

煤矿复垦区土壤重金属形态分布与富集污染研究

李杰锋

(吕梁学院, 山西 吕梁 033000)

摘要: 煤矿复垦区土壤重金属特征对于土地复垦方式选择具有重要意义。以山西煤矿复垦区土壤为研究对象。采用连续提取法对煤矿深部和浅部不同复垦方式土壤重金属特征进行了研究。研究表明: 深部复垦区重金属含量明显高于未复垦区, Zn 的含量是未复垦区的 6.23 倍, 是国家标准值的 9 倍以上; 深部复垦区土壤已受到 Zn 和 Cr 的污染; 浅部复垦区重金属含量高于未复垦区, 但低于国家标准值; 该煤矿复垦区中 Pb 对于周边土壤具有较高的污染影响; Zn 虽然其土壤中的含量较大, 但对环境影响较小, 重金属 Ni 和 Cr 在一定条件下对周围土壤存在危险; 深部和浅部复垦区土壤中重金属 Pb 的 RSP 值最大, 对环境影响最大, 其他三种重金属无污染。

关键词: 矿业工程; 环境污染; 复垦区; 形态分布

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.014

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)01-0116-05

我国是一个煤炭大国, 煤炭消耗量位居全球之首。煤炭对于我国的经济发展具有重要的作用, 我国经济发展不可或缺的重要资源^[1]。至今已开采煤炭资源 500 多亿 t。至十三五末期我国煤炭消耗量控制在 42 亿 t 以下, 占能源比重的 58% 左右, 由此可知, 未来相当长的时间内我国能源还是以煤炭为主^[2]。

在我国煤炭开采过程中主要采用井工和露天进行开采, 其中约 90% 的煤炭资源是由井工开采而来的, 井工开采需要建设大量的巷道, 当煤层被采出后顶板发生破坏, 造成地表塌陷, 据统计, 我国由于井工开采而导致的土地破坏量达到数十万平方公里, 并以每年数万公顷的速度增加, 造成了大量土地的浪费。而《土地复垦条例》的颁布, 从根本上保证了土地的有效使用, 标志着我国煤矿复垦进入了新阶段。由于煤矿开采过程中产生大量的煤矸石以及粉尘影响, 造成复垦区土壤的破坏。特别是重金属的污染对于人体产生重大影响, 同时, 它也是影响土地质量的

重要因素。因此, 开展煤矿复垦区重金属污染特征的研究对于矿区复垦方式和土地利用具有重要的意义^[3-4]。

对于煤矿复垦区重金属污染的研究, 国内外众多学者进行了大量的研究^[5-8], 多集中在对重金属的含量以及空间分布上, 而对于其形态分布涉足较少。因此, 本文以山西煤矿复垦区土壤作为研究对象, 对矿区不同的复垦方式下的土壤重金属特征进行研究, 并对其污染影响进行分析, 从定量化角度来进一步揭示该地区的污染状况, 为该煤矿复垦方式的选择提供技术支撑。

1 煤矿研究区特征

该煤矿位于山西省中部, 属于温带大陆性季风气候, 复垦区主要用于耕地、建设等项目。在该复垦区上选取复垦过的以及没有复垦的土壤进行对比分析, 对于复垦的方式主要用煤矿井下开采过程中的煤矸石进行充填以及挖坑垫浅两种。其中, 煤矸石复垦的土地从 2005 年开始进行, 对

收稿日期: 2020-12-17; 改回日期: 2021-05-11

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2020L0711); 吕梁市引进高层次科技人才重点研发项目(Rc2020-113)

作者简介: 李杰锋(1985-), 男, 讲师, 博士。

其底部采用煤矿井下开采过程中的煤矸石进行充填，在煤矸石的上部铺垫一定厚度的土壤作为表层土壤，在其上面种植相关的作物，对于挖坑垫浅主要是通过水塘建设过程中产生的大量耕作土，用这部分多余的水塘土铺设在煤矸石的上方。

2 实验方法

2.1 样品采集与处理

对于样品的采集主要是通过网格布点法进行选取，在复垦区的土地上进行取样，样品主要采集浅部的挖坑垫浅土壤以及煤矿井下开采过程中的煤矸石进行充填的土壤，每个区域采集15个样品，两个土壤共采集了30个样品。在采集的过程中先选取一个中心点，在距离中心点一定距离下选取两个点作为样品采集点，将原点以及两个不同位置的采集点采集的图进行混合，混合后的土壤作为该中心点的取样图，取样深度保持在0.1 m左右，每个点采集土壤约1000 g。采集混合完后，在自然状态下进行风干处理，挑选出土壤中的石块、根系等杂质并且过筛网，最后形成合格的样品。

2.2 重金属提取

对于土壤中重金属的提取采用五步提取法进行操作。该方法是将土壤中的重金属分为五种形态：金属可交换态、碳酸盐态、铁(锰)氧化物结合态、有机质及硫化物结合态(有机态)以及残渣晶格结合态(残渣态)。在提取的过程中为了保证实验结果的准确性以及实验的精度值，按照相关国家标准对提取的质量进行控制，在提取的过程中选取的试剂均为优级纯。所使用的容器必须在溶液中进行至少1 d的浸泡，保证容器中不含其他影响实验结果的杂质^[9-10]。

2.3 分析方法

在土壤重金属积累过程中有来自天然的也有来自人为的。为了区分天然以及人为在土壤重金属污染变化过程中的作用，采用次生相与原生相分布比值法进行区分。当其比值越来越大时其代表的是金属物释放到土壤中的概率也就越大并且其对环境的污染程度也越来越严重，通常情况下用一下公式表示：

$$RSP = M_c / M_y \quad (1)$$

当其比值小于1时代表重金属不能污染土

壤，也就是无污染的状态；当其比值大于1小于等于2时，代表重金属可以污染土壤，但是程度较低，属于轻度污染；当比值大于2小于等于3时，代表重金属污染土壤程度加重，属于中度污染；当比值大于3时，代表土壤污染土壤严重，属于重度污染。

3 评价结果与分析

3.1 重金属含量特征

该煤矿井下开采过程中的煤矸石充填的复垦区土壤中含有多种重金属，其数值见表1。

由表1可知，深部复垦区土壤中的重金属Pb、Zn、Ni以及Cr的含量分别是32.45 mg/kg、2250.48 mg/kg、43.96 mg/kg、74.13 mg/kg。煤矸石充填的复垦区土壤中的重金属含量明显高于未复垦的含量，特别是Zn的含量是6.23倍。对于重金属Pb和Ni的含量与未复垦区的重金属含量基本保持一致，相差值较少，而对于重金属Cr的含量其值高于未复垦区土壤中的含量，是其含量的1.57倍。由此可知，煤矿在开采活动中以及产生的煤矸石充填复垦区能够加重土壤重金属含量，对土壤造成重金属污染，其中尤以Zn最为严重，其次是Cr。对于Pb和Ni的重金属污染不明显。通过国家土壤环境质量标准(GB 15618—2009)可知，重金属Zn的含量明显高于标准值，其含量是标准值的9倍以上，而其他三种重金属含量明显低于标准值。由此可知，煤矿井下开采过程中的煤矸石进行充填的土壤已受到重金属的污染，其中Zn尤为严重，Cr次之；对于挖深垫浅复垦区土壤中的重金属Pb、Zn、Ni以及Cr的含量分别是25.13 mg/kg、56.95 mg/kg、40.85 mg/kg、73.92 mg/kg。明显高于未复垦区土壤中的重金属含量。标准值对比，其重金属含量明显低于其标准值。未超过标准中规定的最低限制值^[10]。

综合深部、浅部复垦区土壤中的重金属可知，不同的复垦方式其重金属污染程度存在较大差异，总体上深部煤矸石充填土壤中的重金属含量明显高于浅部，特别是重金属Zn的含量，深部是浅部的39.51倍。经分析，煤矿开采利用的是井工开采，属于封闭式，位于复垦区的下方，在开采过程中造成深部土壤的重金属含量过高，另一方面，煤矸石中的重金属通过运移的方式进入到

表 1 深部和浅部复垦区以及未复垦区土壤中重金属含量特征
Table 1 Characteristics of heavy metal content in deep and shallow reclamation areas and unreclaimed areas

重金属特征		Pb含量	Zn含量	Ni含量	Cr含量
深部复垦区	平均值	32.45 mg/kg	2250.48 mg/kg	43.96 mg/kg	74.13 mg/kg
	变异系数	18.04%	77.99%	27.18%	41.32%
	未复垦含量	30.29 mg/kg	361.23 mg/kg	39.58 mg/kg	47.15 mg/kg
浅部复垦区	平均值	25.13 mg/kg	56.95 mg/kg	40.85 mg/kg	73.92 mg/kg
	变异系数	12.15%	20.22%	16.49%	25.15%
	未复垦含量	14.15 mg/kg	18.69 mg/kg	28.59 mg/kg	39.62 mg/kg
GB15618—2009		600 mg/kg	250 mg/kg	80 mg/kg	200 mg/kg

土壤中，造成土壤 Zn 含量的增加。

土壤中重金属变异情况能够直观的反应该地区重金属分布情况以及污染程度的不同。深部煤矸石充填的土壤中 Zn 的含量变异系数最大，达到了 77.99%，说明 Zn 受外界的干扰比较大，在空间分布上存在较大差异。其次是重金属 Cr，为 41.32%，说明受外界干扰程度一般，在空间分布上存在一定的差异，再次是重金属 Ni，是 27.18%，最小的重金属 Pb，为 18.04%，最后两种重金属受外界干扰程度较小。而对于浅部的挖深垫浅复垦区土壤中的重金属含量的变异系数整体偏小，由此可知，对于浅部的挖深垫浅复垦区土壤中重金属在空间分布上比较均匀，受到外界影响较小^[10]。

3.2 重金属形态特征

煤矿复垦区土壤中重金属形态分布特征见图 1。由图 1 (a) 可知，重金属 Pb 主要以残渣态和铁(锰)氧化态两种状态为主，其占比分别是 42.58% 和 37.48%。其铁(锰)氧化态占比较高是由于可交换态和碳酸盐态存在的情况下，重金属 Pb 随着环境发生了交换转变。与铁(锰)氧化形成了稳定的络合物，容易释放导致含量高，该区域的 Pb 对环境具有较高的影响；对于重金属 Zn 主要是以残渣态为主，其占比可达 97.89%。残渣态性质十分稳定，在种植农作物的情况下，该重金属 Zn 可利用的非常小，对于土壤的贡献值不大，由于其稳定性好的缘故，一般情况下对于土壤没有危害；对于重金属 Ni 其主要是以残渣态和铁(锰)氧化态为主，占比分别是 62.35% 和 21.45%。由于铁(锰)氧化态重金属在酸性条件下能够被轻易激活，所以，在土壤中的重金属 Ni 生物的有效性低，但是在酸性条件下会对周围的土壤产生潜在危害；重金属 Cr 主要以残渣态和铁(锰)氧化态

为主，占比分别是 81.21% 和 11.58%。由于重金属 Cr 能够在酸性条件下轻易激活，所以，在土壤中的重金属 Cr 生物的有效性低，但是在酸性条件作用下重金属 Cr 会对周围的土壤产生潜在危害^[5,10]。

由图 1 (b) 重金属 Pb 主要以铁(锰)氧化态和残渣态两种状态为主，其占比分别是 42.57% 和 35.26%。其铁(锰)氧化态占比较高是由于可交换

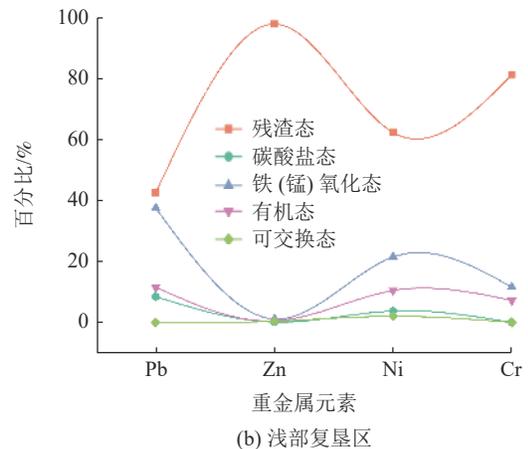
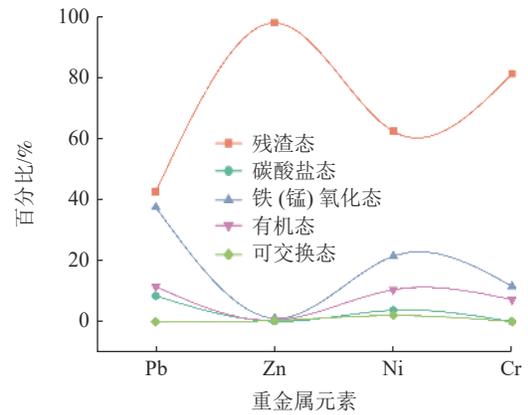


图 1 煤矿复垦区土壤重金属形态分布特征

Fig.1 Form distribution characteristics of soil heavy metals in coal mine reclamation area

态和碳酸盐态存在的情况下，重金属 Pb 随着环境发生了交换转变。与铁(锰)氧化形成了稳定的络合物，容易释放导致含量高，该区域的 Pb 对环境具有较高的影响；对于重金属 Zn，其状态主要残渣态为主，其占比达到了 78.25%，残渣态性质十分稳定，在种植农作物的情况下，该重金属 Zn 可利用的非常小，对于土壤的贡献值不大，一般对土壤没有危害；对于重金属 Ni 主要以残渣态和铁(锰)氧化态为主，占比分别是 64.35% 和 20.85%。由于铁(锰)氧化态重金属在酸性条件下能够被轻易激活，所以，在土壤中的重金属 Ni 生物有效性低，但在酸性条件下会对周围的土壤产生潜在危害；重金属 Cr 主要以残渣态和铁(锰)氧化态为主，占比分别是 82.19% 和 9.01%。由于重金属 Cr 能够在酸性条件下轻易激活，所以，在土壤中的重金属 Cr 生物的有效性低，但是在酸性条件作用下重金属 Cr 会对周围的土壤产生潜在危害。

综上所述，该煤矿复垦区中 Pb 对于周边土壤具有较高的污染影响；Zn 虽然含量较大，但其形态主要以残渣态为主，其对于环境影响较小。而对于重金属 Ni 和 Cr，由于其在酸性条件下容易发生交换，因此，对于周围土壤存在潜在危险。该煤矿重金属状态主要以残渣态为主，主要与该煤矿土壤呈碱性有关。

3.3 重金属含量与形态特征

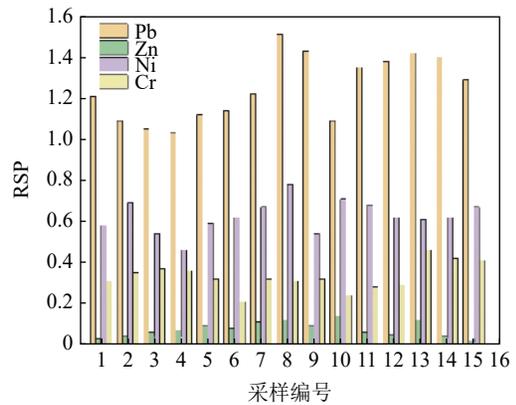
煤矿复垦区土壤中重金属形态占比主要受含量影响。深部复垦区土壤中除了重金属 Cr 以外，其他重金属元素含量与重金属形态之间存在密切关联关系，不同重金属元素，其关系程度存在差异。随重金属含量的增加占比不断增大。对于挖坑垫浅复垦区土壤中重金属，重金属含量与重金属形态所占比例呈现关系不明显，但重金属含量与残渣量之间存在明显相关关系，重金属残渣态占比随重金属含量增加而不断增大^[10]。

3.4 重金属污染特征

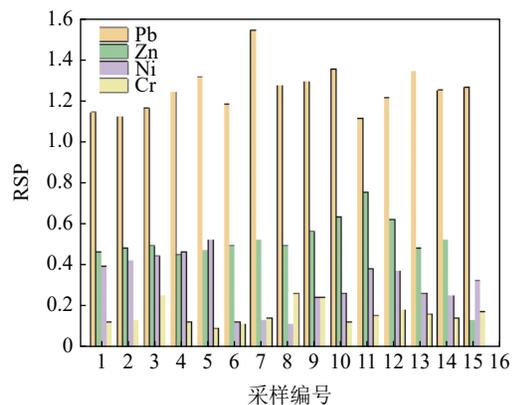
为了更好的分析土壤中重金属对于土壤的污染特征。采用次生相与原生相分布比值法进行污染影响特征分析，得出的数据见图 2。

由图 2 (a) 可知，RSP 值最大的是重金属 Pb，其平均值可达 1.24，其值位于 1 和 2 之间，代表重金属可以污染土壤，但是程度较低，属于轻度污染，受到了一定的认为影响，对环境产生一定的危害；其次是重金属 Ni，其平均值为

0.65，最小的是重金属 Zn，其值为 0.07，后面三种重金属的值均小于 1，代表重金属不能污染土壤，也就是无污染的状态。



(a) 深部复垦区



(b) 浅部复垦区

图 2 深部和浅部复垦区土壤中重金属 RSP 值分布
Fig.2 Distribution of RSP value of heavy metals in soil in deep and shallow reclamation areas

由图 2 (b) 可知，同样 RSP 值最大的是重金属 Pb，其平均值为 1.25，其值位于 1 和 2 之间，代表重金属可以污染土壤，但是程度较低，属于轻度污染，受到了一定的认为影响，对环境产生一定的危害；其次是重金属 Zn，其 RSP 平均值为 0.50，最小的是重金属 Cr，其 RSP 平均值为 0.16，后面三种重金属的值均小于 1，代表重金属不能污染土壤，也就是无污染的状态。

4 结 论

(1) 与未复垦区土壤对比，煤矸石充填的复垦区土壤中重金属含量明显高于未复垦，特别是 Zn 的含量是 6.23 倍，重金属 Cr 的含量高于未复垦区，是其含量的 1.57 倍；与标准值对比，重金

属 Zn 的含量是标准值的 9 倍以上, 其它三种重金属含量明显低于标准值。煤矿井下开采过程中的煤矸石进行充填的土壤已受到重金属的污染。对于浅部的挖深垫浅复垦区土壤中重金属含量明显高于未复垦区土壤中的重金属含量。其重金属含量低于标准值。

(2) 煤矿复垦区中 Pb 对于周边土壤具有较高的污染影响; Zn 虽含量较大, 但形态以残渣态为主, 对环境影响较小。而对于 Ni 和 Cr, 其在酸性条件下易发生交换, 对周围土壤具有潜在危险。该煤矿重金属状态以残渣态为主, 与该煤矿土壤碱性有关。

(3) 深部和浅部复垦区土壤中重金属 Pb 的 RSP 值最大, 对环境影响最大, 其他三种重金属无污染。该煤矿中 Pb 对于环境的影响较为严重。深部煤矿井下开采过程中的煤矸石对于重金属 Zn 的富集非常明显。

参考文献:

- [1] 康红普, 徐刚, 王彪谋, 等. 我国煤炭开采与岩层控制技术发展 40a 及展望[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2):7-39.
- KANG H P, XU G, WANG B M, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2):7-39.
- [2] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的空间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2020, 2(2):5-30.
- KANG H P. Spatial scale analysis on coalmining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2020, 2(2):5-30.
- [3] 康红普. 煤炭开采与岩层控制的时间尺度分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2021, 3(1):5-27.
- KANG H P. Temporal scale analysis on coal mining and strata control technologies[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2021, 3(1):5-27.
- [4] 王家臣. 基于采动岩层控制的煤炭科学开采[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019, 1(2):40-47.
- WANG J C. Sustainable coal mining based on mining ground control[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2):40-47.
- [5] 刘应冬, 代力, 张卫华. 青海某金矿矿集区土壤重金属污染评价及综合利用讨论[J]. 矿产综合利用, 2018(5):97-100.
- LIU Y D, DAI L, ZHANG W H. Assessment of soil heavy metals pollution and comprehensive utilization in a gold mine area in qinghai[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(5):97-100.
- [6] 韩张雄, 万的军, 胡建平, 等. 土壤中重金属元素的迁移转化规律及其影响因素[J]. 矿产综合利用, 2017(6):5-9.
- HAN Z X, WAN D J, HU J P, et al. Migration and transformation of heavy metals in soil and its influencing factors[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2017(6):5-9.
- [7] 闫英师, 李玉凤, 赵礼兵. 改性钢渣吸附重金属离子的研究现状[J]. 矿产综合利用, 2021(1):8-13.
- YAN Y S, LI Y F, ZHAO L B. Research status of heavy metal ions adsorption by modified steel slag[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(1):8-13.
- [8] 褚海艳, 薛志宏, 高叶玲. 褐煤对汞和砷的吸附行为研究[J]. 矿产综合利用, 2021(2):91-96.
- CHU H Y, XUE Z H, GAO Y L. Study on adsorption behavior of mercury and arsenic on lignite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):91-96.
- [9] 黄静, 高良敏, 冯娜娜, 等. 煤矿复垦区土壤重金属分布特征与质量评价[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(2):68-71.
- HUANG J, GAO L M, FENG N N, et al. Distribution characteristics of heavy metals in reclamation area of coal mine and its quality evaluation[J]. Environmental Pollution and Control, 2012, 34(2):68-71.
- [10] 江培龙. 淮南煤矿复垦区土壤重金属含量分布及污染评价[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2014.
- JIANG P L. Pollution assessment of heavy metals in reclaimed soils of Huainan coal mine[J]. Wuhu: Anhui Normal University, 2014.

(下转第 163 页)