

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

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

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM_{2.5} 清除作用 孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)

降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)

北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)

浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)

2014 年 APEC 期间北京市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 氧化性损伤能力研究 郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)

武汉市洪山区夏季 PM_{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 翟程凯 (3714)

基于快速聚类方法分析常州市区 PM_{2.5} 的统计特性 王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)

PM_{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)

树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)

轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴焯, 胡京南, 郝吉明 (3743)

基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)

西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)

生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)

三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)

城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)

基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)

贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 钱锋, 吴婕贻, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)

地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)

昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)

滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)

排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)

快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 李洁, 肖琳 (3850)

一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)

聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)

典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)

O₃/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)

蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)

2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)

不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)

长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)

焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)

黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)

苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)

城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)

菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)

生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)

生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)

土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)

土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)

蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)

不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)

黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)

挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)

中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)

《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)

生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性

宣雍祺¹, 周丽¹, 邓慧萍^{1*}, 蔡宙², 李大鹏², 刘刚²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海核工程研究设计院, 上海 200233)

摘要: 采用生物粉末活性炭-超滤(BPAC-UF)组合工艺对模拟微污染源水中的嗅味物质进行了去除试验, 并对组合工艺中微生物量的分布和变化进行了测定. 结果表明, 相比混凝沉淀常规工艺, BPAC-UF 组合工艺对微污染源水中的嗅味物质有较好的控制效果, 对二甲基三硫醚、2-甲基异茨醇和 β -紫罗兰酮的平均去除率分别可达 77.51%、65.86% 和 98.43%, 并且对原水冲击负荷有更好的适应性; 炭池是组合工艺中去除嗅味物质的主要单元, 其微生物量远高于其它区域; 炭池生物量变化平稳, 组合工艺对原水中嗅味物质的去除具有稳定性.

关键词: 生物粉末活性炭; 超滤; 微污染源水; 嗅味物质; 微生物特性

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3864-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.10.026

Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process

XUAN Yong-qi¹, ZHOU Li¹, DENG Hui-ping^{1*}, CAI Zhou², LI Da-peng², LIU Gang²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The odorants in simulated micro-polluted source water were removed by the Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration (BPAC-UF) combined process, and variations of microorganisms in the combined process were discussed. Compared with the conventional process of coagulation and sedimentation, BPAC-UF combined process had better performance in controlling odorants in micro-polluted source water. The average removal rates of dimethyl trisulfide, 2-methylisoborneol and β -ionone reached up to 77.51%, 65.86% and 98.43%, respectively. The process was more adaptable to raw water shock load. The carbon tank which had much more microbial biomass than other areas was determined to be the main unit for removing odorants. The biomass changed smoothly in the carbon tank, while the removal of odorants in raw water was stable in the process.

Key words: biological powdered activated carbon; ultrafiltration; micro-polluted source water; odorants; microbial characteristics

近年来,微污染源水产生的嗅味问题正日益引起人们的关注^[1]. 微污染水体中富含的 N、P 等营养元素和有机质为藻类和细菌的生长提供了良好的环境,而许多藻类和细菌都能够产生具有嗅味的次生代谢产物^[2,3],从而引发水体异嗅问题,对饮用水供水安全造成威胁. 一直以来,由某些藻类和放线菌产生的土霉味物质土臭素(GSM)和 2-甲基异茨醇(2-MIB)被国内外研究者认为是地表水中最主要的致嗅物质^[3-6]. 近年来以 β -环柠檬醛(β -cyclocitral)、 β -紫罗兰酮(β -ionone)为代表的藻类代谢产生的草木味物质和以甲硫醚(DMS)、二甲基三硫醚(DMTS)为代表的微生物厌氧分解产生的腥臭味物质开始成为研究的热点^[7-9]. 以上 4 种物质在我国多地广泛检出,并成为国内许多饮用水嗅味事件的主要成因^[10-12].

水厂传统的混凝-沉淀-过滤工艺对嗅味物质去

除效果有限,在嗅味物质含量高时往往不能达到除臭的效果^[13,14]. 粉末活性炭(PAC)因其发达的孔隙结构、巨大的比表面积及丰富的活性基团而对包括嗅味物质在内的小分子疏水性有机物具有优异的去除效能^[3,13,15-18]. 但现在通常采用的一次性投加的应用方式,不仅不经济,而且由于接触时间较短,往往无法充分发挥 PAC 的吸附能力. 而生物粉末活性炭(BPAC)则能够通过以活性炭为载体生长的微生物有效降解吸附于活性炭表面的有机物和氨氮,使活性炭的吸附能力得到再生,从而可以在水处理系统中长期稳定运行. 为弥补生物活性炭对大分

收稿日期: 2016-03-31; 修订日期: 2016-05-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07405002, 2011ZX06002-001)

作者简介: 宣雍祺(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: 448972937@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: denghuiping@tongji.edu.cn

子有机物和致病微生物去除能力不足的缺陷,在生物活性炭后加入超滤(UF)工艺,构成集活性炭吸附、微生物降解以及膜过滤作用于一体的生物粉末活性炭-超滤(BPAC-UF)组合工艺.该工艺在去除浊度、细菌和氨氮的同时,能有效去除水中的嗅味物质;且对原水水质适应能力强,操作灵活性大,膜污染较小^[19-23].基于以上优点,研究BPAC-UF工艺对含嗅微污染源水深度处理的技术,具有理论和现实意义.

本研究针对实际微污染源水中的嗅味问题,采用分段式BPAC-UF组合工艺开展试验,考察此工艺对嗅味物质的去除效果,并对组合工艺中微生物的分布和变化进行了分析,以期对处理含嗅微污染源水探索一种新的途径.

1 材料与方法

1.1 试验水质

本试验研究对象为华东地区某水厂备用水源地的含嗅微污染源水.该水源水污染较为严重,氨氮和有机物含量高,为典型的微污染原水,同时存在严重的水体异嗅问题.经检测,该水源水中DMTS、2-MIB、 β -ionone的质量浓度在其最高季分别达到了97.85、138.20、284.49 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (三者嗅阈值分别为1~7.5、6~42、7 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[24]),常规水处理工艺无法达到将其降低至嗅阈值以下的目标.为便于试验,本试验采用人工配水的方法对目标水源水进行模拟,在同济大学三好坞原水的基础上投加一定浓度的氯化铵(用以模拟原水中的氨氮)和嗅味物质标准样品充分混合而成.所得配水水质与目标水源水在常规水质指标方面基本保持一致,水源水与模拟配水的常规水质参数如表1所示.

表1 水源水与模拟配水的常规水质参数

水质指标	水源水	模拟配水
浊度/NTU	23.6~68.8	18.8~52.6
氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.624~1.802	1.682~2.033
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.065~0.094	0.072~0.087
$\text{DOC}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3.834~4.774	3.828~4.802
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.583~6.214	4.940~5.976

1.2 试剂与材料

试剂:3种目标嗅味物质DMTS、2-MIB、 β -ionone标准品均购自美国Sigma-Aldrich公司,纯度>97%,用甲醇(色谱纯,上海国药集团化学试剂有限公司)配制成1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液置于4℃下避光

保存,使用时用Milli-Q超纯水稀释至所需浓度.内标物2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(2-isobutyl-3-methoxypyrazine, IBMP)购自梯希爱上海化成工业发展有限公司,纯度>98%,配制成20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的储备液置于4℃下避光保存,使用时用Milli-Q超纯水稀释至20 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$.其余试剂均为分析纯,购自上海国药集团化学试剂有限公司.

材料:粉末活性炭(上海活性炭厂有限公司,木质炭,粒径200目);中空纤维超滤膜组件(苏州立升净水科技有限公司,材质为PVC,孔径0.01 μm ,有效膜面积约1 m^2 ,截留分子量50 000).

1.3 工艺流程及试验装置

原水进入BPAC-UF工艺前先经过模拟混凝沉淀过程,混凝剂采用聚合氯化铝湿法投加,投加量为20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,加药后用三级搅拌机依次以不同转速模拟混凝沉淀的不同阶段:高速搅拌(80 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)30 s模拟快速混合阶段,中速搅拌(40 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)5 min模拟絮凝前期,低速搅拌(20 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)15 min模拟絮凝中后期,然后静置沉淀2 h,再通过进水泵抽取上清液至BPAC-UF小试装置.

本试验所用的分段式BPAC-UF小试装置如图1所示.装置由三部分组成,炭池、沉淀区和膜池.炭池是活性炭吸附和生物作用的主要场所,容积为3 L,水力停留时间为2 h,内设曝气装置和搅拌机,采用24 h连续曝气和搅拌,曝气流量为30 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$,搅拌机转速为50 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$.试验开始前往炭池内一次性投加浓度为1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的粉末活性炭,经过一个月左右的通水运行,炭池的活性炭颗粒已经形成絮状物,氨氮去除率基本稳定在70%左右,表明炭池内粉末活性炭表面的微生物已培养成熟,达到进行稳定生物降解的工况.炭池出水经溢流堰进入沉淀区,沉淀区容积为4.2 L,停留时间约为3 h,由导流板分为三格,使水流在沉淀区内形成利于沉淀的流态.沉淀下来的污泥通过沉淀区底部每隔1 h运行一次的污泥回流泵回流到炭池.沉淀区出水经溢流堰进入膜池,膜池内的水在出水抽吸泵作用下以20 $\text{L}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的膜通量透过超滤膜组件成为膜出水.试验时通过空调使室温维持在24℃ \pm 1℃以确保水温恒定.

1.4 检测方法

浊度采用哈希2100P便携式浊度仪进行测定; UV_{254} 采用T6新世纪紫外可见分光光度计进行测定;高锰酸盐指数采用酸性高锰酸钾法测定;氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定;DOC采用岛津总有

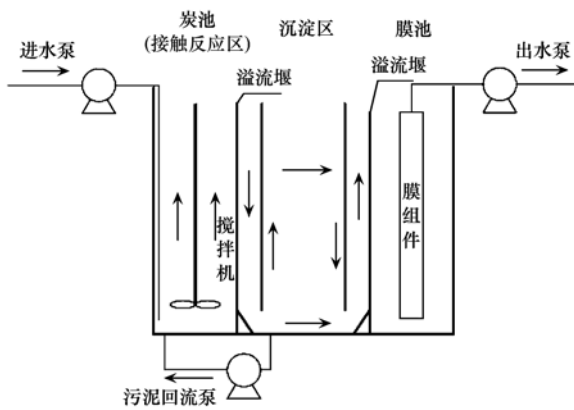


图 1 分段式 BPAC-UF 小试装置示意

Fig. 1 Bench-scale setup of segmented BPAC-UF

机碳分析仪 (TOC-LCPH) 进行测定.

臭味物质 (DMTS、2-MIB 和 β -ionone) 采用顶空固相微萃取 (57348-U, 美国 Supelco 公司)-气相色谱质谱联用仪 (Trace DSQ II, 美国 Thermo Fisher 公司) 进行测定^[5, 25]. GC 条件为: 载气为高纯氦气; 柱中流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 不分流进样; 进样口温度 270°C ; 炉温升温程序为: 初始温度为 50°C , 以 $6^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 150°C , 保持 2 min, 再以 $15^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 220°C . MS 条件为: 电子轰击源 (EI); 电子能量为 70 eV; 离子源温度 200°C ; 接口温度 250°C .

细菌总数测定采用异养菌平板计数法 (heterotrophic plate counts, HPC)^[26], 取样后以 10 倍系列稀释到 10^{-5} , 再倒入 R2A 培养基在 22°C 下培养 7 d 后进行平板计数.

微生物群落组分结构委托上海美吉生物信息公司进行 MiSeq 高通量测序分析, 采用 ABI GeneAmpRR 9700 型 PCR 仪进行扩增, 将 PCR 产物用 QuantiFluor™-ST 蓝色荧光定量系统 (Promega 公司) 进行检测定量.

2 结果与讨论

2.1 组合工艺对 3 种臭味物质的去除效果

将模拟原水通入已经运行稳定的组合工艺, 以超滤膜的一个常规清洗周期即 36 h 为试验总时长进行去除试验, 3 种臭味物质的质量浓度前 18 h 均配成 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 以模拟目标水源水中臭味物质的最高季浓度, 后 18 h 配成 $200 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 以考察臭味物质浓度继续升高时组合工艺的抗冲击负荷能力. 试验前对原水进行了同等停留时间和曝气强度条件下的曝气试验, 结果表明 36 h 内曝气对 3 种臭味物质的

平均去除率仅为 5% ~ 20%, 可以看出 3 种臭味物质均难以通过单纯的曝气工艺加以去除. 试验过程中每隔 2 h 对沉后水和膜出水取样进行检测, 得到组合工艺对模拟原水中的臭味物质去除情况如图 2 所示.

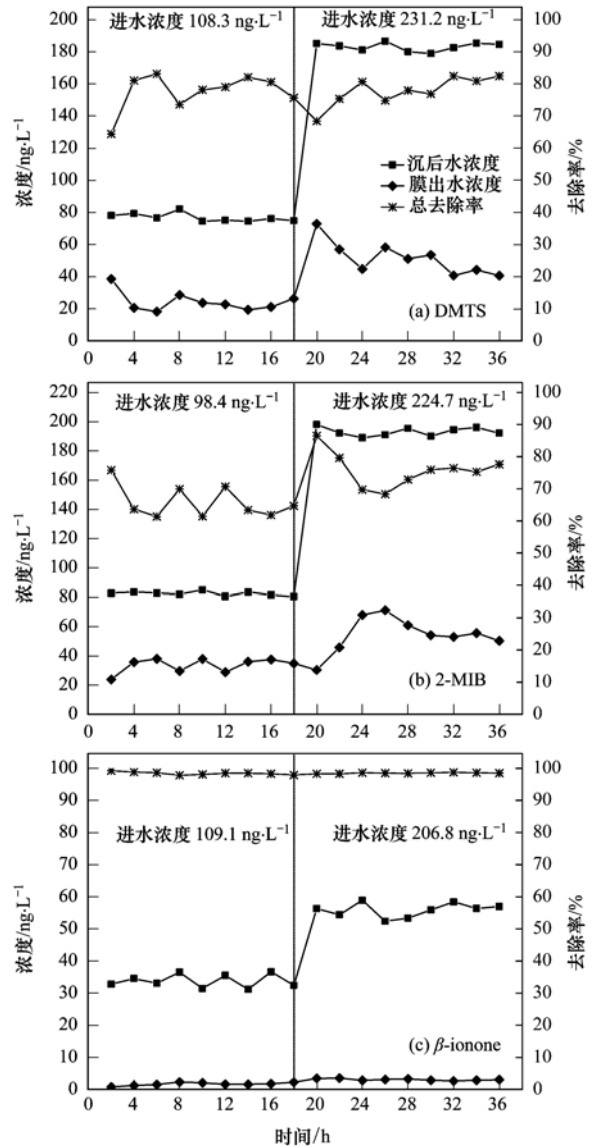


图 2 组合工艺对 3 种臭味物质的去除效果

Fig. 2 Removal of three odorants by the combined process

可以看出, 在原水的臭味物质质量浓度为 $100 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 组合工艺运行 8 h 后对 3 种臭味物质的去除率基本达到稳定. 其中 β -ionone 在混凝沉淀阶段即可达到 69.02% 的平均去除率, 而混凝沉淀工艺对 DMTS 和 2-MIB 的去除效果则不甚理想, 平均去除率分别只有 29.13% 和 16.23%, 而在经过了 BPAC-UF 工艺后, DMTS、2-MIB 和 β -ionone 的总去除率平均值分别达到了 77.51%、65.86% 和 98.43%, 膜出水中三者的剩余质量浓度分别只有

24.36、33.60 和 $1.71 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,除了 DMTS 已基本控制在各自的嗅阈值以下,而 DMTS 出水质量浓度相对于进水亦有大幅下降,说明 BPAC-UF 体系对于微污染水体中的臭味物质有较好的控制效果. 由于臭味物质较小的分子量使其远不足以被超滤膜截留,而根据前文曝气试验的结果,单独的曝气作用对臭味物质的去除效果有限,因此可以推断出,BPAC-UF 工艺对臭味物质的去除主要通过 PAC 的吸附作用及其表面负载的微生物的生物降解作用来实现. 另外可以注意到,无论是在常规工艺还是 BPAC-UF 工艺中, β -ionone 的去除率都要比 DMTS 和 2-MIB 高,造成这种差别的主要原因是: β -ionone 是一种含共轭三烯结构的酮类化合物,其体系能量较低,化学性质极不稳定,在太阳光的照射下即有可能氧化裂解,并且其分子量较大,在絮凝或吸附阶段更易被絮凝体或是生物活性炭碰撞吸附;而 2-MIB 为带饱和六碳环的桥环化合物,结构比较稳定,难以自然分解,生物降解效率也较低;DMTS 虽然也有较强的还原性,但需要 O_3 、 KMnO_4 等强氧化剂才能取得较好的去除效果,而且 DMTS 分子量小,极性大,在水中有较高的溶解度,因而不易被去除^[10, 27].

当进水臭味物质质量浓度升高到 $200 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,混凝沉淀工艺对 3 种臭味物质的去除效果出现了不同程度的下降,DMTS、2-MIB 和 β -ionone 的平均去除率分别只有 20.80%、14.04% 和 67.97%,可见常规工艺对臭味物质的去除能力有限,在面对藻华暴发等突发性生态污染事件而导致的高进水负荷往往不能有效适应. 而膜出水浓度在经历 6~10 h 的短暂波动后则能够恢复平稳,总去除率平均值分别为 77.75%、75.81% 和 98.50%,相比进水浓度上升前甚至略有升高,并且还有继续上升的趋势. 这主要是因为微生物能够根据外界环境的变化调整自身的生长状态,经过一段时间高负荷原水的培养,炭池内驯化出了适应高浓度臭味物质的微生物种群. 从中可以得出结论:相对于传统工艺,BPAC-UF 工艺由于生物作用的存在而对进水水质波动具有更强的抗冲击负荷能力.

2.2 臭味物质在组合工艺中的空间分布

试验期间对 BPAC-UF 小试装置的进出水和各个区域混合液进行采样分析,以考察 3 种臭味物质在工艺各阶段的去除和分布情况,试验进水质量浓度为 $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,所得结果如图 3 所示.

可以看到,沉后水在经过炭池后,其中 DMTS、2-MIB 和 β -ionone 的质量浓度分别由 78.02、82.64

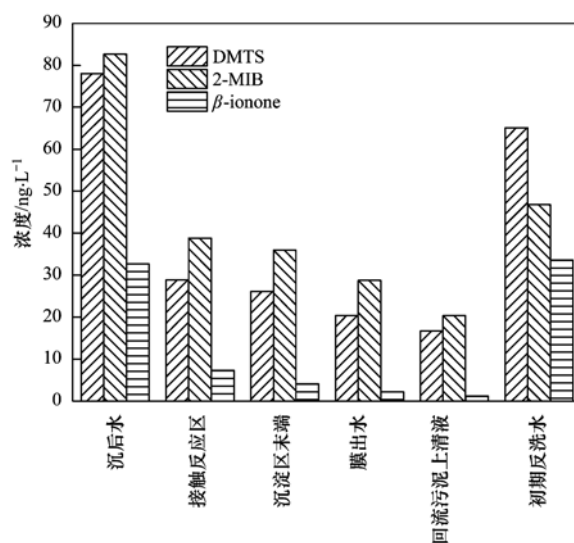


图 3 臭味物质在组合工艺中的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of odorants in the combined process

和 $32.76 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 锐减为 28.88、38.84 和 $7.33 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,大部分的臭味物质在此得到去除. 由此可知炭池是组合工艺中去除臭味的主要单元,沉淀区和超滤膜对臭味的去除能力很小. 在沉淀区的回流污泥上清液中并未检出较高浓度的臭味物质,表明生物活性炭颗粒表面吸附的大部分臭味物质已被生物降解,在进入沉淀区后并无解吸的风险;同时也保证了污泥回流后不会显著增加炭池内的臭味物质负荷,这对于工艺的稳定运行是有利的. 另外还可以注意到,臭味物质在回流污泥上清液中的浓度低于沉淀区末端浓度,出现这种情况可能是由污泥中微生物持续的降解作用所致. 对连续运行一周左右的超滤膜的进行反冲洗,在前 1 min 的初期反洗水中检出了较高浓度的臭味物质,然而超滤膜本身对于臭味物质并没有太强的截留作用,据推测出现这种情况的原因是:生物活性炭颗粒并未在沉淀区完全沉淀,有少量炭粒随水流进入了膜池并被超滤膜截留,在反洗水流的高速冲击下,这些活性炭有可能发生部分解吸从而使反洗水浓度升高. 因此,在实际应用过程中,当进水臭味物质浓度较高时,不建议将初期反洗水直接回流入炭池,应进行排放或稀释处理,同时还应提高污泥回流的频率以减少活性炭进入膜池的数量.

2.3 组合工艺中微生物的空间分布

试验期间对 BPAC-UF 小试装置的进出水和各个区域混合液的细菌总数进行了监测,所得结果如图 4 所示. 可以看出,微生物群落普遍分布于组合工艺的各个阶段,其中炭池(接触反应区)所含有的

微生物量最高,其数量($1.84 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$)远高于组合工艺中的其它区域. 作为组合工艺中主要的生物处理单元,炭池有着适宜好氧微生物生长的良好条件和载体(PAC),沉淀区污泥的回流使得负载有微生物的活性炭在炭池进一步富集,因而其混合液中含有大量的微生物,生物量比沉后水高出一个数量级. 对比图3可知,大部分的臭味物质正是在炭池中得到了去除,这进一步反映出生物活性炭对于降低水体异臭的重要意义. 进入沉淀区的微生物大部分会随着活性炭载体经由污泥回流重新返回炭池,但不可避免会有少量微生物留在沉淀区,因此在沉淀区末端也有一定数量的微生物存在,这些微生物可以起到在沉淀区持续降解臭味物质的作用. 在膜池中检出了 $1.2 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的微生物量,这是由于超滤膜对细菌的去除能力很强(膜出水浓度只有 $840 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$),故被超滤膜截留的微生物在膜池内发生了累积. 尽管膜池中的生物量也较高,但由于膜池进水污染物浓度相较于炭池已大幅降低,截留在超滤膜表面的微生物缺少良好的附着和生长条件,因此未能表现出与炭池一样的降解特性. 超滤膜表面累积的微生物及其分泌物还有可能堵塞膜孔,给超滤工艺的运行带来不利影响,故在实际应用中应尽可能减少微生物在膜表面的累积. 经试验,膜池中微生物累积的影响可通过超滤膜的维护性清洗加以消除.

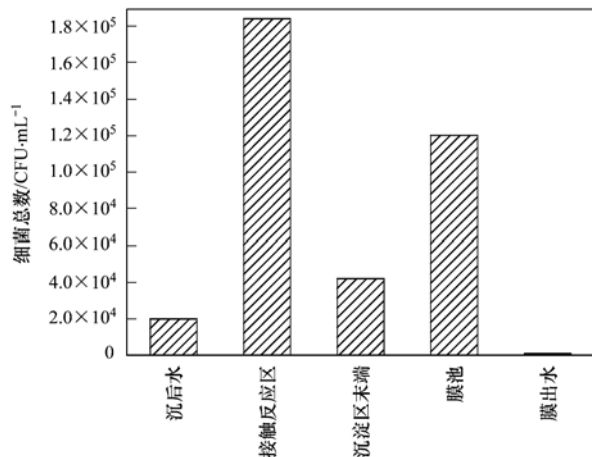


图4 微生物在组合工艺中的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of biomass in the combined process

2.4 炭池生物量变化

鉴于炭池内的微生物含量最高且在生物降解中起主要作用,因此重点研究炭池的生物量变化情况及其对臭味物质降解的影响. 图5为7d内炭池生物量和组合工艺臭味物质去除率的变化情况. 可以

看到,试验期间炭池生物量在 $1.79 \times 10^5 \sim 1.96 \times 10^5 \text{CFU} \cdot \text{mL}^{-1}$ 范围内波动,上下波动幅度不超过10%,表明炭池中微生物的繁殖和死亡速度已达到动态平衡,生物群落已基本培养成熟. 在炭池中共检出以反硝化菌丛毛单胞菌科为主的149个菌属,生物多样性丰富,具有稳定的脱氮和分解有机物的功能. 组合工艺对臭味物质的去除率随着炭池生物量的变化而在一定范围内浮动,一方面印证了炭池中的生物量对臭味物质的降解有重要意义,另一方面说明组合工艺对原水中臭味物质的去除具有稳定性.

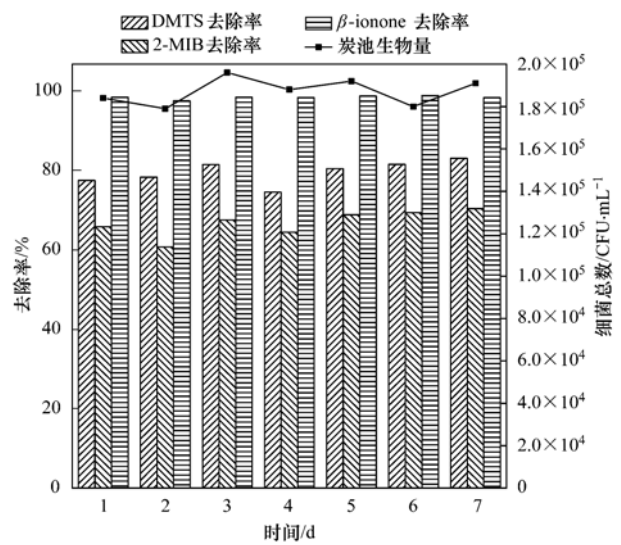


图5 炭池生物量和组合工艺对臭味物质的去除率的变化情况

Fig. 5 Trend of biomass in the carbon tank and removal rate of odorants in the combined process

3 结论

(1)相对于混凝沉淀常规工艺,BPAC-UF组合工艺对微污染源水中的臭味物质有较好的控制效果,对DMTS、2-MIB和 β -ionone的平均去除率分别可达77.51%、65.86%和98.43%;并且对原水冲击负荷有更好的适应性.

(2)炭池是组合工艺中去除臭味物质的主要单元;生物活性炭在沉淀区内无解吸风险,污泥回流不会增加炭池中的臭味物质负荷;膜在反冲洗初期会产生高臭味的反洗水,不应直接回流入炭池.

(3)炭池中的微生物量远高于组合工艺其它区域;微生物在膜池有累积现象,但可以通过膜的维护性清洗加以消除.

(4)炭池生物量变化平稳,组合工艺对原水中臭味物质的去除具有稳定性.

参考文献:

- [1] 李勇, 张晓健, 陈超. 我国饮用水中嗅味问题及其研究进展[J]. 环境科学, 2009, **30**(2): 583-588.
- [2] 陈晨. 高藻原水藻类次生嗅味污染特征及光氧化控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [3] 马晓燕. 土臭素和二甲基异冰片的控制技术及其机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
- [4] Srinivasan R, Sorial G A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: a critical review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(1): 1-13.
- [5] 白晓慧, 张明德, 贾程慎. 上海某黄浦江原水供水系统中主要致嗅物质的迁移规律分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 120-124.
- [6] Watson S B. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity[J]. Phycologia, 2003, **42**(4): 332-350.
- [7] Deng X W, Liang G D, Chen J, *et al.* Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2011, **1218**(24): 3791-3798.
- [8] 孙静, 王锐, 尹大强. 顶空固相微萃取-气质联用法同时测定城市水源水中的九种嗅味物质[J]. 环境化学, 2016, **35**(2): 280-286.
- [9] 李林, 宋立荣, 甘南琴, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱测定水中异味化合物[J]. 分析化学, 2005, **33**(8): 1058-1062.
- [10] 成银, 高乃云, 张可佳. 硫醚类嗅味物质的检测和去除技术研究进展[J]. 四川环境, 2011, **30**(2): 119-124.
- [11] 张晓健, 张悦, 王欢, 等. 无锡自来水事件的城市供水应急除臭处理技术[J]. 给水排水, 2007, **33**(9): 7-12.
- [12] 齐敏, 孙小雪, 邓绪伟, 等. 太湖不同形态异味物质含量、相互关系及其与环境因子关系的探讨[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 31-38.
- [13] 张素霞, 马刚, 郭强, 等. 粉末活性炭技术处理水中臭味物质的应用研究[J]. 给水排水, 2007, **33**(9): 17-22.
- [14] 马晓雁, 高乃云, 李青松, 等. 上海市饮用水中痕量土臭素和二甲基异冰片年变化规律及来源研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 902-908.
- [15] Zoschke K, Engel C, Börmick H, *et al.* Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions: influence of NOM and process modelling [J]. Water Research, 2011, **45**(15): 4544-4550.
- [16] 杨茜. 不同粒径粉末活性炭吸附嗅味物质实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- [17] 成银, 高乃云, 张可佳, 等. 二甲基三硫和 β -环柠檬醛的颗粒活性炭吸附机理研究[J]. 水处理技术, 2011, **37**(6): 54-58.
- [18] Liang C Z, Wang D S, Yang M, *et al.* Removal of earthy-musty odorants in drinking water by powdered activated carbon [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2005, **40**(4): 767-778.
- [19] Zhang Y, Tian J Y, Nan J, *et al.* Effect of PAC addition on immersed ultrafiltration for the treatment of algal-rich water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1415-1424.
- [20] Liang S, Li X, Yang Y L, *et al.* PAC addition on immersed ultrafiltration membrane for the treatment of raw water containing taste and odor compounds [J]. Advanced Materials Research, 2012, **446-449**: 2855-2859.
- [21] 詹凤凌, 胡婧逸, 黎园, 等. PAC/MBR 与 MBR 工艺处理微污染水源水的效能对比研究[J]. 水处理技术, 2011, **37**(12): 78-82.
- [22] 李永红, 张伟, 张晓健, 等. PAC 及颗粒物对超滤膜有机物污染的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, **50**(9): 1392-1395.
- [23] 李星, 刘玲, 杨艳玲, 等. 混凝沉淀-生物粉末炭/超滤组合工艺处理含嗅味微污染水研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, **33**(5): 533-537, 544.
- [24] 毛敏敏, 张可佳, 张土乔, 等. 大体积浓缩-固相微萃取-气相色谱-质谱联用测定水样中 6 种典型嗅味物质[J]. 分析化学, 2013, **41**(5): 760-765.
- [25] Peng S F, Ding Z, Zhao L, *et al.* Determination of seven odorants in purified water among worldwide brands by HS-SPME coupled to GC-MS [J]. Chromatographia, 2014, **77**(9-10): 729-735.
- [26] 戴吉胜, 陈贻球, 刘文君, 等. 异养菌总数检测方法研究[J]. 给水排水, 2007, **33**(S1): 22-23.
- [27] 李林, 宋立荣, 陈伟, 等. 淡水藻源异味化合物的光降解和光催化降解研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(13): 102-105.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 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