

doi: 10.12029/gc20210306

林苾,梁文静,焦旸,杨莉,范亚宁,田涛,刘晓萌. 2021. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. 中国地质, 48(3): 749–763.

Lin Jin, Liang Wenjing, Jiao Yang, Yang Li, Fan Yaning, Tian Tao, Liu Xiaomeng. 2021. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province[J]. Geology in China, 48(3): 749–763(in Chinese with English abstract).

## 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤 重金属生态健康风险评价

林苾<sup>1</sup>,梁文静<sup>1</sup>,焦旸<sup>2</sup>,杨莉<sup>3</sup>,范亚宁<sup>1</sup>,田涛<sup>1</sup>,刘晓萌<sup>1</sup>

(1. 陕西省环境科学研究院,陕西 西安 710061;2. 陕西省测绘地理信息局,陕西 西安 710054;3. 长安大学,陕西 西安 710064)

**摘要:**为了解潼关金矿矿区早期粗放式的矿业活动对矿区周边农田土壤的重金属污染状况的影响以及对暴露人群的不良健康效应的评价,采用地质调查工程选取了矿区附近 6 块农田土壤为研究对象,通过 X 射线荧光光谱分析法测定了 68 个土壤样本中 Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 等 8 种土壤重金属含量,采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型分别评价该区土壤重金属污染程度、潜在生态风险和人体健康风险。结果表明,该区农田土壤中 Cd、Hg、Pb、Cu、Ni、Zn 6 种重金属平均值高于潼关县土壤背景值,呈现不同程度的积累;Pb、Hg、Cd 的土壤积累含量不仅超出了土壤重金属污染对农产品质量存在安全风险的最低限值农用地土壤污染风险筛选值,还分别以 41.2%、72.1%、14.7% 的超标率超出了土壤重金属污染对农产品质量存在安全风险的最高限值农用地土壤污染风险管制值;研究区土壤重金属污染评价显示,土壤中 Hg、Cd、Pb 总体污染程度最重,Cu、Zn 总体呈现轻—重污染,Ni、Cr、As 总体呈现无污染状态。生态风险评价显示,Hg、Cd、Pb 为主要生态危害元素,Hg 为极强风险,Cd 和 Pb 为强风险。人体健康风险表明,研究区重金属对儿童的非致癌风险显著,Pb、Hg 为主要非致癌因子;致癌风险均在合理范围,Cd 致癌风险最大,手—口摄入为最主要的暴露途径,儿童更易受到重金属污染威胁。

**关键词:**潼关县金矿矿区;农田土壤;地质调查工程;重金属;生态风险;健康风险

**中图分类号:**P595;X142 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2021)03-0749-15

## Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province

LIN Jin<sup>1</sup>, LIANG Wenjing<sup>1</sup>, JIAO Yang<sup>2</sup>, YANG Li<sup>3</sup>, FAN Yaning<sup>1</sup>, TIAN Tao<sup>1</sup>, LIU Xiaomeng<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Academy of Environmental Sciences, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to understand the impact of the early extensive mining activities in the Tongguan gold mine on the heavy metal pollution of the farmland soil and the evaluation of the adverse health effects of the exposed population, engineering six farmland soils near the mine area were selected as the research object in the geological survey. Spectral analysis method was used to

收稿日期: 2020-04-21; 改回日期: 2021-05-09

基金项目: 陕西省环境科学研究院潼关金矿矿区农田重金属污染调查科研项目(SXH[2019]-18)资助。

作者简介: 林苾,男,1987年生,硕士,工程师,主要从事土壤重金属污染研究及污染修复研究工作; E-mail: 1319389623@qq.com。

determine the contents of Cd, Hg, As, Pb, Cr, Cu, Ni, Zn and other 8 soil heavy metals of 68 soil samples. The soil accumulation index method, potential ecological hazard index method and health risk assessment model were used to evaluate the soil heavy metal pollution degree, potential ecological risk and human health risk in the area. The results show that the average values of Ni, Hg, Cd, Zn, Pb and Cu in the farmland soil in this area are higher than the soil background value of Tongguan County, indicating different levels of accumulation. The accumulated soil content of Pb, Hg, and Cd not only exceeds the minimum limit of the safety risk of heavy metal pollution, but also exceeds the maximum limit of the safety risk of heavy metal pollution on the quality of agricultural products by 41.2%, 72.1%, and 14.7% of the exceedance rates respectively. The evaluation of soil heavy metal pollution in the study area shows that the total pollution degree of Hg, Cd and Pb in the soil is the heaviest, Cu and Zn are generally light to heavy pollution, and Ni, Cr and As are generally pollution-free. The ecological risk assessment shows that Hg, Cd, and Pb are the main ecological hazard elements, Hg is a very strong risk, and Cd and Pb are strong risks. Human health risks show that the non-carcinogenic risk of heavy metals to children is obvious, and Pb and Hg are the main non-carcinogenic factors. Carcinogenic risks are within a reasonable range. Cd is the most carcinogenic risk, and hand-mouth intake is the most important exposure route. Children are more vulnerable to heavy metal pollution.

**Key words:** Tongguan gold mine; soil; geological survey engineering; heavy metal; ecological risk; health risk.

**About the first author:** LIN Jin, male, born in 1987, master, engaged in research on soil heavy metal pollution and pollution remediation research; E-mail: 1319389623@qq.com.

**Fund support:** Funded by Shaanxi Academy of Environmental Sciences Tongguan Gold Mine Mining Area Farmland Heavy Metal Pollution Investigation and Research Project (No. SXH[2019]-18).

## 1 引 言

金矿山开采及矿石冶炼过程中,大量重金属会伴随尾矿渣、冶炼废水和废气通过雨水淋溶渗透、污水灌溉以及大气降尘等方式进入土壤(Wei et al., 2009; Li et al., 2014; 曹雪荧等, 2015)。由于重金属元素在土壤中的累积性、多样性、稳定性和生物毒性(夏维玉, 2017),使得进入土壤的重金属通过吸附、沉淀、络合等作用形成不同的赋存形态,不同形态之间还存在着相互转换,共同影响了土壤的pH、阳离子交换量、氧化还原电位、黏粒含量等土壤理化指标,高浓度土壤重金属使得土壤中的含氧量、孔隙率、微生物等含量减少,抑制了植物根系的生长以及对有益矿质元素的吸收转移。同时土壤重金属可以通过人体直接暴露在污染区时以人体皮肤接触和呼吸吸入的方式,以及通过“土壤-农作物-人体”和“土壤-农作物-动物-人体”的食物链间接进入人体的方式在人体内蓄积,严重威胁人体健康(张小敏等, 2014)。

目前对于土壤重金属污染的风险评价,国内外学者常用评价方法主要有单因子指数法、内梅罗指数法、地累积指数法和潜在生态危害指数。其中:柳云龙(2015)通过单因子指数法对上海城-郊-乡土壤重金属污染进行浓度梯度分析,单因子指数法

只需要计算土壤中某一种重金属实测浓度和土壤环境质量标准比值,评价计算公式简单,但计算结果只能反映出某种重金属的污染程度,无法综合性地反映重金属在土壤中的污染程度;王幼奇(2016)采用内梅罗指数法对银川市不同功能区表层土壤开展风险评价,内梅洛指数计权了单元极值或突出最大值,但是没有考虑到受体受到污染物的毒性危害程度,并且异常值也会影响评价结果的准确性;Umme Aiman(2016)运用地累积指数法对一个位于巴基斯坦拉尔市的垃圾填埋场土壤开展了风险评价,地累积指数法在充分考虑土壤背景值对评价结果影响的基础上,还考虑道路重金属污染受人类活动的影响程度,综合判定后给出土壤重金属污染程度直观判断标准,但其缺少不同土壤重金属污染因子综合作用的效果;管后春(2013)对黄山城区及郊区土壤重金属风险评价过程中运用了潜在生态危害指数法,在全面考虑了土壤重金属含量和重金属的环境效应、生态效应、毒理性联系后,综合反映出重金属对生态环境的影响,具有快速、准确、简便等特性,是目前开展土壤重金属污染风险评价最常用的评价方法。

潼关县位于小秦岭金矿带,是中国第二大黄金产区。南部山地灌木丛林区为选矿、冶炼的主要区域。在20世纪80至90年代,矿业开采混乱、乱采滥

挖严重,冶炼主要以混汞-浮选法提金,废渣、废水以及废气随意排放现象突出(庞喆等,2019)。附近村民个体还采用小浮选、小氰化、小汞碾的“三小”提金法对尾矿渣进行二次提金,提金过程产生污染性更大的废弃物被直接倾倒在河道旁以及平原沟壑谷地处,更加剧了当地农田土壤有害重金属污染程度(张江华等,2020)。近年来,对于潼关金矿区农田土壤重金属污染的研究偏重于污染的环境效应,如张俊丽等(2019)对潼关县农田重金属污染风险评价,发现研究区的农田土壤中Pb、Cd和Hg超标率分别达到16.0%、56.0%和80.0%。李庚飞等(2012)对潼关县某金矿区排水沟附近土壤的重金属污染风险状况研究,发现Ag、Hg单项污染指数平均值分别为321和252,均已达到极严重污染状态,Mo、As、Zn和Se污染状况虽然相对较轻,但其平均值也已达重度污染水平。随着对土壤重金属污染环境问题的不断深入的研究,土壤重金属污染直接或间接的影响到人体的健康风险,相比与全国其他地区重金属污染对于人体的健康风险的影响性分析,针对于潼关县金矿区土壤重金属污染对于当地人群人体健康风险的影响评价相对较少。本文选择对潼关县金矿区周边农田作为研究对象,揭示其土壤重金属污染状况,分析对人体健康的危害程度,为后期改良潼关县土壤重金属污染和提升居民健康生活水平提供科学依据。

## 2 研究区概况

潼关县位于陕西省中东部,东邻河南省灵宝市,西接华阴市、南依秦岭连接洛南县,西北与大荔县毗邻,北与山西省芮城县分列黄河两侧。潼关县地处秦岭山地,关中盆地东南缘的内侧,地势南高北低,海拔为320~2100 m,地貌呈冲积平原、漫滩阶地、黄土沟壑、冲积斜塬区、中一低山陡坡山地区等五类地貌区(柯海玲,2005;徐东寅,2011)。气候类型属温带大陆性季风型干旱气候,四季多风、气候干燥,年平均降雨量625 mm,年平均日照属2269 h。境内河流众多,河流沿地形从东南向西北分布(胡明,2014)。

潼关县金矿开采区位于县城南部,矿区东西相距18 km,南北相距8~10 km,总面积162 km<sup>2</sup>,占全县国土面积的42%。其中金矿工业储量超过100 t,同时伴生银、铅。另外有铁矿及石英石、石墨、熔炼

水晶、大理岩、辉绿岩等非金属矿产,从矿区金石英脉相对密集的程度看,最主要的金矿区分布在东桐峪金矿区、麻(峪)太(峪)金矿区、西潼峪金矿区3个矿区。矿区中多金属矿多以铅为主,铜、锌次之,亦伴生有银。铅、锌、铜、银多金属和金在潼关县小秦岭中是同一成矿系列,具有成矿机理上的内在本质联系,所以在矿体形态、控矿因素等地质背景和金矿是基本相同的,区别仅在于同一脉体甚至矿体中铅及其他伴生金属和金的富集部位不同。潼关金矿开发产生的废渣,其分布在区域上具有明显的规律。南部山区主要为采矿废石渣、少量选矿尾矿渣。选(冶)厂、尾矿库和氰化池以及无库的尾矿渣堆主要分布于山前斜塬区。黄土残塬和黄渭河平原区主要分布小型尾矿渣库。选矿尾矿渣在占压土地、农田的同时,含有高浓度的Hg、Pb、Cd、Cu和Zn重金属元素,因矿业污水灌溉、暴雨作用导致农田污染;冬春季节大风扬尘的作用下,随风飘入村民院落、周边农田,导致农田土壤重金属含量升高。结合潼关县土壤、农业生产、污染源及河流分布,确定地处34°28'28~24°34'17N,110°18'35~110°22'14E之间的6块潼关县金矿区附近农田作为研究区域。

## 3 材料与方法

### 3.1 样品采集

在潼关县3个乡镇6个村的3种不同地块类型(傍河流农田、尾矿库旱地、废渣堆置区农田)的农田设置了6个调查点位,依据调查点位农田面积大小并结合现场实际地形地貌共布设了68个采样点,其中在傍河流农田布设了16个采样点,在尾矿库旱地布设了18个采样点,在废渣堆置区农田布设了34个采样点。调查点位分别为太要村旱地、下马店村农田、窑上村农田、东上官村农田、善车口村农田、万家岭村农田。采样时间为2019年5月至8月,进行现场采样(王斌等,2012)。采样点GPS精确定位,用木铲铲取地块0~20 cm的表层土壤,先去除表层土中碎砾石及植物根系等杂物,在每一个采样地块的4个方位点和1个中心点采集土壤样,等量均匀混合后采用四分法,取1 kg土壤样品带回实验室处理。图1为调查地块位置分布情况。

### 3.2 样品分析

带回实验室的土壤样品放置于通风、避光、干



燥处自然风干,去除土样杂质后研磨,经100目尼龙筛筛选后备测。采用玻璃电极法测定土壤样品的pH值,采用通过X射线激发双曲面弯晶晶体DCC单色光技术的三代XRF测定土壤样品的重金属含量,XRF仪器对于土壤测试样品有Mining-LE-FP, Mining-MidS-FP, Mining-fP共3种测试曲线(表1),将仪器自带的粉末压片标准样品,在土壤样品测试前对XRF进行重金属标准曲线绘制及校准,然后将测试土壤样品同样进行粉末压片制备。为了使得8种土壤重金属含量测定值均符合国家标准参

比物质允许的误差范围,将每个测试样品单次测量时间设定为300 s;为了减少偶然误差,对土壤样进行10次测量,并取其平均值。

### 3.3 数据处理

采用Excel2011和Origin9.0对数据进行分析和处理。

### 3.4 生态风险评价方法与标准

#### 3.4.1 土壤重金属污染地累积指数法

地累积指数法又称为Mull指数(Muller, 1969),该方法广泛应用于研究沉积物及土壤中重金属污

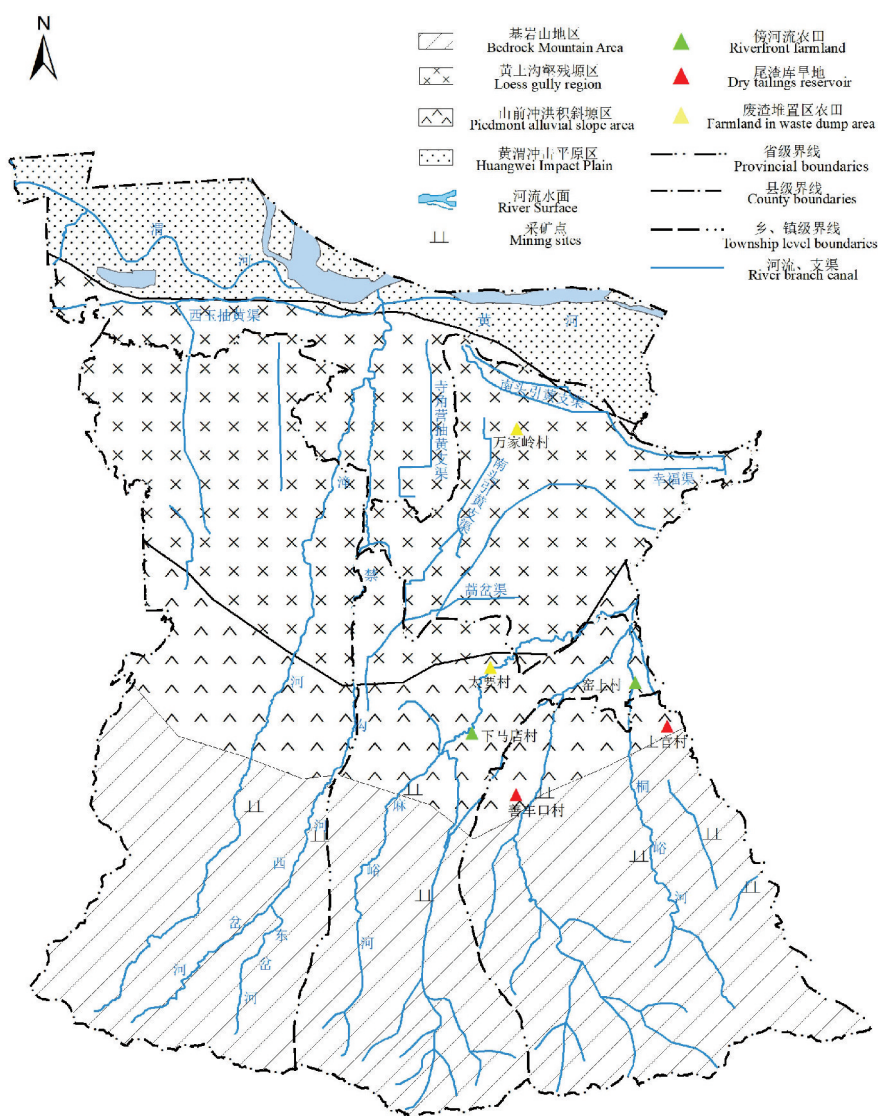


图1 潼关县太要村、下马店村、窑上村、东上官村、善车口村、万家岭村调查地块位置示意图

Fig.1 Location of investigate sites of Taiyao, Xiamadian, Yaoshang, Dongshangguan, Shanchekou and Wanjialing in Tongguan County

表 1 各元素测试曲线

测试曲线	元素
Mining-LE-FP	Al、Si、P、S、Ba、S、V、Mg
Mining-MidS-FP	Pb、U、Ni、W、As、Bi
Mining-fP	K、Ca、Ti、Mn、Fe、Co、Cu、Zn、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Ta、Sb、Cd、Sn、Cr

染程度的定量指标,计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_i}{K \times B_i} \right] \quad (1)$$

式中,  $C_i$  为土壤中重金属  $i$  的实测值;  $B_i$  为参考潼关县农用地土壤重金属元素背景值(中华人民共和国土壤环境背景值图集, 1994; 柯海玲, 2005; 胡明, 2014);  $K$  为转换系数, 一般为常量 1.5。根据地累积指数将重金属污染共分为 6 级(表 2)(Diami et al., 1993; 彭景等, 2007)。

### 3.4.2 土壤重金属潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数又称为 PER (Hakanson, 1980), 该指数根据土壤重金属性质及特点, 既考虑污染物含量, 还考虑了污染物毒性, 可反映多种污染物的综合作用, 可将潜在生态风险程度进行定量划分(管后春等, 2013; 徐玉霞等, 2016; 代杰瑞等, 2018), 其计算公式如下:

$$P_i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times P_i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i} \quad (4)$$

式中,  $P_i$  是某一重金属污染参数,  $C_i$  是土壤中某种重金属的实测值;  $C_n^i$  为潼关县农用地土壤重金属元素背景值(中华人民共和国土壤环境背景值图鉴, 1994; 柯海玲, 2005; 胡明, 2014);  $E_r^i$  为某一重金属潜在生态危害风险指数;  $T_r^i$  为某重金属的毒性响应参数;  $RI$  为总的潜在生态危害风险指数。根据  $E_r^i$  和  $RI$ , 将单因子潜在生态危害和总潜在生态危害共分成了 5 级(表 3)。各重金属毒性系数为: Mn=Zn=1、Cr=V=2、Ni=Cu=Pb=Cu=5、As=10、Cd=30、Hg=40(徐争启等, 2008; 邱其俊等, 2017)。

### 3.4.3 土壤重金属人体健康风险评价

参考美国国家环境保护署 (USEPA) 提出的土壤健康风险模型, 对潼关县金矿区附近居民人体健康风险进行评价, 评价主要分为暴露计量计算和

表 2 地累积指数与污染程度分级

Table 2 The geo-accumulation index and classification of pollution degree

地累积指数 $I_{geo}$	级别	污染程度
$I_{geo} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{geo} < 1$	1	轻污染
$1 \leq I_{geo} < 2$	2	中污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中-重污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	重污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	重-极重污染
$5 \leq I_{geo}$	6	极重污染

表 3 Hakanson 潜在生态危害评价指标

Table 3 Indices used to assess the potential ecological risk status

单项重金属潜在生态危害指数 $E_r^i$	单因子污染物生态风险程度	多项重金属潜在生态危害指数 $RI$	总潜在生态危害指数
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$600 \leq RI < 1200$	很强
$320 \leq E_r^i$	极强	$1200 \leq RI$	极强

健康风险表征两个部分。土壤重金属对人体有非致癌和致癌风险, 并主要经手-口直接摄入、呼吸吸入、皮肤接触 3 种途径进入人体。

#### (1) 暴露量的计算

参考美国环境保护局的指南和暴露因子手册(尹伊梦等, 2018)(表 4)对于致癌重金属在上述 3 种途径下对于成人的致癌日平均暴露量, 以及对于成人和儿童的非致癌日平均暴露量, 通过公式(5)~(7)计算。

$$ADD_{ing} = C_i \times \frac{Ing \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$ADD_{inh} = C_i \times \frac{InhR \times EF \times PD}{PEF \times BW \times AT} \quad (6)$$

$$ADD_{idem} = C_i \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (7)$$

式中,  $ADD_{ing}$ 、 $ADD_{inh}$  和  $ADD_{idem}$  分别代表经手-口摄入、呼吸吸入和皮肤接触摄入某种重金属的日均暴露计量,  $C_i$  为土壤中某种重金属含量。参照不同季节中国人暴露皮肤表面积和潼关县农村人口平均身高和体重计算出暴露皮肤表面积(王喆, 2008; 刘梦梅等, 2018)其他参数参照中国环境保护部发布的 HJ 25.3-2014《污染场地风险评估技术导则》(中华人民共和国生态环境部, 2014)和 US EPA 发布的人体参数(US EPA, 2011)。致癌重金属在上

述3种途径下对于儿童致癌终生日平均暴露量按照公式(8)~(10)计算。

$$LADD_{ing} = C_i \times \frac{EF}{AT} \times \left( \frac{IngR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{IngR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times 10^{-6} \quad (8)$$

$$LADD_{inh} = C_i \times \frac{EF}{PEF \times AT} \times \left( \frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times 10^{-6} \quad (9)$$

$$LADD_{idrem} = C_i \times \frac{EF \times SL \times ABS}{AT} \times \left( \frac{SA_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{SA_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \times 10^{-6} \quad (10)$$

## (2) 健康风险表征

式中,  $HQ$  为某种重金属在某一途经的非致癌健康风险指数,  $ADD$  为某种重金属在此途经下的非致癌风险量;  $RfD$  表示某种重金属在该途经下的非致癌日均摄入量;  $HI$  表示所有单项重金属在多种暴露途经下总的非致癌健康风险; 当  $HQ$  或者  $HI < 1$  时, 表示重金属非致癌风险较小或可忽略, 反之, 则可表示重金属非致癌风险存在。

$SF$  为某一重金属致癌风险的斜率度系数;  $Risk$  表示致癌风险; 美国 EPA 研究表明  $Risk$  在  $10^{-6} \sim 10^{-4}$ , 可认为该种重金属不具备致癌风险(韦妮玉等, 2016; 尹伊梦等, 2018), 3种暴露途径的  $RfD$  和  $SF$  值, 见表5(刘庆等, 2008; USEPA, 2009, 2013; 中华人民共和国生态环保部, 2014)。

表4 重金属健康风险暴露参数

参数符号及单位	参数含义	儿童参考值	成人参考值
$C/(\text{mg}/\text{kg})$	重金属浓度	95%UCL	95%UCL
$ED/\text{a}$	暴露年限	6	25
$BW/\text{kg}$	平均体重	15.9	56.8
$EF/(\text{d}/\text{a})$	暴露频率	350	350
$AT$	非致癌/d	平均暴露时间	$365 \times ED$
	致癌/d	平均暴露时间	$365 \times 72$
$IngR/(\text{mg}/\text{d})$	摄食灰尘量	200	100
$InhR/(\text{m}^3/\text{d})$	空气摄入量	7.5	14.5
$PEF/(\text{m}^3/\text{kg})$	颗粒物排放因子	$1.36 \times 10^9$	$1.36 \times 10^9$
$SL/(\text{Mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d}))$	皮肤黏着度	0.2	0.2
$SA/(\text{cm}^2/\text{d})$	暴露的皮肤表面积	1078	2011
$ABS$	皮肤吸入因子	0.001	0.001

注: 95%UCL 为平均值的 95% 置信区间,  $ED$  为 25;  $ABS$  单位为“1”。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤重金属分布特征

潼关县金矿矿区 6 块农田土壤重金属平均含量(表 6)表现出较大的差异, 平均含量由高到底依次为  $Pb > Zn > Cu > Cr > Ni > Hg > As > Cd$ , 其中  $Ni$ 、 $Hg$ 、 $Cd$  的含量范围分别为 24.30~34.90 mg/kg、1.60~59.90 mg/kg、2.30~7.50 mg/kg, 68 个点位均超过潼关县土壤背景值(8 种重金属元素潼关县农田背景值,  $Pb=29.4$  mg/kg,  $Zn=64.5$  mg/kg,  $Cu=22.5$  mg/kg,  $Cr=55.5$  mg/kg,  $Cd=0.08$  mg/kg, 胡明, 2014;  $Hg=0.18$  mg/kg,  $As=11.1$  mg/kg 柯海玲, 2005;  $Ni=20.9$  mg/kg 中华人民共和国土壤环境背景值图集, 1994), 平均含量分别是潼关县土壤背景值的 1.43 倍、90.95 倍、36.37 倍;  $Zn$ 、 $Pb$ 、 $Cu$  的含量范围分别为 61.40~856.00 mg/kg、25.30~4651.00 mg/kg、9.50~697.00 mg/kg, 分别有 97%、94.1% 和 98.5% 的点位超过潼关县背景值, 平均含量分别是潼关县背景值的 3.44 倍、37.89 倍、8.58 倍, 表明这 6 种元素在土壤中有不同程度的积累,  $Ni$ 、 $Hg$ 、 $Cd$  积累效应最明显,  $Zn$ 、 $Pb$  和  $Cu$  积累效应次之。  $Cr$  和  $As$  的含量范围分别为 29.00~58.30 mg/kg、2.20~15.60 mg/kg, 分别有 2.9%、22% 的点位超过潼关背景值, 平均含量分别是潼关背景值的 0.75 倍、0.79 倍, 表明这 2 种元素在土壤中含量平均值稍低, 变化不大。由于该区距离南部采矿山区较远, 但该区小量私人混汞碾、小氰化池分布是造成没有明显的积累效应的原因。从 8 种重金属的变异系数来看,  $Cu(0.88) > Pb(0.86) > Hg$

表5 重金属不同暴露途径参考计量和致癌斜率因子

重金属	参考计量 $RfD/(\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d}))$			致癌因子 $SF/(\text{kg} \cdot \text{d}/\text{mg})$		
	经口	呼吸	皮肤	经口	呼吸	皮肤
Cd	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	6.1	6.3	6.1
Hg	$3.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-5}$	—	—	—
As	$3.0 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-4}$	1.5	$4.3 \times 10^{-3}$	1.5
Pb	$3.5 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^{-3}$	$5.3 \times 10^{-4}$	—	—	—
Cr	$3.0 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-5}$	$7.5 \times 10^{-5}$	—	42	—
Cu	$4.0 \times 10^{-2}$	—	$4.0 \times 10^{-2}$	—	—	—
Ni	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-4}$	—	0.84	—
Zn	$3.0 \times 10^{-1}$	—	$3.0 \times 10^{-1}$	—	—	—

注: “—” 元素对应的致癌因子在该暴露途径下的致癌斜率无对应参数。



表6 研究区表层土壤重金属含量特征(mg/kg)

Table 6 Concentrations distribution of heavy metals in the study area(mg/kg)

特征参数	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Ni	Zn	
最小值	2.30	1.60	2.20	25.30	29.00	9.50	24.30	61.40	
最大值	7.50	59.90	15.60	4651.00	58.30	697.00	34.90	856.00	
平均值1	2.91	16.37	8.83	1114.11	41.55	193.15	29.89	221.90	
变异系数	0.60	0.80	0.34	0.86	0.14	0.88	0.07	0.67	
背景值	0.08	0.18	11.10	29.40	55.50	22.50	20.95	64.50	
潼关土壤 背景值	超出个数	68	68	15	67	2	64	68	66
背景值	平均值1超出 背景值倍数	36.37	90.95	0.79	37.89	0.75	8.58	1.43	3.44
农用地土壤污 染风险筛选值	pH>7.5	0.60	3.40	25	170	250	100	190	300
	超出个数	32	55	*	61	*	41	*	14
	平均值2	3.56	18.16	*	1232.48	*	288	*	459.11
	平均值2超出 筛选值倍数	5.94	5.34	*	7.25	*	2.88	*	1.53
农用地土壤污 染风险管制值	pH>7.5	4.00	6.00	100	1000	1300	-	-	-
	超出个数	10	49	*	28	*	-	-	-
	平均值3	5.40	19.79	*	1960	*	-	-	-
	平均值3超出 管制值倍数	1.35	3.30	*	1.96	*	-	-	-

注: \*表示未超标;变异系数无量纲;Cu、Ni、Zn无农用地土壤污染风险管制值。

(0.80) > Zn (0.67) > Cd (0.60) > As (0.34) > Cr (0.14) > Ni (0.07)。Cu、Pb、Hg的变异系数极高,表明潼关县6块金矿矿区农田3种重金属含量变化具有明显的差异性和离散性,潼关县南部山前冲洪积斜源区和河谷冲积地带3种元素的土壤含量明显增加,由于该区紧邻潼关南部采矿山区,并建有大型选矿厂和尾矿库,用机械对母岩矿石粉碎,所含重金属除被河流带走外,几乎全以尾矿渣的形式堆砌于附近土壤旁,说明3种重金属受到人类活动和采矿冶炼影响较大,空间分布也差异明显(陈怡先等,2018)。Zn和Cd的变异系数较高,这说明2种重金属受到一定的人类活动和采矿冶炼影响,空间分布具有一定的区域集中性。As、Cr、Ni的变异系数极低,说明3种重金属含量在农田土壤中分布较为均匀,受到人类活动和采矿冶炼干扰较小。

潼关县金矿矿区6块农田土壤pH值介于7.64~8.18,对比8种重金属含量分布范围、潼关县土壤背景值、土壤环境质量农用地污染风险筛选值及土壤污染风险管制值(中华人民共和国生态环境部,2018)的分布特征(图2),农田土壤中As、Cr、Ni均未超出农用地土壤污染风险筛选值;Zn、Cu分别有20.5%和60.3%的采样点超出农用地土壤污染风险筛选值,超标采样点重金属含量平均值2分别为农

用地土壤污染风险筛选值的1.53倍和2.88倍;Pb、Hg、Cd不仅分别有89.7%、80.9%、47%的采样点超出农用地土壤污染风险筛选值,还分别有41.2%、72%、14.7%的采样点超出农用地土壤污染风险管制值,超标采样点重金属含量平均值3分别为农用地土壤污染风险管制值的1.96倍、3.30倍、1.35倍。因此,Zn和Cu是潼关县金矿矿区农田土壤的一般超标元素,可能会对本地生态环境和农作物安全产生影响,应当加强监测的同时,可以通过土壤淋洗技术、植物修复技术、微生物修复技术等安全稳定对重金属污染的土壤进行原位土壤修复;Pb、Hg、Cd是潼关县金矿矿区农田土壤的严重超标元素,会对本地的生态环境和农作物安全产生影响,同时也会对人体健康带来危害,应当采取严格的管控措施,可以通过向土壤中添加一土壤改良剂或抑制剂,降低土壤重金属的有效性和迁移性,从而降低重金属污染物对环境中动物、植物的毒性。

#### 4.2 重金属污染程度分析

以潼关土壤背景值为评价标准,运用地累积指数法对潼关县金矿矿区6块农田土壤重金属污染程度进行评价(表7),重金属污染指数平均值由高到低依次为Hg(5.42) > Cd(4.24) > Pb(4.03) > Cu(1.87) > Zn(0.93) > Ni(-0.07) > Cr(-1.01) > As(-1.02)。6

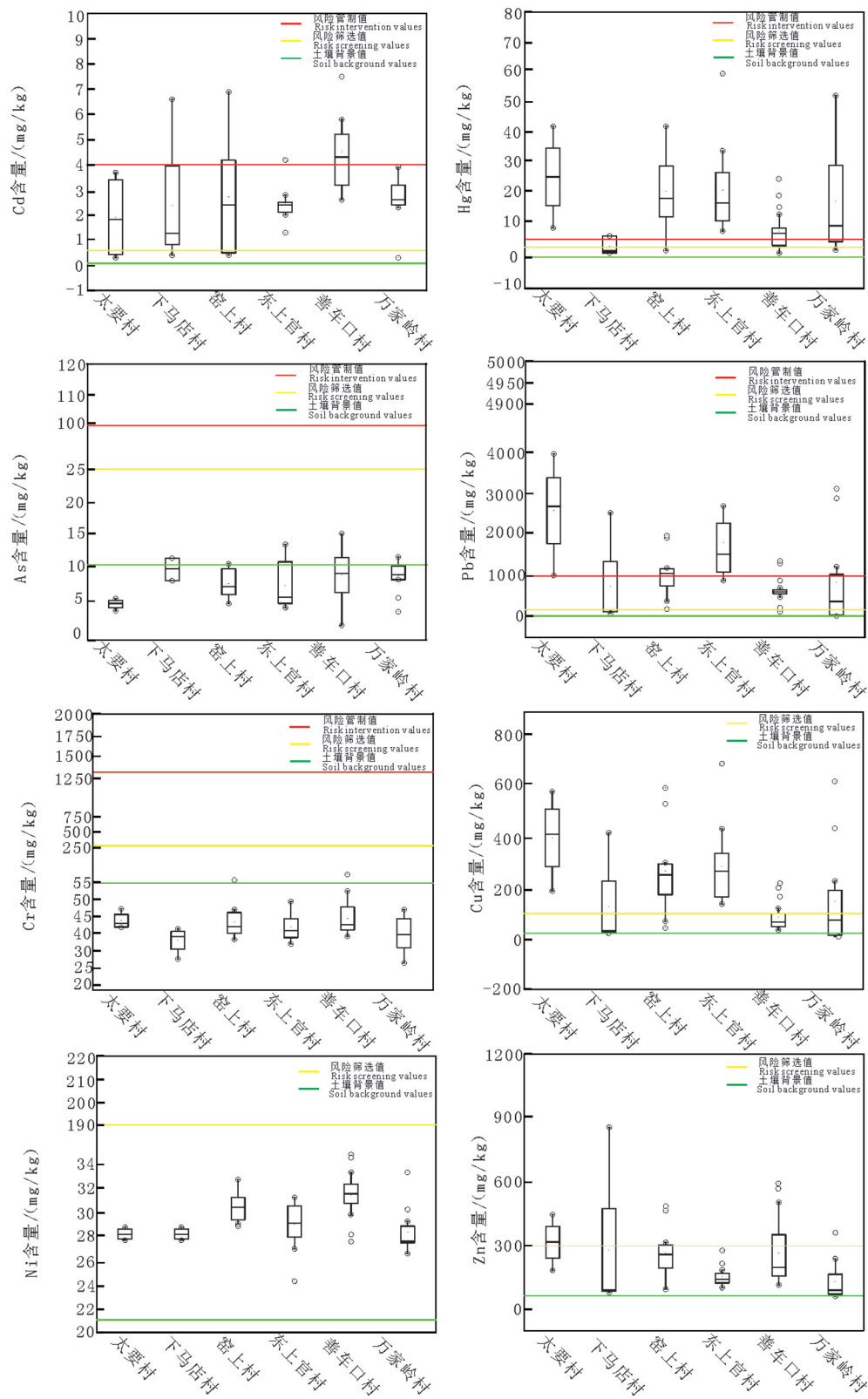


图2 潼关县6块农田土壤重金属分布箱式图

Fig.2 Box-plots of soil heavy metals concentrations of 6 farmlands in Tongguan



表7 土壤重金属污染地累积指数分级

Table 7 Classification of heavy metals in soil based on the  $I_{geo}$ 

重金属	指数均值	潼关地块68个样各级样本数						
		无污染	轻污染	中污染	中一重污染	重污染	重一极污染	极度污染
Cd	4.24	9	17	4	2	3	22	11
Hg	5.42	0	0	2	5	8	10	43
As	-1.02	53	15	0	0	0	0	0
Pb	4.03	3	1	4	4	19	21	16
Cr	-1.01	68	0	0	0	0	0	0
Cu	1.87	7	14	11	17	15	4	0
Ni	-0.07	52	16	0	0	0	0	0
Zn	0.93	11	29	19	8	1	0	0

块农田土壤中Hg污染状态最为严重,68个采样点均处中污染状态之上,其中有63.2%的采样点处于极度污染状态,重一极度污染状态和重度污染状态采样点数量相近,分别占总采样点的14.7%和11.8%,Hg总体污染处于极重污染状态;Cd和Pb的地累积指数介于4~5,分别有36个和56个采样点处于重污染状态之上,分别占总采样点的52.9%和82.3%,Cd和Pb总体污染处于重一极重污染状态,污染情况明显;Cu和Zn的地累积指数介于0~2,分别有32个和59个采样点处于中污染状态之下,分别占总采样点的47%和87.8%,Cu总体污染处于中污染状态,Zn总体污染处于轻污染状态;Ni、Cr、As的地累积指数均小于0,分别有52个、68个和53个采样点处于无污染状态,Ni、Cr、As总体污染处于无污染状态。因此,6块农田土壤Hg污染现象最为突出,同时Cd和Pb的污染现象同样不容忽视,这3种重金属元素土壤污染呈现污染样品多,污染程度重的特点。

#### 4.3 重金属潜在生态风险评价

以潼关土壤背景值作为参比值,运用潜在生态风险指数法对潼关县金矿矿区6块农田土壤潜在生态危害风险程度进行评价(表8),农田土壤As、Cr、Ni、Zn的 $E_i$ 范围分别为1.52~14.00、1.04~2.10、5.87~8.33、0.95~13.27,这4种重金属在全部采样点的 $E_i$ 均小于40,全部为轻微生态风险;Cu的 $E_i$ 范围为2.11~154.89,生态风险主要分布于轻微—强风险,其中39个采样点处于轻微风险,占比57.4%,使Cu以轻微风险为主;Pb的 $E_i$ 范围为4.30~790.90,生态风险主要分布于强—极强风险,其中26个采样点处于强风险,占比38.2%,使Pb以强风险为主;Cd的 $E_i$ 范围为112.50~1387.50,生态风险主要分布于强—极强风险之间,其中36个采样点处于极强风险,占比52.9%,使

表8 土壤重金属的潜在生态危害指数统计

Table 8 Potential ecological risk coefficient of every heavy metal in soil

危害指数	分布范围	潼关地块68个样各级样本数					
		轻微	中	强	很强	极强	
Cd	112.50~1387.50	0	0	14	18	36	
Hg	355~13311	0	0	0	0	68	
As	1.52~14.00	68	0	0	0	0	
$E_i$	Pb	4.30~790.90	12	1	26	16	13
	Cr	1.04~2.10	68	0	0	0	0
	Cu	2.11~154.89	39	18	11	0	0
	Ni	5.79~8.33	68	0	0	0	0
	Zn	0.95~13.27	68	0	0	0	0
$RI$	32.81~15843.50	2	1	0	7	58	

Cd以极强风险为主;Hg的 $E_i$ 范围为355~13311,生态风险全部为极强风险;因此,潼关县农用地土壤Hg、Cd和Pb为主要生态危害元素,其中Hg在土壤中积累明显,对土壤生态危害程度十分明显。

潼关金矿矿区6块农田土壤重金属总的潜在生态指数 $RI$ 分布范围为32.81~1584.50,生态风险在轻微至极强风险分布,其中极强风险以85.3%的占比使得潼关6块研究区农田土壤极强生态风险面积大、整体呈现生态风险高等特点。

#### 4.4 人体健康风险评价

##### 4.4.1 重金属暴露评估分析

在潼关金矿矿区6块农田8种土壤重金属的日暴露计算参数、计算公式的基础上,参照表9、表10、表11的数据。农田土壤重金属非致癌平均日暴露量,儿童8种重金属经手-口摄入量、呼吸摄入量、皮肤接触摄入量分布范围分别处于 $9.26 \times 10^{-6} \sim 3.88 \times 10^{-3}$ 、 $2.55 \times 10^{-10} \sim 1.07 \times 10^{-7}$ 、 $9.98 \times 10^{-9} \sim 4.19 \times 10^{-6}$ ,成人8种重金属经手-口摄入量、呼吸摄入量、皮肤接触摄入量分布范围分别处于 $5.04 \times 10^{-6} \sim 2.66 \times 10^{-3}$ 、 $5.76 \times 10^{-10} \sim 2.41 \times 10^{-7}$ 、 $2.17 \times 10^{-8} \sim 9.11 \times 10^{-6}$ ,儿童和成人均呈现手-口摄入量 > 皮肤接触摄入量 > 呼吸摄

表9 土壤重金属非致癌平均日暴露量(mg/(kg·d))

Table 9 Non-carcinogenic average daily exposure doses of heavy metals in soil(mg/(kg·d))

重金属	ADD <sub>ing</sub>		ADD <sub>inh</sub>		ADD <sub>derm</sub>		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	5.40×10 <sup>-6</sup>	9.26×10 <sup>-6</sup>	5.76×10 <sup>-10</sup>	2.55×10 <sup>-10</sup>	2.17×10 <sup>-8</sup>	9.98×10 <sup>-9</sup>	5.42×10 <sup>-6</sup>	9.27×10 <sup>-6</sup>
Hg	3.27×10 <sup>-5</sup>	5.62×10 <sup>-5</sup>	3.49×10 <sup>-9</sup>	1.54×10 <sup>-9</sup>	1.32×10 <sup>-7</sup>	6.05×10 <sup>-8</sup>	3.29×10 <sup>-5</sup>	5.62×10 <sup>-5</sup>
As	1.60×10 <sup>-5</sup>	2.75×10 <sup>-5</sup>	1.70×10 <sup>-9</sup>	7.58×10 <sup>-10</sup>	6.45×10 <sup>-8</sup>	2.96×10 <sup>-8</sup>	1.61×10 <sup>-5</sup>	2.75×10 <sup>-5</sup>
Pb	2.26×10 <sup>-3</sup>	3.88×10 <sup>-3</sup>	2.41×10 <sup>-7</sup>	1.07×10 <sup>-7</sup>	9.11×10 <sup>-6</sup>	4.19×10 <sup>-6</sup>	2.27×10 <sup>-3</sup>	3.89×10 <sup>-3</sup>
Cr	7.14×10 <sup>-5</sup>	1.23×10 <sup>-4</sup>	7.65×10 <sup>-9</sup>	3.39×10 <sup>-9</sup>	2.89×10 <sup>-7</sup>	1.33×10 <sup>-7</sup>	7.20×10 <sup>-5</sup>	1.23×10 <sup>-4</sup>
Cu	3.91×10 <sup>-4</sup>	6.72×10 <sup>-4</sup>	4.18×10 <sup>-8</sup>	1.85×10 <sup>-8</sup>	1.58×10 <sup>-6</sup>	7.24×10 <sup>-7</sup>	3.93×10 <sup>-4</sup>	6.72×10 <sup>-4</sup>
Ni	5.11×10 <sup>-5</sup>	8.77×10 <sup>-5</sup>	5.45×10 <sup>-9</sup>	2.42×10 <sup>-9</sup>	2.06×10 <sup>-7</sup>	9.46×10 <sup>-8</sup>	5.14×10 <sup>-5</sup>	8.78×10 <sup>-5</sup>
Zn	4.23×10 <sup>-4</sup>	7.27×10 <sup>-4</sup>	4.52×10 <sup>-8</sup>	2.00×10 <sup>-8</sup>	1.70×10 <sup>-6</sup>	7.83×10 <sup>-7</sup>	4.26×10 <sup>-4</sup>	7.28×10 <sup>-4</sup>
ADD	3.26×10 <sup>-3</sup>	5.59×10 <sup>-3</sup>	3.47×10 <sup>-7</sup>	1.54×10 <sup>-7</sup>	1.31×10 <sup>-5</sup>	6.02×10 <sup>-6</sup>	3.27×10 <sup>-3</sup>	5.60×10 <sup>-3</sup>

注:ADD<sub>ing</sub>为某重金属经口摄入非致癌平均日暴露量,ADD<sub>inh</sub>为某重金属经呼吸摄入非致癌平均日暴露量,ADD<sub>derm</sub>为某重金属经皮肤接触非致癌平均日暴露量。

表10 土壤Cd、As、Cr、Ni元素成人致癌平均日暴露量(mg/(kg·d))

Table 10 Carcinogenic average daily exposure doses of Cd, As, Cr and Ni in soil to adults(mg/(kg·d))

重金属	ADD <sub>ing</sub>	ADD <sub>inh</sub>	ADD <sub>derm</sub>	ADD
Cd	1.87×10 <sup>-6</sup>	1.99×10 <sup>-10</sup>	7.54×10 <sup>-9</sup>	1.88×10 <sup>-6</sup>
As	5.57×10 <sup>-6</sup>	5.93×10 <sup>-10</sup>	2.24×10 <sup>-8</sup>	5.60×10 <sup>-6</sup>
Cr	2.50×10 <sup>-5</sup>	2.66×10 <sup>-9</sup>	1.00×10 <sup>-7</sup>	2.50×10 <sup>-5</sup>
Ni	1.78×10 <sup>-5</sup>	1.89×10 <sup>-9</sup>	7.14×10 <sup>-8</sup>	1.78×10 <sup>-5</sup>
ADD	5.01×10 <sup>-5</sup>	5.34×10 <sup>-9</sup>	2.02×10 <sup>-7</sup>	5.04×10 <sup>-5</sup>

注:ADD<sub>ing</sub>为成人某重金属经口摄入致癌平均日暴露量,ADD<sub>inh</sub>为成人某重金属经呼吸摄入致癌平均日暴露量,ADD<sub>derm</sub>为成人某重金属经皮肤接触致癌平均日暴露量。

入量,同时经手-口摄入量量级均是皮肤接触摄入量和呼吸摄入量的10<sup>4</sup>倍;8种重金属在3种途径的日平均摄入量有较大差异,由高到低依次为Zn>Cr>Pb>Cu>Ni>As>Hg>Cd,且儿童在单一途径8种重金属平均日暴露量及总暴露量均高于成人。As、Cd、Cr、Ni 4种农田土壤重金属致癌平均日暴露量,儿童4种重金属经手-口摄入量、呼吸摄入量、皮肤接触摄入量分布范围分别处于5.09×10<sup>-6</sup>~6.76×10<sup>-5</sup>、2.89×10<sup>-10</sup>~3.83×10<sup>-9</sup>、1.32×10<sup>-8</sup>~1.76×10<sup>-7</sup>,成人4种重金属经手-口摄入量、呼吸摄入量、皮肤接触摄入量分布范围分别处于1.87×10<sup>-6</sup>~2.5×10<sup>-5</sup>、1.99×10<sup>-10</sup>~2.66×10<sup>-9</sup>、7.54×10<sup>-9</sup>~1.00×10<sup>-7</sup>。儿童和成人也均呈现出重金属经手-口途径为最主要且摄入量最大的途径,4种重金属在3种途径的日平均摄入量由高到低依次为Cr>Ni>As>Cd,同时儿童在单一统计4种重金属平均日暴露量及总量同样均高于成人。因此,经手-口摄入均为潼关金矿矿区农田土壤重金属非致癌和致癌暴露评估中的主要途径,潼关金矿矿区农田土壤的儿童平均日暴露在非

表11 土壤Cd、As、Cr、Ni元素儿童致癌平均日暴露量(mg/(kg·d))

Table 11 Carcinogenic average daily exposure doses of children to Cd, As, Cr and Ni in soil (mg/(kg·d))

重金属	LADD <sub>ing</sub>	LADD <sub>inh</sub>	LADD <sub>derm</sub>	LADD
Cd	5.09×10 <sup>-6</sup>	2.89×10 <sup>-10</sup>	1.32×10 <sup>-8</sup>	5.11×10 <sup>-6</sup>
As	1.51×10 <sup>-5</sup>	8.57×10 <sup>-10</sup>	3.92×10 <sup>-8</sup>	1.52×10 <sup>-5</sup>
Cr	6.76×10 <sup>-5</sup>	3.83×10 <sup>-9</sup>	1.76×10 <sup>-7</sup>	6.78×10 <sup>-5</sup>
Ni	4.82×10 <sup>-5</sup>	2.73×10 <sup>-9</sup>	1.25×10 <sup>-7</sup>	4.83×10 <sup>-5</sup>
LADD	1.36×10 <sup>-4</sup>	7.71×10 <sup>-9</sup>	3.53×10 <sup>-7</sup>	1.36×10 <sup>-4</sup>

注:LADD<sub>ing</sub>为儿童某重金属经口摄入致癌平均日暴露量,LADD<sub>inh</sub>为儿童某重金属经呼吸摄入致癌平均日暴露量,LADD<sub>derm</sub>为儿童某重金属经皮肤接触致癌平均日暴露量。

致癌和致癌评估中均高于成人。

#### 4.4.2 健康风险评价

在应用健康风险评价参数、风险评估模型及风险评价指数计算公式的基础上,参照潼关金矿矿区6块农田8种重土壤金属含量的平均值和最大值,分别计算出不同重金属元素对于儿童和成人在3种暴露途径下的某一元素非致癌风险指数、非致癌风险总指数、某一元素致癌风险指数、致癌风险总指数(表12,表13)。

在农田土壤重金属对人体健康的非致癌风险评估中,儿童8种重金属在手-口、呼吸、皮肤接触3种途径下的非致癌风险分布范围分别为2.41×10<sup>-3</sup>~9.21×10<sup>-1</sup>,4.35×10<sup>-6</sup>~1.30×10<sup>-4</sup>,2.31×10<sup>-6</sup>~6.56×10<sup>-3</sup>,3种不同途径对非致癌总风险的贡献率分别为99.06%、0.027%、0.913%,手-口途径是儿童非致癌风险的最主要途径;成人8种重金属在手-口、呼吸、皮肤接触3种途径下的非致癌风险分布范围分别为1.25×10<sup>-3</sup>~5.37×10<sup>-1</sup>,9.82×10<sup>-6</sup>~2.93×10<sup>-4</sup>,5.02×10<sup>-6</sup>~1.43×10<sup>-2</sup>,3种不同途径对非致癌总风险的贡

表 12 土壤重金属非致癌健康风险指数  
Table 12 Non-carcinogenic health risk index of heavy metals in soil

重金属		$HQ_{ing}$		$HQ_{inh}$		$HQ_{derm}$		$HQ$	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	最大值	$1.27 \times 10^{-2}$	$2.17 \times 10^{-2}$	$1.35 \times 10^{-4}$	$5.98 \times 10^{-5}$	$2.04 \times 10^{-3}$	$9.36 \times 10^{-4}$	$1.48 \times 10^{-2}$	$2.27 \times 10^{-2}$
	平均值	$4.91 \times 10^{-3}$	$8.42 \times 10^{-3}$	$5.24 \times 10^{-5}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$7.90 \times 10^{-4}$	$3.63 \times 10^{-4}$	$5.76 \times 10^{-3}$	$8.81 \times 10^{-3}$
Hg	最大值	$3.37 \times 10^{-1}$	$5.78 \times 10^{-1}$	$3.59 \times 10^{-5}$	$1.59 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-2}$	$8.90 \times 10^{-3}$	$3.56 \times 10^{-1}$	$5.87 \times 10^{-1}$
	平均值	$9.21 \times 10^{-2}$	$1.58 \times 10^{-1}$	$9.82 \times 10^{-6}$	$4.35 \times 10^{-6}$	$5.29 \times 10^{-3}$	$2.43 \times 10^{-3}$	$9.74 \times 10^{-2}$	$1.60 \times 10^{-1}$
As	最大值	$8.78 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$	$1.87 \times 10^{-4}$	$8.30 \times 10^{-5}$	$3.53 \times 10^{-4}$	$1.62 \times 10^{-4}$	$8.83 \times 10^{-2}$	$1.51 \times 10^{-1}$
	平均值	$4.97 \times 10^{-2}$	$8.52 \times 10^{-2}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$4.69 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-4}$	$9.18 \times 10^{-5}$	$4.99 \times 10^{-2}$	$8.53 \times 10^{-2}$
Pb	最大值	2.24	3.85	$2.39 \times 10^{-4}$	$1.06 \times 10^{-4}$	$5.96 \times 10^{-2}$	$2.74 \times 10^{-3}$	2.30	3.87
	平均值	$5.37 \times 10^{-1}$	$9.21 \times 10^{-1}$	$5.72 \times 10^{-5}$	$2.54 \times 10^{-5}$	$1.43 \times 10^{-2}$	$6.56 \times 10^{-3}$	$5.52 \times 10^{-1}$	$9.28 \times 10^{-1}$
Cr	最大值	$3.28 \times 10^{-2}$	$5.63 \times 10^{-2}$	$4.12 \times 10^{-4}$	$1.82 \times 10^{-4}$	$5.28 \times 10^{-3}$	$2.42 \times 10^{-3}$	$3.85 \times 10^{-2}$	$5.89 \times 10^{-2}$
	平均值	$2.34 \times 10^{-2}$	$4.01 \times 10^{-2}$	$2.93 \times 10^{-4}$	$1.30 \times 10^{-4}$	$3.76 \times 10^{-3}$	$1.73 \times 10^{-3}$	$2.74 \times 10^{-2}$	$4.19 \times 10^{-2}$
Cu	最大值	$2.94 \times 10^{-2}$	$5.04 \times 10^{-2}$	-	-	$1.18 \times 10^{-4}$	$5.43 \times 10^{-5}$	$2.95 \times 10^{-2}$	$5.05 \times 10^{-2}$
	平均值	$8.15 \times 10^{-3}$	$1.39 \times 10^{-2}$	-	-	$3.28 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-5}$	$8.18 \times 10^{-3}$	$1.39 \times 10^{-2}$
Ni	最大值	$2.95 \times 10^{-3}$	$5.05 \times 10^{-3}$	$2.73 \times 10^{-4}$	$1.21 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-4}$	$3.52 \times 10^{-3}$	$5.31 \times 10^{-3}$
	平均值	$2.52 \times 10^{-3}$	$4.33 \times 10^{-3}$	$2.34 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$2.53 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-4}$	$3.01 \times 10^{-3}$	$4.55 \times 10^{-3}$
Zn	最大值	$4.82 \times 10^{-3}$	$8.26 \times 10^{-3}$	-	-	$1.94 \times 10^{-5}$	$8.90 \times 10^{-6}$	$4.84 \times 10^{-3}$	$8.27 \times 10^{-3}$
	平均值	$1.25 \times 10^{-3}$	$2.41 \times 10^{-3}$	-	-	$5.02 \times 10^{-6}$	$2.31 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^{-3}$	$2.14 \times 10^{-3}$
HQ	最大值	2.75	4.72	$1.28 \times 10^{-4}$	$5.68 \times 10^{-4}$	$8.70 \times 10^{-2}$	$4.00 \times 10^{-2}$	2.84	4.76
	平均值	$7.19 \times 10^{-1}$	1.23	$7.53 \times 10^{-4}$	$3.34 \times 10^{-4}$	$2.46 \times 10^{-2}$	$1.13 \times 10^{-2}$	$7.45 \times 10^{-1}$	1.24

注: $HQ_{ing}$ 为某重金属经口摄入非致癌健康风险指数, $HQ_{inh}$ 为某重金属经呼吸摄入非致癌健康风险指数, $HQ_{derm}$ 为某重金属经皮肤接触非致癌健康风险指数。

献了分别为96.6%、0.1%、3.3%，手-口途经是也是成人非致癌风险的最主要途径；对比8种重金属对儿童和成人人体健康非致癌总风险评价指数由高到低均为Pb>Hg>As>Cr>Cu>Cd>Ni>Zn，除农田土壤Pb含量在最大值经手-口途经对人体的HQ大于1，表明一定区域农田土壤的Pb对于人体健康非致癌风险显著。儿童和成人非致癌总风险指数平均值分别为为1.24和0.745，最大值为4.76和2.84，表明儿童明显受到潼关县金矿矿区农田土壤重金属的非致癌风险威胁，8种重金属元素对非致癌风险总指数的贡献率分别由大到小分别为Pb(74.7%)>Hg(12.8%)>As(6.87%)>Cr(3.26%)>Cu(1.12%)>Cd(0.71%)>Ni(0.37%)>Zn(0.17%)，Pb、Hg是潼关县农田土壤的主要非致癌因子，应该

对其进一步加强风险管控和防治。

在农田土壤重金属对人体健康的致癌风险评价中，儿童4种重金属在手-口、呼吸、皮肤接触3途经下的致癌风险分布范围分别为 $2.26 \times 10^{-5} \sim 3.10 \times 10^{-5}$ 、 $3.69 \times 10^{-12} \sim 1.76 \times 10^{-9}$ 、 $5.88 \times 10^{-8} \sim 8.23 \times 10^{-6}$ ，3种不同途经对致癌总风险的贡献率分别为87.522%、0.003%、12.475%，成人4种重金属在手-口、呼吸、皮肤接触3种途经下的致癌风险分布范围分别为 $8.35 \times 10^{-6} \sim 1.14 \times 10^{-5}$ 、 $2.55 \times 10^{-12} \sim 1.21 \times 10^{-9}$ 、 $3.36 \times 10^{-8} \sim 4.20 \times 10^{-6}$ ，3种不同途经对致癌总风险的贡献率分别为82.017%、0.005%、17.978%，表明手-口途经均为儿童和成人最主要的暴露途经；4种重金属对于儿童和成人人体健康致癌总风险指数由高到低均为Cd>As>Cr>Ni，其中Cd对于儿童和成

表 13 土壤重金属Cd、As、Cr、Ni致癌健康风险值  
Table 13 Carcinogenic health risk of heavy metals (Cd, As, Cr, Ni) in soil

重金属	$Risk_{ing}$		$Risk_{inh}$		$Risk_{derm}$		$Risk$	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
Cd	$1.14 \times 10^{-5}$	$3.10 \times 10^{-5}$	$1.21 \times 10^{-9}$	$1.76 \times 10^{-9}$	$4.75 \times 10^{-8}$	$8.32 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-5}$	$3.11 \times 10^{-5}$
As	$8.35 \times 10^{-6}$	$2.26 \times 10^{-5}$	$2.55 \times 10^{-12}$	$3.69 \times 10^{-12}$	$3.36 \times 10^{-8}$	$5.88 \times 10^{-8}$	$8.39 \times 10^{-6}$	$2.27 \times 10^{-5}$
Cr	-	-	-	-	$4.20 \times 10^{-6}$	$7.39 \times 10^{-6}$	$4.20 \times 10^{-6}$	$7.39 \times 10^{-6}$
Ni	-	-	-	-	$5.99 \times 10^{-8}$	$1.05 \times 10^{-7}$	$5.99 \times 10^{-8}$	$1.05 \times 10^{-7}$
RISK	$1.98 \times 10^{-5}$	$5.36 \times 10^{-5}$	$1.22 \times 10^{-9}$	$1.77 \times 10^{-9}$	$4.34 \times 10^{-6}$	$7.64 \times 10^{-6}$	$2.41 \times 10^{-5}$	$6.12 \times 10^{-5}$

注: $Risk_{ing}$ 为某重金属经口摄入致癌健康风险值, $Risk_{inh}$ 为某重金属经呼吸摄入致癌健康风险值, $Risk_{derm}$ 为某重金属经皮肤接触致癌健康风险值。



人人健康致癌总风险指数为4种重金属致癌总风险指数中的最大值,分别为 $3.11 \times 10^{-5}$ 和 $1.15 \times 10^{-5}$ ,对比参考美国EPA推荐的可接受致癌风险范围 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ,因此,4种重金属对于儿童和成人人体健康致癌总风险整体水平较低,属于可接受范围。其次儿童对于4种重金属在3种途经下致癌风险均高于成人,说明儿童身体健康更易受到潼关金矿矿区农田土壤重金属的致癌威胁,需要对于儿童健康加强防范。

## 5 讨 论

土壤是农作物生长的重要物质基础,一旦土壤环境遭到破坏或污染将会严重影响农作物的产量、质量和安全,并将限制农业生产和经济发展,同时也将威胁人体的健康。而土壤重金属污染在众多土壤污染问题中,因其具有的隐蔽性、累积性、多样性、稳定性和生物毒性等特性受到人们的日益关注。因此,土壤重金属污染研究成为当下土壤污染研究的重点问题之一。

潼关县金矿开采冶炼时间久远,其中金矿矿区的无序开采以及冶炼过程中的非法提金现象严重,在开采冶炼过程中产生的废水、废气的无净化处理排放,在潼关不同的地球化学景观下3种类型农田

(尾矿库旱地、傍河流农田、废渣堆置区农田)通过对比研究区土壤重金属平均值、潼关农田背景值、数值变异系数说明:在潼关南部山前冲洪积斜源区建有大型选矿厂和尾矿库,在对金矿矿床经过机械粉碎,使其母岩所含重金属几乎全以尾矿渣的形式堆置于土壤上;在潼关河谷冲积阶地区农田受到7条河峪直接径流影响,影响土壤质量;潼关北部黄土沟壑谷地距采矿山区较远,但该区私人混汞碾、小氰化池数量多且分散广,影响土壤,造成尾矿库、河流谷地、废渣堆置区附近农田土壤重金属Pb、Hg和Cd明显高于潼关县农田土壤背景值,污染现象严重,Cu、Zn也受到金矿开采冶炼活动的影响,但污染程度较轻。张俊丽(2019)研究也发现潼关县农田重金属现状中Pb、Cd和Hg污染程度重同时污染面积大且分布极不均匀。庞喆(2019)研究表明潼关矿区Cd和Hg的污染等级为V级,Cu的污染等级为IV级,Zn为III级。金矿开采冶炼过程产生的尾矿渣、氰化渣随意堆放是附近农田的土壤重金属污染的来源。

目前,土壤重金属污染引发的关注主要在于生态风险和健康风险(表14)。潼关县金矿矿区附近农田土壤中Pb、Cd和Hg的污染评价结果与张俊丽(2019)的研究结果一致,但在Cr污染评价上存在差异,本文

表 14 农田土壤重金属生态及健康风险评价对比

Table 14 Comparison of ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil

研究区域	陕西省潼关县 农田	陕西省潼关县 农田	陕西省潼关县 矿区土壤	湖南省苏山区 金属矿土壤	福建省政和县 水库农田	潼关金矿矿区周边 农田土壤
重金属生态风险评价	单因子污染指数评价法;内梅罗综合指数法	单因子污染指数评价法;综合污染指数评价法	单因子污染指数评价法;潜在生态风险指数法	单因子污染指数评价法;综合污染指数评价法	地累积指数法;潜在生态风险指数法	地累积指数法;潜在生态风险指数法
土壤重金属污染评价结果	Pb、Cr、Cu、Cd含量超出土壤背景值,污染较严重,Zn和Mn的污染程度较低。	Pb、Cd、Hg超标率分别达到16%、56%、80%,Hg污染程度最重	Cd污染最终,Hg为轻污染,Cu到达警戒值	Hg污染最重,Pb、As属于强污染、Zn、Cu属于轻污染	Cd为重污染,Pb为重污染	Hg、Cd、Pb总体污染程度最重,生态危害风险;Hg为极强风险,Cd和Pb为强风险
人体健康风险评价	/	/	/	EPA 致癌风险模型,非致癌风险模型		
人体健康风险评价结果	/	/	/	手口摄入是儿童非致癌风险的主要暴露途径;As、Pb的儿童非致癌健康暴露风险显著;As对成人不存在显著致癌风险,	手口摄入是儿童非致癌风险的主要暴露途径;Pb的儿童非致癌健康暴露风险显著;Ni、Cr、As、Cd通过呼吸途径不具有致癌风险	手口摄入是儿童非致癌风险的主要暴露途径;Pb、Hg为主要非致癌因子,Cd致癌风险最大
资料来源	胡明等,2014	张俊丽等,2019	庞喆等,2019	陈怡先等,2018	邱其俊等,2017	本文

认为Cr存在中等强度的生态风险,张俊丽等认为Cr的生态风险较低,由于张俊丽引用潼关县农用土壤Cr背景值与本文引用的背景值不同,本文数据引用长安大学赵阿宁(2006)对于潼关县多次实地取样及与华阴市土壤背景值对比后剔除差异较大值后得到的,更能反映潼关农田土壤实际情况。其次,张俊丽(2019)对于土壤污染评价采用的是单因子指数法和内梅罗指数法,这样的评价模型虽然可以评价各个重金属的污染程度及重金属综合污染程度,但由于没有考虑各污染物的毒害性,且异常值会对评价结果造成较大的影响,不能全面地反映土壤的污染状况。本文和胡明(2014)关于潼关土壤Pb、Cr、Cu、Cd土壤污染的严重程度评价一致,4种重金属受到金矿采选和冶炼影响时间长,土壤中重金属污染程度严重,同时也造成了潼关县小麦、玉米、叶菜类蔬菜以及水果中重金属超标显著的现象,建议对潼关县农田土壤进行综合有效的治理措施。

潼关金矿矿区农田土壤重金属对人体健康的非致癌和致癌风险主要以手-口暴露途径摄入人体,总体风险均可控,但儿童受到的非致癌和致癌风险在3种暴露途径下均大于成人,说明儿童更易受到潼关金矿矿区农田土壤重金属的危害,与陈怡先(2018)、邱其俊(2017)等研究结果相近,由于儿童更易接触到土壤并且整体的抵抗及免疫力较低可能是造成这种结果的原因。健康风险评价既与暴露剂量相关外,还与重金属的毒性相关。Cd、Hg等毒性较大的重金属对人体的危害更重,结合本次研究,相关重金属的污染程度也十分严重,从健康角度出发,需要加强土壤重金属健康风险预警,同时加大潼关县农田土壤重金属污染的治理工作。

## 6 结 论

(1)潼关县金矿矿区农田土壤Cd、Hg、Ni、Zn、Pb、Cu等重金属均高于潼关县土壤背景值,Cd元素最为突出,同时Cu、Pb、Hg的变异系数均大于0.8,这3种元素受开矿影响明显;Pb、Hg、Cd不仅超出农用地土壤污染风险筛选值,还在部分点位超出农用地土壤污染风险管制值,这3种重金属是研究区土壤的主要超标元素,会对本地的生态环境和人体健康产生严重影响。

(2)地累积指数评价结果显示,潼关金矿矿区农

田土壤Hg、Cd、Pb元素污染严重,Hg元素的污染状态最为严重,在68个采样点中以63.2%的采样点处于极度污染状态下,Cd、Pb的污染状态同样不容忽视,分别以47%和87.8%的采样点处于重—极重污染状态下;Cu、Zn的总体污染分别处于中污染状态和轻污染状态;Ni、Cr、As总体污染处于无污染状态。

(3)重金属潜在生态风险评价结果显示,潼关金矿矿区农田土壤重金属生态危害Hg和Cd为极强风险,Pb为强风险,As、Cr、Ni、Zn、Cu为轻微风险;潼关金矿矿区农田土壤重金属RI处于(32,1585),其中85.3%为极强风险,整体生态风险具有风险高、面积大,对土壤生态危害程度十分明显。

(4)重金属平均日暴露量和人体健康风险评价结果显示,儿童健康更易受到重金属的危害;经手-口摄入是人体健康风险暴露的最主要途径;Pb、Hg是潼关金矿矿区农田土壤主要非致癌因子,儿童人体健康非致癌总风险指数平均值大于1,成人的HQ小于1,潼关金矿矿区土壤重金属对儿童有明显的非致癌风险;Cd的致癌风险最高,但4种重金属的致癌风险均小于 $10^{-4}$ ,对人体健康尚不构成致癌风险,但儿童致癌风险均高于成人,应当加强对儿童的防范保护措施。

## References

- Cao Xueying, Zhang Shana, Tan Changyin, Hu Pengjie, Cui Xu, Zhou Tong, Wu Longhua, Luo Yongming. 2015. Heavy metal contamination characteristics in soils around a nonferrous metal smelter in Central Southern China[J]. Soil, 47(1): 94–99(in Chinese with English abstract).
- Chen Yixian, Jiang Xiaosan, Wang Yong, Zhuang Dafang. 2018. Assessment of ecological environment and human health of heavy metals in mining area based on GIS[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(4): 1642–1652(in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Song Jianhua, Dong Jian, Hu Xueping, Li Xiaopeng. 2018. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province[J]. Geology in China, 45(3): 617–627 (in Chinese with English abstract).
- Diami S M, Kusin F M, Madzin Z. 2016. Potential ecological and human health risks of heavy metals in surface soils associated with iron ore mining in Pahang, Malaysia[J]. Environmental Science and Pollution Research, 23: 21086–21097.
- Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany[J]. Water Science and

- Technology, 28(8): 307–314.
- Hu Ming. 2014. Contamination evaluation for the farmland heavy metals in the soils of Tongguan County in Shannxi[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 42(4):141–143 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment to logical approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Guan Houchun, Li Yunhuai, Peng Miaozi, Liu Daobin. 2013. The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan City[J]. *Geology in China*, 40(6): 1949–1958 (in Chinese with English abstract).
- Ke Hailing. 2005. Environmental Geochemical Characteristics and Pollution Evaluation of Soil Heavy Metals in Tongguan Gold Mine, Shaanxi[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Li Gengfei. 2012. Heavy metal pollution assessment of soil along the drainage ditch of a gold field in Tongguan County[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 40(10):187–189 (in Chinese with English abstract).
- Liu Mengmei, Wang Lijun, Wang Li, Zhang Wenjuan, Shi Xingmin, Lu Xinwei, Li Xiaoping, Li Xiaoyun. 2018. Concentration and ecological health risk assessment of heavy metals of soil in different functional areas in Xi'an, China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 49(1): 167–175(in Chinese with English abstract).
- Liu Qing, Wang Jing, Shi Yanxi, Zhang Yanyu, Wang Qinghua. 2008. Health risk assessment on heavy metals in soil based on GIS—a case study in Cixi city of Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 39(3): 634–639(in Chinese with English abstract).
- Liu Yunlong, Zhang Lijia, Zhuang Tengfei. 2015. Spatial variability and distribution of soil Cu Zn and Pb in gradient urban–transect[J]. *Resources and Environment in the Yangtze basin*, 24(7):1207–1213 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Ma Z, van der Kuijp T J, Yuan Z, Huang L. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 468: 843–853.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 2: 109–118.
- Peng Jing, Li Zeqin, Hou Jiayu. 2007. Application of the index of geo-accumulation index and ecological risk index to assess heavy metal pollution in soils[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 14(8): 13–17(in Chinese with English abstract).
- Pang Zhe, Wang Qilong. 2019. Potential ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in Tongguan mining area[J]. *Land Development and Engineering Research*, 4(7):145–51 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Qijun, Yu Ruilian, Hu Gongren, Cai Zhaoliang. 2017. Ecological and health risk assessment of heavy metals in soil around a new reservoir in Northern Fujian Province, China[J]. *Earth and Environment*, 45(3): 348–355(in Chinese with English abstract).
- Umme Aiman, Adeel Mahmood, Sidra Waheed, Riffat Naseem Malik. 2016. Enrichment, geo-accumulation and risk surveillance of toxic metals for different environmental compartments from Mehmood Booti dumping site, Lahore city, Pakistan[J]. *Chemosphere*, 144(2): 356–365.
- USEPA. 2011. Exposure Factors Handbook[R]. Washington: National Center for Environmental Assessment.
- USEPA. 2009. Highlights of the Child-specific Exposure Factors Handbook(Final Report) [R]. Washington, DC: U.S.Environmental Protection Agency.
- USEPA. 2013. Regional Screening Level (RSL) for Chemical Contaminants at Superfund Sites[R]. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Wang Bin, Zhang Xia. 2012. The features and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Tianjin suburban farmland[J]. *Environmental Monitoring in China*, 28(3): 23–26(in Chinese with English abstract).
- Wei C Y, Sun X, Wang C, Wang W Y. 2009. Factors influencing arsenic accumulation by *Pteris vittata*: A comparative field study at two sites [J]. *Environmental Pollution*, 144(3): 488–493.
- Wang Zhe, Liu Shaoqing, Chen Xiaomin, Lin Chunye. 2008. Estimates of the exposed dermal surface area of Chinese in view of human health risk assessment[J]. *Journal of Safety and Environment*, 8(4): 152–155(in Chinese with English abstract).
- Wang Youqi, Bai Yiru, Wang Jianyu. 2016. Distribution of urban soil heavy metal and pollution in different functional zones of Yinchuan City[J]. *Environmental Science*, 37(2): 710–716 (in Chinese with English abstract).
- Wei Niyu, Zhang Xinying, Lin Shanchun, Chen Ping. 2016. Health risk assessment of heavy metals of street dust from northwest Guangxi Mining Area[J]. *Environment and Sustainable Development*, 16(5): 167–170(in Chinese with English abstract).
- Xu Dongyin. 2011. The Heavy Metal Pollution and Risk Assessment on Human Health of Farmland Soil in the Goldfield[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Xia Weiyu. 2017. Study on the Characteristics of Heavy Metal Contamination and Safe Use of Soil around the Mining Area[D]. University of Science and Technology of China(in Chinese with English abstract).
- Xu Yuxia, Wang Qinghua, Wang Huabin, Peng Youkai, Xue Lei. 2016. Research of dominant plants selection for treatment of heavy metal polluted soils surrounding mining areas[J]. *Environmental Protection Science*, 42(6): 61–67(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science &*



- Technology, 31(2): 112–115(in Chinese with English abstract).
- Yin Yimeng, Yuan Zhaowei, Huang Ting, Cheng Shenggao, Zhao Zhenli. 2018. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil–rice system in an E–waste dismantling area[J]. Environmental Science, 39(2): 916–925(in Chinese with English abstract).
- Zhang Junli, Lei Jianxin, Zhao Xiaojin. 2019. Analysis of heavy metal contamination in farmland soil of Tongguan County, Shaanxi Province[J]. Acta Agriculturae Boreali–occidentalis Sinica, 28(2): 247–252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianghua, Xu Youning, Chen Huaqing, Ke Hailing, Qiao Gang. 2020. Comparative study of the accumulated effect of heavy metals on soil and wheat in Xiaojinling gold mining area[J]. Northwestern Geology, 53(3): 284–294(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaomin, Zhang Xiuying, Zhong Taiyang, Jiang Hong. 2014. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. Environment Science, (2): 692–703(in Chinese with English abstract).
- Zhao Aning. 2006. The Assessment of Contamination and Correlation on Heavy Metal Between Farmland and Corps in Tongguan Gold Mining Area in Shaanxi[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 曹雪莹, 张莎娜, 谭长银. 2015. 中南大型有色金属冶炼场周边农田土壤重金属污染特征研究[J]. 土壤, 47(1): 94–99.
- 陈怡先, 姜小三, 王勇, 庄大方. 2018. 基于GIS矿区土壤重金属生态环境及人体健康评价[J]. 环境科学学报, 38(4):1642–1652.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 董建, 胡雪平, 李肖鹏. 2018. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. 中国地质, 45(3): 617–627.
- 胡明. 2014. 陕西潼关县农业土壤重金属污染评价[J]. 贵州农业科学, 42(4):141–143.
- 管后春, 李运怀, 彭苗芝, 刘道彬. 2013. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 中国地质, 40(6):1949–1958.
- 柯海玲. 2005. 陕西潼关金矿区土壤重金属环境地球化学特征及污染评价[D]. 长安大学.
- 李庚飞. 2012. 潼关县某金矿排水沟附近土壤的重金属污染评价[J]. 贵州农业科学, 40(10):187–189.
- 刘梦梅, 王利军, 王丽, 张文娟, 史兴民. 2018. 西安市不同功能区土壤重金属含量及生态健康风险评价[J]. 土壤通报, 49(1): 167–175.
- 刘庆, 王静, 史衍玺, 张衍毓, 汪庆华. 2008. 基于GIS的县域土壤重金属健康风险评价——以浙江省慈溪市为例[J]. 土壤通报, 39(3): 634–639.
- 柳云龙, 章立佳, 庄腾飞. 2015. “城郊”梯度下土壤Cu、Zn、Pb含量的空间变异特征[J]. 长江流域资源与环境, 24(7):1207–1213.
- 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 2007. 地积累指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. 广东微量元素科学, 14(8): 13–17.
- 庞喆, 王启龙. 2019. 潼关矿区土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 土地开发工程研究, 4(7):45–51.
- 邱其俊, 于瑞莲, 胡恭任, 蔡兆亮. 2017. 闽北某新建水库周边土壤重金属生态与健康风险评价[J]. 地球与环境, 45(3): 348–355.
- 王斌, 张震. 2012. 天津近郊农田土壤重金属含量特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 28(3):23–26.
- 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 林春野. 2008. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报, 8(4): 152–155.
- 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 2016. 基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. 环境科学, 37(2):710–716.
- 韦妮玉, 张新英, 林善春, 陈平. 2016. 桂西北矿区道路灰尘重金属污染及健康风险评价[J]. 环境与可持续发展, 16(5): 167–170.
- 夏维玉. 2017. 矿区周边农田土壤的重金属污染特征与安全利用技术研究[D]. 中国科学技术大学.
- 徐东寅. 2011. 金矿区农田土壤污染与人体健康风险研究[D]. 西安: 长安大学.
- 徐玉霞, 汪庆华, 王华斌, 彭囿凯, 薛雷. 2016. 矿区周边土壤重金属污染治理的优势植物筛选——以关中西部某铅锌冶炼区为例[J]. 环境保护科学, 42(6):61–67.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 2008. 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, 31(2): 112–115.
- 尹伊梦, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 赵珍丽, 余葱葱. 2018. 电子垃圾拆解区土壤–水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 39(2): 916–926.
- 张俊丽, 雷建新, 赵晓进. 2019. 陕西省潼关县农田重金属污染分析与评价[J]. 西北农业学报, 28(2):247–252.
- 张江华, 徐友宁, 陈华清, 柯海玲, 乔冈. 2020. 小秦岭金矿区土壤–小麦重金属累积效应对比研究[J]. 西北有色, 53(3): 284–294.
- 张小敏, 张秀英, 钟太洋. 2014. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2:692–703.
- 赵阿宁. 2006. 陕西潼关金矿区农田土壤重金属污染评价与农作物相关性分析[D]. 西安: 长安大学.
- 中华人民共和国环境监测总站. 1994. 中华人民共和国土壤环境背景值图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国环境保护部. 2014. HJ 25.3–2014 污染场地风险评估技术导则[S]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 中华人民共和国生态环境部. 2018. GB15618–2018 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].