

颜欣, 易娟, 安娜, 等. 城市污水处理厂 MBR 工艺膜寿命预测方法[J]. 净水技术, 2026, 45(4): 89-95.

Yan X, Yi J, An N, et al. Lifespan prediction methodology of MBR membranes in urban WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(4): 89-95.

## 城市污水处理厂 MBR 工艺膜寿命预测方法

颜欣, 易娟, 安娜\*, 张智通, 肖维贵, 安乐, 王巍巍

(深圳市水务<集团>有限公司, 广东深圳 518100)

**摘要** 【目的】 本文致力于突破膜生物反应器(MBR)膜寿命预测领域的技术瓶颈,即针对缺乏多维耦合的寿命评价指标体系及难以精准量化膜污染与膜性能衰减协同作用机制,构建科学的寿命预测方法体系。【方法】 建立以比通量为膜性能衰减和寿命评价的核心指标,跨膜压差实时表征膜污染动态,累计产水量界定机械极限的三级指标体系。基于“理化性能衰减-功能极限判定-维护干预影响”的全生命周期理论框架,本文构建了集成比通量衰减法、累计产水量分析及化学清洗强度评估法的寿命预测方法体系。基于机器学习算法动态解析运行数据与膜污染的关联机制,开发膜寿命在线评估模型,指导 MBR 工艺智能运维。【结果】 基于 A 污水厂 6 年期运行数据集的验证,此模型在膜污染量化、异常工况识别及工艺参数优化等方面表现优异,7#、10#、16#膜组预测寿命稳定在 8.5 年,较制造商标称寿命(8 年)提高 6.25%,较人工预测均值(7 年)提高约 21.43%。【结论】 本文构建的“指标体系-方法集成-模型开发”三位一体框架,实现了膜性能衰减、污染量化等多维度耦合分析,所提出的预测方法兼具可行性和鲁棒性。模型的应用可辅助优化膜组件更换周期及化学清洗策略,显著提升膜组的使用效率,降低运维成本,具有一定的工程应用价值。

**关键词** 膜生物反应器(MBR)膜系统 膜寿命 预测方法 评价指标 在线评估模型

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)04-0089-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.04.010

## Lifespan Prediction Methodology of MBR Membranes in Urban WWTPs

Yan Xin, Yi Juan, An Na\*, Zhang Zhitong, Xiao Weigui, An Le, Wang Weiwei

(Shenzhen Water <Group> Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

**Abstract** [Objective] This paper aims to address the technical bottlenecks in the field of membrane lifespan prediction for membrane bioreactor (MBR), namely the lack of a multidimensional coupled lifespan evaluation index system and the difficulty in accurately quantifying the synergistic mechanism between membrane fouling and membrane performance degradation. A scientific lifespan prediction methodology system has been constructed. [Methods] A three-tier evaluation system was established, utilizing specific flux as the core criterion for membrane performance degradation and lifespan assessment, employing real-time transmembrane pressure to characterize membrane fouling dynamics, and defining cumulative water production as the mechanical limit index. Based on the full life-cycle theoretical framework encompassing "physicochemical performance degradation-functional limit determination-maintenance intervention effects", this paper developed a comprehensive lifespan prediction methodology integrating specific flux attenuation analysis, cumulative water production evaluation, and chemical cleaning intensity assessment. An online membrane lifespan evaluation model was subsequently developed, by dynamically analyzing the correlation mechanism between operational data and membrane fouling using machine learning algorithms, which served to guide the intelligent operation and maintenance of MBR processes. [Results] Validated with six-year operational data from wastewater treatment plant A, this model demonstrated superior performance in membrane fouling quantification, abnormal operation identification, and process parameter optimization. The predicted lifespans for Group 7#, 10#, and 16# stabilized at 8.5 years, showing a 6.25% extension over the manufacturer-specified lifespan (8 years) and an approximately 21.43% improvement compared to manual prediction averages (7 years). [Conclusion] The proposed "index system-method integration-model development" three-in-one framework enables multidimensional coupled analysis of membrane

[收稿日期] 2025-01-21

[作者简介] 颜欣(1993—),女,工程师,主要从事水污染控制等工作,E-mail:zyanxin2016@163.com。

[通信作者] 安娜(1979—),女,正高级工程师,主要从事水污染控制等工作,E-mail:anna197911@163.com。

performance degradation and membrane fouling quantification. The developed prediction methodology demonstrates feasibility and robustness. The application of the model aids in optimizing membrane module replacement cycles and chemical cleaning strategies, significantly enhancing the service efficiency of membrane modules and reducing operation and maintenance costs, thus demonstrating certain engineering application value.

**Keywords** membrane bioreactor (MBR) membrane system membrane lifespan prediction methodology evaluation indices online evaluation model

膜生物反应器(MBR)工艺凭借优质出水、紧凑布局和低污泥产量等优势,自20世纪90年代起在污水处理领域获得大规模应用<sup>[1-2]</sup>。但在工程实践中,膜污染、机械损伤和材料老化等问题导致设备产水效率下降与水质波动,显著提高运维成本<sup>[3]</sup>。超滤膜更换成本尤为突出,成为工艺推广的关键瓶颈。数据显示,MBR系统运行成本(3.5~4.9元/m<sup>3</sup>)较传统活性污泥工艺成本(2.1~3.3元/m<sup>3</sup>)平均提升55.5%,其中膜折旧、能耗及清洗费用构成主要成本要素<sup>[4]</sup>。典型MBR设施(1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d处理规模)年能耗预估达200万kW·h,仅电费支出即逾140万元<sup>[4]</sup>。多案例<sup>[5-7]</sup>分析表明,膜更换成本在运行费用中的占比接近50%,以6×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d规模系统为例,膜面积达1×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>,单次更换成本超过2000万元<sup>[7]</sup>。因此,建立精准的膜寿命预测方法对优化系统运行、延长膜组件使用周期具有重要工程价值。

当前MBR系统普遍采用基于厂商理论寿命(通常为5~8年)或产水量阈值的经验性膜更换策略,缺乏与实时运行数据的深度融合。历史运行数据蕴含反映膜性能退化的关键信息(如跨膜压差波动、清洗周期变化等),通过系统分析这些参数与膜寿命的关联机制,可构建动态预测模型,实现运行参数优化与维护成本控制。本文基于深圳A污水厂MBR系统历史数据,系统解析出水水质、运行参数与膜性能的关联特征,建立膜寿命评价指标体系,开发在线寿命评估模型。该模型可实现单膜组寿命预测,为工艺调控与更换决策提供数据支撑,对保障MBR系统稳定运行具有现实意义。

## 1 A污水厂MBR膜系统运行概况

A污水厂MBR膜系统已稳定运行长达7年,其稳定运行的关键前提在于膜工段出水持续达标。实际运行中,运维人员通常依赖膜出水水质、产水流量及跨膜压差等实时监测数据的经验化判

读来评估膜运行状态。然而,单一参数的瞬时性特征难以系统反映膜性能的演变规律。相较而言,膜通量与比通量的累积变化趋势可深度表征膜污染进程及材料老化特征:通过定量分析其随运行时间的衰减曲线,既能揭示透水性能的渐进性劣化规律,又能辨识不可逆污染对膜结构的累积损伤效应。这种基于时序演变的动态分析方法,为构建膜寿命评价体系提供了关键数据支撑,对实现膜寿命的在线分析预测具有重要理论价值和工程指导意义。

### 1.1 膜系统产水水质分析

图1为MBR膜系统出水悬浮物(SS)及粪大肠菌群月度指标情况。MBR系统出水SS变化态势趋于平稳,自2018年8月起SS质量浓度均维持在低于5 mg/L的水平。出水粪大肠菌群平均为32个/L,虽在部分月份(如2018年9月、2019年7月)数值偏高,但相较于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B类出水要求(1×10<sup>4</sup>个/L),仍处于较低水平,对水质影响可忽略不计。总体而言,MBR系统出水水质得到显著提升,表明超滤膜的分离选择性有效增强了A污水厂对于纤维、微生物等污染物的去除能力<sup>[8-9]</sup>。

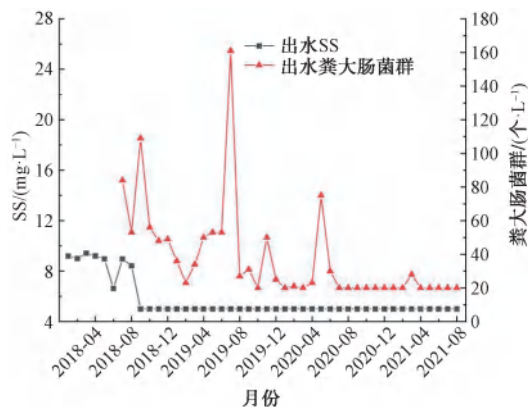


图1 MBR系统出水SS及粪大肠菌群

Fig. 1 SS and Fecal Coliforms in Effluent of MBR System

## 1.2 膜系统运行数据分析

### 1.2.1 膜系统跨膜压差与混合液悬浮固体 (MLSS) 浓度

图2展示了 MBR 系统 1#膜组的跨膜压差与 MLSS 变化趋势。1#膜组跨膜压差整体呈渐进式增长特征,运行1年增幅达60%。膜污染发展可分为4个阶段:运行初期为基准期,随后经历孔隙堵塞主导期,进而逐步形成致密凝胶层,最终进入污染稳定期。周期性恢复性化学清洗虽可部分缓解通量衰减<sup>[8,10]</sup>,但膜丝表面不可逆污染仍持续累积。MLSS 浓度变化方面:运行初期质量浓度主要在 8 000 ~ 13 000 mg/L,中后期质量浓度稳定维持在 5 000 ~ 9 000 mg/L。研究<sup>[11]</sup>表明,MLSS 与跨膜压差的交互作用具有动态平衡特性:MLSS 浓度过高易导致污泥在膜表面积聚,降低膜渗透性能,从而增大跨膜压差;而浓度过低则会削弱污泥对溶解性有机物的吸附能力,促进凝胶层形成,增加过滤阻力并降低膜通量。因此,在维持跨膜压差与 MLSS 动态平衡的前提下,宜通过优化调控策略将 MLSS 控制在适宜浓度区间,以实现膜系统高效稳定运行<sup>[12]</sup>。

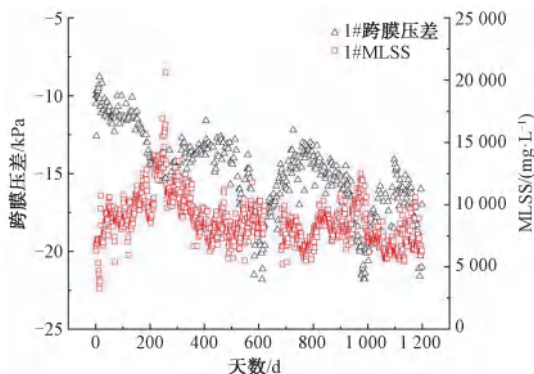


图2 MBR 系统跨膜压差与 MLSS

Fig. 2 Transmembrane Pressure and MLSS in the MBR System

### 1.2.2 膜通量

图3呈现了 MBR 系统 1#、3#膜组通量的变化情况。膜通量依据式(1)进行计算,该指标直观地反映了膜的产水能力。由图3可知,运行约700 d时,平均膜通量约为 33.5 L/(m<sup>2</sup>·h);运行约1350 d时,平均膜通量降至 32.0 L/(m<sup>2</sup>·h),表明在连续运行工况下,膜系统产水通量随运行周期延续呈现渐进式衰减,平均膜通量的年降幅<4%。

$$J = Q/A \quad (1)$$

其中: $J$ ——膜通量,L/(m<sup>2</sup>·h);

$Q$ ——流量,L/h;

$A$ ——有效过滤面积,m<sup>2</sup>。

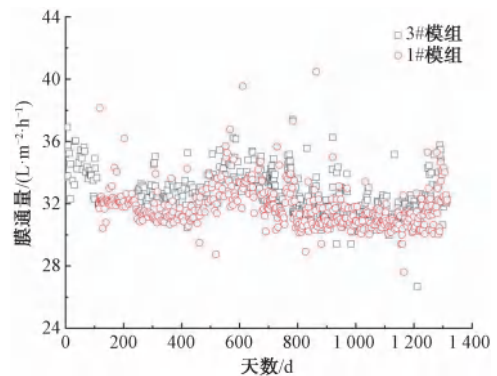


图3 MBR 系统膜通量

Fig. 3 Membrane Flux in the MBR System

### 1.2.3 膜比通量

膜比通量是综合膜通量和跨膜压差变化关系,精准反映膜在实际运行中性能衰减的核心判据。其计算如式(2)。如图4所示,MBR 系统 1#、3#膜组的比通量总体呈渐进式衰减态势,平均比通量年降幅<32.3%,最低比通量已趋近于 1.0 L/(m<sup>2</sup>·h·kPa),经恢复性化学清洗,膜比通量呈现有限恢复特性。依据《中空纤维膜使用寿命评价方法》(GB/T 38511—2020),超滤膜比通量的衰减下限为 0.5 L/(m<sup>2</sup>·h·kPa),此值即为膜性能衰减的最低临界值。当比通量衰减至该临界值时,表明膜材料已进入不可逆失效阶段。此时膜孔结构发生永久性改变,膜材料出现不可逆老化,常规化学清洗难以有效恢复其产水水质与分离性能,则判定膜寿命达到终点。

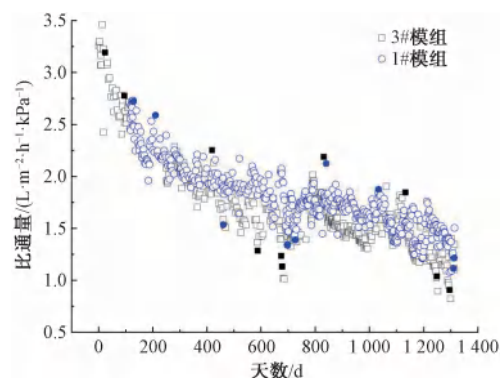


图4 MBR 系统比通量

Fig. 4 Specific Flux in the MBR System

$$F = J/T \quad (2)$$

其中: $F$ ——比通量,L/(m<sup>2</sup>·h·kPa);

$T$ ——跨膜压差, kPa。

## 2 膜寿命预测方法建立

### 2.1 膜寿命相关性分析

通过对 2018 年—2021 年期间年平均跨膜压差、膜通量及比通量的实际运行数据进行深入剖析, 可发现跨膜压差整体降幅达 75.6%, 比通量整体降幅达 46.6%, 而膜通量降幅相对较小, 仅为 5.0%, 这一结果与前文分析结论相契合(表 1)。

表 1 年均比通量、膜通量、跨膜压差指标变化幅度

Tab. 1 Variation Ranges of Annual Average Specific Flux, Membrane Flux, and Transmembrane Pressure Difference

指标	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	总降幅
跨膜压差/kPa	-11.86	-16.70	-17.29	-20.83	-75.6%
产水量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ )	294.34	292.06	281.11	279.50	5.0%
膜通量/ ( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	33.60	33.34	32.09	31.91	5.0%
比通量/( $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$ )	2.51	1.70	1.57	1.34	46.6%

为构建膜寿命评价指标体系, 本研究基于 Python 语言开展皮尔逊(Pearson)相关性分析<sup>[13]</sup>, 系统解析 MBR 工艺中水质指标与运行参数的交互关系。图 5 所示相关性热力图矩阵中, 各坐标交点代表两因素之间的相关性, 色块颜色深度表征相关系数绝对值, 正负号表征两指标间的正负相关特性<sup>[8]</sup>。结果表明, 比通量、跨膜压差与化学需氧量(COD)、SS、MLSS 的累计去除量呈现显著相关性 ( $|r| > 0.8$ ), 其关联强度远超单日水质指标。时序关联性研究显示, 天数与比通量呈强负相关 ( $r = -0.9$ ), 与跨膜压差呈显著正相关 ( $r = 0.8$ ), 与累计处理水量呈显著正相关 ( $r = 1$ )。因此, 确立比通量作为膜寿命评价的核心指标, 跨膜压差因其动态响应特性可作为过程监控指标用来量化膜污染, 累计处理水量关联膜机械耐受极限, 形成“基础参数-过程监控-决策预测”三级评价体系, 为寿命预测方法建立提供理论依据。

### 2.2 膜寿命预测方法

#### 2.2.1 比通量衰减法

比通量衰减法寿命分析如图 6 所示。图 6 中实心点分别标记了不同恢复性化学清洗周期内的比通量恢复的峰值(表征膜系统最佳性能状态)和

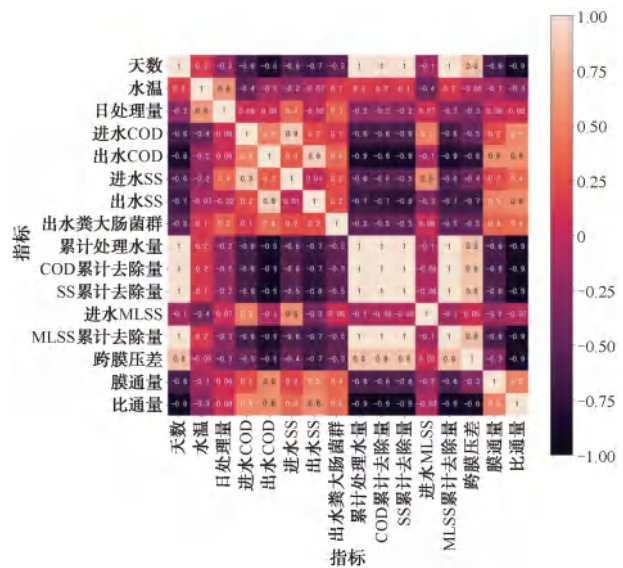


图 5 比通量与各影响因素间相关性热力图

Fig. 5 Heat Map of Correlation between Specific Flux and Various Influencing Factors

膜污染严重阶段时的比通量谷值(反应系统最低运行状态)<sup>[8]</sup>。基于筛选的特征数据点进行拟合: 上方拟合曲线表征恢复性化学清洗后膜系统可达到的最高比通量衰减规律, 下方拟合曲线代表极端污染负荷与最大操作压力协同作用下的比通量衰减规律, 2 条拟合曲线的交点即为膜寿命终点。该判定依据在于通过提高操作压力、清洗频率及增加清洗浓度等常规调控手段已无法维持生产所需的通量要求<sup>[9]</sup>。最终拟合寿命 T1 结果约为 6.5 年。

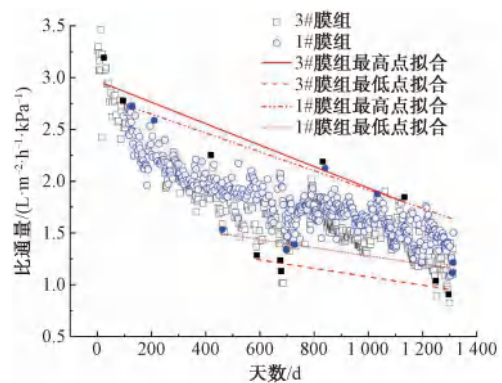


图 6 MBR 系统比通量与时间关系

Fig. 6 Specific Flux-Time Relationship in the MBR System

#### 2.2.2 累计产水能力分析法

累计产水量表征膜的机械耐受极限, 定义为单位膜面积的累计处理水量。许颖等<sup>[14]</sup>在前期研究

中建立了基于季度均值参数的膜寿命预测方法,采用季度平均比通量为纵轴变量、季度平均累计处理水量为横轴变量进行线性回归分析。与之相比,本文引入日累计变化趋势分析法,通过构建高时间精度的运行数据集,实现了对膜污染关键阶段及化学清洗后性能恢复期的动态寿命预测,提高了预测结果的准确率。图7拟合曲线交点代表膜寿命终结时的最高累计产水量。基于A污水厂的设计产水规模、实际产水规模以及膜有效过滤面积,可估算膜使用寿命。寿命终结时预测的累计产水量约为 $1\ 650\ \text{m}^3/\text{m}^2$ ,依据A污水厂实际产水量计算得出膜使用寿命T2约为7.5年。

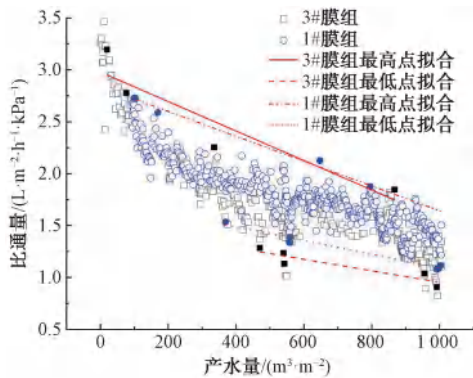


图7 MBR系统比通量与累计产水量关系

Fig. 7 Relationship of Specific Flux and Cumulative Water Production in the MBR System

### 2.2.3 化学清洗强度分析法

化学清洗可改变膜表面的理化特性,包括膜孔径分布、亲水性能及表面分离层化学组成等<sup>[15-16]</sup>。研究<sup>[17]</sup>表明,随着化学清洗频次的增加,膜系统比通量呈现典型的阶段性衰减特性。依据《中空纤维膜使用寿命评价方法》(GB/T 38511—2020)规定,当比通量衰减至临界阈值 $0.5\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$ ,膜系统已发生不可逆的膜渗透性能衰减和机械损伤,此时需及时更换超滤膜。因此,定量分析化学清洗强度与膜寿命的关联机制对保障膜系统的稳定运行具有重要工程价值。

如图8所示,3#膜组比通量与累计清洗强度呈显著负相关,其季度平均比通量随清洗强度的增加呈梯度下降趋势。拟合结果显示,当比通量衰减至 $0.5\ \text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{kPa})$ 的更换阈值时,对应累计化学清洗强度约为 $1.45\ \text{kg}/\text{m}^2$ 。结合膜系统单次清洗药剂平均用量及年平均清洗频次进行测算,可推算出

膜使用寿命T3约为7年。该研究结果为优化化学清洗方案、延长膜系统使用周期提供了重要的决策依据。

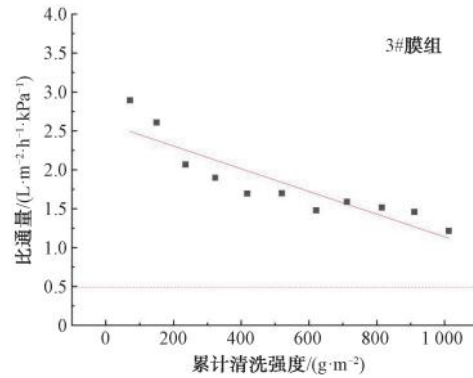


图8 MBR系统比通量与累计清洗强度关系

Fig. 8 Relationship of Specific Flux and Cumulative Cleaning Intensity in the MBR System

### 2.2.4 预测方法的比较与讨论

采用多种寿命预测方法对A污水厂超滤膜的寿命进行预测,结果显示,T1预测值较T2和T3缩短约1年。这是由于化学清洗的双刃剑效应——虽可部分去除膜表面累计的不可逆污染物,但反复的化学作用会引发膜材质溶蚀现象:一方面膜材料固高分子链结构在长期运行中逐渐解离,另一方面酸碱药剂强氧化性加速膜表面功能层的化学降解<sup>[10]</sup>,共同导致膜渗透选择性及机械强度不可逆下降。虽然,提高清洗药剂浓度、清洗频率或改变清洗顺序等方法能短期提升膜丝性能,但会增加化学冲击负荷,最终导致实际产水效能偏离工程设计参数。因此,T1的预测结果更具工程指导价值,而T2、T3可表征特定运行过程产水能力与清洗效果的动态平衡关系。

此外,膜寿命不仅受清洗工艺影响,更与进水水质特性及运行工况存在相关性。实际工程中,不同水源条件下形成的污染层结构及其与药剂的反应动力学差异,直接导致同材质膜组的理论寿命预测值发生波动。因此,构建融合在线水质监测、膜性能诊断(膜通量、跨膜压差、比通量)和化学清洗参数(药剂浓度、清洗频次)的多维度寿命评估模型至关重要。通过该模型实时评估不同膜组污染状态,动态优化清洗方案,精准预测剩余使用寿命,降低系统运行能耗及药剂成本,可为污水深度处理设施的长周期稳定运行提供技术保障。

### 3 膜寿命预测方法的应用

现有研究<sup>[7]</sup>表明,商业膜产品的理论寿命普遍处于 5~8 年。然而,膜系统全寿命周期的运行数据具有体量大、维度高、时序性强的特点,传统依赖人工经验的数据分析方法存在显著局限性:一方面,基于手动筛选数据点进行回归拟合的预测方式受主观判断影响较大,预测结果存在不确定性;另一方面,离线分析模式导致的决策滞后性难以满足实时调控需求。针对上述问题,本文在膜寿命预测方法的基础上,构建了基于机器学习算法的膜寿命在线评估模型,通过开发实时数据采集接口与智能分析模块,建立膜污染动态量化评估系统,为 MBR 工艺优化提供数据驱动的决策支持。

为验证模型的有效性,选取 A 污水厂 2018 年—2023 年全周期运行数据作为训练集,对所有膜组进行纵向对比研究。如图 9 所示,以 7#、10#、16# 膜组模型运行结果为例,系统调试初期(2018 年—2019 年),比通量年衰减约为  $1.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$ ,对应寿命预测值为 8.7~10.9 年;2020 年工艺参数优化后,预测寿命为 9.0~9.9 年,验证了曝气强度、反洗频率及化学清洗药剂投加量调整的有效性。值得注意的是,2021 年第二季度进水铁离子浓度异常,导致跨膜压差平均增速达  $0.75 \text{ kPa}/\text{d}$ ,模型及时预警,通过调整化学清洗周期(6 个月缩短至 3 个月)、调整药剂浓度(柠檬酸投加质量浓度增加至  $3.5 \text{ g}/\text{L}$ )及降低通量,使寿命预测值开始增加。截至 2023 年 12 月,预测寿命稳定在 8.5 年,较制造商标称寿命(8 年)提高 6.25%,较人工预测均值(7 年)显著提高约 21.43%。

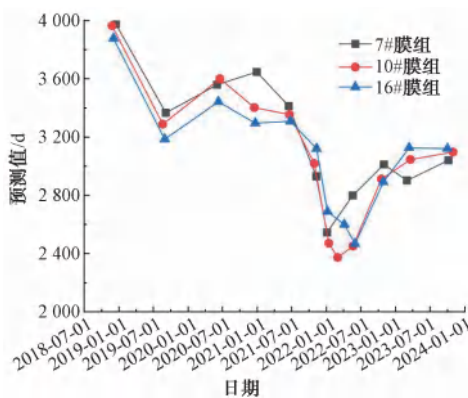


图 9 模型预测效果

Fig. 9 Performance of Model Prediction

本模型已集成至 A 污水厂智慧水务平台,实现膜系统“运行参数-污染状态-寿命预测”的动态映射。实际应用表明,该模型可提前识别异常工况,降低化学清洗能耗及膜更换成本。后续研究将着重于优化模型算法,提升模型泛化能力,以及开发基于数字孪生的预测性维护模块等,进一步完善膜系统全生命周期管理体系的智能化水平,满足其他污水厂 MBR 工艺运行监测需求。

### 4 结论

(1) A 污水厂 MBR 膜系统运行第 4 年,膜系统性能下降较为明显:1#膜组跨膜压差显著增加,膜通量降幅相对较小,平均膜通量在  $32.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,比通量下降至  $1.0 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kPa})$ 。

(2) 基于膜系统全寿命周期运行数据的相关性分析,明确比通量、跨膜压差及膜通量指标具有时间累积性,揭示了比通量与膜寿命的高度相关性,确立其作为膜性能衰减和寿命评价的核心指标,跨膜压差量化膜污染速率,累计产水量关联膜机械耐受极限,形成三级评价体系,为构建膜系统寿命评价方法体系提供理论依据。

(3) 基于膜寿命评价体系,提出 3 种膜寿命预测方法:一是基于膜性能衰减规律的比通量衰减法,二是关联产水量与膜污染阈值的累计产水能力分析,三是量化化学清洗效率对膜寿命补偿效应的化学清洗强度分析法。方法体系覆盖膜系统“理化性能衰减-功能极限判定-维护干预影响”全生命周期决策链。预测膜寿命 T1 约为 6.5 年, T2 约为 7.5 年, T3 约为 7 年。

(4) 基于膜寿命在线评估模型,动态解析运行数据与膜污染的关联机制,预测膜使用寿命。通过预测 A 污水厂 7#、10#、16#膜组寿命,验证了模型在膜污染监测预警、异常工况识别及工艺优化调试等方面的应用价值。模型预测结果较制造商标称寿命(8 年)提高 6.25%,较人工预测均值(7 年)提高约 21.43%。

### 参考文献

- [1] 夏静远. 浅谈 MBR 工艺在污水处理中的应用和发展[J]. 智能城市, 2019, 5(5): 130-131.  
Xia J Y. Application and development of MBR process in sewage treatment[J]. Intelligent City, 2019, 5(5): 130-131.
- [2] 李鹏峰,孙永利,郑兴灿,等. 太湖流域某污水厂工艺过程

- 诊断及优化措施[J]. 中国给水排水, 2014, 30(17): 109-112.
- Li P F, Sun Y L, Zheng X C, et al. Process evaluation and operational optimization measures of a WWTP in Taihu Lake Basin[J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(17): 109-112.
- [ 3 ] Verrecht B, Maere T, Nopens I, et al. The cost of a large-scale hollow fibre MBR[J]. Water Research, 2010, 44(18): 5274-5283.
- [ 4 ] 黄全辉, 杨志婷, 赵帅. 膜生物反应器(MBR)技术在污水回用与资源化中的进展[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(9): 147-149, 159.
- Huang Q H, Yang Z T, Zhao S. Progress of membrane bioreactor (MBR) technology in wastewater reuse and resource utilization [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2024, 50(9): 147-149, 159.
- [ 5 ] 林爽. 城市污水处理厂 MBR 工艺综合评价研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- Lin S. A comprehensive evaluation for municipal sewage plant based MBR technology [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [ 6 ] 陈黎明, 肖学贵, 周林凡, 等. MP-MBR 工艺在污水处理厂不停产提标改造中的工程应用[J]. 净水技术, 2025, 44(1): 170-177.
- Chen L M, Xiao X G, Zhou L F, et al. Application of MP-MBR process in upgrading and reconstruction project of WWTP with non-stop operation[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(1): 170-177.
- [ 7 ] 杨学贵, 肖晓文, 孙雁, 等. 昆明第四水质净化厂 MBR 工艺 7 年运行实践分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(14): 121-127.
- Yang X G, Xiao X W, Sun Y, et al. Analysis of MBR of 7 years practical operation in the fourth wastewater purification plant of Kunming[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(14): 121-127.
- [ 8 ] 刘华发, 于水利, 高乐, 等. 超滤膜在水厂运行中分离性能变化及膜寿命评价[J]. 给水排水, 2020, 46(7): 47-53.
- Liu H F, Yu S L, Gao L, et al. The separation performance change of ultrafiltration membrane in water treatment plant and membrane life-time prediction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(7): 47-53.
- [ 9 ] 王晓爽, 高金华, 艾冰, 等. 再生水厂 MBR 工艺的膜寿命评价[J]. 净水技术, 2014, 33(5): 24-27, 37.
- Wang X S, Gao J H, Ai B, et al. Evaluation of membrane life span in a full scale MBR process for reclaimed water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2014, 33(5): 24-27, 37.
- [ 10 ] 刘璟言, 卢小艳, 朱燕茹, 等. 酸碱及氧化剂对聚偏氟乙烯超滤膜老化的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(8): 25-30.
- Liu J Y, Lu X Y, Zhu Y R, et al. Effect of different chemical cleaning agents on the ageing of PVDF ultrafiltration membrane [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 25-30.
- [ 11 ] 杨薇兰, 陈豪, 陈虎. MBR 工艺在无锡城北污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2012, 28(22): 117-120.
- Yang W L, Chen H, Chen H. Application of membrane bioreactor process in Wuxi Chengbei sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(22): 117-120.
- [ 12 ] 聂新宇, 罗敏, 刘慰, 等. 无锡梅村污水处理厂 MBR 工艺多年运行效果分析[J]. 给水排水, 2017, 53(1): 25-27.
- Nie X Y, Luo M, Liu W, et al. Analysis on the effect of MBR process in Wuxi Meicun sewage treatment plant for many years [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(1): 25-27.
- [ 13 ] 石多多. 基于皮尔逊相关性促进中学生体质健康提升的策略研究[J]. 武术研究, 2024, 9(12): 148-150.
- Shi D D. Research on strategies for promoting physical health improvement of middle school students based on Pearson correlation[J]. Wushu Studies, 2024, 9(12): 148-150.
- [ 14 ] 许颖, 雷霆, 孙剑宇, 等. 城市污水膜生物反应器处理工程中膜寿命预测[J]. 中国给水排水, 2015, 31(5): 34-39.
- Xu Y, Lei T, Sun J Y, et al. Life-time assessment of membrane in large-scale MBR plants for municipal wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(5): 34-39.
- [ 15 ] 刘露露, 冯磊. 化学清洗对中空纤维超滤膜性能影响研究[J]. 天津科技, 2021, 48(5): 22-25.
- Liu L L, Feng L. Study on effect of chemical cleaning on performance of hollow fiber ultrafiltration membrane[J]. Tianjin Science & Technology, 2021, 48(5): 22-25.
- [ 16 ] 上官思源. 化学清洗中 PVDF/PTFE 微滤膜的老化特性及膜污染去除特性研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- Shangguan S Y. Study on aging characteristics and membrane fouling removal characteristics of PVDF/PTFE microfiltration membrane in chemical cleaning [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [ 17 ] 常嘉雨, 于水利, 刘华发, 等. 地下水源膜法给水厂长期运行过程中膜性能演变[J]. 环境工程, 2021, 39(7): 73-79.
- Chang J Y, Yu S L, Liu H F, et al. Evolution in membrane performance of groundwater sourced waterworks during long-term operation[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(7): 73-79.