城镇净水厂 $A^2OA-MBR$ 工艺关键膜污染组分识别及清洗

匡 科[1]，孙 伟[1]，董嘉豪[2]，林达超[2]，王子源[1]，杜 星[1*]

（1. 广州市净水有限公司，广州 510627；2. 广东工业大学 土木与交通工程学院，广州 510006）

摘要：针对华南地区某污水厂 $A^2OA-MBR$ 工艺实际运行中关键膜污染组分的识别及维护性清洗问题开展研究，构建 3 组不同污泥质量浓度（6 000、8 000 和 12 000 mg/L）的膜生物反应器，连续运行 60 d 期间定期进行膜清洗。结果表明，微生物新陈代谢过程中分泌的胞外有机物是膜丝表面的主要污染物，以蛋白类有机物为主。由于除磷药剂的投加，膜表面同时存在以磷酸铝络合物为代表的无机污染物。定期用次氯酸钠反洗可以利用氧化作用洗脱一部分可逆污染物，但不可逆污染仍然会逐渐积累，形成厚实的污染层。洗脱后的有机污垢重新溶解进膜池浓缩液中，并在实验过程中持续积累；当反洗液次氯酸钠质量浓度从 200 mg/L 提高至400 mg/L时，膜池多糖类及蛋白类物质浓度分别增加了 42%及 15%，同时加剧了膜组件出水中相关污染物的泄漏风险。在长期运行过程中，次氯酸钠对膜面污染物的清洗效果逐渐变弱，并随着反应器内活性污泥浓度的增加，清洗效果削弱程度越明显. 膜清洗时需特别注意减少对系统功能性细菌的影响。

关键词：城镇净水厂；膜生物反应器；关键膜污染组分；维护性清洗；工艺优化

中图分类号：TQ028；TU991.2 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-8924(2025)02-0162-11

doi：10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.02.019

A^2OA - MBR（Anaerobic-anoxic-oxic-membrane bioreactor）即“厌氧-缺氧-好氧”生物脱氮除磷膜生物反应器，是活性污泥法与膜法水处理技术的有机结合，既能实现活性污泥对有机物、氨氮和磷酸盐的高效去除，也能利用超滤膜微滤膜的固液分离能力，有效富集功能菌，强化活性污泥法净水能力的同时有效去除浊度。$A^2OA-MBR$ 在城镇净水厂场景中用于不同规模和类型的污废水处理[1-3]。大型 $A^2OA-MBR$ 用于城市污水处理，小型 $A^2OA-MBR$ 应用于乡村、旅游景区和小区等小型污废水处理，都可以实现污水的环保处理和水资源回用，在国内外得到了广泛的研究并取得了一定的成果[4-7]。

膜污染是膜分离技术面临的严峻挑战，沉积在膜表面的污染层降低了膜通量，增加了维护管理难度和运行成本，成为制约膜工程，特别是 $A^2OA-MBR$ 在城镇净水领域进一步推广的主要因素。$A^2OA-MBR$ 的膜组件与大量高浓度的回流陈化活性污泥直接接触时间更长，微生物及其新陈代谢产物更易于在膜表面形成生物膜污染层[8]。抗污染膜材料的开发、膜生物反应器运行参数的优化以及高效预处理等手段[9]只能缓解膜污染，定期在线与离线清洗膜是必不可少的关键环节。

收稿日期：2024-09-27；修改稿收到日期：2024-11-18

基金项目：国家自然科学基金资助面上项目(52170070)

第一作者简介：匡 科(1972-)，男，湖南祁东人，博士，正高级工程师，主要研究方向为城镇净水技术. * 通讯作者，E-mail：hitduxing@163.com

引用本文：匡 科，孙 伟，董嘉豪，等. 城镇净水厂 $A^2OA-MBR$ 工艺关键膜污染组分识别及清洗[J]. 膜科学与技术，2025，45(2)：162-172.

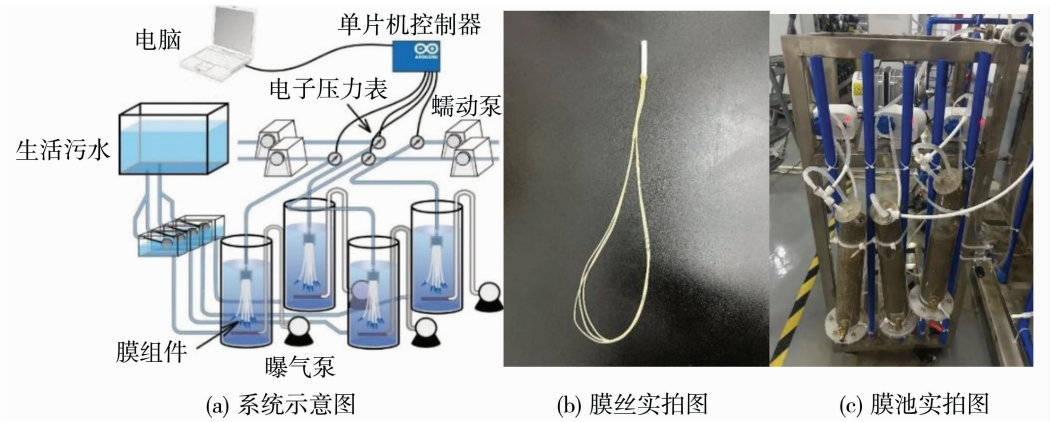
Citation：Kuang K，Sun W，Dong J H，*et al*. Identification and cleaning of key membrane fouling components for $A^2OA-MBR$ in sewage purification plant[J]. Membrane Science and Technology(Chinese)，2025，45(2)：162-172.

当前城镇净水厂 $A^2OA-MBR$ 的膜清洗方案大多源于膜供应商,其清洗手段基本上是采取传统的酸碱清洗,缺少目标生物污染物,并没有考虑清洗剂的使用对不同污泥浓度的生物冲击这一影响因素,会造成清洗剂选择不当,使用量过大,对活性污泥冲击过大,清洗效果差等不良问题。因此,本研究旨在分析 $A^2OA-MBR$ 中污泥浓度对膜生物反应器组件运行情况的影响,对膜面污染层污染物的关键组分及其物化特性进行系统分析,明晰膜污染形成机制;设计针对性清洗方案,达到提升清洗效率、降低清洗成本的目的,为城镇污水厂 $A^2OA-MBR$ 工艺的高效运行提供技术支撑和理论指导。

1　实验装置与方法

1.1　实验装置

模拟华南某地区 $A^2OA-MBR$ 城镇净水厂,搭建小型 MBR 实验装置,如图 1 所示。净水厂中总水力停留时间为 12.20 h,其中厌氧段 1.38 h,缺氧Ⅰ段为 2.75 h,好氧段为 5.13 h,缺氧Ⅱ段为 2.95 h,处理流量为 16 万 t/d。本实验装置膜池体积为14.13 L,膜通量为 20 L/(m^2 · h)。膜池曝气系统为穿孔曝气管,曝气口孔径 2.5 mm,每孔间隔 5 mm,可通过曝气对膜丝进行扫动。膜材料为 PVDF 中空纤维超滤膜,截留分子量为 300 000,内径为0.7 mm,外径为 1.3 mm;6 根长度为 50 cm 的膜丝 U 型封装。蠕动泵保证膜组件在恒定 20 L/(m^2 · h)通量下持续运行;配置一定浓度的次氯酸钠溶液,按照每 3 d 一次的频率对膜组件进行反冲洗。



(a) 系统示意图　　(b) 膜丝实拍图　　(c) 膜池实拍图

图 1　MBR 膜组件装置图

Fig. 1　Experiment setup of MBR system

表 1　华南某地区城镇净水厂 $A^2OA-MBR$ 各工艺段运行参数

Table 1　Parameters of $A^2OA-MBR$ in a South China sewage treatment plant

工艺段名称	污泥质量浓度/(mg · L^{-1})	溶解氧质量浓度/(mg · L^{-1})
厌氧段	3 000	＜0.3
缺氧Ⅰ段	4 000～5 500	＜0.5
好氧段	6 000	0.5～1.0
缺氧Ⅱ段	5 000～5 500	0.2～0.5

1.2　实验方案

1.2.1　实验工艺及原水

膜池中加入华南某地区城镇净水厂 $A^2OA-MBR$ 工艺中膜池污泥。表 1 给出了各工艺段的污泥浓度及溶解氧浓度。膜池进水平均水质情况如下:COD 为 95.30 mg/L,总磷为 1.78 mg/L,总氮为 26.28 mg/L,氨氮为 18.63 mg/L,SS 为 35.30 mg/L,pH 为 7.1。

1.2.2　关键膜污染组分识别实验

实验周期持续 60 d。装置运行过程中,为满足实验需求,采用定期排泥的方式将膜池污泥质量浓度(MLSS)分别维持为 6 000、8 000 和 12 000 mg/L;利用跨膜压差传感器监控膜组件产水的跨膜压差。实验结束后,对污染膜丝进行取样检测,并利用统计学分析方法分析识别膜面关键污染组分,探究其物化特性。表 2 总结了本研究各实验组参数差异,膜池污泥浓度及维护性清洗次氯酸钠浓度的设定以华南某地区城镇净水厂实际情况为参考依据。

1.2.3　维护性清洗策略优化实验

实验设定 3 个实验组,$A^2OA-MBR$ 膜池污泥浓度以华南某地区城镇净水厂实际情况为依据,均控制为 8 000 mg/L,膜清洗液中次氯酸钠质量浓度梯度为 200、300 和 400 mg/L。该实验组其余参数

与 1.2.2 中保持一致。利用蠕动泵反抽吸次氯酸钠打入膜丝中进行反洗，监控清洗前后跨膜压差的变化，探究次氯酸钠维护性清洗策略在不同活性污泥浓度情况下的有效性。本部分实验旨在考察不同次氯酸钠浓度膜清洗策略对膜清洗效果的影响规律，针对污染物的组分分布规律进行针对性膜组件清洗，提高膜清洗效率。

表 2 各实验组膜池污泥浓度及维护性清洗次氯酸钠浓度

Table 2 Concentration of active sludge and NaClO for different experiment groups

反应器名称	污泥质量浓度/(mg·L^{-1})	次氯酸钠质量浓度/(mg·L^{-1})
1# 反应器	6 000	200
2# 反应器	8 000	300
3# 反应器	12 000	400

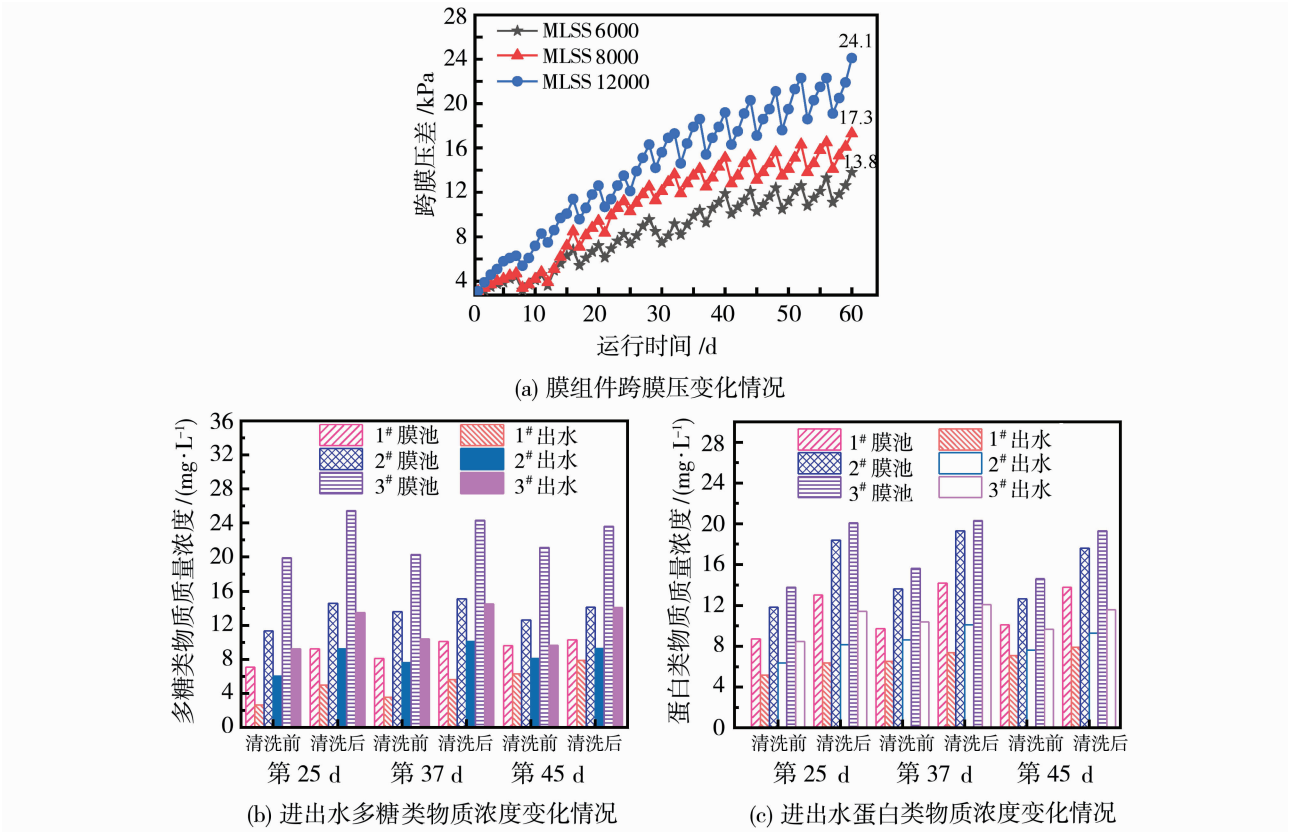
1.3 检测指标与分析方法

基于 A^{2}O-MBR 反应器运行情况，进行进出水水质检测和膜面污染层的高级表征。利用扫描电子显微镜(Quantum 200FEG，美国 FEI 公司)分析膜面污染物的微观形貌；利用能谱仪(EDS)可视化膜面污染物元素分布组成；利用荧光分光光度计(F7000，日本 Hitachi 公司)分析膜面污染层中荧光有机化合物，激发(EX)波长范围设置为 200～450 nm(间隔为 5 nm)，发射(EM)波长范围设置为 250～550 nm(间隔为 1 nm)；利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)(Nicolet 6700，美国)考察膜面污染层关键组分；利用 XPS 光电子能谱仪(Thermo Scientific K-Alpha，美国)考察除磷药剂的投加对膜面污染物无机组分的影响规律；利用 BCA 蛋白检测试剂盒(Sangon Biotech 公司，产品编号 C503061-1250)量化膜污染层中蛋白类污垢浓度；采用苯酚-硫酸法测定膜面污染层中多糖类污垢浓度；利用高通量测序技术识别污泥中主要生物功能菌种及分析其丰度变化。此外，本研究还涉及基于线性拟合的相关性分析；并利用定期记录的跨膜压差变化情况量化膜组件污染情况。

2 结果分析与讨论

2.1 膜组件跨膜压差及进出水微生物胞外聚合物浓度变化情况

膜生物反应器运行过程中，膜组件跨膜压差及进出水多糖和蛋白浓度变化情况如图2所示。结果



(a) 膜组件跨膜压变化情况

(b) 进出水多糖类物质浓度变化情况

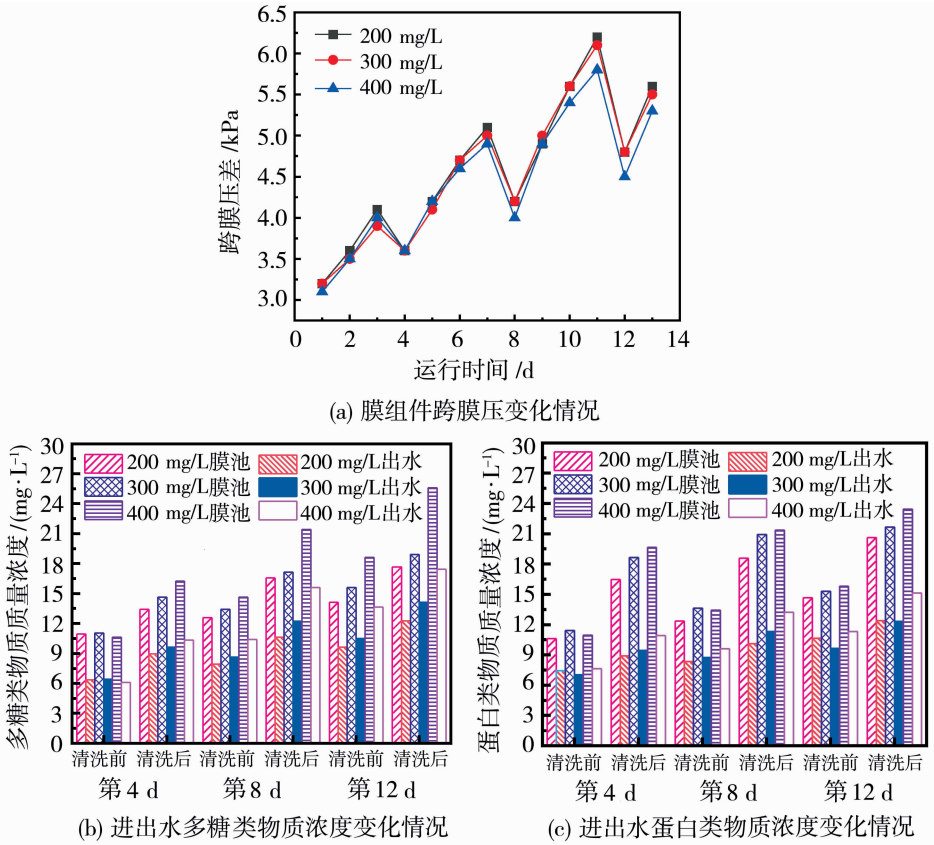
(c) 进出水蛋白类物质浓度变化情况

图 2 膜组件跨膜压差及进出水水质变化情况

Fig. 2 Development of transmembrane pressure and change in water quality in membrane module and effluent

表明,3 组膜生物反应器的跨膜压差在维护性清洗后呈现一定程度的下降,说明维护性清洗可以有效缓解膜污染。但随着运行时间的延长,3 组膜生物反应器的跨膜压差均仍持续上升,说明不可逆污染持续积累。当膜生物反应器从第 25 d 运行到第 28 d 时,3# 反应器的跨膜压差从 12 kPa 上升至 16 kPa,而 1# 反应器跨膜压差仅从 7.8 kPa 上升至9.8 kPa,2# 反应器跨膜压差也仅仅从 10.1 kPa 上升至 12.1 kPa。维护性清洗虽然能够洗脱部分膜面污染物,但随着过滤的进行,活性污泥中大量微生物的新陈代谢产物同样易于沉积在膜表面,污染层变得密实,并难以通过维护性清洗彻底洗脱。在这种情况下,应考虑进行恢复性清洗以维持膜组件高效运行。频繁进行次氯酸钠维护性清洗,膜面污染层微生物可能会产生耐药性,影响清洗效果[10-11]。

前人研究表明,微生物胞外有机物是膜生物反应器膜污染的关键组分,而微生物胞外有机物主要包含了多糖类和蛋白质类有机物[12-14]。因此,本研究在后续部分对各实验组中膜池的多糖类和蛋白质类组分进行了深入分析。结果表明,3 组膜生物反应器浓缩液中均含有大量多糖类和蛋白质类胞外有机物,两者浓度随着膜池活性污泥浓度的增加而增加,同时膜生物反应器对上述污染物质的截留能力持续提高,这可能归因于膜表面形成滤饼层对上述污染物质的预过滤作用。而次氯酸钠反洗能够有效减缓跨膜压差增加的原因是,膜面污染层中的部分胞外有机物被洗脱到膜池中,延缓了膜污染的持续发展。值得注意的是,膜清洗使膜面污染层中部分多糖类和蛋白质类有机物溶于水中,清洗后膜组件出水多糖类、蛋白质含量增加,略高于清洗前的水平,另一方面,次氯酸钠氧化作用下生物大分子部分降解为小分子有机物可能是出水多糖类、蛋白质含量增加的重要原因[15]。



(a) 膜组件跨膜压变化情况

(b) 进出水多糖类物质浓度变化情况

(c) 进出水蛋白类物质浓度变化情况

图 3　不同次氯酸钠浓度清洗策略对膜组件的影响效果(膜池 MLSS=8 000 mg/L)

Fig. 3　Influence of NaClO dosage in cleaning strategies on membrane module (MLSS=8 000 mg/L)

接着,以华南某地区城镇净水厂 A²OA-MBR 工艺中膜池活性污泥浓度实际情况为依据,设置了 3 组污泥浓度为 8 000 mg/L 的膜生物反应池,维护性清洗时清洗剂中次氯酸的质量浓度分别为 200、300 和 400 mg/L(图 3)。膜生物反应器运行过程中的跨膜压差变化趋势如图 3(a)所示。3 组膜生物反

应器的跨膜压差随着运行时间的增加而增加，说明3种维护性清洗策略的膜清洗效果存在差异。当膜池活性污泥浓度相同时，高浓度次氯酸钠清洗膜有机污染和生物污染的效果更好。此外，洗脱后的蛋白类污垢和多糖类污垢均会重新回到膜池中，在膜生物反应器长期运行过程中持续积累，并加剧了出水中两者泄漏的风险。值得注意的是，清洗剂中过高浓度的次氯酸钠不仅可能会影响净水功能菌的活性，而且可能会让部分微生物产生抗药性，削弱膜组件的长期清洗效果[10-11]。因此，在膜生物反应器实际运行过程中，不能一味地提高清洗剂中次氯酸钠的浓度，而应该通过最佳浓度比选和药剂比例调整优化膜污染清洗效果。

2.2　维护性清洗效果与膜池微生物胞外聚合物浓度变化情况的相关性分析

利用线性拟合对膜面污染层清洗效果与膜池微生物胞外聚合物（蛋白质类和多糖类）浓度变化情况开展深入分析（图4）。结果表明，清洗前后膜池蛋白

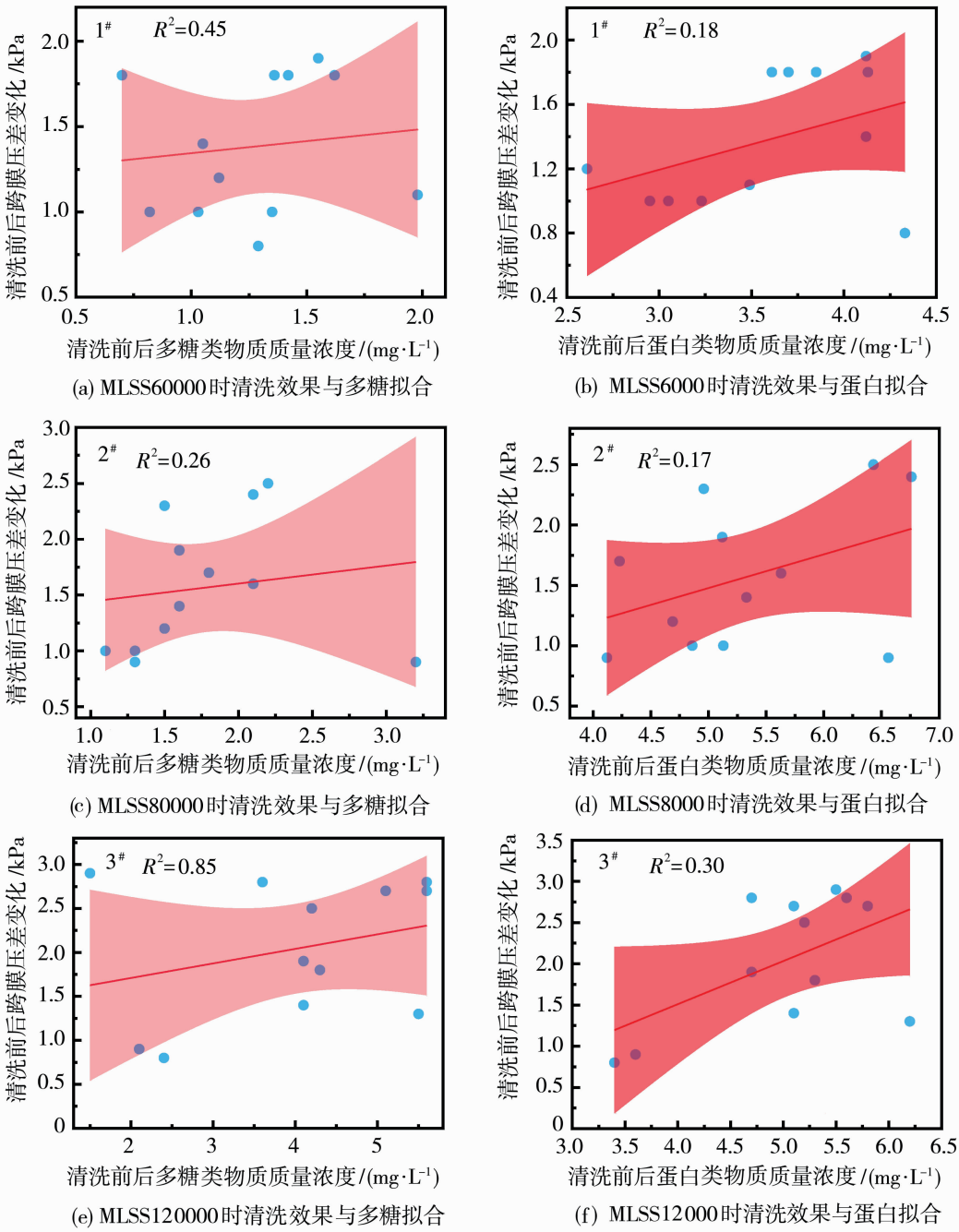


图4　清洗效果与膜池微生物胞外聚合物浓度变化情况的拟合分析

Fig. 4　Fitting analysis of cleaning performance and concentration of microbial metabolites in membrane module

含量变化与跨膜压差变化幅度的拟合程度较好,初步推断膜面污染层以蛋白质类组分为主。前人研究表明,蛋白质类有机物是微生物胞外有机物的重要成分[11,16-17]。胞外有机物中有机碳的 MOS 范围为 −0.14～−0.51,主要成分为蛋白质和碳水化合物[17]。在其他研究中,蛋白质类有机物在微生物胞外有机物中的占比都在 76%～87%之间[18]。

2.3　维护性清洗前后膜池微生物胞外聚合物三维荧光检测分析

维护性清洗前后膜池微生物胞外聚合物三维荧光检测结果按照以下几种主要有机物的特征划分为 5 个区:Ⅰ区对应酪氨酸类芳香族蛋白物质;Ⅱ区为色氨酸类芳香族蛋白质;Ⅲ区为富里酸类物质;Ⅳ区对应微生物代谢产物类物质;Ⅴ区主要为腐殖酸类物质(图 5)。结果表明,清洗前后超滤膜都能对部分大分子荧光有机物起到一定程度的截留作用,出水中溶解性微生物产物(Ⅳ区)的峰强度均比膜池的更低。而通过对比清洗前后的膜组件出水及膜池三维荧光图可知,清洗后的膜组件出水和膜池中的溶解性微生物产物浓度均比清洗前的高,这是因为次氯酸钠清洗剂将膜面污染层中溶解性微生物产物氧化洗脱,侧面验证了利用次氯酸钠进行恢复性清洗对于缓解膜丝污染的有效性,也表明膜面污染层的有机组分以溶解性微生物产物为主。

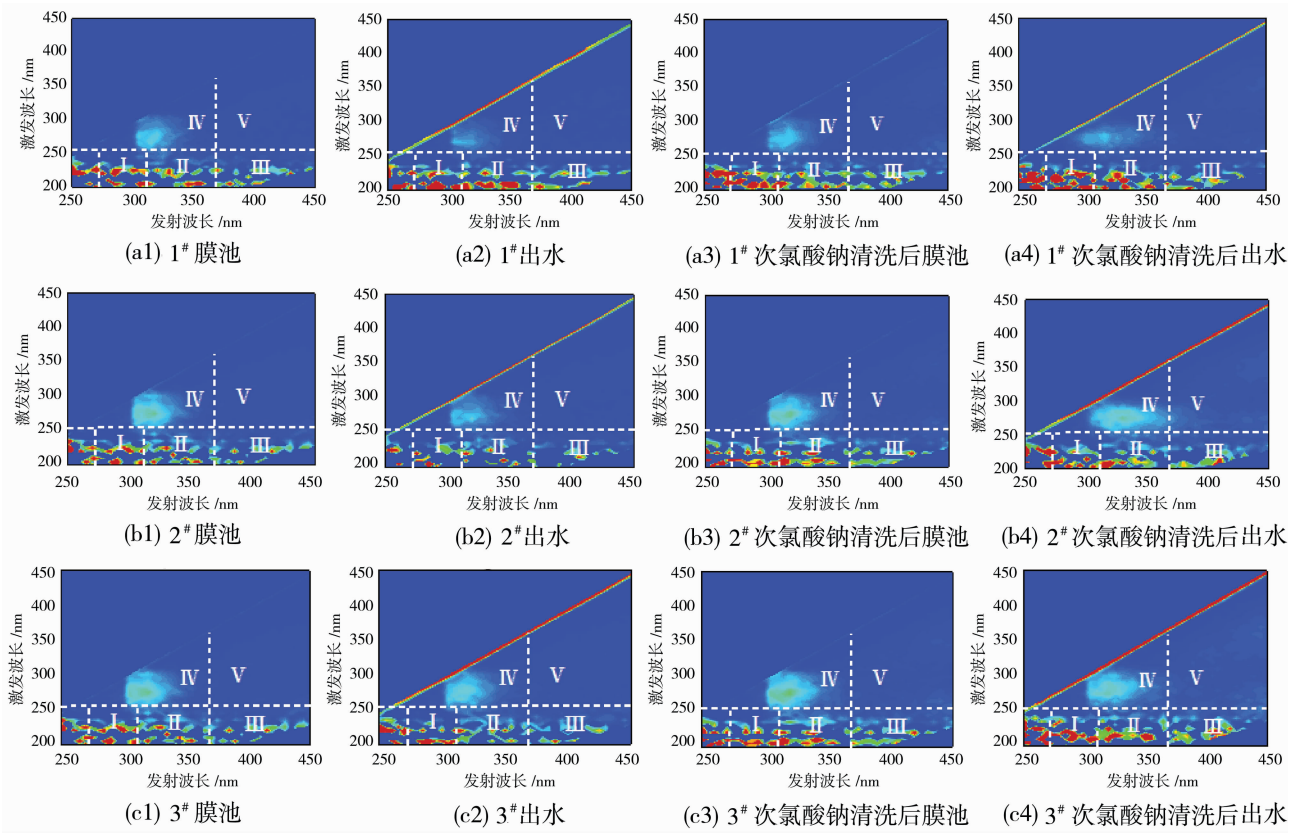


图 5　维护性清洗前后膜池微生物胞外聚合物三维荧光检测分析

Fig. 5　EEM spectra of microbial metabolites in membrane module before and after maintenance cleaning

2.4　维护性清洗前后膜面污染层高级表征

2.4.1　SEM 扫描电镜成像

膜面滤饼层 SEM 扫描电镜图(图 6)表明,当膜池污泥浓度较低时,膜面污染层形成单层块状的微观形貌。这主要是因为沉积到膜表面的污染物较少,导致膜面污泥层较薄[19]。此外,其表面产生的微小孔洞则是次氯酸钠反洗过程中产生的过水通道。但提高膜池污泥浓度后,膜面污染层呈现更粗糙的表面形貌,且出现严重层层堆叠情况,污染物积累情况更严重。在高污泥浓度下,附着在膜表面污染物增多,膜面污染层更加厚实[20]。上述层状污垢可能是除磷药剂硫酸铝与有机污染物形成的络合物[21]。在城镇净水厂运行过程中常在缺氧Ⅱ池中投入硫酸铝利用混凝作用来去除进水中的磷,所形成的络合物在膜滤过程中会被有效拦截在膜表面。此外,高浓度次氯酸钠提升膜

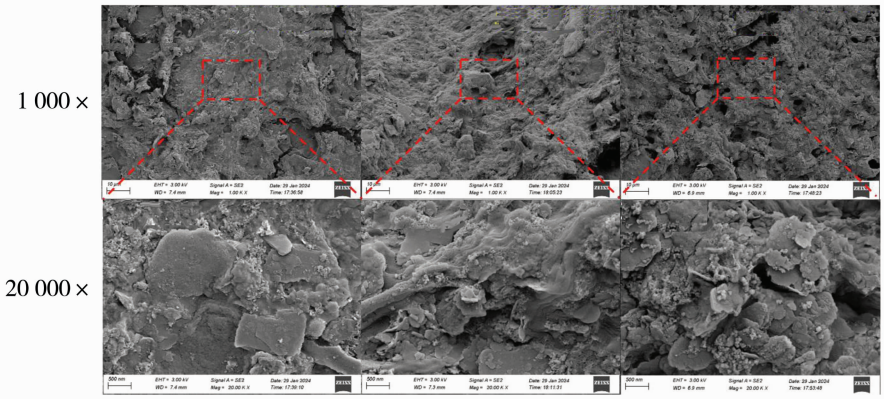
污染的清洗效果，表现为膜面污染层中过水通道尺寸更大。

2.4.2　EDS 能谱扫描元素分布成像

如图 7 所示，不同污泥浓度条件下膜生物反应器膜面污染层的 EDS 能谱中元素 C、N 和 O 的强度存在显著差异。随着污泥浓度的提高，膜面污染层中各元素强度持续上升，说明膜面污染层积累量持续增加，并以有机污染物为主。这一结果与膜面污染层清洗前后膜池多糖类和蛋白类物质的浓度变化结果相对应。另一方面，Al元素和P元素的存在证实了除磷药剂硫酸铝易于与污水中的 PO_4^{3-} 结合而生成的磷酸铝络合物在膜表面沉积。

2.4.3　傅里叶变换红外光谱分析

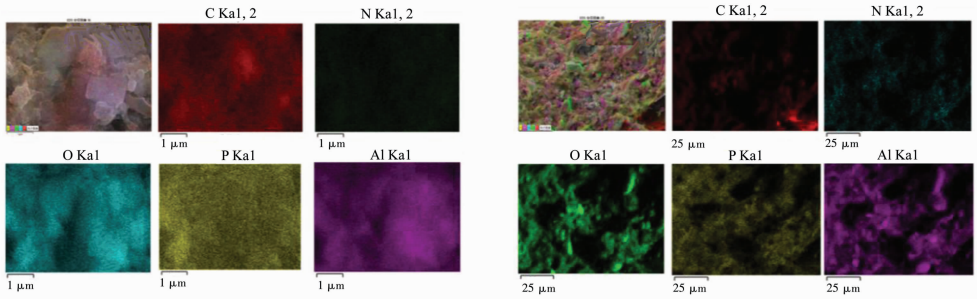
膜面污染层的傅里叶变换红外光谱图（图 8）显示，随着污泥浓度的提高，波数为 2 924.1 cm^{-1}（ν_{C-H}对应腐殖类物质）、1 657.8 cm^{-1}（$\nu_{C=O}/\nu_{NH_2}$ 对应蛋白类物质）和 1 031.7 cm^{-1}（ν_{C-O}/ν_{C-C}对应多糖类物质）的特征峰强度也随之升高。说明随着活性污泥浓度提高，膜面污染层中的腐殖类、蛋白类和多糖类污垢积累量均显著。



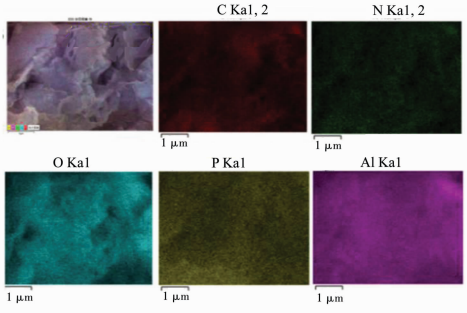
(a) 膜池 MLSS6000　(b) 膜池 MLSS8000　(c) 膜池 MLSS12000

图 6　膜面滤饼层 SEM 扫描电镜图

Fig. 6　SEM images of cake layer on membrane surface



(a) MLSS6000时膜面滤饼层　(b) MLSS8000时膜面滤饼层



(c) MLSS12000时膜面滤饼层

图 7　膜面滤饼层 EDS 能谱扫描元素分布图

Fig. 7　EDS mapping of cake layer on membrane surface

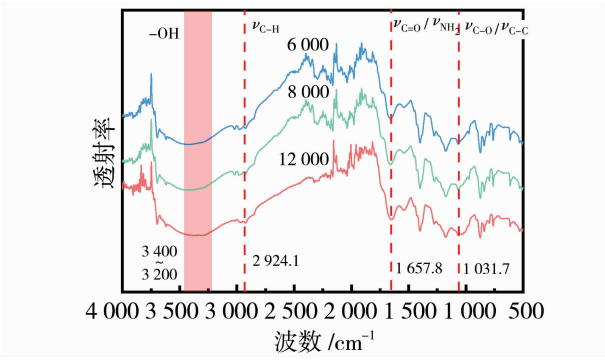
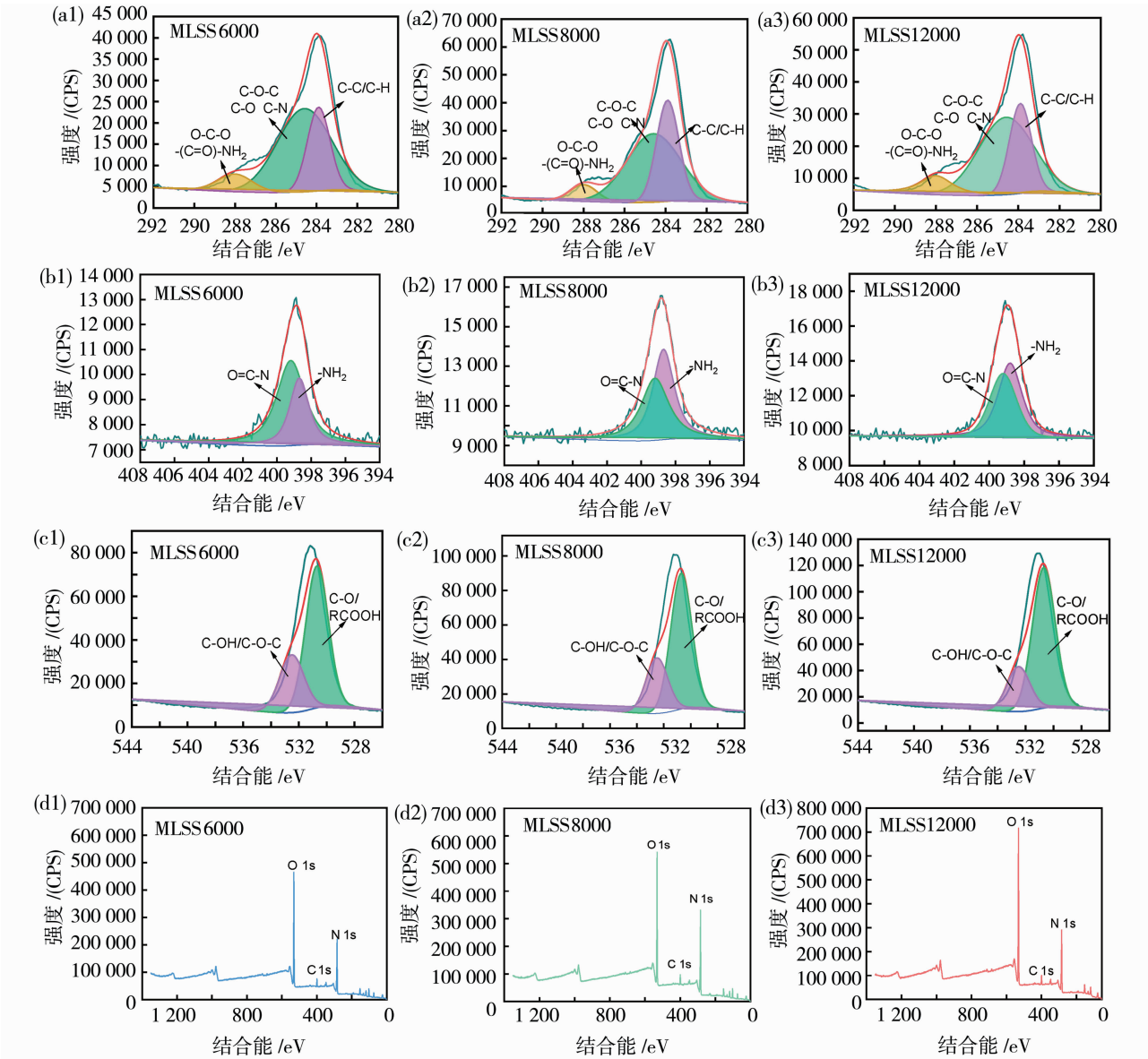


图 8　膜面滤饼层傅里叶变换红外光谱图

Fig. 8　FTIR spectra of cake layer on membrane surface

2.4.4　X 射线光电子能谱分析

如图 9 所示,利用 X 射线光电子能谱分析膜面污染层的主要组分。在各膜面污染层的能谱图中均观察到 C 1s、N 1s 和 O 1s 的典型峰。一般来说,元素 C 和 O 与有机物相关,而元素 N 更是与蛋白质类与有机物相关。而 C 1s、N 1s、O 1s 的高分辨率扫描有助于进一步提供有机物种类的信息。在 C 1s 典型峰中,284.6 eV 的峰 C-1 与来自多糖、氨基酸和脂质的 C—C/C—H 键有关;286.1 eV 的峰 C-2 属于酰胺、醇或胺基的 C—O/C—N 键;288 eV 的峰C-3则与羰基、酰胺、蛋白质有关。随着膜池中活



(a1)～(a3)C 元素的高分辨扫描;(b1)～(b3)N 元素的高分辨扫描;(c1)～(c3)O 元素的高分辨扫描;(d1)～(d3)全元素扫描

图 9　膜面滤饼层 X 射线光电子能谱图

Fig. 9　XPS spectra of cake layer on membrane surface

性污泥浓度的提高，峰 C-2 的强度也逐渐增强，表明具有酰胺、醇或胺基的蛋白质类污垢积累量增加。N 1s 典型峰在代表 N—H 键的 399.4 eV 处的 N-2 峰更强，同样表明了 12 000 mg/L 活性污泥造成膜面污染层中蛋白质类污垢量持续增加。O 1s 典型峰可分解成 530.7 和 532.5 eV 两个峰，前者表示与羰基、羧酸盐、酰胺或酯基有关，后者则与醇、半缩醛或糖类的 C—O—C/C—O—H 键有关。但在各膜面污染层的能谱图中上述 O 1s 峰的强度差别较小。上述结果表明，膜池中活性污泥浓度越高，膜面有机污染越严重，特别是蛋白类组分。

2.4.5　微生物高通量测序分析

当膜生物反应器污泥浓度不同时，长期运行后其菌种丰度也会发生改变（图10）。在污泥浓度为 12 000 mg/L 的膜池中，硝化螺旋菌属、聚磷菌属、嗜热单胞菌属、奥托菌属等具有脱氮除磷功能的细菌的丰度明显高于污泥浓度为 8 000 和 6 000 mg/L 的膜池，且在总菌属中所占比重更大[22-23]。实验结果说明，活性污泥浓度的增加，有助于为相关功能菌提供更好的生长环境，特别是脱氮除磷功能菌所占比重也能随之提高，有助于强化膜生物反应器的净水能力. 值得注意的是，过高的污泥浓度加剧膜污染隐患。另一方面，膜清洗也需避免对此类功能菌的负面影响，单纯提高清洗液中的次氯酸钠浓度难以实现高效膜清洗的目的。后续应进一步探究不同浓度次氯酸钠清洗对于膜表面微生物群落结构影响的规律，分析提高次氯酸钠浓度导致部分微生物耐药性和降低功能菌活性的风险。

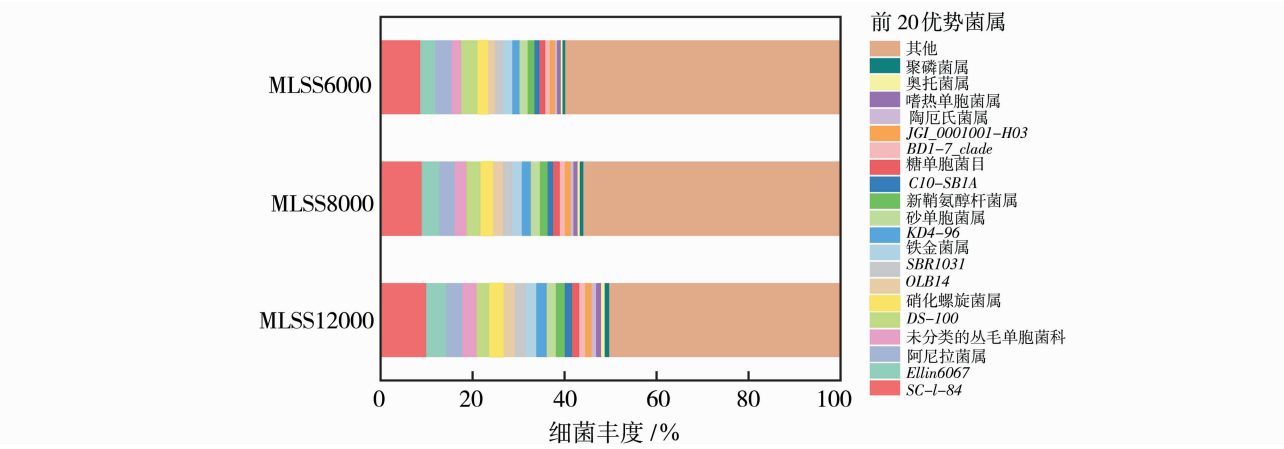


图 10　膜面滤饼层微生物高通量测序分析

Fig. 10　Microorganism community analysis of cake layer on membrane surface

2.5　城镇净水厂维护性清洗策略思考

SEM 和 EDS、XPS 分析结果表明，膜面污染层由微生物胞外有机物组成，其中与跨膜压差相关的关键组分为蛋白质类有机物。此外，膜面污染层中还存在除磷药剂与磷酸盐络合形成的磷酸铝络合物。从高通量测序结果来看，膜池中不同浓度污泥的细菌群落结构会发生变化，更高浓度污泥包含更多净水功能细菌，有助于提高系统净水，同时也会带来微生物胞外有机物的进一步分泌和积累的风险。虽然提高次氯酸钠浓度有助于改善维护性清洗效率，但也会带来部分微生物耐药性和降低功能菌活性的风险。针对膜面污染层应当开发针对性清洗策略而非单纯提高清洗剂中次氯酸钠浓度。

本实验所用活性污泥来自实际城镇净水厂，含有残留除磷药剂，并可能与磷酸盐反应产生磷酸铝络合物。SEM、EDS、FTIR 和 XPS 的结果表明膜面污染层的主要成分仍是有机污染，但磷酸铝络合物仍带来了潜在的膜污染风险，后续可考虑设置酸碱组合清洗策略达到更好的清洗效果[24]。在实际城镇净水厂膜组件维护性清洗前，建议增加膜面污染层物化特性分析并识别关键污染组分，制定相应的清洗策略后有针对性地清洗，提高膜组件维护性清洗效率，减少药剂损耗，降低膜组件的寿命折损，提高膜池运行效率；同时增加与清洗剂次氯酸钠浓度对膜截留能力的影响相关的研究。

3　结论

针对 A^2OA-MBR 工艺实际运行中关键膜污染组分的识别及维护性清洗问题开展研究，构建 3 组不同污泥浓度的膜生物反应器，连续运行 60 d 期间

定期进行膜清洗。主要结论如下:

1) 多糖类和蛋白类等微生物胞外有机物是膜面滤饼层的主要污染物,其中蛋白类物质是与膜污染相关的关键组分。由于除磷药剂的投加,膜面污染层中还存在部分磷酸铝络合物。膜生物反应器中污泥浓度与膜污染层厚实程度/跨膜压差上升幅度呈正相关。

2) 次氯酸钠维护性反洗可以将部分膜面污染层氧化洗脱,有效延缓膜污染,提升膜组件运行效率。洗脱后的多糖类有机物和蛋白质类有机物重新溶解进膜池浓缩液中,并在膜生物反应器运行过程中持续积累。实验末期,反洗液次氯酸钠质量浓度为 400 mg/L 时膜池多糖类及蛋白类质量浓度比 200 mg/L 时分别增加了 42%及 15%,还加剧了膜组件出水中相关污染物的泄漏风险。

3) 膜池中不同浓度的活性污泥浓度的优势菌属丰度均存在差异。维护性清洗时应特别注意清洗剂中次氯酸钠对净水功能菌的负面影响;此外,高频高浓度次氯酸钠维护性清洗效果随着膜生物反应器的长期运行被削弱,这一现象与膜面污染层微生物的耐药性有关。因此,维护性清洗中次氯酸钠浓度应控制在合理范围内而非单纯提高其浓度。

参考文献:

[1] 杨曦凯, 田海成, 王　冠, 等. 济南华山全地下水质净化厂 AAO+MBR 工艺设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(22): 59-62.

[2] 白玉华, 张欣宇, 黄政鑫, 等. AAOA-MBR 强化脱氮工艺用于内江市某污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(24): 87-91.

[3] 肖　磊, 罗　衍, 何金锋, 等. A/O+MBR 工艺对盐化城污水厂提标改造的中试研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(11): 70-72.

[4] 华　佳, 柏双友, 张　军, 等. A^2/OA-MBR 工艺在污水处理厂扩建设计中的应用[J]. 给水排水, 2018, 44(5): 31-36.

[5] 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.

[6] Mutamim N S A, Noor Z Z, Hassan M A A, *et al*. Membrane bioreactor: Applications and limitations in treating high strength industrial wastewater[J]. Chem Eng J, 2013, 225: 109-119.

[7] 卢爱平, 雍文斌, 李　力. 膜生物反应器技术在大型地埋式市政污水处理厂的应用[J]. 中国给水排水, 2011, 27(2): 74-76.

[8] Xiao K, Xu Y, Liang S, *et al*. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: Current state and future prospect[J]. Front Env Sci Eng, 2014, 8(6): 805-819.

[9] Ding A, Zhao Y, Yan Z, *et al*. Co-application of energy uncoupling and ultrafiltration in sludge treatment: evaluations of sludge reduction, supernatant recovery and membrane fouling control[J]. Front Env Sci Eng, 2020, 14(4): 59.

[10] Chen G, Wu Y, Wang Y, *et al*. Effects of microbial inactivation approaches on quantity and properties of extracellular polymeric substances in the process of wastewater treatment and reclamation: a review[J]. J Hazard Mater, 2021, 413: 125283.

[11] Cai W, Liu Y. Enhanced membrane biofouling potential by on-line chemical cleaning in membrane bioreactor[J]. J Membr Sci, 2016, 511: 84-91.

[12] Wang Z, Wu Z, Yin X, *et al*. Membrane fouling in a submerged membrane bioreactor (MBR) under sub-critical flux operation: Membrane foulant and gel layer characterization[J]. J Membr Sci, 2008, 325(1): 238-244.

[13] 李志东, 李　娜, 张洪林. 膜生物反应器(MBR)处理废水的研究进展[J]. 净水技术, 2007,26(1):18-22.

[14] 李绍峰, 崔崇威, 黄君礼. 胞外聚合物 EPS 对 MBR 膜污染的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(2): 266-269.

[15] Cheng X, Liang H, Ding A, *et al*. Application of Fe(Ⅱ)/peroxymonosulfate for improving ultrafiltration membrane performance in surface water treatment: Comparison with coagulation and ozonation[J]. Water Res, 2017, 124: 298-307.

[16] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. Nat Rev Microbiol, 2010, 8(9): 623-633.

[17] Wang Z, Wu Z, Tang S. Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor[J]. Water Res, 2009, 43(9): 2504-2512.

[18] Zuriaga A E, Bes P A, Mendoza R J A, *et al*. Influence of extraction methods on proteins and carbohydrates analysis from MBR activated sludge flocs in view of improving EPS determination[J]. Sep Purif Technol, 2013, 112: 1-10.

[19] Fan H, Xiao K, Mu S, *et al*. Impact of membrane pore morphology on multi-cycle fouling and cleaning of

hydrophobic and hydrophilic membranes during MBR operation[J]. J Membr Sci, 2018, 556: 312-320.
[20] Gao Y, Yang J, Song X, *et al*. An experimental study on the use of a sequencing-batch membrane bioreactor (SBMBR) for the treatment of mixed municipal wastewater[J]. Water Sci Technol, 2021, 83(6): 1459-1469.
[21] Park T, Ampunan V, Lee S, *et al*. Chemical behavior of different species of phosphorus in coagulation[J]. Chemosphere, 2016, 144: 2264-2269.
[22] Cao Z, Fan L. Functional biological anode as electron acceptor for direct oxidation of ammonia nitrogen to N_2 in an anaerobic single-chamber reactor[J]. J Clean Prod, 2023, 382: 135413.
[23] Han X, Qu Y, Dong Y, *et al*. Simultaneous electricity generation and eutrophic water treatment utilizing iron coagulation cell with nitrification and denitrification biocathodes[J]. Sci Total Environ, 2021, 782: 146436.
[24] Wang Z, Ma J, Tang C Y, *et al*. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review[J]. J Membr Sci, 2014, 468: 276-307.

Identification and cleaning of key membrane fouling components for A^2OA-MBR in sewage purification plant

KUANG Ke[1], *SUN Wei*[1], *DONG Jiahao*[2], *LIN Dachao*[2], *WANG Ziyuan*[1], *DU Xing*[1]

(1. Guangzhou Sewage Puification Co., Ltd., Guangzhou 510627, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study aims to identify the key components for membrane fouling and establish maintenance cleaning strategies for A^2OA-MBR in sewage purification plants in southern China. Three membrane bioreactors with different sludge concentration (6 000, 8 000 and 12 000 mg/L) were established and then operated for 60 days. During filtration, membrane cleaning was regularly required. The results indicated that extracellular organic matters from microbial metabolism was the main foulants for membrane fouling, in which protein-like substances were dominant. Owing to the addition of coagulants, inorganic fouling (e.g. aluminum phosphate complexes) was also found in membrane fouling. Regular backwashing based on sodium hypochlorite could remove reversible membrane fouling by oxidation, but irreversible membrane fouling continuously accumulated, forming a dense fouling layer. The exfoliative reversible membrane fouling could be dissolved in concentrate and then accumulated during filtration. The concentration of polysaccharide-like and protein-like substances in concentrate was increased by 42% and 15% when the concentration of NaClO in cleaning solution was increased from 200 to 400 mg/L. With prolonging filtration time, the cleaning efficiency of sodium hypochlorite on membrane fouling was gradually weakened. Membrane fouling developed in bioreactors with more activated sludge was more likely to be removed. The negative influence of cleaning solution on functional bacteria in bioreactors should be avoided.

Key words: sewage purification plant; membrane bioreactor; membrane fouling component; maintenance cleaning; process optimization