

DOI: 10.5846/stxb201805091027

祁金玉, 邓继峰, 尹大川, 蔡立新, 刘冬萍, 张丽丽, 林梅. 外生菌根菌对油松幼苗抗氧化酶活性及根系构型的影响. 生态学报, 2019, 39(8): - .  
Qi J Y, Deng J F, Yin D C, Cai L X, Liu D P, Zhang L L, Lin M. Effects of inoculation of exogenous mycorrhizal fungi on the antioxidant and root configuration enzyme activity of *Pinus tabulaeformis* seedlings. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): - .

## 外生菌根菌对油松幼苗抗氧化酶活性及根系构型的影响

祁金玉\*, 邓继峰, 尹大川, 蔡立新, 刘冬萍, 张丽丽, 林梅

沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866

**摘要:** 研究盆栽条件下, 接种褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus*) 和红汁乳菇 (*Lactarius hatsudake*) 对油松 (*Pinus tabulaeformis*) 苗木生长, 抗氧化酶活性和根系构型的影响。结果表明: (1) 褐环乳牛肝菌和红汁乳菇均可与油松合成外生菌根, 并显著提高苗木的苗高、地径、鲜重和干重。(2) 接种褐环乳牛肝菌苗木针叶抗氧化酶 (SOD、CAT、POD) 活性分别比接种红汁乳菇苗木高 14.77%、20.77%、34.68%; 接种褐环乳牛肝菌苗木根系抗氧化酶 (SOD、CAT、POD) 活性分别比接种红汁乳菇苗木高 8.54%、4.34%、33.31%; 接种处理苗木抗氧化酶活性均显著高于不接种处理。接种处理苗木根长、表面积、体积、平均直径、根尖数、分叉数显著高于不接种处理; 接种处理间苗木只有根尖数存在显著差异; 接种褐环乳牛肝菌的油松根系分枝成 80°—90° 的一级侧根数占 23.81%, 显著多于接种红汁乳菇和对照苗木。研究表明, 接种褐环乳牛肝菌和红汁乳菇均能促进油松苗木生长, 提高油松体内抗氧化酶活性, 扩大苗木根系的吸收范围, 其中褐环乳牛肝菌各方面的促进效果要优于红汁乳菇。

**关键词:** 油松; 外生菌根真菌; 抗氧化酶; 根系构型

## Effects of inoculation of exogenous mycorrhizal fungi on the antioxidant and root configuration enzyme activity of *Pinus tabulaeformis* seedlings

QI Jinyu, DENG Jifeng, YIN Dachuan, CAI Lixin, LIU Dongping, ZHANG Lili, LIN Mei

College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

**Abstract:** The seedlings of *Pinus tabulaeformis* were inoculated with *Lactarius hatsudake* and *Suillus luteus* under pot culture conditions, and the growth characteristics, anti-oxidase activity and root architecture of seedlings after the formation of ectomycorrhizal fungi were examined. The results showed that: (1) The two exogenous mycorrhizal fungi variables can form exogenous mycorrhizae with *P. tabulaeformis* and the seedling height, ground diameter, fresh weight, and dry weight were significantly improved; (2) In the needles treated with *S. luteus*, the activity of superoxide dismutase (SOD) was 14.77% higher than that after *L. hatsudake* treatment, peroxidase (POD) was 20.77%, and catalase (CAT) was 34.68%. In roots treated with *S. luteus*, the activities of SOD, POD, and CAT were 8.54%, 4.34%, and 33.31% higher than those after *L. hatsudake* treatment, respectively. All root indices (root length, surface area, volume, average root diameter, number of root tips, and branching) and anti-oxidase activity with the two treatments were improved significantly. Among all root indices, there was only a significant difference in the number of root tips between the inoculation of *L. hatsudake* and *S. luteus*. Following *S. luteus* treatment, the seedling primary lateral roots number in the 80°—90° angle of branch was 23.81%, which was significantly greater than that following *L. hatsudake* treatment and in the control group (CK). Based on these results, *S. luteus* and *L. hatsudake* treatments improved seedling growth, enhanced the anti-oxidase activity of the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31800542); 辽宁省自然科学基金 (20180550893) 辽宁省教育厅项目 (1102-01052017004)

收稿日期: 2018-05-09; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qijinyu@126.com

seedlings, and enlarged the absorption range of the roots. Compare to *L. hatsudake* treatments, *S. luteus* treatment has better promotion effects on all seedling indices.

**Key Words:** *Pinus tabulaeformis*; ectomycorrhizal fungi; antioxidase; root architecture

油松 (*Pinus tabulaeformis*) 为中国特有树种。它适应性强,根系发达,耐干旱耐瘠薄,是我国北方地区最主要造林树种<sup>[1]</sup>,依赖菌根来吸收水分和养分以适应不良的环境条件<sup>[2-3]</sup>。外生菌根具有促进油松生长,增强油松抗逆性的作用<sup>[4-6]</sup>。

植物根系将植物固定在土壤中支撑着植物的地上部分,是植物吸收水分和养分的主要器官,根系的空间分布特征对其吸收水分养分的能力、根系生物量/根系生产力和根系动态变化有重要影响<sup>[7-8]</sup>。外生菌根真菌 (Ectomycorrhizal fungi; 简称 ECMF) 侵染植株根系后,增加了植株根系的适应性,拓宽了植株获取营养的渠道。吴小芹等<sup>[9]</sup>研究接种黄色须腹菌 (*Rhizopogon luteous*)、彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*) 和美味牛肝菌 (*Boletus edulis*) 均能增加黑松 (*P. thunbergii*) 根系直径、吸收根的范围等根系参数。翟帅帅等<sup>[10]</sup>研究褐环乳牛肝菌 (*S. luteus*) 接种马尾松显著增加了马尾松根系总长度、表面积、体积等根系参数,扩展了根系分布范围。目前对油松根系的研究,主要有不同光照、施用有机碳肥等条件下油松根系变化情况,以及建立油松根系的三维静态模型<sup>[11-13]</sup>。对于不同类型的外生菌根真菌接种后油松幼苗根系构型报道较少。

本研究通过对油松接种褐环乳牛肝菌 (*S. luteus*) 和红汁乳菇 (*L. hatsudake*),以期促进油松幼苗苗高地径的增长,提高苗木理化性质,探讨两种 ECMF 对油松根系构型的促生效应,为培育优良的油松菌根苗木,提高造林成活率,提供研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

油松种子由抚顺林业局提供。供试菌种:红汁乳菇 (*L. hatsudake*) 吉林农业大学惠赠;褐环乳牛肝菌 (*S. luteus*) 分离自辽宁省彰武县章古台实验林场。

### 1.2 试验准备

种子催芽:2016年4月20日播种,选取大小一致的油松种子,预先用0.5%高锰酸钾消毒30 min,无菌水冲洗数次后,用灭菌湿纱布包裹保湿,置于25℃人工气候箱中催芽,每天早、晚用无菌水各冲洗1次,直至出芽。

无菌土制备:试验用盆为营养钵(15 cm×12 cm×13 cm)。钵内预先装入121℃下高温高压灭菌2 h的混合土(草炭土:蛭石:河沙=2:1:1),每盆土量重约500 g。

菌剂制备:用直径5 mm的无菌打孔器,切取在平板培养基上培养好的褐环乳牛肝菌、红汁乳菇,分别接种于盛有250 mL PD液体培养基(配方:葡萄糖20 g,马铃薯200 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  3g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1.5g,  $\text{H}_2\text{O}$  1000 mL)的三角瓶中,每瓶接种3片菌饼。置于摇床上(25℃、160 r/min)振荡培养,得到液体菌剂。使用前按照菌剂和水体积为1:3的比例混合,用搅拌机将菌丝体搅碎做匀浆处理,备用。

### 1.3 试验设计

试验设置3种处理方式:

处理1:接种无菌PD培养基(CK);

处理2:接种红汁乳菇(LH);

处理3:接种褐环乳牛肝菌(SL);

待幼苗成活定株后,采取打孔灌根接种的方式接种红汁乳菇和褐环乳牛肝菌,每盆接种50 mL菌剂。CK施以等量无菌PD培养基。每个处理10次重复,每盆5株苗,共30盆,150株苗。

## 1.4 测定方法

### 1.4.1 菌根侵染率

在苗木生长 4 个月后,每处理随机挖取油松幼苗 10 株,在体式镜下观察菌根形态,测定菌根侵染率。

外生菌根侵染率采用统计计算法。将根样剪成 1 cm 等长的根段,随机选取根样,每样 100 个根段,在体式镜下观察外生菌根侵染率。

$$\text{菌根侵染率}(\%) = \frac{\text{侵染菌根根段数}}{\text{总根段数}} \times 100\%$$

### 1.4.2 苗木生长指标测定

每处理随机取样 10 株,轻轻抖掉表面土,流水冲掉根部附着土,用卷尺和游标卡尺分别测量植株的苗高、地径;用吸水纸吸干水分电子天平称取鲜重,80℃烘干至恒重称取干重。

### 1.4.3 苗木抗氧化酶活性

分别选取不同处理油松苗相同部位针叶和根系取样,利用南京建成试剂盒测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。

### 1.4.4 苗木根系参数测定

根系生长:扫描仪对不同处理的根系进行扫描、分级。用万深 LA-S 植物根系分析系统对根系长度、投影面积、表面积、体积、平均直径、根尖数、分枝数、交叉数等指标进行分析。

根系空间构型:测定一级侧根与主根的夹角,根据吴小芹<sup>[11]</sup>方法将一级侧根分为 3 类(Ⅰ:<60°侧根;Ⅱ:60°—80°侧根;Ⅲ:80°—90°侧根),计算各类角度侧根占一级侧根总数的比例。

## 1.5 数据统计

数据用 SPSS 进行单因素差异显著性分析, $\alpha=0.05$ ,并用平均值±标准差的形式表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 油松幼苗的菌根侵染率及形态观察

油松幼苗菌根侵染率见表 1,菌根形态见图 1。由表 1 可知,两种外生菌根菌均能与油松形成外生菌根,其中褐环乳牛肝菌与油松菌根合成率最高为 68.62%,红汁乳菇与油松菌根合成率为 62.12%,二者差异不显著。

褐环乳牛肝菌与油松可形成棒状和二叉状分支的菌根;红汁乳菇与油松形成的菌根中只观察到棒状菌根。形成菌根的苗木根系前端有膨大增粗,呈盾圆形。对照未形成菌根根系前端平齐。

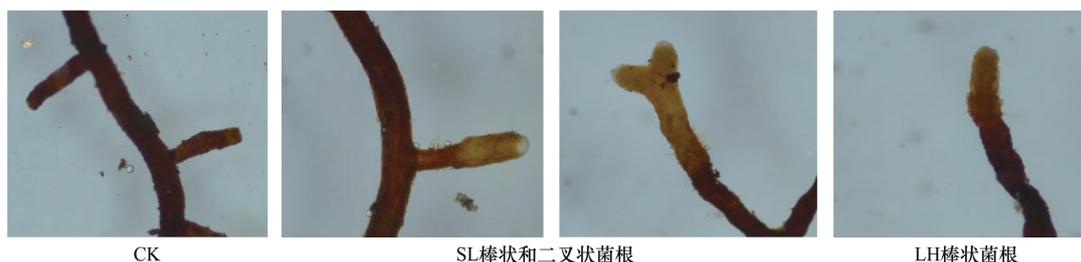


图 1 形成菌根形态(20×)

Fig.1 The formation of mycorrhizal synthesis(20×)

CK:对照 Control check;LH:红汁乳菇 *Lactarius hatsudake*;SL:褐环乳牛肝菌 *Suillus luteus*

### 2.2 不同外生菌根菌对油松幼苗生长的影响

对照油松生长纤细,针叶稀疏,接种红汁乳菇和褐环乳牛肝菌处理油松幼苗生长健壮,针叶较对照茂密,其中接种褐环乳牛肝菌油松针叶尤其茂盛。

接种处理均能显著提高油松的苗高、地径;地上和地下部分的鲜重、干重。不同接种处理只有地径差异不显著( $P>0.05$ ),接种褐环乳牛肝菌相比接种红汁乳菇的苗木苗高增加 12.17%;地上和地下部分的鲜重增加 37.68%、60.68%;地上和地下部分的干重增加 40.11%、61.64%。

表 1 不同处理对幼苗生长的影响

Table 1 Effects of different treatments on seedling growth

处理 Treatment	苗高 Plant height/cm	地径 Ground diameter/cm	地上部 Shoot/g		地下部 Root/g		菌根侵染率 Mycorrhizal infection rate/%
			鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	
CK	6.81±0.71a	0.642±0.01a	0.4713±0.11a	0.165±0.03a	0.1576±0.03a	0.0623±0.02a	3.85±0.03a
LH	8.23±0.82b	0.853±0.01b	0.9147±0.15b	0.2963±0.03b	0.2683±0.06b	0.1027±0.02b	62.12±0.03b
SL	9.37±0.36c	0.898±0.01b	1.4677±0.19c	0.4947±0.04c	0.6823±0.24c	0.2677±0.09c	68.62±0.03b

CK:对照 Control check;LH:红汁乳菇 *Lactarius hatsudake*;SL:褐环乳牛肝菌 *Suillus luteus*

### 2.3 不同外生菌根菌对油松幼苗抗氧化酶活性的影响

不同处理油松幼苗抗氧化酶活性见表 2。接种外生菌根菌的油松幼苗针叶和根系 SOD、POD、CAT 3 种抗氧化酶活性均大于不接种处理,经方差分析接种处理与对照 CK 存在显著差异。接种褐环乳牛肝菌幼苗针叶的抗氧化酶活性均大于接种红汁乳菇幼苗,其中 SOD 活性比接种红汁乳菇的高 14.77%,POD 活性高 20.77%,CAT 活性高 34.68%;根系中抗氧化酶活性也均大于接种红汁乳菇幼苗,分别高出 8.54%、4.34%、33.31%。

表 2 不同处理对幼苗针叶和根系抗氧化酶活性的影响( $U\ g^{-1}\ s^{-1}$ )Table 2 *Pinus tabulaeformis* seedling needles and root antioxidant activity under different the mycorrhizal inoculation

幼苗部位 Seedling parts	处理 Treatment	超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (SOD)	过氧化物酶 Peroxidase(POD)	过氧化氢酶 Catalase (CAT)
针叶 Needle leaf	CK	119.75±2.53a	9.29±0.31a	2.00±0.44a
	LH	201.08±2.06b	11.60±0.64b	2.26±0.18b
	SL	236.20±5.65c	14.64±1.59c	3.46±0.25c
根系 Root system	CK	178.18±2.53a	13.82±0.84a	9.03±0.26a
	LH	298.54±2.47b	18.49±1.25b	16.14±1.76b
	SL	326.44±3.65c	19.33±1.53b	24.20±1.62c

### 2.4 不同外生菌根菌对油松幼苗根系构型的影响

#### 2.4.1 根系参数

不同处理根系生长参数测定结果见表 3。接种处理显著提高了油松根系长度、表面积、体积、平均直径、根尖数、分叉数。接种褐环乳牛肝菌和红汁乳菇处理与对照相比,根系长度分别增加 12.82%和 19.15%;表面积分别增加 70.37%、69.81%;根系体积分别增加 92.34%、92.61%;根系平均直径均增加 66.67%;根尖数分别增加 92.24%、88.13%;分叉数分别增加 79.29%、80.41%。

表 3 不同处理幼苗根系生长参数

Table 3 Morphological parameters of different treatments

处理 Treatment	根长 Length/cm	表面积 Surface area/cm <sup>2</sup>	体积 Volume/mm <sup>3</sup>	平均直径 Average diameter/mm	根尖数 Tips	分叉数 Bifurcation
CK	22.92±4.44a	0.16±0.02a	0.47±0.02a	0.06±0.01a	113.67±40.29a	19.33±4.64a
LH	26.29±4.76b	0.54±0.01b	6.14±0.01b	0.18±0.01b	1465.33±280.60b	93.33±5.44b
SL	28.35±2.41b	0.53±0.01b	6.36±0.02b	0.18±0.02b	957.67±172.57c	98.6±14.01b

2 种接种处理根系参数中根系长度增加幅度较小,在 10.00%—20.00%之间;其余指标均增加 60.00%以

上。方差分析表明接种处理与对照均存在显著差异,两种接种处理间只有根尖数存在显著差异,其他根系参数指标均差异不显著。

#### 2.4.2 油松不同菌根幼苗根系空间构型

不同处理油松幼苗的根系分布情况见图 2、图 3。

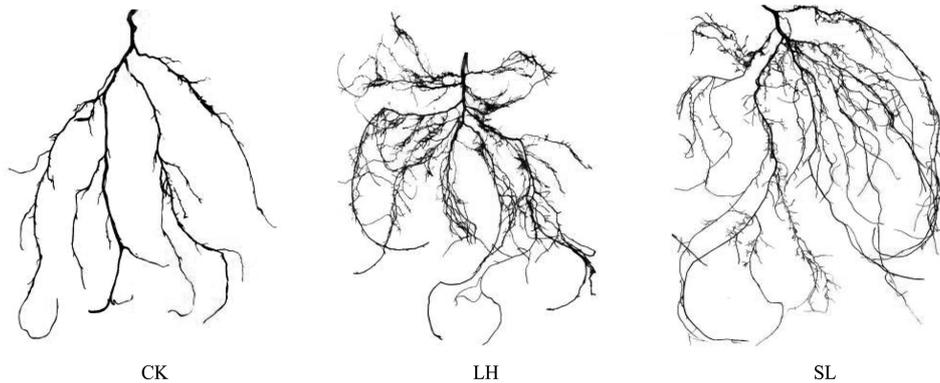


图 2 不同处理油松根系形态

Fig.2 *Pinus tabulaeformis* root morphology under different treatments

由图 2 可见接种褐环乳牛肝菌的油松根系构型明显优于接种红汁乳菇和对照。由图 3 可见接种褐环乳牛肝菌幼苗根沿主根分支成  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  的一级侧根占 23.81%,  $60^{\circ}$ — $80^{\circ}$  的一级侧根占 16.65%,  $<60^{\circ}$  的一级侧根占 59.54%; 接种红汁乳菇幼苗根沿主根分支成  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  的一级侧根占 13.3%,  $60^{\circ}$ — $80^{\circ}$  的一级侧根占 17.34%,  $<60^{\circ}$  的一级侧根占 69.36%; 对照幼苗根沿主根分支成  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  的一级侧根仅占 2.41%,  $60^{\circ}$ — $80^{\circ}$  的一级侧根占 4.91%,  $<60^{\circ}$  的一级侧根占 92.68%。其中褐环乳牛肝菌  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  的一级侧根最多,红汁乳菇次之,对照根系中所占比例最少,因而接种褐环乳牛肝菌幼苗的根系沿根围不同方向生长范围最广,对照根系中  $80^{\circ}$ — $90^{\circ}$  的一级侧根少,限制了根系的横向生长。

### 3 结论与讨论

研究表明,在实验室条件下选用的两种外生菌根菌均能与油松合成典型的外生菌根,菌根侵染率超过 60%。低于刘强<sup>[14]</sup>褐环乳牛肝菌与油松的菌根合成率和翟帅帅等<sup>[10]</sup>褐环乳牛肝菌与马尾松菌根合成率,这可能是由于不同采集地点菌株差异、不同寄主植物间差异或菌剂施用浓度的差异。褐环乳牛肝菌与油松主要形成棒状和二叉状菌根;红汁乳菇与油松主要形成棒状菌根,试验中未观察到其他形态菌根。研究结果同时表明,两种外生菌根接种处理均显著提高了油松幼苗的苗高、地径、干重、鲜重。

CAT、POD 和 SOD 是植物体内主要的抗氧化酶系,通过它们的变化程度可以反映植物的抗逆性<sup>[15]</sup>。SOD 作为植物抗氧化系统的第一道防线在生物体中普遍存在,它将超氧阴离子自由基转化为过氧化氢,控制细胞膜脂过氧化,接着由 CAT 和 POD 立即将过氧化氢分解为无害的水<sup>[16-17]</sup>。在正常的条件下,植物体内酶彼此协调,防御系统中酶的活性高低就成为控制伤害的决定因素,也能较好地反映植物对逆境的适应能力<sup>[18]</sup>。本研究中接种外生菌根油松幼苗的针叶和根系 3 种抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性显著高于不接种

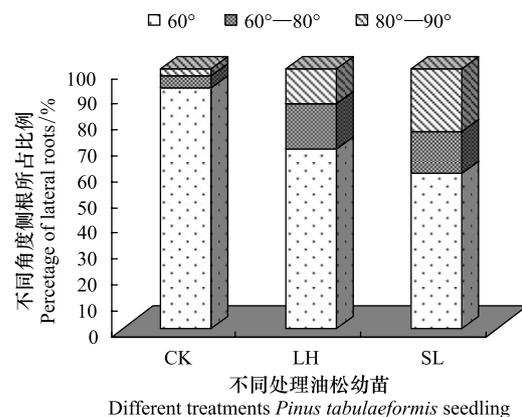


图 3 油松不同外生菌根苗木根系不同角度一级侧根所占比例

Fig.3 The occupation of primary lateral roots in the different angle of branch under different the mycorrhizal inoculation

处理,两种外生菌根菌处理间褐环乳牛肝菌针叶和根系抗氧化酶活性均高于红汁乳菇处理,其中只有根系 POD 活性间无显著差异,其余均具有显著差异。

生长指标可以直接评价苗木生长的好坏程度。油松接种两种外生菌根菌后,苗高、地径等生长指标有了显著提高,说明选用的两种外生菌根菌均具有促进苗木生长的作用。褐环乳牛肝菌与松科合成菌根的研究较多,红汁乳菇研究报道较少,周崇莲等<sup>[19]</sup>报道了红汁乳菇与马尾松形成菌根促进生长;薛振文等<sup>[20]</sup>研究了与马尾松接种适宜的红汁乳菇菌剂量;李小利<sup>[21]</sup>研究了红汁乳菇与黑松能形成菌根,其他大多是野外调查红汁乳菇与松科植物的菌根情况<sup>[22]</sup>。本研究证明红汁乳菇也能在人工条件下与油松形成菌根,并促进油松生长。但研究结果表明接种褐环乳牛肝菌对油松幼苗生长及生物量的积累作用优于红汁乳菇,同时,接种褐环乳牛肝菌的油松苗木针叶和根系中保护酶活性均高于红汁乳菇接种苗木。生长健壮的苗木,其体内抗氧化酶系也相应的高,进一步从生理角度证明适宜接种褐环乳牛肝菌培育油松壮苗。

根系长度、表面积和体积是衡量植物根系分布范围的重要参数,接种红汁乳菇和褐环乳牛肝菌增加了油松根系总长度、表面积和体积。平均根系直径、根尖数、分叉数是衡量根系吸收功效的重要参数,接种红汁乳菇和褐环乳牛肝菌增加了油松根系平均直径、根尖数、分叉数。这与翟帅帅<sup>[10]</sup>在褐环乳牛肝菌对马尾松根系构型的促进作用的研究结果一致。

不同处理油松幼苗的根系各不同角度的根分布不均衡,其中接种褐环乳牛肝菌幼苗根沿主根分支成 80°—90°的一级侧根占 23.81%,显著大于红汁乳菇接种处理,<60°的一级侧根显著低于红汁乳菇处理。结合根系生长参数、一级侧根角度综合看,虽然在根系总长度、表面积等参数上红汁乳菇和褐环乳牛肝菌作用基本相同,但接种褐环乳牛肝菌油松幼苗一级侧根角度中 80°—90°的一级侧根最多,有利于根系扩大沿根围向不同方向生长的范围,表明褐环乳牛肝菌形成的油松根系发达、分布范围广,更利于养分和水分的吸收。所以接种褐环乳牛肝菌的处理方式更有利于油松生长。对照根系中 80°—90°的一级侧根很少,限制了根系的横向生长。一旦外生菌根菌与树木根形成外生菌根后,特殊结构和根-菌互作,使外生菌根具有诸多功能。有些地区缺乏外生菌根菌,在常规造林的过程中使其自然感染菌根真菌是相当难的,为了达到更高的油松造林成活率,人为菌根化苗木的培育就显得十分重要。

由于研究条件等的限制,相比较地上部分功能形状的研究,根系研究仍相对滞后<sup>[23]</sup>。本研究选用传统方法中的容器法,由于受容器限制,会抑制或影响根系生长,从而导致观测数据与实际情况的不符,还需要今后利用苗圃等野外实验条件进一步实验。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 邵东华, 杨喜平, 张晓东, 白淑兰, 峥嵘, 王璐钢. 浅黄根须腹菌侵染油松形成外生菌根. 生态学杂志, 2013, 32(1): 78-81.
- [ 2 ] 鲍瑾, 朱海军, 生静雅, 张普娟, 陈亚辉, 刘广勤. 外生菌根在林业上的应用. 安徽农业科学, 2014, 42(4): 972-973.
- [ 3 ] 花晓梅, Charles E. Cordell. 彩色豆马勃菌剂的应用研究. 林业科学, 1990, 26(4): 374-378.
- [ 4 ] 郭渊, 唐明, 王亚军, 杨彦军. 外生菌根真菌对油松幼苗的接种效应. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 116-119.
- [ 5 ] 白淑兰, 赵春杰, 房耀维, 白玉娥, 刘勇. 粘盖牛肝菌不同菌株对 Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的吸附及其对油松 Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的耐受性. 生态学报, 2005, 25(2): 220-224.
- [ 6 ] 张茹琴, 唐明, 张海涵. 四种外生菌根真菌对油松幼苗的抗猝倒病和促生作用. 菌物学报, 2011, 30(5): 812-816.
- [ 7 ] 丁红, 张智猛, 戴良香, 宋文武, 康涛, 慈敦伟. 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对于干旱胁迫的响应. 生态学报, 2013, 33(17): 5169-5176.
- [ 8 ] Bailey P H J, Currey J D, Fitter A H. The role of root system architecture and root hairs in promoting anchorage against uprooting forces in *Allium cepa* and root mutants of *Arabidopsis thaliana*. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(367): 333-340.
- [ 9 ] 吴小芹, 郑玲, 叶建仁. 黑松三种菌根苗根系构型差异及其与生长的关系. 生态学报, 2009, 29(10): 5493-5499.
- [ 10 ] 翟帅帅, 丁贵杰, 王艺, 罗晓蔓, 李敏. 褐环乳牛肝菌对马尾松幼苗根系构型的影响. 森林与环境学报, 2015, 35(3): 243-248.
- [ 11 ] 冯博, 徐程扬, 陈建军, 任军, 柴源, 腰政魁, 李金航, 王畅. 光照对 3 种针叶树种幼苗生长与根系发育影响的研究. 吉林林业科技, 2016, 45(1): 28-32.
- [ 12 ] 陈串, 孙保平, 张建锋, 申豪杰, 陈艺超. 有机碳菌剂对 4 种植物肥料利用率和根系形态的影响. 水土保持学报, 2017, 31(4): 272-276.

284-284.

- [13] 刘秀萍, 陈丽华, 宋维峰, 吴彦霖. 油松根系形态分布的分形分析研究. 水土保持通报, 2007, 27(1): 47-50, 54-54.
- [14] 刘强. 褐环乳牛肝菌不同菌株及其与油松合成的菌根苗对盐碱的适应性[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [15] He J L, Qin J J, Long L Y, Ma Y L, Li H, Li K, Jiang X N, Liu T X, Polle A, Liang Z S, Luo Z B. Net cadmium flux and accumulation reveal tissue-specific oxidative stress and detoxification in *Populus × canescens*. *Physiologia Plantarum*, 2011, 143(1): 50-63.
- [16] Alscher R G, Erturk N, Heath L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372): 1331-1341.
- [17] 张旭东, 王智威, 韩清芳, 王子煜, 闵安成, 贾志宽, 聂俊峰. 玉米早期根系构型及其生理特性对土壤水分的响应. 生态学报, 2016, 36(10): 2969-2977.
- [18] 崔婷茹, 于慧敏, 李会彬, 边秀举, 王丽宏. 干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响. 草业科学, 2017, 34(4): 788-793.
- [19] 周崇莲, 韩桂之, 周玉芝, 刘忱, 张维春, 许光辉. 几种松树外生菌根真菌的研究[J]. 生态学报, 1983, 3(2): 103-109.
- [20] 薛振文, 应国华, 吕明亮, 李伶俐, 高凤娟. 红汁乳菇与马尾松幼苗外生菌根合成研究. 中国食用菌, 2014, 33(3): 18-19.
- [21] 李小利. 外生菌根真菌菌株耐盐碱性筛选以及黑松(*Pinus thunbergii* Parl.)菌根苗合成、耐盐碱性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [22] 王淑清, 徐丽华. 东北主要用材树种外生菌根真菌资源调查研究. 辽宁林业科技, 2002, (3): 17-20.
- [23] 苗原, 吴会芳, 马承恩, 孔德良. 菌根真菌与吸收根功能性状的关系: 研究进展与评述. 植物生态学报, 2013, 37(11): 1035-1042.