

王越, 王嘉斌, 赵培海, 等. 磁环境下 AAO 工艺中的微生物群落演替规律[J]. 净水技术, 2024, 43(2):90-96.
WANG Y, WANG J B, ZHAO P H, et al. Succession regulations of microflora in AAO process under magnetic environment[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2):90-96.

磁环境下 AAO 工艺中的微生物群落演替规律

王 越¹, 王嘉斌^{1,*}, 赵培海², 宋 健³

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东济南 250002; 2. 利津县胜瑞城市建设集团有限公司, 山东东营 257400; 3. 山东省环境保护科学研究设计院有限公司, 山东济南 250109)

摘 要 将 AAO 反应器置于 5 mT 大小的平均磁场环境, 文中研究了磁场对 AAO 工艺效能的影响, 并从分子生物学的角度对其影响机理进行了初步探究。结果表明, 在 5 mT 磁场环境下, AAO 工艺启动阶段的平均总氮去除率有较明显提升, 比对照组上升 6%; AAO 反应器启动时间较对照组缩短了 5 d; AAO 中以固氮螺旋菌(*Azospira*)为代表的反硝化菌群的相对丰度占比明显提升, 丝硫菌属(*Thiothrix*)的相对丰度占比大幅降低, 对污泥膨胀的抑制作用较明显; 通过基因功能预测发现磁环境下细胞运动类基因相对丰度相对无磁场条件提升 75%, 膜运输类基因大幅下降, 从而提高了 AAO 的启动速度, 提升了脱氮效能。

关键词 磁场 AAO 工艺 生物脱氮 群落结构 功能基因预测

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)02-0090-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.011

Succession Regulations of Microflora in AAO Process under Magnetic Environment

WANG Yue¹, WANG Jiabin^{1,*}, ZHAO Peihai², SONG Jian³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250002, China;
2. Lijin Shengrui Urban Construction Group Co., Ltd., Dongying 257400, China;
3. Shandong Environmental Protection Scientific Research and Design Institute Co., Ltd., 250109, China)

Abstract The effect of magnetic field on the performance of AAO process was studied by placing AAO reactor in an average magnetic field environment of 5 mT, and mechanism of its effect was preliminarily explored from the perspective of molecular biology. The results showed that under a magnetic field environment of 5 mT, the average total nitrogen removal rate in start-up stage of AAO process was significantly improved, with an increase of 6% compared to the control group; and start-up time of AAO reactor was shortened by 5 days compared with control group. The relative abundance of denitrifying bacteria represented by *Azospira* in AAO was significantly increased, relative abundance of *Thiothrix* was greatly reduced, and inhibitory effect on sludge bulking was obvious. Through gene function prediction found that relative abundance of cell movement genes in magnetic environment increased by 75% compared with that in control group, and membrane transport genes decreased significantly, thereby startup speed and denitrification efficiency of AAO were significantly improved.

Keywords magnetic field AAO process biological nitrogen removal microflora structure functional gene prediction

AAO 工艺被广泛地应用于世界各地的污水处理厂以处理各种类型的水污染物, 是应用最为成熟

的城市污水生物处理工艺之一^[1]。近些年, 人们逐渐发现常规 AAO 工艺活性污泥的菌群结构中, 进一步提升反硝化菌、硝化菌相对丰度的难度较大, 其脱氮除磷效能提升遇到了瓶颈, 难以满足愈加严苛的氮、磷等无机污染物排放标准。

为进一步提升其处理效能, AAO 工艺结构被多次改良与优化。Zhang 等^[2]通过 AAO 反应器与曝气生物滤池结合的方式, 强化了 AAO 反应器的反硝

[收稿日期] 2023-02-27

[基金项目] 国家自然科学基金项目(52100088); 济南大学科技计划项目(XBS2001)

[作者简介] 王越(1996—), 男, 硕士, 研究方向为市政工程, E-mail: 794016110@qq.com。

[通信作者] 王嘉斌(1979—), 男, 教授, 博士, 研究方向为市政工程, E-mail: cea_wangjb@ujn.edu.cn。

化过程,提升了 AAO 工艺对总氮的去除率。Huang 等^[3]通过电场与 AAO 工艺结合的方式,改善活性污泥中微生物的群落结构,促进了多种类型脱氮细菌的生长。吴延虎等^[4]发现悬浮填料可以强化活性污泥中的优势菌群,使其具有更强的脱氮效率。Li^[5]等构建以移动床生物膜反应器(MBBR)为生物载体的 AAO 反应器,优化了碳源消耗和微生物群落结构。Wang 等^[6]利用生物膜强化的 AAO 反应器,使 AAO 具有更高的反硝化能力和更合理的菌群结构。Fan 等^[7]通过分段配水的方式,优化了 AAO 的群落结构。

近些年的研究发现,磁场作为一种稳定且高效的辅助方法,在生物脱氮方面有着巨大的潜力^[8]。Wang 等^[9]发现静磁场改变了膜生物反应器(MBR)内微生物种群的群落结构和相对丰度占比,使 MBR 具有更高的污染物去除率。Hu 等^[10]通过对序批式反应器(SBR)的生物磁效应研究,证明了磁场可通过提高微生物的胞外聚合物和聚羟基丁酸酯合成的方式,强化微生物电子迁移能力,提升反应器对总氮的去除率。Chen 等^[11]通过投加磁粉的方式,提升了 MBBR 硝化菌群与反硝化菌群的生物量,提升了整体的同步硝化反硝化效能,促进总氮去除。Zaidi 等^[12]发现磁场可以提升相关菌群的生物活性,增加污染物的去除性能和降解能力。Chen 等^[13]和 Ceng 等^[14]研究发现磁场可以提升污泥指数(SVI)、污泥浓度(MLSS/MLVSS)等,加速好氧颗粒污泥(AGS)的形成,并在一定程度上改变系统中微生物的多样性与均匀性,与无外磁场相比,磁环境下的微生物具有更高的信号转导、细胞活力相关的功能基因表达量。AAO 工艺作为厌氧、缺氧及好氧环境交替并存,好氧菌、厌氧菌、兼性厌氧菌混生的复杂生物体系,磁场对于各微生物种群的差异性影响及其对 AAO 处理效能的作用规律研究尚不够深入。

本文拟在磁场环境下启动 AAO 反应器,对比研究磁环境下 AAO 反应器启动与污染物去除特性,解析其微生物群落结构与功能基因的变化规律,并探究其分子生物学机理,为 AAO 工艺群落结构优化提供新的理论参考。

1 材料与方法

反应器由有机玻璃制成(图 1),为长方体,有效容积为 40 L,厌氧区、缺氧区 and 好氧区的体积比为

1 : 1 : 2,配备永磁体、计量泵、循环提升泵和曝气装置。

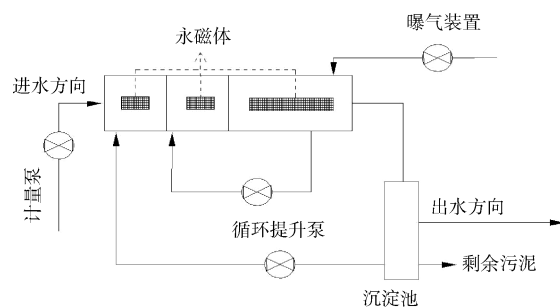


图 1 反应器工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Reactor

组建反应器 R1、R2,其中 R1 作为对照组不投加磁场,R2 通过角钢架在反应器两侧固定永磁体,其对反应器施加的平均磁场强度为 5 mT。反应器接种济南市某大型污水厂的回流污泥区污泥,MLSS 为 3 500 mg/L;运行温度为 21~24 ℃,污泥停留时间(SRT)为 15 d,水力停留时间(HRT)为 16 h,曝气池溶解氧(DO)质量浓度为 2 mg/L,污泥回流比为 50%,混合液回流比为 200%。试验进水采用人工模拟生活废水,使用无水乙酸钠、氯化铵配制进水 COD_{Cr}、氨氮;碳酸氢钠、磷酸二氢钾、无水硫酸镁、无水氯化钙为活性污泥提供常量元素,投加适量花园土壤浸出液提供微量元素,并通过碳酸氢钠补充曝气时消耗的碱度,使出水 pH 值维持在 7~8。

2 结果与分析

2.1 反应器启动特性分析

两组反应器接种启动后,每天取样一次测定进水、出水的 COD_{Cr}、氨氮、总氮,结果如图 2~图 4 所示。磁场的存在使接种污泥更快适应了新运行环境,缩短了 AAO 反应器的启动过程,磁场反应器 R2 有更高的脱氮效率和更短的启动时间。R1 的 COD_{Cr} 去除率在第 18 d 之后稳定在 90%(图 2),R2 在 14 d 时开始稳定在 90%以上。反应器运行至 11 d 时,R2 氨氮去除率达到 95%以上,而 R1 反应器一直缓慢提升,直到运行 16 d 时氨氮去除率提升至 90%(图 3),之后两反应器氨氮去除率均维持在 95%以上。R2 的平均总氮去除率比 R1 高 6%,达到 89%,且稳定出水时间要比 R1 早 5 d(图 4)。

在 COD_{Cr} 去除率相差不大的情况下,R2 具有更高的总氮去除率,推测是因为磁场环境的存在,影响到了碳源的消耗途径,有更多的碳源供给反硝化过程,从而降低了反应器出水的总氮浓度。

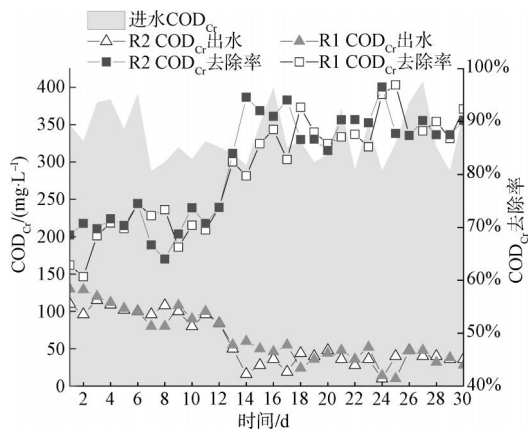


图2 不同反应器启动过程 COD_{Cr} 浓度变化及去除率
Fig. 2 Changes of COD_{Cr} Concentration and Removal Rate during Start-Up Process of Different Reactors

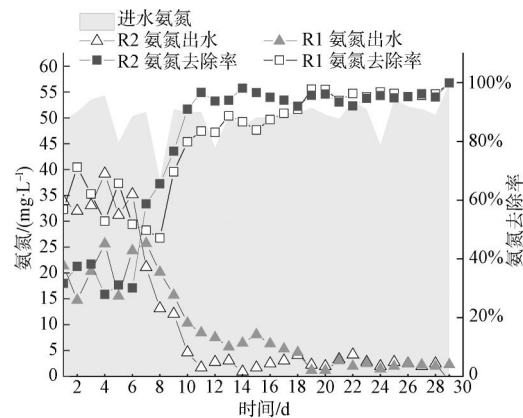


图3 不同反应器启动过程氨氮浓度变化及去除率
Fig. 3 Changes of Ammonia Nitrogen Concentration and Removal Rate during Start-Up Process of Different Reactors

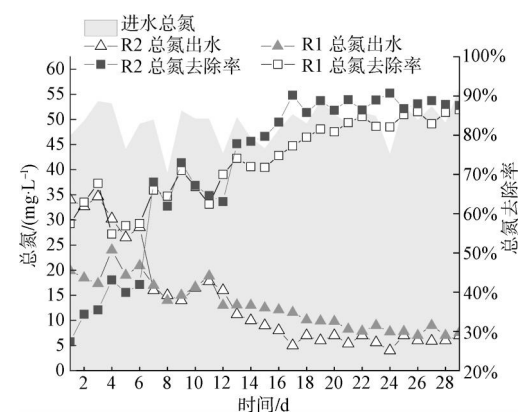


图4 不同反应器启动过程总氮浓度变化及去除率
Fig. 4 Changes of Total Nitrogen Concentration and Removal Rate during Start-Up Process of Different Reactors

2.2 群落结构分析

使用因美纳公司的 Illumina NovaSeq 测序平台对 R1、R2 反应器 30 d 时的沉淀池污泥样本与接种污泥留样进行双末端测序,引物序列为 CCTAYG-GGRBGCASCAG (341F)、GGACTACNNGGTATCT-AAT(806R)。后经过拼接过滤,操作分类单元 (OTUs) 聚类,进行物种注释及丰度分析并创建小区域基因文库,最后使用 PICRUST 分析方法推断不同菌群的基因功能。

使用 Qiime (Version 1.9.1) 计算原生接种污泥 (R) 和 R1、R2 生物样本的 Chao 1、Ace、Shannon、Simpson 和 Good's coverage 5 项 α 多样性指标,对每个样本的覆盖度的多样性估计如表 1 所示。在本研究中,所有样品的 Good's coverage 覆盖率均为 0.993,确保了其检查测效果真实性。

如表 1 所示,R2 中的微生物丰富度 (由 Chao 1 和 Ace 估计) 和多样性 (由 Shannon 和 Simpson 估计) 较 R1 有较大幅度升高。说明磁场的存在有利于提升物种多样性,使脱氮细菌分布更加丰富^[10,15]。

表 1 3 组样品中微生物的 α 多样性指标
Tab. 1 α -Diversity Index of Microorganisms in Three Groups of Samples

反应器	Shannon	Simpson	Chao1	Ace	Good's coverage
R	8.889	0.989	2 374.503	2 393.224	0.993
R1	4.242	0.632	1 459.143	1 513.833	0.993
R2	8.174	0.987	2 144.088	2 762.146	0.993

基于样品 OUTs 进行生物群落结构主成分分析 (PCA),结果如图 5 所示。相对于 R,两组反应器启动成功后的微生物群落结构均发生较大变化。随着两组反应器的运行,表现出了物种的优胜劣汰现象,优势菌群出现更替并不断壮大,部分种群消亡,群落物种多样性降低。对比 R1、R2 的样品生物多样性可以发现,磁场的存在有助于提升反应器内生物多样性,提高群落结构的稳定性。这有可能是磁场的介入可以控制优势菌群的持续壮大,平衡了种群间的底物竞争,为部分非优势菌群提供了生存空间。

为进一步探究活性污泥的潜在途径和功能,深入解析磁环境下 AAO 系统的工作机理,通过高通量测序的物种注释与丰度分析,在门水平和属水平上对样本的物种组成和群落结构相对丰度变化规律进

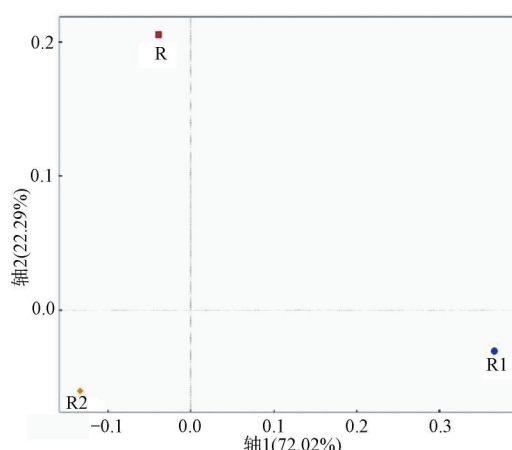


图5 3组样品中群落结构PCA分析

Fig. 5 PCA Analysis of Community Structure in Three Groups of Samples

行了解析,如图6~图7所示。

从门水平(图6)看,变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)是AAO系统中活性污泥的主要构成,这3种细菌门类在污水处理工艺中COD降解和氮去除中发挥关键作用^[16]。变形菌门是污水处理反应器、沉淀物、活性污泥中最丰富的门之一,分别占样品的33%、75%、37%。

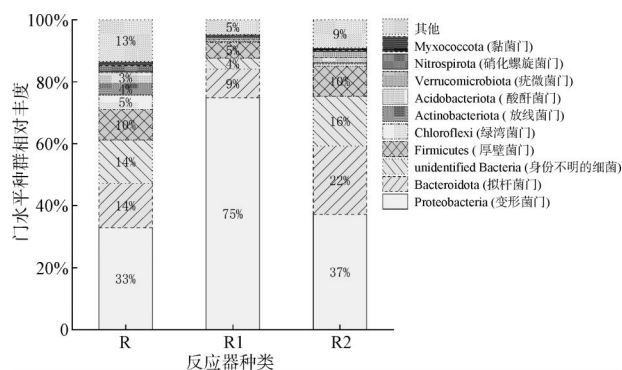


图6 门水平微生物群落相对丰度

Fig. 6 Relative Abundance of Microflora at Phylum Level

图7列举了属水平上相对丰度前30的细菌种类,其中前10相对丰度的菌群几乎均与脱氮反应相关。在添加磁场后,变形菌门中的固氮螺旋菌属(*Azospira*)的相对丰度从1%上升至7%,明显高于R1和R反应器。文献^[17]表明固氮螺旋菌属作为一种重要的反硝化菌属,其可在缺氧和微嗜氧下进行脱氮反应。可以在厌氧条件下以硝态氮为电子受体进行厌氧呼吸的嗜氢菌属(*Hydrogenophaga*)与可以

进行反硝化的*OLB8*属^[18-19]相对丰度均提升至4%左右;聚糖假丝酵母菌属(*Candidatus competibacter*) (相对丰度占比为4%)和陶厄氏菌属(*Thauera*) (相对丰度占比为1%)在污水处理系统中是主要的短程反硝化菌属^[20]。上述具有反硝化能力的菌属的相对丰度占比总和从R1的小于5%上升至R2的20%,表明磁场环境的存在有助于反硝化菌群的繁衍。磁场对反硝化菌属的正向作用大幅提升了系统的反硝化能力,这也较好解释了R2总氮去除率上升的原因。R2中变形菌门的丝硫菌属(*Thiothrix*)的相对丰度由61%下降至3%,丝硫菌属常在膨胀污泥中被大量检出,在生物量相同的情况下丝状菌提高了污泥的表观黏度,导致污泥膨胀。磁环境下丝硫菌属生存受到抑制,说明磁场对丝硫菌属的增殖与活性有重大影响,通过这种方式,磁场环境能改善部分由丝硫菌属引起的污泥膨胀。在前10相对丰度属种群中,拟杆菌门中的*OLB12*在磁环境中相对丰度有所上升,而变形菌门的*Ellin6067*相对丰度则出现下降,这两种具有硝化能力的菌属在总相对丰度上保持均衡,所以R1与R2反应器表现出了相差无几的氨氮去除率。

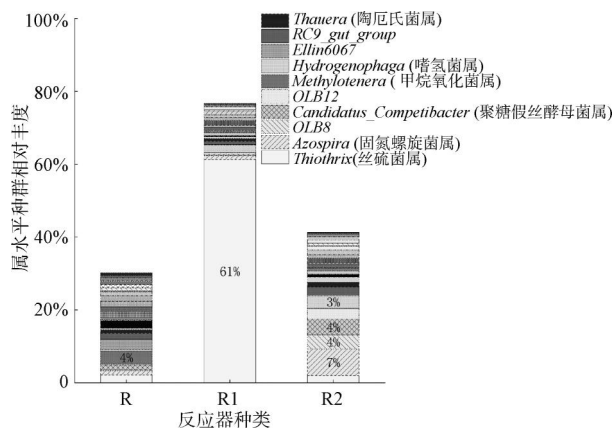


图7 属水平微生物群落相对丰度

Fig. 7 Relative Abundance of Microflora at Genus Level

2.3 功能基因分析

为进一步解析磁场对AAO工艺的影响机理,使用PICRUSt判断磁环境下AAO系统中的细菌潜在功能,分析结果如图8~图9所示。新陈代谢(49.43%~49.74%)是菌群最重要的功能基因,其次是遗传信息处理,占16.76%~17.17%,环境信息处理基因和细胞过程基因也占有较大地位,剩余基因类别的相对丰度低于5%(图8)。5 mT磁场环境

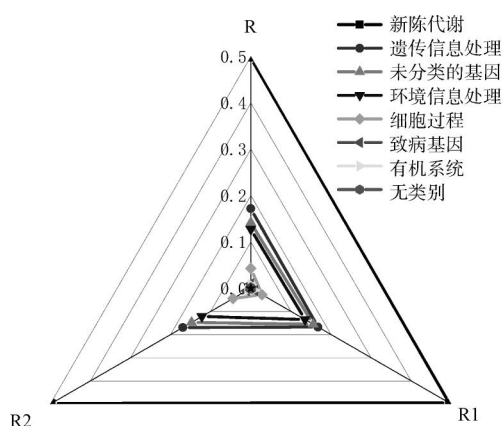


图 8 一级功能基因雷达图

Fig. 8 Radar Map of Primary Functional Gene

下的 AAO 中微生物功能基因与接种污泥和对照 AAO 存在显著差异(图 9)。

由图 10 可知,膜运输是 R 与 R1 中相对丰度最高的基因类别,膜运输作为一级功能基因中环境信息处理的主要途径,能帮助微生物获取更多有机物。R2 中的膜运输类基因丰度出现明显下降,说明磁场可通过抑制膜运输基因的表达来减少部分异养微生物(如 *Thiothrix* 等)对有机碳源的获取量。由此,有

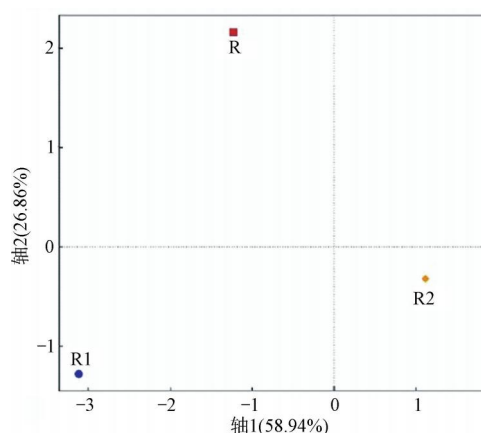


图 9 3 组样品微生物一级功能基因 PCA

Fig. 9 PCA of Microbial Primary Functional Genes of 3 Groups of Samples

机碳源竞争力偏弱的反硝化菌群获得了更多的摄取碳源的机会,进而提升反硝化菌群在 AAO 中的竞争力,这也较好解释了图 4 中 R2 反应器反硝化菌群总相对丰度上升的现象。磁环境下,细胞运动类基因相对丰度较 R1 提升 75%,说明磁场有助于提升细胞的活性,促进底物的捕获与代谢,这也是 R2 反应器能更快启动的重要原因。

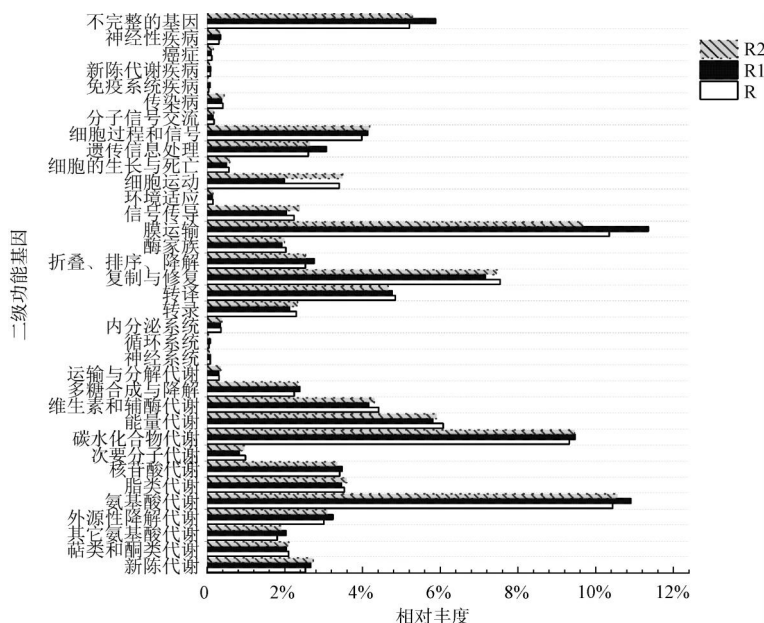


图 10 二级功能基因相对丰度

Fig. 10 Relative Abundance of Secondary Functional Genes

3 结论

(1) 磁场对 AAO 工艺的启动过程有较明显影响,两组反应器接种运行 30 d 内,磁环境下的 AAO

成功启动所需的天数较无磁场少 5 d,平均总氮去除率比无磁场环境的 AAO 反应器高 6%。

(2) 磁场会影响到 AAO 反应器的微生物群落

结构,通过高通量测序发现磁场环境下 AAO 反应器具有反硝化能力的菌群相对丰度大幅上升,其相对丰度占比从 R1 的 5% 上升至 R2 的 20%,从而有效提升了总氮去除效能;变形菌门中的丝硫菌属相对丰度占比出现大幅下降,磁场表现出抑制丝状菌过度繁殖的作用。

(3) 基因预测分析表明,磁场通过刺激细胞运动,使细胞更具活力,从而缩短反应器启动时间;磁场抑制了膜运输类基因的表达,提高了反硝化过程对机碳源的竞争力,提升了反硝化菌群的相对丰度。

参考文献

- [1] WANG J, CHON K M, REN X H, et al. Effects of beneficial microorganisms on nutrient removal and excess sludge production in an anaerobic-anoxic/oxic (A^2O) process for municipal wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2019(281): 90–98. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.02.047.
- [2] ZHANG M, PENG Y Z, WANG C, et al. Optimization denitrifying phosphorus removal at different hydraulic retention times in a novel anaerobic anoxic oxic-biological contact oxidation process[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016(106): 26–36. DOI: 10.1016/j.bej.2015.10.027.
- [3] HUANG W, GONG B Z, WANG Y M, et al. Metagenomic analysis reveals enhanced nutrients removal from low C/N municipal wastewater in a pilot-scale modified AAO system coupling electrolysis [J]. *Water Research*, 2020 (173): 115530. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115530.
- [4] 吴延虎, 王勇康, 李想, 等. 悬浮填料强化 SBR 工艺处理高校园区生活污水实验研究[J]. *应用化工*, 2022, 51(5): 1319–1323.
- WU Y H, WANG Y K, LI X, et al. Experimental study on the treatment of domestic sewage in university park by suspension filler enhanced SBR process [J]. *Applied Chemical Industry*, 2022, 51(5): 1319–1323.
- [5] LI J, ZHENG L, YE C B, et al. Unveiling organic loading shock-resistant mechanism in a pilot-scale moving bed biofilm reactor-assisted dual-anaerobic-anoxic/oxic system for effective municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2022(347): 126339. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126339.
- [6] WANG F, BIAN W, LIU W A, et al. Enrichment of functional microorganisms in AAO segmental influent-biofilm filler coupling process to improve the pollutants removal efficiency at low temperature [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022 (49): 102985. DOI:10.1016/j.jwpe.2022.102985.
- [7] FAN L R, YAO H, DENG S H, et al. Performance and microbial community dynamics relationship within a step-feed anoxic/oxic/anoxic/oxic process (SF-A/O/A/O) for coking wastewater treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021(792): 148263. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.148263.
- [8] XU D, JI H M, REN H Q, et al. Inhibition effect of magnetic field on nitrous oxide emission from sequencing batch reactor treating domestic wastewater at low temperature [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020(87): 205–212. DOI: 10.1016/j.jes.2019.05.014.
- [9] WANG M N, LI J M, NING S X, et al. Simultaneously enhanced treatment efficiency of simulated hypersaline azo dye wastewater and membrane antifouling by a novel static magnetic field membrane bioreactor (SMFMBR) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(821): 153452. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153452.
- [10] HU B W, WANG Y L, QUAN J N, et al. Effects of static magnetic field on the performances of anoxic/oxic sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2020 (309): 123299. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123299.
- [11] CHEN Y, ZHANG F Y, SHI X S, et al. Synthesis and application of magnetic PS@Fe₃O₄ microparticles for improving nitrogen removal in wastewater treatment process [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(4): 108164. DOI:10.1016/j.jece.2022.108164.
- [12] ZAIDI N S, SOHAIL I J, MUDA K, et al. Magnetic field application and its potential in water and wastewater treatment systems [J]. *Separation & Purification Reviews*, 2013, 43(3): 206–240.
- [13] CHEN R F, SHUAI J, XIE Y J, et al. Aerobic granulation and microbial community succession in sequencing batch reactors treating the low strength wastewater: The dual effects of weak magnetic field and exogenous signal molecule [J]. *Chemosphere*, 2022(309): 136762. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136762.
- [14] GENG S Y, FU W Z, CHEN W F, et al. Effects of an external magnetic field on microbial functional genes and metabolism of activated sludge based on metagenomic sequencing [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8818. DOI:10.1038/s41598-020-65795-3.
- [15] LÜ W L, QUN S, SHI J, et al. Weak magnetic field affected microbial communities and function in the A/O/A sequencing batch reactors for enhanced aerobic granulation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2021(266): 118537. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118537.
- [16] SHU D T, HE Y L, YUE H, et al. Microbial structures and community functions of anaerobic sludge in six full-scale wastewater treatment plants as revealed by 454 high-throughput [J]. *Bioresource Technology*, 2015(186): 163–172. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.03.072.
- [17] ZHOU X, ZHANG Q, SUN H L, et al. Efficient nitrogen removal from synthetic domestic wastewater in a novel step-feed

- three-stage integrated anoxic/oxic biological aerated filter process through optimizing influent flow distribution ratio[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019 (231): 1277–1282. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.11.014.
- [18] LIU X W, XU J L, HUANG J L, et al. Bacteria-supported iron scraps for the removal of nitrate from low carbon-to-nitrogen ratio wastewater [J]. *Royal Society of Chemistry*, 2019, 9 (6): 3285–3293.
- [19] AQEEL H, LISS S N. Autotrophic fixed-film systems treating high strength ammonia wastewater[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020(11): 551925. DOI: 10.3389/fmicb.2020.551925.
- [20] LIU X H, LIU R Y, YANG Q, et al. Achieving and control of partial denitrification in anoxic-oxic process of real municipal wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2021 (341): 125765. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125765.

(上接第 89 页)

设的 MBR 工艺。提标增效中可结合前端不能稳定达到现行地标的设施,结合周边环境特点,均可考虑资源化利用模式。

(4)上海农村生活污水资源化利用开展了试点,积累了一定经验,但市级层面缺乏统一的指导,需要抓紧编制农村生活污水资源化利用指导意见,形成部门合力,会同生态环境、农业农村、绿化市容等部门协同推进。同时,要抓紧研究相关导则和标准,具体指导资源化利用的规划设计、建设施工以及设施管护等工作。

(5)要建立资源化利用后评估机制,重点评估村庄及周边环境质量、资源化利用设施维护、村民满意度等内容。区级主管部门每年开展一次资源化利用成效评估并报市级主管部门,市级主管部门对评估结果进行抽查复核,并将复核结果纳入各区年度河长制考核,确保资源化利用取得实效。

参考文献

- [1] 黎辉. 小型污水处理设施在农村水环境治理中的应用[J]. *智能城市*, 2021, 7(7): 117–118.
- LI H. Application of small sewage treatment facilities in rural water environment treatment [J]. *Intelligent City*, 2021, 7(7): 117–118.
- [2] 杨明. 探析农村生活污水的来源及防治策略[J]. *清洗世界*, 2023, 39(3): 158–160.
- YANG M. Exploring the sources and prevention strategies of rural domestic sewage [J]. *Cleaning World*, 2023, 39 (3): 158–160.
- [3] 李怀正, 金伟, 张文灿, 等. 我国农村生活污水综合治理研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 154–160.
- LI H Z, JIN W, ZHANG W C, et al. Comprehensive treatment of rural domestic sewage in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 154–160.
- [4] 李无双, 王洪阳, 潘淑君. 农村分散式生活污水现状与处理技术进展[J]. *天津农业科学*, 2008, 14(6): 75–77.
- LI W S, WANG H Y, PAN S J. Present status on decentralized domestic sewage in rural areas of China and its treatment technology [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2008, 14 (6): 75–77.
- [5] 苏鸿洋. 中国村镇分散生活污水处理技术现状[J]. *给水排水*, 2015, 51(s1): 197–201.
- SU H Y. Current status of decentralized domestic sewage treatment technology in villages and towns in China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 51(s1): 197–201.
- [6] 胡昕晔, 翁晏呈, 黄彰奕. 上海农村生活污水治理现状与发展的思考[J]. *水利建设与管理*, 2021, 41(1): 73–76.
- HU X Y, WENG Y C, HUANG Z Y. Consideration on present situation and development of sewage treatment in rural areas of Shanghai[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2021, 41 (1): 73–76.
- [7] 李娟红, 管福征, 陈长秋, 等. 复合型人工湿地对污水厂尾水处理效能及微生物群落研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(10): 104–109.
- LI J H, GUAN F Z, CHEN C Q, et al. Evaluation of the performance and microbial communities by a hybrid constructed wetland system for treating wastewater treatment plant tail-water [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48 (10): 104–109.