

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任巍, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁砚, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 王伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161)	《环境科学》征订启事 (4365)
信息 (4123, 4132, 4409)	

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化

敖秀玮¹, 李豪杰¹, 刘文君^{1*}, 余京儒²

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 成都润兴消毒药业有限公司, 成都 610100)

摘要: 以北京田村山净水厂原水和炭后出水作为试验用水, 对新型消毒剂单过硫酸氢钾复合粉消毒后生成的消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 进行定性分析. 向受试水样中分别投加单过硫酸氢钾复合粉和次氯酸钠, 比较了复合粉消毒和氯消毒的 DBPs 生成量, 并通过 *umu* 试验对水样消毒后的遗传毒性变化进行测试. 结果表明, 测试水样投加单过硫酸氢钾复合粉消毒前后的有机物种类变化不大, 但仍有新的卤代烃和卤代物生成. 与氯消毒相比, 单过硫酸氢钾复合粉消毒后生成的三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 的含量更低. 另外, 根据 *umu* 测试的结果, 经单过硫酸氢钾复合粉消毒后原水和炭后水的遗传毒性均明显低于氯消毒. 然而在水中有机物较多和消毒剂投加量较大时, 单过硫酸氢钾复合粉用于消毒仍有一定安全风险.

关键词: 单过硫酸氢钾; 氯消毒; 消毒副产物; 遗传毒性; *umu* 试验

中图分类号: X171.5; TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4241-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201604116

Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder

AO Xiu-wei¹, LI Hao-jie¹, LIU Wen-jun^{1*}, YU Jing-ru²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chengdu Rosun Disinfection Pharmaceuticals Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: The qualitative analysis for by-products in the course of disinfection of the raw water and the effluent of GAC in Beijing Tiancuishan Drinking Water Treatment Plant by potassium monopersulfate compound powder was determined. Halogen disinfection by-products during disinfection process by potassium monopersulfate compound powder was evaluated in a bench scale by comparing with chlorine disinfection process, and the genotoxicity evaluation of potassium monopersulfate compound powder and chlorine disinfection processes was also conducted by *umu*-test. The results showed that there were small changes in the organic pollutant components of water samples after disinfection by potassium monopersulfate compound powder, while some new halogen disinfection by-products were generated. Disinfection with potassium monopersulfate compound powder generated much less trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) than chlorination disinfection. Moreover, the results of *umu* test indicated that the raw water and the effluent of GAC presented lower genotoxicity after potassium monopersulfate compound powder disinfection than chlorine disinfection. However, there was a risk for safety at a high level of organic matters and disinfectant dosage during potassium monopersulfate compound powder disinfection process.

Key words: potassium monopersulfate compound; chlorine disinfection; disinfection by-products; genotoxicity; *umu*-test

氯消毒应用于饮用水消毒处理已有 100 多年的历史, 是目前饮用水厂最常见的消毒技术. 然而自从 20 世纪 70 年代 Rook^[1] 首先发现饮用水氯消毒后有副产物三卤甲烷 (THMs) 生成, 多种 DBPs 陆续被检出, 例如卤乙酸^[2]、卤乙腈^[3]、卤代醛^[4]、卤代酮^[5, 6]、卤代硝基甲烷^[7] 等, 还有多种非卤代 DBPs, 如亚硝胺类^[8, 9] 等. 有研究表明, 大多数 DBPs 会导致饮用水的“致癌、致畸、致突变”的风险明显增加^[10~14], 还可能诱导致病菌产生抗生素抗性基因^[15, 16], 对人类健康和生态安全造成威胁, 使得氯消毒的安全性受到了广泛关注^[17]. 为了消除或减少氯消毒过程中产生的 DBPs, 人们先后研究了

臭氧、紫外线、二氧化氯等替代消毒技术^[18], 然而这些消毒技术都存在局限性, 如臭氧、二氧化氯消毒工艺中仍具有 DBPs 生成的风险^[2, 19], 臭氧和紫外消毒不具备持久的杀菌能力等. 因此, 探寻更能保障饮用水安全的新型消毒剂也成为近些年的研究热点^[20].

单过硫酸氢钾复合粉 (oxone, $2\text{KHSO}_5 \cdot \text{KHSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$) 是一种新型的过氧化物消毒剂, 其中的活性

收稿日期: 2016-04-15; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07404-002); 国家自然科学基金重大项目 (51290284)

作者简介: 敖秀玮 (1992~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水处理高级氧化技术, E-mail: imaoxiuwei@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: wjliu@mails.tsinghua.edu.cn

成分和氧化势能来源为单过硫酸氢钾(KHSO_5 , Peroxymonosulfate, PMS),复合粉中同时辅以氯化钠和表面活性剂等成分.单过硫酸氢钾复合粉溶于水后可释放包括小分子自由基、新生态氧在内的多种活性物种^[21],能够破坏微生物的细胞膜通透性屏障^[22];PMS 可被核酸中钙、铁等金属离子活化而产生自由基,使 DNA 的磷酸二酯键断裂,干扰 DNA 和 RNA 的合成^[23];能氧化病原体,使得菌体蛋白质变性凝固,从而杀灭病原微生物^[24].单过硫酸氢钾复合粉对细菌、真菌、病毒等多种致病微生物具有较强的杀灭作用^[25],实际消毒使用的水溶液毒性较低^[26],已在欧美多个国家上市.然而目前对单过硫酸氢钾复合粉用于饮用水消毒的安全性的研究尚少,Sánchez-Fortún 等^[27]考察了包括单过硫酸氢钾复合粉在内的几种药剂作为冷却水系统消毒剂时的遗传毒性,发现单过硫酸氢钾复合粉在试验条件下的遗传毒性较低.

本文对单过硫酸氢钾复合粉在消毒过程中的 DBPs 生成风险和遗传毒性进行研究,以北京田村山净水厂进水和活性炭滤池出水作为试验用水,对水样经单过硫酸氢钾复合粉消毒后生成的 DBPs 进行定性分析,比较了单过硫酸氢钾复合粉和氯消毒的 DBPs 生成量,并通过 *umu* 试验对水样消毒后的遗传毒性变化进行测试.

1 材料与方法

1.1 实验方法

试验水样为北京田村山净水厂的进水(原水)和活性炭滤池出水(炭后水).水样收集后 2 h 内运送至实验室,并立即采用 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤去除悬浮物.水样在投加一定剂量的单过硫酸氢钾复合粉后置于密闭棕色试剂瓶中,在室温条件下进行消毒反应,反应时间为 24 h,结束后加入适量硫代硫酸钠溶液($2\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)终止消毒反应.将投加复合粉前后的水样进行固相萃取,吸附柱为 HLB 柱($500\ \text{mg}$, $6\ \text{mL}$, 美国 OASIS),以 $5\ \text{mL}$ 甲醇和 $5\ \text{mL}$ 纯水活化,以 $3\ \text{mL}$ 二氯甲烷和 $3\ \text{mL}$ 乙酸乙酯作为淋洗液进行富集.洗脱液经氮吹浓缩后进行 GC/MS 定性分析.

在 DBPs 生成量测定和 *umu* 测试中,一组试验以单过硫酸氢钾复合粉作为消毒剂,另一组试验则投加次氯酸钠(氯消毒)作为对比.向水样分别投加一定剂量的单过硫酸氢钾复合粉和次氯酸钠进行消毒反应,采用液相微量萃取-气相色谱法测定消毒后

三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)的生成量.

同样取田村山水厂原水和炭后水,水样过滤后分别投加单过硫酸氢钾复合粉和次氯酸钠,加入硫代硫酸钠溶液终止反应后用盐酸调节水样 pH 至 2.0 ± 0.1 ,再进行固相萃取.萃取后的洗脱液用氮气吹干,用二甲基亚砜(DMSO)溶解定容,进行 *umu* 遗传毒性测试.*umu* 测试选用鼠伤寒沙门氏菌 TA1535/*pSK1002* 菌株,由日本东京药科大学提供.本试验以 4-硝基喹啉-1-氧化物(4-nitroquinoline-1-oxide, 4-NQO)作为阳性对照.*umu* 试验方法参见文献[28].

1.2 实验试剂

单过硫酸氢钾复合粉,由成都润兴消毒药业有限公司提供;次氯酸钠水溶液(有效氯浓度 $\geq 5\%$,化学纯)、硫代硫酸钠(分析纯)、盐酸(分析纯),由国药提供;试验中所用有机溶剂甲醇、甲基叔丁基醚(MtBE)、正己烷、丙酮、二氯甲烷、乙酸乙酯等均为 HPLC 级,由 J. T. Baker 公司提供;DMSO(ACS 级)由美国 Amresco 公司提供;4-NQO($\geq 98\%$)、三卤甲烷和卤乙酸标准物质,由 Sigma-Aldrich 公司提供.

1.3 主要设备

全自动固相萃取仪, DIONEX AT280; Agilent 7890A 气相色谱仪; Agilent 5975C 质谱仪;酶标仪, MD SpectraMax M5; 恒温培养箱、酶标板振荡培养器、离心机、水浴恒温振荡器、氮吹仪等.

2 结果与讨论

2.1 消毒副产物定性分析

分别向原水和炭后水中投加 $2.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 单过硫酸氢钾复合粉,消毒前后水样中微量有机物经 GC/MS 分析的结果见表 1 和表 2 所示.

由于原水中存在的腐殖酸等难挥发大分子有机物不易通过 GC/MS 检出,GC/MS 分析仅限于挥发性的小分子有机物.根据本试验结果,原水中共检测出 32 种有机物,被列入 USEPA 优先控制污染物名单的有 7 种,列入我国优先控制污染物名单的有 8 种.在所有的有机污染物中,芳香族化合物(包括苯系物、苯酚类、苯胺类、稠环芳烃及其他苯的衍生物)共有 18 种,为原水中主要的污染物类型,其次为酮类(4 种)、杂环类(3 种)和邻苯二甲酸酯类(2 种).原水投加单过硫酸氢钾复合粉后,生成了几种原水中没有的卤代烃和卤代物,包括三氯甲烷、1,1,2,2-四氯乙烷、双(2-氯异丙基)醚和氯甲基乙基醚,前三者均为 USEPA 公布的优先控制污染物.

表 1 原水投加单过硫酸氢钾复合粉前后 GC/MS 分析结果¹⁾

Table 1 Qualitative analysis results for by-products in the disinfection course of raw water by potassium monopersulfate compound powder		
检测出的物质分类	原水	原水投加单过硫酸氢钾复合粉
卤代烃		三氯甲烷 ^{a,b} 、1,1,2,2-四氯乙烷 ^{a,b}
卤代物	1,4-二氯苯 ^{a,b}	氯甲基乙基醚、1,4-二氯苯 ^{a,b} 、双(2-氯异丙基)醚 ^a
苯系物	邻二甲苯 ^[b] 、对二甲苯 ^b 、苯乙烯	邻二甲苯 ^b 、苯乙烯、对二甲苯 ^b
苯酚类	苯酚 ^{a,b} 、邻硝基苯酚 ^{a,b} 、3-甲基-2-硝基苯酚、4-甲基-2-硝基苯酚、5-甲基-2-硝基苯酚	苯酚 ^{a,b} 、邻硝基苯酚 ^{a,b}
苯胺类	1-乙基-1-苯肼	
稠环芳烃	萘 ^{a,b} 、1-甲基萘、菲 ^a	萘 ^{a,b} 、1-甲基萘
邻苯二甲酸酯类	邻苯二甲酸二甲酯 ^{a,b} 、邻苯二甲酸二正丁酯 ^{a,b}	邻苯二甲酸二甲酯 ^{a,b} 、邻苯二甲酸二正丁酯 ^{a,b}
烷烃	高碳烷烃	高碳烷烃
烯烃	高碳烯烃	高碳烯烃
醇类	2-乙基-1-己醇、2-苯基-2-丙醇	2-苯基-2-丙醇
醛类	苯甲醛	苯甲醛
酮类	环己酮、2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮、苯乙酮、对甲基苯乙酮、1-茛满酮、9-茛酮	苯乙酮、2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮、1-茛满酮
醌类	2,6-二叔丁基-1,4-苯醌	2,6-二叔丁基-1,5-苯醌
腈类	苯甲腈	苯甲腈、四甲基琥珀腈、2-萘甲腈
脂肪酸酯	2-(2-正丁氧基乙氧基)乙酸乙酯	丁酸丁酯
杂环类	苯并噻唑、环丁砜、喹啉	苯并噻唑、环丁砜、喹啉

1) 上标 a 表示该有机物属于 USEPA 公布的优先控制污染物；上标 b 表示该有机物属于中国环境优先控制污染物，下同

表 2 炭后水投加单过硫酸氢钾复合粉前后 GC/MS 分析结果

Table 2 Qualitative analysis results for by-products in the disinfection course of the GAC effluent by potassium monopersulfate compound powder		
检测出物质分类	炭后水	炭后水投加单过硫酸氢钾复合粉
卤代烃	1,1,2,2-四氯乙烷 ^{a,b}	三氯甲烷 ^{a,b} 、1,1,2,2-四氯乙烷 ^[a,b] 、三溴甲烷 ^[a,b]
卤代物	1,4-二氯苯 ^{a,b} 、双(2-氯异丙基)醚 ^a	1,4-二氯苯 ^{a,b} 、双(2-氯异丙基)醚 ^a
苯系物	邻二甲苯 ^b 、苯乙烯、对二甲苯 ^b	邻二甲苯 ^b 、苯乙烯、对二甲苯 ^b
苯酚类	苯酚 ^{a,b} 、2,4-二叔丁基苯酚	苯酚 ^{a,b} 、2,4-二叔丁基苯酚
稠环芳烃	萘 ^{a,b} 、1-甲基萘	萘 ^{a,b} 、1-甲基萘
邻苯二甲酸酯类	邻苯二甲酸二甲酯 ^{a,b} 、邻苯二甲酸二正丁酯 ^{a,b}	邻苯二甲酸二甲酯 ^{a,b} 、邻苯二甲酸二正丁酯 ^{a,b} 、邻苯二甲酸酐、邻苯二甲酸异丙酯
烷烃	高碳烷烃	高碳烷烃
烯烃	高碳烯烃	高碳烯烃
醇类	2-乙基-1-己醇、2-苯基-2-丙醇	2-乙基-1-己醇、2-苯基-2-丙醇
醛类	苯甲醛	苯甲醛
酮类	苯乙酮、2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮、9-茛酮、1-茛满酮	苯乙酮、2,6,6-三甲基-环己烯-1,4-二酮、1-茛满酮、9-茛酮
肟类		甲氧基-苯基-肟
腈类		苯甲腈
羧酸		棕榈酸
芳香酸酯	苯甲酸丁酯	苯甲酸丁酯、苯甲酸苄酯、
脂肪酸酯	2-(2-正丁氧基乙氧基)乙酸乙酯	丁酸丁酯
杂环类	环丁砜、苯并噻唑	环丁砜、苯并噻唑、喹啉、6-甲氧基-2-甲基苯并噻唑

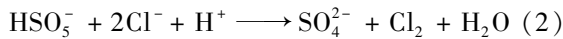
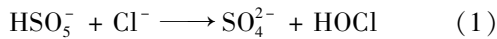
由表 2 结果可知,炭后水中存在的有机物种类相对原水较少,共检测出 25 种有机物,其中 7 种被列入 USEPA 优先控制污染物名单,8 种被列入我国优先控制污染物名单.炭后水所含有机污染物中,芳香族化合物仍为主要污染类型,共检出 14 种.炭后水在投加单过硫酸氢钾复合粉之后,除了本身含有的 1,1,2,2-四氯乙烷、1,4-二氯苯和双(2-氯异丙基)醚外,又生成了 DBPs 三氯甲烷和三溴甲烷.

大多数 DBPs 具有潜在致癌、致畸、致突变性,对饮用水安全造成威胁.从以上分析结果可以看出,水样在投加单过硫酸氢钾复合粉之后,有机污染物的组成变化不大,但仍有新的卤代烃和卤代物生成,使得消毒后水体具有一定的安全风险.

2.2 消毒副产物生成量测定

三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 是氯化消毒过程产生的两类主要的 DBPs,是评价 DBPs 致癌

风险的重要指标参数^[29]. 单过硫酸氢钾复合粉中含有 NaCl 等辅助成分. Lente 等^[30]研究 PMS 与卤素的反应,发现 PMS 可以被卤素活化产生 OX^- (X 为 Cl、Br 或 I). 徐蕾等^[31]的试验证实,当水中 Cl^- 的浓度较低时,PMS 即可直接与 Cl^- 进行非自由基反应生成活性物种 Cl_2 和 $HOCl$,如式(1)与(2)所示. 因此当单过硫酸氢钾复合粉溶于水时,由于复合粉中 NaCl 的存在,使得复合粉可以释放一定量的次氯酸,从而具有生成卤代 DBPs 的可能.



向原水和炭后水中分别投加单过硫酸氢钾复合粉次氯酸钠,复合粉投加量为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,次氯酸钠投加后其起始有效氯浓度也为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 水样经消毒反应后的 THMs 和 HAAs 生成量测定结果见图 1 和图 2.

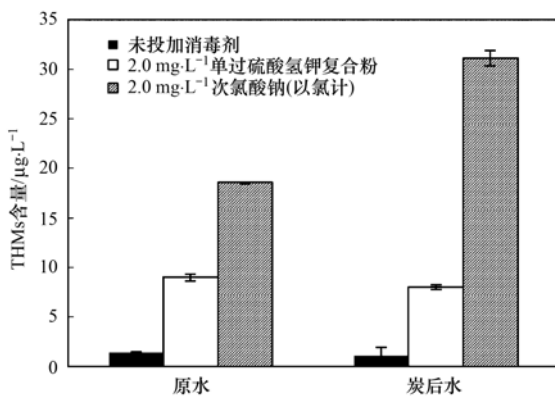


图 1 投加不同消毒剂对原水和炭后水中三卤甲烷 (THMs) 生成量影响

Fig. 1 Effect of different disinfectants on THMs formation in the raw water and the effluent of GAC

由图 1 和图 2 可以看出,原水和炭后水投加两种消毒剂后,水中有机物与两种消毒剂均发生反应生成了 DBPs,其中 THMs 和 HAAs 含量相对原水和炭后水有明显上升. 原水的 THMs 和 HAAs 含量分别为 $1.41 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.59 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,投加 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 单过硫酸氢钾复合粉后 THMs 和 HAAs 含量提高至 $8.98 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $6.72 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,相应地投加次氯酸钠后二者含量增至 $18.54 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $22.06 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 对于炭后水而言,也取得了相似的试验结果.

从本试验结果可以看出,虽然单过硫酸氢钾复合粉消毒过程也可产生卤代消毒 DBPs,但投加次氯酸钠后水中的 THMs 和 HAAs 生成量是投加单过硫酸氢钾复合粉后的生成量的 2~4 倍,投加单过硫酸氢钾复合粉消毒比氯消毒后产生的 DBPs 更少.

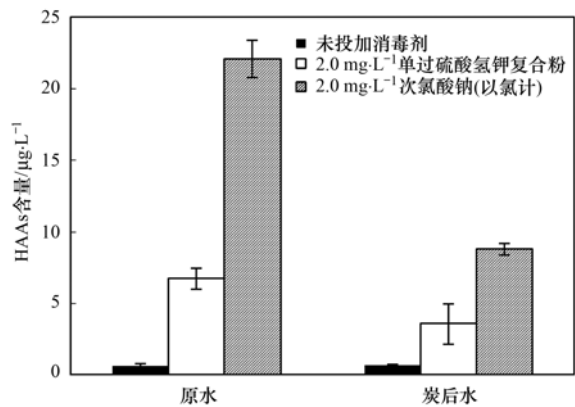


图 2 投加不同消毒剂对原水和炭后水中卤乙酸 (HAAs) 生成量的影响

Fig. 2 Effect of different disinfectants on HAAs formation in raw water and the effluent of GAC

2.3 遗传毒性评估

大多数关于 DBPs 风险的研究,是基于实验室进行的毒理学研究来判断的. 目前遗传毒理学短期试验的测试方法主要有 Ames 试验、微核试验、彗星试验和 *umu* 试验等. 本研究采用 *umu* 试验的方法对单过硫酸氢钾复合粉消毒过程的 DBPs 的遗传毒性进行分析. 试验测试结果以诱导率 I_r 值表示,以阳性物质 4-NQO 的等当量毒性来评价饮用水的致癌风险.

利用 4-NQO 对小鼠的致癌剂量效应曲线推算得到对人的剂量效应曲线,得到对人的致癌强度系数 ($q = 0.369 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$). 假设样品中污染物的致癌效应与 4-NQO 相同,比较试验中阳性对照和样品的剂量效应关系曲线的斜率,得到样品中 4-NQO 等当量浓度 TEQ ($\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$),从而确定样品的致癌风险大小. 按成年人体重 70kg,每日饮水 2L 计算,基于 *umu* 效应致癌风险为:

$$P = \frac{\text{TEQ} \times 2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}}{70 \text{ kg}} \times 0.369 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$$

式中, P 为致癌风险. 当遗传毒性效应的致癌风险为百万分之一 (即 $P = 10^{-6}$) 时,水中的遗传毒性当量浓度 TEQ (以 4-NQO 计,下同) 为 $94.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,本研究以此为安全风险阈值对测试结果进行评估.

向 2 L 过滤后的原水、5 L 过滤后的炭后水中分别投加剂量为 0.1、0.5、1.0、 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的单过硫酸氢钾复合粉和起始有效氯浓度为 0.1、0.5、1.0、 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的次氯酸钠,考察消毒剂投加量对遗传毒性的影响,测试结果如下图 3 和图 4 所示.

根据测试结果,原水和炭后水本身均具有一定的遗传毒性. 投加消毒剂后,随着消毒剂剂量的增

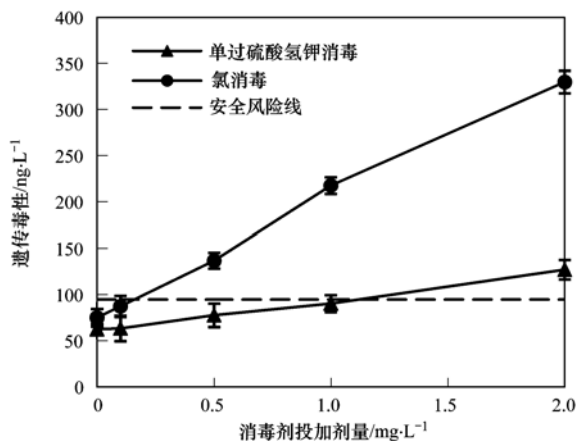


图3 投加氯和单过硫酸氢钾消毒粉后原水遗传毒性随消毒剂投加量的变化

Fig. 3 Changes in the genotoxicity of the raw water disinfected by chlorine and potassium monopersulfate compound powder with different initial dosages

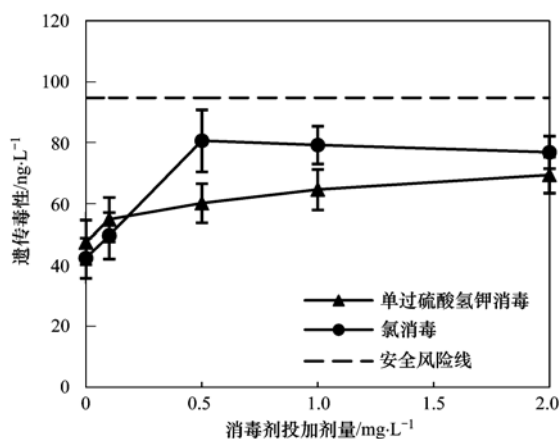


图4 投加氯和单过硫酸氢钾消毒粉后炭后水遗传毒性随消毒剂投加量的变化

Fig. 4 Changes in the genotoxicity of the effluent of GAC disinfected by chlorine and potassium monopersulfate compound powder with different initial dosages

加,除了炭后水投加氯消毒后遗传毒性先增大随后稍有下降,其余原水和炭后水的遗传毒性均随之增加。其中原水有机物含量和种类较多,更易于与消毒剂作用,使得原水的遗传毒性强于炭后出水。

原水在氯的投加量达到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,遗传毒性当量浓度为 $137.0 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,已高于安全风险阈值 ($94.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$),随着氯投加量的增大,遗传毒性呈较为快速增长的趋势。原水中投加氯消毒后的遗传毒性明显高于单过硫酸氢钾复合粉消毒,并且明显高于安全风险阈值。但在单过硫酸氢钾复合粉投加量达到 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,遗传毒性当量浓度为 $127.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,超过了安全阈值,说明当水样有机物较多

时,提高单过硫酸氢钾复合粉的投加量也存在着一一定安全风险。

本试验结果表明,炭后水在氯消毒和单过硫酸氢复合粉消毒后的遗传毒性均低于安全风险阈值,其中氯消毒的遗传毒性高于单过硫酸氢钾复合粉消毒。

3 结论

(1)通过 GC/MS 定性分析,测试水样在投加单过硫酸氢钾复合粉之后,虽然有机污染物的组成变化不大,但仍有新的卤代烃和卤代烷生成,使得消毒后水体具有一定的安全风险。

(2)测试水样经氯消毒后的三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 生成量明显高于经单过硫酸氢钾复合粉消毒后的生成量。单过硫酸氢钾复合粉消毒后虽然有 DBPs 生成,但其含量较低,并明显低于氯消毒。

(3)通过 *umu* 毒性测试,水样经氯消毒后的遗传毒性高于经单过硫酸氢钾复合粉消毒的遗传毒性。且在水样中有机物含量较多时,氯消毒后的遗传毒性随消毒剂投加量的增大而上升明显,而单过硫酸氢钾复合粉消毒后的遗传毒性则上升缓慢。然而当水样有机物较多时,较大的单过硫酸氢钾复合粉的投加量 (文中为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 也存在着一一定的安全风险。

参考文献:

- [1] Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural water[J]. Water Treatment Examination, 1974, **23**: 234-243.
- [2] Hua G H, Reckhow D A. Comparison of disinfection byproduct formation from chlorine and alternative disinfectants[J]. Water Research, 2007, **41**(8): 1667-1678.
- [3] Shah A D, Mitch W A. Halonitroalkanes, halonitriles, haloamides, and N-Nitrosamines: a critical review of nitrogenous disinfection byproduct formation pathways [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(1): 119-131.
- [4] Jeong C H, Postigo C, Richardson S D, et al. Occurrence and comparative toxicity of haloacetaldehyde disinfection byproducts in drinking water[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(23): 13749-13759.
- [5] Guilherme S, Rodriguez M J. Occurrence of regulated and non-regulated disinfection by-products in small drinking water systems [J]. Chemosphere, 2014, **117**: 425-432.
- [6] 丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 等. 饮用水中消毒副产物 1, 1-二氯丙酮的形成机制[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1662-1667.
Ding C S, Meng Z, Xu Y Y, et al. Formation mechanism of the disinfection by-product 1, 1-dichloroacetone in drinking water [J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1662-1667.
- [7] 丁春生, 邹邦文, 缪佳, 等. 饮用水中含氮消毒副产物三氯硝基甲烷的形成过程和影响因素[J]. 环境科学, 2013, **34**

- (8): 3113-3118.
- Ding C S, Zou B W, Miao J, *et al.* Formation process of nitrogenous disinfection byproduct trichloronitromethane in drinking water and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3113-3118.
- [8] West D M, Wu Q H, Donovan A, *et al.* N-nitrosamine formation by monochloramine, free chlorine, and peracetic acid disinfection with presence of amine precursors in drinking water system[J]. Chemosphere, 2016, **153**: 521-527.
- [9] Krasner S W, Mitch W A, McCurry D L, *et al.* Formation, precursors, control, and occurrence of nitrosamines in drinking water: a review[J]. Water Research, 2013, **47**(13): 4433-4450.
- [10] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 20-33.
- Zhao Y L, Li X F. Drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and toxicity [J]. Environmental Chemistry, 2011, **30**(1): 20-33.
- [11] Stalter D, O'Malley E, von Gunten U, *et al.* Fingerprinting the reactive toxicity pathways of 50 drinking water disinfection by-products[J]. Water Research, 2016, **91**: 19-30.
- [12] Hrudey S E, Backer L C, Humpage A R, *et al.* Evaluating evidence for association of human bladder cancer with drinking-water chlorination disinfection by-products [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B: Critical Reviews, 2015, **18**(5): 213-241.
- [13] Monarca S, Zani C, Richardson S D, *et al.* A new approach to evaluating the toxicity and genotoxicity of disinfected drinking water[J]. Water Research, 2004, **38**(17): 3809-3819.
- [14] 于洋, 韦霄, 张志勇. 饮用水中卤乙腈的形成和毒性研究进展[J]. 环境与健康杂志, 2014, **31**(8): 741-745.
- Yu Y, Wei X, Zhang Z Y. Formation and toxicity of haloacetonitriles in drinking water: a review of recent studies [J]. Journal of Environment and Health, 2014, **31**(8): 741-745.
- [15] Li D, Zeng S Y, He M, *et al.* Water disinfection byproducts induce antibiotic resistance-role of environmental pollutants in resistance phenomena [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(6): 3193-3201.
- [16] 吕露, 张梦露, 王春明, 等. 3 种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2525-2531.
- Lü L, Zhang M L, Wang C M, *et al.* Effect of three typical disinfection byproducts on bacterial antibiotic resistance [J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2525-2531.
- [17] 常洋洋, 陈庆欣, 李宁, 等. 饮用水消毒技术发展趋势的文献计量学分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 413-419.
- Chang Y Y, Chen Q X, Li N, *et al.* Development tendency of drinking water disinfection based on a bibliometrics analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 413-419.
- [18] 陈国光, 朱慧峰, 钱静汝. 消毒方式及消毒副产物控制研究[J]. 给水排水, 2014, **40**(10): 9-13.
- Chen G G, Zhu H F, Qian J R. Study on the disinfection methods and disinfection byproducts control [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, **40**(10): 9-13.
- [19] von Gunten U. Ozonation of drinking water: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine [J]. Water Research, 2003, **37**(7): 1469-1487.
- [20] Shannon M A, Bohn P W, Elimelech M, *et al.* Science and technology for water purification in the coming decades [J]. Nature, 2008, **452**(7185): 301-310.
- [21] Paetzold S C, Davidson J. Aquaculture fouling: efficacy of potassium monopersulphonate triple salt based disinfectant (Virkon® Aquatic) against *Ciona intestinalis* [J]. Biofouling, 2011, **27**(6): 655-665.
- [22] Waites W M, Wyatt L R, King N R, *et al.* Changes in spores of *Clostridium bifermentans* caused by treatment with hydrogen peroxide and cations [J]. Journal of General Microbiology, 1976, **93**(2): 388-396.
- [23] Demple B, Halbrook J, Linn S. Escherichia coli xth mutants are hypersensitive to hydrogen peroxide[J]. Journal of Bacteriology, 1983, **153**(2): 1079-1082.
- [24] Anipsitakis G P, Tufano T P, Dionysiou D D. Chemical and microbial decontamination of pool water using activated potassium peroxymonosulfate[J]. Water Research, 2008, **42**(12): 2899-2910.
- [25] Su X W, D'Souza D H. Inactivation of human norovirus surrogates by benzalkonium chloride, potassium peroxymonosulfate, tannic acid, and Gallic acid[J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2012, **9**(9): 829-834.
- [26] Wong M K, Chan T C, Chan W Y, *et al.* Dioxiranes generated in situ from pyruvates and oxone as environmentally friendly oxidizing agents for disinfection [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(2): 625-630.
- [27] Sánchez-Fortún S, Llorente M T, Castaño A. Cytotoxic and genotoxic effect in RTG-2 cell line exposed to selected biocides used in the disinfection of cooling towers [J]. Ecotoxicology, 2008, **17**(4): 273-279.
- [28] Ozhan G, Catalgol B K, Unal A S, *et al.* Assessment of the genotoxic potential of surface waters using *umu*-test [J]. Toxicology Letters, 2008, **172**(S7): S161.
- [29] 陈晓峰, 丁新良, 周伟杰, 等. 无锡地区出厂水消毒副产物变化趋势及致癌风险研究[J]. 环境卫生学杂志, 2015, **5**(2): 135-138.
- Chen X F, Ding X L, Zhou W J, *et al.* Disinfection by-products tendency and carcinogenic risk in treated water in Wuxi [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2015, **5**(2): 135-138.
- [30] Lente G, Kalmaár J, Baranyai Z, *et al.* One-versus two-electron oxidation with peroxomonosulfate ion: reactions with Iron (II), Vanadium (IV), halide ions, and photoreaction with Cerium (III) [J]. Inorganic Chemistry, 2009, **48**(4): 1763-1773.
- [31] 徐蕾, 袁瑞霞, 郭耀广, 等. 氯离子对钴/单过氧硫酸盐体系降解 2,4,6-三氯苯酚的影响[J]. 武汉大学学报(理学版), 2013, **59**(1): 51-56.
- Xu L, Yuan R X, Guo Y G, *et al.* Effects of chloride ions on degradation of 2, 4, 6-trichlorophenol by Co (II)/peroxymonosulfate (Co/PMS) system [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2013, **59**(1): 51-56.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《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11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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