

## 干旱胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗生长 和微量元素吸收的影响

王 艺, 丁贵杰

(贵州大学 造林生态研究所, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 在温室采用盆栽方法, 研究在 4 种干旱条件下, 5 种菌根真菌对马尾松 *Pinus massoniana* 幼苗生长和微量元素吸收的影响。结果表明: ①在干旱胁迫下, 外生菌根真菌能显著提高苗木苗高、地径、生物量和抗旱能力, 且不同菌种、不同干旱程度处理间的差异极显著。中度干旱胁迫时接种鸡油菌 *Cantharellus cibarius* 对苗高、地径促生效果最好, 分别比对照增加 27.8% 和 52.9%; 接种褐环乳牛肝菌 *Suillus luteus* Sp1 对苗木生物量促进效果最明显, 较对照增加 230%。②在干旱胁迫下, 外生菌根对苗木微量元素的吸收有一定影响。在中度干旱胁迫时, 接种褐环乳牛肝菌 Sp1 的苗木中铁、锰、铜和锌质量分数最高, 比对照分别增加 135%, 33%, 155% 和 96%。在中度胁迫下, 接种褐环乳牛肝菌 Sp1 的苗木中铁、锰、铜和锌质量分数与正常水分条件下该菌根化苗木相比增幅最大, 分别为 47.9%, 46.1%, 130.7% 和 49.0%。综上所述, 中度胁迫时, 接种褐环乳牛肝菌 Sp1 能增加苗木干物质的积累, 促进苗木对微量元素的吸收, 进而促进苗木生长, 提高苗木抗旱性。图 1 表 3 参 15

**关键词:** 森林培育学; 马尾松; 外生菌根; 干旱胁迫; 生长; 微量元素

**中图分类号:** S723      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2012)06-0822-07

## Growth and microelement absorption for *Pinus massoniana* seedlings with ectomycorrhizae and water stress

WANG Yi, DING Gui-jie

(Institute of Silviculture and Ecology, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** According to the principle of adjust measures to local conditions to choice the fine strains for afforestation, at the same time make mycorrhizal biological technology applied to production practice preferably. The effect of ectomycorrhizae on growth and microelement absorption of potted *Pinus massoniana* seedlings was studied in a greenhouse, by inoculating *Pisolithus tinctorius*, *Cenococcum geophilum*, *Cantharellus cibarius*, *Suillus luteus* respectively and control group, under the conditions of four levels water stress that make the relative water content of soil, to moisture conditions, light water stress, moderate water stress and severe water stress. Results showed that ectomycorrhizae significantly improved growth ( $P=0.01$ ), ground diameter ( $P=0.01$ ), and biomass ( $P=0.01$ ) of *P. massoniana* seedlings with drought stress. And the double factor analysis of variance showed that highly significant differences ( $P=0.01$ ) were also noted between the various strains, moisture, and the interaction of strains and water. The seedling by inoculating *Cenococcum geophilum* had the best growth increases for height (27.8%) and diameter (52.9%) compared to control group under the conditions of moderate water stress. And the seedling by inoculating *Suillus luteus* Sp1 had the best increased for biomass (230%) compared to control group. Ectomycorrhizae fungi could effect the seedling to absorption of microele-

收稿日期: 2011-12-29; 修回日期: 2012-03-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2011AA10020301); 贵州省特助人才课题(TZJF-2007 年 20 号); 人才基地建设项目(黔人办发[2009]9 号); 创新团队建设项目(黔科合人才团队 2011); 贵州大学研究生创新基金(省研农 2009002)

作者简介: 王艺, 博士研究生, 从事人工林培育研究。E-mail: 2003wangyi@163.com。通信作者: 丁贵杰, 教授, 博士生导师, 从事人工林培育及稳定性研究。E-mail: guijieding@yahoo.com

ment under the conditions of water stress. The seedling by inoculating *Suillus luteus* Sp1, had the high content of Fe, Mn, Cu, and Zn, and compared to control group, seedling microelement absorption increased for Fe (135%), Mn (33%), Cu (155%), and Zn (96%) under the conditions of moderate water stress. In addition, the seedling by inoculating *Suillus luteus* Sp1, had the best increased for Fe (47.9%), Mn (46.1%), Cu (130.7%), and Zn (49.0%) compared to moisture conditions, under the moderate water stress. Thus, inoculation with *Suillus luteus* Sp1 undergoing moderate stress could increase biomass, improve seedling absorption of microelements, promote seedling growth, and enhance seedling drought resistance. [Ch, 1 fig. 3 tab. 15 ref.]

**Key words:** silviculture; *Pinus massoniana*; ectomycorrhizae; water stress; growth; microelement

菌根菌通过大量伸展到土壤中的根外菌丝把土壤中的矿质元素、水分等运送到植物根内供植物吸收利用<sup>[1-2]</sup>, 同时通过根内菌丝从植物获得其生长繁殖所需的碳水化合物, 从而与植物形成一种营养上的共生关系<sup>[3]</sup>, 有利于植物的生长发育, 提高植物的抗性<sup>[4]</sup>。植物正常生长过程中, 不仅需要氮磷钾等大中量营养元素, 还需要必要的微量元素。微量元素在植物生命周期中扮演着非常重要的角色, 它们与植物的光合作用、碳水化合物的运转和积累密切相关, 对植物的干物质积累起着重要的作用。目前, 在干旱胁迫下外生菌根对苗木微量元素的影响方面研究甚少。本试验通过在干旱胁迫下, 研究外生菌根对马尾松 *Pinus massoniana* 苗木微量元素吸收及分布情况, 揭示菌根化苗木在干旱胁迫下生长发育的营养状况, 从而因地制宜地选择优良的菌种进行植树造林, 使菌根生物技术更好地应用到生产实践中。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验材料

试验菌种包括: 褐环乳牛肝菌 *Suillus luteus* Sp7 (简称 S7), 褐环乳牛肝菌 Sp1 (简称 S1), 鸡油菌 *Cantharellus cibarius* (简称 G), 彩色豆马勃 *Pisolithus tinctorius* (简称 C), 土生空团菌 *Cenococcum geophilum* (简称 T), 对照不接菌(ck)。试验树种为马尾松, 种子采自贵州省都匀市优良林分。

### 1.2 菌剂制备及培养

见参考文献[5]。

### 1.3 种子及土壤处理

选择籽粒饱满的马尾松种子, 流水冲洗。然后用体积分数为 75% 的乙醇表面消毒 1 min, 无菌水冲洗 4 次, 再用初始温度 45 °C 温水浸种 24 h, 湿纱布包裹, 置于 25 °C 恒温箱催芽, 待种子裂嘴露白时即可播种。试验基质是由第四纪红色黏土发育的黄壤与干净的河砂, 按体积 9:2 比例混合而成。苗床上的土壤用甲醛溶液进行消毒 10 d 后播种。盆栽土壤在高压灭菌锅内(压力 0.14 Mpa, 124~126 °C)连续灭菌 2 h 后备用。塑料花盆规格为 25 cm × 28 cm, 用体积分数为 95% 的乙醇擦拭后晾干。将灭菌基质称取 5 kg·盆<sup>-1</sup>, 装入灭菌好的花盆内备用, 供试土壤的基本理化性质: 全氮为 0.060 g·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.360 g·kg<sup>-1</sup>, 全钾 1.496 g·kg<sup>-1</sup>, 有效氮 66 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷 11 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效钾 164 mg·kg<sup>-1</sup>, 铁 16.3 mg·kg<sup>-1</sup>, 锰 8.2 mg·kg<sup>-1</sup>, 铜 1.6 mg·kg<sup>-1</sup>, 锌 5.6 mg·kg<sup>-1</sup>, 交换性钙 2.9 g·kg<sup>-1</sup>, 交换性镁 0.4 g·kg<sup>-1</sup>, 有机质 58.8 g·kg<sup>-1</sup>。

### 1.4 播种和接种

播种和接种同时进行, 采用条播方式, 先将培养好的菌丝液喷洒在苗床上, 然后将已催芽的种子播种于苗床上, 最后再将菌液喷洒于种子周围, 覆土。

### 1.5 试验设计

试验采用双因素随机区组试验设计。因素 A 为接种处理, 分别为 S7, G, S1, C, T 和 ck; 因素 B 为干旱胁迫处理, 分别为正常水分(65±5)%, 轻度胁迫(50±5)%, 中度胁迫(35±5)%, 重度胁迫(25±5)%。重复 3 次, 5 盆·处理<sup>-1</sup>, 2 株·盆<sup>-1</sup>。

选取各处理生长一致的 1 年生苗木移栽至花盆中, 统一浇水管理, 全部恢复正常生长后, 开展干旱胁迫试验。最初使每盆的土壤含水量均达到饱和状态, 然后在温室内模拟自然干旱胁迫。每天通过称量

法维持土壤相对含水量保持在试验设计的范围内。60 d后进行指标测定。

### 1.6 指标测定

干旱胁迫开始后每隔 10 d 测定 1 次苗高和地径，直至胁迫试验结束。在胁迫试验结束后测定生物量和微量元素。生物量的测定是将植株冲洗干净，然后置 80 °C 烘箱烘至恒量，称干质量。菌根依赖性 (%) = (接种处理干质量 - 不接种处理干质量) / 接种干质量 × 100<sup>[6]</sup>。土壤基本分析采用常规分析方法<sup>[7]</sup>。

### 1.7 数据处理

数据采用 Excel 和 SPSS 18.0 统计软件进行数理统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗生长的影响

2.1.1 苗高和地径 外生菌根真菌与干旱胁迫对幼苗生长均产生了显著影响(图 1 和表 1)。处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。在相同水分条件下，菌根化苗高和地径均高于对照。随干旱胁迫程度的加剧，对照苗高和地径逐渐降低，而菌根化苗木苗高、地径则先增后降，均在中度胁迫时达最大，彼此间差异随胁迫的加剧而增大。接种处理 T 的苗高和地径最高，较对照分别提高 27.8% 和 52.9%。说明在干旱胁迫条件下，接种外生菌根真菌能显著提高苗木生长和抗旱能力，其中以菌种 T 和 G 效果最好。

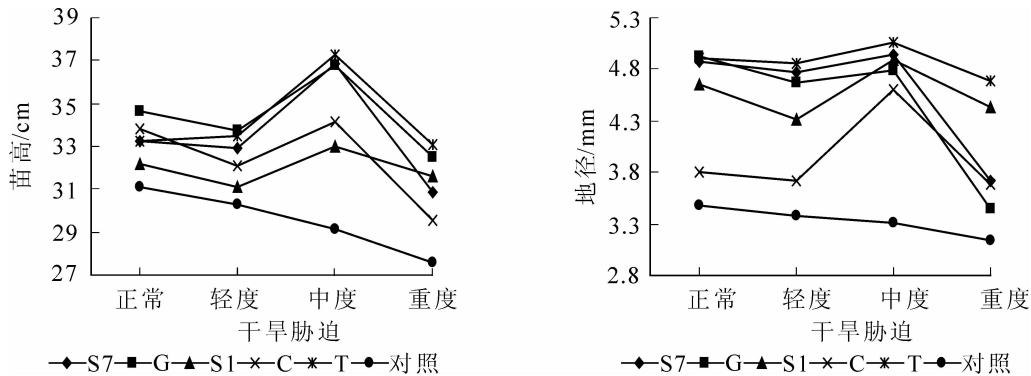


图 1 接种外生菌根真菌对马尾松苗高和地径的影响

Figure 1 Effects of different ectomycorrhizal fungi on the heights and ground diameters of *Pinus massoniana* seedlings

表 1 马尾松幼苗菌根真菌和干旱胁迫二因素试验方差分析

Table 1 Two factor analysis of *Pinus massoniana* seedlings in mycorrhizal fungi and drought stress

变异来源	苗高			地径			生物量		
	均值/cm	F 值	显著性	均值/mm	F 值	显著性	均值/g	F 值	显著性
A 接种菌根真菌	40.4	1.03	0.000	3.80	379.11	0.000	12.16	9.80	0.000
B 干旱处理	43.0	1.09	0.000	1.90	184.59	0.000	1.92	1.55	0.000
A×B	3.9	99.47	0.000	0.29	28.49	0.000	1.23	9.88	0.000
误差		0.39			0.48			1.24	

说明： $P < 0.01$  表示差异极显著。

2.1.2 生物量 接种外生菌根真菌能显著促进幼苗生物量的增加(表 2)。在相同水分条件下，菌根化苗木地上部分、地下部分和总生物量均高于对照，且处理间差异极显著( $P < 0.01$ )。随水分胁迫加剧，接种 S7 和 G 的苗木总生物量逐渐降低，而接种 S1, C 和 T 的苗木总生物量则先增后降，其中，接种 S1 和 C 的苗木在中度胁迫时达最大，分别比对照增加 230% 和 111%；接种 T 的苗木在轻度胁迫时达最大，比对照增加 268%。综合在各种水分胁迫条件下的表现，以菌种 S1 效果最好。说明在干旱缺水条件下，接种 S1 更能增强幼苗的吸收功能，增加干物质的积累，进而促进苗木的生长。

在干旱条件下，外生菌根真菌能显著促进苗木的地上和地下部分生长，特别是对根系的促进作用效果更加明显，因此，菌根化苗木的根冠比显著高于对照。在干旱条件下，外生菌根真菌能显著提高苗木

表 2 干旱胁迫下外生菌根真菌对幼苗生物量的影响

Table 2 Effect of ectomycorrhizal fungi on the biomass of *Pinus massoniana* under drought stress

干旱处理	菌种	地上部分/g	地下部分/g	总生物量/g	根冠比	菌根依赖性/%
正常	S7	3.51 fD	1.43 eD	4.94 fD	0.41 bA	75.1
	G	2.82 eD	1.63 fD	4.45 eC	0.58 eD	72.3
	S1	2.81 dD	0.74 cA	3.55 dB	0.26 aA	65.3
	C	1.11 bA	0.62 bC	1.73 bA	0.56 dD	28.8
	T	2.22 cC	1.12 dC	3.34 cC	0.51 cD	63.2
	对照	0.78 aC	0.45 aC	1.23 aC	0.58 eC	
轻度	S7	1.96 cB	0.92 cB	2.88 cB	0.47 cB	57.1
	G	2.44 eB	1.19 eC	3.63 eB	0.49 dC	66.0
	S1	2.43 dB	1.08 dC	3.68 eC	0.44 aC	64.8
	C	1.26 bB	0.57 bA	1.83 bB	0.45 bC	32.7
	T	3.04 fD	1.50 fD	3.51 dB	0.50 eC	72.8
	对照	0.71 aA	0.53 abD	1.24 aC	0.44 aD	
中度	S7	1.70 cA	0.86 bA	2.56 cA	0.51 eC	55.5
	G	2.46 eC	1.17 dB	3.63 eB	0.47 cA	68.7
	S1	2.54 fC	1.21 eD	3.76 fD	0.48 dD	69.7
	C	1.67 bD	0.73 cD	2.40 bD	0.44 cB	52.6
	T	1.89 dB	0.71 bA	2.59 dB	0.37 bA	56.0
	对照	0.90 aD	0.24 aA	1.14 aB	0.27 aA	
重度	S7	1.99 eC	1.080 fC	3.07 eC	0.54 fD	64.14
	G	1.87 dA	0.897 dA	2.77 dA	0.48 eB	60.22
	S1	2.42 fA	1.031 eB	3.45 fA	0.43 aB	68.10
	C	1.34 bC	0.580 bB	1.92 bC	0.43 aA	42.82
	T	1.64 cA	0.752 cB	2.39 cA	0.46 dB	54.03
	对照	0.76 aB	0.340 aB	1.10 aA	0.43 aB	

说明：同一列平均数后注有不同大小写英文字母者分别为达到新复极差测验 1%和 5%显著水平。

生物量，并通过增加根系生长，增强苗木对水分的吸收，提高苗木抗旱能力。

## 2.2 干旱胁迫下外生菌根真菌对幼苗微量元素的影响

2.2.1 对铁质量分数的影响 由表 3 可见：相同水分条件下，菌根化幼苗铁质量分数均高于对照，各菌种间差异显著( $P < 0.05$ )。然而随干旱胁迫加剧，苗木铁质量分数总体呈现下降趋势。在轻度、中度和重度胁迫时，分别以接种 C, S1, G 的苗木铁质量分数最高，分别较对照增加了 126%，135%和 100%。在同一菌种，不同干旱胁迫处理间苗木铁质量分数差异显著( $P < 0.05$ )。与正常水分条件相比，轻度干旱胁迫时，接种 S7 苗木的铁质量分数增幅最大，达 55.5%；在中度干旱胁迫时，接种 S1 苗木的铁质量分数增幅最大，达 47.9%；在重度干旱胁迫时，仅接种 G 的苗木铁质量分数高于正常水分条件，增幅达 20.9%。说明接种后，这些菌种既促进了苗木生长，又显著促进了苗木对铁的吸收，进而增强的苗木的抗旱性。

2.2.2 对锰质量分数的影响 在相同水分条件下，菌根化马尾松幼苗锰质量分数均高于对照，且各菌种间差异显著( $P < 0.05$ )。随干旱胁迫的加剧，除接种 C 外，其他苗木锰质量分数总体呈现上升趋势。在轻度干旱胁迫时以接种 S7 的苗木锰质量分数最高，较对照增加了 34.5%；中度和重度胁迫时，以接种

S1 的苗木质量分数最高, 分别较对照增加了 33.1%和 59.6%。在同一菌种, 不同干旱胁迫处理间苗木锰质量分数差异显著( $P<0.05$ )。与正常水分条件相比, 在轻度胁迫下, 接种 C 苗木的锰质量分数增幅最大, 达 50.1%; 在中度和重度胁迫下, 接种 S1 苗木的锰质量分数增幅最大, 分别比对照增加了 46.1%和 79.0%。说明外生菌根真菌能促进苗木对锰的吸收, 且在中度和重度干旱胁迫下, 接种 S1 对促进苗木锰吸收效果最好。

**2.2.3 对铜质量分数的影响** 外生菌根真菌对苗木铜吸收有一定影响, 且不同菌根化苗木表现不一致, 各菌种间差异显著( $P<0.05$ )。随水分胁迫的增加, 接种 S1 和 T 的苗木铜质量分数逐渐增加; 接种 S7, G 和 C 的苗木铜质量分数先增后减, 在轻度干旱胁迫时达最大。在轻度胁迫时, 接种 C 的苗木铜质量分数最高, 较对照增加了 128%; 中度和重度干旱胁迫时, 接种 S1 的苗木铜质量分数最高, 较对照分别增加 155%和 3.75%。在同一菌种, 不同干旱胁迫处理间苗木铜质量分数差异显著( $P<0.05$ )。与正常水分条件相比, 在轻度干旱胁迫下, 接种 C 的苗木铜质量分数增幅最大达 21.9%; 在中度胁迫和重度胁迫下, 接种 S1 苗木铜质量分数增幅最大, 分别为 130.7%和 14.5%。说明中度和重度干旱胁迫下, 接种 S1 能显著促进了苗木对铜的吸收。

**2.2.4 对锌质量分数的影响** 外生菌根真菌对马尾松幼苗锌吸收有一定的影响, 各处理间差异显著( $P<0.05$ )。随干旱胁迫的加剧, 除接种 S1 和 T 外, 其他苗木锌质量分数逐渐降低。在轻度、中度和重度胁迫时, 分别以接种 C, S1, T 的苗木锌质量分数最高, 分别较对照增加了 106%, 96%, 22%。轻度干旱胁迫下, 菌根化苗木锌质量分数均低于正常水分条件, 其中接种 C 的苗木降幅最小(2.56%)。在中度和重度干旱胁迫下, 接种 S1 苗木锌质量分数与正常水分条件相比增幅最大, 分别为达 49.0%和 29.3%。说明在中度和重度胁迫下, 接种 S1 能显著提高苗木锌质量分数。

**2.2.5 对钙质量分数的影响** 外生菌根的形成对苗木钙的吸收无明显促进作用, 但处理间差异显著( $P<0.05$ )。随干旱胁迫加剧, 苗木钙质量分数总体呈现下降趋势。在轻度胁迫时, 接种 S7 的苗木钙质量分数最高, 比对照增加了 152%。中度和重度胁迫时, 接种 G 的苗木钙质量分数最高, 分别比对照增加了 90%和 127%。在同一菌种, 不同干旱胁迫处理间苗木钙质量分数差异显著( $P<0.05$ )。与正常水分条件相比, 在轻度干旱胁迫下, 接种 S7 苗木钙质量分数增幅最大达 147.4%; 在中度干旱胁迫下, 接种 S7 苗木钙质量分数增幅最大达 55.5%; 在重度干旱胁迫下, 菌根化苗木钙质量分数均低于正常水分条件, 且接种 S7 苗木降幅最小(37.1%)。可见, 在轻度干旱胁迫下, 接种 S7 能促进苗木对钙的吸收, 而在重度干旱胁迫下, 外生菌根真菌不能促进苗木对钙的吸收。说明较低的土壤含水量会抑制苗木对钙的吸收。

**2.2.6 对镁质量分数的影响** 除轻度干旱胁迫时, 接种 C 的苗木镁质量分数显著低于对照外, 菌根化苗木在各水分处理下镁质量分数均高于对照, 且各处理间差异显著( $P<0.05$ )。随干旱胁迫的加剧, 除接种 C 外其他苗木镁质量分数逐渐增加。在轻度、中度和重度胁迫时, 分别以接种 S1, G, T 的苗木镁质量分数最高, 分别较对照增加了 35.6%, 56.2%, 67.6%。在同一菌种, 不同干旱胁迫处理间苗木镁质量分数差异不显著( $P<0.05$ )。与正常水分条件相比, 在轻度干旱胁迫下, 接种 S1 苗木镁质量分数增幅最大达 12.8%; 在中度干旱胁迫下, 接种 S1 苗木镁质量分数增幅最大达 20.3%。在重度干旱胁迫下, 接种 T 苗木镁质量分数增幅最大达 23.2%。可见, 在中度干旱胁迫时, 接种 S1 能促进苗木对镁的吸收; 而在重度干旱胁迫时, 接种 T 仍能促进苗木对镁的吸收。

### 3 结论与讨论

外生菌根能促进苗木生长<sup>[8-9]</sup>。外生菌根真菌侵染植株根系后, 改变了其根形态, 增加了植株根系的适应性, 拓宽了植株获取营养的渠道, 有利于根系在土壤中的生长<sup>[10]</sup>。本研究进一步表明: 在一定干旱条件, 菌根化苗木可通过促进根系生长, 促进苗木对水分的吸收来提高苗木抗旱能力, 进而促进苗木生长。但不同菌种促生效果不同, 在中度胁迫时菌种土生空团菌对苗高、地径促生效果最好, 分别比对照提高了 27.8%和 52.9%, 而菌种褐环乳牛肝菌 Sp1 对苗木生物量促进效果最明显, 较对照增加了 230%。

干旱胁迫下, 外生菌根真菌对苗木微量元素的吸收有一定影响, 这与前人的研究结果相一致<sup>[11-12]</sup>。轻度干旱胁迫时, 接种彩色豆马勃的苗木的铁、锰、铜和锌质量分数最高, 钙和镁最低; 在中度干旱胁迫

表 3 干旱胁迫下外生菌根真菌对苗木微量元素质量分数的影响

Table 3 Effect of ectomycorrhizal fungi on contents of microelements in *Pinus massoniana* seedlings under drought stress

干旱处理	菌种	铁/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	锰/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	铜/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	锌/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	钙/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	镁/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
正常	S7	363.7 aB	182.5 eA	14.8 aC	55.1 aD	10.7 bB	3.2 bA
	G	470.6 cB	177.6 dB	15.0 bC	55.6 bD	13.7 cB	3.6 bAB
	S1	540.1 dB	144.9 bA	15.3 cA	55.5 bB	10.2 aB	3.2 bA
	P	957.5 fC	328.5 fC	26.0 fC	79.3 eD	32.5 eD	4.1 cC
	T	550.9 eD	154.5 cB	16.3 dC	67.2 cB	19.8 dD	3.6 bcA
	对照	365.1 bC	144.1 aA	20.5 eD	76.7 dD	11.2 abC	2.4 aA
轻度	S7	565.8 dD	207.2 eD	17.8 eD	50.3 eB	28.2 fD	3.1 bcA
	G	439.2 cA	174.4 dA	15.2 cD	49.4 dC	20.7 eD	3.2 cA
	S1	574.0 eC	154.7 cB	15.4 dB	35.3 aA	15.5 dD	3.6 cAB
	P	962.4 fD	493.1 fD	31.7 fD	77.3 fC	4.9 aA	1.0 aA
	T	431.3 bA	153.5 aA	12.6 aA	39.4 cA	13.4 cC	3.7 cA
	对照	422.7 aD	154.0 bA	13.9 bB	37.5 bA	11.2 bC	2.7 bA
中度	S7	465.6 bC	196.7 dB	12.4 aA	43.4 bA	17.8 eC	3.1 bA
	G	594.0 eD	186.5 cC	14.0 cB	47.4 cB	18.3 fC	4.0 dB
	S1	798.9 fD	211.7 fC	35.3 fD	82.6 fD	14.3 cC	3.9 dB
	P	474.2 cB	206.5 eA	16.8 eB	52.7 dB	14.9 dC	3.4 bcB
	T	543.4 dC	182.0 bC	15.3 dB	72.2 eC	8.4 aB	3.7 cdA
	对照	340.0 aB	159.1 aB	13.8 bA	42.3 aB	9.6 bB	2.6 aA
重度	S7	353.7 cA	200.6 bC	14.0 cB	52.0 cC	7.2 cA	3.8 bB
	G	569.1 fC	237.0 eD	13.6 bA	46.9 bA	8.5 eA	3.6 bAB
	S1	538.6 eA	259.3 fD	17.5 fC	71.7 eC	5.3 bA	3.8 bB
	P	292.2 bA	209.2 cB	12.2 aA	39.1 aA	7.1 cB	3.5 bB
	T	447.4 dB	211.5 dD	17.3 eD	74.8 fD	7.9 dA	4.5 cB
	对照	285.0 aA	162.4 aC	16.9 dC	61.4 dC	3.7 aA	2.9 aA

说明：同一列平均数后注有不同大小写英文字母者分别为达到新复极差测验 1%和 5%显著水平。

胁迫时，接种褐环乳牛肝菌 Sp1 苗木铁、锰、铜和锌质量分数最高，钙和镁较低。从微量元素含量的变化来看，菌种 N1 对干旱胁迫的适应性很强，随着干旱胁迫的加重，菌种褐环乳牛肝菌 Sp1 能迅速适应干旱胁迫，各种微量元素质量分数逐渐增加。在中度胁迫时，接种褐环乳牛肝菌 Sp1 的苗木微量元素质量分数仍能维持在较高水平，这些都有助于增强苗木抵御干旱的能力，也就是说接种 S1 的苗木能通过对自身营养元素调节的方式，来增强苗木叶绿素含量和各种酶活性，从而更有利于苗木光合作用的正常进行，提高菌根化苗木的抗旱性。

综上所述：在干旱条件下，外生菌根真菌促进了马尾松幼苗的吸收功能，增加了干物质的积累，进而促进了植株的生长，该结果与其他学者的发现一致<sup>[13-15]</sup>。其中，在中度干旱胁迫时，接种褐环乳牛肝菌 Sp1 在生物量积累和促进苗木微量元素吸收方面综合效果最好。需要指出的是，在干旱胁迫下，由于不同菌株促进马尾松苗木生长、改善营养的效应有所差异，故在推广使用过程中应根据具体情况酌情选择。

#### 参考文献：

- [1] 朱教君，徐慧，许美玲，等. 外生菌根菌与森林树木的相互关系[J]. 生态学杂志，2003，22 (6)：70 - 76.

- ZHU Xiaojun, XU Hui, XU Meilin, *et al.* Review on the ecological relationships between forest trees and ectomycorrhizal fungi [J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (6): 70 – 76.
- [2] 张小龙, 张洪, 张香, 等. 外生菌根菌剂对白皮松幼苗生长效应的研究[J]. 林业科学研究, 2005, **18** (2): 133 – 136.
- ZHANG Xiaolong, ZHANG Hong, ZHANG Xiang, *et al.* Study on the effects of ectomycorrhizal preparation on seedling growth of *Pinus bungeana* [J]. *For Res*, 2005, **18** (2): 133 – 136.
- [3] 郑来友, 李文钊, 成小飞, 等. 彩色豆马勃与松树形成内外生菌根的研究[J]. 林业科学研究, 2003, **16** (3): 262 – 268.
- ZHENG Laiyou, LI Wendian, CHENG Xiaofei, *et al.* Study on ecto-endomycorrhizae associated by *Pisolithus tinctorius* with pine [J]. *For Res*, 2003, **16** (3): 262 – 268.
- [4] 姜学艳, 黄艺. 菌根真菌增加植物抗盐碱胁迫的机理[J]. 生态环境, 2003, **12** (3): 353 – 356.
- JIANG Xueyan, HUANG Yi. Mechanism of contribution of mycorrhizal fungi to plant saline-alkali tolerance [J]. *Ecol Environ*, 2003, **12** (3): 353 – 356.
- [5] 周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [6] PLENCHETTE C, FORTIN J A, FURLAN V. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P-fertility (I) Mycorrhizal dependency under field conditions [J]. *Plant Soil*, 1983, **70** (2): 199 – 209.
- [7] 李酉开. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 1 – 243.
- [8] 高悦, 吴小芹, 孙民琴. 马尾松不同菌根苗对氮磷钾的吸收利用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2009, **33** (4): 77 – 80.
- GAO Yue, WU Xiaoqin, SUN Minqin. Effects of ectomycorrhizal seedlings of masson pine on absorption and utilization of N, P and K [J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **33** (4): 77 – 80.
- [9] 付瑞, 郭素娟, 马履一. 菌根化栓皮栎苗木对不同土壤水分条件的形态和生理响应[J]. 西北林学院学报, 2011, **26** (2): 101 – 104.
- FU Rui, GUO Sujuan, MA Lüyi. The morphology and physiological response of mycorrhizal seedlings of *Quercus variabilis* under different soil moisture levels [J]. *J Northwest For Univ*, 2011, **26** (2): 101 – 104.
- [10] MARULAND A A, AZC N R, RUIZ-LONAZO J M. Contribution of six arbuscular mycorrhizal fungal isolates to water uptake by *Lactuca sativaplants* under drought stress [J]. *Physiol Plant*, 2003, **19**: 526 – 533.
- [11] 李晓林, 姚青. VA 菌根与植物的矿质营养[J]. 自然科学进展, 2000, **10** (6): 524 – 531.
- LI Xiaolin, YAO Qing. Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and mineral nutrition of plants [J]. *Prog Nat Sci*, 2000, **10** (6): 524 – 531.
- [12] AL-KARAKI G N, AL-RADDADA A. Drought stress and VA mycorrhizal fungi effects on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in drought resistance [J]. *Mycorrhiza*, 1997, **7** (2): 83 – 88.
- [13] HARLEY J L. The significance of mycorrhiza [J]. *Mycol Res*, 1989, **92**: 129 – 139.
- [14] LI Xiaolin, MARSHNER H, GEORGE E. Acquisition of phosphorus and copper by VA-mycorrhizal hyphae and root-to-shoot transport in white clover [J]. *Plant Soil*, 1991, **136**: 49 – 57.
- [15] DENNY H J A, RIDGE I. Fungal slime and its role in the mycorrhizal amelioration of zinc toxicity to higher plants [J]. *New Phytol*, 1995, **130**: 252 – 257.