

DOI: 10.12401/j.nwg.2023093

煤基固废协同矿山土壤生态修复的理论解析 与实践探索——以陕西榆林市为例

李强¹, 艾锋¹, 王玺², 马泳波¹, 刘浪³, 朱占荣⁴, 张凯煜¹

(1. 榆林学院, 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000; 2. 榆林市固体废物管理中心, 陕西 榆林 719000;
3. 西安科技大学能源学院, 陕西 西安 710098; 4. 陕西省一八五煤田地质有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要: 矿山环境修复治理与固体废弃物综合利用均是北方能源富集区亟待解决的生态问题。笔者基于“理论解析-案例研究-协同治理”的思路, 以陕西榆林市为例, 在系统分析工业固废与矿山生态受损现状的基础上, 全面解析煤基固废协同修复矿山生态的政策优势、技术可行性及市场潜力, 并提出基于固废结构、营养和环境功能改性制备土壤调理剂的路径技术。通过将土壤调理剂应用于风沙地治理、盐碱地改良和露天煤矿排土场土壤生态修复实践, 发现施用土壤调理剂后风沙地、盐碱地和排土场土壤养分含量显著增加, 植物生物量平均增幅分别为 50.3%、36.0% 和 39.9%。研究成果为北方能源型城市煤基固废协同修复矿山土壤生态提供科学支撑。

关键词: 煤基固废; 生态修复; 土壤调理剂; 解析

中图分类号: P69; TD167

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)03-0070-08

Theoretical Analysis and Practical Exploration on Ecological Restoration of Mines with Multi-source Solid Wastes: Example from Yulin City, Shaanxi Province

LI Qiang¹, AI Feng¹, WANG Xi², MA Yongbo¹, LIU Lang³, ZHU Zhanrong⁴, ZHANG Kaiyu¹

(1. Yulin University, Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Shaanbei Mining Area, Yulin 719000, Shaanxi, China; 2. Yulin Afforestation Service Center, Yulin 719000, Shaanxi, China; 3. School of energy, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710098, Shaanxi, China; 4. Shaanxi 185 Coal Field Geology Co., Ltd. Yulin 719000, Shaanxi, China)

Abstract: Mine environmental restoration and the comprehensive utilization of solid waste are two ecological issues that are highly concerned by the whole society at present. Based on the idea of "theoretical analysis-case study-collaborative governance", taking Yulin, Shaanxi Province as an example, this paper comprehensively analyzes the policy advantages, technical feasibility and market potential of multi-source solid waste collaborative mine ecological restoration on the basis of systematic analysis of the current situation of industrial solid waste and mine ecological restoration. Secondly, based on the multi-source solid waste modification of structure, nutrition and environmental function, a soil conditioner was prepared. Finally, through the practical exploration of applying soil conditioner to sand treatment, saline alkali land improvement and soil ecological restoration of

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2023-04-23; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 陕西省煤田地质集团有限公司创新能力支撑项目“陕北典型矿山生态修复试验与示范”(SMDZ-2022CX-4), 国家重点研发计划“农田风蚀协同阻控技术研究”(2022YFF1300802), 国家自然科学基金“陕北露天煤矿排土场非均匀土体植物根系构架形成机理与抗蚀效应”(42267071)联合资助。

作者简介: 李强(1986-), 男, 教授, 主要从事多源固废协同生态修复研究。E-mail: mr.li_qiang@163.com。

mine waste dump, it is found that the average increase of above-ground biomass of plants in sand land, saline alkali land and waste dump after applying soil conditioner is 50.3%, 36.0% and 39.9% respectively. The present manuscript may provide scientific support for the coordinated ecological restoration of multi-source solid wastes in northern energy cities.

Keywords: coal based solid waste; ecological restoration; soil conditioner; analysis

煤炭在开发利用的同时会产生大量的煤矸石、粉煤灰和煤泥等煤基固体废弃物。据测算,露天、井采每采万t煤炭破坏土地面积分别为 $4.9 \times 10^{-3} \text{ km}^2$ 和 $2.7 \times 10^{-3} \text{ km}^2$,排放煤矸石 $2.0 \sim 6.1 \text{ 万 m}^3$ (白中科等, 1998);煤转化电每万MW排放粉煤灰500t,煤转化油(气)每万t吨排放气化渣等固体废弃物0.25万t。以陕西榆林为例,2021年排放煤矸石3396万t,粉煤灰1026万t,炉渣506万t(赵江等, 2022)。煤基固废通常含有碳、硅、铁、铝等有效成分及少量重金属元素,兼具“资源”和“环境”双重特性以及污染“源”和“汇”双重属性,其资源化利用对生态环境保护和高质量发展具有重要意义(徐亚等, 2023)。

中国工业固体废弃物一直秉持“减量化、资源化、无害化”的处理原则。例如,《粉煤灰综合利用管理办法(2013)》《煤矸石综合利用管理办法(2015)》积极支持粉煤灰/煤矸石的科学研究、技术开发、先进技术推广和科学普及,重点发展粉煤灰/煤矸石复垦塌陷区等大宗用量和高科技含量、高附加值的实用技术。《“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》(发改环资[2021]381号)也明确推进煤矸石和粉煤灰在塌陷区治理、矿井充填以及盐碱地、沙漠化土地生态修复等领域的利用,为区域煤基固废协同矿山生态修复实践探索提供了政策指引(曹馨等, 2022)。从社会-经济-自然复合系统角度出发,能源聚集区针对固废量大面广和矿山生态受损严重的实际,亟需发展多元化的创新措施,形成具有地方特色的适用技术和产业模式,其中煤基固废跨产业、资源化梯级利用成为破题关键(李国政, 2019; 田超, 2022)。有研究发现,煤基固废改性制备的土壤调理剂修复矿山土壤生态环境为矿区复垦土地的高效化治理提供了可能,不仅能够改善矿区困难立地条件(盐碱、沉陷等)的土壤理化性质,同时有助于提升植被的修复效率和质量,达到“以废治废”的目的(孙艺香, 2021; 宋慧平等, 2022)。

为此,笔者基于“理论解析-案例研究-协同治理”思路,在系统分析陕西榆林工业固废与矿山生态受损的基础上,引用案例全面解析了煤基固废改性制备土

壤调理剂协同矿山生态修复的理论方法支撑。为北方能源型城市煤基固废协同生态修复研究提供科学支撑。

1 榆林市工业固废与生态受损特征

1.1 煤基固废概况

近十年来,榆林市工业固废呈快速增加趋势(图1),2021年排放量5668万t,居全国第四,其中煤基固废主要包括煤矸石和粉煤灰,量大面广的工业固废堆存易于造成堆场周围水、土、气及生物生态系统污染。根据笔者调研,榆林市固废综合利用率低于40%,远远低于国家固废综合利用要求的73%,以及国家固废综合利用率平均值的59%。其次,工业固废综合利用产业规模小,且缺少高附加值综合利用项目。三是工业固废综合利用鼓励支持政策不够,企业主动性不强,市场活力不足,其产业可持续性受到极大挑战。

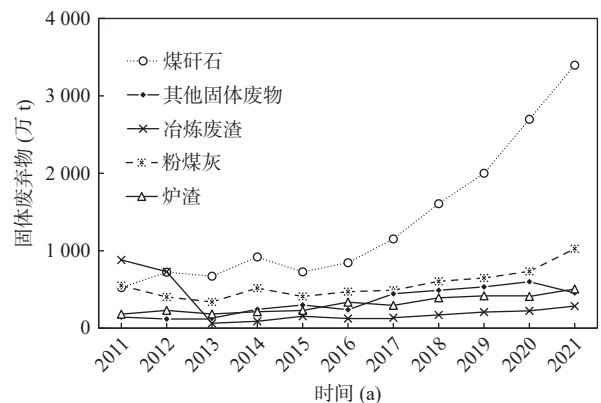


图1 榆林市主要固体废弃物排放量图(数据来自榆林市生态环境局 <http://hb.yl.gov.cn/cms/index/index>)

Fig. 1 Discharge of main solid wastes in Yulin city

1.2 生态受损特征

煤矿开采对土地损毁表现为2个方面:①对土地的挖损和压占,主要涉及采场、排矸场、井场和固废堆放场(胡振琪, 2019; 卞正富等, 2020)。据统计,榆林市采矿活动占用土地面积为 4541 km^2 ,损毁土地资源面积为 1116 km^2 ,地面塌陷面积为 1001 km^2 。②对

地形地貌的破坏, 矿山露天开采破坏地形地貌景观面积为 18.30 km², 固体废弃物堆存占地面积为 15.73 km²。根据全国第五次荒漠化和沙化监测结果, 榆林市目前沙区有 2 000 km² 的残破林地亟需改造复壮, 1 000 km² 的防护林网亟待更新, 中度以上退化草地面积为 2 400 km²。可见, 随着能源化工开发强度的增加, 土地的挖损和地形地貌的破坏与煤基固体废弃物对土地的压占日益严重, 加之区域林草地的自然退化, 使得已逆转的土地面临二次沙化风险, 亟待探索因地制宜的土壤生态修复路径(况欣宇, 2020)。

2 煤基固废协同生态修复可行性解析

2.1 理论解析

国内外固废利用的研究侧重固废型建材(Mkahal et al., 2021)、胶凝材料(刘浪等, 2021)、土壤改良和吸附材料(李强等, 2023)等方面。有研究发现, 从固废的处置和利用实践视角, 适宜走一条处置无害化+消纳本地化相结合的发展路径(刘艳丽等, 2022)。在固废的负面环境效应方面, 宋慧平等(2022)对固废为主要基质制备的土壤调理剂及应用进行了全流程重金属安全性评价, 发现重金属含量均符合国家标准的限

定值。为此, 依托矿山成为能源富集区大规模处理一般工业固体废弃物的最佳模式, 该模式具有修复生态环境与节省土地资源等优点, 为固废的处理提供了新的途径。例如, 郑瑞伦等(2023)认为人工技术土壤是利用有机和无机固体废弃物创造的用于种植植物的新土壤。王蒙(2021)发现煤矸石肥料本身的吸附性、粘结性和离子交换性等性质, 有利于土壤团聚体的形成。马淑花等(2021)、艾锋等(2023)发现粉煤灰基调理剂可以增加土壤微生物的多样性, 促进土壤团聚体的形成, 更利于植物的根系呼吸和土壤-植物系统可持续性。

2.2 技术方法

从“植物→煤→煤矸石/粉煤灰”的转化过程可以看出, 煤基固废中含有多种植物所需营养元素, 可以显著提升土壤的保水保肥能力及微生物群落的丰度(郭莹莹, 2022; 关冰, 2022)。笔者研究发现, 典型煤基固废(煤矸石/粉煤灰)的重金属含量均低于国家农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)(表 1), 且许多地区均有煤基固废在生态修复中的探索与应用(表 2)。为此, 笔者依据土壤学“质地理论”、农学“测土配方”理论和微生物活化技术, 对煤基固废进行结构功能、营养功能和环境功能改造后制备土壤

表 1 典型煤基固废营养元素及重金属含量表

Tab. 1 Nutrient elements and heavy metal content of typical coal-based solid waste

名称	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	K ₂ O(%)
粉煤灰	14.2	8.5	92.8	61.81	21.51	7.39	1.72	1.39	2.69
煤矸石	6.81	9.3	76.9	59.22	29.72	1.58	0.26	0.68	1.55
名称	Cr(mg/kg)	Ni(mg/kg)	Cu(mg/kg)	Zn(mg/kg)	Se(mg/kg)	Cd(mg/kg)	Pb(mg/kg)	Hg(mg/kg)	—
粉煤灰	22.3	14.2	4.5	60.0	12.7	0.36	10.2	0.03	—
煤矸石	42.5	23.9	34.0	45.2	3.7	0.34	15.8	0.03	—
国家标准①	250	220	100	300	25	0.6	170	3.4	—

注: ①采用农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618-2018)。

表 2 煤基固废用于生态修复的技术及实例表

Tab. 2 Technology and examples of coal based solid waste used for ecological restoration

固废种类	立地条件	实施地点	主要内容	研究机构
粉煤灰	盐碱土	山东滨州市	耐盐菌复配工业固体废弃物改良盐碱土	南京农业大学(王悦等, 2023)
	赤红壤	华南某地	复合土壤调理剂修复土壤镉(Cd)污染	广东省地质检测试验中心(曹鹏等, 2023)
	砂土	银川市	粉煤灰配施有机肥改良风沙土	宁夏大学(田超, 2022)
煤矸石	矸石	辽宁阜新市	微生物菌剂施对煤矸石及苜蓿的影响	辽宁工程技术大学(孔涛等, 2023)
	褐土	北京市	煤矸石复配玉米秸秆、聚丙烯酰胺对植被生长及重金属的影响	北京林业大学(张汝翀等, 2018)
	沙土	呼和浩特市	煤矸石与城市污泥混合制备植生基质	北京林业大学(秦琪焜等, 2022)

生态修复材料(图2)。由于制备的土壤生态修复材料的原料为煤基材料,用于生态修复输入土壤后,有助

于土壤肥力的提升,同时有助于植物地下、地上生物量的增加,进一步实现了生态系统碳汇增长目标。

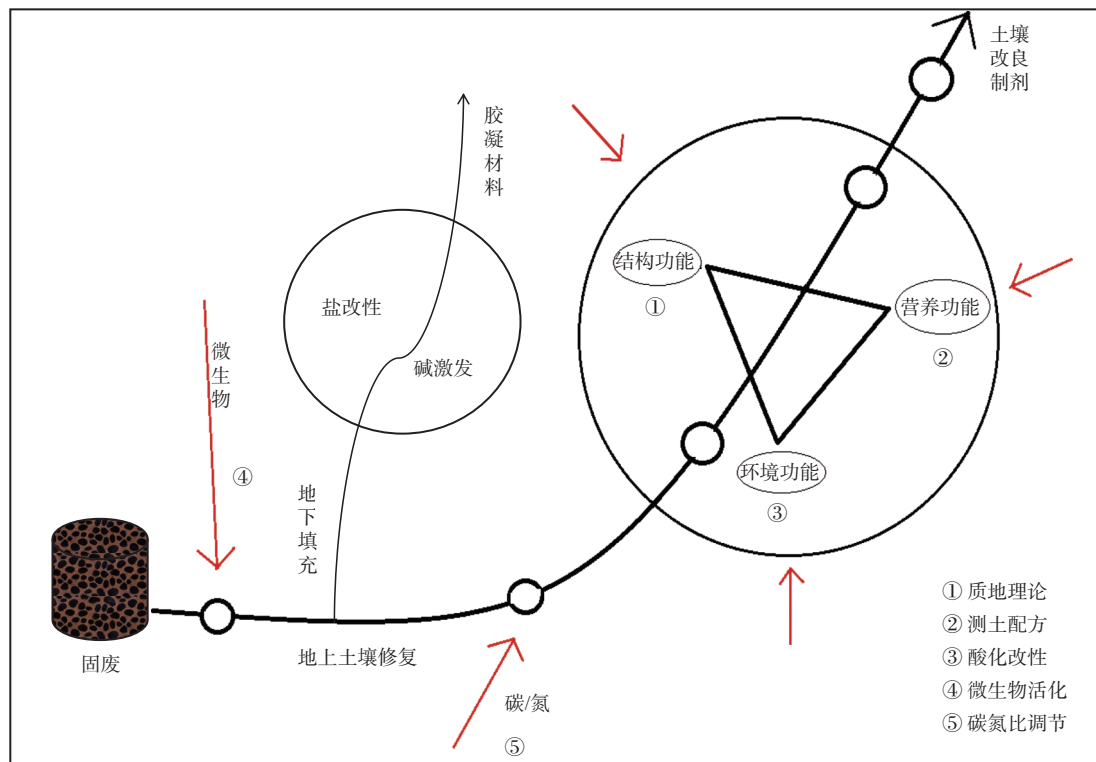


图2 煤基固废改性制备土壤调理剂思路图

Fig. 2 Ideas for preparing soil conditioner by modifying multi-source solid wastes

3 煤基固废协同生态修复实践探索

3.1 试验地概况

试验土壤调理剂是由复配课题组自主研发的、以粉煤灰、煤矸石占比75%~85%总量的激发剂形成。试验地土壤类型分别为风沙土、盐碱土和红土,土壤重金属含量均低于国家标准(表3)。

(1)风沙地:试验地位于陕西省榆林市牛家梁(E 109°45'27", N 38°22'50"),平均海拔为1100~1200 m,年平均温度为10.4℃,年无霜期为150 d,年降雨量为446.5 mm(图3)。

(2)盐碱地:试验地位于陕西省榆林市榆阳区芹河镇(E 109°32'52", N 38°12'22"),属毛乌素沙漠南缘地带,地下水位为2.5~15 m。土壤总盐分含量为1.2~2.8 g/kg,主要属于中度盐碱地,春季地下水位上升,低温低,容易翻浆,春夏之交容易受盐碱胁迫。

(3)排土场:试验地位于陕西省榆林市方家畔煤矿(E 110°18'52", N 38°51'22")实施。试验露天煤矿

排土场分为平台系统和边坡系统,其中边坡系统的坡度为38°。边坡上覆红土、黄土母质及岩土混合物,碎石质量占比为4%~11%。土壤砂粒(2.00~0.05 mm)、粉粒(0.05~0.02 mm)和黏粒(<0.02 mm)质量分数分别为19.0%、35.2%和45.8%。

3.2 试验设计

(1)风沙地和盐碱地试验风沙地(SD-)和盐碱地(SA-)试验为同步对比试验,均采用随机区组设计的研究方法,试验小区规格为长3 m×宽3 m,设置3个不同土壤调理剂施肥处理和1个对照CK,即CK(0 t/km²)、SD-T1/SA-T1(1500 t/km²)、SD-T2/SA-T2(3000 t/km²)和SD-T3/SA-T3(4500 t/km²)4个试验处理,每个处理包含3个独立重复,测试植物为中科羊草 *Leymus chinensis* (Trin.) Tzel。试验于2020年4月28日布设,观测期为2020年5月至2022年8月,其中生物量测试为2022年8月。

(2)排土场试验 野外试验的边坡通过人工平整后划为3个独立重复观测小区,每个小区为50 m×10 m。试验植物由燕麦 *Avena sativa* L.、沙打旺 *Astra-*

表 3 试验地土壤和土壤调理剂的基本性质表

Tab. 3 Basic properties of soil and soil conditioner in the test site

指标	风沙地	盐碱地	排土场	土壤调理剂	黄绵土背景值 ^①	国家标准/GB15618-2018 ^②
有机质(g/kg)	2.72	7.44	5.1	22.60	—	—
有效氮(mg/kg)	9.65	28.25	18.07	48.28	—	—
速效磷(mg/kg)	7.15	11.2	14.5	1 689	—	—
速效钾(mg/kg)	1.57	82.8	69.99	125	—	—
含盐量(g/kg)	0.55	2.4	0.47	0.70	—	—
pH	8.64	9.11	8.19	7.73	—	—
Cr(mg/kg)	21	12	24	39	65.10	250.00
Ni(mg/kg)	16	18	19	23	27.6	190.00
Cu(mg/kg)	6	9	7	70	18.90	100.00
Zn(mg/kg)	26	32	31	190	65.60	300.00
As(mg/kg)	0.79	1.03	1.98	4.77	11.40	25.0
Cd(mg/kg)	0.01	0.05	0.03	ND	—	0.60
Hg(mg/kg)	0.08	0.07	0.06	0.09	—	3.40

注：①引自《黄土高原土壤地球化学》；②《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》。

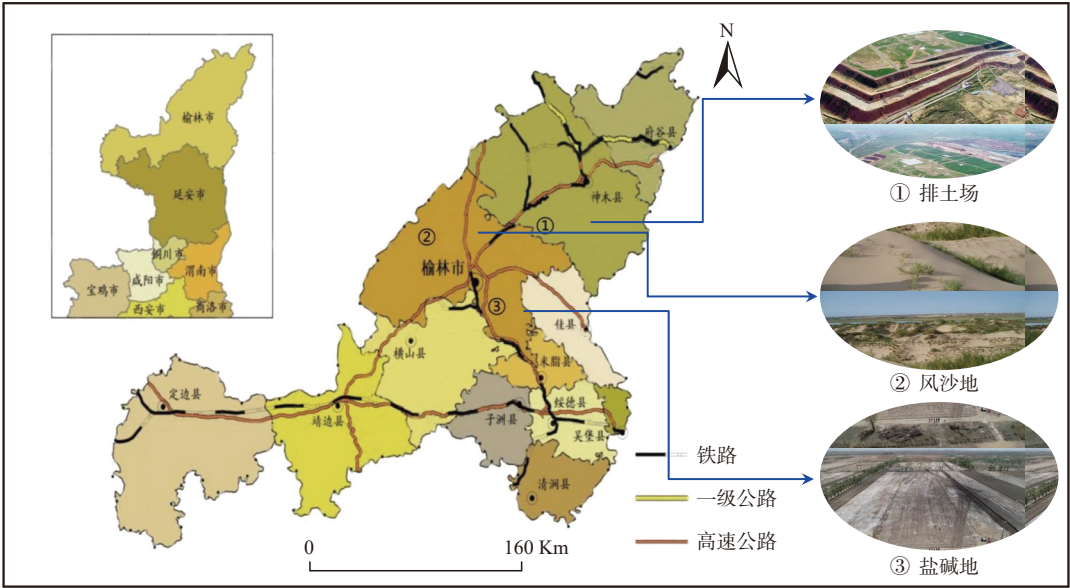


图 3 施用土壤调理剂试验地分布图

Fig. 3 Distribution of experimental sites for soil conditioner application

galus laxmannii Jacquin、中科羊草 *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.、猪毛菜 *Salsolacollina* Pall.、油菜花 *Brassica rapa* var.*oleifera* de Candolle 和紫穗槐 *Amorpha fruticosa* Linn.6类物种组成种子包,播种量为 4 500 t/km²。试验于 2021 年 5 月 19 日布设,CK 为不施肥,处理 TR 为施肥 4 500 t/km²,观测期从 2021 年 6 月至 2022 年 8 月。

3.3 指标测定及数据分析

土壤有机质采用硫酸-重铬酸钾外加热法,有效氮采用碱解扩散法,速效磷采用钼锑抗比色法,速效钾采用火焰光度计法,土壤酸碱度采用 pH 计法。植物生物量采用样方收集法。数据采用平均值±标准差表示,SPSS23.0 软件的单因素方差分析进行差异显著性检验和多重比较分析($P<0.05$)。

3.4 结果与分析

土壤调理剂的制备为矿区复垦土地的高效化治理提供了可能,它不仅能够改善矿区的土壤理化性质,提高矿区边坡土壤的保水保肥性能,促进植物生长和抗逆性,达到“以废治废”目的。榆林典型脆弱生态修复区(风沙地、盐碱地和煤矿排土场)施用土壤调理剂后理化性质的变化特征(表4)。可以看出,施用土壤调理剂后,土壤肥力指标呈显著增加趋势,土壤pH变化无统计学显著差异。图4和图5显示了典型立地

条件下施用土壤调理剂后植物生物量的变化特征。由图4可以看出,施用土壤调理剂后,风沙地和盐碱地中科羊草的地上生物量均呈显著增加趋势,与对照相比,风沙地生物量增幅为34.0%~58.7%,盐碱地生物量为15.9%~57.2%,平均增幅为50.3%和36.0%。值得注意的是,与对照相比,排土场新构土体条件下植物地上生物量增幅为21.6%~49.0%,平均增幅可达39.9%。可见,施用土壤调理剂后的沙地、盐碱地和排土场植物地上生物量增幅平均分别为50.3%、

表4 典型立地条件不同处理土壤理化性质变化表

Tab. 4 Changes in soil physicochemical properties under typical site conditions

立地条件	指标	处理			
		CK	SD-T1/SA-T1	SD-T2/SA-T2	
风沙地	有机质(g/kg)	2.45±0.12 ^c	2.96±0.24 ^b	2.66±0.10 ^b	3.33±0.16 ^a
	有效氮(mg/kg)	16.20±0.81 ^d	24.6±1.23 ^c	28.3±1.42 ^b	34.3±1.72 ^a
	速效磷(mg/kg)	17.6±0.88 ^c	19.0±0.95 ^c	28.30±1.42 ^b	33.40±1.67 ^a
	速效钾(mg/kg)	58.00±2.9 ^b	84.10±4.21 ^a	89.80±4.07 ^a	89.90±4.57 ^a
	pH	8.54±0.06 ^a	8.47±0.11 ^a	8.45±0.10 ^a	8.42±0.14 ^a
盐碱地	有机质(g/kg)	10.21±0.24 ^d	14.26±0.38 ^a	13.55±0.10 ^b	12.03±0.16 ^c
	有效氮(mg/kg)	17.44±0.03 ^d	22.45±0.12 ^c	28.43±0.20 ^a	27.87±0.15 ^b
	速效磷(mg/kg)	34.97±0.33 ^b	38.82±0.96 ^a	37.54±0.32 ^a	38.50±1.28 ^a
	速效钾(mg/kg)	119.80±0.51 ^a	106.12±0.34 ^d	110.55±0.14 ^b	107.18±0.45 ^c
	pH	8.56±0.06 ^b	8.97±0.11 ^a	8.15±0.10 ^c	8.49±0.14 ^b
排土场	有机质(g/kg)	5.10±0.53 ^b	6.12±0.82 ^a	—	—
	有效氮(mg/kg)	18.07±1.22 ^b	33.62±3.23 ^a	—	—
	速效磷(mg/kg)	14.50±1.03 ^b	22.8±1.02 ^a	—	—
	速效钾(mg/kg)	69.99±2.25 ^a	72.8±2.31 ^a	—	—
	pH	8.19±0.11 ^a	8.01±0.09 ^a	—	—

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

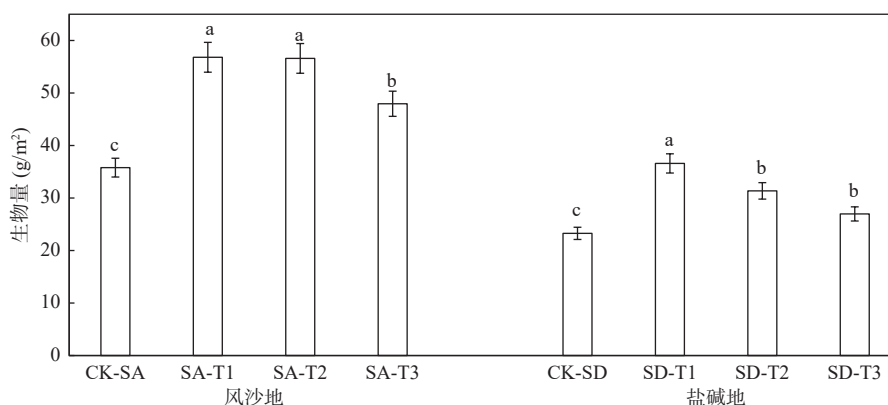


图4 风沙地和盐碱地中科羊草生物量变化图

Fig. 4 Biomass change of Leymus Chinensis in sandy and saline alkali land

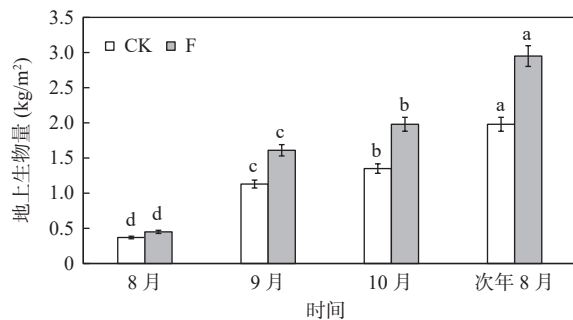


图5 排土场植物地上生物量变化图

Fig. 5 Change of above-ground biomass of waste dump

36.0%和39.9%。这一结果印证了关冰(2022)、宋慧平(2022)等学者的理论解析和实践

4 结论

(1)煤基固废协同矿山生态修复具有较好的政策优势、技术可行性和市场潜力。

(2)提出了基于煤基固废结构、营养和环境功能改性思路,并实践将煤基固废改性制备成土壤调理剂。

(3)施用土壤调理剂后沙地、盐碱地和排土场土壤养分含量显著增加,植物地上生物量增幅平均分别为50.3%、36.0%和39.9%。

参考文献(References):

艾锋, 张生, 李强, 等. 蚯蚓肥复配土壤调理剂对盐碱地土壤性质及中科羊草生长的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(5): 531-538.

AI Feng, ZHANG Sheng, LI Qiang, et al. Effects of Earthworm Fertilizer Mixed with Soil Conditioner on Soil Properties in Saline Alkali Land and the Growth of *Leymus Chinensis*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(5): 531-538.

白中科, 王文英. 黄土区大型露天煤矿剧烈扰动土地生态重建研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 621-626.

BAI Zhongke, WANG Wenying. Ecological Rehabilitation of Drastically Disturbed Land at Large Opencut Coal Mine in Loess Area[J]. Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 621-626.

卞正富, 于昊辰, 侯竟, 等. 西部重点煤矿区土地退化的影响因素及其评估[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 338-350.

BIAN Zhengfu, YU Haochen, HOU Jing, et al. Influencing Factors and Evaluation of Land Degradation of 12 Coal Mine Areas in Western China[J]. Journal of Coal Industry, 2020, 45(1): 338-350.

曹馨, 梁希超, 钱媛, 等. 多源煤基固废协同共生利用的环境效益研究综述[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(4): 32-38.

CAO Xin, LIANG Xichao, QIAN Yuan, et al. A Review of Research on Environmental Benefits of Multi-Source Solid Waste Symbiotic Utilization[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022, 38(4): 32-38.

曹鹏, 陈亚刚, 焦洪鹏, 等. 一种复合土壤调理剂的制备及其镉(Cd)污染农田修复效果[J/OL]. 环境保护科学, 2023: 1-10. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202210038..>

CAO Peng, CHEN Yagang, JIAO Hongpeng, et al. Preparation of a Composite Soil Conditioner and its Effect on Remediation of Cd-Contaminated farmland [J/OL]. Environmental Protection Science, 2023: 1-10. <https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.202210038..>

关冰, 吕林有, 赵艳, 等. 多源固废协同利用沙地生态治理的可行性探讨[J]. 水土保持应用技术, 2022, (6): 4-6.

GUAN Bing, LV Linyou, ZHAO Yan, et al. Discussion on the Feasibility of Ecological Control of Sandy Land by the Coordinated Utilization of Multi-Source Solid Wastes[J]. Application Technology of Water and Soil Conservation, 2022, (6): 4-6.

郭莹莹. 固废与微生物菌剂复合措施对矿区植物生长与土壤改良的效应研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.

GUO Yingying. Effects of Combined Measures of Solid Waste and Microbial Agent on Plant Growth and Soil Improvement in Mining Area [D]. Fuxin: University of Engineering and Technology, 2022.

胡振琪. 我国土地复垦与生态修复30年: 回顾、反思与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 25-35.

HU Zhenqi. 30 years of Land Reclamation and Ecological Restoration in China: Review, Reflection and Prospect[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 25-35.

李国政. 新时代矿山地质修复模式的升级与重塑: 基于“地质修复3.0”的概念分析[J]. 西北地质, 2019, 52(4): 270-278.

LI Guozheng. Upgrading and Reshaping of Mine Geological Restoration Model in the New Era: Conceptual Analysis Based on "Geological Restoration 3.0"[J]. Northwestern Geology, 2019, 52(4): 270-278.

李强, 艾锋, 柳永兵, 等. 气化渣复配沙土对苜蓿生长及其越冬返青的影响[J]. 榆林学院学报, 2023, 33(2): 34-37+46.

LI Qiang, AI Feng, LIU Yongbing, et al. Effects of Gasification Slag Mixed with Sandy Soil on the Growth of Alfalfa and Its Green after Winter[J]. Journal of Yulin College, 2023, 33(2): 34-37+46.

刘浪, 阮仕山, 方治余, 等. 镁渣的改性及其在矿山充填领域的应用探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(12): 3833-3845.

LIU Lang, RUAN Shishan, FANG Zhiyu, et al. Modification of Magnesium Slag and its Application in Mine Filling Field[J]. Coal Journal, 2021, 46(12): 3833-3845.

刘艳丽, 李强, 陈占飞, 等. 煤气化渣特性分析及综合利用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(11): 251-257.

- LIU Yanli, LI Qiang, CHEN Zhanfei, et al. Research Progress Characteristics Analysis and Comprehensive Utilization of Coal Gasification Slag[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(11): 251–257.
- 马淑花, 王晓辉, 王月娇, 等.《用于生态修复的粉煤灰(T/CACE 028—2021)》[S].北京:中国循环经济协会, 2021-04-20.
- MA Shuhua, WANG Xiaohui, WANG Yuejiao, et al. Fly Ash for Ecological Restoration (T/CACE 028-2021)[S]. Beijing: China Circular Economy Association, Published on April 20th, 2021.
- 孙艺香. 基于国土空间规划视域下的工矿城镇发展模式——以陕北煤炭资源集中开采区为例[J]. *西北地质*, 2021, 54(1): 247–255.
- SUN Yixiang. Analysis on Development Modes of Mining and Industrial Towns in Northern Shaanxi Province: A National Spatial Planning Perspective[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(1): 247–255.
- 秦琪焜, 方健梅, 王根柱, 等. 煤矸石与城市污泥混合制备植生基质的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 304–314.
- QIN Qikun, FANG Jianmei, WANG Genzhu, et al. Experimental Study of Planting Substrate Mixed with Coal Gangue and Municipal Sludge[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 304–314.
- 王悦, 陈爽, 曹锐, 等. 耐盐菌联合化学复合调理剂协同改良黄河三角洲盐碱土壤的效果[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 354–360.
- WANG Yue, CHEN Shuang, CAO Rui, et al. Effects of Salt-tolerant Bacteria Combined with Chemical Compound Amendment on Improving Saline-alkali Soil in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2023, 37(1): 354–360.
- 王蒙. 神东矿区脱硫石膏和粉煤灰改良盐碱地的配比模式研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2021.
- WANG Meng. Study on the Ratio Model of Desulfurization Gypsum and Fly Ash to Improve Saline Land in Shendong Mining Area[D]. Inner Mongolia: Mongolia Agricultural University, 2021.
- 宋慧平, 安全, 申午艳, 等. 固废基土壤调理剂的制备及其矿区生态修复效果[J]. *环境工程*, 2022, 40(12): 187–195+230.
- SONG Huiping, AN Quan, SHEN Wuyan, et al. Preparation of Solid Waste Based Soil Conditioner and its Ecological Restoration Effect in Mining Area[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(12): 187–195+230.
- 田超. 粉煤灰、气化细渣对风沙土的改良效果及治理沙漠化的途径研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022, 303(7): 98–106.
- TIAN Chao. Study on the improvement effect of fly ash and gasification fine slag on aeolian sandy soil and the way to control desertification[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022, 303(7): 98–106.
- 况欣宇. 基于采矿固废的东部草原表土稀缺矿区土壤重构试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- KUANG Xinyu. Experimental Study on Soil Reconstruction in Eastern Grassland Topsoil Scarce Mining Area Based on Mining Solid Waste[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- 孔涛, 张开, 黄丽华, 等. 菌剂混施对各粒径矸石性质及苜蓿生长的影响[J/OL]. *煤炭学报*, 2023: 1–12. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615.
- KONG Tao, ZHANG Kai, HUANG Lihua, et al. The Effect of Mixed Application of Microbial Agents on the Properties of Various Particle Size Gangue and the Growth of Alfalfa [J/OL]. *Journal of Coal Science*, 2023, 1–12. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0615.
- 郑瑞伦, 朱永官, 孙国新. 人工技术土壤研究进展与展望[J/OL]. *土壤学报*, 2023: 1–16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221108.1043.004.html>.
- ZHENG Ruilun, ZHU Yongguan, SUN Guoxin. Progress and Prospect of Artificial Soil Research [J/OL]. *Journal of Soil Science*, 2023: 1–16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20221108.1043.004.html>.
- 徐亚, 王京京, 李淑, 等. 黄河流域固废治理现状、问题与对策建议[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(2): 373–380.
- XU Ya, WANG Jingjing, LI Shu, et al. Current Situation, Problems and Countermeasures of Solid Waste Treatment in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science Research*, 2023, 36(2): 373–380.
- 赵江, 王云康, 王建友, 等. 榆林市工业固体废弃物现状与应用进展[J]. *工业催化*, 2022, 30(3): 1–7.
- ZHAO Jiang, WANG Yunkang, WANG Jianyou, et al. Current Situation and Application Progress of Industrial Solid Waste in Yulin City[J]. *Industrial Catalysis*, 2022, 30(3): 1–7.
- 张汝翀, 王冬梅, 张英, 等. 煤矸石绿化基质对白三叶草生长及其抵御重金属污染的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 908–914.
- ZHANG Ruchong, WANG Dongmei, ZHANG Ying, et al. The Effect of Coal Gangue Greening Matrix on the Growth of White Clover and its Resistance to Heavy Metal Pollution[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(4): 908–914.
- Mkahal, Zeinab, Mamindy Pajany, et al. Recycling of mineral solid-wastes in backfill road materials: Technical and environmental investigations[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, (3): 12–17.