

在线混凝-平板陶瓷膜过滤处理长江原水特性研究

赵元琛, 梁心怡, 黄一荻, 夏圣骥

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 以在线混凝-平板陶瓷膜过滤工艺为研究对象, 考察了向长江原水中投加不同混凝剂时膜污染的控制效果以及对出水水质的影响。结果表明, 在膜通量为 $120 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 工况下, 在线混凝预处理可有效降低比跨膜压差的增量, 与直接过滤相比, 有机物的去除效果均能够提高 2 倍以上。从工艺的透过性和选择性考量, 投加铝盐的处理效果均优于铁盐, 这与泥饼层的形成过程及结构相关。混凝剂投加量对膜污染的影响程度较大, 对有机物的去除效果影响较小。投加混凝剂可降低原水中富里酸、蛋白质类有机物含量, 能够有效缓解膜污染。相同条件下, 投加 4 mg/L PAC 的处理效果最佳。

关键词: 在线混凝; 平板陶瓷膜; 膜污染; 微滤

中图分类号: TU991.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-2455(2020)01-0011-06

Study on treatment of Yangtze River raw water using online coagulation-plate ceramic membrane filtration process

ZHAO Yuan-Chen, LIANG XIN-Yi, HUANG Yi-di, XIA Sheng-ji

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Taking online coagulation-plate ceramic membrane filtration process as the research object, the effect of different coagulants on membrane fouling control of Yangtze River raw water as well as the effluent water quality were investigated. The results showed that, online coagulation pretreatment could effectively reduce the incremental quantity of the transmembrane pressure under membrane flux of $120 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Compared with direct filtration, the removal efficiency of organic matters could be increased by more than two times. Considering the permeability and selectivity of the combined process, the treatment effect by aluminium salt was better than that by iron salt, which was related to the formation process and structure of the sludge cake layer. Coagulant dosage had a greater impact on membrane fouling and a smaller impact on organic matters removal. Adding coagulant could reduce the content of fulvic acid and protein organic matters in raw water, which effectively alleviated the membrane fouling. Under the same condition, adding 4 mg/L PAC could get the best water treatment effect.

Keywords: online coagulation; plate ceramic membrane; membrane fouling; microfiltration

膜处理具有提高出水水质, 缩短净水工艺流程以及易于实现自动化控制等特点^[1-3]。在线混凝预处理与膜处理联用, 投加混凝剂后无需沉淀, 絮凝形成较小的矾花即可被膜拦截去除, 进一步缩短了处理时间、节省了药剂并减少了占地面积^[4-5]。同时, 在线混凝过程能增大膜表面泥饼层的孔隙率, 使其更易于反冲洗^[6], 原水中病毒等微生物、部分有机物等由于吸附在泥饼层表面得以被有效处理^[5,7-8]。

陶瓷膜具有热稳定性、机械稳定性、化学稳定

性强的特点^[9-10], 在长期运行、水力或化学反冲洗、以及与其他工艺联用方面比有机膜更具优势^[11-13]。本研究以冬季长江原水作为处理对象, 通过投加 3 种不同的混凝剂, 探究在线混凝与平板陶瓷膜过滤联用方式, 在高通量运行工况下控制膜污染的效果, 以及对出水水质的影响。

1 材料与方法

1.1 试验仪器

日本岛津 TOC-L CPH 型总有机碳分析仪, 哈

希 DR6000 紫外可见分光光度计, Cary Eclipse 荧光分光光度计, 美国 Waters 超高效液相色谱仪-Ultrahydrogel™ 250 column 凝胶色谱柱等。

1.2 试验装置

试验装置如图 1 所示。试验装置由混合加药、膜过滤、数据记录系统 3 个部分组成。原水箱及高位水箱有效容积均远大于试验过程所需水量, 并设有进水管路、放空管路与溢流管路, 以保证整套系统的运行连续性和水质稳定性。

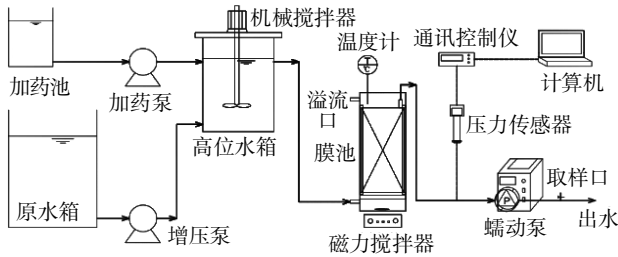


图 1 试验装置
Fig. 1 Experimental device

1.3 原水水质

以冬季长江原水作为处理对象, 原水取自长江下游某江段南岸, 试验期间水温为 8.9 ~ 13.2 ℃, 平均水温为 10.9 ℃, 其他主要水质指标见表 1。

表 1 原水主要水质指标
Tab. 1 Main characteristics of raw water

项目	pH 值	浊度/ NTU	$\rho(\text{BOD}_5)/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{UV}_{254}/$ cm^{-1}
范围	8.35 ~ 8.56	25.04 ~ 43.50	2.46 ~ 4.48	0.036 ~ 0.045
均值	8.47	32.82	3.20	0.041

1.4 试验方法

长江原水经增压泵提升至高位水箱, 在机械搅拌器搅拌下与经加药泵投加的混凝剂充分混合, 机械搅拌桨转速为 350 r/min, 高位水箱水力停留时间约为 5 min。

混凝剂采用饮用水级聚合氯化铝(PAC)、明矾($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2\cdot 12\text{H}_2\text{O}$)、聚合硫酸铁(PFS), 配置 10 g/L 的溶液(PAC、 $\text{KAlSO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 以 Al^{3+} 浓度计, PFS 以 Fe^{3+} 浓度计)。投药泵配置 ASK-600 型计量电磁泵, 按一定比例投加药品至高位水箱中。混凝剂投加量根据预先烧杯试验结果计算。

平板陶瓷膜为 Al_2O_3 材料制成, 外形尺寸为 250 mm × 100 mm, 平均膜孔径为 100 nm, 有效过滤面积为 400 cm^2 , 固定在膜池液面以下。由恒流蠕动泵提供动力, 运行时膜组件采用浸没式抽滤方式过

滤, 恒定过滤通量为 120 $\text{L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, 每 60 min 进行 1 次水力反冲洗, 反冲洗强度取 50 kPa, 持续时间 90 s。膜池设置溢流口维持膜池内液位恒定, 溢流流量为 15 L/h。

压力传感器检测管道内压力变化情况, 信号经通讯控制仪传送至计算机处理, 每 2 s 记录 1 次, 实际膜污染与反冲洗恢复情况均可通过跨膜压差的变化反映。

仪器分析出水样品前过 0.45 μm 滤膜预处理。

1.5 分析及计算方法

采用恒流抽滤式膜过滤方式, 通过测定跨膜压差(TMP)表征膜通量下降情况和反冲洗效果:

$$\text{TMP} = P_1 - P_2 \tag{1}$$

式中: P_1 和 P_2 分别为跨膜前、后的渗透压力, kPa。

根据周期性反冲洗前后跨膜压差的变化情况, 将总膜污染(TF)分为可逆膜污染(RF)与不可逆膜污染(IF)两部分^[14]:

$$\text{TF} = \text{IF} + \text{RF} \tag{2}$$

试验中第 n 个周期的 TF 值以该周期结束与初始的比跨膜压差(TMP/TMP_0)差值表示, IF 值以第 $n + 1$ 个周期初始与第 1 周期初始比跨膜压差差值表示, RF 值以本周期结束与第 $n + 1$ 个周期初始比跨膜压差差值表示。

取样分析工艺进出水水质, 通过比较原水与渗透液的 DOC、 UV_{254} 、三维荧光(EEMs)、相对分子质量分布等指标来考察工艺处理效果。

2 结果与讨论

2.1 不同混凝剂对比跨膜压差的影响

在高通量 120 $\text{L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 运行条件下, 不投加混凝剂与投加不同混凝剂对比跨膜压差(TMP/TMP_0)的影响见图 2。

原水直接过滤的比跨膜压差增长较快, 1 个运行周期内比跨膜压差(TMP/TMP_0)上升至 1.28, 5 个周期后上升至 1.74。说明长江原水直接采用平板陶瓷膜过滤时, 原水中的污染物容易在陶瓷膜内外表面沉积, 造成较严重的膜污染, 水力反冲洗效果有限。投加混凝剂在线混凝处理后, 过滤周期开始与结束时的比跨膜压差增长情况均有所减缓。

直接过滤情况下, 天然水体中的亲水性有机物, 尤其是蛋白质和多糖类, 容易沉积在陶瓷膜内外表面上, 形成污染层。随着过滤过程的进行, 膜

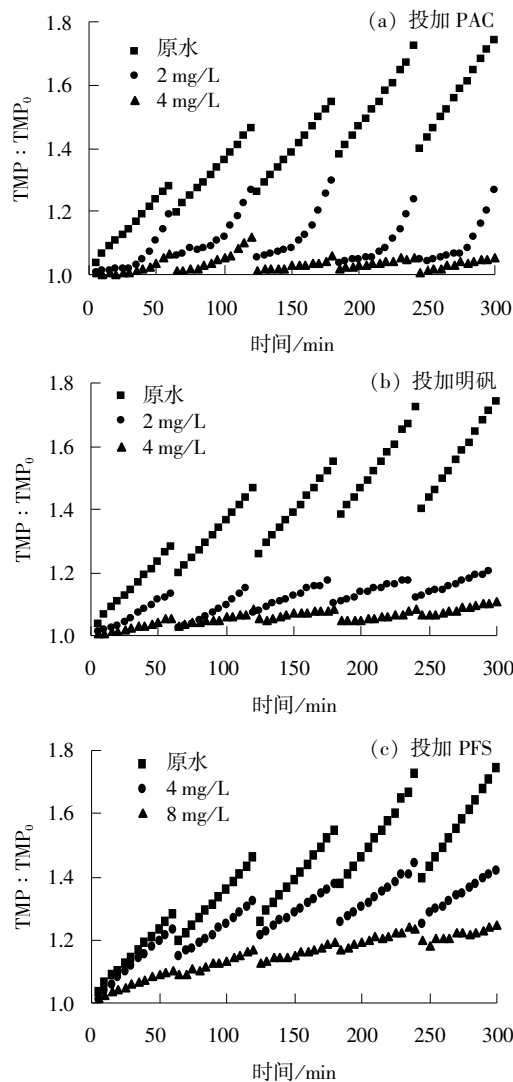


图2 不同混凝剂对比跨膜压差的影响

Fig. 2 Effect of different coagulants on transmembrane pressure

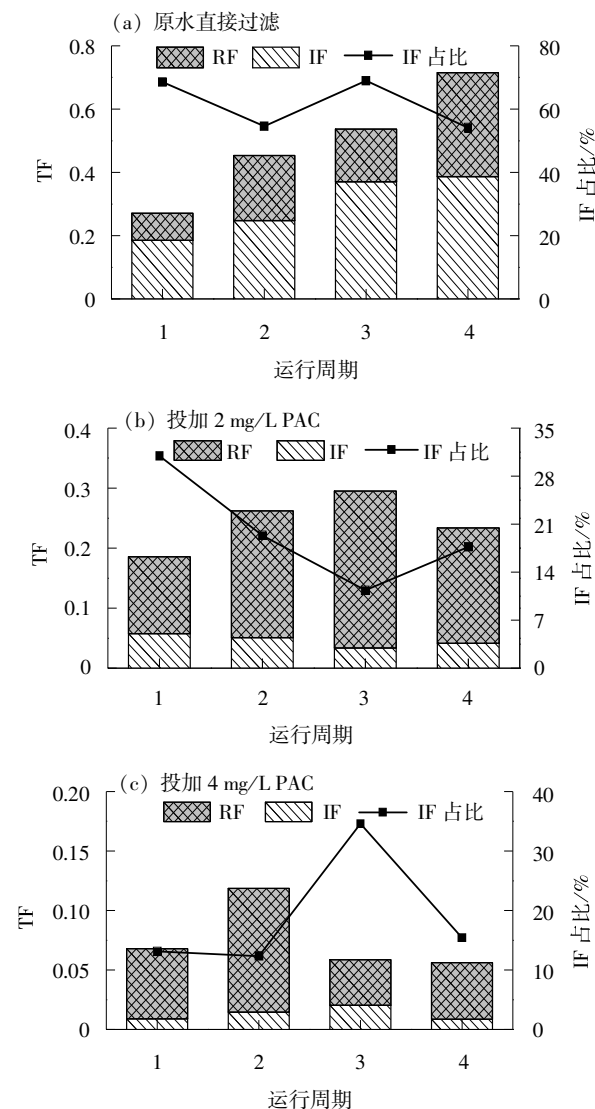
截留污染物累积使得污染层阻力逐渐增大, 恒流过滤所需驱动力相应提升, 跨膜压差随之增大^[4,15]。在这个过程中, 部分尺寸小于膜孔径的小分子物质进入膜内表面, 加深膜的污染, 一般的水力反冲洗很难除去这部分污染物, 使得在连续过滤中出现污染累积的情况, 即产生不可逆污染。采用在线混凝预处理时, 投加混凝剂产生矾花会在平板膜表面形成松散的泥饼层, 可以更有效地拦截污染物并阻止小分子物质进入膜内部, 减轻膜污染。

通过比较3种混凝剂在不同投加量下对比跨膜压差的影响, 发现在有效范围内, 随着混凝剂投加量的增加, 膜污染呈现一致的减轻趋势, 这可能是因为其在平板膜表面形成的泥饼层提高了污染物的拦截效能。当混凝剂投加量相近时, 铝盐较铁盐更

有利于膜污染的减轻, 这是因为铁盐形成的矾花更密实, 在平板膜表面快速形成的泥饼层可能过于致密, 产生更大阻力, 表现抗污性能降低。与聚合混凝剂相比, 明矾形成的矾花较小, 泥饼层形成较慢, 每个周期中比跨膜压差的整体增长均较低。这一现象也与文献[16]中“粒径与分形维数更小的絮体更加有利于膜的渗透性, 产生更小的膜污染”的结论相符。同时还发现, 投加 PAC 的在线混凝试验中, PAC 的污染曲线呈现前段斜率小、后段斜率大的特征, 这与泥饼层的形成过程相关, 在工程上体现一定的指导意义。

2.2 膜污染与污染恢复

试验通过分析周期性可逆污染与不可逆污染情况, 考察原水直接过滤与在线混凝-平板陶瓷膜联用工艺的膜污染与污染恢复特性, 结果如图3所示。



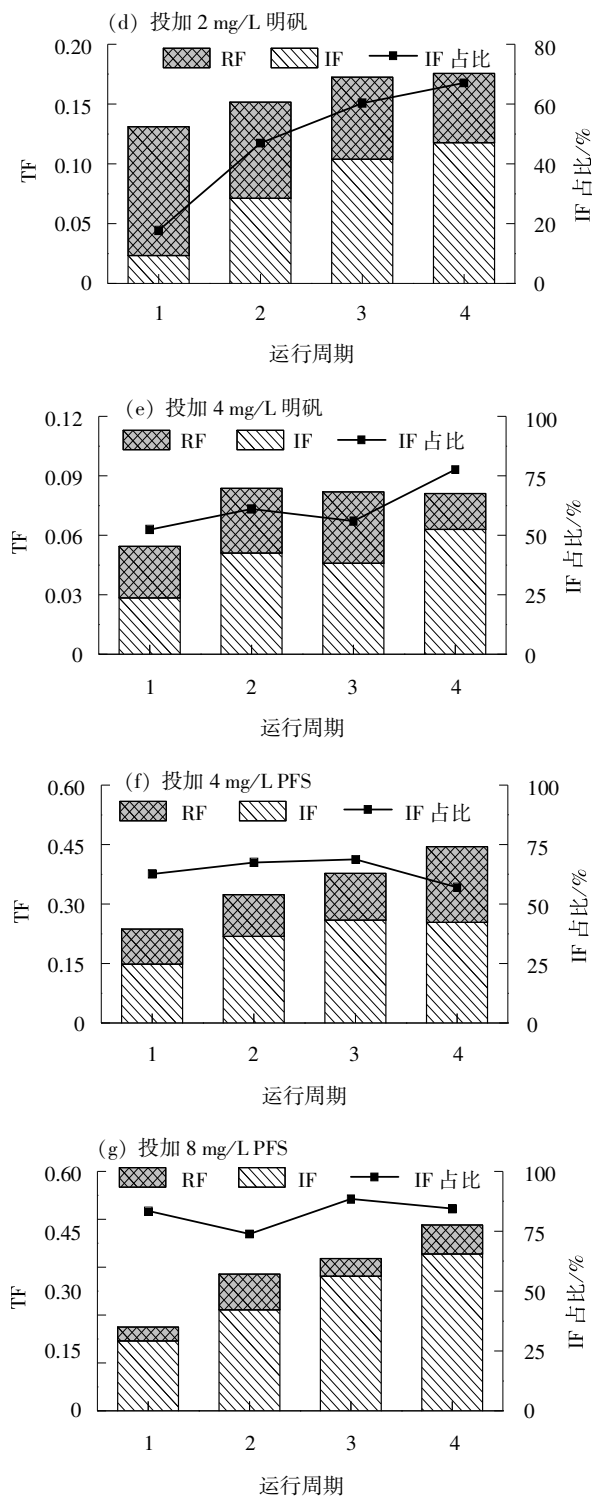


图3 膜污染特性

Fig. 3 Characteristics of membrane fouling

原水直接膜过滤时,膜污染情况随过滤周期呈现上升趋势,平均不可逆污染在总污染中约占60%,水力反冲洗不能有效缓解膜污染。投加不同量 PAC 在线混凝后过滤,膜污染分别下降约 1/2、

3/4,膜污染减轻,不可逆污染占比下降,表明此情况下水力反冲洗效能提高。投加不同量明矾在线混凝后过滤,膜污染分别下降约 3/4、4/5,膜污染大大降低,然而其不可逆污染占比呈现增加趋势,表明随着运行周期的增加,不可逆污染情况加剧,该结果不利于实际生产长期运行。投加不同量 PFS 在线混凝后过滤,膜污染分别下降约 1/2、3/5,膜污染有所减轻,但与铝盐相比,铁盐的不可逆污染占比更大,水力反冲洗效果更差。

以上试验结果表明,在线混凝能有效降低膜污染程度,尤其是其中不可逆膜污染。在一定范围内,投加较高浓度混凝剂,更有利于减轻膜污染、提高反冲洗效果。与铁盐相比,铝盐对 TF 和 IF 的降低效果更明显。尽管明矾能使 TF 下降更多,但在长期运行的情况下, PAC 更有利于膜污染的去除与恢复。

2.3 有机物去除效果

不同混凝剂投加条件下在线混凝-平板陶瓷膜对 DOC 与 UV_{254} 去除情况如图 4 所示。

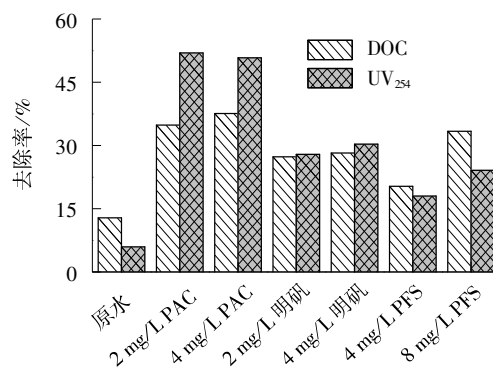


图4 在线混凝-平板陶瓷膜对有机物的去除效果

Fig. 4 Removal of organic compounds by online coagulation-plate ceramic membrane filtration

原水直接过滤对有机物的去除效果有限,平均 DOC 与 UV_{254} 去除率仅为 12.85% 和 5.93%。投加混凝剂后,膜对有机物的去除效果均提高 2 倍以上,其中铝盐对 DOC 和 UV_{254} 的去除效果整体上高于铁盐,聚合铝混凝剂比小分子无机铝混凝剂对有机物的去除效果更好。

在线混凝试验中,絮体粒径与形成的絮体分形维数大小对泥饼层的形成有很大影响。更大的粒径更有助于形成致密的泥饼层,并进一步拦截粒径较小的颗粒,吸附有机物。絮体分形维数的不同同样影响到其密实程度,一般在网捕卷扫作用下形成的

絮体更易在平板膜表面较快形成疏松多空的滤饼结构^[17], 有助于利用泥饼层的吸附能力去除有机物, 因此, 投加 PAC 对 DOC 和 UV_{254} 的去除率均较大。

同时, 铝盐对 UV_{254} 的去除率较 DOC 的略高, 铁盐则相反, 这可能在膜表面形成的泥饼层的选择性能有关。提高混凝剂投加量对于去除有机物的影响不大。

2.4 三维荧光光谱

原水直接过滤和在线混凝-膜过滤出水的三维荧光响应情况如图 5 所示。

三维荧光光谱图的相应区域可划分为 5 个部分, A(富里酸类物质), C(腐殖酸类物质), T_1 (可溶性微生物副产物类物质), B 和 T_2 (芳香族蛋白质)^[18]。在长江原水中, 响应较强的污染物依次是富里酸、蛋白质和少部分腐殖酸, 微生物副产物含量较低。

试验结果表明, 经膜过滤后出水各区域荧光强度均有所下降, 且在线混凝后过滤出水相应下降程

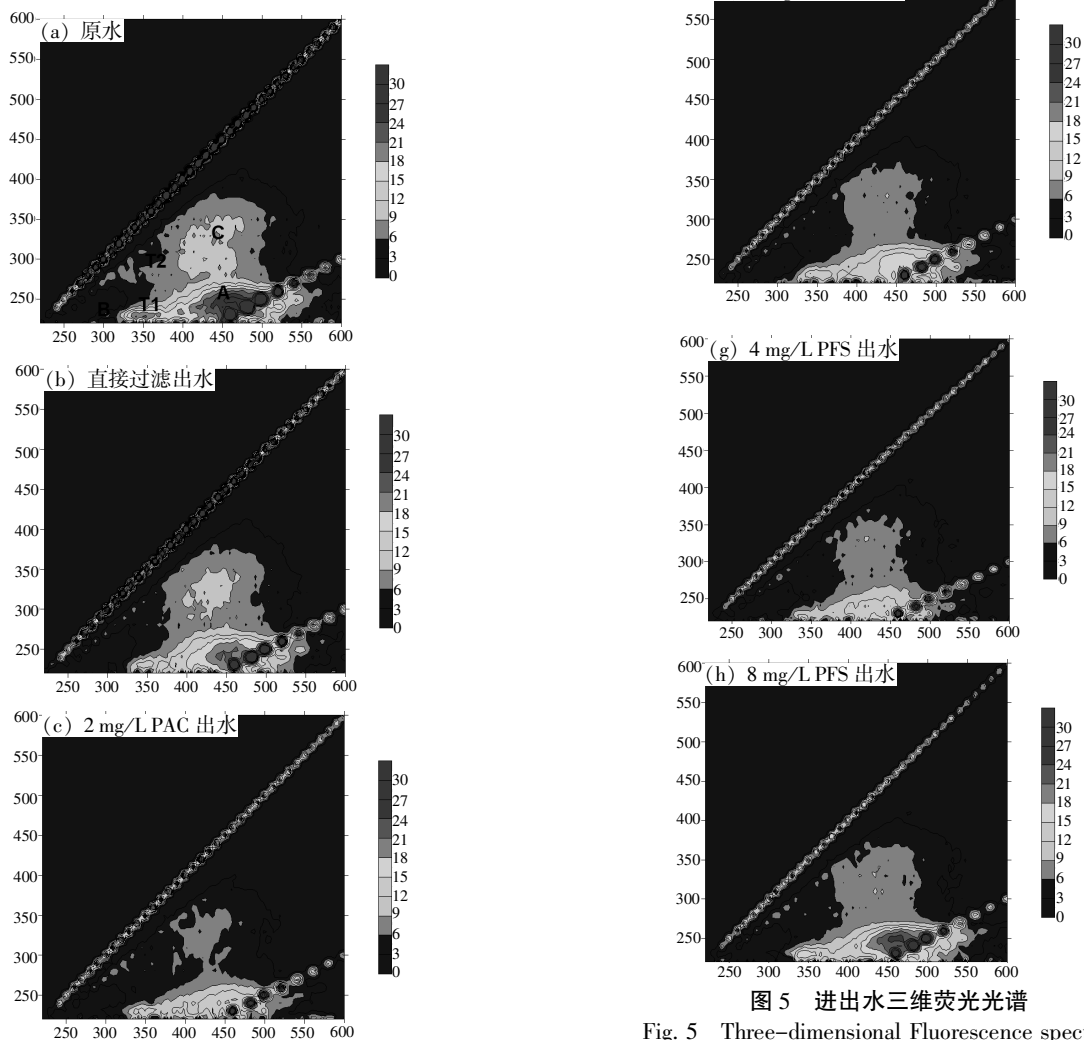


图 5 进出水三维荧光光谱
Fig. 5 Three-dimensional Fluorescence spectra

度优于直接过滤。投加不同混凝剂出水效果依次为 PAC、4 mg/L PFS、明矾、8 mg/L PFS, 这与有机物去除率结果相符。微滤对可溶性生物副产物蛋白质类的去除效果明显, 但不易去除腐殖酸与富里酸类, 在线混凝过程能够加强膜对后两者的去除能力。研究认为 C 区的亲水性有机物是造成膜的不可逆污染的主要原因, 在线混凝能够促进该区域污染物的减少, 因而降低膜污染, 提高水力反冲洗效果^[19]。

2.5 有机物相对分子质量分布

对原水以及在线混凝-膜过滤出水中的有机物进行相对分子质量分布测定, 结果如图 6 所示。

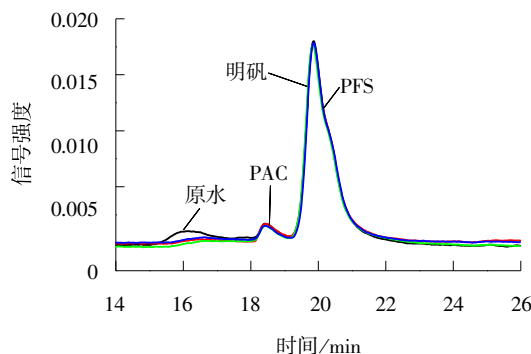


图 6 相对分子质量分布

Fig. 6 Relative molecular mass distribution

从图 6 可看出, 均产生 3 个响应峰, 分布于 15 ~ 25 min 之间。根据凝胶色谱柱出峰规律, 大分子的物质出峰时间靠前, 小分子出峰时间滞后, 由此可以看出, 长江原水中大分子物质的含量偏低, 主要污染物为小分子类物质。在线混凝-平板陶瓷膜过滤方法不会改变处理水体中的有机物分子大小和结构, 它对相对分子质量较大的有机物组分去除能力较高, 而对小分子有机物组分去除能力有限。因此, 如何提高整体有机物的去除效能, 还有待进一步研究。

3 结论

采用平板陶瓷膜微滤处理长江原水, 取得了一定的净化效果, 但由于长江原水污染物中富里酸类和蛋白质类占比较大, 容易造成膜的不可逆污染, 从而导致该工艺长期运行不可实现性。过滤前增加在线混凝工艺, 可增大污染物尺寸并吸附小分子类物质, 有助于截留污染物以及减缓膜污染。

一定范围内, 投加混凝剂可降低膜污染, 投加量越高, 膜污染程度越轻。当投加量相近时, 铝盐的膜污染较铁盐更低, 抗污性能更强。PAC 的污

染曲线呈现前段斜率小, 后段斜率大的特征, 与泥饼层的形成过程相关, 在工程上具有一定的指导意义。

在线混凝-平板陶瓷膜组合工艺可以大大提高有机污染物的去除效果, 铝盐对 DOC 和 UV₂₅₄ 的去除效果整体上高于铁盐, 聚合混凝剂比小分子无机混凝剂效果更好, 投加浓度的影响不明显。

综合组合工艺的出水情况, 投加 4 mg/L PAC (以 Al³⁺ 计) 的在线混凝-平板陶瓷膜过滤联用工艺在处理长江原水的过程中效果最佳。

参考文献:

- [1] GEISE G M, LEE H S, MILLER D J, *et al.* Water purification by membranes: The role of polymer science[J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2010, 48(15): 1685-1718.
- [2] SHENG J X, XING L, JI Y, *et al.* Application of membrane techniques to produce drinking water in China[J]. *Desalination*, 2008, 222(1-3): 497-501.
- [3] 张硕, 王如华, 蔡报祥. 超滤膜在城镇大型水厂升级改造中的应用[J]. *工业用水与废水*, 2015, 46(3): 10-14.
- [4] 华建良, 倪先哲, 桂波, 等. 在线混凝/超滤膜高通量处理太湖水的效果与机理[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(3): 37-41.
- [5] 范小江. 臭氧/陶瓷膜集成工艺处理微污染原水研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [6] 李凯, 梁恒, 叶挺进, 等. 在线混凝对浸没式超滤膜出水水质和膜污染的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(2): 287-291.
- [7] MATSUSHITA T, MATSUI Y, SHIRASAKI N, *et al.* Effect of membrane pore size, coagulation time, and coagulant dose on virus removal by a coagulation-ceramic microfiltration hybrid system[J]. *Desalination*, 2005, 178(1-3): 21-26.
- [8] ZHANG X, FAN L, RODDICK F A. Feedwater coagulation to mitigate the fouling of a ceramic MF membrane caused by soluble algal organic matter[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 133: 221-226.
- [9] HOF S B, OGIER J, VRIES D, *et al.* Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 79(3): 365-374.
- [10] 黄有泉, 武云龙, 付馨, 等. 陶瓷膜的三步法清洗及效果分析[J]. *工业用水与废水*, 2011, 42(6): 43-47.
- [11] 郭建宁. 陶瓷膜及其集成工艺处理微污染饮用水的研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [12] 李博文, 李响, 周丽, 等. 臭氧陶瓷膜工艺处理微污染原水效果与膜污染研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(1): 114-117.
- [13] 姜晓锋, 张晓临, 朱佳, 等. 平板陶瓷膜和中空纤维膜处理重金属废水效能对比[J]. *水处理技术*, 2017, 43(3): 82-86.
- [14] FABRIS ROLANDO, LEE EUN KYUNG, CHOW CHRISTOPHER W K, *et al.* Pretreatments to reduce fouling of low pressure

(下转第 21 页)

(2) 药剂种类及其投加量对 COD 和 SS 去除效果影响显著, pH 值对去除效果影响相对较小。冷却-混凝预处理气田废水三效蒸发母液的最佳工艺条件为: 温度为 14 ℃, pH 值为 7.3, 加入 2 g/L PAC 快速搅拌 2 min, 再加入 1.5 mg/L PAM 慢速搅拌 20 min。此条件下 COD 去除率为 51.24%, SS 去除率为 99.32%。

(3) 冷却-混凝法对蒸发母液的 COD 和 SS 处理效果明显, 为下一步的深度处理奠定了基础。该法操作相对简单, 药剂需求量少, 是能够在生产现场应用的气田废水蒸发母液预处理方法。

参考文献:

- [1] 叶春松, 郭京晓, 周为, 等. 页岩气压裂返排液处理技术的研究进展[J]. 化工环保, 2015, 35(1): 21-26.
- [2] 杨家村. 应用高效三效蒸发技术处理高浓度废水[J]. 环境卫生工程, 2007, 15(3): 35-36.
- [3] 李华昌, 朱国, 任黎明. 电极周期转换电絮凝预处理油气田出水蒸发浓缩母液[J]. 环境科技, 2018, 31(5): 24-28.
- [4] 胡志勇, 刘俊. 川西地区气田废水处理技术及应用[J]. 油气田环境保护, 2009, 19(2): 38-41.
- [5] 姬涛, 潘永宝, 吴魁, 等. 油田钻井作业废水特性及处理措施探讨[J]. 绿色科技, 2014, (8): 181-182.
- [6] 张魏. 组合工艺处理采气废水的研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [7] ONCEL M S, MUHCU A, DEMIRBAS E, *et al.* A comparative study of chemical precipitation and electrocoagulation for treatment of coal acid drainage wastewater [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, 1(4): 989-995.
- [8] 高慧, 王敏. Fenton-混凝法处理生活垃圾沼液试验研究[J]. 工业用水与废水, 2010, 41(5): 43-46.
- [9] 刘强, 姜嘉莉, 刘冬雪, 等. 高铁锰反冲洗废水处理中混凝剂的优化选择[J]. 市政技术, 2016, 34(2): 149-150.
- [10] 商平, 刘涛利, 孔祥军. PAC 与 PFS 复合混凝/沉淀法预处理垃圾渗滤液[J]. 中国给水排水, 2011, 27(1): 65-67.
- [11] LESSOUED R, SOUAIHI F, PELAEZ L C. Modelization and statistical optimization of coagulation - flocculation treatment of an old leachate [J]. Water Environment Research, 2017, 89(12): 2136-2141.
- [12] 纪祥廷. 温度及搅拌等因素对混凝法处理污水效果的影响[J]. 低碳世界, 2017, (29): 14-14.
- [13] 崔福义, 任刚, 安全. 混凝法处理洗浴废水的试验研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2004, 20(1): 69-73.
- [14] 刘阳. 钢铁厂焦化废水混凝预处理实验研究[J]. 四川冶金, 2017, 39(5): 74-77.
- [15] 潘碌亭, 束玉保. 聚合氯化铝铁絮凝剂的制备及其在焦化废水深度处理中的应用[J]. 环境污染与防治, 2009, (9): 27-29.
- [16] 罗坚, 杨殿海. 聚合氯化铝混凝机理及混凝条件对余铝的影响[J]. 海南医学院学报, 2005, (4): 343-346.
- [17] 张玉清, 刘明华. 混凝沉淀-Fenton 氧化法在垃圾渗滤液生化处理出水中的应用[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(1): 28-32.
- [18] YU T, LI G, LIN W, *et al.* Coagulation increased the growth potential of various species bacteria of the effluent of a MBR for the treatment of domestic wastewater [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(6): 5126-5133.
- [19] LIU Z Q, YOU L, XIONG X, *et al.* Potential of the integration of coagulation and ozonation as a pretreatment of reverse osmosis concentrate from coal gasification wastewater reclamation [J]. Chemosphere, 2019, 222: 696-704.

作者简介: 曾尉(1995-), 男, 四川乐山人, 硕士生, 研究方向为水污染控制工程, (电子信箱)862485977@qq.com。

收稿日期: 2019-08-06 (修回稿)

(上接第 16 页)

- microfiltration (MF) membranes [J]. J MEMBRANE SCI, 2007, 289(1-2): 231-240.
- [15] ZHANG X, FAN L, RODDICK F A. Effect of feedwater pre-treatment using UV/H₂O₂ for mitigating the fouling of a ceramic MF membrane caused by soluble algal organic matter [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 493: 683-689.
- [16] ZHAO B, WANG D, LI T, *et al.* Influence of floc structure on coagulation-microfiltration performance: Effect of Al speciation characteristics of PACls [J]. Separation and Purification Technology, 2010, 72(1): 22-27.
- [17] 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 等. 微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4249-4256.
- [18] HUDON N, BAKER A, REYNOLDS D. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters -a review [J]. River Research and Applications, 2007, 23(6): 631-649.
- [19] WANG H, QU F, DING A, *et al.* Combined effects of PAC adsorption and in situ chlorination on membrane fouling in a pilot-scale coagulation and ultrafiltration process [J]. Chemical Engineering Journal, 2015: S1385894715011754.

作者简介: 赵元琛(1994-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为给水处理理论与技术, (电子信箱)zzzyccc@126.com; 通讯作者: 夏圣骥(1978-), 男, 江苏东台人, 教授, 博士生导师, 研究方向为膜法水处理, (电子信箱)xiashengji@tongji.edu.cn。

收稿日期: 2019-07-05 (修回稿)