

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.07.006

# 基于XDLVO理论的亲疏水组分对超滤膜污染的影响

余健鑫<sup>1</sup>, 钟绮芸<sup>2</sup>, 龙志宏<sup>2</sup>, 李 婧<sup>2</sup>, 陈 康<sup>1</sup>, 杨海燕<sup>3</sup>,  
柳君侠<sup>1</sup>

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州市自来水有限公司,  
广东 广州 510600; 3. 华南师范大学 环境学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 天然有机物的亲疏水性对膜污染的影响较大,但目前对其缺乏深入理解。以东江水为超滤原水,从界面作用角度探究不同亲疏水组分对超滤膜污染的影响。结果显示:原水中强疏水性和弱疏水性组分主要为腐殖类和蛋白类物质,而亲水组分主要为多糖类物质;相比疏水性组分,亲水性组分对超滤膜的污染较为严重。进一步采用腐殖酸(HA)、牛血清白蛋白(BSA)、海藻酸钠(SA)作为亲疏水组分的代表,研究各类污染物在不同pH条件下的污染行为。对于SA和HA,随着pH的增加膜通量衰减趋缓,对于BSA来说,在pH远离零电荷点(pH=4.7)时膜通量衰减较为缓和;整体来看,三者对膜污染的严重程度排序为SA>HA>BSA。采用XDLVO理论从界面作用能角度来理解膜污染,结果发现:不同pH条件下三类污染物对膜污染的影响与界面能垒呈现正相关性,能垒越大,膜表面对污染物的抵抗作用越强,越有利于缓解膜污染;此外,膜过滤后期的相对平稳通量值与“污染物-污染膜”界面能垒呈线性正相关。研究结果对原水预处理及水化学调配控制污染具有重要的启发。

**关键词:** 超滤; 膜污染; 亲疏水组分; XDLVO理论; 界面能垒

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)07-0035-08

## Effect of Hydrophobic/Hydrophilic Components on Ultrafiltration Membrane Fouling Based on XDLVO Theory

YU Jian-xin<sup>1</sup>, ZHONG Qi-yun<sup>2</sup>, LONG Zhi-hong<sup>2</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, CHEN Kang<sup>1</sup>,  
YANG Hai-yan<sup>3</sup>, LIU Jun-xia<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology,  
Guangzhou 510006, China; 2. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China;  
3. School of Environment, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The hydrophilicity/hydrophobicity of natural organic compounds has a great influence on membrane fouling, but still lack in-depth understand. Dongjiang water was used as ultrafiltration raw water to investigate the influence of different hydrophobic and hydrophilic components on ultrafiltration membrane fouling from the perspective of interface interaction. The results showed that the strong hydrophobic and weak hydrophobic components were mainly humic and protein, while the hydrophilic components were polysaccharide. Compared to hydrophobic components, hydrophilic components caused

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0101090004); 广州市自来水有限公司校企合作项目

通信作者: 柳君侠 E-mail: whjunxia@163.com

severer fouling. Humic acid (HA), bovine serum albumin (BSA) and sodium alginate (SA) were further used as the typical hydrophobic/hydrophilic simulated substances to study the fouling behavior under different pH. For SA and HA, the flux attenuation slowed down with the increase of pH. For BSA, the flux decline was relatively mild at the pH far from the isoelectric point ( $\text{pH}=4.7$ ). On the whole, the order of causing severe fouling was  $\text{SA}>\text{HA}>\text{BSA}$ . The XDLVO theory was used to understand membrane fouling from the perspective of the interface interaction energy. The results showed that: under different pH conditions, the influence of three types of pollutants on membrane fouling was highly related to the interface energy barrier. The larger the energy barrier, the stronger the resistance of membrane surface to pollutants, and milder fouling; In addition, the relatively stable flux at the later stage of membrane filtration was linearly and positively correlated with the foulant-fouled membrane interface energy barrier. The research results provide important implications for raw water pretreatment direction for fouling control.

**Key words:** ultrafiltration; membrane fouling; hydrophobic and hydrophilic components; XDLVO theory; interface energy barrier

随着水环境污染问题的日渐突出以及生活饮用水标准的逐渐提高,传统给水处理工艺难以满足当前的用水需求。超滤膜分离技术具有高效、节能、出水水质稳定、工艺简便等特点,在给水深度处理方面具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。然而,在超滤工艺的应用过程中,天然水体中的污染物会不可避免地沉积在膜表面或堵塞膜孔造成膜污染,进而降低膜通量,增加运行功耗<sup>[2-5]</sup>。天然水体中造成膜污染的主要成分有腐殖类、多糖类、蛋白类、脂类等<sup>[6-7]</sup>, Yamamura等<sup>[8]</sup>对水源进行亲疏水性分离,发现亲水性组分对超滤膜造成的污染最严重,而且亲水大分子多糖和蛋白质更容易加剧超滤膜的水力不可逆污染。Qu等<sup>[9]</sup>研究认为,天然水体中的疏水性组分易引起超滤膜不可逆污染。Zularisam等<sup>[10]</sup>研究表明,有机污染物中的亲水组分在促进膜污染方面起主要作用,其次才是疏水组分。由此可见,天然有机物中不同亲疏水组分对膜污染的贡献差别较大,对于哪些亲疏水组分对膜污染的影响较严重,不同学者给出了不同的结论。因此,针对特定水质,系统深入研究天然有机物亲疏水组分对超滤膜污染的影响,可为原水预处理指明方向。

现有对膜污染的研究大多停留在宏观的通量行为或液流传质的浓差极化及滤饼层形成。实际上,膜污染的本质是污染物在水动力学作用下克服界面能垒沉积到膜表面或膜孔,进而引起通量的衰减,因此,探究污染物-膜界面作用能够对膜污染获

得深刻的认识。根据文献报道<sup>[11]</sup>,界面作用受水化学条件的影响较大,对于带负电的污染物,严重的污染发生在较低的pH、较高的离子强度或多价阳离子浓度时<sup>[12-14]</sup>,这是由于污染物-净膜(或污染物-污染膜)的静电排斥作用受到抑制。因此,研究不同水化学条件下的界面作用及膜污染行为对原水化学调配控制污染具有重要意义。

以东江水为超滤原水,采用XDLVO理论从界面作用角度解读不同亲疏水组分对膜污染的影响,以期为超滤工艺的膜污染控制及稳定运行提供理论依据。首先对东江水进行亲疏水分离,明确水中的亲疏水性组分;继而研究各组分的超滤膜污染行为,并采用腐殖酸(HA)、牛血清白蛋白(BSA)、海藻酸钠(SA)作为亲疏水组分的代表,研究各类污染物在不同pH条件下的污染行为;最后采用XDLVO理论从污染物-净膜以及污染物-污染膜界面能垒角度解读原水特性成分及水化学条件对膜污染影响的本质。

## 1 材料与方法

### 1.1 原水与材料

试验水样取自广州市某水厂,源自珠江流域东江北干流,其pH为7.56,温度为23.5℃,浊度为18.70 NTU,  $\text{UV}_{254}$ 为0.073  $\text{cm}^{-1}$ , TOC为3.47 mg/L。膜材料选用具有较好的亲水性和热稳定性的聚醚砜膜(PES膜,有效过滤面积为0.003 6  $\text{m}^2$ ,上海焱勤科技有限公司)。腐殖酸购于阿拉丁生化科技股份

有限公司,牛血清白蛋白和海藻酸钠购于西格玛奥德里奇公司,以上试剂均为分析纯。

## 1.2 超滤试验

超滤试验装置如图1所示。



图1 超滤试验装置

Fig.1 Schematic diagram of membrane filtration unit

试验采用恒压死端过滤,操作压力为0.1 MPa。水样在氮气瓶恒定压力下,由进水箱流入超滤杯,实时读出水质量数据并传输给计算机。在过滤之前,先用超纯水对膜片预压0.5 h使通量稳定,之后通入原水进行过滤。每个过滤试验均采用一张新膜。膜通量( $J$ )计算公式<sup>[15]</sup>为:

$$J = \frac{\Delta m}{\rho A \Delta t} \quad (1)$$

式中: $J$ 为膜通量, $L/(m^2 \cdot h)$ ;  $\Delta m$ 为渗透液的质量增量,kg;  $\Delta t$ 为相应的过滤时间增量,h;  $\rho$ 为溶液密度, $kg/m^3$ ;  $A$ 为有效过滤面积, $m^2$ 。

## 1.3 亲疏水性分离试验

根据文献报道<sup>[16]</sup>,采用XAD-8和XAD-4吸附树脂串联法将原水有机物分离成亲水性组分、强疏水性组分和弱疏水性组分。具体来说,用0.45  $\mu m$ 膜过滤原水以去除悬浮物质,再用旋转蒸发器(RE-2000A)将原水浓缩至TOC浓度为5 mg/L。加入HCl溶液调节pH=2,水样依次通过固相萃取装置中的XAD-8和XAD-4树脂吸附柱,将流出水样用NaOH调至中性,得到亲水性组分水样;使用pH=13的NaOH溶液将XAD-8和XAD-4所吸附的有机物洗脱,分别得到强疏水性水样和弱疏水性水样。

## 1.4 水化学条件影响试验

采用腐殖酸(HA)、牛血清白蛋白(BSA)和海藻酸钠(SA)为腐殖类、蛋白类、多糖类模拟污染物,其浓度调整为5 mg/L,研究三种污染物在不同pH条件(3~11)下的污染行为。

## 1.5 测试方法

采用总有机碳测定仪(巩义予华TOC-3000)测定样品中TOC含量;采用UV-5100(北京普析通用)紫外分光光度计测定 $UV_{254}$ ,并根据标准曲线转化为腐殖类污染物含量;采用BCA微量蛋白质试剂盒法<sup>[17]</sup>测定蛋白质含量;采用苯酚-硫酸法<sup>[18]</sup>测定多糖含量;采用纳米粒度及Zeta电位分析仪(Malvern公司,Zetasizer Nano ZS)检测典型污染物的粒径和Zeta电位;采用水接触角测试仪(克吕士DSA30S)测定PES膜的接触角以及被HA、BSA和SA污染后的超滤膜接触角。根据污染物的颗粒尺寸、Zeta电位、接触角和膜的Zeta电位、接触角通过XDLVO理论计算污染物-净膜和污染物-污染膜的界面能垒。

## 1.6 XDLVO理论

根据XDLVO理论<sup>[19]</sup>污染物-膜的总相互作用能可以表示为:

$$U_{TOT}(h) = U_{AB}(h) + U_{LW}(h) + U_{EL}(h) \quad (2)$$

式中: $U_{AB}$ 、 $U_{LW}$ 、 $U_{EL}$ 分别表示酸碱作用能、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,最大值为能垒 $\Delta E_b$ 。污染物-膜的酸碱、范德华、静电作用能与污染物和膜特性有关。简单来说,根据污染物的Zeta电位、接触角和颗粒尺寸( $d_p$ ),膜的表面Zeta电位和接触角,可计算出污染物与膜之间的界面作用变化<sup>[20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原水亲疏水性组分特性

对东江原水进行亲疏水组分分离,各组分含量由多到少依次为强疏水性污染物(37.76%)、亲水性污染物(33.42%)、弱疏水性污染物(28.82%)。地表水的亲疏水性组分比例与其所处地理位置、季节、气候以及周边环境有关<sup>[21]</sup>。研究发现,受藻类、微生物污染的水体中有机物的亲水组分比例较高,通过雨水冲刷、土壤渗透等陆源污染的水体具有较高疏水性污染物组分<sup>[22]</sup>。东江水中疏水性组分比例较高,可能是由于东江流域常年雨水充沛,受到的陆源污染较多。

根据文献报道,亲疏水组分相同的有机物往往具有类似的物质构成,而不同的亲疏水组分在其元素含量、官能团类型、化合键饱和程度等方面均有较大差异<sup>[23]</sup>。为了探明各组分特性成分,进一步测定了各组分中的腐殖酸、多糖、蛋白类的含量,结果



见图2。在亲水组分中,多糖类占比最多;在弱疏水性组分中占比最多的则是蛋白质类,腐殖类占比相对较少;在强疏水性组分中,腐殖类占比相对更大。这与三类物质的特性有关,腐殖类和蛋白质类绝大部分是疏水性物质,而多糖类绝大部分为亲水性物质。

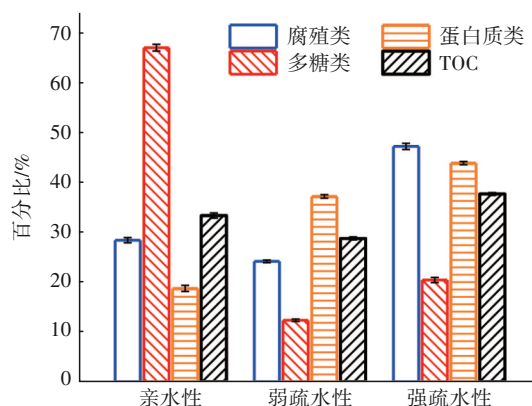


图2 东江水亲疏水性组分分布

Fig.2 Distribution of hydrophilic and hydrophobic components in Dongjiang River

## 2.2 亲疏水性组分对膜污染的影响

为了探明各组分对膜污染的影响,将原水、亲水组分、弱疏水组分和强疏水组分调成相同的pH和TOC浓度进行过滤,通量随时间的变化见图3。

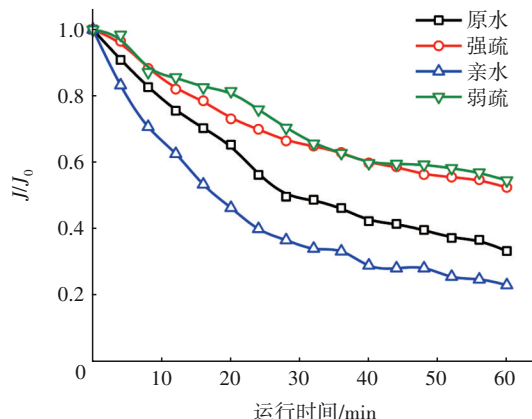


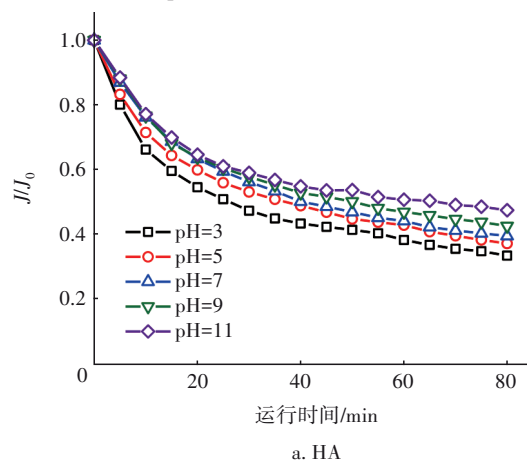
图3 不同亲疏水性组分的超滤行为

Fig.3 Ultrafiltration behavior of different hydrophilic and hydrophobic components

整体来说,原水及各组分溶液在过滤初期30 min 通量快速降低,之后趋缓。其中亲水组分溶液对超滤膜的污染程度最高,膜通量下降最多,60 min 过滤结束时,膜通量仅为起始通量的22.88%;强疏水性和弱疏水性溶液对超滤膜的污染程度最小,通量行为基本一致,弱疏水性略优于强疏水性,过滤

结束时,弱疏水性环境下的膜通量为原来的54.47%,强疏水性环境下的膜通量为原来的52.34%。与过滤原水相比,单独亲水性组分能够加重膜污染,而单独疏水性组分则可缓解膜污染。

众所周知,膜污染受水化学条件的影响较大。图4为不同pH条件下腐殖类、蛋白类、多糖类物质的膜污染行为,试验中离子强度(IS)为10 mmol/L,三种污染物浓度均为5 mg/L。整体来看,在超滤初期,膜通量下降较快,过滤后期都表现出较为平缓的趋势;在相同pH条件下,三种污染物造成的超滤膜污染程度为SA>HA>BSA,这可能与界面作用有关,和前人报道的多糖类比蛋白类易于黏附膜表面难以洗脱,是主要的污染成分相符<sup>[24]</sup>。具体来看,pH对HA和SA的影响具有相似的变化趋势,pH越低污染越严重,这可能与Zeta电位有关。由图4(d)可知,两种污染物的Zeta电位在pH为3~11条件下均为负值,且随pH升高而绝对值增大,即污染物在pH越大的溶液中其带负电荷越多,由于超滤膜也带负电,导致污染物和超滤膜之间的静电排斥作用增加,膜污染减少。与HA和SA不同的是,BSA溶液在pH=5表现出最明显的通量下降,即膜污染最严重,当pH越小或越大时,其BSA的通量下降趋势均有所缓和。这是由于BSA在pH=5时接近零电荷点(pH=4.7),膜与BSA的静电作用较弱,污染物容易黏附在膜上。尽管BSA在pH=3时与膜所带电荷相反,但其通量仍略微高于pH=5的情况。这是由于初始污染由污染物和净膜的界面作用决定,但随着过滤的进行,膜表面被污染物覆盖后,污染物-污染膜作用起着更关键作用,则变成污染物-污染膜作用<sup>[25]</sup>,因此在pH=3条件下,BSA污染物之间的排斥作用比在pH=5的情况下更大。



a. HA

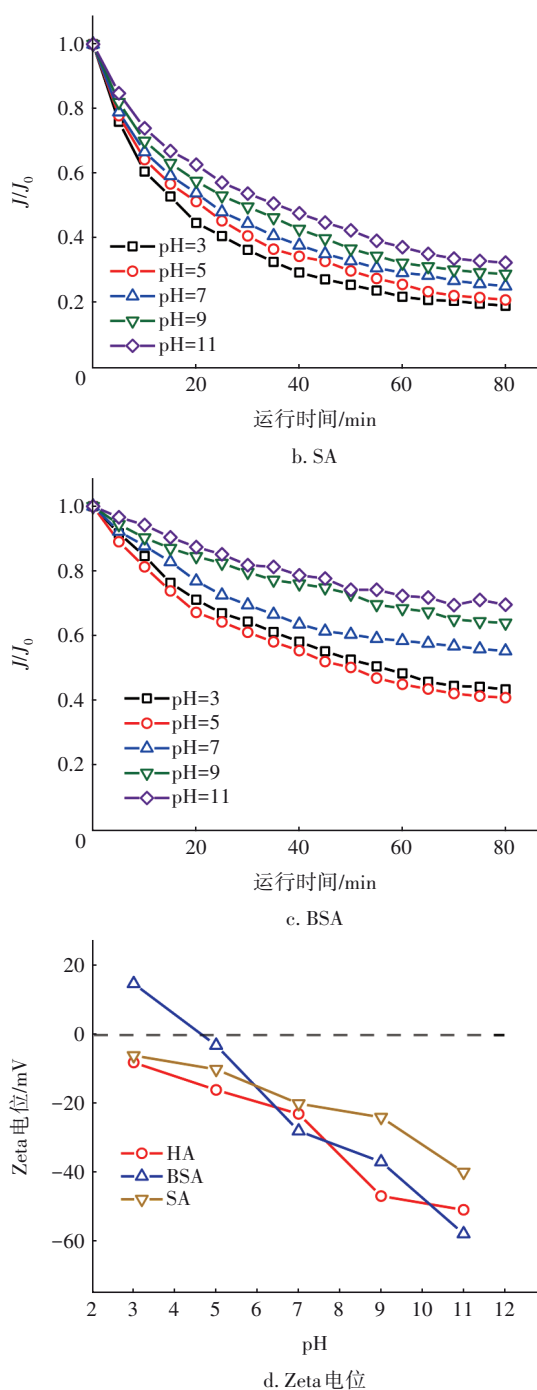


图4 pH对三类代表污染物通量行为及Zeta电位的影响

Fig.4 Flux behavior and Zeta potential of foulants as function of solution pH

### 2.3 超滤过程中污染物-膜界面作用

为了从本质上探明膜污染原因,测定了“污染物-净膜”和“污染物-污染膜”的界面能垒变化,结果见图5(以HA为例)。在pH=7时,HA、SA、BSA与干净超滤膜的能垒分别为 $8.96 \times 10^{-21}$  J、 $3.70 \times 10^{-21}$  J、 $12.82 \times 10^{-21}$  J。能垒越高,污染物与膜表面间的排

斥作用就越强,污染物颗粒越不易黏附,这能很好地解释这些污染物在超滤初期的通量下降行为。

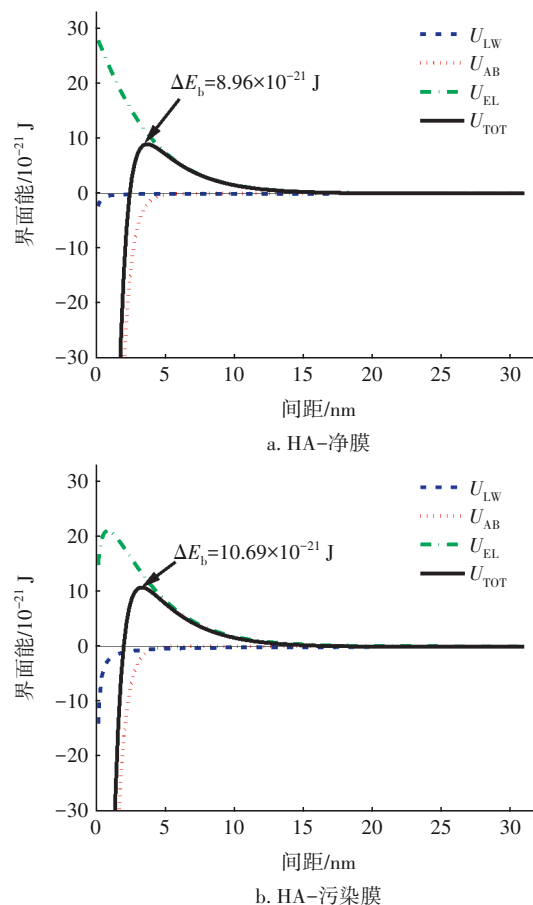


图5 污染物与超滤膜的界面作用(pH=7)

Fig.5 Interfacial interaction between foulants and ultrafiltration membranes at pH=7

随着越来越多的污染物沉积在膜表面,影响膜污染的界面作用逐渐转变为污染物与污染膜之间的作用。HA、SA、BSA与污染后的超滤膜之间的作用能分别为 $10.69 \times 10^{-21}$  J、 $8.34 \times 10^{-21}$  J、 $19.81 \times 10^{-21}$  J,都大于与干净超滤膜之间的能垒。当超滤膜表面被污染物覆盖后,溶液中的污染物需要克服更大的能垒才能黏附到表面,这也是在过滤后期膜污染速率趋缓的原因之一(另一个原因是通量自身导致水动力学拖曳作用减弱)。在三种污染物中,SA与污染前后超滤膜的界面能垒均比其他污染物低,SA在整个过滤过程都比其他两种污染物更易于黏附到膜表面,这与膜过滤后的通量行为相符。

### 2.4 过滤后期通量与界面作用的相关性

为进一步确定过滤后期通量与界面作用的关联性,分析了三种污染物过滤80 min后的相对平稳

通量( $J_{80}$ )及“污染物-污染膜”界面能垒随pH的变化,结果见图6。

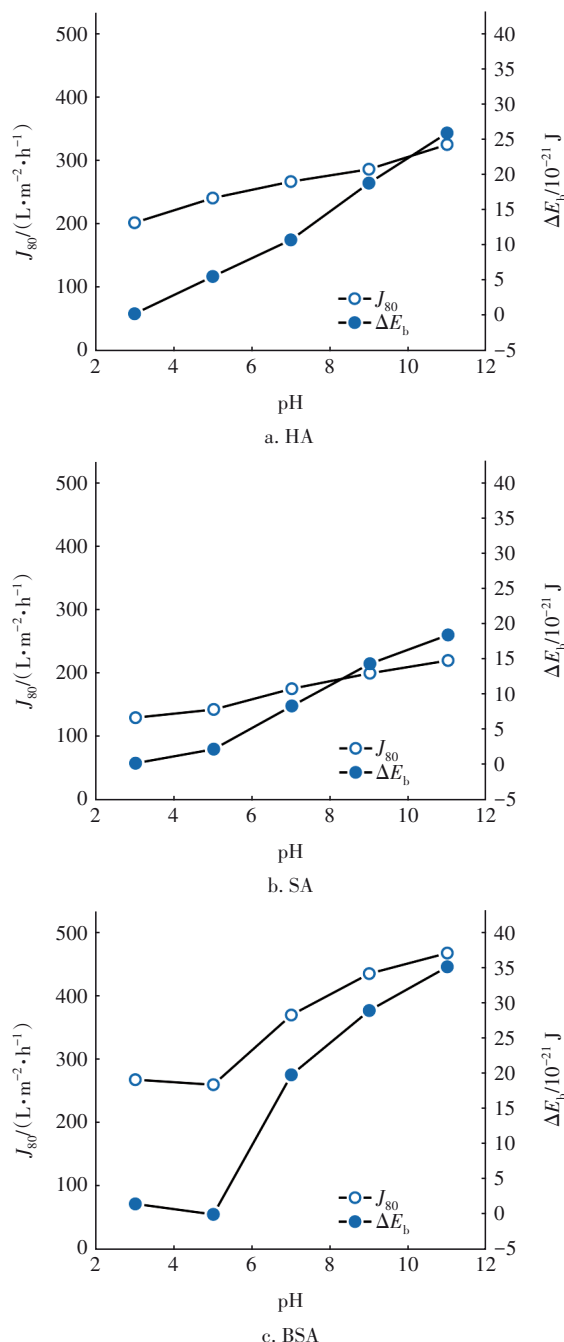


图6 超滤后期通量( $J_{80}$ )、界面能垒与pH之间的关系

Fig.6 Relationships between pH and flux ( $J_{80}$ ) or interface energy barrier ( $\Delta E_b$ ) at the later fouling stages

对于HA和SA,其过滤后期平稳通量及“污染物-污染膜”界面作用随着pH升高近似呈线性增大。而对于BSA,由于pH=5时BSA与污染后膜之间的静电斥力和能垒最小,在过滤后期能维持的通量也最低;随着pH升高,BSA与污染后超滤膜之间

的能垒变化趋势与其他污染物一致。

分析过滤80 min后的相对平稳通量( $y$ )与界面能垒( $x$ )的关联性,得到拟合方程分别为:

$$y=18.92x+207.69 \quad (3)$$

$$y=20.05x+131.15 \quad (4)$$

$$y=24.51x+258.49 \quad (5)$$

污染物超滤后期通量与污染物-污染膜界面的能垒值呈显著正相关( $R^2$ 分别为0.970 2、0.996 3、0.998 2),即能垒越高,超滤后期能维持的通量越大,进一步显示了污染物-污染膜界面能垒对超滤长期运行通量的重要性,这与Tang等人<sup>[26]</sup>的报道相似,即长期稳定通量由稳定胶体悬浮液的污染物-污染膜相互作用决定,而过滤初期的通量行为由污染物-净膜相互作用决定。因此,在过滤后期,净膜本身的作用对膜污染影响不大。

### 3 结论

① 东江水中强疏水性和弱疏水性组分主要为腐殖类和蛋白类,而亲水组分主要为多糖类物质。相比疏水性组分,亲水性组分造成的超滤膜污染更为严重。因此预处理工艺的选择应着重考虑去除亲水性物质。

② pH对HA、SA、BSA膜污染行为有重要的影响:对于SA和HA,随着pH的增加则膜通量衰减趋缓,对于BSA来说,在pH远离零电荷点(pH=4.7)时膜通量衰减较为缓和;而三者对膜污染的严重程度为SA>HA>BSA。因此,建议在生活饮用水允许的pH范围内,原水化学调配应尽量提高pH,以有效减缓膜污染。

③ 不同pH条件下HA、SA、BSA对膜污染的影响与界面能垒呈正相关,能垒越大,膜表面对污染物的抵抗作用越强;膜过滤后期的稳态通量值与“污染物-污染膜”界面能垒呈线性正相关。

④ 膜过滤初期污染受“污染物-净膜”作用决定,在实际中通过选择抗污染性能较好的膜材料或对膜进行亲水改性可以提高膜过滤初期的表现。膜过滤后期的相对稳态通量由“污染物-污染膜”界面作用决定,因此原水预处理及水化学调配应尽量提高“污染物-污染膜”界面能垒,以期取得较高的过滤后期平稳通量。

### 参考文献:

[1] 吴艳华,张明,镇祥华,等. 珠海某绿色高品质饮用水

- 厂工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 88-92.
- WU Yanhua, ZHANG Ming, ZHEN Xianghua, *et al.* Design of a green and high-quality waterworks in Zhuhai [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 88-92 (in Chinese).
- [2] 郑利祥, 郭中权, 毛维东. 矿井水处理聚合氯化铝残留物对超滤膜污染的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 51-56, 63.
- ZHENG Lixiang, GUO Zhongquan, MAO Weidong. Influence of polyaluminium chloride residue on ultrafiltration membrane fouling in mine water treatment [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 51-56, 63 (in Chinese).
- [3] FANG X F, LI J S, LI X, *et al.* Iron-tannin-framework complex modified PES ultrafiltration membranes with enhanced filtration performance and fouling resistance [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 505: 642-652.
- [4] KIRSCHNER A Y, CHENG Y H, PAUL D R, *et al.* Fouling mechanisms in constant flux crossflow ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2019, 574: 65-75.
- [5] 姬晓羽, 南军, 王振北, 等. 混凝/粉末炭组合预处理改善超滤膜污染可逆性的效能[J]. 中国给水排水, 2019, 35(3): 1-6.
- JI Xiaoyu, NAN Jun, WANG Zhenbei, *et al.* Improving the reversibility of ultrafiltration membrane fouling by coagulation/powdered activated carbon combined pretreatment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(3): 1-6 (in Chinese).
- [6] 何林娟, 邹康兵, 盛云鸽, 等. 预处理对东江原水超滤过程中膜污染的控制作用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 16-21, 27.
- HE Linjuan, ZOU Kangbing, SHENG Yunge, *et al.* Control effect of pretreatment on membrane fouling during ultrafiltration of Dongjiang River raw water [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 16-21, 27 (in Chinese).
- [7] 王立. 好氧颗粒污泥-超滤/纳滤双膜耦合工艺中膜污染特性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- WANG Li. Membrane Fouling Characteristics in Integrated Aerobic Granular Sludge and UF/NF Process [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018 (in Chinese).
- [8] YAMAMURA H, KIMURA K, WATANABE Y. Mechanism involved in the evolution of physically irreversible fouling in microfiltration and ultrafiltration membranes used for drinking water treatment [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(19): 6789-6794.
- [9] QU F S, LIANG H, WANG Z Z, *et al.* Ultrafiltration membrane fouling by extracellular organic matters (EOM) of *Microcystis aeruginosa* in stationary phase: influences of interfacial characteristics of foulants and fouling mechanisms [J]. Water Research, 2012, 46(5): 1490-1500.
- [10] ZULARISAM A W, ISMAIL A F, SALIM M R, *et al.* Fabrication, fouling and foulant analyses of asymmetric polysulfone (PSF) ultrafiltration membrane fouled with natural organic matter (NOM) source waters [J]. Journal of Membrane Science, 2007, 299(1/2): 97-113.
- [11] 许凡超. 天然有机质胶体行为机制和膜污染预测研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- XU Fanchao. Colloidal and Membrane Fouling Behavior of Natural Organic Matter in Aquatic Systems: Mechanism and Prediction [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021 (in Chinese).
- [12] YIN Z Q, MA Y Q, TANIS-KANBUR B, *et al.* Fouling behavior of colloidal particles in organic solvent ultrafiltration [J]. Journal of Membrane Science, 2020, 599: 117836.
- [13] WANG Y N, TANG C Y. Protein fouling of nanofiltration, reverse osmosis, and ultrafiltration membranes—the role of hydrodynamic conditions, solution chemistry, and membrane properties [J]. Journal of Membrane Science, 2011, 376(1/2): 275-282.
- [14] LONG Y, YU G Y, DONG L, *et al.* Synergistic fouling behaviors and mechanisms of calcium ions and polyaluminum chloride associated with alginate solution in coagulation-ultrafiltration (UF) process [J]. Water Research, 2021, 189: 116665.
- [15] HE Z, NG T C A, LYU Z, *et al.* Alumina double-layered ultrafiltration membranes with enhanced water flux [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 587: 124324.
- [16] JAMIL S, LOGANATHAN P, KANDASAMY J, *et al.* Removal of dissolved organic matter fractions from reverse osmosis concentrate: comparing granular activated carbon and ion exchange resin adsorbents [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019,



- 7(3): 103126.
- [17] ROGATSKY E. Pandora box of BCA assay. Investigation of the accuracy and linearity of the microplate bicinchoninic protein assay: analytical challenges and method modifications to minimize systematic errors [J]. *Analytical Biochemistry*, 2021, 631: 114321.
- [18] ZENG C, YE G, LI G, *et al.* RID serve as a more appropriate measure than phenol sulfuric acid method for natural water-soluble polysaccharides quantification [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118928.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 丰桂珍, 杨银, 江立文. 赣江原水中溶解性有机物对超滤膜污染的影响研究 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(10): 1274–1279.
- FENG Guizhen, YANG Yin, JIANG Liwen. Effect of dissolved organic matter in raw water of Ganjiang River on ultrafiltration membrane fouling [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, 43(10): 1274–1279 (in Chinese).
- [22] ZULARISAM A W, AHMAD A, SAKINAH M, *et al.* Role of natural organic matter (NOM), colloidal particles, and solution chemistry on ultrafiltration performance [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 78(2): 189–200.
- [23] BAGHOTH S A, SHARMA S K, AMY G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation–emission matrices and PARAFAC [J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 797–809.
- [24] LIU J X, YANG E N, HUANG T Y, *et al.* Correlation of chemically irreversible fouling with organic constituents of feed water during membrane filtration [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 597: 124790.
- [25] 常新强, 林涛, 陈卫, 等. PAC/PS 预处理对水中镉的去除及 UF 膜污染控制 [J]. *中国给水排水*, 2022, 38(1): 64–69.
- CHANG Xinqiang, LIN Tao, CHEN Wei, *et al.* PAC/PS pretreatment for removal of cadmium from water and control of ultrafiltration membrane fouling [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(1): 64–69 (in Chinese).
- [26] TANG C Y, CHONG T H, FANE A G. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: a review [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, 164(1/2): 126–143.

作者简介: 余健鑫 (1998–), 男, 广东江门人, 硕士, 主要研究方向为膜法水处理技术。

E-mail: 15002001763@163.com

收稿日期: 2022-12-22

修回日期: 2023-01-10

(编辑: 李德强)

像保护眼睛一样保护生态环境,  
像对待生命一样对待生态环境