

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法:以上海市为例 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹(1971)

上海夏季PM_{2.5}中有机物的组分特征、空间分布和来源 高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹(1978)

北京南郊区PM_{2.5}中水溶性无机盐季节变化及来源分析 高韩钰, 魏静, 王跃思(1987)

基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋(1994)

广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析 田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光(2000)

基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径 韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬(2010)

区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用 樊守彬, 郭津津, 李雪峰(2015)

典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征 林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林(2023)

多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究 庞树江, 王晓燕, 马文静(2030)

氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源 金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里(2039)

白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价 高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰(2048)

太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏(2056)

长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平(2067)

桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂(2075)

青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性 马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜(2086)

城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋(2095)

溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉(2104)

三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析 赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊(2117)

澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析 望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩(2126)

蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征 苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿(2135)

两种水生植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响 杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢(2145)

于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量 文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承(2154)

岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨(2165)

农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析 李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广州(2174)

不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响 向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影(2184)

真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质 孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓(2195)

石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G 夏文君, 刘锋, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌(2202)

载钼或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制 李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新(2211)

DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验 梁雨, 何江涛, 张思(2219)

污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征 孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东(2230)

低温污水前置强化混凝 刘海龙, 任宇霞, 张忠民(2239)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性 谭玉琚, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文(2249)

生物膜CANON反应器性能的优化:从FBRR到MBBR 付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国(2256)

两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化 高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲(2265)

铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较 王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟(2274)

热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响 代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益(2283)

曝气时间对比亚硝化颗粒污泥形成的影响 李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰(2289)

中国城市污泥中汞含量的时空分布特征 王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔(2296)

夏季太湖草/藻型湖区N₂O生成与迁移特征及其影响因素 郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承(2306)

太湖藻型湖区CH₄、CO₂排放特征及其影响因素分析 贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥(2316)

内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO₂、N₂O特征 李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭(2330)

黄土高原成龄苹果园生态系统CO₂通量特征 杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森(2339)

生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群玲, 汤稼豪(2351)

不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响 李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯(2360)

ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇(2368)

不同排海方式城市尾水微生物扩散规律 郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月(2380)

旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例 吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘(2389)

不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析 朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇(2400)

生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响 阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺(2412)

铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征 房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰(2420)

湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾克宇(2431)

反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制 张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰(2438)

广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价 张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹(2446)

三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响 陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇(2456)

水稻不同生长时期不同组织中抗内生菌的筛选与鉴定 王伯勋, 王学东, 段桂兰(2464)

汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征 李雨琴, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇(2472)

华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价 徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法(2480)

基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM_{2.5}健康效应 宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟(2489)

中国PM_{2.5}污染空间分布的社会经济影响因素分析 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波(2498)

《环境科学》征订启事(2094) 《环境科学》征稿简则(2164) 信息(2183, 2411, 2445)

印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性

谭玉珺^{1,2}, 张泽田^{1,2}, 吴乾元^{1*}, 姚颖³, 胡洪营^{2,4*}, 丘培文³

(1. 清华大学深圳研究生院, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 深圳 518055; 2. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 北京 100084; 3. 佛山市佳利达环保科技股份有限公司, 佛山 528000; 4. 清华-伯克利深圳学院, 环境与新能源技术工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 反渗透 (RO) 脱盐工艺对实现印染废水再生利用具有重要的意义. 膜污堵却制约了 RO 工艺应用. 对广东省某工业园区印染废水 RO 脱盐系统运行性能及膜污堵特性进行了研究. 结果表明, 印染废水生化处理出水经臭氧氧化-砂滤-超滤 (UF) 预处理后, RO 进水 COD 平均浓度为 $12.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浊度 $<1 \text{ NTU}$. RO 系统脱盐率稳定在 98%, RO 产水高锰酸盐指数约为 $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 浊度约为 0.12 NTU . 但 RO 系统运行 3 a 后, 跨膜压差高达 0.6 MPa , 产水量下降至 $120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, 且不能通过化学清洗恢复, 在 RO 膜面沉积了不可逆的污堵物. RO 膜面的有机物占总污堵物干重的 $(53.5 \pm 0.2)\%$, 无机物占 $(46.5 \pm 0.2)\%$, RO 膜面有机污堵与无机污堵贡献相近. Si、Al 与 Ca 是 RO 膜面主要的无机元素. 碱液 (NaOH 溶液) 对沉积在 RO 膜面的 Si 与 Al 及有机物提取效果较好.

关键词: 印染废水; 反渗透工艺; 运行效果; 膜污堵; 膜解剖

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-2249-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201707020

Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater

TAN Yu-jun^{1,2}, ZHANG Ze-tian^{1,2}, WU Qian-yuan^{1*}, YAO Ying³, HU Hong-ying^{2,4*}, QIU Pei-wen³

(1. Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control of Shenzhen, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control (SMARC), School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Foshan Jialida Environmental Protection Technology Co., Ltd., Foshan 528000, China; 4. Shenzhen Environmental Science and New Energy Technology Engineering Laboratory, Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The reverse osmosis (RO) process is of great significance for the desalination and reclamation of dyeing wastewater. However, fouling of RO membranes has been a severe problem and key limiting factor in the widespread application of the RO process. The operating characteristics and fouling characteristics of a RO membrane system for desalination of dyeing wastewater were investigated in an industrial park in Guangdong Province. The results showed that the COD and turbidity of RO influent after ozone oxidation-sand filtration-ultrafiltration (UF) processes were $12.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $<1 \text{ NTU}$, respectively, with a stable desalination rate of the RO system of around 98%. The COD and turbidity of the RO effluent were $0.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and 0.12 NTU , respectively. However, after 3 years of operation, the pressure drop across the membrane reached 0.6 MPa , and the permeate flux decreased to $120 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, which could not be restored to its original flux by chemical cleaning. The organic and inorganic matter occupied $(53.5 \pm 0.2)\%$ and $(46.5 \pm 0.2)\%$ of the deposits on the RO membrane, respectively, suggesting both organic and inorganic fouling were the main problems for the RO membrane. Si, Al, and Ca were major inorganic elements on the RO membrane. Large amounts of Si, Al, and organic matter deposited on the RO membrane were dissolved easily by alkaline (NaOH) solution than acid (HCl) solution.

Key words: dyeing wastewater; RO process; system performance; membrane fouling; membrane autopsy

纺织印染行业是新鲜水消耗与污水排放大户^[1,2]. 2015 年, 我国纺织印染业整体排放的废水量高达 18.4 亿 m^3 , 在重点行业废水排放量中排在第三位^[3], 约 80% 为印染废水. 印染废水水质特点为高色度、高化学需氧量 (COD)、高 pH、高盐度、高硬度与低可生化性等, 其有机污堵负荷大, 是一类难处理的工业废水^[4~7].

反渗透 (RO) 工艺具有脱盐率高, 有机污堵物

去除率高, 膜组件化设计, 自动化程度高, 生产高品质再生水等优势^[1,8], 正逐渐应用于印染废水再生利用领域. 然而, 膜污堵却限制了 RO 膜的应用.

收稿日期: 2017-07-04; 修订日期: 2017-11-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFE0118800); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07205001); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20160125095838752)

作者简介: 谭玉珺 (1991~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水再生利用, E-mail: tanyujun@126.com

* 通信作者, E-mail: wuqianyuan@tsinghua.edu.cn; hyhu@tsinghua.edu.cn

RO 膜污堵分为颗粒物/胶体污堵、无机结垢、有机污堵与生物污堵,膜污堵会造成膜阻力上升,浓差极化加强,能耗增加,产水量下降等一系列问题^[9,10].

膜解剖研究有助于识别膜面关键污堵物质,加深对 RO 膜污堵机理的认知,有效控制膜污堵^[11]. 目前国内外对于 RO 系统运行效果及膜污堵特性的研究集中在海水与苦咸水淡化及市政污水再生利用领域,对印染废水再生利用领域认识有限. RO 膜污堵特性受诸多因素的影响,包括 RO 膜性质与操作条件等,但主要取决于进水水质特性^[12~14]. 印染工业废水再生处理,因进水有机物种类更加复杂、浓度更高,导致 RO 膜污堵更严重^[15]. 因此有必要开展实际印染废水 RO 脱盐工艺运行性能及膜污堵特性的研究,识别 RO 膜关键污堵物质,掌握无机、有机、生物等污堵特征,对优化 RO 预处理工艺、减缓 RO 膜污堵与保障印染废水 RO 脱盐系统稳定运行具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 超滤-反渗透脱盐系统

广东省某工业园区印染废水二级生化处理出水,经臭氧氧化-砂滤过滤预处理后,进入超滤(UF)-RO 脱盐系统,污水处理量为 $30\,000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,工艺流程如图 1 所示. 为保障臭氧接触池中臭氧浓度维持 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,设置了两套臭氧处理单元,分别配备了 5 台产量为 $10\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 4 台产量为 $13\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 的臭氧发生器,水力停留时间为 2 h. 砂滤池填充滤料为粒径 0.45 mm 与 $1\sim 2\text{ mm}$ 的精制

石英砂,填充高度为 0.85 m ,体积为 33 m^3 . 为避免砂滤池生物膜生长及污堵,次氯酸钠(NaClO)溶液作为杀菌剂,连续投加到砂滤进水中,且每 8 h 进行 1 次反清洗,反清洗方式为气洗水.

为保护 UF 膜免受机械性损伤,在 UF 预处理前设置自反洗过滤器,其过滤精度为 $150\text{ }\mu\text{m}$. UF 膜与 RO 膜主要技术参数如表 1 所示. 为减缓 UF 膜污堵,每 15 min 进行 1 次反清洗,每天用 NaClO 溶液强化反清洗 1 次.

为保护 RO 膜免受机械性损伤,在进 RO 膜系统前设置保安过滤器,其过滤精度为 $5\text{ }\mu\text{m}$. 为提高 RO 系统的回收率,RO 系统采用二段式,总体回收率为 70%. 为防止 RO 膜氧化与膜污堵,投加一定量的还原剂、非氧化性杀菌剂与阻垢剂等化学药剂. 每 3 个月在线化学酸碱清洗 RO 膜系统 1 次.

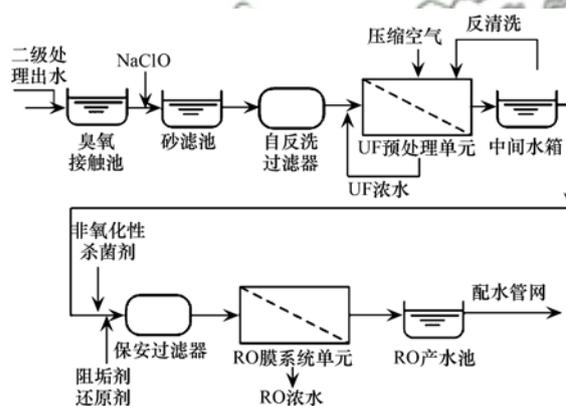


图 1 印染废水生物处理出水 UF-RO 脱盐系统工艺流程

Fig. 1 Schematic diagram of the UF-RO desalination system for biologically treated dyeing wastewater

表 1 UF-RO 脱盐系统膜技术参数

Table 1 Technical parameters of the UF and RO membranes applied in the desalination system

参数	UF	RO
膜材质	聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜	芳香族聚酰胺复合膜
设计膜通量/ $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	25	20.6
回收率/%	90	70

1.2 样品准备

1.2.1 水样采集

在 RO 脱盐系统沿程设置 RO 进水与 RO 产水两个采样点,使用棕色玻璃瓶采集水样 1 L,在冰浴中立即运回实验室. $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜(Millipore, 美国)过滤去除水样中的悬浮颗粒物、细菌等,过滤后的水样保存于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中,在 24 h 内测定水质指标,以减少水质变化. 连续采集 1 年的水样,以减少季节变化对水质的影响.

1.2.2 污堵 RO 膜采集

RO 系统已连续运行 3 a, 选择并采集第一段 RO 膜系统的第一支膜元件,作为 RO 膜污堵特性分析的研究对象. 在采集 RO 膜样品前,确保 RO 膜在上一次化学清洗后已连续运行至少 2 个月,且在 2 个月内没有进行化学清洗. 采集的 RO 膜在湿润条件下,立即运回实验室并进行膜解剖实验.

1.2.3 RO 膜面污堵物溶解提取

为更好地溶解与提取沉积在 RO 膜面的无机与

有机组分, 分别使用氢氧化钠(NaOH)、盐酸(HCl)与超纯水(UPW)这 3 种溶液溶解与提取 RO 膜面污堵物. 平行地剪裁 3 片 10 cm × 10 cm RO 膜, 并分别溶解于 1 L 的 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液、1 mol·L⁻¹ HCl 溶液与 UPW 中^[16]. 为了使得 RO 膜面污堵物更多地溶解提取, 将含 RO 膜片溶液放置于 25℃ 振荡培养箱中, 缓慢振荡 2 h. 用 HCl 或 NaOH 将 RO 膜洗液 pH 调整为 7.0 ± 0.2 后, 分别经 0.45 μm 滤膜(Millipore, 美国)过滤, 丢弃已洗脱的 RO 膜片, 滤液保存在 4℃ 冰箱中.

1.3 灼烧减量法

从特定面积的 RO 膜面刮取沉积物, 先后置于 110℃ 烘箱与 550℃ 马弗炉中至恒重, 称取 550℃ 煅烧后残留物质的重量, 为 RO 膜面无机物含量; 通过差减法计算 550℃ 煅烧过程损失的物质重量, 为 RO 膜面有机物含量^[17].

1.4 RO 膜面细菌计数

使用 75% 乙醇溶液消毒后的载玻片, 从 2 cm × 2 cm RO 膜面刮取沉积物, 溶解于磷酸盐缓冲溶液(PBS)中, 涡旋振荡, 重悬获取细胞悬浮菌液. 利用 R2A 培养基(Sigma-Aldrich, 美国)平板计数方法测定菌液中的异养菌群数^[18].

1.5 分析仪器

溶解性有机碳(DOC)使用 TOC-5000A 分析仪(岛津, 日本)测定. 在 254 nm 处的吸光度(UV₂₅₄)使用 UV-2401PC UV-VIS 紫外可见分光光度计(岛津, 日本)测定. 色度使用昕瑞 SD-9012 色度分析

仪(中国)测定. 无机元素分析由 Varian VISTA-MPX 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES, 美国)、PerkinElmer ELAN DCR-e 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国)与 Metrohm 761 离子色谱仪(IC, 瑞士)测定.

2 结果与讨论

2.1 RO 进水水质分析

浊度能反映水中悬浮物与胶体浓度. 砂滤出水的浊度为 0.74 ~ 2.67 NTU, 有一定的波动性. 经 UF 预处理工艺后, RO 进水浊度 < 1 NTU, 平均值为 0.48 NTU, 如图 2(a)所示. UF 预处理工艺对水中悬浮物质、胶体与细菌真菌等微生物去除效果显著, 满足了 RO 膜系统进水水质要求(浊度 < 1 NTU).

RO 进水中溶解性有机物(DOM)是引发 RO 膜污堵的主要原因之一. RO 进水 COD 浓度为 2.0 ~ 28.8 mg·L⁻¹, 波动性较大, 平均浓度为 12.4 mg·L⁻¹, 如图 2(b)所示. RO 进水 COD 浓度, 虽与市政污水 RO 系统进水 COD 浓度基本维持在 30 mg·L⁻¹ 以下^[16,19]一致, 但有机组分差异大. 染料、助剂和浆料等有机物质, 通过生化处理、臭氧氧化与砂滤等处理工艺难完全降解矿化, 且 UF 膜对其不能有效截留, 成为 RO 进水中主要有机组分, 也是导致印染废水难脱色的主要原因. 二级出水色度平均值为 115 倍, 经臭氧氧化-砂滤-UF 工艺处理后, RO 进水色度降低至 5 ~ 35 倍, 平均值约为 18 倍.

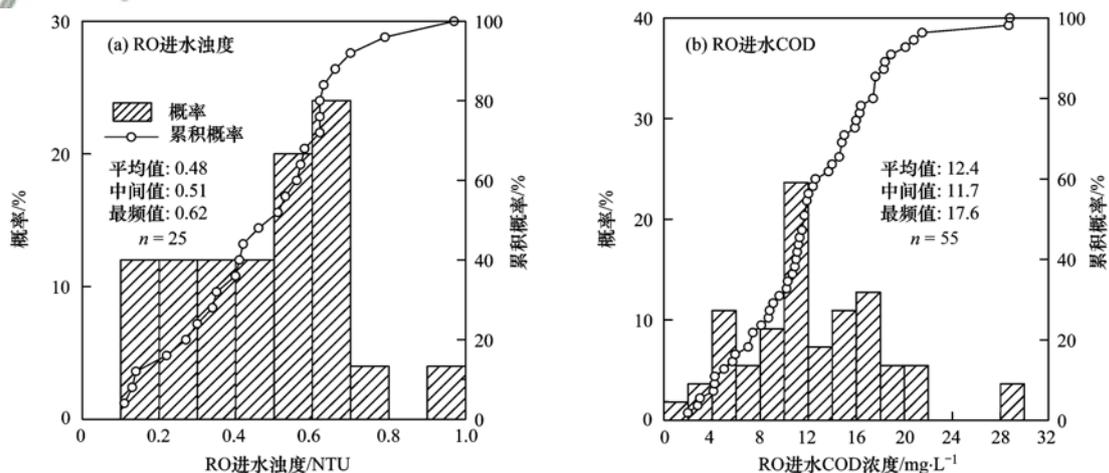


图 2 RO 进水浊度与 COD

Fig. 2 Turbidity and COD concentration for the RO influent

无机盐离子浓度与 RO 膜浓差极化、无机结垢相关. 电导率为水中无机盐离子浓度综合指示指标, RO 进水的电导率为 1 850 ~ 2 800 μS·cm⁻¹.

2.2 RO 工艺运行效果分析

2.2.1 RO 产水水质分析

RO 产水浊度为 0.01 ~ 0.31 NTU [图 3(a)],

有一定的波动性,平均值为 0.12 NTU,约 90% 产水浊度在 0.18 NTU 以下. RO 产水浊度与市政污水

RO 脱盐系统产水浊度较为接近. 市政污水 MF-RO 脱盐系统 RO 产水浊度一般在 0.1 NTU 以下^[20].

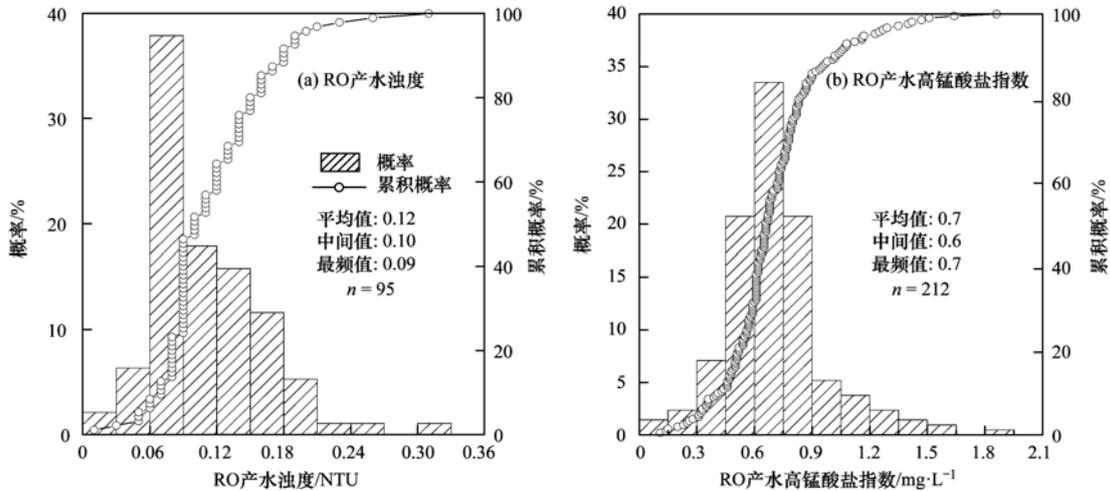


图 3 RO 产水浊度与高锰酸盐指数浓度分布

Fig. 3 Turbidity and COD concentration for the RO effluent

RO 产水高锰酸盐指数在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下[图 3 (b)],平均值为 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,约 90% 的产水高锰酸盐指数 $< 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与市政污水 RO 脱盐系统产水高锰酸盐指数 $< 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19]一致.

印染再生水回用于纺织业生产线生产使用时,硬度是重点控制的指标. 高硬度的再生水,易使纺织产品发生乳胶状沉淀,降低纺织产品的质量. RO 产水硬度为 $0 \sim 17.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 CaCO_3 计),90% 的 RO 产水硬度值 $< 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,控制在较低的硬度水平,满足了纺织业生产线对再生水硬度的要求.

此外,RO 产水色度在 2 倍以下,pH 为 6.5 ~ 7.5,电导率平均值为 $48.7 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,与预氧化-MBR-RO 工艺对印染废水生化出水处理的产水水质类似^[21]. 该 RO 系统对印染废水中污染物去除效果显著,能为用户提供高品质再生水.

2.2.2 RO 工艺运行性能评价

脱盐率、产水量与跨膜压差是常用的评价 RO 工艺运行性能的主要指标. 某时间段内 RO 系统连续操作运行参数变化情况如图 4 所示,在整个运行周期内,系统脱盐率基本维持稳定,约为 98%,表明 RO 膜元件基本完整,未出现破损现象,脱盐率与 RO 膜污堵程度不直接相关,与 Tan 等^[22]的研究结果一致,其发现芬顿氧化-砂滤-UF-RO 系统处理印染废水时,RO 膜污堵严重,但脱盐率未下降,稳定在 98%.

随运行时间的延长,RO 产水量不断下降,跨膜压差逐渐增大,表明 RO 膜污堵日益严重. 35 d

后,跨膜压差已高达 0.6 MPa,超过 RO 膜承受水平,对 RO 膜系统进行化学清洗,清洗后跨膜压差明显下降,下降至 0.3 MPa,而产水量恢复水平有限. 91 d 后,RO 产水量从 $178 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 下降至 $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,下降了 32.6%. RO 系统已连续运行 3 a,在 RO 膜面沉积了大量不可逆的污堵物,化学清洗不能使其有效去除,影响了 RO 产水量的恢复,亟

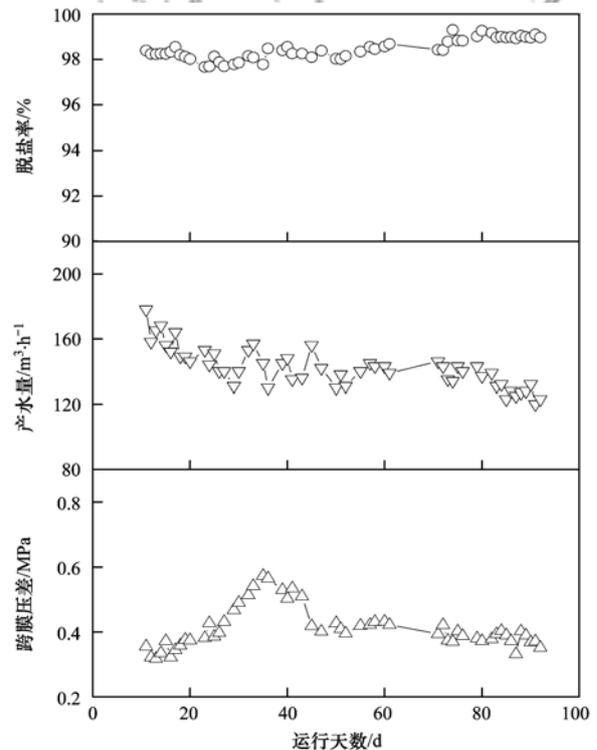


图 4 RO 操作运行参数变化

Fig. 4 Changes in operating parameters for the RO membrane

需对 RO 膜面关键污堵物质进行识别。

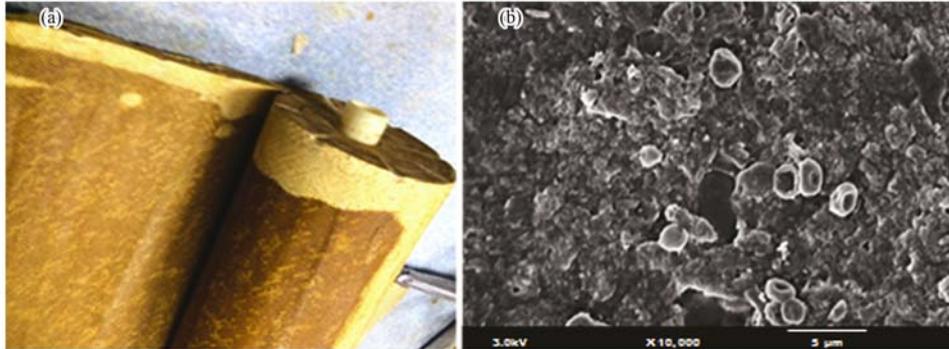
2.3 RO 膜污堵特性分析

2.3.1 RO 膜面污堵形态

已被解剖并展开的 RO 膜表面污堵形态如图 5(a) 所示, RO 膜表面沉积了厚重的黏泥状污堵层, 污堵层为深褐色, 表面潮湿且有滑腻的触感, 散发着强烈的

腥臭味, 表明在 RO 膜面形成了大量的生物黏泥。

利用扫描电镜(SEM)技术观察 RO 膜面微观污堵形态, 如图 5(b) 所示. RO 膜面覆盖着厚重且不规则的黏泥状物质, 类似生物膜, 且存在大量游离的细菌等微生物, 表明 RO 膜生物污堵与有机污堵严重有关。



(a) 已被解剖并展开的 RO 膜; (b) RO 膜面电镜扫描图

图 5 RO 膜面污堵形态

Fig. 5 Surface morphology of the fouled RO membrane

2.3.2 活性生物量

以异养菌平板计数(HPC)表征 RO 膜面活性生物量. RO 膜面 HPC 平均值为 $8.8 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$, 数量级为 $10^5 \sim 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$. Yu 等^[23]报道称市政污水 RO 脱盐系统连续运行 5 a 后, RO 系统第一段中第一支 RO 膜面 HPC 为 $(9.6 \pm 0.5) \times 10^6 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$. Tan 等^[22]发现印染废水在高 COD 条件下进入 RO 中试脱盐系统, 非氧化性杀菌剂使得 RO 膜面 HPC 从 $10^7 \sim 10^8 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下降至 $10^4 \sim 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$. 在本研究中, RO 膜面 HPC 值相对较低, 主要与 RO 进水 COD 浓度较低, 投加非氧化性杀菌剂及定期化学清洗有关. 但 RO 膜面仍存在对非氧化性杀菌剂及化学清洗药剂均有抗药性的细菌, 生物量高于 $10^4 \sim 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{cm}^{-2}$, 也足以形成成熟的生物膜^[24].

2.3.3 有机污堵特征

RO 膜面沉积的有机物量为 $(5.1 \pm 0.3) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 占干重的 $(53.5 \pm 0.2) \%$. RO 膜面有机物除了与进水中有机物相关, 也受膜面微生物影响, 部分沉积于 RO 膜面的有机物来自细菌分泌的产物. 分别使用 NaOH 洗液, HCl 洗液与 UPW 洗液提取 RO 膜面有机组分, 不同 RO 膜洗液中 DOC 与 UV_{254} 值如图 6 所示. NaOH 洗液中 DOC 为 $(2.03 \pm 0.10) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, UV_{254} 为 $(0.48 \pm 0.06) \text{ cm}^{-1}$, 显著高于 HCl 洗液与超纯水(UPW)洗液中 DOC 与 UV_{254} 值. HCl 洗液与 UPW 洗液的 DOC 与 UV_{254} 值均较为接近. 相比于

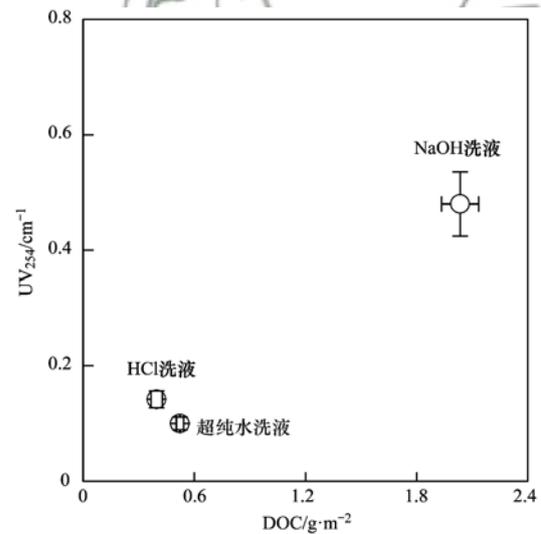


图 6 不同 RO 膜洗液中 DOC 与 UV_{254} 含量

Fig. 6 DOC and UV_{254} contents in the different RO extraction solutions

HCl 和 UPW 溶液, NaOH 溶液会更好地溶解沉积在 RO 膜面的有机组分, 与 Tang 等^[16]的研究结果一致, 其报道了在市政污水脱盐系统中, 碱液清洗污堵的 RO 膜通常比酸洗有效, 膜面有机物更易溶解在碱液中。

比紫外吸光度(SUVA)为 UV_{254} 与 DOC 的比值, 常用以表征多环芳香族有机物含量. NaOH、HCl 与 UPW 这 3 种洗液的 SUVA 平均值分别为 0.24、0.36 与 $0.19 \text{ m}^2 \cdot (\text{g} \cdot \text{cm})^{-1}$. HCl 洗液的 SUVA 值最高, 表明 HCl 溶液从 RO 膜面洗脱下的有机组分

中芳香族有机物含量最高. RO 膜面沉积的芳香族有机物与 RO 进水中含有大量偶氮染料等相关.

2.3.4 无机污堵特征

RO 膜面沉积的无机物量为 $(4.4 \pm 0.3) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 占干重的 $(46.5 \pm 0.2)\%$, 与有机组分比例接近, 表明 RO 膜面有机污堵与无机污堵贡献接近. 使用 NaOH 与 HCl 溶液分别溶解与提取 RO 膜面无机元素, RO 进水和 RO 膜面无机元素量如图 7 所示, Si、Al 与 Ca 是 RO 膜面主要的无机元素, 但同种元素在 NaOH 洗液与 HCl 洗液中浓度差别较大, 尤其 Si 与 Al 元素. 而 Mg、Fe、Zn、Cu 与 Mn 元素在 RO 膜面沉积的浓度不高, 在 NaOH 洗液与 HCl 洗液中浓度接近.

在 NaOH 洗液中, Si、Al 与 Ca 量分别为 (679.6 ± 3.4) 、 (646.9 ± 42.7) 与 $(480.5 \pm 25.2) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, Si 为 RO 膜面最主要的元素. 在 HCl 洗液中, Si 与 Al 量分别降低至 $(153.6 \pm 1.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $(263.4 \pm 4.5) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 大部分 Si 与 Al 未被 HCl 溶液溶解提取. Si、Al 与 Ca 元素在 NaOH 洗液与 HCl 洗液中浓度差距较大, 与其在 RO 膜面存在的形态有关.

Si 在 RO 进水中浓度为 $7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 是 RO 膜最主要无机污堵组分. RO 进水中的 Si 易在膜面沉积, 形成硅垢, 除了以 SiO_2 形式存在, SiO_2 在聚合过程中也与有机物发生共沉淀, 加剧 RO 膜污堵^[25].

Al 在 RO 进水中浓度为 $(3.8 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相比其他研究者的结果, 发现该 RO 进水中 Al 浓度较高. 在印染废水或市政污水脱盐过程中, RO 进水的 Al 浓度一般较低, 甚至 $< 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[16,22,23]. Al 在 RO 膜面的沉积量较高, 与进水中 Al 含量较高有关, 进水中 Al 易在膜面沉积, 一般会以磷酸盐类、硅酸盐类与氢氧化物类结垢形式存在, 但沉积在 RO 膜面的有机物或胞外分泌物 (EPS) 可能会通过架桥与静电吸引力等作用与 Al 发生共沉淀, 加剧 RO 膜污堵^[22,23].

Ca 在 RO 进水与 RO 膜面的含量均较高. Ca 在 RO 膜面主要以碳酸盐类与硫酸盐类等结垢形式存在, 而阻垢剂在一定程度上能抑制其沉淀的发生. 另外, Ca 作为二价阳离子会与有机物发生共沉淀, 影响 RO 膜污堵.

无机元素除了在膜面结垢沉淀, 也会与膜面的有机物通过共沉淀作用以有机络合物形式存在. 建议通过适合的预处理技术进一步降低 RO 进水中有机物浓度, 以降低 RO 膜污堵. 碱液 (NaOH 溶液)

对沉积在 RO 膜面的 Si 与 Al 及有机物提取效果较好, 酸液 (HCl 溶液) 对 Ca 与芳香族有机物提取效果较好, 不同洗液所能提取的污堵物成分不同, 建议 RO 膜污堵后酸碱化学清洗交替进行.

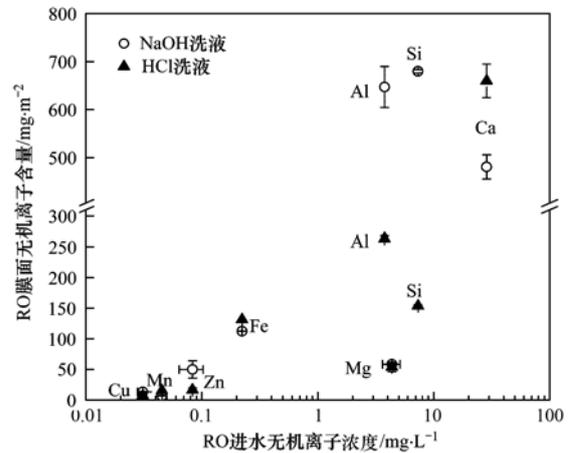


图 7 RO 进水与膜面无机元素浓度

Fig. 7 Concentration of inorganic elements in the RO influent and on the RO membrane

3 结论

经臭氧氧化-砂滤-UF 预处理后, RO 脱盐系统的进水水质整体较好, 进水 COD 平均浓度为 $12.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浊度 $< 1 \text{ NTU}$. RO 系统脱盐率基本维持在 98%, 产水高锰酸盐指数、色度、硬度等指标均满足各行业回用水水质标准, 且产水效果较为稳定. 但在运行 3 a 后, RO 系统膜性能下降, 跨膜压差高达 0.6 MPa, 产水量下降至 $120 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 且产水量不能通过化学清洗有效恢复, 在 RO 膜面沉积了不可逆的污堵物. RO 膜面有机污堵与无机污堵贡献相似, RO 膜面有机物占总污堵物干重的 $(53.5 \pm 0.2)\%$, 无机物占 $(46.5 \pm 0.2)\%$. Si、Al 与 Ca 是 RO 膜面主要的无机元素. 沉积在 RO 膜面的 Si 与 Al 及有机物更易溶解在碱液中, 但 Fe、Mg 等差别不大. RO 膜污堵机理复杂, 需同时控制 RO 膜面有机、无机及生物污堵.

参考文献:

- [1] Dasgupta J, Sikder J, Chakraborty S, *et al.* Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques; a state of the art review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **147**: 55-72.
- [2] An A K, Guo J X, Jeong S, *et al.* High flux and antifouling properties of negatively charged membrane for dyeing wastewater treatment by membrane distillation [J]. *Water Research*, 2016, **103**: 362-371.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 环境统计年报 [R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2015.

- [4] Valh J V, Le Marechal A M, Vajnhandl S, *et al.* 4. 20-Water in the textile industry[J]. *Treatise on Water Science*, 2011, **4**: 685-706.
- [5] 岳秀, 唐嘉丽, 于广平, 等. 双氧水协同生化法强化处理印染废水[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3769-3780.
Yue X, Tang J L, Yu G P, *et al.* Enhanced treatment of printing and dyeing wastewater using H₂O₂-biochemical method [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3769-3780.
- [6] 黄利, 陈文艳, 万玉山, 等. 制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2604-2609.
Huang L, Chen W Y, Wan Y S, *et al.* Comprehensive toxicity evaluation and toxicity identification used in tannery and textile wastewaters[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2604-2609.
- [7] Fan J, Li H B, Shuang C D, *et al.* Dissolved organic matter removal using magnetic anion exchange resin treatment on biological effluent of textile dyeing wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(8): 1567-1574.
- [8] Tang F, Hu H Y, Sun L J, *et al.* Fouling characteristics of reverse osmosis membranes at different positions of a full-scale plant for municipal wastewater reclamation[J]. *Water Research*, 2016, **90**: 329-336.
- [9] Kochkodan V, Johnson D J, Hilal N. Polymeric membranes: surface modification for minimizing (bio) colloidal fouling [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2014, **206**: 116-140.
- [10] Jiang S, Li Y N, Ladewig B P. A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 567-583.
- [11] Darton T, Annunziata U, del Vigo Pisano F, *et al.* Membrane autopsy helps to provide solutions to operational problems[J]. *Desalination*, 2004, **167**: 239-245.
- [12] Khan M T, Busch M, Molina V G, *et al.* How different is the composition of the fouling layer of wastewater reuse and seawater desalination RO membranes? [J]. *Water Research*, 2014, **59**: 271-282.
- [13] 谢文州, 酃和生. 反渗透膜有机污染的研究现状综述[J]. *净水技术*, 2015, **34**(5): 21-25.
Xie W Z, Li H S. Review of research status of organic fouling for reverse osmosis membrane [J]. *Water Purification Technology*, 2015, **34**(5): 21-25.
- [14] Jeong S, Naidu G, Vollprecht R, *et al.* In-depth analyses of organic matters in a full-scale seawater desalination plant and an autopsy of reverse osmosis membrane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2016, **162**: 171-179.
- [15] Yang C, Li L, Shi J L, *et al.* Advanced treatment of textile dyeing secondary effluent using magnetic anion exchange resin and its effect on organic fouling in subsequent RO membrane[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, **284**: 50-57.
- [16] Tang F, Hu H Y, Sun L J, *et al.* Fouling of reverse osmosis membrane for municipal wastewater reclamation: autopsy results from a full-scale plant[J]. *Desalination*, 2014, **349**: 73-79.
- [17] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**(1): 101-110.
- [18] Reasoner D J, Geldreich E E. A new medium for the enumeration and subculture of bacteria from potable water [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, **49**(1): 1-7.
- [19] Tam L S, Tang T W, Lau G N, *et al.* A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems[J]. *Desalination*, 2007, **202**(1-3): 106-113.
- [20] 汤芳, 孙迎雪, 石晔, 等. 污水再生处理微滤-反渗透工艺运行效果分析[J]. *给水排水*, 2012, **38**(6): 38-42.
- [21] 朱兆亮, 崔山, 葛孝新, 等. 预氧化-MBR-反渗透工艺深度处理印染废水研究[J]. *工业水处理*, 2017, **37**(5): 79-82.
Zhu Z L, Cui S, Ge X X, *et al.* Research on the advanced treatment of printing and dyeing wastewater by pre-oxidation-MBR-reverse osmosis process [J]. *Industrial Water Treatment*, 2017, **37**(5): 79-82.
- [22] Tan Y J, Sun L J, Li B T, *et al.* Fouling characteristics and fouling control of reverse osmosis membranes for desalination of dyeing wastewater with high chemical oxygen demand [J]. *Desalination*, 2017, **419**: 1-7.
- [23] Yu T, Meng L, Zhao Q B, *et al.* Effects of chemical cleaning on RO membrane inorganic, organic and microbial foulant removal in a full-scale plant for municipal wastewater reclamation [J]. *Water Research*, 2017, **113**: 1-10.
- [24] 管运涛, 赵婉婉, 蒋展鹏, 等. 给水系统附生物膜发育的生物量和种群结构[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, **47**(6): 818-821.
Guan Y T, Zhao W W, Jiang Z P, *et al.* Biomass and community structure of biofilm development in drinking water distribution systems[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2007, **47**(6): 818-821.
- [25] Kimura K, Okazaki S, Ohashi T, *et al.* Importance of the co-presence of silica and organic matter in membrane fouling for RO filtering MBR effluent[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, **501**: 60-67.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle (PM _{2.5}) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in PM _{2.5} in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM _{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a MnFe ₂ O ₄ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N ₂ O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO ₂ and N ₂ O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO ₂ Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism Between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of PM _{2.5} Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)