

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硫酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

某微污染水源自来水管的纳滤深度处理效果研究

吴玉超¹, 陈吕军^{1,2*}, 兰亚琼², 刘锐^{2*}

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006)

摘要: 采用一级四段纳滤组合工艺处理南方某微污染水源自来水管的传统净水工艺段出水, 考察了纳滤膜工艺对出水水质的提升效果. 结果表明, 纳滤对常规水质指标与微量有机物有较好的去除效果, 对混凝沉淀池出水中 TOC 和 UV₂₅₄ 的去除率在 95% 以上 (出水 TOC ≤ 0.3 mg·L⁻¹, UV₂₅₄ ≤ 0.005 cm⁻¹); 对卤乙酸、三卤甲烷前体物、多环芳烃和有机氯农药的截留率分别在 62%、85%、50% 和 95% 左右, 使用 Umu-SOS 测试的出水遗传毒性低于检出限, 不同段纳滤膜对相对分子质量较大的消毒副产物前体物与有机氯农药的去除率未呈现明显差异, 但对相对分子质量较小的多环芳烃去除效果呈现明显差异, 表明纳滤主要依靠物理截留去除水中相对分子质量较大的有机物, 对相对分子质量较小的有机物则存在较大的局限性. 与之相比, 水厂目前使用的双级臭氧-生物活性炭深度处理工艺对传统净水工艺出水中多环芳烃、有机氯农药、遗传毒性的去除截留率分别仅为 17%、62%、80% 左右, 显示纳滤对微量有机物的去除效果更为理想.

关键词: 纳滤; 臭氧-生物活性炭; 多环芳烃; 有机氯农药; 遗传毒性

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3466-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.09.027

Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource

WU Yu-chao¹, CHEN Lü-jun^{1,2*}, LAN Ya-qiong², LIU Rui^{2*}

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Four nanofiltration membranes connected in series were used for improving the drinking water quality in a water supply plant in south China with micropolluted water resource. The performance of the nanofiltration for improving the drinking water quality was investigated. The results showed that nanofiltration was efficient for removal of both traditional water pollution indicators and organic toxicants. More than 95% of TOC and UV₂₅₄ were removed from the effluent of the traditional water purification process in the water supply plant. The NF effluent had a TOC of no higher than 0.3 mg·L⁻¹ and a UV₂₅₄ of below 0.005 cm⁻¹. The removal rates of haloacetic formation potential, trihalomethanes formation potential, polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) and organochlorinated pesticides (OCPs) were 62%, 85%, 50% and 95%, respectively. Genotoxicity of the NF effluent was undetectable in the umu-SOS test. Moreover, no significant difference was observed in the organic pollutants removal of haloacetic formation potential, trihalomethanes formation potential and OCPs among the four NF membranes but in the removal of PAHs with relatively smaller molecular weight. Nanofiltration showed higher removal rate of high-molecular-weight organic matters over low-molecular-weight organic matters. By comparison, only 17% of PAHs, 62% of OCPs and 80% of genotoxicity were removed by advanced treatment of ozone (O₃) followed by treatment with biological activated carbon (BAC) in this water plant, indicating that nanofiltration was better for removal of organic pollutants.

Key words: nanofiltration; ozone-biological activated carbon; PAHs; OCPs; genotoxicity

近年来,随着我国经济的发展、城市化进程的加速以及各类化学品的数量与种类增加,我国部分地区的生活水源已受到不同程度的污染,水源中含有的有机污染物导致“三致物”(致畸、致癌、致突变)的潜在威胁加大,水源水微污染问题日益严重,饮用水安全问题日益突出,解决我国饮用水的净化问题迫在眉睫^[1,2]. 目前的常规处理工艺(混凝-沉淀-过滤-消毒)不能有效去除微污染水源水中的有机物污染物,对高锰酸盐指数、UV₂₅₄和微量有机物去除效果不好,氯消毒后副产物浓度较高,因此近年

来南方部分水厂在常规的混凝沉淀-砂滤工艺之后,增加了双级臭氧-生物活性炭深度处理工艺,从而使处理出水中氯消毒副产物和各种有机微污染物的含量得到较大幅度的削减^[3~5]. 然而,随着生活水平不断提高,居民对优质供水的需求增加,如何获得更高质量的饮用水显得尤为重要.

收稿日期: 2016-02-26; 修订日期: 2016-04-19

基金项目: 嘉兴市科技计划项目(SQ2016000457)

作者简介: 吴玉超(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为饮用水安全保障技术, E-mail: wuyuchao52139@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: chenlj@tsinghua.edu.cn; liuruitsinghuazj@gmail.com

纳滤(nanofiltration)作为一种新型的膜技术,其孔径范围介于反渗透膜与超滤膜之间,适合分离相对分子质量在 300~500 之间的有机小分子物质,在去除大部分有机物的同时,还能选择性截留无机离子,同时还具有能耗低、操作简便等特性^[6,7]. 法国巴黎的梅里奥塞水厂是世界上第一个大型的纳滤饮用水深度处理厂,该厂的纳滤工艺对 TOC 的平均去除率高达 60%,对农药的去除率大于 90%,出水中残留的绝大多数微污染物质低于检出限^[8]. 陈欢林等^[9]研究了超滤、纳滤及反渗透膜集成工艺对钱塘江潮汐水源的处理效果,结果表明长期运行条件下,系统的出水水质稳定,各项指标均满足国家饮用水卫生标准. 杨忠盛等^[10]研究了台湾金门县超滤及纳滤组合系统对水中有机物的去除效果,发现纳滤对 TOC 与消毒副产物生成势的去除率在 90% 以上,出水各项检测指标均符合台湾地区的饮用水标准,且出水口感有明显改善. 由于纳滤对微量有机物与重金属的高效去除作用,其在优质饮用水的生产中显示出越来越明显的优势,随着膜组件成本的下降,更展示出广阔的应用前景^[11].

本研究采用纳滤工艺处理南方某水厂的传统工艺段出水. 该水厂以河网水为水源,水质较差,原水中高锰酸盐指数与 UV₂₅₄ 较高,经氯消毒后消毒副产物生成浓度高^[12]. 本研究搭建了一套一级四段的纳滤装置,以该厂混凝沉淀池出水为进水,分析了纳滤深度处理对水中各种有机污染指标的去除效果,考察了不同段纳滤出水水质的区别,并与现有的臭氧-生物活性炭深度处理工艺进行了比较,探讨了纳滤进一步提升该水厂出水水质的可能性,以期为该水厂今后的升级改造提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验对象自来水厂在当地河网取水,净水工艺流程为生物预处理→常规处理→双级臭氧-生物活性炭深度处理,处理规模为 5 万 m³·d⁻¹. 生物预处理采用了悬浮填料生物接触氧化池,该池分为并列的两组,其中每组分 3 个串联的接触氧化区,总设计停留时间为 1 h,填料的填充率为 50%. 常规处理采用了机械混合搅拌絮凝-平流沉淀池-V 型砂滤池工艺,絮凝时间 15 min,水力停留时间 1.5 h,滤池的滤速为 8.3 m·h⁻¹. 双级臭氧-生物活性炭深度处理(O₃-BAC)的每级臭氧接触池有效水深为 6 m,停留时间为 12 min,臭氧最大投加总量为 5

mg·L⁻¹. 炭滤池的池深 5.5 m,有效炭层厚度为 2 m,接触时间 12 min,流速为 10 m·h⁻¹.

自来水厂进水水质情况见表 1.

表 1 水厂原水水质(2015 年 1~11 月)

项目	范围	平均值
pH	7.6~7.8	7.65
温度/°C	15~25	18
浊度/NTU	20~55	35
TDS/mg·L ⁻¹	350~430	380
TOC/mg·L ⁻¹	3.6~5.7	4.1
UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	0.065~0.110	0.084
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	4.5~5.5	4.8
氨氮/mg·L ⁻¹	0.2~0.5	0.45

1.2 纳滤设备与纳滤膜

纳滤设备照片和流程分别见图 1 和图 2. 以常规工艺段混凝沉淀池出水作为进水,前端采用海南立昇公司提供的 LH3-8DD 超滤净水器作为前置保安过滤器,截留进水中较大颗粒物质;此后采用四段纳滤膜并联运行以提高纳滤工艺产水率(产水率 ≥75%),纳滤膜元件由美国陶氏公司提供,第一段膜为 NF270-400,后三段膜为 NF90-400,皆为聚酰胺复合膜,孔径为 1~2 nm,单膜有效面积皆为 37 m²,对氯化钠的截留率分别为 75%~95% 和 30%~50%. 依照文献[13],设计纳滤进水压力 0.30 MPa,产水量 180 L·h⁻¹,产水率 75%,其中第一至第四段纳滤膜的产水量分别为 80、47、33、20 L·h⁻¹,对应的产水率分别为 33%、29%、29%、25%. 开展连续运行实验,设定每 30 min 正冲洗 1 min,冲洗强度为 400 L·h⁻¹.

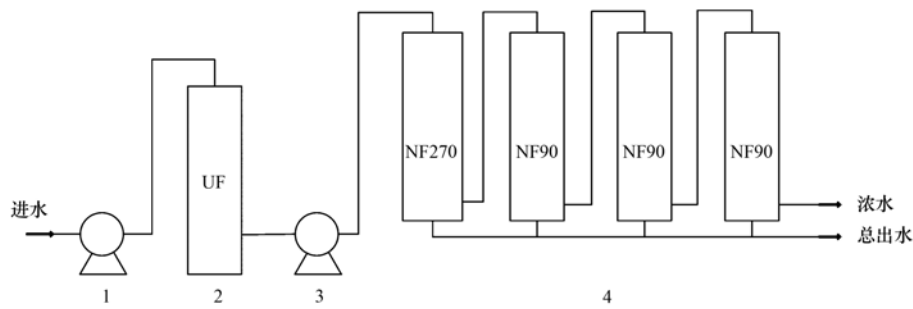


图 1 纳滤设备实物

Fig. 1 Photograph of NF water treatment system

1.3 水样采集与预处理

2015 年 9~11 月多次采集水厂各处理单元出水,以及各段纳滤膜处理出水,取样点如图 3,检测水中的高锰酸盐指数、三卤甲烷和卤乙酸(生成势)、有机氯农药(OCPs)、多环芳烃(PAHs)以及



1. 进水泵; 2. 超滤过滤安保器; 3. 纳滤提升泵; 4. 纳滤组件

图 2 纳滤系统设备流程示意

Fig. 2 Schematic diagram of NF water treatment system

UMU-SOS 遗传毒性等指标。采样时,在容积 120 mL 的顶空瓶里添加 0.6 g 的抗坏血酸,装满水后加盖密封冷藏,用于检测三卤甲烷;在 40 mL 的血清瓶中加入 40 mg 氯化铵,装满水后加盖并用封口膜密封冷藏,用于检测卤乙酸;用 10 L 干净 PVC 塑料桶采集水样,过 0.45 μm 混合纤维膜去除水中杂质,用于检测其他指标;三卤甲烷的测定在 24 h 内完成,卤乙酸的萃取在 48 h 内完成,17 种有机氯农药、16 种多环芳烃、遗传毒性等指标在 72 h 内完成前

处理。

UMU-SOS 遗传毒性样品预处理方法如下:先用 5 mL 甲醇和 5 mL 超纯水将 HLB 柱(500 mg, Agilent)活化;再将现场采集的 4 L 水样以 10 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速通过 HLB 柱进行富集,氮气吹干;依次用 5 mL 二氯甲烷和正己烷混合液(1:1)、5 mL 二氯甲烷和甲醇混合液(9:1)、5 mL 丙酮对 HLB 柱洗脱;收集洗脱液并氮气吹干,用二甲基亚砜(DMSO)定容至 200 μL ^[14]。所有溶剂均为分析纯。

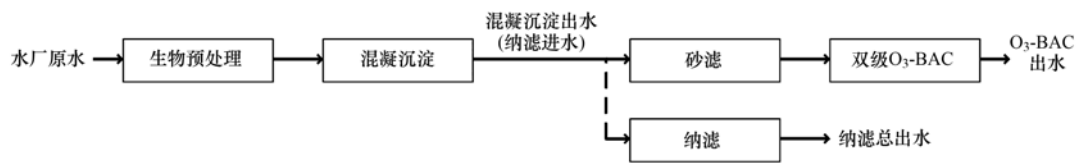


图 3 水厂工艺与水样取样点

Fig. 3 Water treatment process and sampling sites

1.4 分析方法

水样高锰酸盐指数采用高锰酸钾法测定^[15];浊度采用 DR900 便携式浊度仪(美国哈希公司)测定;总溶解固体(TDS)与电导率采用 SX650 笔式电导/TDS 仪(上海三信公司)测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法,采用 UV-2450 紫外分光光度计(日本岛津公司)测定^[16];UV₂₅₄采用 UV-2450 紫外分光光度计(日本岛津公司)测定;总有机碳(TOC)测定前水样经过 0.45 μm 滤膜过滤,采用 TOC-L 总有机碳分析仪(日本岛津公司)测定;三维荧光采用荧光光谱分析仪(FLUOROMAX-4, 法国 HORIBA 公司)测定,样品前处理与测试方法见文献[12];投加过量的氯可以使样品中的消毒副产物前体物转化为三卤甲烷与卤乙酸,二者的生成量分别称为样品的三卤甲烷生成势与卤乙酸生成势(以三卤甲烷和卤乙酸浓度计)。样品预处理方法见文献[17],三卤甲烷和卤乙酸采用岛津 GC-2010 气相色谱仪(日

本岛津公司)进行检测^[18];有机氯农药采用岛津 GC-2010 气相色谱仪(日本岛津公司),样品前处理与测试方法见文献[19];多环芳烃采用岛津 LC-2010A 高效液相色谱仪(日本岛津公司),样品前处理与测试方法见文献[20]。

UMU-SOS 遗传毒性试验采用的是 *Salmonella typhimurium* TA 1535/PSK 1002 大肠杆菌,由日本近畿大学小田美光教授提供。实验方法见文献[21],但在以下方面有所改进:96 孔板中加入 200 μL 菌液和 2 μL 样品进行暴露培养,培养时间由 2 h 改为 4 h。以折算后的 4-硝基喹啉-1-氧化物(4-nitroquinoline 1-oxide, 4-NQO)等当量浓度来评价所富集的水样遗传毒性强度。

本实验所用三卤甲烷、卤乙酸、有机氯农药、多环芳烃标准品均为分析纯,购自美国 AccuStandard 公司;DMSO 与 4-NQO 均为分析纯,购自美国 Sigma 公司。

2 结果与讨论

2.1 纳滤的调试运行

纳滤的调试操作运行情况如图 4 所示, 混凝沉淀池出水水质比较稳定, 电导率在 $510 \sim 600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间波动, 在前置超滤的保护与定期冲洗的条件下, 纳滤的产水流量基本保持稳定, 运行操作

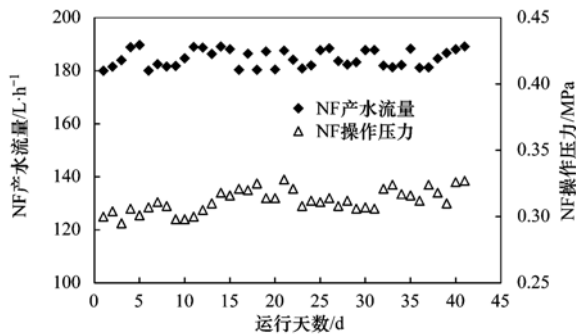


图 4 纳滤产水流量与操作压力变化

Fig. 4 Change of operating pressure and water yield rate of NF membranes

压力有略微提高, 有效管理与定期清洗能降低膜污染, 延长膜使用寿命^[22].

2.2 常规指标的去除分析

对比臭氧-生物活性炭深度处理与纳滤处理的出水水质, 结果如表 2 所示. 水厂水源水的浊度在 $20 \sim 55 \text{ NTU}$ 之间, 高锰酸盐指数为 $4.5 \sim 5.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 经过常规工艺混凝沉淀处理后, 出水浊度降低为 0.5 NTU 以内, 高锰酸盐指数降低至 $3.5 \sim 4.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮控制在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内. 经过臭氧-生物活性炭 ($\text{O}_3\text{-BAC}$) 深度处理后, 处理出水的氨氮低于检出限, 浊度在 0.5 NTU 以内, 高锰酸盐指数在 $2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, 出水常规指标均满足《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)^[23]. 与之相比, 纳滤实验设备的处理出水浊度低于检出限 (0.05 NTU), 高锰酸盐指数低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TOC 低于 $0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, UV_{254} 低于 0.0100 cm^{-1} , 常规指标分析结果表明纳滤对混凝沉淀出水的深度处理效果优于臭氧-生物活性炭工艺.

表 2 进出水水质

Table 2 Conventional Index of raw water and effluent

项目	水厂原水	常规工艺出水 (去除率/%)	$\text{O}_3\text{-BAC}$ 出水 (去除率/%)	纳滤总出水 (去除率/%)
pH	7.6~7.8	7.6~7.8	7.6~7.8	7.5~7.7
温度/ $^{\circ}\text{C}$	15~25	15~25	15~25	15~25
浊度/NTU	20~55	0.1~0.5	0.1~0.5	<0.1
TDS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	350~430	360~445	360~445	180~200(50)
TOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.6~5.7	3.1~3.9(23)	2.1~3.2(35)	0.2~0.3(>95)
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.0650~0.1100	0.0531~0.0982(17)	0.0247~0.0721(54)	<0.0100(>90)
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.5~5.5	3.5~4.0(13)	1.3~1.9(76)	0.1~0.2(>90)
氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.2~0.5	0.2~0.3	<0.2	<0.2

2.3 进出水三维荧光分析

各水处理单元出水的三维荧光光谱图见图 5 (a)~5(c). 通常认为荧光光谱中的不同荧光峰表征对应不同结构的有机物, 根据激发荧光与接收荧光对荧光峰进行分类统计, 区域 I、II、III、IV、V 分别代表芳香蛋白类物质 1、芳香蛋白类物质 2、富里酸类物质、溶解性微生物代谢产物和腐殖酸类物质^[24].

水厂原水的荧光光谱主要集中在区域 I、II、IV, 说明进水中有明显的蛋白类有机物特征, 主要是水体中微生物分解过程中产生的酶以及生物残骸物质; 而芳香蛋白类有机物则主要与人类活动关系紧密^[25]. 对比不同工艺段出水荧光光谱图, 可以看出混凝沉淀出水荧光峰强度较原水有所降低, 说明混凝沉淀对芳香类蛋白质有一定的去除效果; 臭氧-

生物活性炭深度处理工艺进一步去除此类物质, 同时, 区域 IV 荧光强度降低明显, 说明臭氧活性炭工艺对溶解性微生物副产物类物质也表现出较好的去除效果^[24]. 而混凝沉淀出水经过纳滤处理后, 荧光信号基本消失, 总荧光峰强度去除率在 90% 以上, 原因在于蛋白类有机物以及微生物副产物相对分子质量较大, 易被纳滤膜截留去除. 三维荧光分析结果表明纳滤能高效去除水体中溶解性有机物 (DOM).

2.4 纳滤对消毒副产物生成势的去除

纳滤能有效去除水中的消毒副产物生成势^[26]. 如图 6 所示, 样品中均表现出卤乙酸生成势 (HAAFP) 显著高于三卤甲烷生成势 (THMEP), 主要原因在于原水 (混凝沉淀出水) 与纳滤出水中的有机物亲水性较强, 原水与纳滤出水的比紫外吸光度 (SUVA) 低于 $2 \text{ m}^{-1}\cdot(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}$, 亲水性有机物

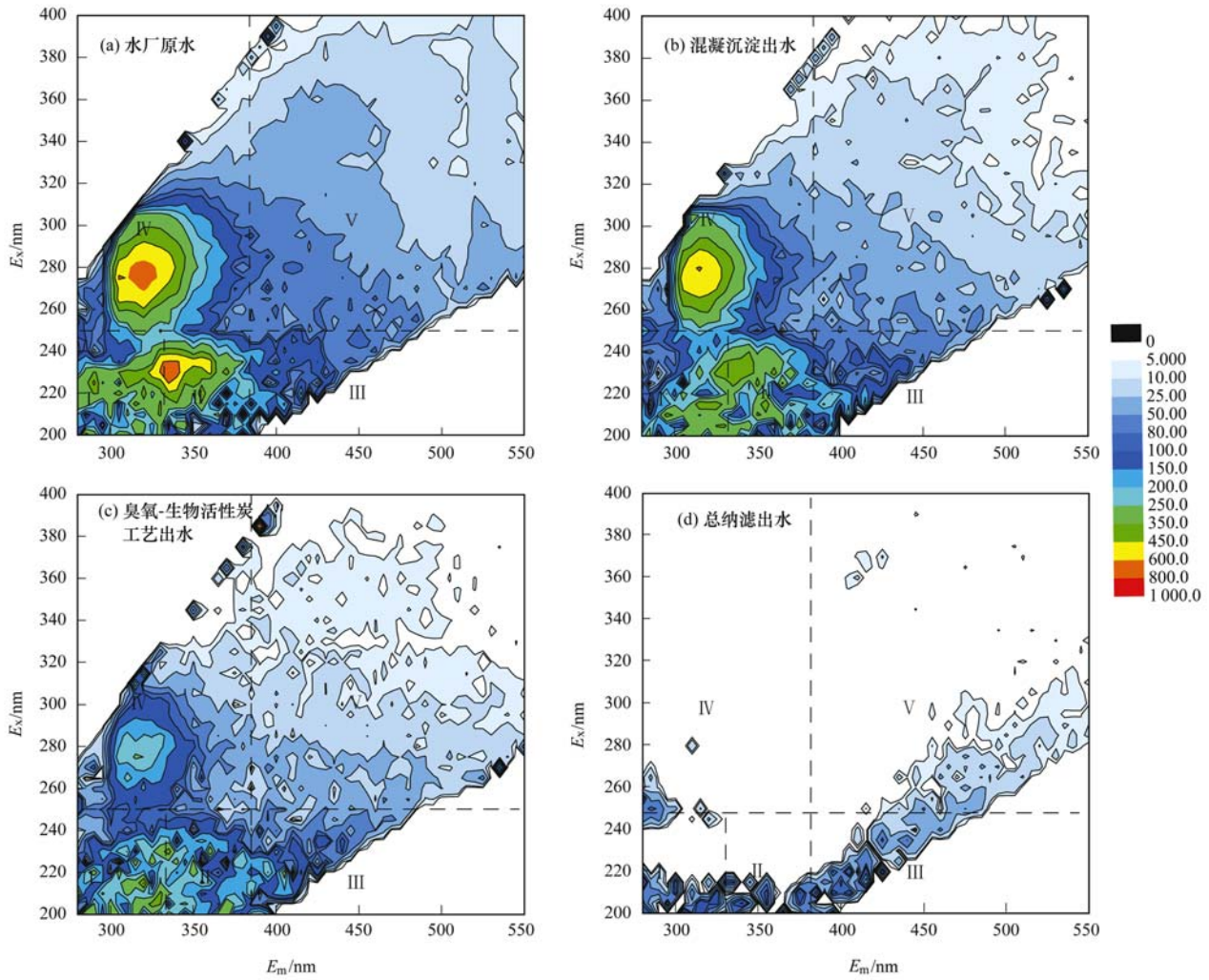
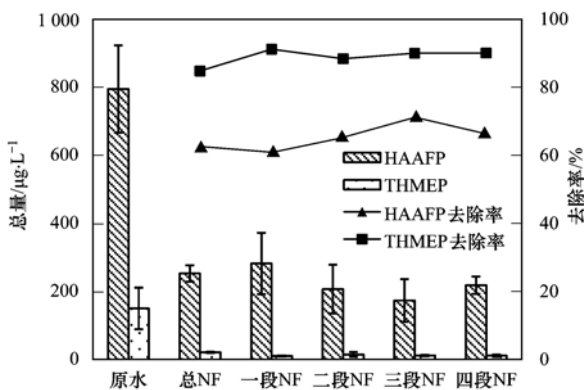


图 5 不同工艺出水三维荧光光谱图

Fig. 5 Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy of dissolved organic matter (DOM) in effluent from different treatment units



误差棒表示标准偏差(SD),测定次数 $n \geq 3$,下同
图 6 消毒副产物生成势总量及去除率

Fig. 6 Removal efficiency of HAAFP and THMEP in different NF membranes

倾向于消毒后倾向于生成卤乙酸^[27]。经多段纳滤处理后,水中三卤甲烷生成势(THMEP)和卤乙酸生

成势(HAAFP)分别减少了85%和62%,且不同段纳滤膜对消毒副产物前体物的去除率未呈现明显差异。由于纳滤NF270和NF90通过物理截留来控制消毒副产物的生成^[28],而大部分三卤甲烷消毒副产物的生成前体物是腐殖酸和富里酸,相对分子质量大于纳滤膜的截留范围(300~500),因此对THMEP表现出更高的去除率。

2.5 纳滤对有机氯农药与多环芳烃的去除分析

有机氯农药(OCPs)和多环芳烃(PAHs)由于其持久性、生物蓄积性以及生态毒性而受到环境科学界广泛关注,并被列入持久性有机污染物(POPs)。已有研究指出,部分有机氯农药是内分泌干扰物质或者潜在的内分泌干扰物质,而多环芳烃类物质也有强烈的致畸、致癌和致突变性作用^[19,29]。

不同段纳滤对有机氯农药和多环芳烃的去除效

果如图 7 所示. 纳滤进水中检出 6~7 种有机氯农药, 有机氯农药总浓度为 $20.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 多环芳烃总浓度为 $47.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 纳滤对有机氯农药表现出较好的去除效果, 去除率达 95% 以上, 且纳滤各段出水中的有机氯农药以相对分子质量较小的七氯、六氯环己烷(BHC)为主. 这是由于大部分有机氯农药的相对分子质量大于 300, 易被纳滤膜截留去除, 相对分子质量较小的有机氯农药难以被纳滤去除. 与之相比, 多环芳烃的相对分子质量在 200 左右, 远小于有机氯农药, 因此其难以被纳滤膜截留去除, 导致纳滤膜对多环芳烃的去除率仅为 50%^[30,31]. 实验结果显示纳滤对相对分子质量较大的有机氯农药去除效果明显, 而对相对分子质量较小的有机物则存在较大的局限性^[32]. 此外, 由于纳滤膜的末端进水为前段浓水, 浓度积累效应导致末端纳滤的去除率明显低于其他段. 最终纳滤末端浓水中有机氯农药和多环芳烃的平均浓度分别为 $81.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $191.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 比进水浓度上升了 3~4 倍.

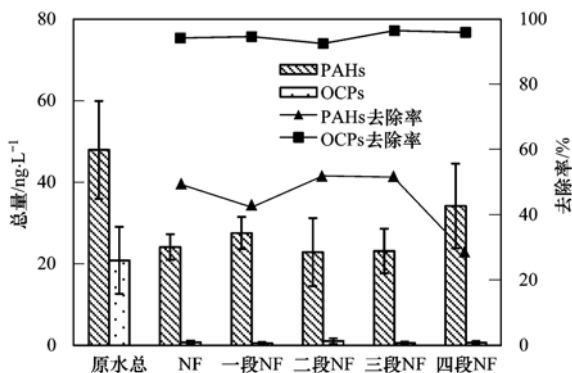


图 7 不同段纳滤对有机氯农药和多环芳烃去除效果

Fig. 7 Removal efficiency of OCPs and PAHs in different NF membranes

如图 8 所示, 水厂现有工艺对有机氯农药和多环芳烃有一定的去除效果, 传统的混凝沉淀工艺和双级臭氧-生物活性炭对有机氯农药的去除率分别为 32.6%、29.7%, 而对多环芳烃的去除率分别为

4.1%、12.2%, 水厂现有工艺组合对有机氯农药和多环芳烃整体平均去除率为 62% 与 16% 左右, 说明臭氧-生物活性炭深度处理工艺对稳定性较强的 PAHs 去除效果极为有限. 与之相比, 纳滤对有机氯农药和多环芳烃的去除率分别大于 90% 和 50%, 效果明显优于水厂现有深度处理工艺. 纳滤处理后有机氯农药的检出率也大幅度降低, 水厂进水中检出有机氯农药 6~7 种, 水厂现有深度处理工艺出水中的检出种类与进水相同, 而纳滤处理后能检出的种类为 2~3 种.

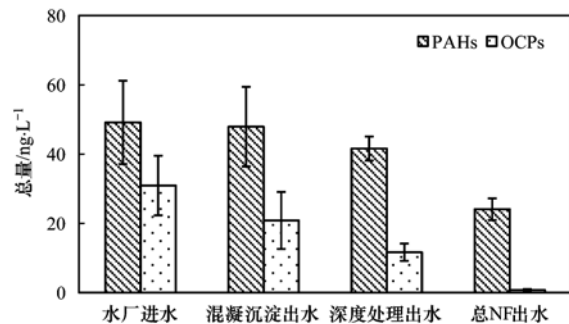


图 8 不同工艺有机氯农药与多环芳烃去除效果

Fig. 8 Removal efficiency of OCPs and PAHs in effluent of different treatment units

2.6 不同工艺对遗传毒性的去除分析

对水厂各处理单元出水和纳滤出水的遗传毒性进行检测, 得到的水质遗传毒性如表 3 所示. 原水遗传毒性当量 $\text{TEQ}_{4-\text{NQO}}$ 为 $109.8 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 经过传统工艺混凝沉淀处理后毒性变化不明显. 常规处理工艺能较好地去除大分子有机物(相对分子质量 ≥ 3000), 但由于混凝沉淀出水中小分子有机物可能会增加, 从而导致遗传毒性效应有增加的可能性^[33]. 同时, 水厂采用的双级臭氧-生物活性炭深度处理工艺能显著去除水中的遗传毒性效应, 平均去除率为 82.1%. 经过纳滤系统处理后, 各段纳滤出水遗传毒性均低于检出限, 说明纳滤膜对遗传毒性有极高的去除率, 能最大限度保障出水水质安全.

表 3 不同工艺对水质遗传毒性的去除效果¹⁾

Table 3 Genotoxicity removal efficiency of different treatment units

水样	水厂进水 / $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	混凝沉淀		深度处理		纳滤	
		出水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%	出水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%	出水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	去除率/%
$\text{TEQ}_{4-\text{NQO}}$	109.8 ± 4.1	97.1 ± 10.3	11.6	19.7 ± 2.2	82.1	nd	>95

1) 以标准偏差(SD)表示, 测定次数 $n \geq 3$; nd 表示在检测范围内未检出

3 结论

水厂现有处理工艺出水常规水质指标能满足国家饮用水标准, 而对有机氯农药、多环芳烃、遗传

毒性等污染物的去除效果较差, 去除率仅为 62%、16%、82%. 本研究通过截留相对分子质量为 200~500 之间的纳滤膜对原有混凝沉淀工艺出水进行深度处理, 处理后三卤甲烷生成势、卤乙酸生成势、

有机氯农药、多环芳烃等污染物的去除效果有显著提升,去除率达到 85%、62%、95%、50%,出水中遗传毒性低于检出限;而作为深度处理工艺,纳滤工艺与现有臭氧活性炭工艺相比,在常规指标,有机氯农药,多环芳烃等污染物去除方面,纳滤表现出较好的去除效果,去除率较后者提高 30%~80%,因此纳滤工艺的使用能显著提升水质,更好地保障出水安全,但纳滤产生的浓水水量和其中较高的污染物浓度问题不容忽视,实际水厂在设计时会通过增加段数的方式提高产水率,而浓水则因地制宜进行处置,必要时可以对浓水进行处理后再排放。

参考文献:

- [1] 左金龙. 微污染水源水水质特点及其处理工艺选择[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(16): 15-18.
- [2] 刘冰, 余国忠, 古励, 等. 混凝和活性炭吸附去除微污染水源水中 DON 的研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1392-1401.
- [3] 王继萍, 华伟, 蒋福春, 等. 臭氧-生物活性炭工艺去除 AOC 和有机物的效果研究[J]. 给水排水, 2014, **40**(2): 11-15.
- [4] Song A A, Liu X, Liu Y, *et al.* Fate of organic pollutants in a full-scale drinking water treatment plant using O₃-BAC [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2015, **37**(3): 257-268.
- [5] Wu Y F, Zhu G C, Lu X W. Characteristics of DOM and removal of DBPs precursors across O₃-BAC integrated treatment for the micro-polluted raw water of the Huangpu River [J]. *Water*, 2013, **5**(4): 1472-1486.
- [6] López-Ramírez J A, Lee E, Castañeda R J, *et al.* Sustainable improvement of drinking water quality by nanofiltration powered by renewable energy[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2013, **13**(2): 309-318.
- [7] Vergili I. Application of nanofiltration for the removal of carbamazepine, diclofenac and ibuprofen from drinking water sources[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **127**: 177-187.
- [8] Gaid A, Bablon G, Turner G, *et al.* Performance of 3 years' operation of nanofiltration plants[J]. *Desalination*, 1998, **117**(1-3): 149-158.
- [9] 陈欢林, 吴礼光, 陈小洁, 等. 钱塘江潮汐水源的饮用水膜法集成系统示范运行经验[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(22): 98-101.
- [10] 杨忠盛, 芦敏, 袁东星, 等. 活性炭结合超滤及纳滤工艺深度处理饮用水的中试研究[J]. 给水排水, 2011, **37**(5): 29-34.
- [11] Goncharuk V V, Kavitskaya A A, Skil'skaya M D. Nanofiltration in drinking water supply [J]. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2011, **33**(1): 37-54.
- [12] 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 等. J 市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评估[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3474-3479.
- [13] 陶氏化学(中国). 陶氏 FILMTEC(陶氏反渗透膜和纳滤膜)手册[M]. 上海: 陶氏化学(中国), 2014. 135-145.
- [14] 张建超, 马福俊, 胡建英. 利用 SOS/umu 测试方法鉴定沙颍河河水中的遗传毒性物质[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(3): 344-349.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 211-213, 566-574.
- [16] 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 等. 黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 958-963.
- [17] 孙迎雪, 吴乾元, 田杰, 等. 污水中溶解性有机物组分特性及其氯消毒副产物生成潜能[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2282-2287.
- [18] 刘静, 陈超, 张晓健. 组合氯化消毒工艺的卤代消毒副产物生成特性[J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2538-2542.
- [19] 蒋煜峰, 王学彤, 孙阳昭, 等. 上海市城区土壤中有有机氯农药残留研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 409-414.
- [20] 刘新, 王东红, 马梅, 等. 中国饮用水中多环芳烃的分布和健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2011, **6**(2): 207-214.
- [21] Li J, Ma M, Cui Q, *et al.* Assessing the potential risk of oil-field produced waters using a battery of bioassays/biomarkers [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, **80**(6): 492-496.
- [22] 张立卿, 王磊, 王旭东. 纳滤膜物化特征对膜分离及膜污染影响研究[J]. 水处理技术, 2009, **35**(1): 24-29.
- [23] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [24] 高连敬, 杜尔登, 崔旭峰, 等. 三维荧光结合荧光区域积分法评估净水厂有机物去除效果[J]. 给水排水, 2012, **38**(10): 51-56.
- [25] 郭卫东, 黄建平, 洪华生, 等. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1419-1427.
- [26] 孔繁鑫, 王小, 杨宏伟, 等. 纳滤控制饮用水中消毒副产物的研究进展[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(18): 28-32.
- [27] Kim Y, Lee Y, Gee C S, *et al.* Treatment of taste and odor causing substances in drinking water [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **35**(8): 29-36.
- [28] Ribera G, Llenas L, Rovira M, *et al.* Pilot plant comparison study of two commercial nanofiltration membranes in a drinking water treatment plant [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, **51**(1-3): 448-457.
- [29] 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊, 等. 滴水湖水系沉积物中多环芳烃的分布及风险评估[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(11): 2069-2074.
- [30] Derbalah A, Ismail A, Hamza A, *et al.* Monitoring and remediation of organochlorine residues in water [J]. *Water Environment Research*, 2014, **86**(7): 584-593.
- [31] Zhu L F. Rejection of organic micropollutants by clean and fouled nanofiltration membranes [J]. *Journal of Chemistry*, 2015, **2015**: 934318.
- [32] Teixeira M R, Sousa V S. Fouling of nanofiltration membrane: effects of NOM molecular weight and microcystins [J]. *Desalination*, 2013, **315**: 149-155.
- [33] 李娜, 骆坚平, 饶凯锋, 等. 用 SOS/Umu 生物测试评价北方某自来水厂对遗传毒性物质的去除效果[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(11): 10-16.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i>	(3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i>	(3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i>	(3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i>	(3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i>	(3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i>	(3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i>	(3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan	(3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing	(3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i>	(3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i>	(3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i>	(3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i>	(3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i>	(3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i>	(3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i>	(3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i>	(3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i>	(3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i>	(3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo	(3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i>	(3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i>	(3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i>	(3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i>	(3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i>	(3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i>	(3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i>	(3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i>	(3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i>	(3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i>	(3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i>	(3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui	(3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i>	(3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i>	(3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i>	(3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-jian, YANG Yan, YAN Jun-xia	(3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong	(3670)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行