

黑松三种菌根苗根系构型差异及其与生长的关系

吴小芹, 郑 玲, 叶建仁

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为探讨林木不同菌根根系亚宏观结构对植物生长的影响, 将黑松 (*Pinus thunbergii*) 分别接种黄色须腹菌 (*Rhizopogon luteous*, 简称 R1)、彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*, 简称 Pt₂) 和美味牛肝菌 (*Boletus edulis*, 简称 Be) 3 种外生菌根菌, 研究了不同菌根苗根系构型的差异及其与黑松生长的关系。结果表明, 黑松 3 种菌根苗的根系参数 (主根长、侧根总级数、一级侧根数量及直径、吸收根分布的范围、吸收根的数量及比表面积等) 均比对照有不同程度的增加, 且与黑松生长呈一定的正相关性; 黑松不同处理菌根苗的根系整体构型差异显著: 在生长最好的 R1 菌根苗根系中, 主根与侧根间具不同夹角的一级侧根分布均衡, 且横向生长 (80 ~ 90°) 的侧根较多, 其它角度 (60 ~ 80° 和 < 60°) 的一级侧根依次递减, 使整个根系呈“♡”型, 有效扩大了根系吸收的空间范围; 生长相对较差的 Be 菌根苗其根系不同角度的一级侧根分布不均或 80 ~ 90° 的侧根较少; Pt₂ 菌根苗生长较好, 其根系构型介于前二者之间; 而生长差的对照苗根最少, 几乎没有 80 ~ 90° 的一级侧根。由此可见, 不同菌根菌可通过影响根系的结构发育而影响黑松苗木的生长。

关键词: 外生菌根真菌; 黑松; 根系构型; 根系参数

文章编号: 1000-0933 (2009) 10-5493-07 中图分类号: Q141, Q143, Q958 文献标识码: A

Root architecture differences and their relationships with the growth of *Pinus thunbergii* seedlings with three kinds of ectomycorrhizae

WU Xiao-Qin, ZHENG Ling, YE Jian-Ren

College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5493 ~ 5499.

Abstract: To explore the effects of sub-macrosarchitecture of different root systems on seedling growth, *Pinus thunbergii* seedlings were inoculated with three ectomycorrhizal fungi: *Rhizopogon luteous* (R1), *Pisolithus tinctorius* (Pt₂), and *Boletus edulis* (Be), respectively, to study the relationships of different ectomycorrhizal root architectures and the growth of *Pinus thunbergii* seedlings. Results showed that the root parameters (length of tap roots; total orders, numbers, and diameters of primary lateral roots; distribution range, number, and specific surface area (the ratio of surface area/volume) of absorptive roots) of *Pinus thunbergii* seedlings with three kinds of ectomycorrhizae increased at different degrees in comparison with non-inoculated seedlings (the control), and were positively correlated with the growth of *P. thunbergii*. The root architectures were significantly different among the seedlings with different ectomycorrhizal roots. In the root system of the seedlings with R1, which grew best, the primary lateral root with different branching angles to tap roots were appropriately distributed. The ones with 80 — 90° branching angles were more than those with other branching angles and the lateral roots with branching angles of 60 — 80° and < 60° decreased descendingly, which made the root system “heart-shaped”, and increased the uptaking spacial areas of the root system efficiently. The seedlings with Be grew relatively worse. Its root systems with different branching angles were not well distributed and the primary lateral roots with branching

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30571471); 江苏省自然科学基金重点资助项目 (B K 2004217); 国家“十一五”科技支撑专题资助项目 (2006BAD08A1002)

收稿日期: 2008-06-20; 修订日期: 2008-09-23

致谢: 感谢美国康涅狄克州农业试验站李德伟博士对写作给予帮助。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xqwu@njfu.com.cn

angles of 80—90° were less than those with other two ectomycorrhizal roots. The root architectures of the seedlings with Pt₂ were between the ones with Rl and Be. The control seedlings developed the least roots, and almost no lateral roots with branching angles of 80—90°. Thus, ectomycorrhizal fungi had impact on the seedling growth of *Pinus thunbergii* by affecting the architectural development of its root systems.

Key Words: ectomycorrhizal fungi; *Pinus thunbergii*; root architectures; root parameters

菌根是高等植物的根系与真菌形成的互惠共生体,能有效地促进宿主植物的生长。有关菌根的促生作用机理,以前的研究主要侧重于菌根能改善土壤养分状况及促进根系发育而增强吸收能力等方面^[1,2],而对宿主植物根系构型的研究较少。近年来,有关植物根系构型的研究日渐增多。根系构型是指同一根系中不同类型的根在生长介质中的空间分布,包括立体几何构型和平面几何构型。对于立体几何构型,目前尚无定量描述的综合指标;而平面几何构型则可由能直接测定的指标(如主根与侧根之间的夹角等参数)描述,各类根的根长、根重和吸收面积等指标在一定程度上也能间接反映此特征^[3]。研究发现,土壤养分(如氮、磷、硫等)的有效性影响根构型的形成,如根毛的形成、主根的生长和侧根的形成,同时植物可以通过分泌激素来调控根构型的形成^[4]。由于菌根的存在,使得土壤养分、根系构型、植物激素之间的关系更加密切复杂。因此研究菌根与寄主植物根系构型的关系对阐明菌根对植物的促生机理具有较重要的意义。本研究以黑松(*Pinus thunbergii*)为材料,从宿主植物吸收养分的主要器官——根系的角度来探讨不同林木外生菌根菌与黑松形成的根系构型的差异及其对黑松生长的影响,为进一步阐明菌根的作用机理提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试外生菌根菌及其固体菌剂的制备

试验采用 3 种外生菌根菌:黄色须腹菌(*Rhizopogon luteous*,简称 Rl)、彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*,简称 Pt₂)和美味牛肝菌(*Boletus edulis*,简称 Be)。参见吴小芹等方法^[5]制备固体菌剂。

1.2 供试松树及菌根苗的培育

供试松树为黑松(*Pinus thunbergii*),种子来源于山东。

从江苏句容林场采集松林土,将土壤一部分保持自然状态(非灭菌土),另一部分经高温高压灭菌 2h 后待用(灭菌土)。将非灭菌土和灭菌土分装入营养杯,用培养好的 3 种外生菌根菌剂分别对黑松幼苗(播种后 20d 左右)进行截根菌根化接种后植入营养杯^[5],对照(CK)不接菌,共计 8 个处理,每处理 20 株苗。所有试验苗均在 25℃ 温室中培养,进行统一的光照和浇水管理。

1.3 菌根苗生长量的测定

黑松不同外生菌根苗生长 14 个月后,分别测定各处理苗木的苗高和地径。

1.4 菌根苗根系参数的测定

每处理分别取生长处于处理内平均水平的黑松苗各 3 株,将带土根系在水中浸泡 10min,冲洗数次去掉根围土,剔除根际土壤及其它杂质,对以下根系参数进行测定。

(1) 主根及侧根根系参数

主根长,侧根总级数,一级侧根数,一级侧根长度和直径。

(2) 吸收根参数

① 吸收根集中分布的范围。

② 主根周围 3cm 范围内平均每支一级侧根上的吸收根数。

③ 吸收根的长度 L (mm)、直径 D (mm)、比表面积(SRA):每处理随机选取根系末级侧根上的 30 个吸收根段进行测定。比表面积的计算公式:比表面积(SRA) = 表面积/体积 = $\pi DL / \pi (D/2)^2 L = 4/D$ (吸收根按圆柱体计算,根尖端面积忽略不计)。

(3)根系空间构型参数

测定一级侧根与主根的夹角,根据夹角的大小将一级侧根分为 3 类(Ⅰ: <60°侧根;Ⅱ: 60 ~ 80°侧根;Ⅲ: 80 ~ 90°侧根),并分别计算各类角度侧根占一级侧根总数的比例。

1.5 数据统计分析

对黑松生长量和根系参数的测定值用 SPSS 软件进行统计分析,LSD 多重比较检验,显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同外生菌根菌对黑松苗木促生效应的比较

对黑松菌根苗苗高和地径进行测定并经统计分析表明(表 1),无论在非灭菌土还是灭菌土中,接种 R1 对黑松苗高的促生效果最好,平均增长率(灭菌土和自然土中增长率平均值)可达 31.74%,且与 Pt₂、Be、CK 均有显著差异。Pt₂和 Be 的促生效果相对次之,平均增长率分别为 22.82%和 22.15%,二者之间无显著差异。对地径而言,R1 的促生效果仍然最好,在灭菌土中与对照相比增长 53.33%,平均增长率达 36.28%;Pt₂略次之,平均增长率为 34.17%,且与 R1 没有显著差异;Be 相对较差,在非灭菌土中地径生长还略逊于对照,但在灭菌土中仍有 37.5%的增长率,平均增长率为 18.75%。菌根化苗木的生长状况在灭菌土中的表现总体优于非灭菌土(图 1),这表明非灭菌土中原有的微生物可能对目的菌根菌产生了一定的竞争拮抗性;而未接种目的菌根菌的对照苗在非灭菌土中的生长却稍好于灭菌土,说明非灭菌土中的一些微生物可能与黑松形成了些许的互惠关系,但其生长表现远不及在非灭菌土中接种了目的菌根菌的黑松(图 1)。由此可见,接种目的菌根菌能有效促进黑松的生长,但程度不一。

表 1 不同外生菌根菌对黑松苗木生长的影响

	苗高 Height of the seedling					地径 Root collar diameter				
	灭菌土		非灭菌土		苗高平均 增长率 (%)	灭菌土		非灭菌土		地茎平均 增长率 (%)
	平均值 (cm)	比对照 增长(%)	平均值 (cm)	比对照 增长(%)		平均值 (cm)	比对照 增长(%)	平均值 (cm)	比对照 增长(%)	
R1	8.58a	37.20	8.03a	26.28	31.74	3.00a	53.33	2.55a	19.22	36.28
Pt ₂	7.58b	28.89	7.12b	16.75	22.82	2.88a	51.39	2.48a	16.94	34.17
Be	7.75b	30.45	6.93b	13.85	22.15	2.24b	37.50	1.98b	—	18.75
CK	5.39c	—	5.97c	—	—	1.40c	—	2.06bc	—	—

在表中的同一列数值中,有不同小写字母者表示差异显著($P < 0.05$),以下表格标注相同;平均增长率(%) = (灭菌土中增长率 + 自然土中增长率) / 2 Significant differences (LSD test, $P < 0.05$) were indicated by different letters in the same line; Increase rate referred to growth increase compared to the Control. Mean increase rate (%) = (increase rate (%) in sterilized soil + increase rate (%) in unsterilized soil) / 2; 灭菌土 Sterilized soil; 非灭菌土 Unsterilized soil; 平均值 Mean; 比对照增长 Increase rate compared to the control; 苗高平均增长率 Mean increase rate of heights; 地径平均增长率 Mean increase rate of root collar diameters

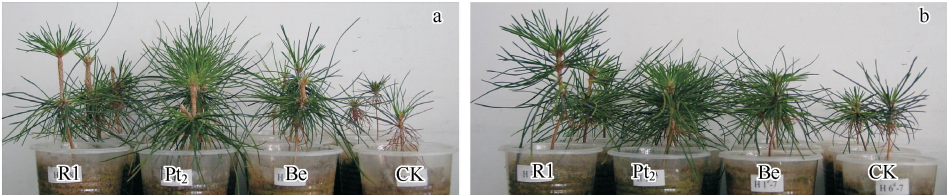


图 1 不同外生菌根菌对黑松苗木生长的影响

Fig. 1 The effect of different ectomycorrhizal fungi on the growth of *Pinus thunbergii* seedlings

a. 灭菌土 Sterilized soil, b. 非灭菌土 Unsterilized soil

2.2 黑松不同菌根苗主要根系参数差异及其与黑松生长的关系

黑松接种不同菌根菌生长 14 月后,其根系均比未接菌的对照发达,且差异显著;同时各菌根菌处理间的

根系生长状况也存在较大差异。RI 菌根苗的根系生长最为茂盛;Pt₂ 略次之;Be 菌根苗的根系生长较差(图 2)。

2.2.1 不同菌根苗主根及侧根根系参数的比较

黑松各菌根苗不论在灭菌土还是非灭菌土中,其主根及侧根的生长状况均优于对照;但各菌根菌处理间有所差异(表 2)。

在灭菌土中,RI 菌根苗主根平均长度为 93cm,最长可达 140cm;Pt₂ 菌根苗主根生长较一致,其根长约为 50~60cm 左右;Be 菌根苗的主根长 80~85cm 左右;而对照苗的主根最短,平均根长只有 35cm(最长的主根也仅为 50cm,最短只有 20cm)。在非灭菌土中,各处理黑松苗的主根长度为 RI > Pt₂ > Be > CK。

就侧根总级数而言,灭菌土中 RI 菌根苗的根系最多可达 6 级分支,Pt₂ 5 级,Be 4 级,CK 根系分支最少,只有 3 级;非灭菌土中不同处理间没有差异,都为 3 级,分支末端多形成珊瑚状或二叉分支的菌根。黑松不同菌根苗的第一级侧根数均多于对照,一般为 8~10 条;而对照一般为 5~7 条。此外,黑松菌根苗第一级侧根直径均比对照有较大程度的增粗,可达 0.7~0.85mm,而对照苗直径 < 0.5mm;各菌根菌处理之间则差异不显著。

表 2 黑松不同外生菌根苗主根及侧根根系参数

Table 2 The main and lateral roots parameters of different ectomycorrhizal *Pinus thunbergii* seedlings

	主根平均长(cm)		侧根总级数		第一级侧根数(条/株)		第一级侧根直径(mm)	
	灭菌土	非灭菌土	灭菌土	非灭菌土	灭菌土	非灭菌土	灭菌土	非灭菌土
RI	93	59	5~6	3	7~9	8~10	0.85a	0.8a
Pt ₂	54	50	5	3	8~9	8~9	0.8a	0.72a
Be	83	34	4	3	8~9	9~10	0.7a	0.50bc
CK	35	33	3	3	4~6	6~8	0.45b	0.46c

主根平均长 Mean length of main roots; 侧根总级数 Total order of lateral roots; 第一级侧根数(条/株) Number of the first order lateral root (pieces / seedlings); 第一级侧根直径 Diameter of the first order lateral root; 灭菌土 Sterilized soil; 非灭菌土 Unsterilized soil

由上可见,3 种外生菌根菌均促进了黑松主根及侧根的生长,其促进效果在灭菌土中表现较好,这与黑松在灭菌土中的苗高和地径生长优于非灭菌土的结果一致。表明菌根菌能通过改变主根及侧根的生长状况来影响黑松的生长。

2.2.2 不同菌根苗吸收根参数的差异

吸收根对苗木根系的养分吸收代谢具有重要作用。黑松菌根苗的吸收根较对照发达,且数量较多;但各处理间存在差异(图 2)。不同菌根苗在灭菌土中吸收根集中分布的范围及其相关参数测定分析表明(表 3),RI 菌根苗的吸收根分布范围最广,达到根下 5~7cm;Pt₂ 次之;Be 的吸收根较少,只在根下 1~2cm 范围内生

表 3 黑松不同外生菌根苗吸收根参数的差异

Table 3 The absorption roots parameters of different ectomycorrhizal *Pinus thunbergii* seedlings

	灭菌土 Sterilized soil					非灭菌土 Unsterilized soil	
	吸收根集中分布的范围	根周 3cm 内一支侧根上的平均吸收根数(条)	吸收根长度 L (mm)	吸收根直径 D (mm)	吸收根比表面积 (SRA)	吸收根(菌根)集中分布的范围	吸收根数量
RI	根基以下 5~7 (cm)	114	3.31a	0.21a	19.29a	根基以下 3~5cm	很多
Pt ₂	根基以下 4~6 (cm)	103	3.23ac	0.21a	19.06a	根基以下 2~3cm	多
Be	根基以下 1~2 (cm)	43	2.84b	0.23b	17.93b	不集中分布	少
CK	不集中分布	25	3.02bc	0.28c	14.46c	不集中分布	少

吸收根集中分布的范围 Concentrated distributing scope; 根周 3cm 内一支侧根上吸收根数(条) Number of absorption roots per first order lateral root within 3cm from the main root (pieces); 吸收根长度 Length of absorption roots; 吸收根直径 Diameter of absorption roots; 吸收根比表面积 Specific surface area of absorption roots; 吸收根(菌根)集中分布的范围 Concentrated distributing scope of absorption roots (ectomycorrhizas); 吸收根数量 Number of absorption roots; 根基以下 Below the root base; 不集中分布 No concentrated distributing; 较多 More; 多 Many; 少 Few

长;CK 的吸收根最少,不集中分布。黑松菌根苗主根周围 3cm 范围内一支一级侧根上的吸收根数量均多于对照,各处理苗吸收根平均数量的顺序为:RI(114 条) > Pt₂(103 条) > Be(43 条) > CK(25 条)。

黑松苗吸收根的长度在菌根及非菌根处理间差异不大,但吸收根的直径在各处理间差异显著。RI 和 Pt₂ 菌根苗的吸收根平均直径均为 0.21mm,Be 菌根苗为 0.23mm,而 CK 苗为 0.28mm。由比表面积的计算公式可知,吸收根直径的大小直接反向影响了其比表面积的大小,因此,从 CK→Be→Pt₂ 和 RI,其菌根苗吸收根的比表面积逐渐增大,且差异均达到显著水平。结合 2.1 黑松苗生长状况来看,生长好的 RI 和 Pt₂ 菌根苗吸收根数量多,分布范围广,比表面积较大,因此提高了根系的吸收能力,促进了苗木的生长。

在非灭菌土中,各处理黑松苗均可见末级侧根上形成了明显的菌根,但未接目的菌的对照也形成了少量菌根。从图 2、表 3 可见,RI 处理苗的菌根数量多,集中分布的范围也较广,可达根基以下 3~5cm;Pt₂ 的菌根也较多,集中分布在根基以下 2~3cm 左右;Be 和对照形成的菌根均较少。在非灭菌土中黑松各处理根系中并未见到典型的吸收根,而是在末级侧根上形成了菌根而行使吸收根的功能,这与灭菌土中形成的吸收根有所差异。

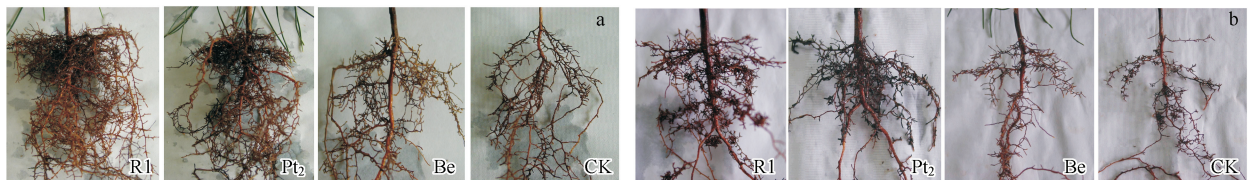


图 2 黑松不同菌根苗及对照苗根系生长状况

Fig. 2 The root systems of different ectomycorrhizal *Pinus thunbergii* seedlings

a. 灭菌土 Sterilized soil, b. 非灭菌土 Unsterilized soil

2.3 黑松不同菌根苗根系空间构型的差异

黑松接种不同外生菌根菌后,决定根系空间构型的第一级侧根的生长角度与对照有显著差异,同时各菌根菌处理之间也表现出较大差异(图 2,图 3)。在不同菌根苗及对照苗根系中,其 3 种类型一级侧根(<60°侧根、60~80°侧根和 80~90°侧根)所占比例无论在灭菌土还是非灭菌土中变化规律一致。RI 和 Pt₂ 菌根苗的根系各不同角度的根分布较均衡,可沿根围不同方向生长。如在灭菌土中,RI 和 Pt₂ 菌根苗沿主根分支成 80~90°的一级侧根几乎占侧根总数的一半,60~80°的一级侧根和<60°的一级侧根所占比例在 RI 菌根苗中分

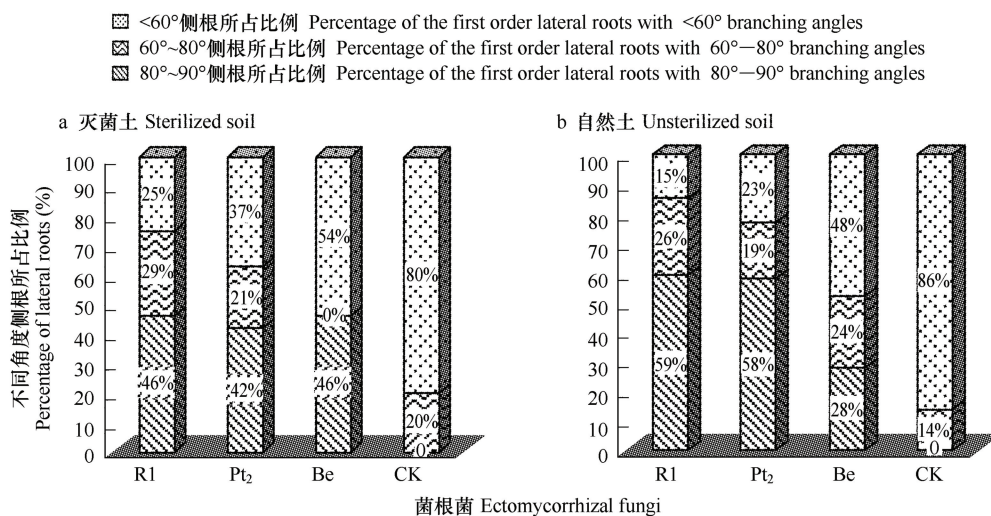


图 3 黑松不同外生菌根苗木根系不同角度一级侧根所占比例

Fig. 3 Percentage of three categories of the first order lateral roots in different ectomycorrhizal *Pinus thunbergii* seedlings

别为 29% 和 25%, 在 Pt_2 菌根苗中为 21% 和 37%, 从而使前者根系呈典型的“ $\heartsuit$ ”型, 后者近似“ $\heartsuit$ ”型。Be 菌根苗根系在灭菌土中 $80 \sim 90^\circ$ 的一级侧根也较多, 但 $60 \sim 80^\circ$ 的侧根几乎没有, 根系分布不均衡; 其在非灭菌土中根系虽分布较均衡, 但 $80 \sim 90^\circ$ 的一级侧根较少, 因而 Be 菌根苗的生长不如 RI 和 Pt_2 。对照根系中没有 $80 \sim 90^\circ$ 的一级侧根, 限制了根系的横向生长。结合黑松生长量来看, $80 \sim 90^\circ$ 的侧根或 $< 60^\circ$ 侧根的数量及所占比例对黑松生长具有极其重要的影响。随着黑松苗木根系中 $80 \sim 90^\circ$ 的一级侧根所占比例从 RI 菌根苗的 46% (灭菌土) 和 59% (非灭菌土) 逐渐减小到 0, $< 60^\circ$ 一级侧根所占比例从 RI 的 15% 逐渐增大到对照的 86% (图 3), 其生长量也从 RI $\rightarrow Pt_2 \rightarrow Be \rightarrow CK$ 而逐渐减小 (表 1, 图 1)。黑松对照苗根系由于缺少 $80 \sim 90^\circ$ 的一级侧根, 且主根较短, 根系不发达, 分布范围小, 而不利养分和水分的吸收, 影响了黑松苗木的生长。

3 结论与讨论

接种不同菌根菌后, 黑松苗根系构型及根系参数与对照相比都发生了不同程度的变化。Regvar and Gogala^[6] 研究发现, 云杉幼苗接种 Pt 后其侧根数量有所增加; 其它试验也表明外生菌根真菌的协同存在可以刺激侧根的发生和形成^[7,8]。同时, 从黑松不同菌根苗根系的整体构型来看, 其变化与黑松生长有较显著的相关性。RI 和 Pt_2 菌根苗的根系发达, 且 3 种不同角度的一级侧根生长分布均衡, 加强了植物对各层土壤尤其是表层土壤中丰富的养分和水分的吸收; Be 菌根苗的根系生长较不发达, 数量较少; 而对照苗的根系不仅数量少, 且几乎没有横向生长的一级侧根, 缩小了根系的生长范围。这说明根系构型可影响根系吸收养分和水分的的能力, 从而影响松苗的生长。

接种菌根菌后, 黑松苗木在非灭菌土与灭菌土中的根系参数有所差异, 如 Be 的主根长度和一级侧根直径及其生长量在灭菌土中明显大于非灭菌土, 这似乎表明非灭菌土中某些微生物与所接种的目的菌根菌之间可能存在某种竞争消长作用, 在一定程度上影响了 Be 菌根菌促生作用的最佳发挥, 从而影响了黑松的生长。同时, 黑松各处理苗木在非灭菌土中可见末级侧根上形成明显的菌根, 而在灭菌土中菌根形态不甚明显, 这暗示非灭菌土中原有的一些微生物 (如菌根促生细菌^[9,10] 或其它可能存在的菌根菌) 有助于菌根的形成和发育。然而, 灭菌土中的苗木接种后虽无明显可见的菌根形成, 但其生长也得到了明显的促进^[11], 这表明菌根菌的促生作用可能还与其分泌的一些胞外物质有关。

另外, 同种菌根真菌在不同生长条件下对宿主的促生效应表现不同, 特别是 Be 和 RI。本实验室曾在灭菌的基质 (沙子 + 蛭石) 中对黑松等松属植物接种 Be 和 RI, 发现 Be 的促生作用优于 RI^[5], 而本试验以土壤为生长基质则二者的表现是 RI 优于 Be, 这暗示菌根菌在不同生长介质中的生存适应能力不同, 表明菌根菌的促生作用可能还与土壤特性如土壤质地、pH 值、微生物以及养分状况等密切相关, 这些因素都可能在一定程度上影响菌根菌的作用。

本研究从根构型和根系参数角度探讨了不同外生菌根菌对黑松生长的影响, 为进一步探讨菌根的促生作用机理提供了参考。在今后的研究中, 可借助根系图像扫描仪和根系分析系统软件, 对根系参数进行更完整准确的测定, 同时还可结合土壤养分、土壤微生物和植物激素的测定分析, 深入研究菌根如何通过养分和激素等作用对植物根构型产生影响, 进一步阐明菌根的促生作用机理。

References:

- [1] Fitter A H, Hay R K M. Environmental physiology of plants, 2nd edn. Academic Press, London, 2002.
- [2] Lu X H. Summary of the function of ectomycorrhizas and their mechanism. Shanxi Forest Science and Technology, 2004, 4: 1—3.
- [3] Yan X L, Liao H, Ge Z Y. Root architectures and efficiency of phosphorus absorption. Chinese Bulletin of Botany., 2000, 17(6): 511—519.
- [4] José López-Bucio, Alfredo Cruz-Ramírez and Luis Herrera-Estrella. The role of nutrient availability in regulating root architecture. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6: 280—287.
- [5] Wu X Q, Sun M Q. Mycorrhizal formation between seven ectomycorrhizal fungi and seedlings of three pines species. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4186—4191.
- [6] Regvar M, Gogala N. Changes in root growth patterns of (*Picea abies*) spruce roots by inoculation with an ectomycorrhizal fungus *Pisolithus*

tinctorius and jasmonic acid treatment. *Trees*, 1996, 10: 410—414.

- [7] Karabaghli-Degron C, Sotta B, Bonnet M, Gay G, Le Tacon F. The auxin transport inhibitor 2,3,5-triodobenzoic acid (TIBA) inhibits the stimulation of in vitro lateral root formation and the colonization of the tap-root cortex of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings by the ectomycorrhizal fungus *Laccaria bicolor*. *New Phytologist*, 1998, 140:723—733.
- [8] Tranvan H, Habricot Y, Jeannette E, Gay G, Sotta B. Dynamics of symbiotic establishment between an IAA-overproducing mutant of the ectomycorrhizal fungus *Hebeloma cylindrosporum* and *Pinus pinaster*. *Tree Physiology*, 2000;123—129.
- [9] Duponnois R, Plenchette C. A mycorrhiza helper bacterium enhances ectomycorrhizal and endomycorrhizal sysmbiosis of Australian *Acacia* species. *Mycorrhiza*, 2003,13: 85—91.
- [10] Aspray TJ, Frey-Klett P, Jones JE, Whipps JM. Mycorrhization helper bacteria: a case of specificity for altering ectomycorrhiza architecture but not ectomycorrhiza formation. *Mycorrhiza*, 2006, 16:533—541.
- [11] Niemi K, H ggman H. Pisolithus tinctorius promotes germination and forms mycorrhizal structures in Scots pine somatic embryos in vitro. *Mycorrhiza*, 2002,12: 263—267.

参考文献:

- [2] 吕小红. 林木外生菌根作用及其机理综述. *山西林业科技*, 2004(4):1~3.
- [3] 严小龙,廖红,戈振扬,罗锡文. 植物根构型特性与磷吸收效率. *植物学通报*, 2000,17(6):511~519.
- [5] 吴小芹,孙民琴. 七株外生菌根真菌与三种松苗菌根的形成能力. *生态学报*, 2006,26(12):4186~4191.