

刘强, 张桑, 张德祥, 等. MBBR+PACT 耦合 AO 工艺在低碳氮比废水脱氮处理中的应用实例[J]. 净水技术, 2026, 45(8): 147-153.

Liu Q, Zhang S, Zhang D X, et al. Application example of MBBR + PACT coupled AO process in nitrogen removal from Low C/N ratio wastewater[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(8): 147-153.

MBBR+PACT 耦合 AO 工艺在低碳氮比废水脱氮处理中的应用实例

刘 强¹, 张 桑¹, 张德祥², 张改新^{1,*}

(1. 山东省环科院环境工程有限公司, 山东济南 250100; 2. 山东省建筑设计研究院有限公司, 山东济南 250001)

摘 要 【目的】针对河北省某市制革工业区水处理中心废水低碳氮比(C/N)特性及北方冬季低温运行难点, 研究复合工艺强化生物脱氮效能, 验证其在低温条件下的运行稳定性。【方法】针对制革废水 BOD₅ 低、TN 高的水质特点, 采用二级生化[移动床生物膜反应器(MBBR)+粉末活性炭工艺(PACT)耦合缺氧-好氧(AO)工艺]-三级深度处理(絮凝沉淀+反硝化深床滤池+臭氧催化氧化)组合工艺, 处理规模为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在二级 AO 工艺生化处理中, 采用 MBBR 悬浮填料强化生物膜形成, PACT 工艺吸附难降解有机物, 提高冬季低温条件下低 C/N 制革废水的生物脱氮稳定运行能力。【结果】根据 2024 年第一季度的运行数据, 经处理后, 出水 COD、氨氮、TP 满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准, 出水 TN $\leq 15 \text{ mg/L}$, 其中, 该水处理中心平均出水 TN 为 12.56 mg/L , 氨氮为 0.49 mg/L , 二级生化段液体复合碳源用量为 80 mg/L 。【结论】该工艺处理出水稳定, 对水质变化、低温气候适应性强, 有效破解低 C/N 工业废水脱氮难题, 碳源利用效率高, 有效降低水厂运行成本, 为同类工业废水处理提供一定的技术参考。

关键词 制革废水; 移动床生物膜反应器+粉末活性炭工艺生物强化处理; 缺氧-好氧工艺; 低碳氮比; 废水脱氮

中图分类号: TU99 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)08-0147-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.08.015

Application Example of MBBR + PACT Coupled AO Process in Nitrogen Removal from Low C/N Ratio Wastewater

Liu Qiang¹, Zhang Shen¹, Zhang Dexiang², Zhang Gaixin^{1,*}

(1. Shandong Huankeyuan Environmental Engineering Co., Ltd., Jinan 250100, China;

2. Shandong Provincial Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Jinan 250001, China)

Abstract [Objective] A composite process is studied to enhance biological nitrogen removal efficiency and verify operational stability under low-temperature conditions, targeting the challenges of low carbon-to-nitrogen ratio wastewater from a tannery industrial zone in Hebei Province and the difficulties of winter operation in northern China. [Methods] To address the characteristics of tannery wastewater with low BOD₅ and high TN, a combined process is adopted, including secondary biochemical treatment [Moving bed biofilm reactor(MBBR) + Powdered activated carbon treatment(PACT) coupled anoxic-oxic(AO) process] and tertiary advanced treatment (coagulation sedimentation + denitrification deep-bed filter + ozone catalytic oxidation), with a treatment capacity of $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$. In the secondary AO process, MBBR suspended carriers are employed to enhance biofilm formation, while the PACT process is utilized to adsorb refractory organic matter, thereby improving the stable operation capability of biological nitrogen removal under low-temperature conditions in winter for tannery wastewater with a low carbon-to-nitrogen ratio. [Results] Based on operational data from the first quarter of 2024, the effluent COD, ammonia nitrogen, and TP met the Class IV standards of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838—2002). The effluent TN was maintained at $\leq 15 \text{ mg/L}$, with an average TN of 12.56 mg/L and ammonia nitrogen of 0.49 mg/L . The dosage of liquid composite carbon sources in the secondary biochemical stage was controlled at 80 mg/L . [Conclusion] The process is demonstrated to achieve stable effluent quality, strong adaptability to water quality

[收稿日期] 2025-04-24

[作者简介] 刘强(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事市政给排水及工业废水处理设计等工作, E-mail: liuqiang211@163.com。

[通信作者] 张改新(1996—), 女, 工程师, 主要从事水处理工程设计等工作, E-mail: 2398736251@qq.com。

fluctuations and low-temperature conditions, and effective resolution of nitrogen removal challenges in industrial wastewater with a low carbon-to-nitrogen ratio. High carbon source utilization efficiency is attained, significantly reducing operational costs. This paper provides technical references for the treatment of similar industrial wastewater.

Keywords tannery wastewater; moving bed biofilm reactor (MBBR) + powdered activated carbon treatment (PACT) bio-enhanced treatment; anoxic-oxic (AO) process; low C/N ratio; wastewater nitrogen removal

移动床生物膜反应器 (MBBR) 是一种高效的生物膜水处理技术,融合了传统活性污泥法和生物膜法的技术优势。该工艺通过向反应器内投加悬浮生物载体,使微生物附着于载体表面形成稳定的生物膜,依托曝气或搅拌使载体在反应器中形成流化状态,进而高效生物降解废水中的有机物、氨氮等污染物。该工艺自 20 世纪 80 年代末于挪威研发问世以来,已广泛应用于市政污水、工业废水处理及存量污水处理厂的提标改造工程^[1-2]。MBBR 可借助悬浮填料的动态传质特性与生物膜微环境调控机制,在反应器内构建局部缺氧-好氧 (AO) 交替环境,促进氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌与反硝化菌的协同代谢作用,在同步硝化反硝化及深度脱氮领域展现出显著技术优势。但低温环境抑制、进水碳源不足及生物膜脱落等问题,仍会制约 MBBR 工艺脱氮性能的稳定性^[3-5]。粉末活性炭工艺 (PACT) 依托“吸附-降解-再生-再吸附”的协同作用机制,通过向活性污泥系统中投加粉末活性炭 (PAC),利用 PAC 的吸附作用和微生物的生物降解作用,有效提升难降解有机物去除效能、优化出水水质^[6]。该工艺可显著解决废水可生化性差的问题,同时可提升废水中氨氮与色度的去除效果,适配复杂水质废水处理场景^[7-8]。但 PACT 工艺在实际应用中存在活性炭吸附饱和后再生效果差、脱氮能力提升有限等问题,难以满足低成本、规模化工程应用需求。

现有研究表明,MBBR 与 PACT 工艺的生物强化协同应用,可使两者优势互补。MBBR 悬浮填料随水流和曝气作用处于流化状态,为功能微生物提供充足附着载体,同时提升微生物种群丰度与群落结构稳定性,体系中投加 PAC 可在氧化池内同步实现物理吸附与生物降解双重作用。一方面,PAC 可吸附去除难降解有机物,削弱制革废水中毒性物质对微生物降解反应的抑制作用,提升系统的抗冲击负荷能力^[9]。另一方面,PAC 作为缓释碳源可补充低 C/N 工况下的反硝化需求,进一步提高生化系统

对 COD 及氨氮的去除效能。MBBR+PACT 生物强化处理,在工业废水及北方低温地区的工程应用中展现出优异的运行稳定性^[10]。

伴随工业化与城市化进程的快速推进,工业废水排放量持续攀升,其中低 C/N 废水的处理难度尤为突出^[11]。该类废水普遍具有有机碳含量低、总氮 (TN) 含量高、可生化性差的特点,广泛存在于制革、焦化等工业生产过程中。传统的生物脱氮存在碳源不足的弊端,处理这类废水时往往需要外加充足的碳源来满足反硝化的需求,常用的碳源有乙酸钠、甲醇、乙醇、乙酸和葡萄糖等,一定程度上增加了污水处理系统的运行能耗与药剂成本^[12],而脱氮效率和运行成本往往是贯穿整个污水处理工艺运营生命周期的两个核心指标^[13-14]。因此,开发适配低 C/N 废水、高效低耗的稳定脱氮工艺,已成为工业废水处理领域亟待解决的工程问题。本文以河北省某市制革工业区水处理中心为工程依托,采用 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理低 C/N 制革废水,系统探究该耦合工艺的污染物去除效能与低温运行稳定性,以为同类工业废水处理工艺的优化运行提供指导性建议。

1 工程概况

1.1 废水来源、规模及水质特点

河北省某市制革工业区水处理中心的水处理总规模为 $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$,其中,制革废水为 $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,市政污水为 $7.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。制革废水主要来源于园区内 30 余家制革企业,包括牛皮/羊皮制革企业、毛革企业等,具有盐度高、有机物总量高、可降解有机物含量低、难降解有机物含量高、氨氮和 TN 含量高等特点,属于典型的低 C/N 工业废水。

1.2 设计进出水水质

该制革工业区制革废水经企业内部预处理后,进入制革工业区水处理中心制革废水深度处理系统进行集中处理,经处理后的出水水质应达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类标准(其中 $\text{TN} \leq 15 \text{ mg/L}$)。设计进出水水质如表 1 所示。

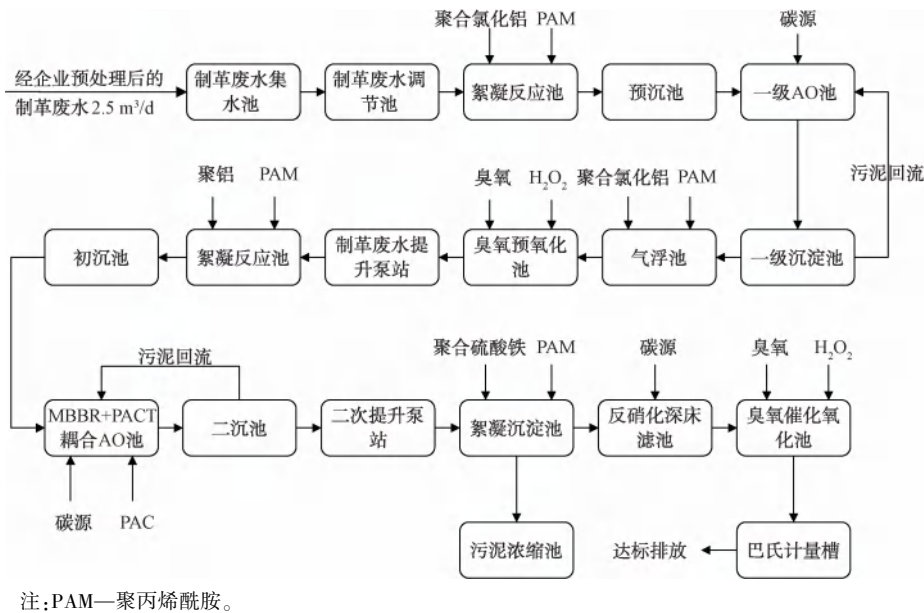
表 1 设计进出水水质
Tab. 1 Design Water Quality of Influent and Effluent

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	pH 值
进水	≤300	≤80	≤70	≤140	≤4	≤120	6~9
出水	≤30	≤6	≤1.5	≤15	≤0.3	≤10	6~9

1.3 工艺流程

为解决制革废水高氨氮、高 TN 且进水水质波动大等问题,水处理中心采用制革废水预处理+一级生化(AO)+二级生化(MBBR+PACT 耦合 AO 工艺)+深度处理系统。制革废水先采用一级生化处理,加强制革废水生化系统的处理能力。经一级生化处理后,制革废水中的有机污染物以难降解有机物为主,为提高制革废水的可生化性,采用臭氧预氧化工艺将废水中难以生物降解的有机物氧

化为小分子有机物,提高后续二级生化工艺处理效率。二级生化处理可进一步高效脱氮除磷,同时大大提高系统的抗冲击负荷能力,有效节约占地面积。二级生化处理后的出水进入反硝化深床滤池,进一步强化脱氮并有效截留和吸附污水中的悬浮物及微生物。臭氧催化氧化池利用臭氧+均相催化剂+光催化氧化工艺强化 COD 处理,确保水质全面稳定达标。水处理中心制革废水处理工艺流程如图 1 所示。



注:PAM—聚丙烯酰胺。

图 1 制革废水处理工艺流程

Fig. 1 Leather Wastewater Treatment Process

2 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺改造及设计

2.1 二级生化处理工艺比选

水处理中心二级生化处理系统原采用“缺氧池+奥贝尔氧化沟”工艺组合。然而,由于现阶段进水为制革废水,与原设计以生活污水为主要处理对象的工况存在较大差异,导致现有处理工艺在脱氮效能及 COD 去除率方面均无法达到设计指标要求。基于此,需对原二级生化处理系统进行技术改造及升级,以实现制革废水中污染物去除效能的有效提升。应用于污水处理的生物处理工艺按照构筑物的组成形式、操作方式的不同,可分为悬浮型活性污泥法、附着

型生物膜法及组合式。悬浮型活性污泥法主要有氧化沟系列、AO 系列、序批式反应器(SBR)系列;附着型生物膜法主要包括曝气生物滤池、生物流化床等;组合式主要包括活性污泥法+悬浮生物填料(即 MBBR)组合工艺。鉴于水处理中心经过一级生化预处理后的制革废水可生化性明显降低,进入二级生化系统后,难以高效发挥生物降解作用,综合考虑占地面积、技术经济可行性等问题,为了进一步强化生物处理功能,提高对溶解性难降解有机物的降解效率,将二级生化系统设置为 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺。该耦合工艺与其他传统工艺的比选分析如表 2 所示。

表 2 工艺比选分析
Tab. 2 Analysis of Processes Comparison

对比指标	悬浮型活性污泥法	附着型生物膜法	MBBR+PACT 耦合 AO 工艺
处理效率	对制革废水适应性差,脱氮效果与 COD 去除率低	易受悬浮物与毒性物质影响,处理效能不稳定	协同处理难降解有机物与含氮污染物,效率显著提升
运行成本	污泥产量高,污泥处置费用高;易出现污泥问题,药剂消耗大	曝气生物滤池反冲洗能耗高;生物流化床流化能耗高	生物量较稳定,综合成本较低
占地面积	原工艺改造需扩建,占地大	需新建构筑物,占地大	可利用现有构筑物,投加填料与活性炭,占地小
污泥特性	污泥易膨胀、流失,处理难度大	生物膜更新控制复杂	污泥产量低,沉降性能好,易于处理

2.2 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺改造及运行参数

MBBR+PACT 耦合 AO 工艺将 MBBR、PACT 技术与传统 AO 工艺有机结合,通过对原有氧化沟进行分区改造实现污染物强化去除,其处理单元平面布置如图 2 所示。其中,外沟改造为缺氧区,中沟及内沟改造为好氧区。为避免 PAC 沉积、匹配 PACT 工艺运行所需的搅拌与推流工况,系统增设了缺氧区搅拌器与好氧区潜水推流器。工艺功能分区明确:外沟缺氧区主要完成废水反硝化脱氮反应,有效水深为 6.1 m,水力停留时间为 7.3 h,复合碳源投加量为 300 mg/L;中沟与内沟好氧区负责硝化反应,实现 COD 与氨氮的高效去除,该区有效水深为 4.4 m,水力停留时间为 14.5 h,中沟 MBBR 填料填充比为 37.6%,PAC 投加质量浓度为 2 000~3 000 mg/L。系统稳定运行工况参数如下:好氧区污泥质量浓度为 3 500~4 500 mg/L,PAC 日均投加的质量浓度为 50~100 mg/L,污泥回流比为 100%,混合液回流比为 100%~200%,污泥负荷为 0.12 kg COD/(kg MLSS·d),总氮负荷为 0.034 kg TN/(kg MLSS·d),气水比为 11.8:1;同时池底铺设总长为 8 145 m 的微孔曝气管,配套 25 mm×10 mm 规格高密度聚

乙烯(HDPE)材质 MBBR 生化填料,有效生物膜面积可达 4.03×10⁶ m²,依托生物降解与活性炭物理吸附协同作用,显著提升制革废水处理效能。

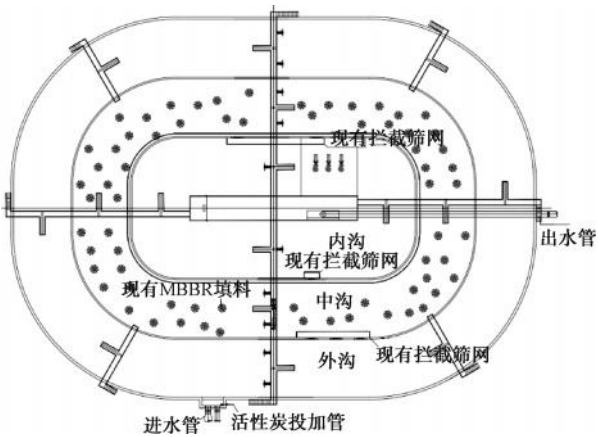


图 2 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元平面布置
Fig. 2 Plan Layout of the MBBR + PACT Coupled AO Treatment Unit

3 工艺运行效果分析

3.1 水处理中心总体运行效果分析

污水处理中心在 2024 年 1 月—2024 年 3 月稳定运行期间总体进出水日均指标如表 3 所示。

表 3 2024 年第一季度月平均进、出水水质
Tab. 3 Monthly Average Influent and Effluent Water Quality in First Quarter of 2024

项目	平均水温/℃		COD/(mg·L ⁻¹)		氨氮/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)		TP/(mg·L ⁻¹)	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
2024 年 1 月	13.8	12.6	140.89	22.96	13.12	0.90	123.09	12.46	0.89	0.17
2024 年 2 月	14.7	13.3	154.46	18.84	8.94	0.85	113.20	12.98	1.61	0.13
2024 年 3 月	15.0	14.6	134.87	27.22	18.29	0.89	125.13	11.37	0.83	0.23
每日平均去除率			83.96%		93.46%		89.82%		84.08%	

如表 3 及图 3~图 6 监测数据分析所示,水处理中心在冬季低温工况下运行稳定性良好,出水 COD、氨氮、TP 可稳定达到地表水Ⅳ类标准,TN 的

质量浓度稳定低于 15 mg/L。本工程处理的制革废水具备典型的低碳高氮、可生化性差的特征:进水 COD 的质量浓度的范围为 104.00~200.33 mg/L,

而进水 TN 日均质量浓度最高可达 160 mg/L,且进水氨氮及 TN 含量波动较大,制革废水可生物降解有机物含量较低也给污染物的生物去除造成较大阻力。由表 3 可知,COD、氨氮、TN、TP 去除率分别为 72.72%~93.11%、80.20%~99.45%、77.39%~93.61%、50.00%~99.27%,系统 TN 平均去除率接近 90%,氨氮平均去除率达到 90%以上,该水处理中心采用的两级生化+深度处理工艺对各类污染物去除效果显著。

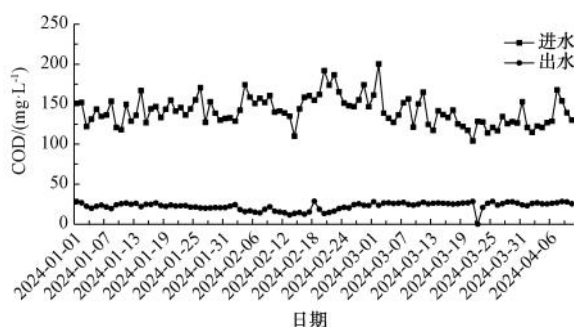


图 3 水处理中心进水和出水的 COD 水质变化特征
Fig. 3 Variation Characteristics of COD in Influent and Effluent of Water Treatment Center

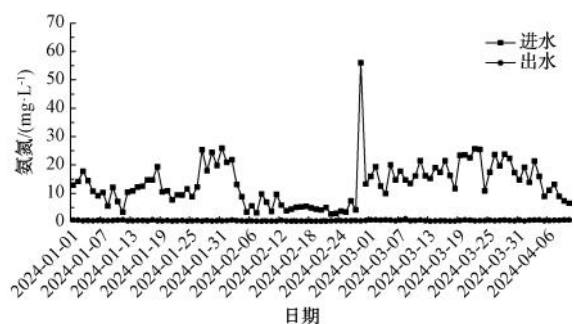


图 4 水处理中心进水和出水的氨氮水质变化特征
Fig. 4 Analysis of Ammonia Nitrogen in Influent and Effluent of Water Treatment Center

3.2 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺脱氮效果分析

在运行期间,每日采集 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元进出水水质数据,分析氨氮及硝酸盐氮的质量浓度指标。以进水氨氮的去除率来评价其硝化能力,结果如图 7 所示。进水氨氮的质量浓度为 0.40~9.46 mg/L,出水氨氮的质量浓度范围为 0.20~3.95 mg/L,氨氮去除率范围为 20.93%~93.69%,平均值为 71.58%,涵盖率为 90%时,氨氮去除率为 77.84%。以进水硝酸盐氮的去除率来评价其反硝化能力,结果如图 8 所示。进水硝酸盐氮

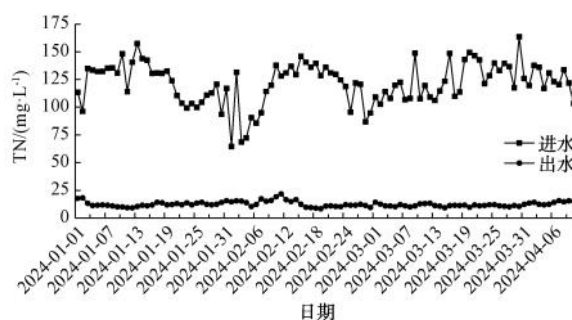


图 5 水处理中心进水和出水的 TN 水质变化特征
Fig. 5 Variation Characteristics of TN in Influent and Effluent of the Water Treatment Center

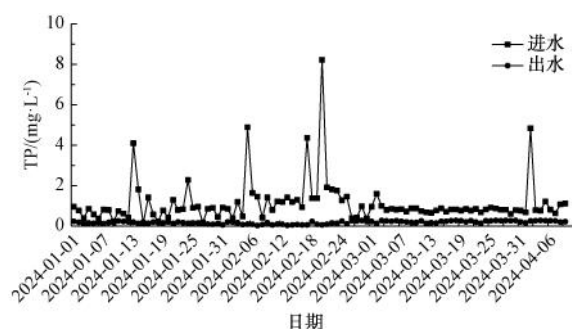


图 6 水处理中心进水和出水的 TP 水质变化特征
Fig. 6 Variation Characteristics of TP in Influent and Effluent of the Water Treatment Center

的质量浓度为 17.50~63.17 mg/L,出水硝酸盐氮的质量浓度为 4~24 mg/L,硝酸盐氮去除率为 46.36%~91.61%,平均值为 77.22%,涵盖率为 90%时,硝酸盐氮去除率为 78.46%。运行数据表明,MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元对低 C/N 制革废水的脱氮效果显著,表现出稳定、高效的硝化、反硝化性能。在硝化阶段,MBBR 悬浮填料为硝化细菌提供大量附着位点,PACT 工艺中 PAC 凭借丰富的孔隙结构,吸附有机污染物与有毒物质,减少对硝化细菌的抑制,二者协同作用提高硝化效率。在反硝化阶段,MBBR 生物膜上的反硝化细菌可充分利用进水中有机碳源及活性炭吸附的有机物作为电子供体。同时,活性炭提供附着位点并缓慢释放碳源,保障反硝化反应持续稳定进行。

由图 9 可知,通过对 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元出水氨氮、硝酸盐氮及 TN 指标进行对比分析,该工艺可将出水 TN 的质量浓度基本稳定控制在 30 mg/L 以下。结果表明,针对低 C/N 制革废水可生化性差、生物脱氮难度大的特点,该耦合工

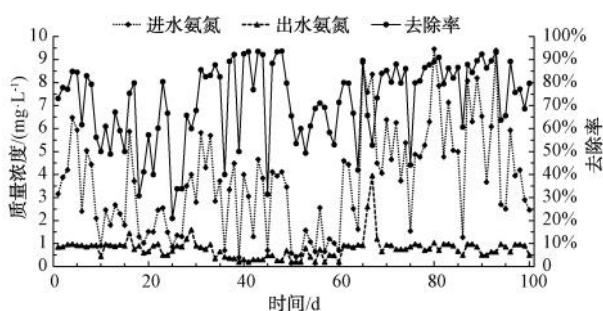


图 7 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元对氨氮的去除效果

Fig. 7 Removal Efficiency of Ammonia Nitrogen by MBBR + PACT Coupled AO Process Treatment Unit

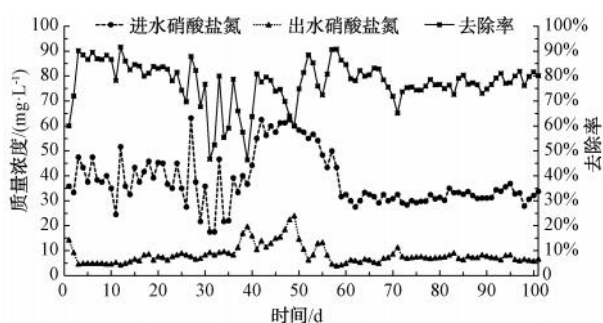


图 8 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元对硝酸盐氮的去除效果

Fig. 8 Removal Efficiency of Nitrate Nitrogen by MBBR + PACT Coupled AO Process Treatment Unit

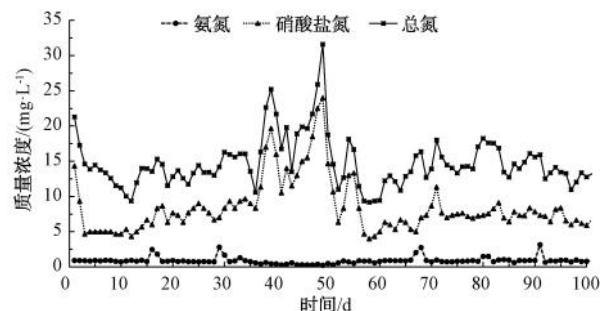


图 9 MBBR+PACT 耦合 AO 工艺处理单元出水氨氮、硝酸盐氮及总氮的数据对比

Fig. 9 Data Comparison of Ammonia Nitrogen, Nitrate Nitrogen and Total Nitrogen in Effluent of MBBR + PACT Coupled AO Treatment Unit

艺脱氮性能良好且稳定,能够有效应对进水水质波动带来的冲击负荷,显著提升了整套制革废水处理系统的运行稳定性与抗冲击能力。

3.3 运行成本

水处理中心制革废水系统直接运行成本约为

4.38 元/ m^3 ,包含电费、药剂费、污泥处置费、其他费用等。其中药剂费主要包含:10%液体 PAC 单价约为 450 元/t,投加的质量浓度为 700 mg/L;PAM 单价约为 8 500 元/t,投加的质量浓度为 3~5 mg/L;聚合硫酸铁单价约为 4 000 元/t,投加的质量浓度为 30~50 mg/L;复合碳源单价约为 1 000 元/t,投加的质量浓度为 80 mg/L;PAC 单价约为 4 500 元/t,日常投加的质量浓度为 30~100 mg/L;双氧水投加的质量浓度为 200 mg/L。

4 结论

(1) MBBR 生物膜可富集高丰度硝化、反硝化菌群,依托填料微环境实现分区脱氮,搭配 PACT 工艺的物理吸附与碳源缓释作用,有效缓解了制革废水碳源不足、有毒物质抑制微生物活性的问题。该工艺适配性强,可充分发挥 MBBR+PACT 生物强化处理能力。

(2) 冬季低温运行工况下,MBBR+PACT 耦合 AO 工艺可实现污染物高效稳定去除,出水 COD、氨氮、TP 可稳定达到地表水Ⅳ类标准,出水 TN 质量浓度稳定控制在 15 mg/L 以内。系统总氮平均去除率接近 90%,氨氮平均去除率达到 90% 以上,能够有效抵御进水水质波动带来的负荷冲击,保障系统长期稳定达标运行。

(3) MBBR+PACT 耦合 AO 工艺可充分依托原有氧化沟构筑物进行提效改造,无需大规模土建扩建,改造成本低、落地性强。在稳定实现高标准出水的前提下,制革废水直接运行成本仅为 4.38 元/ m^3 ,实现了水质达标、运行稳定与经济节能的多重效益统一。

(4) MBBR+PACT 耦合 AO 工艺可有效解决低 C/N 难降解工业废水低温脱氮不稳定、运维成本高等问题,为同类制革及高氮工业废水的提标改造、低温稳定运行、节能降耗及运维优化提供了可靠的工程实践依据与技术参考。

参考文献

- [1] 卢德强,张喜宝,张家鸣,等. MBBR 工艺在城市污水处理厂提标改造中的应用分析[J]. 环境工程, 2023, 41(s1): 23-26.
Lu D Q, Zhang X B, Zhang J M, et al. Application and analysis of MBBR process in the upgrading of urban sewage treatment plant[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(s1): 23-26.
- [2] 谢成浩,钱臻,谭映宇,等. AO-MBBR-磁混凝沉淀-反硝化

- 滤池工艺在污水处理厂提标扩容中的应用[J]. 给水排水, 2024, 60(s1): 29-32.
- Xie C H, Qian C, Tan Y Y, et al. Application of AO-MBBR-magnetic coagulation sedimentation process in upgrading and expansion of WWTP [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 60(s1): 29-32.
- [3] 张麒麟, 杜昊, 王新平. 改良 AAO-MBBR 工艺在污水处理厂原位提标改造中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 163-169.
- Zhang Q L, Du H, Wang X P. Application case of modified AAO-MBBR processes in in-situ upgrading and reconstruction of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 163-169.
- [4] 申世峰, 郭兴芳, 孙永利, 等. 基于悬浮填料强化脱氮的污水处理厂总氮提标措施研究[J]. 给水排水, 2022, 58(S1): 674-678, 686.
- Shen S F, Guo X F, Sun Y L, et al. Research on total nitrogen raising measures of a wastewater treatment plant based on enhanced denitrification by suspended carrier [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(S1): 674-678, 686.
- [5] Xing X, Yuan X, Zhang Y, et al. Enhanced denitrification of the AO-MBBR system used for expressway service area sewage treatment: A new perspective on decentralized wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118763.
- [6] 李稳, 代锋, 曹艺, 等. PACT+芬顿氧化工艺在苏南印染废水处理中的应用实例[J]. 给水排水, 2024, 60(12): 79-83.
- Li W, Dai F, Cao Y, et al. Application of PACT + Fenton oxidation process in the treatment of printing and dyeing wastewater in Southern Jiangsu Province [J]. Water & Wastewater Engineering, 2024, 60(12): 79-83.
- [7] 张俊杰, 宋宜嘉, 王忠敏, 等. PACT 工艺在福建省某污水处理厂提标改造工程中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 143-149.
- Zhang J J, Song Y J, Wang Z M, et al. Application of PACT process of upgrading and reconstruction project in a WWTP in Fujian Province [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 143-149.
- [8] 宋伟, 周桢, 高永. 混凝气浮+水解+缺氧+ PACT+MBR 组合工艺处理印染废水的工程实践研究[J]. 山东化工, 2021, 50(8): 269-271.
- Song W, Zhou Z, Gao Y. Engineering practice research on printing and dyeing wastewater treatment by combined process of coagulation floatation + hydrolysis + anoxia + PACT + MBR [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(8): 269-271.
- [9] 唐霞, 李江鹏, 申云, 等. 基于 A²O-MBBR 工艺的污水厂提标改造中试研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11): 52-57.
- Tang X, Li J P, Shen Y, et al. A pilot test on upgrading and reconstruction of municipal wastewater treatment plant based on A²O-MBBR process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(11): 52-57.
- [10] 王翠, 章北平, 杨高华, 等. 碳氮比对 A-O-N 工艺脱氮效果的影响[J]. 工业用水与废水, 2008, 39(4): 32-35.
- Wang C, Zhang B P, Yang G H, et al. Influence of C/N ratio on nitrogen removal by A-O-N process [J]. Industrial Water & Wastewater, 2008, 39(4): 32-35.
- [11] 鲍任兵, 高廷杨, 宫玲, 等. 污水生物脱氮除磷工艺优化技术综述[J]. 净水技术, 2021, 40(9): 14-20.
- Bao R B, Gao T Y, Gong L, et al. Review of process optimization of biological denitrification and phosphorus removal in wastewater treatment [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(9): 14-20.
- [12] Cao J S, Yang E, Xu C Z, et al. Model-based strategy for nitrogen removal enhancement in full-scale wastewater treatment plants by GPS-X integrated with response surface methodology [J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144851. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144851.
- [13] 司文曦, 李辰, 马庆. 污水处理厂强化生物脱氮措施探析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(16): 21-25.
- Si W X, Li C, Ma Q. Discussion and analysis of enhanced biological denitrification measures in wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(16): 21-25.
- [14] 刘增军, 张开海, 孙序营, 等. 多级 AO 用于高排放标准下低碳高氮生活污水处理[J]. 中国给水排水, 2024, 40(2): 55-56, 57-59.
- Liu Z J, Zhang K H, Sun X Y, et al. Application of multi-stage AO in the treatment of low carbon and high nitrogen domestic sewage with high discharge standard [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(2): 55-56, 57-59.