

水分胁迫下 AM 真菌对柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 生长和抗旱性的影响

贺学礼*, 刘 媿, 安秀娟, 赵丽莉

(河北大学生命科学学院, 河北保定 071002)

摘要: 利用盆栽实验研究了水分胁迫条件下 AM 真菌对柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*) 生长和抗旱性的影响。在土壤相对含水量为 80%、60% 和 40% 条件下, 分别接种摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和柠条锦鸡儿根际土著菌, 结果表明, 水分胁迫对 AM 真菌的接种效果有显著影响。不同水分条件下, 接种 AM 真菌显著提高了宿主植物根系菌根侵染率。土壤相对含水量为 40% ~ 60% 时, 接种株的株高、茎粗、生物干重和叶片保水力明显高于不接种株; 接种 AM 真菌提高了植株对土壤有效 N 和有效 P 的利用率, 增加了植株全 P、叶片叶绿素和可溶性糖含量以及 SOD、POD、CAT 等保护酶活性。土壤相对含水量为 40% 时, 叶片 MDA 含量明显下降。水分胁迫条件下, 以接种柠条锦鸡儿根际土著菌的效果最佳。AM 真菌增强宿主植物的抗旱性可能源于促进宿主植物根系对土壤水分和矿质元素吸收的直接作用和改善植物体内生理代谢活动、提高保护酶活性的间接作用。

关键词: AM 真菌; 水分胁迫; 生长量; 抗旱性; 柠条锦鸡儿

文章编号: 1000-0933(2009)01-0047-06 中图分类号: Q142, Q948 文献标识码: A

Effects of AM fungi on the growth and drought resistance of *Caragana korshinskii* under water stress conditions

HE Xue-Li*, LIU Ti, AN Xiu-Juan, ZHAO Li-Li

College of Life Sciences, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 0047 ~ 0052.

Abstract: The effects of AM fungi on the growth and drought resistance of greenhouse grown *Caragana korshinskii* inoculated *Glomus mosseae* or native fungi in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* were studied at three water treatments levels of 80%、60% and 40% water added to the soil for the potted plant. The results showed that application amount of water significantly influenced the growth of host plants and inoculation effects of AM fungi. Mycorrhizal infection rate was promoted by inoculation AM fungi under different soil water contents. The height, stem thickness and total dry weight of plants were increased, the utilization of available N and P in soil, complete P content in host plant and water preservation in leaves were enhanced by inoculation AM fungi under applying 40% ~ 60% water content. The content of chlorophyll, soluble sugar and activity of protective enzymes, such as SOD, POD and CAT significantly increased. The content of MDA significantly decreased by inoculation AM fungi under applying 40% water content. The best inoculation effect was native fungi in the rhizosphere of *Caragana korshinskii* under soil water stress. It could be concluded that the mechanism of AM fungi strengthening the drought resistance of *Caragana korshinskii* may be the direct role of AM fungal hyphal contribution to soil water and minerals uptake in mycorrhizal plant, and the indirect role of AM fungi improved the water status and physiological metabolic activity and enhanced the activity of protective enzymes of mycorrhizal plant.

Key Words: water stress; AM fungi; growth amount; drought resistance; *Caragana korshinskii*

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670371, 40471637)

收稿日期: 2007-08-15; 修订日期: 2008-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlh3615@tom.com

干旱是一个世界性问题,在干旱、半干旱地区,由于水资源短缺,不仅严重危害到农业生产和生态环境,而且造成大面积土地荒漠化和沙漠化。通过生物途径使植物充分适应干旱环境,以提高植物在干旱环境中的成活率和生产力是近年来国内外研究的热点领域。丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza,简称AM)真菌能够与80%以上的植物建立共生关系,共生关系的建立可以提高植物的抗逆性,促进植物生长^[1~3]。尽管AM真菌与植物在干旱环境中的共生现象早已被发现,正常条件下AM真菌对植物的接种效应报道较多^[4~6],但有关AM真菌在干旱环境中与植物共生关系及其作用机理的研究较少。

柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)属于豆科锦鸡儿属(*Caragana* Fabr)植物。是黄土高原和西北荒漠地区主要旱生落叶灌木。多年造林实践证明,柠条锦鸡儿根系发达,具有广泛的适应性和很强的抗逆性,是营造水土保持林、防风固沙林、薪炭林和饲料林的优良树种之一,在西部地区植被建立和生态恢复方面发挥着重要作用[7]。

本实验以摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和柠条锦鸡儿根际土著菌作为接种剂,设置不同梯度水分处理,一方面探讨AM真菌与柠条锦鸡儿生长的关系及其作用机理;另一方面考察毛乌素沙地原位土著混合菌种的接种效应,以便为筛选优良抗旱菌种,促进荒漠植物生长和植被恢复提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试柠条锦鸡儿种子采自毛乌素沙地柠条锦鸡儿植株。供试菌种为摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和柠条锦鸡儿根际土著菌(是以缢球囊霉 *G. constrictum* 和摩西球囊霉 *G. mosseae* 为优势种的混合菌种),接种剂分别是经黑麦草扩大繁殖后获得含有孢子、菌丝和侵染根段的根际土。供试肥料为尿素(含N 34%),过磷酸钙(含 P_2O_5 13%)和硫酸钾(含 K_2O 46%)。供试土壤有效N 53.49 $\mu g/g$,有效P 7.98 $\mu g/g$,有效K 167.80 $\mu g/g$,有机质 13.74g/kg,pH 7.69,最大田间持水量 20%。

试验容器为23cm×22cm×22cm的塑料盆,每盆装土3.5kg,接种处理每盆层施菌剂20g,对照处理不加任何菌剂。2006年4月26日播种,30d后出苗,8片真叶后留下生相一致的壮苗,每盆2株。植株生长期间,各处理统一正常浇水量,温室常规管理,不定期灭蚜,松土。2006年9月6日开始不同水分梯度处理,每天用称重法保持土壤含水量恒定,10月31日收获。

1.2 方法

试验设3个土壤相对含水量:40%(重度胁迫)、60%(中度胁迫)和80%(正常供水),同一水分条件下设不接种(CK)、接种摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)(GM)和接种柠条锦鸡儿根际土著菌(GC)3个处理,重复4次。同时,每盆每公斤土加0.2gN、0.15g P_2O_5 和0.15g K_2O 。试验盆随机排列。

柠条锦鸡儿收获时菌根侵染率按Phillips和Hayman方法测定^[8]。植物组织全N用凯氏定氮法;组织全P用钒钼黄比色法;叶绿素含量用浸提法;可溶性糖用蒽酮法;脯氨酸用茚三酮比色法;SOD酶活性用NBT光化学还原法(以抑制NBT降解10%作为1个酶活单位);POD酶活性用愈创木酚法(以每分钟光密度值上升0.01的酶量作为1个酶活单位);CAT活性用紫外分光光度法(以每分钟内引起光密度值减少0.1的酶量单位为1个酶活单位);MDA含量用硫代巴比妥酸比色法;植株形态学指标用测量法;植株干重用称重法^[9]。土壤有机质用重铬酸钾硫酸外加热法,有效N用碱解扩散法,有效P用Olsen法,有效K用硝酸钠浸提-四苯硼钠比浊法^[10]。

试验数据用SPSS13.0统计软件One-Way ANOVA程序进行统计分析,平均值按Duncan新复极差分析进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 AM真菌和土壤含水量对植株生长量的影响

由表1可见,不同水分条件下,接种AM真菌显著提高了柠条锦鸡儿根系菌根真菌侵染率,而对植株叶面积和根长没有明显的正效应,对株高和茎粗的影响因菌种和土壤含水量不同而有差异。同一水分条件下,柠

条根际土著菌的接种效应优于摩西球囊霉的接种效应,只有在土壤相对含水量为 60% 和 40% 时,接种柠条根际土著菌植株的株高和茎粗显著高于不接种株。

表 1 水分胁迫下接种 AM 真菌对柠条锦鸡儿生长的影响
 Table 1 Effects of AM fungi on the growth of *Caragana Korshinskii* under water stress

土壤相对含水量 Soil water content (%)	接种 Inoculation	株高 Plant height (cm)	茎粗 Shoot thickness (mm)	叶面积 Leaf area (mm ²)	根长 Root length (cm)	地上部干重 DW of shoots (g/plant)	地下部干重 DW of roots (g/plant)	侵染率 Infection rate (%)
80	CK	43.13a	4.55a	24.73a	27.89a	7.75a	3.96a	19.17b
	GM	52.78a	4.86a	25.31a	30.09a	8.54a	4.02a	61.67a
	GC	51.50a	5.58a	27.12a	31.26a	8.34a	4.43a	70.00a
60	CK	39.05b	3.90b	24.29a	27.25a	5.78b	3.39b	26.67b
	GM	47.70ab	4.24ab	24.77a	29.56a	7.03a	3.48ab	67.50a
	GC	50.14a	5.21a	26.06a	30.26a	7.67a	4.33a	70.83a
40	CK	34.76b	3.68b	20.08a	26.13a	4.51b	2.39b	14.33b
	GM	42.84a	4.13ab	20.16a	26.96a	4.91ab	2.67ab	53.33a
	GC	43.95a	4.71a	22.60a	28.71a	5.10a	3.44a	64.17a

CK 不接种 Non-inoculation, GM 接种摩西球囊霉 Inoculation *Glomus mosseae*, GC 接种土著菌 Inoculation native fungi in the rhizosphere of *Caragana korshinskii*;同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著 Different letters in the same column means 5% significant differences;下同 the same below

随着水分胁迫程度提高,接种株和不接种株生物量随之降低。接种 AM 真菌对柠条锦鸡儿生物量的提高有一定促进作用,但促进效应因菌种和土壤含水量不同存在差异。土壤相对含水量为 40% 时,只有接种柠条根际土著菌的植株地上部和地下部干重显著大于不接种株;土壤相对含水量为 60% 时,接种两个菌种的植株地上部干重都显著大于不接种株,而只有接种柠条根际土著菌的植株地下部干重显著大于不接种株;土壤相对含水量为 80% 时,接种 AM 真菌对宿主植物生物量影响不大。

2.2 AM 真菌和土壤含水量对植株叶片保水力的影响

室内自然干燥条件下离体叶在不同时刻累计失水结果表明(表 2),接种处理在单位时间内累计失水量都低于不接种处理。同一水分条件下,接种柠条根际土著菌植株叶片的保水力最好,特别是在处理后期时间为 36h、48h 和 72h 时,在土壤相对含水量为 60% 和 40% 条件下,接种柠条根际土著菌植株的叶保水力显著优于接种摩西球囊霉和不接种处理;而接种摩西球囊霉和不接种处理之间无显著差异。

表 2 水分胁迫下接种 AM 真菌对植株叶片保水力的影响
 Table 2 Effects of AM fungi on water preservation in leaves under water stress

土壤相对含水量 Soil water content (%)	接种 Inoculation	叶保水力 Water preservation in leaves (%)									
		0h	2h	4h	6h	8h	12h	24h	36h	48h	72h
80	CK	0a	13.16a	36.18a	47.02a	62.57a	73.25a	85.56a	91.17a	93.74a	94.94a
	GM	0a	12.24a	31.80a	45.22a	60.18a	71.89a	79.41a	89.10a	90.10a	93.40a
	GC	0a	12.42a	26.67a	42.21a	53.82a	66.96a	74.03a	84.21a	86.40a	87.95a
60	CK	0a	18.36a	41.19a	52.52a	69.03a	77.41a	83.80a	93.80b	96.94b	98.21b
	GM	0a	17.18a	36.09a	49.41a	64.02a	73.23a	82.65a	92.06b	93.73b	96.86b
	GC	0a	14.78a	28.85a	45.20a	59.31a	71.77a	80.35a	85.18a	86.97a	88.82a
40	CK	0a	27.11a	46.26b	67.84a	78.10a	86.43a	89.70a	95.56b	96.88b	98.44b
	GM	0a	22.41a	39.77ab	54.46a	73.35a	81.83a	89.24a	92.52b	94.69b	96.69b
	GC	0a	20.87a	35.18a	49.25a	69.34a	80.96a	85.21a	85.80a	87.38a	88.94a

2.3 AM 真菌和土壤含水量对植株生理生化特性的影响

由表 3 可知,随着土壤含水量降低,除叶片脯氨酸和丙二醛含量略有增加外,接种株和不接种株其他生理生化指标均有所降低,但降低程度因菌种和土壤含水量不同而有差异。在土壤相对含水量为 60% 和 40% 时,

只有接种柠条根际土著菌的植株叶绿素含量显著高于不接种植株。土壤相对含水量为 40% 时,接种 AM 真菌植株叶片可溶性糖含量显著高于不接种株,而叶片 MDA 含量显著低于不接种株。不同水分条件下,接种 AM 真菌对叶片可溶性蛋白和脯氨酸含量影响不大。接种 AM 真菌对植株叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响因菌种和土壤相对含水量不同而异,如在 3 个土壤含水量时,接种柠条根际土著菌的植株叶片 SOD、POD 和 CAT 活性明显高于不接种株;而只有在土壤相对含水量为 60% 时,接种摩西球囊霉才对植株叶片 POD 和 CAT 活性有明显影响。

表 3 水分胁迫下接种 AM 真菌对植株生理学特性的影响

Table 3 Effects of AM fungi on the physiological indexes of *Caragana korshinskii* leaves under water stress

土壤相对含水量 Soil water content (%)	接种 Inoculation	叶绿素 Total chlorophyll (mg/gFW)	可溶性糖 Soluble sugar (mg/g DW)	可溶性蛋白 Soluble protein (mg/g FW)	脯氨酸 Proline (mg/g)	丙二醛 MDA (μ mol/gFW)	SOD (μ /gFW)	POD (μ /gFW)	CAT (μ /gFW)
80	CK	1.55a	15.87a	1.03a	0.14a	0.34a	244.14b	35.87b	116.50a
	GM	1.66a	17.77a	1.12a	0.11a	0.33a	304.18ab	55.47a	120.50a
	GC	2.05a	18.07a	1.18a	0.08a	0.31a	394.56a	57.16a	131.50a
60	CK	1.09b	12.21a	1.00a	0.15a	0.39a	214.44b	31.57b	100.00b
	GM	1.58ab	14.59a	1.04a	0.18a	0.34a	279.71b	45.84a	120.50a
	GC	1.88a	14.58a	1.13a	0.13a	0.32a	355.65a	49.65a	133.50a
40	CK	1.09b	8.32b	0.96a	0.16a	0.44b	207.53b	34.64b	99.50b
	GM	1.52ab	13.25a	0.97a	0.20a	0.35a	244.14ab	35.63b	103.00ab
	GC	1.87a	13.96a	1.04a	0.16a	0.33a	299.16a	47.56a	129.00a

2.4 AM 真菌和土壤含水量对土壤和植株 N、P 含量的影响

由表 4 可知,不同水分条件下,接种 AM 真菌对植株地上部和地下部全 N 含量影响不大;接种柠条根际土著菌的植株地上部全 P 含量在土壤相对含水量 60% 和 80% 时显著高于不接种株,在土壤相对含水量 60% 时高于接种摩西球囊霉的植株,而接种摩西球囊霉对地上部全 P 含量没有明显影响;接种柠条根际土著菌的植株在 3 个土壤含水量时地下部全 P 含量均显著高于不接种株,只有在土壤相对含水量 80% 时接种摩西球囊霉对地下部全 P 含量才有明显影响。除在土壤相对含水量为 60% 和 40% 时接种处理的土壤有效 P 和相对含水量为 40% 时接种处理的土壤有效 N 含量显著低于不接种处理外,其他各处理土壤有效 N 和有效 P 含量无明显变化。

表 4 水分胁迫下接种 AM 真菌对土壤和植株 N、P 含量的影响

Table 4 Effects of AM fungi on N and P content of plant and soil under water stress

土壤相对含水量 Soil water content (%)	接种 Inoculation	土壤 Soil		植株地上部 Upper plant		植株地下部 Roots	
		有效 N Available N	有效 P Available P	全 N Total N	全 P Total P	全 N Total N	全 P Total P
		(μ g/g)	(μ g/g)	(μ g/g)	(μ g/g)	(μ g/g)	(μ g/g)
80	CK	39.00a	3.906a	0.029a	0.031b	0.031a	0.036b
	GM	38.50a	3.343a	0.036a	0.042ab	0.032a	0.070a
	GC	36.75a	2.289a	0.041a	0.052a	0.034a	0.097a
60	CK	39.50a	4.498b	0.030a	0.031b	0.029a	0.029b
	GM	39.00a	3.435a	0.031a	0.035b	0.032a	0.061ab
	GC	38.75a	3.208a	0.034a	0.050a	0.033a	0.093a
40	CK	44.75b	4.915b	0.025a	0.031a	0.028a	0.022b
	GM	41.50ab	3.865a	0.028a	0.034a	0.031a	0.029ab
	GC	39.50a	3.800a	0.029a	0.043a	0.032a	0.033a

3 讨论

实验结果表明,接种 AM 真菌,特别是接种柠条根际土著菌促进了植株生长发育,加强了叶绿素的合成,

提高了光合效率,这与在其他植物上的接种效果一致^[5,11]。接种 AM 真菌使柠条锦鸡儿在受到干旱胁迫时能够通过增加对土壤 P 和 N 的吸收来促进根系生长,大量根外菌丝扩展了根系吸收面积,加强了对水分和矿质元素的吸收利用。同时根系表面形成的庞大菌丝网络系统有利于稳定土壤团聚体结构,从而在促进荒漠地区植物定植、控制水土流失和生态环境建设方面有重要作用^[12]。

Bethlenfalvay 等^[13,14]研究表明,接种菌根真菌能够明显改善宿主植物水分状况,提高水分利用效率,增强宿主植物的耐旱性。本实验结果表明,在室内自然干燥条件下,接种株的叶保水力好于不接种株,特别是在处理后期,在土壤相对含水量为 40% 和 60% 时,接种柠条根际土著菌植株的叶保水力显著优于不接种株。因此推测接种 AM 真菌有利于柠条锦鸡儿在强旱生环境中的生存和生长。

渗透调节是植物抗旱性的一种重要生理保护机制^[15],其机理分为两种:一种以脯氨酸及其他有机溶质为渗透调节物质,主要调节细胞质的渗透势,同时对酶、蛋白质和生物膜起保护作用;另一种是以 K^+ 和其它无机离子为渗透调节物质,主要调节液泡的渗透势,以维持膨压等生理过程。实验结果证明了第一种机理,即水分胁迫抑制了可溶性糖的合成,而接种 AM 真菌显著提高了可溶性糖含量。在水分胁迫条件下,无论接种还是不接种植株的脯氨酸含量都比正常水分处理(土壤相对含水量为 80%) 的植株高,但接种株的脯氨酸含量略低于不接种株。这可能是接种 AM 真菌后植株的可溶性糖合成增多,降低了细胞质的渗透势,从而提高了对干旱的耐受性,受干旱胁迫的影响较小,脯氨酸得以维持较低的浓度来保护酶的活性^[16]。

干旱条件下植物细胞由于代谢受阻而产生大量的活性氧、超氧自由基(1O_2 、 H_2O_2 、 $\cdot OH$ 、 O_2^- 等),这些活性氧、超氧自由基以其极强的氧化性对细胞膜脂进行过氧化,导致膜系统损伤和细胞器伤害。在此过程中植物将主动调动保护系统来调节细胞内活性氧的产生速率和 MDA 的形成,从而减轻细胞膜脂过氧化的伤害。保护系统分为酶促防御系统和非酶促防御系统^[15],酶促防御系统中的 SOD、POD 和 CAT 酶活性越高,消除氧自由基的能力越强,植物的抗旱能力越强^[17]。本实验结果表明,水分胁迫条件下,接种 AM 真菌主要通过提高 SOD、POD 和 CAT 酶活性进而清除因干旱胁迫导致的活性氧积累,从而减轻细胞膜脂过氧化的伤害,减少膜脂过氧化产物 MDA 的合成,最终提高植株的抗旱性^[18]。

AM 真菌对宿主植物生长发育和代谢活动的调节作用随着环境因子变化而不同,在不同条件下,AM 真菌可能对有些生长指标有正效应,而对其他生长指标没有作用或有负效应。如在土壤相对含水量为 80% 时,接种 AM 真菌显著提高了植株 SOD、POD 酶活和植株全 P 含量,而对其他生长指标没有明显影响;土壤相对含水量为 60% 时,接种柠条根际土著菌对叶片保水力的有益作用只发生在处理后期。闫明等人的实验结果也证实了这一点^[19,20]。

AM 真菌对植物生长和抗旱性的影响因宿主植物种类、AM 真菌菌种和环境因子而有明显差异^[21,22]。本实验中,以柠条根际土著菌的接种效果最为明显,这是由于柠条根际土著菌是多个菌种的混合物,它们共同作用的效果大于单一菌种;另外,柠条根际土著菌与柠条锦鸡儿形成了长期适应的共生关系,更有利于菌根有益效应的发挥。所以,针对不同植物和生长环境,筛选优良 AM 真菌菌种,对于高效菌剂的研制和菌根生物技术的应用至关重要。

4 结论

(1) 试验结果表明,AM 真菌能与柠条锦鸡儿根系形成良好的共生关系。AM 真菌可能通过促进宿主植物根系对土壤水分和矿质元素吸收的直接作用和改善植物体内生理代谢活动、提高保护酶活性的间接作用来增强植株的抗旱性,促进植株生长。

(2) 柠条根际土著菌接种效果优于摩西球囊霉,进一步说明 AM 真菌和宿主植物的共生关系存在一定的选择性和适应性。所以,筛选和培养优势菌种进行柠条锦鸡儿人工接种或菌根化育苗,是提高干旱条件下柠条锦鸡儿抗旱性和成活率的关键问题。

References:

- [1] Allen M F. Formation of vesicular mycorrhizae in *Atriplex gardneri* (Chenopodiaceae): Seasonal response in a cold desert. *Mycologia*, 1983, 75:

773—776.

- [2] Brundrett M C. Mycorrhizas in natural ecosystems. *Adv. Eco. Res.*, 1991, 21:171—313.
- [3] Dhillon S S, Zak J C. Microbial dynamics in arid ecosystem-desertification and the potential role of mycorrhizas. *Revista Chilena de Historia Natural*, 1993, 66: 253—270.
- [4] Levy Y, Krikun J. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhiza on *Citrus jambhiri* water relations. *New Phytologist*, 1980, 85:25—31.
- [5] Ruiz-Lozano J M, Azcon R. Hyphal contribution to water uptake in mycorrhizal plants as affected by the fungal species and water status. *Physiologia Plantarum*, 1995, 95:472—478.
- [6] He X L, Zhao L L, Yang H Y. Diversity and spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi of *Caragana korshinskii* in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11):3835—3840.
- [7] Yang W Z, Yu C Z. Management and Evaluation for the Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1992. 252—258.
- [8] Phillips J M & Hayman D S. 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: 158—161.
- [9] Gao J F. Experiment Technology of Plant Physiology. Xi'an: Corp of World Books Press, 2000.
- [10] Lu R K. Physical and Chemical Analysis of Soil. Beijing: Press of Sciences and Technology of China, 1998.
- [11] Johnson C R, Hummel R L. Influence of mycorrhizae and drought stress on growth of *Poncirus xcitrus* seedlings. *Hortscience*, 1985, 20(4):754—755.
- [12] Smith M R, Charvat I and Jacobson R L. Arbuscular mycorrhizae promote establishment of prairie species in a tallgrass prairie restoration. *Can J Bot*, 1998, 76:1947—1954.
- [13] Bethlenfalvay G J, Brown M S, Franson R L. Glycine-Glomus bradyrhizobium symbiosis IX. Relationships between leaf gas exchange and plant and soil water status in nodulated, mycorrhizal soybean under drought stress. *Plant Physiology*, 1990, 94:723—728.
- [14] Wright D P, Scholes D, Read D J. Effects of VA mycorrhizal colonization on photosynthesis and biomass production of *Trifolium repens* L. *Plant, Cell & Environment*, 1998, 21: 209—216.
- [15] Zhang J S. *Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [16] Subramanian K S, Charest C. Influence of arbuscular mycorrhizae on the metabolism of maize under drought stress. *Mycorrhiza*, 1995, 5:273—278.
- [17] He X L, Zhao L L, Li Y P. Effects of AM fungi on the growth and protective enzymes of cotton under NaCl stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1):188—193.
- [18] Wu Q S, Zou Y N, Xia R X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on reactive oxygen metabolism of *Citrus tangerine* leaves under water stress. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(4):825—830.
- [19] Yan M, Zhong Z C. Effects of aluminum stress on Growth of *Cinnamomum camphora* seedlings inoculated with AMF. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(4):59—65.
- [20] Tong R J, Yang X H, Li D Y. Effects of interspecies difference of arbuscular mycorrhizal fungi on *Citrus grandis* cv Changshou Shatian You seedlings vegetative growth and mineral contents. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1229—1233.
- [21] Ruiz-Lozano J M, Azcon R, Gomez M. Effects of arbuscular mycorrhizal *Glomus* species on drought tolerance: physiological and nutritional plant responses. *Appl Environ Microbiol*, 1995, 61(2): 456—460.
- [22] Kaya C, Higgs D, Kimak H, et al. Mycorrhizal colonization improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb.) grown under well-watered and water — stressed conditions. *Plant and Soil*, 2003, 253: 287—292.

参考文献:

- [6] 贺学礼, 赵丽莉, 杨宏宇. 黄土高原柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性及空间分布. *生态学报*, 2006, 26(11):3835~3840.
- [7] 杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价. 北京: 科学出版社, 1992. 252~258.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验技术. 西安: 世界图书出版公司, 2000.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国科学技术出版社, 1998.
- [15] 张继澍. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [17] 贺学礼, 赵丽莉, 李英鹏. NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响. *生态学报*, 2005, 25(1):188~193.
- [18] 吴强盛, 邹英宁, 夏仁学. 水分胁迫下丛枝菌根真菌对红橘叶片活性氧代谢的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(4):825~830.
- [19] 闫明, 钟章成. 铝胁迫对感染丛枝菌根真菌的樟树幼苗生长的影响. *林业科学*, 2007, 43(4):59~65.
- [20] 仝瑞建, 杨晓红, 李东彦. 丛枝菌根真菌种间差异对柚苗营养生长及矿质含量的影响. *应用生态学报*, 2006, 17(7):1229~1233.