

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期
Vol.43 No.2

目次

综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 李勤之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)
再生水水质稳定性评价指标与体系 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 黄文, 王胜利 (597)
基于多种新型受体模型的 PM_{2.5} 来源解析对比 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)
华中地区夏季 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源分析 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)
淄博 2021 年元宵节 PM_{2.5} 水溶性离子污染特征 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)
浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM_{2.5} 分布的影响 潘晨, 康志明 (649)
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM_{2.5} 预报比较分析 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 徐森, 李思亮, 钟君 (752)
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)
雨源型城市河流水污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 王子娇, 李叙勇 (867)
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 张丁, 黄容, 高雪松 (946)
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 鞠铁男, 雷梅 (957)
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 穆德苗, 孙约兵 (965)
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全性的影响 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 庞发虎, 韩辉 (1031)
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)
《环境科学》征订启事 (618) 《环境科学》征稿简则 (761) 信息 (685, 935, 956)

新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估

张坤锋^{1,2,3}, 昌盛^{1,2*}, 涂响^{1,2}, 付青^{1,2*}, 杨光^{1,2}, 樊月婷^{1,2}, 孙兴滨³

(1. 中国环境科学研究院国家环境保护饮用水水源保护地重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 为了揭示新冠肺炎疫情下武汉典型饮用水水源中消毒副产物(DBPs)的污染特征与风险水平,选取武汉典型饮用水源地26个采样点位,采用 N,N -二乙基-1,4-苯二胺分光光度法和气相色谱仪-微池电子捕获检测器(GC- μ ECD)法分别对水体中残余氯消毒剂 and DBPs 进行了检测,并开展健康与生态风险评估。结果表明,26个点位中有16个检出了游离氯或总余氯,检出最大浓度为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,部分点位游离氯超过了国家地表水标准,靠近城市污水厂排水口的点位浓度相对较高。对10个代表性点位进行了34种DBPs的检测,有24种物质被检出,检出率为10.00%~100.00%; ρ (总DBPs)浓度范围为 $0.11 \sim 104.73 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $7.26 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。三氯甲烷检出浓度最高,浓度范围为 $9.98 \sim 11.15 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $10.47 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;一溴一碘乙酰胺检出浓度最低,浓度范围为ND~ $0.11 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.01 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;研究区域内DBPs总体检出水平较低。健康风险评估结果显示,DBPs不会对人体产生致癌和非致癌健康风险;生态风险评估结果表明,三氯甲烷对水生生物有较高的生态风险。

关键词: 新冠疫情(COVID-19); 武汉; 典型饮用水水源; 消毒副产物(DBPs); 风险评估

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0878-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106099

Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic

ZHANG Kun-feng^{1,2,3}, CHANG Sheng^{1,2*}, TU Xiang^{1,2}, FU Qing^{1,2*}, YANG Guang^{1,2}, FAN Yue-ting^{1,2}, SUN Xing-bin³

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Drinking Water Source Protection, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to reveal the pollution characteristics and risk levels of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan under the COVID-19 pandemic, 26 sampling sites were selected in typical drinking water sources in Wuhan. N,N -diethyl-1,4-phenylenediamine spectrophotometry and gas chromatograph-micro-cell electron capture detector (GC- μ ECD) methods were used to detect residual chlorine disinfectants and DBPs in water, respectively, and their health and ecology risks were assessed. The results showed that free chlorine or total residual chlorine were detected in 16 of the 26 water samples, and the maximum concentration was $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which exceeded the limit of the surface water standard in China. The concentration of residual chlorine was higher in sampling sites near the outfall of a municipal sewage plant. There were 34 types of DBPs measured in 10 sampling sites, and 24 types of substances were detected with the detection rate of 10.00%~100.00%. The ρ (total DBPs) was in the range of $0.11 \sim 104.73 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average value of $7.26 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of chloroform was the highest among all the DBPs, ranging from $9.98 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ to $11.15 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average value of $10.47 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of 2-bromo-2-iodoacetamide was the lowest, ranging from ND~ $0.11 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, with an average value of $0.01 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The overall detection level of the DBPs area was low in this study area, and the result of the health risk assessment showed that the DBPs had no carcinogenic or non-carcinogenic health risks to human body. However, the results of the ecological risk assessment showed that chloroform presented a high ecological risk to aquatic organisms.

Key words: COVID-19; Wuhan; typical drinking water sources; disinfection by-products (DBPs); risk assessment

保障饮用水安全已经成为世界共识,并受到公众及相关部门的重视。为了避免饮用水中含有细菌、病毒和原生动物或其他微生物而引起疾病,水源通常需要加入氯气和二氧化氯等氯消毒剂才能被人类使用。但是在杀灭细菌和病毒的同时,残留的一些消毒剂会与水中天然有机或无机前体物反应生成消毒副产物(disinfection by-products, DBPs),从而对人体健康造成一些不良影响。自1974年首次发现DBPs以来^[1],饮用水中已经确定的DBPs达800余种^[2~4],对国内饮用水DBPs的调查显示,三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)是饮用水氯化消毒

过程中形成的最常见的两类消毒副产物^[5~7],其检出浓度范围分别为ND~ $92.80 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和ND~ $56.90 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8~10],中国台湾饮用水中THMs的含量偶尔会超过 $100.00 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[11]。饮用含有低剂量DBPs的水是否会对人体健康产生危害已经成为众多学者研究的热点问题,目前已有研究表明,人体长

收稿日期: 2021-06-11; 修订日期: 2021-07-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2020-JY-005)

作者简介: 张坤锋(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为饮用水污染控制与安全保障, E-mail: Zhangkf1995@163.com

* 通信作者, E-mail: changsheng83@163.com; fuqing@craes.org.cn

期暴露在低剂量的 DBPs 与脑癌^[12]、膀胱癌^[13]、结肠癌和直肠癌^[14]的发病有关,此外,还会对人体产生神经毒性效应^[15]和生殖毒性^[16]。

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 疫情发生以来,为了更好地抑制病毒扩散,大量的氯消毒剂被用于医院、公共交通和生活及医疗废水处理设施等的消毒。作为国内 COVID-19 疫情的首发地,武汉市更是采用了大量的消毒剂来抑制和杀灭病毒。大量残留氯消毒剂的污水厂出水排入地表水体,由于污水处理后的排水中有机物浓度较高,成分更复杂,导致其在加氯消毒过程中具有更高的有毒有害副产物生成几率,城市污水处理厂尾水加氯氧化后,一氯胺是剩余氧化性氯中最主要的残留物。虽然一氯胺反应活性低于游离态氯,但其不仅会产生三卤甲烷 (THMs) 和卤乙酸 (HAAs),更可产生卤代乙腈、氰卤化物等含氮有机卤化副产物。因此,在污水排水以及受纳水体中,含氯消毒剂均能产生有毒有害消毒副产物,从而对人体健康造成危害。公共场所消毒剂经过雨水冲刷和地表径流也最终进入到长江及汉江流域,势必会造成饮用水水源地水体中 DBPs 浓度增加。因此,开展武汉市长江及汉江主要饮用水

水源地 DBPs 的调查及评估十分必要。本研究分析了武汉典型饮用水水源中 DBPs 的污染特征,并进行风险评估,从而更好地了解新冠疫情发生以来消毒对饮用水水源所产生的影响,以期为保障武汉饮用水安全提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究于 2020 年 9 月,在湖北省武汉市选取了包含 18 个集中式饮用水水源地共计 26 个采样点位,进行了表层水样采集。26 个采样点详细点位分布见图 1,其中 1~24 号点位位于长江及汉江干流,25 号点位位于长江支流潞水河,26 号点位位于长江支流举水河。所有水样均采自距表层 1 m 处近表层水体,均为单个样品无混合采集。由于水中游离氯和总余氯的稳定性差,易于挥发、水解和受热分解,测定总余氯和游离氯的样品应预先加入采样体积 1% 的 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液,所有采集的样品均用棕色玻璃瓶密封,采样瓶顶部不留空气,4℃ 下冷藏保存,并于 24 h 内运到实验室进行处理分析。



图 1 武汉市典型饮用水水源地采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of typical drinking water sources in Wuhan

1.2 仪器与试剂

主要仪器:紫外可见分光光度计 (UV-1601, 北分瑞利分析仪器有限公司); 安捷伦 7890A 型气相

相色谱仪-电子捕获检测器 (GC- μ ECD), 配备 HP-5 (30 m $\times$ 0.32 mm $\times$ 0.25 μ m) 气相毛细管柱。

主要试剂:检测的 34 种 DBPs 物质分别为三氯

甲烷、二氯丙烷、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷、三溴甲烷、二氯乙醛、三氯乙醛、二溴乙醛、一溴二氯乙醛、一溴一氯乙醛、二溴一氯乙醛、三溴乙醛、二氯丙酮、三氯丙酮、三氯乙腈、二氯乙腈、一溴二氯乙腈、一溴一氯乙腈、二溴一氯乙腈、二溴乙腈、三溴乙腈、二氯硝基甲烷、三氯硝基甲烷、三溴硝基甲烷、二氯乙酰胺、一溴一氯乙酰胺、二溴乙酰胺、三氯乙酰胺、一氯一碘乙酰胺、一溴二氯乙酰胺、一溴一碘乙酰胺、二溴一氯乙酰胺、三溴乙酰胺和二氯乙酸,各物质标准品(色谱纯)均购自美国 Sigma-Aldrich 公司;无水硫酸钠(分析纯)、甲基叔丁基醚(色谱纯)和 *N,N*-二乙基-1,4-苯二胺(DPD)购自上海阿拉丁生化科技公司。

1.3 样品预处理与检测方法

水样中游离氯和总余氯浓度的检测按照 HJ 586-2010 测定方法采用 *N,N*-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法^[17],在 pH 值为 6.20~6.50 条件下,游离氯与 DPD 发生反应(存在过量碘化钾时,单质氯、次氯酸、次氯酸盐和氯胺与 DPD 反应),生成红色化合物,于 515 nm 波长处测定吸光度,本研究中方法检出限为 0.007 mg·L⁻¹,测定范围为 0.01~0.21 mg·L⁻¹^[18]. DBPs 浓度的检测方法如下:采用液液萃取法对水样中 DBPs 进行富集,使用甲基叔丁基醚作为萃取剂,相关方法参考 Carter 等^[19]的研究.取 20 mL 待测水样至 40 mL 棕色玻璃瓶中,加入 4 mL 甲基叔丁基醚,之后立即加入 8 g 无水 Na₂SO₄(无水 Na₂SO₄使用前在 550℃ 下干燥 2 h),充分振荡 5 min 后静置 30 min,移取上层有机相 1 mL 到进样小瓶中采用 GC-μECD 进行分析检测.检测时 GC 操作条件为:进样口温度为 200℃,采用进样方式不分流;升温的流程为首先以 35℃ 维持 1 min,后以 10℃·min⁻¹升至 80℃,然后以 20℃·min⁻¹升温到 120℃,后再以 15℃·min⁻¹到 210℃,最后再以 20℃·min⁻¹升至 250℃并保持 5 min. ECD 以高纯度的氮气为载气,工作温度为 250℃.

1.4 质量控制与保证

本研究采用了方法空白、回收率实验和精密度对 DBPs 进行质量控制和保证.在实验过程中,在每组 10 个样品中增加 1 个方法空白,相对标准偏差(RSD) < 20% (*n* = 6).水样中 DBPs 的加标回收率为 72.00%~105.00%,方法检测限范围为 0.09~0.11 μg·L⁻¹.对游离氯和总余氯进行质量控制和保证,在分析过程中采用样品平行样、空白加标和方法空白.每 10 个样品为 1 组,分别设置一个空白加标、方法空白和溶剂空白.每个样品都有替代标准物,相对标准偏差(RSD) < 20% (*n* = 6),说明检测

数据可靠.每个样品均进行 3 次平行测定,取平均值为最终结果,方法空白没有物质检出.样品分别加入 2.0 mL(含次氯酸钙 10 μg)次氯酸钙溶液,做加标测定,回收率为 68.00%~99.00%,高浓度曲线检出限为 0.01 mg·L⁻¹,低于国标中的检出限 0.03 mg·L⁻¹,检测数据可靠.

1.5 健康风险评价

本研究采用美国环保局(EPA)推荐的健康风险评估模型^[20]对武汉典型饮用水水源中检出的 DBPs 进行健康风险评估.包括致癌风险和非致癌健康风险评估,具体公式如下:

致癌风险指数(*R*):

$$R = CDI_{\text{oral}} \times SF_{\text{oral}} \quad (1)$$

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

式中, CDI_{oral} 为人体每天饮水摄入量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$; SF_{oral} 为物质的致癌斜率参数, $\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$, 具体数值参考相关研究及 EPA 综合风险信息数据库(IRIS)确定; CW 为物质在水中检出浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; IR 为日饮水量, $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$, 查阅文献^[21, 22], 成人为 1.85 $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$, 儿童为 1.00 $\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, 365 $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为暴露持续时间, 参考中国统计数据, 成年男性为 74 a, 成年女性为 78 a, 儿童推荐为 12 a; BW 为体重, 成年男性为 67.7 kg, 成年女性平均为 59.6 kg, 儿童为 26.8 kg^[23]; AT 代表暴露时间, 成年男性为 27 010 d、成年女性为 28 470 d 和儿童为 4 380 d.

非致癌风险指数(HI):

$$HI = CDI_{\text{oral}} / RfD \quad (3)$$

式中, RfD 为非致癌参考量, $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 取值根据 IRIS 确定.

1.6 生态风险评价

本研究将采用风险商值法进行生态风险评估,在进行生态风险评估时,首先要进行低剂量暴露效应评价,也就是最大限度不发生不可接受效应的最大质量浓度.在进行藻类、蚤类和鱼类等 3 个营养级急性毒性数据 [$L(E)C_{50}$] 对 PNEC 进行外推时选择评价系数为 1 000^[24].而对于污染物质的暴露评价可以通过模型预测或者环境中实际测得的数据^[25],本研究选择实际测得数据进行评价,具体公式如下:

$$RQ = MEC / PNEC \quad (4)$$

式中, RQ 为风险商值; MEC 为环境中物质实际测得的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; $PNEC$ 为预测的对水生生物无影响浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.目前关于 DBPs 物质 PNEC 值的文献报道还相对较少,本研究仅选取了三氯甲

烷、三溴甲烷、一溴二氯甲烷和二溴一氯甲烷这 4 种 DBPs 进行生态风险评估,其 PNEC 值见表 1.

表 1 不同 DBPs 对应的 PNEC 值¹⁾

Table 1 PNEC of different DBPs		
DBPs	评价因子	PNEC/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
三氯甲烷	1 000	4. 16
三溴甲烷	1 000	100. 00
一溴二氯甲烷	1 000	60. 00
二溴一氯甲烷	1 000	100. 00

1) 推导依据为急性毒性 $[L(E)C_{50}]$,相关数据参见文献[25]

2 结果与讨论

2.1 残余消毒剂的检出情况

新冠疫情发生以来,由于城市污水处理设施、医院和城市道路等公共场所大量使用次氯酸钠等含氯消毒剂进行病毒消杀和预防,这些消毒剂随着污水排放、雨水冲刷和地表径流进入地表水体中,因

此,水源地水体中残余消毒剂的浓度水平及分布状况值得关注.为了更好地研究武汉典型饮用水水源中 DBPs 的污染情况,本研究对水样中游离氯和总余氯浓度进行了测定,结果见表 2.

由表 2 可知,有超过半数的点位水体中检测出游离氯或总余氯,游离氯和总余氯最大浓度均为 $0.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 游离氯可以与水体中氨氮结合生成氯胺,也可以与部分有机物结合生成有机氯胺. 游离氯和氯胺均具有一定的氧化性,会对水生态环境里的微生物和动植物等造成氧化胁迫压力,最终会导致水域生态环境遭到破坏^[26]. 地表水环境质量标准(GB 3838-2002)^[27]中游离氯浓度的标准限值为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,武汉部分水源地水体残余消毒剂含量已经超过了国家标准限值,可能造成一定的健康和生态风险.

表 2 武汉典型饮用水水源中游离氯和总余氯浓度¹⁾

Table 2 Concentrations of free chlorine and total residual chlorine in a typical drinking water source in Wuhan					
点位	游离氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总余氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	点位	游离氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	总余氯/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	ND	ND	14	ND	ND
2	ND	ND	15	ND	ND
3	0.01	0.02	16	ND	ND
4	0.01	0.01	17	ND	0.04
5	ND	ND	18	0.02	0.02
6	0.01	0.01	19	0.01	0.03
7	ND	ND	20	0.01	0.01
8	0.01	0.01	21	ND	0.03
9	ND	ND	22	0.03	0.03
10	0.03	0.03	23	0.02	0.02
11	ND	ND	24	0.01	0.01
12	0.01	0.01	25	0.04	0.04
13	ND	ND	26	0.02	0.04

1) ND 表示未检出

通过分析游离氯超标点位分布情况可以发现,超标点位主要在石洋污水处理厂和新城污水处理厂排口附近及下游 5 km 范围内.可以推测,城市污水厂尾水加氯消毒是造成水源地游离氯超标的主要原因.因此,建议城市污水处理厂在强化消毒的同时注意采取必要的脱氯措施,或者考虑减少含氯消毒剂的用量,使用其它类型的消毒剂进行替代.

2.2 DBPs 的检出情况

本研究从 26 个点位中选取了 10 个代表性点位,进行了 34 种消毒副产物的检测.结果显示,共有 24 种消毒副产物被检出,检出率及检出情况如表 3 所示.

在 24 种检出的 DBPs 中,三氯甲烷、二氯丙烷、二氯乙醛、三溴乙醛、二溴一氯乙腈和二溴乙腈等 6 种物质检出率为 100.00%,即在 10 个代表性点位均被检出;一溴二氯甲烷、三溴甲烷、二溴乙醛、

一溴一氯乙醛、二溴一氯乙醛和二氯乙酰胺这 6 种 DBPs 的检出率也达到 80.00%~90.00%;二溴一氯甲烷、二氯丙酮、三氯乙腈和一溴一碘乙酰胺检出率较低均为 10.00%,也即仅在 1 个点位被检出.被检出的 24 种 DBPs 的总浓度范围为 $0.11\sim104.73\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $7.26\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其中浓度最高的为三氯甲烷,检出范围为 $9.98\sim11.15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值达到 $10.47\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,高于我国部分饮用水水厂出水中三氯甲烷的平均值($7.98\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[29];其次是二溴一氯乙腈,检出范围为 $0.54\sim3.29\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $1.89\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;其余 DBPs 的浓度均较低,平均值均低于 $2.00\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 武汉典型饮用水水源中检出的各 DBPs 浓度均满足地表水环境质量标准(GB 3838-2002)和生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)规定的限值,但是三氯甲烷浓度相对较高,需要持续关注.为了更进一步了解

武汉典型饮用水水源地水体在研究前(新冠疫情发生前)的 DBPs 的污染情况,本研究参考了中国环境监测总站所提供的 2018 年和 2019 年的 18 个典型

饮用水源地月度例行的常规监测数据,其中包括三氯甲烷、三溴甲烷、二氯乙烷和三氯乙醛这 4 种 DBPs 单体,结果是其均未检出.

表 3 武汉典型饮用水水源中 DBPs 的检出情况¹⁾

Table 3 Detection of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan					
DBPs	检出频率/%	检出范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	地表水标准限值 ^[27] / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	生活饮用水标准限值 ^[28] / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
三氯甲烷	100.00	9.98 ~ 11.15	10.47	0.06	0.06
二氯丙烷	100.00	0.31 ~ 0.99	0.75	—	—
一溴二氯甲烷	90.00	ND ~ 0.39	0.32	—	0.06
二溴一氯甲烷	10.00	ND ~ 0.23	0.02	—	0.10
三溴甲烷	80.00	ND ~ 0.19	0.13	0.10	0.10
二氯乙醛	100.00	0.23 ~ 0.68	0.45	—	—
三氯乙醛	20.00	ND ~ 0.27	0.05	0.01	0.01
二溴乙醛	80.00	ND ~ 0.15	0.10	—	—
一溴一氯乙醛	80.00	ND ~ 0.19	0.09	—	—
二溴一氯乙醛	80.00	ND ~ 0.37	0.18	—	—
三溴乙醛	100.00	0.10 ~ 1.76	0.70	—	—
二氯丙酮	10.00	ND ~ 0.12	0.01	—	—
三氯乙腈	10.00	ND ~ 0.12	0.01	—	—
二溴一氯乙腈	100.00	0.54 ~ 3.29	1.89	—	—
二溴乙腈	100.00	0.73 ~ 1.14	0.92	—	—
三溴乙腈	70.00	ND ~ 0.91	0.30	—	—
二氯硝基甲烷	50.00	ND ~ 0.48	0.14	—	—
二氯乙酰胺	90.00	ND ~ 0.42	0.27	—	—
一溴一氯乙酰胺	20.00	ND ~ 0.14	0.03	—	—
一氯一碘乙酰胺	20.00	ND ~ 0.16	0.03	—	—
一溴二氯乙酰胺	60.00	ND ~ 1.19	0.21	—	—
一溴一碘乙酰胺	10.00	ND ~ 0.11	0.01	—	—
二溴一氯乙酰胺	40.00	ND ~ 1.10	0.26	—	—
三溴乙酰胺	20.00	ND ~ 0.42	0.08	—	—
24 种消毒副产物	—	0.11 ~ 104.73	7.26	—	—

1) “—”表示该单体暂无国家标准; ND 表示未检出

同时对 DBPs 浓度在各点位的检出情况进行分析(见图 2),可以看出除三氯甲烷和二溴一氯乙腈以外,其余 22 种 DBPs 的均值均在 $1.00\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以

内. 三氯甲烷的浓度均值超过了 $10\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在所有点位的浓度均高于其他 DBPs,二溴一氯乙腈在大多数点位的浓度也超过了其他 DBPs,同时三溴乙酰胺

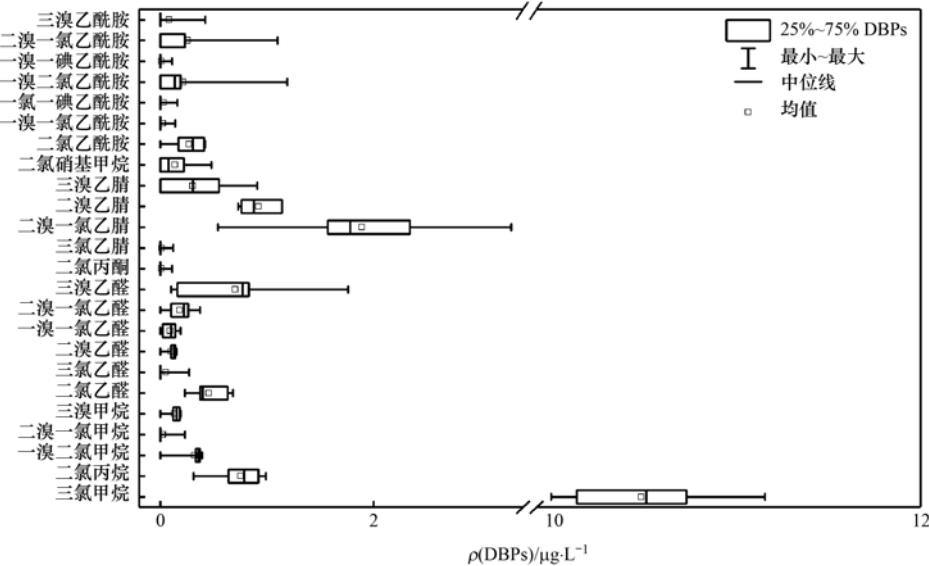


图 2 武汉典型饮用水水源中 DBPs 浓度箱线图

Fig. 2 Boxplot of DBPs concentration in typical drinking water sources in Wuhan

胺、二溴一氯乙酰胺和一溴二氯乙酰胺等 3 种 DBPs 物质在个别点位检出浓度远高于其他点位或未检出点位。如图 3 所示, 10 个代表性采样点位 ρ (总 DBPs) 范围为 $16.05 \sim 20.27 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $17.44 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 三氯甲烷在各代表性点位均有较高浓度的检出, 在总 DBPs 中所占质量分数最高, 达到 $51.00\% \sim 67.10\%$ 。

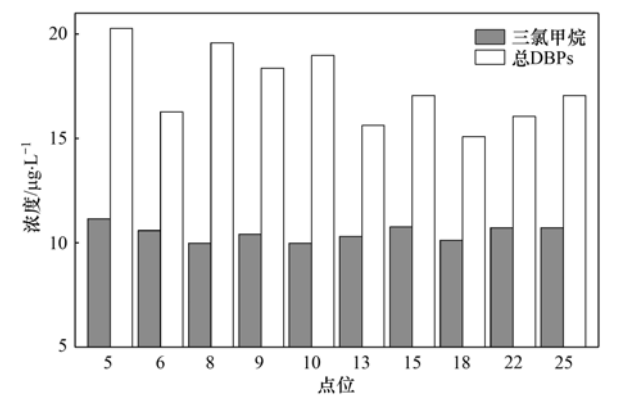


图 3 武汉典型饮用水水源中三氯甲烷和总 DBPs 浓度
Fig. 3 Concentrations of chloroform and total DBPs in typical drinking water sources in Wuhan

2.3 与国内外湖库饮用水中 DBPs 检出对比

为了进一步研究武汉典型饮用水水源水体中 DBPs 的污染情况, 本研究将武汉典型饮用水水源水体中 DBPs 的检出与国内外湖库以及武汉饮用水源地在新冠疫情发生前的检出情况进行了对比分析, 结果见表 4。从中可知, 武汉典型饮用水源地水体(原水)和上海水库水源水(水厂出水)检出 DBPs 种类较多, 远高于我国松花江、太湖和长江以及菲律宾马尼拉和巴基斯坦拉瓦尔品第(水厂出水), 但所有水源类型检出 DBPs 单体均以三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)为主, 与之前的研究结果一致。从检出浓度来看, 本研究区域作为水源地水体(原水)检出 DBPs 浓度远高于同类型的长江饮用水源水(原水)、太湖饮用水源水(原水)、上海水库水源水(原水)和松花江哈尔滨段水体(原水), 与菲律宾马尼拉地下水(原水)和废水污染程度相当, 由此说明武汉典型饮用水源地水体在疫情防控期间大量消毒剂的使用下确实受到了一定的污染。相比同一湖库水源水体原水发现, 在进行水厂消毒之后水体中检出的 DBPs 浓度和单体种类都有很明显地增加, 说

表 4 武汉典型饮用水源水体 DBPs 检出与国内湖库对比¹⁾

Table 4 Comparison of the detection of DBPs in Wuhan's typical drinking water sources with lakes and reservoirs in China				
水源	年份	DBPs 种类 (总浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	主要检出物质及浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
武汉典型饮用水源水(原水)	2020(疫情下)	24(418.08)	三氯甲烷(10.47)、二溴一氯乙腈(1.89)、二溴乙腈(0.92)、二氯丙烷(0.75)和一溴二氯甲烷(0.32)	本研究
长江饮用水源水(原水)	2014~2016	5(5.23)	三氯甲烷(0.19)、三氯乙酸(0.84)、二氯乙酸(0.22)、一溴二氯甲烷(0.05)和二溴一氯甲烷(0.04)	[30]
太湖饮用水源水(原水)	2014~2016	2(19.80)	三氯乙酸(4.75)和二氯乙酸(0.20)	[30]
长江饮用水源水(水厂出水)	2014~2016	5(31.13)	三氯甲烷(11.79)、三氯乙酸(8.77)、二氯乙酸(2.88)、一溴二氯甲烷(5.83)和二溴一氯甲烷(1.84)	[30]
太湖饮用水源水(水厂出水)	2014~2016	6(29.03)	三氯甲烷(5.04)、三氯乙酸(1.45)、二氯乙酸(0.49)、一溴二氯甲烷(8.16)、二溴一氯甲烷(9.84)和三溴甲烷(4.05)	[30]
上海浦东饮用水(水厂出水)	2012~2014	6(31.38)	三氯甲烷(7.75)、二溴一氯甲烷(6.49)、一溴二氯甲烷(5.56)、三溴甲烷(4.63)、三氯乙酸(4.10)和二氯乙酸(1.98)	[31]
武汉饮用水源水(水厂出水)	2018(疫情前)	5(—)	三氯甲烷(20.00)、一氯二溴甲烷(0.30)、二氯一溴甲烷(3.40)、三氯乙醛(4.00)和二氯甲烷(0.02) ²⁾	[32]
上海水库水源水(原水)	2020	5(2.02 ± 1.16)	三氯甲烷(1.55 ± 0.66)、二氯一溴甲烷(0.03 ± 0.05)、一氯二溴甲烷(0.28 ± 0.36)、三氯乙酸(0.14 ± 0.06)和二氯乙酸(0.02 ± 0.03)	[33]
上海水库水源水(水厂出水)	2020	25(—)	三氯甲烷(8.73 ± 1.48)、二氯一溴甲烷(3.58 ± 0.83)、一氯二溴甲烷(3.05 ± 0.71)、三氯乙酸(2.21 ± 0.12)和二氯乙酸(2.57 ± 0.48)	[33]
松花江哈尔滨段水体(原水)	2016	1(3.44)	三氯甲烷(3.44)	[34]
松花江哈尔滨段水体(消毒后)	2016	10(188.79)	三氯甲烷(85.23)、二氯一溴甲烷(17.09)、一氯二溴甲烷(1.29)、二氯丙酮(18.83)和水合三氯乙醛(42.82)	[34]
菲律宾马尼拉	2012	—	溴酸盐自来水中为 $7.00 \sim 138.00$; 河流平均 $15.00 \sim 80.00$; 地下水(246.00)和废水(342.00)	[35]
巴基斯坦拉瓦尔品第(水厂出水)	2013	4(142.30)	THMs(三氯甲烷、三溴甲烷、二氯一溴甲烷和一氯二溴甲烷)(142.30)	[36]

1) “—”表示文献中无此数据; 2) 此行数据为中位数

明消毒剂的使用确实促进了水体中消毒副产物的产生,进一步说明了武汉典型饮用水源水体中过高浓度的 DBPs 受到了污水处理厂点源排放和疫情期间大量含氯消毒剂使用后通过雨水冲刷及地表径流汇入等两方面的影响。

3 健康风险评估

为了尽可能全面评估人体暴露在低剂量 DBPs 下的健康风险,本研究将对所检出的 4 种主要 DBPs 物质均纳入风险评价范围,在评价健康风险时只考虑了通过饮水途径所造成的健康风险,其相关的致癌斜率因子与非致癌参考剂量见表 5。

表 5 各消毒副产物致癌斜率因子与非致癌参考剂量参数¹⁾

Table 5 Carcinogenic slope factor and non-carcinogenic reference dose parameters of DBPs

项目	物质	RfD	SF _{oral}
		/mg·(kg·d) ⁻¹	/kg·d·mg ⁻¹
DBPs	三氯甲烷	0.01	0.031 0
	二溴一氯甲烷	0.02	0.084 0
	一溴二氯甲烷	0.02	0.062 0
	三溴甲烷	0.02	0.007 9

1) 数据来自文献[37]

武汉典型饮用水水源中 DBPs 健康风险评估结果如表 6 所示。成年男性、成年女性和儿童这 3 种人群暴露于三卤甲烷 (THMs) 的致癌风险指数范围

表 6 武汉典型饮用水水源中 DBPs 致癌和非致癌风险指数

Table 6 Carcinogenic and non-carcinogenic risk indexes of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan

DBPs	致癌风险指数 × 10 ⁻⁶			非致癌风险指数 × 10 ⁻²		
	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
三氯甲烷	8.45 ~ 9.45	9.60 ~ 10.73	11.54 ~ 12.90	2.73 ~ 3.05	3.10 ~ 3.46	3.72 ~ 4.16
一溴二氯甲烷	0 ~ 0.66	0 ~ 0.75	0 ~ 0.90	0 ~ 0.05	0 ~ 0.06	0 ~ 0.07
二溴一氯甲烷	0 ~ 0.53	0 ~ 0.60	0 ~ 0.72	0 ~ 0.03	0 ~ 0.04	0 ~ 0.04
三溴甲烷	0 ~ 0.04	0 ~ 0.05	0 ~ 0.06	0 ~ 0.03	0 ~ 0.03	0 ~ 0.04
THMs	8.45 ~ 10.68	9.60 ~ 12.13	11.54 ~ 14.58	2.73 ~ 3.16	3.10 ~ 3.59	3.72 ~ 4.31

4 生态风险评估

对 10 个代表性点位测得的三氯甲烷、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和三溴甲烷这 4 种 THMs 进行了生态风险评估,通过检出物质的浓度 (PEC) 与对应的无影响浓度 (PNEC) 比值,可计算得到各物质的生态风险商值 RQ,结果如表 7 所示。根据 EPA 标准,当 RQ < 0.10 时,水体中污染物不会对水生生物造成风险;当 RQ 值介于 0.10 ~ 1.00 之间时,表明对于水生生物的暴露在安全水平,但应该持续关注水体相关的污染情况,避免对水生生物产生较高的生态风险;当 RQ > 1.00 时,说明相关污染物会对水生生物产生较高生态风险,需要进行水质长期监测并提供合理的处理措施。由表 7 可知,武汉典型

分别为 $8.45 \times 10^{-6} \sim 10.68 \times 10^{-6}$ 、 $9.60 \times 10^{-6} \sim 12.13 \times 10^{-6}$ 和 $11.54 \times 10^{-6} \sim 14.58 \times 10^{-6}$, 4 种 DBPs 的致癌与非致癌风险指数大小排序均为:三氯甲烷 > 一溴二氯甲烷 > 二溴一氯甲烷 > 三溴甲烷,而由表 3 可知,4 种 DBPs 平均检出浓度大小排序为:三氯甲烷 > 一溴二氯甲烷 > 三溴甲烷 > 二溴一氯甲烷,由此可以得出,致癌与非致癌健康风险指数的大小不仅与浓度相关,还可能与该物质的化学特性(如致癌因子指数和非致癌参考剂量)相关,进一步说明为了更好地保护饮用水源地周边居民饮水安全,迫切需要了解 DBPs 的浓度和风险评估数据。致癌风险指数均处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内,说明武汉典型饮用水水源中 DBPs 对人体所产生的致癌风险处于可接受范围,但已经超过了风险阈值,对敏感人群可能存在潜在致癌风险;非致癌风险指数范围分别为 $2.73 \times 10^{-2} \sim 3.16 \times 10^{-2}$ 、 $3.10 \times 10^{-2} \sim 3.59 \times 10^{-2}$ 和 $3.72 \times 10^{-2} \sim 4.31 \times 10^{-2}$,单个和总非致癌风险结果均远小于 1,说明暴露于 THMs 的非致癌健康风险在可接受范围内。综合来看,武汉典型饮用水水源中 DBPs 的健康风险在可接受范围内,但致癌风险均超过了风险阈值(10^{-6}),特别是对儿童的致癌与非致癌风险指数相对较高,说明儿童更容易受到污染物暴露所产生的健康危害,这与 Shi 等^[38]的研究结果一致。

表 7 武汉典型饮用水水源中 DBPs 的生态风险

Table 7 Ecological risk of DBPs in typical drinking water sources in Wuhan

点位	三氯甲烷	一溴二氯甲烷 × 10 ⁻³	二溴一氯甲烷 × 10 ⁻³	三溴甲烷 × 10 ⁻³	THMs
5	2.68	6.00	0	1.40	2.69
6	2.55	6.20	0	1.80	2.55
8	2.40	4.80	0	1.90	2.41
9	2.50	5.80	0	1.60	2.51
10	2.40	6.00	0	1.90	2.41
13	2.48	0	2.30	0	2.48
15	2.59	6.50	0	0	2.59
18	2.43	5.70	0	1.30	2.44
22	2.58	6.50	0	1.20	2.58
25	2.58	5.50	0	1.80	2.58

饮用水水源 10 个代表性点位中 THMs 的生态风险商值范围为 2.41 ~ 2.69, 其中三氯甲烷的生态风险商值范围为 2.40 ~ 2.68, 均大于 1, 表明具有较高风险水平, 其他 3 种物质生态风险商值均远小于 0.10, 不会对水生生物造成风险。三氯甲烷是 DBPs 中最常见的一种, 其浓度与含氯消毒剂的使用量有着直接的关联。武汉水源地水体中三氯甲烷表现出较高的生态风险, 这可能是由于武汉市城区以及水源地上游过度使用含氯消毒剂造成的, 因此, 也进一步说明了科学合理使用消毒剂的必要性。

5 结论

(1) 武汉典型饮用水水源地部分点位游离氯超过地表水环境质量标准, 主要集中在污水处理厂排口附近及下游 5 km 范围内, 城市污水厂尾水加氯消毒和疫情期间大量含氯消毒剂使用的面源汇入是造成水源地游离氯超标的主要原因。

(2) 武汉典型饮用水水源地 10 个代表性点位中共有 24 种 DBPs 被检出, 检出率范围为 10.00% ~ 100.00%, 总浓度范围 0.11 ~ 104.73 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 7.26 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 三氯甲烷浓度最高, 检出范围为 9.98 ~ 11.15 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 10.47 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 一溴一碘乙酰胺浓度最低, 范围为 ND ~ 0.11 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 0.01 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(3) 武汉典型饮用水水源中 DBPs 物质浓度均低于地表水环境质量标准和生活饮用水卫生标准规定的限值, 三氯甲烷浓度高于国内部分饮用水中三氯甲烷平均浓度, 其他 DBPs 单体与国内外污染水平相比处于中低水平, 检出 DBPs 总浓度偏高。

(4) 武汉典型饮用水水源中 DBPs 不会对人体产生致癌和非致癌健康风险, 儿童所受的健康风险水平高于成人; 三氯甲烷对水生生物产生较高的生态风险, 需要引起高度关注。建议城市污水厂等公共设施合理使用含氯消毒剂。

参考文献:

- [1] Rook J J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters[J]. *Water Treatment Examination*, 1974, **23**: 234-243.
- [2] 张瑜, 丁婷婷, 肖欣欣, 等. 我国淡水环境中卤乙酸类消毒副产物的预测无效应浓度研究[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(7): 1624-1631.
Zhang Y, Ding T T, Xiao X X, *et al.* Predicted non-effect concentrations for disinfection by-products of haloacetic acids (HAAs) in freshwater environment in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(7): 1624-1631.
- [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]. *Reviews in Mutation Research*, 2007, **636**(1-3): 178-242.
- [4] Culin 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.
- [5] Mishra B K, Gupta S K, Sinha A. Human health risk analysis from disinfection by-products (DBPs) in drinking and bathing water of some Indian cities[J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 2014, **12**(1), doi: 10.1186/2052-336X-12-73.
- [6] 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.
- [7] Liu X Y, Chen L, Yang M T, *et al.* The occurrence, characteristics, transformation and control of aromatic disinfection by-products: a review [J]. *Water Research*, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116076.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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): 237-250.
- [12] Cantor K P, Lynch C F, Hildesheim M E, *et al.* Drinking water source and chlorination byproducts in Iowa. III. Risk of brain cancer[J]. *American Journal of Epidemiology*, 1999, **150**(6): 552-560.
- [13] Diana M, Felipe-Sotelo M, Bond T, *et al.* Disinfection byproducts potentially responsible for the association between chlorinated drinking water and bladder cancer: a review [J]. *Water Research*, 2019, **162**: 492-504.
- [14] Rahman M B, Cowie C, Driscoll T, *et al.* Colon and rectal cancer incidence and water trihalomethane concentrations in New South Wales, Australia[J]. *BMC Cancer*, 2014, **14**(1), doi: 10.1186/1471-2407-14-445.
- [15] Moser V C, Phillips P M, Medaniel K L, *et al.* Neurotoxicological evaluation of two disinfection by-products, bromodichloromethane and dibromoacetonitrile, in rats [J]. *Toxicology*, 2007, **230**(2-3): 137-144.
- [16] Nieuwenhuijsen M J, Toledano M B, Eaton N E, *et al.* Chlorination disinfection byproducts in water and their association with adverse reproductive outcomes: a review[J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2000, **57**(2): 73-85.
- [17] HJ 586-2010, 水质 游离氯和总氯的测定 N, N-二乙基-1,4-苯二胺分光光度法[S].
- [18] 赵剑超, 潘献辉, 刘昱, 等. DPD 分光光度法测定水中余氯的标准方法的对比[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(20): 106-110.
Zhao J C, Pan X H, Liu Y, *et al.* Comparison of Standards for determination of residual chlorine in water by DPD

- spectrophotometry[J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32** (20): 106-110.
- [19] Carter R A A, Liew D S, West N, *et al.* Simultaneous analysis of haloacetonitriles, haloacetamides and halonitromethanes in chlorinated waters by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Chemosphere*, 2019, **220**: 314-323.
- [20] US EPA. IRIS (Integrated Risk Information System)[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris>, 2021-02-24.
- [21] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷)概要[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册-儿童卷: 6~7岁[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [23] 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>, 2021-04-10.
- [24] 雷炳莉, 孙延枫, 刘倩, 等. 风险污染物短期高剂量暴露下的生态风险评估方法[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3240-3246.
- Lei B L, Sun Y F, Liu J, *et al.* Method of ecological risk assessment for risk pollutants under short-term and high dose exposure in water pollution accident[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3240-3246.
- [25] 罗莹, 刘娜, 孙善伟, 等. 我国地表水中典型 DBPs 的暴露水平及生态风险[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(4): 1806-1814.
- Luo Y, Liu N, Sun S W, *et al.* Occurrence and ecological risk of typical DBPs in Chinese surface water[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(4): 1806-1814.
- [26] 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 等. 溴酸盐对水生生物的急性毒性效应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 756-764.
- Wang Z W, Liu D M, Zhang W J, *et al.* Acute toxic effects of bromate on aquatic organisms[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 756-764.
- [27] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [28] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [29] 王晓霜, 董少霞. 中国部分城市饮用水中三卤甲烷类健康风险评估[J]. *中国公共卫生*, 2020, **36**(9): 1384-1388.
- Wang X S, Dong S X. Health risk assessment of trihalomethanes in drinking water in some cities of China: a literature study[J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2020, **36**(9): 1384-1388.
- [30] 罗兰. 江苏某地长江、太湖水源饮用水中有机物的致突变性、消毒副产物的变化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- Lou L. The variation of mutagenicity of organic compounds and the distribution of disinfection by-products in drinking water from the Yangtze River and Taihu Lake in certain area of Jiangsu Province[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [31] 郝莉鹏, 孙乔, 刘晓琳, 等. 上海市浦东新区饮用水三卤甲烷和卤乙酸含量及其健康风险评估[J]. *环境与职业医学*, 2014, **31**(6): 442-447.
- Hao L P, Sun Q, Liu X L, *et al.* Levels and health risk assessment of trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water in Pudong new area, Shanghai[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2014, **31**(6): 442-447.
- [32] 潘锋, 王佩, 刘俊玲. 武汉市饮用水中氯化消毒副产物风险评估[J]. *公共卫生与预防医学*, 2019, **30**(2): 109-111.
- Pan F, Wang P, Liu J L. Health risk assessment of chlorination disinfection by-products in drinking water in Wuhan City[J]. *Journal of Public Health and Preventive Medicine*, 2019, **30**(2): 109-111.
- [33] 李永珍, 何更生, 詹铭, 等. 上海市水源水及出厂水中卤甲烷、卤乙酸、卤乙腈类消毒副产物含量及健康风险评估[J]. *环境与职业医学*, 2021, **38**(5): 460-466.
- Li Y Z, He G S, Zhan M, *et al.* Levels and health risk assessments of halomethanes, haloacetic acids, and haloacetonitriles disinfection by-products in source and finished water in Shanghai[J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2021, **38**(5): 460-466.
- [34] 张忠祥, 赵琦, 刘玉蕾, 等. 气相色谱法同时测定水中12种挥发性消毒副产物[J]. *分析化学*, 2017, **45**(8): 1203-1208.
- Zhang Z X, Zhao Q, Liu Y L, *et al.* Determination of twelve kinds of volatile disinfection byproducts in drinking water by gas chromatography with electron capture detector[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, **45**(8): 1203-1208.
- [35] Genuino H C, Espino M P B. Occurrence and sources of bromate in chlorinated tap drinking water in Metropolitan Manila, Philippines[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **62**(3): 369-379.
- [36] Amjad H, Hashmi I, Rehman M S U, *et al.* Cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in urban drinking water supplies of Pakistan[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **91**: 25-31.
- [37] 刘俊萍, 于健全, 李青松, 等. 浙江省H市供水系统消毒副产物及其健康风险评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5302-5308.
- Liu J P, Yu J Q, Li Q S, *et al.* Disinfection by-products and the relevant health risk in the water supply system in H City of Zhejiang Province[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5302-5308.
- [38] Shi W, Zhang F X, Zhang X W, *et al.* Identification of trace organic pollutants in freshwater sources in Eastern China and estimation of their associated human health risks[J]. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(5): 1099-1106.

CONTENTS

A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China	LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> (577)
Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability	ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo (586)
Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou	HUANG Wen, WANG Sheng-li (597)
PM _{2.5} Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models	WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> (608)
Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM _{2.5} During Summer in Central China	SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> (619)
Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City	CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (629)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM _{2.5} in Zhejiang Province	LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> (639)
Impact of Meteorological Conditions on PM _{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019	PAN Chen, KANG Zhi-ming (649)
Comparison and Analysis of PM _{2.5} Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model	GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> (663)
Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020	FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> (675)
Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O ₃ Pollution Event in Ji'nan	SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> (686)
Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong	YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> (696)
Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass	ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> (707)
Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer	YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> (714)
Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China	ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> (723)
Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts	ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> (735)
Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020	TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao (743)
Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China	XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun (752)
Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake	XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> (762)
Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events	ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (770)
Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen	BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> (782)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City	PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River	GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> (803)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example	CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (813)
Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai	YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> (826)
Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang	GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (837)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake	LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> (847)
Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake	LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> (859)
Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation	WANG Zi-qiao, LI Xu-yong (867)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> (878)
Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration	QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> (887)
Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar	CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (896)
Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water	ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> (907)
Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge	HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> (920)
Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance	FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> (928)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan	LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> (936)
Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain	ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song (946)
Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example	JU Tie-nan, LEI Mei (957)
Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China	MU De-miao, SUN Yue-bing (965)
Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area	HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> (975)
Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas	ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> (985)
Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years	REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> (995)
Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth	CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> (1004)
Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments	WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> (1015)
Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation	CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (1023)
Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat	LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> (1031)
Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (1040)
Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i>	LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> (1050)
Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas	JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> (1059)
Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils	DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> (1069)
Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil	HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> (1077)
Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine	HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> (1089)
Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province	WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> (1097)
Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta	XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> (1108)