

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组岩土质量综合评价

崔 潇, 周妍如, 刘孝阳, 白中科

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

CUI Xiao, ZHOU Yanru, LIU Xiaoyang, and BAI Zhongke

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于聚氨酯复合基材的岩质边坡客土生态修复试验研究

An experimental study of the ecological restoration of rock slope based on polyurethane composite-based materials

喻永祥, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 李明, 李伟, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 174-181

典型草原露天煤矿区地下水环境演化机理研究

Evolution mechanism of a groundwater system in the opencast coalmine area in the typical prairie

冯海波, 董少刚, 张涛, 李铤, 刘晓波, 李政葵, 王超 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 163-163

改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用

A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou

范明明, 裴向军, 杜杰, 肖维阳, 周立宏, 杨华阳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 183-190

承德市富硒土壤区镉的地球化学特征及生态风险评价

Geochemical characteristics and ecological risk assessment of cadmium in selenium-rich soil of Chengde City in Hebei Province

杨帆, 王京彬, 王晨, 何泽新, 贾凤超, 黄行凯, 张晓敏, 刘卫, 崔晓英 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 163-172

基于地质建造探索承德市土地利用优化路径

Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City

卫晓峰, 王京彬, 孙厚云, 殷志强, 何泽新, 贾凤超, 李霞, 刘宏伟, 张竞 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 15-25

大牛地气田区地下水水质模糊综合评价

Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater quality of the Daniudi gas field area

梁乃森, 钱程, 穆文平, 段扬, 朱阁, 张日升, 武雄 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 52-59



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202008053

平朔露天煤矿复垦区不同地质层组 岩土质量综合评价

崔 潇¹, 周妍如¹, 刘孝阳², 白中科^{1,3,4}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心, 北京 100012; 3. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100035)

摘要: 露天煤矿生态地质环境系统恢复过程中, 排于地表的不同年代地质层组的岩土剥离物都有可能成为复垦土壤母质。为科学合理利用矿区岩土剥离物, 重构高质量复垦土壤, 并指导后期分类排放, 以平朔露天矿区黄土母质作为对照, 评价不同类型岩土理化性状差异, 从复垦土壤母质来源进行造地的源头控制, 为露天煤矿土地复垦与生态修复提供依据。结合单项养分含量及有益微量元素含量分析结果, 借助修正的内梅罗综合指数法, 评价各岩土层肥力质量; 借助单因子质量指数法, 评价各岩土层环境质量。结果表明: 各岩土层综合肥力系数位于 0.40~1.26 范围内, 属贫瘠或一般水平; 安家岭矿中 2 个煤矸石层的有机质或全氮含量、上部页岩层的全钾含量, 以及东露天矿中炭质泥岩层的全磷含量丰富, 显著高于黄土母质层; 东露天矿底部细砂岩层及安家岭矿中泥灰岩层硫含量过高; 东露天矿镉元素环境质量指数为 1.05, 属轻微污染等级; 安家岭矿底部细砂岩层 pH 值低至 4.25, 酸度过大。平朔露天矿大多岩土层环境质量较好, 但综合肥力质量较差, 其中单项养分含量丰富, 环境质量安全且易于风化的岩土层, 适宜作为重构复垦土壤的备选材料。

关键词: 生态地质环境; 土地复垦; 生态修复; 土壤母质; 黄土区; 平朔露天煤矿

中图分类号: S154.1; X141

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)02-0164-10

Comprehensive evaluation of rock and soil quality of different geological stratum groups in Pingshuo opencast coal mine reclamation area

CUI Xiao¹, ZHOU Yanru¹, LIU Xiaoyang², BAI Zhongke^{1,3,4}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Technical Centre for Soil, Agricultural and Rural Ecology and Environment, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 3. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 4. Ecological Restoration Engineering Technology Innovation Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: In order to make scientific and rational use of waste rock and soil in mining areas, guide its classification and discard and reconstruct high quality reclaimed soil, the loess parent material in the Pingshuo opencast mining area is used as a control to analyze the differences in physical and chemical properties of different types of rock and soil layers, and the source control of land reclamation is conducted from the source of the

收稿日期: 2020-08-22; 修订日期: 2021-01-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0206802); 中国地质大学(北京)大学生创新创业训练计划项目(X201911415284)

第一作者: 崔潇(1999-), 女, 主要研究方向为土地整治。E-mail: CuiX0927@163.com

通讯作者: 白中科(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地整治与生态修复、环境影响评价。E-mail: baizk@cugb.edu.cn

reclaimed soil parent material. It may provide a basis for land reclamation and ecological restoration in opencast coal mines. Combining the analysis results of the single nutrient content and beneficial trace element content, with the help of the modified Nemero comprehensive index method, the fertility quality of each rock and soil layer is comprehensively evaluated. With the single factor quality index method, the environmental quality of each rock and soil layer is also evaluated. The comprehensive fertility coefficient of each rock and soil layer is in the range of 0.40 to 1.26, which is barren or general. The organic matter or total nitrogen content of the two gangue layers in the Anjialing Mine, the total potassium content of the upper shale layer in the Anjialing Mine, and the total phosphorus content of the carbonaceous mudstone layer in the East Opencast Mine are rich, which are significantly higher than those of the loess parent material layer. The fine sandstone layer at the bottom of the East Opencast Mine and the marl layer in the Anjialing Mine have excessively high sulfur content, and the former cadmium element environmental quality index is 1.05, which is a slight pollution level. The pH value of the fine sandstone layer at the bottom of the Anjialing Mine is as low as 4.25 and the acidity is too high. Most of the rock and soil layers in the Pingshuo opencast mine are of good environmental quality but poor comprehensive fertility quality. The rock and soil layers with safe environmental quality, which have rich individual nutrient contents and are easily weathered, can be used as the alternative material for rebuilding the reclaimed soil. It is conducive to improving the quality of the reclaimed soil and improving the productivity of reclaimed soil in a short time.

Keywords: eco-geological environment; land reclamation; ecological restoration; soil parent material; loess area; Pingshuo opencast coal mine

煤炭资源大规模开采与利用推动了我国经济增长,但同时带来剧烈的景观扰动、生态破坏、地质灾害等问题^[1-3],人为地质作用对生态环境产生较大影响,从地质角度研究生态问题,进行矿山生态环境建设具有重要意义。土壤重构是矿区生态系统恢复重建“五阶段”的核心^[4];成土因素学说表明,母质是土壤肥力的基础,露天煤矿不同年代地质层组岩土剥离物都有可能排于地表成为复垦土壤母质,其很大程度上决定复垦后土壤的肥力状况和稳定性。因此,对不同类型岩土质量进行综合评价是重构高质量复垦土壤的重要前提^[5]。

国内外关于露天煤矿复垦区重构土壤的研究多集中于土壤改良剂及表土替代材料研制。如,胡振琪等^[6]研制煤基混合物用于复垦土壤改良;RAM等^[7]进行长期田间试验表明褐煤粉煤灰能够改善复垦土壤质地、肥力和生产力;况欣宇等^[8]进行试验研究表明当表土:煤矸石:岩土剥离物=3:3:4时重构效果最佳;Wilson-kokes等^[9]通过长期试验发现风化棕色砂岩更适合作为表土替代物,土壤重构材料及方式具有一定地域差异性。现有研究多认为,由于侵蚀作用黄土区表层土壤肥力已与下层黄土母质相差不大,可以在地表直接覆盖土源丰富的黄土母质^[10-11];且多侧重于黄土区复垦土壤质量演变规律、影响因素及培肥

措施的研究^[12-14]。从土壤母质来源角度,对不同地质层组各岩土层系统分析的研究较少,对岩土剥离物的合理利用及分类排弃缺乏充分指导依据。因此,综合评价不同地质层组岩土质量,进行造地的源头控制,对于修复矿区极度退化的生态具有积极作用。

平朔露天矿是典型黄土区大型露天煤矿。本文以黄土母质层作为对照,探究其生态地质背景,对比矿区不同年代地质层组各岩土层理化性状差异,识别适宜植被生长的表土替代材料或土壤改良物质,并对有害物质相对富集的岩土层进行源头控制,促进植物与地质因子协同。结合采排工艺构建优质的土体剖面构造^[15],能在较短时间内提高复垦土壤生产力,有利于矿区生态修复。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

平朔露天矿位于山西省朔州市平鲁区,包括安太堡露天煤矿、安家岭露天煤矿和东露天煤矿,属黄土高原晋陕蒙接壤黑三角地带,煤炭资源丰富,是我国重要能源基地之一。矿区属典型温带干旱半干旱大陆性季风气候,冬春干旱少雨、寒冷多风,夏秋降雨集中、温凉少风。地处黄土低山丘陵区,海拔高度1300~1400 m,地势北东高、南西低,黄土广布、水蚀

风蚀较严重,属生态脆弱区。本区地带性土壤为栗钙土与栗褐土过渡带,土壤物理风化作用强烈,土质偏砂,土体干旱,土壤贫瘠。地带性植被类型为干草原,没有天然森林,植被覆盖率较低。矿区所在原地表出露地面主要为第四系黄土和新近系红土,平均堆积厚度约 35m。地质层位较平缓,没有较大断层和褶皱,原始地貌地质剖面层组为中石炭统(C_2)、上石炭统(C_3)、下二叠统(P_1)、上新统(N_2)、下更新统(Qp_1)、上更新统(Qp_3)。平朔露天矿采用“采、运、排、复一体化”,百余米厚岩土剥离物将成为构筑复垦土地的基础和来源,上覆岩土经大型机械挖掘运输,堆置形成松散堆积状的排土场,外排土场在原地层层序上增加 100~150 m 岩土排弃层,内排土场在采空区缺损原

地层层序情况下增加 300~350 m 岩土排弃层。随采掘进度推进,排土场范围不断扩大。

1.2 样品采集与处理

2017年6月27日至7月1日,采集平朔露天矿三大矿坑共 31 个岩土样点,包括安家岭矿 11 个,安太堡矿 8 个,东露天矿 12 个,采样点位置分布见图 1。深入露天矿坑底部,自下而上采集不同地质层组各类岩石,直到近地表红土和黄土。在情况允许下,尽量使采集样点呈垂直直线,如情况特殊,无法进行垂直剖面采集,则使采样点尽量集中于同一采矿坡面上,减少由于地层倾斜或断层带来的采样误差。通过 GPS 软件记录采样位置、高程和矿坑下采样运动轨迹等信息,记录岩性描述。

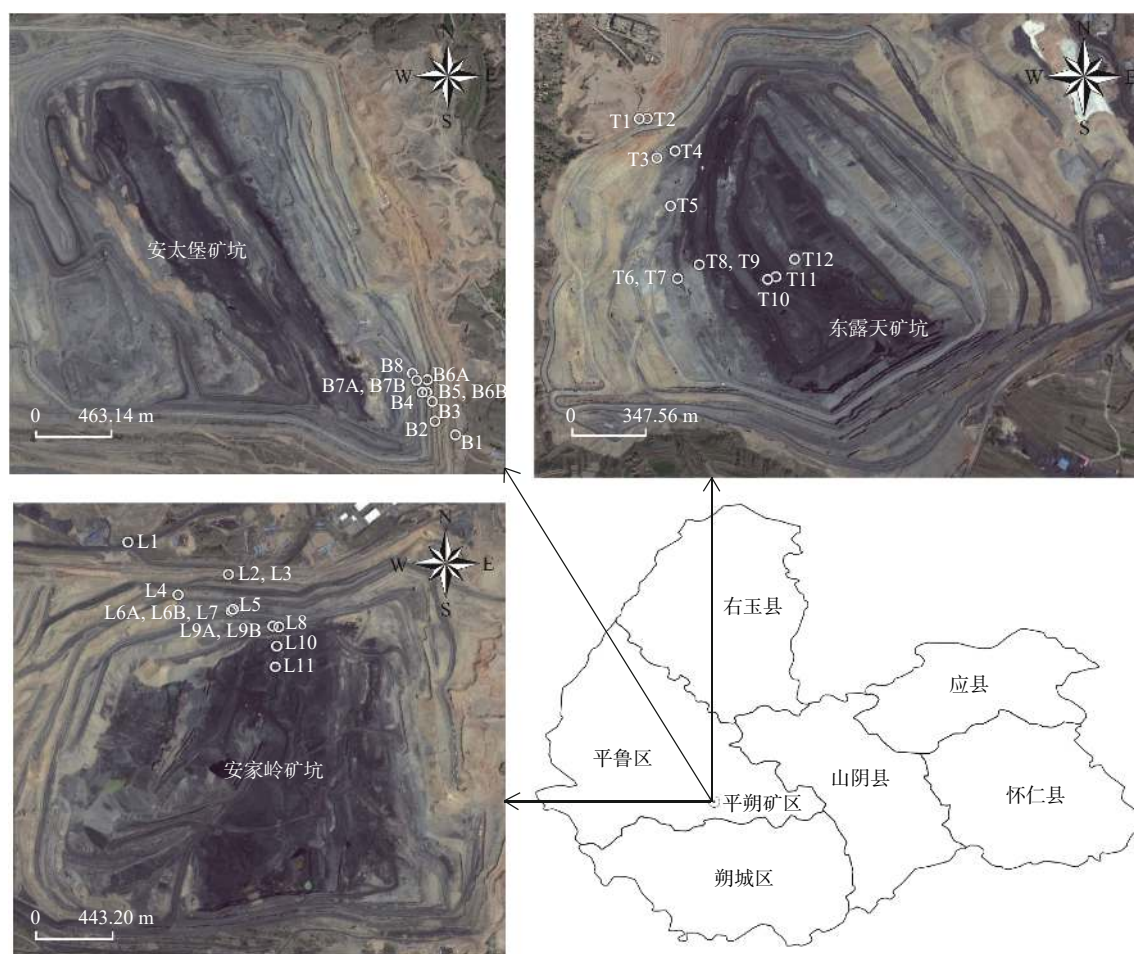


图 1 平朔露天矿坑采样点位置分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points in Pingshuo opencast mine

采样点信息及样品描述如表 1, 样品测试指标包括对植物生长有影响的营养元素、重金属或其他有毒元素含量。养分含量相关测试项目包括 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾等 7 项, pH 值

采用电位法测定, 有机质含量采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定, 全氮含量采用开氏消煮法测定, 全磷含量采用酸溶-钼锑抗比色法测定, 全钾含量采用氢氧化钠熔融法测定, 有效磷含量采用碳酸氢钠法测

定,速效钾含量采用四苯硼钠比浊法测定。有益微量元素测试项目包括 Fe、Mn、Mo、B、S 等 5 项,采用光谱分析法测定。重金属或其他有毒元素测试项目包括 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Hg、As、F 等 9 项,重金属采用电感耦合等离子体质谱法测定,F 元素采用离子选择电极法测定。各元素分析及样品加工要求均按《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130—2006)要求进行。

表 1 采样点信息及样品描述
Table 1 Sampling points informations and samples descriptions

安太堡矿坑				安家岭矿坑				东露天矿坑			
编号	深度/m	岩土性状	地层	编号	深度/m	岩土性状	地层	编号	深度/m	岩土性状	地层
B1	13	黄土	第四系	L1	7	黄土	第四系	T1	29	黄土	第四系
B2	18	红土	新近系	L2	53	红土	新近系	T2	36	红土	新近系
B3	112	砂岩	二叠系	L3	57	细砂岩		T3	89	红土	新近系
B4	115	中细粒砂岩		L4	95	页岩	二叠系	T4	103	细砂岩	
B5	116	变质细砂岩		L5	108	细砂岩		T5	122	炭质泥岩	二叠系
B6A	118	砂质页岩	石炭系	L6A	118	煤矸石(炭质页岩)		T6	135	泥灰岩夹灰黄色泥云岩	
B6B		风化物		L6B				T7	142	中细粒花岗岩闪长岩	
B7A		中细粒花岗岩闪长岩		L7	126	炭质泥岩		T8	153	中粒二长花岗岩	
B7B	143	风化物		L8	163	泥灰岩,层间或裂隙见方解石细脉充填	石炭系	T9	156	泥灰岩	石炭系
B8	147	泥灰岩		L9A	167	煤矸石(炭质泥岩)		T10	174	粉砂岩夹炭质泥岩	
				L9B				T11	181	砂质页岩	
				L10	183	细砂岩		T12	205	细砂岩	
				L11	186	页岩					

注: B6A—未风化层, B6B—风化层; B7A—未风化层, B7B—风化层; L6A—岩层上层, L6B—岩层下层; L9A—岩层上层, L9B—岩层下层。

1.3 研究方法

1.3.1 修正的内梅罗综合指数法

采用修正的内梅罗综合指数法^[16-17]对各岩土层肥力质量进行综合评价,能够突出限制性因子、兼顾极值。为消除各属性因子参数间量纲差别,对其进行标准化,pH 值(≥ 7)与岩土质量呈负相关,其他属性因子与岩土质量呈正相关,计算方法见表 2、表 3^[18]。

表中, P_i 为单项肥力系数, C_i 为因子实际测定值, X_i 为因子分级标准,参照《第二次全国土壤普查技术规程》中的标准并结合当地实际情况^[19]确定,其中 X_a 表示评价等级差, X_c 表示评价等级中, X_p 表示评价等级好,具体结果见表 4。

综合肥力系数计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{P_{i平均}^2 + P_{i最小}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n}$$

式中: P ——综合肥力系数;

$P_{i平均}$ ——各单项肥力系数平均值;

$P_{i最小}$ ——单项肥力系数中最小值;

n ——参评因子个数。

将岩土综合肥力质量分为四个等级,见表 5。

表 2 正相关指标标准化计算

Table 2 Standardized calculation of positive correlation index

分级标准	计算方法
差($C_i \leq X_a$)	$P_i = C_i / X_a (P_i \leq 1)$
中等($X_a < C_i \leq X_c$)	$P_i = 1 + (C_i - X_a) / (X_c - X_a) (1 < P_i \leq 2)$
较好($X_c < C_i \leq X_p$)	$P_i = 2 + (C_i - X_c) / (X_p - X_c) (2 < P_i < 3)$
好($C_i > X_p$)	$P_i = 3$

表 3 负相关指标标准化计算

Table 3 Standardized calculation of negative correlation index

分级标准	计算方法
差($C_i > X_a$)	$P_i = X_a / C_i (P_i \leq 1)$
中等($X_c < C_i \leq X_a$)	$P_i = 1 + (X_a - C_i) / (X_a - X_c) (1 < P_i \leq 2)$
较好($X_p < C_i \leq X_c$)	$P_i = 2 + (X_c - C_i) / (X_c - X_p) (2 < P_i < 3)$
好($C_i \leq X_p$)	$P_i = 3$

表 4 各属性分级标准

Table 4 Grading Standard of each attribute

属性	X_a	X_c	X_p
pH 值(≥ 7)	8.5	8.0	7.5
pH 值(≤ 7)	4.5	5.5	6.5
有机质/(g·kg ⁻¹)	6	10	20
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.50	0.75	1.00
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.4	0.6	0.8
全钾/(g·kg ⁻¹)	10	15	20
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	3	5	10
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	50	100	150

表 5 综合肥力分级标准

Table 5 Grading Standard of comprehensive fertilizer

等级	很肥沃	肥沃	一般	贫瘠
P	$P \geq 2.7$	$1.8 \leq P < 2.7$	$0.9 \leq P < 1.8$	$P < 0.9$

1.3.2 单因子质量指数法

以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018)^[20] 中的风险筛选值为标准,通过单因子质量指数法计算各岩土层单项重金属污染程度^[21-22],等级划分见表 6。计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中: P_i ——环境质量指数;

C_i ——实际测定值;

S_i ——风险筛选值。

表 6 单因子质量指数等级

Table 6 Grade of single factor quality index

环境质量指数	污染等级
$P_i \leq 1$	无污染
$1 < P_i \leq 2$	轻微污染
$2 < P_i \leq 3$	轻度污染
$3 < P_i \leq 5$	中度污染
$P_i > 5$	重度污染

2 结果与分析

2.1 肥力质量

2.1.1 单项养分含量分析

(1)pH 值分析

平朔露天矿不同地质层组大多岩土属微碱性($\text{pH}=7.5 \sim 8.5$),随深度增加 pH 值呈减小趋势,第四系黄土 pH 值相近,略高于下部岩层。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿深度 167~183 m 石炭系 L10 细砂岩 pH 值为 4.25,属强酸性($\text{pH}<4.5$),酸化严重,应避免在排弃过程中覆于表层;L4 页岩至 L6 煤矸石大致在中性($\text{pH}=6.5 \sim 7.5$)范围内波动;其他岩土层均属微碱性。安太堡矿上部土层至下部岩层均大致在微碱性范围内波动,其中 B6 砂质页岩及 B7 中细粒花岗闪长岩出现岩石风化后 pH 值减小现象。东露天矿 T12 细砂岩 pH 值为 6.76,呈中性;其他岩土层均在微碱性范围内波动。微碱性岩土层与当地现代自然土壤表层接近,用于重构土壤不会对植被产生明显消极影响^[23],适宜植被对养分和营养元素的吸收利用。

(2)有机质含量分析

平朔露天矿第四系黄土及新近系红土有机质含量极低,均属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中六级水平($<6 \text{ g/kg}$)。矿区中、上石炭统主要为海陆交互相煤地层,是滨海沼泽环境产物,安家岭矿石炭系地层部分岩层有机质含量极为丰富。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿深度 126~163 m 石炭系 L8 泥灰岩有机质含量丰富,属一级水平($>40 \text{ g/kg}$),其他岩土层均属低等缺乏水平;安太堡矿 B8 泥灰岩有机质含量相对丰富,属三级水平($20 \sim 30 \text{ g/kg}$),其他岩土层均属低等缺乏水平;东露天矿 T9 泥灰岩有机质含量相对丰富,属二级水平($30 \sim 40 \text{ g/kg}$),T5 炭质泥岩及 T6 泥灰岩夹灰黄色泥云岩属三级水平,T12 细砂岩属四级水平($10 \sim 20 \text{ g/kg}$),其他岩土层均属六级最低水平。深度 108~118 m 石炭系 L6 煤矸石及 163~167 m 石炭系 L9 煤矸石有机质含量非常丰富,能够改善土壤养分状况,且随风化程度提高具有保水性能^[24],在硫铁矿含量低、不发生自燃情况下^[25],可考虑用作土壤改良剂或配置表土替代材料。安家岭矿 L6、L8、L9 岩层有机质含量丰富,可考虑用于改善复垦土壤肥力。

(3)全氮含量分析

平朔露天矿不同地质层组岩土全氮含量普遍匮乏,包括第四系黄土在内大多岩土属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中六级最低水平($<0.5 \text{ g/kg}$),但安家岭矿石炭系个别岩层全氮含量丰富。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿深度 163~167 m 石炭系 L9 煤矸石全氮含量丰富,属一级水平($>2 \text{ g/kg}$),可能多为有机态氮^[26];L6 煤矸石及 L8 泥灰岩全氮含量也相对较高,属中等水平,其他岩土层均属六级最低水平。安太堡矿及东露天矿各岩土层全氮含量均属六级最低水平,含量极度缺乏。安家岭矿 L9 煤矸石全氮含量丰富,可考虑用于改善复垦土壤肥力。

(4)全磷含量分析

平朔露天矿上石炭统至下二叠统普遍发育含煤岩系,在漫长地质时期中,随古气候和地质环境变化,岩层元素组成在不同时期差异显著。三大露天矿第四系黄土全磷含量相近,相对大多岩层较高,平均约 0.62 g/kg ,属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中三级中等水平($0.6 \sim 0.8 \text{ g/kg}$),随深度增加全磷含量总体波动降低,波动幅度较大,东露天矿二叠系个别岩层由于矿物组成,全磷含量丰富。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿仅有 L3 细砂岩及

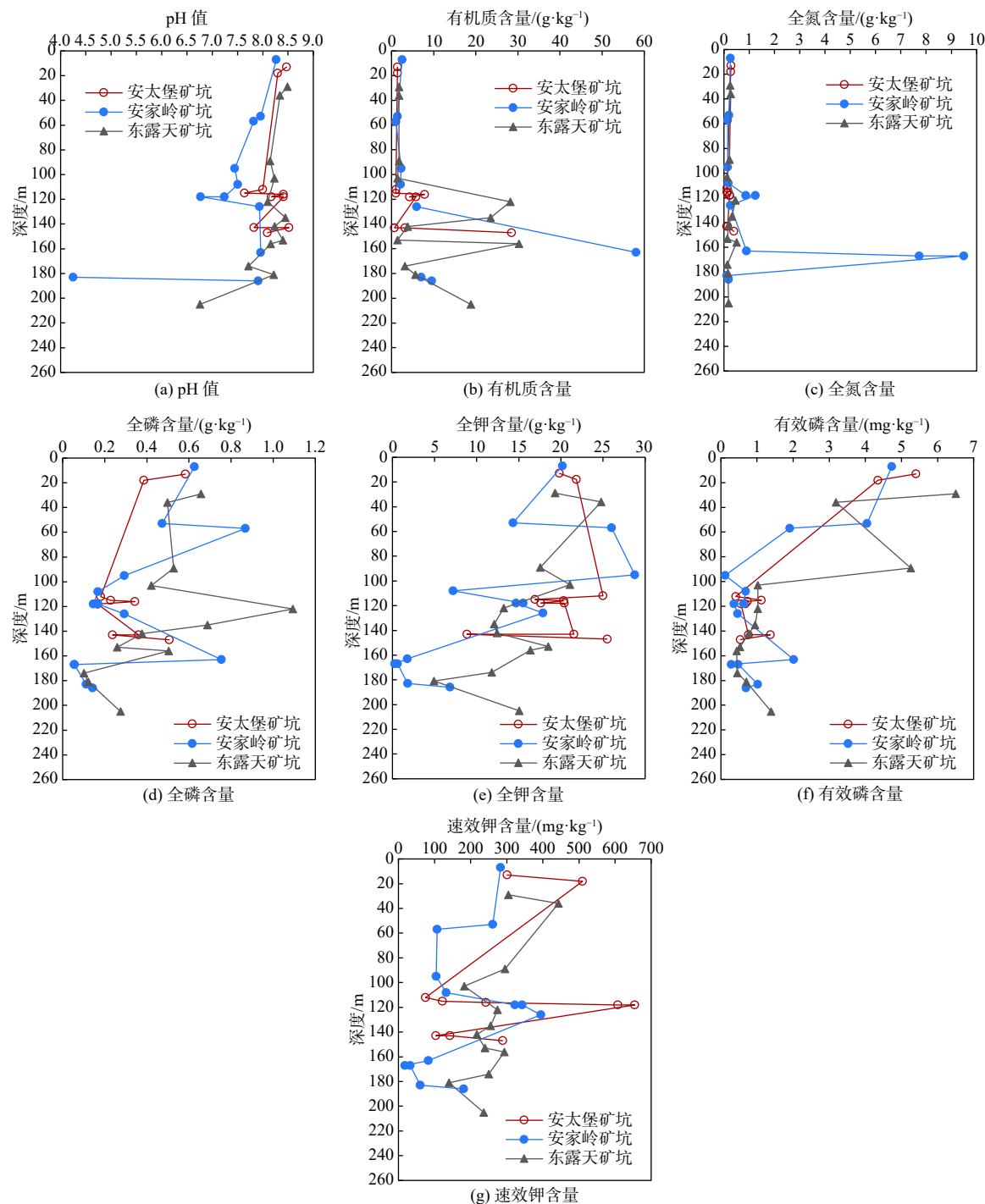


图 2 各岩土层单项养分指标

Fig. 2 Single nutrient index of each rock and soil layer

注: 由于矿石原因无法检测 L3 煤矸石的 pH 值; L3、L6 煤矸石有机质含量高, 已超出检测方法上限。

L8 泥灰岩全磷含量高于黄土母质, 分别属三级和二级水平(0.8~1.0 g/kg), 其他岩土层属中等偏低水平; 安太堡矿下部各岩土层全磷含量均低于黄土母质, 属中等偏低水平; 东露天矿仅有深度 103~122 m 的 T5 炭质泥岩及其下 T6 泥灰岩夹灰黄色泥云岩全磷含量高

于黄土母质, 分别属一级(>1 g/kg)和三级水平, 其他岩土层均属中等偏低水平。东露天矿 T5 炭质泥岩全磷含量丰富, 可考虑用于提高复垦土壤肥力。

(5)全钾含量分析

平朔三大露天矿不同地质层组大多岩土全钾含

量较高,随深度增加而下降,波动幅度较大,第四系黄土全钾含量相近,平均约 20 g/kg,属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中二级中上等水平(20~25 g/kg),二叠系部分岩石全钾含量丰富。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿深度 53~95 m 二叠系 L3 细砂岩、L4 页岩全钾含量较黄土母质高,属一级水平(>25 g/kg),其他岩土层属中下等水平;安太堡矿下部岩土层全钾含量总体较高,属中上等水平,明显较黄土母质高的有 B3 砂岩及 B8 泥灰岩,属一级水平;东露天矿 T2 红土及 T4 细砂岩全钾含量较黄土母质高,属二级水平,但新近系红土质地偏黏,容易形成土壤障碍层,影响植被根系发育,不宜将其覆于排土场地表。安家岭矿 L4 页岩全钾含量丰富,可考虑用于提高复垦土壤肥力。

(6)有效磷含量分析

对于同一地层三大露天矿有效磷含量评价结果相差不大:石炭系及二叠系岩石有效磷含量普遍极低,第四系黄土及新近系红土有效磷含量高于下部岩层,总体随深度增加波动下降。

由表 1 及图 2 可知,三大露天矿下部岩层有效磷含量均属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中六级最低水平(<3 mg/kg),含量极度缺乏,上部红土及黄土含量有所提高,但也属缺乏等级,黄土母质有效磷含量属五级(3~5 mg/kg)或四级水平(5~10 mg/kg)。土壤全磷和有效磷之间相关性很弱甚至无关,且复垦地的相关性更低^[23],因此,复垦地土壤需适度补充磷肥以满足植被生长需要。

(7)速效钾含量分析

平朔三大露天矿不同地质层组岩土速效钾含量丰富,随深度增加而波动下降,第四系黄土评价结果一致,均属《第二次全国土壤普查技术规程》标准中一级水平(>200 mg/kg)。

由表 1 及图 2 可知,安家岭矿 L6 煤矸石及 L7 炭质泥岩速效钾含量丰富,属一级水平,L11 页岩属二级较高水平(150~200 mg/kg),其他岩土层属中下等水平;安太堡矿 B5 变质细砂岩、B6 砂质页岩和 B8 泥灰岩速效钾含量丰富,属一级水平,其他岩土层属中下等水平;东露天矿各岩土层速效钾含量变幅不大,基本属于上等水平。黄土母质可满足植物生长需求,在绿化种植中不会因复垦土壤缺钾而受影响。

2.1.2 有益微量元素指标分析

Fe、Mn、B、Mo、S 等有益微量元素对调节植物生长、提高作物产量有重要意义,植物所需量虽很少,但

缺乏某些元素就不能完成正常生长繁育。分析结果表明,平朔三大露天矿不同地质层组岩土 Fe、Mn、B、Mo 四种有益微量元素含量波动幅度较大,第四系黄土 Fe、Mn、Mo、S 元素含量均在植株适宜调节利用范围内,既能满足生长需求,也不会因含量过多引起中毒现象。黄土母质中的 B 元素含量超出了植物最适宜调节范围(3~30 mg/kg),但 90%~95% 是以晶格态存在,根据土壤学和植物营养学相关理论,一般土壤环境条件下,晶格态硼不会大量释放、转化为有效态硼,不会对植物造成危害^[27]。大多岩土层中的 S 元素含量位于适宜范围 100~5 000 mg/kg 内^[28],但安家岭矿深度 126~163 m 石炭系 L8 泥灰岩(17 460 mg/kg)及东露天矿 181~205 m 石炭系 T12 细砂岩(8 837 mg/kg)硫含量过高,可能由于 FeS 含量较高;L6、L9 煤矸石硫含量并不过高,因硫铁矿氧化而引起自燃、酸化等危害较小,可允许其作为复垦基质排在地表^[29]。

2.1.3 综合肥力质量评价

平朔三大露天矿不同地质层组各岩土层综合肥力系数在 0.40~1.26 范围内,属贫瘠或一般水平(图 3),同一地层岩土评价结果差异不明显,随深度增加综合肥力总体为下降趋势,虽有个别岩层略高于黄土母质,但并不能起到明显改良作用。结合前述对各地层不同岩土单项指标分析,部分岩层在矿物肥料角度具有可利用价值,能够从某些指标方面改善复垦土地土壤肥力,尤其能够改善有机质及全氮含量极为匮乏问题。

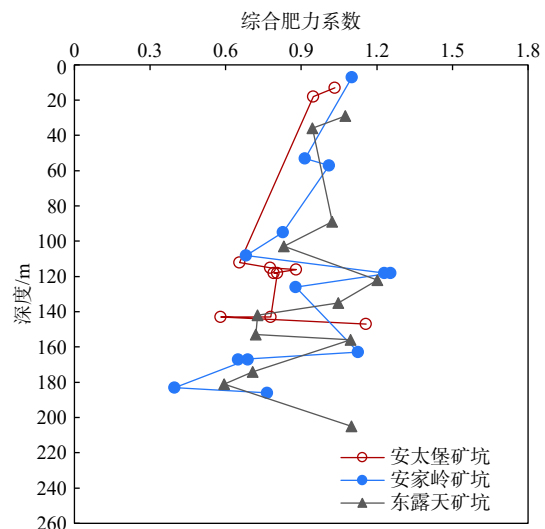


图 3 各岩土层综合肥力系数

Fig. 3 Comprehensive fertility coefficient of each rock and soil layer

结合养分、有益微量元素等单项肥力指标以及岩石风化难易程度,可选取有机质及全氮含量丰富的

L9 煤矸石、有机质含量丰富的 L6 煤矸石、全磷含量丰富的 T5 炭质泥岩、全钾含量丰富的 L4 页岩及黄土母质作为表土替代材料或土壤改良物质, 以提升复垦土壤综合质量。由于不同地质层组各岩土层纵向及横向理化性状差异, 应从“剥离—开采—运输—排弃—造地—复垦—管护”一体化角度, 统筹安排平朔三大露天矿土地复垦与生态修复工程, 合理配置有价值岩土废料。

2.2 环境质量

当重金属或其他有毒元素富集的岩土进行自然堆放、运输或作为复垦土地填充物时, 元素释放会对生态环境造成污染。只有在环境质量达到正常标准后, 才能考虑后期具体土地利用方向问题。测试结果显示, 平朔三大露天矿不同地质层组各岩土 As、Cu、Cr、Ni 元素含量总体上随矿坑深度增加而降低, 可能由于矿区在生产过程中的污染物质通过水体和大气等渠道扩散到了上部岩土层; 其他元素含量在深度上无明显变化规律。通过单因子质量指数法计算各岩土层单项重金属污染程度, 仅有东露天矿深度 181 ~ 205 m 石炭系 T12 细砂岩 Cd 元素的环境质量指数为 1.05, 属轻微污染等级, 其他各地层岩土各重金属元素含量均为无污染等级; F 元素含量基本处于或接近山西省土壤背景值范围, 不至于对植被造成伤害。

Cd 具有较强化学活动性, 容易进入生物体系, 不仅对植物产生毒害, 含 Cd 食物也会威胁人类健康^[30]; 另外, Cd 具有亲硫性^[31], 易在煤灰中富集, 容易扩散, 且在沉积过程中的还原环境能大量富集。因此, 在平朔露天矿区中要重视 Cd 污染问题, 从源头上控制污染物质排放, 对 T12 细砂岩结合采排工艺采取有效隔离、稀释、包埋等处理措施, 减少其对周围环境造成污染。

3 讨论

不同土地复垦方向对土地质量要求不同, 平朔露天矿当前复垦方向主要有耕、林、草三种, 土地污染情况需要首先严格控制, 应避免 T12 细砂岩排在地表。耕地复垦方向对有效土层厚度、剖面质地、pH 值等有严格要求, 建议将黄土母质作为主要材料排在地表, 采取主动管理方式和积极施肥措施提高土壤肥力; 林地、草地复垦方向, 可选择前述单项养分含量丰富、环境质量安全且易于风化的岩土作为表土替代材料或土壤改良物质, 通过加速风化、熟化、培肥等工程措施、生物措施, 实现较短时间内提高土壤生产力。

研究主要分析了复垦土壤各肥力指标、环境指标初始含量, 即母岩、母质中元素含量。尚未充分考虑

岩石在自然环境下不断风化成土过程中各指标含量变化规律。在后续研究中, 如结合复垦地地形、土地利用方向等因素, 通过温室大棚配比试验及野外小区试验等方法, 研究复垦土壤备选材料重构比例及重构方式, 可进一步为矿区土地复垦与生态修复提供参考依据。

4 结论

(1) 平朔露天矿不同地质层组各岩土层综合肥力系数位于 0.40 ~ 1.26 范围内, 属贫瘠或一般水平, 总体上随深度增加肥力下降。由于各岩土层纵向及横向理化性状差异, 应从“剥离—开采—运输—排弃—造地—复垦—管护”一体化角度, 统筹安排平朔三大露天矿土地复垦与生态修复工程。

(2) 平朔露天矿黄土母质速效钾含量丰富, 但其他养分含量均较低, 有机质及全氮含量极度缺乏; 综合单项肥力指标、环境质量及风化难易程度, 可选取有机质及全氮含量丰富的 L9 煤矸石、有机质含量丰富的 L6 煤矸石、全磷含量丰富的 T5 炭质泥岩、全钾含量丰富的 L4 页岩, 与黄土母质一同作为重构复垦土壤备选材料; 各岩土层有效磷含量普遍较低, 可通过适度补充磷肥予以改善。

(3) 平朔露天矿大多岩土层环境质量较好, 但对于酸化严重的 L10 细砂岩 (pH=4.25)、硫含量过高的 L8 泥灰岩及硫含量过高且镉元素轻微污染的 T12 细砂岩, 应注意结合采排工艺采取有效处理措施, 减少其对周围环境造成消极影响。

参考文献 (References):

- [1] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 278 - 288. [SUN Qi, BAI Zhongke, CAO Yingui, et al. Ecological risk assessment of land destruction in large open-pit mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 278 - 288. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李建中, 张进德. 我国矿山地质环境调查工作探讨[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 169 - 172. [LI Jianzhong, ZHANG Jinde. Discussion on the work of mine geo-environmental investigation of China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 169 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 郭振中, 裴捍华, 黄卫星, 等. 关于山西煤矿环境地质调查研究的思考[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(2): 101 - 104. [GUO Zhenzhong, PEI HANHUA, HUANG Weixing, et al. Investigation actuality and thinking of environmental geology of coal mines in Shanxi

- province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(2): 101 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1 – 9. [BAI Zhongke, ZHOU Wei, WANG Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. *China Land Science*, 2018, 32(11): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 白中科, 付梅臣, 赵中秋. 论矿区土壤环境问题[J]. *生态环境*, 2006, 15(5): 1122 – 1125. [BAI Zhongke, FU Meichen, ZHAO Zhongqiu. On soil environmental problems in mining area[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(5): 1122 – 1125. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 120 – 124. [HU Zhenqi, KANG Jingtao, WEI Xiujie, et al. Experimental research on improvement of reclaimed soil properties and plant production based on different ratios of coal-based mixed materials[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 120 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [7] RAM L C, SRIVASTAVA N K, TRIPATHI R C, et al. Management of mine spoil for crop productivity with lignite fly ash and biological amendments[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(2): 173 – 187.
- [8] 况欣宇, 曹银贵, 罗古拜, 等. 基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(4): 453 – 461. [KUANG Xinyu, CAO Yingui, LUO Gubai, et al. Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 453 – 461. (in Chinese with English abstract)]
- [9] WILSON-KOKES L, EMERSON P, DELONG C, et al. Hardwood tree growth after eight years on brown and gray mine soils in west Virginia[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(5): 1353 – 1362.
- [10] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. *科技导报*, 2009, 27(17): 30 – 34. [LI Jinchuan, BAI Zhongke, CHAI Shujie, et al. Study on technology of land reclamation and ecological rehabilitation of waste land in Pingshuo surface mine[J]. *Science & Technology Review*, 2009, 27(17): 30 – 34. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 230 – 238. [WANG Jinman, ZHANG Meng, BAI Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(4): 230 – 238. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 樊文华, 李慧峰, 白中科. 黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化——以平朔安太堡露天煤矿为例[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 26(4): 313 – 316. [FAN Wenhua, LI Huifeng, BAI Zhongke. The research of the soil fertility changes in loess area large opencast coal mine's different reclamation models and reclamation years——Taking Pingshuo ATB opencast coal mine as example[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2006, 26(4): 313 – 316. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 刘伟红, 王金满, 白中科, 等. 露天煤矿排土场复垦土地土壤有机碳的动态变化[J]. *金属矿山*, 2014(3): 141 – 146. [LIU Weihong, WANG Jinman, BAI Zhongke, et al. Soil organic carbon dynamics of reclaimed soils at an opencast coal mine[J]. *Metal Mine*, 2014(3): 141 – 146. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于CT分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 229 – 236. [WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 229 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. *土壤*, 2005, 37(1): 8 – 12. [HU Zhenqi, WEI Zhongyi, QIN Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soils*, 2005, 37(1): 8 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 单奇华, 俞元春, 张建锋, 等. 城市森林土壤肥力质量综合评价[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 186 – 190. [SHAN Qihua, YU Yuanchun, ZHANG Jianfeng, et al. Comprehensive estimation of soil fertility in urban forest[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 186 – 190. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 袁志鹰, 夏江南, 刘月新, 等. 百合中王百合苷A对土壤肥力的响应分析[J]. *中成药*, 2019, 41(10): 2526 – 2529. [YUAN Zhiying, XIA Jiangnan, LIU Yuexin, et al. Response analysis of regaloside A in *Lilium Bulbus* to soil fertility[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2019, 41(10): 2526 – 2529. (in Chinese)]
- [18] 郭佩, 米美霞, 郭昕懿, 等. 长治市城区道路绿地表层

- 土壤理化性质研究[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(4): 635 – 640. [GUO Pei, MI Meixia, GUO Xinyi, et al. Study on soil physical and chemical properties of road green space in urban area of Changzhi city[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(4): 635 – 640. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘耀宗, 张经元. 山西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 248-344. [LIU Yaozong, ZHANG Jingyuan. *Shanxi soil* [M]. Beijing: Science Press, 1992: 248-344. (in Chinese)]
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality: Risk control standard for soil contamination of agricultural land (Trial): GB 15618—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)]
- [21] 姜彬慧, 张博, 王雪峰, 等. 抚顺西露天矿区土壤重金属污染及潜在风险评价[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 568 – 574. [JIANG Binhui, ZHANG Bo, WANG Xuefeng, et al. Heavy metal pollution and potential risk assessment of soil in Fushun western open-pit mining area[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(4): 568 – 574. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 叶俊, 任大军, 张晓晴, 等. 中国部分林地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(6): 2507 – 2514. [YE Jun, REN Dajun, ZHANG Xiaoqing, et al. Heavy metal contents distribution and contamination assessment in some Chinese forest soils[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(6): 2507 – 2514. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘孝阳. 露天煤矿区人工扰动土壤质量时空变化研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018. [LIU Xiaoyang. Spatial and temporal change of soil quality in the artificially disturbed areas of the open-pit coal mine[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 黄雨晗, 况欣宇, 曹银贵, 等. 草原露天矿区复垦地与未损毁地土壤物理性质对比[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(7): 940 – 946. [HUANG Yuhan, KUANG Xinyu, CAO Yingui, et al. Comparison of soil physical properties between reclaimed land and undamaged land in grassland opencast mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(7): 940 – 946. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 樊文华, 李慧峰, 白中科, 等. 黄土区大型露天煤矿煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 319 – 324. [FAN Wenhua, LI Huifeng, BAI Zhongke, et al. Effect of gangue spontaneous combustion on reclaimed soil quality of large-scaled opencast mine in loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 319 – 324. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 张耿杰. 矿区复垦土地质量监测与评价研究——以平朔露天煤矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [ZHANG Gengjie. Study on monitoring and evaluation of the quality of reclaimed land in mining area——A case study in Pingshuo mining area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 李晋川, 白中科. 露天煤矿土地复垦与生态重建[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 42-52. [LI Jinchuan, BAI Zhongke. Land reclamation and ecological reconstruction in open-pit coal mine[M]. Beijing: Science Press, 2000: 42-52. (in Chinese)]
- [28] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 296-336. [YUAN Keneng. Soil chemistry of plant nutrient elements[M]. Beijing: Science Press, 1983: 296-336. (in Chinese)]
- [29] 秦俊梅, 白中科, 马祥爱, 等. 煤矸石自然风化及人工模拟风化过程中盐分及pH值的动态变化——以平朔露天矿区为例[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 649 – 652. [QIN Junmei, BAI Zhongke, MA Xiangai, et al. The dynamic change in total salt and pH value of coal waste rock in the process of nature and man-made simulation weathering——Taking Pingshuo opencast mine area as an example[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(4): 649 – 652. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 杨帆, 王京彬, 王晨昇, 等. 承德市富硒土壤区镉的地球化学特征及生态风险评价[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 163 – 172. [YANG Fan, WANG Jingbin, WANG Chensheng, et al. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of cadmium in selenium-rich soil of Chengde City in Hebei Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 163 – 172. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 安永龙, 万利勤, 李霞, 等. 承德市土壤重金属空间结构与分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 119 – 131. [AN Yonglong, WAN Liqin, LI Xia, et al. Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 119 – 131. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华

实习编辑: 宗 爽