

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评估

李晓玲^{1,2}, 刘锐², 兰亚琼², 余素林², 文晓刚^{2,3*}, 陈吕军^{2,4}, 张永明¹

(1. 上海师范大学生命与环境科学学院, 上海 200234; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 3. 嘉兴学院南湖学院, 嘉兴 314000; 4. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: J市位于太湖下游, 其水源水质受上游和自身工农业发展的影响, 有机物和氨氮浓度较高, 氯消毒副产物及其引发的健康风险广泛受到关注. 2012年5、8、10月以及2013年1月采样, 使用气相色谱法分析了J市饮用水中4种三卤甲烷和5种卤乙酸的含量, 发现自来水中三卤甲烷浓度占三卤甲烷与卤乙酸总和的88.1%以上, 5月、8月和次年1月浓度较高(分别为39.34、50.37和28.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 10月浓度(19.19 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)较低, 远高于卤乙酸的浓度(2.58~4.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 自来水煮沸3 min后, 三卤甲烷可去除92.3%以上, 但卤乙酸会大幅度增加. 基于EPA推荐的健康风险评估模型对经口摄取途径时氯消毒副产物的致癌和非致癌风险进行计算, 发现化学致癌物质的健康风险为 $3.1 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$, 高于可接受风险水平 1×10^{-6} ; 煮沸后致癌物质的健康风险大幅度降低至 7.9×10^{-7} , 低于可接受风险水平. 煮沸后非致癌氯消毒副产物的健康风险由 2.1×10^{-11} 显著升高至 3.4×10^{-9} , 未超过 10^{-5} 的风险管理参考值.

关键词: 饮用水; 三卤甲烷; 卤乙酸; 氯消毒副产物; 健康风险

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3474-06

Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City

LI Xiao-ling^{1,2}, LIU Rui², LAN Ya-qiong², YU Su-lin², WEN Xiao-gang^{2,3}, CHEN Lü-jun^{2,4}, ZHANG Yong-ming¹

(1. College of Life and Environmental Science, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 3. Nanhu College, Jiaxing University, Jiaxing 314000, China; 4. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: J City lies in the downstream of Taihu Lake and its water source was micro-polluted by the well-developed industry and agriculture inside the city and in the upper stream. Tap water of J City is characterized as high concentrations of organics and ammonia nitrogen, and chlorinated disinfection byproducts (CDBPs), which has drawn many public concerns for the health risk. Tap water was sampled in May, August, October of 2012 and January of 2013. Four trihalomethanes (THMs) and five haloacetic acids (HAAs) were determined with the gas chromatography. Results revealed that THMs accounted for 88.1% of the sum of THMs and HAAs, with higher concentrations in May, August and January (39.34, 50.37 and 28.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively) while obviously lower in October (19.19 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), which were significantly higher than that of HAAs (2.58-4.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). After boiled for three minutes, THMs were removed over 92.3% but HAAs were largely increased. The health risk of CDBPs was then calculated based on the health risk assessment model recommended by the USEPA. The health risk caused by carcinogenic CDBPs was within a range of $3.1 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$ in the tap water, all over the recommended level of 1×10^{-6} , but after boiled, the value significantly decreased to 7.9×10^{-7} , which is below the recommended level. The health risk caused by non-carcinogenic CDBPs absolutely increased from 2.1×10^{-11} to 3.4×10^{-9} after boiled, which is below the reference value of 10^{-5} .

Key words: drinking water; trihalomethanes; haloacetic acids; chlorinated disinfection byproducts; health risk

氯消毒可以有效杀灭饮用水中的病原微生物, 但同时会产生氯消毒副产物. 已知的氯消毒副产物有很多种, 包括三卤甲烷、卤乙酸、卤代氰、卤代酮、卤代醛等^[1]. 目前, 我国99.5%以上的水厂仍然采用氯消毒^[2], 产生的氯消毒副产物中三卤甲烷和卤乙酸一般占60%~70%^[3~5]. 三卤甲烷具有致癌效应^[6~8], 卤乙酸具有潜在致癌、致突变性以及生殖发育毒性^[9,10].

J市位于太湖下游, 受上游污染和自身工农业发展的影响, 境内主要河流水质以V类、劣V类为主, 历年达不到《地表水环境质量标准》规定的水源水质要求, 主要超标项目为高锰酸盐指数和氨氮, 经

收稿日期: 2012-12-11; 修订日期: 2013-03-07

基金项目: 嘉兴市科技计划项目(2012AZ1013)

作者简介: 李晓玲(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为饮用水安全保障技术, E-mail: luanxing1987@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wensg.thzj@gmail.com

氯消毒后消毒副产物生成浓度高。为了提高饮用水质量, J 市近年来在传统的混凝-沉淀-砂滤处理工艺之后、出水氯消毒之前, 又增设了臭氧-生物活性炭深度处理设施, 从而有效去除氯消毒副产物的生成前体物, 使饮用水中氯消毒副产物含量得到有效控制。尽管如此, 由于 J 市水源水质差, 臭氧-生物活性炭深度处理后自来水中的氯消毒副产物含量仍然受到广泛关注, 值得进一步研究。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

岛津 GC-2014 型气相色谱, 附 ECD 检测器。HP-5 毛细管色谱柱 (30 m × 0.25 μm × 0.25 μm)。10 μL 和 100 μL 微量进样针。4 种三卤甲烷 (氯仿、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、溴仿) 和 5 种卤乙酸 (一氯乙酸、一溴乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、二溴乙酸) 的标准品, 购自环境保护部标准样品研究所。卤乙酸内标物购自 Accustandard®。

1.2 样品采集

2012 年 5、8、10 月以及 2013 年 1 月采集 J 市饮用水集中供水的 G 水厂出水, 检测水中的高锰酸盐指数、三卤甲烷和卤乙酸。每次取样前打开水龙头放水 3 min 以消除滞留水对测试结果的影响。采样时, 在容积为 120 mL 的玻璃顶空瓶中添加 0.6 g 抗坏血酸, 装满水后加盖密封冷藏, 用于检测三卤甲烷; 在 40 mL 的玻璃封口瓶中加入 40 mg 氯化铵, 装满水后加盖并用封口膜密封冷藏, 用于检测卤乙酸; 三卤甲烷的测定在 24 h 内完成, 卤乙酸的萃取在 48 h 内完成^[11]。

1.3 气相色谱分析条件

三卤甲烷的测试采用顶空-气相色谱法。在 120 mL 玻璃顶空瓶的瓶身处标记 80 mL 液体对应的液面位置, 取一根细长的引流针插入瓶内至 80 mL 液体对应的液面标记下方, 再插入吹扫针通高纯氮气, 调节压力, 使顶空瓶内水样排出至 80 mL 液面附近, 此时气液体积比为 1:2, 在 50℃ 水浴下平衡 40 min, 用 100 μL 的微量进样针取 30 μL 上层空气手动进样。气相色谱分析条件: 进样口 220℃, 检测器 300℃; 分流比 10:1; 程序升温 35℃ (2 min) → 10℃·min⁻¹ → 80℃ → 20℃·min⁻¹ → 120℃ (3 min)。标线的定量范围为 1~100 μg·L⁻¹, 氯仿、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和溴仿的方法检测限分别为 0.45、0.45、0.90 和 0.30 μg·L⁻¹。

卤乙酸的测试采用液液萃取-衍生化气相色谱

法^[12]。气相色谱分析条件: 进样口 200℃, 检测器 300℃; 直接进样 1.0 μL; 程序升温 35℃ (8 min) → 8℃·min⁻¹ → 200℃。标线的定量范围为 1~100 μg·L⁻¹, 一氯乙酸、一溴乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸和二溴乙酸的方法检测限分别为 0.75、0.90、0.30、0.15 和 1.00 μg·L⁻¹。

1.4 饮用途径的健康风险评价方法

根据 EPA 推荐的健康风险评价模型, 可分别评价经口摄取途径时水中化学致癌物质的健康风险和化学非致癌物质的健康风险^[13]。化学致癌物质的健康风险的评价方法: 当化学致癌物质浓度较低时, 一般认为其致癌风险与其浓度水平成正比^[14]。

$$\text{致癌风险} = \text{CDI}_{\text{oral}} \times \text{PF}_{\text{oral}} \quad (1)$$

式中, CDI_{oral} 为单位体重的日常摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; PF_{oral} 为特定物质的潜在致癌因子, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 其值可在 IRIS (integrated risk information system, 综合风险信息系统中) 查得。

$$\text{CDI}_{\text{oral}} = \text{CW} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED} / (\text{BW} \times \text{AT}) \quad (2)$$

式中, CW 为化学物质浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; IR 为摄入速率, EPA 建议 $2 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露时段, 按人的平均寿命计算, 根据我国情况取 70 岁; BW 为体重, 根据我国情况取女性平均体重 60 kg, 男性 70 kg; AT 为平均时间, d, $\text{AT} = \text{ED} \times 365$ 。

化学非致癌物质对人体健康的风险以参考剂量 Rfd 为衡量标准^[13], 用式 (3) 计算:

$$\text{经口摄取途径非致癌风险} = (\text{CDI}_{\text{oral}} / \text{Rfd}) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, CDI_{oral} 为单位体重日常摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; Rfd 为参考剂量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 自来水中三卤甲烷和卤乙酸的含量调查

2012 年 5 月、8 月和 10 月和 2013 年 1 月, J 市自来水中高锰酸盐指数分别为 3.02、2.64、0.96 和 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 10 月数值明显低于 5 月、8 月和次年 1 月。

4 种三卤甲烷和 5 种卤乙酸的浓度见表 1。4 个月三卤甲烷含量分别占两类消毒副产物总和的 90.7%、94.0%、88.1% 和 91.2%。5 月、8 月和次年 1 月三卤甲烷含量较高, 分别为 28.02、39.34、50.37 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 是 10 月浓度的 1~3 倍, 这与 10 月水中高锰酸盐指数浓度显著降低有关。卤

乙酸含量较低,一氯乙酸和二溴乙酸在4个月都没有检出,一溴乙酸仅在5月有检出,而二氯乙酸和三氯乙酸在不同月份均有检出但各月份之间浓度差异不大。

表1 不同月份自来水中的氯消毒副产物含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentration of chlorinated disinfection byproducts in different months/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

物质	2012年5月	2012年8月	2012年10月	2013年1月
氯仿	17.03	13.94	3.75	9.87
一溴二氯甲烷	14.18	15.15	6.37	10.08
二溴一氯甲烷	8.13	16.54	9.07	8.07
溴仿	nd	4.74	nd	nd
总三卤甲烷	39.34	50.37	19.19	28.02
一氯乙酸	nd	nd	nd	nd
一溴乙酸	1.61	nd	nd	nd
二氯乙酸	2.06	2.92	2.07	2.3
三氯乙酸	0.35	0.28	0.51	0.42
二溴乙酸	nd	nd	nd	nd
总卤乙酸	4.02	3.20	2.58	2.72

含溴甲烷占三卤甲烷总量的56.7%~80.5%,浓度在 $15.44\sim 36.43\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,所占比例和浓度均高于上海、佛山等城市^[3,15]。这可能与J市水处理工艺使用臭氧-生物活性炭深度处理有关。臭氧-生物活性炭技术虽然可以减少三卤甲烷的生成前体物,但是会生成溴酸盐,溴酸盐与水中天然有机物发生卤代反应的能力远大于氯,因此有可能导致溴代烷烃的含量上升^[16,17]。

2.2 自来水煮沸前后消毒副产物的变化

自来水煮沸前后三卤甲烷的浓度变化如图1所示。煮沸后水中的三卤甲烷浓度减少了92.3%以上。其中氯仿和一溴二氯甲烷除5月尚有微量残留外,其他月份均降至检出限以下;溴仿仅在8月自来水中检出,经煮沸后其浓度降至检出限以下;二溴一氯甲烷通过煮沸似乎较难完全去除,4个月的饮用水经煮沸后都仍有2.1%~15.0%的残留率。上述实验结果与文献^[18]报道相似,主要是因为三卤甲烷具有易挥发的特性,因此煮沸后浓度呈现显

著降低。

与三卤甲烷大幅减少的趋势不同,煮沸后水中的总卤乙酸含量呈现显著升高(图2)。5种卤乙酸的总含量从煮沸前的 $2.58\sim 4.02\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至煮沸后的 $3.27\sim 9.10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,增加部分主要为一氯乙酸和三氯乙酸。一氯乙酸原本在各月份的原水中均无检出,但煮沸后在各月份均有明显检出,5、8、10月和次年1月的浓度分别为3.15、4.80、1.40和 $1.96\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;三氯乙酸也有大幅度增加,5、8、10月和次年1月分别由原水的0.35、0.28、0.51、 $0.42\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至0.75、1.10、2.90和 $0.69\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,增幅分别为114%、300%、472%和64%。煮沸后一氯乙酸和总卤乙酸浓度上升的现象与文献^[19,20]报道相似,原因可能是一方面,卤乙酸性质比较稳定,煮沸并不能使其挥发而降低浓度;另一方面,加热煮沸可以使一些大分子的氯代有机物热解生成小分子卤乙酸^[21]。自来水煮沸后的二氯乙酸含量在5月和次年1月有所上升,但8月和10月

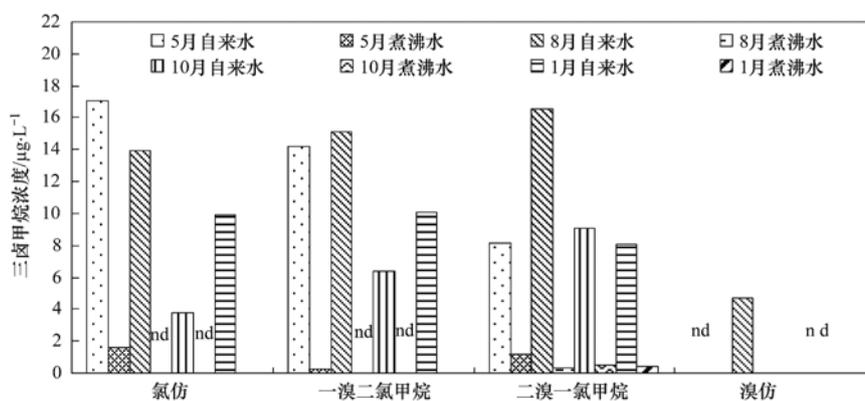


图1 饮用水煮沸前后三卤甲烷的变化

Fig. 1 Changes of trihalomethanes in drinking water before and after boiled

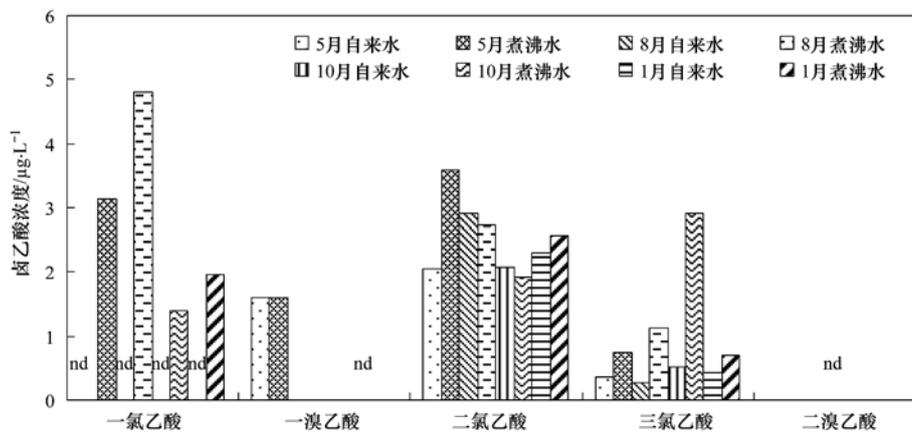


图2 饮用水煮沸前后卤乙酸的变化

Fig. 2 Changes of haloacetic acids in drinking water before and after boiled

却出现小幅降低,此现象与有关报道的加热后二氯乙酸浓度上升的结果不同^[19],可能是受煮沸时间及自来水原水水质差别影响所致。

2.3 消毒副产物的健康风险评价

2.3.1 化学致癌物质的健康风险评价结果

三卤甲烷已被确认是化学致癌物质^[22],而二氯乙酸在动物实验中可以导致小鼠和大鼠患肝癌、肝腺瘤的几率增加而被认为是能导致动物致癌的物质和可能导致人类致癌的物质^[23],因此对三卤甲烷和二氯乙酸这两类致癌化学物质所引起

的健康风险进行评价。不同月份计算的J市自来水三卤甲烷和二氯乙酸的致癌风险如表2所示。致癌风险总值于8月最高,10月最低,其中二溴一氯甲烷和一溴二氯甲烷对致癌风险的贡献最大。4个月里,自来水中三卤甲烷和二氯乙酸的终身致癌风险值最高 7.3×10^{-6} ,最低 3.1×10^{-6} ,均超过了EPA认为的可接受水平 1.0×10^{-6} ^[14],且经饮用途径暴露的致癌风险女性普遍高于男性。煮沸后三卤甲烷和二氯乙酸引起的致癌风险降低至 7.9×10^{-7} 。

表2 不同月份J市自来水氯消毒副产物的致癌风险

Table 2 Carcinogenic risk of chlorinated disinfection byproducts in drinking water in different months of J City

项目	2012年5月		2012年8月		2012年10月		2013年1月	
	男	女	男	女	男	女	男	女
氯仿	2.5×10^{-7}	2.9×10^{-7}	2.1×10^{-7}	2.4×10^{-7}	5.6×10^{-8}	6.5×10^{-8}	1.5×10^{-7}	1.7×10^{-7}
一溴二氯甲烷	2.1×10^{-6}	2.5×10^{-6}	2.3×10^{-6}	2.7×10^{-6}	9.6×10^{-7}	1.1×10^{-6}	1.5×10^{-6}	1.8×10^{-6}
二溴一氯甲烷	1.7×10^{-6}	1.9×10^{-6}	3.4×10^{-6}	3.9×10^{-6}	1.8×10^{-6}	2.2×10^{-6}	1.7×10^{-6}	1.9×10^{-6}
溴仿	0.0×10^0	0.0×10^0	9.09×10^{-8}	1.06×10^{-7}	0.0×10^0	0.0×10^0	0.0×10^0	0.0×10^0
二氯乙酸	2.4×10^{-7}	2.8×10^{-7}	3.4×10^{-7}	4.0×10^{-7}	2.4×10^{-7}	2.8×10^{-7}	2.7×10^{-7}	3.1×10^{-7}
总和	4.3×10^{-6}	5.0×10^{-6}	6.3×10^{-6}	7.3×10^{-6}	3.1×10^{-6}	3.6×10^{-6}	3.6×10^{-6}	4.2×10^{-6}

2.3.2 化学非致癌物质的健康风险评价结果

一氯乙酸在IRIS中仅存在非致癌数据^[24,24],三氯乙酸在小鼠动物实验中会导致小鼠致癌而不导致大鼠致癌,且其对人类是否致癌尚不清楚^[26]。但是,由于在J市饮用水中三氯乙酸的检出率高,且煮沸后一氯乙酸和三氯乙酸的含量均大幅度增加,因此把一氯乙酸和三氯乙酸作为化学非致癌物质进行健康风险评价,结果见图3和图4。

煮沸后一氯乙酸和三氯乙酸浓度大幅度增加,导致非致癌风险增加。一氯乙酸的非致癌风险最高值出现在8月,女性为 3.4×10^{-9} ,男性为 $2.9 \times$

10^{-9} ;三氯乙酸的非致癌风险最高值出现在10月,三氯乙酸的非致癌风险为女性 2.5×10^{-10} 、男性 2.2×10^{-10} ,增加后的风险最高值仍然远远低于公认 10^{-5} 的风险管理值,表明长期饮用煮沸水时,不会对该市居民健康造成风险。

3 结论

(1)三卤甲烷是J市自来水中主要氯消毒副产物类型,占三卤甲烷与卤乙酸总和的88.1%以上。三卤甲烷和二氯乙酸造成的致癌风险超过了EPA认可的可接受风险水平 1.0×10^{-6} ,非致癌风险值

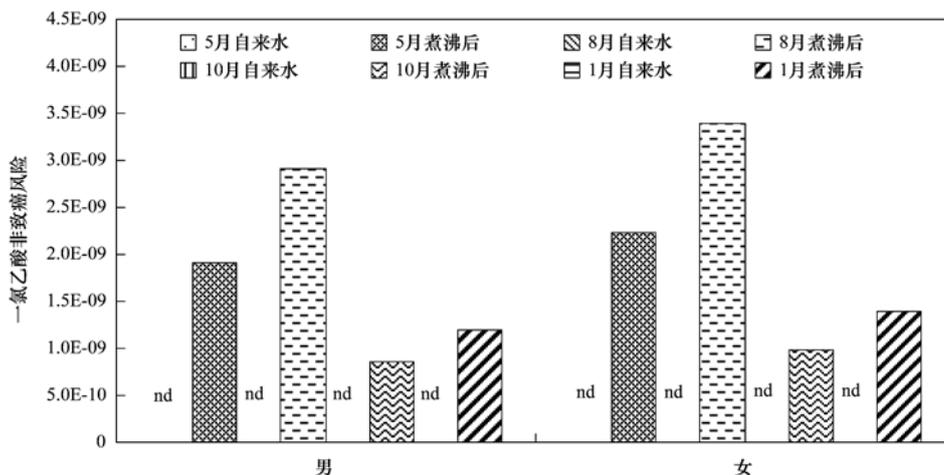


图 3 饮用水煮沸前后一氯乙酸非致癌风险的变化

Fig. 3 Noncarcinogenic risk by monochloroacetic acid in drinking water before and after boiled

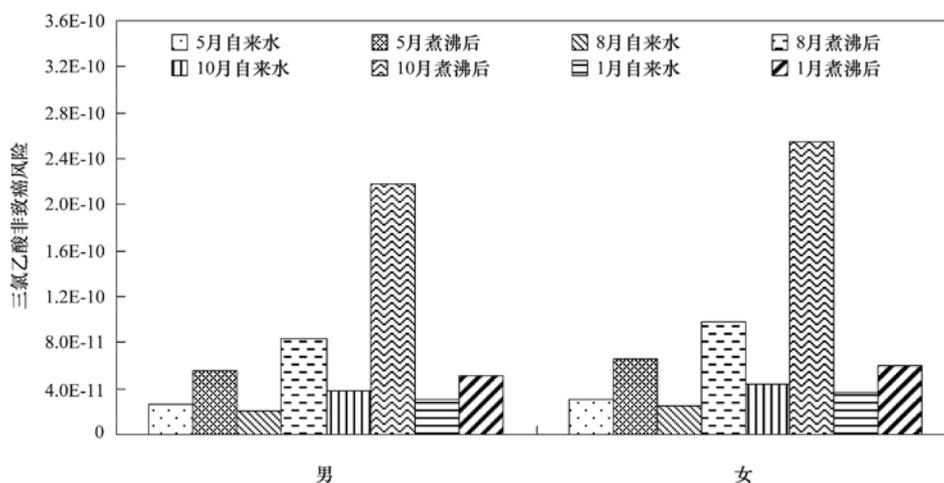


图 4 饮用水煮沸前三氯乙酸非致癌风险的变化

Fig. 4 Noncarcinogenic risk by thichloroacetic acid in drinking water before and after boiled

在可接受的风险范围内。

(2) 煮沸可以去除饮用水中 92.3% 以上的三卤甲烷, 从而使致癌风险值大幅度降低至 7.9×10^{-7} ; 但总卤乙酸含量会大幅度增加, 尤其是一氯乙酸和三氯乙酸浓度增加较多, 从而使非致癌风险值由 2.1×10^{-11} 显著升高至 3.4×10^{-9} , 但尚未超过 10^{-5} 的风险管理参考值。

参考文献:

- [1] CCC (Chlorine Chemistry Council). White paper: a review of disinfection practices and issues[R]. 1997, 6-14.
- [2] 刘文君. 给水处理消毒技术发展展望[J]. 给水排水, 2004, 30(1): 2-5.
- [3] 尤汉虎, 肖兵, 张艳萍, 等. 佛山某区饮用水三卤甲烷健康风险评价[J]. 当代医学, 2011, 17(23): 156-158.
- [4] 王晋宇, 陈玲瑚, 赵辰, 等. 饮用水中三卤甲烷生成影响因素的初步研究[J]. 净水技术, 2009, 28(6): 30-34.
- [5] 周鸿, 陈超, 张晓健, 等. 某市常规水处理工艺对消毒副产物前体物的去除[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(5): 433-435.
- [6] Hu J Y, Wang Z S, Ng W J, *et al.* Disinfection by-products in water produced by ozonation and chlorination[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, 59(1): 81-93.
- [7] Hsu C H, Jeng W L, Chang R M, *et al.* Estimation of potential lifetime cancer risks for Trihalomethanes from consuming chlorinated drinking water in Taiwan [J]. Environmental Research, 2001, 85(2): 77-82.
- [8] Aizawa T, Magara Y, Musashi M. Effects of bromide ions on trihalomethane (THM) formation in water[J]. Journal of Water Supply: Research & Technology, 1989, 38(2): 165-175.
- [9] Hunter E S, Rogers E, Blanton M, *et al.* Bromochloro-haloacetic acids: Effects on mouse embryos in vitro and QSAR considerations[J]. Reproductive Toxicology, 2006, 21(3): 260-266.
- [10] 全重臣, 员建, 苑宏英, 等. 饮用水处理中氯化消毒副产物

- 三卤甲烷和卤代乙酸研究进展[J]. 净水技术, 2012, **31**(2): 6-11.
- [11] 陈鑫, 韦霄, 周颖, 等. 三卤甲烷和卤乙酸测定中样品保存时间与其在萃取液中稳定性研究[J]. 卫生研究, 2010, **39**(2): 187-190.
- [12] 孙伟华. 蓝藻暴发期水源水污染特征及饮用水安全保障技术研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2009. 27-29.
- [13] Gratt L B. Air toxic risk assessment and management: Public health risk from normal operations[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996. 476-513.
- [14] 杨健康, 王启山, 鲁金凤, 等. 饮用水中三卤甲烷多途径暴露的健康风险评价[J]. 中国资源综合利用, 2009, **27**(7): 27-30.
- [15] 陈鑫. 黄浦江为水源的水厂不同工艺点和管网水中 THMs、HAAs 消毒副产物生成模型和转归模型的建立[D]. 上海: 复旦大学, 2010. 48-51.
- [16] 刘利兵, 庞月红, 钱和, 等. 饮用水臭氧消毒副产物——溴酸盐产生机理及影响因素研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(3): 52-54.
- [17] 林涛, 陈卫, 王磊磊. 臭氧-生物活性炭对南方河网典型污染物的去除特性[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- [18] Krasner S W, Wright J M. The effect of boiling water on disinfection by-product exposure[J]. Water Research, 2005, **39**(5): 855-864.
- [19] 张伟, 鲁金凤, 曾有文, 等. 热处理对自来水中卤乙酸浓度的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2010, **21**(5): 109-112.
- [20] Wu W W, Benjamin M M, Korshin G V. Effects of thermal treatment on halogenated disinfection by-products in drinking water[J]. Water Research, 2001, **35**(15): 3545-3550.
- [21] Dion-Fortier A, Rodriguez M J, Sérodes J, *et al.* Impact of water stagnation in residential cold and hot water plumbing on concentrations of trihalomethanes and haloacetic acids[J]. Water Research, 2009, **43**(12): 3057-3066.
- [22] 徐鹏. 北京居民经饮用水途径化学物质暴露的健康风险评价[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2006. 95-98.
- [23] U. S. EPA (U. S Environmental protection Agency). National primary drinking water regulation: stage 1 disinfectants and disinfection byproducts rule. FinalRule[EB/OL]. <http://www.regulations.gov/#! documentDetail; D = EPA-HQ-OW-2002-0043-0003, 1998-12-16>.
- [24] 葛元新, 朱志良, 陆雍森, 等. 饮用水消毒的健康风险分析及评价[J]. 净水技术, 2006, **25**(3): 1-5.
- [25] 孟丽苹, 董兆敏, 胡建英. 全国自来水厂卤乙酸浓度调查、风险评估与标准建议[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(4): 721-726.
- [26] WHO (World Health Organization). Trichloroacetic acid in drinking water (WHO/SDE/WSH/03. 04/120) [EB/OL]. <http://www.who.int/water-sanitation-health/dwq/chemicals/trichloroaceticacid.pdf, 2004-03>.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行