

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, 刘闯, 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)

河北洹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 δ¹³C_{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, 贾永锋 (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 (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 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 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估 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 Al³⁺ 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估 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)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 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)

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

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 系统研究了南水北调中线工程水源——丹江口水库水在氯(胺)化消毒条件下, 常规消毒副产物的产生特性, 考察了消毒方式、消毒剂投加量、接触时间、pH 和溴离子浓度等因素的影响, 并对消毒工艺参数进行了优化。结果发现, 丹江口水库水经氯化消毒可产生三氯甲烷、二氯一溴甲烷等常规含碳和较低浓度二氯乙腈、三氯硝基甲烷等含氮消毒副产物, 而氯胺化消毒仅产生三氯甲烷和三氯硝基甲烷等消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)。自由氯消毒过程产生的各类型 DBPs 浓度约为氯胺消毒的 7.5 倍, 短时自由氯转氯胺方式 DBPs 产生量介于两者之间; 随着自由氯投加量增加, 各类型消毒副产物均呈现增加趋势, 投加量大于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后 DBPs 增加量较少。随氯胺投加量增加, 三氯甲烷生成量变化不大, 投加量大于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后可产生三氯硝基甲烷等副产物。随反应时间延长, 自由氯的衰减速率明显大于氯胺, 同时消毒副产物增长量明显快于氯胺消毒。随着 pH 升高, 自由氯消毒后三氯甲烷含量呈现增加趋势, 而氯胺消毒后变化不明显。随溴离子浓度的增加, 自由氯和氯胺消毒后副产物类型均向溴代 DBPs 转变, 同时总生成量明显增加, 自由氯消毒 DBPs 增长量明显大于氯胺消毒过程。丹江口水库水采用氯胺化消毒可以降低消毒副产物的生成风险, 如采用自由氯消毒方式, 水厂需根据实际常规处理工艺重点控制自由氯的投加量等参数。

关键词: 南水北调; 丹江口水库; 消毒工艺; 含碳消毒副产物; 含氮消毒副产物

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3278-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.020

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, CHENG Tuo, XIA Sheng-ji, CHU Wen-hai

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Key Laboratory of Yangtze Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This study discussed the formation of volatile carbonaceous disinfection by-products (DBPs) and nitrogenous DBPs during chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir water which was the source of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion Project. The effects of disinfection methods, disinfectant dosage, reaction time, pH values and bromide ion concentration were investigated. And the disinfection parameters were optimized. Four DBPs, including chloroform (CF), bromodichloromethane (BDCM), dichloroacetonitrile (DCAN) and trichloronitromethane (TCNM), were observed during the chlorination. But only CF and TCNM were detected during the chloramination of water. The disinfection by-product (DBP) concentration from chlorination is 7.5 times higher than that from chloramination, and the yield of DBPs from short time chlorination then chloramination is in between the first two methods. All kinds of DBPs detected increased with the dosage of increasing chlorine, but the increases slowed down when the dosage was higher than $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The formation of CF varied a little as the dosage of chloramine increasing. TCNM was detected when the chloramine dosage was greater than $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. As reaction time going on, chlorine decayed much faster than chloramine, while DBP formation under chlorination was faster than that of chloramination. THM produced by chlorine increased with the increasing pH, while chloramination showed no obvious changes. As the bromide ion increasing, the species of DBPs transformed from chlorinated DBPs to brominated ones, and the total yield of DBPs increased during both chlorination and chloramination, but the former one was obviously more than that of the latter one. In order to reduce the risk of DBP formation, the chloramination is suggested in the treatment of water from Danjiangkou Reservoir. And if chlorination is applied, the disinfectant dosage should be controlled seriously.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; Dangjiangkou Reservoir; disinfection process; C-disinfection by-products; N-disinfection by-products

丹江口水库是国家南水北调中线工程水源地, 其水质优良, 常年稳定在国家 II 类以上水质标准 (GB 3838-2002)^[1,2]。2014 年下半年, 南水北调中线逐步向沿线地区的北京、天津、河南、河北 4 个省市的 20 多座大中城市提供生活和生产用水, 远期

收稿日期: 2015-01-06; 修订日期: 2015-04-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAJ25B02); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07404-004)

作者简介: 张民盛 (1992~), 男, 硕士, 主要研究方向为饮用水消毒副产物, E-mail: 953454840@qq.com

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

年调水将达到 130 亿 m^3 , 这项工程的实施对于改善华北地区水资源短缺现状, 维持社会持续稳定发展具有重大战略意义^[1,3]. 随着南水北调中线通水, 沿线众多城市水源将进行切换, 众多新建水厂也将采用新的水源. 鉴于丹江口水源水质与城市现有水源水质存在较大差异, 其净水工艺参数也将发生较大变化, 因此探索适合于新水源的净水工艺及工艺参数的优化, 是确保水源切换下水厂高效安全地运行、保障南水北调中线受水区饮用水安全的关键.

消毒是饮用水处理最为重要的过程之一, 是控制生物风险的关键工艺^[4]. 目前我国自来水厂常用的消毒方法主要包括了自由氯消毒和氯胺消毒等^[5,6]. 自由氯消毒技术成熟, 操作简单, 成本低, 灭菌能力强, 是我国城市自来水厂采用的最普遍的消毒方式. 然而自由氯氧化性强, 与水中有机物发生反应可生成产生较高浓度致癌的三卤甲烷和卤乙酸等消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs), 因此探索取代自由氯的消毒方式是本领域研究的热点. 氯胺氧化能力较弱, 灭菌能力不及自由氯, 虽然接触时间要求较长, 但是其自身衰减缓慢, 可以保证持续消毒能力, 同时可有效减少三卤甲烷和卤乙酸等 DBPs 的生成, 因此氯胺消毒方式认为是取代自由氯消毒的重要方法之一, 尤其适合于水中溶解性有机物和氨氮等浓度较高等条件下. 目前上海、天津等城市水厂普遍应用了氯胺消毒方式, 取得了良好的效果^[5]. 然而, 近年来研究发现氯胺消毒过程可产生更多的强“三致”的二甲基亚硝胺 (NDMA)、卤代乙腈 (HANs)、卤代硝基甲烷 (HNMs) 等含氮消毒副产物 (NDMA), 其应用的安全性也开始得到了关注^[7~12].

为适应南水北调来水水质, 沿线城市水厂净水工艺将面临调整和升级改造, 新建南水北调原水水厂设计尚缺少针对性工艺参数的现状, 本文以丹江口水为研究对象, 考察了氯化法和氯胺消毒过程中 DBPs 生成情况, 分析了消毒方式、消毒剂投加量、

消毒接触时间和 pH 等因素的影响规律, 以期为沿线城市水源切换条件下消毒工艺的调整优化等提供理论和技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验试剂、仪器与方法

含碳消毒副产物 (C-DBPs) 和含氮消毒副产物 (N-DBPs) 标准品购自 Sigma-Aldrich 公司, 含碳消毒副产物 (C-DBPs) 主要包括了三氯甲烷、二氯一溴甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲烷等 4 种三卤甲烷 (THMs), 含氮消毒副产物 (N-DBPs) 标准品主要包括了三氯乙腈、二氯乙腈、溴氯乙腈、二溴乙腈等 4 种卤乙腈 (HANs) 和三氯硝基甲烷 (CP) 等. 自由氯消毒反应及氯胺配置均应用次氯酸钠 (4% ~ 5% 有效氯, Sigma-Aldrich) 溶液, 使用前采用 DBP 法进行标定. 各类型 DBPs 分析用色谱级甲基叔丁基醚 (MTBE) 购自于美国 JT-Baker. 优级纯氢氧化钠、浓硫酸、磷酸二氢钾、氯化铵等试剂均购自国药集团化学试剂公司 (上海). 常规水质指标溶解性有机碳 (DOC)、氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、总溶解性氮 (TN) 的标准品均购自国家环境保护局标准样品研究所. 实验试剂均采用 Milli-Q 超纯水配置.

各类型 DBPs 浓度参照 EPA551.1 方法进行测定, 采用岛津 GC-2010 气相色谱仪测定. DOC 和 TN 采用岛津 TOC-L 进行测定; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂比色法测定, UV_{254} 采用紫外分光光度法进行测定 (UNICO SQ-4802), pH 值采用雷磁 PHS-C3 计进行测定.

1.2 水样采集

实验水样于 2014 年 7 月采集于丹江口水库 (湖北省丹江口市), 实验期间每星期采集 1 次水样, 原水采用棕色玻璃瓶采集并尽快送至实验室, 后采用 0.45 μm 的醋酸纤维膜进行过滤去除水中悬浮物, 过滤后水样避光保存在 4 $^{\circ}\text{C}$ 环境下, 并尽快分析常规水质指标. 实验期间水样的水质指标分析结果如表 1 所示.

表 1 实验用水样的水质分析结果
Table 1 Basic parameters of water quality

指标	浑浊度 /NTU	UV_{254} / cm^{-1}	Br^- / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DOC / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
数值	0.425	0.033	0.038	1.614	1.394	0.06	<0.001	0.715

1.3 实验方法

(1) 自由氯消毒实验 取 100 mL 水样, 加入一定量标定好浓度的次氯酸钠溶液, 使反应液中自由

氯 (以 Cl_2 计) 达到实验所需浓度; 采用磷酸盐缓冲液 (10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 体系控制溶液 pH 值; 然后将样品密闭在带有聚四氟乙烯垫片瓶盖的安瓿瓶中; 确

保反应瓶内无空气,样品放置于黑暗环境的培养箱内,温度控制为 $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,反应至所需时间后样品取出,并加入少量氯化铵溶液淬灭残余的自由氯,样品尽快用 MTBE 进行萃取后进行 DBPs 分析。

(2) 氯胺消毒实验 首先采用氯化铵和次氯酸钠(以 Cl_2 计)按摩尔比 1.2:1 在 pH 值 8.5 的条件下($4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸盐缓冲溶液)进行反应,现场生成氯胺浓度约 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的使用液;其次,按自由氯消毒实验步骤进行氯胺消毒实验;最后,为保证相同的萃取条件,同样加入少量氯化铵溶液淬灭氯胺自降解可能产生的自由氯,并尽快进行 DBPs 分析。

(3) 短时游离氯转氯胺消毒实验 取 100 mL 水样,按自由氯消毒实验步骤进行氯消毒实验,15 min 后按照氯化铵和次氯酸钠(以 Cl_2 计)摩尔比 1.2:1 向水样中加入氯化铵,使水样中自由氯转化成氯胺进行后续消毒。反应至所需时间后取出样品,加入少量氯化铵溶液淬灭水样中的自由氯,并尽快进行 DBPs 分析。

2 结果与讨论

2.1 不同消毒方式对消毒效果的影响

为探究自由氯消毒和短时游离氯转氯胺消毒、氯胺消毒方式对副产物生成量的影响,取 3 份平行消毒水样,向其中两份水样中分别加入 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠或氯胺进行消毒,向另一份水样中加入 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠并在 15 min 后加入一定量氯化铵,使游离氯转化为氯胺进行后续消毒,接触时间为 24 h。实验结果如图 1 所示。

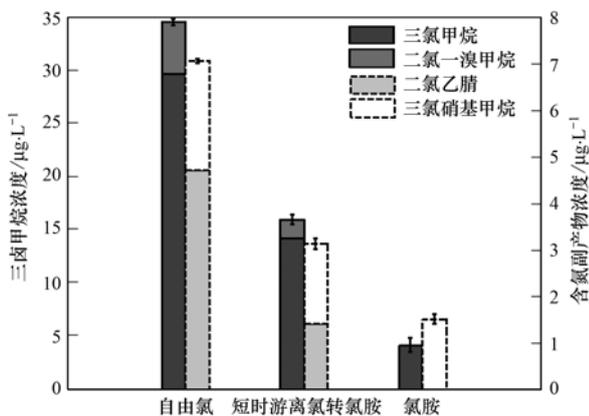


图 1 消毒方式对消毒副产物生成的影响

Fig. 1 Effects of the disinfection methods on formation of DBPs

从图 1 中可以看出,经自由氯和短时游离氯转氯胺工艺消毒可主要产生三氯甲烷、二氯一溴甲

烷、二氯乙腈和三氯硝基甲烷等 4 种 DBPs,而氯胺消毒仅产生三氯甲烷和三氯硝基甲烷等 2 种 DBPs。与自由氯消毒相比,丹江口水库水采用氯胺消毒避免了二氯一溴甲烷与二氯乙腈的产生,三卤甲烷和含氮副产物的总量从 $41.61 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到了 $5.58 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,减少了 86.6%,其中三氯甲烷的浓度减少最为显著,达到 86%,副产物的种类和生成量都被控制在低水平;而短时游离氯转氯胺的消毒方式产生副产物的量和种类介于自由氯消毒与氯胺消毒之间,副产物浓度较自由氯消毒减少了 54.2%,可避免了大量副产物的生成,实现了消毒与副产物的双重控制^[13-17]。短时游离氯转氯胺消毒方式之所以能同时保证快速消毒和产生较少的副产物,是因为消毒初期由自由氯进行短时消毒,自由氯氧化性强,能够快速杀灭病菌,后期再将自由氯转换成氯胺进行持续消毒,氯胺较为稳定,其水解能力弱,只能产生微量自由氯,与腐殖酸等有机物的反应能力低,生成的副产物较少^[18]。尽管短时游离氯转氯胺消毒是区别于自由氯和氯胺消毒的第 3 种方式,但其本质上还是二者的协调作用,它的消毒能力、对副产物的控制能力等都介于二者之间,其随着各影响因素的变化情况介于氯胺和自由氯之间,且与氯胺更为相近。因此,在后续实验中不再进行特别研究。从实验结果分析,氯胺和短时游离氯转氯胺都能达到饮用水的消毒要求,且能够很好控制氯化消毒副产物的生成,也未出现大量含氮消毒副产物,因此这两种消毒方式都具有替代传统自由氯消毒方式的潜力。

2.2 投加量对消毒副产物的影响

为了探究消毒剂投加量对消毒副产物生成量的影响,分别采用自由氯和氯胺进行消毒实验,自由氯和氯胺的投加量均为 0.5 、 1 、 2 、 3 、 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在 25°C 的恒温箱中培养,并于 24 h 测定消毒副产物的生成量。实验结果如图 2 所示。

自由氯消毒的水样中均可检测到两种三卤甲烷(三氯甲烷、二氯一溴甲烷)和两种含氮副产物(二氯乙腈、三氯硝基甲烷)。随着自由氯投加量的增加,各副产物生成量均呈现出不同程度的增加。由于原水中溴的含量较低,消毒剂的投加量充足,因此三氯甲烷的含量占了 60% 以上^[19]。自由氯的投加量对三卤甲烷的生成有着显著影响,随着投加量增加,三卤甲烷的生成量呈对数增长,三氯甲烷生成量相关系数为 $R^2 = 0.989$,二氯一溴甲烷生成量相关系数为 $R^2 = 0.899$,总三卤甲烷生成量相关系数 R^2

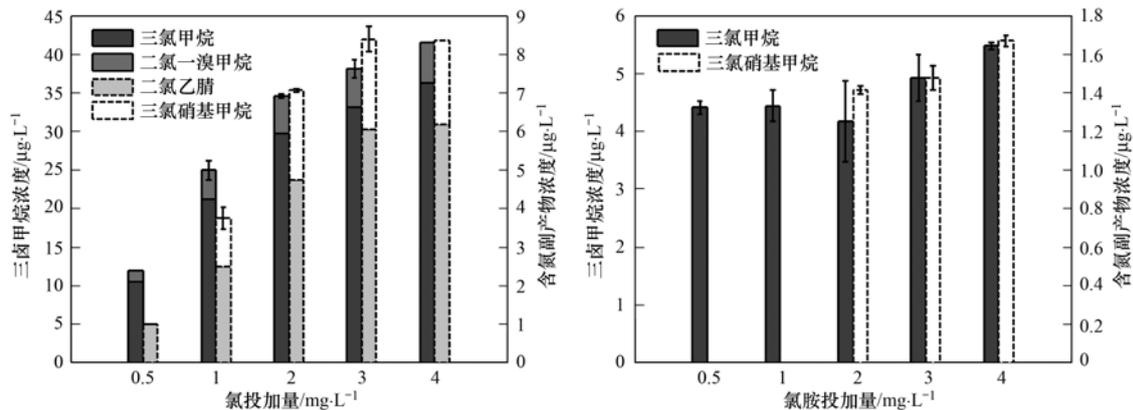


图2 消毒剂投加量对消毒副产物生成的影响

Fig. 2 Effects of the disinfectant dosage on formation of DBPs

=0.982. 这一结果与 Urano 等^[20]得出的三卤甲烷生成速率变化规律一致. 因为原水中含氮有机物有限,所以含氮副产物的浓度不高,随投加量增加,含氮副产物的生成量从 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 $8.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,仅有三卤甲烷的 20% 左右.

氯胺消毒的水样中仅检测到三氯甲烷与三氯硝基甲烷,随着投加量的增加,三卤甲烷的生成量从 $4.41 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增大到 $5.47 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,三氯硝基甲烷的生成量在氯胺投加浓度低时未检出,增加氯胺投加量后,其生成量增加到 $1.67 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,由此可见,增大氯胺的投加量并不会导致三卤甲烷和含氮副产物生成量大幅增长. 这一结果与氯胺的特性有关,副产物的生成主要是水中次氯酸与前体物发生反应,氯胺稳定性强,氯胺自降解产生次氯酸的速度有限,因此随着氯胺投加量的增加,DBPs 的浓度也没有显著变化.

从图 2 结果对比分析可知,在丹江口水库水消毒工艺如果采用自由氯消毒,就必须严格控制其投加量,以防副产物大量产生;如果采用氯胺消毒则可以适当增加消毒剂投加量,以提高消毒效率,减少水体停留时间.

2.3 接触时间对消毒副产物的影响

为探究接触消毒时间对副产物生成量的影响,在 pH 为 7 的水样中加入 $2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠或者氯胺溶液,将次氯酸钠与氯胺消毒水样放在 25°C 恒温培养箱中反应 0.5、2、4、8、24 h. 自由氯消毒和氯胺消毒过程中总余氯的变化如图 3 所示,随反应时间的变化产生的 DBPs 量变化结果如图 4 所示.

从图 3 中可以看出,在丹江口水样自由氯消毒过程中自由氯的衰减速度较快,4 h 内衰减量达到 50%,24 h 后余氯量仅有 $0.2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,持续消毒能

力并不理想;而采用的氯胺消毒过程中氯胺的衰减速度较为缓慢,大约 24 h 后余氯量依然有 50% 以上,其持续消毒能力很好. Yamamoto 等^[21]研究表明,氯胺的半衰期为游离氯的 100 倍,这与丹江口水源地水消毒实验中氯的衰减情况相近.

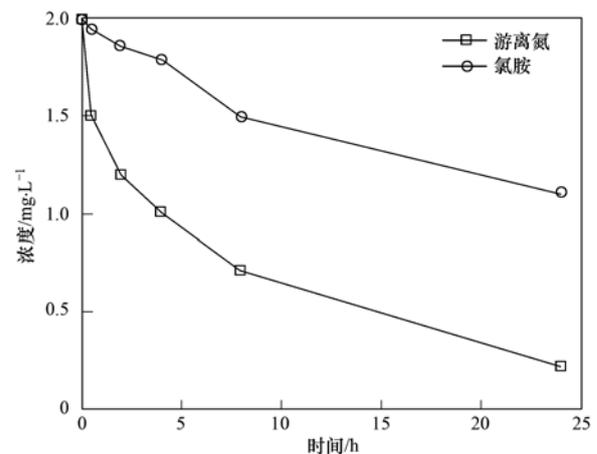


图3 自由氯与氯胺消毒过程中总氯变化曲线

Fig. 3 Reduction of chlorine and chloramine

从图 4 可以看出,自由氯消毒水样中三卤甲烷生成量在前 8 h 内线性增加,8~24 h 之间增幅稍有减缓,这一现象与游离氯衰减情况有关,在前 8 h 内,余氯量较高,与前体物反应迅速,8 h 后余氯量不足 30% 且迅速减少至 $0.2 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,导致与前体物的反应速度有所降低. 有研究提出,自由氯接触消毒时间与三卤甲烷的生成量成正相关^[22],El-Dib 等^[23]与 Gallard 等^[24]的研究均表明三卤甲烷在较短的接触时间内迅速增加,在后续较长时间内缓慢增加,此次丹江口消毒实验所得结果与这些研究结论一致. 含氮副产物在 24 h 内保持缓慢增加,其原因是丹江口水源地水消毒实验中含氮副产物前体物有限所致.

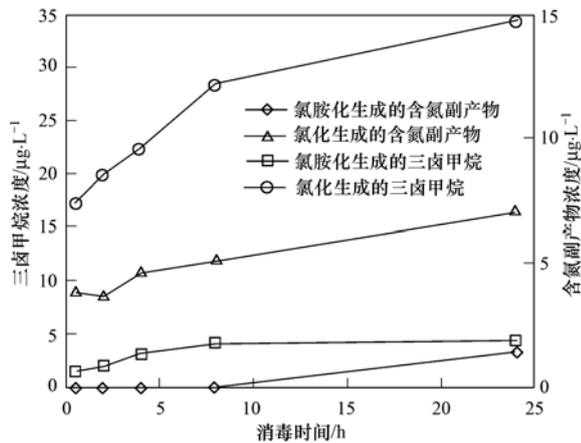


图 4 接触时间对消毒副产物生成的影响

Fig. 4 Effects of contact time on formation of DBPs

氯胺消毒水样中三卤甲烷生成量也随着接触时间的增加而增加,但增加幅度仅有自由氯消毒方式的 16.6%,并且逐渐减缓,8 h 后几乎不再增加.这是因为氯胺氧化性远低于自由氯,可与氯胺发生反应的三卤甲烷前体物有限,因此随着时间延长三卤甲烷产生量变化不大.含氮副产物在前 8 h 内一直未检出,而在 24 h 有少量检出,分析其原因是因为氯胺化含氮副产物前体物浓度都很低,短时间内含氮副产物生成量低于检测限,而随着时间的延长和积累可检出少量的三氯硝基甲烷等 N-DBPs.

对比自由氯消毒和氯胺消毒,可以发现随着反应时间的延长自由氯消毒的消毒剂消耗量和 DBPs 产生量增加明显,而由于氯胺化 DBPs 前体物有限,氯胺化消毒方式 DBPs 产生量低且氯胺的消耗量小.因此对于使用丹江口水库水为水源的城市,应用氯胺作为消毒剂在保证总氯余量同时,可避免管网内长时间停留导致副产物大量升高的弊端^[25].

2.4 pH 对消毒副产物的影响

为探究 pH 对副产物生成的影响,在 pH 分别为 6、7、8、9 的水样中加入 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的次氯酸钠或氯胺,将消毒水样培养 24 h. 实验结果如图 5、图 6 所示.

从图 5 可以清楚地看出,自由氯消毒过程中随着 pH 值的增加,三氯甲烷增加明显,而含氮副产物在 pH 从 6 增加到 7 时没有明显变化,但 pH 从 7 增加到 9 时其浓度明显降低.这主要是由不同 pH 条件下 DBPs 的稳定性有所变化导致.二氯乙腈和三氯硝基甲烷在碱性条件下会通过水解或者自降解,成为更为稳定的三氯甲烷等物质,并且水解速度随着 pH 升高而增加.此外,碱性条件下环状有机物会

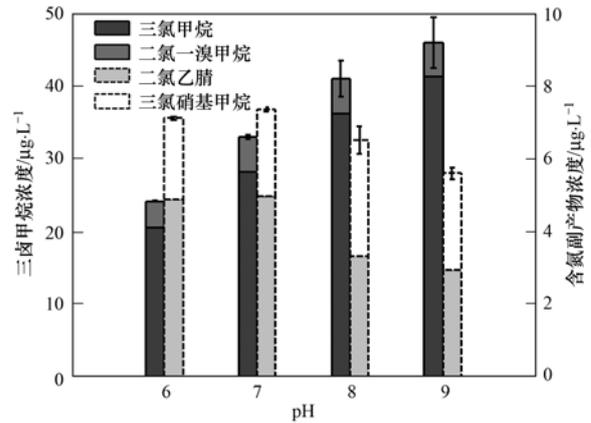


图 5 pH 对氯消毒副产物生成的影响

Fig. 5 Effects of pH on formation of chlorine DBPs

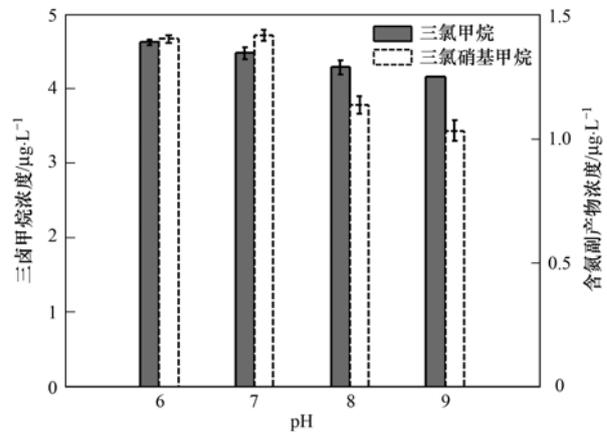
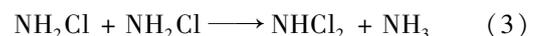


图 6 pH 对氯胺消毒副产物生成的影响

Fig. 6 Effects of pH on formation of chloramine DBPs

发生开环反应,与自由氯反应后生成三氯甲烷等副产物,这进一步增加了氯仿的浓度^[26].

从图 6 中可以看出,氯胺消毒水样中三氯甲烷生成量随着 pH 升高而小幅降低,pH 为 6 时三氯甲烷浓度为 $4.62 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,当 pH 增大到 9 时,三氯甲烷浓度降低了 $0.64 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;而含氮副产物在 pH 从 6 增加到 9 时浓度明显降低.这一现象可以用氯胺的自降解反应[公式(1)~(3)]来解释.氯胺自降解使得水中出现 NH_2Cl 、 NHCl_2 、 OCl^- 、 HOCl 这 4 种含氯氧化剂.



在 pH 为中性条件下, NH_2Cl 是主要存在形式,其转化为 HOCl 的速度也比其他 pH 条件下更快,因此中性条件下三氯甲烷和三氯硝基甲烷的量最多.当 pH 逐渐升高时,三氯硝基甲烷发生水解,浓度进一步降低^[23].

《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》中规定水体 pH 应在 6~9 之间,在此范围内氯胺消毒能够很好地适应水质 pH 的波动,不会出现自由氯消毒时副产物生成量大幅变化的情况,在丹江口原水消毒处理过程中如果出现 pH 上升的情况,就应该使用氯胺作为消毒剂,或者采用短时游离氯转氯胺的消毒方式。

2.5 溴离子对消毒效果的影响

为探究自由氯与氯胺消毒对溴代消毒副产物的控制能力,向水样中分别加入 0.1、0.2、0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溴化钾后再加入 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠或者氯胺溶液,培养 24 h。实验结果如图 7、图 8 所示。

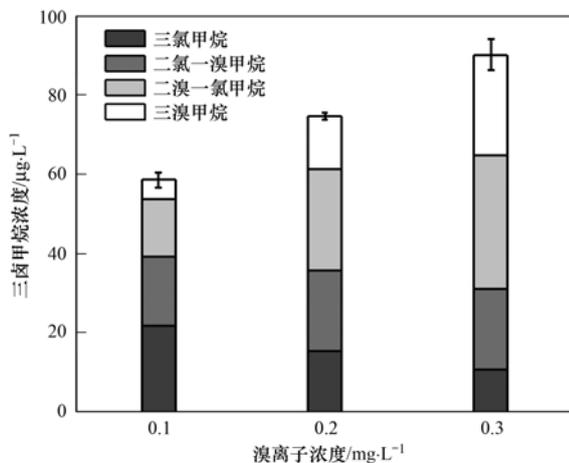


图 7 溴离子浓度对氯消毒副产物生成的影响

Fig. 7 Effects of bromide ion concentration on formation of chlorine DBPs

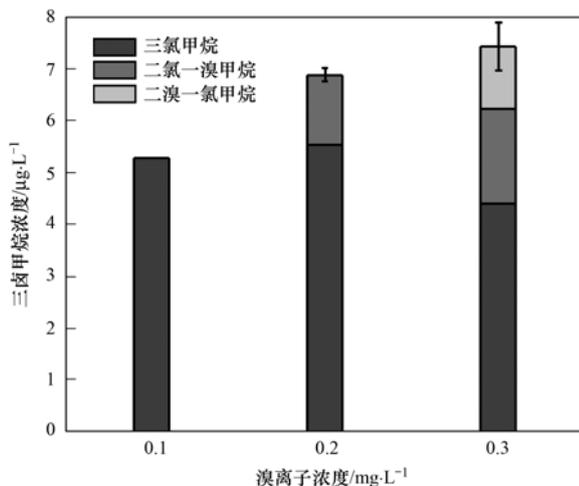


图 8 溴离子浓度对氯胺消毒副产物生成的影响

Fig. 8 Effects of bromide ion concentration on formation of chloramine DBPs

在自由氯消毒水样中检测出了 4 种三卤甲烷(三氯甲烷、二氯一溴甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲

烷),且含量很高。溴离子浓度从 0.1 增加到 0.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总三卤甲烷浓度显著增加,三氯甲烷与二氯一溴甲烷逐渐减少,而二溴一氯甲烷与三溴甲烷逐渐增多,这是因为水中同时存在次氯酸和次溴酸,它们都可以与有机物反应,但是次溴酸的亲电取代能力远强于次氯酸^[22],因此次溴酸更容易与有机物反应生成溴代副产物。

在氯胺消毒水样中仅检测出少量的三氯甲烷和微量的二氯一溴甲烷与二溴一氯甲烷。随着加溴量的增加,氯胺消毒水样中副产物生成量也有显著增加,但增长量明显小于自由氯消毒过程。一氯胺在含溴的水中会生成次溴酸,而次溴酸又能与一氯胺进一步反应生成溴氯胺,溴氯胺在溴代 DBPs 的产生过程中起着重要作用。根据溴氯胺自降解模型,溴代 DBPs 不会出现大幅增长^[27]。

从以上结果可以看出,氯胺消毒比自由氯消毒更能控制溴代副产物的生成,在丹江口原水消毒过程中,如果溴离子含量升高,就应采用氯胺消毒或短时游离氯转氯胺消毒。

3 结论

(1)丹江口水库水经氯化消毒可产生三氯甲烷、二氯一溴甲烷等常规含碳和较低浓度二氯乙腈、三氯硝基甲烷等含氮消毒副产物,而氯胺化消毒仅产生三氯甲烷和三氯硝基甲烷等 DBPs,无论是氯化还是氯胺化消毒,副产物都以三氯甲烷为主;自由氯消毒过程产生的各类型 DBPs 浓度约为氯胺消毒的 7.5 倍,短时自由氯转氯胺方式 DBPs 产生量介于两者之间,是自由氯的二分之一。

(2)随着自由氯投加量增加,含氮副产物在投加量较低时明显增加,投加量达到 3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后基本不再变化,三卤甲烷含量呈对数增长,投加量大于 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后三卤甲烷增加量较少;随氯胺投加量增加,三氯甲烷生成量无显著变化,仅有小幅增加,投加量大于 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后可产生三氯硝基甲烷等副产物;随反应时间延长,自由氯的衰减速率明显大于氯胺,同时消毒副产物增长速度明显快于氯胺消毒,无论哪种消毒方式,副产物都在反应前期迅速增加,到后期增幅渐缓,氯胺消毒仅在反应时间较长的情况下才会累积产生微量三氯硝基甲烷;随着 pH 升高,自由氯消毒后三卤甲烷含量呈现增加趋势,而氯胺消毒后变化不明显,两种消毒方式生成的含氮副产物都有明显降低;随溴离子浓度的增加,自由氯和氯胺消毒后副产物类型均向溴代 DBPs 转变,同

时总生成量明显增加,自由氯消毒 DBPs 增长量明显大于氯胺消毒过程。

(3)丹江口原水消毒工艺应优先选用氯胺或短时游离氯转氯胺的消毒方式而避免采用自由氯以控制水厂出水中消毒副产物的生成量。若选用氯胺消毒,就应增加消毒剂投加量,延长接触时间,保证消毒完全;若选用短时游离氯转氯胺的消毒方式,就应该选取适中的投加量和接触时间,确保达到消毒和副产物的双重控制要求;若选用自由氯消毒,就应该严格控制投加量和接触时间,防止副产物大量生成。当 pH 或者溴离子浓度较高时,应尽量选用氯胺或短时游离氯转氯胺消毒。

参考文献:

- [1] 程拓,徐斌,朱贺振,等.南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比[J].环境科学,2015,36(3):898-904.
- [2] 成庆利,张杰.丹江口水库水质现状分析与评价[J].环境与可持续发展,2007,(1):12-14.
- [3] 刘兆孝,穆宏强,陈蕾.南水北调中线工程水源地保护问题与对策[J].人民长江,2009,40(16):73-75.
- [4] 平伯年.饮用水消毒[J].净水技术,1990,(1):35-37.
- [5] 赵晖,薛科社.饮用水消毒方式与消毒副产物分析[J].地下水,2011,33(4):177-178,194.
- [6] 田富箱,徐斌,荣蓉,等.不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响[J].环境科学,2014,35(2):605-610.
- [7] 黄河,徐斌,朱文倩,等.长江沿线城市水源氯(胺)化消毒副产物生成潜能研究[J].中国环境科学,2014,34(10):2497-2504.
- [8] 尚晓玲,李咏梅.典型含氮消毒副产物的形成及去除的研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(4):60-64.
- [9] 董倩倩,张艾,李咏梅,等.黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系[J].环境科学,2014,35(3):958-963.
- [10] Choi J, Valentine R L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product[J]. Water Research, 2002, 36(4): 817-824.
- [11] Richardson S D. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2003, 22(10): 666-684.
- [12] 林琳,徐斌,覃操,等.黄浦江原水 NDMA 前体物的组成规律及其在常规净水工艺中的削减特性[J].给水排水,2013,39(2):61-65.
- [13] 刘静,陈超,张晓健,等.两点短时游离氯后转氯胺的顺序氯化消毒工艺研究[J].环境科学,2008,29(12):3368-3371.
- [14] 陈超,张晓健,韩宏大,等.顺序氯化消毒控制卫生学指标的效果[J].中国给水排水,2005,21(10):5-8.
- [15] 张晓健,陈超,何文杰,等.顺序氯化消毒工艺的研究[J].中国环境科学,2006,26(4):454-458.
- [16] 刘艳艳,徐中惠,王素影.自由氯,氯胺和顺序氯化对饮用水消毒效果的试验研究[J].供水技术,2012,6(4):13-16.
- [17] Diehl A C, Speitel G E Jr, Symons J M, et al. DBP formation during chloramination [J]. Journal-American Water Works Association, 2000, 92(6): 76-90.
- [18] Ye T, Xu B, Wang Z, et al. Comparison of iodinated trihalomethanes formation during aqueous chlor(am)ination of different iodinated X-ray contrast media compounds in the presence of natural organic matter[J]. Water Research, 2014, 66: 390-398.
- [19] Vahala R, Långvik V A, Laukkanen R. Controlling adsorbable organic halogens (AOX) and trihalomethanes (THM) formation by ozonation and two-step granule activated carbon (GAC) filtration[J]. Water Science and Technology, 1999, 40(9): 249-256.
- [20] Urano K, Wada H, Takemasa T. Empirical rate equation for trihalomethane formation with chlorination of humic substances in water[J]. Water Research, 1983, 17(12): 1797-1802.
- [21] Yamamoto K, Fukushima M, Oda K. Disappearance rates of chloramines in river water[J]. Water Research, 1988, 22(1): 79-84.
- [22] 陈萍萍,张建英,金坚袁.饮用水中卤乙酸和三卤甲烷的形成及影响因素研究[J].环境化学,2005,24(4):434-437.
- [23] El-Dib M A, Ali R K. THMs formation during chlorination of raw Nile river water [J]. Water Research, 1995, 29(1): 375-378.
- [24] Gallard H, Von Gunten U. Chlorination of natural organic matter: kinetics of chlorination and of THM formation[J]. Water Research, 2002, 36(1): 65-74.
- [25] 焦中志,陈忠林,陈杰,等.氯胺消毒对消毒副产物的控制研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(11):1486-1488.
- [26] Xu B, Zhu H Z, Lin Y L, et al. Formation of volatile halogenated by-products during the chlorination of oxytetracycline [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, 223(7): 4429-4436.
- [27] Tian F X, Xu B, Tian K N, et al. Formation of carbonaceous and nitrogenous disinfection by-products during monochloramination of oxytetracycline including N-Nitrosodimethylamine [J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 54(8): 2299-2306.

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, et al.	(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, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(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, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(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, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(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, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(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, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggy Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitro bacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(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, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(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, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(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, et al.	(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, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(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