

# 山东某沿海城市集中式饮用水水源水质及健康风险评价

赵璐<sup>1</sup>, 亓靛<sup>1</sup>, 薛莲<sup>1</sup>, 谭培功<sup>1</sup>, 刘文欣<sup>2</sup>, 刘岳峰<sup>2</sup>

(1. 山东省青岛生态环境监测中心, 山东 青岛 260003; 2. 青岛市环境保护科学研究院, 山东 青岛 260003)

**摘要:**基于2017—2020年山东某沿海城市集中式饮用水水源水质监测数据,采用单因子评价法和美国环保局(USEPA)的健康风险模型对该市集中式饮用水水源水质进行综合评价。结果表明,2017—2020年该市集中式饮用水源地Ⅲ类以上水质比例为98.7%;总健康风险年均值为 $4.11 \times 10^{-6}$ ,超过英国皇家协会、瑞典环保局和荷兰环境部的可接受风险水平限值( $1 \times 10^{-6}$ ),低于USEPA( $1 \times 10^{-4}$ )和国际放射防护委员会(ICRP)( $5 \times 10^{-5}$ )的可接受风险水平限值,风险等级为I级,处于低风险水平。该市水源健康风险主要来自致癌物,致癌物健康风险为:砷>镉。2017—2020年该市集中式饮用水源地水质健康风险分级稳定在I级,并呈逐年降低趋势。通过对比分析,水质与健康风险评价结论不尽相同,健康风险评价可作为现阶段水质评价的有益补充,进一步说明水源地的水质状况和健康风险,为生态环境管理及居民生活提供有益参考。

**关键词:**饮用水源地;单因子评价法;健康风险评价;山东

中图分类号:X824

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2021)05-0116-08

## Water Quality and Health Risk Assessment of the City's Centralized Drinking Water Sources in a Coastal City in Shandong

ZHAO Lu<sup>1</sup>, QI Liang<sup>1</sup>, XUE Lian<sup>1</sup>, TAN Pei-gong, LIU Wen-xin<sup>2</sup>, LIU Yue-feng<sup>2</sup>

(1. Qingdao Bio-Environmental Monitoring Center of Shandong Province, Qingdao, Shandong 266003, China; 2. Qingdao Research Academy of Environmental Science, Qingdao, Shandong 266003, China)

**Abstract:** Based on the water quality monitoring data of centralized drinking water sources in a coastal city in Shandong from 2017 to 2020, the single-factor evaluation method and the USEPA health risk model were used to comprehensively evaluate the water quality of the centralized drinking water sources in the city. The analysis results showed that the water quality ratio of the city's centralized drinking water sources site above Class III from 2017 to 2020 was 98.5%. The annual total health risk was  $4.11 \times 10^{-6}$ , which exceeded the acceptable risk level limit ( $1 \times 10^{-6}$ ) of the Royal Society of Britain, the Swedish Environmental Protection Agency and the Dutch Ministry of Environment, but didn't reach the USEPA ( $1 \times 10^{-4}$ ) and ICRP ( $5 \times 10^{-5}$ ) acceptable risk level limits, the risk level was I, at a low risk level. The city's health risks of water sources mainly came from carcinogens, in which arsenic showed higher health risk than cadmium. From 2017 to 2020, the health risk of the city's centralized drinking water source water quality was stable at level I (low risk), and was decreasing year by year. Through comparative analysis, water quality and health risk assessment conclusions were not the same. Health risk assessment can be used as a useful supplement to water quality assessment at this stage, further explaining the water quality and health risks of the water source and providing a useful reference for ecological environment management and residents' lives.

**Key words:** Drinking water source; Single-factor evaluation method; Health risk assessment; Shandong

收稿日期:2021-07-06;修订日期:2021-08-12

基金项目:青岛市民生科技计划基金资助项目(14-8-3-10-NSH)

作者简介:赵璐(1984—),女,工程师,硕士,从事环境质量综合评价工作。

现阶段,我国生态环境监测部门针对集中式饮用水水源地开展监测的指标为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)<sup>[1]</sup>和《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)<sup>[2]</sup>中相关指标,涉及理化、毒性、卫生、微生物等指标,并采用单因子评价法进行水质评价,其中对水源地水质类别产生影响的主要为理化指标,有毒有害物质大多痕量检出或未检出,水质评价较少关注且变化趋势也无从体现,不利于全面、客观反映水体功能是否满足人类使用及健康要求<sup>[3]</sup>。目前,国内外针对饮用水水源地的健康风险评价的研究较多,大多采用美国环保局(USEPA)推荐的水环境健康风险评价模型,将有毒有害物质经饮水暴露途径对人体健康产生的危害定量描述<sup>[4-17]</sup>,在饮用水水质渐趋达标及稳定的大环境下,将健康风险评价引入日常水质评价中,可以更全面地利用监测数据,更深入地评价水质状况以及对人体健康影响情况提供一定的参考。现以2017—2020年山东某沿海城市集中式饮用水水源地为例,采用单因子评价法以及USEPA推荐的水环境健康风险评价模型进行健康风险评价,提出针对饮用水源健康风险管理的重点指标及防控方向,为当地环境管理提供技术参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域

山东某沿海城市2017—2020年主要集中式饮用水水源地有18处,其中6处为地级水源地,12处为县级水源地,且多数为地表水型水源地,仅2处为地下水型水源地。客水取水量占全市的比例为62.5%~82.5%,多数水源地取水量较小,占比不足5%。

### 1.2 数据来源及处理

2017—2020年主要地表水饮用水水源地监测数据及相关统计来自当地生态环境监测部门统计资料,用Excel 2016建立监测数据库,通过SPSSAU进行统计分析。

### 1.3 监测项目和监测频次

根据国家有关集中式水源地监测要求,地表水监测项目为《GB 3838—2002》中表1的基本项目(除化学需氧量、河流总氮外的23项)、表2的补充项目(5项)和表3的优选特定项目(33项),共61项指标。地下水监测项目为《GB/T 14848—2017》表1中39项指标。地级地表水水源地每月

监测1次,县级地表水水源地每季度监测1次,地下水水源地地上、下半年各监测1次;同时,每年开展一次全项目分析(《GB 3838—2002》中表1、表2、表3中109项,地下水表1、表2共93项)。根据模型要求,仅选择基本项目和补充项目中相关指标参与评价模型统计。

### 1.4 饮用水水质评价方法

地表水依据《GB 3838—2002》Ⅲ类水质标准评价,基本项目按照《地表水环境质量评价办法(试行)》(环办[2011]22号)评价<sup>[18-19]</sup>,补充项目采用单因子评价法评价;地下水依据《GB/T 14848—2017》Ⅲ类水质标准,采用单因子评价法评价。

### 1.5 饮用水健康风险评价模型

通过饮水途径危害人体健康的污染物可以分为基因毒物质和躯体毒物质,基因毒物质主要为化学致癌物和放射性污染物,躯体毒物质主要为非致癌物<sup>[20]</sup>,参考US EPA的经饮水途径暴露健康风险评价模型,结合山东某沿海城市实际,建立饮用水健康风险评价模型。由于放射性污染物在水源地中检出较少<sup>[21]</sup>,且根据赵小健等<sup>[22]</sup>研究结果,放射性污染物健康风险远低于致癌物,仅分别计算致癌物和非致癌物的年健康风险。

目前,国内大部分研究主要选择六价铬、砷、镉3项致癌物,符刚<sup>[23]</sup>、徐爱兰<sup>[24]</sup>、韩芹芹<sup>[25]</sup>、耿雅妮<sup>[11]</sup>等人研究中增加了三氯甲烷、四氯化碳、苯并芘、镍等项目,根据以上研究结论,这几项致癌物的健康风险多在 $10^{-9}$ ~ $10^{-8}$ 的水平,且风险从大到小排序均排在六价铬、砷、镉之后;另外,根据研究区域2017—2020年监测情况,六价铬均为未检出、33项特定项目及其他全分析指标大多为未检出,故未将上述相关项目列入健康风险模型中。最终致癌物选择砷、镉2项,非致癌物选择氨氮、铜、锌、氟化物、硒、汞、铅、氰化物、挥发酚、硝酸盐、铁、锰12项。

根据US EPA的健康风险评价模型并结合相关研究<sup>[21-22]</sup>,本研究饮用水健康风险评价模型计算公式如下:

$$D_i = (C_i \times IR) / BW \quad (1)$$

式中: $D_i$ ——单位体重日均暴露剂量,mg/(kg·d); $C_i$ ——污染物*i*的浓度,mg/L;IR——暴露人群日均饮水量,L/d,取《中国人群暴露参数手册(成人卷):概要》山东省饮水摄入量参考值

2.275 L/d<sup>[26]</sup>; BW——暴露人群平均体重, 取国务院新闻办公室发布的《中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)》中 18 岁以上居民男性平均体重 69.6 kg<sup>[27]</sup>。

$$R_i^c = [1 - \exp(-D_i \times q_i)] / \text{Age} \quad (2)$$

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_i^c \quad (3)$$

$$R_i^n = [D_i \times 10^{-6} / \text{RfD}_i] / \text{Age} \quad (4)$$

$$R^n = \sum_{i=1}^k R_i^n \quad (5)$$

$$R_{\text{总}} = R^c + R^n \quad (6)$$

式中:  $R_i^c$ ——单项致癌物  $i$  指标致癌风险;  $q_i$ ——致癌物  $i$  经饮水途径致癌强度系数,  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ; Age——地区人均期望寿命, 取研究区域卫健委公布的 2019 年的人均期望寿命 81.43 岁,  $a$ ;  $R^c$ ——经饮水途径致癌物总风险;  $R_i^n$ ——单项非致癌物  $i$  指标致癌风险;  $\text{RfD}_i$ ——非致癌物  $i$  经饮水途径参考剂量,  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ;  $R^n$ ——经饮水途径非致癌物总风险;  $R_{\text{总}}$ ——暴露人群经饮水途径的年健康风险值。

其中,  $q_i$  和  $\text{RfD}_i$  取值参考 USEPA 推荐的致癌斜率因子和参考剂量, 致癌物中砷为 15, 镉为 6.1; 非致癌物中氨氮为 0.97, 铜为 0.005, 锌为 0.3, 氟化物为 0.06, 硒为 0.005, 汞为 0.000 3, 铅为 0.001 4, 氰化物为 0.037, 挥发酚为 0.3, 硝酸盐为 1.6, 铁为 0.3, 锰为 0.14, 以上参数单位均为  $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

国际各机构推荐的健康风险水平限值详见表 1。USEPA 将砷列为 A 类致癌物, 建议该项指标健康风险参照最严格的  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值评价<sup>[28-29]</sup>, 本研究中镉也参照该限值评价。

表 1 各机构推荐健康风险水平限值

机构	可接受风险水平限值	可忽略风险水平限值	A 类致癌物可接受风险水平限值
美国环保局(US EPA)	$1 \times 10^{-4}$		$1 \times 10^{-6}$
国际放射防护委员会(ICRP)	$5 \times 10^{-5}$		
英国皇家协会	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7}$	
瑞典环保局	$1 \times 10^{-6}$		
荷兰环境部	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-8}$	

参考祝慧娜等<sup>[30-31]</sup>通过模糊理论和专家咨询法得出的健康风险分级, 结合 US EPA 和 ICRP 推荐的健康风险水平, 按照等级、程度和范围划分为

6 个级别, 见表 2。

表 2 健康风险等级、程度及范围评价标准

风险等级	风险程度	风险值范围
I 级	低	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$
II 级	低-中	$1.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-5}$
III 级	中	$5.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-4}$
IV 级	中-高	$1.0 \times 10^{-4} \sim 5.0 \times 10^{-4}$
V 级	高	$5.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-3}$
VI 级	极高	$1.0 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质评价结果

2017—2020 年该山东沿海城市 18 处集中式饮用水水源地中, 有 1 处 4 年均未供水, 根据其他在用 17 处饮用水水源地共 392 个样本数据评价统计结果, III 类以上比例为 98.7%, IV ~ V 类比例为 1.3%, 地表水主要污染指标为总磷, 地下水主要污染指标为总硬度和硫酸盐。各水源地 III 类以上比例在 75.0% ~ 100%。水质达 III 类以上比例按水源类型来看, 地表水 > 地下水, 河流型 > 湖库型; 按水源级别来看, 地级 > 县级; 客水 > 本地水; 从年际变化来看, 水质为 III 类以上比例总体呈升高趋势, 2020 年达到 100%。

### 2.2 健康风险评价

#### 2.2.1 健康风险评价指标监测结果

2017—2020 年该山东沿海城市饮用水水源地 392 个样本中 2 项致癌物和 12 项非致癌物的质量浓度监测结果统计见表 3。

#### 2.2.2 致癌物健康风险

根据模型计算得出致癌物健康风险(表 4)。由表 4 可见, 2017—2020 年该市致癌物健康风险均值为  $4.11 \times 10^{-6}$ , 超过英国皇家协会、瑞典环保局和荷兰环境部的推荐的的可接受风险水平限值 ( $1 \times 10^{-6}$ ), 但未达到 USEPA ( $1 \times 10^{-4}$ ) 和 ICRP ( $5 \times 10^{-5}$ ) 推荐的可接受风险水平限值。按分级标准评价风险等级为 I 级, 处于低风险程度。致癌物质中, A 类致癌物砷的健康风险均值超过  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值, 镉未达到该限值, 致癌物质健康风险为: 砷 > 镉。砷对致癌物质健康风险的贡献(单项指标健康风险值占致癌物健康风险值的比例)较高, 均值为 76.5%, 镉为 23.5%,

故目前该市应主要关注砷对水源地健康风险的影响。

饮用水水源致癌健康风险分类统计均值见表 5。由表 5 可见,致癌健康风险从水源类型来看,地表水 > 地下水,湖库型 > 河流型;从水源级别来看,

地级 > 县级;从供水来源看,客水 > 本地水。以上饮用水水源致癌健康风险均超过可接受风险水平限值( $1 \times 10^{-6}$ ),但未达到 US EPA( $1 \times 10^{-4}$ )和 ICRP( $5 \times 10^{-5}$ )的可接受风险水平限值。

表 3 饮用水水源健康风险评价指标监测结果

mg/L

类别	指标	平均值	最小值	P10 百分位数	P50 百分位数	P95 百分位数	最大值
致癌物质	砷	0.000 6	0.000 1	0.0002	0.000 2	0.002 2	0.008 5
	镉	0.000 21	0.000 03	0.000 03	0.000 05	0.000 5	0.001
非致癌物质	氨氮	0.15	0.01	0.03	0.11	0.40	0.90
	铜	0.003	0.000 04	0.000 04	0.000 5	0.022	0.057
	锌	0.015	0.000 3	0.000 4	0.015	0.033	0.06
	氟化物	0.576	0.040	0.300	0.580	0.949	0.998
	硒	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.000 6
	汞	0.000 02	0.000 005	0.000 02	0.000 02	0.000 03	0.000 06
	铅	0.001 7	0.000 05	0.000 05	0.001 2	0.005	0.008 3
	氰化物	0.002	0.000 5	0.002	0.002	0.002	0.002
	挥发酚	0.000 3	0.000 2	0.000 2	0.000 2	0.001	0.002 8
	硝酸盐	1.50	0.008	0.06	0.67	6.59	19.7
	铁	0.034 25	0.000 41	0.000 41	0.015	0.17	0.28
	锰	0.012 53	0.000 06	0.000 66	0.005	0.06	0.09

表 4 饮用水水源致癌健康风险结果

类别	指标	最小值	P10 百分位数	P50 百分位数	P95 百分位数	最大值	平均值
致癌物质风险值	砷	$6.02 \times 10^{-7}$	$9.03 \times 10^{-7}$	$9.03 \times 10^{-7}$	$1.32 \times 10^{-5}$	$5.08 \times 10^{-5}$	$3.60 \times 10^{-6}$
	镉	$6.12 \times 10^{-8}$	$6.12 \times 10^{-8}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$1.22 \times 10^{-6}$	$2.45 \times 10^{-6}$	$5.10 \times 10^{-7}$
致癌物质健康风险贡献率/%	砷	26.9	42.5	93.7	99.5	99.9	76.5
	镉	0.1	0.7	6.3	57.5	73.1	23.5
总致癌物质风险值		$6.66 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-7}$	$2.13 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-5}$	$5.09 \times 10^{-5}$	$4.11 \times 10^{-6}$

表 5 饮用水水源致癌健康风险分类统计

分类方式	类别名称	砷	镉	总致癌健康风险
按水源类型	地表水	$3.11 \times 10^{-6}$	$4.45 \times 10^{-7}$	$3.55 \times 10^{-6}$
	湖库型	$3.45 \times 10^{-6}$	$4.17 \times 10^{-7}$	$3.86 \times 10^{-6}$
	河流型	$9.03 \times 10^{-7}$	$6.25 \times 10^{-7}$	$1.53 \times 10^{-6}$
按水源级别	地下水	$1.20 \times 10^{-6}$	$1.22 \times 10^{-6}$	$2.43 \times 10^{-6}$
	地级	$3.82 \times 10^{-6}$	$4.99 \times 10^{-7}$	$4.32 \times 10^{-6}$
按水源来源	县级	$2.38 \times 10^{-6}$	$5.57 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-6}$
	客水	$1.12 \times 10^{-5}$	$6.12 \times 10^{-8}$	$1.12 \times 10^{-5}$
各水源地致癌健康风险值范围	本地水	$2.37 \times 10^{-6}$	$5.66 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-6}$
		$9.03 \times 10^{-7} \sim 1.12 \times 10^{-5}$	$6.12 \times 10^{-8} \sim 1.22 \times 10^{-5}$	$9.64 \times 10^{-7} \sim 1.12 \times 10^{-5}$

在用 17 处饮用水水源地致癌健康风险在  $9.64 \times 10^{-7} \sim 1.12 \times 10^{-5}$  之间,其中 16 处均超过  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值,但均未达到 USEPA( $1 \times 10^{-4}$ )和 ICRP( $5 \times 10^{-5}$ )的可接受风

险水平限值。各水源地砷的健康风险在  $9.03 \times 10^{-7} \sim 1.12 \times 10^{-5}$  之间,64.7% 的水源风险值高于  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值,各水源地致癌健康风险中砷占比在 48.8% ~ 99.3%,应为该市有检出的主要致癌物,值得注意的是,客水中砷的致癌健康风险值较高( $1.12 \times 10^{-5}$ ),占客水致癌健康风险的 99.5%;其次为镉,风险值在  $6.12 \times 10^{-8} \sim 1.22 \times 10^{-5}$  之间,仅 1 处地下水源超过  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值,但该处地下水镉 4 年均均为未检出。

### 2.2.3 非致癌物健康风险

根据模型计算得出非致癌物健康风险统计结果(表 6)。由表 6 可见,2017—2020 年该市非致癌物质健康风险均值为  $5.19 \times 10^{-9}$ ,低于英国皇家学会( $1 \times 10^{-7}$ )和荷兰环境部的可忽略风险水平( $1 \times 10^{-8}$ ),所以,该市集中式饮用水水源的非致癌物健康风险较小,几乎不会对该市通过饮水途径

表 6 饮用水水源非致癌健康风险结果

类别	指标	最小值	P10 百分位数	P50 百分位数	P95 百分位数	最大值	平均值
非致癌物质风险值	氨氮	$4.14 \times 10^{-12}$	$1.24 \times 10^{-11}$	$4.51 \times 10^{-11}$	$1.65 \times 10^{-10}$	$3.72 \times 10^{-10}$	$6.05 \times 10^{-11}$
	铜	$3.21 \times 10^{-12}$	$3.21 \times 10^{-12}$	$4.01 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-9}$	$4.58 \times 10^{-9}$	$2.56 \times 10^{-10}$
	锌	$4.48 \times 10^{-13}$	$4.68 \times 10^{-13}$	$2.05 \times 10^{-11}$	$4.48 \times 10^{-11}$	$8.03 \times 10^{-11}$	$1.95 \times 10^{-11}$
	氟化物	$2.68 \times 10^{-10}$	$2.01 \times 10^{-9}$	$3.88 \times 10^{-9}$	$6.35 \times 10^{-9}$	$6.68 \times 10^{-9}$	$3.84 \times 10^{-9}$
	硒	$1.61 \times 10^{-11}$	$1.61 \times 10^{-11}$	$1.61 \times 10^{-11}$	$1.65 \times 10^{-11}$	$4.82 \times 10^{-11}$	$1.71 \times 10^{-11}$
	汞	$6.69 \times 10^{-12}$	$2.68 \times 10^{-11}$	$2.68 \times 10^{-11}$	$3.35 \times 10^{-11}$	$8.03 \times 10^{-11}$	$2.73 \times 10^{-11}$
	铅	$1.29 \times 10^{-11}$	$1.29 \times 10^{-11}$	$3.51 \times 10^{-10}$	$1.43 \times 10^{-9}$	$2.37 \times 10^{-9}$	$4.84 \times 10^{-10}$
	氰化物	$5.42 \times 10^{-12}$	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.15 \times 10^{-11}$
	挥发酚	$2.01 \times 10^{-13}$	$2.01 \times 10^{-13}$	$2.01 \times 10^{-13}$	$1.34 \times 10^{-12}$	$3.75 \times 10^{-12}$	$4.07 \times 10^{-13}$
	硝酸盐	$2.01 \times 10^{-12}$	$1.51 \times 10^{-11}$	$1.68 \times 10^{-10}$	$1.51 \times 10^{-9}$	$4.94 \times 10^{-9}$	$3.73 \times 10^{-10}$
	铁	$5.49 \times 10^{-13}$	$5.49 \times 10^{-13}$	$2.01 \times 10^{-11}$	$2.27 \times 10^{-10}$	$3.75 \times 10^{-10}$	$4.58 \times 10^{-11}$
	锰	$1.72 \times 10^{-13}$	$1.90 \times 10^{-12}$	$1.43 \times 10^{-11}$	$1.72 \times 10^{-10}$	$2.58 \times 10^{-10}$	$3.59 \times 10^{-11}$
	非致癌物质健康风险贡献率/%	氨氮	0.04	0.3	0.9	3.2	8.3
铜		0.04	0.1	1.0	22.9	56.6	3.9
锌		0.01	0.01	0.3	0.9	1.8	0.4
氟化物		6.7	50.2	79.9	94.8	97.3	75.7
硒		0.2	0.2	0.3	0.8	1.1	0.4
汞		0.1	0.3	0.5	1.3	2.3	0.6
铅		0.2	0.2	4.3	31.9	42.9	8.6
氰化物		0.1	0.3	0.4	1.0	1.3	0.5
挥发酚		0.002	0.003	0.004	0.03	0.1	0.01
硝酸盐		0.03	0.3	3.0	23.2	51.8	7.0
铁		0.01	0.02	0.4	3.9	6.3	0.9
锰		0.00	0.05	0.3	2.8	8.6	0.7
总非致癌物质风险值			$1.67 \times 10^{-9}$	$2.70 \times 10^{-9}$	$5.07 \times 10^{-9}$	$8.59 \times 10^{-9}$	$1.03 \times 10^{-8}$
总致癌物质风险值		$6.66 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-7}$	$2.13 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-5}$	$5.09 \times 10^{-5}$	$4.11 \times 10^{-6}$
总健康风险		$6.66 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-7}$	$2.13 \times 10^{-6}$	$1.33 \times 10^{-5}$	$5.09 \times 10^{-5}$	$4.11 \times 10^{-6}$

暴露人群造成危害。非致癌物质中,各指标健康风险均值范围在  $4.07 \times 10^{-13} \sim 3.84 \times 10^{-9}$ ,从高到底依次为:氟化物 > 铅 > 硝酸盐 > 铜 > 氨氮 > 铁 > 锰 > 汞 > 氰化物 > 锌 > 硒 > 挥发酚。其中,氟化物对非致癌物健康风险的贡献率为 6.7% ~ 97.3%,且贡献率 P50 百分位数已达到 79.9%,故氟化物为该市非致癌物质中需要重点关注的指标。

#### 2.2.4 总健康风险

由表 6 可见,2017—2020 年该市在用集中式饮用水水源地总健康年风险均值为  $4.11 \times 10^{-6}$ ,已超过可接受风险水平限值 ( $1 \times 10^{-6}$ ),392 个样本超标率为 78.8%,ICRP ( $5 \times 10^{-5}$ ) 限值超标率为 0.3%,均未达到 US EPA ( $1 \times 10^{-4}$ ) 的可接受风险水平限值,按分级标准评价风险等级为 I 级,处于低风险程度。致癌物健康风险值为  $4.11 \times 10^{-6}$ ,占总健康风险的 99.9%。因此,该市集中式饮用水水源地健康风险主要来自致癌物,该结论与韩芹芹<sup>[27]</sup>、陈汉等<sup>[4]</sup>大部分研究一致。

#### 2.2.5 时间变化趋势

饮用水水源健康风险年际变化情况见表 7。由表 7 可见,2017—2020 年该市在用集中式饮用水水源地总健康风险在  $3.63 \times 10^{-6} \sim 5.54 \times 10^{-6}$ ,2017 年最高,2020 年最低,呈逐年降低趋势,风险等级均为 I 级,稳定处于低风险水平;致癌物质和非致癌物质风险值变化趋势与总健康风险一致。致癌物中,镭风险值总体降低并稳定在  $10^{-7}$  水平;砷的健康风险在  $3.00 \times 10^{-6} \sim 4.57 \times 10^{-6}$ ,2017 年最高,2018 年最低,均超过  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值,应持续关注其健康风险变化趋势。非致癌物中各指标各年度均低于英国皇家学会 ( $1 \times 10^{-7}$ ) 和荷兰环境部的可忽略风险水平 ( $1 \times 10^{-8}$ ),氟化物基本维持在  $10^{-9}$  的水平并呈逐年降低趋势,其他指标均维持在  $10^{-13} \sim 10^{-10}$  的较低水平。

2.2.6 与国内各地饮用水水源健康风险评估结果比较

根据近年来全国各地饮用水水源健康风险评估部分研究结果,将各地致癌物健康风险和致癌物

表 7 饮用水水源健康风险年际变化

健康风险	指标	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
致癌物质风险值	砷	$4.57 \times 10^{-6}$	$3.00 \times 10^{-6}$	$3.55 \times 10^{-6}$	$3.47 \times 10^{-6}$
	镉	$9.60 \times 10^{-7}$	$8.52 \times 10^{-7}$	$1.33 \times 10^{-7}$	$1.50 \times 10^{-7}$
非致癌物质风险值	氨氮	$7.40 \times 10^{-11}$	$6.34 \times 10^{-11}$	$5.49 \times 10^{-11}$	$5.18 \times 10^{-11}$
	铜	$2.78 \times 10^{-10}$	$2.17 \times 10^{-10}$	$1.84 \times 10^{-10}$	$3.57 \times 10^{-10}$
	锌	$2.88 \times 10^{-11}$	$3.04 \times 10^{-11}$	$8.76 \times 10^{-12}$	$1.10 \times 10^{-11}$
	氟化物	$4.37 \times 10^{-9}$	$3.89 \times 10^{-9}$	$3.64 \times 10^{-9}$	$3.56 \times 10^{-9}$
	硒	$1.65 \times 10^{-11}$	$1.75 \times 10^{-11}$	$1.67 \times 10^{-11}$	$1.75 \times 10^{-11}$
	汞	$2.90 \times 10^{-11}$	$2.99 \times 10^{-11}$	$2.59 \times 10^{-11}$	$2.44 \times 10^{-11}$
	铅	$9.17 \times 10^{-10}$	$7.50 \times 10^{-10}$	$1.92 \times 10^{-10}$	$1.31 \times 10^{-10}$
	氰化物	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.11 \times 10^{-11}$	$2.17 \times 10^{-11}$	$2.17 \times 10^{-11}$
	挥发酚	$3.64 \times 10^{-13}$	$3.57 \times 10^{-13}$	$5.50 \times 10^{-13}$	$3.47 \times 10^{-13}$
	硝酸盐	$3.74 \times 10^{-10}$	$4.13 \times 10^{-10}$	$3.51 \times 10^{-10}$	$3.50 \times 10^{-10}$
	铁	$4.42 \times 10^{-11}$	$4.01 \times 10^{-11}$	$5.53 \times 10^{-11}$	$4.33 \times 10^{-11}$
锰	$2.59 \times 10^{-11}$	$3.20 \times 10^{-11}$	$5.58 \times 10^{-11}$	$2.76 \times 10^{-11}$	
总致癌物质风险值		$5.53 \times 10^{-6}$	$3.85 \times 10^{-6}$	$3.68 \times 10^{-6}$	$3.62 \times 10^{-6}$
总非致癌物质风险值		$6.18 \times 10^{-9}$	$5.51 \times 10^{-9}$	$4.61 \times 10^{-9}$	$4.60 \times 10^{-9}$
总健康风险		$5.54 \times 10^{-6}$	$3.86 \times 10^{-6}$	$3.69 \times 10^{-6}$	$3.63 \times 10^{-6}$

中砷、镉的健康风险水平与本研究结果列表比较(表 8)。由于大部分研究选择了六价铬、砷和镉作为主要致癌物参与健康风险评价,仅韩芹芹<sup>[26]</sup>、耿雅妮等<sup>[11]</sup>增加了镍、苯并芘等其他致癌物,但这些新增致癌物风险基本都远低于各研究主要关注致癌物,故暂未将其列入致癌物健康风险参与比较。

由表 8 可见,本研究区域集中式饮用水水源地致癌物健康风险低于其他各地区。致癌物中,各地

砷的健康风险范围在  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  数量级,本研究区域砷的健康风险低于北京、上海、天津、长沙、宝鸡、东南某市、广州、青岛,高于乌鲁木齐和南方某市,与无锡、莆田年健康风险水平较为一致;各地镉的健康风险范围在  $10^{-8} \sim 10^{-6}$  数量级,较之神风险值较低。本研究区域集中式饮用水水源地致癌物健康风险为 I 级(低风险),属于较安全的水平。其他各地市多处于 II 级(低-中风险)~ III 级(中风险),个别地市达到了 IV 级(中-高风险)。

表 8 国内各地饮用水水源致癌物健康风险研究比较

研究区域	参考文献	年份	致癌物健康风险	风险等级	砷	镉
北京	[6]		$2.2 \times 10^{-5}$	II 级	$1.3 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-5}$	$0.9 \times 10^{-6} \sim 2.3 \times 10^{-6}$
上海	[5]	2006	$4.76 \times 10^{-5}$	II 级	$4.1 \times 10^{-6} \sim 3.4 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-7} \sim 1.3 \times 10^{-6}$
上海某地	[7]	2007—2011	$7.1 \times 10^{-5} \sim 2.1 \times 10^{-4}$	III ~ IV 级	$1.5 \times 10^{-5} \sim 2.5 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-7} \sim 6.1 \times 10^{-7}$
天津	[8]	2003—2007	$9.2 \times 10^{-6} \sim 1.6 \times 10^{-5}$	I ~ II 级	$5.0 \times 10^{-6} \sim 1.1 \times 10^{-5}$	$6.8 \times 10^{-8} \sim 1.6 \times 10^{-7}$
苏州	[22]	2015—2019	$4.07 \times 10^{-5}$	II 级		
无锡	[9]	2011—2015	$4.5 \times 10^{-5} \sim 9.1 \times 10^{-5}$	II ~ III 级	$2.0 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-5}$	$3.2 \times 10^{-7} \sim 1.4 \times 10^{-6}$
长沙	[10]	2011—2015	$3.38 \times 10^{-5} \sim 4.09 \times 10^{-5}$	II 级	$3.29 \times 10^{-5} \sim 3.32 \times 10^{-5}$	
宝鸡	[11]	2017			$5.16 \times 10^{-6} \sim 1.98 \times 10^{-5}$	$8.22 \times 10^{-7} \sim 1.88 \times 10^{-6}$
乌鲁木齐	[26]	2011—2013			$1.64 \times 10^{-6}$	$1.64 \times 10^{-6}$
莆田	[13]	2013—2014	$4.9 \times 10^{-5} \sim 7.5 \times 10^{-5}$	II 级 ~ III 级	$1.0 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-7} \sim 6.8 \times 10^{-7}$
南方某市	[14]	2013	$1.09 \times 10^{-5}$	II 级	$2.11 \times 10^{-6}$	$1.59 \times 10^{-7}$
东南某市	[4]	2007—2016	$3.21 \times 10^{-5} \sim 3.26 \times 10^{-5}$	II 级	$2.62 \times 10^{-5}$	$0.95 \times 10^{-7}$
广州	[15]	2017			$2.62 \times 10^{-5}$	$0.009 \times 10^{-5}$
大连	[16]	2007—2011	$5.31 \times 10^{-5} \sim 2.15 \times 10^{-4}$	III ~ IV 级	$5.73 \times 10^{-6} \sim 2.39 \times 10^{-5}$	$4.56 \times 10^{-8} \sim 6.42 \times 10^{-7}$
青岛	[17]	2011			$8.15 \times 10^{-6}$	
山东某沿海城市	本研究	2017—2020	$4.11 \times 10^{-6}$	I 级	$3.60 \times 10^{-6}$	$5.10 \times 10^{-7}$

由于各地监测项目的分析方法和仪器有差异,以及模型在项目的选择上不尽相同,在致癌物以及各项目健康风险对比结论上有不确定性,只能尽可能在一定意义上做参考。

### 2.2.8 不确定性分析

本研究中健康风险评价的不确定性来源于 USEPA 健康风险模型本身以及当地监测数据,模型中赋予各研究指标的强度系数及参数不同,参考暴露人群的体重和暴露时间不同,各指标的分析方法、仪器精度差异等均会对健康风险结果产生直接影响,其带来的不确定性不可忽略。

## 3 结论

(1) 2017—2020 年山东某沿海城市 18 处集中式饮用水水源地中,17 处在用饮用水水源地水质Ⅲ类以上比例为 98.7%,Ⅳ~Ⅴ类比例为 1.3%,影响地表水的主要污染指标为总磷,影响地下水的为总硬度和硫酸盐。各水源地水质Ⅲ类以上比例在 75.0%~100% 之间。从不同类型水源地水质Ⅲ类以上比例看,地表水>地下水,河流型>湖库型,地级>县级,客水>本地水;从年际变化来看,Ⅲ类以上比例总体呈升高趋势,2020 年达到 100%。

(2) 2017—2020 年该市在用集中式饮用水水源地总健康风险年均值  $4.11 \times 10^{-6}$ ,即每百万人口中因饮用水水源水质的致癌物质危害(或死亡)的为 4.11 人/a,未达到 US EPA 的 10 人/年和 ICRP 的 5 人/a,超过英国皇家协会、瑞典环保局和荷兰环境部的 1 人/a;风险等级为Ⅰ级,处于低风险水平。

(3) 该市健康风险值主要来源于致癌物。致癌物质中,A 类致癌物砷的健康风险均值超过  $1 \times 10^{-6}$  的可接受风险水平限值,镉未达到该限值。地表水集中式饮用水水源致癌健康风险较地下水高,湖库型高于河流型,地级高于县级,客水高于本地水。致癌物质健康风险为:砷>镉。建议将砷作为该市水源地致癌健康风险的重点控制指标。与其他相关研究相比,该市集中式饮用水水源地砷、镉的年健康风险处于中等偏低水平,属于较安全的范畴。该市非致癌物健康风险较低,暂不会对居民健康造成较大危害。

(4) 2017—2020 年该市在用集中式饮用水水源地总健康风险在  $10^{-6}$  数量级范围内,健康风险

分级稳定在Ⅰ级(低风险),并呈逐年降低趋势。

(5) 近年来全国各地饮用水水源关于致癌物的健康风险研究结果显示,风险等级多处于Ⅱ级(低-中风险)~Ⅲ级(中风险),个别地市达到了Ⅳ级(中-高风险),相较而言,本研究致癌物年健康风险较低,属于较安全的范畴。

### [参考文献]

- [1] 国家环境保护局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T14848—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1—14.
- [3] 李文攀, 朱攀, 李东一, 等. 集中式饮用水水源地水质评价方法研究[J]. 中国环境监测, 2015, 31(1): 24—27.
- [4] 陈汉, 王振峰, 梅琨, 等. 东南沿海某水源地水质健康风险评估[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 1161—1170.
- [5] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 60—65.
- [6] 高继军, 张力平, 黄圣彪, 等. 北京市饮用水水源重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 47—50.
- [7] 姜春燕, 龚敏. 上海某地区饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 北方环境, 2013, 29(5): 125—127.
- [8] 王秋莲, 张震, 刘伟, 等. 天津市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 187—190.
- [9] 盛翼, 张虎军, 王洁尘, 等. 无锡市饮用水源地水环境健康风险评估[J]. 干旱环境监测, 2019, 33(1): 1—7.
- [10] 彭小玉, 周理程, 潘海婷, 等. 长沙城区主要饮用水源重金属健康风险的初步评价[J]. 环境与健康, 2018, 36(10): 933—936.
- [11] 耿雅妮, 杨宁宁, 董洁, 等. 宝鸡市饮用水源地重金属健康风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 73—77.
- [12] 杨显双, 龙明梅, 金超, 等. 重庆乡镇集中式饮用水水源地健康风险评估——以北碚区为例[J]. 环境工程, 2018, 36(增刊): 60—62.
- [13] 傅丽君, 林凯睿, 胡海舟, 等. 莆田市主要饮用水水质健康危害风险度评价[J]. 莆田学院学报, 2016, 23(2): 77—82.
- [14] 曾彩明, 黄奕彦, 谭晓辉. 南方某河流型饮用水源地重金属健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 27—31.
- [15] 商仲彬, 吴锐, 赵艳萍, 等. 广州水厂感潮水源地水体中重金属季节性分布特征与健康风险评估[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(4): 102—120.
- [16] 魏金波, 郑怀军, 刘欣. 大连市水环境健康风险评估[J]. 环境科学导刊, 2012, 31(5): 71—73.
- [17] 孟晓琦, 孔伟威, 宣肇菲. 青岛市饮用水源地重金属污染物健康风险初步评价[J]. 干旱环境监测, 2012, 26(1): 14—16.
- [18] 环境保护部. 地表水环境质量评价办法(试行)[EB/OL].

- (2011-03-09)[2021-06-10]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401\\_208364.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201104/t20110401_208364.htm).
- [19] 环境保护部. 关于印发《全国集中式生活饮用水水源水质监测信息公开方案》的通知(环办监测[2016]3号)[R]. 北京:环境保护部,2016.
- [20] USEPA. Risk assessment guidance for superfund: volume3 - process for conducting probabilistic risk assessment chapter1, part a[R]. Washington D. C. : office of emergency and remedial Response US EPA,2001.
- [21] 刘松华,周静,金龙龙,等. 苏州市集中式饮用水源地健康风险评估研究[J]. 环境工程,2021,39(5):217-223.
- [22] 赵小健. 饮用水源地痕量有毒有害污染物环境健康风险评估[J]. 中国环境监测,2014,30(1):11-12.
- [23] 符刚,曾强,赵亮,等. 基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评估[J]. 环境科学,2015,36(12):4553-4560.
- [24] 徐爱兰,陈敏,孙克遥. 长江口南通地区饮用水源地健康风险评估[J]. 中国环境监测,2012,28(6):9-13.
- [25] 韩芹芹,王涛,杨永红,等. 乌鲁木齐市主要饮用水源地水质健康风险评估[J]. 中国环境监测,2015,31(1):57-63.
- [26] 赵秀阁,段小丽. 中国人群暴露参数手册:概要[M]. 北京:中国环境出版社,2014:18-21.
- [27] 国务院新闻办. 中国居民营养与慢性病状况报告(2020年)[EB/OL]. (2020-12-23)[2021-05-19]. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/42311/44583/index.htm>.
- [28] US EPA. Superfund public health evaluation manual [R]. EPA-AP540P1-86. Washington DC;US EPA,1986.
- [29] US EPA. Available information on assessment exposure from pesticides in food[R]. Washington D. C. : U. S. Environmental Protection Agency Office of Pesticide Programs,2000.
- [30] 祝慧娜,袁兴中,曾光明,等. 基于区间数的河流环境健康风险模糊综合评价模型[J]. 环境科学学报,2009,29(7):1527-1533.
- [31] 胡习邦,王俊能,许振成,等. 区间数的饮用水源地健康风险模糊综合评价[J]. 环境科学与技术,2012,35(12J):349-355.

.....

(上接第70页)

- [4] GUARNIERI M, BARMES J R. Outdoor air pollution and asthma [J]. Lancet, 2014,383(9928):1581-1592.
- [5] 丁亚萍,虞明星,郝海燕,等. 石家庄市空气PM<sub>2.5</sub>浓度与儿童呼吸系统疾病门诊量的关系[J]. 中华疾病控制杂志,2018,22(7):672-676.
- [6] 贾云飞,韦丽,唐彦钊,等. 2015—2017年南京市大气污染物对儿童内科门诊量影响的时间序列分析[J]. 职业与健康,2020,36(5):666-669,673.
- [7] 周芳,崔玉霞,刘焯,等. 空气污染物暴露对儿童常见呼吸系统疾病住院患儿数的影响[J]. 中国医药导报,2020,17(21):58-61.
- [8] 李虹静,任钰婷,张燕妮,等. 大气污染与儿童门急诊呼吸系统疾病相关性研究[J]. 环境卫生学杂志,2020,10(2):143-148,154.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 环境空气质量标准:GB 3095—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.
- [10] 史亚妮,董继元,刘玉荣. 兰州市空气污染对儿童呼吸疾病的影响[J]. 中国环境科学,2020,40(4):1792-1799.
- [11] 张莉君,东春阳,许慧慧,等. 上海市大气污染与某综合医院儿童呼吸系统疾病门诊人次的关系[J]. 环境与职业医学,2020,37(8):741-746.
- [12] 梁志江,马远珠,缪华章,等. 广州地区空气污染对儿童呼吸系统疾病就诊人次的影响研究[J]. 环境与健康杂志,2015,32(6):481-484.
- [13] 张开月,金武,姚庆兵,等. 扬州市空气细颗粒物与居民死亡关系的时间序列分析[J]. 南通大学学报(医学版),2019,39(4):299-301.

栏目编辑 王 湜 周立平