

# 贵州煤矸石淋滤液污染区土壤重金属分布特征及污染评价

袁丽, 胡小芬\*

贵州省检测技术研究应用中心, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年2月28日; 录用日期: 2022年4月1日; 发布日期: 2022年4月8日

## 摘要

为探讨煤矸石淋滤液对土壤环境质量的影响, 运用单因子指数法、内梅罗综合指数法、潜在生态风险指数法和地质累积指数法等对土壤中8种重金属元素(Cu、Zn、Cr、Ni、Cd、Pb、Hg、As)进行分析。结果表明, 研究区表层土壤pH值在3.45~6.34之间, 总体呈弱酸性, Cu、Zn、As、Cd、Cr、Ni超出农用地土壤污染风险筛选值(GB15618-2018), 且多种重金属元素含量超出背景值。土壤重金属单项生态风险表明, 研究区土壤为中等生态危害, 内梅罗综合污染指数显示有20%土壤样点达到重度污染水平, 地质累积指数显示土壤环境为中度污染, 潜在生态风险指数显示土壤生态系统受轻微损害, 以Cu污染中严重, 其次为Cd、Hg和Ni。

## 关键词

煤矸石, 淋滤液, 重金属, 分布特征, 污染评价

## Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Coal Gangue Leachate Polluted Area in Guizhou

Li Yuan, Xiaofen Hu\*

Guizhou Testing Technology Research and Application Center, Guiyang Guizhou

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2022; accepted: Apr. 1<sup>st</sup>, 2022; published: Apr. 8<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to explore the effect of coal gangue leachate on soil environmental quality, the sin-  
\*通讯作者。

gle-factor index method, Nemerow comprehensive index method, potential ecological risk index method and geological accumulation index method were used to measure the 8 kinds of heavy metal elements (Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, Pb, Hg, As) in soil for analysis. The results show that the pH value of the surface soil in the study area is between 3.45 and 6.34, and the overall is weakly acidic. Cu, Zn, As, Cd, Cr and Ni exceed the soil pollution risk screening value of agricultural land (GB15618-2018), and the contents of several heavy metal elements exceed the background value. The single ecological risk of heavy metals in the soil shows that the soil in the study area is of moderate ecological hazard, the Nemerow comprehensive pollution index shows that 20% of the soil samples have reached the level of severe pollution, the geological accumulation index shows that the soil environment is moderately polluted, and the potential ecological risk index shows that the soil environment is moderately polluted. The ecosystem was slightly damaged, with Cu pollution being the most serious, followed by Cd, Hg and Ni.

## Keywords

Gangue, Coal-Washing Water, Heavy Metal, Distribution Characteristics, Pollution Assessment

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

贵州省煤矿资源丰富, 煤炭生产企业众多, 在煤炭开采和洗选过程中会产生大量煤矸石[1] [2] [3]。根据王贤荣等[4]以及高海燕等[5]研究表明, 煤矸石浸溶液显酸性, 煤矸石长期堆放会影响周边土壤, 使土壤呈弱酸性, 土壤中重金属元素含量增加, 土壤环境、水环境受危害; 同时, 煤矸石在自然风化和降雨淋溶过程, 会释放大量重金属元素, 沿地表扩散迁移对邻近区域土壤环境造成影响, 影响土壤生态系统、地下水环境以及农产品质量, 甚至可通过食物链危及人体健康[6]-[12]。

目前, 众多研究人员主要在煤矸石堆放造成的环境影响、煤矸石重金属溶出特性、煤矸石淋滤液对植物生长影响等方面进行了研究, 如: 煤矸石堆放对水环境的影响——以山东省一些煤矸石堆为例[13]、煤矸石在动态淋溶条件下重金属的溶出特性[14]、煤矸石淋滤液对柳叶空心菜幼苗生长的影响[15]。关于煤矸石淋滤液释放的重金属在土壤中的分布情况以及对农用地土壤的危害程度亟需探明, 文章基于工作实际, 以贵州楼下镇洗煤厂煤矸石淋滤液污染区域为研究对象, 通过单因子指数法、内梅罗综合指数法、潜在生态风险指数法和地质累积指数法等多种评价方法, 查明污染区土壤重金属分布特征, 为煤矸石淋滤液污染区土壤环境修复提供科学支持, 对土壤重金属污染防治具有科学意义。

## 2. 样品采集与实验方法

### 2.1. 研究区域概况及样品布置

贵州楼下镇洗煤厂建于 2011 年, 2014 年停产, 场区内堆存有大量煤矸石, 降雨天产生大量的煤矸石淋滤液, 由于坡度较陡, 淋滤液沿着地表径流至下游农用地环境中, 导致农用地土壤受不同程度的影响。根据 Google Earth 历史卫星影像图及现场人员访谈, 研究区农用地受煤矸石淋滤液影响已有 5 年以上。

于 2020 年 10 月采用系统布点[16]选取 35 个土壤采样点位, 每个点位采集 3 个平行样, 共采集 105

个土壤样品, 采样深度为 0~20 cm, 每个点位用木铲采取土壤样品约 1.5 kg 装入密封袋带回实验室, 经自然风干、去除异物、研磨、过筛装入自封袋备用。采样点位见图 1。



Figure 1. Sampling distribution map in the study area

图 1. 研究区采样布点图

## 2.2. 样品的测定

土壤样品的 pH 值根据 HJ 962-2018 [17] 的方法来测定(水土比 2.5:1)。称取 0.2000 g 土样于消解罐中, 经过 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF 消解后, Cu、Zn、Cr 和 Ni 采用原子吸收分光光度计法(HJ 491-2019) [18] 进行测定, Cd 和 Pb 采用石墨炉原子吸收分光光度计(GB/T 17141-1997) [19] 进行测定; 称取 0.2000 g 土样用王水消解, Hg 采用原子荧光光度计法(GB/T 22105.1-2008) [20] 进行测定, As 经过硫脲和抗坏血酸溶液处理后, 采用原子荧光光度计法(GB/T 22105.2-2008) [21] 进行测定。测定全程序采用空白样、10% 平行样和国家土壤样品标准进行质量控制。

## 3. 重金属污染评价方法

### 3.1. 评价标准

对研究区土壤中重金属 Cu、Zn、Cr、Ni、Cd、Pb、Hg、As 的污染评价采用贵州省土壤背景值[22] 和《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)农用地土壤污染风险筛选值(研究区基本为水田, 标准值见表 1), 农用地土壤污染风险筛选值指农用地土壤中污染物含量等于或者低于该值的, 对农产品质量安全、农作物生长或者土壤生态环境风险低, 一般情况下可以忽略; 超过该值的, 对农产品的质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险, 应当加强土壤环境监测和农产品协同监测, 原则上应当采取安全利用措施[23]。

**Table 1.** Soil environmental quality standards and soil background values in Guizhou  
**表 1.** 土壤环境质量和贵州省土壤背景值(mg/kg)

指标	风险筛选值				背景值
	pH ≤ 5.5	5.5 < pH ≤ 6.5	6.5 < pH ≤ 7.5	pH > 7.5	
Cd	0.3	0.4	0.6	0.8	0.4
Hg	0.5	0.5	0.6	1	0.13
As	30	30	25	20	13.48
Pb	80	100	140	240	33.57
Cr	250	250	300	350	98.98
Cu	150	150	200	200	34.5
Ni	60	70	100	190	39.3
Zn	200	200	250	300	104.21

### 3.2. 单因子指数法

对研究区土壤重金属污染评价采用单因子指数法( $P_i$ ), 计算公式如下:

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

公式(1)中:  $P_i$ 为污染物  $i$  的污染指数;  $C_i$ 为污染物  $i$  的实测值;  $S_i$ 为污染物  $i$  的环境质量标准值。

### 3.3. 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法(NPI)能全面反映各污染物对土壤污染的不同程度, 同时又突出高浓度对土壤环境质量的影响, 可反映多种污染物的综合污染水平[24] [25], 其公式如下:

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

公式(2)中:  $P_n$ 为综合污染指数;  $P_{i\max}$ 为各单项污染指数( $P_i$ )中的最大值;  $P_{i\text{ave}}$ 为各单因子污染指数( $P_i$ )的平均值, 根据单因子指数( $P_i$ )和综合污染指数( $P_n$ )的大小可将土壤污染程度划分为 5 级, 见表 2。

### 3.4. 潜在生态风险指数法

采用瑞典学者 Hakanson 提出的潜在生态风险指数进行评价, 该指数可反应某一环境中各种重金属的风险等级[26], 潜在生态风险指数(RI)计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_p^i}{C_n^i} \quad (3)$$

公式(3)中: RI 为多种潜在生态风险指数,  $E_r^i$ 为单项金属潜在生态风险因子,  $T_r^i$ 为重金属  $i$  的毒性系数,  $C_f^i$ 为单一金属污染系数,  $C_n^i$ 为土壤重金属  $i$  的背景值,  $C_p^i$ 为土壤重金属  $i$  的实测浓度。土壤重金属毒性系数  $T_r^i$  分别为[23] Cu = 5、Zn = 1、Cr = 2、Ni = 5、Cd = 30、Pb = 5、Hg = 40、As = 10。

### 3.5. 地质累积指数法

地质累积指数法( $I_{geo}$ )由德国科学家 Muller 在 20 世纪 60 年代提出, 此方法考虑了环境背景值和人为活动对重金属的影响, 已被广泛应用于人为活动引起的土壤重金属污染研究中[27], 该指数将土壤中重金属的污染程度分为 7 个等级, 代表不同的重金属污染程度[28]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left[ \frac{C_n}{k \times B_n} \right] \quad (4)$$

公式(4)中,  $I_{geo}$  为地质累积指数;  $C_n$  为样品中元素  $n$  的实测值;  $B_n$  为元素  $n$  的地球化学背景值;  $k$  为修正系数, 用于消除岩石差异、成岩作用等因素可能会引起背景值的波动而设立, 一般取 1.5 [29]。

**Table 2.** Classification table of evaluation index  
**表 2.** 评价指数分级表

$P_i$	污染水平	PI	污染水平	$E_r^i$	RI	风险水平	$I_{geo}$	污染水平
$P_i \leq 1$	无	$PI \leq 0.7$	无	$E_r^i < 40$	$RI < 150$	轻微	$I_{geo} \leq 0$	无
$1 < P_i \leq 2$	轻微	$0.7 < PI \leq 1$	轻微	$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等	$0 < I_{geo} \leq 1$	无 - 中度
$2 < P_i \leq 3$	轻度	$1 < PI \leq 2$	中度	$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	强	$1 < I_{geo} \leq 2$	中度
$3 < P_i \leq 5$	中度	$2 < PI \leq 3$	重度	$160 \leq E_r^i < 320$	-	很强	$2 < I_{geo} \leq 3$	中 - 强度
$P_i > 5$	重度	$PI > 3$	严重	$E_r^i \geq 320$	$RI \geq 600$	极强	$3 < I_{geo} \leq 4$	强度
							$4 < I_{geo} \leq 5$	强 - 极强
							$5 < I_{geo}$	极强

### 3.6. 数据分析

常规数据统计分析以及图表制作采用 Origin2021、Excel、ArcGIS10.2 完成。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 研究区土壤 pH 值及重金属含量

研究区农田土壤重金属表含量见表 3, 表层土壤的 pH 值在 3.45~6.34 之间(均值为 4.81, 变异系数为 0.16), 表明表层土壤总体呈酸性。此外, Cu、Zn、Hg、As、Cd、Cr、Pb、Ni 这 8 种重金属含量表现出较大的差异, 其含量(mg/kg)分别为 63~223、56~241、0.0624~0.256、7.57~32.3、0.0422~0.558、78~268、10.8~36.5、15~158。8 种重金属元素的变异系数顺序为 Cd (0.60) > Ni (0.50) > Hg (0.40) > As (0.32) > Zn (0.29) > Cu (0.28) > Cr (0.25) > Pb (0.24), 不同于 pH 值(0.16)较小的变异系数, Cd、Ni、Hg 较高的变异系数表明不同的采样点这 3 种重金属含量差异明显, 离散性较大, 说明这 3 种重金属受外界因素的影响较大, 空间分布差异明显。Cu、Zn、Cr、Pb 的变异系数较低, 表明 Cu、Zn、Cr、Pb 受外界干扰影响较小。

**Table 3.** Soil pH and heavy metal content  
**表 3.** 土壤 pH 值与重金属含量(mg/kg)

	pH	Cu	Zn	Hg	As	Cd	Cr	Pb	Ni
T1	4.29	223	241	0.0878	24.1	0.558	268	36.5	113
T2	4.98	84	117	0.0729	25.2	0.281	197	15.7	62
T3	4.99	100	135	0.0745	20.8	0.249	199	18.5	63
T4	5.59	98	129	0.0795	16.8	0.262	205	19.1	66
T5	5.72	117	141	0.0720	18.1	0.311	206	17.7	78
T6	5.45	102	122	0.0625	12.3	0.277	167	16.8	52

## Continued

T7	6.32	100	126	0.0794	9.82	0.260	121	16.8	65
T8	5.13	104	159	0.0975	7.57	0.0422	195	15.2	97
T9	5.76	118	167	0.0624	13.1	0.265	213	18.4	63
T10	5.46	117	165	0.0795	15.7	0.282	160	16.9	69
T11	5.62	114	135	0.0894	25.2	0.323	181	18.2	72
T12	6.34	128	132	0.0729	13.0	0.168	173	12.8	61
T13	5.37	72	99	0.126	19.9	0.231	134	16.8	41
T14	4.51	121	113	0.107	15.5	0.259	171	15.9	54
T15	5.32	143	80	0.124	14.9	0.143	150	13.5	35
T16	5.55	82	105	0.0851	9.53	0.166	165	14.6	56
T17	3.63	111	85	0.124	16.5	0.107	148	13.4	41
T18	3.49	88	56	0.158	12.7	0.0859	91	14.2	74
T19	4.86	153	147	0.0798	11.7	0.225	144	16.8	158
T20	4.87	137	133	0.0660	8.84	0.257	166	14.8	65
T21	4.77	146	129	0.0874	11.9	0.280	79	16.3	56
T22	4.88	156	146	0.0926	18.4	0.360	78	18.9	62
T23	5.15	158	164	0.127	32.3	0.529	101	20.9	51
T24	5.02	135	131	0.256	17.3	0.195	185	19.8	78
T25	3.45	108	95	0.163	27.6	0.0727	151	21.5	33
T26	3.92	63	64	0.194	24.5	0.0451	121	16.9	20
T27	4.42	129	135	0.135	19.5	0.137	168	19.8	71
T28	4.09	122	124	0.152	21.4	0.128	169	21.9	51
T29	3.64	83	79	0.161	22.6	0.0843	134	18.6	23
T30	3.82	83	89	0.204	25.8	0.0974	134	18	22
T31	4.37	106	108	0.141	21.1	0.119	164	17.6	37
T32	3.91	66	76	0.169	17.1	0.0796	162	15.9	15
T33	3.92	88	91	0.191	19.7	0.0805	146	15.8	19
T34	4.44	100	116	0.127	22.8	0.138	152	10.8	36
T35	5.25	82	95	0.156	19.6	0.0759	138	13.4	24
最小值	3.45	63	56	0.0624	7.57	0.0422	78	10.8	15
最大值	6.34	223	241	0.256	32.3	0.558	268	36.5	158
平均值	4.81	112.49	120.83	0.12	18.08	0.20	158.17	17.39	56.66
中值	4.88	108.00	124.00	0.11	18.10	0.20	162.00	16.80	56.00
超标率(%)	—	11.43	2.857	0.00	2.857	14.29	2.86	0.00	48.57
标准差	0.79	31.86	35.60	0.05	5.86	0.12	39.17	4.17	28.48
变异系数	0.16	0.28	0.29	0.40	0.32	0.60	0.25	0.24	0.50

根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618-2018)农用地土壤污染风险筛选值标准, 研究区土壤中有 Cu、Zn、As、Cd、Cr、Ni 超出农用地土壤污染风险筛选值, 这几种重金属含量超标率为 Ni (48.57%) > Cd (14.29%) > Cu (11.43%) > Zn (2.86%) = As (2.86%) = Cr (2.86%)。与贵州省土壤背景值相比, Cd、Hg、Pb (平均值)未超出贵州省土壤背景值, As、Cr、Cu、Ni、Zn (平均值)超出贵州省土壤背景值的 1.3、1.6、3.3、1.4、1.2 倍, 表明 As、Cr、Cu、Ni、Zn 这几种元素在环境中存在不同程度的积累, 其中 Cu 元素积累最明显。

## 4.2. 重金属污染评价

本研究以贵州省土壤背景值作为参比值, 对所采样本中超出背景值的 As、Cr、Cu、Ni、Zn 元素进行单项污染指数统计, 统计结果见表 4, 研究区 As、Cr、Cu、Ni、Zn 的单项污染指数范围分别为 0.56~2.40、0.79~2.71、1.83~6.46、0.79~2.88、0.54~2.31, 从污染程度看, Cu 污染程度最严重, 样点重度污染比例为 57%; As、Cr、Ni、Zn 处于安全状态的比例分别为 29%、9%、9%、31%, 这几种重金属元素的污染程度从大到小的依次为 Cu > Ni > Cr > As > Zn。从内梅罗综合污染指数来看, 研究区土壤内梅罗综合污染指数在 1.83~5.12 范围, 均值为 2.69, 采样点  $PI > 3$ , 达到重度污染水平的比例为 20%, Cu 为研究区土壤污染的主要因素, 这与仝双梅[24]等研究相一致。

**Table 4.** Soil heavy metal pollution index and pollution degree  
**表 4.** 土壤重金属污染指数及污染程度

指标	$P_i$					PI
	As	Cr	Cu	Ni	Zn	
范围	0.56~2.40	0.79~2.71	1.83~6.46	0.79~2.88	0.54~2.31	1.83~5.12
均值	1.34	1.60	3.26	1.60	1.16	2.69
安全%	29	9		9	31	
警戒线%						
轻污染%	66	77	43	77	66	40
中污染%	6	14	37	14	3	40
重污染%			57			20

## 4.3. 土壤重金属潜在生态风险评价

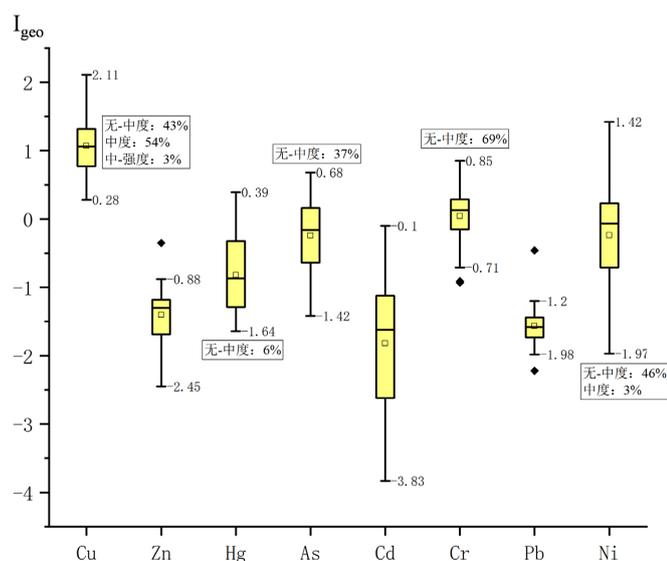
根据土壤重金属潜在生态风险评价表 5 可知, 土壤中 Cu、Zn、As、Cr、Pb、Ni 的单项生态风险系数( $E_r^i$ )均小于 40, 范围分别为 9.13~32.32、0.54~2.31、5.62~23.96、1.58~5.42、1.61~5.44、1.91~20.10, 这几种元素表现为轻微生态危害; 土壤中 Hg 的单项生态风险系数范围为 19.20~78.77 (均值为 36.54), 有 66% 的土壤样点处于轻微生态危害, 而 34% 的土壤样点则处于中等生态危害; 土壤中 Cd 的单项生态风险系数范围为 3.19~41.85 (均值为 15.37), 有 3% 的土壤样点 Cd 处于中等生态危害, 其余土样均处于轻微生态危害。从土壤重金属单项生态风险系数均值分析, 这几种土壤重金属元素的生态危害程度依次为 Hg > Cu > Cd > As > Ni > Cr > Pb > Zn, Hg、Cu、Cd 是主要的潜在生态风险因子; 从多种重金属的潜在生态风险指数(RI)分析, 研究区 RI 范围值为 71.23~146.60, 均值为 95.78 (小于 150), 研究区 100% 土壤样点处于中等生态危害程度及以下。

**Table 5.** Statistical table of potential ecological hazards of heavy metals in soil  
**表 5.** 土壤重金属潜在生态危害统计表

指标	$E_r^i$								RI
	Cu	Zn	Hg	As	Cd	Cr	Pb	Ni	
范围	9.13~ 32.32	0.54~ 2.31	19.20~ 78.77	5.62~ 23.96	3.19~ 41.85	1.58~ 5.42	1.61~ 5.44	1.91~ 20.10	71.23~ 146.60
均值	16.30	1.16	36.54	13.41	15.37	3.20	2.59	7.21	95.78
轻微生态危害%	100	100	66	100	97	100	100	100	100
中等生态危害%			34		3				

#### 4.4. 土壤重金属地质累积指数法评价

经统计(图 2), 研究区土壤重金属元素 Zn、Cd、Pb 的  $I_{geo}$  均小于 0, 未受污染; Cu 有 43% 的样品点位土壤为无-中度污染水平、54% 样品点位土壤为中度污染水平、3% 样品点位土壤为中-强度污染水平; Ni 有 46% 的样品点位土壤为无-中度污染水平、3% 样品点位土壤为中度污染水平; Hg、As、Cr 分别有 6%、37%、69% 样品点位土壤为无-中度污染水平; 研究区土壤重金属以 Cu 污染较为严重, 其次为 Ni、Cr、As、Hg。



**Figure 2.** Statistical chart of soil heavy metal geological accumulation index

**图 2.** 土壤重金属地质累积指数统计图

## 5. 结论

研究区土壤 pH 值在 3.45~6.34 之间(均值为 4.81), 土壤总体呈弱酸性, 多种重金属超出农用地土壤污染风险筛选值(GB15618-2018)以及土壤背景值, 土壤环境受到污染, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境存在风险, 应引起重视。通过多种评价结果分析, 土壤生态系统受到轻微损害, 土壤重金属中以 Cu 污染最严重, 其次为 Cd、Hg 和 Ni, 应对土壤环境进行修复, 降低其对周围环境的影响。

## 参考文献

- [1] 董金龙, 赵婷婷, 等. 山西部分矿区煤矸石中重金属含量分析及迁移转化研究[J]. 煤炭加工与综合利用, 2021(5): 93-98.
- [2] 刘炯天. 煤炭工业“三废”资源综合利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [3] 刘迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 60-62.
- [4] 王贤荣, 张维, 等. 煤矸石长期堆放对周边土壤环境的影响及污染评价[J]. 广西轻工业, 2010, 26(5): 84-86.
- [5] 高海燕, 周建伟, 等. 合山市东矿矿区煤矸石淋滤液特征及其环境影响分析[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(2): 90-93+103.
- [6] 董兴玲, 董书宁, 等. 古土壤层对煤矸石淋滤液中典型污染物的防污性能[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1957-1965.
- [7] 叶晟, 赵静, 等. 矿区土壤重金属污染生态修复综述[J]. 区域治理, 2020(3): 120-122.
- [8] Moser, S.C. (1996) Partial Instructional Module on Global and Regional Land Use/Cover Change: Assessing the Data and Searching for General Relationships. *GeoJournal*, **39**, 241-283. <https://doi.org/10.1007/BF00188374>
- [9] 马保国, 胡镇琪, 等. 污泥和粉煤灰覆盖煤矸石山防治污染的模拟试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1553-1559.
- [10] 赵燕, 李壮福, 等. 煤矸石中有害微量元素研究现状及趋势[J]. 能源技术管理, 2010(1): 124-126.
- [11] 姜利国. 煤矸石山中多组分溶质释放-迁移规律的研究[D]: [博士学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2011.
- [12] 王心义, 杨建, 等. 煤矸石山周围地下水污染状况[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(2): 326-330.
- [13] 余运波, 汤鸣皋, 等. 煤矸石堆放对水环境的影响——以山东省一些煤矸石堆为例[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 163-169.
- [14] 张敬凯, 王春红, 等. 煤矸石在动态淋溶条件下重金属的溶出特性[J]. 煤炭技术, 2018, 37(12): 323-325.
- [15] 侯沁文. 煤矸石淋滤液对柳叶空心菜幼苗生长的影响[J]. 长治学院学报, 2015, 32(5): 21-26.
- [16] 国家环境保护总局. HJ/T166-2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [17] 生态环境部. HJ962-2018 土壤 pH 值的测定电位法[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [18] 生态环境部. HJ491-2019 土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定火焰原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国环境出版社, 2019.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T17141-1997 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法[S]. 北京: 国家环境保护总局, 1997.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T22105.1-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法(第 1 部分:土壤中总汞的测定) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T22105.2-2008 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法(第 2 部分:土壤中总砷的测定) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [22] 蔡大为, 李龙波, 等. 贵州耕地主要元素地球化学背景值统计与分析[J]. 贵州地质, 2020, 37(3): 233-239.
- [23] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行) [S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [24] 仝双梅, 连国奇, 等. 贵州典型煤矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(3): 112-117+125.
- [25] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sediment Logical Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [26] Han, Y.M., Du, P.X., Cao, J.J., et al. (2006) Multivariate Analysis of Heavy Metal Contamination in Urban Dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, **355**, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.026>
- [27] 张婉璐, 吴云. 基于内梅罗指数法与地质累积指数法对海宁市土壤重金属污染状况评价的比较与分析[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(12): 13-15+20.
- [28] 易秀, 谷晓静, 等. 陕西省泾惠渠灌区土壤重金属地质累积指数评价[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(3): 288-291.
- [29] 王冠森, 柴民伟, 等. 深圳典型红树林湿地重金属累积特征比较研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 862-870.