

· 论 著 ·

杭州市生活饮用水健康风险评估

薛鸣, 金铨, 张力群, 王小芳, 杨忠乔, 边天斌, 龚立科

杭州市疾病预防控制中心理化检验科, 浙江 杭州 310021

摘要: **目的** 对2016—2017年杭州市生活饮用水水质进行健康风险评估, 为确保居民生活饮用水安全提供依据。**方法** 收集2016—2017年杭州市主城区36份水源水、36份出厂水和288份末梢水中5种基因毒物质(砷、六价铬、镉、三氯甲烷和四氯化碳)及13种躯体毒物质(铅、汞、硒、氰化物、氟化物、硝酸盐、铁、氨氮、锰、铜、锌、铝和挥发酚)的监测数据, 采用美国国家环境保护局推荐的风险评价模型评价经饮水途径引起的健康风险。**结果** 水源水、出厂水和末梢水中5种基因毒物质和13种躯体毒物质浓度均在GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》参考限值范围内。水源水中化学污染物致癌风险、非致癌风险和总健康风险分别为 $2.18 \times 10^{-5}/a$ 、 $7.75 \times 10^{-9}/a$ 和 $2.18 \times 10^{-5}/a$; 出厂水中化学污染物致癌风险、非致癌风险和总健康风险分别为 $1.08 \times 10^{-5}/a$ 、 $3.70 \times 10^{-9}/a$ 和 $1.08 \times 10^{-5}/a$; 末梢水中化学污染物致癌风险、非致癌风险和总健康风险分别为 $1.96 \times 10^{-5}/a$ 、 $3.61 \times 10^{-9}/a$ 和 $1.96 \times 10^{-5}/a$ 。致癌风险和总健康风险由高到低依次为水源水、末梢水和出厂水, 非致癌风险由高到低依次为水源水、出厂水和末梢水。**结论** 杭州市生活饮用水中18种化学污染物的健康风险处于较低水平, 且致癌风险远大于非致癌风险, 致癌物中以六价铬风险最高, 非致癌物中以氟化物和铝风险最高。

关键词: 生活饮用水; 基因毒物质; 躯体毒物质; 健康风险评估

中图分类号: R123.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-5087 (2019) 01-0028-05

Assessment on health risk of drinking water in Hangzhou

XUE Ming, JING Quan, ZHANG Li-qun, WANG Xiao-fang, YANG Zhong-qiao, BIAN Tian-bin, GONG Li-ke
Department of Physical Testing and Chemical Analysis, Hangzhou Center for Disease Control and Prevention, Hangzhou, Zhejiang 310021, China

Abstract: Objective To assess the health risk associated with drinking water in Hangzhou from 2016 to 2017, and to provide evidence for the safety of drinking water. **Methods** The monitoring data of 5 genetic toxic substances (arsenic, hexavalent chromium, cadmium, chloroform, tetrachloromethane) and 13 body toxic substances (lead, mercury, selenium, cyanide, fluoride, nitrate, iron, ammonia nitrogen, manganese, copper, zinc, aluminum, volatile phenol) from 36 source water samples, 36 finished water samples and 288 tap water samples in the main urban areas of Hangzhou were collected from 2016 to 2017. The health risk of drinking water containing the chemical pollutants mentioned above were assessed based on the evaluation models recommended by United States Environmental Protection Agency. **Results** The concentrations of 5 genetic toxic substances and 13 body toxic substances in source water, finished water and tap water were all within the reference limits issued by Standards for Drinking Water Quality (GB 5749—2006). The carcinogenic risk, non-carcinogenic risk and total health risk caused by the chemical pollutants in the source water were $2.18 \times 10^{-5}/a$, $7.75 \times 10^{-9}/a$ and $2.18 \times 10^{-5}/a$. The carcinogenic risk, non-carcinogenic risk and the total health risk caused by the chemical pollutants in the finished water were $1.08 \times 10^{-5}/a$, $3.70 \times 10^{-9}/a$ and $1.08 \times 10^{-5}/a$. The carcinogenic risk, non-carcinogenic risk and total health risk caused by the chemical pollutants in the tap water were $1.96 \times 10^{-5}/a$, $3.61 \times 10^{-9}/a$ and $1.96 \times 10^{-5}/a$. The carcinogenic risk and total health risk caused by chemical pollutants ranged from high to low in the source water, tap water and finished water. The non-carcinogenic risks ranged from high

DOI: 10.19485/j.cnki.issn2096-5087.2019.01.007

基金项目: 浙江省医药卫生科技计划 (2017KY131); 杭州市农业与社会发展科研计划项目 (20170533B72)

作者简介: 薛鸣, 硕士, 主管技师, 主要从事食品检验工作

通信作者: 薛鸣, E-mail: xmxueming@126.com

to low in the source water, finished water and tap water. **Conclusion** The health risks of 18 chemical pollutants in drinking water in Hangzhou were at a low level, with the greater carcinogenic risk than the non-carcinogenic risk. Hexavalent chromium had the highest carcinogenic risk, while fluoride and aluminum had the highest non-carcinogenic risk.

Key words: Drinking water; Genetic toxic substances; Body toxic substances; Health risk assessment

健康风险评价是一种主要针对环境中基因毒物质和躯体毒物质的评价体系,它以风险度作为评价指标,将环境污染与人体健康联系起来,定量描述污染对人体产生健康危害的风险^[1]。目前河北省^[2]及珠三角^[3]等地已对农村饮用水和城市生活饮用水水源水质进行风险评价。2009—2011年杭州市城市居民生活饮用水水质状况分析^[4]显示,末梢水中部分重金属污染较为严重,但尚未见有关杭州市生活饮用水水质的相关健康风险评价研究。本研究对2016—2017年杭州市市区6个市政水厂的水源水、出厂水和末梢水进行监测,参照美国国家环境保护局推荐的健康风险评价模型^[5]对水中化学污染物通过饮水途径引起的健康风险进行评价,为生活饮用水污染治理提供依据。

1 对象与方法

1.1 对象 选取杭州市市区6家市政供水厂,分别在2016年和2017年的3月、7月和11月采集水源水、出厂水,同时根据供水范围选择35个末梢水点开展监测。末梢水监测一般按每2万供水人口设一个监测点^[5],2017年末杭州市区常住人口329万,以各个水厂供水人口50万左右估算设置160个末梢水监测点。采用各区覆盖、随机抽样的方法进行布点,分别于丰水期和枯水期对72个末梢水监测点进行采样。

1.2 方法

1.2.1 水样采集、保存和检测 水样采集、保存和检测参考GB/T 5750—2006《生活饮用水卫生标准检验方法》^[6]。

1.2.2 检测指标 根据国际癌症研究机构和世界卫生组织评价化学污染物致癌性的分类系统可知,属于I组和II组的化学物质为化学致癌物,其他为非致癌化学有毒物,前者 and 放射性污染物同属于基因毒物质,后者属于躯体毒物质。由于在一般水体中放射性污染物含量极低^[7-8],因此本研究仅考虑化学致癌物。根据相关文献报道^[5,9]和实际检测项目,本研究选取的检测指标包括砷、六价铬、镉、三氯甲烷和四氯化碳等基因毒物质及铅、汞、硒、氰化物、氟化物、硝酸盐、铁、氨氮、锰、铜、锌、铝和挥发酚等

躯体毒物质。

1.2.3 评价标准 检测结果按照GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》^[10]进行评价。各水厂水源均为地面水,检测值<检出限时以1/2检出限计算。

1.3 健康风险评价

1.3.1 基因毒物质的健康风险评价 基因毒物质的致癌风险通常以风险值(risk, R)表示,计算公式^[11-12]如下:

$$D_i = 1.923 \times C_i / 62.5 \quad (1)$$

$$R_i = [1 - \exp(-D_i q_i)] / 82.08 \quad (2)$$

$$R_T = \sum R_i \quad (3)$$

式(1)中, D_i 为某种毒物质通过饮水途径的暴露剂量[mg/(kg·d)];1.923为浙江省城市成人日均总饮水摄入量(L/d); C_i 为某种毒物在水中的浓度(mg/L);62.5为浙江省城市成人平均体质量(kg)^[13]。式(2)中, R_i 为某种基因毒物质通过饮水途径产生的个人致癌风险(a^{-1}); q_i 为某种基因毒物质通过饮水途径的致癌系数[(kg·d)/mg];82.08为2016年杭州市居民平均期望寿命(a)^[14]。式(3)中, R_T 为某种基因毒物质通过饮水途径产生的个人致癌总风险(a^{-1})。

1.3.2 躯体毒物质的健康风险评价 躯体毒物质的非致癌风险以风险指数(hazard index, HI)表示,计算公式^[11-12]如下:

$$HI_i = (D_i / RfD_i) \times 10^{-6} / 82.08 \quad (4)$$

$$HI_T = \sum HI_i \quad (5)$$

式(4)中, HI_i 为某种躯体毒物质通过饮水途径产生的个人非致癌风险(a^{-1}); RfD_i 为某种躯体毒物质通过饮水途径摄入的参考剂量[mg/(kg·d)]; 10^{-6} 为 RfD_i 制定过程中引入的实际安全剂量概念,表示100万人超额罹患率低于1人。式(5)中, HI_T 为某种躯体毒物质通过饮水途径产生的个人非致癌总风险(a^{-1})。

1.3.3 总健康风险评价 饮用水中各化学污染物对人体健康危害产生的累积效应可能存在相加、协同或拮抗关系。由于在水中化学污染物的浓度相对较低,因此认为各类污染物对人体产生的作用相互独立,即各

类污染物对人体健康危害产生的累积效应只考虑相加关系^[9]。水环境中总健康风险评价计算公式^[11-12]如下:

$$R_{\text{总风险}} = R_T + HI_T \quad (6)$$

式(6)中, $R_{\text{总风险}}$ 为致癌物健康风险与非致癌物健康风险相加得到的总健康风险。

1.3.4 评价参数 根据文献[7,12],参考美国国家环境保护局及其综合风险信息系统的分类信息,砷、六价铬、镉、三氯甲烷、四氯化碳经饮水途径的致癌系数分别为15、41、6.1、 3.1×10^{-2} 和 1.3×10^{-1} mg/(kg·d),铅、汞、硒、氰化物、氟化物、硝酸盐、铁、氨氮、锰、铜、锌、铝和挥发酚经饮水途径的参考剂量分别为 1.4×10^{-3} 、 3.0×10^{-4} 、 5.0×10^{-3} 、 3.7×10^{-2} 、 6.0×10^{-2} 、1.6、 3.0×10^{-1} 、 9.7×10^{-1} 、 1.4×10^{-1} 、 4.0×10^{-2} 、 3.0×10^{-1} 、 4.0×10^{-4} 和 3.0×10^{-1} mg/(kg·d)。

1.4 统计分析 采用Excel 2007软件录入数据并建立数据库,采用SPSS 17.0软件统计分析。定量资料不服从正态分布,以中位数和四分位数间距 $[M(Q_R)]$ 描述,组间比较采用Kruskal-Wallis H 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 一般情况 共采集360份水样,其中水源水36份,出厂水36份,末梢水288份。5份水源水中铁超标,1份末梢水中氨氮超标,其他水样中各指标均符合标准。

2.2 基因毒物质检测情况 水源水、出厂水和末梢水中砷、六价铬、镉、三氯甲烷和四氯化碳浓度均在GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》参考限值范围内。除镉外,其他4种基因毒物质在水源水、出厂水和末梢水中的浓度差异均有统计学意义($P < 0.05$)。见表1。

表1 不同类型水样中基因毒物质的浓度 $[M(Q_R), \mu\text{g/L}]$

水样类型	砷	六价铬	镉	三氯甲烷	四氯化碳
水源水	0.50 (2.03)	1.24 (0.66)	0.01 (0.01)	0.25 (0.00)	0.01 (0.00)
出厂水	0.35 (0.77)	0.57 (0.19)	0.01 (0.02)	7.52 (7.59)	0.01 (0.00)
末梢水	0.01 (0.37)	1.24 (0.67)	0.01 (0.02)	3.75 (5.35)	0.01 (0.00)
参考值	10.00	50.00	5.00	60.00	2.00
χ^2 值	18.13	17.70	0.29	34.48	9.58
P 值	<0.001	<0.001	0.861	<0.001	<0.001

注:参考值引自GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》^[10]。

2.3 躯体毒物质检测情况 水源水、出厂水和末梢水中13种躯体毒物质均在GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》参考限值范围内。除硝酸盐、氨氮、锌、铝和挥发酚外,其他8种躯体毒物质在水源水、出厂水和末梢水中的浓度差异均有统计学意义($P < 0.05$)。见表2。

2.4 基因毒物质致癌风险评价 水源水、出厂水和末梢水中5种基因毒物质经饮水途径所引起的致癌风险分别为 $2.18 \times 10^{-5}/\text{a}$ 、 $1.08 \times 10^{-5}/\text{a}$ 和 $1.96 \times 10^{-5}/\text{a}$,致癌风险由高至低依次为水源水、末梢水、出厂水。水源水中致癌风险以六价铬和砷为主,占水源水总致癌风险的99.72%;出厂水和末梢水中以六价铬的致癌风险最高,分别占出厂水和末梢水总致癌风险的81.09%和96.88%。见表3。

2.5 躯体毒物质非致癌风险评价 水源水、出厂水和末梢水中13种躯体毒物质通过饮水途径所引起的

非致癌风险分别为 $7.75 \times 10^{-9}/\text{a}$ 、 $3.70 \times 10^{-9}/\text{a}$ 和 $3.61 \times 10^{-9}/\text{a}$,非致癌风险由高至低依次为水源水、出厂水、末梢水。三类水样中非致癌风险均以氟化物和铝为主,分别占水源水、出厂水和末梢水总非致癌风险的90.30%、87.02%和83.68%。见表4。

2.6 总健康风险评价 水源水、出厂水和末梢水总健康风险分别为 $2.18 \times 10^{-5}/\text{a}$ 、 $1.08 \times 10^{-5}/\text{a}$ 和 $1.96 \times 10^{-5}/\text{a}$,其中致癌物构成比均超过99.13%。总健康风险由高至低依次为水源水、末梢水、出厂水。

3 讨论

本研究结果表明,2016—2017年杭州市市政供水水厂中水源水、出厂水和末梢水总体健康风险均低于国际辐射防护委员会的最大可接受风险水平 $5.00 \times 10^{-5}/\text{a}$ (即每年每千万人口中因饮用水中各类污染物而受到健康危害甚至死亡的人数不能超过500人)^[4],

表2 不同类型水样中躯体毒物质的浓度[M(Q_R), μg/L]

水样类型	铅	汞	硒	氰化物	氟化物	硝酸盐
水源水	0.40 (0.76)	0.01 (0.00)	0.31 (0.50)	1.00 (0.00)	200.00 (35.00)	1 500.00 (950.00)
出厂水	0.01 (0.11)	0.01 (0.03)	0.31 (0.50)	1.00 (0.00)	190.00 (15.00)	1 800.00 (475.00)
末梢水	0.05 (0.11)	0.01 (0.00)	0.03 (0.09)	1.00 (0.00)	170.00 (20.00)	1 800.00 (300.00)
参考值	10.00	1.00	10.00	50.00	1 000.00	10 000.00
χ ² 值	21.33	11.56	9.64	8.92	26.95	3.62
P 值	<0.001	0.003	0.008	0.012	<0.001	0.164

水样类型	铁	氨氮	锰	铜	锌	铝	挥发酚
水源水	146.00 (804.95)	7.50 (162.50)	6.00 (8.50)	0.51 (9.23)	33.12 (53.79)	26.00 (63.43)	1.00 (0)
出厂水	0.05 (18.95)	7.50 (392.50)	0.02 (0.00)	0.22 (2.04)	10.74 (164.52)	6.68 (2.23)	1.00 (0)
末梢水	18.61 (42.45)	7.50 (160.50)	1.00 (5.98)	6.00 (12.00)	26.02 (54.49)	2.68 (12.06)	1.00 (0)
参考值	300.00	500.00	100.00	1 000.00	1 000.00	200.00	2.00
χ ² 值	7.71	1.05	15.56	17.60	1.25	4.44	0.00
P 值	0.021	0.592	<0.001	<0.001	0.531	0.064	1.000

注：参考值引自 GB 5749—2006 《生活饮用水卫生标准》^[10]。

表3 不同类型水样中基因毒物质的致癌风险

水样类型	砷 (×10 ⁻⁷ /a)	六价铬 (×10 ⁻⁶ /a)	镉 (×10 ⁻⁸ /a)	三氯甲烷 (×10 ⁻⁹ /a)	四氯化碳 (×10 ⁻¹⁰ /a)	合计 (×10 ⁻⁵ /a)
水源水	28.13	19.02	2.97	2.91	2.44	2.18
出厂水	19.69	8.76	2.29	8.71	2.44	1.08
末梢水	5.62	19.00	2.29	44.20	2.44	1.96

表4 不同类型水样中躯体毒物质的非致癌风险

水样类型	铅 (×10 ⁻¹² /a)	汞 (×10 ⁻¹² /a)	硒 (×10 ⁻¹² /a)	氰化物 (×10 ⁻¹¹ /a)	氟化物 (×10 ⁻⁹ /a)	硝酸盐 (×10 ⁻¹⁰ /a)	铁 (×10 ⁻¹⁴ /a)
水源水	107.00	6.25	22.50	1.01	1.25	3.51	18 200.00
出厂水	2.67	6.25	22.50	1.01	1.19	4.22	6.25
末梢水	13.43	6.25	22.50	1.01	1.06	4.22	2 320.00

水样类型	氨氮 (×10 ⁻¹² /a)	锰 (×10 ⁻¹⁴ /a)	铜 (×10 ⁻¹² /a)	锌 (×10 ⁻¹¹ /a)	铝 (×10 ⁻⁹ /a)	挥发酚 (×10 ⁻¹² /a)	合计 (×10 ⁻⁹ /a)
水源水	2.90	1 610.00	4.78	4.13	5.75	1.25	7.75
出厂水	2.90	5.35	1.87	1.34	2.03	1.25	3.70
末梢水	2.90	268.00	56.23	3.25	1.96	1.25	3.61

但高于英国皇家协会、瑞典环境保护部及荷兰建设和环境部推荐的最大可接受水平 (1.0 × 10⁻⁶/a)^[15], 说明杭州市饮用水水质中化学污染对人群健康的危害处于较低水平, 但仍有潜在风险。邓春拓等^[5] 研究表明, 水源水中化学物致癌风险为 3.75 × 10⁻⁵/a, 高于本研究结果。陈艳等^[12] 研究显示, 出厂水和末梢水的致癌风险分别为 4.01 × 10⁻⁵/a 和 3.74 × 10⁻⁵/a, 均高于本研究结果。由于大多数躯体毒物质健康风险研究未将铝纳入, 本研究在不考虑铝的健康风险水平时, 结果与陈艳等^[12] 结果 (1.95 × 10⁻⁹/a~3.15 × 10⁻⁹/a) 相近, 低于丁克颖等^[7] 研究结果 (7.33 ×

10⁻⁹/a ~8.48 × 10⁻⁹/a)。廖雅芬等^[9] 研究显示, 广东省肇庆市农村地区铝的非致癌风险为 6.32 × 10⁻⁹/a, 略高于本研究。作为人群饮水直接摄入的主要来源, 末梢水中六价铬的致癌风险最高, 因此, 杭州市水质管理部门应加强监测, 特别应重视六价铬的污染, 通过有效技术减少或去除六价铬等污染物, 从而降低饮用水水质污染或导致的风险。

水源水经过处理后, 砷、六价铬、镉、铅、氟化物、铁、锰、铜、锌、铝的致癌风险或非致癌风险明显降低, 特别是铅、铁和锰, 说明常规水处理方法对水体中某些化学污染物的去除效果相当有效。三氯甲

烷在出厂水和末梢水中的致癌风险比水源水高，主要原因可能是大多数水厂把液氯作为消毒剂，在水处理过程中产生了氯化副产物三氯甲烷，因此，水厂对液氯投放量的掌握至关重要，投放过多或过少都会造成出厂水中三氯甲烷的增加或者杀菌效果的降低^[5]。

杭州市水源水中化学污染物致癌风险、非致癌风险和总健康风险均为最高。末梢水中化学污染物的致癌风险和总健康风险高于出厂水，但非致癌风险略低于出厂水，其中末梢水中六价铬的致癌风险是出厂水的2.17倍，铅、铁、锰、铜和锌的非致癌风险分别是出厂水的5.02倍、371倍、50.1倍、30.1倍和2.42倍，这说明水源水经过水厂处理工艺后，水体中化学物质含量有了不同程度降低，但出厂水由于输水管网的老化、供水距离和供水水箱及其配件的锈蚀等原因又受到了上述6种金属的污染，因此，水质安全管理的关键是如何减少工农业生产对水源的污染和出厂水输送过程中的污染。

本研究主要以杭州市城区6个水厂的水源水和出厂水及随机布点的末梢水监测数据来推断2016—2017年人体经饮水途径所产生的健康风险，仍存在一些不足之处：(1) 研究采用美国国家环境保护部人体健康暴露风险评价模型，由于生活习惯和人种的差异，美国的暴露参数不能完全代表我国居民的暴露特征；(2) 以1/2检出限估算小于检出限的结果可能存在高估；(3) 本研究选取的是2016—2017年的监测数据，需要进一步补充监测点和数据，以便更准确地评价杭州市政供水健康风险，为政府部门水污染治理提供参考意见。

综上所述，杭州市市政供水中18种化学污染物的健康风险处于较低水平，致癌物的风险远大于非致癌物，致癌物中以六价铬的致癌风险最高，非致癌物中以氟化物和铝的非致癌风险最高。

参考文献

- [1] 章英, 谢许情, 熊文艳. 南昌市生活饮水健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2014, 41 (13): 2327-2329.
- [2] 赵晓风, 李振山, 张汉松. 河北省农村饮用水水质健康危害的风险度评价 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (26): 14614-14617.
- [3] 邓春拓, 何伦发, 郭艳, 等. 珠三角某市管网末梢水中化学污染物健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2016, 43 (17): 3116-3123.
- [4] 岑斌, 陈树昶, 虞爱旭, 等. 2009年—2012年杭州市城市居民生活饮用水水质状况分析 [J]. 中国卫生检验杂志, 2012, 22 (6): 1383-1385.
- [5] 邓春拓, 何伦发, 郭艳, 等. 珠三角某市生活饮用水中化学污染物健康风险评价 [J]. 中华疾病控制杂志, 2017, 21 (5): 523-527.
- [6] 中华人民共和国卫生部, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准检验方法: GB/T 5750—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 丁克颖, 应圣洁, 张佳维, 等. 上海市闵行区城市供水水质健康风险评价 [J]. 环境与职业医学, 2010, 27 (6): 349-352.
- [8] 贾继民, 田华, 张建江, 等. 新疆部队饮用水中污染物的健康风险评价 [J]. 解放军预防医学杂志, 2013, 31 (1): 27-29.
- [9] 廖雅芬, 叶坚, 古翠虹. 肇庆市农村地区饮用水健康风险评价 [J]. 现代预防医学, 2018, 45 (6): 1133-1136.
- [10] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [11] 刘国红, 蓝涛, 徐新云, 等. 深圳市市政供水健康风险评价 [J]. 环境卫生学杂志, 2014, 4 (2): 119-124.
- [12] 陈艳, 朱彩明, 张锡兴, 等. 长沙市城市饮用水水质健康风险评价 [J]. 中国卫生产业, 2017, 36: 149-153.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册 (成人卷) [M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 88-760.
- [14] 杭州网. 杭州居民平均期望寿命达到82.08岁 [EB/OL]. (2017-06-01) [2018-09-26]. http://ori.hangzhou.com.cn/ornews/content/2017-06/01/content_6566537.htm.
- [15] 黄艳红, 常薇, 何振宇. 武汉市农村地区地下水健康风险评价 [J]. 环境与健康杂志, 2010, 27 (10): 892-894.

收稿日期: 2018-07-04 修回日期: 2018-10-24 本文编辑: 陆璟璇