

# 基于 MABR 的短流程工艺处理市政污水性能研究

柳蒙蒙<sup>1</sup>, 彭梦文<sup>1</sup>, 王殿常<sup>1,2</sup>, 尹 炜<sup>1</sup>,  
朱向东<sup>2</sup>, 刘龙志<sup>2</sup>, 周小国<sup>2</sup>, 陈亚松<sup>1\*</sup>

(1. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014;  
2. 长江生态环保集团有限公司, 武汉 430010)

**摘要:** 本研究搭建了 100 m<sup>3</sup>/d 的膜曝气生物膜反应器(MABR)中试装置,通过对实际市政污水进行处理,探究工艺设计合理性、系统运行效果,分析 MABR 脱氮贡献、氧传质特性及环境因子的相关性。结果表明:MABR 在一个月內可以完成微生物挂膜,并且该工艺系统內回流点位设置在 MABR 单元后端,并保持内外回流比均为 100%左右,可以避免对进水氨氮的稀释,进而提高 MABR 硝化速率(NR),强化 MABR 单元同步硝化反硝化效果;运行期间,MABR 硝化速率达(2.75±1.13) g N/(m<sup>2</sup>·d),MABR 单元脱氮贡献占系统总脱氮量的 20.42%±7.97%;氧传质效率(OTE)与氧传质速率(OTR)分别达到 33.36%±10.75%和(10.85±2.88) g O<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·d),证明 MABR 具有较强的氧传质特性。本中试系统实现了高效短流程脱氮,在较短生化停留时间(HRT=10.81 h)条件下,出水指标优于江苏省地标《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440-2022)的 A 类标准(其中 TN<10 mg/L)。

**关键词:** 膜曝气生物膜反应器; 同步硝化反硝化; 市政污水; 氧传质; 短流程脱氮

**中图分类号:** X703; TQ028 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)06-0116-10

**doi:** 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.06.013

随着城市化进程的加快和环保要求的日益严格,污水处理厂面临着更高效的脱氮除磷需求。传统活性污泥法[如厌氧-缺氧-好氧(AAO)、氧化沟工艺等]虽然广泛应用于污水处理,但其停留时间长、运行能耗高、脱氮效率低等问题日益凸显,难以满足污水处理行业绿色低碳发展需求<sup>[1]</sup>。因此,开发高效节能的新型污水处理技术及工艺成为当前研究的热点。近年来,膜曝气生物膜反应器(MABR)因其革新性的氧传质机制和同步硝化反硝化(SND)能力,成为污水处理领域的研究热点<sup>[2]</sup>。与传统曝

气技术不同,MABR 通过透气性中空纤维膜直接向生物膜供氧,氧气利用率高达 90%以上,且生物膜內形成的氧浓度梯度可实现同步硝化反硝化,显著缩短脱氮流程。与传统活性污泥工艺相比,MABR 具有能耗低、污泥产量少、占地面积小等优势,尤其适用于低碳氮比污水的处理,契合“双碳”目标下的绿色低碳发展需求<sup>[3-5]</sup>。

然而,当前国际上针对 MABR 的研究多聚焦于实验室规模的小试研究<sup>[6-7]</sup>,针对实际污水复杂水质(如高悬浮物、毒性物质)的适应性研究仍显不足,且

收稿日期: 2025-05-06; 修改稿收到日期: 2025-05-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3207601); 中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(NBWL202300013)

第一作者简介: 柳蒙蒙(1992-),男,河北衡水人,高级工程师,博士,主要研究方向为污水废水处理及资源化利用。\* 通讯作者, E-mail: chen\_yasong@ctg.com.cn

引用本文: 柳蒙蒙,彭梦文,王殿常,等. 基于 MABR 的短流程工艺处理市政污水性能研究[J]. 膜科学与技术, 2025, 45(6): 116-125.

Citation: Liu M M, Peng M W, Wang D C, *et al.* Study on the performance of municipal wastewater treatment by short process based on MABR[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(6): 116-125.

缺乏中试规模的长期运行数据支撑。国内研究则更多关注 MABR 与传统工艺的耦合优化,如小部分研究开发了 A<sup>2</sup>/O-MABR 工艺<sup>[8]</sup>,通过强化内回流控制,将总氮(TN)去除率提升至 85% 以上,但其将 MABR 膜组件安装在好氧区,且组合工艺生化段停留时间(HRT)17.8 h,并没有完全发挥 MABR 同步硝化反硝化的优势及缩短系统停留时间。国内大部分研究将 MABR 安装在缺氧区<sup>[9-12]</sup>,通过强化同步硝化反硝化效果,缩短好氧池停留时间及整个工艺系统占地面积。但由于 MABR 技术受限于投资成本高等问题,目前在国内外大规模应用案例仍较少,设计参数及运行控制经验有待进一步总结<sup>[1]</sup>。尤其是在当前污水处理工艺短流程、低碳化发展的驱动下<sup>[1,9]</sup>,面对实际市政生活污水,如何合理设置工艺流程及内外回流,进而通过发挥 MABR 优势,强化同步硝化反硝化性能,降低运行能耗、缩短生化段停留时间具有重要意义。

为了更好地贴合实际工程应用场景,为低碳短流程污水脱氮工艺设计提供技术支撑,本研究在苏州市某污水处理厂内搭建了一座 100 m<sup>3</sup>/d 的 MABR 工艺中试装置,采用实际市政污水作为进水。对 MABR 系统运行效果、MABR 单元脱氮贡献、硝化速率及传质特性等进行系统性研究,旨在为 MABR 技术的工程化推广和应用提供理论依据和技术支持,推动市政污水处理向低碳短流程方向发展。

## 1 材料与方 法

### 1.1 中试装置概况

中试装置设计处理规模为 100 m<sup>3</sup>/d,主要工艺流程见图 1。中试装置主体采用碳钢材质加工而成,主要包括生化池(厌氧池、MABR 池、前缺氧池、前好氧池、后缺氧池、后好氧池)和二沉池。生化池

总有效容积为 45.07 m<sup>3</sup> (11.65 m × 1.46 m × 2.65 m),MABR 单元有效容积为 4.64 m<sup>3</sup> (1.46 m × 1.20 m × 2.65 m)。设计流量下生化段总停留时间为 10.81 h,各单元设计停留时间如表 1 所示。MABR 池及前后好氧池均安装有溶解氧(DO)在线监测仪,系统进水、内外回流管路均安装有流量计。厌氧池、前后缺氧池均安装有潜水搅拌机,假定各反应单元为完全混合状态,不存在短流、死区现象。二沉池内安装有斜管填料,在设计流量下表面负荷为 2.30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · h)。

表 1 中试装置设计参数

Table 1 Design parameters of pilot plant

设计参数	设计值
设计处理水量/(m <sup>3</sup> · d)	100
生物池总停留时间/h	10.81
厌氧池停留时间/h	0.93
MABR 池停留时间/h	1.11
前缺氧池停留时间/h	1.39
前好氧池停留时间/h	2.41
后缺氧池停留时间/h	2.97
后好氧池停留时间/h	2.00

本中试系统于 2024 年 5 月 20 日~12 月 20 日期间运行,进水取自苏州市某城市污水处理厂预处理阶段曝气沉砂池出水,系统接种污泥取自该污水处理厂污泥浓缩池。在运行过程中,控制前、后好氧池溶解氧均在 2.0~3.5 mg/L。为减小回流对进水氨氮的稀释,提高 MABR 单元进水氨氮负荷,将内回流点位设置在 MABR 池后端、前缺氧池进水端。前期内回流比相对较大,后根据 MABR 单元同步硝化反硝化对总氮去除效果较好,逐渐降低内回流比例至 60%~100%;外回流点设置在厌氧池进水端,回流比例为 80%~100%。

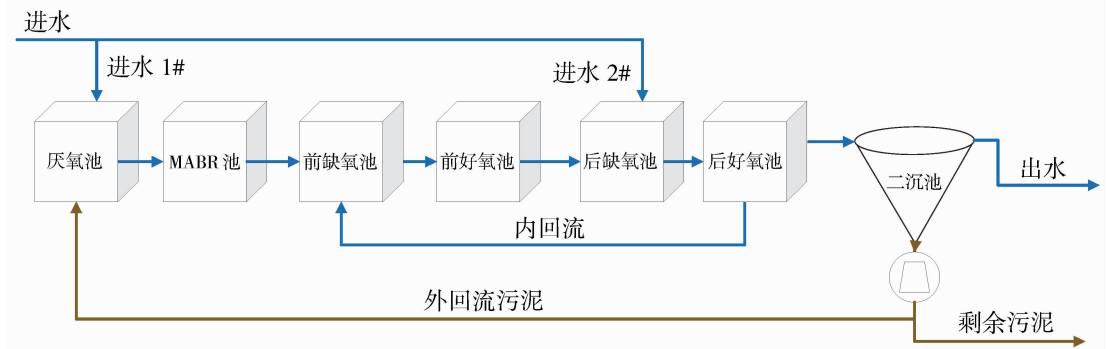


图 1 中试装置工艺流程示意图

Fig. 1 Diagram of pilot-scale system

### 1.2 中试 MABR 膜组件

MABR 膜组件以中空纤维帘式膜为生物膜载体,总有效膜面积为 180 m<sup>2</sup>,分为 4 个膜片并列成一个膜组件,单个膜片 45 m<sup>2</sup>,中空纤维膜组件垂直置于 MABR 池中间,MABR 膜材料相关的物化及性能规格参数如表 2 所示。膜组件供气分为工艺供气、搅拌用气、擦洗用气,均通过空压机控制,空压机维持供气压力 35~50 kPa。工艺供气控制在 0.8~2.0 Nm<sup>3</sup>/h;为保证 MABR 单元的充分混合,实现污染物与 MABR 表面生物膜的充分接触,减少死区、短流现象,在 MABR 组件底部安装有搅拌供气管用于产生向上的脉冲大气泡,搅拌供气为间歇启停,供气量控制在 5~14 Nm<sup>3</sup>/h,开 10 s 停 110 s;为控制 MABR 膜表面较佳的生物膜厚度,防止生物膜厚度过厚影响氧传质效果,设置擦洗用气量 13~40 Nm<sup>3</sup>/h,每 12 h 擦洗 3 min。

表 2 MABR 膜组件规格参数

Table 2 Specification parameters of MABR membrane module

项目	设计参数
膜组件外形尺寸(长×宽×高)/mm	950×340×2 500
膜丝有效长度/mm	2 500
有效膜面积/ m <sup>2</sup>	180
膜组件类型	中空纤维帘式膜组件
膜丝材质	复合高分子材料
膜丝直径/ μm	1 100
膜丝平均断裂拉伸强度/N	>100
氧渗透系数/(L·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ·Pa <sup>-1</sup> )	0.001~0.004
膜工作气压/kPa	40~55

### 1.3 测试方法

试验期间,保证每周至少 1 次测样,水样现场均使用 0.45 μm 滤膜过滤后测定,常规指标均按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》中的标准方法测定,溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)等采用多参数水质分析仪(美国,哈希,HQ 30d)在中试现场测定。

硝化速率[NR, g N/(m<sup>2</sup>·d)]是衡量 MABR 性能的核心指标,也是评价其在实际应用中能否有效去除氨氮的重要依据,采用式(1)计算<sup>[3]</sup>。

$$NR = \frac{(NH_{x,inf} - NH_{x,eff}) \cdot Q_w}{A} \quad (1)$$

式中: NH<sub>x,inf</sub> 和 NH<sub>x,eff</sub> 为 MABR 单元进、出水的氨氮浓度, mg/L; Q<sub>w</sub> 为 MABR 单元的进水流量, m<sup>3</sup>/h; A 为 MABR 膜表面积, m<sup>2</sup>。

同时,对 MABR 处理生活污水的曝气性能进行计算分析,其中氧传质效率(OTE, %)、氧传质速率

[OTR, g O<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·d)]的计算参照式(2)~式(4)<sup>[4]</sup>:

$$OTE = \frac{O_{2,in} - (1 - V_{loss}) \cdot O_{2,exh}}{O_{2,in}} \times 100\% \quad (2)$$

$$V_{loss} = \frac{1 - O_{2,in}}{1 - O_{2,exh}} \quad (3)$$

$$OTR = \frac{[Q_{air,in} \cdot O_{2,in} - (1 - V_{loss}) \cdot O_{2,exh}] \cdot \rho_{O_2}}{A} \quad (4)$$

式中: Q<sub>air,in</sub> 为 MABR 供气流量, Nm<sup>3</sup>/h; O<sub>2,in</sub> 为大气中氧气的体积分数, 常数, 取 20.9%; O<sub>2,exh</sub> 为 MABR 尾气中氧气的体积分数; V<sub>loss</sub> 为进、出口处的氧气损失系数; ρ<sub>O<sub>2</sub></sub> 为标准工况下氧气的密度, kg/m<sup>3</sup>; A 为 MABR 膜表面积, m<sup>2</sup>。采用便携式氧气单一气体检测仪(爱德克斯®, ADKS-1, 检测范围为体积分数 0~30%), 每天检测 MABR 膜组器尾气氧气含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 系统运行效能

运行期间,系统进水水质分布特征如图 2 所示。可以看出,进水 COD 为(144.83±62.20) mg/L,最大值为 314 mg/L,最小值为 22 mg/L;进水氨氮为(24.24±5.98) mg/L,最大值为 34.93 mg/L,最小值为 7.56 mg/L;进水总氮为(27.23±6.26) mg/L,最大值为 39.9 mg/L,最小值为 8.8 mg/L;进水总磷为(2.88±1.17) mg/L,最大值为 6.47 mg/L,最小值为 0.81 mg/L。

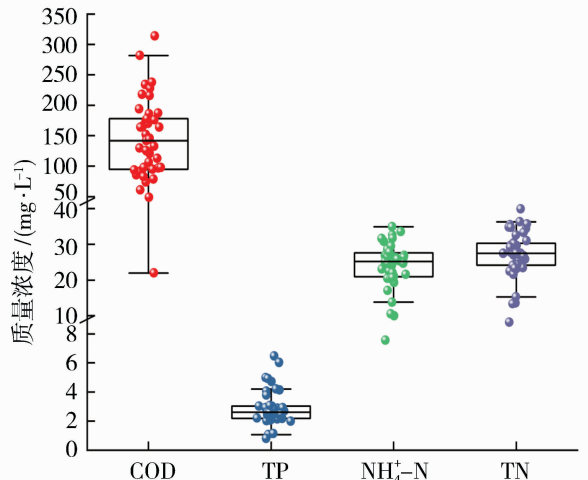


图 2 进水各水质指标分布特征

Fig. 2 Influent quality distribution characteristics of the system

系统设计总进水量为  $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 、前后进水流量比按照约 3 : 2 控制。实际运行期间,前后进水及回流量情况如图 3 所示。阶段 I 为系统运行初期(5 月 25 日~6 月 25 日),此阶段经历污泥接种培养、MABR 挂膜、调试阶段,该阶段为了提高系统脱氮效果,设置前端进水量和内回流量较大。第 II 阶段为常规运行阶段(6 月 26 日~8 月 25 日),前后总进水量控制在  $100 \sim 108 \text{ m}^3/\text{d}$  左右,经过 MABR 膜表面微生物挂膜及系统稳定后,调

整前后进水流量比为 3 : 2 左右,并逐步降低内回流比为  $60\% \sim 100\%$ ,外回流比控制在  $100\%$  左右,研究供气量对 MABR 单元硝化及反硝化性能。第 III 阶段(8 月 26 日~10 月 28 日)为水量提升阶段,增加前后总进水量至  $120 \text{ m}^3/\text{d}$  左右,生化阶段 HRT 缩短至  $8.75 \text{ h}$  左右,并优化内外回流比例,研究系统脱氮除碳性能。第 IV 阶段考虑进水水温略微降低,恢复系统前后总进水量至  $100 \sim 108 \text{ m}^3/\text{d}$ ,研究系统稳定性。

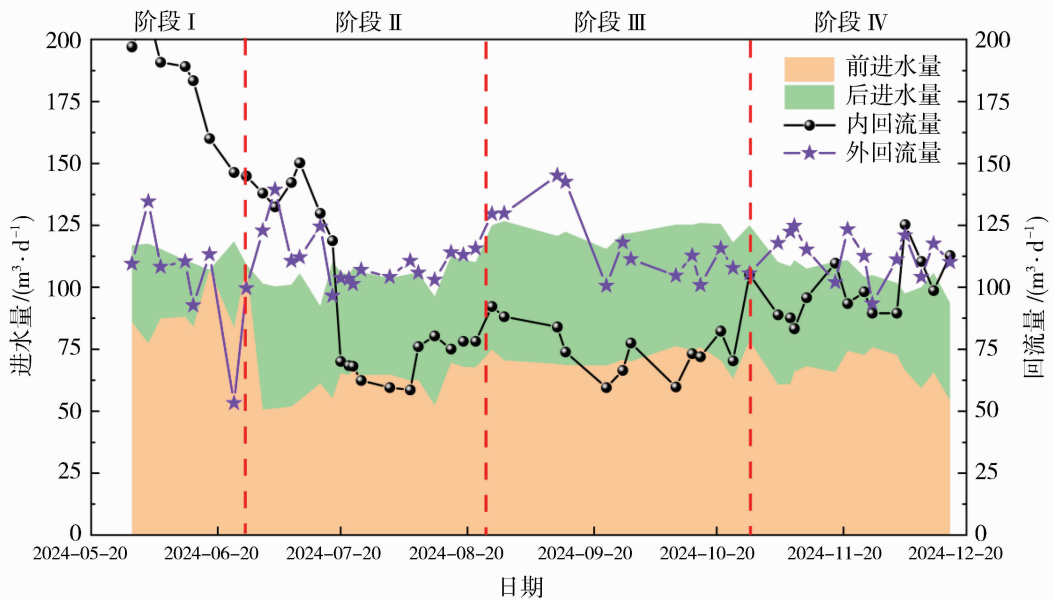


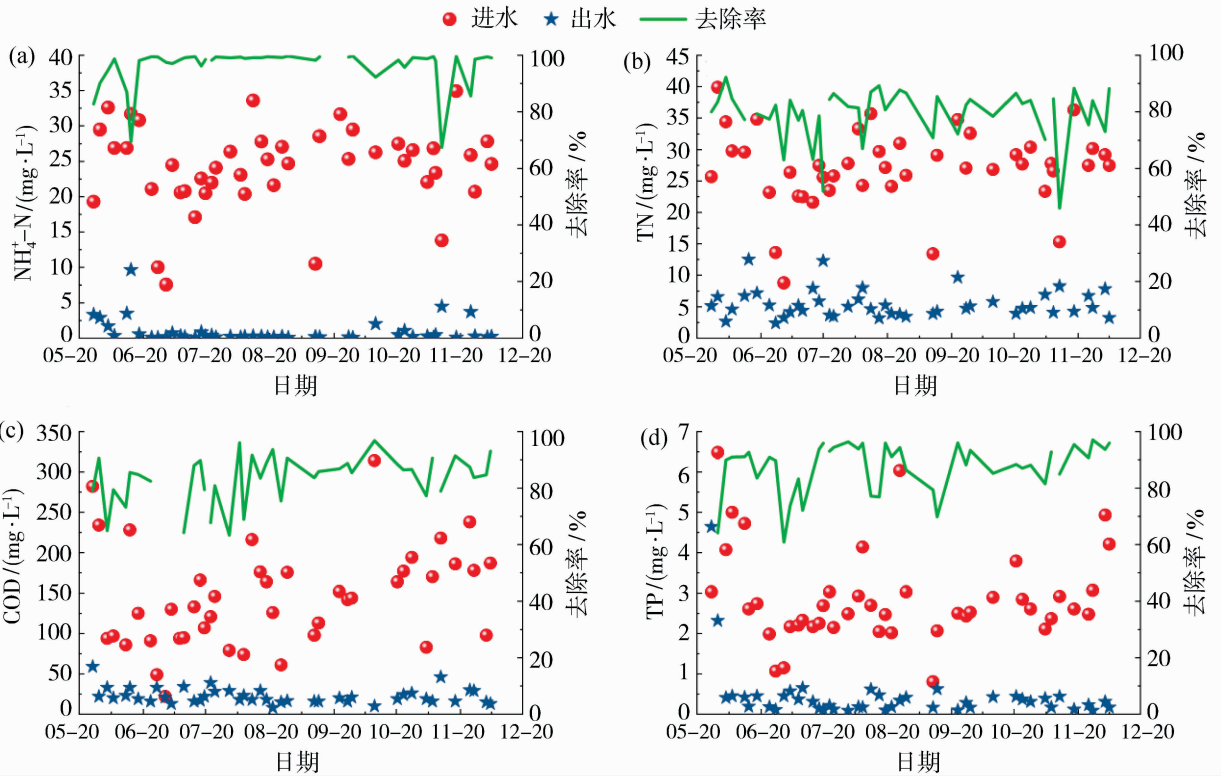
图 3 中试系统前后进水量及内外回流量情况

Fig. 3 Influent flow and internal and external return flow of pilot system

运行期间,系统进出水水质数据如图 4 及表 3 所示。可以看出,系统进水水质波动较大,出水长期保持稳定,得益于 MABR 高的氧传质效率以及好氧池高效的硝化作用。四个阶段稳定运行下,系统对 TN 去除率达  $79.13\% \pm 9.61\%$ ,出水 TN 质量浓度为  $(5.49 \pm 2.25) \text{ mg/L}$ ;  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率达  $96.01\% \pm 7.30\%$ ,出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  质量浓度为  $(0.95 \pm 1.77) \text{ mg/L}$ ; COD 去除率达  $81.02\% \pm 16.53\%$ ,出水 COD 质量浓度为  $(22.66 \pm 9.74) \text{ mg/L}$ ,优于江苏省地标《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440-2022)的 A 类标准(TN <  $10 \text{ mg/L}$ )。同时,结合图 3 可以看出,系统内回流比缩小,对系统运行效果影响不大,这主要是因为 MABR 单元发生了同步硝化反硝化去除了部分总氮,因此可以降低系统内回流量,进而有利于减小系统回流产生的能耗。

## 2.2 MABR 脱氮性能

硝化速率(NR)表示单位时间内单位 MABR 膜面积去除氨氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )的能力,是衡量 MABR 脱氮性能的核心指标<sup>[13]</sup>。图 5 显示 MABR 硝化速率(NR)随时间变化情况,其中  $Q_w$  为系统前端进水量与污泥外回流量总和,即 MABR 单元进水流量。假定系统各反应单元均为全混状态。试验期间, MABR 单元硝化速率(NR)稳定在  $(2.75 \pm 1.13) \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,优于文献中报道的  $(1.01 \pm 0.57) \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[14]</sup>和  $2.1 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[15]</sup>。由图 5 可以看出, MABR 单元进水氨氮浓度越高, MABR 氨氮去除量越大,硝化速率(NR)越高,即 MABR 膜表面硝化菌活性越高,硝化性能越好。由此可以得出, MABR 的硝化性能与进水氨氮浓度呈明显的正相关关系,这也表明 MABR 的生物膜系统正处于氨氮限制条件下运行<sup>[4,10,12]</sup>。该特性有利于



(a) 氨氮; (b) 总氮; (c) COD; (d) 总磷

图 4 中试系统对污染物的去除效果

Fig. 4 Removal effect of the pilot system on pollutants

表 3 运行期间系统运行效果

Table 3 System operation effect during operation

项目	COD	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TN	TP
进水/(mg·L <sup>-1</sup> )	144.83±62.20	24.24±5.98	27.23±6.26	2.88±1.17
出水/(mg·L <sup>-1</sup> )	22.66±9.74	0.95±1.77	5.49±2.25	0.44±0.77
去除率/%	81.02±16.53	96.01±7.30	79.13±9.61	87.48±8.95

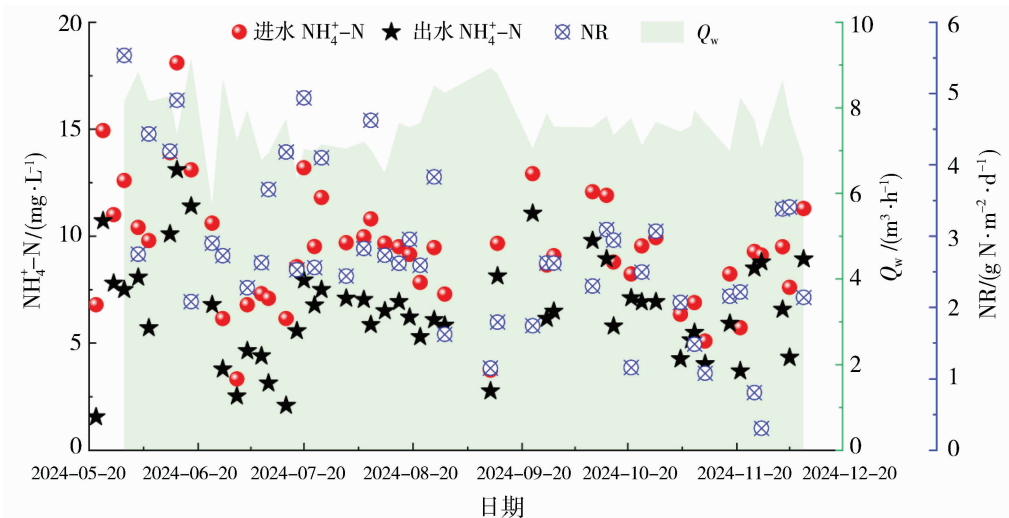


图 5 MABR 硝化速率(NR)变化情况

Fig. 5 Changes of nitrification rate (NR) in MABR

MABR 系统应对进水氨氮浓度突然增加带来的负荷冲击,提高系统抗冲击韧性。该效果印证了本中试装置内回流点位设置在 MABR 单元后端是合理的,避免了内回流对 MABR 单元进水氨氮的稀释,通过提高 MABR 单元进水氨氮负荷可提高其硝化性能。

由于 MABR 生物膜的氧气传递方向为膜内侧向膜外侧扩散,在靠近膜侧形成好氧区,远离膜侧形成缺氧区,这种特殊的分层结构有利于 MABR 单元同步硝化反硝化(SND)反应。运行期间,各阶段控制 MABR 单元溶解氧维持在 0.3~0.5 mg/L 之间,维持低 DO 环境以为 MABR 单元同步硝化反硝化提供良好的缺氧环境。图 6 展示了 MABR 单元同步硝化反硝化效果,可以看出在该单元氨氮和总氮去除具有较强的线性正相关关系( $y=1.006x$ ,  $R^2=0.90$ ),总氮去除量基本等于氨氮去除量,说明硝化产生的硝态氮、亚硝态氮均基本被反硝化,直观印证了 MABR 单元在同步硝化反硝化(SND)中的高效性与稳定性,这得益于 MABR 生物膜内形成的氧梯度(内层好氧/外层缺氧),该优势也减少了对额外缺氧池池容和硝化液回流的需求,避免了脱氮系统停留时间长、占地面积大、内回流能耗高以及内回流夹带溶解氧影响反硝化等问题的发生。同时,在

MABR 单元氨氮去除量最高达 40 g/h,总氮去除量也接近 40 g/h,表明 MABR 单元在高负荷下仍保持高效脱氮。

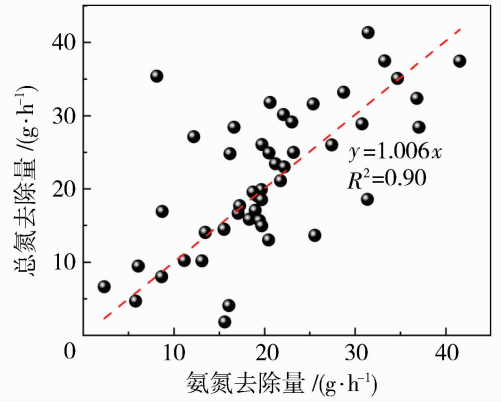


图 6 MABR 单元同步硝化反硝化效果

Fig. 6 Simultaneous nitrification and denitrification (SND) in MABR

图 7 进一步量化了耦合系统脱氮性能及 MABR 单元的脱氮贡献。可以看出,MABR 承担了系统 20.42%±7.97% 的 TN 去除量,最多去除系统 39.45% 的 TN,最低去除系统 7.47% 的 TN。MABR 单元较高的总氮去除贡献,也有利于提高进水碳源利用率,减少对额外缺氧池容积及内回流的需求。

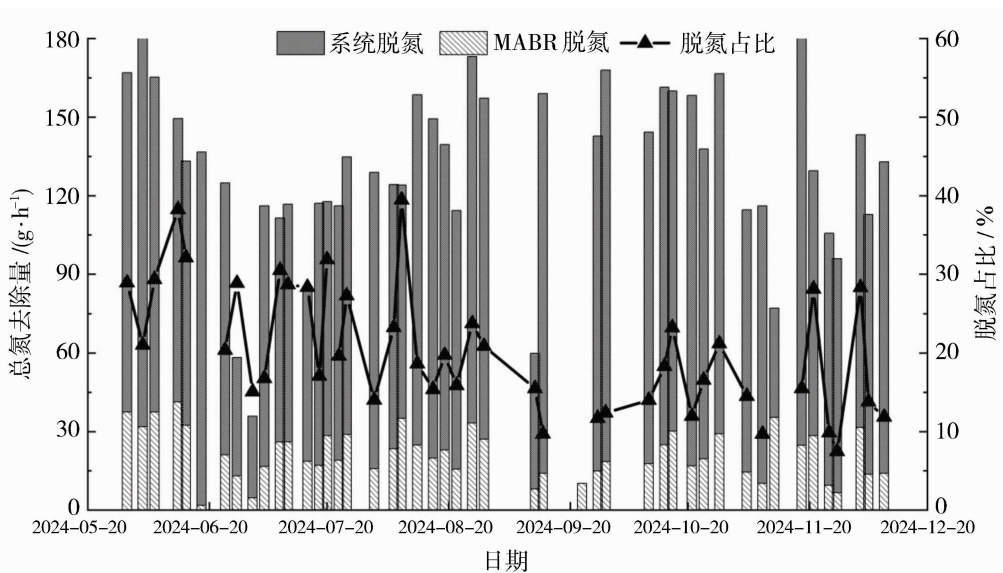


图 7 系统脱氮性能及 MABR 单元脱氮贡献

Fig. 7 Nitrogen removal performance of the system and contribution of MABR

### 2.3 MABR 传质特性

本系统选用的膜组件为贯通式曝气,该方式可

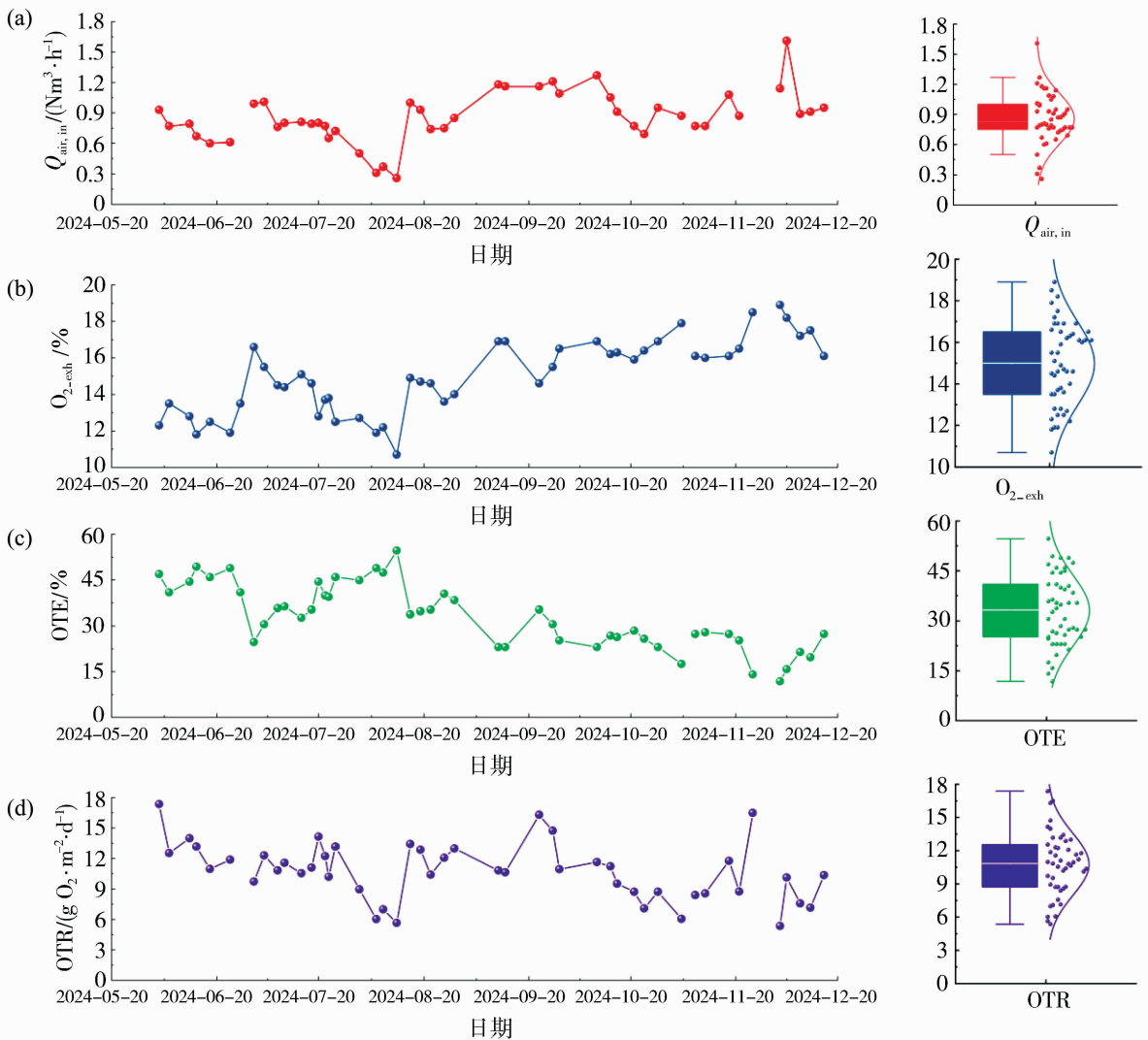
以使膜腔内空气/氧气浓度分布相对均匀,产生较高的氧气传递效率。MABR 膜组件供气量、尾气氧含

量、OTE 及 OTR 变化情况如图 8 所示。MABR 供气量控制在  $(0.9 \pm 0.4) \text{ Nm}^3/\text{h}$  之间,由图 8(a)、8(b)可以看出,供气量越小,尾气氧含量越低,OTE 越高;供气量越大,尾气氧含量越高。即较低的供气量条件下,氧气在膜腔停留时间较长,更多的氧气可以被膜表面微生物所利用。运行期间,MABR 膜组件 OTE 为  $11.80\% \sim 54.65\%$ ,平均值为  $33.36\%$ ,优于传统曝气方式(如表 4 所示);OTR 为  $(5.35 \sim 17.37) \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,平均值为  $10.85 \text{ g O}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。对比相关研究(表 5)可知,MABR 在本中试系统中 OTE、OTR 优于文献中报道<sup>[4,9-10]</sup>,接近于美国 YBSD 升级改造应用工程报道<sup>[15]</sup>。同时,整体来看,OTE 和 OTR 呈现略微下降趋势,说明长期运

行过程中 MABR 性能随着时间的延长逐渐下降。分析原因,一方面可能由于长期运行导致膜丝断裂或进水中毛发等纤维类物质缠绕在膜丝表面,降低了有效膜面积;另一方面可能由于长期运行导致 MABR 膜表面生物膜过厚或膜污染<sup>[16]</sup>导致氧气传质效率降低。

### 2.4 MABR 相关性分析

采用 Mantel 检验<sup>[22]</sup>,对 49 组 MABR 单元性能参数数据(硝化速率、尾气氧含量、氧传质效率、氧传质速率)和环境参数数据(水温、进水氨氮浓度、出水氨氮浓度、水力停留时间、MABR 供气量)进行相关性分析。由图 9 可知,硝化速率(NR)与进出水氨氮浓度呈显著正相关关系( $p < 0.05$ ),与水温、停留



(a) 膜组件供气量变化情况;(b) 膜组件尾气氧浓度变化情况;(c) 膜组件氧传质效率变化情况;(d) 膜组件氧传质速率变化情况

图 8 MABR 传质特性

Fig. 8 Mass transfer characteristic in MABR tank

表 4 不同曝气方式氧传质效率对比情况

Table 4 Comparison of oxygen transfer efficiency with the different aeration method

曝气方式	氧传质效率(OTE)/%	文献
鼓风曝气		
小气泡	15.22~19.78	[17]
	16.16	[18]
中气泡	8~16	[19]
大气泡	3~9	[19]
低压射流曝气	26	[20]
MABR	17.42~33.61	[9]
	30.9~59.8	[21]
	11.80~54.65,	本研究
	平均值 33.36	

时间、供气量不显著 ( $p > 0.05$ )。较高的进水氨氮负荷,可以促进氨氮底物向膜表面硝化菌富集层的

扩散,强化 MABR 表面硝化菌活性,这更突出了其动态供氧特性及抗冲击能力。同时,由于 MABR 属于生物膜法,生物膜由微生物及其分泌的胞外聚合物(EPS)构成多层结构,形成稳定的微环境。膜内部温度变化比外部水体更缓慢,其对水温的敏感度较低,尤其在低温时,膜内微生物仍能维持一定活性,避免因短时水温波动导致大量微生物失活<sup>[4]</sup>。尾气氧含量与供气量呈强正相关关系 ( $p < 0.01, r > 0.4^{**}$ ),OTE 次之,OTR 最弱 ( $r < 0.2$ )。氧传质效率与气量呈正相关关系,但受限于生物膜和液相传质阻力,导致供气量增加,氧传质效率(OTE)增速递减。由于高供气量条件下,氧溶解度受限,同时生物膜氧消耗速率达到饱和,导致氧传质速率(OTR)增加不明显。

表 5 中试及以上规模 MABR 工艺性能参数比较

Table 5 Comparison of performance parameters of MABR processes at pilot-scale and above

序号	处理规模/ ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	生化 HRT/h	膜面积/ $m^2$	NR/ ( $g N \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	OTR/ ( $g O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )	OTE/%	来源
1	480	—	1 920	1.03~2.14	9.54±1.79	25.7±5.75	[4]
2	36	15.6	168.8	—	—	—	[8]
3	75	12	1 450	0.24~1.07	2.17~5.32	17.42~33.61	[9]
4	400	8.2	1 900	—	9.0	27.4	[10]
5	13 702	—	23 040	2.1	12	—	[15]
6	100	10.81	180	2.75±1.13	10.85±2.88	33.36±10.75	本研究

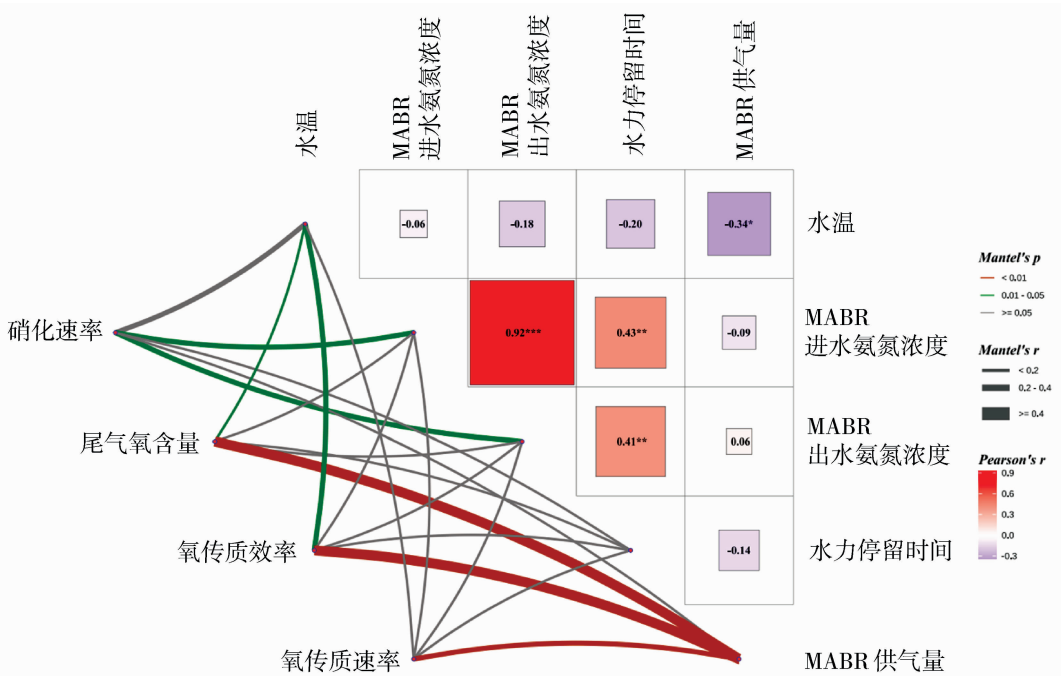


图 9 MABR 性能与环境因子之间的相关关系

Fig. 9 The correlation between MABR performance and environmental factors

综上, MABR 系统通过独特的生物膜结构实现了“氨氮负荷驱动-氧传递自平衡”的运作模式。硝化速率与进水氨氮浓度/负荷的强关联性源于生物膜渗透特性调控, 而氧代谢参数的分异响应则揭示了气量调控存在临界阈值。建议在实际运行中采用氨氮浓度导向的动态控制策略, 同时建立气量-氧效的智能匹配模型, 以实现 OTE 的最大化、OTR 的稳定化, 进而促进脱氮效能与能耗的最优平衡。

### 3 结论

1) 本中试系统实现了高效短流程脱氮, 在较短生化停留时间 (HRT=10.81 h) 条件下, 出水指标优于江苏省地标《城镇污水处理厂污染物排放标准》(DB 32/4440-2022) 的 A 类标准 (其中 TN < 10 mg/L), 同时该系统具有较强的抗冲击能力, 当来水水量为 1.2 倍设计水量时, 出水仍然可以满足排放标准。

2) MABR 通过逆向传质形成的生物膜氧梯度, 在较低 MABR 膜面积 (180 m<sup>2</sup>) 填充条件下, 通过优化供气量、内回流点位等条件, 充分发挥 MABR 优势, 硝化速率 (NR) 达 (2.75±1.13) g N / (m<sup>2</sup> · d), 显著高于文献报道值; 同时 MABR 单元实现了同步硝化反硝化 (SND), 贡献系统总脱氮量的 20.42%±7.97%, 最高贡献率可达 39.45%。这种短流程脱氮机制使系统内回流比降至 60%~100%, 较传统 A<sup>2</sup>/O 工艺降低 50% 以上, 具有显著降低间接碳排放的潜力, 为低碳污水处理提供了新路径。

3) MABR 氧传质效率 (OTE) 与氧传质速率 (OTR) 分别达到 33.36%±10.75% 和 (10.85±2.88) g O<sub>2</sub> / (m<sup>2</sup> · d)。研究了 NR、OTE、OTR 与供气量、进水氨氮负荷等的相关关系, 验证了 MABR 在高氨氮负荷下的抗冲击能力, 同时表明同等处理规模、MABR 装填密度条件下, 供气量调控存在临界阈值, 可以实现 MABR 脱氮效率和供气能耗的最优平衡。

4) 长期运行数据表明, NR、OTE 与 OTR 有缓慢下降趋势, 推测与生物膜厚度、膜污染堵塞及低温条件下传质系数下降有关。建议后续研究重点关注: ① MABR 生物膜脱落机制及长期运行中厚度控制策略; ② 冬季低温条件对 SND 效能的影响; ③ 研究 MABR 膜表面氮转化路径, 并从分子层面解析 MABR 生物膜-悬浮相微生物群落互作机制; ④ 研

究工程应用层面膜曝气与剪切控制系统, 提高系统处理效率及稳定性。

### 参考文献:

- [1] 刘智晓, 吴凡松. 污水生化处理工艺发展阶段化技术特征及未来趋势[J]. 给水排水, 2024, 60(4): 12-22.
- [2] Sun Z Y, Li Y, Liu J, *et al.* Performance and mechanism of the synergistic hexavalent chromium and nitrogen removal in a MABR system[J]. Chem Eng J, 2023, 478(12): 147433.
- [3] Li T G, Liu J X, Bai R B, *et al.* Membrane-aerated biofilm reactor for the treatment of acetonitrile wastewater[J]. Environ Sci Technol, 2008, 42(6): 2099.
- [4] Uri-Carreo 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]. Sci Total Environ, 2021, 779(1): 146366.
- [5] 宋舒兴, 杨一铭, 张焯铠, 等. 膜曝气生物膜反应器处理生活污水 N<sub>2</sub>O 等温室气体的排放特性[J]. 环境工程学报, 2023, 17(9): 2872-2878.
- [6] Veleva I, Weert W V, Belzen N V, *et al.* Petrochemical condensate treatment by membrane aerated biofilm reactors: A pilot study[J]. Chem Eng J, 2021, 428(3): 131013.
- [7] Adem M K, Morris I C, Shin C, *et al.* Efficient sulfide and methane removal in anaerobic secondary effluent using a pilot-scale membrane-aerated biofilm reactor[J]. Chem Eng J, 2024, 486(4): 150066.
- [8] 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.
- [9] 王 杰, 穆永杰, 张丽丽, 等. MABR 工艺处理市政污水生产性验证研究[J/OL]. 环境工程学报, 2025. <https://link.cnki.net/urlid/11.5591.X.20250312.1549.006>.
- [10] 包聿禾, 徐 庶, 杨 婷, 等. MABR 耦合 A<sup>2</sup>O 工艺处理市政污水的效能[J]. 中国给水排水, 2024, 40(21): 15-20.
- [11] 柳蒙蒙, 陈亚松, 陈梅雪, 等. MABR 工艺处理生活污水的中试研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(12): 1-9.
- [12] 柳蒙蒙, 彭梦文, 王殿常, 等. 进水氨氮对 MABR 氧传质特性的影响中试研究[J]. 水处理技术, 2025, 51(12): 10-19.
- [13] Houweling D, Daigger G T. Intensifying activated sludge using media-supported biofilms [M]. Boca

- Raton; CRC Press, 2019; 20.
- [14] Uri-Carreo N, Nielsen P H, Gernaey K V, *et al.* The effects of low oxidation-reduction potential on the performance of full-scale hybrid membrane-aerated biofilm reactors [J]. *Chem Eng J*, 451 (1): 2023, 138917.
- [15] 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.
- [16] 孙广垠, 宋舒兴, 隋倩雯, 等. MABR 强化生物脱氮技术研究与应用进展[J]. *膜科学与技术*, 2022, 42 (6): 178-186.
- [17] 张景炳, 范海涛, 任争光, 等. 污水厂生物处理单元工艺状态下曝气性能测定与评价[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(2):559-565.
- [18] 吴媛媛, 周小红, 施汉昌, 等. 污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 194-197.
- [19] 王邺奇. 无泡膜曝气-好氧接触氧化反应器在生活污水处理中的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.
- [20] 曹蕊. 供气式低压射流曝气器与微孔曝气器性能的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2013.
- [21] 江兴, 魏春海, 袁喆, 等. 膜曝气生物膜反应器处理低碳氮比市政污水的同步除碳脱氮及氧传质效能[J/OL]. *中国环境科学*, 2025. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923>.
- [22] He H, Peng M W, Lu W D, *et al.* Commercial organic fertilizer substitution increases wheat yield by improving soil quality[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 851(1):158132.

## Study on the performance of municipal wastewater treatment by short process based on MABR

*LIU Mengmeng*<sup>1</sup>, *PENG Mengwen*<sup>1</sup>, *WANG Dianchang*<sup>1,2</sup>, *YIN Wei*<sup>1</sup>,  
*ZHU Xiangdong*<sup>2</sup>, *LIU Longzhi*<sup>2</sup>, *ZHOU Xiaoguo*<sup>2</sup>, *CHEN Yasong*<sup>1</sup>

(1. National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River  
Economic Belt, Wuhan 430014, China; 2. Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd.,  
Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In this study, a 100 m<sup>3</sup>/d MABR pilot plant was built. Through the actual municipal sewage treatment, the rationality of process design and system operation effect were explored, and the MABR nitrogen removal contribution, oxygen mass transfer characteristics and correlation with environmental factors were analyzed. The results showed that: MABR could complete microbial film hanging within one month, and the reflux point in the process system was set at the back end of the MABR unit, and the internal and external reflux ratio was maintained at about 100%, which could avoid the dilution of influent ammonia nitrogen, thereby increasing the nitrification rate (NR) of MABR, and enhancing the simultaneous nitrification and denitrification effect of the MABR unit; During operation, the nitrification rate of MABR reached (2.75±1.13) g N/(m<sup>2</sup>·d), and the nitrogen removal contribution of MABR unit accounted for 20.42%±7.97% of the total nitrogen removal amount. oxygen transfer efficiency (OTE) and oxygen transfer rate (OTR) reached 33.36%±10.75% and (10.85±2.88) g O<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·d), respectively. It is proved that MABR has strong oxygen mass transfer property. Under the condition of short biochemical residence time (HRT=10.81 h), the effluent index was better than the Class A standard (TN<10 mg/L) of the local standard of Jiangsu province, “Pollutant Discharge Standard for Urban Sewage Treatment Plants” (DB 32/4440—2022).

**Key words:** membrane aerated biofilm reactor(MABR); simultaneous nitrification and denitrification; municipal wastewater; oxygen mass transfer; short-process nitrogen removal