

# 大冶铜铁冶炼厂周边砷和镉污染水平及健康风险评估

罗利霞, 王丹丹, 章江阳, 梅勇, 常薇

武汉科技大学公共卫生学院, 职业危害识别与控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081

**摘要:**目的 调查湖北黄石市大冶铜铁冶炼厂周边区域砷和镉的污染现状, 评估该矿区周围砷和镉暴露健康风险水平。方法 采用单因子污染指数法和地累积指数法评价环境介质中砷和镉污染现状; 采用人体暴露污染物的健康风险评估模型评估不同暴露途径中砷和镉对人体的健康风险。结果 该冶炼厂主导风向向下风向东南方的 10 km 范围内, 室内空气和大气中砷和镉的单因子污染指数( $P_i$ )分别是 2.47 和 2.67 ( $2 < P_i \leq 3$ , 中度污染); 地表水中重金属砷和镉的  $P_i$  分别是 1.50 和 1.21 ( $1 < P_i \leq 2$ , 轻度污染)。沉积物样品中砷的地累积指数( $I_{geo}$ )为 3.87 ( $3 < I_{geo} < 4$ , 重度污染), 镉的  $I_{geo}$  为 9.07 ( $I_{geo} > 5$ , 严重污染); 积尘样品中的砷的  $I_{geo}$  为 1.89 ( $1 < I_{geo} < 2$ , 中度污染), 镉的  $I_{geo}$  为 4.80 ( $4 < I_{geo} < 5$ , 重度-严重污染); 土壤样品中砷的  $I_{geo}$  为 0.27 ( $0 < I_{geo} < 1$ , 无-中度污染), 镉的  $I_{geo}$  为 2.57 ( $2 < I_{geo} < 3$ , 中度-重度污染)。居民中砷和镉非致癌风险的危害指数(HI)大小分别为 11.75 和 1.03, 该地区砷和镉的暴露对人体健康存在潜在的非致癌风险, 砷和镉经消化道摄入非致癌风险的危害商(HQ)大小分别为 9.89 和 1.03, 经呼吸道摄入的 HQ 分别为 1.86 和  $8.74 \times 10^{-4}$ , 经皮肤接触的 HQ 分别为  $7.47 \times 10^{-4}$  和  $2.91 \times 10^{-4}$ ; 居民中砷和镉总致癌风险指数(TCR)大小分别为  $1.53 \times 10^{-3}$  和  $2.15 \times 10^{-3}$  ( $TCR > 1.00 \times 10^{-4}$ ), 该地区砷和镉的暴露对居民健康的致癌风险已不可忽略, 砷和镉经消化道摄入的致癌风险指数(R)分别为  $1.53 \times 10^{-3}$  和  $2.15 \times 10^{-3}$ , 经呼吸道吸入的 R 分别为  $4.10 \times 10^{-5}$  和  $1.89 \times 10^{-6}$ , 经皮肤接触的 R 分别为  $4.72 \times 10^{-8}$  和  $1.20 \times 10^{-7}$ 。结论 该冶炼厂主导风向向下风向东南方的 10 km 范围内的环境介质受到砷和镉的污染, 环境介质中砷和镉暴露对区域内居民健康的影响超过了可接受水平。该地区砷和镉暴露对居民的非致癌风险水平和致癌风险水平均表现为, 经消化道摄入 > 经呼吸道吸入 > 经皮肤接触。

**关键词:** 铜铁冶炼厂; 重金属; 污染特征; 健康风险

中图分类号: X508; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1003-8507(2024)01-34-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202307216

## Pollution level and health risk assessment of arsenic and cadmium around Daye copper and iron smelter

LUO Li-xia, WANG Dan-dan, QIN Jiang-yang, MEI Yong, CHANG Wei

Hubei Key Laboratory of Occupational Hazard Identification and Control, School of Public Health, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

**Abstract: Objective** To investigate the pollution status of arsenic and cadmium in the surrounding area of Daye copper and iron smelter in Huangshi city, Hubei Province, and to evaluate the health risk level of arsenic and cadmium exposure around the mining area. **Methods** The pollution status of arsenic and cadmium in environmental media was evaluated by single factor pollution index method and ground accumulation index method, and the health risk assessment model of human exposure pollutants was used to evaluate the health risk of arsenic and cadmium via different exposure pathways. **Results** The single factor pollution index ( $P_i$ ) of arsenic and cadmium in indoor air and atmosphere were 2.47 and 2.67 ( $2 < P_i < 3$ , moderate pollution), respectively, and the  $P_i$  of heavy metal arsenic and cadmium in surface water were 1.50 and 1.21, respectively ( $1 < P_i < 2$ , mild pollution) in the 10 km range of downwind to southeast of the smelter. The geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ) of arsenic in sediment samples was 3.87 ( $3 < I_{geo} < 4$ , severe pollution), the  $I_{geo}$  of cadmium was 9.07 ( $I_{geo} > 5$ , severe pollution), the  $I_{geo}$  of arsenic in dust samples was 1.89 ( $1 < I_{geo} < 2$ , moderate pollution), the  $I_{geo}$  of cadmium was 4.80 ( $4 < I_{geo} < 5$ , severe pollution), the  $I_{geo}$  of arsenic in soil samples was 0.27 ( $0 < I_{geo} < 1$ , no moderate pollution), and the  $I_{geo}$  of cadmium was 2.57 ( $2 < I_{geo} < 3$ , moderate-severe pollution). The hazard index (HI) of non-carcinogenic risk of arsenic and cadmium in residents was 11.75 and 1.03, respectively. Exposure to arsenic and cadmium in this area had a potential non-carcinogenic risk to human health. The hazard quotient (HQ) of non-carcinogenic risk of arsenic and cadmium ingested through the digestive tract was

9.89 and 1.03, respectively, and the HQ of respiratory intake was 1.86 and  $8.74 \times 10^{-4}$ , respectively. The HQ of skin contact was  $7.47 \times 10^{-4}$  and  $2.91 \times 10^{-4}$ , respectively. The total carcinogenic risk index (TCR) of arsenic and cadmium was  $1.53 \times 10^{-3}$  and  $2.15 \times 10^{-3}$ , respectively (TCR >  $1.00 \times 10^{-4}$ ). The carcinogenic risk index (R) of arsenic and cadmium intake through digestive tract was  $1.53 \times 10^{-3}$  and  $2.15 \times 10^{-3}$ , respectively. The R value through respiratory tract was  $4.10 \times 10^{-5}$  and  $1.89 \times 10^{-6}$  respectively, and the R value through skin contact was  $4.72 \times 10^{-8}$  and  $1.20 \times 10^{-7}$ , respectively. **Conclusion** The environmental media in the range of 10 km to the southeast of the smelter are polluted by arsenic and cadmium, and the effects of arsenic and cadmium exposure on the health of residents in the area exceed the acceptable level. The non-carcinogenic risk level and carcinogenic risk level of arsenic and cadmium exposure to residents in this area are as follows: intake through digestive tract > inhalation through respiratory tract > exposure through skin.

**Keywords:** Copper and iron smelter; Heavy metal; Pollution characteristics; Health risk

大多数环境重金属污染都是过度使用金属和含金属化合物而引起<sup>[1]</sup>。现有研究表明矿区<sup>[2-3]</sup>周围砷和镉的健康风险危害最高,非致癌性和致癌性风险值均会造成人体危害。国际癌症研究机构已将砷和镉列为 I 类致癌物<sup>[4]</sup>。

砷和镉往往与铜铁矿石伴生,提炼铜铁后,砷和镉成为“三废”释放到周围环境中,此前黄石大冶铜铁冶炼厂邻近的阳新县发生过因冶炼导致的砷污染事件<sup>[5]</sup>。为掌握该厂周边环境状况及其对人群健康影响,提出环境与健康综合防治对策,应当地卫生、环保部门要求开展此项工作。本研究监测了湖北黄石市大冶铜铁冶炼厂主导风向下风向东南方的 10 km 范围内的室内空气、环境空气、地表水、沉积物、积尘、土壤样品及大米蔬菜中砷和镉。在该基础上,利用单因子污染指数法和地累积指数法来评价该地区砷和镉环境污染程度,根据《中国人群暴露参数手册》<sup>[6]</sup>选取适合该地区的健康暴露评价参数,结合不同环境介质中砷和镉的含量数据,按照 US EPA 人体暴露污染物的健康风险评估模型<sup>[7-8]</sup>评估不同暴露途径砷和镉对人体的健康风险。

## 1 对象与方法

**1.1 样品来源** 大冶铜铁冶炼厂的常年主导风向为东南风,建厂至今近 20 余年,该企业行业类型为有色金属的冶炼及压延加工,包括阴极铜年产量为  $5.3 \times 10^5$  t,铜杆年产量为  $3.0 \times 10^5$  t,铁精矿年产量为  $2.4 \times 10^5$  t。距离该厂东南方向 10 km 范围内的常住总人口有 17.0 万人,其中成人(18~75 岁)有 11.1 万人,儿童(3~17 岁)5.6 万人。2019 年 4—5 月,综合考虑该厂的空间和地理分布以及实施采样的可行性,以该厂东南方向的 10 km 范围内,根据人群暴露情况选取具有代表性的采样点,具体对象包括 8 个村,分别选取具有代表性的采样点。

(1)环境空气 该地常年主导风向为东南风,故环境空气监测点位分布于该铜铁冶炼厂东南部,布设环境空气采样点位 9 个,共采集样品 90 份。

(2)室内空气 采取环境空气-室内空气-人群健康调查一致的原则,在环境空气监测范围内的人群居住区进行监测,采样高度与人呼吸带高度相一致。采样时通过调查家庭的房屋结构类型和主要燃料类型等排除家庭活动造成砷镉污染的情况。布设室内空气采样点位 11 个,共采集 102 份样品。

(3)大米和蔬菜 自产农作物,均来自 8 个行政村居民,以家庭为单位。大米共采集 32 份样品,蔬菜共采集 48 份样品。

(4)地表水 根据当地水系图和生态功能区划图,布点方式参照地表水河道水体的布点方式,覆盖有排污口以及地表水经过的、进行外暴露和人群健康调查的点位共布设 4 个采样断面,共采集地表水样品 24 份。

(5)沉积物 根据当地水系图和生态功能区划图,布点方式参照地表水河道水体的布点方式,采集表层沉积物,采样为深度 0~20 cm,沉积物采样点位与地表水一致,共采集 4 份样品。

(6)积尘 此次调查污染区居民室内积尘采样点位原则上与室内空气一致,收集居民室内表层尘土;对于学校,采样位置在积尘量较多的学校仓库。根据实际情况选取刮擦法,每点混合样本量 1~5 g。布设 11 个采样点,共采集 11 份样品。

(7)土壤 本研究中采集了蔬菜采样点的土壤和学校绿化带的土壤,均为红壤土。一般监测采集表层土,采样深度为 0~20 cm,每个采样点的样品为土壤混合样。露调查的蔬菜采样点布设土壤点位 48 个,在 7 所学校布设土壤采样单元,每个学校 3 个采样点位,共计 21 份混合土样,共计土样 69 份。

## 1.2 环境污染评价方法

**1.2.1 单因子污染指数法** 单因子污染指数(single factor pollution index,  $P_i$ )<sup>[9]</sup>确定主要污染物及其危害程度,评价水、室内空气、环境空气、大米及蔬菜样品中砷和镉的污染程度。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad \text{式(1)}$$

式(1)中: $P_i$ 为样品中重金属元素*i*的污染物指数, $C_i$ 为重金属元素*i*的实测值, $S_i$ 为重金属元素*i*评价标准值。若 $P_i \leq 1$ ,表明未受污染; $1 < P_i \leq 2$ ,为轻度污染; $2 < P_i \leq 3$ ,为中度污染; $P_i > 3$ ,为重度污染。

**1.2.2 地累积指数法** 地累积指数(index of geoaccumulation,  $I_{geo}$ )<sup>[9]</sup>由 Muller 提出,应用于研究沉积物、土壤、积尘中重金属的污染评价。

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_i}{1.5B_i}\right) \quad \text{式(2)}$$

式(2)中: $C_i$ 为重金属*i*在样品中的实测含量(mg/kg); $B_i$ 为重金属*i*在土壤中的背景含量(mg/kg);系数 1.5 是考虑到环境中重金属*i*背景值的变化及人类影响而取的修正系数<sup>[10]</sup>。按受污染程度强弱,对地累积指数进行分级<sup>[11]</sup>,见表 1。

表 1 地累积指数分级标准

Table 1 Classification criteria for pollution index

地累积指数( $I_{geo}$ )	级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	1	无污染
$0 < I_{geo} < 1$	2	无 - 中度污染
$1 < I_{geo} < 2$	3	中度污染
$2 < I_{geo} < 3$	4	中度 - 重度污染
$3 < I_{geo} < 4$	5	重度污染
$4 < I_{geo} < 5$	6	重度 - 严重污染
$I_{geo} > 5$	7	严重污染

**1.3 健康风险评估模型** 采用 US EPA 人体暴露污染物的健康风险评估模型来评估采样区域内砷和镉经不同摄入途径的健康风险,非致癌风险和致癌风险<sup>[7]</sup>,主要步骤包括暴露量计算和健康风险表征。

**1.3.1 暴露计算** 不同途径砷和镉的日均暴露剂量分别采用以下公式计算<sup>[12]</sup>。

经呼吸途径:

$$ADD_{inh} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{式(3)}$$

经口途径:

$$ADD_{oral} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{式(4)}$$

经皮肤途径:

$$\text{土壤、积尘: } ADD_{derm} = \frac{C \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times CF}{BW \times AT} \quad \text{式(5)}$$

$$\text{水: } ADD_{derm} = \frac{C \times SA \times T \times K \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{式(6)}$$

式(3)、(4)、(5)、(6)中:ADD 为 3 种不同途径日均暴露量,mg/(kg·d);C 为环境介质中的污染物的浓度(mg/L;mg/kg;mg/m<sup>3</sup>);其他重金属健康风险暴露参数<sup>[6,12]</sup>。见表 2。

表 2 健康风险评估参数取值

Table 2 Values of health risk assessment parameters

暴露参数	单位	参数值	参考文献
IR <sub>s</sub>	土壤/积尘摄入量	mg/d	50 <sup>[6]</sup>
IR <sub>w</sub>	饮水摄入量	L/d	1.795 <sup>[6]</sup>
IR <sub>大米</sub>	大米摄入量	g/d	307.45 <sup>[6]</sup>
IR <sub>蔬菜</sub>	蔬菜摄入量	g/d	371.43 <sup>[6]</sup>
IR <sub>a</sub>	呼吸量	m <sup>3</sup> /d	14.5 <sup>[6]</sup>
EF	暴露频率	d/a	350 <sup>[12]</sup>
ED	暴露持续时间	a	24 <sup>[12]</sup>
BW	体重	kg	60.1 <sup>[6]</sup>
AT	平均总暴露时间	d	ED × 365 (非致癌) 70 × 365 (致癌) <sup>[6]</sup>
AF	皮肤黏附系数	mg/(cm <sup>2</sup> ·d)	0.07 <sup>[6]</sup>
SA <sub>s</sub>	暴露土壤皮肤表面积	cm <sup>2</sup>	5.0 × 10 <sup>3</sup> <sup>[6]</sup>
ABS	皮肤吸收系数	-	As:0.03 Cd:0.001 <sup>[12]</sup>
T	洗澡时间	min/d	9 <sup>[6]</sup>
SA <sub>w</sub>	暴露水皮肤表面积	cm <sup>2</sup>	1.6 × 10 <sup>4</sup> <sup>[6]</sup>
K	皮肤渗透系数	cm/h	0.001 <sup>[6]</sup>

**1.3.2 风险表征** 风险表征包括非致癌风险和致癌风险,分别采用非致癌风险系数(HQ)和致癌健康风险指数(R)评估。依照如下公式计算。

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad \text{式(7)}$$

$$R = ADD \times SF \quad \text{式(8)}$$

$$HI = \sum HQ_i \quad \text{式(9)}$$

$$TCR = \sum R_i \quad \text{式(10)}$$

式(7)、(8)、(9)、(10)中:危害商(hazard quotient, HQ),人体经单一途径暴露于非致癌污染物受到危害的水平,无量纲;RfD 为污染物的参考剂量,mg/(kg·d);ADD 为污染物的日均暴露剂量,mg/(kg·d);SF 为致癌斜率因子,[mg/(kg·d)]<sup>-1</sup>。危害指数(hazard index, HI),人群经多种途径暴露于单一污染物的危害商之和,表征人体暴露于非致癌污染物受到危害的水平;总致癌风险指数(total carcinogenic risk index, TCR),即全部暴露途径的致癌风险指数的总和。HQ > 1.00,表明存在潜在的非致癌风险<sup>[7-8]</sup>。致癌风险指数(carcinogenic risk index, R),可接受范围为 1.00 × 10<sup>-6</sup> ~ 1.00 × 10<sup>-4</sup>,R < 1.00 × 10<sup>-6</sup>,则致癌风险可忽略;R > 1.00 × 10<sup>-4</sup>,则致癌风险已不可忽略,较为明显<sup>[7-8]</sup>。不同暴露途径下砷和镉的 RfD 与 SF 值<sup>[6,13]</sup>。见表 3。

## 2 结果

**2.1 各介质中 As 和 Cd 污染水平调查结果** 根据该厂主导风向向下风向东南方 10 km 范围内介质中砷和镉含量与国内现有相关标准的比较可知,只有大米和蔬菜中砷和镉含量均低于相应的标准限值,其余调查区环境介质室内空气、环境空气、地表水、沉积物、

积尘和土壤样品均都受到不同程度的砷和镉污染,见表 4。

表 3 各途径砷和镉的 RfD、SF 的参数取值

Table 3 Parameter values of RfD and SF for arsenic and cadmium

元素	RfD[mg/(kg·d)]			SF [mg/(kg·d)] <sup>-1</sup>		
	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触
As	3.83 × 10 <sup>-6</sup>	3 × 10 <sup>-4</sup>	3 × 10 <sup>-4</sup>	16.8	1.5	1.5
Cd	1 × 10 <sup>-3</sup>	1 × 10 <sup>-3</sup>	3 × 10 <sup>-5</sup>	6.3	6.1	40

表 4 冶炼厂周围环境介质中重金属砷和镉含量

Table 4 Concentrations of arsenic and cadmium in environmental media around the copper-iron smelting plant

环境介质	As 平均值	As 标准限值	Cd 平均值	Cd 标准限值	参考标准
环境空气(μg/m <sup>3</sup> )	0.016 0 <sup>*</sup>	0.006	0.001 98	0.005	《环境空气质量标准》二级限值(GB 3095-2012)
室内空气(μg/m <sup>3</sup> )	0.014 8 <sup>*</sup>	0.006	0.001 80	0.005	《环境空气质量标准》二级限值(GB 3095-2012)
大米(mg/kg)	0.070 2	0.5	0.090 4	0.2	食品中污染物限量(GB 2762-2017)
蔬菜(mg/kg)	0.068 7	0.5	0.068 4	0.2	食品中污染物限量(GB 2762-2017)
地表水(mg/L)	0.074 8 <sup>*</sup>	0.05	0.006 05 <sup>*</sup>	0.005	《地表水环境质量标准》III 类限值(GB3838-2002)
沉积物(mg/kg)	270.5 <sup>*</sup>	1.74	137.0 <sup>*</sup>	0.3	《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)
积尘(mg/kg)	68.6 <sup>*</sup>	25	7.12 <sup>*</sup>	0.3	《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)
土壤(mg/kg)	22.3	25	1.51 <sup>*</sup>	0.3	《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)

注:<sup>\*</sup>表示环境介质的平均值超过国家标准限值。

2.2 环境介质中砷和镉的单因子污染指数 按照单因子污染指数法对环境介质室内空气、环境空气、大米、蔬菜和地表水进行污染状况评价,该地区室内空气和环境空为未受污染。该地区水样中砷和镉的 P<sub>i</sub> 是 1.50 和 1.20,为轻度污染。大米和蔬菜中砷和镉的 P<sub>i</sub><1,为未受污染。见表 5。

表 5 环境介质中砷和镉的单因子污染指数

Table 5 Single-factor pollution index of arsenic and cadmium in environmental media

环境介质	As 单因子污染指数(P <sub>i</sub> )		Cd 单因子污染指数(P <sub>i</sub> )	
	As 污染程度	Cd 污染程度	As 污染程度	Cd 污染程度
室内空气	2.47	中度污染	0.36	未受污染
环境空气	2.67	中度污染	0.40	未受污染
大米	0.14	未受污染	0.45	未受污染
蔬菜	0.14	未受污染	0.34	未受污染
地表水	1.50	轻度污染	1.21	轻度污染

2.3 环境介质中砷和镉的地累积指数 采用地累积指数法评价沉积物样品、积尘样品和土壤样品,按湖北省土壤背景值<sup>[14]</sup>(As:12.30 mg/kg;Cd:0.17 mg/kg)计算分析得出该地区沉积物样品中的砷和镉的 I<sub>geo</sub> 分别为 3.87 和 9.07,为重度污染和严重污染;积尘样品中的砷和镉的 I<sub>geo</sub> 分别为 1.89 和 4.80,为中度污染和重度-严重污染;土壤样品中砷和镉的 I<sub>geo</sub> 分别为 0.27 和 2.57,砷为无-中度污染和重度-严重污染,镉为重度污染。见表 6。

表 6 环境介质中砷和镉的地累积指数

Table 6 Index of geoaccumulation of arsenic and cadmium in environmental media

环境介质	As		Cd	
	地累积指数(I <sub>geo</sub> )	污染程度	地累积指数(I <sub>geo</sub> )	污染程度
沉积物	3.87	重度污染	9.07	严重污染
积尘	1.89	中度污染	4.80	重度-严重污染
土壤	0.27	无-中度污染	2.57	中度-重度污染

## 2.4 人群健康风险评估

2.4.1 非致癌风险 结果表明,该地区居民不同途径砷和镉暴露的 HI 分别为 11.75 和 1.03。其中,经消化道摄入砷和镉途径的 HQ 分别为 9.89 和 1.03;经呼吸道吸入的 HQ 分别为 1.86 和 8.74 × 10<sup>-4</sup>;经皮肤接触的 HQ 分别为 7.47 × 10<sup>-4</sup> 和 2.91 × 10<sup>-4</sup>;该地区砷和镉暴露对居民的非致癌风险水平均表现为经消化道摄入>经呼吸道吸入>经皮肤接触。见表 7。

2.4.2 致癌风险 根据计算结果可知,该地区砷和镉的 TCR 分别为 1.57 × 10<sup>-3</sup> 和 2.15 × 10<sup>-3</sup>,不同途径砷和镉暴露的 R 如下:经消化道摄入的 R 分别为 1.53 × 10<sup>-3</sup> 和 2.15 × 10<sup>-3</sup>;经呼吸道吸入的 R 分别为 4.10 × 10<sup>-5</sup> 和 1.89 × 10<sup>-6</sup>;经裸露皮肤接触的 R 分别为 4.72 × 10<sup>-8</sup> 和 1.20 × 10<sup>-7</sup>;该地区砷和镉对居民的致癌风险水平均表现为经消化道摄入>经呼吸道吸入>经皮肤接触。见表 8。

表 7 多途径摄入各环境介质中砷和镉的非致癌风险的危害商和危害指数

Table 7 Hazard quotient and hazard index of non-carcinogenic risk from arsenic and cadmium intake through multiple pathways in various environmental media

暴露途径	环境介质	As 非致癌风险的危害商(HQ)	Cd 非致癌风险的危害商(HQ)	As 不同暴露途径非致癌风险的危害商(HQ)	Cd 不同暴露途径非致癌风险的危害商(HQ)
呼吸道摄入	环境空气	0.97	$4.58 \times 10^{-4}$	1.86	$8.74 \times 10^{-4}$
	室内空气	0.89	$4.16 \times 10^{-4}$		
经消化道摄入	大米	1.15	0.44	9.89	1.03
	蔬菜	1.36	0.40		
	水	7.14	0.17		
	积尘	0.18	$5.68 \times 10^{-3}$		
	土壤	$5.92 \times 10^{-2}$	$1.20 \times 10^{-3}$		
皮肤接触	水	$2.33 \times 10^{-6}$	$7.72 \times 10^{-7}$	$7.47 \times 10^{-4}$	$2.91 \times 10^{-4}$
	积尘	$5.62 \times 10^{-4}$	$2.39 \times 10^{-4}$		
	土壤	$1.83 \times 10^{-4}$	$5.07 \times 10^{-5}$		
非致癌风险的危害指数(HI)		11.75	1.03	11.75	1.03

表 8 多途径摄入各环境介质中砷和镉的致癌风险指数

Table 8 Carcinogenic risk index of arsenic and cadmium intake through various pathways in environment

暴露途径	环境介质	As 致癌风险指数(R)	Cd 致癌风险指数(R)	As 不同暴露途径致癌风险指数(R)	Cd 不同暴露途径致癌风险指数(R)
呼吸道摄入	环境空气	$2.13 \times 10^{-5}$	$9.88 \times 10^{-7}$	$4.10 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-6}$
	室内空气	$1.97 \times 10^{-5}$	$8.99 \times 10^{-7}$		
消化道摄入	大米	$9.14 \times 10^{-6}$	$9.27 \times 10^{-4}$	$1.53 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-3}$
	蔬菜	$2.09 \times 10^{-4}$	$8.47 \times 10^{-4}$		
	水	$1.10 \times 10^{-3}$	$3.62 \times 10^{-4}$		
	积尘	$2.81 \times 10^{-5}$	$2.52 \times 10^{-6}$		
	土壤	$1.77 \times 10^{-4}$	$1.19 \times 10^{-5}$		
皮肤接触	水	$1.52 \times 10^{-10}$	$3.27 \times 10^{-10}$	$4.72 \times 10^{-8}$	$1.20 \times 10^{-7}$
	积尘	$3.56 \times 10^{-8}$	$9.84 \times 10^{-8}$		
	土壤	$1.15 \times 10^{-8}$	$2.09 \times 10^{-8}$		
总致癌风险(TCR)		$1.57 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-3}$	$2.15 \times 10^{-3}$

### 3 讨论

**3.1 污染现况** 从调查区砷和镉的污染状况来看,调查区的室内空气、环境空气和地表水中砷的  $P_i$  均大于 1,沉积物、积尘和土壤样品中砷的  $I_{geo}$  也均大于 0,表明该调查区的室内空气、环境空气、地表水、沉积物、积尘和土壤样品都受到了砷的污染。根据 Salazar-Camacho C 等<sup>[15-16]</sup>研究发现室内空气、环境空气、地表水、沉积物、积尘和土壤这些环境介质都可能成为砷的暴露途径。该调查区地表水中镉的  $P_i$  大于 1,沉积物、积尘和土壤样品中砷的  $I_{geo}$  也均大于 0,表明该调查区地表水、沉积物、积尘和土壤样品都受到了镉的污染,根据 Chen R 等人<sup>[17-18]</sup>的相关研究研究表明这些环境介质都可能成为镉的暴露途径,结合非致癌风险水平和致癌风险水平可知以上环境介质都是砷和镉的暴露途径。

**3.2 非致癌风险** 该地区不同暴露途径的砷和镉的 HI 分别为 11.75 和 1.03,  $HI > 1.00$ , 表明该区域环境介质中砷和镉暴露对居民存在潜在的非致癌风险,其中经消化道摄入途径的 HQ 分别为 9.89 和 1.03,表明经消化道摄入是主要的非致癌风险途径;经呼吸道

摄入途径砷的 HQ 为 1.86,表明神经呼吸道摄入途径存在潜在的非致癌风险。根据非致癌风险评估结果砷和镉暴露对居民的非致癌风险水平由高到低为经消化道摄入 > 经呼吸道吸入 > 经皮肤接触。这意味着通过消化道摄入砷和镉是主要的非致癌风险途径,其次是通过呼吸道吸入,最后是经皮肤接触。李良钟等<sup>[13,19]</sup>研究发现通过消化道摄入的砷和镉是主要的非致癌风险来源,且砷的非致癌风险大于镉的非致癌风险与本研究一致。因此,应该采取相应的措施来减少当地居民对砷和镉的摄入。

**3.3 致癌风险** 调查区砷和镉的所有暴露途径产生的 TCR 分别高达  $1.57 \times 10^{-3}$  和  $2.15 \times 10^{-3}$ ,超过可接受范围值<sup>[12]</sup>为  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 。根据致癌风险评估结果可以看出在砷和镉的暴露途径中,经消化道摄入暴露风险最大,其次是经呼吸道摄入,暴露风险经皮肤接触暴露风险最小,与非致癌风险的结果一致。关于砷和镉污染区人群暴露致癌风险评估,已经受到广泛关注。汪洁等<sup>[20-21]</sup>在砷和镉污染的典型地区调查发现,环境中砷和镉的总致癌风险均超过  $10^{-4}$ ,经消化道摄入仍是砷和镉最主要的致癌风险途径,与本研究结果

一致。

以该铜铁冶炼厂主导风向下风向东南方 10 km 范围内的环境介质受到砷和镉的污染,环境介质中砷和镉暴露对区域内居民健康的影响超过了可接受水平。该地区砷和镉暴露对居民的非致癌风险水平和致癌风险水平均表现为:经消化道摄入>经呼吸道吸入>经皮肤接触。砷和镉主要通过消化道摄入途径对暴露人群健康造成潜在危害,故应从根源上降低砷和镉对人群的健康风险,采用敏感指标进行筛查,监测污染区人群的健康状况并及早发现早期健康损伤。同时,建立长期追踪队列,对健康影响进展进行持续随访,分析和探讨暴露、早期健康损伤及慢性健康影响(如慢性疾病、癌症或死亡)之间的相互关系,全面了解该铜铁矿矿区周边环境对砷和镉污染对人体健康影响,为预防和控制矿区周围砷和镉污染提供人群健康依据。

本次风险评估也存在一定的局限性,在人体健康风险评估过程中,水中的镉和砷检测的水体指的是地表水,当地居民大部分使用自来水厂的自来水,同时当地居民也会购买食用其他非污染地区的粮食和蔬菜,因此,通过消化道摄入途径对暴露人群的危害风险评估结果可能偏高。

**利益冲突声明** 本研究不存在任何利益冲突

#### 参考文献

- [ 1 ] Kim JJ, Kim YS, Kumar V. Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2019, 54: 226–231.
- [ 2 ] Wang H, Maqbool A, Xiao X, et al. Seasonal pollution and risk assessment of heavy metals in atmospheric dust from coal mining area [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(12): 11963–11972.
- [ 3 ] Ghazban F, Parizanganeh A, Zamani A, et al. Evaluation of heavy metal contamination of surface soils in zarshouran Gold district, northwestern Iran [J]. *International Journal of Environmental Research*, 2018, 12(6): 843–860.
- [ 4 ] International Agency for Research on Cancer. List of classifications by cancer sites with sufficient or limited evidence in humans [EB/OL]. [2023–11–22]. [https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2019/07/Classifications\\_by\\_cancer\\_site](https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2019/07/Classifications_by_cancer_site).
- [ 5 ] 刘佳奇,王印. 湖北黄石重大砷污染致村民中毒案的经验与启示[J]. *环境保护*, 2015, 43(11): 61–64.  
Liu JQ, Wang Y. The experiences and inspirations on the serious Arsenic poisoning case at Huangshi city [J]. *Environmental Protection*, 2015, 43(11): 61–64.
- [ 6 ] 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.  
Environmental Protection Department. *China Population Exposure Parameters Manual (Adult Volume)*[M]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2013.
- [ 7 ] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I human health evaluation manual (Part A). EPA/540/1–89/002[R]. Washington DC: US EPA, 1989.
- [ 8 ] US EPA. Exposure factors handbook. EPA/600/R–090/052F[R]. Washington DC: US EPA, 2011.
- [ 9 ] 胡永兴,宿虎,张斌,等. 土壤重金属污染及其评价方法概述[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(17): 33–39.  
Hu YX, Su H, Zhang B, et al. Overview of soil heavy metal pollution and its evaluation methods [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(17): 33–39.
- [ 10 ] 曾令晗,宁栋梁,毛欣,等. 近 60 年大冶市三里七湖重金属污染沉积记录[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(4): 252–260.  
Zeng LH, Ning DL, Mao X, et al. Daye city sedimentary records of heavy metal pollution in sanliqihu lake over the past 60 years [J]. *Earth Environment*, 2014, 5(4): 252–260.
- [ 11 ] 滕彦国,度先国,倪师军,等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染:选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002(2): 7–9, 48.  
Teng YG, Tuo XG, Ni SJ, et al. Applying Geo-accumulation Index to Assess Heavy Metal Pollution in Sediment: Influence of Different Geochemical Background [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002(2): 7–9, 48.
- [ 12 ] 中华人民共和国环境保护部. HJ 25.3–2019 《污染场地风险评估技术导则》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
北京. HJ 25.3–2019 Technical Guidelines for Risk Assessment of Contaminated Sites [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [ 13 ] 李良忠,胡国成,张丽娟,等. 矿区家庭灰尘中重金属污染及其潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(4): 1230–1238.  
Li LZ, Hu GC, Zhang LJ, et al. The pollution and potential ecological risk assessment of the heavy metals in household dusts from mineral areas [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(4): 1230–1238.
- [ 14 ] 国家环境保护局主持,中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
China National Environmental Monitoring Centre. *Soil Element Background Values in China* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [ 15 ] Salazar–Camacho C, Salas–Moreno M, Marrugo–Madrid S, et al. A human health risk assessment of methylmercury, Arsenic and metals in a tropical river basin impacted by Gold mining in the Colombian Pacific region [J]. *Environmental Research*, 2022, 212(Pt B): 113120.
- [ 16 ] Botle A, Salgaonkar S, Tiwari R, et al. Brief status of contamination in surface water of rivers of India by heavy metals: a review with pollution indices and health risk assessment [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(6): 2779–2801.
- [ 17 ] Chen R, Han L, Liu Z, et al. Assessment of Soil–Heavy metal pollution and the health risks in a mining area from southern Shaanxi province, China [J]. *Toxics*, 2022, 10(7): 385.
- [ 18 ] Salcedo SER, Martínez J, Morales MM, et al. Ecological and health risk assessment of potential toxic elements from a mining area (water and sediments): the San Juan–Taxco river system, Guerrero [J]. *Water*, 2022, 14(4): 518.
- [ 19 ] Ngo HTT, Watchalayann P, Nguyen DB, et al. Environmental health risk assessment of heavy metal exposure among children living in an informal e–waste processing village in Viet Nam [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 142982.

- 290-291, 301.
- [7] 韩玉, 彭杨灵, 曲波, 等. 计划行为理论及其在医学中的应用[J]. 实用预防医学, 2015, 22(6): 763-765.  
Han Y, Peng YL, Qu B, et al. Study on the theory of planned behavior and its application in medicine[J]. Practical Preventive Medicine, 2015, 22(6): 763-765.
- [8] Jha SS, Dobe M, Taklikar C, et al. School-based intervention on behavioral intention of adolescents regarding healthy diet in India[J]. Front Public Health, 2023, 11: 1094960.
- [9] Arrizabalaga-López M, Rada-Fernández de Jáuregui D, Portillo MDP, et al. A theory-based randomized controlled trial in promoting fruit and vegetable intake among schoolchildren: PROFRUVE study [J]. European Journal of Nutrition, 2020, 59(8): 3517-3526.
- [10] 沈艳辉, 姜秀春, 孟毅, 等. 2017 年北京市中小学生学习营养状况及饮食行为分析[J]. 现代预防医学, 2019, 46(1): 40-43, 57.  
Shen YH, Jiang XC, Meng Y, et al. Nutritional status and dietary behaviors of primary and middle school students in Beijing, 2017[J]. Modern Preventive Medicine, 2019, 46(1): 40-43, 57.
- [11] 苏彦萍, 王鹏, 江南, 等. 2018 年北京市通州区中小学生学习零食行为与家庭相关因素影响研究 [J]. 预防医学论坛, 2021, 27(9): 674-679.  
Su YP, Wang P, Jiang N, et al. Study on relationship between snacks consumption and family-related factors of primary and secondary school students, Tongzhou district, Beijing city, 2018 [J]. Preventive Medicine Tribune, 2021, 27(9): 674-679.
- [12] 张曼, 王行, 杨素芳, 等. 青海省农牧区高年级小学生零食行为现状[J]. 中国学校卫生, 2023, 44(6): 819-823, 827.  
Zhang M, Wang H, Yang SF, et al. Status of snack behavior of Senior primary school students in agricultural and pastoral areas of Qinghai Province [J]. Chinese Journal of School Health, 2023, 44(6): 819-823, 827.
- [13] 刘峥, 郭欣, 符筠. 北京市中小学生学习 2013 年水饮料零食消费状况[J]. 中国学校卫生, 2017, 38(7): 1066-1068.  
Liu Z, Guo X, Fu J. Consumption of water drinks and snacks among primary and secondary school students in Beijing in 2013[J]. Chinese Journal of School Health, 2017, 38(7): 1066-1068.
- [14] 张曼, 闫心语, 李亦斌, 等. 中国城市高年级小学生零食消费现状[J]. 中国学校卫生, 2019, 40(2): 171-174.  
Zhang M, Yan XY, Li YB, et al. Snack food consumption among grade four and grade five primary school students in six cities of China[J]. Chinese Journal of School Health, 2019, 40(2): 171-174.
- [15] 戴杨, 徐通, 马永红, 等. 学龄前儿童饮食行为及其影响因素研究[J]. 中国儿童保健杂志, 2018, 26(3): 243-246.  
Dai Y, Xu T, Ma YH, et al. Study on the status and influencing factors for eating behaviors of preschool children [J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2018, 26(3): 243-246.
- [16] 吴岷, 王质蕙, 殷芳媛, 等. 四城市学龄儿童放学后零食消费行为调查[J]. 上海预防医学, 2016, 28(7): 459-463.  
Wu M, Wang ZH, Yin FY, et al. Study on snack-eating behaviors after school among school aged children in four cities [J]. Shanghai Journal of Preventive Medicine, 2016, 28(7): 459-463.
- [17] Wang CW, Chen DR, Chan CC, et al. I knew I should stop, but I couldn't control myself: a qualitative study to explore the factors influencing adolescents' consumption of sugar-sweetened beverages and sugary snacks from a socio-ecological perspective [J]. Public Health Nutrition, 2022, 25(9): 2465-2474.
- [18] 阿丽亚·依加提, 张亚迪, 肖卓然, 等. 社会心理决定因素与小学生零食摄入行为的关联 [J]. 中国学校卫生, 2022, 43(9): 1363-1366, 1371.  
Aliya Y, Zhang YD, Xiao ZR, et al. Association between psychosocial determinants with primary school students snacking behavior [J]. Chinese Journal of School Health, 2022, 43(9): 1363-1366, 1371.
- [19] Chen BY, Kattelman K, Comstock C, et al. Parenting styles, food parenting practices and dietary intakes of preschoolers [J]. Nutrients, 2021, 13(10): 3630.
- [20] 倪慧娟, 邹淑蓉, 陈毅琼, 等. 家长对小学生零食消费相关行为的影响[J]. 环境与职业医学, 2011, 28(6): 335-337, 341.  
Ni HJ, Zou SR, Chen YQ, et al. Impact of parents on snacks consumption among primary school children[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2011, 28(6): 335-337, 341.
- [21] 倪慧娟, 邹淑蓉, 陈毅琼, 等. 上海市静安区小学生零食消费及其与家长知识态度关系 [J]. 中国学校卫生, 2012, 33(2): 158-159, 161.  
Ni HJ, Zou SR, Chen YQ, et al. Status of snacks consumption among pupils and correlations with their parents' knowledge and attitude in Jing'an District in Shanghai [J]. Chinese Journal of School Health, 2012, 33(2): 158-159, 161.

收稿日期: 2023-07-18

(上接第 39 页)

- [20] 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 等. 昆明市土壤重金属污染特征及其生态与健康风险评价[J]. 轻工学报, 2022, 37(4): 118-126.  
Wang J, Gong J, Liu YJ, et al. Ecological and health risk assessment of heavy metals in urban soils from a typical southwest capital city[J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Natural Science Edition), 2022, 37(4): 118-126.
- [21] 周少磊, 刘波, 王鹏, 等. 北京市通州区农村饮用水神暴露健康风险评估[J]. 预防医学, 2022, 34(7): 705-709.  
Zhou SL, Liu B, Wang P, et al. Health risk assessment of Arsenic exposure in rural drinking water in Tongzhou District, Beijing Municipality[J]. Journal of Preventive Medicine, 2022, 34(7): 705-709.

收稿日期: 2023-07-12