

丛枝菌根真菌对生菜耐热性的效应

马通^{1,2}, 刘润进¹, 李敏^{1,2,*}

青岛农业大学¹菌根生物技术研究所, ²园艺学院, 山东青岛266109

摘要: 生菜即叶用莴苣栽培过程中, 常常会遇到高温抑制生长等问题, 而丛枝菌根(AM)真菌具有增强植物耐高温、干旱和盐害等抗逆性的功能。本研究旨在温室盆栽条件下, 探索不同温度下(25 °C、30 °C和35 °C) AM真菌摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、根内球囊霉(*Glomus intraradices*)和地表球囊霉(*Glomus versiforme*)对生菜耐热性的影响。结果表明, 供试3种AM真菌与生菜根系均形成了菌根, 其中, 摩西球囊霉侵染率最高(70.4%)、根内球囊霉最低(44.6%)。同一温度下, 接种AM真菌生菜叶片中的防御性酶SOD、POD、CAT活性均不同程度高于不接种对照, 尤其是在35 °C下接种摩西球囊霉的生菜防御性酶活性最高, SOD、POD和CAT活性分别比对照增加68.4%、128.6%和88.9%; 接种AM真菌生菜叶片中的MDA含量和膜透性显著低于对照。接种AM真菌处理的生菜可溶性糖含量、脯氨酸含量和根系活力显著高于对照, 用摩西球囊霉接种的生菜可溶性糖、脯氨酸和可溶性蛋白的含量均显著高于对照, 尤其在35 °C高温下, 其根系活力和叶绿素含量分别比对照增加255.5%和27.2%。结论认为, AM真菌显著提高了生菜的耐热性, 摩西球囊霉是提高生菜耐热性效应最显著的菌种, 亦是本试验选出的提高生菜耐热性的优良菌种。

关键词: AM真菌; 生菜; 耐热性; 优良菌种

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Heat-Tolerance of *Lactuca sativa* L.

MA Tong^{1,2}, LIU Run-Jin¹, LI Min^{1,2,*}

¹Institute of Mycorrhizal Biotechnology, ²Horticulture College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: There are problems of high temperature inhibiting growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in production, while arbuscular mycorrhizal (AM) fungi have the function of increasing plant tolerance to high temperature, drought, and salt stress etc. The purpose of the present experiment was to evaluate effects of AM fungi (*Glomus mosseae*, *Glomus intraradices* and *Glomus versiforme*) on heat tolerance of lettuce plants grown in pots under different temperature (25 °C, 30 °C and 35 °C), and greenhouse conditions. The results showed that the three tested AM fungi could colonize lettuce roots and form mycorrhizas. The colonization percentage of *G. mosseae* was the highest (70.4%), while *G. intraradices* the least (44.6%). Under the same temperature, the activity of SOD, POD and CAT in leaves of lettuce inoculated with AM fungi were higher than those of the control, and the inoculation treatment with *G. mosseae* showed the highest under 35 degrees, which were 68.4%, 128.6% and 88.9% higher than those of the control respectively. The content of MDA and membrane permeability in leaves of lettuce inoculated with AM fungi was significantly lower than that of the control, while the contents of soluble sugar, proline content and root activities were significantly higher than those of the control. The contents of soluble sugar, proline and soluble protein in lettuce inoculated *G. mosseae* were significantly higher than those of the control, and the root activity and chlorophyll content also significantly increased to 255.5% and 27.2% respectively, especially under the high temperature of 35 degrees. It was concluded that inoculation with AM fungi could improve lettuce heat tolerance, of which *G. mosseae* was superior and should be a possible effective strains of increasing heat tolerance of lettuce in the production.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Lactuca sativa*; heat-resistant; excellent strains

叶用莴苣(*Lactuca sativa* L.)属菊科莴苣属莴苣种中的叶用类型, 别称生菜, 又分散叶生菜、结球生菜等变种。喜冷凉、不耐高温, 15~25 °C为适宜生长温度, 超过30 °C则生长受到阻碍, 品质下降。生菜是目前国内一种十分重要的特色蔬菜种类, 消费量大、市场需求面广, 然而受夏季持续高

收稿 2015-07-08 修定 2015-10-16

资助 国家“十二五”科技支撑计划(2014BAD05B03)、山东省科技发展计划(2013GNC11014)和青岛市科技局项目(13-1-4-143-jch和14-2-3-43-nsh)。

* 通讯作者(E-mail: minli@qau.edu.cn; Tel: 0532-88030113)。

温的影响,难以进行盛夏季节生产,因此阻碍了高温季节生菜生产的顺利发展。与90%以上的植物可形成共生关系的丛枝菌根(arbuscular mycorrhize, AM)真菌能增强植物对高温、干旱、盐害、重金属毒害和土传病害等抗性(孙吉庆等2012; Heine-meyer和Fitter 2004; Abdel-Latef和He 2011; Li等2012; Serfoji等2010)、并同时促进植物生长发育(Survoot等2013; 李聪等2014)。大量研究表明,逆境下AM真菌通过提高植物SOD、POD等防御酶的活性和植物根系活力,降低MDA含量,降低膜透性,增加植株渗透调节能力,从而提高植物对逆境的抗性(李思龙等2009; 杨晓红等2005; 陈可等2013)。

关于AM真菌与生菜的关系国内外也开展了一些工作,这些研究主要集中在盐胁迫和水胁迫逆境下AM真菌对生菜生长的影响(Marulanda等2003; Ruiz-lozano等2011)。Vicente-Sanchez等(2014)认为菌根化可能是一种诱导结球生菜盐胁迫抗性的合理途径,AM真菌侵染对生菜在低盐胁迫下的生长存在促进作用(郑义艳和冯固2006);而高盐胁迫下AM真菌不能显著促进受盐胁迫生菜的生长(Garmendia和Mangas 2014)。然而,高温胁迫下AM真菌对生菜耐热性的效应了解甚少。本试验目的是针对生菜高温下难以正常栽培问题,结合AM真菌提高植物抗逆性的防御功效,研究不同温度下(25 °C、30 °C和35 °C)摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、根内球囊霉(*Glomus intraradices*)、地表球囊霉(*Glomus versiforme*)对生菜耐热性的影响,为筛选提高生菜耐热性的优良菌种提供理论依据和技术基础。

材料与方法

1 材料

1.1 供试菌剂

摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, Gm)、根内球囊霉(*Glomus intraradices*, Gi)、地表球囊霉(*Glomus versiforme*, Gv)菌剂由青岛农业大学菌根生物技术研究所提供,菌剂由孢子、菌丝、菌根根段和培养基质组成。

1.2 供试植物

双子结球生菜(*Lactuca sativa* var. *capitata* L.) (生菜种子由北京绿蓝种苗有限责任公司购买)。

1.3 培养基质

试验基质为草炭:蛭石:土=2:1:1,土壤取自青岛农业大学试验地,过孔径0.5 cm筛,121 °C高温蒸汽灭菌2 h。将灭菌基质装入消毒的营养钵(高10.5 cm,直径8 cm)中备用。

2 方法

2.1 试验设计

设接种地表球囊霉(Gv)、根内球囊霉(Gi)、摩西球囊霉(Gm)和不接种AM真菌对照(CK)4个处理。每钵分别接种AM菌剂100 mL相应菌剂,对照(CK)则加等量灭菌接种物和接种物滤液。

2.2 试验方法

试验于2014年在青岛农业大学温室中进行。9月4日将生菜种子播种营养钵中,每个钵5粒种子,营养钵内接种AM真菌,10月4日每钵定植1株,温室中培养生长,自然光照,白天气温(25±2) °C,夜间气温(18±2) °C,1~2 d浇一次水,7~10 d浇一次Hoagland营养液(磷减半)。10月19日随机选取各处理9株长势均匀的莴苣,分3组(每组3株)分别放在25 °C、30 °C和35 °C光照培养箱(12 h/12 h)中处理3 d后进行各项指标测定。

3 测定指标

超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、电导率、根系活力等指标的测定均采用王学奎(2006)描述的方法,重复3次。叶绿素含量采用美国CCM-200手持式叶绿素仪测定,每个处理随机选3株,每株测5片叶,每片叶片测相同部位,求平均值。

菌根侵染率:采集生菜须根系,洗净,加入5% KOH溶液,80 °C水浴5 min,清洗3次,加2% HCl浸泡5 min后,加入0.1%酸性品红-乳酸甘油染色液,室温下过夜,加乳酸脱色,制片镜检,计算菌根侵染率(刘润进和陈应龙2007)。菌根侵染率=Σ(0×根段数+10%×根段数+20%×根段数+...+100%×根段数)/总根段数

4 数据统计及处理

采用Microsoft Excel软件进行数据统计、绘图和SPSS 19.0软件进行单因子和双因子方差分析,多重比较采用Duncan法。

实验结果

1 不同AM真菌对生菜根系的侵染率状况

3种AM真菌与生菜根系都形成了菌根, 而不同AM真菌对生菜根系的侵染率不同。摩西球囊霉侵染率最高, 为70.4%, 而地表球囊霉(56.1%)和根内球囊霉(44.6%)相对较低(图1)。

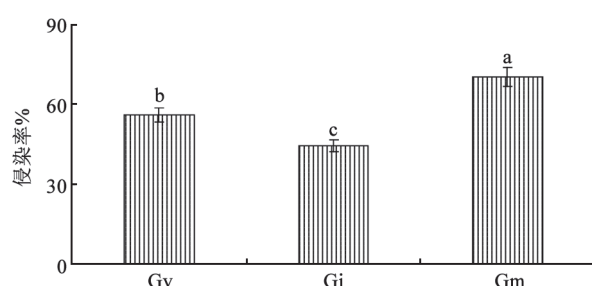


图1 AM真菌对生菜根系的侵染率

Fig.1 Colonization percentage of AM fungi on lettuce roots
柱上不同小写字母代表 $P<0.05$ 水平差异显著。

2 不同温度处理下AM真菌对生菜叶片防御性酶活性的影响

不同温度对生菜防御性酶SOD、POD、CAT活性影响不同, 无论接种AM真菌与否, 生菜防御

性酶SOD、POD、CAT活性都随着温度升高而显著降低($P<0.01$)。同一温度下, 接种AM真菌生菜叶片防御性酶SOD、POD、CAT活性高于对照, 但30℃下3种菌种SOD活性与对照差异不显著; AM真菌提高生菜SOD、POD、CAT活性能力的强弱在菌种之间有差异, 3个温度处理下摩西球囊霉提高生菜防御性酶活性最显著, SOD活性分别比对照高9.5% (25℃)、12.2% (30℃)和68.4% (35℃); POD活性分别比对照高78.4% (25℃)、54.3% (30℃)和128.6% (35℃); CAT活性分别比对照高34% (25℃)、35% (30℃)和88.9% (35℃)。其次是地表球囊霉, 而根内球囊霉对提高生菜防御性酶活性能力相对较差(图2)。

3 不同温度下AM真菌对生菜叶片电导率、MDA含量的影响

电导率反映了细胞膜在逆境下遭破坏程度, 随温度升高, 逆境程度越高, 生菜细胞膜破坏程度渐而加重, 电导率随之升高, 接种AM真菌的生菜叶片的电导率增幅均显著降低, 表明接种AM真菌能减轻高温胁迫对膜系统的破坏程度。不同菌种对生菜叶片电导率的影响不同, 摩西球囊霉表现最佳, 特别是在30℃、35℃处理下电导率分别比对

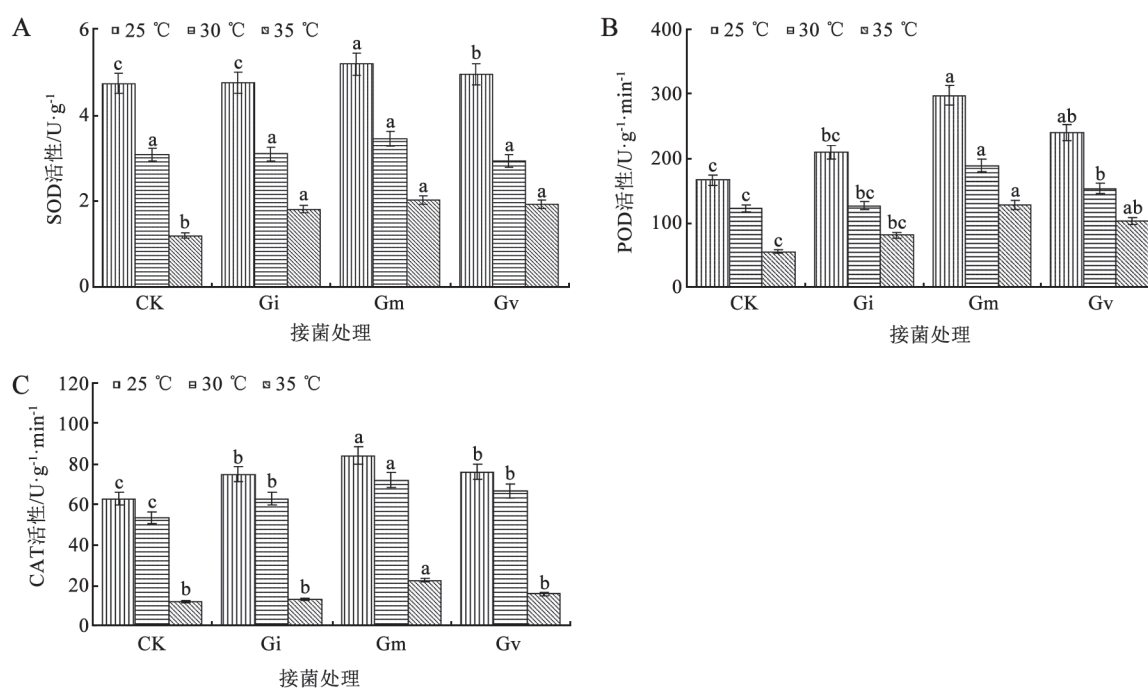


图2 不同温度处理下AM真菌对生菜叶片防御性酶活性的影响

Fig.2 Effect of AM fungi on defensive enzyme activities in leaves of lettuce under different temperatures
同一温度条件下, 各处理柱上不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平差异显著, 柱上竖线为标准误。下图同。

照降38%和40%。随温度升高,无论接种与否生菜膜脂过氧化程度均加剧,使得MDA含量增加(图3),加剧了膜的损伤。同一温度下,接种AM真菌的生

菜叶片中MDA积累量均显著低于对照。3种菌种中摩西球囊霉相对表现较好,在30℃、35℃处理下生菜叶片MDA含量均比对照降低19%(图3)。

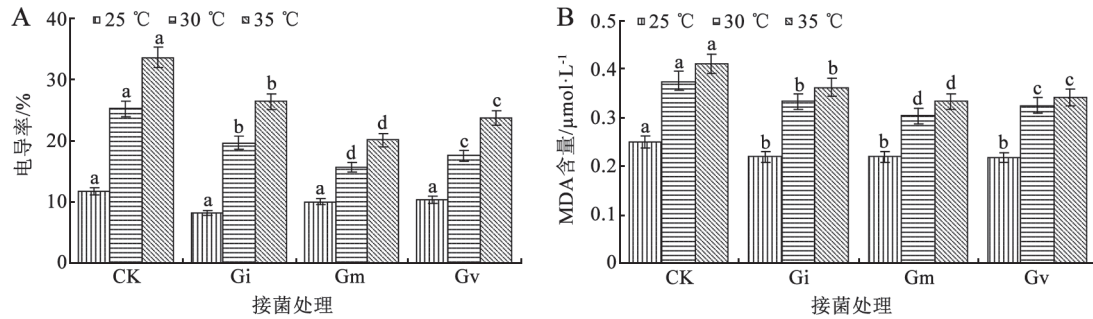


图3 不同温度处理下AM真菌对生菜叶片电导率、MDA含量的影响

Fig.3 Effect of AM fungi on conductivity and MDA contents in leaves of lettuce under different temperatures

4 不同温度下AM真菌对生菜叶片内渗透调节物质的影响

植物在高温逆境胁迫下,渗透调节物质能保持植物细胞水势的平衡,其中,脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖是最常见的渗透调节物质。随着温度升高,生菜叶片中脯氨酸含量逐渐降低。虽30℃下脯氨酸含量接种处理提高不显著,但是在

25℃和35℃下接种处理生菜叶片内脯氨酸含量显著高于对照,其中,在35℃下接种摩西球囊霉、地地球囊霉和根内球囊霉的生菜叶片内脯氨酸含量依次比对照提高16%、10.6%和6.8%(图4)。

生菜叶片可溶性糖含量随着温度升高逐渐增加;无论何种温度处理下接种AM真菌后生菜叶片可溶性糖含量显著增加,尤其在35℃处理下接种

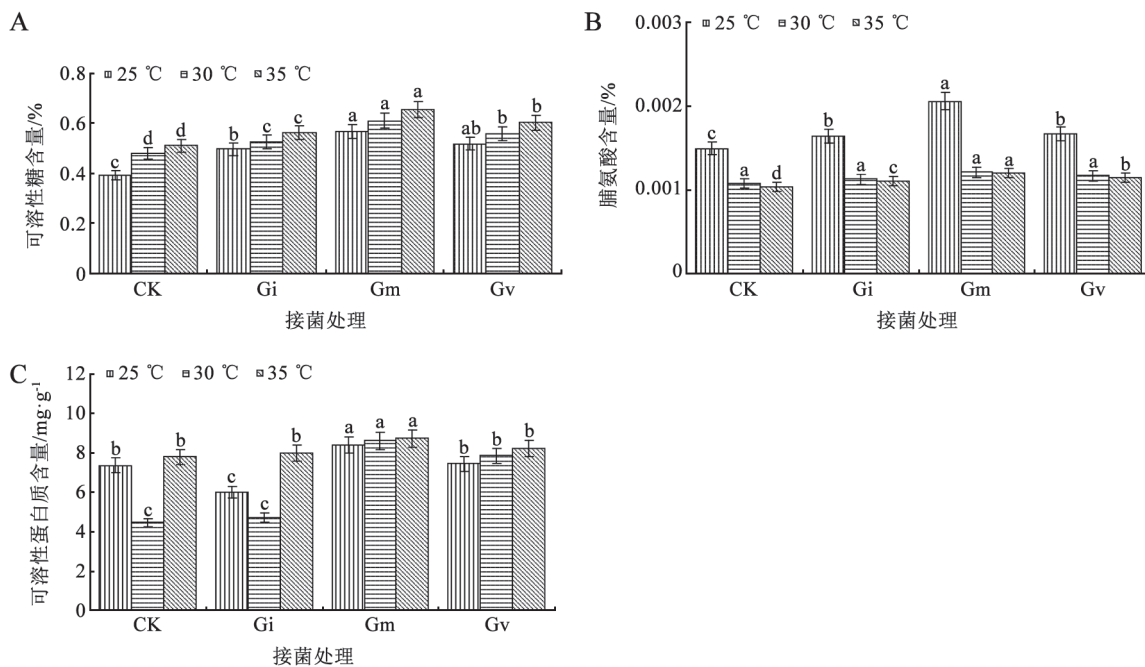


图4 不同温度处理下AM真菌对生菜叶片内渗透调节物质的影响

Fig.4 Effect of AM fungi on osmotic adjustment substances in leaves of lettuce under different temperatures

摩西球囊霉、地表球囊霉和根内球囊霉的生菜叶片可溶性糖含量分别比对照增加28.3%、18.2%和10% (图4)。

随温度升高, 接种AM真菌与不接种对照生菜叶片中可溶性蛋白的含量变化不同, 接种摩西球囊霉的生菜在3个温度处理下可溶性蛋白含量均显著高于对照, 分别比对照提高14% (25 °C)、93% (30 °C)和12% (35 °C) (图4)。

表1 温度和AM真菌对生菜生理指标影响的方差分析

Table 1 Variance analysis of temperature and AM fungi on the physiological index in lettuce

| | SOD | POD | CAT | MDA | 电导率 | 脯氨酸 | 根系活力 | 叶绿素 | 可溶性糖 | 可溶性蛋白 |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 温度 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| AM真菌 | 0.068 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 温度×AM真菌 | 0.675 | 0.328 | 0.074 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.108 | 0.173 | 0.000 |

数据经双因素分析(邓肯氏复极差测验), $P \leq 0.05$ 、 $P \leq 0.01$ 和 $P > 0.05$ 分别代表差异显著、极显著和不显著。

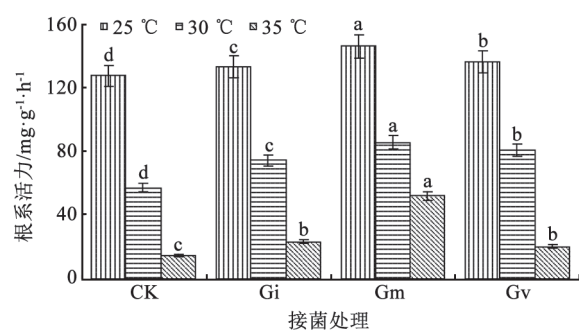


图5 不同温度处理下AM真菌对生菜根系活力的影响
Fig.5 Effect of AM fungi on the root activity of lettuce under different temperatures

5 不同温度下AM真菌对生菜根系活力的影响

随着温度升高生菜根系活力显著下降($P < 0.01$, 表1), 接种AM真菌之后, 生菜根系活力显著高于对照。不同菌株与生菜根系互作效应不同, 摩西球囊霉对生菜根系活力影响最显著, 尤其是35 °C高温下生菜根系活力比对照高255.5%, 而地表球囊霉和根内球囊霉分别比对照高38.7% (35 °C)和58.1% (35 °C) (图5)。

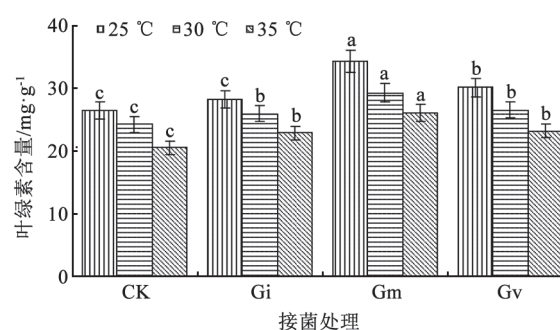


图6 不同温度处理下AM真菌对生菜叶片内叶绿素含量的影响
Fig.6 Effect of AM fungi on chlorophyll content in leaves of lettuce under different temperatures

6 不同温度下AM真菌对生菜叶片内叶绿素含量的影响

随着温度的升高生菜叶片叶绿素含量逐渐降低(图6), 而接种AM真菌的生菜叶片叶绿素含量显著高于不接种对照。在30 °C和35 °C高温下, 接种摩西球囊霉的叶片叶绿素含量最高, 分别比对照提高20.8%和27.2%, 其次为Gv和Gm处理。

7 温度和AM真菌对生菜生理指标的方差分析

温度对生菜各项生理指标影响均达到极显著水平; 接种AM真菌对生菜SOD活性的影响不显著, 对其他各项生理指标影响均达到极显著水平。温度与接种AM真菌交互作用对生菜各项生理指标影响显著性差异不同, 对MDA、电导率、脯氨

酸、根系活力和可溶性蛋白影响达到极显著水平, 但是对SOD、POD、CAT、叶绿素和可溶性糖影响不显著(表1)。

讨 论

AM真菌侵染植物与植物根系形成菌根, 而侵染率的高低与其促进植物生长等功能具有直接关系(田蜜等2013; 贺忠群等2006); 但是侵染率的高低对植物抗逆性影响目前未见统一说法, 这可能是不同菌种对不同植物在逆境下的防效不同所致(Zhu等2011; 叶佳舒等2013; 郭绍霞等2013)。本试验接种AM真菌的对生菜根系的侵染率在正常温度下摩西球囊霉侵染率最高, 达70%, 而摩西球囊

霉提高生菜耐热性效果最显著,这可能与其较高的侵染率有关,值得进一步研究,以期评价筛选高效菌种提供技术依据。

众所周知,AM真菌可以提高植物抗高温能力(田蜜等2013;陈笑莹等2013;李思龙等2009;韩婷婷等2011;Zhu等2011)。杨晓红等(2005)认为枳壳幼苗菌根化是提高枳壳耐热能力的重要途径。从本试验结果来看,接种AM真菌显著提高了生菜叶片防御性酶SOD、POD和CAT的活性,特别是摩西球囊霉在30℃和35℃高温处理下提高生菜防御性酶活性最显著。高温逆境胁迫在引起植物活性氧自由基增加的同时启动防御系统,SOD、POD、CAT三者协调作用,共同组成植物的保护酶系统,清除植物体内活性氧,提高植物对胁迫的适应性(刘雪超等2011)。这说明AM真菌能提高生菜抗高温胁迫的能力,从而减轻高温伤害。值得一提的是,在方差分析表中数据表明接种菌根真菌对SOD的活性影响不显著,这是因为只有35℃下SOD活性在对照与接菌处理之间是显著的,而30℃下对照与接菌处理之间是不显著的,25℃下只有接种摩西球囊霉和地表球囊霉处理与对照差异显著,因此在双因素分析表中数据显示整体接菌对SOD的活性影响不显著,说明只有在一定高温下菌根真菌对生菜叶片内SOD活性影响显著。

植物在受到胁迫时体内活性氧的产生和清除的动态平衡遭到破坏,使得活性氧的大量积累,引起膜蛋白和膜内脂的变化,导致电解质渗透率和MDA含量增加(际少裕1989;Martineau和Specht 1979;徐向东等2010)。本试验发现在35℃下接种AM真菌的生菜叶片细胞的电导率低于对照,尤其是摩西球囊霉,在30℃、35℃处理下电导率分别比对照低21%和33%。接种AM真菌的生菜叶片中MDA的积累量均显著降低,表明接种AM真菌使生菜叶片细胞膜过氧化程度得到减缓,一定程度上提高了生菜的耐热性。接种AM真菌的生菜在3种温度下根系活力均显著高于不接种对照。说明在高温胁迫条件下AM真菌提高了生菜根系活力,减缓了高温对生菜的伤害。这可能是由于接种AM真菌后,根外菌丝对土壤养分和水分具有强大的吸收能力,改善了寄主植物营养状况和水分状况,尤其是提高组织中磷含量(Wu等2005),细胞膜磷

脂含量增加,保持膜的完整性,使膜透性降低。高温胁迫下AM真菌可通过提高生菜SOD、POD和CAT活性来减少或清除活性氧,维持细胞的正常生理功能,以适应高温逆境。由于膜脂过氧化作用涉及到多种活性氧及酶促与非酶促保护系统的平衡(Ren等2012),因此,接种AM真菌通过减缓生菜高温对膜脂过氧化过程、降低细胞膜透性与诱导植株防御酶活性,增强了生菜的耐热性,这也支持了吴强盛和夏仁学(2005)以及陈可等(2013)的观点。

脯氨酸是一种渗透保护剂,大量研究表明,脯氨酸的积累量与植物的抗逆能力呈正相关(邱念伟等2013;Misra和Gupta 2005;Hayat等2012),本试验发现接种AM真菌的生菜叶片脯氨酸含量显著高于不接种的生菜,说明接种AM真菌缓解了高温对生菜造成的伤害。可溶性糖是调节渗透胁迫的小分子物质,是增加渗透性溶质的重要组成部分,逆境下含量升高调节体内渗透势,以适应逆境条件,其含量高低是植物重要的抗逆性生理指标(喻方圆等2004),本试验发现接种AM真菌的生菜叶片可溶性糖含量都显著高于不接种的生菜,说明接种AM真菌提高了生菜在高温下的渗透调节能力。可溶性蛋白质主要是功能蛋白酶,它的增加可以显著增强植物细胞的保水力,含量较高的其抗逆性也较强(李思龙等2009;董万鹏等2015)。而各温度处理下可溶性蛋白含量差异无规律,这可能是生菜体内可溶性蛋白含量较低缘故,这支持了谷建田等(2006)认为可溶性蛋白含量不是结球莴苣耐热性鉴定的可靠指标的观点。

叶绿素是与光合作用密切相关的最重要的色素(卢彦琦和贺学礼2008),研究发现接种不同种球囊霉属(*Glomus mosseae*、*G. versiforme*、*G. intraradices*、*G. etonicatum*或*G. deserticola*)的几种作物(洋葱、草莓、辣椒、玉米和鹰嘴豆)叶片叶绿素的含量均显著增加(Garmendia等2004; Afek等1990; Borkowska 2002; Bolandnazar等2007; 陈笑莹等2013; Sohrabia等2012)。本试验中随温度升高,叶绿素含量降低,而接种AM真菌的生菜叶绿素的含量显著高于不接种对照。叶绿素含量的增加,叶片PSII实际光合效率提高(张永平等2014),从而提高耐高温能力。而关于接种AM真菌对生菜叶片光

合及叶绿素荧光的影响,有待于进一步研究。

杨晓红等(2005)认为球状巨孢球囊霉和摩西球囊霉可作为长江柑桔带柑桔耐热性菌根化育苗的重要优良菌种。摩西球囊霉和地表球囊霉是国内常见的大量繁殖的菌剂,本文的研究表明摩西球囊霉在生菜提高耐热性方面效果最显著,因此,摩西球囊霉可作为生菜提高耐热性菌根化育苗的优良菌种。

参考文献

- 陈可,孙吉庆,刘润进,李敏(2013). 丛枝菌根真菌对西瓜嫁接苗生长和根系防御性酶活性的影响. 应用生态学报, 24 (1): 135~141
- 陈笑莹,宋凤斌,朱先灿,刘胜群,柏会子(2013). 高温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响. 华北农学报, 28 (2): 108~113
- 董万鹏,罗充,龙秀琴,胡静,李燕(2015). 低温胁迫对西番莲抗寒生理指标的影响. 植物生理学报, 51 (5): 771~777
- 谷建田,范双喜,张喜春,韩良玉(2006). 结球莴苣耐热性鉴定方法的研究. 华北农学报, 21 (增刊): 99~103
- 郭绍霞,徐丽娟,李敏(2013). AM真菌对牡丹实生苗耐盐性的影响. 中国农学通报, 29 (4): 123~129
- 韩婷婷,王维华,郭绍霞(2011). AM真菌对彩叶草光合特性的影响. 青岛农业大学学报(自然科学版), 28 (1): 9~12
- 贺忠群,贺超兴,张志斌,邹志荣,王怀松(2006). 不同丛枝菌根真菌对番茄生长及相关生理因素的影响. 沈阳农业大学学报, 37 (3): 308~312
- 际少裕(1989). 膜脂过氧化与植物逆境胁迫. 植物学通报, 6 (4): 211~217
- 刘润进,陈应龙(2007). 菌根学. 北京: 科学出版社, 386~387
- 李聪,贺超兴,闫妍,李衍素,于贤昌, Vosatka MJM (2014). 不同时期接种AM真菌对大棚黄瓜产量及品质的影响. 中国蔬菜, 2014 (8): 21~24
- 李思龙,张玉刚,陈丹明,马健,郭绍霞(2009). 丛枝菌根对高温胁迫下牡丹生理生化的影响. 中国农学通报, 25 (7): 154~157
- 卢彦琦,贺学礼(2008). AM真菌和施氮量对白术光合色素的影响. 西北农业学报, 17 (4): 314~316
- 刘雪超,齐红岩,陈岩,华利静(2011). AgNO₃对网纹甜瓜试管苗糖代谢及抗氧化酶活性的影响. 植物生理学报, 47 (3): 286~292
- 邱念伟,杨翠翠,付文诚,胡胜,周峰(2013). 高盐和高温胁迫下外源脯氨酸对PSII颗粒的保护作用. 植物生理学报, 49 (6): 586~590
- 孙吉庆,刘润进,李敏(2012). 丛枝菌根真菌提高植物抗逆性的效应及其机制研究进展. 植物生理学报, 48 (9): 845~852
- 田蜜,陈应龙,李敏,刘润进(2013). 丛枝菌根结构与功能研究进展. 应用生态学报, 24 (8): 2369~2376
- 王学奎(2006). 植物生理生化实验原理和技术(第2版). 北京: 高等教育出版社,
- 吴强盛,夏仁学(2005). AM真菌对柑橘嫁接苗/红肉脐橙抗旱性的影响. 应用生态学报, 16 (5): 865~869
- 徐向东,孙艳,孙波,张坚,郭晓芹(2010). 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响. 应用生态学报, 21 (5): 1295~1300
- 喻方圆,徐锡增, Guy RD (2004). 水分和热胁迫对苗木针叶可溶性糖含量的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 28 (5): 1~5
- 杨晓红,曾斌,李新国,孙中海(2005). AM真菌种间差异对枳实生长及耐热性效应的研究. 菌物学报, 24 (4): 582~589
- 叶佳舒,李涛,胡亚军,郝志鹏,高彦征,王幼珊,陈宝冬(2013). 干旱条件下AM真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响. 生态学报, 33 (4): 1080~1090
- 张永平,范红伟,杨少军,陈幼源(2014). 外源水杨酸对甜瓜幼苗生长、光合作用和活性氧代谢的缓解效应. 植物生理学报, 50 (10): 1555~1562
- 郑义艳,冯固(2006). 盐胁迫和AM真菌对生菜生长的效应. 土壤学报, 43 (6): 966~971
- Abdel-Latef AAH, He CX (2011). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress. Acta Physiol Plant, 33 (4): 1217~1225
- Afek U, Rinaldelli E, Menge JA, Johnson ELV, Pond E (1990). Mycorrhizal species, root age, and position of mycorrhizal inoculum influence colonization of cotton, onion, and pepper seedlings. J Am Soc Hort Sci, 115: 938~942
- Bolandnazar SA, Neyshabouri MR, Aliasgharzad N, Chaparzadeh N (2007). Effects of mycorrhizal colonization on growth parameters of onion under different irrigation and soil conditions. Pak J Biol Sci, 10: 1491~1495
- Borkowska B (2002). Growth and photosynthetic activity of micro-propagated strawberry plants inoculated with endomycorrhizal fungi (AMF) and growing under drought stress. Acta Physiol Plant, 24: 365~370
- Heinemeyer A, Fitter AH (2004). Impact of temperature on the arbuscular mycorrhizal (AM) symbiosis: growth responses of the host plant and its AM fungal partner. J Exp Bot, 55 (396): 525~534
- Hayat S, Hayat Q, Alyemeni MN, Wani AS, Pichtel J, Ahmad A (2012). Role of proline under changing environments: a review. Plant Signal Behav, 7 (11): 1~11
- Garmendia I, Goicoechea N, Aguirreolea J (2004). Antioxidant metabolism in asymptomatic leaves of Verticillium-infected pepper associated with an arbuscular mycorrhizal fungus. Phytopathol, 152: 593~599
- Garmendia I, Manga VJ (2014). Comparative study of substrate-based and commercial formulations of arbuscular mycorrhizal fungi in romaine lettuce subjected to salt stress. J Plant Nutr, 37 (11): 1717~1731
- Li Y, Chen YL, Li M, Lin XG, Liu RJ (2012). Effects of arbuscular mycorrhizal fungal communities on soil quality and growth of cucumber seedlings in a greenhouse soil continuously planted to cucumber. Pedosphere, 22: 79~87
- Martineau JR, Williams JH, Specht JE (1979). Temperature tolerance in soybeans. II. Evaluation of segregating populations for membrane thermostability. Crop Sci, 19: 75~81
- Marulanda A, Azcón R, Ruiz-lozano JM (2003). Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativa* plants under drought stress. Physiol Plant, 119: 526~533

- Misra N, Gupta AK (2005). Effect of salt stress on proline metabolism in two high yielding genotypes of green gram. *Plant Sci*, 169: 331~339
- Ren LX, Lou YS, Zhang N, Zhu XD, Hao WY, Sun SB, Shen QR, Xu GH (2012). Role of arbuscular mycorrhizal network in carbon and phosphorus transfer between plants. *Biol Fert Soils*, 49 (1): 3~11
- Ruíz-lozano JM, Perálvarez MC, Azcón R, Aroca R (2011). The application of a treated sugar beet waste residue to soil modifies the responses of mycorrhizal and non mycorrhizal lettuce plants to drought stress. *Plant Soil*, 346: 153~166
- Serfoji P, Rajeshkumar S, Selvaraj T (2010). Management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita* on tomato cv Pusa Ruby by using vermicompost, AM fungus, *Glomus aggregatum* and mycorrhiza helper bacterium, *Bacillus coagulans*. *J Agric Technol*, 6: 37~45
- Suravoot Y, Nuttawuth P, Suriyan C, Kanyaratt S (2013). Arbuscular mycorrhiza improved growth performance in *Macadamia tetraphylla* L. grown under water deficit stress involves soluble sugar and proline accumulation. *Plant Growth Regulation*, 69 (3): 285~293
- Sohrabia Y, Heidaria G, Weisanya W, Ghasemi-Golezanib K, Mohammadi K (2012). Some physiological responses of chickpea cultivars to arbuscular mycorrhiza under drought stress. *Russ J Plant Physiol*, 59: 708~716
- Vicente-Sanchez J, Nicolas E, Pedrero, F, Alarcon JJ, Maestre-Valero JF, Fernandez F (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates detrimental effects of saline reclaimed water in lettuce plants. *Mycorrhiza*, 24 (5): 339~348
- Wu SC, Cao ZH, Li ZG, Cheung KC, Wong MH (2005). Effect of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: A greenhouse trial. *Geoderma*, 125:155~156
- Zhu XC, Song FB, Liu SQ, Liu TD (2011). Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on photosynthesis and water status of maize under high temperature stress. *Plant Soil*, 346 (1-2): 189~199