

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾琰杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响

毕薇薇¹, 叶胜¹, 于建全¹, 杨玉龙², 陈晨³, 李青松⁴, 马晓雁^{1*}

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 3. 浙江省天正设计工程有限公司, 杭州 310000; 4. 厦门理工学院水资源环境研究所, 厦门 361005)

摘要: 供水管网覆盖区域大, 导致出厂消毒剂量不足以维持管网末梢余氯量, 需进行途中二次投氯. 以 H 市供水管网为目标, 通过均匀布点采样分析, 考察二次加氯消毒型管网中消毒副产物 (disinfection by-products, DBPs) 的分布特征. 结果表明, 管网中检出 DBPs 包括三氯甲烷 (TCM)、一溴二氯甲烷 (BDCM)、二溴一氯甲烷 (DBCM)、三溴甲烷 (TBM)、二氯乙酸 (DCAA)、三氯乙酸 (TCAA)、二氯乙腈 (DCAN)、溴氯乙腈 (BCAN) 和三氯硝基甲烷 (TCNM) 等, 所检水样中 DBPs 浓度均低于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 规定的标准限值. 二次加氯前检出质量浓度 (以平均值 $\pm$ 偏差表示) 分别为: (8.08 ± 3.34) 、 (9.77 ± 2.91) 、 (7.38 ± 4.82) 、 (2.65 ± 2.02) 、 (2.95 ± 3.26) 、 (6.02 ± 6.06) 、 (3.13 ± 2.48) 、 (1.61 ± 2.05) 和 (0.15 ± 0.10) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 二次加氯后检出质量浓度分别为: (10.30 ± 4.55) 、 (11.73 ± 3.60) 、 (8.23 ± 5.22) 、 (2.95 ± 2.45) 、 (3.29 ± 3.60) 、 (8.15 ± 7.58) 、 (3.31 ± 2.61) 、 (1.33 ± 2.04) 和 (0.12 ± 0.06) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 二次加氯后 DBPs 含量相较于出厂水至二次加氯点呈明显上升趋势, 三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs) 分别比前段管网含量升高 6.32%~26.60% 和 5.32%~42.71%. 此外, 原水水质和季节变化对 DBPs 的形成有一定影响, 夏季 DBPs 的水平普遍高于春季或秋季. 出厂水及管网水 DBPs 生成势分析表明, H 市供水系统中 DBPs 可能存在超标风险, 后续需考虑进一步优化处理工艺以保障供水水质.

关键词: 消毒副产物; 长距离供水管网; 二次加氯; DBPs 生成势; 水质安全

中图分类号: X131.2; TU991.25 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3297-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001007

Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems

BI Wei-wei¹, YE Sheng¹, YU Jian-quan¹, YANG Yu-long², CHEN Chen³, LI Qing-song⁴, MA Xiao-yan^{1*}

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Tianzheng Design Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China)

Abstract: It is difficult for waterworks that add chlorine into finished water once to maintain sufficient residual chlorine at unfavorable points of the pipe network that supply water for large areas of coverage. Therefore, booster chlorination was employed for a long-distance water distribution system. The study was performed in H City with a water supply system serving about 400 km² of downtown and rural areas. The purpose of this work is to obtain the distribution characteristics of disinfection by-products (DBPs) in the booster chlorination disinfection pipe network through uniformly distributed sampling analysis. The results showed that detected DBPs include trichloromethane (TCM), bromodichloromethane (BDCM), dibromochloromethane (DBCM) and tribromomethane (TBM), dichloroacetic acid (DCAA), trichloroacetic acid (TCAA), dichloroacetonitrile (DCAN), bromochloroacetonitrile (BCAN), and trichloronitromethane (TCNM). The concentrations of the regulated DBPs were found to be lower than the standard limits specified in the Sanitary Standard for Drinking Water (GB5749-2006). Before booster chlorination, the average concentrations of the DBPs mentioned (expressed as mean $\pm$ deviation) were (8.08 ± 3.34) , (9.77 ± 2.91) , (7.38 ± 4.82) , (2.65 ± 2.02) , (2.95 ± 3.26) , (6.02 ± 6.06) , (3.13 ± 2.48) , (1.61 ± 2.05) , and (0.15 ± 0.10) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, while afterwards, they were increased to (10.30 ± 4.55) , (11.73 ± 3.60) , (8.23 ± 5.22) , (2.95 ± 2.45) , (3.29 ± 3.60) , (8.15 ± 7.58) , (3.31 ± 2.61) , (1.33 ± 2.04) , and (0.12 ± 0.06) $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Trihalomethanes (THMs) and haloacetic acids (HAAs) increased by 6.32%-26.60% and 5.32%-42.71%, respectively, after booster chlorination. In addition, raw water quality and seasonal changes had a certain impact on the occurrence of DBPs. The levels of DBPs in summer were generally higher than those in spring or autumn. According to the analysis of DBP formation potential of source water, finished water, and tap water, it was found that the risk of DBPs exceeding the standard limit may exist in the water supply system of H City; therefore, further optimization of the treatment process should be considered to ensure water quality.

Key words: disinfection by-products; long-distance water supply network; booster chlorination; DBPs formation potential; water quality safety

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-02-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678527, 51878582, 51808497); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07201003); 浙江省自然科学基金项目 (LY19E080019, LY20E080021); 浙江省教育厅基金项目 (Y201636517)

作者简介: 毕薇薇 (1983~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为城市供水管网水力水质模拟, E-mail: weiweibi@zjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: mayaner620@163.com

统一供水是城乡一体化的重要组成部分,为了提高农村饮用水质量,中国已逐步采用集中式供水模式^[1].浙江省启动“农村饮用水安全工程”,通过城镇管网延伸工程和联村供水工程实现农村集中供水. H市2座水厂为CX水厂和TH水厂. CX水厂以L水库水和T溪水为供水水源,主要供水服务区域为H市中心城区. TH水厂则主要担负着NX、LS、SL、LH和DX五大片区的供水任务,以T湖为原水. 随着H市多水源城乡联合供水管网的建设,原乡镇小型水厂逐步关停,实现并网供水,供水覆盖面积可达到400余hm²,供水水量能够满足H市区及城乡到2030年的城乡用水需求. 然而,由于供水管网的长度不断延伸,供向偏远地区的管网类型多为树状,水流动性差,停留时间过长,管网微生物等滋生风险升高. 二次消毒是解决长距离管网输配过程中二次污染,保障饮用水水质的必要措施.

氯是保证长距离输水过程抑制微生物生长最有效的消毒剂,但氯与水源中有机/无机前体相互作用时会形成消毒副产物(disinfection by-product, DBPs)^[2,3]. 在过去的40多年中,已经确定了600多种DBPs^[4~6],当前大量的研究表明,DBPs具有潜在的致癌性、致突变性以及遗传毒性^[7~9].

余氯会继续与水中的有机物反应生成DBPs,管网中DBPs含量与水厂出水往往具有较大差别,并且管网生物膜中细菌的代谢产物及管壁腐蚀物吸附的有机物也会与余氯反应,进一步影响DBPs的生成以及分布变化情况^[10]. 国内外供水系统中DBPs含量调查显示,三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)和卤乙酸(haloacetic, HAAs)是管网中检出的最主要的DBPs^[11~13]. 法国3个供水系统中THMs平均浓度范围为21.6~59.9 μg·L⁻¹,而在管网中检出的THMs浓度是出厂水的1.1~5.7倍^[14]. Villanueva等^[15]对西班牙217个管网水样本分析显示,THMs和HAAs的浓度范围分别为0.8~98.1 μg·L⁻¹和0.9~86.9 μg·L⁻¹. Chan等^[16]的调查发现,THMs和HAAs在新泽西州供水系统中均有检出,且THMs的浓度会随着在管网中水力停留时间的增加而增加,而HAAs变化趋势则相反. Gan等^[17]对中国沿海地区3个城市的饮用水中DBPs进行了调查,THMs和HAAs的浓度范围分别为0.7~62.7 μg·L⁻¹和0.3~81.3 μg·L⁻¹,并且HAAs会随着时间在分配系统中被生物降解. 与THMs和HAAs等常规受控DBPs相比,新兴DBPs包括卤乙腈(haloacetonitrile, HANs)、卤代酮(halogenated, HKs)和卤代硝基甲烷(halogenated nitromethane, HNMs)等通常以较低的水平存在于饮用水中^[18,19],但它们却具有更高的细

胞毒性和遗传毒性^[20,21]. 董蕾等^[22]在6个城市管网水中检测到TCNM的浓度为ND~1.21 μg·L⁻¹. 最近的一项针对中国东部农村地区的DBPs调查显示,THMs和HAAs是管网中检出的主要DBPs,其中位浓度分别为29.76 μg·L⁻¹和20.47 μg·L⁻¹,而HANs、HKs和TCNM的存在水平很低,中位浓度仅为3.98、0.76和0.03 μg·L⁻¹^[1]. 然而,当前的调查研究中大多针对常规加氯后管网中DBPs,鲜见报道二次加氯管网中DBPs的分布及变化情况. 长距离输水管网中DBPs的形成和转化受到多种因素的影响,例如原水水质,水处理工艺、消毒剂类型和管道材料等^[23~26]. 因此,研究城市管网特别是二次加氯型管网中DBPs的分布和变化情况对饮用水安全保障具有极其重要的意义.

本文以浙江省H市供水系统为研究目标,开展了针对二次加氯型管网中DBPs的种类及分布特征的调查,同时深入分析了二次加氯及季节变化对管网水中DBPs的影响,并评估了供水管网中可能存在的DBPs超标风险,通过增进对饮用水中DBPs发生的了解,以期为保障安全饮水及优化水厂处理工艺提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 水样采集与保存

采样区域位于浙江省H市饮用水处理及供水系统,在2018年5月~2019年9月期间分别对H市的CX水厂和TH水厂出厂水及相应管网水进行水样采集,两水厂工艺流程及采样点位置如图1所示. 水样采集完毕后,立即带回实验室,经0.45 μm玻璃纤维膜过滤,并置于4℃避光环境储存,所有样品的检测均在48 h内完成.

1.2 仪器与试剂

分析仪器包括multi N/C2100型TOC仪(德国耶拿)、GC-2014型气相色谱仪(日本岛津)配备HP-5毛细管色谱柱(30 m×0.25 μm×0.25 μm,上海安谱)、UPHW1-90T型纯水机/超纯水制造系统(北京优普时代)和TU-1901型紫外分光光度计(北京普析). 试验所需药品均为分析纯或标准品,甲醇(HPLC级)、叔丁基甲基醚(GC级)和三卤甲烷混标[三氯甲烷(TCM)、一溴二氯甲烷(BDCM)、二溴一氯甲烷(DBCM)和三溴甲烷(TBM)]均购自上海安谱实验科技有限公司. 1,2-二溴丙烷(AR)、二氯乙酸(DCAA)、三氯乙酸(TCAA)、二氯乙腈(DCAN)、溴氯乙腈(BCAN)和三氯硝基甲烷(TCNM)等标准品购自上海阿拉丁试剂有限公司.

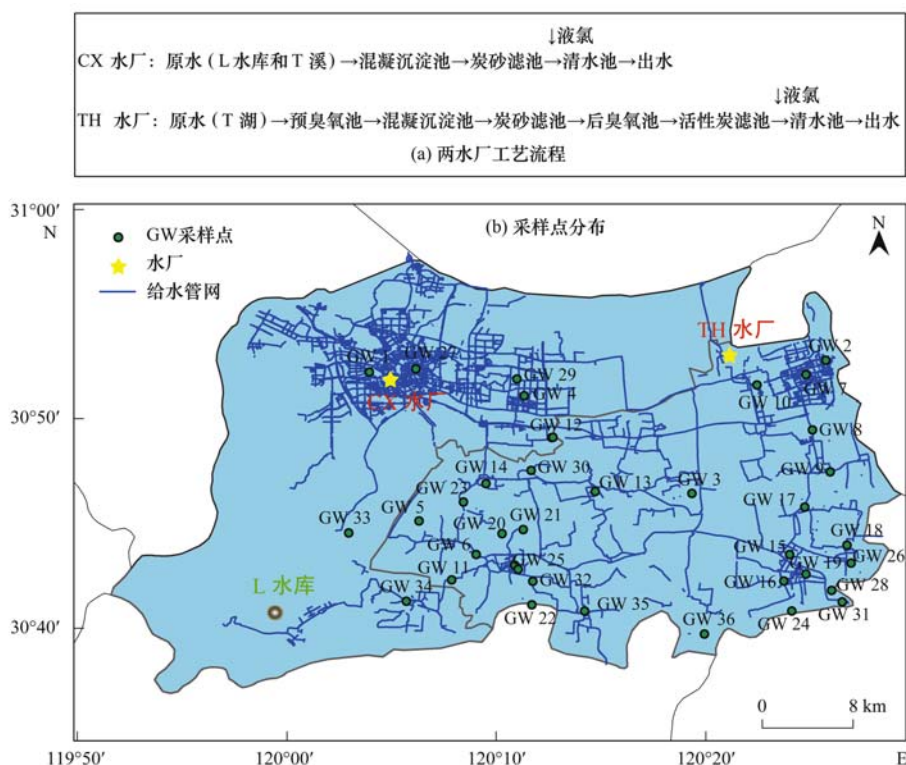


图1 水厂工艺流程及管网水采样点位置示意

Fig. 1 Treatment process of waterworks and sampling sites in the water distribution system

1.3 检测方法

THMs、HANs 和 TCNM 预处理方法为液液萃取,采用溶于甲基叔丁基醚(MTBE)的1,2-二溴丙烷来提取 THMs、HANs 和 TCNM,然后采用配备电子捕获检测器的气相色谱仪(GC-ECD)分析提取物.分析条件为进样口温度 200℃,不分流进样;升温程序为初始温度 35℃,保持 5 min,以 8℃·min⁻¹升至 100℃,保留 2 min,再以 20℃·min⁻¹升至 200℃,保留 1 min. ECD 温度为 250℃.载气为高纯氮气,总流量为 50 mL·min⁻¹,吹扫流量为 3 mL·min⁻¹.

HAA₅ 的测定方法是基于美国 USEPA552.3 法,即采用液液微萃取联合酸化甲醇酯化法.用溶于 MTBE 的 1,2-二溴丙烷萃取,酸化甲醇衍生.并使用 GC-ECD 进行定量分析.分析条件为进样口温度 210℃,不分流进样;升温程序为初始温度 35℃,保持 8 min,以 8℃·min⁻¹升温至 200℃,保持 15 min. ECD 温度 280℃.载气为高纯氮气,总流量为 50 mL·min⁻¹,吹扫流量为 3 mL·min⁻¹.

其它水质参数包括 pH 值、水温、浊度和余氯等均采用常规方法检测.使用装有自动进样器的 TOC 仪进行 DOC 分析,用紫外可见分光光度计在 254 nm 波长下读取 UV₂₅₄ 吸光度.为保证检测结果的准确性,每次测样均设置平行样及空白对照组,并对异常值进行重复检测.

2 结果与讨论

2.1 水厂及对应供水管网中 DBPs 分布

分别对 H 市两水厂及其供水管网中 DBPs 进行检测,共检出 9 种 DBPs,包括 4 种 THMs (TCM、BDCM、DBCM 和 TBM),2 种 HAA₅ (DCAA 和 TCAA),2 种 HANs (DCAN 和 BCAN) 以及 TCNM,含量及分布见图 2.

由图 2 可见,CX 和 TH 水厂出水及其对应供水管网中 DBPs 均以 THMs 和 HAA₅ 为主.其中,CX 出水及管网水中 THMs 主要种类为 TCM,平均检出浓度分别为 8.60 μg·L⁻¹ 和 13.94 μg·L⁻¹,THMs 种类分布顺序为 TCM > BDCM > DBCM > TBM,这与国内外其它地区 DBPs 调查含量相当^[18,27].相较于 CX 水厂,TH 水厂出水及管网水中则产生了更多的溴代 THMs,溴代 THMs 检出率为 100%,且 BDCM 含量高于 TCM,出厂水中 BDCM 的平均检出浓度为 5.78 μg·L⁻¹,在管网水中最高检出浓度可达 19.42 μg·L⁻¹,这可能归因于 TH 水厂原水取自 T 湖,原水中溴离子含量较高^[28];此外 TH 水厂采用的是臭氧活性炭工艺,臭氧可以将水体中较大分子量的 NOM 分解为较小分子量的有机物质^[29],同时臭氧的强氧化性可将溴化物快速氧化为次溴酸(HOBr),HOBr 进一步与 NOM 反应^[30],从而导致更多的溴化 THMs 形成. HAA₅ 中,DCAA 和 TCAA 在两水厂出水和管

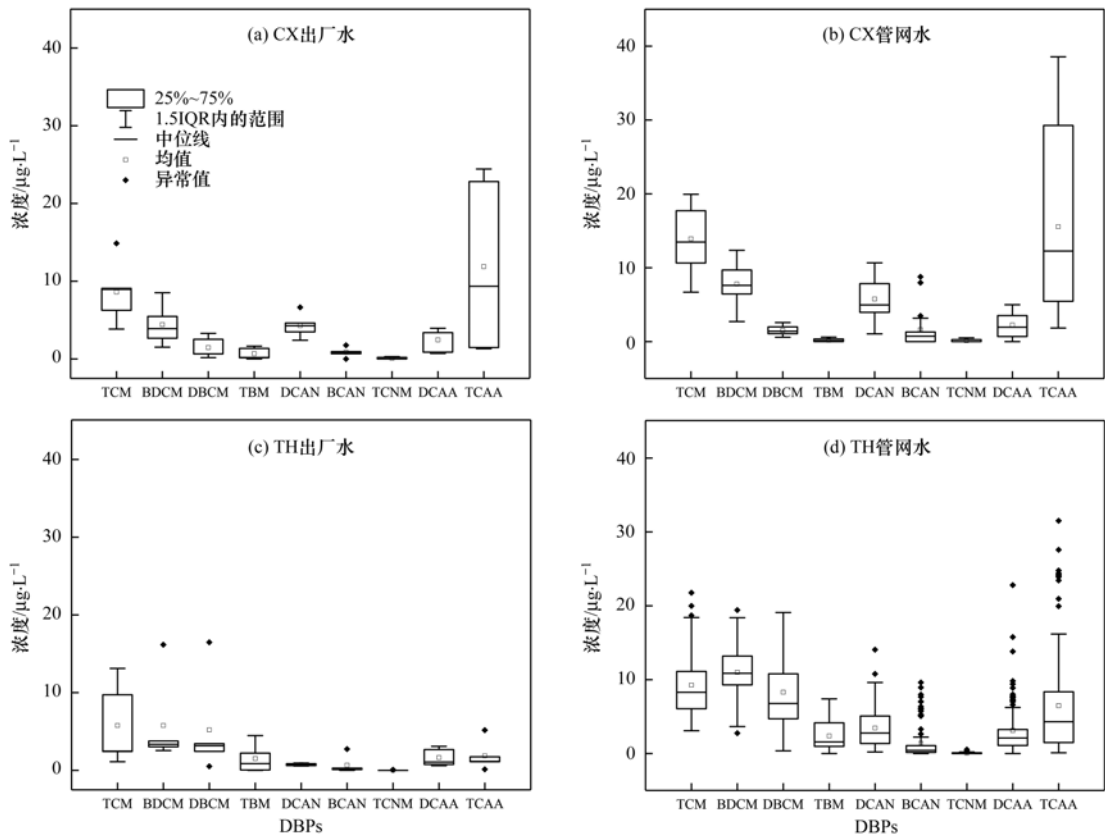


图 2 水厂及对应管网中 DBPs 分布
Fig. 2 Distribution of DBPs in the waterworks and water distribution system

网水中均 100% 检出,但低于国家标准限值,两水厂出水及管网水中 HAAs 的平均浓度分别为 $16.57 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.15 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 值得注意的是, CX 水厂出水及管网水中 HAAs 含量均高于 TH 水厂,这可能是由于 CX 水厂原水中含有较多 HAAs 前体物,同时 TH 水厂采用了包括臭氧化和生物活性炭吸附在内的深度处理工艺,可显著减少 C-DBPs 的前体和微量有机污染物^[31,32],臭氧氧化产生的低分子酸易被生物利用,提高了生物降解和吸附效能,从而进一步减少了 HAAs 的形成^[33,34]. 非受控 DBPs 在两水厂及管网水中检出的主要类别为 DCAN、BCAN 和

TCNM. 其中 DCAN 含量高于 BCAN 和 TCNM,在 TH 管网水中检出最高浓度 ($14.06 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),但未超过 WHO 暂时性指导值 ($20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),而 TCNM 在两水厂仅以痕量浓度检出,平均值分别为 $0.27 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 此外,两水厂供水管网中 DBPs 含量均高于出厂水,说明 DBPs 在管网中余氯存在的条件下继续生成.

2.2 长距离输水管网中 DBPs 季节性变化
在不同季节条件下,对 CX 和 TH 水厂管网水的水温、pH、余氯、浊度、DOC 和 UV_{254} 进行检测,其结果见表 1,两水厂原水和出水水质情况见表 2.

表 1 H 市 2 水厂不同季节管网水理化指标

理化指标	CX 水厂			TH 水厂		
	春	夏	秋	春	夏	秋
水温/ $^{\circ}\text{C}$	21.7 ~ 24.2	22.5 ~ 29.1	17.5 ~ 19.5	22.4 ~ 26.8	24.3 ~ 35.0	16.5 ~ 18.5
pH	7.08 ~ 7.25	6.57 ~ 7.44	7.13 ~ 7.46	7.15 ~ 7.57	6.73 ~ 7.53	7.13 ~ 7.68
余氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.43 ~ 0.61	0.03 ~ 0.52	0.34 ~ 0.85	0.03 ~ 0.84	0.01 ~ 0.96	0.12 ~ 1.90
浊度/NTU	0.34 ~ 1.46	0.28 ~ 1.05	0.29 ~ 2.93	0.19 ~ 1.64	0.17 ~ 2.52	0.39 ~ 5.31
DOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.41 ~ 1.82	2.53 ~ 5.11	3.65 ~ 4.43	0.91 ~ 2.31	2.45 ~ 6.57	2.87 ~ 5.44
$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	0.005 ~ 0.018	0.012 ~ 0.035	0.018 ~ 0.026	0.007 ~ 0.029	0.008 ~ 0.047	0.013 ~ 0.029

由表 1 可见,大多数水质参数都表现出明显的季节性变化,管网水中 DOC 含量较高,浓度范围为 $0.91 \sim 6.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,H 市供水系统中 DOC 平均值的变化规律为夏季 > 秋季 > 春季. UV_{254} 显示出与

DOC 相同的变化规律,夏季含量高于其它季节,这可能是与夏季藻类生长旺盛有关,有研究表明,原水中藻类的生长可通过释放细胞内外有机物来促进 DOC 和 UV_{254} 的产生^[35]. 由表 2 可见,TH 水厂原水

表 2 H 市 2 水厂原水及出水水质参数

Table 2 Characterization of raw water and effluent water quality parameters in H City									
项目	水温/℃	pH	余氯 /mg·L ⁻¹	浊度 /NTU	DOC /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	电导率 /μS·cm ⁻¹	溶解氧 /mg·L ⁻¹	
CX 水厂	原水	17.4~33.2	6.90~7.50	—	45~216	2.23~10.75	0.025~0.079	94.0~336.0	5.07~9.37
	出水	18.1~27.9	6.44~7.14	0.41~0.65	0.002~0.33	1.22~5.41	0.010~0.039	97.3~110.1	7.87~9.90
TH 水厂	原水	15.2~31.7	7.29~8.04	—	56~145	3.86~19.47	0.051~0.081	213.2~452.0	4.43~9.45
	出水	17.0~30.8	6.64~7.21	0.84~1.57	0.03~0.48	1.98~5.24	0.011~0.037	115.6~455.0	6.60~9.82

中 DOC 和 UV₂₅₄ 含量均略高于 CX 水厂. 管网水中游离余氯的季节性变化较为明显, 夏季余氯浓度更低, 可能是由于夏季的高温会加速氯化反应的进行, 从而导致大量的氯消耗, 最终导致管网水中游离余氯的降低.

水质参数包括水温、pH 值、UV₂₅₄ 和 DOC 等均可对消毒副产物的形成产生影响, H 市供水系统中 THMs 和 HAAs 的检出率较高, 在调查的各季节中 DBPs 平均浓度的变化如图 3 所示.

由图 3 可见, THMs 和 HAAs 的平均浓度呈季节性变化趋势. CX 水厂主要供水服务区域为 H 市中心城区, THMs 浓度夏季最高, 平均浓度为 25.61 μg·L⁻¹, 春季和秋季则相对较低, 平均浓度分别为 22.46 μg·L⁻¹ 和 18.16 μg·L⁻¹, 夏季水温与游离余氯浓度较高, 水温与 THMs 的形成存在着正相关性, 较高的游离氯会促进 THMs 的形成^[36]. 此外, THMs

的形成还与有机前体的含量有关, 夏季有机质从腐烂的植物中浸出的可能性增加^[37]. TH 供水管网中, 不同季节均检出较高浓度的溴代 THMs, 这可能是与原水中溴化物水平有关^[6]. 与 THMs 趋势相似, HAAs 也显示出明显的季节性差异, 夏季供水系统中的含量高于其它调查季节, HAAs 是氯和有机物之间反应的结果, 夏季较高的 DOC 和 UV₂₅₄ 水平可能会产生更多的 HAAs. 值得注意的是, TH 水厂管网水中 DCAA 浓度在春秋两季高于 TCAA, 而在夏季 TCAA 浓度高于 DCAA, 这可能是由于 DCAA 和 TCAA 具有不同的前体, 水的 NOM 特性可能会在不同季节中发生变化^[38], 同时 DCAA 在夏季水温较高的情况下会发生明显的生物降解^[39]; 此外, TH 水厂管网水的 pH 值在夏季相对较低, 在较低的 pH 值下, 氯化水中 TCAA 更易形成, 而 pH 值对 DCAA 的形成影响不大^[40].

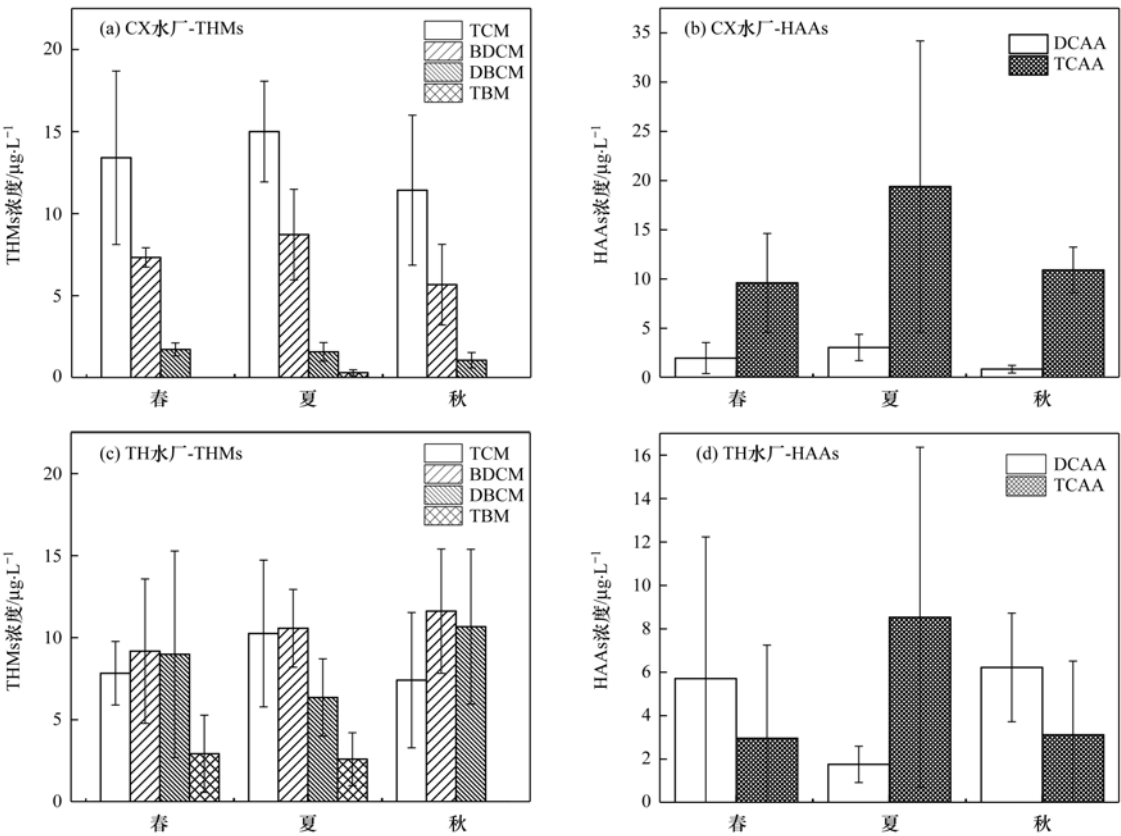


图 3 H 市供水系统中 DBPs 季节性变化

Fig. 3 Seasonal variation of DBPs in the H City water supply system

2.3 二次加氯对供水系统 DBPs 分布的影响

二次加氯是在管网中选择特定的位置作为“二次加氯点”,对饮用水再次消毒,以满足用水节点水

质安全所需的最低余氯水平的加氯方式^[41].如图4和图5所示,H市供水系统中LH及LS镇均有二次加氯点(GW25和GW17)对管网水进行补氯消毒.

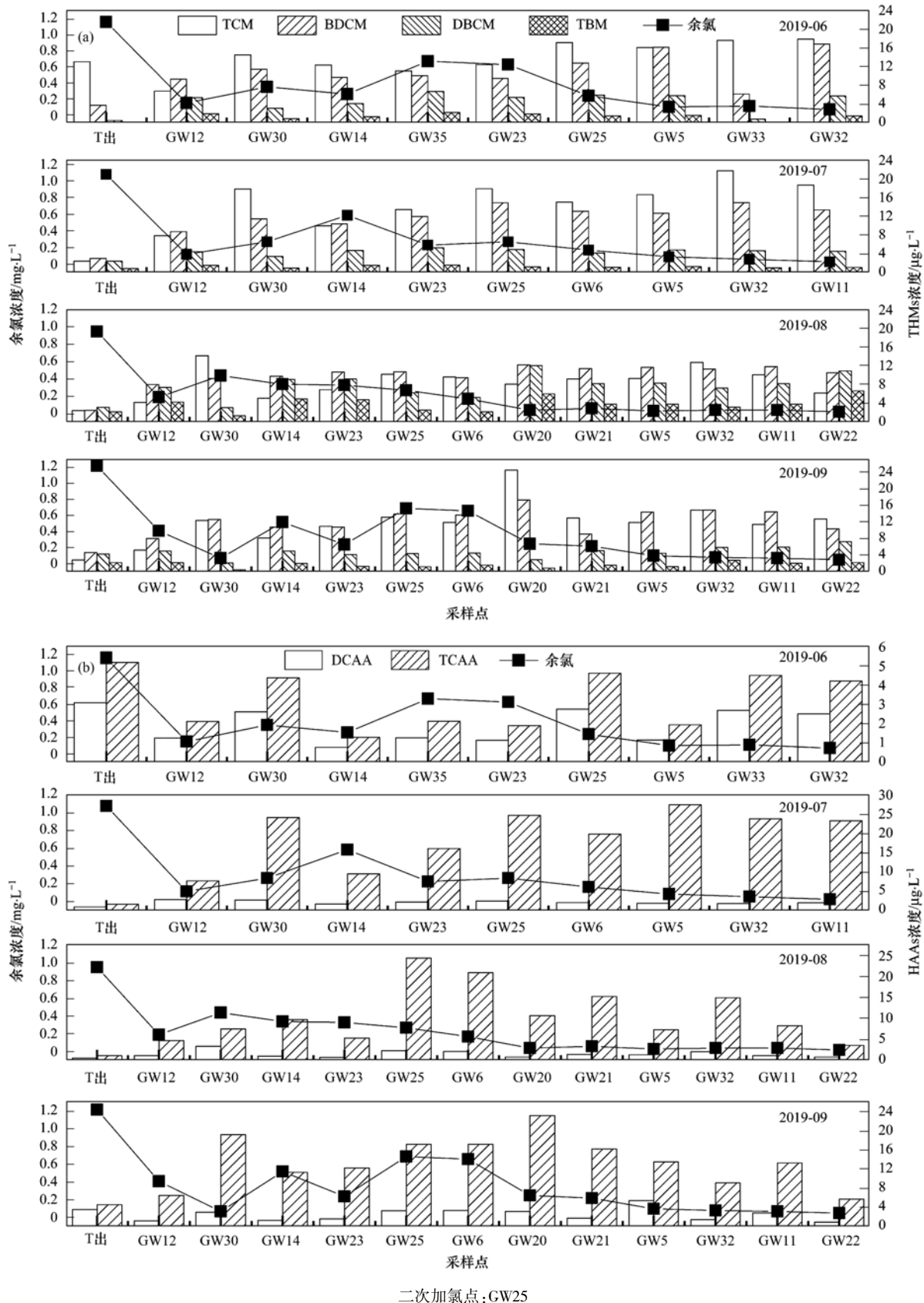
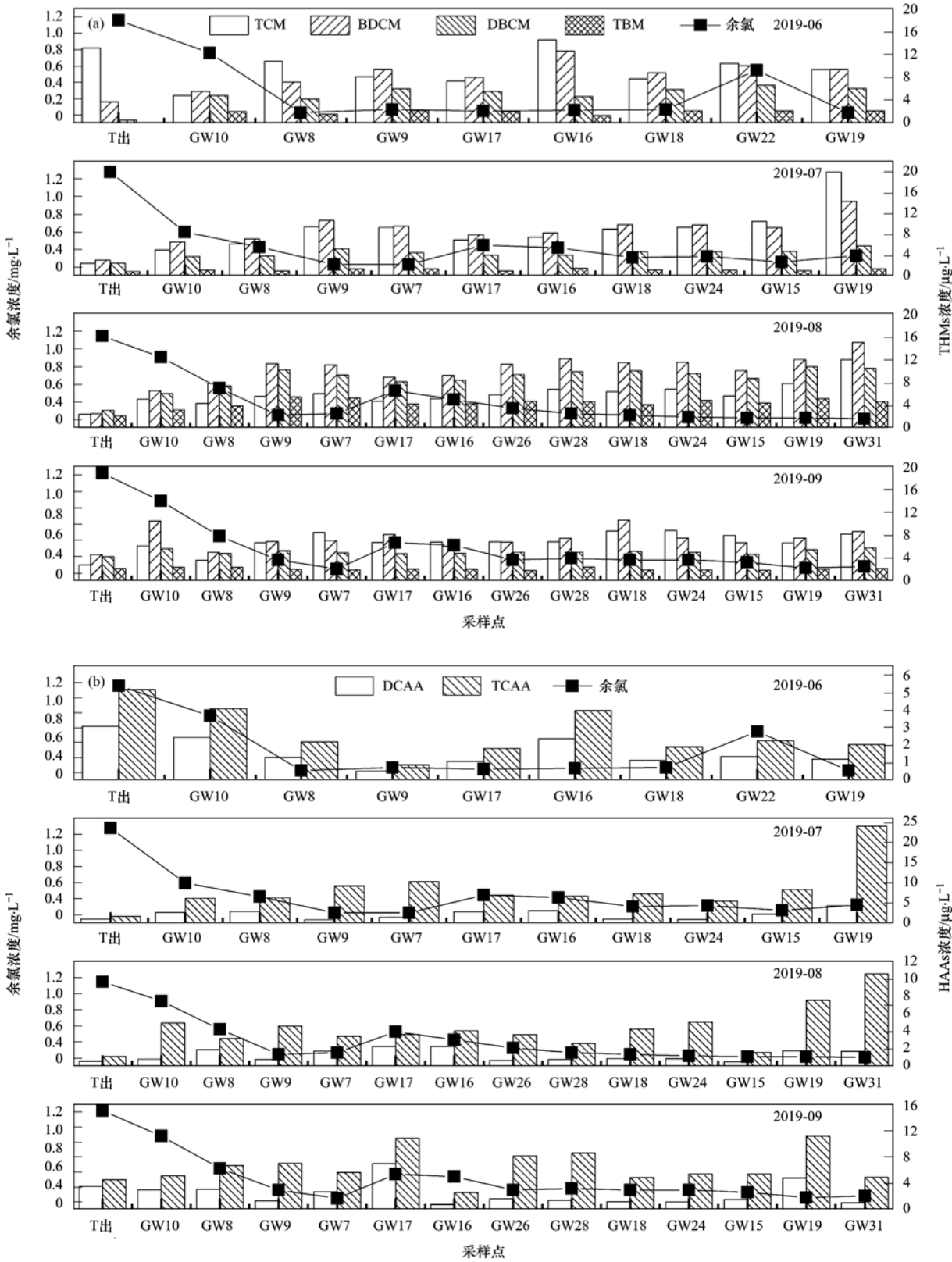


图4 LH二次加氯管网中THMs和HAAs含量变化

Fig. 4 Variation of THMs and HAAs in the distribution system after LH booster chlorination

依据管网中余氯衰减进行水流走向定线,部分管网点余氯呈波动性变化,可能与管线走向判断及其它未知影响因素有关.在二次加氯消毒后,DBPs 含量相较于前段管网呈明显上升趋势,THMs 波动范围

为 $19.91 \sim 45.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAA5 波动范围为 $2.14 \sim 29.58 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,分别比前段管网含量升高 $6.32\% \sim 26.60\%$ 和 $5.32\% \sim 42.71\%$,DBPs 变化如图 4 和图 5 所示.



二次加氯点:GW17
图 5 LS 二次加氯管网中 THMs 和 HAAs 含量变化

Fig. 5 Variation of THMs and HAAs in the distribution system after LS booster chlorination

由图4可见,LH二次加氯供水管网中检出THMs包括TCM、BDCM、DBCM和TBM等,2019年6~9月的浓度范围分别为23.62~42.13、22.68~42.44、24.08~38.58和20.42~45.54 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,THMs总量变化范围为20.42~45.54 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.THMs包括TCM、BDCM、DBCM和TBM随供水管线和供水时间延长大致呈逐渐升高趋势.而含量较低的DBPs受测定误差影响变化规律不明显.其中,8月各供水管网中检出的溴化THMs浓度明显高于其他月份,且溴化THMs浓度高于TCM.二次加氯后,随着管网中余氯浓度升高,THMs前体物在供水管网中与氯进一步反应,使得TCM、BDCM、DBCM和TBM等浓度进入二次升高阶段.TCM、BDCM、DBCM和TBM二次升高阶段较出厂水至二次加氯点均值升高28.85%.二次加氯后峰值较二次消毒最低含量升高分别为17.38、15.75、11.88和18.35 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

DCAA和TCAA是LH二次加氯供水管网中检出的主要HAAs,其中TCAA含量远高于DCAA,这可能是余氯浓度较高的情况下更有利于高氯代HAAs的生成.2019年6~9月HAAs的含量范围分别为2.06~7.38、10.78~29.58、4.45~26.74和6.67~26.44 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAAs总量变化范围为2.06~29.58 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.管网中TCAA与THMs的变化规律不同,二次加氯后TCAA迅速达到峰值,较加氯前采样点均值高46.84%,后随着供水管线和供水时间延长大致呈逐渐降低趋势.分析认为,由于HAAs易被生物降解,后续管网中余氯浓度不断降低,在供水管网中悬浮生长的微生物以及管壁生物膜的作用下TCAA存在降解现象^[42];此外,高氯代HAAs更容易发生氧化脱羧反应^[43],可能为TCAA在后续管网

中出现降低趋势原因.

LS采样点距离TH水厂较近,由其供水的可能性高,或者供水比例高.由图5可见,该供水线路上管网水中检出THMs包括TCM、BDCM、DBCM和TBM等,2019年6~9月的浓度范围分别为17.34~33.21、16.45~41.49、21.04~42.25和15.93~26.59 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,THMs总量变化范围为15.93~42.25 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.二次加氯后,TCM、BDCM、DBCM和TBM等浓度同样进入二次升高阶段,余氯浓度在二次加氯点处有明显升高趋势.TCM、BDCM、DBCM和TBM二次升高阶段较出厂水至二次加氯点均值升高23.11%,在后续管网中,THMs的总量趋于稳定,二次加氯后峰值较二次消毒最低含量升高分别为10.16、23.34、18.61和6.66 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

LS镇二次加氯供水管线上管网水检出HAAs主要为TCAA和DCAA,以TCAA为主,2019年6~9月的含量范围分别为1.41~6.53、6.53~28.41、2.15~12.30和3.35~17.85 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAAs总量变化范围为1.41~28.41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.二次加氯后,TCAA呈明显升高趋势,较加氯前采样点均值高19.66%.

二次加氯DBPs含量调查结果显示,二次加氯在维持管网水中余氯量以保证水质生物稳定性的同时,也会增加水中DBPs的含量,因此有必要合理地控制水厂中氯的总投加量,同时优化二次加氯点的选址及加氯运行方案,避免二次加氯点附近管网水中余氯浓度过高.

2.4 供水系统DBPs超标风险分析

对H市供水系统中DBPs分布水平调查表明,两水厂供水管网中各类DBPs含量均高于出厂水,且二次加氯后供水管网中DBPs含量也有不同程度

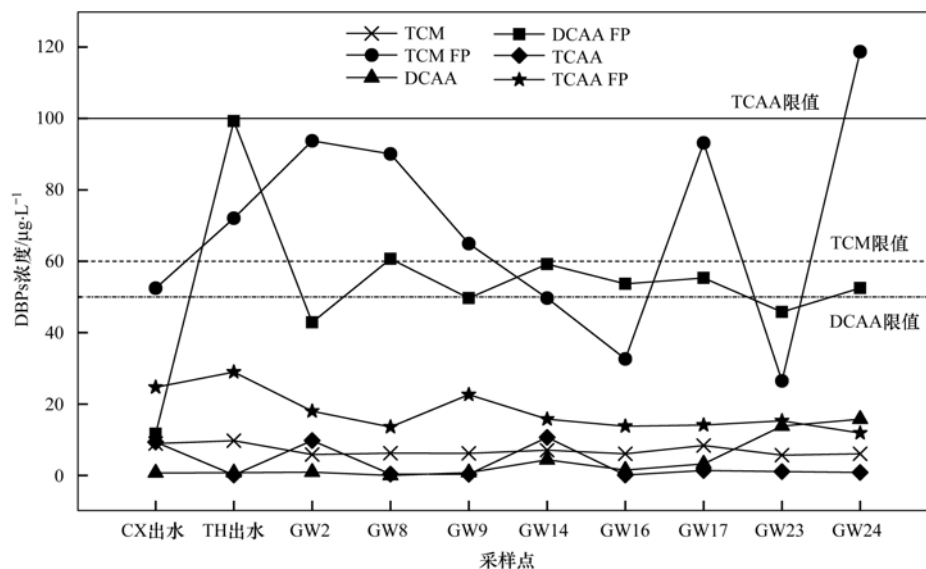


图6 H市供水管网水样DBPs生成势

Fig. 6 Formation potential of DBPs in the distribution system of H City

的升高,但均未超出《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定的限值。然而在余氯量足够高,供水时间足够长的情况下,可能存在 DBPs 安全风险。本文从 DBPs 生成势的角度考察管网水可能存在的超标风险,选取不同管网点采样后实测 DBPs 和 DBPs 生成势(DBPs FP),结果如图 6 所示。从中可见,两水厂出水及管网采样点 TCM 浓度均低于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而 TCM 生成势远高于出厂水及管网采样点实测值,为 $26.47 \sim 118.69 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其中,TH 水厂出水 TCM 生成势较高,为 $72.08 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,62.5%的管网采样点生成势超过了国标限值 $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。DCAA 和 TCAA 在采样中实测范围分别为 $0 \sim 15.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.13 \sim 10.68 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,生成势分别为 $11.69 \sim 99.26 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.88 \sim 28.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

生成势高于标准限值说明管网中 DBPs 存在超标风险,而对 DBPs 超标风险的控制则应从多角度、多途径考虑。DBPs 的形成与水源水质特征的变化有关,原水中的 NOM 和人为化学物质是 DBPs 的主要前体,应加强对原水水质的监测与保护,根据原水水质的不同来选择处理工艺可有效提高 DBPs 的去除效率,但由于水体成分非常复杂,因此通常很难用单一技术完全去除 DBPs 前体,通过多技术联用可发挥出更大的优势;此外,消毒条件对 DBPs 的形成有很大影响。可以通过优化消毒条件来减少 DBPs 的形成,例如接触时间,消毒剂及其用量等^[44,45]。

3 结论

(1) THMs 和 HAAs 是 H 市供水系统中检出的主要 DBPs 类型,具有季节性变化特征,夏季的浓度要高于春季和秋季。溴化 THMs 在 TH 水厂对应管网水中不同季节均有较高浓度检出,主要与原水溴化物存在水平和臭氧深度处理工艺有关。非受控 DBPs 检出的主要类型有 DCAN、BCAN 和 TCNM,其中 TCNM 在两水厂及对应管网中仅检出痕量。两水厂供水管网中 DBPs 含量均高于出厂水,DBPs 在管网中余氯存在的条件下继续生成。

(2) 二次加氯在保障管网末梢余氯量达标、供水水质生物稳定性的同时,也会导致管网中 DBPs 含量的二次升高。LH 和 LS 镇二次加氯后 THMs 分别较出厂水至二次加氯点均值升高了 28.85% 和 23.11%,而二次加氯后 TCAA 呈明显升高趋势,分别较加氯前均值升高了 46.84% 和 19.66%。

(3) 出厂水及管网采样点生成势测定中,各 DBPs 生成量较高,部分采样点生成势超过了标准限值,说明管网中 DBPs 可能存在超标风险,需加强对 H 市饮用水水质的常规监测,同时考虑进一步优化

水处理工艺流程,去除 DBPs 前体物。建议在满足水质要求的前提下,降低氯化投加量,合理布置二次加氯点,减少 DBPs 前体物与氯反应的时间。

参考文献:

- [1] Yu Y, Ma X, Chen R Y, *et al.* The occurrence and transformation behaviors of disinfection byproducts in drinking water distribution systems in rural areas of eastern China[J]. *Chemosphere*, 2019, **228**: 101-109.
- [2] Uyak V, Ozdemir K, Toroz I. Seasonal variations of disinfection by-product precursors profile and their removal through surface water treatment plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **390**(2-3): 417-424.
- [3] Richardson S D, Plewa M J, Wagner E D, *et al.* Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research [J]. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [4] Richardson S D. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2003, **22**(10): 666-684.
- [5] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [6] Bond T, Huang J, Graham N J D, *et al.* Examining the interrelationship between DOC, bromide and chlorine dose on DBP formation in drinking water—a case study[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 469-479.
- [7] Cedergren M I, Selbing A J, Löfman O, *et al.* Chlorination byproducts and nitrate in drinking water and risk for congenital cardiac defects[J]. *Environmental Research*, 2002, **89**(2): 124-130.
- [8] Costet N, Villanueva C M, Jaakkola J J K, *et al.* Water disinfection by-products and bladder cancer: is there a European specificity? A pooled and meta-analysis of European case-control studies[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2011, **68**(5): 379-385.
- [9] Tardiff R G, Carson M L, Ginevan M E. Updated weight of evidence for an association between adverse reproductive and developmental effects and exposure to disinfection by-products [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2006, **45**(2): 185-205.
- [10] 夏岩. 城乡统筹区域供水管网中消毒副产物生成规律及影响因素研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
Xia Y. Study on formative regulation and influencing factors of disinfection by-products in regional water distribution system of urban and rural areas[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [11] Guilherme S, Rodriguez M J. Occurrence of regulated and non-regulated disinfection by-products in small drinking water systems [J]. *Chemosphere*, 2014, **117**: 425-432.
- [12] Zhang X X, Chen Z L, Shen J M, *et al.* Formation and interdependence of disinfection byproducts during chlorination of natural organic matter in a conventional drinking water treatment plant[J]. *Chemosphere*, 2019, **242**: 125227.
- [13] Ding H H, Meng L P, Zhang H F, *et al.* Occurrence, profiling and prioritization of halogenated disinfection by-products in drinking water of China[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(7): 1424-1429.
- [14] Mouly D, Joulin E, Rosin C, *et al.* Variations in trihalomethane levels in three French water distribution systems and the development of a predictive model[J]. *Water Research*, 2010, **44**(18): 5168-5179.

- [15] Villanueva C M, Castaño-Vinyals G, Moreno V, *et al.* Concentrations and correlations of disinfection by-products in municipal drinking water from an exposure assessment perspective [J]. *Environmental Research*, 2012, **114**: 1-11.
- [16] Chen W J, Weisel C P. Halogenated DBP concentrations in a distribution system [J]. *Journal - American Water Works Association*, 1998, **90**(4): 151-163.
- [17] Gan W H, Guo W H, Mo J M, *et al.* The occurrence of disinfection by-products in municipal drinking water in China's Pearl River Delta and a multipathway cancer risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 108-115.
- [18] Wei J R, Ye B X, Wang W Y, *et al.* Spatial and temporal evaluations of disinfection by-products in drinking water distribution systems in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(20): 4600-4606.
- [19] Bond T, Templeton M R, Mokhtar Kamal N H, *et al.* Nitrogenous disinfection byproducts in English drinking water supply systems; Occurrence, bromine substitution and correlation analysis[J]. *Water Research*, 2015, **85**: 85-94.
- [20] Muellner M G, Wagner E D, McCalla K, *et al.* Haloacetonitriles vs. regulated haloacetic acids: are nitrogen-containing DBPs more toxic? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(2): 645-651.
- [21] Plewa M J, Wagner E D, Jazwierska P, *et al.* Halonitromethane drinking water disinfection byproducts: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(1): 62-68.
- [22] 董蕾, 王海燕, 蔡宏铨, 等. 我国六城市饮用水中含氮消毒副产物的现状调查[J]. *环境与健康杂志*, 2016, **33**(3): 232-235.
Dong L, Wang H Y, Cai H Q, *et al.* Investigation on nitrogenous disinfection by-products in drinking water in six cities, China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, **33**(3): 232-235.
- [23] Krasner S W. The formation and control of emerging disinfection by-products of health concern[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2009, **367**(1904): 4077-4095.
- [24] Sillanpää M, Neibi M C, Matilainen A, *et al.* Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: a comprehensive review[J]. *Chemosphere*, 2018, **190**: 54-71.
- [25] Wang F, Gao B Y, Yue Q Y, *et al.* Effects of ozonation, powdered activated carbon adsorption, and coagulation on the removal of disinfection by-product precursors in reservoir water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(21): 17945-17954.
- [26] Hong H C, Huang F Q, Lin H J, *et al.* Factors affecting formation of haloacetonitriles and halo ketones during chlorination/monochloramination of Jinlan Reservoir water[J]. *Water Supply*, 2013, **13**(4): 1123-1129.
- [27] Golfinopoulos S K, Nikolau A D. Survey of disinfection by-products in drinking water in Athens, Greece[J]. *Desalination*, 2005, **176**(1-3): 13-24.
- [28] Hong H C, Qian L Y, Xiong Y J, *et al.* Use of multiple regression models to evaluate the formation of halonitromethane via chlorination/chloramination of water from Tai Lake and the Qiantang River, China [J]. *Chemosphere*, 2015, **119**: 540-546.
- [29] Chen H, Lin T, Chen W, *et al.* Removal of disinfection byproduct precursors and reduction in additive toxicity of chlorinated and chloraminated waters by ozonation and up-flow biological activated carbon process [J]. *Chemosphere*, 2019, **216**: 624-632.
- [30] Hua G H, Reckhow D A. Effect of pre-ozonation on the formation and speciation of DBPs[J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4322-4330.
- [31] Li W G, Qin W, Song Y, *et al.* Impact of ozonation and biologically enhanced activated carbon filtration on the composition of micropollutants in drinking water [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **26**(33): 1-9.
- [32] Sun Y W, Angelotti B, Brooks M, *et al.* A pilot-scale investigation of disinfection by-product precursors and trace organic removal mechanisms in ozone-biologically activated carbon treatment for potable reuse [J]. *Chemosphere*, 2018, **210**: 539-549.
- [33] Karnik B S, Davies S H, Baumann M J, *et al.* The effects of combined ozonation and filtration on disinfection by-product formation[J]. *Water Research*, 2005, **39**(13): 2839-2850.
- [34] Yan M Q, Wang D S, Ma X N, *et al.* THMs precursor removal by an integrated process of ozonation and biological granular activated carbon for typical Northern China water[J]. *Separation and Purification Technology*, 2010, **72**(3): 263-268.
- [35] Zhou X L, Zheng L L, Chen S Y, *et al.* Factors influencing DBPs occurrence in tap water of Jinhua Region in Zhejiang Province, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 813-822.
- [36] Stéfán D, Erdélyi N, Izsák B, *et al.* Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination[J]. *Microchemical Journal*, 2019, **149**: 104008.
- [37] Keegan T, Whitaker H, Nieuwenhuijsen M J, *et al.* Use of routinely collected data on trihalomethane in drinking water for epidemiological purposes[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2001, **58**(7): 447-452.
- [38] Stevens A A, Moore L A, Miltner R J. Formation and control of non-trihalomethane disinfection by-products [J]. *Journal - American Water Works Association*, 1989, **81**(8): 54-60.
- [39] Serrano M, Montesinos I, Cardador M J, *et al.* Seasonal evaluation of the presence of 46 disinfection by-products throughout a drinking water treatment plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **517**: 246-258.
- [40] Rodriguez M J, Sérodes J B, Levallois P. Behavior of trihalomethanes and haloacetic acids in a drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2004, **38**(20): 4367-4382.
- [41] 李莉. 基于水质安全的城市输配水系统二次加氯优化与分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Li L. Optimal scheduling and analysis of booster chlorination in urban water distribution network based on water quality safety [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [42] Zhang P, LaPara T M, Goslan E H, *et al.* Biodegradation of haloacetic acids by bacterial isolates and enrichment cultures from drinking water systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(9): 3169-3175.
- [43] Zhang X R, Minear R A. Decomposition of trihaloacetic acids and formation of the corresponding trihalomethanes in drinking water[J]. *Water Research*, 2002, **36**(14): 3665-3673.
- [44] Sun X F, Chen M, Wei D B, *et al.* Research progress of disinfection and disinfection by-products in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, **81**: 52-67.
- [45] Li Y, Zhang X R, Yang M T, *et al.* Three-step effluent chlorination increases disinfection efficiency and reduces DBP formation and toxicity [J]. *Chemosphere*, 2017, **168**: 1302-1308.

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)