

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 Y J, et al. Ecological and health risk assessment of heavy metals in urban soils from a typical southwest capital city [J]. Journal of Light Industry, 2022, 37(4): 118-126. DOI: 10. 12187/2022. 04. 016



昆明市土壤重金属污染特征及其生态与健康 风险评价

汪洁¹, 龚竞², 刘雨佳¹, 于淼¹, 王炜皓¹, 李梦莹¹, 徐武美³, 向萍¹

- 1. 西南林业大学 生态与环境学院/环境修复与健康研究院, 云南 昆明 650224;
- 2. 西南林业大学 学生工作处, 云南 昆明 650224;
- 3. 云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500

摘要: 对昆明市4个行政区内生活区土壤中的Cr、As、Cd、Pb、Ni、Cu、Zn、Mn 8种重金属含量进行测定分析, 并采用地积累指数法、潜在生态危害指数法以及健康风险模型对其潜在的生态和人群健康风险进行评估。结果表明: 研究区域内, 除Cr、Ni外, 其余6种重金属的平均含量均高于昆明市土壤背景值, 但各重金属平均含量均不超过《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中居住用地的风险筛选值。各重金属的地积累污染程度依次为Zn>Cd>Cu>Mn>Pb>Ni>As>Cr, 其中Zn和Cd达到中等污染程度; 各重金属潜在生态危害指数值依次为Cd>Ni>Cu>As>Pb>Mn>Cr>Zn, 其中Cd具有强潜在生态风险, 重金属的综合潜在生态危害指数达到中等风险水平。土壤中重金属对成人和儿童的慢性非致癌风险均小于1, 儿童的非致癌风险高于成人; 对儿童与成人的致癌风险均处于人体可接受范围内, 但由于目前健康风险模型缺少手-口摄入和皮肤接触的致癌斜率因子参考值, 该结果可能低估了实际的重金属致癌风险。

关键词: 城市土壤; 重金属污染; 生态风险评价; 健康风险评价

中图分类号: X82 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-1553(2022)04-0118-09

0 引言

随着城市化和工农业发展进程的加快, 导致重金属在城市土壤中普遍存在^[1]。重金属的主要来源是矿产资源开发、金属加工冶炼、化学生产、工厂排放、污水灌溉等人为活动^[2], 并通过交通运输、大气降尘等途径进入城市土壤^[3-5], 能够在土壤中存留较长时间^[6]。城市土壤是位于城市或郊区, 受人

类强烈影响, 特性发生改变的土壤总称^[7]。城市土壤是城市生态系统的重要组成部分, 可视为长期积累的各种污染物的来源和汇聚地^[8], 直接影响城市生态与人群的健康和安全^[3,9-10]。而重金属作为一种易富集、难降解、危害持久的有毒污染物, 进入城市土壤环境后通过土壤—植物—动物食物链不断累积, 最终通过摄食进入人体^[11], 进而导致潜在的健康风险, 因此重金属在城市土壤中的蓄积日益引起

收稿日期: 2021-06-21; **修回日期:** 2021-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41967026); 云南省创新团队项目(202005AE160017); 云南省农业基础研究联合专项重点项目(202101BD070001-023); 云南省高层次人才引进计划项目(YNQR-QNRC-2018-049); 国家级大学生创新训练计划项目(202010677004)

作者简介: 汪洁(1998—), 女, 四川省攀枝花市人, 西南林业大学硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与人体健康。E-mail: wang_jie0613@126.com

通信作者: 向萍(1985—), 男, 湖南省麻阳县人, 西南林业大学研究员, 博士, 主要研究方向为环境污染与食品安全及人体健康。E-mail: xiangping@swfu.edu.cn

人们的关注^[12]。健康风险评价作为环境风险评价的重要组成部分,将环境污染程度与人体健康联系起来,定量评价暴露于某因子下人体健康所受的影响,具有重要的现实意义^[13]。

昆明市作为省会城市,又是中国面向东南亚、南亚的前沿和门户,近年来城市化进程不断加快,但它也是全国典型的重金属高背景值区。目前对昆明市城市土壤重金属污染的研究较少,主要集中于城市土壤重金属的来源分析、含量及评估^[14],有学者做了作物的重金属污染研究^[15],但关于重金属的生态风险和人体健康风险评价方面的研究鲜见报道。鉴于此,本研究拟对昆明市4个中心城区的土壤进行采样调查,测定土样中重金属镉(Cd)、砷(As)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)和铅(Pb)的含量,采用地累积指数和潜在生态风险法及健康风险评价模型分别对研究区域土壤的重金属污染现状、生态风险与居民健康风险进行评估,旨在了解该区域土壤的重金属污染状况,以期为城市土壤环境的保护、重金属污染控制与修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂与仪器

主要试剂:浓硝酸(HNO₃,优级纯),美国默克公司产;过氧化氢(H₂O₂,优级纯),天津风船化学试剂科技有限公司产。

主要仪器:ICAPQR型电感耦合等离子体质谱仪,美国赛默飞公司产;Agilent 710型电感耦合等离子体发射光谱仪,美国安捷伦科技公司产。

1.2 样品采集与处理

分别在昆明市人口密度相对较大的五华区、盘龙区、西山区和官渡区4个行政区内的居民区随机进行土壤样品采集,并利用便携GPS仪精确记录样点的地理坐标,于2020年10月完成。采集时除去土壤表面的杂物,在每个样点的邻近区域利用梅花布点取样法随机采集表层(0~20 cm)5个点的土壤子样,混合均匀成为一个质量约0.5~2.0 kg的样本,共采集12个样点土样。将土样置于聚乙烯(PE)自封袋密封保存并标记采集时间与地点。

采集的土样带回实验室后,于室内自然风干,去

除动植物残体、砾石、杂物等,研磨土样使之全部通过孔径为60目(0.42 mm)的尼龙筛,筛后保存于PE袋备用。土壤重金属含量的测定依据美国国家环境保护局(USEPA)的USEPA 3050B方法,将土样用HNO₃和H₂O₂于105℃的消解炉内消解至样品溶液体积剩余1~2 mL,利用体积分数5%的HNO₃溶液定容至25 mL,过0.45 μm滤膜于4℃保存备用,每个采集点均做3个平行消解样品。采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定土壤重金属Ni、Cu、Zn、Mn含量,土壤重金属Cr、As、Cd、Pb含量则采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

1.3 数据处理与分析

采用Excel、SPSS、GraphPad软件进行土壤重金属含量、地累积污染指数、潜在生态风险指数的数据进行统计和分析,采用ArcGIS 10.0软件对土壤采样点分布、潜在生态风险指数分布进行分析和作图。

1.4 土壤生态风险评估方法

1.4.1 地累积指数 地累积指数(I_{geo})由G. Muller^[16]在1969年提出,相比其他评价方法,地累积指数法不仅考虑到人为活动的影响,也考虑到环境地球化学背景值与自然地质过程导致的差异^[17]。本研究采用 I_{geo} 方法评估研究区域土壤的重金属污染程度,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{k \times B_n} \right]$$

式中, C_n 为元素 n 的实测浓度/(mg·kg⁻¹), B_n 为该元素的土壤背景值/(mg·kg⁻¹), k 为考虑各地地质过程引起的背景值的变动而取的修正系数,本文中 $k=1.5$ ^[18]。

I_{geo} 分级标准为: $I_{geo} < 0$ 为无污染(污染级别为0), $0 \leq I_{geo} < 1$ 为轻度-中等污染(污染级别为1), $1 \leq I_{geo} < 2$ 为中等污染(污染级别为2), $2 \leq I_{geo} < 3$ 为中等-强污染(污染级别为3), $3 \leq I_{geo} < 4$ 为强污染(污染级别为4), $4 \leq I_{geo} < 5$ 为强-极强污染(污染级别为5), $I_{geo} \geq 5$ 为极强污染(污染级别为6)。

1.4.2 潜在生态危害指数 潜在生态危害指数法由瑞典学者L. Hakanson^[19]于1980年建立,现已被普遍应用于土壤或沉积物中重金属的生态风险评价^[20]。重金属的综合潜在生态危害指数(RI)计算

公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i / C_n^i$$

式中, E_r^i 为第 i 种元素的潜在生态危害指数; T_r^i 为第 i 种元素的毒性系数, 各金属 (Cd、As、Cu、Ni、Pb、Cr、Mn、Zn) 的毒性系数分别为 30、10、5、5、5、2、1、1; C_r^i 为第 i 种元素的实测含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为第 i 种元素的参考值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[14], 本文选用昆明市土壤背景值。RI 为潜在生态风险指数, 是参评元素 E_r^i 的和。根据 E_r^i 和 RI 值的大小, 对评价对象的生态风险进行分级, 标准为: $E_r < 40$ 或 $RI < 150$, 轻微生态危害 (轻微风险水平); $40 \leq E_r < 80$ 或 $150 \leq RI < 300$, 中等生态危害 (中等风险水平); $80 \leq E_r < 160$ 或 $300 \leq RI < 600$, 强生态危害 (强风险水平); $160 \leq E_r < 320$ 或 $RI > 600$, 很强生态危害 (很强风险水平); $E_r > 320$, 极强生态危害 (极强风险水平)。

1.5 健康风险评估方法

土壤中的重金属可通过手-口摄入、皮肤接触、呼吸吸入 3 种暴露途径进入人体, 从而带来健康风险^[21]。健康风险包括致癌和慢性非致癌风险, 一般采取 USEPA 建立的健康风险模型进行评估。本文关注具有慢性非致癌健康风险的 8 种土壤重金属元素, 即 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、As、Cd。由于 USEPA 未给出重金属手-口摄入和皮肤接触的致癌斜率因子参考值, 只给出了呼吸吸入途径致癌斜率因子参考值, 因此本文仅考虑 As、Ni、Cr 和 Cd 这 4 种重金属元素经呼吸暴露途径所导致的致癌风险^[22-23]。土壤重金属中成人和儿童慢性非致癌重金属的日均暴露剂量计算公式如下^[24]:

$$ADD_{\text{ing}} = C \times \frac{IngR \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT_{\text{非致癌}}}$$

$$ADD_{\text{inh}} = C \times \frac{InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT_{\text{非致癌}}}$$

$$ADD_{\text{derm}} = C \times \frac{SA \times SL \times ABS \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT_{\text{非致癌}}}$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 、 ADD_{derm} 依次为手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触 3 种途径的重金属日均暴露剂量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。C 取值为实际测得的土壤重金属含量的 95% 置信区间/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); $IngR$ 为手-口摄食土壤频率/($\text{mg} \cdot \text{d}^{-1}$); CF 为转换系数/($\text{kg} \cdot$

mg^{-1}); EF 为暴露频率/($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED 为暴露时间/a; BW 为人体平均体重/kg; AT 为重金属平均暴露时间/d; $InhR$ 为呼吸频率/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); PEF 为颗粒物排放因子/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$); SA 为皮肤暴露的面积/ cm^2 ; SL 为皮肤黏着度/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); ABS 为皮肤吸收因子, 无量纲。具体参数参考我国《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3—2014)^[25] 及国内外相关研究^[22,24]。

致癌重金属日均暴露剂量 ($LADD_{\text{inh}}$) 的计算公式如下^[26]:

$$LADD_{\text{inh}} = \frac{C \times EF}{AT_{\text{致癌}} \times PEF} \times \left(\frac{InhR_{\text{child}} \times ED_{\text{child}}}{BW_{\text{child}}} + \frac{InhR_{\text{adult}} \times ED_{\text{adult}}}{BW_{\text{adult}}} \right)$$

非致癌重金属的健康风险指数 HQ (危害商) 的计算公式为:

$$HQ = ADD/RfD$$

非致癌总风险指数 (HI) 的计算公式为:

$$HI = \sum HQ_i$$

式中, RfD 为污染物的参考剂量; 当 $HQ \leq 1$ 时, 认为非致癌健康风险较小或可忽略不计; 当 $HQ > 1$ 时, 则表示存在非致癌健康风险^[27]。

致癌重金属的健康风险指数 CR 计算公式为:

$$CR = LADD_{\text{inh}} \times SF$$

式中 SF 为重金属致癌斜率因子。若 CR 在 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$ 内, 则认为该重金属小于致癌阈值, 不具有致癌风险^[13]。不同暴露途径的 RfD 和 SF 参见表 1。

表 1 土壤中重金属不同暴露途径 RfD 和 SF
Table 1 Reference dose (RfD) and slope factors (SF) of heavy metals in soil by different exposure pathways

元素	$RfD/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$			$SF/(\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1})$
	手-口摄入	皮肤接触	呼吸吸入	呼吸吸入
Cr	3×10^{-3}	6×10^{-5}	2.86×10^{-5}	42
As	3×10^{-4}	1.23×10^{-4}	3×10^{-4}	15.1
Cd	1×10^{-3}	3×10^{-5}	1×10^{-3}	6.30
Pb	3.5×10^{-3}	5.25×10^{-4}	3.5×10^{-3}	—
Ni	2×10^{-2}	5.4×10^{-3}	2.06×10^{-2}	0.84
Cu	4×10^{-2}	1.2×10^{-2}	4×10^{-2}	—
Zn	3×10^{-1}	6×10^{-2}	3×10^{-1}	—
Mn	4.6×10^{-2}	1.84×10^{-3}	1.43×10^{-5}	—

注: —表示未检测出, 下同。

2 结果和分析

2.1 土壤重金属含量分析

各研究区域的重金属含量分布结果如表 2 所示。本文根据土壤利用类型以健康风险评价为目的,选用具有居住用地类型的《土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)^[28]作为评价标准。由表 2 可知,研究区域重金属 As、Cd、Pb、Cu、Zn、Mn 的平均含量均高于昆明土壤背景值,分别为土壤背景值的 1.08 倍、4.06 倍、1.52 倍、3.61 倍、4.24 倍和 1.91 倍。各重金属含量均未超过前述标准的风险筛选值,但由于标准中缺少 Cr、Zn、Mn 的筛选值,此评价结果并不全面。由表 2 还可以看出,研究区域出现了一定程度的重金属富集现象,尤其是 Cd 和 Zn。各重金属含量的变异系数从大到小排列为 Cu>Mn>Cd>Zn>Pb>As>Cr>Ni,所有重金属的变异系数均<1,属于低变异类型。变异系数越大,反映金属元素在空间上分布离散程度越高,分布受人为因素干扰程度越大^[8];各重金属变异系数均<1,说明受人为因素干扰较小。除 Ni 元素外,其他重金属元素偏度均>0,呈偏斜;Mn 元素的峰度属于高峰度,表明其含量偏高的样点多。

2.2 土壤生态风险评价结果

2.2.1 I_{geo} 评价结果 研究区域土壤重金属的 I_{geo} 及污染评价结果见表 3,研究区域样点各重金属不同污染程度所占比例见图 1。由表 3 和图 1 可见,土壤中各重金属元素的污染程度从强到弱排序为 Zn>Cd>Cu>Mn>Pb>Ni>As>Cr。Ni、Pb、As 和 Cr 的

污染级别为 0,污染程度均属于无污染水平,大部分样点处于无污染程度;Mn 与 Cu 污染级别为 1,属于轻度-中等污染,大部分样点的 Mn 属于无污染和轻度-中等污染程度,大部分样点的 Cu 属于轻度-中等污染程度;Cd 和 Zn 污染级别为 2,属于中等污染,大部分样点的 Cd 属于轻度-中等及以上污染程度;所有样点的 Zn 属于轻度-中等及以上污染程

表 3 研究区域土壤重金属 I_{geo} 及污染评价结果
Table 3 I_{geo} of heavy metals in the urban soils and the results of pollution assessment

元素	I_{geo} 最小值	I_{geo} 最大值	I_{geo} 平均值	污染级别	污染程度
Cr	-2.37	-0.69	-1.59	0	无
As	-1.72	0.47	-0.59	0	无
Cd	-0.11	2.51	1.18	2	中等
Pb	-2.43	0.98	-0.23	0	无
Ni	-1.19	-0.21	-0.54	0	无
Cu	-0.95	2.84	0.75	1	轻度-中等
Zn	0.06	2.48	1.27	2	中等
Mn	-1.31	1.98	0.04	1	轻度-中等

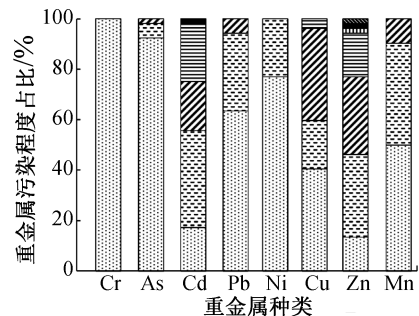


图 1 研究区域样点各重金属不同污染程度所占比例

Fig. 1 Percentage of heavy metal pollution in the urban soils samples

表 2 研究区域土壤重金属含量分布

Table 2 Concentrations of heavy metals in urban soils

重金属	含量范围/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准偏差/ %	偏度	峰度	变异 系数	背景值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	建设用地风险筛 选值/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Cr	28.19~90.45	51.09±19.983	17.65	0.81	0.92	0.35	97	—
As	4.08~18.64	9.72±5.707	4.03	0.62	0.96	0.41	9	20
Cd	0.37~2.31	1.10±1.093	0.67	0.63	-1.22	0.61	0.27	20
Pb	11.42~121.12	62.27±44.084	33.48	0.32	-0.73	0.54	41	400
Ni	27.05~53.24	43.00±14.324	7.27	-0.73	0.79	0.17	44	150
Cu	53.46~743.27	249.03±147.984	232.35	1.51	1.29	0.93	69	2000
Zn	141.10~750.85	381.79±758.430	211.51	0.39	-1.26	0.55	90	—
Mn	366.35~3585.49	1160.15±702.234	889.02	2.00	4.99	0.77	606	—

度。因此,在研究区域 Zn 是造成土壤重金属污染最主要的污染因子,Cd 的污染程度次之,Cu 和 Mn 也对土壤造成了一定的污染。

2.2.2 E_r 和 RI 评价结果 研究区域土壤重金属 E_r/RI 及其生态风险评价结果如表 4 所示。各重金属的 E_r 平均值从大到小排序为 $Cd > Ni > Cu > As > Pb > Mn > Cr > Zn$ 。土壤中 Cd 处于中等风险、强风险、很强风险水平的样点数占总样点数的比例分别为 50%、17%、33%;土壤中 Ni 处于轻微风险水平的样点数占比为 58%,中等和强风险水平的样点数占比分别为 33%、8%;土壤中 Cu 处于中等风险水平的样点数占比为 17%,其余样点均处于轻微风险水平;所有样点中 Cr、As、Pb、Zn、Mn 均处于轻微风险水平;因此 Cd 是主要的生态风险因子。研究区域的 RI 平均值为 205.18,处于中等风险水平,其中处于轻微风险、中等风险、强风险水平的样点数所占比例分别为 42%、25%、33%。

表 4 研究区域土壤重金属 E_r/RI 及其生态风险评价结果

Table 4 E_r/RI of heavy metals in the urban soils and the results of ecological risk assessment

元素	E_r 平均值	不同生态风险水平样点数 占样点总数的比例/%				
		轻微 风险	中等 风险	强风险	很强 风险	极强 风险
Cr	1.05	100	0	0	0	0
As	10.80	100	0	0	0	0
Cd	121.90	0	50	17	33	0
Pb	7.59	100	0	0	0	0
Zn	0.48	100	0	0	0	0
Cu	18.05	83	17	0	0	0
Ni	43.39	58	33	8	0	0
Mn	1.91	100	0	0	0	0
RI 平均值	205.18	42	25	33	0	0

对比表 3 和表 4 的数据可知, I_{geo} 和 E_r 这 2 种土壤生态风险评价方法的结果具有显著差异,这与刘芳等^[29]对准东露天煤田周边土壤重金属污染的研究结果一致,其原因可能是前者侧重于外源重金属的富集程度,后者更侧重于重金属毒性效应的潜在影响^[30]。在 E_r 法中,Zn、Mn 的毒性系数最低(为 1),而 Cd、As、Pb 的毒性系数分别为 30、10、5、2 种评价方法的参比值均为土壤背景值,因此毒性系

数差别大导致其 E_r 有较大变化。与 I_{geo} 法相比, E_r 法除了考虑重金属的含量之外,更多考虑了其生物毒性影响,这与本文评估土壤重金属对人体健康风险的目的更相符合,评价结果更为准确。

根据以上评价结果可知,Cd、Cu、Zn、Ni 是研究区域土壤重金属污染的主要元素,Cd 具有强潜在生态风险。土壤中重金属含量主要受土地利用类型、成土母质与人类活动的影响^[31]。不同母质形成的土壤中重金属差异很大,实验结果中的 Cu、Zn 污染可能与研究区域土壤背景值偏高有关,据刘忠翰^[32]的研究可知,昆明市 Cu、Zn 土壤环境背景值高于云南省和全国土壤环境背景值。此外,重金属污染还可能与外源因子有关,废水废气的排放、交通运输、城市垃圾堆放等都将导致重金属在土壤中富集^[33]。研究区域周边有多处冶炼厂,冶炼过程往往同时产生含 Zn、Cd 的废气、废水、废渣,废气中的粉尘随大气沉降进入土壤,废水、废渣也会通过渗透进入土壤^[34]。昆明作为云南省省会,人流量极大,城市交通运输和垃圾堆放是昆明城市土壤重金属的主要污染源,汽车刹车造成的轮胎磨损产生大量 Cu、Zn 和 Ni 等重金属元素^[35];昆明大量居民区的垃圾堆放区没有垃圾分类措施及渗滤液防渗漏设备,有研究^[18]表明垃圾堆放场的土壤重金属含量高于当地的土壤背景值,塑料、印刷品、餐厨垃圾、蓄电池、干电池等都可能导致 Cu、Zn、Cd、Ni 的富集^[36]。

2.3 土壤重金属暴露剂量和人体健康风险评估

2.3.1 土壤重金属暴露剂量分析 研究区域土壤重金属的日均暴露剂量见表 5。由表 5 可见,儿童和成人不同暴露途径的慢性非致癌重金属日均暴露剂量顺序均为手-口摄入>皮肤接触>呼吸吸入,手-口摄入是土壤重金属进入成人与儿童体内的主要途径;在 3 种暴露途径下,儿童的慢性非致癌重金属日均暴露剂量均大于成人。慢性非致癌重金属日均暴露剂量排序均为 $Mn > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > As > Cd$,致癌重金属日均暴露剂量排序为 $Cr > Ni > As > Cd$ 。

2.3.2 土壤重金属人体健康风险评估 研究区域土壤重金属污染的 HQ 、 HI 和 CR 见表 6。由表 6 可见,成人和儿童不同暴露途径的 HQ 排序均为手-

表5 研究区域土壤重金属的日均暴露剂量
Table 5 Average daily exposure doses of heavy metals in urban soils

元素	C/ (mg·kg ⁻¹)	慢性非致癌重金属日均暴露剂量/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)						致癌重金属日均暴露 剂量/(mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹)
		手-口摄入		呼吸吸入		皮肤接触		
		儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	
Cr	62.30	8.31×10 ⁻⁴	4.02×10 ⁻⁵	2.29×10 ⁻⁸	4.44×10 ⁻⁹	1.33×10 ⁻⁶	1.02×10 ⁻⁶	6.40×10 ⁻⁹
As	12.28	1.64×10 ⁻⁴	7.93×10 ⁻⁶	4.52×10 ⁻⁹	8.75×10 ⁻¹⁰	2.62×10 ⁻⁷	2.01×10 ⁻⁷	1.26×10 ⁻⁹
Cd	1.53	2.03×10 ⁻⁵	9.85×10 ⁻⁷	5.61×10 ⁻¹⁰	1.09×10 ⁻¹⁰	3.25×10 ⁻⁸	2.50×10 ⁻⁸	1.57×10 ⁻¹⁰
Pb	83.55	1.11×10 ⁻³	5.39×10 ⁻⁵	3.07×10 ⁻⁸	5.95×10 ⁻⁹	1.78×10 ⁻⁶	1.37×10 ⁻⁶	—
Ni	47.62	6.35×10 ⁻⁴	3.07×10 ⁻⁵	1.75×10 ⁻⁸	3.39×10 ⁻⁹	1.02×10 ⁻⁶	7.80×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁹
Cu	396.66	5.29×10 ⁻³	2.56×10 ⁻⁴	1.46×10 ⁻⁷	2.82×10 ⁻⁸	8.46×10 ⁻⁶	6.50×10 ⁻⁶	—
Zn	516.18	6.88×10 ⁻³	3.33×10 ⁻⁴	1.90×10 ⁻⁷	3.68×10 ⁻⁸	1.10×10 ⁻⁵	8.46×10 ⁻⁶	—
Mn	1 725.01	2.30×10 ⁻²	1.11×10 ⁻³	6.34×10 ⁻⁷	1.23×10 ⁻⁷	3.68×10 ⁻⁵	2.83×10 ⁻⁵	—

表6 研究区域土壤重金属的健康风险指数
Table 6 Health risk index of heavy metals in urban soils

元素	HQ						HI		CR
	手-口摄入		呼吸吸入		皮肤接触		儿童	成人	
	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人			
Cr	2.77×10 ⁻¹	1.34×10 ⁻²	8.01×10 ⁻⁴	1.55×10 ⁻⁴	2.22×10 ⁻²	1.70×10 ⁻²	3.00×10 ⁻¹	3.06×10 ⁻²	2.69×10 ⁻⁷
As	5.46×10 ⁻¹	2.64×10 ⁻²	1.51×10 ⁻⁵	2.92×10 ⁻⁶	2.13×10 ⁻³	1.64×10 ⁻³	5.48×10 ⁻¹	2.81×10 ⁻²	1.91×10 ⁻⁸
Cd	2.03×10 ⁻²	9.85×10 ⁻⁴	5.61×10 ⁻⁷	1.09×10 ⁻⁷	1.08×10 ⁻³	8.33×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻²	1.83×10 ⁻³	9.87×10 ⁻¹⁰
Pb	3.18×10 ⁻¹	1.54×10 ⁻²	8.78×10 ⁻⁶	1.70×10 ⁻⁶	3.39×10 ⁻³	2.61×10 ⁻³	3.22×10 ⁻¹	1.80×10 ⁻²	—
Ni	3.17×10 ⁻²	1.54×10 ⁻³	8.50×10 ⁻⁷	1.65×10 ⁻⁷	1.88×10 ⁻⁴	1.44×10 ⁻⁴	3.19×10 ⁻²	1.68×10 ⁻³	3.13×10 ⁻⁹
Cu	1.32×10 ⁻¹	6.40×10 ⁻³	3.65×10 ⁻⁶	7.06×10 ⁻⁷	7.05×10 ⁻⁴	5.42×10 ⁻⁴	1.33×10 ⁻¹	6.95×10 ⁻³	—
Zn	2.29×10 ⁻²	1.11×10 ⁻³	6.33×10 ⁻⁷	1.23×10 ⁻⁷	1.84×10 ⁻⁴	1.41×10 ⁻⁴	2.31×10 ⁻²	1.25×10 ⁻³	—

口摄入>皮肤接触>呼吸吸入,且3种暴露途径下儿童的HQ均大于成人,这与李萍等^[37]研究结果一致。儿童HI排序为Mn>As>Pb>Cr>Cu>Ni>Zn>Cd,成人HI排序为Mn>Cr>As>Pb>Cu>Ni>Zn>Cd。HI和HQ均<1,表明不存在非致癌风险。CR排序为Cr>As>Ni>Cd,均低于癌症风险阈值范围(1×10⁻⁶~1×10⁻⁴),表明致癌风险较低,目前该研究区域土壤重金属污染情况不会对人体造成危害,但Cr的CR接近1×10⁻⁶,应当引起关注。

3种暴露途径下儿童的HQ均大于成人,说明处于同一区域中的儿童更易受到土壤重金属的危害,应加强对儿童的保护。为了减少重金属对人体健康的影响,应从根本上防治交通污染、垃圾污染和工业污染,制定修复和管理污染场地的有效条例。另外,在健康风险评价中由于目前只有呼吸吸入的SF,没有考虑到手-口摄入和皮肤接触这2种摄入途径导致的致癌风险,因此昆明市实际的土壤重金属致癌风险可能比本研究评估的致癌风险更高。此外,我国尚未设立相应的RfD和SF,评估时多使用国外的

相关参数,设立符合我国实际情况的评估参数是完善我国环境健康风险评价体系的当务之急^[29-30]。

3 结论

本文采用地积累指数法、潜在生态危害指数法及健康风险模型对昆明市4个中心城区的土壤重金属含量进行测定分析与评估,结果表明:1)该研究区域土壤重金属除Cr、Ni外,As、Cd、Pb、Cu、Zn、Mn的平均含量均高于昆明土壤背景值,但各重金属平均含量均未超过相应用地类型的风险筛选值;变异系数均小于1,受人类活动影响较小。2)Cd、Cu、Zn、Ni是该研究区域土壤重金属污染的主要元素,Cd具有强潜在生态风险。3)儿童和成人的非致癌重金属日均暴露剂量顺序均为手-口摄入>皮肤接触>呼吸吸入,且在3种暴露途径下儿童的非致癌重金属日均暴露剂量均大于成人。4)非致癌重金属的HQ和HI均<1,非致癌风险可忽略;儿童和成人的CR均低于癌症风险阈值范围(1×10⁻⁶~1×10⁻⁴)。但由于目前健康风险模型缺少手-口摄入和

皮肤接触的致癌斜率因子参考值,可能低估了土壤中重金属实际的致癌风险。参考值的缺失直接影响了健康风险评估体系的质量和可靠性,应该及时完善相关信息,以提高污染场地健康风险评估的规范性。对于昆明市,应从根本上加强对工业污染和交通污染的治理,才能降低地表土壤中重金属对人体健康的危害。

参考文献:

- [1] 孟君,苏彩娜.郑州市环境中重金属 Pb,Cd 的污染分析[J].郑州轻工业学院学报(自然科学版),2013,28(4):52-54.
- [2] BENHADDYA M L, HADJEL M. Contamination levels assessment of heavy metals in road dust deposited in various types of urban traffic: A case study of Hassi Messaoud City (Algeria) [J]. World Review of Science, Technology and Sustainable Development, 2014, 11(3/4): 197-218.
- [3] YANG Q, LI Z, LU X, et al. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 690-700.
- [4] HOU D, O'CONNOR D, NATHANAIL P, et al. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review [J]. Environmental Pollution, 2017, 231: 1188-1200.
- [5] YANG L Y, LI Y, PENG K, et al. Nutrients and heavy metals in urban soils under different green space types in Anji, China [J]. Catena, 2014, 115: 39-46.
- [6] MEHR M R, KESHAVARZI B, MOORE F, et al. Distribution, source identification and health risk assessment of soil heavy metals in urban areas of Isfahan province, Iran [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017, 132: 16-26.
- [7] GU Y G, YUAN P P, LIN Q. Contamination, bioaccessibility and human health risk of heavy metals in exposed-lawn soils from 28 urban parks in southern China's largest city Guangzhou [J]. Applied Geochemistry, 2016, 67: 52-58.
- [8] ZHUANG P, HUILING Z, WENSHENG S. Bio-transfer of heavy metals along a soil-plant-insect-chicken food chain: Field study [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(6): 849-853.
- [9] 张甘霖,朱永官,傅伯杰.城市土壤质量演变及其生态环境效应[J].生态学报,2003(3): 539-546.
- [10] GULAN L, MILENKOVIC B, ZEREMSKI T, et al. Persistent organic pollutants, heavy metals and radioactivity in the urban soil of Priština City, Kosovo and Metohija [J]. Chemosphere, 2017, 171: 415-426.
- [11] WANG J, GAO P, LI M Y, et al. Dermal bioaccessibility and cytotoxicity of heavy metals in urban soils from a typical plateau city: Implication for human health [J]. Science of the Total Environment, 2022, 835: 155544.
- [12] PAN L B, WANG Y, MA J, et al. A review of heavy metal pollution levels and health risk assessment of urban soils in Chinese cities [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(2): 1055-1069.
- [13] JIANG Y X, CHAO S H, LIU J W, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China [J]. Chemosphere, 2017, 168: 1658-1668.
- [14] 缪瑞琪.昆明市土壤重金属元素的环境地球化学特征及时空变化研究[D].昆明:昆明理工大学,2015.
- [15] 徐武美,许俊,何翰宇,等.新建城市零散作物种植地重金属污染研究:以昆明呈贡新区为例[J].西南农业学报,2020,33(10):2378-

- 2383.
- [16] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2:108-118.
- [17] ACKAH M. Soil elemental concentrations, geoaccumulation index, non-carcinogenic and carcinogenic risks in functional areas of an informal e-waste recycling area in Accra, Ghana [J]. *Chemosphere*, 2019, 235:908-917.
- [18] 范刘丹,王明仕,宋党育,等. 部分中国城市公园重金属生态风险及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(4):793-804.
- [19] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [20] DASH S, BORAH S S, KALAMDHAD A S. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment for surficial sediments of Deepor Beel, India [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122:107265.
- [21] 马骄阳,田稳,王坤,等. 污染场地土壤重金属的生物可给性及毒性研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10):4885-4893.
- [22] FERREIRA-BAPTISTA L, DE MIGUEL E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(25):4501-4512.
- [23] LIU X M, GU S B, YANG S Y, et al. Heavy metals in soil-vegetable system around E-waste site and the health risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779:146438.
- [24] 马骄阳,保欣晨,王坤,等. 土壤镉污染的人体健康风险评价研究:生物有效性与毒性效应[J]. *生态毒理学报*, 2021(6):120-132.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则:HJ 25.3—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [26] 常静,刘敏,李先华,等. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(5):548-554.
- [27] IHEDIOHA J, UKOHA P, EKERE N. Ecological and human health risk assessment of heavy metal contamination in soil of a municipal solid waste dump in Uyo, Nigeria [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, 39(3):497-515.
- [28] 生态环境部,国家市场监督管理总局. 土壤环境质量建设用地区域土壤污染风险管控标准(试行):GB 36600—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [29] 刘芳,高宇潇,阿不都,等. 准东露天煤田周边土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8):1388-1393.
- [30] WILLIAMS J A, ANTOINE J. Evaluation of the elemental pollution status of Jamaican surface sediments using enrichment factor, geoaccumulation index, ecological risk and potential ecological risk index [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 157:111288.
- [31] 何云玲,张淑洁,邓福英,等. 快速城市化地区昆明市“城-郊-乡”梯度土壤表层碳氮磷化学计量特征[J]. *生态科学*, 2020, 39(3):17-24.
- [32] 刘忠翰. 云南红壤铜、锌背景值在农业生产中的应用[J]. *环境科学导刊*, 1990(2):16-19.
- [33] VAREDA J P, VALENTE A J, DURÃES L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246:101-118.
- [34] 顾济沧,赵娟. 云南省土壤重金属污染现状及治理技术研究[J]. *环境科学导刊*, 2010, 29(5):68-71.
- [35] 张志红,杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析[J]. *中国公共卫生*, 2001(7):47-48.
- [36] ZHANG Q Z, WANG C C. Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: A review [J]. *Water, Air, & Soil*

Pollution, 2020, 231(7): 1-13.

金属污染评价及健康风险评估[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1021-1028.

[37] 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 等. 兰州市大气降尘重

Ecological and health risk assessment of heavy metals in urban soils from a typical southwest capital city

WANG Jie¹, GONG Jing², LIU Yujia¹, YU Miao¹, WANG Weihao¹, LI Mengying¹, XU Wumei³, XIANG Ping¹

1. Institute of Environmental Remediation and Human Health, School of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China;

2. Student affairs office, Southwest Forestry University, Kunming, 650224, China;

3. College of Energy and Environmental Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

Abstract: Concentrations of 8 heavy metals (Cd, Cr, As, Pb, Zn, Mn, Cu, Ni) in soils from the living quarters of four various administrative districts of Kunming were determined. Pollution levels and ecological & health risk were assessed by index of geo-accumulation (I_{geo}), the potential ecological risk index (RI) and human health risk assessment in the study. Results showed that all heavy metals except Cr and Ni exceeded their background values. All of the samples' heavy metal concentrations were lower than the risk screening values for concentration of development land in the national soil environment quality standards (GB 36600—2018). The index of geo-accumulation (I_{geo}) data showed $Zn > Cd > Cu > Mn > Pb > Ni > As > Cr$, and the pollution of Zn and Cd reached the moderate levels. Potential ecological risk index (RI) results showed $Cd > Ni > Cu > As > Pb > Mn > Cr > Zn$, in which Cd had a strong potential ecological risk, indicating a strong ecological risk, the comprehensive ecological risk index of the study area reached the medium ecological risk level. The non-carcinogenic risk HI of soil heavy metals in Kunming City for adults and children were lower than 1, and the non-carcinogenic risk of children was higher than that of adults; the carcinogenic risk to children and adults was within the acceptable range for humans. However, since the current health risk model lacked reference values for carcinogenic slope factors for hand-to-mouth intake and skin contact, it might underestimate the actual carcinogenic risk of heavy metals in the soil.

Key words: urban soil; heavy metals contamination; ecological risk assessment; health risk assessment

(责任编辑: 王晓波)