

文章编号: 1001-1498(2013)02-0227-07

# 水分胁迫下外生菌根对马尾松幼苗养分吸收的影响

王 艺, 丁贵杰\*

(贵州大学造林生态研究所, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 利用接种褐环乳牛肝菌、鸡油菌、彩色豆马勃、土生空团菌的马尾松苗, 在温室采用盆栽方法, 研究水分胁迫下不同菌根化苗对养分的吸收情况。结果表明: 在水分胁迫下, 外生菌根能显著提高马尾松幼苗对 N、P、K 的吸收。随胁迫加剧, 菌根化苗 N、P 含量和磷酸酶活性均呈先增后降趋势, 在中度胁迫时达最大, 其中, 接种褐环乳牛肝菌 1 的苗对 N、P 吸收效果最好, 分别比对照增加 56.65% 和 44.32%; 接种彩色豆马勃和褐环乳牛肝菌 1 的马尾松苗的 K 含量随胁迫的加剧先增后降, 在轻度胁迫时达最大, 分别比对照增加 221.99% 和 200.00%。N 和 K 主要分布在叶中, 而 P 在根、茎、叶中分布较均匀, 菌根的形成有利于马尾松幼苗 N、K 的上行运输。在轻度和中度胁迫下, 接种褐环乳牛肝菌 1 对提高马尾松苗 N、P、K 的吸收和含量效果最好, 同时也促进了马尾松幼苗生长和抗旱能力的增强。

**关键词:** 马尾松; 水分胁迫; 外生菌根; 幼苗养分

中图分类号: S791.248

文献标识码: A

## Influence of Ectomycorrhiza on Nutrient Absorption of *Pinus massoniana* Seedlings Under Water Stress

WANG Yi, DING Gui-jie

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

**Abstract:** The effect of ectomycorrhiza on nutrient absorption of potted seedlings of *Pinus massoniana* under water stress was studied in greenhouse, by inoculating *Pisolithus tinctorius*, *Cenococcum geophilum*, *Cantharellus cibarius* Fr., *Suillus luteus* (L.: Fr.) Gray respectively. The results showed that ectomycorrhiza could significantly improve the absorption of content of N, P and K in drought stress. The contents of N, P and phosphatase activities of mycorrhizal seedling increased at first and then decreased with the water stress increase, and reached the maximum in moderate stress. The seedling of inoculation *Suillus luteus*1 had the best absorption to N, P, and increased 56.65% and 44.32% respectively compared to control group. The content of K in mycorrhizal seedling inoculating *Pisolithus tinctorius* and *Suillus luteus*1 increased at first and then decreased with the increase of water stress, and reached the maximum in the light stress. They increased by 222% and 119% respectively compared to the control group. N and K mainly distributed in the leaf, while P equally distributed in root, stem and leaf. The formation of mycorrhizal benefited the transportation of N and K upward. Inoculating *Suillus luteus*1 in mild and moderate stress had the best comprehensive effect in absorption and content of N, P and K, and at the same time it could promote seedling growth and enhance seedling drought resistance.

**Key words:** *Pinus massoniana*; water stress; ectomycorrhiza; seedling nutrient

收稿日期: 2012-02-05

基金项目: 国家 863 项目(2011AA10020301); 贵州省人才基地建设项目(黔人颁发[2009]9号); 贵州省创新团队建设项目(黔科合人才团队 2011) 及贵州大学研究生创新基金(省研农 2009002)

作者简介: 王 艺(1985—), 女, 贵州遵义市人, 博士研究生, 主要从事人工林培育研究。

\* 通讯作者: 教授, 博导, 主要从事人工林培育研究。

干旱对世界作物产量的影响,在自然逆境中居首位,其危害相当于其他自然灾害之和<sup>[1]</sup>。研究表明,接种菌根可显著增强和诱导植物抗旱等能力,促进植物根系生长及对矿质养分的吸收利用,进而促进植物生长并改善其品质<sup>[2-5]</sup>。Gamalero等<sup>[6]</sup>研究发现:接种AMF能有效提高蔬菜对干旱等逆境的抵抗能力,改善宿主植物的营养状况,从而促进蔬菜生长和提高产量。王如岩等<sup>[7]</sup>在滇柏上的试验表明,在一般干旱条件下,菌根真菌能够促进滇柏对养分的吸收,提高抗旱能力。Azcón等<sup>[8]</sup>发现在水分胁迫下接种AMF的植物N显著高于不接种处理。Siddiqui等<sup>[9]</sup>发现优良的共生体组合在提高宿主抗旱性中发挥着重要作用。这些研究多集中在内生菌根真菌上,对干旱条件下,外生菌根真菌与宿主植物共生后,对植物体内养分的吸收利用则较少见报道<sup>[10-15]</sup>。

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是我国南方最主要工业用材树种之一,是典型的外生菌根树种,其生长发育往往受种植区干旱、贫瘠的土壤生态环境及病害发生的限制。本试验将菌根化和非菌根化的马尾松幼苗进行水分胁迫处理,以研究在干旱逆境条件下,菌根化苗对养分的吸收和利用情况,并根据其表现筛选出优良菌种,最终把优良的外生菌种科学、合理地用于干旱区的植树造林,使菌根生物技术更好的应用于生产实践中。

## 1 材料及方法

### 1.1 试验材料

2010年1月—2011年10月,在贵州大学林学院苗圃、组培室、土壤实验室和森林培育实验室进行实验。试验菌种包括:牛肝菌(*Sp7*) (简称S7)、牛肝菌(*Sp1*) (简称S1)均属褐环乳牛肝菌(*Suillus luteus*(L.:Fr.) Gray)、鸡油菌(*Cantharellus cibarius* Fr.) (简称G)、彩色豆马勃 *Pisolithus tinctorius*

(Pers.) Coker et Couch(简称C)、土生空团菌(*Cenococcum geophilum* Fr.) (简称T)由西南大学黄建国教授提供,保存于4℃冰箱中,对照为不接菌(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

将5个供试菌种进行平板培养,选用MMN固体培养基,28℃培养10d,菌丝长满后备用。液体扩大培养基,采用改良PD培养基。首先将制备好的培养基装入500mL的三角瓶中,每个三角瓶中装入300mL培养基,然后在超净工作台内分别用直径1cm无菌打孔器切取已培养好的外生菌根菌平板菌落,接种于液体培养基中,每瓶装5个菌片,封口。接种后置25℃培养箱中,静置培养约20d,待菌丝长满基质后,作为菌剂使用<sup>[16-17]</sup>。

### 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75%乙醇表面消毒1min,无菌水冲洗4次,再用初始温度40℃温水浸种24h,湿纱布包裹,置于25℃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;然后在高压灭菌锅内(压力0.14Mpa,124~126℃)连续灭菌2h后备用。塑料花盆规格为250mm×280mm,用95%酒精擦拭后晾干。将灭菌基质称取5kg·盆<sup>-1</sup>,装入消毒好的花盆内备用,供试土壤的基本理化性质见表1。

### 1.4 播种和接种

播种、接种同时进行:采用条播方式,先将培养好的菌液喷洒在苗床上,用量约800mL·m<sup>-2</sup>,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,CK则喷洒等量的无菌培养液。整个试验在温室大棚中进行,为了避免污染,不同菌种处理的苗床之间间隔约30cm,并采用隔离板分隔开。

表1 供试土壤基本化学性质

全量/(g·kg <sup>-1</sup> )			有效/(mg·kg <sup>-1</sup> )			微量/(mg·g <sup>-1</sup> )				交换性/(g·kg <sup>-1</sup> )		有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )
N	P	K	N	P	K	Fe	Mn	Cu	Zn	Ca	Mg	
0.16	0.36	14.96	66	11	164	16.3	8.2	1.6	5.6	2.9	0.4	5.88

### 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,设6个处理,分别为:S7、G、S1、C、T和对照CK;因素B为水分胁迫处理,设4个水分胁迫梯度,分别使其土壤的相对含水量为:正常水分(65±

5)%、轻度胁迫(50±5)%、中度胁迫(35±5)%、重度胁迫(25±5)% (以下简称正常、轻度、中度和重度)。各处理重复3次,每处理15盆,每盆2株。

选取各处理生长一致的1年生接种苗和不接种苗移植至花盆中,正常生长后,开展水分胁迫试验。

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。每天通过称重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

待苗木半年生时从大约 200 株苗中随机抽取 20 株进行侵染率调查。观察发现:接种外生菌根真菌的苗木侵染率达 100%,而未接种的苗木侵染率为 0。土壤与植物养分均参照土壤农业化学分析方法<sup>[18]</sup>,全 N 的测定采用扩散法,全 P 的测定采用钼锑抗比色法,植株全 K 的测定采用火焰光度计法。土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[19]</sup>。

### 1.7 数据处理

数据采用 EXCEL 和 SPSS18.0 统计软件进行数理统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗 N 吸收的影响

由表 2 可见:随着水分胁迫程度的增加,接种

S7、G、S1 和 T 的菌根化苗的 N 含量先增加后降低,均在中度胁迫时达最大,分别比 CK 增加 48.98%、41.59%、56.65% 和 26.75%,而 CK 苗的 N 含量则逐渐降低。相同水分条件下各处理间差异极显著( $p < 0.01$ ),说明在一定的干旱条件下更利于菌根化苗对 N 的吸收。接种外生菌根真菌能有效提高苗木对 N 的吸收能力。

在正常水分条件下,菌根化苗中 N 的含量均高于 CK(表 2),其中,接种 C 的苗 N 含量最高  $11.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图 1 可见:在轻度胁迫时,接种 S7 和 S1 苗的 N 含量最高,分别比正常水分条件下增加 18.9% 和 3.07%。在中度胁迫时,接种 S7 和 S1 苗的 N 含量最高,分别比正常水分条件下增加 24.9%、20.4%;而在重度胁迫时,菌根化苗的 N 含量均低于正常水分条件,且接种 T 的降幅最小,仅 11.76%。由此可见,在中度胁迫时,接种 S7 和 S1 仍能显著提高马尾松苗的 N 含量,说明接种 S7 和 S1 能促进苗木对 N 的吸收功能,提高苗木对干旱的适应能力。

表 2 水分胁迫下外生菌根真菌对马尾松苗 N、P、K 含量的影响

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

养分	菌种	水分胁迫处理			
		正常	轻度	中度	重度
N	S7	8.79 ± 0.19 cC	10.46 ± 0.12 fE	10.98 ± 0.21 eD	5.66 ± 0.87 bB
	G	9.37 ± 0.03 dD	7.11 ± 0.02 bB	10.44 ± 0.03 cC	6.37 ± 0.11 cC
	S1	9.59 ± 0.03 eE	9.88 ± 0.01 eD	11.55 ± 0.12 fE	6.37 ± 0.01 cC
	C	11.80 ± 0.06 fF	7.84 ± 0.02 cC	10.80 ± 0.10 dD	6.99 ± 0.20 dD
	T	8.10 ± 0.01 bB	8.04 ± 0.03 dC	9.34 ± 0.07 bB	7.15 ± 0.07 eD
	CK	7.81 ± 0.01 aA	5.85 ± 0.01 aA	7.37 ± 0.02 aA	2.72 ± 0.04 aA
P	S7	0.44 ± 0.02 bB	0.53 ± 0.03 dB	0.79 ± 0.12 bB	0.45 ± 0.03 bBC
	G	0.46 ± 0.01 bcB	0.48 ± 0.06 cB	0.78 ± 0.08 bB	0.47 ± 0.05 bBC
	S1	0.50 ± 0.03 cdBC	0.62 ± 0.02 eC	0.76 ± 0.11 bB	0.51 ± 0.11 bC
	C	0.53 ± 0.10 deC	0.71 ± 0.10 fD	0.72 ± 0.04 bB	0.40 ± 0.08 aAB
	T	0.56 ± 0.02 eC	0.41 ± 0.02 bA	0.68 ± 0.06 bAB	0.48 ± 0.04 bC
	CK	0.38 ± 0.01 aA	0.35 ± 0.01 aA	0.56 ± 0.02 aA	0.37 ± 0.03 aA
K	S7	4.60 ± 0.30 eE	1.95 ± 0.10 bB	1.93 ± 0.08 bB	1.99 ± 0.06 cC
	G	4.10 ± 0.12 dD	3.08 ± 0.05 dD	1.56 ± 0.05 aA	1.71 ± 0.10 bB
	S1	3.76 ± 0.22 cC	4.23 ± 0.14 eE	3.44 ± 1.04 eE	2.32 ± 0.23 dD
	C	3.86 ± 0.14 cCD	4.54 ± 0.20 fF	2.89 ± 1.10 dD	2.70 ± 0.17 eE
	T	3.12 ± 0.06 bB	2.64 ± 0.11 cC	2.52 ± 0.08 cC	2.69 ± 0.04 eE
	CK	1.76 ± 0.02 aA	1.41 ± 0.09 aA	1.55 ± 0.06 aA	1.41 ± 0.03 aA

注:表中不同小写字母表示在同一水分处理、不同菌种间  $p < 0.05$  差异显著;不同大写字母表示在同一水分处理、不同菌种间  $p < 0.01$  差异极显著(下同)。

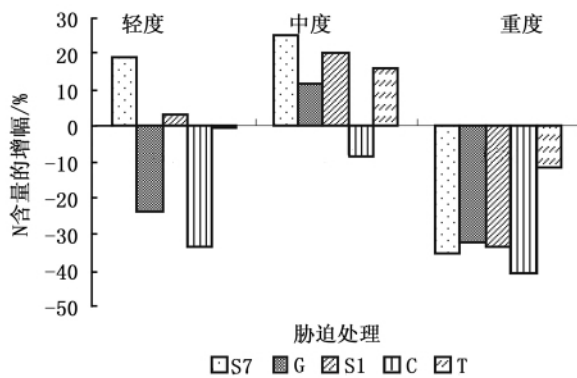


图1 水分胁迫与正常条件相比菌根化苗 N 含量的增幅

2.2 水分胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗 P 吸收和磷酸酶活性的影响

菌根化马尾松苗 P 含量随着水分胁迫程度的加剧先增加后降低(表2),在中度胁迫时达最大,均高于 CK,说明适当的水分胁迫能促进 P 的吸收,而水分过多或过少都会降低 P 的吸收。同一水分胁迫处理下,菌根化与非菌根化苗之间 P 含量差异显著( $p < 0.05$ ),菌根化苗 P 含量平均值大小依次: S1 (44.32%) > C (42.09%) > S7 (34.39%) > G (31.97%) > T (28.66%)。可见,不同水分胁迫下接种外生菌根真菌显著提高了马尾松苗 P 含量,且在中度胁迫下效果最好。

在正常水分条件下,菌根化马尾松苗中 P 含量均高于 CK(表2),其中,接种 T 的苗木 P 含量最高

( $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。由图2可见:轻度胁迫下,接种 C 的苗 P 含量最大,与正常水分条件相比增幅达 33.0%。在中度胁迫下,菌根化苗 P 含量均显著高于正常水分条件( $p < 0.05$ ),增幅大小依次为: S7 (78.8%) > G (70.2%) > S1 (51.3%) > C (34.7%) > T (22.8%)。在重度胁迫下,仅 S7、G、S1 苗 P 含量略高于正常水分条件。土壤中磷酸酶活性均高于 CK,各处理酸性磷酸酶含量均显著高于碱性磷酸酶,且在相同水分条件下各处理间差异极显著( $p < 0.01$ ,表3)。随胁迫加剧,磷酸酶活性在中度胁迫时达最大,与 P 在苗中表现一致。可见,在中度胁迫下,外生菌根真菌能显著提高苗 P 含量,亦能使土壤中磷酸酶活性增强,从而提高了苗活化有机 P 的能力,有利于外生菌根对 P 的吸收,改善苗 P 素营养,增强苗木抗旱性。

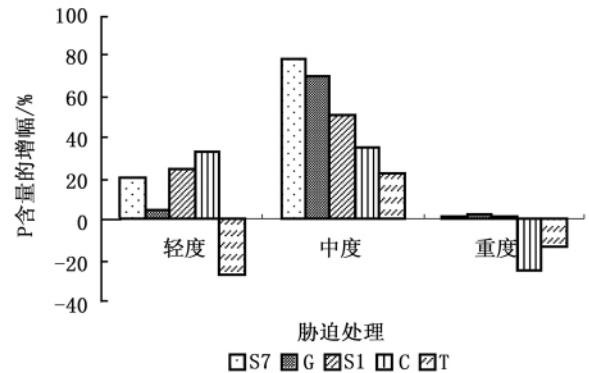


图2 水分胁迫与正常条件相比菌根化苗 P 含量的增幅

表3 水分胁迫下外生菌根真菌对花盆土壤磷酸酶活性的影响

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

土壤磷酸酶	菌种	水分处理			
		正常	轻度	中度	重度
酸性磷酸酶	S7	57.02 ± 1.12 dE	55.92 ± 4.32 eF	55.22 ± 3.56 cD	34.34 ± 2.13 bB
	G	50.05 ± 2.23 cC	50.68 ± 2.56 cC	53.81 ± 2.45 cC	54.23 ± 3.23 dD
	S1	18.38 ± 2.15 bB	21.29 ± 3.24 bB	70.32 ± 4.34 eE	69.38 ± 5.52 fE
	C	65.00 ± 3.43 eF	53.38 ± 2.43 dE	67.02 ± 2.30 dF	67.32 ± 3.65 eF
	T	51.32 ± 2.35 cD	52.32 ± 1.32 cdD	51.96 ± 2.26 bB	51.57 ± 4.23 cC
	CK	14.76 ± 3.53 aA	14.24 ± 4.45 aA	20.94 ± 4.54 aA	13.76 ± 2.51 aA
碱性磷酸酶	S7	6.58 ± 0.12 eE	3.80 ± 0.23 dD	5.57 ± 0.32 eE	5.32 ± 0.12 dC
	G	3.80 ± 0.23 dD	4.05 ± 0.13 eE	4.56 ± 0.23 dD	1.52 ± 0.10 bA
	S1	6.59 ± 0.25 eE	4.56 ± 0.14 fF	10.89 ± 0.41 fF	9.88 ± 0.13 eD
	C	2.03 ± 0.31 cC	3.29 ± 0.22 cC	3.80 ± 0.25 cC	1.35 ± 0.23 abA
	T	1.52 ± 0.24 bB	2.53 ± 0.24 bB	3.29 ± 0.34 bB	3.29 ± 0.21 cB
	CK	1.21 ± 0.42 aA	1.15 ± 0.31 aA	1.50 ± 0.56 aA	1.33 ± 0.10 aA

2.3 水分胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗 K 吸收的影响

接种外生菌根真菌的马尾松苗的 K 含量显著高

于 CK(表2) 相同水分条件下各处理间差异极显著( $p < 0.01$ )。随着水分胁迫程度的加剧, K 的变化比较复杂,接种 S7、G 和 T 的菌根化马尾松苗的 K 含

量先下降又上升的趋势,而接种 S1 和 C 的 K 含量是先升又降的变化趋势,其原因有待进一步研究。

由图 3 可见: 在轻度胁迫下,接种 C 和 S1 的马尾松苗的 K 含量与正常水分条件相比,分别增幅 17.7%、12.6%,而中度和重度胁迫下,菌根化马尾松苗的 K 含量均低于正常水分条件。说明在轻度胁迫

下,接种 C 和 S1 更能增强苗木对 K 的吸收功能,提高苗木对 K 的吸收和含量。

由表 4 可见: 各菌种、各水分处理以及菌种和水分处理间的差异均极显著 ( $p < 0.01$ ),且菌种与水分处理间的交互作用对马尾松菌根化苗 N、P、K 吸收的影响极显著。

表 4 马尾松幼苗菌根真菌和水分胁迫二因素试验方差分析

变异来源	N			P			K		
	MS	F	P	MS	F	P	MS	F	P
菌根(A)	3.13	511.50	0.000	0.06	43.30	0.000	6.10	1.12	0.000
水分处理(B)	45.80	7.49	0.000	0.27	208.90	0.000	7.48	1.37	0.000
A × B	5.26	858.90	0.000	0.02	12.20	0.000	1.34	245.40	0.000
误差	0.006			0.001			0.005		

注:  $p < 0.01$  表示差异极显著。

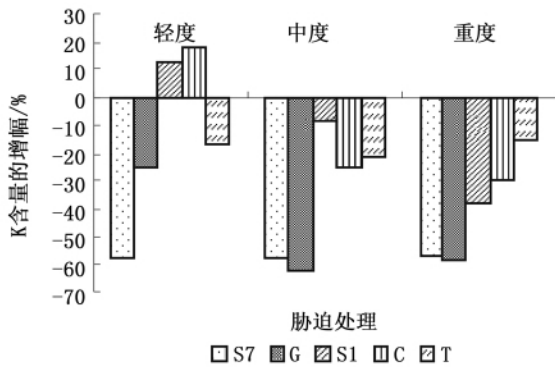


图 3 水分胁迫与正常条件相比菌根化苗 K 含量的增幅

#### 2.4 水分胁迫下外生菌根真菌对马尾松幼苗 N、P、K 分布的影响

由图 4 可见: 外生菌根真菌促进了马尾松幼苗对养分的吸收。N 的含量主要分布在叶中,根和茎中分布较少,中度胁迫时,接种 S1 的苗 N 含量最高。外生菌根真菌促进了幼苗对 N 的吸收,并将大部分 N 运输到幼苗叶片中供植物生长,从而提高了幼苗的抗旱能力。

在中度胁迫下, P 更多的分布于幼苗根和茎中,其中,接种 S7、G、S1 的幼苗在根和茎中含量较高,而在叶中较低。其他胁迫条件下 P 分布无显著差异 ( $p > 0.05$ )。可能在一定水分胁迫下,菌根化苗的储存能力大于生长能力,植物根系吸收的营养物质首先在根和茎中贮藏,然后再用于新生器官的生长,以此来适应干旱的环境,增强植物的抗旱能力。

K 更多分布在叶中,随胁迫加剧, K 吸收量逐渐降低,水分胁迫对 K 吸收有抑制作用,但在轻度胁迫下,接种 S1 能有效促进 K 的吸收,而根中的 K 更多上

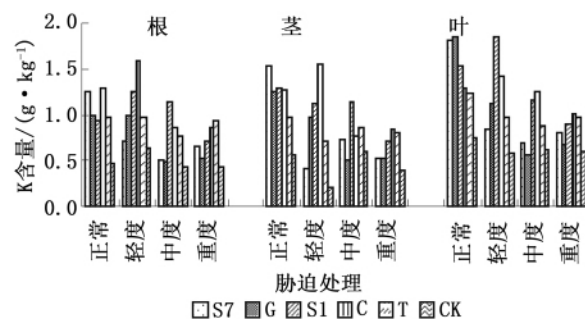
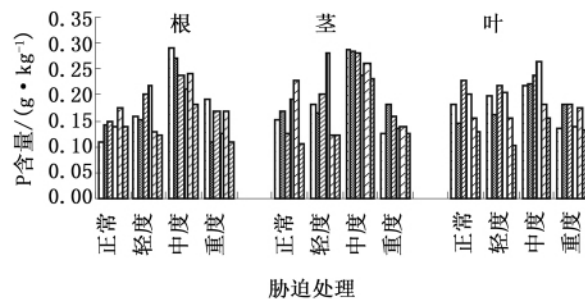
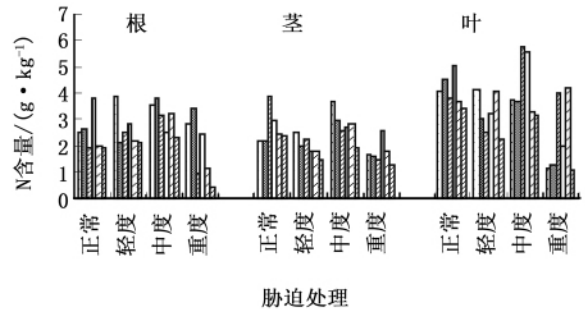


图 4 水分胁迫下菌根化马尾松幼苗根茎叶中 N、P、K 的分布

行运输转移到叶中,使叶中 K 的含量大大增加,从而为苗木叶片各种生理生化活动提供充足的养分。

### 3 结论与讨论

研究表明,在水分胁迫下,外生菌根真菌能显著提高马尾松幼苗对 N、P、K 的吸收功能和适应干旱的能力。外生菌根真菌和水分胁迫对幼苗养分吸收的影响具有交互作用,且不同水分处理、菌种、水分×菌种差异均达显著或极显著水平(表4)。N、P、K 含量均随着水分胁迫的变化而变化,在正常水分条件下,接种 C 的综合效果较好;在轻度及中度胁迫下,接种 S1 综合表现较好;在重度胁迫下,接种 T 综合效果较好。N 和 K 主要分布在叶中,P 在根茎叶分布较平均,菌根的形成有利于苗木 N、K 的上行运输。

接种菌根真菌能显著提高植物矿质营养元素的总含量,有利于促进根系对矿质元素的吸收<sup>[20-26]</sup>,从而促进植物的生长,尤其在贫瘠的土壤上接种菌根真菌,植物吸收和利用矿质元素会更好。菌根真菌能够改善植物营养状况的机制,扩大植物吸收范围、增强植物吸收和运输的能力、活化土壤等<sup>[27-29]</sup>。Ezawa 等<sup>[30]</sup>发现,侵入植物体内的丛枝菌丝有酸性和碱性磷酸酶,认为对体内的多聚磷酸盐降解与运输有重要作用。有研究表明:有菌根植株幼苗的氮含量是无菌根的 1.7 倍<sup>[31]</sup>,且外生菌根真菌能促进茶树、松树、桉树的氮营养吸收<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,中度胁迫下,接种 S7 和 S1 较其他菌种更能显著提高马尾松幼苗 N、P 的含量和磷酸酶活性,菌根化苗木的酸性磷酸酶活性均显著高于 CK,说明菌根苗根系中的酸性磷酸酶显著提高了马尾松幼苗中 P 的含量;因为外延菌丝能远伸到根际的缺磷区之外或分泌大量的磷酸酶,从而增加寄主对磷的吸收和利用。此外,菌根分泌的有机酸可与钙、铝、铁等形成稳定螯合物,促使土壤难溶性磷(包括 Al-P、Ca-P 和 Fe-P)解体<sup>[33]</sup>,使菌丝或根原生质内沉淀态磷溶解供植株利用。在干旱瘠薄的土壤上,菌根的形成使苗木磷的吸收和上行运输增加,有益于缓解苗木磷素营养不足问题。

大量研究表明,外生菌根真菌和寄主植物吸收钾离子的过程十分复杂,某些植物感染外生菌根真菌后,其吸收钾离子的速率显著提高,导致寄主植物体内的含钾量明显增加<sup>[33-35]</sup>。本研究表明,马尾松菌根苗的 K 含量高于 CK,轻度胁迫下,接种 C 和 S1 较其他菌种更能显著提高苗木 K 含量,但胁迫达中度以上,便对苗木 K 含量有抑制作用。其原因可能

与菌种(株)、土壤种类、生态环境和气候条件等各种因素有关,具体准确原因有待进一步研究。

综合各种条件下的表现,在提高马尾松菌根苗 N、P、K 的吸收和含量方面,以接种 S1 的综合效果最好。接种后形成的菌根能够促进马尾松幼苗根系对土壤中重要营养元素的吸收,这为改善马尾松幼苗在干旱胁迫下根系微生物组成和土壤环境提供了新的有效途径。因此,在土壤干旱瘠薄,有效养分缺乏时,采用接种 S1 的菌根化苗进行植树造林应有较好的前景。据研究<sup>[36]</sup>,混合接种外生菌根真菌有利于发挥各个菌株的长处,促进苗木生长的效果较单接种更好,所以在进一步工作中,可加强外生菌根真菌的混合接种研究,以筛选和制作出适合于我国干旱地区的菌根菌剂。

#### 参考文献:

- [1] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(3): 92-100
- [2] 杨振寅, 廖声熙. 丛枝菌根对植物抗性的影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2005, 18(2): 26-29
- [3] 余卓玲, 梁计南. VA 菌根真菌对植物吸收能力及抗逆性的影响研究进展[J]. 广东农业科学, 2005(3): 44-47
- [4] Evelin H, Kapoor R, Giri B. Arbuscular mycorrhizal fungi in alleviation of salt stress: A review[J]. Annals of Botany, 2009, 104(7): 1263-1280
- [5] Sharifi M, Ghorbanli M, Ebrahimzadeh H. Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164: 1144-1156
- [6] Gamalero E, Lingua G, Berta G et al. Beneficial role of plant growth promoting bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi on plant responses to heavy metal stress[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(5): 501-514
- [7] 王如岩, 于水强, 张金池, 等. 水分胁迫下菌根真菌对滇柏(*Cupressus duclouxiana* Hichel) 幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 中国岩溶, 2011, 30(3): 313-318
- [8] Azcón R, Rodríguez R, Amora-Lazcano E, et al. Uptake and metabolism of nitrate in mycorrhizal plants as affected by water availability and N concentration in soil[J]. European Journal of Soil Science, 2008, 59: 131-138
- [9] Siddiqui Z A, Akhtar M S, Futai K. Mycorrhizae: Sustainable Agriculture and Forestry[M]. Netherlands: Springer, 2008: 6-14
- [10] 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
- [11] 李倩, 黄建国. 外生菌根真菌改善树木钾素营养的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 107-110
- [12] Meng F R, Shao J W. The ecological distribution of ectomycorrhizal fungi in main coniferous forests in northeast China[J]. Mycosys-

- tema, 2001 (3): 413-419
- [13] Kikuchi J, Futai K. Spatial distribution of sporocarps and the biomass of ectomycorrhizas of *Suillus pictus* in a Korean pine (*Pinus koraiensis*) stand [J]. *Journal of Forest Research*, 2003 (1): 339-342
- [14] Choi D S, Kayamab M, Jinc H O, et al. Growth and photosynthetic responses of two pine species (*Pinus koraiensis* and *Pinus rigida*) in a polluted industrial region in Korea [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(3): 421-432
- [15] Hirose D, Kikuchi J, Kanzaki N, et al. Genet distribution of sporocarps and ectomycorrhizas of *Suillus pictus* in a Japanese white pine plantation [J]. *New Phytologist*, 2004, 164 (3): 527-541
- [16] 周德庆. 微生物学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- [17] 唐丽杰. 微生物学实验[M]. 哈尔滨: 工业大学出版社, 2005
- [18] 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
- [19] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986
- [20] Mosse B. Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apples [J]. *Nature (London)*, 1957, 179: 992-994
- [21] 陈应龙, 弓明钦, 王凤珍, 等. 混合接种 *Glomus* 与 *Pisolithus* 菌株对尾叶桉矿质营养吸收的影响 [J]. *林业科学研究*, 1999, 12(3): 262-267
- [22] 周志春, 陈连庆, 黄秀凤. 马褂木菌根真菌筛选和菌根化育苗效果研究 [J]. *林业科学研究* 2009 22(2): 196-199
- [23] 宋 微, 吴小芹, 叶建仁. 6 种外生菌根真菌对 895 杨矿质营养吸收的影响 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2011, 35(2): 35-38
- [24] Adeyemi A O, Gadd G M. Fungal degradation of calcium-lead and silicon-bearing minerals [J]. *Biometals* 2005, 18(3): 269-281
- [25] Burford E P, Fomina M, Gadd G M. Fungal involvement in bio-weathering and biotransformation of rocks and minerals [J]. *Mineral Magaz* 2003 67(6): 1127-1155
- [26] 黄世臣, 李熙英. 水分胁迫条件下接种菌根菌对山杏实生苗抗旱性的影响 [J]. *东北林业大学学报* 2007 35(1): 31-33
- [27] 闫 伟, 韩秀丽, 白淑兰, 等. 虎榛子几种菌根苗抗旱机制的研究 [J]. *林业科学* 2006 42(12): 73-76
- [28] 吴强盛, 夏仁学. 水分胁迫下从枝菌根真菌对枳实生苗生长和渗透调节物质含量的影响 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2004 30(5): 583-588
- [29] Joanne L, Hodge A, Fitter A H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic materia [J]. *New Phytologist*, 2008, 181: 199-207
- [30] Ezawa T, Smith S E, Smith F A. Differentiation of polyphosphate metabolism between the extra and intraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *New phytologist* 2001, 149(3): 555-563
- [31] 阎秀峰, 张 琴. 接种外生菌根真菌对辽东栎苗生长的影响 [J]. *植物生态学报* 2002 26(6): 701-707
- [32] 周崇莲, 齐玉臣. 外生菌根与植物营养 [J]. *生态学杂志*, 1993, 12(1): 37-44
- [33] Huang J G, Lapeyrie F. Ability of ectomycorrhizal fungi *laccaria bicolor* S238N to increase the growth of Douglas fir seedlings and their phosphorus and potassium uptake [J]. *Pedosphere*, 1996, 6(3): 217-223
- [34] Smith S E, Read D J. *Mycorrhizal Symbiosis* [M]. New York: Academic Press, 1997
- [35] Yuan L, Huang J G, Li X L, et al. Biomobilization of potassium from minerals by ectomycorrhizal fungi and eucalypt seedlings [J]. *Plant and soil*, 2004, 10(4): 252-261
- [36] 宋瑞清, 王 锋, 冀瑞卿, 等. 红皮云杉外生菌根菌单接种及混合接种对苗木生长的影响 [J]. *微生物学报* 2007 47(2): 1091-1094