
FESE 机器学习在膜生物反应器研究中的应用

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/32832.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

FESE 机器学习在膜生物反应器研究中的应用。论文标题：Machine learning for membrane bioreactor research: principles, methods, applications, and a tutorial

期刊：Frontiers of Environmental Science Engineering

作者：Yizhe Lai, Kang Xiao, Yifan He, Xian Liu, Jihua Tan, Wenchao Xue, Aiqian Zhang, Xia Huang

发表时间：15 Mar 2025

DOI：10.1007/s11783-025-1954-2

微信链接：[点击此处阅读微信文章](#)

近日，中国科学院大学的肖康教授等在Frontiers of Environmental Science Engineering期刊第19卷第3期发表了题为Machine learning for membrane bioreactor research: principles, methods, applications, and a tutorial的综述论文。

本文系统探讨了机器学习在膜生物反应器（MBR）研究中的应用。研究指出，人工神经网络（ANN）、支持向量机（SVM）与随机森林（RF）等机器学习模型在预测MBR膜污染与污染物去除效率方面展现出显著优势，部分模型的预测精度与泛化能力超越传统统计方法，为MBR智能控制提供了新思路。

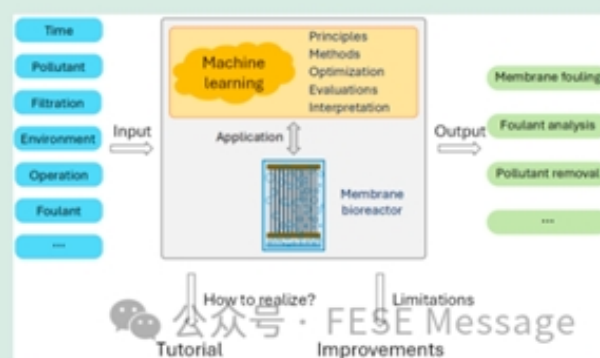
Machine learning for membrane bioreactor research: principles, methods, applications, and a tutorial

Yizhe Lai¹, Kang Xiao ^{1,2,3}, Yifan He⁵, Xian Liu^{3,4}, Jihua Tan^{1,3}, Wenchao Xue⁵, Aiqian Zhang^{3,4}, Xia Huang⁶

1. Beijing Yanshan Earth Critical Zone National Research Station, College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China
2. Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China
3. Environmental Chemistry Faculty, College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China
4. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
5. Department of Energy, Environment, and Climate Change, School of Environment, Resources, and Development, Asian Institute of Technology, P.O. Box 4, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand
6. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

HIGHLIGHTS

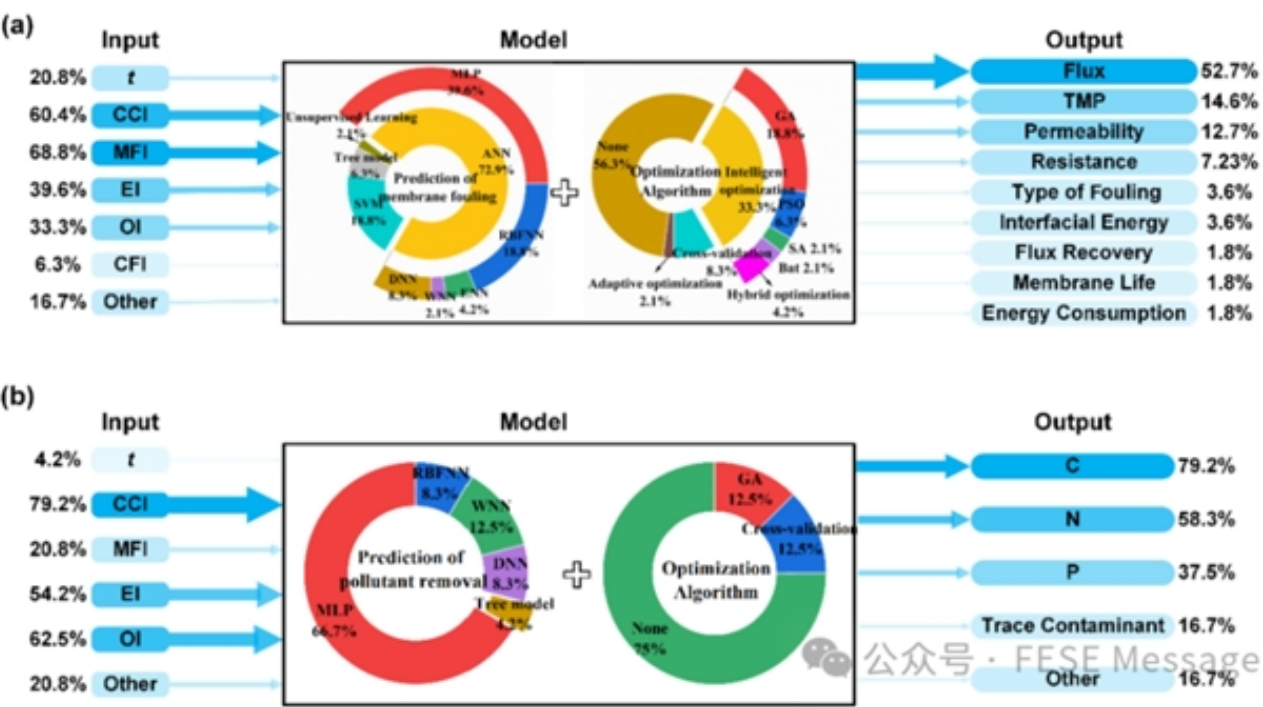
- Principles and methods of machine learning for MBR application are summarized.
- Available models for MBR pollutant removal and membrane fouling are reviewed.
- A tutorial is given to illustrate machine learning models for fouling prediction.
- Limitations and future improvements for MBR intelligent operation are discussed.



MBR技术具有高效处理污水、占地面积小、污泥产量低等优势，是水处理领域的重要技术。然而，膜污染导致的通量下降、能耗增加与膜寿命缩短，严重制约其经济性与可持续性。传统控制策略多依赖经验或滞后性监测，难以实现精准预测。尽管统计模型（如偏最小二乘法）已用于膜污染预测，但其对复杂非线性关系的拟合能力有限，且在大数据分析中存在计算效率低、收敛速度慢等缺陷。而机器学习因其强大的数据驱动建模能力，为解决MBR复杂系统预测难题提供了新途径。

本研究系统梳理了适用于MBR研究的机器学习方法，涵盖监督学习、无监督学习与强化学习三大类。其中，人工神经网络（ANN）凭借非线性映射能力成为主流选择，多层感知机（MLP）与径向基函数神经网络（RBFNN）在预测跨膜压差（TMP）、膜通量等关键指标时表现突出。支持向量回归（SVR）在小样本场景下表现出强泛化能力，而随机森林（RF）通过集成学习能有效降低过拟合风险，优于单一决策树模型。研究进一步通过虚拟数据集验证了五种典型模型（SVM、RF、BPNN、LSTM、GA-BP）的性能。结果显示，所有模型在训练集与测试集上均保持较

高一致性，其中长短期记忆网络（LSTM）因引入时序特征，在动态膜污染预测中略胜一筹。此外，研究强调了模型优化与解释的重要性：粒子群优化（PSO）与模拟退火（SA）等启发式算法可提升收敛速度；SHAP等可解释性工具则能解析输入变量对膜污染的贡献度，为工艺调控提供依据。



用于 MBR 研究的不同机器学习模型的分布：（a）膜污染预测模型，（b）污染物去除预测模型

尽管机器学习在MBR研究中成果显著，当前仍面临三大挑战：其一，输入特征多依赖常规水质指标，缺乏对膜材料特性、污染物分子特征等精细参数的整合；其二，模型解释性不足，黑箱特性限制了其在工程决策中的应用；其三，实时预测与反馈控制尚未实现，现有模型多用于事后分析，难以支撑前瞻性调控。针对这些问题，研究建议未来从四方面突破：开发基于光谱技术的在线监测系统以获取分子级数据；结合物理机制构建混合模型；建立开放共享的MBR运行数据库以提升模型泛化能力；探索自动化机器学习（AutoML）与可解释人工智能（XAI）的集成应用，推动模型从实验室向工程场景转化。随着深度学习、多模态大模型等前沿技术的引入，MBR智能控制系统有望在特征监测、实时预警与自适应调控等维度实现突破，助力污水处理向高效化、低碳化迈进。



扫码获取文章原文

本文内容来自FESE期刊2025年第19卷第3期发表的综述文章Machine learning for membrane bioreactor research: principles, methods, applications, and a tutorial。通讯作者为中国科学院大学的肖康教授。

引用格式：Yizhe Lai, Kang Xiao, Yifan He, Xian Liu, Jihua Tan, Wenchao Xue, Aiqian Zhang, Xia Huang. Machine learning for membrane bioreactor research: principles, methods, applications, and a tutorial. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 2025, 19(3): 34

<https://doi.org/10.1007/s11783-025-1954-2>

期刊简介

Frontiers of Environmental Science Engineering是由高等教育出版社、中国工程院和清华大学共同主办的环境领域综合学术期刊，聚焦环境领域前沿问题与研究成果，重点关注开创性、跨学科的研究，致力于打造具有国际影响力的高水平学术交流平台，是中国工程院院刊系列期刊、中国科技期刊卓越行动计划入选期刊。

主编：曲久辉院士，John Crittenden院士

期刊官网1（国内免费获取）

<http://journal.hep.com.cn/fese>

期刊官网2

www.springer.com/journal/11783

欢迎关注



来源：Frontiers of Environmental Science & Engineering

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发