

2014—2022 年南京市生活饮用水中化学污染物健康风险评估

郑雨虹, 张景山, 陈春静, 葛明

南京市疾病预防控制中心环境卫生科, 江苏 南京 210003



DOI 10.11836/JEOM24027

摘要:

[背景] 生活饮用水中含有多种化学物质, 可能会对人体造成一定的健康风险。

[目的] 评估南京市 2014—2022 年生活饮用水中化学污染物致癌与非致癌健康风险。

[方法] 按照 GB/T 5750—2006《生活饮用水标准检验方法》及 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》对南京市 2014—2022 年出厂水、末梢水和二次供水开展水质常规指标监测。采用美国环保署推荐的健康风险评估模型评估饮用水中砷、镉、铬(六价)、铅、汞、硒、氰化物、氟化物、硝酸盐、三氯甲烷、四氯化碳、铝、铁、锰、铜、锌共 16 种化学物质通过不同途径(饮水摄入、经皮肤接触)在不同人群(成年男性、成年女性和儿童)中所引起的健康风险, 并对不同地区(城市、农村)、水期类型(枯水期、丰水期)和水样类型(出厂水、末梢水、二次供水)进行分层分析。

[结果] 南京市 2014—2022 年共监测生活饮用水水样 4198 份, 包括出厂水 483 份, 末梢水 3313 份, 二次供水 402 份, 所有指标合格率均在 99%以上。健康风险评估结果显示, 砷和铅的非致癌风险/致癌风险分别从 2015 年和 2016 年开始上升, 连续 3 年和 4 年维持相对较高水平, 于 2018 年和 2020 年起下降后保持平稳; 镉的致癌风险远高于其他化学物, 且除了 2018、2019 年之外风险均大于 1.00×10^{-4} 。不同人群(成年男性、成年女性和儿童)在不同暴露方式(饮水摄入和经皮肤接触)下饮用水非致癌风险均小于 1; 但饮水摄入致癌风险值大于 1.00×10^{-4} , 其中不同人群饮水摄入镉的致癌风险均大于 1.00×10^{-4} 。不同人群比较, 儿童饮用水致癌/非致癌风险均为最高; 不同途径比较, 饮水摄入的致癌/非致癌风险均高于经皮肤接触。饮用水致癌/非致癌风险的分层分析结果显示, 城市饮用水中砷、镉的致癌/非致癌风险高于农村($P < 0.05$); 丰水期砷、三氯甲烷的致癌/非致癌风险高于枯水期($P < 0.05$); 镉在不同类型水中的致癌风险无论是否有差异, 均 $> 1.00 \times 10^{-4}$; 而其余化学物质在不同水样类型中的健康风险各有不同, 但均在风险可接受范围内。

[结论] 南京市 2014—2022 年生活饮用水中化学污染物非致癌风险和致癌风险总体呈现下降或平稳趋势。16 种化学物质中, 除镉的致癌风险超过美国环保署推荐的可接受范围, 其余化学物的致癌/非致癌风险均在可接受范围内。在今后饮用水风险管理中应对镉给予重点关注。

关键词: 生活饮用水; 化学污染物; 健康风险评估

Health risk assessment of chemical pollutants in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022
ZHENG Yuhong, ZHANG Jingshan, CHEN Chunjing, GE Ming (Environmental Health Department, Nanjing Municipal Center for Disease Control and Prevention, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract:

[Background] Drinking water contains a variety of chemicals that may pose certain health risks to the human body.

[Objective] To evaluate carcinogenic and non-carcinogenic health risks of chemical pollutants in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022.

[Methods] According to the *Standard examination methods for drinking water* (GB/T 5750-2006) and the *Standards for drinking water quality* (GB 5749-2006), the conventional water quality indexes of finished water, tap water, and secondary water supply in Nanjing from 2014 to 2022 were monitored. The health risk assessment model recommended by the United States Environmental Protection Agency (US EPA) was used to assess the health risks of 16 chemicals [arsenic, cadmium, chromium (hexavalent), lead, mercury, selenium, cyanide, fluoride, nitrate nitrogen,

基金项目

南京市卫生科技发展专项资金医学重点科技发展项目 (ZKX22058); 南京疾控中心青年人才科研培育团队项目 (NPY2303); 南京市疾病预防控制中心南京市现场流行病学培训项目 (无编号)

作者简介

郑雨虹 (1993—), 女, 硕士, 医师;
E-mail: 2512057378@qq.com

通信作者

张景山, E-mail: zjs-017@163.com

作者中包含编委会成员 无

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2024-01-23

录用日期 2024-06-12

文章编号 2095-9982(2024)08-0905-06

中图分类号 R12

文献标志码 A

补充材料

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24027

引用

郑雨虹, 张景山, 陈春静, 等. 2014—2022 年南京市生活饮用水中化学污染物健康风险评估 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(8): 905-910.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM24027

Funding

This study was funded.

Correspondence to

ZHANG Jingshan, E-mail: zjs-017@163.com

Editorial Board Members' authorship

No

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2024-01-23

Accepted 2024-06-12

Supplemental material

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24027

To cite

ZHENG Yuhong, ZHANG Jingshan, CHEN Chunjing, et al. Health risk assessment of chemical pollutants in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022 [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(8): 905-910.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM24027

trichloromethane, carbon tetrachloride, aluminum, iron, manganese, copper, and zinc] in drinking water through different routes (drinking water and skin contact) in different populations (adult males, adult females, and children). Region (urban and rural), water period (dry period and wet period), and water sample type (finished water, tap water, and secondary water supply) were stratified for analysis.

[Results] From 2014 to 2022, a total of 4 198 samples of drinking water were monitored in Nanjing, including 483 samples of finished water, 3 313 samples of tap water, and 402 samples of secondary water supply. The pass rates of all indicators were above 99%. The health risk assessment results showed that the carcinogenic/non-carcinogenic risks of arsenic and lead presenting a trend of first increasing from 2015 and 2016 respectively, remaining relatively high for 3 and 4 consecutive years respectively, and then decreasing from 2018 and 2020 respectively before remaining stable; the carcinogenic risk of cadmium was much higher than that of other chemicals, and the risk was greater than 1.00×10^{-4} except for 2018 and 2019. The non-carcinogenic risks of drinking water in different populations (adult males, adult females, and children) under different exposure modes (intake of drinking water and skin contact) were less than 1. The values of carcinogenic risk via drinking water in total population and of cadmium intake via drinking water in all sub-groups (adult males, adult females, and children) were greater than 1.00×10^{-4} . The carcinogenic/non-carcinogenic risk of drinking water was the highest in children, and the carcinogenic/non-carcinogenic risk via drinking water ingestion was higher than that via skin contact. The stratified analysis showed that the carcinogenic/non-carcinogenic risks of arsenic and cadmium in urban drinking water were higher than those in rural drinking water ($P < 0.05$); the carcinogenic/non-carcinogenic risks of arsenic and trichloromethane in wet season were higher than those in dry season ($P < 0.05$); the carcinogenic risks of cadmium in different types of water were all greater than 1.00×10^{-4} ; the health risks varied by chemicals and water sample types for the other chemicals, but all were within an acceptable level.

[Conclusion] The non-carcinogenic risks and carcinogenic risks of selected chemical pollutants in drinking water in Nanjing City from 2014 to 2022 show decreasing or stable trends. Among the 16 chemicals, the carcinogenic risk of cadmium exceeds the acceptable range recommended by the US EPA, and the carcinogenic/non-carcinogenic risks of the remaining chemicals are within the acceptable ranges. Cadmium should be given priority attention in future risk management of drinking water.

Keywords: drinking water; chemical pollutant; health risk assessment

安全饮用水对公共卫生至关重要。中国居民的饮用水主要为水厂集中供应的自来水,然而,多数自来水管网的净化工艺流程并不能有效、彻底地去除水中的无机或有机污染物^[1]。据报道,世界各地的自来水中均曾检出某些金属元素或有机化合物^[2-5]。目前,对饮用水水质的关注主要局限于是否达到或超过标准。然而,长期摄入或间接接触水中的低剂量致癌物和非致癌物可能会给人群带来一定健康风险^[2]。水质健康风险评估可以定量描述水体中各种指标对人体的健康危害。现有的研究大多使用美国环境保护署推荐的风险模型进行健康风险评估^[2,6]。有学者对南京市饮用水重金属和消毒副产物进行健康风险评估,王刚^[7]在对南京地表水中重金属污染特征及风险的研究中发现南京地表水中重金属属于轻微污染。陈春静等^[8-9]研究发现重金属对南京部分地区儿童造成一定的致癌风险,氯化消毒副产物健康风险在可接受范围内。另外一项研究显示,在南京饮用水中检出一种新型饮用水消毒副产物 N-亚硝基二甲胺并存在潜在致癌风险^[10]。但以上研究均是针对南京地区某一时间内饮用水中某种或某类物质的健康风险评估,缺少对其他多种化合物的长期趋势研究。因此,本文对南京市 2014—2022 年近 10 年的饮用水中 16 种化学物质进行健康风险评估,以期为南京市饮水安全和水质风险管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据来自中国疾病预防控制中心信息系统中江苏省南京市 2014—2022 年城乡生活饮用水水质监测结果。根据人口疏密、地理环境、管网的近远端以及水质易受污染的地点等监测点设置原则,南京市城市饮用水每个区监测点至少 8 个,每个街道至少 1 个,农村饮用水每个乡镇至少 4 个,共设置出厂水 20 个、末梢水 190 个、二次供水 20 个,进行长期、连续、系统监测。

1.2 监测指标及方法

水样的采集、保存、运输、检测及质量控制均按照 GB/T 5750—2006《生活饮用水标准检验方法》进行。本次评估的饮用水污染物包括砷、镉、铬(六价)、铅、汞、硒、氰化物、氟化物、硝酸盐、三氯甲烷、四氯化碳、铝、铁、锰、铜、锌共 16 种化学污染物。所有指标检测结果按照 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》进行判定是否合格。

1.3 健康风险评估

1.3.1 暴露评定 经口摄入和经皮肤接触生活饮用水每日暴露剂量计算公式分别如式(1)和式(2):

$$ADD_{\text{oral}} = \frac{C_w \times IR_w \times ED \times EF}{BW \times AT} \quad (1)$$

$$ADD_{\text{derm}} = \frac{C_w \times K_p \times ET \times ED \times EF \times SA \times 6 \times 10^4}{BW \times AT} \quad (2)$$

式(1)(2)中, ADD 为日均暴露剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C_w 为饮用水中污染物质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); IR_w 为日均饮水量 ($\text{L} \cdot \text{d}^{-1}$); ED 为暴露持续时间(年); EF 为暴露频率 ($\text{d} \cdot \text{年}^{-1}$); BW 为体重(kg); AT 为平均暴露时间(d); K_p 为皮肤渗透系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); ET 为暴露时间 ($\text{min} \cdot \text{d}^{-1}$); SA 为皮肤表面积 (cm^2)。

1.3.2 健康风险评估模型 致癌风险大小用 CR(cancer risk)值表示, 非致癌风险大小用危害商(hazard quotient, HQ)表示, 计算公式分别如式(3)和式(4):

$$CR = ADD \times SF \tag{3}$$

$$HQ = ADD / RfD \tag{4}$$

式(3)(4)中, SF 为斜率因子 [$(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$]; RfD 为参考剂量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$].

根据美国环保署, CR 低于 1.00×10^{-6} , 认为风险较低, 可以忽略; 在 $1.00 \times 10^{-6} \sim 1.00 \times 10^{-4}$ 范围, 表明存在潜在的致癌风险, 但尚可接受; 高于 1.00×10^{-4} , 表明存在较大风险, 不可接受。HQ < 1, 表明对人群健康危害较小; HQ ≥ 1, 表明暴露剂量超过阈值, 可能有一定的慢性非致癌风险。

1.3.3 健康风险评估参数 根据《中国人群暴露参数手册》^[11-12]查询江苏省成人和儿童摄入量、体重、暴露时间和皮肤表面积, 见表 1。参考美国环境保护署 (United States Environmental Protection Agency, US EPA) 综合风险信息系统(Integrated Risk Information System, IRIS)、风险评估信息系统(Risk Assessment Information System, RAIS)和文献资料^[13-14], 得到各化学物质的 SF、RfD 和 K_p , 见表 2。

表 1 健康风险评估参数

Table 1 Health risk assessment parameters

人群	摄入量(IR)/(L·d ⁻¹)	暴露持续时间(ED)/年	暴露频率(EF)/(d·年 ⁻¹)	体重(BW)/kg	平均暴露时间(AT)/d	暴露时间(ET)/(min·d ⁻¹)	皮肤表面积(SA)/cm ²
男	2.580	74.60	365	68.5	27 229.00	18.07	17 000
女	2.087	78.81	365	57.9	28 765.65	17.80	15 000
儿童	1.173	7.00	365	26.7	2 555.00	15.00	10 000

表 2 16 种化学物质的斜率因子、参考剂量和皮肤渗透系数

Table 2 Slope factors, reference doses, and skin permeability coefficients of 16 chemicals

化学物质	斜率因子 (SF)/[(kg·d)·mg ⁻¹]	参考剂量 (RfD)/[mg·(kg·d) ⁻¹]	皮肤渗透系数 (K _p)/(cm·h ⁻¹)
砷	1.5	0.000 3	0.001
镉	6.1	0.000 5	0.001
铬(六价)	0.5	0.003	0.002
铅	0.008 5	0.001 4	0.000 1
三氯甲烷	0.031	0.01	0.006 83
四氯化碳	0.07	0.004	0.016 3
汞	—	0.000 3	0.001
硒	—	0.005	0.001
氰化物	—	0.000 63	0.001
氟化物	—	0.04	0.001
硝酸盐	—	1.6	0.001
铝	—	1	0.001
铁	—	0.3	0.001
锰	—	0.14	0.001
铜	—	0.04	0.001
锌	—	0.3	0.000 6

[注] —: 暂未查到相关信息。

1.4 统计学处理

使用 Excel 2016 软件建立数据库, SPSS 27.0 进行数据统计分析。当物质浓度小于方法最低检测质量浓度时, 以 1/2 检出限表示。因数据为偏态分布, 故使用中位数(P_{50})和第 25、75 百分位数(P_{25} 、 P_{75})以及检出率和合格率进行统计描述。两组样本比较用 Mann-

Whitney U 检验, 多组样本比较采用 Kruskal-Wallis H 秩和检验, 多组间两两比较用 Kruskal-Wallis 单因素 ANOVA 检验(k 个样本), 检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 水质监测结果

本次研究监测水样共 4 198 份, 其中出厂水 483 份, 末梢水 3 313 份, 二次供水 402 份。丰水期 2 096 份, 枯水期 2 102 份。农村水 2 287 份, 城市水 1 911 份。检出率较高的指标分别为氟化物(99.9%)、铝(98.9%)、硝酸盐(95.7%)、三氯甲烷(93.6%)、铁(72.9%)、锌(69.5%)和锰(65.7%)。所有指标按照 GB 5749—2006《生活饮用水卫生标准》进行判定, 合格率均较高, 除铅、硝酸盐、三氯甲烷、四氯化碳、铝、铁、锰浓度最大值超过了生活饮用水卫生标准限值, 其余指标均合格。见表 3。

2.2 健康风险评估

2.2.1 时间趋势分析 选择非致癌风险最大值超过 0.1 的 11 种化学污染物年中位数以及 6 种污染物致癌风险值年中位数分别绘图, 进行非致癌风险和致癌风险的变化趋势分析(见图 1 和图 2)。结果显示, 2014—2022 年南京市饮用水中化学污染物非致癌风险/致癌风险呈现总体下降或平稳趋势。砷的非致癌风险/致癌

风险从 2015 年起上升,连续 3 年维持较高水平,2018 年下降后保持平稳。镉的非致癌风险/致癌风险在 2018—2019 年呈下降趋势,2020 年上升,后维持在稳定状态。铅的非致癌风险/致癌风险在 2016 年起上升,连续 4 年维持在较高水平,2020 年下降,之后保持在较低水平。铜的非致癌风险从 2018 年开始下降,后维持在较低水平。三氯甲烷的非致癌风险从 2015 年开始下降,2017 年呈上升趋势,一直到 2021 年再次下降。铬(六价)、汞、锌、氰化物、氟化物、硝酸盐的非致癌风险均保持相对平稳趋势。铬(六价)、三氯甲烷、四氯化碳的致癌风险也均保持相对平稳趋势。

表 3 2014—2022 年南京市饮用水中 16 种化学物质水平
Table 3 The concentrations of 16 chemical substances in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022

化学物质	检出限/ (mg·L ⁻¹)	检出 率/%	质量浓度/(mg·L ⁻¹)				合格 率/%
			<i>P</i> ₂₅	<i>P</i> ₅₀	<i>P</i> ₇₅	$\bar{x}$	
砷	1.00×10 ⁻³	32.7	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	1.00×10 ⁻³	7.03×10 ⁻⁴	100.0
镉	1.00×10 ⁻³	8.3	2.50×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	4.80×10 ⁻⁴	100.0
铬(六价)	4.00×10 ⁻³	21.6	2.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	2.00×10 ⁻³	2.65×10 ⁻³	100.0
铅	2.00×10 ⁻³	41.0	1.00×10 ⁻³	1.25×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³	1.88×10 ⁻³	99.9
汞	1.00×10 ⁻⁴	34.2	1.00×10 ⁻⁵	5.00×10 ⁻⁵	1.00×10 ⁻⁴	7.32×10 ⁻⁵	100.0
硒	1.00×10 ⁻³	6.5	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	5.00×10 ⁻⁴	5.43×10 ⁻⁴	100.0
氰化物	2.00×10 ⁻³	18.5	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻³	1.00×10 ⁻³	1.22×10 ⁻³	100.0
氟化物	1.00×10 ⁻¹	99.9	2.00×10 ⁻¹	2.30×10 ⁻¹	2.80×10 ⁻¹	2.33×10 ⁻¹	100.0
硝酸盐	1.00×10 ⁻¹	95.7	1.20	1.66	1.95	2.07	99.9
三氯甲烷	2.00×10 ⁻⁴	93.6	6.90×10 ⁻³	1.40×10 ⁻²	2.79×10 ⁻²	1.82×10 ⁻²	99.8
四氯化碳	2.00×10 ⁻⁵	51.1	1.00×10 ⁻⁵	2.00×10 ⁻⁵	7.00×10 ⁻⁵	6.27×10 ⁻⁵	99.9
铝	5.00×10 ⁻³	98.9	4.70×10 ⁻²	7.00×10 ⁻²	9.90×10 ⁻²	7.47×10 ⁻²	99.4
铁	5.00×10 ⁻³	72.9	2.50×10 ⁻³	1.50×10 ⁻²	3.20×10 ⁻²	2.73×10 ⁻²	99.9
锰	1.00×10 ⁻³	65.7	5.00×10 ⁻⁴	2.50×10 ⁻³	2.50×10 ⁻²	1.08×10 ⁻²	99.9
铜	5.00×10 ⁻³	40.8	2.50×10 ⁻³	2.50×10 ⁻³	2.00×10 ⁻²	1.08×10 ⁻²	100.0
锌	5.00×10 ⁻³	69.5	2.50×10 ⁻³	1.00×10 ⁻²	4.68×10 ⁻²	3.32×10 ⁻²	100.0

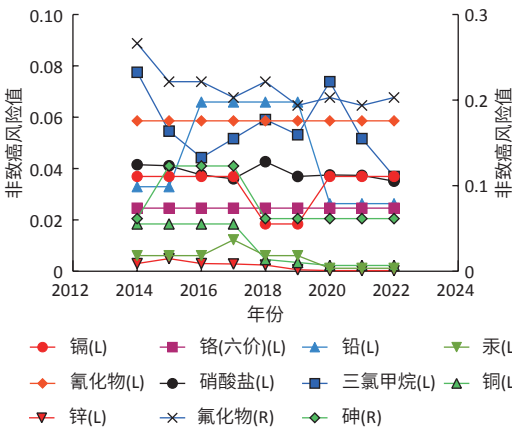


图 1 2014—2022 年南京市生活饮用水非致癌风险变化趋势
Figure 1 Trends of non-carcinogenic risks of selected chemicals in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022

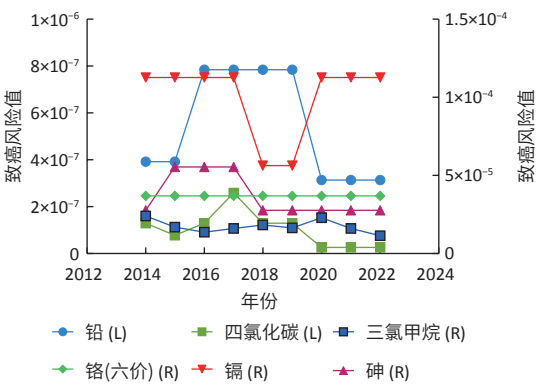


图 2 2014—2022 年南京市生活饮用水致癌风险变化趋势
Figure 2 Trends of carcinogenic risks of chemicals in drinking water in Nanjing from 2014 to 2022

2.2.2 不同人群、途径饮用水健康风险评估 饮用水非致癌风险评估结果如表 4 所示,不同人群(成年男性、成年女性和儿童)在不同暴露方式(饮水摄入和经皮肤接触)下饮用水非致癌风险均小于 1。就人群而言,无论何种途径,均是儿童的非致癌风险最大,HQ 分别为 7.65×10^{-1} 和 2.61×10^{-3} 。就暴露方式而言,三种人群中均是饮水摄入的非致癌风险远大于经皮肤接触。就化学物质而言,经饮水摄入的非致癌风险最高的为氟化物,但均在 10^{-1} 水平。

表 4 2014—2022 年南京市不同人群在不同暴露方式下饮用水非致癌风险

化学物质	饮水摄入			经皮肤接触		
	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
砷	8.83×10^{-2}	8.45×10^{-2}	1.03×10^{-1}	1.75×10^{-4}	1.81×10^{-4}	2.20×10^{-4}
镉	3.62×10^{-2}	3.64×10^{-2}	4.22×10^{-2}	7.18×10^{-5}	7.39×10^{-5}	8.99×10^{-5}
铬(六价)	3.33×10^{-2}	3.91×10^{-2}	3.89×10^{-2}	1.32×10^{-4}	1.36×10^{-4}	1.66×10^{-4}
铅	5.05×10^{-2}	4.83×10^{-2}	5.89×10^{-2}	1.00×10^{-5}	1.03×10^{-5}	1.26×10^{-5}
汞	9.19×10^{-3}	8.80×10^{-3}	1.07×10^{-2}	1.82×10^{-5}	1.88×10^{-5}	2.28×10^{-5}
硒	4.09×10^{-3}	3.92×10^{-3}	4.77×10^{-3}	8.12×10^{-6}	8.37×10^{-6}	1.02×10^{-5}
氰化物	7.30×10^{-2}	6.99×10^{-2}	8.51×10^{-2}	1.45×10^{-4}	1.49×10^{-4}	1.81×10^{-4}
氟化物	2.20×10^{-1}	2.10×10^{-1}	2.56×10^{-1}	4.36×10^{-4}	4.49×10^{-4}	5.46×10^{-4}
硝酸盐	4.87×10^{-2}	4.66×10^{-2}	5.68×10^{-2}	9.67×10^{-5}	9.96×10^{-5}	1.21×10^{-4}
三氯甲烷	6.85×10^{-2}	6.56×10^{-2}	8.00×10^{-2}	9.29×10^{-4}	9.57×10^{-4}	1.16×10^{-3}
四氯化碳	5.90×10^{-4}	5.65×10^{-4}	6.88×10^{-4}	1.91×10^{-5}	1.97×10^{-5}	2.39×10^{-5}
铝	2.81×10^{-3}	2.69×10^{-3}	3.28×10^{-3}	5.58×10^{-6}	5.75×10^{-6}	7.00×10^{-6}
铁	3.42×10^{-3}	3.28×10^{-3}	3.99×10^{-3}	6.79×10^{-6}	7.00×10^{-6}	8.51×10^{-6}
锰	2.89×10^{-3}	2.77×10^{-3}	3.38×10^{-3}	5.74×10^{-6}	5.92×10^{-6}	7.19×10^{-6}
铜	1.01×10^{-2}	9.71×10^{-3}	1.18×10^{-2}	2.01×10^{-5}	2.07×10^{-5}	2.52×10^{-5}
锌	4.17×10^{-3}	3.99×10^{-3}	4.86×10^{-3}	4.96×10^{-6}	5.11×10^{-6}	6.22×10^{-6}
合计	6.56×10^{-1}	6.27×10^{-1}	7.65×10^{-1}	2.08×10^{-3}	2.15×10^{-3}	2.61×10^{-3}

饮用水致癌风险评估结果如表 5 所示,成年男性、成年女性和儿童经饮水摄入的 CR 分别为 2.22×10^{-4} 、 2.12×10^{-4} 、 2.59×10^{-4} ,均大于 1.00×10^{-4} ,超过 USEPA 推荐的可接受范围;经皮肤接触的 CR 值分别为 7.89×10^{-7} 、 8.13×10^{-7} 、 9.89×10^{-7} ,小于 1.00×10^{-6} 。与非致癌风险评估结果一致,两种暴露方式下均是儿童致癌风险最大,三种人群中均是饮水摄入致癌风险远大于经皮肤接触。值得关注的是镉在不同人群经饮水摄入的 CR 均大于 1.00×10^{-4} 。

表 5 2014—2022 年南京市不同人群在不同暴露方式下饮水水的致癌风险

Table 5 Carcinogenic risks of drinking water by subgroups and exposure modes in Nanjing from 2014 to 2022

化学物质	饮水摄入			经皮肤接触		
	成年男性	成年女性	儿童	成年男性	成年女性	儿童
砷	3.97×10^{-5}	3.80×10^{-5}	4.64×10^{-5}	7.88×10^{-8}	8.12×10^{-8}	9.88×10^{-8}
镉	1.10×10^{-4}	1.06×10^{-4}	1.29×10^{-4}	2.19×10^{-7}	2.25×10^{-7}	2.74×10^{-7}
铬(六价)	5.00×10^{-5}	4.78×10^{-5}	5.83×10^{-5}	1.98×10^{-7}	2.04×10^{-7}	2.48×10^{-7}
铅	6.01×10^{-7}	5.75×10^{-7}	7.01×10^{-7}	1.19×10^{-10}	1.23×10^{-10}	1.49×10^{-10}
三氯甲烷	2.12×10^{-5}	2.03×10^{-5}	2.48×10^{-5}	2.88×10^{-7}	2.97×10^{-7}	3.61×10^{-7}
四氯化碳	1.65×10^{-7}	1.58×10^{-7}	1.93×10^{-7}	5.34×10^{-9}	5.51×10^{-9}	6.69×10^{-9}
合计	2.22×10^{-4}	2.12×10^{-4}	2.59×10^{-4}	7.89×10^{-7}	8.13×10^{-7}	9.89×10^{-7}

2.2.3 不同地区、水期、水样分层分析 饮用水非致癌风险的分层分析结果显示,城市水中砷、镉、锌高于农村水,其余 7 种化学物质(除氟化物外)均低于农村水;丰水期砷、氰化物、氟化物、三氯甲烷高于枯水期,硝酸盐低于枯水期;二次供水镉、铜高于末梢水,出厂水和末梢水铬(六价)高于二次供水,末梢水汞高于出厂水和二次供水,末梢水氰化物高于二次供水,二次供水氰化物高于出厂水,末梢水和二次供水硝酸盐、三氯甲烷高于出厂水,末梢水和二次供水锌高于出厂水,二次供水锌高于末梢水,结果见补充材料表 S1。

饮用水致癌风险的分层分析结果显示,城市水砷、镉高于农村水,铬(六价)、铅、三氯甲烷、四氯化碳低于农村水;丰水期砷、三氯甲烷、四氯化碳高于枯水期;末梢水铬(六价)、四氯化碳高于二次供水,末梢水和二次供水三氯甲烷高于出厂水,结果见补充材料表 S2。

3 讨论

2014—2022 年南京市饮用水中 16 种化学物质合格率均在 99%以上,说明南京饮用水水质基本符合国家饮用水卫生标准。然而,化学物质未被检测到或浓

度低于标准值并不意味着对人体没有负面影响,长期接触低剂量污染物仍然会造成一定的健康风险。如果仅根据每种污染物的浓度是否达到相应标准来评估饮用水安全,则无法揭示饮用水对目标人群的定量健康影响^[14]。

2014—2022 年间南京市饮用水化学污染物健康风险评估研究结果显示,砷和铅非致癌风险和致癌风险呈现先升高后下降的趋势,其余化学物质的变化趋势呈现总体下降或平稳趋势,说明随着南京市饮用水水质改善,健康风险也有所下降。16 种化学物质非致癌风险 HQ 均小于 1,在可接受范围内。致癌风险最高的是镉,其 CR 大于 1.00×10^{-4} ,存在较大风险;其次是铬(六价)、砷和三氯甲烷,CR 均介于 $1.00\times 10^{-6}\sim 1.00\times 10^{-4}$ 之间,存在潜在的致癌风险。有研究报道,南京主城区土壤中检出镉,并且对生态存在中等潜在危害^[15]。另外一项研究显示,在饮用水镉含量高的地区,大米也检出镉^[16]。由此可见,环境中镉污染是相互影响的。镉污染来源主要是采矿、冶炼等工矿企业排放的废气、废水和废渣以及煤、石油等矿物燃料的燃烧,长期食用受镉污染的粮食、蔬菜、鱼类等,会引起人体慢性中毒,对肾脏、骨骼和消化系统造成损害^[17]。因此,本地应高度重视镉污染,并严格控制含镉、铬(六价)、砷等重金属污染物排放。

饮水摄入和经皮肤接触,均是儿童饮用水健康风险值高于成年人,而成人不同性别之间无明显差异,这与其他研究结果一致,主要是儿童和成人的生理差异所致^[18]。非致癌风险和致癌风险分层分析结果显示,城市水砷、镉高于农村水,其余均低于农村水,可能是城市工业化使得砷、镉排放量高于农村,而农村小型集中供水水处理工艺不完善、消毒不规范以及农药使用等原因导致其他指标风险值高于城市^[14]。总体来说,丰水期风险值高于枯水期,可能与季节、水量有一定的关系^[19]。不同化学物质在不同水样类型中的健康风险也不尽相同,原因错综复杂。末梢水与出厂水中不同物质健康风险存在差异可能是出厂水所经过的输配水系统由于管道腐蚀、生物膜形成和分离、沉积物积聚和再悬浮等因素导致^[20]。二次供水健康风险与出厂水和末梢水存在差异,可能是由于水滞留时间长、沉积物积累、金属浸出和管理不合理等^[21]。

本文主要评估了南京市 2014—2022 年饮用水中的化学污染物对人群的健康风险,补全了南京市全区域饮用水风险评估的短缺,为有关部门进一步制定饮用水风险管理政策提供相关依据。但风险评估方法是

有关暴露和毒性的多假设的条件估计,因此存在很多的不确定性,主要包括:仅对16种化学物质进行了风险评估,未考虑微生物指标、放射性指标和非常规指标等的风险结果;本研究只计算了经口和经皮肤暴露途径,吸入接触途径未纳入计算,如三氯甲烷淋浴时的吸入;虽然考虑了儿童和成人的差异,但未将儿童不同年龄段的差异纳入计算;在数据处理时,未检出的物质浓度按照其检出限的1/2纳入分析,可能会高估部分地区风险水平;还未考虑人群饮水习惯(净化、烧开等)或生活方式对健康风险模型产生的影响。因此,本文给出的南京市饮用水健康风险结果,可能与实际情况存在一定的偏差,需谨慎解读相关数据。

综上,南京市2014—2022年饮用水中化学污染物非致癌风险和致癌风险总体呈现下降或平稳趋势。16种化学物质中,除镉的致癌风险超过USEPA推荐的可接受范围外,其余化学物的致癌/非致癌风险均在可接受范围内。在今后饮用水风险管理中应对镉给予重点关注。

参考文献

- [1] SHARMA S, BHATTACHARYA A. Drinking water contamination and treatment techniques[J]. *Appl Water Sci*, 2017, 7(3): 1043-1067.
- [2] GENG M, QI H, LIU X, et al. Occurrence and health risk assessment of selected metals in drinking water from two typical remote areas in China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(9): 8462-8469.
- [3] KUMARI M, GUPTA SK. Cumulative human health risk analysis of trihalomethanes exposure in drinking water systems[J]. *J Environ Manage*, 2022, 321: 115949.
- [4] AB RAZAK NH, PRAVEENA SM, ARIS AZ, et al. Drinking water studies: a review on heavy metal, application of biomarker and health risk assessment (a special focus in Malaysia)[J]. *J Epidemiol Glob Health*, 2015, 5(4): 297-310.
- [5] WEE SY, ARIS AZ. Endocrine disrupting compounds in drinking water supply system and human health risk implication[J]. *Environ Int*, 2017, 106: 207-233.
- [6] 曹金虎, 郝鹏飞, 王宽, 等. 2012—2019年河南省某地级市农村生活饮用水健康风险评估[J]. *现代疾病预防控制*, 2023, 34(9): 659-663.
CAO JH, HAO PF, WANG K, et al. Health risk assessment of rural drinking water in a prefecture-level city of Henan province, 2012-2019[J]. *Mod Dis Control Prev*, 2023, 34(9): 659-663.
- [7] 王刚. 南京市地表水重金属污染特征及风险研究[J]. *环境生态学*, 2020, 2(7): 37-47.
WANG G. Characteristic and risk of heavy metals contamination of surface water in Nanjing city[J]. *Environ Ecol*, 2020, 2(7): 37-47.
- [8] 陈春静, 张景山, 李峻, 等. 2019年南京市饮用水重金属健康风险评估[J]. *现代预防医学*, 2020, 47(5): 813-816.
CHEN CJ, ZHANG JS, LI J, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water, Nanjing, 2019[J]. *Mod Prev Med*, 2020, 47(5): 813-816.
- [9] 陈春静, 张景山, 葛明, 等. 南京市出厂水氯化消毒副产物健康风险评估[J]. *预防医学*, 2021, 33(2): 194-196.
CHEN CJ, ZHANG JS, GE M, et al. Health risk assessment of chlorination disinfection by-products of drinking water in Nanjing[J]. *Prev Med*, 2021, 33(2): 194-196.
- [10] 郑雨虹, 李登昆, 陈春静, 等. 江苏省南京市饮用水中N-亚硝基二甲胺健康风险评估[J]. *环境与职业医学*, 2022, 39(8): 890-894,901.
ZHENG YH, LI DK, CHEN CJ, et al. Health risk assessment of N-nitrosodimethylamine in drinking water in Nanjing, Jiangsu province[J]. *J Environ Occup Med*, 2022, 39(8): 890-894,901.
- [11] 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.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population-Adults[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [12] 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.
Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population-Children (6-17 years)[M]. Beijing: China Environmental Press, 2016.
- [13] LIN Z, LIU Y, CHENG Z, et al. Uncertainty health risk assessment and regional control of drinking water: a case study of Hanyuan county, southwest mountainous area, China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2022, 29(45): 68202-68215.
- [14] 潘璐, 王炳玲, 王寅, 等. 2014~2019年青岛市生活饮用水健康风险评估[J]. *山东大学学报(医学版)*, 2021, 59(12): 42-49,57.
PAN L, WANG BL, WANG Y, et al. Health risk assessment of drinking water in Qingdao from 2014 to 2019[J]. *J Shandong Univ (Health Sci)*, 2021, 59(12): 42-49,57.
- [15] 杨正标, 徐荣, 何青青, 等. 南京市主城区土壤环境质量调查及生态风险评估研究[J]. *环境科学与管理*, 2021, 46(6): 175-179.
YANG ZB, XU R, HE QQ, et al. Soil environmental quality survey and ecological risk assessment in Main Urban Area of Nanjing[J]. *J Environ Sci Manage*, 2021, 46(6): 175-179.
- [16] LI M, DU Y, CHEN L, et al. Assessment of trace elements in terminal tap water of Hunan province, South China, and the potential health risks[J]. *Environ Monit Assess*, 2018, 190(6): 318.
- [17] 谭科艳. 重金属污染水土的地球化学-生物修复技术研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
TAN KY. Research on geochemistry-biological remediation technology for heavy metal polluted water and soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2013.
- [18] JI Y, WU J, WANG Y, et al. Seasonal variation of drinking water quality and human health risk assessment in Hancheng city of Guanzhong Plain, China[J]. *Exposure Health*, 2020, 12(3): 469-485.
- [19] LU SY, ZHANG HM, SOJINU SO, et al. Trace elements contamination and human health risk assessment in drinking water from Shenzhen, China[J]. *Environ Monit Assess*, 2015, 187(1): 4220.
- [20] HU D, ZENG J, HU Y, et al. A survey on heavy metal concentrations in residential neighborhoods: the influence of secondary water supply systems[J]. *J Environ Sci (China)*, 2022, 117: 37-45.
- [21] LIU G, ZHANG Y, KNIBBE WJ, et al. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: a review[J]. *Water Res*, 2017, 116: 135-148.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 丁瑾瑜)