

AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜生长 和抗氧化酶活性的影响

许炜萍, 谢晓红, 黄 志*, 何 茂, 赖 艳

(四川农业大学 园艺学院, 成都 611130)

摘 要:以甜瓜(*Cucumis melo* L.)品种“中蜜 3 号”为试材, 摩西球囊霉菌(*Glomus mosseae*, GM)为供试菌种, 采用温室盆栽试验研究接种丛枝菌根真菌(AMF)对弱光及盐胁迫下甜瓜生长和抗氧化酶活性的影响, 以明确 AMF 对甜瓜复合逆境下的增抗作用并探讨其生理机制。结果显示: (1) 在弱光及盐胁迫条件下, 甜瓜幼苗生长受到明显抑制, 其株高、干重和鲜重均明显降低, 同时体内可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸和 MDA 含量以及 SOD、POD、CAT 活性均比对照显著升高。 (2) 弱光及盐胁迫下, 接种 AMF 可显著促进甜瓜幼苗的生长, 菌根侵染率随胁迫时间延长与盐浓度呈负相关关系。 (3) 弱光及盐胁迫下, 接种 AMF 进一步提高了甜瓜幼苗体内可溶性糖、可溶性蛋白、淀粉和脯氨酸含量及 SOD、POD、CAT 活性, 显著降低了 MDA 含量, 且叶片 SOD、POD 活性变化大于根系, CAT 则相反。研究表明, AMF 可通过促进弱光及盐胁迫下甜瓜生长和抗氧化酶活性的提高, 有效降低体内膜脂过氧化水平, 从而增强植株对弱光及盐胁迫的耐性。

关键词:丛枝菌根真菌; 甜瓜; 弱光; 盐胁迫; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.79; S652

文献标志码: A

Physiological Responses of Melon(*Cucumis melo* L.) Seedlings to *Glomus* under Low Light and Salt Stress

XU Weiping, XIE Xiaohong, HUANG Zhi*, HE Mao, LAI Yan

(College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to clarify the effect of AMF on the resistance of muskmelon to compound stress, and to explore its physiological mechanism, we investigated the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and the antioxidant activities of melon under low light and salt stress by pot experiment in greenhouse. The results showed that: (1) the growth of melon seedlings was significantly inhibited. The plant height, the dry weight and the fresh weight were significantly reduced. Soluble protein, soluble sugar, proline, malondialdehyde (MDA) contents and antioxidant enzymes activities (SOD, POD and CAT) in melon seedlings under low light and salt stress were higher than those in control group. (2) The inoculation with *Glomus* could significantly promote the growth of muskmelon seedlings, and the rate of mycorrhizal infection was negatively correlated with salt stress with the extension of stress time. (3) The inoculation with *Glomus* improves the physiological parameters of inoculated seedlings compared with non-AM seedlings; the contents of soluble sugar, soluble protein, starch, proline and antioxidant enzymes activities

收稿日期: 2016-01-01; 修改稿收到日期: 2016-01-17

基金项目: 留学回国人员科技项目择优资助(2016); 四川农业大学双支计划

作者简介: 许炜萍(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培生理研究。E-mail: 1225575622@qq.com

* 通信作者: 黄 志, 博士, 副教授, 主要从事设施园艺研究。E-mail: dr.huangzhi@qq.com

(SOD, POD and CAT) increased significantly, while MDA content decreased, and mycorrhizal infection rate with stress duration was negatively correlated with the salt concentration; the contents of SOD and POD in leaves were more active than those in roots, while CAT activity was less than that in roots. We propose that AM symbiosis can protect melon plants from low light and salt stress by improving their antioxidant activities and bi-directional transport of carbohydrates.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; melon; low light; salt stress; antioxidant enzyme

土壤盐渍化对农业的威胁是一个全球性问题。中国盐渍土总面积约 3 600 hm^2 , 占全国可利用土地面积的 4.88%^[1]。甜瓜在中国具有悠久的栽培历史, 且栽培总面积和产量都居世界首位, 是设施栽培的重要蔬菜作物之一。中国设施蔬菜生产中因追求高产而不合理地超量施用化肥和偏施氮肥, 造成土壤盐分过量积累, 严重影响了设施蔬菜生产的可持续发展。盐胁迫会对植物产生离子毒害、渗透胁迫、营养失衡和氧化胁迫等危害^[2], 从而导致作物减产或死亡。同时, 在设施栽培生产中, 经常遇到的弱光胁迫也已成为限制众多设施瓜类蔬菜优质高效栽培的关键因素之一^[3]。在寡日照地区弱光胁迫对作物生长的影响更为突出, 弱光直接影响植物的物质积累和光合作用, 进而会造成作物徒长、生长缓慢等生理障碍。已有研究表明, 接种丛枝菌根真菌(AMF)能促进盐碱土中植物的生长^[4], 可增加叶面积和叶绿素含量, 提高地上部及地下部干物质重量^[5]。AMF 能促进弱光下植株对水分和养分吸收, 提高光合能力, 增加植株物质积累, 促进形态建成和提高根系活力等, 从而降低叶绿素含量、根冠比和 MDA 含量等^[6-7]。但目前对设施栽培逆境研究大多集中在单一逆境因子方面, 对弱光及盐胁迫复合逆境鲜见报道。因此, 本试验通过分析 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜幼苗物质含量、膜脂过氧化作用、抗氧化酶活性等影响, 探讨 AMF 对甜瓜复合逆境下的增抗作用, 为 AMF 的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试菌种为摩西球囊霉菌 *Glomus mosseae* (GM), 供试甜瓜品种为‘中蜜 3 号’, 均由中国农业科学院蔬菜花卉研究所提供。取饱满的种子温汤浸种: 将种子浸泡在 55 $^{\circ}\text{C}$ 温水中 15 min, 然后用冷水冷却, 在 28 $^{\circ}\text{C}$ 恒温箱中催芽 18 h 后播种塑料盆内, 盆的规格是: 上口内径 15 cm, 盆底内径 9 cm, 盆高 10.5 cm。采用蛭石 4:1 珍珠岩作为试验基质。每盆装试验基质约 300 g, 基质预先经过 0.11 MPa,

121 $^{\circ}\text{C}$ 高压蒸汽灭菌^[8]。

1.2 试验设计

试验于 2014 年 5~6 月于四川农业大学农场设施大棚内及设施系实验室中进行, 经测定当地时间 10:00~16:00 平均光照强度约为 1 080~1 620 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 以 1 个塑料大棚为对照(平均光强约为 540~810 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 将另 1 个大棚上覆盖 1 层黑色遮阳网模拟弱光环境(白天中午最高光强为 670 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最高温度为 30 $^{\circ}\text{C}$; 夜间最低温度为 18 $^{\circ}\text{C}$, 无光照)根据参考文献选择 3 个盐浓度(0、60、120 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl, 分别记为 S_0 、 S_{60} 、 S_{120})^[9-10], 每个逆境组合设接菌和未接菌 2 个处理(GM 和 CK), 共 6 个处理, 每个处理种植 12 盆, 每盆 3 株幼苗。接菌处理每盆添加接种物共 10 g(经检测约含 720 个孢子)。孢子的接种采用“二层接种法”^[11], 即首先在试验盆中装入 1/3 高度的灭菌基质, 然后均匀地撒上 1 层接种体, 用量大约是每盆接入量的 3/5, 之后又撒上 1 层基质至盆高的 3/4 处, 将剩余的菌根接种体全部施入, 覆上 1 层基质, 种子播于其上, 再覆上 1 层细的基质即可。未接菌处理接入等质量高温灭菌后的接种物。

经过 20 d 的侵染, 幼苗达到“三叶一心”时开始弱光和盐胁迫处理, 无盐处理用 0.5 倍 Hoagland 营养液浇灌, 盐处理则用 0.5 倍 Hoagland 营养液配制相应盐浓度溶液浇灌, 每隔 2 d 浇 1 次盐水, 每次各浇 100 mL, 钵下放盘, 为保持盆内盐浓度, 如有渗漏, 将渗出液反倒回去。盐胁迫 0、3、6、9 d 后分别取各处理的叶片和根系, 进行相关生理指标的测定。每处理分别取 5 株, 剪取幼苗根组织和生长点下第 2 片展开真叶测定, 重复 3 次。

1.3 测定指标与方法

(1) AM 真菌侵染率、菌根依存度。

处理 9 d 后, 取根系 30 个根段采用苯胺蓝(aniline blue)染色镜检后, 通过频率标准法计算菌根侵染率^[8]。菌根侵染率(%) = 丛枝菌根感染的根段长度/检查根段的总长度 $\times 100$ 。菌根依赖度按下式计算^[12], 菌根依赖度(%) = 接种处理的干质量 - 不接

种处理干质量/接种处理的干质量×100。

(2)生长量及生理指标的测定。

处理 9 d 后,测量幼苗(5 株)从子叶到生长点的高度记为株高;幼苗与子叶展开方向平行的子叶节的茎粗度记为茎粗;分别取幼苗地上部和地下部,用清水冲洗表面杂物,再用去离子水冲洗干净,擦干水分后,分别称鲜重,105 ℃烘箱中杀青 15 min,转为 75 ℃烘至恒重,称干重。

于 0、3、6、9 d 后,各处理随机选取 3 盆幼苗,各取 1 份土样,每份土样 50 g;分别倒入 3 个烧杯中;以 2∶1 的水土比例,用量筒量取蒸馏水,分别倒入已装好基质样本的烧杯中,轻轻振荡 5 min,然后用滤纸过滤,使用 IS228 电导率仪测定 EC 值并记录。

盐处理后,每天观察记录,以幼苗叶片出现黄叶作为盐害症状,耐盐系数为盐害症状出现前在不同浓度 NaCl 中生长的天数乘以百分比浓度的总和^[13]。耐盐系数=Σ(盐害症状出现前在不同浓度 NaCl 中生长的天数×百分比浓度)。

采用考马斯亮蓝 G-250 法^[14]测定可溶性蛋白含量;苯酚法^[15]测定可溶性糖含量;蒽酮硫酸法^[16]测定淀粉含量;采用硫代巴比妥酸法^[17]测定 MDA 含量;酸性茚三酮染色法^[17]测定 Pro 含量;采用焦彦生等^[17]的方法测定 SOD、POD、CAT 活性。

1.4 数据处理

应用 Excel 进行数据整理,采用 SPSS 数据处理软件进行显著性分析(邓肯新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜侵染率和菌根依赖度的影响

由表 1 可以看出,胁迫至 3 d 时,低浓度盐胁迫下菌根侵染率有小幅增长,而后随着盐浓度增加和胁迫时间延长,菌根侵染率呈现不同程度降低且与盐

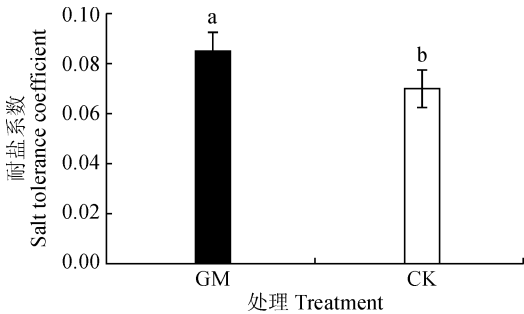
浓度呈负相关,GMS₀ 到胁迫 9 d 时较胁迫前菌根侵染率增加了 19.4%;GMS₆₀、GMS₁₂₀ 则减少了 16.6%和 48.0%;无盐处理(GMS₀)则随时间增加呈现持续增长趋势。菌根依存度则随盐浓度的增加降低了 19.5%。

2.2 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜耐盐系数和根际电导率的影响

由图 1 可知,GM 处理耐盐系数显著高于未接菌处理。随着处理时间和 NaCl 浓度增加,甜瓜根际 EC 值持续升高;同盐浓度下,胁迫中期,接菌处理显著低于未接菌处理,而胁迫后期,差异不显著,无盐处理在整个时期变化不大(图 2)。

2.3 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜生长的影响

由表 2 可以看出,高浓度盐胁迫显著降低了甜瓜幼苗的干重、鲜重和株高,同时还提高了根冠比,但茎粗无显著差异,而接种 AMF 后显著提高了甜瓜幼苗的干重、鲜重、株高和茎粗。其中 CKS₆₀ 地上部干重最大,GMS₆₀ 地下部干重最大,GMS₁₂₀ 处理根



GM. 接菌处理;CK. 对照(不接菌);不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著。下同

图 1 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜耐盐系数的影响
GM. Inoculation treatment;CK. Control (No inoculation); The different normal letters on each column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below
Fig.1 Effect of AMF on the salt tolerance coefficient of melon under low light and salt stress

表 1 盐胁迫对甜瓜幼苗菌根侵染率和菌根依赖度的影响

Table 1 Effect on the infection rate and mycorrhizal dependence of melon under salt stress

处理 Treatment	不同处理时间菌根侵染率 AMF colonization rate/%				菌根依存度 AMF dependence/%
	0	3	6	9	
GMS ₀	68.7±1.5a	75.0±2.0a	77.0±2.7a	82.0±2.0a	137.7±1.3a
GMS ₆₀	68.7±1.5a	71.3±0.6b	63.3±1.5b	57.3±2.5b	130.9±1.8b
GMS ₁₂₀	68.7±1.5a	47.3±1.5c	36.3±1.5c	35.7±2.5c	118.2±2.1c

注:数据经邓肯氏新复极差法检验,表中小写字母表示 $P<0.05$ 显著水平;数据均为 3 次重复均值;S₀、S₆₀、S₁₂₀ 分别表示 0、60 和 120 mmol·L⁻¹ NaCl;GM 表示接菌处理;下同

Note: The data were tested by Duncan's multiple range. Letters in the tables indicate significant level of $P<0.05$; Data are the average of three replicates; S₀, S₆₀, S₁₂₀ expressed NaCl concentration; GM was treated with the inoculation of AMF. The same as below

冠比值最高,而CKS₆₀根冠比最低。

2.4 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜叶片物质积累的影响

由图 3 可以看出,除 S₁₂₀ 处理 9 d 外,同盐浓度各处理的 GM 甜瓜可溶性糖含量均显著高于未接菌株;同盐浓度下,GM 甜瓜叶片可溶性糖含量均呈现中期增加后期降低的趋势,而未接菌处理 6 d 时就开始呈现下降趋势;GM 甜瓜叶片可溶性蛋白含量均显著高于未接菌处理,无盐处理甜瓜叶片可溶性蛋白含量在整个时期变化不大,低盐胁迫 3 d 后均持续保持较高浓度,而高盐处理在胁迫后期大幅度下降;AMF 显著的提高了甜瓜幼苗叶片的淀粉含量;胁迫 3 d 时,S₆₀ 和 S₁₂₀ 叶片淀粉含量显著提高,各处理(GMS₆₀、CKS₆₀、GMS₁₂₀、CKS₁₂₀)较胁迫前分别增长了约 67.7%、75.7%、114.4%、95.4%;GMS₆₀ 和 GMS₁₂₀ 在胁迫 6 d 时仍然维持较高含量,几乎为未接菌株(CKS₆₀ 和 CKS₁₂₀)淀粉含量的 2 倍。胁迫 9 d 时,GMS₀ 和 GMS₆₀ 淀粉含量保持较高,而 S₁₂₀ 无论接菌与否淀粉含量均降至最低且二者

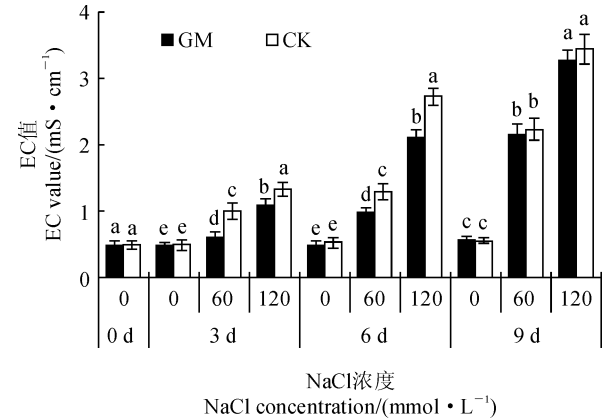


图 2 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜根际电导率(EC 值)的影响

Fig. 2 Effect of AMF on the electrical conductivity in Melon under low light and salt stress

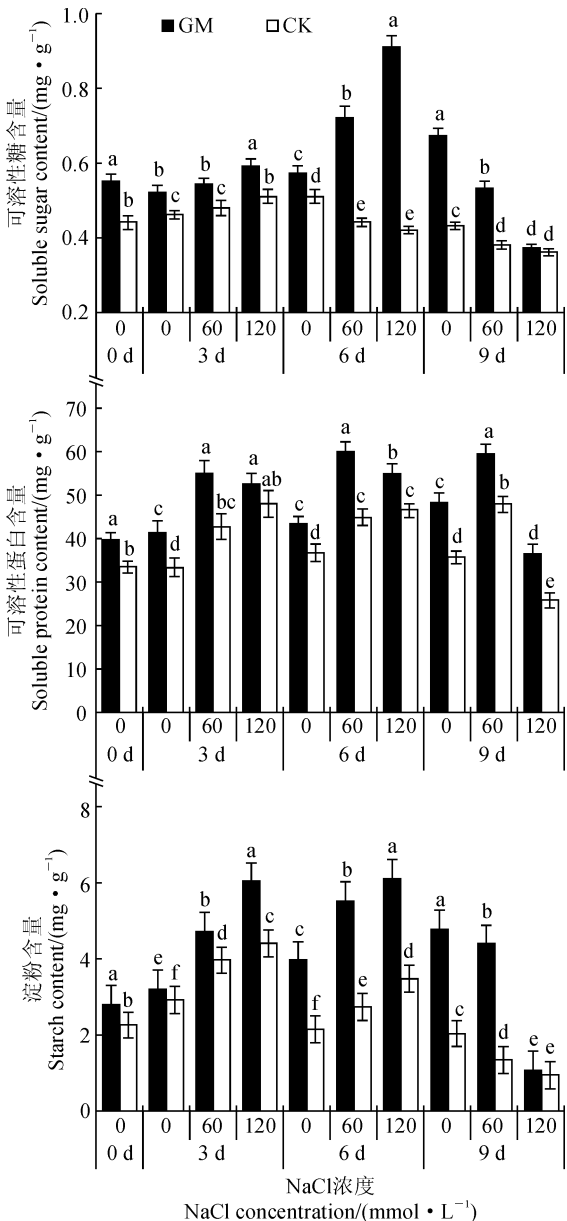


图 3 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜叶片物质积累的影响

Fig. 3 Effect of AMF on the carbohydrates accumulation in melon leaf under low light and salt stress

表 2 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜生长的影响

Table 2 Effect of AMF on the growth in melon under low light and salt stress

处 理 Treatment	干重 Dry weight/g		鲜重 Fresh weight /g	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	根冠比 Root shoot ratio
	地上部 Shoot	地下部 Root				
GMS ₀	1.46±0.05b	0.15±0.01b	9.67±0.23a	16.83±0.58ab	3.74±0.22a	0.10±0.02d
GMS ₆₀	1.12±0.08d	0.18±0.01a	7.97±0.09c	18.50±0.46a	3.75±0.26a	0.17±0.02b
GMS ₁₂₀	0.67±0.05e	0.15±0.02b	7.12±0.25d	17.40±0.79a	3.66±0.36a	0.22±0.03a
CKS ₀	1.36±0.03c	0.12±0.01c	9.05±0.23b	15.37±0.67bc	3.37±0.2ab	0.09±0.02d
CKS ₆₀	1.67±0.03a	0.09±0.01d	7.98±0.27c	14.63±1.42cd	3.16±0.15b	0.05±0.02e
CKS ₁₂₀	0.56±0.04f	0.08±0.01d	6.76±0.20d	13.27±1.16d	3.03±0.04b	0.15±0.01c

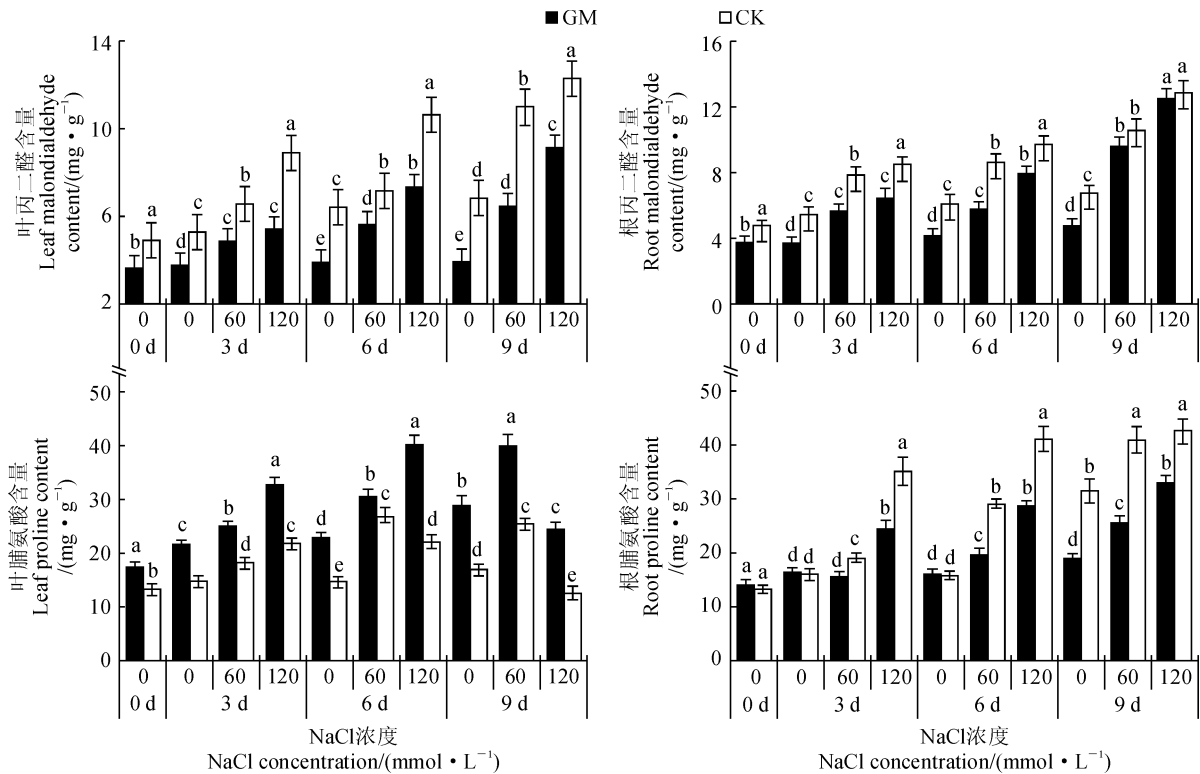


图 4 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜丙二醛和脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effect of AMF on MDA and Pro in melon under low light and salt stress

无显著差异。

2.5 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜渗透调节物质的影响

由图 4 可以看出,同盐浓度下,GM 叶片 MDA 含量均显著低于未接菌处理;随 NaCl 胁迫持续,叶片和根系 MDA 含量均持续积累,GM 处理中期增幅较小,后期增幅较大,而未接菌处理与之相反;AMF 无盐处理植株(GMS₀)在整个时期变化不大,而未接菌无盐处理(CKS₀)叶片和根系 MDA 含量均有小幅增加。同盐浓度下,GM 甜瓜叶片 Pro 含量均显著高于未接菌处理;而 GM 甜瓜根系 Pro 含量均显著低于未接菌处理。GMS₀甜瓜叶片 Pro 含量持续增加,而未接菌处理 CKS₀后期有所降低;盐胁迫 GM 植株和 CKS₁₂₀处理植株则均在中期开始下降。甜瓜根系 Pro 含量均缓慢积累,但未接菌处理较 GM 增幅更大。

2.6 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜抗氧化酶活性的影响

由图 5 可知,接种菌根后,甜瓜幼苗叶片和根系 SOD、POD、CAT 活性均显著高于未接菌株;盐胁迫条件下,甜瓜幼苗叶片和根系中 SOD、POD、CAT 活性在盐胁迫下 6 d 达到峰值,此后 3 种酶活性均开始下降,SOD、POD 的变化幅度叶片大于根系,而

CAT 变化幅度根系大于叶片;盐胁迫条件下接种 AMF 后,与单独盐处理相比,幼苗叶片 SOD(第 6 天)、POD(第 6 天)、CAT(第 6 天)活性分别提高了 156%、65%、123%,根系 3 种酶活性分别提高了 66%、159%、206%。说明盐胁迫初期,幼苗为适应环境胁迫,可通过自身的调节机制提高 SOD、POD 和 CAT 的活性,此后幼苗自身调节能力减弱,内源抗氧化酶系统清除活性氧、防止膜脂过氧化作用的能力下降,幼苗会受到伤害。接种 AMF 可以进一步提高甜瓜幼苗体内抗氧化酶的活性,增强植株对活性氧的清除能力,从而提高植株的抗盐性。

3 讨论

已有研究表明,接种 AMF 可以有效缓解盐胁迫植物生长受到的抑制作用,提高其地上部及地下部干物质质量^[18]。本试验表明,接种 AMF 可以提高盐胁迫下甜瓜植株株高、茎粗、地上部和地下部鲜、干重,显著促进植株生长。因受弱光和盐双重胁迫,低浓度盐胁迫促进植株地上部徒长,高浓度盐胁迫抑制地下部生长,而接种 AMF 能有效地抑制以上 2 种不利影响,这与韩冰等^[19]的研究结果相似。盐胁迫减少了 AMF 对甜瓜植株的侵染率,这与 Trimble 等^[20]在黄瓜、Copeman 等^[21]在番茄上的研究结果一

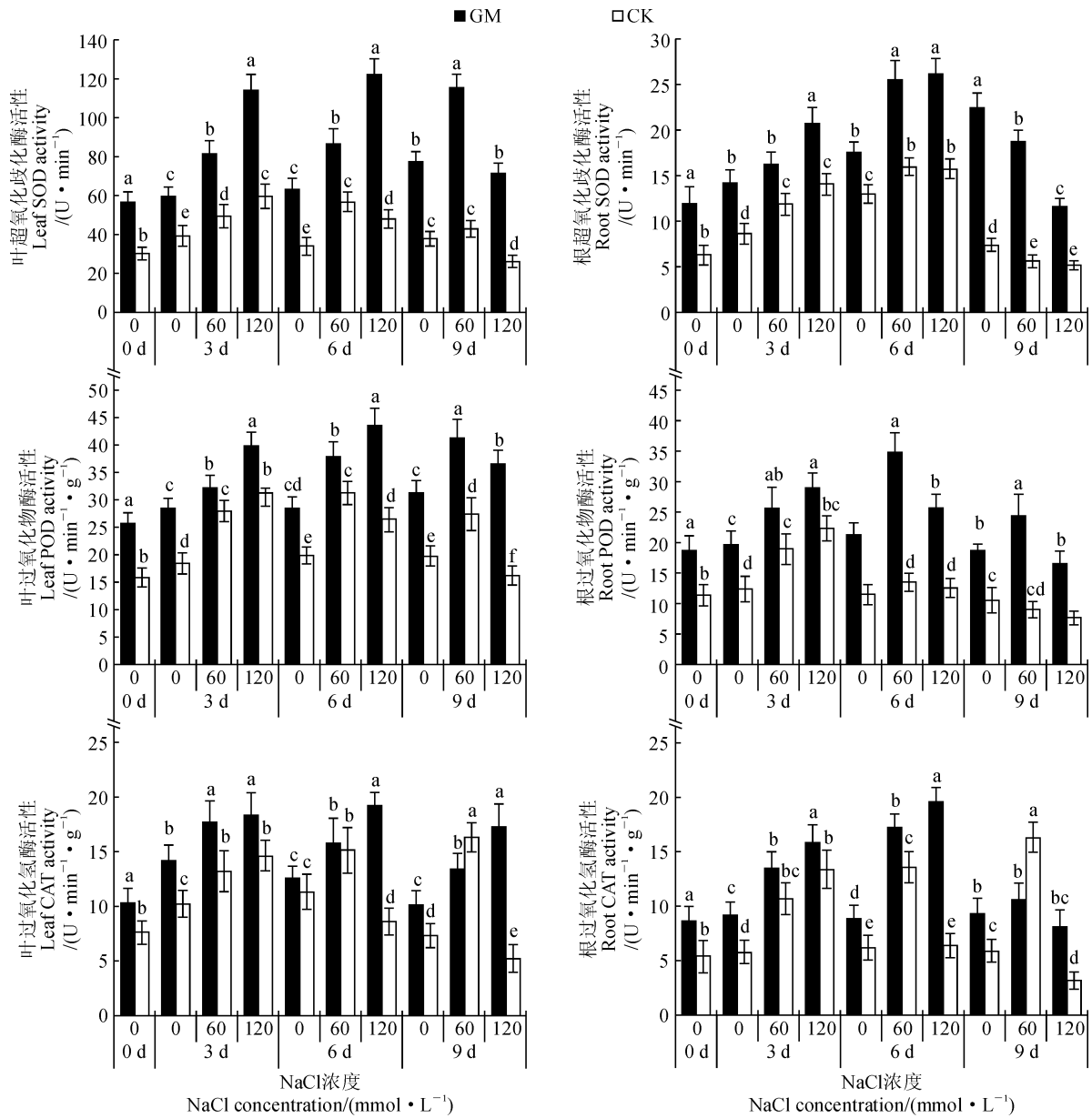


图 5 接种 AMF 对弱光及盐胁迫下甜瓜抗氧化酶活性的影响

Fig. 5 Effect of AMF on the activities of antioxidant enzymes in Melon under low light and salt stress

致。本试验表明随盐浓度和胁迫时间的增加,AM 真菌的侵染率从 82.0%逐渐降低到35.7%,这与 AM 真菌对玉米^[22]在不同盐胁迫等级下的侵染率在 20%~60%区间有差异。这可能与不同 AM 真菌菌种、不同寄主植物以及不同的栽培管理方式等有关。菌根依存度指接种 AMF 与未接种株相比对植物的生长效应,盐胁迫下接菌处理的菌根依存度低于正常接菌处理,说明与盐胁迫条件下相比,无盐条件下接种菌根对植物生长的促进作用更明显。研究表明 AMF 可通过促进盐胁迫下菌根植株体内可溶性糖^[23]和可溶性蛋白^[24]的积累,从而维持细胞内较低的渗透势,保持胞内的水分,维持细胞正常生理

代谢。与单纯盐处理相比,本试验中接菌盐处理能够诱导产生更多的可溶性糖、可溶性蛋白和淀粉。盐胁迫研究中发现,接种 AMF 提高植株的可溶性糖含量与耐盐能力有关^[25],本研究中,高盐胁迫下接种 AMF 在处理后期与未接种株可溶性糖含量均显著降低且无差异,这可能是植株盐积累过多导致植株组织液外渗或已濒临死亡,而无盐及低盐 AMF 植株在整个时期可溶性糖含量均高于未接菌株,说明弱光下接种 AMF 可以通过增加植株可溶性糖等含量来提高植株的耐盐性。

环境胁迫会使植物体内活性氧自由基积累,积累的氧自由基会导致膜脂肪酸中的不饱和键被过氧

化形成 MDA,MDA 含量是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标^[26]。在弱光及盐胁迫条件下,植物体内清除活性氧的抗氧化酶系统如 SOD、POD、CAT 活性会提高,其中 SOD 可以催化 2 个 O₂⁻ 发生歧化反应,生成 H₂O₂ 和 O₂, POD 和 CAT 则进一步分解 H₂O₂ 形成 H₂O^[27]。AMF 可通过提高胁迫条件下植株体内 SOD、POD、CAT 活性,从而显著降低植株体内超氧阴离子自由基和 MDA 含量^[28]。本试验表明,与未接菌种相比,接菌盐处理有效提高了甜瓜植株体内 SOD、

POD、CAT 活性,降低了 MDA 含量,减轻了 MDA 产生导致的幼苗活性氧伤害和膜脂过氧化,且在盐胁迫下接种 AMF 比对照效果更明显,从而提高植株对盐胁迫的抵御能力。

综上所述,弱光及盐胁迫下接种 AMF 可促进甜瓜植株生长及增加可溶性糖等渗透调节物质的含量,提高各种保护酶的活性,减少 MDA 的生成和积累,从而缓解弱光及盐胁迫对植株造成的伤害,增强植株对弱光及盐胁迫的抗性。

参考文献:

[1] MUNNS R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. *Plant Cell & Environment*, 2002, **25**(2):239-250.

[2] ZHU J K. Plant salt tolerance. [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, **6**(2):66.

[3] 战吉成, 黄卫东, 王利军. 植物弱光逆境生理研究综述[J]. 植物学报, 2003, **20**(1):43-50.

ZHAN J C, HUANG W D, WANG L J. Research of weak light stress physiology in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, **20**(1):43-50.

[4] SHARIFI M, GHORBANLI M, EBRAHIMZADEH H. Improved growth of salinity stressed soybean after inoculation with salt pretreated mycorrhizal fungi[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, **164**(9):1 144-1 151.

[5] AL-KARAKI G N. Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress[J]. *Mycorrhiza*, 2000, **10**(2):51-54.

[6] COPEMAN R H, MARTIN C A, STUTZ J C. Tomato growth in response to salinity and mycorrhizal fungi from saline or nonsaline soil[J]. *Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 1996, **31**(3):341-344.

[7] ROSENDAHL C N, ROSENDAHL S. Influence of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus* spp.) on the response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to salt stress[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 1991, **31**(3):313-318.

[8] HUANG Z, ZOU Z, R, HE C, X, *et al.* Physiological and photosynthetic responses of melon (*Cucumis melo* L.) seedlings to three *Glomus* species under water deficit[J]. *Plant and Soil*, 2011, **339**(1):391-399.

[9] 鲁乃增, 周礼彬, 轩正英. NaCl 胁迫对甜瓜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 河北农业科学, 2011, **15**(11):17-20.

LU N Z, ZHOU L B, XUAN Z Y. Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of melon[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, **15**(11):17-20.

[10] 徐志然, 赵九洲, 胡晓辉, 等. 萌发期和幼苗期甜瓜品种耐盐碱性评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, **43**(4):99-107.

XU Z R, ZHAO J Z, HU X H, *et al.* Salt-alkaline tolerance of melon(*cucumis melon* L.) at germinating and seedling stages[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2015, **43**(4):99-107.

[11] 黄 志. 丛枝菌根真菌对甜瓜抗旱性的生理效应及分子机制的研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2010.

[12] T. TAKÁCS, I. VÖRÖS. Effect of metal non-adapted arbuscular mycorrhizal fungi on Cd, Ni and Zn uptake by ryegrass[J]. *Acta Agronomica Hungarica*, 2003, **51**(3):347-354.

[13] 阮松林, 薛庆中. 壳聚糖包衣对杂交水稻种子发芽和幼苗耐盐性的影响[J]. 作物学报, 2002, **28**(6):803-808.

RUAN S L, XUE Q Z. Effects of chitosan coating on seed germination and salt-tolerance of seedlings in hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, **28**(6):803-808.

[14] 焦彦生, 郭世荣, 李 娟, 等. 钙对根际低氧胁迫下黄爪幼苗活性氧代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2006, **26**(10):2 056-2 062.

JIAO Y S, GUO S R, LI J, *et al.* Effect of low rhizosphere oxygen stress on reactive oxygen species metabolism in cucumber seedlings [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, **26**(10):2 056-2 062.

[15] 何仲复. 蔬菜瓜果鲜样中 NO₃⁻-N 及 NO₂⁻-N 测定方法的改进[J]. 农业环境保护, 1995, (1):46-48.

HE Z F. The improvement of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N determination method in fresh samples of vegetable and fruits[J]. *Agricultural Environmental Protection*, 1995, (1):46-48.

[16] 乔永旭, 刘栓桃, 赵智中, 等. 甜瓜果实发育过程中糖积累与蔗糖代谢相关酶的关系[J]. 果树学报, 2004, **21**(5):447-450.

QIAO Y X, LIU S T, ZHAO Z Z, *et al.* Study on the correlation of sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzymes during the developing period of muskmelon (*Cucumis melon*) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2004, **21**(5):447-450.

[17] 高武军, 于美玲, 邓传良, 等. NaCl 胁迫对 6 种红花幼苗渗透调节物质及抗氧化系统的影响 [J]. *植物科学学报*, 2010, **28**(5):612-617.

GAO W J, YU M L, DENG C L, *et al.* Effect of NaCl stress on the antioxidative system and osmotic regulation substance of six varieties of safflower seedlings [J]. *Plant Science Journal*, 2010, **28**(5):612-617.

[18] HUANG Z, HE C X, HE Z Q, *et al.* The effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on reactive oxyradical scavenging system of tomato under salt tolerance [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2010, **9**(8):1 150-1 159.

[19] 韩 冰, 贺超兴, 闫 妍, 等. AMF 对低温胁迫下黄瓜幼苗生长和叶片抗氧化系统的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, **44**(8):1 646-1 653.

HAN B, HE C X, YAN Y. *et al.* Effects of arbuscular mycorrhiza fungi on seedlings growth and antioxidant systems of leaves in cucumber under low temperature stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, **44**(8):1 646-1 653.

[20] TRIMBLE M, KNOWLES N. Influence of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus on growth, carbohydrate partitioning and mineral nutrition of greenhouse cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants during establishment [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1995, **75**(1):239-250.

[21] COPEMAN R H, MARTIN C A, STUTZ J C. Tomato growth in response to salinity and mycorrhizal fungi from saline or nonsaline soil [J]. *Hortscience A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 1996, **31**(3):341-344.

[22] 冯 固, 李晓林, 张福锁, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对玉米水分和养分状况的影响 [J]. *应用生态学报*, 2000, **11**(4):595-598.

FENG G, LI X L, ZHANG F S, *et al.* Effect of AM fungi on water and nutrition status of corn plants under salt stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(4):595-598.

[23] ZHANG F S. Uptake of nitrogen from indigenous soil pool by cotton plant inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2002, **33**(19-20):3 825-3 836.

[24] 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 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(1):188-193.

HE X L, ZHAO L L, LI Y P, *et al.* Effects of AM fungi on the growth and protective enzymes of cotton under NaCl stress [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(1):188-193.

[25] 韩 冰, 贺超兴, 郭世荣, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响 [J]. *西北植物学报*, 2011, **31**(12):2 492-2 497.

HAN B, HE C X, GUO S R, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on osmoregulation substance contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2011, **31**(12):2 492-2 497.

[26] KANAZAWA S, SANO S, KOSHIBA T, *et al.* Changes in antioxidative enzymes in cucumber cotyledons during natural senescence: comparison with those during dark induced senescence [J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, **109**(2):211-216.

[27] 孙国荣, 彭永臻, 阎秀峰, 等. 干旱胁迫对白桦实生苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响 [J]. *林业科学*, 2003, **39**(1):165-167.

SUN G R, PENG Y Z, YAN X F, *et al.* Effects of drought stress on activity of cell defense enzymes and lipid peroxidation in leaves of betula platyphylla seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(1):165-167.

[28] 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 [J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(4):825-830.

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 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(4):825-830.

(编辑:宋亚珍)