

构树 (*Broussonetia papyrifera*) 幼苗氮、
磷吸收对接种 AM 真菌的响应

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

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715 3. 西南大学生命科学学院, 重庆 400715)

摘要 对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 (*G. versiforme*)、透光球囊霉 (*G. diaphanum*) 的单独接种、混合接种和不接种处理。幼苗生长 3 个月后测定其根茎叶 N、P 含量和土壤酶活性。结果表明：接种 AM 真菌后构树幼苗生物量显著增加，植株根茎叶 N 含量较对照组显著提高，其含量为根 < 茎 < 叶。各处理中除了透光球囊霉处理的茎含量与对照差异不显著外，其余各处理含量均呈显著或极显著差异。AM 真菌对构树苗 P 的促进效应主要体现在根、茎的利用上，而叶片 P 含量除混合接种外则有所降低，但 M+ (接种处理) 与 M- (非接种处理) 间无显著差异。构树苗根茎叶等量干物质 P 含量依次为叶 > 根 > 茎。进一步研究表明，接种 AM 真菌显著提高了土壤酶活性，这种显著性主要体现在蛋白酶和碱性磷酸酶上，植株 N 含量与土壤蛋白酶和碱性磷酸酶活性有显著相关性，而 P 含量只是根部吸收与多酚氧化酶活性显著相关。结果表明，接种 AM 真菌促进了宿主植物构树生物量的积累，提高了根际土壤酶活性，增加了植株对 N、P 的吸收。

关键词 AM 真菌 构树 N、P 吸收

文章编号：1000-0933 (2007) 11-4840-08 中图分类号：Q945.1 文献标识码：A

Response of N and P absorption on *Broussonetia papyrifera* seedlings to inoculate
Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus

HE Yue-Jun¹, ZHONG Zhang-Cheng^{2 3,*}, LIU Ji-Ming¹, LIU Jin-Chun^{2 3}, JIN Jing^{2 3}, SONG Hui-Xing^{2 3}

1 Forest College, Guizhou University, Guiyang 550025, China
2 Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing 400715, China
3 Life Science College of Southwest University, Chongqing 400715, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (11) 4840 ~ 4847.

Abstract : An experiment was conducted that *Glomus mosseae*, *Glomus versiforme* and *Glomus. diaphanum* were inoculated to *Broussonetia papyrifera* seedlings with single inoculation, co-inoculation and non-inoculation. Three months later, concentrations of nitrogen and phosphorus and soil enzyme activities seedlings were measured. The results showed that nitrogen concentration of host plants was increased significantly in root, stem and leaf comparing with none-inoculated, the order was root < stem < leaf. Nitrogen concentration was significantly or extremely difference between inoculating and none disposals except for stem in treatment of *Glomus diaphanum*. AM fungus increased absorption of phosphorus in root and stem. Concentration of phosphorus in leaf decreased except for the co-inoculation plot, but was not clear in M+ and M-

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (30370279, 30670334)
收稿日期 2007-03-21 ; 修订日期 2007-08-28
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@swu.edu.cn

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

Received date 2007-03-21 ; **Accepted date** 2007-08-28

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

. The order of phosphorus absorbability was root > stem < leaf. Activities of four kinds of soil enzymes (Polyphenol oxidase , Protease , Alkaline phosphatase , Peroxide hydrogenase) increased , and activities of Protease and Alkaline phosphatase were significant difference between inoculation and none disposals. A significant correlation was found between nitrogen concentration with Protease and Alkaline phosphatase , phosphorus concentration was correlated with Polyphenol oxidase. We conclude treatments of inoculation on AM fungus increase contents of N and P host plant with biomass and soil enzyme activites.

Key Words : AM fungus ; *Broussonetia papyrifera* ; nitrogen and phosphorus absorbability

菌根研究是当前生态学研究的热点。AM 真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungus ,以下简称 AM 真菌)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 AMF 能够促进植物生长 ,改变根际环境已不少报道^[1~3]。石灰岩地貌是一种具有特殊的物质、能量、结构和功能的生态系统^[4] ,其上生长的植被一旦破坏便难以恢复^[5]。构树作为我国南方石灰岩地区生长的常见物种 ,在石灰岩生态系统植被恢复过程中起着重要作用。而石灰岩地区瘠薄的土壤上植物能够较好地生长 ,是否与植物根际微生物有关 ? 菌根是否是石灰岩系统中植物演替恢复的重要对策成为探索石灰岩生态系统植被恢复的重要问题。有人发现构树、鬼针草等石灰岩适生植物被丛枝菌根真菌所侵染^[6,7] ,但缺乏对其进一步的深入研究。由于石灰岩地区土壤侵蚀强度大 ,容易造成养分的流失 ,丛枝菌根真菌侵染植物后是否对其养分利用造成一定的影响 ,是关系到石灰岩生态系统养分循环利用和植被恢复潜力研究的重要问题。目前从菌根角度研究石灰岩地区适生种群生态学特性的文献还未见报道 ,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。近年来 ,应用菌根促进植物生长有较多的研究^[8~12] ,选取构树为研究对象 ,以石灰岩土壤基质为材料进行 AM 真菌的接种实验 ,测定其营养器官的 N、P 含量 ,以期从植株养分生理方面了解接种 AM 真菌对石灰岩适生种群的作用 ,为恢复石灰岩退化生态系统具有重要的理论和实践意义。

2 材料与方法

2.1 实验材料

菌种 摩西球囊霉 (*Glomus mosseea* ,约 300 个孢子/20g ,简称 GM) 地表球 (*Glomus versiforme* ,约 1000 个孢子/20g ,简称 GV) 透光球囊霉 (*Glomus diaphanum* ,约 900 个孢子/20g ,简称 GD) 以上菌种均从北京市农林科学院植物营养与资源研究所购得。植物种子采于贵阳花溪石灰岩山上同一植株的构树 (*Broussonetia papyrifera*) 。土壤基质取自重庆北碚鸡公山石灰岩山上的石灰土。供试土壤理化性质如表 1。

表 1 供试土壤理化性质
Table 1 Physicochemical 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

2.2 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。将构树种子在 10% 的 H₂O₂ 内浸泡 20 min ,用无菌水冲洗 3 次 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。实验分接种组和对照组如下 :

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 ,每处理 5 个重复 ,该接种处理为 SI。①、②处理后放入培养室 ,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 AM 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 ℃ 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 ,然后播入表面消毒灭菌的构树种子 ,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℃ 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 2.2.1.1 同样条件培养。

2.3 指标测定

N、P 测定 :幼苗培养 3 个月后 ,分别取处理组和对照组幼苗同等部位根、茎、叶 (叶片采用功能叶)放入烘箱内 80℃ 烘干 ,待测。N 素测定采用凯氏定氮法 (用瑞士 BüCHI 公司生产的 Distillation Unit B-324 全自动凯氏定氮仪测定) ;P 素测定采用钼锑抗比色法^[3]。土壤酶活性测定 :过氧化氢酶活 (Catalase)性测定 :容量法 ;蛋白酶 (Protease PRO.)活性测定 :茚三酮比色法 ;碱性磷酸酶 (Alkaline phosphatase ALP.)活性测定 :磷酸苯二钠比色法 ;多酚氧化酶 (Polyphenol oxidase PPO.)活性测定 :邻苯三酚比色法^[4]。比色采用岛津 2550 紫外可见分光光度计测定。菌根侵染率的测定采用酸性品红染色 ,然后用感染长度算法测定菌根侵染率^[5]。

2.4 数据处理

采用 SPSS 11.0 软件进行数据差异性统计分析。

3 结果

3.1 AM 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。差异性检验的结果显示 4 种接种处理下 CI 混合接种处理与单独接种处理之间有显著差异。

3.2 接种 AM 真菌对构树生物量的影响

构树生物量而言 ,接种 GM、GV、GD 以及这 3 种菌根真菌混合接种后 ,其生物量与对照之间呈显著差异 ($P < 0.05$)。接种 AM 真菌的构树幼苗生物量大小 $CI > GD > GM > GV$ 构树幼苗生物量较对照 GM 提高了 2.55 倍 ,GV 提高 4.80 倍 ,GD 提高 3.02 倍 ,CI 提高 6.48 倍 ,这一结果表明接种 AM 真菌能够促进构树幼苗生物量的积累 ,混合接种较单独接种更幼苗生物量贡献更大 ,同时不同的 AM 真菌对同一宿主植物的生长促进作用有差异 ,侧面说明构树对不同的菌种依赖性不同 ,这对菌根化育苗中菌种的筛选具有一定的指导意义 (表 3)。

3.3 接种 AM 真菌对构树 N 含量的影响

由图 1 可以看出 ,接种 AM 真菌后 ,构树幼苗植株根茎叶 N 素处理组均比 CK 组高 ,其提高程度因不

表 2 不同接种处理对构树幼苗侵染率的影响
Table 2 Effects of colonization rate on *Broussonetia papyrifera* seedlings in different inoculation disposals (mean ± SE)

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

a、b 字母相同表示各处理之间差异性不显著 ,字母不同表示各处理之间差异性显著 ;下同 Differences means non-significant when 'a' or 'b' are the same letters ,otherwise menas significant between M + and M - treatments in this table 2 ;the same below

同的 AM 处理而有所不同。无论是处理组还是对照组 ,N 素含量在构树幼苗植株中分配均是根 < 茎 < 叶 ,即根的含量最小 ,叶的含量最大。在 GM 处理条件下 ,根系中 N 含量提高 75.96%、茎提高 82.58%、叶提高 17.33% ;在 GV 处理下 构树根系 N 含量提高 197.71% ,茎提高 84.10% ,叶提高 73.71% ;在 GD 处理下根提高 242.77% ,茎提高 18.14% ,叶提高 107.53% ;在混合接种条件下根、茎、叶提高率分别是 499.48% ,38.85% ,32.93%。该试验说明接种 AM 真菌后能促进构树幼苗对 N 素的吸收。以上分析认为 ,接种组较对照组而言均表现为根对 N 的利用提高幅度比茎和叶都大 ,而其中的混合接种方式最为明显 ,其次是透光球囊霉单独接种处理。同时混合接种处理在根、茎、叶中含氮量亦是处于较高的水平。

表 3 接种 AM 真菌对构树幼苗生物量的影响

Table 3 Effects of biomass on *Broussonetia papyrifera* seedlings inoculated AM fungus (mean ± SE)

	GM	GV	GD	CI
M +	0.3824 ± 0.0742 a	0.3682 ± 0.0736 a	0.4783 ± 0.0937 a	0.9768 ± 0.1713 a
M -	0.1499 ± 0.0759 b	0.0767 ± 0.0151 b	0.1581 ± 0.0382 b	0.1508 ± 0.0257 b

SPSS 统计分析表明 除了 GD 中茎 N 含量 M + 与对应的 M - 无显著差异外 ,其余各 M + 与对应 M - 间均存在极显著差异 ($P < 0.01$) ,总体上看 ,接种 AM 能够促进构树幼苗根、茎、叶对 N 素的吸收利用。

3.4 接种 AM 对构树 P 含量的影响

由图 2 可知 ,在构树根、茎中 ,无论是单独接种还是混合接种 ,均增加了构树幼苗对 P 素的吸收。除了混合接种 M + 较 M - 磷含量高外 ,其余叶片磷 M + 比 M - 低。统计分析表明接种组与 CK 组间根 P 含量在混合接种与其对照无显著差异 ,其余处理均差异显著。茎 P 在 GM 和 GV 处理以及混合接种下与其对照则存在显著差异 ($P < 0.05$)。叶 P 在 GM 处理下与 CK 组差异显著 ,其余接种处理与其对照处理均无显著差异。总的趋势看 ,接种 AM 菌能够提高根、茎对 P 素的吸收 ,而对叶 P 则不尽然 ,无论 M + 还是 M - 构树根茎叶 P 含量表现为根 > 茎 < 叶。构树根磷含量 GM 处理下提高 23.19% ,GV 处理提高 29.41% ,GD 处理提高 29.64% ;在混合接种下构树根磷含量较非处理组无显著差异。构树茎磷含量 GM 处理下提高 38.37% ,GV 处理下茎磷含量提高 48.46% ,GV 处理下与对照组无差异 ,其含量相当为 4.71mg/g 和 4.661mg/g ;CI 处理下茎磷显著含量提高了 55.08%。GD 接种处理在根、茎、叶中磷含量均较其他接种处理要高 ,表明该菌种更能够促进对土壤磷的吸收。由此可见 ,接种 AM 真菌增强了宿主植物的 P 的吸收。

3.4 接种 AM 真菌对基质土壤酶活性的影响

土壤酶系主要来源于动植物的分泌及其残体和微生物的分泌等^[41]。土壤中微生物的变化必然影响了土壤酶活性的变化 ,进而影响到植物对营养元素的转化和利用。对构树苗进行接种与不接种处理结果表明 ,构树幼苗基质土壤酶活性在接种条件下均有所升高 ,不同的土壤酶因酶本身的性质的差异而酶活性表现有别。其中土壤蛋白酶和碱性磷酸酶活性在 M + 与 M - 处理下差异性均表现出显著水平 ($P < 0.05$)。在混合接种 CI 处理下蛋白酶和碱性磷酸酶活性均表现最大活性 ,而多酚氧化酶活性最大的是 GD 透光球囊霉处理 ,过氧化氢酶活性最大则为地表球囊霉 GV 处理 (如表 4.)。3.2 中接种构树较非接种构树植株根、茎、叶中 N 素含量提高了 ,其可能的原因之一是接种 AM 真菌菌丝体在土壤内繁殖生长过程中分泌释放出活性酶如蛋白酶 ,蛋白酶将土壤中存在的氨基酸及其他含氮化合物转化成宿主植株可利用的氮源 ,而对照植株因缺乏菌丝体的分泌作用 ,故植株所能利用的 N 素较低。

3.5 构树幼苗菌根侵染率与 N、P 含量及土壤酶活性的相关性分析

表 5 可知 ,菌根侵染率与全 N、全 P 显著相关 ,同时也与蛋白酶和碱性磷酸酶显著相关 ,与多酚氧化酶和过氧化氢酶相关性不显著 ($R = 0.627$ 和 $R = 0.468$)。构树幼苗在 N、P 利用上 ,与基质土壤酶活性之间存在一定的相关性。其中构树幼苗对 N 的吸收与碱性磷酸酶活性呈显著相关性 ($P < 0.05$) ,而与多酚氧化酶以及过氧化氢酶活性相关性不显著 ($P > 0.05$) ,但根、叶对 N 的吸收与蛋白酶活性相关性显著 ,而茎对 N 吸收则不然。构树苗对 P 的吸收除了与土壤中过氧化氢酶活性有极显著相关性外 ($P < 0.01$) ,其余相关性均不显著。

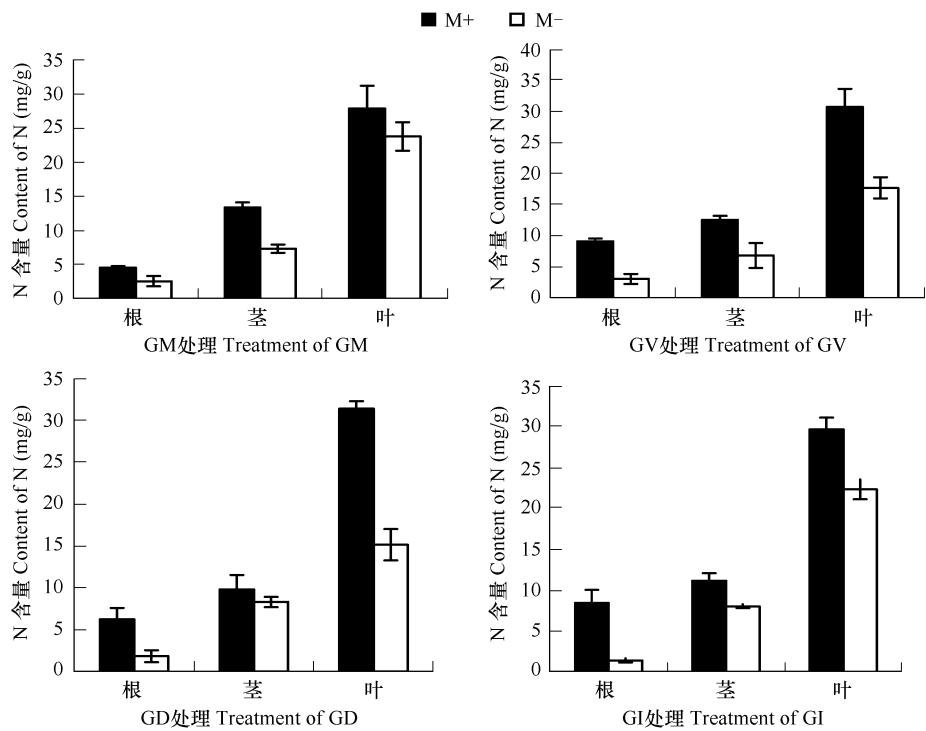


图1 不同接种处理对构树幼苗 N 吸收的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen absorption of *Broussonetia papyrifera* seedlings in different inoculating treatment (mean $\pm$ SE)

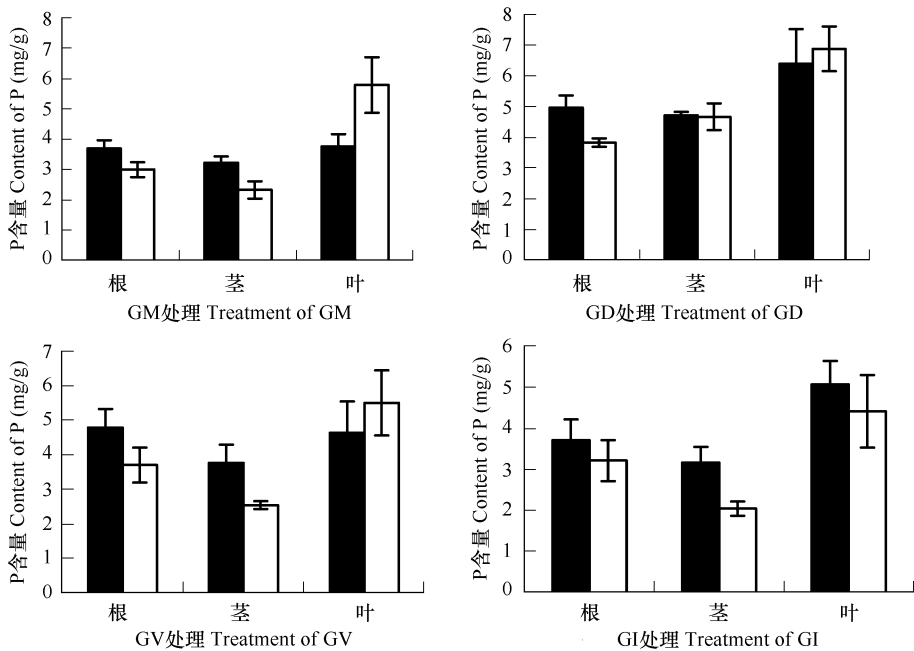


图2 不同接种处理对构树幼苗 P 吸收的影响

Fig. 2 Effects of phosphorus absorption on *Broussonetia papyrifera* seedlings in different inoculating treatment (mean $\pm$ SE)

构树幼苗对 N 的利用与 P 的利用没有显著相关性,而 N 的利用上,幼苗根系的吸收与叶片含量的大小存在显著相关性,在 P 的利用上除了根与茎吸收磷有显著相关性外,其余相关性不显著。植株根、茎和叶片 N 含量与叶片 P 含量之间还有一定的负相关性。土壤基质中,各酶活之间除了蛋白酶与碱性磷酸酶活性存在显著相关性外(相关系数 0.833 $P=0.011$) ,其余各酶活性相关性均不显著。相关分析认为,菌根侵染率对植株养分

的吸收利用有较大的相关性 ,同时这些养分的吸收利用又与土壤中的酶活性有较大的相关性 ,表明菌根的形成对土壤酶活性的增强以及土壤养分的转化和利用具有显著作用。

表 4 构树幼苗不同接种处理对基质土壤酶活性的影响

Table 4 The effects on soil enzymes activities in different inoculating disposals to <i>Broussonetia papyrifera</i> seedlings											
处理 Disposals		多酚氧化酶 Polyphenol oxides (mg/ (2h·g))			蛋白酶 Proteas (mg/ (24h·g))			碱性磷酸酶 Alkalinep hosphata (mg/ (24h·g))		过氧化氢酶 Peroxide hydrogenas (ml/ (20min·s))	
GM	M +	0.0071 a			0.3166 a			0.3172 a		0.5844 a	
	M -	0.0070 a			0.2465 b			0.2346 b		0.5984 a	
GV	M +	0.0089 a			0.2896 a			0.3168 a		0.6312 a	
	M -	0.0073 b			0.2376 b			0.2213 b		0.6132 a	
GD	M +	0.0093 a			0.3128 a			0.3156 a		0.6113 a	
	M -	0.0089 a			0.2356 a			0.2189 b		0.6000 a	
CI	M +	0.0092 a			0.3295 a			0.3248 a		0.6121 a	
	M -	0.0088 a			0.2241 b			0.2368 b		0.6072 a	

表 5 构树幼苗菌根侵染率与氮磷吸收以及土壤酶活性的 Spearman's 相关性

Table 5 Spearman's correlation between colonization rate and soil enzymatic activeties with concentration of nitrogen and phosphorus											
菌根侵染率 Colonization rate		全氮 Total N			全磷 Total P			多酚 氧化酶 Polyphenoloxidas Polyphenol oxidas	蛋白酶 Proteas	碱性 磷酸酶 Alkalinep hosphata	过氧化氢酶 Peroxide hydrogenas
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf				
菌根侵染率 Colonization rate	1	0.824 *	0.736 *	0.837 *	0.769 *	0.697 *	0.589	0.627	0.764 *	0.783 *	0.468
全氮 Total N	根 Root	1	0.643	0.810 *	0.595	0.476	-0.167	0.524	0.810 *	0.714 *	0.548
	茎 Stem		1	0.619	0.405	0.524	-0.452	0.357	0.69	0.786 *	-0.048
	叶 Leaf			1	0.476	0.405	-0.19	0.548	0.738 *	0.762 *	0.286
全磷 Total P	根 Root				1	0.881 **	0.381	0.857 **	0.286	0.143	0.548
	茎 Stem					1	0.429	0.619	0.357	0.095	0.119
	叶 Leaf						1	0.262	-0.214	-0.619	0.024
多酚氧化酶 Polyphenol oxidas								1	0.31	0.333	0.571
蛋白酶 Proteas									1	0.833 *	0.048
碱性磷酸酶 Alkaline hosphata										1	0.119
过氧化氢酶 Peroxide hydrogenas											1

* $P < 0.05$; * * $P < 0.01$

4 讨论

本实验中 ,构树在接种 AM 真菌后生物量显著增加 ,进一步研究表明构树幼苗 N、P 的吸收也显著增强 ,但因不同的菌种处理方式不同而有所差异。许多试验中都发现接种 AM 菌根真菌可显著促进植物对土壤磷的吸收 [16] ,原因归结于菌根真菌菌丝体的直接吸收作用和改变了土壤理化性质的间接作用 ,从而影响了根系本身对土壤养分的摄取能力 [17]。由于菌根菌的侵染 ,使宿主根系土壤磷酸酶活性增加 [18 ,19] ,这对植株 P 的获取有重要作用。通过 ¹⁵N 标记试验就已证明 ,AM 菌根菌丝能够从数厘米远的土壤中吸收 NH₄⁺ ,并运输到

宿主植物^[20] ,本实验构树叶片 P 素的增强效应并不显著 ,可能与 P 在植株体内生理转化过程所处的阶段有一定的关系 ,但总体上来说构树植株是提高了土壤中 N、P 的吸收利用的。

宋勇春等证实 ,对缺磷土壤上三叶草和玉米接种泡囊丛枝根真菌 ,可增加根际土壤酸性磷酸酶和碱性磷酸酶的活性^[21-22]。唐振尧等对枳苗接种 AM 菌根真菌 ,以施难溶性 P 肥而不接种菌根为对照 ,结果菌根菌感染率增高 ,使枳苗根系分泌磷酸酶活性增强 ,进而使植物含 P 量增多 ,他们认为 AM 菌根促进柑桔分泌磷酸酶而增强对难溶性 P 肥的吸收^[23]。本实验中蛋白酶和碱性磷酸酶在接种组和对照组间酶活性差异显著 ,这种差异可能促进了土壤植物系统中 N 和 P 的转化过程的改变。菌根的作用不仅仅局限在植物根部对养分的吸收 ,而且可能通过一定的途径或方式调节着植物养分运输的生理过程 ,促进根部的养分通过茎尽快向叶片转移 ,以满足叶片光合代谢的需要 ,改变了养分在植物体内的分配比例^[20]。相关分析表明菌根感染率与植株养分吸收有较大关系 ,同时与土壤蛋白酶和碱性磷酸酶活性显著相关 ,表明接种 AM 真菌在某种程度上通过改变土壤酶活的方式来增强宿主植株对土壤中 N、P 等营养元素的利用 ,这种生理上的响应可能通过植株生物量的形式表示出来 ,进而表现为植株生物量的积累增加。实验中接种 AM 真菌促进了植株生物量的积累 ,同时混合接种较单独接种生物量促进效应更大 ,可能是混合接种处理下各菌种的协同效应的结果。比较 N 和 P 根茎叶含量的全过程可看出 AM 真菌加强对 N 的吸收作用要强于对磷的吸收作用。接种 AM 真菌后 ,构树幼苗叶片磷没有显著增强 ,而在茎和叶中磷的利用增强了 ,但对氮的利用在根茎叶中均是极显著增强了。接种菌根菌能够增强叶片的 P 的吸收不一致 ,可能原因是植株磷素正处于根部向茎部和叶部转移阶段 ,具体原因有待更为细致实验进一步研究。

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] Zheng Y C , Wang S J , Geological cause of calcareous soil erosion and land rocky desertification in Karst area , Guizhou Province. Resources and Environment in the Yangtze Basin , 2002 , 11 (5) : 461 — 465.

[5] Zhu S Q , He J X. A study on microhabitats to karst forest in Maolan. Zhu S Q. Ecological research on karst forest (III). Guiyang : Guizhou Publishing House of Science and Technology , 2003 : 38 — 47.

[6] 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.

[7] Li T , Li J P , Zhao Z W. Arbuscular mycorrhizas in a valley-type savanna in southwest China. Mycorrhiza , 2004 , 14 : 323 — 327.

[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 responses 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 ectomycorrhizal 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] Qian S P , Measure discussion to soil total phosphorus. Xinjiang Agricultural Science and Technology , 2001. 24 — 25.

[14] Guan S Y. Soil Enzyme and its Research Method. Beijing : Agricultural Press , 1986.

[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] Kothari S K , Marschner H , Romheld V . Direct and indirect effects of VAM fungi and rhizosphere microorganisms on acquisition of mineral nutrients by maize (*Zea mays* L.) in a calcareous soil. *New Phytol* , 1990 , 116 : 637 – 645.

[17] Graham J H , Linderman R G , Men J A. Development of external hyphae by different isolates of mycorrhizal *Glomus*. Spp in relation to root colonization and growth of *Troger citrange*. *New Phytol* . 1982 , 133 : 177 – 185.

[18] Wang Y Z , Zhang M Q , Ke Y Q. Effects of the mycorrhiza preinoculation on the root development of sugarcane. *Journal of Fujian Agricultural University* , 1995 24 (3) : 318 – 322.

[19] Song F Q , Yang G T , Meng F R. The rhizospheric niche of seedlings of *Populus ussuriensis* colonized by arbuscular mycorrhizal (AM) fungi. *Ecology and Environment* , 2004 , 13 (2) : 211 – 216.

[20] Ames R M , Reid C P P , Porter L K , Cambardella C. Hyphal uptake and transport of from two ¹⁵ N labeled source by *Glomus mosseae* a vesicular-arbuscular fungus. *New Phytol* , 1983 95 : 381 – 396.

[21] Song Y C , Feng G , Li X L. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in the rhizosphere of clover. *Chin J Appl Environ Biol* 2000 6 (2) : 171 – 175.

[22] Song Y C , Li X L , Feng G. Effect of VAM fungi on phosphatase activity in maize rhizosphere. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2001 , 12 (4) : 593 – 596.

[23] Tang Z Y , He S L. Study on mycorrhiza promote orange absorbability mechanism to hard soluble phosphorus fertilizer. *Jouanal of China Orange* , 1991 20 (2) : 7 – 10.

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] 郑永春 王世杰. 贵州山区石灰土侵蚀及石漠化的地质原因分析. *长江流域资源与环境* , 2002 , 11 (5) : 461 ~ 465.

[5] 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.

[6] 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.

[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 吴清凤 周玉芝. 刺槐共生菌盆栽接种试验. *林业科学* 2002 38 (4) : 78 ~ 83.

[13] 钱淑萍. 土壤全磷测定方法讨论. *新疆农业科技* , 2001 24 : 25.

[14] 关松荫 等. 编著土壤酶及其研究方法. 北京 : 农业出版社 , 1986.

[18] 王元贞 张木清 柯玉琴 等. 菌根菌接种对甘蔗根系发育的影响. *福建农业大学学报* , 1995 24 (3) : 318 ~ 322.

[19] 宋福强 杨国亭 孟繁荣. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域环境的研究. *生态环境* 2004 13 (2) : 211 ~ 216.

[21] 宋勇春 冯固. 泡囊丛枝菌根对红三叶草根际土壤磷酸酶活性的影响. *应用与环境生物学报* 2000 6 (2) : 171 ~ 175.

[22] 宋勇春 李晓林 冯固. 泡囊丛枝 (VA) 菌根对玉米根际磷酸酶活性的影响. *应用生态学报* 2001 12 (4) : 593 ~ 596.

[23] 唐振尧 何首林. 菌根促进柑桔吸收难溶性磷肥的机理研究. *中国柑桔* , 1991 20 (2) : 7 ~ 10.