

文章编号:2095-0411(2016)02-0046-04

供水管网中氯化消毒副产物健康风险评价

陈梦杰¹, 张凤娥¹, 董良飞¹, 李 源¹, 张建兵²

(1.常州大学 环境与安全工程学院,江苏 常州 213164;2.常州通用自来水有限公司,江苏 常州 213003)

摘要:为了评价南方某城市供水管网中氯化消毒副产物对人体健康产生的潜在危害,对该市全线供水管网中的三卤甲烷和卤乙酸质量浓度进行检测,并采用美国环境保护署(US EPA)的健康风险评价方法,对管网水体中氯消毒副产物通过食入、皮肤接触和呼吸吸入 3 种途径进入人体的危害进行了风险计算和初步评价。结果表明:管网水体中消毒副产物对人体健康产生的致癌风险最大值为 4.32×10^{-5} ,在美国环境保护署(US EPA)可以接受的限值($10^{-6} \sim 10^{-4}$)内,不会对人体产生明显的健康危害。

关键词:供水管网;消毒副产物;健康风险评价

中图分类号:X 820.4

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.02.009

Health Risk Assessment of Chlorinated Disinfection By-products in Water Distribution System

CHEN Mengjie¹, ZHANG Feng'e¹, DONG Liangfei¹, LI Yuan¹, ZHANG Jianbing²

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
2. Changzhou CGE Water Co. Ltd., Changzhou 213003, China)

Abstract: In order to assess the potential health risk to human beings caused by chlorinated disinfection by-products (DBPs) in water distribution network in a southern city, the concentrations of THMs and HAAs in drinking water from the centralized water supply systems were detected in this paper, and assessment of the health risks invited by three exposure pathways (i.e. oral ingestion, dermal absorption and inhalation exposure) was performed through a method of US EPA. The results showed that the maximum cancer risk within the area of water supply pipe network was 4.32×10^{-5} , which met the needs of US EPA ($10^{-6} \sim 10^{-4}$) as well as harmless for people.

Key words: water distribution system; disinfection by-products; health risk assessment

三卤甲烷(THMs)和卤乙酸(HAAs)是饮用水氯化消毒的典型副产物,供水管网中 THMs 和 HAAs 浓度过高,将会对人体健康造成危害。为了了解该市生活饮用水水质的卫生状况和氯化消毒副产物(DBPs)的健康风险,课题组对该市全线供水管网水中的 THMs 中的三氯甲烷(TCM)、一溴二氯甲

烷(DBCM)、二溴一氯甲烷(BDCM)、三溴甲烷(TBM)和 HAAs 中的二氯乙酸(DCAA)的含量进行了检测,并根据美国环境署的评价方法进行初步健康风险评价,以期全面提高和保障饮用水水质安全性提供依据和对策。

收稿日期:2015-06-11。

基金项目:常州市社会发展基金项目(CE20145029)。

作者简介:陈梦杰(1991—),男,安徽安庆人,硕士生。通讯联系人:张凤娥(1964—),E-mail:zfelzh@cczu.edu.cn

1 材料与方 法

1.1 采样点和采样时间布置

采样点:以该市输水与供水主干线为研究对象,考虑到管网中水体流动的复杂性,从源头到供水管网末梢依次布置监测点,全面调查分析输配水管网、二次加压过程中水质的变化以及管网末梢水质情况。为尽量体现水体水质沿线变化规律,本研究选取水源单一而且环状管段较少的一条管线(水厂—输水干管—二次加压泵站进出水管—配水管—管网末梢)进行采样。具体采样路线如图 1 所示。

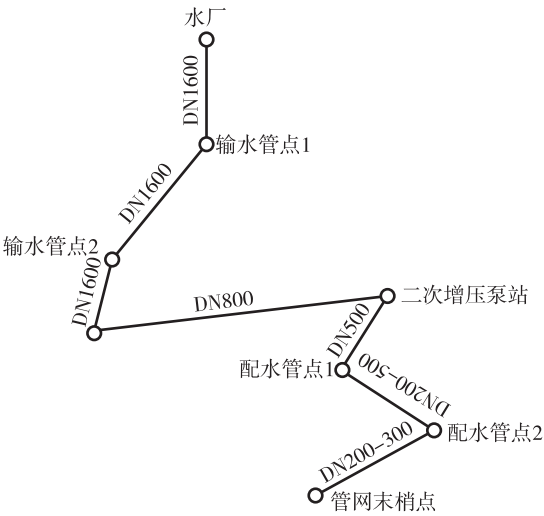


图 1 采样路线
Fig.1 Sampling routes

采样时间:2014~2015 年夏秋冬 3 季,各监测点具体情况见表 1。

表 1 水质监测点及管段基本信息表
Table 1 Basic information table for water quality monitoring points and pipe segments

编号	采样点	管段	管长/km	备注
1	水厂出水	—	—	—
2	输水管采样点 A	1~2	6.4	钢筋混凝土管
3	输水管采样点 B	2~3	4.6	钢筋混凝土管
4	二次加压泵站吸水井进水管	3~4	6.0	钢筋混凝土管
5	二次加压泵站出水管	4~5	—	—
6	配水管线采样点 C	5~6	1.6	球磨铸铁管
7	配水管线采样点 D	6~7	1.8	球磨铸铁管
8	管网末梢	7~8	1.4	球磨铸铁管或聚乙烯塑料管

1.2 测试指标和方 法

THMs,顶空气相色谱法;HAAs,液相萃取衍生气相色谱法。

1.3 致癌风险评估方 法

致癌风险评估是指人体长期暴露于某种危害因素条件下从而导致患癌症的特征,其主要包含 4 个阶段:数据收集和评估、暴露和毒性评估、风险特征描述和风险管理^[1]。人体暴露水环境主要有 3 种方式:呼吸吸入、饮食摄入以及皮肤渗入方式。其中最大的风险被认为是经饮食摄入的致癌风险^[2],但是人们在日常生活中因洗澡、洗脸、洗菜等活动也会导致从皮肤渗入或者呼吸吸入的途径产生的致癌风险,该过程同样也不可忽视。

本研究参考由美国环保署建立的致癌风险评估模型,评估了在经口摄入、皮肤渗入和呼吸吸入 3 种暴露途径下 THMs 和 HAAs 对人体的致癌风险。而由于 HAAs 挥发性低,不易通过皮肤渗入,因此,不考虑 HAAs,皮肤接触和呼吸吸入的致癌风险计算方法如下:

经口摄入暴露剂量的计算方法为:

$$C_0 = \frac{C_w \cdot I_w \cdot E_F \cdot E_D}{B_w \cdot A_T}$$

(1)

式中: C_0 为经口暴露于某种化合物的剂量,mg/(kg·d); C_w 为饮用水中消毒副产物质量浓度,mg/L; I_w 为食物的摄入率,取 2L/d; E_F 为暴露频率,取 350d/a; E_D 为暴露时间,取 70a; B_w 为体重,取 70kg; A_T 为平均暴露时间,取 25 550d。

皮肤接触暴露剂量的计算方法为:

$$C_1 = \frac{C_w \cdot S_A \cdot K_p \cdot E_T \cdot E_F \cdot E_D \cdot C_F}{B_w \cdot A_T}$$

(2)

式中: C_1 为经皮肤接触暴露于某种化合物的剂量,mg/(kg·d); S_A 为皮肤表面积,取 20 000cm²; E_T 为暴露时间,取 0.25h/d; K_p 为 25℃ 下皮肤渗透系数,cm/h,其中 TCM、DBCM、BDCM 和 TBM 的皮肤渗透系数分别为 0.21、0.16、0.18 和 0.20, C_F 为转换系数 10⁻³,L/cm³。

呼吸吸入暴露剂量的计算方法为:

$$C_2 = \frac{C_a \cdot I_a \cdot E_T \cdot E_F \cdot E_D}{B_w \cdot A_T}$$

(3)

式中: C_2 为经呼吸暴露于某种化合物的剂量,mg/(kg·d); C_a 为研究地区空气中 THMs 的质量浓度,mg/L,根据公式(4)、(5)计算; I_a 为呼吸速率,取

0.83m³/h。

由于沸点比较低、挥发性交强,TCM 是所有消毒副产物中最容易通过呼吸进入人体从而产生致癌风险^[3]。TCM 在空气中的浓度普遍采用水体中的 TCM 的浓度和挥发因子来确定^[4-5]。通过这种方法来评估 TCM 在空气中的浓度可以计算出 TCM 的致癌风险值。本文采用 Nazir and Khan^[6]提出的基于实验基础上的模型计算 THMs 在空气中的剂量。

空气中 TCM 的剂量按式(4)计算:

$$C_{\text{TCM}}=10.45\times C_{\text{w}}-99.60$$

(4)

对于其他消毒副产物,在空气中的质量浓度

$$C_{\text{a}}=0.000\,5\times C_{\text{w}}$$

(5)

某种消毒副产物的致癌风险值

$$R_m=\sum_i S_m\times C_m$$

(6)

式中: R_m 为某种化合物在不同暴露途径下致癌风险值之和; m 为不同化合物; i 为不同暴露途径; S_m 为效力因子,(kg·d)/mg,具体数值见表2; C_m 为每日摄入量,mg/(kg·d)。

所有研究的消毒副产物的总致癌风险:

$$R_{\text{T}}=\sum R_{\text{m}}$$

(7)

式中: R_{T} 为该监测点各化合物的致癌风险之和。

以上致癌风险评价模型中饮水率、呼吸量、平均体重、皮肤表面积和期望寿命等参数参考了 US EPA 的推荐值^[7]及该地区的统计值。

表 2 所研究化合物的效力因子

Table 2 The effect factors SF of different compounds

化合物质	人类健康致癌性	效力因子/((kg·d)/mg)		
		摄入	呼吸	皮肤
TCM	B-2	6.10×10^{-3} (RAIS)	8.10×10^{-2} (RAIS)	6.10×10^{-3}
	Not likely	— (IRIS)	— (IRIS)	— (IRIS)
DBCM	B-2	6.20×10^{-2} (IRIS)	6.20×10^{-2}	6.20×10^{-2}
BDCM	C	8.40×10^{-2} (IRIS)	8.40×10^{-2}	8.40×10^{-2}
TBM	B-2	7.90×10^{-3} (IRIS)	7.90×10^{-3} (RAIS)	7.90×10^{-3}
DCAA	B-2	5.00×10^{-2} (IRIS)	n.a	n.a
TCAA	B-2	5.00×10^{-2} (IRIS)	n.a	n.a

说明:B-2 为可能的人致癌剂(充分的实验室证据);C 为可能的人致癌剂;RAIS 为风险评估系统(RAIS,2009);IRIS 为综合评估系统(IRIS,2009);n.a 指未被采用。

2 结果与讨论

2.1 研究区域内水样检测结果

表3为通过2014~2015年夏秋冬3季的信息采集得到THMs、DCAA质量浓度的平均值。

表 3 管网中 THMs 和 HAAs 的质量浓度分布

Table 3 Distribution of THMs and HAAs mass concentration

in pipe network					μg/L
采样点编号	TCM	DBCM	BDCM	TBM	DCAA
1	9.30	2.82	ND	ND	15.29
2	13.69	5.02	ND	ND	16.47
3	16.64	5.69	0.05	ND	16.35
4	18.27	6.78	0.20	ND	15.07
5	21.35	7.17	0.18	ND	18.63
6	23.75	8.31	0.34	ND	23.30
7	26.72	8.97	0.34	ND	23.05
8	28.06	9.39	0.42	ND	18.17

说明:表中ND表示质量浓度在监测线以下。

从表3可知,TCM和DCAA含量较高,其次是DBCM,BDCM仅检测出痕量,TBM未检测出,但各项测定值均未超过我国《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)。分析表3可发现TCM的质量浓度沿管线呈逐渐上升趋势,这主要是因为它的质量浓度易受管网供水长度和THMs前驱物质量浓度的影响,与中间二次加压关系不大,只要控制供水管线在一定的范围内,其质量浓度则不会超标;而DCAA变化与管线长度关系并不明显,可以表述为缓慢增长—迅速增长—迅速降低趋势,但在二次加压点又伴随着加压与加氯再次提升,这与文献研究^[8-9]结论相同:即DCAA与管网中余氯浓度呈正相关,后期可以通过控制管线长度以及加氯量来降低整个供水管网中消毒副产物的质量浓度。

2.2 致癌风险评价

为了对该市水厂供水管网中THMs和HAAs

对人体健康产生的致癌风险进行评估,本研究参考了 US EPA 推荐的致癌风险评估值,US EPA 明确指出:当 $R_T < 10^{-6}$ 时,表示致癌风险很低,不会对人体健康造成威胁;当 $10^{-6} < R_T < 10^{-4}$,此时的致癌风险可以被人们接受,在考虑水质安全问题时可以做为次要因素考虑;当 $R_T > 10^{-4}$ 时,有致癌风险,需要及时对水质及供水管线采取改进措施。

2.2.1 消毒副产物致癌风险值分布

表 4 为 THMs 类化合物和 DCAA 的致癌风险值,具体计算方法:分别将表 2、表 3 所列的氯化消毒副产物的相关参数代入式(1)~(7)中,计算得到相应的致癌风险值,计算中对于检测结果为 ND(未检出)的值取 0。

表 4 不同物质致癌风险贡献值

Table 4 Contribution of different substances to the value of the carcinogenic risk $\times 10^{-6}$

采样点编号	R_{TCM}	R_{DBC}	R_{BDC}	R_{TBM}	R_{DCA}	R_T
1	0.91	3.01	0	0	8.75	12.56
2	5.52	5.35	0	0	9.43	20.30
3	8.77	6.06	0.07	0	9.36	24.26
4	10.57	7.22	0.29	0	8.62	26.71
5	13.97	7.64	0.26	0	10.66	32.54
6	16.62	8.86	0.51	0	13.34	39.33
7	19.89	9.57	0.51	0	13.19	43.16
8	21.38	10.01	0.62	0	10.40	42.40

分析表 4 可知,管网中消毒副产物致癌风险值随着管线的延长呈明显的上升趋势,变化幅度较大,其中 TCM 对总的致癌风险贡献最大,DCAA 其次,再次是 DBCM,检测时段内 BDCM 均有检出,但其风险贡献较小,TBM 则未被检出,风险贡献值为 0。究其原因,尽管溴取代有机碳上的碳原子能力比氯强^[10],但由于在水体中溴的质量浓度远低于水中氯的质量浓度,所以生成的溴代甲烷(或乙酸)量远低于氯代甲烷(或乙酸)量;此外,该市输配水管网中 DBPs 以 TCM、DCAA 为主,但是 DCAA 只考虑经口摄入途径下的致癌风险,最终导致其致癌风险计算值次于 TCM。

2.2.2 沿线消毒副产物致癌风险变化

沿线管网水中消毒副产物的质量浓度随着水体的流动不断发生着变化,图 2 为消毒副产物的致癌风险值沿线变化情况。

分析图 2 可知,管网中消毒副产物致癌风险值随着管线的延长而呈上升趋势,其最大值出现在配水管网后半段,为 4.32×10^{-5} ,在 US EPA 的致癌

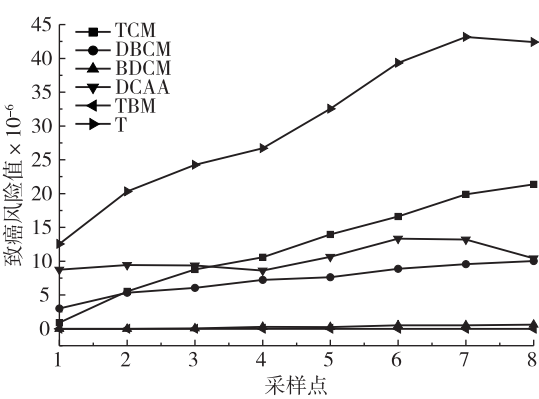


图 2 供水管线上消毒副产物的致癌风险变化情况
Fig.2 Changes of DBPs cancer risk in water supply line

风险评价指南中认为可接受的风险水平($10^{-6} \sim 10^{-4}$),同时也低于 ICRP 国际辐射防护委员会推荐的最大可接受风险水平(5×10^{-5}),因此,初步认为目前该城市供水管网中氯化消毒副产物不会对人体产生明显的健康危害。

3 结 论

通过对南方某城市供水管网中 THMs 和 HAAs 的致癌风险进行了健康风险评价,评价结果显示:

- 1)研究区域内的致癌风险最大值为 4.32×10^{-5} ,在 US EPA 可以接受的限值($10^{-6} \sim 10^{-4}$),不会对人体产生明显的健康危害。
- 2)经研究发现对致癌风险贡献较大的是 TCM 和 DCAA,TCM 的质量浓度沿管线呈逐渐上升趋势,DCAA 变化与管网中余氯浓度呈正相关。建议在相关输配水管道设计规划中,可以将 TCM 和 DCAA 作为主要控制对象,通过控制供水管线的范围、出厂或中间二次加氯量来尽可能消除消毒副产物的生产量,降低其对人体的致癌风险,从而进一步保障生活饮用水水质安全。

参考文献:

[1]陈敏建,陈炼钢,丰华丽.基于健康风险评价的饮用水水质安全管理[J].中国水利,2007(7):12-15.
[2]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.
[3]LEE S C, GUO H, LAM S M. Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in

4 结 论

多涡卷混沌吸引子的生成电路形式很多,其中最为简单且易物理实现的是基于Jerk形式的多涡卷混沌电路。基于一个简单的Jerk电路,通过引入由三角函数芯片实现非线性正弦函数运算的反馈电路,提出了一个新的多涡卷Jerk混沌电路。采用数字示波器进行实验测量,从多涡卷Jerk混沌电路中截取到了复杂的3涡卷混沌吸引子。此外,Jerk系统随着参数变化时存在混沌、周期以及周期窗等复杂动力学行为。Jerk系统的动力学特性理论分析说明了本文所提出的Jerk电路确实可生成多涡卷混沌吸引子。

参考文献:

- [1]YALCIN M. Increasing the entropy of a random number generator using n -scroll chaotic attractors[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007, 17(12): 4471-4479.
- [2]LIU Z, CHEN S Y, XI F. A compressed sensing framework of frequency-sparse signals through chaotic system[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(6): 1250151.
- [3]SUKENS J A K, VANDEWALLE J. Generation of n -double scrolls ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$)[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 1993, 40(11): 861-867.

- [4]TANG W K S, ZHONG G Q, CHEN G, et al. Generation of N -scroll attractors via sine function[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2001, 48(11): 1369-1372.
- [5]包伯成, 徐强, 徐煜明, 等. 三维多涡卷Colpitts混沌系统及其数字硬件实现[J]. 电路与系统学报, 2011, 16(1): 69-73.
- [6]BAO B C, ZHOU G H, XU J P, et al. Multi-scroll chaotic attractors from a modified Colpitts oscillator model[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2010, 20(7): 2203-2211.
- [7]LAI Q, GUAN Z H, WU Y H, et al. Generation of multi-wing chaotic attractors from a Lorenz-like system[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2013, 23(9): 1350152.
- [8]黄运. 一类多翼蝴蝶混沌吸引子及其电路实现[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 080505.
- [9]YU J H, YU S M, LEUNG H, et al. Experimental verification of multidirectional multiscroll chaotic attractors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2006, 53(1): 149-165.
- [10]SPROTT J C. A new chaotic jerk circuit[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2011, 58(4): 240-243.
- [11]SRISUCHINWONG B, NOPCHINDA D. Current-tunable chaotic jerk oscillator[J]. Electronics Letters, 2013, 49(9): 587-589.

(责任编辑:李艳)

【上接第49页】

- Hong Kong[J]. Environmental Research, 2012, 94(1): 47-56.
- [4]TOKMAK B, CAPAR G, DILEK F B, et al. Trihalomethanes and associated potential cancer risks in the water supply in Ank-ara, Turkey[J]. Environmental Research, 2004, 96(3): 345-352.
- [5]UYAK V. Multi-pathway risk assessment of trihalomethanes exposure in Istanbul drinking water supplies[J]. Environmental Research, 2006, 32(1): 12-21.
- [6]NAZIR M, KHAN F I. Human health-risk modeling for various exposure routes of trihalomethanes (THMs) in potable water supply[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(10): 1416-1429.

- [7]US EPA. Exposure factors hand book[R]. Washington DC: Office of Research and Development US EPA, 1989.
- [8]陈萍萍, 张建英, 金坚袁. 饮用水中卤乙酸和三卤甲烷的形成及影响因素研究[J]. 环境化学, 2005, 24(4): 434-437.
- [9]李源, 张凤娥, 陈春芳, 等. 水厂消毒副产物的变化规律[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2013, 25(2): 27-30.
- [10]LII E R B, MARGETAS D, DUGGIRALA R. Ravikrishna D Copper catalysis in chloroform formation during water chlorination[J]. Water Research, 2003, 37(18): 4385-4394.

(责任编辑:李艳)