于沨, 王伟, 于扬,等. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试,2021,40(3):408-424.
YU Feng, WANG Wei, YU Yang, et al. Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Jiulong Li – Be Mining Area, Western Sichuan Province, China[J]. Rock and Mineral Analysis,2021,40(3):408-424.
L DOL 10, 15808 /: archit. 11, 2131 /cd, 2020112001541

[DOI: 10.15898/j.cnki.11 – 2131/td.202011300154]

# 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价

于沨<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 于扬<sup>2\*</sup>, 王登红<sup>2</sup>, 刘善宝<sup>2</sup>, 高娟琴<sup>1,2</sup>, 吕秉廷<sup>3</sup>, 刘丽君<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083;

2. 自然资源部成矿作用与资源评价国家重点实验室,中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;

3. 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所,四川成都 610036)

摘要:川西九龙地区是近年来中国关键矿产资源勘查的热点地区之一,区内锂铍等稀有金属矿产资源优势 突出,有望逐步发展成为国家级大型资源基地。作为长江上游生态保护屏障,该区生态环境脆弱,面对矿业 开发的巨大机遇,在当前"环保优先"的现实情况下,急需摸清该区环境家底,支撑国家能源战略发展。本文 用 ICP - MS 方法检测了该区 352 件土壤样品中7 种重金属元素(Cd、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn)的含量,运用地 累积指数法、污染负荷指数法、潜在生态风险指数法和健康风险评价模型,结合 GIS 空间分析,综合研究了该 区土壤中重金属的空间分布特征和生态风险。结果表明:①研究区土壤7种重金属元素浓度的平均值均没 有超过国家农用土壤污染风险筛选值。As 和 Pb 平均含量低于四川省土壤背景值、Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 含量 高于背景值,分别是背景值的2.44、1.04、1.15、1.28 和1.17 倍。②Cd、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 六种重金属元素 浓度的空间分布特征明显受到区内黑云母花岗岩的影响,Pb 的高浓度中心以及 Cr、Cu、Ni 和 Zn 的低浓度中 心与岩体的空间位置对应关系明显。③地累积指数法评价结果显示,研究区土壤区域整体上不存在重金属 异常累积;污染负荷指数法评价结果显示污染负荷指数均小于1,不存在重金属的污染;除 Cd 存在轻微的潜 在生态风险外,其余6种元素均不存在潜在生态风险。④健康风险评价模型分析结果显示,空间上,Cd元素 的单元素潜在生态风险指数空间分布规律与岩体存在一定联系,无生态风险区域与黑云母花岗岩岩体位置 对应。土壤中的重金属可以通过手口、呼吸和皮肤直接接触三种途径进入人体,其中手口途径是产生健康风 险的最主要途径。在全部重金属元素产生的健康风险中,除 Cr 的手口途径会产生可以接受的正常的自然致 癌风险外,其余元素均不存在致癌性和非致癌性。研究表明,当前研究区土壤不存在重金属污染,潜在危害 程度较低,且不存在非致癌和致癌性风险。但基于土壤中重金属存在一定的累积效应,在今后矿业开发过程 中要密切关注土壤重金属浓度的变化,防止重金属污染带来的风险。

关键词:重金属;地累积指数;污染负荷指数;潜在生态风险;健康风险评价 要点:

(1) 揭示了研究区土壤中重金属的浓度变化范围大,空间分布受岩体影响明显。

(2) 指数法的评价结果表明研究区重金属不存在污染且潜在危害程度较低。

(3) 健康风险模型评价结果表明研究区重金属非致癌和致癌性风险不存在或风险较小。

中图分类号: S151.93; 0657.63 文献标识码: A

第一作者:于沨,博士研究生,地球化学专业。E-mail: yufeng0214@ foxmail.com。

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-03-30; 接受日期: 2021-05-03

基金项目:中国地质调查局地质调查项目"松潘一甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价"(DD20190173)

通信作者:于扬,博士,副研究员,主要从事地球化学研究。E-mail: yuyang\_cags@ sina. com。

土壤重金属污染及生态风险评价是近年来国内 外环境污染领域研究热点问题之一,主要研究方向 包括土壤重金属生态风险评价、土壤重金属污染源 研究以及土壤重金属污染治理等[1-7]。其中最首要 的工作是了解土壤重金属的污染程度,而生态风险 评价是最直接的手段之一<sup>[8]</sup>。目前,国内外评价土 壤中重金属污染的方法较多[9-11],主要可以分为四 类:指数法、模型法、基于 GIS 的分析方法和其他数 学方法。其中指数法包括:单因子指数法[12-14]、内 梅罗综合指数法<sup>[15-19]</sup>、污染负荷指数法<sup>[20-22]</sup>、富集 系数法<sup>[23]</sup>、地累积指数法<sup>[24-26]</sup>、潜在风险指数 法<sup>[27-40]</sup>等;模型法包括:健康风险评价模型<sup>[41-43]</sup>、 几何均值评价模型<sup>[44]</sup>等;基于 GIS 的分析方法包 括:GIS 多元统计分析法<sup>[45]</sup>、GIS 空间评价法<sup>[46]</sup>等; 其他数学方法包括:模糊数学法<sup>[47]</sup>、灰色聚类 法<sup>[48]</sup>、层次分析法<sup>[49]</sup>、理想点法<sup>[2]</sup>、分形<sup>[50]</sup>等。其 中,应用最广泛的是指数法中的地积累指数法和潜 在生态风险评价指数法以及模型法中的健康风险评 价模型。由于各种评价方法都有其适用范围、评价 目的、优点及不足<sup>[51]</sup>,迄今为止尚没有成熟的方法 和统一的标准,而且由于研究区所处的环境、气候特 征、污染源等诸多方面存在显著差异,运用单一评价 方法进行生态风险评价具有一定局限性<sup>[41]</sup>,因此有 必要联合应用多种评价方法进行综合评价,使评价 结果更符合实际情况<sup>[52]</sup>。

川西九龙地区是近年来中国关键矿产资源勘查 的热点地区之一,区内锂铍等稀有金属矿产资源优 势突出,有望逐步发展成为国家级大型资源基地。 作为长江上游生态保护屏障,该区生态环境脆弱,一 旦生态环境遭到破坏,其恢复难度大大增加。面对 矿业开发的巨大机遇,在当前"环保优先"的现实情 况下,急需摸清该区环境家底,特别是与矿业开发紧 密相关的土壤环境<sup>[53]</sup>。本文将指数法、模型法与基 于 GIS 的空间评价方法相结合,对研究区土壤中的 重金属生态影响进行综合评价,可以一定程度上减 少单一评价方法的局限性,更加真实准确地揭示大 型基地开发前的土壤环境本底,支撑国家能源战略 发展。

#### 1 研究区概况

研究区位于四川省西部,甘孜藏族自治州九龙县。地理位置属于攀西高原与青藏高原的过渡地带,地貌景观区为高原深切割区。区内地势北高南低,海拔2600~4500m,高差悬殊,地形坡度较陡,多

悬崖绝壁。植被丰富,主要以灌丛混合林和高山草 地为主。区内水系发育,以溪沟为主,夏季水流湍 急,呈树枝状分布,向南西汇入九龙河。该区冬季寒 冷干燥,而夏季多雨、多雾以及冰雹等,属高原气候。 九龙县常驻人口约6.8万,人口密度为每平方公里 9.18人,人口多为藏族,沿河而居,为典型半农半牧 区。主要农产品有玉米、青稞、马铃薯以及松茸、贝 母、虫草等地方特产。家畜以牦牛、山羊、骡马等为 主。土地利用以林地、草地、园地和耕地等农业用地 为主<sup>[54]</sup>。

研究区大地构造位于松潘一甘孜地槽褶皱系南 东缘雅江冒地槽褶皱带南端九龙地背斜。研究区内 出露中酸性岩浆岩,岩性为二云母花岗岩,时代为印 支期一燕山期,属于雅江一九龙岩浆岩带。区内岩 脉发育,空间上围绕花岗岩体呈水平环状分布,主要 以伟晶岩脉为主,其次为花岗岩脉和石英脉。岩脉 多分布于侵入岩体内、外接触带的节理裂隙中,多呈 脉状,少数为透镜状、团块状、树枝状和网脉状等,脉 长数米至数百米,厚度从不到1m 至数十米不等。

研究区内存在一处稀有金属铍矿床,其成矿母 岩为区内出露的二云母花岗岩。该铍矿床的主要矿 体有4条,呈沿NW—SE向展布,厚30~100m,脉体 向东倾斜,倾向为75°~80°,倾角为45°~60°,呈不 规则脉状。目前初步预测,BeO 资源量可达大型 规模<sup>[55]</sup>。

#### 2 样品采集和测试

本次研究共采集表层土壤样品 352 件,采样深 度为0~20cm,采样日期为 2019 年 5 月 16 日至同 年 6 月 16 日,采样位置如图 1 所示。采样时去除土 壤中的杂物、动植物残留体、砾石以及肥料团块等, 每件样品原始质量大于 1000g。同时用 GPS 记录采 样点坐标信息并在图上标记采样点位置,现场填写 土壤采样记录卡,记录样品的各种特征。

样品风干后用尼龙筛截取-0.8mm(20目)粒级的样品,分装并编号,送至西南冶金地质测试所进行加工和测试。样品经粉碎至200目,溶样后通过NexION 300x型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国PerkinElmer公司)测定重金属元素(Cd、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn)浓度。检测方法参照《硅酸盐岩石化学分析方法第30部分:44个元素量测定》(GB/T14506.30—2010)和《土壤地球化学测量规范》(DZ/T0145—1994),测定结果的相对标准偏差(RSD)小于2%~10%,检测下限为0.05mg/kg。

— 409 —



#### 图1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Map of sampling points distribution and the location of the research area

## 3 评价方法和模型

#### 3.1 地累积指数法

地累积指数法又称地质累积指数法或 Müller 指数法(index of geoaccumulation, *I*geo)<sup>[56]</sup>,是德国科 学家 Müller 提出的一种研究土壤中重金属累积程 度的定量化方法,现已被广泛使用<sup>[57]</sup>。该方法可以 反映单一元素的污染水平,在计算过程中以地质背 景值为评价标准,并加入了对其他因素的修正系数, 充分考虑到人为活动和其他地质活动对重金属累积 的影响,因此该方法不仅可以反映重金属分布的自 然变化特征,而且还可以反映人为活动、特殊地质条 件土壤的影响,是区分土壤中重金属异常累积行为 的重要参数<sup>[24]</sup>。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2\left(\frac{C_n}{k \times B_n}\right) \tag{1}$$

式(1)中:*I*geo为元素 n 的地累积指数;*C*<sub>n</sub>为元素 n 在 土壤中的实测值;*k* 为常系数,一般取值为1~2,本 次研究取值为1.5;*B*<sub>n</sub>为土壤的地球化学背景值,本 此研究选择四川省土壤重金属平均背景值<sup>[58-59]</sup>。 地累积指数一般分为7个级别(0~6级),表示重金 属的异常累积程度从无到极强,分别为:级别0, — 410 —  $I_{geo} \leq 0$ ,异常积累程度无;级别1,0 <  $I_{geo} \leq 1$ ,异常累 积程度较弱;级别2,1 <  $I_{geo} \leq 2$ ,异常累积程度弱;级 别3,2 <  $I_{geo} \leq 3$ ,异常累积程度中等;级别4,3 <  $I_{geo} \leq 4$ ,异常累积程度较强;级别5,4 <  $I_{geo} \leq 5$ ,异常累 积程度强烈;级别6, $I_{geo} > 5$ ,异常累积程度极强。

#### 3.2 污染负荷指数法

污染负荷指数法(pollution load index,PLI)是由 学者 Tomlinson<sup>[60]</sup>提出的一种评价土壤中重金属污 染程度的评价方法。该方法将多种重金属元素指标 相结合,相对单元素指标方法,反映了土壤中重金属 的整体污染情况。其计算公式为:

$$PLI = \sqrt[n]{\frac{C_1}{B_1} \times \frac{C_2}{B_2} \times \dots \times \frac{C_n}{B_n}}$$
(2)

式(2)中:PLI 为土壤的污染负荷指数; $C_n$ 为元素 n 在土壤中的实测值; $B_n$ 为土壤中重金属的评价标准, 本次研究采用《土壤环境质量农用地土壤污染风险 管控标准》(GB 15618—2018)中的筛选值作为污染 负荷指数法的评价标准。Tomlinson<sup>[60]</sup>最初将 PLI 分为两级:PLI <1 为无污染,PLI >1 为污染。本次 研究在结合前人<sup>[20-22]</sup>研究的基础上将 PLI 分为四 级(0~3 级),表示从无污染至重度污染,分别为:级 别0,PLI <1,无污染;级别0,1 < PLI <2,轻度污染; 级别2,2 < PLI ≤ 3, 中度污染; 级别3, PLI > 3, 重度 污染。

## 3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(potential ecological risk index,RI),由瑞典科学家 Hakanson<sup>[61]</sup>提出。该方 法以土壤中重金属的元素背景值为评价标准,考虑 到不同重金属元素的不同毒性<sup>[37]</sup>,结合重金属的生 物毒性、环境效应进行计算<sup>[36]</sup>,突出了污染较严重、 毒性较强的重金属的作用,反映土壤中重金属污染 的生态效应。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_{r}^{i} = \sum_{i=1}^{n} (T_{r}^{i} \times C_{f}^{i}) = \sum_{i=1}^{n} (T_{r}^{i} \times \overline{B_{i}})$$
(3)

式(3)中:RI 为土壤的潜在生态风险指数; $E_r^i$ 为元 素 i 的潜在生态风险系数; $T_r^i$ 为元素 i 的毒性相应 系数; $C_f^i$ 为元素 i 的富集系数; $W_i$ 为土壤中元素 i 的 实测值; $B_i$ 为元素 i 的富集系数; $W_i$ 为土壤中元素 i 的 实测值; $B_i$ 为元素 i 的参比标准值,本次研究以四川 省土壤重金属元素背景值作为标准值<sup>[58-59]</sup>。前人 研究表明<sup>[61-62]</sup>,重金属元素的毒性相应系数由小到 大可以表示为:Zn = 1 < Cr = 2 < Cu = Ni = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30。富集系数( $C_f^i$ )、单元素潜在生态 风险( $E_r^i$ )、土壤的潜在生态风险(RI)分级<sup>[29,61]</sup>分别 为:风险等级无, $C_f^i$  < 1, $E_r^i$  < 40, RI < 150;风险等级 轻微,1 <  $C_f^i$  < 2,40 <  $E_r^i$  < 80,150 < RI < 300;风险等 级中等,2 <  $C_f^i$  < 3,80 <  $E_r^i$  < 160,300 < RI < 600;风 险等级强烈,3 <  $C_f^i$ ,160 <  $E_r^i$  < 320,600 < RI;风险等 级强烈,320 <  $E_r^i$ 。

#### 3.4 健康风险评价模型

根据美国环境保护局(EPA)综合风险信息系统 (Integrated Risk Information System, IRIS)和国际癌 症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)的相关研究成果,一般认为,土壤中 存在的微量的重金属等致癌风险物,会对人体健康 产生危害<sup>[42]</sup>。土壤重金属主要通过三种途径进入 体内:经手口途径摄入、经呼吸途径摄入以及经皮肤 直接接触途径摄入<sup>[63-64]</sup>。三种途径的日均暴露量 (average daily doses, ADD)计算公式如下:

手口途径日均暴露量(ADD<sub>ing</sub>):

$$ADD_{ing} = \frac{c_i \times I_{ng} R \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT}$$
(4)  

$$\mathbb{F} \mathbb{W} \& \& EI \square \square \mathbb{W} \& \mathbb$$

皮肤直接接触途径日均暴露量(ADD<sub>dem</sub>):

$$ADD_{derm} = \frac{c_i \times SA \times SL \times ABS \times CF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (6)$$

结合 US EPA 的风险评价导则(Risk Assessment Guidance for Superfund)、土壤筛选指南(Soil Screening Guidance: Technical Background Document)、中国对人群暴露健康评价的研究成果以 及前该对模型及参数的修订<sup>[41]</sup>,本次研究利用终生 日均暴露量(life average daily doses, LADD)进行评 价。该模型考虑到了人类成长的不同阶段,将儿童 和成人阶段分别计算更具有科学性。三种途径的终 生日均暴露量(LADD)为:

手口途径的终生日均暴露量(LADD<sub>ing</sub>):

$$LADD_{ing} = \frac{c_i \times CF \times EF}{AT} \times k_{ing}$$
(7)

$$k_{\rm ing} = \frac{I_{\rm ng} R_{\rm child} \times ED_{\rm child}}{BW_{\rm child}} + \frac{I_{\rm ng} R_{\rm adult} \times ED_{\rm adult}}{BW_{\rm adult}}$$
(8)

呼吸途径的终生日均暴露量(LADD<sub>inh</sub>):

$$LADD_{inh} = \frac{c_i \times EF}{AT \times PEF} \times k_{inh}$$
(9)

$$k_{\rm inh} = \frac{I_{\rm nh}R_{\rm child} \times ED_{\rm child}}{BW_{\rm child}} + \frac{I_{\rm nh}R_{\rm adult} \times ED_{\rm adult}}{BW_{\rm adult}} \qquad (10)$$

皮肤直接接触途径的终生日均暴露量(LADD<sub>dem</sub>):

$$LADD_{derm} = \frac{c_i \times ABS \times CF \times EF}{AT} \times k_{derm}$$
(11)

$$k_{derm} = \frac{SA_{child} \times SL_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{SA_{adult} \times SL_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}}$$
(12)

式(7)、(9)和(11)中:LADD<sub>ing</sub>、LADD<sub>inh</sub>、LADD<sub>dem</sub>分 别为手口、呼吸、皮肤三种途径的终生日均暴露量;

#### 表1 暴露健康评价模型参数值

Table 1 Parameter values of exposure assessment models

参数	中文含义(单位)	成人	儿童
$I_{ng}R$	摄入土壤的频率(mg/d)	100	200
$I_{nh}R$	呼吸频率(m <sup>3</sup> /d)	20	5
EF	暴露频率(d/a)	180	180
ED	暴露年限(a)	24	6
BW	平均体质量(kg)	62.4	15
AT	平均暴露时间(d)	365 ×ED(非致癌) 365 ×70(致癌)	365 ×ED(非致癌) 365 ×70(致癌)
PEF	灰尘排放因子(m <sup>3</sup> /kg)	$1.36 \times 10^{9}$	$1.36 \times 10^{9}$
$\mathbf{CF}$	转换系数(kg/mg)	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$
SL皮	Σ肤黏着度[mg/(d・cm²)	] 0.07	0.2
ABS	皮肤吸收因子(无量纲)	0.001	0.001
SA	暴露皮肤表面积(cm <sup>2</sup> )	2011	1078

-411 -

k<sub>ing</sub>、k<sub>inh</sub>、k<sub>dem</sub>分别表示三种途径中成人与儿童存在 区别的参数项。其余参数含义、单位以及取 值<sup>[41-42,65]</sup>见表1。

通过日均暴露量模型,结合不同重金属元素的 致癌性的区别,可以评价研究区的土壤重金属的健 康风险。健康风险可以根据重金属元素的致癌性分 为非致癌性风险和致癌性风险。其计算公式如下:

非致癌性风险:

$$HI = \sum HQ_i = \sum \left(\frac{LADD}{RfD}\right)_i$$
(13)

式(13)中:HI为非致癌性风险指数;HQ为非致癌 性风险熵;RfD为非致癌性重金属不同暴露途径的 参考剂量值。当HI≤1时,认为不存在健康风险或 风险较小;当1<HI≤10时,认为存在一定的非致癌 性风险;当HI>10时,表明存在慢性毒性<sup>[41]</sup>。

致癌性风险:

 $CR = \sum Risk_i = \sum (LADD \times SF)_i$  (14) 式(14)中:CR 为致癌性风险指数;SF 为致癌风险斜 率系数。当 CR  $\leq 10^{-6}$ 时,认为不存在致癌性风险或 风险较小;当 10<sup>-6</sup> < CR  $\leq 10^{-4}$ 时,认为是可以接受 的正常的自然致癌风险;当 CR > 10<sup>-4</sup>时,认为存在 较高的致癌风险。RfD 和 SF 的取值<sup>[41-42]</sup>详见表 2。

# 4 结果与讨论

#### 4.1 研究区土壤重金属浓度特征

研究区所有土壤样品 pH 值范围为 5.07 ~ 7.05,Cd、As、Pb、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的平均浓度等描述 性统计结果见表 3。结果显示,土壤整体呈中酸性, pH 值范围对应的《土壤环境质量农用地土壤污染 风险管控标准》(GB 15618—2018)筛选值见表 3。 研究区土壤中全部 7 种重金属元素浓度的平均值均 没有超过该筛选值。与四川省土壤背景值相比,As 和 Pb 的平均浓度低于背景值;Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn

#### 表 2 土壤重金属不同暴露途径的 RfD 和 SF 值

Table 2 RfD and SF values of heavy metals in the soil of different exposure pathways

非致癌暴露参考剂量 Cr<sup>3+</sup>  $\operatorname{Cd}$ Ph Cu Zn As 和致癌风险斜率  $RfD_{ing}(mg/kg \cdot d)$  $1.00 \times 10^{-3}$  $3.50 \times 10^{-3}$  $4.00 \times 10^{-2}$ 0.3  $3.00 \times 10^{-4}$  $3.00 \times 10^{-3}$  $RfD_{inh}(mg/kg \cdot d)$  $1.00 \times 10^{-3}$  $3.01 \times 10^{-4}$  $3.52 \times 10^{-3}$ 2.86  $\times 10^{-5}$  $4.00 \times 10^{-2}$ \_  $RfD_{derm} (mg/kg \cdot d)$  $1.20 \times 10^{-2}$ 0.3  $1.00 \times 10^{-5}$  $1.23 \times 10^{-4}$  $5.25 \times 10^{-4}$  $6.00 \times 10^{-5}$  $SF_{ing}(kg \cdot d/mg)$ 6.30 15.1 1.5 \_  $SF_{inh}(kg \cdot d/mg)$ 6.40 15.1  $SF_{derm}(kg \cdot d/mg)$  $1.95 \times 10^{-2}$ 6.30 7.5

注:"-"表示无相关数据。

的浓度高于背景值,分别是背景值的 2.44、1.04、 1.15、1.28和1.17倍,它们的异常富集或与研究区 内的成矿作用有关。全部元素的变异系数(反映了 各采样点浓度相对平均值的离散程度)均小于 1,表 明各采样点重金属浓度值波动幅度不大,空间连续 较好,空间分布差异不显著,与土壤中重金属元素浓 度的自然分布规律一致。采样点 Cd、As、Pb、Cr、Cu、 Ni和 Zn 浓度的频率分布如图 2 所示。由图 2 可 知,占总样点比例 55.40%的 Cd、57.10%的 As、 43.47%的 Pb、56.82%的 Cr、55.68%的 Cu、 54.26%的 Ni和48.30%的Zn浓度分别集中在0.15 ~0.25mg/kg、1 ~ 3mg/kg、25 ~ 30mg/kg、90 ~ 130mg/kg、30 ~ 50mg/kg、45 ~ 65mg/kg 和 85 ~ 110mg/kg 区间。

利用克里金插值将研究区土壤中的7种重金属 元素浓度进行插值,研究其空间分布特征(图3)。 从图3可知,除As元素外,其余6种元素都表现出 类似的空间分布特征,元素在土壤中的高(低)浓度 中心与花岗岩岩体的空间位置十分吻合,表明元素 浓度空间分布明显受到了研究区内黑云母花岗岩的 影响。其中Pb元素的高浓度中心与花岗岩岩体的 空间位置对应,而Cr、Cu、Ni和Zn则相反,花岗岩岩 体空间位置对应低浓度中心。As元素浓度的空间 分布与岩体的位置关联性不强,出现两个元素浓度 较高中心。

由于研究区存在一处铍矿床,考虑到 Be 元素 也具有一定的生物毒性,因此也需要考虑 Be 元素 对土壤造成污染。研究区的黄牛坪铍矿床位于二云 母花岗岩与三叠系地层的接触带附近。目前已探明 的矿体有 4 条, Be 的平均浓度为 138.6mg/kg<sup>[55]</sup>。 土壤中 Be 的浓度范围为 0.98 ~ 18.86mg/kg,平均 浓度为 3.79mg/kg(表 3);74.15% 的采样点的 Be 浓度在 1~4mg/kg(图 2)。由于中国缺少农用土地



图 2 研究区土壤金属浓度频数分布

Fig. 2 Frequencies of heavy metals concentration in soils of the research area

Be 元素污染的相关评价标准,因此采用加拿大相关标准进行研究,其标准值浓度为4mg/kg<sup>[66]</sup>。与此标准相比,74.43%的采样点的Be浓度低于标准,全部采样点的平均值也低于标准。部分超过标准限值的采样点仅分布在铍矿床周边,并未发生扩散迁移。

# 4.2 研究区土壤重金属的异常累积情况

以四川省土壤元素背景值为标准,利用地累积 指数法研究九龙地区土壤中重金属的异常累积情况。研究区土壤中各种重金属的地累积指数计算结 果见表4,并利用克里金插值将评价结果进行空间



## 图 3 研究区土壤重金属浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of heavy metals element concentration in soils of the research area

## 表 3 研究区土壤重金属浓度描述性统计

Table 3 Concentrations of heavy metals in soils of the research area

重金属元素	浓度范围 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	筛选值 ( mg/kg)	四川省土壤背景值 (mg/kg)
Cd	0.05~0.49	0.19	0.07	0.39	0.88	1.52	0.3	0.079
As	0.34 ~12.21	2.50	1.74	0.70	1.92	5.33	40	10.4
Pb	$6.05 \sim 47.28$	30.36	4.60	0.15	0.27	2.25	90	30.9
Cr	8.11~133.79	81.98	28.21	0.34	-1.56	1.20	150	79
Cu	4.86~109.89	35.86	15.77	0.44	0.47	1.90	50	31.1
Ni	3.99~75.49	41.65	15.85	0.38	-1.04	0.35	70	32.6
Zn	33.94 ~157.02	101.35	18.81	0.19	-0.84	0.89	200	86.5
Be	0.98~18.86	3.79	2.09	0.55	3.09	14.81	-	1.80

		各分级中样品数占兰样品数比例(%)								
重金属元素	I <sub>geo</sub> 平均值 ·							第6级		
	-	第0级	第1级	第2级	第3级	第4级	第5级			
Cd	0.59	13.92	62.50	23.30	0.28	0	0	0		
As	-2.95	100	0	0	0	0	0	0		
Pb	-0.63	99.72	0.28	0	0	0	0	0		
Cr	-0.72	99.43	0.57	0	0	0	0	0		
Cu	-0.57	79.55	19.89	0.57	0	0	0	0		
Ni	-0.44	62.50	37.50	0	0	0	0	0		
Zn	-0.39	96.88	3.13	0	0	0	0	0		

#### 表4 研究区土壤重金属 Igeo 分级统计

Table 4 Statistical classification of heavy metals  $I_{reo}$  in soils of the research area

分析。从表4可知,该研究区除Cd以外的其余6种 重金属元素的Igeo平均值均小于0,表明这些元素总体 上不存在异常的累积。Cd元素的Igeo平均值虽大于 0,但大多数(62.5%)采样点的累积指数为1级,异常 累积为较弱水平,累积程度较轻。以Igeo作为评价方 法,研究区土壤中7种重金属元素的异累积程度从强 到弱依次为:Cd>Zn>Ni>Cu>Pb>Cr>As。

将各个元素的 I<sub>geo</sub>值进行克里金插值分析其空间分布特征。结果表明,As、Pb 和 Zn 元素在整个研究区范围内,都呈现为无异常累积的状态。研究区中 Cr、Cu 和 Ni 在绝大部分区域处于无异常累积状态,仅零星区域出现较弱累积的状态。Cd 元素在研究区中主要以较弱累积区域为主,其余少部分区域为无累积和弱累积区域。重金属元素的地累积指数空间上没有明显的空间分布特征,与元素浓度的空间分布存在不同,未能表现出与岩体空间位置相关的特征关系。虽然岩体会对重金属元素的浓度产生影响,但其影响程度不足以造成异常的累计,也未对分级产生影响。因此,在分级插值图上并未表现出与岩体的空间相关关系。

#### 4.3 研究区土壤重金属污染情况

利用污染负荷指数法评价研究区土壤的污染情况,利用直方图将统计结果绘制成图 4。PLI 反映了 各个采样点的全部 7 种重金属元素的综合污染水 平,从图 4 中可以看出全部采样点的污染负荷指数 均小于 1,均属于无污染级别。其中 91.5% 的采样 点的污染负荷指数小于 0.5,表明探究区土壤重金 属还有较高的承载空间,浓度的轻微波动不会造成 重金属超过标准的上限,达到污染的水平。

# 4.4 研究区土壤重金属潜在生态风险情况

利用潜在生态风险指数法对研究区重金属的单

元素潜在生态风险和土壤生态风险进行了评价,各 个采样点的单元素潜在生态风险统计结果见表5。 从表5可知,除了Cd外,其余6种元素全部为不存 在潜在生态风险等级。大多数采样点 Cd 的潜在生 态风险为无风险和轻微风险等级,分别占全部采样 点的 9.94% 和 56.63%;中等潜在生态风险占 32.39%, 仅有 1.14% 采样存在 Cd 强生态风险; 全 部 352 个采样点的平均值 Eca为 73.1,属于轻微风 险等级。由于Cd的生态毒性较大,在这7种重金属 元素中排名第一,因此会导致单元素潜在风险指数 偏大,该结果表现出一定的潜在生态风险。相对地, 对于土壤生态风险评价结果,会更加客观地反映出 研究区土壤的综合潜在生态风险。统计结果表明: 研究区 94.6% 的采样点不存在潜在生态风险, 5.4%的采样点存在轻微的生态风险。352个采样 点的 RI 平均值为 95.81,表明整体上研究区不存在 潜在生态风险。



#### 图4 研究区土壤重金属污染负荷指数(PLI)统计

Fig. 4 Statistics of pollution load index (PLI) in soils of the research area

# 表 5 研究区土壤重金属单元素潜在生态风险等级统计

Table 5 Statistics of  $E_r^i$  in soils of the research area

等级	各分级中样品数占总样品数比例(%)									
	Cd	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn			
无	9.94	100	100	100	100	100	100			
轻微	56.53	0	0	0	0	0	0			
中等	32.39	0	0	0	0	0	0			
强烈	1.14	0	0	0	0	0	0			
极强	0	0	0	0	0	0	0			

利用克里金插值对 Cd 元素和土壤整体的潜在 风险指数(RI)进行插值,分析其空间特征(图5)。 从图中可以看出,Cd 的单元素潜在生态风险指数空 间分布规律与岩体存在一定空间联系,无生态风险 区域与黑云母花岗岩岩体位置对应;轻微风险和中 度风险区域的分布规律不十分明显。土壤潜在生态 风险指数在整个研究区范围内的绝大部分区域不存 在潜在生态风险,仅在研究区西南局部存在轻微风 险区域,空间分布规律不明显。

# 4.5 研究区土壤重金属对健康的影响

研究区土壤重金属健康风险评价结果见表 6。 从表 6 可知, 三种途径的终生日均暴露量依次为: LADD<sub>ing</sub> > LADD<sub>inh</sub> > LADD<sub>dem</sub>, 说明手口途径是研究 区土壤中重金属进入人体的主要途径。研究区土壤 重金属三种途径终生日均摄入量的总和(ΣLADD) 从大到小排序为: Zn > Ni > Cu > Pb > Cr > As > Cd。 除 Ni 没有相关数据外, 研究区土壤中其余 6 种重



#### 图 5 研究区 Cd 元素和土壤潜在生态风险指数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of Cd and soil potential ecological risk index in the research area

— 416 —

#### 表 6 研究区不同途径土壤重金属日均暴露量、非致癌风险指数和致癌风险指数

Table 6 Daily exposure doses, non - carcinogenic risk index and carcinogenic risk index of heavy metals in soils of the research area

参数	Cd	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	合计
$\frac{\text{LADD}_{\text{ing}}}{(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})}$	1.61 × 10 <sup>-7</sup>	2.09 × 10 <sup>-6</sup>	2.24 × 10 <sup>-4</sup>	6.84 × 10 <sup>-5</sup>	2.64 × 10 <sup>-4</sup>	3.07 × 10 <sup>-4</sup>	7.46 × 10 <sup>-4</sup>	1.61 × 10 <sup>-3</sup>
$\frac{\text{LADD}_{\text{inh}}}{(\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})}$	9.66 × 10 <sup>-12</sup>	1.25 × 10 <sup>-10</sup>	2.63 × 10 <sup>-6</sup>	4. 12 × 10 <sup>-9</sup>	3.10×10 <sup>-6</sup>	3.60 × 10 <sup>-6</sup>	8.77 × 10 <sup>-6</sup>	1.81 × 10 <sup>-5</sup>
$LADD_{derm}$ (mg · kg <sup>-1</sup> · d <sup>-1</sup> )	$1.90 \times 10^{-10}$	2.47 × 10 <sup>-9</sup>	2.49 × 10 <sup>-7</sup>	8.11 × 10 <sup>-8</sup>	2.94 × 10 <sup>-7</sup>	3.42 × 10 <sup>-7</sup>	8.31 × 10 <sup>-7</sup>	1.80 × 10 <sup>-6</sup>
$\sum_{(mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1})}$	1.61 × 10 <sup>-7</sup>	$2.09 \times 10^{-6}$	$2.27 \times 10^{-4}$	6.85 × 10 <sup>-5</sup>	2.68 × 10 <sup>-4</sup>	3.11 × 10 <sup>-4</sup>	7.56 × 10 $^{-4}$	1.63 × 10 <sup>-3</sup>
$\mathrm{HQ}_{\mathrm{ing}}$	$1.61 \times 10^{-4}$	$6.95 \times 10^{-3}$	$6.39 \times 10^{-2}$	$2.28 \times 10^{-2}$	$6.60 \times 10^{-3}$	-	$2.49 \times 10^{-3}$	$1.03 \times 10^{-1}$
$\mathrm{HQ}_{\mathrm{inh}}$	9.66 $\times 10^{-9}$	4.17 × 10 $^{-7}$	$7.46 \times 10^{-4}$	$1.44 \times 10^{-4}$	7.76 $\times 10^{-5}$	-	-	9.68 × 10 $^{-4}$
$\mathrm{HQ}_{\mathrm{derm}}$	$1.90 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-5}$	4.74 $\times 10^{-4}$	$1.35 \times 10^{-3}$	2.45 $\times 10^{-5}$	-	$2.77\times10^{-6}$	$1.89 \times 10^{-3}$
HI	$1.80 \times 10^{-4}$	$6.97 \times 10^{-3}$	$6.51 \times 10^{-2}$	$2.43 \times 10^{-2}$	6.71 × 10 $^{-3}$	-	$2.49 \times 10^{-3}$	$1.06 \times 10^{-1}$
Risk <sub>ing</sub>	$1.01 \times 10^{-6}$	$3.15 \times 10^{-5}$	-	$1.0 \times 10^{-4}$	-	-	-	1.35 × 10 <sup>-4</sup>
$\operatorname{Risk}_{\operatorname{inh}}$	6. 19 × 10 $^{-11}$	$1.89 \times 10^{-9}$	-	-	-	-	-	$1.96 \times 10^{-9}$
$\operatorname{Risk}_{\operatorname{derm}}$	$1.20 \times 10^{-9}$	$1.85 \times 10^{-8}$	-	$1.58 \times 10^{-9}$	-	-	-	2.13 × 10 $^{-8}$
CR	$1.01 \times 10^{-6}$	$3.15 \times 10^{-5}$	_	$1.0 \times 10^{-4}$	_	_	_	$1.35 \times 10^{-4}$

注:"-"表示无相关数据。

金属,对于人体产生的 HQ 和 HI 值均小于 1,表明 不存在非致癌性风险。三种摄入途径中的手口途径 产生的 HQ 值最大,说明手口途径是产生非致癌性 风险的主要途径。6 种重金属元素产生的非致癌性 风险由大到小依次为:Pb > Cr > Cu > Zn > As > Cd。

对于致癌性风险,三种途径的贡献顺序与终生 日均暴露量和非致癌性风险一致,手口途径依然是 产生致癌性风险最主要的方式。除Cr的手口途径 会产生可以接受的正常的自然致癌风险外,其余元 素、其余途径均不存在致癌性风险或风险较小。 已有数据的三种重金属元素产生的致癌性风险由大 到小依次为:Cr>As>Cd。

由于非致癌风险 HI 值和致癌性风险 CR 值,是 通过各元素浓度经过模型参数的线性组合而来,较 高的元素浓度会对应较高的风险,因此,非致癌性风 险和致癌性风险的空间分布规律与各元素浓度的空 间分布规律保持一致。

#### 5 结论

研究区土壤中7种重金属浓度均低于国家农用 土壤污染风险筛选值,不存在重金属污染的情况。 除As外,其余重金属元素浓度的空间分布特征受到 研究区内黑云母花岗岩的影响。岩体的空间位置对 应 Pb 元素的高浓度中心以及 Cr、Cu、Ni 和 Zn 元素 的低浓度中心。

对于研究区土壤重金属的评价结果如下: ①地累积指数评价结果表明,除 Cd 元素存在较弱 的累积外,其余元素均不存在累积。研究区土壤中 7种重金属元素的地累积指数由大到小依次为:Cd >Zn > Ni > Cu > Pb > Cr > As。②污染负荷指数评 价结果表明:研究区土壤全部采样的污染负荷指数 均小于1,不存在重金属的污染。③潜在生态风险 指数评价结果表明:除了 Cd 元素外,其余6种元素 全部为不存在潜在生态风险等级。Cd 元素在研究 区的潜在生态风险指数的平均值  $E_{cd} = 73.1$ ,属于 轻微风险等级。④健康风险评价结果表明:手口途 径是产生健康风险的最主要途径。全部参评元素均 不存在致癌性风险。除 Cr 元素的手口途径会产生 可以接受的正常的自然致癌风险外,其余元素、其余 途径均不存在致癌性风险或风险较小。

目前研究区土壤重金属不存在污染,重金属潜 在危害程度较低,非致癌和致癌性风险值不存在或 风险较小,尚不会对人体造成健康危害,但由于土壤 中重金属存在一定的累积效应,在该地区后续的开 采、选矿等矿业活动过程中,需对土壤重金属的含量 进行长期动态的监测,为实现矿产资源高质量开发 提供更精准、有力的支撑保障。

**致谢**:全部样品的加工和测试工作由西南冶金地质 测试所完成,审稿老师对本文提出了宝贵修改意见, 在此一并表示感谢。

#### 6 参考文献

 [1] 况琴,黄庭,向京,等.鄂西北某农田保护区土壤重金 属分布特征及生态风险评价[J].环境工程,2019,37
 (5):45-49,55.

Kuang Q, Huang T, Xiang J, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the soil of a farmland protection area in northwest Hubei [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5):45-49,55.

 [2] 张建东,赖建清,范舟,等.理想点法在太原盆地土壤 重金属污染等级评价中的应用[J].物探与化探, 2009,33(2):161-164.

Zhang J D, Lai J Q, Fan Z, et al. The application of the ideal point method to the grade evaluation of heavy metal pollution in soils of Taiyuan Basin [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009, 33(2):161 – 164.

 [3] 吕建树,张祖陆,刘洋,等.日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J].地理学报,2012,67(7): 971-984.

> Lv J S,Zhang Z L,Liu Y, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (7):971-984.

 [4] 张菊,陈诗越,邓焕广,等.山东省部分水岸带土壤重 金属含量及污染评价[J].生态学报,2012,32(10): 3144-3153.

Zhang J, Chen S Y, Deng H G, et al. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10):3144-3153.

 [5] 石占飞,王力.神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(6): 1150-1158.

Shi Z F, Wang L. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. Journal of Agro – Environment Science, 2013,32(6):1150 – 1158.

[6] 郭笑笑,刘丛强,朱兆洲,等.土壤重金属污染评价方 法[J].生态学杂志,2011,30(5):889-896. Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5):889 – 896.

- [7] 赵科理,傅伟军,戴巍,等.浙江省典型水稻产区土壤 -水稻系统重金属迁移特征及定量模型[J].中国生态农业学报,2016,24(2):226-234.
  Zhao K L, Fu W J, Dai W, et al. Characteristics and quantitative model of heavy metal transfer in soil - rice systems in typical rice production areas of Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2016,24(2):226-234.
- [8] 洪涛,孔祥胜,岳祥飞.滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J].环境科学,2019,40
   (10):4620-4627.

Hong T, Kong X S, Yue X F. Concentration characteristics, source analysis, and potential ecological risk assessment of heavy metals in a peak – cluster depression area, southeast of Yunnan Province [J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4620 – 4627.

[9] 王玉军,吴同亮,周东美,等.农田土壤重金属污染评价研究进展[J].农业环境科学学报,2017,36(12): 2365-2378.

> Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2017,36(12):2365-2378.

- [10] 周国华. 土壤重金属生物有效性研究进展[J]. 物探 与化探,2014,38(6):1097-1106.
  Zhou G H. Recent progress in the study of heavy metal bioavailability in soil[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2014,38(6):1097-1106.
- [11] 孟敏,杨林生,韦炳干,等.我国设施农田土壤重金属 污染评价与空间分布特征[J].生态与农村环境学报, 2018,34(11):1019-1026.
   Meng M, Yang L S, Wei B G, et al. Contamination

assessment and spatial distribution of heavy metals in greenhouse soils in China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(11):1019-1026.

- [12] 周永超,孙慧兰,陈学刚,等. 绿洲城市伊宁市表层土 壤重金属污染特征及其生态风险评价[J]. 干旱区资 源与环境,2019,33(2):127-133.
  Zhou Y C, Sun H L, Chen X G. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface soil of Yining in Oasis City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33 (2): 127-133.
- [13] 叶宏萌,李国平,郑茂钟,等.茶园土壤重金属空间分 异及风险评价[J].森林与环境学报,2016,36(2):

— 418 —

209 - 215.

Ye H M, Li G P, Zheng M Z. Spatial variation and risk assessment of heavy metals in the tea garden soils [J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36 (2): 209-215.

[14] 王蕊,陈明,陈楠,等.基于总量及形态的土壤重金属 生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例[J].环境科 学,2017,38(10):4348-4359.

Wang R, Chen M, Chen N, et al. Comparison of ecological risk assessment based on the total amount and speciation distribution of heavy metals in soil: A case study for Longyan City, Fujian Province [J]. Environmental Science, 2017, 38(10):4348-4359.

[15] 何博,赵慧,王铁宇,等. 典型城市化区域土壤重金属
 污染的空间特征与风险评价[J]. 环境科学,2019,40
 (6):2869-2876.

He B,Zhao H, Wang T Y, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in soils from a typical urbanized area [J]. Environmental Science, 2019, 40 (6):2869-2876.

 [16] 王斐,黄益宗,王小玲,等. 江西某铜矿冶炼厂周边土 壤重金属生态风险评价[J]. 环境化学,2014,33(7): 1066-1074.

Wang F, Huang Y Z, Wang X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of a copper smelting plant in Jiangxi Province [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(7):1066 - 1074.

[17] 王斐,黄益宗,王小玲,等. 江西钨矿周边土壤重金属 生态风险评价:不同评价方法的比较[J].环境化学, 2015,34(2):225-233.

Wang F, Huang Y Z, Wang X L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in surrounding soils of tungsten ores: Comparison of different evaluation method [J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(2):225 – 233.

[18] 罗改,谭晓莲.金阳县丝窝土地开发区土壤重金属污染现状及生态风险评价[J].环境保护与循环经济, 2019,39(10):41-44.

Luo G, Tan X L. Pollution situation and ecological risk assessment of heavy metals in soil in Siwo land development zone, Jinyang County [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2019, 39 (10): 41-44.

[19] 方晓波,史坚,廖欣峰,等.临安市雷竹林土壤重金属 污染特征及生态风险评价[J].应用生态学报,2015, 26(6):1883-1891.

> Fang X B, Shi J, Liao X F, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phyllostachy spraecox* stands of Lin' an [J]. Chinese

Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6):1883 - 1891.

[20] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,阿吉古丽·马木提,艾尼瓦尔·买买提,等.博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].地理学报,2017,72(9):1680-1694.
 Eziz M, Mamut A, Mohammad A, et al. Assessment of

heavy metal pollution and its potential ecological risks of farmland soils of oasis in Bosten Lake Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(9): 1680 – 1694.

[21] 李一蒙,马建华,刘德新,等.开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境科学,2015,36(3):
 1037-1044.

Li Y M, Ma J H, Liu D Z, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng City, China [J]. Environmental Science, 2015,36(3):1037 - 1044.

- [22] 王小莉,陈志凡,魏张东,等. 开封市城乡交错区农田 土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境化学, 2018,37(3):513-522.
  Wang X L, Chen Z F, Wei Z D, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in agricultural soils located in the peri – urban area of Kaifeng City [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37 (3):513-522.
- [23] 赵庆令,李清彩,谢江坤,等.应用富集系数法和地累 积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及 生态风险评价[J]. 岩矿测试,2015,34(1):129-137. Zhao Q L, Li Q C, Xie J K, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and its ecological risk assessment in south Jining District using methods of enrichment factor and index of geoaccumulation [J]. Rock and Mineral Analysis,2015,34(1):129-137.
- [24] 李有文,曹春,巨天珍,等. 白银市不同区域蔬菜地土 壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2015,34(11):3205-3213.
  Li Y W, Cao C, Ju T Z, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of different vegetable soils of Baiyin, Gansu, China [J]. Chinese Journal of Ecology,2015,34(11):3205-3213.
- [25] 张倩,陈宗娟,彭昌盛,等.大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价[J].环境科学,2015,36(11): 4232-4240.

Zhang Q, Chen Z J, Peng C S, et al. Heavy metals pollution in topsoil from Dagang industry area and its ecological risk assessment [J]. Environmental Science, 2015,36(11):4232-4240.

[26] 虞敏达,张慧,何小松,等.典型农业活动区土壤重金 属污染特征及生态风险评价[J].环境工程学报, 2016,10(3):1500-1507.

Yu M D,Zhang H,He X S, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in typical agricultural soils [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(3):1500 - 1507.

[27] 秦鱼生,喻华,冯文强,等.成都平原北部水稻土重金 属含量状况及其潜在生态风险评价[J].生态学报, 2013,33(19):6335-6344.

> Qin Y S, Yu H, Feng W Q, et al. Assessment on heavy metal pollution status in paddy soils in the northern Chengdu Plain and their potential ecological risk [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19):6335-6344.

[28] 赵曦,黄艺,李娟,等.大型垃圾焚烧厂周边土壤重金
 属含量水平、空间分布、来源及潜在生态风险评价
 [J].生态环境学报,2015,24(6):1013-1021.

Zhao X, Huang Y, Li J, et al. Environmental levels, spatial distribution, sources and potential ecological risk of heavy metals in soils surrounding a large solid waste in cinerator [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015,24(6):1013 – 1021.

[29] 郑杰,王志杰,王磊,等.贵州草海流域不同土地利用 方式土壤重金属潜在生态风险评价[J].生态毒理学 报,2019,14(6):1-10.

> Zheng J, Wang Z J, Wang L, et al. Risk potentials of soil heavy metals under different land use patterns in Caohai Basin of Guizhou Province [J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2019,14(6):1-10.

[30] 陆泗进,王业耀,何立环.湖南省某冶炼厂周边农田 土壤重金属污染及生态风险评价[J].中国环境监测, 2015,31(3):77-83.

Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils near a smelting area in Hunan Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(3):77-83.

 [31] 陆泗进,王业耀,何立环.会泽某铅锌矿周边农田土 壤重金属生态风险评价[J].生态环境学报,2014,23
 (11):1832-1838.

Lu S J, Wang Y Y, He L H. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soilsaround a Pb – Zn mine in Huize Country [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23 (11):1832 – 1838.

[32] 杨净,王宁.夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在
 生态风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(3):
 595-600.

Yang J, Wang N. Assessment of potential ecological risk of heavy metals in soils from Jia – Pi – Gou gold mine area, China [J]. Journal of Agro – Environment Science, 2013,32(3):595 – 600. [33] 黄顺红,杨伊,李倩,等.铅锌矿区土壤重金属空间分布及生态风险评价[J].环境科学与技术,2016,39
 (2):186-192.

Huang S H, Yang Y, Li Q, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in soil around lead – zinc mining area [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 186 – 192.

- [34] 李仕群,朱静媛,崔留欣,等. 沙颍河沈丘段底泥、土壤中砷及重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 生态毒理学报,2013,8(2):275-279.
  Li S Q, Zhu J Y, Cui L X, et al. Pollution and risk assessment of arsenic and heavy metals in sediments and soils from Shenqiu Section of Shaying River[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2013,8(2):275-279.
- [35] 戴彬,吕建树,战金成,等.山东省典型工业城市土壤 重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J].环境 科学,2015,36(2):507-515.
  Dai B,Lv J S,Zhan J C, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metalsin soils in a typical industry – based city of Shandong Province, eastern China [J]. Environmental Science, 2015,36(2):507-515.
- [36] 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,等. 顺德水道土壤及沉积物中 重金属分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2016,37(5):1763-1770.
  Cai Y M, Chen W P, Peng C, et al. Spatial distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals insoils and sediments in Shunde Waterway, southern China[J]. Environmental Science, 2016, 37(5):1763-1770.
- [37] 高鹏,刘勇,苏超.太原城区周边土壤重金属分布特 征及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2015,34
  (5):866-873.
  Gao P,Liu Y,Su C. Distribution and risk assessment of

soil heavy metals in area surrounding Taiyuan City[J]. Journal of Agro – Environment Science, 2015, 34(5): 866 – 873.

[38] 周艳,陈樯,邓绍坡,等.西南某铅锌矿区农田土壤重 金属空间主成分分析及生态风险评价[J].环境科学, 2018,39(6):2884-2892.

Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al. Principal component analysis and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils around a Pb – Zn mine in southwestern China[J]. Environmental Science, 2018, 39(6):2884 – 2892.

[39] 海米提·依米提,祖皮艳木·买买提,李建涛,等.焉
 耆盆地土壤重金属的污染及潜在生态风险评价[J].
 中国环境科学,2014,34(6):1523-1530.

— 420 —

Hamid Y, Zulpiya M, Li J T, et al. Sources explanation, pollution and assessment of potential ecological hazards of heavy metals in the soils of Yanqi Basin, China [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (6): 1523 – 1530.

[40] 冉秀芝,吴爽,谢相尉,等.重庆市某区果蔬基地土壤 重金属污染及其风险评价研究[J].食品与发酵科技, 2019,55(6):115-121.

> Ran X Z, Wu S, Xie X W, et al. Evaluation of heavy metals pollution risk of fruit and vegetable bases in the suburbs of Chongqing [ J ]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2019, 55(6):115 - 121.

[41] 崔勇,柏连阳,龙岳林,等.长沙市近郊莲花镇土壤重金属生态风险评价[J].环境工程,2020,38(5):202-209.

Cui Y, Bai L Y, Long Y L, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in soils of Lianhua Town in the suburbs of Changsha [ J ]. Environmental Engineering, 2020, 38(5):202 – 209.

[42] 张广胜,徐文彬,李俊翔,等.一个未开采的铅锌矿周 边土壤重金属含量及生态安全评价[J].生态环境学 报,2015,24(3):522-528.

> Zhang G S, Xu W B, Li J X, et al. Heavy metals pollution and eco – security evaluation in the surrounding soil of an untapped lead – zinc mining [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3):522 – 528.

[43] 张学礼,徐乐昌,张辉.某铀尾矿库周围农田土壤重 金属污染潜在生态风险评价[J].中国环境监测, 2016,32(6):76-83.

> Zhang X L, Xu L C, Zhang H. Potential ecological risk assessment of heavy metals contamination in farmland soils near an uranium tailings pond [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, 32(6):76-83.

- [44] Pardo T, Clemente R, Epelde L, et al. Evaluation of the phytostabilisation efficiency in a trace elements contaminated soil using soil health indicators[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 268:68 - 76.
- [45] Lee C S L, Li X, Shi W, et al. Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. Science of the Total Environment, 2006, 356:45 - 61.
- [46] 王小宇,周忠发,黄登红,等.喀斯特山区茶园土壤重 金属污染损失率模型评价研究[J].环境工程,2018, 36(3):169-175.

Wang X Y, Zhou Z F, Huang D H, et al. Study on evaluation model of heavy metal pollution loss rate in teagarden soils in Karst mountainous region [J]. Environmental Engineering, 2018, 36(3):169 – 175. [47] 李飞,黄瑾辉,李雪,等. 基于随机模糊理论的土壤重 金属潜在生态风险评价及溯源分析[J].环境科学学 报,2015,35(4):1233-1240.
Li F, Huang J H, Li X, et al. Potential ecological risk assessment based on stochastic - fuzzy simulation for soils and pollution source identification [J]. Acta

Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(4): 1233 - 1240.

- [48] 罗厚枚,王宏康.用灰色聚类法综合评价土壤中重金属污染程度[J].北京农业大学学报,1994(2): 197-203.
  Luo H M, Wang H K. Application of gray cluster method in comperhensive evalution of heavy matel pollusion in soil [J]. Acta Agriculaturae Universitatis Pekinensis, 1994(2):197-203.
- [49] 岑静,陈家玮,杨忠芳,等. 层次分析法在四川省通江 县广纳镇土地评估中的应用[J]. 地质通报,2008,
  (2):277-285.
  Cen J, Chen J W, Yang Z F, et al. Application of the

Cen J, Chen J W, Yang Z F, et al. Application of the analytic hierarchy process in the evaluation of land quality of Guangna Town, Tongjiang County, Sichuan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (2): 277 – 285.

- [50] 疏志明,王雄军,赖健清,等.分形理论在太原盆地土 壤重金属元素分析中的应用[J].物探与化探,2009, 33(2):157-160.
  Shu Z M, Wang X J, Lai J Q, et al. The application of fractal theory to soil heavy trace metal analysis in Taiyuan Basin, Shanxi Province [J]. Geophysical & Geochemical Exploration,2009,33(2):157-160.
- [51] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报,2010,26(17):310-315.
  Fan S X,Gan Z T,Li M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2010,26(17):310-315.
- [52] 周亚龙,郭志娟,王成文,等.云南省镇雄县土壤重金 属污染及潜在生态风险评估[J].物探与化探,2019, 43(6):1358-1366.
  Zhou Y L, Guo Z J, Wang C W, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiong County, Yunnan Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(6): 1358-1366.
- [53] 高娟琴,于扬,王登红,等. 川西甲基卡锂资源富集区 根系土壤重金属含量水平及时空分布特征[J]. 岩矿 测试,2019,38(6):681-692.
  Gao J Q, Yu Y, Wang D H, et al. The content and distribution characteristics of heavy metals in root soil in Jiajika lithium - bearing area, western Sichuan Province

[J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38 (6): 681-692.

- [54] 王刚.四川省九龙县土地利用变化特征及生态系统 服务价值分析[D].成都:四川农业大学,2019.
  Wang G. Analysis of land use characteristics and ecosystem service value in Jiulong County, Sichuan Province [D].
  Chengdu:Sichuan Agricultural University,2019.
- [55] 王伟,刘图强,袁蔺平,等.川西九龙黄牛坪铍矿床地 质特征及找矿潜力[J].中国地质调查,2019,6(6): 72-78.

Wang W, Liu T Q, Yuan L P, et al. Geological characteristics and prospecting potential of Huangniuping beryllium deposit in Jiulong of West Sichuan [J]. Geological Survey of China,2019,6(6):72-78.

- [56] Ji Y Q, Fengy C, Wu J H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20 (5): 571-578.
- [57] Loska K, Wiechuła D, Korus I. Metal contamination of farming soils affected by industry [J]. Environment International, 2004, 30(2):159-165.
- [58] 赵兵,王玉云,徐德江,等.四川石棉工业园区周边土 壤重金属污染及生态风险评价研究[J].四川环境, 2019,38(6):138-142.

Zhao B, Wang Y Y, Xu D J, et al. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk of soils near a industrial park in Shimian Sichuan Province [J]. Sichuan Environment, 2019, 38(6):138-142.

[59] 王玉云,赵兵,徐德江,等.四川雅安工业园区周边土 壤重金属空间分布及污染评价研究[J].四川环境, 2019,38(6):133-137.

Wang Y Y, Zhao B, Xu D J, et al. Study on the spatial distribution and pollution evaluation of soil heavy metals

around a industrial park in Ya'an, Sichuan Province [J]. Sichuan Environment, 2019, 38(6):133-137.

- [60] Tomlinson D, Wilson J, Harris C, et al. Problems in the assessment of heavy – metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgoländer Meeresunter Suchungen, 1980, 33(1):566 - 575.
- [61] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975 - 1001.
- [62] 徐争启,倪师军,庹先国,等.潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J].环境科学与技术,2008
  (2):112-115.
  Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology,2008(2):112-115.
- [63] Lai H Y, Hseu Z Y, Chen T C, et al. Health risk based assessment and management of heavy metals – contaminated soil sites in Taiwan [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2010,7(10):3595 – 3614.
- [64] Wu K, Zhang L. Progress in the development of envir - onmental risk assessment as a tool for the decision making process [J]. Journal of Service Science and Management, 2014, 7:131 - 143.
- [65] 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.
- [66] Ministry of The Environment. Soil, ground water and sediment standards for use under part XV. 1 of the Environmental Protection Act [R]. Ontario: Ministry of the Environment, Conservation and Parks, 2009.

# Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from Jiulong Li – Be Mining Area, Western Sichuan Province, China

YU Feng<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, YU Yang<sup>2</sup>\*, WANG Deng - hong<sup>2</sup>, LIU Shan - bao<sup>2</sup>, GAO Juan - qin<sup>1,2</sup>, LV Bing - ting<sup>3</sup>, LIU Li - jun<sup>3</sup>

- School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
   Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Natural Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
- 3. Geology and Mineral Resources Scientific Institute, Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610036, China)

## HIGHLIGHTS

- (1) The concentrations of heavy metals in the soil in Jiulong, eastern Sichuan, China, had a wide range, and the distribution was affected by the rock mass in space.
- (2) The assessment result of the index method showed that there was no pollution of heavy metals in the study area and the potential harm was also low.
- (3) The assessment results of the health risk model indicated that the non carcinogenic and carcinogenic risks of heavy metals in the study area did not exist or were relatively low.



# ABSTRACT

**BACKGROUND**: The Jiulong area in western Sichuan is an important rare metal production area in China, which has a large resource potential. As an ecological protection barrier on the upper reaches of the Yangtze River, the ecological environment of this area is fragile. Facing the huge opportunities of mining development and under the current situation of 'environmental protection first', it is urgent to investigate the environmental background of this area to support the development of national energy strategy.

**OBJECTIVES**: To evaluate the ecological risk of heavy metals in soils from the Jiulong Li - Be mining area.

**METHODS**: A total of 352 soil samples were collected. The concentration of 7 heavy metals (Cd, As, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn) in soil was analyzed by NexION 300x inductively coupled plasma – mass spectrometer (ICP – MS). The comprehensive assessment methods including geoaccumulation index, pollution load index, potential ecological risk index, and health risk model, combined with GIS spatial analysis were used to study the spatial distribution characteristics and ecological risk of heavy metals in the soil.

**RESULTS**: The average concentration of all 7 heavy metals in the soil in Jiulong did not exceed the Chinese national standard. There was no soil heavy metals pollution in the studied area. Compared with the soil background value of Sichuan Province, the average concentrations of As and Pb were lower than the background; the concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, and Zn were higher than the background, which were 2.44, 1.04, 1.15, 1.28, and 1. 17 times the background values, respectively. The spatial distribution characteristics of these elements except As were affected by biotite granite in the study area. The high concentration center of Pb and the low concentration center of Cr, Cu, Ni and Zn had an obvious correspondence with the spatial position of the rock mass. Except for the weak accumulation indicated by Cd  $I_{geo}$ , there was no accumulation of other heavy metals. Similarly, there was no potential ecological risk in the study area, except for the slight potential ecological risk of Cd. Spatially, the distribution of Cd single element potential ecological risk index was related to the rock mass. Heavy metals in the soil can enter the human body through direct contact with hands, mouth, and skin, and through inhalation. The hand – to – mouth approach is the most important way to generate health risks among all 3 approaches. Except hand – to – mouth approach of Cr, which has an acceptable and normal natural carcinogenic risk, there is no carcinogenic risk for other metals.

**CONCLUSIONS**: At present, there is no pollution of heavy metals in the soil in the studied area. The potential risk of heavy metals is low, and there are no non – carcinogenic and carcinogenic risks. However, due to the cumulative effect of heavy metals in the soil, close attention must be paid to changes in the concentration of heavy metals in the soil in the future mining development process, to prevent the risk caused by heavy metals pollution.

**KEY WORDS**: heavy metals; index of geoaccumulation; pollution load index; potential ecological risk; health risk assessment