

张健,殷祺,陈艳,等. 混凝剂对超滤膜去除有机物及膜污染的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(1):51-57, 102.

ZHANG J, YIN Q, CHEN Y, et al. Effect of coagulant on ultrafiltration membrane for organic matter removal and membrane fouling[J].

Water Purification Technology, 2022, 41(1):51-57, 102.



扫我试试?

混凝剂对超滤膜去除有机物及膜污染的影响

张健^{1,2}, 殷祺³, 陈艳^{1,2,*}, 徐鹏成^{1,2}, 李惠平¹

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 甘肃兰州 730070; 3. 吴江华衍水务有限公司, 江苏苏州 215220)

摘要 以太湖水为研究对象, 采用超滤工艺, 通过分别投加混凝剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和聚合氯化铝(PAC), 分析混凝过程对超滤膜运行效果及压力的影响。结果表明: 混凝可以有效提高超滤对有机物的去除效果, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PAC 投加量大于 6 mg/L 和 3 mg/L(以 Al^{3+} 计)时, 混凝剂对超滤去除有机物的提升效果趋于稳定; 混凝可以有效减缓超滤膜膜压差的增长和不可逆污染, 单独超滤时不可逆污染指数(HIFI)为 0.002 92, 最佳投加量下 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -UF 和 PAC-UF 的 HIFI 分别为 0.001 13 和 0.001 02; 造成超滤膜不可逆膜污染的有机物主要以具有紫外响应的中分子量有机物为主, 其次是中、小分子量无紫外响应的溶解性有机物(dissolved organic compound, DOC); $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 混凝剂更易于减少中等分子量有机物对超滤膜的污染, PAC 混凝剂更易于减少小分子量有机物对超滤膜的污染。

关键词 混凝 超滤 有机物 跨膜压力 分子量分布

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)01-0051-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.01.008

Effect of Coagulant on Ultrafiltration Membrane for Organic Matter Removal and Membrane Fouling

ZHANG Jian^{1,2}, YIN Qi³, CHEN Yan^{1,2,*}, XU Pengcheng^{1,2}, LI Huiping¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China;

3. Wujiang Huayan Water Group, Suzhou 215220, China)

Abstract Take Taihu Lake as research object, adopt ultrafiltration(UF) process to analyze the influence of coagulation process on operation effect and pressure of UF membrane by adding coagulant $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and polymeric aluminum chloride (PAC) respectively. Results showed that coagulation process could effectively improve the effect of ultrafiltration on the removal of organic matter. When the dosage of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ and PAC were greater than 6 mg/L and 3 mg/L(measured by Al^{3+}), the promoting effect of coagulant on the removal of organic matter tends to be stable. Coagulation process could effectively relieve the growth of pressure and irreversible pollution of UF membrane. The HIFI of UF alone was 0.002 92, and the HIFI of $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -UF and PAC-UF were 0.001 13 and 0.001 02, respectively, under the optimal dosage. According to molecular weight distribution, medium molecular weight organics with UV response were the main factors causing irreversible membrane fouling of ultrafiltration membrane, followed by dissolved organics carbon (DOC) with no UV response at medium and small molecular weights. $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ coagulant was easier to reduce the foul of UF membrane caused by medium molecular weight organic matter, and PAC coagulant was easier to reduce the foul of UF membrane caused by small molecular weight organic matter.

[收稿日期] 2020-12-23

[基金项目] 国家“十三五”重大水专项; 苏州市饮用水安全保障技术集成与综合(2017ZX07201001)

[作者简介] 张健(1996—), 男, 硕士, 研究方向为微污染水源水质处理技术, E-mail: 2321112561@qq.com。

[通信作者] 陈艳, 女, 副教授, 研究方向为微污染水源水质处理理论与技术、环境经济学, E-mail: xiaojingmama@163.com。

Keywords coagulation ultrafiltration (UF) organic mater transmembrane pressure (TMP) molecular weight distribution (MWD)

近年来,超滤技术因其在去除水中的颗粒和胶体方面的优良性能,而在饮用水处理中得到了广泛的应用^[1]。超滤膜可以完全去除病原体 and 颗粒杂质,从而显著提高饮用水的生物安全性^[2]。然而,膜污染会影响超滤技术在水处理中的进一步发展,显著降低膜通量,导致更高的能耗^[3-4]。另外,UF膜对有机物去除效果较差,且自然有机物是不可逆膜污染的主要成分^[5]。因此,人们开始越来越多地研究UF膜的预处理方法,试图在降低膜污染的同时,提高有机物的去除效果。通过大量的研究,发现在超滤前增加混凝过程,不仅可以减少膜污染,而且还可以有效提高超滤对有机物的去除效果^[6],但是针对不同机理的混凝剂对超滤膜污染影响的研究相对较少。

本研究采用混凝-超滤装置,通过加入不同浓度的混凝剂 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PAC,分析混凝剂对UF去除有机物的促进效果以及对膜污染的影响,并结合有机物分子量分布,分析造成超滤膜污染的原因,进一步探究不同混凝剂作用于超滤膜的机理,以期超滤工艺在水处理方面的推广与应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验用水

本试验在苏州某水厂内进行,水源采用东太湖原水,试验期间原水水质如表1所示。

表1 试验原水水质
Tab. 1 Raw Water Quality for Experiment

水质指标	变化范围	平均值
pH 值	7.44~8.12	7.76
浊度/NTU	55.9~107.0	73.7
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	3.50~4.50	4.12
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.034 8~0.051 2	0.089

1.2 试验装置及参数

将原水装入40 L的原水箱,原水通过原水泵进入供水箱,再由供水泵注入超滤膜;超滤每周期过滤30 min,运行结束后由自动控制装置进行物理反冲洗,并记录运行流量和超滤膜压力(TMP)的变化,

试验装置如图1所示。

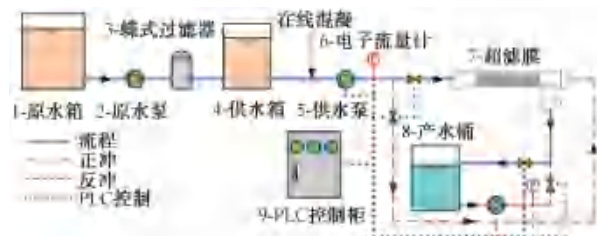


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Experimental Device

超滤膜总面积为 0.07 m^2 ,截留分子量为 $150\ 000 \text{ Da}$,采用内压死端过滤方式、定通量恒流过滤运行,运行通量为 $68 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$,流量为 $80 \text{ mL}/\text{min}$ 。混凝剂投加量以水厂实际运行工况为参考,PAC 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 投加量分别为 $2 \text{ mg}/\text{L}$ 和 $4 \text{ mg}/\text{L}$ (以 Al^{3+} 计)。本试验采用 PAC 投加梯度为 $0、1、2、3、4 \text{ mg}/\text{L}$, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 投加梯度为 $0、2、4、6、8 \text{ mg}/\text{L}$ 。

1.3 试验方法

浊度: HACH2100P 便携式浊度仪; pH: PB-21 酸度计; COD_{Mn} : 酸性高锰酸钾滴定法; UV_{254} : 紫外可见分光光度计; 分子量分布: 日本岛津 LC-10ADVP 凝胶色谱。

2 结果与分析

2.1 混凝剂对浊度去除效果的影响

图2为不同铝盐混凝剂对超滤去除浊度的影响,超滤对浊度有很好的去除效果,不同工况下超滤出水浊度都能保持在 0.23 NTU 以下。投加混凝剂后,超滤对浊度的去除效果呈现上升态势,且投加 PAC 对浊度去除的提升效果优于 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 。但超滤出水的浊度很低,超滤膜截留分子量有限,因此,添加混凝剂对超滤去除浊度的提升不大,最大只提高了 0.3% 的去除率。

2.2 混凝剂对有机物去除效果的影响

图3为不同混凝剂投加量下,混凝+UF对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除效果。单独超滤去除有机物效果较差,对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率分别为 22.7% 和 5.6% ,说明大部分有机物可以通过UF膜

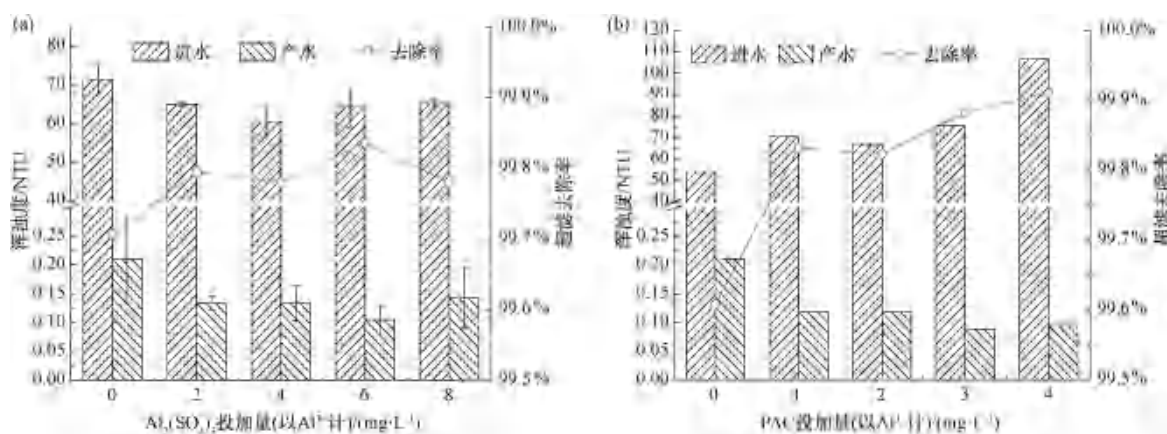


图2 混凝剂对超滤去除浑浊度效果影响

Fig. 2 Influence of Coagulant on Turbidity Removal by UF

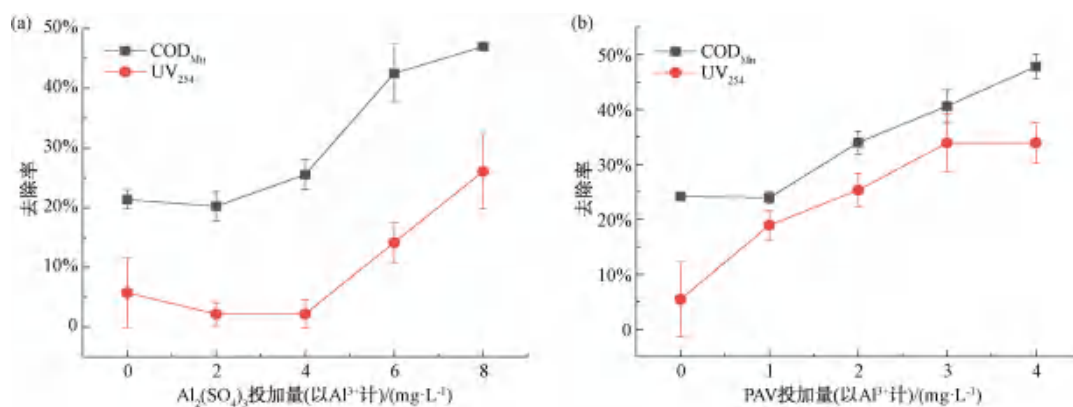


图3 混凝剂对超滤去除有机物效果影响

Fig. 3 Influence of Coagulant on Organic Removal by UF

达到产水侧。投加较低浓度的混凝剂[2.0 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ 和 1 mg/L PAC]时, $Al_2(SO_4)_3$ -UF 对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率分别是 28.2% 和 14.8%, PAC-UF 对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率分别是 23.9% 和 18.9%。由此可知,低剂量混凝剂并不能有效提高 UF 对 COD_{Mn} 的去除效果,但可以有效促进 UF 对 UV_{254} 的去除效果。这是因为低剂量的混凝剂并不足以使水中胶体形成容易沉淀的絮体^[7],有机物不易黏附于絮体而被去除。但 UV_{254} 代表苯环和不饱和烃类有机物,含羧酸、羟基等极性基团,而混凝剂的水解产物带正电荷^[8],因此,部分 UV_{254} 通过与混凝剂水解产物电位结合的方式得以去除。当提高混凝剂投加量时,UF 对 COD_{Mn} 和 UV_{254} 的去除率开始逐渐升高。 $Al_2(SO_4)_3$ 和 PAC 的投加量分别增加到 8 mg/L 和 4 mg/L 时, COD_{Mn} 的去除率逐渐提高到 47.8% 和 47%, UV_{254} 的去除率逐渐提高到

32.9% 和 33.9%。由此可知,混凝对 UF 去除有机物有很好的促进作用,且两种混凝剂的促进作用相似。Eun 等^[9]研究发现,经过混凝过程后,40%~50% 的溶解性有机物会转化为颗粒物质。因此,有机物去除率的提高,主要是由于混凝过程中同时形成微絮体和有机物沉淀,部分有机物黏附于絮体而被去除,部分有机物则转化为颗粒物,自身形成沉淀得以去除。

2.3 混凝剂对超滤膜 TMP 的影响

不同混凝剂对超滤运行 TMP 影响如图 4 所示,混凝剂对超滤膜 TMP 有明显的抑制效果,不投加混凝剂时, TMP 随运行周期逐渐增加,且每周期的最大 TMP 均大于 60 kPa。当 $Al_2(SO_4)_3$ 投加量为 2 mg/L,运行第 1 周期时 TMP 偏高(最高为 64.4 kPa),运行至 2~5 周期时 TMP 明显降低,且 TMP 最高值趋于稳定[(54.9±2.3) kPa]。当 $Al_2(SO_4)_3$

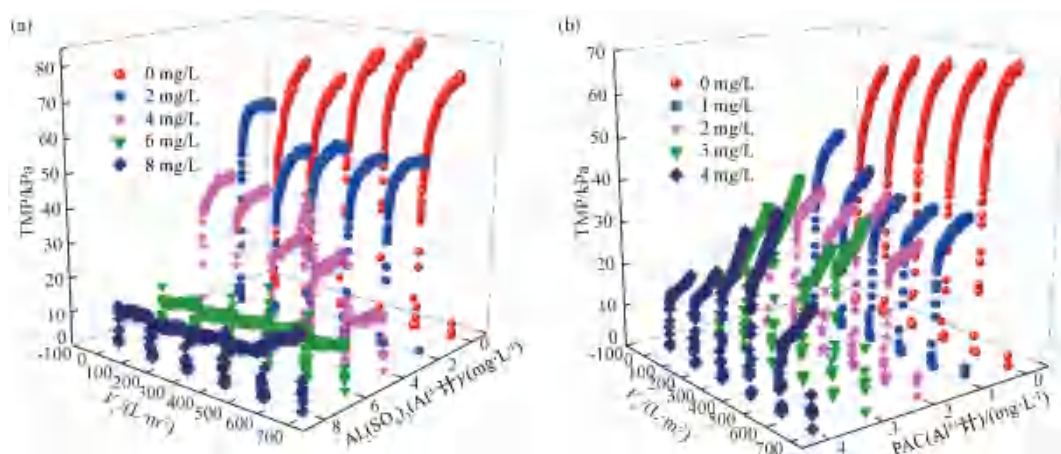


图4 混凝剂对超滤膜 TMP 的影响

Fig. 4 Influence of Coagulant on TMP of UF Membrane

投加量为 4 mg/L 时,随着运行周期的增加,TMP 的增长明显处于下降的状态(从第 1 周期的 45.6 kPa,逐渐下降至第 5 周期的 16.4 kPa)。当 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 投加量为 6 mg/L 和 8 mg/L 时,TMP 最高值在不同周期下趋于稳定 $[(12.92 \pm 1.88) \text{ kPa}]$,但投加量为 8 mg/L,在运行第 5 周期时,TMP 有明显的上升(由第 4 周期的 13.8 kPa 上升到 21.0 kPa),说明混凝剂高投加量会降低膜压力增长的抑制作用。与 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 相比,低投加量下,PAC 对超滤膜压力增长抑制作用更为明显,但随着 PAC 投加量的增加,对超滤运行过程中 TMP 增长的抑制效果无太明显的提升作用,由图 4 可知,当 PAC 投加量为 2~4 mg/L 时,TMP 的增长呈现波动性,但每周期的最大 TMP 均小于 40 kPa。

2.4 混凝剂对超滤膜 HIFI 的影响

通过在不同混凝剂投加量下的 5 周期运行对比,确定 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PAC 的最佳投加量分别为 6 mg/L 和 3 mg/L(以 Al^{3+} 计)。以最佳投加量的混凝剂进行 20 周期的试验,观察在多周期运行下,混凝剂对超滤膜 TMP 的影响,并参考前人研究^[10],采用不可逆污染指数 HIFI 比较混凝剂对超滤膜不可逆污染的影响。HIFI 计算如式(1)~式(2)。

$$1/J_s' = 1 + \text{HIFI} \times V_s \quad (1)$$

$$1/J_s' = (1/\text{TMP}_0) / (1/\text{TMP}_m) = \text{TMP}_m / \text{TMP}_0 \quad (2)$$

其中:HIFI——不可逆污染指数;

TMP_0 ——每周期起始跨膜压差,kPa;

TMP_m ——物理反冲洗后跨膜压差,kPa;

V_s ——单位膜面积的过滤体积, L/m^2 。

不同混凝剂下的 TMP 变化及不可逆污染指数的确定如图 5 所示。

由图 5(a)可知,当原水不投加混凝剂直接采用超滤过滤时,TMP 增长较快,在运行到第 12 周期时 TMP 已经达到极限值(147.2 kPa)。由图 5(b)可知, $1/J_s'$ 随着 V_s 的增加,在第 7 周期前增长较快(从 1 增长到 2.51),但从第 7 周期以后 $1/J_s'$ 开始波动,但无明显升高(最高为 2.68)。且在第 7 周期以后 TMP 增长速度快于前 6 周期,说明此时超滤膜表面可能形成了滤饼层,原水中悬浮物、胶体颗粒和大分子有机物被拦截于滤饼层中,减少了和膜直接相接触的机会,因此,减缓了膜不可逆污染的速度^[11]。但同时也需要更大的压力来保证恒流运行,所以提高了 TMP 的增长速度。

由图 5(c)和图 5(e)可知,混凝剂的投加有效地减缓了 TMP 的增长,在运行至第 20 周期时 TMP 才增长到最大值(141.4 kPa 和 145.2 kPa);另外由图 5(d)和图 5(f)可知,投加混凝剂后, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和 PAC 的 $1/J_s'$ 最高值分别为 1.73 和 1.81,相比于没投加混凝剂时第 7 周期的 2.51, $1/J_s'$ 的增长速度明显降低。利用最小二乘法做出 $1/J_s' - V_s$ 的一次线性回归方程,无混凝剂投加: $1/J_s' = 1 + 2.92 \times 10^{-3} V_s$;投加 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$: $1/J_s' = 1 + 1.13 \times 10^{-3} V_s$;投加 PAC: $1/J_s' = 1 + 1.02 \times 10^{-3} V_s$ 。方程式中斜率为不可逆污染指数 HIFI,由此可知:不投加混凝剂时的 HIFI 最大,对膜的污染程度最高;投加 PAC 时 HIFI 最小,对膜的污染程度最小。

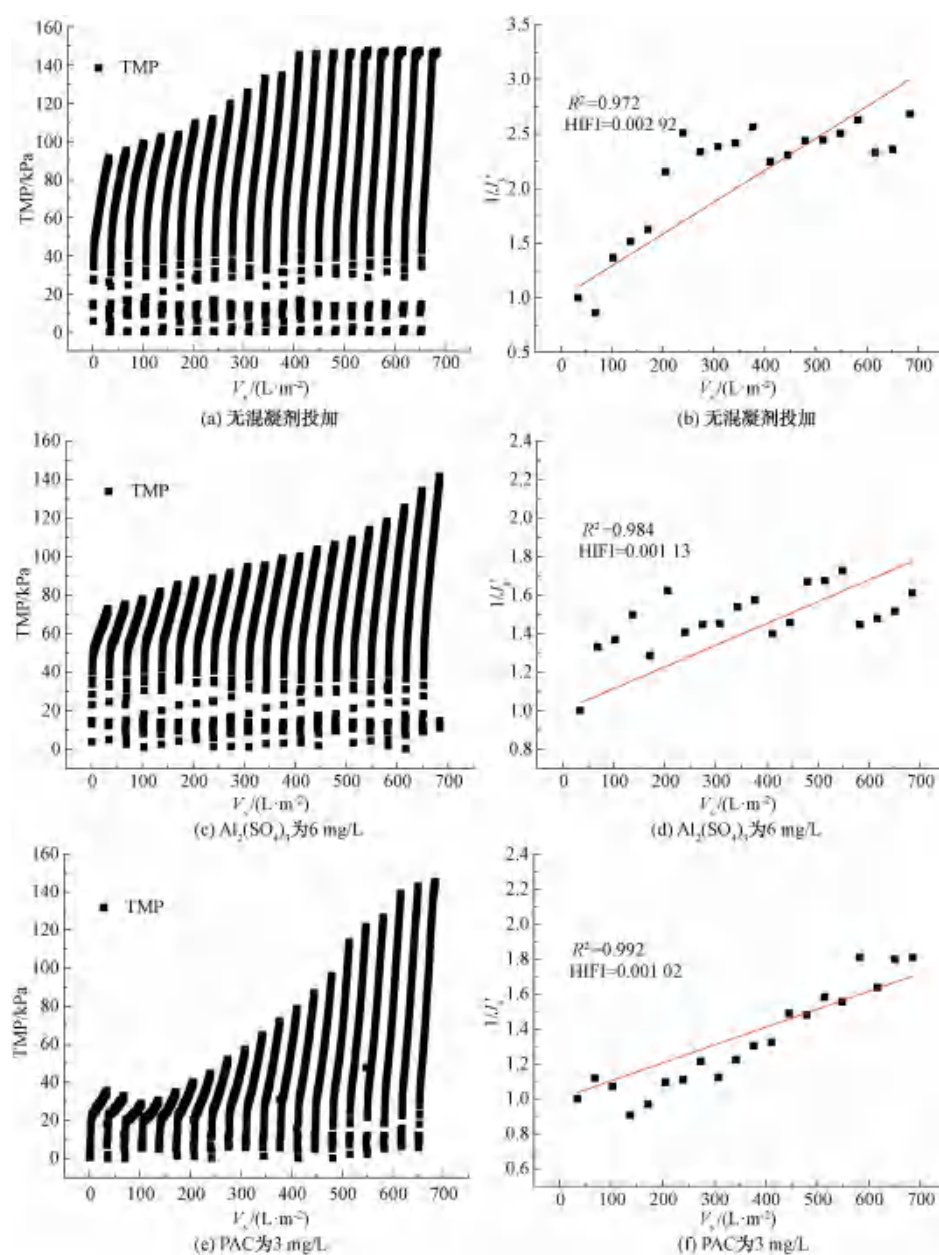


图 5 不同混凝剂下的超滤膜 TMP 及 HIFI 指数变化

Fig. 5 Changes of TMP and HIFI Indices of UF Membrane under Different Coagulants

2.5 混凝剂对 UF 去除有机物分子量分布的影响

图 6 为不同混凝剂下的 UF 膜进出水有机物分子量分布变化。由图 6 可知,原水中有有机物分子量主要分布在 0.2~50 kDa,DOC 和 UV₂₅₄ 的峰值分别出现在 2 kDa 和 10 kDa 处。为了方便分析,将图中有机物分子量划分为 3 个区域:区域 I(≤4 kDa)、区域 II(4~50 kDa)和区域 III(≥50 kDa)。

将进出水不同区域分子量有机物进行二维积

分,积分去除率结果如表 2 所示。

由表 2 可知,单独 UF 对分子量≥50 kDa 的有机物去除效果好,但对分子量≤4 kDa 的小分子 DOC 去除效果差,去除率不足 10%,且单独使用 UF 对中、小分子量的 UV₂₅₄ 几乎没有去除作用。加入混凝剂后,两种混凝剂对于小分子量 DOC 和中、小分子量 UV₂₅₄ 的去除都产生了明显的提升效果,小分子量 DOC 去除率均上升为 31.6%,小分子量 UV 去除率上升为 15.0%和 17.3%,中分子量 UV 去除

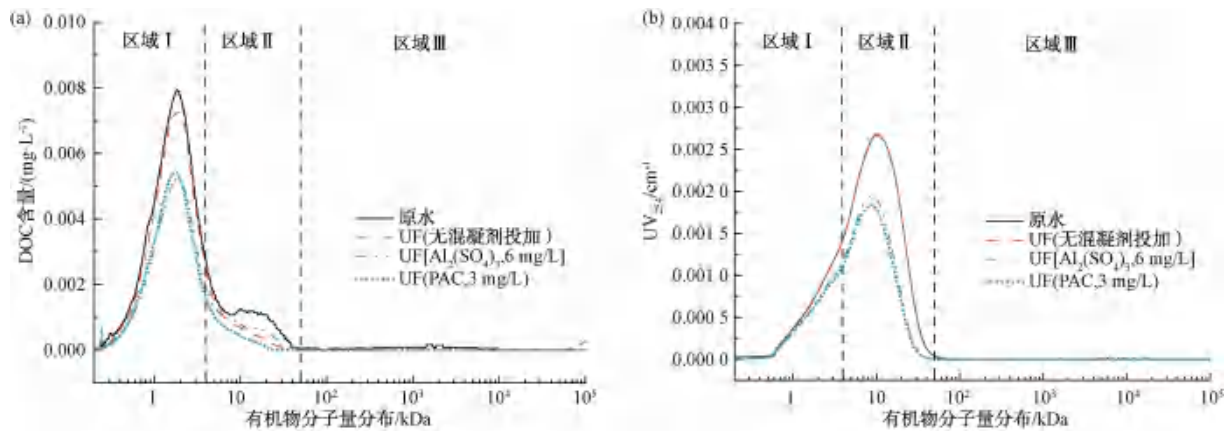


图6 UF进出水有机物分子量变化

Fig. 6 Molecular Weight Change of Organic Matters in Raw Water and Treated Water of UF

表2 有机物分子量区域强度积分去除率
Tab. 2 Removal Rate of MW Region Integral Intensity
of Organic Matters

指标		区域 I	区域 II	区域 III	总区域
DOC	UF	7.9%	41.2%	100.0%	16.5%
	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF	31.6%	33.9%	70.7%	33.0%
	PAC+UF	31.6%	62.6%	100.0%	39.2%
UV_{254}	UF	2.3%	0.0%	95.8%	1.2%
	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF	15.0%	35.4%	100.0%	31.0%
	PAC+UF	17.3%	39.8%	100.0%	34.8%

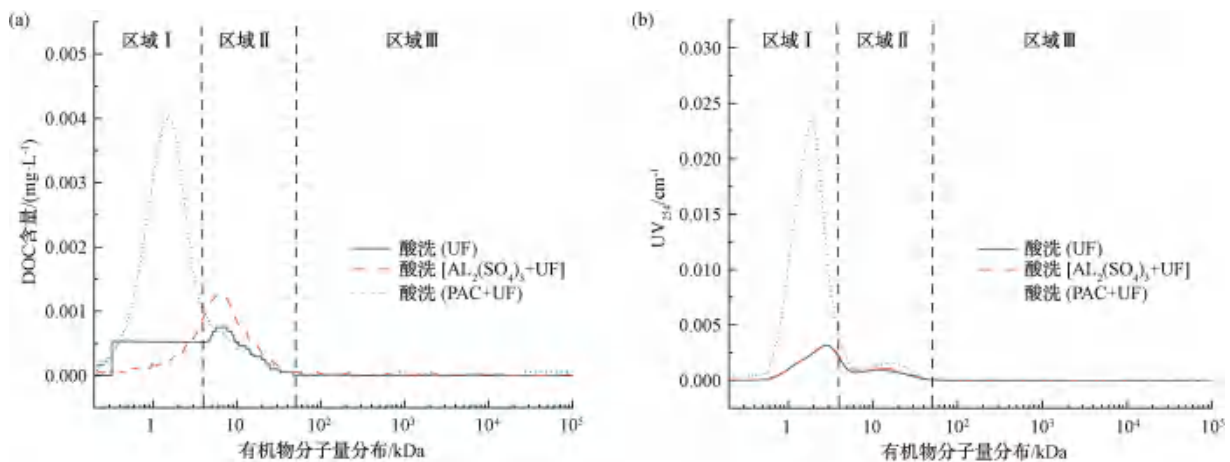
率上升为 35.4% 和 39.8%, 这与之前的试验结论一致。但对于中分子量 DOC, 两种混凝剂则产生了不同的处理效果, PAC+UF 的去除率相比于直接超滤上升了 21.36%, 然而 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF 的去除率反而下降了 7.3%, 再结合前文中 PAC+UF 的 HIFI 最低, 说明造成膜污染的有机物主要为小分子量紫外

响应有机物, 其次是中、小分子量无紫外响应的 DOC。

2.6 超滤膜化学清洗液有机物分子量分布

超滤膜在不同工况下运行 20 周期后进行化学清洗。清洗液中有有机物分子量分布如图 7 所示。

由图 7(a) 和图 7(b) 可知: 单独 UF 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF 的酸洗液 DOC 含量较低, 主要以中等分子量有机物为主; 而 PAC+UF 的酸洗液 DOC 含量较高, 主要由小分子量的有机物组成。酸洗的主要目的是清洗引起膜污染的无机物和难以被物理清洗冲刷掉的滤饼层^[12]。这说明 PAC 形成的滤饼层相对疏松, 能有效截留有机质, 在酸洗过程中即可清除部分有机质。但是, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 形成的滤饼层较致密, 更易截取中分子量的有机物, 所以酸洗不易去除。此外, PAC 酸洗溶液中对紫外光响应的小分子量有机物较多, 这类有机物主要是具有苯环结构



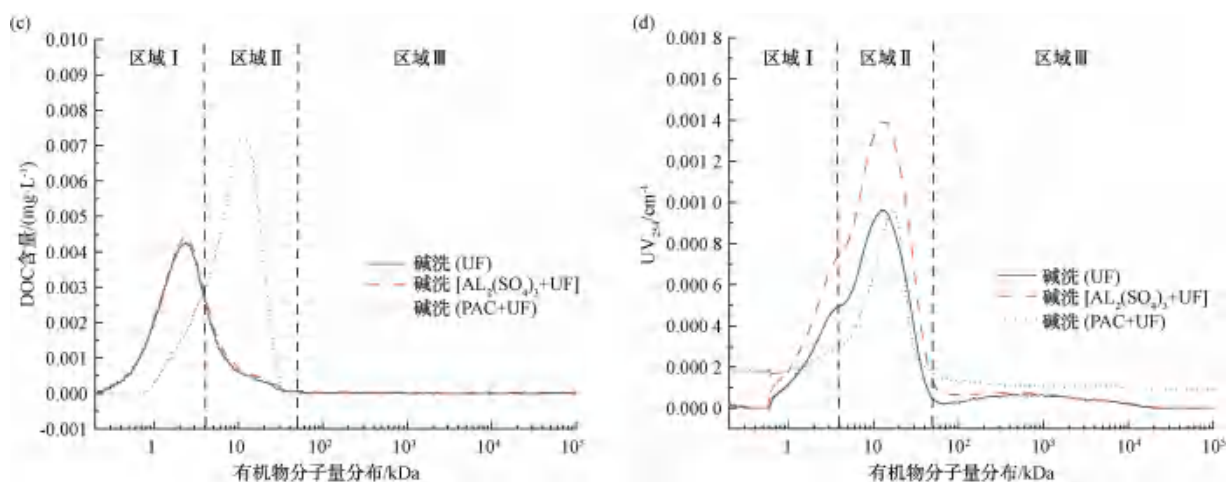


图7 清洗液有机物分子量分布

Fig. 7 MWD of Organic Compounds in Cleaning Solution

的芳香族类蛋白质。而 UF 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF 清洗液中紫外响应的有机物含量较低,说明这些有机物被截留在 PAC 形成的松散滤饼层中,并不是膜污染的主要来源。

在酸洗去除滤饼层后进行碱洗,由图 7(c)和图 7(d)可知,单独 UF 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ +UF 碱洗溶液中的 DOC 主要以小分子量为主,而 PAC+UF 主要以中分子量 DOC 为主。这说明 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 滤饼层可以拦截中分子量有机物,不能拦截小分子量有机物,从而能够使小分子有机物进入膜孔。PAC 形成的滤饼层能够拦截小分子量有机物,反而对中分子量有机物不能产生有效的拦截。这可能是因为 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 主要是通过电性中和作用形成絮体,更易将体积较大的中分子量有机物进行包裹,形成的滤饼层也较为密实,不易被水泵供压所破坏。PAC 主要以吸附架桥作用形成絮体,易形成体积较大的松散絮体,对小分子量有机物同样有较好的截留效果,但由于中分子量有机物质量较大,在水泵供压的情况下易通过水力剪切作用,脱离松散的絮体进入膜孔内,从而对超滤膜造成污染。

3 结论

(1)混凝过程可以有效提高超滤膜对有机物的去除效果,PAC 和 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 对 COD_{Mn} 、 UV_{254} 去除率分别提高了 14.3%、16.4% 和 25.4%、28.5%。

(2)混凝剂的投加可以有效减缓超滤膜污染,不投加混凝、投加 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ 和投加 PAC 时

的超滤膜 HIFI 分别为 0.002 92、0.001 31 和 0.001 02。

(3)通过结合不同混凝剂下不同分子量有机物的去除效果发现,造成超滤膜不可逆污染的有机物主要是中分子量的具有苯环及双键等不饱和键的紫外响应有机物,其次是中、小分子量无紫外响应的有机物。

(4)经过混凝之后,超滤不但可以保证出水浑浊度,有效促进对有机物的去除,而且对超滤膜压力的增长也能产生很好的抑制作用,可以在一定程度上代替常规工艺,作为应急供水的前处理方式,具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] HUANG H, YOUNG T A, SCHWAB K J, et al. Mechanisms of virus removal from secondary wastewater effluent by low pressure membrane filtration[J]. Journal of Membrane Science, 2012. DOI:10.1016/j.memsci.2011.12.050.
- [2] TIAN J Y, WU C W, YU H R, et al. Applying ultraviolet/persulfate (UV/PS) preoxidation for controlling UF membrane fouling by natural organic matter (NOM) in surface water[J]. Water Research, 2018, 132. DOI: 10.1016/j.watres.2018.01.005.
- [3] 李瑞峰. 超滤膜污堵的原因分析及对策[J]. 净水技术, 2020, 39(s2):101-102.
- [4] SHEN X, GAO B, GUO K, et al. Characterization and influence of floc under different coagulation systems on ultrafiltration membrane fouling[J]. Chemosphere, 2020, 238. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.124659.

(下转第 102 页)

气-液-泥三相之间的传质效率更高,提高了微生物获取有机污染物的效率。同时,活性污泥所处溶解氧环境不断在溶解氧充足和缺乏之间交替,抑制了活性污泥的膨胀,改善了活性污泥的状态,提高了处理效率。装置内流化性使进水均质化效果明显,将进水波动最大限度地降低,保证了进水的相对稳定,减少了水质的波动冲击。

(4)不影响污水的可生化性能。活性污泥的强吸附作用,极大地吸附了大量不可降解有机污染物,改善了出水的可生化性能,提高了去除污染物的能力。

(5)该方法对去除水中污染物有较好的效果,但是对去除氨氮等污染物受限制条件较多,在实际生产中受其他因素如成本、环境等影响较难实现。

参考文献

- [1] 金玉. 高含盐重质原油炼化废水处理研究[D]. 北京:北京化工大学, 2016.
- [2] 王琼. 中国海油炼化污水处理与回用技术综述[J]. 工业水处理, 2014, 34(6): 14-16, 28.
- [3] 黄亮, 姜晓艳, 徐全数, 等. 有机物高效降解菌的筛选及其在石油炼化污水中的应用[J]. 化学与生物工程, 2018, 35(10): 47-51.
- [4] 陈宇, 吴青, 代小丽, 等. 重质油炼化污水生化处理出水的污染特征分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2015, 28(2): 7-12.
- [5] 温沁雪, 赵晔. 油田含聚丙烯酰胺废水处理研究进展[J]. 化工环保, 2009, 29(1): 39-42.
- [6] 严琼, 杨俊. 综述高级氧化技术在废水处理中的应用[J]. 净水技术, 2013, 32(3): 5-7.
- [7] 程建萍, 唐志国. 超声协同其它技术处理含酚废水[J]. 净水技术, 2007, 26(2): 38-41.
- [8] 舒展, 孙宇维, 魏颢, 等. 催化臭氧化三相环流反应器的模拟[J]. 石油化工, 2019, 48(5): 491-495.
- [9] 舒展, 孙宇维, 魏颢, 等. 催化臭氧化三相环流反应器的CFD模拟[J]. 石油化工, 2019, 48(5): 67-71.
- [10] 丁富新. 环流反应器的发展和应用[J]. 石油化工, 2004, 33(9): 801-807.
- [11] TSUGE H, OTATSUME S, KOBAYASHI K, et al. Liquid circulation and mass transfer in an external-loop airlift reactor with partitioning plates[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2004, 37(8): 941-946.
- [12] 李志洪, 张彤炬. 深井曝气技术处理炼油废水工程实例[J]. 净水技术, 2018, 37(11): 116-119.
- [13] 龙文芳, 李小明, 曾光明. 生物絮凝剂在废水处理中的研究进展[J]. 净水技术, 2004, 23(2): 28-30.
- [14] 张喜宝. 活性污泥法中控制氨氮去除效果的方法[J]. 净水技术, 2014, 33(s2): 35-40.
- [15] 桂丽娟, 彭永臻, 甘冠雄, 等. 低 DO 协同负荷引发的黏性膨胀和丝状菌膨胀[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 2042-2048.
- [16] 邱东茹, 高娜, 安卫星, 等. 活性污泥微生物胞外多聚物生物合成途径与菌胶团形成的调控机制[J]. 微生物学通报, 2019, 46(8): 2080-2089.
- [5] WANG W Y, YUE Q Y, LI R H, et al. Optimization of coagulation pre-treatment for alleviating ultrafiltration membrane fouling: The role of floc properties on Al species [J]. Chemosphere, 2018, 200. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.114.
- [6] YU W, GRAHAM N, LIU T. Effect of intermittent ultrasound on controlling membrane fouling with coagulation pre-treatment: Significance of the nature of adsorbed organic matter[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 535. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.04.031.
- [7] 郭小龙. 在线混凝—超滤—臭氧活性炭联用工艺处理藻类微污染原水的中试研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019.
- [8] 刘云根, 王海峰. 混凝剂和混凝方法对 UV254 的处理效率研究[J]. 三峡环境与生态, 2009, 2(5): 11-14, 28.
- [9] EUN J K, CHUL W J, SI H C, et al. The influence of rapid mixing condition on coagulation in water treatment[J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 2001, 23(4): 631-640.
- [10] 常海庆. 反冲洗水化学组成对超滤膜不可逆污染的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
- [11] 高艳红. 不同预处理方式防止超滤膜污染特性及其机理研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
- [12] 李惠平. 纳滤膜在高品质饮用水处理中的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2020.

(上接第 57 页)