

# 接菌对紫花苜蓿根系抗拉性及根菌复合土体抗剪强度影响

毕银丽<sup>1,2</sup>, 罗睿<sup>1</sup>, 王双明<sup>1</sup>

(1.西安科技大学 煤炭绿色开发地质保障重点实验室,陕西 西安 710054;2.中国矿业大学(北京) 煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083)

**摘要:**废弃矿井生态修复既包含井工采煤沉陷造成的根系拉伤修复,也包含露天开采边坡地质灾害治理。废弃矿井受采矿影响致使生态脆弱,植株成活率低,生态修复成为矿山环境治理的主要目标。利用微生物修复技术恢复根系功能成为研究热点。为了深入揭示2类共生真菌丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhiza fungi, AMF)和深色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)对根系抗拉强度及根土复合体抗剪强度的影响,以紫花苜蓿为研究对象,布设室内盆栽实验,设置不种植物不接菌为纯对照CK1、种植植物不接菌为对照CK2、单接菌AMF、单接菌DSE和双接菌AMF+DSE 5种处理,研究接菌对根系力学特性及菌根复合土的抗剪强度影响作用。结果表明:接菌与对照处理的土壤粒径组成大致相同:细砂粒>中砂粒>粗砂粒,接菌前后土壤构成中粗砂粒所占比重增高,细砂粒含量成倍降低。5种不同处理下的平均单根抗拉力及复合体抗剪强度由大至小依次为AMF+DSE, DSE, AMF, CK2, CK1;平均单根抗拉强度依次为AMF+DSE, CK2, AMF, DSE。5种处理下深度10~20, 20~30 cm处菌根复合土黏聚力比30~40 cm深度处的显著增加,黏聚力与根系分布相关;不同处理的根土复合体黏聚力均存在最优根径,即根径约为0.6 mm时黏聚力达到最大。该研究成果为微生物复垦机理提供了一种新的力学方法,为采煤沉陷地和地质灾害生物减损修复提供了一种新的思路。

**关键词:**菌根复合土;根系力学;抗剪强度;丛枝菌根真菌(AMF);深色有隔内生真菌(DSE)  
**中图分类号:**TD88 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)06-2182-11

## Effect of inoculation on the mechanical properties of alfalfa root system and the shear strength of mycorrhizal composite soil

BI Yinli<sup>1,2</sup>, LUO Rui<sup>1</sup>, WANG Shuangming<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory for Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Ecological restoration of abandoned mines includes root strain injury caused by underground coal mining and geological disaster prevention and control of open-pit slope. Abandoned mines have fragile ecology and low plant survival rate, so ecological restoration has become the main goal of mine environmental governance. Microbial remediation technology is used to restore root function, which has become a research hotspot. In order to reveal the effects of two symbiotic fungi, arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) and dark septate endophytes (DSE), on the tensile

收稿日期:2022-01-24 修回日期:2022-04-07 责任编辑:韩晋平 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.FQ22.0120

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974326);首都科技领军人才资助项目(Z18110006318021)

作者简介:毕银丽(1971—),女,陕西米脂人,长江学者特聘教授,博士生导师。E-mail:ylbi88@126.com

引用格式:毕银丽,罗睿,王双明.接菌对紫花苜蓿根系抗拉性及根菌复合土体抗剪强度影响[J].煤炭学报,2022,47(6):2182-2192.

BI Yinli, LUO Rui, WANG Shuangming. Effect of inoculation on the mechanical properties of alfalfa root system and the shear strength of mycorrhizal composite soil [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2182-2192.



移动阅读

strength of roots and the shear strength of root-soil composite, the *Medicago sativa* was taken as the research object. The indoor pot experiment was conducted, and five treatments were set: control CK1 without plant and fungus inoculation, control CK2 with plant and no fungus inoculation, AMF with simple fungus inoculation, DSE with simple fungus inoculation and AMF+DSE with double-fungus inoculation. The effect of fungus inoculation on the root mechanical properties and shear strength of mycorrhizal composite soil was studied. The results showed that the grain size composition of soil inoculated with bacteria in control treatment was almost consistent: fine sand > medium sand > coarse sand. The proportion of coarse sand in soil composition increased and the content of fine sand decreased exponentially before and after inoculation. The average tensile strength of single root and shear strength of composite under five different treatments from high to low were as follows: AMF+DSE>DSE>AMF>CK2. The average tensile strength of single root from high to low was as follows: AMF+DSE>CK2>AMF>DSE. The cohesive force of mycorrhizal composite soil at different depths of 10–20 cm and 20–30 cm was significantly higher than that at depths of 30–40 cm under five treatments, and the cohesive force was related to the distribution of root system. There was an optimal root diameter for the cohesion of root-soil composite with different treatments, namely the cohesion reached the maximum when the root diameter was about 0.6 mm. The research results provide a new mechanical method for microbial reclamation mechanism, and a new idea for biological impairment and restoration of underground coal mining and geological disasters.

**Key words:** mycorrhizal compound soil; root mechanics; shear strength; arbuscular mycorrhizal fungi (AMF); dark septate endophytes (DSE)

随着矿业资源开发,废弃矿井的生态环境问题逐渐突显,废弃井工矿开采导致地表沉陷<sup>[1]</sup>,废弃露天矿排土场致使边坡地质灾害频发。不同废弃矿井对生态环境的影响均与植物生长密切相关,开采对植被根系造成了不同程度的拉伤或损伤<sup>[2]</sup>,致使植被成活率降低,生物种群锐减、土地质量退化。根系发育好坏是关系到生态修复能否成功的核心,植物根系不仅能从土壤中吸收水分和养分,还能改良土壤结构和成分,从而增强土壤的抗剪切能力。根系对土力学作用方面的研究较多<sup>[3-4]</sup>,根复合土抗剪强度明显高于不含根素土<sup>[5]</sup>。随着土体含水率的提高<sup>[6]</sup>,根复合土抗剪强度指标黏聚力  $c$  降低,复合土中存在最优含根量<sup>[7]</sup>,当复合土为最优含根量时,土体的抗剪强度最大。研究发现草木根系力学特性受根径、植物生长位置<sup>[8]</sup>等因素影响,根系中纤维素、半纤维素、木质素 3 种化学成分也可以影响根系抗剪强度<sup>[9]</sup>。

近年来利用微生物修复技术在煤矿区沉陷地和露天排土场取得了较好的生态修复效应,微生物修复技术成为根系修复和土壤改良的强有力手段<sup>[10-11]</sup>。目前对采煤沉陷地根系发育影响较大的 2 种主要微生物是丛枝菌根真菌 (AMF) 和深色有隔内生真菌 (DSE), 2 种真菌都能侵染植物根系促进根系功能发育,提高生态修复效应<sup>[12]</sup>。AMF 和 DSE 都能生成根外菌丝,增强根系与土壤的接触面积<sup>[13]</sup>,促进宿主植物对养分的吸收利用<sup>[14]</sup>,提高宿主的适应性或营养状况<sup>[15]</sup>,增强对拉伤或其他胁迫的抵抗力<sup>[16-18]</sup>。

接菌对损伤根系的修复机理和作用已有报道<sup>[19]</sup>,而 AMF 和 DSE 联合对根系力学特性和根菌复合土抗剪强度的研究却鲜有报道。

紫花苜蓿适应性广、具有抗旱、抗寒等特点,为矿区适生优势植物。笔者选择紫花苜蓿作为宿主植物,采用室内盆栽实验,对不同微生物接种根系进行力学特性研究,比较菌根复合土黏聚力与含根量等指标之间的关系,揭示不同真菌对紫花苜蓿根系力学强度特性及根菌复合土力学变化特征的影响,以期为微生物修复在采煤沉陷地或排土场废弃地的力学研究提供新思路。

## 1 供试材料与方法

### 1.1 供试材料

选取适用于干旱半干旱地区生长的紫花苜蓿种子 (*Medicago sativa* L, 多年生草本植物,简称苜蓿,下同),播种前用 10%  $H_2O_2$  表面消毒 10 min,后用去离子水反复冲洗 3~4 次,在 26 °C 培养箱催芽 1 d。供试菌种为摩西管柄囊霉 (*Funnelliformis mosseae*, 简称 *F.m*) 和深色有隔内生真菌 (DSE)。微生物菌剂均为西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院自主增殖扩繁所得。供试土壤为质量比 3 : 1 沙子黑黏土混合而成,经过 121 °C 高温高压灭菌 2 h 后风干备用。

### 1.2 试验设计

试验设置详如表 1 和图 1 所示。每根管内填充 1.3 kg 土,接种 52 g 含有 AMF 根段和根际土的 AMF

菌剂与土壤拌合后装柱再播种;接种 DSE 为将 80% 的 DSE 菌液( $8 \times 10^5$  cfu/mL) 15 mL 均匀撒在种子周围,对照处理加等量灭活菌剂。每根管播 5 粒催芽苜蓿种子。试验在西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院光照培养室内进行,日均温度 16~31 °C,生长期中常规管理,采用称重浇水法,保持土壤含水量为土壤最大饱和持水量的 60%。种植 3 个月后,收获植物地上部,烘干称重其干物质,地下部根菌复合土制备试样进行三轴剪切试验。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

不同处理	土壤质量/kg	菌剂用量	播种数量/颗	数量/盆
不接菌素土 CK1	1.3	—	5	6
不接菌种植 CK2	1.3	—	5	6
单接菌种植 AMF	1.3	52 g	5	6
单接菌种植 DSE	1.3	15 mL	5	6
双接菌种植 AMF+DSE	1.3	52 g+15 mL	5	6

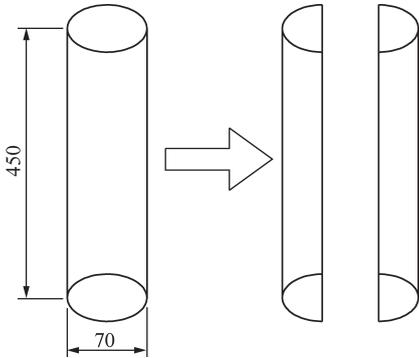


图 1 试验装置

Fig.1 Test device

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 植物地上、地下生长量及侵染率指标测定

对紫花苜蓿地上株高、生物量、地下根径、根长指标进行测定统计。采用刻度为 0.1 cm 的钢卷尺对株高进行测量,采用干重法测定地上和地下部的生物量。采用根系扫描系统 MICROTEK GXY-A V2.3.2 分析根径、根长等数据。随机取新鲜根样(约 45 个根段制片),用 10% KOH 溶液浸泡 24 h,冲洗干净后,用酸性品红乳酸甘油染色液染色法染色,在显微镜(Motic Panthera Client)下观察测定苜蓿的 AMF 菌根和 DSE 侵染率。

#### 1.3.2 三轴剪切试验

土体抗剪强度是一个重要力学性质,直接反应土壤的聚合能力和迁移阻力。三轴剪切试验常常被作

为土体在实际土层中受力状况的模拟方法,能更合理反映土体的抗剪强度<sup>[20]</sup>。因此,对接菌根系复合土试样做不固结不排水试验(UU 试验),由 SLB-1A 型应力应变控制式三轴蠕变仪进行,对试样分级施加 25,50,100 kPa 共 3 级围压,以 0.8%/min 的速率进行剪切试验。方法参照 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》<sup>[21]</sup>的要求进行:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中, $\tau_f$  为土体抗剪强度,kPa; $c$  为黏聚力,kPa; $\sigma$  为法向应力,kPa; $\varphi$  为内摩擦角,(°)。

#### 1.3.3 单根拉伸试验

三轴剪切试验结束后,将试样放置在孔径为 0.02 mm 的筛中清洗出根,用滤纸吸干根表面水分后称重并统计,用根系表型分析系统扫描后统计数据。单根拉伸试验以根从中间发生断裂为有效数据<sup>[22]</sup>。以单根最大抗拉力及根径,计算出 4 种处理下根系的最大抗拉强度,计算公式为

$$P = 4F/(\pi D^2) \quad (2)$$

式中, $P$  为最大单根抗拉强度,MPa; $F$  为最大单根抗拉力,N; $D$  为根段直径,mm。

接菌根系复合土试样的含根量为

$$m_r = m_t/V \quad (3)$$

式中, $m_r$  为接菌根系复合土含根量,指单位体积内根土复合体所含植物根系的质量, $g/cm^3$ ; $m_t$  为接菌根系复合土所含鲜根质量,g; $V$  为接菌根系复合土体积,为 96  $cm^3$ 。

#### 1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理及统计,采用 Origin2021 进行绘图。使用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行方差分析,显著性水平  $P=0.05$ 。接菌贡献率(%)=接菌与对照的苜蓿地上生物量差值/接菌生物量 $\times 100$

## 2 结果与分析

### 2.1 接菌对土体物理性质及植物生长指标特征影响

#### 2.1.1 土体物理性质

由表 2 可以看出,接菌和对照处理的土壤粒径组成总体情况相同,均为细砂粒>中砂粒>粗砂粒。接菌处理的土壤构成中粗砂粒所占比例均比未接菌前增高,且细砂粒也均比接菌前的含量成倍降低。此外接菌后的土壤颗粒分布中,双接菌的土壤构成里细砂粒所占的比例明显低于单接菌处理后的土壤颗粒分布,说明双接菌更有利于团聚体的形成,这与双接菌的植物生长繁密,可降低地表水分蒸发,保水能力更强有关。

表 2 土体物理性质指标  
Table 2 Soil physical properties index

复合体 类型	土质 类型	不同颗粒体积分布/%					
		接菌前			接菌后		
		0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	0.075~0.25 mm	0.5~2 mm	0.25~0.5 mm	0.075~0.25 mm
CK1	粉砂	1.83	20.35	46.46	0.41	24.07	42.73
CK2 复合土	粉砂	2.47	18.23	41.00	10.34	30.07	29.17
AMF 复合土	粉砂	0.31	19.59	45.21	9.82	23.64	23.39
DSE 复合土	粉砂	0.20	15.10	47.68	11.72	26.81	25.64
AMF+DSE 复合土	粉砂	0.22	16.53	45.71	18.90	26.33	19.90

2.1.2 植物生长指标特征

株高和地上生物量是植物长势最直观的特征。随接菌种类和方式的改变,苜蓿株高和地上生物量均呈现增加的趋势。

由表 3 可知,接种菌根均不同程度地增加苜蓿的株高,其中双接菌 AMF+DSE 处理的株高显著提高

29%;双接菌 AMF+DSE 处理下的地上生物量显著高于单接菌 AMF 和 DSE 处理( $P<0.05$ ),与 2 个单接菌处理分别对比增长了 55%,43%。随着侵染率的增加,地上生物量显著增加,接菌与苜蓿形成了较好的共生关系,表明双接菌对宿主植物生长更有促进优势,菌根对生物量的贡献率达 74%。

表 3 接菌处理对紫花苜蓿地上部和地下部生长影响

Table 3 Effects of inoculation on the growth of aerial and underground parts of alfalfa

不同处理	平均株高/cm	地上生物量/g	地下生物量/g	侵染率/%	接菌贡献率/%
CK1	0±0b	0±0c	0±0c	—	—
CK2	34.0±0.46a	4.89±1.47b	0.08±0.05bc	—	—
AMF	39.67±6.67a	6.56±1.89b	0.26±0.07ab	40.30	48
DSE	39.4±5.71a	7.10±1.05ab	0.40±0.14ab	26.70	58
AMF+DSE	41.0±3.06a	10.14±2.98a	0.48±0.13a	63.30	74

注:同列的字母不相同表示 0.05 水平上差异显著,下同。

2.2 接菌对单根抗拉力和单根抗拉强度的影响

不同接菌处理对苜蓿单根抗拉力、抗拉强度及根径的影响见表 4,接菌处理下紫花苜蓿平均根径显著大于 CK2 处理( $P<0.05$ ),而不同菌处理间差异不显著。紫花苜蓿根系单根抗拉力在 4 种处理下由大到小依次为 AMF+DSE>DSE>AMF>CK2,其中双接菌处理下平均单根抗拉力显著高于其他 3 种处理,分别为 CK2,AMF,DSE 处理的 1.698 倍、1.692 倍、1.545 倍。4 种处理下紫花苜蓿根系平均单根抗拉强度由大到

小依次为 AMF+DSE>CK2>AMF>DSE,其中双接菌处理下平均单根抗拉强度对比 CK2,AMF,DSE 处理增长了 20%,41%,52%,双接菌 AMF+DSE 根系平均单根抗拉强度对比单接菌 AMF,DSE 处理有明显增强。

单根抗拉力、抗拉强度与根径的关系如图 2 所示。不同接菌处理的单根抗拉力随根径增加而增大,符合幂函数关系;单根抗拉强度随直径增大而减小,且单根抗拉强度随根径增大而减小的速率开始变缓慢,符合指数函数关系。该试验结果与朱海丽等<sup>[23]</sup>、

表 4 不同接菌处理对单根抗拉力及抗拉强度影响

Table 4 Effects of different inoculation treatments on the tensile strength and tensile strength of single root

不同 处理	单根抗拉力			单根抗拉强度			平均根 径/mm	有效样本 数量/根
	平均单根抗 拉力/N	单根抗拉力与 根径回归方程	相关系 数 $R^2$	平均单根抗拉 强度/MPa	单根抗拉强度与 根径回归方程	相关系 数 $R^2$		
CK2	4.22±0.41b	$F = 5.75D^{1.21}$	0.8	16.70±0.33ab	$P = 0.19D^{-1.31}$	0.8	0.42±0.62b	10
AMF	4.24±0.90b	$F = 8.53D^{1.94}$	0.6	12.31±2.52b	$P = 0.20D^{-0.72}$	0.7	0.52±0.13ab	12
DSE	4.64±0.04b	$F = 10.80D^{1.67}$	0.7	10.1±1.92b	$P = 0.21D^{-1.15}$	0.8	0.58±0.03ab	14
AMF+DSE	7.17±1.58a	$F = 12.80D^{1.73}$	0.8	20.95±3.08a	$P = 0.22D^{-1.70}$	0.7	0.53±0.03a	12

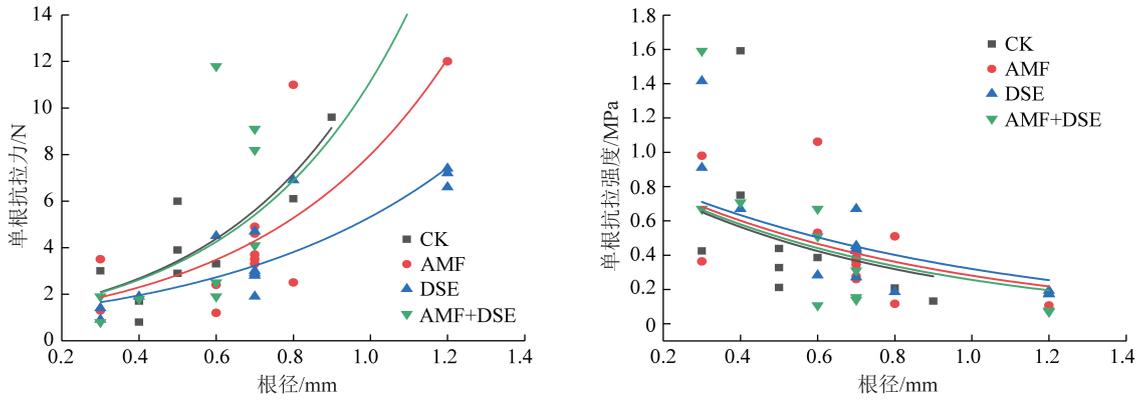


图 2 不同处理下根径与单根抗拉力、单根抗拉强度关系

Fig.2 Relationship between root diameter and single root tensile strength and single root tensile strength under different treatments

李可等<sup>[24]</sup>对四翅滨藜、柠条锦鸡儿和草地早熟禾根系单根拉伸试验结果相一致。由根系抗拉力与根径之间的回归表达式(表 4)分析可知,不同处理的苜蓿根系抗拉力、抗拉强度与根径之间均存在显著相关关系,而双接菌处理的幂函数关系变幅最大,不接菌处理变幅最低。当根径超过 0.6 mm 时,单根抗拉力随根径增大的速率更大,单根抗拉强度随根径增大而减小,表明双接菌处理的苜蓿根系可显著增强自身的抗拉特性。

### 2.3 不同接菌对复合土抗剪强度特征的影响

#### 2.3.1 主应力差与轴向应变的关系

由表 5 可知,在同一围压作用下,所有种植植物的根土复合土均可增加土体的主应力差,同时接菌处理的主应力差峰值显著大于不接菌处理,其中双接菌处理的主应力差最大,单接菌次之。在单接菌中,DSE 处理的菌根复合土主应力差高于 AMF 处理。原因是接菌根系更粗、根量更大(表 5),对土壤产生显

著的“加筋”作用,增加了土壤之间的摩擦力,在受到剪切作用时,生成的摩擦力会使菌根不容易被拉断,菌根就起到了锚杆的作用,所以土体的抗剪强度也会提高。因此前述主应力差由大到小的顺序与根径、含根量顺序一致,依次为 AMF+DES, DSE, AMF, CK2, CK1。有研究表明,AMF 和 DSE 均可与植物共生,促进根系发育,对植物根系生长有显著正向影响<sup>[25]</sup>。在本试验中,接菌处理的含根量和根径均显著高于不接菌处理,因此其抗剪强度都高于不接菌处理。有研究发现,AMF 和 DSE 可以一起生长并定殖在宿主根系,形成共生结构,对根系发育和土壤性质有直接关联,2 者通过土壤养分积累和与植物的养分交换来促进植物生长及根系发育<sup>[25]</sup>。因此双接菌处理的菌根复合土强度对比单接菌 AMF, DSE 处理增加了 16%, 13%。在含水率和根径无明显差异的情况下, DSE 处理的土体含根率远超出 AMF 处理。

表 5 土样破坏时主应力差和接菌贡献率

Table 5 Principal stress difference and inoculation contribution rate when soil samples are damaged

不同处理	含水率/%	根径/mm	含根量/(g·cm <sup>-3</sup> )	不同围压下的主应力差/kPa(接菌贡献率/%)		
				$p_1 = 25$ kPa	$p_2 = 50$ kPa	$p_3 = 100$ kPa
CK1	18.27±2.58a	0±0b	0±0b	10.81	6.41	11.15
CK2	19.21±6.70a	0.63±0.18a	0.66±0.45a	56.73	69.53	95.63
AMF	21.53±2.97a	0.65±0.40a	2.14±2.49a	63.87(11)	116.57(40)	178.50(46)
DSE	22.28±1.16a	0.65±0.26a	3.49±3.79a	79.00(28)	101.30(31)	186.50(49)
AMF+DSE	19.98±4.32a	0.83±0.18a	4.19±4.27a	87.00(35)	113.00(38)	235.30(146)

不同接菌处理下复合土在剪切试验中主应力差与轴向应变的关系曲线如图 3 所示,其中围压  $p_1 = 25$  kPa,  $p_2 = 50$  kPa,  $p_3 = 100$  kPa。由图 3 可知,峰值主应力差随着围压的增大而增大;随着围压增大应力-应变曲线初始阶段线性程度有增加,具有明显的弹性性质<sup>[26]</sup>,说明接菌复合土体符合摩尔-库伦抗剪

强度理论。接菌处理的根系可显著提高土体抗变形作用(表 5),在 25 kPa 围压作用下,当主应力差为 20 kPa 时,AMF+DSE 处理试样的轴向应变为 1.03%, DSE 为 0.94%, AMF 为 0.75%, CK2 为 0.56%,与单接菌相比,双接菌处理的根系相对更显著提高土体的抗剪强度,提高了 146%。

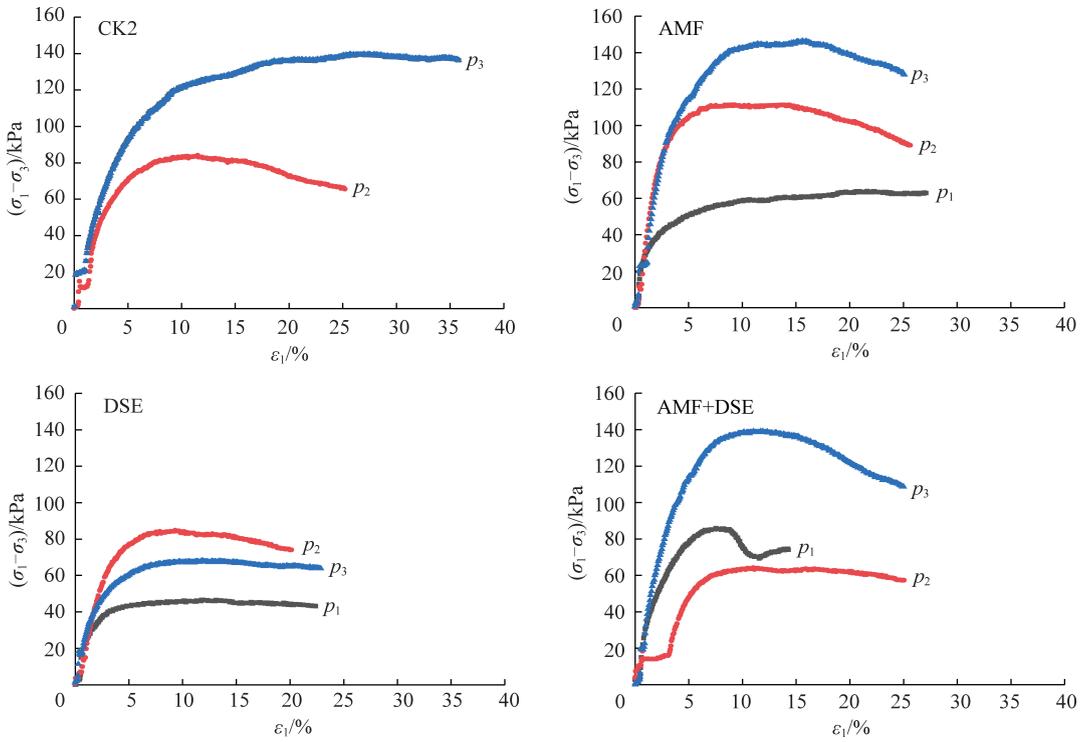


图 3 同一深度不同处理试样在 3 种围压下主应力差( $\sigma_1-\sigma_3$ )和轴向应变  $\varepsilon_1$  曲线

Fig.3 Principal stress difference and axial strain curves of different treatments at the same depth under three confining pressures

在三轴剪切试验的初始阶段,相同围压作用下双接菌处理试样的抗剪强度相较其余处理试样的抗剪强度增长速率更为明显。对于崩塌、滑塌、沉陷等地质灾害发生的突发性特点,双接菌处理的根系在灾害发生初始阶段可起到显著增强土体抗剪强度的作用,提高土体抗变形能力,因此在一定程度上起到显著提高土体稳定性,增大减损的功效。

2.3.2 不同接菌黏聚力随深度变化规律分析

由表 6 及图 4 可知,在相同深度处,接菌处理下根菌复合土试样的黏聚力均大于未接菌处理。此外,

在地表下 10~20 cm 处,3 种接菌处理下根菌复合土试样的黏聚力为 16.0~27.9 kPa,与不接菌处理相比黏聚力最大增幅达 5 倍多,接菌贡献率最高达 186%。不同处理下黏聚力  $c$  由大至小依次为 AMF + DSE (27.90 kPa) > DSE (17 kPa) > AMF (16.00 kPa) > CK2 (15.00 kPa) > CK1 (5.73 kPa)。相应的在 20~30, 30~40 cm 处,接菌处理下根菌复合土试样的黏聚力分别为 18.00~32.66, 14.00~18.83 kPa,与不接菌处理相比根菌复合土黏聚力增幅分别为 5.88%~196.91%, 19.15%~115.2%,接菌处理贡献率达到 192%,160%。

表 6 不同处理及不同深度的根土复合体黏聚力及其与含量之间的拟合关系

Table 6 Cohesion values of root-soil complexes at different treatments and depths and their fitting relationship with root content

不同处理	黏聚力 $c$ /kPa			拟合方程	相关系数 $R^2$
	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm		
CK1	5.73	11.00	8.75	—	—
CK2	15.00	17.00	11.75	$y = 70.64 - 10.83x + 0.41x^2$	0.99
AMF	16.00	18.00	14.00	$y = 58.77 - 9.03x + 0.37x^2$	0.99
DSE	17.00	24.00	15.11	$y = -3.06 - 0.69x + 0.08x^2$	0.99
AMF+DSE	27.90	32.66	18.83	$y = 111.07 - 10.89x + 0.28x^2$	0.99

不同处理下黏聚力由大至小依次为 AMF+DSE>DSE>AMF>CK2>CK1 处理,该结论与试样含根量分布大小一致。说明菌根能起到加筋作用,含量越多用来约束土体变形的能力就越强,因此双接菌处理在不

同深度处均能显著提高紫花苜蓿根菌复合土的黏聚力  $c$ 。

对比同一处理不同深度下的黏聚力可知,地表下 20~30 cm 深度处根菌复合土黏聚力最大,其次为

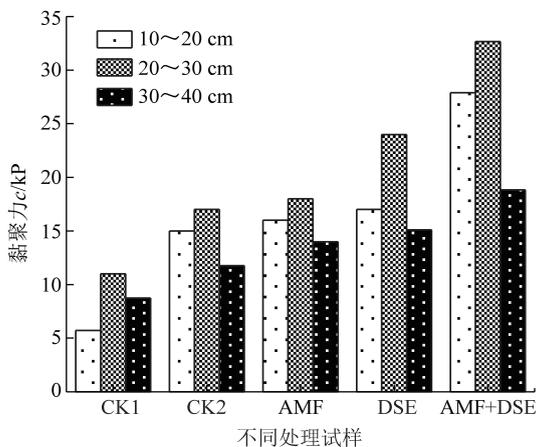


图4 10~20,20~30,30~40 cm 深度下不同处理试样黏聚力

Fig.4 Cohesion of different treated samples at depths of 10-20,20-30 and 30-40 cm

10~20 cm 深度处,30~40 cm 处黏聚力最小,也与含根量分布顺序一致。根量在浅土层 20~30 cm 处分布最多,在越深的土层位置,根系分布相对越少,对增强土体黏聚力发挥的作用随之减小。具体表现为在地下 30~40 cm 深度处,5 种处理下的含根量比 10~20 cm 处相对降低了 44%~100%,比 20~30 cm 处降低了 73%~100%。

### 2.3.3 不同接菌黏聚力随根长、根径变化规律

由表 7 分析可知,菌根复合土存在最优根径的特点,即菌根复合土的黏聚力在根径约为 0.6 mm 时达到相对最大值;当根径小于 0.6 mm 时,菌根复合土黏聚力  $c$  随根径增加而增加;当根径大于 0.6 mm 时,表现为随根径增加而减小的趋势。可见并不是越粗的根对提高土体黏聚力作用越强<sup>[27]</sup>。

表 7 根径、根长分布统计

Table 7 Root diameter and root length distribution statistics

不同处理	深度/cm	平均根径/mm	<0.6 mm 细根统计量/%	平均根长/mm	黏聚力 $c$ /kPa
CK2	10~20	0.80	50.0	58.07	15.00
	20~30	0.63	70.0	30.35	17.00
	30~40	0.45	0	18.98	11.75
AMF	10~20	1.08	14.5	33.26	16.00
	20~30	0.60	37.5	67.82	18.00
	30~40	0.28	26.7	31.51	14.00
DSE	10~20	0.94	15.4	27.82	17.00
	20~30	0.58	44.4	27.30	24.00
	30~40	0.43	40.0	40.45	15.11
AMF+DSE	10~20	1.02	25.0	6.12	27.90
	20~30	0.66	54.5	18.19	32.66
	30~40	0.82	42.9	17.21	18.83

根长在不接菌处理下随深度增加而减小(表 6),在接菌处理下均呈现随深度先增大后减小的规律,且都在 20~30 cm 处最长,黏聚力与根长在深度上亦有相同规律。在 30~40 cm 深度处,双接菌 AMF+DSE 处理的平均根长比 CK2,AMF,DSE 处理的根长分别降低了 10%,83%,135%,但黏聚力比上述 3 种处理分别增长了 37.6%,25.65%,19.76%,表明双接菌的菌根对提高紫花苜蓿菌根复合土黏聚力具有更显著的正向效应。

### 2.3.4 不同接菌黏聚力和内摩擦角随含根量变化规律

根系多分布浅土层(20~30 cm),对由含根量引起的黏聚力变化进行分析可知(表 8),接菌处理下菌根复合土的含根量均大于 CK2,黏聚力随含根量的增加而增加,含根量与黏聚力呈正相关关系。其中,双接菌处理的接菌贡献率高达 186%,是单接菌 AMF,DSE 处理的 1.744 倍、1.641 倍,表明双接菌处理可显著增强土体强度。

表 8 不同接菌处理 20~30 cm 深度土样含根量、黏聚力及内摩擦角

Table 8 Root content, cohesion and internal friction angle of soil samples at 20-30 cm depth with different inoculation treatments

试样类型	含根量/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏聚力 $c$ /kPa	菌根贡 献率/%	内摩擦角 $\varphi$ /( $^{\circ}$ )
CK1	0	13.67±6.50b	0	17.00±3.46a
CK2 复合土	0.47	14.58±1.53b	0	18.00±1.73a
AMF 复合土	1.00	16.00±1.15ab	106.67	20.33±6.43a
DSE 复合土	1.96	18.70±2.70ab	113.33	19.67±5.77a
AMF+DSE 复合土	2.40	26.46±7.03ab	186.00	15.67±1.53a

本试验中 4 种处理下的内摩擦角均无明显变化,说明菌根对内摩擦角影响很小,主要通过增加黏聚力来提高土体的抗剪强度。

## 3 讨 论

笔者研究了紫花苜蓿根系在接菌处理下单根抗拉强度与根径的关系,以及根菌复合土抗剪强度与根长、根径、含根量、深度之间的关系。

根系是植物重要器官,不仅吸收输导土壤中水分养分<sup>[28]</sup>、还有合成和储存营养物质的功能,还具有固持水土能力<sup>[29]</sup>。研究表明,植物根系通过发挥其自身的抗拉特性以增强土体的抗剪强度<sup>[30]</sup>,同时,植物根系具有的抗拉性能是增强采煤沉陷或边坡稳定性最重要的因素<sup>[31]</sup>。单根力学特性大小与根系尺寸有着密切关系<sup>[6,32]</sup>。国内外学者对部分植物的单根抗

拉力、抗拉强度研究表明,植物根系拉拔力随根径增加而增大,抗拉力与植物生物学特性、土壤含水率等因素有关<sup>[33]</sup>。可能是随着根系直径的增粗,根的横截面积迅速增加,且根系木质化程度会随着根径的增大而提高,使细胞排列相对紧密,含水量降低,促使根系具有较好的抵抗变形的能力,抗拉力也随之增加<sup>[34]</sup>。本试验中,各处理下紫花苜蓿根系抗拉强度随直径增加呈指数函数减小,与柠条、沙棘和沙柳根系抗拉强度的变化规律一致<sup>[9]</sup>。本研究接菌处理促使宿主植物根径增加,引起根系单根抗拉强度发生显著变化,而本试验接菌处理之间的平均根径无显著变化,但双接菌的单根抗拉强度显著高于单接菌,说明双接菌增强了植物根系的抗拉伸能力。

抗剪强度是衡量根-土复合土力学性能的重要力学特性,也是生态治理研究领域热点问题之一<sup>[30,35-36]</sup>,而黏聚力和摩擦角是主要体现抗剪强度的力学指标。对根-土复合体来讲,当土体受到外力作用时,不仅产生土粒与土粒之间的凝聚力,还产生土粒与根系之间的凝聚力,故黏聚力  $c$  可理解为土壤与根系之间的凝聚力之和;且复合土受到剪切作用时,不仅产生土粒之间的摩擦作用,还有土粒与根系之间的摩擦作用,因此摩擦角  $\varphi$  可理解为土壤与根系之间的综合摩擦角<sup>[37]</sup>。本试验中摩擦角均未产生显著差异,各个处理下的复合体试样抗剪强度大小集中体现在黏聚力的变化上。申紫燕等<sup>[38]</sup>的研究结果指出,复合体黏聚力  $c$  与速效 P、含根量和有机质 3 种因素之间的关联度较高。在土壤表层,有机质、速效 P 等营养易产生表聚现象,可促进了植物根系生长,含根量也随之增大。而 AMF<sup>[10]</sup> 和 DSE<sup>[39]</sup> 在改良土壤性状方面均有重要作用,接种后土壤质地发生变化<sup>[40]</sup>,增强了土壤保水能力,土壤养分也有明显改善,如有机碳、全氮等营养含量明显增高。本试验中,双接菌 AMF+DSE 处理在相同深度下比单接菌处理黏聚力  $c$  大,菌根复合体黏聚力呈现出随土体深度增加而减小的趋势,与含根量在深度上变化规律一致,均为 20~30 cm 深度处最大。DOCKER 等<sup>[41]</sup>对根-土复合土试样进行原位直剪试验,指出植物根系可显著增强土体抗剪强度和抗剪切变形能力。植物根系不仅可通过影响土壤中养分的供应来提高土体强度与稳定性<sup>[42]</sup>,且植物根系和相关微生物也会分泌一些有机物质,即根系分泌物,与土壤力学性质也密切相关<sup>[43]</sup>。接菌有利于土壤碳累积、植物养分交换及促进植物生长激素的增加来影响根系发育和植物生长<sup>[44]</sup>。本研究中接菌处理均产生了根外菌丝,接菌处理下根菌复合土的含根量均大于 CK,其土壤

强度也显著提升。菌丝作为真菌的营养体,是由纤维素、蛋白质及几丁质等组成,随着菌丝的不断生长,菌丝之间相互交织形成菌丝网络<sup>[45]</sup>,将土体黏结形成一个黏结体,促进根系吸收更多的水分及养分之外,也增强了对土壤的保水作用和植物生长的促进作用。研究表明,菌丝对提高土体强度的原因是菌丝对基质材料的缠绕和黏结,菌丝定殖程度对其力学特性有重要的影响<sup>[46]</sup>。且 AMF+DSE 也可通过根分泌物的有机物如黏液、微生物诱导的生物膜,真菌缠结和微生物诱导的生物矿化形成的土壤团聚体<sup>[47]</sup>。很明显,黏液可改变紧靠根系周围区域的土壤结构,从而改变该区域的机械和水文行为,从而有利于植物生长,还可促进土壤颗粒与根系的机械黏附,促进二者之间的接触<sup>[48]</sup>。同时,根际周围的微生物聚合物会影响土壤的机械性能,已有研究证明新鲜根系分泌物可降低土壤的渗透阻力<sup>[49]</sup>,使根系延长,它导致土壤颗粒黏附在根上<sup>[50]</sup>,促进周边区域在根际附近聚集,从而有效使植物锚固周边的土壤,使土壤的变形阻力有效增强<sup>[51]</sup>。因此,对菌丝引起的根际周围土壤环境的变化对土壤结构及力学性能的贡献仍需要更深入的探讨。

在自然环境中,根系形态结构发育具有随机、多样性,且坡地根系形态不同于平地<sup>[52]</sup>,受坡度影响,根系固土作用不及预期,很多学者意识到植物根系的形态结构是影响土体抗剪强度的重要因素<sup>[53]</sup>。本试验仅对比了接菌对植物根系力学特性的影响,对根系在地下的形态结构变化对土体抗剪强度的影响尚未展开,有待后续进一步研究。

## 4 结 论

(1) 试验中根系平均单根抗拉力由大到小顺序依次为 AMF+DSE>DSE>AMF>CK,其单根抗拉力变化为 4.22~7.17 N,随着根径增加而增大。平均单根抗拉强度由大到小依次为 AMF+DSE>CK>AMF>DSE,随着根径增加而减小,接菌贡献率最大为 147%。

(2) 不同接菌处理下复合土抗剪强度显著大于素土,说明接菌能显著提高土体的抗剪强度,贡献率达 186%。接菌处理下菌根复合土黏聚力均比相同深度未接菌处理的菌根复合土的黏聚力大,其中 AMF+DSE 双接菌处理下的菌根复合土黏聚力最大,为 CK 处理的 2 倍。

(3) 不同接菌处理的复合土含根量有差异,在地表下 10~20,20~30 cm 深度处逐渐增加,至 30~40 cm 深度时减小,其黏聚力  $c$  随着含根量变化规律一致。含根量与黏聚力呈正相关关系。双接菌处理的黏聚力  $c$  最大,且含根量在深度上均在地表下 20~30 cm 深度处最佳。

(4) 苜蓿根系对土体抗剪强度的增强作用存在最优根径, 苜蓿最优根径为 0.6 mm, 菌根复合土抗剪强度最高。

## 参考文献(References):

- [1] 彭苏萍, 毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221.  
PENG Suping, BI Yinli. Strategic consideration and core technology about environmental ecological restoration in coal mine areas in the Yellow River Basin of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 1211-1221.
- [2] 毕银丽, 彭苏萍, 杜善周. 西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1355-64.  
BI Yinli, PENG Suping, DU Shanzhou. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355-1364.
- [3] 曾红艳, 吴美苏, 周成, 等. 根系与植筋带固土护坡的力学机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S2): 151-156.  
ZENG Hongyan, WU Meisu, ZHOU Cheng, et al. Experimental study on reinforcement mechanism of vegetated slopes with root system and vertical geotextile belts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S2): 151-156.
- [4] LEUNG F T Y, YAN W M, HAU B C H, et al. Root systems of native shrubs and trees in Hong Kong and their effects on enhancing slope stability[J]. Catena, 2015: 125.
- [5] COMINO E, DRUETTA A. The effect of Poaceae roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 106(2): 194-201.
- [6] 祁兆鑫, 余冬梅, 刘亚斌, 等. 寒旱环境盐生植物根-土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(6): 1438-1448.  
QI Zhaoxin, YU Dongmei, LIU Yabin, et al. Experimental research on factors affecting shear strength of halophyte root-soil composite systems in cold and arid environments[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(6): 1438-1448.
- [7] 胡敏, 李为萍, 史海滨, 等. 布根方式及根系径级对根土复合体抗剪性能的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 42-44.  
HU Min, LI Weiping, SHI Haibin, et al. Effects of root lay out and diameter on shear performance in root-soil composite [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(1): 42-44.
- [8] CAPILLERI P P, MOTTA E, RACITI E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. Procedia Engineering, 2016, 158: 116-121.
- [9] 武艺儒, 刘静, 张欣, 等. 3 种灌木直根抗剪特性及其与化学组分的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 129-133.  
WU Yiru, LIU Jing, ZHANG Xin, et al. Relationship between anti-shear characteristics of root and its responses to their chemical components for three shrubs[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 129-133.
- [10] 毕银丽. 丛枝菌根真菌在煤矿区沉陷地生态修复应用研究进展[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 800-806.  
BI Yinli. Research advance of application of arbuscular mycorrhizal fungi to ecological remediation in subsided land of coal mining areas[J]. Mycosystema, 2017, 36(7): 800-806.
- [11] SARKAR A, ASAEDA T, WANG Q, et al. Arbuscular mycorrhizal influences on growth, nutrient uptake, and use efficiency of Miscanthus sacchariflorus growing on nutrient-deficient river bank soil [J]. Flora-Morphology Distribution Functional Ecology of Plants, 2015, 212: 46-54.
- [12] SURONO, NARISAWA K. The dark septate endophytic fungus Phialocephala fortinii is a potential decomposer of soil organic compounds and a promoter of Asparagus officinalis growth[J]. Fungal Ecology, 2017, 28: 1-10.
- [13] DECLERCQ I. Monitored natural attenuation (MNA) of contaminated soils: State of the art in Europe-A critical evaluation [J]. Science of The Total Environment, 2012: 393-405.
- [14] 杨应, 何跃军, 董鸣, 等. 丛枝菌根网络对不同喀斯特适生植物生长及氮摄取的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8477-8485.  
YANG Y, HE Y J, DONG M, et al. Effects of common mycorrhizal networks on nitrogen acquisition and growth traits of different plants in karst areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8477-8485.
- [15] 张延旭, 毕银丽, 王瑾. 接种菌根对采煤沉陷区苜蓿生长及土壤改良影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(4): 142-147.  
ZHANG Yanxu, BI Yinli, WANG Jin. Research on effect of arbuscular mycorrhizal fungi on alfalfa growth and soil improvement in mining subsidence area [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(4): 142-147.
- [16] HUANG D, MA M, WANG Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhanced drought resistance in apple by regulating genes in the MAPK pathway[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 149: 245-255.
- [17] HOU L, LI X, HE X et al. Effect of dark septate endophytes on plant performance of Artemisia ordosica and associated soil microbial functional group abundance under salt stress [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 165: 103998.
- [18] SHADMANI L, JAMALI S, FATEMI A. Isolation, identification, and characterization of cadmium-tolerant endophytic fungi isolated from barley (Hordeum vulgare L.) roots and their role in enhancing phytoremediation [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2021, 52(3): 1097-1106.
- [19] 毕银丽, 孙金华, 张健, 等. 接种菌根真菌对模拟开采伤根植物的修复效应[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 1013-1020.  
BI Yinli, SUN Jinhua, ZHANG Jian, et al. Remediation effects of plant root growth inoculated with AM fungi on simulation subsidence injured [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1013-1020.
- [20] 宋效兰. 直剪饱和和固结快剪与三轴固结不排水剪切试验比较[J]. 山西水利, 2013, 29(1): 33-34.  
SONG Xiaolan. Comparison of direct-shear saturated consolidation fast shear and triaxial consolidation undrained shear test [J]. Shanxi Water Resources, 2013, 29(1): 33-34.
- [21] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 110-117.

- [22] A M G, B N K A, D A S C, et al. Root reinforcement in plantations of *Cryptomeria japonica* D. Don; effect of tree age and stand structure on slope stability[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 256(8): 1517-1526.
- [23] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(S2): 3445-3452.
- ZHU Haili, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(S2): 3445-3452.
- [24] 李可, 朱海丽, 宋路, 等. 青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 240-249.
- LI Ke, ZHU Haili, SONG Lu, et al. Relationship between tensile properties and microstructure of two typical plant roots in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(2): 240-249.
- [25] 毕银丽, 解琳琳. 丛枝菌根真菌与深色有隔内生真菌生态修复功能与作用[J]. *微生物学报*, 2021, 61(1): 58-67.
- BI Yinli, XIE Linlin. Functions of arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes in ecological restoration[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2021, 61(1): 58-67.
- [26] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006(5): 67-72.
- LIU Xiuping, CHEN Lihua, SONG Weifeng. Study on the shear strength of forest root-loess composite[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006(5): 67-72.
- [27] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 柴达木盆地4种盐生植物根系力学特性及根-土复合体抗剪强度研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 101-110.
- XU Tong, LIU Changyi, HU Xiasong. Study on the mechanical properties of roots and the shear strengths of four halophytic plants in Qaidam Basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 101-110.
- [28] 毕银丽, 王瑾, 冯颜博, 等. 菌根对干旱区采煤沉陷地紫穗槐根系修复的影响[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(8): 1758-1764.
- BI Yinli, WANG Jin, FENG Yanbo, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on root self-repairing action of *Amorpha fruticosa* in coal mining subsidence and in arid areas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8): 1758-1764.
- [29] JI J, KOKUTSE N, GENET M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the LOESS Plateau, China[J]. *Catena*, 2012, 92: 139-154.
- [30] 宗全利, 冯博, 蔡杭兵, 等. 塔里木河流域河岸植被根系护坡的力学机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(5): 1290-1300.
- ZONG Quanli, FENG Bo, CAI Hangbing, et al. Mechanism of riverbank protection by desert riparian vegetation roots in Tarim River basin[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1290-1300.
- [31] 赵丽兵, 张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 7-12.
- ZHAO Libing, Zhang Baogui. Experimental study on root biomechanics and relevant factors of *Medicago sativa* and *Digitaria sanguinalis*[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 7-12.
- [32] 吕春娟, 陈丽华, 周硕, 等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(S1): 329-335.
- LÜ Chunjuan, CHEN Lihua, ZHOU Shuo, et al. Root mechanical characteristics of different tree species[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(S1): 329-335.
- [33] 管世峰, 夏振尧, 张伦, 等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(6): 24-28.
- GUAN Shifeng, XIA Zhenyao, ZHANG Lun, et al. Pull-out test of *Indigofera amblyantha* Craib root under horizontal load[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(6): 24-28.
- [34] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 40-46.
- ZHU Haili, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Relationship between mechanical characteristics and anatomical structures of slope protection plant root[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 40-46.
- [35] 付江涛, 余冬梅, 李晓康, 等. 柴达木盆地盐湖区盐生植物根-土复合体物理力学性质指标概率统计分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(8): 1696-1709.
- FU Jiangtao, YU Dongmei, LI Xiaokang, et al. Statistical probability analysis of the physical index of rooted soil in Qaidam Basin[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(8): 1696-1709.
- [36] YE C, GUO Z, LI Z, et al. The effect of Bahiagrass roots on soil erosion resistance of Aquilts in subtropical China[J]. *Geomorphology*, 2017, 285(15): 82-93.
- [37] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 1996(2): 31-38.
- YANG Yachuan, MO Yongjing, WANG Zhifang, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(2): 31-38.
- [38] 申紫雁, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区高寒草地不同深度土壤理化性质与抗剪强度关系研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(2): 392-401.
- SHEN Ziyang, LIU Changyi, HU Xiasong, et al. Relationships between the physical and chemical properties of soil and the shear strength of root-soil composite systems at different soil depths in alpine grassland in the source region of the Yellow River[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(2): 392-401.
- [39] 欧阳瑞培. 内蒙古艾蒿丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌的研究[D]. 包头: 内蒙古农业大学, 2021.
- OUYANG Ruipei. Study on Arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytic of *Artemisia argyi* in Inner Mongolia, College of Life Sciences[D]. Baotou: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [40] 毕银丽, 郭晨, 肖礼, 等. 微生物复垦后土壤有机碳组分及其高光谱敏感性识别效应[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(12): 4170-4177.

- BI Yinli, GUO Chen, XIAO Li, et al. Identification of soil organic carbon components and hyperspectral sensitivity in microbial reclamation area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(12): 4170-4177.
- [41] DOCKER B B, HUBBLE T. Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species [J]. *Geomorphology*, 2008, 100(3-4): 401-418.
- [42] DUCKETT N, KNAPPETT. Modelling the seismic performance of rooted slopes from individual root-soil interaction to global slope behaviour [J]. *Geotechnique*, 2015, 65(12): 995-1009.
- [43] YOUNG I M, RITZ K. Tillage, habitat space and function of soil microbes [J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 53(3-4): 201-213.
- [44] LINLIN X, YINLI B, SHAO P M, et al. Combined inoculation with dark septate endophytes and arbuscular mycorrhizal fungi: synergistic or competitive growth effects on maize? [J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 1-11.
- [45] SHAKIR M A, AZAHARI B, YUSUP Y, et al. Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of bio-composite [J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2020, 65(2): 253-263.
- [46] 苟乐宇, 刘西周, 李飒, 等. 菌丝复合轻质土的准备及力学特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(10): 1933-1958.
- GOU Leyu, LIU Xizhou, LI Sai, et al. Preparation and mechanical properties of composite mycelial lightweight soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1933-1958.
- [47] OADES J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure-ScienceDirect [J]. *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships*, 1993: 377-400.
- [48] CARMINATI A, ZAREBANADKOUKI M, KROENER E, et al. Biophysical rhizosphere processes affecting root water uptake [J]. *Annals of Botany*, 2016, 118(4): 561-571.
- [49] OLEGHE E, NAVEED M, BAGGS E M, et al. Plant exudates improve the mechanical conditions for root penetration through compacted soils [J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1-2): 19-30.
- [50] P G Roots. Rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? [J]. *Eur J Soil*, 2006: 2-12.
- [51] HINSINGER P B A G, VETTERLEIN D. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance [J]. *Plant and Soil*, 2009, 321(1): 117-152.
- [52] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力 [J]. *岩土力学*, 2021(12): 1-11.
- LI Zhenyu, OU Yangmiao, XIAO Hongbin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021(12): 1-11.
- [53] GHESTEM M, VEYLON G, BERNARD A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance [J]. *Plant & Soil*, 2014, 377(1-2): 43-61.