

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响

吴悦^{1,3}, 吴纯德^{1,2*}, 刘吕刚¹, 袁博杰¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 3. 汕头职业技术学院, 汕头 515078)

摘要: 为研究常见无机阴离子对含溴水臭氧化过程溴酸盐(BrO_3^-)生成的影响, 本研究通过小试分别考察了不同质量浓度氯离子(Cl^-)、碳酸氢根离子(HCO_3^-)和硫酸根离子(SO_4^{2-})对 BrO_3^- 生成的影响, 并结合反应过程臭氧衰减、中间产物次溴酸/次溴酸根离子(HOBr/OBr^-)生成及总溴浓度变化情况, 进一步分析了这3种无机阴离子对 BrO_3^- 生成的影响机制。结果表明, 以60 min为例, Cl^- 质量浓度为3~150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水样 BrO_3^- 生成量相对于未投加 Cl^- 条件降低了8.8%~25.7%; 反应20 min时, SO_4^{2-} 质量浓度从0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BrO_3^- 生成量减少了63.9%; 而当 HCO_3^- 质量浓度由0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BrO_3^- 生成量增加了6.4倍, 其质量浓度超过30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 继续投加 HCO_3^- 对 BrO_3^- 生成量的促进作用提高不大。研究表明, 在相同的臭氧投加量和相同的反应时间下, 投加 Cl^- 和 SO_4^{2-} 均能抑制臭氧化过程 BrO_3^- 的生成, 而投加 HCO_3^- 能极大地促进 BrO_3^- 的生成。

关键词: 含溴水; 臭氧化; 溴酸盐; 氯离子; 碳酸氢根离子; 硫酸根离子

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3292-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.09.022

Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water

WU Yue^{1,3}, WU Chun-de^{1,2*}, LIU Lü-gang¹, YUAN Bo-jie¹

(1. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China; 3. Shantou Polytechnic, Shantou 515078, China)

Abstract: To study the effects of common inorganic anions on bromate formation during ozonation of bromide-containing water, the effects of different mass concentrations of Cl^- , HCO_3^- , and SO_4^{2-} on bromate formation were investigated in bench-scale test. The mechanisms of these three coexisting anions on bromate formation was analyzed based on the ozone decomposition, HOBr/OBr^- formation, and transformation of total bromine species. Our results showed that adding of 3-150 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cl^- can reduce 8.8%-25.7% of bromate formation within 60 min. 63.9% of bromate would be decreased by increasing SO_4^{2-} concentration from 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ within 20 min. However, more than 6.4 times the mass concentrations of bromate were formed as HCO_3^- mass concentrations increased from 0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ within 20 min. The production of bromate was slightly increased when HCO_3^- mass concentrations was above 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Under the condition of the same ozone dosage and reaction time, adding of Cl^- and SO_4^{2-} will inhibit the formation of bromate during ozonation, while adding of HCO_3^- significantly will increase the production of bromate.

Key words: bromide-containing water; ozonation; bromate; chloride ion; bicarbonate ion; sulfate ion

臭氧化作为一种高级氧化技术(advanced oxidation process, AOP)越来越广泛地应用于饮用水处理中, 然而, 该工艺处理含溴离子(Br^-)水有 BrO_3^- 副产物生成风险^[1,2]。 BrO_3^- 具有高致癌性且对人类肾脏有害, 被国际癌症研究机构(IARC)定义为2B级潜在致癌物^[1]。我国最新颁布实施的生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)规定 BrO_3^- 的限值为10 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[3]。以往研究发现, 臭氧化过程 BrO_3^- 的生成受多种因素影响, 主要包括水质因素(Br^- 初始浓度、温度、pH值、腐殖酸浓度等)和运行因素(反应时间、催化剂投加量、臭氧投加量及投加方式)^[4~8]。

Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 等无机阴离子广泛存在于地表水体中^[9~11], 是天然水体的重要组成部分, 它们也参与了 BrO_3^- 的形成过程, 研究常见无机阴离子对含溴水臭氧化过程 BrO_3^- 生成的影响, 具有广泛的应用价值。其中, Cl^- 主要来源于海水入侵、动物和人类排泄物和天然盐渗透, 其浓度与 Br^- 浓度存在一定的关系^[9,12]; HCO_3^- 是水中碱度的代表,

收稿日期: 2015-02-05; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078148, 41173103); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07423-003)

作者简介: 吴悦(1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为给水净化技术与水污染控制, E-mail: 5.yue@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ppchdwu@scut.edu.cn

也是天然水体中最普遍存在的无机盐离子^[10]; SO_4^{2-} 在淡水中的浓度介于 HCO_3^- 和 Cl^- 之间. 此外, 这 3 种阴离子对羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 有较强的捕获作用^[11]. 目前, 关于常见无机阴离子对 BrO_3^- 生成的影响研究很少, 而关于 Cl^- 影响的研究更是未见报道. 因此, 本研究以含溴水为对象, 重点分析 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 对臭氧氧化过程 BrO_3^- 生成的影响, 以期控制实际水体中 BrO_3^- 提供试验依据.

1 材料与方法

1.1 水样与试剂

试验水样采用去离子水配制. 溴化钾 (天津市密科欧化学试剂有限公司) 为基准级, 氯化钠、碳酸氢钠和硫酸钠均为优级纯, 且均购于广州化学试剂厂.

1.2 试验方法

试验装置主体部分包括了臭氧发生器、嵌套有石英管的 2 L 柱状玻璃反应器和尾气吸收瓶. 臭氧发生器为反应提供臭氧. 柱状玻璃反应器的直径为 7.5 cm, 高 40 cm, 并设有一个取样口. 底部进气口的砂芯曝气头可减小气泡体积, 使臭氧迅速溶解. 同时, 采用转速为 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的磁力搅拌器快速将气水充分混合, 使反应器内各点臭氧浓度均匀. 尾气经 2% 的碘化钾溶液吸收处理, 以防止臭氧等有毒有害气体逸散到空气中.

试验启动后向反应器中注入 1.5 L 去离子水, 水体 pH 值控制为 6.5 ± 0.2 , 水温 (25.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$. 开启磁力搅拌器后向反应器中连续通入流量为 $0.04 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的臭氧 5 min, 使之达到饱和状态 (此时臭氧质量浓度为 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 后停止通气, 立即向其中投加溴化钾使体系中 Br^- 的初始质量浓度为 $400 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 同时加入无机阴离子溶液. 定时取样并用氮气淬灭水样中剩余臭氧, 随后测定水样中剩余臭氧、 BrO_3^- 、 Br^- 和 HOBr/OBr^- 质量浓度.

1.3 分析方法

水中臭氧浓度采用 UNICO (中国上海) 仪器有限公司出产的 UV2000 型紫外可见分光光度计直接测定 [波长为 258 nm, 吸光系数为 $2950 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{cm})^{-1}$]; BrO_3^- 和 Br^- 由美国 Dionex 公司出产的 ICS-1000 型离子色谱仪测定; IonPac AS23 型分析柱 (250 mm $\times$ 4 mm) 和 IonPac AG23 型保护柱 (50 mm $\times$ 4 mm) 淋洗液为 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠和 $4.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 碳酸钠组成的混合淋洗液, 流速 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样量为 200 μL ; HOBr/OBr^- 采用

DPD 分光光度法测定^[13].

2 结果与讨论

2.1 氯离子影响

在 Cl^- 质量浓度为 $0 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 Br^- 初始质量浓度为 $400 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、臭氧投加量为 $3.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、溶液初始 pH 为 6.5 ± 0.2 、温度为 (25.0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、搅拌速度为 $500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下, 不同反应时间 BrO_3^- 生成量和水中臭氧衰减量随 Cl^- 质量浓度的变化见图 1.

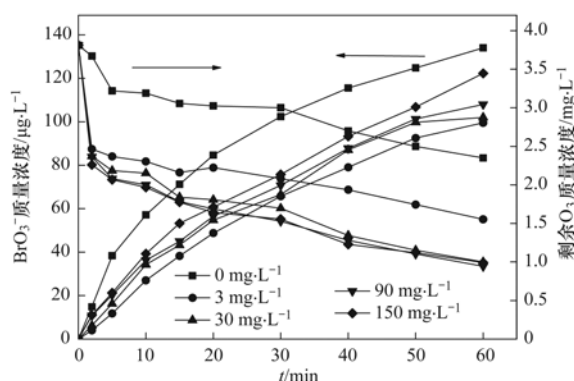
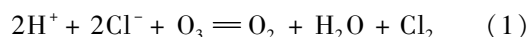


图 1 Cl^- 质量浓度对 BrO_3^- 生成量和水中臭氧衰减的影响

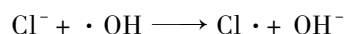
Fig. 1 Effect of Cl^- mass concentrations on BrO_3^- formation and ozone decomposition in water

由图 1 可知, 在相同的臭氧投加量和反应时间下, 以 60 min 为例, Cl^- 质量浓度为 3、30、90 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水样 BrO_3^- 的生成量相对于未投加 Cl^- 条件分别降低了 25.7%、23.9%、19.4% 和 8.8%, 说明向水体中投加 Cl^- 能显著降低含溴水臭氧化过程中 BrO_3^- 生成量.

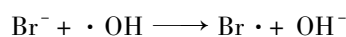
水中臭氧衰减速率依次为: $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} > 0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明投加 Cl^- 能加速水中 O_3 衰减. Yeatts 等^[14] 发现在溶液 pH < 7.0 下, 投加 Cl^- 能加速水中 O_3 分解生成 O_2 , 臭氧直接氧化途径受限制. 投加臭氧后, 反应过程体系 pH 值变化不大, 略低于 6.5.



同时, 在较低 pH (6.0 ~ 8.0) 值条件下, HOBr/OBr^- 几乎都是被 $\cdot\text{OH}$ 氧化^[15], Cl^- 能与 Br^- 竞争 O_3 分解产生的 $\cdot\text{OH}$ ^[9], 阻碍了 Br^- 经 $\cdot\text{OH}$ 间接氧化形成 BrO_3^- 的途径.

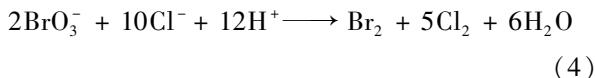


$$K = 4.3 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1} \quad (2)$$



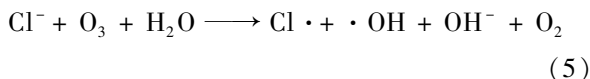
$$K = 1.1 \times 10^9 \text{ L} \cdot (\text{mol} \cdot \text{s})^{-1} \quad (3)$$

此外,根据 Shin^[16] 的研究,在酸性条件下,Cl⁻ 与 BrO₃⁻ 还会发生氧化还原反应.



因此,Cl⁻ 对 BrO₃⁻ 生成的抑制作用可能是 Cl⁻ 阻碍臭氧氧化途径、Cl⁻ 与 ·OH 发生自由基取代反应及 Cl⁻ 与 BrO₃⁻ 氧化还原反应共同作用的结果.

水中 Cl⁻ 质量浓度越高,臭氧衰减加快,BrO₃⁻ 生成的抑制作用呈略微下降趋势. 推测可能随着 Cl⁻ 质量浓度的增加,水中更多臭氧会衰减产生 O₂^[14] 和 ·OH,其中,·OH 会被水中 Cl⁻ 所淬灭^[9],过量的 Cl⁻ 会与水中剩余臭氧反应生成 ·OH 而增加 BrO₃⁻ 生成量^[14].



从图 1 还可发现,在相同的臭氧投加量和 Cl⁻ 质量浓度下,随着反应时间的推移,BrO₃⁻ 生成量均不断增加.

为进一步探讨 Cl⁻ 的作用机制,对反应过程中间产物 HOBr/OBr⁻ 的生成情况进行了考察,结果见图 2. 不同 Cl⁻ 质量浓度条件下,水中 HOBr/OBr⁻ 生成量均在反应进行至 2 min 时已趋于稳定. 投加 Cl⁻ 均能显著降低水中 HOBr/OBr⁻ 质量浓度. 结合图 1 中臭氧衰减情况,投加 Cl⁻ 加速水中 O₃ 衰减,从而限制了 Br⁻ 经臭氧直接氧化形成 HOBr/OBr⁻ 的途径. 同时,Cl⁻ 能与 ·OH 反应生成 Cl·^[9],限制了 Br⁻ 经 ·OH 氧化形成 HOBr/OBr⁻ 的途径. 因此,Cl⁻ 的加入减少了水中 HOBr/OBr⁻ 的生成量. HOBr/OBr⁻ 是 Br⁻ 转化成 BrO₃⁻ 的重要中间产物^[15]. 当溶液 pH 值为 6.0 ~ 8.0 时,HOBr/OBr⁻ 几乎被 ·OH 氧化^[15],Cl⁻ 的加入阻碍了 HOBr/OBr⁻ 被 ·OH 氧化成次溴酸自由基 (BrO·) 的过程,最终抑制 BrO₃⁻ 的生成.

图 3 反映了 Br⁻、HOBr/OBr⁻ 和 BrO₃⁻ 这 3 种形式溴元素总浓度的变化情况. 未投加 Cl⁻ 体系中,总溴浓度一直稳定在 5 μmol·L⁻¹ 左右. 而投加 Cl⁻ 的体系,总溴浓度均明显降低. 一方面,Cl⁻ 的存在抑制了水中 BrO₃⁻ 的生成;另一方面,Cl⁻ 存在的体系可能发生许多复杂反应,产生多种难以检测的含氯或溴的物质^[16~18].

2.2 碳酸氢根离子

在 HCO₃⁻ 质量浓度为 0 ~ 90 mg·L⁻¹、Br⁻ 初始质量浓度为 400 μg·L⁻¹、臭氧投加量为 3.9

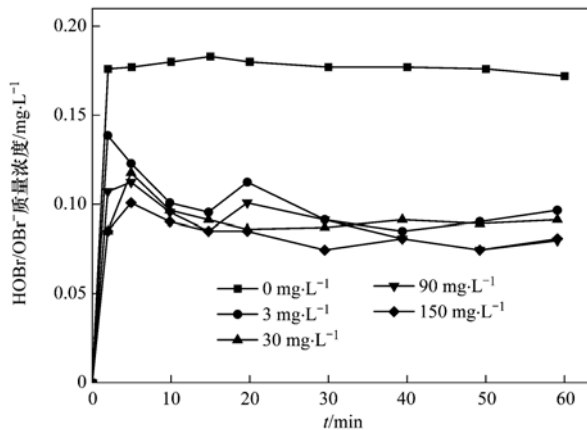


图 2 不同 Cl⁻ 质量浓度下 HOBr/OBr⁻ 的生成情况

Fig. 2 HOBr/OBr⁻ formation at various Cl⁻ mass concentrations

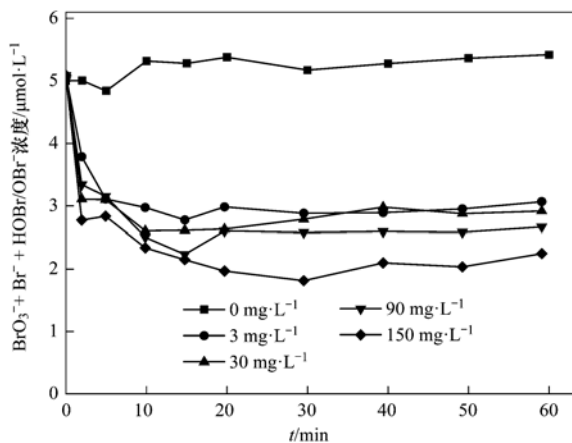


图 3 含溴组分转化情况

Fig. 3 Transformation of bromine species

mg·L⁻¹、溶液初始 pH 为 6.5 ± 0.2、温度为 (25.0 ± 0.5) °C、搅拌速度为 500 r·min⁻¹ 条件下,不同反应时间 BrO₃⁻ 的生成量和水中臭氧衰减量随 HCO₃⁻ 质量浓度的变化见图 4.

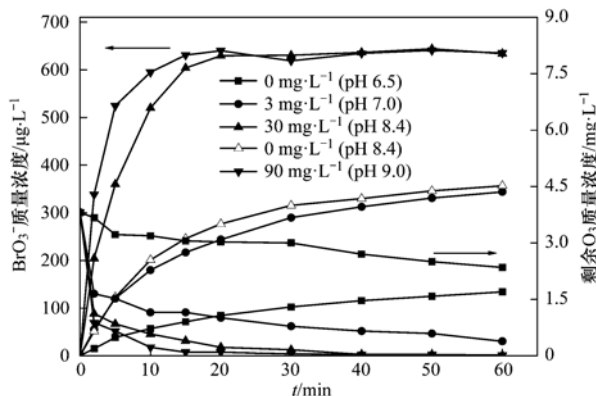
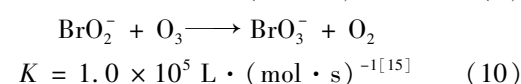
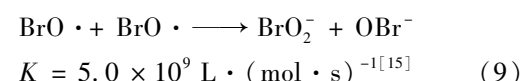
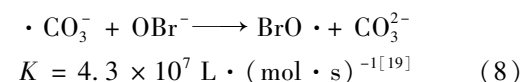
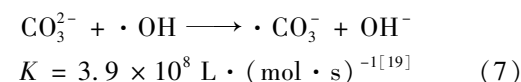
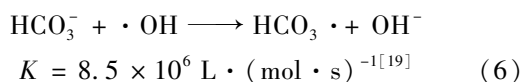


图 4 HCO₃⁻ 质量浓度对 BrO₃⁻ 生成量和水中臭氧衰减的影响

Fig. 4 Effect of HCO₃⁻ mass concentrations on BrO₃⁻ formation and ozone decomposition in water

由4图可知,在相同的臭氧投加量和反应时间下,以20 min为例,当 HCO_3^- 质量浓度由 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, BrO_3^- 生成量增加6.4倍,水中剩余臭氧质量浓度减少 $2.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明投加 HCO_3^- 的水体中,臭氧衰减加快, BrO_3^- 生成量显著增加。

一方面,由于 HCO_3^- 的水解作用,体系pH值随其加入而升高(0、3、30和 $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCO_3^- 溶液pH值分别为6.5、7.0、8.4和9.0),pH升高促进了 BrO_3^- 的生成^[15]。且随体系pH值的升高,臭氧对 HOBr/OBr^- 直接氧化作用所占的比例逐渐提高^[15],臭氧直接氧化途径增强,臭氧衰减加快, BrO_3^- 生成量显著增大。另一方面, $\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{2-}$ 会与 $\cdot\text{OH}$ 发生反应生成 $\text{HCO}_3\cdot/\cdot\text{CO}_3^-$,体系中的 $\cdot\text{OH}$ 不断被消耗,这也间接促进了臭氧分解。而生成的 $\cdot\text{CO}_3^-$ 可将 OBr^- 氧化为 $\text{BrO}\cdot$,最终促进 BrO_3^- 的生成^[15,19,20]。



但当水中 HCO_3^- 质量浓度超过 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,继续投加 HCO_3^- 对 BrO_3^- 生成量的增加趋势不大,臭氧衰减加快。这是由于碳酸氢钠是强碱弱酸盐,其质量浓度由 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到 $90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,pH值升高幅度不大,且 $\cdot\text{OH}$ 与 HOBr/OBr^- 的反应速率远大于 $\cdot\text{CO}_3^-$ 与 HOBr/OBr^- 的反应速率^[19]。当溶液 $\text{pH} \geq 8.0$ 时,臭氧对 HOBr/OBr^- 直接氧化作用所占的比例逐渐提高,导致臭氧衰减加快^[15]。

在相同的臭氧投加量和 HCO_3^- 质量浓度下,随着反应时间的推移, BrO_3^- 生成量均不断增加,15 min后基本达到平衡。

从图4还可明显看出,在溶液pH值均为8.4的条件下,未投加 HCO_3^- 的体系中 BrO_3^- 的生成量远低于投加 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ HCO_3^- 的体系,因此, HCO_3^- 对 BrO_3^- 生成量的影响包括体系pH变化和 HCO_3^- 的共同影响。

为进一步探讨 HCO_3^- 的作用机制,试验过程中检测了不同反应时间中间产物 HOBr/OBr^- 的质量浓度,结果见图5。结合图4还可发现, HCO_3^- 质量浓度越高,水中臭氧衰减越快, HOBr/OBr^- 生成量越低。 HCO_3^- 的加入提高溶液pH值,促进水中臭氧衰减。当溶液 $\text{pH} \geq 8.0$ 时,臭氧对 HOBr/OBr^- 直接氧化作用所占的比例逐渐提高^[15], Br^- 经臭氧直接氧化和 $\cdot\text{CO}_3^-$ 间接氧化的共同作用促进 BrO_3^- 的生成, HOBr/OBr^- 生成后被快速氧化成 BrO_3^- 而没被大量累积,导致其质量浓度降低。

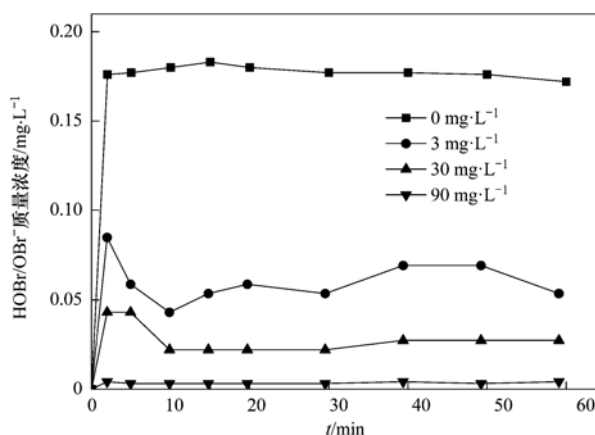


图5 不同 HCO_3^- 质量浓度下 HOBr/OBr^- 的生成情况

Fig. 5 HOBr/OBr^- formation at various HCO_3^- mass concentrations

2.3 硫酸根离子

在 SO_4^{2-} 质量浓度为 $0 \sim 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Br^- 初始质量浓度为 $400 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、臭氧投加量为 $3.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、溶液初始pH为 6.5 ± 0.2 、温度为 $(25.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、搅拌速度为 $500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下,不同反应时间 BrO_3^- 的生成量随 SO_4^{2-} 质量浓度的变化见图6。

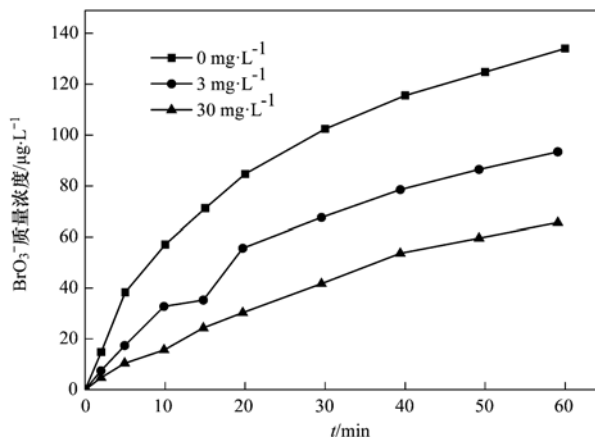


图6 SO_4^{2-} 质量浓度对 BrO_3^- 生成量的影响

Fig. 6 Effect of SO_4^{2-} mass concentrations on BrO_3^- formation

由 6 图可看出,在相同的臭氧投加量和反应时间下,以反应 20 min 为例, SO_4^{2-} 质量浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水样 BrO_3^- 的生成量相对于未投加 SO_4^{2-} 条件分别降低了 33.8% 和 63.9%,说明投加 SO_4^{2-} 能显著减少含溴水臭氧化过程中 BrO_3^- 生成量. SO_4^{2-} 能捕获 $\cdot\text{OH}$, 生成硫酸根自由基($\text{SO}_4^{\cdot-}$)^[21,22], 从而消耗了 $\cdot\text{OH}$, 阻碍了 Br^- 经 $\cdot\text{OH}$ 间接氧化生成 BrO_3^- 的途径, 降低了 BrO_3^- 的生成量. 尽管 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 氧化能力 (2.60 V) 与 $\cdot\text{OH}$ (2.80 V) 差不多, 但 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 并不参与 BrO_3^- 的形成过程. 同时, Hoigné 等^[23] 发现, SO_4^{2-} 不会消耗 O_3 . 该试验结果与 Zhang 等^[24] 的研究结果相反, 其认为 SO_4^{2-} 的加入增加了溶液的离子强度, 加快了氧化反应速率, 从而提高 BrO_3^- 生成量.

从图 6 还可发现, 在相同的臭氧投加量和 SO_4^{2-} 质量浓度下, 随着反应时间的推移, BrO_3^- 生成量均不断增加.

3 结论

(1) 在相同的臭氧投加量和反应时间下, 投加 Cl^- 和 SO_4^{2-} 对含溴水臭氧化过程中 BrO_3^- 的生成有明显的抑制作用. Cl^- 和 SO_4^{2-} 的加入分别使 BrO_3^- 的质量分数降低 8.8% ~ 25.7% 和 33.8% ~ 63.9%.

(2) 在相同的臭氧投加量和反应时间下, 投加 HCO_3^- 能极大地促进含溴水臭氧化过程中 BrO_3^- 的生成. HCO_3^- 质量浓度由 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, BrO_3^- 生成量增加 6.4 倍, 水中剩余臭氧质量浓度减少 $2.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但其质量浓度超过 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 继续添加 HCO_3^- 对 BrO_3^- 生成量的增加趋势不大. HCO_3^- 对 BrO_3^- 生成量的影响包括体系 pH 变化和 HCO_3^- 的共同影响.

参考文献:

- [1] 钟琼, 李欢. Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO_3^- 吸附性能的研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1566-1575.
- [2] 俞潇婷, 张家辉, 潘循哲, 等. 水溶液中臭氧和溴离子的反应研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3139-3143.
- [3] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [4] 李商国, 吴纯德, 翁国杰, 等. 含溴离子水臭氧化过程中溴酸盐生成影响因素研究[J]. 水处理技术, 2010, **36**(5): 34-37.
- [5] 华伟, 蒋福春, 林涛, 等. 臭氧化阶段溴类物质生成及其对溴代副产物的影响[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(9): 41-46.
- [6] 李能能, 聂玉伦, 胡春. Fe-Al/ Al_2O_3 催化臭氧化去除水中有机污染物 2, 4-D 过程中溴酸盐的生成控制研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(7): 1849-1854.
- [7] 武琳, 杨宏伟, 杨少霞, 等. 催化臭氧化过程中溴酸盐的生成机制研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2279-2283.
- [8] 何茹, 鲁金凤, 马军, 等. 臭氧催化氧化控制溴酸盐生成效能与机理[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 99-103.
- [9] Caregnato P, Rosso J A, Soler J M, et al. Chloride anion effect on the advanced oxidation processes of methidathion and dimethoate: Role of $\text{Cl}_2^{\cdot-}$ radical [J]. Water Research, 2013, **47**(1): 351-362.
- [10] Kim M K, Zoh K D. Effects of natural water constituents on the photo-decomposition of methylmercury and the role of hydroxyl radical [J]. Science of the Total Environment, 2013, **449**: 95-101.
- [11] 任学昌, 张国珍, 朱亚敏, 等. 水体中常见无机阴离子对 TiO_2 薄膜光催化还原 Cr(VI) 的影响[J]. 环境化学, 2009, **28**(6): 829-832.
- [12] Leybourne M I, Goodfellow W D. Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, **71**(9): 2209-2223.
- [13] 李商国. 含溴水臭氧化过程中溴酸盐生成及抑制方法初步研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. 21-22.
- [14] Yeatts L R B, Taube H. The kinetics of the reaction of ozone and chloride ion in acid aqueous solution [J]. Journal of the American Chemical Society, 1949, **71**(12): 4100-4105.
- [15] Pinkernell U, von Gunten U. Bromate minimization during ozonation: Mechanistic considerations [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(12): 2525-2531.
- [16] Shin H S. Sensitive determination of bromate in ozonated and chlorinated water, and sea water by gas chromatography-mass spectrometry after derivatization [J]. Journal of Chromatography A, 2012, **1223**: 136-141.
- [17] Odeh I N, Nicoson J S, Huff Hartz K E, et al. Kinetics and mechanisms of bromine chloride reactions with bromite and chlorite ions [J]. Inorganic Chemistry, 2004, **43**(23): 7412-7420.
- [18] Heeb M B, Criquet J, Zimmermann-Steffens S G, et al. Oxidative treatment of bromide-containing waters: Formation of bromine and its reactions with inorganic and organic compounds—A critical review [J]. Water Research, 2014, **48**: 15-42.
- [19] von Gunten U, Hoigne J. Bromate formation during ozonation of bromide-containing waters: Interaction of ozone and hydroxyl radical reactions [J]. Environmental Science & Technology, 1994, **28**(7): 1234-1242.
- [20] Xie P C, Ma J, Liu W, et al. Removal of 2-MIB and geosmin using UV/persulfate: Contributions of hydroxyl and sulfate radicals [J]. Water Research, 2015, **69**: 223-233.
- [21] Asghar A, Raman A A A, Daud W M A W. Advanced oxidation processes for *in-situ* production of hydrogen peroxide/hydroxyl

- radical for textile wastewater treatment: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, **87**: 826-838.
- [22] Devi L G, Munikrishnappa C, Nagaraj B, *et al.* Effect of chloride and sulfate ions on the advanced photo Fenton and modified photo Fenton degradation process of Alizarin Red S [J]. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2013, **374-375**: 125-131.
- [23] Hoigné J, Bader H, Haag W R, *et al.* Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water-III. Inorganic compounds and radicals [J]. *Water Research*, 1985, **19**(8): 993-1004.
- [24] Zhang T, Chen W P, Ma J, *et al.* Minimizing bromate formation with cerium dioxide during ozonation of bromide-containing water [J]. *Water Research*, 2008, **42**(14): 3651-3658.

欢迎订阅 2015 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2015 年为大 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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