

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制

何欢¹, 董秉直^{2*}, 许光红¹, 闫昭辉³

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 陶氏化学(中国)有限公司, 上海 201203)

摘要: 采用颗粒状大孔阴树脂和混凝作为微滤膜的预处理, 考察它们去除有机物以及缓解膜污染的效果和机制. 结果表明, 树脂可有效去除中等和小分子的有机物, 但对大分子有机物的去除有限; 混凝可有效去除大分子有机物, 但对中等和小分子有机物的去除有限. 仅采用树脂作为预处理, 虽然去除有机物效果较好, 但缓解膜污染的作用有限; 而混凝与树脂联用, 不仅有效去除有机物, 而且也有有效缓解膜污染.

关键词: 饮用水处理; 颗粒状大孔阴树脂; 微滤膜; 膜污染; 混凝

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1824-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.027

Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment

HE Huan¹, DONG Bing-zhi², XU Guang-hong¹, YAN Zhao-hui³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Dow Chemical (China) Company Limited, Shanghai 201203, China)

Abstract: A granular macro-porous anion exchange resin combined with coagulation was used as pretreatment of microfiltration membrane, and their effects and mechanism on removing organics and reduction of membrane fouling were evaluated. The results showed that resin could be effective in removing organics with medium and small molecular weight (M_r) but ineffective in removing organics with large M_r , while coagulation could significantly remove organics with large M_r , with a limited removal for organics with medium and small M_r . Using resin alone as pretreatment could be effective in removal of organics but limited in reduction of membrane fouling. With combination of coagulation and resin as pretreatment of microfiltration, not only organics could be removed effectively, but also membrane fouling could be reduced.

Key words: drinking water treatment; granular macro-porous anion resin; microfiltration membrane; fouling; coagulation

离子交换树脂因吸附容量大、再生能力强等特点, 在去除溶解性有机物方面具有独特的优势^[1]. 树脂吸附作为预处理与膜过滤工艺联用时, 可发挥提高有机物去除效果和缓解膜污染的作用, 故成为近年来国内外研究的热点, 但还处于起步阶段. 冯正宇等^[2]采用磁性离子交换树脂(MIEX)与超滤膜联用处理淮河原水, 研究发现 MIEX 可有效去除小分子溶解性有机物, 并能缓解超滤膜的不可逆污染, 延长超滤膜的过滤周期. 许航等^[3]也研究发现 MIEX 预处理可减小膜过滤时膜孔堵塞及滤饼层阻力, 有效控制膜污染. Huang 等^[4]研究发现 MIEX 预处理对有机物去除效果很好, 但对短期膜污染的缓解效果却不佳. Cai 等^[5]研究发现, 引起膜污染的主要物质只是有机物中一小部分没有紫外吸收的物质, 离子交换树脂对膜污染的缓解效果有限.

Humbert 等^[6]研究发现单独使用大孔树脂作为预处理对可逆膜污染没有明显的缓解作用. 由此可见, 目前国内外关于树脂吸附预处理缓解膜污染的研究结果各异, 且采用的多是 MIEX, 针对大孔树脂缓解膜污染的研究则非常有限, 国内尚鲜见报道. MIEX 多采用完全混合式, 为了加速聚集沉降以便分离再生, 制作树脂时需掺入铁氧化物使之具有磁性^[7]. 相比之下, 采用过滤柱的方式更有利于在线再生, 并且避免了树脂流失, 可有效降低树脂应用成本, 但鲜见这方面的研究报道.

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2013-11-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07410-002)

作者简介: 何欢(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水深度处理, E-mail: 1131376_hehuan@tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dbz77@tongji.edu.cn

本研究采用颗粒状大孔阴离子树脂, 通过过滤柱的方式, 作为微滤膜的预处理, 分析其去除有机物和缓解膜污染的效果与机制。

1 材料与方法

1.1 分析仪器

TOC 采用日本 Shimadzu 公司的 TOC-LCSH 测定, UV₂₅₄ 采用美国 HACH 公司的 DR5000 测定, 分子量分布测定采用美国 Waters 公司的 Waters e2695 凝胶色谱仪, 并连接美国 GE 公司的 Sievers 900 TurboTOC 检测器, 三维荧光测定采用日本日立公司的 Hitachi F 4500 荧光光谱仪。

1.2 大孔阴离子交换树脂

本试验采用美国陶氏公司 (Dow) 提供的两种大孔阴离子交换树脂, 型号分别为 AMBERLITE™ PW16 和 AMBERLITE™ PWA9, 以下简称 PW16 和 PWA9, 相关参数见表 1, 两种树脂均为苯乙烯系大孔树脂, 功能基团均为季胺基团, PWA9 的含水率略低, 而交换容量和装载密度均略高, 颗粒尺寸略小于 PW16。生产厂家已经对树脂进行了预处理和活化, 故在使用之前, 只需用超纯水将树脂漂洗干净即可。

表 1 PW16 和 PWA9 树脂参数

| 树脂型号 | PW16 | PWA9 |
|----------------------------|---|----------------|
| 树脂类型 | 大孔型 | |
| 骨架结构 | 苯乙烯-二乙烯苯交联共聚物 | |
| 功能基团 | 季胺基团 | |
| 离子形式 | Cl ⁻ , OH ⁻ | |
| 外形 | 白色不透明颗粒 | |
| 总交换容量/eq · L ⁻¹ | ≥0.7 | ≥0.8 |
| 含水率/% | 70 ~ 82 | 66 ~ 72 |
| 润湿孔径 | 100 ~ 500 nm | |
| 粒度范围/mm | 0.42 ~ 1.2 | 0.3 ~ 1.18 |
| | (0.42 以下 <5%; 1.2 以上 <3%) | (0.355 以下 <1%) |
| 装载密度/g · L ⁻¹ | 689 | 700 |
| 最高使用温度/°C | 60(OH ⁻), 100(Cl ⁻) | 40 |

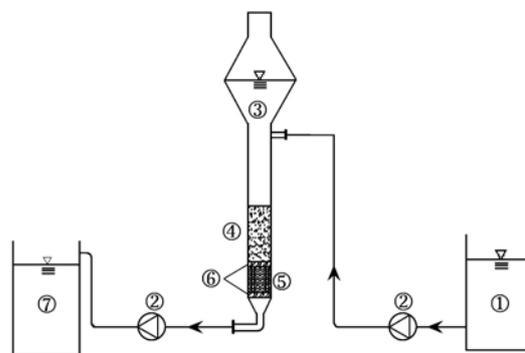
1.3 试验装置

1.3.1 树脂过滤装置

树脂动态吸附试验采用滤柱形式, 装置如图 1 所示。吸附滤柱固定在铁架台上, 滤柱内径为 2.3 cm, 外径为 2.5 cm, 有机玻璃材质, 滤柱上部做成胖肚形用来缓冲两台泵的流量差。滤柱的装填方法为: 滤柱底部先垫一个聚乙烯垫片, 然后装填一定量的玻璃珠作为承托层, 在玻璃珠上面再垫一个聚乙烯垫片以防止树脂颗粒落入玻璃珠的间隙内, 最后

将 30 mL 未使用过的树脂填入滤柱中。滤柱装填好之后, 需用一定量的超纯水淋洗滤柱, 将装填滤柱时带入的杂质冲洗干净; 在淋洗的同时, 要注意把滤柱中的气泡排净, 以免影响动态吸附的水力条件。

进行动态吸附试验时, 将需要进行树脂动态吸附的水样装入进水箱, 通过蠕动泵抽入滤柱上部缓冲空间, 同时再用另外一台蠕动泵在滤柱下部抽吸作为过滤的驱动力, 树脂吸附交换后的出水由蠕动泵抽入出水箱, 按照试验要求定时取样测定指标。蠕动泵为保定兰格公司生产, 型号为 BQ50-1J + WX10-14, 过柱流速采用蠕动泵转速调节, 两台泵的流量要一致, 以保证整个系统流量平衡。



①进水箱; ②蠕动泵; ③滤柱; ④树脂层;
⑤玻璃珠承托层; ⑥垫片; ⑦出水箱

图 1 树脂动态吸附试验装置示意

Fig. 1 Schematics of experimental apparatus for resin dynamic adsorption

1.3.2 微滤膜过滤装置

试验采用平板膜死端过滤方式 (带有搅拌装置), 装置如图 2 所示。膜过滤罐采用中国科学院上海应用物理研究所提供的杯式过滤器, 有效容积 300 mL, 有效过滤面积 $3.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 。膜过滤器进水端连接一个容积为 5 L 的储水箱, 保证过滤时水量充足稳定, 出水端为料液收集罐, 其收集到的水量以质量的形式传输到电脑中, 再除以水的密度

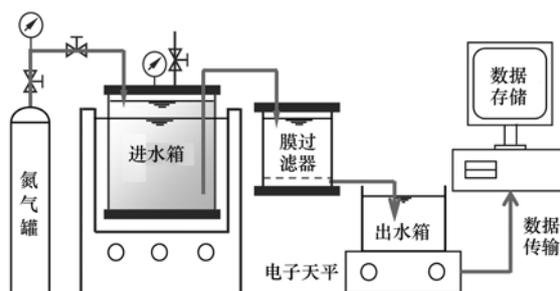


图 2 微滤膜过滤装置示意

Fig. 2 Schematics of experimental apparatus for the microfiltration step

$1 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 则得到过膜水量的体积. 试验中以高纯氮气作为驱动压力,操作压力 0.1 MPa . 每次试验采用一张新膜,使用前用超纯水浸泡漂洗 3 次,每次浸泡 8 h 以上, 4°C 保存.

试验前用 Milli-Q 去离子水对平板膜进行预压 2 h 左右,直至获得稳定通量,记录为初始通量 J_0 ,过滤水样时每隔 10 s 记录一次通量 J_t ,直到过滤结束.

膜污染程度通常可以用膜通量下降情况来表征. 本研究主要考察孔径为 $0.1 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维微

滤膜(Millipore,下文简称 CA $0.1 \mu\text{m}$) 过滤各水样时对有机物的去除效果和膜通量 J/J_0 下降的趋势.

1.3.3 试验原水

试验的原水采用位于同济大学校园内的小河三好坞原水(SW)和太湖原水(TW). 其中树脂预处理缓解膜污染的效果试验采用三好坞原水;而为了突出混凝效果,混凝与树脂联用缓解膜污染的效果试验采用大分子有机物含量更高的太湖原水(见 2.2.2 节). 2 种原水的主要水质指标如表 2 所示.

表 2 试验原水(三好坞原水和太湖原水)的主要水质指标

Table 2 Water quality objectives of the raw waters (SW and TW)

| 原水 | 浊度/NTU | 高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | pH | DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$ | $\text{SUVA}/\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$ |
|------|--------|---------------------------------------|------|------------------------------------|----------------------------------|--|
| 太湖水 | 38.8 | 3.91 | 8.56 | 4.134 | 0.099 | 2.39 |
| 三好坞水 | 5.30 | 3.23 | 8.40 | 6.005 | 0.080 | 1.33 |

1.3.4 混凝沉淀条件

混凝剂采用聚合氯化铝,投加量为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 Al_2O_3 的含量计). 在 5 L 的大烧杯里面加入 4 L 原水,投加混凝剂后以 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 1 min,然后以 $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 10 min,再以 $50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速搅拌 10 min,最后沉淀 30 min,取上清液进行树脂吸附交换试验.

2 结果与讨论

2.1 不同树脂去除有机物和缓解膜污染的效果

从图 3 可以看出,两种树脂出水的膜通量下降情况并无明显差异,膜通量下降的趋势线几乎完全重合. 对比原水膜通量下降曲线可知,两种树脂均能在一定程度上延缓膜污染. 从表 3 可知,两种树脂对有机物的去除效果相近,PW16 略优于 PWA9; CA $0.1 \mu\text{m}$ 微滤膜对有机物有一定的去除效果,过滤树脂出水的有机物去除率低于直接过滤原水,这

是因为树脂出水的有机物浓度较低,且大部分是一些小分子有机物,导致去除率下降. 由此可见,树脂和微滤膜联用对有机物有很好的去除效果.

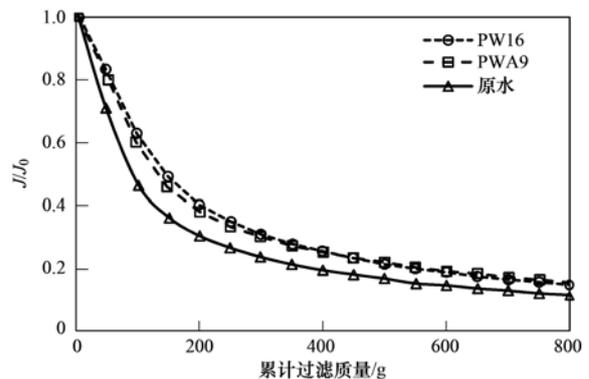


图 3 微滤膜过滤三好坞原水和两种树脂初始出水的通量变化(PW16 和 PWA9, 0~10 h)

Fig. 3 Flux decline during microfiltration of SW and effluents from the two resins (PW16 and PWA9, 0-10 h)

表 3 两种树脂(PW16 和 PWA9)和微滤膜对三好坞原水有机物的去除效果(0~10 h)

Table 3 Removal efficiency of the two resins (PW16 and PWA9) and the microfiltration membrane for organic in SW (0-10 h)

| 项目 | 高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | | DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | | | $\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$ | | |
|------------------------|---------------------------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|----------------------------------|-------|-------|
| | PW16 | PWA9 | 原水 | PW16 | PWA9 | 原水 | PW16 | PWA9 | 原水 |
| 膜前 | 1.132 | 1.206 | 3.077 | 1.925 | 2.084 | 5.334 | 0.012 | 0.016 | 0.073 |
| 膜后 | 0.985 | 1.077 | 2.749 | 1.623 | 1.654 | 4.807 | 0.008 | 0.011 | 0.067 |
| 树脂去除率 ¹⁾ /% | 63.20 | 60.80 | — | 63.92 | 60.93 | — | 83.56 | 78.08 | — |
| 膜去除率 ¹⁾ /% | 4.80 | 4.20 | 10.67 | 5.65 | 8.06 | 9.89 | 5.48 | 6.85 | 8.22 |
| 总去除率/% | 68.00 | 65.00 | — | 69.57 | 68.99 | — | 89.04 | 84.93 | — |

1) 表中的去除率均表示各工艺对原水中有机物的去除率

2.2 连续动态吸附预处理去除有机物和缓解膜污染的效果

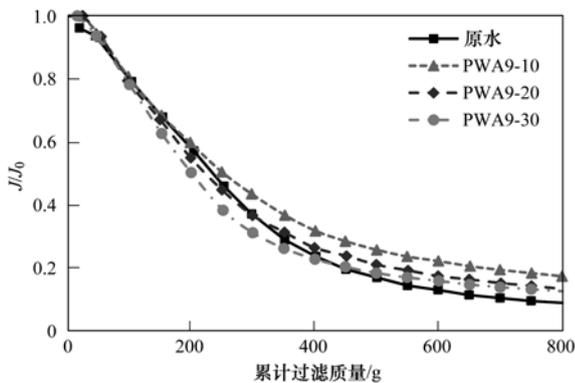
2.2.1 膜通量下降情况

由于两种树脂对有机物的去除效果相近,仅选用其中一种树脂 PWA9 来考察连续动态吸附的情况下树脂预处理缓解膜污染的效果. 图 4 为连续动

态吸附 0 ~ 30 h 内微滤膜过滤三好坞原水及各时段 PWA9 出水的通量变化图. 从中可以看出, 0 ~ 10 h 树脂出水的膜通量下降程度最小, 但随着时间的延续, 通量逐渐下降并接近原水的通量.

图 5 为连续动态吸附 0 ~ 100 h 内树脂和膜去除有机物的效果. 从图 5 (a) 可以看出, 树脂 PWA9 对 3 种有机物指标均有较好的去除效果. DOC 的平均去除率为 31.08%, 高锰酸盐指数的平均去除率为 45.79%, UV_{254} 的平均去除率为 66.98%. 由此可见, 树脂对 UV_{254} 的去除效果最佳, 其次为高锰酸盐指数, 而 DOC 最差.

从图 5 (b) 可以看出, CA 0.1 μm 微滤膜对有机物的去除效果均不是很好, DOC 的平均去除率为 8.29%, UV_{254} 的平均去除率为 6.21%, 而高锰酸盐指数的平均去除率为 4.80%. 在过滤的最初阶段, 膜对有机物去除效果出现较为明显的增加, 随后又下降. 对照树脂去除有机物的情况, 可知这期间树脂去除有机物的效果呈下降趋势, 因此, 树脂预处理与膜过滤对有机物的去除, 存在某种协同的作用.



PWA9-10 为 0 ~ 10h; PWA9-20 为 10 ~ 20h;
PWA9-30 为 20 ~ 30 h

图 4 微滤膜过滤三好坞原水和 PWA9 出水的通量变化 (0 ~ 30 h)

Fig. 4 Flux decline during microfiltration of SW and resin PWA9 effluent (0-30 h)

2.2.2 有机物相对分子质量分布

从图 6 可知, 原水中有机物分布在 3 个区间, I 区间的相对分子质量分布为 $5.0 \times 10^6 \sim 5.0 \times 10^4$, 属大分子, 它的 TOC 略有响应, 但 UV_{254} 却完全没有响应. 这表明这类大分子有机物在水中的浓度较低, 且多为亲水性组分, 被认为是一些对紫外吸收极低的多糖类、胶体或高分子蛋白类组成^[8-10]; II 区间的相对分子质量分布为 $1.10 \times 10^4 \sim 2.64 \times 10^3$, 属中等分子, 虽然 TOC 响应不甚强烈, 但 UV_{254} 的响应

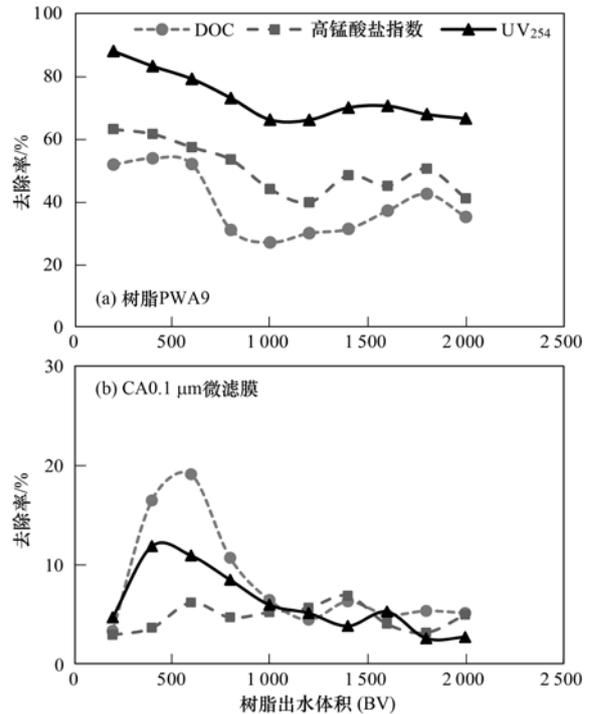


图 5 树脂 PWA9 和微滤膜对三好坞原水有机物的去除效果 (0 ~ 100 h)

Fig. 5 Removal efficiency of resin PWA9 and microfiltration for organic matters in SW (0-100 h)

却非常强烈, 表明它们主要为紫外吸收极强的腐殖类有机物构成; III 区间的相对分子质量分布在 $2.64 \times 10^3 \sim 2.16 \times 10^2$, 为小分子, 它们的紫外响应较为微弱, 但 TOC 的响应强烈, 说明它们主要由亲水性的有机物构成.

由图 6 (a) 和 6 (b) 可知, 在最初的 0 ~ 10 h, 树脂对中等分子的 TOC 去除效果非常显著, 对小分子的 TOC 去除效果良好, 对大分子也有一定程度的去除; 而经树脂处理后各分子量区间的 UV_{254} 响应强度均大为减弱, 尤其是中等分子的 UV_{254} 响应几乎完全消失. 这表明, 树脂更易于去除中等分子以及紫外吸收强烈的小分子有机物, 如腐殖酸类及其小分子降解产物, 而对大分子有机物和非紫外吸收的小分子有机物的去除效果次之.

由图 6 (c) 和 6 (d) 可知, 在之后的 10 ~ 20 h, 随着通水倍数增加, 树脂对中等分子有机物的 TOC 去除效果依然显著, 对大分子的 TOC 去除有所下降, 而对小分子的 TOC 去除效果明显变差, 出水的小分子 TOC 甚至超过了原水; 而从 UV_{254} 响应来看, 树脂出水中中等分子的 UV_{254} 响应仍然得以完全去除, 小分子的 UV_{254} 响应和 0 ~ 10 h 相比略有增加, 但仍远低于原水.

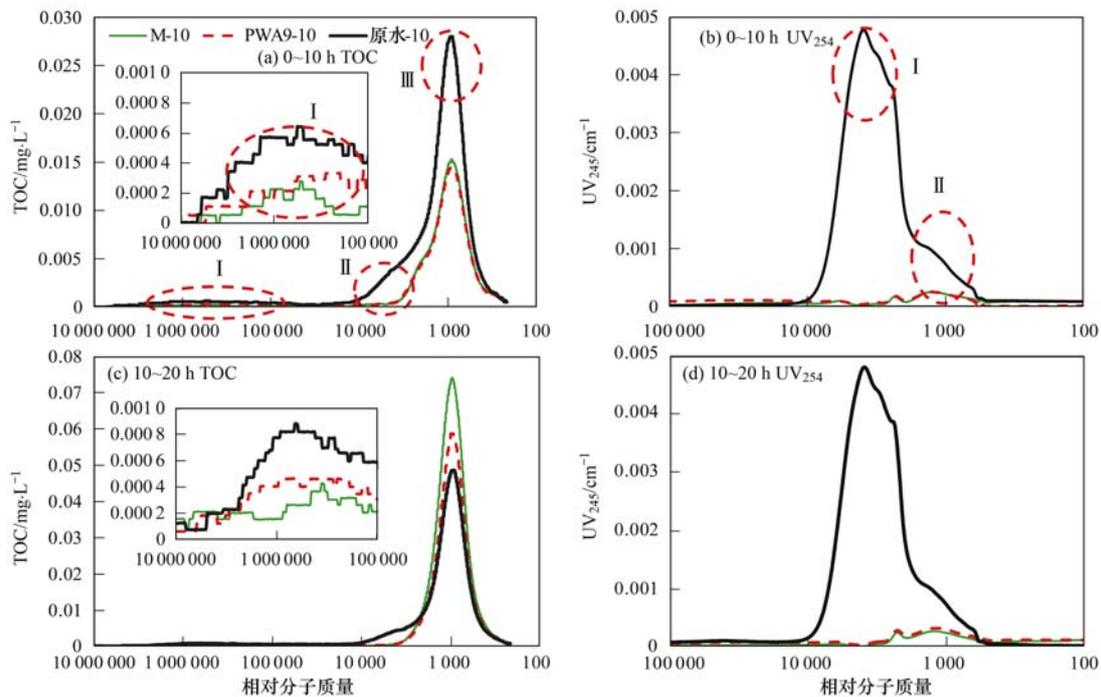


图 6 三好坞原水、PWA9 树脂出水和微滤膜出水的相对分子质量分布(0~20 h)

Fig. 6 The M_r distribution of SW, resin PWA9 effluent and microfiltration effluent (0-20 h)

结合树脂自身特性来看, PWA9 为阴离子大孔树脂, 其润湿孔径范围在 100 ~ 500 nm, 而水中大分子在 0.1 ~ 1.0 μm 左右, 甚至更大^[11], 故而能进入孔道的大分子有机物有限, 树脂对其去除效果一般. 而对于能够进入孔道中、小分子有机物, 树脂主要通过吸附交换作用去除之. PWA9 为阴离子树脂, 可交换离子为 Cl^- 和 OH^- , 故而水解后表面带正电荷; 而 UV_{254} 表征的有机物富含羧基等官能团, 水解后表面带负电荷. 由于静电作用, 阴离子树脂对 UV_{254} 类有机物(包括原水中的中等分子有机物和部分小分子有机物)具有更强的吸附交换能力^[12,13]. 在处理初期, 树脂的交换位充裕, 无论是 UV_{254} 类还是非 UV_{254} 类有机物, 均可得到有效的去除; 随着处理的持续进行, 交换位逐渐饱和, 中等分子及部分小分子的 UV_{254} 类有机物在吸附竞争中占优势, 将原先吸附在树脂上的小分子非 UV_{254} 类有机物置换或交换出来, 导致出水的小分子 TOC 增加, 甚至超过原水.

有机物相对分子质量分布的这种变化规律与图 5 中有机物去除效果的变化相吻合. 树脂去除 DOC 的效果随处理的持续进行呈下降的趋势, 正是由于原先被吸附或交换到树脂中的小分子非 UV_{254} 类有机物逐渐为 UV_{254} 类有机物所替代的缘故.

从图 6 中微滤膜的表现来看, 微滤膜出水的中、

小分子的 TOC 和 UV_{254} 响应线几乎一直与树脂出水重合, 表明微滤膜对树脂预处理出水中的这部分有机物几乎没有效果. 对于大分子有机物, 微滤膜显示出一定程度的去除效果, 但随着处理的进行, 树脂对大分子有机物的去除效果逐渐变差, 相应地, 微滤膜对大分子有机物的去除效果有所提高, 但这必然导致了更多的大分子有机物在膜表面沉积, 从而加重了膜污染, 这也同时解释了为何膜通量呈现逐渐下降的趋势.

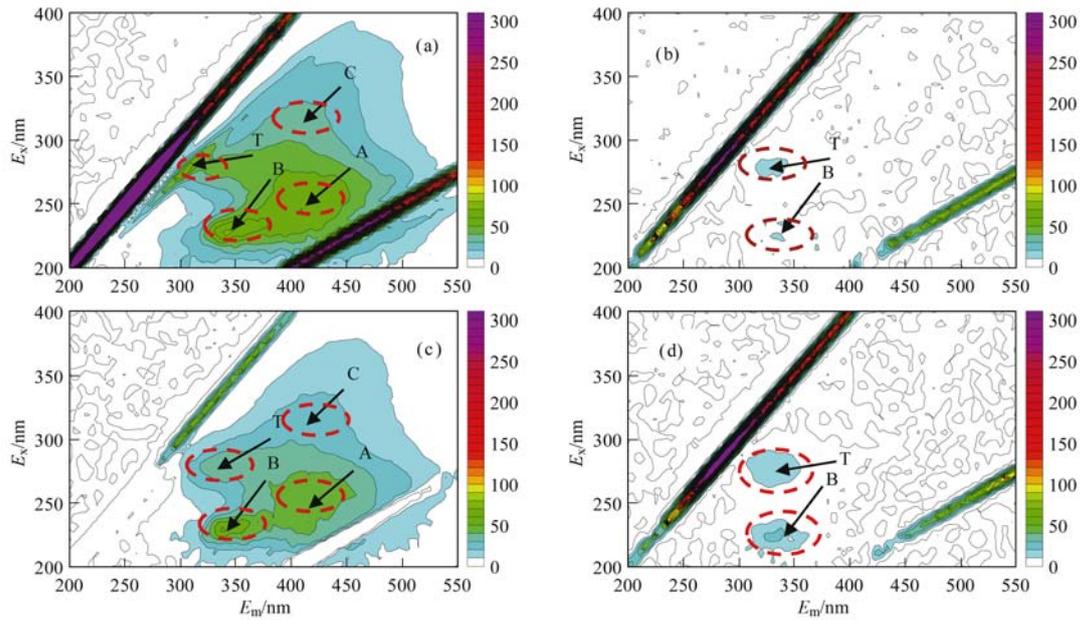
2.2.3 三维荧光光谱

从图 7(a) 可知, 原水的荧光响应区域可标为 T、B、A、C, 蛋白类荧光区 B 区和 T 区被认为是蛋白类有机物, 响应较为强烈, A 区域可视为富里酸类有机物, 响应强度次之, C 区域为腐殖质类有机物, 响应强度最小^[14].

由图 7(b) 可知, 微滤膜直接过滤时, 对原水中有荧光响应的有机物去除效果很差, 仅去除少量 T 区和 B 区的大分子蛋白类物质, 因此造成膜污染的有机物主要是一些荧光响应较弱或者没有荧光响应的物质.

由图 7(c) 可知, 树脂对荧光响应的有机物有很好的去除效果, 这与图 6 中树脂可非常有效去除 UV_{254} 类有机物的结果相吻合.

图 7(d) 表明, 微滤膜过滤树脂预处理后的出水



(a) 原水; (b) 微滤膜直接过滤原水前后的差值; (c) 树脂预处理原水前后的差值(0~10 h);
(d) 微滤膜过滤树脂出水前后的差值(0~10 h)

图7 三好坞原水的三维荧光光谱及各工艺处理前后水样的三维荧光光谱差值

Fig. 7 EEMs fluorescence spectra of SW and subtraction EEMs fluorescence spectra of waters before and after each process

时,去除的有机物仍仅限于 T 区域和 B 区域. 结合图 6 的有机物相对分子质量分布变化可知,树脂对大分子有机物去除效果较差,未被树脂吸附的大分子有机物为后续的微滤膜所去除,这进一步说明 T 区域和 B 区域反映的多为大分子的蛋白类有机物.

2.3 “混凝沉淀 + 树脂”预处理缓解膜污染的效果

由上述的研究可知,树脂适合去除中、小分子有机物,但对大分子有机物的去除有限. 混凝广泛应用于膜的预处理,由于它可有效去除大分子有机物,因而可有效缓解膜污染^[15, 16]. 然而,混凝去除中、小分子有机物的效果有限,如果它与树脂联用作为膜的预处理,则不仅可有效缓解膜污染,还可有效去除有机物.

2.3.1 膜通量下降情况

采用“混凝沉淀 + 树脂”作为 CA 0.1 μm 微滤膜的预处理,并比较微滤膜过滤太湖原水、混凝沉淀出水和树脂出水的通量变化曲线. 如图 8 所示,微滤膜直接过滤太湖原水时,通量下降严重,过滤结束时的通量下降到初始通量的 5.3% 左右;过滤混凝沉淀出水时,结束通量为初始的 33%,与直接过滤原水相比有明显提升;但过滤树脂出水时的通量没有得到进一步的提升,这和未与混凝联用时(图 3)略有不同,这种差别的原因在于原先为树脂去除的部分大分子有机物已为混凝所去除.

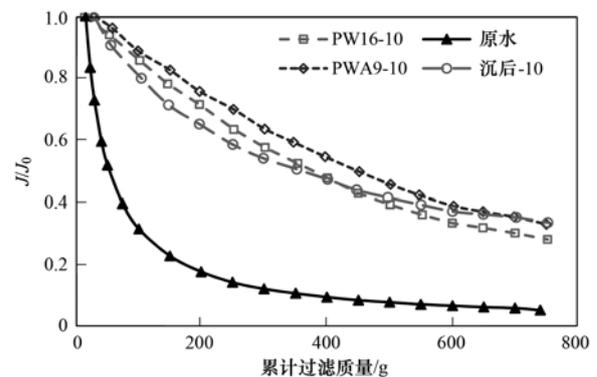


图8 微滤膜过滤太湖原水、沉后水及两种树脂(PWA9 和 PW16)出水的通量变化(0~10 h)

Fig. 8 Flux decline during microfiltration of TW and effluents from sedimentation, resin PWA9 and PW16 (0~10 h)

2.3.2 有机物的去除效果

表 4 表明“混凝沉淀 + 树脂 + 微滤膜”组合工艺中,各工艺对高锰酸盐指数的去除效果最佳的为混凝,其次为树脂,最差的为膜过滤; DOC 和 UV_{254} 去除效果最佳的为树脂,其次为混凝,最差的为膜过滤. 从表 4 还可以看出,组合工艺对有机物的总去除效果非常明显,对高锰酸盐指数的去除率在 75% 以上,对 DOC 的去除率在 60% 以上,对 UV_{254} 的去除率在 80% 以上.

表 5 中列出了 0~10 h 时段“PWA9 树脂 + 微滤膜”和“混凝沉淀 + PWA9 树脂 + 微滤膜”对有机物的

表 4 “混凝沉淀 + 树脂 + 微滤膜”组合工艺对太湖原水有机物的去除效果(0~10 h)

Table 4 Removal efficiency of integrated process “coagulation-sedimentation-resin PWA9-microfiltration” for organics in TW (0-10 h)

| 指标 | 水样 | 有机物浓度 | | 去除率 ¹⁾ /% | |
|---------------------------------------|--------|-------|-------|----------------------|-------|
| | | PW16 | PWA9 | PW16 | PWA9 |
| 高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 膜处理 | 0.966 | 1.155 | 2.89 | 1.30 |
| | 树脂处理 | 1.130 | 1.228 | 27.13 | 25.40 |
| | 混凝沉淀处理 | 2.669 | | 52.96 | |
| | 总去除 | — | | 82.97 | 79.65 |
| DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | 膜处理 | 1.024 | 1.374 | 1.16 | 0.64 |
| | 树脂处理 | 1.072 | 1.401 | 46.26 | 38.32 |
| | 混凝沉淀处理 | 2.985 | | 27.81 | |
| | 总去除 | — | | 75.23 | 66.76 |
| $\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$ | 膜处理 | 0.009 | 5.05 | 6.06 | 26.09 |
| | 树脂处理 | 0.014 | 50.51 | 41.41 | 64.06 |
| | 混凝沉淀处理 | 0.064 | | 35.35 | |
| | 总去除 | — | | 90.91 | 82.83 |

1) 表中的去除率均表示各工艺对原水中有有机物的去除率

表 5 有无混凝沉淀时组合工艺对太湖原水有机物的去除率(0~10 h)

Table 5 Removal efficiency of integrated process with/without coagulation-sedimentation for organics in TW (0-10 h)

| 项目 | DOC/% | 高锰酸盐指数/% | $\text{UV}_{254}/\%$ |
|---------------|-------|----------|----------------------|
| 树脂 + 微滤膜 | 52.05 | 63.24 | 88.10 |
| 混凝 + 树脂 + 微滤膜 | 66.76 | 79.65 | 82.83 |
| 差值 | 14.71 | 16.42 | -5.27 |

去除率,比较这两种组合工艺对有机物的去除效果.有混凝沉淀时,DOC 和高锰酸盐指数的去除率比没有混凝沉淀时要高 10% 左右,但是对 UV_{254} 的去除率却要低 5%~8% 左右,这可能是因为在沉后水中含有一些细小的絮体,在进行树脂吸附交换时,这些絮体会包裹在树脂表面,从而影响树脂对 UV_{254} 的去除.

2.3.3 有机物相对分子质量分布

从图 9 可以看出,太湖原水相对分子质量分布的 TOC 响应主要有 2 个峰值,一是在 6.0×10^5 左右,其响应范围在 $3.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^5$,为大分子;二是在 2.5×10^3 左右,响应范围在 $1.0 \times 10^4 \sim 2.16$

$\times 10^2$,为中、小分子.相对分子质量分布的 UV_{254} 响应也有 2 个峰值,一是在 5.0×10^4 左右,二是在 4.0×10^3 左右.与三好坞原水相比,太湖原水在大分子区间的响应明显更为强烈,表明太湖原水的大分子有机物含量明显高于三好坞原水.由图 9(a)可知,经混凝沉淀处理后,大分子的 TOC 响应几乎完全消失, 2.5×10^3 左右的也有一定程度的减弱,说明混凝沉淀可有效去除大分子有机物,也去除少量的中等分子有机物,这也解释了为何沉后水的通量得到明显改善.后续的树脂处理发挥了其去除中、小分子有机物的特点, $1.0 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^3$ 的 TOC 响应

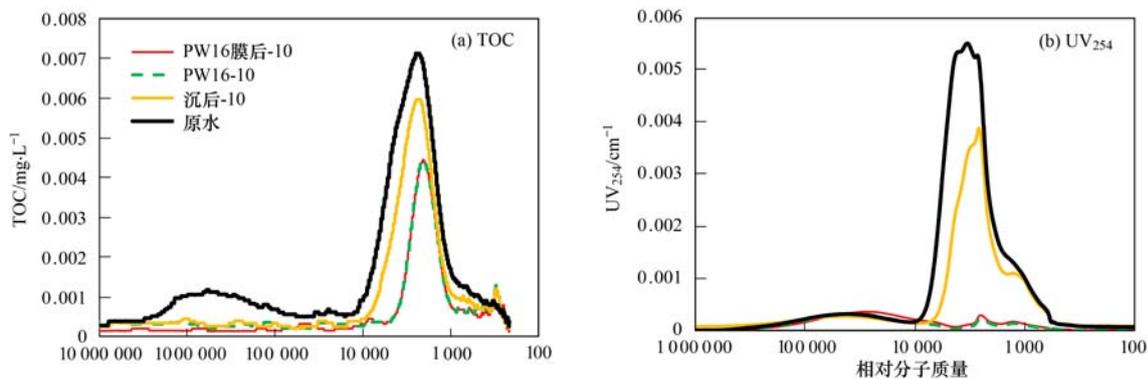


图 9 混凝沉淀和树脂预处理对太湖原水有机物分子量分布变化的影响(0~10 h)

Fig. 9 Effects of coagulation-sedimentation and resin pretreatment on M_r distribution of organics in TW (0-10 h)

几乎完全消失,而 2.5×10^3 左右的得到了进一步的下降. 由图 9(b)可知,对 2.5×10^3 左右的 UV_{254} 类有机物,混凝沉淀仍然表现出较好的去除效果;而树脂的表现更为出色,这部分的 UV_{254} 响应几乎完全消失,说明树脂可非常有效地去除中、小分子的 UV_{254} 类有机物. 令人注意的是,无论是混凝还是树脂,它们对 5.0×10^4 左右的 UV_{254} 类有机物,几乎没有去除效果.

综上所述,混凝主要去除大分子和少量中等分子有机物,而树脂能有效去除中、小分子有机物,特别是中等分子的有机物. 所以混凝预处理后,膜通量下降得到明显改善;虽然树脂对缓解膜污染的效果有限,但它可有效去除中、小分子有机物,从而弥补了混凝的不足. 由此可见,混凝与树脂的联用可发挥它们各自的优势,最大限度地去除有机物.

3 结论

(1) 颗粒状大孔阴树脂去除效果最佳的有机物指标为 UV_{254} , 其次为高锰酸盐指数, 最差的为 DOC; 由于自身特性, 树脂对大分子去除效果有限, 对中、小分子的 UV_{254} 类有机物优先吸附.

(2) 颗粒状大孔阴树脂在连续动态吸附的初期对膜污染有一定程度的缓解效果.

(3) 微滤膜仅去除少量大分子蛋白类物质, 造成膜污染的有机物基本上是一些荧光响应较弱或者没有荧光响应的物质.

(4) “混凝沉淀 + 树脂 + 微滤膜”组合工艺中, 混凝主要去除大分子和少量中等分子的有机物, 可明显缓解膜污染; 树脂能有效去除中、小分子有机物, 对膜污染的缓解效果有限, 但可有效弥补混凝的不足.

(5) “混凝沉淀 + 树脂 + 微滤膜”组合工艺对原水中的有机物去除效果显著, 其中对高锰酸盐指数的去除率在 75% 以上, 对 DOC 的去除率在 60% 以上, 对 UV_{254} 的去除率在 80% 以上.

参考文献:

[1] 张龙, 吴伟, 李爱民, 等. 吸附法处理水体中溶解性有机物的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 2009, **25**(1): 91-96.
[2] 冯正宇, 陈卫, 范珊珊, 等. 磁性离子交换树脂与超滤膜联

用处理淮河原水[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(15): 4-7.

- [3] 许航, 陈卫, 袁哲, 等. MIEX 树脂预处理改善超滤膜过滤性能的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2010, **39**(6): 924-928.
[4] Huang H O, Cho H H, Schwab K J, *et al.* Effects of magnetic ion exchange pretreatment on low pressure membrane filtration of natural surface water [J]. *Water Research*, 2012, **46**(17): 5483-5490.
[5] Cai Z X, Benjamin M M. NOM fractionation and fouling of low-pressure membranes in microgranular adsorptive filtration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(20): 8935-8940.
[6] Humbert H, Gallard H, Jacquemet V, *et al.* Combination of coagulation and ion exchange for the reduction of UF fouling properties of a high DOC content surface water [J]. *Water Research*, 2007, **41**(17): 3803-3811.
[7] Cook D, Chow G, Drikas M. Laboratory study of conventional alum treatment versus MIEX treatment for removal of natural organic matter [R]. Canberra Australia; Proceeding of the 19th federal AWA convention, 2001. 1-4.
[8] 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.
[9] 董秉直, 林洁, 张晗. 一种新的有机物分子质量测定以及在膜污染研究中的应用[J]. 给水排水, 2012, **38**(7): 117-122.
[10] 张晗, 董秉直. HPSEC-UV-TOC 联用技术测定有机物相对分子质量分布[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3144-3151.
[11] Jacangelo J G, Aieta E M, Carns K E, *et al.* Assessing hollow-fiber ultrafiltration for particulate removal [J]. *American Water Works Association*, 1989, **81**(11): 68-75.
[12] Bolto B, Dixon D, Eldridge R, *et al.* Cationic polymer and clay or metal oxide combinations for natural organic matter removal [J]. *Water Research*, 2001, **35**(11): 2669-2676.
[13] Bolto B, Dixon D, Eldridge R, *et al.* Removal of natural organic matter by ion exchange [J]. *Water Research*, 2002, **36**(20): 5057-5065.
[14] Aryal R, Lebegue J, Vigneswaran S, *et al.* Identification and characterization of biofilm formed on membrane bio-reactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, **67**(1): 86-94.
[15] 胡孟柳, 林洁, 许光红, 等. 天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 169-176.
[16] 喻瑶, 许光红, 林洁, 等. 太湖原水中膜污染物质的确定与表征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(11): 2067-2074.

CONTENTS

| | |
|---|--|
| Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region | TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623) |
| Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing | XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633) |
| Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011 | LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644) |
| Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region | GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654) |
| Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013 | SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662) |
| Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China | LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671) |
| Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion | LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680) |
| Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical | DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688) |
| Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities | YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694) |
| Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu | MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698) |
| Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal | LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708) |
| Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City | LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718) |
| Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period | PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727) |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers | TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735) |
| Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed | HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742) |
| Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake | LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750) |
| Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland | JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759) |
| Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems | YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766) |
| Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method | XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773) |
| Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration | SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781) |
| Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System | LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788) |
| Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron | YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793) |
| BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light | PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798) |
| Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles | CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804) |
| Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism | ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810) |
| Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China | GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817) |
| Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment | HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824) |
| Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes | ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832) |
| Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater | ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838) |
| Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst | WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843) |
| Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment | YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850) |
| Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor | LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857) |
| Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process | YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866) |
| Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge | CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871) |
| Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L. | XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878) |
| Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene | HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884) |
| Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals | LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891) |
| Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area | CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901) |
| Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe | WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909) |
| Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors | WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915) |
| Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing | WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922) |
| Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs | XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928) |
| Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling | TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933) |
| Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area | ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939) |
| Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge | LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946) |
| Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China | YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955) |
| Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake | ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962) |
| Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice | WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968) |
| Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i> | HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974) |
| Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate | JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981) |
| Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) | YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988) |
| Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process | WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994) |
| Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay | SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002) |
| Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites | ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010) |
| Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review | JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018) |
| A Research Overview of Methanogens | LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

| | | | | |
|---------|--|------------------|----|---|
| 主 管 | 中国科学院 | Superintended | by | Chinese Academy of Sciences |
| 主 办 | 中国科学院生态环境研究中心 | Sponsored | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences |
| 协 办 | (以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院 | Co-Sponsored | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University |
| 主 编 | 欧阳自远 | Editor-in -Chief | | OUYANG Zi-yuan |
| 编 辑 | 《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn | Edited | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717 | Published | by | Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂 | Printed | by | Beijing Bei Lin Printing House |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com | Distributed | by | Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局 | Domestic | | All Local Post Offices in China |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱) | Foreign | | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行