

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20240815001

曾晓丽, 李惠民, 樊艳春, 等. 基于蒙特卡罗模拟的金属矿区周边农田土壤重金属健康风险评估[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(1): 432-439

ZENG X L, LI H M, FAN Y C, et al. Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metals in agricultural soil surrounding metal mining areas [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(1): 432-439

基于蒙特卡罗模拟的金属矿区周边农田土壤重金属健康风险评估

曾晓丽^{1,2}, 李惠民¹, 樊艳春¹, 梅子奇¹, 杨秀琼¹, 赵刚^{1,*}

1. 江西省生态环境科学研究与规划院, 环境污染防治江西省重点实验室, 南昌 330039

2. 南昌大学资源与环境学院, 南昌 330031

收稿日期: 2024-08-15 录用日期: 2024-10-15

摘要: 为评估赣西北典型金属矿区周边农田的污染特征和人体健康风险, 采集了矿区周边农田表层土壤样品, 测定了镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)和锌(Zn) 8种重金属含量, 采用蒙特卡罗模拟的健康风险评估模型进行了土壤重金属健康风险评价。结果表明, 除 Hg、As 和 Zn 外, 研究区土壤重金属 Cd、Pb、Cr、Cu 和 Ni 的含量均值均大于土壤背景值, 其中 Cd、As 和 Ni 均存在超过风险筛选值的样点, 超过比率分别为 29.17%、4.17% 和 37.50%; 基于蒙特卡罗模拟的概率风险评估结果表明研究区土壤重金属的累积对成人和儿童整体均表现为不存在非致癌风险, 存在可接受致癌风险, 对儿童的健康风险均高于成人, 其中 As 是致癌风险的主要因素。

关键词: 重金属; 农田土壤; 健康风险评价; 蒙特卡罗模拟

文章编号: 1673-5897(2025)1-432-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Monte Carlo Simulation-based Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soil Surrounding Metal Mining Areas

ZENG Xiaoli^{1,2}, LI Huimin¹, FAN Yanchun¹, MEI Ziqi¹, YANG Xiuqiong¹, ZHAO Gang^{1,*}

1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control, Jiangxi Academy of Eco-Environmental Sciences and Planning, Nanchang 330039, China

2. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Received 15 August 2024 accepted 15 October 2024

Abstract: To assess the pollution characteristics and human health risks of heavy metals in farmland surrounding typical metal mining areas in the northwest of Jiangxi Province, surface soil samples were collected from the farmland near the mining area. The concentrations of eight heavy metals, including cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu), nickel (Ni), and zinc (Zn), were determined. A health risk assessment model based on Monte Carlo simulation was used to evaluate the health risks of soil heavy metals. The results indicated that, except for Hg, As, and Zn, the mean concentrations of Cd, Pb, Cr, Cu, and Ni in the study area's soil were all greater than the background values, with Cd, As, and Ni having sample points exceeding the risk

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1700802); 环境污染防治江西省重点实验室项目(2023SSY02011)

第一作者: 曾晓丽(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为耕地土壤重金属源解析及风险评估, E-mail: 1121568859@qq.com

* 通信作者 (Corresponding author), E-mail: zhaogang6766@126.com

screening values at rates of 29.17%, 4.17%, and 37.50%, respectively. The probabilistic risk assessment based on Monte Carlo simulation showed that the cumulative effects of soil heavy metals in the study area posed no non-carcinogenic risk and an acceptable carcinogenic risk to both adults and children. The health risks to children were higher than those to adults, with As being the primary factor contributing to the carcinogenic risk.

Keywords: heavy metals; agricultural soil; health risk assessment; Monte Carlo simulation

0 引言

土壤是构成生态系统的基本要素之一,是人类生存和发展不可或缺的宝贵资源。伴随矿山开采过程中的“三废”排放,周边土壤面临着有毒重金属元素释放和积累的问题^[1-2]。土壤中重金属的存在不仅会降低土壤质量,影响作物产量和品质,还会通过食物链积累、吸入粉尘、皮肤接触等途径对人体健康构成风险^[3-6]。如土壤镉暴露会对肾功能产生不利影响,而铅会抑制血液中的 ALA 脱水酶和亚铁螯合酶,并对中枢神经系统有害^[7-8]。马杰等^[9]评估了重庆市某煤矸石山周边土壤中重金属的健康风险,发现存在可耐受致癌健康风险。刘洋等^[10]研究了云南省某受铜矿影响的土壤重金属健康风险,评估结果显示该研究区域土壤致癌风险已超过可接受水平,并且儿童患癌症的风险更高。

目前常用的土壤健康风险评价模型主要是采用美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)推荐的健康风险(HRA)模型,主要方法包括对土壤重金属浓度和暴露参数进行定量评估,包含经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入^[11]。需要指出的是,同一人群的生理和代谢参数存在个体差异,因此难以使用具有确定性的参数来准确估计风险水平^[12]。常用的平均值或中位值点估计值不能反映参数变异对风险不确定的影响。引入概率风险评价能够了解风险的分布情况,有效降低实际风险评价过程中的结果偏离实际问题^[13]。与贝叶斯网络和人工神经网络等相比,蒙特卡罗模拟能有效改善传统模型的不足,所需的数据量更小,可以通过产生随机数来减少健康风险评估中的不确定性^[14-16]。

江西省是全国十大有色金属重点省份之一,亦是中国 13 个粮食主产区之一。有文献报道江西省被重金属污染的农田已占耕地总面积的 14.2%^[17]。近年来,赣西北、赣东北等区域采矿业和冶金行业在带动经济发展的同时也可能导致重金属进入周边环境,引起耕地土壤污染。有文献报道江西省部分钨矿和铜矿周边农田土壤镉、铜等重金属污染较为严重^[18]。因此,对江西省内典型金属矿区周边农田土

壤开展重金属污染健康风险评估意义重大。本研究以赣西北某金属矿区为研究对象,分析周边农田土壤污染状况,同时采用蒙特卡罗模拟对土壤中重金属健康风险进行评估,以为当地及全省矿区周边农田土壤健康防范措施的制定提供科学依据。

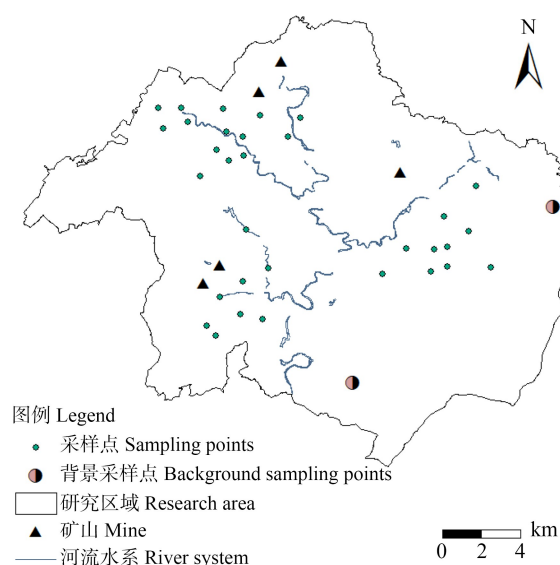
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省赣西北某金属矿区,气候属温和湿润的亚热带季风气候,地形以丘陵山地为主。研究区拥有丰富的煤矿、铁矿等矿产资源,有多处矿山开采。耕地土壤主要是以水田为主,水稻为研究区主要农作物。

1.2 样品的采集与测定

根据研究区地形、土地利用等情况采用带状布点法和网格布点法相结合的方法进行矿区周边农田样点的采集(图 1),在每个样点收集含有 0 ~ 20 cm 表土的 1 kg 土壤样品,共采集 34 个表层土壤样品,其中包括 2 个背景样点。样品采集完毕后保存在自密封聚乙烯袋中。



注:该图基于审图号为赣 S(2020)001 号标准地图制作。

图 1 研究区采样点图

Fig. 1 Sampling point map of the research area

所有土壤样品随后在室温下风干。通过 0.15 mm 的筛子筛分样品以去除石头和碎屑,最后密封在塑料袋中进行后续化学分析。土壤中 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 和 As 重金属元素的含量采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)测定,Hg 的含量采用原子荧光光度法测定。为确保分析的质量和可靠性,我们在测试方案中加入了国家标准土壤样品(GSS-3a)以及相关土壤样品。每种元素的回收率在 93% ~ 111% 之间。

1.3 基于蒙特卡罗模拟的概率健康风险评估

采用美国环境保护局(United States Environmental Protection Agency, US EPA)推荐的 HRA 模型评估该研究区域的土壤健康风险^[19]。考虑到不同人群在行为和生理上的差异,本研究分别对成人和儿童的健康风险进行了评估。土壤中的重金属主要通过 3 种暴露方式(经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入)对人体健康造成危害^[20-21]。计算公式如下:

$$ADD_{i,ingest}=\frac{C_i\times R_{ingest}\times EF\times ED}{BW\times AT}\times 10^{-6}$$

(1)

$$ADD_{i,dermal}=\frac{C_i\times SA\times SL\times ABF\times EF\times ED}{BW\times AT}\times 10^{-6}$$

(2)

$$ADD_{i,inhal}=\frac{C_i\times R_{inhal}\times EF\times ED}{PEF\times BW\times AT}$$

(3)

式中:ADD_{*i,ingest*}、ADD_{*i,dermal*} 和 ADD_{*i,inhal*} 分别表示经口摄入、皮肤接触和呼吸吸入的每日平均暴露剂量;C_{*i*}为表土重金属*i*的浓度。其他参数含义见表 1,暴露参数参照中国人群暴露参数手册(儿童版、成人版)^[22-24]和相关文献^[25]。

非致癌风险由总危害指数(HI)来确定,HI 是不同暴露方式下的危害系数(HQ)的总和;致癌风险是通过不同重金属的总致癌风险值(TCR)来评估的。计算公式如下:

$$HI=\sum HQ=\sum \frac{ADD_i}{RfD_i}$$

(4)

$$TCR=\sum CR=\sum ADD_i\times SF_i$$

(5)

式中:RfD_{*i*}为重金属元素*i*的参考剂量;SF_{*i*}为重金属元素*i*的致癌斜率因子。具体取值见表 2^[26-28]。当 HQ 或 HI>1 时,说明对人体有潜在的不良影响,

表 1 基于蒙特卡罗的重金属健康风险评估参数取值

Table 1 Parameter values for heavy metal health risk assessment based on Monte Carlo simulation

参数	含义	单位	儿童	成人	分布类型
R _{ingest}	土壤颗粒摄入速率	mg·d ⁻¹	66、103 和 161	4、30 和 52	三角
EF	暴露频率	d·a ⁻¹	180、345 和 365		三角
ED	暴露期	a	6	24	单点
BW	体质量	kg	16.68 和 1.48	57.03 和 1.18	正态
AT	平均暴露时间	d	365×ED(非致癌)和 365×70(致癌)		单点
SA	皮肤暴露面积	m ²	0.23	0.54	单点
SL	皮肤黏附系数	mg·cm ⁻²	0.65 和 1.2	0.49 和 0.54	对数正态
ABF	皮肤吸收因子	量纲为 1	0.001(非致癌)和 0.01(致癌)		单点
R _{inhal}	土壤颗粒吸入速率	mg·d ⁻¹	8.6	19	单点
PEF	颗粒物释放因子	m ³ ·kg ⁻¹	1.36×10 ⁹		单点

表 2 重金属参考剂量和斜率因子取值

Table 2 Reference dose and slope factor values for heavy metals

重金属	参考剂量(RfD _{<i>i</i>})/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)			致癌斜率因子(SF _{<i>i</i>})/(kg·d·mg ⁻¹)		
	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	经口摄入	皮肤接触	呼吸吸入
Ni	2.00E-02	5.40E-03	2.06E-02			8.40E-01
Cu	4.00E-02	1.20E-02	4.02E-02			
Zn	3.00E-01	6.00E-02	3.00E-01			
Cd	1.00E-03	1.00E-05	1.00E-05	6.10E+00		6.30E+00
As	3.00E-04	1.23E-04	1.23E-04	1.50E+00	3.66E+00	1.51E+01
Cr	3.00E-03	6.00E-05	2.86E-05	8.50E-03		4.20E+01
Pb	3.50E-03	5.25E-04	3.52E-03	8.50E-03		
Hg	3.00E-04	2.10E-05	8.57E-05			

反之则致癌风险可以被忽略^[29]。当 CR 或 TCR $\leq 1.00\text{E}-06$ 时,表示致癌风险非常低,不显著,当 $1.00\text{E}-06 < \text{CR}$ 或 $\text{TCR} \leq 1.00\text{E}-04$ 时,致癌风险在可接受范围内,属于可以容忍的水平。而当 CR 或 $\text{TCR} > 1.00\text{E}-04$ 时,致癌风险超出可接受范围,属于不可接受的水平^[30]。

采用蒙特卡罗模拟对健康风险的概率分布进行表征。本研究使用 Oracle Crystal Ball 水晶球进行蒙特卡罗模拟,模拟浓度特异性,模拟次数设为 10 000 次,置信水平确定为 95%。

2 结果与讨论

2.1 研究区耕地土壤环境质量

研究区域土壤重金属含量特征如表 3 所示,pH 均值为 6.39,土壤整体呈酸性。Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量均值分别为 0.49、0.16、7.21、37.35、93.15、27.47、80.31 和 $86.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除了 Hg、As 和 Zn 的含量均值低于研究区土壤背景值外,Cd、Pb、Cr、Cu 和 Ni 的含量均值分别是土壤背景值的 3.52 倍、1.02 倍、1.56 倍、1.27 倍和 3.08 倍。以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[31]中污染风险筛选值为标准进行土壤重金属污染评价。其中 Cd、As 和 Ni 均存在超过风险筛选值的样点,超过比率分别为 29.17%、4.17% 和 37.50%。变异系数(CV)反映了土壤重金属概率分布的变异性和分散性,一般而言,CV 越大,说明受人为活动干扰程度越大^[32]。研究区域土壤重金属变异系数大小依次为: $\text{Ni} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Zn} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Cu} \geq \text{Pb}$ 。其中 Ni、As 和 Cd 的 CV 值较高,说明这 3 种元素受到人类活动影响较大。

2.2 基于蒙特卡罗模拟的概率健康风险评估

2.2.1 土壤重金属非致癌概率健康风险评估

基于蒙特卡罗模拟的非致癌健康风险评估结果如表 4 和图 2 所示。8 种重金属儿童和成人的非致癌风险指数(HQ)的均值均表现为 $\text{Cr} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn}$ 。儿童的综合非致癌健康风险指数(HI)和 95% 值分别为 $3.88\text{E}-01$ 和 $5.59\text{E}-01$,均小于 1,成人的 HI 和 95% 值分别为 $2.99\text{E}-02$ 和 $4.87\text{E}-02$,均小于 1,说明研究区域农田土壤重金属对儿童和成人带来的非致癌健康风险可以忽略。儿童的非致癌风险指数明显高于成人,表明土壤中重金属的累积对儿童的潜在健康影响更为显著。对成人和儿童而言,摄入途径风险指数均表现为:经口摄入>呼吸吸入>皮肤接触。

2.2.2 土壤重金属致癌概率健康风险评估

研究区重金属致癌风险指数概率分布图 3 可知,对于儿童而言,土壤重金属 Cd 和 As 的致癌风险均值和 95% 值均大于 $1.00\text{E}-06$,小于 $1.00\text{E}-04$,说明 Cd 和 As 均会对儿童造成可接受致癌风险,Pb、Cr 和 Ni 对儿童的致癌风险值均小于 $1.00\text{E}-06$,表明它们不存在致癌风险。儿童的总致癌风险值(TCR)均值和 95% 值分别为 $7.01\text{E}-06$ 和 $1.04\text{E}-05$,表明研究区土壤重金属累积对儿童存在可接受致癌风险。对于成人而言,As 的均值和 95% 值均大于 $1.00\text{E}-06$,小于 $1.00\text{E}-04$,说明 As 会对成人造成可接受致癌风险。成人的总致癌风险值(TCR)均值和 95% 值分别为 $2.37\text{E}-06$ 和 $3.81\text{E}-06$,表明研究区土壤重金属累积对成人存在可接受致癌风险。总体而言,研究区土壤重金属致癌概率健康风险评估表现为儿童的致癌健康风险高于成人,As 是主要的致癌元素,对儿童和成人均存在可接受致癌风险。

表 3 土壤重金属含量统计结果
Table 3 Statistical results of soil heavy metal content

统计值	pH ^①	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn
最大值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	7.85	1.42	0.29	21.97	48.99	149.97	34.18	260.00	165.09
最小值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	5.53	0.18	0.06	2.21	26.97	42.58	16.73	24.11	25.84
平均值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	6.39	0.49	0.16	7.21	37.35	93.15	27.47	80.31	86.52
标准差/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.27	0.06	4.27	5.52	24.11	4.12	59.45	42.26	0.27
变异系数(CV)		0.54	0.37	0.59	0.15	0.26	0.15	0.74	0.49
研究区土壤背景值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		0.14	0.18	17.4	36.5	59.9	21.6	26.1	89.8
	$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	0.4	0.5	30	100	250	50	70	200
风险筛选值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	0.6	0.6	25	140	300	100	100	250
	$\text{pH} \geq 7.5$	0.8	1	20	240	350	100	190	300

注:①pH 量纲为 1。

表 4 蒙特卡罗模拟的土壤重金属非致癌健康风险评价结果

Table 4 Results of Monte Carlo simulation for non carcinogenic health risk assessment of soil heavy metals

重金属	综合非致癌健康 风险指数(HI)	儿童			成人			
		HQ _i ,经口摄入	HQ _i ,皮肤接触	HQ _i ,呼吸吸入	HI	HQ _i ,经口摄入	HQ _i ,皮肤接触	HQ _i ,呼吸吸入
Cd	2.90E-03	2.88E-03	4.18E-07	1.77E-05	2.57E-04	2.45E-04	2.16E-07	1.14E-05
Hg	3.10E-03	3.10E-03	6.43E-08	6.66E-07	2.65E-04	2.64E-04	3.33E-08	4.31E-07
As	1.40E-01	1.40E-01	4.96E-07	2.10E-05	1.20E-02	1.19E-02	2.57E-07	1.36E-05
Pb	6.23E-02	6.23E-02	6.03E-07	3.80E-06	5.31E-03	5.31E-03	3.12E-07	2.46E-06
Cr	1.82E-01	1.81E-01	1.32E-05	1.17E-03	1.62E-02	1.54E-02	6.81E-06	7.54E-04
Cu	4.01E-03	4.01E-03	1.94E-08	2.45E-07	3.42E-04	3.41E-04	1.00E-08	1.58E-07
Ni	2.34E-02	2.34E-02	1.26E-07	1.40E-06	2.00E-03	2.00E-03	6.52E-08	9.03E-07
Zn	1.68E-03	1.68E-03	1.22E-08	1.03E-07	1.43E-04	1.43E-04	6.32E-09	6.68E-08

注:表中数据均为平均值。

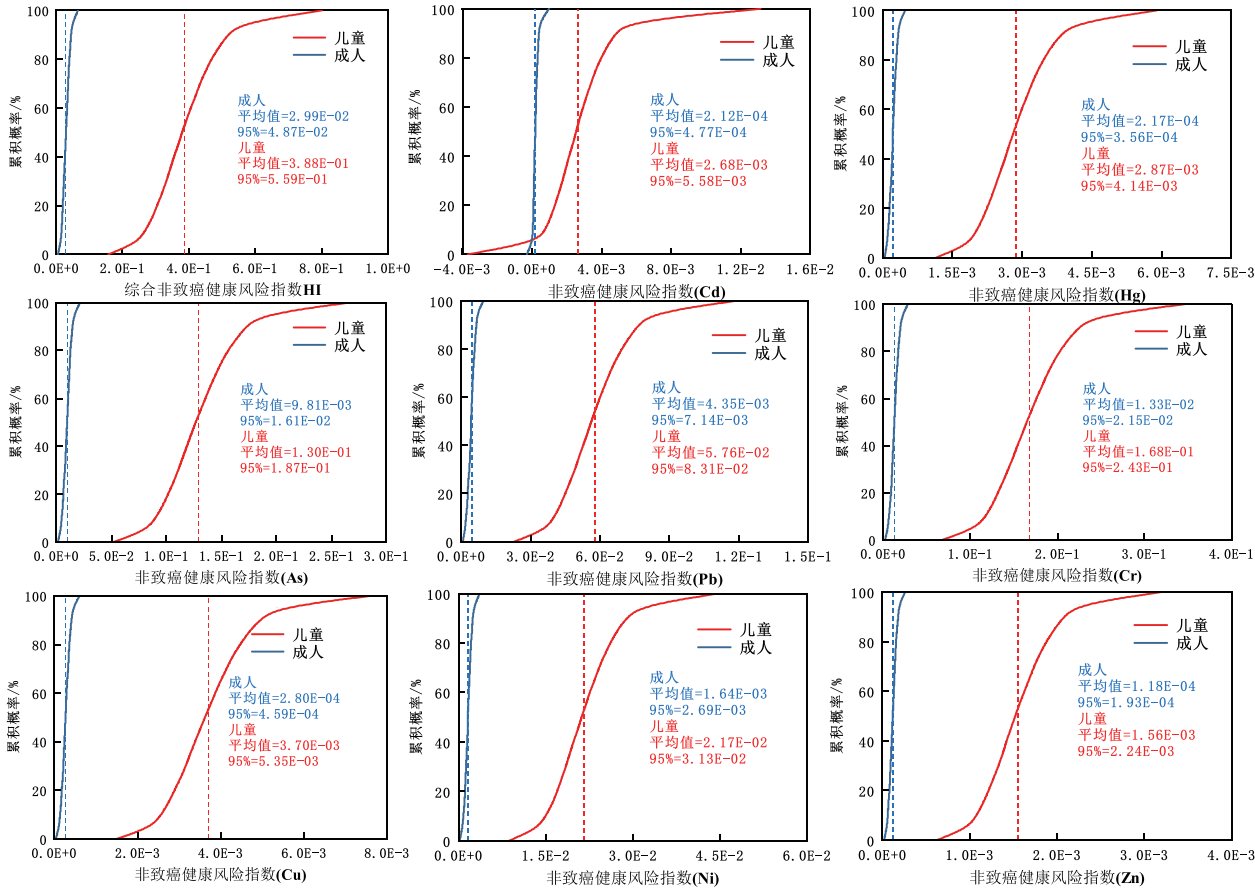


图 2 重金属非致癌风险指数概率分布

Fig. 2 Probability distribution of non carcinogenic risk index for heavy metals

3 结束语

综上所述,研究区土壤重金属除 Hg、As 和 Zn 外,Cd、Pb、Cr、Cu 和 Ni 的含量均值都大于土壤背景值,分别是土壤背景值的 3.52 倍、1.02 倍、1.56

倍、1.27 倍和 3.08 倍。其中 Cd、As 和 Ni 均存在超过风险筛选值的样点,超过比率分别为 29.17%、4.17%和 37.50%。基于蒙特卡罗模拟的金属矿区周边农田土壤重金属概率风险评估可知,研究区土

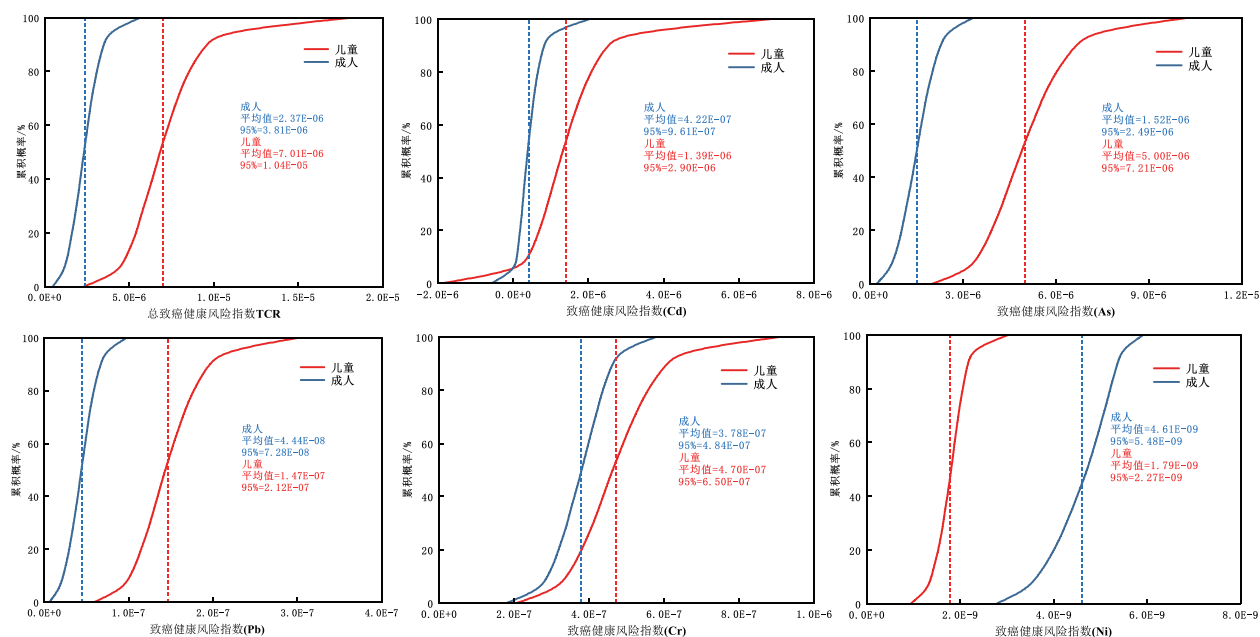


图 3 重金属致癌风险指数概率分布

Fig. 3 Probability distribution of carcinogenic risk index of heavy metal

壤中最主要的致癌重金属元素为 As,对儿童和成人均存在可接受致癌风险,前人研究也有类似报道^[33-35]。这可能与 As 的致癌斜率因子(SF)数值较大有关,长期暴露于 As 环境中可能导致肺、肾、肝等内脏的癌变^[36]。从综合健康风险评估结果来看,研究区土壤重金属的累积对成人和儿童整体来说,非致癌风险可以忽略不计,存在的致癌风险属于可接受范围,对儿童的健康风险均高于成人,与 LEI 等^[37]和 JIANG 等^[38]的研究结果一致,这可能是由于儿童的生理和行为模式对污染物的敏感性更高有关。应重视当地矿区周边儿童土壤重金属暴露的健康风险,加强区域土壤 Cd 和 As 等重金属的监测与来源管理,降低人群(尤其是儿童)的暴露风险,保护人体健康与生态环境安全。

通信作者简介:赵刚(1985—),男,博士,副研究员,主要研究方向为土壤环境化学与污染修复。

4 参考文献

- [1] LI Y N, LIU S, ZHAN C L, et al. Source-based health risk assessment of heavy metal contamination in soil: a case study from a polymetallic mining region in South-eastern Hubei, Central China[J]. Environmental geochemistry and health, 2023, 46(1): 12.
- [2] 陈航,王颖,王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2719-2731.
- [3] CHEN H, WANG Y, WANG S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. Environmental science, 2022, 43(5): 2719-2731.
- [4] FEI X F, LOU Z H, XIAO R, et al. Contamination and health risk assessment of heavy metal pollution in soils developed from different soil parent materials[J]. Exposure and health, 2023, 15(2): 395-408.
- [5] SUN Q F, SUN Z A, XING W G, et al. Ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil of Changchun new area[J]. Polish journal of environmental studies, 2021: 30(6): 5775-5787.
- [6] XU X B, HU X Y, WANG T, et al. Non-inverted U-shaped challenges to regional sustainability: the health risk of soil heavy metals in coastal China[J]. Journal of cleaner production, 2021, 279: 123746.
- [7] WANG X P, WANG L Q, ZHANG Q, et al. Integrated assessment of the impact of land use types on soil pollution by potentially toxic elements and the associated ecological and human health risk[J]. Environmental pollution, 2022, 299: 118911.
- [8] LI Y Z, CHEN H Y, TENG Y G. Source apportionment and source-oriented risk assessment of heavy metals in the sediments of an urban river-lake system[J]. Science of

- the total environment, 2020, 737: 140310.
- [8] ZHAO K L, ZHANG L Y, DONG J Q, et al. Risk assessment, spatial patterns and source apportionment of soil heavy metals in a typical Chinese hickory plantation region of southeastern China [J]. *Geoderma*, 2020, 360: 114011.
- [9] 马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 等. 基于蒙特卡罗模拟的煤矸山周边农用地土壤重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, 44(10): 5666-5678.
- MA J, SHE Z L, WANG S L, et al. Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around the gangue heap of coal mine based on Monte Carlo simulation[J]. *Environmental science*, 2023, 44(10): 5666-5678.
- [10] 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 等. 云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 936-945.
- LIU Y, HE Z H, NIU X K, et al. Health risk assessment of soil heavy metals in a small watershed of a mining area in Yunnan[J]. *Environmental science*, 2022, 43(2): 936-945.
- [11] ZHAO R, GUAN Q Y, LUO H P, et al. Fuzzy synthetic evaluation and health risk assessment quantification of heavy metals in Zhangye agricultural soil from the perspective of sources[J]. *Science of the total environment*, 2019, 697: 134126.
- [12] 刘海, 魏伟, 黄健敏, 等. 长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1686-1697.
- LIU H, WEI W, HUANG J M, et al. Heavy metal pollution characteristics and health risk assessment of soil-crops system in Anhui section of the Yangtze River Basin [J]. *Environmental science*, 2023, 44(3): 1686-1697.
- [13] RUAN D M, BIAN J M, WANG Y, et al. Identification of groundwater pollution sources and health risk assessment in the Songnen Plain based on PCA-APCS-MLR and trapezoidal fuzzy number-Monte Carlo stochastic simulation model[J]. *Journal of hydrology*, 2024, 632: 130897.
- [14] TONG R P, YANG X Y, SU H R, et al. Levels, sources and probabilistic health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in the agricultural soils from sites neighboring suburban industries in Shanghai[J]. *Science of the total environment*, 2018, 616: 1365-1373.
- [15] DING D, KONG L Y, JIANG D D, et al. Source apportionment and health risk assessment of chemicals of concern in soil, water and sediment at a large strontium slag pile area[J]. *Journal of environmental management*, 2022, 304: 114228.
- [16] HUANG J L, WU Y Y, SUN J X, et al. Health risk assessment of heavy metal(loid)s in park soils of the largest megacity in China by using Monte Carlo simulation coupled with positive matrix factorization model[J]. *Journal of hazardous materials*, 2021, 415: 125629.
- [17] 黄国勤. 江西省土壤重金属污染研究 Ⅲ. 不同类型和深度土壤重金属污染状况[C]/2015 年中国环境科学学会学术年会论文集. 深圳: 江西农业大学生态科学研究中心, 2015: 490-498.
- [18] 戴清文, 曾志明, 王继玉, 等. 江西省主要金属厂矿对畜牧业影响的初步调查[J]. *农业环境科学学报*, 1993, 12(3): 124-126.
- DAI Q W, ZENG Z M, WANG J Y, et al. Preliminary investigation on the influence of main metal factories and mines on animal husbandry in Jiangxi Province[J]. *Journal of agro-environmental science*, 1993, 12(3): 124-126.
- [19] 黄安香, 柏文恋, 邹能英, 等. 贵州油茶主产区土壤重金属环境质量状况及风险评估[J]. *环境化学*, 2023, 42(4): 1325-1336.
- HUANG A X, BAI W L, WU N Y, et al. Pollution and risk assessment of heavy metals in *Camellia oleifera* main producing area soil of Guizhou Province[J]. *Environmental chemistry*, 2023, 42(4): 1325-1336.
- [20] CAO S Z, DUAN X L, ZHAO X G, et al. Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China[J]. *Science of the total environment*, 2014, 472: 1001-1009.
- [21] WANG M S, HAN Q, GUI C L, et al. Differences in the risk assessment of soil heavy metals between newly built and original parks in Jiaozuo, Henan Province, China[J]. *Science of the total environment*, 2019, 676: 1-10.
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(儿童卷:0~5岁)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 魏洪斌, 罗明, 向垒, 等. 金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估[J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2461-2472.
- WEI H B, LUO M, XIANG L, et al. Health risk assessment of heavy metals in farmland soils and crops around metal mines[J]. *Environmental science*, 2024, 45(4): 2461-2472.
- [26] GU Y G, LIN Q, GAO Y P. Metals in exposed-lawn soils from 18 urban parks and its human health implications in Southern China's largest city, Guangzhou[J]. *Journal of cleaner production*, 2016, 115: 122-129.

- [27] LIU Z, DU Q Q, GUAN Q Y, et al. A Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metals in soils of an oasis agricultural region in northwest China[J]. *Science of the total environment*, 2023, 857: 159543.
- [28] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 805-812.
- ZHANG C L, ZHANG W P, CHENG H D, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou City[J]. *Environmental chemistry*, 2019, 38(4): 805-812.
- [29] 郭志娟, 周亚龙, 王乔林, 等. 雄安新区土壤重金属污染特征及健康风险[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 431-441.
- GUO Z J, ZHOU Y L, WANG Q L, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiongan New District[J]. *China environmental science*, 2021, 41(1): 431-441.
- [30] 吴凯章, 刘明, 罗中华, 等. 大宝山多金属矿区周边大气重金属来源解析与风险评估[J/OL]. *中国环境科学*. [2024-08-15]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230811.001>.
- WU K Z, Liu M, LUO Z H, et al. Source analysis and risk assessment of atmospheric heavy metals around the Dabaoshan polymetallic mining area[J]. *China environmental science*. [2024-08-15]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230811.001>.
- [31] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 生态环境部, 2018.
- [32] 杨博, 熊健, 李伟, 等. 基于蒙特卡罗模拟的拉萨城区土壤重金属健康风险评估[J]. *环境化学*, 2024, 43(4): 1339-1352.
- YANG B, XIONG J, LI W, et al. Health risk assessment of soil heavy metals in Lhasa urban area based on Monte Carlo simulation[J]. *Environmental chemistry*, 2024, 43(4): 1339-1352.
- [33] 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 等. 香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, 43(12): 5728-5741.
- CHEN Y J, QU X C, ZHANG B, et al. Ecological and health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of Xianghe County[J]. *Environmental science*, 2022, 43(12): 5728-5741.
- [34] LI J, LI C, SUN H J, et al. Arsenic relative bioavailability in contaminated soils: comparison of animal models, dosing schemes, and biological end points[J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(1): 453-461.
- [35] TSENG W P. Effects and dose: response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic[J]. *Environmental health perspectives*, 1977, 19: 109-119.
- [36] 郑立龙, 张德程, 郝连成, 等. 广东雷州东部土壤重金属分布特征、来源分析及健康风险评估[J]. *中国地质*. [2024-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240618.1339.002.html>
- ZHENG L L, ZHANG D C, HAO L C, et al. Distribution characteristics, source analysis, and health risk assessment of heavy metals in soils in eastern Leizhou, Guangdong Province[J]. *Geology of China*. [2024-08-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20240618.1339.002.html>
- [37] LEI M, LI K, GUO G H, et al. Source-specific health risks apportionment of soil potential toxicity elements combining multiple receptor models with Monte Carlo simulation[J]. *Science of the total environment*, 2022, 817: 152899.
- [38] JIANG H H, CAI L M, WEN H H, et al. An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals[J]. *Science of the total environment*, 2020, 701: 134466. ◆