

◆特邀栏目◆

高原高寒露天煤矿区土壤重金属污染及潜在生态风险评价^{*}许泰^{1,2,3,4}, 鄂崇毅^{1,2,3**}

(1. 青海师范大学, 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 青海西宁 810008; 2. 青海师范大学地理科学学院, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海西宁 810008; 3. 青海省人民政府-北京师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海西宁 810008; 4. 陇东学院能源工程学院, 甘肃庆阳 745000)

摘要:高原高寒露天煤矿区周边土壤重金属的含量及污染状况, 与生态环境修复治理方案的制定密切相关。以青海省木里露天煤矿区周边土壤为研究对象, 采集矿坑周边土壤和矿坑外围未受人为扰动和污染的草甸土壤样品共计 54 个, 分析各土壤中重金属的含量及分布特征, 运用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法及潜在生态风险指数法对矿坑周边土壤重金属的污染程度和潜在生态风险进行综合评价。研究表明, 各矿坑周边土壤重金属含量与背景值差异并不明显, 仅 Zn、Cd、Pb、Cr 和 Hg 的平均含量高于背景值。矿区土壤重金属单因子污染指数总体表现为 $P_{Pb} > P_{Hg} = P_{Cr} > P_{Cd} > P_{Zn} > P_{Cu} > P_{Ni} > P_{As}$, 在清洁安全范围内。内梅罗综合污染指数在 0.55–2.52, 平均值为 1.39, 属于轻度污染, 局部处于清洁、警戒线和中度状态。所有重金属地质累积指数平均值均为负值, 污染级别为 0 级。重金属单项潜在生态风险程度从高到低依次表现为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$, 综合潜在风险生态指数平均值为 110.38, 以轻微风险为主。矿区周边土壤中 Cu 与 Cr、Pb、Cd、Zn, Cr 与 Zn、Cd、Pb、Ni, Zn 与 Cd 之间相关性显著, 在空间分布上相互依存, 具有相对专一的来源。总体来看, 除了局部有轻度污染的迹象, 矿区周边土壤并未受到重金属污染, 但是 Hg 和 As 对露天开采、矸石堆积等人类活动表现敏感, 在后期生态环境监测与修复治理过程中应予以重点关注。

关键词:露天煤矿 高原高寒 矿区土壤 重金属 污染评价 潜在生态风险 木里矿区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2022)03-0584-11

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20220418.001

土壤重金属污染以隐蔽性强、长期性等为主要特征, 此外, 土壤中的重金属难降解、难迁移、易累积, 其污染会直接或间接对生态环境安全产生威胁^[1-3]。煤炭的露天开采为矿区重金属的释放创造了有利条

收稿日期: 2021-11-08

^{*} 国家自然科学基金项目(42171011, 41761042), 青海省自然科学基金项目(2021-ZJ-918)和甘肃省青年科技基金计划项目(20JR10RA140)资助。

【作者简介】

许泰(1987–), 男, 在读博士研究生, 主要从事环境地表过程与生态响应研究, E-mail: xutai871113@163.com。

【**通信作者】

鄂崇毅(1979–), 男, 教授, 主要从事全球变化与高原环境研究, E-mail: echongyi@163.com。

【引用本文】

许泰, 鄂崇毅. 高原高寒露天煤矿区土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 广西科学, 2022, 29(3): 584-594.

XU T, E C Y. Soil Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk Assessment in Plateau Alpine Open-pit Coal Mining Area [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(3): 584-594.

件^[4-6]。目前,矿区土壤重金属污染现象已在环境污染领域引起高度关注^[7-9]。

近年来,国内外诸多学者针对煤矿开采造成的矿区土壤重金属污染问题做了大量富有成效的工作。Reza 等^[10]通过对印度阿萨姆矿区土壤重金属测试分析,认为土壤中 Cd 和 Pb 的污染与煤矿开采密切相关。Bhuiyan 等^[11]认为煤炭开采是孟加拉人民共和国北部矿区周边农田土壤中 Mn、Zn、Pb 和 Ti 的主要来源。Benhaddya 等^[12]采用 GIS 手段分析阿尔及利亚 Hassi Messaoud 地区表层土壤重金属污染的空间分布,有力支持了该地区的重金属防治工作。Ars-lan 等^[13]采用单因子污染指数法、地质累积指数法和富集因子法对土耳其某银矿周边土壤中重金属进行评价,得出矿区周边土壤受到人类活动影响的结论。Mishra 等^[6]、Pandey 等^[14]发现煤矿开采都会出现程度不等的重金属富集或超标。国内学者在煤矿区露天采场、矸石山周边土壤、复垦土壤重金属的累积、迁移、来源以及污染程度等方面做了许多工作,其中,对于淮南矿区采煤塌陷区周边土壤重金属特征和煤矸石堆积效应的研究最具代表性,欧金萍等^[15]发现 Cd、Cr 对淮南矿区采煤沉陷积水区存在潜在生态危害;陈军等^[16]报道了淮南采煤塌陷积水区总体的水质健康风险几乎全部由致癌风险构成,而致癌风险又几乎由 Cr 造成;熊鸿斌等^[17]认为煤矸石露天堆放对淮南矿区土壤重金属的影响不明显,而崔龙鹏等^[18]得出受采矿活动影响,矿区土壤重金属具有累积性的结论;王兴明等^[19]发现煤矿区农田土壤重金属(Zn、Pb、Cd 和 Cu)的含量高于淮南土壤背景值,矿区土壤存在一定的生态风险;孙贤斌等^[20]认为煤矿废弃地土壤重金属含量的空间变异均是微小尺度,其变异特征与复杂的地物和人为干扰有关。以上国内外研究皆指明煤矿露天开采会造成当地生态破坏和导致环境污染严重。

虽然国内外学者针对露天煤矿区和煤矸石周边土壤的重金属污染研究取得了丰硕的成果,但是这些相关研究主要集中在海拔较低的黄河中下游地区,且多集中于土壤重金属的来源、空间分布、污染程度、累积效应等方面,有关生态环境脆弱的高寒、缺氧、高海拔煤矿区土壤重金属污染的研究比较少,尤其是填充基质在高原高寒恶劣环境下土壤重构的安全方面鲜有报道。木里露天煤矿区开膛破肚式开采严重破坏了生态环境,而各类岩石碎屑、煤矸石、煤粉灰、矿石等固体矿渣是土壤重构最主要的原材料,这些矿渣中

的重金属是否会对矿区周边土壤环境质量产生影响尚不明确。因此,本研究以青海省木里露天煤矿区为研究对象,对矿区周边土壤中重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg 的含量进行分析,选用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地质累积指数法和潜在生态风险指数法评价矿区周边土壤重金属的污染程度和生态风险情况,探讨煤矿开采活动对周边土壤环境质量的影响,旨在为高寒生态脆弱矿区生态治理和修复提供基础信息和科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

木里露天煤矿区(以下简称“木里矿区”)地处黄河上游重要支流大通河的发源地,是祁连山水源涵养地和生态安全保障的重要组成部分,地理坐标为 38°02′02″–38°16′00″N,98°55′40″–99°37′38″E。矿区海拔 3 840–4 200 m,自然条件恶劣,多年平均气温为 -0.39℃,年平均降水量为 450 mm,年平均蒸发量为 1 544.84 mm,四季不分明,气候寒冷,昼夜温差大,属典型的高原大陆性气候。矿区植被较为发育,以高寒沼泽草甸类为主,常与高寒草甸类植被镶嵌交错。矿区土壤类型主要以沼泽草甸土和高山草甸土为主,广泛发育冻土。木里矿区属于青藏高原典型生态脆弱区,矿区的开采活动始于 20 世纪七八十年代,其间一直是小规模开采,进入 21 世纪以来,先后有 8 家企业单位入驻矿区,开采规模逐渐加大,开采方式为开挖式露天开采,长期露天开采活动形成了 11 个矿坑、19 座渣山,对祁连山南麓生态环境造成了极大的破坏,在国内外引起不同程度的关注。目前,所有矿区已经全部停产,根据地形地貌特点,结合矿坑和渣山现状,正在大面积开展矿山生态环境修复治理。

1.2 土壤样品采集与测试分析方法

样品于 2020 年 10 月初采集,共计采集矿坑土壤表层(0–20 cm)混合样品 29 个(表 1)。在矿坑和煤矸石堆积外围选取未受人类扰动的草甸土壤作为背景,共采集有代表性的土壤样品 25 个,采样点位置分布如图 1 所示。为保证后期数据的可靠性和代表性,在每个采样点附近 5 m² 范围内均匀采集 4 个 0–20 cm 土壤样品,充分混合后按四分法取足量土壤组成新样品装入样品袋带回实验室,同时记录样品坐标和高程等信息。在实验室内待土壤样品自然风干,剔除杂质,研磨并过 200 目筛后,称取土壤样品 500 g,密

封保存待实验室测试。

表 1 矿坑土壤样品采集信息

Table 1 Collection information of mine soil sample

矿坑名称 Pit name	样品编号 Sample number	地理坐标 Geographic coordinates	海拔(m) Altitude (m)
Pit No. 1 in Duosugongma mining area	ML1 # 5-1	38°9′56.088″N,99°1′12.608 4″E	4 062.20
	ML1 # 5-2	38°9′56.602 8″N,99°1′15.751 2″E	4 078.26
Pit No. 3 in Juhugeng mining area	ML3 # 10-1	38°6′56.43″N,99°9′57.888″E	4 042.94
	ML3 # 10-2	38°6′56.43″N,99°9′57.888″E	4 042.94
Pit No. 4 in Juhugeng mining area	ML4 # 1-1	38°8′1.467 6″N,99°9′9.097 2″E	3 966.19
	ML4 # 1-2	38°8′1.467 6″N,99°9′9.097 2″E	3 966.19
	ML4 # 1-3	38°8′1.467 6″N,99°9′9.097 2″E	3 966.19
	ML4 # 1-4	38°8′1.467 6″N,99°9′9.097 2″E	3 966.19
	ML4 # 1-5	38°8′1.467 6″N,99°9′9.097 2″E	3 966.19
	ML4 # 9-1	38°8′32.442″N,99°8′24.817 2″E	3 977.93
Pit No. 5 in Juhugeng mining area	ML5 # 8-1	38°6′40.053 6″N,99°8′24.446 4″E	4 057.75
	ML5 # 8-2	38°6′39.358 8″N,99°8′24.946 8″E	4 056.09
	ML5 # 8-3	38°6′38.836 8″N,99°8′24.27″E	4 060.47
Pit No. 7 in Juhugeng mining area	ML7 # 4-1	38°8′41.449 2″N,99°6′39.927 6″E	4 062.53
Pit No. 9 in Juhugeng mining area	ML9 # 3-1	38°8′9.535 2″N,99°4′8.853 6″E	4 239.01
	ML9 # 3-2	38°8′7.576 8″N,99°4′8.349 6″E	4 254.34
	ML9 # 3-3	38°8′6.982 8″N,99°4′7.982 4″E	4 239.57
	ML9 # 3-4	38°8′6.982 8″N,99°4′7.982 4″E	4 239.57
Pit No. 1 in Jiangcang mining area	JC1 # 1-1	38°2′23.794 8″N,99°35′36.452 4″E	3 625.38
	JC1 # 1-2	38°2′23.794 8″N,99°35′36.452 4″E	3 625.38
	JC1 # 1-3	38°2′29.911 2″N,99°35′44.25″E	3 743.89
	JC1 # 1-4	38°2′29.911 2″N,99°35′44.25″E	3 743.89
Pit No. 2 in Jiangcang mining area	JC2 # 2-1	38°2′43.623 6″N,99°34′4.054 8″E	3 796.37
	JC2 # 2-2	38°2′43.623 6″N,99°34′4.054 8″E	3 796.37
	JC2 # 2-3	38°2′43.623 6″N,99°34′4.054 8″E	3 796.37
	JC2 # 2-4	38°2′43.623 6″N,99°34′4.054 8″E	3 796.37
Pit No. 4 in Jiangcang mining area	JC4 # 3-1	38°2′18.2″N,99°30′24.1″E	3 842.84
	JC4 # 4-1	38°2′30.3″N,99°28′42.4″E	3 878.75
	JC4 # 4-2	38°2′30.3″N,99°28′42.4″E	3 878.75

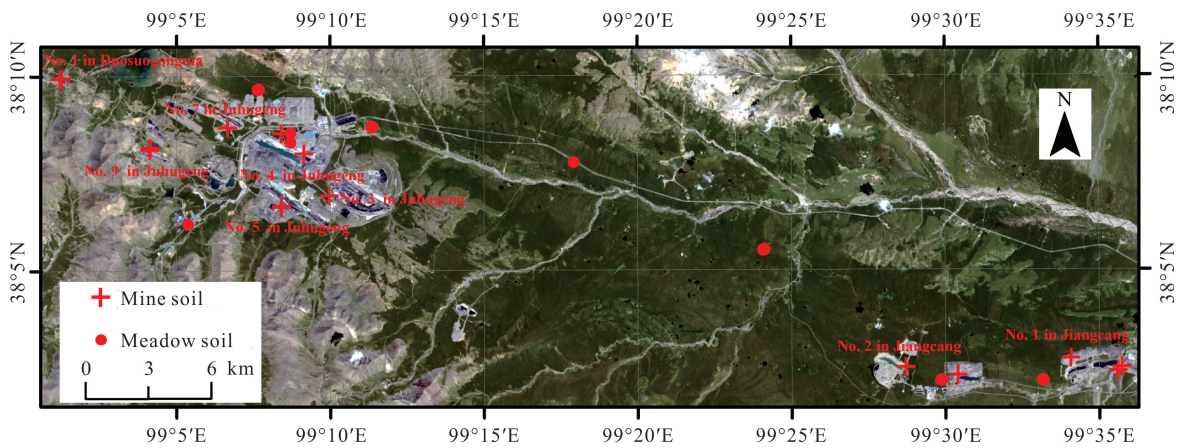


图 1 采样区位置和采样点分布
Fig.1 Sampling area location and sampling point distribution

采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,型号:ICAP RQ,赛默飞世尔科技公司)测定土壤样品中Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni的含量;采用氢化物发生原子荧光光谱法(双道氢化物发生原子荧光光度计,型号:AFS-2202E,北京海光仪器有限公司)测定As和Hg的含量。通过测定空白样、平行样和加标回收进行严格质量控制,重金属元素平行样的相对误差 $<5\%$,标样的回收率在 $80\% - 120\%$,测试数据真实有效。

以未受污染的高寒沼泽草甸土壤中的重金属平均含量作为标准,对矿区周边土壤重金属的污染进行评价。

1.3 土壤重金属评价方法

单因子污染指数法计算公式为

$$P_i = C_i / S_i, \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中重金属 i ($i=1,2,3,\dots$)的单因子污染指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为土壤中重金属 i 的评价标准值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。根据 P_i 值将土壤重金属污染划分为4个等级^[21,22](表2)。

内梅罗综合污染指数法计算公式为

$$P_N = [(P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2) / 2]^{1/2}, \quad (2)$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数; $P_{\max}$ 为土壤中各项重金属单因子污染指数中的最大值; P_{ave} 为土壤中各项重金属单因子污染指数的算术平均值。根据 P_N 值将土壤重金属污染划分为5个等级(表2)。

地质累积指数法计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (K \cdot B_i)], \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数; C_i 为土壤中重金属 i 的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为土壤中重金属 i 的地球化学背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),有时也采用当地无污染区该元素含量作为背景值; K 为成岩作用引起的背景值变动系数,一般 K 值取1.5。根据 I_{geo} 值的不同将土壤重金属污染划分为6个等级^[21,23](表2)。

潜在生态风险指数法计算公式为

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_s^i / C_n^i, \quad (4)$$

式中,RI为多种重金属综合潜在生态风险指数; E_i 为土壤中重金属 i 的潜在生态风险指数; T_r^i 为土壤中重金属 i 的毒性响应系数,反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度,Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、As、Hg、Cd的毒性响应系数分别为2,5,5,1,5,10,40和30^[24]; C_r^i 为土壤中重金属 i 的污染系数; C_s^i 为土壤中重金属 i 的实测值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为土壤中重

金属 i 的评价标准值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); n 为土壤中重金属总数, $n=8$ 。根据RI值的不同将土壤重金属污染划分4个等级(表2)。

表2 土壤重金属污染评价分级标准

Table 2 Soil heavy metal pollution evaluation classification standard

评价方法 Evaluation method	分级标准 Classification standards	污染等级 Pollution level
Single factor pollution index (P_i)	$P_i \leq 1$	No
	$1 < P_i \leq 2$	Light
	$2 < P_i \leq 3$	Mild
	$P_i > 3$	Heavy
Nemerow pollution index (P_N)	$P_N \leq 0.7$	Clean
	$0.7 < P_N \leq 1.0$	Still clean
	$1.0 < P_N \leq 2.0$	Mild
	$2.0 < P_N \leq 3.0$	Moderate
	$P_N > 3.0$	Heavy
Geo-accumulation index (I_{geo})	$I_{\text{geo}} \leq 0$	No
	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	Light
	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	Mild
	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	Moderate
	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	Heavy
Individual potential ecological risk index (E_i)	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	Very heavy
	$E_i \leq 40$	Light
	$40 < E_i \leq 80$	Medium
	$80 < E_i \leq 160$	Comparatively high
Comprehensive potential ecological risk index (RI)	$160 < E_i \leq 320$	High
	$\text{RI} \leq 110$	Light
	$110 < \text{RI} \leq 220$	Medium
	$220 < \text{RI} \leq 440$	Comparatively high
	$\text{RI} > 440$	High

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量

对木里矿区周边土壤重金属含量测试,分析统计极值、平均值、标准差、变异系数(表3)。从表3可以看出,矿区土壤中的重金属Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg含量范围区间跨度较大,所有重金属含量的最大值均高于背景值,其中Hg的最大值达到背景值的3倍多,Cd、As、Pb、Cr、Cu的最大值达到背景值的2倍左右,Ni和Zn的最大值达到背景值的1.5倍左右,表明采矿活动和煤矸石堆积会造成矿坑周边土壤

重金属污染,尤其是 Hg、Cd、As 和 Pb 这 4 种重金属最为敏感。同时,研究发现矿坑周边如页岩、泥岩中重金属含量都特别低(表 3),因此将页岩、泥岩粉碎辅以有机肥料代替土壤复绿是可行的。土壤重金属 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg 的平均含量分别为 $23.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $83.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.154 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $25.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $68.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $35.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $6.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.043 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整体来看,8 种重金属的平均含量与背景值差异并不明显,只有 Zn、Cd、Pb、Cr 和 Hg 的平均含量略高于背景值,Cu、Ni 和 As 的平均含量略低于背景值。

表 3 土壤重金属含量

Table 3 Content of heavy metals in soil

重金属 Heavy metal	统计指标 Statistical indicators					页岩、泥岩平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Average content of shale and mudstone ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Background value ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
	最小值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Minimum value ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	最大值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Maximum value ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Average value ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	标准差 Standard deviation	变异系数 (%) Variable coefficient (%)		
Cu	4.59	42.38	23.19	7.71	0.33	14.76	23.43
Zn	41.02	134.56	83.19	23.22	0.28	58.84	80.64
Cd	0.039	0.297	0.154	0.07	0.42	0.08	0.14
Pb	12.01	37.31	25.07	5.26	0.21	18.90	19.06
Cr	31.75	110.36	68.41	15.79	0.23	52.67	57.38
Ni	22.71	51.70	35.84	7.56	0.21	29.99	36.76
As	0.13	14.54	6.42	4.01	0.62	3.15	6.83
Hg	0.005	0.115	0.043	0.03	0.64	0.02	0.036

木里露天煤矿区土壤中重金属的变异系数为 0.21–0.64,均小于 1,变异程度顺序为 $\text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} = \text{Ni}$,根据变异系数分级标准^[25,26],属于高强度变异或中等变异,土壤中重金属整体在空间分布上差异比较明显。Hg、As 和 Cd 的变异系数均大于 0.36,说明露天开采、煤炭筛选、汽车运输等人类活动对木里矿区周边土壤的 Hg、As 和 Cd 干扰较大。

2.2 土壤重金属污染评价

2.2.1 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价

如图 2 所示,各矿坑周边土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg 的单因子污染指数分别为 0.20–1.81,0.51–1.67,0.28–2.16,0.63–1.96,0.55–1.92,0.62–1.41,0.02–2.13,0.13–3.19。污染程度以清洁–轻度占主导地位。从平均值来看,土壤重金属单因子污染指数表现为 $P_{\text{Pb}} > P_{\text{Hg}} = P_{\text{Cr}} > P_{\text{Cd}} > P_{\text{Zn}} > P_{\text{Cu}} > P_{\text{Ni}} > P_{\text{As}}$,其中,Hg 和 Cr 的单因子污染指数相同,Zn 和 Cd 的单因子污染指数接近,Cu、Ni 和 As 的单因子污染指数相差甚微。根据表 2 单因子污染指数等级标准,所有重金属单因子污染指数均

在 1 附近波动,说明 8 种重金属对土壤尚且不能构成威胁,属清洁安全范围,这也与 2.1 节中 Zn、Cd、Pb、Cr 和 Hg 的平均含量略高于背景值的结果一致。各矿坑土壤样品的内梅罗综合污染指数为 0.55–2.52,平均值为 1.39,说明矿区总体上处于轻度污染状态,局部属于清洁、警戒线和中度状态。

2.2.2 地质累积指数评价

如图 3 所示,各矿坑周边土壤中 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg 的地质累积指数分别为 $-2.94 - 0.27$, $-1.56 - 0.15$, $-2.43 - 0.50$, $-1.25 - 0.38$, $-1.44 - 0.36$, $-1.24 - 0.06$, $-6.36 - 0.50$, $-3.53 - 1.09$ 。根据表 2 地质累积指数污染等级划分标准,所有矿坑周边土壤中 Ni 的地质累积指数最大值均小于 0,Ni 属于无污染状态。除了 Hg 之外,其他重金属地质累积指数最大值也全部小于 1,重金属整体以无污染状态为主,个别为无–中度污染状态。从平均值来看,所有重金属地质累积指数平均值均为负数,表明重金属处于无污染状态,污染级别为 0 级。

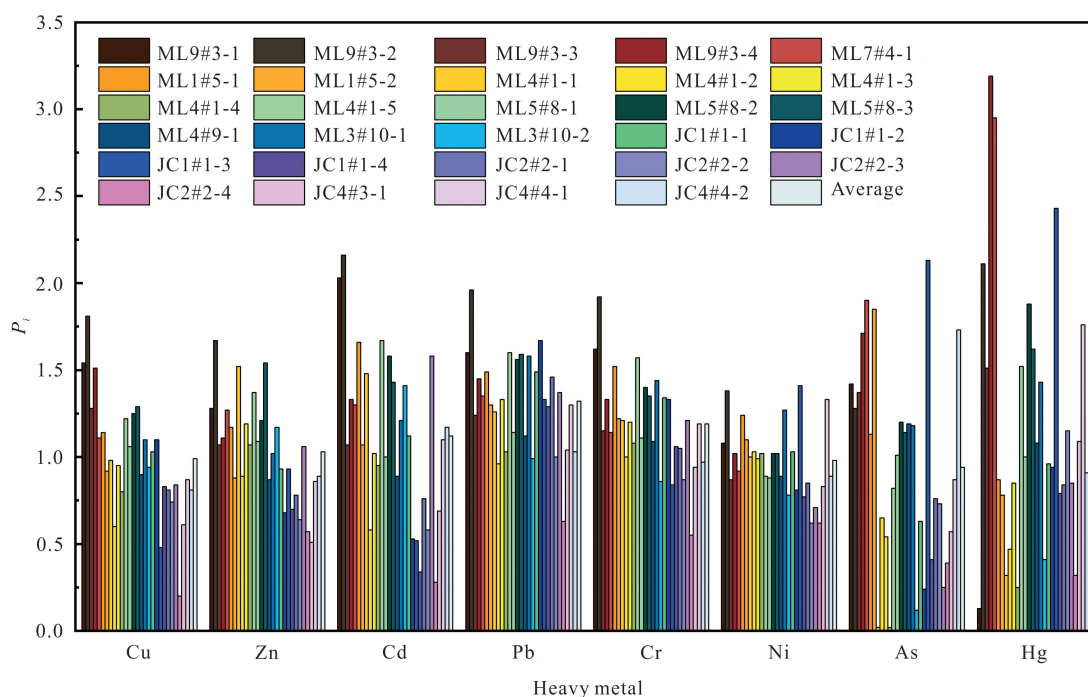


图2 单因子污染指数

Fig.2 Single factor pollution index

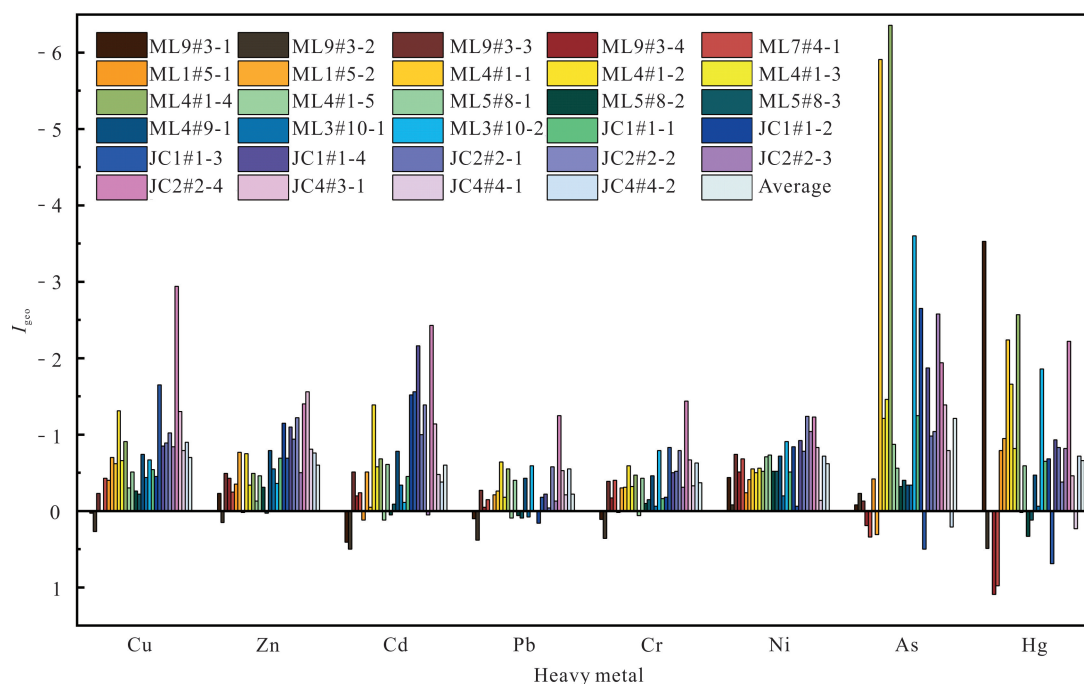


图3 地质累积指数与污染程度的关系

Fig.3 Relationship between geo-accumulation index and pollution degree

2.2.3 潜在生态风险评价

如图4所示,各矿坑周边土壤中Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni、As、Hg的潜在生态风险指数分别为0.98-9.05,0.51-1.67,8.52-64.88,3.15-9.79,1.11-3.85,3.09-7.03,0.18-21.30,5.20-127.50。根

据表2潜在生态风险指数污染等级划分标准,除Hg和Cd以外,其余重金属潜在生态风险指数的最大值均小于40,属于轻微污染状况。从平均值来看,重金属单项潜在生态风险程度从高到低依次表现为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$,平均值除Hg

以外均未超过 40, 矿坑周边的土壤生态风险等级皆属于轻度生态危险程度。整个矿区多种重金属的综合潜在风险生态指数为 34.25–208.28, 区间跨度明显, 表明矿坑周边的土壤存在潜在的生态风险, 程度以轻微风险为主, 个别采样点呈中等风险。综合潜在

风险生态指数平均值为 110.38, 由于处于临界点, 根据多种重金属综合潜在生态风险指数确定污染程度属于轻微生态危险。综合所有重金属元素的生态危害程度, 发现 Hg 和 Cd 是主要的潜在生态风险因子, 二者对 RI 的贡献率达到 73.5%, 应当引起重视。

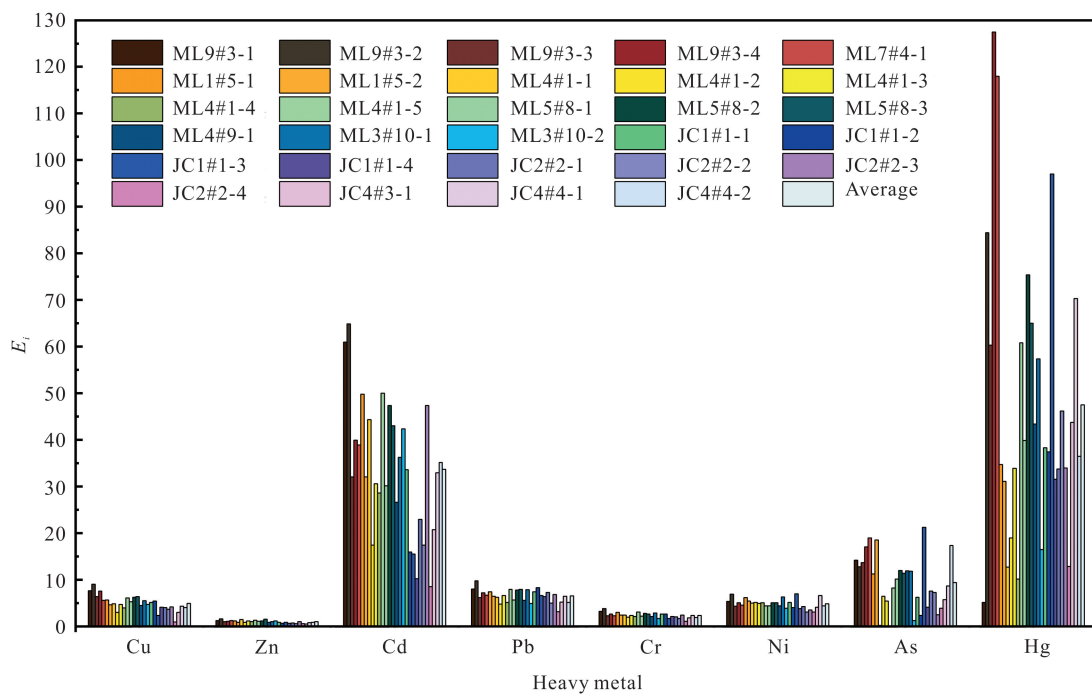


图 4 重金属单项潜在生态风险指数

Fig. 4 Single potential ecological risk index of heavy metal

2.2.4 重金属元素相关性分析

对木里矿坑周边土壤中重金属含量进行相关性分析, 并对显著性进行 0.01 与 0.05 的双侧检验, 结果如表 4 所示。从重金属元素之间的相关性系数可以看出, 数值全部为正值且数值较大, 说明各重金属有各自不同的相关性。在 0.01 水平上, Cu-Zn、Cu-Cd、Cu-Pb、Cu-Cr, Zn-Cd、Zn-Pb、Zn-Cr, Cd-Pb、Cd-Cr,

Pb-Cr、Pb-Ni, Cr-Ni, As-Hg 相关系数为 0.522–0.894, 相关性显著。在 0.05 水平上, Ni-Zn、Ni-Cd、Ni-As, Hg-Cu、Hg-Pb 相关系数为 0.379–0.467, 相关性显著。综上可以发现, Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni 两两之间关系紧密, As 与其他重金属之间相似性小 (Hg 和 Ni 除外), Hg 与 Zn、Cd、Cr、Ni 相似性也较小。

表 4 土壤重金属相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis results of soil heavy metals

	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ni	As	Hg
Cu	1							
Zn	0.718 **	1						
Cd	0.788 **	0.835 **	1					
Pb	0.789 **	0.561 **	0.614 **	1				
Cr	0.878 **	0.673 **	0.787 **	0.894 **	1			
Ni	0.361	0.428 *	0.390 *	0.522 **	0.532 **	1		
As	0.301	0.161	0.210	0.268	0.201	0.467 *	1	
Hg	0.379 *	0.237	0.172	0.404 *	0.243	0.358	0.643 **	1

Note: ** and * mean significantly correlated at the 0.01 and 0.05 level (both sides), respectively

3 讨论

目前,关于土壤中重金属的选取和污染评价,还没有统一的规定标准^[27,28]。同一研究区域分别采用国家土壤环境质量和当地土壤背景值作为评价标准,可能会产生截然不同的污染程度等级。木里矿区地处祁连山国家级自然生态保护区,担负着重大的生态服务功能使命,而国家土壤环境质量标准综合了全国不同地区土壤的平均值,受地形、气候、风向、自然环境等条件影响,必然会使评价结果产生偏差。虽然选用土壤背景值作为污染评价标准较为严苛,易导致评价结果被认为是最严重的^[29]。但是鉴于恢复生态环境和保护自然生态是高寒矿区的首要任务,为维持自然背景的土壤环境质量的限制值,以保障优质的土壤环境,本研究选取矿区外围未受污染的高寒沼泽草甸土壤作为背景值,测试结果显示,高寒草甸土壤具有很大的重金属环境容量。因此选取该土壤背景值作为评价标准虽然苛刻,但是合理适用,具有一定的指导意义。

木里矿区周边的煤矸石、矿渣等各种废石固体来源于不同地质年代,是矿区土壤重构基质的主要组成部分,不同基质中的重金属含量对土壤环境质量的影响在地貌重塑、植被重建过程中具有一定的随机性。研究表明,木里矿区周边土壤重金属含量总体上处于较低水平,并未表现出明显的污染状态,Zn、Cd、Pb、Cr、Ni属于中等变异,其变异系数变化差异较小;Hg和As的变异系数分别达到0.64和0.62,属于高强度变异,充分反映出这两种重金属对采矿活动、矸石堆积等人类活动表现敏感,存在点源污染的迹象。纵观4种评价结果,木里矿区周边土壤并未受到重金属污染或者是局部有轻度污染的迹象,整体上趋于一致,但是具体的评价结果又存在略微的差异,主要原因是各种评价方法的侧重点不同。内梅罗综合污染指数法在部分采样点的污染等级评价上略比单因子污染指数法要严重,原因在于该方法过度地体现了最大污染元素对土壤环境质量的作用,导致评价结果偏大,但是在本研究的评价过程中,两种方法互补,契合度很高。地质累积指数法充分考虑了地质作用对背景值的影响,强调某种重金属污染的程度,与重金属含量呈线性关系,所获得的评价结果与前两种指数法基本吻合,没有明显的差异。潜在生态风险指数是将环境生态效应与毒理学结合起来,其评价结果更偏重于毒理学方面^[30],矿区周边土壤重金属的综合潜在

风险生态指数显示污染程度属于轻微生态危险,Hg和Cd是最主要的贡献因子,这与众多专家学者对煤矿区废弃地周边农田土壤、煤矸石堆场土壤重金属污染研究的结果^[31,32]一致,说明煤矿露天开采、矿渣在排放和长期堆积的过程中,已经对周边的土壤构成威胁,存在一定的潜在生态风险,应该引起相关部门的重视。Cd通过食物链进入动物体内并累积,超过一定剂量就会损害肾脏、骨骼、肺等器官,是环境污染中最危险的5种物质之一,虽然矿区偏碱性的土壤有利于重金属的固定沉积,但环境有效态部分含量较高,随着生态环境的修复治理,土壤的pH势必会发生变化,随之一些潜在的碳酸盐态将发生转换,特别是碳酸盐态比例高的Cd(水溶态和离子交换态)含量增加,将对大通河及祁连山南麓生态环境造成潜在威胁。Hg和Cd的平均值均高出沼泽草甸土壤的背景值,表明长期堆积的矿渣等固体废弃物受降雨和雪水冲刷作用,部分淋溶液流入附近土壤。同时,潜在生态风险指数反映矿区环境受重金属污染的状况,筛选出的Hg和Cd是最重要的两个生态风险因子,这对于重金属的污染防控尤为重要,鉴于Hg和Cd具有较高的毒害系数(分别为40和30),在后期生态修复治理中应予重点关注。虽然矿区周边土壤的重金属处于安全-轻微污染状态,但是土壤中的重金属污染是不可逆的过程,尤其是对于木里这种高寒自然生态环境脆弱的草甸区域,在利用矿渣等固体废料进行土壤重构时,可采用添加钝化剂、改良剂的方式减少重金属进入土壤的可能性,从而降低重金属污染风险。同时,加强对土壤环境持续性监测,尽快使矿坑周边复绿,以防土壤环境恶化。

厘清矿区土壤重金属的来源问题,可以为矿区土壤和邻区生态系统重金属污染的防控提供科学有效的信息。相关性分析在土壤重金属来源分析中已经非常成熟并被广泛应用,通过对木里矿区周边土壤中不同重金属含量的相关性研究,发现不管是在0.01水平还是0.05水平上,大部分重金属元素的相关性都很显著,尤其是Cu与Cr、Pb、Cd、Zn,Cr与Zn、Cd、Pb、Ni,Zn与Cd之间关系紧密,因此,可以将Cu、Zn、Cd、Pb、Cr、Ni归为一类,另一类为Hg和As。综合以上结果可以初步推断,矿坑周边土壤中的重金属在空间分布上相互依存,地球化学性质相近,在相同的外界环境条件下其变化趋势基本一致,具有良好的伴生性。由于木里矿区地处海拔4000多米的高寒区,属于祁连山国家级自然生态保护区,

在煤矿开采以前几乎不存在人为扰动和破坏,因此重金属来源具有相对专一性,可以确定其来源于煤矿的露天开采,在矿区土壤重构过程中应着重对不同重金属之间的相关性与内在联系进行分析,综合防控重金属污染,减少人力、物力的损耗。

4 结论

木里矿区周边土壤中的重金属含量与高寒草甸土壤中的重金属含量差异不明显,Zn、Cd、Pb、Cr 和 Hg 的平均含量略高于背景值,Cu、Ni 和 As 的平均含量略低于背景值,将矿渣、页岩和泥岩粉碎后辅以有机肥料作为覆土,对高寒煤矿区生态环境不会形成风险。

综合评价结果表明,木里矿区周边土壤未受到重金属污染,但是 Hg 和 Cd 对露天开采、矸石堆积等人类活动敏感,应尽快对排土场、煤矸石堆进行清理,减少 Hg 和 Cd 在地表的暴露,并在后期生态环境监测与修复治理过程中予以重点关注,以防土壤环境恶化。

参考文献

- [1] 骆占斌,马静,杨永均,等.近年来土壤重金属研究知识图谱分析及关键主题述评[J].土壤,2019,51(4):760-768.
- [2] 吴仁杰,陈银萍,曹雯婕,等.营养元素与螯合剂强化植物修复重金属污染土壤研究进展[J].中国土壤与肥料,2021(5):328-337.
- [3] ALQADAMI A A, KHAN M A, OTERO M, et al. A magnetic nanocomposite produced from camel bones for an efficient adsorption of toxic metals from water [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 178: 293-304.
- [4] 党志,姚谦,陈锴,等.粤北大宝山矿区污染成因与源头控制技术应用进展[J].农业环境科学学报,2021,40(7):1377-1386.
- [5] 毕银丽,郭晨,王坤.煤矿区复垦土壤的生物改良研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(4):52-59.
- [6] MISHRA V K, UPADHYAYA A R, PANDEY S K, et al. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 930-936.
- [7] 李晶,杨超元,殷守强,等.草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征[J].煤炭学报,2019,44(12):3676-3684.
- [8] 刘军,张成福,孙冬杰,等.草原区煤矿开采对周边旱作农田土壤养分和重金属的影响[J].生态与农村环境学报,2019,35(7):909-916.
- [9] LIANG J, WU H B, WANG X X. Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals and PAHs in the soils of green spaces in Shanghai, China [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2019, 191(6):345.
- [10] REZA S K, BARUAH U, SINGH S K, et al. Geostatistical and multivariate analysis of soil heavy metal contamination near coal mining area, Northeastern India [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(9):5425-5433.
- [11] BHUIYAN M A H, PARVEZ L, ISLAM M A, et al. Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 173(1/2/3):384-392.
- [12] BENHADDYA M L, HADJEL M. Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in surface soils of Hassi Messaoud, Algeria [J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(3):1473-1486.
- [13] ARSLAN Ş, ÇELİK M. Assessment of the pollutants in soils and surface waters around Gümüşköy silver mine (Kütahya, Turkey) [J]. Bulletin Environmental Contamination Toxicology, 2015, 95(4):499-506.
- [14] PANDEY B, AGRAWAL M, SINGH S. Ecological risk assessment of soil contamination by trace elements around coal mining area [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(1):159-168.
- [15] 欧金萍,郑刘根,陈永春,等.顾桥采煤沉陷积水区重金属分布与迁移特征[J].生态环境学报,2018,27(4):785-792.
- [16] 陈军,董少春,尹宏伟,等.淮南潘一矿采煤塌陷积水区水环境健康风险评估[J].煤田地质与勘探,2017,45(4):118-125.
- [17] 熊鸿斌,胡海文,王振祥,等.淮南煤矿区土壤重金属污染分布特征及污染溯源研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(5):686-693.
- [18] 崔龙鹏,白建峰,史永红,等.采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究[J].土壤学报,2004,41(6):896-904.
- [19] 王兴明,张瑞良,王运敏,等.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,2016,25(5):877-884.
- [20] 孙贤斌,李玉成.淮南大通煤矿废弃地土壤重金属空间分布及变异特征[J].地理科学,2013,33(10):1238-1244.
- [21] GYAMFI E, APPIAH-ADJEI E K, ADJEI K A. Potential heavy metal pollution of soil and water resources

- from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana [J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 8: 450-456.
- [22] ZHU D, WEI Y, ZHAO Y H, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the agriculture soil in Xunyang Mining Area, Shaanxi Province, Northwestern China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 101(2): 178-184.
- [23] 李云路, 崔文刚, 刘绥华, 等. 典型喀斯特区稻田土壤重金属 Cd、Pb 污染及膳食风险评价[J/OL]. 广西科学. [2021-12-13]. <https://doi.org/10.13656/j.cnki.gxkx.20211014.001>.
- [24] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [25] 汪冬华, 马艳梅. 多元统计分析与 SPSS 应用 [M]. 2 版. 上海: 华东理工大学出版社, 2018.
- [26] 徐业梅, 张超兰, 黎宁, 等. 广西环江县农田土壤重金属空间变异及分布特征[J]. 广西科学, 2018, 25(6): 701-708.
- [27] 于泓, 王伟, 于扬, 等. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2021, 40(3): 408-424.
- [28] 孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 等. 承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征[J]. 环境科学, 2019, 40(8): 3753-3763.
- [29] 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 876-885.
- [30] 旷攀, 李秋华, 金爽, 等. 贵州高原普定水库水环境重金属的时空分布特征及风险评价[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3): 576-588.
- [31] 贾亚琪, 程志飞, 刘品桢, 等. 煤矿区周边农田土壤重金属积累特征及生态风险评价[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 474-479.
- [32] 杨勇, 刘爱军, 朝鲁孟其其格, 等. 锡林郭勒露天煤矿矿区草原土壤重金属分布特征[J]. 生态环境学报, 2016, 25(5): 885-892.

Soil Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk Assessment in Plateau Alpine Open-pit Coal Mining Area

XU Tai^{1,2,3,4}, E Chongyi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation (Ministry of Education), Qinghai Normal University, Xining, Qinghai, 810008, China; 2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, College of Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai, 810008, China; 3. Academy of Plateau Science and Sustainability, People's Government of Qinghai Province and Beijing Normal University, Xining, Qinghai, 810008, China; 4. College of Energy Engineering, Longdong University, Qingyang, Gansu, 745000, China)

Abstract: The content and pollution status of heavy metals in the soil around the plateau alpine open-pit mining area are closely related to the formulation of the ecological environment governance and restoration plan. The soil around the Muli open-pit coal mining area in Qinghai Province was taken as the research object, a total of 54 samples were collected from the soil around the pit and the meadow soil that had not been disturbed by humans. The content and distribution characteristics of heavy metals in each soil were analyzed, and the single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index, geological accumulation index and potential ecological risk index were used to comprehensively evaluate the pollution degree and potential ecological risks of heavy metals in the soil around the mine pit. The research results showed that there was no significant difference between the heavy metal content the background value in soil around each mine pit. Only the average contents of Zn, Cd, Pb, Cr and Hg was higher than the background value. The overall performance of the heavy metal single factor pollution index in the soil of mining area was $P_{Pb} > P_{Hg} = P_{Cr} > P_{Cd} > P_{Zn} >$

$P_{Cu} > P_{Ni} > P_{As}$, which was within the range of clean and safety. The Nemerow comprehensive pollution index was between 0.55 – 2.52, the average value was 1.39, which belonged to light pollution and partly was in a clean, alert and moderate state. The average value of the accumulation index of all heavy metals was negative, and the pollution level was 0. The single potential ecological risk degree of heavy metals in descending order was $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$. The average value of the comprehensive potential risk ecological index was 110.38, mainly with slight risk. The correlation between Cu and Cr, Pb, Cd, Zn, Cr and Zn, Cd, Pb, Ni, Zn and Cd in the soil around the mining area was obvious, and the spatial distribution was interdependent and had a relatively specific source. Overall, the soil around the mining area was not polluted by heavy metals except for some mild pollution signs in some areas. However, Hg and As were sensitive to human activities such as open-pit mining and gangue accumulation, which should be paid attention in the later stage of ecological environment monitoring and remediation.

Key words: open-cast coal mine; plateau alpine; mine soil; heavy metal; pollution assessment; potential ecological risk; Muli mining area

责任编辑: 梁 晓



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>