

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.011

MBBR工艺用于北方某污水厂提标改造的效果

刘超¹, 吴红娟², 罗玖淇³, 陈国栋¹, 徐瑞捷⁴, 周家中⁵

(1. 石家庄污水处理有限公司 桥东污水处理厂, 河北 石家庄 050026; 2. 石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043; 3. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003; 4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 5. 青岛思普润水处理股份有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要: 北方某污水处理厂一期设计规模为 $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 设计出水水质执行国家一级A标准, 需要提标至《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)中重点控制区排放限值标准。该污水厂采用移动床生物膜反应器(MBBR)工艺进行升级改造, 改造后生化池出水COD、TP、 NH_4^+-N 、TN分别为 (16.2 ± 3.9) 、 (0.2 ± 0.2) 、 (0.18 ± 0.1) 、 $(8.1\pm 2.2)\text{ mg/L}$ 。改造后出水水质稳定优于设计排放标准, 原水碳源利用率提高了63.14%, 减少了36.5%的外碳源投加量和43.4%的聚合氯化铝(PAC)投加量。系统中的优势硝化菌属为*Nitrospira*, 其在生物膜中的相对丰度达到7.31%, 是活性污泥中的6.5倍。基于MBBR的原位改造实现了系统脱氮与除磷能力的同步提升, 保障了出水水质的稳定达标, 同时降低了运行费用。

关键词: 移动床生物膜反应器(MBBR); 原位提标改造; 硝化性能; 生物膜; 降耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0076-06

Impact of MBBR Process on Upgrade of a Wastewater Treatment Plant in Northern China

LIU Chao¹, WU Hong-juan², LUO Jiu-qi³, CHEN Guo-dong¹, XU Rui-jie⁴,
ZHOU Jia-zhong⁵

(1. Qiaodong Wastewater Treatment Plant, Shijiazhuang Wastewater Treatment Co. Ltd., Shijiazhuang 050026, China; 2. School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 4. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 5. Qingdao SPRING Water Treatment Co. Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: The design capacity of the phase I project of a wastewater treatment plant in northern China is $50\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$. The effluent quality is designed to meet the first level A criteria specified in the national discharge standard, but it needs to be upgraded to comply with the discharge limit for key control areas as specified in *Ziya River Basin Water Pollutants Discharge Standards* (DB 13/2796—2018). The project employed the moving bed biofilm reactor (MBBR) process for its upgrade and transformation. After transformation, the chemical oxygen demand, total phosphorus, ammonia nitrogen and total nitrogen in the

通信作者: 周家中 E-mail: zhoujiazhongBY@163.com

effluent from the biochemical tank were (16.2±3.9) mg/L, (0.2±0.2) mg/L, (0.18±0.1) mg/L and (8.1±2.2) mg/L, respectively. In addition, the effluent quality was stable and better than the design discharge standard. The utilization rate of the carbon source in the raw water increased by 63.14%, while the dosage of external carbon sources and polyaluminum chloride (PAC) was reduced by 36.5% and 43.4%, respectively. The predominant nitrifying bacteria in the system was *Nitrospira*, with a relative abundance of 7.31% in the biofilm, which was 6.5 times higher than that in the activated sludge. The MBBR-based in-situ transformation achieved concurrent enhancement of the system's nitrogen and phosphorus removal capabilities, ensured stable and compliant effluent quality, and reduced operation costs.

Key words: moving bed biofilm reactor (MBBR); in-situ upgrade and transformation; nitrification performance; biofilm; energy saving

近年来,随着污水排放标准的提升,越来越多的污水处理厂加入提标改造的行列。但污水处理厂能够用于改造的用地已十分紧张,因此改造工艺的选择和设计成为关键。在国家倡导绿色低碳发展的背景下,污水处理厂的提标不仅仅是出水水质的提升,也是运行效率的提升,应统筹考虑水质、运行参数等因素,合理选择改造工艺,实现污水处理厂整体提质增效的目标。

北方某污水处理厂的出水水质需要从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准提升至《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)中重点控制区排放限值标准,存在无改扩建用地、冬季低温期达标压力大、运行费用高等问题,经综合分析,采用移动床生物膜反应器(MBBR)对生化工艺进行原位改造,实现了脱氮与除磷能力的同步提升,保障了出水水质的稳定达标,降低了运行费用。

1 污水处理厂概况

北方某污水处理厂于 2005 年建成投产,一期设计规模为 50×10⁴ m³/d,主要采用 AO 工艺,设计出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的二级标准。2012 年,该污水处理厂进行提标改造,维持原设计规模不变,将 AO 工艺改为 AAO 工艺,并增设“反硝化深床滤池+加砂沉淀池+V 型滤池”深度处理工艺,将出水水质标准提升至 GB 18918—2002 的一级 A 标准。2020 年,该污水处理厂进行第 2 次提标改造,要求出水水质达到《子牙河流域水污染物排放标准》(DB 13/2796—2018)中重点控制区排放限值标准,设计进、出水水质如表 1 所示。

表 1 设计进、出水水质
Tab.1 Design influent and effluent quality

mg·L ⁻¹						
项目	BOD ₅	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	SS
设计进水	300	750	65	85	8	400
实际进水	225.4±65.3	302.1±77.3	46.7±8.2	58.4±6.6	5.1±0.9	330.2±97.3
设计出水	10	40	2.0(3.5)	15	0.4	10
实际出水	2.0±1.0	19.5±4.2	0.3±0.3	9.5±2.3	0.2±0.1	8.0±0.8

注: 括号内数值为水温≤12℃时的控制指标。

2 改造技术路线的确定

2.1 污水厂的运行现状与改造需求

① 冬季硝化难保障:污水厂现状生化段为活性污泥法,正常情况下出水氨氮浓度基本可以满足低于 2.0 mg/L 的目标,但是冬季存在 15~30 d 的低温期,水温在 8~10℃,根据近几年的运行数据,低温期出水氨氮浓度虽然低于 8 mg/L,但是远高于 3.5 mg/L,不能满足提标后的排放标准,需对冬季硝化能力进行强化。

② 现状运行费用高:该污水厂实际进水 C/N 值达到 6.3,主要依靠 AAO 生化脱氮和反硝化深床滤池脱氮,AAO 生化脱氮主要利用原水有机物,总回流比为 200%,有机物有效利用率仅为 40%,生化段出水 TN 达到近 35 mg/L,不仅增加了生化段好氧区的曝气量,而且导致反硝化深床滤池的碳源投加量高达(36.4±5.2) t/d,运行成本较高。因此需对原工艺进行改造,强化缺氧区对原水碳源的利用率,提升生化段脱氮效率,降低运行成本。原水碳源利用率根据缺氧池实际进、出水 COD 浓度之差来判断,即 $\Delta\text{COD}_{\text{缺氧}}/\text{COD}_{\text{进水}}$ 。该污水处理厂改造前缺氧

池进、出水 COD 浓度之差的均值为 (123.2 ± 60.6) mg/L, COD 利用率仅为 40.7%。

③ 污水厂内无扩建用地:该污水厂经过第 1 次提标改造后,预留用地已用于新建深度处理工艺,已无其他可用土地用于本次提标改造,因此需要充分利用现有构筑物,实现处理能力的原位提升。

综上所述,该污水厂本次提标改造的重点以及难点是在不新增用地的基础上,提高系统的硝化能力,尤其是冬季低温硝化能力,另外同步提高原水碳源利用率和生化段脱氮效率,核心在于提升生化段的运行效率。

2.2 改造路线

MBBR 是目前应用广泛的活性污泥系统强化技术,其可通过“镶嵌”的改造方式,向现有生化段投加悬浮载体形成生物膜,富集功能微生物,达到提升生化效率的目标。生物膜的特征是长泥龄,因此更容易富集自养型硝化菌,相对丰度可达到 10% 以上,除了具有更高的硝化能力外,还具备良好的抗低温性能^[1-2]。东北某新建污水处理厂采用改良 Bardenpho-MBBR 工艺,实现了在 $8 \sim 9$ °C 低温条件下稳定的准 IV 类出水水质^[3]。生物膜的优势是硝化,因此通过向生化系统投加悬浮载体可以强化好氧区的硝化性能,缩短好氧区停留时间,弥补缺氧区停留时间不足的问题,强化脱氮,形成“移好补缺”的 MBBR 原位改造方式^[4]。例如,哈尔滨某污水厂采用 MBBR 工艺进行原位升级改造,重新划分功能区,在好氧区投加悬浮载体形成 MBBR 区,改造后出水水质稳定达到国家一级 A 标准^[5];太原城南污水厂结合现状工艺设施对原 AAO 工艺进行改造,重新划分好氧段,无需新建构筑物,实现了污水厂从一级 A 到准 V 类出水标准的平滑升级^[6]。因此,该污水厂采用 MBBR 进行提标改造,在提升出水水质的前提下,保障运行的稳定性,同时优化脱氮效果,提高原水碳源利用率,降低药剂投加费用。

3 工艺设计

本次提标改造仅涉及生化段,现状生化池总池容为 $284\,648\text{ m}^3$,有效水深为 7 m,设计厌氧区、缺氧区、兼氧区、好氧区的水力停留时间(HRT)分别为 2.68、3.75、1.57、5.64 h。在改造过程中,厌氧区保持不变,停用兼氧区的曝气头,将其改造为缺氧区,

以强化生化池的脱氮能力,保障总氮的达标率。好氧区通过投加悬浮载体形成好氧 MBBR 区,并设置进出水拦截系统、MBBR 配套曝气系统及 MBBR 专用推流器,保证悬浮载体良好的流化状态且不会随出水流失。另外,由于部分设备老旧,维护成本较高,本次改造同步对现状部分老旧设施进行更换。

改造后,厌氧区、缺氧区、好氧区的 HRT 分别为 2.68、5.32、5.64 h,总 HRT 保持不变。池内共设 MBBR 专用推流器 16 台,辅助穿孔曝气系统 8 套,进出水拦截系统 8 套;厌氧段更换两台推流器,缺氧段更换两台推流器,好氧 MBBR 区投加 SPR-III 型悬浮载体,填充率为 42%。改造后污水厂工艺流程如图 1 所示。



图1 污水厂改造后的工艺流程

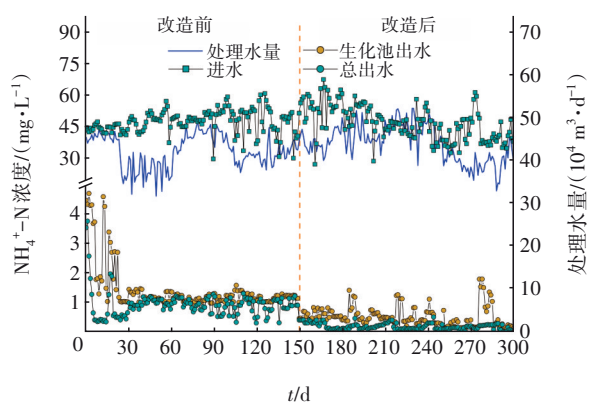
Fig.1 Flow chart of treatment process in a WWTP after transformation

4 改造效果

选取污水厂改造前、后各 150 d 的运行数据,分析提标改造效果。生化池改造前、后的污泥浓度分别为 5.5、4.3 g/L,好氧 MBBR 区的溶解氧浓度为 2~4 mg/L。

4.1 硝化效果

改造前、后系统的硝化效果如图 2 所示。改造前,系统进水氨氮均值为 (47.3 ± 5.5) mg/L,生化池出水氨氮均值为 (1.43 ± 0.8) mg/L,生化池对氨氮的平均去除率为 97%。其中,前 25 d 水温存在低于 10 °C 的情况,生化池出水氨氮均值为 2.78 mg/L,最大值为 4.70 mg/L。改造后,系统进水氨氮均值为 (46.7 ± 8.2) mg/L,生化池出水氨氮均值为 (0.5 ± 0.3) mg/L,生化池对氨氮的平均去除率达到 99%,系统出水氨氮均值为 (0.18 ± 0.1) mg/L,优于设计标准。在第 270~290 天冬季低温下,生化池出水氨氮均值为 (0.72 ± 0.19) mg/L,最大值为 1.79 mg/L,保障了低温条件下系统出水氨氮浓度的稳定达标。已有研究表明,生物膜具有高效富集功能菌的能力,其对硝化细菌的富集效率是传统活性污泥法的 10~20 倍^[7],从而实现系统硝化性能的提升。

图2 NH_4^+-N 的去除效果Fig.2 Removal effect of NH_4^+-N

4.2 脱氮性能

改造前、后系统的脱氮效果如图3所示。改造前,系统进水TN均值为 (59.3 ± 6.6) mg/L,生化池出水TN均值为 (34.1 ± 2.9) mg/L,生化池对TN的平均去除率仅为42.3%,脱氮效果较差。核算AAO生化脱氮和反硝化深床滤池脱氮占比分别为52.8%、47.2%。AAO生化段对TN的去除能力不足,导致后续深度处理工艺运行压力较大,外加碳源投量远高于一般污水厂。改造前进水C/N值为6.3,缺氧池出水COD均值为 (178.9 ± 54.8) mg/L,缺氧池有效利用的COD均值为 (123.2 ± 60.6) mg/L, COD利用率仅为40.7%,大部分COD在好氧区通过曝气去除,既造成了原水碳源的浪费,又对好氧区硝化效果造成不利影响。

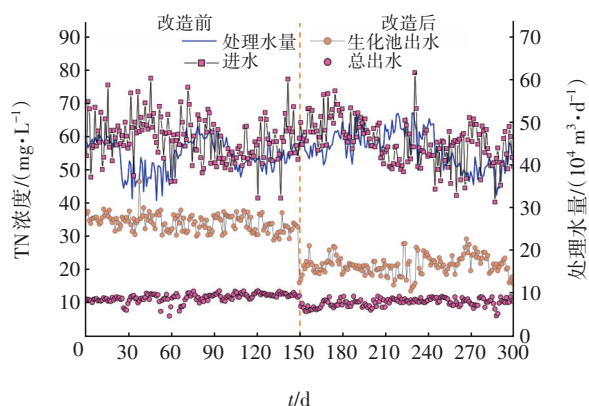


图3 TN的去除效果

Fig.3 Removal effect of TN

改造后,兼氧池变为缺氧池,缺氧池池容扩大42%,系统进水TN均值为 (58.4 ± 6.6) mg/L,生化池出水TN均值为 (21.3 ± 3.0) mg/L,生化池对TN的平均去除率为63.5%,相比改造前提高了50.12%,系

统出水TN均值为 (8.1 ± 2.2) mg/L,稳定达到设计标准。改造后缺氧区的COD利用情况如图4所示。缺氧池出水COD均值为 (118.3 ± 42.5) mg/L,有效利用的COD均值为 (234.0 ± 75.4) mg/L, COD利用率提高至66.4%,提升了63.14%。通过增加缺氧池池容,延长了缺氧区的HRT,大幅提升了原水碳源的利用率,提高了AAO生化段的TN去除效果,同时也降低了因缺氧池碳源利用率低导致碳源穿透而对好氧区硝化作用的不利影响,降低了好氧区的运行能耗。AAO生化段TN去除效果的提升也减少了后续反硝化深床滤池的运行压力,改造前、后外碳源(甲醇)投加量分别为 (36.4 ± 5.2) 、 (23.1 ± 4.4) t/d,改造后外碳源投加量降低了36.5%,大幅降低了运行费用。

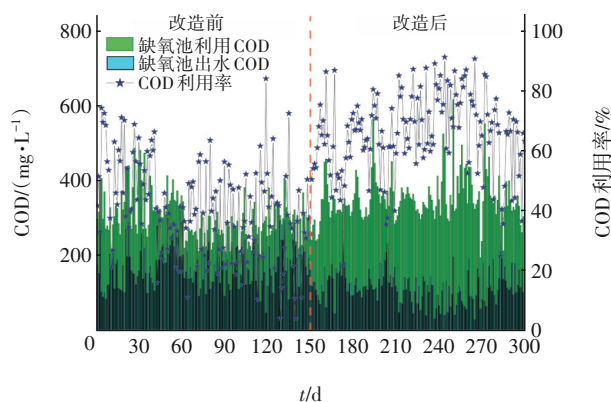


图4 缺氧区的COD利用率

Fig.4 COD utilization rate in anoxic zone

4.3 除磷性能

改造前、后系统对TP的去除效果如图5所示。改造前,系统进水TP均值为 (5.2 ± 1.1) mg/L,生化池出水TP均值为 (1.5 ± 0.4) mg/L,生化池对TP的平均去除率为71.2%;改造后,系统进水TP均值为 (5.1 ± 0.9) mg/L,生化池出水TP均值为 (0.8 ± 0.4) mg/L,生化池对TP的平均去除率为84.3%,系统出水TP均值为 (0.2 ± 0.2) mg/L,满足设计标准要求。改造前、后厌氧释磷情况基本保持一致,改造后系统除磷效果的提升主要是由于悬浮载体的投加使生化段形成了“双泥龄”系统。生物膜的泥龄长,以富集自养型硝化菌为主,强化脱氮;活性污泥控制短泥龄,强化生物除磷,改造后系统的好氧污泥龄从8 d降至5 d,为生物除磷效果的提升创造了良好条件。有研究表明,除磷菌更倾向于在活性污泥中富集^[8],该污水厂通过生物膜的形式富集硝化菌,为

污泥中的除磷菌让出生态位,强化了生物除磷效果。同时,改造后缺氧区的HRT由3.75 h延长至5.32 h,良好的反硝化效果也为反硝化除磷创造了有利条件^[9]。改造前、后除磷药剂聚合氯化铝(PAC)投加量分别为 (46.3 ± 25.3) 、 (26.2 ± 23.0) t/d,改造后PAC投加量降低了43.4%,除磷效率的提升实现了除磷药剂投加量的降低。

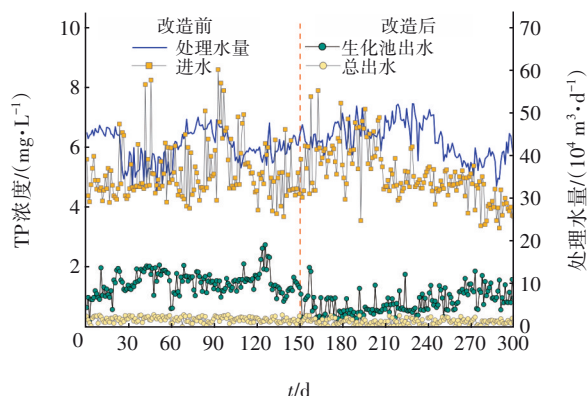


图5 TP的去除效果

Fig.5 Removal effect of TP

4.4 微生物分析

为进一步从微观层面探究MBBR工艺改造对系统处理能力的提升效果,分别取活性污泥和生物膜样品进行16S rRNA基因扩增子高通量测序,属水平微生物的相对丰度如图6所示。悬浮载体生物膜上的优势硝化菌属为硝化螺旋菌属*Nitrospira*和亚硝化单胞菌属*Nitrosomonas*,相对丰度分别为7.31%和1.31%,而在活性污泥中的相对丰度分别为1.12%和0.23%,MBBR工艺通过向好氧段投加悬浮载体实现了硝化细菌的专性富集,核心硝化菌属*Nitrospira*的相对丰度达到活性污泥的6.5倍,为生物膜载体良好的硝化效果提供了保障。反硝化菌属包括*Bdellovibrio*、*Hyphomicrobium*和*Terrimonas*等,其在活性污泥中的相对丰度分别为4.98%、2.96%和3.02%。从微生物功能来看,上述微生物菌属除了具有反硝化功能外,*Terrimonas*中的部分菌能够降解蒽类物质,*Hyphomicrobium*可利用多种有毒难降解有机物进行反硝化脱氮^[9]。在活性污泥系统中,与除磷相关的优势菌属主要包括*Candidatus Accumulibacter*和*Tetrasphaera*,相对丰度分别为1.18%和0.29%,两者在除磷过程中发挥着协同作用。*Tetrasphaera*被认为是重要的除磷菌,具有发酵除磷和反硝化除磷的性能^[8,10],能够降解复杂有机

化合物,从而为*Candidatus Accumulibacter*提供碳源^[11]。*Candidatus Accumulibacter*在不同条件下能够利用 O_2 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N作为电子受体吸磷,具备反硝化除磷的功能,对系统中氮、磷的去除起到重要作用^[12]。生物膜对硝化菌群实现了专性富集,提高了污水厂脱氮效率,同时也为活性污泥释放了压力,使活性污泥能够有更多的空间发挥反硝化和除磷的作用。

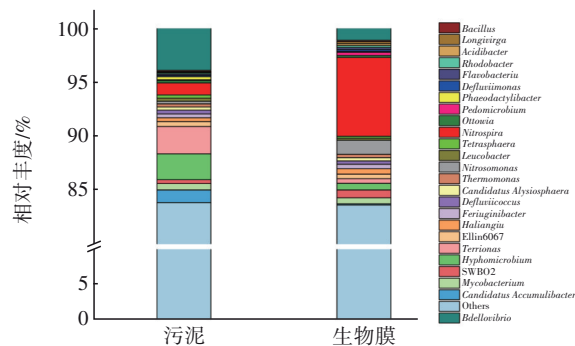


图6 属水平微生物的相对丰度

Fig.6 Relative abundance of microorganisms at genus level

5 结论

北方某污水处理厂采用“A²O+MBBR”技术路线解决了提标改造中面临的硝化和反硝化同步提升、冬季低温达标压力大、无扩建用地等问题,实现了污水厂处理能力原位提升的目标。改造后,出水COD、TP、氨氮、TN浓度均值分别为 (16.2 ± 3.9) 、 (0.2 ± 0.2) 、 (0.18 ± 0.1) 、 (8.1 ± 2.2) mg/L,出水水质稳定达到提标改造要求。生化段通过镶嵌MBBR工艺保障了氮、磷的稳定达标,同时通过功能区再分配,延长了缺氧池的HRT,TN去除率提高了50.12%,碳源利用率提高了63.14%。核心硝化菌属*Nitrospira*在悬浮载体生物膜中的相对丰度达到活性污泥的6.5倍,为系统硝化性能的提升提供了微观基础。基于MBBR改造,该污水厂节省了36.5%的碳源投加量和43.4%的PAC投加量,降低了运行费用。

参考文献:

- [1] 刘婧邈,毕学军,杨新慈,等.低温条件下纯膜MBBR系统脱氮能力中试研究[J].中国给水排水,2023,39(19):19-26.
LIU Jingmiao, BI Xuejun, YANG Xinci, et al. Nitrogen

- removal performance of a pilot-scale pure moving bed biofilm reactor system at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39 (19): 19-26 (in Chinese).
- [2] 郑志佳, 白华清, 孟涛, 等. 低温下 MBBR 强化硝化原理分析和应用[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(23): 6-11.
- ZHENG Zhijia, BAI Huaqing, MENG Tao, *et al.* Principle analysis and application of MBBR enhanced nitrification at low temperature [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(23): 6-11(in Chinese).
- [3] 茹春, 张爽, 路晖, 等. 低温条件下污水处理厂的除污效果及运行调控分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37 (9): 1-6.
- RU Chun, ZHANG Shuang, LU Hui, *et al.* Pollutants removal performance and operation regulation of urban wastewater treatment plant under low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37 (9): 1-6(in Chinese).
- [4] 吴迪. MBBR 在国内的工程应用与发展前景[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(16): 22-31.
- WU Di. Application and development prospect of MBBR in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34 (16): 22-31 (in Chinese).
- [5] 王洪刚, 纪海霞, 程树辉. 哈尔滨市某污水处理厂提标改扩建工程设计[J]. *中国给水排水*, 2024, 40 (10): 64-68.
- WANG Honggang, JI Haixia, CHENG Shuhui. Design of a wastewater treatment plant upgrading and expansion project in Harbin [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(10): 64-68(in Chinese).
- [6] 杨晓峰, 秦翠霞, 徐思涵, 等. 太原城南污水厂 MBBR 系统不停水提质增效改造[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(18): 125-128.
- YANG Xiaofeng, QIN Cuixia, XU Sihan, *et al.* Quality and efficiency improvement of MBBR system without water shutoff in Taiyuan Chengnan WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38 (18): 125-128 (in Chinese).
- [7] 周家中, 韩文杰, 吴迪, 等. MBBR 工艺应用于市政污水处理的系列解决方案探讨 [J]. *中国给水排水*, 2023, 39(12): 1-12.
- ZHOU Jiazhong, HAN Wenjie, WU Di, *et al.* Discussion on series solutions of MBBR process applied to municipal sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(12): 1-12 (in Chinese).
- [8] 李志伟, 赵治东, 祁学玲, 等. MBBR 在西藏某污水厂低温环境的应用效果分析[J]. *工业水处理*, 2023, 43(8): 185-192.
- LI Zhiwei, ZHAO Zhidong, QI Xueling, *et al.* Application analysis of MBBR in a wastewater treatment plant of Tibet with low temperature [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(8): 185-192(in Chinese).
- [9] 栾志翔, 吴迪, 韩文杰, 等. 北方某污水厂 MBBR 工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(2): 333-341.
- LUAN Zhixiang, WU Di, HAN Wenjie, *et al.* Effect of high efficiency nitrogen and phosphorus removal in a wastewater treatment plant in north China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14 (2): 333-341 (in Chinese).
- [10] FAN Z, ZENG W, MENG Q, *et al.* Achieving partial nitrification, enhanced biological phosphorus removal and in-situ fermentation (PNPRF) in continuous-flow system and mechanism analysis at transcriptional level [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 428 (7): 131098.
- [11] CHEN L, WEI G, ZHANG Y, *et al.* *Candidatus Accumulibacter* use fermentation products for enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2023, 246: 120713.
- [12] 曾薇, 李超, 孟庆安, 等. MUCT 工艺反硝化除磷效率与 *Candidatus Accumulibacter* 的群落演替[J]. *北京工业大学学报*, 2019, 45(12): 1243-1251.
- ZENG Wei, LI Chao, MENG Qing'an, *et al.* Efficiency of denitrifying phosphorus removal and population dynamics of *Candidatus Accumulibacter* in MUCT [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, 45 (12): 1243-1251 (in Chinese).

作者简介:刘超(1978-),男,河北深州人,大学本科,高级工程师,主要研究方向为水污染治理技术及应用。

E-mail:liuchao512@sina.com

收稿日期:2024-08-21

修回日期:2024-11-11

(编辑:刘贵春)