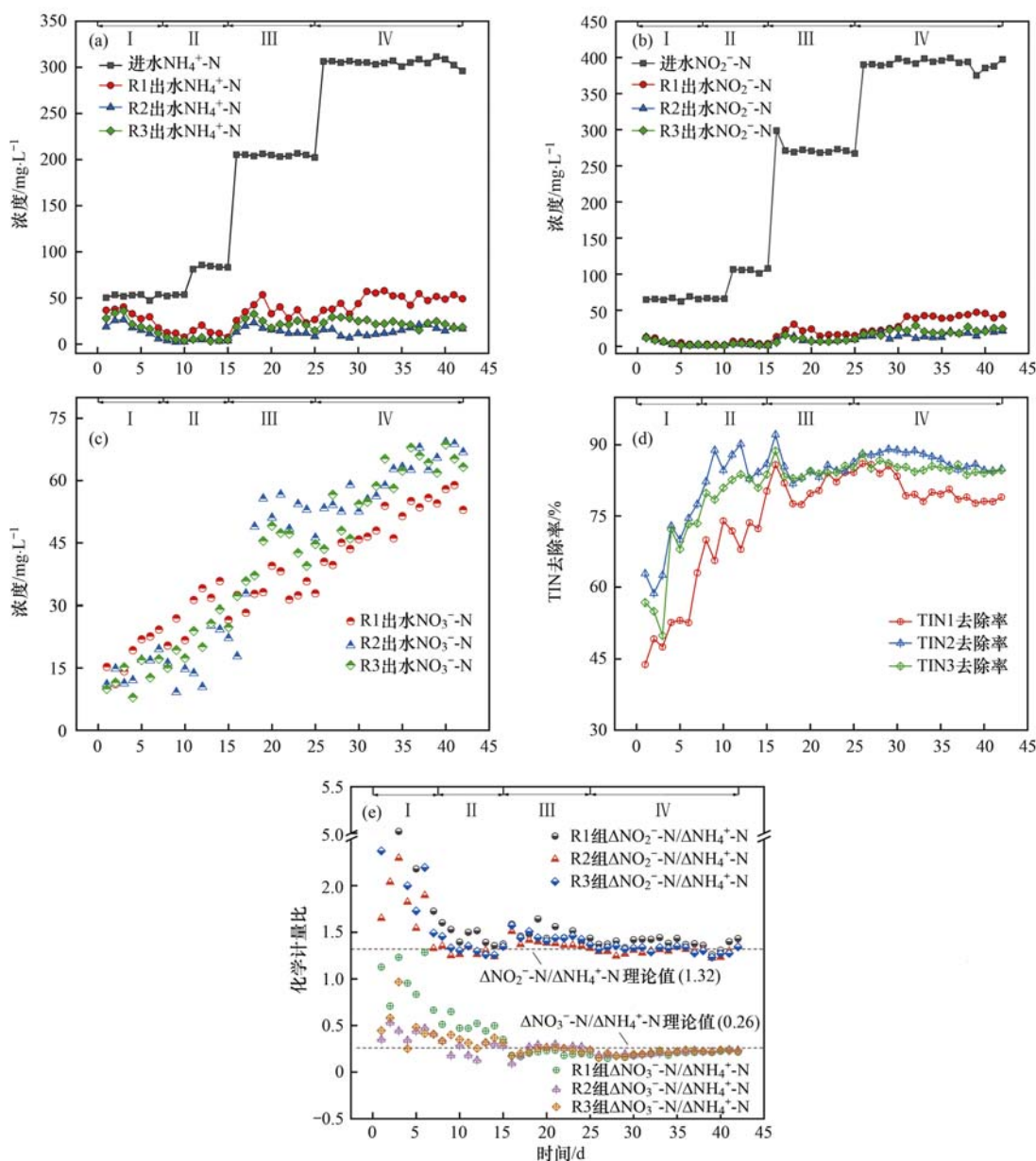


图4 活性恢复过程中反应器的脱氮性能和化学计量比变化

Fig. 4 Changes in denitrification performance and stoichiometric ratio in the reactor during activity recovery

去除率分别达 78.96%、84.92% 和 84.66%， $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 1.43、1.35 和 1.34，略高于理论值 1.32， $\text{NO}_3^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 0.21、0.24 和 0.23，略低于理论值 0.26。王贤等^[22]的研究指出，不同反应装置的化学计量比往往因为反应器类型、菌种的结构和状态，所处环境条件不同而存在差异。一个好的 ANAMMOX 系统往往是多菌种共同协作的脱氮过程^[20]，本实验除了存在氨氧化菌(AOB)将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 外，还存在部分反硝化菌将 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ ，使系统出现 $\text{NO}_3^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 略低于理论值，而 $\text{NO}_2^- - \text{N} / \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 略高于理论值的现象。结果显示，R2 和 R3 反应器的 TIN 去除率显著优于 R1 反应器，在长期室温储存的 ANAMMOX 污泥的活性恢复过程中，填料可以为微生物提供更加稳定的生长环境，增强 ANAMMOX 污泥抵抗不利环境的能力，提高 ANAMMOX 系统的脱氮稳定性。

2.3 微生物群落特征分析

2.3.1 门分类水平上菌群结构分析

图 5 所示的是 3 组反应器在门水平上的微生物群落结构，优势菌门（相对丰度 > 5%）为 Proteobacteria（变形菌门）、Chloroflexi（绿弯菌门）、Bacteroidetes（拟杆菌门）、Planctomycetes（浮霉菌门）和 Patescibacteria。AnAOB 是化能自养型细菌，目前发现的 AnAOB 均属于浮霉菌门，R1、R2 和 R3 反应器中的浮霉菌门占比分别为 3.79%、8.71% 和 8.86%。刘冰等^[11]的研究发现填料的理化特性可显著影响脱氮功能菌（尤其是 AnAOB）的富集效果及活性，添加填料的 R2 和 R3 反应器获得了更高的浮霉菌门丰度。

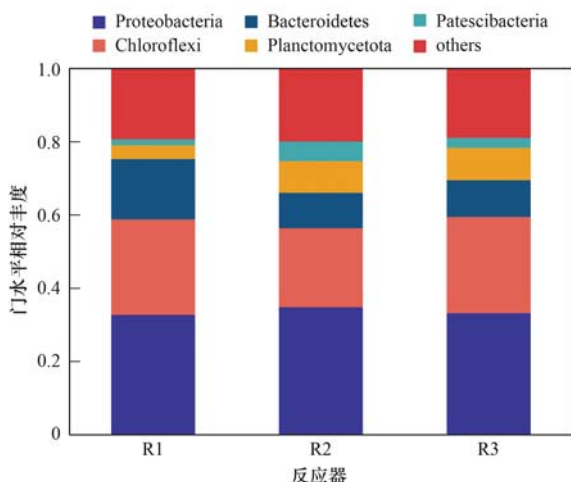
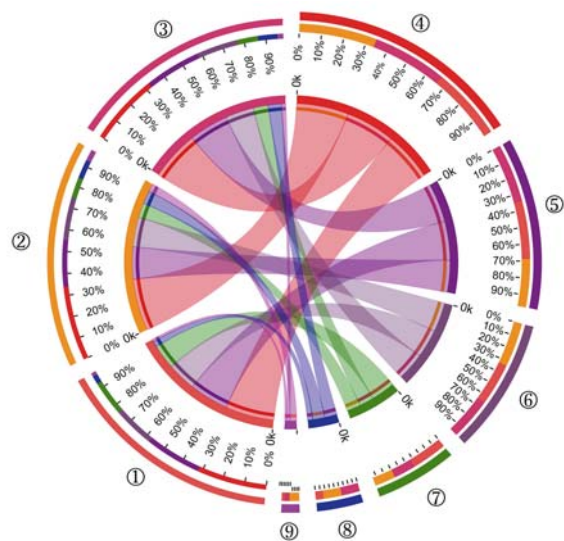


图 5 微生物群落门水平分布

Fig. 5 Distribution of microbial communities on phylum level

此外，在 3 组反应器中，变形菌门 (Proteobacteria) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 均占据了很大的比例 (图 6)，这与多数研究中的厌氧氨氧

化系统菌群分布相一致^[23,24]。变形菌门与脱氮过程密切相关^[25,26]，在厌氧氨氧化系统中广泛存在，包括氨氧化细菌 (AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 在内的多种微生物都属于变形菌门，参与脱氮及许多污染物的降解过程。绿弯菌门常在自养脱氮系统中被发现，是起骨架和载体作用的重要伴生功能菌^[27,28]，在 ANAMMOX 系统中扮演着重要角色。



①表示 R1 组；②表示 R2 组；③表示 R3 组；④表示 Proteobacteria (变形菌门)；⑤表示 Chloroflexi (绿弯菌门)；⑥表示 others (其他)；⑦表示 Bacteroidetes (拟杆菌门)；⑧表示 Planctomycetes (浮霉菌门)；⑨表示 Patescibacteria

图 6 样品与物种关系 (门水平)

Fig. 6 Relationship between samples and species (phylum level)

2.3.2 属分类水平上菌群结构分析

考察 3 组反应器在属水平上的微生物群落结构，并进行分析，不同 ANAMMOX 反应器中的 AnAOB 丰度及其在浮霉菌门中的占比见表 2。热图可以通过可视化的方法直观地反映微生物的群落组成，污泥样品中相对丰度排名前 25 的属的分布热图见图 7。测序结果表明，污泥样品中典型的 ANAMMOX 菌属为 *Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Brocadia*，其中，*Candidatus Jettenia* 在 3 组反应器中的相对丰度分别为 1.62%、5.74% 和 5.21%，其在 R2 反应器中的相对丰度最高，其次是 R3 反应器，添加填料的两组反应器中的 *Candidatus Jettenia* 的相对丰度是空白对照组的 3 ~ 4 倍。*Candidatus Brocadia* 在 3 组反应器中的相对丰度均较低，分别为 0.57%、1.11% 和 0.85%。总体来看，R1、R2 和 R3 反应器中的 AnAOB 在浮霉菌门中的占比分别为 57.78%、78.65% 和 68.40%。可以发现，填料的加入促进了 AnAOB 在浮霉菌门中占据主导地位，使优势菌属更为凸显。

表 2 反应器 AnAOB 分布情况/%
Table 2 Distribution of ANAMMOX bacteria in the reactor/%

反应器	相对丰度			AnAOB 在浮霉菌门中的占比	
	<i>Candidatus Jettenia</i>	<i>Candidatus Brocadia</i>	AnAOB	浮霉菌门	门中的占比
R1	1.62	0.57	2.19	3.79	57.78
R2	5.74	1.11	6.85	8.71	78.65
R3	5.21	0.85	6.06	8.86	68.40

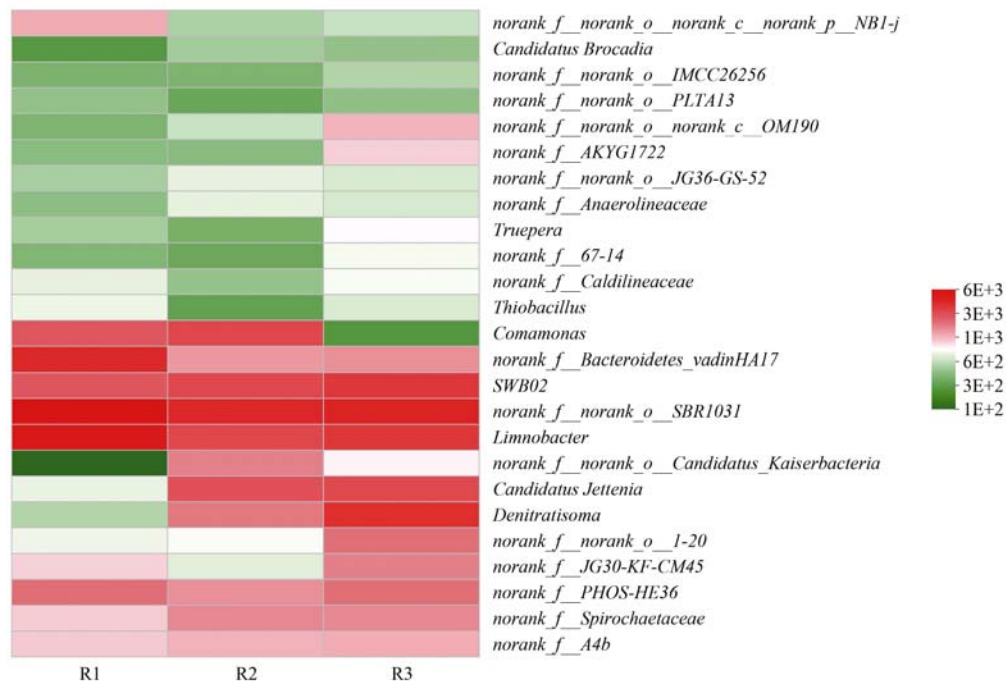


图 7 微生物群落热图分析 (属水平)
Fig. 7 Microbial community heatmap analysis (genus level)

2.4 厌氧氨氧化生物膜生长和颗粒污泥形成机制

一个好的 ANAMMOX 系统中氮的去除往往是以 AnAOB 为主导功能菌,多种脱氮细菌综合作用的结果,好氧菌和异养菌为 AnAOB 提供了基质和生存环境^[29]. R2 和 R3 反应器中的 ANAMMOX 生物膜如图 8 所示.



图 8 反应器内的 ANAMMOX 生物膜
Fig. 8 ANAMMOX biofilm in the reactor

R2 和 R3 反应器中的颗粒污泥主要是通过生物膜分离形成的,可能的颗粒化过程如图 9 所示.生物膜的形成是一个动态的过程,包括初始生物量的

积累(微生物附着)、发育(生长)和末端生物量的积累(成熟)^[30].最初,悬浮污泥首先吸附在填料上,逐渐生长形成生物膜,这时的生物膜主要由好氧氨氧化菌(AOB)和异养反硝化菌(DEN)组成.待好氧菌把氧气消耗后,生物膜内部出现缺氧区,为 AnAOB 的生存提供了有利条件,生物膜上的 AnAOB 数量逐渐增多.

胞外聚合物(EPS)是形成生物膜的重要条件,李鸿江等^[31]的研究发现 AnAOB 分泌的胞外聚合物含量要高于 AOB,故其在填料上的挂膜效果显著优于 AOB.因此,在良好的生存环境下,AnAOB 利用氮素实现自身新陈代谢和生长繁殖,菌体数量得以增长,逐渐在填料上形成一层 ANAMMOX 生物膜并变厚.在机械振荡和水力剪切作用下,部分厌氧氨氧化聚集体从过厚的生物膜外侧分离出来,逐渐形成颗粒污泥,进行菌体的分裂繁殖,实现 *Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Brocadia* 数量的成倍增长,生物膜上的 AnAOB 的相对丰度是空白对照组的 2 ~ 4 倍.

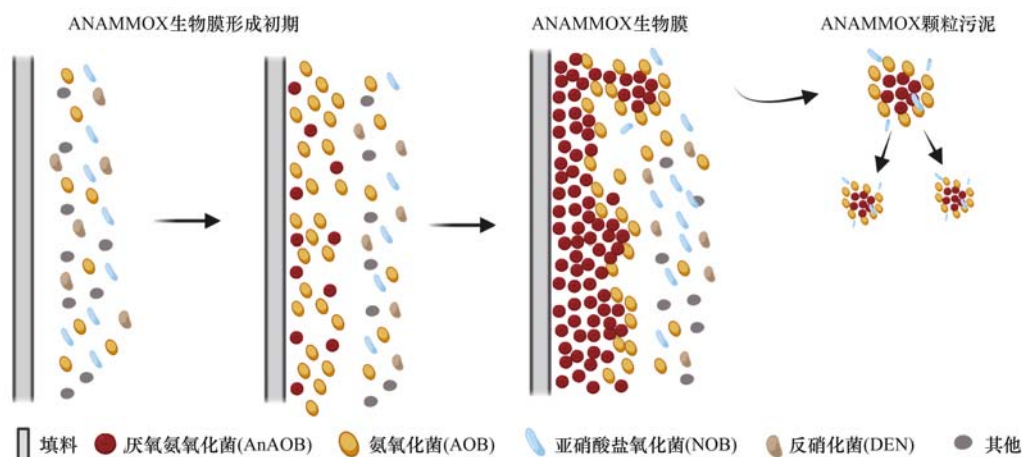


图9 ANAMMOX生物膜生长和颗粒污泥形成过程

Fig. 9 ANAMMOX biofilm growth and granular sludge formation process

3 结论

(1) 投加填料构建厌氧氨氧化生物膜-颗粒污泥复合系统, 可以有效提高室温下储存 9 个月的 ANAMMOX 污泥的活性恢复速率, 投加填料的 2 组 ANAMMOX 反应器的 AnAOB 相对丰度是空白对照组的 2~4 倍, 填料有效提高了反应器中的 AnAOB 的相对丰度, 且彗星纤维填料的促进作用略优于 K3 填料。

(2) 在厌氧氨氧化污泥的活性恢复过程中, 填料可以提高 ANAMMOX 污泥的耐冲击负荷能力, 提高系统的生态稳定性和脱氮稳定性。

参考文献:

- [1] Zhang M, Wang S Y, Ji B, *et al.* Towards mainstream deammonification of municipal wastewater: partial nitrification-ANAMMOX versus partial denitrification-ANAMMOX [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **692**: 393-401.
- [2] Wu G X, Zhang T Q, Gu M Q, *et al.* Review of characteristics of anammox bacteria and strategies for anammox start-up for sustainable wastewater resource management [J]. *Water Science & Technology*, 2020, **82**(9): 1742-1757.
- [3] Tomaszewski M, Cema G, Ziemińska-Buczyńska A. Influence of temperature and pH on the anammox process: a review and meta-analysis [J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 203-214.
- [4] Vodičková P. Anammox bakterie a jejich unikátní charakteristiky [J]. *Chemické Listy*, 2019, **113**(6): 350-356.
- [5] Ma W J, Li G F, Huang B C, *et al.* Advances and challenges of mainstream nitrogen removal from municipal wastewater with anammox-based processes [J]. *Water Environment Research*, 2020, **92**(11): 1899-1909.
- [6] Kocameci B A, Dityapak D, Semerci N, *et al.* Anammox start-up strategies: the use of local mixed activated sludge seed versus Anammox seed [J]. *Water Science & Technology*, 2018, **78**(9): 1901-1915.
- [7] 黄佳路, 王小龙, 高大文. 常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4687-4695.
- [8] Huang J L, Wang X L, Gao D W. Storage and reactivation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge at room temperature [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4687-4695.
- [9] Quan L M, Khanh D P, Hira D, *et al.* Reject water treatment by improvement of whole cell ANAMMOX entrapment using polyvinyl alcohol/alginate gel [J]. *Biodegradation*, 2011, **22**(6): 1155-1167.
- [10] Zhu G L, Yan J, Hu Y Y. Anaerobic ammonium oxidation in polyvinyl alcohol and sodium alginate immobilized biomass system: a potential tool to maintain anammox biomass in application [J]. *Water Science & Technology*, 2014, **69**(4): 718-726.
- [11] Engelbrecht S, Fondengap M T, Rathsack K, *et al.* Highly efficient long-term storage of carrier-bound anammox biomass [J]. *Water Science & Technology*, 2016, **74**(8): 1911-1918.
- [12] 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 等. 填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 283-292.
- [13] Liu B, Zheng Y M, Qin H A, *et al.* Effect of filter medium on the enhancement of complete autotrophic nitrogen removal over nitrite process in a tidal flow constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 283-292.
- [14] He T X, Xie D T, Ni J P, *et al.* Ca (II) and Mg (II) significantly enhanced the nitrogen removal capacity of *Arthrobacter arilaitensis* relative to Zn (II) and Ni (II) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **368**: 594-601.
- [15] Ma X Y, Jin Y, Zhang W J. Effects of Ca²⁺ concentration on anaerobic ammonium oxidation reactor microbial community structure [J]. *Water*, 2019, **11**(7), doi: 10.3390/w11071341.
- [16] 杜帅, 李凤娟, 李南锟, 等. 厌氧氨氧化系统的快速启动及其脱氮性能研究 [J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(5): 101-108.
- [17] Du S, Li F J, Li N K, *et al.* Study on start-up and denitrification performance of anaerobic ammonium oxidation system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(5): 101-108.
- [18] Zhang X J, Zhang N, Chen Z, *et al.* Long-term impact of sulfate on an autotrophic nitrogen removal system integrated partial nitrification, ANAMMOX and endogenous denitrification (PAED) [J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 336-343.
- [19] Kartal B, Keltjens J T. Anammox biochemistry: a tale of heme c proteins [J]. *Trends in Biochemical Sciences*, 2016, **41**(12): 998-1011.
- [20] 汪彩华, 郑平, 唐崇俭, 等. 间歇性饥饿对厌氧氨氧化菌混

- 培物保藏特性的影响[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 36-43.
- Wang C H, Zheng P, Tang C J, *et al.* Effects of intermittent starvation on preservation characteristics of ANAMMOX bacteria [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 36-43.
- [18] Kang D, Li Y Y, Xu D D, *et al.* Deciphering correlation between chromaticity and activity of anammox sludge[J]. *Water Research*, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116184.
- [19] 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.
- [20] Zhang L, Liu M M, Zhang S J, *et al.* Integrated fixed-biofilm activated sludge reactor as a powerful tool to enrich ANAMMOX biofilm and granular sludge[J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 114-118.
- [21] 江宇勤, 厉炯慧, 方治国. 多孔填料特性对生物膜形成影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3684-3690.
- Jiang Y Q, Li J H, Fang Z G. Effect of porous fillers properties on biofilm growth[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3684-3690.
- [22] 王贤, 汪涛, 王书航, 等. 常温条件下厌氧氨氧化污泥储存及激活[J]. 工业水处理, 2020, **40**(4): 44-48.
- Wang X, Wang T, Wang S H, *et al.* Storage and activation of anaerobic ammonium oxidation sludge under room temperature conditions[J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, **40**(4): 44-48.
- [23] 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 等. 厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5535-5543.
- Yan B, Xia S, Gui S L, *et al.* Microbial community structure and diversity during the enrichment of anaerobic ammonium oxidation bacteria[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5535-5543.
- [24] 严锋, 张方, 袁林江. ANAMMOX 反应器启动前后微生物群落结构差异性[J]. 工业微生物, 2020, **50**(1): 38-43.
- Yan F, Zhang F, Yuan L J. Differences of microbial community structure before and after ANAMMOX-UASB reactor start-up[J]. *Industrial Microbiology*, 2020, **50**(1): 38-43.
- [25] Fan S Q, Xie G J, Lu Y, *et al.* Granular sludge coupling nitrate/nitrite dependent anaerobic methane oxidation with anammox: from proof-of-concept to high rate nitrogen removal [J]. *Environmental & Science Technology*, 2020, **54**(1): 297-305.
- [26] Chen D Y, Gu X S, Zhu W Y, *et al.* Denitrification-and ANAMMOX-dominant simultaneous nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in subsurface flow constructed wetlands[J]. *Bioresource Technology*, 2019, **271**: 298-305.
- [27] Björnsson L, Hugenholtz P, Tyson G W, *et al.* Filamentous *Chloroflexi* (green non-sulfur bacteria) are abundant in wastewater treatment processes with biological nutrient removal [J]. *Microbiology*, 2002, **148**: 2309-2318.
- [28] Ismail S, Elsamadony M, Elreedy A, *et al.* Physico-chemical and microbial characterization of compartment-wise profiles in an anammox baffled reactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **232**: 875-886.
- [29] Li J W, Li J L, Gao R T, *et al.* A critical review of one-stage ANAMMOX processes for treating industrial wastewater: optimization strategies based on key functional microorganisms [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **265**: 498-505.
- [30] O'toole G, Kaplan H B, Kolter R. Biofilm formation as microbial development[J]. *Annual Review of Microbiology*, 2000, **54**: 49-79.
- [31] 李鸿江, 王超, 徐晓晨, 等. AOB 与 AnAOB 在不同生物填料上挂膜效果的研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4141-4149.
- Li H J, Wang C, Xu X C, *et al.* Biofilm formation of Ammonia-Oxidizing Bacteria and Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria on different biocarriers[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4141-4149.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)