

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.21.003

MABR耦合A²O工艺处理市政污水的效能

包聿禾¹, 徐 庶², 杨 婷³, 向昕怡⁴, 柴春燕³

(1. 南京智岛水环境科技有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019; 3. 江苏金陵环境股份有限公司, 江苏 南京 210014; 4. 南京市给排水工程设计院有限公司, 江苏 南京 210004)

摘 要: 为研究膜曝气生物膜反应器(MABR)处理市政污水的实际应用效果,在南京市某市政污水处理厂内建设了400 m³/d的MABR耦合A²O(A²O-MABR)工艺示范项目。示踪试验结果表明池体处于水力全混状态,能够匹配连续流搅拌反应器(CSTR)模型。在长期运行中,MABR的氧传递性能及硝化性能稳定,传氧速率(OTR)平均值为9.0 g/(m²·d),硝化去除的氨氮占进水氨氮的28%,且在MABR单元内实现了同步硝化反硝化(SND)。MABR生物膜的生物富集作用强于活性污泥,MABR生物膜及活性污泥内具有丰富的微生物群落,包含各类污水处理系统中的典型菌种,且MABR生物膜内硝化菌相对丰度平均值达到12%。MABR系统平均能耗为0.11 kW·h/m³,仅占总体能耗的19%,在节能降碳方面极具潜力。

关键词: MABR; A²O工艺; 传氧速率; 同步硝化反硝化; 生物膜; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)21-0015-06

Performance of MABR Coupled A²O Process for Municipal Wastewater Treatment

BAO Yu-he¹, XU Shu², YANG Ting³, XIANG Xin-yi⁴, CHAI Chun-yan³

(1. Zhidao Environmental Technology Co. Ltd., Nanjing 210019, China; 2. JSTI Group Co. Ltd., Nanjing 210019, China; 3. Jiangsu Jinling Environment Co. Ltd., Nanjing 210014, China; 4. Nanjing Water Supply and Drainage Engineering Design Institute Co. Ltd., Nanjing 210004, China)

Abstract: In order to study the performance of membrane aerated biofilm reactor (MABR) in municipal wastewater treatment, a full-scale demonstration plant (400 m³/d) using MABR coupled A²O (A²O-MABR) process was established in a municipal wastewater treatment plant in Nanjing. The dye test results showed that the tanks were in completely mixed condition and the continuous stirred tank reactor model was applied. The oxygen transfer and nitrification performances of MABR were stable in long-term operation, with an average oxygen transfer rate (OTR) of 9.0 g/(m²·d), and 28% of the influent ammonia nitrogen was removed by MABR. The simultaneous nitrification and denitrification was achieved in MABR tank. The microbe enrichment effect of MABR biofilm was stronger than that of activated sludge. The MABR biofilm and activated sludge had rich microbial communities, including typical species found

基金项目:“创业南京”科技顶尖专家集聚计划(2019年)

通信作者:柴春燕 E-mail: 749860821@qq.com

in various wastewater treatment systems. The average relative abundance of *Nitrospira* in MABR biofilm reached 12%. The energy consumption of MABR system was $0.11 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$, accounting for 19% of the total energy consumption, indicating its great potential for energy saving and carbon reduction.

Key words: MABR; A^2O process; oxygen transfer rate; simultaneous nitrification and denitrification; biofilm; microbial community

膜曝气生物膜反应器(MABR)作为一种能耗低、占地小、脱氮效率高的新技术受到广泛关注。MABR的供氧方式具有“无泡曝气”特性^[1],即氧气从透氧膜内通过扩散作用传递至膜外侧过程中无气泡产生,不像传统微孔曝气需经过液相边界层,故其无 α 系数转化问题^[2],具备更高的氧传递效率。同时,MABR的传质过程具有“逆向扩散”特性^[3],即来自透氧膜内部的氧气与来自外部水体中的底物从相反方向进入生物膜,两者将产生不同的传质浓度梯度,使生物膜形成独特的分层结构。MABR内层生物膜因供氧充足且底物浓度低,利于硝化自养菌生长,而外层生物膜与之相反,更有利于异养菌生长,大幅降低了硝化菌与异养菌对氧气的竞争,以及硝化速率受BOD负荷的影响^[4]。一般将MABR置于缺氧区运行,可实现同步硝化反硝化(SND),有效降低系统的硝化液回流量,从而降低运行成本。

MABR的诸多优势使其具备广阔应用前景,但目前的实际工程案例还不多,且国内采用其处理市政污水的中试研究规模普遍较小^[5-7],运行周期也较短。为更加贴合实际工程应用场景和更深入验证MABR的性能及表现,于南京市某污水处理厂内建设了处理量为 $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 的示范项目,结合现场实际工况,开展工程规模下的应用研究。示范项目参照目前主流的市政污水处理工艺 A^2O ,采用 A^2O -MABR工艺,按现有工程标准建设及运维,配备完善的自动化数据监测系统及定期的人工采样检测,旨在通过对该项目的长期稳定运行监测,收集大量数据进行总结分析,多角度评估MABR的应用效果,为该技术的开发与推广奠定基础。

1 项目概况

1.1 设计规模及水质

示范项目位于南京市某市政污水处理厂曝气沉砂池旁,进水为曝气沉砂池出水,取水点位于精细格栅后端。设计处理量为 $400 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积约 150 m^2 。设计进水COD、氨氮、TN、TP浓度分别为

180、27、30、3.2 mg/L,经处理后的出水水质预期达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类(其中 $\text{TN} \leq 10 \text{ mg/L}$)。

1.2 工艺流程及布置

系统以连续进水连续出水的方式不间断运行,工艺流程为:进水→厌氧区→缺氧区→好氧区→二沉池→出水。池体采用碳钢板焊接而成,配套彩钢房中控室、风机房、水质在线监测室及碳源投加装置等设施,现场布置见图1。在缺氧区内安装2座同规格的MABR膜箱,与缺氧区共同组成“MABR单元”,采用1台无油风机对2座膜箱供气。考虑MABR具有高效硝化能力及SND作用,故未设置硝化液内回流,回流泵仅作二沉池污泥回流用。为验证系统自身的生物脱氮除磷能力及避免干扰,碳源投加仅作强降雨等突发情况下维持污泥活性的应急使用,不用作例行投加以提升处理效果与出水水质。因占地及成本受限,不设配套污泥处置设施,剩余污泥排入污水厂进行处置。

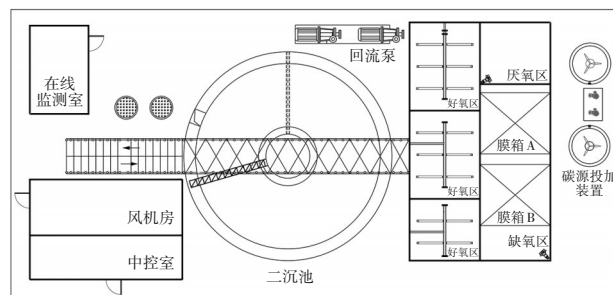


图1 示范项目平面布置

Fig.1 Layout plan of demonstration project

MABR膜箱主要由集成中空纤维膜丝的多列膜组件、整体支撑框架、气体分配组件与管路构成。工艺运行流程为:风机供气由膜箱上部进入,经过膜丝利用后,尾气在膜箱下部的集气装置内聚集,再导入至装置两侧的穿孔管后产生向上的脉冲大气泡,对膜丝进行擦洗以控制生物膜厚度、冲刷附着的杂质垃圾,并搅动混合周边缺氧区的活性污泥。空气在膜丝内腔因温差产生的冷凝液将存于

底部收集槽内,定期由外部水射器吸出排放。

1.3 设计及运行参数

各生化区有效水深均为3.5 m,其中厌氧区尺寸为2.1 m×2.4 m×3.8 m,缺氧区尺寸为6.0 m×2.4 m×3.8 m,好氧段三区尺寸为2.1 m×2.4 m×3.8 m、3.0 m×2.4 m×3.8 m、3.0 m×2.4 m×3.8 m;中进周出辐流式二沉池的尺寸为 \varnothing 7.1 m×3.8 m,有效水深为3.4 m,设计表面负荷为0.42 m³/(m²·h)。单座MABR膜箱的膜面积约1 900 m²,体积约11 m³。

在2022年10月—2023年7月期间,系统各项运行参数平均值如下:进水量为(298±16) m³/d,进水温度为(18.6±4.0) °C,进水pH为6~8;污泥回流比为(65±9)%,SRT为(9±2) d;好氧区末端MLSS为2 400 mg/L;好氧区曝气量为(92±28) m³/h,DO为(2.6±0.9) mg/L;2座MABR膜箱供气量共(17.5±1.1) m³/h,供气压力为(50.1±1.2) kPa。

1.4 分析指标及方法

通过江苏德林在线监测仪对系统进出水COD、氨氮、TN、TP进行检测,频率为1次/h;采用水质传感器实时监测生化区的DO、pH、ORP及MLSS;MABR尾气的氧浓度采用在线氧分析仪(上海昶艾,CI-PC162)实时监测;定期采集缺氧区的进出水水样,在实验室采用标准方法测定氨氮、硝酸盐氮、正磷酸盐浓度;对MABR的生物膜采样及处理后,利用高通量测序技术对16S rDNA特征序列进行分析。

1.5 池体水力状态的示踪试验

构筑物的水力状态对水处理生化反应的传质过程及效率有显著影响,进而决定处理效果的优劣。为检验生化区有无死区、短流问题,以及是否符合CSTR模型的水力全混状态,进行了示踪试验:将示踪剂罗丹明B加入待测试的池子中,注入清水至有效水深并开启搅拌混合设备,再按照设计流量稳定供应清水作为进水源,之后定时取出水口水样检测示踪剂浓度,记录其随时间的变化数据并绘制相应变化曲线,从而判断结果是否符合所采用的流体模型。结果表明,示范项目的生化区池体设计符合CSTR模型,达到了较理想的水力全混状态,为后续系统发挥处理效能及稳定运行提供了基础保障。

2 运行结果与分析

2.1 总体运行效果

经过污泥接种培养、MABR挂膜、联动调试后,

系统运行状态逐渐稳定。2022年10月—2023年7月运行期间总体进出水日均指标见表1,其中进水取样点为精细格栅后,出水取样点为二沉池出水口。

表1 运行期间进出水水质

Tab.1 Influent and effluent quality during operation

项目	COD	氨氮	TN	TP
进水/(mg·L ⁻¹)	248±56	29.7±5.3	36.6±5.2	3.8±0.8
出水/(mg·L ⁻¹)	25±4	1.3±0.9	10.9±2.0	0.6±0.3
去除率/%	90	96	70	84

运行期间出水水质接近设计要求。对比实际MABR工程对COD、氨氮、TN、TP的去除率,如北方地区某提标改造工程^[8]为90%、92%、83%、88%(未加药),湖北某高速公路服务区试点工程^[9]约为95%、99%、97%、96%,本项目对TN、TP的去除率略低。

示范项目进水COD浓度波动较大,出水长期保持稳定。氨氮去除率最高,得益于MABR高效的硝化作用。由于MABR附着固定生长的好氧生物膜,以及高效硝化性能对好氧区硝化作用的替代和增强,A²O-MABR系统可长期保持较低的SRT(约9 d)运行,从而排放更多的富磷剩余污泥,有利于提高TP去除率。但出水TP与TN仍未达到设计标准,主要原因是进水碳源不足——长期处于进水BOD₅与总凯氏氮之比约为3、BOD₅与TP之比约为20的低碳源条件下,且外碳源仅为强降雨时短期投加而非用于日常运行。

2.2 MABR的氧传递效果

评判MABR氧传递效果的3个重要指标为传氧效率(OTE,空气中氧气传递至生物膜上的比例)、传氧速率(OTR,每平方米膜面积每天传递的氧气量)及充氧动力效率(AE,每消耗1 kW·h电量所传递的氧气量)。根据在线氧分析仪监测的膜箱尾气氧浓度数据,计算出运行期间OTE、OTR、AE的平均值分别为27.4%、9.0 g/(m²·d)、4.7 kg/(kW·h),与美国YBSD升级改造应用工程^[2]及中试案例^[7,10]的数据接近。传统曝气装置的OTE设计值一般为10%~20%^[4],微孔曝气器的AE为2.6 kg/(kW·h)^[10],表明MABR具备更高效的氧传递能力。

2.3 MABR单元的脱氮除磷效果

为评估MABR单元的脱氮除磷效果,定期采集缺氧区的进出水水样,分析氨氮、硝酸盐氮及正磷酸盐指标。MABR单元对氨氮的去除由其上生长的好氧生物膜通过硝化反应来实现。采用MABR对

总进水氨氮的去除占比来评估其硝化能力,结果见图2。MABR去除占比为19%~37%,平均值为28%。对比北方地区某提标改造工程去除占比为9.6%^[8](该项目本身设计值低),英国某中试案例去除占比为21%~34%^[11],表明本项目MABR的硝化效果良好。且运行期间MABR去除占比基本保持在20%以上,表现出稳定的硝化性能。由图2可知,MABR的硝化作用与氨氮浓度之间有明显的相关性,这表明MABR的生物膜系统正处于氨氮限制条件下运行^[4]。该特点有利于应对进水氨氮峰值负荷的冲击,并可为后段好氧区悬浮态活性污泥系统规避或减轻超负荷运行的风险。

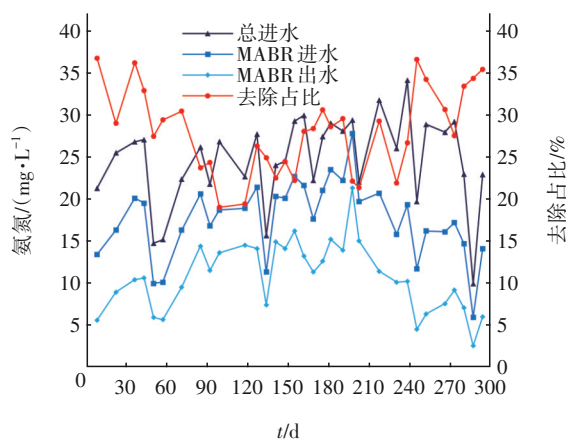


图2 MABR对氨氮的去除效果

Fig.2 Removal effect of ammonia nitrogen by MABR

MABR单元的SND作用主要由MABR上内层好氧生物膜对氨氮的硝化、外层缺氧生物膜及悬浮态活性污泥对硝酸盐氮的反硝化组成。根据进出水氨氮及硝酸盐氮数据,分别计算出两者的去除量作比较以评估同步硝化反硝化效果,如图3所示。可知两者去除量具有较明显的线性关系,表明MABR单元内SND效果较为良好,使系统可在无硝化液回流的运行方式下满足生物脱氮需求,既节省了内回流所需的能耗,又避免了传统A²O工艺内回流夹带溶解氧对反硝化过程造成抑制的问题。

MABR单元的除磷效果如图4所示。大多时段下进出水正磷酸盐浓度相差较小,除磷效果较弱。MABR单元的除磷作用可能是通过一类不同于传统聚磷菌(PAOs)的反硝化聚磷菌(DPAOs)来实现。DPAOs可在缺氧条件下利用NO₂⁻或NO₃⁻作为电子受体吸收环境中的无机磷酸盐合成多聚磷酸盐进行除磷,而导致除磷效果低的潜在原因有DPAOs富

集量较少、前段厌氧区释磷不充分、水温较低及反硝化菌对DPAOs的竞争等。因MABR单元对磷的去除贡献较低,故对于系统整体的除磷作用而言,仍主要依靠传统聚磷菌的厌氧释磷及好氧吸磷过程,最终通过排出富磷剩余污泥实现。

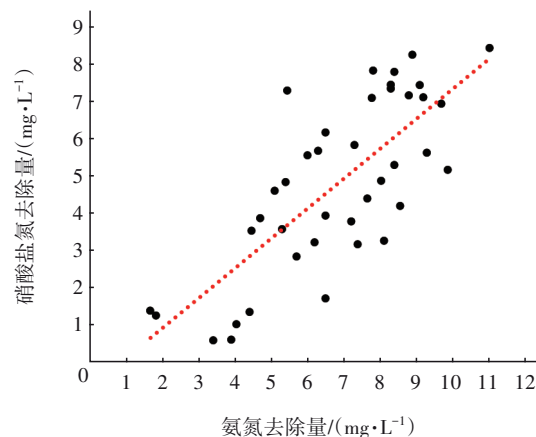


图3 MABR单元的同时硝化反硝化效果

Fig.3 SND in MABR tank

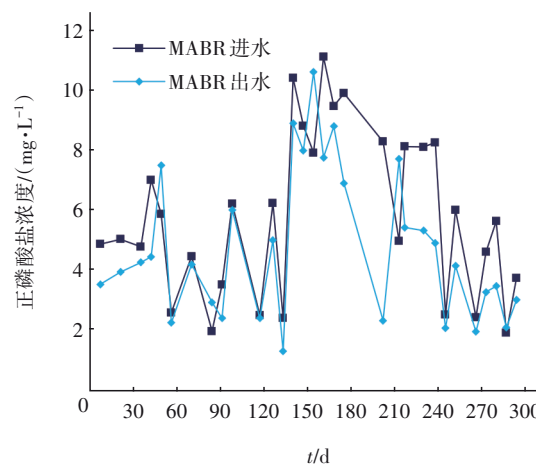


图4 MABR单元的除磷效果

Fig.4 Phosphorus removal effect in MABR tank

2.4 微生物多样性分析

在系统运行稳定且MABR充分挂膜后,沿着进出水流方向对膜箱前中后段以及左右两侧膜丝进行生物膜采样,同时采集膜箱周边活性污泥混合液样品,进行生物膜厚度测定、微生物群落结构及丰度分析。各点位分别编号为BI(前段)、BM(中段)、BO(后段)、BL(左侧)、BR(右侧)、AS(混合液),每个点位取3个样品。

结果显示,样品生物膜厚度在200~500 μm之间,已具有分层结构特征。各点位生物膜的绝对丰度(以C计)分别为100.4、92.9、81.8、90.9、85.2

mg/g,显示出前中后段的生物膜生物量在依次下降。考虑到后段出水端膜丝受到更少的进水水流冲击,故排除水力冲刷减少生物量的影响,则前中后段生物膜生物量沿着水流方向下降应与进水端有更丰富的反应底物有关。活性污泥样品的绝对丰度为76.3 mg/g,生物膜上的生物量相对活性污泥明显更多,说明MABR具备更好的生物富集作用。再对各样品进行16S rDNA高通量测序后,分别在门、属分类水平下统计样品的群落结构,结果如图5所示。

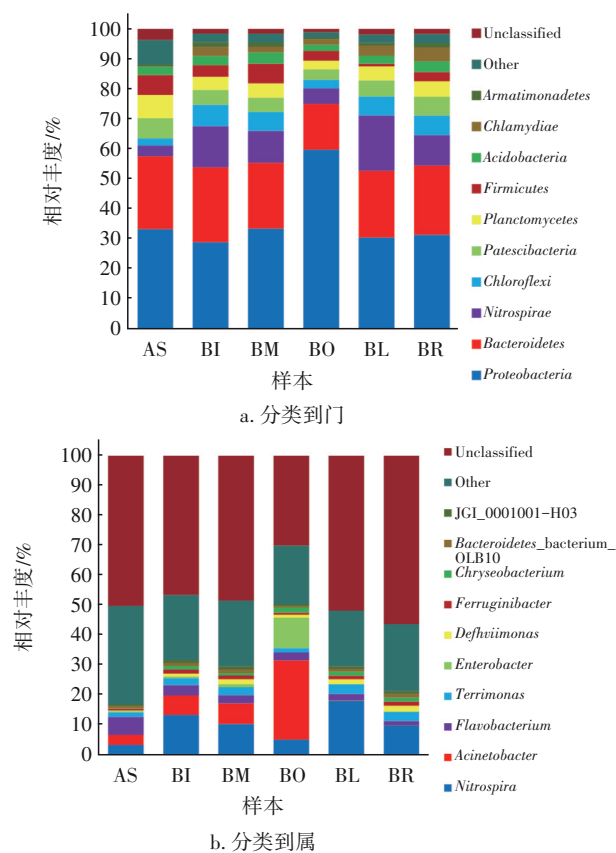


图5 样品群落结构

Fig.5 Bacterial communities groups of samples

从图5(a)可以看出,在门水平上分类出10种主要细菌门类,且生物膜与活性污泥样品的微生物种群结构相似,但生物膜样品的群落分布和多样性随水流方向而有所区别,结合上述水流方向上生物量下降的现象,可从侧面证明MABR单元的水力流态良好,无阻塞短流等状况。无论在生物膜还是活性污泥中,变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)及硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)的相对丰度较高,这与其他中试案例^[5-6]的结果类似。此三者是污水处理系统中的常见细菌类群,*Proteobacteria*是大多数污水处理系统中最优势的菌门,是参与脱

氮除磷、有机物降解的主要菌种;*Bacteroidetes*菌门的物种可降解有机物、参与反硝化过程;*Nitrospirae*则是典型的硝化优势菌门。

从图5(b)可以看出,在属水平上硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)的相对丰度较高,其是污水处理系统中亚硝酸盐氧化菌(NO_B)的优势种属。各生物膜样品中*Nitrospira*占比为5%~18%,平均占比为12%,而在活性污泥中其占比则不到4%。这验证了MABR对硝化菌的富集作用,该特点是MABR具备更优硝化性能的基础保障。

2.5 运行能耗分析

运行期间通过现场安装的电表读数,统计系统的耗电量在152~188 kW·h/d之间,平均为171 kW·h/d,平均能耗约为0.57 kW·h/m³。对比处理规模<1×10⁴ m³/d的实际污水处理厂(0.346±0.211) kW·h/m³的平均能耗统计数据^[12],本项目总体能耗偏高。多方位分析后总结造成系统能耗偏高的主要原因有:示范项目各类仪表、中控设备、照明及换气等公共系统的用电在总体用电中占比不低,但项目规模相比实际污水厂还不足够大,故无法较大程度上平摊该部分用电量而使吨水能耗较高;为使系统调控有足够的操作空间,示范项目在设备选型上往往有较大的负荷冗余,导致工作功率上升、能耗增加。

单独统计MABR系统的平均能耗为0.11 kW·h/m³,相对北方地区某提标改造工程^[8](MABR工艺段运行能耗为0.61 kW·h/m³)而言较低。示范项目MABR运行能耗仅占总体能耗的19%,而传统活性污泥法中好氧曝气能耗约占总能耗的50%以上。MABR系统的低能耗得益于其曝气量相比传统工艺的好氧区大幅降低,故所需鼓风机装机负荷小、用电量低。同时A²O-MABR工艺降低或取消传统活性污泥法的硝化液回流后,原有回流设备对应的电耗也将被节省。综上所述,A²O-MABR工艺具有降低能耗的作用,但因项目规模所限导致能耗降低效果不明显。而随着MABR技术不断推广,在更大规模工程化应用场景下节能降碳优势将会更加显著。

3 结论

① 示范项目水池水力条件达到CSTR全混状态,这是系统稳定运行的基础。

② 系统总体出水水质接近设计要求;MABR的氧传递及硝化性能稳定,硝化去除的氨氮占总进水氨氮的28%;MABR单元的同步硝化反硝化效果

明显,除磷效果因各种因素影响而不显著。

③ MABR挂膜效果良好,生物富集作用更强,存在丰富的各类污水处理系统典型菌种,且生物膜内硝化菌相对丰度更高,平均值达到12%。

④ MABR系统的耗电量仅占总体能耗的19%,在未来更大规模的工程化项目中将会进一步突显出节能降碳的优势,应用前景广阔。

参考文献:

- [1] COTE P, BERSILLON J L, HUYARD A, *et al.* Bubble-free aeration using membranes: process analysis [J]. Journal-Water Pollution Control Federation, 1988, 60(11): 1986-1992.
- [2] 龙泽波, 罗敏, 马文超, 等. 膜传氧生物膜反应器在污水厂升级改造中的应用[J]. 中国给水排水, 2020, 36(17): 1-5.
- LONG Zebo, LUO Min, MA Wenchao, *et al.* Application of membrane aerated biofilm reactor in upgrading of wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(17): 1-5(in Chinese).
- [3] HE H, WAGNER B M, CARLSON A L, *et al.* Recent progress using membrane aerated biofilm reactors for wastewater treatment[J]. Water Science and Technology, 2021, 84(9): 2131-2157.
- [4] HOUWELING D, DAIGGER T G. Intensifying Activated Sludge Using Media-supported Biofilms [M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [5] 柯艳春, 李晓琳, 刘豹, 等. MABR耦合活性污泥技术处理市政污水的中试研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(10): 110-114, 120.
- KE Yanchun, LI Xiaolin, LIU Bao, *et al.* A pilot study on the treatment of municipal wastewater by MABR coupled with activated sludge technology [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(10): 110-114, 120(in Chinese).
- [6] 孙治治, 李保安, 李玫, 等. 基于MABR的市政污水处理强化脱氮中试研究[J]. 化学工业与工程, 2020, 37(6): 61-71.
- SUN Zhiye, LI Bao'an, LI Mei, *et al.* Pilot study on enhanced nitrogen removal of municipal wastewater treatment based on MABR [J]. Chemical Industry and Engineering, 2020, 37(6): 61-71(in Chinese).
- [7] 陈晶, 王冠平, 石伟, 等. 单级MABR纯生物膜法处理市政污水的应用研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(11): 74-78.
- CHEN Jing, WANG Guanping, SHI Wei, *et al.* Application of single stage MABR pure biofilm for the treatment of municipal wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(11): 74-78(in Chinese).
- [8] 魏爱书, 牛晓君. MABR工艺在污水处理站提标改造中的应用[J]. 环境工程学报, 2021, 15(6): 2174-2180.
- WEI Aishu, NIU Xiaojun. Application of MABR in upgrading and reconstruction of a wastewater treatment station[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(6): 2174-2180(in Chinese).
- [9] 徐亮, 陈鹏, 成波, 等. MABR技术在高速公路服务区污水处理中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(9): 72-78.
- XU Liang, CHEN Peng, CHENG Bo, *et al.* Application of MABR technology in wastewater treatment of expressway service area[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 72-78(in Chinese).
- [10] URI-CARREÑO N, NIELSEN P H, GERNAEY K V, *et al.* Long-term operation assessment of a full-scale membrane-aerated biofilm reactor under Nordic conditions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 779: 146366.
- [11] SUNNER N, LONG Z B, HOUWELING D, *et al.* MABR as a low-energy compact solution for nutrient removal upgrades—results from a demonstration in the UK[C]//WEFTEC. Proceedings of the Water Environment Federation. New Orleans: Water Environment Federation, 2018: 1264-1281.
- [12] 张羽就, 席佳锐, 陈玲, 等. 中国城镇污水处理厂能耗统计与基准分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(8): 8-17.
- ZHANG Yujiu, XI Jiarui, CHEN Ling, *et al.* Energy consumption statistics and benchmarking analysis of urban wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(8): 8-17(in Chinese).

作者简介:包聿禾(1994-),男,浙江临海人,本科,助理工程师,主要研究方向为污水处理新技术的开发与应用。

E-mail:baoyuhe1994@163.com

收稿日期:2024-08-21

修回日期:2024-09-11

(编辑:李德强)