

AM 真菌对濒危物种四合木及近缘种霸王抗旱性的影响

王同智^{1,2},包玉英¹

(1. 内蒙古大学 生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古煤炭建设生态环境研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要:为探求四合木保护的菌根学途径,利用盆栽试验研究了干旱胁迫条件下丛枝菌根真菌(AMF 或 AM 真菌)对四合木和霸王生长及抗旱性的影响。结果表明:AMF 显著提高了四合木幼苗成活率,所有处理中,干旱胁迫且接种 AMF 处理的四合木、霸王与正常水分且不接种 AMF 处理相比较,株高、鲜质量相当,说明接种 AM 真菌有显著的促生作用。不同接种菌剂处理对四合木叶片数量无显著性影响,但不同接种剂对霸王叶片数量存在极显著性影响;接种 AMF 提高了四合木的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)的活性,降低了过氧化物酶(POD)的活性,但霸王的 SOD、CAT 和 POD 均升高。研究表明,四合木借助提高抗氧化酶活性来适应干旱胁迫,而霸王通过减少叶片的数量,以降低蒸腾作用,提高抗氧化酶活性共同适应水分的胁迫。利用 AMF 菌种对濒危物种四合木保护具有重要生态学意义。

关键词:AMF; 干旱胁迫; 四合木; 霸王

中图分类号:Q945 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2014)03-0170-06

Effects of AM Fungi on the Growth and Drought Resistance of Endangered Shrub *Tetraena mongolica* Maxim. and *Zygophyllumx anthoxylum* Maxim.

WANG Tong-zhi^{1,2}, BAO Yu-ying¹

(1. College of Life Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China;

2. Research Institute of Ecology Environment of Inner Mongolia Coal Mine, Huhhot 010020, China)

Abstract: With pot experiment in a greenhouse, the paper studied the effects of *Arbuscular mycorrhizal* Fungi on growth and drought tolerance of *Tetraena Mongolica* Maxim. and *Zygophyllumx anthoxylum* Maxim. under drought stress. The results showed that: AMF significantly increased survival rate of *Tetraena mongolica* Maxim. Under different AMF treatments, *Tetraena mongolica* had no significant effect on root fresh weight and leaf number, while *Zygophyllumx anthoxylum* had significant effect on leaf number. AMF improved growth of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllumx anthoxylum*, plant height and fresh weight of *Tetraena mongolica* and *Zygophyllumx anthoxylum* was no significant difference between drought stress, colonization and well water, no-colonization. Under AM fungal colonization, the activity of SOD and CAT in *Tetraena mongolica* was improved, while the activity of POD was decreased. But the activity of SOD, POD and CAT in *Zygophyllumx anthoxylum* was improved. The results indicated that *Tetraena mongolica* adapted to drought stress by increasing the AMF infection rate and coordinating antioxidant enzyme system, while *Zygophyllumx anthoxylum* adapted to drought stress by reducing the number of leaves and increasing the activity of antioxidant enzyme system. Therefore, by separating and screening AMF, using AMF resources to protect endangered *Tetraena mongolica* is of great significance.

Key words: AMF; Drought stress; *Tetraena mongolica*; *Zygophyllumx anthoxylum*

丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhizae* Fungi, AMF 或 AM 真菌)是能与 80% 高等植物共生,并且形成菌根共生体^[1]。二者协同进化过程中,AMF 可

以影响宿主植物对土壤养分的吸收和转运,从而影响植物群落结构、影响群落生物多样性以及植物群落的生产力^[2-3]。在许多干旱和半干旱地区,干旱

收稿日期:2013-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(30460033;30960309);国家基础科学人才培养基金项目(J0730648);内蒙古自然科学基金项目(200508020513)

作者简介:王同智(1976-),男,内蒙古牙克石人,在读博士,主要从事菌根生物学及土地复垦研究。

通讯作者:包玉英(1963-),女,内蒙古科尔沁人,教授,博士,主要从事菌根生物学及土地复垦研究。

胁迫限制了植物的生长^[4],孙吉庆等^[5]报道,AMF 可以提高植物的抗旱性和水分利用率。

四合木 (*Tetraena mongolica* Maxim.) 和霸王 (*Zygophyllum anthoxylum* Maxim.) 同为蒺藜科 (*Zygophyllaceae*) 超旱生灌木。其中四合木为四合木属 (*Tetraena* Maxim.) 单种属植物,西鄂尔多斯特有分布种,为第三纪古地中海孑遗植物,属国家二级保护植物,分布范围极其狭小^[6],对阿拉善荒漠地区植物物种起源、生物多样性、古植物区系、生物进化及环境演变研究具有指示作用^[7]。霸王是中亚地区的特有植物属^[8],是与四合木亲缘关系最近的物种,相对四合木生态幅较宽。二者在数亿年的进化过程中,成功适应了干旱、高温、风沙等恶劣气候,成为该地区的优势物种。目前有关 AM 真菌对四合木抗旱性的研究已有一些报道^[7],但 AM 真菌对四合木及其近缘种霸王抗旱性影响的研究还尚未见报道。本研究在室内以四合木、霸王幼苗为材料,通过控制水分和接种 AM 真菌双因素处理,研究 AM 真菌对四合木和霸王抗旱特性的影响,探索 AM 真菌与寄主植物协同适应西鄂尔多斯干旱环境的生理机理,为四合木保护探索可能的菌根生物学途径。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试幼苗:植物种子采自内蒙古乌海骆驼山,种子用蒸馏水浸泡 10 min,0.3% 高锰酸钾消毒 10 min,用蒸馏水反复冲洗数次,剥果皮的四合木种子^[9]和霸王种子播种于盛有已灭菌的混合基质(河沙:蛭石=1:1)种植袋内,30℃、7% 水分培养箱内生长 90 d,形成实生苗后,选择个体大小一致的幼苗备用。

供试 AMF 菌剂:菌剂为含有孢子、菌丝和侵染根段的根际土。菌种 1,记作 +A1,20 mL 体积菌剂含摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 孢子 1 472 个,用量为每盆 20 mL;菌种 2,记作 +A2,20 mL 体积菌剂含地表球囊霉 (*Glomus versiforme*) 孢子 7 814 个,用量为每盆 4 mL;菌种 3,记作 +A3,20 mL 体积菌剂含缩球囊霉 (*Glomus constrictum*) 孢子 653 个,每盆接种量 40 mL。以上 3 种 AM 真菌由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供;菌种 4,记作 +A4,前 3 种菌剂各取 1/3 混合;菌种 5,记作 +A5,土著真菌,来源于四合木种群根际土,经高粱诱集培养后获得含有孢子、菌丝和侵染根段的根际土,优势菌种为透光球囊 (*G. diaphanum*) 和缩球囊霉,总孢子数

量每 20 mL 菌剂 1 300 个孢子,接种用量 20 mL/盆。

供试容器:15.0 cm × 10.0 cm × 13.0 cm 的塑料花盆,用前在 KMnO₄ 溶液中浸泡 1 h,晾干备用。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 采用随机区组排列的双因素 8 水平设计,因素一为接种 AMF,分为 CK, +A1, +A2, +A3, +A4 和 +A5 共 6 个水平;因素二为水分处理,正常水分 (Well water, WW) 和干旱胁迫 (Drought stress, DS),正常水分控制在基质最大持水量的 75% ~ 80%,干旱胁迫控制在基质最大持水量的 35% ~ 45%^[10],每处理 8 个重复,共 96 盆,每盆 4 株宿主植物。

1.2.2 试验处理 种植袋内幼苗根部接种上述剂量的菌种,置于装有 2 kg 基质花盆内培养,对照盆加等量灭菌菌剂。自然光照,平均室温 23℃,灭菌 Hoagland 营养液浇灌,生长 90 d 后,开始干旱胁迫处理,每日称量法控制水分,干旱胁迫处理 90 d 后对相关指标进行测定。

1.2.3 测定方法 对植物叶片数量、根系鲜质量,总鲜质量、茎粗、株高进行测定。氮蓝四唑 (Nitro Blue Tetrazolium chloride, NBT) 比色法测定超氧化物歧化酶 (SOD)^[11-12];愈创木酚法测定过氧化物酶 (POD)^[13];Rao 等和阮海华等^[14-15]的方法测定过氧化氢酶 (CAT)。

1.3 数据统计

数据进行正态分布和方差齐性检验,若不符合,反对数转换。使用 SPSS 15 软件的双因素有重复方差分析确定差异性及交互作用,Duncan 新复极差分析进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 AMF 对四合木和霸王幼苗成活率的影响

干旱胁迫下,接种 AMF 的四合木幼苗的成活率显著提高,而对霸王幼苗无显著性影响。干旱胁迫下接种 +A5 处理的四合木成活率显著高于其他处理,较其他处理平均成活率提高 11% (图 1)。

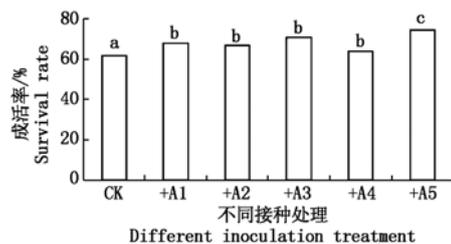


图 1 干旱胁迫下 AMF 对四合木幼苗成活率的影响

Fig. 1 Effects of *Tetraena mongolica* seedling survival rate in different AMF

2.2 不同处理对四合木和霸王幼苗生长的影响

不同处理对四合木根系鲜质量、叶片数的影响不显著($P > 0.05$, 表1)。正常水分和干旱胁迫下, 接种 AMF 的四合木的株高、总鲜质量均显著增高($P < 0.01$), 且接种 + A5 高于其他处理, 正常水分

下株高较 CK 增高了 4.3 cm, 鲜质量较 CK 增加了 0.8 g; 干旱胁迫下, 株高较 CK 提高了 3.4 cm, 鲜质量较 CK 增加了 0.5 g, 说明接种 AMF 促进了四合木的生长, 且两因素存在交互作用($P < 0.05$)。

表1 不同水分和 AMF 接种对四合木生长效应的影响

Tab.1 The effects of AMF and drought stress on the growth of *Tetraena mongolica*

不同处理		株高/cm	总鲜质量/g	根鲜质量/g	叶片数/片
Different treatment		Plant height	Total fresh mass	Root fresh mass	Leaves number
正常水分 WW	+ A1	10.3 ± 2.1a	1.2 ± 0.13a	0.13 ± 0.01	88
	+ A2	9.3 ± 2.3a	1.4 ± 0.30a	0.15 ± 0.03	92
	+ A3	10.3 ± 3.2a	1.3 ± 0.12a	0.14 ± 0.04	80
	+ A4	9.2 ± 3.1a	1.5 ± 0.13a	0.17 ± 0.02	84
	+ A5	11.7 ± 4.1a	1.6 ± 0.13a	0.18 ± 0.01	80
	CK	7.4 ± 1.3b	0.8 ± 0.12b	0.09 ± 0.10	84
干旱胁迫 DS	+ A1	8.5 ± 3.6b	0.7 ± 0.04b	0.08 ± 0.03	88
	+ A2	7.3 ± 3.4b	0.8 ± 0.05b	0.09 ± 0.02	84
	+ A3	8.5 ± 4.1b	0.6 ± 0.30b	0.07 ± 0.01	88
	+ A4	8.5 ± 5.3b	0.8 ± 0.10b	0.09 ± 0.04	84
	+ A5	9.5 ± 2.4b	0.9 ± 0.10b	0.10 ± 0.02	84
	CK	6.1 ± 5.1c	0.4 ± 0.20c	0.04 ± 0.01	80
显著性 Significance	DS	**	**	N	N
	AMF	*	*	N	N
	DS × AMF	*	*	N	N

注: ** . 极显著性差异; * . 显著差异; N. 无差异, 不同字母表示组内差异性。表2同。

Note: ** . Denote extremely significant difference; * . Denote significant difference; N. Denote no difference. The same as Tab. 2.

不同处理对霸王根鲜质量无显著性影响($P > 0.05$, 表2), 不同处理对霸王株高、总鲜质量的影响趋势与四合木类似。但对霸王叶片数影响存在极显著差异($P < 0.01$), 对叶片数结果进行 Duncan 多重比较, 霸王叶片数差异的处理分组排序: 正常水分接

种、不接种 AM 真菌处理组 > 干旱胁迫且接种 AM 真菌霸王组 > 干旱胁迫且不接种 AM 真菌霸王组, 说明霸王通过减少叶片的数量降低蒸腾作用而适应干旱胁迫的环境。

表2 不同 AM 真菌接种及水分对霸王生长效应的影响

Tab.2 Effects of different AMF and water content on the growth of *Sarcozygiumx anthoxylon*

不同处理		株高/cm	总鲜质量/g	根鲜质量/g	叶片数/片
Different treatment		Plant height	Total fresh mass	Root fresh mass	Leaves number
正常水分 WW	+ A1	50.1 ± 2.1a	17.1 ± 1.1a	2.1 ± 0.4	100a
	+ A2	44.1 ± 3.1a	16.4 ± 2.2a	1.6 ± 0.3	96a
	+ A3	51.1 ± 4.1a	15.8 ± 1.3a	1.4 ± 0.2	104a
	+ A4	45.4 ± 3.1a	18.4 ± 3.1a	2.2 ± 0.4	100a
	+ A5	43.5 ± 3.2a	17.2 ± 2.4a	1.8 ± 0.5	104a
	CK	33.3 ± 3.5b	10.7 ± 1.7b	1.3 ± 0.4	104a
干旱胁迫 DS	+ A1	38.5 ± 3.2b	9.8 ± 3.2b	1.2 ± 0.2	72b
	+ A2	37.4 ± 4.3b	11.6 ± 3.5b	1.4 ± 0.1	76b
	+ A3	36.5 ± 4.6b	12.6 ± 4.1b	1.2 ± 0.3	80b
	+ A4	38.3 ± 3.1b	9.76 ± 4.1b	1.1 ± 0.4	84b
	+ A5	39.1 ± 3.9b	10.6 ± 2.1b	1.4 ± 0.1	80b
	CK	28.4 ± 2.5c	7.6 ± 2.1c	1.9 ± 0.2	64c
显著性 Significance	DS	**	**	N	**
	AMF	*	*	N	*
	DS × AMF	*	*	N	N

综合表 1、表 2 数据可知,干旱胁迫、接种 AMF 处理(DS × +A)的四合木和霸王与正常水分、不接种 AMF(WW × CK)的处理相比较,其株高、鲜质量相当,由于 AM 真菌的作用,干旱胁迫没有影响二者的生物量。

2.3 AMF 对四合木和霸王 SOD 活性的影响

正常水分下,接种 AMF 处理显著提高了四合木、霸王 SOD 活性($P < 0.05$,图 2),其中接种 +A4 处理对四合木、霸王 SOD 活性影响最大,与 CK 比较;四合木 SOD 活性增加 707 U/mg,霸王增加了 700 U/mg。

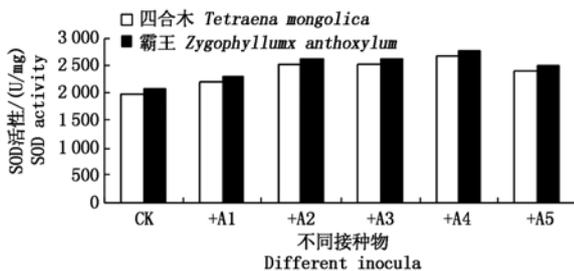


图 2 正常水分下四合木、霸王的 SOD 活性对不同接种 AM 真菌处理的响应

Fig. 2 SOD of *Tetraena mongolica*, *Sarcozygiumx anthoxylon* to feedback with different AMF treatment under well water

干旱胁迫条件下,接种 AMF 处理对四合木、霸王 SOD 活性也有显著提高(图 3),其中接种 +A5 真菌处理对四合木、霸王 SOD 活性影响最大,较 CK 处理,四合木 SOD 活性增加了 819 U/mg,霸王 SOD 活性增加了 798 U/mg。

两种植物 SOD 活性相比较,接种、非接种的四合木的 SOD 活性均低于霸王。说明霸王在接种 AM 真菌后,应对干旱胁迫的调节能力要强于四合木。

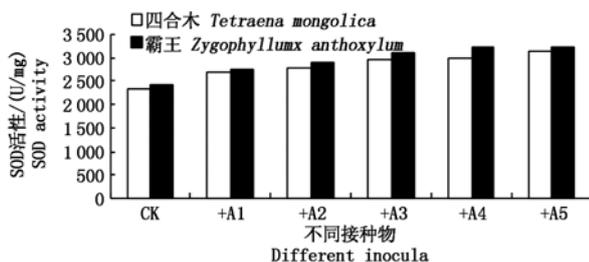


图 3 干旱胁迫条件下四合木、霸王的 SOD 活性对不同处理的响应

Fig. 3 SOD of *Tetraena mongolica*, *Sarcozygiumx anthoxylon* to feedback with different AMF treatment under drought stress

2.4 AM 真菌对四合木和霸王 POD 活性的影响

正常水分条件下,接种 AMF 的四合木 POD 活性显著降低,而霸王 POD 活性显著增强($P < 0.05$, $P = 0.03$,图 4)。

干旱胁迫条件下,接种 AMF 处理显著降低了四合木的 POD 活性,而霸王 POD 活性显著增加(图 5),其中接种 +A5 真菌霸王 POD 活性影响最大,与

CK 相比,霸王 POD 活性提高了 70 U/mg。

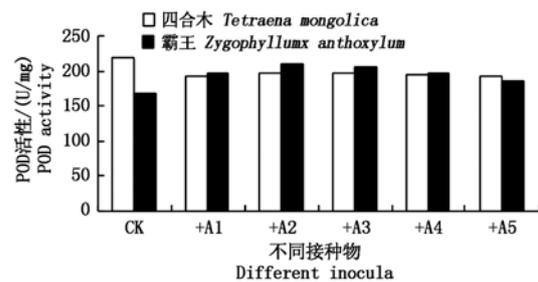


图 4 正常水分下 AMF 接种处理四合木、霸王 POD 活性的比较

Fig. 4 Compare of AM fungal inoculation on the activities of POD of *Tetraena mongolica* and *Sarcozygiumx anthoxylon* under well water

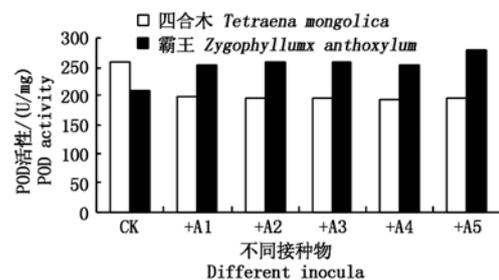


图 5 干旱胁迫条件下 AMF 接种处理四合木、霸王 POD 活性的比较

Fig. 5 Compare of AM fungal inoculation on the activities of POD of *Tetraena mongolica* and *Sarcozygiumx anthoxylon* under drought stress

2.5 AMF 对四合木和霸王 CAT 活性的影响

正常水分条件下,接种 AMF 处理四合木、霸王 CAT 活性显著增强($P < 0.05$,图 6),其中接种 +A3 真菌对四合木、霸王的 CAT 活性影响最大,分别提高了 15,12 U/mg。

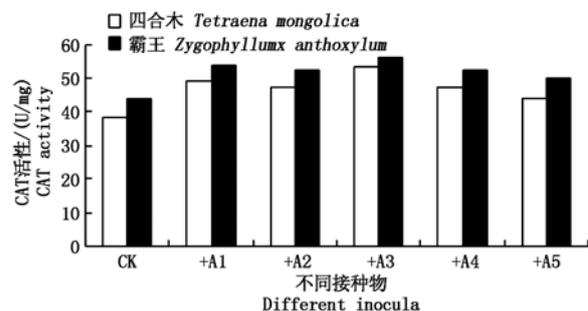


图 6 正常水分下接种 AMF 处理四合木、霸王 CAT 活性的比较

Fig. 6 Compare of AM fungal inoculation on the activities of CAT of *Tetraena mongolica* and *Sarcozygiumx anthoxylon* under well water

干旱胁迫条件下,接种 AMF 的四合木、霸王 CAT 活性显著增强($P < 0.05$,图 7),接种 +A5 的四合木、霸王 CAT 活性影响最大,分别提高了 18,19 U/mg。

由以上试验结果可知,正常水分条件下,接种不

同的 AMF 其抗氧化酶活性表现不同,而干旱胁迫条件下,接种 +A5 真菌其宿主植物抗氧化酶表现出较强的活性,说明菌剂 +A5 提高四合木、霸王抗旱性有较好的效果。

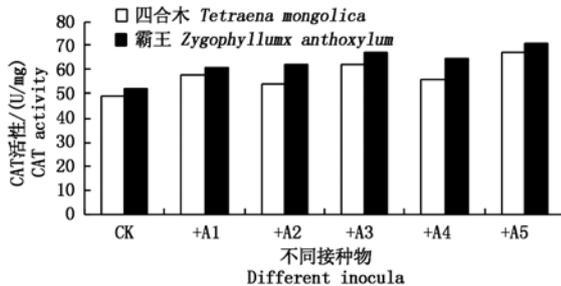


图7 干旱胁迫条件下接种 AMF 处理四合木、霸王 CAT 活性的比较

Fig. 7 Compare of AM fungal inoculation on the activities of CAT of *Tetraena mongolica* and *Sarcosygium anthoxylum* under drought stress

3 讨论

3.1 AMF 对四合木幼苗成活率的影响

四合木幼苗对环境条件变化的耐受能力较弱,当年出现的幼苗,第2年会不明原因消失,自然种群幼苗很难发现^[16],而接种 AMF 显著地提高四合木幼苗成活率。国内学者对 AMF 提高杜鹃幼苗^[17]、樱桃幼苗^[18]成活率的研究,也得到了相同结果。不同之处在于四合木为濒危物种,杜鹃、樱桃均为经济作物,AMF 提高四合木幼苗成活率对解决自然种群中幼苗缺乏及种群外扩有重要生态学意义。分析 AMF 提高四合木幼苗成活率的可能原因是四合木种子无胚乳、子叶小,储备的营养物少,四合木生存自然环境极其干旱^[19],AMF 可扩大幼苗根系吸收面积,提高幼苗素质^[20],增强根系活力,使得幼苗在干旱胁迫下能够迅速从土壤中吸取营养物质,缓解了种子营养物储备少的先天缺陷,从而使四合木实生苗数量增加。

3.2 AMF 对四合木生物量及抗氧化酶的影响

干旱胁迫下,接种 AM 真菌四合木、霸王的生物量(株高、鲜质量)没有显著降低,AM 真菌对四合木和霸王均有促生作用,这与近几年许多学者对 AM 真菌提高旱生植物沙打旺^[21],油蒿^[22]抗旱性的研究结果一致。大部分研究结果认为,AM 真菌通过提高与植物的共生,扩大根系吸收面积,从而促进植物生长^[22]。

四合木与霸王自然生境干旱,本研究结果表明,接种 AMF 提高了四合木的 SOD、CAT 的活性,降低了 POD 的活性,但霸王的 SOD、CAT 和 POD 均升

高。说明四合木借助提高抗氧化酶活性^[23-24]来适应水分的胁迫,POD 降低可能作为一种胁迫信号而激活其他抗氧化保护机制^[25]。霸王则通过减少叶片的数量,提高抗氧化酶活性两条渠道适应水分胁迫,这也正解释了霸王生态适应性较四合木强、分布广的原因。四合木、霸王接种 AM 真菌后,生理生态指标表现不同,说明不同植物对干旱逆境的应激方式不同^[24],AMF 对宿主植物生长、抗旱性的影响因宿主植物种类、AMF 菌种而呈现差异^[26]

从 AM 真菌提高植物抗旱性的分子机制^[27]分析,接种 AM 真菌极有可能诱导了四合木某些新的逆境基因表达,从而促发了抗氧化酶系统发挥作用,提高四合木抗旱性。这将是四合木与 AM 真菌深入研究的内容之一。

参考文献:

- [1] Gadkar V, David-Schwartz R, Kunik T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal colonization. Factors involved in host recognition [J]. *Plant Physiol*, 2001, 127(4): 1493 - 1499.
- [2] Govindarajulu M, Pfeffer P E, Jin H, et al. Nitrogen transfer in the Arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. *Nature*, 2005, 435(743): 819 - 823.
- [3] Ehrenfeld J G, Ravit B, Elgersma K. Feedback in the plant-soil system [J]. *Annual Review of Environmental Resource*, 2005, 30: 75 - 115.
- [4] Maggio A, Reddy M P, Joly R J. Leaf gas exchange and solute accumulation in the halophyte *Salvadora persica* grown at moderate salinity [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, 44(1): 31 - 38.
- [5] 孙吉庆,刘润进,李敏. 丛枝菌根真菌提高植物抗逆性的效应及其机制研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2012, 48(9): 845 - 852.
- [6] 中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 687 - 688.
- [7] 周红兵,王迎春,石松利,等. 四合木和霸王幼苗抗氧化系统对干旱胁迫的响应差异 [J]. *西北植物学报*, 2011, 31(6): 1188 - 1194.
- [8] 赵一之,朱宗元. 亚洲中部荒漠区的植物特有属 [J]. *云南植物研究*, 2003, 25(2): 113 - 121, 122.
- [9] 王同智,南丁,包玉英,等. 果皮水浸出液、盐分对四合木种子萌发的影响 [J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(1): 69 - 73.
- [10] 贺学礼,张焕仕,赵丽莉. 不同土壤中水分胁迫和 AM 真菌对油蒿抗旱性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 994 - 1001.
- [11] 李合生. 现代植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

- [12] Dhindsa R S, Matowe W. Drought tolerance in two mosses: correlated with enzymatic defense against lipid peroxidation [J]. *J Exp Bot*, 1981, 32: 79 – 88.
- [13] 刘祖棋, 张石城. 植物逆境生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 370 – 372.
- [14] Rao M V, Paliyath G, Ormrod DP, *et al.* Influence of salicylic acid on H_2O_2 production, oxidative stress, and H_2O_2 -metabolizing enzymes [J]. *Plant Physiol*, 1997, 115: 137 – 149.
- [15] 阮海华, 沈文飏, 叶茂炳, 等. 一氧化氮对盐胁迫下小麦叶片氧化损伤的保护效应 [J]. *科学通报*, 2001, 46 (23): 1993 – 1997.
- [16] 杨 持, 张颖娟. 四合木水浸出液对几种植物种子萌发及幼苗存活的影响 [J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1998, 29(1): 128 – 132.
- [17] 欧 静, 刘仁阳, 陈 训, 等. 菌根真菌对桃叶杜鹃种子萌发及幼苗移植的影响 [J]. *南方农业学报*, 2013, 44(2): 293 – 298.
- [18] 闫昭如, 张忠兰, 薛元霞, 等. 菌根真菌对樱桃幼苗生长发育的影响 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40 (15): 47 – 49, 81.
- [19] 杨 持, 王迎春, 张云飞, 等. 四合木保护生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 2 – 180.
- [20] 王倡宪, 李晓林, 宋福强, 等. 丛枝菌根真菌对不同番茄品种幼苗素质的影响 [J]. *华北农学报*, 2010, 25 (Z2): 149 – 153.
- [21] 郭辉娟, 贺学礼. 水分胁迫下 AM 真菌对沙打旺生长和抗旱性的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (21): 5933 – 5940.
- [22] 赵金莉, 贺学礼. AM 真菌对油蒿生长和抗旱性的影响 [J]. *华北农学报*, 2007, 22 (5): 184 – 188.
- [23] García A, Mar M D, Ballester C, *et al.* Effect of arbuscular mycorrhizae and induced drought stress on antioxidant enzyme and nitrate reductase activities in *Juniperus oxycedrus* L. grown in a composted sewage sludge-amended semi-arid soil [J]. *Plant and Soil*, 2006, 279 (1 – 2): 209 – 218.
- [24] 龚吉蕊, 赵爱芬, 张立新, 等. 干旱胁迫下几种荒漠植物抗氧化能力的比较研究 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1570 – 1577.
- [25] Christine H, Foyer, Barry Halliwell. The presence of glutathione and glutathione reductase in chloroplasts: A proposed role in ascorbic acid metabolism [J]. *Planta*, 1976, 133: 21 – 25.
- [26] Davies Jr F T, Olalde-Portugal V, Aguilera-Gomez L, *et al.* Alleviation of drought stress of Chile ancho pepper (*Capsicum annuum* L. cv. San Luis) with arbuscular mycorrhiza indigenous to Mexico [J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 92(3/4): 347 – 359.
- [27] 李 涛, 杜 娟, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展 [J]. *生态学报*, 2012, 32 (22): 7169 – 7176.