

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<sub>2.5</sub>)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<sub>2.5</sub>改善效果评估 ..... 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM<sub>2.5</sub>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<sub>3</sub>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, 方运震 (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, 王日起, 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<sub>x</sub>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, 贾璐杰, 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)

海水中的红霉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, 贾竞宇, 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, 于健全, 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<sup>0</sup>/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)

一硫代砷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, 韩徽, 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<sub>2</sub>及CH<sub>4</sub>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<sub>2</sub>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)

## 供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型

刘俊萍<sup>1</sup>, 陈镜吉<sup>1</sup>, 宋亚丽<sup>2</sup>, 杨玉龙<sup>3</sup>, 李青松<sup>4</sup>, 马晓雁<sup>1\*</sup>

(1. 浙江工业大学土木工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江科技学院建筑工程学院, 杭州 310023; 3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 厦门理工学院水资源环境研究所, 厦门 361005)

**摘要:** 消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)是影响饮用水水质的重要指标. 以浙江省H市某区域供水点为调查目标, 考察终端龙头水及加热器处理后饮用水中DBPs的含量特征, 结合水质理化指标, 初步确定管网终端DBPs预测模型, 评估经口摄入的健康风险. 结果表明, H市某供水点龙头水中共检出THMs、HANs和HAAs这3类共计10种DBPs. 龙头水中目标DBPs检出率均为100%, THMs、HANs和HAAs质量浓度分别为10.12~28.39、0.98~5.19和2.65~7.83  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 热水中TBM、TCAN和DBAN的检出率分别为46.43%、82.14%和92.86%, BCAN未检出, 其它DBPs检出率为100%, THMs、HANs和HAAs质量浓度分别为0.60~12.58、0.02~0.52和2.42~5.86  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 加热处理后THMs和HANs的含量有所降低, 总量分别降低84.22%和91.45%, HAAs变化不明显. 水质理化指标pH值和SUVA与DBPs呈正相关关系, 余氯和氨氮与DBPs呈负相关关系. 根据常规指标与DBPs相关性建立THMs多元线性预测模型, 相对误差小于10.00%, 准确度较高, 可用于管网供水终端THMs的预测. 基于美国环保署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H市龙头水和热水中DBPs通过饮水途径的致癌风险分别为 $(17.24\sim84.63)\times 10^{-6}$ 和 $(25.49\sim258.82)\times 10^{-7}$ ; 非致癌风险分别为 $(4.17\sim50.32)\times 10^{-2}$ 和 $(6.52\sim107.74)\times 10^{-3}$ . 龙头水中BDCM对致癌风险的贡献率最大, 而热水系统中TCM贡献率最大; 龙头水及热水中非致癌风险主要来自于TCM. 热水中THMs的削减量最高达到94.38%, 致癌风险降低79.00%.

**关键词:** 消毒副产物(DBPs); 供水管网终端; 热水; 预测模型; 健康风险

中图分类号: X131.2; TU991.25; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3307-08 DOI: 10.13227/j.hjck.202001045

## Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water

LIU Jun-ping<sup>1</sup>, CHEN Jing-ji<sup>1</sup>, SONG Ya-li<sup>2</sup>, YANG Yu-long<sup>3</sup>, LI Qing-song<sup>4</sup>, MA Xiao-yan<sup>1\*</sup>

(1. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Disinfection by-products (DBPs) are defined as important parameters that can deteriorate drinking water quality. The investigation was performed at a laboratory located on a campus in H City of the Zhejiang province. The purpose of the work was to obtain knowledge on the occurrence of DBPs in tap water and boiled water taken from the same pipe, to establish a statistical model to predict DBPs information in tap water based on physicochemical parameters, and to evaluate carcinogenic and non-carcinogenic risks caused by DBPs on a prediction level. The results showed three categories of trihalomethanes (THMs), haloacetonitrile (HANs), and haloacetic acids (HAAs), including 10 species of disinfection by-products detected in drinking water. The detection rate of target DBPs in tap water was 100% and the concentrations varied in the ranges of 10.12-28.39, 0.98-5.19, and 2.65-7.83  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. In boiled water, bromochloroacetonitrile (BCAN) was not detected; the detection rates of tribromomethane (TBM), trichloroacetonitrile (TCAN), and dibromoacetonitrile (DBAN) were 46.43%, 82.14%, and 92.86%, respectively, while the detection rate for other DBPs was 100%. The concentrations of THMs, HANs, and HAAs were in the ranges of 0.60-12.58, 0.02-0.52, and 2.42-5.86  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectively. After heating, the concentrations of THMs and HANs decreased by 84.22% and 91.45%, respectively. No obvious decrease was found for HAAs. The pH value and specific ultraviolet absorbance (SUVA) had positive correlation with DBPs, whereas residual chlorine and ammonia nitrogen had negative correlation with DBPs. Based on the correlation between the physicochemical parameters and DBPs, a multiple linear regression prediction model of THMs was established, with deviation less than 10.00%, which can be used for the prediction of THMs in tap water. Based on the EPA recommended health risk assessment model, the carcinogenic and non-carcinogenic risks of chlorine disinfection by-products through oral intake were calculated. It was found that the carcinogenic risks caused by the disinfection by-products in the tap and boiled water were  $(17.24\sim84.63)\times 10^{-6}$  and  $(25.49\sim258.82)\times 10^{-7}$ , respectively, and the non-carcinogenic risks were  $(4.17\sim50.32)\times 10^{-2}$  and  $(6.52\sim107.74)\times 10^{-3}$ , respectively. The carcinogenic risk caused mainly by THMs and bromodichloromethane (BDCM) contributed the highest cancer risk in tap water, while for boiled water, trichloromethane (TCM) was found to contribute the highest cancer and non-carcinogenic risk. In boiled water, the reduction of THMs was up to 94.38%, and the cancer risk was reduced by 79.00%.

收稿日期: 2020-01-06; 修订日期: 2020-02-13

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

作者简介: 刘俊萍(1969~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水资源系统工程, E-mail: lj23@zjut.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: mayaner620@163.com

**Key words:** disinfection by-products (DBPs); water supply terminal; boiled water; prediction model; health risks

消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)是由消毒剂与天然有机物(natural organicmatter, NOM)的反应产物<sup>[1]</sup>,包括三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)、卤代乙酸(haloacetic, HAAs)、卤代乙腈(haloacetonitrile, HANs)、卤代酮(halogenated, HKs)、亚硝胺(nitrosamine)和其它新型消毒副产物<sup>[2, 3]</sup>。目前,饮用水中检出DBPs的种类高达数百种<sup>[4, 5]</sup>,其中THMs和HAAs被许多国家和组织列入水质标准。

THMs和HAAs等常规受控DBPs在各国饮用水系统中均有检出,含量地区差异较大。孟加拉国Kallyanpur和Panthapath地区供水管网中THMs浓度分别为 $(139.20 \pm 5.37) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(20.20 \pm 8.40) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[6]</sup>;在中国深圳饮用水系统中THMs浓度低于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,远高于中国台湾地区报道的浓度范围( $10.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其中位浓度为 $19.90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,略高于广州( $17.70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )和北京( $14.12 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[7-10]</sup>。近年来调查发现北京市自来水厂中HAAs浓度范围为 $\text{ND} \sim 30.36 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,非受控HANs浓度范围为 $\text{ND} \sim 4.70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,与美国、英国和加拿大浓度水平相似<sup>[10-13]</sup>。

中国大部分家庭习惯将自来水煮沸饮用,加热过程对龙头水DBPs含量有较大影响。Wang等<sup>[14]</sup>对深圳某区的龙头水进行监测,发现THMs浓度范围为 $8.60 \sim 111.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,5种HAAs的浓度范围为 $5.90 \sim 55.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而龙头水经过配备活性炭滤芯的锅炉装置处理后THMs可去除40.00%~60.00%,HAAs几乎无去除。Pan等<sup>[15]</sup>的研究发现,龙头水煮沸后不仅氯化DBPs可减少61.10%,溴化DBPs也可降低62.80%,认为加热处理减少了人类接触DBPs的风险。Chowdhury等<sup>[16]</sup>对加拿大某住宅饮用水DBPs的研究发现,水龙头和热水箱中的THMs分别是住宅进水口的1.40~1.80和1.90~2.70倍,HAAs为0.23~2.24倍和0.53~2.61倍,认为在封闭管道中挥发性DBPs无法逸出,此外水力停滞和水温升高的过程中可能使游离氯残留物和残留有机物之间的反应速率增加,从而形成额外的DBPs;加热还可能通过NOM与游离氯反应或通过预先形成的卤代前体物分解从而促进HAAs的形成<sup>[17]</sup>。

由于余氯及管网中微生物的存在,管网中DBPs会随着供水时间发生变化,部分DBPs会出现逐渐升高的现象,为避免供水风险,及时掌握饮用水中的DBPs含量十分重要。通过DBPs与常规指标之间的相关性,建立统计型预测模型可实现终端龙头水

DBPs的粗略估算。据报道,Lin等<sup>[18]</sup>对长江三角洲地区原水建立DBPs预测模型,THMs、HANs和HAA<sub>5</sub>预测模型的相关系数 $R^2$ 分别为0.92、0.92和0.84,为水厂优化水处理工艺控制DBPs提供了重要信息;Golfiopoulou等<sup>[19]</sup>建立多元线性回归模型对雅典饮用水处理厂中的THMs、三氯甲烷(TCM)和一溴二氯甲烷(BDCM)进行预测,相关系数 $R^2$ 分别为0.89、0.89和0.87,精度较高,可用于类似希腊地区气候特征的饮用水处理厂中THMs浓度的预测。然而目前针对供水管网中DBPs的模型预测研究较少,本文以浙江省H市大学校园内某建筑物供水龙头水为目标,通过定期监测获取数据,在分析DBPs的分布及其与理化指标相关性的基础上,建立多元线性回归模型对供水终端DBPs含量进行预测。基于美国环保署推荐的风险评估模型,分析该地区龙头水和热水经口摄入后对人类造成的风险。DBPs的预测模型和健康风险评估模型可实现管网终端龙头水中DBPs的预测,以期为水厂的供水安全预警及工艺优化提供信息。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂与仪器

本实验中所用到的药品和试剂均为色谱纯,包括甲醇(HPLC级)、叔丁基甲醚(GC级)、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。二氯乙酸(DCAA)、三氯乙酸(TCAA)、二氯乙腈(DCAN)、三氯乙腈(TCAN)、二溴乙腈(DCBN)和溴氯乙腈(BCAN)等标准品购自上海阿拉丁试剂有限公司。

仪器设备包括GC-2014型气相色谱配ECD检测器(日本岛津)、multi N/C2100型TOC仪(德国耶拿)、UPHW1-90T型纯水机(北京优普时代)、TU-1901紫外分光光度计(北京普析)和SX751 pH计(上海雷磁)。

### 1.2 样品的采集与保存

2019年4~9月期间对浙江省杭州市西湖区浙江工业大学建工学院教学大楼内自来水龙头进行样品的采集和检测。为获得准确且具有可比性的数据,每次选择相同的采样时间。所有自来水龙头均未配备过滤器或其它净水装置。在采取水样前,打开水龙头放水5 min,水样采集后立刻检测。

同期采集同管网热水器出水,热水器为碧丽牌JO-K90商用热水器配备JC60(K-03-J)底座。热水器

供水量为  $130 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ , 底座装有管道式净水器, 采用多级过滤模式, 分别为微米优质 PP 棉、双高效活性炭和高纯度铜锌合金 (KDF) 净水材料, 热水采集后立刻检测。

### 1.3 样品分析方法

理化指标 pH 值用 pH 计测定, 氨氮采用紫外分光光度法测定, TOC 采用有机碳分析仪测定, 余氯采用 *N,N*-二乙基-1,4-苯二胺 (*N,N*-Diethyl-1,4-phenylenediamine, DPD) 比色滴定法测定。

有机物指标 THMs 和 HANs 采用叔丁基甲醚 (MTBE) 为萃取剂进行液液萃取, 取水样 25 mL 于 40 mL 样品瓶中, 加入 4 g 无水硫酸钠, 溶解后加入 2 mL  $150 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  MTBE 萃取液, 振荡 2 min 后静置分层, 取上部有机相进样 GC-ECD 检测。GC 采用不分流进样, ECD 温度设置为  $250^\circ\text{C}$ , 进样口温度设置为  $210^\circ\text{C}$ , 色谱柱初始温度为  $35^\circ\text{C}$  维持 5 min, 以  $8^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $100^\circ\text{C}$  维持 2 min, 再以  $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升至  $200^\circ\text{C}$  维持 1 min。HAAs 采用液液萃取联合酸性甲醇酯化法, 取水样 30 mL 于 40 mL 样品瓶中, 加入 4 g 无水硫酸钠, 溶解后加入 2 mL 浓硫酸, 再加入 3 mL  $300 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  MTBE 萃取液, 振荡 2 min 后静置分层, 取上部有机相于 20 mL 样品瓶中, 立即加入 2.5 mL 新配制的 10% 的酸化甲醇溶液, 将样品瓶置于水温为  $50^\circ\text{C}$  水浴锅中水浴加热 2 h, 后放入  $4^\circ\text{C}$  的冰箱中冷却 5 min, 取出后立即加入 7 mL  $150 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  的硫酸钠溶液, 再取上层有机相于 2 mL 样品瓶中, 立即加入 1 mL 饱和碳酸氢钠溶液, 振荡、放气并静置 3 min, 最后取上部有机相进样 GC-ECD 检测。GC 采用不分流进样, 进样口温度设置为  $210^\circ\text{C}$ , 色谱柱初始温度  $35^\circ\text{C}$  保持 8 min, 以  $8^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升到  $200^\circ\text{C}$ , 保留 15 min。载气均为高纯氮气, 总流量为  $50 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。吹扫流量为  $3 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

为保证实验的准确性, 每次测样均设平行样及空白对照, 并对检测结果异常的样品进行复查。

### 1.4 管网终端 DBPs 预测模型

多元线性回归方程:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_j x_j + \dots + \beta_p x_p + \mu$$

式中,  $y$  表示因变量;  $x$  表示自变量;  $\beta_j$  表示回归系数 ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ );  $p$  表示自变量个数;  $\mu$  表示去除  $p$  个量对  $y$  影响后的随机误差。

多元线性回归方程可用下式表示:

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_p x_{1p} + \mu_1, \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \beta_p x_{2p} + \mu_2, \\ \dots \dots \dots \\ y_n = \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \beta_p x_{np} + \mu_n. \end{cases}$$

其矩阵形式为:

$$y = x\beta + \mu$$

其中:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix}; \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix}$$

则多元线性回归模型的矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_n \end{bmatrix}$$

## 1.5 健康风险模型

### 1.5.1 致癌风险

健康风险评价是描述人类暴露于环境危害因素之后, 出现不良健康效应的特征<sup>[20]</sup>。基于浙江省 H 市龙头水检测的 DBPs, 以美国环保署推荐的致癌和非致癌健康风险评估模型对 DBPs 进行风险评价。癌症风险评估公式如下<sup>[21]</sup>:

$$R = \text{CDI} \times \text{SF} \quad (R < 0.01) \quad (1)$$

$$R = 1 - \exp(-\text{CDI} \times \text{SF}) \quad (R \geq 0.01) \quad (2)$$

式中,  $R$  为致癌风险, 表示人体终生超额患癌的概率; CDI 为饮水途径的日摄入量 [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]; SF 表示化学致癌物的致癌斜率因子 [ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ ]

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

式中, CW 表示饮用水中 DBPs 浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); IR 表示成人每日饮水量 ( $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 中国人群暴露参考手册 (成人卷) 推荐值为  $1.85 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$ ; EF 为暴露频率, 推荐值为  $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ ; ED 为持续暴露时间, 推荐值为 70 a; BW 为成人体重, 中国人群暴露参考手册 (成人卷) 推荐值为 60.6 kg; AT 为平均暴露时间 (致癌风险的 AT 值为  $70 \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ , 非致癌风险的 AT 值为  $30 \times 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$ )。当存在多种致癌物时, 通常将各种致癌物质的健康风险计算后求和:  $R_T = \sum R_i$ 。

### 1.5.2 非致癌风险

DBPs 对人体的非致癌风险一般用危害指数 HI 表示:

$$\text{HI} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}}$$

式中, RfD 为化学物质非致癌参考量

[ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ].

### 1.5.3 参考剂量

龙头水中检出的各 DBPs 致癌分级、致癌斜率因子及非致癌参考剂量见表 1.

表 1 DBPs 致癌分级、致癌斜率因子及非致癌参考剂量<sup>1)</sup>

Table 1 DBPs carcinogenic classification, slopefactor, and reference dose for non-cancer risk

DBPs	致癌性分级 <sup>2)</sup>	致癌斜率因子	非致癌参考剂量
TCM	B <sub>2</sub>	0.031	0.010
BDCM	B <sub>2</sub>	0.062	0.020
DBCM	C	0.084	0.020
TBM	B <sub>2</sub>	0.079	0.020
DCAA	B <sub>2</sub>	0.050	0.040
TCAA	B <sub>2</sub>	0.070	0.020

1) 美国环保署综合风险信息系统 (IRIS) 公布数据; 2) B<sub>2</sub> 为根据充分的动物实验资料, 极有可能为人类致癌物质, C 为可能为人类致癌物质

## 2 结果与讨论

### 2.1 龙头水 DBPs 的含量特征

供水管网终端龙头水中共检测了 4 类消毒副产物 THMs、HANs、HAAs 和三氯硝基甲烷 (TCNM), 其中 TCNM 未检出. THMs 包括 TCM、BDCM、DBCM 和 TBM; HANs 包括 DCAN、TCAN、BCAN 和 DBAN; HAAs 包括 DCAA 和 TCAA. 热水中未检出 BCAN. 所有 DBPs 均未超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 限值. 供水点龙头水和热水 DBPs 分布见图 1~3.

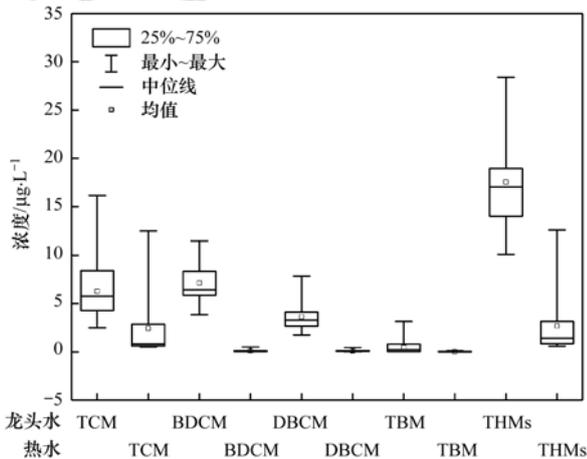


图 1 供水点龙头水和热水中三卤甲烷分布

Fig. 1 Distribution of THMs in tap water and boiledwater at the sample site

由图 1~3 可见, 龙头水共检出 3 类 10 种 DBPs, THMs、HANs 和 HAAs 的存在水平分别为 10.12 ~ 28.39、0.98 ~ 5.19 和 2.65 ~ 7.83  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其中位浓度分别为 16.95、2.41 和 4.50  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 热水 THMs、HANs 和 HAAs 的存在水平分别为 0.60 ~ 12.58、0.02 ~ 0.52 和 2.42 ~ 5.86

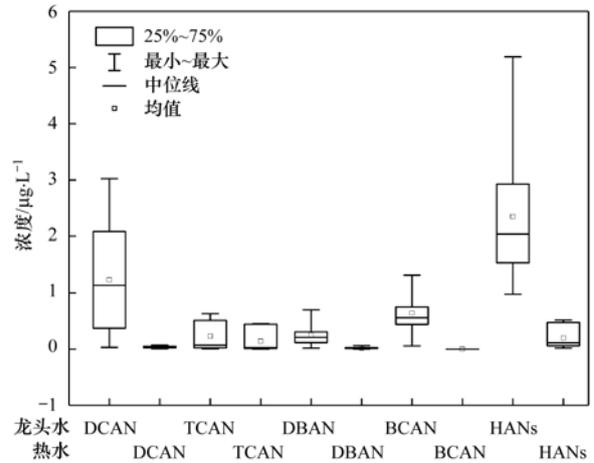


图 2 供水点龙头水和热水中卤乙腈分布

Fig. 2 Distribution of HANs in tap water and boiledwater at the sample site

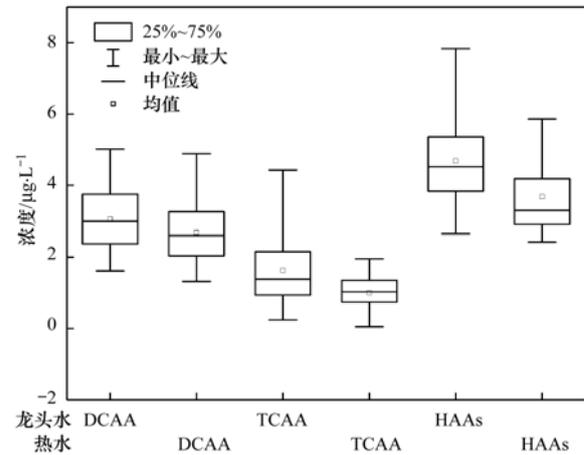


图 3 供水点龙头水和热水中卤乙酸分布

Fig. 3 Distribution of HAAs in tap water and boiledwater at the sample site

$\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其中位浓度分别为 1.43、0.11 和 3.40  $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ . 龙头水煮沸后 THMs 和 HANs 的浓度大大降低, THMs 的去除率最高可达 94.38%, HANs 的去除率最高为 98.33%. 设置为采样点的热水处理装置不断对饮用水进行加热, 可能是本研究中 DBPs 的去除率较高的主要原因. HAAs 是非挥发性物质, 它浓度的降低主要是因为热脱羧反应分解生成挥发性 THMs<sup>[15]</sup>. 造成其他非挥发性 DBPs (HANs) 浓度的降低可能因为一些其他的反应机制, 如水解等<sup>[22]</sup>. HANs 发生水解反应时首先断开碳氮三键, 随后与水中  $\text{OH}^-$  和  $\text{H}^+$  反应生成卤代乙酰胺, 而卤代乙酰胺是一种亚稳定中间产物, 可能继续发生水解反应而生成 HAAs<sup>[23]</sup>. 因此, 在龙头水煮沸后, HAAs 的浓度变化不明显, 有时会出现浓度增加等情况.

供水点龙头水和热水 DBPs 构成比例如图 4 所示.

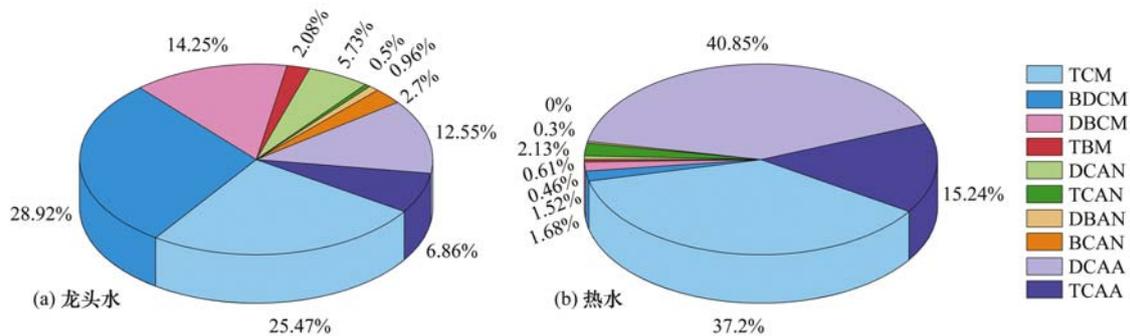


图4 供水点龙头水和热水 DBPs 构成

Fig. 4 Concentrations of DBPs in tap water and boiled water at the sample site

供水点龙头水中 10 种 DBPs 均 100% 检出。由图 4 可知, DBPs 以 THMs 中的 TCM 和 BDCM 为主, 分别占总 DBPs 的 25.47% 和 28.92%, 其中 TCM 浓度最高达  $16.14 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; HAAs 以 DCAA 为主, 占总 DBPs 的 12.55%; 非受控类 HANs 含量较低, 占总 DBPs 的 9.89%。龙头水加热至沸腾后, TBM、TCAN 和 DBAN 的检出率分别为 46.43%、82.14% 和 92.86%, BCAN 未检出, 其余 DBPs 检出率均为 100%。加热后水中 DBPs 总量减小, 各类 DBPs 占比发生较大变化, HAAs 为 DBPs 主要组分, DCAA 占比最高 (40.85%), TCAA 次之。热水中的 THMs 大

大降低, 但 TCM 仍为最主要的成分之一, 占比为 37.20%。热水中 TCM、BDCM、DBCM 和 TBM 相比龙头水分别降低了 60.20%、98.42%、97.08% 和 94.00%, 减量顺序与 THMs 水解速率 (BDCM > DBCM > TBM > TCM) 相符<sup>[24]</sup>。由于 HANs 的不稳定性, 易挥发或水解等特性<sup>[17,22,25,26]</sup>, 加热后 HANs 也有所降低, 总占比降低为 3.05%。

## 2.2 供水管网终端龙头水 DBPs 预测模型

供水点龙头水理化指标余氯、pH 值、TOC、 $\text{UV}_{254}$  和氨氮见表 2。供水管网理化指标与 DBPs 的 Spearman 相关性分析见表 3。

表 2 供水点龙头水理化指标

Table 2 Physicochemical parameters of tap water at the sample site

项目	余氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	TOC/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{UV}_{254}/\text{cm}^{-1}$	$\text{SUVA}/\text{L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$	氨氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
参数值	0.04 ~ 0.49	6.50 ~ 7.21	0.79 ~ 6.21	0.008 ~ 0.061	0.50 ~ 1.29	0.01 ~ 0.07

表 3 供水点龙头水 DBPs 与水体理化指标之间 SPSS 相关性分析

Table 3 Relationship between DBPs and physicochemical parameters of tap water at the sample site

DBPs	pH	余氯	氨氮	SUVA
TCM	0.721 **	0.290	-0.570 **	0.464 **
BDCM	0.103	-0.409 *	0.196	0.640 **
DBCM	-0.127	-0.217	0.270	0.241
TBM	-0.809	-0.019	0.344 *	0.182
THMs	0.627 *	-0.641 **	-0.255 **	0.940 **
DCAN	0.571 **	-0.254	-0.573 **	0.520 **
TCAN	-0.161	-0.021	0.227	0.080
DBAN	-0.202	0.208	0.407 *	-0.203
BCAN	0.331	0.294	0.096	0.336
HANs	0.637 **	-0.355 *	-0.561 **	0.663 **
DCAA	-0.175	0.206	-0.514 **	-0.085
TCAA	0.272	-0.007	-0.396 *	0.213
HAAs	0.125	0.093	-0.660 **	0.086

1) \* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

由表 3 可以看出, THMs 和 HANs 与 pH 具有显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 有研究证实碱性条件下许多中间 DBPs (如三卤丙烷、三卤乙腈和三卤乙醛) 易水解, 从而促进 THMs 的形成<sup>[27]</sup>。有研究表明 HAAs 的生成量随着 pH 值升高而降低<sup>[28]</sup>, 本次研

究中 HAAs 与 pH 之间无显著的相关关系, 可能是由于水样 pH 值变化范围不大。THMs 和 HANs 与余氯具有显著的负相关关系 ( $P < 0.05$ )。为保证管网水质的稳定性, 水厂出水具有较高浓度的余氯, 因此水在管网运输过程中 DBPs 前体物与游离氯持续反

应生成 DBPs<sup>[29]</sup>,导致 DBPs 含量增加,而游离氯浓度降低. THMs、HANs 和 HAAs 与氨氮浓度均具有显著的负相关关系( $P < 0.05$ ),在氯化过程中,氨可以与氯快速反应,生成氯胺,氨氮浓度的增加会抑制氯胺水解生成自由氯,从而导致 DBPs 的产率降低<sup>[30,31]</sup>. THMs 和 HANs 均与 SUVA 呈显著的正相关关系,这表明 THMs 和 HANs 的前体物可能是具有苯环、酚羟基、共轭双键和疏水基团的有机物<sup>[32]</sup>. 有研究阐述当  $SUVA > 3.00 \text{ L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$  时, SUVA 与 DBPs 之间有较高的相关性,而在低 SUVA 的水中相关性可能较弱<sup>[33]</sup>.

根据上述相关性分析,选择余氯、pH 值、氨氮和 SUVA 为自变量,THMs 和 HANs 为因变量,建立 H 市某供水点龙头水 THMs 和 HANs 的多元线性回归预测模型. 在模型建立过程中选择 34 组监测数据作为样本数据,10 组数据作为检验数据. 利用 MATLAB 建立多元线性回归模型,预测模型分析如下.

THMs 的线性回归模型:

$$y = -9.6340 + 2.6347x_1 - 1.6587x_2 - 29.9424x_3 + 13.1706x_4$$

HANs 的线性回归模型:

$$y = -10.8741 + 1.7594x_1 + 2.0579x_2 - 19.7272x_3 + 1.7352x_4$$

式中, $x_1$  为 pH 值, $x_2$  表示余氯浓度, $x_3$  表示氨氮浓度, $x_4$  表示 SUVA

通过 MATLAB 建模分析,选取相关系数  $R^2$ 、统计量  $F$ 、概率  $P$  和误差方差作为多元线性回归模型的统计量,当  $R^2$  的值越接近 1,统计量  $F$  的值越大回归方程越显著,概率  $P < 0.05$  或  $P < 0.001$  时预测模型有效,具体结果见表 4.

表 4 龙头水 THMs 和 HANs 多元线性回归模型统计量汇总表

Table 4 Summary of THMs and HANs multiple linear regression model statistics				
DBPs	相关系数( $R^2$ )	统计量 $F$	概率 $P$	误差方差
THMs	0.8713	49.0950	0.0000	1.0190
HANs	0.5812	10.0630	0.0000	0.2020

由表 4 可知,THMs 的线性模型相关系数较高( $R^2 = 0.8713$ ),而 HANs 的相关系数相对较低( $R^2 = 0.5812$ ). 因此,在预测过程中 THMs 线性模型可以提供较为准确的预测结果.

由图 5 可知,在 MATLAB 多元线性回归分析的 34 组样本数据中,仅有 2~3 组数据出现异常,对模型的可靠性干扰不大. 将 10 组 DBPs 数据代入预测模型计算可知,THMs 预测模型的相关系数较高( $R^2 = 0.8713$ ),相对误差在 10.00% 以内,模拟效果较好;而 HANs 预测模型的相关系数较低,10 组预测数的相对误差范围在 1.73%~26.99%.

### 2.3 龙头水 DBPs 健康风险评估

本次检测的龙头水及热水 DBPs 浓度较低,故选择公式(1)计算致癌风险值,见表 5.

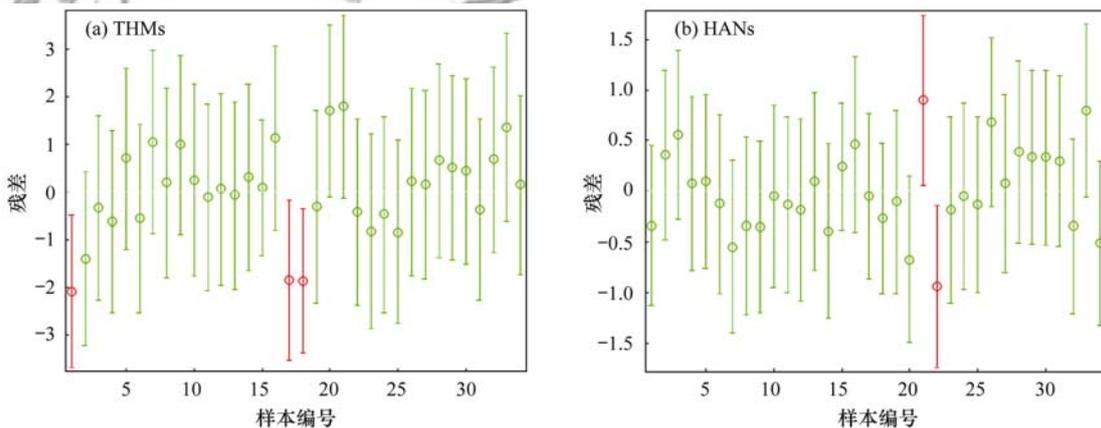


图 5 龙头水 THMs 和 HANs 的预测模型残差

Fig. 5 Residual map of THMs and HANs prediction model for tap water

由表 5 可见,根据健康风险评估模型及参数计算供水点龙头水及热水中 DBPs 通过饮用途径的致癌风险分别为  $(17.24 \sim 84.63) \times 10^{-6}$  和  $(25.49 \sim 258.82) \times 10^{-7}$ . 龙头水的致癌风险主要来自于 THMs,TCM、BDCM 和 DBCM 的致癌风险均高于  $10^{-6}$ ,这与 Lee 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致. 除 HAAs 外,加热后 DBPs 的致癌风险均有所降低,其致癌风险主要来自于 TCM 和 HAAs. 龙头水及热水中 DBPs

通过饮水途径的非致癌风险分别为  $(4.17 \sim 50.32) \times 10^{-2}$  和  $(6.52 \sim 107.74) \times 10^{-3}$ . 龙头水非致癌风险主要来自于 TCM 和 BDCM,热水非致癌风险主要来自于 TCM 和 DCAA. 可见,加热煮沸可大大降低饮用水的致癌和非致癌风险. 据报道,含氮消毒副产物(nitrogenous-disinfection by-products, N-DBPs)比含碳消毒副产物(carbonaceous-disinfection by-products, C-DBPs)具有更高的细胞毒性和基因毒

表5 供水点龙头水和热水的致癌及非致癌风险

Table 5 Cancer risk and non-carcinogenic risk in tap water and boiledwater at the sample site

DBPS	致癌风险		非致癌风险	
	龙头水	热水	龙头水	热水
TCM	$(2.37 \sim 15.27) \times 10^{-6}$	$(4.84 \sim 118.02) \times 10^{-7}$	$(1.78 \sim 11.50) \times 10^{-2}$	$(3.92 \sim 88.33) \times 10^{-3}$
BDCM	$(7.30 \sim 21.71) \times 10^{-6}$	$(0.17 \sim 9.60) \times 10^{-7}$	$(1.37 \sim 4.08) \times 10^{-2}$	$(0.03 \sim 1.81) \times 10^{-3}$
DBCM	$(4.51 \sim 20.18) \times 10^{-6}$	$(0.18 \sim 11.26) \times 10^{-7}$	$(0.63 \sim 2.80) \times 10^{-2}$	$(0.03 \sim 1.56) \times 10^{-3}$
TBM	$(0.07 \sim 10.35) \times 10^{-6}$	$(ND \sim 2.65) \times 10^{-7}$	$(0.01 \sim 15.28) \times 10^{-2}$	$(ND \sim 0.39) \times 10^{-3}$
DCAA	$(2.47 \sim 7.65) \times 10^{-6}$	$(20.19 \sim 75.60) \times 10^{-7}$	$(0.29 \sim 0.89) \times 10^{-2}$	$(2.36 \sim 8.70) \times 10^{-3}$
TCAA	$(0.52 \sim 9.47) \times 10^{-6}$	$(0.11 \sim 41.69) \times 10^{-7}$	$(0.09 \sim 15.77) \times 10^{-2}$	$(0.18 \sim 6.95) \times 10^{-3}$
总计	$(17.24 \sim 84.63) \times 10^{-6}$	$(25.49 \sim 258.82) \times 10^{-7}$	$(4.17 \sim 50.32) \times 10^{-2}$	$(6.52 \sim 107.74) \times 10^{-3}$

性<sup>[35]</sup>, 由于尚未获得 N-DBPs 的致癌斜率因子和非致癌参考剂量, 暂时无法评估其致癌风险。

### 3 结论

(1) 加热煮沸可降低饮用水中 DBPs 含量, 供水管网终端龙头水 THMs、HAAs 和 HANs 分别降低 84.21%、91.45% 和 21.16%; DBPs 构成由以 TCM、BDCM 和 DBCM 为主变为以 TCM、DCAA 和 TCAA 为主。

(2) 基于常规指标的 THMs 预测模型, 准确度高 ( $R^2 = 0.8713$ , SD), 简单易行, 可以运用到实际生活中为饮用水消毒副产物风险预警提供实时预测数据, 并为估算与氯化过程中 DBPs 暴露有关的健康风险提供基础数据。

(3) 加热器出水相对于同管网龙头水, 致癌风险和非致癌风险分别降低了 79.00% 和 78.60%。供水管网终端龙头水的致癌风险主要来源于 THMs, 其中 BDCM 致癌风险贡献最大, 热水系统中致癌风险主要来源于 TCM 和 HAAs, 其中 TCM 致癌风险贡献最大。龙头水及加热器出水致癌风险均在美国环保署规定可接受的范围内, 但仍应加强对水源环境的保护。

#### 参考文献:

[1] Kimura S Y, Cuthbertson A A, Byer J D, *et al.* The DBP exposome: development of a new method to simultaneously quantify priority disinfection by-products and comprehensively identify unknowns[J]. *Water Research*, 2019, **148**: 324-333.

[2] Richardson S D, Postigo C. A new technique helps to uncover unknown peptides and disinfection by-products in water [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**: 6-8.

[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] Chu W H, Gao N Y, Yin D Q, *et al.* Ozone-biological activated carbon integrated treatment for removal of precursors of halogenated nitrogenous disinfection by-products [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(11): 1087-1091.

[5] Zhang H F, Zhang Y H, Shi Q, *et al.* Characterization of unknown brominated disinfection byproducts during chlorination

using ultrahigh resolution mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(6): 3112-3119.

[6] Ahmed F, Khan T A, Fakhruddin A N M, *et al.* Estimation and exposure concentration of trihalomethanes (THMs) and its human carcinogenic risk in supplied pipeline water of Dhaka City, Bangladesh [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(16): 16316-16330.

[7] Chang H H, Tung H H, Chao C C, *et al.* Occurrence of haloacetic acids (HAAs) and trihalomethanes (THMs) in drinking water of Taiwan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, **162**(1-4): 237-250.

[8] Huang H, Zhu H H, Gan W H, *et al.* Occurrence of nitrogenous and carbonaceous disinfection byproducts in drinking water distributed in Shenzhen, China [J]. *Chemosphere*, 2017, **188**: 257-264.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Wang X M, Mao Y Q, Tang S, *et al.* Disinfection byproducts in drinking water and regulatory compliance: a critical review [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, **9**(1): 3-15.

[12] 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.

[13] Mercier Shanks C, Sérodes J B, Rodriguez M J. Spatio-temporal variability of non-regulated disinfection by-products within a drinking water distribution network [J]. *Water Research*, 2013, **47**(9): 3231-3243.

[14] Wang L, Chen Y, Chen S W, *et al.* A one-year long survey of temporal disinfection byproducts variations in a consumer's tap and their removals by a point-of-use facility [J]. *Water Research*, 2019, **159**: 203-213.

[15] Pan Y, Zhang X R, Wagner E D, *et al.* Boiling of simulated tap water: effect on Polar brominated disinfection byproducts, halogen speciation, and cytotoxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 149-156.

[16] Chowdhury S, Rodriguez M J, Sadiq R, *et al.* Modeling DBPs formation in drinking water in residential plumbing pipes and hot water tanks [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 337-347.

[17] 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.
- [18] Lin J J, Chen X, Hong H C, *et al.* Regression models evaluating THMs, HAAs and HANs formation upon chloramination of source water collected from Yangtze River Delta Region, China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **160**: 249-256.
- [19] Goufopoulos S K, Arhonditsis G B. Multiple regression models: a methodology for evaluating trihalomethane concentrations in drinking water from raw water characteristics[J]. *Chemosphere*, 2002, **47**(9): 1007-1018.
- [20] 陈敏建, 陈炼钢, 丰华丽. 基于健康风险评价的饮用水水质安全管理[J]. *中国水利*, 2007, (7): 12-15.  
Chen M J, Chen L G, Feng H L. Quality safety management on drinking water based upon health risk assessment [J]. *China Water Resources*, 2007, (7): 12-15.
- [21] 杨洛贤, 滕卫林, 王强, 等. 2014 年杭州市主城区饮用水中消毒副产物的分布及其健康风险[J]. *环境与职业医学*, 2016, **33**(3): 237-242.  
Yang L X, Teng W L, Wang Q, *et al.* Distribution and health risk of disinfection by-products in drinking water in Hangzhou main urban zone, 2014 [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2016, **33**(3): 237-242.
- [22] Krasner S W, Wright J M. The effect of boiling water on disinfection by-product exposure[J]. *Water Research*, 2005, **39**(5): 855-864.
- [23] Yu Y, Reckhow D A. Kinetic analysis of haloacetonitrile stability in drinking waters[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(18): 11028-11036.
- [24] Zhang X L, Yang H W, Wang X M, *et al.* Trihalomethane hydrolysis in drinking water at elevated temperatures[J]. *Water Research*, 2015, **78**: 18-27.
- [25] Shi W D, Wang L, Chen B Y. Kinetics, mechanisms, and influencing factors on the treatment of haloacetonitriles (HANs) in water by two household heating devices[J]. *Chemosphere*, 2017, **172**: 278-285.
- [26] Koch J, Volker P. Zur bildung von artefakten und deren vermeidung bei der bestimmung leichtflüchtiger Halogenkohlenwasserstoffe in wasser mittels headspace-gaschromatographie unter den bedingungen der DIN 38407 Teil 5 (DEV-F5). Teil II: überhöhte trihalogenmethanbefunde in gechlortem schwimmbeckenwasser [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1996, **24**(4): 179-184.
- [27] Fang J Y, Ma J, Yang X, *et al.* Formation of carbonaceous and nitrogenous disinfection by-products from the chlorination of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Research*, 2010, **44**(6): 1934-1940.
- [28] 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.  
Chen P P, Zhang J Y, Jin J Y. Study on the effect and formation of trihalo-methanes and haloacetic ethyl acid in drinking waters [J]. *Environmental Chemistry*, 2005, **24**(4): 434-437.
- [29] Hong H C, Xiong Y J, Ruan M Y, *et al.* Factors affecting THMs, HAAs and HNMs formation of Jin Lan Reservoir water exposed to chlorine and monochloramine[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **444**: 196-204.
- [30] Sun Y X, Wu Q Y, Hu H Y, *et al.* Effect of ammonia on the formation of THMs and HAAs in secondary effluent chlorination [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(5): 631-637.
- [31] 赵新华, 王熠宁, 周广宇, 等. 配水管网中三氯甲烷风险概率及影响因素分析[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, **47**(4): 343-348.  
Zhao X H, Wang Y N, Zhou G Y, *et al.* Analysis on chloroform risk probability and impact factors for water distribution network [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, **47**(4): 343-348.
- [32] Hang C, Zhang B B, Gong T T, *et al.* Occurrence and health risk assessment of halogenated disinfection byproducts in indoor swimming pool water [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **543**: 425-431.
- [33] Ates N, Kitis M, Yetis U. Formation of chlorination by-products in waters with low SUVA—correlations with SUVA and differential UV spectroscopy [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4139-4148.
- [34] Lee S C, Guo H, Lam S M J, *et al.* Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong[J]. *Environmental Research*, 2004, **94**(1): 47-56.
- [35] Bond T, Huang J, Templeton M R, *et al.* Occurrence and control of nitrogenous disinfection by-products in drinking water - a review[J]. *Water Research*, 2011, **45**(15): 4341-4354.

## 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>x</sub> 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 <sup>0</sup> /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 <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> 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 <sub>2</sub> 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)