

# 2018-2022年某县镉和铅多暴露途径的健康风险评估

王苏玮,刘毅刚,安玉琴,袁树华,郝海燕,丁婷婷

(河北省疾病预防控制中心环境卫生监测与评价所,河北 石家庄 050021)

**摘要:**目的 评估某县大气细颗粒物( $PM_{2.5}$ )、饮用水、土壤中镉和铅的人群健康风险。方法 收集2018—2022年某县大气 $PM_{2.5}$ 、饮用水、土壤中镉和铅的监测数据,运用环境健康风险评估模型分析镉和铅浓度中位数的致癌风险和慢性非致癌风险。分析不同暴露途径占比情况和不同年份结果的变化。结果 镉和铅的致癌风险为 $8.02\times 10^{-7}$ 、 $2.50\times 10^{-7}$ ,均小于 $1\times 10^{-6}$ ,处于可接受水平。镉和铅慢性非致癌风险为 $6.95\times 10^{-2}$ 、 $1.09\times 10^{-2}$ ,危害系数均小于1,不会造成显著损害。不同暴露途径的致癌风险对比,镉、铅为大气 $PM_{2.5}$ 吸入途径占比最高。不同途径的慢性非致癌风险对比,镉为大气 $PM_{2.5}$ 吸入途径占比最高,铅为饮用水经口摄入途径占比最高。2022年镉和铅致癌风险和慢性非致癌风险均比2018年有所下降。结论 2018—2022年某县镉、铅的健康风险处于可接受水平,不同途径的健康风险对比中,空气 $PM_{2.5}$ 吸入途径占比最高,应加强当地大气 $PM_{2.5}$ 监测与污染管理。

**关键词:**镉;铅;健康风险评估;大气细颗粒物;饮用水;土壤;多暴露途径

中图分类号:R12

文献标志码:A

## Health risk assessment of cadmium and lead in a certain county with multi-pathways from 2018 to 2022

WANG Suwei, LIU Yigang, AN Yuqin, YUAN Shuhua, HAO Haiyan, DING Tingting

(Environmental Health Monitoring and Evaluation Institute, Hebei Province Center for Disease Prevention and Control, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

**Abstract: Objective** To evaluate the health risks of cadmium and lead in air fine particulate ( $PM_{2.5}$ ), drinking water, and soil of a certain county. **Methods** The monitoring data of cadmium and lead in the air  $PM_{2.5}$ , drinking water, and soil of a certain county from 2018 to 2022 were collected. The environmental health risk assessment model was applied to evaluate both carcinogenic risk and chronic non-carcinogenic risk caused by median concentration of cadmium and lead. The proportion of different exposure routes and the change of results in different years were analyzed. **Results** The carcinogenic risk values were  $8.02\times 10^{-7}$  for cadmium, and  $2.50\times 10^{-7}$  for lead, which were less than  $1\times 10^{-6}$  and at an acceptable level. The chronic non-carcinogenic risk values were  $6.95\times 10^{-2}$  for cadmium, and  $1.09\times 10^{-2}$  for lead. The hazard coefficients were less than 1 and had no significant harm. The comparison of carcinogenic risks through different pathways showed that cadmium and lead had the highest proportion of  $PM_{2.5}$  inhalation in the air. The comparison of chronic non-carcinogenic risks through different pathways showed that cadmium had the highest proportion of inhalation pathways in air  $PM_{2.5}$ , while lead had the highest proportion of oral intake pathways in water. The carcinogenic and chronic non-carcinogenic risks of cadmium and lead were both lower in 2022 than in 2018. **Conclusion** From 2018 to 2022, the chronic non-carcinogenic risks and carcinogenic risks of cadmium and lead were at an acceptable level in the county. The proportion of  $PM_{2.5}$  inhalation route was the highest in the comparison of health risk of different routes, so the monitoring and pollution management of  $PM_{2.5}$  should be strengthened.

**Key words:** Cadmium; Lead; Health risk assessment; Fine particulate; Drinking water; Soil; Multi-pathways

空气、饮用水、土壤的卫生安全关系到每一个人的身体健康,镉(cadmium, Cd)、铅(lead, Pb)等污染物在各种环境介质中屡被检出。Cd和Pb主要通过经口摄入、吸入、皮肤接触等暴露途径进入人体,具有高毒性、持久性长、难降解、生物富集等特点,对生命安全构成巨大威胁,甚至可能导致癌症<sup>[1-3]</sup>。根据国际癌症研究机构致癌物分类清单、美国国家环保局综合风险信息查询系统和加利福尼亚州环境健康危害评估办公室化学物查询系统,Cd是1类致癌物,有明确的泌尿系统毒性;Pb为2B类致癌物,有发育毒性和生殖毒性<sup>[4-6]</sup>。

我国环境健康风险评估工作已进行20余年,针对Cd和Pb的健康风险相关研究多侧重于单一暴露介质或单一暴露途径,多介质的多暴露途径的综合健康风险研究较少<sup>[3,7]</sup>。本文依据《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777—2021)<sup>[8]</sup>,结合本地2018—2022年的环境监测数据,定量描述某县大气细颗粒物(fine particulate, PM<sub>2.5</sub>)、饮用水、土壤中Cd和Pb多途径暴露对居民身体健康造成危害的可能性,以期对环境健康评价指标体系的构建、环境健康相关标准的修订提供参考,为开展环境健康精准防控和提高居民环境风险防护意识提供依据<sup>[9]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据

某县大气PM<sub>2.5</sub>、饮用水、土壤中重金属Cd和Pb浓度数据来自于环境健康综合监测系统。大气PM<sub>2.5</sub>样本按照《环境空气质量手工监测技术规范》(HJ/T 194—2017)<sup>[10]</sup>采集保存,采集时间为2020—2022年每月10—16日,共252份样本;饮用水样本按照《生活饮用水标准检验方法水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)<sup>[11]</sup>进行采集、保存,采集时间为2018—2022年的4月和8月,共300份样本;土壤样本按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)<sup>[12]</sup>进行采集、保存,采集时间为2018—2021年9月,共80份样本。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 数据描述

本研究中重金属Cd和Pb浓度数据为定量资料,经过正态性检验不符合正态分布,使用浓度范围、 $M(P_{25}, P_{75})$ 描述,低于检出限的数据使用检出限一半表示。

空气PM<sub>2.5</sub>中Cd和Pb浓度的标准限制参考《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)<sup>[13]</sup>,Cd、Pb年平均浓度限值为0.005 μg/m<sup>3</sup>、0.5 μg/m<sup>3</sup>。饮用水中Cd和Pb浓度的标准限制参考《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)<sup>[14]</sup>,Cd为0.005 mg/L, Pb为0.01 mg/L。土壤中Cd和Pb浓度的标准限制参考《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)<sup>[15]</sup>,取最小风险管制值Cd为1.5 mg/kg, Pb为400 mg/kg。

#### 1.2.2 健康风险评估

依据《化学物质环境健康风险评估技术指南》(WS/T 777—2021)<sup>[8]</sup>,评估空气PM<sub>2.5</sub>、饮用水、土壤中Cd和Pb对人体健康的慢性非致癌效应和致癌效应。使用浓度的中位数和下述公式进行健康风险评估。

##### 1.2.2.1 暴露评估

日均暴露量的计算参照公式(1)~(5):

$$ADD_{air} = C_{air} \times EF \times ED \times ET / AT \quad (1)$$

$$ADD_{oral} = C_{water} \times IR \times EF \times ED / (EW \times AT) \quad (2)$$

$$ADD_{oral-dermal} = C_{water} \times CF \times SA \times PC \times EF \times ED \times ET / (EW \times AT) \quad (3)$$

$$ADD_{soil} = C_{soil} \times CF \times IR \times EF \times ED / (EW \times AT) \quad (4)$$

$$ADD_{soil-dermal} = C_{soil} \times CF \times AF \times SA \times ABS \times EF \times ED / (EW \times AT) \quad (5)$$

式中,  $ADD_{air}$ —吸入途径日均暴露量, mg/m<sup>3</sup>;  $ADD_{oral}$ —水中化学物质经口摄入途径日均暴露量, mg/(kg·d);  $ADD_{oral-dermal}$ —水中化学物质皮肤接触途径日均暴露量, 单位 mg/(kg·d);  $ADD_{soil}$ —土壤中化学物质经口摄入途径日均暴露量, mg/(kg·d);  $ADD_{soil-dermal}$ —土壤中化学物质皮肤接触途径日均暴露量, 单位 mg/(kg·d);  $C_{air}$ —空气中化学物质浓度, mg/m<sup>3</sup>;  $C_{water}$ —水中化学物质浓度, mg/L;  $C_{soil}$ —土壤中化学物质浓度, mg/kg; 其他参数见表1。

表1 健康风险评估暴露参数

Table 1 Exposure parameters for health risk assessment

参数	说明	数值	来源
EF	暴露频率	土壤中化学物质皮肤接触途径 350 次/年, 其他途径 350 d/年	文献[16]
ED	暴露持续时间	30 年	文献[16]
ET	暴露时间	吸入途径 24 h/d; 水中化学物质经口摄入途径用洗澡时间代替, 0.07 h/d	文献[16-17]

续表

参数	说明	数值	来源
AT	暴露时长	慢性非致癌效应 AT 取值 30 年·350 d, 致癌效应评估 AT 取值 70 年·350 d	文献[16]
IR	摄入率	水中化学物质经口摄入量取值 1.125 L/d, 土壤中化学物质经口摄入量取值 50 mg/d	文献[18]
BW	体质量	63.5 kg	文献[18]
CF	转换因子	饮用水中为 $1 \times 10^{-3}$ L/cm <sup>3</sup> , 土壤中为 $1 \times 10^{-6}$ kg/mg	文献[8]
SA	皮肤接触暴露面积	全身 1.6 m <sup>2</sup> , 脸部 0.042 9 m <sup>2</sup> , 手部 0.08 m <sup>2</sup>	文献[18]
PC	皮肤渗透系数	Cd 为 0.001 cm/h, Pb 为 0.000 1 cm/h	文献[16]
AF	土壤皮肤黏附因子	头部 0.031 4 mg/cm <sup>2</sup> , 手 0.133 6 mg/cm <sup>2</sup>	文献[18]
ABS	皮肤吸收因子	Cd 为 0.001, Pb 为 0.01	文献[3, 16]

### 1.2.2.2 风险特征

重金属慢性非致癌风险的危害商(hazard quotient, *HQ*)和致癌风险(carcinogenic risk, *CR*)的计算公式分别为公式(6)和公式(7), 镉和铅毒理学参数及来源见表 2。

$$HQ = ADD/RfD(RfC) \quad (6)$$

$$CR = ADD \times SF(IUR \times CF) \quad (7)$$

式中, *RfD*—参考剂量, 单位 mg/(kg·d); *RfC*—

参考浓度, 经空气吸入途径单位 mg/m<sup>3</sup>。吸入途径为 *ADD* 和 *RfC* 的比值, 经口摄入途径和经皮肤接触途径为 *ADD* 和 *RfD* 的比值。 *SF*—斜率因子, 单位为 kg·d/mg; *IUR*—吸入单位风险, 单位 m<sup>3</sup>/μg, *CF* 取值 1 000 μg/mg。吸入途径 *CR* 为 *ADD*、*IUR*、*CF* 的乘积, 经口摄入途径和经皮肤接触途径 *CR* 为 *ADD* 和 *SF* 的乘积。

表 2 镉和铅毒理学参数及来源

Table 2 Toxicological parameters and sources of Cd and Pb

污染物	暴露途径	<i>RfD</i> 或 <i>RfC</i>			<i>SF</i> 或 <i>IUR</i>		
		数值	单位	来源	数值	单位	来源
Cd	经口摄入	0.000 5	mg/(kg·d)	文献[5]	0.64	kg·d/mg	文献[3]
	吸入	0.000 01	mg/m <sup>3</sup>	文献[19]	0.001 8	m <sup>3</sup> /μg	文献[5]
	皮肤接触	0.000 012 5	mg/(kg·d)	文献[3]	25.6	kg·d/mg	文献[3]
Pb	经口摄入	0.003 5	mg/(kg·d)	文献[3]	0.008 5	kg·d/mg	文献[6]
	吸入	—*	—	—	0.000 012	m <sup>3</sup> /μg	文献[6]
	皮肤接触	0.003 5	mg/(kg·d)	文献[3]	0.008 5	kg·d/mg	文献[3]

\* 通过查询参数系统和相关文献, Pb 无 *RfC*<sup>[3,5,6,19]</sup>

### 1.2.2.3 风险加和

同一种化学物质分别计算各暴露途径的 *CR* 后求和, 得到累积致癌风险(cumulative carcinogenic risk, *CCR*)<sup>[8]</sup>。 *CCR* <  $1.0 \times 10^{-6}$ , 致癌风险较低, 处于可接受水平; *CCR* 为  $(1.0 \times 10^{-6}) \sim (1.0 \times 10^{-4})$ , 具有一定致癌风险; *CCR* >  $1.0 \times 10^{-4}$ , 致癌风险较高。

同一种化学物质分别计算各暴露途径的 *HQ* 后求和, 得到危害指数(hazard index, *HI*)<sup>[8]</sup>。 *HI* ≤ 1, 表示暴露量未超过不良反应阈值, 非致癌风险较低; *HI* > 1, 表示暴露量超过阈值, 非致癌风险较高。

### 1.3 统计学处理

采用 Rstudio 2023.03.1-446 软件绘制概率分布图, 展示 Cd、Pb 不同暴露途径的致癌风险和慢性非

致癌风险。不同年份的风险评估结果的趋势检验采用 Mann-Kendall 检验。 *P* < 0.05 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 不同介质中 Cd 和 Pb 浓度水平

2020—2022 年大气 PM<sub>2.5</sub> 中 Cd、Pb 的浓度中位数低于标准限值, 2018—2022 年饮用水中 Cd、Pb 的浓度中位数低于标准限值, 2018—2021 年土壤中 Cd、Pb 的浓度中位数低于标准限值(表 3)。2018—2022 年分年度大气 PM<sub>2.5</sub>、饮用水、土壤中 Cd 和 Pb 浓度分布见图 1。

表3 2018—2022年某县3种介质中Cd和Pb浓度  
Table 3 Concentrations of Cd and Pb in 3 media in a certain county from 2018 to 2022

介质	污染物	最小值	$P_{25}$	中位数	$P_{75}$	最大值	平均浓度	合格率/%
空气/(ng/m <sup>3</sup> )	Cd	0.010	0.340	0.675	1.203	7.820	1.017	98.016
	Pb	2.580	13.300	21.400	32.625	173.000	28.312	100.000
饮用水/(μg/L)	Cd	0.050	0.050	0.050	0.050	0.200	0.065	100.000
	Pb	1.250	1.250	1.250	1.250	5.000	1.625	100.000
土壤/(mg/kg)	Cd	0.050	0.090	0.120	0.160	0.310	0.131	100.000
	Pb	8.500	17.125	20.050	25.075	40.600	22.156	100.000

\* 低于检出限的数据用检出限一半表示。

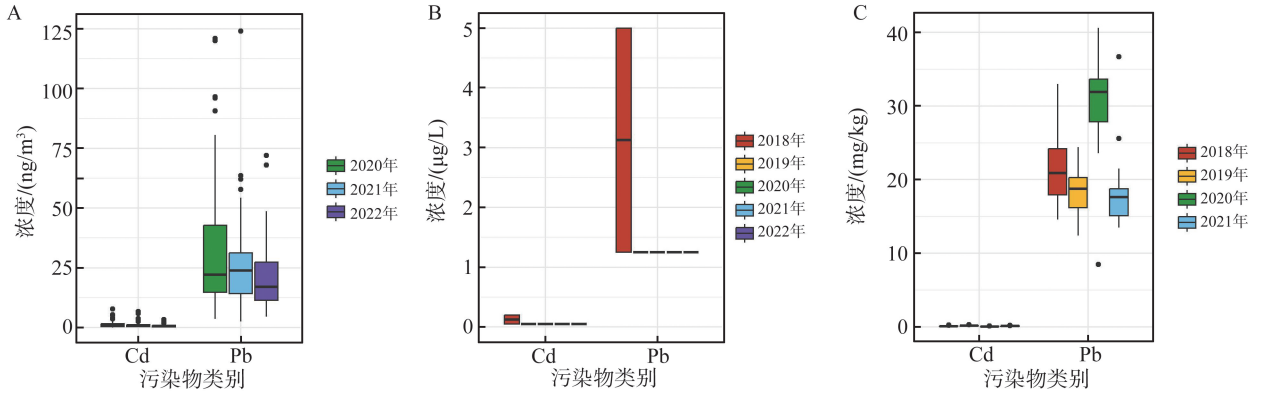


图1 某县2018—2022年不同年份Cd和Pb浓度对比

A: 大气PM<sub>2.5</sub>中Cd和Pb浓度; B: 饮用水中Cd和Pb浓度; C: 土壤中Cd和Pb浓度。

Figure 1 Comparison of Cd and Pb concentrations in different years in a certain county

A: Concentrations of Cd and Pb in fine particulate; B: Concentrations of Cd and Pb in drinking water; C: Concentrations of Cd and Pb in soil.

## 2.2 健康风险评估

### 2.2.1 致癌风险评估

Cd、Pb的累积致癌风险CCR为 $8.02 \times 10^{-7}$ 、 $2.50 \times 10^{-7}$ ,数值均小于 $1.0 \times 10^{-6}$ ,致癌风险较低,处于可接受的水平(表4)。

不同暴露途径的致癌风险对比,Cd、Pb为空气PM<sub>2.5</sub>吸入途径占比最高。Cd不同暴露途径的致癌

风险排序为空气PM<sub>2.5</sub>吸入途径>饮用水经口摄入途径>土壤经口摄入途径>饮用水皮肤接触途径>土壤皮肤接触途径,Pb不同暴露途径的致癌风险排序为空气PM<sub>2.5</sub>吸入途径>饮用水经口摄入途径>土壤经口摄入途径>土壤皮肤接触途径>饮用水皮肤接触途径(图2)。

表4 某县Cd和Pb的致癌风险  
Table 4 Carcinogenic risk of Cd and Pb in a certain county

污染物	空气PM <sub>2.5</sub> 吸入途径CR	饮用水经口摄入途径CR	饮用水皮肤接触途径CR	土壤经口摄入途径CR	土壤皮肤接触途径CR	CCR
Cd	$5.21 \times 10^{-7}$	$2.43 \times 10^{-7}$	$9.68 \times 10^{-9}$	$2.59 \times 10^{-8}$	$2.50 \times 10^{-9}$	$8.02 \times 10^{-7}$
Pb	$1.10 \times 10^{-7}$	$8.07 \times 10^{-8}$	$8.03 \times 10^{-12}$	$5.75 \times 10^{-8}$	$1.38 \times 10^{-9}$	$2.50 \times 10^{-7}$

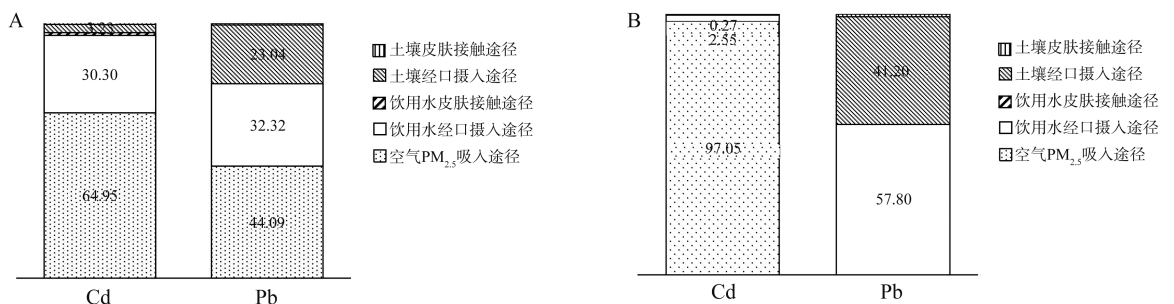


图2 某县Cd和Pb不同暴露途径致癌风险和慢性非致癌风险的占比

A: 致癌风险; B: 慢性非致癌风险。

Figure 2 Carcinogenic risk and chronic non-carcinogenic risk of Cd and Pb in a certain county

A: Carcinogenic risk; B: Chronic non-carcinogenic risk.

2.2.2 慢性非致癌风险评估

Cd、Pb 的慢性非致癌风险 HI 为  $6.95 \times 10^{-2}$ 、 $1.09 \times 10^{-2}$ , 数值均 < 1, 慢性非致癌风险较低, 不会造成显著损害(表 5)。

不同暴露途径的慢性非致癌风险对比, Cd 为空气 PM<sub>2.5</sub> 吸入途径的占比最高, Pb 无空气 PM<sub>2.5</sub> 吸入途径数值, 饮用水经口摄入途径占比最高。Cd 不同

暴露途径的慢性非致癌风险排序为空气 PM<sub>2.5</sub> 吸入途径 > 饮用水经口摄入途径 > 土壤经口摄入途径 > 饮用水皮肤接触途径 > 土壤皮肤接触途径, Pb 不同暴露途径的致癌风险排序为饮用水经口摄入途径 > 土壤经口摄入途径 > 土壤皮肤接触途径 > 饮用水皮肤接触途径(图 2)。

表 5 某县 Cd 和 Pb 慢性非致癌风险  
Table 5 Chronic non-carcinogenic risk of Cd and Pb in a certain county

污染物	空气 PM <sub>2.5</sub> 吸入途径 HQ	饮用水经口摄入途径 HQ	饮用水皮肤接触途径 HQ	土壤经口摄入途径 HQ	土壤皮肤接触途径 HQ	HI
Cd	$6.75 \times 10^{-2}$	$1.77 \times 10^{-3}$	$7.06 \times 10^{-5}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-5}$	$6.95 \times 10^{-2}$
Pb	—*	$6.33 \times 10^{-3}$	$6.30 \times 10^{-7}$	$4.51 \times 10^{-3}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-2}$

\* Pb 无 RfC, 未计算 Pb 空气 PM<sub>2.5</sub> 吸入途径 HQ。

2.2.3 健康风险比较

Cd 的累积致癌风险 2022 年比 2018 年下降 41.46%, Pb 的累积致癌风险 2022 年比 2018 年下降

39.31%。Cd 的慢性非致癌风险 2022 年比 2018 年下降 25.62%, Pb 的慢性非致癌风险 2022 年比 2018 年下降 47.13%(图 3)。

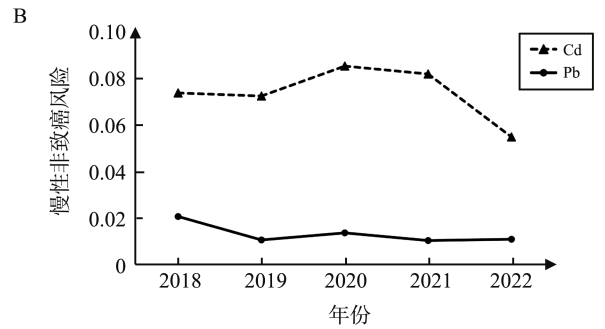
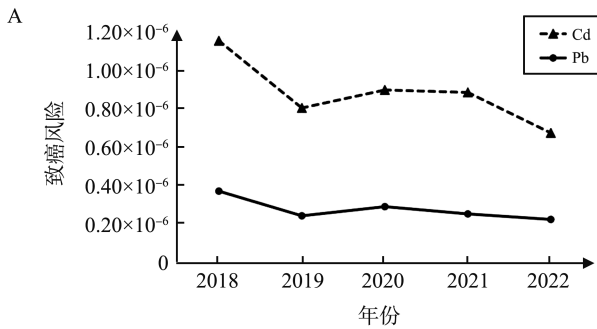


图 3 2018—2022 年某县 Cd 和 Pb 的健康风险的变化趋势  
A: 致癌风险; B: 慢性非致癌风险。

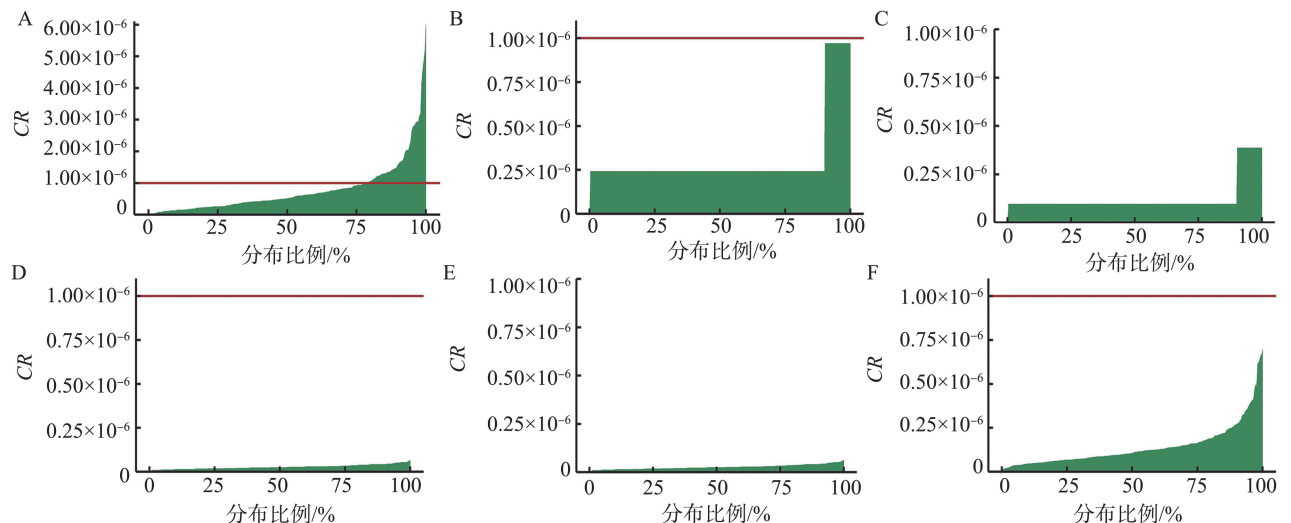
Figure 3 Time change trend of Cd and Pb health risk in a certain county from 2018 to 2022  
A: Carcinogenic risk; B: Chronic non-carcinogenic risk.

2.2.4 概率风险估计

Cd 和 Pb 致癌风险概率分布提示, 空气 PM<sub>2.5</sub> 中 Cd 的 CR 高于  $1.0 \times 10^{-6}$  的比例为 21.21%, Cd 其他暴露途径的 CR 均低于  $1.0 \times 10^{-6}$ , Pb 不同暴露途径

的 CR 均低于  $1.0 \times 10^{-6}$ (图 4)。

Cd 和 Pb 慢性非致癌风险概率分布提示, Cd 和 Pb 不同暴露途径的 HQ 均低于 1(图 5)。



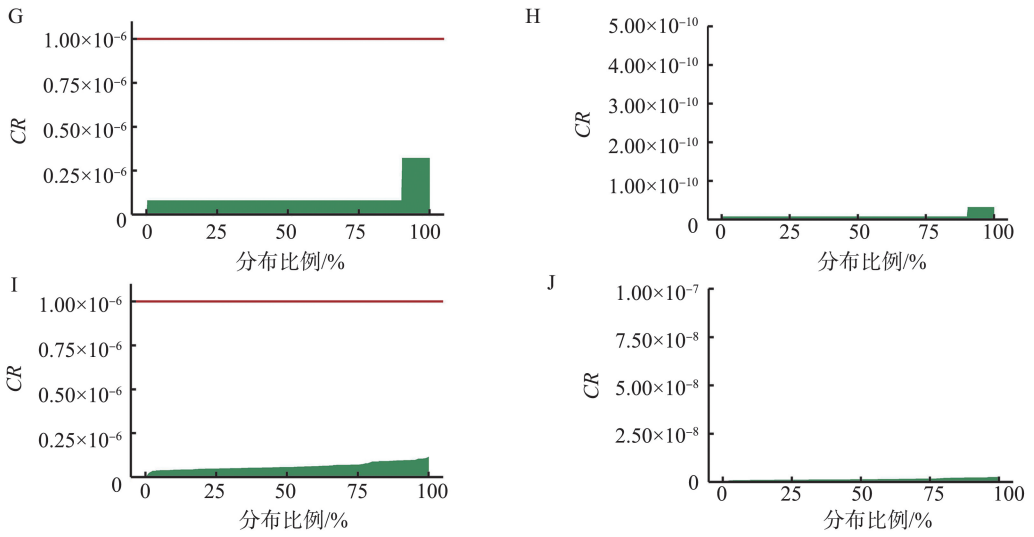


图4 某县Cd和Pb不同暴露途径致癌风险的概率分布(图中红线的位置为风险值 $1 \times 10^{-6}$ )

A-E: Cd经大气 $PM_{2.5}$ 吸入(A)、饮用水摄入(B)、饮用水皮肤接触(C)、土壤摄入(D)、土壤皮肤接触(E)致癌风险概率分布;F-J: Pb经大气 $PM_{2.5}$ 吸入(F)、饮用水摄入(G)、饮用水皮肤接触(H)、土壤摄入(I)、土壤皮肤接触(J)致癌风险概率分布。

Figure 4 Probability distribution of carcinogenic risk for different exposure pathways of Cd and Pb in a certain county (the position shown by red line in the picture denoted the risk value  $1 \times 10^{-6}$ )

A-E: Probability distribution of carcinogenic risk of Cd through  $PM_{2.5}$  inhalation(A), drinking water intake(B), skin contact of drinking water(C), soil intake(D) and skin contact of soil(E); F-J: Probability distribution of carcinogenic risk of Pb through  $PM_{2.5}$  inhalation(F), drinking water intake(G), skin contact of drinking water(H), soil intake(I) and skin contact of soil(J).

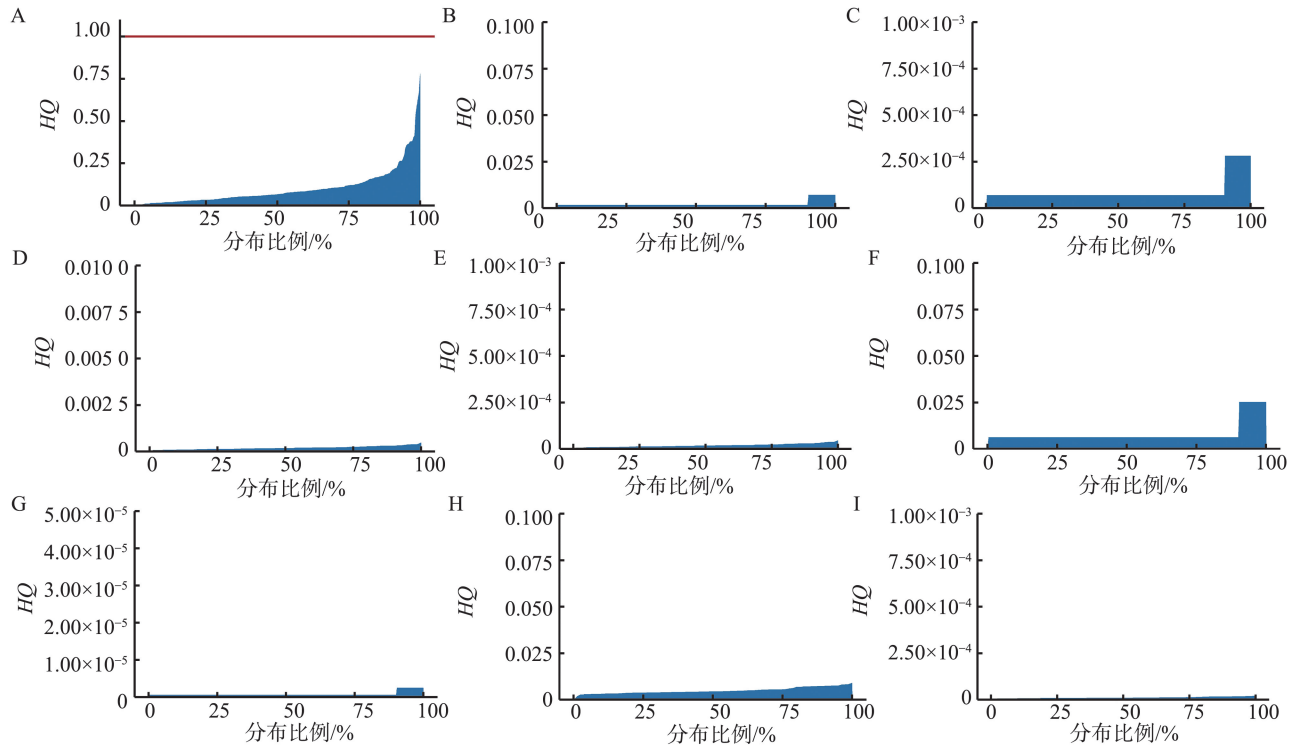


图5 某县Cd和Pb不同暴露途径慢性非致癌风险的概率分布(图中红线的位置为风险值1)

A-E: Cd经大气 $PM_{2.5}$ 吸入(A)、饮用水摄入(B)、饮用水皮肤接触(C)、土壤摄入(D)、土壤皮肤接触(E)致癌风险概率分布;F-J: Pb经大气 $PM_{2.5}$ 吸入(F)、饮用水摄入(G)、饮用水皮肤接触(H)、土壤摄入(I)、土壤皮肤接触(J)致癌风险概率分布。

Figure 5 Probability distribution of chronic non-carcinogenic risk for different exposure pathways of Cd and Pb in a certain county (the position shown by red line in the picture denoted the risk value 1)

A-E: Probability distribution of chronic non-carcinogenic risk of Cd through  $PM_{2.5}$  inhalation(A), drinking water intake(B), skin contact of drinking water(C), soil intake(D) and skin contact of soil(E); F-J: Probability distribution of carcinogenic risk of Pb through  $PM_{2.5}$  inhalation(F), drinking water intake(G), skin contact of drinking water(H), soil intake(I) and skin contact of soil(J).

### 3 讨论

本研究分析某县 2018—2022 年大气  $PM_{2.5}$ 、饮用水、土壤 3 种介质中 Cd 和 Pb 的浓度,能全面反映某县现状。2020—2022 年该县  $PM_{2.5}$  年均浓度为  $43 \sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,年超标天数占比 13%~17%,本研究  $PM_{2.5}$  重金属成分样本中, Cd 超标率 1.984%。我国其他地区空气  $PM_{2.5}$  中 Cd 超标仍有报道<sup>[20-21]</sup>。在现行的《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)<sup>[13]</sup>中, Cd 仅规定了参考浓度限值,进一步规定年均季均等标准限值迫在眉睫。

进行风险评估时,本研究考虑了空气吸入、饮用水经口摄入、土壤经口摄入、饮用水经皮肤接触和土壤经皮肤接触多种暴露途径,与单暴露途径评价相比,结果更全面。Cd、Pb 的累积致癌风险为  $8.02 \times 10^{-7}$ 、 $2.50 \times 10^{-7}$ , 小于  $1.0 \times 10^{-6}$ ; Cd、Pb 的慢性非致癌风险为  $6.95 \times 10^{-2}$ 、 $1.09 \times 10^{-2}$ , 均小于 1, 表明该县居民经空气、饮用水和土壤 Cd 暴露引起的致癌风险和慢性非致癌风险较低,与其他研究结果一致<sup>[3,22-25]</sup>,或略低于某些研究<sup>[24-25]</sup>。

不同介质和暴露途径的健康风险占比不同,这与重金属在人体摄入量的不同以及重金属对人体靶器官的敏感性有关,应减少空气  $PM_{2.5}$  吸入、饮用水和土壤重金属摄入量。Cd、Pb 经空气吸入的 CR 占比最高, Cd 经空气吸入的 HQ 占比最高,说明吸入途径是造成致癌风险和慢性非致癌风险的主要途径。空气中 Pb 来源于钢铁、塑料、颜料生产过程,扬尘,燃煤锅炉排放,机动车排放; Cd 来源于高温生产过程(如冶金和燃料燃烧)、机动车排放、轮胎磨损等,控制工业生产时废气的排放对降低空气  $PM_{2.5}$  中 Cd 和 Pb 的浓度有重要意义<sup>[1]</sup>。Pb 经饮用水摄入途径的 HQ 占比最高,饮用水摄入途径是产生健康风险的重要途径。我国城镇居民饮用水一般由市政管网输送,饮用水源地水体的金属污染、市政输水管网老化等问题加剧了城镇居民集中式饮用水的污染<sup>[2]</sup>。饮用水的深度处理如膜工艺能直接去除重金属,可以进一步降低健康风险<sup>[9]</sup>。Pb 经土壤摄入的 CR 和 HQ 占比较高,说明经土壤摄入也是健康风险的重要途径。土壤重金属的污染是人类活动、工业污染、化学品和农药使用、交通排放等造成的<sup>[2,25]</sup>。采取有效干预措施控制工业污染、使用低毒农药、加强防护减少扬尘等减少土壤重金属暴露,降低健康风险<sup>[26]</sup>。

本研究所使用的风险评估方法存在局限性,包括以下方面:①只获得 2018—2021 年土壤样本和

2020—2022 年空气样本,对 2018—2022 年 5 年浓度的估计有所偏差,风险评估结果会与实际风险值存在出入;②生活饮用水中 Cd 和 Pb 的检出率较低,当水样浓度未检出时,以检出限的一半代替,实际浓度可能与其有差距<sup>[27]</sup>;③使用《中国人群暴露参数手册(成人卷)》<sup>[18]</sup>推荐的体质量、饮水量、洗澡时间等数据评估风险,日饮水量中位数为 1.125 L/d,平均数为 1.625 L/d,参数取值的不同造成不确定性增大;④本文未考虑居民饮水习惯、年龄或性别、时间活动模式等对 Cd、Pb 环境总暴露的影响,今后应对人群做分层分析,对环境暴露行为模式做更深入的研究<sup>[2]</sup>;⑤本文根据 Cd、Pb 的环境暴露量进行风险评估,未引入生物可给性,若以人体靶器官的重金属摄入量进行评价结果会更加科学<sup>[28]</sup>。风险评估的不确定性造成本文的结果可能与实际风险存在一定偏差。

### 参考文献:

- [1] 支敏康. 2016 和 2020 年北京市冬季不同粒径大气颗粒物中金属元素的分布与风险评估比较研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2022.
- [2] 赵秀阁. 典型地区居民金属环境总暴露影响因素研究及健康风险评估[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [3] 张盈盈, 岳帅, 杜艳君, 等. 2017 年某地重金属多介质多暴露途径的健康风险评估[J]. 山东大学学报(医学版), 2021, 59(12): 127-133, 142.  
ZHANG Yingying, YUE Shuai, DU Yanjun, et al. Health risk assessment of heavy metals in multi-pathways in a certain area in 2017[J]. Journal of Shandong University(Health Sciences), 2021, 59(12): 127-133, 142.
- [4] WHO/IARC. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to human [R/OL]. (2024-01-04) [2024-06-17]. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>.
- [5] IRIS. IRIS assessments[R/OL]. (2024-01-04) [2024-06-17]. [https://iris.epa.gov/AtoZ/?list\\_type=alpha](https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha).
- [6] CALEPA. Toxicity criteria on chemicals evaluated by OEHHA, chemicals search [R/OL]. (2024-01-04) [2024-06-17]. <https://oehha.ca.gov/chemicals>.
- [7] 张翼, 王情, 王苏玮, 等. 我国环境健康风险评估指南编制的思考[J]. 环境与健康杂志, 2019, 36(12): 1046-1048.  
ZHANG Yi, WANG Qing, WANG Suwei, et al. Thoughts on compilation of guidelines for environmental health risk assessment in China[J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(12): 1046-1048.
- [8] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 化学物质环境健康风险评估技术指南: WS/T 777—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [9] 韩嘉艺, 叶必雄, 张岚. 某市饮用水中 10 种污染物的健

- 康风险评估[J]. 环境卫生学杂志, 2019, 9(3): 203-209.
- HAN Jiayi, YE Bixiong, ZHANG Lan. Health risk assessment of 10 pollutants in a city's drinking water [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2019, 9(3): 203-209.
- [10] 中华人民共和国国家生态环境部. 中华人民共和国国家环境保护标准:环境空气质量手工监测技术规范 HJ 194—2017 [S/OL]. (2017-12-29) [2024-01-04]. <https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201801/W020180108573132220085.pdf>.
- [11] 中华人民共和国卫生部. 中华人民共和国国家标准:生活饮用水标准检验方法水样的采集与保存 GB/T 5750.2—2006 [S/OL]. (2006-12-29) [2024-01-04]. <http://www.nhc.gov.cn/cm-sresources/zwgkzt/wsbz/new/20070628150039.pdf>.
- [12] 中华人民共和国国家生态环境部. 中华人民共和国环境保护行业标准:土壤环境监测技术规范 HJ/T 166—2004 [S/OL]. (2004-12-09) [2024-01-04]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022\\_172314.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172314.htm).
- [13] 中华人民共和国国家生态环境部. 中华人民共和国国家标准:环境空气质量标准 GB3095—2012[S]. 北京:中国环境出版社, 2012.
- [14] 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.
- [15] 中华人民共和国国家生态环境部. 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/OL]. (2018-06-22) [2024-01-04]. [https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703\\_446029.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/trhj/201807/t20180703_446029.shtml).
- [16] United States Environmental Protection Agency. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment) Final [R]. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, 2004.
- [17] Du YJ, Zhao L, Ban J, et al. Cumulative health risk assessment of disinfection by-products in drinking water by different disinfection methods in typical regions of China [J]. Sci Total Environ, 2021, 770: 144662. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144662.
- [18] 中华人民共和国国家生态环境部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2013.
- [19] Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Minimal Risk Levels (MRLs) for Hazardous Substances [R/OL]. (2024-01-04) [2024-06-17]. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MRLS/mrlsListing.aspx>.
- [20] Yu PY, Han YL, Wang MD, et al. Heavy metal content and health risk assessment of atmospheric particles in China: a meta-analysis [J]. Sci Total Environ, 2023, 867: 161556. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.161556.
- [21] 李友平, 刘慧芳, 周洪, 等. 成都市 PM<sub>2.5</sub> 中有毒重金属污染特征及健康风险评估[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2225-2232.
- LI Youping, LIU Huifang, ZHOU Hong, et al. Contamination characteristics and health risk assessment of toxic heavy metals in PM<sub>2.5</sub> in Chengdu [J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2225-2232.
- [22] 王燕, 高衍新, 李仁波, 等. 济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 铅污染特征、变化趋势与风险评估[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(7): 811-816.
- WANG Yan, GAO Yanxin, LI Renbo, et al. Pollution characteristics, long-term variation trend, and health risk assessment of lead in ambient PM<sub>2.5</sub> in Jinan [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(7): 811-816.
- [23] 岳宣志, 李欢, 高昇, 等. 2021年内蒙古自治区农村饮用水砷、镉、铬、铅和汞健康风险评估[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(10): 765-769, 777.
- YUE Xuanzhi, LI Huan, GAO Sheng, et al. Health risk assessment of arsenic, cadmium, chromium, lead and mercury in rural drinking water in Inner Mongolia Autonomous Region, China, 2021 [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(10): 765-769, 777.
- [24] 郭日, 张盈盈, 臧加伟, 等. 中国十省市土壤重金属生态风险和健康风险评估[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(9): 680-685, 695.
- GUO Ri, ZHANG Yingying, ZANG Jiawei, et al. Ecological and health risk assessment of cadmium in soil of ten provinces and cities, China [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(9): 680-685, 695.
- [25] 李志. 广州市灰尘、土壤重金属污染特征及其健康风险评估[D]. 广州:广州大学, 2022.
- [26] 王珊, 魏海春. 2018年我国中东部局部地区农田土壤典型重金属健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2019, 36(9): 807-810.
- WANG Shan, WEI Haichun. Health risk assessment of typical heavy metals in farmland soils in parts of central and Eastern China in 2018 [J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(9): 807-810.
- [27] 王苏玮, 丁婷婷, 安玉琴, 等. 河北省市政供水三氯甲烷和四氯化碳的健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2023, 13(7): 524-529, 536.
- WANG Suwei, DING Tingting, AN Yuqin, et al. Health risk of chloroform and carbon tetrachloride in municipal water supply in Hebei Province, China [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2023, 13(7): 524-529, 536.
- [28] 龙新宪, 刘文晶, 仇荣亮. 中国农田土壤重金属污染的人体健康风险评估: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2024, 61(5). doi:10.11766/trxb202306130229.
- LONG Xinxian, LIU Wenjing, QIU Rongliang. Research progress and prospects of human health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soils of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5). doi:10.11766/trxb202306130229.