

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.016

某铅锌矿区土壤重金属污染分析

张永康^{1,2,3}, 冯乃琦^{1,2,3}, 张耀^{1,2,3}, 王庆^{1,2,3}, 王振宁^{1,2,3}, 刘佳^{1,2,3}

- (1. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 郑州 450006;
2. 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 郑州 450006;
3. 西北地质科技创新中心, 西安 710054)

摘要:分析检测了某铅锌矿区水、土壤、尾矿、废石等样品重金属元素含量,追踪调查了尾矿库、排土场下游土壤重金属污染程度和分布范围,并对重金属元素相关性进行了研究。结果表明:铅锌矿区土壤环境质量总体较差,铅锌矿区重金属污染集中分布在尾矿库和排土场下游地块;铅锌矿区主要污染元素为Cd、Cu、Pb、Zn、As,污染程度以轻度-中度污染为主;尾矿库下游重金属元素Cu、Pb、Zn、As污染分布在1 600 m内;排土场重金属污染范围主要集中在下游400 m内。土壤样品Cu、Pb、Zn与As、Cd元素呈显著正相关性,Cu、Pb、Zn、As、Cd元素来自同一源头,可能源自尾矿、废石等固体废物;Hg、Cr、Ni元素来自另一源头,与矿业活动无关。

关键词:铅锌矿;重金属污染;相关性

中图分类号:X825

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0102-07

Analysis of Heavy Metal Pollution in Soil of a Lead-zinc Mining Area

ZHANG Yong-kang^{1,2,3}, FENG Nai-qi^{1,2,3}, ZHANG Yao^{1,2,3},
WANG Qing^{1,2,3}, WANG Zhen-ning^{1,2,3}, LIU Jia^{1,2,3}

- (1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources CAGS, Zhengzhou 450006, China;
2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, MNR, Zhengzhou 450006, China;
3. Northwest China Center for Geosciences Innovation, Xi'an 710054, China;)

Abstract: Contents of heavy metal elements in samples of water, soil, tailings and waste rocks from a lead-zinc mining area were analyzed. Pollution degree and distribution of heavy metal in downstream soil of tailings pond and dump were surveyed, and correlation between these heavy metal elements was studied. The results show that soil environmental quality of lead-zinc mining area is poor, where heavy metal pollution is concentrated in downstream plots of both tailings pond and dump. Main pollutants in mining area are Cd, Cu, Pb, Zn and As, and pollution degree of Cd, Cu, Pb, Zn and As is mainly from light to moderate. Heavy metal pollution in downstream plot of tailings pond exceeds the standard GB 15618—2018 within 1 600 m, while pollution is mainly concentrated in downstream area within 400 m. Elements of Cu, Pb and Zn in soil samples show significant positive correlation with As and Cd, and they come from the same source which may be tailings, waste rocks and other solid wastes. Elements of Hg, Cr and Ni are likely to come from another same source, which possibly had nothing to do with mining activities.

Key words: lead-zinc ore; heavy metal pollution; correlation

收稿日期:2020-05-14

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20190269)

作者简介:张永康(1987-),男,江西上饶人,硕士,工程师

铅锌矿是我国重要的战略性矿产资源^[1]。然而,铅锌工业产生的废气、废渣、废水也对生态环境造成了严重威胁,土壤重金属污染具有难降解、持续时间长、隐蔽性和滞后性等特点^[2-4],因此,土壤重金属污染防治一直是人们关注的热点。目前,科研工作者对土壤重金属污染分析评价^[5-7]、来源分析^[8-11]、污染防治^[12-18]等方面开展了卓有成效的工作,取得了大量成果。针对铅锌矿区土壤重金属污染分析评价多集中在采用单因子指数法^[19]、内梅罗综合污染指数法^[20]、地质累积指数法^[21]、潜在生态危害指数法^[22]等方法分析评价矿区土壤污染程度。本文采集了长江中游某铅锌矿区典型水、土壤、尾矿、废石等样品,以尾矿库、选矿厂、排土场等矿山废物堆积区为重点区域,结合矿区气候、地貌特征,重点分析了重金属污染范围及污染程度,同时分析了土壤样品中各重金属元素的相关性。

1 调查区概况

某铅锌矿调查区面积约为 11 km²,采矿品种为铅锌矿。区域内矿产为多金属矿,以铅、锌、铜、硫、钴、铁为主,伴生有银、镉、砷等。选矿工艺采用铜、铅、锌、硫优先浮选流程,依次产出铜精矿、铅精矿、锌精矿、硫精矿;采矿方式为露天开采,开采工艺为水平台阶开采。

矿石开采后,汽车运输至破碎车间,剥离的废石运送至排土场。矿山现有尾矿库 1 座,矿石经选矿作业,尾矿通过管道输送至尾矿库内。尾矿库所在沟谷汇入一东西流向的溪流,溪流周边分布大片农田,部分农田已荒废。

矿区为构造剥蚀丘陵地形,总体地势为南东高、北西低。区内属亚热带季风气候区,气候温和、雨量充沛,全年主导风向为东风,次主导风向为东北偏东风,平均风速 1.5 m/s。区内土壤类型主要为红壤,成土母质以砂质岩类及第四纪红土为主。

2 材料与方 法

2.1 样品布 设与采 集

矿山排土场采集典型废石样品 2 件(200 kg/件),尾矿库中采集典型尾砂样品 1 件。尾矿库下净化池中采集水样(尾矿水)1 件,露天采场矿坑水 1 件。

土壤样品采集总体以网格布设的方法采样,网格密度 3 件/km²,剖面样品采样深度 0~120 cm,表层土壤样品采样深度 0~20 cm。

针对矿山尾矿库、选矿厂、排土场等矿业活动集中区,通过加密布设样品,追踪重金属污染范围,重点考察水力传播、淋滤等作用对重金属元素迁移、扩散的影响。因矿区全年主导风向为东风,下风向地块主要为丘陵(次生林生长繁盛),基本无农用地分布,且矿区风速小(平均风速 1.5 m/s),不考虑风力作用对重金属传播的影响。共采集土壤样品 33 件,同时详细记录采样地点、坐标、周边地貌、农作物种植等情况。采样点布设如图 1 所示。

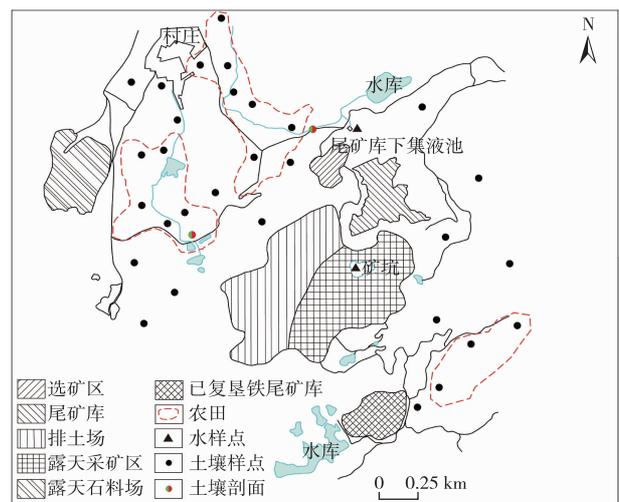


图 1 土壤采样点分布示意图

Fig. 1 Distribution sketch map of soil sampling points

2.2 样品处理与检测

废石样品经破碎、混匀、缩分、四分法取样,废石样品和尾砂样品烘干后磨细至 -0.074 mm ,送检测分析。

除去土壤样品外包装袋,除去石块、草根等杂物,阴凉通风处自然阴干。过筛混匀,四分法取样,干燥磨细后至 -0.074 mm ,送检测分析。

水样采集后现场加入分析纯硝酸酸化至 pH 小于 2 保存,三天内送检测分析。

采用电感耦合等离子体质谱法检测样品中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd 元素含量,原子荧光法分析 As 和 Hg 元素含量,玻璃电极法测定 pH。

2.3 评价与分析方法

采用单因子指数法^[19]对铅锌矿区土壤重金属状况进行分析评价,参比标准为 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险管控标准》中的农用地土壤风险筛选值。采用 SPSS20.0 统计分析软件分析铅锌矿区土壤重金属元素之间的相关性。

3 结果与讨论

3.1 土壤样品检测结果分析

铅锌矿区土壤样品各重金属的含量结果如表 1 所示。以铅锌矿区土壤样品检测值平均值计,除 Cr、Ni、As、Hg 元素含量低于农用地土壤风险筛选值外,其他元素含量均高于对应的土壤风险筛选值,说明铅锌矿区周边土壤环境质量总体较差;Cd 元素超标较严重,超标率为 84.85%,其次是 Zn、Cu、Pb、As、Hg 元素,超标率分别为 54.55%、45.45%、

42.42%、27.27%和 15.15%;Ni 元素仅 1 件样品超标,Cr 元素无超标样品。对照采样记录发现,超标样品主要分布在尾矿库和排土场下游区域。

由表 1 可知,Pb、Zn 元素含量中位数和平均数相差大,标准差数值也很大,表明样品中 Pb、Zn 元素含量分布不平均,离散度高,存在极值。调查区内土壤 Pb、Zn 元素含量可能受外来因素的影响。由表 2 可知,铅锌矿区土壤主要污染元素为 Cd、Cu、Pb、Zn、As,污染程度以轻度-中度污染为主,Cd 元素污染较严重。

表 1 土壤重金属检测结果统计

Table 1 Statistic results of heavy metals in soil

元素	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	GB 15618—2018	超标数/件	超标率/%
						风险筛选值		
Cu	120	24.8	53.31	42.2	24.99	50	15	45.45
Pb	850	37.6	181.74	87.6	192.73	100	14	42.42
Zn	937	99.2	320.04	223	233.51	200	18	54.55
Cr	164	75.6	108.80	105	26.67	250	0	0
Ni	95.3	26.6	42.19	39.9	12.64	70	1	3.03
Cd	2.18	0.4	1.14	1.04	0.54	0.4	28	84.85
As	90	10.7	28.70	21	20.05	30	9	27.27
Hg	4.54	0.08	0.41	0.2	0.77	0.5	5	15.15

注:表中各元素实测含量和标准限值单位均为 mg/kg

表 2 单因子指数分析结果

Table 2 Results of single factor index method

元素	污染程度样本百分比/%			
	非污染	轻度污染	中度污染	重度污染
Cu	54.55	36.36	9.09	0
Pb	57.58	9.09	15.15	18.18
Zn	45.45	24.24	21.21	9.09
Cr	100	0	0	0
Ni	96.97	3.03	0	0
Cd	15.15	30.30	27.27	27.27
As	72.73	21.21	6.06	0
Hg	84.85	12.12	0	3.03

3.2 尾矿库、排土场下游区域土壤重金属污染分析

为研究尾矿库北侧下游土壤重金属污染状况,沿水流方向布设了 6 件土壤样品,采样位置距尾矿库的距离分别为 50、400、800、1 200、1 600、3 200 m。土壤样品重金属含量结果如图 2 所示。由图 2 可知,尾矿库北侧沿水流方向土壤样品中 Cu、Pb、Zn、As 元素含量总体呈下降趋势,Ni、Cr 元素含量基本保持不变,Ni、Cr、Hg 元素含量不超标,Cd 元素含量均超标;距尾矿库 1 600 m 后,样品中 Cu、Pb、Zn、As

元素含量均不超标。这说明尾矿下土壤样品中 Cu、Pb、Zn、As 污染范围分布在其下游 1 600 m 内。

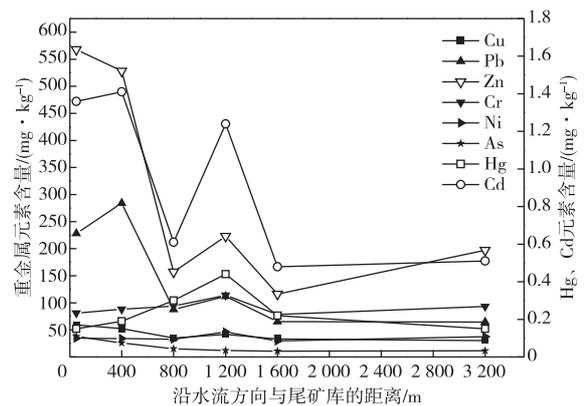


图 2 尾矿库下沿水流方向土壤重金属元素分析结果

Fig. 2 Results of heavy metals in soil along direction of water flow downstream of tailings pond

在尾矿库下游沿水流方向距尾矿库 50 m 的荒废农田内布设了 1 个垂向土壤剖面,重金属元素检

测结果如图3所示。由图3可知,尾矿库下剖面样重金属污染较严重,0~120 cm深度样品中Cu、Pb、Zn、Cd元素含量均超标,Ni、Cr和Hg元素含量基本不变;剖面土壤中Cu、Pb、Zn、As元素含量随深度总体呈先上升后下降的趋势;在采样深度为60~80 cm,Cu、Pb、Zn、Cd、As元素含量达到最大值,这说明土壤中重金属元素污染已在垂直向方向迁移、扩散,并在60~80 cm深度处富集。可见尾矿库下游重金属污染地块垂直向淋滤作用明显。

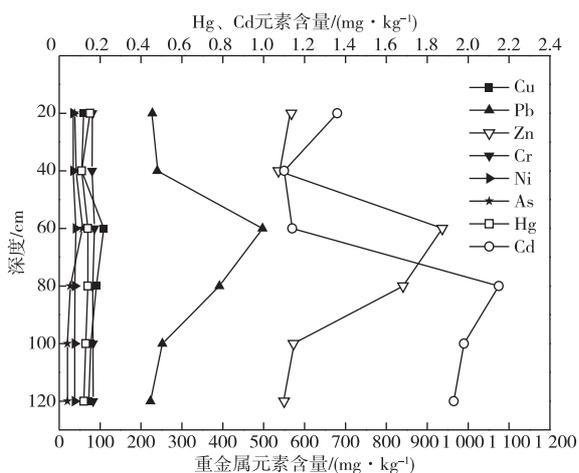


图3 尾矿库下剖面土壤样品分析结果
Fig. 3 Results of profile samples downstream of tailings pond

排土场北侧沿水流方向布设了5件土壤样品,采样位置距排土场距离分别为400、800、1 200、1 500、1 800 m。由图4可知,排土场下沿水流方向,5件样品中Cd元素含量均超标,Pb、Cr元素不超标;样品中重金属含量总体呈先下降后上升的趋势。距排土场400 m的样品中Cu、Zn、Ni、Cd、As、Hg元素均超标,距排土场800~1 800 m,仅Cd元素超标;对照采样记录,距排土场1 500 m的采样点附近有渔业养殖、蔬菜种植、生活垃圾堆放。因此,推测距排土场1 500~1 800 m的土壤样品重金属含量升高的原因与农业生产等活动有关。排土场水流方向重金属污染范围主要集中在下游400 m内。

沿水流方向距排土场400 m的荒地内布设一垂直向土壤剖面,样品分析检测结果如图5所示。由图5可知,排土场下剖面样重金属污染集中在表层0~20 cm,在此深度Cu、Zn、Ni、Cd、As、Hg元素含量均超标,20~40 cm处仅Zn、Cd元素轻微超标,40 cm以下深度重金属元素含量均不超标。这表明土壤中重金属元素污染已出现垂直向方向迁移、扩

散的趋势。

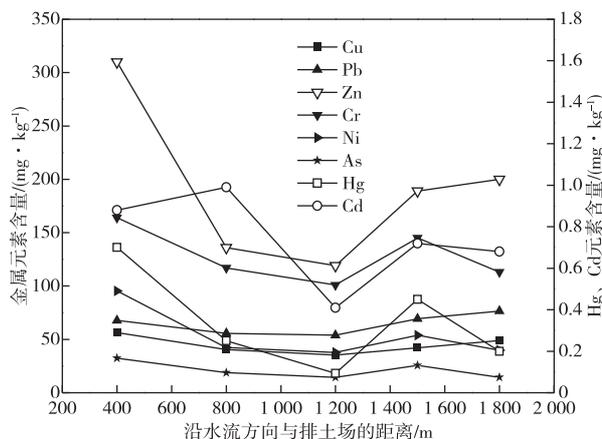


图4 排土场下沿水流方向土壤重金属元素含量分析结果
Fig. 4 Results of heavy metals in soil along direction of water flow downstream of dump

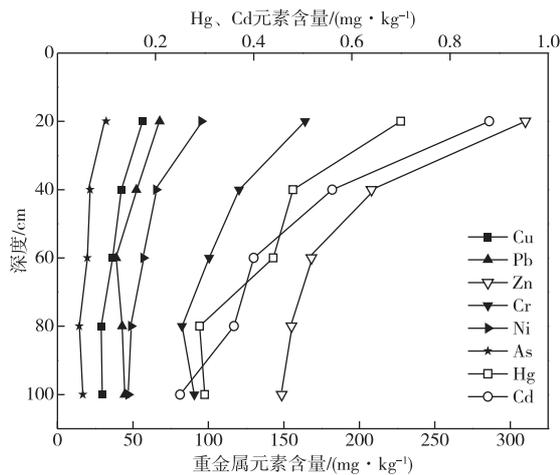


图5 排土场下剖面土壤样品重金属含量分析结果
Fig. 5 Results of heavy metals in profile samples downstream of dump

3.3 重金属元素污染相关性分析

有文献^[23-24]表明,通过样品重金属含量相关性分析可推断出各重金属元素来源是否相同,重金属元素含量之间显著相关,则表明他们可能同源。根据这一理论,采用SPSS20.0统计软件分析了样品重金属元素的相关性,结果如表3所示。由表3相关性结果分析可知,Cu、Pb、Zn与As、Cd元素呈显著正相关,Hg元素与Cu、Pb、Zn、Cd呈负相关,Cr、Ni元素与Cu、Pb、Zn元素呈负相关,Hg、Cr、Ni呈正相关,推断Cu、Pb、Zn、As、Cd元素污染来自同一

源头,主要来自尾矿、废石等固体废弃物,与矿业活动密切相关;Hg、Cr、Ni元素来源另一源头,可能来自农业活动,与矿业活动无关。相较于Cu、Pb、Zn

元素正相关水平,Cd元素与Cu、Pb元素相关性稍弱,推测Cd元素可能还有另一源头,可能源自Cd元素高背景区。

表3 土壤样品中各元素相关性分析

Table 3 Correlation analysis of heavy metal elements in soil samples

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
Cu	1.000							
Pb	0.903*	1.000						
Zn	0.853*	0.823*	1.000					
Cr	-0.443*	-0.477*	-0.510*	1.000				
Ni	-0.068	-0.201	-0.134	0.745*	1.000			
Cd	0.446*	0.482*	0.621*	-0.126	-0.016	1.000		
As	0.740*	0.846*	0.583*	-0.132	0.050	0.254	1.000	
Hg	-0.254	-0.222	-0.248	0.480*	0.313	-0.121	0.179	1.000

注*:在0.01水平(双侧)上显著相关

3.4 铅锌矿区废石、尾矿、尾矿水等样品分析

废石、尾砂和尾矿水等样品中各重金属元素含量如表4所示。从表4可知,废石1#、废石2#和尾砂等样品中Cu、Pb、Zn、Cd和As元素含量远高于土壤风险筛选值,样品中Cr和Ni元素含量低于土壤风险筛选值。尾矿水重金属元素含量满足《地

表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水指标,矿坑水中除Zn元素含量稍高外,其他重金属含量也符合Ⅲ类水指标。可见,尾矿砂、废石等固体废弃物若随意堆放,重金属可能释放进入周边环境,造成土壤重金属污染。废石、尾矿样品的分析结果进一步佐证了Cu、Pb、Zn、As、Cd元素同源性分析的结论。

表4 废石、尾矿和尾矿水样品中重金属含量

Table 4 Contents of heavy metals in waste rocks, tailing sand and tailing water /(mg · kg⁻¹)

样品	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg	pH**
废石1#	820	8 900	3 670	31.4	13.7	13.9	338	0.10	—
废石2#	1 800	4 800	1 500	46.0	20.0	8.2	470	0.14	—
尾砂	443	1 780	1 800	44.6	34.6	5.85	518	0.07	—
尾矿水*	0.007	0.051	0.31	0.003	0.030	0.002	<0.005	<0.000 1	7.45
矿坑水*	0.018	0.005	1.24	0.003	0.12	0.005	<0.005	<0.000 1	7.61

注*:水质样品重金属元素检测结果单位为mg/L; **无单位

4 结论

1)铅锌矿区土壤环境质量总体较差,重金属污染集中分布在尾矿库和排土场下游地块,主要污染元素为Cd、Cu、Pb、Zn、As,污染程度以轻度-中度污染为主,Cd元素污染较严重。

2)铅锌矿区尾矿库下游重金属元素Cu、Pb、Zn、As污染分布在1 600 m内,排土场重金属污染范围主要集中在下游400 m内;尾矿库和排土场下游地块重金属元素在垂直向方向已出现扩散、迁移。

3)土壤样品Cu、Pb、Zn与As、Cd元素呈显著正相关性,其来自同一源头,可能来自尾矿、废石等固体废物;Hg、Cr、Ni元素来自另一源头,可能来源于农业活动,与矿业活动无关。

参考文献

[1] 刘晓,张宇,王楠,等.我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J].中国矿业,2015(增刊1):6-9.
LIU X, ZHANG Y, WANG N, et al. Pb-Zn metal resources situation and suggestion for Pb-Zn metals industry development in China [J]. China Mining Magazine,2015(S1):6-9.

[2] LI L, ZHU L. International development trend analysis for patented technology of the soil heavy metal pollution and remediation [J]. Science Focus, 2016, 11(2):25-32.

[3] 何林华,高小红.三江源区土壤重金属的累积特征及潜在生态风险评价-以青海省玉树县为例[J].农业环境科学学报,2016,35(6):1071-1080.
HE L H, GAO X H. Assessment of potential

- ecological risk for soil heavy metals in Sanjiang source region; A case study of Yushu county, Qinghai province [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1071-1080.
- [4] 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 waste land with geological high background [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(2):76-82.
- [5] 常家华,杨世利,余江.典型企业场地土壤重金属污染及风险水平研究[J].*东北师大学报(自然科学版)*, 2019, 51(1):154-160.
CHANG J H, YANG S L, YU J. Study on pollution state and risk level of heavy metals in soil of typical enterprise sites [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2019, 51(1):154-160.
- [6] 高月,孙荣国,叶彩,等.贵州省丹寨县某铅锌矿区土壤重金属污染生态风险评价[J].*生态学杂志*, 2020, 39(3):928-936.
GAO Y, SUN R G, YE C, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in soil of a lead-zinc mine area in Danzhai county, Guizhou province, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3):928-936.
- [7] 吴劲楠,龙健,刘灵飞,等.某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J].*中国环境科学*, 2018, 38(3):1054-1063.
WU J N, LONG J, LIU L F, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(3):1054-1063.
- [8] 罗飞,巴俊杰,苏春田,等.武水河上游区域土壤重金属污染风险及来源分析[J].*岩矿测试*, 2019, 38(2):195-203.
LUO F, BA J J, SUN C T, et al. Contaminant assessment and sources analysis of heavy metals in soils from the upper reaches of the Wushui river [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2):195-203.
- [9] 陈雅丽,翁莉萍,马杰,等.近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J].*农业环境科学学报*, 2019, 38(10):2219-2238.
CHEN Y L, WENG L P, MA J, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(10):2219-2238.
- [10] 张东明,吕新,王海江,等.工业区周边农田重金属污染评价及来源分析[J].*土壤通报*, 2017, 48(3):715-723.
ZHANG D M, LYU X, WANG H J, et al. Heavy metal pollution assessment and source analysis on farmland soil around an industrial area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3):715-723.
- [11] 邹天森,潘丽波,吕占禄,等.某废弃铅冶炼场地周边蔬菜重金属污染水平及来源解析[J].*环境污染与防治*, 2019, 41(10):1218-1226.
ZOU T S, PAN L B, LYU Z L, et al. Contents and source appointment of heavy metal in vegetables in the area of abandoned lead smelting site [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(10):1218-1226.
- [12] 徐建明,孟俊,刘杏梅,等.我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J].*中国科学院院刊*, 2018, 33(2):153-159.
XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):153-159.
- [13] 陈卫平,杨阳,谢天,等.中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J].*土壤学报*, 2018, 55(2):261-272.
CHEN W P, YANG Y, XIE T, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2):261-272.
- [14] 党政,代群威,赵玉连,等.生物矿化在重金属污染治理领域的研究进展[J].*环境科学研究*, 2018, 31(7):1182-1192.
DANG Z, DAI Q W, ZHAO Y L, et al. Research progress of biomineralization in the treatment of heavy metal contamination [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(7):1182-1192.
- [15] 鲁洪娟,周德林,叶文玲,等.生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J].*环境污染与防治*, 2019, 41(11):1378-1383.
LU H J, ZHOU D L, YE W L, et al. Advances in application of bio-organic fertilizer in soil improvement and remediation of heavy metals pollution [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, 41(11):1378-1383.
- [16] 曾晓舵,王向琴,涂新红,等.农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J].*生态环境学报*, 2019, 28(9):1900-1906.
ZENG X D, WANG X Q, TU X H, et al. Research progress on speciation and physiological control of heavy metal in soil-plant system [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9):1900-1906.

- [17] 林海,江昕昞,李冰,等. 有色金属尾矿植物修复强化技术研究进展[J]. 有色金属工程,2019,9(11):122-132.
LIN H,JIANG X Y,LI B,et al. Research progress on strengthening technology for phytoremediation of non-ferrous metal tailings [J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(11):122-132.
- [18] 张湘茗,任学昌,万建新,等. 碳酸钙对污染土壤中 Pb、Zn、Cd 的稳定化作用[J]. 有色金属工程,2019,9(6):114-120.
ZHANG X M,REN X C,WAN J X,et al. Stabilization effects of calcium carbonate for Pb, Zn and Cd in contaminated soil[J]. Nonferrous Metals Engineering,2019,9(6):114-120.
- [19] 余璇,宋柳霆,滕彦国. 湖南省某铅锌矿土壤重金属污染分析与风险评价[J]. 华中农业大学学报,2016,35(5):27-32.
YU X,SONG L T,TENG Y G. Pollution analysis and ecological environment risk assessment of heavy metals in soils of a Pb-Zn mine in Hunan province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2016,35(5):27-32.
- [20] 张金婷,孙华. 内梅罗指数法和模糊综合评价法在土壤重金属污染评价应用中的差异分析[J]. 环境监测管理与技术,2016,28(4):27-31.
ZHANG J T,SUN H. Differences of Nemerow index method and fuzzy comprehensive evaluation method in evaluation heavy metal pollution in soil[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring,2016,28(4):27-31.
- [21] MÜLLER G. Schwermetalle in den sedimenten des rheins-veränderungen seit 1971 [J]. Umschau,1979,79(24):778-783.
- [22] 金晓丹,马华菊,廖俊鸿,等. 广西某铅锌矿区土壤重金属污染生态和健康风险特征[J]. 桂林理工大学学报,2018,38(1):124-131.
JIN X D,MA H J,LIAO J H,et al. Health risk characteristics and ecological risk assessment in soil heavy metals from lead and zinc mines soils in Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology,2018,38(1):124-131.
- [23] 毛香菊,卞孝东,肖芳,等. 某铜矿区水土环境重金属污染及其农作物效应[J]. 矿产保护与利用,2018,38(5):131-138.
MAO X J,BIAN X D,XIAO F,et al. Heavy metal elements pollution and crop effect of a copper mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2018,38(5):131-138.
- [24] 许兴斌,焦黎,王勇辉. 夏尔西里自然保护区土壤重金属相关性分析及污染风险评价[J]. 水土保持研究,2015,22(5):336-341.
XU X B,JIAO L,WANG Y H. Risk evaluation and correlation analysis of soil heavy metal contamination in Xiaerxili nature reserve [J]. Research of Soil and Water Conservation,2015,22(5):336-341.