

doi: 10.12029/gc20200602

鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评估[J]. 中国地质, 47(6): 1625–1636.

Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6):1625–1636(in Chinese with English abstract).

重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评估

鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷

(重庆土地质量地质调查重点实验室, 重庆市地质矿产勘查开发局川东南地质大队, 重庆 400038)

摘要: 为了解矿业活动较多的重庆秀山县西北部农田土壤重金属污染状况, 采集了表层土壤样品 386 件, 分析测定 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、Mn 等 9 种重金属元素, 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, 对该区土壤重金属污染程度、生态风险和 health 风险进行评估。结果表明, 该区农田土壤 9 种重金属平均值都高于重庆市土壤背景值, 呈现不同程度的积累; Cd、Hg 明显超出国家农用地土壤污染风险筛选值, 超标率分别为 75.2% 和 44.6%。土壤中 Hg 污染较严重, 处于中污染或重污染状态, Mn、As、Cd 总体呈轻污染, 其余重金属基本无污染。生态风险评估显示, Hg、Cd 为主要生态危害元素, Hg 以强、很强和极强风险为主, Cd 以中等风险为主。人体健康风险评估显示, 儿童更易受到重金属污染威胁, 重金属对成人不具有非致癌风险, 对儿童具有非致癌风险, As、Cr 是主要非致癌因子; 成人致癌风险在可接受范围内, 个别土壤样对儿童具有致癌风险, As 致癌风险最大。

关键词: 土壤; 重金属; 生态风险; 健康风险; 环境地球化学调查工程; 秀山县; 重庆

中图分类号: P595; X142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2020)06–1625–12

Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing

BAO Liran, DENG Hai, JIA Zhongmin, LI Yu, DONG Jinxiu, YAN Mingshu, ZHANG Fenglei

(Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Southeast Sichuan Geological Group, Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 400038, China)

Abstract: In order to understand the heavy metal pollution of farmland soil in northwest Xiushan, Chongqing, with quite a lot of mining activities, the authors collected 386 surface soil samples, analyzed and determined the concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn and Mn and evaluated the soil heavy metal pollution level, the ecological risk and health risk by using the geological accumulation index, potential ecological hazard index and health risk assessment model. The results show that the average values of 9 heavy metals in the surrounding soil of Xiushan mining area are higher than the soil background values of Chongqing, showing different degrees of accumulation effect. The concentrations of Cd and Hg significantly exceeded the risk screening values for soil contamination of agricultural land, with the over-standard rates of 75.2% and 44.6% respectively. In the soil, Hg pollution is

收稿日期: 2018–09–23; 改回日期: 2018–11–25

基金项目: 中国地质调查局成都地质调查中心地调科研项目(WT[2016]–171)和重庆市国土资源和房屋管理局科技项目(KJ–2018034)资助。

作者简介: 鲍丽然, 女, 1983 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地质量地球化学评价研究工作; E-mail: blr1999@163.com。

通讯作者: 贾中民, 男, 1978 年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事土地质量地球化学评价研究工作; E-mail: zhongminjia@163.com。

relatively serious, and its pollution level is medium pollution or heavy pollution, Mn, As and Cd are generally light pollution, and the remaining heavy metals are basically pollution-free. The potential ecological hazard index shows that Hg and Cd are the main ecological hazard elements, Hg ecological risk is mainly strong to extremely strong, and Cd ecological risk is mainly medium. The heavy metal health risk assessment results show that children are more susceptible to the heavy metal pollution. There are no significant non-carcinogenic risks for adults, children however show significant non-carcinogenic effect, and As and Cr are major non-carcinogenic factors. The carcinogenic risks for adults are acceptable, individual soil samples have carcinogenic effect on children, and As has a relatively higher carcinogenesis risk.

Key words: soil; heavy metal; ecological risk; health risk; environmental geochemical survey engineering; Xiushan County; Chongqing

About the first author: BAO Lran, female, born in 1983, master, engages in research on geochemistry evaluation of land quality; E-mail: blr1999@163.com.

About the corresponding author: JIA Zhongmin, male, born in 1978, doctor, engages in research on geochemistry evaluation of land quality; E-mail: zhongminjia@163.com.

Fund support: Supported by Chengdu Geological Survey Center of China Geological Survey Geological Research (No. WT[2016]-171) and Science and Technology Project of Chongqing Land, resources and Housing Administration Bureau (No. KJ-2018034).

1 引 言

土壤是最宝贵的自然资源,农业生产和人类生存都离不开健康的土壤。随着工业化的进程,良好的土壤生态环境不断遭到破坏,土壤污染问题日益严重。农田土壤重金属污染将会影响农产品质量和食用安全,危及人类健康(蔡奎等,2016)。采矿区和冶炼区周边是土壤重金属高风险区,矿山开采、冶炼和选矿活动中产生的粉尘、残留尾矿、矿渣和废石等都会以扩散或淋滤等方式向土壤中释放重金属。近年矿区周边土壤重金属污染引起国内外学者的广泛关注。王爽等(2014)研究了矿业开采较多的陕西潼关县农田土壤重金属污染及潜在风险,发现土壤主要受到Hg、Cd、Pb的污染,具有轻微至很强的生态风险。Obiora et al.(2016)研究了尼日利亚东南部某锌矿区周围耕地土壤重金属污染程度,发现土壤Pb超标率为87%,Zn超标率为31%。Diemi et al.(2016)对马来西亚某铁矿区表层土壤重金属生态风险和人体健康风险进行了评价,发现Cd、As、Pb、Cu等生态风险较低,未发现明显的非致癌风险,As潜在致癌风险较大。田美玲等(2018)对广西南丹矿业活动影响区稻田土壤As、Sb、Cd、Pb、Cu和Zn等进行了污染评价,发现Cd、As存在严重超标现象。徐友宁等(2013)研究了某金矿区农田土壤镉污染及环境效应,发现土壤镉明显超过国家土壤环境质量二级标准,人发中镉含量较高,人群健康受到威胁。王兴明等(2016)研究了

淮南某煤矿周边农田土壤重金属污染情况,发现Cd、Pb、Cu和Zn明显高于当地土壤背景值,处于轻度至中度风险水平。

秀山县矿产资源丰富,已探明可开采矿藏有汞矿、锰矿、铅锌矿和钒钼矿等,尤其是西北部地区拥有重庆市最大的汞矿和锰矿。以往该区研究侧重于对某个矿区的尾矿、矿渣堆积区土壤污染和生态风险评价(李柳,2014;李礼等,2014;陈绍杨,2016),较少对矿区周边较广范围的农田土壤进行研究。基于此,本文在汞矿、锰矿开采较多的3个乡镇(溪口乡、溶溪镇和膏田镇)展开农田土壤重金属调查,系统分析土壤重金属污染特征和生态风险,并评价了重金属人体健康风险,以期土壤重金属污染防治、生态环境保护和居民健康生活提供科学依据。

2 研究区概况

秀山县位于重庆市东南部,地理坐标介于北纬28°9'43"~28°53'5",东经108°43'6"~109°18'58",东和东北与湖南省花垣、龙山、保靖县毗邻,南和东南、西南与贵州省松桃县相连,北和西北与酉阳县接壤。秀山县地处武陵山脉中段,四川盆地东南缘的外侧,地势西南高,东北低,海拔位于500~800 m之间,地貌呈平坝、丘陵、低山、中山互相交错状。属亚热带湿润季风气候,四季分明,气温正常,降水充沛,日照偏少。境内河溪纵横,河流切割强烈,地表起伏大,山脉、河流沿构造线东北向展布。土地利用

方式多样,以耕地和林地为主,分别占土地总面积的25.84%和49.22%。秀山县西北部的溪口乡、溶溪镇和膏田镇是汞矿、锰矿主产地,矿产开采加工业较多,威胁着周边生态环境。

3 材料与方 法

3.1 样品采集与测试

在研究区内耕地或园地采集表层土壤样,采用网格布样法,采样密度为1/km²,以GPS定位的采样点为中心,向四周辐射30~50 m确定3~5个分样点。采样时避开沟渠、林带、田埂、路边、旧房基等高低不平无代表性地段,采集0~20 cm的表层土壤样品,使用木铲直接采取样品,各分样点土壤掰碎,挑出根系、秸秆、石块等杂物,充分混合后,留取1.0~1.5 kg装入样品袋。土壤样品风干、敲碎,过20目尼龙筛后及时送实验室测试。将4 km²大格内样品等重量组合为1个分析样,全区共采集表层土壤单点样386件,组合分析样97件,图1为组合分析样分布位置。

样品测试由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心按《生态地球化学评价样品分析技术要求》(DD 2005-03)执行,分析指标、测定方法及检出限见表1。准确度和精密度采用国家一级标准物质进行控制,元素分析准确度和精密度合格率均高于

98%;元素报出率高于99.6%。

3.2 评价方法

3.2.1 土壤重金属污染评价

采用德国科学家Muller(1969)提出的地累积指数法,评价土壤重金属的污染水平,计算公式为:

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

式中, I_{geo} 为重金属*i*的地累积指数; C_i 为土壤中重金属*i*的实测值; S_i 为参比值,选用重庆市土壤重金属元素背景值(由重庆市1:25万土地质量地球化学调查数据统计得出); k 为修正系数,一般为1.5。根据地累积指数 I_{geo} ,进行重金属污染评价等级划分(表2)(Forstner et al, 1993)。

3.2.2 土壤重金属生态风险评价

采用Hakanson潜在生态危害指数法评价研究区土壤重金属生态风险,该方法不但将重金属的含量考虑在内,还将重金属的生态效应、环境效应和毒理学效应联系起来,是目前生态风险评价使用较广泛的方法(崔邢涛等,2011;管后春等,2013;代杰瑞等,2018)。其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_i^j) = \sum_{i=1}^n (T_{ir} \times \frac{C_i^j}{C_n^i}) \quad (2)$$

式中, C_i^j 为某一金属的污染指数; C_i 为土壤中某重金属的实测值; C_n^i 为某重金属参比值,采用重庆市土壤重金属背景值; E_r^i 为单项重金属潜在生态风险指数; T_r^i 为某重金属的毒性响应参数,各重金属毒性系数为:Zn=1 < Cr=Mn=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=30 < Hg=40 (Hakanson, 1980; 徐争启等,2008); RI 为总的潜在生态风险指数。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进行分级(表3)。

3.3.3 土壤重金属人体健康风险评价

采用USEPA公布的健康风险评估模型评价土壤重金属的人体健康风险,评价步骤包括暴露计算和风险表征。土壤重金属以经口直接摄入、呼吸吸入和皮肤接触等3种途径进入人体,对人体健康具有非致癌风险和致癌风险,在风险评估中将分别表征。

1) 暴露计算

3种重金属暴露途径致癌和非致癌日均暴露剂量如下式计算:

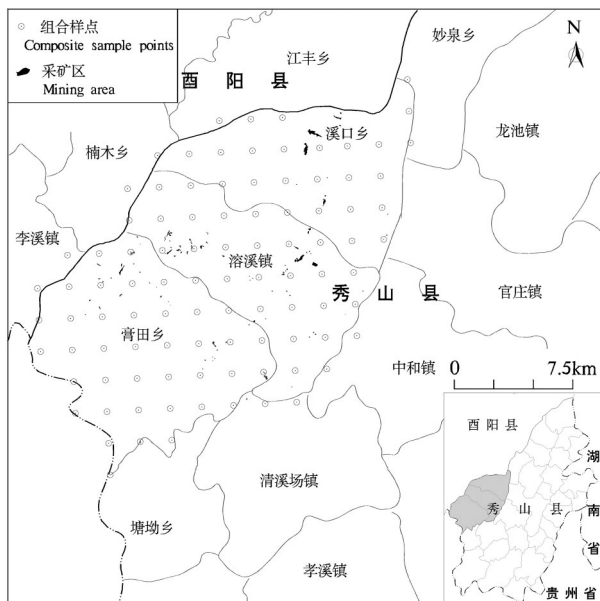


图1 组合样点位示意图

Fig.1 Map of the composite sample points

表 1 元素分析方法与检出限(mg·kg⁻¹)
Table 1 The element analysis methods and detection limit (mg·kg⁻¹)

指标	测定方法	检出限	指标	测定方法	检出限
Cr	X射线荧光	3	Cu	等离子体	1
Pb		2	Ni	发射光谱法	1
Zn	光谱法	1	Mn		10
As	原子荧光	0.2	Cd	等离子体质谱法	0.02
Hg	光谱法	0.0005	pH	pH计电极法	0.10

注: pH无量纲。

表 2 地累积指数污染程度划分标准
Table 2 I_{geo} index and the criteria of pollution grade

地累积指数 I _{geo}	级别	污染程度
I _{geo} <0	0	无污染
0≤I _{geo} <1	1	轻污染
1≤I _{geo} <2	2	中污染
2≤I _{geo} <3	3	中—重污染
3≤I _{geo} <4	4	重污染
4≤I _{geo} <5	5	重—极重污染
5≤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

生态危害	轻微	中等	强	很强	极强
单项重金属潜在生态危害指数 E _i '	<40	40~80	80~160	160~320	≥320
总潜在生态危害指数 RI	<150	150~300	300~600	600~1200	≥1200

$$ADD_{ing} = \frac{C_i \times IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$ADD_{inh} = \frac{C_i \times InhR \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \quad (4)$$

$$ADD_{iderm} = \frac{C_i \times SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{PEF \times BW \times AT} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中, ADD_{ing}、ADD_{inh} 和 ADD_{iderm} 分别代表经口摄入、呼吸摄入和皮肤接触摄入某重金属的日均暴露计量, C_i代表土壤中某污染重金属浓度。暴露皮肤面积根据王喆等(2008)统计的不同季节中国人暴露皮肤表面积和重庆市气候特征计算得出,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》(国家环境保护总局, 2014)和 US EPA 发布的人体参数(US EPA, 2011)(表 4)。

儿童致癌重金属日平均暴露量与成人有所不同, 需将单独个体儿童和成年阶段的暴露量加权平均, 再将暴露量平均分配到整个生命期, 计算公式为:

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

$$LADD_{inh} = \frac{C_i \times EF}{PEF \times AT} \times \left(\frac{InhR_{child} \times ED_{child}}{BW_{child}} + \frac{InhR_{adult} \times ED_{adult}}{BW_{adult}} \right) \quad (7)$$

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

2) 风险表征

$$HQ = \sum HQ_i = \sum \frac{ADD_{ing} + ADD_{inh} + ADD_{iderm}}{RfD_i} \quad (9)$$

$$CR = \sum CR_i = \sum (ADD_{ing} + ADD_{inh} + ADD_{iderm}) \times SF \quad (10)$$

式中, HQ 表示所有重金属非致癌健康风险指数, HQ_i表示单项重金属 i 非致癌健康风险指数, RfD_i表示重金属 i 的非致癌日均摄入量; HQ 或者 HQ_i < 1 表示重金属非致癌风险可忽略, 反之存在非致癌风险。CR 表示所有重金属致癌健康风险指数, CR_i表示单项重金属 i 致癌健康风险指数, SF 表示致癌斜率因子; 不同暴露途径的 RfD 和 SF 值, 见表 5(国家环境保护总局, 2014; 刘庆等, 2008; USEPA, 2009; USEPA2013); 一些研究将 10⁻⁶~10⁻⁴作为致癌健康风险指数 CR 或 CR_i可接受范围(李如忠等, 2012; 尹伊梦等, 2018)。

4 结果与分析

4.1 土壤重金属分布特征

研究区农田土壤重金属含量(表 6)由高至低依次为 Mn>Zn>Cr > Pb >Cu >Ni >As>Hg>Cd, 均高于重庆市土壤背景值, 表明重金属在土壤中都有一定程度的累积。Hg 含量为 0.066~30.02 mg·kg⁻¹, 平均值为 1.18 mg·kg⁻¹, 是重庆土壤背景值的 10 余倍; Mn、Cd、As 平均值分别为 1131 mg·kg⁻¹、0.588 mg·kg⁻¹和 18.8 mg·kg⁻¹, 是重庆土壤背景值的 2~3 倍; Cu、Pb、Zn、Cr 和 Ni 是重庆土壤背景值的 1~1.5 倍,

表4 重金属健康风险暴露参数

Table 4 Exposure parameters for the heavy metals

符号	参数名称/单位	成人参考值	儿童参考值
ED	暴露年限/a	25	6
BW	平均体重/kg	56.8	15.9
EF	暴露频率/(d·a ⁻¹)	350	350
AT	平均暴露时间/d	致癌26280, 非致癌9125	致癌26280, 非致癌2190
IngR	每日摄入土壤量/(mg·d ⁻¹)	100	200
InhR	每日空气呼吸量/(m ³ ·d ⁻¹)	14.5	7.5
SA	暴露皮肤表面积/cm ²	2415	1295
SL	皮肤粘附系数/[mg (cm ² ·d) ⁻¹]	0.2	0.2
PEF	地表灰尘排放因子/(m ³ ·kg ⁻¹)	1.36×10 ⁹	1.36×10 ⁹
ABS	皮肤吸收因子	0.001	0.001

显然土壤中Hg 积累效应最明显,Mn、Cd、As 次之。从变异系数来看,Hg 明显高于其他元素,达到2.72; Mn、Cd、As 变异系数也较高,分别为0.860、0.576 和0.530;其他元素变异系数介于0.142~0.277。变异系数越大,元素在土壤中分布越不均匀,受人类活动影响越大,该区土壤的Hg 元素受矿业开采等影响最大。

研究区土壤pH值介于4.5~8.1,不同范围重金属分布特征(图2)(为保持数据整体形态,作图剔除了Hg 元素特高值30.02 mg·kg⁻¹)显示,与土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值相比(国家生态环境,2018),土壤中Cr、Pb、Zn均未超标,Ni有1个样品超标,Cu、As有少量样品超标,Cd、Hg则存在较多样品超标,经统计超标率分别为75.2%和44.6%,Cd最高值是标准值的7.56倍,Hg最高值超出标准值的10倍以上。因此,Cd、Hg是该区土壤主要超标元素,可能

表5 重金属不同暴露途径参考计量和致癌斜率因子

Table 5 Reference dose and slope factor of heavy metals to different exposed ways

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

会对生态环境、农作物安全和人体健康带来危害。

4.2 重金属污染程度分析

以重庆土壤背景值为评价标准,对研究区土壤重金属污染程度进行地累积指数评价(表7)。重金属污染指数平均值从高至低顺序为Hg > As > Cd > Mn > Pb > Cu > Zn > Ni > Cr,土壤Hg 污染最严重,总体处于中—重污染水平,所有土壤样都受到不同程度的Hg 污染,中污染和中—重污染样品较多,分别占样本总数的26.8%和21.6%,轻污染和重污染均占17.5%,并存在少量的无污染和极重污染。As、Cd、Mn的地累积指数介于0~1,总体处于轻污染水平,1件样品Mn达到重污染,部分样品As和Cd达到中—重污染。Cr、Ni、Pb、Zn地累积指数均小于1,总体呈无污染状态。因此,研究区农田土壤Hg 污染现象最为突出,污染程度重、样品多。

4.3 重金属潜在生态风险评价

以重庆市土壤背景值作为参比值,进行研究区

表6 研究区表层土壤重金属含量特征(mg·kg⁻¹)

Table 6 Concentrations distribution of heavy metals in the study area

特征参数	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Mn
最小值	3.91	0.225	43.5	17.3	0.066	14	30.1	72.7	229
最大值	76.6	2.27	144	65.8	30.02	82.2	66.3	173	9178
平均值	18.8	0.588	82.3	36.3	1.18	36.1	41.8	112.6	1131
变异系数	0.530	0.576	0.145	0.282	2.72	0.236	0.178	0.168	0.860
重庆土壤背景值	6.62	0.280	74.4	24.6	0.069	31.6	28.1	81.9	559
农用地土壤污染 风险筛选值	pH≤5.5	30	0.3	150	50	0.5	60	70	200
	pH=5.5~6.5	30	0.3	150	50	0.5	70	90	200
	pH=6.5~7.5	25	0.3	200	100	0.6	100	120	250
	pH≥7.5	20	0.6	250	100	1	190	170	300

注:重庆市土壤重金属背景值由土地质量地球化学调查数据统计得出,调查范围包括重庆主城区、西部地区、东北及东南部地区,覆盖面积近6万km²,占全市土地面积的72.8%,基本可以代表全市土壤元素背景值;变异系数无量纲。

农田土壤潜在生态危害风险程度评价(表8)。从单项重金属潜在生态风险看,全部样品的Cr、Cu、Ni、Mn、Pb和Zn生态风险指数均小于40,为轻微生态风险;As风险指数范围为5.9~116,存在轻微至强生态风险,以轻微风险为主,占85.6%;Cd风险指数范围为24.1~243,存在轻微至很强的生态风险,以中等风险为主,占56.7%;Hg风险指数范围为38.5~17470,存在轻微至极强生态风险,以极强风险为主,占41.2%;因此,Hg、Cd为研究区土壤主要生态危害元素,As也有较轻的生态危害风险。Mn虽然积累明显且部分样品受到中或重污染,但由于其生态学毒性较弱,从而对土壤生态危害风险程度较低,均为轻微水平。

研究区重金属总的潜在生态指数RI分布范围为105~17583,存在轻微至极强的生态风险,以中等和强为主,所占比例分别为29.9%和34.0%。RI空

间分布图(图3)显示,溪口乡生态风险最高,大面积土壤具有极强生态风险,调查发现溪口乡北部的五龙村、潮水寸建有集采矿、选矿、冶炼于一体的大型汞矿企业,长期生产活动导致周边土壤Hg等重金属生态风险较高。溶溪镇大部分地区为强至很强的生态风险,膏田乡主要强风险,该区域锰矿企业较多,土壤呈现As、Cd、Mn、Hg等多种重金属污染状态。研究区东南边缘一带距离矿区较远,生态风险最低,表现为中等或轻微强度。

4.4 人体健康风险评价

4.4.1 重金属暴露评估分析

首先对研究区土壤重金属的日暴露进行评估(表9,表10)。非致癌平均日暴露量中,成人和儿童不同途径平均日摄入量由高到低顺序为 $ADD_{ing} > ADD_{derm} > ADD_{inh}$,经口摄入的重金属远高于经皮肤接触和呼吸吸入的重金属量;不同重金属3种途径

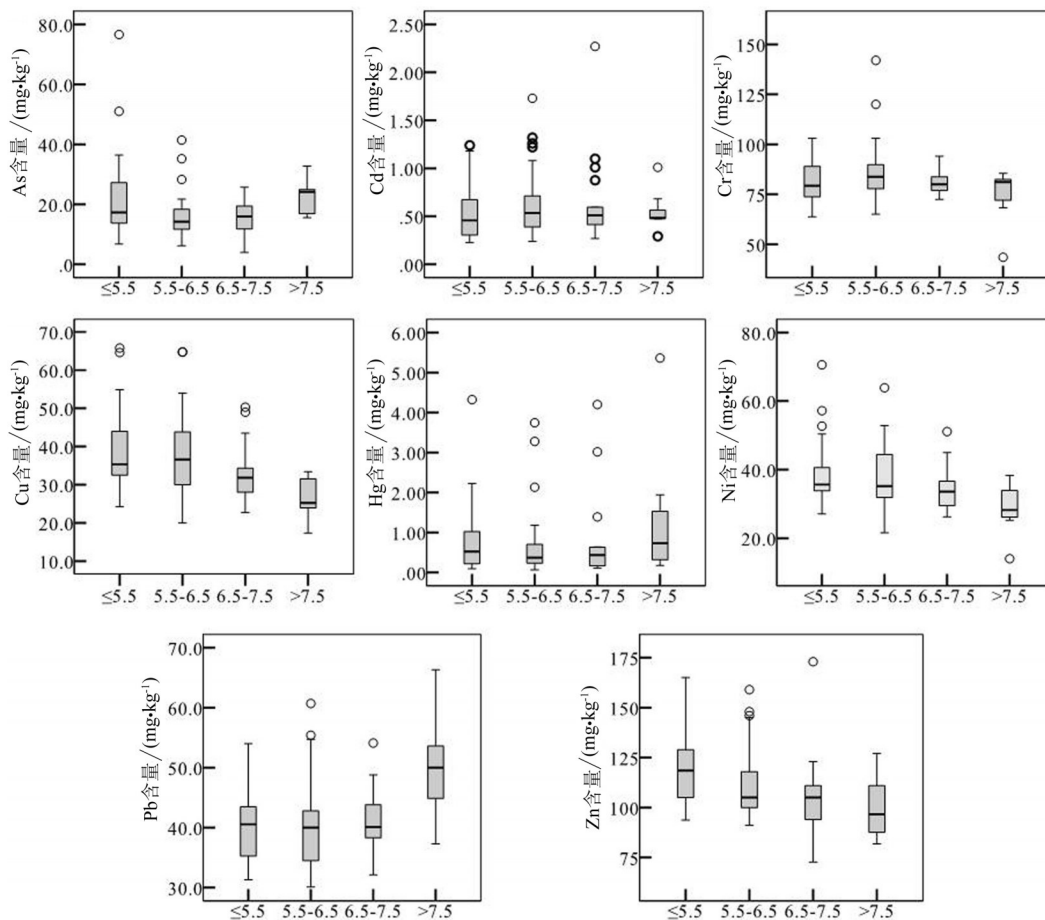


图2 研究区土壤重金属分布箱式图

Fig.2 Box-plots of heavy metals concentrations in the study area

表7 土壤重金属污染地累积指数分级
Table 7 The classification of heavy metals in the soil based on the I_{geo}

重金属	指数均值	各级样本数						
		无污染	轻污染	中污染	中-重污染	重污染	重-极重污染	极重污染
As	0.760	9	58	27	3	0	0	0
Cd	0.302	32	49	14	2	0	0	0
Cr	-0.453	95	2	0	0	0	0	0
Cu	-0.074	63	34	0	0	0	0	0
Hg	2.33	3	17	26	21	17	7	6
Ni	-0.430	90	7	0	0	0	0	0
Pb	-0.035	57	40	0	0	0	0	0
Zn	-0.145	74	23	0	0	0	0	0
Mn	0.213	38	49	9	0	1	0	0

平均日摄入量由高到低顺序为 Zn> Cr>Pb> Cu > Ni >As>Hg>Cd,所有重金属的儿童单一途径日摄入量及日摄入总量均高于成人。As、Cd、Cr、Ni元素致癌平均日暴露量中,经口摄入同样远高于皮肤和呼吸,平均日摄入量由高到低顺序为 Cr> Ni >As >Cd,儿童摄入量高于成人。因此,土壤重金属致癌和非致癌暴露评估中经口摄入是主要暴露途径,儿童平均日暴露量高于成人。

4.4.2 健康风险评价

依据健康风险评价模型、评价参数和调查数据,计算得出研究区8种重金属的非致癌和致癌健康风险评价指数(表11,表12)。

非致癌健康风险评价中,成人和儿童的同一元素不同暴露途径非致癌风险均表现为 $HQ_{ing}> HQ_{dem}> HQ_{inh}$,与暴露评估结论一致,表明非致癌风

险与暴露途径有关,经口摄入是土壤重金属非致癌风险的主要途径。不同重金属非致癌风险由高到低为 As>Cr>Pb>Hg>Ni>Cu> Cd>Zn,重金属单项非致癌风险指数平均值小于1,说明单项重金属对人体健康尚不存在非致癌风险。儿童重金属单项风险指数均高于成人,受危害的可能性更大。成人非致癌健康风险总指数平均值为0.197,最大值为0.762,表明研究区土壤中这8种重金属对成人的非致癌健康风险较小,可忽略不计。儿童重金属健康风险总指数平均值为1.34,最大值为5.26,表明该区土壤重金属对儿童具有非致癌健康风险。从非致癌风险总指数平均值构成比例看(图4),As、Cr是研究区土壤中主要非致癌因子,尤其对儿童具有较大的非致癌健康威胁,应加强该元素风险防治。

致癌健康风险评价中,成人和儿童的同一元素不同暴露途径致癌风险同样表现为 $CR_{ing}>CR_{dem}> CR_{inh}$,致癌风险大小也与暴露途径密不可分;重金属致癌风险由高到低为 As>Cd>Cr>Ni,说明As元素致癌风险最高。成人和儿童致癌风险总指数平均值分别为 1.89×10^{-5} 和 5.09×10^{-5} ,处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间,说明总体上研究区重金属引起的致癌总风险尚可接受,但仍超出美国EPA提出的土壤治理基准值 10^{-6} 。从致癌风险总指数最大值看,成人和儿童分别为 7.62×10^{-5} 和 2.06×10^{-4} ,儿童值超出可接受范围,主要由As的经口摄入途径导致。经统计分析发现,4个土壤样品的儿童致癌风险总指数超出范围,超标率为4.12%;3个样品的As致癌风险指数超出范围,超标率为3.01%;其余3种重金属致癌风险指数均未超出可接受范围。因此,该区土壤重金属对儿童

表8 土壤重金属的潜在生态危害指数统计
Table 8 Potential ecological risk coefficient for every heavy metal in the soil

危害指数	分布范围	各级样本数					
		轻微	中	强	很强	极强	
As	5.9~116	83	13	1	0	0	
Cd	24.1~243	23	55	17	2	0	
Cr	1.17~3.87	97	0	0	0	0	
Cu	3.52~13.4	97	0	0	0	0	
Ei	Hg	38.5~17470	1	5	23	28	40
	Ni	2.21~11.2	97	0	0	0	0
	Pb	5.35~11.8	97	0	0	0	0
	Zn	0.887~2.11	97	0	0	0	0
	Mn	0.819~32.8	97	0	0	0	0
RI	105~17583	4	29	33	19	12	

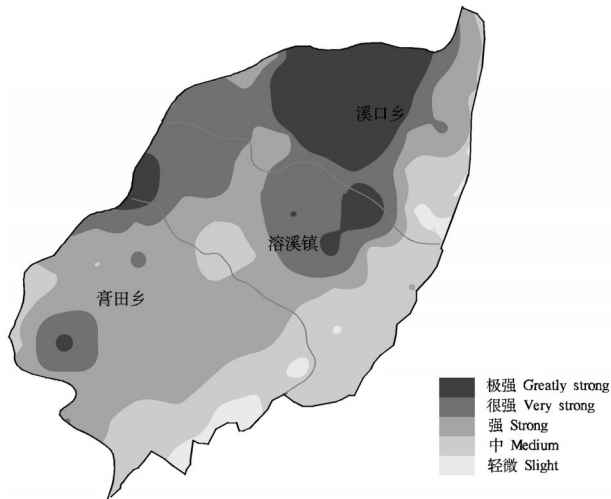


图3 研究区土壤生态风险等级分布图

Fig.3 The spatial distribution of total potential ecological grade

已呈现致癌风险,尤其是As元素具有较大的致癌风险,应加强防范。

5 讨论

土壤重金属污染是当前基础地质、环境和土壤领域研究的重点问题之一,工业区、城市区和采矿

区等是重金属污染的高危地带。秀山西北部矿业发达,农田土壤重金属Hg明显高于重庆市背景值,已出现严重污染现象,Mn、As、Cd也受到开矿活动影响,但污染程度相关较低。张龙等(2011)研究也发现秀山溪口乡汞矿开采导致当地土水环境受到Hg污染,土壤Hg最高超过土壤环境二级标准值的2倍。黄小娟等(2014)发现溶溪锰矿区河流两岸农田土壤主要受到Mn、Cd两种重金属污染,矿渣堆下方距离较远农田主要受到Cd的污染。

目前,土壤重金属污染评价主要关注于生态风险和健康风险。生态风险是由环境的自然变化或人类活动引起的生态系统组成、结构的改变而导致系统功能损失的可能性。秀山西北部农田土壤Mn、Cu、Zn、Pb生态风险与黄小娟等(2014)研究结果一致,而Cd有较大差别,本文中Cd生态风险以中和强为主,黄小娟等认为该元素存在很强或极强的生态风险。这应该是由于两次研究选用的参比值不同导致的,黄小娟等选用了《中国土壤元素背景值》中四川省背景值(Cd, 0.079 mg·kg⁻¹),与本文数据明显不同,重庆地区背景值更能反映当地土壤实际情况。李柳(2014)评价了溪口乡五龙村汞矿区

表9 土壤重金属非致癌平均日暴露量(10⁻⁸ mg·kg⁻¹·d⁻¹)

Table 9 Non-carcinogenic average daily exposure doses of heavy metals in the soil

重金属	ADD _{ing}		ADD _{inh}		ADD _{derm}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	3165.74	22618.15	0.34	0.62	15.29	29.29	3181.37	22648.06
Cd	99.24	709.05	0.01	0.02	0.48	0.92	99.73	709.99
Cr	13892.94	99260.22	1.48	2.74	67.10	128.54	13961.52	99391.50
Cu	6129.08	43790.14	0.65	1.21	29.60	56.71	6159.33	43848.06
Hg	200.43	1432.02	0.02	0.04	0.97	1.85	201.42	1433.91
Ni	6102.45	43599.89	0.65	1.20	29.47	56.46	6132.57	43657.55
Pb	7056.55	50416.61	0.75	1.39	34.08	65.29	7091.39	50483.29
Zn	19010.31	135822.06	2.03	3.75	91.82	175.89	19104.15	136001.69
ADD	55656.74	397648.14	5.93	10.96	268.82	514.95	55931.49	398174.06

表10 土壤As、Cd、Cr、Ni元素致癌平均日暴露量(10⁻⁸ mg·kg⁻¹·d⁻¹)

Table 10 Carcinogenic average daily exposure doses of As, Cd, Cr and Ni in the soil

重金属	ADD _{ing}		ADD _{inh}		ADD _{derm}		ADD	
	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	1100.00	2980.00	0.12	0.17	5.31	7.75	1100.00	2990.00
Cd	34.50	93.50	0.00	0.01	0.17	0.24	34.60	93.80
Cr	4820.00	13100.00	0.51	0.74	23.30	34.00	4850.00	13100.00
Ni	2130.00	5780.00	0.23	0.33	10.30	15.00	2140.00	5790.00
ADD	8090.00	22000.00	0.86	1.24	39.10	57.00	8130.00	22000.00

表 11 土壤重金属非致癌健康风险指数 (10^{-4})
Table 11 Non-carcinogenic health risk index of heavy metals in the 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
As	最大值	4310.57	30797.51	9.19	16.98	20.82	39.88	4340.58	30854.37
	平均值	1055.25	7539.38	2.25	4.16	5.10	9.76	1062.60	7553.30
Cd	最大值	38.32	273.80	0.41	0.75	7.40	14.18	46.13	288.74
	平均值	9.92	70.91	0.11	0.20	1.92	3.67	11.95	74.77
Cr	最大值	810.34	5789.61	10.16	18.78	156.56	299.90	977.06	6108.29
	平均值	463.10	3308.67	5.81	10.73	89.47	171.39	558.38	3490.80
Cu	最大值	27.77	198.41	—	—	0.13	0.26	27.91	198.67
	平均值	15.32	109.48	—	—	0.07	0.14	15.40	109.62
Hg	最大值	1689.22	12068.92	0.18	0.33	116.56	223.28	1805.96	12292.53
	平均值	66.81	477.34	0.01	0.01	4.61	8.83	71.43	486.18
Ni	最大值	69.39	495.74	6.43	11.89	8.38	16.05	84.20	523.67
	平均值	30.51	218.00	2.83	5.23	3.68	7.06	37.03	230.28
Pb	最大值	319.80	2284.83	0.03	0.06	10.20	19.54	330.03	2304.43
	平均值	201.62	1440.47	0.02	0.04	6.43	12.32	208.07	1452.83
Zn	最大值	9.74	69.56	—	—	0.05	0.09	9.78	69.65
	平均值	6.34	45.27	—	—	0.03	0.06	6.37	45.33
HQ	最大值	7275.14	51978.38	26.41	48.80	320.10	613.18	7621.65	52640.36
	平均值	1848.87	13209.53	11.02	20.37	111.31	213.23	1971.21	13443.13

内部及其下风向 2 km 范围内土壤重金属生态风险,发现全部土壤样品的生态危害程度均为极强,此次评价中溪口乡五龙村附近土壤生态风险也为极强,两次研究均发现该区域土壤存在严重的生态危害,建议及时采取有效措施进行土壤污染治理。

健康风险是人的生命过程中,因自然、社会和人自身发展的诸多因素,导致人出现疾病、伤残以及造成健康损失的可能性。研究区农田土壤重金属对成人基本不具有非致癌和致癌风险,对儿童已

构成非致癌风险和致癌风险,表明儿童更易受到重金属危害,与杨敏等(2016)、Jia et al.(2018)等研究结果相符,可能是由于儿童接触土壤的机会更多而免疫力却相对较低导致的。该区 As、Cr 健康风险较大,这与邻近的黔江区评价结果一致(张永江等,2016),黔江农业区土壤 As、Cr 为主要非致癌因子,呼吸途径致癌风险 Cr 元素最强,尚未对其他途径进行研究。周楠(2016)在评价湖南省某尾矿库周边农田土壤重金属风险时,也发现 As 是导致当地居民

表 12 土壤重金属 As、Cd、Cr、Ni 致癌健康风险指数 (10^{-8})
Table 12 Carcinogenic health risk index of heavy metals(As, Cd, Cr, Ni) in the soil

重金属		CR_{ing}		CR_{inh}		CR_{derm}		CR	
		成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童	成人	儿童
As	最大值	6740.00	18300.00	0.00	0.00	32.50	47.50	6770.00	18300.00
	平均值	1648.83	4480.00	0.00	0.00	7.96	11.60	1656.99	4490.00
Cd	最大值	812.00	2200.00	0.09	0.13	3.92	5.72	816.00	2210.00
	平均值	210.00	571.00	0.02	0.03	1.02	1.48	211.24	572.75
Cr	最大值	—	—	37.80	54.60	—	—	37.80	54.60
	平均值	—	—	21.60	31.20	—	—	21.60	31.20
Ni	最大值	—	—	0.35	0.50	—	—	0.35	0.50
	平均值	—	—	0.19	0.28	—	—	0.19	0.28
CR	最大值	7550.00	20500.00	38.20	55.20	36.50	53.20	7620.00	20600.00
	平均值	1860.00	5050.00	21.80	31.50	8.98	13.10	1890.00	5090.00

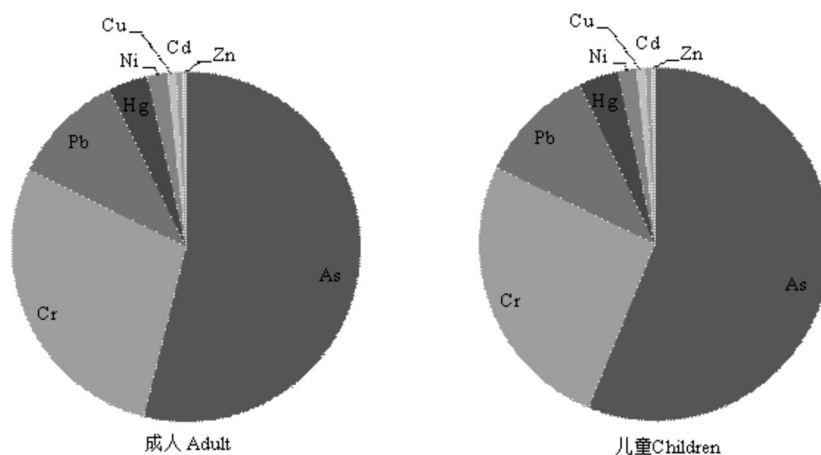


图4 成人和儿童土壤8种重金属的HQ贡献率

Fig.4 Adults and children HQ contribution rate of 8 heavy metals in the soil

受到非致癌风险的首要元素。上述研究中As暴露量都明显低于Zn、Cu、Pb等,但健康风险最大,可见重金属健康风险除了与暴露剂量有关外,还与重金属本身的毒性相关。毒性较大的重金属As、Hg,参考计量值较小,更易产生人体健康风险。考虑到进入人体的重金属不可能全部被消化吸收,部分学者(李继宁等,2013;李华等,2015;武慧君等,2017)尝试了引入生物可给性,发现重金属对儿童的非致癌风险和致癌风险会大幅降低,更准确地评估重金属的危害风险。因此,本文高估了土壤重金属对儿童的危害,可能并不会带来非致癌风险和致癌风险,真实情况如何今后还需要进一步研究。但从健康角度出发,现阶段土壤污染防治丝毫不容懈怠,对土壤重金属健康风险应提高警惕,加强预警。

6 结 论

(1) 秀山县西北部农田土壤As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn等重金属均高于重庆土壤背景值,Hg元素最为突出,且变异系数大,受开矿影响最明显。与国家农用地土壤污染风险筛选值相比,Cd、Hg是研究区土壤主要超标元素,可能会产生生态健康危害。

(2) 地累积指数评价结果显示,该区土壤Hg元素污染现象最严重,总体处于中—重污染水平;As、Cd、Mn总体处于轻污染水平,Mn污染程度较高;Cr、Ni、Pb、Zn总体呈无污染状态。

(3) 重金属潜在生态风险评价结果表明,研究区土壤潜在重金属生态危害主要表现为Hg和Cd,Hg

的生态风险以强、很强和极强为主,Cd以中等为主,其余重金属危害不明显。溪口乡土壤重金属生态风险最强,疑是周边汞矿开采导致。

(4) 重金属人体健康风险评价结果显示,儿童更易受到重金属威胁,经手口摄入是土壤暴露风险的主要途径。As、Cr是研究区土壤主要非致癌因子,成人非致癌健康风险总指数HQ小于1,危害可忽略;儿童的HQ大于1,重金属对儿童具有非致癌风险。As的致癌风险高于Cd、Cr、Ni,成人和儿童致癌风险总指数平均值处于 10^{-6} ~ 10^{-4} 之间,尚可接受;但个别样品儿童的致癌风险总指数或As致癌风险指数已超出范围,重金属对儿童存在致癌风险。

References

- Cai Kui, Duan Yamin, Luan Wenlou, Li Qian, Ma Yunchao. 2016. Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1420–1428(in Chinese with English abstract).
- Chen Shaoyang. 2016. Research on Mercury Pollution assessment and Adsorption–Desorption Characteristics of Soil and Sediment around the Mercury Ore Area[D]. Chongqing: Chongqing University(in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Niu Yanbin, Li Suimin, Song Zefeng. 2011. An assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazards in urban soil of Tangshan City [J]. *Geology in China*, 38(5): 1379–1386(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.
- Guan Houchun, Li Yunhui, 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).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment to logical approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Jia Z M, Li S Y, Wang L. 2018. Assessment of soil heavy metals for eco–environment and human health in a rapidly urbanization area of the upper Yangtze Basin[J]. *Scientific Reports*, 8, 3256.
- Huang Xiaojuan, Jiang Changshe S, Hao Qingju. 2014. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi Manganese mine land of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(15): 4201–4211(in Chinese with English abstract).
- Li Hua, Li Hailong, Zhu Yuen, Liu Miao, Shi Weiyu. 2015. Health risk assessment based on bioavailability of heavy metals in contaminated sites[J]. *Journal of Earth Environment*, 6(1): 60–66 (in Chinese with English abstract).
- Li Jining, Hou Hong, Wei Yuan, Xu Yafei, Li Fasheng. 2013. Bioaccessibility and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil from Zhuzhou, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 26(10): 1139–1146(in Chinese with English abstract).
- Li Li, Xu Longjun, Li Dou. 2014. Analysis and evaluation of soil heavy metal pollution in Chongqing Xiushan manganese mine–zone[J]. *Earth and Environment*, 42(5): 646–651(in Chinese with English abstract).
- Li Liu. 2014. Study on Environmental Pollution Status and Risk Assessment of Mercury in Xikou Mercury Mining Area[D]. Chongqing: Chongqing University(in Chinese with English abstract).
- Li Ruzhong, Pan Chengrong, Chen Jing, Jiang Yanmin, Ding Guizhen. 2012. Heavy metal contamination and health risk assessment for urban topsoil and dust in Tongling City[J]. *China Environmental Science*, 32(12): 2261–2270(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).
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. 2014. Technical Guidelines for Risk Assessment of Contaminated: HJ 25.3–2014[M]. Beijing: China Environmental Science Press(in Chinese).
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2008. Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S]: GB15618–2008(in Chinese).
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 2: 109–118.
- Obiora S C, Chukwu A, Davies T C. 2016. Heavy metals and health risk assessment of arable soils and food crops around Pb–Zn mining localities in Enyigba, southeastern Nigeria[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 116: 182–189.
- Tian Meiling, Zhong Xuemei, Zhang Yunxia, Yu Yuanyuan, Pang Rui. 2018. Concentrations and health risk assessment of heavy metal contents in soil and rice of mine contaminated areas[J]. *Environmental Science*, 39(6): 2919–2926(in Chinese with English abstract).
- US EPA. 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 Shuang, Li Ronghua, Zhang Zengqiang, Feng Jing, Shen Feng. 2014. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 34(9): 2313–2320(in Chinese with English abstract).
- Wang Xingming, Zhang Ruiliang, Wang Yunmin, Lu Xianwen, Zha Fugeng. 2016. Eco–toxicity effect of heavy metals in cropland soils collected from the vicinity of a coal mine in huainan[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 25(5): 877–884(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Wu Huijun, Fang Fengman, Wu Jiayuan, Yao Yuru, Wu Minghong. 2017. Bioaccessibility and health risk of heavy metals at topsoil in primary schools in a coal mining city[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 48(5): 1247–1255(in Chinese with English abstract).
- Xu Youning, Zhang Jianghua, Ke Hailing, Liu Runping, Chen Huaqing. 2013. Cd contamination of farmland soil in a gold mining area and its environmental effects [J]. *Geology in China*, 40(2): 636–643 (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).
- Yang Ming, Teng Ying, Ren Wenjie, Huang Yang, Xu Defu. 2016. Pollution and health risk assessment of heavy metals in agricultural soil around shimen realgar mine[J]. *Soil*, 48(6): 1172–1178(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 Haizhen, Tang Yuli, Lu Jun, Zhou Hong, Xu Yunxian. 2014. Sources and spatial distribution of typical heavy metal pollutants in soils in Xihu scenic area[J]. *Environmental Science*, 35(4): 1516–1522(in Chinese with English abstract).
- Zhang Long, Lin Xianhui, Liu Qiao, Xu Li, Zhang Jinzhong. 2011. Effects of Mercury Mine Exploitation on local soil and water environment in Xiushan[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 36(6): 105–109(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongjiang, Deng Mao, Wang Xiangbin, Yao Jiang, Liu Xianliang. 2016. Assessment on human health risk of potentially heavy metals in agricultural farmland of Qianjiang district[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 34(2): 37–42(in Chinese with English abstract).
- Zhou Nan. 2016. The Pollution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops Around A Taolongs in Hunan Province[D]. Nanjing: University of south China(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 李倩, 马云超. 2016. 河北平原农田土壤重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的影响因素[J]. *中国地质*, 43(4): 1420–1428.
- 陈绍杨. 2016. 汞矿区周边土壤和溪流沉积物的汞污染评价及吸附解吸特征研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 李随民, 宋泽峰. 2011. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. *中国地质*, 38(5):1379–1386.
- 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.
- 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.
- 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 2014. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. *生态学报*, 34(15):4201–4211.
- 李华, 李海龙, 朱宇恩, 刘苗, 时伟宇. 2015. 基于人体可给性的重金属污染场地健康风险评估[J]. *地球环境学报*, 6(1): 60–66.
- 李继宁, 侯红, 魏源, 许亚飞, 李发生. 2013. 株洲市农田土壤重金属生物可给性及其人体健康风险评估[J]. *环境科学研究*, (10): 1139–1146.
- 李礼, 徐龙君, 李斗. 2014. 重庆秀山锰矿区土壤重金属污染分析与评价[J]. *地球与环境*, 42(5): 646–651.
- 李柳. 2014. 溪口汞矿地区汞环境污染现状及风险评估研究[D]. 重庆: 重庆大学.
- 李如忠, 潘成荣, 陈婧, 姜艳敏, 丁贵珍. 2012. 铜陵市区表土与灰尘重金属污染健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 32(12): 2261–2270.
- 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估—以浙江省慈溪市为例[J]. *土壤通报*, 39(3): 634–639.
- 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞. 2018. 矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险[J]. *环境科学*, 39(6): 2919–2926.
- 王爽, 李荣华, 张增强, 冯静, 沈锋. 2014. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. *中国环境科学*, 34(9): 2313–2320.
- 王兴明, 张瑞良, 王运敏, 鲁先文, 查甫更. 2016. 淮南某煤矿邻近农田土壤中重金属的生态风险研究[J]. *生态环境学报*, 25(5): 877–884.
- 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 林春野. 2008. 健康风险评估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.
- 武慧君, 方凤满, 武家园, 姚有如, 吴明宏. 2017. 煤矿型城市小学校园表层土壤重金属生物可给性与健康风险研究[J]. *土壤通报*, 48(5): 1247–1255.
- 徐友宁, 张江华, 柯海玲, 刘瑞萍, 陈华清. 2013. 某金矿区农田土壤镉污染及其环境效应[J]. *中国地质*, 40(2): 636–643.
- 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*, 2008, 31(2): 112–115.
- 杨敏, 滕应, 任文杰, 黄阳, 徐德福. 2016. 石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J]. *土壤*, 48(6): 1172–1178.
- 尹伊梦, 袁赵委, 黄庭, 程胜高, 赵珍丽. 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估[J]. *环境科学*, 39(2): 916–925
- 张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜. 2014. 西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征[J]. *环境科学*, 35(4): 1516–1522.
- 张龙, 林先辉, 刘俏, 徐粒, 张进忠. 2011. 秀山汞矿开采对当地水土环境的影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 36(6): 105–109.
- 张永江, 邓茂, 王祥炳, 姚靖, 刘先良. 2016. 黔江区农业区域土壤重金属健康风险评估[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 34(2): 37–42.
- 周楠. 2016. 湖南省某尾矿库周边农田土壤和农作物重金属污染及健康风险评估[D]. 南京: 南京大学.
- 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. 2008. GB15618–2008 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].