

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.003

## 预处理对东江原水超滤过程中膜污染的控制作用

何林娟<sup>1</sup>, 邹康兵<sup>2</sup>, 盛云鸽<sup>3</sup>, 杨恩诺<sup>1</sup>, 黄添怡<sup>1</sup>, 王志红<sup>1</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. 广州市自来水公司, 广东 广州 510600; 3. 河南省交通规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘 要:** 以珠江流域东江水作为原水, 研究不同预处理(混凝、吸附、氧化)及其组合对水体中有机污染物的去除效果及对超滤膜污染的控制作用。试验结果表明, 针对东江原水中天然有机物的去除, 聚合氯化铝(PACl)、粉末活性炭(PAC)和高锰酸钾(KMnO<sub>4</sub>)的最佳投加量分别为 20、30、0.1 mg/L; 三种单一预处理方法能够在一定程度上缓解膜通量衰减, 而两两组合预处理则能够进一步提高膜运行通量; 对于聚偏氟乙烯膜, PACl + PAC 组合预处理对膜污染的控制作用最好。对于 UV<sub>254</sub> 和蛋白质, PACl 和 KMnO<sub>4</sub> 对其去除效果优于 PAC; 对于多糖, 三种预处理方法对其去除效果均不佳(<40%), 其中 PAC 略好于 PACl 和 KMnO<sub>4</sub>。此外, 三种单一预处理方法对腐殖酸类荧光物质的去除效果高于蛋白质类荧光物质, 而组合预处理能够更加显著地降低这两类荧光物质的响应强度, 其中 PACl + PAC 组合预处理对有机物各荧光组分的去除效果最佳。通过对膜污染物成分的识别分析可知, 东江原水中造成超滤膜污染的物质有腐殖酸类、多糖类和蛋白质类物质, 而化学不可逆污染物主要为多糖类物质及少量的腐殖酸类物质, 化学可逆污染物主要为蛋白质类物质及部分腐殖酸类物质。

**关键词:** 超滤; 膜污染; 预处理; 天然有机物; 混凝; 吸附; 氧化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0016-07

## Control Effect of Pretreatment on Membrane Fouling during Ultrafiltration of Dongjiang River Raw Water

HE Lin-juan<sup>1</sup>, ZOU Kang-bing<sup>2</sup>, SHENG Yun-ge<sup>3</sup>, YANG En-nuo<sup>1</sup>, HUANG Tian-yi<sup>1</sup>,  
WANG Zhi-hong<sup>1</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., Guangzhou 510600, China; 3. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Effects of different pretreatment processes (coagulation, adsorption and oxidation) and their combinations on removal of organic pollutants in raw water of Dongjiang River in Pearl River Basin and control of ultrafiltration membrane fouling were explored. For removal of natural organic matter in raw water of Dongjiang River, the optimal dosages of coagulant (polyaluminum), adsorbent (powdered activated carbon) and oxidant (KMnO<sub>4</sub>) were 20 mg/L, 30 mg/L and 0.1 mg/L, respectively. Three single pretreatment process could effectively alleviate membrane flux attenuation, while pairwise combined

pretreatment processes could further alleviate membrane fouling. The combined pretreatment of polyaluminum and powdered activated carbon exhibited the best control effect on fouling of the polyvinylidene fluoride membrane. Polyaluminum and  $\text{KMnO}_4$  had better removal efficiency of  $\text{UV}_{254}$  and protein compared with that of powdered activated carbon. However, the three pretreatment processes had poor removal efficiency of polysaccharides ( $< 40\%$ ), among which, powdered activated carbon was slightly better than polyaluminum and  $\text{KMnO}_4$ . In addition, the three single pretreatment processes were more effective in removing humic-like fluorescent substances than protein-based fluorescent substances, while combined pretreatment processes could significantly reduce the response intensity of these two types of fluorescent substances. Among them, the combined pretreatment process of polyaluminum and powdered activated carbon had the best removal effect on each fluorescent component of organic matter. Through the identification and analysis of membrane fouling components, it was showed that the main fouling substances during ultrafiltration of Dongjiang River raw water included humic acids, polysaccharides and proteins. Among them, chemically irreversible foulants were polysaccharides and a small amount of humic acids, whereas the chemically reversible foulants were proteins and some humic acids.

**Key words:** ultrafiltration; membrane fouling; pretreatment; natural organic matter; coagulation; adsorption; oxidation

随着生活与生产排放污染物的加剧以及居民生活饮用水水质标准的提高,水厂常规处理工艺难以满足出水水质要求,因此迫切需要对现有工艺进行升级改造。膜技术由于其生产成本低,且能够有效去除水中的悬浮固体、细菌和部分大分子有机物,因此能够有效提高饮用水的水质安全性。然而,水体中的天然有机物(NOM)会造成膜污染,引起膜过滤通量的下降,增加运行能耗和缩短膜的使用寿命,是膜技术推广和应用的瓶颈<sup>[1]</sup>。在膜前添加预处理技术,比如混凝、吸附、氧化等可以在提高膜过滤水质的同时降低膜污染,因此,预处理可作为一种有效缓解膜污染的手段。但需要注意的是,由于实际水体成分较为复杂,单一预处理技术往往难以达到预期效果,不同预处理组合,发挥各自的优势,是一种较好的选择。因此,明确不同预处理对 NOM 主要特性成分的去除效果,从而确定最佳的预处理组合工艺,显得至关重要。

笔者以珠江流域东江水作为原水,以超滤为核心处理技术,采用小试研究不同预处理(混凝、吸附、氧化)及其组合对水中 NOM 特性成分的去除效果,以及对超滤膜污染的控制作用,并通过对污染膜进行化学清洗及表征来识别东江水中的主要膜污染物成分,以期超滤技术用于珠三角地区水厂升级改造及深度处理提供理论依据及技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验选用聚偏氟乙烯超滤膜(型号 PVDF-700)和聚醚砜超滤膜(型号 PES-700),两种膜的截留分子量均为 70 ku,有效过滤面积为  $0.0036 \text{ m}^2$ 。混凝剂采用聚合氯化铝(PACl),吸附剂采用粉末活性炭(PAC),氧化剂采用高锰酸钾( $\text{KMnO}_4$ ),膜清洗试剂采用次氯酸钠( $\text{NaClO}$ )和氢氧化钠( $\text{NaOH}$ ),以上试剂均为分析纯。

### 1.2 超滤试验及进水水质

超滤试验装置如图 1 所示,由氮气瓶、进水罐、杯式超滤器、出水罐、电子天平、计算机等组成。采用恒压死水端过滤,操作压力为  $0.1 \text{ MPa}$ ;进水由高纯氮气驱动流入超滤杯,出水由电子天平记录并实时传输给计算机。

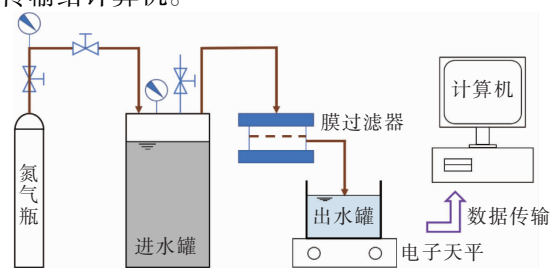


图 1 超滤试验装置

Fig. 1 Schematics of ultrafiltration test device

试验用水取自广州新塘水厂进水(珠江流域东江水),其 pH 值、 $UV_{254}$ 、TOC、多糖和蛋白质含量分别为 6.82、 $0.124\text{ cm}^{-1}$ 、 $1.47\text{ mg/L}$ 、 $9.51\text{ mg/L}$ 、 $4.86\text{ mg/L}$ 。

膜通量  $J$  的计算公式为:

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

式中:  $m$  为滤液质量,  $g$ ;  $\rho$  为滤液密度,  $g/cm^3$ ;  $A$  为超滤膜有效过滤面积,  $m^2$ ;  $t$  为过滤时间,  $s$ 。

超滤试验开始时,首先用超纯水将超滤膜预压至通量达到稳定值  $J_0$ ,之后分别通入经过不同预处理的水样进行膜过滤试验,预处理药剂的投加量通过试验方法确定。此外,将未经预处理的东江原水直接过滤作为参照试验。

### 1.3 膜清洗试验

通常,膜化学清洗方法有酸洗、碱洗和氧化剂清洗,一般酸洗主要去除无机金属及污垢,而碱洗和氧化剂清洗对有机污染物具有较好的去除效果<sup>[2]</sup>。在众多的清洗药剂中,氢氧化钠和次氯酸钠对有机污染物具有较好的洗脱能力,二者配合使用能达到更好的清洗效果<sup>[2]</sup>。因此,本试验采用次氯酸钠(0.2%)和氢氧化钠(0.2%)混合液作为化学清洗药剂。

膜滤试验结束后,将被污染的超滤膜从膜分离装置上取下,取一片样品先用清水洗去浮尘,之后采用化学清洗药剂对其进行 24 h 浸泡。对洗膜液进行成分分析,对污染前后的膜进行红外光谱(FIR)表征,进而识别膜污染物的主要成分。

### 1.4 预处理试验

首先确定预处理药剂的最佳投加量。选用 PACl 作为混凝剂,投加量分别设为 10、20、30、40、50、60 mg/L;选择 PAC 作为吸附剂,投加量分别设为 5、10、20、30、50 mg/L;选择  $KMnO_4$  作为氧化试剂,投加量分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/L。以 TOC 去除率为衡量指标,确定 PACl、PAC、 $KMnO_4$  的最佳投加量。然后进行预处理试验:分别向原水中投加不同预处理药剂,搅拌之后静置 1 h,取上清液作为超滤试验进水。搅拌条件如下:采用六联搅拌机(MY3000-6)快速混合反应 1 min(300 r/min);慢速搅拌分两个阶段,第一阶段搅拌速度为 100 r/min、时间为 1 min,第二阶段搅拌速度为 50 r/min、时间为 10 min。

## 1.5 测试方法

超滤试验采用恒压过滤,因此在过滤过程中跨膜压差不变(0.1 MPa),水通量随着过滤时间的延长而逐渐降低,将水通量作为衡量膜污染程度的指标。其余水质指标测定方法如下:采用紫外分光光度计测定  $UV_{254}$  值;采用总有机碳测定仪测定 TOC 含量;采用 BCA 微量蛋白质试剂盒法测定蛋白质含量,以牛血清白蛋白为标准物质;采用苯酚硫酸法测定多糖含量,以葡萄糖为标准物质;采用三维荧光光谱仪(Cary Eclipse, Varian, USA)测定水样中的荧光物质含量,具体方法参见文献[3];采用傅里叶变换红外光谱仪分析膜表面污染物质的主要官能团;采用 Zeta 电位测定仪测定两种膜的 Zeta 电位。

## 2 结果与讨论

### 2.1 预处理药剂最佳投加量的确定

当 PACl 投加量分别为 10、20、30、40、50、60 mg/L 时,TOC 去除率分别为 35.41%、50.00%、39.00%、38.64%、33.81% 和 21.35%,其中,当 PACl 投加量为 20 mg/L 时 TOC 去除率达到最大值。当 PAC 投加量分别为 5、10、20、30、50 mg/L 时,TOC 去除率分别为 14.7%、25.44%、30.85%、51.19% 和 40.48%,当 PAC 投加量为 30 mg/L 时 TOC 去除率最高。当  $KMnO_4$  投加量分别为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/L 时,TOC 去除率分别为 6.80%、9.90%、20.45%、20.08%、40.31%、24.54%、28.52%、31.89%、31.02%, $KMnO_4$  投加量为 0.1 mg/L 时 TOC 去除率最大。因此,确定混凝剂 PACl、吸附剂 PAC、氧化剂  $KMnO_4$  的最佳投量分别为 20、30、0.1 mg/L。

### 2.2 不同预处理对膜污染的影响

在最佳预处理药剂投加量条件下,对不同预处理出水进行超滤试验,其膜比通量  $J/J_0$  随时间的变化情况如图 2 所示。由图 2(a)可知,对于 PES 超滤膜,对比原水直接过滤的膜污染行为,混凝、吸附、氧化等单一预处理方法均可以有效减缓膜通量衰减,过滤 35 min 后能够将膜比通量提高到 0.6 左右;与单一预处理方法相比,组合预处理能够显著提高膜比通量( $J/J_0 > 0.8$ ),三种组合预处理的效果接近。图 2(b)为 PVDF 超滤膜的污染情况,与 PES 超滤膜相似,经混凝、吸附、氧化单一预处理后膜通量有所提升,而组合预处理能够在单一预处理的基础上进一步提高膜通量,其中 PACl + PAC 组合工艺对膜通



量的改善效果最好。另外,对比两种超滤膜的通量变化发现,东江原水对 PVDF 超滤膜造成的污染比 PES 超滤膜略微严重,尤其是在预处理之后更为明显。从两种膜的物化特性来分析原因:在水流阻力方面,两种膜的截留分子质量均为 70 ku,因此看不出明显的差异;在表面化学特性方面,PES 超滤膜的 Zeta 电位(  $-31.5$  mV)低于 PVDF 超滤膜的 Zeta 电位(  $-26.4$  mV),而通常地表水中的 NOM 带负电,因此,在污染物与膜作用的过程中,PES 膜比 PVDF 膜带有更多的排斥电荷,因此具有更高的界面静电排斥作用,能够阻挡污染物颗粒沉淀,呈现出较低的膜污染趋势。

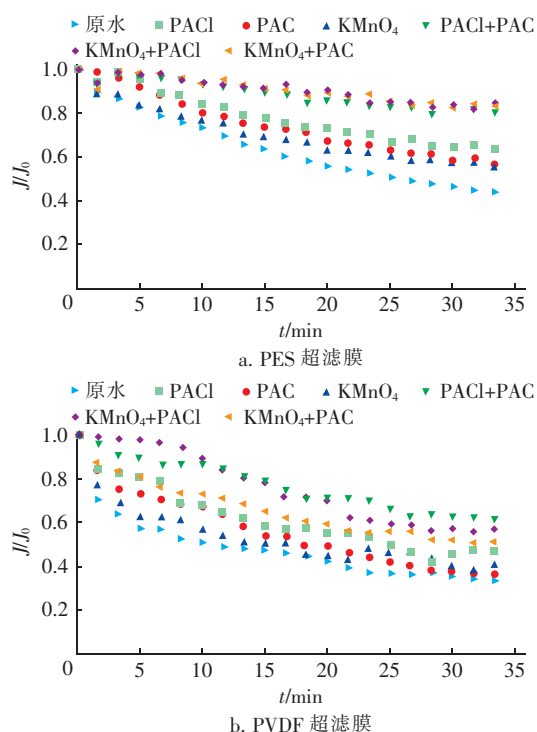


图 2 不同预处理对膜污染的缓解作用

Fig. 2 Fouling mitigation by different pretreatment processes

### 2.3 不同预处理对有机物组分的去除效果

三种预处理方法(混凝、吸附和氧化)对  $UV_{254}$  的去除率分别为 58.55%、51.28% 和 58.17%,对多糖类物质的去除率分别为 24.20%、29.83% 和 26.17%,对蛋白质类物质的去除率分别为 69.23%、48.28% 和 71.62%。 $UV_{254}$  代表水中天然存在的疏水性腐殖酸类有机物以及含  $C=C$  双键和  $C=O$  双键的芳香族化合物<sup>[4]</sup>,通常混凝和氧化对疏水性 NOM 有较好的去除效果<sup>[5-6]</sup>,而 PAC 属于疏水性物质,易于吸附疏水性物质(有利于去除强疏水性

组分<sup>[6-7]</sup>),因此,三种方法对  $UV_{254}$  的去除效果优于亲水性多糖类物质。针对  $UV_{254}$ ,PACl 和  $KMnO_4$  的去除效果略优于 PAC;针对多糖类物质,三种方法的去除能力均有限,其中 PAC 对其去除效果略优于 PACl 和  $KMnO_4$ ,这是因为 PAC 对中性亲水性组分物质有一定的去除能力<sup>[8]</sup>;针对蛋白质类物质,PACl 和  $KMnO_4$  的去除效果优于 PAC,这可能是由于蛋白质类分子质量较大,混凝和氧化预处理对大分子有机物的去除效果较好<sup>[9]</sup>,而 PAC 由于孔的尺寸受阻,对分子质量较大的物质去除有限<sup>[7]</sup>。

对原水和不同预处理出水进行三维荧光光谱分析,结果如图 3 所示。

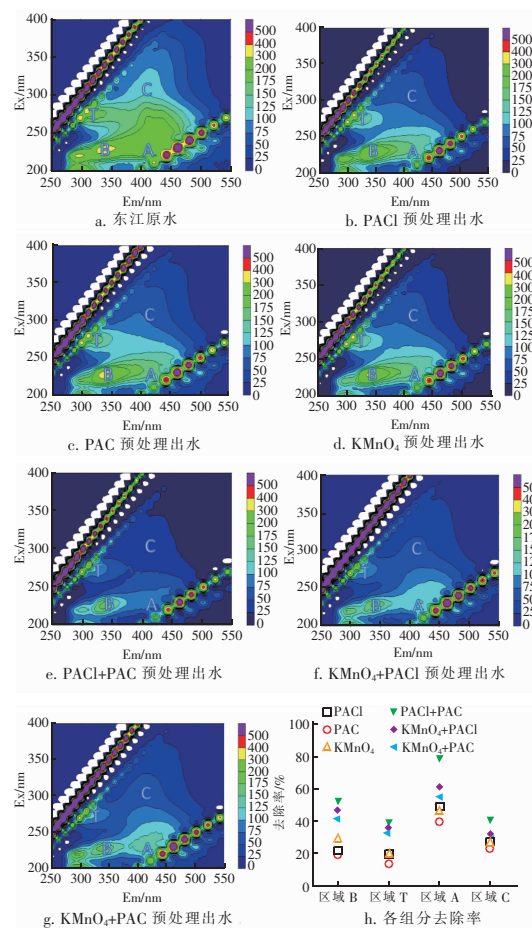


图 3 预处理对东江原水三维荧光光谱的影响

Fig. 3 Effect of pretreatment on three-dimensional fluorescence spectrum of Dongjiang River raw water

根据有机物激发波长 Ex 和发射波长 Em 范围,将荧光光谱范围分为 4 个区域<sup>[10]</sup>:B 区域为芳香族蛋白质类,  $Ex/Em = 200 \sim 250$  nm/ $280 \sim 380$  nm;T 区域为溶解性微生物代谢产物,  $Ex/Em = 250 \sim 300$

nm/280 ~ 380 nm; C 区域为腐殖酸类,  $E_x/E_m = 280 \sim 350 \text{ nm}/380 \sim 480 \text{ nm}$ ; A 区域为富里酸类,  $E_x/E_m = 200 \sim 250 \text{ nm}/380 \sim 480 \text{ nm}$ 。原水在荧光 B 区和 A 区具有较高的响应,说明东江原水含有较多的芳香族蛋白质类和富里酸类物质,此外还有一定的溶解性微生物代谢产物(T区)以及少量的腐殖酸类物质(C区)。与原水相比,经混凝、吸附、氧化预处理后,T、B、A、C 区域的荧光响应强度和响应面积均有不同程度的减小,说明预处理对原水中的荧光性有机物有一定的削减作用。而不同预处理两两联用之后,四个区域的荧光强度和荧光响应面积都进一步减弱。

为进一步量化各种预处理方法对不同荧光性有机物的去除效果,对四个荧光分区进行积分<sup>[3]</sup>,并计算去除率,结果如图 3(h) 所示。可以看出,三种单一预处理方法对腐殖酸类荧光区(即 A 区富里酸和 C 区腐殖酸)的去除效果高于蛋白质类荧光区(即 B 区芳香族蛋白质类和 T 区溶解性微生物代谢产物),这与三种预处理方法更易于去除疏水性物质的结果一致;与单一预处理相比,组合预处理能明显提高荧光性有机物去除率,其中 PACl + PAC 组合预处理效果最佳,其次为  $\text{KMnO}_4 + \text{PACl}$ ,  $\text{KMnO}_4 + \text{PAC}$  组合预处理效果最差,这与组合预处理的膜通量表现相一致。通常,混凝易于去除疏水性和大分子有机物<sup>[11]</sup>;而 PAC 能够吸附强疏/中亲组分和小分子有机物<sup>[7-8]</sup>,因此,无论从分子大小角度还是亲疏水组分角度, PACl + PAC 组合对 NOM 的去除效果均最佳,对膜污染的缓解作用最好。

#### 2.4 膜污染物成分识别

为了确定膜污染物的主要成分,将原膜、污染后及化学清洗后的膜进行红外光谱检测,结果见图 4。PES 原膜中出现了聚醚砜材料所具有的  $\text{S}=\text{O}$  ( $1\,174 \text{ cm}^{-1}$ )、 $=\text{C}-\text{H}$  ( $874 \text{ cm}^{-1}$ )、 $\text{O}-\text{H}$  ( $1\,401 \text{ cm}^{-1}$ ) 等特征基团<sup>[12]</sup>; PVDF 原膜中出现了聚偏氟乙烯材料所具有的  $\text{C}-\text{F}$  ( $1\,177 \text{ cm}^{-1}$ )、 $\text{F}-\text{C}-\text{F}$  ( $1\,069 \text{ cm}^{-1}$ )、 $=\text{C}-\text{H}$  ( $873 \text{ cm}^{-1}$ )、 $\text{O}-\text{H}$  ( $1\,401 \text{ cm}^{-1}$ ) 等特征基团<sup>[13]</sup>。膜污染后,出现了一些新的峰,且膜本身的一些特征峰被掩盖。根据蛋白质二级结构特征峰,在  $1\,600 \sim 1\,700 \text{ cm}^{-1}$  处为酰胺 I 带,  $1\,500 \sim 1\,600 \text{ cm}^{-1}$  处为酰胺 II 带。图 4 中在  $1\,644 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,652 \text{ cm}^{-1}$  处的峰属于酰胺 I 带,说明在膜污染物中存在蛋白质类物质;在  $992 \text{ cm}^{-1}$  和

$1\,003 \text{ cm}^{-1}$  处出现一个大峰,这代表存在碳水化合物特征基团  $\text{C}-\text{O}$ ,说明膜污染物中存在多糖类物质;另外,在  $3\,000 \sim 3\,700 \text{ cm}^{-1}$  处出现宽阔的峰,这是由于  $-\text{OH}$  和  $-\text{NH}$  的伸缩振动所致,表明在膜污染物中存在腐殖酸类。由此可以确定,蛋白质类、多糖类、腐殖酸类是膜的主要有机污染成分。

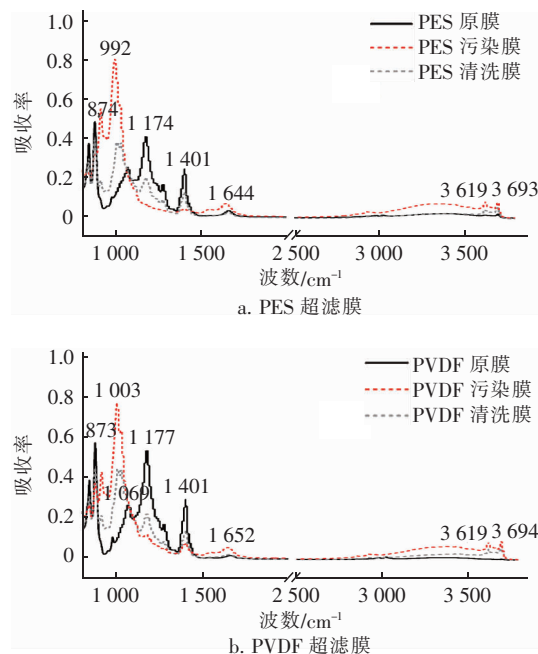


图4 超滤膜污染前后以及清洗后的红外光谱图

Fig. 4 Infrared spectrum of ultrafiltration membrane

污染的膜经过化学清洗后,污染物的响应峰值( $992 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,003 \text{ cm}^{-1}$ 、 $3\,400 \text{ cm}^{-1}$  附近区间、 $3\,619 \text{ cm}^{-1}$ )都有不同程度的减弱;对比原膜的红外光谱,  $1\,644 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,652 \text{ cm}^{-1}$  附近的蛋白质类物质基本被完全洗脱; PES 膜上  $2\,900 \sim 3\,700 \text{ cm}^{-1}$  区间的腐殖酸类物质也被完全洗掉,但是 PVDF 膜上仍残留少量腐殖酸类物质;多糖类( $992 \text{ cm}^{-1}$  和  $1\,003 \text{ cm}^{-1}$ )污染物的峰值依然明显存在,即化学清洗并不能完全洗脱这部分污染物质,说明原水中的多糖类物质及少量的腐殖酸类物质是造成两种超滤膜化学不可逆污染的主要成分。

进一步对洗膜液进行三维荧光光谱分析,结果如图 5 所示。洗膜液的主要荧光响应位置在 B、T 区域,说明超滤膜上的化学可逆污染成分主要为蛋白质类荧光物质,即溶解性微生物代谢产物和芳香族蛋白质类物质,这与红外光谱的表征结果一致(即蛋白质类物质容易被洗脱)。洗膜液在 A、C 区域也存在较弱的荧光峰,说明洗膜液中含有少量的

腐殖酸类物质,但并不能认为腐殖酸类物质没有被大量洗脱下来,因为腐殖酸属于混合物,部分腐殖酸类污染物不会有荧光响应。

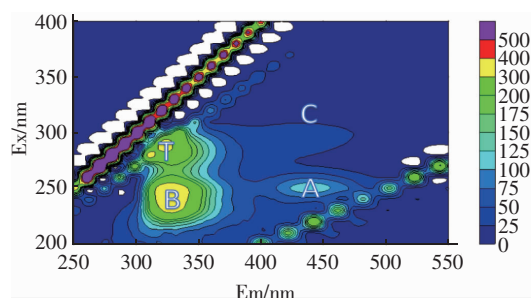


图5 PES超滤膜洗膜液的三维荧光光谱

Fig.5 Three-dimensional fluorescence spectrum of cleaning solution of PES ultrafiltration membrane

### 3 结论

① 针对东江原水中天然有机物的去除(以TOC为衡量指标),PACl混凝、PAC吸附和 $\text{KMnO}_4$ 氧化预处理的最佳投加量分别为20、30、0.1 mg/L。

② 混凝、吸附、氧化等单一预处理方法能够在一定程度上缓解东江原水对超滤膜的污染,而组合预处理能够进一步提高膜运行通量;对于PES膜,PACl+PAC、PAC+ $\text{KMnO}_4$ 、PACl+ $\text{KMnO}_4$ 三种组合预处理对膜污染的改善效果接近,而对于PVDF膜,PACl+PAC组合预处理对膜污染的控制作用最好。

③ 对于 $\text{UV}_{254}$ 和蛋白质,PACl和 $\text{KMnO}_4$ 对其去除效果优于PAC;对于多糖,三种预处理方法的去除效果均不佳( $<40\%$ ),其中PAC对其去除效果略好于PACl和 $\text{KMnO}_4$ 。三种单一预处理方法对腐殖酸类荧光物质的去除效果高于蛋白质类荧光物质,而组合预处理能够更加显著地降低这两类荧光物质的响应强度,其中,PACl+PAC组合预处理对有机物各荧光组分的去除效果最佳。

④ 东江原水中造成超滤膜污染的物质为腐殖酸类、多糖类、蛋白质类物质,而化学不可逆污染物主要为多糖类及少量的腐殖酸类物质,化学可逆污染物主要为蛋白质类及部分腐殖酸类物质。

### 参考文献:

[1] 朱逸康,胥倩倩,黄瑶瑶,等.天然有机物对不同孔径超滤膜的污染特性研究[J].宁波大学学报(理工版),2019,32(1):109-114.

ZHU Yikang, XU Qianqian, HUANG Yaoyao, *et al.* Characteristics of natural organic matter fouling of ultrafiltration membrane [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition), 2019,32(1):109-114(in Chinese).

[2] WANG Z, MA J, TANG C Y, *et al.* Membrane cleaning in membrane bioreactors: a review [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 468: 276-307.

[3] CHEN W, WESTERHOFF P, LEENHEER J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(24):5701-5710.

[4] LIU J, WANG Z, CAO B, *et al.* Ultrafiltration of distinct natural waters: correlation of fouling resistances with water constituents [J]. Desalination and Water Treatment, 2017, 68: 40-48.

[5] ARHIN S G, BANADDA N, KOMAKECH A J, *et al.* Membrane fouling control in low pressure membranes: a review on pretreatment techniques for fouling abatement [J]. Environmental Engineering Research, 2016, 21(2):109-120.

[6] 姬晓羽. 混凝/粉末炭组合的水处理特性对膜污染控制的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. JI Xiaoyu. Effect of the Water Treatment Characteristics of Coagulation/Powdered Activated Carbon Combination on Ultrafiltration Membrane Fouling Control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).

[7] LIU J, WANG Z, DONG B, *et al.* Fouling behaviors correlating to water characteristics during the ultrafiltration of micro-polluted water with and without the addition of powdered activated carbon [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 511: 320-328.

[8] LIU J, CHU H, DONG B, *et al.* Effect of PACs pretreatment on UF performance for NOM removal [J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(37/38/39): 6878-6885.

[9] 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 (下转第27页)