

VA 真菌对构树 (*Broussonetia papyrifera*) 幼苗物质代谢的影响

何跃军¹, 钟章成^{2,*}, 刘济明¹, 刘锦春², 金 静³, 李宗峰²

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715; 3. 南京大学国际地球科学系统研究所 南京 210093)

摘要:石灰岩地区因其干旱瘠薄的生境特征, 植被难以恢复, 然而仍有一些适生植物如构树生长良好, 原因可能与根际微生物有关。就石灰岩适生植物构树(*Broussonetia papyrifera*)进行菌根真菌摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)、地表球囊霉(*Glomus versiforme*)、透光球囊霉(*Glomus diaphanum*)的单独接种、混合接种和不接种处理, 幼苗生长 3 个月后测定其生理指标, 以期从代谢水平上了解植物对 VA 真菌的生理响应。结果表明: 构树幼苗叶片可溶性糖、蛋白质、脯氨酸和叶绿素均较非接种处理有不同程度的显著提高, 丙二醛含量则较对照降低。各代谢物质存在一定相关性。在物质代谢水平上, 构树幼苗对不同 VA 真菌处理有不同的生理响应。宿主植物和 VA 真菌之间存在一定的相互选择。接种 VA 真菌提高了石灰岩适生植物构树的抗逆性。

关键词: VA 真菌; 构树; 物质代谢

文章编号: 1000-0933(2007)12-5455-08 中图分类号: Q948.12*2.3 文献标识码: A

The effects of VA mycorrhizal fungus inoculation on material metabolisms of *Broussonetia papyrifera* seedlings

HE Yue-Jun¹, ZHONG Zhang-Cheng^{2,*}, LIU Ji-Ming¹, LIU Jin-Chun², JIN Jing³, LI Zong-Feng²

1 Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Life Science School of Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China

3 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5455 ~ 5462.

Abstract: It's difficult to restore vegetation in limestone area, due to the severe and thin soil layer of the limestone habitat. However, some plants adaptive to limestone soil like *Broussonetia papyrifera* grow in this habitat, the reason maybe that these plants possess rhizospher microbes like Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus. In this paper, an experiment was conducted on *Broussonetia papyrifera* seedling by disposals of single inoculation, co-inoculation and non-inoculation using three mycorrhizal fungus, which are *Glomus. mosseae*, *Glomus. versiforme* and *Glomus. diaphanum*. Some physiological indexes of leaves are measured to study the metabolism response in this experiment after 3 months. The results show that the concentrations of soluble sugar, protein, proline and chlorophyll a and b are significantly increase in the leaves of the host plants in inoculation group compared with none-inoculation. However, the malondialdehyde concentration decrease or remain equivalently in inoculation disposal. All the substances have certain correlation at physiological metabolism. Even as metabolite, there are different physiologically response in different inoculation disposals by AMF. The interactional selection

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370279, 30670334)

收稿日期: 2006-09-24; 修订日期: 2007-03-28

作者简介: 何跃军(1977~), 男, 贵州习水人, 硕士, 主要从事植物种群生理生态学研究. E-mail: hyj1358@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zzhong@swnu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30370279, 30670334)

Received date: 2006-09-24; **Accepted date:** 2007-03-28

Biography: HE Yue-Jun, Master, mainly engaged in physiological ecology of plant population. E-mail: hyj1358@163.com

exist in host plants and AMF. It could be conclude that inoculation AMF could enhance the stress tolerance of *Broussonetia papyrifera* seedling growing in limestone habitat.

Key Words: VA fungus ; *Broussonetia papyrifera* ; Material metabolism

菌根研究是当前生态研究的热点。VA 真菌 (Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus, 以下简称 VAMF) 是一类能够与大多数植物形成共生关系的真菌。菌根与土壤的交互作用形成菌根际, 它由有生命的真菌、植物和非生命的土壤形成微生态系统。关于 VAMF 能够促进植物生长, 改变根际环境已不少报道^[1~3], 尽管在石灰岩土壤上生长的植物发现了 VAM 真菌的存在^[4,5], 但对该生境下的菌根形成及其生态学意义尚缺乏充分的认识和研究。石灰岩因其特殊的生境 (土层干旱瘠薄, 水分亏缺), 该地区植被在自然演替过程中难以恢复, 但仍有其恢复潜力^[6]。干旱地区菌根的作用主要表现为增加植物抗旱性和提高水分的传递速率, VA 菌根与宿主植物之间共生生活而达到高度平衡的联合体, 具有扩大宿主植物根的吸收面积, 增加宿主植物对磷及其他养分的吸收, 提高宿主植物的抗逆性等有益作用^[7]。石灰岩地区植被恢复除了与该地区树种本身具有较发达的根系, 叶片具蜡质层等生物学特性而具有抗干旱耐瘠薄的生态学特性有关外, 植物在瘠薄的土壤上生长是否与根际微生物有关? 是否与真菌对植物侵染后形成的特殊共生关系有关? 菌根是否是该地区植物演替恢复的重要对策? 要解决以上问题, 需要进行石灰岩基质上菌根真菌接种实验。近年来, 应用菌根促进植物生长有较多的研究^[8~12], 从菌根水平上对石灰岩地区适生种群生态学研究还未见其文, 故开展石灰岩地区石漠化基质上适生种群和菌根真菌关系的生态学研究, 是石灰岩植被恢复的一条重要途径。构树是我国南方石灰岩地区广泛分布的适生物种之一, 其适合在海拔在 0 ~ 1400m 的山地及平原地区生长、年平均气温要求 6 ~ 22℃, 年均降水量 400 ~ 1600mm、喜光、耐旱瘠薄、对土壤条件的适应能力强。本实验选取石灰岩地区生长的适生植物构树进行接种实验, 测定其生理指标, 以期从代谢水平上了解 VA 真菌对植物的促进效应, 对恢复石灰岩退化生态系统具有重要的理论和实践意义。

1 实验材料

菌种采用摩西球囊霉 (*Glomus. mosseae*, GM) 由新疆的新疆韭根际分离, 约 300 个孢子/20g; 地表球囊霉 (*Glomus. versiforme*, GV) 由北京的高粱根际分离, 约 1000 个孢子/20g; 透光球囊霉 (*Glomus. diaphanum*, GD), 由新疆的水稻根际分离, 约 900 个孢子/20g (北京市农林科学院植物营养与资源研究所购得)。植物种子是 2003 年 8 月采于贵阳花溪石灰岩山上同一植株的构树 (*Broussonetia papyrifera*)。土壤基质是于 2003 年 11 月取自重庆北碚鸡公山石灰岩山上石灰土。其样地土壤剖面理化性质如下表:

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physico-chemical characteristics of soil on the experiment

pH	有机质 Organic contaminant (%)	碱解氮 Alkali hydrolysable nitrogen (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	速效磷 Available phosphorus (mg/kg)	交换性钙 Exchangeable calcium (mg/kg)	全钾 Total potassium (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	水分系数 Water coefficient
6.815	2.674	68.355	108.415	1.7615	2326.4	14.625	0.4655	1.337	0.943

2 实验方法

实验分接种组 (M+) 和对照组 (M-), 每一个组内分单独接种 (Single-inoculation) 和混合接种 (Co-inoculation, CI) 处理, 每个处理 5 个重复。

2.1 灭菌

种子灭菌是将构树种子在 10% 的 H₂O₂ 内浸泡 20 min, 用无菌水冲洗 3 次。土壤灭菌是将野外取回的石灰土喷 5% 苯酚溶液 4 ml/m² 后在高压灭菌锅压力 0.14 MPa, 124 ~ 126℃ 连续灭菌 1h 后作为幼苗培养基质

备用。同样条件将塑料花盆高压灭菌 30 min。将灭菌基质称取 1.5 kg/盆装入规格为 190 mm × 150 mm 的塑料花盆内,备用。

2.2 接种

接种组(M+) ①混合接种,等量称取以上菌剂 GM、GV、GD 共 20g 均匀混合,平铺于已装盆的灭菌土表面,播入灭菌构树种子,再放入一层疏松的表土覆盖种子及菌剂(一方面使种子保湿、另一方面隔离外界杂菌的污染)。每个处理各 5 个重复,该接种处理为 CI。②单独接种,以同样的方法称取以上菌种各 20g 于已装土的备用盆内,均匀铺平后放入构树种子,然后放上疏松表土,每个菌种处理 5 个重复,该接种处理为 SI。①、②处理后放入培养室,每天用无菌水浇注,待幼苗出土后一个月换用蒸馏水。

对照组 CK(M-) 该组不接种 VA 菌。①混合接种对照,等量称取以上菌剂 GM、GV、GD 共 20g 均匀混合(共 20g)进行 0.14 MPa, 124 ~ 126 °C 灭菌 20 min 后均匀铺于灭菌土上,同样称取等量混合菌剂共 20g 加入 200 ml 无菌水浸泡 10 min 后用双层滤纸过滤,取其滤液 10 ml 加于灭菌接种物上以保证除了目的菌种以外的其他微生物的区系一致,然后播入灭菌构树种子,覆盖灭菌土以作为混合接种对照处理。每个处理 5 个重复。②单独接种对照,同样称取各菌种 20 g 进行 0.14 MPa, 124 ~ 126 °C 灭菌 20 min 后均匀铺于灭菌土上,再将各未灭菌菌剂称取 20 g 分别加入 200 ml 无菌水浸泡 10 min 后用双层滤纸过滤,分别取其滤液 10 ml 加于灭菌接种物上,然后播入灭菌构树种子,覆盖灭菌土以作为单独接种对照。每个处理 5 个重复。与前同样条件培养。

2.3 指标测定

幼苗培养 3 个月后进行生长及生理指标测定。脯氨酸测定采用茚三酮比色法,可溶性糖的测定采用蒽酮比色法,蛋白质测定采用微量凯氏定氮法,脯氨酸测定采用茚三酮比色法,丙二醛测定采用硫代巴比妥酸比色法,光合色素测定采用浸提法^[13,14]。

2.4 菌根侵染率的测定

酸性品红染色,然后用感染长度计算法测定菌根侵染率^[15]。

2.5 数据处理:

SPSS 11.0 统计分析软件,EXCEL

3 结果与分析

3.1 VA 接种处理对构树幼苗菌根侵染率的影响

幼苗生长 3 个月后测定其菌根侵染率结果见表 2。在 GM、GV、GD 和 CI 4 种处理中,侵染率最高为 CI 混合接种处理,达到 83.41%,最低为透光球囊霉 68.05%。而在 M- 未接种处理中,各处理侵染率均为 0。

3.2 可溶性糖

可溶性糖是植物体内一种重要的渗透调节物质,可溶性糖含量的增加有利于维持细胞膨压,提高植株抗旱性^[16]。由图 1 可知,石灰岩适生植物构树在接种 3 种不同 VA 真菌(GM、GV、GD)处理后,植株可溶性糖含量均具有不同程度的提高,较对照而言,构树接种组中以混合接种效应最为明显,其中构树每 1 g 叶片可溶性糖为 39.11 mg,提高了 45.33%;接种效应最低为地表球囊霉,每 1 g 叶片可溶性糖含量为 21.60mg,较对照提高了 161.82%。透光球囊霉可溶性糖含量接种组 29.12mg/g 鲜叶,较对照提高 178.13%;摩西球囊霉接种处理 23.99mg/g 鲜叶重,对照 8.89mg/g 鲜叶重,提高了 169.85%。混合接种带来的菌根效应较单独接种高,其次是透光球囊霉,摩西球囊霉和地表球囊霉。说明就可溶性糖这一水平上混合接种比较单独接种更能提高植株的抗旱能力。统计分析表明,接种组与相应非接种组差异性显著($p < 0.05$)或极显著(地表球囊霉 $p = 0$),而接种组中,混合接种处理较其他单独接种可溶性糖含量差异显著。该实验说明 VA 真菌能够刺激宿主

表 2 不同处理对构树幼苗侵染率的影响

Table 2 The effects of Colonization rate on *Broussonetia papyrifera* seedlings in different inoculating disposals

处理 Disposals	侵染率 Colonization rate(%)	
	M +	M -
GM	76.50 ± 4.61	0
GV	71.63 ± 3.30	0
GD	68.05 ± 5.12	0
CI	83.41 ± 4.37	0

植物可溶性糖的积累,使之降低叶片水势,增强渗透调节能力,从而降低了干旱亏缺时带来的水分生理伤害。VAM 植株较 NM 植株叶中积累更高的可溶性糖,表明 VA 菌根对提高宿主植株的抗干旱能力有帮助^[17,18]。

3.3 蛋白质

由图 2 可知接种 VA 真菌后构树幼苗叶片蛋白质含量显著增加了,与王元贞研究结果一致^[19],其增加幅度分别为摩西球囊霉 38.20%、地表球囊霉 73.71%、透光球囊霉 147.27%、混合接种处理 38.59%。可溶性糖与蛋白质含量之间提高的百分比可以看出,二者变化几近一致,说明这两种物质在接种构树幼苗中生理代谢上存在了一定的相关性,这可以从表 3 得出结论。统计分析表明,接种 VA 真菌后,植株蛋白质含量较对照差异性显著,表明 VA 真菌能够提高植株叶片蛋白质的含量,一般认为蛋白质合成减弱,降解增强将促进器官的衰老进程,或是诱导器官衰老的一种因素^[20]。各接种处理之间构树叶片蛋白质含量差异不显著,表明在延缓植株衰老这一水平上 4 种处理没有差别。但较非接种组而言,接种 VAMF 后能够延缓构树植株的衰老进程,提高其抗旱性。

3.4 脯氨酸

脯氨酸是植物体内渗透调节物质,脯氨酸的含量可作为植物生理抗逆性指标。图 3 可知构树幼苗叶片在 M+ 与 M- 之间脯氨酸含量存在极显著差异,各个菌种对接种植物构树脯氨酸的提高效应有所不同,其中摩西球囊霉处理 3.15mg/g 干叶重,对照处理 0.60mg/g 干叶重,提高 425.00%;地表球囊霉 2.52mg/g 干叶重,对照 0.56mg/g 干叶重,提高 350.00%,透光球囊霉 3.09mg/g 干叶重,对照 0.87mg/g 干叶重,提高了 255.17%,混合接种处理最大为 3.43mg/g 干叶重,对照 1.72mg/g 干叶重,提高 99.42%。脯氨酸是一种逆境反应物质,水分胁迫条件下会大量积累,然而在没有水分胁迫环境下,脯氨酸含量的多少可做为植物抗旱性的指标。植株体内脯氨酸含量越高,说明越能够从环境中吸取水分供植株生长之用。本实验是在正常供水条件下进行的,而指标测定时候是利用干物质材料测定的,各接种处理与非接种处理之间差异性均达到显著水平,表明通过对石灰岩适生植物构树接种 VA 真菌后能够增强宿主植物脯氨酸的积累,间接表明植株的抗旱潜力得到提高。石灰岩干旱瘠薄的生境特征决定了植被的难恢复性,这些物种能够在石灰岩地区存活除了与他们本身具有的生物学特性有关外,可能与其生境中的菌根真菌有较大的关系,才能抵制石灰岩水分亏缺的干旱生境。本实验中石灰岩树种在接种 AMF 后其脯氨酸含量增高,说明植株抗旱性增强。

3.5 丙二醛

植物器官衰老或在逆境下遭受伤害,往往发生膜脂过氧化作用。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的最终产

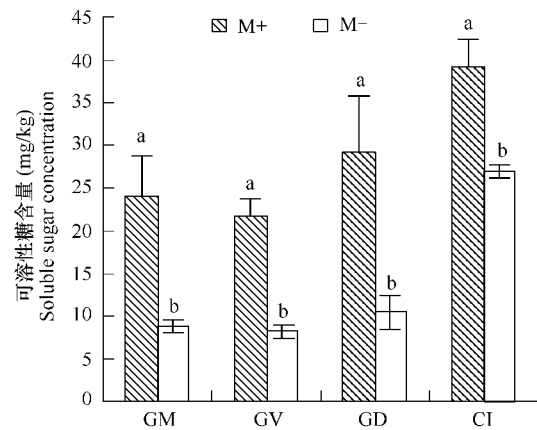


图 1 VA 真菌对构树可溶性糖含量的影响

Fig. 1 The effects of VA fungus to soluble sugar concentration of *Broussonetia papyrifera*

其中不同字母表示某一 VA 真菌处理的 M+ 与 M- 之间差异性显著,相同字母表示的 M+ 与 M- 之间无显著差异 ($P < 0.05$)

The different letters indicate significant difference between the M+ and M- at $P < 0.05$, while the same don't differ significantly using certain VAMF disposal,下同 the same below

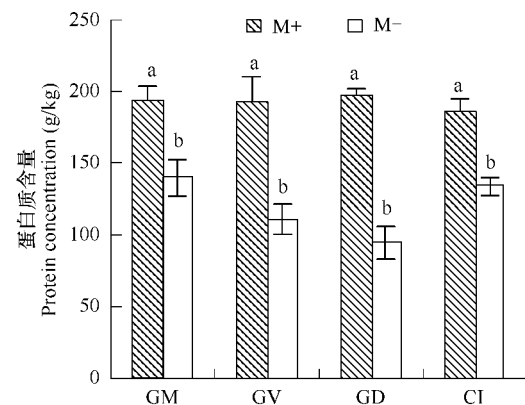


图 2 VA 真菌对构树叶蛋白质含量的影响

Fig. 2 The effects of VA fungus to protein concentration of *Broussonetia papyrifera*

物,其含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度。MDA 从膜上产生的位置释放后,可以与蛋白质、核酸反应,改变这些大分子的构型,或使之产生交联反应,从而散失功能,还可以使纤维素分子的桥键松弛,或抑制蛋白质的合成。因此 MDA 的积累可能对膜和细胞造成一定的伤害^[14]。图 4 表明接种 VA 真菌后,构树幼苗植株叶片 MDA 含量降低了,而在透光球囊霉中接种与非接种处理 MDA 含量相当每克叶片含量为 0.03047 μmol 和 0.03055 μmol ,二者没有差异性。摩西球囊霉接种处理 1g 叶片 MDA 含量分别为 0.02854 μmol 和 0.03683 μmol ,降低了 47.20%;接种地表球囊霉分别为 0.02758 μmol 和 0.03683 μmol ,降低了 33.54%;而混合接种处理下为 0.03968 μmol 和 0.04704 μmol ,降低 18.62%。统计分析表明摩西球囊霉处理与其对照有显著差异($P=0.026$),其余接种与非接种处理没有显著差异,但有较大影响。说明摩西球囊霉更能降低宿主植株的脂膜过氧化伤害作用。总体上分析,VA 真菌降低了构树植株叶片的 MDA 含量,表明 VA 真菌降低了植株衰老进程中脂膜过氧化引起的植株伤害作用,这与王元贞研究结果一致的^[19]。

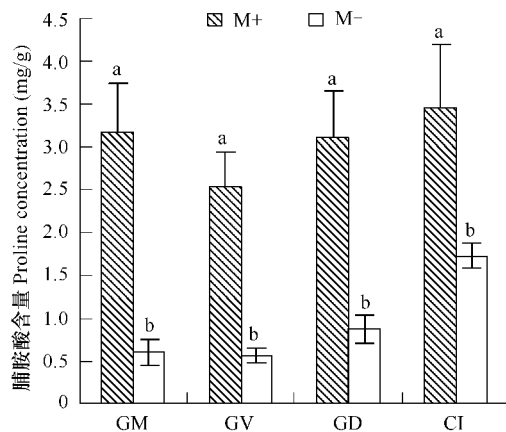


图 3 VA 真菌对构树脯氨酸含量的影响

Fig. 3 The effects of VA fungus to proline concentration of *Broussonetia papyrifera*

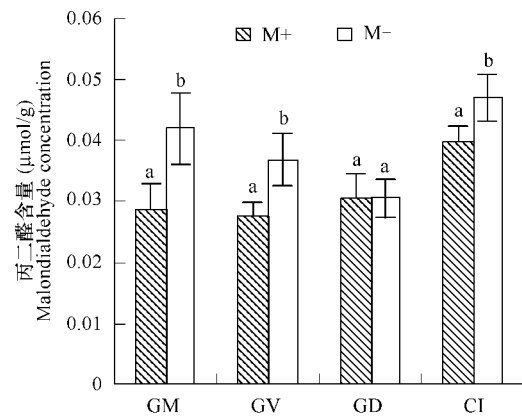


图 4 VA 真菌对构树含量的影响

Fig. 4 The effects of VA fungus to malondialdehyde concentration of *Broussonetia papyrifera*

3.6 VA 真菌对构树幼苗光合色素的影响

植物以叶绿素为载体进行光合作用,叶绿素含量的高低主要影响了植物光合作用。对构树的 chl a、chl b 测定后均有不同程度的增加,其增加的量因不同的 VA 处理而不同。在摩西球囊霉和混合接种处理下,VA 菌根真菌对构树的叶绿素贡献较大,Chl a 分别提高了 67.09% 和 89.16%。Chl b 分别提高了 54.52% 和 60.73%。以上 4 种接种条件下,磨西球囊霉,地表球囊酶和混和接种处理与其对应的 CK 组在 chl a、chl b 上差异显著,而透光球囊霉对构树叶绿素贡献相对较小,差异无显著(表 3)。叶绿素 a 与叶绿素 b 之间呈极显著相关关系($r=0.987, p=0.000$)(表 4)。说明了不同的菌种对不同的植物在叶绿素贡献上存在区异,进而反映在接种处理的光合水平上。

表 3 接种不同 VA 真菌对构树幼苗叶绿素含量的影响(mg/g 鲜叶重)

Table 3 Inoculated different VA fungus' effects on chlorophyll of *Broussonetia papyrifera* seedlings(mg/g weight of leaf)

处理 Disposals		GM	GV	GD	CI
叶绿素 a Chl a	M +	6.00 a	4.59 a	4.22 a	5.87 a
	M -	3.59 b	3.21 b	3.65 b	3.10 b
叶绿素 b Chl b	M +	1.97 a	1.57 a	1.39 a	1.99 a
	M -	1.27 b	1.21 b	1.36 a	1.24 b

3.7 VA 真菌处理下各代谢物质相关性分析

由表 4 看出,丙二醛的含量与叶片组织中蛋白质,脯氨酸及光合色素(叶绿素 a 和叶绿素 b)含量均呈负

相关,而与可溶性糖呈正相关,但相关性不显著。可溶性糖与蛋白质($P=0.045$)和脯氨酸($P=0.002$)的含量显著正相关。蛋白质与脯氨酸极显著相关($P=0.002$),与叶绿素 a 显著相关($P=0.032$)。脯氨酸与叶绿素 a、叶绿素 b 显著相关($P=0.012$ 和 0.018)。表明这些物质在生理代谢途径的合成与降解有一定关系,以应变干旱或其他逆境带来的生理伤害。

表 4 构树幼苗叶片各代谢物质相关分析

Table 4 The correlation on leaves metabolism substances of *Broussonetia papyrifera* seedlings

代谢物质 Substances	丙二醛 Malondialdehyde	可溶性糖 Soluble sugar	蛋白质 Protein	脯氨酸 Proline	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b
丙二醛 Malondialdehyde	1.000	0.061 0.885 8	-0.363 0.377 8	-0.337 0.414 8	-0.423 0.296 8	-0.342 0.406 8
可溶性糖 Soluble sugar		1.000	0.718 * 0.045 8	0.898 ** 0.002 8	0.628 0.095 8	0.648 0.082 8
蛋白质 Protein			1.000	0.898 ** 0.002 8	0.451 * 0.032 8	0.678 0.065 8
脯氨酸 Proline				1.000	0.824 * 0.012 8	0.798 * 0.018 8
叶绿素 a Chl a					1.000	0.987 ** 0.000 8
叶绿素 b Chl b						1.000

* $P < 0.05$ 差异显著 Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed); * * $P < 0.01$ 差异显著 Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

4 讨论

VA 菌根真菌对宿主植株的影响首先应该反映在植株的代谢机制上。本实验中石灰岩适生种群构树接种 VA 真菌后,对其幼苗叶片可溶性糖、脯氨酸和蛋白质含量具有显著增强效应。但因不同的菌种对构树幼苗的影响也有一定的差异。这与菌种的生物学特性以及他们与宿主植株之间的亲和性有一定关系,这种亲和性可以通过 VA 真菌与宿主植物构树之间的侵染情况的不一致性得到证实,该结果与文献一致^[21~23],表明植物对不同的 VA 真菌的依赖性是不一样的,它们之间存在一定的相互选择。干旱条件下的 VAM 植株总蛋白浓度比 NM(非接种)植株一致地高,被认为是有益于 VA 植株的抗旱效应^[17,18,24]。接种 VA 真菌的植株叶中也出现较非接种植株更高的脯氨酸浓度,被认为是有利于接种 VA 植株的耐旱性,是更有效地渗透胁迫适应^[25]。水分胁迫下用 VA 菌根菌单独接种甘蔗处理显著提高了蔗叶的硝酸还原酶活性,促进了蔗株 N、P、K 的吸收和脯氨酸的积累,提高了叶缘水含量以及生物学产量^[26]。由于菌丝体在土壤中不断的进行复制和扩增,所需要的物质和能量主要来自其宿主植物,菌根植物必然对其自身的物质和能量进行再分配和运输,并通过增加叶片光合产物来调节,宿主植物通过增加光合作用的载体叶绿素的量来增大对光的捕获,进而增加光合产物以维持自身生理代谢和菌丝在土壤系统中的扩大繁殖所需的物质和能量,光合产物主要是碳水化合物中的糖分,因而接种 VA 真菌增加了可溶性糖的含量。轻度水分胁迫下,内生真菌可使宿主植物的可溶性糖含量增加,以增强宿主植物的渗透调节能力^[27]。可溶性糖、脯氨酸,均是渗透调节物质,植株在接种后这些物质的量增加了,表现了更强的渗透适应,说明 VA 菌根真菌有助于这些物质在植株叶片中的积累,细胞内积累的物质增加,降低了细胞水势,细胞内外渗透势差增大,使得外界水分有利于向细胞内扩增,进而提高了植物的抗旱性。

接种 VA 真菌后,宿主植物在生理代谢上加强,如可溶性糖、脯氨酸以及蛋白质质量的积累,VA 植株表现了更强的渗透适应,由于构树是石灰岩地区干旱生境中的适生植物,这些物质的积累有利于宿主植物的渗透调

节,以维持干旱条件下水分亏缺的影响,这可能是特殊立地生境下植株的抗旱代谢途径。未接种处理本身可能就是一种人为“逆境”,其生长植株在“逆境”中丙二醛含量较接种 VA 处理要高可以说明这一点。由于营养物质在体内的积累,VA 植株叶片在光合生理上表现出增大 Chl a 和 Chl b,从而表现出光合能力的增强,这在本实验另文中得以体现。光合能力增加,使得植株体内糖分等物质得以积累,生理上表现在可溶性糖等物质含量增大,而生长上以生物量及表型特征反映。宿主对不同 VA 处理侵染响应不一,表明宿主对 VA 真菌有一定的选择性。

接种 VA 真菌能够显著提高宿主植株可溶性糖、蛋白质、脯氨酸,以及光合色素 Chl a 和 Chl b 的含量,同时降低丙二醛含量,表明 VA 真菌提高了宿主植物构树的抗逆性,降低植株生长进程中由于衰老引起的脂膜过氧化。各物质在生理代谢上存在一定相关性。

References:

- [1] Huang Y, Chen Y J. Effect of rhizospheric environment of VA mycorrhizal plants on forms of Cu, Zn, Pb and Cd in polluted soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 431—434.
- [2] Feng G, Yang M Q, Bai D S, *et al.* Influence of VA mycorrhizal fungi on availability of different phosphates in calcareous soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(1): 43—48.
- [3] Feng G, Bai D S, Yang M Q, *et al.* Effects of salinity on VA mycorrhiza formation and of inoculation with VAM fungi on saline-tolerance of plants. *Chin J App Ecol*, 1999, 10(1): 79—82.
- [4] Li J P, Li T, Zhao Z W. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the hot-dry valley of Jinsha river. *Mycosystema*, 2003, 22(4): 604—612.
- [5] Lei Z P, Wang C W, Wu B Y. The application of biological preparation on afforestation by *P. tabulaeformis* and *P. orientalis*. *Journal of Beijing Forestry University*, 1991, 13(1) surpp.: 79—87.
- [6] Zhu S Q, He J X. A study on microhabitats to karst forest in Maolan. in: Zhu S Q. *Ecological research on karst forest (III)*. Guiyang: Guizhou Publishing House of Science and Technology, 2003. 38—47.
- [7] Gong M Q, Chen Y L, Zhong C L. *Mycorrhizal research and application*. Guiyang: China Forestry Publishing House, 1997.
- [8] David P Janos, Michelle S Schroeder, *et al.* Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi enhances growth of *Litchichinensis* Sonn. trees after propagation by air-layering. *Plant and Soil*, 2001, 233: 85—94.
- [9] Gehring Catherine A. Growth reponses to arbuscular mycorrhizae by rain forest seedlings vary with light intensity and tree species. *Plant Ecology*, 2003, 167(1): 127—139.
- [10] Yan X F, Wang Q. Effects of ectomycorrhizal inoculation on the seedling growth of *Quercus liaotungensis*. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(6): 701—707.
- [11] Yan X F, Wang Q. Effects of co-inoculation with two ecomycorrhizal fungi on *Quercus liaotungensis* seedlings. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2004, 28(1): 17—23.
- [12] He X Y, Wu Q F, Zhou Y Z. Study on the joint symbiotic association of *Robinia Pseudoacaca* and the microbion. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 78—83.
- [13] Zhang Z L, Qu W Q, *et al.* *Practical instructions of plant physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [14] Wang J Y, Ao H, *et al.*, eds. *Technology and principle of plant physiological and biochemical experiments*. Northeast Forest University Press, 2003.
- [15] Schulze E D. Air pollution and forest decline in a spruce (*Picea abies*) forest, *Science*, 1989, 244: 776—783. Smith, S. E. & D. J. Read. *Mycorrhizal symbiosis*. (2nd edition). San Diego: Academic Press, 1997. 164, 233—289.
- [16] He X L, Zhao L L, Li S X. Effects of water stress and VA mycorrhizal fungi on the growth of mongbean. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2000, 14(4): 290—294.
- [17] Subramanian K S, Charest C. Influence of arbuscular mycorrhizae on the metabolism of maize under drought stress. *Mycorrhiza*, 1995, 5: 273—278.
- [18] Subramanian K S, Charest C. Nutritional, growth, and reproductive responses of maize (*Zea mays* L.) to arbuscular mycorrhizal inoculation during and after drought stress at tasselling. *Mycorrhiza*, 1997, 7: 25—32.
- [19] Wang Y Z, Ke Y Q, Pan T G. Effects of different mycorrhizal fungi on physiological metabolism of tobacco seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 84—90.
- [20] Paull R E. Postharvest Senescence and Physiology of Leafy Vegetables. *Post News and Inf*, 1992, 1: 11—20.

- [21] Streitwolf Engel R, *et al.* Clonal growth traits two *Prunella* species and determined by co-occurring arbuscular mycorrhizal fungi from a calcareous grassland. *Ecology*, 1997, 85: 181–191.
- [22] Van D er Heijden M G A, *et al.* Different arbuscular mycorrhizal fungal species are potential determinants of plant community structure. *Ecology*, 1998, 79(6): 2082–2091.
- [23] He Z Q, He C X, Zhang Z B, *et al.* Physiological Study of Tomato Growth Effects Induced by Different Arbuscular Mycorrhizal Fungus (AMF) Strains. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3): 308–312.
- [24] Ruiz Lozano J M, Azcón R. Mycorrhizal colonization and drought stress as factors affecting nitrate reductase activity in lettuce plants. *Agric Ecosyst Environ*, 1996, 60: 175–181.
- [25] Ruiz Lozano J M, Azcón R, Hyphal contribution to water uptake in mycorrhizal plants as affected by the fungal species and water status. *Physiol Plant*, 1995, 95: 472–478.
- [26] Wang Y Z, Zhang M Q, Ke Y Q. Effects of mycorrhizal fungus on sugarcane growth under water stress. *Journal of Fujian Agricultural University (Natural Sciences Edition)*, 1994, 23(4): 383–385.
- [27] Ren A Z, Gao Y B, Wang W. Photosynthetic pigments and photosynthetic products of endophyte-infection and endophyte-free *Lolium perenne* L. under drought stress conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2): 225–231.

参考文献:

- [1] 黄艺, 陈有键. 菌根植物根际环境对污染土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 形态的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 431–434.
- [2] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎. VA 菌根真菌对石灰性土壤不同形态磷酸盐有效性的影响. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(1): 43–48.
- [3] 冯固, 白灯莎, 杨茂秋. 盐胁迫对 VA 菌根形成及接种 VAM 真菌对植物耐盐性的效应. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 79–82.
- [4] 李建平, 李涛, 赵之伟. 金沙江干热河谷(元谋段)丛枝菌根真菌多样性研究. *菌物系统*, 2003, 22(4): 604–612.
- [5] 雷增普, 王昌温, 吴炳云. 生物制剂在油松侧柏育苗造林中的应用. *北京林业大学学报*, 1991, 13(1)增刊: 80–87.
- [6] 朱守谦, 何纪星, 等. 茂兰喀斯特森林小生境特征研究. 朱守谦主编, 喀斯特森林生态学研究(Ⅲ). 贵阳: 贵州科技出版社, 2003. 38–47.
- [7] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇录. 菌根研究及应用. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [10] 阎秀峰, 王琴. 接种外生菌根对辽东栎幼苗生长的影响. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 701–707.
- [11] 阎秀峰, 王琴. 两种外生菌根真菌在辽东栎幼苗上的混合接种效应. *植物生态学报*, 2004, 28(1): 17–23.
- [12] 何兴元, 吴清风, 周玉芝. 刺槐共生菌盆栽接种试验. *林业科学*, 2002, 38(4): 78–83.
- [13] 张志良, 瞿伟菁, 主编. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [14] 王晶英, 敖红, 等编. 植物生理生化实验技术与原理. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003.
- [16] 贺学礼, 赵丽莉, 李生秀. 水分胁迫及 VA 菌根接种对绿豆生长的影响. *核农学报*, 2000, 14(4): 290–294.
- [19] 王元贞, 柯玉琴, 潘廷国. 不同类型菌根菌对烟草幼苗生理代谢的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 84–90.
- [23] 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 等. 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*, 2006—06, 37(3): 308–312.
- [26] 王元贞, 张木清, 柯玉琴, 等. 水分胁迫下菌根菌对甘蔗上的效应. *福建农业大学学报*, 1994, 23(4): 383–385.
- [27] 任安芝, 高玉葆, 王巍. 干旱胁迫下内生真菌感染对黑麦草光合色素和光合产物的影响. *生态学报*, 2005, 25(2): 225–231.