

# 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系 复合体抗剪性能的差异性

赵菊<sup>1</sup>, 刘方<sup>1,2</sup>, 朱健<sup>1,2</sup>, 刘元生<sup>2</sup>, 陈祖拥<sup>2</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 探究黑麦草生长对混合基质物理性质与抗剪性能的影响, 为煤矸石山植被快速恢复和防治水土流失提供科学依据。[方法] 针对煤矸石物理结构差和养分含量少等特点, 通过在煤矸石中添加磷石膏和菌渣形成混合植生基质, 在盆栽条件下种植黑麦草, 探讨黑麦草生长对混合基质物理性质与抗剪性能的影响。[结果] ① 添加不同比例的磷石膏、菌渣改良煤矸石均可以明显促进黑麦草生长, 其中在添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣的煤矸石混合基质上黑麦草株高、地上部干生物量、根重密度和叶绿素含量指标改善效果最好, 其次是添加 10% 磷石膏和 10% 菌渣的煤矸石。② 添加磷石膏和菌渣可明显改善煤矸石混合基质的通气持水能力, 其中添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣处理组相对于只添加 10% 菌渣处理组煤矸石混合基质的自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度分别提高了 18.88%, 14.18%, 13.12% 和 18.08%, 而容重降低了 24.76%。③ 添加磷石膏和菌渣的煤矸石混合基质有利于黑麦草根系的发育生长, 相对于只添加 10% 菌渣处理组, 添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣处理组的煤矸石混合基质各级垂直荷载下的抗剪强度平均提高了 71.71%, 黏聚力和内摩擦角分别提高了 102.84%, 45.05%。[结论] 添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣的煤矸石混合基质与黑麦草根系复合体抗剪性能最好, 有利于控制煤矸石山水土流失。

**关键词:** 煤矸石; 改良剂; 黑麦草生长指标; 抗剪强度; 水土流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0103-07

中图分类号: S157.1, X752

**文献参数:** 赵菊, 刘方, 朱健, 等. 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系复合体抗剪性能的差异性[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 103-109. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.009; Zhao Ju, Liu Fang, Zhu Jian, et al. Differential shear resistance of a mixed substrate of gangue-phosphogypsum-mushroom residue and ryegrass rhizosphere complex [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 103-109.

## Differential Shear Resistance of a Mixed Substrate of Gangue-Phosphogypsum-Mushroom Residue and Ryegrass Rhizosphere Complex

Zhao Ju<sup>1</sup>, Liu Fang<sup>1,2</sup>, Zhu Jian<sup>1,2</sup>, Liu Yuansheng<sup>2</sup>, Chen Zuyong<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of ryegrass growth on the physical properties and shear resistance of a mixed substrate were studied in order to provide a scientific basis for the rapid restoration of coal gangue hill vegetation and for the prevention of soil erosion. [Methods] The physical structure of gangue is poor and the nutrient content is low. Ryegrass was planted in pots to which phosphogypsum and mycorrhizal residue were added to determine the effect of ryegrass growth on the physical properties and shear resistance of a mixed substrate. [Results] ① The addition of different proportions of phosphogypsum and mycorrhizal slag significantly increased the growth of ryegrass. Height, aboveground dry biomass, root weight density, and chlorophyll content of ryegrass on the mixed coal gangue substrate consisting of 20% phosphogypsum and 10% mycorrhizal slag had the best effect, followed by the mixed substrate consisting of 10% phosphogypsum

收稿日期: 2022-09-27

修回日期: 2022-12-07

资助项目: 贵州省科技计划项目“磷石膏改性植生基质规模化利用关键技术及应用研究”(黔科合支撑[2019]2864号)

第一作者: 赵菊(1996—), 女(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为固体废物资源化利用。Email: zhaojuycy@163.com。

通讯作者: 刘方(1964—), 男(侗族), 贵州省天柱县人, 博士, 教授, 主要从事固体废物资源化利用方面的研究。Email: lfang6435@163.com。

and 10% mycorrhizal slag. ② The addition of phosphogypsum and slag significantly increased the aeration and water-holding capacity of the gangue mixed substrate in which the natural water content, total porosity, capillary porosity, and non-capillary porosity of the gangue mixed substrate with 20% phosphogypsum and 10% slag were increased by 18.88%, 14.18%, 13.12%, and 18.08%, respectively, and the bulk density was decreased by 24.76% compared with the respective values observed for the gangue mixed substrate with only 10% slag. ③ The shear strength of the gangue mixed substrate with 20% phosphogypsum and 10% mycorrhizal slag increased by 71.71%, and the cohesion and internal friction angle increased by 102.84% and 45.05%, respectively, compared with the mixed substrate having only 10% mycorrhizal slag. [Conclusion] The coal gangue mixed substrate with ryegrass root complex having 20% phosphogypsum and 10% mycorrhizal residue had the greatest shear resistance and was beneficial for controlling soil erosion in coal gangue hills.

**Keywords:** gangue; amendment; ryegrass growth index; shear strength; soil erosion

煤矸石是煤炭开采和洗选过程中产生的含碳量较低、发热值低、较煤坚硬的黑灰色固体废物,大量煤矸石露天堆存形成的煤矸石山体需要进行生态修复<sup>[1]</sup>。煤矸石含有大量的硫化物、铁和锰等金属离子<sup>[2]</sup>,酸度大,大孔隙多、渗透性强、保水性能差、有效水利用率低,有效养分低<sup>[3]</sup>,使得煤矸石山及周围环境的生态恢复较难;此外,由于煤矸石山边坡具有不稳定性,松散堆置的煤矸石山没有挡土墙、护坡等水土流失防治措施,在大雨及暴雨条件下极易导致地表裸露,土体抗侵蚀能力减弱,诱发矸石山塌方、滑坡、泥石流等地质灾害<sup>[4]</sup>,进一步加剧了煤矸石堆场生态环境恶化。抗剪强度是衡量土体抑制外力剪切形变能力的重要指标,改善土壤物理性质和提高土体抗剪强度对于防治水土流失和减少地质灾害具有重要意义<sup>[5]</sup>。为了控制矸石山水土流失,部分学者根据力学原理,对煤矸石山坡面抗冲性和抗剪性等方面进行了研究,为煤矸石山的稳定性分析提供了思路<sup>[6-7]</sup>,通过在煤矸石山种植草本植物形成根—土复合体,能够有效提高边坡抗剪强度,增强矸石山土体稳定<sup>[8-9]</sup>,但是不同植物种类对土壤抗剪性能和物理性质的影响差异显著<sup>[10-11]</sup>。可见,研究不同种类的草本植物根—土复合体的抗剪性对控制煤矸石堆场水土流失及其生态修复具有重要的指导意义。然而,目前对改良剂及其根系复合体耦合作用的研究相对较少,因而本文采用磷石膏和菌渣进行煤矸石基质改良。近期,较多研究表明磷石膏含有丰富的磷、钙、硫、硅、铁等营养元素,且合适粒级磷石膏可提高土壤水渗透性,减少地表径流,缓解土壤养分流失,对土壤起良好的调理作用<sup>[12]</sup>。食用菌渣富含有机质及氮、磷等多种营养元素,广泛应用于土壤改良等方面<sup>[13]</sup>。因此,本研究通过在煤矸石中添加磷石膏和菌渣形成混合植生基质,在盆栽条件下种植黑麦草(*Lolium perenne*),探究黑麦草生长对混合基质物理性质与抗剪性能的影响,以

期为煤矸石山植被快速恢复和防治水土流失提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及基质材料

供试煤矸石(coal gangue)采自贵州省贵阳市花溪区久安乡打通村对门寨的煤矿废弃地。该乡属亚热带高原季风气候,海拔高度 1 090~1 402 m,年平均气温 13 ℃,年平均降雨量 1 150 mm。该煤矿废弃地曾是贵阳市重要产煤区,通过煤矿整治后小煤矿并全部关闭,但多年开采废弃的煤矸石仍露天堆放在矿井周边,当降雨时该煤矿废弃地存在崩塌地质灾害隐患。

磷石膏(phosphogypsum)采于贵阳息烽某磷化肥公司;食用菌渣(bacterial residue)采自贵阳花溪周边的某食用菌工厂。2021年10月各样品基质采集后在室内经过自然风干磨碎后过 2 mm 粗筛备用。供试植物为多年生黑麦草。

### 1.2 试验设计

将备用的煤矸石、磷石膏和菌渣按照表 1 添加比例(质量比)配置试验混合基质,设置 6 组重复共 60 盆,其中 30 盆按照《土工试验方法标准(GB/T50123-2019)》要求进行环刀样用于直剪试验,其中混合基质的水分含量依据后期盆栽试验的含水率添加;另外 30 盆用于种植基质(2 kg/盆),充分混匀后装进花盆(规格:长 35 cm,宽 18 cm,高 11.5 cm),在花盆底部垫入 200 目纱布滤布,放置能够储水的塑料盆在花盆底部收集渗滤液。盆栽试验制备后等密度播种黑麦草草籽(20 g/盆),浇水使基质含水量为最大田间持水量的 70%左右以满足黑麦草生长,置于自然环境下生长,后期视煤矸石混合基质干湿度浇水。该试验于 2021 年 10 月 21 日至 2022 年 4 月 21 日在贵州大学试验场进行。

表 1 试验混合基质的配置

Table 1 Configuration of tested mixed substrate

处理组	煤矸石/%	磷石膏/%	菌渣/%
GPB <sub>1</sub>	90	0	10
GPB <sub>2</sub>	80	10	10
GPB <sub>3</sub>	70	20	10
GPB <sub>4</sub>	60	30	10
GPB <sub>5</sub>	50	40	10
GPB <sub>6</sub>	80	0	20
GPB <sub>7</sub>	70	10	20
GPB <sub>8</sub>	60	20	20
GPB <sub>9</sub>	50	30	20
GPB <sub>10</sub>	40	40	20

注:各处理均设置 3 个重复。

### 1.3 样品采集

2022 年 4 月采集样品,取样条件为雨后连续放晴 3 d 以上。首先测量黑麦草株高,并采集少量黑麦草叶片用于叶绿素含量测定<sup>[14]</sup>,其次用剪刀刈割黑麦草地上部装袋于 60 °C 烘箱中烘干至恒重称量干生物量;接着用底面积为 30 cm<sup>2</sup>,高为 2 cm 的环刀慢慢压入花盆取样,共 120 个煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系复合体抗剪环刀样;容重、混合基质孔隙度测定使用容积为 100 cm<sup>3</sup> 的环刀取样;自然含水率则使用铝盒取 15~20 g 混合基质测定。

### 1.4 试验指标测定

自然含水率用烘干法测定 105 °C;容重、土壤孔隙度用环刀法测定<sup>[15]</sup>;抗剪强度采用 ZJ 型直剪仪分别在竖直压力为 100,200,300 和 400 kPa 下测定,且依据库伦定律计算黏聚力和内摩擦角;收集测定抗剪强度的环刀样,4 个环刀样为一组,将带有根系的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质用自然水泡若干小时,以至于根、土分离,接着将带有部分混合基质的根系放在孔隙极细网筛中洗净装入已排序的袋中,用烘箱在 60 °C 下烘干至恒重,用 1/1 000 电子天平称量根干重。根重密度是指单位基质中根系干质量。根重密度计算公式如下所示:

$$D = m_{hd} / v_{jz} \quad (1)$$

式中: $D$  为根重密度(mg/cm<sup>3</sup>); $m_{hd}$  为环刀内根系总干质量(mg); $v_{jz}$  为煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质体积(cm<sup>3</sup>)。

### 1.5 数据处理方法

利用 SPSS 24.0 软件对试验数据进行差异显著性检验(Duncan 法,  $p < 0.05$ ),用皮尔森(Pearson)法做相关性分析;利用 Origin 2018 绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质上黑麦草生长状况

为了探究不同配比基质下黑麦草生长的态势,不同处理组黑麦草的株高、地上部干生物量、根重密度及叶绿素含量的情况由图 1 所示。只含有煤矸石的处理组黑麦草没有发芽,说明了煤矸石中添加不同含量的磷石膏和菌渣能在不同程度上促进黑麦草生长。在相同菌渣添加量下,磷石膏添加量为 20% 时黑麦草的株高、地上部干生物量、根重密度、叶绿素含量高于其他处理组,其中 GPB<sub>3</sub> 处理组相对于 GPB<sub>1</sub> 处理组的株高、地上部干生物量、根重密度、叶绿素含量分别显著提高了 42.75%,42.68%,124.90% 和 25.99%,GPB<sub>8</sub> 处理组相对于 GPB<sub>6</sub> 处理组的株高、地上部干生物量、根重密度、叶绿素含量分别显著提高了 32.19%,29.02%,120.62% 和 23.52%。

磷石膏添加量相同时,添加 10% 菌渣处理组比添加 20% 菌渣处理组株高、地上部干生物量、根重密度、叶绿素含量高。其中,GPB<sub>3</sub> 处理组以上指标值达到最大,GPB<sub>3</sub> 处理组相对于 GPB<sub>8</sub> 处理组株高、地上部干生物量、根重密度分别显著提高了 25.41%,17.77% 和 17.07%;添加 10% 菌渣处理组和 20% 菌渣处理组叶绿素含量之间无显著性差异,但是添加 10% 菌渣处理组比添加 20% 菌渣处理组叶绿素含量高,其中 GPB<sub>3</sub> 处理组比 GPB<sub>8</sub> 处理组含量高 10.72%。说明,添加 20% 的磷石膏和 10% 的菌渣改良煤矸石(GPB<sub>3</sub> 处理组)对黑麦草的株高、地上部干生物量、根重密度、叶绿素含量的促进效果最佳。

### 2.2 不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质的容重、含水率和孔隙度的差异

种植黑麦草后,不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质的容重、含水率、孔隙度差异如表 2 所示。在相同菌渣添加量下,随着磷石膏量的增加,混合基质的自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度先升高后降低,容重先降低后升高,且在磷石膏添加量为 20% 时,以上指标值达到最优,其中 GPB<sub>3</sub> 处理组相对于 GPB<sub>1</sub> 处理组的自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度分别显著提高了 18.88%,14.18%,13.12% 和 18.08%,容重显著降低了 24.76%;添加 30% 磷石膏处理组与添加 40% 的磷石膏处理组之间自然含水率、容重、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度无显著性差异。

磷石膏添加量相同时,添加 10%菌渣处理组比添加 20%菌渣处理组对混合基质的容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度改善大;添加 20%菌渣处理组比添加 10%的菌渣处理组的自然含水率高,其

中,GPB<sub>1</sub> 处理组相对于 GPB<sub>6</sub> 处理组自然含水率显著提高了 8.34%。综上所述,种植黑麦草后,添加 20%磷石膏和 10%菌渣的煤矸石植生基质物理指标最佳。

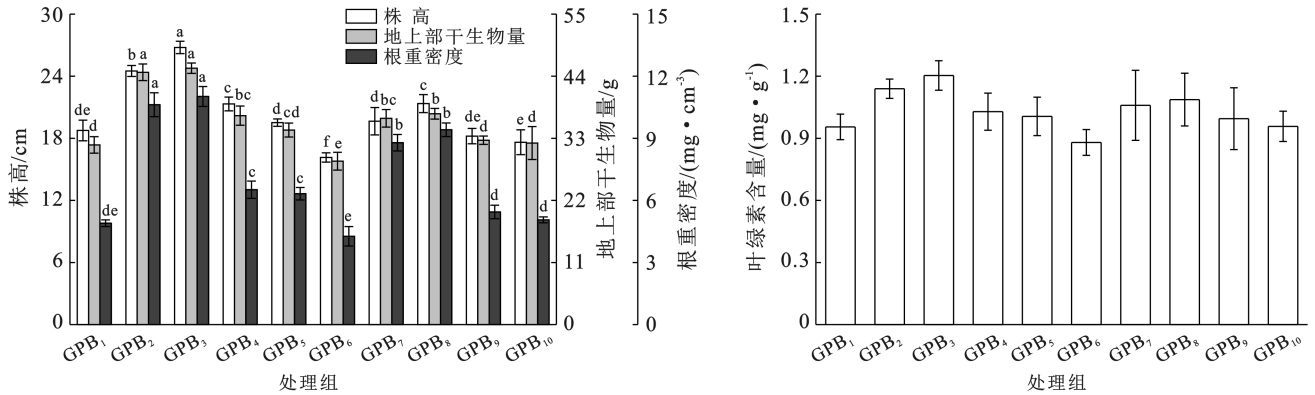


图 1 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质上黑麦草生长状况

Fig.1 Growth of ryegrass on coal gangue-phosphogypsum-mycorrhizal mixed substrate

表 2 不同处理基质含水率、容重和孔隙度

Table 2 Water content, capacitance and porosity of substrates with different treatments

处 理	自然含水率/%	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙/%	非毛管孔隙度/%
GPB <sub>1</sub>	21.45±1.36 <sup>d</sup>	1.04±0.03 <sup>a</sup>	59.74±1.01 <sup>e</sup>	46.96±0.82 <sup>de</sup>	12.78±0.41 <sup>de</sup>
GPB <sub>2</sub>	24.20±0.60 <sup>bc</sup>	0.82±0.02 <sup>e</sup>	67.00±0.50 <sup>a</sup>	52.82±0.93 <sup>a</sup>	14.18±0.43 <sup>bc</sup>
GPB <sub>3</sub>	25.50±0.75 <sup>ab</sup>	0.78±0.01 <sup>e</sup>	68.21±0.33 <sup>a</sup>	53.12±1.07 <sup>a</sup>	15.09±0.82 <sup>a</sup>
GPB <sub>4</sub>	23.54±0.33 <sup>e</sup>	0.92±0.02 <sup>c</sup>	63.70±0.69 <sup>c</sup>	49.76±0.77 <sup>bc</sup>	13.94±0.09 <sup>bc</sup>
GPB <sub>5</sub>	23.41±0.43 <sup>e</sup>	0.95±0.03 <sup>bc</sup>	62.49±0.83 <sup>cd</sup>	48.79±0.76 <sup>cd</sup>	13.70±0.33 <sup>cd</sup>
GPB <sub>6</sub>	23.24±0.51 <sup>e</sup>	1.07±0.02 <sup>a</sup>	58.72±0.74 <sup>e</sup>	46.08±1.62 <sup>e</sup>	12.63±0.88 <sup>e</sup>
GPB <sub>7</sub>	24.27±1.22 <sup>bc</sup>	0.87±0.03 <sup>d</sup>	65.24±0.99 <sup>b</sup>	51.20±1.10 <sup>ab</sup>	14.04±0.48 <sup>bc</sup>
GPB <sub>8</sub>	26.28±0.35 <sup>a</sup>	0.81±0.03 <sup>e</sup>	67.33±1.01 <sup>a</sup>	52.53±1.30 <sup>a</sup>	14.80±0.54 <sup>ab</sup>
GPB <sub>9</sub>	24.61±1.02 <sup>bc</sup>	0.96±0.03 <sup>bc</sup>	62.27±0.87 <sup>cd</sup>	48.71±0.95 <sup>cd</sup>	13.56±0.15 <sup>cd</sup>
GPB <sub>10</sub>	23.78±1.26 <sup>e</sup>	0.98±0.04 <sup>b</sup>	61.50±1.16 <sup>d</sup>	48.03±0.95 <sup>cd</sup>	13.47±0.21 <sup>cd</sup>

注:数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一指标不同处理组之间存在显著性差异(Duncan法,  $p < 0.05$ )。下同。

### 2.3 不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质抗剪性能差异

如表 3 和图 2 所示,在相同菌渣添加量下,添加磷石膏的处理组与未添加磷石膏的处理组之间在垂直荷载下的抗剪强度和抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角)均存在显著性差异,且磷石膏添加量越大的处理组在各级垂直荷载下的抗剪强度,黏聚力、内摩擦角都更好。其中 GPB<sub>5</sub> 处理组相对于 GPB<sub>1</sub> 处理组在各级垂直荷载下的抗剪强度平均提高了 42.97%、黏聚力和内摩擦角分别提高了 65.48% 和 27.27%; GPB<sub>10</sub> 处理组相对于 GPB<sub>6</sub> 处理组平均提高了 44.48%,

黏聚力和内摩擦角分别提高了 67.60% 和 28.28%。GPB<sub>5</sub> 与 GPB<sub>3</sub> 在 100, 200 和 400 kPa 垂直荷载下抗剪强度与抗剪性能参数(黏聚力、内摩擦角)均呈现显著性变化。由此说明,添加 40%磷石膏的煤矸石混合基质抗剪强度及其抗剪性能参数最好。磷石膏添加量相同时,添加 20%菌渣处理组比添加 10%菌渣处理组在各级垂直荷载下的抗剪强度,抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角)大,但增大幅度较小且处理组之间无显著性差异。以上说明,在煤矸石中添加 40%磷石膏和 10%菌渣的混合基质(GPB<sub>5</sub> 处理组)抗剪强度及其抗剪性能参数最好。



表 3 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质的抗剪强度

Table 3 Shear strength of gangue-phosphogypsum-mycorrhizal mixed substrate

处理	竖直荷载			
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
GPB <sub>1</sub>	77.52±4.18 <sup>d</sup>	107.58±3.17 <sup>e</sup>	163.47±4.83 <sup>e</sup>	187.73±7.48 <sup>e</sup>
GPB <sub>2</sub>	98.08±8.37 <sup>c</sup>	141.85±7.80 <sup>d</sup>	184.04±11.66 <sup>d</sup>	233.61±10.77 <sup>d</sup>
GPB <sub>3</sub>	103.89±5.99 <sup>bc</sup>	143.96±2.74 <sup>bcd</sup>	194.59±3.17 <sup>abcd</sup>	244.16±8.12 <sup>bcd</sup>
GPB <sub>4</sub>	113.57±12.16 <sup>ab</sup>	150.29±4.19 <sup>abcd</sup>	200.92±9.62 <sup>abc</sup>	261.03±17.40 <sup>ab</sup>
GPB <sub>5</sub>	122.34±7.48 <sup>a</sup>	152.93±2.42 <sup>ab</sup>	206.19±5.08 <sup>a</sup>	273.69±9.88 <sup>a</sup>
GPB <sub>6</sub>	80.15±6.40 <sup>d</sup>	109.69±7.13 <sup>e</sup>	164.00±12.08 <sup>e</sup>	192.48±14.26 <sup>e</sup>
GPB <sub>7</sub>	101.77±7.81 <sup>bc</sup>	142.38±4.19 <sup>cd</sup>	185.62±4.83 <sup>cd</sup>	239.41±11.88 <sup>cd</sup>
GPB <sub>8</sub>	112.85±8.12 <sup>ab</sup>	146.60±4.83 <sup>abcd</sup>	190.37±11.88 <sup>abc</sup>	258.39±14.95 <sup>abc</sup>
GPB <sub>9</sub>	120.76±3.98 <sup>a</sup>	151.34±2.41 <sup>abc</sup>	201.97±6.39 <sup>a</sup>	272.63±3.65 <sup>a</sup>
GPB <sub>10</sub>	123.40±5.70 <sup>a</sup>	155.03±5.70 <sup>a</sup>	208.30±9.27 <sup>a</sup>	276.32±10.29 <sup>a</sup>

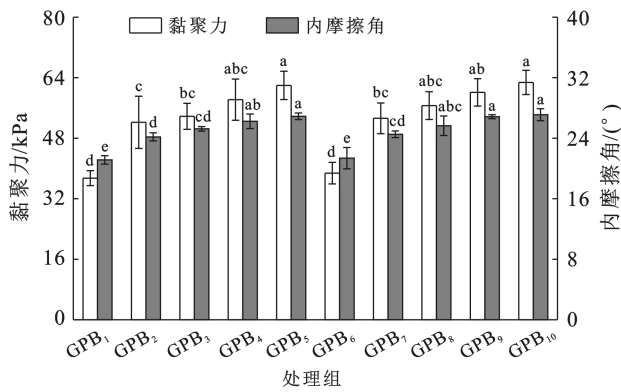


图 2 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质的黏聚力和内摩擦角

Fig.2 Cohesion and internal friction angle of gangue-phosphogypsum-slag mixed matrix

#### 2.4 不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系复合体抗剪性能差异

由表 4 和图 3 可知,播种黑麦草后,在相同菌渣添加量下,添加磷石膏处理组的根—基质复合体和未添加磷石膏处理组之间在各级垂直荷载下的抗剪强度、抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角)均存在显著性差异。随着磷石膏含量的增加,不同处理组根—基质复合体在各级垂直荷载下的抗剪强度、黏聚力、内摩擦角均呈现先升高后降低的趋势,且在磷石膏添加量为 20% 时,根—基质复合体以上指标值达到最优。相对于 GPB<sub>1</sub> 处理组,GPB<sub>3</sub> 处理组的各级垂直荷载下的抗剪强度平均提高 71.71%,黏聚力和内摩擦角分别提高了 102.84%,45.05%;相对于 GPB<sub>6</sub> 处理组,GPB<sub>8</sub> 处理组的各级垂直荷载下的抗剪强度平均提高了 66.79%,黏聚力和内摩擦角分别提高了 109.10%,39.06%。

磷石膏添加量相同时,添加 10% 菌渣处理组比添加 20% 菌渣处理组的根—基质复合体在各级垂直荷载下的抗剪强度和抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦

角)大。GPB<sub>3</sub> 处理组与 GPB<sub>8</sub> 处理组之间在各级垂直荷载下的抗剪强度和抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角)均存在显著性差异,相对于 GPB<sub>8</sub> 处理组,GPB<sub>3</sub> 处理组的各级垂直荷载下的抗剪强度平均提高了 12.42%,黏聚力和内摩擦角分别提高了 10.31%,10.35%。综上所述,在煤矸石中添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣形成植生基质(GPB<sub>3</sub> 处理组)并种植黑麦草,能显著提高混合基质与黑麦草根系复合体的抗剪强度与抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角),对于增强煤矸石土体稳定,进行煤矸石山植被恢复起到重要作用。

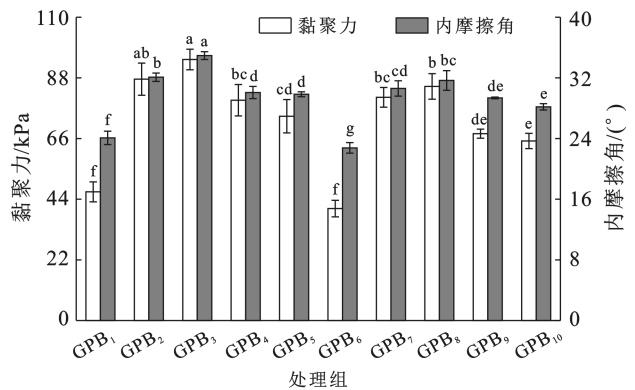


图 3 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系复合体的黏聚力和内摩擦角

Fig.3 Cohesion and internal friction angle of gangue-phosphogypsum-mycorrhizal mixed substrate and ryegrass rhizosphere complex

由表 5 可以得出,自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度与抗剪性能参数在  $p < 0.01$  水平上均是极显著相关,其中,自然含水率总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度与黏聚力相关系数分别可达 0.641,0.914,0.887,0.765,与内摩擦角分别可达 0.676,0.915,0.889 和 0.767。

表 4 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系复合体的抗剪强度

Table 4 Shear strength of gangue-phosphogypsum-mycorrhizal mixed substrate and ryegrass rhizosphere complex

处 理	竖 直 荷 载			
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
GPB <sub>1</sub>	91.76±4.75 <sup>g</sup>	130.25±8.71 <sup>g</sup>	191.42±9.49 <sup>f</sup>	220.42±10.54 <sup>f</sup>
GPB <sub>2</sub>	149.76±4.84 <sup>b</sup>	212.52±13.45 <sup>b</sup>	277.90±7.13 <sup>b</sup>	336.96±11.41 <sup>b</sup>
GPB <sub>3</sub>	165.06±5.56 <sup>a</sup>	233.08±5.08 <sup>a</sup>	303.22±12.69 <sup>a</sup>	373.88±8.12 <sup>a</sup>
GPB <sub>4</sub>	139.75±7.13 <sup>cde</sup>	191.42±8.37 <sup>cd</sup>	256.28±17.41 <sup>e</sup>	311.13±10.17 <sup>cd</sup>
GPB <sub>5</sub>	135.52±5.56 <sup>def</sup>	187.20±11.98 <sup>de</sup>	237.30±4.19 <sup>d</sup>	310.07±10.38 <sup>cd</sup>
GPB <sub>6</sub>	83.85±5.70 <sup>g</sup>	117.07±4.19 <sup>g</sup>	177.71±6.39 <sup>f</sup>	203.55±9.67 <sup>f</sup>
GPB <sub>7</sub>	142.38±4.75 <sup>bcd</sup>	194.59±11.41 <sup>cd</sup>	261.03±7.25 <sup>bc</sup>	317.46±13.83 <sup>cd</sup>
GPB <sub>8</sub>	146.07±6.58 <sup>bc</sup>	207.24±14.06 <sup>bc</sup>	273.69±11.07 <sup>b</sup>	329.58±17.99 <sup>bc</sup>
GPB <sub>9</sub>	131.31±1.59 <sup>ef</sup>	172.44±4.18 <sup>ef</sup>	230.44±2.41 <sup>de</sup>	299.52±3.98 <sup>de</sup>
GPB <sub>10</sub>	127.62±3.98 <sup>f</sup>	162.42±3.29 <sup>f</sup>	218.84±8.12 <sup>e</sup>	287.40±5.55 <sup>e</sup>

表 5 自然含水率和孔隙度与抗剪性能参数相关分析

Table 5 Correlation analysis of natural moisture content and porosity with shear performance parameters

抗剪性能参数	自然含水率	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
黏聚力	0.641**	0.914**	0.887**	0.765**
内摩擦角	0.676**	0.915**	0.889**	0.767**

注：“\*”表示在  $p < 0.05$  水平(双侧)上显著相关;“\*\*”表示在  $p < 0.01$  水平(双侧)上极显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 煤矸石中添加磷石膏和菌渣能明显提高混合基质抗剪性能

本研究中,添加磷石膏、菌渣均能提高煤矸石混合基质抗剪性能,其机理可能为:磷石膏的颗粒较细,级配良好,大部分为粉粒和黏粒,其含有  $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等活性氧化物,会生成少量具有一定强度和硬化的水化胶凝物质,因而在强度方面表现出一定黏聚力。同时,由于其复杂的晶体结构,板状的晶体之间相互交错搭接,故而也具有一定摩擦力<sup>[16]</sup>。另外,磷石膏有较大的比表面和较强的静电场<sup>[17]</sup>,能吸附细颗粒到其周围,同时其遇水溶解后能向土壤溶液中释放电解质,增加土壤溶液中阳离子的交换,从而防止土壤颗粒的分散,促使颗粒相互结合,增强土壤固土能力。而食用菌渣含有较多纤维<sup>[18]</sup>,纤维具有良好的韧性,剪切过程中均匀分布的纤维网络分散了剪应力作用,提高了土体抗剪强度<sup>[19]</sup>。有研究<sup>[20]</sup>表明,添加适量的植物纤维可以增强混凝土的黏聚力,阻止混凝土的开裂。因此,本研究中磷石膏生成的水化胶凝物质,使煤矸石颗粒粘结成团,发生凝结和硬化,煤矸石黏聚力增高,加之菌渣纤维表面包裹的煤矸石颗粒,增加纤维与煤矸石混合基质的啮合力从而提高了土体抗剪强度。

### 3.2 黑麦草根系与混合基质复合体能显著提高混合基质抗剪性能

草类根系对土壤起到加筋和锚固作用,能有效降低土壤容重,增加土壤养分和改善土壤微环境等,形成根—土复合体结构,从而有效增强土壤抗剪性和抗侵蚀性<sup>[21]</sup>。本研究中心磷石膏和菌渣与黑麦草根系组合对增强煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质的抗剪强度、黏聚力和内摩擦角有较大影响。这是因为含水率<sup>[22]</sup>、容重、土壤孔隙度以及土壤颗粒组成等土壤物理指标<sup>[11]</sup>和植物根系指标<sup>[23]</sup>影响了土壤抗剪性能。本研究黑麦草须根多且根系发达,根系在混合基质中盘结缠绕起到了固结土壤的作用,一定程度上制约了混合基质的变形。相关研究说明黑麦草根系加固土体稳定机理主要有两方面的原因:①根系本身具有较高的抗拉强度和弹性模量<sup>[24]</sup>,根系抗拉能力则以部分侧根拉断和部分不定根从团粒体中被拉出来限制试样产生剪切变形,提高了根—土复合体的黏聚力<sup>[25]</sup>;②根系分泌物的有机黏结物质和多糖类物质使土颗粒黏结在根系周围形成一定结构性的团粒,且茎基部和根系的连接又将土体团粒连接成根系网络状结构,提高了根—土复合体的黏聚力和内摩擦角<sup>[5,25]</sup>,增强了土体的稳定性。可见,植物根系可直接对土壤抗剪性能产生影响。此外,添加磷石膏和菌渣改善了混合基质营养状况及其物理化学性质为黑麦草生长提供了适宜的生长环境,而草类根系在生长过程中穿插于混合基质中,根系的生长改善土壤物理性质,间接影响了土壤抗剪强度<sup>[11]</sup>。本研究相关分析表明,自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度与抗剪性能参数(黏聚力和内摩擦角)在  $p < 0.01$  水平上均呈极显著正相关。综上说明混合基质与黑麦草根系复合体抗剪强度较好,优于混合基质。本研究探究了不同比例的煤矸石—磷石膏—菌渣混

合基质与植物根系复合体对混合基质抗剪强度的耦合作用。但是,本研究仅对禾本科的黑麦草进行了研究,而不同类型植物根系有较大的差别,煤矸石混合基质与根系复合体抗剪强度性能也会出现明显的差异,这方面内容还值得深入研究。

## 4 结论

(1) 添加磷石膏、菌渣改良煤矸石可以明显促进黑麦草生长。添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣处理组对黑麦草株高、地上部干生物量、根重密度和叶绿素平均含量指标改善效果最好,相较于只添加 10% 菌渣处理组以上指标平均值分别显著地提高了 42.75%, 42.68%, 124.90%, 25.99%。

(2) 添加磷石膏和菌渣改良煤矸石种植黑麦草后能显著提高煤矸石混合基质的自然含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度,降低容重,改善土壤通气持水能力。其中,添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣处理组煤矸石混合基质的自然含水率、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度的平均值可达到最佳,分别为 25.50%, 0.78 g/cm<sup>3</sup>, 68.21%, 53.12% 和 15.09%。

(3) 煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质与黑麦草根系的耦合作用能显著提高混合基质抗剪性能。总体上,添加 40% 磷石膏和 10% 菌渣的煤矸石混合基质抗剪强度、黏聚力和内摩擦角最佳,种植黑麦草后,相对于同比例煤矸石—磷石膏—菌渣混合基质处理组以上指标平均增幅分别为 15.39%, 19.58%, 10.96%; 并且,其中添加 20% 磷石膏和 10% 菌渣的煤矸石混合基质与黑麦草根系复合体的抗剪强度和抗剪性能参数更佳,各级垂直荷载下的抗剪强度平均达到 268.81 kPa, 黏聚力和内摩擦角平均分别达到 94.66 kPa 和 34.94°。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 李振, 雪佳, 朱张磊, 等. 煤矸石综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 165-178.

[2] 刘方, 陈祖拥, 刘元生, 等. 植被自然恢复对煤矸石堆场 Fe/Mn 淋溶迁移的影响及其作用效果[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 181-186.

[3] 孔涛, 黄舒漫, 梁冰, 等. 木霉菌对煤矸石分解和绿化效果的影响[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3204-3211.

[4] 杨鑫光, 李希来, 王克宙, 等. 煤矸石山生态恢复的主要路径[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7740-7751.

[5] 陈飞, 施康, 钱乾, 等. 根土复合体材料的抗剪强度特性研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(6): 96-104.

[6] 潘德成, 李海燕, 吴祥云, 等. 阜新煤矿区次生裸坡土壤抗冲性动态变化[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 203-206.

[7] 李东升, 刘东升. 煤矸石抗剪强度特性试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 2808-2816.

[8] 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 等. 高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(6): 105-113.

[9] 闫聪, 胡夏嵩, 李希来, 等. 高寒矿区排土场植被恢复对边坡土体物理力学性质影响研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(2): 383-393.

[10] 毛旭芮, 胥鹏海, 曹月娥, 等. 露天煤矿废弃地植物根系抗剪强度试验[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(6): 103-110.

[11] 李铁, 王润泽, 湛芸, 等. PAM 和草类根系对荒坡紫色土物理性质与抗剪性能的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(2): 69-78.

[12] 张峻, 解维闵, 董雄波, 等. 磷石膏材料化综合利用研究进展[J/OL]. 材料导报, 2023(16): 1-24 [2023-04-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20220901.1257.014.html>.

[13] 陈文峰, 夏新星, 李世汨. 菌渣改良淤泥固化土及其促进黑麦草的生长[J]. 环境工程, 2022, 40(7): 116-122, 68.

[14] 张志良. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.

[15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.

[16] 杜婷婷, 李志清, 周应新, 等. 水泥磷石膏稳定材料用于路面基层的探究[J]. 公路, 2018, 63(2): 189-195.

[17] 喜银巧, 赵英, 李生宇. 3 种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1401-1410.

[18] 王瑛, 刘津岐, 楚光明, 等. 盆栽模拟条件下优选复合材料对沙土理化性状的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(8): 169-175.

[19] 李双洋, 陈芳清, 熊丹伟. 外掺料对植被混凝土高羊茅根系生长及抗剪强度的作用[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(3): 1242-1248.

[20] 梁永哲, 陈毅, 刘大翔, 等. 外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 136-139, 145.

[21] 周涛, 湛芸, 王润泽, 等. 种草和施用聚丙烯酰胺对荒坡紫色土抗剪和抗蚀性能的影响研究[J]. 草业学报, 2019, 28(3): 62-73.

[22] Si Zhongqian. Study on the effect of water content on shearing strength parameters of unsaturated loess [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3489 (638/640): 585-588.

[23] Murielle G, Guillaume V, Alain B, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance [J]. Plant and Soil, 2014, 377 (1/2): 43-61.

[24] 李自蹊. 草本植物根系模型构建与力学试验研究[D]. 辽宁 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.

[25] 李强, 姬凤玲, 刘涛德, 等. 黑麦草根系对砂土抗剪强度的影响研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 275-280.