

葛俊, 岳冬梅, 陈晨, 等. 分向 AO 工艺在低 C/N 污水处理中的自然挂膜启动优化试验[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 94-99.

GE J, YUE D M, CHEN C, et al. Optimized experiment of natural biofilm formation startup of modified AO process in low C/N wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 94-99.

分向 AO 工艺在低 C/N 污水处理中的自然挂膜启动优化试验

葛俊*, 岳冬梅, 陈晨, 吴耀, 束梦照, 朱晓明

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要 【目的】 本文旨在探索多点进水条件下分向缺氧-好氧(AO)生物膜工艺在处理低碳源生活污水时的自然挂膜启动特性,通过直接利用化粪池污水中的土著微生物进行自然挂膜,以期为该工艺在实际应用中的快速启动和高效运行提供理论依据和技术支持。【方法】 在试验期间,进水化学需氧量(COD)质量浓度为 92.0~148.9 mg/L,总氮(TN)质量浓度为 13.4~56.9 mg/L,平均碳氮比约为 3.1:1.0。挂膜启动过程分为好氧预挂膜和缺氧挂膜 2 个阶段,通过连续监测氨氮和 COD 去除率作为关键评价指标,并结合显微镜技术,从微观层面全面追踪生物膜形成与演变过程。【结果】 在好氧预挂膜阶段,缺氧区域填料表面成功构建稳固生物膜基底,氨氮和 COD 去除率最高分别达到 92.21% 和 79.21%。30 d 的稳定运行后,系统进入缺氧挂膜阶段,氨氮和 COD 的去除率有所下降,最终分别稳定为 70% 和 60% 左右。显微镜观察证实,好氧区及缺氧区填料表面的生物膜附着紧密,结构稳定,表明自然挂膜过程已成功完成。【结论】 分向 AO 生物膜工艺通过利用化粪池污水中的土著微生物进行自然挂膜,不仅操作简便、经济高效,且能在短短 40 d 内完成启动,展现出显著的污染物去除性能。该发现为低碳源污水处理领域提供了关键技术支撑,具有良好的工程应用价值和推广前景。

关键词 农村生活污水 生物膜 挂膜启动 低碳氮比 缺氧-好氧工艺

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)12-0094-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.011

Optimized Experiment of Natural Biofilm Formation Startup of Modified AO Process in Low C/N Wastewater Treatment

GE Jun*, YUE Dongmei, CHEN Chen, WU Yao, SHU Mengzhao, ZHU Xiaoming

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract [Objective] This paper aims to explore the natural biofilm cultivation characteristics of a multi-point influent anoxic/oxic (AO) biofilm process in treating low-carbon domestic wastewater, utilizing indigenous microorganisms from septic tank effluent for natural biofilm formation, with the purpose of providing theoretical basis and technical support for rapid startup and efficient operation of this process in practical applications. [Methods] During the experimental period, the influent chemical oxygen demand (COD) mass concentration ranged from 92.0 mg/L to 148.9 mg/L, total nitrogen (TN) concentration varied between 13.4 mg/L and 56.9 mg/L, with an average carbon-to-nitrogen ratio of approximately 3.1:1.0. The biofilm cultivation process was divided into two stages: aerobic pre-biofilm formation and anoxic biofilm cultivation. Key evaluation indices were continuously monitored through ammonia nitrogen and COD removal rates, complemented by microscopic techniques to comprehensively track biofilm formation and evolution at the microscale. [Results] Experimental findings revealed that during the aerobic pre-biofilm stage, a stable biofilm matrix was successfully established on the packing material surface in the anoxic zone, with peak removal rates of 92.21% for ammonia nitrogen and 79.21% for COD. After 30 days of stable operation, the system entered the anoxic biofilm stage, with removal rates slightly declining and ultimately stabilizing around 70% for ammonia nitrogen and 60% for COD. Microscopic observations confirmed that the biofilms in both aerobic and anoxic zones were tightly attached and structurally stable, indicating the successful completion of the natural biofilm cultivation process. [Conclusion] The research demonstrates that the multi-point inlet AO biofilm process, utilizing

[收稿日期] 2024-06-20

[基金项目] 中交上航局科研项目(SHJKJ-2022-004)

[通信作者] 葛俊(1989—),男,高级工程师,研究方向为农村生活污水处理与运营技术,E-mail:gejun3011@qq.com。

indigenous microorganisms from septic tank effluent for natural biofilm cultivation, is not only operationally simple and economically efficient but can also complete startup within a mere 40 days, exhibiting remarkable pollutant removal performance. This finding provides critical technical support for low-carbon wastewater treatment, suggesting promising engineering application prospects and potential for widespread implementation.

Keywords rural domestic sewage biofilm biofilm culturing start-up low C/N ratio anoxic-oxic process

随着我国农村生活水平的提高和农村工业经济的不断升级,农村生活污水量呈显著上升趋势,而与此同时,环境质量却面临严峻挑战,污染问题逐渐从城市蔓延至农村^[1]。在“乡村振兴战略”和“美丽中国建设”的双重背景下,农村生活污水的有效治理成为至关重要的环节。然而,农村地区因其特有的分散性和地形条件,使得污水收集与处理面临诸多困难,传统的直接排放方式不仅污染了小微水体,更对农业生产和农村经济可持续发展构成了威胁^[2-3]。针对农村污水特点,研究者们不断探索适宜的治理方案。传统的活性污泥处理方法虽有其优势,但在处理小体量、低碳氮比(C/N)污水时,往往效果不尽如人意。一般来说,当进水 COD 中质量浓度低于 200 mg/L,以及 BOD₅/TN 小于 4 时,可以将这样的污水视为典型的低碳源水体,这种水体中由于有机碳含量低,难以满足生物处理过程中的碳源需求,进而影响了脱氮效率^[4]。尽管传统活性污泥法污水厂常通过添加外源碳源来提高处理效果,但这一做法不仅增加了处理成本,也不符合当前倡导的碳中和、碳达峰的环保理念。

在此背景下,生物膜法因其对低浓度污水的良好适应性和耐冲击负荷的特性,在农村污水处理中展现出独特优势^[5]。此研究开发了一种分向缺氧/好氧(AO)生物膜处理工艺,融合了横向与竖向多点进水策略,并在内部划分出多个功能区域,每个区域配置高效填料模块,模块内部实施精确曝气控制。通过优化进水流向与曝气强度,该工艺在横向上构建了一个连续且逐级递进的 AO 反应体系。在此体系中,硝化液能够直接从好氧区顺流进入下一级缺氧区,显著减少了内部回流的需求,从而提高了处理效率。同时,在竖向上,工艺也巧妙地设计了 AO 反应层次,底部区域专注于厌氧及缺氧过程,而中上部则转变为相对富氧环境。污水沿此梯度自然上升并高效混合,原水直接作为反硝化反应的碳源,有效提升了低碳源污水的脱氮效果。而该工艺成功的关键在于填料

的挂膜启动阶段,它直接决定了后续处理过程的稳定性和效率。

目前,挂膜启动的方法主要包括自然挂膜法和污泥接种法^[6]。其中:自然挂膜法通过持续通入污水,使微生物自然附着在填料上,并通过逐步提高污染物负荷来增强附着稳定性。该方法简便易行,对水质变化适应性强,但操作周期长,且在农村小型污水处理设施中的研究相对较少。本研究旨在通过深入分析化学需氧量(COD)和氨氮去除率的变化,探讨化粪池原污水自然挂膜启动阶段填料表面微生物膜的生长过程,以期分为分向 AO 生物膜工艺的优化运行提供理论支持和实践指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验设施

本研究使用自主搭建的聚丙烯(PP)板材试验设施(图1),尺寸为 1.9 m×1.0 m×1.0 m,有效容积为 1.5 m³。该反应器内部巧妙地划分为 5 个主要功能区,包括缺氧 I 区、好氧 I 区、缺氧 II 区、好氧 II 区以及缺氧 III 区。各区由打孔隔板隔开,既保证了各区之间的独立性,又允许水流在这些区域之间自由流通。

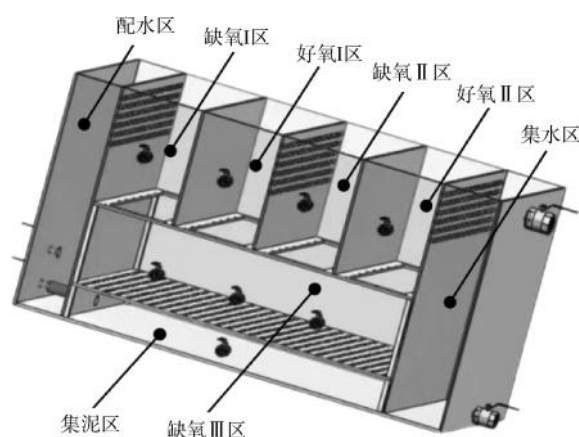


图 1 试验反应器工艺结构

Fig. 1 Process Structure of Test Reactor

1.2 填料特性

在反应器各功能区内部填充填料,缺氧 I 区、缺

氧Ⅱ区悬挂组合填料,缺氧Ⅲ区投加直径为 80 mm 亲水海绵悬浮球填料,好氧Ⅰ区和好氧Ⅱ区投加直径为 100 mm 聚氨酯悬浮球填料。反应器填料总填充率为有效容积的 40%。填料特性如表 1 所示。

表 1 生物填料主要特性
Tab. 1 Main Characteristics of Biological Packing

编号	种类	规格	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	投加位置
A	聚氨酯悬浮球	直径:100 mm	700	好氧Ⅰ区 好氧Ⅱ区
B	亲水海绵悬浮球	直径:80 mm	800	缺氧Ⅲ区
C	组合填料	100 cm/根	>1 000	缺氧Ⅰ区 缺氧Ⅱ区

表 2 试验进水水质
Tab. 2 Test Influent Water Quality

项目	COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氨氮/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH 值	水温/ $^{\circ}\text{C}$
数值	92.0~148.9	12.0~51.2	13.4~56.9	1.9~5.0	6.9~7.8	16.2~25.1
平均值	118.4	35.6	38.1	3.2	7.5	19.3

著微生物的自然富集,在填料表面形成生物膜。在 AO 生物膜工艺反应器中,生物膜的形成受到两大核心因素的制约:首先,是填料表面性质,过于光滑的表面会阻碍生物膜的附着;其次,是缺氧功能区内微生物的代谢速率,若速率过慢,则不利于生物膜的形成^[8]。

为了克服这些挑战,本研究提出“好氧预挂膜+缺氧挂膜”的两阶段启动策略,如表 3 所示。在第

表 3 挂膜启动过程具体运行参数
Tab. 3 Specific Operation Parameters of Biofilm Culturing Startup

运行参数	第一阶段			第二阶段
	0~6 d	7~20 d	21~30 d	31~40 d
水力停留时间(HRT)/h	48	36	24	24
曝气段	好氧区+缺氧区	好氧区+缺氧区	好氧区+缺氧区	好氧区
进气流量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	90	90	90	90
进水分配	单点进水	两点进水(1:1)	两点进水(3:2)	两点进水(3:2)

注:第一进水点在配水区;第二进水点位于缺氧区Ⅱ。

3 结果与讨论

3.1 对氨氮的去除性能

分向 AO 生物膜工艺自然挂膜启动过程中,氨氮进出水浓度及去除率变化如图 2 所示。

在 AO 生物膜工艺的自然挂膜启动过程中,氨氮的去除率变化呈现出显著的特点。在启动初期,尽管生物膜尚未在填料表面形成,氨氮的去除率已

1.3 原水水质及检测方法

试验用水取自本单位园区内化粪池,由小型潜污泵抽提至储水箱,再通过计量泵进入反应器内。自然挂膜启动阶段原水水质情况如表 2 所示,进水平均 C/N 约为 3.1:1.0,呈现明显的低 C/N 现象。

氨氮、TN、TP 等指标监测方法参照《水和废水监测分析方法》^[7],COD 采用快速消解法测定(雷磁 COD-571),溶解氧、pH、温度由雷磁 DZB-708L 型多参数分析仪直接读数。微生物膜生物相的观察采用尼康 CI-S 型荧光显微镜。

2 挂膜启动过程参数

本研究从始于 2022 年 4 月下旬,通过原水中土

一阶段,采取全段曝气的方式,利用好氧微生物快速繁殖的特性,通过其新陈代谢产生多糖类物质,从而改善填料的表面性能,为生物膜的附着提供理想条件^[9]。进入第二阶段后,好氧区继续曝气,而缺氧区则停止曝气。在第一阶段缺氧区的填料已经形成了良好的生物膜基础,因此,可以显著缩短缺氧挂膜的时间^[10]。

达到了约 32%,这主要归因于生物填料对氨氮的吸附作用。然而,随着填料吸附容量的饱和,在第 8 d,氨氮的去除率突然下降,这可能与缺氧区开始第 2 点进水后,污水在后续反应区内未充分反应有关。值得关注的是。自第 14 d 起,原水中土著微生物在填料表面展现出了显著的增殖与生长活性,导致氨氮去除率出现了迅速且明显的提升。截至第 20 d,

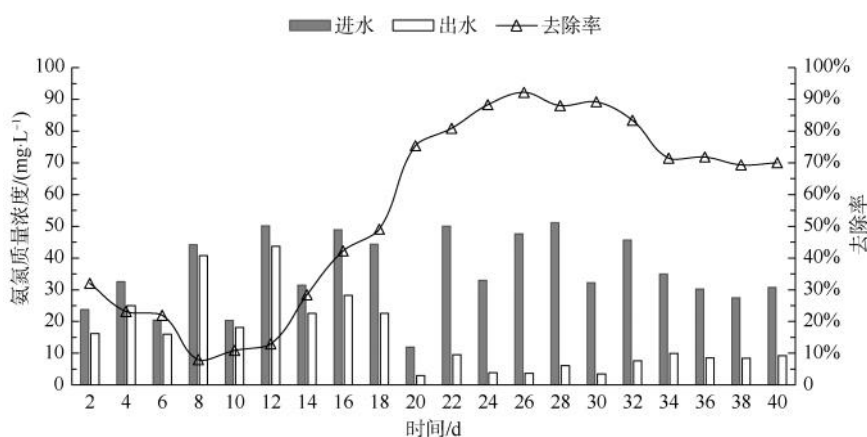


图2 自然挂膜启动阶段氨氮进出水浓度及去除率

Fig. 2 Influent and Effluent Concentration and Removal Rate of Ammonia Nitrogen in Natural Biofilm Culturing Startup Stage

氨氮的去除率显著跃升至 75.39%, 这主要得益于生物膜的形成和微生物活性的显著提升, 它们共同强化了氨氮的生物转化效率。第 26 d, 氨氮去除率达到最大值 92.21%, 这一现象与 Huang 等^[11]的研究相吻合, 他们在一个连续流动的缺氧/氧化生物膜反应器中观察到了氨氮去除率高达 95% 以上。在第 30 d, 当挂膜启动进入第二阶段, 缺氧区停止曝气后, 氨氮的去除率虽有所下降, 但仍维持在较高水平。这表明尽管缺氧区停止曝气, 硝化反应仍能在一定程度上进行, 这可能是由于生物膜中的部分微生物能在缺氧条件下进行硝化反应^[12]。自第 34 d

起, 缺氧区填料表面的生物膜经历了一个重要的微生物群落调整过程, 其中部分微生物逐渐演替为兼性菌, 为更高效的氨氮转化过程奠定了基础, 随着这一过程的深入, 氨氮去除率逐渐趋于稳定状态。至第 40 d, 氨氮的去除率保持在 70% 左右, 出水中氨氮质量浓度低于 10 mg/L, 这标志着反应器内硝化细菌生物膜已基本稳定, 可视为挂膜启动成功。

3.2 对有机物的去除性能

分向 AO 生物膜工艺自然挂膜启动过程中, 有机物的去除以 COD 的变化来表示, 其进出水浓度及去除率变化如图 3 所示。

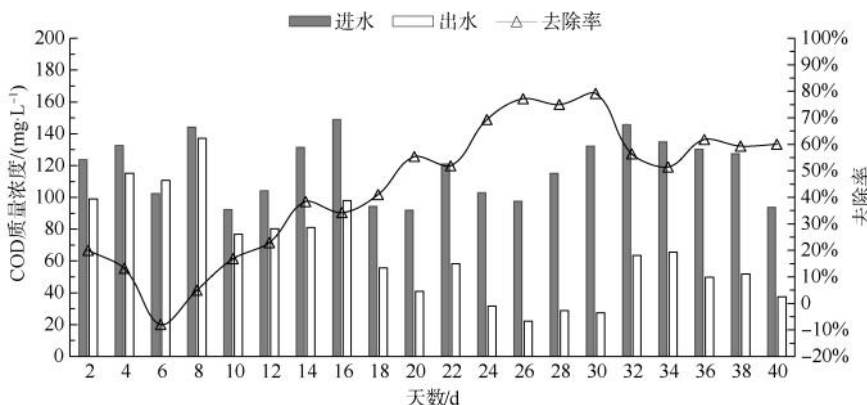


图3 自然挂膜启动阶段 COD 进出水浓度及去除率

Fig. 3 Influent and Effluent Concentration and Removal Rate of COD in Natural Biofilm Culturing Startup Stage

在自然挂膜启动的初期, 有机物的去除与氨氮的去除机制类似, 主要依赖于填料对原水中污染物的物理截留和吸附作用。然而, 与氨氮相比, 填料对有机物的吸附饱和现象更为显著。具体而言, COD 去除率在短期内经历了从 20.03% 到 -7.96% 的显著下降,

甚至出现出水 COD 浓度高于原水的情况。这一现象揭示了启动初期生物膜尚未稳定形成, 填料截留的有机物在气水冲击作用下被冲刷至出水中, 导致 COD 浓度升高^[13]。经过一周的挂膜启动, 系统对有机物的去除效能显著提升。这主要归功于好氧异养菌的

快速繁殖和生物膜的形成。相比硝化菌,好氧异养菌具有较短的世代周期,且能优先利用水体中的溶解氧,从而加速生物膜的形成和成熟^[14]。因此,随着生物膜的稳定和成熟,系统的 COD 去除率逐渐提高,并在第 30 d 达到峰值 79.21%,此时进水 COD 质量浓度为 132.28 mg/L,出水 COD 质量浓度降至 27.50 mg/L。值得注意的是,在挂膜启动的后期,即第 34 d 左右,COD 去除率出现了快速下降的现象。这是系统进入第二阶段,缺氧区停止曝气,导致缺氧环境下的生物反应受到影响。然而,这种影响并未持续,从第 36 d 开始,COD 去除率逐渐回升并稳定在 60% 左右。这一转变表明,生物膜在填料表面实现了良好的富集和生长,系统挂膜成功,并能在不同运行条件下保持稳定的有机物去除效果。

3.3 不同功能分区生物膜观察

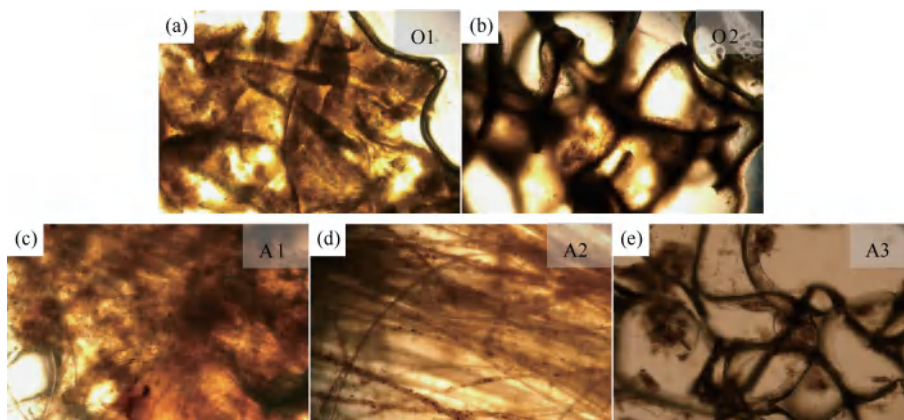
自然挂膜启动作为生物膜反应器运行的关键初始阶段,可划分为初始和成熟 2 个主要阶段。本研

究通过系统观察和分析,揭示了分向 AO 生物膜反应器在这两个阶段的特征变化。在自然挂膜启动的最初 3 d,各功能区填料表面变化不显著,但由于缺氧 I 区毗邻进水端,原水中的杂质首先在该区域的组合填料表面形成薄薄的、浅黑色的覆盖层。随着反应进行,在曝气作用下,好氧 I 区和好氧 II 区的悬浮球填料逐渐发展出生物膜。约一周后,填料开始缓慢下沉,打开悬浮球内部载体时可察觉淡淡泥腥味,表明微生物群落开始初步形成。到第 20 d,悬浮球填料完全沉入水面以下,填料表面覆盖了较厚的黄褐色生物膜。第 30 d 左右,进入成熟阶段,缺氧区组合填料表面的生物膜由深褐色逐渐转变为灰褐色,揭示兼性菌群逐渐占据主导地位。缺氧区组合填料表面生物膜的演变过程如图 4 所示。自然挂膜启动完成后,显微镜观察(图 5)显示,无论在好氧区还是缺氧区,微生物膜都紧密附着于载体表面,表明生物膜已达到成熟状态。



图 4 缺氧 I 区填料生物膜增长

Fig. 4 Growth of Packing Biofilm in Anaerobic Zone I



注:O1—好氧 I 区;O2—好氧 II 区;A1—缺氧 I 区;A2—缺氧 II 区;A3—缺氧 III 区。

图 5 各功能区生物膜镜检图(100 倍)

Fig. 5 Microscopic Examination of Biofilm in Different Functional Areas (100 Times)

4 结论

(1)分向 AO 生物膜工艺处理低碳源生活污水,控制自然挂膜启动条件,分好氧预挂膜和缺氧挂膜两阶段进行,反应器内主要采用两点进水,曝气量为 90 L/min, HRT 从 48 h 逐渐减小至 24 h, 最终 40 d 左右挂膜启动完成。

(2)好氧预挂膜阶段,氨氮和 COD 去除率最高为 92.21% 和 79.21%, 同时在缺氧区悬浮填料表面形成良好膜基, 30 d 后进入缺氧挂膜阶段,氨氮和 COD 去除率有一定下降,但最终分别稳定在 70% 和 60% 左右;

(3)挂膜启动完成后,通过显微镜观察生物膜,好氧及缺氧功能区内填料表面微生物膜附着良好,同时镜检发现,生物膜内包裹有累枝虫、钟虫和少量轮虫、进一步揭示生物膜已成熟。

参考文献

- [1] 王昶, 王力, 曾明, 等. 我国农村生活污水治理的现状分析和对策探究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(2): 283-292.
- WANG C, WANG L, ZENG M, et al. Status and countermeasure for the treatment of rural domestic sewage in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(2): 283-292.
- [2] 贾小梅, 于奇, 王文懿, 等. 关于“十四五”农村生活污水治理的思考[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 623-626.
- JIA X M, YU Q, WANG W Y, et al. Considerations for rural domestic sewage treatment during the 14th Five-Year Plan[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(5): 623-626.
- [3] 李怀正, 金伟, 张文灿. 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. Comprehensive treatment of rural domestic sewage in China [J]. Engineering Science in China, 2022, 24(5): 154-160.
- [4] 张义悦, 韦伟, 朱曙光. 低碳源城市污水脱氮处理方法研究进展[J]. 安徽建筑大学学报, 2021, 29(4): 58-63.
- ZHANG Y Y, WEI W, ZHU S G. Research progress on denitrification of low carbon source municipal wastewater [J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2021, 29(4): 58-63.
- [5] HAN A, LEE S Y. An overview of various methods for in vitro biofilm formation: A review [J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 32(12): 1617-1629.
- [6] 邹海明, 王艳, 李飞跃, 等. 2 种生物膜挂膜方法对比分析及其影响因素研究[J]. 工业水处理, 2015, 35(10): 62-65.
- ZOU H M, WANG Y, LI F Y, et al. Comparative analysis on two kinds of bio-film forming methods and its influential factors [J]. Industrial Water Treatment, 2015, 35(10): 62-65.
- [7] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境出版集团, 2002.
- Editorial Board of *Monitoring and Analytical Methods for Water and Wastewater* of the State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods for water and wastewater[M]. 4th ed. Beijing: China Environment Publishing Group, 2002.
- [8] XU R, CUI H, FAN F, et al. Combination of sequencing batch operation and A/O process to achieve partial mainstream anammox: Pilot-scale demonstration and microbial ecological mechanism[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(37): 13887-13900.
- [9] 徐巧. 缺氧反硝化 MBBR 填料生物膜特性及运行条件优化研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- XU Q. Operation optimization and biofilm characteristics of denitrification MBBR[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [10] 朱成辉, 李秀芬, 陈坚, 等. 好氧移动床生物膜反应器挂膜启动过程[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(4): 92-96.
- ZHU C H, LI X F, CHEN J, et al. Start-up in aerobic moving-bed biofilm reactor [J]. Journal of Food science and Biotechnology, 2005, 24(4): 92-96.
- [11] HUANG Y, PENG Y, HUANG D, et al. Enhanced nitrogen removal from domestic wastewater by partial-denitrification/anammox in an anoxic/oxic biofilm reactor [J]. Processes, 2022, 10(1): 109. DOI: 10.3390/pr10010109.
- [12] 陈月芳, 王岩, 安丹凤, 等. 组合 MBBR 反应器中溶解氧浓度和进水流量变化对除碳脱氮的影响[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(4): 130-134, 140.
- CHEN Y F, WANG Y, AN D F, et al. Effect of dissolved oxygen mass concentration and influent flow rate on removal of carbon and nitrogen removal in combined MBBR reactor [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(4): 130-134, 140.
- [13] 钟天意, 冯骞, 于阳阳, 等. 水动力作用对生物膜形成特性和群体感应系统的影响[J]. 净水技术, 2017, 36(11): 26-32.
- ZHONG T Y, FENG Q, YU Y Y, et al. Hydrodynamic effects on characteristics of biofilm formation and quorum sensing system [J]. Water Purification Technology, 2017, 36(11): 26-32.
- [14] 方建文, 刘建广, 郝兆亮. 悬浮填料好氧移动床反应器挂膜启动方式研究[J]. 环境科学导刊, 2010(1): 11-14.
- FANG J W, LIU J G, HAO Z L. Study on startup methods of biofilm culturing of suspended carrier aerobic moving bed reactor [J]. Environmental Science Survey, 2010(1): 11-14.