

两种外生菌根真菌在辽东栎幼苗上的混合接种效应

阎秀峰 王 琴

(东北林业大学生命科学学院 哈尔滨 150040)

摘 要 辽东栎 (*Quercus liaotungensis*) 是中国暖温带落叶阔叶林的主要优势树种之一。铆钉菇 (*Gomphidius viscidus*) 和臭红菇 (*Russula foetens*) 是在自然环境中与其共生形成外生菌根的真菌。在前期工作证明铆钉菇和臭红菇接种对辽东栎幼苗生长有明显促进作用并以两菌种混合接种效果较好的基础上,探讨了不同的接种量和两个菌种不同比例的混合接种对辽东栎幼苗生长和氮、磷养分的影响。对应于试验的 12、18、24 g·pot⁻¹ 3 个接种量处理,随着接种量的增加,辽东栎幼苗的菌根侵染率增加,铆钉菇菌根的比例增加,而臭红菇菌根的比例减少。辽东栎幼苗的生物量、株高、净光合速率和全株的全氮、全磷含量均以 18 g·pot⁻¹ 接种量的最高。当接种物中铆钉菇:臭红菇的比例分别为 2:1、1:1、1:2 时,辽东栎幼苗的菌根侵染率分别为 96.54%、91.02%、92.13%,但彼此间差异不显著。随着接种物中铆钉菇比例的减少,铆钉菇菌根所占比例由 42.49% 降为 23.33%,而臭红菇菌根的比例由 57.51% 增加为 76.67%。辽东栎幼苗的生物量和净光合速率均是以接种比例为 1:1 的最高。接种比例为 1:1 的辽东栎幼苗的全氮含量也是最高的,并且与另两种接种比例处理的差异显著,而对于全株的全磷含量,则是随着接种物中臭红菇的比例增加而增加。

关键词 辽东栎幼苗 外生菌根 混合接种 生物量 光合速率 氮磷含量

EFFECTS OF CO-INOCULATION WITH TWO ECTOMYCORRHIZAL FUNGI ON *QUERCUS LIAOTUNGENSIS* SEEDLINGS

YAN Xiu-Feng and WANG Qin

(College of Life Sciences, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract *Quercus liaotungensis*, a special *Quercus* species of China, is one of the dominant species in the warm temperate deciduous broad-leaved forests, China. *Gomphidius viscidus* and *Russula foetens* are two species of ectomycorrhizal fungi being symbiosis and formation of ectomycorrhizae with *Q. liaotungensis* in the natural circumstance. The positive effect of the inoculation with *G. viscidus* and *R. foetens* on *Q. liaotungensis* seedling growth, and the improvement induced by co-inoculation with a mixed inoculum of *G. viscidus* and *R. foetens* have been reported in our early work. In the present paper, a controlled experiment was conducted in pots to investigate the effects of different inoculation amounts and different inoculation ratios of *G. viscidus* and *R. foetens*. *Q. liaotungensis* seeds were collected in autumn of 2001 from the natural forest of Mt. Donglingshan in the Beijing area. Before germination, seeds were rinsed in running tap water overnight, surface disinfected by shaking for 60 min in 0.5% KMnO₄ and washed in four changes of sterile distilled water. Seeds were germinated in sterile sand, and seedlings were transplanted to pots (diameter 20 cm, depth 20 cm) with a sterile mixture of soil and sand in a greenhouse. The sterile mixture had a pH of 6.9, an organic matter content of 3.76%, and total N, P, K levels of 0.30%, 0.12% and 2.61%, respectively. On June 2, 2002, every 15 pots of *Q. liaotungensis* seedlings were randomly grouped for inoculation treatment. Three levels of inoculation amount of 12, 18 and 24 g·pot⁻¹ were created at the ratio of 1:1 of *G. viscidus*:*R. foetens*, and three ratios of 2:1, 1:1 and 1:2 of *G. viscidus*:*R. foetens* were inoculated at the inoculum amount of 18 g·pot⁻¹. After 3 months of inoculation, the mycorrhizal infection rate and the percentages of *G. viscidus* and *R. foetens* mycorrhizae were observed. The height, dry weight, nitrogen and phosphorus contents of root, stem and leaf, net photosynthesis rate of the mycorrhizal seedlings and non-mycorrhizal seedlings were measured, and biomass, nitrogen and phosphorus contents of the whole plant, root/shoot ratio and leaf water content were calculated.

The infection rate of mycorrhizae of *Q. liaotungensis* seedlings and the percentage of *G. viscidus* mycor-

rhizae increased but the percentage of *R. foetens* mycorrhizae decreased when the inoculation amount was higher. The maximum biomass, height, net photosynthesis rate and total nitrogen and phosphorus contents of whole plant of *Q. liaotungensis* seedlings all showed in plants with inoculation amount of $18 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$. As to inoculation ratio, with the inoculum ratios of 2:1, 1:1 and 1:2 of *G. viscidus* and *R. foetens*, the infection rates of total ectomycorrhizae were 96.54%, 91.02% and 92.13% respectively, and no significantly difference among them. As the proportion of *G. viscidus* in the inoculum decreased, the percentage of *G. viscidus* mycorrhizae decreased from 42.49% to 23.33%, and that of *R. foetens* mycorrhizae rose from 57.51% to 76.67%. With an inoculation amount of $18 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$ at a ratio of 1:1 *G. viscidus*:*R. foetens*, the seedlings of *Q. liaotungensis* have maximal biomass, net photosynthesis rate, and total nitrogen content of the whole plant which was significantly higher than seedlings under other inoculation ratio conditions. Total phosphorus content of the whole plant of *Q. liaotungensis* was enhanced by the increasing ratio of *R. foetens*.

Key words *Quercus liaotungensis* seedlings, Ectomycorrhizae, Co-inoculation, Biomass, Photosynthesis rate, Nitrogen and phosphorus content

形成外生菌根的植物主要是木本植物,并且由于菌根的形成使植物的生长和养分吸收得到显著改善(Smith & Read, 1997),对森林生态系统产生深远的影响(Hogetsu, 1998)。尽管近年来对于壳斗科、桃金娘科、龙脑香科、桦木科等科的一些阔叶树种的外生菌根也有一些研究报道(弓明钦等, 1997; Dell et al., 2000; Egerton-Warburton & Allen, 2001),但相对于针叶树种特别是松科的植物而言,对于阔叶树上外生菌根及其与宿主关系的研究还很有限(Perry et al., 1987; Cairney & Chambers, 1997; Newton & Haigh, 1998; Pera et al., 1999)。

辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是我国暖温带落叶阔叶林的主要优势树种之一,从辽宁、山西、河北、河南、山东到陕西、甘肃、四川等省都有分布(林舜华等, 1997; 高贤明等, 1998)。研究辽东栎林的演替过程以及真菌在此过程中的作用对于暖温带森林植被特别是退化森林生态系统的恢复与重建具有重要意义。

在前期辽东栎幼苗外生菌根的合成实验中,有6种外生菌根真菌即铆钉菇(*Gomphidius viscidus*)、臭红菇(*Russula foetens*)、厚环乳牛肝菌(*Suillus grevillei*)、褐环乳牛肝菌(*Suillus luteus*)、彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)和美味牛肝菌(*Boletus edulis*)与辽东栎幼苗形成了外生菌根(阎秀峰等, 2002a)。在此基础上,选择对辽东栎幼苗感染率较高且在北京东灵山地区有自然分布(黄永青, 1996)的两种外生菌根真菌——铆钉菇和臭红菇,进一步观察了外生菌根与辽东栎幼苗生长的关系,结果表明两个菌种外生菌根的形成对辽东栎幼苗的生长有明显的促进作用。而且在生长促进效果上,铆钉菇和臭红菇同时接种明显优于单独接种,并且以混合接种处理的效果最好(阎秀峰等, 2002b)。为此,进一步试验了

不同的接种量和两个菌种不同比例的混合接种对辽东栎幼苗生长和氮、磷养分的影响,以期探讨这两个外生菌根菌种在共生过程中与辽东栎幼苗形成的竞争关系以及与辽东栎幼苗养分吸收及生长的关系。

1 材料和方法

1.1 外生菌根菌种及培养

用于混合接种的两种外生菌根真菌为铆钉菇和臭红菇。用 MMN 琼脂培养基对所用菌种进行平板培养,获得生活力旺盛的菌种后,在 500 ml 三角瓶中以蛭石、草炭土、木屑(体积比 3:1:1)为基质,加入 MMN 液体培养基(200 ml)培养二级菌种。培养温度为 25 °C, 4 周后用于接种。

1.2 辽东栎幼苗培养及接种处理

2001 年秋季于北京东灵山采集辽东栎成熟种子,低温保存。2002 年春季取精选种子,流水冲洗过夜后用 0.5% 的 KMnO_4 消毒 1 h,然后用无菌清水冲洗 4 次,播入 121 °C 灭菌 1 h 的河沙中。当幼苗开始长出侧根时,移入口径 20 cm、深 20 cm 的花盆中,盆中基质为马粪土、河沙混合物(体积比 3:1,混合后 121 °C 灭菌 1 h)。基质的营养状况为:有机质含量 3.76%, pH 6.9,全氮含量 0.30%,全磷含量 0.12%,全钾含量 2.61%。

2002 年 6 月 2 日,选择长势一致的辽东栎幼苗分组进行接种处理,每组 15 盆。对照(CK)组不接种(为与接种的保持条件一致,在花盆中加入不含菌根真菌的二级菌种培养基),接种处理分为不同接种量和不同接种比例两类。不同接种量处理的,铆钉菇和臭红菇菌种的量相等,总接种量分别为 12、18 和 24 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。不同接种比例处理的,总接种量均为 18 $\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$,铆钉菇:臭红菇的比例分别为 2:1、1:1 和 1:2。以上各处理均是铆钉菇和臭红菇的二

级菌种混匀后直接接种到幼苗的根部,接种深度为 3~10 cm。

接种后的辽东栎幼苗置于温室中自然培养,3 个月后测定辽东栎幼苗的各项指标。温室为自然采光,培养期间的昼间温度 25~28 ℃,夜间温度 18~21 ℃,昼夜温度自然过渡。湿度为 60%~70%。

1.3 外生菌根感染率及菌根比例的统计

外生菌根感染率用计数统计方式确定。随机选取辽东栎幼苗细根根段,以形成外生菌根的根段数占观察的总根段数的百分比作为菌根感染率。在同时形成两种外生菌根的辽东栎幼苗上,进一步统计每种菌根所占的比例。某种外生菌根的比例为辽东栎幼苗根段上形成的该种外生菌根的数目占所形成的全部外生菌根数目的百分比。

1.4 幼苗生长状况测定

量取株高后将辽东栎幼苗从花盆中取出,小心洗去根际泥土,按根、茎、叶分开,称取叶片鲜重后于 80 ℃烘箱中烘干至恒重,计算生物量(幼苗总干重)、根冠比(根干重/地上部干重)、叶片含水量(叶片水分占鲜重的百分比)。各处理 8 株重复。

1.5 光合速率的测定

选择晴天,利用 LI-6400 便携式光合作用系统(LI-COR 公司,美国)测定各处理组辽东栎幼苗的净光合速率。测定时选择幼苗上部充分展开的叶片,各处理 5 株以上重复。

1.6 幼苗全氮和全磷含量的测定

参照崔晓阳(1998)的方法,采用自动凯氏法测定幼苗的全氮含量,采用硫酸-高氯酸溶-钼锑抗比色法测定幼苗的全磷含量。

以上数据用 SPSS 软件做常规统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同接种量对辽东栎幼苗菌根形成的影响

从表 1 可以看出,铆钉菇和臭红菇两种菌根真

菌的侵染率均很高,都超过了 70%。但从所形成的外生菌根的比例来看,臭红菇的侵染效果明显好于铆钉菇。接种量的差异对外生菌根的形成有一定的影响。随着接种量由 12 g·pot⁻¹增加到 24 g·pot⁻¹,两种菌根真菌的侵染率以及总的侵染率有增加的趋势,但除铆钉菇的侵染率在接种量为 12 g·pot⁻¹和 24 g·pot⁻¹时的差异达到显著水平外,其余的差异均不显著。在两种菌根的比例方面,随着接种量的增加,铆钉菇菌根的比例增加,而臭红菇菌根的比例减少,但接种量为 18 g·pot⁻¹和 24 g·pot⁻¹时的差异并不显著。可见,接种量超过 18 g·pot⁻¹后,接种量的增加对菌根形成的影响减弱。

2.2 不同接种量对辽东栎幼苗生长的影响

从生物量、株高和净光合速率看,均以接种量 18 g·pot⁻¹的为最好,但 3 个接种量间株高的差异并不显著。同样,根冠比和叶片含水量也都没有显著的差异。从生物量看,接种量 24 g·pot⁻¹的明显低于 12 g·pot⁻¹和 18 g·pot⁻¹的(表 2)。可见,并不是接种量越大,对辽东栎幼苗的生长促进效果越好。

2.3 不同接种量对辽东栎幼苗氮、磷养分的影响

从整个植株的全氮含量看,18 g·pot⁻¹接种量的最高,但与 12 g·pot⁻¹和 24 g·pot⁻¹接种量的差异在统计上未达到显著水平,而根、茎、叶各器官的全氮含量与接种量之间也未呈现出明显的相关性。从氮素养分在辽东栎幼苗各器官的分配比例看,随着接种量的增加,在根中的分配比例有略微增加的趋势,而在叶中的分配比例则是减少的。茎中的情况特殊一些,12 g·pot⁻¹和 18 g·pot⁻¹接种量的比较接近,而 24 g·pot⁻¹接种量的则与它们有很大的差异(表 3)。

辽东栎幼苗全磷含量的情况与全氮含量有些类似,全株的全磷含量也是 18 g·pot⁻¹接种量的最高,并且与另两个接种量的差异不显著,根、茎、叶的全磷含量与接种量之间的关系也缺乏明显的规律性。在各器官的分配比例上,与氮素的情形正好相反,磷

表 1 接种量不同时辽东栎幼苗的菌根侵染率和臭红菇、铆钉菇的菌根比例
Table 1 Infection rate and percentage of *Gomphidius viscidus* and *Russula foetens* mycorrhizae in seedlings of *Quercus liaotungensis* with different amount of inoculum

接种量 Amount of inoculum (g·pot ⁻¹)	菌根侵染率 Inoculation rate(%)			菌根比例 Percentage of mycorrhizae	
	铆钉菇菌根 Mycorrhizae of <i>G. viscidus</i>	臭红菇菌根 Mycorrhizae of <i>R. foetens</i>	全部 Total	铆钉菇菌根 Mycorrhizae of <i>G. viscidus</i>	臭红菇菌根 Mycorrhizae of <i>R. foetens</i>
0	0	0	0		
12	71.35 ^a	83.21 ^a	85.42 ^a	27.21 ^a	72.79 ^a
18	86.45 ^{ab}	90.76 ^a	91.02 ^a	33.60 ^b	66.40 ^b
24	88.68 ^b	89.16 ^a	94.66 ^a	37.11 ^b	62.89 ^b

同一列数据中字母不同者表示差异显著($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

表 2 接种量不同时辽东栎幼苗的生长状况

Table 2 The growth of *Quercus liaotungensis* seedlings with different amount of inoculum

接种量 Amount of inoculum (g·pot ⁻¹)	生物量 Biomass (g DW·plant ⁻¹)	株高 Height (cm)	根冠比 Root/shoot ratio	叶片含水量 Water content of leaf (%)	净光合速率 Net photosynthesis rate ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	0.83 ^a	5.8 ^a	3.30 ^a	47.13 ^a	2.91 ^a
12	5.14 ^b	11.1 ^b	3.58 ^a	53.72 ^b	6.29 ^b
18	5.58 ^b	12.2 ^b	3.57 ^a	53.57 ^b	8.88 ^c
24	3.63 ^c	9.9 ^b	3.42 ^a	54.52 ^b	6.36 ^b

同一列数据中字母不同者表示差异显著 ($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

表 3 接种量不同时辽东栎幼苗的全氮、全磷含量和器官分配比例

Table 3 The total N or P content and allocation to organs of *Quercus liaotungensis* seedlings with different amount of inoculum

接种量 Amount of inoculum (g·pot ⁻¹)	全氮含量 Total N content (%)				分配比例 Allocation to organs (%)		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
0	0.93 ^a	0.92 ^a	2.31 ^a	1.07 ^a	66.27 ^a	10.51 ^a	23.21 ^{ab}
12	1.68 ^b	1.13 ^{ab}	3.07 ^b	1.86 ^b	70.39 ^a	3.58 ^b	26.03 ^a
18	1.71 ^b	1.04 ^{ab}	2.58 ^{ab}	2.27 ^b	72.52 ^a	3.50 ^b	23.97 ^{ab}
24	1.89 ^b	1.36 ^b	2.76 ^{ab}	1.98 ^b	73.52 ^a	5.05 ^c	21.44 ^b

同一列数据中字母不同者表示差异显著 ($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

接种量 Amount of inoculum (g·pot ⁻¹)	全磷含量 Total P content (%)				分配比例 Allocation to organs (%)		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
0	0.10 ^a	0.07 ^a	0.11 ^a	0.10 ^a	77.70 ^a	9.37 ^a	12.93 ^a
12	0.18 ^{bc}	0.16 ^b	0.18 ^b	0.18 ^b	78.80 ^a	5.26 ^b	15.94 ^a
18	0.21 ^b	0.11 ^c	0.24 ^c	0.21 ^b	76.92 ^a	3.17 ^c	19.91 ^b
24	0.15 ^c	0.11 ^c	0.28 ^c	0.17 ^b	69.43 ^a	4.98 ^b	25.59 ^c

同一列数据中字母不同者表示差异显著 ($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

表 4 接种比例不同时辽东栎幼苗的菌根侵染率和臭红菇、铆钉菇的菌根比例

Table 4 Infection rate and percentage of *Gomphidius viscidus* and *Russula foetens* mycorrhizae in seedlings of *Quercus liaotungensis* with different inoculum ratio

铆钉菇:臭红菇 <i>G. viscidus</i> : <i>R. foetens</i>	菌根侵染率 Inoculation rate (%)			菌根比例 Percentage of mycorrhizae	
	铆钉菇菌根 Mycorrhizae of <i>G. viscidus</i>	臭红菇菌根 Mycorrhizae of <i>R. foetens</i>	全部 Total	铆钉菇菌根 Mycorrhizae of <i>G. viscidus</i>	臭红菇菌根 Mycorrhizae of <i>R. foetens</i>
2:1	91.44 ^a	93.78 ^a	96.54 ^a	42.49 ^a	57.51 ^a
1:1	86.45 ^{ab}	90.76 ^a	91.02 ^a	33.60 ^b	66.40 ^b
1:2	75.47 ^b	90.56 ^a	92.13 ^a	23.33 ^c	76.67 ^c

同一列数据中字母不同者表示差异显著 ($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

素分配到根的比例随着接种量的增加而呈现出减少的趋势。分配到叶片中的磷素比例则明显增加,而且各接种量处理间的差异均达到了显著水平(表 3)。

2.4 不同接种比例对辽东栎幼苗菌根形成的影响

接种物中铆钉菇和臭红菇的改变对辽东栎幼苗总的菌根侵染率以及臭红菇的侵染率影响不大,但铆钉菇的侵染率则是随着接种物中铆钉菇的比例增大而增加。从形成的外生菌根的比例看,两种菌根所占的比例均是随着接种物中相应的菌根真菌所占比例的变化而消长,但在试验的比例范围内,并未改变臭红菇菌根占优势的格局(表 4)。

2.5 不同接种比例对辽东栎幼苗生长的影响

接种物中铆钉菇:臭红菇为 1:1 时辽东栎幼苗

的生物量最高,但与铆钉菇:臭红菇为 2:1 的差异不大。辽东栎幼苗叶片的光合速率也是铆钉菇:臭红菇为 1:1 的最高,但不同接种比例处理间的差异不显著。同样,不同接种比例处理的辽东栎幼苗的株高、根冠比和叶片含水量也都没有明显的差异(表 5)。可见,接种物中铆钉菇和臭红菇的比例的差异,在菌根对辽东栎幼苗生长的促进效果上并未产生大的影响。

2.6 不同接种比例对辽东栎幼苗氮、磷养分的影响

接种物中铆钉菇:臭红菇为 1:1 时辽东栎幼苗全株的全氮含量最高,而且与另两个接种比例处理的差异达到了显著水平。辽东栎幼苗根中的全氮含量也有类似的规律,但差异未达到显著水平,而茎、叶中全氮含量的最高值则分别是接种比例为 2:1 和

1:2 处理的。从氮素养分在器官中的分配比例看,分配到根、叶的氮素比例在不同接种比例处理间的差异不显著,而分配到茎的氮素比例在不同处理间差异显著,并以接种比例为 1:1 的最低(表 6)。

从辽东栎幼苗全株及根的全磷含量看,有随着接种物中臭红菇比例增加而增加的趋势,而茎、叶的情况则不相同。从磷素在各器官中的分配比例看,接种比例为 2:1 时,分配到茎、叶中的磷素最多,而分配到根中的磷素最少(表 6)。

3 讨论

在自然界中,一种树木经常与多种真菌共生形成菌根,而且常常可以观察到在同一根系中有不同种类的真菌形成不同类型的菌根(Harvey *et al.*, 1980; Fleming, 1985)。Trappe(1977)估计可能有 2 000 种真菌能与花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)形成菌根, Timonen 等(1997)在欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的根系上就观察到 12 种不同形态类型的菌根。因此,外生菌根真菌需要在有限的空间和营养下相互竞争,同时也与周围的寄生或腐生真菌以及细菌发生竞争。已有许多工作通过共同接种的方式探讨了菌根真菌之间(外生菌根之间、AM 菌根之间、外生菌根与 AM 菌根之间)的竞争以及对宿主植物生长

促进效果的影响(Holden *et al.*, 1983; Mason *et al.*, 1983; Hung & Molina, 1986; Browning & Whitney, 1991; Reddy & Natarajan, 1997; Wu *et al.*, 1999; 陈应龙等, 1999),也有工作考察菌根真菌与细菌共同接种的效果(Requena *et al.*, 1997; Dunstan *et al.*, 1998; Priya *et al.*, 1999; Probanza *et al.*, 2001; Xavier & Germida, 2002),但这类工作在阔叶树上很少(Fleming, 1985; Dunstan *et al.*, 1998; 陈应龙等, 1999)。

国外已有一些关于栎属树木外生菌根的研究工作(Beckjord *et al.*, 1985; Garbaye *et al.*, 1992; Majumdar *et al.*, 1992; Hermann *et al.*, 1998)。辽东栎是我国特有的栎林树种,我们的前期工作表明铆钉菇和臭红菇共同接种对辽东栎幼苗生长的促进效果优于单独接种(阎秀峰等, 2002b)。从该实验的结果看,接种量的差异以及接种物中铆钉菇和臭红菇比例的不同对于辽东栎幼苗菌根的形成和生长促进效果的影响并不是非常明显。

在单菌种接种的情况下,铆钉菇和臭红菇对辽东栎幼苗的菌根侵染率都很高,而且接近,分别为 90.78% 和 91.61%(阎秀峰等, 2002b)。在该实验中,虽然随着总接种量的增加有铆钉菇菌根比例增加、臭红菇菌根比例减少的趋势,但臭红菇菌根的比

表 5 接种比例不同时辽东栎幼苗的生长状况

Table 5 The growth of *Quercus liaotungensis* seedlings with different inoculum ratio

铆钉菇:臭红菇 <i>G. viscidus</i> : <i>R. foetens</i>	生物量 Biomass (g DW·plant ⁻¹)	株高 Height (cm)	根冠比 Root/shoot ratio	叶片含水量 Water content of leaf (%)	净光合速率 Net photosynthesis rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2:1	5.42 ^a	12.7 ^a	3.52 ^a	55.82 ^a	7.78 ^a
1:1	5.58 ^a	12.2 ^a	3.57 ^a	53.57 ^a	8.88 ^a
1:2	4.35 ^b	10.8 ^a	3.63 ^a	52.68 ^a	7.82 ^a

同一列数据中字母不同者表示差异显著($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

表 6 接种比例不同时辽东栎幼苗的全氮、全磷含量和器官分配比例

Table 6 The total N or P content and allocation to organs of *Quercus liaotungensis* seedlings with different inoculum ratio

铆钉菇:臭红菇 <i>G. viscidus</i> : <i>R. foetens</i>	全氮含量 Total N content (%)				分配比例 Allocation to organs (%)		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
2:1	1.43 ^a	1.26 ^a	2.51 ^a	1.58 ^a	70.21 ^a	5.58 ^a	24.21 ^a
1:1	1.71 ^a	1.04 ^a	2.58 ^{ab}	2.27 ^b	72.52 ^a	3.50 ^b	23.97 ^a
1:2	1.42 ^a	1.19 ^a	2.90 ^b	1.64 ^a	67.70 ^a	4.63 ^c	27.67 ^a
铆钉菇:臭红菇 <i>G. viscidus</i> : <i>R. foetens</i>	全磷含量 Total P content (%)				分配比例 Allocation to organs (%)		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
2:1	0.15 ^a	0.11 ^a	0.30 ^a	0.17 ^a	69.05 ^a	4.31 ^a	26.63 ^a
1:1	0.21 ^b	0.11 ^a	0.24 ^b	0.21 ^{ab}	76.92 ^a	3.17 ^b	19.91 ^b
1:2	0.22 ^b	0.14 ^a	0.29 ^a	0.23 ^b	76.07 ^a	3.79 ^a	20.13 ^b

同一列数据中字母不同者表示差异显著($p < 0.05$) Data with different letters are significantly different ($p < 0.05$) in the same column

例始终远大于铆钉菇菌根的比例(表 1)。在不同接种比例的处理中,随着接种物中铆钉菇的减少和臭红菇的增加,所形成的菌根中铆钉菇菌根的比例也由 42.49% 减少到 23.33%,而臭红菇菌根的比例则由 57.51% 增加到 76.67%(表 4)。但是,臭红菇菌根的比例还是明显优于铆钉菇菌根。这些结果意味着在臭红菇和铆钉菇共同接种辽东栎幼苗的情况下,臭红菇和铆钉菇之间存在竞争,而且竞争结果不简单地取决于接种体的数量和比例。总体看来,臭红菇与辽东栎幼苗共生形成菌根的能力要强于铆钉菇。实验中,只是在最后的阶段观察了菌根的形成情况,而没有从接种开始到实验结束整个阶段内跟踪两种菌根的动态变化过程。也许在这个过程中,两种菌根的比例会有一些的规律性变化。

从单独接种的生长促进效果看,形成臭红菇菌根的辽东栎幼苗的生物量、株高、净光合速率、水分利用效率以及全株的全氮、全磷含量都略优于形成铆钉菇菌根的辽东栎幼苗(差异均未达到显著水平),但分配到叶片中的磷素养分比例却有差异,臭红菇菌根幼苗显著高于铆钉菇菌根幼苗(阎秀峰等, 2002b)。但是,在该实验的混合接种中,接种物中臭红菇比例高的处理的生长促进效果却不是最好的,辽东栎幼苗的生物量和净光合速率都是接种比例为 1:1 处理的最高,尽管不同处理之间的差异并不是非常显著(表 5)。随着接种物中臭红菇比例的增加,辽东栎幼苗全株的全磷含量随之增加,但分配到叶片中的磷素养分却是铆钉菇:臭红菇比例为 2:1 处理的最高(表 6)。从一定意义上讲,在辽东栎幼苗上两种菌根的比例差异应该与不同处理间幼苗生长及氮磷养分的差异关系更密切,但是将表 1 与表 2、表 3 以及表 4 与表 5、表 6 分别结合起来分析,仍看不出两种菌根的比例与辽东栎幼苗的生长促进效果有明显的对应关系。

总之,尽管共同接种时铆钉菇和臭红菇两种菌根真菌在与辽东栎幼苗形成外生菌根的竞争能力上表现出一定差异,但是两种菌根真菌在接种物中比例的差异以及不同的接种量处理,在对辽东栎幼苗的生长促进效果上并未呈现出清晰的规律性,两种菌根真菌在侵染辽东栎幼苗过程中的相互作用以及对辽东栎幼苗生长影响的互作机理还需要更细致的实验来探讨。

参 考 文 献

- Beckjord, P. R., J. H. Melhuish Jr. & M. S. McIntosh. 1985. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on growth and formation of ectomycorrhizae of *Quercus alba* and *Q. rubra* seedlings by *Pisolithus tinctorius* and *Scleroderma auranteum*. *Canadian Journal of Botany*, **63**: 1677 ~ 1680.
- Browning, M. H. R. & R. D. Whitney. 1991. Response of jack pine and black spruce seedlings to inoculation with selected species of mycorrhizal fungi. *Canadian Journal of Forest Research*, **21**: 701 ~ 706.
- Cairney, J. W. G. & S. M. Chambers. 1997. Interactions between *Pisolithus tinctorius* and its hosts: a review of current knowledge. *Mycorrhiza*, **7**: 117 ~ 131.
- Chen, Y. L. (陈应龙), M. Q. Gong (弓明钦), F. Z. Wang (王凤珍), Y. Chen (陈羽) & D. Bernie. 1999. Effect on nutrient acquisition of *Eucalyptus urophylla* inoculated with *Glomus* and/or *Pisolithus*. *Forest Research (林业科学研究)*, **12**: 262 ~ 267. (in Chinese with English abstract)
- Cui, X. Y. (崔晓阳). 1998. Modern experimental analysis technology for forest soil. Harbin: Northeast Forestry University Press. 73 ~ 78, 95 ~ 99. (in Chinese)
- Dell, B., N. Aggangan, X. Lu, N. Malajczuk, N. Pampolina & D. Xu. 2000. Role of ectomycorrhizal fungi in Eucalypt plantations. In: Gong, M. Q., D. P. Xu, C. L. Zhong, Y. L. Chen, B. Dell & M. Brundrett eds. *Mycorrhizal fungi biodiversity and applications of inoculation technology*. Beijing: China Forestry Publishing House. 161 ~ 167.
- Dunstan, W. A., N. Malajczuk & B. Dell. 1998. Effects of bacteria on mycorrhizal development and growth of container grown *Eucalyptus diversicolor* F. Muell. seedlings. *Plant and Soil*, **201**: 241 ~ 249.
- Egerton-Warburton, L. & M. F. Allen. 2001. Endo- and ectomycorrhizas in *Quercus agrifolia* Nee. (Fagaceae): patterns of root colonization and effects on seedling growth. *Mycorrhiza*, **11**: 283 ~ 290.
- Fleming, M. V. 1985. Experimental study of sequences of ectomycorrhizal fungi on birch (*Betula* sp.) seedling root systems. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**: 591 ~ 600.
- Gao, X. M. (高贤明) & L. Z. Chen (陈灵芝). 1998. Studies on the species diversity of *Quercus liaotungensis* communities in Beijing Mountains. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **22**: 23 ~ 32. (in Chinese with English abstract)
- Garbaye, J., J. L. Churin & R. Duponnois. 1992. Effects of substrate sterilization fungicide treatment and mycorrhization helper bacteria on ectomycorrhizal formation of pedunculate oak *Quercus robur* inoculated with *Laccaria laccata* in two peat bare-root nurseries. *Biology and Fertility of Soils*, **13**: 55 ~ 57.
- Gong, M. Q. (弓明钦), Y. L. Chen (陈应龙) & C. L. Zhong (仲崇禄). 1997. *Mycorrhizal research and application*. Beijing: China Forestry Publishing House. 70 ~ 104. (in Chinese)
- Herrmann, S., J. C. Munch & F. Buscot. 1998. A gnotobiotic culture system with oak microcuttings to study specific effects of mycobionts on plant morphology before, and in the early phase of, ectomycorrhiza formation by *Paxillus involutus* and *Piloderma croceum*. *New Phytologist*, **138**: 203 ~ 212.
- Hervey, A. E., M. F. Jurgensen & M. J. Larsen. 1980. Clearcut harvesting and ectomycorrhizae: survival of activity on residual roots and influence on a bordering forest stand in western Montana. *Canadian Journal of Forest Research*, **10**: 300 ~ 303.
- Hogetsu, T. 1998. A hidden actor in the forest ecosystem: symbiosis between trees and ectomycorrhizal fungi. *Protein, Nucleic Acid and Enzyme*, **43**: 1246 ~ 1253. (in Japanese)
- Holden, J. M., G. W. Thomas & R. M. Jackson. 1983. Effect

- of mycorrhizal inocula on the growth of Sitka spruce seedlings in different soils. *Plant and Soil*, **71**: 313 ~ 317.
- Huang, Y. Q. (黄永青). 1996. Epigeous macrofungocoenoses diversity in Dongling Mountain, Beijing, China. Research Report of Postdoctoral Fellow of Institute of Microbiology, the Chinese Academy of Sciences. (in Chinese with English abstract)
- Hung, L. L. & R. Molina. 1986. Use of the ectomycorrhizal fungus *Laccaria laccata* in forestry. III. Effects of commercially produced inoculum on container-grown Douglas-fir and Ponderosa pine seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*, **16**: 802 ~ 806.
- Lin, S. H. (林舜华), B. Xiang (项斌), L. M. Gao (高雷明) & Y. X. Huang (黄银晓). 1997. The response of *Quercus liaotungensis* to doubled CO₂ concentration. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **21**: 297 ~ 303. (in Chinese with English abstract)
- Majumdar, S. K., C. C. Derivaux, S. L. Hofkin, C. C. Daehler, S. Geist, T. A. Baker, B. Baker & M. Connaughton. 1992. Morphological studies of oak mycorrhizae from two forest habitats differing in their sensitivities to acid precipitation in eastern Pennsylvania. *Phytomorphology*, **42**: 109 ~ 115.
- Mason, P. A., J. Wilson & F. T. Last. 1983. The concept of succession in relation to the spread of sheathing mycorrhizal fungi on inoculated tree seedlings growing in unsterile soil. *Plant and Soil*, **71**: 247 ~ 256.
- Newton, A. C. & J. M. Haigh. 1998. Diversity of ectomycorrhizal fungi in Britain: a test of the species-area relationship, and the role of host specificity. *New Phytologist*, **138**: 619 ~ 627.
- Pera, J., I. F. Álvarez, A. Rincón & J. Parladé. 1999. Field performance in northern Spain of Douglas-fir seedlings inoculated with ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, **9**: 77 ~ 84.
- Perry, D. A., R. Molina & M. P. Amaranthus. 1987. Mycorrhizae, mycorrhizospheres, and reforestation: current knowledge and research needs. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 929 ~ 940.
- Priya, R., A. Ashok, R. S. Mehrotra, P. Rani & A. Aggarwal. 1999. Growth responses in *Acacia nilotica* inoculated with VAM fungi (*Glomus mosseae*), *Rhizobium* sp. and *Trichoderma harzianum*. *Indian Phytopathology*, **52**: 151 ~ 153.
- Probanza, A., J. L. Mateos, J. A. L. Garcia, B. Ramos, M. R. de Felipe & F. J. G. Manero. 2001. Effects of inoculation with PGPR *Bacillus* and *Pisolithus tinctorius* on *Pinus pinea* L. growth, bacterial rhizosphere colonization, and mycorrhizal infection. *Microbial Ecology*, **41**: 140 ~ 148.
- Reddy, M. S. & K. Natarajan. 1997. Coinoculation efficacy of ectomycorrhizal fungi on *Pinus patula* seedlings in a nursery. *Mycorrhiza*, **7**: 133 ~ 138.
- Requena, N., I. Jimenez, M. Toro & J. M. Barea. 1997. Interactions between plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR), arbuscular mycorrhizal fungi and *Rhizobium* spp. in the rhizosphere of *Anthyllis cytisoides*, a model legume for revegetation in Mediterranean semi-arid ecosystems. *New Phytologist*, **136**: 667 ~ 677.
- Smith, S. E. & D. J. Read. 1997. *Mycorrhizal symbiosis*. 2nd ed. San Diego: Academic Press. 164, 233 ~ 289.
- Timonen, S., H. Tammi & R. Sen. 1997. Characterization of the host genotype and fungal diversity in Scots pine ectomycorrhiza from natural hummus microcosms using isozyme and PCR-RFLP analyses. *New Phytologist*, **135**: 313 ~ 323.
- Trappe, J. M. 1977. Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries. *Annual Review of Phytopathology*, **15**: 203 ~ 222.
- Wu, B., K. Nara & T. Hogetsu. 1999. Competition between ectomycorrhizal fungi colonizing *Pinus desiflora*. *Mycorrhiza*, **9**: 151 ~ 159.
- Xavier, L. J. C. & J. J. Germida. 2002. Response of lentil under controlled conditions to co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia varying in efficacy. *Soil Biology & Biochemistry*, **34**: 181 ~ 188.
- Yan, X. F. (阎秀峰) & Q. Wang (王琴). 2002a. Ectomycorrhizal formation in seedlings of *Quercus liaotungensis*. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **26**: 64 ~ 68. (in Chinese with English abstract)
- Yan, X. F. (阎秀峰) & Q. Wang (王琴). 2002b. Effects of ectomycorrhizal inoculation on the seedling growth of *Quercus liaotungensis*. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **26**: 701 ~ 707. (in Chinese with English abstract)