

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



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

浙江省H市供水系统消毒副产物及其健康风险评价

刘俊萍¹, 于建全¹, 李青松², 马晓雁¹, 杨玉龙^{3*}, 贾佳⁴

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 厦门理工学院水资源环境研究所, 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心, 厦门 361005; 3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 浙江省环境工程技术评估中心, 杭州 310000)

摘要:以浙江省H市供水系统为调查对象,采用配有电子捕获器的气相色谱(GC-ECD)检测2座水厂及相应供水管网中18种消毒副产物(DBPs)的含量,深入探讨了DBPs导致的饮用水健康风险及前体物指标与各类DBPs的相关性。结果发现H市饮用水中检出三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)、卤乙腈(HANs)和三氯硝基甲烷(HNMs)等类消毒副产物,THMs含量最高,HAAs次之。CX水厂出水和供水管网中THMs分别为7.70~32.73 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和9.00~51.42 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAAs分别为3.05~21.30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和6.00~26.79 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。TH水厂出水和供水管网中THMs分别为8.65~38.76 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和12.09~42.04 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAAs分别为2.42~14.79 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和2.80~33.40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2家水厂出厂水和供水管网中消毒副产物浓度均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)。采用溶解性有机碳(DOC)和UV₂₅₄表征水样有机物,分析有机物与DBPs的相关性,发现管网水中三氯甲烷(TCM)与DOC和UV₂₅₄呈显著负相关性。基于EPA推荐的健康风险评价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市出厂水和管网水中消毒副产物引起的致癌风险分别为 $5.94 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-5}$ 和 $5.94 \times 10^{-6} \sim 5.56 \times 10^{-5}$,非致癌风险分别为 $0.91 \times 10^{-2} \sim 4.20 \times 10^{-2}$ 和 $1.26 \times 10^{-2} \sim 4.72 \times 10^{-2}$ 。致癌风险主要来自THMs,一溴二氯甲烷(BDCM)贡献了最高的致癌风险,非致癌风险主要来自TCM。

关键词:饮用水;消毒副产物(DBPs);前体物;相关性分析;健康风险

中图分类号: X131.2; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5302-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907083

Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province

LIU Jun-ping¹, YU Jian-quan¹, LI Qing-song², MA Xiao-yan¹, YANG Yu-long^{3*}, JIA Jia⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Fujian Engineering and Research Center of Rural Sewage Treatment and Water Safety, Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. Technological Assessment Center of Environmental Engineering of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The occurrence of 18 types of disinfection by-products (DBPs) in two waterworks and the corresponding water supply networks of H City in Zhejiang Province was determined by gas chromatography coupled with electron capture detector (GC-ECD). The correlation between DBPs and organic precursors, and health risks caused by DBPs, were discussed. Results showed that the disinfection by-products detected in drinking water in H City mainly include trihalomethanes (THMs), haloacetic acid (HAAs), haloacetonitrile (HANs) and trichloronitromethane (HNMs), with highest concentrations of THMs followed by HAAs. In the finish water of CX Waterworks and tap water supplied by CX Water works, concentrations of THMs ranged from 7.70 to 32.73 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 9.00 to 51.42 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and those of HAAs 3.05 to 21.30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 6.00 to 26.79 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The THMs in finished water and tap water of TH Waterworks were in the range 8.65-38.76 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 12.09-42.04 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and those of HAAs were 2.42-14.79 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 2.80-33.40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The DBPs in the finished and tap water of the two waterworks were at lower levels than the limitations regulated by the Sanitary Standard for Drinking Water (GB 5749-2006). The index of dissolved organic carbon (DOC) and UV₂₅₄ were adopted to describe the organic compounds, and it was found that trichloromethane (TCM) was significantly negatively correlated with DOC and UV₂₅₄ in tap water. Based on the EPA recommended health risk assessment model, the carcinogenic and non-carcinogenic risks of chlorine disinfection by-products in the oral intake route were calculated. It was found that the carcinogenic risks caused by the disinfection by-products in the finished water and tap water of H City were $5.94 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-5}$ and $5.94 \times 10^{-6} \sim 5.56 \times 10^{-5}$, respectively, while the non-carcinogenic risks were $0.91 \times 10^{-2} \sim 4.20 \times 10^{-2}$ and $1.26 \times 10^{-2} \sim 4.72 \times 10^{-2}$, respectively. The carcinogenic risk is mainly from THMs; bromodichloromethane (BDCM) contributes the highest cancer risk, and the non-carcinogenic risk is mainly from TCM.

Key words: drinking water; disinfection by-products (DBPs); precursors; correlation analysis; health risks

氯消毒能有效杀灭病原微生物,保障供水安全。

消毒副产物(disinfection by-product, DBPs)是指水中

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2019-07-22

基金项目: 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); 浙江省自然科学基金项目(LY19E080019); 福建省农村污水处理与用水安全工程研究中心开放课题项目(RST201803)

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@163.com

* 通信作者, E-mail: yulongy@zju.edu.cn

有机前体物与消毒剂反应生成的化合物^[1], 如三卤甲烷类 (trihalomethanes, THMs)、卤乙酸类 (haloacetic, HAAs)、卤乙腈 (haloacetonitrile, HANs)、卤代酮 (halogenated, HKs) 和卤代硝基甲烷 (halogenated nitromethane, HNMs) 等. 自 1974 年 Rook^[2] 首次发现 DBPs 至今, 饮用水中已经确定 800 余种 DBPs^[3~5].

国内饮用水消毒副产物的调查显示, THMs 和 HAAs 为饮用水中主要消毒副产物, 内陆地区总浓度范围分别为未检出 ND ~ 92.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 ND ~ 59.6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[6~8], 中位浓度为 10.53 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 12.67 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[9], 而中国台湾地区 THMs 含量有时会超过 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10]. 另外, 含氮消毒副产物 (nitrogenous-disinfection by-products, N-DBPs) 在各地区的饮用水中均不同程度检出, 其中主要为 HANs 和 HNMs, 其检测中位浓度为 1.11 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.05 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 沿海城市 N-DBPs 水平高于内陆城市, 且南方城市高于北方城市^[11,12], 可能是因为中国南方的水源低浊度、高藻类和高有机物等污染更严重^[8]. 饮用水中 DBPs 的产生受多种因素的影响, 其中原水水质是最重要的因素. 有研究表明, 饮用水中 THMs、HAAs、HANs 和 HKs 与 DOC 和 UV_{254} 都有显著相关性^[13,14]. HNMs 的形成与 NO_2^- -N 等含氮离子有显著相关性, 高 Br^- 浓度原水会产生更多溴化消毒副产物^[15~17].

饮用水是人体赖以生存的必需品, 长期低剂量暴露于饮用水 DBPs 中是否会对人群健康产生危害成为当前世界各国学者关注的热点. 有研究表明, THMs 具有致癌效应^[18~20], HAAs 具有潜在致癌、致突变性以及生殖发育毒性^[20~22], HANs、HNMs 和卤代乙酰胺 (HAcAm) 等 N-DBPs, 据报道比含碳消毒副产物 (carbonaceous-disinfection by-product, C-DBPs) 具有更高的遗传毒性和细胞毒性^[23~25]. 此外, 在口服、皮肤接触和吸入这 3 种接触 DBPs 途径中, 通过口服摄入 DBPs 的致癌风险高于其他 2 种途径.

本文以浙江省 H 市典型饮用水供水系统为目标, 展开常规及深度饮用水处理工艺对应饮用水中 DBPs 种类和分布水平调查, 深入剖析 DBPs 与水体理化指标关系, 结合风险评估系统数据, 评估该地区饮用水中的 DBPs 在经口服摄入后对人群的健康风险, 以期获取饮用水供水安全信息及水厂优化处理工艺提供数据基础.

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

岛津 GC-2014 型气相色谱, 附 ECD 检测器、

HP-5 毛细管色谱柱 (30 m $\times$ 0.25 μm $\times$ 0.25 μm) 和 10 μL 微量进样针, 耶拿 multi N/C2100 TOC 仪和普析 TU-1901 紫外分光光度计. 4 种三卤甲烷混标 [三氯甲烷 (TCM)、一溴二氯甲烷 (DCBM)、二溴一氯甲烷 (DBCM) 和三溴甲烷 (TBM)]、二氯乙酸 (DCAA)、三氯乙酸 (TCAA)、溴乙酸 (BAA)、二溴乙酸 (DBAA)、溴氯乙酸 (BCAA)、二氯乙腈 (DCAN)、三氯乙腈 (TCAN)、二溴乙腈 (DCBN)、溴氯乙腈 (BCAN)、碘乙腈 (IAN)、二氯乙酰胺 (DcAcn)、三氯乙酰胺 (TcAcn) 和三氯硝基甲烷 (TCNM) 等标准品, 均购自上海安谱实验科技有限公司.

1.2 样品的采集与保存

2017 年 12 月 ~ 2018 年 11 月期间分别对 H 市 2 家市政水厂的水源水、出厂水和相应管网水进行样品的采集和检测, 水厂和采样点位置见图 1. CX 水厂采用混凝、沉淀、过滤和消毒的常规水处理工艺, TH 水厂采用深度处理工艺, 包括预臭氧、混凝、沉淀、砂滤、后臭氧、活性炭滤池和消毒, 2 个水厂均采用液氯消毒, 其中 CX 水厂有 2 个水源, 分别为 L 水库和 T 河. 为获得较为准确和具有可比性的监测数据, 相同月份的样品均于同一天采集. 所有水样均在 4 $^{\circ}\text{C}$ 以下保存, 并立即带回实验室分析.

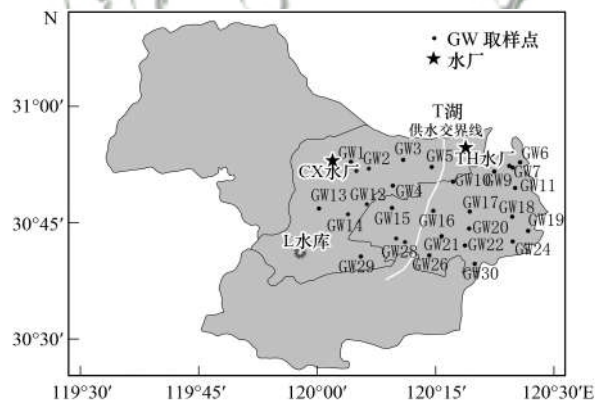


图 1 H 市采样点位置示意

Fig. 1 Sample sites of H City

1.3 实验方法

有机物指标采用 UV_{254} 和 TOC, UV_{254} 采用紫外分光光度法测定, TOC 采用有机碳分析仪测定. THMs、HANs、HAcAm 和 HNMs 采用叔丁基甲醚 (MTBE) 为萃取剂进行液液萃取, 取上部有机相进样 GC-ECD 检测. GC 检测条件为进样口温度 200 $^{\circ}\text{C}$, 不分流进样; 升温程序为初始温度 35 $^{\circ}\text{C}$, 保持 1 min, 以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 70 $^{\circ}\text{C}$, 以 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 120 $^{\circ}\text{C}$, 以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$, 以 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 240 $^{\circ}\text{C}$, 保留 5 min. ECD 温度 250 $^{\circ}\text{C}$. 载气为高纯氮, 总流量为 50 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 吹扫流量

3.6 mL·min⁻¹.

HAA_s 采用液液萃取联合酸性甲醇酯化法. GC 检测条件为进样口温度 210℃,不分流进样,载气为高纯氮,总流量 50 mL·min⁻¹,吹扫流量 3.6 mL·min⁻¹;升温程序为初始温度 35℃保持 8 min,以 8℃·min⁻¹升到 200℃,保留 15 min. ECD 温度 280℃.

为控制检测质量,每次测样均设平行样及空白对照,从而确保检测的准确性,对检测结果过高或过低的样品进行复查.

1.4 相关性分析

SPSS (statistical product and service solutions), 即“统计产品与服务解决方案”,主要用于分析不同变量元素之间的关系. 基于 SPSS 平台进行水质参数与消毒副产物之间的相关性分析,由于数据为非正态分布,因此采用 Spearman 相关分析.

1.5 健康风险模型

1.5.1 致癌风险

基于测量的 DBPs 水平,评估经口服摄取途径时潜在 DBPs 摄取量. 根据 H 市居民的生活方式和管网水中 DBPs 分布情况,确定饮用人群的暴露源、暴露途径、暴露的程度、持续时间和暴露率. 癌症风险评估公式如下^[26]:

$$R = CDI_{oral} \times SF_{oral}$$

式中,R 表示终生超额患癌风险度;CDI_{oral} 表示人体每日口服摄入量,mg·(kg·d)⁻¹;SF_{oral} 表示致癌物的致癌斜率因子(kg·d)·mg⁻¹.

$$CDI_{oral} = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

式中,CW 代表饮用水中 DBPs 浓度(mg·L⁻¹);IR 为饮用水摄入率(L·d⁻¹);EF 为暴露频率(d·a⁻¹);ED 为暴露持续时间,根据中国人口数据,假设男性为 74 a,女性为 78 a^[27];BW 为体重,男性平均为

67.7 kg,女性平均为 59.6 kg^[27],AT 为平均暴露时间,经计算为25 550 d^[28].

1.5.2 非致癌风险

DBPs 对人体的非致癌风险通常用危害指数 HI^[26]表示:

$$HI = CDI_{oral} / RfD$$

式中,RfD 为化学物质非致癌参考量,mg·(kg·d)⁻¹.

1.5.3 参考剂量

饮用水中各 DBPs 致癌性分级、致癌斜率因子 SF 和非致癌参考量见表 1.

表 1 DBPs 致癌性分级、致癌斜率因子及非致癌参考剂量¹⁾

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

DBPs	致癌性分级 ²⁾	致癌斜率因子	非致癌参考剂量
TCM	B2	0.031	0.010
BDCM	B2	0.062	0.020
DBCM	C	0.084	0.020
TBM	B2	0.079	0.020
DCAA	B2	0.050	0.040
TCAA	B2	0.070	0.020

1) 美国环保署综合风险信息系统(IRIS)公布数据;2) B2 为根据充分的动物实验资料,极有可能为人类致癌物质,C 为可能的人类致癌物质

2 结果与讨论

2.1 常规受控与非受控 DBPs 的种类和存在水平

H 市 2 家水厂出厂水和对应供水管网中 DBPs 共检出 13 种,常规受控 DBPs 检出类别为 TCM、BDCM、DBCM、TBM、DCAA 和 TCAA,非常规受控 DBPs 检出类别为 BAA、DBAA、BCAA、DCAN、DBAN、BCAN 和 TCNM,均未超过国家标准,部分水源水存在 DBPs 背景值. H 市供水管网中 DBPs 分布见图 2,DBPs 具体的含量水平见表 2.

由图 2 可见,与 CX 水厂和 TH 水厂相关的供水

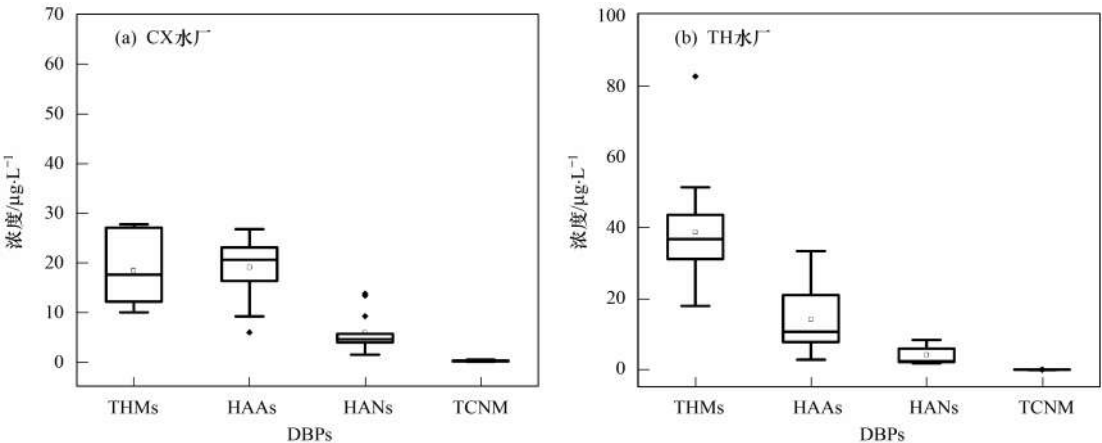


图 2 H 市 2 水厂对应供水管网中 DBPs 分布

Fig. 2 Distribution of DBPs in tap water of two water plants in H City

管网中 DBPs 以 THMs 和 HAAs 为主,CX 水厂对应供水管网中 THMs、HAAs、HANs 和 TCNM 的存在水平分别为 9.00 ~ 51.42、6.00 ~ 26.79、1.51 ~ 13.82 和 0.11 ~ 0.60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其中位浓度分别为 18.23、20.50、4.49 和 0.22 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. TH 水厂对应

供水管网中 THMs、HAAs、HANs 和 TCNM 的存在水平分别为 12.09 ~ 42.04、2.80 ~ 33.40、1.89 ~ 10.15 和 ND ~ 0.31 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,中位浓度分别为 36.80、12.83、3.80 和 0.14 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. H 市供水系统的 DBPs 总量高于全国平均水平^[9].

表 2 H 市饮用水中 DBPs 检测结果¹⁾

Table 2 Occurrence of DBPs in tap water of H City									
DBPs	CX 水厂出厂水		CX 水厂管网水		TH 水厂出厂水		TH 水厂管网水		限值 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
	检出率 /%	浓度范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	浓度范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	浓度范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	检出率 /%	浓度范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
TCM	100	6.27 ~ 17.50	100	3.86 ~ 18.16	100	4.54 ~ 10.57	100	3.81 ~ 11.10	60
BDCM	100	1.25 ~ 10.27	100	2.92 ~ 10.96	100	0.9 ~ 16.17	100	1.27 ~ 15.20	100
DBCM	100	0.18 ~ 3.30	100	0.54 ~ 3.94	100	1.81 ~ 16.48	100	3.90 ~ 17.04	60
TBM	25.00	ND ~ 1.66	14.3	ND ~ 2.77	100	1.4 ~ 5.54	100	3.11 ~ 7.40	100
DCAA	100	0.41 ~ 8.30	85.71	0.52 ~ 8.30	100	1.39 ~ 9.36	100	1.04 ~ 9.78	50
TCAA	100	2.34 ~ 10.44	100	3.56 ~ 14.21	75.00	ND ~ 0.80	100	1.74 ~ 14.21	100
BAA	50.00	ND ~ 0.62	85.71	0.50 ~ 3.80	75.00	ND ~ 0.53	90.91	ND ~ 12.2	—
DBAA	50.00	ND ~ 0.49	92.86	0.40 ~ 2.43	75.00	ND ~ 0.20	89.66	0.12 ~ 1.31	—
BCAA	75.00	ND ~ 1.45	100	0.24 ~ 5.57	75.00	ND ~ 0.83	100	0.05 ~ 8.31	—
DCAN	100	0.57 ~ 3.48	100	1.47 ~ 10.67	75.00	0.26 ~ 0.80	100	0.13 ~ 1.70	—
TCAN	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	—
DBAN	80.00	ND ~ 4.27	75.00	ND ~ 3.15	75.00	0.03 ~ 2.7	100	0.37 ~ 4.00	—
BCAN	20.00	ND ~ 2.74	32.15	ND ~ 3.21	50.00	ND ~ 2.7	62.14	ND ~ 6.41	—
IAN	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND	—
DcAcm	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND	—
TeAcm	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND	—
TCNM	100	0.11 ~ 0.51	100	0.11 ~ 0.60	75.00	ND ~ 0.12	96.97	ND ~ 0.43	—

1)ND 表示未检出;—表示无参考值

由表 2 可见,除 CX 水厂对应供水管网中 TBM 检出率较小外,其它 5 种常规受控 DBPs 在 2 家水厂出水及管网水中均 100% 检出,HANs 检出类别为 DCAN、DBAN 和 BCAN,其中 DCAN 检出率最高,TCAN 和 IAN 未检出,TCNM 在 2 家水厂出厂水及管网水中均有检出. CX 水厂出厂水及管网水 THMs 以 TCM 为主,平均检测浓度为 10.24 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HAAs 以 DCAA 和 TCAA 为主,平均检测浓度分别为 3.45 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 8.67 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,3 种 HANs 的检测含量最高值为 4.27 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (DBAN),TCNM 在管网中平均浓度为 0.26 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. TH 水厂出水及管网水 THMs 中 BDCM 和 DBCM 含量较高,平均检测浓度分别为 13.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 13.24 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能是由 2 方面原因造成的,一是 TH 水厂水源水 T 湖中溴化物含量偏高^[29],二是因为 TH 水厂采用臭氧活性炭工艺,臭氧活性炭工艺会减少 THMs 前体物的生成,但同时会生成溴酸盐与水中有机物发生卤代反应,导

致溴代烷烃含量的上升^[30]. HAAs 以 DCAA 和 TCAA 为主,平均浓度分别为 3.99 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 4.52 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,HANs 的检测最高值为 6.41 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (BCAN),TCNM 在管网中的平均浓度为 0.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 2 家水厂 HANs 总量均未超过 WHO 的暂时性指导值(70 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),总 N-DBPs 的检测浓度高于广州和深圳等城市^[11]. TH 水厂 C-DBPs 和 N-DBPs 含量总体低于 CX 水厂,主要是因为 TH 水厂采用预臭氧和臭氧生物活性炭工艺,该工艺可提高对氨氮、DOC、UV₂₅₄和高锰酸盐指数的去除,从而减少该类 DBPs 的产生.

2.2 水样理化指标与 DBPs 的相关性

分别对 H 市 2 个水厂对应管网水的水温、pH、游离余氯、DOC 和 UV₂₅₄进行检测,结果见表 3,游离余氯的合格率分别为 CX 水厂 96.8% 和 TH 水厂 100%. 对 2 家水厂管网水理化指标与 DBPs 进行相关性分析,其结果见表 4 和表 5.

表 3 H 市 2 水厂管网水理化指标

Table 3 Physicochemical parameters of drinking water in H City							
水厂	pH	水温 /℃	余氯 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DOC / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	UV ₂₅₄	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	溶解氧 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
CX	7.00 ~ 7.44	17.5 ~ 23.8	0.03 ~ 0.85	1.03 ~ 2.58	0.006 ~ 0.034	130.6 ~ 282.0	7.94 ~ 8.82
TH	6.56 ~ 7.54	16.5 ~ 26.8	0.20 ~ 0.84	0.91 ~ 2.30	0.006 ~ 0.053	126.5 ~ 468.0	6.58 ~ 11.84

表 4 CX 水厂管网水 DBPs 浓度与水体理化指标的相关性分析¹⁾

Table 4 Relationship between DBPs and physicochemical parameters of drinking water in CX water plant					
DBPs	CX 水厂管网水				
	pH	水温	余氯	DOC	UV ₂₅₄
TCM	-0.696	0.912 *	0.249	-0.911 *	-0.527 *
BDCM	-0.636	0.453	0.262	-0.483	-0.519
DBCM	-0.754	0.225	-0.150	-0.517	-0.201
TBM	-0.423	0.371	-0.448	0.137	0.413
THMs	-0.857	0.726	0.240	-0.667 *	-0.485 *
DCAA	0.514	0.565 *	-0.147	0.100	0.402
TCAA	0.896	-0.736	-0.088	-0.183	0.310
DCAN	-0.820	0.414	-0.092	-0.283	-0.653
DBAN	0.336	0.809 *	0.109	0.483	0.494
TCNM	-0.731	0.800	0.155	-0.059	-0.168

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$,下同

表 5 TH 水厂管网水 DBPs 浓度与水体理化指标的相关性分析

Table 5 Relationship between DBPs and physicochemical parameters of drinking water in TH water plant					
DBPs	TH 水厂管网水				
	pH	水温 /℃	余氯 /mg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄
TCM	0.671 *	-0.041	-0.370 *	-0.696 **	-0.853 **
BDCM	0.465	-0.603 *	0.110	-0.272	-0.278
DBCM	0.028	0.664 **	0.157	0.176	0.184
TBM	0.514 **	0.688 **	-0.399 *	0.247	-0.158
THMs	0.518 **	0.680 **	-0.387 *	0.250	-0.278
DCAA	-0.401	0.704 **	-0.393	0.315	0.006
TCAA	0.430	0.222	-0.515 *	0.021	-0.510
DCAN	0.200	0.405 *	0.034	-0.191	-0.521
DBAN	-0.305	-0.105	0.374	0.457	0.298
TCNM	-0.160	0.057	-0.206	-0.094	-0.040

由表 4 和表 5 可见, CX 水厂和 TH 水厂对应管网水 TCM 与 DOC 和 UV₂₅₄ 均有显著相关性 ($P < 0.05$), 这与 Hong 等^[14] 的研究结果一致, 因为 DOC 和 UV₂₅₄ 能反映水中天然有机物 (NOM) 的量, 氯会与 NOM 反应形成 TCM. 对于总三卤甲烷 (T-THMs), CX 水厂管网水 T-THMs 与 DOC 和 UV₂₅₄ 有显著相关性, 而 TH 水厂管网水 T-THMs 与 DOC 和 UV₂₅₄ 并没有呈现良好相关性, 这可能是由于 CX 水厂管网水 T-THMs 的贡献主要来自 TCM, TH 水厂管网水的 T-THMs 则主要来自 BDCM 和 DBCM, 这 2 类 DBPs 受到水中溴离子的存在水平的影响^[31]. 此外 2 家水厂管网水中 DCAA、TCAA 和 DCAN 等与 DOC 和 UV₂₅₄ 没有呈现明显相关性, 这表明 DOC 和 UV₂₅₄ 不是这些 DBPs 前体物的良好指标. 管网中余氯与前体物接触时间的增加会导致更多 DBPs 的产生^[32], 例如 THMs 和 TCAA, 以及剩余氯量的减少, 因此本研究中管网水中剩余氯量与 THMs 和 TCAA 呈负相关. 温度的升高会加速反应, 水温和大部分 DBPs 呈显著的正相关关系. TH 水厂管网水数据显示 pH 值对 THMs 的形成有促进作用, 而 CX 水厂管网水 pH 和 THMs 并没有呈现显著相关性, 这可能是由于 2 家水厂的原水有机物种类差异较大.

2.3 DBPs 健康风险评估

通过健康风险评价模型, 可分别评价经口摄取途径时水中化学致癌物质的健康风险和化学非致癌物质的健康风险. H 市 2 家水厂的出厂水及管网水中不同 DBPs 的致癌风险和非致癌风险如表 6 和表 7 所示.

表 6 H 市 2 家水厂出厂水和管网水的致癌风险

Table 6 Cancer risk in finished water and tap water in H City				
DBPs	致癌风险 (CX) 水厂		致癌风险 (TH 水厂)	
	出厂水	管网水	出厂水	管网水
TCM	$(3.08 \sim 7.11) \times 10^{-6}$	$(2.38 \sim 7.05) \times 10^{-6}$	$(1.84 \sim 4.29) \times 10^{-6}$	$(1.55 \sim 4.43) \times 10^{-6}$
BDCM	$(1.33 \sim 8.35) \times 10^{-6}$	$(1.64 \sim 9.65) \times 10^{-6}$	$(0.73 \sim 16.41) \times 10^{-6}$	$(1.03 \sim 31.06) \times 10^{-6}$
DBCM	$(1.07 \sim 3.63) \times 10^{-6}$	$(1.23 \sim 4.34) \times 10^{-6}$	$(1.99 \sim 10.14) \times 10^{-6}$	$(4.29 \sim 18.88) \times 10^{-6}$
TBM	$(0 \sim 1.72) \times 10^{-6}$	$(3.94 \sim 6.21) \times 10^{-7}$	$(1.45 \sim 5.74) \times 10^{-6}$	$(3.22 \sim 6.89) \times 10^{-6}$
DCAA	$(0.46 \sim 2.13) \times 10^{-6}$	$(0.50 \sim 2.01) \times 10^{-6}$	$(0.91 \sim 6.12) \times 10^{-6}$	$(2.33 \sim 6.41) \times 10^{-6}$
TCAA	$(0 \sim 8.59) \times 10^{-6}$	$(3.27 \sim 12.1) \times 10^{-6}$	$(0 \sim 1.19) \times 10^{-7}$	$(1.6 \sim 13.04) \times 10^{-6}$
总计	$(5.94 \sim 31.52) \times 10^{-6}$	$(9.42 \sim 35.81) \times 10^{-6}$	$(6.93 \sim 47.57) \times 10^{-6}$	$(1.40 \sim 5.56) \times 10^{-5}$

表 7 H 市 2 家水厂出厂水和管网水的非致癌风险

Table 7 Non-carcinogens risk in finished water and tap water in H City				
DBPs	非致癌风险 (CX) 水厂		非致癌风险 (TH 水厂)	
	出厂水	管网水	出厂水	管网水
TCM	$(0.99 \sim 2.29) \times 10^{-2}$	$(0.77 \sim 2.28) \times 10^{-2}$	$(0.60 \sim 1.39) \times 10^{-2}$	$(0.50 \sim 1.43) \times 10^{-2}$
BDCM	$(1.07 \sim 6.73) \times 10^{-3}$	$(1.32 \sim 7.78) \times 10^{-3}$	$(0.59 \sim 10.60) \times 10^{-3}$	$(0.83 \sim 4.88) \times 10^{-3}$
DBCM	$(6.36 \sim 21.6) \times 10^{-4}$	$(7.34 \sim 25.80) \times 10^{-4}$	$(1.19 \sim 10.80) \times 10^{-3}$	$(2.56 \sim 11.20) \times 10^{-3}$
TBM	$(0 \sim 1.09) \times 10^{-3}$	$(2.49 \sim 3.93) \times 10^{-4}$	$(9.18 \sim 36.30) \times 10^{-4}$	$(2.04 \sim 4.36) \times 10^{-4}$
DCAA	$(2.33 \sim 10.70) \times 10^{-4}$	$(2.52 \sim 10.10) \times 10^{-4}$	$(4.56 \sim 30.70) \times 10^{-4}$	$(1.17 \sim 3.21) \times 10^{-3}$
TCAA	$(0 \sim 6.14) \times 10^{-3}$	$(2.33 \sim 8.67) \times 10^{-3}$	$(0 \sim 8.52) \times 10^{-5}$	$(1.14 \sim 9.31) \times 10^{-3}$
总计	$(1.19 \sim 4.01) \times 10^{-2}$	$(1.26 \sim 4.32) \times 10^{-2}$	$(0.91 \sim 4.20) \times 10^{-2}$	$(1.27 \sim 4.72) \times 10^{-2}$

由表 6 和 7 可见,H 市 CX 水厂的出厂水和管网水中 DBPs 通过饮水途径的致癌风险分别为 $(5.94 \sim 31.52) \times 10^{-6}$ 和 $(9.42 \sim 35.81) \times 10^{-6}$,HI 值分别为 $(1.19 \sim 4.01) \times 10^{-2}$ 和 $(1.26 \sim 4.32) \times 10^{-2}$. TH 水厂的出厂水和管网水中 DBPs 通过饮水途径的致癌风险分别为 $(6.93 \sim 47.57) \times 10^{-6}$ 和 $(1.40 \sim 5.56) \times 10^{-5}$,HI 值分别为 $(0.91 \sim 4.20) \times 10^{-2}$ 和 $(1.27 \sim 4.72) \times 10^{-2}$. 2 家水厂出水和管网水致癌风险均高于 EPA 规定的最低或可忽略风险水平(1×10^{-6}),但在 EPA 规定的监管范围内($1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$). 4 种 THMs 中,2 家水厂出厂水和管网水的 BDCM 均表现出最高的致癌风险,最高达到 3.14×10^{-6} ,尽管在 CX 水厂出水和管网水中 TCM 含量更高,这与 Lee 等^[33]和 Viana 等^[34]的研究结果类似,主要是因为 BDCM 具有较高的口服致癌斜率因子. 对于 HAAs,TCAA 的致癌风险贡献明显大于 DCAA,这是因为 TCAA 具有较高的浓度水平和口服斜率因子^[35]. 由于水厂出水进入管网后 DBPs 含量会继续升高,因此可以看出管网水 DBPs 致癌风险普遍高于出厂水. 2 家水厂的出厂水和管网水非致癌风险主要来自 TCM,其 HI 最高值达 2.29×10^{-2} . 此外据报道,同浓度下溴化 HAAs 比氯化 HAAs 更有毒性^[36],含氮消毒副产物 HANs 和 HNMs 等虽然在水中浓度低,但其致癌性却是 C-DBPs 的几倍^[23,37]. 然而由于尚未获得这些物质的癌症效力,因此无法具体得出其致癌风险.

3 结论

(1)THMs 和 HAAs 是 H 市 2 家水厂饮用水中主要氯消毒副产物类型,此外含氮 DBPs 包括 DCAN、DBAN、BCAN 和 TCNM 亦有检出;臭氧深度处理工艺可能导致含溴消毒副产物比例较高,2 家水厂水样均未发现水体中 DBPs 超标的现象,但 DBPs 总量高于全国平均水平.

(2)饮用水中 DBPs 的生成受到水中污染物种类、污染水平影响. TH 水厂和 CX 水厂出水 TCM 均与 DOC 和 UV_{254} 呈显著负相关性,余氯与 THMs 和 TCAA 呈负相关关系,温度和 pH 均与部分 DBPs 有显著相关性.

(3)H 市饮用水中 6 种 DBPs(TCM、BDCM、DBCM、TBM、TCAA 和 DCAA)通过饮水途径所引起的致癌风险相当,其中 BDCM 贡献最大,非致癌风险则主要来自 TCM. 致癌风险虽在美国环保署可接受的风险范围内,但不容忽视,建议加强水环境的保护,从源头上控制污染物的排放,水厂应采用深度处理工艺更有效去除 DBPs 前体物,管网可采用多

级加氯方式,从而减少 DBPs 的生成.

参考文献:

- [1] Sohn J, Amy G, Cho J, *et al.* Disinfectant decay and disinfection by-products formation model development: chlorination and ozonation by-products [J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2461-2478.
- [2] Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters[J]. *Water Treatment Examination*, 1974, **23**: 234-243.
- [3] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [4] 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.
- [5] Ćulin J, Mustać B. Environmental risks associated with ballast water management systems that create disinfection by-products (DBPs)[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, **105**: 100-105.
- [6] 邓瑛,魏建荣,鄂学礼,等. 中国六城市饮用水中氯化消毒副产物分布的研究[J]. *卫生研究*, 2008, **37**(2): 207-210.
Deng Y, Wei J R, E X L, *et al.* Study for distribution level of disinfection byproducts in drinking water from six cities in China [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2008, **37**(2): 207-210.
- [7] Zhang H, Chang S, Wang L B, *et al.* Estimating and comparing the cancer risks from THMs and low-level arsenic in drinking water based on disability-adjusted life years [J]. *Water Research*, 2018, **145**: 83-93.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Ding L, Deng H P, Wu C, *et al.* Affecting factors, equilibrium, kinetics and thermodynamics of bromide removal from aqueous solutions by MIEX resin [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **181-182**: 360-370.
- [13] Chowdhury S, Champagne P, McLellan P J. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: a chronological review [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(14): 4189-4206.
- [14] Hong H C, Song Q Y, Mazumder A, *et al.* Using regression models to evaluate the formation of trihalomethanes and haloacetonitriles via chlorination of source water with low SUVA values in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2016, **38**(6): 1303-

- 1312.
- [15] Shah A D, Mitch W A. Halonitroalkanes, halonitriles, haloamides, and N-nitrosamines: a critical review of nitrogenous disinfection byproduct formation pathways [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(1): 119-131.
- [16] Hong H C, Qian L Y, Xiao Z Q, *et al.* Effect of nitrite on the formation of halonitromethanes during chlorination of organic matter from different origin [J]. Journal of Hydrology, 2015, **531**: 802-809.
- [17] Hong H C, Yan X Q, Song X H, *et al.* Bromine incorporation into five DBP classes upon chlorination of water with extremely low SUVA values [J]. Science of the Total Environment, 2017, **590-591**: 720-728.
- [18] Minashree K, Gupta S K. Age dependent adjustment factor (ADAF) for the estimation of cancer risk through trihalomethanes (THMs) for different age groups – A innovative approach [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **148**: 960-968.
- [19] Regli S, Chen J, Messner M, *et al.* Estimating potential increased bladder cancer risk due to increased bromide concentrations in sources of disinfected drinking waters [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(22): 13094-13102.
- [20] Villanueva C M, Cantor K P, Cordier S, *et al.* Disinfection byproducts and bladder cancer: a pooled analysis [J]. Epidemiology, 2004, **15**(3): 357-367.
- [21] Hunter III E S, Rogers E H, Schmid J E, *et al.* Comparative effects of haloacetic acids in whole embryo culture [J]. Teratology, 1996, **54**(2): 57-64.
- [22] Stacpoole P W, Henderson G N, Yan Z M, *et al.* Pharmacokinetics, metabolism, and toxicology of dichloroacetate [J]. Drug Metabolism Reviews, 1998, **30**(3): 499-539.
- [23] Muellner M G, Wagner E D, McCalla K, *et al.* Haloacetonitriles vs. regulated haloacetic acids: are nitrogen-containing DBPs more toxic? [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(2): 645-651.
- [24] 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.
- [25] Liviak D, Creus A, Marcos R. Genotoxicity analysis of two halonitromethanes, a novel group of disinfection by-products (DBPs), in human cells treated in vitro [J]. Environmental Research, 2009, **109**(3): 232-238.
- [26] Office of Emergency and Remedial Response. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) [EB/OL]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/rags_a.pdf, 2019-01-05.
- [27] 中国统计年鉴. 中国国家统计局按地区划分的人口预期寿命 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/yb2004-c/indexch.htm>, 2004-01-01.
- [28] Wang G S, Deng Y C, Lin T F. Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water [J]. Science of the Total Environment, 2007, **387**(1-3): 86-95.
- [29] 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.
- [30] 林涛, 陈卫, 王磊磊. 臭氧-生物活性炭对南方河网典型污染物的去除特性 [J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- Lin T, Chen W, Wang L L. Removal characters of ozone-biological activated carbon process for typical pollutants in southern brooky regions of China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Lee S C, Gu 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.
- [34] Viana R B, Cavalcante R M, Braga F M G, *et al.* Risk assessment of trihalomethanes from tap water in Fortaleza, Brazil [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **151**(1-4): 317-325.
- [35] Pan S L, An W, Li H Y, *et al.* Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **280**: 288-294.
- [36] Richardson S D. Richardson. Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2003, **22**(10): 666-684.
- [37] Karanfil T, Krasner S W, Westerhoff P, *et al.* Occurrence, formation, health effects and control of disinfection by-products in drinking water [M]. Washington, DC: American Chemical Society, 2008. 36-50.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)