

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8  
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM<sub>2.5</sub>污染特征与浓度控制效果 ..... 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 ..... 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>中元素组成特征及重污染成因分析 ..... 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 ..... 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 ..... 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 ..... 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM<sub>2.5</sub>污染的影响 ..... 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM<sub>2.5</sub>排放的影响 ..... 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 ..... 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 ..... 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 ..... 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 ..... 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 ..... 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 ..... 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 ..... 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 ..... 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 ..... 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>化学特征及来源 ..... 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 ..... 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 ..... 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 ..... 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 ..... 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 ..... 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 ..... 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 ..... 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 ..... 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 ..... 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 ..... 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 ..... 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 ..... 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 ..... 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 ..... 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 ..... 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 ..... 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 ..... 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 ..... 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 ..... 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 ..... 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 ..... 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N<sub>2</sub>O产生特征 ..... 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 ..... 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 ..... 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 ..... 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 ..... 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 ..... 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 ..... 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 ..... 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 ..... 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 ..... 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 ..... 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 ..... 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 ..... 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM<sub>2.5</sub>毒性 ..... 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

# 光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制

范科文, 李星\*, 杨艳玲, 周志伟

(北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:** 污水的资源化与回用可作为城市 and 各类建筑的非传统水源, 必须满足相关水质标准, 其中有机物一直是广泛关注的重要指标. 本文采用华北某市大型污水厂的二级出水, 研究了二氧化钛光催化氧化(UV-TiO<sub>2</sub>)和颗粒活性炭(GAC)技术对溶解性有机物的去除特性以及对纳滤(NF)的膜污染控制特性, 构建了UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF组合工艺, 评价了组合工艺的有机物去除效能和膜污染控制作用, 解析了影响NF膜污染程度的有机物种类和相对分子质量分布特征. 结果表明, UV-TiO<sub>2</sub>和GAC技术均可不同程度地缓解NF膜的不可逆污染、降低膜通量衰减速率; UV-TiO<sub>2</sub>/GAC联用的不可逆膜污染程度比单独UV-TiO<sub>2</sub>或GAC技术分别降低了48.7%或61.4%. 类蛋白质和类腐殖质等有机污染物是不可逆膜污染的主要组分; 相对分子质量为小于3×10<sup>3</sup>和30×10<sup>3</sup>~100×10<sup>3</sup>的有机物是造成纳滤膜通量下降的主要因素. UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF组合工艺的COD、DOC和UV<sub>254</sub>去除率为45.7%、74.5%和89.2%, 出水中COD、DOC和UV<sub>254</sub>等有机物指标均得到有效去除. 研究成果为城市 and 各类建筑非传统水源的深度净化与多途径回用提供了技术支持.

**关键词:** 二级出水; 有机污染物; 二氧化钛光催化氧化(UV-TiO<sub>2</sub>); 颗粒活性炭(GAC); 纳滤; 膜污染

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3626-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901186

## Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process

FAN Ke-wen, LI Xing\*, YANG Yan-ling, ZHOU Zhi-wei

(College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** For cities and various types of constructions, the recycling and reuse of wastewater can be an important and unconventional water source. However, water quality must meet relevant standards, especially with respect to organic matter. In this study, secondary effluents from a large sewage plant in a northern city in China were analyzed. The removal efficiencies for soluble organic matter and the characteristics of nanofiltration (NF) membrane fouling of UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis and GAC adsorption were studied, and a combined UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF process was developed. The removal of organic matter and the controlling effect of membrane fouling in the combined UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF process was evaluated. The types and molecular weights of organic matter, which influenced the degree of membrane fouling, were analyzed. The results indicated that both the UV-TiO<sub>2</sub> and GAC techniques can alleviate irreversible NF membrane fouling and reduce the attenuation rate of membrane flux to some extent. Compared to individual UV-TiO<sub>2</sub> or GAC processes, the degree of irreversible membrane fouling in the combined UV-TiO<sub>2</sub>/GAC process was reduced by 48.7% and 61.4%, respectively. Protein-like and humus-like components were dominant in the irreversible membrane fouling, and organic components with relative molecular mass of less than 3×10<sup>3</sup> and between 30×10<sup>3</sup> and 100×10<sup>3</sup> were dominant in causing a decrease in NF membrane flux. Organic content was efficiently removed using UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF combined process, achieving a removal rate for COD, DOC, and UV<sub>254</sub> of 45.7%, 74.5%, and 89.2%, respectively. This study provides technical support for the advanced treatment and multi-path reuse of unconventional water sources for cities and various types of constructions.

**Key words:** secondary effluent; organic matter; titania photocatalysis (UV-TiO<sub>2</sub>); granular active carbon (GAC); nanofiltration; membrane fouling

污水深度处理和资源化利用是城市 and 各类建筑的主要非传统水源, 需要对生活污水二级处理工艺的出水进行深度处理, 以达到排放和回用的相关标准. 已有的深度处理技术包括混凝沉淀过滤、活性炭吸附、膜处理、生物处理和高级氧化等, 但仍然存在一些指标难以满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)标准中地表水Ⅲ类或者一些更严格的地方排放和回用标准的问题<sup>[1~3]</sup>, 其中有机物指标是突出的问题之一. 生活污水二级出水中的有机物包含了生物处理过程中产生的微生物代谢产

物、残留的有机质以及药物、杀虫剂、致癌物等多类污染物<sup>[4]</sup>, 难以采用常规的深度处理技术进行有效去除, 是业界面临的技术与应用难题.

近年来, 膜滤技术得到了快速发展, 已在污水深度处理与回用方面得到广泛研究和应用<sup>[5, 6]</sup>, 但不同类型膜的污染物截留效能有很大差异, 其中微

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-03-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406203)

作者简介: 范科文(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水深度处理与回用, E-mail: fkwforwork@163.com

\* 通信作者, E-mail: lixing@vip.163.com

滤和超滤已广泛应用于膜生物反应器(membrane bioreactor, MBR)工艺中, 纳滤(nanofiltration, NF)常作为 MBR 或超滤等技术的后置单元进一步净化水质<sup>[7, 8]</sup>, 反渗透(reverse osmosis, RO)也是污水深度处理与回用过程的重要技术<sup>[9]</sup>. NF 可以有效截留各种有机物、二价以上无机物及微量污染物等, 可满足我国《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)、《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T 18921-2002)及《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)标准中Ⅲ类水体标准的要求<sup>[10]</sup>, 是最具应用价值的深度处理技术之一<sup>[11]</sup>, 但是 NF 的膜污染控制仍是亟待解决的技术问题<sup>[12]</sup>. 污水厂二级出水中含有腐殖质、蛋白质等有机物, 是造成纳滤膜污染的主要因素<sup>[13]</sup>, 需采用高效的预处理技术来有效缓解纳滤膜污染. 活性炭与 NF 联用可较有效地改善处理效果, 延缓膜通量衰减, 减轻 NF 膜污染<sup>[14~16]</sup>. 近年来, 光催化氧化技术逐步得到广泛应用, 可有效地将污水中的大分子有机物转化为中、小分子有机物, 提高后续处理单元的污染物去除效能<sup>[17]</sup>.

本文分别研究紫外/二氧化钛光催化(UV-TiO<sub>2</sub>)高级氧化和颗粒活性炭(GAC)吸附对污水厂二级出水中的有机物去除特性以及对 NF 膜污染控制特性, 评价 UV-TiO<sub>2</sub>、GAC 及 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用的可行性, 并构建 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF 组合工艺, 考察组合工艺对有机物的去除效能以及纳滤的膜污染控制作用, 以期为该组合工艺在污水深度处理工艺中的应用提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 原水及材料

本试验用水取自华北某市大型污水处理厂的二级出水, 主要有机物参数指标为: COD 20.39 ~ 123.10 mg·L<sup>-1</sup>、DOC 3.504 ~ 7.89 mg·L<sup>-1</sup>、UV<sub>254</sub> 0.161 ~ 0.203 cm<sup>-1</sup>. 本试验用 NF 膜脱盐率 40% ~ 60% (250 ng·L<sup>-1</sup> NaCl)、有效膜面积 0.41 m<sup>2</sup>、适宜 pH 值范围为 3 ~ 10. 采用的 GAC 为煤质炭, 粒径 2 ~ 4 mm、碘吸附值 200 ~ 250 mm·g<sup>-1</sup>、粒度 8 ~ 16 目、比表面积 750 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>.

### 1.2 试验装置及流程

动态试验工艺中的 UV-TiO<sub>2</sub> 单元采用管道式反应器(Wallenius AOT, 瑞典), 材质为二级钛金属, 内壁有 TiO<sub>2</sub> 涂层, 采用 254 nm 波长、18 W 的紫外线灯, 反应时间为 80 s; GAC 单元采用下向流 GAC 滤柱, 滤层厚度 0.5 m、高 600 mm、直径 140 mm, 水力停留时间 3.5 min; NF 单元采用的 NF 膜运行

条件为操作压力 0.4 MPa、浓水流量 5.8 L·min<sup>-1</sup>、回收率 90%.

动态试验流程如图 1 所示. 进行 UV-TiO<sub>2</sub> 单元试验时, 进水从进水箱进入 UV-TiO<sub>2</sub> 反应器, 出水流至 GAC 进水箱. 进行 GAC 单元试验时, 进水从 GAC 进水箱进入 GAC 滤柱, 出水进入 NF 进水箱. 进行 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF 组合工艺试验时, 进水先流经 UV-TiO<sub>2</sub> 反应器后进入 GAC 滤柱, 出水进入 NF 进水箱, 再经过高压泵加压进入 NF 膜柱, NF 产水进入产水箱, NF 浓水回流至 NF 进水箱.

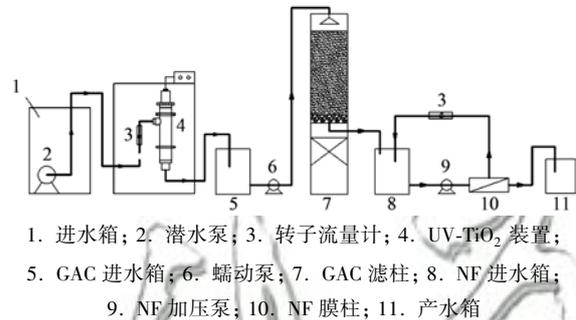


图 1 试验工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental process

### 1.3 分析方法

化学需氧量(COD)采用紫外可见智能型多参数水质测定仪(LH-3BA, 连华, 兰州)测定. 溶解性有机碳(DOC)采用 TOC 分析仪(vario TOC, Elementar, 德国)测定. UV<sub>254</sub>采用紫外可见分光光度计(UV2600, 舜宇恒平, 上海)测定. COD、DOC 和 UV<sub>254</sub>测定前均采用 0.45 μm 微滤膜过滤. 有机物的相对分子质量分布采用串联式超滤膜法确定, 将溶解性有机物(DOM)分为相对分子质量: 小于 3 × 10<sup>3</sup>、3 × 10<sup>3</sup> ~ 10 × 10<sup>3</sup>、10 × 10<sup>3</sup> ~ 30 × 10<sup>3</sup>、30 × 10<sup>3</sup> ~ 100 × 10<sup>3</sup> 和 100 × 10<sup>3</sup> ~ 0.45 μm 这 5 个区间. 三维荧光光谱(EEM)采用荧光光度计(F-7000, HITACHI, 日本)测定. 膜表面污染物形态采用扫描电子显微镜(SEM, SU3500, HITACHI, 日本)进行表征. Zeta 电位采用 Zeta 电位仪(Nano-Z, Malvern, 英国)测定.

NF 比通量测定采用静态平板膜装置, 有效膜面积为 42 cm<sup>2</sup>, 操作压力为 0.4 MPa, 采用死端过滤, 产水量由电子天平记录, 单次试验总过滤水量 400 mL. 膜污染特性分别用可逆膜污染指数、不可逆膜污染指数来表征.

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机物去除效能

图 2 为 UV-TiO<sub>2</sub> 单元、GAC 单元、UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用和组合工艺对二级出水中 COD、DOC 和

UV<sub>254</sub> 的去除效果。可看到, UV-TiO<sub>2</sub> 单元出水 COD 和 DOC 的去除率分别为 1.3% 和 4.7%, 而 UV<sub>254</sub> 的去除率达 22.6%, 说明 UV-TiO<sub>2</sub> 高级氧化对芳香族有机物有更明显的去除效能, 这主要因为高级氧化产生的羟基自由基更易氧化和降解 UV<sub>254</sub> 所代表的芳香族化合物<sup>[18]</sup>, 但是 UV-TiO<sub>2</sub> 单元对污染物的整体去除效果不明显, 这是由于高级氧化更多地是将相对分子质量较大的有机物降解为较小的有机物, 对有机物总体含量影响不大<sup>[19]</sup>。GAC 的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率分别为 38.7%、24.3% 和 39.8%, 与 UV-TiO<sub>2</sub> 单元相比, GAC 单元的有机污染物去除效果明显提高, 这主要是因为 GAC 可以有效吸附各种极性 & 非极性有机物, 中、小相对分子质量的有机物都可得到较有效地去除<sup>[20]</sup>。

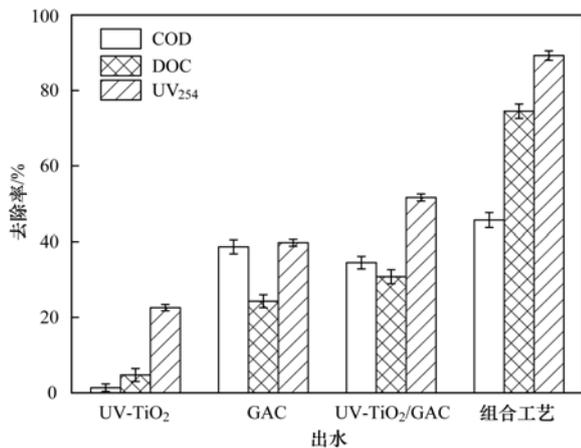


图2 各单元及组合工艺的有机物去除效果

Fig. 2 Removal efficiency of organic matter by the individual and combined processes

UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 的去除率分别为 34.5%、30.8% 和 51.6%, UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用的 COD 去除率比单独 GAC 的降低了 4.2 个百分点, 这可能是因为经 UV-TiO<sub>2</sub> 处理后水中有机物不完全氧化生成了复杂的中间产物<sup>[21]</sup>, 影响了 GAC 的吸附作用。UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用 DOC 和 UV<sub>254</sub>

的去除率比单独 GAC 的分别提高了 6.5 和 11.8 个百分点, 溶解性有机污染物去除效果有明显改善, 这主要是由于 UV-TiO<sub>2</sub> 对 UV<sub>254</sub> 有较好的去除效果, 同时将相对分子质量较大的有机物降解为中、小相对分子质量有机物<sup>[22]</sup>, 使其更易于被 GAC 吸附去除, UV-TiO<sub>2</sub> 与 GAC 联用可以形成优势互补。UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF 组合工艺的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 总去除率达到了 45.7%、74.5% 和 89.2%, 其中 NF 单元的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率也分别达 17.0%、63.2% 和 77.8%, 出水的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 平均值分别为 14.16 mg·L<sup>-1</sup>、1.22 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.02 cm<sup>-1</sup>。

从上述结果中可以看出, UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF 组合工艺可高效去除不同类型的有机物, 其中 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 工艺段的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 的去除率分别占组合工艺总去除率的 75.5%、41.3% 和 57.8%, 显著降低了 NF 单元的负荷; NF 单元又进一步去除了有机物, 充分保证了出水水质满足相应地标限值要求。

## 2.2 膜污染特性

图3 中所示为进水、UV-TiO<sub>2</sub> 出水、GAC 出水和 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水的 NF 膜污染变化特性。从图3(a) 中可看出, NF 膜比通量呈先迅速衰减、后缓慢衰减的变化趋势, 其中膜比通量衰减速率最大的是进水直接纳滤、最小的是进水经 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 后纳滤。进水直接纳滤时, 膜比通量减少了 32.6%, 膜比通量衰减速率高, 膜污染程度严重; 进水经 UV-TiO<sub>2</sub> 后进行纳滤时, 膜比通量减少了 28.5%, 膜比通量衰减速率仅降低了 12.6%; 进水经 GAC 后进行纳滤时, 膜比通量减少了 26.4%, 膜比通量衰减速率降低了 19.0%, 膜污染的缓解作用也不明显; 进水经 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 后进行纳滤时, 膜比通量仅减少了 21.3%, 衰减速率降低得较明显, 比进水直接纳滤的衰减速率降低了 34.7%, 有

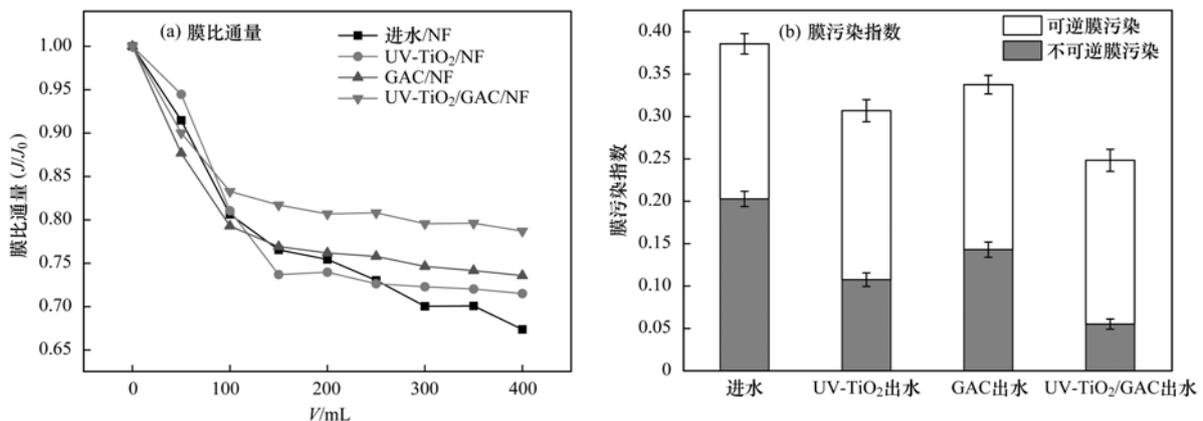


图3 不同单元出水的膜污染特性

Fig. 3 Membrane fouling characteristics of the different effluent components

效地缓解了膜污染, 可见 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用更有效地去除了可造成膜污染的有机污染物。

图 3(b) 为进水、UV-TiO<sub>2</sub> 出水、GAC 出水和 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水的 NF 可逆膜污染与不可逆膜污染特性。经过 UV-TiO<sub>2</sub> 或 GAC 后的可逆膜污染指数没有明显差异, 而不可逆膜污染指数分别降低了 47.0% 和 29.5%, 尽管 UV-TiO<sub>2</sub> 的有机物去除效果不明显, 但可非常显著地缓解不可逆膜污染, GAC 也明显地减轻了纳滤膜的不可逆污染; UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用的不可逆膜污染指数比进水、UV-TiO<sub>2</sub> 和 GAC 分别降低了 72.8%、48.7% 和 61.4%, 可见 UV-TiO<sub>2</sub> 与 GAC 联用更有效地缓解了纳滤膜的不可逆膜污染。

为了更直观了解不同预处理后膜污染情况, 图 4 为 NF 新膜、进水直接纳滤、UV-TiO<sub>2</sub> 出水纳滤、GAC 出水纳滤和 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水纳滤的膜表面 SEM 图。未经预处理的进水直接纳滤时, 膜表面污染物密集且附着了大量团聚状污染物, 膜表面污染程度最为严重。UV-TiO<sub>2</sub> 出水纳滤后, 膜表面污染物依旧密集, 但团聚状污染物基本消失, 并且污染层出现裂纹, 说明此时的污染层较为疏松, 易于通过清洗而去除, 同时也证实了前文中 UV-TiO<sub>2</sub> 可以缓解不可逆膜污染的论述。GAC 出水纳滤后, 膜表面污染物密集程度明显降低, 残留污染物形态主要为尺寸稍大的块状物质, 污染层较为密实, 这说明 GAC 有效吸附了中、小分子量的污染物, 而相对分子质量较大的污染物透过了 GAC 滤柱后附着在 NF 膜上。UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水纳滤的膜表面污染物密集程度较前 3 种更低, 并且污染物尺寸分布较为均匀, 粗糙程度低, 因此也具有更高的抗污染能力<sup>[23]</sup>, 同时污染层质地疏松, 易于清洗去除, 降低不可逆膜污染。

## 2.3 膜污染物的特性

### 2.3.1 有机物种类

进水和组合工艺各单元出水的荧光特性如图 5 所示。可以看到, 进水主要为类腐殖质和类色氨酸<sup>[24]</sup>; UV-TiO<sub>2</sub> 出水的荧光特征峰分布情况与进水类似, 但峰值明显降低, 类腐殖质(A 峰)和类色氨酸(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 峰)的去除率分别为 43.7% 和 50.3% 及 43.6%, 说明 UV-TiO<sub>2</sub> 对类蛋白质及类腐殖质均有良好地降解效果, 虽然 UV-TiO<sub>2</sub> 出水的膜比通量与进水的相比没有明显改善[图 3(a)], 但膜污染指数明显下降, 同时不可逆膜污染得到了缓解[图 3(b)], 说明类蛋白质及类腐殖质是不可逆膜污染的主要组分。

UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 出水的类腐殖质(A 峰)和类色

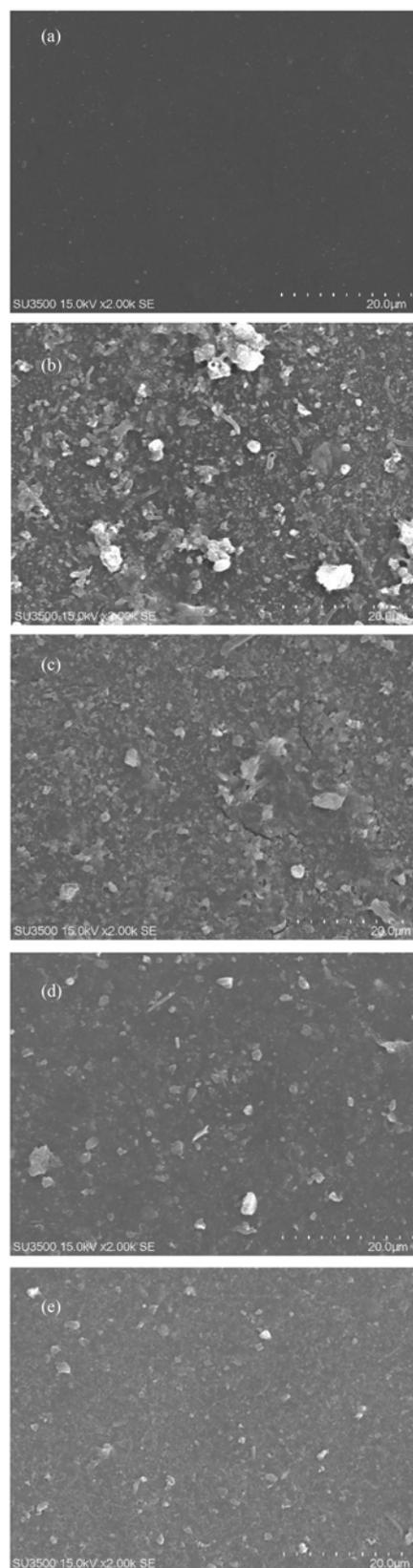
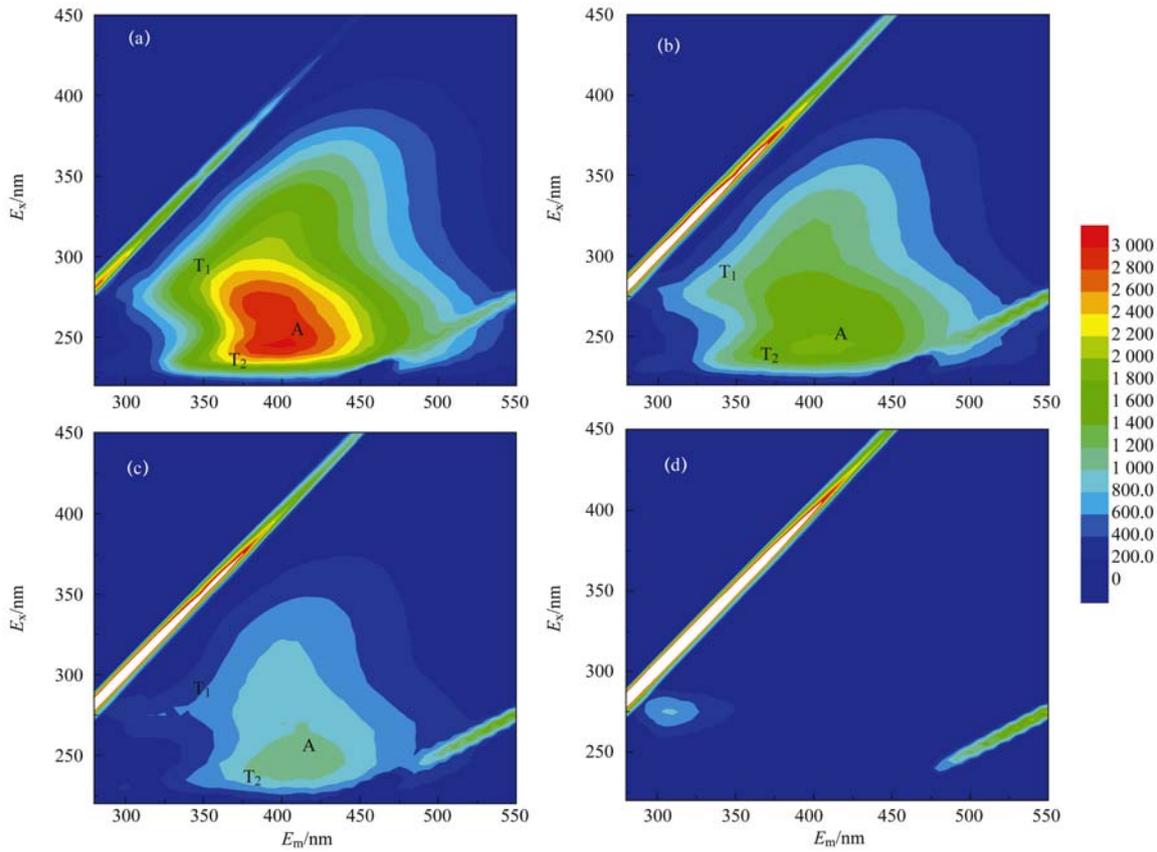


图 4 不同单元出水的膜污染表面 SEM 图  
Fig. 4 SEM images of membrane fouling by different effluent components

图 4 不同单元出水的膜污染表面 SEM 图

Fig. 4 SEM images of membrane fouling by different effluent components

氨酸(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 峰)的去除率分别达 67.8% 和 77.4% 及 69.2%, 表明类腐殖质和类蛋白质被更有效地去



(a) 进水; (b) UV-TiO<sub>2</sub> 出水; (c) UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 出水; (d) NF 出水

图 5 有机物荧光特性

Fig. 5 Fluorescence characteristics of the organic matter

除. 蛋白质等有机物易在膜表面截留和附着, 可造成膜通量衰减<sup>[13]</sup>, 腐殖质也是膜污染的主要因素<sup>[25]</sup>, UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 可有效去除类腐殖质和类色氨酸蛋白质, 显著减少了纳滤膜的不可逆膜污染程度.

从图 5(d) 中可看到, NF 出水的类腐殖质(A 峰)和类色氨酸(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 峰)的峰值基本消失, 组合工艺的去除率分别达 94.9% 和 81.5% 及 93.4%, 高效地截留了类腐殖质、类蛋白质等有机物. 经组合工艺处理后, 进水、UV-TiO<sub>2</sub> 出水、UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 出水和 NF 出水的 Zeta 电位分别为 -12.0、-10.45、-10.35 和 -2.53 mV, 预处理段对 Zeta 电位的降低效果并不明显, 而经 NF 处理的出水 Zeta 电位显著降低, 这是由于 NF 膜表面带有负电荷, 具有 Donnan 效应<sup>[26]</sup>, 通过电荷排斥作用将水中同样带负电的腐殖质和蛋白质截留, 使出水的 Zeta 电位显著下降, 进一步保障了出水水质.

### 2.3.2 有机物分子量

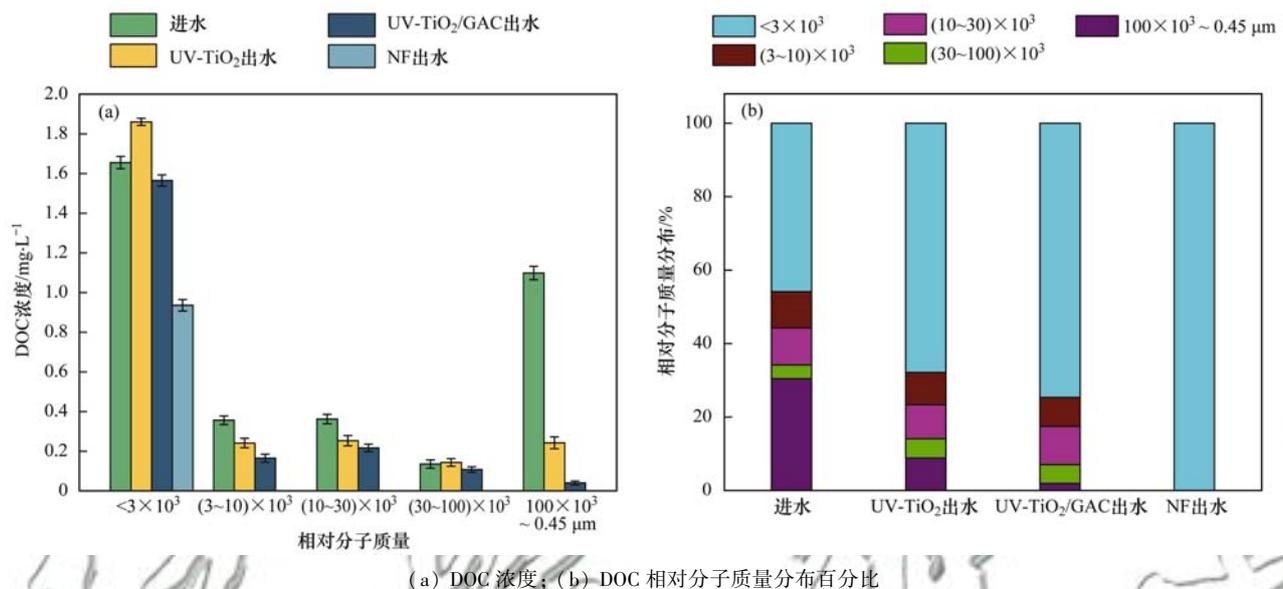
图 6 所示为组合工艺的进水及各单元出水的 DOC 相对分子量分布特征. 进水中小于  $3 \times 10^3$  和  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 分别为  $1.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 分别占进水中总 DOC 的 45.9% 和

30.4%, 是二级出水中溶解性有机物的主要组分. UV-TiO<sub>2</sub> 单元出水中  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 去除率为 77.9%, DOC 百分比由进水的 30.4% 降低到 8.8%, 小于  $3 \times 10^3$  的 DOC 百分比由 45.9% 升高到 67.9%,  $3 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC 百分比为 23.7%, 与进水的 23.3% 相比没有明显变化, 说明 UV-TiO<sub>2</sub> 单元将大分子量的 DOC 降解为小分子量的 DOC, 改变了有机物分子量的分布特性, 但有机物整体去除效果不明显(见图 2), 膜通量衰减的控制作用有限[见图 3(a)]. UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水中小于  $3 \times 10^3$ 、 $3 \times 10^3 \sim 10 \times 10^3$ 、 $10 \times 10^3 \sim 30 \times 10^3$ 、 $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  和  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 去除率分别为 15.9%、31.5%、14.2%、24.8% 和 83.5%, 小于  $3 \times 10^3$  的 DOC 百分比由 67.9% 增加到 74.7%,  $3 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC 百分比为 23.4%, 与 UV-TiO<sub>2</sub> 单元出水的 23.3% 比没有明显变化,  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 百分比由 8.9% 降低到 1.9%, 说明 GAC 单元对 UV-TiO<sub>2</sub> 单元出水中各分子量的 DOC 均有一定的去除作用, 其中对  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 去除效果显著. NF 出水中仅含有小于  $3 \times 10^3$  的 DOC, 说明大于  $3 \times 10^3$  的 DOC 全部被 NF 去除, 小于  $3 \times$

$10^3$  的 DOC 去除率为 40.2%, NF 进一步去除了 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 工艺段出水中小于  $3 \times 10^3$  的 DOC。

对比图 6 中进水、UV-TiO<sub>2</sub> 出水、UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用出水和 NF 出水的 DOC 相对分子质量分布特点, 结合图 5(a) 膜比通量衰减规律可以发现, UV-TiO<sub>2</sub> 主要降解了  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC, 对  $3 \times 10^3 \sim 30 \times 10^3$  的 DOC 也有一定的去除效果,

但对纳滤膜比通量衰减的缓解作用并不明显; 与 UV-TiO<sub>2</sub> 相比, UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 在去除  $3 \times 10^3 \sim 30 \times 10^3$  和  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC 的同时, 对小于  $3 \times 10^3$  和  $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC 也具有明显的去除效果, 并且膜通量衰减速率明显降低, 这说明小于  $3 \times 10^3$  和  $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC 是造成纳滤膜通量降低的主要因素。



(a) DOC 浓度; (b) DOC 相对分子质量分布百分比

图 6 进水及各单元出水有机物相对分子质量分布

Fig. 6 Molecular weight distribution of organic matter in the influent and effluent of each process unit

### 3 结论

(1) 依据 UV-TiO<sub>2</sub>、GAC 和 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用对有机物的去除特性, 构建了 UV-TiO<sub>2</sub>/GAC/NF 组合工艺, 可显著提高污水厂二级出水的有机物去除效能, 有效控制 NF 的膜污染程度; 其中 UV-TiO<sub>2</sub> 单元有机物去除效果不明显, GAC 单元有机物去除效果较佳, UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用的有机物去除效果得到进一步改善, COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率分别为 34.5%、30.8% 和 51.6%, 组合工艺的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 去除率分别达 45.7%、74.5% 和 89.2%, 出水的 COD、DOC 和 UV<sub>254</sub> 分别达 14.16 mg·L<sup>-1</sup>、1.22 mg·L<sup>-1</sup> 和 0.02 cm<sup>-1</sup>, 有效地控制了有机物浓度。

(2) UV-TiO<sub>2</sub> 和 GAC 可使膜比通量衰减速率分别降低 12.6% 和 19.0%, 其中不可逆膜污染指数分别减少了 47.0% 和 29.5%; UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 联用可使膜比通量衰减速率降低 34.7%, 不可逆膜污染指数比 UV-TiO<sub>2</sub> 和 GAC 分别减少了 48.7% 和 61.4%, 显著控制了纳滤膜的不可逆膜污染。

(3) 城市污水厂二级出水中类腐殖质和类色氨酸是造成纳滤膜不可逆膜污染的主要组分, 相对分

子质量小于  $3 \times 10^3$  和  $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC 是造成膜通量下降的主要因素; UV-TiO<sub>2</sub> 单元可更有效地降解  $100 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC, GAC 单元更有效地去除了小于  $3 \times 10^3$  和  $30 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$  的 DOC; UV-TiO<sub>2</sub>/GAC 工艺段对类腐殖质和类色氨酸的去除效果显著, 同时有效去除了相对分子质量小于  $3 \times 10^3$  和  $3 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$  的 DOC, 有效控制了纳滤的膜污染。

### 参考文献:

- [1] 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 等. 污水厂二级出水中难凝聚有机物的臭氧化特性[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 844-851.  
Hou R, Jin X, Jin P K, et al. Ozonation characteristics of low coagulability organic matter from the secondary effluent of WWTPs[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 844-851.
- [2] 徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 等. 以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1353-1359.  
Xu T, Li Y, Zhu Y J, et al. Assessing performance of pollutant removal from municipal wastewater by physical and chemical methods based on membranes [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1353-1359.
- [3] 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 等. 臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 640-646.  
Hou R, Jin X, Jin P K, et al. Characteristics and mechanism of hybrid ozonation-coagulation process in wastewater reclamation [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 640-646.
- [4] Jin P K, Jin X, Bjerkelund V A, et al. A study on the reactivity

- characteristics of dissolved effluent organic matter (EfOM) from municipal wastewater treatment plant during ozonation[J]. *Water Research*, 2016, **88**: 643-652.
- [ 5 ] Gong H, Jin Z Y, Wang X, *et al.* Membrane fouling controlled by coagulation/adsorption during direct sewage membrane filtration (DSMF) for organic matter concentration[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **32**: 1-7.
- [ 6 ] 魏源送, 王健行, 岳增刚, 等. 纳滤膜技术在废水深度处理中的膜污染及控制研究进展[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 1-10.  
Wei Y S, Wang J X, Yue Z G, *et al.* Fouling and control of nanofiltration membrane in the advanced treatment of wastewater: an overview[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 1-10.
- [ 7 ] Sert G, Bunani S, Kabay N, *et al.* Investigation of mini pilot scale MBR-NF and MBR-RO integrated systems performance—Preliminary field tests[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2016, **12**: 72-77.
- [ 8 ] 宁若, 张永丽, 张建, 等. 超滤-纳滤双膜工艺处理城市污水厂出水[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, **45**(S2): 108-111.  
Wang N R, Zhang Y L, Zhang J, *et al.* Study on UF-NF for municipal wastewater advanced treatment[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, **45**(S2): 108-111.
- [ 9 ] Shanmuganathan S, Vigneswaran S, Nguyen T V, *et al.* Use of nanofiltration and reverse osmosis in reclaiming micro-filtered biologically treated sewage effluent for irrigation [J]. *Desalination*, 2015, **364**: 119-125.
- [ 10 ] Li K, Wang J X, Liu J B, *et al.* Advanced treatment of municipal wastewater by nanofiltration; operational optimization and membrane fouling analysis [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **43**: 106-117.
- [ 11 ] Mohammad A W, Teow Y H, Ang W L, *et al.* Nanofiltration membranes review; recent advances and future prospects [J]. *Desalination*, 2015, **356**: 226-254.
- [ 12 ] 李昆, 王健行, 魏源送. 纳滤在水处理与回用中的应用现状与展望[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2714-2729.  
Li K, Wang J X, Wei Y S. Application of nanofiltration in water treatment and water reclamation; Current status and future aspects [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2714-2729.
- [ 13 ] Tang C Y, Chong T H, Fane A G. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: a review. [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2011, **164**(1-2): 126-143.
- [ 14 ] Kappel C, Kemperman A J B, Temmink H, *et al.* Impacts of NF concentrate recirculation on membrane performance in an integrated MBR and NF membrane process for wastewater treatment[J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, **453**: 359-368.
- [ 15 ] 张泉, 郭曦, 董文艺, 等. 预处理方式对纳滤工艺性能及膜污染影响研究[J]. *膜科学与技术*, 2014, **34**(1): 82-86, 90.  
Zhang Q, Guo X, Dong W Y, *et al.* Comparison of pretreatments on nanofiltration performance and membrane fouling [J]. *Membrane Science and Technology*, 2014, **34**(1): 82-86, 90.
- [ 16 ] Shanmuganathan S, Johir M A H, Nguyen T V, *et al.* Experimental evaluation of microfiltration - granular activated carbon (MF-GAC)/nano filter hybrid system in high quality water reuse[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, **476**: 1-9.
- [ 17 ] 王旭东, 唐婧, 王磊, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化-超滤法处理模拟二级出水[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(4): 1615-1620.  
Wang X D, Tang J, Wang L, *et al.* Treatment of simulated secondary effluent with a method of nano-TiO<sub>2</sub> photocatalysis and ultrafiltration membrane [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(4): 1615-1620.
- [ 18 ] 李一飞, 王旭东, 吴珂琦, 等. TiO<sub>2</sub> 光催化预氧化对城市二级出水中溶解性有机物性状影响[J]. *水处理技术*, 2016, **42**(11): 83-88.  
Li Y F, Wang X D, Wu K Q, *et al.* Effect of TiO<sub>2</sub> photocatalytic pre oxidation on the dissolved organic matters characters in the secondary effluent of municipal wastewater [J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, **42**(11): 83-88.
- [ 19 ] Li L S, Zhang P Y, Zhu W P, *et al.* Comparison of O<sub>3</sub>-BAC, UV/O<sub>3</sub>-BAC and TiO<sub>2</sub>/UV/O<sub>3</sub>-BAC processes for removing organic pollutants in secondary effluents [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2005, **171**(2): 145-151.
- [ 20 ] Schreiber B, Brinkmann T, Schmalz V, *et al.* Adsorption of dissolved organic matter onto activated carbon—the influence of temperature, absorption wavelength, and molecular size [J]. *Water Research*, 2005, **39**(15): 3449-3456.
- [ 21 ] Alvarez-Corena J R, Bergendahl J A, Hart F L. Advanced oxidation of five contaminants in water by UV/TiO<sub>2</sub>: reaction kinetics and byproducts identification [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **181**: 544-551.
- [ 22 ] 贾陈忠, 王焰新, 张彩香. 光催化氧化处理过程中渗滤液溶解性有机物组分的三维荧光光谱变化特征[J]. *分析化学*, 2012, **40**(11): 1740-1746.  
Jia C Z, Wang Y X, Zhang C X. Variation characteristics of 3D-excitation emission matrix fluorescence spectra of dissolved organic matter from landfill leachate during photocatalytic degradation [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2012, **40**(11): 1740-1746.
- [ 23 ] 陈健华, 黄霞. 纳滤膜过滤 MBR 出水的污染原因与清洗方法[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2481-2487.  
Chen J H, Huang X. Fouling reasons and cleaning methods of nanofiltration membrane filtrated with the effluent of membrane bioreactor [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(9): 2481-2487.
- [ 24 ] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [ 25 ] 张立卿, 王磊, 王旭东, 等. 城市污水二级出水有机物分子量分布和亲疏水特性对纳滤膜污染的影响[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 75-80.  
Zhang L Q, Wang L, Wang X D, *et al.* Effect of molecular weight distribution and hydrophobicity of wastewater effluent organic matter (EfOM) on nanofiltration membrane fouling [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(1): 75-80.
- [ 26 ] Bowen W R, Mohammad A W, Hilal N. Characterisation of nanofiltration membranes for predictive purposes—use of salts, uncharged solutes and atomic force microscopy [J]. *Journal of Membrane Science*, 1997, **126**(1): 91-105.

## CONTENTS

Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3397)
Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i>	(3405)
Elemental Composition Characteristics of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian	(3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i>	(3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM <sub>2.5</sub> Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei	(3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM <sub>2.5</sub> from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i>	(3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i>	(3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao	(3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i>	(3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i>	(3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i>	(3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i>	(3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i>	(3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i>	(3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian	(3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i>	(3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i>	(3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i>	(3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i>	(3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i>	(3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i>	(3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i>	(3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i>	(3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i>	(3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua	(3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i>	(3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i>	(3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i>	(3722)
Nitrification, Denitrification, and N <sub>2</sub> O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i>	(3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan	(3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i>	(3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i>	(3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i>	(3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i>	(3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo	(3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i>	(3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i>	(3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan	(3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i>	(3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i>	(3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(3833)
Toxicity of PM <sub>2.5</sub> Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i>	(3840)