

盐胁迫下接种 AM 真菌对牡丹幼苗抗氧化酶活性的影响

郭绍霞, 陈丹明, 刘润进*

(青岛农业大学菌根生物技术研究所, 山东青岛 266109)

摘要: 将牡丹 (*Paeonia suffruticosa*) 幼苗接种丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizas, AM) 真菌摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和地表球囊霉 (*G. versiforme*) 后, 在 4 个不同盐水处理 (质量百分比 0、8%、16% 和 24%) 下, 研究 AM 真菌对牡丹抗氧化酶活性的影响。研究表明, 8% 盐水处理, 牡丹幼苗菌根依赖性最高, 且接种 *G. mosseae* 的处理显著高于接种 *G. versiforme* 的处理, 分别为 172% 和 150%; 该胁迫 30 d 时, 接种 *G. mosseae* 和 *G. versiforme* 植株干质量分别为 0.51 和 0.45 g, 叶片相对含水量分别为 80.5% 和 78.5%, 叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性分别为 4.72 和 4.46 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$, 过氧化物酶 (POD) 活性分别为 60.3 和 57.4 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 过氧化氢酶 (CAT) 活性分别为 51.3 和 47.2 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 均显著高于对照。16% 和 24% 盐水处理下的表现与此相似。随盐胁迫时间的延长, SOD 和 CAT 活性呈先升高后降低趋势, POD 活性呈持续上升趋势。AM 真菌通过增强牡丹幼苗抗氧化酶活性, 提高其耐盐性, 以 *G. mosseae* 接种效果较好。

关键词: 牡丹; 菌根真菌; 摩西球囊霉; 地表球囊霉; 抗氧化酶; 耐盐性

中图分类号: S 685.11, Q 945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2010) 11-1796-07

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Antioxidant Enzyme Activity in Peony Seedlings under Salt Stress

GUO Shao-xia, CHEN Dan-ming, and LIU Run-jin*

(Institute of Mycorrhizal Biotechnology, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: The effects of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on antioxidant enzyme activity in peony (*Paeonia suffruticosa*) seedlings inoculated with *Glomus mosseae* or *G. versiforme*, and grown under the condition of four levels of artificial seawater (0, 8%, 16% and 24%) were studied. The experimental results showed that mycorrhizal dependence (MD) of peony seedlings in treatment with 8% salt was the highest, and MD of peony seedlings inoculated with *G. mosseae* was 172% significantly higher than that with *G. versiforme* (150%). Thirty days after salt stress with 8% salt concentration, the dry weight, leaf relative water content, leaf superoxide dismutase activity, peroxidase activity, peroxidase activity, catalase activity of peony seedlings inoculated with *G. mosseae* and *G. versiforme* were 0.51 g and 0.45 g, 80.5% and 78.5%, 4.72 and 4.46 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$, 60.3 and 57.4 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, 51.3 and 47.2 $\text{U} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively, and

收稿日期: 2010-07-06; **修回日期:** 2010-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30871737, 40171049); 青岛市自然科学基金项目 (08-1-3-20-jch); 作物生物学国家重点实验室开放课题 (2008KF09)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: liurj@qau.edu.cn)

significantly higher than control. The similar trends were given under 16% and 24% salt concentration. As time prolonged under salt stress condition, SOD and CAT activities increased first but decreased afterwards, while POD activities showed an increasing trend. AM fungi could increase activities of the antioxidant enzyme system. Thus, the salt tolerance of mycorrhizal seedlings was enhanced. *Glomus mosseae* was the superior.

Key words: *Paeonia suffruticosa*; arbuscular mycorrhizal fungi; *Glomus mosseae*; *G. versiforme*; antioxidant enzyme; salt tolerance

丛枝菌根 (arbuscular mycorrhizas, AM) 真菌适应性强, 分布广泛, 不仅大量分布于农田和森林土壤, 还广泛存在于多种逆境环境中, 如海滩、沙漠、盐碱滩和盐碱地以及重金属污染土壤等 (王发园 等, 2003)。业已证实, 接种 AM 真菌能提高大豆 SOD、POD 和 APOX 活性 (Ghorbanli et al., 2004) 和草莓叶片 SOD、POD、CAT 酶活性 (杨瑞红 等, 2009)。Alguacil 等 (2003) 观察到接种 AM 真菌后油橄榄 (*Olea europaea*) 和 *Retama sphaerocarpa* SOD、POD 和 APOX 活性提高, 但不影响 CAT 活性。接种 AM 真菌提高了番茄 SOD、POD 和 APX 活性, CAT 活性瞬间被诱导后又与对照物无差异 (He et al., 2007)。接种菌根真菌摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 还能显著提高 NaCl 处理下盐生植物碱蓬叶片 SOD 和 CAT 活性, 降低 MDA 含量 (Li et al., 2008)。表明 AM 真菌能影响植物抗氧化酶活性, 降低盐胁迫伤害 (Alguacil et al., 2003; Harisnaut et al., 2003; He et al., 2007)。

牡丹 (*Paeonia suffruticosa* Andr.) 主栽园区土壤中 AM 真菌资源十分丰富, 自然侵染率较高 (郭绍霞 等, 2007), AM 真菌能促进牡丹生长 (陈丹明 等, 2010), 这就为探索和评价 AM 真菌提高牡丹耐盐能力的途径和方法提供了条件。作者在上述工作的基础上, 继续探索接种 AM 真菌对盐胁迫下牡丹幼苗生长和抗氧化酶活性的影响, 为 AM 真菌在牡丹抗盐方面的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2009 年在青岛农业大学实验园进行。供试丛枝菌根 (AM) 真菌菌种为摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和地表球囊霉 (*G. versiforme*), 用保存在三叶草上的孢子、菌根根段和菌丝作为接种物, 由青岛农业大学菌根生物技术研究所提供。供试材料为取自菏泽牡丹园牡丹 (*Paeonia suffruticosa*) ‘凤丹’ 的种子。

珍珠岩和草炭土按 1:3 比例过筛灭菌 (121 °C, 2 h) 后作为播种基质备用, 该基质 pH 6.54, 电导率 700 $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 有机质含量 31.2 %, 速效磷 23.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮 243.10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 160.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 基质含盐量 0.03%。

盐处理液采用人工配制的以盐碱地为系统的人工海水 (pH 7.8) (Epstein, 1972)。原液 (盐水 100%) 配方为: 410.52 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl, 9.93 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl, 10.23 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2 , 53.58 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MgCl_2 , 28.25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2SO_4 , 2.34 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 , 0.83 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaBr, 0.07 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ SrCl_2 和 0.44 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ H_3BO_3 。通过稀释得到 0、8%、16% 和 24% 盐水处理液。

1.2 接种处理

将 ‘凤丹’ 种子表面消毒, 沙藏层积和低温处理后, 于 2009 年 3 月上旬选取根长整齐一致的种子播种于营养钵 (16 cm \times 13 cm) 中。种子在播种时分别将约 5 000 接种势单位 (刘润进和陈应龙,

2007) 的 *G. mosseae* 和 *G. versiforme* 的接种物施于根系周围, 对照则加等量灭菌接种物和接种物滤液。每个处理 800 株苗, 随机排列, 重复 3 次。

1.3 盐胁迫处理

将培养 60 d 的生长良好的幼苗进行盐胁迫处理。设 0、8%、16%、24% 等 4 个盐水处理液, 3 次重复。盐胁迫前控水数天, 以利于盐水在干燥培养土中迅速扩散。为避免盐冲击效应, 盐水浓度按每天质量百分比 8% 的浓度递增, 直至预定浓度。然后每周定时、定量按预定盐浓度(混有 Hoagland 营养液成分)浇灌 1 次, 至约 2/3 的溶液流出, 以便将以前积余盐分冲洗掉, 以保持基质盐浓度恒定, 同时营养液成分保证植株生长所需养分。

1.4 测定指标与方法

盐胁迫 30 d 后, 分别将植株从钵中取出, 漂洗干净, 测量地上干质量和地下干质量。

盐胁迫前和胁迫后 30 d 依据刘润进和陈应龙(2007)描述的方法测定菌根侵染率及菌根依赖性。

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

菌根依赖性(%) = $\text{接种植物的干质量} / \text{对照植物的干质量} \times 100$ 。

盐胁迫后的 0、10、20 和 30 d 时称重法测定叶片相对含水量; 氧化硝基四氮唑蓝测定牡丹叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性; 高锰酸钾法测定过氧化氢酶(CAT)活性; 愈创木酚氧化法测定过氧化物酶(POD)活性(李合生, 2000)。

2 结果与分析

2.1 盐水胁迫下牡丹菌根侵染率和菌根依赖性

盐胁迫显著影响牡丹菌根侵染率。随着盐浓度增加, 菌根侵染率显著降低。盐胁迫前, 接种 *G. mosseae* 的侵染率显著高于 *G. versiforme*; 胁迫 30 d 后, 接种 *G. mosseae* 与接种 *G. versiforme* 的侵染率无差异。盐胁迫后, 牡丹地上部和地下部干物重皆有所下降, 但接种 AM 真菌处理的下降幅度小于未接种对照。8% 盐水胁迫下牡丹对 *G. mosseae* 的菌根依赖性最大; 24% 盐水胁迫下牡丹对 *G. versiforme* 的菌根依赖性最小(表 1)。

表 1 AM 真菌对盐水胁迫下牡丹菌根侵染率和菌根依赖性的影响
Table 1 Effects of AM fungi on mycorrhizal colonization and mycorrhizal dependence of *Paeonia suffruticosa* under salt stress

人工海水/% Artificial seawater	菌根真菌 AM fungi	菌根侵染率 /% Mycorrhizal colonization		干物质量 /g Dry weight		菌根依赖性 /% Mycorrhizal dependence
		0 d	30 d	地上部 Shoot	地下部 Root	
0	对照 Control	-	-	0.17 ef	0.42 e	-
	<i>G. versiforme</i>	43.6 b	50.3 a	0.28 b	0.62 b	152 bc
	<i>G. mosseae</i>	48.3 a	52.2 a	0.32 a	0.68 a	169 ab
8	对照 Control	-	-	0.15 gh	0.31 f	-
	<i>G. versiforme</i>	43.6 b	37.7 b	0.24 c	0.45 d	150 cd
	<i>G. mosseae</i>	48.3 a	40.2 b	0.28 b	0.51 c	172 a
16	对照 Control	-	-	0.11 i	0.24 h	-
	<i>G. versiforme</i>	43.6 b	26.6 c	0.18 e	0.29 g	134 de
	<i>G. mosseae</i>	48.3 a	29.3 c	0.22 d	0.32 f	154 bc
24	对照 Control	-	-	0.09 i	0.16 j	-
	<i>G. versiforme</i>	43.6 b	19.3 d	0.14 h	0.18 i	130 e
	<i>G. mosseae</i>	48.3 a	20.1 d	0.16 fg	0.25 h	152 bc

注: 同列不同字母标记的数值在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Note: The different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level in the same row.

2.2 AM 真菌对盐水胁迫下牡丹叶片相对含水量的影响

盐胁迫下，接种 AM 真菌的牡丹植株叶片相对含水量显著高于对照。随盐水浓度的增加和盐胁迫时间延长，不同盐水浓度胁迫下叶片相对含水量均有下降，但接种 AM 真菌处理始终显著高于对照，接种 *G. mosseae* 处理相对含水量高于接种 *G. versiforme* 处理。在 8% 盐水浓度下，接种 *G. mosseae* 处理的叶片显著高于接种 *G. versiforme* 处理。16% 和 24% 盐水胁迫 30 d 时，接种 *G. mosseae*、*G. versiforme* 处理分别比对照高 4.0%、4.6% 和 9.3%、6.5%，差异显著（表 2）。

胁迫 30 d 时，不同处理的生长状况表现不同。8% 盐水胁迫下，接种植株与对照均生长良好，无黄化叶片和失水萎蔫现象。16% 盐水胁迫下，对照生长较好，叶片出现轻微黄化，并有失水萎蔫现象；接种植株叶片偶有黄化，接种 *G. versiforme* 处理的植株叶片有失水萎蔫现象，而接种 *G. mosseae* 处理无此现象。24% 盐水胁迫下，对照植株叶片黄化，失水萎蔫；接种植株叶片轻微黄化和轻微失水萎蔫，接种 *G. mosseae* 处理的植株生长状况优于接种 *G. versiforme* 处理。表明接种 AM 真菌可以缓解牡丹叶片的失水速度，改善植株的水分状况。

表 2 AM 真菌对盐水胁迫下牡丹叶片相对含水量的影响
Table 2 Effects of AM fungi on dehydration and leaf relative water content of *Paeonia suffruticosa* under salt stress

人工海水/% Artificial seawater	菌根真菌 AM fungi	叶片相对含水量/% Leaf relative water content			
		0 d	10 d	20 d	30 d
0	对照 Control	87.1b	86.3 b	86.3 bc	87.7 b
	<i>G. versiforme</i>	88.5 a	88.6 a	87.8 ab	89.2 b
	<i>G. mosseae</i>	88.9 a	88.7 a	89.1 a	90.9 a
8	对照 Control	87.1 b	83.8 c	79.0 d	76.6 e
	<i>G. versiforme</i>	88.5 a	85.4 b	83.9 c	78.5 d
	<i>G. mosseae</i>	88.9 a	87.9 a	87.5 ab	80.5 c
16	对照 Control	87.1 b	80.1 e	72.2 g	65.8 g
	<i>G. versiforme</i>	88.5 a	82.0 d	74.7 f	68.4 f
	<i>G. mosseae</i>	88.9 a	84.8 c	76.8 e	68.8 f
24	对照 Control	87.1 b	79.0 f	66.5 i	57.2 i
	<i>G. versiforme</i>	88.5 a	81.2 d	69.9 h	61.9 h
	<i>G. mosseae</i>	88.9 a	83.0 cd	73.0 g	62.5 h

注：同列不同字母标记的数值在 $P < 0.05$ 水平差异显著。
Note: The different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level in the same row.

2.3 AM 真菌对盐水胁迫下牡丹抗氧化酶活性的影响

接种 AM 真菌后牡丹叶片 SOD 活性显著提高。随盐水胁迫时间延长，至 20 d 时达最大值，之后呈现下降趋势。同一盐水浓度处理下，接种 AM 真菌的牡丹叶片 SOD 活性在整个盐水胁迫时期均显著高于对照（表 3）。24% 盐水胁迫 30 d 时，接种 *G. mosseae*、*G. versiforme* 和对照的 SOD 活性分别比胁迫前增加了 73.5%、71.3% 和 68.6%，接种 AM 真菌的牡丹叶片 SOD 活性的提高幅度大于对照。接种 *G. mosseae* 处理的 SOD 活性显著高于 *G. versiforme* 处理。

接种 AM 真菌后牡丹叶片 POD 活性显著提高。24% 盐水胁迫 30 d 时，接种 *G. mosseae* 的 POD 活性比接种 *G. versiforme* 和对照分别高 6.4% 和 12.8%。24% 盐水胁迫 30 d 后，接种 *G. mosseae*、*G. versiforme* 和对照的 POD 活性分别比胁迫前增加了 182.1%、161.9% 和 158.0%（表 3）。说明盐水胁迫条件下，接种 AM 真菌能更有效的牡丹提高体内 POD 活性。

接种 AM 真菌对盐水胁迫前牡丹叶片 CAT 活性的影响不显著；盐水胁迫下，随盐浓度的增加和时间的延长，接种 AM 真菌提高了牡丹叶片 CAT 活性，盐水胁迫至 20 d 时达最大值，之后呈现下降趋势（表 3）。

表 3 AM 真菌对盐胁迫下牡丹叶片 SOD, POD 和 CAT 的影响
Table 3 Effects of AM fungi on SOD, POD and CAT activity in leaves of *Paeonia suffruticosa* under salt stress

人工海水/% Artificial seawater	菌根真菌 AM fungi	SOD 活性/ (U · g ⁻¹) SOD activity				POD 活性/ (U · min ⁻¹ · g ⁻¹) POD activity				CAT/ (U · min ⁻¹ · g ⁻¹) CAT activity			
		0 d	10 d	20 d	30 d	0 d	10 d	20 d	30 d	0 d	10 d	20 d	30 d
0	对照	3.29 c	3.56 h	3.60 j	3.74 j	25.0 c	24.2 h	24.6 j	25.8 j	26.4 a	29.4 e	24.5 e	25.8 f
	<i>G. versiforme</i>	3.43 b	3.74 g	3.74 i	3.97 i	28.7 b	27.6 g	27.2 i	28.4 i	26.8 a	30.2 e	24.4 e	27.9 f
	<i>G. mosseae</i>	3.59 a	3.91 f	4.32 h	4.32 gh	30.9 a	29.2 g	29.1 h	30.7 i	26.3 a	28.7 e	26.1 e	26.9 f
8	对照	3.29 c	3.74 g	4.58 g	4.17 h	25.0 c	32.1 f	41.1 g	52.1 h	26.4 a	31.2 e	53.1 d	42.4 e
	<i>G. versiforme</i>	3.43 b	4.09 f	4.87 f	4.46 g	28.7 b	35.2 e	43.6 f	57.4 g	26.8 a	39.1 d	59.7 c	47.2 d
	<i>G. mosseae</i>	3.59 a	4.25 ef	5.34 e	4.72 f	30.9 a	37.7 d	46.8 e	60.3 f	26.3 a	43.0 c	60.3 c	51.3 c
16	对照	3.29 c	4.34 e	5.63 e	4.84 f	25.0 c	38.9 d	48.7 d	58.4 g	26.4 a	46.4 c	61.7 c	47.4 d
	<i>G. versiforme</i>	3.43 b	4.74 d	6.15 d	5.16 e	28.7 b	42.7 c	53.0 c	63.4 e	26.8 a	48.4 c	65.4 b	52.7 c
	<i>G. mosseae</i>	3.59 a	4.92 d	6.43 c	5.42 d	30.9 a	46.0 b	56.5 b	67.6 d	26.3 a	53.7 b	70.3 a	57.8 b
24	对照	3.29 c	5.13 c	6.42 c	5.54 c	25.0 c	43.6 c	53.4 c	70.6 c	26.4 a	61.7 a	69.4 a	55.2 c
	<i>G. versiforme</i>	3.43 b	5.42 b	6.93 b	5.88 b	28.7 b	45.8 b	57.1 b	75.1 b	26.8 a	64.1 a	71.1 a	60.3 b
	<i>G. mosseae</i>	3.59 a	5.76 a	7.36 a	6.23 a	30.9 a	48.7 a	60.8 a	79.6 a	26.3 a	65.3 a	72.2 a	64.0 a

注: 同列不同字母标记的数值在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: The different letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level in the same row.

2.4 各单项指标之间相关性分析

对 6 个指标进行相关性分析得到相关系数矩阵 (表 4)。盐胁迫后, 牡丹菌根侵染率与叶片相对含水量和植株总干样质量呈极显著正相关, 与 SOD、POD、CAT 活性呈极显著负相关。植株总干样质量与其他各指标之间呈显著或极显著相关。

表 4 各单项指标的相关系数矩阵
Table 4 Correlation Matrix of every single index

项目 Item	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization	总干样质量 Dry weight	相对含水量 Relative water	SOD	POD
总干样质量 Dry weight	0.89**				
相对含水量 Relative water content	0.92**	0.87**			
SOD	- 0.80**	0.97**	- 0.91**		
POD	- 0.86**	1.00**	- 0.94**	0.96**	
CAT	- 0.88**	0.47*	- 0.94**	0.96**	0.99**

注: *代表 0.05 显著水平, **代表 0.01 显著水平。

Note: * correlation is significant at the 0.05 level, ** correlation is significant at the 0.01 level .

3 讨论

AM 真菌侵染植物根系后, 产生大量根外菌丝, 能促进植物体对水分和矿质元素的吸收, 缓解温度、水分和盐等胁迫对植物的伤害 (Sylvia & Williams, 1992)。盐胁迫下菌根真菌与植物共生关系的建立, 受盐渍土壤种类及盐渍程度的影响。侵染率是鉴定菌根形成的直观指标 (冯固 等, 2000)。本研究表明, 随盐浓度增加, AM 真菌对牡丹根系的侵染率表现出降低的趋势, 说明盐胁迫抑制菌根形成。这支持了在番茄和黑莓幼苗上得出的结论 (贺忠群 等, 2007a, 2007b; 王明元 等, 2008)。但也有研究表明侵染率在一定范围内随着盐浓度增加而递增 (Yano-Melo et al., 2003)。这可能是寄主植物和 AM 真菌不同, 两者之间相互选择性以及形成菌根的能力受盐胁迫的程度也不同。

AM 真菌通过根外菌丝扩大根系吸收表面积能改善寄主植物水分状况。本研究发现, 无盐胁迫

时接种 AM 真菌的牡丹幼苗叶片相对含水量与对照差异不显著, 随着盐浓度及盐胁迫时间的增加, 接种 AM 真菌的叶片相对含水量显著高于对照。表明接种 AM 真菌能显著改善盐胁迫下牡丹叶片的水分状况, 提高其耐盐性。

逆境胁迫下, SOD、POD 和 CAT 在氧自由基清除系统中具有重要作用。研究表明, AM 真菌提高了盐胁迫下牡丹 SOD、POD 和 CAT 活性。在持续盐胁迫下, AM 真菌对 SOD 活性的影响受到抑制, 虽然如此, 与对照相比接种 AM 真菌的植株仍有较高的 SOD 活性。Ghorbanli 等 (2004) 研究了接种 *Glomus etunicatum* 对 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下大豆根部和地上部抗氧化酶活性的影响, 发现增加了大豆根部 SOD 活性, 但对 CAT 没有影响。而本试验结果表明, 无盐胁迫时, AM 真菌对牡丹叶片 CAT 活性的影响不显著; 盐胁迫下, 接种 AM 真菌处理的 CAT 活性显著高于胁迫前和未接种对照。

本试验结果表明, AM 真菌能提高牡丹抗氧化酶的活性, 这对于提高牡丹的耐盐性具有十分重要的意义。植物抗氧化酶的活性可能受多种因素调控。例如, SOD 和 CAT 的变化可能还与微量元素的利用有关 (Alguacil et al., 2003), Fe 可提高皱叶烟草 (*Nicotiana plumbaginifolia*) CAT 活性 (Kamfenkel et al., 1995)。Evelin 等 (2009) 认为 AM 真菌促进植物对 Fe、Cu、Zn 和 Mn 的吸收, 从而提高 SOD 的活性。另外, AM 真菌提高植物抗氧化酶的活性可能与促进植物的生长和对 P、N 的吸收有关 (Alguacil et al., 2003)。可见, AM 真菌提高牡丹抗氧化酶的活性作用机制还有待深入研究。

通过各指标相关分析表明, 试验中测定的牡丹幼苗的 5 个指标都与菌根侵染率存在极显著相关。随盐浓度的增加, AM 真菌侵染率降低, SOD、POD 和 CAT 活性呈增加趋势, 菌根侵染率和三者活性显著负相关。表明 AM 真菌能增加牡丹植株氧自由基清除系统的活性, 促进盐胁迫下牡丹生长, 提高牡丹的耐盐性。

本试验结果表明, 接种 *G. mosseae* 处理在提高牡丹耐盐性方面具有潜在应用价值。我国有 0.2 亿多公顷的盐碱地, 约占全国可耕地面积的 25%, 涉及到 23 个省、市、自治区 (刘润进 等, 1999)。随着我国人口的剧增及工业的高速发展, 可耕地面积急剧下降, 而不合理灌溉又造成了大量良田次生盐渍化。因此, 利用 AM 真菌与植物共生关系来增加植物在盐渍土壤中的适应能力, 对于扩大牡丹种植面积, 提高其在盐碱地的观赏价值, 具有重要现实意义。

References

- Alguacil M M, Hernandez J A, Caravaca F, Portillo B, Roldan A. 2003. Antioxidant enzyme activities in shoots from three mycorrhizal shrub species afforested in a degraded semi-arid soil. *Physiologia Plantarum*, 118: 562 - 570.
- Chen Dan-ming, Guo Na, Guo Shao-xia. 2010. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and some physiological indices of *Paeonia suffruticosa*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 30 (1): 131 - 135. (in Chinese)
- 陈丹明, 郭娜, 郭绍霞. 2010. 丛枝菌根真菌对牡丹生长及相关生理指标的影响. *西北植物学报*, 30 (1): 131 - 135.
- Epstein E. 1972. Mineral nutrition of plants: Principles and perspectives. New York: Sunderland Mass Sinauer Associates Publishers.
- Evelin H, Kapoor R, Giri B. 2009. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: A review *Annals of Botany*, 104: 1263 - 1280.
- Feng Gu, Bai Deng-sha, Yang Mao-qiu, Li Xiao-lin, Zhang Fu-suo, Li Sheng-xiu. 2000. Influence of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on growth and salinity tolerance parameters of maize plants. *Acta Agronomica Sinica*, 26 (6): 743 - 750. (in Chinese)
- 冯固, 白灯莎, 杨茂秋, 李晓林, 张福锁, 李生秀. 2000. 盐胁迫下 AM 真菌对玉米生长及耐盐生理指标的影响. *作物学报*, 26 (6): 743 - 750.
- Ghorbanli M, Ebrahimzadeh H, Sharifi M. 2004. Effects of NaCl and mycorrhizal fungi on antioxidative enzymes in soybean. *Biologia Plantarum*, 48 (4): 575 - 581.
- Guo Shao-xia, Zhang Yu-gang, Li Min, Liu Run-jin. 2007. AM fungi diversity in the main tree-peony cultivation areas in China. *Biodiversity*

- Science, 15 (4): 425 - 431. (in Chinese)
- 郭绍霞, 张玉刚, 李 敏, 刘润进. 2007. 我国洛阳与菏泽牡丹主栽园区 AM 真菌多样性研究. 生物多样性, 15 (4): 425 - 431.
- Harisnaut P, Poonsopa D, Roengmongkol K, Charoensataporn R. 2003. Salinity effects on antioxidant enzymes in mulberry cultivar. Science Asia, 29: 109 - 113.
- He Z Q, He C X, Zhang Z B, Zou Z R, Wang H S. 2007. Changes in antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by arbuscular mycorrhizae under NaCl stress. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 59: 128 - 133.
- He Zhong-qun, He Chao-xing, Zhang Zhi-bin, Zou Zhi-rong. 2007a. Mechanism of plant salt tolerance enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 27 (2): 414 - 420. (in Chinese)
- 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 邹志荣. 2007a. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐性的作用机制. 西北植物学报, 27 (2): 414 - 420.
- He Zhong-qun, He Chao-xing, Zhang Zhi-bin, Zou Zhi-rong, Wang Huai-song, Tunde Takacs. 2007b. Study on osmotic adjustment mechanism of tomato salt tolerance enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi. Acta Horticulturae Sinica, 34 (1): 147 - 152. (in Chinese)
- 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 邹志荣, 王怀松, Tunde Takacs. 2007b. 丛枝菌根真菌对番茄渗透调节物质含量的影响. 园艺学报, 34 (1): 147 - 152.
- Kamfenkel K, van Montagu M, Inze D. 1995. Effects of iron on *Nicotiana plumbaginifolia* plants: Implication to oxidative stress. Plant Physiology, 107: 725 - 737.
- Li He-sheng. 2000. Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Li T, Duan D, Yang Q, Wang B S. 2008. Effects of inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi *Glomus mosseae* on SOD and CAT activity in *Suaeda salsa* seedlings under salt stress. Agricultural Science & Technology, 9 (5): 31 - 33, 87.
- Liu Run-jin, Chen Ying-long. 2007. Mycorrhizology. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 刘润进, 陈应龙. 2007. 菌根学. 北京: 科学出版社.
- Liu Run-jin, Liu Peng-qi, Xu Kun, Lü Zhi-fan. 1999. Ecological distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in saline alkaline soils of China. Chinese Journal of Applied Ecology, 10 (6): 721 - 724. (in Chinese)
- 刘润进, 刘鹏起, 徐 坤, 吕志范. 1999. 中国盐碱土壤中 AM 菌的生态分布. 应用生态学报, 10 (6): 721 - 724.
- Sylvia D M, Williams S E. 1992. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and environmental stress. ASA Special Publication, 54: 101 - 124.
- Wang Fa-yuan, Liu Run-jin, Lin Xian-gui, Zhou Jian-min. 2003. Comparison of diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in different ecological environments. Acta Ecologica Sinica, 23 (12): 2666 - 2671. (in Chinese)
- 王发园, 刘润进, 林先贵, 周健民. 2003. 几种生态环境中 AM 真菌多样性比较研究. 生态学报, 23 (12): 2666 - 2671.
- Wang Ming-yuan, Xia Ren-xue, Wang You-shan, Zhou Kai-bing, Wang Peng, Ni Hai-zhi. 2008. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth of *Poncirus trifoliata* seedlings under iron deficiency and heavy bicarbonate stresses. Acta Horticulturae Sinica, 35 (4): 469 - 474. (in Chinese)
- 王明元, 夏仁学, 王幼珊, 周开兵, 王 鹏, 倪海枝. 2008. 缺铁和过量重碳酸盐胁迫下丛枝菌根真菌对枳生长的影响. 园艺学报, 35 (4): 469 - 474.
- Yang Rui-hong, Liu Run-jin, Liu Cheng-lian, Wang Yong-zhang, Li Pei-huan, Yuan Yong-bing. 2009. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and salicylic acid on salt tolerance of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) plants. Scientia Agricultura Sinica, 42 (5): 1590 - 1594. (in Chinese)
- 杨瑞红, 刘润进, 刘成连, 王永章, 李培环, 原永兵. 2009. AM 真菌和水杨酸对草莓耐盐性的影响. 中国农业科学, 42 (5): 1590 - 1594.
- Yano-Melo A M, Saggin O J, Maia L C. 2003. Tolerance of mycorrhized banana (*Musa* sp. cv. Pacovan) plantlets to saline stress. Agriculture, Ecosystems and Environment, 95 (1): 343 - 348.