

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2013.03.008

张传博, 谭金玉, 罗充, 等. 茂兰地区白茅丛枝菌根真菌多样性及其对紫花苜蓿的接种效应研究[J]. 广西植物, 2013, 33(3):324–330
Zhang CB, Tan JY, Luo C, et al. Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Imperata cylindrica* in Maolan karst forest and inoculation effects of the dominant AMF species on *Medicago sativa* [J]. Guihaia, 2013, 33(3):324–330

茂兰地区白茅丛枝菌根真菌多样性及其对紫花苜蓿的接种效应研究

张传博, 谭金玉, 罗充, 孙云子, 张超, 乙引*

(贵州师范大学 生命科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 对贵州省荔波茂兰国家自然保护区内优势草本植物白茅(*Imperata cylindrica*)根际丛枝菌根(Arbuscular Mycorrhizal, AM)真菌多样性, 优势种对紫花苜蓿的接种效应进行研究。结果表明: AM真菌对白茅根系的菌根侵染率为91.3%, 白茅根际土壤共分离AM真菌2属35种, 其中球囊霉属(*Glomus*)18种, 无梗囊霉属(*Acaulospora*)17种, 黑球囊霉(*Glomus melanosporum*)、聚生球囊霉(*G. fasciculatum*)、红色无梗囊霉(*Acaulospora capicula*)为优势AM真菌。以三叶草扩繁优势菌种, 接种紫花苜蓿(*Medicago sativa*), 均显著提高了生长量和超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性。

关键词: 茂兰地区; 白茅; AM真菌; 多样性; 接种效应

中图分类号: Q938.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2013)03-0324-07

Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Imperata cylindrica* in Maolan karst forest and inoculation effects of the dominant AMF species on *Medicago sativa*

ZHANG Chuan-Bo, TAN Jin-Yu, LUO Chong,

SUN Yun-Zi, ZHANG Chao, YI Yin*

(College of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: An investigation was carried out to determine the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Imperata cylindrica* in Maolan Karst Forest Natural Reserve of Libo County, Guizhou Province, and inoculation effects of the dominant AMF species on *Medicago sativa*. The results indicated that the infection rating of *Imperata cylindrica* by AMF was 91.3%. Thirty-five species were isolated from *I. cylindrica* rhizosphere soil samples belonging to two genera, including 18 species of *Glomus* and 17 species of *Acaulospora*. *Glomus melanosporum*, *G. fasciculatum*, *Acaulospora capicula* were the dominant species. In addition, the growth and superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) activities of the *Medicago sativa* inoculated with dominant species were improved compared to the control without inoculation.

Key words: Maolan karst forest; *Imperata cylindrica*; AM fungi; diversity; inoculation effect

收稿日期: 2012-12-13 修回日期: 2013-03-21

基金项目: 贵州省自然科学基金(黔科合J字2007-2048); 贵州师范大学资助博士科研项目(11904-05032100010); 长江学者和创新团队发展计划项目(PCSIRT)

作者简介: 张传博(1976-), 男, 山东梁山人, 博士, 从事内生真菌与菌根真菌研究, (E-mail) zhangchuanbo2004@163.com。

*通讯作者: 乙引, 博士, 教授, 从事植物生理生态研究, (E-mail) yiyin@gznu.edu.cn。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与 90% 的维管植物形成互惠共生体(Akhtar *et al.*, 2008),广泛分布于各种陆地生态系统中(许秀强等, 2009)。AM 真菌通过根外菌丝促进植物根系对矿质元素,特别是 N、P 的吸收和转运,提高植物抗病性及抗逆性(Tanaka *et al.*, 2005; Lapointe *et al.*, 2006);显著改善土壤理化性状,稳定土壤团粒结构,对植物的多样性、群落组成及生产力具有明显的促进作用(Caravaca *et al.*, 2005; Scheublin *et al.*, 2007)。西南喀斯特地区生态环境脆弱,以石漠化为典型代表的生态退化问题已成为我国西南喀斯特地区可持续发展的制约因素。喀斯特地区植被恢复是解决石漠化的重要前提,先锋树种选择,苗木质量和造林成活率是需要解决的关键问题。AM 真菌的生理生态特性使菌根技术成为喀斯特地区退化生态系统修复的一个新途径。

AM 真菌正在被广泛应用到退化或受损生态系统的恢复和重建中。丛枝菌根在煤矸石山土地复垦中具有较好的生态效果。接种 AM 真菌后能够提高植被成活率,促进植株生长和发育。利用 AM 真菌接种技术能够在矿渣地上建立良好的植被,形成持久的草类群落,成功地达到了复垦的目的(Noyd *et al.*, 1996)。将菌根技术应用于干旱区沙漠治理及荒山荒地生态林建设也都取得了明显的成效。成功的应用实例表明,将 AM 真菌应用到喀斯特地区的石漠化治理中是切实可行的。

AM 真菌的分布具有明显的地域性,目前关于我国喀斯特地区 AM 真菌种质资源和多样性的研究刚刚开始起步。喀斯特地区的生态环境不同于其它地区,空间异质性强,特殊的地质背景和气候条件会形成特有的 AM 真菌多样性,其多样性对植物适应这一地区石生、干旱、低磷的环境具有重要意义。茂兰保护区内的喀斯特森林是在喀斯特地貌、石灰土等特殊生境上形成的非地带性植被,也是世界同纬度地区仅有的一片原生性较强的喀斯特森林,植物种类繁多,植被类型独特(刘济明, 1999)。白茅(*Imperata cylindrica*)属禾本科白茅属,是喀斯特森林及喀斯特退化生态系统中的优势草本植物,耐荫、耐瘠薄和干旱,能穿透树根,断节再生能力强,对喀斯特环境具特殊的适应能力,也是喀斯特地区石漠化治理的理想先锋草种之一。

本研究以贵州茂兰国家级自然保护区喀斯特森林为取样地点,研究喀斯特地区优势草本植物白茅

土壤和根系内 AM 真菌的种类组成及多样性,并获得优势 AM 真菌菌种,以优势 AM 真菌菌剂接种紫花苜蓿,观察 AM 真菌对紫花苜蓿生长量和抗氧化酶活性的影响。对于研究喀斯特森林中 AM 真菌多样性与植物群落的互作关系,筛选优势 AM 真菌菌种,为菌根技术应用于石漠化地区退化生态系统的植被恢复和重建提供了依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集地概况

茂兰国家自然保护区位于贵州省荔波县南部,位于 107°37'~108°18' E, 25°7'~25°39' N 之间,最高海拔 1 078.6 m,最低海拔 430 m,平均海拔 758.8 m,属中亚热带季风性湿润气候,年均气温 18.6 °C,年均降水量 1 752 mm,年日照时数 1 272.8 h。茂兰地区是典型的喀斯特地貌,土壤以黑色石灰土为主,成土母质是纯度较高的石灰岩和白云岩,成土受母岩影响深刻,土壤矿物风化度不高,土层浅薄且土被不连续,常有母岩裸露,抗旱性差,土壤呈中性至碱性(周政贤, 1987)。白茅样品于 2010 年 10 月采集于茂兰国家自然保护区内的拉跃坡、三岔河、漏斗森林,平均海拔 800 m 左右,土壤 pH=7.5,有机质和全氮含量特别丰富,周围伴生植物为马尾松、火棘、悬钩子、蜈蚣草、鸢尾等。

1.2 样品采集及处理

采用五点采样法采集白茅根际土壤,去除表层 5 cm 厚的杂物,挖 10~20 cm 深的土壤剖面,收集根际土壤,装入塑料袋中,剪取白茅新鲜幼嫩根系,FAA 溶液固定,土样自然风干,4 °C 冰箱保存。

选取饱满、大小一致的紫花苜蓿(*Medicago sativa*)种子 30 粒,60 °C 温水浸种 4 h,自然冷却,播种于育苗盘中,生长 30 d,挑选生长健壮,大小一致的幼苗,移栽至营养钵中,每钵 4 株,用于接种处理。

1.3 侵染率、孢子密度测定及 AM 真菌鉴定

菌根侵染率的测定:碱解离-酸性品红染色法处理白茅根系,测定其侵染率,计算菌根侵染率(刘润进等, 2007)。

菌根侵染率(%) = $\frac{\sum (0 \times \text{根段数} + 10\% \times \text{根段数} + 20\% \times \text{根段数} + 30\% \times \text{根段数} + \dots + 100\% \times \text{根段数})}{\text{观察总根段数}}$

AM 真菌鉴定:湿筛倾注-蔗糖离心法分离、镜检孢子,记录孢子数,计算孢子密度。依据 Schenck

和 Perez 编著的《VA 菌根菌鉴定手册》和国际 VA 菌种保藏中心 INVAM (<http://invam.caf.wvu.edu/Myc-Info/>) 的菌根菌的分类描述和图片 (Schenck *et al.*, 1988), 近年来发表的新种、新记录种等进行种属的检索、鉴定和分类。

1.4 AM 真菌多样性指数测定及计算

物种丰富度 (species richness, SR) 指 10 g 土壤中含有的 AM 真菌种数, 即 $SR = \text{AM 真菌总种数} / \text{土样数}$ 。

孢子密度 (spore number, SN) 指 10 g 土壤中 AM 真菌的孢子个数, 即 $SN = \text{某土样中 AM 真菌所有孢子数} / \text{土样数}$ 。

分离频度 (frequency, F) 指 AM 真菌某属或种在样本总体中出现的频度, 即 $F = (\text{AM 真菌某属或种的出现次数} / \text{土样数}) \times 100\%$

相对多度 (relative abundance, RA) 指该采样点 AM 真菌某属或种的孢子数占总孢子数的比率, 即 $RA = (\text{该采样点 AM 真菌某属或种的孢子数} / \text{该采样点 AM 真菌总孢子数}) \times 100\%$

重要值 $I = (F + RA) / 2$, 即分离频度和相对多度的平均值。

将 AM 真菌的优势度按分离频度 (F) 划分为 5 个等级: $F > 80\%$ 为优势属 (种), $60\% < F \leq 80\%$ 为最常见属 (种), $40\% < F \leq 60\%$ 为常见属 (种), $20\% < F \leq 40\%$ 为少见属 (种); $F \leq 20\%$, 偶见属 (种)。

1.5 菌种扩繁

以珍珠岩:蛭石 = 1:1 的比例混匀为栽培基质, 经灭菌处理后, 在解剖镜下用移液枪将从白茅分离得到的优势土著 AM 真菌单孢直接放在白三叶草幼苗根系上, 将该苗定植于营养钵中, 室内培养, 定期浇 1/10 强度无菌水配制的 Hoagland 营养液。经白三叶草扩繁的菌剂为含有真菌孢子、菌丝和被侵染宿主植物根段的根际土。

1.6 接种及管理

挑选生长状况一致的紫花苜蓿幼苗, 将制备好的优势 AM 真菌菌剂与石灰土培养基质以 1:1 的比例混合, 移至营养钵中, 将紫花苜蓿幼苗移栽至营养钵, 每盆 4 株。置于温室中培养, 培养条件为 12 h 光照, 12 h 黑暗, 温度 25 °C, 生长期 90 d, 期间每隔 1 周浇 1 次 1/10 强度无菌水配制的 Hoagland 营养液。

1.7 优势 AM 真菌对紫花苜蓿的侵染率及生长量的测定

待紫花苜蓿长到 10 cm 高左右拔出紫花苜蓿,

在清水下冲洗干净称量其地上和地下部分的湿重, 烘干后再称干重, 测量其主根的长度、株高和叶片数, 测定 AM 真菌对紫花苜蓿的侵染率, 记录数据。

1.8 优势 AM 真菌对紫花苜蓿 SOD、POD、CAT 活性影响的测定

取紫花苜蓿一定部位去除叶脉的叶片适量, 进行超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD)、过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 液的提取 (郑炳松, 2006), 以 SOD、POD、CAT 试剂盒 (南京建成科技有限公司) 进行酶活性测定和计算。

1.9 数据分析

采用 DPS 统计软件进行方差分析。

2 结果和分析

2.1 AM 真菌对白茅的侵染率情况

白茅是典型的丛枝菌根植物, 能够与 AM 真菌形成良好的共生关系。在幼根皮层组织细胞间及细胞内均观察到大量的 AM 真菌菌丝、孢子、泡囊结构, 未见菌丝圈 (图 1)。白茅根系 AM 真菌的侵染率为 91.3%, 根际土壤分离的 AM 真菌孢子每 10 g 土壤中为 105.34 个, 说明丛枝菌根真菌对白茅根际的石灰土具很好的适应能力。

2.2 白茅根际土壤 AM 真菌的多样性

从白茅根际土壤中, 共分离 AM 真菌 2 属 35 种 (表 1)。其中球囊霉属 (*Glomus*) 18 种, 无梗囊霉属 (*Acaulospora*) 17 种, 黑球囊霉、聚生球囊霉、红色无梗囊霉为根际优势 AM 真菌。黑球囊霉的孢子密度每 10 g 土壤是 17.00 个, 分离频度 93.33, 相对多度 16.14, 重要值指数 54.74。聚生球囊霉的孢子密度每 10 g 土壤为 26.50 个, 分离频度 93.33, 相对多度 25.16, 重要值指数 59.25。红色无梗囊霉的孢子密度每 10 g 土壤为 5.17 个, 分离频度 86.67, 相对多度 4.9, 重要值指数 45.79。

2.3 优势 AM 真菌

2.3.1 黑球囊霉 (*Glomus melanosporum*) 孢子呈黑色, 为不规则的球形, 大小为 $(166 \sim 277) \mu\text{m} \times (129 \sim 244) \mu\text{m}$, 表面不光滑, 胞壁为易逝壁, 易碎成黑色碎片; 加入 Melzer 染色后无明显变化 (图 2)。

2.3.2 聚生球囊霉 (*G. fasciculatum*) 孢子为球形, 浅黄色到浅黄褐色, 大小为 $(50 \sim 149) \mu\text{m} \times (55 \sim 49) \mu\text{m}$, 外面有少量易逝壁, 压片后孢壁厚 $7 \sim 12 \mu\text{m}$ 。孢

表1 白茅中分离的AM真菌孢子密度、分离频度、相对多度及重要值

Table 1 Spore density, isolation frequency, relative abundance and important value of *Imperata cylindrica*

AM 真菌	AM fungus	孢子密度 SN (个/10g)	分离频度 F (%)	相对多度 RA (%)	重要值 I (%)
双网无梗囊霉	<i>Acaulospora bireticulata</i>	5.17	0.33	0.06	0.20
红色无梗囊霉	<i>A. capicula</i>	5.17 *	86.67 *	4.90 *	45.79 *
附柄无梗囊霉	<i>A. caulospora</i>	0.65	26.67	0.63	13.65
空洞无梗囊霉	<i>A. cavernata</i>	2.17	20.00	2.06	11.03
脆无梗囊霉	<i>A. delicata</i>	1.67	20.00	1.58	10.79
膨胀无梗囊霉	<i>A. dilatata</i>	2.17	20.00	2.53	11.27
丽孢无梗囊霉	<i>A. elegans</i>	0.65	53.33	0.63	26.98
凹坑无梗囊霉	<i>A. excavata</i>	1.50	66.67	1.42	34.05
孔窝无梗囊霉	<i>A. foveata</i>	1.50	46.67	1.42	24.05
浅窝无梗囊霉	<i>A. lacunosa</i>	1.17	33.33	1.11	17.22
蜜色无梗囊霉	<i>A. mellea</i>	1.00	0.20	0.01	0.11
尼氏无梗囊霉	<i>A. micolsonii</i>	0.17	33.33	0.63	16.98
瑞士无梗囊霉	<i>A. rehmsii</i>	3.83	33.33	3.64	18.49
皱壁无梗囊霉	<i>A. rugosa</i>	0.34	33.33	0.32	16.82
刺无梗囊霉	<i>A. spinosa</i>	8.00	0.87	0.10	0.48
孢果无梗囊霉	<i>A. sporocarpia</i>	1.17	73.33	1.11	37.22
波状无梗囊霉	<i>A. undulata</i>	15.50	46.67	14.71	30.69
白色球囊霉	<i>Glomus albidum</i>	0.65	13.33	0.63	6.98
澳洲球囊霉	<i>G. australe</i>	1.50	46.67	1.42	24.05
褐色球囊霉	<i>G. badium</i>	7.50	60.00	7.12	33.56
近明球囊霉	<i>G. claroideum</i>	2.84	66.67	2.89	34.68
明球囊霉	<i>G. clarum</i>	2.50	53.33	2.37	27.85
柑橘球囊霉	<i>G. citricolum</i>	1.65	26.67	1.11	13.89
缩球囊霉	<i>G. constrictum</i>	0.65	27.00	1.00	14.00
沙荒球囊霉	<i>G. deserticola</i>	0.84	46.67	0.79	23.73
聚生球囊霉	<i>G. fasciculatum</i>	26.50 *	93.33 *	25.16 *	59.25 *
地球囊霉	<i>G. geosporum</i>	1.84	33.33	1.74	17.54
根内球囊霉	<i>G. intraradices</i>	2.16	40.00	2.06	21.03
枫香球囊霉	<i>G. liquidambaris</i>	2.00	33.33	1.90	17.62
纯黄球囊霉	<i>G. luteum</i>	0.16	33.33	0.16	16.75
宽柄球囊霉	<i>G. magnicaule</i>	11.50	80.00	15.00	47.00
黑球囊霉	<i>G. melanosporum</i>	17.00 *	93.33 *	16.14 *	54.74 *
网状球囊霉	<i>G. reticulatum</i>	1.50	40.00	1.42	20.71
悬钩子球囊霉	<i>G. rubiforme</i>	1.16	40.00	1.11	20.55
弯丝球囊霉	<i>G. sinuosum</i>	0.05	7.00	1.00	4.00

壁分为3层:W1褐色,薄;W2颜色浅,较透明;W3膜状,褐色。加入Melzer染色后,无明显变化(图3)。

2.3.3 红色无梗囊霉(*Acaulospora capicula*) 孢子为球形,橙色到棕色,大小(220~310) μm×(290~440) μm,表面有少量易逝壁;压破后孢子壁可见,厚7~20 μm。颜色较深,分为3层:W1为褐色膜状壁;W2为黄褐色单一壁;W3为褐色膜状壁,有时还可看见孢子表面突起纹饰。加入Melzer染色后,无明显变化(图4)。

2.4 优势AM真菌对紫花苜蓿的侵染率及生长量的测定

黑球囊霉、聚生球囊霉、红色无梗囊霉对紫花苜蓿的侵染率都较高,以红色无梗囊霉最高,3种AM真菌对紫花苜蓿侵染率在0.05水平差异显著(表2)。

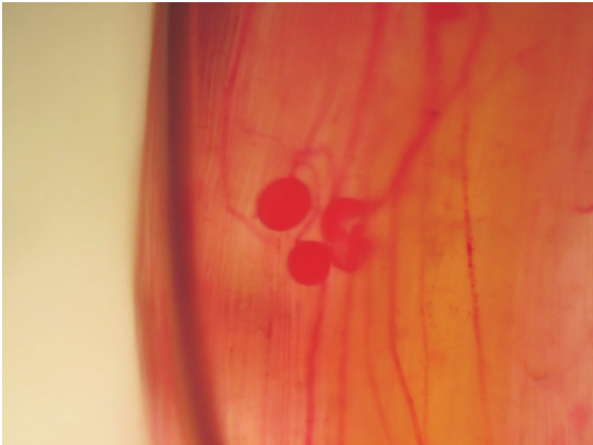


图1 白茅根内的AM真菌菌丝、孢子(×200)
Fig.1 AM fungal hyphae and spores inside root cells of *I. cylindrica* (×200)

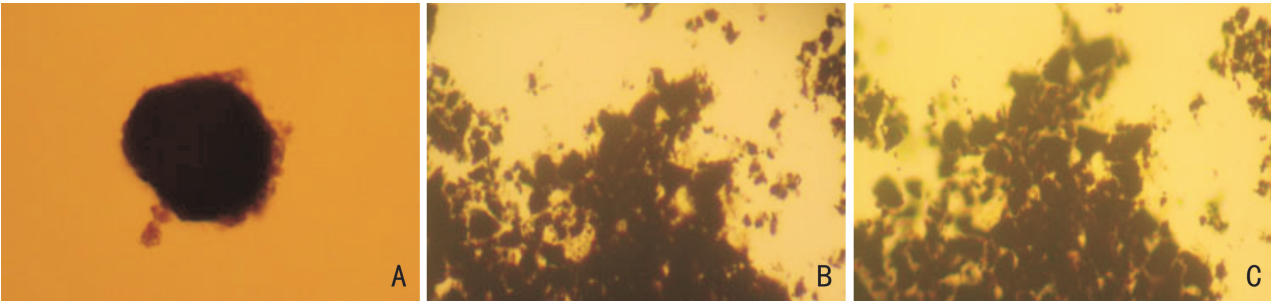


图 2 黑色球囊霉的形态特征 A. 完整孢子(×400); B. 破裂孢子(×400); C. Melze's 染色后的颜色反应(×400)。
Fig. 2 Morphological characters of *G. melanosporum* A. Complete spores(×400); B. Broken spores(×400); C. Stain reaction of spores in Melze's reagent(×400).

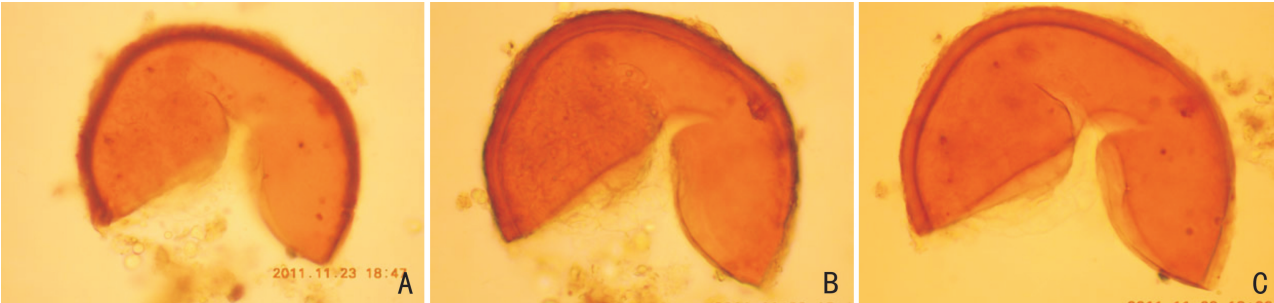


图 3 聚生球囊霉的形态特征 A-B. 破裂孢子 (×400); C. Melzer 染色后的颜色反应 (×400)。
Fig. 3 Morphological characters of *G. fasciculatum* A-B. Broken spores (×400); C. Stain reaction of spores in Melze's reagent (×400).

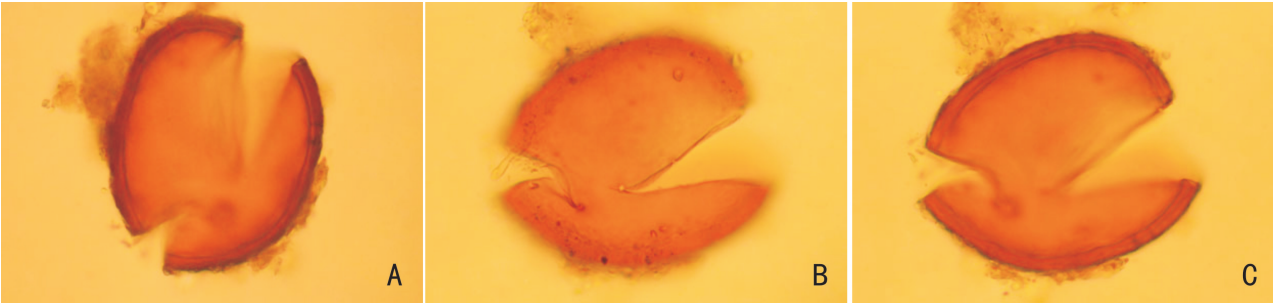


图 4 红色无梗囊霉的形态特征 A-B. 破裂孢子及孢壁 (×400); C. Melzer 染色后的颜色反应 (×400)。
Fig. 4 Morphological characters of *A. capicula* A-B. Broken spores and spore wall layers (×400); C. Stain reaction of spores in Melze's reagent (×400).

表 2 优势 AM 真菌对紫花苜蓿的侵染率

Table 2 Infection rates of the dominant species isolated from *Imperata cylindrica* on *Medicago sativa*

AM 真菌 AM fungus	对紫花苜蓿的侵染率 Infection rate on <i>M. sativa</i>
黑球囊霉 <i>Glomus melanosporum</i>	0.750±0.017a
聚生球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>	0.520±0.006b
红色无梗囊霉 <i>Acaulospora capicula</i>	0.917±0.012c

注：不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。

Note: Different small letters mean significantly differences at $P=0.05$ level.

紫花苜蓿接种黑球囊霉、聚生球囊霉、红色无梗囊霉后,与对照组相比,3 种接种物都显著提高了紫花苜蓿的生长指标,在 0.05 水平上差异显著。其中,红色无梗囊霉对紫花苜蓿的地上鲜重、地上干重、地下鲜重、地下干重,主根长、株叶片数影响最大,与对照组相比,分别提高了 2.57 g、1.02 g、1.20 g、0.44 g、11.47 cm、26.00 片;对株高影响最大的是聚生球囊霉,与对照相比,提高了 21.00 cm。3 种接种物间相比,对地上鲜重、地上干重的影响,在 0.05 水平上差异显著,红色无梗囊霉与聚生球囊霉和黑球囊霉间对地上鲜重和地上干重的影响在 0.01 水平上差异极显著,在 0.05 水平上差异显著。

2.5 优势 AM 真菌对紫花苜蓿 SOD、POD、CAT 活性的影响

白茅分离的优势 AM 真菌分别接种到紫花苜蓿后,显著提高了 SOD、POD、CAT 的活性,和对照

组相比,在 0.01 水平上差异极显著,在 0.05 水平上差异显著。3 种 AM 真菌之间对 SOD、POD、CAT 的活性的影响,在 0.01 水平上差异极显著,在 0.05 水平上差异显著。

表 3 白茅中优势 AM 真菌对紫花苜蓿生长量的影响

Table 3 Effects of the dominant species isolated from *Imperata cylindrica* on the growth of *Medicago sativa*

AM 真菌 AM fungus	地上部分鲜重 Fresh weight of shoot	地上部分干重 Dry weight of shoot	地下部分鲜重 Fresh weight of root	地下部分干重 Dry weight of root	主根长 Main-root length	株高 Plant height	叶片数 Number of leaves
黑球囊霉 <i>Glomus melanosporum</i>	2.96±0.08cB	1.00±0.01cB	1.28±0.29aA	0.44±0.09aA	21.33±1.93bB	26.00±1.53bA	54.67±1.45aA
聚生球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>	3.24±0.08bB	1.13±0.05bB	1.35±0.11aA	0.53±0.03aA	22.90±1.77bB	30.00±1.53aA	50.67±12.20aA
红色无梗囊霉 <i>Acaulospora capicula</i>	3.65±0.05aA	1.29±0.02aA	1.53±0.05aA	0.53±0.03aA	26.17±0.66aA	25.67±0.88bA	55.33±2.33aA
CK	1.98±0.09dC	0.57±0.03dC	0.79±0.06bB	0.29±0.02bB	19.70±0.55cC	18.76±0.58cB	39.33±2.60bB

注：不同的大写字母表示在 1%水平上差异极显著。下同。
Note: Different capital letters mean significant differences at *P* = 0.01 level. The same below.

表 4 优势 AM 真菌对紫花苜蓿 SOD、POD、CAT 活性影响

Table 4 SOD,POD,CAT activities of *Medicago sativa* inoculated with the dominant species isolated from *Imperata cylindrica*

AM 真菌 AM fungus	SOD 活性 (U · g ⁻¹ FW) SOD activity	POD 活性 (U · g ⁻¹ FW) POD activity	CAT 活性 (U · g ⁻¹ FW) CAT activity
黑球囊霉 <i>Glomus melanosporum</i>	88.740±0.607cC	100.175±0.067aA	85.93±0.39bB
聚生球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>	97.801±0.138bB	84.861±0.116bB	89.14±0.15aA
红色无梗囊霉 <i>Acaulospora capicula</i>	107.91±0.253aA	80.916±0.177cC	77.61±0.64cC
CK	75.703±0.343dD	65.267±0.679dD	40.56±0.39dD

3 结论与讨论

AM 真菌作为生态系统的重要组分,其多样性和森林中植物种类分布、生长和发育、群落结构及演替密切相关(Santos *et al.*, 2006; Pivato *et al.*, 2007),特别对退化生态系统恢复过程中的先锋植物有明显的促进作用(Van der Heijden *et al.*, 2003; Guadarramal *et al.*, 2004)。喀斯特地区适生植物构树(*Broussonetia papyrifera*)接种 AM 真菌后,能够显著促进构树幼苗的生长,而且宿主植物与菌种存在一定的选择性(何跃军等, 2007)。不同植物对 AM 真菌的依赖性不同,菌根依赖性越强的植物从 AM 真菌中获得的利益越大。研究结果表明,白茅是菌根依赖性强的植物,AM 真菌能够与白茅形成良好的共生关系,在宿主植物皮层细胞中有大量的 AM 真菌菌丝、孢子、泡囊,但未观察到菌丝圈结构。

白茅 AM 真菌多样性非常丰富,从根际土壤中,共分离出 AM 真菌 2 属 35 种,球囊霉属(*Glomus*) 18 种,无梗囊霉属(*Acaulospora*) 17 种,各种 AM 真菌的重要

值都比较高。结果球囊霉属和无梗囊霉属的 AM 真菌在喀斯特土壤中能与白茅形成良好共生关系,和 AM 真菌对白茅的高侵染率相符合,也和白茅的生命力顽强、根系发达密切相关。球囊霉属在喀斯特地区属优势属,在其它地区均属优势属,但优势种类不同,内蒙古草原上优势种为地球囊霉,我国东南沿海地区为摩西球囊霉(*Glomus mosseae*),西北干旱地区优势种为近明球囊霉(*G. claroideum*)(张美庆等, 1999; 冀春花等, 2007)。黑球囊霉、聚生球囊霉、红色无梗囊霉的分离频率 *F* > 80%,为根际优势 AM 真菌。黑球囊霉在白茅根际为优势种,其寄主植物多样,为很多药用植物及草本植物根际的优势种。油蒿(*Artemisia ordosica*)根围,黑球囊霉为稀有种,但相似生境,沙蒿及柠条锦鸡儿根围却为优势种(贺学礼等, 2012)。由此可知,优势 AM 真菌生态分布复杂,受植物种类、土壤 pH、有机质含量、甚至海拔高度等因素影响。

黑球囊霉、聚生球囊霉、红色无梗囊霉均能与紫花苜蓿形成良好的共生关系,接种 AM 真菌的紫花苜蓿苗在株高、叶片数、主根长、地上部鲜重、干重以

及地下部鲜重、干重等生长指标均高于未接种的。不同种属的 AM 真菌对紫花苜蓿的侵染程度、生长指标的影响不同,同种 AM 真菌对紫花苜蓿不同的生长指标的影响也不一样,充分表现出接种 AM 真菌对宿主影响的复杂性及宿主偏好性。

SOD、POD、CAT 是植物体内主要的抗氧化酶系统,植物抗逆性的形成依赖于抗氧化酶系统的启动。AM 真菌提高植物的抗逆性与 AM 真菌促进植物的抗氧化酶系统有一定相关性(李晓林,2001;补娟,2009)。接种优势 AM 真菌后,显著提高了紫花苜蓿根系中 SOD、POD、CAT 的活性,表明 AM 真菌可以促进根系的抗氧化酶活性。胁迫条件下细胞内产生的活性氧(Reactive oxygen species,ROS)能够有效地启动抗氧化酶系统,因此,国内研究多测定干旱、胁迫、不同 N 素水平等条件下接种 AM 真菌对 SOD、POD、CAT 活性的影响(Wu *et al.*,2008;Alejo-Iturvide *et al.*,2008)。本实验结论表明,在养分充足条件下接种 AM 真菌,能够系统提高紫花苜蓿抗氧化酶活性,而非仅仅在胁迫条件下,且不同 AM 真菌对不同类型氧化酶活性的影响不同。

参考文献:

- 李晓林,冯固. 2001. 丛枝菌根生理生态学[M]. 北京: 华文出版社:1—358
- 刘润进,陈应龙. 2007. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社
- 周政贤. 1987. 茂兰喀斯特森林科学考察集[M]. 贵阳: 贵州人民出版社:1—23
- Alejo-Iturvide F, Márquez-Lucio MA, Morales-Ramírez I, *et al.* 2008. Mycorrhizal protection of chili plants challenged by *Phytophthora capsici*[J]. *Eur J Plant Pathol*, **120**(1):13—20
- Akhtar MS, Siddiqui Z. 2008. Abscultural Mycorrhizal Fungi As Potential Bioprotectants Against Plant Pathogens[M]. Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry:61—69
- Bu J(补娟), Cui WD(崔卫东). 2009. The effect of inoculation with AMF inoculum on growth and verticillium Wilt of cotton (接种丛枝菌根真菌对棉花生长和黄萎病的影响)[J]. *Xinjiang Agric Sci*(新疆农业科学), **46**(3):549—555
- Caravaca F, Alguacil MM, Díaz G, *et al.* 2005. Nutrient acquisition and nitrate reductase activity of mycorrhizal *Retama sphaerocarpha* L. seedlings afforested in an amended semiarid soil under two water regimes[J]. *Soil Use Manag*, **21**(1):10—16

- Guadarrama P, Sánchez JA, Briones O. 2004. Seedling growth of two pioneer tropical tree species in competition: the role of arbuscular mycorrhizae[J]. *Euphytica*, **138**(2):113—121
- He XL(贺学礼), Chen Z(陈燕), Guo HJ(郭辉娟) *et al.* 2012. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Cargana korshinskii* Kom. in desert zone(荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **32**(10):3 041—3 049
- He YJ(何跃军), Zhong ZC(钟章成), Liu JM(刘济明) *et al.* 2007. Growth response of *Broussonetia papyrifera* seedlings to VA mycorrhizal fungi inoculation(构树幼苗对接种丛枝菌根真菌的生长响应)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **18**(10):2 209—2 213
- Liu JM(刘济明). 1999. Study on the seed bank of maolan karst funnel forest(茂兰喀斯特漏斗森林种子库研究)[J]. *J South-west Agric Univ*(西南农业大学学报), **21**(5):465—472
- Noyd RK, Pflieger FL, Norland MR. 1996. Field responses to added organic matter, arbuscular mycorrhizal fungi, and fertilizer in reclamation of taconite iron ore tailing[J]. *Plant & Soil*, **179**(1):89—97
- Pivato B, Mazurier S, Lemanceau P, *et al.* 2007. Medicago species affect the community composition of arbuscular mycorrhizal fungi associated with roots[J]. *New Phytol*, **176**(1):197—210
- Santos JC, Finlay RD, Tehler A. 2006. Molecular analysis of arbuscular mycorrhizal fungi colonising a semi-natural grassland along a fertilisation gradient[J]. *New Phytol*, **172**(1):159—168
- Scheublin TR, Logtestijn RSP, van der Heijden MGA. 2007. Presence and identity of arbuscular mycorrhizal fungi influence competitive interactions between plant species[J]. *J Ecol*, **95**(4):631—638
- Tanaka Y, Yano K. 2005. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied[J]. *Plant Cell & Environ*, **28**(10):1 247—1 254
- Van der Heijden MGA, Klironomos JN, Ursic M, *et al.* 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity[J]. *Nature*, **396**(5):69—72
- Wu QS, Xia RX, Zou YN. 2008. Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress[J]. *Eur J Soil Biol*, **44**(1):122—128
- Xu XQ(许秀强), Li M(李敏), Liu RJ(刘润进). 2009. A survey of arbuscular mycorrhizal fungal diversity in pesticide polluted soil(农药污染土壤中 AM 真菌多样性初步调查)[J]. *J Qingdao Agric Univ*(青岛农业大学报), **26**(1):1—3
- Yang HY(杨宏宇), Zhao LL(赵丽莉), He XL(贺学礼). 2005. Function of arbuscular mycorrhiza in the restoration and reconstruction of degraded ecosystems(丛枝菌根在退化生态系统恢复和重建中的作用)[J]. *Arid Land Geogr*(干旱区地理), **28**(6):836—842