

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.15.003

侧流水解/两级AO耦合MABR工艺强化脱氮中试

王东¹, 廖静¹, 张伯鸿²

(1. 杭州市水务集团有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381)

摘要: 为打造节能低耗的生物处理工艺,在南方某城市污水处理厂开展了侧流水解/两级AO耦合膜曝气生物膜反应器(MABR)工艺的中试研究,详细分析了生物脱氮效果及MABR工艺性能。结果显示,当MABR供气量为 $4.4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,系统出水总氮浓度可稳定低于 10 mg/L ,平均值在 5 mg/L 以下,MABR区实现了平均约23.9%的脱氮效率,单位膜面积总氮去除负荷和氨氮去除负荷分别为 2.7 和 $2.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,且系统对进水氨氮浓度波动具有较好的缓冲性能。基于氧在膜材料上发生的溶解-扩散过程理论以及MABR反应器特性,提出在工程化应用中应当将反应器置于氮污染物浓度较高的区域,以维持较高的氮污染物去除效率。

关键词: 膜曝气生物膜反应器(MABR); 两级AO; 污水处理; 生物脱氮; 节省能耗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)15-0015-06

Pilot Scale Test of Enhanced Nitrogen Removal by Side-stream Hydrolysis/Two-stage AO Coupled MABR Process

Wang Dong¹, Liao Jing¹, Zhang Bohong²

(1. Hangzhou Water Group Co. Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China)

Abstract: In order to develop an energy-saving and low-consumption biological treatment process, a pilot-scale study on the side-stream hydrolysis/two-stage AO coupled MABR process was carried out in a municipal wastewater treatment plant in a southern city of China. The biological denitrification effect and performance of MABR process were analyzed in detail. The results showed that when the gas supply of MABR was $4.4 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, the total nitrogen concentration in the effluent of the pilot system could remain stable below 10 mg/L , while the average value reached below 5 mg/L . The MABR achieved an average nitrogen removal efficiency of about 23.9%, a unit membrane area total nitrogen removal load of $2.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and a unit membrane area ammonia nitrogen removal load of $2.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. The pilot system demonstrated buffering performance against fluctuations in influent ammonia nitrogen concentration. Based on the dissolution and diffusion process theory of oxygen on membrane materials and the characteristics of MABR reactors, it is proposed that the reactor should be placed in an area with high nitrogen concentration in engineering applications to maintain a high nitrogen removal efficiency.

Keywords: MABR; two-stage AO; wastewater treatment; biological nitrogen removal; energy saving

通信作者: 张伯鸿 E-mail: zhang.bohong@qq.com

节约能耗和药剂,并能够在经受冲击负荷时维持稳定高效的脱氮效率一直是污水处理行业攻坚的重点。好氧池曝气能耗最高可占污水处理用电的65%~75%^[1]。根据一项覆盖全国56.6%污水厂的药剂使用情况的统计调查结果,碳源药剂的平均成本达到0.42元/m³^[2]。

膜曝气生物膜反应器(MABR)作为一种无泡曝气的生物脱氮工艺,与传统活性污泥法相比,具有能耗低、占地面积小等优点,近年来受到越来越多关注,并逐渐在污水处理厂提标改造中被采用^[3]。美国约克维尔布里斯托尔卫生区的污水处理厂将原生物池的一格好氧池改为厌氧池,并在缺氧池安装12台MABR反应器,形成MABR/活性污泥复合工艺。12台MABR反应器能提供约23 040 m²供微生物附着生长的表面积,供气量为8~16 m³/(h·台),供气压力为48 kPa。在整个观察期间,MABR反应器的单位膜面积氨氮硝化负荷约为2.1 g/(m²·d),日均去除氨氮52 kg,占进水氨氮的22%^[4]。该技术在兰州雁儿湾污水处理厂提标改造工程中成功应用,在原AAO生物池基础上实施工期30 d的MABR设备改造,最终实现了出水水质稳定达到一级A标准,同时降低总运行成本约0.103元/m³^[5]。

侧流污泥水解工艺是指在生物池之外通过设置独立单元对部分回流污泥或混合液进行发酵以及特殊功能微生物的培养,将污水中的可慢速降解有机物水解为挥发性脂肪酸(VFAs)并释放磷酸盐,同时提高聚磷菌群多样性,促进*Tetrasphaera*型聚磷菌的繁殖。在水解过程中,一些剩余污泥中的微生物被加速死亡裂解,释放出的胞内有机物被其他微生物种群利用,从而能够在低COD/N条件下减少污泥产量并提高污染物去除效率^[6]。该技术在国内外进水碳源不足的污水厂均有成功应用案例,有效改善了出水水质^[7]。

本中试研究将侧流水解、两级AO与MABR工艺耦合,在发挥各自特点的同时,实现工艺之间的优势互补,为常规生物系统提供更加高效的脱氮除磷解决方案。中试规模为100 m³/d,目的是测试该组合工艺的运行稳定性及对脱氮除磷的强化效果,为改扩建工程工艺设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

中试在某污水处理厂进行,反应器采用碳钢材

质集装箱形式,其流程见图1。生物池总长约13.3 m,宽约1.5 m,设计水深为2.65 m,设计流量为100 m³/d,通过隔板将其分为侧流水解发酵池、厌氧池、MABR、前缺氧池、前好氧池、后缺氧池、后好氧池,后接二沉池,生物池各单元的设计水力停留时间(HRT)分别为1.50、0.95、1.10、1.46、2.46、3.00和2.06 h,总HRT为12.53 h。MABR放置在厌氧池和前缺氧池之间,是为了防止硝化回流液稀释MABR区的氨氮浓度。

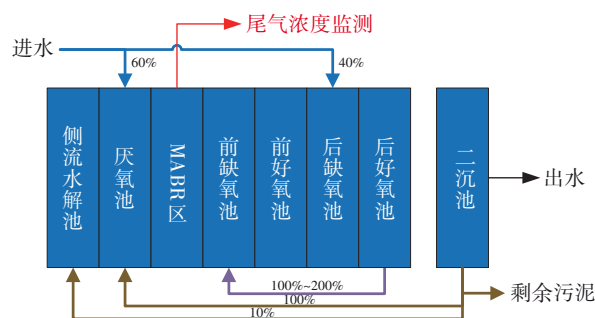


图1 中试装置工艺流程

Fig.1 Process flow of pilot plant

MABR的有效膜面积为180 m²,单位膜面积供气量为3.5~6.8 L/(m²·h),平均供气量为4.4 L/(m²·h),实际供气压力为30~40 kPa。MABR定时通过大气泡进行膜丝间水流搅动和擦洗,频率分别为10 s/120 s和3 min/12 h。除供气管道补漏以外,在运行期间MABR零维护。硝化液从后好氧池末端回流至前缺氧池,回流比为100%~200%;污泥从二沉池回流至厌氧池,回流比为100%;侧流水解污泥来自二沉池,回流比约10%。两级AO的厌氧池和后缺氧池进水比例为6:4。后好氧池设计污泥浓度(MLSS)为3 500 mg/L,泥龄为12.2 d。

1.2 进水水质

2024年5月中试反应器接种现状污水处理厂污泥进行培养,并于6月中旬完成设备调试,至9月底稳定运行3个月。中试反应器进水取自污水处理厂沉砂池出水渠,中试期间污水处理厂进水COD、BOD₅、NH₃-N、TN、TP范围分别为118.00~452.00、46.70~182.00、10.50~44.00、15.40~54.40、1.42~12.40 mg/L,均值分别为232.00、97.54、26.16、33.79、3.87 mg/L。

中试期间进水BOD₅/TN>4的天数占比约为13%,平均碳氮比为2.97;BOD₅/TP>17的天数占比约为87%,平均碳磷比为28.49。预估污水中碳源

能较好地满足生物除磷需求,但对于生物脱氮来说相对匮乏,常规 AAO 工艺生物池需要补充碳源才能够取得比较理想的生物脱氮效果。试验期间,污水处理厂持续投加碳源,也充分说明原水碳源不足。

1.3 仪表与控制

在进水管中设置氨氮电极,在二沉池出水堰前设置出水氨氮、硝态氮电极;在前缺氧池、前好氧池、后好氧池设置 DO 探头;在前好氧池和后好氧池设置 MLSS 探头。水质在线仪表用于反馈反应器运行情况,确保各分隔池溶解氧(DO)处于正常水平,以及活性污泥浓度处于工程常规范围。在厌氧池进水管、后缺氧池进水管、厌氧池外回流管、缺氧池内回流管以及侧流发酵污泥管道上设电动、手动阀门和流量计,用以调节进水及各回流流量。

1.4 分析方法

定期在反应器各单元取水样,静置分离后的上清液经 0.45 μm 滤纸过滤后进行检验,指标包括 COD、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN,分别采用重铬酸盐法、钼酸铵分光光度法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。

2 结果与讨论

2.1 中试反应器出水水质

中试反应器及污水处理厂出水水质对比情况见表 1。

表 1 中试装置及污水处理厂出水水质
Tab.1 Effluent quality of pilot plant and wastewater treatment plant

项目		COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
中试反应器	范围/(mg/L)	8.00~39.00	0.06~0.85	2.40~9.65	0.09~0.65
	均值/(mg/L)	21.07	0.26	4.97	0.30
	去除率/%	84	99	81	88
污水处理厂	范围/(mg/L)	10.00~28.00	0.05~1.31	3.40~8.56	0.04~0.29
	均值/(mg/L)	15.40	0.31	5.86	0.15
	去除率/%	93	99	83	96

在未投加外部碳源的情况下,中试装置对污染物的去除率较高;污水处理厂出水 COD 和 TP 指标优于中试出水,但这是基于污水厂平均碳源(20% NaAc)投加量为 42.50 g/m^3 、平均混凝剂投加量为 75.83 g/m^3 ,且二级处理出水经混凝沉淀、过滤达成

的。受设备条件限制,二沉池的设计水力停留时间显著不足,且存在明显的进出水短流现象,直接削弱了混凝沉淀效果,导致固液分离不彻底。同时,反应器内部存在大量死区,局部淤积的活性污泥发生老化分解,释放出溶解性污染物。上述问题的叠加作用,可能是影响中试出水水质的重要原因。建议后续试验重点优化二沉池水力停留时间、流态分布及污泥排放系统。

2.2 沿程变化分析

在中试稳定运行期间,对反应器各单元进行采样分析,结合内、外回流量,得到沿程 COD、氨氮、TN 的平均浓度(见图 2)。

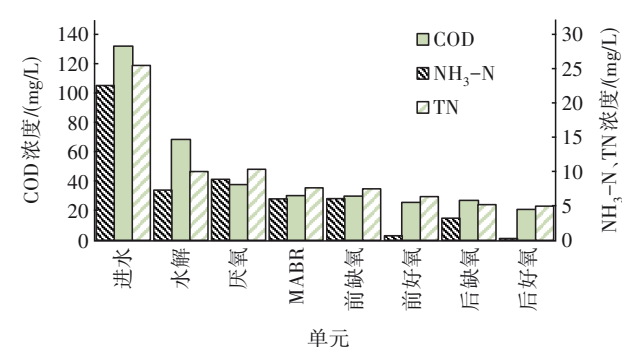


图 2 生物池各单元出水污染物浓度

Fig.2 Concentrations of effluent pollutants along units

结合反应器配套的流量计记录的数据,以各单元污染物变化量占生物池污染物总去除量的比例作为单元去除效率,对水解池、厌氧池、MABR、前缺氧池、前好氧池、后缺氧池、后好氧池共 7 个单元的去除效率进行核算,结果如下:COD 平均去除效率依次为-1%、53%、5%、-4%、5%、34%、8%;氨氮平均去除效率依次为-3%、0%、23%、-13%、53%、4%、35%;TN 平均去除效率依次为-2%、21%、24%、5%、8%、46%、-1%。去除效率为负数,说明该种污染物的总量在该单元出水中比在进水中多。可见,水解池中 COD、氨氮及 TN 增多,虽然增加量仅分别为生物池去除总量的 1%、3% 和 2%,但考虑到水解池流量仅为进水量的 10%,实际上相对于水解池本身进水物质总量,COD、氨氮及 TN 增加量分别可达到 10%、30% 及 20%。这可能是因为侧流水解过程中,储存在微生物细胞内部的 COD 和氨氮重新释放出来^[8]。根据质量平衡分析,在水解池中 COD 及氨氮的释放总量平均值分别为 19 和 2.8 g/h ,释放的氨氮重新参与生物池脱氮循环,按照工程经验中常规

脱氮消耗 COD 比例 $C/N=5$ 来估算,水解过程盈余 5 g/h 碳源,可见设置水解池有利于节约碳源。

在厌氧池 COD 大幅削减,约占 53%,且 TN 去除效率为 21%。这可能是微生物通过裂解聚磷酸盐获取能量,将碳源转化至胞内存储^[9];同时随着污泥外回流的确态氮在厌氧池发生了反硝化反应,消耗了碳源,并减少了总氮。

在 MABR 区 COD 发生了小幅度削减,约占全池削减总量的 5%;氨氮和 TN 明显削减,均达到约 23%,说明氮类污染物在 MABR 区经过硝化-反硝化过程被有效脱除。MABR 区 TN 去除效率约为后缺氧池的 50%,但去除的 COD 仅为后缺氧池的 15%,则 MABR 区去除单位质量 TN 消耗的 COD 相对于后缺氧池的比例为 30%,即 MABR 区发生的脱氮反应相比后段悬浮活性污泥池节省碳源达 70%。

在前缺氧池中观察到 COD、氨氮释放的现象,而总氮被少量去除。这可能是因为反硝化过程消耗了大量的原生碳源,虽然硝态氮被还原去除,但由于缺少碳源,前缺氧池中的一些活性污泥微生物开始分解自身的生物质来获取必需的碳源,从而释放出 COD 和氨氮,而这些 COD 能够被重新用于反硝化过程。这与 Yadegari 等^[10]在 MBR 中观察到的当缺少碳源时缺氧阶段氨氮浓度上升的现象相符。

前好氧池中 COD 发生小幅削减,约占 5%;氨氮得到大幅削减,约占 53%;TN 去除效率约为 8%。这是因为在好氧条件下主要发生硝化反应,氨氮被氧化生成硝态氮;同时一部分氨氮通过微生物的同化作用被去除。

在后缺氧池 COD 和总氮大幅削减,而氨氮只得到小幅去除,这是因为后缺氧池接收后段进水和来自前好氧池的硝化液,主要发生反硝化反应,总氮中大部分的硝态氮被还原为氮气脱除,同时也有少量的氨氮通过微生物同化作用去除。

后好氧池 COD 和氨氮的去除效率分别为 8% 和 35%,总氮浓度基本不变,这是因为在后好氧池中主要发生硝化反应,氨氮被氧化生成硝态氮。

2.3 脱氮效率

中试期间 MABR 单位膜面积氮去除负荷及其去除效率见图 3。氨氮及 TN 去除负荷变化情况基本一致。中试期间,平均总氮去除浓度约为 20.3 mg/L,平均去除负荷为 2.7 g/(m²·d),平均脱氮效率约为 23.9%,最低效率不低于 10%;平均氨氮去除浓

度为 22.0 mg/L,平均去除负荷为 2.8 g/(m²·d),平均去除效率约为 22.9%,最低效率不低于 9%。可以推算出在相同进水水质条件下,在生物池中设置 1.8 m²/m³ 规模的 MABR,能够承担最少 10% 的 TN 或最少 9% 的氨氮去除。

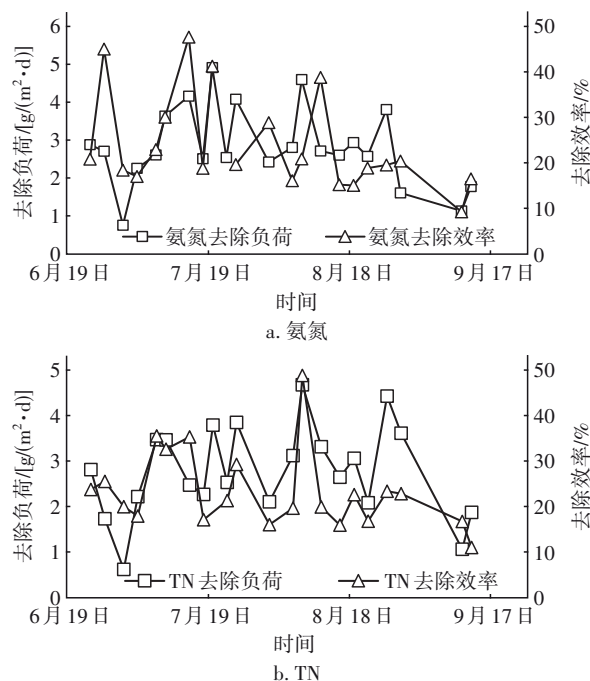


图3 MABR对氨氮和总氮的去除负荷及效率

Fig.3 Removal load and efficiency of ammonia nitrogen and total nitrogen in MABR

利用 MABR 单位膜面积氨氮及总氮去除负荷数据绘制散点图并进行拟合,结果表明,氨氮与总氮的去除负荷相接近($y=0.9956x, R^2=0.939$),由此推断 MABR 中发生了同步硝化反硝化过程。同样,得到 MABR 单位膜面积氨氮去除负荷与进水浓度呈正相关($y=0.2214x+0.9144, R^2=0.334$),即污染物浓度越高, MABR 去除污染物的速率越快。

Yang 等人^[11]总结了 MABR 膜上硝化过程受限的不同情景。MABR 膜上主要发生了氧气和底物氨氮的逆向传质过程,生物膜脱氮过程受到生物膜中硝化菌生物量、氧和底物浓度的影响。①生物量限制:生物膜中的硝化菌已达到了最大的硝化速率,但仍不足以处理全部氨氮,通常发生在 MABR 投入使用的初始挂膜期间,或经受冲击负荷时,但硝化菌数量也会随着底物浓度增加而增加,直到与氧、底物氨氮之间达到新的平衡。②氧限制:供给的氧气不以满足硝化反应,导致氨氮残留,通常发生

在供氧不足或有机物侵入生物膜深处导致异养菌竞争氧气时,这种情况则需要提高膜腔内氧分压。③氨氮限制:底物氨氮不足时,氨氮不足以抵达生物膜中深层的硝化菌富集区,通常发生在膜过厚或膜区域局部配水不均、流道短流或不畅通时,这种现象可以通过控制生物膜厚度解决。④协同限制:氧和底物氨氮同时限制,一般只发生在长时间关闭氧和进水时。由这个扩散模型可知,高水平的氨氮浓度对于保持MABR良好的脱氮效率是必要的。

2.4 MABR耗氧量

衡量曝气效率的常用参数包括氧传质效率(OTE)和氧传质速率(OTR)^[4]。氧传质效率是单位时间内传递到水中的氧气质量占供气量的百分比,反映了微生物降解污染物所需要的曝气能耗;标准氧传质速率是单位时间内通过单位膜面积传递到水中的氧气质量。

MABR的OTE、OTR和供气量情况见图4。根据在2024年5月中旬(设备启动进水初期)至10月中旬期间所采集的100 d数据,平均OTR为10.86 g/(m²·d),除6月底与8月上旬由于设备机械故障造成供气量低于0.6 m³/h的情况,OTR可稳定维持在不小于10 g/(m²·d)的较高水平。由OTR公式^[4]可知,当OTR一定时,OTE与供气量成反比。由图4可以看出氧传质效率与供气量呈负相关,因此降低供气量可以获得更高的氧传质效率。

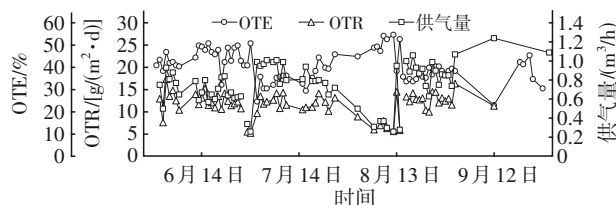


图4 MABR中OTE、OTR和供气量折线图

Fig.4 Line chart of OTE, OTR and gas supply in MABR

分析显示,尾气中的氧含量随氨氮浓度升高而降低($y = -0.0034x + 0.169$, $R^2 = 0.436$),OTE则相反($y = 0.0173x + 0.2346$, $R^2 = 0.437$)。说明氨氮浓度高有利于氧传质效率提升。

MABR区供气量与OTR及OTE的关系见图5。当供气量<0.8 m³/h[约合4.4 L/(m²/h)]时,OTR与供气量呈线性正相关;当供气量>0.8 m³/h时,OTR维持在10~14 g/(m²/d),在此供气量范围内,OTR并未表现出显著上升趋势,系统氧传递效率趋于饱

和。OTE与供气量呈负相关,供气量越大,氧传质效率越低。因此,设置MABR最小供气量为4.4 L/(m²/h)即可将OTR维持在约12 g/(m²/d),以实现最高的氧传质效率,并节约能耗。

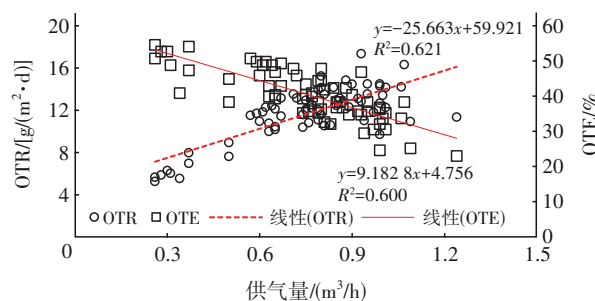


图5 MABR区供气量与OTR及OTE的关系

Fig.5 Scatter diagram of relationship between air supply and OTR, OTE

2.5 曝气能效

传统的污水处理厂曝气形式可分为表面曝气、大孔曝气、微孔曝气,目前在大型污水处理厂中应用最广泛的是微孔曝气。曝气能效是指单位能耗能够供给氧气的质量,本次MABR曝气能效测算参照CJ/T 475—2015标准方法,采用实际污水直接测定,数据较清水测试值更为保守,工程参考价值更高。常见的生物池曝气装置包括机械曝气(横轴曝气机、立轴曝气机)、粗泡曝气器、微泡曝气器,它们的曝气能效水平分别为<2.0、0.8~1.2、2.0~2.5 kg/(kW·h)。在本次中试中MABR的曝气能效平均为5.55 kg/(kW·h),远超传统的曝气形式,在污水处理厂减污降碳发展要求下具有较好的推广前景。

3 结论

① 在不投加除磷药剂和碳源的情况下,侧流水解/两级AO耦合MABR工艺对总氮的去除率达到81%,对氨氮的去除率达到99%,对总磷的去除率达到88%。出水总氮、氨氮浓度分别稳定低于10和1 mg/L,均值分别为4.97和0.26 mg/L。其中,膜装填量为1.8 m²/m³的MABR通过同步硝化反硝化实现了23.9%的脱氮效率。

② 在更高的进水氨氮浓度条件下,MABR的单位膜面积氨氮去除负荷更高,因此提高MABR进水氨氮浓度有利于提高其脱氮效率;MABR反应器平均曝气能效达到5.55 kg/(kW·h),远超常规的机械或微气泡曝气。

③ 中试最佳供气量为4.4 L/(m²/h),此时可

将OTR维持在10~14 g/(m²/d),OTE维持在约40%,在实现较高氧传质效率的同时,节约了供气能耗。

④ 本次中试成功实现将侧流污泥水解与MABR工艺进行耦合运行,验证了该组合工艺在当前进水条件下的可行性。但研究尚存一定局限:未设置控制变量的平行对照试验,暂难以明确各工艺单元的协同作用机制及各自的性能贡献;受中试装置规模和硬件条件限制,反应器内部流场均匀性、设备稳定性及水样采集的代表性存在偏差,部分数据离散度较高,增加了结果分析的不确定性;试验周期仅覆盖单一季节的运行工况,未经历水质水量突变及极端气候条件的考验,工艺抗冲击负荷能力与长期运行可靠性有待验证。后续可通过增设对照试验、优化装置配置、延长运行周期深化机理研究,以提升结论严谨性与工程适用性。

参考文献:

- [1] Jamaludin M, Tsai Y C, Lin H T, et al. Modeling and control strategies for energy management in a wastewater center: a review on aeration [J]. *Energies*, 2024, 17 (13): 3162.
- [2] 田海成,杨红红,焦文海,等. 低碳源污水深度脱氮除磷工艺的经济性分析及优化策略[J]. *净水技术*, 2024, 43(7): 56-62,110.
Tian Haicheng, Yang Honghong, Jiao Wenhai, et al. Economic analysis and optimization strategy of advanced denitrification and dephosphorization for low carbon source wastewater treatment [J]. *Water Purification Technology*, 2024, 43(7): 56-62,110 (in Chinese).
- [3] Li J, Feng M, Zheng S, et al. The membrane aerated biofilm reactor for nitrogen removal of wastewater treatment: principles, performances, and nitrous oxide emissions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 460: 141693.
- [4] Guglielmi G, Coutts D, Houweling D, et al. Full-scale application of MABR technology for upgrading and retrofitting an existing WWTP: performances and process modelling [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2020, 19(10): 1781-1789.
- [5] 张强,李一,夏海霞,等. 兰州雁儿湾污水处理厂原位提标MABR工程应用[J]. *中国给水排水*, 2025, 41 (2):101-104.
Zhang Qiang, Li Yi, Xia Haixia, et al. MABR application for in- situ upgrading of Yanerwan WWTP in Lanzhou[J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(2): 101-104(in Chinese).
- [6] Liu H, Zeng W, Wu L, et al. Integrated process of *Tetrasphaera*-dominated in-situ waste activated sludge fermentation, biological phosphorus removal and endogenous denitrification in single reactor for treatment of wastewater with limited carbon sources[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 412: 131392.
- [7] 宋永莲,李地超,伍昌年,等. 侧流水解酸化工艺强化生物脱氮研究[J]. *水处理技术*, 2021, 47 (12): 99-102.
Song Yonglian, Li Dichao, Wu Changnian, et al. Research on side-stream hydrolysis-acidification process for enhanced biological nitrogen removal [J]. *Technology of Water Treatment*, 2021, 47(12): 99-102 (in Chinese).
- [8] 秦璐,王东琦,李凯龙. 厌氧污泥停留时间对侧流强化生物除磷工艺的影响及机理研究[J]. *环境科学学报*, 2025,45(6):31-42.
Qin Lu, Wang Dongqi, Li Kailong. The effect of sludge retention time during anaerobic stage on the side-stream enhanced biological phosphorus removal process and the underlying mechanisms[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025,45(6): 31-42(in Chinese).
- [9] Dorofeev A G, Nikolaev Y A, Mardanov A V, et al. Role of phosphate-accumulating bacteria in biological phosphorus removal from wastewater [J]. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2020, 56(1): 1-14.
- [10] Yadegari F, Abdollahzadeh Sharghi E, Adl M. Water biological denitrification in batch and anoxic/aerobic-membrane bioreactor operations: carbon-to-nitrogen ratio, nitrate concentration and hydraulic retention time [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2025, 22(12): 11705-11724.
- [11] Yang C, Houweling D, He H, et al. Available online sensors can be used to create fingerprints for MABRs that characterize biofilm limiting conditions and serve as soft sensors[J]. *Water Science & Technology*, 2022, 86 (9):2270-2287.

作者简介:王东(1968—),男,浙江杭州人,大学本科,高级工程师,主要从事城市给排水生产运行及水质保障研究。

E-mail:chzinan@163.com

收稿日期:2026-05-19

修回日期:2026-06-28

(编辑:李德强)