

A²/O与A²/O + MBR工艺在新疆某污水厂中的运行效能对比

张宇萌¹, 楼强^{2*}, 吴一平², 汪海洋¹, 王维红¹

¹新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐

²新疆昆仑新水源河西水务有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年12月24日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月23日

摘要

A²/O + MBR工艺为A²/O工艺与MBR工艺的串联组合, 利用了MBR膜池代替A²/O工艺中的二沉池, 使其具有更小的占地面积和更加优质、稳定的出水水质保障。为了探究传统A²/O工艺及A²/O + MBR工艺在城镇污水处理中的应用效能, 在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下, 比较分析了两种工艺在连续31 d中对污染物的降解效能。结果表明: A²/O + MBR工艺在处理城镇生活污水的效果上优于传统A²/O工艺, 且抗冲击负荷能力更强, 是更具优势的成熟工艺。A²/O工艺、A²/O + MBR工艺的平均处理成本分别为0.4702元/m³、0.6354元/m³, 传统A²/O工艺运行成本比A²/O + MBR工艺低0.1652元/m³, 相较之下更具经济性。

关键词

A²/O + MBR工艺, A²/O工艺, 城镇污水处理, 混合液污泥浓度, 有机物去除率

Comparison of Operational Efficiency between A²/O and A²/O + MBR Processes in a Wastewater Treatment Plant in Xinjiang

Yumeng Zhang¹, Qiang Lou^{2*}, Yiping Wu², Haiyang Wang¹, Weihong Wang¹

¹College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Kunlun New Water Hexi Water Co. Ltd., Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 24th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 张宇萌, 楼强, 吴一平, 汪海洋, 王维红. A²/O 与 A²/O + MBR 工艺在新疆某污水厂中的运行效能对比[J]. 水污染及处理, 2025, 13(1): 1-8. DOI: 10.12677/wpt.2025.131001

Abstract

The A²/O + MBR process is a series combination of A²/O process and MBR process. The MBR membrane tank is used to replace the secondary sedimentation tank in the A²/O process, so that it has a smaller floor area and better quality and stable effluent quality assurance. In order to explore the application efficiency of traditional A²/O process and A²/O + MBR process in urban sewage treatment, the degradation efficiency of pollutants by the two processes in 31 days was compared and analyzed under the condition of uniform distribution of water in the same season and at the same time. The results show that the A²/O + MBR process is superior to the traditional A²/O process in the treatment of urban domestic sewage, and the impact load resistance is stronger, which is a more advantageous mature process. The average treatment costs of the A²/O process and the A²/O + MBR process are 0.4702 yuan/m³ and 0.6354 yuan/m³, respectively. The operating cost of the traditional A²/O process is 0.1652 yuan/m³ lower than that of the A²/O + MBR process, which is more economical.

Keywords

A²/O + MBR Process, A²/O Process, Urban Sewage Treatment, Mixed Liquid Sludge Concentration, Organic Removal Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2015 年, 国务院颁布了《水污染防治行动计划》, 以改善水环境质量为核心, 系统推进水污染防治、水生态保护和水资源管理。因此, 国内的大多污水处理厂陆续开始进行污水厂的提标改造和扩建工程。传统的 A²O 技术, 作为生物处理领域的一种优化手段, 巧妙地融入了前置反硝化池与厌氧池等多个功能单元, 从而实现了污水中氮磷等营养元素的显著去除, 有效缓解了水体富营养化的严峻挑战[1]。而耦合了传统活性污泥法和膜过滤技术的膜生物反应器(简称 MBR)由于其出水水质稳定优良且占地面积小等优势而被作为提标改造工程的首选工艺[2] [3]。本文以新疆乌鲁木齐市某城镇污水厂内的两座生物池为研究对象, 分析了在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下传统 A²/O 工艺和 A²/O + MBR 工艺对城镇生活污水污染物的去除效能。

2. 工程概况

Table 1. Design influent water quality and emission standards

表 1. 设计进水和出水标准

项目	COD/(mg·L ⁻¹)	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	ρ /(mg·L ⁻¹)			
			NH ₃ -N	TN	TP	SS
设计进水	≤620	≤280	≤55	≤65	≤7	≤350
一级 A 标准	≤50	≤10	≤5	≤15	≤0.5	≤10

新疆某城镇污水处理厂位于新疆乌鲁木齐市, 总设计处理规模为 20 万 m³/d, 由一期工程使用的传统

A²/O 工艺和二期提标改造工程使用的 A²/O + MBR 工艺并联组成，出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级 A 排放标准限值要求。两种工艺的工程设计进水水质、出水标准及 2023 年月平均进水数值均相同且见表 1。

3. 工艺流程及主要构筑物

3.1. 工艺流程

传统 A²/O 工艺和 A²/O + MBR 工艺的工艺流程如图 1 和图 2 所示。

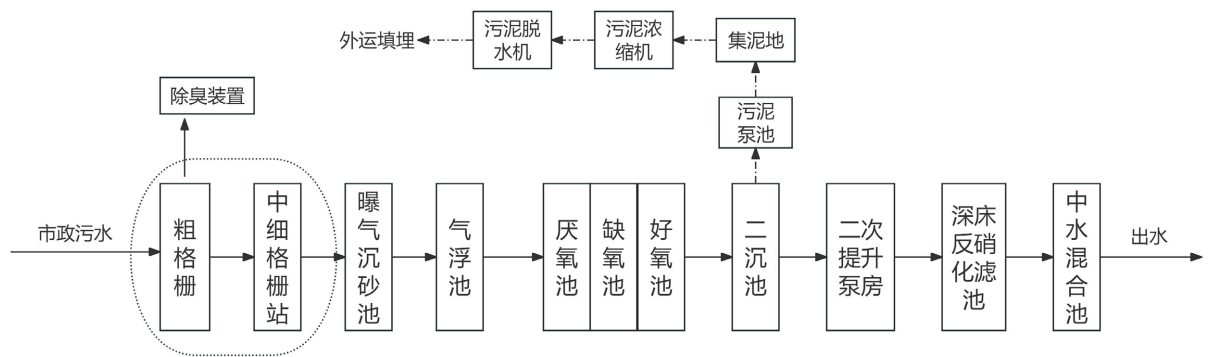


Figure 1. Flow chart of traditional A²/O process
图 1. 传统 A²/O 工艺流程

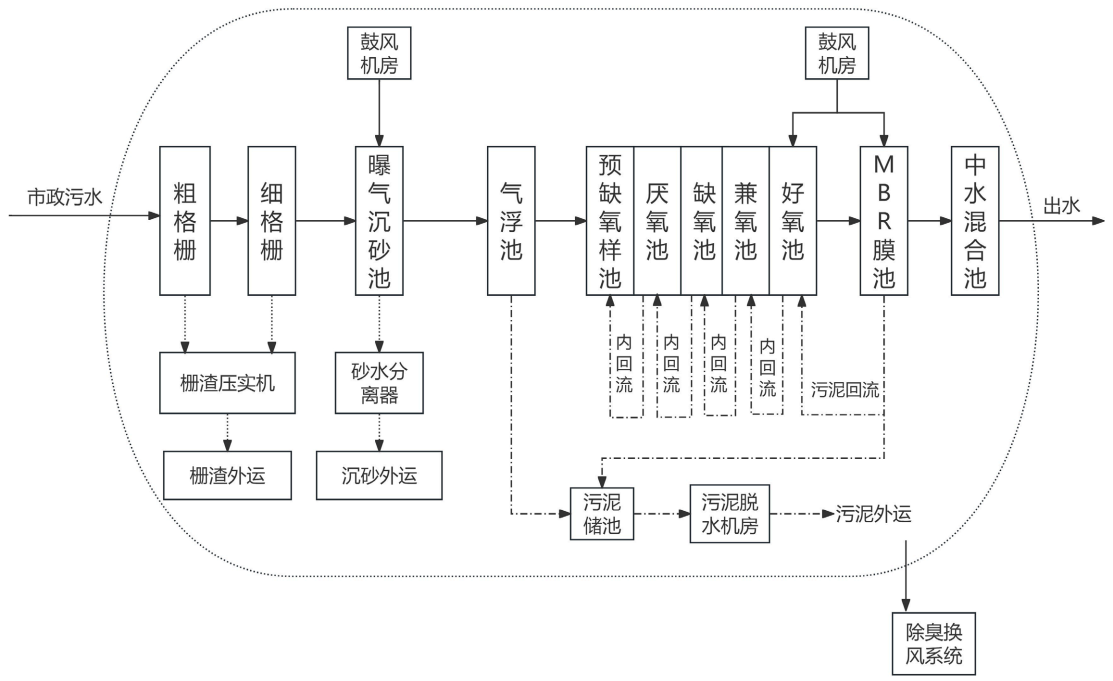


Figure 2. Flow chart of A²/O + MBR process
图 2. A²/O + MBR 工艺流程

3.2. MBR 膜池

膜生物反应器(MBR)是以膜组件、膜组器为核心的集成技术系统[4]。MBR 膜池利用膜所具有的高效

截留能力对传统 A²/O 工艺出水水质进一步提高,同时起到调配污泥的作用。同时,MBR 工艺替代了传统 A²/O 工艺中的二沉池和深床硝化滤池于一体,使得其具有更小的占地面积。

该污水处理厂使用的膜组器是碧水源生产的 MBRU 系列,其膜组件型号为 RF-III-1-A,型式为帘式,中空纤维膜材质为增强聚偏氟乙烯(PVDF),平均设计通量为 15~25 LMH,膜丝内径和外径分别为 0.95 mm 和 1.9 mm,其他性能参数见表 2。

Table 2. Performance parameter of enhanced (RF) membrane module
表 2. 增强型(RF)膜组件性能参数

平均膜孔径 (μm)	膜面积 (m ² /片)	有效长度 (mm)	最大跨膜压差 (MPa)	极限跨膜压差 (MPa)	最大耐受 pH 值范围	推荐工作 pH 值范围
0.3	35	1850	0.035	0.08	2~12	6~9

4. 运行分析

4.1. 研究方法

污水处理厂的每座生物池日处理能力为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,本次对比实验选用 A 和 M 系列两座生物池。A 系列生物池采用传统 A²/O 工艺,生化系统的功能分区依次为厌氧区、缺氧区、好氧区;M 系列生物池采用 A²/O + MBR 工艺,生化系统的功能分区依次为预厌氧区、厌氧区、缺氧区、兼氧区、好氧区、MBR 膜池区。实验期间,两个系列在相同运行条件下运行。

根据实验需要选取工艺沿程各阶段的进、出水在线监测数据,分别对比分析该污水厂好氧池和膜池的活性污泥浓度和 A、M 系列对各污染物指标的去除率。

4.2. 运行参数

参与对比的两组生物池平均 MLSS 浓度介于 4000~6000 mg/L,MBR 膜池由于其高效的截留作用导致其 MLSS 浓度较高,平均浓度介于 8000~11000 mg/L。传统 A²/O 工艺各段停留时间为:厌氧区 1.5 h,缺氧区 8.25 h,好氧区 16.5 h,共计停留 26.25 h;A²/O + MBR 工艺各段停留时间为:预缺氧区 0.65 h,厌氧区 1.30 h,缺氧区 3.92 h,兼氧区 1.96 h,好氧区 5.62 h,共计停留 13.45 h。

4.3. 活性污泥系统分析

污泥浓度(MLSS)与污泥龄(SRT)密切相关[5],而 SRT 则决定了活性污泥中微生物的种类,SRT 过高会使得活性污泥变成惰性污泥,一方面会降低脱氮除磷的效果,另一方面会过多消耗生物池的溶解氧[6],这对整个生物处理系统中的脱氮除磷效能有着极大的影响。SRT 的常用计算公式为:

$$\text{SRT} = \text{MLSS} \times \text{曝气池有效容积} / (24 \times \text{每小时排泥体积} \times \text{排泥浓度}) \quad [7] \quad (1)$$

式中:MLSS × 曝气池有效容积为总泥量;24 × 每小时排泥体积 × 排泥浓度为日排泥量。

从式(1)中可以得出,在当日排泥量不变的条件下,MLSS 和 SRT 呈线性正相关。因此在实际污水厂运行管理中,比起计算 SRT,直接使用 MLSS 这一指标更为简便直观。

对 A 和 M 系列的好氧池和 MBR 膜池内的 MLSS 浓度进行了 31 d 重复监测,结果见图 3。传统 A²/O 工艺的好氧池内 MLSS 平均浓度为 4640.81 mg/L,A²/O + MBR 工艺的膜池内 MLSS 平均浓度为 8206.32 mg/L。在相同进水条件下,传统 A²/O 工艺中的好氧池污泥浓度要远低于 MBR 膜池中的污泥浓度。这是由于 MBR 中膜的高效截滤功能,使得 MBR 膜池中污泥浓度得以富集,有效地提高了有机物的容积负荷,降低了污泥负荷,从而极大程度上提高处理效果。

有研究表明适当地提高 MLSS 对 TN 的去除效果有明显的提升[8],这是因为高 MLSS 伴随着长泥龄,使得世代时间长的自养硝化菌更丰富,硝化效果更好, TN 去除效果提升。因此具有高 MLSS 的 MBR 能够取得更好的硝化效果。而对于传统 A²/O 工艺来说,在 SVI 值一定时, MLSS 越高污泥沉降比就越大,直到污泥无法在二沉池中沉淀,随着水流流出从而影响出水水质[9]。因此在传统 A²/O 工艺运行中需要严格优化、控制 MLSS,否则可能会影响二沉池沉淀效果,出现水质不达标的现象。

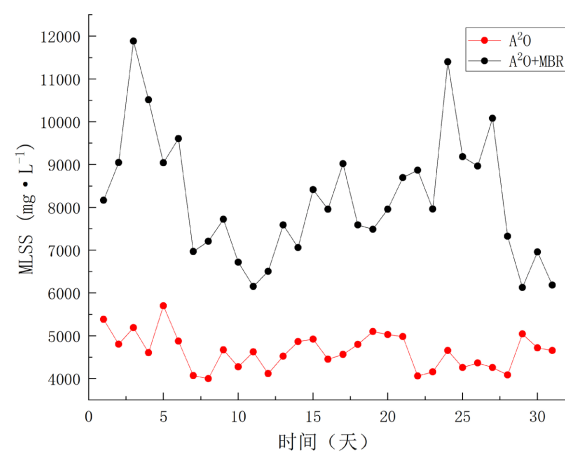


Figure 3. MLSS of the two processes
图 3. 两种工艺的 MLSS

4.4. 污染物去除效果分析

4.4.1. COD 去除效果

针对 A 系列与 M 系列的厌氧池进水以及生物池出水,进行了为期 31 天的连续 COD 指标监测,去除率结果见图 4。

传统 A²/O 工艺对 COD 去除率均值为 96.16%, A²/O + MBR 工艺的去除率均值为 96.77%。结果表明,在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下, A²/O + MBR 工艺对 COD 的去除效果优于传统 A²/O 工艺。这是由于 MBR 工艺中使用的膜滤技术可以使得污水中的微生物长时间停留在反应器内,不易受到外界负荷波动的影响。

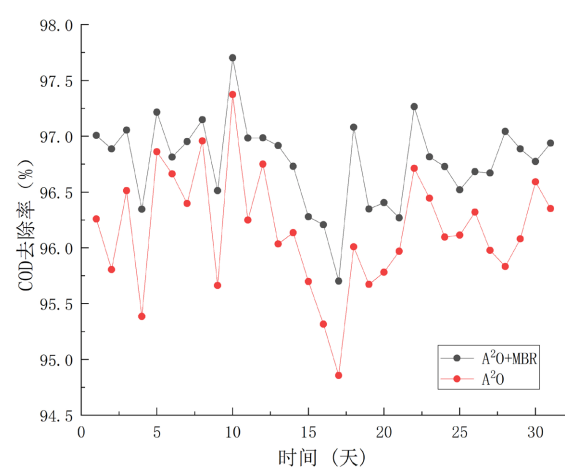


Figure 4. Analysis of COD removal effect
图 4. COD 去除效果分析

4.4.2. $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果

针对 A 系列与 M 系列的厌氧池进水以及生物池出水,进行了为期 31 天的连续 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标监测,去除率结果见图 5。

传统 A^2/O 工艺对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率均值为 97.62%, $\text{A}^2/\text{O} + \text{MBR}$ 工艺的去除率均值为 99.04%。结果表明,在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下, $\text{A}^2/\text{O} + \text{MBR}$ 工艺对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果优于传统 A^2/O 工艺。这可能与前文提到的具有高 MLSS 的 MBR 膜池的泥龄更长,含有更高浓度的反硝化细菌,有利于硝态氮的降解,使得脱氮效果更佳。同时因为 $\text{A}^2/\text{O} + \text{MBR}$ 工艺中 MBR 系统中的膜过滤功能实现了对微生物的截留,完成对 HRT 和 SRT 的分离,延长了 SRT,更加有利于污泥龄较长的硝化菌生长和富集,实现对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的有效去除[10]。

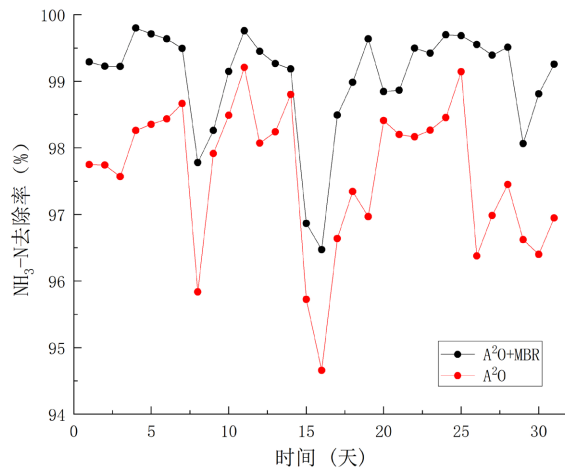


Figure 5. Analysis of $\text{NH}_3\text{-N}$ removal effect
图 5. $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除效果分析

4.4.3. TN 去除效果

针对 A 系列与 M 系列的厌氧池进水以及生物池出水,进行了为期 31 天的连续 TN 指标监测,去除率结果见图 6。

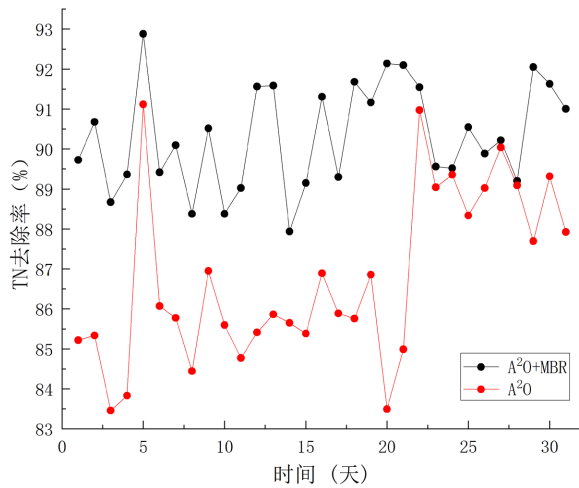


Figure 6. Analysis of TN removal effect
图 6. TN 去除效果分析

传统 A²/O 工艺对 TN 去除率均值为 86.76%，A²/O + MBR 工艺的去除率均值为 90.33%。结果表明，在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下，A²/O + MBR 工艺对 TN 的去除效果优于传统 A²/O 工艺。这可能是由于 MBR 膜池中的高浓度 MLSS 带来的优势。同时，A²/O + MBR 工艺采用膜区至好氧区首端、好氧区出水至缺氧区首端、缺氧区出水至厌氧区首端的三级回流方式。这种回流方式避免了污泥外回流中溶解氧过高而影响厌氧区释磷效果的问题，从而优化了脱氮除磷的过程。

4.4.4. TP 去除效果

针对 A 系列与 M 系列的厌氧池进水以及生物池出水，进行了为期 31 天的连续 TP 指标监测，去除率结果见图 7。

传统 A²/O 工艺对 TP 去除率均值为 94.63%，A²/O + MBR 工艺的去除率均值为 98.62%。结果表明，在同季节、同时段、进水均匀分配的条件下，A²/O + MBR 工艺对 TP 的去除效果优于传统 A²/O 工艺。

传统工艺生活污水生物除磷是由于聚磷菌在厌氧条件下释放磷，在好氧条件下过度吸磷，并通过排出部分含磷污泥以此完成除磷的过程。相比之下，A²/O 工艺污泥的沉降性能的好坏和变化依赖性更大，而 A²/O + MBR 工艺由于其所具有的膜过滤功能使得含磷污泥被截留在膜池中，更加有利于降低出水中的磷含量，强化 TP 的去除效果，平抑污泥变化带来的出水水质波动，从而弥补 A²/O 工艺的不足，故在除磷方面 MBR 更具有优势。

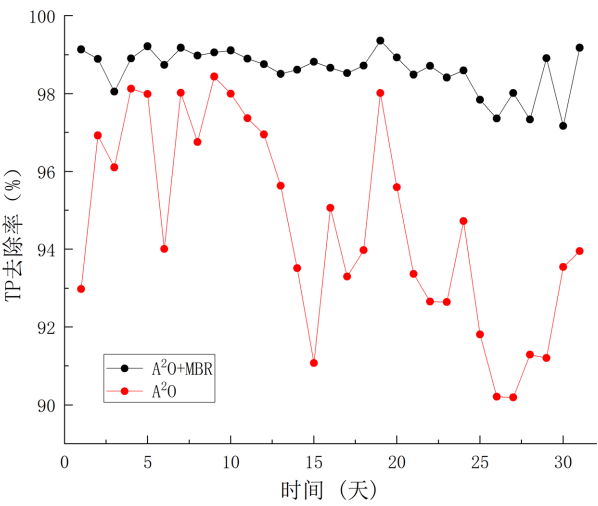


Figure 7. Analysis of TP removal effect
图 7. TP 去除效果分析

5. 经济分析

Table 3. Operating costs of A²O and A²O + MBR processes

表 3. 传统 A²O、A²O + MBR 工艺运行成本

项目(元/m ³)	传统 A ² /O 工艺	A ² /O + MBR 工艺
电耗	0.0968	0.2992
污泥处置	0.1948	0.1996
药耗	0.1786	0.1366
平均处理成本	0.4702	0.6354

传统 A²/O 工艺的工程总投资 2.7 亿元, A²/O + MBR 工艺的工程总投资 7.8 亿元。如表 3 所示, 两种工艺的运营成本主要包括电耗、药耗及污泥处置三部分。传统 A²/O 工艺的平均处理成本为 0.4702 元/m³, 电耗、污泥处置及药耗分别占总处理成本的 20.59%、41.42%、37.99%; A²/O + MBR 工艺的平均处理成本为 0.6354 元/m³, 电耗、污泥处置及药耗分别占总处理成本的 47.09%、31.41%、21.5%。传统 A²/O 工艺的投资较少且运行成本比 A²/O + MBR 工艺低 0.1652 元/m³, 相较之下更具经济性。

6. 结论

在相同季节的运行环境下, 相较于传统的 A²/O 工艺, A²/O + MBR 工艺在处理污水时, 对 COD、TN、TP 及 NH₃-N 的去除效果呈现出更为优越的整体趋势。

(1) 对活性污泥浓度分析结果可得, 传统 A²/O 工艺的 MLSS 不宜过高, 否则会影响二沉池沉降性能进而影响出水水质。然而由于膜的高效截留作用, 可以使得 MBR 膜池中保持较高的 MLSS, 故而能够增强系统对水质波动与水量变化的适应弹性, 同时也能够显著提升其抵御冲击负荷的能力。

(2) 通过经济分析可知, 传统 A²/O 和 A²/O + MBR 工艺的平均处理成本分别为 0.4702 元/m³、0.6354 元/m³, 综合比较而言传统 A²/O 工艺更具经济性。相较 A²/O + MBR 工艺, 传统 A²/O 工艺在药耗方面所占成本较高, 后续厂区可进一步优化相关运行工艺参数及药耗投加; 而 A²/O + MBR 工艺中电耗较大, 后续厂区可针对节能降耗进行工作展开。

(3) A²/O + MBR 技术融合了 A²/O 的生物脱氮除磷效能与 MBR 的膜过滤优势, 能够显著提升污水中有机物、氮、磷等污染物的去除效率, 确保出水水质满足更高标准。其出水中的悬浮物与浊度极低, 几乎为零, 超越了传统沉淀池的分离效能, 为接纳水体提供了更为优质的水质保护, 有效降低了水体富营养化等环境隐患。该工艺的应用对城市水环境的改善、水资源利用率的提升以及环境污染与破坏的减少具有积极作用, 进而促进了城市的可持续发展进程。它不仅与现行的环保政策相契合, 也预示着未来城市发展的必然趋势。

基金项目

国家自然科学基金项目: 基于好氧颗粒污泥系统的粒径与关联因素响应机制的高效调控体系构建 (51968071)。

参考文献

- [1] 田海成, 杨红红, 焦文海, 等. AAO + MBR 组合工艺各工段设计要点[J]. 中国给水排水, 2023, 39(6): 71-77.
- [2] 李社锋, 张家琛, 冯巍, 等. 膜生物反应器研究新进展与应用[J]. 环境工程, 2024, 42(1): 37-46.
- [3] 王志伟. 膜法污水处理技术的绿色低碳化发展思考[J]. 给水排水, 2022, 58(7): 1-10.
- [4] Meng, F., Zhang, S., Oh, Y., Zhou, Z., Shin, H. and Chae, S. (2017) Fouling in Membrane Bioreactors: An Updated Review. *Water Research*, **114**, 151-180. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>
- [5] 刘瑾, 高廷耀. 城市污水生物除磷脱氮的机理及工艺研究[J]. 给水排水, 1995(11): 47.
- [6] 范艳明. 污泥停留时间对除磷菌种群结构的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2015.
- [7] 赵晓娟, 张智瑞, 刘东洋, 等. A²O 工艺活性污泥黏性膨胀原因及控制措施[J]. 工业水处理, 2024, 44(4): 198-204.
- [8] 胡小兵, 韦京云, 林睿, 等. 营养失衡下的分层分质 EPS 对异型膨胀污泥及其沉降性差异影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5110-5118.
- [9] 王少坡, 于静洁, 吕建波, 等. 活性污泥法中污泥龄应用问题探讨[J]. 给水排水, 2009, 45(S2): 118-122.
- [10] 许忠凤, 戴海平, 孙磊, 等. 多级 A/O-MBR 工艺对生活污水脱氮除磷的工艺研究[J]. 水处理技术, 2019, 45(11): 117-121, 126.