

含氯消毒副产物的种类、危害与地表水污染现状

朱红霞, 薛荔栋, 刘进斌, 陈 焯, 金小伟, 袁 懋*

中国环境监测总站, 北京 100012

摘要: 新型冠状病毒肺炎(COVID-19, 简称“新冠肺炎”)疫情期间, 含氯消毒剂被大量使用, 含氯消毒剂会与水中本底存在的有机物反应生成含氯消毒副产物(CDBPs), CDBPs包括卤甲烷、卤乙酸、无机卤氧酸盐、卤代乙腈、卤化氰、卤化硝基甲烷、卤代乙醛和其他CDBPs。梳理了各类CDBPs的危害, 结果表明: 大部分CDBPs具有致癌、致畸和致突变的“三致”毒性, 在自然水体中威胁水生生物安全和人群健康; 虽然现阶段大量研究集中于饮用水中的消毒副产物, 但也有少量研究证实地表水中已有消毒副产物的检出。新冠肺炎疫情期间含氯消毒剂使用量较大, 建议对余氯呈阳性的地表水继续开展主要CDBPs的筛查, 有针对性地开展监测, 推动含氯消毒剂的合理使用; 同时, 应加强监管, 在地表水质量标准修订时完善消毒副产物指标, 在相关行业废水控制标准中增加消毒副产物指标, 避免对地表水生态系统造成次生环境影响。

关键词: 含氯消毒副产物(CDBPs); CDBPs种类; “三致”毒性; 污染现状; 地表水

中图分类号: X52

文章编号: 1001-6929(2020)07-1640-09

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.14

Types, Hazards and Pollution Status of Chlorinated Disinfection By-Products in Surface Water

ZHU Hongxia, XUE Lidong, LIU Jinbin, CHEN Ye, JIN Xiaowei, YUAN Mao*

China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China

Abstract: During the outbreak of novel coronavirus pneumonia (COVID-19), chlorinated disinfectants were widely used. The chlorinated disinfectants will react with the organic matter in surface water, and the reaction products are chlorinated disinfection by-products (CDBPs). Common CDBPs include halomethanes, haloacetic acids, inorganic haloxate, haloacetonitriles, cyanogen halides, halonitromethane, haloacetaldehyde and other CDBPs. In view of the continued discovery and study of CDBPs, the types and hazards of CDBPs reported in the literature were reviewed. The results indicate that most of the CDBPs have ‘three effects’ of carcinogenic, teratogenic and mutagenic toxicity, threatening aquatic biosecurity and human health. Although the current research mainly focuses on CDBPs in drinking water, a few studies have confirmed that CDBPs are also detected in surface water. Because large amount of chlorine disinfectants are used during the COVID-19 outbreak, it is recommended to screen the main CDBPs in the surface water containing residual chlorine, conduct targeted monitoring, promote the rational use of disinfectants and strengthen supervision. CDBPs should be added to surface water quality standards and industry wastewater discharge standards. Finally, the secondary environmental impacts on the surface water ecosystems can be avoided.

Keywords: chlorinated disinfection by-products (CDBPs); types of CDBPs; ‘three effects’ toxicity; pollution situation; surface water

为抑制新型冠状病毒(2019-nCoV)的扩散传播, 消毒剂在医院、污水处理厂等地被大量使用。国家卫生健康委员会在抗击疫情过程中先后发布了7版《新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行)》, 指出可以有效灭活新型冠状病毒的消毒方式或消毒剂包括紫外线、高温, 以及乙醚、75%乙醇、含氯消毒剂、过氧乙酸和氯仿等脂溶剂^[1]。在新型冠状病毒肺炎(COVID-19,

简称“新冠肺炎”)疫情期间生态环境部对医疗污水和城镇污水的监管工作进一步加强, 印发了《关于做好新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗污水和城镇污水监管工作的通知》(环办水体函[2020]52号), 要求切实加强对医疗污水消毒情况的监督检查, 严禁未经消毒处理或处理未达标的医疗污水排放, 并且要督促城镇污水处理厂切实加强消毒工作。消毒剂种类较

收稿日期: 2020-04-15 修订日期: 2020-06-03

作者简介: 朱红霞(1986-), 女, 北京人, 高级工程师, 硕士, 主要从事环境监测分析方法研究与评价研究, zhuhx@cnemc.cn.

* 责任作者, 袁懋(1974-), 男, 吉林公主岭人, 正高级工程师, 博士, 主要从事环境监测分析方法与评价研究, yuanmao@cnemc.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2017ZX07302-01)

Supported by Major Science and Technology Water Project of the Ministry of Science and Technology, China (No.2017ZX07302-01)

多,但 GB 18466—2005《医疗机构水污染物排放标准》中只有总余氯的限值指标(0.5 mg/L),而 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中则没有消毒剂的相关控制指标。经消毒处理后的水样进入自然水体后易出现消毒剂残留,2020年1—3月新冠肺炎疫情期间,生态环境部针对饮用水源地的监测中共检出余氯147次^[2]。消毒剂的检出,也预示着 DBPs(消毒副产物)的存在^[3]。

鉴于含氯消毒剂是控制病原微生物污染和传播的高效消毒剂,在疫情期间被广泛使用^[4]。但残留在地表水中的含氯消毒剂会进一步与水中天然有机物等物质反应,生成毒性强、危害人体健康的 CDBPs(含氯消毒副产物)^[5]。在现有研究基础上,该研究对水中 CDBPs 的种类、危害进行梳理,筛选出含量较高、毒性较强的 CDBPs,并结合国内外研究成果分析地表水中 CDBPs 的污染现状,以期为地表水中 DBPs 的筛查、监测以及疫情过后的生态和健康风险评估提供一定的技术支持。

1 CDBPs 的种类和危害

1.1 国内外水质标准中的 DBPs

CDBPs 来源于含氯消毒剂,1974年 Rook^[6]发现消毒剂次氯酸和次溴酸会与水中自然存在的有机物

反应生成4种主要的三卤甲烷,分别为三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷,并开启了针对水中 CDBPs 的研究。Richardson^[7]于2002年利用气相色谱质谱和液相色谱质谱技术,在氯消毒后的水中发现了包括卤乙酸在内的600多种 CDBPs。液氯或氯气消毒产生的 CDBPs 主要包括三卤甲烷、四氯化碳、卤代乙酸、卤代乙腈、卤代酮、三氯硝基甲烷和三氯乙醛;氯胺消毒产生的 CDBPs 主要为亲水性化合物,如三氯硝基甲烷、卤代酮和氯化氰;二氧化氯消毒产生的 CDBPs 主要为无机卤酸盐,包括氯酸盐、亚氯酸盐和溴酸盐等^[8-9]。可见,含氯消毒剂的种类不同,生成的 CDBPs 也存在差异。CDBPs 的生成量与消毒剂的用量成正比,如杨品璐^[10]对生活饮用水中 CDBPs 的检测与现状进行了研究,发现卤乙酸的浓度随投氯量的增加而上升,当前驱物总有机碳的浓度与余氯值在1~2之间变化时,卤乙酸生成量将增至最高;QIN 等^[11]在模拟紫外/液氯联合消毒过程中发现,随液氯剂量的增加,三氯硝基甲烷的生成量随之增加。

目前,国内外水质标准中涉及的 DBPs 种类及限值如表1所示。由表1可见,国内外水质标准中有机 DBPs 和无机 DBPs 均有涉及(3~14种),其中,三卤

表1 国内外水质标准中 DBPs 种类及限值

Table 1 The limit of DBPs in domestic and foreign water quality standards

标准名称	DBPs 种类数量	DBPs 种类	数据来源
中国 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》	12	三氯甲烷(0.06)、二氯一溴甲烷(0.06)、一氯二溴甲烷(0.1)、三溴甲烷(0.1)、二氯甲烷(0.02)、四氯化碳(0.002)、1,2-二氯乙烷(0.03)、二氯乙酸(0.05)、三氯乙酸(0.1)、溴酸盐(0.01)、氯酸盐(0.7)、亚氯酸盐(0.7)	文献[12]
中国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》	9	三氯甲烷(0.06)、四氯化碳(0.002)、二氯甲烷(0.02)、1,2-二氯乙烷(0.03)、甲醛(0.9)、乙醛(0.05)、三氯乙醛(0.01)、2,4,6-三氯苯酚(0.2)、2,4-二氯苯酚(0.093)	文献[13]
世界卫生组织《饮用水质量指南(第四版)》	14	三氯甲烷(0.3)、二氯一溴甲烷(0.06)、一氯二溴甲烷(0.1)、三溴甲烷(0.1)、二氯乙酸(0.05)、三氯乙酸(0.2)、溴酸盐(0.01)、亚氯酸盐(0.7)、三氯乙醛(0.01)、二氯乙腈(0.02)、二溴乙腈(0.07)、氯化氰(0.07)、2,4,6-三氯苯酚(0.2)、甲醛(0.9)	文献[14]
美国环境保护局《国家饮用水基本规则:第2阶段 消毒剂及消毒副产物准则》	4	三卤甲烷(0.08)、卤代乙酸(0.06)、溴酸盐(0.01)、亚氯酸盐(1.0)	文献[15]
欧盟理事会《1998年11月3日理事会指令 98/83/EC 人类饮用水质量》	3	三卤甲烷(0.1)、溴酸盐(0.01)、1,2-二氯乙烷(0.003)	文献[16]
加拿大《加拿大饮用水质量指南》	7	溴酸盐(0.01)、四氯化碳(0.002)、氯酸盐(1.0)、亚氯酸盐(1.0)、卤乙酸总量(年均值为0.08)、N-亚硝基二甲胺(0.000 04)、三卤甲烷(年均值0.1)	文献[17]
日本《饮用水水质标准》	13	四氯化碳(0.002)、二氯甲烷(0.02)、氯乙酸(0.02)、二氯乙酸(0.03)、三氯乙酸(0.3)、氯仿(0.06)、二溴甲烷(0.1)、总三卤甲烷(0.1)、一溴二氯甲烷(0.03)、溴仿(0.09)、甲醛(0.08)、1,2-二氯乙烷(0.004)、1,1,1-三氯乙烷(0.3)	文献[18]

注:括号中数值为 DBPs 限值,单位为 mg/L。三卤甲烷包括三氯甲烷、三溴甲烷、二氯一溴甲烷、二溴一氯甲烷;卤代乙酸包括一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、一溴乙酸、二溴乙酸。

甲烷、溴酸盐和卤乙酸出现频率较高,我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中只有 9 种有机 DBPs,未涉及氯溴甲烷、溴甲烷、溴酸盐、卤乙酸、氯酸盐、亚氯酸盐等常见消毒副产物。

1.2 CDBPs 的种类

常见的 CDBPs 有卤甲烷、卤乙酸、无机卤氧酸盐、卤代乙腈、卤化氰、卤化硝基甲烷、卤代乙醛等^[19-21],其中占比较高的 3 类为三卤甲烷、卤乙酸和卤代乙醛(见表 2)。由表 2 可见:卤甲烷、卤乙酸、无机卤氧酸盐等 6 类常见 CDBPs 在相关标准中均有相应的限值要求,如三卤甲烷、一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸、氯酸盐、亚氯酸盐、溴酸盐等;而卤化氰、卤化硝基甲烷、卤代对苯醌等 5 种 CDBPs 在国内外水质标准中均没有相应的限值要求。

表 2 CDBPs 的分类

Table 2 Classification of CDBPs

类别	常见化合物
卤甲烷	三卤甲烷*、二氯甲烷*和四氯化碳*
卤乙酸	一氯乙酸*、二氯乙酸*、三氯乙酸*、溴氯乙酸、溴二氯乙酸、二溴氯乙酸、一溴乙酸*、二溴乙酸*、三溴乙酸、一碘乙酸、溴碘乙酸
无机卤氧酸盐	氯酸盐*、亚氯酸盐*、溴酸盐*
卤代乙腈	氯乙腈、二氯乙腈*、三氯乙腈、溴乙腈、二溴乙腈*、溴氯乙腈和碘乙腈
卤化氰	氯化氰、溴化氰
卤化硝基甲烷	一氯硝基甲烷、二氯硝基甲烷、三氯硝基甲烷、一溴硝基甲烷、二溴硝基甲烷、三溴硝基甲烷、二溴一氯硝基甲烷、一溴二氯硝基甲烷、一氯一溴硝基甲烷
卤代乙醛	一氯乙醛、一溴乙醛、一碘乙醛、二氯乙醛、二溴乙醛、一溴一氯乙醛、三氯乙醛*、三溴乙醛、一溴二氯乙醛、二溴一氯乙醛
其他 CDBPs	卤代苯酚包括 2,4,6-三氯苯酚、2,4-二氯苯酚、2,4,6-三溴苯酚、2,6-二氯-4-硝基苯酚和 2,6-二溴-4-硝基苯酚;卤代对苯醌包括二氯对苯醌、二氯甲基苯醌、三氯对苯醌和二溴对苯醌;卤代酮包括二氯丙酮和三氯丙酮;卤代咪喃酮包括 3-氯-4-(二氯甲基)-5-羟基-2-(5H)-咪喃酮

注:*表示该化合物在国内外水质标准中有相应的限值要求。

1.3 CDBPs 的危害

大部分 CDBPs 有潜在的致癌、致畸、致突变的“三致”毒性^[22],致癌性较强的是卤乙酸、溴酸盐、三卤甲烷,致畸和致突变性较强的是卤代乙腈、卤化氰、卤化硝基甲烷。

1.3.1 卤甲烷

三卤甲烷中常检测到的化合物有三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷。三氯甲烷早在

1976 年被美国癌症协会列为可疑性致癌物,同时证实其对动物具有致癌作用^[23]。IARC (国际癌症研究机构)^[24]指出,三氯甲烷可通过非遗传毒性诱导动物产生肿瘤。Beane 等^[25]研究了不同暴露途径下膀胱癌与三卤甲烷之间的关联,结果表明每日摄入高水平三卤甲烷的人群患膀胱癌的风险较高,高水平三氯甲烷的暴露与膀胱癌之间有中度的关联性。周国宏等^[26]对深圳市 13 个市政水厂出厂水和部分末梢水中的三卤甲烷进行了健康风险评估,结果表明几种三卤甲烷的健康风险大小依次为三氯甲烷>二氯一溴甲烷>一氯二溴甲烷>三溴甲烷,其通过饮水途径暴露的致癌风险均值虽然在美国环境保护局规定的可接受风险之内,但已经存在健康风险。

二氯甲烷和四氯化碳也是氯甲烷类的 CDBPs^[27-28]。二氯甲烷在世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中属于 2A 级(对试验动物致癌性证据充分)致癌物,对雄性和雌性小鼠的肝脏和肺脏具有致癌作用^[29]。四氯化碳则属于高蓄积性化合物,在哺乳动物的肝部可产生蓄积,导致大鼠肝纤维化^[30],诱发肝癌^[31]。

1.3.2 卤乙酸

卤乙酸已被证实对啮齿类动物有致癌、致畸变、致突变作用,有胚胎毒性^[32],致癌危害远高于其他 DBPs 的总和。研究^[33]表明,卤乙酸的致癌风险占 DBPs 总致癌风险的 91.9%以上。Giller 等^[34]用 3 种不同方法测定并比较了几种典型卤乙酸的细胞毒性,毒性大小依次为一溴乙酸>一氯乙酸>二溴乙酸>二氯乙酸>三氯乙酸>三溴乙酸。日常饮水是人体摄入卤乙酸的最主要途径,虽然卤乙酸在 CDBPs 中的含量占比仅为 30%~39%,低于三卤甲烷,但卤乙酸对人体的危害程度较大,甚至有研究者认为卤乙酸是构成 DBPs 致癌风险的首要因素^[35]。

1.3.3 无机卤氧酸盐

亚氯酸盐能引起动物的溶血性贫血和变性血红蛋白血症,可能会抑制血清甲状腺素的作用,引起胎儿小脑重量下降、神经行为作用迟缓或细胞数下降^[36]。氯酸盐是神经、心血管和呼吸道中毒与甲状腺损害贫血的诱因之一,其毒性会降低精子的数量和活力^[37]。植物吸收氯酸盐会抑制植物细胞对 NO_3^- 的吸收和运输,导致植物缺氮,进而影响植物体的生理、营养和生殖生长^[38]。

消毒剂会氧化水中溴离子生成溴酸盐,溴酸盐可造成水生生物(如大型蚤、裸腹蚤、斑马鱼等)生长速度变慢、运动受抑制或死亡率增加^[39]。也可诱发试验

动物肾脏细胞肿瘤^[40],且具有遗传毒性^[41],被国际癌症研究机构定为2B级(对试验动物致癌性证据并不充分)潜在致癌物^[42]。一个体重为70 kg的成年人,每天饮水2 L,当溴酸盐浓度为5、0.5和0.05 μg/L时,其终身致癌率分别为 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} ,致癌风险均较高^[43]。

1.3.4 卤代乙腈和卤化氰

卤代乙腈有极强的致畸和致突变性,其细胞毒性远大于三卤甲烷和卤乙酸等常规CDBPs。卤代乙腈细胞毒性分别约是三卤甲烷、卤乙酸的150、100倍,遗传毒性分别约是三卤甲烷、卤乙酸的13、4倍^[44]。对于卤代乙腈的毒性研究多集中在其遗传毒性,对于致癌性的研究较为鲜见。二氯乙腈已被确认具有致癌、致畸、致突变性。二氯乙腈可导致有机体诱变,引起培养的人体淋巴细胞内DNA链的断裂、诱发皮肤肿瘤。中国仓鼠卵巢细胞试验结果^[45-46]表明,7种卤代乙腈的慢性细胞毒性大小依次为二溴乙腈>碘乙腈≈溴乙腈>溴氯乙腈>二氯乙腈>氯乙腈>三氯乙腈,遗传毒性大小依次为碘乙腈>溴乙腈≈二溴乙腈>溴氯乙腈>氯乙腈>三氯乙腈>二氯乙腈。

1.3.5 卤化硝基甲烷

卤化硝基甲烷具有强效的哺乳动物细胞毒素和基因毒素,可能对人类健康和环境造成危害^[47],并且具有强烈的致突变性,溴代硝基甲烷的细胞毒性和遗传毒性比目前有限值标准的DBPs都强,被美国环境保护局列入优先控制DBPs^[48-49]。研究^[50]显示,几种卤化硝基甲烷对中国仓鼠卵巢(CHO)细胞的慢性细胞毒性(72 h暴露)大小依次为二溴硝基甲烷>二溴一氯硝基甲烷>一溴硝基甲烷>三溴硝基甲烷>一溴二氯硝基甲烷>一溴一氯硝基甲烷>二氯硝基甲烷>一氯硝基甲烷,诱导CHO细胞基因组DNA损伤的强弱依次为二溴硝基甲烷>一溴二氯硝基甲烷>三溴硝基甲烷>三氯硝基甲烷>一溴硝基甲烷>二溴一氯硝基甲烷>一溴一氯硝基甲烷>二氯硝基甲烷>一氯硝基甲烷。

1.3.6 卤代乙醛

从质量浓度上看,卤代乙醛是饮用水中仅次于三卤甲烷和卤乙酸的第三大类CDBPs^[50-51]。卤代乙醛的平均毒性远高于三卤甲烷和卤乙酸,都有一定的基因毒性和致癌性^[52]。卤代乙醛中细胞毒性大小依次为三溴乙醛>一溴乙醛>二溴乙醛>二氯乙醛>二溴一氯乙醛>一碘乙醛>一溴乙醛>二氯一溴乙醛>二氯乙醛>三氯乙醛,基因毒性大小依次为二溴乙醛>一氯乙醛>二溴一氯乙醛>三溴乙醛>一溴乙醛>二氯一溴

乙醛>一溴一氯乙醛>二氯乙醛>一碘乙醛^[53]。

1.3.7 其他CDBPs

其他含氯新型DBPs包括卤代苯酚、卤代对苯醌、卤代酮、卤代呋喃酮等。卤代苯酚是饮用水中的新型芳香族CDBPs,不易挥发,有较高的发育毒性、细胞毒性和生长抑制作用^[54]。卤代对苯醌是2009年发现的新型DBPs,目前还没有直接致癌性的试验数据^[55],仅被预测是一类可能致膀胱癌的物质^[56]。卤代酮同样有致畸、致癌和致突变效应,有研究^[57]证实卤代酮对小白鼠有较强的致癌性和致畸性,对人类也有遗传毒性和致癌风险。氯代呋喃酮类DBPs是一种强致诱变化合物,常见的为3-氯-4(二氯甲基)-5-羟基-2(5H)-呋喃酮,其可引起哺乳动物细胞多种遗传损害,表现为引起基因突变、DNA损伤、染色体畸变、姊妹染色单体交换^[58]。

2 CDBPs的地表水污染现状

普遍认为DBPs在自然水体中一般不存在,针对饮用水中的DBPs研究较多,而针对自然水体尤其是地表水中DBPs的监测研究较少。随着消毒剂的广泛应用以及检测技术的发展,该类物质在许多地表水质污染物调查研究中被检出(见表3)。魏晓婷^[59]应用液液萃取气相色谱法,监测了天津于桥水库中的CDBPs发现,水库原水中三卤甲烷和卤乙酸类CDBPs均有检出;Kemsley^[61]监测了美国洛杉矶两处水库水中的溴酸盐,检出浓度分别为68和106 μg/L。

表3 国内外地表水中DBPs的检出情况

地点	DBPs及浓度水平	数据来源
天津于桥水库	三氯甲烷为0~19 μg/L;一氯二溴甲烷为0~2.9 μg/L;二氯一溴甲烷为2~4 μg/L;氯乙酸为5.8~31.2 μg/L;二溴乙酸为0.4~1.7 μg/L;氯乙酸为0.7 μg/L;二氯乙酸为2.8~10.1 μg/L;三氯乙酸为2~9.5 μg/L	文献[59]
北京饮用水厂源水	溴酸盐为0.6~2.2 μg/L	文献[60]
美国洛杉矶两处水库	溴酸盐分别为68和106 μg/L	文献[61]
菲律宾马尼拉	自来水中溴酸盐为7~138 μg/L;两条河流平均溴酸盐浓度为15~80 μg/L;地下水和废水样品中溴酸盐分别为246和342 μg/L	文献[62]
松花江哈尔滨段	三氯甲烷为3.44 μg/L	文献[63]

地表水中本底存在的有机物是DBPs前体物,可提高DBPs的生成势^[64-65],在一定条件下这些有机物

接触氯消毒剂后就会生成 CDBPs, 其中三卤甲烷、卤乙酸和卤代乙腈等生成量较大. 由表 4 可见, 各类地表水经氯化消毒后, 均有 CDBPs 的检出. 张忠祥等^[63]用气相色谱法测定了我国江水和含藻水中添加氯消毒剂后的 DBPs, 其中卤甲烷、卤代乙腈、卤代酮、卤代乙醛和三氯硝基甲烷等均有检出. 朱晓燕等^[66]采用氯和臭氧联合消毒的方式, 选用钱塘江水源水进行消毒试验, 结果发现卤甲烷、卤乙酸、卤代乙腈和卤

化硝基甲烷均有检出, 且不同 pH、反应时间和反应温度条件下, 各类 DBPs 的生成浓度存在一定差异. 宋凌志等^[67]以中山市西江饮用水源为研究对象, 发现经次氯酸钠消毒后, 含有强疏水性有机物的水样中三卤甲烷和卤乙酸的生成量较大. 钟惠舟^[69]在研究北江和珠江广州河段水质中 CDBPs 健康风险的过程中发现, 添加消毒剂后的江水样品中三卤甲烷的浓度可达 2.6 mg/L.

表 4 消毒后地表水中 CDBPs 的检出情况

Table 4 Detection of CDBPs in disinfected surface water

地表水类别	CDBPs 及浓度水平	数据来源
氯化消毒后的松花江水	三氯甲烷为 85.23 $\mu\text{g/L}$; 三氯乙腈为 3.94 $\mu\text{g/L}$; 一溴二氯甲烷为 17.09 $\mu\text{g/L}$; 水合三氯乙醛为 42.82 $\mu\text{g/L}$; 二氯乙腈为 5.38 $\mu\text{g/L}$; 二氯丙酮为 18.83 $\mu\text{g/L}$; 三氯硝基甲烷为 4.11 $\mu\text{g/L}$; 二氯一溴甲烷为 1.29 $\mu\text{g/L}$; 氯溴乙腈为 2.29 $\mu\text{g/L}$; 三氯丙酮为 7.81 $\mu\text{g/L}$	文献[63]
氯化消毒后的松花江含藻水	三氯甲烷为 69.21 $\mu\text{g/L}$; 三氯乙腈为 3.87 $\mu\text{g/L}$; 水合三氯乙醛为 45.78 $\mu\text{g/L}$; 二氯乙腈为 19.57 $\mu\text{g/L}$; 二氯丙酮为 2.58 $\mu\text{g/L}$; 三氯硝基甲烷为 3.32 $\mu\text{g/L}$; 三氯丙酮为 2.68 $\mu\text{g/L}$	文献[63]
氯氧消毒后的钱塘江水源水	三卤甲烷为 10~50 $\mu\text{g/L}$; 二卤乙酸为 20~40 $\mu\text{g/L}$; 三卤乙酸为 20~50 $\mu\text{g/L}$; 卤代乙腈为 4~9 $\mu\text{g/L}$; 卤化硝基甲烷为 3~6 $\mu\text{g/L}$	文献[66]
次氯酸钠消毒后的中山市西江水源水	三卤甲烷为 345.6, 433.76 $\mu\text{g/L}$; 卤乙酸为 200, 240 $\mu\text{g/L}$	文献[67]
加次氯酸钠消毒后的水库水	二氯乙腈为 2 000 $\mu\text{g/L}$; 三氯硝基甲烷为 100~1 000 $\mu\text{g/L}$; 三氯乙腈 < 100 $\mu\text{g/L}$; 二溴乙腈 < 100 $\mu\text{g/L}$; 溴乙腈为 500 $\mu\text{g/L}$	文献[68]
消毒后的北江和珠江广州河段水	三卤甲烷为 101.92~2 590.85 $\mu\text{g/L}$	文献[69]

综上, 地表水接触消毒剂后均有不同种类、不同浓度水平的 DBPs 生成. 新冠肺炎疫情以来, 氯消毒剂以其杀菌谱广、价格低廉, 成为最常用的一类消毒剂^[70], 且已有部分饮用水源地有余氯的检出^[3], 不可避免会有相关 CDBPs 的生成及其浓度的升高.

美国环境保护局制定了《第一阶段和第二阶段消毒剂 and 消毒副产物准则》, 以保护公众免受 DBPs 的威胁^[71], 准则指出经氯气、氯胺和二氧化氯消毒后的自然水体, 需要重点关注三卤甲烷、卤乙酸、亚氯酸盐和溴酸盐. 该研究梳理的 DBPs 中也涵盖了这 4 种 DBPs, 故对我国地表水中 CDBPs 筛查时需要关注致癌性较强的卤乙酸、无机卤氧酸盐和三卤甲烷以及毒性较强的卤代乙腈、卤化氰、卤代硝基甲烷.

大部分 DBPs 在我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中没有相应的限值要求, 监管上的缺失, 可能导致 DBPs 在疫情及今后一段时间内长期存在于地表水中, 对生物乃至人类造成危害. 因此, 亟需关注 DBPs 对水生态和人体健康的影响, 适时制订相关 DBPs 的控制限值.

3 结论与展望

a) 7 类 CDBPs 中占比较高的三类分别为三卤甲烷、卤乙酸和卤代乙醛, 致癌性较强的分别为卤乙酸、无机卤氧酸盐、三卤甲烷, 致畸和致突变性较强的分别为卤乙腈、卤化氰、卤代硝基甲烷, 考虑到 DBPs 对环境水体造成的长期影响, 尤其在消毒剂大量使用的地区, 建议对有余氯检出的地表水中的主要 CDBPs 进行筛查, 有针对性地开展调查监测, 尤其是生物敏感区和生态保护区, 适时采取合理的治理措施, 如调整氯消毒剂的使用配方, 降低相关 DBPs 的产出量, 对局部污染较重的水体可用活性炭进行 DBPs 的吸附等措施, 避免 DBPs 对水生态系统造成次生环境影响以及影响人群健康.

b) 即使在非疫情期间, 部分地表水中已有 CDBPs 检出, 而目前我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中 DBPs 指标并不全面, 卤乙酸、溴酸盐、卤代乙腈、卤代硝基甲烷等均没有涉及, 鉴于其潜在毒性, 建议在修订 GB 3838—2002 时, 充分结合地表水中 DBPs 的调查监测数据, 完善 DBPs 指标, 补充

常见的且“三致”风险较大的 DBPs,如卤乙酸、溴酸盐、卤代乙腈、卤代硝基甲烷等;同时,也需要加强对工业企业、污水处理厂、医院等废水生产部门废水出口水中 DBPs 的监管,由于各企业废水处理工艺各不相同,需根据消毒工艺不同,采取不同的 DBPs 排放控制措施,在行业废水控制标准中建议适时增加 DBPs 指标。

参考文献 (References):

- [1] 国家卫生健康委员会办公厅,国家中医药管理局办公室.关于印发新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)的通知[EB/OL].北京:国家卫生健康委员会,2020-03-03[2020-03-04].<http://so.kaipuyun.cn/s?q=1&qt=%E6%96%B0%E5%9E%8B%E5%86%A0%E7%8A%B6%E7%97%85%E6%AF%92%E8%82%BA%E7%82%8E%E8%AF%8A%E7%96%97%E6%96%B9%E6%A1%88&pageSize=10&database=all&siteCode=N000001644&docQt=&page=1>.
- [2] 生态环境部.生态环境部通报全国医疗废物、医疗废水处置和环境监测情况[EB/OL].北京:生态环境部,2020-03-23[2020-03-23].http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk15/202003/t20200323_770227.html.
- [3] 张平.活性炭吸附饮用水中氯消毒副产物特征研究[D].杭州:浙江大学,2019:1-5.
- [4] 程胜梓,刘晶晶,刘红磊,等.含氯消毒剂的应用和环境毒性特点[J/OL].三峡生态环境监测,2020-03-03.<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1214.X.20200302.1433.006.html>.
CHENG Shengzi, LIU Jingjing, LIU Honglei, *et al.* Application and environmental toxicity of chlorine-containing disinfectants[J/OL]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2020-03-03. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1214.X.20200302.1433.006.html>.
- [5] ZHANG X X, CHEN Z L, SHEN J M, *et al.* Formation and interdependence of disinfection byproducts during chlorination of natural organic matter in a conventional drinking water treatment plant[J]. Chemosphere, 2020. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125227.
- [6] ROOK J J. Formation of haloforms during chlorination of natural waters[J]. Water Treatment Examination, 1974, 23: 234-243.
- [7] RICHARDSON S D. The role of GC-MS and LC-MS in the discovery of drinking water disinfection by-products[J]. Environmental Monitoring, 2002, 4(1): 1-9.
- [8] 韩畅,刘绍刚,仇雁,等.饮用水消毒副产物分析及相关研究进展[J].环境保护科学,2009,35(1):12-16.
HAN Chang, LIU Shaogang, QIU Yan, *et al.* Progress on analytical techniques and related research of disinfection by-products in drinking water[J]. Environmental Protection Science, 2009, 35(1): 12-16.
- [9] 张盛军,张大钰,董燕,等.二氧化氯消毒副产物的生成规律研究[J].中国给水排水,2013,29(5):70-76.
ZHANG Shengjun, ZHANG Dayu, DONG Yan, *et al.* Formation rule of chlorine dioxide disinfection by-products[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(5): 70-76.
- [10] 杨品璐.生活饮用水中氯化消毒副产物的检测与现状研究[J].化工管理,2019(11):46-47.
- [11] QIN L, LIN Y L, XU B, *et al.* Kinetic models and pathways of ronidazole degradation by chlorination, UV irradiation and UV/chlorine processes[J]. Water Research, 2014, 65: 271-281.
- [12] 卫生部,国家标准化委员会.GB 5749—2006 生活饮用水卫生标准[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [13] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [14] World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality, fourth edition, incorporating the first addendum[EB/OL]. Geneva: World Health Organization, 2017-01-01[2020-03-28]. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/.
- [15] US Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations: stage 2 disinfectants and disinfection by products rule[J]. Federal Register, 2006, 71: 387-493.
- [16] EUR-Lex. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption[EB/OL]. Brussels: The Council of the European Union, 2015-10-07[2020-04-28]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1998/83/2015-10-27?eliuri=eli:dir:1998:83:2015-10-27>.
- [17] Health Canada. Guidelines for Canadian drinking water quality—summary table[EB/OL]. Ottawa: Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2019-06-28[2020-05-13]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality/guidelines-canadian-drinking-water-quality-summary-table.html>.
- [18] Ministry of Health, Labour and Welfare. Drinking Water Quality Standards[EB/OL]. Tokyo: Ministry of Health, Labour and Welfare, 2015-04-01[2020-04-28]. https://www.mhlw.go.jp/english/policy/health/water_supply/4.html.
- [19] MUELLNER M G, WAGNER E D, MCCALLA K, *et al.* Haloacetonitriles vs. regulated haloacetic acids: are nitrogen-containing DBPs more toxic[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(2): 645-651.
- [20] 杨帆,楚文海,张永吉,等.饮用水有机类消毒副产物毒理学研究方法进展[J].生态毒理学报,2012,7(1):35-43.
YANG Fan, CHU Wenhai, ZHANG Yongji, *et al.* Recent advances in toxicological methods for testing toxicity of organic disinfection by-products (DBPs) in drinking water[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2012, 7(1): 35-43.
- [21] ZHAO Y L, QIN F, BOYD J M, *et al.* Characterization and

- determination of chloro- and bromo- benzoquinones as new chlorination disinfection by products in drinking water [J]. Analytical Chemistry, 2010, 82(11) : 4599-4605.
- [22] 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, 2007, 636 (1/2/3) : 178-242.
- [23] National Cancer Institute. Report on the carcinogenesis bioassay of chloroform [EB/OL]. Bethesda; National Institute of Health, 1976-03-01 [2020-04-28]. https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rpts/trchloroform.pdf.
- [24] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Some chemicals that cause tumours of the kidney or urinary bladder In rodents and some other substances [EB/OL]. France Lyon; International Agency for Research on Cancer, Lyon, 1998-10-13 [2020-04-28]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK402050>.
- [25] BEANE F L E, CANTOR K P, BARIS D, *et al.* Bladder cancer and water disinfection by-product exposures through multiple routes; a population-based case-control study (New England, USA) [J]. Environmental Health Perspectives, 2017. doi: 10.1289/EHP89.
- [26] 周国宏, 余淑苑, 彭朝琼, 等. 深圳市饮用水中消毒副产物三卤甲烷的健康风险评估 [J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(8) : 718-722. ZHOU Guohong, YU Shuyuan, PENG Zhaoqiong, *et al.* Health risk assessment of trihalomethanes in drinking water in Shenzhen [J]. Journal of Environment and Health, 2013, 30(8) : 718-722.
- [27] 万巧玲, 王良超, 余薇薇, 等. 自来水中消毒副产物 (DBPs) 变化规律研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2) : 104-108. WAN Qiaoling, WANG Liangchao, YU Weiwei, *et al.* Variation of the disinfection by-products (DBPs) in water supply [J]. Environmental Science & Technology (China), 2016, 39(S2) : 104-108.
- [28] 刘南, 熊鸿燕, 李秀安. 二氧化氯对水消毒效果及消毒副产物的测定 [J]. 中国消毒学杂志, 2007, 24(3) : 215-218. LIU Nan, XIONG Hongyan, LI Xiuan. Efficacy of chlorine dioxide in disinfection of water and measurement of disinfection by product [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2007, 24(3) : 215-218.
- [29] 杨飞飞. 二氯甲烷肝脏毒性的实验研究 [D]. 济南: 济南大学, 2016; 1-2.
- [30] 李成浩, 张红英. 黄芪提取物对四氯化碳致大鼠肝纤维化的保护作用 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2011, 17(20) : 217-220. LI Chenghao, ZHANG Hongying. Protective effect of extracts from astragal radix on liver fibrosis induced by CCl₄ in rats [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2011, 17(20) : 217-220.
- [31] 徐新宝, 冷希圣, 杨晓. 四氯化碳/乙醇诱导 129/Sv 小鼠产生原发性肝癌模型的建立 [J]. 消化内科, 2005, 4(1) : 34-37. XU Xinbao, LENG Xisheng, YANG Xiao. Establishment of the primary hepatocellular carcinoma model of 129/Sv mice induced by carbon tetrachloride (CCl₄)/ethanol [J]. Journal of Digestive Surgery, 2005, 4(1) : 34-37.
- [32] 童小萍, 姬艳丽, 冀元棠. 二氯乙酸对胎鼠中脑细胞增殖和分化的影响 [J]. 卫生毒理学杂志, 2004, 18(2) : 104-105. TONG Xiaoping, JI Yanli, JI Yuantang. Effects of dichloroacetic acid on rat embryo midbrain cell proliferation and differentiation [J]. Journal of Health Toxicology, 2004, 18(2) : 104-105.
- [33] 张晓健, 李爽. 消毒副产物总致癌风险的首要指标参数-卤乙酸 [J]. 城市给排水, 2000, 26(8) : 1-6. ZHANG Xiaojian, LI Shuang. Halo-acetic acids as an indicator of the total carcinogenic risk of disinfection by-products [J]. Water & Wastewater Engineering, 2000, 26(8) : 1-6.
- [34] GILLER S F, LE C F, ERB F, *et al.* Comparative genotoxicity of halogenated acetic acids found in drinking water [J]. Mutagenesis, 1997, 12(5) : 321-328.
- [35] 张金松, 卢小艳. 饮用水消毒工艺及副产物控制技术发展 [J]. 给水排水, 2016(9) : 1-3.
- [36] 郭强. 二氧化氯消毒机理及其消毒副产物的控制 [J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15(22) : 172-174. GUO Qiang. The mechanism of disinfection by chlorine dioxide and its control of disinfection by-products [J]. Science/Technology Information Development & Economy, 2005, 15(22) : 172-174.
- [37] US Environmental Protection Agency. Perchlorate environmental contamination; toxicological review and risk characterization [EB/OL]. Washington DC; National Center for Environment Assessment Office of Research and Development, 2002-01-16 [2020-04-28]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/94006BA1.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000039%5C94006BA1.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>.
- [38] 安东, 李伟光, 崔福义, 等. 溴酸盐的生成及控制 [J]. 水处理技术, 2005, 31(6) : 54-55. AN Dong, LI Weiguang, CUI Fuyi, *et al.* Formation and control of bromate [J]. Technology of Water Treatment, 2005, 31(6) : 54-55.
- [39] 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 Zhiwei, LIU Dongmei, ZHANG Wenjuan, *et al.* Acute toxic effects of bromate on aquatic organisms [J]. Environmental Science, 2016, 37(2) : 756-764.

- [40] SAMUEL Y G, JONATHAN D D, KIRI H J, *et al.* Relationship between dose and duration of administration of potassium bromate on selected electrolytes and hepatorenal parameters in male albino wistar rats[J]. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 2019, 11(4):214-220.
- [41] CHIPMAN J K, PARSONS J L, BEDDOWES E J. The multiple influences of glutathione on bromate genotoxicity: implications for the dose-response relationship[J]. *Toxicology*, 2006, 221(2/3):187-189.
- [42] HUSAM F A, SAMEER F Z, MARIVI C A, *et al.* Elevated concentrations of bromate in drinking water and groundwater from kuwait and associated exposure and health risks[J]. *Environmental Research*, 2020. doi:10.1016/j.envres.2019.108885.
- [43] 刘润生, 张燕. 饮用水中溴酸盐的去除技术[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(12):66-70.
LIU Runsheng, ZHANG Yan. Removal technologies of bromate in drinking water[J]. *Environmental Science & Technology (China)*, 2010, 33(12):66-70.
- [44] 沈开源, 徐斌, 夏圣骥, 等. 饮用水中含氮消毒副产物卤代腈(氰)的生成特性与控制研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(10):72-77.
SHEN Kaiyuan, XU Bin, XIA Shengji, *et al.* Progress on the formation and control of disinfection byproduct halogenated nitriles in drinking water chlorination[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010, 32(10):72-77.
- [45] 赵玉丽, 李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, 30(1):20-33.
ZHAO Yuli, LI Xingfang. Drinking water disinfection by-products: chemical characterization and toxicity[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1):20-33.
- [46] CURIEUX F L, GILLER S, GAUTHIER L, *et al.* Study of the genotoxic activity of six halogenated acetonitriles, using the SOS chromotest, the ames-fluctuation test and the newt micronucleus test[J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 1995, 341(4):289-302.
- [47] LIVIAC D, CREUS A, MARCOS R. Genotoxicity analysis of two halonitromethanes, a novel group of disinfection byproducts (DBPs), in human cells treated *in vitro* [J]. *Environmental Research*, 2009, 109(3):232-238.
- [48] KUNDU B, RICHARDSON S D, SWARTZ P D. Mutagenicity in salmonella of halonitromethanes: a recently recognized class of disinfection by products in drinking water[J]. *Mutation Research*, 2004, 562(1/2):39-65.
- [49] WOO Y T, LAI D, MCLAIN J L, *et al.* Use of mechanism based structure activity relationship sanalysis in carcinogenic potential ranking for drinking water disinfection by products[J]. *Environment Health Prospect*, 2002, 110(1):75-87.
- [50] 林英姿, 林涣, 朱洋, 等. 饮用水消毒副产物三氯乙醛的研究现状[J]. *吉林建筑大学学报*, 2019, 36(6):27-31.
LIN Yingzi, LIN Huan, ZHU Yang. Research status quo of the byproducts of drinking water disinfection trichloroacetaldehyde[J]. *Journal of Jilin Jianzhu University*, 2019, 36(6):27-31.
- [51] 许吴宇. 水中卤代乙醛紫外光降解速率及影响因素研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019:3-4.
- [52] BULL R J, RECKHOW D A, LI X F, *et al.* Potential carcinogenic hazards of non-regulated disinfection by-products: haloquinones, halo-cyclopentene and cyclohexene derivatives, n-halamines, halonitriles, and heterocyclic amines [J]. *Toxicology*, 2011, 286(1/2/3):1-19.
- [53] JEONG C H, POSTIGO C, RICHARDSON S D, *et al.* Occurrence and comparative toxicity of haloacetaldehyde disinfection by-products in drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(23):13749.
- [54] 马健, 王俊杰, 胡绍洋, 等. 室内泳池水中8种芳香族氯/溴代消毒副产物的生成[J]. *环境化学*, 2019, 38(12):2639-2648.
MA Jian, WANG Junjie, HU Shaoyang, *et al.* Formation of eight aromatic chlorinated/brominated disinfection byproducts in indoor swimming pool water[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(12):2639-2648.
- [55] BULL R J, RECKHOW D A, ROTELLO V, *et al.* Use of toxicological and chemical models to prioritize DBP research [EB/OL]. Alexandria: The Wate Research Foundation, 2006-06-19 [2020-04-28]. [https://www. waterf. org/research/projects/use-toxicological-and-chemical-models-prioritize-dbp-research](https://www.waterf.org/research/projects/use-toxicological-and-chemical-models-prioritize-dbp-research).
- [56] 方道奎, 周国宏, 余淑苑. 水消毒副产物卤代苯醌的化学特征、环境暴露和毒性评估现状[J]. *癌变·畸变·突变*, 2019, 31(4):334-338.
- [57] 余晓敏, 赵少远, 袁守军, 等. 卤代醛/酮消毒副产物的生成潜能及其前驱物的结构特征[J]. *环境化学*, 2020, 39(1):28-38.
YU Xiaomin, ZHAO Shaoyuan, YUAN Shoujun, *et al.* Formation potential of halogenated aldehydes and ketones disinfection by-products and structural characteristics of their precursors [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(1):28-38.
- [58] PLEAWA M J, WAGNER E D, JAZWIERSKA P, *et al.* Halonitromethane drinking water disinfection by products: chemical characterization and mammalian cell cytotoxicity and genotoxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(1):62-68.
- [59] 魏晓婷. 于桥水库典型消毒副产物及其前体物研究[D]. 天津: 天津大学, 2014:25-33.
- [60] 刘勇建, 牟世芬, 林爱武, 等. 北京市饮用水中溴酸盐、卤代乙醛及高氯酸盐研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(2):51-55.
LIU Yongjian, MOU Shifen, LIN Aiwu, *et al.* Investigation of bromate, haloacetic acids and perchlorate in Beijing's drinking water[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(2):51-55.
- [61] KEMSLEY J. Bromate in Los Angeles water [J]. *Chemical & Engineering News*, 2007. doi:10.1021/cen-v085n052.p009.

- [62] 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.
- [63] 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 Zhongxiang, ZHAO Qi, LIU Yulei, *et al.* Determination of twelve kinds of volatile disinfection by-products in drinking water by gas chromatography with electron capture detector [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(8):1203-1208.
- [64] 李瑞华. 黑河水源水消毒副产物生成势的变化规律[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [65] 陈铭, 徐斌, 王安琪, 等. 巢湖水中溶解性有机物分子大小分布、亲疏水性及消毒副产物的生成势[J]. 净水技术, 2018, 37(3):22-28.
CHEN Ming, XU Bin, WANG Anqi, *et al.* Distribution of molecular size, hydrophilicity and hydrophobicity, and DBP formation potential of DOM in water of Chaohu Lake [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(3):22-28.
- [66] 朱晓燕, 叶婷, 夏彭斌, 等. 臭氧与氯联合消毒对钱塘江水源水 DBPs 形成及溴取代的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(4):1226-1233.
ZHU Xiaoyan, YE Ting, XIA Pengbin, *et al.* Formation of disinfection by-products and the bromine incorporation upon ozone-chlorination of Qiantang [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(4):1226-1233.
- [67] 宋凌志, 施周, 徐勇, 等. 西江原水有机物成分解析及其消毒副产物生成特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21):32-38.
SONG Lingzhi, SHI Zhou, XU Yong, *et al.* Analysis of organic compounds in Xijiang raw water and characteristics of disinfection by-products formation [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21):32-38.
- [68] 任鹏飞. 地表水中溶解性有机氮消毒副产物生成分析[J]. 建材与装饰, 2019(8):173-174.
- [69] 钟惠舟. 北江和珠江广州河段水体的氯消毒副产物风险评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2015:65.
- [70] 林立旺, 陈路瑶, 章灿明, 等. 新型冠状病毒防控中消毒剂的正确选择[J]. 中国消毒学杂志, 2020, 37(3):226-229.
- [71] US Environmental Protection Agency. Drinking water requirements for states and public water systems: stage 1 and stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rules [EB/OL]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 1998-12-16 [2020-04-28]. <https://www.epa.gov/dwreginfo/stage-1-and-stage-2-disinfectants-and-disinfection-byproducts-rules>.

(责任编辑: 刘 方)