doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.008

汞矿区土壤和农产品重金属污染状况及风险评估

贾亚琪[1],刘文政[2],秦俊虎[1],迟峰[1],高庚申[1]

(1. 贵州省环境科学研究设计院,贵阳 550081;
2. 贵州省疾病预防控制中心,贵阳 550004)

摘要:为了解汞矿选冶采矿活动对当地生态环境的影响,以贵州某汞矿区尾矿堆场为研究对象,利用随机布点法采集土壤样品及农产品各 60 份,利用内梅罗综合指数法、潜在生态风险评价法对土壤重金属污染程度进行评价,利用健康风险评估模型对农产品中重金属的健康危害进行评估。结果表明,研究区土壤复合污染程度为重污染,Hg 贡献最大,Cd 次之,且 A 区较 B 区土壤污染严重。蔬菜、稻米、玉米中 Hg 的超标率分别为 82.8%、46.7%、20%,蔬菜中 Cd 的超标率为 51.7%,其他元素均低于限量标准。食用当地稻米及蔬菜对人群产生的健康危害指数 $HI>1$,可能存在潜在健康风险,玉米对人群产生的健康危害指数较小,其潜在健康风险可忽略不计。土壤重金属含量与农产品中重金属含量无明显相关性。

关键词:汞矿区;土壤;农产品;重金属;健康风险

中图分类号:X53　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-7545(2021)03-0043-08

Pollution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Agricultural Products around Mercury Mining Areas

JIA Ya-qi[1], LIU Wen-zheng[2], QIN Jun-hu[1], CHI feng[1], GAO Geng-shen[1]

(1. Guizhou Environmental Scientific Research and Design Institute, Guiyang 550081, China;
2. Guizhou Center for Disease Control and Prevention, Guiyang 550004, China)

Abstract: In order to investigate impact of mercury mining activity on local ecological environment, soil and agricultural products around mercury mining area in Guizhou, 60 soil samples and 60 agricultural products samples were collected by random sampling to evaluate pollution degree of heavy metals in soil by Nemerow comprehensive index method and potential ecological risk assessment method, and population's exposure to heavy metals in agricultural products by health risk assessment model. The results show that pollution degree of soil in study area is heavy pollution; Hg shows the highest contribution factor in soil, followed by Cd, and soil pollution in area A is more serious than that in area B. Over standard rate of Hg in samples of vegetables, rice and corn is 82.8%, 46.7% and 20%, respectively, followed by 51.7% samples of Cd in vegetables, and other elements do not exceed limit standard in food. Health hazard index ($HI>1$) of rice and vegetables may have health risk, but corn is safe. There is no obvious linear relationship between heavy metal content in soil and edible part of agricultural products.

Key words: mercury mining areas; soil; agricultural products; heavy metals; health risk

收稿日期:2020-10-23

基金项目:贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2019]2831 号);贵州省科技平台及人才团队计划项目(黔科合平台人才[2018]5731)

作者简介:贾亚琪(1991-),女,陕西白水人,硕士,工程师;**通信作者**:高庚申(1981-),男,山西神池人,高级工程师

近年来,随着经济的快速发展,我国土壤重金属污染问题愈发严重。有研究报告指出,我国有8.2%的点位存在重金属污染或超标情况,覆盖面积高达 759.14 万公顷(11 387 万亩)[1]。造成土壤重金属污染或超标的原因主要有地质背景高、成土过程的次生富集作用和人类活动,其中人类活动,比如采矿选冶等工业活动中企业"三废"未经处理的直接排放、农业生产活动中污水灌溉及农药化肥的不合理使用以及大量汽车在使用过程中汽油、发动机、轮胎等部分的燃烧或磨损等是造成或加剧土壤重金属污染的重要原因[1-3]。重金属一旦进入土壤,会长期存在且不断累积,进而通过淋溶转运污染地下水及农产品。食物链是人体累计重金属最主要途径之一,食用重金属污染土壤种植的谷类和蔬菜可能对人群健康有潜在风险[4],因此,开展矿区周边土壤重金属污染状况及风险评价有重要意义。

某研究区历史悠久,经历了土法炼汞和新法炼汞的转变。已有研究结果表明,该地区土壤及农产品有明显的汞累积效应[5-7],对其他重金属在土壤-农作物整体系统污染水平的研究则较少报道。为全面了解汞矿区汞含量及其他伴生重金属对周边环境带来的生态影响,本研究以贵州典型汞矿区为研究对象,对土壤及主要农产品(水稻、玉米、蔬菜)中 8 种重金属(Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、Ni、Hg 和 As)的含量进行分析,探究土壤重金属含量水平及污染程度,同时对当地成人食用农产品造成的健康风险进行评价,并对本地区土壤及农产品中重金属富集规律进行探究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省东部某典型汞矿区,因盛产朱砂、水银而成为中国最大的汞工业生产基地,由于资源枯竭,2001 年国家对该汞矿实施政策性关闭。该区域以喀斯特岩溶地貌为主,集山、水、林、洞为一体。属于中亚热带季风湿润气候,年平均气温 13.4 ℃,年平均降水量 1 400 mm,常年主导风向为东北风。

1.2 样品采集与处理

根据当地农产品成熟的季节,样品于 2018 年 8 月采集于贵州省某典型汞矿区,根据 NY/T 395—2000《农田土壤环境质量监测技术规范》、NY/T 398—2000《农、畜、水产品污染监测技术规范》,有针对性地选取矿区周边耕作年限较长、有代表性的耕地作为采样单元(采样点如图 1 所示),每个采样单元随机选取约 4 株植物样品(叶类蔬菜)或籽粒样品,混合均匀后装袋,作为一个样品;同时采集根际土壤表层样品。共采集汞矿区周边农田土壤及对应农产品(水稻、玉米、蔬菜)各 60 份。

土壤样品经风干、研磨过 100 目尼龙筛后装入自封袋,备用;农产品样品取可食用部分,谷物经烘干、脱壳、洗净、粉碎后装入自封袋,蔬菜样品洗净、匀浆后保存于 50 mL 离心管内,并置于超低温冰箱内,备用。

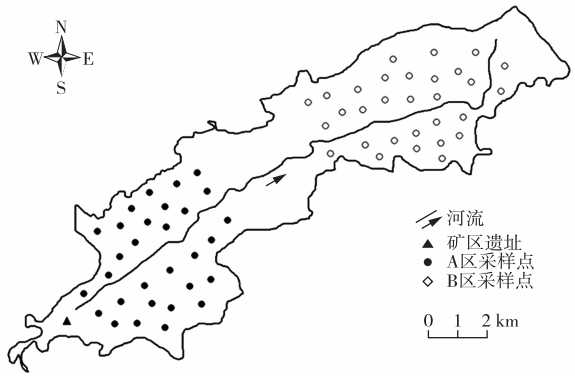

图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 样品分析方法

土壤和农产品中重金属 Pb、Cr、Cd、Cu、Zn、Ni、As 含量采用电感耦合等离子体质谱仪测定[8];土壤和农产品中 Hg 的含量采用原子荧光仪测定[8]。

1.4 土壤重金属污染评价

1.4.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法是我国常用的评价土壤污染程度的方法,其评价公式和污染等级分级标准按照文献[9]进行分析,元素评价标准选取贵州省土壤背景值[10-11]。

1.4.2 内梅罗综合指数法

使用内梅罗综合污染指数法评价某个整体区域的复合污染状况,计算公式和污染等级分级标准按照文献[8]进行分析。

1.4.3 潜在生态风险评价法

潜在生态危害指数法由瑞典科学家 Hakanson[12]提出,计算公式和某一重金属毒性响应系数按照参考文献[13]进行计算,参比值取贵州省土壤平均背景值。单因子潜在生态危害系数和综合危害指数污染等级及其阈值参考文献[12]。

1.5 农产品摄入的健康风险评价

农产品摄入是人体重金属主要暴露途径之一,

本研究采用危险商法对当地居民农产品摄入重金属潜在健康风险进行评价[14-17]，具体计算公式及各指标取值参考文献[14-20]，根据暴露参数手册和当地居民的饮食习惯，确定研究区成人米类及其制品摄入量为 334.4 g/d，其他谷类摄入量 14.2 g/d，蔬菜摄入量为 211 g/d。

1.6　数据处理和分析

采用 EXCEL 2017 进行统计分析，SPSS 21.0 软件进行相关性分析。

1.7　质量控制

整个试验过程均在洁净、专业的样品处理室进行，处理前容器于 20% HNO_3 溶液里浸泡 24 h 并用超纯水润洗后投入使用。所用试剂均为优级纯，水为超纯水。

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属含量特征

矿区周边土壤重金属含量如表 1 所示。分别对图 1 中的 A 区和 B 区土壤重金属含量进行统计分析，A 区土壤 Cr、Cu 和 B 区土壤 Cr 含量符合正态分布，其它重金属含量均不符合正态分布。由表 1 可知，A 区土壤 Cu、Zn、Cd、Hg 含量分别为 49.8、148、1.06、12.8 mg/kg，分别为贵州省土壤背景值的 1.56、1.49、1.61、116 倍。与农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618—2018)相比，Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 和 As 的含量均小于风险筛选值，土壤 Cd 含量高于风险筛选值，低于风险管控值，土壤 Hg 含量是风险管制值的 2.13 倍；B 区土壤 Cu、Zn、Cd、Hg 四种元素含量中位值分别为 33.5、112、0.836、8.82 mg/kg，分别为贵州省土壤背景值的 1.05、1.12、1.27、80.2 倍。Pb、Cr、Cu、Ni、Zn 和 As 的含量均小于 GB 15618—2018 风险筛选值，土壤 Cd 含量高于风险筛选值但低于风险管控值，土壤 Hg 含量是风险管制值的 1.47 倍。综上所述，研究区土壤中 Hg 污染严重，Cd 次之，这可能是由于汞矿等矿石中多半生镉[21]。胡国成等[22]对万山各汞矿周围土壤的研究结果显示，土壤 Hg 的超标倍数高达 135 倍，喻子恒等[23]对贵州丹寨汞矿区周边土壤的研究结果表明，土壤 Hg 的平均含量为 20.4 mg/kg，远高于贵州省土壤环境 Hg 背景值。方差分析表明，除 Zn 外，其他元素均为 A 区的显著高于 B 区的($P<0.05$)，由于 A 区更靠近汞矿，表明汞矿的开采活动已经对周边的生态环境造成严重的污染破坏。

由变异系数可知，A 区 Cd 和 Hg 变异程度最大，超过 100%，属于强变异，这是由矿产开采和冶炼活动导致的；A 区 Pb、As，B 区 Ni、Cd、Hg、As 属于中等变异程度，变异系数大于 40%；其他元素变异程度较低[24]，变异系数小于 40%。

表 1　土壤重金属含量

Table 1　Contents of heavy metals in soil　　/(mg·kg^{-1})

采样区	统计	重金属含量							
		Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Cd	Hg	As
A 区 (pH 5.72～8.35)	最小值	15.1	36.1	26.1	70.1	22.4	0.401	0.947	5.90
	最大值	111	85.6	75.1	411	77.8	23.2	93.7	62.5
	中位值	31.8	61.2	46.8	148	38.6	1.06	12.8	13.6
	均值	35.6	61.2	49.8	154	38.5	3.07	24.6	17.0
	标准差	20.8	14.6	10.3	59.9	9.34	5.89	26.3	11.1
	变异系数/%	58.5	23.8	20.8	38.9	24.3	191	107	65.2
B 区 (pH 5.82～8.38)	最小值	16.8	33.4	16.8	89.9	11.0	0.435	1.06	2.78
	最大值	49.2	89.3	74.4	250	89.4	2.28	35.8	22.2
	中位值	26.3	49.7	33.5	112	23.7	0.836	8.82	8.30
	均值	26.5	51.5	36.4	133	25.4	0.872	11.3	9.58
	标准差	5.98	13.4	12.3	42.3	14.1	0.351	9.28	4.37
	变异系数/%	22.5	26.1	33.9	31.8	55.8	40.2	81.9	45.6
贵州省土壤背景值		35.2	95.9	32.0	99.5	39.1	0.66	0.11	20
GB 15618—2018 风险筛选值(pH>7.5)		170	250	100	300	190	0.6	3.4	25
GB 15618—2018 风险管制值(pH>7.5)		1 000	1 300	—	—	—	4.0	6.0	100

2.2　内梅罗综合指数评价结果

采用内梅罗综合指数法对调查区土壤重金属的污染程度进行评价，评价结果如表 2 所示。由表 2 可知，A 区和 B 区土壤重金属 Cr、Pb、Ni、As 元素单因子污染指数 P_i 均小于 1，为警戒线水平以下；Cu、Zn、Cd 均表现为轻度污染水平，Hg 表现为重度污

染水平。A 区元素的单因子污染指数表现为 Hg>Cd>Cu>Zn>Ni>Pb>As>Cr,B 区素的单因子污染指数表现为 Hg>Cd>Zn>Cu>Pb>Ni>Cr>As。综合污染指数评价结果表明,研究区土壤重金属复合污染程度均为重度污染,其中 Hg 对综合污染指数贡献最大,A 区土壤重金属单因子污染指数和综合污染指数均大于 B 区。

表 2 土壤重金属内梅罗综合污染指数评价结果

Table 2 Results of assessment of heavy metals in soil by Nemero index

重金属	A 区		B 区	
	P_i	$P_{综}$	P_i	$P_{综}$
Pb	0.902	83.3	0.747	57.2
Cr	0.638		0.537	
Cu	1.56		1.05	
Zn	1.49		1.13	
Ni	0.988		0.606	
Cd	1.61		1.27	
Hg	117		80.2	
As	0.680		0.415	

2.3 潜在生态风险评价结果

表 3 为矿区土壤重金属的单因素潜在生态危害指数及综合潜在生态危害指数的评价结果。由表 3 可知,A 区土壤样品中 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、As 6 种重金属的潜在生态危害指数均小于 40,处于轻微生态危害水平,Cd 为中度生态危害水平,Hg 潜在生态危害指数远大于 320,处于极强生态危害水平。B 区土壤样品中 Pb、Cr、Cu、Zn、Ni、As、Cd 7 种重金属潜在生态危害指数均小于 40,处于轻微生态危害水平,Hg 潜在生态危害指数远大于 320,处于极强生态危害水平。A 区和 B 区土壤重金属综合生态危害指数均远大于 600,表现为很强生态危害水平,表明调查区土壤生态破坏严重,Hg 的贡献最大,Cd 次之。内梅罗综合污染指数法虽能考虑污染区最严重的污染因子进行评价,但不能反映重金属本身特性和自身的影响[25],潜在生态风险指数不仅能反映多种重金属对生态环境的影响,而且考虑了重金属自身的毒性系数,因此,本研究认为同时使用这两种评价方法可以对当地农田重金属污染状况进行准确评价。

表 3 土壤重金属潜在生态风险评价结果统计

Table 3 Results of assessment of potential ecological risk of heavy metals in soil

重金属	A 区		B 区	
	E_r^i	RI	E_r^i	RI
Pb	4.51	4.75×10^3	3.74	3.26×10^3
Cr	1.28		1.07	
Cu	7.78		5.24	
Zn	1.49		1.13	
Ni	4.94		3.03	
Cd	48.4		38.1	
Hg	4.67×10^3		3.21×10^3	
As	6.80		4.15	

2.4 农产品污染特征及健康风险评价

研究区谷物和蔬菜样品重金属含量水平见表 4。由表 4 可知,与我国食品污染物限量(GB 2762—2017)相比,蔬菜、水稻、玉米中汞的平均含量分别为 0.073、0.032、0.011 mg/kg,分别是限量标准的 7.3 倍、1.6 倍、0.55 倍,超标率分别为 82.8%、46.7%、20%;其次是蔬菜中 Cd,平均含量为 0.054 mg/kg,是限量标准的 1.08 倍,超标率为 51.7%;其他元素在蔬菜、水稻、玉米中均表现为低于限量标准。综上所述,研究区农产品中 Hg 含量超标严重,其次是 Cd。显著差异分析结果显示,水稻中 Cr、Ni 含量水平显著高于蔬菜($P<0.05$),其他重金属含量在不同农产品中均无显著性差异。

表 4 农产品中重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals in agricultural products /(mg·kg^{-1})

重金属	水稻		玉米		蔬菜		GB 2762—2017 限量标准		
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	水稻	玉米	蔬菜
Pb	0.02～0.15	0.10	0.01～0.12	0.09	0.01～0.09	0.06	0.2	0.2	0.1
Cr	0.01～0.58	0.23	0.02～0.15	0.08	0.03～0.14	0.07	1.0	1.0	0.5
Cu	2.11～5.39	2.96	1.45～3.09	2.31	1.46～10.8	2.58	—	—	—
Zn	12.3～125	24.10	15.4～36.0	23.90	3.91～29.7	6.76	—	—	—
Ni	0.177～3.73	0.735	0.290～1.33	0.467	0.138～0.405	0.252	—	—	—
Cd	0.014～0.119	0.063	0.008～0.036	0.017	0.003～0.146	0.054	0.2	0.1	0.05
Hg	0.00～0.141	0.032	0～0.064	0.011	0～0.299	0.073	0.02	0.02	0.01
As	0～0.27	0.126	0～0.121	0.017	0～0.064	0.015	—	0.5	0.5

为进一步了解矿区农产品摄入对人群健康的影响,采用危害商法对人群摄入重金属健康风险进行评价,评价结果见表 5。由表 5 可知,单元素健康风险评价结果表明:居民食用农产品各元素危害指数 *HI* 均小于 1,不对人群有潜在的健康风险。多种重金属复合健康风险表明:居民食用水稻和蔬菜的危害指数 *HI* 大于 1,小于 10,表明对人体产生健康风险的可能性大,食用玉米则不对人体有潜在健康风险。其中水稻和蔬菜中 Hg 对人体的健康风险最高,分别占 *HI* 值的 27.2%、58.6%。由于食用复合污染的大米、蔬菜对当地人群有显著的潜在健康危害风险,故建议矿区周边家庭应改善膳食结构或减少对本地农产品的摄入。

表 5　农产品中重金属对成人的健康危害商

Table 5　Health hazard of heavy metals in agricultural products to adults

农作物	*HQ*								*HI*
	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Cd	Hg	As	
水稻	0.136	0.000 7	0.353	0.383	0.175	0.301	0.509	0.012	1.87
玉米	0.005	1.08×10^{-5}	0.012	0.016	0.005	0.003	0.007	6.90×10^{-5}	0.049
蔬菜	0.052	0.000 1	0.194	0.068	0.038	0.163	0.733	0.000 9	1.25

2.5　土壤和农作物重金属含量相关性分析

表 6～8 分别为土壤与玉米、稻米、蔬菜可食部分中重金属含量的相关性分析结果。由表 6～8 可知,玉米和蔬菜可食部分中重金属含量与土壤重金属含量均无明显的相关性,稻米中 Pb、Cu、Zn、Cd 与土壤 Hg 存在显著相关性($P<0.05$);土壤 Hg 与稻米中 Hg、As 呈极显著相关($P<0.01$);土壤 As 与稻米中 Hg 呈极显著相关($P<0.01$)。表明大部分农作物重金属含量与土壤重金属含量无明显相关性,这可能与农产品与土壤中重金属的化学形态、生物有效性有关[26-28]。因此,研究重金属在土壤-农作物系统中的迁移规律,不仅要关注重金属的总量,还应该对土壤重金属的有效形态(能被植物体有效吸收的那部分重金属)进行生物有效性评价,进而有助于对土壤-农作物系统中重金属的污染程度进行科学、准确的评价。

表 6　土壤与玉米重金属含量相关性分析

Table 6　Correlations of heavy metals in soils and corn

土壤中重金属	玉米中重金属							
	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Cd	Hg	As
Pb	0.411	−0.597	0.010	0.016	−0.290	0.438	0.200	0.248
Cr	−0.306	0.010	0.005	−0.126	0.129	−0.212	−0.265	−0.146
Cu	−0.212	0.212	−0.026	−0.070	0.218	−0.152	−0.253	0.008
Zn	−0.274	0.206	0.206	−0.167	0.130	−0.166	−0.181	−0.115
Ni	0.077	−0.469	−0.075	0.072	−0.242	−0.038	0.155	−0.099
Cd	−0.230	−0.098	−0.125	−0.116	−0.100	−0.232	−0.222	−0.207
Hg	0.274	−0.015	0.199	0.109	0.166	0.198	0.173	0.246
As	0.477	−0.424	0.150	0.479	−0.115	0.204	0.491	0.178

表 7　土壤与稻米重金属含量相关性分析

Table 7　Correlations of heavy metals in soils and rice

土壤中重金属	稻米中重金属							
	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Cd	Hg	As
Pb	0.411	−0.597	0.010	0.016	−0.290	0.438	0.200	0.248
Cr	0.206	−0.128	−0.028	0.041	−0.072	0.232	0.112	0.089
Cu	−0.065	−0.414	−0.281	−0.223	−0.317	0.046	0.131	−0.020
Zn	−0.109	−0.322	−0.294	−0.147	−0.295	−0.098	0.275	−0.101
Ni	0.025	−0.319	−0.242	−0.057	−0.274	0.014	0.313	−0.040
Cd	−0.265	−0.540*	−0.304	−0.279	−0.472	−0.314	0.144	−0.358
Hg	0.909**	0.060	0.667**	0.817**	0.332	0.705**	0.555*	0.683**
As	0.465	0.038	0.250	0.448	0.173	0.246	0.499*	0.218

注:* 在 0.05 水平上显著相关;** 在 0.01 水平上显著相关,下同

表 8 土壤与蔬菜重金属含量相关性分析

Table 8 Correlations of heavy metals in soils and vegetables

土壤中重金属	蔬菜中重金属							
	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni	Cd	Hg	As
Pb	0.411	−0.597	0.010	0.016	−0.290	0.438	0.200	0.248
Cr	0.081	0.144	0.215	0.015	0.273	0.019	0.019	0.268
Cu	−0.058	0.274	0.299	−0.117	0.150	−0.046	−0.184	0.006
Zn	0.001	0.366	0.083	−0.006	0.209	−0.062	−0.141	−0.064
Ni	0.097	−0.129	0.263	0.264	0.254	−0.035	0.253	0.336
Cd	0.324	0.233	0.158	0.282	0.147	0.172	−0.153	0.265
Hg	0.008	−0.113	−0.094	−0.062	−0.050	0.030	−0.020	−0.068
As	−0.050	−0.217	−0.315	−0.060	−0.463*	−0.140	−0.012	−0.137

3 结论

以贵州省某典型汞矿区周边土壤及农产品为调查对象,两种评价方法表明:研究区土壤复合污染严重,表现为重污染及很强生态风险水平,其中 Hg 的贡献最大,Cd 次之;农产品中 Hg 含量超标严重,其次是 Cd,食用水稻和蔬菜对当地居民造成潜在的健康风险。相关性分析结果显示,大部分农产品可食部分重金属与土壤重金属无显著相关性。

参考文献

[1] 中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告[R]. 北京:中国地质调查局,2015:5-6.
China Geological Survey. Geochemical survey of cultivated land in China[R]. Beijing: China Geological Survey, 2015:5-6.

[2] 黄春国,王鑫. 我国农田污灌发展现状及其对作物的影响研究进展[J]. 安徽农业科学,2009,37(22):10692-10693,10755.
HUANG C G, WANG X. China's farmland sewage irrigation development and its impact on crop research[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(22): 10692-10693, 10755.

[3] 徐永荣,冯宗炜,王春夏,等. 绿带对公路两侧土壤重金属含量的影响研究[J]. 湖北农业科学,2002,41(5):75-77.
XU Y R, FENG Z W, WANG C X, et al. Effects of greenbelt on levels of heavy metals in roadside soils[J]. HubeiI Agricultural Science, 2002, 41(5): 75-77.

[4] 黄楚珊,胡国成,陈棉彪,等. 矿区家庭谷物和豆类重金属含量特征及风险评价[J]. 中国环境科学,2017,37(3):1171-1178.
HUANG C S, HU G C, CHEN M B, et al. Heavy metal content characteristics and risk assessment of household cereal and beans form mining areas[J]. China Environment Science, 2017, 37(3): 1171-1178.

[5] 湛天丽,黄阳,何腾兵,等. 贵州铜仁汞矿区主要农产品重金属污染及其健康风险评估[J]. 安全与环境学报,2017,17(4):1524-1529.
ZHAN T L, HUANG Y, HE T B, et al. Heavy metal pollution and health risk in major agricultural products in Tong-ren mercury mine area, Guizhou[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1524-1529.

[6] 赵金璇,李玉锋,梁佳,等. 贵阳和万山地区部分蔬菜中的重金属含量及其健康风险[J]. 生态毒理学报,2009,4(3):392-398.
ZHAO J X, LI Y F, LIANG J, et al. Contents of heavy metals in some vegetables and their potential risks to human health in Guiyang and Wanshan areas[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(3): 392-398.

[7] 高庚申,毛金群,黄婉玉,等. 万山汞矿区农产品中总汞和甲基汞污染特征及风险评价[J]. 环境与健康杂志,2019,36(1):30-33.
GAO G S, MAO J Q, HUANG W Y, et al. Risk assessment of mercury and methylmercury pollution in agricultural products in Wanshan mercury mining area[J]. Journal of Environment and Health, 2019, 36(1): 30-33.

[8] 贾亚琪. 贵阳市白云区农田土壤重金属污染状况及风险评估[D]. 贵阳:贵州师范大学,2017.
JIA Y Q. Heavy metal pollution status and risk assessment of farmland soil in Baiyun District of Guiyang city[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017.

[9] 张贵友,王素萍,杜雷,等. 武汉市江夏区农田土壤重金属含量及其生态风险评价[J]. 湖北农业科学,2020,59(17):54-57,136.
ZHANGG Y, WANG S P, DU L, et al. Analysis and ecological risk assessment on heavy metal contents of farmland soils in Jiangxia district, Wuhan city[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2020, 59(17): 54-57, 136.

[10] 武晶芳,江帆,韦唯,等. 某镍钼矿区周边土壤重金属风险评价及种植蔬菜健康风险评估[J]. 有色金属(冶炼

部分),2019(7):84-90.
WU J F,JIANG F,WEI W,et al. Risk assessment of heavy metals in soil and health risk assessment of vegetable growing around nickel-molybdenum mine area[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2019(7):84-90.

[11] 刘晓媛,刘品祯,杜启露,等.地质高背景区铅锌矿废弃地土壤重金属污染评价[J].有色金属(冶炼部分),2019(2):76-82.
LIU X Y,LIU P Z,DU Q L,et al. Evaluation of heavy metal pollution in soil of lead-zinc mine wasteland with geological high background[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy),2019(2):76-82.

[12] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.

[13] 徐争启,倪师军,张成江,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,2008,31(2):112-115.
XU Z Q,NI S J,ZHANG C J,et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science &Technology,2008,31(2):112-115.

[14] 吴迪,杨秀珍,李存雄,等.贵州典型铅锌矿区水稻土壤和水稻中重金属含量及健康风险评价[J].农业环境科学学报,2013,32(10):1992-1998.
WU D,YANG X Z,LI C X,et al. Concentrations and health risk assessments of heavy metals in soil and rice in Zinc-lead mining area in Guizhou province,China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2013,32(10):1992-1998.

[15] 盛蒂,朱兰保,陈健.蚌埠地区主要谷物重金属含量及健康风险评价[J].安全与环境学报,2014,14(4):263-266.
SHENG D,ZHU L B,CHEN J. Heavy metals content and health risk assessment of cereals in Bengbu area,Anhui[J]. Journal of Safety and Environment,2014,14(4):263-266.

[16] 吴洋,杨军,周小勇,等.都安县玉米籽粒重金属累积特征与健康风险评价[J].农业环境科学学报,2015,34(11):2048-2054.
WU Y,YANG J,ZHOU X Y,et al. Accumulation characteristics and health risk assessment of heavy metals in corn kernel in Du'an Yao Autonomous County[J]. Journal of Agro-Environment Science,2015,34(11):2048-2054.

[17] 杨刚,沈飞,钟贵江,等.西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J].环境科学学报,2011,31(9):2014-2021.
YANG G,SHEN F,ZHONG G J,et al. Concentrations and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2011,31(9):2014-2021.

[18] 余志,陈凤,张军方,等.锌冶炼区菜地土壤和蔬菜重金属污染状况及风险评价[J].中国环境科学,2019,39(5):2086-2094.
YU Z,CHEN F,ZHANG J F,et al. Contamination and risk of heavy metals in soils and vegetables from zinc smelting area[J]. China Environment Science,2019,39(5):2086-2094.

[19] 杜景东,高凡,王敬贤,等.京郊蔬菜重金属含量特征及安全评价[J].北京农学院学报,2014,29(3):42-46.
DU J D,GAO F,WANG J X,et al. Concentration analysis and health risk assessment of heavy metals in vegetables of Beijing suburban[J]. Journal of Bejing University of Agriculture,2014,29(3):42-46.

[20] CHERFI A,ACHOUR M,CHERFI M,et al. Health risk assessment of heavy metals through consumption of vegetables irrigated with reclaimed urban wastewater in Algeria[J]. Process Safety and Environmental Protection,2015,98:245-252.

[21] 常慧.贵州省万山汞矿区镉的空间分布和来源识别[C]//中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集.北京:中国矿物岩石地球化学学会,2019:940.
CHANG H. Spatial distribution and source identification of cadmium in Wanshan mercury mining area,Guizhou[C]//Abstracts of papers of the 17th annual meeting of the Chinese Society of Mineral Petrogeochemistry. Beijing:Chinese Society of Mineral Petrogeochemistry,2019:940.

[22] 胡国成,张丽娟,齐剑英,等.贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价[J].生态环境学报,2015,24(5):879-885.
HU G C,ZHANG L J,QI J Y,et al. Contaminant characteristics and risk assessment of heavy metals in soils from Wanshan mercury mine area,Guizhou province[J]. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(5):879-885.

[23] 喻子恒,黄国培,张华,等.贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估[J].生态学杂志,2017,36(8):2296-2301.
YU Z H,HUANG G P,ZHANG H,et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area,Guizhou,China[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(8):2296-2301.

[24] ZHANG X Y,LIN F F,WONG MIKE T F,et al. Identification of soil heavy metal sources from

anthropogenic activities and pollution assessment of Fuyang County, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 154(1/2/3/4): 439-449.

[25] 余嘉衍,李冰玉,周一敏,等.湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J].环境化学,2020,39(4):1024-1030.
YU J Y, LI B YU, ZHOU Y M, et al. Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan province[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(4): 1024-1030.

[26] 宋恒飞,吴克宁,刘霈珈.土壤重金属污染评价方法研究进展[J].江苏农业科学,2017,45(15):11-14.
SONG H F, WU K N, LIU P J. Research progress in evaluation methods of soil heavy metal pollution[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017(15): 11-14.

[27] FAIRBROTHER A, WENSTEL R, SAPPINGTON K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 68(2): 145-227.

[28] 张成丽,张伟平,程红丹,等.禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J].环境化学,2019,38(4):805-812.
ZHANG C L, ZHANG W P, CHENG H D, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou city[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(4): 805-812.

(上接第 30 页)

[4] 常前发,王运敏.冶金矿山节能减排的技术现状与对策措施[J].矿产保护与利用,2013,37(5):13-18.
CHANG Q F, WANG Y M. Status of energy conservation and emissions reduction technology in metallurgical mines and the countermeasures[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2013, 37(5): 13-18.

[5] 贾杰林,卢然,王兆苏,等."十三五"时期我国重金属污染防控思路与任务[J].环境保护科学,2018,44(2):1-5.
JIA J L, LU R, WANG Z S, et al. Study of the ideas and tasks of prevention and control of heavy metal pollution during the 13th Five-year Plan period[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(2): 1-5.

[6] 刘进,张宗华.选矿工程技术的现状与发展[J].云南冶金,2004,33(1):14-17,57.
LIU J, ZHANG Z H. Current status and development of ore dressing engineering[J]. Yunnan Metallurgy, 2004, 33(1): 14-17, 57.

(上接第 42 页)

ZHOU S K, XIAO J, LIU Y J, et al. In the process of the electric repair electrolyte concentration of U(Ⅵ) migration and the impact of energy consumption[J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5228-5239.

[17] ZHOU D M, DENG C F, CANG L, et al. Electrokinetic remediation of a Cu-Zn contaminated red soil by controlling the voltage and conditioning catholyte pH[J]. Chemosphere, 2005, 61(4): 519-527.

[18] SUN Z C, WU B, GUO P H, et al. Enhanced electrokinetic remediation and simulation of cadmium-contaminated soil by superimposed electric field[J]. Chemosphere, 2019, 233: 17-24. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.233.