

NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响

贺学礼^{1,2}, 赵丽莉¹, 李英鹏²

(1. 河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; 2. 西北农林科技大学生命科学学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:利用盆栽实验研究了 NaCl 胁迫条件下 AM 真菌对棉花生长和叶片保护酶系统的影响。结果表明:在土壤中加入 0、0.1%、0.2%、0.3% 浓度 NaCl 条件下, NaCl 胁迫对 AM 真菌的接种效果有显著影响。接种 AM 真菌提高了棉花根系菌根侵染率, 增加了棉株的生物产量, 以 0~0.2% NaCl 浓度时 AM 真菌接种效果最好。AM 真菌对棉株生理参数和保护酶活性的影响因生育期和 NaCl 浓度不同而异, 现蕾期和低盐浓度(0~0.1%)下叶片叶绿素含量明显增加; 中高盐水平(0.2%~0.3%)和生育后期叶片可溶性蛋白质含量和 SOD、POD、CAT 等保护酶活性显著提高, MDA 含量明显降低; 棉株 K、Ca、Mg 含量因植株部位和盐浓度不同而变化。AM 真菌增强宿主植物的耐盐性可能源于促进宿主根系对土壤矿质元素吸收的直接作用和改善植物体内离子平衡和生理代谢活动、提高保护酶活性的间接作用。

关键词: NaCl 胁迫; AM 真菌; 生物量; 保护酶系统; 棉花

Effects of AM fungi on the growth and protective enzymes of cotton under NaCl stress

HE Xue-Li^{1,2}, ZHAO Li-Li¹, LI Ying-Peng² (1. Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China; 2. Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 188~193.

Abstract: The effects of AM fungi on the growth and protective enzymes in cotton plants inoculated *Glomus mosseae* and *Glomus caledonium* under salt-caused stress conditions was studied at the levels of 0, 0.1%, 0.2%, 0.3% NaCl added to the soil for the potted plant. The results showed that application amount of NaCl significantly influenced the growth of cotton plants and inoculation effect of AM fungi. After inoculation mycorrhizal infection rate was promoted, and total dry weights and output of cotton were increased, which was the best under applying 0~0.2% NaCl density. Leaf syn-pigment significantly increased in the period of showing buds and 0~0.1% NaCl density. The content of soluble protein and activity of protective enzyme, such as SOD, POD and CAT increased in the pregnant later period and 0.2%~0.3% NaCl density. The content of K, Ca and Mg varied with the position of plant and NaCl density. It could be concluded that the mechanism of AM fungi strengthening the salt tolerance of cotton plants may be the direct role of AM fungal hyphal contribution to soil minerals uptake in mycorrhizal plant, and the indirect role of AM fungi improved mycorrhizal plant interior ionic balance and the physiological metabolic activity and enhanced the activity of protective enzymes.

Key words: NaCl stress; AM fungi; growth amount; protective enzyme system; cotton

文章编号: 1000-0933(2005)01-0188-06 中图分类号: Q142, Q948.12, S562 文献标识码: A

土壤盐渍化是影响农业生产与生态环境的主要因素之一。通过生物途径使植物充分适应盐渍环境, 以提高植物在盐渍土壤上的生产力是近年来国内外盐渍土改良的新方向。丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, 简称 AM 真菌)能够与 80% 以

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(141101); 西北农林科技大学科学基金资助项目(0808); 河北大学生物工程重点学科资助项目

收稿日期: 2003-10-09; **修订日期:** 2004-05-25

作者简介:贺学礼(1963~), 男, 陕西蒲城人, 博士, 教授, 主要从事生物多样性及土壤生态学研究。E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

Foundation item: the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry (No. 141101); The Scientific Research Foundation of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (No. 0808); The key Discipline of Bio-Engineering of Hebei University

Received date: 2003-10-09; **Accepted date:** 2004-05-25

Biography: HE Xue-Li, Ph. D., Professor, mainly engaged in biodiversity and soil ecology.

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^[1,2]。尽管 AM 真菌与植物在盐渍土环境中的共生现象早已被发现^[3,4],正常条件下 AM 真菌对植物的接种效应报道较多^[5~7],但有关 AM 真菌在盐渍环境中与植物共生关系及其作用机理的研究较少。本试验设置不同浓度的 NaCl 处理,以期探讨 AM 真菌与棉花生长的关系及其作用机理,为生物改良盐碱地及菌根化农业生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自西北农林科技大学农作站耕作层(0~20cm),装盆前过筛混匀。土壤有机质 11.5g/kg、碱解氮 47.8 mg/kg、速效磷 8.1mg/kg、速效钾 172mg/kg、pH(H₂O)7.83、CaCO₃58.4g/kg。供试植物为陆地红心棉花。供试 AM 真菌为 *Glomus mosseae*(由中国农科院土壤肥料研究所提供)和 *Glomus caledonium*(由中国科学院南京土壤研究所提供)。接种剂是两种 AM 真菌分别经黑麦草扩大繁殖后获得含有孢子、菌丝和侵染根段根际土的等量混合物。

试验容器为 24cm×30cm×30cm 的塑料桶,每桶装土 10kg。接种处理每桶穴施菌剂 100g,对照处理每桶加等量灭菌菌剂。2002 年 4 月 27 日进行播种,5 月 5 日出苗,5 月 25 日定下生相一致两片真叶的棉苗 2 株,成活后留苗 1 株。生长期间,温室常规管理,不定期防虫,松土,7 月 15 日打顶。在打顶前测定常规生长量指标,并在现蕾期(7 月 1 日)、盛蕾期(7 月 15 日)、花期(8 月 13 日)和铃期(9 月 1 日)分别测定棉株的生理生化指标,10 月 12 日收获,测定生物产量,各指标均重复 6 次。

1.2 试验方法

试验设 4 个盐水平(0、0.1%、0.2%、0.3%NaCl),同一盐水平设接种(+M)与不接种(-M)2 个处理,重复 6 次。同时,每盆每 kg 土加 0.25gN,0.20gP₂O₅,0.25gK₂O。试验盆随机排列。

棉花收获时菌根侵染率按 Phillips 和 Hayman 方法测定^[8]。在棉花蕾期(主枝倒 4 位叶)、花期(倒 2 位叶)和铃期(倒 1 位叶)进行叶样采集。叶绿素含量用丙酮酸提取法;可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝(G-250)测定;超氧化物歧化酶活性(SOD)采用 NBT 光化学还原法测定(以抑制 NBT 降解 10%作为 1 个酶活单位);过氧化氢酶活性(CAT)用紫外吸收法测定(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);过氧化物酶活性(POD)用愈创木酚法测定(以每分钟光密度值上升 0.01 的酶量作为 1 个酶活单位);MDA 含量用巴比妥酸法测定;棉花生物产量用称重法^[9]。测定植株体内 Na、K、Ca、Mg 含量用原子吸收法^[10]。土壤有机质用重铬酸 K 容量法外加热法测定,碱解扩散法测定碱解 N 含量,NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定速效 P 含量,土壤速效 K 用 1mol/L NH₄OAc 溶液浸提后,用原子吸收分光光度计测定,CaCO₃ 用气量法,pH 用 1:1 水浸,酸度计法。

试验数据用 SAS6.10 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉花形态学指标的影响

由表 1 可见,接种 AM 真菌能够显著提高棉花根系菌根侵染率。NaCl 浓度为 0 时,与不接种植株相比,接种处理的株高和单株铃数显著提高,分别增加了 10.3%(7 月 15 日)和 27.8%(8 月 13 日)。随着 NaCl 浓度增加,盐胁迫严重抑制了不接种株的生长发育,而对接种植株的作用因盐浓度不同而异。与同水平的不接种植株相比,NaCl 浓度 0.1%时 AM 真菌能显著提高棉花

表 1 NaCl 胁迫下接种 AM 真菌对棉花生长的影响
Table 1 Effect of AM fungi on growth of cotton plant under NaCl stress

NaCl 水平 NaCl levels (%)	接种 Inoculation	株高 Plant height (cm)	每株叶片数 Leaf number (No. /plant) 15/07	茎粗 Shoot count (cm)	每株果枝 Fruit shoots (No. /plant) 13/08	每株铃数 Bells (No. /plant)	侵染率 Infection rate (%) 12/10
0	-M	28.2	9.3	0.4	4.0	4.3	22.4
	+M	31.1*	10.0	0.42	3.5	5.5*	56.8*
0.1	-M	28.1	9.3	0.38	3.3	2.3	31.5
	+M	27.9	8.8	0.42*	3.8*	4.5*	62.3*
0.2	-M	25.6	7.5	0.35	3.0	1.8	23.3
	+M	26.4	7.8	0.35	3.3	2.8*	54.6*
0.3	-M	26.3	7.8	0.34	2.5	1.5	12.5
	+M	26.6	8.0	0.35	2.8*	2.5*	50.7*

-M 不接种 Non-inoculation, +M 接种 Inoculation; * 接种与不接种处理相比差异达到 5%显著水平 Mean 5% significant difference between inoculating and non-inoculation with AM fungi;下同 the same below

茎粗、果枝数和单株铃数,分别增加了 10.5%、15.4%和 95.6%;0.2%~0.3%NaCl 浓度时接种植株的果枝数和铃数增加明显。说明接种 AM 真菌能够缓解盐胁迫对棉花形态学指标的抑制作用,促进植物生长。

2.2 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉叶光合色素含量的影响

NaCl 浓度为 0 时,花期接种株与不接种株相比,叶片总叶绿素和类胡萝卜素含量分别增加了 23.2%和 24.1%,均达到显著水平(表 2)。随着 NaCl 浓度增加,接种株与不接种株叶片叶绿素含量逐渐降低,类胡萝卜素含量在现蕾期和盛蕾期降低,花期升高;NaCl 浓度为 0.1%~0.2%时,接种株与不接种株在各生育期的叶绿素和类胡萝卜素含量变化不大;NaCl 浓度为 0.3%时,现蕾期接种株叶片总叶绿素和类胡萝卜素含量显著高于不接种株。说明 NaCl 胁迫下接种 AM 真菌能够提高棉株叶片叶绿素和类胡萝卜素含量。

表 2 NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉叶总叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 2 Effects of AM fungi on total chlorophyll and carotenoid contents under NaCl stress

NaCl 水平 NaCl levels (%)	接种 Inoculation	总叶绿素 Total chlorophyll			类胡萝卜素 Carotenoid		
		(mg/gFW)			(mg/gFW)		
		01/07	15/07	15/08	01/07	15/07	15/08
0	-M	1.35	1.74	1.42	0.372	0.294	0.236
	+M	1.40	1.83	1.75*	0.375	0.289	0.293*
0.1	-M	1.21	1.77	1.46	0.349	0.286	0.265
	+M	1.27	1.74	1.52	0.365	0.291	0.276
0.2	-M	1.22	1.62	1.42	0.364	0.277	0.286
	+M	1.30	1.66	1.56	0.383	0.288	0.297
0.3	-M	1.03	1.62	1.60	0.308	0.284	0.288
	+M	1.17*	1.69	1.67	0.351*	0.293	0.291

2.3 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉叶可溶性蛋白质和 MDA 含量的影响

由表 3 可见,NaCl 浓度为 0~0.1%时,接种 AM 真菌对植株可溶性蛋白质含量影响不大,而在 0.2%NaCl 浓度铃期和 0.3%NaCl 浓度现蕾期和铃期,接种株可溶性蛋白质含量都显著高于不接种株。

NaCl 浓度为 0 时,接种 AM 真菌对植株 MDA 含量影响不大,而在 0.1%、0.2%和 0.3%NaCl 浓度时,接种株与不接种株相比,叶片 MDA 含量显著降低的时期分别出现在盛蕾期(7 月 15 日)、花期(8 月 1 日)和铃期(9 月 1 日)。说明接种 AM 真菌可使体内的 MDA 含量维持在较低水平。

表 3 NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉叶可溶性蛋白质和 MDA 含量的影响

Table 3 Effects of AM fungi on soluble protein and MDA content of cotton leaves under NaCl stress

NaCl 水平 NaCl levels (%)	接种 Inoculation	可溶性蛋白质 Soluble protein				丙二醛 MDA			
		(mg/gFW)				(nmol/gFW)			
		01/07	15/07	01/08	01/09	01/07	15/07	01/08	01/09
0	-M	10.08	11.70	7.56	6.90	17.34	19.70	26.34	43.97
	+M	9.31	12.78	7.94	7.19	17.73	21.20	31.40	46.36
0.1	-M	9.18	8.06	5.54	4.19	18.31	23.22	31.03	57.70
	+M	9.75	8.52	5.31	4.38	17.50	19.77*	28.93	63.63
0.2	-M	8.74	7.18	4.11	1.61	19.77	28.20	35.18	84.00
	+M	9.29	7.64	4.54	3.35*	21.52	31.33	59.15	71.65*
0.3	-M	7.54	7.14	3.33	1.35	20.52	46.04	51.88	95.41
	+M	8.50*	7.45	3.54	1.62*	31.76	37.64*	41.76*	79.66

2.4 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉叶保护酶活性的影响

2.4.1 SOD 活性 由表 4 可见,随着 NaCl 浓度提高,接种株与不接种株叶片 SOD 活性除盛蕾期逐渐升高外,其他时期均依次降低。与不接种株相比,0~0.1%NaCl 浓度时,接种株 SOD 活性在花蕾期较低,铃期有所提高;0.2%~0.3%NaCl 浓度时,铃期接种株叶片 SOD 活性分别提高了 22.5%和 42.1%,与不接种株相比,差异达显著水平。说明 NaCl 胁迫下接种 AM 真菌对棉花生殖生长前期叶片 SOD 活性有较强阻遏作用,而在后期却能显著提高 SOD 活性。

2.4.2 POD 活性 随着 NaCl 浓度提高,不接种株叶片 POD 活性从现蕾到盛蕾期逐渐升高,而同水平的接种株却升高明显(表 4)。与不接种株相比,现蕾期的接种株叶片 POD 活性由盐浓度为 0 到 0.3%分别提高了 117.8%、67.5%、204.5%和 33.6%,而在铃期又依次降低了 36.1%、35.2%、18.2%和 43.9%。说明 NaCl 胁迫下接种 AM 真菌能够有效调节棉株叶片

POD 活性。

2.4.3 CAT 活性 由表 4 可知,无论盐胁迫是否存在,4 个测定时期不接种株和接种株叶片 CAT 活性都有先降后升再降的趋势,但接种株叶片 CAT 活性再次升高的时间提前。NaCl 浓度为 0 时,不接种株与接种株相比,CAT 活性在花期有所升高,但升高不明显;随着 NaCl 浓度增加,接种株在现蕾期叶片 CAT 活性稍低,盛蕾期后明显提高,尤其是盐胁迫浓度愈高,CAT 活性提高愈显著,如 0.1%盐浓度时接种株 CAT 活性提高了 83.6%(花期),0.2%盐浓度时分别提高了 133.2%(花期)和 32.1%(铃期),而 0.3%盐浓度时分别提高了 22.9%(盛蕾期)、214.1%(花期)和 59.9%(铃期)。说明 NaCl 胁迫下接种 AM 真菌能显著提高棉花叶片 CAT 活性。

表 4 NaCl 胁迫条件下 AM 真菌对棉花叶片保护酶系统的影响
Table 4 Effects of AM fungi on protective enzymes of cotton leaves of under NaCl stress

酶活 Enzyme activity	日期 Date	NaCl 水平 NaCl levels(%)							
		0		0.1		0.2		0.3	
		-M	+M	-M	+M	-M	+M	-M	+M
SOD (μ/g)	1/7	248.48	176.24	219.52	206.23	194.90	202.26	175.49	178.54
	15/7	129.02	127.68	148.95	144.37	205.14	222.47	246.36	208.55
	1/8	167.07	160.28	159.63	145.39	148.37	158.08	128.87	137.59
	1/9	139.50	154.34*	127.73	128.66	101.49	124.37*	74.98	106.54*
POD (μ/g)	1/7	1.15	2.50*	1.91	3.20*	1.92	5.84*	3.56	4.76*
	15/7	3.20	3.11	4.03	2.54	4.80	3.41	6.83	8.64*
	1/8	12.69	14.49*	11.89	16.18*	7.41	6.54	7.31	4.98
	1/9	18.87	12.06	16.07	10.41	8.49	6.95	8.16	4.58
CAT (μ/g)	1/7	99.56	79.25	139.06	130.06	144.81	149.19	128.11	93.03
	15/7	60.06	62.88	70.69	74.38	89.31	83.22	67.50	83.06*
	1/8	64.83	67.92	55.75	84.00*	57.33	87.08*	53.25	85.58*
	1/9	68.92	50.17	55.05	56.08	49.75	65.75*	43.50	69.58*

2.5 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉花体内矿质元素含量的影响

从表 5 可见,NaCl 浓度为 0 时,接种 AM 真菌能显著提高植株地上部和根系 Na 和 Ca 含量,降低 K 和 Mg 含量。NaCl 浓度为 0.1%~0.2%时,接种 AM 真菌显著提高了植株地上部 K 和 Ca 含量和根系 Na 含量,而对地上部 Na 和 Mg 含量及根系 K、Ca、Mg 含量影响不大。高盐浓度(0.3%)时,接种株与不接种株相比,地上部 Na、K、Mg 含量和根系 K、Ca、Mg 含量显著提高。说明在中低盐条件下接种株主要是提高地上部 K、Ca 含量增强耐盐性,而高盐时接种株主要以提高地上部和根系 K、Ca 和 Mg 的含量减轻离子毒害,提高耐盐性。

2.6 AM 真菌和 NaCl 浓度对棉花生物产量的影响

从表 6 可见,随着 NaCl 水平提高,接种株与不接种株生物产量随之降低。接种 AM 真菌对棉花生物产量的提高有一定促进作用,但促进效应因盐浓度不同而存在差异。

NaCl 浓度为 0 时,与不接种株相比,接种株地上部生物产量降低,但地下部鲜重和籽棉重有所提高;0.1%NaCl 浓度时,棉株地上部鲜重、干重和籽棉重分别提高了 21.87%、41.18%和 14.80%,差异达显著水平;0.2%~0.3%NaCl 浓度时接种 AM 真菌对棉株生物产量影响不大。

表 5 NaCl 胁迫下 AM 真菌对棉花植株矿质元素含量的影响
Table 5 Effects of AM fungi on mineral element content of cotton plant under NaCl stress

NaCl 水平 NaCl levels (%)	接种 Inoculation	地上部分 Upper plant(%)				根系 Root(%)			
		Na	K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg
0	-M	0.386	2.775	1.421	0.988	0.731	3.989	1.622	1.608
	+M	0.438*	2.321	1.662*	0.880	0.808*	3.343	1.792*	1.576
0.1	-M	0.536	2.268	1.424	1.096	1.032	3.233	1.805	1.515
	+M	0.560	2.626*	1.599*	1.026	1.066	2.378	1.010	1.485
0.2	-M	0.700	2.175	1.404	1.126	1.086	3.202	1.537	1.533
	+M	0.704	2.677*	1.543*	0.965	1.437*	2.745	0.904	1.475
0.3	-M	0.803	1.436	1.413	1.073	1.141	2.295	0.649	1.417
	+M	1.118*	1.994*	1.455	1.112*	1.230	2.981*	1.126*	1.533*

3 讨论

盐胁迫几乎影响到植物的所有代谢过程^[11]。本试验研究表明,盐胁迫条件下不接种的对照株在各生育期的叶片叶绿素和可溶性蛋白质含量明显下降,说明盐胁迫抑制了植株的物质代谢,使叶绿素和蛋白质不能正常合成。而接种株叶片叶绿素和可溶性蛋白质含量在高盐的现蕾期和铃期明显高于不接种株,差异达显著水平。说明接种 AM 真菌能明显减轻盐胁迫造成的代谢紊乱,并促进代谢正常进行,从而提高棉花的生物产量^[6,12]。

表 6 NaCl 胁迫条件下 AM 真菌对棉花生物产量的影响
Table 6 Effects of AM fungi on biomass and yield of cotton plant under NaCl stress

NaCl 水平 NaCl levels (%)	接种 Inoculation	地上部 Upper plant(g/pot)		根系 Root(g/pot)		籽棉重(g/plant) Seed cotton yield
		鲜重 FW	干重 DW	鲜重 FW	干重 DW	
0	-M	32.01	12.78	5.04	1.66	4.12
	+M	31.19	11.47	5.59*	1.67	4.52
0.1	-M	27.76	8.45	3.89	1.34	3.58
	+M	33.83*	11.93*	4.06	1.16	4.11*
0.2	-M	16.54	5.40	3.26	0.95	3.18
	+M	19.71	6.79	3.65*	0.96	3.34
0.3	-M	13.35	4.56	4.40	0.89	2.80
	+M	13.87	4.93	4.59	1.15	2.92

植物耐盐机理的实质是 Na⁺ 及其和其它离子代谢的关系问题。土壤中 Cl⁻、H₂PO₄⁻、NO₃⁻、Na⁺、K⁺ 离子之间存在着竞争性吸收^[13]。增加介质中 K⁺、Ca²⁺ 的比例可以降低 Na⁺、Cl⁻ 在植株体内的相对含量(K/Na、Ca/Na、P/Cl 比值),从而减轻离子毒害,提高植物的耐盐性^[14, 15]。有试验结果表明,盐胁迫会导致植株体内养分如 K、Ca 等含量的减少^[12],出现营养亏缺,但是植物的盐害及其耐盐性与环境条件、植物种类等因素密切相关,一些植物在盐渍环境中体内 K、Ca、P 等元素含量受 Na 影响较小,甚至与 Na 含量同步升高^[16]。研究表明,AM 真菌菌丝能够延伸到距离根表数厘米以外的土壤中获得植物根系无法吸收的矿质营养,特别是对土壤磷素的吸收,提高了共生植株的含磷量并促进植株生长^[17],这可能是 AM 真菌提高棉花耐盐性的主要原因,因为磷的代谢是植物体内一切代谢活动的核心^[18,19]。本试验结果表明,与不接种株相比,多数情况下接种 AM 真菌的棉株在中低盐条件下地上部 K、Ca 含量较高,高盐时地上部和根系 K、Ca 和 Mg 含量较高,这对于植物耐盐性的提高是有利的,因为 K 不仅是营养元素,在盐胁迫下还起着调节植株体内渗透势的作用^[20];而 Ca 既能作为磷脂中的磷酸与蛋白质的羧基间联结的桥梁,稳定膜结构,又是一些酶的活化剂,具有缓解 NaCl 的胁迫效应^[11]。

值得注意的是在中低盐条件下接种 AM 真菌的棉株根系 Mg 的含量略低于不接种株,而高盐(0.3%NaCl 浓度)时又显著高于不接种株。Mg 是植物生长的必需元素,也是许多酶的活化剂,在植物光合作用、核酸和蛋白质代谢中起着重要作用^[11]。然而,植物 Mg 营养与 AM 真菌之间的关系尚不明了,还有待进一步的探讨。

在自由基伤害学说中,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)是防御系统的主要保护酶类,这三者协调一致,使生物体内自由基维持在一个较低水平,从而防止自由基伤害。盐胁迫使植物的光能利用和 CO₂ 的同化受抑制,叶绿体电子传递中电子传递给 O₂ 的几率增大,促进了活性氧和自由基数量的增加,引起膜脂过氧化和对蛋白质、核酸等的损伤^[21]。从试验结果看,与不接种株相比,生育前期 POD 活性较高,高盐胁迫和生育后期棉株叶片 SOD 和 CAT 活性较高,而 POD 活性较低;接种株叶片 MDA 含量也维持在较低水平,且有些时期差异达显著水平。说明 NaCl 胁迫条件下,接种 AM 真菌可有效调节保护酶系统活性,使保护酶有更强的能力清除自由基,缓解棉株体内发生的膜脂过氧化,从而提高棉花的耐盐性。与 SOD 和 CAT 相比,POD 活性的变化规律说明其可能是此过程中清除自由基的主要酶类,也可能是接种 AM 真菌能够缓解不同时期盐胁迫对 POD 活性的不利影响。以上特异现象的机理有待进一步深入研究。

References:

[1] Brundrett M C. Mycorrhizas in natural ecosystems. *Adv. Eco. Res.*, 1991, **21**:171~313.
[2] Crunes D L, Stout P R, Brownell J R. Grass tetany of ruminants. *Adv. Agron.*, 1970, **22**: 332~374.
[3] Mason E. Note on the presence of mycorrhizas in the root of salt marsh plants. *New Phytol.*, 1928, **27**: 193~195.
[4] Zang J Z, Liu X Z, Miu Z Q, *et al.* A Survey of arbuscular mycorrhizal fungi in soline-sodic soil in China. *Journal of Laiyang Agricultural College*, 1999, **16**(1):16~20.
[5] Jiang D F, Li M, Liu R J, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of cotton. *Eco-Agriculture Research*, 1998, **6**(4):24~26.

- [6] Liu R J, Shen C Y, Qiu W F. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on growth and yield of cotton. *Juornal Beijing Agriculture University*, 1994, **20**(1):89~91.
- [7] Mao S C, Xing J S, Song M Z, *et al.* Reaction of two indigenous strain of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on cotton. *Acta Gossypii Sinica*, 1994, **6**(4):237~242.
- [8] Phillip J M, Hayman D S. Improved procedures for cleaning and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *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] Nanjing Soil Institute of Academy of Sciences of China. *Physical and Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Press of Sciences and Technology of Shanghai, 1978.
- [11] Zhang J S. *Plant Physiology*. Xi'an: Corp of World Books Press, 1999. 71~72, 390~392.
- [12] Feng G, Bai D S, Yang M Q, *et al.* Effects of salinity on VA mycorrhiza formation and of inoculation with VAM fungi on salt tolerance of plant. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1):79~82.
- [13] Grattan S R, Grieve M. Mineral element acquisition and growth response of plants growth in saline environments. *Agr. Eco. and Envir.*, 1992, **38**:275~300.
- [14] Awad A S, Edwards D G, Campbell L C. Phosphorus enhancement of salt tolerance of tomato. *Crop Sci.*, 1990, **30**: 123~128.
- [15] Gouia H M, Ghorbal H, Touraine B. Effects of NaCl on flows of N and mineral ions and on NO_3^- reduction rate within whole plants of salt-sensitive bean and salt-tolerant cotton. *Plant Physiol.*, 1994, **105**:1409~1418.
- [16] Pfeiffer C A, Bloss H E. Growth and nutrition of guayle (*Parthenium argentatum*) in a saline soil as influenced by vesicular-arbuscular mycorrhiza and phosphorus fertization. *New Phytol.*, 1988, **108**:315~321.
- [17] He X L, Zhao F G, Zhao L L, *et al.* Effects of AM fungi on the growth and chemical composition of tobacco leaf under different P levels. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(5):761~764.
- [18] Poss J A, Pond E, Menge J A, *et al.* Effect of salinity on mycorrhizal onion and tomato in soil with and without additional phosphate. *Plant and Soil*, 1985, **88**: 307~319.
- [19] Gupta R, Krishnamurthy K V. Response of mycorrhizal and nonmycorrhizal arachis hypogaea to NaCl and acid stress. *Mycorrhiza*, 1996, **6**: 145~149.
- [20] Ruiz Lozano J M, Azcon R. Hyphal contribution to water uptake in mycorrhizal plant as affected by the fungal species and water status. *Physiol. Plant*, 1995, **95**:472~478.
- [21] Li Y P, Sun W, Zhao L L, *et al.* Effects of AM fungi on the growth and leaf protective enzymes of tobacco under K deficiency. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, **21**(1):51~54.

参考文献:

- [4] 张金政, 刘杏忠, 缪作清, 等. 中国盐碱土壤中 AM 真菌初步调查. 莱阳农学院学报, 1999, **16**(1):16~20.
- [5] 姜德锋, 李敏, 刘润进, 等. AM 真菌对棉花生长和产量的影响. 生态农业研究, 1998, **6**(4):24~26.
- [6] 刘润进, 沈崇尧, 裘维藩. VA 菌根真菌对棉花生长和产量的影响. 北京农业大学学报, 1994, **20**(1):89~91.
- [7] 毛树春, 邢金松, 宋美珍, 等. 两种土著 VA 菌根真菌与棉花的作用. 棉花学报, 1994, **6**(4):237~242.
- [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] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [11] 张继澍. 植物生理学. 西安:世界图书出版公司, 1999. 71~72, 390~392.
- [12] 冯固, 白灯莎, 杨茂秋, 等. 盐对 VA 菌根形成的影响及 VA 菌根真菌接种对植物耐盐性的效应. 应用生态学报, 1999, **10**(1):79~82.
- [17] 贺学礼, 赵方贵, 李斌, 等. AM 真菌和施磷量对不同叶位烟叶生长和化学成分的交互效应. 应用生态学报, 1999, **10**(1):79~82.
- [21] 李英鹏, 孙渭, 赵莉丽, 等. 钾胁迫条件下 AM 真菌对烟草生长和叶片保护酶系统的影响. 干旱地区农业研究, 2003, **21**(1):51~54.