

郭李凯,任珊珊,毕斌,等.煤矸山下农田土壤重金属的空间分布及生态风险评价[J].江苏农业科学,2016,44(8):467-470.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.134

# 煤矸山下农田土壤重金属的空间分布及生态风险评价

郭李凯,任珊珊,毕斌,于亚军

(山西师范大学地理科学学院,山西临汾 041000)

**摘要:**煤矸石堆存过程中会通过雨水淋溶和扬尘等途径造成周边农田土壤的重金属污染,因此研究煤矸山下农田土壤重金属的空间分布特征并进行生态风险评价,对于指导矿区污染农田因地制宜、合理进行农业生产具有重要意义。以山西省霍州市曹村煤矿煤矸山下农田为研究对象,分析铅(Pb)、铜(Cu)、铬(Cr)、锌(Zn)4种重金属在水平方向(距煤矸山0~100 m范围)、垂直方向(0~100 cm土层)的空间分布特征;同时,运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法对4种重金属元素进行生态风险评价。结果表明:煤矸山下农田中4种污染元素在垂向分布上表现为Cu、Cr在距煤矸山0~100 m范围内的0~100 cm各土层中的含量分别约比山西省土壤背景值高1.4、1.1倍;Pb在0~20、20~40、80~100 cm土层的含量也超出背景值;Zn在0~100 cm土层的含量均未超出背景值。在水平方向上:Cu、Cr在0~100 m范围内分别约比背景值高1.45、1.03倍;Pb在距煤矸山0~50 m处土壤中含量也超过背景值;Zn在0~100 m范围均未超过背景值。单因子生态风险评价表明,距煤矸山0 m处Cr污染最严重,属重度污染水平,距煤矸山20~100 m处的Cu污染最严重,属中度污染水平;Pb(0 m处除外)、Zn在整体上处于清洁水平。从综合污染指数来看,Pb、Cu、Cr、Zn 4种元素综合污染状况表现为距煤矸山愈远,污染程度愈轻的趋势,但是即使在距煤矸山100 m处仍基本属于轻度污染;垂直方向上表现出较深土层(40~100 cm)的污染程度高于表层(0~40 cm)土壤。

**关键词:**煤矸山;农田土壤;重金属污染;空间分布;生态风险

**中图分类号:**S151.9<sup>+</sup>3;X825

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2016)08-0467-03

煤炭开采和洗选过程中会排出大量煤矸石,除约有20%用作工业用途外,其余均以矸石山的形式堆存<sup>[1-3]</sup>。目前,我国累计堆存矸石约40亿t,形成煤矸山1500多座,占地面积超过1.33万hm<sup>2</sup>,而且仍以约1亿t/年的速度递增<sup>[4-5]</sup>。煤矸石堆放不仅占用大量土地,而且堆放过程中大量重金属元素会通过雨水淋溶和扬尘进入土壤造成重金属污染<sup>[6]</sup>。它们大量地富集在土壤中,被作物吸收后通过食物链无限放大,再沿食物链最终进入人体,对人体造成严重伤害<sup>[7]</sup>。因此,查明煤矸山周边农田土壤重金属污染状况并开展生态风险评价将有助于矿区因地制宜、合理进行农业生产。本研究选取煤矸山下农田土壤中铅(Pb)、铜(Cu)、铬(Cr)、锌(Zn)4种重金属,分析其空间分布状况和污染程度,对于指导煤矿区污染农田农业生产具有一定指导意义。

山西省煤炭资源储量大、产量高,全省煤矿企业矸石累计堆存量为8.3亿t,已形成300多座煤矸山<sup>[8]</sup>,其中山西省霍州市霍煤集团堆积形成的矸石山就达10余座,以此为样区开展煤矸山周边农田土壤重金属污染的研究具有典型性。本研究以山西省霍州市曹村煤矿煤矸山下农田为研究对象,研究农田土壤重金属在水平空间(距煤矸山0~100 m范围)、垂直空间(0~100 cm土层)的分布状况,并采用单项污染指

数法、内梅罗综合污染指数法对研究区内的土壤重金属污染进行评价,以期农业生产实践活动提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省霍州市霍煤集团曹村矿区,该矿区距霍州市约7 km,区内山高岭峻,沟壑纵横,属侵蚀型黄土丘陵地貌。该区为温带大陆性季风气候,年平均气温12.1℃,年均降水量353.3~688.9 mm,降水年内分布不均,主要集中在7、8、9这3个月,且常以暴雨出现,春秋季节干燥且风较大,全年盛行偏南风、偏北风,春季以偏南风为主,其次是偏北风。夏、秋、东3个季节以偏北风为主,西南风次之。

研究样地位于该矿南下庄矸石山(地理位置36°30′47.9″N, 111°42′11.1″E),该矸石山从1959年开始使用,矸石堆存量约为200万t,占地约1.6 hm<sup>2</sup>,垂直高度约为50 cm,坡度约为40°,该样地矸石裸露,矸石中重金属Pb、Cu、Cr、Zn含量分别为30.40、74.06、180.52、146.33 mg/kg。样地植被处于自然恢复状态,植被稀疏,主要为沙棘、黄刺梅、荆条。研究所选农田位于该煤矸山下西北方向,土地平整,面积约为2 000 m<sup>2</sup>,土壤类型为褐土,多年连续种植农作物,采样时种植的作物为玉米(*Zea mays* L.)。

### 1.2 土样采集与分析

采样点分别为距离矸石山0、20、50、80、100 m处,按“S”形5点采样法进行采样,每个采样点用土钻采集100 cm土层(20 cm为1个深度单位,共分5层,距矸石山下0 m处因60 cm以下土层均为煤矸石而无法采土,因而仅取到60 cm)。每个采样点、每一土层均由5个子样混合组成,混合均匀后按

收稿日期:2015-12-23

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金(编号:41301304)。

作者简介:郭李凯(1989—),男,山西晋城人,硕士研究生,主要从事生态恢复方面的研究。E-mail:479298962@qq.com。

通信作者:于亚军,博士,副教授,主要从事区域环境与生态恢复方面的教学与科研工作。E-mail:yuyajun0211@126.com。

四分法获取足够的样品装入塑料袋,标明采样信息后带回实验室,经自然风干后剔除植物的残根、石块等杂物,磨碎后过 100 目(孔径 0.150 mm)尼龙筛,保存于塑料袋待测。

测定时称取约 0.5 g 风干土样,放入聚四氟乙烯坩埚中,分别加入 10 mL 硝酸、8 mL 氢氟酸、1mL 高氯酸(3 种试剂均为优级纯),加盖,置于电热板上消解,得到样品消解液,用 nov-AA400 火焰-石墨炉原子吸收光谱仪测定其含量,重复 3 次,取平均值。

1.3 污染评价方法

用单因子污染指数法评价的计算公式<sup>[9]</sup>:  
$$P_i = C_i / S_i。$$
  
式中: $P_i$  为重金属  $i$  的累积指数; $C_i$  为重金属  $i$  的实测值; $S_i$  为重金属  $i$  的评价参比值,本研究以山西省土壤背景值作为评价标准<sup>[10]</sup>,具体值未列出。

内梅罗综合污染指数评价法计算公式:  
$$P = [(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2) / 2]^{1/2}。$$
  
式中: $P$  为内梅罗综合指数; $P_{\max}$  为单项指数最大值; $P_{\text{ave}}$  为单项指数算数平均值。土壤重金属评价具体分级标准见表 1。

2 结果与分析

2.1 煤矸山下农田土壤重金属的空间分布

表 2 煤矸山下农田土壤重金属水平分布情况									
距离 (m)	金属元素	重金属含量(mg/kg)					超标比例(%)		
		最大值	最小值	中值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值
0	Pb	16.62	10.14	15.67	14.14	2.86	13.1	6.6	9.8
	Cu	68.54	58.50	66.20	64.41	4.29	199.3	155.5	181.3
	Cr	177.22	95.14	132.62	134.99	33.55	220.5	72.0	144.1
	Zn	55.94	52.10	53.86	53.97	1.57	—	—	—
20	Pb	14.78	8.39	14.00	12.46	2.49	—	—	—
	Cu	65.80	51.32	57.50	56.88	5.20	187.3	124.1	148.4
	Cr	109.44	78.40	104.70	96.75	12.29	97.9	41.8	75.0
	Zn	54.81	46.58	48.78	49.47	2.86	—	—	—
50	Pb	18.36	13.20	14.34	15.50	2.19	24.9	21.9	23.4
	Cu	55.96	49.27	54.96	53.80	2.53	144.4	115.2	134.9
	Cr	131.14	104.86	107.02	112.20	9.90	137.1	89.6	102.9
	Zn	54.82	50.66	51.70	52.04	1.46	—	—	—
80	Pb	13.66	3.10	11.20	10.32	3.80	—	—	—
	Cu	63.45	48.32	52.94	54.43	5.09	177.1	111.0	137.7
	Cr	133.06	96.66	124.64	117.78	15.28	140.6	74.8	113.0
	Zn	48.40	43.60	47.43	46.89	1.74	—	—	—
100	Pb	14.35	9.86	12.24	12.21	1.72	—	—	—
	Cu	56.88	41.86	50.54	50.31	5.66	148.4	82.8	119.7
	Cr	111.69	1.68	96.74	62.10	49.59	101.9	74.9	85.1
	Zn	49.34	42.54	46.35	45.75	2.78	—	—	—

注:“—”表示未超标;“#”表示超标,超标比例的计算公式为:(含量-山西省土壤重金属含量背景值)/背景值×100%。表 3 同。

2.1.2 土壤重金属的垂直分布 由表 3 可见:Cu 含量在各土层均超出了土壤背景值,超标比例均在 140% 左右,最大值出现在 80~100 cm 处,超标比例为 146.7%;Cr 含量在 0~40 cm 土层表现出随深度增加而波动的趋势,在 40~60 cm 土层处含量增高,均超出了土壤背景值,超标比例约为 100%,Cr 含量的最大值出现在 80~100 cm,超出背景值 121.8%;Pb 含量在 20、40、100 cm 土层均超出了土壤背景值,超标比例分别为 6.8%、24.9%、21.9%;Zn 含量在 0~100 cm 土层均未超出土壤背景值。

整体来看,在 Pb、Cu、Cr、Zn 这 4 种元素中,Cu、Cr 含量在 0~100 cm 土层均超出了土壤背景值;Pb 含量在 20~40、80~100 cm 土层较高,超标比例较大;Zn 含量在 0~100 cm 土层均未超过背景值。

2.2 土壤重金属的生态风险评价

从表 4 可以看出:Cr 在距矸石山 0 m 处 0~20 cm 土层达到重度污染水平;Cu 在距煤矸山 0、20、50、80、100 m 处基本

表 3 煤矸山下农田土壤重金属垂直分布情况

土层深度 (cm)	金属元素	重金属含量 (mg/kg)					超标比例 (%)		
		最大值	最小值	中间值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值
0 ~ 20	Pb	16.62	9.86	13.20	12.99	2.55	13.1	0.5	6.8
	Cu	68.54	50.54	52.86	56.29	6.60	199.3	120.7	145.8
	Cr	177.22	96.74	107.02	118.57	29.64	220.5	74.9	114.4
	Zn	55.94	42.56	43.60	49.75	5.62	—	—	—
20 ~ 40	Pb	18.36	3.10	10.76	11.27	5.02	24.9	—	24.9
	Cu	66.20	41.86	51.32	54.42	9.10	189.1	82.8	137.7
	Cr	105.40	95.14	98.68	100.20	4.28	90.6	72.0	81.2
	Zn	52.10	47.43	48.78	49.76	1.67	—	—	—
40 ~ 60	Pb	15.67	10.74	12.24	12.70	1.79	—	—	—
	Cu	65.80	46.44	54.96	55.73	6.38	155.5	102.8	143.3
	Cr	133.06	1.68	104.86	90.12	48.63	140.6	41.8	102.9
	Zn	54.82	46.58	47.98	50.02	3.57	—	—	—
60 ~ 80	Pb	14.40	13.66	14.34	14.19	0.31	—	—	—
	Cu	55.96	48.32	52.02	53.03	3.15	144.4	111.0	131.6
	Cr	124.64	85.82	111.69	108.76	14.18	125.4	55.2	96.7
	Zn	51.70	46.35	48.22	48.97	1.95	—	—	—
80 ~ 100	Pb	17.92	8.39	13.14	13.32	3.38	21.9	—	21.9
	Cu	57.50	55.66	55.94	56.49	0.74	151.1	143.1	146.7
	Cr	132.10	1.73	104.70	92.42	53.50	138.9	89.3	121.8
	Zn	50.66	42.54	47.60	47.30	2.97	—	—	—

达到中度污染水平;Pb、Zn 仅在 0 m 处 0 ~ 20 cm 土层的污染风险较大,分别属于轻度污染水平、清洁水平。

总的来看,研究区内 0 m 处 0 ~ 20 cm 土层 Cr 污染最严重,属于重度污染水平;20、50、80、100 m 距离处 Cu 污染较严重,基本处于中度污染水平;Pb(0 m 除外)、Zn 整体处于未累积状况,属于清洁水平。

表 4 煤矸石下农田土壤重金属单项污染指数评价结果

金属元素	土层深度 (cm)	不同距离单项污染指数 $P_i$				
		0 m	20 m	50 m	80 m	100 m
Pb	0 ~ 20	1.13	1.01	0.90	0.71	0.67
	20 ~ 40	0.69	0.95	1.25	0.21	0.73
	40 ~ 60	1.13	0.73	0.93	0.76	0.83
	60 ~ 80	—	0.98	0.98	0.93	0.98
	80 ~ 100	—	0.57	1.22	0.89	0.94
Cu	0 ~ 20	2.99	2.26	2.31	2.26	2.25
	20 ~ 40	2.89	2.41	2.15	2.77	1.83
	40 ~ 60	2.55	2.87	2.40	2.31	2.03
	60 ~ 80	—	2.71	2.44	2.11	2.44
	80 ~ 100	—	2.51	2.44	2.43	2.48
Cr	0 ~ 20	3.20	1.98	1.94	1.85	1.75
	20 ~ 40	1.72	1.91	1.91	1.75	1.78
	40 ~ 60	2.39	1.42	1.89	2.41	0.03
	60 ~ 80	—	1.55	2.04	2.25	2.02
	80 ~ 100	—	1.89	2.37	2.39	0.03
Zn	0 ~ 20	0.88	0.86	0.82	0.69	0.67
	20 ~ 40	0.82	0.77	0.81	0.75	0.78
	40 ~ 60	0.85	0.73	0.86	0.74	0.76
	60 ~ 80	—	0.78	0.81	0.76	0.73
	80 ~ 100	—	0.75	0.79	0.76	0.67

注:“—”表示未取样,无数据。表 5 同。

由表 5 可见:在距煤矸山 0 m 处 0 ~ 60 cm 土层,4 种重金属元素综合污染状况均达到中度污染水平;而在距煤矸山

20、50 m 处的 0 ~ 40 cm 土层内达到轻度污染水平,但在 50 m 处的 40 ~ 100 cm 土层达到中度污染水平;在距煤矸山 80 m 处 0 ~ 20、60 ~ 80 cm 土层达到轻度污染水平,20 ~ 60、80 ~ 100 cm 土层达到中度污染水平;在距煤矸山 100 m 处 0 ~ 60、80 ~ 100 cm 土层达到轻度污染水平,60 ~ 80 cm 土层达到中度污染水平。

整体来看,在水平方向上表现为距煤矸山愈远,污染程度愈轻,但在 100 m 处仍处于轻度污染;垂直方向上虽然表现出深层次(40 ~ 100 cm)的农田重金属污染程度高于表层(0 ~ 40 cm)土壤,但表层土壤仍达到轻度污染水平。

表 5 煤矸石下农田土壤重金属综合污染指数评价结果

土层深度 (cm)	不同距离内梅罗综合污染指数 $P_{综}$				
	0 m	20 m	50 m	80 m	100 m
0 ~ 20	2.69	1.93	1.95	1.87	1.85
20 ~ 40	2.31	1.99	1.87	2.19	1.58
40 ~ 60	2.18	2.27	2.01	2.03	1.57
60 ~ 80	—	2.19	2.05	1.92	2.04
80 ~ 100	—	2.04	2.10	2.06	1.90

3 结论

从重金属含量的空间分布来看,Pb、Cu、Cr、Zn 4 种元素在垂直方向的规律:Cu、Cr 在 0 ~ 100 cm 土层的含量均超出土壤背景值;Pb 在部分层次距离(20 ~ 40、80 ~ 100 cm)含量较高,超出背景值比例较大;Zn 在 0 ~ 100 cm 土层含量均未超过背景值。在水平方向上表现:Cu、Cr 在距煤矸山 0 ~ 100 m 含量较多,均超出了土壤背景值且超出比例较大;Pb 在距煤矸山 0、50 m 处超出比例较大,其余各处含量较少,也未超出背景值;Zn 在距煤矸山 0 ~ 100 m 范围内均未超出背景值。

从单项污染指数来看,Pb、Cu、Cr、Zn 这 4 种元素中,Cr 在 0 m 处 0 ~ 20cm 土层污染最重,处于重度污染水平;Cu 在

汤波,赵佐平,宋凤敏,等. 汉江上游铅锌尾矿区土壤环境效应[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):470-473.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.08.135

# 汉江上游铅锌尾矿区土壤环境效应

汤波<sup>1,2,3</sup>, 赵佐平<sup>1,3</sup>, 宋凤敏<sup>1,3</sup>, 段敏<sup>1,3</sup>, 李琛<sup>1,3</sup>, 王彦民<sup>1,3</sup>, 刘智峰<sup>1,3</sup>

(1. 陕西理工学院化学与环境学院,陕西汉中 723001; 2. 西安科技大学地质与环境学院,陕西西安 710054;  
3. 秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心,陕西汉中 723001)

**摘要:**以陕西省南部某铅锌矿区为研究对象,采用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)测定土壤铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、锰(Mn)、锆(Ge)、镍(Ni)含量,采用欧洲参考交流局(BCR)修正的顺序提取技术进行重金属形态分析;测定土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶活性。结果表明:尾砂堆积对周边土壤的重金属含量影响明显,6种重金属乙酸提取态含量较高,容易迁移至土壤环境,风险评估编码法(RAC)重金属生态评价结果为Cu、Zn、Pb、Ge、Ni等5种重金属的生态风险评价等级为中等,Mn的生态风险等级为低;重金属复合污染对土壤过氧化氢酶、脲酶活性呈抑制作用,对蔗糖酶、磷酸酶活性具有激活作用。

**关键词:**铅锌矿区;重金属复合污染;土壤酶

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)08-0470-04

近年来矿产开采活动日益频繁,由于尾矿、废石的堆放,占用了大量土地,污染周围环境,破坏了生态系统平衡。由于空气氧化、雨水淋溶等自然作用,尾矿、废石中的重金属会进入矿区及周边土壤、地表水及地下水,使环境生态问题不断恶化<sup>[1]</sup>。土壤酶是由微生物、土壤动物、植物根系和生物残体等释放到土壤中的一类具有催化作用的生物活性物质,是土壤系统中生物化学反应过程的主要参与者,它与土壤发育、土壤肥力形成、土壤环境净化等息息相关<sup>[2-3]</sup>。众多研究表明,土壤重金属的毒性、生物有效性、迁移转化特点,以及重金属对土壤酶的影响机理与效果都不仅与单一重金属含量相关,而且更加

明显地受重金属的赋存形态和多种重金属复合污染的影响<sup>[4]</sup>。因此,开展矿区土壤重金属形态分布特征、多种重金属复合污染特点及其对土壤酶影响的研究,其意义远大于单因素污染的研究。本研究探讨了陕西省南部燕子砭铅锌矿区周边土壤重金属的复合污染特征及其对土壤酶活性的影响,旨在为汉江上游铅锌尾矿区土壤生态保护提供科学的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究区位于陕西省西南部的宁强县,该县位于陕西省、四川省、甘肃省的交界处,长江的最大支流——汉江就发源于此,因此宁强县有“千里汉江第一城”之美誉。该县境内富含数十种金属、非金属矿藏,主要有铁(Fe)、铜(Cu)、锰(Mn)、锌(Zn)、金(Au)等,区域成矿条件优越,被李四光先生誉为“中国的乌拉尔”<sup>[3]</sup>。本研究中的燕子砭铅锌矿地处陕西省宁强县、略阳县、勉县的三角地带,降水量充沛,地表雨水径流活跃,而且山区人口较多,耕地农田面积较大,所以该

收稿日期:2015-10-21

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(编号:14JK1136);秦巴山区生物资源综合开发协同创新中心自然科学基金项目[编号:QBXT-Z(P)-15-17]。

作者简介:汤波(1980—),女,陕西汉中人,博士研究生,讲师,研究方向为土壤面源污染、矿山环境污染及修复治理。E-mail:czhatb@163.com。

20、50、80、100 m处污染较重,基本处于中度污染水平;Pb(0 m除外)、Zn整体处于未累积状况,属于清洁水平。

从综合污染指数来看,Pb、Cu、Cr、Zn 4种元素综合污染状况表现为距煤矸山愈远污染程度愈轻的趋势;垂直方向上表现出深层(40~100 cm)土壤的污染程度高于表层(0~40 cm)土壤。

## 参考文献:

- [1] 苏光全,何书金,郭焕成. 矿区废弃土地资源适宜性评价[J]. 地理科学进展,1998,17(4):39-46.
- [2] 卞正富. 国内外煤矿区土地复垦研究综述[J]. 中国土地科学,2000,14(1):6-11.
- [3] 王孝本,林玉利. 煤矿矸石山生态系统的演替[J]. 国土与自然资源研究,2000(1):44-45.

- [4] 王金达,刘景双,于君宝. 沈阳市城区土壤和灰尘中铅的分布特征[J]. 中国环境科学,2003,23(3):300-304.
- [5] 韦朝阳,张立城,何书金,等. 我国煤矿区生态环境现状及综合整治对策[J]. 地理学报,1997,52(4):300-307.
- [6] 陈峰,胡振琪,柏玉,等. 矸石山周围土壤重金属污染的生态风险评价[J]. 农业环境科学学报,2006,25(增刊):575-578.
- [7] 曹斌,何松洁,夏建新. 重金属污染现状分析及其对策研究[J]. 中央民族大学学报:自然科学版,2009,18(1):29-33.
- [8] 武冬梅,张建红,吕珊兰,等. 山西矿区矸石山复垦种植施肥策略[J]. 自然资源学报,1998,13(4):333-336.
- [9] 胡克宽,王英俊,张玉岱,等. 渭北黄土高原苹果园土壤重金属空间分布及其累积性评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(5):934-941.
- [10] 史崇文,赵玲芝,郭新波,等. 山西土壤元素背景值及其特征[J]. 华北地质矿产杂志,1994,9(2):188-196.