

曝气调控恢复主流自养脱氮性能及脱氮菌群特性研究

刘人源¹, 罗红梅², 涂智³, 瞿畏³, 彭阳⁴, 陈宏³

1. 广东自远环保股份有限公司, 广东 梅州 514700;
2. 湖南省气象服务中心, 湖南 长沙 410118;
3. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;
4. 江西环境工程职业学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 针对主流条件下部分亚硝化-厌氧氨氧化(PNA)工艺难以维持长期稳定运行的问题, 采用气升式内循环反应器构建一段式反应系统, 探究高溶解氧浓度导致工艺脱氮性能失稳后, 原位恢复工艺脱氮性能的可行性及调控策略。结果表明, 仅通过适宜的曝气调控, 主流PNA工艺的脱氮性能可以实现原位恢复。在进水氨氮浓度为(50±1.81) mg/L、曝气速率为0.30 L/min的条件下, 工艺的氮去除率可恢复至74.8%, 氮去除速率达0.46 kg N/m³·d。此外, 曝气调控能够提高胞外聚合物中蛋白质的含量, 从而提升污泥浓度和促进污泥颗粒化; 氨氧化活性和厌氧氨氧化活性得到了增强, 亚硝酸盐氧化活性得到了有效的控制。在恢复策略的实施下, *Candidatus Brocadia*属和*Nitrosomonas*属的相对丰度恢复至5.3%和8.7%, *Nitrospira*属的相对丰度减少至0.2%。研究结果为厌氧氨氧化技术在主流条件下的应用提供理论指导和技术支持。

关键词: 部分亚硝化-厌氧氨氧化; 主流; 性能恢复; 曝气调控; 氮去除

中图分类号: X703

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022040039

Recovery performance of mainstream autotrophic nitrogen removal and characteristics of functional microbes under aeration control

LIU Renyuan¹, LUO Hongmei², TU Zhi³, QU Wei³, PENG Yang⁴, CHEN Hong³

1. Guangdong Zi Yuan Environmental Protection Co. Ltd., Meizhou 514700, China;
2. Hunan Meteorological Service Center, Changsha 410118, China;
3. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
4. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To solve the stability of partial nitrification-anammox process (PNA) under mainstream conditions, a one-stage PNA system was constructed by an airlift internal circulation reactor. The feasibility of the in-situ recovery and the control strategy of PNA process were explored under an instability condition of nitrogen removal by a high concentration dissolved oxygen. The results showed that the performance of the PNA process could be recovered under an appropriate aeration control. The nitrogen removal efficiency reached 74.8% and the nitrogen removal rate reached 0.46 kg N/m³·d with the influent concentration of (50±1.81) mg/L and the aeration rate of 0.30 L/min. Furthermore, aeration control could improve the protein contents and enhance the sludge concentration. It also promoted the sludge granulation. The specific activity of ammonia oxidation and anammox were enhanced, and the specific activity of nitrite oxidation was inhibited. With the implementation of recovery strategy, the relative abundance of *Candidatus Brocadia* and *Nitrosomonas* returned to 5.3% and 8.7%, and the *Nitrospira* abundance decreased to 0.2%. This study provided a scientific basis for the application of the mainstream anammox process.

Keywords: partial nitrification-anammox; mainstream; performance recovery; aeration control; nitrogen removal

CLC number: X703

收稿日期: 2022-04-12

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2022SK2091); 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2020SS05)

作者简介: 刘人源(1981-), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 污水处理理论与技术。E-mail: 18923012189@163.com

通信作者: 罗红梅(1975-), 女, 硕士、高级工程师。研究方向: 污染防治与应用气象技术。E-mail: 553976140@qq.com

引用格式: 刘人源, 罗红梅, 涂智, 等. 曝气调控恢复主流自养脱氮性能及脱氮菌群特性研究[J]. 环境保护科学, 2022, 48(5): 105-109.

相较于传统硝化-反硝化生物脱氮工艺,厌氧氨氧化技术因其高效低耗的显著优势而受到研究者的广泛关注^[1]。在实际应用中,厌氧氨氧化技术常常与亚硝化技术耦合,共同实现污水中氮素的去除,称为部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺 (partial nitrification-anammox, PNA),也叫自养脱氮工艺。根据亚硝化与厌氧氨氧化 2 个反应是否在同一个反应器中发生,能将 PNA 工艺分为一段式和两段式。从经济性和操作方便来看,一段式 PNA 工艺更具优势,但工艺稳定运行的控制也更为困难。目前,PNA 工艺已经成功应用于高氨氮污水处理(侧流污泥消化液、垃圾渗滤液等)^[2-3],但是对于低氨氮浓度的主流城市污水,可以普及的工程化应用尚为空白。特别对于曝气量、溶解氧等环境条件的变化,会导致工艺性能失稳、脱氮效能下降,严重影响了该工艺的工程化推广,有效的恢复策略亟待研究。

在一段式 PNA 工艺中,曝气操作是控制工艺性能稳定性的关键因素^[4],曝气速率能直接影响体系内溶解氧浓度的大小。亚硝化过程需要好氧条件,而厌氧氨氧化需要较为严格的厌氧环境,这给一段式 PNA 工艺高效脱氮性能的发挥带来了困难。曝气量较低,不利于亚硝化反应,同时也难以为厌氧氨氧化过程提供充足的反应基质;而曝气量过高,抑制了厌氧氨氧化反应活性,也会导致亚硝酸盐氧化菌的大量增殖,使得性能恶化、体系崩溃^[5]。尽管通过曝气操作维持 PNA 工艺稳定性的相关研究已有报道^[6],但是很少关注失稳后工艺性能恢复的调控策略,特别是仅通过曝气调控原位恢复工艺脱氮性能。

本研究采用气升式内循环反应器构建一段式 PNA 工艺系统,通过曝气调控考察反应器脱氮性能的变化,解析自养脱氮污泥变化特征及反应活性,探究过量曝气失稳后 PNA 工艺性能恢复的可行性及调控策略,解析恢复过程中功能微生物丰度变化,以期厌氧氨氧化工艺在主流条件下应用提供理论指导和技术支持。

1 实验部分

1.1 实验装置

一段式 PNA 工艺系统,见图 1。

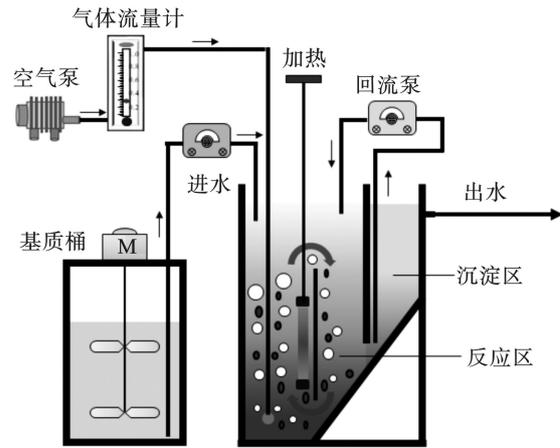


图 1 一段式 PNA 系统

主反应器由有机玻璃制成,总有效体积为 2 L,其中反应区容积为 1.6 L,沉淀区容积为 0.4 L。空气泵为系统提供曝气,通过气体流量计调控曝气速率,曝气位点设置于反应区底部。利用进水泵将基质桶中的模拟废水输送至反应区,回流泵用于回流沉淀区底部的污泥。整个系统的混合液随着气泡的提升而在反应区形成循环。系统温度维持在 25 °C,进水 pH 值维持在 7.8 ~ 8.2。

1.2 接种污泥与实验用水

接种污泥取自实验室已稳定运行的一段式 PNA 反应器混合絮体污泥,VSS 为 0.67 g/L,TS 为 1.35 g/L,总氮去除率达到 0.47 kg N/m³·d。

实验用水为人工配置的低氨氮废水^[4],以 NH₄HCO₃ 为唯一氮源,以 KH₂PO₄ 为磷源,不含有机碳源。具体废水组成如下: NH₄HCO₃ 50 mg/L, KH₂PO₄ 41 mg/L, CaCl₂ 36 mg/L, MgCl₂ 40 mg/L, ZnSO₄ 0.215 mg/L, NiCl₂ 0.095 mg/L, NaSeO₄ 0.21 mg/L, MnCl₂ 0.495 mg/L, H₃BO₃ 0.007 mg/L, Na₂-EDTA 8.304 mg/L, CuSO₄ 0.125 mg/L, CoCl₂ 0.12 mg/L, NaMo₄ 0.11 mg/L, FeSO₄ 5 mg/L。

1.3 实验方法

实验共连续运行 160 d,整个过程可以分为 4 个阶段:阶段 I (启动及稳定阶段,1 ~ 25 d),阶段 II (失稳阶段,26 ~ 40 d),阶段 III (恢复阶段,41 ~ 134 d),阶段 IV (再稳定阶段,135 ~ 160 d)。其中,失稳阶段人为地增大曝气速率,造成工艺脱氮性能恶化。各阶段的操作条件,见表 1。分别在第 20、40 和 155 d,采集污泥样品并测定污泥浓度,提取细胞外聚合物测定蛋白质含量。同时开展批次实验测定污泥的氨氧化活性(不含厌氧氨氧化)、亚

硝酸盐氧化活性、厌氧氨氧化活性和反硝化活性，并送样检测微生物群落结构及多样性。

表 1 工艺操作条件

阶段	t/d	曝气速率/ L·min ⁻¹	溶解氧/ mg·L ⁻¹	进水氨氮/ mg·L ⁻¹	进水氮负荷/ kg N·(m ³ ·d) ⁻¹
I	1~25	0.20	0.10~0.25		
II	26~40	1.00	0.85~1.05		
	41~64	0.10	0.05~0.10	50±1.81	0.60±0.02
III	65~110	0.20	0.10~0.15		
	111~134	0.30	0.25~0.30		
IV	135~160	0.30	0.25~0.30		

1.4 分析方法

采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮浓度；采用离子色谱法测定亚硝氮、硝氮浓度；利用 pH 计原位测定反应区的 pH；溶解氧浓度由便携式溶解氧仪原位测定；称量法测定污泥的 VSS 和 TS；采用热碱水解结合高速离心和涡旋振荡的方法提取胞外聚合物中的蛋白质^[5]，蛋白质浓度的测定采用考马斯亮蓝法；污泥活性的测定参考 CHEN et al^[4] 的研究；氮反应速率的计算参考先前的研究报道^[5]；定期采集污泥样品并送检，在上海美吉生物公司云平台分析高通量测序结果。

2 结果与讨论

2.1 脱氮性能变化

整个实验过程中，各阶段进出水氮浓度，见图 2。

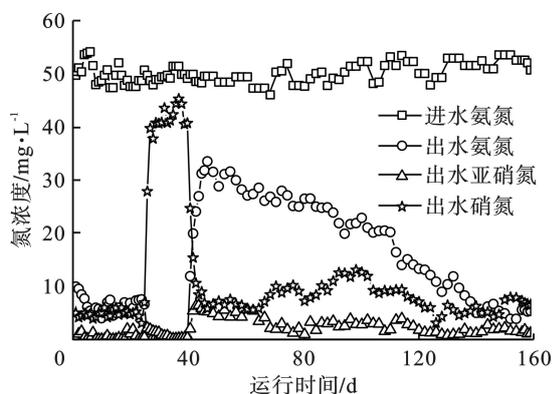


图 2 进出水氮浓度

由于实验用泥直接取自运行稳定的 PNA 反应器，所以阶段 I 中工艺的脱氮性能在初始就维持较高水平。在进水总氮浓度为(50±1.81) mg/L、曝气速率为 0.20 L/min 的条件下，出水氨氮、亚硝氮和

硝氮浓度分别为 5.69、0.24 和 4.79 mg/L。在阶段 II 中，为了探究工艺性能恢复的可行性，人为的增大曝气速率、造成高溶解氧状态，破坏工艺稳定的运行性能。当曝气速率由 0.20 升至 1.00 L/min，出水氨氮和亚硝氮浓度迅速减至 0.85 和 0.02 mg/L，硝氮浓度急剧增至 40.94 mg/L。结果表明，过量的曝气造成的高溶解氧环境使得体系内氨氮和亚硝氮氧化完全，同时破坏了厌氧氨氧化所需的厌氧条件，导致出水中硝氮积累、体系失稳性能恶化。

增大曝气后总氮去除率由 78.4% 降至 14.8%，这也表明工艺的脱氮性能失稳恶化。出水中硝氮浓度的生成量与氨氮浓度变化之比是衡量自养脱氮反应是否占主导的一个重要指标， Δ 硝氮浓度/ Δ 氨氮浓度的比值越接近 11%，表明反应体系中厌氧氨氧化脱氮过程为主要脱氮途径^[7]。而在过量曝气条件下， Δ 硝氮浓度/ Δ 氨氮浓度的比值也由 11.3% 增加至 84.0%，说明亚硝化过程失稳、厌氧氨氧化反应完全被破坏，亚硝酸盐被氧化成硝酸盐，出水中硝氮积累，见图 3。

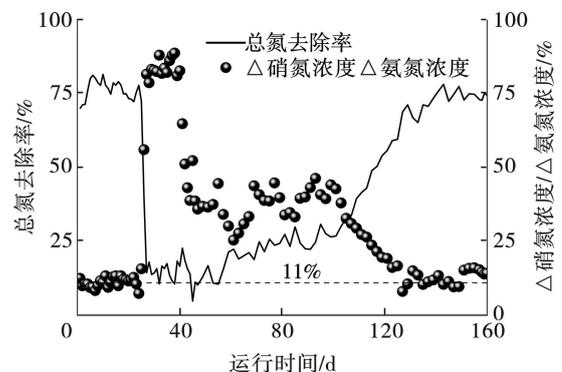


图 3 总氮去除率和化学计量比

在阶段 III 中，通过调控曝气速率，探讨主流条件下工艺性能恢复的可行性。曝气速率由 1.00 降低至 0.10 L/min，而后逐级增加至 0.30 L/min，脱氮性能也逐渐实现了恢复。阶段 IV 的再稳定过程中，出水中氨氮、亚硝氮和硝氮浓度分别达到 4.99、1.58 和 6.90 mg/L，总氮去除率也恢复至 74.8%。结果表明，通过适宜的曝气调控，可以实现主流条件下失稳后 PNA 工艺的性能恢复。

进一步计算分析反应体系中的氮反应速率(图 4)，进水氮负荷一直维持在 0.60 kg N/m³·d，氮去除速率初始阶段稳定在 0.42 kg N/m³·d。随着过量曝气的实施，氨氧化速率由 0.28 增至 0.56 kg N/m³·d，亚硝酸盐氧化速率由 0.02 增加至 0.51 kg N/m³·d。

这表明,过量曝气同步增强了氨氧化反应和亚硝酸盐氧化反应,使得亚硝化过程失稳。因此,氮去除速率也减少至 $0.07 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。恢复阶段通过曝气速率的调控,氨氧化速率随着曝气量的增大而逐步提升,亚硝酸盐氧化速率被抑制,氮去除速率逐步恢复至 $0.46 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。在性能恢复的过程中,曝气速率是重要的调控要素,曝气量较低无法促进氨氧化过程,也间接的抑制了后续的厌氧氨氧化反应。所以,曝气调控要结合出水中氨氮浓度综合考虑。实验结果表明,利用氨氧化反应和亚硝酸盐氧化反应的需氧差异,调控适宜的曝气能够强化氨氧化反应、控制亚硝酸盐氧化反应,有效地提升氮去除性能。

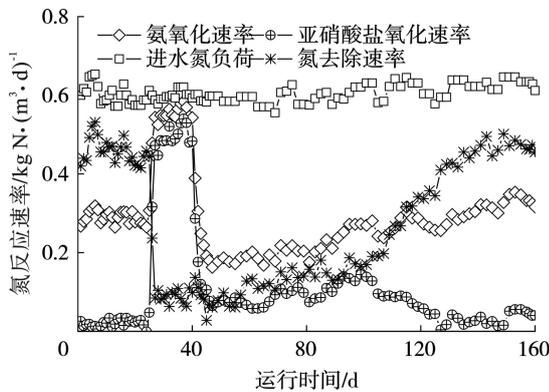


图 4 氮反应速率变化

2.2 污泥特征及活性

厌氧氨氧化菌具有较长的倍增周期^[8],所以 PNA 工艺常常因为生物量流失而造成功能菌丰度不足,从而使得脱氮性能下降。实验各阶段污泥的组成及含量,见图 5。

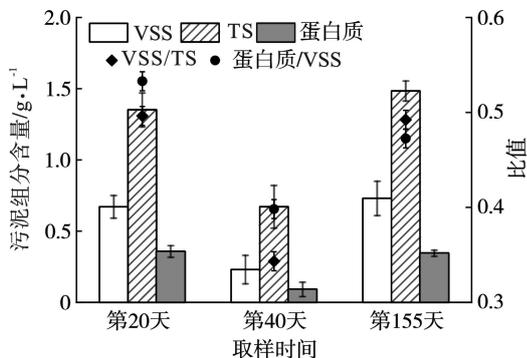


图 5 污泥组成及含量

在过量曝气作用下,VSS 由稳定阶段的 0.67 降至 0.23 g/L ,VSS/TS 也由 0.49 减至 0.34 。这表明,过量曝气加速了生物量流失,降低了污泥浓度,也是性能下降的主要原因。此外,蛋白质含量和占比

也明显下降。胞外聚合物中较高的蛋白质含量有利于颗粒化的形成,从而提高生物量的持留能力^[9],所以蛋白质含量的降低也与污泥浓度变化相一致。随着恢复阶段的曝气调控,VSS 和 TS 恢复至 0.73 和 1.48 g/L ,蛋白质含量也增至 0.35 g/L 。结果表明,有效的曝气调控可以强化生物量的持留,提高污泥浓度,这对于工艺脱氮性能的恢复有积极作用。

工艺的脱氮性能与污泥活性密切相关,由污泥浓度和活性共同决定^[10-11],各阶段污泥活性变化,见图 6。

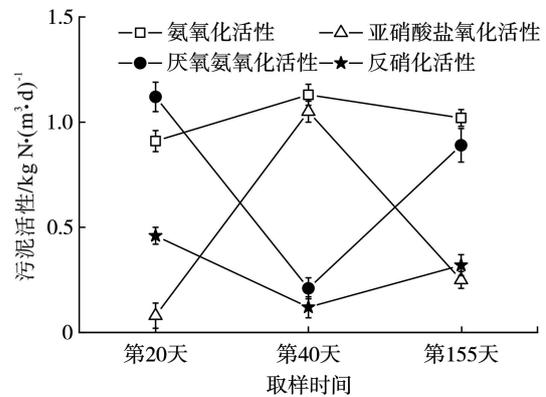


图 6 污泥活性变化

在阶段 II 中,过量曝气和高溶解氧浓度极大地促进了硝化反应,同时抑制了厌氧氨氧化反应和反硝化活性。氨氧化活性和亚硝酸盐氧化活性由 0.91 和 $0.08 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 增长至 1.13 和 $1.05 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$;而厌氧氨氧化活性和反硝化活性降低至 0.21 和 $0.12 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。这也与 2.1 节脱氮性能的变化相一致,污泥活性的变化影响了工艺的宏观脱氮性能。随着恢复阶段的曝气调控,氨氧化活性略微下降,厌氧氨氧化活性恢复至 $0.89 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$,而亚硝酸盐氧化活性得到了抑制。结果表明,适宜曝气调控不仅能够提高污泥浓度,同时可以强化功能反应的活性;氨氧化反应活跃、厌氧氨氧化反应主导和亚硝酸盐氧化反应抑制是主流 PNA 体系脱氮性能提升和恢复的关键。

2.3 微生物特性分析

氨氧化菌和厌氧氨氧化菌是 PNA 工艺中的脱氮功能微生物,亚硝酸盐氧化菌属于干扰菌群^[1]。各阶段污泥样品中功能微生物在属水平上的相对丰度,见图 7。

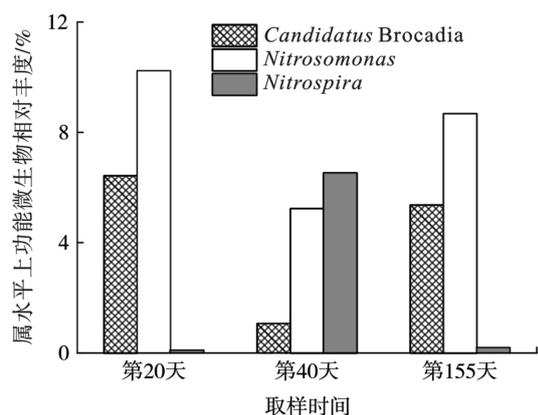


图7 属水平上功能微生物相对丰度

整个过程中,检出的厌氧氨氧化菌为 *Candidatus Brocadia* 属,氨氧化菌为 *Nitrosomonas* 属,亚硝酸盐氧化菌为 *Nitrospira* 属。当工艺启动达到稳定阶段时, *Candidatus Brocadia* 属和 *Nitrosomonas* 属的相对丰度达到 6.4% 和 10.2%, *Nitrospira* 属几乎未检出。在阶段 II 中,过量曝气和高溶解氧抑制了厌氧氨氧化菌的生长(1.1%),使得 *Nitrospira* 属过度增殖(6.5%),这也是性能失稳后出水中出现硝氮积累的原因。但随着恢复操作的实施, *Candidatus Brocadia* 属和 *Nitrosomonas* 属的相对丰度恢复至 5.3% 和 8.7%, *Nitrospira* 属的相对丰度减少至 0.2%。结果表明,适宜的曝气调控可以抑制亚硝酸盐氧化菌的生长,促进氨氧化菌和厌氧氨氧化菌的富集,能够优化主流 PNA 体系中功能菌群结构,从而使得工艺性能得到改善甚至恢复。

3 结论

针对脱氮性能失稳的 PNA 工艺,通过适宜的原位曝气调控,实现了主流条件下 PNA 工艺失稳后性能的恢复。在进水氮浓度为 (50 ± 1.81) mg/L、曝气速率为 0.30 L/min 的条件下,总氮去除率达到 74.8%,氮去除速率达到 $0.46 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。

适宜的曝气调控能够有效地提升污泥浓度和促进颗粒化的形成,使得系统内恢复并维持较高的生物量;此外,曝气调控能够强化氨氧化反应和厌

氧氨氧化反应、提高功能菌群的丰度水平,抑制亚硝酸盐氧化菌的过度增殖。

本研究验证了曝气调控原位恢复主流 PNA 工艺脱氮性能的可行性,适宜的曝气调控是 PNA 工艺性能恢复和提升反应速率及污泥丰度的关键要素,这为厌氧氨氧化工艺在主流条件下的应用提供了策略。

参考文献

- [1] 夏琼琼, 张文安, 王雅雄, 等. 污水处理厌氧氨氧化工艺研究与应用进展[J]. *水处理技术*, 2019, 45(5): 1-5.
- [2] 韩晓宇, 黄京, 刘新春, 等. 厌氧氨氧化技术处理热水解消化液的实验研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2542-2549.
- [3] 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 等. 耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 4195-4201.
- [4] CHEN H, WANG H, YU G, et al. Key factors governing the performance and microbial community of one-stage partial nitrification and anammox system with bio-carriers and airlift circulation[J]. *Bioresour Technol*, 2021, 324: 124668.
- [5] CHEN H, WANG H, CHEN R, et al. Unveiling performance stability and its recovery mechanisms of one-stage partial nitrification-anammox process with airlift enhanced micro-granules[J]. *Bioresour Technol*, 2021, 330: 124961.
- [6] 刘珂, 吴莎, 陈婧, 等. 新型单级强化自养脱氮系统关键因子优化研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(2): 28-36.
- [7] CHEN R, JI J, CHEN Y, et al. Successful operation performance and syntrophic micro-granule in partial nitrification and anammox reactor treating low-strength ammonia wastewater[J]. *Water Research*, 2019, 155: 288-299.
- [8] 李权, 王少坡, 李博洋, 等. 厌氧氨氧化菌种类及其与各类功能菌在 ANAMMOX 系统内的协作[J]. *水处理技术*, 2018, 44(7): 10-16.
- [9] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, 41(5): 1022-1030.
- [10] 宋培圆, 张亮, 杨慎华, 等. 生物膜强化推流式颗粒污泥自养脱氮反应器启动[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6): 2595-2601.
- [11] 赵婉情, 李柏林, 王伟, 等. 颗粒-絮状污泥耦合单级自养脱氮系统的脱氮性能分析[J]. *环境工程*, 2020, 38(9): 43-47.