

DOI: 10.5846/stxb201701130106

毕银丽, 孙江涛, 王建文, 张延旭, 孙金华, 于森. AM 真菌对采煤沉陷区黄花菜生长及根际土壤养分的影响. 生态学报, 2018, 38(15): - .

Bi Y L, Sun J T, Wang J W, Zhang Y X, Sun J H, Yu M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on daylily growth and soil fertility in a coal mining subsidence area of northern Shaanxi. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): - .

AM 真菌对采煤沉陷区黄花菜生长及根际土壤养分的影响

毕银丽^{1,2,*}, 孙江涛^{2,3}, 王建文⁴, 张延旭², 孙金华², 于森²

1 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

2 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

3 河南省地质环境勘查院, 郑州 450051

4 陕西煤业集团柠条塔矿, 榆林 719300

摘要:于陕北黄土沟壑采煤沉陷区内布设试验小区,对黄花菜(*Hemerocallis citrina Baroni*)接种丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)—摩西管柄囊霉菌,通过测定黄花菜光合性能、植株生长、抗逆性、土壤养分含量、根际微生物数量等,揭示 AM 真菌对黄花菜生长和土壤养分的影响。结果表明,黄花菜种植 3—5 个月后,接种 AM 真菌显著提高了黄花菜株高、冠幅及其根系菌根侵染率、菌丝密度。与不接种对照区相比,接种 AM 真菌后黄花菜叶片的光合速率、可溶性糖含量和过氧化氢酶活性分别提高了 51%、12%、79%。接种 AM 真菌处理区黄花菜根际土壤的电导率、有机质、碱解氮和速效钾含量等均显著高于对照区,细菌数量和磷酸酶活性的菌根贡献率分别达 77% 和 24%。表明采煤沉陷区扰动土壤接种 AM 真菌具有增强土壤微生物活性、改善土壤肥力和提高黄花菜植株抗逆性的作用,对促进陕北黄土沟壑采煤沉陷区经济作物生长和提高土壤质量具有重要现实生态意义。

关键词:丛枝菌根;黄花菜;采煤沉陷区;土壤肥力

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on daylily growth and soil fertility in a coal mining subsidence area of northern Shaanxi

BI Yinli^{1,2,*}, SUN Jiangtao^{2,3}, WANG Jianwen⁴, ZHANG Yanxu², SUN Jinhua², YU Miao²

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing, 100083, China

2 State Key Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China

3 Henan Institute of Geo-Environment Exploration, Zhengzhou 450051, China

4 Ningtiao Tower Mine of Shaanxi Coal Group, Yulin 719300, China

Abstract: Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AM) on the growth of daylily (*Hemerocallis citrina Baroni*) and soil fertility were investigated by measuring daylily growth, soil nutrition contents, soil microbial population, and enzyme activities in a coal mining subsidence loess hilly area of northern Shaanxi. Results showed that AM fungal inoculation significantly increased plant height and crown width, mycorrhizal colonization rate, and hyphal density. Compared with control, AM fungal inoculation increased leaf photosynthesis rate, soluble sugar content, and catalase activity by 51%, 12%, and 79%, respectively. Moreover, the soil conductivity and organic matter, available nitrogen, and potassium content in the rhizosphere soil were significantly higher in mycorrhizal plants than control, and the contribution rates of AM

基金项目:国家自然科学基金(51574253);首都科技领军人才工程(Z18110006318021)

收稿日期:2017-01-13; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylb88@126.com

fungi inoculation to bacteria population and acid phosphatase activity in rhizospheric soil were 77% and 24%, respectively. This showed that AM fungal inoculation may play an important role in enhancing plant resistance stress and improving soil fertility, soil microbial population, and enzyme activities. It will have an important value in promoting the growth of cash crops and further research on degraded land reclamation.

Key Words: mycorrhizal fungi; daylily (*Hemerocallis citrina Baroni*); coal mining subsidence; soil fertility

近年来我国煤炭开采重心已逐步向西部转移,陕西北部地区成为全国最主要的产煤基地之一。大规模煤炭资源开采造成了大量采煤沉陷地,使原本沟壑纵横的黄土高原生态环境更为恶化与脆弱^[1],选择当地适生的经济作物进行生态治理是采煤沉陷地开展的研究工作之一。黄花菜是本地重要的经济作物,具有耐瘠、抗旱、入药等特点,在陕北黄土高原地区被广泛种植。因其花瓣肥厚,色泽金黄,香味浓郁,食之清香、鲜嫩,爽滑同木耳、草菇,营养价值高,是人们喜吃的一种传统蔬菜,被视作“席上珍品”。近年来由于煤炭开采引起的土地退化使黄花菜根际生态环境遭到严重破坏,其生长和发育受到严重影响^[2]。

丛枝菌根真菌(*Arbuscula mycorrhizal fungi*, 简称 AM 真菌)是自然界中普遍存在的一种能与植物根系形成互惠互利共生关系的土壤微生物^[3],在干旱、贫瘠的土壤中能够显著增强宿主植物对干旱或贫瘠的抗逆性^[4-6],从而实现植被恢复,提高生态系统稳定性的目的。张鑫等^[7]通过调查紫花苜蓿草地中 AM 真菌与根际土壤性质之间的相关性,结果发现大同地区 AM 真菌与紫花苜蓿可以形成良好的共生关系,AM 真菌对土壤营养吸收具有重要的作用。李娇清等^[8]通过在自然条件下接种 AM 真菌,研究其对煤矸石修复的作用,结果表明接种 AM 真菌后植株成活率平均提高 30%,重金属含量显著下降,土壤有机质及速效氮、磷、钾含量显著提高,说明接种 AM 真菌在煤矸石山中具有较好的土壤修复效应。

黄土沟壑沉陷区由于受地形破碎、土质疏松、降雨集中等自然因素的影响,水土流失、土地塌陷裂缝现象非常严重,生态环境脆弱^[9],生物修复技术已经成为近年来脆弱区生态治理的有效方法。利用 AM 真菌促进本地生态经济植物黄花菜生长及其土壤改良方面尚未见报道。通过测定 AM 真菌对黄花菜营养生长状况及根际土壤理化特性、微生物数量的影响,研究接种 AM 真菌对当地经济作物的生态修复效应,不仅对于本地经济作物的恢复及大规模种植,甚至对于提高当地农民经济收入起到积极作用,同时也为陕北黄土高原煤矿区受损生态与经济的可持续发展提供理论依据,具有重要的生态意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区地处毛乌素沙漠与黄土沟壑区的过渡地带,位于陕西省神木县柠条塔矿区,属干旱半干旱高原大陆性气候,常年干旱少雨,多风沙,植被稀疏。年平均降雨量为 441 mm,主要集中于 7—9 月份,年均蒸发量为 1337 mm,是降水量的 3 倍。年平均气温为 8.9℃。土壤类型主要为黄土,土质疏松,养分贫瘠。本研究所处地区植被退化较为严重,植物种类主要以一年生狗尾草(*Setaria viridis*)、黄花菜(*Hemerocallis citrina Baroni*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana intermedia*)等植物为主。

1.2 试验区设计

试验区总面积为 11512 m²,分接菌区(简称 GM,下同)和对照区(简称 CK,下同)各占一半,其地形和土质均相近。于 2015 年 5 月开始种植黄花菜(daylily, *Hemerocallis citrina Baroni*),种植密度 16 株/m²。供试菌剂由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室自主扩繁培养得到的摩西管柄囊霉 *Funneliformis mosseae*(简称 F.m),该菌剂为混有菌根根段的砂土等基质材料组成,其菌丝密度为 5.09 m/g。菌剂随黄花菜幼苗种植时一起接入根际周围,每株接菌 20 g 菌剂。植株栽培后第一个月内每周浇水一次,并达到最大持水量,一个月后不再人工浇水自然生长。

1.3 指标测定

试验分别于 2015 年 8 月和 10 月测定两个试验小区黄花菜菌根侵染、植株生长以及植株生化含量等常规试验指标。每个小区随机选择 60 个样本测定黄花菜植株的株高、冠幅等生长指标,随机选择 15 个样本测定植株叶片的叶绿素含量、氮、磷、钾等营养指标;在各试验小区随机选取 15 株黄花菜,在其根际 10—30 cm 处采集新鲜土样 100 g,并立即用自封袋密封于 4℃ 冰盒,并于当天带回实验室放入 4℃ 冰柜冷藏,用于测定微生物数量和酸性磷酸酶活性。此外,每个根际土壤样品选取 50 g 风干,过 2 mm 筛后用于分析其理化性质。菌根侵染率的测定采用曲利苯蓝染色法^[10]及根段侵染率加权法^[11]测定。菌丝密度的测定采用网格交叉法^[12]。

黄花菜叶片叶绿素含量的测定采用 Konica Minolta 公司生产的 SPAD-502 叶绿素仪测定叶绿素值(Soil and Plant Analyzer Development,简称 SPAD,下同),测定时,每个小区选取 40 株,每株黄花菜选取叶片上、下两层各两片叶子,每片叶子测 10—15 个点。取其平均值作为此叶片的叶绿素相对值。光合作用速率的测定采用 LI-6400XT 便携式光合仪,时间段选择在 9:00—11:00 时,以及 14:00—16:00 时。测定时选择小区内外形长势相近的植物作为样品,每个小区选择 30 株,每株选择 4 个方位长势旺盛的叶片,每个测点重复测 3 次求平均。可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[13],过氧化氢酶含量测定采用 pH 7.8 磷酸缓冲液提取粗酶液的分光光度法^[14]。

根际土壤 pH 值为水土比 5:1 的玻璃电极-酸度计法,电导率(Electrical Conductivity,简称 EC,下同)为水土比 5:1 浸提-电导法,土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法^[15],速效钾采用 1.0 mol/L NH₄OAc 浸提—火焰光度法^[16],土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热方法(K₂Cr₂O₇-H₂SO₄法)^[17]。土壤速效氮含量采用碱解扩散法^[7]。土壤微生物数量的测定采用常规的稀释平板法^[18],其中,真菌数量的测定采用孟加拉红培养基,放线菌数量的测定采用改良高氏一号培养基,细菌数量的测定采用牛肉膏蛋白胨培养基。酸性磷酸酶活性的测定采用改进的 Tabatabai & Brimmer 法^[19],酶活性用单位时间每克土产酚量($\mu\text{gg}^{-1}\text{h}^{-1}$)表示。

本文中菌根贡献率的计算采用以下公式^[20]:

$$\text{菌根贡献率}(\%) = \frac{\text{接菌植株指标数据} - \text{对照组植株指标数据}}{\text{接菌组植株指标数据}} \times 100\%$$

2 结果与分析

2.1 黄花菜菌根侵染率及菌丝密度

侵染率反映了菌根真菌与植物根系之间的亲和程度。接菌小区内黄花菜的菌根侵染率达到 80% 左右,而对照小区内黄花菜的菌根侵染率只有 20% 左右(表 1)。接菌区黄花菜根际土壤菌丝密度均高于对照区 2.8 倍左右,接种 AM 真菌极显著提高土壤中菌丝密度,达到显著性差异。此外,与 8 月份相比,10 月份相同处理的黄花菜根际土壤菌丝密度没有显著差异,可能由于两次监测时间间隔过短,寄主植物根际土壤菌丝密度的变化量不明显所致。

2.2 接种 AM 真菌对黄花菜生长量的影响

8 月份和 10 月份接菌处理的黄花菜株高是对照处理黄花菜株高的 3—4 倍左右(表 1),达到显著性差异。在 8 月份和 10 月份接菌与对照处理黄花菜的冠幅均达到显著性差异,两次监测时期接菌处理的黄花菜的冠幅是对照组黄花菜冠幅的 2.4—2.8 倍左右,说明接种 AM 真菌对黄花菜的生长起到了显著的促进作用。另外由于两次监测时间间隔较短,相同处理的黄花菜株高和冠幅在不同月份之间差异不显著。

2.3 接种 AM 真菌对黄花菜抗逆性影响

8 月份和 10 月份接菌和对照处理的黄花菜叶片的光合速率影响见表 2,在 8 月份不同处理间黄花菜叶片的光合速率未达到显著性差异,而在 10 月份接菌处理黄花菜叶片的光合速率显著高于对照组,菌根贡献率达 51%,可能是由于 10 月份陕北黄土区气温已经下降,光强较 8 月份变弱,而接种 AM 真菌能在一定程度上减

弱光强对植物光合速率的影响,对促进光合作用起到积极作用。

表 1 接种菌根对黄花菜根系菌根侵染率、菌丝密度及株高冠幅的影响

Table 1 Effect of AM fungal inoculation on root infection rate, hyphal density, plant height and crown width of daylily

监测时间 Monitoring time	接菌处理 Inoculation treatment	侵染率/% Infection rate	菌丝密度/(m/g) Hyphal density	株高/cm Plant height	冠幅/cm Crown width
8 月份 August	GM	76.00±10.38a	5.04±0.57a	43.33±4.89a	42.90±3.18a
	CK	18.89±8.39b	1.71±0.21b	14.03±1.81b	17.56±3.19b
10 月份 October	GM	83.33±10.54a	5.24±0.03a	46.29±3.77a	41.73±3.87a
	CK	22.10±5.38b	1.95±0.10b	11.49±1.34b	14.78±2.31b

GM:分接菌区;CK:对照区

表 2 接种菌根对黄花菜抗逆性影响

Table 2 Effect of AM fungal inoculation on the resistance stress of daylily

监测时间 Monitoring time	接菌处理 Inoculation treatment	光合速率 Photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	叶绿素含量 (SPAD) Chlorophyll content	可溶性糖 Soluble sugar content/(g/kg)	过氧化氢酶 Catalase activity /($\text{U kg}^{-1} \text{min}^{-1}$)
8 月份 August	GM	32.47±4.47ab	39.85±3.64a	—	—
	CK	25.60±4.75b	37.09±4.46a	—	—
10 月份 October	GM	32.21±5.26a	41.0±4.34a	0.074±0.009a	222.42±59.27a
	CK	15.74±2.59c	39.68±3.82a	0.065±0.004b	47.11±16.92b

8 月份和 10 月份不同处理的黄花菜叶片叶绿素含量接菌的处理均高于对照,但并未达到差异显著水平(表 2),说明在该野外试验条件下,接种 AM 真菌在一定程度上有利于提高黄花菜叶片叶绿素含量,增强光合产物的生产能力。

比较了 10 月份接菌和对照处理黄花菜叶片可溶性糖含量(表 2)。接菌组叶片可溶性糖含量显著高于对照,菌根贡献率达 12%。说明接种 AM 真菌对于黄花菜叶片可溶性糖的合成起到积极促进作用,增加了黄花菜叶片的抗寒能力。

过氧化氢酶是作物抗氧化防御的一种表现,接菌和对照处理过氧化氢酶含量如表 2 所示。接菌组叶片的过氧化氢酶含量显著高于对照组,菌根贡献率达 79%,说明在该试验区接种 AM 真菌能显著促进黄花菜叶片合成过氧化氢酶的能力,增强了黄花菜抗逆性。

2.4 接种 AM 真菌对黄花菜根际土壤养分含量的影响

8 月份和 10 月份接菌与对照处理黄花菜根际土壤 pH 没有显著性差异,而电导率均显著高于对照处理,菌根贡献率分别为 39%、48%(表 3),说明接菌处理对改善黄花菜根际土壤盐分含量有一定作用。8 月份和 10 月份相比,相同处理间差异不明显,可能与其监测间隔时间较短相关。

表 3 不同处理对黄花菜根际土壤理化参数的影响

Table 3 Effects of AM fungal inoculation on the of physical and chemical properties of rhizosphere soil of daylily

监测时间 Monitoring time	接菌处理 Inoculation treatment	pH	电导率值 EC Electrical conductivity/ (mS/cm)	有机质 Organic matter/ (g/kg)	碱解氮 Alkali-hydrolyzable nitrogen/ (g/kg)	速效磷 Available phosphorus/ (mg/kg)	速效钾 Available potassium/ (mg/kg)
8 月份 August	GM	7.49±0.04a	199±32a	11.20±0.14c	14.0±2.50ab	2.97±0.38a	5.57±0.13b
	CK	7.40±0.05a	121±11b	12.15±1.05c	11.67±2.02b	3.32±0.60a	3.88±0.08d
10 月份 October	GM	7.81±0.14a	186±41a	18.6±1.71a	16.33±2.02a	3.66±0.45a	6.38±0.18a
	CK	7.93±0.03a	96±12b	14.55±0.15b	8.17±2.02c	4.28±0.50a	4.23±0.62c

8 月份不同处理黄花菜根际土壤有机质含量差异不显著,而在 10 月份不同处理间达到显著性差异,菌根

贡献率达 21%(表 3)。与 8 月份相比,10 月份接菌与对照处理黄花菜根际土壤有机质含量均有所增加,说明 10 月份后气温下降,早晚温差变大有利于有机质的积累,接种 AM 真菌对土壤有机质积累有积极促进作用。

接菌处理根际土壤碱解氮、速效钾含量均显著高于对照处理,其中碱解氮的菌根贡献率达 17%—50%,速效钾的菌根贡献率为 30%—34%(表 3),说明接种 AM 真菌能够显著提高该土壤中碱解氮、速效钾的含量。土壤速效磷含量略与对照处理之间没有显著性差异,接菌处理略低于对照处理,可能是菌根对磷较为敏感,接菌促进了植物吸收了较多的土壤磷所致。

2.5 接种 AM 真菌对黄花菜根际土壤微生物数量及磷酸酶活性的影响

10 月份接菌处理的黄花菜根际土壤微生物数量及酸性磷酸酶活性均高于对照组(表 4),表明菌根真菌能够影响根际土壤微生物的数量与酸性磷酸酶活性。接菌处理对黄花菜根际土壤中真菌、放线菌数量影响不显著,而土壤细菌数量显著高于对照,菌根贡献率达 77%,说明接种 AM 真菌能够显著促进根际细菌的数量,而对真菌和放线菌数量的影响作用不明显。接菌黄花菜根际土壤酸性磷酸酶活性显著高于对照,菌根贡献率为 24%,说明接种 AM 真菌能显著提高黄花菜根际土壤酸性磷酸酶活性,促进了土壤速效磷的高效利用。

表 4 接种菌根对黄花菜根际土壤微环境的影响
Table 4 Effects of AM fungal inoculation on the micro-environment of soil in mining area

接菌处理 Inoculation treatment	真菌/(10 ³ cfu/g) Fungal number	放线菌/(10 ⁵ cfu/g) Actinomycete number	细菌/(10 ⁶ cfu/g) Bacterium number	酸性磷酸酶/(μg g ⁻¹ h ⁻¹) Acid phosphatase activity
GM	5.43±1.57a	3.05±0.58a	1.86±0.68a	4.00±0.94a
GM	5.27±1.95a	2.80±0.55a	0.42±0.59b	3.05±0.38b
菌根贡献率 Mycorrhizal contribution rate/%	3	8	77	24

3 讨论

本文研究了接种 AM 真菌对陕北柠条塔黄土沟壑采煤沉陷扰动区黄花菜生长及土壤改良的影响。黄花菜是当地农民普遍选种的一种经济植物,近年来随着采煤沉陷对土地的破坏与扰动,黄花菜的生存环境受到了很大的干扰,幼苗成活率低。接种菌根真菌显著提高了黄花菜的生长,一定程度上改善了黄花菜根际土壤养分状况,改善提高了品质和抗逆性。为黄土沟壑沉陷区扰动土地的微生物修复技术应用提供了较好的研究思路,具有普遍的现实生态意义。

对照区黄花菜根有一定的菌根侵染率和菌丝密度,自然状态下土壤中存在土著 AM 真菌,野外人工接种 AM 真菌对于加速生态修复具有积极意义。接种 AM 真菌能够扩大植物根系吸收面积^[21]、增加根系内营养与水分的运输速度^[22],促进植物生长,改善植物对磷、锌、钙、镁等矿物质营养元素的吸收^[23-24]。8 月份和 10 月份接菌处理的黄花菜株高、冠幅均显著高于对照组,对于黄花菜的生长起到显著的促进作用,这可能是由于菌根菌丝扩大了黄花菜根系与土壤的接触面积,促进了黄花菜根系对土壤中水分和矿物质养分的吸收,长势明显,与在采煤沉陷区接种 AM 真菌的沙蒿^[25]、柠条^[26]和紫穗槐^[27]均表现出相同的生长规律。

黄土丘陵土壤养分贫瘠,气候干旱,采煤沉陷频发又加剧了贫瘠及干旱等逆境胁迫。在土壤养分贫瘠、气候干旱、入秋早温差大的煤矿塌陷区,接种 AM 真菌可以显著提高寄主植物的抗旱寒性等逆境的适应性,改善其品质^[28]。植物的抗旱能力与其体内的可溶性糖含量密切相关^[29],过氧化氢酶作为抗氧化剂,可为作物组织提供抗氧化防御能力^[30]。接种丛枝菌根真菌显著提高黄花菜叶片光合速率,可能是接种菌根激活了黄花菜叶片的气孔开关^[31],也可能是由于菌根菌丝加强了黄花菜根系对土壤中水分和其他矿物质养分的吸收和转运,使之有利于接菌组黄花菜叶片的气体交换,从而提高植物叶片的光合速率^[32]。接菌处理黄花菜叶片可溶性糖含量与过氧化氢酶含量均显著高于对照处理,菌根贡献率分别达到 12% 和 79%,与前人的研究结果一致^[33],可能是在土壤养分和水分贫瘠的采煤沉陷区,菌根真菌可以通过增加宿主体内的可溶性糖含量来降低

渗透势,以维持植株体内的水分含量^[34]。说明在煤炭开采强烈干扰区接种真菌可以显著提高黄花菜植株的可溶性糖与过氧化氢酶含量,从而增强黄花菜在干旱贫瘠地区的生长适应能力,提高品质。

由于陕北黄土沟壑采煤沉陷区水土流失严重,土壤中普遍缺乏有机质以及氮、磷、钾等矿物质元素^[35]。接菌处理对黄花菜根际土壤的电导率值显著高于对照组,显著提高了黄花菜根际土壤的有机质、碱解氮、速效钾含量,这说明接种 AM 真菌改善了黄花菜根际土壤的微环境,促进了根际土壤中矿物质养分的活化,改良了土壤肥力,从而促进黄花菜植株的生长和根际微环境的改善。这对黄土沟壑采煤沉陷区受损的生态系统恢复到自然生态系统的良性循环具有重要的意义。这一结论与王瑾等^[36]在神东采煤沉陷区利用紫穗槐接种丛枝菌根真菌促进根际土壤的速效磷、碱解氮、有机质含量等增加的规律一致。

土壤性状改善反过来促进了黄花菜根际土壤微生物群落的生长和新陈代谢,土壤中微生物主要参与有机质的分解、腐殖质的形成、土壤养分转化等过程,土壤中的酶活性及土壤中微生物数量的变化不仅可以敏感地反映土壤质量及其物质代谢的旺盛程度^[37-38],而且也是土壤生物活性的具体体现^[39]。接种 AM 真菌显著提高了黄花菜根际土壤中的真菌、放线菌、细菌及磷酸酶活性,表明 AM 真菌对刺激土壤中微生物的生长有一定的促进作用,与王瑾^[33]和马源^[40]等研究结果类似。接菌后微生物数量及酶活性的增加,一定程度上反映了接菌区土壤质量改善^[41],这对于黄花菜根际土壤微生态环境的改良起到积极促进作用,使得黄土沟壑采煤沉陷区的生态系统具有向多样性发展的潜力。

参考文献 (References):

- [1] 雷少刚, 卞正富. 西部干旱区煤炭开采环境影响研究. 生态学报, 2014, 34(11): 2837-2843.
- [2] 史晓琼, 杨泽元, 张艳娜, 许登科, 郝俊卿, 李文莉. 陕北高强度采煤对生态环境影响的研究进展. 煤炭技术, 2016, 35(1): 314-316.
- [3] 刘永俊. 丛枝菌根的生理生态功能. 西北民族大学学报: 自然科学版, 2008, 29(1): 54-59.
- [4] 毕银丽, 任婧. 接种菌根对根际微生物群落和磷营养的影响. 能源环境保护, 2007, 21(3): 25-28.
- [5] 李少朋, 毕银丽, 陈咄咄, 陈书琳, 张延旭, 孔维平, 王瑾. 干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4181-4188.
- [6] 孔维平, 毕银丽, 李少朋, 陈书琳, 冯颜博, 余海洋. 利用高光谱估测干旱胁迫下接菌根菌大豆叶绿素含量. 农业工程学报, 2014, 30(12): 123-131.
- [7] 张鑫, 裴宗平, 孙干, 王瑜, 苏雪鹏. 紫花苜蓿根际丛枝菌根真菌与土壤理化性质的相关性研究. 北方园艺, 2016, (13): 172-177.
- [8] 李娇清, 刘德良, 杨期和, 陈勇杰. 煤矸石土壤修复中丛枝菌根的接种效应. 广东农业科学, 2013, (24): 55-58.
- [9] 王帅红, 孙泰森, 周伟, 张继栋. 黄土丘陵沟壑区煤矿沉陷耕地复垦. 农业工程学报, 2011, 27(9): 299-304.
- [10] Phillips JM, Hayman DS. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161, IN16-IN18.
- [11] 盛萍萍, 刘润进, 李敏. 丛枝菌根观察与侵染率测定方法的比较. 菌物学报, 2011, 30(4): 519-525.
- [12] Abbott LK, Robson AD, DeBoer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*. New Phytologist, 1984, 97(3): 437-446.
- [13] 丁雪梅, 张晓君, 赵云, 谭智敏, 李玉梅, 王鹏, 唐鸿宇, 丛彦龙, 包国章, 马骥超, 张金玉, 沈景林. 蒽酮比色法测定可溶性糖含量的试验方法改进. 黑龙江畜牧兽医, 2014, (23): 230-233.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 王珣珏, 黄巧云, 蔡鹏, 陈雯莉. 解钾菌解钾效率检测方法的比较. 华中农业大学学报, 2016, 35(1): 81-85.
- [17] 靳振江, 李强, 黄静云, 邓丽君, 陆文体, 黄美辉, 唐志琴, 唐显治, 罗堃, 杨帅, 吴琼敏. 典型岩溶生态系统土壤酶活性、微生物数量、有机碳含量及其相关性——以丫吉岩溶试验场为例. 农业环境科学学报, 2013, 32(2): 307-313.
- [18] 沈萍, 范秀容, 李广斌. 微生物学实验(第三版). 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [19] 赵兰坡, 姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨. 土壤通报, 1986, 17(3): 138-141.
- [20] 贺学礼, 高露, 赵丽莉. 水分胁迫下丛枝菌根 AM 真菌对民勤绢蒿生长与抗旱性的影响. 生态学报, 2011, 31(4): 1029-1037.
- [21] 刘婷. 丛枝菌根真菌(AMF)调控杨树生长及干旱响应机制的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 2-5.
- [22] 田蜜, 陈应龙, 李敏, 刘润进. 丛枝菌根结构与功能研究进展. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2369-2376.
- [23] 曹庆芹, 冯永庆, 刘玉芬, 郭献平, 张国庆, 秦岭. 菌根真菌促进植物磷吸收研究进展. 生命科学, 2011, 23(4): 407-413.

- [24] 毕银丽, 孙江涛, Ypyszhaz Z, 解文武, 于森. 不同施磷水平下接种菌根玉米营养状况及光谱特征分析. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1227-1235.
- [25] 于瑞雪, 李少朋, 毕银丽, 张延旭, 孔维平, 王瑾, 陈书琳, 刘生. 煤炭开采对沙蒿根系生长的影响及其自修复能力. 煤炭科学技术, 2014, 42(2): 110-113.
- [26] 孙金华, 毕银丽, 王建文, 张延旭, 于森, 孙江涛. 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. 生态学报, 2017, 37(7): 2300-2306.
- [27] 岳辉, 毕银丽, 刘英. 神东矿区采煤沉陷地微生物复垦动态监测与生态效应. 科技导报, 2012, 30(24): 33-37.
- [28] 王志刚, 毕银丽, 李强, 裴浪, 江彬, 刘浩. 接种 AM 真菌对采煤沉陷地复垦植物光合作用和抗逆性的影响. 南方农业学报, 2017, 48(5): 800-805.
- [29] 王川, 谢惠民, 王娜, 王宏礼. 小麦品种可溶性糖和保护性酶与抗旱性关系研究. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 94-99.
- [30] 赵芸, 张初, 刘飞, 孔汶汶, 何勇. 采用可见/近红外光谱检测大麦叶片过氧化氢酶与过氧化物酶含量的研究. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2382-2386.
- [31] Drüge U, Schonbeck F. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizal infection on transpiration, photosynthesis and growth of flax (*Linum usitatissimum* L.) in relation to cytokinin levels. Journal of Plant Physiology, 1993, 141(1): 40-48.
- [32] 朱先灿, 宋凤斌, 徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(2): 470-475.
- [33] 王瑾, 毕银丽, 张延旭, 洪天才, 裴浪, 陈书琳. 接种丛枝菌根对矿区扰动土壤微生物群落及酶活性的影响. 南方农业学报, 2014, 45(8): 1417-1423.
- [34] 张中峰, 张金池, 黄玉清, 徐广平, 张德楠, 俞元春. 接种菌根真菌对青冈栎幼苗耐旱性的影响. 生态学报, 2016, 36(11): 3402-3410.
- [35] 郝文芳, 单长卷, 梁宗锁, 陈存根. 陕北黄土丘陵沟壑区人工刺槐林土壤养分背景和生产力关系研究. 中国农学通报, 2005, 21(9): 129-135.
- [36] 王瑾, 毕银丽, 邓穆彪, 邹慧, 孙江涛, 解文武. 丛枝菌根对采煤沉陷区紫穗槐生长及土壤改良的影响. 科技导报, 2014, 32(11): 26-32.
- [37] 惠竹梅, 岳泰新, 张瑾, 程建梅, 李华. 西北半干旱区葡萄园生草体系中土壤生物学特性与土壤养分的关系. 中国农业科学, 2011, 44(11): 2310-2317.
- [38] 夏雪, 谷洁, 车升国, 高华, 秦清军. 施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响. 中国农业科学, 2011, 44(8): 1618-1627.
- [39] 杨满元, 杨宁, 郭锐, 邹芳平, 赵林峰, 林仲桂. 衡阳紫色土丘陵坡地恢复过程中土壤微生物数量特征. 生态环境学报, 2013, 22(2): 229-232.
- [40] 马源. 丛枝菌根真菌对黄花蒿根围土壤的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [41] 张延旭, 毕银丽, 王瑾, 孔维平, 于森, 张晓燕. 采煤沉陷地丛枝菌根的应用及其生态效应研究. 北方园艺, 2014, (21): 161-164.