

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.007

某水厂超滤膜污染物识别及空间分布特征解析

肖峰¹, 郑德铎², 魏月华¹, 王连弟¹, 田家宇²

(1. 天津市自来水集团有限公司, 天津 300381; 2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

摘要: 超滤膜污染行为与机制已得到广泛研究,但现有成果多聚焦于污染物时序变化规律及整体污染特性分析,对膜表面污染物的空间分布特征研究明显不足。为此,立足于水厂实际运行的超滤膜组件,通过对不同空间点位的膜污染物进行萃取,结合SEM、FTIR、XPS和EDS等原位表征技术,解析了超滤膜污染在膜组件三维空间的分布特征。结果表明,超滤膜污染主要是源于腐殖酸、多糖等有机物与Fe、Mn、Al等无机物形成的复合污染;污染物在膜组件纵向上呈现“进水断面>中间断面>出水断面”的分布规律,横向上呈现“内层>中层>外层”的分布规律。基于此可优化超滤膜的清洗策略,并优化膜组件设计。

关键词: 超滤; 聚偏氟乙烯; 膜污染; 成分识别; 空间分布

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0047-08

Identification and Spatial Distribution Analysis of Membrane Fouling in Ultrafiltration Systems in a Drinking Water Treatment Plant

XIAO Feng¹, ZHENG De-duo², WEI Yue-hua¹, WANG Lian-di¹, TIAN Jia-yu²

(1. Tianjin Waterworks Group Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: At present, the fouling behavior and mechanism of ultrafiltration (UF) membranes have been widely studied, but the existing achievements mostly focus on the temporal variation patterns of foulants and overall fouling characteristics, and the exploration of the spatial distribution features of foulants on membrane surfaces is obviously insufficient. This study investigated UF membrane modules operating in actual water treatment plants. By extracting and analyzing foulants from distinct spatial locations and employing in-situ characterization techniques such as SEM, FTIR, XPS, and EDS, the three-dimensional spatial distribution characteristics of UF membrane fouling within modules were comprehensively elucidated. Results indicated that UF membrane fouling primarily arose from composite contaminants formed by organic substances (e. g., humic acids, polysaccharides) and inorganic components (e.g., Fe, Mn, Al). The foulants exhibited distinct spatial distribution patterns: a longitudinal gradient of “inlet section>middle section>outlet section” and a transverse progression of “inner layer>middle layer>outer layer”. These findings offer technical insights for optimizing membrane cleaning strategies and establish a theoretical foundation for advanced membrane module design.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52370035); 天津水务集团课题(2023KY-09)

通信作者: 魏月华 E-mail: yuehua.wei@tjce.com; 田家宇 E-mail: tjy800112@126.com

Key words: ultrafiltration; PVDF; membrane fouling; composition identification; spatial distribution

随着全球水环境污染问题日益严峻以及水质标准不断提高,城市水厂在保障供水安全和可持续发展方面面临着严峻挑战^[1]。超滤技术具有良好的分离性能,能够高效去除水中的微小颗粒、胶体物质及致病微生物,已成为给水处理领域的核心技术之一。然而,膜污染问题制约了其推广应用,不仅导致膜系统的产水量下降、运行压力升高,而且频繁清洗操作会增加运行成本,缩短膜的使用寿命。如何优化膜污染控制,提升超滤膜运行的经济性和稳定性,已成为当前亟待解决的技术难题^[2]。

虽然饮用水处理中超滤膜的污染行为与机理已被广泛研究,但现有研究主要集中在膜面污染物的时间变化规律及整体污染特性分析上,对污染物在膜组件内部的空间分布特征研究不足^[3-4]。在实际工程中发现,压力驱动式超滤膜组件内部沿水流方向会形成显著的纵向污染梯度,同时污染物在膜丝径向截面上的分布也不均匀^[5]。这种空间分布差异导致传统基于时间维度或整体污染指标的清洗策略存在明显局限性,既可能造成局部污染残留,又易引发过度清洗造成膜材料老化损伤^[6]。

天津某水厂采用“脉冲澄清池+压力驱动式超滤膜”短流程处理工艺,由于澄清池出水未经砂滤处理,因此超滤进水中仍含有一定量的微小絮体,进一步加剧了运行过程中膜污染与控制问题的复杂性^[7]。本研究旨在解析超滤膜污染的主要成分,并揭示其空间分布特征,从而为优化清洗策略和确保水厂超滤系统的高效运行提供技术支持。

1 工程概况

1.1 原水水质

天津某水厂采用“预处理+上向流炭吸附脉冲澄清池+超滤膜”的短流程处理工艺,于2020年投入使用,设计处理规模为 $30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其原水来自南水北调中线供水,聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜组件拆解时间为2024年9月,该月的原水水质指标平均值如下:浊度为1.3 NTU, pH为8.1,高锰酸盐指数为1.9 mg/L,藻类为 1.652×10^4 个/L,菌落总数为442 CFU/mL,氨氮为0.10 mg/L,总硬度为113 mg/L。

1.2 前段工艺运行参数

超滤膜前段工艺流程如下:首先通过预臭氧接触池,利用 O_3 的强氧化性氧化分解水中有机物,有效降低色度和嗅味;之后进入机械混合池,按有效铝为0.6 mg/L、有效铁为3.6 mg/L投加聚合氯化铝和三氯化铁,同时投加粉末活性炭构建复合混凝-吸附体系;上向流炭吸附脉冲澄清池将混凝剂、粉末活性炭与池中悬浮层泥渣有机结合,实现有机物吸附与颗粒物的同步去除,澄清池出水浊度为0.20~0.45 NTU,保证超滤进水要求(浊度 ≤ 1.5 NTU)。为进一步提高超滤膜组件长期运行的稳定性,在超滤单元前端设置了过滤精度为200 μm 的自清洗过滤器,它可以有效降低超滤进水颗粒物含量。

1.3 超滤膜运行方式

超滤膜运行主要包括产水、气水反冲洗、维护性清洗(EFM)和恢复性清洗(CIP)4个操作步骤,具体运行方式如下:超滤膜每运行1 h进行一次120 s的气水反冲洗,每周进行一次EFM清洗(NaClO 浓度为500 mg/L),以维持产水性能。每年进行一次CIP清洗,采用先碱后酸的清洗方式,碱性清洗剂为1 500 mg/L的NaOH和2 000 mg/L的 NaClO ,酸性清洗剂为8 000 mg/L的柠檬酸,以去除膜表面积累的不可逆污染物,降低跨膜压差并恢复过滤性能。

研究选用的膜组件位于超滤车间中部,在进行拆解前处于稳定运行状态,运行参数如下:水温约25 $^{\circ}\text{C}$,膜通量为 $32.7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,跨膜压差(TMP)维持在40~50 kPa。膜组件拆解时间为9月初,拆解前该膜组件已在上一次CIP清洗后连续运行了10个月,处于EFM清洗周期的第6天,距上一次气水反冲洗约40 min,其膜表面污染物的积累与分布特征对于水厂长期运行的膜组件而言具有较好的代表性。

2 材料与方法

2.1 膜丝取样方法

从实际水厂的超滤膜系统中选取一个典型膜组件,在膜组件不同的空间位置截取膜丝样品,以确保采样的全面性和代表性。具体取样方法如下:纵向上在膜组件的不同断面位置进行采样,包括进水断面、中间断面和出水断面;横向上在每个断面

位置,从膜组件的不同层次采样,包括内层、中层和外层(见图1)。从每个采样区域裁剪长度为20 cm的膜丝样品,并将样品用自封袋密封后于0℃冷冻保存,以防止污染物损失或二次污染。采集的膜丝用于污染物组成及膜污染空间分布特征分析。

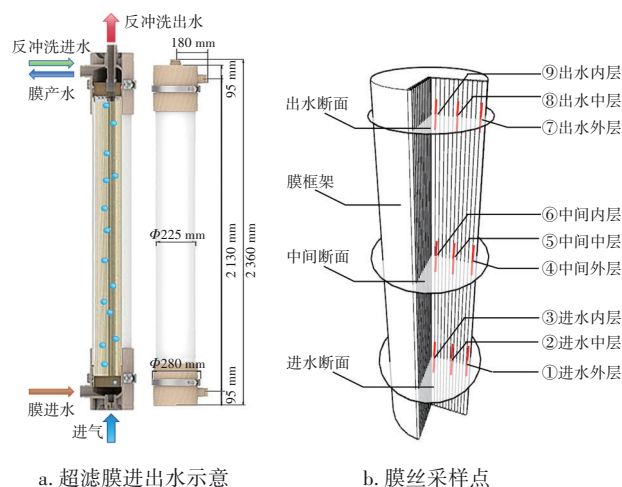


图1 超滤膜进出水示意及膜丝采样点

Fig.1 Schematic diagram of feed and permeate flow for the UF membrane and filament sampling points

2.2 膜污染物的萃取与分析

2.2.1 萃取方法

采用0.1%的柠檬酸溶液作为化学溶解药剂,对超滤膜污染物进行提取与分析。取不同空间点位相同长度的超滤膜膜丝浸泡于50 mL柠檬酸溶液中,并超声10 min以增强污染物的溶解,静置萃取24 h,对萃取液进行分析。

2.2.2 水质检测方法

超滤膜污染物萃取液的有机污染物分析中,采用苯酚-硫酸法测定多糖(PS),采用改良Lowry法测定蛋白质(PN),采用TOC总有机碳分析仪(TNM-LROHS,日本岛津)测定溶解性有机物(DOC),采用紫外分光光度法测定 UV_{254} 。测定中均扣除柠檬酸溶液的空白值,避免柠檬酸对分析结果的干扰。

对于无机污染物分析,采用原子吸收光谱法(AAS)测定Ca和Mg元素的含量,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定Fe、Mn和Al元素的含量,从而表征萃取液中无机污染物含量。

2.3 膜污染的原位表征方法

2.3.1 膜结构及元素分析

采用Nova Nano SEM450扫描电子显微镜(SEM)对膜污染物、膜表面和膜断面微观形态特征进行检

测分析。采用液氮对超滤膜膜丝进行淬断处理,通过SEM拍摄膜断面垂直部位的图像,并在每个断面上测量污染层厚度,随机选取三个位置的测量值,取其平均值作为最终结果。采用OCTANE PLUS能谱分析仪(EDS)分析污染层的主要元素。

2.3.2 官能团分析

采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)对膜污染物及膜表面官能团进行分析,光谱范围为4 000~400 cm^{-1} 。采用Thermo K-Alpha X射线光电子能谱(XPS)对污染物的特征元素及其化学态进行分析。

3 结果与讨论

3.1 膜污染物主要成分的识别

将膜组件切开后,肉眼可见进水断面处存在较多粉末状松散沉积的污染物。为初步判断超滤膜的主要膜污染物成分,首先刮取污染物粉末,进行了微观形貌与化学组成分析。

3.1.1 扫描电子显微镜分析

采用SEM观察膜污染物粉末的形貌特征,结果见图2。在100 μm 和50 μm 低倍放大下可以看到粉末主要由较大的不规则颗粒构成,分布较为松散。随着放大倍数的增加,在20、10 μm 高倍放大下,可以更清晰地观察到这些颗粒表面粗糙且具有明显的晶体特征,其周围有细小的凝胶状物质。这种形貌特征表明膜污染物可能是由多种物质组成的复合污染物,较大的不规则结晶颗粒可能是无机盐,如铁盐和铝盐的结晶,这些盐类可能来自水处理过程中的混凝剂或自然水体中的无机离子。凝胶状物质可能源于多糖、蛋白质或腐殖酸类有机物,此类物质易黏附于超滤膜上并形成凝胶,其在进行研磨后呈现出非晶态。

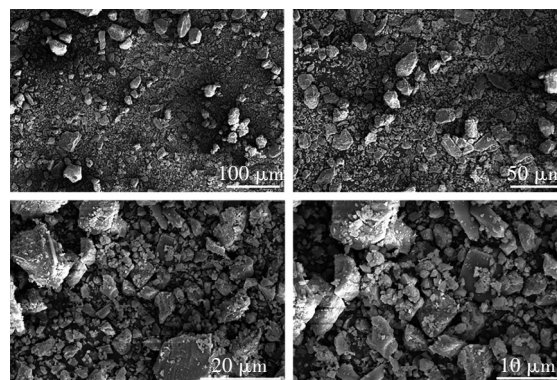


图2 膜污染物的SEM照片

Fig.2 SEM images of membrane foulants

3.1.2 傅里叶变换红外光谱分析

FTIR 光谱分析结果显示,膜污染物粉末在波数为 $3\ 200\sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 范围内存在明显的 O—H 伸缩振动峰,为有机物的化学键; $1\ 658\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是—COOH(羧基)的 C=O 伸缩振动峰,表明存在腐殖酸类污染物; $1\ 070\text{ cm}^{-1}$ 处为 C—O 伸缩振动峰,表明存在多糖或具有类似含氧官能团的有机污染物。从 FTIR 光谱得出,膜污染物中的有机污染物主要由腐殖酸和多糖类物质组成,这些成分是天然有机物的重要组分,可能通过原水中的溶解性有机物富集并在膜表面沉积,从而导致膜污染。

3.1.3 能谱(EDS)分析

进一步利用能谱仪分析膜污染物粉末的元素组成,结果表明,C、N、O、F、Mg、Al、Si、Cl、Ca、Mn、Fe 的质量百分比分别为 19.03%、3.89%、39.88%、2.33%、0.65%、5.29%、4.17%、0.33%、1.43%、0.25% 和 22.73%,原子百分比分别为 29.86%、5.24%、46.98%、2.32%、0.51%、3.69%、2.80%、0.18%、0.67%、0.09% 和 7.67%。可见,膜污染物由有机元素和无机元素共同组成。其中,有机元素以 C、N、O 为主,高含量的 C 和 O 表明污染物中富含多糖、腐殖酸等有机物,而较低的 N 含量则表明蛋白质、肽链或氨基酸等含氮有机物含量较少。无机元素方面,膜污染物中检出 Mg、Al、Si、Ca、Mn 和 Fe 等,其中 Al 和 Fe 含量较高,表明污染层可能含有金属沉淀物,如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$,这可能与水厂采用三氯化铁和聚合氯化铝作为混凝剂有关。Si 则可能来源于水中细小颗粒物或硅酸盐的沉积。

综上所述,超滤膜污染主要由有机污染物与无机盐类复合形成。SEM 观察到污染物中存在晶体颗粒,EDS 分析确认其主要由 Fe、Al 等组成,可以初步判断 Fe 和 Al 的无机组分在污染层形成过程中发挥了关键作用,而 FTIR 分析进一步表明污染物中富含腐殖酸和多糖类有机物。根据以上结果,对膜污染形态与污染物的空间分布特征进行了探究。

3.2 超滤膜污染的空间分布特征

3.2.1 膜丝形貌分析

原始新膜表面较为平整光滑,而污染后的膜表面会积累大量的颗粒物质,从而形成粗糙的污染层。通过对比可以看出,沿纵向方向(膜组件内部水流方向),膜表面的污染程度存在显著梯度变化,具体表现为进水断面的污染最严重,其次为中间断

面,出水断面则污染较轻(见图3)。造成这一现象的主要原因是超滤膜系统采用下进上出运行模式,污染物易积累在超滤膜底部,造成严重的膜污染^[8]。在横向分布上,从外层到中层及内层,污染颗粒的分布密度逐渐增加,表明内层超滤膜污染较重,外层污染较轻,这是由于反冲洗和维护性化学清洗过程中沉积于内部膜丝上的污染物难以排出,而外层膜丝上污染物的清洗效率较高,特别是靠近出水断面的外层膜丝,其表面接近新膜状态。

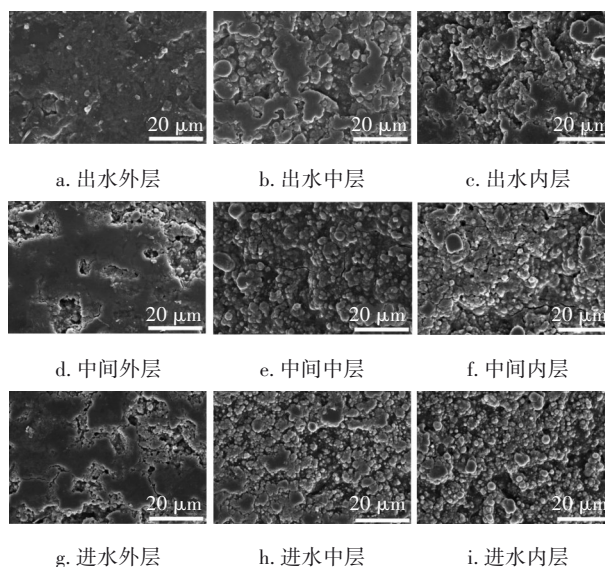


图3 不同空间点位下超滤膜表面的SEM照片

Fig.3 SEM images of the UF membrane surface at different spatial points

不同空间点位下污染膜断面微观形貌见图4。

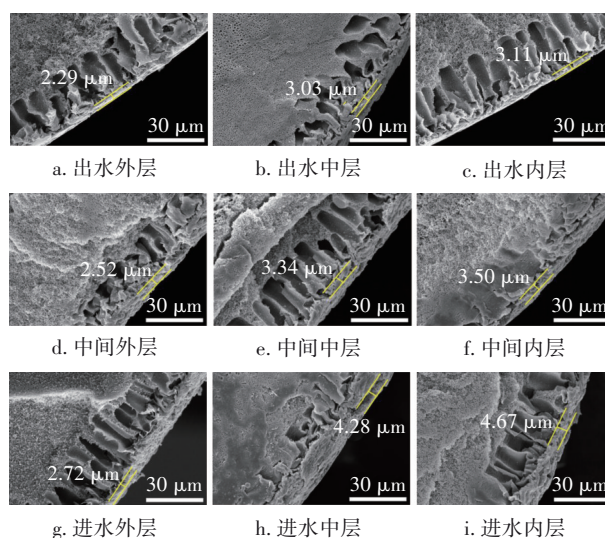


图4 不同空间点位下超滤膜断面的SEM照片

Fig.4 SEM images of the cross-section of UF membrane at different spatial points

新膜表面分离层的断面结构平滑有序,无污染层。由图4可以看出,进水断面的内层膜丝上污染物堆积最为严重,污染层厚度达到 $4.67\ \mu\text{m}$,而出水断面的外层膜丝污染最轻,污染层厚度仅为 $2.29\ \mu\text{m}$ 。从纵向上来看,污染层厚度变化趋势为进水断面>中间断面>出水断面,表明从进水端至出水端膜污染逐渐减轻;从横向上看,污染层厚度从外层至内层逐渐增加,表明膜污染越来越重。以上结果与图3较为一致。

3.2.2 有机污染物分析

天然有机物(NOM)是水处理中常见的污染物,广泛存在于地表水和地下水中,成分复杂,包括腐殖质、多糖、蛋白质等^[9]。多糖和蛋白质作为NOM的重要组分,其分子之间可通过静电、架桥等作用形成共聚物,从而加剧凝胶层的形成并造成严重的膜污染^[10]。因此,对超滤膜表面的多糖、蛋白质进行了量化分析以进一步明晰膜污染空间分布规律,结果见图5。多糖含量在超滤膜组件中表现出明显的纵向和横向分布差异。其中,纵向上进水断面的多糖含量最高,中间其次,出水断面最低,含量分别为 1.51 、 0.98 、 $0.76\ \text{g}/\text{m}^2$;横向上内层的多糖含量最高,中层次之,外层最低,含量分别为 1.46 、 0.91 、 $0.89\ \text{g}/\text{m}^2$ 。而蛋白质含量分布较为均匀($0.42\sim 0.48\ \text{g}/\text{m}^2$),无明显的空间分布差异。

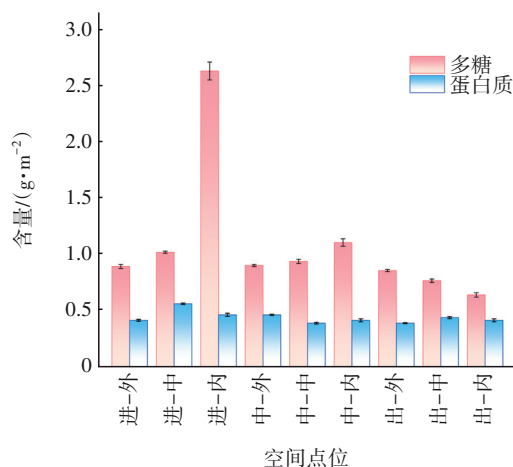


图5 超滤膜表面的多糖、蛋白质含量

Fig.5 Distribution of polysaccharide and protein contents on the surface of UF membrane

进一步采用DOC与 UV_{254} 作为NOM的综合性指标考察了超滤膜表面的有机污染物空间分布特征,与图5中各点位对应的DOC含量依次为 2.91 、

3.08 、 4.23 、 2.97 、 2.82 、 2.64 、 2.45 、 2.66 、 $3.03\ \text{g}/\text{m}^2$, UV_{254} 分别为 1.34 、 1.75 、 2.61 、 1.22 、 1.45 、 1.27 、 0.87 、 0.97 、 $1.25\ \text{cm}^{-1}$,且DOC与 UV_{254} 在超滤膜不同断面和不同层次上的分布规律具有较好的一致性,纵向上均呈现进水断面>中间断面>出水断面的趋势,横向分布呈现内层>中层>外层的空间分布特征(如图6所示)。

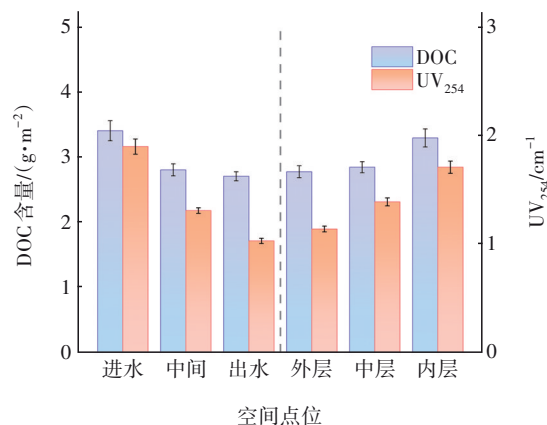


图6 超滤膜表面的DOC含量和 UV_{254} 分布

Fig.6 Distribution of DOC content and UV_{254} on the surface of UF membrane

3.2.3 膜表面官能团分析

膜表面特征官能团的FTIR分析显示,原膜存在6个明显的特征峰: $1402\ \text{cm}^{-1}$ 附近是C—F的变形振动吸收峰; $1180\ \text{cm}^{-1}$ 附近是C—F的拉伸振动吸收峰; 760 和 $673\ \text{cm}^{-1}$ 处是PVDF的 α 相特征峰; 878 和 $840\ \text{cm}^{-1}$ 是PVDF的 β 相特征峰^[11]。在超滤过程中被污染之后,膜表面出现了三个新的特征峰,其中 $3280\ \text{cm}^{-1}$ 处为O—H的伸缩振动峰, $1070\ \text{cm}^{-1}$ 处为C—O的伸缩振动峰,这两个峰是与多糖类化合物相关的振动峰。 $1658\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰对应于羧基的C=O伸缩振动,表明存在腐殖酸类污染物。

由纵向FTIR观察可知,被污染后的超滤膜表面PVDF特征峰逐渐减弱,表明膜表面逐渐被沉积的污染物所覆盖。从膜污染特征峰的强度来看,纵向上峰强排列顺序为:进水断面>中间断面>出水断面,表明有机污染从进水至出水逐渐减弱;横向上峰强排列顺序为:内层>中层>外层,表明有机污染由内向外分布逐渐减少。

通过XPS分析膜表面C1s区域的元素组成以进一步揭示膜污染的空间变化规律,结果如图7所示。超滤膜C元素精细谱图中出现了4个峰,分别位于 284.8 、 286.5 、 288.2 、 $290.7\ \text{eV}$ 处,依次为C—C、C—O、

C=O 和 C—F₂ 的峰。

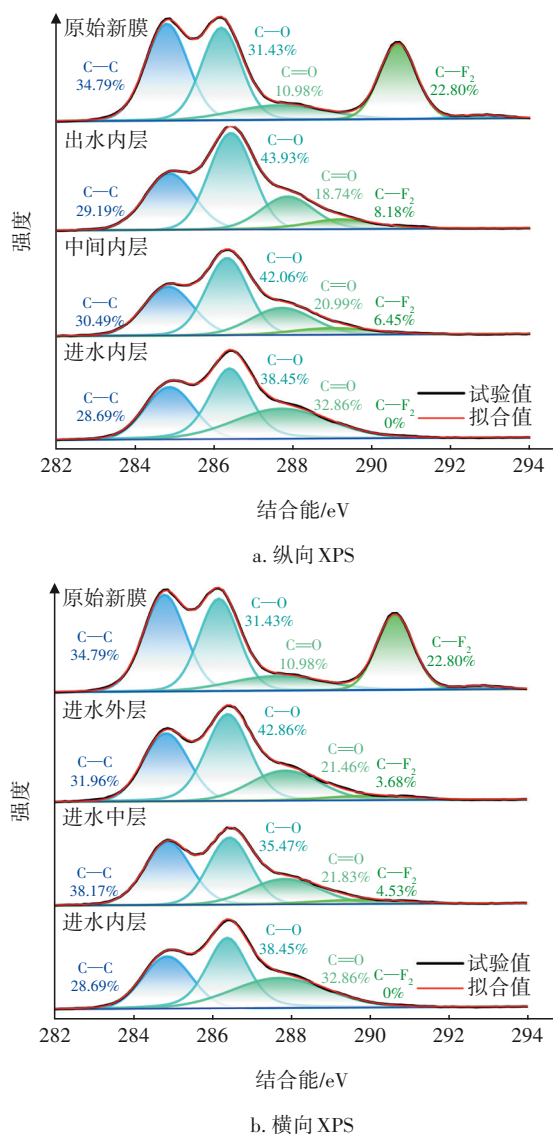


图7 超滤膜XPS图

Fig.7 XPS spectrum of the UF membrane

由图7(a)可知,原始新膜的C=O峰占比为10.98%,随着超滤膜被污染后,从出水端至进水端C—F₂特征峰面积占比越来越少,而C=O特征峰面积占比越来越大,进一步证实了超滤膜沿纵向上污染程度从进水端至出水端呈梯度分布,这与FTIR分析结果相一致。横向分析结果同样反映C=O特征峰面积占比由外向内逐渐增大的趋势,表明膜污染越来越重。综上所述,超滤膜有机膜污染的空间分布规律为:纵向上进水断面>中间断面>出水断面;横向为内层>中层>外层。

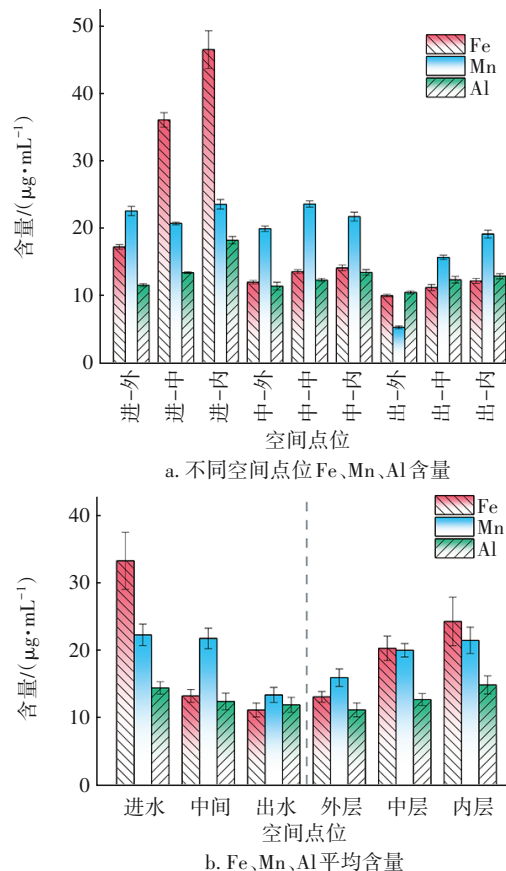
3.2.4 膜面污染物元素组成

进一步采用EDS对不同空间位置膜表面污染

层的元素组成进行分析,结果表明,原膜主要由C、O、F三种元素组成,其中F元素主要源于PVDF膜材料,随着不同空间位置被污染覆盖后,F元素的原子百分比明显降低。O元素既是有机污染物的典型元素,同时也是金属氧化物的组成元素。从纵向看,Ca、Mg、Fe、Mn、Al无机元素含量在不同断面均呈现进水>中间>出水的规律,表明无机污染沿纵向上由进水至出水呈现出梯度分布的趋势。横向分布上原子百分比>5%的Mn、Al含量呈现内层>中层>外层的规律,这与萃取测定的Mn、Al含量的分布趋势一致,说明超滤膜内层可能更容易吸附、络合或沉积这些金属元素。

3.2.5 无机污染物分析

与Ca和Mg相比,Fe、Mn、Al在超滤膜表面的分布表现出更为明显的空间变化规律:纵向分布上,三种金属含量均呈现进水断面>中间断面>出水断面的趋势;横向上,呈现内层含量最高、中间层其次、外层最低的趋势(见图8)。这与有机污染的空间分布规律相一致,可能是由于NOM具有较强的吸附性,更容易与金属离子或金属氧化物发生络合、交联等反应。



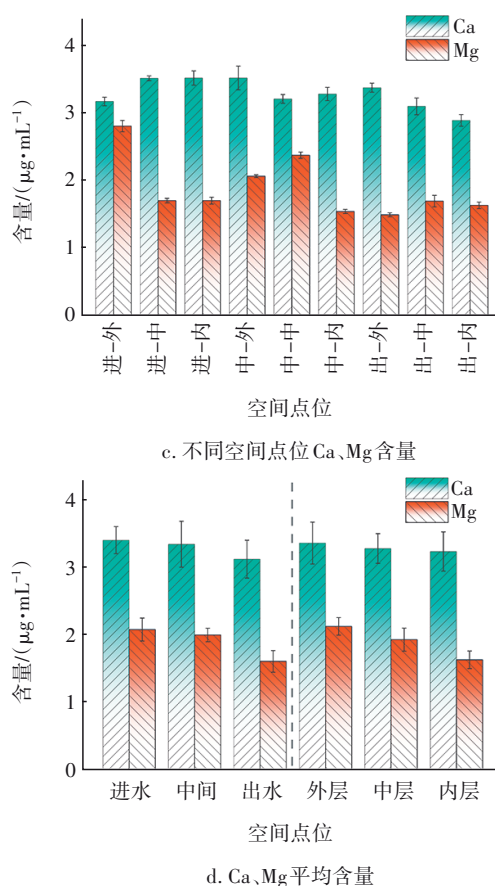


图8 超滤膜不同空间点位5种金属含量分布

Fig.8 Distribution of five metal contents on the surface of UF membrane

Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是天然水体中普遍存在的硬度离子,具有桥联作用,能够促进有机物间的聚集及其与膜材料之间的相互作用,从而加重膜污染。如图8所示,Ca与Mg在超滤膜纵向上具有与有机物类似的梯度分布(进水断面>中间断面>出水断面),这可能是由于两者通常易与水中的有机物形成复合物,从而在膜表面产生沉积。但在横向上,Ca与Mg则呈现出与有机物相反的分布趋势,即外层>中层>内层,出现该现象的原因仍有待于进一步解析。

3.2.6 膜污染因素的相关性

采用 Pearson 相关性分析研究同元素以及各指标间的相关性,结果如图9所示。由图9(a)可知,O与Fe、Mn、Al相关性系数分别为0.73、0.85、0.97,均为正相关,表明其在超滤膜表面的存在形式可能是氧化物或氢氧化物,如 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 MnO_2 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等。而Fe、Mn、Al和Ca两两之间均具有强相关性,证实了超滤膜表面的无机污染是由多种金属共沉淀造成的。由图9(b)可知,Fe、Al与 UV_{254} 具有强显

著性关系($p < 0.001$, 相关性系数分别为0.94和0.92),说明腐殖酸类物质更易于Fe、Al三价金属离子发生吸附和络合。DOC与PS有较强显著性关系($p < 0.01$, 相关性系数为0.88),DOC与 UV_{254} 则有更强的正相关性($p < 0.001$, 相关性系数为0.95),这进一步证实了造成该水厂超滤膜污染的有机物是以腐殖酸为主,多糖其次。

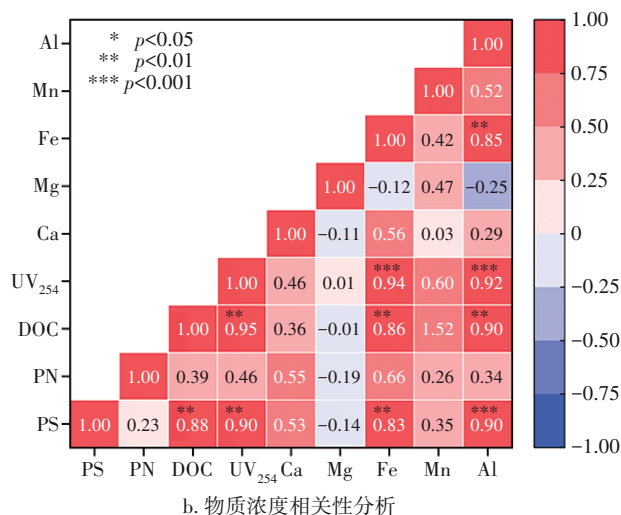
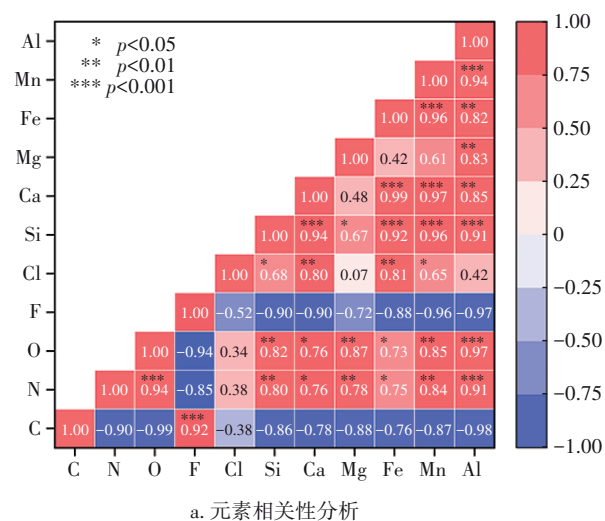


图9 相关性分析

Fig.9 Correlation analysis

4 结论

① 水厂超滤膜污染是由有机物(如腐殖酸和多糖)和无机物组成的有机-无机复合污染,有机物主要为腐殖酸和多糖,无机物主要为Fe、Mn、Al及其水解形成的胶体与微小颗粒。

② 通过膜污染物萃取测定及多种原位表征分析,进一步证实了超滤系统中膜污染存在明显的

空间分布差异:在纵向上,有机污染物和无机污染物均呈现“进水断面>中间断面>出水断面”的污染规律;在横向上,污染程度排序为“内层>中层>外层”。膜组件的进水断面和内层膜污染最为严重,出水断面和外层污染较轻。

③ 该水厂采用NaClO进行维护性化学清洗,但针对膜表面的有机-无机复合污染,该方法仅可以氧化去除有机污染物,在无机污染物的长期累积下,超滤膜表面颜色逐渐变深,形成难以去除的无机污染层。因此,建议采用具有金属离子螯合作用的酸性物质进行周期性清洗,以有效去除膜表面无机污染层。此外,根据膜污染空间分布特征,超滤膜供应商亦可考虑对膜组件构型进行优化,如采用多点进水以应对膜组件纵向污染差异的问题,改变横断面膜丝密度以应对横向污染差异等。

参考文献:

- [1] 张岚. 谈对2022年版《生活饮用水卫生标准》的理解与认识[J]. 中国给水排水, 2023, 39(22): 1-5.
ZHANG Lan. Understanding and recognition of *Standards for Drinking Water Quality* (GB 5749-2022) [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(22): 1-5 (in Chinese).
- [2] 宋佳临,王明远,张逸,等. 不同超滤组合工艺处理南水北调水源水效能及膜污染[J]. 中国给水排水, 2024, 40(13): 28-33.
SONG Jialin, WANG Mingyuan, ZHANG Yi, et al. Treatment efficiency and membrane fouling analysis of different ultrafiltration combined processes for source water of the South-to-North Water Diversion Project [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(13): 28-33 (in Chinese).
- [3] MA B, DING Y, LI W, et al. Ultrafiltration membrane fouling induced by humic acid with typical inorganic salts [J]. Chemosphere, 2018, 197: 793-802.
- [4] ZHAO J, JIANG T, CHENG Y, et al. The influence of micro-flocculation on membrane fouling during ultrafiltration of dissolved organic matter [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 56: 104361.
- [5] GUO Y, YAO J, YAN W, et al. Membrane fouling in engineering nanofiltration process for drinking water treatment: the spatial and chemical aspects [J]. Journal of Membrane Science, 2024, 695: 122491.
- [6] CHENG Q, LEE S, REN X, et al. Spatial variability of cake layer in membrane fouling of full-scale MBR: new insights and implications [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(6): 114126.
- [7] 肖峰,魏月华,王连弟. 超滤膜在天津市某水厂短流程工艺中的运行实践研究[J]. 城镇供水, 2024(3): 108-115.
XIAO Feng, WEI Yuehua, WANG Liandi. Practical operation of external-pressure ultrafiltration membrane in the shortened process of a waterworks in Tianjin [J]. City and Town Water Supply, 2024(3): 108-115 (in Chinese).
- [8] LEE S, GOH S, SUWARNO S R, et al. Characterizing spatial distribution of fouling on flat-sheet membranes in a pilot-scale gravity-driven membrane reactor for seawater pretreatment [J]. Journal of Water Process Engineering, 2021, 44: 102436.
- [9] ZHOU H, LIU T, GRAHAM N, et al. Effect of seasonal variation of natural organic matter on the fouling of hydrophilic ultrafiltration membranes [J]. Journal of Water Process Engineering, 2025, 70: 107125.
- [10] 曾碧珍. 膜分离过程中多糖物质造成膜污染的相关机制研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2023.
ZENG Bizhen. Study on the Mechanism of Membrane Fouling Caused by Polysaccharides in Membrane Separation Process [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2023 (in Chinese).
- [11] CHEN G, LI S, LI X, et al. Enhanced gravity-driven membrane filtration for purifying roof rainwater using multi-walled carbon nanotubes tuned PVDF hollow fiber membranes [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 356: 129869.

作者简介:肖峰(1981-),男,四川成都人,工学硕士,正高级工程师,研究方向为膜法水处理理论与技术。

E-mail:Feng.xiao@tjce.com

收稿日期:2025-02-25

修回日期:2025-03-19

(编辑:李德强)