

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.006

藻源污染物对正渗透膜分离性能的影响

鞠欣雨¹, 李志浩², 朱明飞¹, 王一涵¹, 王涛¹, 朱宇洁¹,
黄志超¹, 路孝振³, 李照^{1,4}, 王琳^{1,4}

(1. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东省建筑设计研究院
有限公司, 山东 济南 250101; 3. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410000;
4. 山东建筑大学 资源与环境创新研究院, 山东 济南 250101)

摘要: 正渗透(FO)在处理含藻水体时存在的主要问题是膜污染,水通量可能会受到累积在膜表面的活/死藻细胞以及藻源有机物的影响。为此,探究了铜绿微囊藻藻源污染物对FO膜分离的影响,并明确分离过程中的主要污染物。结果表明,铜绿微囊藻的4种藻源污染物即活藻细胞、死藻细胞、藻细胞外有机物(EOM)、藻细胞内有机物(IOM)引起的水通量损失分别为27.43%、9.57%、13.14%、17.53%,其中,活藻细胞造成的膜污染最严重,IOM次之。活藻细胞的界面能垒值(0.26×10^{-18} J)比死藻细胞(1.63×10^{-18} J)小,表明活藻细胞与正渗透膜之间的排斥作用较小,进而导致其造成的膜污染更严重。XDLVO理论的计算结果表明,活藻细胞+EOM的组合界面自由能更负,容易相互聚合并黏附在FO膜上,其造成的水通量损失在混合污染中最大。

关键词: 正渗透; 铜绿微囊藻; 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(2025)07-0039-08

Impact of Algae-derived Foulants on Separation Efficiency of Forward Osmosis Membrane

JU Xin-yu¹, LI Zhi-hao², ZHU Ming-fei¹, WANG Yi-han¹, WANG Tao¹,
ZHU Yu-jie¹, HUANG Zhi-chao¹, LU Xiao-zhen³, LI Zhao^{1,4}, WANG Lin^{1,4}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China; 2. Shandong Provincial Architecture Design Institute Co. Ltd., Jinan 250101, China; 3. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China; 4. Resources and Environment Innovation Institute, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: The primary challenge in utilizing forward osmosis (FO) for the treatment of algae-laden water is membrane fouling, which can be caused by the accumulation of both live and dead algal cells on the membrane surface, as well as the presence of algal-derived organic matter. This fouling may significantly impact the water flux. In this study, the impact of *Microcystis aeruginosa*-derived algal foulants on FO membrane separation was systematically investigated, and the primary foulants present

基金项目: 山东省“青创人才引育计划”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

during the separation process were identified. The flux loss caused by four types of *Microcystis aeruginosa*-derived foulants, live algal cells, dead algal cells, algal extracellular organic matter (EOM) and algal intracellular organic matter (IOM), were 27.43%, 9.57%, 13.14%, and 17.53%, respectively. Among these, the membrane fouling caused by live algal cells was the most severe, followed by that induced by IOM. The interfacial energy barrier for live algal cells (0.26×10^{-18} J) was significantly lower than that for dead algal cells (1.63×10^{-18} J). This suggested that the repulsive force between live algal cells and the FO membrane was weaker, resulting in more severe membrane fouling caused by live algal cells. The calculation results based on the XDLVO theory indicated that the interfacial free energy of living algal cells in combination with EOM was significantly more negative, leading to a higher propensity for aggregation and adhesion to the FO membrane. Consequently, this phenomenon contributed to the most substantial water flux loss among mixed foulants.

Key words: forward osmosis; *Microcystis aeruginosa*; membrane fouling; interfacial energy barrier

近年来,随着水体富营养化不断加剧,藻华现象频发,严重威胁饮用水水质安全^[1]。铜绿微囊藻是我国富营养化水体中的主要蓝藻水华藻种^[2],会产生臭味并释放藻毒素及其他藻源有机物,并形成消毒副产物(DBPs)前体物^[3]。常规的饮用水处理工艺对溶解性藻源有机物无法有效去除^[4]。

正渗透(FO)作为一种能耗低、出水水质好的新型膜处理工艺,克服了传统压力驱动膜工艺、高级氧化工艺等深度处理技术的局限性,在当前“双碳”背景下是一种高效处理含藻水体的膜法分离技术^[5]。已有的研究表明,FO膜在活性层朝向汲取液(AL-DS)模式下的水通量相比活性层朝向原料液(AL-FS)模式下更高,并且AL-DS模式对FO膜的稳定性要求较低^[6]。另外,不同类型的藻源污染物对FO膜的污染情况不同^[7-8]。刘东良^[9]研究表明,铜绿微囊藻活藻细胞与藻细胞外有机物(EOM)同时过滤会加剧FO膜污染,两者之间存在协同污染作用。但目前关于FO膜分离藻细胞及其裂解产物的研究较为有限。为此,笔者以铜绿微囊藻活藻细胞、死藻细胞、EOM、藻细胞内有机物(IOM)为目标污染物,研究AL-DS模式下FO膜对这些污染物单独或混合过滤时的主要污染因素,并利用XDLVO理论分析了藻细胞及藻源有机物的膜污染机理,以期为FO处理实际含藻水体提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

试验仪器:HPSEC-UV-TOC凝胶色谱仪、纳米

粒度及Zeta电位分析仪、紫外-可见分光光度计、三维荧光光谱分析仪、总有机碳测定仪、场发射扫描电子显微镜(FESEM)、接触角测试仪。

试验材料:铜绿微囊藻(FACHB-975)购于中国科学院水生生物研究所,在温度为25℃、光照度为2 000 lx、光暗比为12 h:12 h的培养箱中培养,由BG11培养基为藻类提供营养,收集处于稳定生长期的藻细胞用于试验研究。

1.2 正渗透试验

正渗透试验装置见图1,FO膜采用FTS公司的三醋酸纤维膜,水温保持在 (22 ± 0.2) ℃,汲取液采用2 L、2 mol/L的NaCl溶液。每个试验周期运行8 h,每种运行工况做3组平行试验以降低误差。

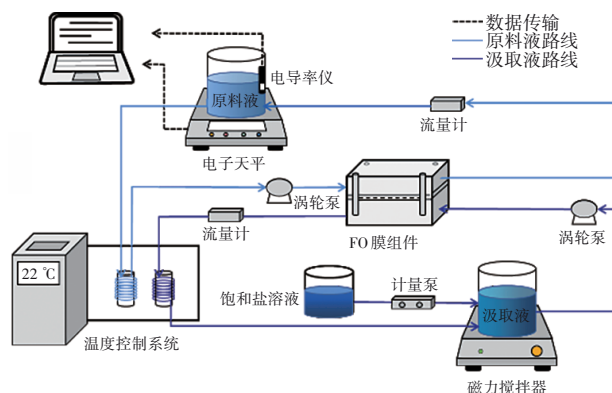


图1 正渗透试验装置

Fig.1 Schematic diagram of FO device

1.3 藻液预处理

藻源污染物的提取方法^[10]:藻液在高速冷冻离心机中以4℃、10 000 r/min离心15 min,将上清液过

0.45 μm 微滤膜得到EOM溶液,用0.6%的NaCl溶液将离心管底部的藻细胞重新悬浮得到活藻细胞溶液;将活藻细胞溶液在水浴锅中于80 $^{\circ}\text{C}$ 加热30 min,然后在相同的条件下离心,将上清液过0.45 μm 微滤膜得到IOM溶液,用0.6%的NaCl溶液将离心管底部的物质重新悬浮得到死藻细胞溶液。

1.4 分析方法

1.4.1 膜阻力分析

通过分析膜阻力考察正渗透过程中膜上污染物的分布情况,计算公式如下^[11]:

$$J_w = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R_t} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot (R_m + R_s + R_p)} \quad (1)$$

式中: J_w 为膜通量, $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ΔP 为膜两侧的渗透压差,Pa; μ 为汲取液的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; R_t 为膜总阻力, m^{-1} ; R_m 为膜自身和浓差极化现象引起的固有阻力, m^{-1} ; R_s 为支撑层污染物沉积在膜面产生的阻力, m^{-1} ; R_p 为支撑层孔隙内部堵塞引起的阻力, m^{-1} 。

1.4.2 界面能垒计算

采用XDLVO理论计算界面自由能,研究藻源污染物的膜污染机理,界面自由能包括聚合自由能(ΔG^{CO})和黏附自由能(ΔG^{AD}),两者均采用以下公式计算^[12]:

$$\Delta G^{\text{CO}}/(\Delta G^{\text{AD}}) = \Delta G^{\text{AB}} + \Delta G^{\text{LW}} + \Delta G^{\text{EL}} \quad (2)$$

式中: ΔG^{AB} 为路易斯酸碱自由能; ΔG^{LW} 为范德华自由能; ΔG^{EL} 为静电双电层自由能。自由能的正负值代表不同的界面行为,负值表示两物质之间为吸引力,正值代表两物质之间为排斥力,数值越大表明相互作用越强。

测定污染物的粒径、Zeta电位、接触角以及膜表面的Zeta电位、接触角,根据XDLVO理论计算界面能垒,污染物与膜之间的作用能计算公式如下^[13]:

$$U^{\text{TOT}} = U^{\text{AB}} + U^{\text{LW}} + U^{\text{EL}} \quad (3)$$

式中: U^{AB} 为路易斯酸碱作用能; U^{LW} 为范德华作用能; U^{EL} 为静电双电层作用能; U^{TOT} 为关于污染物与膜表面距离 h 的函数,其最大值为界面能垒 ΔE_b 。FO膜污染情况与界面能垒密切相关,界面能垒越大,膜污染越轻^[14]。

2 结果与讨论

2.1 藻液组分特性

2.1.1 基本水质

试验用藻液各组分参数如表1所示。活藻细胞

的Zeta电位绝对值相比死藻细胞更高,其溶液更稳定且不易聚集。虽然同为藻源有机物,但EOM和IOM的参数差异较大,EOM和IOM的 UV_{254} 值分别为0.049和0.037 cm^{-1} ,说明IOM含有的芳香性有机物更少;IOM更低的Zeta电位绝对值表明其体系的稳定性更差。

表1 藻液各组分参数

Tab.1 Detailed information of various components in algal solution

项目	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	藻细胞浓度/ ($\text{个} \cdot \text{mL}^{-1}$)	$\text{UV}_{254}/$ cm^{-1}	$\text{SUVA}/(\text{L} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	Zeta/ mV
活藻细胞	—	2×10^6	—	—	-14.4
死藻细胞	—	2×10^6	—	—	-10.2
EOM	5	0	0.049	0.984	-13.1
IOM	5	0	0.037	0.739	-7.5
活藻细胞+ EOM	5	2×10^6	0.052	1.042	-27.6
死藻细胞+ IOM	5	2×10^6	0.041	0.812	-19.4
死藻细胞+ EOM+IOM	5	2×10^6	0.046	0.917	-23.8

注: EOM和IOM溶液预先提取,用超纯水稀释到DOC浓度为5 mg/L 。

采用纳米粒度分析仪测量4种藻源污染物的粒径分布情况。活藻细胞粒径分布在3~9 μm 之间,死藻细胞粒径相比活藻细胞粒径发生了较大变化,主要分布在30~70 μm 范围内。IOM和EOM的粒径范围分别为20~60、50~120 nm,IOM的平均粒径相比EOM的更小,含有更多的小粒径物质。

2.1.2 三维荧光特征分布

对藻类的溶解性有机物进行三维荧光光谱检测,主要检出5个荧光特征峰,如图2所示。其中,T峰代表类色氨酸物质,主要来源为溶解性藻类代谢产物;S峰代表类酪氨酸物质,是藻类生物降解形成的荧光峰,与芳香性氨基酸结构有关^[15];A峰代表类富里酸物质,C峰代表类腐殖酸物质,由藻细胞中的有机物经腐殖化作用形成^[16];M峰代表深度降解的腐殖酸类有机物,来自藻类的腐殖化作用^[17]。从图2可以看出,两种水样的有机物荧光响应位置及强度均有一定差异。EOM的主要荧光响应区域为T峰,其次为A峰和C峰,表明EOM中类色氨酸物质含量较多,腐殖酸类有机物含量次之;IOM的荧光响应区域相比EOM范围更广,主要荧光响应区域增加

了M峰和S峰,而C峰和A峰的荧光响应较弱,说明IOM中含有较多深度降解的腐殖酸类有机物以及类酪氨酸物质,这可能是由于藻细胞吸收并聚集外源性腐殖酸,同时对其利用分解产生了类色氨酸物质的代谢产物^[18]。

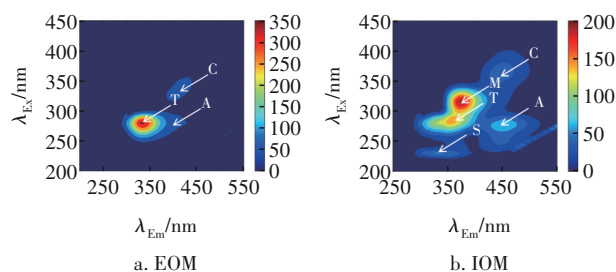


图2 EOM和IOM的三维荧光光谱

Fig.2 Three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy of EOM and IOM

2.1.3 相对分子质量分布

利用HPSEC-UVA/TOC体系的原理,分析EOM和IOM不同亲疏水组分的分子质量(MW)分布特征,结果如图3所示。

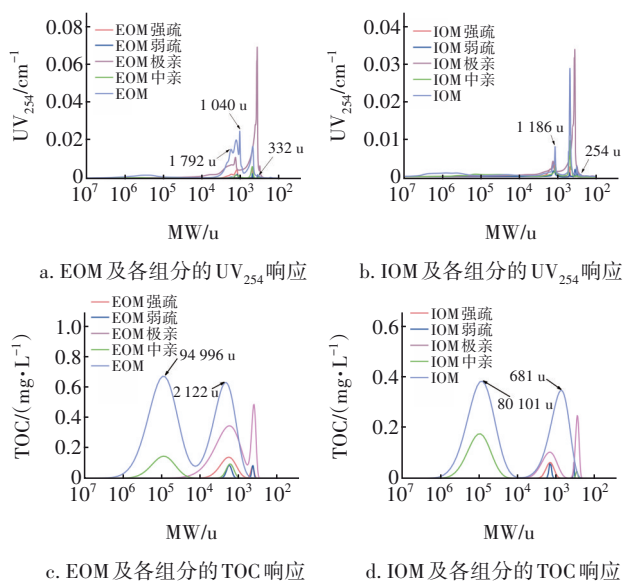


图3 EOM、IOM及其各亲疏水组分的分子质量分布

Fig.3 Molecular weight distribution of EOM, IOM and their hydrophobic and hydrophilic components

由图3(a)和(b)可知,EOM、IOM中的大分子质量区间($10^4 \sim 10^6$ u)均表现出较低的 UV_{254} 峰值响应,以中亲组分为主,表明大分子藻源有机物的芳香性较低。EOM、IOM的极亲组分在中小分子质量区间($200 \sim 10^4$ u)的 UV_{254} 峰值响应最高,说明中小分子质量物质主要为极亲组分。EOM的中小分子 UV_{254} 峰值响应区间为 $332 \sim 1792$ u,IOM的中小分子 UV_{254} 峰

值响应区间为 $254 \sim 1186$ u,IOM的响应区间更窄,表明IOM的中小分子质量范围更小。由图3(c)和(d)可知,大分子物质中的中亲组分占比较大,说明这些大分子物质主要由亲水性化合物组成,例如多糖、蛋白质和氨基糖^[6]。EOM、IOM的中小分子峰值的TOC表观分子质量(AMW_{TOC})分别为2122和681 u,这一差异表明IOM的中小分子物质的 AMW_{TOC} 低于EOM。IOM的中小分子TOC峰面积约占总TOC峰面积的59.80%,而EOM的中小分子TOC峰面积约占总TOC峰面积的48.76%,这说明IOM含有更多的中小分子质量有机物。

2.2 藻原液分离对FO膜分离性能的影响

采用FO膜对藻原液分离后形成的活藻细胞和EOM进行单独及混合过滤,结果见图4。在AL-DS模式下,与基线通量相比,活藻细胞+EOM混合过滤造成的水通量损失最为严重,水通量降至 14.87 L/($m^2 \cdot h$),下降约38.12%。而单独过滤含有EOM、活藻细胞的原料液时,水通量分别下降了13.14%、27.43%;过滤结束时,EOM和活藻细胞的截留率分别为91.27%、90.15%,这说明FO膜对活藻细胞的截留效果相对较差。相比EOM,活藻细胞造成的膜污染情况更为严重,这可能是由于活藻细胞粒径较大,更容易沉积在膜支撑层表面并形成致密的滤饼层,从而形成较为严重的外部浓差极化(ECP)膜污染。

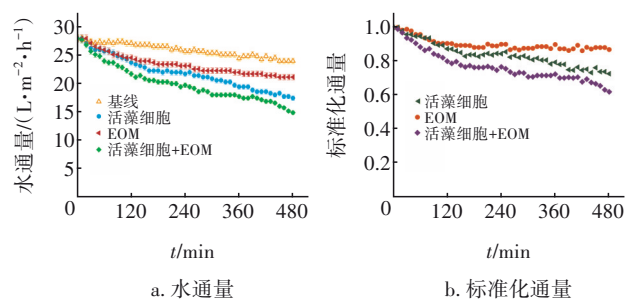


图4 活藻细胞、EOM单独以及混合过滤对FO膜分离性能的影响

Fig.4 Effects of live algal cells, EOM alone and mixed filtration on FO membrane separation efficiency

图5为被活藻细胞和EOM污染后的FO膜表面电镜照片。可以看出,活藻细胞较为松散地覆盖在FO膜表面;过滤EOM时,FO膜表面会形成纤维状有机污染层;活藻细胞+EOM混合过滤时,膜表面沉积的藻细胞污染层更为致密,可能是分离后的EOM对活藻细胞的吸附起到促进作用。

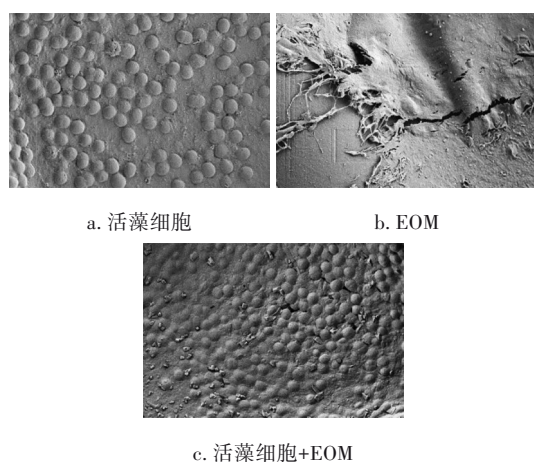


图5 被活藻细胞和EOM污染后的FO膜表面电镜照片
Fig.5 SEM images of FO membrane surface after live algal cells and EOM fouling

2.3 活藻细胞裂解对FO膜分离性能的影响

对死藻细胞和IOM进行单独及混合过滤,探究活藻细胞裂解后对FO膜分离性能的影响,结果如图6所示。由图6(a)可知,在整个过滤周期内,相比基线通量,死藻细胞、IOM、死藻细胞+IOM造成的水通量损失分别为9.57%、17.53%、28.54%,混合污染造成的水通量损失最严重。值得注意的是,在过滤初期(前60 min)死藻细胞组的水通量迅速下降,可能是因为死藻细胞粒径较大,其快速堆积在支撑层膜面,导致水通量下降较快。IOM中小分子有机物较多,在过滤初期即造成比较严重的膜孔堵塞^[19],使得内部浓差极化(ICP)现象更为严重,进而导致水通量损失较大。

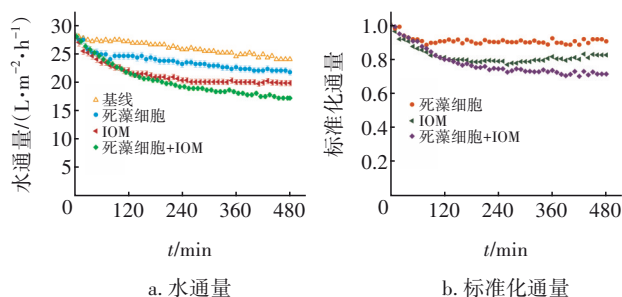


图6 死藻细胞、IOM单独以及混合过滤对FO膜分离性能的影响

Fig.6 Effects of dead algal cells, IOM alone and mixed filtration on FO membrane separation efficiency

FO膜对死藻细胞、IOM的截留率分别为92.91%、89.11%,表明FO膜对IOM的截留效果更差。由图6(b)可知,与死藻细胞相比,IOM对FO膜的污染更重。在初始阶段(前60 min),FO膜过滤死

藻细胞和IOM的标准化通量分别下降了0.11和0.14,分别占通量下降总量的88.41%和48.74%。以上结果表明,死藻细胞引起的FO膜污染主要发生在初始阶段,而IOM引起的FO膜污染情况更为严重且持续。

图7为被死藻细胞和IOM污染后的FO膜表面电镜照片。可以看出,死藻细胞在FO膜表面形成的污染层与活藻细胞相比更疏松,这进一步证实死藻细胞与活藻细胞在FO膜表面的污染形态不同。死藻细胞+IOM混合过滤时,死藻细胞被IOM形成的纤维状污染层紧密包裹在一起,说明分离后的IOM可能对死藻细胞起到聚集作用。

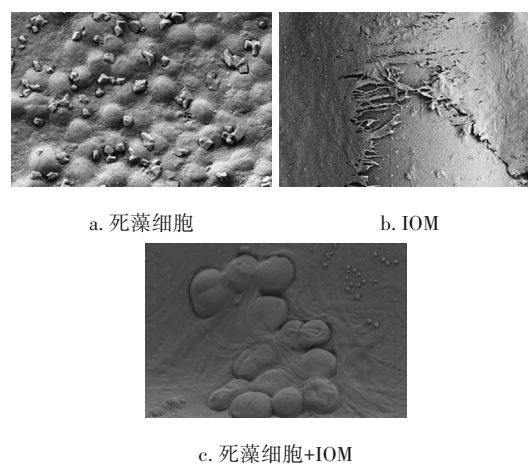


图7 被死藻细胞和IOM污染后的FO膜表面电镜照片
Fig.7 SEM images of FO membrane surface after dead algal cells and IOM fouling

2.4 混合藻源污染物对FO膜分离性能的影响

综合探究了藻源污染物对FO膜分离性能的影响,以及4种藻源污染物单独过滤时对FO膜阻力的影响,结果如图8所示。由图8(a)可知,单独过滤时活藻细胞造成的FO膜污染最严重;混合过滤时活藻细胞+EOM的组合造成的FO膜污染最严重。过滤结束时,FO膜对EOM和IOM的吸附量分别为16.75和23.85 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$,对IOM的吸附量大于EOM。相比EOM,IOM吸附在膜上的物质更多,从而引起更大的水通量损失。

为了进一步探究4种藻源污染物在膜上的吸附方式,对过滤后的FO膜进行了膜阻力测定,结果如图8(b)所示。过滤活藻细胞的FO膜的 R_f 值为 $22.63 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$,在4种藻源污染物中最大,说明活藻细胞造成的膜污染情况最严重,水通量损失最多;

同时,过滤活藻细胞的FO膜的 R_s 值为 $5.09 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$,占比较高,且在4种藻源污染物中数值最高,说明其形成的膜支撑层表面污染较重。过滤IOM的FO膜的 R_p 值为 $4.83 \times 10^{14} \text{ m}^{-1}$,在4种藻源污染物中数值最高,说明其造成的膜内部阻力较大,这可能与IOM含有较高比例的低分子质量溶解性有机物(例如腐殖酸类物质、单宁酸及其分解产物),更易进入支撑层中的孔隙并形成内部浓差极化有关^[6,19]。

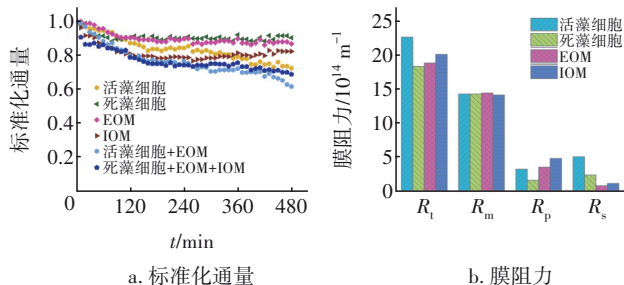


图8 活藻细胞、死藻细胞、EOM、IOM单独及混合过滤对FO膜分离性能的影响

Fig.8 Effects of live algal cells, dead algal cells, EOM, IOM alone and mixed filtration on FO membrane separation efficiency

2.5 机理分析

为进一步分析藻源污染物对FO膜污染的机理,采用XDLVO理论计算界面自由能,并结合界面自由能进一步得到污染物与膜之间的界面能垒,明确藻源污染物对FO膜的污染特性,结果见图9和表2。由图9可知,EOM、IOM与污染后FO膜之间的界面能垒分别为 3.52×10^{-21} 、 $0.57 \times 10^{-21} \text{ J}$,界面能垒越小,污染物与膜之间的排斥作用越弱,黏附性越强^[19],因此IOM更易吸附在FO膜上。活藻细胞、死藻细胞与污染后FO膜之间的界面能垒分别为 0.26×10^{-18} 、 $1.63 \times 10^{-18} \text{ J}$,均高于EOM和IOM,这可能是由于界面能垒大小与污染物粒径成正比,藻细胞的粒径较大,故其界面能垒值也较大^[13]。此外,相比死藻细胞,活藻细胞具有较小的界面能垒,需要克服的膜与污染物之间的排斥力较小,因此更容易黏附在膜表面。

由表2可知,当藻细胞与污染物共存时界面自由能受到影响,这可能是因为藻源有机污染物主要为亲水性较强的物质,使得混合污染时的界面自由能绝对值降低。在3组混合污染中,活藻细胞+EOM的 ΔG^{CO} 最负,说明活藻细胞+EOM的混合污染物更疏水;同时,活藻细胞+EOM的 ΔG^{AD} 最负,其与膜之

间的吸引力较强,易在膜上发生吸附,导致更严重的膜污染,这可能是由于EOM更易与活藻细胞结合为更紧密的污染层,导致膜通量下降严重。

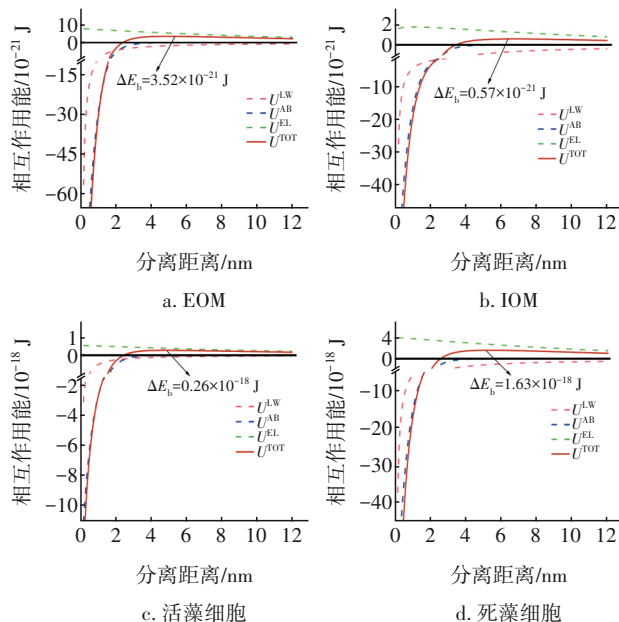


图9 藻源污染物与污染后FO膜之间的界面作用能

Fig.9 Interaction energies between algae-derived foulants and fouled FO membrane

表2 污染后的FO膜界面自由能

Tab.2 Interfacial free energy of fouled FO membrane $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$

项目	聚合自由能(污染物之间)			黏附自由能(污染物与膜之间)		
	ΔG^{LW}	ΔG^{AB}	ΔG^{CO}	ΔG^{LW}	ΔG^{AB}	ΔG^{AD}
支撑层	-6.37	-1.73	-8.10			
活藻细胞+EOM	-7.75	-2.99	-10.74	-7.03	-2.32	-9.35
死藻细胞+IOM	-7.50	4.12	-3.38	-6.91	1.15	-5.76
死藻细胞+EOM+IOM	-6.97	1.77	-5.20	-6.66	-0.08	-6.74

FO膜分离不同藻源污染物的机理如图10所示。溶解态的藻源污染物EOM和IOM在渗透电力的作用下主要进入膜的多孔支撑层中,形成孔隙堵塞,导致内部浓差极化。颗粒态的藻源污染物活藻细胞、死藻细胞由于粒径尺寸较大,主要形成支撑层膜面污染,导致外部浓差极化。当EOM、IOM与活藻细胞、死藻细胞混合污染时,混合污染物中的溶解性有机物组分可能会通过物理和化学吸附等作用吸附藻细胞^[10],过滤一段时间后,更多的有机污染物可能会填充藻细胞缝隙,在FO膜上形成藻

细胞与藻源有机物相结合的有机污染层,进一步加剧膜污染。活藻细胞+EOM的组合污染黏附自由能绝对值最大,与FO膜的结合最紧密。

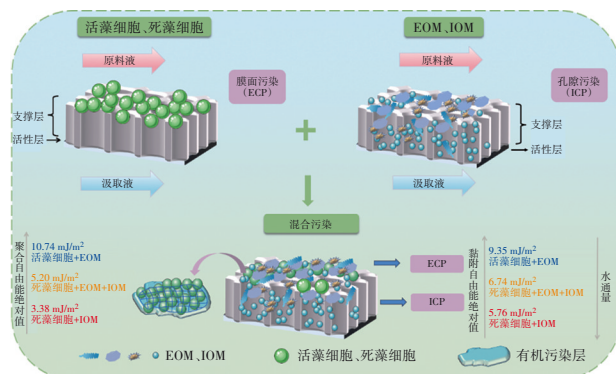


图10 FO膜分离不同藻源污染物的机理示意

Fig.10 Schematic diagram of filtration mechanism of different algae-derived foulants by FO membrane

3 结论

① 针对藻原液分离后形成的EOM和活藻细胞,当采用FO膜单独过滤两者时,水通量下降顺序为活藻细胞>EOM,活藻细胞更易黏附于膜表面而造成严重的膜污染;当活藻细胞和EOM混合过滤时,水通量下降进一步加剧,且水通量下降曲线更接近活藻细胞的,活藻细胞对水通量的影响更大。

② 采用FO膜分别过滤死藻细胞和IOM,水通量损失分别为9.57%和17.53%,IOM中含有的中小分子有机物吸附在膜多孔支撑层中,产生较大的孔隙堵塞,引起的膜污染更严重。在死藻细胞+IOM的混合污染中,水通量下降曲线更接近IOM的,污染过程中IOM对水通量的影响更大。

③ 4种藻源污染物导致的膜总阻力为:活藻细胞>IOM>EOM>死藻细胞,活藻细胞造成的水通量损失及膜污染最严重;界面能垒分析进一步表明,活藻细胞的界面能垒较小,与膜之间的排斥力较小,单位时间内吸附在膜上的藻细胞更多,进而造成的膜污染更严重;XDLVO理论分析表明,混合污染时黏附自由能排序为:活藻细胞+EOM>死藻细胞+EOM+IOM>死藻细胞+IOM,活藻细胞+EOM的组合与膜的黏附作用最强,造成的膜污染最严重,水通量损失最大。

参考文献:

[1] ZHU J, STUETZ R M, HAMILTON L, *et al.* Odour management in drinking water systems fed by mixed

water supplies [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 56: 104329.

[2] JIANG Y, XIAO P, LIU Y, *et al.* Targeted deep sequencing reveals high diversity and variable dominance of bloom-forming cyanobacteria in eutrophic lakes[J]. *Harmful Algae*, 2017, 64: 42–50.

[3] DIXON M B, FALCONET C, HO L, *et al.* Nanofiltration for the removal of algal metabolites and the effects of fouling [J]. *Water Science and Technology*, 2010, 61(5): 1189–1199.

[4] HENDERSON R, PARSONS S A, JEFFERSON B. The impact of algal properties and pre-oxidation on solid-liquid separation of algae [J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 1827–1845.

[5] MA C, WANG G, LIU X, *et al.* A novel gravity sedimentation-forward osmosis hybrid technology for microalgal dewatering [J]. *Chemosphere*, 2022, 308: 136300.

[6] WANG L, LI T, CHU H, *et al.* Natural organic matter separation by forward osmosis: performance and mechanisms [J]. *Water Research*, 2021, 191: 116829.

[7] 温海涛,张宏伟,王捷,等. 正渗透工艺用于微藻生物燃料脱水的研究进展 [J]. *膜科学与技术*, 2023, 43(6): 223–231.

WEN Haitao, ZHANG Hongwei, WANG Jie, *et al.* Research progress in dewatering of microalgae biofuels using forward osmosis process [J]. *Membrane Science and Technology*, 2023, 43(6): 223–231 (in Chinese).

[8] LARRONDE-LARRETICHE M, JIN X. Microalgae (*Scenedesmus obliquus*) dewatering using forward osmosis membrane: influence of draw solution chemistry [J]. *Algal Research*, 2016, 15: 1–8.

[9] 刘东良. 正渗透处理含藻水过程中膜污染特性及机理研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2018.

LIU Dongliang. Characteristics and Mechanism of Membrane Fouling in the Process of Treating Algal-rich Water by Forward Osmosis [D]. Tianjin: Tiangong University, 2018 (in Chinese).

[10] 柳斌. 超滤处理含藻水的藻源混合污染特性与工艺调控研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

LIU Bin. The Characteristic of Combined Fouling and Operation Regulation during Ultrafiltration of Algae-laden Water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).

[11] KIM D I, KIM J, HONG S. Changing membrane orientation in pressure retarded osmosis for sustainable

- power generation with low fouling [J]. *Desalination*, 2016, 389: 197–206.
- [12] LIU J, FAN Y, SUN Y, *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.
- [13] LIU J, ZHAO Y, FAN Y, *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.
- [14] 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).
- [15] MURPHY K R, STEDMON C A, WAITE T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 108(1/2): 40–58.
- [16] HER N, AMY G, PARK H R, *et al.* Characterizing algogenic organic matter (AOM) and evaluating associated NF membrane fouling [J]. *Water Research*, 2004, 38(6): 1427–1438.
- [17] HE W, HUR J. Conservative behavior of fluorescence EEM–PARAFAC components in resin fractionation processes and its applicability for characterizing dissolved organic matter [J]. *Water Research*, 2015, 83: 217–226.
- [18] 潘红卫, 童文彬, 雷宏军, 等. 施加有机肥对农田有机质和氮素演化影响的光谱学分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(10): 3116–3123.
- PAN Hongwei, TONG Wenbin, LEI Hongjun, *et al.* Spectral analysis of the effect of organic fertilizer application on the evolution of organic matter and nitrogen in farmalands [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(10): 3116–3123 (in Chinese).
- [19] 朱明飞, 郑成龙, 崔雯, 等. 分子质量对天然水体有机物正渗透膜分离的影响[J]. *中国给水排水*, 2024, 40(9): 107–115.
- ZHU Mingfei, ZHENG Chenglong, CUI Wen, *et al.* Effect of molecular weight on forward osmosis membrane for separation of organic matters in natural water [J]. *China Water & Wastewater*, 2024, 40(9): 107–115 (in Chinese).

作者简介: 鞠欣雨(1999–), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 主要研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: jxy13022758559@163.com

收稿日期: 2024–10–14

修回日期: 2024–12–19

(编辑: 刘贵春)

综合运用自然恢复和人工修复,
持之以恒推进生态建设