

王宏信, 冷 凝, 剧春晖, 等. 菌根真菌与根瘤菌联合作用对降香黄檀幼苗根系构型及养分吸收的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 120–124.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.029

# 菌根真菌与根瘤菌联合作用对降香黄檀幼苗根系构型及养分吸收的影响

王宏信<sup>1</sup>, 冷 凝<sup>1</sup>, 剧春晖<sup>2</sup>, 陈 博<sup>1</sup>, 陈文术<sup>1</sup>, 李向林<sup>3</sup>, 冉 旭<sup>1</sup>

(1. 三亚学院, 海南三亚 57200; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715;

3. 北华大学东北红豆杉繁育技术研究所, 吉林吉林 132013)

**摘要:**采用盆栽试验, 研究接种幼套球囊霉 (*Glomus etunicatum*) 和慢生根瘤菌 (*Bradyrhizobium japonicum*) 对降香黄檀 (*Dalbergia odorifera* T. Chen) 幼苗生长、根系构型和养分吸收的影响。分别设置不接种 (CK)、单接种幼套球囊霉 (GE)、单接种慢生根瘤菌 (BJ) 和双接种幼套球囊霉与慢生根瘤菌 (GE + BJ) 4 个处理, 结果发现: 接种丛枝菌根真菌 (AMF) 和根瘤菌均可以增加降香黄檀幼苗的地上、地下生物量、苗高、地径及其根冠比, 其中双接种 GE + BJ 处理增加幅度最大; 双接种 GE + BJ 处理的 AMF 侵染率最高, 达到 85.13%, 同时该处理根系产生的根瘤数量和根瘤质量与单接种根瘤菌处理相比显著提高 ( $P < 0.05$ ); 双接种 GE + BJ 处理促进了降香黄檀幼苗总根长、主根长和一级侧根长, 同时提高了根系的根表面积、根体积、平均根系直径、根尖数量和根分枝数, 其效果最为显著 ( $P < 0.05$ ); 双接种 GE + BJ 处理提高降香黄檀幼苗地上部、地下部 N、P 的含量作用最为显著 ( $P < 0.05$ )。可见, 与单接种 AM 真菌或者根瘤菌相比, 双接种技术具有明显的优势。

**关键词:** 菌根真菌; 根瘤菌; 降香黄檀幼苗; 根系构型; 养分吸收

**中图分类号:** Q939.11<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)13-0120-05

降香黄檀 (*Dalbergia odorifera* T. Chen) 为蝶形花科降香黄檀属落叶乔木, 是海南特有的珍稀濒危树种, 具有较高的经济价值和生态价值<sup>[1-2]</sup>。植物的根系构型, 例如根系分枝数量、根生长角度、根长、根表面积、根体积、根尖数以及不同径级间的长度、面积、体积、根尖数等对水分及营养物质的吸收起着关键的作用<sup>[3]</sup>。土壤根际微生物是土壤中各种生物学和生物化学过程的重要构成因子, 它对植物的根系构型有重要的影响, 同时植物根系构型的改变也会影响微生物群落的构成与分布<sup>[4]</sup>。目前, 研究较多的是丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)、根瘤菌 (*Rhizobium leguminosarum*) 等根际微生物如何有效地调控植物根系构型<sup>[5-6]</sup>。AMF 能与陆地上 90% 的开花植物形成共菌根生体, 能够改变宿主植物的根系构型、增加植物对土壤矿质元素和水分的吸收利用, 提高植物抗旱性和抗逆性<sup>[7-9]</sup>。根瘤菌与根系形成的共生体, 通过固氮作用为植物生长提供所需的氮源<sup>[10]</sup>。研究表明, 根瘤菌可以促进蒺藜状苜蓿的根毛卷曲及增加分枝程度, 进而侧根数量增多<sup>[11]</sup>, 且能够有效提高棉花根干质量、根生物量和根表面积等根系生物指标<sup>[12]</sup>。在豆科植物的根际生态系统中, 存在 AMF-豆科植物-根瘤菌的共

生体系<sup>[13]</sup>, 研究表明, 干旱条件下, 同时接种摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*) 和大豆慢生根瘤菌 (*Bradyrhizobium japonicum* Jordan), 能够提高大豆的结瘤量, 避免大豆根瘤过早衰老<sup>[14]</sup>。更多的研究表明, AMF 与根瘤菌的双接种可以强烈地刺激豆科植物的生长和根瘤的形成, 使 AMF 侵染率增加, 从而达到对养分吸收的协同促进作用, 其优越性远远大于它们的单独接种<sup>[15-16]</sup>。

有研究表明, 接种珠状球囊霉 (*Glomus margarita*) 和幼套球囊霉 (*Glomus etunicatum*) 可促进灭菌土中生长的降香黄檀幼苗生长<sup>[17]</sup>, 另研究表明混合接种摩西球囊霉和疣状无梗囊霉 (*Acaulospora tuberculata*) 能促进灭菌土中降香黄檀幼苗的生长发育并提高其抗逆性<sup>[18]</sup>。慢生根瘤菌属 (*Bradyrhizobium*)、根瘤菌属 (*Rhizobium*)、中华根瘤菌属 (*Sinorhizobium*) 等多种根瘤菌能够与降香黄檀形成稳定的共生关系, 从而形成根瘤固氮, 提高其抗逆性<sup>[19]</sup>。然而目前, 接种 AMF 和根瘤菌如何影响幼龄降香黄檀幼苗的生物量和根系形态特征及其能否促进根系生长和养分吸收等相关研究较少。

本研究通过为幼龄降香黄檀实施 AMF、根瘤菌和混合接种的方式来探讨 AMF 和根瘤菌对根系生长和养分吸收的影响, 为降香黄檀大面积推广栽培提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验土壤采自三亚学院园林试验基地林下表层土。土壤类型为砖红壤, 土壤 pH 值 4.56, 全氮含量为 0.73 g/kg, 有机质含量为 11.118 g/kg, 全磷含量为 0.182 g/kg, 全钾含量为

收稿日期: 2017-10-23

基金项目: 海南省自然科学基金 (编号: 317181); 海南省高等学校科学研究项目 (编号: Hnky2016ZD-13, Hnky2017-60); 河南省三亚市院地科技合作项目 (编号: 2012YD56)。

作者简介: 王宏信 (1983—), 男, 重庆人, 硕士, 讲师, 主要从事园林植物生理、生化研究。E-mail: orange269@163.com。

通信作者: 陈 博, 硕士, 副教授, 主要从事园林植物生理、生化研究。E-mail: mysy20040216@126.com。

4.135 g/kg, 田间持水量为 21.8%。土壤过 2 mm 筛, 在 0.14 MPa, 121 °C 下连续灭菌 2 h 备用。试验种子采自海南省三亚市热带珍稀苗木种植场, 降香黄檀树龄 20 年, 其种子用 5% 次氯酸钠溶液消毒 20 min, 然后用无菌水冲洗备用。经过前期试验筛选, 供试菌根真菌种为幼套球囊霉 (*G. etunicatum*, GE), 由中国农林科学院植物营养与资源研究所提供, 菌根真菌采用高粱苗为宿主进行盆栽扩繁, 以含有宿主植物侵染根段、菌丝片段、菌根真菌孢子的根际土为接种剂。供试根瘤菌为慢生根瘤菌 (*B. japonicum*, BJ), 购自中国农业大学根瘤中心。

盆栽容器为 45 cm × 32 cm × 25 cm (盆高 × 盆口直径 × 盆底直径) 红色塑料盆, 使用前用 95% 乙醇消毒, 自来水冲洗干净后备用。每盆装土 4.8 kg。

## 1.2 试验设计

试验在三亚学院园林试验大棚中进行, 该地块位于海南省三亚市吉阳区, 地处 109°53'92"E、18°32'72"N, 海拔 200 m。大棚四周与外界温度、湿度、光照相对一致, 年平均降水量为 1 755 mm, 年平均相对湿度为 78%, 年平均气温为 25 °C。试验时间为 2016 年 7 月 17 日至 2017 年 7 月 17 日, 试验设 4 个处理: 不接种 (对照 CK)、单接种幼套球囊霉 (GE)、单接种慢生根瘤菌 (BJ)、双接种幼套球囊霉与慢生根瘤菌 (GE + BJ), 每个处理 6 个重复, 共计 24 盆。培养土装盆时, 在基质的 2/3 处平铺菌剂 100 g, 接种 AMF 的处理加入含有孢子、菌丝的土壤及其寄主植物的根段混合物作为接种物, 同时播入消毒并催芽的降香黄檀种子, 未接种的处理加入等量灭活菌剂和灭菌的沙子作为对照。接种根瘤菌的方法是将供试菌株先接种到 YMA 斜面活化, 25 °C 恒温培养 3 d, 然后转接于 YMA 培养液 (1 000 mL) 的三角瓶中, 振荡 30 h, 培养至对数生长期 ( $D_{600\text{nm}} = 0.812$ ), 离心浓缩并用无菌水重悬, 配制成菌悬液 (菌数约  $10^4$  CFU/mL), 每盆接种 100 mL 根瘤菌剂, 不接种的对照注射 100 mL 无菌水。2016 年 7 月 7 日播种, 1 个月后定苗至 6 株并施肥 (硝酸铵 200 mg/kg、磷酸二氢钾 50 mg/kg、硝酸钾 300 mg/kg)。

## 1.3 指标测定

1.3.1 生长发育测定 播种 2 个月后, 用卷尺和游标卡尺测量株高和地径, 每个月测定 1 次。

1.3.2 根系形态测定 2017 年 7 月 17 日收获, 将植株连同塑料盆同时浸入水中, 冲洗掉根部土壤, 获取完整根系, 用根系扫描仪 Epson Perfection 4990 PHOTO 进行扫描测定总根长、根系总表面积、根体积、根尖数、根分枝数, 分析软件为 Regent Instruments 公司提供的 WinRHIZO。

1.3.3 地下根瘤数量及根瘤质量测定 根系扫描完毕后, 计算每株根瘤数并用游标卡尺随机测定 30 个根瘤的直径, 取平均值。

1.3.4 生物量测定 测定后的植株从基径处分开, 地上部称鲜质量, 105 °C 杀青 30 min 后置于 70 °C 烘干, 称干质量, 计算干鲜比, 换算出地上生物量; 地下部分分成 2 份: 一份用来测定 AMF 侵染率, 另一份 105 °C 杀青 30 min 后置于 70 °C 烘干, 称干质量, 计算干鲜比, 换算出地下生物量。

根冠比 = 地上干质量 / 地下干质量。

1.3.5 主根长度、侧根长度测定 长度测定精确到 0.01 cm。

1.3.6 AMF 侵染率测定 参照 Phillips 等方法进行染色观察菌根侵染情况, 称取约 0.1 g 的根, 剪成约 1 cm 的小段, 放入装有 10% KOH 的试管中, 80 °C 水浴 20 min, 用 1% HCl 洗涤, 再用蒸馏水冲洗干净; 用 0.065% 苯胺蓝染液在 80 °C 水浴中染色 10 min, 洗净后用甘油保存并在解剖镜下镜检<sup>[20]</sup>。

1.3.7 植物养分含量测定 植物组织中氮 (N)、磷 (P) 经浓硫酸 - 双氧水消解后分别用凯氏定氮法、钼钼黄比色法、火焰光度计法测定含量<sup>[21]</sup>。

## 1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件单因素完全随机法进行数据统计, 检验处理间的差异显著性。采用 Excel 2007 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同接种方式对降香黄檀幼苗植株株高、地径的影响

如图 1、图 2 所示, 接种 AMF 和根瘤菌均对降香黄檀幼苗株高和地径产生显著影响。2016 年 9 月 17 日至 2017 年 6 月 17 日, 连续测量 10 个月, GE、BJ、GE + BJ 处理株高分别比 CK 增加 19.84%、6.81%、19.69%, 其中 GE 处理与 GE + BJ 处理差异不显著, 其余各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。GE、BJ、GE + BJ 处理地径分别比 CK 增加 25.62%、5.66%、24.85%, 其中 GE 处理与 GE + BJ 处理差异不显著, 其余各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。说明接种 AMF 和根瘤菌显著促进了降香黄檀幼苗株高和地径的生长, 单独接种 AMF 的效果优于单独接种根瘤菌效果, 而双接种产生协同效应。10 个月后, CK、GE、BJ、GE + BJ 处理株高与地径的净增长量分别为 8.45、11.23、9.35、11.03 cm 和 2.85、3.85、3.07、3.79 mm。

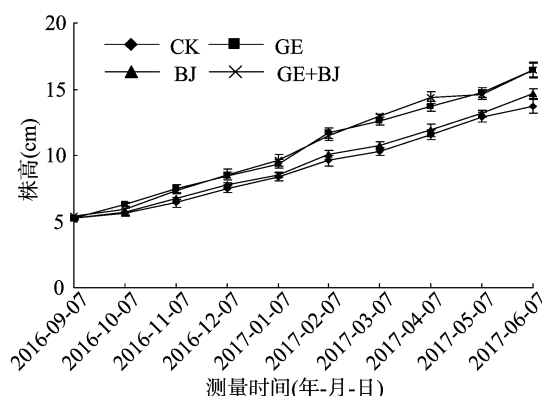


图1 不同处理对降香黄檀幼苗株高动态变化的影响

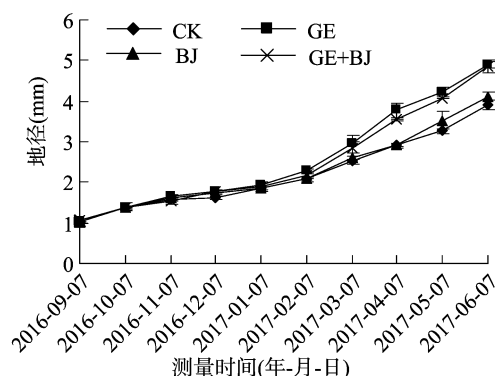


图2 不同处理对降香黄檀幼苗地径动态变化的影响

2.2 不同接种方式对降香黄檀幼苗植株的菌根侵染率、根瘤数量、根瘤质量、生物量及根冠比影响

如表 1 所示,双接种 GE + BJ 处理的降香黄檀幼苗菌根侵染率比单独接种 AMF 的 GE 处理略高,但差异不显著。双接种 GE + BJ 处理的降香黄檀根瘤数量和根瘤质量比单独接种根瘤菌的 BJ 处理增加 15.92% 和 32.35%,且差异显著 ( $P < 0.05$ )。苗木的生物量及其根冠比是苗木生长状况的重要指标。由表 2 可知,接种 AMF 和根瘤菌均可以增加降香黄檀幼苗的生物量及其根冠比,而且各处理与 CK 处理相比差异均显著 ( $P < 0.05$ )。GE、BJ、GE + BJ 处理的总干质量、总鲜质量、地上部干质量、地上部鲜质量、地下部干质量、地下部鲜质量分别比 CK 处理增大 125.3%、61.9%、130.8%、125.5%、61.9%、131.2%、112.1%、56.7%、117.7%、112.5%、57.0%、117.8%、149.6%、70.8%、156.6%、150.0%、71.4%、156.6%。根冠比是表征植物地上和地下生

表 1 不同处理对降香黄檀幼苗的菌根侵染率、根瘤数量、根瘤质量的影响

处理	菌根侵染率 (%)	根瘤数量 (个/株)	根瘤质量 (g/株)
CK	6.83 ± 1.54b	13.16 ± 2.13c	0.016 3 ± 0.006c
GE	80.93 ± 1.35a	12.51 ± 1.05c	0.013 3 ± 0.005c
BJ	3.40 ± 1.41b	30.22 ± 1.57b	0.034 0 ± 0.004b
GE + BJ	85.13 ± 4.46a	35.03 ± 1.58a	0.045 0 ± 0.005a

注:表中同列数据后不同小写字母表示不同处理间达显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

物量分配的重要指标。单独接种 AMF 和根瘤菌以双接种的处理根冠比均显著高于 CK 对照处理 ( $P < 0.05$ ),说明 AMF 和根瘤菌对降香黄檀幼苗的地上部、地下部生物量产生了显著的影响,调节了植物体内碳库 - 碳源的流通分配过程。

表 2 不同处理对降香黄檀幼苗的生物量的影响

处理	总干质量 (g)	总鲜质量 (g)	地上部分		地下部分		根冠比
			干质量 (g)	鲜质量 (g)	干质量 (g)	鲜质量 (g)	
CK	3.28 ± 0.12c	13.28 ± 0.49c	2.15 ± 0.05c	8.70 ± 0.19c	1.13 ± 0.10c	4.58 ± 0.39c	0.53b
GE	7.38 ± 0.12a	29.94 ± 0.48a	4.56 ± 0.10a	18.49 ± 0.42a	2.82 ± 0.10a	11.45 ± 0.23a	0.62a
BJ	5.30 ± 0.21b	21.50 ± 0.84b	3.37 ± 0.15b	13.66 ± 0.59b	1.93 ± 0.10b	7.85 ± 0.26b	0.57a
GE + BJ	7.58 ± 0.21a	30.70 ± 0.85a	4.68 ± 0.11a	18.95 ± 0.43a	2.90 ± 0.11a	11.75 ± 0.43a	0.62a

2.3 不同接种方式对降香黄檀幼苗植株的根系构型的影响

植物根系构型是植物重要的植物学性状和生态学指标,除受植物的遗传因素调控外,还受环境因子的调控,而环境因子往往通过影响侧根的发生来影响根系构型<sup>[22]</sup>。如表 3 所示,3 个处理 GE、BJ、GE + BJ 总根长分别比 CK 处理增加 41.54%、13.80%、38.19%,其中 GE 和 GE + BJ 处理与 CK 处理差异显著 ( $P < 0.05$ );4 个处理间主根长差异并不显著;

GE、BJ、GE + BJ 处理的一级侧根长度分别比 CK 处理增加 43.65%、13.62%、50.27%,其中 GE、GE + BJ 处理均与 CK 处理差异显著 ( $P < 0.05$ );GE、BJ、GE + BJ 处理的二级侧根长分别比 CK 处理增加 53.94%、22.23%、7.82%,其中只有 GE 处理与 CK 处理差异显著 ( $P < 0.05$ );4 个处理的三级侧根长差异均不显著。

表 3 不同处理对降香黄檀幼苗的主侧根根长的影响

处理	总根长 (cm)	主根长 (cm)	一级侧根长 (cm)	二级侧根长 (cm)	三级侧根长 (cm)
CK	319.88 ± 18.51b	21.39 ± 4.04a	234.03 ± 21.35b	56.40 ± 15.49b	7.99 ± 1.04a
GE	452.77 ± 38.00a	21.53 ± 3.73a	336.18 ± 28.49a	86.82 ± 10.14a	8.20 ± 2.47a
BJ	364.01 ± 15.24b	20.88 ± 5.12a	265.91 ± 17.94b	68.94 ± 7.84ab	8.24 ± 0.96a
GE + BJ	442.05 ± 39.50a	22.15 ± 3.98a	351.68 ± 44.03a	60.81 ± 8.46b	7.37 ± 1.01a

如表 4 所示,GE、BJ、GE + BJ 处理与 CK 相比,根表面积分别增加 64.42%、42.17%、89.56%;根体积分别增加 35.54%、10.74%、40.77%;平均根系直径分别增加 46.61%、25.42%、51.69%;根尖数分别增加 40.37%、12.48%、45.94%;根分枝数分别增加 64.33%、28.73%、74.78%。根系表面积和根系体积是根系在土壤中分布范围的重要指标,3 个接种

处理根系表面积和根系体积与 CK 处理差异显著 ( $P < 0.05$ ),说明接种 AMF 和根瘤菌明显扩展了降香黄檀幼苗根系的分布范围。平均根系直径、根尖数、根分枝数则反映植物根系的吸收能力,3 个接种处理平均根系直径、根尖数、根分枝数与 CK 处理差异显著 ( $P < 0.05$ ),说明接种 AMF 和根瘤菌明显增加了降香黄檀幼苗根系的吸收能力。

表 4 不同处理对降香黄檀幼苗的根系构型的影响

处理	根表面积 (cm <sup>2</sup> )	根体积 (g)	平均根系直径 (mm)	根尖数 (个)	根分枝数 (个)
CK	129.44 ± 15.10d	3.63 ± 0.16c	1.18 ± 0.04c	556.41 ± 12.52d	1 366.28 ± 113.25c
GE	212.82 ± 12.19b	4.92 ± 0.13a	1.73 ± 0.08a	781.02 ± 16.29b	2 245.14 ± 101.06a
BJ	184.03 ± 11.50c	4.02 ± 0.13b	1.48 ± 0.06b	625.84 ± 12.33c	1 758.84 ± 80.27b
GE + BJ	245.36 ± 11.49a	5.11 ± 0.13a	1.79 ± 0.11a	812.01 ± 16.53a	2 387.99 ± 99.00a

## 2.4 不同接种方式对降香黄檀幼苗植株 N、P 含量的影响

如表 5 所示,降香黄檀幼苗地上部、地下部 N、P 含量均表现为 GE + BJ > GE > BJ > CK。与 CK 相比,3 个处理 GE、BJ、GE + BJ 地上部和地下部的 N 含量分别增加 53.87%、8.53%、56.27% 和 79.17%、24.17%、95.00%,且 GE 和 GE + BJ 处理与其他 2 个处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ );与 CK 相比,3 个处理 GE、BJ、GE + BJ 地上部和地下部的 P 含量分别增加 92.68%、12.20%、95.12% 和 66.67%、6.67%、100.00%,其中 GE 和 GE + BJ 处理的地上部 P 含量与其他 2 个处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ),GE、GE + BJ 处理的地下部 P 含量与其他 2 个处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 5 不同处理对降香黄檀幼苗的 N、P 含量的影响

处理	N 含量 (%)		P 含量 (%)	
	地上部	地下部	地上部	地下部
CK	3.75 ± 0.06c	1.20 ± 0.17c	0.41 ± 0.04b	0.15 ± 0.04b
GE	5.77 ± 0.08a	2.15 ± 0.13a	0.79 ± 0.02a	0.25 ± 0.04a
BJ	4.07 ± 0.06b	1.49 ± 0.16b	0.46 ± 0.06b	0.16 ± 0.03b
GE + BJ	5.86 ± 0.05a	2.34 ± 0.06a	0.80 ± 0.03a	0.30 ± 0.03a

## 3 结论与讨论

前人研究表明,AMF 和根瘤菌对宿主植物根的识别、侵入、诱导,使植物根系发生形态和生理上的变化,并与植物建立共生关系,这一过程与根系分泌的信号分子的诱导有关<sup>[23]</sup>。接种 AMF 能够提高对宿主植物叶片的蒸腾速率和气孔导度,进而影响宿主植物的生物量和一些生理指标<sup>[24-25]</sup>。本试验以降香黄檀幼苗为材料,研究双接种 AMF 和根瘤菌对降香黄檀幼苗生长的影响。结果表明,接种 AMF 和根瘤菌均可以增加降香黄檀幼苗的地上、地下生物量、株高、地径及其根冠比,其中双接种 GE + BJ 处理增加幅度最大。李雅慧等研究也发现,双接种 AMF 和根瘤菌显著促进菜豆的生长<sup>[26]</sup>。吴福勇等研究发现,双接根瘤菌与摩西球囊霉处理对沙打旺生长效应显著高于单接菌处理<sup>[15]</sup>。这表明 AMF 和根瘤菌联合作用,能促进植物生长发育。

前人研究表明,AMF 分泌物对宿主植物的根瘤形成具有促进作用,对根瘤呈现正趋化作用<sup>[27]</sup>。本试验结果表明,幼态球囊霉能够和降香黄檀幼苗根系形成良好的共生关系,侵染率达到 80.93%,而在根瘤菌的作用下,AMF 侵染率略有提高,达到 85.13%。同样,在 AMF 作用下,降香黄檀幼苗根系产生的根瘤数量和根瘤质量比单接种根瘤菌处理都有提高,并达到显著水平,这与前人的研究结果<sup>[28-29]</sup>是相似的。这也表明 AMF 和根瘤菌在侵染降香黄檀幼苗过程中是相互促进的。

植物的根系构型直接决定植物的固土能力和养分吸收空间的大小,同时反映了植物根系的生长状况及其对养分和水分吸收的能力。侧根的生长状况是植物根系发育的重要指标。本试验结果表明,双接种 AMF 和根瘤菌显著促进降香黄檀幼苗总根长、主根长和一级侧根长,同时提高了根系的根表面积、根体积、平均根系直径、根尖数量和根分枝数。这表明双接种 AMF 和根瘤菌大幅提高降香黄檀幼苗的根系的分布范围,增加了植株对营养物质和水分的吸收面积,这与前人的研究结果<sup>[30]</sup>是一致的。

根瘤菌通过生物固氮为寄主植物提供有效的氮源,促进寄主植物生物量增加,寄主植物为 AMF 生长提供充足的氮素,提高 AMF 侵染率,而 AMF 为宿主植物提供有效的磷营养,促进其生物量的提高。本试验结果表明,双接种 AMF 和根瘤菌促进降香黄檀幼苗地上部、地下部 N、P 含量作用最为明显。前人研究显示,双接种 AMF 与根瘤菌处理根瘤干质量、N 吸收量及固氮速率均显著高于单接 AMF 或单接根瘤菌处理<sup>[31]</sup>。

综上所述,AMF 及根瘤菌在侵染降香黄檀幼苗的过程中,能够相互促进彼此对降香黄檀幼苗的侵染。AMF 侵染率的提高,增加了降香黄檀对土壤中 P 的吸收,而根瘤菌的侵染能力增强,也加大了其对降香黄檀 N 营养的供应能力。N、P 营养供应充足,使得植株生长发育得更好。因此,与单接种 AMF 或者根瘤菌相比,双接种技术具有更明显的优势。

## 参考文献:

- [1] 杨振德,赵岩岩,玉舒中,等. 干旱胁迫对降香黄檀幼苗生理特性及其根系形态特征的影响[J]. 林业科技开发,2014,29(3):63-66.
- [2] 贾瑞丰,徐大平,杨曾奖,等. 干旱胁迫对降香黄檀幼苗光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2013,33(6):1197-1202.
- [3] Dannowski M,Block A. Fractal geometry and root system structures of heterogeneous plant communities[J]. Plant and Soil,2005,272(1/2):61-76.
- [4] 陈伟立,李娟,朱红惠,等. 根际微生物调控植物根系构型研究进展[J]. 生态学报,2016,36(17):5285-5297.
- [5] Wu Q S,Zou Y N,Huang Y M. The arbuscular mycorrhizal fungus *Diversispora spurca* ameliorates effects of waterlogging on growth,root system architecture and antioxidant enzyme activities of citrus seedlings[J]. Fungal Ecology,2013,6(1):37-43.
- [6] Chatzistathis T,Orfanoudakis M,Alifragis D,et al. Colonization of Greek olive cultivars' root system by arbuscular mycorrhiza fungus: rootmorphology, growth, and mineral nutrition of olive plants[J]. Scientia Agricola,2013,70(3):185-194.
- [7] 江夏,陈伟立,徐春香,等. 丛枝菌根真菌和磷水平对番茄幼苗侧根形成的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(4):1186-1192.
- [8] 何跃军,钟章成. 水分胁迫和接种丛枝菌根对香樟幼苗根系形态特征的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2012,34(4):33-39.
- [9] 王如岩,于水强,张金池,等. 干旱胁迫下接种菌根真菌对滇柏和楸树幼苗根系的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2012,36(6):23-27.
- [10] 严小龙. 根系生物学原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2007:158.
- [11] Catoira R,Timmers A C,Maillet F,et al. The HCL gene of *Medicago truncatula* controls *Rhizobium* - induced root hair curling[J]. Development,2001,128(9):1507-1518.
- [12] Hafeez F Y,Safdar M E,Chaudhry A U,et al. Rhizobial inoculation improves seedling emergence, nutrient uptake and growth of cotton[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture,2004,44(6):617-622.
- [13] Scheublin T R,van der Heijden M G. Arbuscular mycorrhizal fungi colonize nonfixing root nodules of several legume species[J]. New Phytologist,2006,172(4):732-738.

- [14] Ruiz - Lozano J M, Collados C, Barea J M, et al. Arbuscular mycorrhizal symbiosis can alleviate drought - induced nodule senescence in soybean plants[J]. New Phytologist, 2001, 151(2): 493 - 502.
- [15] 吴福勇, 武玉坤, 毕银丽, 等. 水分胁迫下 AMF 和根瘤菌对沙打旺生长及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 161 - 166, 181.
- [16] 丁效东, 张林, 李淑仪, 等. 丛枝菌根真菌与根瘤菌接种对大豆根瘤分布及磷素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 662 - 669.
- [17] 周雪刚, 庄雪影, 吴永彬. 降香黄檀幼苗接种 AMF 效应研究[J]. 林业实用技术, 2012(8): 6 - 8.
- [18] 莫惠芝, 洪文君, 何妙坤, 等. 几种 AMF 菌剂对降香黄檀幼苗根效应的比较研究[J]. 福建林业科技, 2014, 41(3): 22 - 26, 43.
- [19] 江业根, 陆俊锟, 康丽华, 等. 菌剂与化肥对降香黄檀苗期生长、结瘤的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(5): 6 - 10, 25.
- [20] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and attaining parasitic and vesicular - arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1970(55): 158 - 161.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 147 - 170.
- [22] 张盛璋, 刘冰洋, 王一凡, 等. 植物根系研究进展[J]. 天津农业科学, 2016, 22(11): 11 - 18.
- [23] Lum M, Hirsch A. Roots and their symbiotic microbes; strategies to obtain nitrogen and phosphorus in a nutrient - limiting environment[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2003, 21(4): 368 - 382.
- [24] 全瑞建, 杨晓红, 李东彦. 丛枝菌根真菌种间差异对柚苗营养生长及矿质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1229 - 1233.
- [25] 陈梅梅, 陈保冬, 王新军, 等. 不同磷水平土壤接种丛枝菌根真菌对植物生长和养分吸收的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1980 - 1986.
- [26] 李雅慧, 盖京苹, 陈清, 等. AMF 与根瘤菌接种对菜豆生长的影响[J]. 中国蔬菜, 2015(5): 33 - 37.
- [27] 贾永, 宋福强. 丛枝菌根(AM)对根瘤菌趋化作用研究[J]. 微生物学通报, 2008, 35(5): 743 - 747.
- [28] 董昌金, 赵斌. 丛枝菌根真菌与根瘤菌互作及类黄酮对互作效果的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1585 - 1588.
- [29] 李淑敏, 李隆, 张福锁. 丛枝菌根真菌和根瘤菌对蚕豆吸收磷和氮的促进作用[J]. 中国农业大学学报, 2004, 9(1): 11 - 15.
- [30] 章淑群, 罗科, 刁明昆, 等. 接种根瘤菌和菌根真菌对三叶草生长及对土壤  $Pb^{2+}$  吸收的影响[J]. 四川环境, 2012, 31(4): 34 - 38.
- [31] Antunes P M, de Varennes A, Rajcan I, et al. Accumulation of specific flavonoids in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] as a function of the early tripartite symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi and *Bradyrhizobium japonicum* (Kirchner) Jordan[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(6): 1234 - 1242.

(上接第 119 页)

酸、茶水浸出物的含量, 而茶多酚含量及酚氨比有所下降, 从而能改善茶叶品质。结合种植密度和整形修剪技术, 使茶树保持一定的透光度, 提高茶树光合能力, 进而提高了经济效益, 是适合茅山地区推广的一种复合经营模式。

#### 参考文献:

- [1] 叶乃兴. 茶叶品质性状的构成与评价[J]. 中国茶叶, 2010, 32(8): 10 - 11.
- [2] 王恒明, 吴凌志, 周茂山. 栗茶间作对北方茶树生长及绿茶产量品质的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(2): 139 - 141.
- [3] 张小琴, 陈娟, 梁远发. 间作对幼龄茶园生态与茶树生育及效益影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(1): 67 - 71.
- [4] 方洪生, 周迎春, 苏有健. 海拔高度对茶园环境及茶叶品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(20): 6573 - 6575.
- [5] 田永辉, 梁远发, 王国华, 等. 人工生态群落对茶园土壤物理化学性质影响的研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 406 - 409.
- [6] 顾俊荣, 张丽, 刘腾飞, 等. 不同茶果间作下洞庭碧螺春茶叶中矿质元素与茶多酚等有效成分的分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 325 - 328.
- [7] 李家贤, 黄华林, 何玉媚, 等. 高咖啡碱茶树品种生物学性状及生化品质特征研究[J]. 广东农业科学, 2010(3): 65 - 68.
- [8] 井然, 冯雷, 陈丽梅. 茶叶中游离氨基酸分析方法的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 9186 - 9187, 9210.
- [9] Sharangi A B. Medicinal and therapeutic potentialities of tea (*Camellia sinensis* L.): a review[J]. Food Research International, 2009, 42(5/6): 529 - 535.
- [10] 府慧君. 茶叶水浸出物含量与品质关系的初步研究[J]. 茶叶, 1957(3): 23 - 25.
- [11] 张文锦, 林春莲, 熊明民. 茶树遮阴效应研究进展[J]. 福建农业学报, 2007, 22(4): 457 - 460.
- [12] 刘鑫, 傅松玲, 江文秀. 林茶间作栽培模式对有机茶品质的影响[J]. 园艺与种苗, 2015(7): 1 - 3.
- [13] 王海斌, 叶江华, 陈晓婷, 等. 不同树龄铁观音茶树的浓香型茶叶品质比较分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 230 - 232.
- [14] 杨春, 郭燕, 胡伊然, 等. 5 类久安古树红茶的香气特征及差异分析[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 324 - 326.
- [15] 宛晓春. 茶叶生物化学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1979.
- [16] 董成森, 肖润林, 彭晚霞, 等. 亚热带红壤丘陵茶区茶 - 杉复合系统生态经济效益探析[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 198 - 202.
- [17] 秦志敏, Tanui J, 冯卫英, 等. 遮光对丘陵茶园茶叶产量指标和内含生化成分的影响[J]. 南京农业大学学报, 2011, 34(5): 47 - 52.
- [18] 黄本芬, 吕小艇, 何正秀. 改进茶叶中游离氨基酸总量测定方法[J]. 食品与发酵科技, 2012, 48(2): 94 - 96.
- [19] 唐茜, 廖长力, 单虹丽. 川西茶区几种茶林(果)复合生态系统生态效应的初步研究[J]. 四川农业大学学报, 2004, 22(1): 41 - 44.
- [20] 李庚飞. 不同郁闭度对茶树净光合速率及茶园生态因子的影响[J]. 福建林业科技, 2013, 40(3): 50 - 53.
- [21] 巩雪峰, 余有本, 肖斌, 等. 不同栽培模式对茶园生态环境及茶叶品质的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(12): 2485 - 2491.
- [22] 王彬, 董慧, 蒋玉兰, 等. 核桃树或桉木与茶树间作对茶叶主要生化成分的影响[J]. 中国茶叶加工, 2014(1): 29 - 34.