

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 ..... 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 ..... 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM<sub>2.5</sub> 污染改善贡献评估 ..... 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度特征和来源分析 ..... 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 ..... 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 ..... 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 ..... 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 ..... 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 ..... 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 ..... 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 ..... 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 ..... 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 ..... 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 ..... 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 ..... 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 ..... 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 ..... 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 ..... 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筶笠湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 ..... 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 ..... 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 ..... 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 ..... 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 ..... 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 ..... 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)<sub>2</sub> 中的氰污染物 ..... 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 ..... 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 ..... 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A<sup>2</sup>/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 ..... 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 ..... 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 ..... 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 ..... 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 ..... 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 ..... 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 ..... 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 ..... 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 ..... 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 ..... 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 ..... 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 ..... 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 ..... 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 ..... 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 ..... 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤微生物可给性的影响 ..... 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 ..... 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 ..... 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 ..... 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 ..... 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的响应 ..... 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 ..... 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 ..... 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

## 预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验

杨海燕<sup>1,2</sup>, 邢加建<sup>2</sup>, 王灿<sup>3</sup>, 孙国胜<sup>1</sup>, 赵焱<sup>1</sup>, 梁恒<sup>2</sup>, 徐叶琴<sup>1</sup>, 李圭白<sup>2\*</sup>

(1. 广东粤海水务股份有限公司, 深圳 518021; 2. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 3. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 青岛 266033)

**摘要:** 以东江水为处理对象, 进行直接超滤、微絮凝-超滤和絮凝/活性炭-超滤中试研究, 探讨预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染的影响. 利用扫描电镜形貌观察、三维荧光光谱(EEM)和高效排阻色谱法等手段对不可逆膜污染物进行表征分析, 比较预处理对不可逆膜污染物含量和组分的影响, 阐述预处理对不可逆膜污染影响的机制. 结果表明, 在  $10 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  低通量运行下, 微絮凝预处理使不可逆膜污染增长速率从直接超滤的  $0.32 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$  下降到  $0.16 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$ , 絮凝/活性炭预处理后超滤工艺几乎零污染运行, 且当絮凝/活性炭-超滤运行通量增加至  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  时, 仍没有观察到明显的不可逆膜污染增长. 东江水中不可逆膜污染的主要组分是蛋白质类和富里酸等腐殖质类物质. 微絮凝通过改变膜表面滤饼层的结构(厚度和密实性), 提高物理清洗效率, 减轻不可逆膜污染的积累; 絮凝/活性炭预处理提高对不可逆膜污染物的去除效果, 减轻膜污染负荷, 控制不可逆膜污染. 因此, 采用絮凝和絮凝/活性炭预处理工艺, 均可有效降低短流程超滤工艺不可逆膜污染积累.

**关键词:** 超滤; 低通量; 短流程; 预处理; 膜污染物

中图分类号: X131.2; TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-1046-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608028

## Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study

YANG Hai-yan<sup>1,2</sup>, XING Jia-jian<sup>2</sup>, WANG Can<sup>3</sup>, SUN Guo-sheng<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>, LIANG Heng<sup>2</sup>, XU Ye-qin<sup>1</sup>, LI Gui-bai<sup>2\*</sup>

(1. Guangdong GDH Water Co., Ltd., Shenzhen 518021, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** Pilot-scale performances for ultrafiltration of Dongjiang river water without and with micro-coagulation and coagulation-adsorption-sedimentation pretreatments were conducted to investigate the effects of pretreatments on hydraulic irreversible fouling of ultrafiltration short processes. Scanning electron microscope (SEM) imaging, high performance size exclusion chromatography (HPSEC) and fluorescence excitation-emission matrix (EEM) were employed to identify foulants responsible for irreversible fouling during ultrafiltration with and without pretreatments. The results showed that the hydraulic irreversible fouling rate was  $0.16 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$  with micro-coagulation pretreatment at  $10 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , while the rate without pretreatment was  $0.32 \text{ kPa} \cdot \text{d}^{-1}$  at the same flux. Meanwhile, the fouling rate with coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment was almost zero at the same flux. Furthermore, when the flux increased to  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , the irreversible fouling was not observable with coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment (backwashing every 24 hours). Properties of foulants from external membrane and internal membrane after backwashing showed that the protein-like and fulvic-like substances were responsible for irreversible fouling in Dongjiang river water. Furthermore, structural alteration of cake layer resulted in less cake resistance and higher backwash efficiency after micro-coagulation pretreatment, leading to less irreversible fouling. Coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment decreased irreversible fouling with higher removal efficiency of protein-like and fulvic substances, which were the foulants responsible for irreversible fouling during ultrafiltration. Both micro-coagulation and coagulation-adsorption-sedimentation pretreatments decreased irreversible fouling during ultrafiltration short process.

**Key words:** ultrafiltration; low flux; short process; pretreatment; membrane foulants

超滤技术具备卓越的颗粒、胶体和微生物的截留性能, 能有效去除两虫和提高饮用水的微生物安全性, 被称为第三代城市净水技术的核心工艺<sup>[1]</sup>. 以超滤为核心的净水工艺, 原水直接或者经过适当预处理直接进入超滤膜池, 极大地简化了工艺流程<sup>[2, 3]</sup>, 相比常规工艺可称为短流程工艺. 短流程超滤工艺降低了工程造价和运营管理的难度, 占地

面积比常规工艺明显减小, 对于用地紧张的新建水厂建设和老旧净水厂改造项目都有明显的技术优势<sup>[4]</sup>.

收稿日期: 2016-08-04; 修订日期: 2016-10-08

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2015M581453)

作者简介: 杨海燕(1986~), 女, 博士, 主要研究方向为膜法水处理工艺, E-mail: karenyanghe@sina.com

\* 通信作者, E-mail: liguibai@vip.163.com

超滤处理过程发生的膜污染问题,特别是无法通过物理清洗去除的为不可逆膜污染,极大影响超滤工艺的制水成本和日常运行管理的难度<sup>[5]</sup>。膜污染控制,特别是不可逆膜污染控制,一直是超滤技术研究和应用的难点。系统运行条件优化和预处理对进水水质进行调控是主要措施和研究方向<sup>[6~8]</sup>。其中,絮凝和活性炭吸附作为应用最广的预处理工艺,显著提高超滤出水水质<sup>[9, 10]</sup>。虽然絮凝和活性炭吸附对作为主要膜污染物的天然有机物都有较好的去除效果,但无论是絮凝还是活性炭吸附,对膜污染控制作用仍有争议。絮凝剂种类投加量和混凝预处理形式,都会影响絮凝预处理对膜污染的影响,投加铁盐缓解和加剧超滤不可逆膜污染的研究这都有所报道<sup>[11, 12]</sup>,而目前关于活性炭对超滤膜污染影响的关键因素仍需要进行更多地探讨<sup>[10, 13, 14]</sup>。

本文以东江水为试验原水,进行直接超滤、微絮凝-超滤以及絮凝/活性炭-超滤短流程中试研究。在低通量运行条件下,考察预处理对短流程超滤工艺控制不可逆膜污染的影响,阐述短流程超滤工艺不可逆膜污染成因及形成机制,据此探讨适合于短流程超滤工艺有效控制不可逆膜污染的方式,期为短流程超滤工艺推广应用提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验原水

试验原水取自广东东莞某净水厂水源,该水源位于珠江水系东江下游段(东莞市上游河段),引自东深供水莲湖至旗岭段供水管道。试验期间原水 pH 6.9~7.5,水温 23.9~28.3℃,浊度 4.5~33.2 NTU,UV<sub>254</sub> 0.025~0.033 cm<sup>-1</sup>,高锰酸盐指数 1.7~3.3 mg·L<sup>-1</sup>,氨氮 0.15~0.50 mg·L<sup>-1</sup>。水质指标符合《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中的 II 类水标准。

### 1.2 中试工艺流程

本试验进行直接超滤、微絮凝-超滤及絮凝/活性炭-超滤短流程工艺的中试试验,工艺流程如图 1 所示。原水经管道,不经任何预处理直接进入浸没式超滤膜池为直接超滤工艺(UF);原水经管道进入混合池与絮凝剂混合,经跌水堰跌水后,一部分进入超滤膜池,为微絮凝-超滤工艺(CUF);另一部分进入絮凝池与活性炭混合并搅拌后,进入斜板沉淀池进行沉淀,最后上清液进入超滤膜池为絮凝/活性炭-超滤(CPUF)。在 CPUF 系统中,斜管沉淀池内的部分炭泥回流到絮凝池,提高活性炭的使用效率。

超滤膜装置采用浸没式 PVC 合金超滤膜(立升,中国)组件,膜截留孔径为 0.01 μm,每个膜池有效膜面积为 15 m<sup>2</sup>。

中试系统主要工艺参数:预处理部分,混凝剂采用液态聚合氯化铝,经药剂池由蠕动泵加到混合池与原水混合,投加量为 5 mg·L<sup>-1</sup>,混合池停留时间为 60 s,经过 15 cm 高跌水堰过程进行微絮凝。机械搅拌絮凝池为孔室旋流反应池四格串联,搅拌转速梯度为 90、50、30、10 r·min<sup>-1</sup>,总絮凝时间为 0.5 h,活性炭于第一格絮凝池投加(10 mg·L<sup>-1</sup>)。斜管沉淀池停留时间为 1.67 h,排泥周期为 24 h,排泥量为 20 L·次<sup>-1</sup>,活性炭回流比为 5%。

物理清洗方式:系统利用膜池与产水箱高度差(1.5 m)形成的虹吸作为驱动力,并通过调节出水阀以恒定通量[10 L·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]运行,当系统膜污染积累到一定程度,膜池与产水箱的高度差无法提供足够的驱动力以设定通量运行时,进行物理清洗。物理清洗方式为气水联合冲洗 5 min,水反洗通量为运行通量的 2 倍[20 L·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>],气洗强度为 0.1 m<sup>3</sup>·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>(以膜面积计算)。

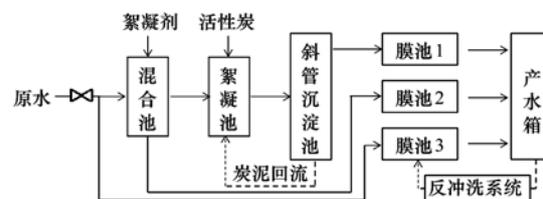


图 1 中试工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of pilot-scale hybrid membrane processes

### 1.3 检测项目及分析方法

#### 1.3.1 水质分析

水样有机物的相对分子质量分布采用凝胶排阻色谱法测定,分析系统为 Shimadzu LC-20A,色谱分离柱为 TSK-GEL® G3000SWXL (7.8 mm × 300 mm),采用 SPD-20AV 紫外检测器和 GE Sievers 900 DOC 在线检测器,以 210、3 610、7 540、34 700 和 126 700 的聚苯乙烯磺酸钠为相对分子质量的标准物质。

三维荧光光谱(EEM)采用日立 F7000 型荧光光谱仪测定,波长扫描范围为  $E_x/E_m = 220 \sim 400$  nm/250~550 nm,激发和发射缝宽度均为 5 nm,扫描速度为 2400 nm·min<sup>-1</sup>。根据不同发射和激发波长反映天然有机物的荧光特性,把 EEM 图谱分成 5 个区域。荧光峰值位于  $E_x < 250$  nm,  $E_m < 380$  nm 为区域 I 和 II,分别与酪氨酸和色氨酸等简单蛋白质相关;区域 IV 位于中等  $E_x$  波长(250~300 nm)和短

$E_m$  波长 ( $E_m < 380 \text{ nm}$ ), 反映可溶性生物代谢产物 (SMP); 区域 III ( $E_x < 250 \text{ nm}, E_m > 380 \text{ nm}$ ) 和区域 V ( $E_x > 280 \text{ nm}, E_m > 380 \text{ nm}$ ) 所在的荧光峰分别与腐殖酸和富里酸等腐殖质类物质相关<sup>[15, 16]</sup>. 为定量比较不同膜污染物之间荧光组分变化, 参照文献 [15] 的方法, 采用荧光区域积分法 (FRI), 对各个区域的荧光总量进行定量分析.

浊度采用 HACH2100N 浊度仪测量;  $UV_{254}$  采用 WFZ UV-2102C 型紫外可见分光光度计测量; TOC 采用 multi N/C UV HS TOC 仪测量; 高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾法测定.

### 1.3.2 不可逆膜污染表征

本试验采用恒通量方式运行, 跨膜压差 (TMP) 变化是评价膜污染的关键指标, 试验过程中系统每分钟自动采集并记录 TMP, 反映总体膜污染 (可逆和不可逆膜污染) 情况. 其中, 不能通过周期性物理反冲洗去除, 而只能通过化学清洗去除的不可逆膜污染, 以试验过程中每次物理清洗后 TMP 恢复稳定后 ( $\sim 5 \text{ min}$  后) 监测到的 TMP 值 ( $TMP_{irr}$ ) 进行分析, 反映不可逆膜污染情况<sup>[9]</sup>.

由于试验时间较长且装置位于室外环境, 水温有一定幅度波动, 对 TMP 数值产生影响, 试验采用水温修正后的 TMP 增长曲线进行膜污染分析, TMP 水温校正采用式 (1) 和 (2):

当  $t \geq 20^\circ\text{C}$  时,

$$TMP_{20} = TMP_t e^{0.0239(t-20)} \quad (1)$$

当  $t \leq 20^\circ\text{C}$  时,

$$TMP_{20} = TMP_t e^{0.021(t-20)} \quad (2)$$

### 1.3.3 不可逆膜污染物分析

为进一步分析预处理对短流程超滤工艺膜污染影响的机制, 试验后期三套工艺进行物理清洗后, 在每个膜池内取一定长度膜丝进行分析, 测定了不可逆膜污染物的成分和性质. 每个膜池取出的膜丝, 一部分直接晾干, 截取其中一小段经过表面镀金后采用扫描电镜 (Hitachi S4700, 日本) 观察表面形貌特征. 用超纯水小心地将另一部分膜丝表面的污染物冲洗下来, 悬浮到超纯水中, 悬浮液经充分震荡后过  $0.45 \mu\text{m}$  尼龙滤膜后, 测定悬浮液的溶解性有机物浓度、有机物相对分子质量分布及三维荧光光谱, 表征不可逆膜污染物中膜表面部分. 此外, 将表面污染物清洗后的膜丝在  $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaOH 溶液浸泡 12 h, 洗脱膜孔内污染物; 调节洗脱液 pH 至中性后测定其有机物浓度、相对分子质量分布及三维荧光光谱, 用以分析不可逆膜污染的膜孔内部分.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不可逆膜污染情况

根据前期对试验水源超滤阈通量和极限通量的测量结果<sup>[17]</sup>, 本试验采用  $10 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$  为中试试验的运行通量连续稳定运行. 试验过程中, 当 TMP 增长至无法通过调节出水阀以设定通量运行时, 进行物理清洗, 因此物理清洗周期一定程度上反映总体膜污染增长情况, 物理清洗周期越长, 工艺的总膜污染越低. 直接超滤装置的物理清洗周期从初始的 48 h 逐渐稳定到约 24 h (图 2). 其中  $TMP_{irr}$  最高增长至  $21.5 \text{ kPa}$ , 不可逆膜污染的平均增长率为  $0.32 \text{ kPa}\cdot\text{d}^{-1}$ .

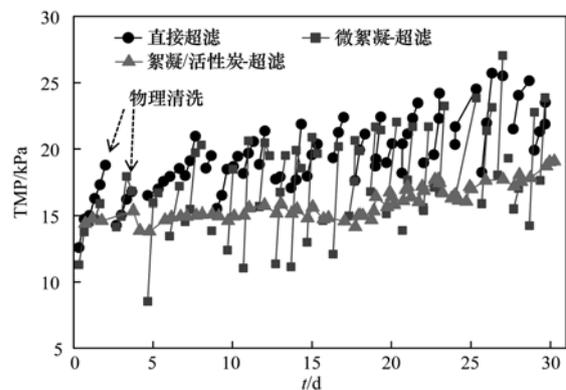


图 2 短流程超滤工艺运行过程的跨膜压差变化

Fig. 2 Variation of TMP with time during ultrafiltration without and with micro-coagulation and coagulation-adsorption-sedimentation pretreatments

#### 2.1.1 微絮凝-超滤工艺不可逆膜污染情况

微絮凝-超滤装置在运行期间的物理清洗周期从最初 58 h 逐渐稳定到约 24 h (图 2), 物理清洗周期略比直接超滤的长, 总体膜污染有所减少. 经微絮凝预处理的  $TMP_{irr}$  (图 3), 比直接超滤的  $TMP_{irr}$  低, 其  $TMP_{irr}$  增长率仅为  $0.16 \text{ kPa}\cdot\text{d}^{-1}$ . 微絮凝-超滤装置的物理清洗周期、TMP 及  $TMP_{irr}$  结果显示, 微絮凝预处理能够显著提高了物理清洗效率, 减少了不可逆膜污染的比例. 微絮凝预处理减少不可逆膜污染、提高膜污染可逆性的现象在以往研究中也已有报道<sup>[18, 19]</sup>, 如董秉直等<sup>[18]</sup> 的研究发现絮凝预处理使反冲洗效率从 40% 提高到 100%.

#### 2.1.2 絮凝/活性炭-超滤工艺不可逆膜污染情况

絮凝/活性炭-超滤工艺在运行期间, TMP 增长极其缓慢 (平均增长速率仅为  $0.16 \text{ kPa}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 无需进行物理清洗仍可以恒定通量 [ $10 \text{ L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ ] 稳定运行, 几乎实现零污染运行. 絮凝/活性炭预处理极大地降低了包括不可逆污染在内的总体膜污染积

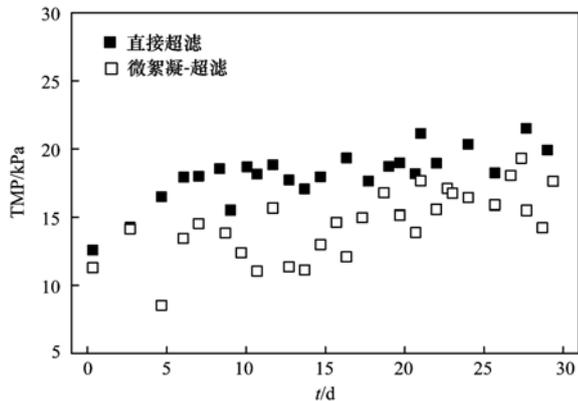


图3 直接超滤和微絮凝-超滤不可逆膜污染增长情况  
Fig. 3 Hydraulic irreversible fouling of ultrafiltration with and without micro-coagulation pretreatment

累. 为进一步考察絮凝/活性炭-超滤工艺是否能在更高通量下实现低污染运行以及对超滤工艺不可逆膜污染控制效果, 分别提高该装置的运行通量至 15、17 和  $18.5 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 比较这些通量运行下的不可逆膜污染的增长情况. 当装置以  $15 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  通量运行 6 d 没有任何物理清洗, 仍以设定通量稳定运行. 当通量先后上升至  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $18.5 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  时, 该装置的物理清洗周期分别上升至 48 h 和 12 h, 但并没有观察到明显的不可逆膜污染增长(图 4). 上述结果显示, 经过絮凝/活性炭预处理, 运行通量升高至  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  (本试验直接超滤运行通量的 1.7 倍) 时, 该装置不可逆膜污染增长不明显, 絮凝/活性炭预处理有效降低了不可逆膜污染增长, 提高了超滤处理东江水过程可实现低污染的运行通量.

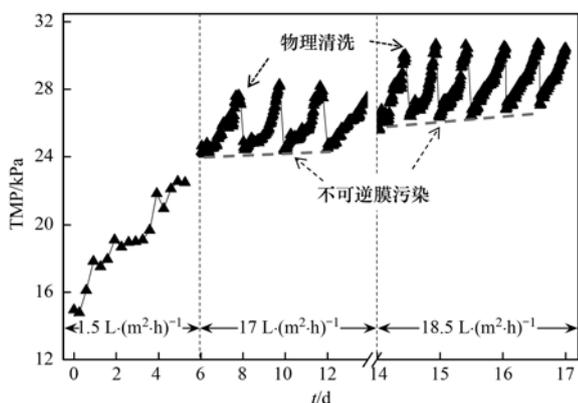


图4 不同运行通量下絮凝/活性炭-超滤工艺 TMP 变化情况  
Fig. 4 Variation of TMP with time during ultrafiltration with pretreatment of coagulation-adsorption-sedimentation at different fluxes

以上 3 套超滤工艺  $\text{TMP}_{\text{irr}}$  增长情况表明, 采用  $10 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  的低通量运行时, 微絮凝预处理显著提高了物理清洗效率, 减少了不可逆膜污染, 降低

了不可逆膜污染的比例. 絮凝/活性炭预处理在  $10 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  运行通量下运行, 总体膜污染极低; 当通量提高至  $18.5 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  (物理清洗周期 12 h) 时, 不可逆膜污染增长仍不明显. 微絮凝和絮凝/活性炭预处理在低通量运行条件下均对不可逆膜污染有明显的控制效果.

## 2.2 预处理对不可逆膜污染物影响机制

在中试试验结束后, 采集 3 套工艺的污染膜丝, 比较微絮凝和絮凝/活性炭预处理工艺对不可逆膜污染物组分的影响, 分析微絮凝和絮凝/活性炭两种预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染控制的机制. 其中, 絮凝/活性炭-超滤工艺在通量  $10 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  运行时膜污染极低, 试验期间没有进行物理清洗, 本研究中该工艺的污染膜丝样品来自  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  的运行工况.

### 2.2.1 污染膜丝表面形貌观察

图 5 为 3 套工艺污染膜丝截面的电镜图. 从中可以看出, 微絮凝-超滤工艺的污染膜丝, 其表面污染层的厚度远比直接超滤的厚, 而且该污染层较直接超滤工艺中膜丝的污染层疏松. Yu 等<sup>[20]</sup> 的研究同样观察到经絮凝预处理的膜丝表面形成颗粒较大的污染层. 这些含有絮体的污染层更易通过物理清洗去除, 提高了物理清洗的效果, 减少不可逆膜污染的积累. 此外, 在物理清洗后测定膜池浓缩液中的悬浮固体浓度 MLSS 也发现, 经微絮凝预处理后, 膜池内的 MLSS ( $2.58 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 远高于直接超滤 ( $1.07 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 微絮凝预处理后, 通过物理清洗去除的污染物增多, 提高了膜污染的可逆性.

与此同时, 对比直接超滤和絮凝/活性炭-超滤后的污染膜丝, 并没有发现两膜丝的形貌有显著差异, 但值得注意的是, 由于絮凝/活性炭-超滤后的污染膜丝来自于  $17 \text{ L} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  运行工艺, 运行通量是其他两套工艺的 1.7 倍, 可以推测, 在相同工况下, 经过絮凝/活性炭预处理的污染膜丝表面的膜污染物更低.

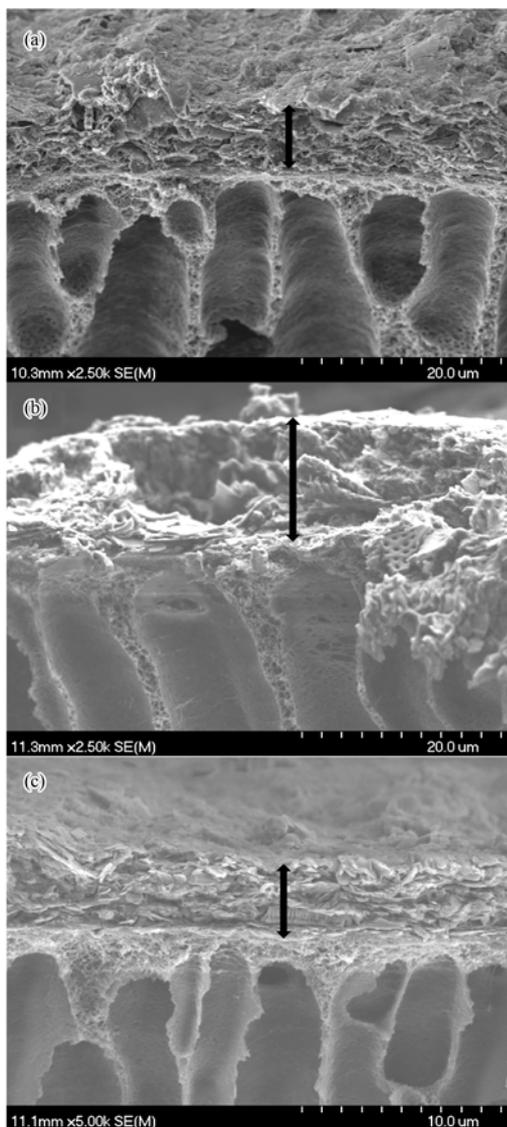
### 2.2.2 不可逆膜污染物有机物含量

为进一步定量比较两预处理对不可逆膜污染物的影响, 本试验测定了 3 套工艺污染膜丝的表面污染物和膜孔内污染物提取液中的总体有机物含量, 详细数据见表 1. 其中, 经两种预处理后的膜表面污染物浓度和膜孔内污染物含量均比直接超滤的要低; 且絮凝/活性炭-超滤工艺的比微絮凝-超滤工艺的更低, 预处理使不可逆膜污染物中有机物含量降低. 值得注意的是, 3 套工艺的膜表面污染物的

SUVA 均比膜孔内污染物要低, SUVA 值反映了水样腐殖质类物质含量的多少<sup>[21]</sup>, 即膜孔内机物的腐殖质类污染物更丰富. 3 套超滤工艺中, 经微絮凝和絮凝/活性炭预处理后, 膜表面污染物的 SUVA 显著下降, 分别仅为  $0.582 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$  和  $0.625 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ , 预处理降低了膜表面污染物中腐殖质类的含量; 而三套工艺不可逆膜污染物的膜孔内污染物的 SUVA 差别不大, 微絮凝和絮凝/活性炭预处理对膜孔内腐殖质类含量影响不大.

### 2.2.3 EEM 荧光图谱

本试验还测定了微絮凝和絮凝-活性炭预处理



(a) 直接超滤; (b) 微絮凝-超滤; (c) 絮凝/活性炭-超滤

图 5 直接超滤、微絮凝-超滤和絮凝/活性炭-超滤工艺的污染膜丝截面电镜图

Fig. 5 SEM images of fouled membranes without or with micro-coagulation, coagulation-adsorption-sedimentation pretreatments

对不可逆膜污染物荧光组分的影响. 膜表面和膜孔内污染物不可逆膜提取溶液的 EEM 荧光图谱及各荧光区域的积分比例如图 6 和 7 所示. 这些不可逆膜污染物中主要有 4 个荧光峰: 与类色氨酸物质相关的峰 ( $E_x/E_m = 225 \text{ nm}/340 \text{ nm}$ )、与可溶性生物代谢物相关的峰 ( $E_x/E_m = 270 \text{ nm}/325 \text{ nm}$ )、与富里酸 ( $E_x/E_m = 230 \text{ nm}/400 \text{ nm}$ ) 和腐殖酸 ( $E_x/E_m = 320 \text{ nm}/440 \text{ nm}$ ) 等腐殖质类物质相关的峰. 其中, 膜表面污染物的荧光组分主要是类酪氨酸和类色氨酸 (区域 I & II) 和可溶性生物代谢物 (区域 IV), 荧光积分占比均超过 78%, 富里酸及腐殖酸等腐殖质类物质的比例极低, 荧光组分以蛋白质类物质为主. 微絮凝-超滤相比直接超滤工艺, 膜表面污染物中的类色氨酸物质和可溶性生物代谢物的峰值分别下降了 60.6% 和 57.9%; 而絮凝/活性炭-超滤的膜表面污染物中, 两蛋白质类物质的峰值则下降了 33.7% 和 35.7%. 微絮凝和絮凝/活性炭预处理工艺显著降低了膜表面污染物的荧光强度, 但对其组分构成影响不大.

此外, 3 套工艺膜孔内污染物荧光组分均以类色氨酸和富里酸为主, 其中富里酸荧光强度和所占比例都显著高于膜表面污染物 (图 6 和图 7), 如直接超滤的膜孔内污染物样品中富里酸区域所占比例高达 37%. 更重要的是, 分别经过微絮凝和絮凝/活性炭预处理后, 膜孔内污染物荧光强度有所下降, 即使在絮凝/活性炭-超滤工艺运行通量较高不可逆膜污染可能积累更快的情况下, 絮凝/活性炭-超滤工艺的膜孔内荧光强度仍明显低于其他两套工艺, 显示出絮凝/活性炭对膜孔内污染物荧光组分有极好的控制效果.

不可逆膜污染物的 EEM 图谱显示, 短流程超滤工艺处理东江水过程中的不可逆膜污染主要是由膜表面的蛋白质类污染物及膜孔内的富里酸及蛋白质类物质组成. 微絮凝和絮凝/活性炭预处理并没有对不可逆膜污染的构成产生明显影响, 对膜表面及膜孔内荧光组分含量都有很好的控制效果, 并且对膜表面的荧光组分下降以及絮凝/活性炭预处理对膜孔内荧光组分控制最为明显. 絮凝/活性炭预处理对膜孔内荧光组分的控制效果明显优于微絮凝前处理.

### 2.2.4 不可逆膜污染物的相对分子质量分布

为进一步分析预处理工艺对不可逆膜污染物性质是否有影响, 还测定了 3 套工艺膜表面污染物和膜孔内污染物提取液有机物的相对分子质量分布 (图 8). 膜表面污染物的相对分子质量出现 ~ 100

表 1 3 套短流程超滤工艺的膜表面污染物和膜孔内污染物水质<sup>1)</sup>

Table 1 Characteristics of external foulants and internal foulants from ultrafiltration unit without or with micro-coagulation and coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment

样品	高锰酸盐指数 /mg·L <sup>-1</sup>	DOC /mg·L <sup>-1</sup>	UV <sub>254</sub> /cm <sup>-1</sup>	SUVA /L·(mg·m) <sup>-1</sup>	
膜表面污染物	直接超滤	6.85	1.89	0.041	2.17
	微絮凝-超滤	7.85	0.92	0.005	0.582
	絮凝/活性炭-超滤	5.71	0.85	0.005	0.625
膜孔内污染物	直接超滤	—	2.35	0.079	3.37
	微絮凝-超滤	—	2.07	0.067	3.25
	絮凝/活性炭-超滤	—	0.70	0.027	3.92

1) 水质数据均折算成 100 cm<sup>2</sup> 膜丝提取得到的数据

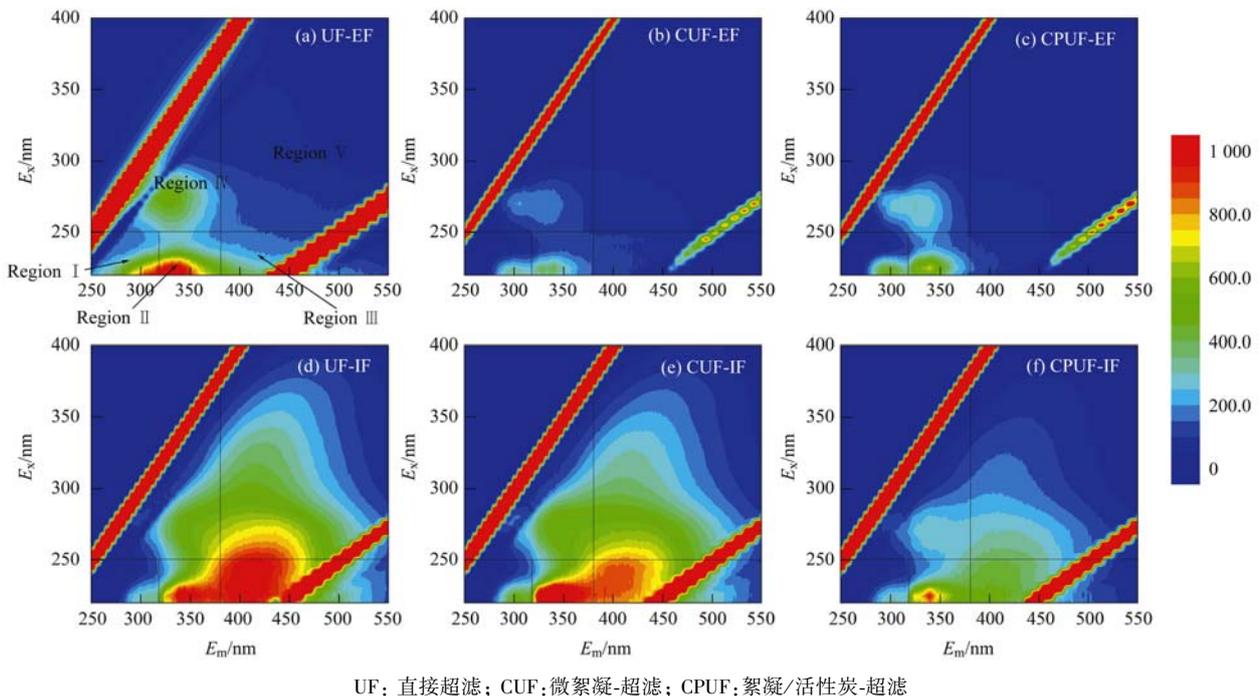


图 6 三套短流程超滤工艺的膜表面污染物 (EF) 及膜孔内污染物 (IF) 荧光光谱

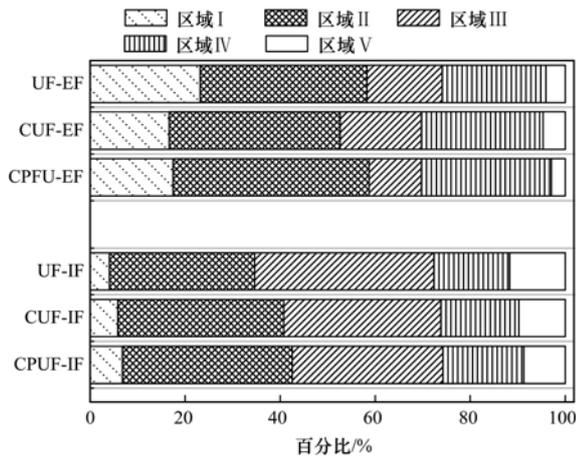
Fig. 6 Fluorescence excitation-emission matrix of external foulants (EF) and internal foulants (IF) from UF, CUF and CPUF

$\times 10^3$  和  $\sim 300$  两个明显的峰, 分别与生物聚合物及低分子中性有机物相关<sup>[22]</sup>; 两预处理均使两峰的响应值有明显下降. 另外, 从膜孔内洗脱出来的污染物相对分子质量分布图显示, 进入膜孔内的污染物的分子均小于超滤膜的切割分子量 ( $\sim 100 \times 10^3$ ), 主要是  $\sim 300$  的代表低分子中性有机物的峰, 而在 1 000 附近出现不明显的峰, 该峰反映如富里酸等小分子腐殖质类组分<sup>[22]</sup>. 而 Shao 等<sup>[23]</sup> 对一体式粉末活性炭-超滤工艺处理东江水的膜污染物进行 SEM-EDX、EEM 图谱、FTIR 等分析也发现蛋白质类物质对不可逆膜污染有重要贡献.

以往的研究发现絮凝作用对生物聚合物、腐殖质等较大分子的有机物有不错的去除效果, 而活性炭吸附对于中小分子的有机物有较好的去除能力<sup>[24, 25]</sup>. 在本试验中, 比较两种预处理对不可逆膜

污染物相对分子质量分布的影响发现, 经微絮凝和絮凝/活性炭前处理后的不可逆膜污染物的相对分子质量分布并没有明显差别, 两预处理均对膜表面污染物的与生物聚合物、膜表面和膜孔内的低分子中性有机物相关的峰有很好的控制效果, 并且絮凝/活性炭对膜孔内各相对分子质量分布的有机物的控制效果明显优于微絮凝预处理, 这一结果与 EEM 图谱分析结果一致.

上述预处理工艺对不可逆膜污染物结构特征、有机物组分及性质影响的结果可以看出, 短流程超滤工艺处理东江水过程中的不可逆膜污染主要是膜表面的生物聚合物等蛋白质以及膜孔内的富里酸、类色氨酸等简单蛋白质等引起的. 絮凝/活性炭预处理对不可逆膜污染物的控制效果明显优于微絮凝预处理. 微絮凝改变了膜丝表面污染层结构; 经过



UF:直接超滤; CUF:微絮凝-超滤; CPFU:絮凝/活性炭-超滤

图 7 3 套中试工艺膜表面污染物 (EF) 和膜孔内污染物 (IF) 的荧光积分比例

Fig. 7 Distribution of FRI in organic matter fractionated from external foulants (EF) and internal foulants (IF) from UF, CUF and CPFU

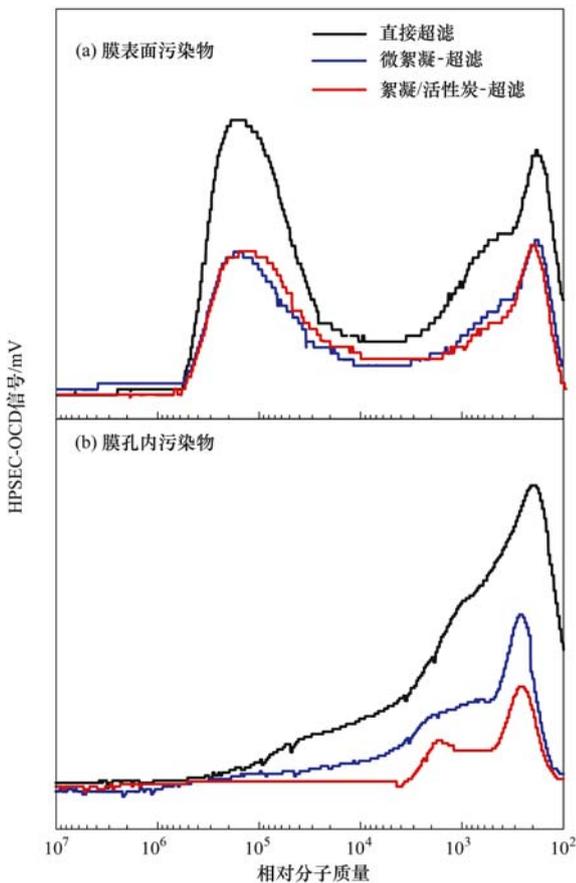


图 8 3 套中试膜表面污染物和膜孔内污染物的相对分子质量分布

Fig. 8 HPSEC-OCD chromatograms of external foulants and internal foulants from ultrafiltration unit without or with micro-coagulation and coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment

微絮凝和絮凝/活性炭预处理后不可逆膜污染物的含量都降低了,但微絮凝和絮凝/活性炭预处理对不

可逆膜污染的组构成影响较小。

微絮凝预处理过程中,由于原水与絮凝剂混合时间短,在较高剪切力下仅形成较小絮体,污染物基本全部进入膜池,没有显著改变超滤膜污染负荷,对总体膜污染的控制效果并不明显(图 3),但微絮凝预处理所形成的絮体,改变了膜表面污染层的密实性和厚度(图 5),提高了物理清洗的效率,减少了不可逆膜污染在膜表面和膜孔内的积累。与此同时,絮凝/活性炭预处理,延长了絮凝时间,增加了沉淀工艺,并利用活性炭优异的吸附性质,使原水的部分污染物在进入膜池前被去除,膜池进水(沉后水)水质有了较明显的改善,絮凝/活性炭预处理对原水的浊度、高锰酸盐指数、UV<sub>254</sub> 的平均去除率分别达到 84.1%、41.2% 和 40.0% (图 9),极大程度的减轻了超滤膜污染负荷,减少了引起不可逆膜污染的污染物进入膜池。

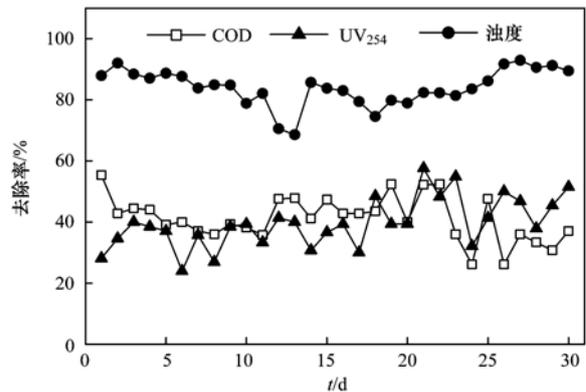


图 9 絮凝/活性炭-超滤工艺进水水质

Fig. 9 Removal of COD, UV<sub>254</sub> and turbidity by coagulation-adsorption-sedimentation pretreatment

### 3 结论

(1)超滤处理东江水过程中,膜表面不可逆污染物主要是类酪氨酸、类色氨酸等简单蛋白质及可溶性生物代谢物等蛋白质类物质,富里酸成分极少;而膜孔内不可逆污染物主要是富里酸和简单蛋白质等有机物。

(2)微絮凝预处理使膜表面形成疏松的滤饼层,易于水力清洗去除,因此减少不可逆膜污染物的积累。

(3)絮凝/活性炭预处理主要是充分利用絮凝和活性炭吸附的作用,通过沉淀作用有效地减少膜污染负荷,实现不可逆膜污染控制。

(4)微絮凝和絮凝/活性炭两套预处理工艺均能降低超滤膜不可逆污染,而絮凝/活性炭预处理对不可逆膜污染的控制效果远远大于微絮凝预处理。在超滤净水厂实际建设和工艺选择过程中,根据水

源和实际情况选择合适的预处理工艺。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李圭白, 梁恒. 创新与我国城市饮用水净化技术发展[J]. 给水排水, 2015, **41**(11): 1-7.
- [ 2 ] 何寿平, 张国宇. 以浸没式超滤膜为核心的短流程净水工艺的应用与思考[J]. 给水排水, 2011, **37**(1): 27-33.  
He S P, Zhang G Y. Application and reflection on the submerged-ultrafiltration-membrane centric shortened water treatment process[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, **37**(1): 27-33.
- [ 3 ] 郭建宁, 张治, 田瑞芝, 等. BAC/UF 替代砂滤的短流程饮用水处理工艺研究[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(23): 1-4.  
Guo J N, Zhang Z, Tian R Z, *et al.* Research on short process of biological activated carbon/ultrafiltration instead of sand filtration in drinking water treatment process [ J ]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(23): 1-4.
- [ 4 ] 徐俊. 浸没式超滤膜技术在水厂升级改造中的应用及设计[J]. 中国给水排水, 2016, **32**(2): 41-44.  
Xu J. Design and application of submerged ultrafiltration membrane to upgrading of drinking water treatment plants[J]. China Water & Wastewater, 2016, **32**(2): 41-44.
- [ 5 ] Crozes G F, Jacangelo J G, Anselme C, *et al.* Impact of ultrafiltration operating conditions on membrane irreversible fouling[J]. Journal of Membrane Science, 1997, **124**(1): 63-76.
- [ 6 ] Gao W, Liang H, Ma J, *et al.* Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production: a review [J]. Desalination, 2011, **272**(1-3): 1-8.
- [ 7 ] 范青如, 肖萍, 肖峰, 等. 浸入式短流程超滤膜生产工艺过程膜污染的形成与控制[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1351-1356.  
Fan Q, Xiao P, Xiao F, *et al.* Membrane fouling mechanism and control strategy for the pilot-scale submerged PVC-UF membrane process[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1351-1356.
- [ 8 ] 刘永旺, 李星, 杨艳玲, 等. 混凝/吸附预处理对超滤膜过滤特性的影响[J]. 北京理工大学学报, 2014, **34**(6): 638-643.  
Liu Y W, Li X, Yang Y L, *et al.* Effect of coagulation/adsorption pretreatment on ultrafiltration characteristics [ J ]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, **34**(6): 638-643.
- [ 9 ] 李凯, 田家宇, 叶挺进, 等. 混凝沉淀-浸没式超滤膜处理北江水中试研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, **44**(2): 38-42, 51.  
Li K, Tian J Y, Ye T J, *et al.* Pilot study on hybrid coagulation-sedimentation and immersed ultrafiltration for drinking water treatment from Bei River [ J ]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, **44**(2): 38-42, 51.
- [ 10 ] Stoquart C, Servais P, Bérubé P R, *et al.* Hybrid Membrane Processes using activated carbon treatment for drinking water: a review[J]. Journal of Membrane Science, 2012, **411-412**: 1-12.
- [ 11 ] Citulski J, Farahbakhsh K, Kent F, *et al.* The impact of in-line coagulant addition on fouling potential of secondary effluent at a pilot-scale immersed ultrafiltration plant [ J ]. Journal of Membrane Science, 2008, **325**(1): 311-318.
- [ 12 ] Hankins N, Price R, Debacher N A. Process intensification during treatment of NOM-laden raw upland waters: control and impact of the pre-coagulation regime during ultra-filtration [J]. Desalination and Water Treatment, 2009, **8**(1-3): 2-16.
- [ 13 ] 冯萃敏, 张欣蕊, 孙丽华, 等. PAC-UF 工艺的膜污染特性及膜污染物研究[J]. 给水排水, 2015, **41**(3): 125-131.  
Feng C, Zhang X, Sun L, *et al.* Study on the characteristics of membrane fouling and the composition of matters for membrane fouling in PAC-UF process [ J ]. Water & Wastewater Engineering, 2015, **41**(3): 125-131.
- [ 14 ] 王彩虹, 闫新秀, 王瑾丰, 等. 不同粒径高浓度粉末活性炭组合 UF 膜工艺特征和过滤效果[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(10): 4797-4802.  
Wang C H, Yan X X, Wang J F, *et al.* Effect of particle size on performance and characteristics of high concentration powdered activated carbon combined ultrafiltration process [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(10): 4797-4802.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Water Research, 2009, **43**(6): 1533-1540.
- [ 17 ] 孙国胜, 刘帅, 武睿, 等. 超滤膜处理东江水的阀通量和极限通量对比研究[J]. 膜科学与技术, 2016, **36**(6): 134-140.  
Sun G S, Liu S, Wu R, *et al.* A comparative study of ultrafiltration threshold flux and limiting flux of Dongjiang River [J]. Membrane Science and Technology, 2016, **36**(6): 134-140.
- [ 18 ] 董秉直, 陈艳, 高乃云, 等. 混凝对膜污染的防止作用[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 90-93.  
Dong B Z, Chen Y, Gao N Y, *et al.* Effect of coagulation on preventing membrane from fouling [ J ]. Environmental Science, 2005, **26**(1): 90-93.
- [ 19 ] Yao M, Nan J, Li Q G, *et al.* Effect of under-dosing coagulant on coagulation-ultrafiltration process for treatment of humic-rich water with divalent calcium ion [ J ]. Journal of Membrane Science, 2015, **495**: 37-47.
- [ 20 ] Yu W Z, Qu J H, Gregory J. Pre-coagulation on the submerged membrane fouling in nano-scale: effect of sedimentation process [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **262**: 676-682.
- [ 21 ] Gray S R, Ritchie C B, Tran T, *et al.* Effect of NOM characteristics and membrane type on microfiltration performance [J]. Water Research, 2007, **41**(17): 3833-3841.
- [ 22 ] Huber S A, Balz A, Abert M, *et al.* Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography - organic carbon detection-organic nitrogen detection (LC-OCD-OND)[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 879-885.
- [ 23 ] Shao S L, Qu F S, Liang H, *et al.* Characterization of membrane foulants in a pilot-scale powdered activated carbon-membrane bioreactor for drinking water treatment [ J ]. Process Biochemistry, 2014, **49**(10): 1741-1746.
- [ 24 ] Ma B W, Yu W Z, Liu H J, *et al.* Effect of low dosage of coagulant on the ultrafiltration membrane performance in feedwater treatment[J]. Water Research, 2014, **51**: 277-283.
- [ 25 ] Chen Y, Dong B Z, Gao N Y, *et al.* Effect of coagulation pretreatment on fouling of an ultrafiltration membrane [ J ]. Desalination, 2007, **204**(1-3): 181-188.

## CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China .....	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> ( 845 )
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter .....	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> ( 855 )
Assessment of PM <sub>2.5</sub> Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> ( 867 )
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Beijing .....	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> ( 876 )
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM <sub>2.5</sub> ) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015 .....	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> ( 884 )
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning .....	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> ( 894 )
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere .....	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> ( 903 )
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain .....	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> ( 911 )
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter .....	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> ( 918 )
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City .....	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> ( 924 )
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe .....	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 936 )
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events .....	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> ( 946 )
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China .....	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> ( 954 )
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake .....	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> ( 964 )
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City .....	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> ( 979 )
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area .....	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> ( 987 )
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories .....	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> ( 993 )
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River .....	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> ( 1002 )
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen .....	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 1010 )
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City .....	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> ( 1018 )
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria .....	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 1028 )
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation .....	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> ( 1038 )
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study .....	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> ( 1046 )
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen ( 1054 )
Oxidation Destruction of Cu(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup> by Persulfate .....	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> ( 1061 )
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells .....	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian ( 1067 )
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template .....	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> ( 1074 )
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A <sup>2</sup> /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays .....	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> ( 1084 )
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i> .....	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> ( 1093 )
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater .....	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 1102 )
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor .....	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> ( 1109 )
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process .....	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> ( 1116 )
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process .....	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> ( 1122 )
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition .....	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 1130 )
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process .....	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> ( 1137 )
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues .....	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> ( 1144 )
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge .....	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> ( 1151 )
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions .....	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao ( 1159 )
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i> .....	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> ( 1167 )
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions .....	YI Jun, CHENG Jin-ping ( 1173 )
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> ( 1182 )
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage .....	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> ( 1189 )
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods .....	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> ( 1201 )
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization .....	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> ( 1209 )
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index .....	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> ( 1218 )
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization .....	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> ( 1227 )
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest .....	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> ( 1235 )
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> Concentration and Temperature .....	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> ( 1245 )
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> ( 1253 )
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area .....	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 1262 )
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw .....	JIANG Ji-shao, YAO Qian ( 1272 )