

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

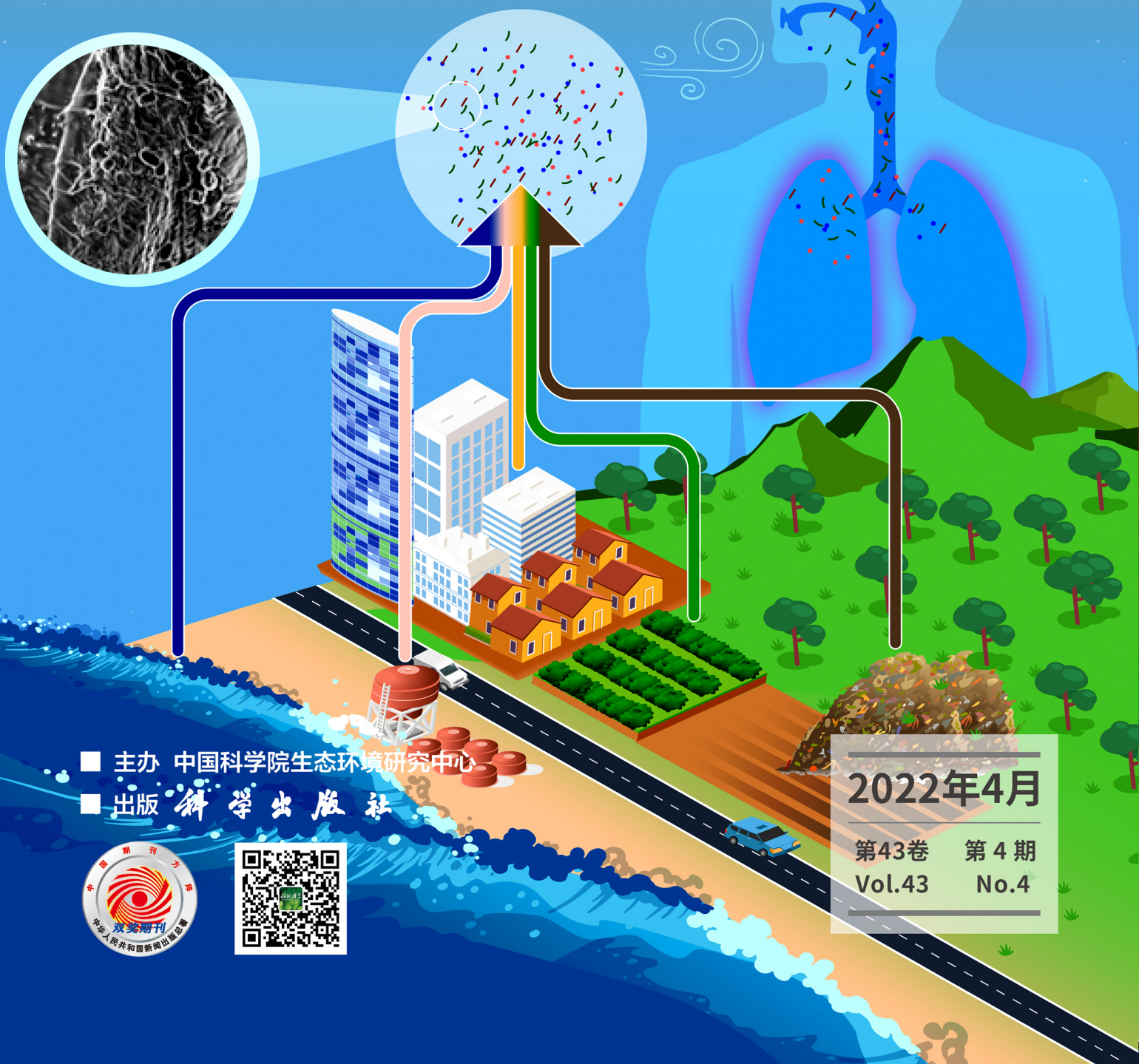
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期
Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM _{2.5} 时空特征与驱动因素分析	葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)
郑州市大气PM _{2.5} 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据	曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)
宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析	杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)
上海城区PM _{2.5} 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征	庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)
南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源	陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)
春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化	江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)
重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势	李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)
珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价	张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)
基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析	刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)
基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源	韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)
基于SOA和O ₃ 生成潜势的杭州市PM _{2.5} 和O ₃ 协同控制	林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)
超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响	王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)
西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应	王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)
大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性	涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)
基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征	高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)
西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征	杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)
“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析	廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)
中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重	秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)
新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系	雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)
珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素	涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)
河套灌区浅层地下水NO ₃ ⁻ -N时空变化及驱动因素	袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)
盐城地区地下水溶质来源及其成因分析	王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)
白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义	王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)
东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素	陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)
松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性	程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)
区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响	高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)
南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素	朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)
千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价	弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)
蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险	靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)
基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价	李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)
小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响	张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)
不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响	王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)
南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析	岳桢桢, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)
老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制	王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)
碳化泡沫负载Co ₃ O ₄ 活化过硫酸盐降解罗丹明B	王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)
低总氮浓度下Fe ²⁺ 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮	郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)
污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性	杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)
长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价	张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)
中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义	王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)
贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素	张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)
地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征	王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)
矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价	王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)
农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价	朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)
安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析	陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)
方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果	任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)
伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响	张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)
我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性	刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)
地膜覆盖和生物炭添加对菜地N ₂ O排放的影响	胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)
氮肥运筹对稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)
松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性	王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)
棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响	周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)
pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响	马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)
生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响	张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)
有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)
九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征	黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)
碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望	刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)
《环境科学》征订启事(1929)	《环境科学》征稿简则(1975)
信息(1996, 2029, 2080)	

低总氮浓度下 Fe^{2+} 促进 ANAMMOX 生物膜反应器脱氮

郑旭文^{1,2}, 秦嘉富^{1,2}, 汪晓军^{1,2,3*}, 陈浩川^{1,2}, 朱梓键^{1,2}, 陈振国^{2,3,4}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 3. 佛山市化尔铵生物科技有限公司, 佛山 528300; 4. 华南理工大学化学与化工学院, 广州 510641)

摘要: 在低总氮(TN)浓度条件下考察了 Fe^{2+} 促进串联两级 ANAMMOX 生物膜反应器脱氮性能的可行性. 结果表明, $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 5、10 和 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 能够有效促进厌氧氨氧化反应, $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对两级 ANAMMOX 生物膜反应器的促进程度最大, 在进水 $\rho(\text{TN})$ 约为 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮负荷(NLR)为 0.62 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 条件下, 最高总氮去除率(NRE)可达 81.71%. 添加 Fe^{2+} 可促进系统胞外聚合物(EPS)的分泌以及亚铁血红素 c 的合成. 批次试验结果进一步验证了 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 5、10 和 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对厌氧氨氧化菌活性的促进作用, 其中 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的比厌氧氨氧化活性(SAA)是对照组的 3.6 倍, 而当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AnAOB 活性受到明显抑制. 高通量测序结果显示, 投加 Fe^{2+} 均促进了反应器中 *Candidatus_Kuenenia* 丰度的增加, 其中 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时两个反应器中 *Candidatus_Kuenenia* 的相对丰度分别增至 16.18% 和 4.22%. 基于 Fe^{2+} 促进下两级厌氧氨氧化的稳定运行为厌氧氨氧化生物膜工艺处理低总氮浓度废水提供了参考.

关键词: 厌氧氨氧化(ANAMMOX); Fe^{2+} ; 生物膜; 生物脱氮; 促进作用

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2047-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107071

Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe^{2+} Under Low Nitrogen Concentration

ZHENG Xu-wen^{1,2}, QIN Jia-fu^{1,2}, WANG Xiao-jun^{1,2,3*}, CHEN Hao-chuan^{1,2}, ZHU Zi-jian^{1,2}, CHEN Zhen-guo^{2,3,4}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Cluster, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 3. Hua An Biotech Co., Ltd., Foshan 528300, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The feasibility for nitrogen removal in a two-stage ANAMMOX biofilm reactor promoted by Fe^{2+} under low nitrogen concentration was investigated. The results showed that the ANAMMOX reaction could be effectively promoted by a $\rho(\text{Fe}^{2+})$ of 5, 10, and 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. A $\rho(\text{Fe}^{2+})$ of 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ presented the highest promotion for the ANAMMOX reaction, with the highest nitrogen removal efficiency (NRE) of 81.71% under a $\rho(\text{TN})$ of 150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and a nitrogen loading rate (NLR) of 0.62 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. Fe^{2+} promoted the secretion of extracellular polymeric substance (EPS) and the synthesis of heme c in the ANAMMOX system. Batch test results further verified the positive effects by Fe^{2+} on the activity of anaerobic ammonium oxidizing bacteria (AnAOB). The specific ANAMMOX activity (SAA) of 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ $\rho(\text{Fe}^{2+})$ was 3.6 times as high as that of the control group [$\rho(\text{Fe}^{2+}) = 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$], whereas the activity of AnAOB was significantly inhibited with $\rho(\text{Fe}^{2+})$ increased to 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. High-throughput sequencing results showed that the addition of Fe^{2+} increased the abundance of *Candidatus_Kuenenia*. When $\rho(\text{Fe}^{2+})$ was 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the relative abundance of *Candidatus_Kuenenia* in reactor 1 and reactor 2 increased to 16.18% and 4.22%, respectively. The stable operation of the two-stage ANAMMOX biofilm process promoted by Fe^{2+} provides an alternative technology for low-strength nitrogen wastewater.

Key words: anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); Fe^{2+} ; biofilm; biological nitrogen removal; facilitation

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)相较于传统硝化反硝化工艺,具有不消耗有机碳源、污泥产率低和能源消耗低等特点^[1-3],作为一种应用前景广阔的生物脱氮技术,吸引了大量国内外学者的关注.然而在低总氮浓度条件下厌氧氨氧化脱氮效率低的问题限制了其在污水处理中的应用^[4,5].吕恺等^[6]的研究采用一段式亚硝化厌氧氨氧化SMBBR处理浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮废水,总氮去除率(NRE)为 $(51.58 \pm 6.80)\%$. Akaboci 等^[7]的研究采用 PNA-SBR 反应器处理 75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮废水,结果表明,在进水总氮负荷(NLR)为 $(0.61 \pm 0.25) \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 的条件下,仅获得 $(52.5 \pm 12.5)\%$ 的总氮去除率.此外在低氨氮浓度条件下游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)浓度

较低,对亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的抑制减弱甚至消失^[8,9],厌氧氨氧化菌(AnAOB)活性受到抑制,难以维持高效稳定脱氮.因此,提高 AnAOB 活性和系统稳定性有助于促进 ANAMMOX 工艺在低氨氮浓度条件下的实际应用.

Fe^{2+} 是含氮废水最常见的金属离子,也是微生物生长的必要营养元素^[10,11].在 ANAMMOX 过程中,适宜浓度的 Fe^{2+} 能够促进 AnAOB 对铁的积累和亚铁血红素 c 的合成,从而提高 AnAOB 活性和脱

收稿日期: 2021-07-08; 修订日期: 2021-09-07

基金项目: 2019 年广东省科技计划项目重点领域研发计划项目(2019B110205002); 2020 年高校教师特色创新研究项目(2020JNHB07)

作者简介: 郑旭文(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 957883823@qq.com

* 通信作者, E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

氮能力^[12-14]. 张黎等^[15]的研究发现,当 $c(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0.085 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,样品中亚铁血红素 c 达 $0.143 \mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$,是同期对照反应器的 2.04 倍. Zhang 等^[16]的试验结果表明,低浓度的 Fe^{2+} ($1 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可以有效促进 AnAOB 活性,而高浓度 Fe^{2+} ($10 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)则会不同程度地抑制 ANAMMOX 过程. 相比于单级 ANAMMOX 系统,两级 ANAMMOX 系统处理低氨氮废水可以实现进一步脱氮从而获得更高的总体脱氮效率^[17, 18]. 然而,关于 Fe^{2+} 是否能促进低总氮浓度条件下的厌氧氨氧化脱氮效率鲜有报道,此研究对于推进厌氧氨氧化工艺的应用具有较大的科学价值和应用指导意义.

本研究考察了不同浓度 Fe^{2+} 条件对串联两级 ANAMMOX 生物膜反应器在低总氮浓度下的脱氮性能,并探究不同浓度 Fe^{2+} 对系统 EPS、亚铁血红素 c 含量、AnAOB 活性和微生物群落结构变化等影响情况,以期利用 Fe^{2+} 促进厌氧氨氧化菌活性以实现厌氧氨氧化生物膜系统在低总氮浓度下的高效稳定脱氮提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行条件

本试验装置如图 1 所示. 两个 ANAMMOX 生物膜反应器(R1 和 R2)尺寸设计完全一样,均由有机玻璃制成,长和宽均为 30 cm,高为 70 cm,持水高度为 60 cm,有效容积为 54 L. 反应器采用温控加热棒将温度控制在 $(31 \pm 2)^\circ\text{C}$, R1 反应器和 Fe^{2+} 进水瓶外部用黑色塑料包裹以避免光. 两个反应器内都装有纤维材质填料. 本试验过程 R1 出水 and R2 进水串联运行,利用高度差使水流通过,氮素和 Fe^{2+} 进水均通过蠕动泵进行调控. 本试验共分为两个阶段进行. 第一个阶段(第 1 ~ 132 d,包括启动和负荷提升)通过缩短水力停留时间(HRT)的方式逐步提升 NLR,探索反应器脱氮性能大小. 第二个阶段(第 133 ~ 202 d)为 Fe^{2+} 影响试验阶段,此阶段保持 NLR 不变,分别在进水 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 5、10 和 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条

件下考察 Fe^{2+} 对两级 ANAMMOX 生物膜系统脱氮性能的影响,每个浓度连续运行至少 3 周.

1.2 试验用水与接种污泥

本试验用水采用人工配水, NH_4^+-N ($65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和 NO_2^--N ($85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别用 NH_4Cl 和 NaNO_2 进行配置,采用 NaHCO_3 作为碱度,浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其他组分包括: KH_2PO_4 $68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 CaCl_2 $68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 微量元素按 EDTA $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 配置,投加量为 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$. 不同浓度 Fe^{2+} 用 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 提供,浓度按需配置.

接种污泥取自实验室培养成熟的厌氧氨氧化污泥,混合液悬浮挥发性固体浓度 $[\rho(\text{MLVSS})]$ 为 $4240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 亚铁浓度对 AnAOB 活性影响批次试验

从运行稳定的 ANAMMOX 反应器取一定量污泥加入 200 mL 血清瓶中,试验前先用蒸馏水清洗 3 遍以去除杂质,分别向 5 个血清瓶中各加入 50 mL 均质污泥和 150 mL 蒸馏水,然后以纯度 99.9% 以上的 N_2 曝气 30 min 以排除氧气影响,加入 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 均分别为 $21.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $28.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 分别按照 0、5、10、15 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 添加. 为保证系统密闭性,瓶口用橡胶塞密封,瓶身用黑布包裹. 血清瓶底部配有磁力搅拌装置,转速为 $140 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 在常温条件下每个 Fe^{2+} 浓度下做 3 组平行脱氮试验,用注射器间隔取样分析 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度变化,试验结束后取 50 mL 混合液测定 MLVSS 并计算比厌氧氨氧化活性(SAA).

1.4 胞外聚合物(EPS)的提取与测定方法

EPS 的提取与测定参照文献[19]来进行. 反应运行到 132、159、180 和 202 d 时,分别在 R1 和 R2 反应器中取出污泥样品 5 mL,在 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 15 min,弃去上清液,加入 10 mL 的 PBS 缓冲液,然后在超声波(40 kHz, 120 W)条件下超声 3 min,再将混合物置于 80°C 水浴加热 30 min,最后在 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下快速离心 15 min,取出上清液通过 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后即可完成 EPS 的提取. 对上述提取的 EPS 进行蛋白质(PN)和多糖(PS)含量的测定. PN 采用修正的 Folin-Lowry 法测定,PS 采用蒽酮比色法测定.

1.5 亚铁血红素 c 的测定

亚铁血红素 c 的提取与测定参照文献[20]来进行. 反应运行到 132、159、180 和 202 d 时,分别在 R1 和 R2 反应器中取出污泥样品 5 mL,将污泥悬

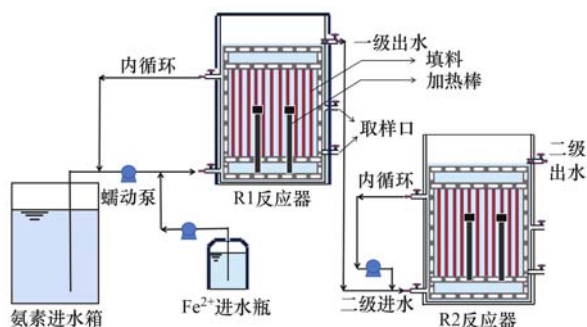


图 1 两级厌氧氨氧化生物膜反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage ANAMMOX biofilm reactor

浮于 10 mL PBS 缓冲液, 然后在冰浴中超声污泥混合液 5 min, 最后在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4°C 下离心 15 min, 过滤溶液后, 用 Pyridine-NaOH 分光光度法在紫外分光光度计上测定。

1.6 分析与计算方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 均采用国家标准方法测定^[21]; pH 值采用 PHS-3C 型 pH 计测定; 溶解氧 (DO) 和温度采用 HQ-30d 便携式溶氧仪; MLVSS 采用重量法测定. 单因素方差分析 (ANOVA, 置信水平 95%) 基于 SPSS 25.0 软件完成. NLR、总氮去除负荷 (NRR) 和 NRE 参照文献^[22] 的公式计算得到. SAA 参照文献^[23] 计算得到。

1.7 高通量测序

采用高通量测序方法分析不同运行阶段条件下反应器生物膜样品中微生物群落结构和变化情况. 测试方法如下: 取适量污泥样品, 用 Powersoil DNA 试剂盒进行 DNA 提取. 采用细菌通用引物对污泥样品进行 16S rRNA 扩增, 引物序列和扩增体系参考文献^[24], 引物为 16S rRNA V4 高变区通用引物, PCR 扩增片段大小为 480 bp. 最后通过 Novaseq-PE250 测序平台对样品进行测序. 整个测序过程委托上海派森诺生物科技有限公司完成。

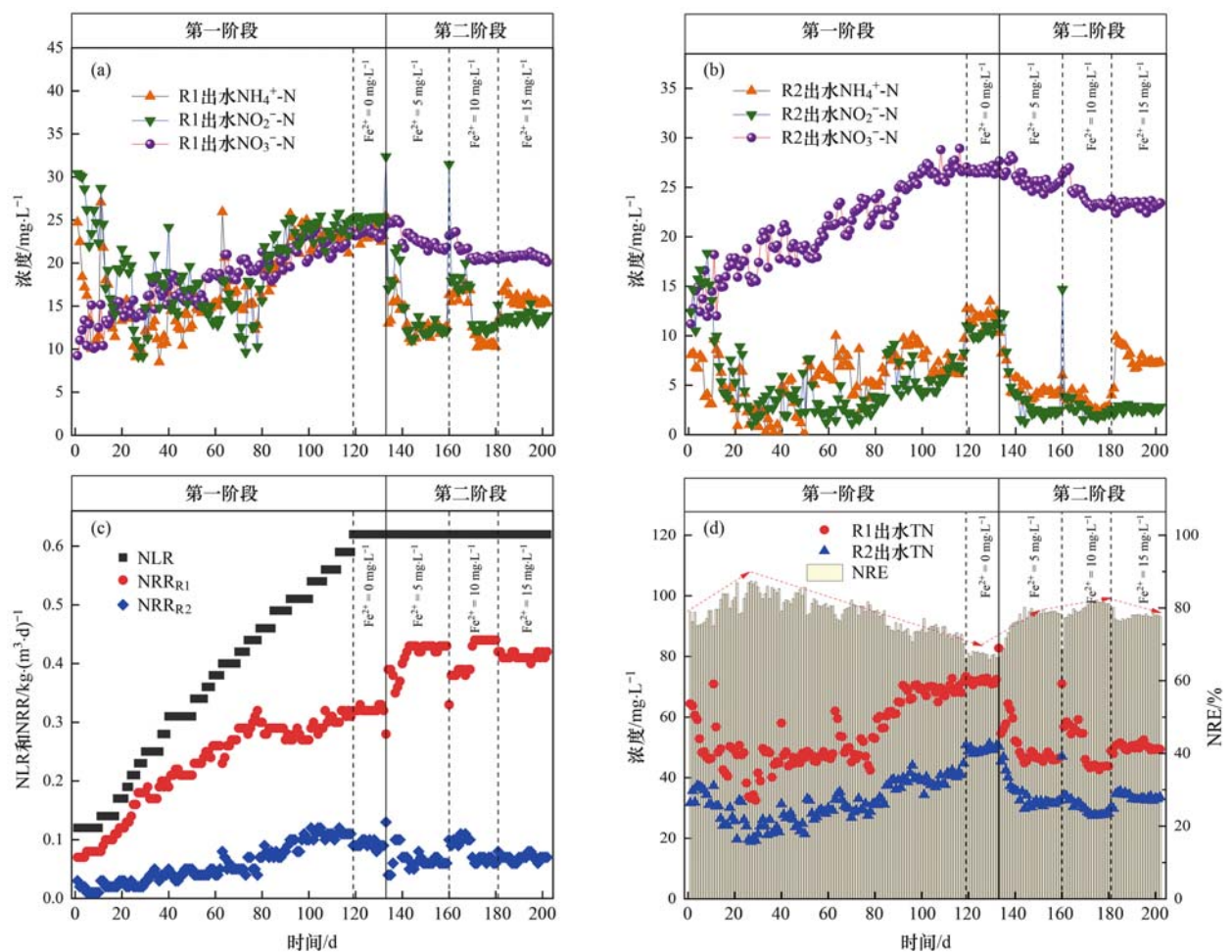
2 结果与讨论

2.1 投加 Fe^{2+} 前后两级 ANAMMOX 生物膜反应器运行效果对比

两个试验阶段反应器氮素浓度、负荷和去除率的变化如图 2 所示. 在第一阶段, R1 反应器的 NLR 由 $0.12\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到了 $0.62\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, R1 的 NRR 由 $0.07\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到了 $0.32\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, R2 的 NRR 由 $0.01\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提高到了 $0.11\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 随着 NLR 的提高, R1 和 R2 出水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和总氮 (TN) 浓度均表现出先降低后逐渐升高的趋势. 其中 R1 出水 $\rho(\text{TN})$ 从 $64.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到最低时的 $32.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 再逐渐升高到 $72.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R2 出水 $\rho(\text{TN})$ 从 $31.67\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到最低时的 $18.90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 再逐渐升高到 $51.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 此现象可能是由于反应器初期 AnAOB 处于适应阶段, 处理能力有限, R1 和 R2 的出水氮素较高; 随着运行时长的增加 AnAOB 逐渐富集, 反应器稳定性和脱氮能力得以增强^[25], 反应器出水氮素浓度逐渐降低. 随着 HRT 缩短, 过快的流速使得进水底物与反应器内微生物的接触反应时间大大缩短, 导致该阶段后期出水氮素浓度明显升高^[22]. 在第 1 ~ 119 d, 随着 NLR 不断升高, 两级 NRE 由 87.40% 逐步降低到阶段末期的 70.17%, 而

R1 和 R2 的 NRR 均逐渐升高. 从图 2(a) 和 2(b) 可知, 即使 R1 出水各氮素浓度随 NLR 升高而不断升高, R2 的平均出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 分别在 $5.52\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下 (最低时均接近 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 这说明在一定 NLR 范围内, R2 反应器可以进一步脱除 R1 反应器出水剩余氮素, 这也验证了两级 ANAMMOX 生物膜反应器处理低浓度氨氮废水的可行性和稳定性. 随着在第 119 ~ 132 d 将 NLR 提高到 $0.62\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 反应器脱氮性能出现恶化, R1 和 R2 的 NRR 均降低, 且 R2 平均出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 和 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 明显升至 $12.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NRE 也进一步降至 66.25%。

有研究表明, Fe^{2+} 对厌氧氨氧化反应有显著影响^[26~30], 本试验第二阶段考察了不同浓度 Fe^{2+} 促进两级 ANAMMOX 生物膜反应器脱氮性能的可行性. 表 1 的单因素 ANOVA 方差分析结果进一步显示了不同浓度 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 脱氮性能的影响存在极显著性差异 ($P < 0.01$). 而由图 2 可知, 投加 Fe^{2+} 条件下反应器氮素浓度相比于未投加 Fe^{2+} 时都有明显下降. 结合图 2(c) 和 2(d) 可以发现, 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, R1 的出水 TN、NRR 和 NRE 均低于 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的相应数值; 但当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 系统脱氮性能反而开始变差, 这一变化趋势与 Zhang 等^[16] 的研究结果一致, 表明 Fe^{2+} 较高时会对 AnAOB 活性产生抑制, 使反应器脱氮性能变差. 由图 2(a) 和 2(b) 还可发现, 进水 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 5 和 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 第 1 d 的出水总氮会出现急剧升高的趋势, 但随后 R1 和 R2 出水各氮素浓度逐渐降低, 最终经过两级 ANAMMOX 处理后的 R2 出水 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 均能降至 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 且随着 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 升至 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R2 出水 NO_3^--N 浓度也逐渐降低, 两级 ANAMMOX 膜生物反应器的出水 TN 浓度更低, NRE 升至 81.71%. 此结果表明 R1 系统消耗剩余的低浓度 Fe^{2+} 可以有效提高 R2 反应器中 AnAOB 活性从而提高系统脱氮性能, 两级 ANAMMOX 生物膜反应器的串联模式具备一定的 Fe^{2+} 抗冲击能力. 随着 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 升高至 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R2 平均出水 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 为 $2.61\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但平均出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 升高至 $7.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 导致 R2 出水 TN 浓度升高, 脱氮性能下降. 根据 Strous 等^[31] 的报道, $n(\text{NO}_2^--\text{N}):n(\text{NH}_4^+-\text{N}) = 1.32$ 是厌氧氨氧化反应适宜的摩尔比, 而 R2 出水 NH_4^+-N 浓度偏高, NO_2^--N 浓度较低可能是因为投加较高浓度 Fe^{2+} 抑制 AnAOB 的活性, NH_4^+-N 基质难以进一步被利用。



(a) R1 反应器进出水三氮浓度变化; (b) R2 反应器出水三氮浓度变化;
(c) R1 和 R2 反应器 NLR 和 NRR 变化; (d) R1 和 R2 反应器出水 TN 和 NRE 变化

图 2 两级 ANAMMOX 的运行效果

Fig. 2 Operational performance of two-stage ANAMMOX reactor

表 1 不同浓度 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 脱氮性能影响的单因素 ANOVA 方差分析

Table 1 One-way ANOVA analysis results on the effect of different Fe^{2+} concentrations on nitrogen removal performance of ANAMMOX

起始 $\rho(\text{Fe}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	方差来源	平方和	自由度	均方	F	$P^{(1)}$
0、5、10 和 15	组间	1 341. 58	3	447. 19	545. 35	0. 00
	组内	36. 25	44	0. 82		
	合计	1 377. 83	47			

1) $P < 0. 05$ 表示存在显著性差异, $P < 0. 01$ 表示存在极显著性差异, 下同

2.2 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 脱氮性能的影响

2.2.1 反应器不同运行条件下 EPS 的变化

EPS 是指一定条件下, 由微生物代谢产生并黏附在细胞壁外的一种高分子聚合物, 其主要成分有 PS、PN 和核酸^[32]. EPS 不仅能够提供细胞生长的结构基质, 而且在抵抗环境压力等方面起着重要作用^[33~35]. 此外, EPS 中 PN/PS 的比值在污泥的颗粒化和稳定过程也起着至关重要的作用. PN/PS 越高, 污泥稳定性越好^[36]. 不同进水 Fe^{2+} 浓度下反应器的生物膜 PN 和 PS 含量变化如图 3 所示.

由图 3 可知, 投加了 Fe^{2+} 之后, 两级反应器的 PN 和 PS 含量都有所提高, 且随着 Fe^{2+} 浓度的升

高, PN/PS 比值越来越高. 在 R1 反应器中, $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 生物膜 $\omega(\text{PN})$ 和 $\omega(\text{PS})$ 分别为 $115.68\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $36.88\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 升高到 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 生物膜 $\omega(\text{PN})$ 和 $\omega(\text{PS})$ 分别升至 $196.64\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $40.25\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 随着 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 继续升高到 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PN 和 PS 含量均有所下降但仍高于 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的 PN 和 PS 含量. 结合图 2 结果可推测, 由于低浓度 Fe^{2+} 有利于污泥絮体的混凝和沉降, 生物膜会分泌大量 PN 和 PS 来抵御这种环境变化以提升污泥环境抗性^[37], 从而促进脱氮, 但较高浓度的 Fe^{2+} 对微生物的毒性抑制作用增强会导致反应器脱氮性能下降.

相比于 R1, R2 反应器中的 PN 和 PS 含量提升得比较缓和, 可能是因为 R1 出水 Fe^{2+} 浓度较低, 污泥絮体的混凝和沉降作用不明显.

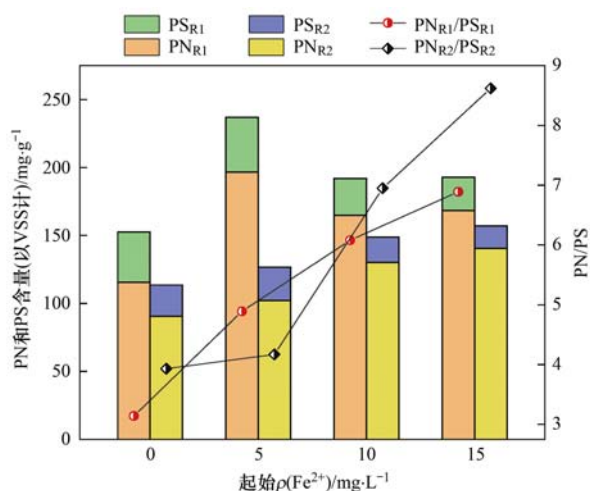


图3 两级反应器不同浓度 Fe^{2+} 作用下 PN 和 PS 的变化

Fig. 3 Variation in PN and PS under different Fe^{2+} concentrations in a two-stage ANAMMOX reactor

2.2.2 亚铁血红素 c 含量的变化

Fe^{2+} 参与亚铁血红素 c 的形成过程, 而亚铁血红素 c 在厌氧氨氧化代谢过程中作为联胺合成酶 (HZS) 和亚硝酸盐还原酶 (NIR) 等主要酶蛋白的辅因子, 在厌氧氨氧化脱氮过程发挥着重要作用^[38~40]. 在每个阶段亚铁血红素 c 的含量 (以 VSS 计, 下同) 和 AnAOB 活性有直接关系^[11,20,41]. 由图 4 可见, 在 R1 反应器中, 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, m_B (亚铁血红素 c) 为 $(3.99 \pm 0.35) \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 提升到 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, c (亚铁血红素 c) 达到 $(8.49 \pm 0.34) \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 是对照组 [$\rho(\text{Fe}^{2+}) = 0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$] 的 2.1 倍. 随着 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 进一步升高到 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, m_B (亚铁血红素 c) 降低到 $(5.20 \pm 0.29) \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 此结果与反应器脱氮性能的变化一致. 因此, 适宜浓度 Fe^{2+} 的添加补充了厌氧氨氧化系统的微量元素 Fe, 能够提高亚铁血红素 c 含量以及功能酶活性, 从而促进厌氧氨氧化脱氮, 而 Fe^{2+} 过高时反而抑制酶活性, 抑制脱氮作用^[13,42,43]. 在 R2 反应器中, 随着 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 由 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐提升到 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, m_B (亚铁血红素 c) 由 $(1.00 \pm 0.24) \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐渐升高到 $(2.48 \pm 0.22) \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 这说明起始 Fe^{2+} 浓度的升高能够提高 R2 反应器内 Fe^{2+} 的浓度, 从而促进亚铁血红素 c 的合成.

2.2.3 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 菌活性的影响

对于厌氧氨氧化生物膜系统, 当 Fe^{2+} 浓度过高时, Fe^{2+} 会通过微生物吸附、跨膜转运和胞内积累等方式进入微生物, 当 Fe^{2+} 浓度超过生物膜的吸附能力, 反应器微生物活性会受到抑制, 进而导致脱氮

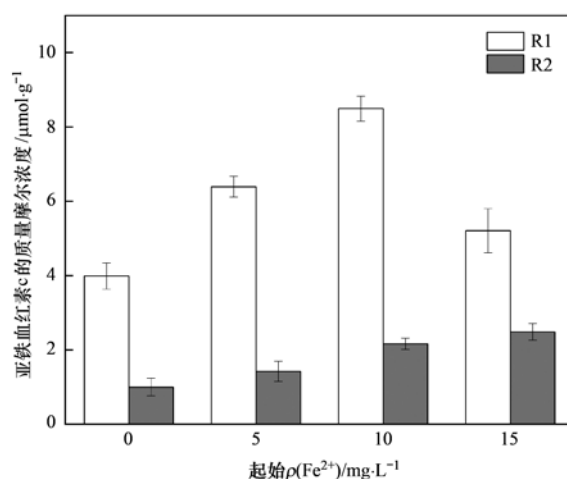


图4 两级反应器不同浓度 Fe^{2+} 作用下亚铁血红素 c 的变化

Fig. 4 Variation in heme c under different Fe^{2+} concentrations in a two-stage ANAMMOX reactor

性能下降^[16,44]. 为进一步验证不同浓度 Fe^{2+} 作用下对厌氧氨氧化过程的影响和响应差异, 采用了稳定运行的 R1 反应器生物膜样品进行了 Fe^{2+} 单因素影响批次试验, 结果如表 2 和图 5 所示. 由表 2 的单因素 ANOVA 分析结果可以确定: 起始 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 0、5、10、15 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对 ANAMMOX 菌活性的影响存在极显著性差异 ($P < 0.01$). 由图 5 可知, 当起始投加 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SAA 为 $(31.03 \pm 3.38) \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 提高到 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SAA 分别升至 $(95.52 \pm 5.26) \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $(111.15 \pm 20.02) \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 这说明此低浓度 Fe^{2+} 范围内对厌氧氨氧化污泥的活性有着明显的促进作用. 其中 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对污泥活性的促进效果相较于对照组的污泥活性提升了 3.6 倍, 略高于 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的 3.1 倍. 当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 提升到 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Fe^{2+} 对系统整体脱氮性能的促进作用开始减弱, SAA 降低到了 $(65.65$

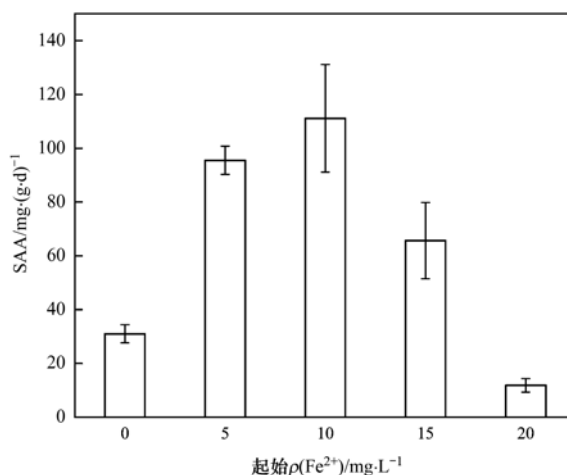


图5 不同浓度 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 菌 SAA 的影响

Fig. 5 Effect of different Fe^{2+} concentrations on SAA of AnAOB

± 14.18) $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$. 而当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 进一步升至 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时表现出明显抑制作用, SAA 降低到 $(11.83 \pm 2.51)\text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, 仅为对照组的 38%.

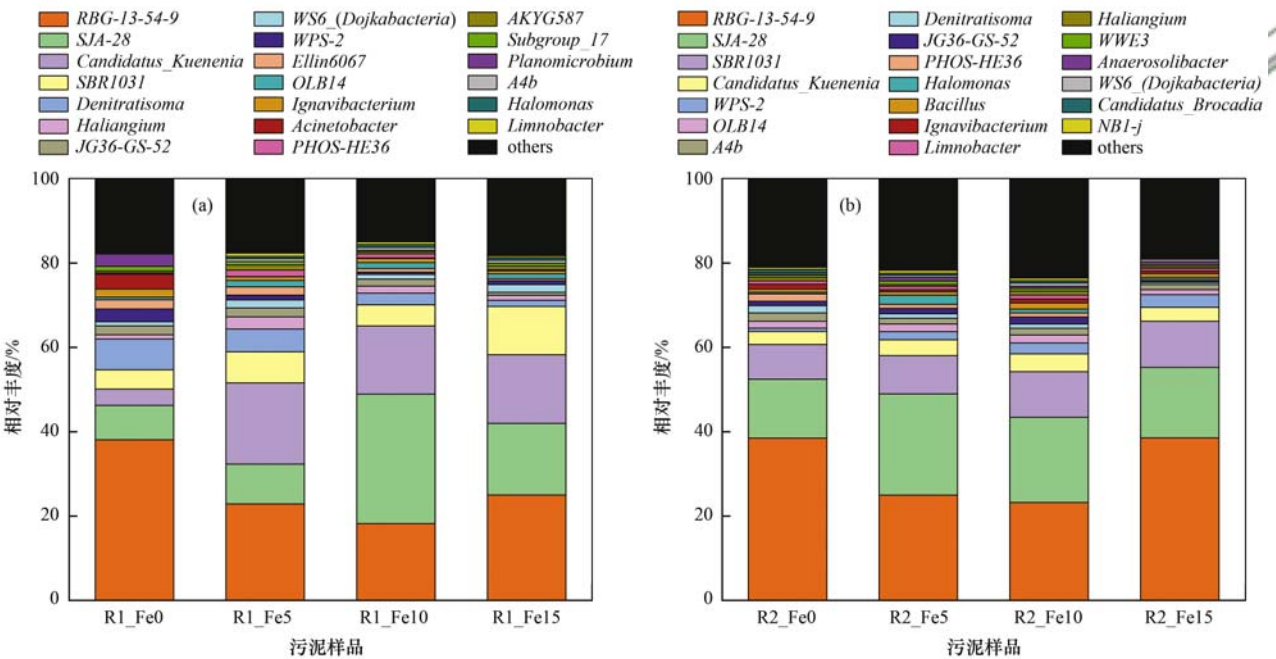
表 2 不同 Fe^{2+} 对 ANAMMOX 菌活性影响的单因素 ANOVA 方差分析

Table 2 One-way ANOVA analysis results on the effect of Fe^{2+} concentrations on AnAOB activity						
起始 $\rho(\text{Fe}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
0、5、10、15 和 20	组间	21 069.29	4	5 267.32	40.67	0.00
	组内	1 295.08	10	129.51		
	合计	22 364.37	14			

2.3 微生物群落分析

图 6 为 Fe^{2+} 投加前后 R1 和 R2 反应器污泥属水平下优势菌群分布变化. 由图 6(a) 可知, *Candidatus_Kuenenia* 是具有厌氧氨氧化能力的优势菌群. 在各 Fe^{2+} 浓度条件下, R1 中 *Candidatus_Kuenenia* 的相对丰度分别为 3.83%、19.27%、16.18% 和 16.25%, 表明适当浓度 Fe^{2+} 的添加有效促进了厌氧氨氧化菌的富集生长. 由图 6(b) 可知, 各 Fe^{2+} 浓度条件下 R2 中 *Candidatus_Kuenenia* 相对丰度分别为 3.09%、3.74%、4.22% 和 3.30%.

$\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的厌氧氨氧化菌富集效果最好, 这与污泥活性和反应器运行效能的变化一致. 综上可以推测, Fe^{2+} 可以促进 *Candidatus_Kuenenia* 丰度的增加, 加上系统异养反硝化菌的存在, 从而实现两级 ANAMMOX 生物膜反应器在低总氮浓度下高效稳定地脱氮. 此外, 有研究表明 *Candidatus_Kuenenia* 菌属下的一些 ANAMMOX 菌能够在发生厌氧氨氧化反应的同时利用 NO_3^- -N 氧化 Fe^{2+} [45,46], 本研究是否存在此现象还需后续进一步探索.



(a) R1 反应器, (b) R2 反应器; R1_Fe0 表示 R1 反应器中 Fe^{2+} 浓度为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 以此类推

图 6 Fe^{2+} 存在下反应器污泥中属水平优势菌群分布

Fig. 6 Distribution of dominant bacteria at the genus level in sludge under the presence of Fe^{2+} in a two-stage reactor

3 结论

- (1) 采用两级 ANAMMOX 生物膜系统处理低浓度总氮废水, 最高 NLR 可达 $0.62\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, NRE 平均值为 67.13%.
- (2) 长期投加 5、10 和 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Fe^{2+} 能够有效提高两级 ANAMMOX 生物膜系统脱氮性能. 其

- 中 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的促进作用最明显, 最高 NRE 可达 81.71%. 添加适量的 Fe^{2+} 有助于 EPS 的分泌和亚铁血红素 c 的合成, 以进一步提高反应器的污泥稳定性和脱氮性能.
- (3) 不同浓度 Fe^{2+} 对 AnAOB 活性的短期影响存在显著性差异. $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 5、10 和 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 对 AnAOB 活性有明显促进作用, 其中 $\rho(\text{Fe}^{2+})$

为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 SAA 是对照组的 3.6 倍。当 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AnAOB 活性受到明显抑制, 其 SAA 仅为对照组的 38%。

(4) 不同 Fe^{2+} 浓度条件下能促使优势菌属 *Candidatus_Kuenenia* 相对丰度发生变化。 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, R1 和 R2 中 *Candidatus_Kuenenia* 的相对丰度分别从 $\rho(\text{Fe}^{2+})$ 为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 3.83% 和 3.09% 增至 16.18% 和 4.22%。

参考文献:

- [1] Wang Y, Ji X M, Jin R C. How anammox responds to the emerging contaminants: status and mechanisms[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **293**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112906.
- [2] Huo T R, Zhao Y P, Tang X, et al. Metabolic acclimation of anammox consortia to decreased temperature[J]. Environment International, 2020, **143**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105915.
- [3] 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): 177-183.
- [4] 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, Lü 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.
- [5] 董堃, 苑宇杭, 陈宇超, 等. 膜生物反应器中厌氧氨氧化的启动研究[J]. 水处理技术, 2020, **46**(5): 87-91.
Dong K, Yuan Y H, Chen Y C, et al. Study on start-up of anaerobic ammonia oxidation in a membrane bioreactor [J]. Technology of Water Treatment, 2020, **46**(5): 87-91.
- [6] 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 等. 一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3385-3391.
Lü K, Shao X M, Wang K Z, et al. Treatment of medium ammonium wastewater by single-stage partial nitrification-anammox SMBBR [J]. Environmental Science, 2021, **42**(7): 3385-3391.
- [7] Akabici T R V, Gich F, Rusalleda M, et al. Assessment of operational conditions towards mainstream partial nitrification-anammox stability at moderate to low temperature: reactor performance and bacterial community[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **350**: 192-200.
- [8] 陈振国, 汪晓军, 周松伟, 等. 基于吸附-生化降解实现低浓度氨氮废水的亚硝化[J]. 中国给水排水, 2019, **35**(3): 19-25.
Chen Z G, Wang X J, Zhou S W, et al. Stable nitrification for low-strength ammonium wastewater based on adsorption and biological desorption[J]. China Water & Wastewater, 2019, **35**(3): 19-25.
- [9] Gu X Y, Zheng X W, Chen Y X, et al. A novel two-stage partial-nitrification/anammox (PN/A) process based on zeolite biological fixed bed reactor for low-strength ammonium wastewater treatment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **787**, doi: 10.1088/1755-1315/787/1/012076.
- [10] Sindhu L, Niu K L, Liu X L, et al. Effect of Fe^{2+} addition on anammox consortia, nitrogen removal performance and functional genes analysis during start-up of anammox process[J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, **43**, doi: 10.1016/j.jwpe.2021.102251.
- [11] 郭蓓蓓. 基于铁元素作用下强化厌氧氨氧化工艺研究[D]. 青岛: 山东大学, 2019.
Guo B B. The study on strengthening anammox performance based on iron element [D]. Qingdao: Shandong University, 2019.
- [12] Zhang J X, Zhang Y B, Li Y, et al. Enhancement of nitrogen removal in a novel anammox reactor packed with Fe electrode [J]. Bioresource Technology, 2012, **114**: 102-108.
- [13] Qiao S, Bi Z, Zhou J T, et al. Long term effects of divalent ferrous ion on the activity of anammox biomass[J]. Bioresource Technology, 2013, **142**: 490-497.
- [14] 张帆. 有机物及铁盐对厌氧氨氧化反应器的脱氮性能及微生物菌群的影响特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
Zhang F. Effects of Organics and ferrors ion on nitrogen removal and microbial communities in anammox reactor [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [15] 张黎, 胡筱敏, 姜彬慧, 等. 亚铁离子对厌氧氨氧化反应器脱氮性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, **36**(12): 1753-1756.
Zhang L, Hu X M, Jiang B H, et al. Effect of iron ions on denitrification performance in anammox reactor[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, **36**(12): 1753-1756.
- [16] Zhang X J, Zhou Y, Zhao S Y, et al. Effect of $\text{Fe}(\text{II})$ in low-nitrogen sewage on the reactor performance and microbial community of an ANAMMOX biofilter[J]. Chemosphere, 2018, **200**: 412-418.
- [17] Fan N S, Bai Y H, Wu J, et al. A two-stage anammox process for the advanced treatment of high-strength ammonium wastewater: microbial community and nitrogen transformation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121148.
- [18] Connan R, Dabert P, Moya-Espinosa M, et al. Coupling of partial nitrification and anammox in two- and one-stage systems: process operation, N_2O emission and microbial community[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, **203**: 559-573.
- [19] Hou J, You G X, Xu Y, et al. Long-term effects of CuO nanoparticles on the surface physicochemical properties of biofilms in a sequencing batch biofilm reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, **100**(22): 9629-9639.
- [20] Ma H Y, Zhang Y L, Xue Y, et al. Relationship of heme c, nitrogen loading capacity and temperature in anammox reactor [J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 568-577.
- [21] 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.
- [22] Karasuta C, Wang X J, Zheng X W, et al. Effect of hydraulic retention time on effluent pH in anammox bioreactors: characteristics of effluent pH and pH as an indicator of reactor performance[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111716.
- [23] Wang Y Y, Xie H C, Wang D L, et al. Insight into the response of anammox granule rheological intensity and size evolution to decreasing temperature and influent substrate concentration[J]. Water Research, 2019, **162**: 258-268.
- [24] Chen Z G, Zheng X W, Chen Y X, et al. Nitrite accumulation stability evaluation for low-strength ammonium wastewater by adsorption and biological desorption of zeolite under different operational temperature[J]. Science of the Total Environment,

- 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135260.
- [25] 严子春, 唐瑞祥, 吴大冰. 有机物对厌氧氨氧化生物膜反应器脱氮效能及微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1303-1308.
- Yan Z C, Tang R X, Wu D B. Effect of organic matter on nitrogen removal efficiency and microbial community of an anammox biofilm reactor [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(4): 1303-1308.
- [26] Li Z X, Peng Y Z, Gao H J. A novel strategy for accelerating the recovery of a Fe(II)-inhibited anammox reactor by intermittent addition of betaine: performance, kinetics and statistical analysis [J]. *Chemosphere*, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126362.
- [27] Feng L, Li J, Ma H R, *et al.* Effect of Fe(II) on simultaneous marine anammox and Feammox treating nitrogen-laden saline wastewater under low temperature: enhanced performance and kinetics[J]. *Desalination*, 2020, **478**, doi: 10.1016/j.desal.2019.114287.
- [28] Zhang X J, Chen Z, Zhou Y, *et al.* Impacts of the heavy metals Cu(II), Zn(II) and Fe(II) on an Anammox system treating synthetic wastewater in low ammonia nitrogen and low temperature: Fe(II) makes a difference[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 798-804.
- [29] Mak C Y, Lin J G, Chen W H, *et al.* The short- and long-term inhibitory effects of Fe(II) on anaerobic ammonium oxidizing (anammox) process[J]. *Water Science and Technology*, 2019, **79**(10): 1860-1867.
- [30] Yang Y F, Xiao C C, Lu J H, *et al.* Fe(III)/Fe(II) forwarding a new anammox-like process to remove high-concentration ammonium using nitrate as terminal electron acceptor[J]. *Water Research*, 2020, **172**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115528.
- [31] 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.
- [32] 孟显松, 李军, 张硕, 等. 低温胁迫下 Fe^{2+} 对厌氧氨氧化脱氮性能影响研究[J]. 水处理技术, 2020, **46**(11): 125-128, 136.
- Meng X S, Li J, Zhang S, *et al.* Study on the effect of Fe^{2+} on denitrification by anaerobic ammonium oxidation under low temperature stress [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, **46**(11): 125-128, 136.
- [33] 郑婧婧, 张智明, 徐向阳, 等. 污水处理好氧颗粒污泥生产运行中的结构与稳定性[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(6): 1672-1685.
- Zheng J J, Zhang Z M, Xu X Y, *et al.* Structure and stability of aerobic granular sludge during operation in wastewater treatment [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, **27**(6): 1672-1685.
- [34] 张亚超, 张晶, 侯爱月, 等. 胞外聚合物和信号分子对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(10): 4133-4140.
- Zhang Y C, Zhang J, Hou A Y, *et al.* Effect of extracellular polymers and signal molecules on the activity of ANAMMOX sludge [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(10): 4133-4140.
- [35] 袁乙卜, 张建民, 陈希, 等. 大分子有机物作用下胞外聚合物对除磷污泥颗粒化的影响[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(4): 1321-1332.
- Yuan Y B, Zhang J M, Chen X, *et al.* Effect of extracellular polymeric substrates on the granulation of phosphorus removal sludge fed with macromolecular organic matter [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021, **15**(4): 1321-1332.
- [36] Yan L L, Liu Y, Wen Y, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances from granular sludge for simultaneous removal of organic matter and ammonia nitrogen [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 460-466.
- [37] Zhang Y L, Ma H Y, Niu Q G, *et al.* Effects of substrate shock on extracellular polymeric substance (EPS) excretion and characteristics of attached biofilm anammox granules [J]. *RSC Advances*, 2016, **6**(114): 113289-113297.
- [38] Bi Z, Qiao S, Zhou J T, *et al.* Fast start-up of Anammox process with appropriate ferrous iron concentration [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **170**: 506-512.
- [39] Huang X L, Gao D W, Peng S, *et al.* Effects of ferrous and manganese ions on anammox process in sequencing batch biofilm reactors [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(5): 1034-1039.
- [40] Ferrousi C, Lindhoud S, Baymann F, *et al.* Iron assimilation and utilization in anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2017, **37**: 129-136.
- [41] Jin R C, Yang G F, Zhang Q Q, *et al.* The effect of sulfide inhibition on the ANAMMOX process [J]. *Water Research*, 2013, **47**(3): 1459-1469.
- [42] 吕冉, 李彬, 肖盈, 等. 铁对废水微生物脱氮的影响研究进展[J]. 化工进展, 2020, **39**(2): 709-719.
- Lü R, Li B, Xiao Y, *et al.* Research progress on the effects of iron on microbiological nitrogen removal in wastewater [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, **39**(2): 709-719.
- [43] 李祥, 黄勇, 巫川, 等. Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4224-4229.
- Li X, Huang Y, Wu C, *et al.* Effect of Fe^{2+} and Fe^{3+} on the activity of ANAMMOX [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4224-4229.
- [44] Vigneri R, Malandrino P, Gianì F, *et al.* Heavy metals in the volcanic environment and thyroid cancer [J]. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2017, **457**: 73-80.
- [45] Oshiki M, Ishii S, Yoshida K, *et al.* Nitrate-dependent ferrous iron oxidation by anaerobic ammonium oxidation (Anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(13): 4087-4093.
- [46] Li X, Yuan Y, Huang Y, *et al.* A novel method of simultaneous NH_4^+ and NO_3^- removal using Fe cycling as a catalyst: Feammox coupled with NAFO [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 153-157.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)