ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

第 31 卷 第 12 期 Vol.31 No.12 2011

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

中国科学院科学出版基金资助出版

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 12 期　　2011 年 6 月　(半月刊)

目　　次

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 35 * 2011-06

封面图说:自然奇观红海滩 · 辽宁省盘锦市——在辽河入海口生长着大片的潮间带植物碱蓬草,举目望去,如霞似火,蔚为壮观,人们习惯地称之为红海滩。粗壮的根系加快着海滩土壤的脱盐过程,掉下的茎叶腐质后肥化了土壤,它是大海的生态屏障。

彩图提供:段文科先生　中国鸟网 http://www.birdnet.cn　E-mail:dwk9911@126.com

生 态 学 报 2011,31(12):3497—3503
Acta Ecologica Sinica

丛枝菌根真菌对低温下黄瓜幼苗光合生理和抗氧化酶活性的影响

刘爱荣[1],陈双臣[1,*],刘燕英[1],李艳楠[1],贺超兴[2]
(1. 河南科技大学林学院,河南洛阳 471003;2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所,北京 100081)

摘要:塑料连栋大棚栽培条件下,研究接种丛枝菌根真菌(AMF)*Glomus mossea*-2 对低温下黄瓜(*Cucumis sativus* L.)幼苗同化产物积累、光合生理和过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性及基因表达的影响。结果表明:低温显著抑制了 AMF 对黄瓜根系的侵染能力和菌根相对依赖性。接菌后 30－45d AMF 为快速侵染期。接种 AMF 植株的鲜重根冠比、总干重、总鲜重均显著大于未接菌处理。低温胁迫下,接种 AMF 延缓了光合速率、根系活力、羧化效率和叶绿素、可溶性蛋白含量的下降,并且使丙二醛(MDA) 的含量保持相对较低的水平,诱导了抗氧化酶基因的表达及活性提高。接种 AMF 可以使叶片维持较高的抗氧化酶水平和光合能力,增强了对低温胁迫的抗性。

关键词:黄瓜;丛枝菌根真菌;低温;抗氧化酶

Effects of AM fungi on leaf photosynthetic physiological parameters and antioxidant enzyme activities under low temperature

LIU Airong[1], CHEN Shuangchen[1,*], LIU Yanying[1], LI Yannan[1], HE Chaoxing[2]
1 *College of Forestry*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *Henan Province China*
2 *Institute of Vegetables and Flowers*, *CAAS*, *Beijing* 100081, *China*

Abstract: Chilling stress may reduce plant growth by affecting physiological and metabolic processes. It is well known that that a symbiotic association of plant roots with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improves plant cold tolerance and related studies have received extensive attention during the last decade. Root colonization by AMF might strengthen the ability of cold tolerance in plants through attenuating membrane lipid peroxidation and plasma membrane permeability, and increasing osmolyte accumulation as well. Among a large number of vegetable crops which could be infected by AM fungi, cucumber is relatively easy to establish symbiotic associations with vesicular arbuscular mycorrhizae (VAM). Previous studies have reported the relief of chilling stress through the use of AMF. However, these were more focused on plant growth and chlorophyll parameters. The biochemical mechanism underlying AMF-mediated low temperature tolerance in vegetable crops warrants further in depth investigation.

Under greenhouse condition, the combined effects of AM fungi and low temperature on cucumber seedlings were investigated with respects to assimilate accumulation, photosynthetic rate, carboxylation efficiency, activities of antioxidant enzymes and related gene expression. AMF inoculums used in this study consisted of spores, soil, hyphae and infected maize root fragment from a stock culture of *Glomus mossea*-2, which were propagated by AMF inoculums. The experimental design consisted of four treatments crossing two mycorrhizal inoculations levels (non-AMF and *Glomus mossea*-2) with two temperature levels (25/15℃, 15/10℃). The inoculated dosage was 20 g of inoculums per pot containing. Repeat 3 times for each treatment, 10 plants per replicate.

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA6B04, 2011BAD12B03);国家自然科学基金项目(30700002, 40971156);博士后基金项目(20070411191,20090461397);河南省自然科学基金(2008B210002, 2009B2100004)

收稿日期:2010-06-19; **修订日期**:2010-11-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chen_shuangchen@126.com

The results showed that mycorrhizal colonization abilities and mycorrhizal dependency were significantly inhibited by low temperature. Fungal growth accelerated considerably during the period from 30 d to 45 d after inoculation with AMF. At 45 d after inoculation, mycorrhizal colonization ratio on cucumber roots was 42.68% and 32.15% under room temperature and low temperature, respectively, Mycorrhizal dependency was 21.42% and 5.46% under room temperature and low temperature respectively and this indicated a significant reduction in low temperature ($P<0.05$). Regardless of the temperature, the root-shoot ratio, total dry weight and fresh weight of AMF inoculated seedlings were significantly higher than that of the non-AMF control ($P<0.05$). The photosynthesis, root activity, carboxylation efficiency, contents of chlorophyll and soluble proteins increased by 23.67%, 29.13%, 33.10% and 11.78% compared with the control under low temperature. Moreover, Malondialdehyde content stayed at relatively low level in AMF-treated seedlings. On the other hand, the AMF treatment enhanced the activities and transcript levels of antioxidant enzymes.

Superoxide dismutase(SOD), peroxidase(POD), catalase(CAT), ascorbate peroxidase (APX) expressions of the AMF-inoculated seedlings were increased by 1.35, 1.44, 1.70, 2.46 folds respectively compared with CK_1. Under chilling stress, the expression levels of SOD, G-POD, CAT and APX genes in the AMF-inoculated seedling were increased by 1.68, 1.37, 1.52 and 1.83 folds respectively in control under normal temperature(CK_1) compared with those under low temperature (CK_2). These results indicated that antioxidant enzymes might play a crucial role in AMF-mediated tolerance to chilling stress, thereby maintaining a high photosynthetic capacity in cucumber seedlings.

Key Words: arbuscular mycorrhizal fungi; cucumber; low temperature; antioxidant enzymes

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是陆地植物根内广泛存在的一类内生菌根真菌,可以不同方式和途径影响植物代谢过程[1]。已有研究对其资源、抗病、生理生态等方面进行了广泛探索[2-3]。不同蔬菜作物对 AMF 的依赖程度不同,洋葱被认为是蔬菜中最易形成 VA 菌根的种类之一,黄瓜、莴苣、芦笋、辣椒、番茄、茄子、豇豆、马铃薯、草莓、西瓜等也易形成 VA 菌根[4]。接种 AMF 能有效提高蔬菜作物对干旱、盐碱、寒热、重金属等逆境的抵抗能力,改善寄主植物的营养状况,从而促进蔬菜生长和提高产量[5-6],这种有益作用促使人们不断尝试把 AMF 应用到农业生产中。

接种 AMF 能增强植物耐低温的能力。El-Tohamy 等研究指出,接种 AMF 可提高菜豆的抗低温能力,这种能力在水分胁迫下更为显著[6]。在低温条件下,接种 AMF 的韭菜植株其细胞受冻害程度远低于对照,其机制可能是因为接种植株增强了 P 素的吸收,增加细胞膜稳定性[7]。玉米接种 AMF 可以减少极端温度胁迫带来的伤害,通过降低膜脂过氧化和质膜相对透性,提高渗透调节物质的积累,从而提高寄主的生物量积累和植株长势[8]。但以上研究多集中在生长发育和叶绿素参数。而蔬菜作物接种 AMF 提高低温抗性的生理和分子作用机制尚缺乏更深入的分析。本试验旨在明确 AMF 与黄瓜共生后黄瓜生长、抗氧化酶活性及表达以及光合特性变化,以探讨 AMF 提高黄瓜耐低温性的可能生理机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种为津春 2 号,由天津科润农业科技股份有限公司选育。供试 AMF 菌剂 *Glomus mossea*-2 由匈牙利科学院土壤科学与农业化学研究所 Tunde Takacs 博士提供。接种物为经玉米栽培后扩繁的含孢子、菌丝和侵染根段的沙性根际土。

黄瓜育苗基质由腐熟秸秆、有机肥与土壤混合配制而成,基本理化性状为:pH 值 7.26,有机质 131g/kg,速效磷 165mg/ kg,速效氮 442mg/kg,速效钾 509mg /kg。于烘箱中 121℃高温灭菌 2h,自然冷却后继续 80℃烘 2h 后放置室温备用。

总 RNA 微提试剂盒、RNA 纯化试剂盒购自 Axygen 公司,反转录试剂盒购自 Fermentas 公司,iQ 多色实时定量 PCR 检测系统购自伯乐公司。

1.2　试验设计

试验在中国农业科学院蔬菜花卉研究所塑料连栋大棚进行。2010 年 3 月 11 日温汤浸种后 28℃催芽。育苗营养钵用 70%酒精擦拭后晾干。2010 年 3 月 13 日播种,每处理重复 3 次,每重复 10 株。播种时接种处理每钵接种 20 g 接种剂,对照接种等量的灭菌接种物和 10 mL 无灭菌接种物水滤液,昼温 27—30℃、夜温 16—18℃培育幼苗。待幼苗接种 20d 时,选整齐一致的幼苗进行低温处理。试验分 4 个处理:① 常温(CK_1):基质+10g 灭菌接种剂,昼/夜温度 25/15℃处理;② 低温(CK_2):基质+10g 灭菌接种物,昼/夜温度 15/10℃;③ 接菌处理(GM):基质+10g 接种剂,昼/夜温度 25/15℃处理;④ 接菌低温处理(GML):基质+10g 接种剂,昼/夜温度 15/10℃。接种 45d 时测定幼苗光合生理指标、抗氧化酶活性、MDA 含量。

1.3　试验方法

接种 30、45、60d 后取各处理根段测定菌根侵染率。取黄瓜根系鲜样, 将 30 个根段采用苯胺蓝染色, 镜检后通过频率标准法计算[9]。采用 TTC 还原法测定接种 45d 时根系活力[10]。参照 Plenchette 等的方法计算植物的菌根相对依赖性,按下式计算:菌根依赖性(%) = (接种处理干重-不接种处理干重)/接种处理干重×100 [11]。

1.3.1　酶液提取与活性测定

酶液的提取:取 0.5 g 叶片加 3 mL pH 7.8 50 mmol/L 磷酸缓冲液(含 1% PVP,0.2 mmol/LEDTA)及少量石英砂,于冰浴中研磨提取,匀浆液于 15 000 g 下 4℃离心 20 min。上清液用于测定酶活性、丙二醛和可溶性蛋白含量。

参照 Patra 的方法测定过氧化氢酶(CAT)活性[12],参照 Nakano 和 Asada 的方法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性[13],参照 Cakmak 和 Marschner 的方法测定愈创木酚过氧化物酶(G-POD)活性[14],参照 Giannopolitis 和 Ries 的方法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性[15],按 Hodges 的方法测定丙二醛(MDA)含量[16],用 Bradford 法测定可溶性蛋白含量[17]。

1.3.2　抗性相关基因表达分析

接种 AMF 45d 时,取根系样品迅速用液氮保存进行 RNA 提取和基因表达分析。总 RNA 用总 RNA 微提试剂盒提取,以 RNA 纯化试剂盒进行纯化。用反转录试剂盒合成 cDNA 的第一条链,作为 RT-PCR 的模板。实时定量 PCR iQ 多色实时定量 PCR 检测系统中进行。25 μL 反应体系中包含:iQ SYBR Green 超混合液 12.5 μL、cDNA 1 μL、上下游引物各 0.2 μmol/L。PCR 反应程序:95℃预变性 3 min;95℃ 变性 10s,58℃ 退火 45s,40 个循环。荧光数据在每个循环的退火末期采集。黄瓜中 *actin* 基因的荧光值作为计算的内标,相对基因表达水平的计算参照 Livak 和 Schmittgen 的 $2^{-\Delta\Delta C(T)}$ 法[18],重复 3 次。用于扩增基因的特异引物序列见表 1。

表 1　实时定量 PCR 分析的基因和引物

Table 1　Genes and primers used in Real-time PCR analysis

基因 Gene	上游引物 Forward primer	下游引物 Reverse primer
CAT	5′-TGGACTCTGGTGATGGTGTTA-3′	5′-CAATGAGGGATGGCTGGAAAA-3′
POD	5′-AGTGCTTGTCCAGGAGTTGA-3′	5′-AGGGATGAAGTGGGATAAAG-3′
Fe-SOD	5′- ATGAAAACATACAAAAAAGG -3′	5′-ATGGACTCCCAGAGAAAATC -3′
cAPX	5′-ATGGGAAAGTGCTACCCTGTT-3′	5′-ACAATGTCCTGGTCCGAAAG-3′
Actin	5′-AAAGATGACGCAGATAAT-3′	5′-GAGAGATGGCTGGAATAG-3′

1.3.3　数据处理

应用 DPS v 7.05 软件进行数据分析,采用 Duncan 氏法进行差异显著性检验。

2　结果与分析

2.1　低温对黄瓜幼苗根系不同时期菌根侵染的影响

由表 2 可知,低温下菌根侵染率均低于常温,表明低温显著抑制了 AMF 对黄瓜根系的侵染能力。接菌后

45d 时菌种侵染率和菌根依赖性比接菌后 30d 有大幅度提高,表明接菌后 30—45d AMF 进入了快速侵染期。接种 AMF 45 d 时,常温和低温下 AMF 对黄瓜根系侵染率分别为 42.68% 和 32.15%,菌根依赖性分别为 21.42% 和 5.46%,均显著高于低温处理。

表 2 低温对黄瓜幼苗根系不同时期菌根侵染的影响

Table 2 Root AMF colonization ratio in cucumber seedling under low temperature

处理 Treatment	30d		45d		60 d	
	菌根侵染率/% Mycorrhizal colonization ratio	菌根依赖性/% Mycorrhizal dependency	菌根侵染率/% Mycorrhizal colonization ratio	菌根依赖性/% Mycorrhizal dependency	菌根侵染率/% Mycorrhizal colonization ratio	菌根依赖性/% Mycorrhizal dependency
常温 CK1	0	0	0	0	0	0
接菌处理 GM	36.42a	18.21a	42.68a	21.42a	44.21a	23.56a
低温 CK2	0	0	0	0	0	0
接菌低温处理 GML	24.76b	3.64b	32.15b	5.46b	32.97b	5.86b

同列数值间字母不同表明 Duncan's 多重比较差异显著($P<0.05$)

2.2 AMF 对低温下黄瓜幼苗同化产物积累的影响

低温胁迫下,黄瓜幼苗地上部和地下部的干鲜重明显降低。低温下 CK_2 和接种处理的总鲜重分别较常温 CK_1 和 GM 处理降低了 17.49% 和 17.47%,总干重分别降低了 14.93% 和 20.08%。与未接菌植株相比,接种 AMF 促进了幼苗总鲜重、总干重和鲜重根冠比的增加。干重根冠比无显著差异(表 3)。表明接种 AMF 后可以减缓物质积累的降低程度,促进黄瓜幼苗地下部的生长。

表 3 AMF 对低温胁迫下黄瓜幼苗同化产物积累的影响

Table 3 Effect of AMF on assimilation production stored of cucumber under low temperature

处理 Treatment	地上部/(g/株) Shoot /(g/plant)		地下部/(g/株) Root /(g/plant)		根冠比 Root-shoot ratio		总鲜重/g Total fresh weight	总干重/g Total dry weight
	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight		
常温 CK1	16.09b	1.67b	2.84bc	0.34b	0.177b	0.204a	18.93b	2.01b
接菌处理 GM	17.51a	2.02a	5.04a	0.42a	0.288a	0.208a	22.55a	2.44a
低温 CK2	12.99c	1.42b	2.63c	0.29b	0.202b	0.204a	15.62c	1.71c
接菌低温处理 GML	14.63c	1.58b	3.98b	0.37b	0.272a	0.228a	18.61b	1.95b

2.3 AMF 对低温下黄瓜幼苗光合生理指标的影响

常温下,接种 AMF 提高了黄瓜幼苗叶片叶绿素含量,显著增加了光合速率和根系活力,分别较 CK_1 增加了 12.11%、23.67%、29.13%(表 4)。低温下,接种 AMF 可有效缓解植株叶片叶绿素含量、光合速率、根系活力和羧化效率的降低,分别较低温对照(CK_2)增加 33.10%、53.50%、37.80%、11.78%。

表 4 AMF 对低温下黄瓜幼苗光合生理指标的影响

Table 4 Effect of AMF on photosynthetic physiological parameters in cucumber seedling under low temperature

处理 Treatment	叶绿素含量 /(mg/g) Chlorophyll content	光合速率 /(μmol $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) Photosynthetic rate	根系活力 /($\mu g \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$) Roots activity	羧化效率 Carboxylation efficiency
常温 CK1	41.20ab	6.76b	0.436b	1.16b
接菌处理 GM	46.19a	8.36a	0.563a	1.35a
低温 CK2	28.67c	4.43c	0.328c	0.09c
接菌低温处理 GML	38.16b	6.80b	0.452b	1.15b

2.4　AMF 对低温下黄瓜幼苗抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

常温下,接种 AMF 提高了黄瓜幼苗叶片 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性,分别较常温对照增加 21.47%、23.16%、38.29% 和 20.62;低温下接种 AMF 较 CK_2 分别增加了 10.59%、20.78%、19.31% 和 20.44%。低温下接种 AMF 降低了黄瓜幼苗叶片 MDA 含量,提高了叶片中可溶性蛋白含量(表 5)。

表 5　AMF 对低温下黄瓜幼苗抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

Table 5　Effect of AMF on activities of antioxidant enzymes and MDA content of cucumber under low temperature

处理 Treatment	丙二醛 MDA /(μmol/g 鲜重)	SOD 活性 SOD activity /(U/g 鲜重)	POD 活性 POD activity /($U·g^{-1}·min^{-1}$ 鲜重)	CAT 活性 CAT activity /($U·g^{-1}·min^{-1}$ 鲜重)	APX 活性 APX activity /($U·g^{-1}·min^{-1}$ 鲜重)	可溶性蛋白含量 Soluble protein content /(μg/g 鲜重)
常温 CK1	5.06 c	171.03 d	66.84 d	208.82 c	29.58 c	16.58 b
接菌处理 GM	5.14 c	207.75 c	82.32 bc	288.78 b	35.68 b	17.13 b
低温 CK2	6.22 a	242.81 b	104.76 b	296.41 b	37.85 ab	18.58 b
接菌低温处理 GML	5.73 b	268.52 a	126.53 a	353.64 a	42.56 a	21.04 a

2.4　AMF 对低温下黄瓜幼苗抗氧化酶基因表达的影响

常温下,接种 AMF 促进了黄瓜幼苗叶片 SOD、G-POD、CAT、APX 的表达,分别较常温对照增加 1.35、1.44、1.70、2.46 倍。低温对照 CK_2 黄瓜叶片中的抗氧化酶相关基因 SOD、G-POD、CAT、APX 表达量分别比常温对照增加 2.74、3.49、3.06、2.96 倍。低温胁迫下,接菌植株叶片 SOD、G-POD、CAT、APX 基因表达量分别比低温对照增加了 1.68、1.37、1.52、1.83 倍(图 1)。

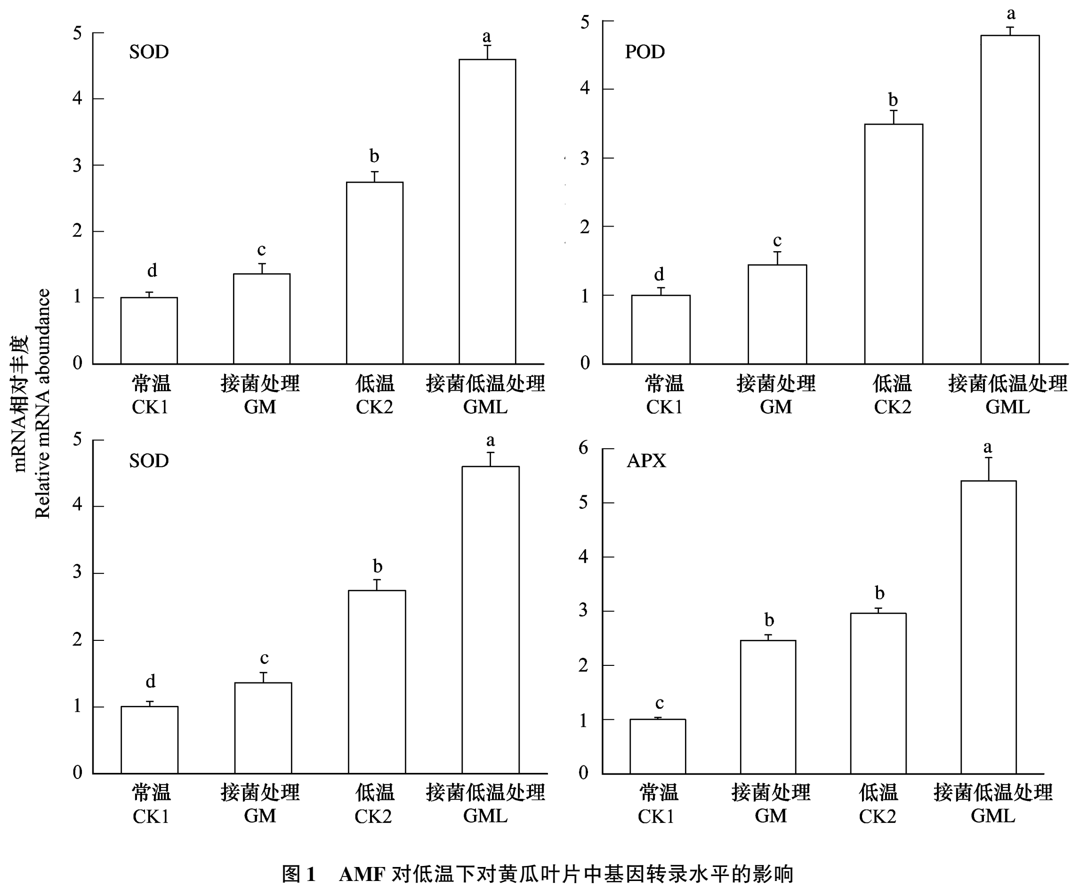

图 1　AMF 对低温下对黄瓜叶片中基因转录水平的影响

Fig. 1　Effect of AMF on the transcripts abundance in cucumber leaves under low temperature

3 讨论

AMF 的接种效应不仅与菌种、土壤环境有关,而且还与菌种与寄主间的亲和性及侵染时期有密切关系,导致不同种类的 AMF 促进植物生长发育的效果有差异[19]。有研究表明,接种摩西球囊霉 *Glomus mosseae* 能提高高温胁迫下猕猴桃苗体内渗透调节物质的含量,从而增强植株的抗热性。同时透光球囊霉 *G. diaphanum* 和地表球囊霉 *G. versiforme* 的作用效果具有一定差异[20]。表明接种 AMF 对植株细胞膜的保护作用也随菌种有所差异,并非接种 AMF 就一定能缓解逆境胁迫对寄主植株的伤害。同时,本研究还表明,低温影响了 AMF 的生长和活性,低温条件下菌根侵染率和菌根依赖性受到明显抑制,这与 Liu 等[21]研究的高粱根际低温降低了丛枝菌根定植率的结果相一致。

植物进行光合作用的主要色素是叶绿素和类胡萝卜素。低温下植株的叶绿素含量降低,而接种 AMF 可提高低温下植株叶片的叶绿素含量[22]。本试验结果也证明了这一点。接种 AMF 菌剂 *Glomus mossea*-2 可促进黄瓜幼苗地下部的生长和干物质的积累,提高了叶绿素含量、光合速率、羧化效率。这可能是因为接种 AMF 促进了黄瓜叶片叶绿素和类胡萝卜素的合成速率,加强了水分和其他营养成分的吸收与转运,使之有利于菌根植物的气体交换,从而有利于光合作用。同时接种 AMF 可以使低温下植株通过提高叶片可溶性蛋白含量来进行渗透调节,同时增加植株抗氧化酶活性并促进了这 3 种酶在 mRNA 水平上的表达,从而降低膜质过氧化程度,缓解了低温胁迫对细胞的伤害。

本研究中育苗基质由腐熟秸秆、有机肥与土壤混合配制而成。一些研究结果表明多年使用的有机栽培土壤不利于 AMF 菌种的高效繁殖[23],然而有机栽培下土壤的低磷条件比普通土壤更有利于 AMF 的生长[24],所以保证有机基质的更新可使 AMF 高效发挥作用。本试验所用基质为新配基质,营养物含量较高,因而为黄瓜生长提供了适宜的生存环境,通过在苗期接种 AMF,使其促生效果更加显著。

References:

[1] Parniske M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. Nature Reviews Microbiology, 2008, 6(10): 763-775.

[2] Evelin H, Kapoor R, Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: a review. Annals of Botany, 2009, 104(7): 1263-1280.

[3] Deng Y, Shen H, Guo T. Review of researches on nitrogen utilized by arbuscular mycorrhiza. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5627-5635.

[4] Mie L C, Chen G L, Ding P H. Research advances of VA mycorrhizal fungi in vegetable. China Vegetables, 2000, (2): 47-50.

[5] Gamalero E, Lingua G, Berta G, Glick B R. Beneficial role of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on plant responses to heavy metal stress. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(5): 501-514.

[6] El-Tohamy W, Schnitzler W H, El-Behairy U, El-Beltagy M S. Effect of VA mycorrhiza on improving drought and chilling tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of Applied Botany, 1999, 73(5/6): 178-183.

[7] Zhao S J, Li S L. The physiological study of VAM in promoting *Allillm tuberosum* increase production. Soils and Fertilizers, 1993, (4): 38-40.

[8] Zhu X C, Song F B, Xu H W. Influence of arbuscular mycorrhiza on lipid peroxidation and antioxidant enzyme activity of maize plants under temperature stress. Mycorrhiza, 2010, 20(5): 325-332.

[9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55(1): 158-161.

[10] Liu Y J, Guo S H, Yang X L. Plant Physiological and Biochemical Experimental Techniques. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[11] Plenehette C, Fortin J A, Furlan V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderateP-fertility I. Mycorrhizal dependency under field conditions. Plant and Soil, 1983, 70(2): 199-209.

[12] Patra H K, Kar M, Mishra D. Catalase activity in leaves and cotyledons during plant development and senescence. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1978, 172: 385-390.

[13] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology, 1981, 22(5): 867-880.

[14] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves. Plant Physiology, 1992, 98: 1222-1227.

[15] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. Plant Physiology, 1977, 59(2): 309-314.

[16] Hodges D M, Delong J M, Forney C F, Prange R K. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in

plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds. Planta, 1999, 207(4): 604-611.

[17] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.

[18] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C}$T method. Methods, 2001, 25(4): 402-408.

[19] Liu R J, Chen Y L. Mycorrhizology. Beijing: Science Press, 2007.

[20] Xu S J. Study on Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Severe Drought and Heat Wave Resistance of Kiwifruit Cuttings. Chongqing: Southwest University, 2008.

[21] Liu A, Wang B, Hamel C. Arbuscular mycorrhiza colonization and development at suboptimal root zone temperature. Mycorrhiza, 2004, 14(2): 93-101.

[22] Zhu X C, Song F B, Xu H W. Effects of arbuscular mucorrhizal fungi on photosynthetic characteristics of maize under low temperature stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2): 470-475.

[23] Scullion J, Eason W R, Scott E P. The effectivity of arbuscular mycorrhizal fungi from high input conventional and organic grassland and grass-arable rotations. Plant and Soil, 1998, 204(2): 243-254.

[24] Gosling P, Shepherd M. Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems inEngland, with particular reference to phosphorus and potassium. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 105(1/2): 425-432.

参考文献:

[3] 邓胤, 申鸿, 郭涛. 丛枝菌根利用氮素研究进展. 生态学报, 2009, 29(10): 5627-5635.

[4] 乜兰春, 陈贵林, 丁平海. 蔬菜 VA 菌根研究进展. 中国蔬菜, 2000, (2): 47-50.

[7] 赵士杰, 李树林. VA 菌根促进韭菜增产的生理基础研究. 土壤肥料, 1993, (4): 38-40.

[10] 刘永军, 郭守华, 杨晓玲. 植物生理生化实验技术. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[19] 刘润进, 陈应龙. 菌根学. 北京: 科学出版社, 2007.

[20] 徐淑君. 丛枝菌根真菌对猕猴桃高温干旱抗性研究. 重庆: 西南大学, 2008.

[22] 朱先灿, 宋凤斌, 徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(2): 470-475.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 12 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

（源于 2010 年版 CSTPCD 数据库）

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	**生态学报**	**11764**	1	**生态学报**	**1.812**
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次，**全国排名第 1**；影响因子 1.812，**全国排名第 14**；第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊；中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅 **执行编辑** 刘天星 段 靖

生 态 学 报
（SHENGTAI XUEBAO）
（半月刊 1981 年 3 月创刊）
第 31 卷 第 12 期 （2011 年 6 月）

ACTA ECOLOGICA SINICA
（Semimonthly，Started in 1981）
Vol. 31 No. 12 2011

编 辑 《生态学报》编辑部
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085
电话：（010）62941099
www. ecologica. cn
shengtaixuebao@ rcees. ac. cn

主 编 冯宗炜

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址：北京海淀区双清路 18 号
邮政编码：100085

出 版 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址：东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
电话：（010）64034563
E-mail：journal@ cspg. net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址：北京 399 信箱
邮政编码：100044

广告经营许可证 京海工商广字第 8013 号

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China
Tel：（010）62941099
www. ecologica. cn
Shengtaixuebao@ rcees. ac. cn

Editor-in-chief FENG Zong-Wei

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add：18，Shuangqing Street，Haidian，Beijing 100085，China

Published by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North Street，
Beijing 100717，China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House，
Beijing 100083，China

Distributed by Science Press
Add：16 Donghuangchenggen North
Street，Beijing 100717，China
Tel：（010）64034563
E-mail：journal@ cspg. net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add：P. O. Box 399 Beijing 100044，China

ISSN 1000-0933 12

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行 国内邮发代号 82-7 国外发行代号 M670 定价 70.00 元