

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.021 CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.021

李玫睿, 杨捷钧, 冯宇超, 等. 煤矸石与菌剂复配对风沙土理化性质及苜蓿生长的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 299-307.

LI Meirui, YANG Jiejun, FENG Yuchao, et al. Effects of coal gangue and microbial inoculant co-amendment on physicochemical properties of aeolian sandy soil and alfalfa growth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 299-307.

## 煤矸石与菌剂复配对风沙土理化性质及苜蓿生长的影响

李玫睿<sup>1,2,3</sup>, 杨捷钧<sup>4</sup>, 冯宇超<sup>4</sup>, 辛文轩<sup>4</sup>, 韩凤朋<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 为研究煤矸石对风沙土的改良效果及配比。[方法] 选取神木市红柳林矿区风沙土为研究对象, 将不同粒径煤矸石( $<1$ 、 $<0.5$ 、 $<0.25$  mm)按不同比例(0~100%)掺入风沙土中, 测定其水力学参数, 并与黄绵土进行比较以确定最佳粒径配比。随后将煤矸石按最佳粒径及配比掺入风沙土中, 并复配不同比例菌剂(1%、3%、5%、7%)。在混合基质中进行为期100 d的室内苜蓿盆栽种植试验, 研究不同煤矸石和菌剂复配比例对风沙土养分质量分数、微生物活性及植物生长的影响。[结果] 风沙土中添加粒径 $<0.25$  mm煤矸石可显著改善其结构并提升持水能力, 其中10%的掺量为最佳配比。在此条件下, 土壤养分质量分数和微生物活性均显著增强。与对照(CK)相比, 土壤有机碳质量分数提高3.5倍, 微生物量碳质量分数提高2.0倍。相应地, 苜蓿的株高、生物量和根系生长指标均分别显著提升1.1、1.3、1.5倍。在此基础上, 复配5%菌剂, 煤矸石的改良效果进一步提高。[结论]  $<0.25$  mm 10%的煤矸石复配5%生物菌剂可有效提高风沙土保水保肥能力并促进苜蓿生长。

**关键词:** 土壤改良; 风沙土; 煤矸石; 苜蓿

中图分类号: S156.2; X752 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)02-0299-09

## Effects of Coal Gangue and Microbial Inoculant Co-Amendment on Physicochemical Properties of Aeolian Sandy Soil and Alfalfa Growth

LI Meirui<sup>1,2,3</sup>, YANG Jiejun<sup>4</sup>, FENG Yuchao<sup>4</sup>, XIN Wenxuan<sup>4</sup>, HAN Fengpeng<sup>1,4</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the improvement effect of coal gangue on aeolian sandy soil and determine its optimal mixing ratio. [Methods] Aeolian sandy soil from the Hongliulin mining area in Shenmu City was selected as the study subject. Coal gangue of different particle sizes ( $<1$  mm,  $<0.5$  mm,  $<0.25$  mm) was mixed into the aeolian sandy soil at varying ratios (0–100%). Hydraulic parameters were measured and compared with those of loessial soil to determine the optimal particle size and mixing ratio. Subsequently, coal gangue at the optimal particle size and proportion was blended into the aeolian sandy soil, and different ratios of microbial inoculants (1%, 3%, 5%, 7%) were added. A 100-day indoor pot experiment with alfalfa was conducted in the mixed substrate to investigate the effects of different coal gangue-microbial inoculant co-amendment ratios on the nutrient content, microbial activity, and plant growth of the aeolian sandy soil. [Results] Adding coal gangue with a particle size of  $<0.25$  mm significantly improved the structure of aeolian sandy soil and enhanced its water-holding capacity, with 10% incorporation being the optimal ratio. Under these conditions, both soil nutrient

收稿日期: 2025-09-08 修回日期: 2025-10-15 录用日期: 2025-10-20 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-16

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF1308003)

第一作者: 李玫睿(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: limeirui09@163.com

通信作者: 韩凤朋(1980—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤环境化学研究。E-mail: hanxiangzi007@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

content and microbial activity increased significantly. Compared with the control (CK), soil organic carbon increased by 3.5-fold and microbial biomass carbon by 2.0-fold. Correspondingly, plant height, biomass, and root-growth indices of alfalfa increased by 1.1-, 1.3-, and 1.5-fold, respectively. Furthermore, the addition of 5% microbial inoculant further enhanced the soil improvement effects of the coal gangue. [Conclusion] A mixture of 10% coal gangue (<0.25 mm) combined with 5% biological inoculant effectively enhances the water and nutrient retention capacity of aeolian sandy soil and promotes alfalfa growth.

**Keywords:** soil improvement; aeolian sandy soil; coal gangue; alfalfa

**Received:** 2025-09-08

**Revised:** 2025-10-15

**Accepted:** 2025-10-20

**Online**(www.cnki.net): 2025-12-16

毛乌素沙地是我国重要的煤炭资源富集区,矿区数量多、规模大,为全球少有的特大型煤田集中分布区<sup>[1]</sup>。其土壤以风沙土为主,机械组成主要为砂粒,保水保肥能力极差<sup>[2]</sup>。沙地原生植被稀疏,以耐旱灌木和草本为主,覆盖度多低于30%(流动沙丘区不足10%),生物多样性低,生态系统抗干扰能力弱<sup>[3]</sup>。加之煤矿开采导致的地表剥离、井工开挖(形成采空区)及运输道路修建,直接破坏原有植被与土壤结构,使矿区成为生态脆弱区与能源基地的重叠区<sup>[4]</sup>。其“干旱多风-沙质土壤-煤炭开采”的复合背景,加剧土地沙化、水土污染及水资源短缺等问题。因此,矿区风沙土改良对生态修复具有重要意义。

目前风沙土改良主要采用工程、生物及化学措施<sup>[5]</sup>。工程措施(如沙障设置)成本低、见效快,但仅适用于流动沙丘,对半固定或固定沙丘效果有限<sup>[6]</sup>;生物措施(如种植耐旱灌木和草本)可实现长期固沙,但植被稳定覆盖需5~8 a,见效慢且依赖水分条件<sup>[7]</sup>;化学改良剂(有机肥、石膏、聚丙烯酰胺等)虽能快速补充养分、改善结构,但存在明显短板,即偏远矿区有机肥来源有限、运输成本高;石膏养分质量分数低且 $\text{SO}_4^{2-}$ 易与土壤钾、钙、镁等阳离子结合形成难溶盐,降低有效养分<sup>[8]</sup>;高分子聚合物改良剂则成本高、长期效果不稳定<sup>[9]</sup>。因此,亟须研发高效低成本的新型改良剂。

煤矸石是煤炭生产(开采与洗选)的副产品,主要由高岭土、石英和碳质矿物构成,我国年产量约5亿t,利用率仅约40%,大量堆积会造成土地占用、污染等环境问题<sup>[10]</sup>。但其富含硅、铝、铁、钙、镁等矿物质及有机质,可补充土壤缺失的N、P、K及Cu、Zn、Fe等元素,具备作为土壤改良剂的潜力<sup>[11]</sup>。将煤矸石用于风沙土改良,既能减少环境污染,又能提升土地质量,实现资源循环利用,但其可行性及最佳利用方式仍需系统研究。

本研究以神木市红柳林矿区不同粒径煤矸石为对象,结合生物菌剂,通过分析复配后土壤的水力学参数、养分指标、植物生长指标及微生物指标,探究

煤矸石对风沙土的改良效果,筛选适宜的粒径与复配比例,为毛乌素矿区复垦及生态恢复提供技术支撑与理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

神木市红柳林矿区(38°55'N, 110°24'E)位于陕西省毛乌素沙地东南缘。该矿区目前洗选煤矸石预估量约200万t,煤矸石乱排乱倒问题严重。该地区降水季节性强,全年约75%的降雨集中在6—9月,多年平均降水量为351.61 mm。土壤多为沙化,土壤体积质量为1.65 g/cm<sup>3</sup>,毛管孔隙度为33.21%,保水保肥性能差,不利于植物生长,易发生水土流失。

### 1.2 试验材料

本研究所使用的风沙土和煤矸石均采自神木市红柳林矿区(38°55'28"N, 110°24'16"E),采样时间为2023年7月。试验所需煤矸石采自神木市红柳林矿区设定的煤矸石堆场,主要参数为pH 8.52,有机质107.40 g/kg,全氮1.26 g/kg,全磷0.24 g/kg。重金属相关参数为Cu 26.09 mg/kg, Zn 98.32 mg/kg, Pb 26.19 mg/kg, Ni 12.49 mg/kg。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)<sup>[12]</sup>为农用地风险筛选值。供试风沙土取自神木市红柳林矿区周边,主要参数为pH 8.14,电导率631.70  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,有机质5.38 g/kg,全氮0.33 g/kg,全磷0.12 g/kg。微生物菌剂来自陕西省易达力生物科技有限公司,该菌剂为粉剂(DP),主要成分为线状菌、丝状菌及酵母菌等200多种益生菌,价格为30元/kg。供试苜蓿品种为“拉烟”(Medicago sativa L.)。

### 1.3 试验设计

将采集的煤矸石均匀分为3份,并利用锤式破碎机(LC-CP, 中国)粉碎后,分别过1、0.5、0.25 mm筛网备用;将采集的风沙土风干后过2 mm筛网。将以上3种粒径煤矸石分别按体积比0、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%添加至风沙土中,均匀混合后填充至环刀,用同一压力压实。

共设33个处理,每个处理重复3次,不同混合模式的体积质量见表1。利用环刀法研究不同粒径及不同比例煤矸石添加后对风沙土水力学参数的影响,测得的水力学参数与黄绵土水力学参数作对比,筛选出煤矸石的最佳粒径及添加比例。

表1 不同风沙土和煤矸石混合模式的体积质量

Table 1 Bulk density of different mixtures of aeolian sandy soil and coal gangue

| 处理  | 体积分数  |       | 体积质量/<br>( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|-----|-------|-------|--|
|     | 风沙土/% | 煤矸石/% |  |
| S0  | 100   | 0     | 1.65                                       |
| S1  | 90    | 10    | 1.62                                       |
| S2  | 80    | 20    | 1.59                                       |
| S3  | 70    | 30    | 1.56                                       |
| S4  | 60    | 40    | 1.53                                       |
| S5  | 50    | 50    | 1.50                                       |
| S6  | 40    | 60    | 1.47                                       |
| S7  | 30    | 70    | 1.44                                       |
| S8  | 20    | 80    | 1.41                                       |
| S9  | 10    | 90    | 1.38                                       |
| S10 | 0     | 100   | 1.35                                       |

通过与黄绵土的水力学参数进行对比,确定煤矸石的最佳粒径及添加比例后,于2024年3月进行室内盆栽试验。本试验共设计6个处理,分别为纯风沙土(CK)、10%粒径 $<0.25\text{ mm}$ 煤矸石(T1)、10%粒径 $<0.25\text{ mm}$ 煤矸石+1%生物菌剂(T2)、10%粒径 $<0.25\text{ mm}$ 煤矸石+3%生物菌剂(T3)、10%粒径 $<0.25\text{ mm}$ 煤矸石+5%生物菌剂(T4)、10%粒径 $<0.25\text{ mm}$ 煤矸石+7%生物菌剂(T5)<sup>[13]</sup>。每处理设3次重复试验。试验花盆直径12 cm、高15 cm。按设定比例将不同粒径煤矸石、菌剂与风沙土混匀后,加入底肥(尿素0.15 g/kg,硫酸钾0.20 g/kg,过磷酸钙0.20 g/kg),再次拌匀并装盆,随后等量浇灌蒸馏水,静置平衡。紫花苜蓿种子播前用30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ 表面消毒5 min,蒸馏水冲洗4~5次,置于垫滤纸的培养皿中,于25℃恒温培养箱培养过夜。选萌发一致的饱满种子播种,每盆间隔播种20粒,覆土1~2 cm。播种后14 d内每日观测出苗,并进行间苗以留10株长势相近的健壮幼苗。盆栽周期为100 d。

#### 1.4 分析测试方法

紫花苜蓿的培养周期结束后,剪下苜蓿地上部分;将盆倒扣在地上,使盆中带有土壤的根部分与盆自然分离,轻轻抖落附着在根系表面的土壤,并用去离子水反复冲洗根部以洗去多余的泥土,用纸巾擦干多余的水分。将地上和地下部分的苜蓿分别装入信封用于后续植物养分指标的测定。株高采用直尺测量从根基部土表到茎叶顶端的长度;根系形态指标包

括根长、根表面积和根体积通过根系扫描仪(Epson Perfection V800 Photo,日本)对平铺的根系进行测定;生物量是将样品在105℃下杀青20 min后,在65℃下烘干至恒重,并分别测量地上和地下部分的干重。

盆中土壤一部分用锡纸包好,立即速冻并放置在一80℃冰箱保存,待进行后续土壤微生物量碳氮及酶活性测定。剩余的土样风干过0.25 mm筛保存。土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法进行测定。土壤硝、铵态氮,全氮用AA3型流动分析仪进行测定。土壤速效磷采用钼锑抗比色法进行测定,土壤全磷采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消解,用钼锑抗比色法进行测定。用微孔板荧光法测定土壤样品中几种 $\beta\text{-D-}$ 纤维素酶(CBH)、 $\beta\text{-1,4-}$ 葡萄糖苷酶(BG)、 $\beta\text{-1,4-N-}$ 乙酰氨基葡萄糖酶(NAG),L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)、碱性磷酸酶(AKP)活性<sup>[14]</sup>。用氯仿熏蒸直接浸提法测定微生物量碳氮<sup>[15]</sup>。

饱和含水量和田间持水量采用环刀法分析测定<sup>[16]</sup>。饱和导水率( $K_s$ )采用定水头法( $H=5\text{ cm}$ )测定。试验前,将装土环刀充分饱和48 h。待渗透稳定后,测定30 min内的渗透水量( $V$ ),各处理重复6次。结合土柱几何参数(长度 $L$ 、截面积 $A$ ),依据达西公式计算 $K$ 值。

$$K_s = \frac{VL}{tAH} \quad (1)$$

式中: $K_s$ 为饱和导水率, $\text{cm/h}$ ;  $V$ 为渗透水量, $\text{cm}^3$ ;  $L$ 为土柱长度, $\text{cm}$ ;  $t$ 为测定时间,30 min;  $A$ 为土柱截面积, $\text{cm}^2$ ;  $H$ 为水头高度, $\text{cm}$ 。

使用高速离心法测量土壤水分特征曲线<sup>[17-18]</sup>。将浸泡饱和的环刀用高速离心机(CR21G)在温度约20℃,吸力梯度为1、10、20、40、60、80、100、200、400、600、800、1 000 kPa下依次离心,待每个吸力下土样平衡之后,取出离心盒,静置一段时间后称量环刀质量。利用RETC软件中的van Genuchten模型对土壤水分特征曲线进行拟合,并得到相关参数。其表达式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (2)$$

式中: $\theta_s$ 为饱和含水量, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_r$ 为残余水含量, $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $h$ 为压力水头, $\text{cm}$ ;  $\alpha$ 、 $n$ 和 $m$ 为影响水分特征曲线形状的参数。

本研究数据采用SPSS 29统计分析软件进行单因素方差分析,并用LSD法进行事后多重比较。图片使用Graphpad Prism 10软件绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同混合比例煤矸石对风沙土水力学参数的影响

随着煤矸石添加量的增加,风沙土饱和水分体积分数与田间持水量呈递增趋势(图1)。在相同添

加量条件下,小粒径煤矸石对应的风沙土饱和含水量与田间持水量均高于大粒径煤矸石。当3种粒径煤矸石(由大到小依次为<1 mm、<0.5 mm、<0.25 mm)添加量由0增至100%时,饱和含水量从0.225 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>分别提升至0.321、0.483、0.499 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>,田间持水量则从0.183 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>提升至0.286、0.312、0.324 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。进一步分析不同粒径煤矸石的转折点特征发现,<1 mm粒径煤矸石的饱和含水量在添加量为40%时出现显著跃升拐点,田间持水量则在添加量达50%时出现转折点;<0.5 mm粒径煤矸石的饱和含水量在添加量30%时出现转折点,其田间

持水量转折点对应添加量为40%;<0.25 mm粒径煤矸石的饱和含水量同样在添加量30%时出现转折点,但其田间持水量转折提前至添加量20%。

饱和导水率随煤矸石添加量增加呈下降趋势。3种粒径煤矸石(由大到小依次为<1 mm、<0.5 mm、<0.25 mm)添加量由0增至100%时,饱和导水率分别由9.670 cm/h降至1.374、0.537、0.289 cm/h。当3种粒径添加量均为10%时,饱和导水率出现急剧下降;其中,<1 mm粒径煤矸石在添加量70%时、<0.5 mm粒径煤矸石在添加量50%时、<0.25 mm粒径煤矸石在添加量40%时,下降趋势均趋于平缓。

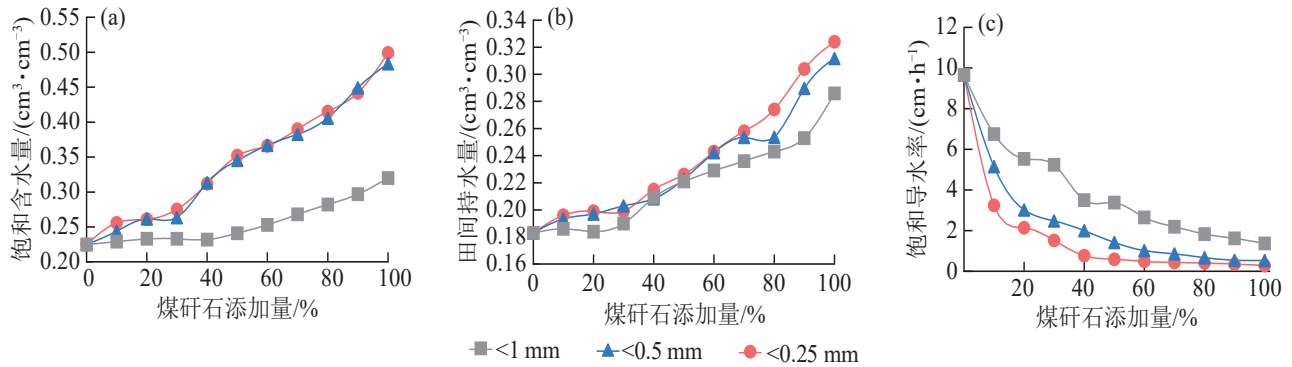


图 1 不同粒径煤矸石添加量对风沙土水力学参数的影响

Fig. 1 Effects of adding coal gangue with different particle sizes on hydrodynamic parameters of aeolian sandy soil

随着煤矸石添加量增加,土壤体积含水量呈上升趋势,水分特征曲线随煤矸石添加量增加呈上移趋势(图2)。当压力水头达2 000 cm时,不同粒径煤矸石配比下的土壤体积含水量均趋于稳定。稳定状态下,3种粒径煤矸石添加量由0增至100%时,土壤

体积含水量由0.050 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>分别提升至0.130、0.334、0.361 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。恒定水头条件下,土壤持水能力与煤矸石质量分数呈正相关,且在同一添加量条件下,随粒径减小持水能力显著增强,该现象在低吸力区间(0~500 cm)表现尤为突出。

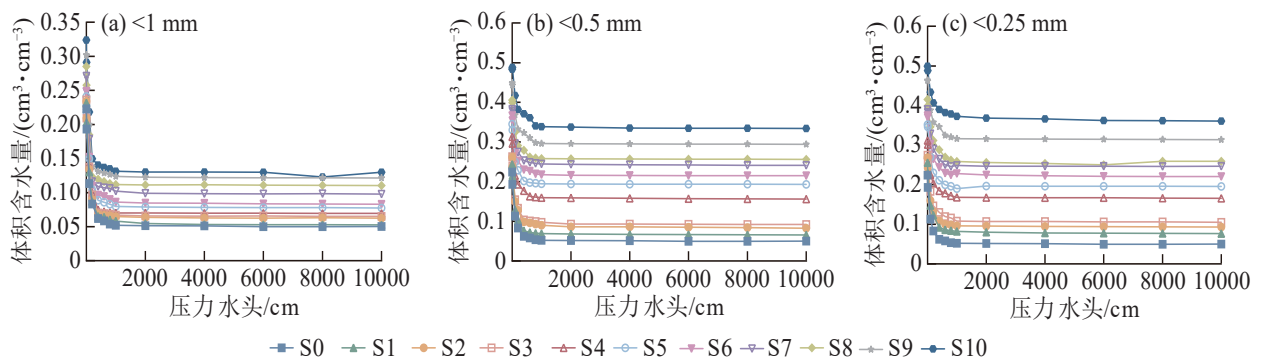


图 2 不同粒径煤矸石添加量对风沙土水分特征曲线的影响

Fig. 2 Effects of adding coal gangue with different particle sizes on soil water retention curves of aeolian sandy soil

采用 van Genuchten 模型对3种粒径煤矸石的水分特征曲线进行拟合,将其拟合参数及饱和水分体积分数( $\theta_s$ )、田间持水量( $\theta_f$ )、饱和导水率( $K_s$ )与黄绵土( $\alpha=0.061, n=1.580, \theta_s=0.265 \text{ cm}^3/\text{cm}^3, \theta_f=0.193 \text{ cm}^3/\text{cm}^3, K_s=3.104 \text{ cm/h}$ )对比分析,每个粒径选取3组最接近的配比(表2)。

$\theta_s, \theta_f, K_s$ 最接近的分别为<1 mm S3、<0.5 mm S2、<0.25 mm S1;水分特征曲线参数最接近的则依次为<1 mm S2、<0.5 mm S2、<0.25 mm S1。由此提出,在风沙土中添加30%粒径<1 mm、20%粒径<0.5 mm、10%粒径<0.25 mm煤矸石可显著提升其持水性能;综合煤矸石添加量考量,最优配比为10%粒径<0.25 mm煤矸石。

试验结果表明,3种粒径的煤矸石中,与黄绵土

表 2 煤矸石 van Genuchten 模型模拟的水分特征曲线参数及水力学参数与黄绵土的比较  
Table 2 Comparison of water retention curve parameters and hydraulic parameters simulated by van Genuchten model for coal gangue with those of loessial soil

| 处理          | 饱和含水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | 田间持水量/(cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ) | 饱和导水率/(cm·h <sup>-1</sup> ) | $\alpha$ | $n$   |
|-------------|--|--|-----------------------------|----------|-------|
| 黄绵土         | 0.265                                      | 0.193                                      | 3.104                       | 0.061    | 1.580 |
| <1 mm S1    | 0.229                                      | 0.186                                      | 6.756                       | 0.076    | 1.653 |
| <1 mm S2    | 0.233                                      | 0.184                                      | 5.534                       | 0.061    | 1.583 |
| <1 mm S3    | 0.233                                      | 0.190                                      | 5.241                       | 0.065    | 1.577 |
| <0.5 mm S1  | 0.244                                      | 0.193                                      | 5.150                       | 0.053    | 1.653 |
| <0.5 mm S2  | 0.262                                      | 0.197                                      | 3.023                       | 0.061    | 1.587 |
| <0.5 mm S3  | 0.263                                      | 0.203                                      | 2.488                       | 0.046    | 1.539 |
| <0.25 mm S1 | 0.256                                      | 0.196                                      | 3.240                       | 0.065    | 1.604 |
| <0.25 mm S2 | 0.261                                      | 0.199                                      | 2.146                       | 0.058    | 1.572 |
| <0.25 mm S3 | 0.275                                      | 0.199                                      | 1.529                       | 0.048    | 1.524 |

2.2 煤矸石及菌剂复配对风沙土养分的影响

添加 10% <1 mm 的煤矸石(T1)后风沙土养分含量均显著提高,复配 5% 的菌剂(T4)后风沙土养分含量达到最大值(图 3)。T1 处理下,土壤有机碳、

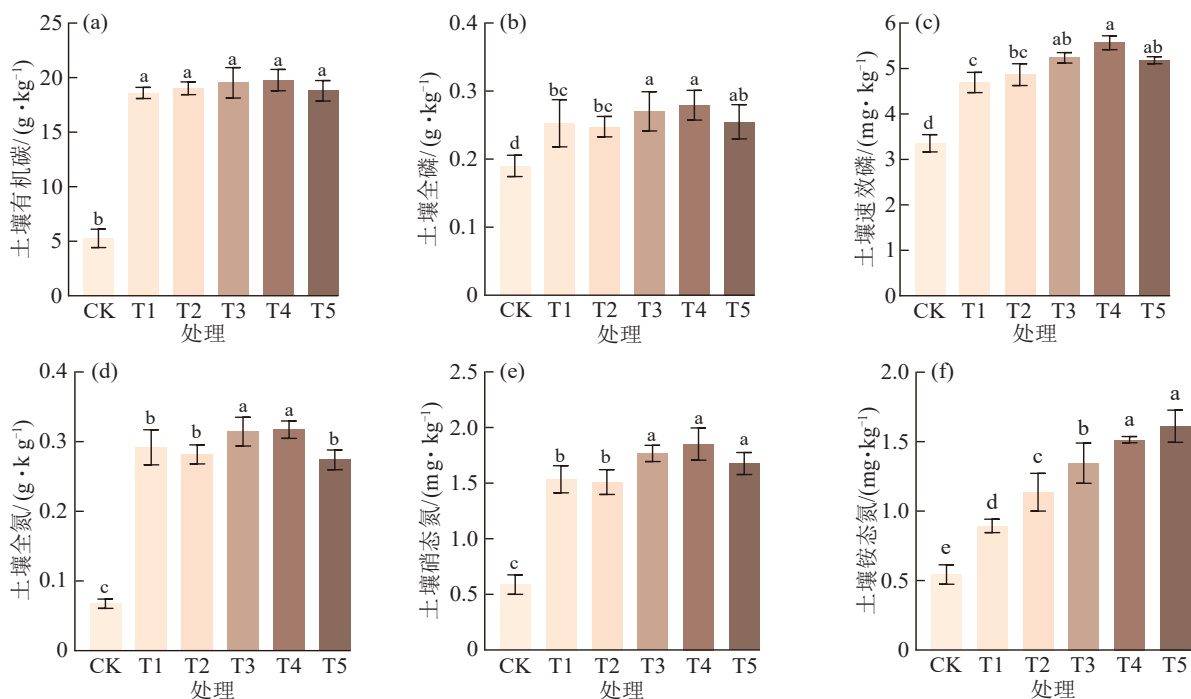
全磷、速效磷、全氮、硝态氮和铵态氮分别比对照提高 3.5、1.3、1.4、4.3、2.6、1.6 倍。T4 处理下土壤有机碳、全磷、速效磷、全氮、硝态氮和铵态氮分别比 T1 提高 6.4%、10.5%、18.6%、8.7%、20.6%、69.5%。随着菌剂添加量的增加,土壤养分呈上升趋势。但当菌剂添加量为 7% 时(T5),除铵态氮外,其余土壤养分含量均低于 T4 处理。

2.3 煤矸石及菌剂复配对苜蓿生长的影响

添加 10% <1 mm 的煤矸石(T1)后苜蓿的株高、地上生物量及根系指标均显著提高,复配 5% 的菌剂(T4)后苜蓿生长指标达到最大值(图 4)。T1 处理下,苜蓿株高、地上生物量、根长、根比表面积、根体积分别比对照提高 1.1、1.3、1.3、1.5、1.8 倍。T4 处理下苜蓿株高、地上生物量、根长、根比表面积、根体积分别比 T1 提高 24.4%、11.4%、87.8%、85.2%、87.8%。与对照相比,T2 和 T4 处理可显著提高苜蓿地下生物量,其他处理影响不大。随着菌剂添加量的增加,苜蓿生长指标呈上升趋势。但当菌剂添加量为 7% 时(T5),苜蓿生长指标低于 T4 处理。

2.4 煤矸石及菌剂复配对风沙土微生物的影响

添加 10% 粒径 <1 mm 的煤矸石(T1)后土壤微生物量碳氮、土壤胞外酶活性均提高,复配 5% 的菌剂(T4)后微生物活性指标达到最优值(图 5)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

图 3 不同粒径煤矸石及菌剂配比对风沙土养分的影响

Fig. 3 Effect of nutrient content in sandy loam soil under different amendment ratios

与对照相比,添加 10% <1 mm 的煤矸石(T1)后土壤微生物量碳、微生物量氮、 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶

(BG)、L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)、碱性磷酸酶(AKP)分别显著提高 2.0、1.4、1.5、1.2、1.9 倍。随着菌剂添加

量增加至 T4, 土壤微生物量碳及胞外酶活性随之增加。但当菌剂添加量为 7% 时(T5),  $\beta$ -1,4-葡萄糖苷

酶(BG)、 $\beta$ -D-纤维素酶(CBH)、L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)和碱性磷酸酶(AKP)活性有所降低。

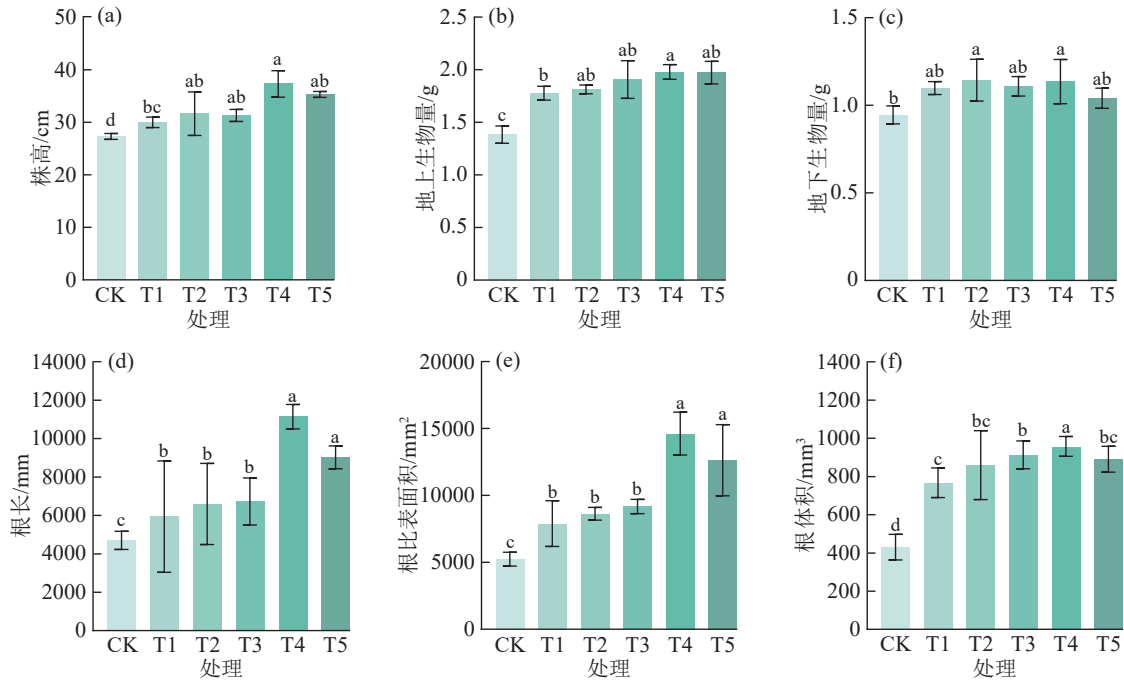


图 4 不同粒径煤矸石及菌剂比对苜蓿生长的影响

Fig.4 Effects of alfalfa growth under different amendment ratios

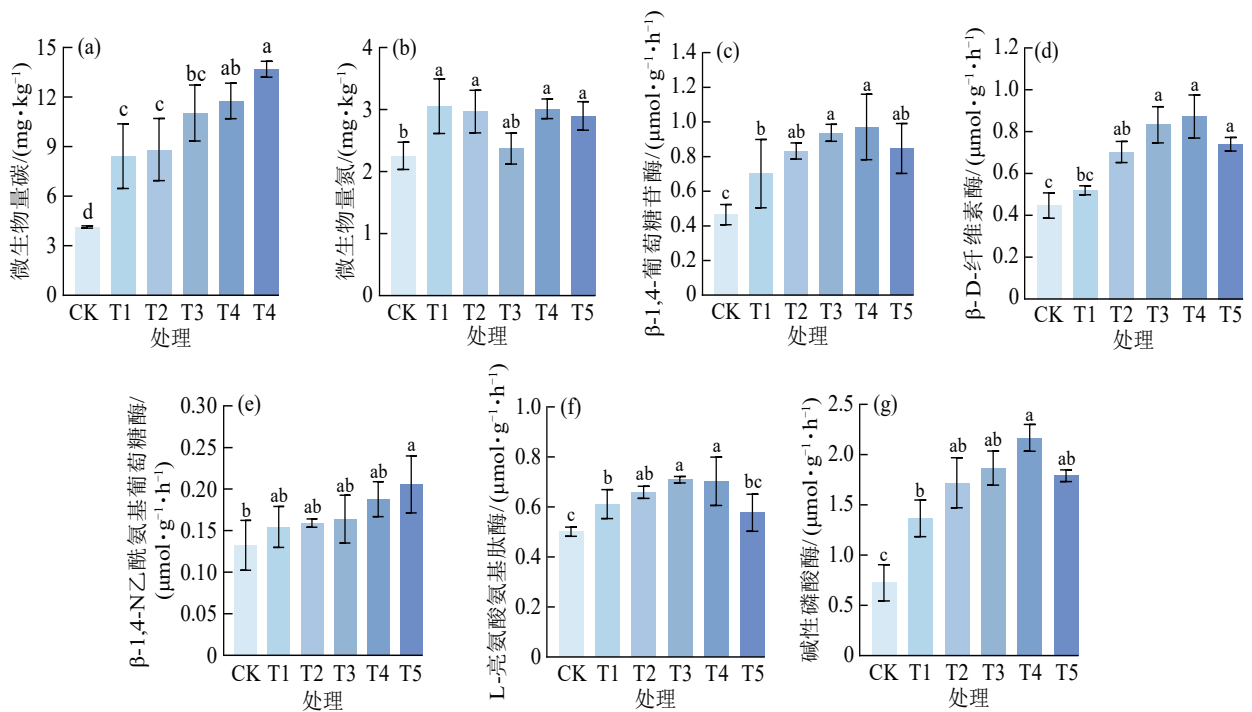


图 5 不同粒径煤矸石及菌剂比对土壤微生物的影响

Fig. 5 Effects of soil microbial under different amendment ratios

### 3 讨论

煤矸石的添加可提高风沙土持水能力, 其中粒径 $<0.25\text{ mm}$ 、添加量为 10% 时效果最佳。风沙土为干旱、半干旱区典型土壤, 以细沙为主, 结构松散且保水能力较弱。此特点严重影响沙地作物或植被的

生长与水分利用效率, 限制农业生产力与生态系统的稳定性。通过向风沙土添加粉碎煤矸石, 其砂粒质量分数显著降低, 粉粒与黏粒质量分数显著增加。这种机械组成的改变直接优化土壤孔隙结构, 提升中小孔隙比例, 进而增强保水性能, 与 NIMMO 等<sup>[17]</sup>

提出的粉粒和黏粒增加可改善沙质土壤持水能力的结论一致。朱磊等<sup>[19]</sup>通过设置0(CK)、54%~90%的煤矸石添加梯度试验发现,当煤矸石质量分数达84%时,土壤水分体积分数提升最显著,且能有效促进沙地柳枝稷生长。值得注意的是,煤矸石粒径越小,改良效果越突出。本研究中<0.25 mm煤矸石添加30%即达饱和含水量转折点,而<1 mm煤矸石需40%添加量,与曹勇等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,即小粒径煤矸石能更高效填充土壤大孔隙,提升持水能力。除了填充土壤孔隙外,小粒径颗粒还可通过促进团聚体形成来改善土壤保水性<sup>[21]</sup>。本研究中风沙土的饱和导水率随煤矸石质量分数增加显著降低,且降低幅度与煤矸石粒径呈正相关,粒径越小,饱和导水率降幅越大。其机制在于,煤矸石质量分数增加提升土壤中小粒径颗粒的比例,这类小颗粒不仅增大土壤比表面积,还显著减少大孔隙占比<sup>[22]</sup>。由于大孔隙是水分快速运移的主要通道,其占比降低直接阻碍水分流动,使土壤导水能力下降<sup>[23]</sup>。邱俊杰等<sup>[24]</sup>研究也证实,小粒径颗粒虽能提升土壤保水能力,但抑制水分快速流动,与本研究结果一致。综上,煤矸石添加通过调整风沙土机械组成提升保水性,但会降低渗透性。实际应用中,需根据改良目标优化煤矸石粒径、添加量及混合比例,平衡持水性与渗透性,以实现最佳改良效果。

添加10%粒径<0.25 mm的煤矸石可显著提高风沙土养分质量分数及微生物活性。风沙土的有机质主要来源于有限的植被残体及微生物分解产物。受干旱气候和低生产力植被限制,风沙土的有机质质量分数极低,是养分匮乏的主要原因,且大量元素(N、P、K)也严重不足,难以满足植物的需求<sup>[25]</sup>。添加10%粒径<0.25 mm的煤矸石后土壤有机碳质量分数显著增高。煤矸石中有机碳质量分数高,可补充土壤有机碳。添加煤矸石后,土壤2种碳代谢的关键性酶(BG、CBH)活性提高。当输入煤矸石作为碳源后,水分和养分条件的改变为微生物提供良好的环境和充足的碳源,促进微生物生长。土壤中有有机碳绝对质量分数显著增加,微生物(如真菌、细菌等)通过“经济规则”大量合成BG和CBH以适应“碳源丰富”的环境<sup>[26]</sup>。同时BG和CBH分解有机碳产生的“小分子产物”(如纤维二糖、葡萄糖等)可作为微生物的代谢信号,触发“正反馈”调节,逆向促进微生物生长<sup>[27]</sup>。伴随氮、磷等其他养分的补充,微生物活性提高,土壤N获取酶(NAG, LAP)及碱性磷酸酶也随之提高,加速养分的周转,释放更多植物可利用的养分,为植物生长提供良好的基础。

风沙土添加10%粒径<0.25 mm的煤矸石后,苜蓿的株高、生物量及根系生长指标显著提升,是煤矸石对风沙土物理、化学、生物性质综合改良的结果。在此基础上,复配5%菌剂,煤矸石的改良效果进一步提高。首先,小粒径煤矸石的添加可改善风沙土物理结构,缓解水分与养分限制。煤矸石填充风沙土的大孔隙,增加毛管孔隙的比例,提高风沙土保水能力。苜蓿根系对水分敏感,水分供应稳定后,根系伸长阻力减小,促进根系生长<sup>[28]</sup>。风沙土的大孔隙会导致降水或灌溉水快速下渗,养分(如 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{K}^+$ )易随水流失。煤矸石填充大孔隙后,水分下渗速率降低,养分在根系层滞留时间延长,苜蓿可吸收更多有效养分(如铵态氮、有效磷等)<sup>[29]</sup>。其次煤矸石可补充土壤养分,激活植物-微生物协同代谢。煤矸石中有机质及其他矿质养分质量分数较高,部分可溶性养分可直接溶解于土壤溶液中,为苜蓿生长提供必需的元素。马腾辉等<sup>[30]</sup>研究发现,煤矸石中的碳质矿物可作为微生物的碳源,刺激土壤微生物繁殖,与本研究微生物量碳提高2倍的现象一致。微生物通过分泌胞外酶(如BG、CBH、NAG)分解风沙土及煤矸石中难降解的有机质,释放小分子养分,供苜蓿吸收。苜蓿为豆科植物,依赖根瘤菌固氮,煤矸石改良后土壤水分与养分条件改善,根瘤菌活性提高,固氮效率提升,为苜蓿提供更多可利用氮<sup>[31]</sup>。煤矸石的改良作用以物理结构优化(填充大孔隙、增加毛管孔隙)和矿质养分补充(释放Si、Ca、Mg等)为主。添加菌剂后,一方面菌剂可直接激活风沙土中的养分,比如固氮菌通过与苜蓿等豆科植物根系共生形成根瘤,将空气中的 $\text{N}_2$ 转化为可利用的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (固氮量50~100 kg/hm<sup>2</sup>),直接补充风沙土中“有效氮不足”的短板<sup>[32]</sup>;另一方面,菌剂通过微生物代谢活动将煤矸石的“惰性养分”转化为“有效养分”,并将煤矸石的结构改良与微生物功能结合,形成协同效应<sup>[33]</sup>。但复配7%菌剂对风沙土的改良效果并不如5%好,可能是因为7%菌剂的微生物总量会引发养分竞争。研究<sup>[34]</sup>发现,过量生物肥料施用会诱导玉米根际微生物竞争并降低氮利用效率,与本研究结果一致。因此5%为最佳的菌剂复配比例。

## 4 结论

1)随着煤矸石添加量的增加,风沙土饱和含水量与田间持水量呈递增趋势,饱和导水率呈递减趋势。相同添加量下,小粒径的煤矸石添加下风沙土的饱和含水量及田间持水量比大粒径更高,饱和导水率更低。通过与黄绵土水力学参数指标对比发现,在风沙土中添加10%粒径<0.25 mm的煤矸石,能最有效提升土壤的持水性能。

2) 10% 粒径 $<0.25$  mm 煤矸石的添加显著提高风沙土养分和微生物活性。添加10% 粒径 $<0.25$  mm 煤矸石后,土壤有机碳、全磷、速效磷、全氮、硝态氮和铵态氮均显著高于对照,土壤微生物量碳、微生物量氮、 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶(BG)、L-亮氨酸氨基肽酶(LAP)、碱性磷酸酶(AKP)也得到显著提升。煤矸石能有效提高土壤养分利用率,改善微生物生存环境,为植物生长提供良好的基础。

3) 10% 粒径 $<0.25$  mm 煤矸石的添加显著促进苜蓿生长,在此基础上,复配5% 菌剂,煤矸石的改良效果进一步提高。煤矸石添加下,苜蓿株高、地上生物量、根长、根比表面积、根体积均显著高于对照组。复配菌剂后煤矸石对土壤养分及微生物活性的提高都更加显著,从而更有效地促进植物生长。

综上所述,对于结构松散、保水保肥能力较差的风沙土,煤矸石的添加能有效改善风沙土的物理结构和养分质量分数,并促进植物生长。在实际生产中粉碎煤矸石价格为20元/t,其价格显著低于大多数常用改良剂或人工土壤制备原料,具备明显的成本优势,且10% 粒径 $<0.25$  mm 的煤矸石复配5% 生物菌剂的改良效果最佳。

#### 参考文献:

- [1] 张健,黄辉,赵家巍,等.煤矿矿区地面生态环境特征模型及损伤阈值界定研究[J].中国煤炭,2025,51(1):32-39.  
ZHANG J, HUANG H, ZHAO J W, et al. Research on the characteristics model and damage threshold definition of ground ecological environment in coal mining areas[J]. China Coal, 2025, 51(1): 32-39.
- [2] 郭雯娴,马艳霞,刘晓琛,等.毛乌素沙地固沙林恢复土壤矿物颗粒固定碳氮效应及机制[J].水土保持通报, 2025, 45(4): 277-285.  
GUO W X, MA Y X, LIU X C, et al. Effects and mechanisms of carbon and nitrogen sequestration in soil mineral particles during restoration of sand-fixing forests in Mu Us sandy land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 277-285.
- [3] 乔硕,王海兵,左合君,等.毛乌素沙地绿洲化过程中生态服务价值及生态网络格局演变[J].中国沙漠, 2022, 42(3): 118-126.  
QIAO S, WANG H B, ZUO H J, et al. Evolution of ecological service value and network pattern of Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(3): 118-126.
- [4] 赵炜,赵举,魏占民,等.气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响[J].水土保持研究, 2022, 29(2): 64-69.  
ZHAO W, ZHAO J, WEI Z M, et al. Effect of aeolian sandy soil improved by gasification slag on soil water physical properties[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 64-69.
- [5] 张海欧,郭振.浅析风沙土的改良与利用措施[J].农业与技术, 2021, 41(15): 69-71.  
ZHANG H O, GUO Z. A brief analysis of improvement and utilization measures for aeolian sandy soil[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(15): 69-71.
- [6] 徐元畅.不同沙障的防风固沙生态服务效益研究[D].南京:南京信息工程大学, 2021.  
XU Y C. Study on the windbreak and sand-fixation ecological service benefits of different sand barriers[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2021.
- [7] LIU C G, JIA X X, REN L D, et al. Relationship of vegetation stand age to soil water dynamics and use in artificial shrublands and grasslands in a semiarid region[J]. Agricultural Water Management, 2025, 313: e109487.
- [8] SYED-OMAR S R, SUMNER M E. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfalfa[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1991, 22(19/20): 2017-2028.
- [9] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1141-1149.  
SUO L N, MA J, LIU B C, et al. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(6): 1141-1149.
- [10] 范立民,向茂西,彭捷,等.毛乌素沙漠与黄土高原接壤区泉的演化分析[J].煤炭学报, 2018, 43(1): 207-218.  
FAN L M, XIANG M X, PENG J, et al. Evolution analysis on springs in contiguous area of Maowusu Desert and Loess Plateau[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 207-218.
- [11] 竹涛,武新娟,邢成,等.煤矸石资源化利用现状与进展[J].煤炭科学技术, 2024, 52(1): 380-390.  
ZHU T, WU X J, XING C, et al. Current situation and progress of coal gangue resource utilization[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 380-390.
- [12] 生态环境部,国家市场监督管理总局.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:中国环境出版社, 2018.  
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land (Trial): GB 15618—2018[S]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2018.
- [13] 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].煤炭学报, 2023, 48(增刊1): 241-251.  
KONG T, ZHANG K, HUANG L H, et al. Effects of combined microbial inoculants on properties of different-sized coal gangue and alfalfa growth[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 241-251.
- [14] HUANG B B, XING Y J, LUO W, et al. Effects of long-term nitrogen addition and throughfall reduction on extracellular enzyme activity and coenzymatic stoichiometry in a temperate forest[J]. Journal of Soil Science and

- Plant Nutrition, 2024, 24(1):1534-1546.
- [15] QU Q, WANG Z, GAN Q, et al. Corrigendum: Impact of drought on soil microbial biomass and extracellular enzyme activity[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: e1221288.
- [16] 林业部科技司. 森林生态系统定位研究方法[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994.
- Science and Technology Department of the Ministry of Forestry. Field research methods in forest ecosystems [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1994.
- [17] NIMMO J R, AKSTIN K C. Hydraulic conductivity of a sandy soil at low water content after compaction by various methods[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(2):303-310.
- [18] REUTER G. Improvement of sandy soils by clay-substrate application[J]. *Applied Clay Science*, 1994, 9(2):107-120.
- [19] 朱磊, 古文哲, 刘小铭, 等. 煤矸石土壤调理剂对毛乌素沙地柳枝稷生长的影响[J]. *山西农业科学*, 2024, 52(5):60-67.
- ZHU L, GU W Z, LIU X M, et al. Effects of coal gangue soil conditioner on growth of switch grass in Mu Us sandy land [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2024, 52(5):60-67.
- [20] 曹勇, 毕银丽, 宋子恒, 等. 物理改良对采矿伴生黏土水分和养分保持能力的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(1):116-121.
- CAO Y, BI Y L, SONG Z H, et al. Effects of physical improvement on water and nutrients of mining associated clay [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(1):116-121.
- [21] 刘新梅, 田剑, 张昊, 等. 改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):326-333.
- LIU X M, TIAN J, ZHANG H, et al. Effects of amendment on aggregates composition and organic carbon content in reclaimed soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1):326-333.
- [22] WANG J M, LI X F, BAI Z K, et al. The effects of coal gangue and fly ash on the hydraulic properties and water content distribution in reconstructed soil profiles of coal-mined land with a high groundwater table[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(3):687-697.
- [23] 朱晓月, 马灿, 方燕, 等. 水分胁迫和粉煤灰添加对风沙土颗粒分形维数及肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):103-110.
- ZHU X Y, MA C, FANG Y, et al. Effects of drought stress and fly ash on fractal dimension and fertility of aeolian sandy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):103-110.
- [24] 邱俊杰, 郑刘根, 陈孝杨, 等. 粉煤灰掺入量对煤矸石水力学性质和导气率的影响[J]. *环境工程*, 2021, 39(9):131-137.
- QIU J J, ZHENG L G, CHEN X Y, et al. Effects of fly ash incorporation on hydraulic characteristics and air permeability of coal gangue [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(9):131-137.
- [25] NAOREM A, JAYARAMAN S, DANG Y P, et al. Soil constraints in an arid environment: Challenges, prospects, and implications[J]. *Agronomy*, 2023, 13(1):e220.
- [26] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(5):937-944.
- [27] YU H L, SI P, SHAO W, et al. Response of enzyme activities and microbial communities to soil amendment with sugar alcohols[J]. *MicrobiologyOpen*, 2016, 5(4):604-615.
- [28] 李振松, 万里强, 李硕, 等. 苜蓿根系构型及生理特性对干旱复水的响应[J]. *草业学报*, 2021, 30(1):189-196.
- LI Z S, WAN L Q, LI S, et al. Response of alfalfa root architecture and physiological characteristics to drought and rehydration [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1):189-196.
- [29] 张俊杰, 宋慧平, 冯政君, 等. 煤矸石粒径及配比对沙化土壤改良效果研究[J]. *环境工程技术学报*, 2025, 15(3):780-787.
- ZHANG J J, SONG H P, FENG Z J, et al. Study on the effect of coal gangue particle size and ratio on desertified soil improvement [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2025, 15(3):780-787.
- [30] 马腾辉, 李蓉, 王坤, 等. 时间序列下煤矸石充填复垦耕地和林地的土壤碳动态特征[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(5):260-268.
- MA T H, LI R, WANG K, et al. Soil carbon dynamic characteristics of coal gangue-filled reclaimed cropland and forest land under time series [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5):260-268.
- [31] 高丽敏, 苏晶, 田倩, 等. 施氮对不同水分条件下紫花苜蓿氮素吸收及根系固氮酶活性的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(3):130-136.
- GAO L M, SU J, TIAN Q, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation and root nitrogenase activity in *Medicago sativa* at different soil water contents [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3):130-136.
- [32] 吕梦真, 吴内, 沈建国, 等. 1990—2023年国内外生物固氮研究热点和发展趋势的计量分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(2):375-394.
- LÜ M Z, WU N, SHEN J G, et al. Bibliometric analysis of research hotspots and trends of biological nitrogen fixation at home and abroad from 1990 to 2023 [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2025, 31(2):375-394.
- [33] 王红萍, 步连燕, 陈文峰, 等. 功能菌剂与生物炭配施对沙化土壤的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1):345-353.
- WANG H P, BU L Y, CHEN W F, et al. Effects of combined application of functional microbial agents and biochar on sandy soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):345-353.
- [34] LI B B, ROLEY S S, DUNCAN D S, et al. Long-term excess nitrogen fertilizer increases sensitivity of soil microbial community to seasonal change revealed by ecological network and metagenome analyses [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 160:e108349.