

全国自来水厂卤乙酸浓度调查、风险评估与标准建议

孟丽苹,董兆敏,胡建英* (北京大学城市与环境学院,地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871)

摘要 采用高特异性和高灵敏度的 UPLC-MS/MS 方法对中国 34 个城市的 117 个自来水厂出水中 9 种卤乙酸进行检测,其中二氯乙酸和三氯乙酸的检出率和检出浓度最高,检出率分别为 78.6%和 81.2%,平均浓度分别为 3.47 $\mu\text{g/L}$ 和 3.31 $\mu\text{g/L}$ 。风险评估结果表明,二氯乙酸导致我国饮用水致癌风险的期望值为 5.72×10^{-6} ,处于较低风险水平;全国只有 1.7%水厂出水 TCAA 浓度超过 20 $\mu\text{g/L}$ 的健康指导值。在风险评估的基础上结合我国水厂的卤乙酸浓度数据,建议我国饮用水的二氯乙酸和三氯乙酸标准分别修改为 16 $\mu\text{g/L}$ 和 20 $\mu\text{g/L}$ 。

关键词: 卤乙酸; 饮用水; 消毒副产物; 风险评估; 饮用水标准

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)04-0721-06

National survey and risk assessment of haloacetic acids in drinking water in China for reevaluation of the drinking water standards. MENG Li-ping, DONG Zhao-min, HU Jian-ying* (College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China). *China Environmental Science*, 2012,32(4): 721~726

Abstract: Nine haloacetic acids were determined in finished water samples from 117 drinking water supply plants, using a specific and sensitive UPLC-MS/MS method. Of nine haloacetic acids, dichloroacetic acid and trichloroacetic acid showed high detection frequencies with 78.6% and 81.2%, and concentrations with 3.47 $\mu\text{g/L}$ and 3.31 $\mu\text{g/L}$, respectively. The expected lifetime cancer risk of dichloroacetic acid associated with uptake of drinking water in China was 5.72×10^{-6} , showing a relatively low risk. The concentration of trichloroacetic acid in finished water which exceeded the health guideline value of 20 $\mu\text{g/L}$ was estimated to be 1.7%. Based on the results of risk assessment and the national survey of haloacetic acids, the criteria of dichloroacetic acid and trichloroacetic were suggested to be 16 $\mu\text{g/L}$ and 20 $\mu\text{g/L}$, respectively.

Key words: haloacetic acids; drinking water; disinfection by-products; risk assessment; drinking water standard

为了控制饮用水中的致病微生物,保证饮水安全,消毒成为供水系统最后一道必不可少的处理工艺。目前,我国 99.5%以上的自来水厂采用氯消毒^[1]。然而,氯消毒在控制致病微生物的同时,又带来了新的健康风险。含氯消毒剂与水中残留有机物如腐殖酸和富里酸反应会产生具有致癌性的消毒副产物(DBPs)。卤乙酸(HAAs)是 DBPs 中非常重要的一类物质。研究表明,HAAs 与目前备受关注的三卤甲烷类消毒副产物相比健康风险更大^[2]。HAAs 包括 9 种物质,分别为一氯乙酸(MCAA)、二氯乙酸(DCAA)、三氯乙酸(TCAA)、一溴乙酸(MBAA)、二溴乙酸(DBAA)、三溴乙酸(TBAA)、一溴氯乙酸(BCAA)、一溴二氯乙酸(BDCAA)和二溴一氯乙酸(DBCAA)。HAAs 由于具有潜在的致癌性、致突变性和生殖发育毒性而得到广泛关注^[3]。

目前,世界上很多国家都将 HAAs 纳入各自的饮用水水质标准体系。美国 EPA 最早在消毒剂与消毒副产物法(DBPR)中制定了 HAAs 的饮用水标准,目前实施的法规中,HAAs (MCAA、DCAA、TCAA、MBAA、DBAA)总的污染物最高浓度为 60 $\mu\text{g/L}$ ^[4]。加拿大饮用水标准中,HAAs 的最高可容许浓度为 80 $\mu\text{g/L}$ ^[5]。世界卫生组织(WHO)现行饮用水标准(第 3 版)中,MCAA、DCAA 和 TCAA 的健康指导值分别为 20,50,200 $\mu\text{g/L}$ ^[6]。2006 年我国颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)参考了 WHO 第 2 版标准,DCAA 和 TCAA 的限值分别为 50 $\mu\text{g/L}$ 和

收稿日期: 2011-07-06

基金项目: 国家“973”项目(2007CB407304);全国水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07419-001)

* 责任作者, 教授, hujy@urban.pku.edu.cn

100 $\mu\text{g/L}$ ^[7].由于缺乏全国范围的HAAs调查,对我国人群因饮用水导致的健康风险并不十分清楚,我国饮用水HAAs标准的合理性值得研讨.

本研究采用高灵敏度和高特异性的UPLC-MS/MS方法^[8],对全国34个城市的117个自来水厂出厂水中9种HAAs进行了监测.在此基础上对HAAs进行了健康风险评价,对我国HAAs饮用水标准提出了修改建议.

1 材料与方 法

1.1 样品的采集

2009年~2011年于全国34个城市的117个自来水厂采集出厂水,样品点分布如图1所示.各采样点采样时间见表1.为了去除余氯,采样时在水样中添加L-抗坏血酸至浓度约0.02g/L.



图1 全国城市自来水厂采样点分布
Fig.1 Sampling sites of tap water in China

1.2 分析方法

用ACQUITY UPLC超高效液相色谱仪(Waters Corp.,USA)对9种目标物质进行分离,用Quattro Premier XE串联四级杆质谱仪(Waters Corp.,USA)进行定量.具体分析条件和参数在作者之前报道方法^[8]的基础上进行了改进.主要是将流动相中的水相由0.1%乙酸/水改为0.1%甲酸/水,从而改善了基质效应造成的保留时间偏移现象.MCAA, DCAA, TCAA, MBAA, DBAA, TBAA, BCAA, BDCAA和CDBAA的定量限分别为5.56, 0.77, 0.83, 1.51, 1.22, 24.2, 2.30, 3.17

和2.63 $\mu\text{g/L}$.9种物质的回收率为83.8%~108%.

表1 全国城市自来水厂采样时间

Table 1 Sampling time of tap water in China

样点	采样时间	样点	采样时间	样点	采样时间
1	2009-11-02	13	2010-07-14	25	2010-12-28
2	2009-12-04	14	2010-07-16	26	2010-12-30
3	2009-12-19	15	2010-08-26	27	2011-01-03
4	2010-03-24	16	2010-09-13	28	2011-01-04
5	2010-04-07	17	2010-09-15	29	2011-01-06
6	2010-04-15	18	2010-09-17	30	2011-01-10
7	2010-06-02	19	2010-09-21	31	2011-01-11
8	2010-07-02	20	2010-11-03	32	2011-01-12
9	2010-07-16	21	2010-11-05	33	2011-01-13
10	2010-07-19	22	2010-11-09	34	2011-03-25
11	2010-07-20	23	2010-11-17		
12	2010-07-12	24	2010-11-18		

2 结果与分析

2.1 全国自来水厂出水卤乙酸调查结果

9种HAAs中,检出频率最高的3种物质为TCAA、DCAA和BCAA,检出率分别为81.2%、78.6%和31.6%.BDCAA、DBAA和DBCAA的检出率较低,分别为13.7%、10.3%和5.1%.117个出水样品中均未检出MBAA和TBAA;只有1个样品检出了MCAA.

所测定的全国水厂出厂水中,DCAA的浓度范围为<0.23(检出限)~27 $\mu\text{g/L}$;TCAA的浓度范围为<0.25~31 $\mu\text{g/L}$;BCAA浓度范围为<0.75~4.4 $\mu\text{g/L}$;DBAA的浓度范围为<0.37~5.0 $\mu\text{g/L}$;BDCAA的浓度范围为<0.98~3.8 $\mu\text{g/L}$;DBCAA的浓度范围为<0.95~4.4 $\mu\text{g/L}$.HAA5的浓度范围为(5种HAAs均未检出)~36 $\mu\text{g/L}$,9种HAAs浓度和范围为(9种HAAs均未检出)~39 $\mu\text{g/L}$.我国自来水厂出厂水中DCAA和TCAA最高浓度分别为27 $\mu\text{g/L}$ 和31 $\mu\text{g/L}$,远低于我国现行饮用水标准.

9种HAAs中,只有DCAA和TCAA的检出率超过50%,因此对两者的总体均值和方差进行估计.为避免未检出数据对数据分析结果的不利影响,选用ProUCL Version 4.00.02软件(USEPA, 2007)对2种物质的浓度数据进行未检出值处理和均值方差估计.处理后的数据使用Crystal Ball

v7.3.1 软件中的 Monte Carlo 方法进行模拟计算, 得到全国水厂出水中 DCAA 和 TCAA 浓度数据均服从对数正态分布, 算数均值分别为 3.47 $\mu\text{g/L}$ 和 3.31 $\mu\text{g/L}$, 算数标准差分别为 4.11 $\mu\text{g/L}$ 和 5.51 $\mu\text{g/L}$ 。

在分析 HAAs 在全国城市的浓度分布时, 对每个城市的几个水厂的出水 HAAs 浓度数据根据日供水量进行加权平均计算。9 种 HAAs 在全国 34 个城市的浓度分布见图 2。对于检出率大于 50% 的 DCAA 和 TCAA, 分析了不同地理分区和水源类型的水厂出水的浓度差异, 见表 2 和表 3。

表 2 不同地理分区对应二氯乙酸和三氯乙酸浓度
Table 2 DCAA and TCAA concentrations in different geographical regions of China

地理分区	浓度范围($\mu\text{g/L}$)	
	二氯乙酸	三氯乙酸
华北	<0.23~22.5 (5.23*)	<0.25~9.71 (2.62*)
华中	<0.23~6.10 (2.97*)	<0.25~5.99 (3.07*)
华南	<0.23~26.5 (4.10*)	<0.25~9.19 (2.29*)
华东	<0.23~8.05 (3.52*)	<0.25~5.54 (2.08*)
东北	<0.23~7.97 (3.68*)	<0.25~30.8 (9.22*)
西北	<0.23~2.34 (0.50*)	<0.25~15.0 (1.58*)
西南	<0.23~6.70 (2.52*)	<0.25~10.0 (3.49*)

注:*为平均值

表 3 不同水源类型对应二氯乙酸和三氯乙酸浓度
Table 3 DCAA and TCAA concentrations of different source types in China

水源类型	浓度范围($\mu\text{g/L}$)	
	二氯乙酸	三氯乙酸
地下水	<0.23~5.36 (1.22*)	<0.25~4.48 (0.45*)
湖库	<0.23~17.3 (3.89*)	<0.25~30.8 (5.08*)
河流	<0.23~26.5 (3.66*)	<0.25~15.0 (2.68*)

注:*为平均值

从图 2 和表 2 可知, 东北和华北一些城市的水厂出水中 HAAs 总浓度较高, 而西部城市的 HAAs 浓度普遍偏低。从表 3 可知, 水源类型为地下水的水厂出水中的 DCAA 和 TCAA 浓度明显低于水源类型为河流和湖库的水厂出水中 DCAA 和 TCAA 浓度。HAAs 的浓度水平主要由

出水中前驱物质浓度水平(主要为腐殖酸和富里酸)和自来水厂氯消毒工艺(氯消毒剂种类和用量、接触时间、消毒时的温度和 pH 值以及是否进行预氯化)决定。而 HAAs 前驱物的含量又与当地土质、源水污染程度、水厂工艺和季节变化等多种因素有关。由于本研究未能获得源水水质和水厂工艺等数据, 因此导致不同地理分区和水源类型的水厂出水中卤乙酸浓度差异的原因还需要进一步研究。

2.2 全国自来水厂出水卤乙酸风险评价

9 种 HAAs 中, MCAA、DCAA、TCAA 和 DBAA 存在毒性数据。研究表明, DCAA 能导致大鼠和小鼠患肝癌和肝腺瘤几率增加, 被认为是动物致癌物质和可能的人类致癌物质^[9]。TCAA 能导致小鼠肝癌但不能使大鼠致癌, 而且 TCAA 是否对人类致癌目前并不清楚^[10]。DBAA 暴露能导致小鼠肝癌和肺癌以及大鼠间皮瘤和造血系统肿瘤^[11]。结合全国水厂出水中 HAAs 的监测数据, DBAA 的检出率和检出浓度均不高。MCAA 仅存在非致癌毒性数据^[12], 只有一个出水样品中检出 MCAA, 因此本研究中只对 DCAA 进行致癌风险评价, 对 TCAA 进行非致癌风险评价。

2.2.1 二氯乙酸致癌风险 DCAA 的致癌风险评价参考 EPA 对 DCAA 进行风险评价的方法和过程^[13]。EPA 采用小鼠饮水暴露于 DCAA 100 周导致肝癌和肝腺瘤几率增加的毒性数据[暴露剂量分别为 0, 8, 0, 84, 168, 315, 429 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$]^[14], 采用多段线性模型计算得到 DCAA 的致癌强度为 0.048 $[\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})]^{-1}$ 。换算成饮用水中的浓度单位, 其剂量-效应关系曲线如式(1)所示。

$$p(x) = 0.048 \times 2 / 60x = 0.0016x \quad (1)$$

式中: x 为 DCAA 浓度, mg/L ; 60 为成人平均体重, kg ; 2 为日平均饮水量, L ; 0.048 为致癌强度系数, $[\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})]^{-1}$ 。

从 2.1 节已知, 全国水厂出水中 DCAA 浓度符合对数正态分布, 几何均值为 2.24×10^{-3} , 几何标准方差为 2.55, 分布函数如式(2)所示。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \ln(2.55)}} e^{-\frac{[\ln(x) - \ln(0.00224)]^2}{2[\ln(2.55)]^2}} \quad (2)$$

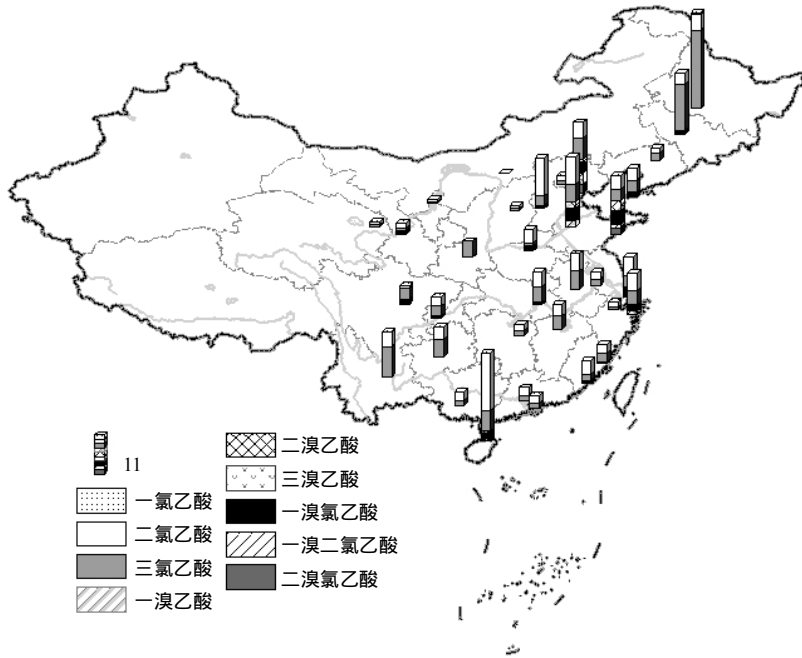


图 2 九种卤乙酸在全国 34 个城市自来水中的浓度分布
 Fig.2 Distribution of HAAs in tap water in 34 cities of China

最后,用式(3)^[15]可计算得到全国自来水厂出水中 DCAA 导致的致癌风险的期望值为 5.72×10^{-6} ,处于一个比较低的风险水平.

$$Risk = \int_0^{+\infty} f(x)p(x)dx \quad (3)$$

2.2.2 三氯乙酸非致癌风险 1993 年,WHO 水质标准第 2 版选用小鼠饮水暴露于 TCAA52 周导致肝重和肝体比明显增加的毒性数据对 TCAA 进行风险评价^[16],其最低有影响作用剂量 (LOAEL)为 178mg/(kg·d),日可耐摄入量(TDI)计算如下:

$$TDI = LOAEL / UF = 178mg / (kg \cdot d) / 10000 = 17.8\mu g / (kg \cdot d)$$

UF 为不确定系数,包含:种间差和种内差 100,可能的致癌性、短期实验及使用 LOAEL 代替 NOAEL 为 100.

Guideline Value = $20\% \times TDI \times 60 / 2 = 0.1mg/L$
 式中: 20%为饮水途径对 TCAA 摄入的贡献率;60 为 WHO 使用的成人平均体重,kg;2 为日平均饮水量,L.

2006 年 WHO 标准第 3 版选用大鼠终生饮

水暴露于 TCAA 导致体重和肝脏重量下降,血清谷氨酸转氨酶升高等发育毒性的数据为 TCAA 制定指导值^[6,17],其无影响作用浓度(NOAEL)为 32.5mg/(kg·d).

$$TDI = NOAEL / UF = 32.5mg / (kg \cdot d) / 1000 = 0.0325mg / (kg \cdot d)$$

UF 包含:种间差和种内差 100,数据缺乏 10(缺乏多代生殖研究以及第 2 物种的发育研究和完整的组织病理学研究).

$$Guideline Value = 20\% \times TDI \times 60 / 2 = 0.2mg/L$$

EPA 在 2003 年的 Stage2 DBPR 中^[18]计算得到 TCAA 的经口摄入参考剂量 (RfD) 为 0.0325mg/(kg·d),与 WHO 第 3 版中的 TDI 相同,但在计算 MCLG 时,考虑到 TCAA 可能的致癌性,EPA 设定了 10 的额外安全系数.

$$MCLG = 20\% \times RfD \times 70 / (2 \times 10) = 20\mu g/L$$

式中:20%为饮水途径对 TCAA 摄入的贡献率;70 为 EPA 使用的成人平均体重,kg;2 为日平均饮水量,L.本研究采用美国 EPA 的上述 MCLG 作为 TCAA 风险评价的安全值.

从 2.1 节已知 TCAA 的浓度服从对数正态分

布,几何均值为 1.17×10^{-3} ,几何标准差为 3.17,分布函数如式(4)所示,频数分布如图 3 所示.

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \ln(3.17)}} e^{-\frac{[\ln(x) - \ln(0.00117)]^2}{2[\ln(3.17)]^2}} \quad (4)$$

利用 TCAA 浓度的频数分布,可得到全国自来水厂中出水 TCAA 浓度超过 $20 \mu\text{g/L}$ 健康指导值的比例仅为 1.7%(图 3),说明我国饮用水中 TCAA 的健康风险较低.

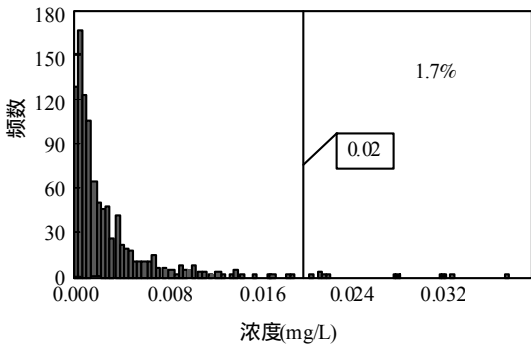


图 3 中国自来水厂出水中 TCAA 的浓度分布
Fig.3 Distribution of TCAA concentrations in tap water in China

2.3 我国卤乙酸饮用水标准存在的问题及建议

2.3.1 我国卤乙酸饮用水标准的问题 2006 年,我国《生活饮用水卫生标准》首次将 HAAs 纳入其中.我国 HAAs 饮用水标准完全参考了 WHO 饮用水水质标准第二版制定^[19],而未能考虑我国饮用水中 HAAs 的实际浓度水平、组成及其风险.另外,值得注意的是,WHO 制定 DCAA 指导值过程中采用了非致癌毒性数据.而最近的研究表明,存在充分证据证明 DCAA 是动物致癌物质,是可能的人类致癌物质^[9],因此美国 EPA 对该物质作为致癌物质进行风险评价^[18].这样,根据致癌物质风险评价方法,用式(1)可以计算我国 DCAA 的现有标准值 $50 \mu\text{g/L}$ 所对应的致癌风险为 8×10^{-5} ,因此即使达标,仍然处于较高的风险水平.

WHO 第二版标准中,制定 TCAA 指导值使用的是动物非终生暴露毒性数据^[16],而目前已存在动物终生暴露毒性数据^[6].所以,有必要选用新的更合理的毒性数据并结合我国饮用水中 HAAs 的实际状况对现有标准进行修订.

2.3.2 对我国卤乙酸饮用水标准的建议 2.2 节中提及,9 种 HAAs 中目前存在满足标准制定毒性数据的物质包括 MCAA、DCAA、TCAA 和 DBAA.而结合我国自来水厂 HAAs 调查数据,MCAA 只在一个样品中检出,DBAA 的检出率仅为 10.3%,且最高浓度仅为 $4.96 \mu\text{g/L}$,因此我国 HAAs 饮用水标准无需采用 EPA 标准的 HAA5 形式,也无需为 MCAA 制定限值,只需保持现有标准中纳入的 DCAA 和 TCAA 即可.

根据 2.2.1 节,DCAA 的致癌剂量-效应关系[式(1)].若设定 10^{-5} 为可容忍风险,可计算出 DCAA 的健康指导值为 $6.3 \mu\text{g/L}$.结合全国水厂出水中 DCAA 的浓度数据,通过概率分布可以得到出水中 DCAA 浓度超出该指导值的自来水厂比例为 13.8%(图 4),该比例相对较高.考虑到饮用水充分消毒和水厂达标能力等因素,指导值应该适当放宽.假定 2% 的超标率为可接受水平,利用 DCAA 浓度的频数分布,计算出对应的 DCAA 的浓度约为 $16 \mu\text{g/L}$,建议作为中国饮用水中 DCAA 的指导值.但对于 DCAA 浓度超过 $6.3 \mu\text{g/L}$ 健康指导值的水厂还应做系统调查研究,以评估 $16 \mu\text{g/L}$ 作为指导值的合理性.根据公式(1)计算出 $16 \mu\text{g/L}$ 对应的致癌风险值为 2.59×10^{-5} ,依然处于相对较高的风险水平,因此随着消毒副产物控制技术的提高,应进一步严格 DCAA 指导值.

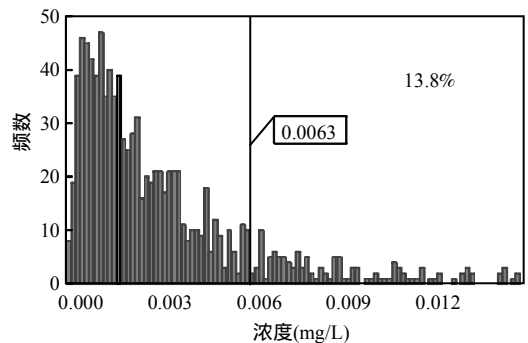


图 4 中国自来水厂出水中 DCAA 浓度分布
Fig.4 Distribution of DCAA concentrations in tap water in China

2.2.2 节已获得 TCAA 的饮用水健康指导值为 $20 \mu\text{g/L}$,全国水厂超标率仅为 1.7%,可见该限

值具有可行性。

3 结论

3.1 全国自来水厂出水9种HAAs中,DCAA和TCAA的检出率和检出浓度最高,而MCAA、MBAA和TBAA基本未检出。DCAA和TCAA浓度的算术均值分别为3.47 $\mu\text{g/L}$ 和3.13 $\mu\text{g/L}$ 。所监测的所有样品中HAAs浓度均未超过我国现有标准。通过HAAs在全国34个城市的浓度分布图可知,华北、东北一些自来水厂出水中HAAs浓度较高,而西部城市的自来水中HAAs浓度偏低。

3.2 我国自来水厂出水中DCAA导致的致癌风险的期望值为 5.72×10^{-6} ,处于比较低的风险水平;全国只有1.7%水厂出水TCAA浓度超过20 $\mu\text{g/L}$ 的健康指导值,因此TCAA处于低风险水平。

3.3 结合我国水厂的HAAs浓度数据和风险评估结果,建议我国的HAAs饮用水标准仅需保持现有标准中已纳入的DCAA和TCAA,其标准限值建议分别修改为16 $\mu\text{g/L}$ 和20 $\mu\text{g/L}$ 。

参考文献:

- [1] 刘文君. 给水处理消毒技术发展展望 [J]. 给水排水, 2004, 30(1):2-5.
- [2] Hu J Y, Wang Z S, Ng W J, et al. Disinfection by-products in water produced by ozonation and chlorination [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999,59:81-93.
- [3] Hunter E S, Rogers E H, Blanton M, et al. Bromochloro-haloacetic acids: Effects on mouse embryos in vitro and QSAR considerations [J]. Reproductive Toxicology, 2006,21(3):260-266.
- [4] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). EPA 820-R-11-002. 2011 edition of the drinking water standards and health advisories [S].
- [5] Health Canada. Guidelines for canadian drinking water quality —summary table [S].
- [6] WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking water quality, 1st Addendum to 3rd edition. Volume 1 [S].
- [7] GB 5749-2006 生活饮用水卫生标准 [S].
- [8] Meng L P, Wu S M, Ma F J, et al. Trace determination of nine haloacetic acids in drinking water by liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2010, 1217(29): 4873-4876.
- [9] U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). National primary drinking water regulations: stage 1 disinfectants and disinfection byproducts rule. Final Rule [R/OL]. 1998-12-16. <http://www.regulations.gov/#!documentDetail;D=EPA-HQ-OW-2002-0043-0003>.
- [10] WHO (World Health Organization). Trichloroacetic acid in drinking water (WHO/SDE/WSH/03.04/120) [R/OL]. 2004-03. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/trichloroaceticacid.pdf.
- [11] Melnick R L, Nyska A, Foster P M, et al. Toxicity and carcinogenicity of the water disinfection byproduct, dibromoacetic acid, in rats and mice [J]. Toxicology, 2007,230(2/3):126-136.
- [12] WHO (World Health Organization). Monochloroacetic acid in drinking water (WHO/SDE/WSH/03.04/85) [R/OL]. 2004-03. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/monochloroaceticacid.pdf.
- [13] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). Toxicological review of dichloroacetic acid (EPA 635/R-03/007) [R/OL]. 2003-08. <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0654tr.pdf>.
- [14] DeAngelo A B, George M H, House D E. Hepatocarcinogenicity in the male B6C3F1 mouse following a life-time exposure to dichloroacetic acid in the drinking water: dose-response determination and modes of action [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 1999,58(8):485-507.
- [15] 胡建英,安伟,曹红斌,等. 化学物质的风险评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] WHO (World Health Organization). Guidelines for drinking water quality, 2nd edition. Volume 1 [S].
- [17] DeAngelo A B, Daniel F B, Most B M, et al. Failure of monochloroacetic acid and trichloroacetic acid administered in the drinking water to produce liver cancer in male F344/N rats [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health, 1997,52(8): 425-445.
- [18] U.S. EPA (Environmental Protection Agency). National primary drinking water regulations: Stage 2 disinfectants and disinfection byproducts rule; National primary and secondary drinking water regulations: Approval of analytical methods for chemical contaminants; Proposed rule [R/OL] 2003-08-18. <http://yosemite.epa.gov/water/owrcatalog.nsf/0/e282271c39f74d8e85256dbb0062c7b0?OpenDocument>.
- [19] 金银龙,鄂学礼,张岚. 《生活饮用水卫生标准》释义 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

作者简介: 孟丽苹(1986-),女,河北承德人,北京大学城市与环境学院硕士研究生,主要从事饮用水中消毒副产物等的检测和风险评估。