

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.012

MSBR工艺强化生物脱氮设计

王文明¹, 杨淇棕¹, 陈圆², 沈磊³, 贺建伟¹, 古伟¹,
莫剑¹, 江娟², 吉成豪³, 王冬波⁴

(1. 湖南先导洋湖再生水有限公司, 湖南 长沙 410208; 2. 湖南省建筑设计院集团股份有限公司, 湖南 长沙 410012; 3. 可事托环保设备<上海>有限公司, 上海 200030; 4. 湖南大学 环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为深度挖掘城市污水生物脱氮潜力,对改良式序批间歇反应器(MSBR)工艺进行了强化生物脱氮设计。本文详细介绍了洋湖再生水厂(三期)工程10单元MSBR工艺的主要设计参数、强化生物脱氮设计方案及实际运行效果。运行结果表明,通过前置缺氧反硝化、后置缺氧反硝化生物脱氮和主曝气好氧单元优化设计等措施,2024年10单元MSBR工艺出水总氮(TN)日均值为4.10 mg/L。该工艺具有集约、低碳、生物脱氮高效等显著优点,是一种适用于城市污水生物脱氮提质增效的先进生物处理工艺。

关键词: 污水处理厂; 10单元MSBR工艺; 强化生物脱氮; 前置缺氧反硝化; 后置缺氧反硝化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0087-06

Design of Enhanced Biological Nitrogen Removal in MSBR Process

Wang Wenming¹, Yang Qiliang¹, Chen Yuan², Shen Lei³, He Jianwei¹, Gu Wei¹,
Mo Jian¹, Jiang Juan², Ji Chenghao³, Wang Dongbo⁴

(1. Hunan Pilot Yanghu Reclaimed Water Co. Ltd., Changsha 410208, China; 2. Hunan Provincial Architectural Design Institute Group Co. Ltd., Changsha 410012, China; 3. Corstar Environmental Equipment Shanghai Co. Ltd., Shanghai 200030, China; 4. College of Environmental Science & Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To further explore the potential for biological nitrogen removal in municipal wastewater, an enhanced biological nitrogen removal design was implemented for the modified sequencing batch reactor (MSBR) process. The main design parameters, enhanced biological nitrogen removal design strategies, and actual operational performance of the 10-unit MSBR process in phase III project of the Yanghu reclaimed water plant were discussed in detail. The results demonstrated that through optimization measures including pre-anoxic denitrification, post-anoxic denitrification biological nitrogen removal, and optimized aeration in the main aerobic unit, the average daily total nitrogen (TN) concentration in the effluent of the 10-unit MSBR process in 2024 was as low as 4.10 mg/L. The process exhibits significant advantages in terms of compactness, low carbon emissions, and high efficiency of biological nitrogen removal. Therefore, it can be regarded as an advanced biological treatment process for

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2024AQ2005)

improving the quality and efficiency of biological nitrogen removal in municipal wastewater.

Keywords: wastewater treatment plant; 10-unit MSBR process; enhanced biological nitrogen removal; pre-anoxic denitrification; post-anoxic denitrification

当前,我国较多省市已制定比《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准更为严格的地方标准,要求污水处理厂出水总氮(TN)低于10 mg/L,甚至低于5 mg/L^[1]。为实现出水TN达标,污水处理厂通常在二级生化工艺后增设反硝化深床滤池(DDF)、膜生物反应器(MBR)等深度处理工艺^[2-4],主要通过投加外碳源或将膜池活性污泥浓度维持在10 000 mg/L以上,但这些措施均显著增加了建设运营成本。因此,在污水处理减污降碳的背景下,对改良式序批间歇反应器(MSBR)、AAO等原有二级生化工艺进行优化设计,深度挖掘其生物脱氮潜力,是当前实现城市污水低碳高效生物脱

氮的有效举措。

1 项目概况

洋湖再生水厂(三期)工程位于长沙市湘江新区洋湖生态新城,紧邻项目二期工程南侧建设,其设计规模10万m³/d($K_z=1.3$)。三期工程工艺流程如图1所示,其中,PAC为聚合氯化铝,PAM为聚丙烯酰胺。采用“10单元MSBR+高效沉淀池+反硝化深床滤池+紫外消毒+人工湿地”组合工艺,并配套建设鼓风机、污泥脱水、加药及除臭等设施。紫外消毒后的出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准IV类标准(TN≤10 mg/L),经人工湿地净化处理后,排入靳江河。

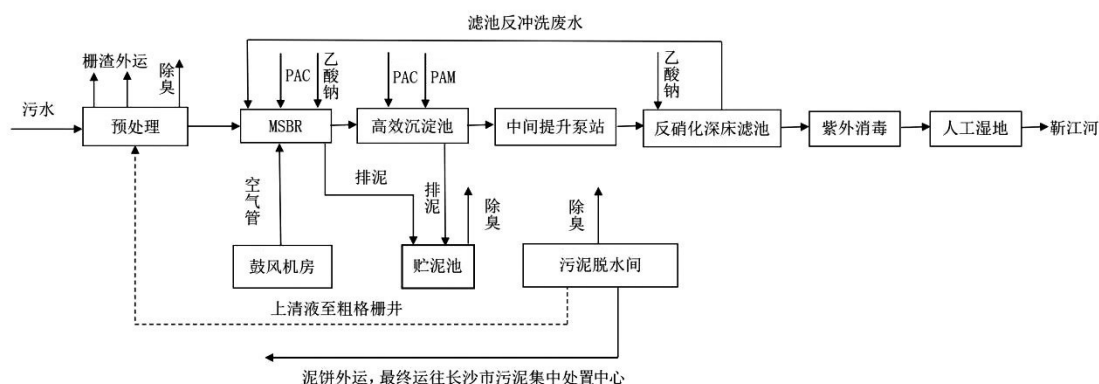


图1 洋湖再生水厂(三期)工程工艺流程

2 MSBR主要设计参数

10单元MSBR工艺为新一代多单元改良式序批间歇反应器,综合了AAO、SBR等工艺的优点,具有占地面积小、进水碳源利用率高、脱氮除磷效果好等优势^[5-7]。为进一步挖掘其生物脱氮潜力,本工程对该工艺进行了强化生物脱氮设计,出水COD、BOD₅、氨氮(NH₃-N)、TN等主要水质指标均要求达到地表水准IV类标准(TN≤10 mg/L)。

本工程设2座10单元MSBR池,单座处理能力5万m³/d,其平面布置和工艺流程分别如图2、3所示。污水依次流经厌氧单元、第一缺氧单元、第二缺氧单元、主曝气好氧单元,随后进入第一缺氧/好氧单元与第一序批单元,或第二缺氧/好氧单元与第二序批单元。其中,两组对称的缺氧/好氧单元、序批单

元交替运行,实现MSBR工艺的恒水位连续进出水。MSBR池运行还包括混合液内回流、污泥外回流、浓缩污泥回流及补充污泥回流。其中,泥水分离单元的沉淀污泥进入预缺氧单元,上清液回流至第一缺氧单元、主曝气好氧单元、第一缺氧/好氧单元或第二缺氧/好氧单元;回流至厌氧单元的浓缩污泥及补充回流污泥,与进水搅拌混合后进入第一缺氧单元,并依次进行下一循环。

本工程10单元MSBR各单元尺寸参数如表1所示。

该池总平面净尺寸91.1 m×57.0 m,总有效容积40 458 m³。与已工程应用的10单元MSBR池相比^[5-7],本工程设置的2座处理池的总水力停留时间从19.11、19.20 h延长至19.42 h。其中,第一、第二

序批单元的水力停留时间从 3.00、3.04 h 延长至 3.33 h;第一、第二缺氧/好氧单元从 0.75、0.78 h 延长至 0.83 h;而厌氧单元从 1.29、1.34 h 缩短至 1.21 h;第一、第二缺氧单元则从 1.35、1.47 h 缩短至 1.31 h。同时,主曝气好氧单元、序批单元及缺氧/好氧单元的有效水深从 6 m 加深至 8 m,而泥水分离单元、预缺氧单元、厌氧单元及第一、第二缺氧单元的有效水深则保持不变。

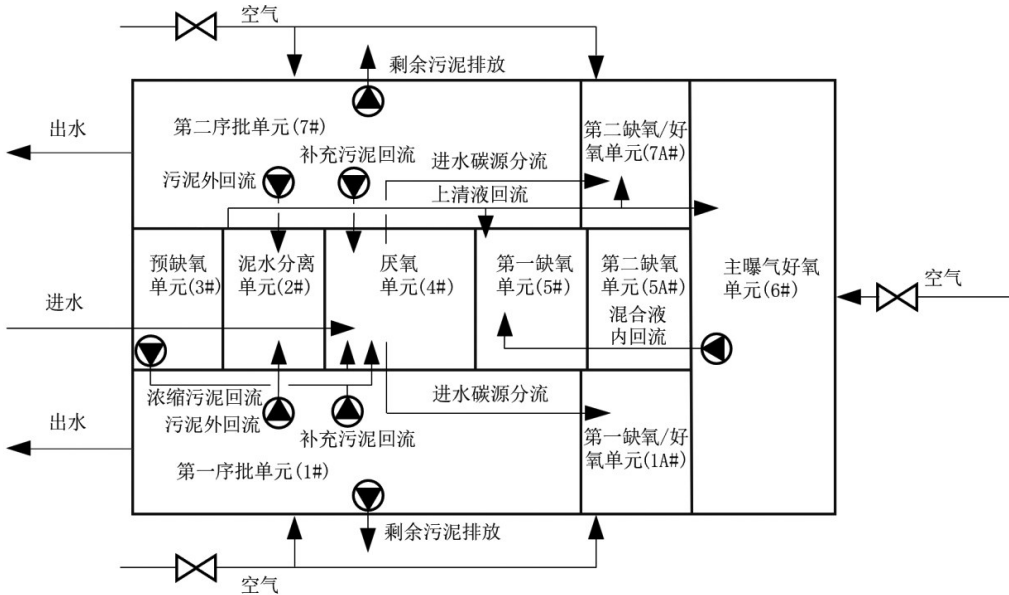


图 2 10 单元 MSBR 池平面布置示意

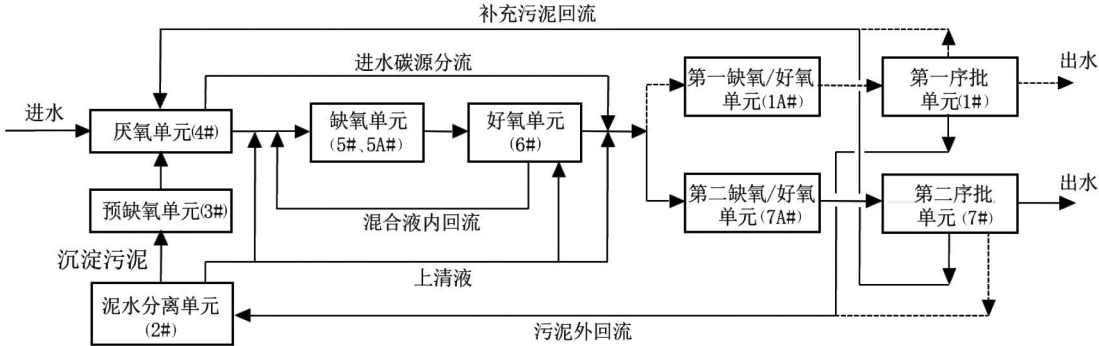


图 3 10 单元 MSBR 池工艺流程示意

表 1 10 单元 MSBR 池各单元尺寸参数

项目	长/m	宽/m	有效水深/m	水力停留时间/h	池容/m ³
第一序批单元(1#)	48.3	18.0	8.00	3.33	6 938
第一缺氧/好氧单元(1A#)	18.0	12.1	8.00	0.83	1 729
泥水分离单元(2#)	20.0	6.1	8.35	0.32	667
预缺氧单元(3#)	20.0	5.0	8.35	0.38	792
厌氧单元(4#)	20.0	14.0	8.15	1.21	2 521
第一缺氧单元(5#)	20.0	17.0	8.15	1.31	2 729
第二缺氧单元(5A#)	20.0	17.1	8.15	1.31	2 729
主曝气好氧单元(6#)	57.0	30.0	8.00	6.57	13 688
第二序批单元(7#)	48.3	18.0	8.00	3.33	6 938
第二缺氧/好氧单元(7A#)	18.0	12.1	8.00	0.83	1 729

本工程 10 单元 MSBR 池的主要设计参数如表 2 所示。通过调节污泥外回流泵及浓缩污泥回流泵的

频率,保证预缺氧单元中硝态氮(NO_x^--N)浓度控制

在 1.0~2.5 mg/L 范围内,厌氧单元中 NO_x^- -N 浓度控制在 1.0 mg/L 以下、DO 低于 0.2 mg/L,从而避免高浓度 NO_x^- -N 在厌氧单元对聚磷菌水解产生不利影响^[5-7]。通过调节主曝气好氧单元的混合液内回流泵频率,提升前置缺氧单元反硝化效率。通过调节厌氧单元的进水碳源分流泵频率,实现厌氧单元向第一、第二缺氧/好氧单元的分流量为进水量的 10%~15%,以满足后置缺氧反硝化过程对有机碳源的需求。

项目	参数
主曝气好氧池污泥浓度/(mg/L)	3 500
污泥负荷/[kgBOD ₅ /(kgMLVSS·d)]	0.046
污泥龄/d	17.52
主曝气好氧池溶解氧(DO)/(mg/L)	2~4
进水碳源分流比(4#→1A#、7A#)/%	10~15
混合液内回流(6#→5#)/%	300~400
污泥外回流(1#、7#→2#)/%	150~200
浓缩污泥回流(3#→4#)/%	50~70
补充污泥回流(1#、7#→4#)/%	10~20

本工程 10 单元 MSBR 池的主要设备配置包括浮筒搅拌器 10 台、混合液内回流泵 2 台、污泥外回

流泵 2 台、浓缩污泥回流泵 2 台、碳源分流泵 2 台、补充污泥回流泵 4 台、剩余污泥泵 4 台、空气控制出水堰 6 组,具体见表 3。同时,在主曝气好氧单元安装固定曝气系统 1 套,在第一、第二缺氧/好氧单元各安装可提升式曝气系统 1 套,在第一、第二序批单元各安装可提升式曝气系统 7 套,均采用长度为 1 m 的微孔管式曝气器。与已工程应用的 10 单元 MSBR 池相比^[5-7],本工程强化了污泥回流,在第一、第二序批单元各增加了 2 台补充污泥回流泵,用于将序批单元沉淀出水阶段的底部污泥快速回流至厌氧单元。该设计有助于在超过设计水量的条件下,或在冬季低温天气期间,提升厌氧单元、缺氧单元及主曝气好氧单元的污泥浓度,较好地弥补厌氧单元及第一、第二缺氧单元水力停留时间缩短而导致的效率下降。此外,空气出水堰沿第一、第二序批单元内水流方向安装,其位置远离序批单元末端池壁。同时,在空气出水堰下方各增加 2 套可提升式曝气系统,有效预防序批单元末端底部污泥的长期沉积以及沉淀出水阶段的污泥上浮,并控制出水悬浮物(SS)浓度。

表 2 10 单元 MSBR 池主要设计参数

表 3 10 单元 MSBR 池主要设备配置

项目	主要规格	单位	数量	安装位置
浮筒搅拌器	功率 5.5 kW	台	1	预缺氧单元(3#)
浮筒搅拌器	功率 14.7 kW	台	1	厌氧单元(4#)
浮筒搅拌器	功率 18.4 kW	台	4	第一、第二序批单元(1#、7#)
浮筒搅拌器	功率 14.7 kW	台	2	第一、第二缺氧单元(5#、5A#)
浮筒搅拌器	功率 11.0 kW	台	2	第一、第二缺氧/好氧单元(1A#、7A#)
混合液内回流泵	3 000~4 200 m ³ /h	台	2	主曝气好氧单元(6#)
污泥外回流泵	3 000~4 200 m ³ /h	台	2	第一、第二序批单元(1#、7#)
浓缩污泥回流泵	1 200~1 500 m ³ /h	台	2	预缺氧单元(3#)
碳源分流泵	250~350 m ³ /h	台	2	厌氧单元(4#)
补充污泥回流泵	200 m ³ /h	台	4	第一、第二序批单元(1#、7#)
剩余污泥泵	3 000~4 200 m ³ /h	台	4	第一、第二序批单元(1#、7#)
空气控制出水堰	每组长 9.6 m	组	6	第一、第二序批单元(1#、7#)

3 MSBR 强化生物脱氮设计

3.1 前置缺氧反硝化生物脱氮优化设计

为强化 10 单元 MSBR 前置缺氧反硝化生物脱氮效率,除保留前置两级缺氧反应单元、设置 2 台可变频混合液内回流泵及混合液内回流至第一缺氧单元前端等传统设计外^[5-6],还从精细化运营管理方面进行了优化。首先,在主曝气好氧单元末端(靠近第二缺氧单元侧)安装在线 DO 仪等仪表。其主要目的是通过控制主曝气好氧单元的曝气量,确保

好氧单元末端的 DO 浓度在 2 mg/L 以下,从而为前置缺氧单元营造缺氧反硝化生物脱氮环境。其次,在第一缺氧单元安装 NO_x^- -N 浓度仪及 DO 仪。以第一、第二缺氧单元中 NO_x^- -N 浓度维持在 3~5 mg/L、DO 浓度低于 0.5 mg/L 为目标,主要通过调节主曝气好氧单元混合液内回流泵频率来控制混合液内回流量。当缺氧单元 DO 升高时,适当降低内回流泵频率;当缺氧单元 DO 偏低时,适当提高内回流泵频率。大多数情况下仅需开启 1 台内回流泵,回流

比150%~200%;当MSBR出水TN超过7 mg/L时,启用2台内回流泵,此时混合液内回流比为300%~400%。最后,为避免混合液从回流管道跌落至渠道,以及在回流渠流动过程中与空气接触所带入的氧气,在缺氧池内消耗更多有机碳源,破坏前置缺氧反硝化生物脱氮环境,采用在回流渠顶部铺满热浸锌复合钢盖板的设计方案以隔绝空气,从而有效保证前置缺氧池的反硝化脱氮环境。

3.2 后置缺氧反硝化生物脱氮优化设计

为强化10单元MSBR后置缺氧反硝化生物脱氮效率,除保留后置第一、第二缺氧/好氧单元及第一、第二序批单元外^[5-9],主要从延长后置缺氧反硝化时间和加深缺氧/好氧单元、序批单元池深等方面进行优化设计。首先,适当扩大后置缺氧/好氧单元容积。该单元的水力停留时间较已工程应用的10单元MSBR增加6.4%~10.6%。在实际运行中,可将交替的等量缺氧、好氧反应时间调整为适当缩短好氧反应时间或采用全程缺氧反应模式,再结合将进水量10%~15%的厌氧单元混合液碳源分流至缺氧/好氧单元,从更长的缺氧反应时间和更充足的有机碳源两个维度,共同保障后置缺氧反硝化生物脱氮效率。其次,适当扩大序批单元容积。该单元的水力停留时间较已工程应用的10单元MSBR增加9.5%~11.0%。在实际运行中,还将序批单元1个序批周期的缺氧反应、好氧反应、预沉淀、出水4个阶段的时间,由原来的30、30、60、120 min调整为40、30、50、120 min,整体上有效延长序批单元的缺氧反应时间。同时,序批单元交替进行的缺氧反应、好氧反应和预沉淀过程,有助于降低混合液和污泥内部的 NO_x^- -N和有机碳源,实现更低的出水TN和污泥稳定化。最后,将缺氧/好氧单元及序批单元的池深从传统的6 m加深至8 m,这有助于在预沉淀阶段,于序批单元中间底部挡板前形成更厚的沉淀污泥层,从而在沉淀出水阶段实现污泥层的接触过滤效果,并强化高浓度污泥层内部的内源反硝化脱氮作用^[10]。

3.3 主曝气好氧单元优化设计

为确保主曝气好氧单元在冬季低温天气下维持更高的污泥浓度,并保证好氧硝化反应更加彻底,从好氧单元的混合液流态和池深2个方面进行优化设计。首先,在垂直于好氧单元进水管方向设置2道内部隔墙,将好氧单元分隔为外侧、中部和内

侧3条廊道,从而在单元内部形成推流式反应器。从缺氧单元进入的污水,通过2根管道配送至最远的外侧廊道,确保进水沿外侧、中部和内侧廊道形成推流。与传统MSBR工艺好氧单元所采用的完全混合式流态相比,优化设计后的好氧单元混合液不易发生短流,内侧廊道末端混合液中的氨氮能够更彻底地氧化为硝态氮。其次,在好氧单元各廊道内分区块设置曝气模块,每个模块的曝气量均可调节。通过调整各个模块的阀门开度,可调节廊道沿程曝气量,并按照曝气量从外侧到内侧逐渐减小的模式进行控制,以保证外侧廊道到内侧廊道的DO浓度逐渐降低,并将内侧末端的DO浓度控制在2 mg/L以下。最后,将好氧单元的池深从传统的6 m加深到8 m。这一措施可确保在冬季低温天气期间,好氧单元的污泥浓度能够提升并维持在4 000~4 500 mg/L。更高的污泥浓度相应延长了污泥龄,有利于好氧单元同时富集硝化菌和反硝化菌群,甚至可在活性污泥絮体内部实现同步硝化反硝化反应。

4 MSBR运行效果分析

本工程由于进水量不足,二级生化系统仅调试投运1座10单元MSBR池。2023年5月,经工艺调试后,该10单元MSBR池出水水质稳定,紫外消毒出水亦稳定达到设计排放标准。2024年,本工程共处理污水约1 657.7万 m^3 ,单座10单元MSBR池日均处理污水4.541 8万 m^3 ,其主要进、出水水质日均值如表4所示。

表4 2024年10单元MSBR池进、出水水质

项目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	总磷(TP)
进水/(mg/L)	205.45	109.26	18.26	25.21	2.35
出水/(mg/L)	16.28	1.65	0.54	4.10	0.36
去除率/%	92.1	98.5	97.0	83.7	84.7

由表4可知,进水经10单元MSBR池处理后,COD、BOD₅、NH₃-N、TN及TP均得到显著去除。10单元MSBR池出水除TP略高于0.3 mg/L外,COD、BOD₅、NH₃-N、TN等指标均已稳定达到本工程出水执行的地表水Ⅳ类标准(TN≤10 mg/L)。其中,出水TN日均值低至4.10 mg/L,低于同期本项目二期工程10单元MSBR池的出水TN日均值(5.61 mg/L;由于在相同时间段内,二期和三期MSBR的进水水质与温度条件相同),也低于目前已工程应用的10

单元MSBR池出水TN指标^[5-8](由于项目不同且时间段不同,与本工程2024年MSBR池的进水水质和温度条件存在一定差异)。

由此可见,通过对10单元MSBR池进行前置缺氧反硝化生物脱氮、后置缺氧反硝化生物脱氮及主曝气好氧单元等优化设计,本工程在不添加或仅在冬季低温天气期间少量添加乙酸钠碳源的条件下,进一步强化了10单元MSBR池的生物脱氮效率,实现了2024年出水TN日均值低于5 mg/L的目标。在实际运行中,反硝化深床滤池深度处理工艺处于超越运行状态,从而较好地满足节能降耗与减污降碳的要求。综上,基于强化生物脱氮设计的10单元MSBR工艺具有低碳、集约及高效生物脱氮等显著优点,可用于城市污水生物脱氮的提质增效。

5 结语

在我国污水处理减污降碳的背景下,为应对日益严格的地方排放标准,基于强化生物脱氮设计的10单元MSBR工艺被开发并投入工程应用。与传统生化工艺及已工程应用的10单元MSBR相比,该改进工艺能够进一步提高生物脱氮效率,其出水主要指标可稳定达到地表水Ⅳ类标准($TN \leq 10 \text{ mg/L}$)。这为高排放标准下的城市污水处理厂的新建或改扩建项目提供了一种可借鉴的二级生物工艺方案。

参考文献:

- [1] 李佳,汪涵,王亚宜.城市污水生物脱氮提质增效技术现状与展望[J].能源环境保护,2023,37(2):48-61.
- [2] 李采芳,杨丹,王志刚.A/O+高效沉淀+深床滤池用

于污水处理厂提标扩建[J].中国给水排水,2018,34(16):88-92.

- [3] 王春晖,邓磊,王春,等.AAO+MBR工艺用于污水处理厂提标改造[J].中国给水排水,2017,33(16):79-81.
- [4] 陈永玲,李伟,王丹.高排放标准下污水处理厂的设计运行分析[J].给水排水,2017,43(7):7-11.
- [5] 王文明,宋凤鸣,尹振文,等.MSBR+微絮凝过滤组合工艺在城市再生水厂的应用[J].中国给水排水,2019,35(18):102-106.
- [6] 王文明,杨淇棕,蔡依廷,等.MSBR工艺在高排放标准污水处理厂的应用[J].中国给水排水,2020,36(16):111-115.
- [7] 沈磊,Yang Chester.新一代多单元MSBR在梅村污水厂四期扩建工程中的应用[J].净水技术,2019,38(4):46-53.
- [8] 柏春荫,万成仁,黄尉,等.MSBR+高效沉淀池组合工艺在高排放标准下污水厂的应用[J].水处理技术,2024,50(1):147-151,156.
- [9] 王斌,闫冰,赵延丰,等.高出水标准地下式污水厂设计探讨[J].给水排水,2022,48(11):39-43.
- [10] 杨殿海,顾国维.改进型MSBR工艺特点与运行效果[J].中国给水排水,2004,20(1):62-65.

作者简介:王文明(1982—),男,四川平昌人,硕士,正高级工程师,湖南省卓越工程师,副总经理,长沙市水污染控制与环境综合治理技术创新中心主任,主要研究方向为城镇污水低碳处理与资源化利用。

E-mail: w.m.wang@126.com

收稿日期: 2025-04-17

修回日期: 2025-04-29

(编辑:沈靖怡)