

云南省 K 市水厂出厂水中卤乙酸的健康风险评估

栗旸, 李建云, 张旭辉, 李晓琍, 张瑞仙

云南省疾病预防控制中心, 云南 昆明 650022

摘要: **目的** 监测饮用水中卤乙酸污染状况, 并对其健康风险进行评价, 了解 K 市人群通过饮水途径可能引起的健康风险。**方法** 依据《生活饮用水标准检测方法》(GB/T 5750-2006) 对 K 市市政水厂出厂水卤乙酸进行监测, 利用美国国家环保局推荐的健康风险模型进行风险评价。**结果** K 市饮用水二氯乙酸、三氯乙酸致癌风险范围分别为 $3.33 \times 10^{-6} \sim 1.38 \times 10^{-4}$ 、 $1.12 \times 10^{-6} \sim 1.91 \times 10^{-4}$, 二氯乙酸致癌风险占比最高; 非致癌健康危害指数分别为 $1.67 \times 10^{-2} \sim 6.90 \times 10^{-1}$ 、 $8.34 \times 10^{-4} \sim 1.42 \times 10^{-1}$, 三氯乙酸对非致癌健康危害风险贡献最大。**结论** K 市应重视长期暴露于饮用水中消毒副产物卤乙酸引起的潜在健康风险, 降低水中卤乙酸类消毒副产物对人群的健康危害。

关键词: 饮用水; 卤乙酸; 健康风险评估

中图分类号: R123 文献标识码: A 文章编号: 1006-3110(2021)05-0577-04 DOI: 10.3969/j.issn.1006-3110.2021.05.010

Health risk assessment of haloacetic acids in water from water treatment plants in City K, Yunnan Province

LI Yang, LI Jian-yun, ZHANG Xu-hui, LI Xiao-li, ZHANG Rui-xian

Yunnan Provincial Center for Disease Control and Prevention, Kunming, Yunnan 650022, China

Corresponding author: ZHANG Rui-xian, E-mail: 1045515173@qq.com

Abstract: **Objective** To monitor the pollution status of haloacetic acids in drinking water and evaluate their health risk so as to understand the health risk possibly caused by drinking water among residents in City K. **Methods** Haloacetic acids in water from municipal water treatment plants in City K were monitored according to the Standard Test Method for Drinking Water (GB/T 5750-2006). The health risk model recommended by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) was used for the risk assessment. **Results** The carcinogenic risk ranges of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid were $3.33 \times 10^{-6} \sim 1.38 \times 10^{-4}$ and $1.12 \times 10^{-6} \sim 1.91 \times 10^{-4}$, respectively, and the proportion of carcinogenic risk due to dichloroacetic acid was the highest. The non-carcinogenic health hazard indexes of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid were $1.67 \times 10^{-2} \sim 6.90 \times 10^{-1}$ and $8.34 \times 10^{-4} \sim 1.42 \times 10^{-1}$, respectively, and trichloroacetic acid contributed the most to the risk of non-carcinogenic health hazard. **Conclusion** Attention should be paid to the potential health risk caused by long-term exposure to disinfection by-products in drinking water in City K so as to reduce the health hazards of disinfection by-products like haloacetic acids in drinking water among residents.

Keywords: drinking water; haloacetic acids; health risk assessment

在城市集中式供水系统中, 消毒是必须的水处理工艺, 是保证饮水安全必不可少的措施。氯化消毒因其技术成熟, 消毒效果好, 价格低廉的优势, 成为我国最广泛使用的一种饮用水消毒方法^[1]。然而, 含氯消毒剂会与水中一些天然有机物或无机物发生反应, 产生一系列消毒副产物。目前饮用水中已经发现 600 余种^[2], 卤乙酸(haloacetic acids, HAAs)就是其中主要的一种^[3], 国际、国内诸多研究表明, HAAs 具有生殖、发育和心脏等毒性^[4-6]。饮用水国家卫生标准^[7]对饮用

水中二氯乙酸(dichloroacetic acid, DCAA)及三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCAA)的限值做出了规定。目前尚未见到有关 K 市饮用水中卤乙酸的健康风险评估的报道, 为了解 K 市人群通过饮水途径可能引起的健康风险, 鉴于我国尚未有完善的健康风险评估模型, 本文作者采用美国国家环保局的致癌和非致癌健康风险评估模型, 对 2017—2019 年 K 市水厂出厂水中卤乙酸的成人致癌风险和非致癌健康风险进行了分析。

1 对象与方法

1.1 对象 K 市市区所有氯化消毒市政水厂, 水样类型为出厂水, 连续三年(2017—2019 年)分别于丰水期

作者简介: 栗旸(1975-), 女, 本科, 副主任技师, 主要从事环境卫生检测工作。

通信作者: 张瑞仙, E-mail: 1045515173@qq.com。

(5—11 月)和枯水期(12 月至次年 4 月)采样进行监测,共检测水样 60 件。

1.2 方法 严格按《生活饮用水标准检测方法》(GB/T 5750—2006)^[8]要求进行水样采集、保存、运输、检测,检测结果按照《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)^[7]进行评价。

1.3 检测指标 二氯乙酸和三氯乙酸。

1.4 质量控制 工作人员经统一培训后,开展水厂基本情况调查、水样采集、检测工作。每次采样均设立平行样及空白对照,在分析过程中,设立空白样品、平行样并进行加标回收试验,以确保检测的准确性。检测的每批样本均带平行质控样,并对超标结果进行复检。

1.5 健康风险模型 采用美国国家环保局推荐的“四步法”,即危害识别、剂量—反应评估、暴露评估、风险特征的健康风险评估模型,对 K 市饮用水中卤乙酸进行经口致癌和非致癌的健康风险评估。美国国家环保局根据污染物是否具有致癌性,分别建立风险模型进行健康风险评估。DCAA 和 TCAA 既具有致癌效应,也具有非致癌效应,因此,在对其进行健康风险评估的同时考虑致癌风险和非致癌风险。

1.5.1 致癌风险评估 致癌性污染物的致癌风险通常用风险值(risk, R)表示,某一化学污染物的低剂量致癌风险按式(1)计算

$$R=CDI\times SF \tag{1}$$

式中,R-某种化学污染物经饮水途径产生的个人致癌风险(/a)。SF-某种化学污染物的致癌潜在因子或斜率因子[(kg.d)/mg],其值可在美国国家环保局的综合风险信息系统(integrated risk information system, IRIS)中查得。CDI-某种化学污染物经饮水途径的日平均摄入量[mg/(kg.d)],CDI 由公式(2)计算:

$$CDI=(CW\times IR\times EF\times ED)/(BW\times AT) \tag{2}$$

CW-饮用水中污染物的浓度(mg/L)。IR-成人每日饮水量(L/d)。EF-暴露频率(d/a)。ED-持续暴露时间(a)。BW-成人体重(kg)。AT-平均暴露时间(AT=ED×365)

当存在多种致癌物质时,一般先分别把各物质健康风险计算出来,然后相加。饮水途径暴露的单项致癌风险和总致癌风险的计算见公式(3):

$$RT=\sum Ri \tag{3}$$

式中:RT-总致癌风险(/a)。Ri-第 i 个致癌物质的致癌风险(/a)

1.5.2 非致癌风险评估 非致癌健康风险通常用危害指数(hazard index, HI)表示,用公式(4)计算:

$$HI=CDI/RfD \tag{4}$$

式中,HI-某种化学污染物经饮水途径产生的平均个人健康危害风险(/a)。CDI-非致癌物经饮水途径的日暴露剂量[mg/(kg.d)]。RfD-为某种化学污染物的非致癌参考剂量[mg/(kg.d)]。

单项非致癌健康危害风险和总的非致癌健康危害风险计算公式如下:

$$HIT=\sum HI_i \tag{5}$$

式中:HIT-总的非致癌健康危害风险(/a)。HIi-第 i 个非致癌物质的健康危害风险(/a)。

1.6 评价模型参数的确定 根据美国国家环保局 IRIS 公布的有关暴露途径的参考剂量值^[9],查询到二氯乙酸的经口 SF 与 RfD 值分别为 0.050、0.004[mg/(kg.d)];三氯乙酸的经口 SF 与 RfD 值分别为 0.067、0.020[mg/(kg.d)]。人群饮水途径的暴露参数参考 2013 年中国环境保护部出版的《中国人群暴露参数手册》(成人卷)^[10],具体见表 1。

表 1 饮水途径的暴露参数

地区	性别	IR(L/d)	EF(d/a)	ED(/a)	BW(kg)
云南省	男	2.121	365	67.06	63.6
城市	女	1.853	365	72.43	54.5

1.7 健康风险评估标准 对于致癌物风险,美国国家环保局规定风险值在 1×10⁻⁶~1×10⁻⁴ 范围内时是可以接受的,致癌物风险值在 1×10⁻⁶ 以下时认为不对人体健康产生危害,在 1×10⁻⁴ 以上时认为危害不可接受;对于非致癌物风险,以危害指数<1 作为评价标准^[9,11]。

1.8 统计学分析 采用 Excel 2010 软件进行检测结果的录入并建立数据库,采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析。经 Kolmogorov-Smirnov 法正态性检验,监测数据均属于非正态性分布,因此数据采用中位数(M)和四分位间距进行表示。当待测物质未检出时,以方法检出限的一半进行统计计算。两组水样卤乙酸浓度的比较采用 Mann-Whitney U 检验;多组间比较采用 Kruskal Wallis H 多组秩和检验。P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 饮用水中卤乙酸的检测情况 二氯乙酸检出率为 100.00%,三氯乙酸检出率为 86.67%;二氯乙酸有 1 件水样不合格,合格率为 98.33%,三氯乙酸合格率为 100%,结果见表 2。

表 2 卤乙酸检测情况

污染物	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	P ₂₅	P ₇₅	检出率 (%)	国家标准限值 (mg/L)	合格率 (%)
二氯乙酸	0.0020~0.0812	0.00735	0.00520	0.01108	100.00	0.05	98.33
三氯乙酸	0.0005~0.0838	0.00890	0.00200	0.01568	86.67	0.1	100.00

2.2 不同时期卤乙酸检测情况 枯水期和丰水期二氯乙酸、三氯乙酸检出浓度差异均有统计学意义 ($P<0.05$),见表 3。

表 3 不同水期卤乙酸检测情况

水期	二氯乙酸			三氯乙酸		
	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	统计学值	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	统计学值
枯水期	0.0022~0.0274	0.00905	$Z=1.420, P=0.035$	0.0005~0.0288	0.0030	$Z=2.066, P=0.000$
丰水期	0.0020~0.0812	0.00735		0.0015~0.0838	0.0129	

2.3 不同年份卤乙酸检测情况 2017—2019 年饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸检出浓度差异均有统计学意义 ($P<0.05$),见表 4。

表 4 不同年份卤乙酸检测情况

水期	二氯乙酸			三氯乙酸		
	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	统计学值	浓度范围 (mg/L)	中位数 (mg/L)	统计学值
2017	0.0037~0.0274	0.01025	$Z=8.612, P=0.013$	0.0044~0.0288	0.01325	$Z=8.156, P=0.017$
2018	0.0020~0.0812	0.00735		0.0014~0.0838	0.00570	
2019	0.0022~0.0136	0.00645		0.0005~0.0447	0.00145	

2.4 健康风险评估 饮用水中二氯乙酸、三氯乙酸致癌风险范围分别为 $3.33\times10^{-6}\sim1.38\times10^{-4}$ 、 $1.12\times10^{-6}\sim1.91\times10^{-4}$,总致癌风险为 $4.45\times10^{-6}\sim3.29\times10^{-4}$,所有采样点 HAAS 的致癌风险均高于美国国家环保局推荐的致癌风险管理阈值 (1.0×10^{-6})。非致癌健康危害指数分别为 $1.67\times10^{-2}\sim6.90\times10^{-1}$ 、 $8.34\times10^{-4}\sim1.42\times10^{-1}$,总的非致癌健康危害风险为 $1.75\times10^{-2}\sim8.33\times10^{-1}$,均低于美国国家环保局规定的限值 ($HI<1$)。女性通过饮水途径致癌风险及非致癌健康危害指数比男性略高,见表 5。

表 5 饮用水中卤乙酸所致健康风险 (个人年风险, /a)

污染物	性别	致癌风险		非致癌风险	
		范围	中位数	范围	中位数
二氯乙酸	男	$3.33\times10^{-6}\sim1.35\times10^{-4}$	1.23×10^{-5}	$1.67\times10^{-2}\sim6.77\times10^{-1}$	6.13×10^{-2}
	女	$3.40\times10^{-6}\sim1.38\times10^{-4}$	1.25×10^{-5}	$1.70\times10^{-2}\sim6.90\times10^{-1}$	6.20×10^{-2}
三氯乙酸	男	$1.12\times10^{-6}\sim1.87\times10^{-4}$	1.99×10^{-5}	$8.34\times10^{-4}\sim1.40\times10^{-1}$	1.48×10^{-2}
	女	$1.14\times10^{-6}\sim1.91\times10^{-4}$	2.03×10^{-5}	$8.50\times10^{-4}\sim1.42\times10^{-1}$	1.51×10^{-2}
合计	男	$4.45\times10^{-6}\sim3.23\times10^{-4}$	3.21×10^{-5}	$1.75\times10^{-2}\sim8.17\times10^{-1}$	7.61×10^{-2}
	女	$4.54\times10^{-6}\sim3.29\times10^{-4}$	3.28×10^{-5}	$1.79\times10^{-2}\sim8.33\times10^{-1}$	7.76×10^{-2}

3 讨论

饮用水卫生是关系民生的重大公共卫生问题,通过风险评估定量描述水质卫生状况对公众健康危害的程度,可以为相关卫生决策和风险管理提供技术依据。卤乙酸作为非挥发性消毒副产物,是《生活饮用水卫生标准》中氯化消毒副产物主要的控制目标。国内研究者对饮用水中卤乙酸健康风险已经开展了一些研究。

本文中,K 市卤乙酸类物质通过饮水途径所致的总致癌风险均高于美国国家环保局给出的可接受最低致癌风险,其中丰水期有一个采样点致癌风险较高,监测结果也超过了国家饮用水卫生标准的限值,应严格把握水源和净化关口,降低致癌风险。总的非致癌健康危害风险为 $1.75\times10^{-2}\sim8.33\times10^{-1}$,均低于美国国家环保局规定的限值 ($HI<1$),非致癌风险处于可以接受范围。K 市饮用水中二氯乙酸对饮水途径致癌风险贡献最大,与李晓玲等^[12]的研究结果基本一致,与谢许情、陈晓峰等^[13-15]的调查结果不一致;非致癌健康危害风险中三氯乙酸占最大比例,与郝莉鹏等^[15]的调查结论不一致;这些结果的差异主要是由不同地区饮用水中消毒副产物浓度差异以及暴露参数不同导致的。监测结果显示,K 市应重视长期暴露于饮用水中消毒副产物引起的潜在健康风险,降低水中卤乙酸类消毒副产物对人群的健康危害。

水源水中有机物含量和氯化消毒工艺对卤乙酸等氯化消毒副产物的形成有明显影响^[16],不同地区、不同时期饮用水中卤乙酸引起的健康风险也有差异。本研究表明,K 市自来水不同年份二氯乙酸、三氯乙酸检出浓度差异有显著性,不同水期三氯乙酸检出浓度差异有显著性。不同年份不同水期有差异,提示需要对饮用水中的卤乙酸进行持续监测,以了解其变化及趋势,及时掌握对饮水人群的健康影响。

需要指出的是,本研究存在一定的不确定性。仅