

# 2018—2020 年某市饮用水中消毒副产物 监测结果及风险评估

王冰, 张永, 韩志宇, 王心宇, 詹未, 盛欣

北京市疾病预防控制中心/北京市预防医学研究中心, 北京 100013

**摘要:** **目的** 了解某市城区生活饮用水中消毒副产物的分布, 并对其进行健康风险评估。 **方法** 2018—2020 年对该市城区市政出厂水消毒副产物进行监测, 按照美国环保局推荐的健康风险模型进行风险评估。 **结果** 出厂水中共检出三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷、二氯乙酸、亚氯酸盐、氯酸盐等 11 种消毒副产物, 其含量均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 的规定。非二氧化氯消毒时仍可检出氯酸盐, 检出率及浓度均较高。除氯酸盐外, 出厂水中三卤甲烷类和卤乙酸类消毒副产物浓度较高。丰水期氯酸盐的浓度要大于枯水期 ( $Z = -3.814, P < 0.001$ ), 其余消毒副产物在枯丰水期的分布差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。以地下水为水源的出厂水中, 二氧化氯消毒的水样中三卤甲烷含量要低于氯消毒的水样, 氯酸盐高于氯消毒水样 ( $P < 0.05$ )。该市出厂水中消毒副产物引起的致癌风险为  $1.42 \times 10^{-5}$ , 非致癌风险为  $3.23 \times 10^{-2}$ ; 三氯甲烷对致癌和非致癌风险的贡献最大。 **结论** 该市城区饮用水消毒副产物以氯酸盐、三卤甲烷和卤乙酸为主, 其致癌和非致癌风险均在可接受范围内。三氯甲烷对健康风险贡献最大, 应作为风险管理的重点对象。

**关键词:** 饮用水; 消毒副产物; 监测; 风险评估

**中图分类号:** R123.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3110(2022)02-0169-05 **DOI:** 10.3969/j.issn.1006-3110.2022.02.011

## Surveillance results and risk assessment of disinfection by-products in drinking water in a city, 2018–2020

WANG Bing, ZHANG Yong, HAN Zhi-yu, WANG Xin-yu, ZHAN Wei, SHENG Xin

Beijing Center for Disease Control and Prevention/Beijing Research Center for Preventive Medicine, Beijing 100013, China

Corresponding author: SHENG Xin, E-mail: 1986072057@qq.com

**Abstract:** **Objectives** To investigate the distribution of disinfection by-products (DBPs) in drinking water in urban area of a city, and to evaluate their potential health risk. **Methods** DBPs in municipal supply water in this city from 2018 to 2020 were monitored, and risk assessment was conducted according to health risk assessment model recommended by the United States Environment Protection Agency (USEPA). **Results** Eleven kinds of DBPs, including trichloromethane, chlorodibromomethane, difluorobromomethane, bromoform, dichloroacetic acid, chlorite, and chlorate were detected in drinking water, and the concentration of above-mentioned DBPs detected was lower than the standard limits specified in the Standards for Drinking Water Quality (GB 5749-2006). Chlorate could be detected in water disinfected by non-chlorine dioxide, with a high detection rate and a high concentration. The contents of trihalomethanes and haloacetic acids were also high in water except chlorate. The concentration of chlorate in wet season was higher than that in dry season ( $Z = -3.814, P < 0.001$ ), and no statistically significant differences were found in the other DBPs in dry season ( $P > 0.05$ ). Among factory water samples with groundwater as the source of water, the concentration of trihalomethanes was lower in water samples disinfected with chlorine dioxide than in water samples disinfected with chlorine, but the concentration of chlorate was higher in water samples disinfected with chlorine dioxide than in water samples disinfected with chlorine ( $P < 0.05$ ). The carcinogenic risk of DBPs was  $1.42 \times 10^{-5}$  per year, and the non-carcinogenic health risk was  $3.23 \times 10^{-2}$  per year. Trichloromethane contributed the most to both carcinogenic and non-carcinogenic risks. **Conclusion** Chlorate, trichloromethane and haloacetic acids are the principal DBPs in drinking water in urban areas of this city, and the carcinogenic and non-carcinogenic risks of DBPs are all within an acceptable range. Trichloromethane is the major contributor to the health risk, and should be the focus of risk management.

**Keywords:** drinking water; disinfection by-product; monitoring; risk assessment

**基金项目:** 首都卫生发展科研专项项目 (首发 2020-2-3013)

**作者简介:** 王冰 (1985-), 女, 硕士, 主管医师, 主要从事环境卫生研究工作。

**通信作者:** 盛欣, E-mail: 1986072057@qq.com。

《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)<sup>[1]</sup>中规定,生活饮用水应进行消毒处理。消毒剂在杀灭病原微生物,预防介水传染病发生的同时,会产生对人类健康有潜在风险的消毒副产物。目前已发现的消毒副产物有 800 余种<sup>[2-3]</sup>,主要包括三卤甲烷类(包括三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷)、卤乙酸类(包括一氯乙酸、二氯乙酸、三氯乙酸等)、卤乙腈、卤代酮等,其对健康有潜在的风险而引起人们的关注。有研究显示,三卤甲烷具有致癌风险,并有生殖发育毒性<sup>[4]</sup>;卤乙酸具有潜在致癌、致突变性和生殖发育毒性<sup>[5-6]</sup>。本研究以某北方城市的市政出厂水为研究对象,对三卤甲烷类、卤乙酸类、氯酸盐、亚氯酸盐及其他 12 种消毒副产物进行监测和分析,以了解该城市市政供水中消毒副产物的含量及分布,并利用美国环境保护局的风险评估模型评估消毒副产物通过饮水途径对人群产生的健康风险,现将监测结果与健康风险评估报告如下。

## 1 材料与方法

1.1 材料与仪器 OI 4660 型吹扫捕集仪,安捷伦 7890A 型气相色谱仪,附 5975C 型质谱检测器、毛细管色谱柱 VF-624ms (60 m×0.25 mm×1.4 μm);岛津 GC-2010 plus 型气相色谱,附 ECD 检测器、毛细管色谱柱 DB-XL (30 m×0.32 mm×0.50 μm) 和 CP-Sil 8 CB (30 m×0.25 mm×0.25 μm);瑞利 VIS-723N 型可见光分光光度计;Dionex ICS-3000 型离子色谱仪。二氯甲烷、三氯乙醛、三氯甲烷、一溴二氯甲烷、二溴一氯甲烷和三溴甲烷标准溶液均购自 DIKMA 公司;二氯乙酸标准溶液购自北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司;三氯乙酸标准溶液购自北京坛墨质检科技有限公司;水中氰成分分析标准物质购自中国计量科学研究院;氯酸盐和亚氯酸盐标准溶液购自农业农村部环境保护科研监测所。

1.2 水样监测 2018—2020 年对该市 35 家市政水厂的出厂水进行采样监测,每年的枯水期和丰水期各采集 1 次水样。

1.3 消毒副产物监测 监测指标为三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷、氯化氰、二氯乙酸、三氯乙酸、二氯甲烷、三氯乙醛、2,4,6-三氯酚、亚氯酸盐、氯酸盐等 12 种消毒副产物。

1.4 样本采集方法 水样的采集、保存严格按照《生活饮用水标准检验方法水样的采集与保存》(GB/T 5750.2-2006)<sup>[7]</sup>进行。

1.5 监测方法 使用吹脱捕集气相色谱-质谱法测

定三氯甲烷,使用离子色谱法测定氯酸盐和亚氯酸盐,使用毛细管柱气相色谱法测定一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷,使用顶空气相色谱法测定二氯甲烷,使用液液萃取衍生化气相色谱法测定卤乙酸类,使用异烟酸-巴比妥酸分光光度法测定氯化氰,使用气相色谱法测定三氯乙醛,使用顶空固相微萃取气相色谱法测定 2,4,6-三氯酚。按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)<sup>[1]</sup>对监测结果进行评估。

1.6 健康风险评估 参照美国环境保护局推荐的健康风险评估模型,对消毒副产物进行健康风险评估<sup>[8-9]</sup>。三氯甲烷等消毒副产物为致癌物质,需同时考虑它的致癌风险和非致癌风险,三氯乙醛为非致癌物,仅考虑其非致癌风险。本研究仅考虑消毒副产物通过经口摄入途径暴露的健康风险。

1.6.1 致癌风险 致癌风险常用风险值(risk,  $R$ )表示,若致癌风险  $R < 10^{-6}$ ,认为引起癌症的风险较低;若  $R$  在  $10^{-4} \sim 10^{-6}$  之间,认为其风险在可接受的范围内,若  $R > 10^{-4}$ ,认为有较高的致癌风险。单个物质的计算公式见(1)和(2);存在多种污染物时,致癌风险计算见公式(3):

$$R = SF \times ADD \quad (1)$$

$$ADD = (C \times IR \times EF \times ED) / (BW \times AT) \quad (2)$$

$$RT = \sum Ri \quad (3)$$

式中:  $R$ —某种致癌物的致癌风险,无量纲;  $SF$ —斜率因子,单位是  $(\text{kg} \cdot \text{d})/\text{mg}$ ;  $ADD$ —经口摄入日均暴露量,单位是  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;  $C$ —某种指标的质量浓度,单位是  $\text{mg}/\text{L}$ ;  $IR$ —饮水摄入量,单位是  $\text{L}/\text{d}$ ,取值为 2.325;  $EF$ —暴露频率,单位是  $\text{d}/\text{a}$ ,取值为 365;  $ED$ —暴露时长,单位是  $\text{a}$ ,取值为 80.18;  $BW$ —暴露人群体重,单位是  $\text{kg}$ ,取值为 66.9;  $AT$ —平均接触时间,单位是  $\text{d}$ ,取值为 29 265.7。以上取值均参考《中国人群暴露参数手册》(成人卷)中的推荐数据<sup>[10]</sup>。

1.6.2 非致癌风险 单一物质的非致癌风险通常用危害系数(hazard quotients,  $HQ$ )来表示,若  $HQ < 1$ ,认为非致癌风险在可接受范围内。单个物质的计算公式见(4),当存在多种污染物时,非致癌风险计算见公式(5):

$$HQ = ADD/RfD \quad (4)$$

$$HQT = \sum HQi \quad (5)$$

式中:  $HQ$ —危害系数,无量纲;  $RfD$ —非致癌物经口摄入的参考剂量,单位是  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;  $ADD$ —同

1.6.1。  
三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸、三氯乙醛的经口摄入参考剂

量(reference dose, RfD) 分别为 0.010、0.020、0.02、0.020、0.0040、0.020、0.10 mg/(kg·d),前六种指标的致癌斜率因子(slope factor, SF) 分别为 0.031、0.084、0.062、0.0079、0.050 和 0.070 (kg·d)/mg,上述参数均参考自美国的综合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS)<sup>[11]</sup>。

1.7 统计学分析 使用 excel 建立水质数据库,采用 SPSS 19.0 进行统计分析。若某种物质未检出,其监测结果按照方法检出限的一半计算。本研究的监测结果均为非正态分布,使用中位数和四分位间距进行统计学描述。两组间的比较采用 Mann-Whitney *U* 检验;多组间比较采用 Kruskal-Wallis 秩和检验,*P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

表 1 2018—2020 年某市市政出厂水消毒副产物监测结果(*n* = 200)

分类	消毒副产物	检出率(%)	检出限(μg/L)	浓度范围(μg/L)	检测浓度 [ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> ), μg/L]	标准限值(μg/L)
三卤甲烷	三氯甲烷	71.50	0.25	ND~50.00	4.35(0.25, 23.05)	60
	一氯二溴甲烷	75.50	0.50	ND~6.93	0.65(0.25, 1.36)	100
	二氯一溴甲烷	62.00	0.50	ND~13.00	1.29(0.25, 4.10)	60
	三溴甲烷	44.00	0.50	ND~5.10	0.25(0.13, 0.65)	100
卤乙酸	二氯乙酸	52.50	1.00	ND~32.00	1.33(0.50, 4.98)	50
	三氯乙酸	47.50	2.00	ND~36.00	1.00(1.00, 6.50)	100
醛类	三氯乙醛	21.50	0.50	ND~8.50	0.25(0.25, 0.25)	10
卤化氰	氯化氰	0.00	10.00	ND	NA	70
卤甲烷	二氯甲烷	0.50	0.50	ND~14.00	0.25(0.25, 0.25)	20
酚类	2,4,6-三氯酚	9.00	0.05	ND~2.00	0.03(0.03, 0.03)	200
无机盐	亚氯酸盐	6.00	8.00	ND~42.50	4.00(4.00, 4.00)	700
	氯酸盐	99.50	8.00	ND~635.00	111.00(50.00, 215.00)	700

注:ND 为未检出;NA 为不适用。

2.2 不同水期出厂水中消毒副产物的含量 根据水样的采集时间不同,将其分为枯水期和丰水期两类,并分析检出率较高的 8 种指标在不同水期的含量。Mann-Whitney *U* 检验结果显示,除氯酸盐外,其余消毒副产物在枯水期和丰水期出厂水中的含量差异无统计学意义(*P*>0.05);丰水期出厂水中氯酸盐含量要大于枯水期(*P*<0.001),见表 2。

表 2 2018—2020 年某市不同水期出厂水中消毒副产物监测结果

监测指标	枯水期浓度	丰水期浓度	<i>Z</i> 值	<i>P</i> 值
	[ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> ), μg/L]	[ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> ), μg/L]		
三氯甲烷	6.71(0.25, 22.10)	3.52(0.25, 24.5)	-0.001	0.999
一氯二溴甲烷	0.61(0.25, 1.40)	0.69(0.26, 1.26)	-0.016	0.987
二氯一溴甲烷	1.70(0.25, 4.10)	0.81(0.25, 4.11)	-0.573	0.567
三溴甲烷	0.25(0.25, 0.68)	0.25(0.13, 0.63)	-1.153	0.249
二氯乙酸	0.50(0.50, 5.70)	1.66(0.50, 4.60)	-0.611	0.541
三氯乙酸	1.00(0.50, 8.00)	1.00(1.00, 5.60)	-1.152	0.249
三氯乙醛	0.25(0.25, 0.25)	0.25(0.25, 0.39)	-1.039	0.299
氯酸盐	73.00(33.00, 178.50)	140.00(61.00, 311.00)	-3.814	<0.001

2.3 不同消毒方式出厂水中消毒副产物的含量 以地下水为水源的水样数共 136 件,涉及消毒方式为氯消毒(129 件)和二氧化氯消毒(7 件)。以地下水为水

2.1 消毒副产物监测结果 2018—2020 年共计监测水样 200 件,其消毒方式为氯消毒(185 件)、氯胺消毒(8 件)和二氧化氯消毒(7 件)。所有水样的消毒副产物监测结果均在《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)<sup>[1]</sup>限值以下。除氯化氰外,其余 11 种消毒副产物均有检出。氯化氰、二氯甲烷、2,4,6-三氯酚和亚氯酸盐的检出率较低,不再进行含量分析和风险评估。亚氯酸盐和氯酸盐通常作为二氧化氯消毒的消毒副产物进行监测,其余消毒方式时不作为常规监测项目。本研究显示,在氯消毒及氯胺消毒的水样中也可以检出氯酸盐,其检出率高达 99.50%且浓度较高;亚氯酸盐在非二氧化氯消毒时检出率较低(200 件水样中共检出 12 件,其中 7 件为二氧化氯消毒,5 件为氯消毒),见表 1。

源的水样中,氯消毒和二氧化氯消毒出厂水中三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷和氯酸盐的含量有统计学差异,即二氧化氯消毒的出厂水中三卤甲烷类含量低于氯消毒出厂水,氯酸盐含量高于氯消毒出厂水;其余消毒副产物含量差异无统计学意义,见表 3。

表 3 2018—2020 年某市地下水水源的出厂水中不同消毒方式下消毒副产物监测结果

监测指标	消毒方式	样本量	检测浓度	<i>Z</i> 值	<i>P</i> 值
			[ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> ), μg/L]		
三氯甲烷	自由氯	129	0.60(0.25, 15.15)	-2.818	0.005
	二氧化氯	7	0.13(0.13, 0.25)		
一氯二溴甲烷	自由氯	129	0.58(0.25, 1.29)	-3.451	0.001
	二氧化氯	7	0.13(0.13, 0.25)		
二氯一溴甲烷	自由氯	129	0.25(0.13, 2.20)	-2.558	0.011
	二氧化氯	7	0.13(0.13, 0.25)		
三溴甲烷	自由氯	129	0.34(0.25, 0.75)	-3.092	0.002
	二氧化氯	7	0.13(0.13, 0.25)		
二氯乙酸	自由氯	129	0.50(0.50, 2.80)	-0.149	0.882



续表 3

监测指标	消毒方式	样本量	检测浓度	Z 值	P 值
			[ <i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> ), μg/L]		
三氯乙酸	二氧化氯	7	0.50(0.50,1.35)	-1.654	0.098
	自由氯	129	1.00(1.00,3.87)		
三氯乙醛	二氧化氯	7	1.00(0.50,1.00)	-1.245	0.213
	自由氯	129	0.25(0.25,0.25)		
氯酸盐	二氧化氯	7	0.25(0.25,0.25)	-2.403	0.016
	自由氯	129	67.00(38.50,160.00)		
	二氧化氯	7	130.00(64.00,250.00)		

2.4 健康风险评估 根据健康风险评估模型和相关参数,利用本研究的监测结果定量评估三氯甲烷、一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷、二氯乙酸、三氯乙酸和三氯乙醛指标经口暴露的致癌风险和非致癌风险(氯酸盐指标 IRIS 系统没有相应的毒理学数据,不对其进行健康风险评估)。通过计算发现,该市出厂水中消毒副产物经口途径摄入的致癌风险为  $1.42\times10^{-5}$  (在  $10^{-4}\sim10^{-6}$  之间),可能会对人体健康带来一定风险,但尚可接受。除三溴甲烷外 ( $R<1.0\times10^{-6}$ ),其余指标的致癌风险均大于  $1.0\times10^{-6}$ 。消毒副产物总危害指数为  $3.23\times10^{-2}$ ,非致癌风险均远低于 1,表明风险在可接受范围内,对致癌风险和非致癌风险贡献最大的指标均为三氯甲烷,见表 4。

表 4 2018—2020 年某市出厂水中消毒副产物经口摄入的健康风险

监测指标	致癌风险		非致癌风险	
	<i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> )	占比(%)	<i>M</i> ( <i>P</i> <sub>25</sub> , <i>P</i> <sub>75</sub> )	占比(%)
三氯甲烷	$4.69\times10^{-6}$ ( $2.69\times10^{-7}$ , $2.48\times10^{-5}$ )	33.08	$1.51\times10^{-2}$ ( $8.69\times10^{-4}$ , $8.01\times10^{-2}$ )	46.86
一氯二溴甲烷	$1.90\times10^{-6}$ ( $7.30\times10^{-7}$ , $1.20\times10^{-5}$ )	19.62	$1.13\times10^{-3}$ ( $4.34\times10^{-4}$ , $2.36\times10^{-3}$ )	6.95
二氯一溴甲烷	$2.78\times10^{-6}$ ( $5.39\times10^{-7}$ , $2.93\times10^{-6}$ )	13.39	$2.24\times10^{-3}$ ( $4.34\times10^{-4}$ , $7.12\times10^{-3}$ )	3.50
三溴甲烷	$6.86\times10^{-8}$ ( $3.57\times10^{-8}$ , $1.78\times10^{-7}$ )	0.49	$4.34\times10^{-4}$ ( $2.26\times10^{-4}$ , $1.13\times10^{-3}$ )	1.35
二氯乙酸	$2.30\times10^{-6}$ ( $8.69\times10^{-7}$ , $8.65\times10^{-6}$ )	16.25	$1.15\times10^{-2}$ ( $4.34\times10^{-3}$ , $4.33\times10^{-2}$ )	35.68
三氯乙酸	$2.43\times10^{-6}$ ( $2.43\times10^{-6}$ , $1.58\times10^{-5}$ )	17.17	$1.74\times10^{-3}$ ( $1.74\times10^{-3}$ , $1.13\times10^{-2}$ )	5.39
三氯乙醛	—	—	$8.69\times10^{-5}$ ( $8.69\times10^{-5}$ , $8.69\times10^{-5}$ )	0.27
合计	$1.42\times10^{-5}$	100.00	$3.23\times10^{-2}$	100.00

3 讨论

消毒是把“双刃剑”,一方面可以杀灭水中微生物,避免介水传染病的发生;另一方面又带来了消毒副产物的化学性威胁。在灭活控制微生物效能的同时,有效控制消毒副产物生成效能,是制定饮用水消毒的优先策略。本研究涉及 35 家市政水厂,其供水范围覆盖全市所有街道的主要城区部分,其监测结果可大体反映出该市城区生活饮用水中消毒副产物的总体水

平。监测结果显示,该市出厂水中消毒副产物监测结果均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)的卫生要求,合格率为 100%。值得注意的是,几乎所有采用氯消毒的出厂水中均可检出氯酸盐。《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)规定,使用复合二氧化氯消毒时候才需监测氯酸盐,因此其通常不作为氯消毒时的常规监测项目。本研究显示,使用氯消毒的出厂水中,仍可检出氯酸盐,与徐鸿等<sup>[12]</sup>的结论相似。其原因可能是次氯酸钠产品中含有氯酸盐,且随着储存时间的延长,氯酸盐含量会逐渐增加。俞蕴芳等<sup>[13]</sup>通过实验证明,采用次氯酸钠消毒时,出厂水中的消毒副产物氯酸盐主要来自该消毒剂产品本身。虽然氯酸盐的含量并不超标,但其较高的检出率应引起重视,可考虑将其纳入常规监测指标中。一般来说,温度和季节的变化会影响消毒副产物的生成<sup>[14]</sup>。本研究中枯水期和丰水期除了氯酸盐外的消毒副产物含量差异无统计学意义,可能与当地供水部门对水源水中前体物进行控制并优化消毒剂投加有关,这些措施使出厂水中消毒副产物的含量较为稳定,没有受到温度和季节的明显影响。丰水期出厂水中氯酸盐含量要高于枯水期,可能由于氯酸盐主要来源于消毒剂产品本身,而非消毒剂与前体物反应生成的消毒副产物。丰水期温度较高,消毒剂储存过程中氯酸盐含量增加较快,从而造成含量高于枯水期。既往研究证实,饮用水中消毒副产物生成的种类和数量与水源水的水质、所使用的消毒剂种类及水处理工艺相关<sup>[14]</sup>。根据水源类型,该市出厂水水样可分为以地表水、地下水以及混合水(既有地表水又有地下水)为水源的三种类型。其中水源类型为混合水的水样数共 11 件,以地表水为水源的水样数共 53 件。因混合水及地表水的水源来源较复杂,涉及水厂的水质处理工艺不一致,因此未对两者进行分析。该市以地下水为水源的供水单位均采用常规水处理工艺,通过研究发现采用二氧化氯消毒技术的出厂水中三卤甲烷类消毒副产物的含量均低于氯消毒。其原因在于二氧化氯不与水中有机物反应形成三卤甲烷。与氯消毒相比,二氧化氯消毒可减少饮水中三卤甲烷 90%以上,减少水中氯仿 2/3~3/4<sup>[15]</sup>,可有效控制水中有机氯化消毒副产物。但与此同时,二氧化氯可产生亚氯酸盐和氯酸盐等无机消毒副产物。本研究显示,二氧化氯消毒的出厂水中氯酸盐含量要高于氯消毒的水样,其安全性仍应加以重视,需持续性对二氧化氯消毒的饮用水进行包括亚氯酸盐和氯酸盐在内的消毒副产物的监测。

健康风险评估可以把环境污染与人体健康联系起

来。与用标准限值进行水质评估的方法相比,它可定量描述污染物对人体健康的危害程度,并能客观的判定各种污染物的主次和治理的优先顺序,从而为饮水安全的风险管理奠定基础<sup>[16]</sup>。健康风险评估结果显示,该市出厂水中消毒副产物经口途径摄入的总体致癌风险为  $1.42 \times 10^{-5}$ ,与南京<sup>[17]</sup>、武汉<sup>[18]</sup>、上海<sup>[19]</sup>等地相似,在美国环保局的可接受水平范围内( $10^{-4} \sim 10^{-6}$ ),提示对人群的健康风险在可接受范围内,但存在风险提示,需采取风险控制措施。各项指标的致癌风险从高到低依次为三氯甲烷、一氯二溴甲烷、三氯乙酸、二氯乙酸、二氯一溴甲烷、三溴甲烷。消毒副产物经口摄入的总体非致癌风险小于 1( $3.23 \times 10^{-2}$ ),处于可接受范围内;各指标非致癌风险从高到低依次为三氯甲烷、二氯乙酸、一氯二溴甲烷、三氯乙酸、二氯一溴甲烷、三溴甲烷、三氯乙醛。由此可见,三氯甲烷是对致癌及非致癌风险贡献最高的指标(分别为 33.08% 和 46.86%),应作为该市饮用水中风险管理的重点关注对象,加强其监测和管理。本研究仅考虑了经口摄入途径,未考虑到其他途径的接触所带来的暴露风险,未考虑烧开水(可导致三氯甲烷浓度减少)、使用水质净化器等饮水习惯对水质的影响,可能会导致估算的风险结果与实际水平存在一定偏差,还需进一步研究以便更精确的评估消毒副产物的健康风险。尽管如此,本研究对了解该市市政供水中消毒副产物的现状,提出后续的监测重点及重点污染物的管理工作仍具有较大的指导意义。建议将氯酸盐纳入日常监测,持续性做好三氯甲烷等污染物的风险评估工作,为生活饮用水健康风险管理提供科学依据,保障市民健康。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准:GB 5749-2006 [S]. 北京:中国标准出版社,2007:2.
- [2] Richardson SD, Plewa MJ, Wagner ED, et al. Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research[J]. Mutat Res, 2007, 636(1-3):178-242.
- [3] Culin J, Musta B. Environmental risks associated with ballast water management systems that create disinfection by-products (DBPs) [J]. Ocean Coastal Manag, 2015, 105:100-105.
- [4] Minashree K, Gupta SK. Age dependent adjustment factor (ADAF) for the estimation of cancer risk through trihalomethanes (THMs) for different age groups - a innovative approach [J]. Ecotoxicol Environ Saf, 2018, 148: 960-968.
- [5] 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]. Environ Sci Technol, 2015, 49(22):13094-13102.
- [6] 栗旻, 李建云, 张旭辉, 等. 云南省 K 市水厂出厂水中卤乙酸的健康风险评估[J]. 实用预防医学, 2021, 28(5):577-580.
- [7] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水标准检验方法水样的采集与保存:GB/T 5750.2-2006 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007:1-6.
- [8] United States Environmental Protection Agency. Drinking water standards and health advisories[S]. Washington DC:US EPA, 2018:1-20.
- [9] United States Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual supplemental guidance[EB/OL]. [2021-12-20]. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/OSWERdirective9285.6-03.pdf>.
- [10] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京:中国环境出版社, 2013:87-801.
- [11] United States Environmental Protection Agency. Integrated risk information system[EB/OL]. (2010-03-31) [2021-01-02]. <https://www.epa.gov/iris>.
- [12] 徐鸿, 才军. S 市出厂水中消毒副产物分析及风险评估[J]. 给水排水, 2020, 46(9):37-40.
- [13] 俞蕴芳, 曹荣玉, 张泾凯, 等. 次氯酸钠消毒对饮用水中氯酸盐的影响[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17):138-140, 144.
- [14] 金涛, 唐非. 饮用水氯化消毒副产物及其对健康的潜在危害[J]. 中国消毒学杂志, 2013, 30(3):255-258.
- [15] 颀学礼. 饮用水深度净化与水质处理器[M]. 北京:化学工业出版社, 2004:153.
- [16] 李晓迪, 刘华, 关玥, 等. 不同类型饮用水中重金属元素和消毒副产物健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2018, 35(7):642-647.
- [17] 陈春静, 张景山, 葛明, 等. 南京市出厂水氯化消毒副产物健康风险评估[J]. 预防医学, 2021, 33(2):194-196.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 曹美苑, 李鲤橙, 黄柏文. 国内饮用水中消毒副产物分布水平与健康风险评估[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(3):90-93.

收稿日期:2021-03-31