

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.09.017

分子质量对天然水体有机物正渗透膜分离的影响

朱明飞¹, 郑成龙¹, 崔雯¹, 赵路¹, 鞠欣雨¹, 王一涵¹,
张欢欢¹, 王琳^{1,2}, 张志斌¹

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东建筑大学 资源与环境创新研究院, 山东 济南 250101)

摘要: 利用大分子质量海藻酸钠、中分子质量单宁酸等目标有机物及天然有机物系统研究分子质量对正渗透膜分离的影响。结果显示,相比于大分子质量海藻酸钠和小分子质量黄腐酸,中分子质量单宁酸及牛血清白蛋白产生的膜污染较重,单宁酸、牛血清白蛋白、黄腐酸、海藻酸钠的通量损失依次为54.72%、49.91%、29.64%、16.52%;当水样中天然有机物以大、中、小分子质量分布特征为主时,通量损失分别为46.5%、54.8%、50.5%,中分子质量天然有机物引起的膜污染较重;此外,大分子质量天然有机物的含量越多,膜污染越轻,正渗透膜对各分子质量天然有机物的截留率均在89%以上。结合XDLVO理论测定污染物与膜之间的界面能垒,以大分子质量有机物为主的水样具有较大的界面能垒(海藻酸钠 $\Delta E_b = 5.71 \times 10^{-20}$ J,滤池反冲洗水 $\Delta E_b = 9.32 \times 10^{-21}$ J),表明污染物与正渗透膜之间的排斥作用较大,膜污染较轻。

关键词: 正渗透; 分子质量; 有机物; 膜污染; 界面能垒

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)09-0107-09

Effect of Molecular Weight on Forward Osmosis Membrane for Separation of Organic Matters in Natural Water

ZHU Ming-fei¹, ZHENG Cheng-long¹, CUI Wen¹, ZHAO Lu¹, JU Xin-yu¹,
WANG Yi-han¹, ZHANG Huan-huan¹, WANG Lin^{1,2}, ZHANG Zhi-bin¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Resources and Environment Innovation Institute, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: This paper investigated the effect of molecular weight on the performance of forward osmosis membrane for separation of the target organic matters such as macromolecular weight sodium alginate (SA) and medium molecular weight tannic acid (TA) and natural organic matters (NOM). Compared with macromolecular weight SA and small molecular weight fulvic acid (FA), the fouling of membrane for separating medium molecular weight TA and bovine serum albumin (BSA) was more serious, and the flux loss of the membrane for separating TA, BSA, FA and SA was 54.72%, 49.91%, 29.64% and 16.52%, respectively. When the NOM in water samples were mainly distributed in large, medium and small molecular weight, the flux loss was 46.5%, 54.8% and 50.5%, respectively, and the

基金项目: 山东省“青创人才引育计划”立项建设团队项目; 山东建筑大学博士基金资助项目(XNBS1629)

通信作者: 王琳 E-mail: lynn04@126.com

membrane fouling caused by NOMs with medium molecular weight was more serious. In addition, the higher content of macromolecular weight NOM would reduce the membrane fouling, and the rejection rate of NOM with different molecular weights was always more than 89%. The interfacial energy barrier between the foulants and membrane was determined according to XDLVO theory. The water samples mainly composed of macromolecular organic matters had large interfacial energy barriers ($\Delta E_b=5.71 \times 10^{-20}$ J for SA and $\Delta E_b=9.32 \times 10^{-21}$ J for filter backwash water), indicating that the repulsion between foulants and the membrane was large and the membrane fouling was not serious.

Key words: forward osmosis; molecular weight; organic matter; membrane fouling; interfacial energy barrier

正渗透(FO)作为一种新兴的无外加操作压力的膜法水处理技术,其具有能耗低、膜污染轻、污染物截留率高和出水水质好等优点^[1-3]。在“碳达峰、碳中和”的“双碳”背景下,FO作为传统压力膜的替代工艺,在海水淡化^[4-5]、地表水净化^[6-7]、污水处理^[8-9]等领域具有广阔的应用前景。此外,在组合工艺中,FO在处理反渗透/纳滤浓水^[10]、自来水厂生产废水^[11]等方面也展现出较高的效能。

FO在应用过程中不可避免地会产生膜污染,在进行有机膜污染研究时往往将大分子质量多糖类海藻酸钠(SA)及中分子质量蛋白类牛血清白蛋白(BSA)代替与微生物代谢相关的有机物,以土壤中常见的小分子质量腐殖类黄腐酸(FA)和中分子质量多酚化合物单宁酸(TA)代替陆源有机物进行研究^[12-15]。有研究认为^[16-18],有机物分子质量会影响膜分离过程,如中分子质量TA、BSA造成的膜污染较重,大分子质量SA造成的膜污染则相对较轻;Wang等人^[7]的研究表明,水体的中、小分子质量天然有机物(NOM)含量越多,膜污染越严重;陈天宇^[11]研究发现,含有较多大分子质量NOM的自来水厂滤池反冲洗水比滤池进水引起的膜污染轻,进一步表明了有机物分子质量会影响膜分离过程。但现有研究中很少系统地对比单一分子质量分布特征的有机物对FO膜分离的影响。笔者选用SA、BSA、TA、FA进行配水试验,利用微污染地表水,通过混凝、超滤得到中、小分子质量的特征水样,以滤池反冲洗水作为大分子质量的特征水样,同时结合XDLVO理论测定“污染物与膜”之间的界面能垒,系统、全面地探究有机物分子质量分布特征对FO膜分离的影响,旨在为自来水厂实际运行及FO膜污染控制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 水样与材料

试验采用单宁酸、黄腐酸、牛血清白蛋白、海藻酸钠作为目标有机物配制水样,采用卧虎山天然地表水和卧虎山给水厂滤池反冲洗水作为试验水样。使用平板三醋酸纤维素(CTA) FO膜,有效过滤面积为 0.0042 m^2 。

1.2 分析仪器与设备

试验仪器包括总有机碳测定仪(TOC-LCPH)、紫外-可见分光光度计、HPSEC-UV-TOC凝胶色谱仪、三维荧光光谱分析仪、纳米粒度及Zeta电位分析仪、水接触角测试仪、固体表面Zeta电位分析仪、热场发射扫描电镜。

1.3 预处理试验

使用聚合氯化铝(PAC)作为混凝剂,PAC投加量分别为0、20、40、60、80、100、150、200 mg/L;取 $0.45 \mu\text{m}$ 微滤膜过滤后的浓缩水样各1 L进行混凝试验,试验在六联搅拌仪上进行,重复3次。混凝条件为先快速混合搅拌(200 r/min)3 min,然后以 60 r/min 搅拌15 min,静置30 min后取上清液,过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后测定水样相关指标。

使用超滤杯进行超滤试验,平板超滤膜的材质为聚醚砜,截留分子质量(MWCO)分别为100、5 ku。对混凝后的浓缩水样进行超滤试验,从而得到以中、小分子质量NOM为主的特征水样。

1.4 正渗透试验

FO试验装置如图1所示。在膜支撑层朝向原料液方向(AL-DS模式)、错流流速为 1000 mL/min 下进行有机物分子质量对FO膜分离的影响研究。将原料液内各水样初始TOC浓度均调至 10 mg/L ,并保证背景溶液离子强度一致;采用NaCl作为汲取

液溶质,浓度稳定在2 mol/L。使用10 mmol/L NaCl的背景溶液进行基线试验,试验开始前至少预压30 min,以保证初始通量水平相一致,而后进行480 min污染试验^[6-8,19]。根据单位时间内原料液溶液质量及有机物浓度的变化计算水通量、吸附量和截留率,并在试验结束时进行膜阻力分析^[7,11]。

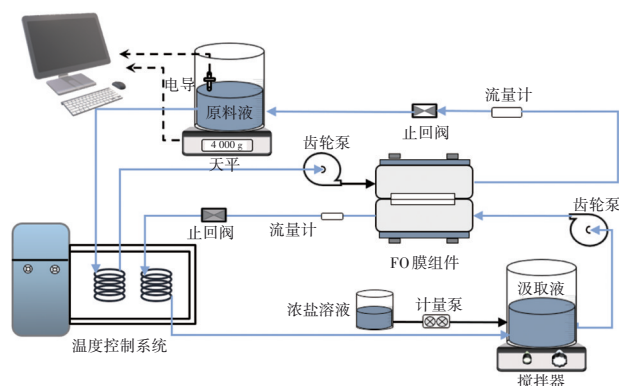


图1 FO试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of FO membrane filtration unit

1.5 界面能垒计算

测定污染物的颗粒尺寸(d_p)、Zeta电位(ζ_f)、接触角和膜表面Zeta电位(ζ_m)、接触角,通过XDLVO理论计算出“污染物与FO膜”之间的界面能垒^[20-23]。污染物与膜的总相互作用能用式(1)表示。

$$U^{\text{TOT}}(h) = U^{\text{AB}}(h) + U^{\text{LW}}(h) + U^{\text{EL}}(h) \quad (1)$$

式中: U^{AB} 、 U^{LW} 、 U^{EL} 分别为酸碱作用能、范德华作用能、静电双电层作用能。 U^{TOT} 是关于污染物与膜表面间距 h 的函数,最大值为界面能垒 ΔE_b , ΔE_b 越大表明污染物与膜之间的排斥作用越大,污染物分子则越不容易吸附在膜上,膜污染越轻^[20-22]。

2 结果与讨论

2.1 各水样特性分析

2.1.1 基本水质指标

使用台式纳滤设备将天然原水及滤池反冲洗水浓缩至TOC浓度约为10 mg/L。对原水、浓缩水进行初始水质指标检测,结果表明,天然原水、浓缩天然原水、滤池反冲洗水、浓缩滤池反冲洗水的TOC分别为2.16、9.92、3.46、10.24 mg/L,UV₂₅₄分别为0.029、0.135、0.042、0.125 cm⁻¹,SUVA分别为1.344、1.361、1.212、1.221 L/(mg·m),pH分别为8.083、7.719、7.963、7.682,电导率分别为586.3、2345.3、705.8、2382.6 μS/cm。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),该水样的有机物浓度

指标已达到Ⅲ类水以上,属于较为典型的微污染水源水质。原水经过约4倍浓缩后,TOC达到10 mg/L左右,两种水样浓缩前后SUVA基本相近,浓缩前后芳香性有机物占比基本相同。此外,浓缩过程中电导率也成倍数增加,对渗透压影响较小。

2.1.2 三维荧光特征

天然水体中常见有机物的三维荧光峰主要分为两大类,即类腐殖质A峰和C峰以及类蛋白B峰和T峰,类蛋白峰与微生物代谢活动相关^[11,24]。如图2(a)、(b)所示,浓缩天然原水与滤池反冲洗水中有机物荧光响应位置及强度基本一致,荧光响应区域主要为A峰、C峰,表明以富里酸和腐殖酸为主的腐殖类NOM含量较多,而B峰、T峰响应较弱,表明蛋白质类NOM含量相对较少。如图2(a)、(c)所示,有机物荧光响应位置及强度表明混凝主要去除的是大分子质量的腐殖类NOM。

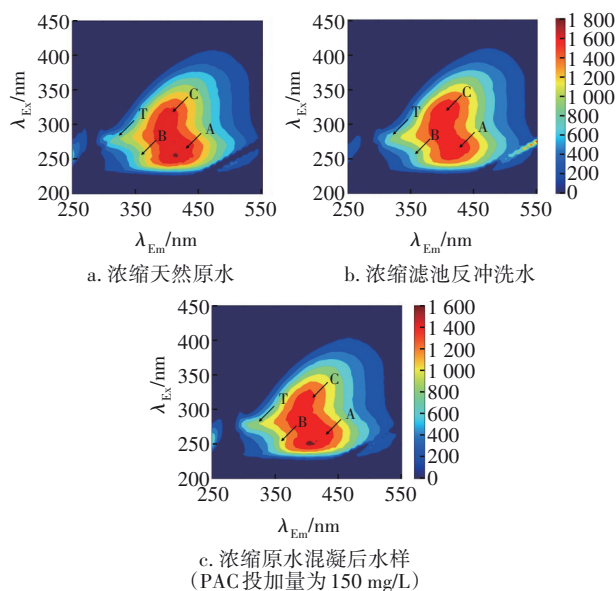


图2 三维荧光光谱

Fig.2 Three-dimensional fluorescence spectrum

图3为混凝后各组分荧光强度最大值,其进一步表明混凝主要去除的是C1组分(类富里酸)、C2组分(与微生物活动相关类腐殖质)和C4组分(陆源类腐殖酸)的有机物。当PAC投加量为150 mg/L时,C1、C2、C4组分的有机物去除率分别为9.61%、14.46%、14.57%,而对C3组分(微生物代谢副产物)的去除效果不明显。混凝处理后水样中NOM主要以中小分子质量的腐殖类(腐殖酸、富里酸)、蛋白质类物质为主。

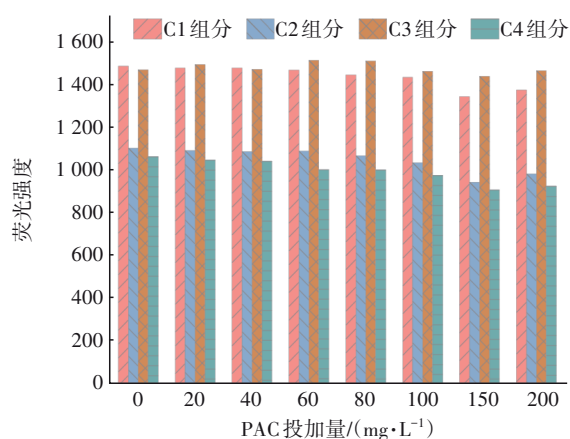
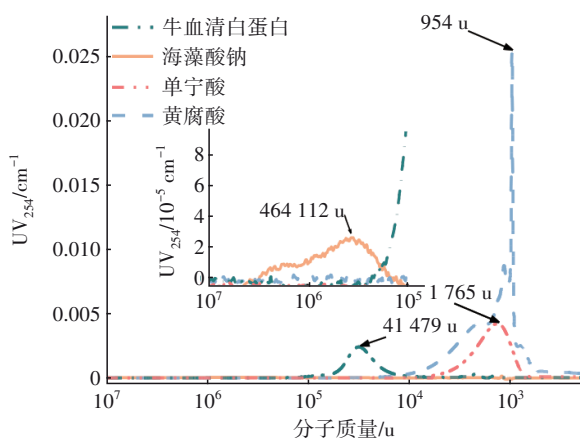


图3 混凝后各组分荧光强度最大值

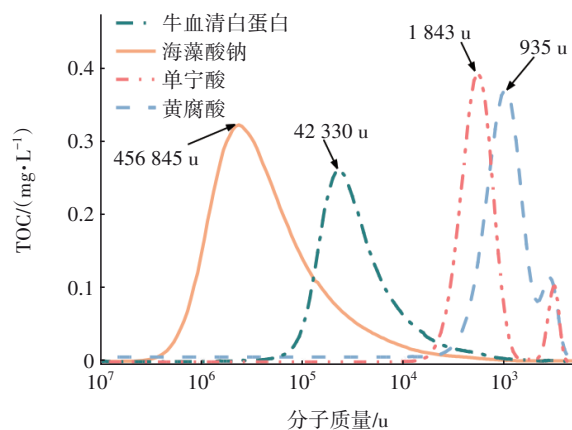
Fig.3 Maximum fluorescence intensity of each component after coagulation

2.1.3 分子质量分布

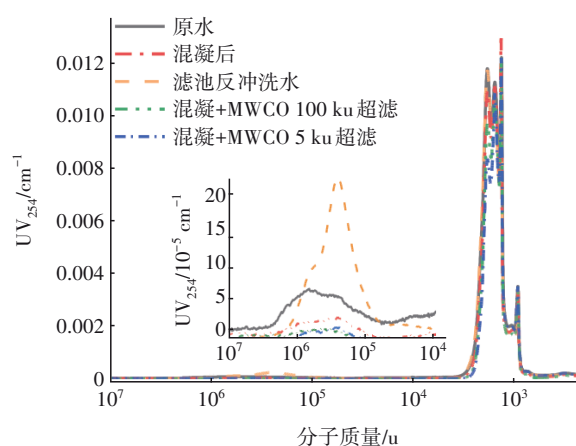
依照分子质量分布规律^[11],对各水样进行分子质量分布特征检测,结果如图4所示。由图4(a)可知,多糖类SA的UV响应值较低,表明其不饱和性较小;蛋白质类BSA及腐殖类TA、FA的UV响应值较高,表明其含有芳香性不饱和键或双键。



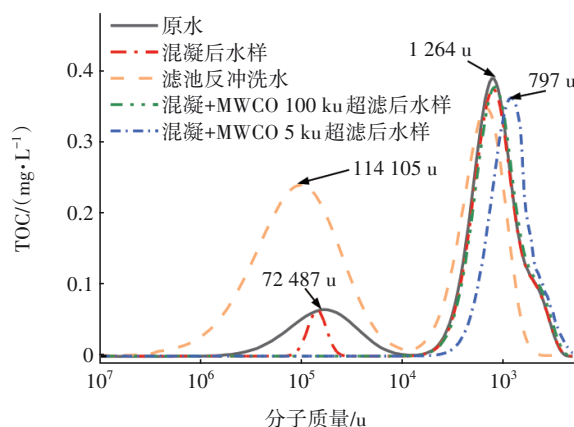
a. 目标有机物的UV响应图



b. 目标有机物的TOC响应图



c. 浓缩水样的UV响应图



d. 浓缩水样的TOC响应图

图4 天然有机物的分子质量分布

Fig.4 Molecular weight distribution of NOM

由图4(b)可知,4种目标有机物TOC响应峰所对应的分子质量(MW_{TOC})顺序为:SA>BSA>TA>FA,表明SA为大分子质量有机物,TA、BSA为中分子质量有机物,FA为小分子质量有机物。

由图4(c)可以看出,各水样中有机物UV响应主要集中在中、小分子质量分布区间,滤池反冲洗水中NOM在大分子质量分布区间具有较高的UV响应值。

由图4(d)可以看出,原水中NOM的TOC响应面积主要分布在中、小分子质量区间,约占80%;滤池反冲洗水中NOM的TOC响应面积主要分布在大分子质量区间,约占68%。因此,选取滤池反冲洗水作为大分子质量水样。原水经过混凝处理以后中、小分子质量的NOM被有效保留,但是大分子质量的NOM仍然没有被完全去除,继续进行100 ku超滤膜试验,此时NOM的TOC峰响应面积主要分布在中分子质量区间,占比在85%以上,大分子质量的

NOM基本被去除,因此将此水样作为中分子质量水样。而后将部分中分子质量水样继续过5 ku超滤膜,过膜后水样小分子质量NOM的TOC响应面积占比最大,约占75%,故将该水样作为小分子质量水样。

2.2 目标有机物对FO膜分离的影响

图5为4种不同分子质量目标有机物TA、SA、BSA和FA对FO膜分离的影响。由图5(a)可知,在480 min试验周期内,相比于基线通量,由TA造成的水通量下降最严重,下降约54.72%,其余3种有机物BSA、FA、SA的通量依次下降49.91%、29.64%、16.52%。在前60 min,TA、SA、BSA和FA的通量均快速下降,这部分的通量损失分别占整体通量损失的35.9%、87.4%、33.1%和59.3%。试验结果与前人的研究结果相一致^[16-17],BSA、TA引起的膜污染更为严重且持久,SA引起的膜污染主要作用在初期,使得初期通量快速下降,这可能与有机物在膜上的吸附量及吸附位置有关^[11]。

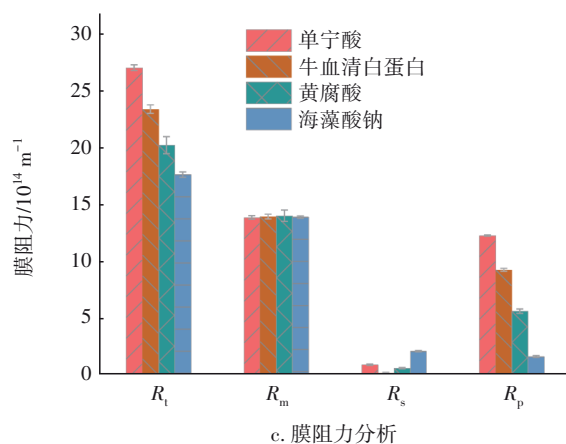
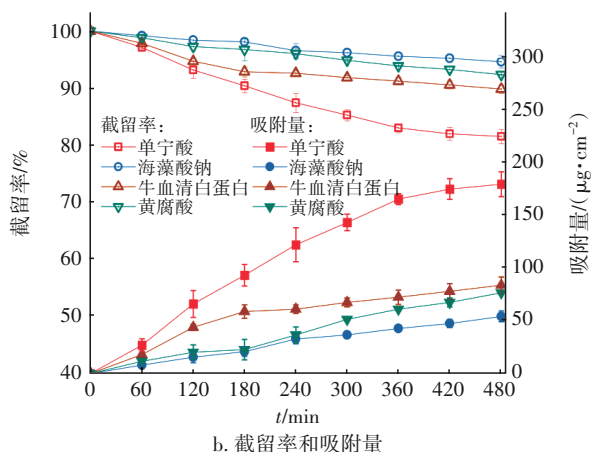
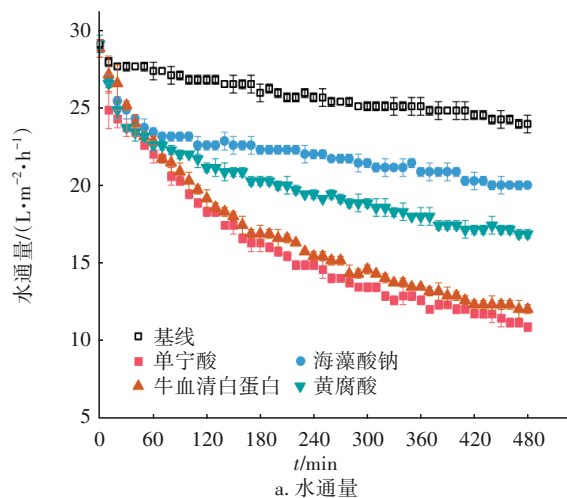


图5 目标有机物对FO膜分离的影响

Fig.5 Effect of targeted organic matters on FO membrane separation

由图5(b)可知,4种目标有机物TA、BSA、FA、SA的总截留率分别为81.6%、89.9%、92.3%、94.1%,TA总吸附量最大,为178.8 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,SA总吸附量最小,为57.0 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。相同水力作用下,SA界面能垒越大,表明SA分子与膜之间的排斥作用越大,以至于SA的吸附量较少,而TA、BSA界面能垒较小,可以更多地吸附在膜上。

图5(c)为试验周期内有机物吸附产生的膜阻力分布情况(R_t 为膜总阻力, R_m 为固有膜阻力, R_s 为表面阻力, R_p 为内部阻力),膜总阻力排序为TA>BSA>FA>SA,SA引起的膜支撑层表面阻力略高于支撑层内部阻力,TA、BSA及FA产生的支撑层内部阻力明显高于支撑层表面阻力。这可能是由于有机物颗粒尺寸引起的吸附位置及多孔支撑层堵塞程度不同造成的^[11,16,25]。4种污染物占比最大的颗粒尺寸依次为:SA(96.4 nm)>FA(56.2 nm)>TA(37.8 nm)>BSA(7 nm)。试验初期($t \leq 60$ min),在膜表面积累的SA造成一定的膜污染,使得通量下降较快。之后由于通量降低而减弱的渗透电力使得更少的SA吸附在膜表面,因此后期SA造成的膜支撑层污染有限;TA、BSA颗粒尺寸相对较小,会逐渐吸附进入支撑层孔隙内,使得膜孔堵塞更为严重,膜内部阻力更大。

图6为污染后的FO膜表面SEM照片。可知,较多的SA吸附在膜支撑层表面,形成了较为松散的有机污染层,而TA、BSA及FA在膜支撑层表面未形成明显的有机污染层,这进一步表明了SA主要产生的是膜表面污染;TA、BSA在通量产生的渗透电力作

用下不断进入支撑层内,形成了较为持久的膜污染。

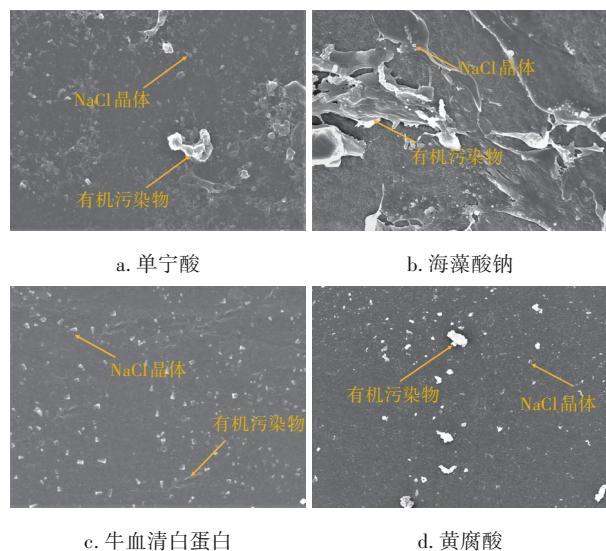
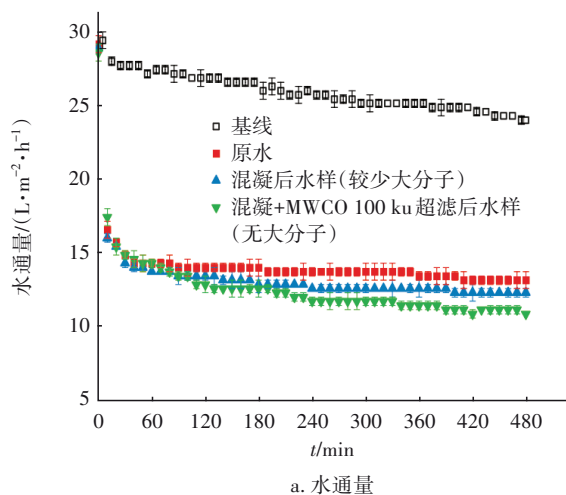


图6 污染后的FO膜表面SEM照片

Fig.6 SEM images of FO membrane surface after fouling

2.3 大分子质量NOM对FO膜分离的影响

将天然原水和预处理后的水样进行FO膜分离,探究天然水体中大分子质量NOM对膜分离的影响,结果如图7所示。由图7(a)、(b)可知,相比于基线通量,原水、混凝后、混凝及超滤(MWCO为100 ku)处理后三种水样的整体通量损失分别为45.3%、48.8%、54.8%,经处理后的水样随着大分子质量NOM含量的降低,通量损失逐渐增大,截留率逐渐降低,吸附量逐渐增大,混凝及超滤(MWCO为100 ku)处理后水样的最终吸附量增大了42%,NOM更多地吸附在膜上。由图7(c)可知,原水所造成的膜总阻力、表面阻力和内部阻力都最小。



a. 水通量

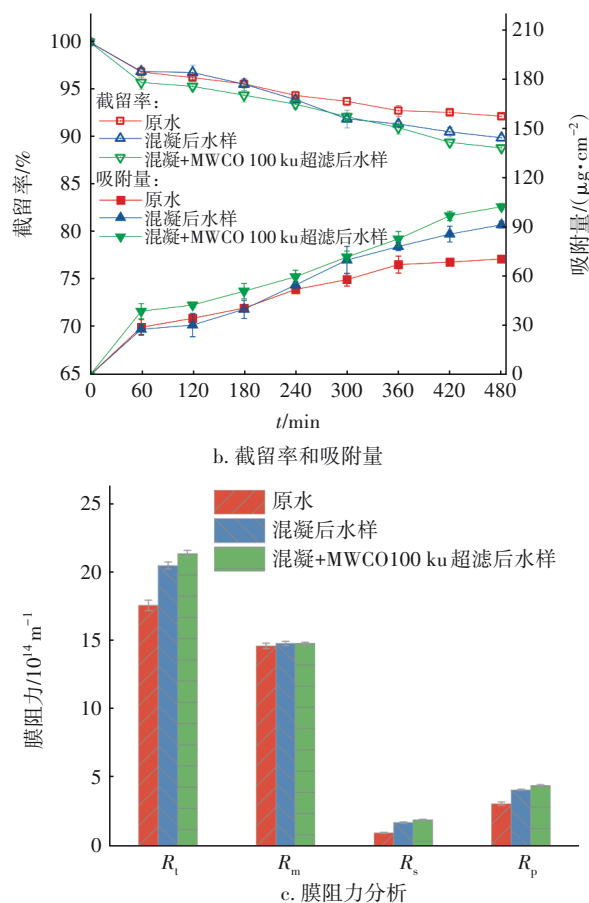
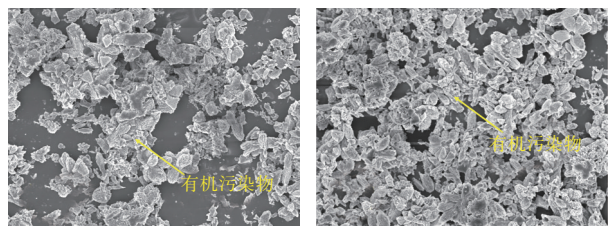


图7 大分子质量NOM对FO膜分离的影响

Fig.7 Effect of macromolecular weight of NOM on FO membrane separation

图8为污染后的膜表面SEM照片。可以看出,经预处理后水样形成的膜表面有机污染层更为致密,以至于膜表面阻力较大。研究表明,中、小分子质量NOM含量越多,膜污染越重,这与Wang等人^[7]的研究结果一致,同时也进一步说明大分子质量NOM含量可以影响膜污染程度,水样中的大分子质量NOM含量越多,膜污染越轻。原水中较大尺寸的大分子质量NOM可以更多地吸附积累在FO膜支撑层表面,并在无外加操作压力的FO膜分离下,形成相对疏松的有机污染层,因此在渗透曳力、错流剪力等水力作用及界面能垒作用下使较少的NOM吸附在膜上^[22]。而经混凝、超滤预处理后,大分子质量NOM的减少或基本去除改变了水体中有机物性质,这可能导致污染物与膜之间的界面能垒变小,中小分子质量NOM更容易吸附在膜上;同时中小分子质量NOM颗粒尺寸也较小,更易进入膜支撑层内造成孔隙堵塞,并在水力作用下,中小分子质量

NOM不断吸附在膜上,且吸附量较大。



a. 原水 b. 混凝+MWC0 100 ku超滤后水样

图8 污染后的膜表面SEM照片

Fig.8 SEM images of FO membrane surface after fouling

2.4 NOM分子质量分布对FO膜分离的影响

为了能更有效地说明NOM分子质量分布特征对FO膜分离的影响,采用大、中、小分子质量水样进行研究,结果如图9所示。

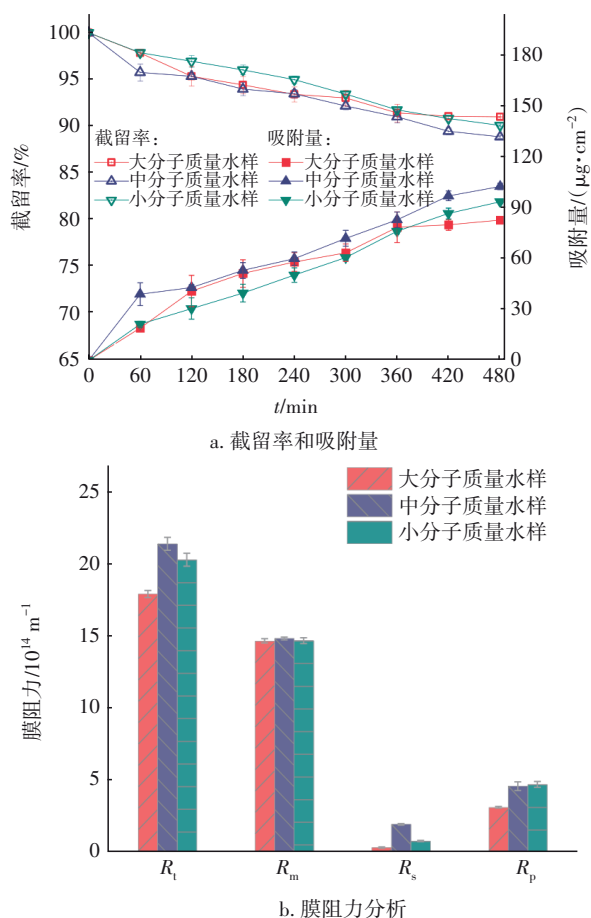


图9 分子质量对FO膜分离NOM的影响

Fig.9 Effect of molecular weight on the separation of NOM by FO membrane

当水样中NOM以大、中、小分子质量分布特征为主时,其整体通量损失分别为46.5%、54.8%、50.5%,中分子水样通量的损失更严重。由图9(a)

可知,污染结束时,FO膜对不同分子质量水样的截留率均在89%以上,总吸附量排序为中分子质量水样>小分子质量水样>大分子质量水样,中分子质量水样的截留率最小,吸附量最大。污染初期($t \leq 60$ min),中分子质量水样由于界面能垒较小,以至于较多的NOM在短时间内吸附在膜上,从而产生较大的通量损失;污染后期($t \geq 360$ min),当污染物逐渐覆盖膜表面时(如大分子质量水样)界面能垒进一步增大,以至于后期单位时间内吸附量有所减少。

由图9(b)可知,中、小分子质量水样由于膜污染形成的支撑层内部阻力基本一致,都大于大分子质量水样,中分子质量水样的膜支撑层表面阻力也较大,相比于大、小分子质量水样,中分子质量水样引起的膜污染更严重。该研究结果在Wang等人^[7]发现中、小分子质量NOM越多引起的膜污染越重的基础上,进一步表明了以小分子质量NOM为主时的膜污染较轻,而以中分子质量NOM为主时的膜污染较重,有机物分子质量占比可能是影响膜污染的重要原因之一。与小分子质量水样相比,具有较大颗粒尺寸的中分子质量NOM进入膜支撑层后能快速引起严重的孔隙堵塞,同时部分中分子质量NOM还可在膜支撑层表面积累(膜表面阻力较大)。另一方面,与大分子质量水样相比,尺寸较小的中分子质量NOM更易进入膜支撑层,从而引起孔隙堵塞,产生更大的内部阻力,进而形成更严重的膜污染。

2.5 界面能垒分析

为进一步说明不同分子质量有机物对FO膜的污染机理,结合XDLVO理论测定了污染物与未污染的膜以及污染物与污染后的膜之间的界面能垒,本研究以SA、大分子质量水样为例。污染初期,在界面能垒作用下SA或大分子质量NOM逐渐吸附在膜表面,当污染物在膜表面不断堆积而逐渐覆盖膜表面时,界面作用逐渐转变为“污染物与污染膜”之间的相互作用^[20-22],SA、大分子质量NOM与污染后的FO膜之间的界面能垒分别为 18.72×10^{-20} 、 14.21×10^{-21} J,分别大于与未污染的FO膜之间的界面能垒(5.71×10^{-20} 、 9.32×10^{-21} J)。当FO膜表面被污染物覆盖后,污染物需要克服更大的界面能垒才能附着在膜上,以至于在污染后期单位时间内吸附量有所减少。

此外,进一步测定其他3种目标有机物及不同分子质量NOM与FO膜之间的界面能垒。FA、TA、

BSA的界面能垒依次为 2.01×10^{-20} 、 5.37×10^{-21} 、 3.17×10^{-21} J,均小于SA的界面能垒,这基本上解释了不同分子质量目标有机物的FO膜污染特性。较小的TA、BSA界面能垒表明,TA、BSA分子与膜之间的排斥作用较小,其更多地吸附在膜上,又因为较小的颗粒尺寸使得膜污染更严重。以大、中、小分子质量分布特征为主的NOM与膜之间的界面能垒依次为 9.32×10^{-21} 、 0.53×10^{-21} 、 0.93×10^{-21} J,相比于中、小分子质量水样,大分子质量水样具有较大的界面能垒,较少的有机物吸附在膜表面。

3 结论

① 试验周期内,4种目标有机物的通量损失排序依次为TA>BSA>FA>SA,中分子质量TA及BSA更多地吸附在膜多孔支撑层,从而产生较大的膜污染,而大分子质量SA和小分子质量FA产生的膜污染则相对较轻。

② 水样中的大分子质量NOM含量越多,膜污染越轻;中小分子质量NOM含量越多,膜污染则越严重。与混凝、超滤(MWCO为100 ku)处理后的水样相比,天然原水中的大分子质量NOM含量较多,膜污染较轻。

③ 当水样中NOM分别以大、中、小分子质量为主要分布特征时,其通量损失排序为中分子质量水样>小分子质量水样>大分子质量水样,中分子质量NOM造成的通量损失及膜污染较严重,当NOM以大分子或小分子质量分布特征为主时,膜污染相对较轻。

④ 界面能垒分析进一步表明,相比于中、小分子质量水样,大分子质量水样具有较大的界面能垒,使得“污染物与膜”之间排斥作用较大,膜污染较轻,污染后期界面能垒进一步增大,使得后期单位时间内吸附在膜上的有机物逐渐减少。

参考文献:

- [1] ANG W L, MOHAMMAD A W, JOHNSON D, *et al.* Forward osmosis research trends in desalination and wastewater treatment: a review of research trends over the past decade [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2019, 31: 100886.
- [2] SHE Q H, WANG R, FANE A G, *et al.* Membrane fouling in osmotically driven membrane processes: a review [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 499: 201-233.
- [3] WANG J L, LIU X J. Forward osmosis technology for water treatment: recent advances and future perspectives [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124354.
- [4] WANG H L, GAO Y, GAO B Y, *et al.* Comprehensive analysis of a hybrid FO-NF-RO process for seawater desalination: with an NF-like FO membrane [J]. *Desalination*, 2021, 515: 115203.
- [5] ELSAID K, SAYED E T, ABDELKAREEM M A, *et al.* Environmental impact of emerging desalination technologies: a preliminary evaluation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8 (5): 104099.
- [6] 杨瑞林, 张新欢, 董秉直, 等. 以天然水为原料液的正渗透过程中CTA膜表面污染物脱附研究[J]. *膜科学与技术*, 2015, 35(3): 37-43.
YANG Ruilin, ZHANG Xinhuan, DONG Bingzhi, *et al.* Study of NOM fouling behavior in forward osmosis process [J]. *Membrane Science and Technology*, 2015, 35(3): 37-43 (in Chinese).
- [7] WANG L, LI T, CHU H Q, *et al.* Natural organic matter separation by forward osmosis: performance and mechanisms [J]. *Water Research*, 2021, 191: 116829.
- [8] 黄亮. 正渗透废水处理体系的盐累积与膜污染特性及调控机制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
HUANG Liang. Salinity Buildup and Mechanisms Foulings in Forward Osmosis Wastewater Treatment System: Mechanisms and Regulation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020 (in Chinese).
- [9] AB HAMID N H, WANG D K, SMART S, *et al.* Achieving stable operation and shortcut nitrogen removal in a long-term operated aerobic forward osmosis membrane bioreactor (FOMBR) for treating municipal wastewater [J]. *Chemosphere*, 2020, 260: 127581.
- [10] ALTAEE A, HILAL N. High recovery rate NF-FO-RO hybrid system for inland brackish water treatment [J]. *Desalination*, 2015, 363: 19-25.
- [11] 陈天宇. 正渗透去除天然地表水溶解性有机物的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
CHEN Tianyu. Study on Removal of Dissolved Organic Matter in Natural Surface Water by Forward Osmosis [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022 (in Chinese).
- [12] 周业凯, 陈卫, 陶辉, 等. 太湖水源水中溶解性有机

- 物特性分析[J]. 中国给水排水, 2017, 33(5): 46-49.
- ZHOU Yekai, CHEN Wei, TAO Hui, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in source water of Taihu Lake [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(5): 46-49(in Chinese).
- [13] CHEN L, GU Y S, CAO C Q, *et al.* Performance of a submerged anaerobic membrane bioreactor with forward osmosis membrane for low-strength wastewater treatment [J]. Water Research, 2014, 50: 114-123.
- [14] MORROW C P, CHILDRESS A E. Evidence, determination, and implications of membrane-independent limiting flux in forward osmosis systems [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(8): 4380-4388.
- [15] 魏永, 吴宏, 罗政博, 等. 正渗透去除单宁酸的影响因素分析[J]. 中国给水排水, 2022, 38(1): 70-76.
- WEI Yong, WU Hong, LUO Zhengbo, *et al.* Influence factors of forward osmosis on tannic acid removal [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(1): 70-76 (in Chinese).
- [16] WANG L, ZHANG W Z, CHU H Q, *et al.* Forward osmosis filtration for removal of organic foulants: effects of combined tannic and alginic acids [J]. Water Research, 2016, 91: 251-263.
- [17] TENG J H, ZHANG H M, LIN H J, *et al.* Molecular level insights into the dynamic evolution of forward osmosis fouling via thermodynamic modeling and quantum chemistry calculation: effect of protein/polysaccharide ratios[J]. Journal of Membrane Science, 2022, 655: 120588.
- [18] TENG J H, ZHANG H M, LIN H J, *et al.* Synergistic fouling behaviors and thermodynamic mechanisms of proteins and polysaccharides in forward osmosis: the unique role of reverse solute diffusion[J]. Desalination, 2022, 536: 115850.
- [19] 李志浩. 水体溶解性有机物正向渗透去除特性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- LI Zhihao. Study on Removal of Dissolved Organic Matter in Water by Forward Osmosis [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020 (in Chinese).
- [20] 余健鑫, 钟绮芸, 龙志宏, 等. 基于XDLVO理论的亲疏水组分对超滤膜污染的影响[J]. 中国给水排水, 2023, 39(7): 35-42.
- YU Jianxin, ZHONG Qiyun, LONG Zhihong, *et al.* Effect of hydrophobic/hydrophilic components on ultrafiltration membrane fouling based on XDLVO theory [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(7): 35-42 (in Chinese).
- [21] LIU J X, FAN Y Q, SUN Y H, *et al.* Modelling the critical roles of zeta potential and contact angle on colloidal fouling with a coupled XDLVO-collision attachment approach[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 623: 119048.
- [22] LIU J X, ZHAO Y X, FAN Y Q, *et al.* Dissect the role of particle size through collision-attachment simulations for colloidal fouling of RO/NF membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2021, 638: 119679.
- [23] TENG J H, ZHANG H M, LIN H J, *et al.* A unified thermodynamic fouling mechanism based on forward osmosis membrane unique properties: an asymmetric structure and reverse solute diffusion[J]. Science of the Total Environment, 2022, 808: 152219.
- [24] 靳百川, 蒋梦云, 白文荣, 等. 三维荧光光谱-平行因子法解析再生水补给人工湿地DOM的光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(4): 1240-1245.
- JIN Baichuan, JIANG Mengyun, BAI Wenrong, *et al.* Fluorescence spectra characteristics of reclaimed water to replenish constructed wetlands using EEM-PARAFAC [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1240-1245 (in Chinese).
- [25] GONZALES R R, ABDEL-WAHAB A, ADHAM S, *et al.* Salinity gradient energy generation by pressure retarded osmosis: a review [J]. Desalination, 2021, 500: 114841.

作者简介: 朱明飞(1998-), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要研究方向为膜法水处理。

E-mail: 1436026723@qq.com

收稿日期: 2023-09-21

修回日期: 2023-12-11

(编辑: 任莹莹)