

# 无锡市自来水中三卤甲烷含量及其对成人的致癌风险

周伟杰<sup>1</sup>, 陈晓峰, 黄春华, 丁新良

无锡市疾病预防控制中心, 江苏 无锡, 214023

**摘要:** [目的] 了解无锡市自来水中三卤甲烷污染情况, 评估其对成人的致癌风险。[方法] 于 2008~2013 年对无锡市水源水、出厂水和末梢水中三卤甲烷进行检测, 并采用美国环保局推荐的低剂量致癌风险评价方法对其进行评价。[结果] 出厂水、末梢水中的三卤甲烷浓度均显著高于水源水( $P<0.05$ ), 末梢水三溴甲烷、一氯二溴甲烷的浓度均显著高于出厂水( $P<0.05$ )。四个水厂间三卤甲烷浓度存在差异( $P<0.05$ )。水源水、出厂水和末梢水中三卤甲烷对成人的致癌风险分别为  $1.46\times 10^{-6}$ 、 $3.67\times 10^{-5}$ 、 $5.61\times 10^{-5}$ , 其中一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷的致癌风险较高。[结论] 无锡市自来水中三卤甲烷浓度均低于 GB5749-2006 标准限值, 但是对成人具有潜在的致癌风险。

**关键词:** 自来水, 三卤甲烷, 致癌风险

The concentrations of trihalomethanes in tap water of Wuxi City and their cancerigenic risks to adults

ZHOU Wei-jie, CHEN Xiao-feng, HUANG Chun-hua, DING Xin-liang

Wuxi Center for Disease Control and Prevention, Wuxi, Jiangsu 214023, China

Corresponding author: DING Xin-liang, E-mail: dxl617@hotmail.com

**Abstract:** Objective To investigate the pollution status of trihalomethanes (THMs) in tap water of Wuxi City and evaluate their cancerigenic risks to adults. **Methods** The source water, finished water and periphery water in Wuxi City were detected for THMs in 2008-2013, and their cancerigenic risks were evaluated using the method recommended by the US Enviromental Protection Agency (USEPA). **Results** The concentrations of the THMs in the finished water and periphery water were significantly higher than those in the source water( $P<0.05$ ). The periphery water had higher concentrations of bromoform ( $\text{CHBr}_3$ ) chlorodibromomethane ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) and bromodichloromethane( $\text{CHBrCl}_2$ ) than the finished water( $P<0.05$ ). The THMs concentrations were statistically different among four water factories( $P<0.05$ ). The cancerigenic risks of THMs in the source water, finished water and periphery water were  $1.46\times 10^{-6}$ ,  $3.67\times 10^{-5}$  and  $5.61\times 10^{-5}$ , respectively. And  $\text{CHBr}_2\text{Cl}$  and  $\text{CHBrCl}_2$  had higher risks.

**Conclusions** The concentrations of the THMs in the tap water of Wuxi are

---

<sup>1</sup>基金项目: 无锡市科技局、无锡市卫生局科研基金资助课题 (基金编号 CSEW1N1101、CSZ00N1237、Q201201)

作者简介: 周伟杰 (1971—), 男, 汉族, 副主任医师, 硕士, 主要从事环境卫生工作

通讯作者: 丁新良, E-mail: dxl617@hotmail.com

lower than the limiting values formulated by GB5749-2006, but they have potential cancerigenic risks to adults.

**Key words:** Tap water, Trihalomethanes (THMs); Cancerigenic risk

自从 1974 年饮用水经氯化消毒后的水中有毒副产物首次发现以来, 超过 600 种消毒副产物被确认, 其中 50 种由于其潜在毒性而被定义为“高优先级”<sup>[1,2]</sup>。目前, 氯化消毒仍是我国使用最为普遍、最为有效的一种饮用水消毒方法, 而我国饮用水水源多为地表水, 大部分含有多种有机污染物, 氯化消毒过程中加入的消毒剂与这些有机物反应从而产生消毒副产物, 三卤甲烷

(trihalomethanes, THMs) 就是其中最主要的一种<sup>[3]</sup>。它是一类挥发性卤代烃类化合物, 主要包括氯仿 ( $\text{CHCl}_3$ )、溴仿 ( $\text{CHBr}_3$ )、一氯二溴甲烷

( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) 和二氯一溴甲烷 ( $\text{CHBrCl}_2$ )。已有研究表明, THMs 具有致癌性和致突变性<sup>[4]</sup>。在西班牙开展的一项病例-对照研究显示, 长期的 THMs 暴露将会增加男性人群癌症的发病风险<sup>[5]</sup>。因此, 国际癌症研究机构 (IARC) 已将  $\text{CHCl}_3$ 、 $\text{CHBr}_3$ 、 $\text{CHBr}_2\text{Cl}$  和  $\text{CHBrCl}_2$  列为人类可能或可疑致癌物。

无锡市地处太湖北岸、长江中下游, 其生活饮用水水源的供应以太湖和长江为主, 由于受长江上游以及太湖周边城市排放的生活污水和工业废水污染, 这两大水体有机物污染问题由来已久, 同时, 为保证居民饮水安全, 大量含氯消毒剂的加入使得饮用水中消毒副产物的问题已不容忽视。为了解无锡市自来水中三卤甲烷的健康风险, 定量评估三卤甲烷对人体健康的危害, 本文采用美国环保局 (USEPA) 推荐的低剂量致癌风险评价方法对 2008~2013 年无锡市自来水中三卤甲烷的成人致癌风险进行了分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 水样的采集

本地区共有中桥、雪浪、锡东和锡澄四家集中式供水单位, 其中中桥、雪浪水厂共用一太湖水源取水点、锡东水厂使用另外一个太湖水源取水点、锡澄水厂水源水取自长江。水源水采样点为水厂水源水取水口处, 共 3 个采样点; 出厂水采样点设在水厂净水工艺完成进入输送管道以前, 每个水厂设置一个固定采样点, 共 4 个采样点; 末梢水根据与相应水厂的距离设置近段、中段和远段各一个采样点, 采样位置为用户水龙头处, 共 12 个采样点。

于 2008 年 1 月~2013 年 12 月每个季度的第二个月采集水样 1 次, 共

456 份水样。

## 1.2 水样中三卤甲烷的测定

水样中三卤甲烷的检测参照 GB5750-2006《生活饮用水标准检验方法》<sup>[6]</sup>进行。

## 1.3 致癌风险评价

根据水样中三卤甲烷的测定结果，采用美国环保局（USEPA）推荐的低剂量致癌风险评价方法<sup>[7]</sup>对饮用水中的三卤甲烷进行评价，评价公式如下：

$$\text{Risk} = \text{CDI} \times \text{SF}$$

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

$$\text{RiskT} = \sum \text{Risk}_i$$

其中，Risk—致癌风险；CDI—日平均摄入量，mg/(kg·d)；SF—斜率因子，kg·d/mg；CW—水中污染物浓度，mg/L；IR—饮水摄入量，L/d；EF—暴露频率，d/年；ED—暴露时间，年；BW—体重，kg；AT—预期寿命，d；RiskT—4种三卤甲烷的总致癌风险；Risk<sub>i</sub>—第*i*种三卤甲烷的致癌风险。

评价参数中，由相关文献查阅和美国环保局综合风险信息系统（IRIS）查询，CHCl<sub>3</sub>、CHBr<sub>3</sub>、CHBr<sub>2</sub>Cl 和 CHBrCl<sub>2</sub> 的 SF 分别为 0.0061、0.0620、0.0840 和 0.0079 kg·d/mg，饮水摄入量 IR 为 2.2 L/d，暴露频率 EF 为 365 d/年，暴露时间 ED 为 70 年，体重 BW 为 60kg，预期寿命 AT 为 70×365=25550d。

## 1.4 统计学方法

采用 Excel 2003 软件进行数据录入，采用 Stata9.0 软件进行统计分析，分析结果以均数±标准差表示，多组间比较采用方差齐性检验和单因素方差分析（One Way ANOVA），进一步进行组间两两比较时，若方差齐时采用 SNK 检验（Student-Newman-Keuls 法）；若方差不齐时采用 Games-Howell 检验。以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 自来水中三卤甲烷总体情况

为掌握无锡地区水样中三卤甲烷总体情况，本研究共检测水源水 72 份、出厂水 96 份、末梢水 288 份，如表 1 所示，在加入含氯消毒剂后，出厂水、末梢

水中的四种三卤甲烷浓度均显著高于水源水（ $P$  值均小于 0.05），其中，末梢水三氯甲烷的浓度与出厂水相近（ $t=0.3488$ ， $P=0.7305$ ），但是末梢水中三溴甲烷、一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷的浓度均显著高于出厂水（ $t=-2.4520$ 、 $-2.1414$ 、 $-1.7767$ ， $P=0.0235$ 、 $0.0441$ 、 $0.0925$ ）。

表 1 无锡地区自来水中三卤甲烷总体情况（ $\mu\text{g/L}$ ， $\bar{x}\pm s$ ）

水样类型	样品数（件）	三氯甲烷	三溴甲烷	一氯二溴甲烷	二氯一溴甲烷
水源水	72	0.78±0.25	0.24±0.01	0.25±0.01	0.26±0.02
出厂水	96	5.73±0.51*	4.96±0.56*	7.46±0.78*	6.46±0.54*
末梢水	288	5.31±1.09*	8.70±1.42* <sup>△</sup>	11.69±1.81* <sup>△</sup>	9.69±1.74*

注：\* 与水源水比较， $P<0.05$ ；<sup>△</sup> 与出厂水比较， $P<0.05$

2.2 自来水中三卤甲烷浓度季度变化

如图 1 所示，三氯甲烷、一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷浓度从一季度到四季度逐渐升高；三溴甲烷浓度在一季度较低，其余三个季度浓度相近、且较一季度明显升高。

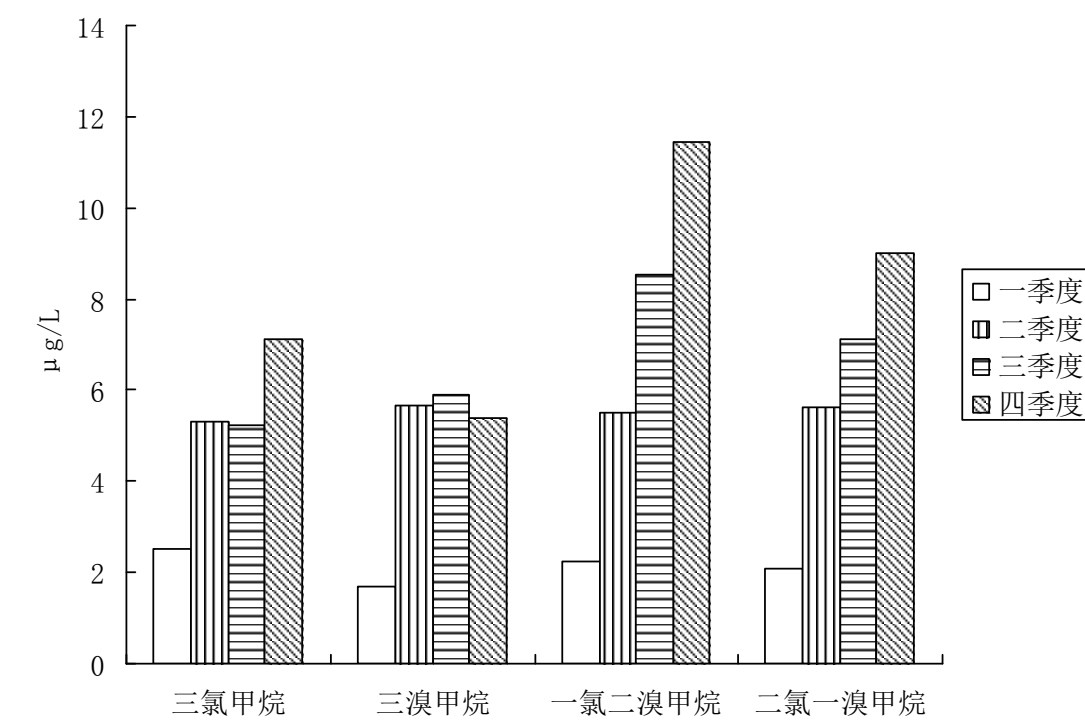


图 1 自来水中三卤甲烷浓度季度变化

2.3 四个水厂间三卤甲烷浓度比较

见表 2。中桥、雪浪出厂水中三氯甲烷浓度相近（ $t=-0.5547$ ， $P=0.5821$ ），

并均显著低于锡东、锡澄两个水厂（中桥： $t=-4.8418$ ， $P=0.0000$ ； $t=-7.2216$ ， $P=0.0000$ ；雪浪： $t=4.0547$ ， $P=0.0000$ ； $t=-6.7643$ ， $P=0.0000$ ）；而三溴甲烷、一氯二溴甲烷在中桥、锡东和雪浪出厂水中均显著高于锡澄出厂水（三溴甲烷： $t=5.1611$ ， $P=0.0000$ ； $t=5.6981$ ， $P=0.0000$ ； $t=5.9785$ ， $P=0.0000$ ；一氯二溴甲烷： $t=4.7407$ ， $P=0.0001$ ； $t=4.6793$ ， $P=0.0001$ ； $t=5.8531$ ， $P=0.0000$ ）；二氯一溴甲烷在锡东出厂水中显著高于雪浪、锡澄出厂水（ $t=2.1222$ ， $P=0.0400$ ； $t=2.9117$ ， $P=0.0068$ ）。

表 2 无锡地区四个水厂间自来水中三卤甲烷浓度比较（ $\mu\text{g/L}$ ， $\bar{x}\pm s$ ）

水厂	样品数 (件)	三氯甲烷	三溴甲烷	一氯二溴甲 烷	二氯一溴甲烷
中桥	24	2.65±0.34	6.10±1.13	9.01±1.62	6.28±1.08
锡东	24	6.17±0.64* <sup>△</sup>	5.20±0.87	9.73±1.79	9.02±1.32 <sup>△</sup>
雪浪	24	2.96±0.46	7.88±1.28	9.25±1.34	5.53±0.98
锡澄	24	11.67±1.20* <sup>△#</sup>	0.25±0.02* <sup>△#</sup>	1.30±0.20* <sup>△#</sup>	4.86±0.54 <sup>#</sup>

注：\* 与中桥出厂水比较， $P<0.05$ ；<sup>△</sup> 与雪浪出厂水比较， $P<0.05$ ；<sup>#</sup> 与锡东出厂水比较， $P<0.05$ ；

2.4 自来水中三卤甲烷对成人的致癌风险

水源水、出厂水和末梢水中三卤甲烷对成人的致癌风险分别为  $1.46\times10^{-6}$ 、 $3.67\times10^{-5}$ 、 $5.61\times10^{-5}$ ，其中一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷的致癌风险较高。见表 3。

表 3 无锡地区自来水中三卤甲烷对成人的致癌风险

水样类型	三氯甲烷	三溴甲烷	一氯二溴甲烷	二氯一溴甲烷	合计
水源水	$1.59\times10^{-7}$	$6.32\times10^{-8}$	$7.00\times10^{-7}$	$5.37\times10^{-7}$	$1.46\times10^{-6}$
出厂水	$1.17\times10^{-6}$	$1.31\times10^{-6}$	$2.09\times10^{-5}$	$1.34\times10^{-5}$	$3.67\times10^{-5}$
末梢水	$1.08\times10^{-6}$	$2.29\times10^{-6}$	$3.27\times10^{-5}$	$2.00\times10^{-5}$	$5.61\times10^{-5}$

3 讨论

自 20 世纪 70 年代研究者发现在饮用水氯化消毒过程产生三卤甲烷等副产物导致饮用水具有“致癌、致畸、致突变”的风险以来，饮用水氯化消毒的安全性问题就引起了世界范围的普遍关注。鉴于一直以来氯化消毒在我国饮用水消毒中的主导地位，开展三卤甲烷等氯化消毒副产物对人体的致癌风险研究对保障我国民众的安全饮水和身体健康具有重要意义。

本研究显示，饮用水中三卤甲烷主要来源于自来水处理过程中的氯化消毒，

其浓度为末梢水>出厂水>水源水，结果表明三卤甲烷等消毒副产物并非瞬间生成，加氯一段时间后仍持续反应，且输水管网沉积的污染物有加大三卤甲烷生成的可能，从而导致末梢水较出厂水浓度高。在时间上，从一季度到四季度三卤甲烷浓度逐渐升高，一方面与加氯量增大有关，另一方面与冬季太湖水源水中藻类逐渐死亡、有机污染物浓度增高有关。四个水厂中，由于水源水和净水工艺的差异也导致出厂水中三卤甲烷浓度不一。虽然本研究中检测的水样四种三卤甲烷浓度均未超出 GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》限值<sup>[8]</sup>，但是按照 USEPA 推荐的低剂量致癌风险评估方法对其进行评估，所检测的四种三卤甲烷的致癌风险均超过了 USEPA 认为可以忽略的水平（ $<10^{-6}$ ），处于具有潜在致癌风险的区间（ $10^{-6}\sim 10^{-4}$ ），其中一氯二溴甲烷和二氯一溴甲烷的致癌风险较高，同时与人体健康密切相关的末梢水的致癌风险也较高，应引起重点关注。这与赵艳玲<sup>[3]</sup>、杨健康<sup>[9]</sup>、尤汉虎<sup>[10]</sup>、曹朝晖<sup>[11]</sup>、吴敏泉<sup>[12]</sup>等的研究结果基本一致。

综上所述，消毒副产物对人体的危害已不容忽视，因此，对于饮用水中氯化消毒副产物的控制可以从以下几个方面进行考虑：（1）保护水源，减少污染，从而减少腐殖酸、富里酸等有机污染物；（2）采用强化混凝法、活性炭吸附法等减少或去除水源水中氯化消毒副产物的前提物质；（3）改进氯化消毒程序；（4）采用过滤或煮沸等措施控制或减少已生成的副产物。目前，由于我国经济、技术等多方面的限制，使得饮用水中消毒副产物的控制受到一定的限制，但是随着科学研究的不断深入和人们对健康需求的不断提高，饮用水相关的法律及标准也将得到逐步完善，从而达到保障饮用水安全和人民身体健康的目的。

参考文献：

- [1] Weinberg HS. The Occurrence of Disinfection By-Products (DBPs) of Health Concern in Drinking Water: Results of a Nationwide DBP Occurrence Study, EPA/600/R-02/068 [R]. Washington, DC: US EPA, 2002.
- [2] Costet N, Villanueva CM, Jaakkola JJ, et al. Water disinfection by-products and bladder cancer: is there a European specificity? A pooled and meta-analysis of European case-control studies [J]. Occup Environ Med, 2011, 68(5): 379-385.
- [3] 赵艳玲, 张桂斌, 张美云, 等. 北京市朝阳区自来水中三卤甲烷对成人的致

癌风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(5): 437-439.

[4] Larson JL, Wolf DC, Butterworth BE. Acute hepatotoxic and nephrotoxic effects of chloroform in male F-344 rats and female B6C3F1 mice [J]. Fundam Appl Toxicol, 1993, 20(3): 302-315.

[5] Villanueva CM, Cantor KP, Grimalt JO, et al. Bladder cancer and exposure to water disinfection by-products through ingestion, bathing, showering, and swimming in pools [J]. Am J Epidemiol, 2007, 165(2): 148-156.

[6] USEPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A) [R]. Washington DC, USEPA: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.

[7] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB5750-2006 生活饮用水标准检验方法[S]. 中国标准出版社, 2006.

[8] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB5749-2006 生活饮用水卫生标准[S]. 中国标准出版社, 2006.

[9] 杨健康, 王启山, 鲁金凤, 等. 饮用水中三卤甲烷多途径暴露的健康风险评价[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(7):27-30.

[10] 尤汉虎, 肖兵, 张艳萍, 等. 佛山某区饮用水三卤甲烷健康风险评价[J]. 当代医学, 2011, 17(23): 156-157.

[11] 曹朝晖. 长沙市饮用水氯化消毒剂主要副产物的监测结果分析[J]. 实用预防医学, 2008, 15(3): 647-651.

[12] 吴敏泉, 林希建, 朱彩明, 等. 2005-2008 年长沙市自来水水质监测情况动态分析[J]. 实用预防医学, 2011, 18(7): 1267-1270.

附

通讯作者联系方式:

丁新良

联系地址: 江苏省无锡市金城路 499 号无锡市疾病预防控制中心 214023

联系电话: 15052101167

E-mail: dxl617@hotmail.com