

• 卫生管理 •

重庆市涪陵区城乡生活饮用水中三卤甲烷含量及健康风险评估*

黎永梅¹, 向 于¹, 梁 美², 毕 玲¹, 刘 榆¹, 艾彦彪¹, 邓会琼¹, 何其峰¹

(1. 重庆市涪陵区疾病预防控制中心, 重庆 408099; 2. 重庆大学附属涪陵医院眼科, 重庆 408107)

[摘要] 目的 了解涪陵区城乡生活饮用水中三卤甲烷 (THMs) 的含量水平, 初步评估涪陵区生活饮用水中 THMs 对人体健康产生的潜在风险。方法 对涪陵区 2024 年城乡生活饮用水中使用氯化消毒, 消毒副产物可能含有 THMs 的城乡生活饮用水进行规范采样, 枯水期采样时间为 2023 年 12 月, 丰水期为 2024 年 5 月, 每个水期采集出厂水和末梢水各 1 件, 采样点基本固定。共采集水样 136 件, 均送实验室采用顶空毛细管柱气相色谱法检测出 THMs 的含量, 通过美国国家环境保护局 (US EPA) 推荐的健康风险评估模型, 对 THMs 经饮水暴露途径进行健康风险评估。结果 涪陵区 4 种 THMs 检出率和含量关系从高到低依次均为三氯甲烷 > 二氯一溴甲烷 > 三溴甲烷 > 一氯二溴甲烷, 除 1 例三氯甲烷含量超过标准限值外, 其余 3 种 THMs (二氯一溴甲烷、三溴甲烷、一氯二溴甲烷) 含量均符合国家《生活饮用水标准》(GB 5749-2022) 的要求, 合格率为 99.26%。城乡居民经饮水途径致癌风险成人和儿童均在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ 可接受范围内, 非致癌风险成人和儿童非致癌风险指数 (HI) 均远小于 1, 风险较低均在可接受范围内。结论 涪陵区城乡生活饮用水中的 THMs 含量合格率为 99.26%, 4 种 THMs 致癌风险和非致癌风险成人和儿童均在可接受范围, 消毒副产物水质安全总体可控, 但三氯甲烷致癌风险成人和儿童均接近上限, 需要进一步监测和控制含量。三氯甲烷是 THMs 消毒副产物主要的健康潜在风险。

[关键词] 生活饮用水; 三卤甲烷; 消毒副产物; 健康风险评估

DOI: 10.3969/j.issn.1009-5519.2025.10.044

中图法分类号: R123.1

文章编号: 1009-5519(2025)10-2480-06

文献标识码: C

涪陵区地处重庆市中部, 三峡库区腹地, 辖区面积 2 942.36 km², 常住人口为 110.46 万人, 辖 11 个街道和 16 个镇, 是重庆主城都市区重要战略支点城市及成渝经济区东部中心城市。涪陵区城乡生活饮用水的安全是政府各级部门重点关注的民生工程, 是备受关注的公共健康问题。对生活饮用水进行消毒, 是杀灭水中对人体健康有害的病原微生物, 防止介水传染病, 保障用水安全的重要手段。通过调查发现本区城乡生活饮用水消毒方式以氯消毒比较常用, 城市生活饮用水 (市政供水) 主要是液氯消毒, 农村生活饮用水主要是二氧化氯和次氯酸钠。氯消毒工艺简单、易操作、投药准确、技术成熟稳定、成本低, 可有效灭活各种病原体的微生物, 在全球范围内广泛应用, 包括液氯、次氯酸钠、二氧化氯、次氯酸钙等方式。但氯消毒剂易与水中无机物、有机物反应生成消毒副产物, 研究表明, 部分消毒副产物具有致畸、致癌和致突变作用^[1], 而氯消毒工艺的消毒副产物产生量远高于其他消毒技术^[2-3], 且消毒副产物种类众多, 包括三卤甲烷 (THMs)、卤乙酸、卤乙腈、卤代酮、卤乙醛、卤代硝基甲烷等。其中, THMs 是最常见的消毒副产

物, 主要包括三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷和三溴甲烷等^[4-6]。在流行病学研究中, 郑霖^[7]研究发现, 人群中膀胱癌的发病率及死亡率等与饮用水中 THMs 的暴露水平相关, 国际癌症研究机构将消毒副产物二氯一溴甲烷、三氯甲烷列入 2B 组 (对人可能致癌物)^[8]。因此, 长期低剂量暴露于饮用水消毒副产物中是否对人群健康产生危害, 成为公众关注的热点^[2]。有文献报道, 我国华北、华南、华东区域典型城市供水系统中 THMs 含量, 其平均值和中位值大都处于安全水平, 不过几乎所有城市都检出了以上 4 种 THMs^[3]。我国 2023 年 4 月 1 日实施的新国标《生活饮用水卫生标准: GB 5749-2022》^[9] 加强了对生活饮用水消毒副产物的监测, 将这 4 种 THMs 全部纳入常规指标进行监测监管。目前, 关于涪陵区城乡生活饮用水中 THMs 的含量和健康风险评估尚未见公开报道, 因此, 本研究进行了城乡生活饮用水消毒副产物的相关调查研究。

1 材料与方法

1.1 水样的采集、检测与评价 按照国家标准《生活饮用水标准检验方法: GB 5750-2023》^[10] 及《涪陵区

* 基金项目: 重庆市涪陵区科卫联合医学科研项目 (2022KWLH060)。

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250708.1413.008\(2025-07-08\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250708.1413.008(2025-07-08))

2024 年城乡生活饮用水水质监测工作方案》，由专业人员对涪陵区 2024 年城乡生活饮用水中使用氯化消毒，消毒副产物可能含有 THMs 的城乡生活饮用水进行规范采样，枯水期采样时间为 2023 年 12 月，丰水期为 2024 年 5 月，每个水期采集出厂水和末梢水各 1 件，采样点基本固定。共采集水样 136 件，均送实验室采用顶空毛细管柱气相色谱法[仪器与试剂：安捷伦 7890A 型气相色谱仪，J-219；实验室用超纯水，氯化钠(分析纯)]检测出 THMs 的含量。结果评价按照《生活饮用水卫生标准:GB 5749-2022》进行评价，三氯甲烷、三溴甲烷、一氯二溴甲烷及二氯一溴甲烷标准限值分别为 0.06、0.10、0.10、0.06 mg/L。

1.2 质量控制 水样采集、保存、运输严格按照现行《生活饮用水标准检验方法 第 2 部分:水样的采集与保存:GB/T 5750. 2-2023》规定执行，每批水样均设置平行样和现场空白样。在分析过程中，设立空白样品、平行样，并进行加标回收试验，要求空白样品不能检出待测成分，平行样相对偏差<20%，回收率为 60%~120%，实际测定结果符合要求，结果可控。对于检测结果存疑的样品进行复检，保证检测结果的准确性。

1.3 健康风险模型 根据污染物是否具有致癌性，国际癌症研究机构(IARC)通常将其分为致癌和非致癌两类污染物，同时，美国国家环境保护局(US EPA)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价。一般来说，致癌污染物均同时具有非致癌健康危害效应。

1.4 健康风险评估 采用 US EPA 推荐的致癌和非致癌健康风险模型^[11-13]，结合我国环境保护部分别于 2013 年和 2016 年出版的《中国人群暴露参数手册(成人卷)》^[14]《中国人群暴露参数手册(儿童卷:6~17 岁)》^[15]，对涪陵区城乡生活饮用水中 THMs 通过饮水途径暴露的健康风险进行初评。

致癌风险评价: $R=ADD\times SF$

非致癌物风险评价: $HI=ADD/RfD$

日均暴露剂量计算: $ADD=C\times EF\times ED\times IR/AT\times BW$

式中:R 为致癌风险指数;HI 为致癌风险指数;ADD 为经口摄入途径日均暴露量[mg/(kg·d)];IR 为平均每日饮水量(L/d),成人为 2 L/d,儿童为 0.85 L/d;EF 为暴露频率(d/a),取 365 d/a;ED 为暴露周期(a),成人推荐为 70 a,儿童推荐为 17 a;AT 为平均暴露时间(d),非致癌物按 30 年 10 950 d,致癌物按 70 年 25 550 d;BW 为体重(kg),重庆地区成人平均为 60 kg,儿童为 15 kg;C 为污染物含量(mg/L);SF 为特定致癌物质的斜率因子[(kg·d)/mg],表示个体终生暴露于某种致癌物后发生恶性肿瘤的概率估

计值,根据 US EPA 风险信息系统;RfD 为化学物质非致癌参考剂量[mg/(kg·d)],指人群终生暴露后不太可能产生可预测的有害效应的日均暴露量估计值。

依照 US EPA 的标准,将致癌风险可接受的水平定为 $1.0\times 10^{-6}\sim 1.0\times 10^{-4}$,即致癌风险< 1.0×10^{-6} 时认为风险不明显,> 1.0×10^{-4} 认为有较大风险。对于非致癌风险,若 $HI<1$,认为非致癌风险较低,在人类可接受范围内;若 $HI>1$,则非致癌风险较高,宜引起关注^[16-18]。

1.5 参数选择 根据 US EPA 综合风险信息系统(IRIS)公布的多种有毒物质有关暴露途径的参考剂量值^[19-20],确定 THMs 的分类与经口 SF 值与 RfD 值,具体见表 1。

表 1 THMs 致癌斜率因子及非致癌参考剂量^a

| THMs | 致癌斜率因子 SF [(kg·d)/mg] | 非致癌参考剂量 RfD[mg/(kg·d)] |
|--------|--------------------------|---------------------------|
| 三氯甲烷 | 0.010 | 0.031 |
| 二氯一溴甲烷 | 0.020 | 0.084 |
| 一氯二溴甲烷 | 0.020 | 0.062 |
| 三溴甲烷 | 0.008 | 0.020 |

注:THMs 为三卤甲烷;^a 表示 US EPA 综合风险信息系统公布数据。

1.6 统计学处理 采用 Excel2003 软件整理数据,采用 SPSS22.0 对数据进行统计学分析,计量资料不符合正态分布,采用中位数(M)表示,对于低于检出限的结果值,根据《水环境监测规范》,采用“1/2 检出限”的方式参与计算。非正态分布资料采用 M 和四分位间距(IQR)描述,组间比较采用 Mann-Whitnef U 检验, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 方法学验证 按照国家标准《生活饮用水标准检验方法:GB 5750-2023》^[10],参与检验的人员参加了国家和重庆市举办的相关专业检验培训,确保批量进行 THMs 检验方法可行,进行了方法学验证,各组分在相应浓度范围内具有良好的线性关系,相关系数(r)>0.99。以信噪比为 3 时对应的目标物浓度作为方法检出限,求得目标组分的检出限为 0.009~0.038 μg/L,低于国家标准。采用空白水样进行加标回收试验,平行测定 7 次,目标组分的回收率在 99.62%~100.04%,相对标准偏差(RSD)在 0.59%~1.65%,提示方法具有较高的准确度与精密度,符合生活饮用水卫生标准的检测要求。见表 2。

2.2 检测结果 2024 年共检测氯化消毒,可能产生 THMs 消毒副产物的城乡生活饮用水共 136 件。有 1 件样品中的三氯甲烷超过标准限值,其余 135 件均未

超过标准限值,合格率为 99.26%,一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷,136 件所检样品均未超过标准限值,合格率为 100.00%。检出率从高到低依次为三氯甲烷>二氯一溴甲烷>三溴甲烷>一氯二溴甲烷,分别为 96.32%,61.03%,33.82%,23.53%;平均含量从高到低依次为三氯甲烷>二氯一溴甲烷>三溴

甲烷>一氯二溴甲烷,分别为 5.690 $\mu\text{g/L}$ >0.730 $\mu\text{g/L}$ >0.020 $\mu\text{g/L}$ >0.008 $\mu\text{g/L}$ 。在 THMs 4 种消毒副产物中,三氯甲烷 Q 较大,表示数据的中间 50% 分布越分散,与三氯甲烷这 1 例超过标准限值的异常值有关。见表 3。

表 2 2024 年涪陵区城乡生活饮用水检测方法的线性范围及检出限、精密度与准确度

| 目标化合物 | 线性范围及检出限 | | | | 精密度与准确度 | | | |
|--------|-----------------------------|--------------------|---------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|---------------|
| | 线性范围 ($\mu\text{g/L}$) | 标准曲线 | 相关系数 | 检出限 ($\mu\text{g/L}$) | 加标量 ($\mu\text{g/L}$) | 测定值 ($\mu\text{g/L}$) | 回收率 (%) | 相对标准 偏差(%) |
| 三氯甲烷 | 2.50~50.0 | $Y=174.26X+276.65$ | 0.998 3 | 0.026 | 8.0 | 7.98 | 99.75 | 1.65 |
| 二氯一溴甲烷 | 2.50~50.0 | $Y=480.76X+953.27$ | 0.997 0 | 0.009 | 8.0 | 7.99 | 99.88 | 0.59 |
| 一氯二溴甲烷 | 2.50~50.0 | $Y=272.50X+496.87$ | 0.997 4 | 0.016 | 8.0 | 7.97 | 99.62 | 1.08 |
| 三溴甲烷 | 2.50~50.0 | $Y=83.42X+89.78$ | 0.999 0 | 0.038 | 8.0 | 8.03 | 100.04 | 1.37 |

表 3 2024 年涪陵区城乡生活饮用水中 THMs 检出情况($n=136$)

| THMs | 合格率 (%) | 检出率 (%) | 检出限 ($\mu\text{g/L}$) | 标准限值 ($\mu\text{g/L}$) | 浓度范围 ($\mu\text{g/L}$) | 中位数 ($M, \mu\text{g/L}$) ^a | 四分位距 ($IQR, \mu\text{g/L}$) |
|--------|------------|------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|----------------------------------|
| 三氯甲烷 | 99.26 | 96.32 | 0.032 | 60 | ND-76.30 | 5.690 | 8.25 |
| 一氯二溴甲烷 | 100.00 | 23.53 | 0.016 | 100 | ND-5.45 | 0.008 | 0.00 |
| 二氯一溴甲烷 | 100.00 | 61.03 | 0.015 | 60 | ND-12.50 | 0.730 | 3.79 |
| 三溴甲烷 | 100.00 | 33.82 | 0.041 | 100 | ND-12.17 | 0.020 | 3.50 |

注:THMs 表示三卤甲烷;^a 数据均为非正态分布,采用 M 和 Q 描述。ND 表示未检出。

从水样类型来看,除二氯一溴甲烷城市水和农村水差异无统计学意义($P>0.05$)外,其余 3 项(三氯甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷)差异均有统计学意义($P<0.05$),城市水中 THMs 的含量高于农村水。从

水期来看,丰水期三氯甲烷、二氯一溴甲烷的含量高于枯水期,2 个水期一氯二溴甲烷的含量大致相同,枯水期三溴甲烷含量高于丰水期,4 种 THMs 消毒副产物比较,差异均有统计学意义($P<0.05$)。见表 4。

表 4 2024 年涪陵区城乡生活饮用水不同水样类型及水期 THMs 含量比较($\mu\text{g/L}$)

| THMs | 水样类型 | | | | 水期 | | | | | | | |
|--------|---------------|------|---------------|------|--------|--------|---------------|------|---------------|-------|---------|--------|
| | 城市水($n=65$) | | 农村水($n=71$) | | Z^a | P | 枯水期($n=66$) | | 丰水期($n=70$) | | Z | P |
| | M | Q | M | Q | | | M | Q | M | Q | | |
| 三氯甲烷 | 6.000 | 6.76 | 3.840 | 8.31 | -3.752 | <0.001 | 4.410 0 | 3.97 | 7.010 0 | 11.19 | -3.194 | 0.001 |
| 一氯二溴甲烷 | 0.008 | 1.81 | 0.008 | 0.00 | -4.647 | <0.001 | 0.008 0 | 0.00 | 0.008 0 | 1.35 | -5.569 | <0.001 |
| 二氯一溴甲烷 | 1.750 | 5.52 | 0.710 | 1.75 | -1.199 | 0.231 | 0.007 5 | 0.00 | 3.040 0 | 5.32 | -10.354 | <0.001 |
| 三溴甲烷 | 0.020 | 9.64 | 0.020 | 1.94 | -3.471 | <0.001 | 3.020 0 | 9.52 | 0.020 0 | 0.00 | -9.040 | <0.001 |

注:THMs 表示三卤甲烷;^a 数据均为非正态分布,采用 M 和 Q 描述,采用 Mann-Whitnef U 检验进行 2 组间比较。

2.3 健康风险评估 运用 US EPA 推荐的致癌和非致癌健康风险模型,对本研究数据进行计算结果显示,涪陵区 2024 年城乡生活饮用水氯化消毒副产物 THMs 的成人和儿童致癌风险均在 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$,依照 US EPA 的标准,均在可接受的水平,但三氯甲烷成人和儿童均接近上限,需要进一步监测和控制含量,其余 3 项(二氯一溴甲烷、一氯二溴

甲烷、三溴甲烷)成人和儿童致癌风险远低于上限,风险不明显;4 种 THMs 消毒副产物 HI 均远小于 1,认为非致癌风险较低,在可接受范围内。见表 5。

从水样类型来看,致癌风险成人和儿童三氯甲烷农村水(2.54×10^{-5} 、 2.44×10^{-5})高于城市水(1.39×10^{-5} 、 1.34×10^{-5}),其余 3 项(二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷)致癌风险成人和儿童城

市水均高于农村水;非致癌风险成人和儿童三氯甲烷农村水(8.19×10^{-2} 、 7.87×10^{-2})也均高于城市水(4.48×10^{-2} 、 4.32×10^{-2}),其余 3 项(二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷)非致癌风险成人和儿童城市水均高于农村水。从水期来看,致癌风险成人和

儿童枯水期三氯甲烷和三溴甲烷均较丰水期高,丰水期一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷均较枯水期高,非致癌风险成人和儿童枯水期三氯甲烷和三溴甲烷均较丰水期高,丰水期一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷均较枯水期高。见表 6。

表 5 2024 年涪陵区城乡生活饮用水 THMs 健康风险评估

| THMs | 检出率(%) | 浓度范围(μg/L) | 致癌风险 | | 非致癌风险 | |
|--------|--------|------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 |
| 三氯甲烷 | 96.32 | ND-76.3 | 2.54×10^{-5} | 2.44×10^{-5} | 8.19×10^{-2} | 7.87×10^{-2} |
| 一氯二溴甲烷 | 23.53 | ND-5.45 | 3.63×10^{-6} | 3.50×10^{-6} | 2.93×10^{-3} | 2.82×10^{-3} |
| 二氯一溴甲烷 | 61.03 | ND-12.50 | 8.33×10^{-6} | 8.02×10^{-6} | 4.96×10^{-3} | 4.77×10^{-3} |

注:THMs 表示三卤甲烷;ND 表示未检出。

表 6 2024 年涪陵区城乡生活饮用水不同水样类型及水期 THMs 健康风险评估

| THMs | 水样类型 | | | | | | | |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 城市水 | | | | 农村水 | | | |
| | 致癌风险 | | 非致癌风险 | | 致癌风险 | | 非致癌风险 | |
| | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 |
| 三氯甲烷 | 1.39×10^{-5} | 1.34×10^{-5} | 4.48×10^{-2} | 4.32×10^{-2} | 2.54×10^{-5} | 2.44×10^{-5} | 8.19×10^{-2} | 7.87×10^{-2} |
| 一氯二溴甲烷 | 3.63×10^{-6} | 3.50×10^{-6} | 2.93×10^{-3} | 2.82×10^{-3} | 1.96×10^{-6} | 1.89×10^{-6} | 1.58×10^{-3} | 1.52×10^{-3} |
| 二氯一溴甲烷 | 8.33×10^{-6} | 8.02×10^{-6} | 4.96×10^{-3} | 4.77×10^{-3} | 6.14×10^{-6} | 5.92×10^{-6} | 3.65×10^{-3} | 3.52×10^{-3} |
| 三溴甲烷 | 3.25×10^{-6} | 3.13×10^{-6} | 2.03×10^{-2} | 1.96×10^{-2} | 3.06×10^{-6} | 2.95×10^{-6} | 1.92×10^{-2} | 1.85×10^{-2} |

| THMs | 水期 | | | | | | | |
|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 枯水期 | | | | 丰水期 | | | |
| | 致癌风险 | | 非致癌风险 | | 致癌风险 | | 非致癌风险 | |
| | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 | 成人 | 儿童 |
| 三氯甲烷 | 2.54×10^{-5} | 2.44×10^{-5} | 8.19×10^{-2} | 7.87×10^{-2} | 1.72×10^{-5} | 1.66×10^{-5} | 5.55×10^{-2} | 5.35×10^{-2} |
| 一氯二溴甲烷 | 1.33×10^{-6} | 1.28×10^{-6} | 1.08×10^{-3} | 1.04×10^{-3} | 3.63×10^{-6} | 3.50×10^{-6} | 2.93×10^{-3} | 2.82×10^{-3} |
| 二氯一溴甲烷 | 2.37×10^{-6} | 2.27×10^{-6} | 1.41×10^{-3} | 1.35×10^{-3} | 8.33×10^{-6} | 8.02×10^{-6} | 4.96×10^{-3} | 4.77×10^{-3} |
| 三溴甲烷 | 3.25×10^{-6} | 3.13×10^{-6} | 2.03×10^{-2} | 1.96×10^{-2} | 2.50×10^{-6} | 2.41×10^{-6} | 1.56×10^{-2} | 1.51×10^{-2} |

注:THMs 表示三卤甲烷。

3 讨 论

3.1 2024 年涪陵区城乡生活饮用水 THMs 消毒副产物水质安全总体可控,但潜在健康风险值得关注。136 件样品中仅有 1 件三氯甲烷超标,合格率为 99.26%,其余 3 项指标(一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷)均未超标,合格率为 100.00%,说明涪陵区城乡生活饮用水中的 THMs 含量基本在国家标准范围内,水质安全总体可控。从 4 种 THMs 检出率来看,从高到低依次为三氯甲烷>二氯一溴甲烷>三溴甲烷>一氯二溴甲烷(检出率分别为 96.32%、61.03%、33.82%、23.53%),三氯甲烷检出率最高,其次是二氯一溴甲烷,与王晓霜等^[3]研究的中国 20 座城市的检出率顺序一致,检出率较王苟等^[20]研究的深圳市龙岗区低。从 4 种 THMs 的含量来看,从高到

低依次为三氯甲烷>二氯一溴甲烷>三溴甲烷>一氯二溴甲烷,含量 M 分别为 5.690、0.730、0.020、0.008 μg/L,均较王晓霜等^[3]研究的近 20 年有关中国部分饮用水厂中三氯甲烷、三溴甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷的平均含量(7.98、1.90、5.87、3.33 μg/L)低。本研究显示,2024 年涪陵区城乡生活饮用水中三氯甲烷的检出率和平均含量均显著高于其他 3 项(一氯二溴甲烷、二氯一溴甲烷、三溴甲烷),表明三氯甲烷在城乡生活饮用水氯化消毒过程中是最易生成的消毒副产物,说明涪陵区需要重点关注三氯甲烷作为消毒副产物对生活饮用水水质的影响及对健康的潜在威胁。从水样类型来看,三氯甲烷和二氯一溴甲烷城市水中的平均含量 M(6.000、1.750 μg/L)高于农村水 M(3.840、0.710 μg/L),其中三氯甲烷差异

有统计学意义($P<0.05$),说明城市水中三氯甲烷的含量差异不是随机波动,可能原因是城市水源以江河水(涪陵段主要是长江和乌江流域)为主,由于流域长,地理和环境因素复杂,可能更容易受到工业或人为污染,水中有机物含量较高,氯消毒过程中消毒剂使用量较高等;也可能是城市供水系统通常规模较大,管网较长,消毒剂在输送过程中也可能与有机物发生更充分的反应,导致三氯甲烷生成量增加。而二氯一溴甲烷差异无统计学意义($P>0.05$),可能表明其来源或分布较为均匀;农村水源多为地下水或小型集中供水系统,有机物含量较低,消毒副产物的生成量相对较少等;从水期来看,4 种 THMs 的含量在丰水期均高于枯水期($P<0.05$),与郭惠珍等^[21]研究结果基本一致。这一现象可能与丰水期水源中有机物含量增加有关。丰水期降雨量较大,地表径流携带大量有机物进入水源,增加了消毒剂与有机物反应的机会,从而导致 THMs 生成量增加。此外,丰水期水温较高,也可能加速氯与有机物的反应速率,进一步增加 THMs 的生成。

建议:提升制水工艺,去除前体物质。各级制水企业和单位,在不能改变消毒方式的情况下,应加强前体物质的去除工艺,从源头上减少消毒副产物 THMs。THMs 的前体物质主要包括腐殖酸、富里酸等大分子天然有机物;藻类及其代谢产物和水生动物;氨基酸、蛋白质等水体中小分子有机物;抗生素、芳香有机物等水体外源性有机污染物等。去除工艺包括活性炭吸附法、膜过滤法、生物氧化法、纳米工艺等,各级制水企业和单位根据水源的实际情况和自身实际情况酌情选择,控制 THMs 在饮用水中的含量,从而降低其对健康的潜在风险。

3.2 2024 年涪陵区城乡生活饮用水 THMs 的致癌风险和非致癌风险,成人和儿童均在可接受范围,但三氯甲烷致癌风险成人和儿童均接近上限,需要进一步监测和控制含量。通过健康风险评估模型可客观评价氯消毒副产物 THMs 对人体健康的危害程度。本研究对涪陵区城乡生活饮用水的健康风险评估显示,4 种 THMs 消毒副产物,成人和儿童的致癌风险均在 $1.0\times 10^{-6}\sim 1.0\times 10^{-4}$,非致癌风险 HI 均远小于 1,致癌风险和非致癌风险对人体的健康均在可接受范围内。二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷远低于下限,风险不明显,但三氯甲烷成人和儿童致癌风险接近上限,是健康的主要潜在风险。三氯甲烷的致癌风险和非致癌风险无论是成人和儿童农村水均高于城市水,枯水期三氯甲烷成人和儿童致癌风险和非致癌风险均比丰水期高。但是从表 4 可以看出,三氯甲烷的四分位距较高,离散程度农村水 $Q(8.31\mu\text{g/L})$ 较城市水 $Q(6.76\mu\text{g/L})$ 高,所以农村水三氯甲

烷的检出率和平均含量虽然低于城市水,但城市水含量分布较为均匀,而农村水中有 1 件样品三氯甲烷含量超过标准限值,因此个别含量高,导致整体致癌风险和非致癌风险增加高于城市水。

建议:各级供水单位和监管部门重点关注的时间节点是枯水期,重点关注的对象是农村水,重点监测指标是 THMs 消毒副产物三氯甲烷。由于新国标将消毒副产物 THMs 纳入了常规监测,建议各级供水单位,有实验室检测条件的水厂,同步纳入制水技术同步监测,根据消毒副产物的含量,调整消毒剂的添加剂量,最大限度减少消毒副产物的产生,减少和降低对健康的潜在风险。

3.3 加强生活饮用水消毒现状和影响因素更广泛的研究,探索减少和降低消毒副产物的干预措施。由于新国标《生活饮用水卫生标准:GB5749-2022》^[9]2023 年 4 月 1 日才开始实施,THMs 纳入了常规指标进行监测,到目前为止,监测数据积累较少,本研究只针对 2024 年度涪陵区城乡生活饮用水进行了分析,导致样本量相对较小,结果可能不具备广泛的代表性;其次,由于本研究仅考虑饮水经口摄入途径,未考虑 THMs 经呼吸系统摄入和经洗澡、游泳、洗脸、泡脚等经皮肤接触途径摄入的因素,估算结果可能与人体实际暴露水平存在一定偏差^[22];同时,THMs 的生成可能受多种因素影响,如水源类型、消毒剂种类和剂量、水温、pH 值、极端天气、管网长度和材质等,而本研究并没有将这些因素纳入进行深入探讨,因此具有一定的研究局限性。但本研究对涪陵区城乡生活饮用水中氯消毒副产物 THMs 的含量水平及污染现状,以及对人体健康产生的潜在风险提供了有效的数据支持,为今后进行更加深入的研究奠定了坚实的基础。

建议:今后结合实际工作,注意积累监测数据,扩大研究的样本量,将更多影响 THMs 生成的因素纳入分析研究,进一步揭示 THMs 的生成机制及其健康风险,探索氯消毒副产物 THMs 的干预措施,提升城乡生活饮用水卫生质量,保障城乡生活饮用水卫生安全,为各级城乡供水单位和监管部门提供更加翔实、有效的数据支撑。

参考文献

[1] KEYSER C H. Report on carcinogenesis bioassay of chloroform [J]. Toxicol Pathol, 1976, 4(4): 21.
[2] 王晓健,塔娜,王天放,等. 1999—2020 年核心期刊三卤甲烷与卤乙酸文献计量学统计[J]. 给水排水, 2021, 47(增 1): 1-8.
[3] 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价[J]. 中国公共卫生, 2020, 3(9): 1384-1388.
[4] CARTER R A, JOLL C A. Occurrence and formation of disinfection byproducts in the swimming pool environ-

ment;a critical review[J]. J Environ Sci,2017,58(8):21-52.

[5] HRUDEY S E. Chlorination disinfection by-products, public health risk tradeoffs and me[J]. Water Res, 2009, 8(43): 2057-2092.

[6] 陈超,王玉,谢宇煊,等. 饮用水水质标准升级带来的消毒副产物挑战与对策[J]. 给水排水, 2024, 50(9): 7-14.

[7] 郑霖. 饮水氯化消毒与三卤甲烷[J]. 中国城乡企业卫生, 1996(3): 22-23.

[8] IARC. Agents Classified by the IARC Monographs, IARC. Volumes 1-121. [EB/OL]. (2011-04-18) [2025-01-01]. <https://www.iarc.who.int/news-events/iarc-mono-graphs-list-of-classifications-2>.

[9] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 中国标准化化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB/T 5749-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 生活饮用水标准检验方法: GB/T 5750-2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[11] US-EPA. EPA/540/1-89/002 Risk assessment guidance for superfund, volume I: human health evaluation manual (Part A) [EB/OL] (1989-10-13) [2025-01-08]. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/rags>.

[12] US EPA. Guidelines for carcinogen risk assessment. EPA/603/P-03/001F[R]. Washington DC, 2005.

[13] US EPA. Exposure factors handbook; 2009 update. EPA/600/R-09/052A [R]. Washington DC, 2009.

[14] 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.

[15] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷: 6~17 岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.

[16] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. 环境与健康杂志, 2009, 26(4): 370-373.

[17] 曹美苑, 李鰭橙, 黄柏文. 国内饮用水中消毒副产物分布水平与健康风险评价[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(3): 90-93.

[18] 马淑青, 代飞飞, 孙广雷. 潍坊市饮用水中消毒副产物的水平及其健康风险评价[J]. 中国公共卫生管理, 2021, 37(1): 99-101.

[19] USEPA. Risk assessment guidance for superfund Volume I-human health evaluation manual (Part B, development of risk based preliminary remediation goals). EPA/540/R92/003. [R]. Washington DC, 1991.

[20] 王荀, 周玉潇, 韦慧慰, 等. 深圳市龙岗区生活饮用水中三卤甲烷健康风险评估[J]. 华南预防医学, 2024, 50(7): 597-598.

[21] 郭惠珍, 洪宇伟, 谢鑫鑫, 等. 2021—2022 年杭州市某区饮用水中三卤甲烷含量监测及风险评估[J]. 实用预防医学, 2024, 31(4): 435-439.

[22] 赵桂鹏, 邹柯婷, 徐清, 等. 西安市市政供水三氯甲烷分布特征及多途径暴露健康风险评估[J]. 现代预防医学, 2023, 50(4): 611-617.

(收稿日期: 2025-03-12 修回日期: 2025-06-23)

• 卫生管理 •

基于 FMEA 的 6S 管理模式对消毒供应室外来器械管理质量的影响

许书琴

(九江市第一人民医院消毒供应中心, 江西 九江 332000)

[摘要] **目的** 探讨基于失效模式与效应分析(FMEA)的 6S 管理模式对消毒供应室外来器械管理质量的影响。**方法** 选取 2023 年 1 月至 2024 年 2 月该院消毒供应室收集的 1 789 件外来器械为对照组, 另选取 2024 年 3 月至 2025 年 3 月收集的 1 820 件外来器械为研究组。对照组行常规管理, 研究组行基于 FMEA 的 6S 管理。对比 2 组器械清洗达标率、器械相关不良事件发生情况、管理质量及工作人员工作能力。**结果** 研究组关节器械、创伤器械、基础器械、脊柱器械、其他器械清洗合格率均较对照组高, 器械相关不良事件发生率较对照组低, 差异均有统计学意义($P<0.05$)。研究组清洗、拆装、消毒、包装得分及工作人员风险防范、服务意识、安全识别得分均较对照组高, 差异均有统计学意义($P<0.05$)。**结论** 消毒供应室外来器械采用基于 FMEA 的 6S 管理可提高器械清洗达标率, 减少器械相关不良事件发生, 提升管理质量与工作人员工作能力。

[关键词] 消毒供应室; 失效模式与效应分析; 6S 管理; 外来器械管理; 管理质量

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2025.10.045

文章编号:1009-5519(2025)10-2485-04

中图法分类号:R197.39

文献标识码:C

随着医疗器械的发展, 多种新型手术室器械逐渐用于临床, 但部分器械价格较高、通用性差, 医院无法

统一采购, 多需向供应商租赁, 以满足医院手术需要^[1]。但外来器械种类较多、结构复杂, 消毒供应室