

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201806029

引文格式: 段凝, 闫明. AM 真菌对煤矿沉陷区不同复合基质上紫花苜蓿生长和生理特性的影响 [J]. 广西植物, 2019, 39(5): 650-660.
DUAN N, YAN M. Effects of AM fungi on growth and physiological characteristics of *Medicago sativa* in different composite substrates in coal mining subsidence areas [J]. *Guihaia*, 2019, 39(5): 650-660.

AM 真菌对煤矿沉陷区不同复合基质上紫花苜蓿生长和生理特性的影响

段凝, 闫明*

(山西师范大学 生命科学学院, 山西 临汾 041000)

摘要: 该研究采用盆栽试验法,以紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 为材料,将煤矸石 (CG)、粉煤灰 (FA) 和沙土 (SS) 按不同质量配比设置 T1 (CG : FA : SS = 75% : 25% : 0%)、T2 (CG : FA : SS = 60% : 25% : 15%)、T3 (CG : FA : SS = 45% : 25% : 30%)、T4 (CG : FA : SS = 30% : 25% : 45%) 四组混合基质以模拟,并以 T5 (CG : FA : SS = 0% : 0% : 100%) 为对照,AM 真菌选用摩西斗管囊霉 (F.m) 和幼套近明球囊霉 (C.e),通过单接菌和混合接菌,探索其对紫花苜蓿根系的侵染率、幼苗生长、抗氧化酶活性和渗透调节物质变化的影响。结果表明:(1)在五组基质上,接种 AM 真菌显著提高了紫花苜蓿根系的菌根侵染率和菌根依赖性,且基质 T4 接种 F.m+C.e [F.m : C.e = 1 : 1 (W/W)] 的值最大 (64.31% 和 86.24%)。(2)接种 AM 真菌不同程度提高了紫花苜蓿株高、基径、叶面积和生物量,且混合接菌的效果优于单接菌。(3)基质中填加过量煤矿废弃物抑制了植株根系的生长,接种 AM 真菌后显著提高了紫花苜蓿总根长、根表面积、根体积,降低了根平均直径。(4)不同接菌处理的紫花苜蓿叶片 POD、SOD、CAT 活性以及可溶性糖、可溶性蛋白含量总体表现为 F.m+C.e>C.e>F.m>non-AMF,且接种 F.m+C.e 的增长幅度最大。研究表明煤矿废弃物复合逆境抑制紫花苜蓿的生长,接种 AM 真菌显著提高了幼苗生长、抗氧化酶活性和渗透调节物质,提高了植物抗逆性能,且以基质 T4 接种 F.m+C.e 的效果最佳。

关键词: 丛枝菌根真菌 (AMF), 煤矿废弃物, 紫花苜蓿, 生长, 抗氧化系统, 渗透调节物质

中图分类号: Q946 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2019)05-0650-11

Effects of AM fungi on growth and physiological characteristics of *Medicago sativa* in different composite substrates in coal mining subsidence areas

DUAN Ning, YAN Ming*

(School of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China)

Abstract: To improve the growth and survival rate of plants in coal mine waste, potting experiment in greenhouse was carried out to explore the effects of single and mixed inoculation with AM fungi (*Funnelformis mosseae*, F.m and *Clar-*

收稿日期: 2018-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(30800133,31270461) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (30800133,31270461)].

作者简介: 段凝(1995-),女(满族),山西朔州人,硕士研究生,从事菌根生态学研究,(E-mail)18335762511@163.com。

*通信作者: 闫明,博士,副教授,从事菌根生态学研究,(E-mail)mycorrhiza@sina.com。

oideoglomus etunicatum, C.e) on the mycorrhizal colonization rate, seedling growth, antioxidant enzyme activity and osmotic adjustment substances of *Medicago sativa* in different compound substrates. The compound substrates were formed by mixing coal gangue (CG), fly ash (FA) and sandy soil (SS) mixed in different proportions T1 (CG : FA : SS = 75% : 25% : 0%), T2 (CG : FA : SS = 60% : 25% : 15%), T3 (CG : FA : SS = 45% : 25% : 30%), T4 (CG : FA : SS = 30% : 25% : 45%) and T5 (CG : FA : SS = 0% : 0% : 100%) was taken as control. The results were as follows: (1) Inoculation of AM fungi significantly increased the mycorrhizal colonization rate and mycorrhizal dependency of *M. sativa*'s root in five different compound substrates. However, the maximum mycorrhizal colonization rate and mycorrhizal dependency after inoculation of F.m+C.e [F.m : C.e = 1 : 1 (W/W)] (64.31% and 86.24%) occurred in T4 substrate. (2) Inoculation with AM fungi increased height, stem diameter, leaf area and biomass of *M. sativa* to some degrees, and the effects of mixed inoculation were better than that of single inoculation. (3) Growth of plant roots were inhibited by excessively adding coal mine solid waste. However, inoculation of AM fungi could significantly promote total length, surface area and volume of root, and decreased root average diameter. (4) Comparative effects of different inoculation treatments on POD activity, SOD activity, CAT activity, soluble sugar content and soluble protein content of *M. sativa* leaves with were F.m + C.e > C.e > F.m > non-AMF, and the optimal effect was showed in inoculated with F.m + C.e. Our results suggested that growth of *M. sativa* was realistically inhibited in coal mine waste. However, AM fungi significantly enhanced resistance to stress by improved seedling growth, antioxidant enzyme activity, and osmotic adjustment substances, especially the combination of F.m+C.e and compound substrate T4 was the best.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), coal mine waste, *Medicago sativa*, growth, antioxidant system, osmotic adjustment substance

煤炭开采造成大规模土地资源破坏,地表塌陷是最主要的表现形式,加剧了矿区地表水土流失、养分损失、植被受损(杨勤学等,2015),使原有的生态环境遭到破坏,加剧了我国日益紧张的人地矛盾。近年来,虽然国内外诸多学者在矿区生态恢复、矿山废弃地土壤质地改良等方面取得了许多进展,但矿区复垦植被成活率低、抗逆性差,人工植被覆盖度仍很低,植被重建的生态效应不明显(毕银丽,2017)。将粉煤灰、煤矸石作为填充基质结合丛枝菌根微生物技术的复垦方式已经受到广泛关注。丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌作为自然界较为活跃的一类有机体,大约80%的陆生高等植物均能与其形成特定的“菌根”结构(周宝利等,2015)。大量研究表明,低磷条件下,接种AM真菌有助于促进宿主植物对磷、钾等矿质元素的吸收,提高植物的抗逆性,促进植物生长,改善土壤结构(Cheng et al., 2012)。AM真菌的侵染能够增加宿主植物不定根和侧根的数量,改变植物的根系形态(毕银丽等,2017,2014)。AM真菌分泌的球囊霉素相关土壤蛋白能增加土壤有机碳库,增强土壤团聚体的稳定性,对土壤具

有改良效应(贺学礼等,2011)。

目前,关于AM真菌对以黑麦草、柠条为宿主植物的煤矿复垦区土壤结构和质量的改良作用(王丽萍等,2012;孙金华等,2017)、AM真菌对以玉米为宿主植物的煤矿塌陷地受损伤植物根系的修复功能(Guo et al., 2014)以及AM真菌对小麦矿质营养的吸收作用(马放等,2014)和玉米对重金属的吸收与转移(Radka & Miroslav, 2007)等方面研究众多,而对于以紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为矿山植被复垦的先锋植物研究较少,以及如何合理填充煤矿废弃物以提高菌根与紫花苜蓿的共生性,改善植物营养生长,根系形态变化,提高植物的抗逆性能等方面鲜有报道。由于紫花苜蓿根系发达、固氮性强、适应范围广,本研究将其作为研究对象,将煤矸石、粉煤灰和沙土按不同质量配比混合作为栽培基质,通过接种AM真菌,研究不同复合基质上接种AM真菌对紫花苜蓿生长以及抗逆性的影响,从而为菌根技术在煤矿沉陷区植被生长发育地运用提供理论与材料的支持,为煤矿废弃地的土地复垦与生态恢复提供一种微生物综合推广应用模式,同时为解决煤矿开采所带

来的生态破坏与环境污染问题提供可行性途径。

1 材料与方 法

1.1 材 料

盆栽试验于 2017 年 7—10 月在山西师范大学试验大棚中开展,紫花苜蓿种子购于临汾市小麦研究所。供试菌种包括摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*, F.m)、幼套近明球囊霉 (*Claroideoglossum etunicatum*, C.e),菌种信息见表 1,购于北京市农林科学院植物与营养资源研究所。选用高粱对两种菌种进行扩繁,培养基质、菌根真菌孢子、菌丝体和被侵染根段的混合物作为菌剂。供试基质由煤矸石(CG)、粉煤灰(FA)、沙土(V 黄土:V 河沙=3:1,SS)混合而成,煤矸石取自临汾市煤运公司煤炭转运站,粉煤灰取自临汾市海资热电厂。试验前期将煤矸石过 3 mm 筛,粉煤灰、黄土、河沙均过 1 mm 筛,经 121 °C 高压蒸汽灭菌锅灭菌 2 h,以杀灭土著 AM 真菌,风干 1 周后待用。

1.2 试验设计

采用两因素随机区组设计,设置菌根和基质两

个因素。接种菌剂设有 4 个水平:接种 F.m、C.e、F.m+C.e [F.m : C.e = 1 : 1 (W/W)] 和 non-AMF。供试基质依据 CG、FA 和 SS 的理化性质将其按照质量配比不同依次设置为 T1 (75% : 25% : 0%)、T2 (60% : 25% : 15%)、T3 (45% : 25% : 30%)、T4 (30% : 25% : 45%)、T5 (0% : 0% : 100%) 作为对照,其基本理化性质见表 2,共同组成 20 个处理组,每个处理组设 3 个重复,共计 60 盆。试验选择规格为 16 cm (盆口直径) × 11 cm (盆底直径) × 14 cm (高) 的塑料花盆,每盆盛放 1.6 kg 基质。

播种前,挑选大小均一、颗粒饱满的种子浸泡在 10% H₂O₂ 中 10 min 进行表面消毒,再用去离子水冲洗数遍后至于室温下进行催芽处理,待种子露白后播种。接种 AM 真菌采用层接法,准确称取 150 g 菌剂均匀的撒施在已混合均匀的基质表层,再在其上面播入已经催芽的种子 20 粒,表层覆盖一层薄薄的灭菌土,大约 1 cm 厚,不接菌对照组加入相同量已经过高温灭菌的菌剂。生长期间试验大盆温度范围在 15~30 °C 之间,每隔 3 d 浇水一次,保证基质含水量是田间持水量的 50%~70%,培养 90 d 后进行各项指标的测定。

表 1 供试菌种的基本信息

Table 1 Basic information of the strains in the experiment

中文名称 Chinese name	菌种学名 Strains academic name	BGC 编号 BGC code	每 10 g 的孢子数 Number of spores of 10 g	寄主名称 Host name
摩西斗管囊霉	<i>Funneliformis mosseae</i>	BGC HEB02	382	玉米
幼套近明球囊霉	<i>Claroideoglossum etunicatum</i>	BGC HEB04	572	玉米

1.3 测定方法

1.3.1 菌根侵染率和菌根依赖性 采用曲利苯蓝染色法染色(赵斌和何绍江,2002),将紫花苜蓿根系洗净加入 10% 的 KOH,80 °C 水浴 30 min 后弃去 KOH,清水轻轻漂洗根样数次,至水不呈黄色即可。将根系剪成 1 cm 的小段,放入 1% 的曲利苯蓝中染色,在显微镜下观察并统计被侵染根段数,计算方法如下(王幼珊等,2012):

菌根侵染率 (%) =

$$\frac{\sum (0 \times \text{根段数} + 10 \times \text{根段数} + \dots + 90 \times \text{根段数} + 100 \times \text{根段数})}{\text{全部根段}};$$

$$\text{菌根依赖性} = \frac{\text{接种植物干重} - \text{未接种植物干重}}{\text{接种植物干重}} \times 100\%。$$

1.3.2 生长指标 将紫花苜蓿地上部分和根系自茎基部剪开,放入烘箱 105 °C 杀青 30 min,再在 75 °C 下烘干至恒重,分别称其干重。用直尺测量株高;用精度 0.02 mm 的游标卡尺测量茎粗;用 LI-3000C 叶面积仪测定叶片面积;用 Delta-TSCAN 根系分析系统测量总根系长、根系表面积、根体积,根平均直径。

1.3.3 叶片生理指标 测超氧化物歧化酶(SOD)活性用 NBT 法,过氧化物酶(POD)活性用愈创木

表 2 供试基质基本理化性质
Table 2 Physical and chemical properties of the substrates

基质 Substrate	煤矸石:粉煤灰:沙土 CG:FA:SS	pH	速效氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)
T1	75%:25%:0%	5.66	20.86	9.12	74.81	26.33
T2	60%:25%:15%	6.71	22.85	12.05	80.98	23.48
T3	45%:25%:30%	7.00	27.77	14.91	95.75	18.72
T4	30%:25%:45%	7.49	34.25	17.28	108.11	14.95
T5	0%:0%:100%	7.84	31.46	12.33	122.80	10.62

酚法,过氧化氢酶(CAT)活性用紫外吸收法(高俊凤,2006),可溶性糖含量用蒽酮比色法,可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法(张志良等,2009)。

1.4 数据处理

采用 SPSS 17 对数据进行统计分析,测定结果表示为平均值±标准误,Duncan's 法检验显著性水平 $P<0.05$ 各处理平均值间的差异显著性,并采用双因子方差分析基质和菌剂的作用以及二者的交互作用,用 Origin 8.5 绘制柱状图。

2 结果与分析

2.1 接种 AM 真菌对紫花苜蓿根系菌根侵染率和菌根依赖性的影响

表 3 显示,在五组基质中,non-AMF 处理的紫花苜蓿根系菌根侵染率和菌根依赖性为 0,说明对照组未被 AM 真菌侵染。相同基质中不同接菌处理的紫花苜蓿根系的菌根侵染之间具有显著性差异($P<0.05$)。基质 T1 上接种 AM 真菌紫花苜蓿菌根侵染率最小,基质 T4 上接种 AM 真菌根系的侵染效果最佳,且接种 F.m+C.e 的菌根侵染率最大,为 64.31%。菌根依赖性的大小趋势与侵染率保持一致,基质 T4 上接种 F.m+C.e 紫花苜蓿根系的菌根依赖性最大,为 86.24%,与接种 C.e 和 F.m 相比具有显著性差异($P<0.05$)。双因子结果分析表明,基质和菌剂对紫花苜蓿根系的菌根侵染率和菌根依赖性具有极显著差异($P<0.001$)基质类型和接菌处理二者的交互作用对紫花苜蓿根系的

菌根侵染率影响非常显著($P<0.01$),对菌根依赖性影响显著($P<0.05$)。

2.2 接种 AM 真菌对紫花苜蓿地上部生长的影响

表 4 显示,各组基质中接种 AM 真菌的紫花苜蓿株高与 non-AMF 相比具有显著性差异($P<0.05$),表现为 F.m+C.e>C.e>F.m>non-AMF。接种 F.m+C.e,基质 T4 与 T5 的株高差异不显著,基质 T4 上接种 F.m+C.e 株高值最大与 non-AMF 相比增加了 83.37%。基质 T1 接种 F.m 的株高最小与 non-AMF 相比增加了 34.02%。各组基质接种 AM 真菌植株基径大小与 non-AMF 相比差异显著($P<0.05$),但各接菌处理间没有显著性差异。五组基质的基径大小比为 T4>T5>T3>T2>T1。基质 T4 接种 F.m+C.e 的基径最大比 non-AMF 高 58.61%,基质 T1 接种 F.m 的基径增幅最小。植株的叶面积总体趋势与株高和基径一致,基质 T4 接种 F.m+C.e 植株的叶面积最大较 non-AMF 增长了 89.96%。基质 T1 接种 F.m+C.e 的叶面积与 non-AMF 具有显著性差异($P<0.05$),接种 C.e、F.m 与 non-AMF 没有显著性差异。混合接菌基质的紫花苜蓿地上部干重增长幅度大于单接菌,基质 T4 接菌 F.m+C.e 的地上部干重最大,与 non-AMF 比较增加了 215.38%。基质 T1 接种 AM 真菌地上部干重增长幅度最小。双因子分析结果表明,基质和接菌处理对紫花苜蓿的株高、地上部干重具有极显著影响($P<0.001$),对基径和叶面积具有非常显著影响($P<0.01$),二者交互作用对紫花苜蓿株高具有极显著影响($P<0.001$),对基径、叶面积和地

表3 不同基质上接种 AM 真菌紫花苜蓿根系菌根侵染率和菌根依赖性的变化

Table 3 Change of mycorrhizal colonization rate and mycorrhizal dependency in root of *Medicago sativa* with AM fungi in different substrates

基质 Substrate	处理 Treatment	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization rate (%)	菌根依赖性 Mycorrhizal dependency (%)
T1	F.m	17.28±1.86Dc	25.82±11.40Bb
	C.e	22.22±2.04Eb	51.93±9.13Ca
	F.m+C.e	29.71±1.32Da	65.81±4.57Ca
	non-AMF	0.00±0.00d	0
T2	F.m	19.09±0.56Dc	37.17±6.84Bb
	C.e	27.35±0.93Db	59.87±10.92BCa
	F.m+C.e	35.67±1.84Ca	71.21±5.91BCa
	non-AMF	0.00±0.00d	0
T3	F.m	24.44±2.40Cc	56.06±6.46Ab
	C.e	33.54±3.94Cb	70.53±3.82ABa
	F.m+C.e	43.83±2.92Ba	79.73±3.00ABa
	non-AMF	0.00±0.00d	0
T4	F.m	42.03±2.49Ac	69.29±8.00Ab
	C.e	50.89±2.79Ab	72.35±2.42ABb
	F.m+C.e	64.31±3.48Aa	86.24±2.00Aa
	non-AMF	0.00±0.00d	0
T5	F.m	33.06±4.62Bc	65.32±4.60Ab
	C.e	45.25±1.79Bb	78.23±2.89Aa
	F.m+C.e	60.70±2.81Aa	82.51±7.30Aa
	non-AMF	0.00±0.00d	0
显著性 Significance	基质 Substrate	***	***
	AMF	***	***
	基质×AMF Substrate×AMF	**	*

注:表中数据为平均值±标准误。不同大写字母表示同一菌处理下不同基质间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。不同小写字母表示同一基质下不同菌处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。* . $P<0.05$; ** . $P<0.01$; *** . $P<0.001$ 。下同。

Note: Data in the table are mean ± standard deviation. Different capital letters mean significant differences ($P<0.05$) between different substrates in same treatment. Different lowercase letters mean significant differences ($P<0.05$) between different treatments in same substrate. * . $P<0.05$, ** . $P<0.01$, *** . $P<0.001$. The same below.

上部干重无显著性影响。

2.3 接种 AM 真菌对紫花苜蓿根系生长的影响

表5显示,接种 AM 真菌对不同基质的紫花苜

蓿根系总长、根表面积、根体积和根系干重均具有显著性差异 ($P<0.05$), 总体趋势表现为 $T4>T5>T3>T2>T1$ 。不同接菌处理间根系总长和根表面积具有显著性差异 ($P<0.05$)。基质 T4 上接菌的效果最佳, 接种 F.m+C.e 较 non-AMF 增幅最大, 根系总长增加了 122.72%, 根表面积增加了 131%。基质 T1 上接菌对根系生长的促进作用较小, 接种 F.m 较 non-AMF 增幅最小, 根系总长增加了 30.08%, 根表面积增加了 25.65%。对于根体积, 尽管部分基质上不同接菌处理间没有显著差异, 但均表现出增长趋势。基质 T4 上接种 F.m+C.e 根体积比 non-AMF 增加 132.33%。基质 T1 上 AM 真菌对根体积的促进作用最小。对于根平均直径, 接种 AM 真菌五组基质表现为 $T1>T2>T3>T4>T5$, 基质 T5 上接种 F.m+C.e 的根平均直径最小, 但基质 T4 接种 F.m+C.e 根平均直径降低幅度最大, 与 non-AMF 相比降低了 57.78%。基质 T4 接种 F.m+C.e 的根系干重最大, 与 non-AMF 相比增加了 204%。基质 T1 接菌 AM 真菌根系干重增幅最小, 接菌 F.m+C.e 和 C.e 没有显著性差异。双因子分析结果表明, 基质和接菌处理对紫花苜蓿的根系总长、根表面积、根体积、根平均直径以及根干重具有极显著影响 ($P<0.001$), 二者交互作用对紫花苜蓿根系总长、根体积具有极显著影响 ($P<0.001$), 对根表面积、根平均直径、根干重有非常显著影响 ($P<0.01$)。

2.4 接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片生理指标的影响

2.4.1 接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片 POD、SOD、CAT 活性的影响 图1显示, 与 non-AMF 相比, 接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片的抗氧化酶活性提高具有显著促进作用。同一基质不同接菌处理的紫花苜蓿叶片 POD、SOD、CAT 活性大小趋势为 $F.m<C.e<F.m+C.e$ 。对于 POD 活性, 随着基质中煤矿废弃物填加量的减少接种 AM 真菌叶片 POD 活性大小呈递增趋势, 填加 30% 煤矸石的基质 (T4) POD 活性最高, 且优于纯沙土基质 (T5)。基质 T4 接种 F.m+C.e 叶片 POD 活性较 non-AMF 增加了 64.57%, T1、T2 基质上 AM 真菌对叶片 POD 活性增幅较小。紫花苜蓿叶片 SOD 活性与 POD

表 4 不同基质上接种 AM 真菌对紫花苜蓿地上部生长的影响

Table 4 Effects of inoculation with AM fungi on aboveground growth of *Medicago sativa* in different growth substrates

基质 Substrate	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎径 Stem diameter (mm)	叶面积 Leaf are (cm ²)	地上部干重 Shoot dry weight (g)
T1	F.m	13.00±0.50Dc	1.90±0.15Bab	0.84±0.30Bb	0.02±0.02Db
	C.e	14.67±0.35Eb	1.97±0.31Bab	0.90±0.25Cab	0.03±0.01Eb
	F.m+C.e	17.17±0.85Ca	2.21±0.11Da	1.19±0.27Da	0.13±0.01Da
	non-AMF	9.70±1.37Dd	1.55±0.28Cb	0.53±0.21Cb	0.02±0.00Db
T2	F.m	15.60±0.46Cb	2.21±0.16Ba	0.77±0.17Bb	0.06±0.03Dc
	C.e	16.87±1.03Db	2.25±0.14Ba	1.12±0.38Cb	0.12±0.02Db
	F.m+C.e	19.50±1.20Ca	2.50±0.30CDa	1.63±0.38DCa	0.20±0.00Da
	non-AMF	10.83±0.29Dc	1.67±0.20BCb	0.68±0.23Cb	0.06±0.04DCc
T3	F.m	21.53±1.85Bb	2.63±0.09Aa	1.05±0.18Bc	0.17±0.04Cb
	C.e	22.70±0.30Cab	2.71±0.12Aa	1.58±0.28Bb	0.23±0.03Cb
	F.m+C.e	24.66±1.52Ba	2.77±0.15BCa	2.21±0.48BCa	0.31±0.05Ca
	non-AMF	13.17±0.85Cc	1.89±0.14ABCb	0.88±0.04BCc	0.07±0.01Cc
T4	F.m	28.47±0.90Ac	2.92±0.25Aa	2.18±0.35Ac	0.26±0.06Ac
	C.e	31.36±1.40Ab	3.08±0.18Aa	2.62±0.58Ab	0.44±0.06Ab
	F.m+C.e	33.04±1.72Aa	3.19±0.30Aa	3.18±0.32Aa	0.64±0.06Aa
	non-AMF	18.03±1.05Bd	2.01±0.19ABb	1.68±0.33Ac	0.20±0.02Ad
T5	F.m	27.50±0.70Ab	2.90±0.18Aa	1.80±0.27Abc	0.22±0.03Bc
	C.e	29.33±1.04Bb	3.05±0.20Aa	2.20±0.34ABb	0.36±0.05Bb
	F.m+C.e	32.00±1.32Aa	3.11±0.18ABa	2.83±0.61Ba	0.49±0.04Ba
	non-AMF	20.37±1.23Ac	2.22±0.23Ab	1.12±0.23Bc	0.14±0.02Bd
显著性 Significance	基质 Substrate	***	**	**	***
	AMF	***	***	***	***
	基质×AMF Substrate×AMF	***	NS	NS	NS

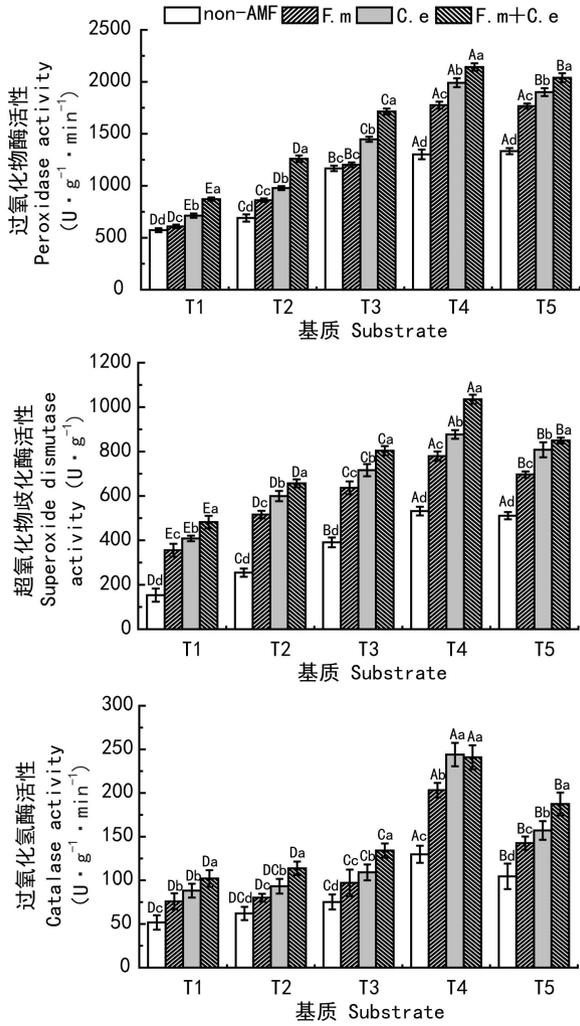
注: NS. 无显著性差异。

Note: NS. No significant difference.

活性具有相似规律,五组基质上接种 AM 真菌叶片 SOD 活性大小趋势为 T1<T2<T3<T5<T4。基质 T4 上接种 F.m+C.e 叶片的 SOD 活性显著提高了 94.73%。基质 T4 接种 AM 真菌叶片 CAT 活性的增幅最大,接种 C.e 和 F.m+C.e 叶片 CAT 活性大小差异不显著,与 non-AMF 相比分别增加了 88%、85.63%。AM 真菌对 T1、T2 基质效果较差。

2.4.2 接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响 图 2 显示,接种 AM 真菌在五组基质,叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量总体表现为 T1<T2<T3<T5<T4 的趋势。同一基质不

同接菌处理的紫花苜蓿叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量均显著高于 non-AMF,且表现为 F.m+C.e>C.e>F.m>non-AMF。基质 T4 接种 AM 真菌叶片的可溶性糖含量差异最显著,且接 F.m+C.e 效果最佳,与 non-AMF 相比增加了 110.58%,接种 AM 真菌对基质 T1 叶片可溶性糖含量效果最差。对于可溶性蛋白含量,部分接菌处理间没有显著性差异,但均呈现增长的趋势。接种 F.m+C.e 叶片的可溶性蛋白含量显著高于其它处理,其中 T4 基质接种 F.m+C.e 含量最高为 8.08 mg·g⁻¹,与 non-AMF 相比提高 58.06%。



注：不同大写字母表示同一菌处理中不同基质间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一基质中不同菌处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different capital letters mean significantly differences between different substrates in same treatment ($P < 0.05$), different lowercase letter mean significantly differences between different treatments in same substrate ($P < 0.05$). The same below.

图 1 不同基质上接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片 POD、SOD、CAT 活性的影响

Fig. 1 Effects of AM fungi on POD, SOD and CAT activity in leaves of *Medicago sativa* grown in different growth substrates

3 讨论与结论

侵染率是反应宿主植物与 AM 真菌之间共生关系的重要指标, 菌根侵染率越高, 表明其与宿主

植物的共生性越好, 对促进植物生长, 提高植物抗逆性的可能越大(李建华等, 2009)。本研究结果表明, 不同复合基质中 AM 真菌均能与紫花苜蓿建立良好的共生关系, 适量减少煤矸石填加量有助于提高植物的菌根侵染率和菌根依赖性, 这可能由于煤矸石的重金属含量高、物理结构差、微生物活性低(魏怀建等, 2015), 过量填加会对植物根系造成损伤, 且水分和养分的保蓄能力差, 不能为宿主植物和菌根的共生提供相对稳定的环境。五组基质相比, T4 基质更有利于 AM 真菌对紫花苜蓿根系的侵染, 这可能与基质的酸碱性和有机质和矿物质含量、水分的储存等综合作用有关。比较 3 种接菌处理, F. m + C. e 的效果最佳。任禛等(2015)研究表明, 虽然不同菌剂间存在着对生态位点和光合产物的竞争性, 但不同菌剂之间的协同效应要强于其竞争性, 因而混合菌剂表现出了高的侵染率。毕银丽等(2005)研究发现, 菌根与基质间具有一定的选择性, 不同的基质对 AM 真菌的生态适应性不同, 与宿主植物的共生性不同, 因而对宿主植物的菌根侵染率和菌根依赖性大小不同。

不同基质接种 AM 真菌均能够增加植株的高度、基径、叶面积和生物量, 煤矸石填加量越大 AM 真菌对宿主植物生长的促进作用越弱, 适量填加煤矸石的基质 AM 真菌对植物生长的促进作用大于纯沙土基质。这可能是由于填加过量煤矸石抑制了 AM 真菌对根系的侵染, 从而抑制了植物的生长, 而合理填加煤矸石、粉煤灰丰富了基质中的矿物质元素和有机质, 并通过菌根作用促进植物吸收。于淼等(2013)研究表明, 在一定的阈值内接种 AM 真菌能够提高宿主植物对微量矿质元素的吸收, 同时抑制有害金属元素的吸收。Hallett et al. (2009)研究证明, 菌根侵染率的大小决定着菌根对宿主植物生长促进作用的大小。另有研究(Enkhtuya et al., 2005)显示, 较低的菌根侵染率能够促进植物生长, 而较高的侵染率对植物生长的促进作用不显著, 这也说明侵染率大小并不能完全反应菌根对植物生长的作用。

根系是植物吸收水分、养分以及合成多种氨基酸的重要器官。本研究发现, 不接种 AM 真菌紫

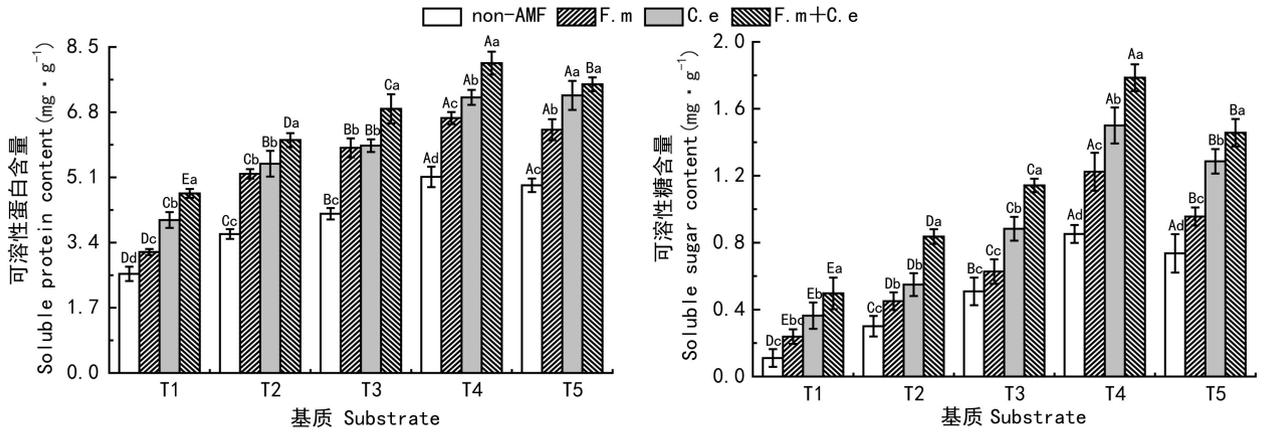


图 2 不同基质上接种 AM 真菌对紫花苜蓿叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effects of AM fungi on soluble sugar content and soluble protein content in leaves of *Medicago sativa* grown in different growth substrates

表 5 不同基质上接种 AM 真菌对紫花苜蓿根系生长的影响

Table 5 Effects of inoculation with AM fungi on root system of *Medicago sativa* in different growth substrates

基质 Substrate	处理 Treatment	根系总长 Total root length (cm)	根表面积 Root surface area (cm ²)	根体积 Root volume (cm ³)	根平均直径 Root average diameter (mm)	根系干重 Root dry weight (g)
T1	F.m	292.93±10.23Ec	18.98±0.65Dc	0.82±0.04Ec	0.71±0.02Ab	0.07±0.03Dbc
	C.e	354.09±14.58Eb	24.07±1.01Eb	1.23±0.18Eb	0.63±0.00Ac	0.09±0.03Eab
	F.m+C.e	420.60±33.38Ea	30.70±0.76Ea	2.00±0.15Ea	0.44±0.01Ad	0.13±0.03Ea
	non-AMF	225.20±24.29Dd	15.10±0.62Dd	0.47±0.05Dd	0.82±0.04Aa	0.03±0.01Dc
T2	F.m	481.61±10.87Dc	27.13±1.60Cc	1.52±0.14Db	0.60±0.04Bb	0.10±0.03Dc
	C.e	554.19±13.65Db	32.83±2.20Db	2.37±0.05Da	0.58±0.03Bb	0.19±0.01Db
	F.m+C.e	603.38±17.00Da	42.70±0.70Da	2.94±0.19Da	0.39±0.02Ac	0.29±0.02Da
	non-AMF	251.51±15.02Dd	15.82±1.30Dd	0.66±0.23Dc	0.75±0.05Ba	0.07±0.02Dc
T3	F.m	519.31±11.02Cc	28.87±0.93Cb	3.70±0.35Cb	0.51±0.03Ca	0.24±0.03Cc
	C.e	689.43±21.55Cb	45.27±0.86Ca	4.11±0.37Cb	0.40±0.02Cb	0.29±0.01Cb
	F.m+C.e	774.94±7.14Ca	46.76±0.56Ca	5.06±0.15Ca	0.30±0.01Bc	0.37±0.03Ca
	non-AMF	321.31±29.26Cd	20.10±0.47Cc	1.96±0.35Cc	0.56±0.04Ca	0.08±0.01Bc
T4	F.m	823.67±22.37Ac	44.43±1.42Ac	5.42±0.12Ac	0.39±0.03Dab	0.43±0.03Ac
	C.e	916.86±27.44Ab	58.26±1.11Ab	6.23±0.11Ab	0.33±0.06Db	0.53±0.02Ab
	F.m+C.e	1005.22±22.71Aa	65.27±0.56Aa	8.51±0.45Aa	0.19±0.07Cc	0.73±0.02Aa
	non-AMF	446.84±23.94Ad	28.18±1.39Bd	3.66±0.17Ad	0.45±0.02Da	0.24±0.04Ad
T5	F.m	701.21±12.57Bc	40.35±0.77Bc	4.54±0.28Bb	0.3±0.04Eb	0.30±0.01Bc
	C.e	827.62±10.47Bb	50.05±1.13Bb	5.16±0.30Bb	0.24±0.01Ec	0.50±0.01Bb
	F.m+C.e	934.41±9.95Ba	60.40±1.08Ba	7.64±0.14Ba	0.16±0.02Cd	0.64±0.04Aa
	non-AMF	378.87±12.58Bd	31.33±1.91Ad	2.74±0.69Bc	0.33±0.01Ea	0.12±0.03Bd
显著性 Significance	基质 Substrate	***	***	***	***	***
	AMF	***	***	***	***	***
	基质×AMF Substrate×AMF	***	**	***	**	**

花苜蓿根系也能较好生长,这可能与其自身较强的耐受力有关。接种 AM 真菌显著提高了紫花苜蓿的根系总长、根表面积、根体积,AM 真菌通过菌丝分泌物影响宿主植物根系的分泌物组成和数量,改变植物根际环境(祖艳群等,2015)从而促进宿主植物根系生长,这与张中峰等(2015)研究结果保持一致。复合基质的配比不同 AM 真菌对宿主植物根系生长的促进作用不同,基质 T4 总根长、根表面积、根体积最大,这可能是由于 T4 的土壤理化性质相对适宜、储水性好、通透性强,提高了菌根与宿主植物的联合作用,促进了根系的生长。接种 AM 真菌显著减小了根系平均直径,这与高雁琳等(2016)研究结果一致。基质 T5 的根系平均直径小于基质 T4,这可能由于 T5 基质与 T4 相比,土壤贫瘠、质地均一、粒径小、吸水性强,根系需穿透土壤中有机的颗粒间隙吸收养分和水分供应植物的生长。同一基质 3 种接菌处理紫花苜蓿总根长、根表面积、根体积大小为 $F.m+C.e > C.e > F.m$,根系平均直径的大小为 $F.m+C.e < C.e < F.m$ 。由于 F.m 与 C.e 相互协同作用大于其拮抗作用,所以混合接菌对紫花苜蓿根系的生长优于单接菌。可见,紫花苜蓿根系形态变化与基质和菌剂的类型具有密切关系。这与范继红等(2011)研究结果一致。

抗氧化酶是反应植物代谢和抗逆性的指标,对细胞膜具有保护作用。自然状态下,植物体的抗氧化酶活性维持在较稳定的水平,当植物体受到逆境胁迫时,细胞的活性氧含量就会升高,抵御过量的氧自由基对细胞造成的伤害,维持生理平衡(王定景等,2012)。本研究结果表明,无论是否进行接菌处理,五组基质的叶片 POD、SOD、CAT 活性大小趋势为 $T1 < T2 < T3 < T5 < T4$,基质中煤矿废弃物填加越多,POD、SOD、CAT 活性越低,表现出对基质环境的不适应性,这可能因为胁迫程度的加重会使植物体细胞膜结构受损程度加重,导致植物受害甚至死亡,而接种 AM 真菌叶片的 POD、SOD、CAT 活性显著增加,且随着基质中煤矸石施加量减少其增幅变大。可见 AM 真菌对宿主植物抗氧化系统作用的大小与环境胁迫显著相关,合理的降低基质胁迫对植物的伤害有助于

提高 AM 真菌对其生长的促进作用。这与郭绍霞等(2010)研究结果相似。接种 AM 真菌后基质 T4 的抗氧化酶活性大于 T5,说明 AM 真菌对具有一定逆境胁迫的紫花苜蓿生长的促进作用大于正常基质环境,这与韩冰等(2011)研究结果相似。同一基质不同接菌处理紫花苜蓿叶片的 POD、SOD、CAT 活性不同,混合接菌对植物抗氧化酶活性的提高效果最佳。张华等(2015)研究证明,在低温、盐胁迫等逆境条件下 AM 真菌能显著提高植物次生代谢物含量,以提高植物的抗逆性,而且混合接种效果好于单接种,韩婷婷等(2011)研究也得到相似结论。

逆境胁迫促使植物细胞积累一些渗透调节物质来维持细胞膨压对某些生理功能的调控,缓解其对植物造成的伤害(康云艳等,2011),可溶性糖和可溶性蛋白是重要的渗透调节物质。本研究结果表明,接种 AM 真菌能够提高叶片可溶性糖和可溶性蛋白的含量,且适量填加煤矿固体废弃物的基质接种 AM 真菌有助于叶片可溶性糖和可溶性蛋白含量的增加,可见一定的胁迫有助于提高 AM 真菌对植物的抗逆性能。赵霞等(2017)研究证明,具有一定盐碱胁迫的基质接种 AM 真菌对紫花苜蓿渗透调节物质积累的作用大于正常基质。前人在番茄(Wang et al., 2011)、羊草(刘滨硕等,2014)等的研究中也得到类似结果。此外,混合接菌更有助于紫花苜蓿体内渗透调节物质的积累,维持细胞正常代谢,降低复合基质这一特殊的立地环境对细胞造成的伤害,这与赵琦等(2015)研究结果一致。

综上所述,AM 真菌对以煤矿废弃物为填充基质的采煤沉陷地的植被重建具有潜在的应用价值,紫花苜蓿作为先锋物种有助于提高复垦植被成活率,提高植被覆盖度,增强植被重建的持续效果。但室内模拟与野外实地试验存在一定的差异,接下来应结合相应的工程措施具体应用于野外实地,探讨“基质-紫花苜蓿-菌种”组合在煤矿沉陷区生态恢复的实际作用效果。

参考文献:

BI YL, 2017. Research advance of application of arbuscular my-

- corrhizal fungi to ecological remediation in subsided land of coal mining areas [J]. *Mycosystema*, 36(7): 800–806. [毕银丽, 2017. 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, 36(7): 800–806.]
- BI YL, SUN JH, ZHANG J, et al., 2017. Remediation effects of plant root growth inoculated with AM fungi on simulation subsidence injured [J]. *J Chin Coal Soc*, 42(4): 1013–1020. [毕银丽, 孙金华, 张健, 等, 2017. 接种丛枝菌根真菌对模拟开采伤根植物的修复效应 [J]. 煤炭学报, 42(4): 1013–1020.]
- BI YL, WANG J, FENG YB, 2014. Effect of arbuscular mycorrhiza on roots self-repairing action of *Amorpha fruticosa* [J]. *J Chin Coal Soc*, 39(8): 1758–1764. [毕银丽, 王瑾, 冯颜博, 2014. 接种丛枝菌根真菌对干旱区采煤沉陷地紫穗槐根系修复的影响 [J]. 煤炭学报, 39(8): 1758–1764.]
- BI YL, WU FY, LIU BH, 2005. Preliminary study on ecological adaptability of arbuscular mycorrhizal fungi in coal solid wastes [J]. *Mycosystema*, 24(4): 570–575. [毕银丽, 吴福勇, 柳博会, 2005. AM 真菌在煤矿废弃物中生态适应性的初步研究 [J]. 菌物学报, 24(4): 570–575.]
- CHENG L, BOOKER FL, BOOKER TC, et al., 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi increase organic carbon decomposition under elevated CO₂ [J]. *Science*, 337(6098): 1084–1087.
- ENKHTUYA B, POSCHL M, VOSATKA M, 2005. Native grass facilitates mycorrhizal colonisation and P uptake of tree seedlings in two anthropogenic substrates [J]. *Water Air Soil Poll*, 166(14): 217–236.
- FAN JH, LI GL, GAO Q, 2011. Effects of different substrate with different arbuscular mycorrhizal fungi on the infection and growth to *Amur cork* tree [J]. *N Hortic*, 2(2): 1–5. [范继红, 李桂伶, 高琼, 2011. 不同基质接种不同丛枝菌根真菌对黄檗幼苗侵染及生长的影响 [J]. 北方园艺, 2(2): 1–5.]
- GUO W, ZHAO R, FU R, et al., 2014. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the development of maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoils [J]. *Environ Sci Poll Res*, 21(5): 3592–3603.
- GAO JF, 2006. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press: 211–218. [高俊凤, 2006. 植物生理学试验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社: 211–218.]
- GAO YL, LI JM, YAN M, 2016. Effects of AMF inoculation the roots growth and antioxidant enzyme activity of *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* in solid wastes [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 44(12): 452–456. [高雁琳, 李钧敏, 闫明, 2016. 接种 AMF 对煤矿废弃物上高丹草根系生长及抗氧化酶系统的影响 [J]. 江苏农业科学, 44(12): 452–456.]
- GUO SX, CHEN DM, LIU RJ, 2010. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on antioxidant enzyme activity in peony seedlings under salt stress [J]. *Acta Hortic Sin*, 37(11): 1796–1802. [郭绍霞, 陈丹明, 刘润进, 2010. 盐水胁迫下接种 AM 真菌对牡丹幼苗抗氧化酶活性的影响 [J]. 园艺学报, 37(11): 1796–1802.]
- HE XL, CHEN C, HE B, 2011. Spatial distribution of arbuscular mycorrhiza fungi and glomalin of *Hippopae rhamnoides* L. in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(6): 1653–1661. [贺学礼, 陈程, 何博, 2011. 北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布 [J]. 生态学报, 31(6): 1653–1661.]
- HALLETT PD, FEENEY DS, BENGOUGH AG, et al., 2009. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport [J]. *Plant Soil*, 314: 183–196.
- HAN B, HE CX, GUO SR, et al., 2011. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on osmoregulation substance contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 31(12): 2492–2497. [韩冰, 贺超兴, 郭世荣, 2011. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响 [J]. 西北植物学报, 31(12): 2492–2497.]
- HAN TT, WANG WH, GUO SX, 2011. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic characteristics of *Coleus blumei* [J]. *J Qingdao Agric Univ (Nat Sci Ed)*, 28(1): 9–12. [韩婷婷, 王维华, 郭绍霞, 2011. AM 真菌对彩叶草光合特性的影响 [J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 28(1): 9–12.]
- KANG YY, YANG X, GUO SR, et al., 2011. Effects of 24-Epibrassinolide on carbohydrate metabolism and enhancement of tolerance to root-zone hypoxia in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. *Sci Agric Sin*, 44(12): 2495–2503. [康云艳, 杨暹, 郭世荣, 等, 2011. 24-表油菜素内脂对低氧胁迫下黄瓜幼苗碳水化合物代谢的影响 [J]. 中国农业科学, 44(12): 2495–2503.]
- LI JH, GAO CH, LU CD, et al., 2009. Ecological effects of arbuscular mycorrhizal and rhizobium on mining land reclamation [J]. *Soil Fert Sci Chin*, (5): 77–80. [李建华, 郜春花, 卢朝东, 等, 2009. 丛枝菌根和根瘤菌双接种对矿区土地复垦的生态效应 [J]. 中国土壤与肥料, (5): 77–80.]
- LIU BS, KANG CL, WANG X, et al., 2014. Physiological and biochemical response characteristics of *Leymus chinensis* to saline-alkali stress [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 30(23): 166–173. [刘滨硕, 康春莉, 王鑫, 等, 2014. 羊草对盐碱胁迫的生理生化响应特征 [J]. 农业工程学报, 30(23): 166–173.]
- MA F, SU M, WANG L, et al., 2014. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth of wheat [J]. *Acta Ecol Sin*, 34(21): 6107–6114. [马放, 苏蒙, 王立, 等, 2014. 丛枝菌根真菌对小麦生长的影响 [J]. 生态学报, 34(21): 6107–6114.]
- RADKA S, MIROSLAV V, 2007. Differences in the effects of three arbuscular mycorrhizal fungal strains on P and Pb accumulation by maize plants [J]. *Plant Soil*, 296(1/2): 77–83.
- REN Z, XIA TY, CHEN LJ, et al., 2015. Effect of different AMF on physiological related indexes of corn [J]. *SW Chin J Agric Sci*, 28(2): 563–568. [任祺, 夏体渊, 陈丽娟, 等,

2015. 不同丛枝菌根真菌对玉米生理相关指标的影响 [J]. 西南农业学报, 28(2):563-568.]
- SUN JH, BI YL, WANG JW, et al., 2017. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Caragana korshinskii* Kom. and soil improvement of coal mining subsidence in the Loess Area of West China [J]. Acta Ecol Sin, 37(7): 2300-2306. [孙金华, 毕银丽, 王建文, 等, 2017. 接种 AM 菌对西部黄土区采煤沉陷地柠条生长和土壤的修复效应 [J]. 生态学报, 37(7):2300-2306.]
- WANG LP, ZHANG H, QIAN KM, et al., 2012. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in reclaimed mine soil system carbon sequestration [J]. J Chin Univ Min Technol, 41(4): 635-640. [王丽萍, 张弘, 钱奎梅, 等, 2012. 丛枝菌根真菌对矿区修复系统固碳的作用 [J]. 中国矿业大学学报, 41(4):635-640.]
- WANG YS, ZHANG SB, ZHANG MQ, 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi resources and germplasm resources in China [M]. Beijing: China Agriculture Press: 166-168. [王幼珊, 张淑彬, 张美庆, 2012. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源 [M]. 北京:中国农业出版社:166-168.]
- WEI HJ, LI YC, WANG N, et al., 2015. Relationship between physical properties and organic-mineral complexes of reclaimed soil back-filled with coal gangue under various vegetation restoration models [J]. Bull Soil Water Conserv, 35(6): 207-212. [魏怀建, 李玉成, 王宁, 等, 2015. 不同植被恢复模式下煤矸石充填复垦土壤物理性质与有机无机复合体的关系 [J]. 水土保持通报, 35(6):207-212.]
- WANG DJ, SI QY, GONG N, et al., 2012. Effects of salicylic acid on antioxidant enzymes of *Anoectochilus roxburghii* under heat stress [J]. Guizhou Agric Sci, 40(5): 39-42. [王定景, 司庆永, 龚宁, 等, 2012. 高温胁迫下外源水杨酸对金钱兰抗氧化酶活性的影响 [J]. 贵州农业科学, 40(5):39-42.]
- WANG X, GENG S, RI YJ, et al., 2011. Physiological responses and adaptive strategies of tomato plants to salt and alkali stresses [J]. Sci Hort, 130(1): 248-255.
- YANG QX, ZHAO BQ, GUO DG, 2015. A review on vegetation of opencast coal mine areas in northern China [J]. Chin J Ecol, 34(4): 1152-1157. [杨勤学, 赵冰清, 郭东罡, 2015. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展 [J]. 生态学杂志, 34(4):1152-1157.]
- YU M, BI YL, ZHANG CQ, et al., 2013. Metal elements utilization by mycorrhizal fungi in fly ash reclamation [J]. J Chin Coal Soc, 38(9): 1675-1680. [于森, 毕银丽, 张翠青, 等, 2013. 菌根真菌对粉煤灰填充复垦中金属元素的利用 [J]. 煤炭学报, 38(9):1675-1680.]
- ZHANG ZL, QU WQ, LI XF, 2009. Experimental guidance of plant physiology [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press: 103-125. [张志良, 瞿伟菁, 李小芳, 2009. 植物生理学试验指导 [M]. 4 版. 北京:高等教育出版社:103-125.]
- ZHANG ZF, ZHANG JC, HUANG YQ, et al., 2015. Effects of water stress and mycorrhizal fungi on root morphology of *Cycloba-lanopsis glauca* seedlings [J]. Chin J Ecol, 34(5): 1198-1204. [张中峰, 张金池, 黄玉清, 等, 2015. 水分胁迫和接种菌根真菌对青冈栎根系形态的影响 [J]. 生态学杂志, 34(5):1198-1204.]
- ZHANG H, SUN JQ, BAO YY, 2015. Advances in studies on plant secondary metabolites influenced by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. J Agric Biotechnol, 23(8): 1039-1103. [张华, 孙纪全, 包玉英, 2015. 丛枝菌根真菌影响植物次生代谢产物的研究进展 [J]. 农业生物技术学报, 23(8):1039-1103.]
- ZHAO B, HE SJ, 2002. Microbiology experiment [M]. Beijing: Science Press: 51-53. [赵斌, 何绍江, 2002. 微生物学试验 [M]. 北京:科学出版社:51-53.]
- ZHAO X, YE L, NA XW, et al., 2017. Influence of arbuscular mycorrhizal fungus on the osmotic adjustment substance and antioxidant system of *Medicago sativa* under salt-alkaline stress [J]. Jiangsu J Agric Sci, 33(4): 782-787. [赵霞, 叶林, 纳学伟, 等, 2017. 盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿渗透调节物质及抗氧化能力的影响 [J]. 江苏农业学报, 33(4):782-787.]
- ZHAO Q, BAO YY, 2015. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and two phenolic acids of *Medicago sativa* under various mixed salt-alkaline stresses [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 35(9): 1829-1836. [赵琦, 包玉英, 2015. 混合盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长及 2 种酚酸含量的影响 [J]. 西北植物学报, 35(9):1829-1836.]
- ZHOU BL, ZHENG JD, BI XH, et al., 2015. Effects of mycorrhizal fungi on eggplant *Verticillium* wilt and eggplant growth [J]. Chin J Ecol, 34(4): 1026-1030. [周宝利, 郑继东, 毕晓华, 等, 2015. 丛枝菌根真菌对茄子黄萎病的防治效果和茄子植株生长的影响 [J]. 生态学杂志, 34(4):1026-1030.]
- ZU YQ, LU X, ZHAN FD, et al., 2015. A review on roles and mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals polluted soils [J]. Plant Physiol J, 51(10): 1538-1548. [祖艳群, 卢鑫, 湛方栋, 等, 2015. 丛枝菌根真菌在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展 [J]. 植物生理学报, 51(10):1538-1548.]