

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

氨氮及 H_2O_2 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响

王永京^{1,2}, 杜旭¹, 金萌¹, 冯思捷¹, 杨凯^{2,3}, 张明露¹, 于建伟^{2,3*}

(1. 北京工商大学食品学院环境科学与工程系, 北京 100048; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 中国科学院饮用水科学与技术重点实验室, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本研究以南方某含溴水源为原水, 利用饮用水常规工艺及臭氧-活性炭深度处理中试连续实验, 评价臭氧氧化过程中溴酸盐生成情况, 并考察了氨氮、过氧化氢(H_2O_2)对溴酸盐控制效果及对三卤甲烷生成势(THMFP)的去除影响。结果表明, 在不同水质条件下, 臭氧消耗量为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时, 溴酸盐的生成量超过标准 ($10.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。利用氨氮和 H_2O_2 投加均能有效控制溴酸盐生成量, 且随投加量增大, 溴酸盐生成量逐渐降低, 氨氮投加 $0.10 \sim 0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $m(\text{H}_2\text{O}_2)/m(\text{O}_3)$ (质量比) 为 $0.2 \sim 1.0$ 时, 能够将溴酸盐控制在标准以内。当氨氮- H_2O_2 联合控制溴酸盐时, 溴酸盐生成量随 $m(\text{H}_2\text{O}_2)/m(\text{O}_3)$ 先升高后降低。在利用氨氮和 H_2O_2 投加进行溴酸盐控制过程中, 氨氮对 THMFP 的去除效率影响并不显著, 而投加 H_2O_2 使得 THMFP 去除效能有所降低。

关键词: 臭氧; 生物活性炭; 溴酸盐; 过氧化氢; 氨氮; 三卤甲烷

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0616-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605091

Impact of Ammonia and H_2O_2 on Bromate and Disinfection By-products Control

WANG Yong-jing^{1,2}, DU Xu¹, JIN Meng¹, FENG Si-jie¹, YANG Kai^{2,3}, ZHANG Ming-lu¹, YU Jian-wei^{2,3*}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A pilot-scale study with conventional water treatment and ozone-biological activated carbon (O_3 -BAC) treatment was conducted to evaluate the impact of ammonia and hydrogen peroxide (H_2O_2) addition on the bromate and disinfection by-products formation potential (DBPFP) control, with bromide containing water as raw water. It was found that bromate concentration would exceed $10.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ as ozone doses were higher than $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ under different water qualities. Ammonia and H_2O_2 could effectively control bromate formation and bromate concentration decreased as ammonia and H_2O_2 doses increased. Bromate concentration could be controlled below $10.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ as ammonia dose was $0.10\text{--}0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ or the $m(\text{H}_2\text{O}_2)/m(\text{O}_3)$ was $0.2\text{--}1.0$. However, as ammonia- H_2O_2 was combined for the same purpose, bromate increased firstly and then decreased. Ammonia addition would not significantly affect the THMFP control but H_2O_2 application would depress the efficiency of THMFP removal.

Key words: ozone; biological activated carbon; bromate; hydrogen peroxide; ammonia; trihalomethane

臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)工艺因能有效去除水中难降解有机物、控制消毒副产物(DBPs)而得到关注。然而含溴水源应用臭氧过程中易生成致癌物溴酸盐,很多国家饮用水标准将其限定在 $10.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下^[1,2]。有研究者对不同含溴水源臭氧氧化,发现溴酸盐生成量超标^[3,4]。部分水源受海水入侵,导致溴离子浓度较高,使溴酸盐超标风险增加^[5,6]。溴酸盐控制的方法较多,如优化臭氧投加量、降低溶液 pH 值、加氨、加过氧化氢等^[7,8],原水氨氮含量较低的情况下投加氨氮能抑制溴酸盐生成,然而对于氨氮含量较高的水源,效果并不显著^[9]。投加 H_2O_2 能有效控制溴酸盐生成,有研究发现 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ (质量比,下同) 高于 0.7 时能够将其控制在标准以内^[10,11],然而溴酸盐生成与控制受到水质因素的影响较大^[12],针对不同水质控制效能有所变化,部分 H_2O_2 用量情况下出现溴酸盐升高的现

象^[13]。另外, H_2O_2 投加可能对 O_3 -BAC 控制 THMFP 的效能产生影响,有研究指出, H_2O_2 投加导致臭氧氧化出水 THMFP 略有升高^[14,15]。本研究以我国南方某含溴水源为原水,利用中试实验评价 O_3 -BAC 处理过程中溴酸盐的生成情况,重点考察氨氮、 H_2O_2 投加对溴酸盐控制效果及对 O_3 -BAC 控制 THMFP 效能的影响,以期为饮用水厂应用 O_3 -BAC 深度处理工艺处理含溴原水时提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 中试工艺流程及参数

中试进水流量为 $200 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$,主要工艺包括常规

收稿日期: 2016-05-13; 修订日期: 2016-07-07

基金项目: 北京工商大学两科基金培育项目(LKJJ2016-17); 国家自然科学基金青年项目(51408010); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51608011)

作者简介: 王永京(1983~),男,博士,副教授,主要研究方向为饮用水污染控制, E-mail: wangyongjing@btbu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jwyu@cees.ac.cn

工艺(混凝-沉淀-砂滤)及臭氧氧化-生物活性炭深度处理组成,深度处理工艺流程如图 1 所示。

混合池采用 DN110 mm 的不锈钢柱,壁厚 3 mm,有效高度 350 mm,总高度 400 mm,有效容积 3.3 L,混合时间为 1 min;絮凝时间:15 min,采用机械搅拌絮凝池,不锈钢材质,池内设 3 挡搅拌机,转速分别为 150、100、50 r·min⁻¹。沉淀池采用异向流斜板沉淀池,沉淀时间:35 min,斜板沉淀区表面负荷为:8 m³·(m²·h)⁻¹,斜板间距 10 mm,厚 3 mm,斜板长度 1 m,沉淀区斜板倾角 60°,采用波纹板(有机玻璃)。砂滤柱采用 DN170 mm 的不锈钢柱(壁厚 3 mm);滤料:石英砂,粒径 $d_{\min}=0.95$ mm, $d_{\max}=1.35$ mm(取自某净水厂),不均匀系数 $K80<1.5$,厚度 700 mm,滤速 8 m·h⁻¹;承托层:粗砂(取自某净水厂),粒径 4~8 mm,厚度 200 mm;水洗滤池的冲洗强度:20 L·(s·m²)⁻¹,冲洗时间:5 min。

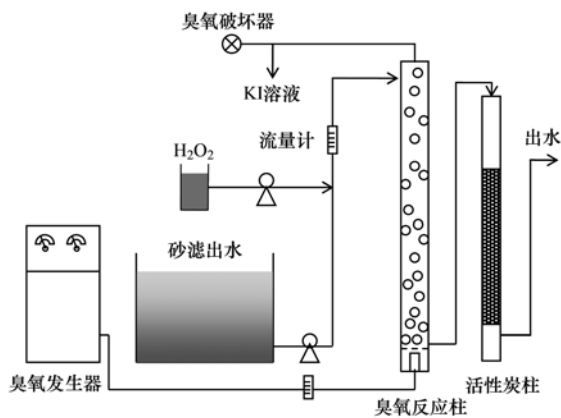


图 1 臭氧-生物活性炭深度处理工艺流程示意
Fig. 1 Flow chart of O₃-BAC treatment processes

本实验中臭氧发生系统包括臭氧发生器(OS-1N, Mitsubishi Electric Co. Japan)和制氧机FY3(北京北辰科技公司)。臭氧反应柱采用 DN130 mm 的不锈钢柱(壁厚 3 mm),臭氧扩散器采用钛板微孔曝气,有效高度 $H_{\text{effective}}=1\,500$ mm,总高度 2 000 mm,有效容积 17.8 L,实际水力停留时间约为 5 min。反应器底部设取样口。活性炭柱(有效高度 = 1.0 m,直径 DN=0.13 m,体积 = 12 L),活性炭取自某水厂运行 2 a 以上的活性炭滤池。

1.2 检测方法

气态臭氧采用碘量法进行检测,水中溶解态臭氧采用靛蓝法检测,DOC 采用 Shimadzu TOC 检测仪(TOC-Vcph)进行检测,UV₂₅₄通过 Hitachi(日本)U-3010 紫外/可见分光光度计进行检测,DOC 与 UV₂₅₄样品在检测前经过 0.45 μm 滤膜(Millipore)

过滤。氨氮等其他指标分析均依据文献[16]的方法。溴离子与溴酸盐检测采用戴安 2000 离子色谱仪,溴酸盐最低检出限为 2.0 μg·L⁻¹,溴离子最低检出限为 10.0 μg·L⁻¹。

三卤甲烷生成势均在前期研究方法基础上进行^[17],首先通过标准方法测量水样的需氯量,取 100 mL 样品利用 0.1 mol·L⁻¹盐酸将其 pH 调整到 7.0,之后进行氯化,并在 25℃ 的培养箱内培养 4 h,之后根据文献[16]的碘量法测量余氯,即可计算出样品的需氯量。在水样的测量中,取 10 mL 样品装入玻璃瓶中,调节 pH 至 7.0 后加入缓冲溶液,之后向水样中加入氯使反应 24 h 后的余氯保持在(1.0 ± 0.4) mg·L⁻¹,将余氯用抗坏血酸猝灭,之后利用 GC-ECD 检测三卤甲烷。

1.3 原水及滤后水水质

表 1 为该水源原水与常规工艺出水即砂滤工艺段出水水质指标,从中可以看出,水中氨氮含量较低,原水在 0.09 mg·L⁻¹以下,有机物及溴离子浓度变化范围较大,水源中溴离子浓度范围为 14.92~71.7 μg·L⁻¹,溴离子浓度随时间和季节变化规律明显,如图 2 所示,从 3 月开始,溴离子浓度开始逐渐降低,7~9 月溴离子浓度达到最低,约为 20.53 μg·L⁻¹左右,之后又逐渐升高,溴离子浓度随季节变化可能与夏季降水的稀释作用有关。

表 1 原水及砂滤出水水质指标

Table 1 Characteristics of raw water and sand filtered water		
水质指标	原水	砂滤出水
pH	7.4~8.2	7.5~7.9
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.02~0.09	0~0.03
DOC/mg·L ⁻¹	1.04~3.02	1.02~2.74
Br ⁻ /μg·L ⁻¹	14.92~71.7	14.74~71.56
THMP/μg·L ⁻¹	101.71~131.22	72.16~100.65

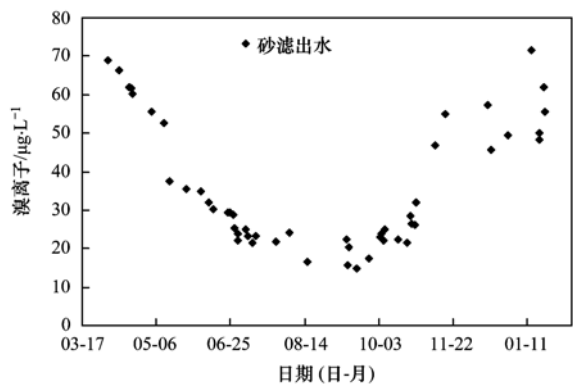


图 2 水源溴离子浓度随季节变化情况

Fig. 2 Bromide concentration of raw water in different seasons

2 结果与讨论

2.1 O_3 -BAC 深度处理对 THMFP 控制效果

研究中原水 DOC 为 $1.04 \sim 3.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随季节波动较大, 在氯消毒过程中, 水中部分有机物能够作为前驱体被氧化生成致癌物三卤甲烷 (THMs), 该水源水的三卤甲烷生成势 (THMFP) 为 $101.71 \sim 131.22 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 常规处理工艺中混凝沉淀砂滤能够去除水中部分 THMs 前驱物, 从表 1 中可以看到砂滤出水 THMFP 为 $72.16 \sim 100.65 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明常规工艺出水 THMFP 有所降低, 这是因为常规工艺能够去除较多的疏水性有机物, 而该类有机物被证明与氯反应时具有较强的 THMs 生成活性^[18], 砂滤出水中 THMFP 含量仍然较高, 在后续消毒中存在超标风险, 需对其进行进一步控制。

图 3 为在常规工艺后利用 O_3 -BAC 深度处理工艺控制 THMFP 的效果, THMFP/THMFP₀ 代表臭氧氧化工艺段及 BAC 处理工艺段出水中 THMFP 相对于常规工艺砂滤出水的剩余率。当不投加臭氧时, BAC 出水剩余率将近 71%, 当臭氧消耗量从 0 增加到 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 臭氧氧化及 BAC 两工艺段出水的剩余率分别达到 61% 和 47%, 说明臭氧的氧化促进了后续 BAC 对 THMs 前驱物的去除效果, 这可能与臭氧氧化生成了更多小分子有机物如醛、酮、羧酸类物质有关^[19,20]。在此基础上继续增加臭氧投加量对 THMFP 并没有进一步的去除。

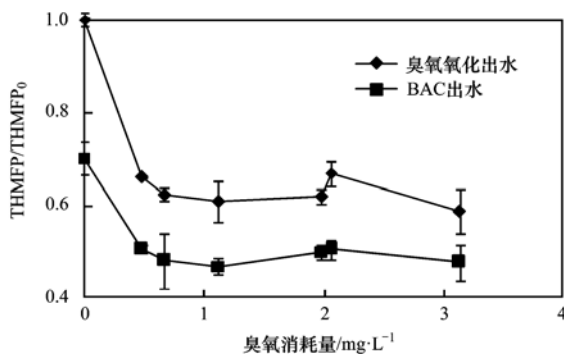


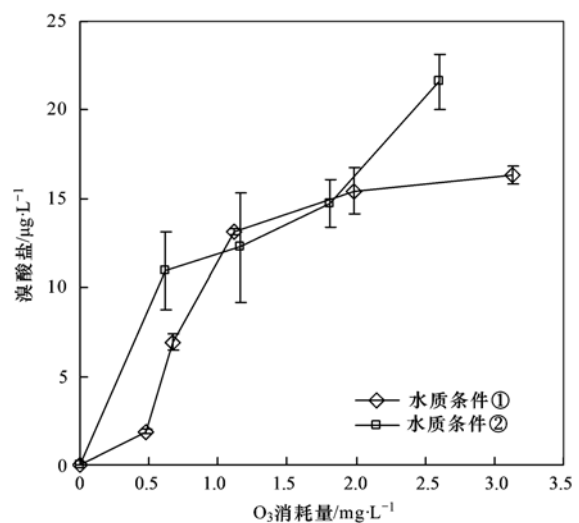
图 3 O_3 -BAC 深度处理对 THMFP 去除影响

Fig. 3 Removal efficiency of THMFP by O_3 -BAC treatment processes

2.2 臭氧氧化过程中溴酸盐生成情况

该水源原水中含有一定量溴离子, 氨氮含量较低, 砂滤出水平均为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在应用臭氧过程中存在溴酸盐生成与超标风险, 图 4 为不同水质条件下臭氧氧化生成溴酸盐的情况, 从中可以看出, 臭氧氧化过程中有溴酸盐生成, 且存在超标风险。臭

氧在水中能够发生分解链反应生成羟基自由基, 臭氧分子与羟基自由基共同氧化溴离子, 导致溴酸盐的生成^[11]。然而当水中有机物和溴离子浓度变化时, 溴酸盐生成量有一定程度的变化。当在水质条件①时, DOC 含量较高, 而溴离子浓度较低, 当臭氧消耗量达到 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, 溴酸盐生成量超过标准, 而当消耗量达到 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, 溴酸盐生成 $15.42 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在水质条件②时, 溴离子浓度升高, DOC 浓度下降, 虽然温度有所降低, 但消耗 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的臭氧即可生成 $10.95 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溴酸盐, 在 $2.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的臭氧量下溴酸盐生成量 $21.60 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。溴酸盐的生成与不同的水质因素有直接的关系, 其中溴离子浓度、有机物、氨氮、温度等因素均会对其生成产生影响, 溴离子、有机物浓度及温度升高均会促进溴酸盐的生成, 而氨氮浓度的增加可能导致溴酸盐生成量减少^[21,22]。该水源水在应用臭氧氧化过程中, 溴酸盐的生成风险较高, 需对其进行控制。



水质条件①: $[\text{Br}^-]$ 为 $15.81 \sim 22.52 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $[\text{NH}_4^+]$ 为 $0 \sim 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DOC 为 $1.45 \sim 2.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 水质条件②: $[\text{Br}^-]$ 为 $21.52 \sim 29.40 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $[\text{NH}_4^+]$ 为 $0 \sim 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DOC 为 $1.02 \sim 1.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图 4 不同水质条件下溴酸盐生成情况

Fig. 4 Bromate formation under different water quality conditions

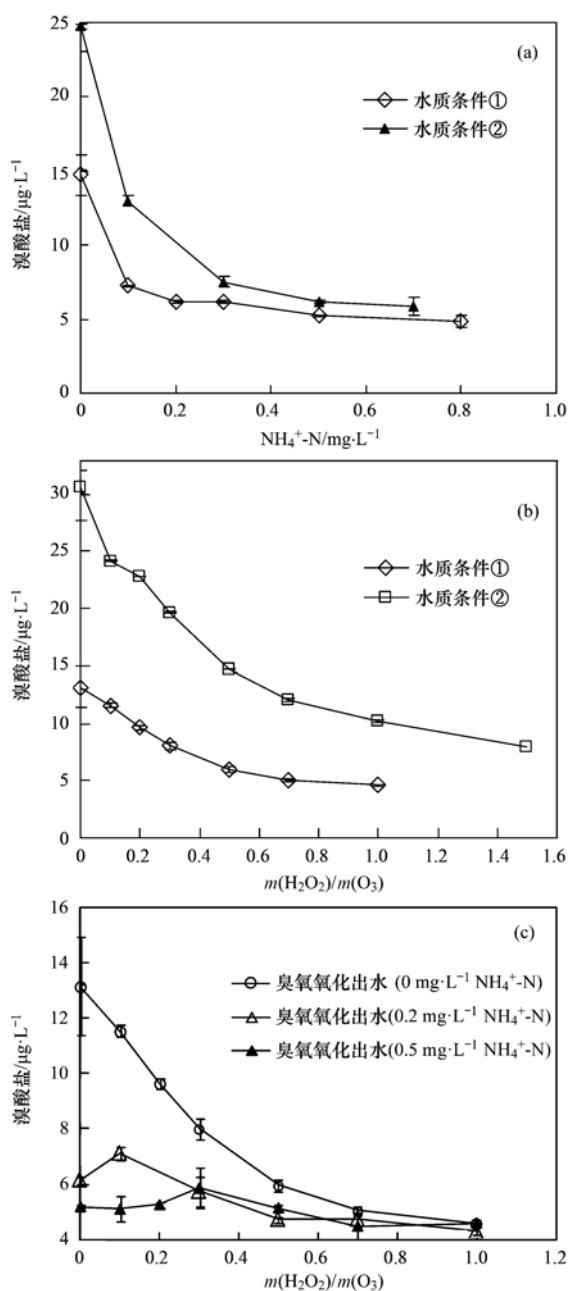
2.3 氨氮/过氧化氢投加控制溴酸盐效果

臭氧氧化致使溴酸盐生成量存在超标风险, 从表 1 中可以看出, 该水源水氨氮含量较低, 本研究考察了投加氨氮对溴酸盐控制效果, 如图 5(a) 所示。在臭氧消耗量为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时, ①和②两种不同的水质条件下, 氨氮投加控制溴酸盐效果较为显著, 从图 5(a) 中可以看出, 随着氨氮投加量的增加,

溴酸盐的生成量逐渐降低,在水质条件下①,投加 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氨氮即可将其有效控制在 $10.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,而对于水质条件②,投加 $0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮才能将其控制在标准以下. 对于两种水质条件,投加氨氮超过 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,继续投加氨氮,对溴酸盐并无进一步去除效果,该结论与以往研究相似^[23,24]. 从图5(a)中还可以看出,投加氨氮对溴酸盐的控制最低达到 $5.10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能与氨氮控制溴酸盐机制有关,其能够与中间产物 HOBr/OBr^- 反应,减少其后续生成溴酸盐量,然而氨氮并不能抑制溴离子被 $\cdot\text{OH}$ 氧化生成溴酸盐的途径,因此,在臭氧氧化初始阶段, $\cdot\text{OH}$ 与臭氧分子氧化生成溴酸盐不受氨氮的影响,导致部分溴酸盐的生成^[9]. 臭氧氧化前投加氨氮将导致出水中氨氮剩余,然而臭氧后的BAC工艺能够将氨氮控制在标准范围内,当氨氮投加 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,BAC出水氨氮剩余量低于 $0.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,当投加量为 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,BAC出水约为 $0.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均在标准以内. 投加氨氮能够有效控制溴酸盐生成,当原水氨氮含量高于 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,并不能有效降低溴酸盐生成,所以本研究考察了投加 H_2O_2 对溴酸盐控制效果.

图5(b)为两种水质条件下利用 H_2O_2 控制溴酸盐的效果. 臭氧消耗量为 $2.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H_2O_2 投加量使 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 保持在 $0\sim 1.5$ 范围内,从图5(b)中可以看出,在两种水质下,溴酸盐生成量随 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 的增加逐渐降低,这可能是由于 H_2O_2 的加入,一方面很大程度促进了臭氧分子的分解,因此直接阻碍了由臭氧分子氧化溴离子生成 HOBr/OBr^- ,进而生成溴酸盐的反应途径;另一方面,过氧化氢能够与 HOBr/OBr^- 发生反应迅速生成 Br^- [反应速率常数为 $7.6\times 10^8(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$],阻碍溴酸盐生成^[9]. H_2O_2 加入虽然导致短时间内生成大量 $\cdot\text{OH}$,然而其可能被过量剩余 H_2O_2 所消耗,另外有研究者发现当反应体系中存在剩余 H_2O_2 时,溴离子通过 $\cdot\text{OH}$ 的氧化生成溴酸盐的途径会受到阻碍,这是因为该途径中 HOBr/OBr^- 为必要的中间产物,而剩余 H_2O_2 会抑制其生成^[11],因此,臭氧的快速消耗及对生成溴酸盐中间产物的抑制导致溴酸盐生成量逐渐降低^[13].

从图5(b)中可以看出,不同水质条件下,将溴酸盐控制在标准以内所需的 H_2O_2 量并不相同,在条件①下, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 在 0.2 时,即可将溴酸盐降低至 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;而在条件②下, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 需要增加到 1.0 才能达到相应效果,从而可以看出,控制溴酸盐



水质条件: ① $[\text{Br}^-]$ 为 $22.52\sim 28.91\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,DOC为 $1.58\sim 2.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; ② $[\text{Br}^-]$ 为 $22.52\sim 27.25\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,DOC为 $1.16\sim 1.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图5 氨氮及过氧化氢投加对溴酸盐控制效果

Fig. 5 Bromate formation as a function of ammonia and hydrogen peroxide doses

的 H_2O_2 最佳投量与原水水质有较大关系. 本研究中考察了不同氨氮条件对 H_2O_2 控制溴酸盐效果,如图5(c)所示. 从中可以看出,与不投加氨氮相比,在 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮投加量下, H_2O_2 对溴酸盐的控制效果有所不同,在不投加氨氮情况下,溴酸盐生成量随 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 的增大而减小,而投加 $0.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 氨氮时,溴酸盐生成量均

呈现出了先增加后降低的趋势. 在 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮投加量下, 在 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 为 0.1 时生成更多溴酸盐, 而 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮条件下, $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 为 0~0.3 时生成更多, 随后均逐渐降低, 这说明, 氨氮含量不同, 会导致 H_2O_2 投加控制溴酸盐的效果产生差异. 以往研究在对黄河水进行溴酸盐控制时, 也发现随着 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 逐渐升高, 溴酸盐生成量先增加后减少, 这有可能与水源水的不同水质因素有关, 有机物、溴离子以及氨氮浓度等不同可能导致臭氧分解与 $\cdot\text{OH}$ 生成速率发生变化, 当臭氧与 $\cdot\text{OH}$ 共同氧化溴离子效率有所增加, 引起溴酸盐生成量略有升高^[1].

2.4 氨氮/过氧化氢投加对 THMFP 去除的影响

氨氮及过氧化氢投加能有效控制溴酸盐, 其可能改变臭氧与水中有机物如 THMs 前驱物的反应途径, 进而影响对 THMFP 的去除. 研究中考察了臭氧消耗量为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 投加氨氮或过氧化氢对 O_3 -BAC 工艺去除 THMFP 的效能影响, 如图 6 所示. 从图 6(a) 中可以看出, 氨氮的投加对 THMFP 的去除效率并没有显著影响, 而图 6(b) 显示 H_2O_2 的加入对 O_3 -BAC 去除 THMFP 效能产生一些影响, 随着 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 的升高, O_3 -BAC 对 THMs 前驱物的去除效果略有下降. 在不投加过氧化氢时, O_3 -BAC 处理之后 THMFP 剩余率为 72%, 而在 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 为 0.5 和 1.0 时, 剩余率增加到了 80%~90%. 以往研究者也发现投加过氧化氢后的 THMFP 比单独臭氧氧化出水 THMFP 高 20%^[25], 有研究者将其归因于过氧化氢加入导致 $\cdot\text{OH}$ 生成, 但 $\cdot\text{OH}$ 在改变 NOM 结构的过程中具有非选择性, 它更容易与有机物反应生成酚、酮等官能团, 而这些物质更容易与氯反应生成 THMs^[26]. 在反应进行过程中, 体系中存在剩余过氧化氢, 其能够与羟基自由基发生反应, 进而也可能减少 THMs 前驱物的氧化效率, 使得该工艺对 THMFP 去除效率有所降低^[25]. 也有研究者对投加 H_2O_2 前后水中有机物不同组分如疏水中性物质、疏水碱性物质、疏水性酸、弱疏水性酸及亲水性物质生成 THMs 的活性进行了比较, 发现过氧化氢的加入削弱了臭氧对亲水物质及疏水性物质的去除效果, 该类物质中存在较多的 THMs 前驱物, 从而导致出水的 THMFP 有所升高^[1].

针对该水源水氨氮含量较低的情况, 投加氨氮能够有效抑制溴酸盐生成量, 由于氨氮投加量高于 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 继续增加氨氮并无进一步控制效果, 因此, 当水源中氨氮含量低于 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 可增加至该水平以控制溴酸盐, 其对 THMFP 产生

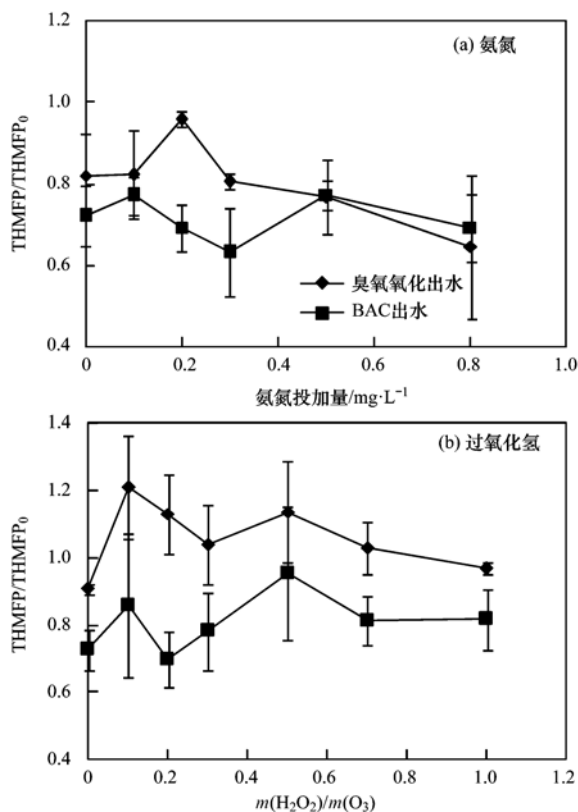


图 6 氨氮及过氧化氢投加对 THMFP 去除的影响

Fig. 6 Impact of ammonia and hydrogen peroxide addition on THMFP control

影响较小, 且 BAC 工艺能够有效控制氨氮浓度; 当水中氨氮浓度较高 (如高于 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 溴酸盐存在超标风险, 需投加过氧化氢控制其生成, 同时应考虑过氧化氢投加对 THMFP 的影响.

3 结论

(1) O_3 -BAC 深度处理工艺对出水 THMFP 有一定去除效果, 原水溴离子浓度变化范围为 $14.92 \sim 71.7 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 不同的溴离子浓度下, 臭氧消耗量超过 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时溴酸盐生成量即存在超标风险.

(2) 氨氮投加 $0.10 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 为 0.2~1.0 时, 能够将溴酸盐控制在 $10.00 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 且随着投加量增大, 溴酸盐生成量逐渐降低. 臭氧氧化生成溴酸盐量越高, 所需氨氮和 H_2O_2 投加量越高; 而氨氮- H_2O_2 联合控制溴酸盐时, 溴酸盐生成量存在先升高后降低的趋势.

(3) 在利用氨氮和 H_2O_2 投加进行溴酸盐控制过程中, 氨氮对 THMFP 的去除效率影响并不显著, 而投加 H_2O_2 使得 THMFP 去除效能有所降低, 在利用过氧化氢控制溴酸盐过程中, 应同时考虑其对 THMFP 去除的影响.

参考文献:

- [1] Wang Y J, Yu J W, Han P, *et al.* Advanced oxidation of bromide-containing drinking water: a balance between bromate and trihalomethane formation control [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(11): 2169-2176.
- [2] Allard S, Nottle C E, Chan A, *et al.* Ozonation of iodide-containing waters: selective oxidation of iodide to iodate with simultaneous minimization of bromate and I-THMs [J]. *Water Research*, 2013, **47**(6): 1953-1960.
- [3] Wang Y J, Yu J W, Zhang D, *et al.* Addition of hydrogen peroxide for the simultaneous control of bromate and odor during advanced drinking water treatment using ozone [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(3): 550-554.
- [4] Elovitz M S, Von Gunten U. Hydroxyl radical/ozone ratios during ozonation processes. I. The R_{cl} concept [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 1999, **21**(3): 239-260.
- [5] Wu C D, Hu C X, Zhang J Y, *et al.* Survey of seawater intrusion in the Pearl River Basin and modeling bromate formation during ozonation of the raw water [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2013, **35**(6): 465-471.
- [6] 卢宁, 黄鑫, 高乃云, 等. 青草沙水库原水中的溴离子和溴酸盐生成势[J]. *净水技术*, 2011, **30**(3): 10-12, 19.
Lu N, Huang X, Gao N Y, *et al.* Bromonium ion and its bromate formation potential in raw water of Qingcaosha reservoir [J]. *Water Purification Technology*, 2011, **30**(3): 10-12, 19.
- [7] 伊胜楠, 史嘉璐, 龙超, 等. 饮用水中溴酸盐控制方法和去除技术研究进展[J]. *环境保护科学*, 2014, **40**(1): 22-27.
Yi S N, Shi J L, Long C, *et al.* Study progress in control methods and removal technologies of bromate in drinking water [J]. *Environmental Protection Science*, 2014, **40**(1): 22-27.
- [8] 陈谷, 方芳, 高乃云, 等. 原水中溴酸盐的产生与控制技术[J]. *净水技术*, 2013, **32**(1): 10-14.
Chen G, Fang F, Gao N Y, *et al.* Formation and control technology of bromate in raw water [J]. *Water Purification Technology*, 2013, **32**(1): 10-14.
- [9] Pinkernell U, Von Gunten U. Bromate minimization during ozonation: mechanistic considerations [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(12): 2525-2531.
- [10] Yang H W, Liu W J, Wang X M, *et al.* Bromate control by dosing hydrogen peroxide and ammonia during ozonation of the Yellow River water [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2015, **37**(2): 127-133.
- [11] Von Gunten U, Oliveras Y. Advanced oxidation of bromide-containing waters: bromate formation mechanisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(1): 63-70.
- [12] Lin T, Wu S K, Chen W. Formation potentials of bromate and brominated disinfection by-products in bromide-containing water by ozonation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(24): 13987-14003.
- [13] Mizuno T, Ohara S, Nishimura F, *et al.* $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ process for both removal of odorous algal-derived compounds and control of bromate ion formation [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2011, **33**(2): 121-135.
- [14] Irabelli A, Jasim S, Biswas N. Pilot-scale evaluation of ozone vs. peroxone for trihalomethane formation [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2008, **30**(5): 356-366.
- [15] Mosteo R, Miguel N, Martin-Muniesa S, *et al.* Evaluation of trihalomethane formation potential in function of oxidation processes used during the drinking water production process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(2-3): 661-666.
- [16] 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.
- [17] Zhang J Z, Yu J W, An W, *et al.* Characterization of disinfection byproduct formation potential in 13 source waters in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(2): 183-188.
- [18] Liu Z S, Yin J, Liu L, *et al.* Characterization of NOM and THM formation potential in reservoir source water [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, **6**(1-3): 1-4.
- [19] Georgeson D L, Karimi A A. Water quality improvements with the use of ozone at the Los Angeles water treatment plant [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 1988, **10**(3): 255-276.
- [20] Chiang P C, Chang E E, Liang C H. NOM characteristics and treatabilities of ozonation processes [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(6): 929-936.
- [21] 闫慧敏, 李攀, 于水利, 等. 东太湖水源臭氧-活性炭工艺中溴酸盐生成及其影响因素 [J]. *给水排水*, 2015, **41**(3): 17-21.
Yan H M, Li P, Yu S L, *et al.* Bromate formation and influence factor during ozone-biological activated carbon processes for Dongtaihu Lake source water treatment [J]. *Water Technology*, 2015, **41**(3): 17-21.
- [22] Arvai A, Jasim S, Biswas N. Bromate formation in ozone and advanced oxidation processes [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2012, **34**(5): 325-333.
- [23] 闫慧敏, 唐玉霖, 于水利, 等. 东太湖水源水臭氧氧化过程中溴酸盐控制技术 [J]. *供水技术*, 2015, **9**(1): 1-6.
Yan H M, Tang Y L, Yu S L, *et al.* Bromate control during ozone oxidation in Dongtaihu Lake source water [J]. *Water Technology*, 2015, **9**(1): 1-6.
- [24] Galey C, Gatel D, Amy G, *et al.* Comparative assessment of bromate control options [J]. *Ozone: Science & Engineering*, 2008, **22**(3): 267-278.
- [25] Kleiser G, Frimmel F H. Removal of precursors for disinfection by-products (DBPs)—differences between ozone- and OH-radical-induced oxidation [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **256**(1): 1-9.
- [26] Lee Y, Von Gunten U. Oxidative transformation of micropollutants during municipal wastewater treatment: comparison of kinetic aspects of selective (chlorine, chlorine dioxide, ferrate^{VI}, and ozone) and non-selective oxidants (hydroxyl radical) [J]. *Water Research*, 2010, **44**(2): 555-566.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172