

广西某矿区附近居民区道路灰尘重金属污染健康风险评估

陈志明¹, 梁桂云¹, 莫招育^{1,2}, 黄炯丽¹, 刘慧琳¹, 毛敬英¹, 李宏姣¹, 杨俊超¹

摘要: [目的] 调查广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中重金属污染水平, 评估其对成人和儿童产生的潜在健康风险。[方法] 采集广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘样品 46 份, 测定砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)、锑(Sb)、汞(Hg)的含量, 并采用美国环保署(USEPA)人体暴露健康风险评估方法评估成人和儿童经多种途径暴露道路灰尘重金属的非致癌风险和致癌风险。[结果] 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘 As、Cd、Pb、Sb 和 Hg 含量平均值分别为 1332.81、38.00、650.88、570.20 和 2.63 mg/kg, 分别是广西土壤背景值的 99.5 倍、481.0 倍、31.8 倍、191.3 倍和 2.2 倍。As、Cd 和 Sb 超标率均为 100.0%, Pb 和 Hg 的超标率分别 55.6% 和 77.8%。无论成人还是儿童, 手-口途径摄入是道路灰尘重金属引起非致癌风险和致癌风险的最主要途径。儿童的非致癌风险和致癌风险均大于成人, 总非致癌风险次序为 As>Sb>Pb>Cd>Hg, 总致癌风险 As>Cd>Pb。儿童和成人总非致癌风险分别为 65.4 和 11.2, 总致癌风险分别为 2.82×10^{-2} 和 4.83×10^{-3} 。手-口摄入途径成人 As 和 Sb 的非致癌风险为 7.51 和 2.41, 儿童 As、Sb 和 Pb 分别为 44.90、14.40 和 1.84, 均超出了可接受的非致癌风险(>1)。无论成人还是儿童, 手-口摄入或经皮肤接触暴露 As 和 Cd 的致癌风险均超出可接受的致癌风险水平(10^{-4})。[结论] 研究区域道路灰尘重金属污染严重, 道路灰尘重金属污染对当地居民健康存在危害, 应当引起重视。

关键词: 道路灰尘; 重金属; 污染; 健康风险评估; 南丹

Health Risk Assessment of Heavy Metals from Road Dust in Residential Areas near a Mining Area of Guangxi CHEN Zhi-ming¹, LIANG Gui-yun¹, MO Zhao-yu^{1,2}, HUANG Jiong-li¹, LIU Hui-lin¹, MAO Jing-ying¹, LI Hong-jiao¹, YANG Jun-chao¹ (1.Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning, Guangxi 530022, China; 2.Fudan University, Shanghai 200433, China). Address correspondence to HUANG Jiong-li, E-mail: huangjiongli123@163.com • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To evaluate the health risks to adults and children caused by heavy metals in road dust in residential areas near a mining area of Nandan, Guangxi. [Methods] Road dust samples ($n=46$) were collected in selected residential areas near a mining area in Nandan to evaluate levels of arsenic (As), cadmium (Cd), lead (Pb), stibium (Sb), and mercury (Hg). The cancer and non-cancer risks of heavy metals in road dust for local children and adults were estimated using United States Environmental Protection Agency (USEPA) health risk assessment model. [Results] The average levels of As, Cd, Pb, Sb, and Hg in road dust in residential areas near a mining area of Nandan were 1332.81, 38.00, 650.88, 570.20, and 2.63 mg/kg, which were 99.5, 481.0, 31.8, 191.3, and 2.2 times of the soil background values of corresponding heavy metals in Guangxi, respectively. The heavy metals levels of all (100.0%) road dusts samples exceeded the national standard limits for As, Cd, and Sb; besides, the heavy metals levels of 55.6% and 77.8% of the samples exceeded the limits for Pb and Hg, respectively. By hand-mouth pathway, both non-cancer and cancer risks for children were higher than those for adults. The order of the total non-cancer risks of heavy metals from high to low was As>Sb>Pb>Cd>Hg, while that of the total cancer risks was As>Pb>Cd. The total non-cancer risk for adults and children were 11.2 and 65.4, and the total cancer risk were 4.83×10^{-3} and 2.82×10^{-2} , respectively. The non-cancer risks of As and Sb through hand-mouth ingestion for adults were 7.51 and 2.41 respectively; the non-cancer risks for As, Sb, and Pb through hand-mouth ingestion for children were 44.90, 14.40, and 1.84, respectively; all exceeded the acceptable non-cancer risk level (>1). The cancer risks of As and Cd through hand-mouth ingestion and dermal exposure in adults and children all exceeded the acceptable carcinogenic risk level (10^{-4}). [Conclusion] The contamination of heavy metals in road dust in the study area is severe. Attention should be paid to the health risks caused by heavy metals to the residents.

Key Words: road dust; heavy metal; contamination; health risk assessment; Nandan

DOI: 10.13213/j.cnki.jeom.2016.16227

[基金项目] 广西科技开发项目(编号: 桂科 14125008-2-11); 广西自然科学基金项目(编号: 2015GXNSFBA139203)

[作者简介] 陈志明(1965—), 女, 学士, 教授级高级工程师; 研究方向: 环境与健康、大气环境研究; E-mail: 75958722@qq.com

[通信作者] 黄炯丽, E-mail: huangjiongli123@163.com

[作者单位] 1.广西壮族自治区环境保护科学研究院, 广西 南宁 530022; 2.复旦大学, 上海 200433

砷(As)和镉(Cd)为明确的化学致癌物,铅(Pb)为可能的化学致癌物,而锑(Sb)也被美国环保署(USEPA)列为优先控制污染物。这些有害重金属可以存在于土壤、灰尘等环境介质中。由于土壤重金属可以通过食物链进入人体而损害人体健康,而灰尘中的重金属可以在外动力作用下对城市环境造成直接污染,所以国内外有关环境重金属的研究多集中在土壤和城市灰尘的重金属污染特征及其健康风险评价方面^[1-5]。而对一些特殊区域,如有色金属矿区周边居住区道路灰尘重金属的研究还很缺乏。

广西南丹有色金属矿产资源丰富,As储量居全国第一,Pb储量居全国第二,Cd、Sb也是当地常见的重金属资源。该区域矿产开采历史悠久,重金属对周边环境造成严重污染,严重危害当地居民健康。虽然国内针对广西南丹矿区的重金属污染及其人群健康风险已有一些报道,但主要研究的是重金属的环境迁移特征^[6]、室内重金属污染及其生态风险评价^[7]及土壤重金属污染及其健康风险评价^[8]。目前尚无有关广西南丹矿区附近居民区道路灰尘重金属污染及其健康风险水平的报道。本研究旨在对该矿区附近居民区道路灰尘中对人体健康危害较大的重金属As、Cd、Pb、Sb和汞(Hg)的污染水平进行调查,以评估其对当地成人和儿童的健康风险。

1 材料与方法

1.1 道路灰尘样品的采集

采样点位于广西南丹某矿区附近周围3 km范围内居民区的主要街道。于2014年10月17日,在晴朗无风的天气下进行样品采集。使用聚乙烯细毛刷,塑料铲子在道路交叉口周围10 m范围内采集3~5个面积约40 m²的平行样品,以其混合样品作为该点的代表样品,并拣出样品中的枯枝、落叶和石子,每个样品20~50 g,装进白色透明聚四氟乙烯(食品级)样品袋,贴上标签,做好记录,常温保存。

1.2 道路灰尘样品的分析

将采集回来的样品放在实验室阴凉处,自然风干后过100目的尼龙筛剔除其中的沙砾、植物根茎等大颗粒外来物,压碎混匀后取一半用玛瑙钵研磨,过200目的尼龙筛后密封于聚乙烯塑料袋中备用。准确称取0.300 g样品置于特氟龙烧杯中,依次加入10 mL浓硝酸、4 mL 3%(质量分数)的过氧化氢和10 mL氢氟酸进行微波消解,消解后用1%(质量分数)的硝酸

定容至50 mL比色管中备用。消解所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水。本实验所用器皿均用10%(质量分数)硝酸浸泡过夜后,经超纯水冲洗3次,自然晾干。

道路灰尘中的As的检测参照GB/T 22105.2—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第2部分:土壤中总砷的测定》,Pb和Cd的检测参照GB/T 17141—1997《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》,Hg的检测参照GB/T 22105.1—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分:土壤中总汞的测定》,Sb的检测参照HJ 680—2013《土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋、锑的测定 微波消解原子荧光法》。

As、Hg和Sb的分析仪器为AFS-830原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司,中国),Pb和Cd分析仪器为AAS ZEE nit 700原子吸收光谱仪(耶拿,德国)。As、Cd、Pb、Sb和Hg的方法检出限分别为0.01、0.006、0.06、0.01和0.002 mg/kg。为实现质量控制,每批样品(10个)采用相同试剂和步骤做2个试剂空白。此外,每批样品增加一个国家有证标准物质(GSS-10和GSS-11,环境保护部标准样品研究所)。各重金属相对标准偏差均小于10%,空白样品测定结果均小于方法检出限,基体加标回收率范围在80%~130%。

1.3 道路灰尘重金属健康风险评价方法

1.3.1 暴露模型与暴露参数的选取 本研究根据USEPA提出的土壤健康风险评估模型^[9-10]进行重金属暴露剂量的估算。经手-口途径暴露: $ADD_{ing} = [(C \times IngR \times EF \times ED) / (BW \times AT)] \times 10^{-6}$; 经呼吸途径暴露: $ADD_{inh} = (C \times InhR \times EF \times ED) / (PEF \times BW \times AT)$; 经皮肤接触途径暴露: $ADD_{dermal} = [(C \times SA \times SL \times ASB \times EF \times ED) / (BW \times AT)] \times 10^{-6}$ 。暴露模型中所涉及的暴露参数主要通过本研究的现场调查、USEPA^[11]和我国最新颁布的污染场地风险评估技术导则^[12]以及国内外的相关研究^[13]暴露参数进行选取,见表1。

1.3.2 风险表征 单一重金属某一暴露途径的非致癌风险和致癌风险计算公式如下。非致癌风险: $HQ = ADD/RfD$; 致癌风险: $Risk = ADD \times SF$ 。式中: HQ 为危害商,用于表征人体经单一途径暴露于非致癌污染物而受到的危害水平; ADD 为某一暴露途径重金属的日均摄入量,mg/(kg·d); RfD 为某一重金属非致癌风险参考剂量,mg/(kg·d); $Risk$ 为致癌风险; SF 为致癌斜率因子,mg/(kg·d)。本研究通过查阅文献^[12-15]获得各重金属不同途径下的 RfD 和 SF 。

表 1 暴露参数的选取

参数	含义	单位	成人	儿童	参考来源
C	尘中重金属的含量	mg/kg	均数	均数	本研究
IngR	土壤/尘日均摄入量	mg/d	100	200	文献[12]
EF	暴露频率	d/年	38.3	4.6	本研究
ED	暴露年限	年	330.8	319	本研究
BW	平均体重	kg	53.6	17.3	本研究
AT(非致癌效应)	平均作用时间	d	13979.5	1679	文献[12]
AT(致癌效应)	平均作用时间	d	26280	26280	文献[12]
InhR	日均空气呼吸量	m ³ /d	14.5	7.5	文献[12]
PEF	土壤颗粒物释放因子	m ³ /kg	1.32 × 109	1.32 × 109	文献[13]
SA	暴露的皮肤表面积	cm ² /d	4925	2556	本研究
SL	表面土壤黏附系数	mg/cm ²	0.07	0.2	文献[12]
ABS	皮肤吸收因子	无量纲	0.001 (As 取 0.03)	0.001 (As 取 0.03)	文献[11]

多种重金属多种暴露途径的总非致癌风险(*HI*)和总致癌风险(*Risk_{total}*)计算如下。总非致癌风险： $HI=\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nHQ_{ij}$ ；总致癌风险： $Risk_{total}=\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^nRisk_{ij}$ 。式中：*HI*为危害指数，是人群经多种途径暴露于单一污染物的危害商之和；*Risk_{total}*为总致癌风险；*HQ_{ij}*为第*i*种重金属第*j*种暴露途径的非致癌风险；*Risk_{ij}*为第*i*种重金属第*j*种暴露途径的非致癌风险；*m*、*n*分别为

重金属种类和暴露途径的数量。USEPA 建议，有毒有害物质的健康风险水平在 $1.0\times10^{-6}\sim1.0\times10^{-4}$ 为可接受风险水平， $<1.0\times10^{-6}$ 表示风险甚微， $>1.0\times10^{-4}$ 年表示风险较为显著。本研究中，单一污染物的可接受 *HQ* 为 1，单一污染的可接受致癌风险水平取值 10^{-4} 。

1.4 统计学分析

采用 Excel 2013 进行数据整理，SPSS 19.0 进行数据统计分析。道路灰尘中重金属浓度数值经对数转换后均服从或近似服从正态分布，道路灰尘重金属之间相关性分析采用 Pearson 相关分析，检验水准 $\alpha=0.05$ (双侧)。

2 结果

2.1 道路灰尘中重金属的污染水平

广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘 As、Cd、Pb、Sb 和 Hg 平均含量分别是广西土壤背景值的 99.5 倍、481.0 倍、31.8 倍、191.3 倍和 2.2 倍。与我国土壤二级标准相比，广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘 As、Cd、Sb、Pb 和 Hg 均存在不同程度的超标，其中 As、Cd 和 Sb 超标率 100.0%。见表 2。

表 2 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中各重金属含量(mg/kg)及超标率分析

指标	As	Cd	Pb	Sb	Hg
均值(mg/kg)	1 332.81	38.00	650.88	570.20	2.63
标准差	1 639.50	39.37	710.37	702.28	2.48
95% 置信上限	1 843.71	49.83	864.30	781.19	3.37
中位数	740.50	26.20	390.00	285.00	2.24
范围	129.00~7 752.00	8.14~194.00	80.90~3 932.00	18.20~3 129.00	0.17~12.00
极距	7 623.00	185.86	3 851.10	3 110.80	11.83
国家二级标准*(mg/kg)	≤ 30	≤ 0.3	≤ 300	≤ 3.5(WHO)	≤ 0.5
广西土壤背景值 ^[16] (mg/kg)	13.40	0.079	20.50	0.38~2.98**	0.10~1.2 ^[17]
南丹土壤背景值 ^[6] (mg/kg)	50	42	76	61	0.10~1.2
超标率(国家二级标准)(%)	100.0	100.0	55.6	100.0	77.8
均值/背景值(广西)	99.5	481.0	31.8	191.3	2.2
均值/背景值(南丹)	26.6	0.90	8.5	9.3	2.2

[注]*：道路灰尘 Hg、Pb、Cd 和 As 含量参考 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》(二级标准)。二级标准为保障农业生产，维护人体健康的土壤限值。**：缺乏广西土壤中 Sb 背景值数据，参比我国土壤 Sb 背景值。

2.2 道路灰尘中重金属含量的相关性

道路灰尘中 As、Cd、Pb 和 Sb 含量两两之间均呈正相关($P<0.01$)，而道路灰尘中的 Pb、Sb 和 Hg 均呈负相关关系($P<0.01$)。见表 3。

2.3 道路灰尘重金属健康风险评价

2.3.1 日均摄入量 表 4 结果显示，成人和儿童均主要通过手-口摄入途径摄入暴露道路灰尘中的重金属。同种暴露途径下，成人和儿童对 As 的摄入量最高，且

儿童摄入量高于成人。

表 3 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中各金属含量的相关系数

重金属	As	Cd	Pb	Sb	Hg
As	1.000	0.824**	0.523**	0.629**	0.082
Cd	—	1.000	0.523**	0.576**	0.162
Pb	—	—	1.000	0.913**	-0.535**
Sb	—	—	—	1.000	-0.528**
Hg	—	—	—	—	1.000

[注]**： $P<0.01$ 。

表4 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中各重金属经不同暴露途径的日均摄入量[mg/(kg·d)]

重金属	手-口摄入		皮肤接触		呼吸吸入		总摄入量	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	2.25×10^{-3}	1.35×10^{-2}	2.33×10^{-4}	1.03×10^{-3}	2.48×10^{-7}	3.83×10^{-7}	2.49×10^{-3}	1.45×10^{-2}
Cd	6.43×10^{-5}	3.84×10^{-4}	2.22×10^{-7}	9.81×10^{-7}	7.06×10^{-9}	1.09×10^{-8}	6.45×10^{-5}	3.85×10^{-4}
Pb	1.10×10^{-3}	6.58×10^{-3}	3.79×10^{-6}	1.68×10^{-5}	1.21×10^{-7}	1.87×10^{-7}	1.10×10^{-3}	6.59×10^{-3}
Sb	9.64×10^{-4}	5.76×10^{-3}	3.32×10^{-6}	1.47×10^{-5}	1.06×10^{-7}	1.64×10^{-7}	9.68×10^{-4}	5.78×10^{-3}
Hg	4.44×10^{-6}	2.65×10^{-5}	1.53×10^{-8}	6.78×10^{-8}	4.88×10^{-10}	7.54×10^{-10}	4.46×10^{-6}	2.66×10^{-5}

2.3.2 非致癌风险 表5结果显示,成人和儿童经手-口摄入暴露途径的非致癌风险明显高于其他途径,贡献率分别达92.0%和94.2%。同种暴露途径下,As对成人和儿童的非致癌风险最大,其次是Sb。儿童道路灰尘重金属暴露的非致癌风险高于成人。手-口摄入途径下,成人As和Sb的暴露风险HQ为7.51和2.41,儿童As、Sb和Pb的HQ分别为44.90、14.40和1.84。成人和儿童5种重金属经3种暴露途径所产生的HI分别为11.2和65.4,均超出了可接受的非致癌风险水平。

2.3.3 致癌风险 表6结果显示,成人和儿童As、Cd和Pb经手-口摄入暴露的致癌风险最高,其贡献率成人分别为90.0%,儿童为92.4%。同种暴露途径下,成人和儿童As致癌风险最高,其次为Cd。As和Cd致癌风险的贡献率成人分别为77.1%和22.7%;儿童分别为77.3%和22.5%。成人和儿童单独经手-口摄入或经皮肤接触暴露As和Cd的致癌风险均超出可接受的致癌风险水平(10^{-4})。儿童道路灰尘3种重金属暴露的致癌风险高于成人,3种致癌重金属经3种暴露途径所产生的Risk_{total}分别为 4.84×10^{-3} 和 2.82×10^{-2} 。

表5 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中各重金属不同暴露途径非致癌风险

重金属	手-口摄入暴露		皮肤接触暴露		呼吸吸入暴露		HI	
	成人HQ	儿童HQ	成人HQ	儿童HQ	成人HQ	儿童HQ	成人	儿童
As	7.51	44.90	7.77×10^{-1}	3.44	6.46×10^{-2}	9.99×10^{-2}	8.35	48.40
Cd	6.43×10^{-2}	3.84×10^{-1}	8.86×10^{-3}	3.93×10^{-2}	2.77×10^{-4}	4.28×10^{-4}	7.34×10^{-2}	4.24×10^{-1}
Pb	3.08×10^{-1}	1.84	2.12×10^{-3}	9.39×10^{-3}	3.43×10^{-5}	5.31×10^{-5}	3.10×10^{-1}	1.85
Sb	2.41	14.40	5.54×10^{-2}	2.45×10^{-1}	4.15×10^{-4}	6.42×10^{-4}	2.47	14.60
Hg	1.48×10^{-2}	8.84×10^{-2}	7.29×10^{-4}	3.23×10^{-3}	6.37×10^{-6}	9.84×10^{-6}	1.55×10^{-2}	9.17×10^{-2}
HI	10.3	61.6	8.44×10^{-1}	3.74	6.54×10^{-2}	1.01×10^{-1}	11.2	65.4
贡献率(%)	92.0	94.2	7.5	57.0	0.6	0.2		

表6 广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘中各重金属不同暴露途径致癌风险

重金属	手-口摄入暴露		皮肤接触暴露		呼吸吸入暴露		Risk _{total}	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	3.38×10^{-3}	2.02×10^{-2}	3.50×10^{-4}	1.55×10^{-3}	3.83×10^{-7}	4.16×10^{-6}	3.73×10^{-3}	2.18×10^{-2}
Cd	9.64×10^{-4}	5.76×10^{-3}	1.33×10^{-4}	5.89×10^{-4}	4.98×10^{-8}	7.69×10^{-8}	1.10×10^{-3}	6.35×10^{-3}
Pb	9.35×10^{-6}	5.59×10^{-5}	6.45×10^{-8}	2.86×10^{-7}	5.08×10^{-9}	7.85×10^{-9}	9.42×10^{-6}	5.62×10^{-5}
Risk _{total}	4.35×10^{-3}	2.60×10^{-2}	4.83×10^{-4}	2.14×10^{-3}	4.37×10^{-7}	4.24×10^{-6}	4.84×10^{-3}	2.82×10^{-2}
贡献率(%)	90.0	92.4	1.0	7.6	0.01	0.02		

3 讨论

3.1 道路灰尘重金属污染水平

本研究结果表明,广西南丹某矿区附近居民区道路灰尘重金属污染严重,且以As和Cd污染为主。与国内相同研究区域不同环境介质相应重金属污染情况相比,李良忠等^[7]研究表明,矿区家庭灰尘As、Cd、Pb和Hg平均含量分别为7.30、20.13、546.10和1.57 mg/kg,本研究中该区域道路灰尘相应重金属的含量分别为矿区家庭灰尘的182、2、1.2和1.7倍,道路灰尘As污染尤为突出。研究显示大厂矿区下游农

村水田土壤As、Cd和Hg平均含量分别226.35、2.58和0.46 mg/kg,本研究相应重金属分别为土壤的6、15和6倍,而土壤和道路灰尘中Pb的含量差别不大^[1,8]。与国内不同研究区域类似环境介质相应重金属的污染情况相比,本研究中As、Cd、Pb和Hg平均含量分别为老工业搬迁区街道灰尘^[18]的133(10.38 mg/kg)、32(1.21 mg/kg)、5(121.75 mg/kg)和12(0.21 mg/kg)倍;Cd、Pb平均含量分别为成都市地表灰尘^[5]的6倍(5.82 mg/kg)和7倍(92.27 mg/kg),为北京市道路灰尘^[19]的81倍(0.47 mg/kg)和13倍(50.79 mg/kg)。矿石冶炼过

程中会通过环境介质释放大量的重金属而造成环境污染。本研究区域内有数量较多的重金属矿山,道路灰尘中的重金属多来源于附近矿区的矿山开采和金属冶炼。道路灰尘中As、Cd、Pb和Sb呈正相关,提示道路灰尘存在重金属复合污染或重金属污染存在同源性,这与研究区域矿山各类As、Cd、Pb和Sb储量均较大有关。而Pb、Sb和Hg均呈负相关关系,表明Pb和Sb对Hg的含量有一定的影响,具体原因还有待进一步研究。

3.2 道路灰尘重金属健康风险

可接受风险水平包括非致癌物的可接受危害商(HQ)和致癌物的可接受致癌风险水平(Risk)。本研究结果还显示,无论成人还是儿童,总非致癌风险主要来源于As和Sb,其中成人As和Sb以及儿童As、Sb和Pb的非致癌风险都大于可接受风险水平(>1)。无论成人还是儿童,总致癌风险主要来源于As和Cd,其中成人和儿童单独手-口摄入或经皮肤接触暴露As和Cd的致癌风险均超出可接受的致癌风险水平(10^{-4})。因此,应当重点管控当地矿区开采过程中As、Cd、Sb的排放量。手-口摄入途径均为成人和儿童道路灰尘重金属暴露非致癌风险和致癌风险的主要途径。提示,应当对当地居民重点宣教如何防范手-口摄入有害重金属。此外,考虑到儿童行为模式的特点,还应控制Pb对居民区环境的污染。

应当注意,本研究采用的是土壤健康风险评估模型进行道路灰尘健康风险,且某些暴露参数来源于国内外的相关研究,这些给本研究的评价结果带来了一定的不确定性,还有待以后进一步深入研究。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献

- [1] Zhang L, Mo Z, Qin J, et al. Change of water sources reduces health risks from heavy metals via ingestion of water, soil, and rice in a riverine area, South China[J]. Sci Total Environ, 2015, 530-531: 163-170.
- [2] Zhang J, Deng H, Wang D, et al. Toxic heavy metal contamination and risk assessment of street dust in small towns of Shanghai suburban area, China[J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2013, 20(1): 323-332.
- [3] Liu E, Yan T, Birch G, et al. Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China[J]. Sci Total Environ, 2014, 476-477: 522-531.
- [4] 孙宗斌, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 天津城市道路灰尘重金属污染特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 157-163.
- [5] 常仕镭, 叶芝祥. 成都市地表灰尘重金属污染分布特征及健康风险评价[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2): 70-75.
- [6] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西河池铅锑矿冶炼区土壤中锑等重金属的分布特征及影响因素分析[J]. 地球与环境, 2010, 38(4): 495-500.
- [7] 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.
- [8] 张丽娥, 莫招育, 覃健, 等. 广西大厂矿区下游农村土壤重金属污染及儿童健康风险评估[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(6): 512-516.
- [9] USEPA. Risk assessment guidance for superfund, vol.1: Human health evaluation manual, Part A, Interim Final [R]. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [10] Exposure factors handbook 2011 Edition (Final): EPA/600/R-09/052F [S]. Washington DC: USEPA, 2011.
- [11] Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites: OSWER 9355.4-24 [S]. Washington DC: USEPA, 2002.
- [12] 污染场地风险评估技术导则: HJ 25.3—2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [13] 场地环境评价导则: DB11/T 656—2009 [S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2010.
- [14] USEPA. Region 9, regional screening levels (RSLs)-Generic Tables [EB/OL]. (2016-05) [2016-06-15]. <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables-may-2016>.
- [15] OEHA. Chemicals [EB/OL]. [2016-06-15]. <http://www.oehha.ca.gov/risk/ChemicalDB/index.asp>.
- [16] 刘铮. 中国土壤微量元素 [M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996.
- [17] 冯新斌, 仇广乐, 王少锋, 等. 我国汞矿区人群的无机汞及甲基汞暴露途径与风险评估[J]. 地球化学, 2013, 42(3): 205-211.
- [18] 马志孝, 任婉侠, 薛冰, 等. 老工业搬迁区街道灰尘重金属污染物的人体健康风险评估[J]. 生态科学, 2014, 33(5): 963-971.
- [19] 唐荣莉, 马克明, 张育新, 等. 北京城市道路灰尘重金属污染的健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2006-2015.

(收稿日期: 2016-03-07)

(英文编辑: 汪源; 编辑: 王晓宇; 校对: 洪琪)