

文章编号:1001—7380(2024)06—0001—06

## 丛枝菌根真菌增强柏木幼苗抗干旱性研究

刘学松<sup>1</sup>, 邵慰忠<sup>1</sup>, 邓创<sup>2,3</sup>, 江波<sup>3</sup>, 王志高<sup>3\*</sup>

(1. 建德市林业局, 浙江 杭州 311600; 2. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300;  
3. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310013)

**摘要:**丛枝菌根真菌与植物形成共生体,有助于提高植物对环境的适应能力。通过对柏木进行摩西斗管囊霉(Fm)、幼套近明囊霉(Ce)和根内根孢囊霉(Ri)3种菌剂单独接种及其等量混合接种处理(MIX),测定和分析了连续干旱胁迫过程中柏木生长和生理指标变化。结果表明,混合接种组根系浸染率显著高于单菌种接种,分别是接种Fm、Ce和Ri的1.63,1.91,1.23倍;连续干旱胁迫下丛枝菌根真菌接种显著提高了柏木的株高和根系生长,混合接种处理组的株高增长量,根尖数和根表面积分别是CK的4.36,2.36,2.47倍;接种Fm,Ri,Ce的根表面积分别是CK的109.91%,131.90%,132.99%。丛枝菌根真菌处理提高了柏木的总叶绿素含量4.17%—9.13%、叶绿素a/b值平均提高6.74%;降低了干旱胁迫过程中细胞的伤害,MDA分别为CK的82.06%—94.06%,细胞保护性酶和渗透调节物质含量显著提升,POD含量分别为CK的116.58%—138.23%,SP含量分别为CK的104.56%—147.50%。结果显示,丛枝菌根真菌处理,尤其是混合接种处理,可以显著提高柏木对干旱胁迫的适应性,促进苗木生长,为干旱条件下的柏木造林提供了新的方法。

**关键词:**丛枝菌根真菌;干旱胁迫;柏木;生长;生理

**中图分类号:**Q948.12<sup>+</sup>2.2;Q949.32;S723.9 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2024.06.001

## Arbuscular mycorrhizal fungi can enhance the drought resistance of the seedlings of *Cupressus funebris*

Liu Xuesong<sup>1</sup>, Shao Weizhong<sup>1</sup>, Deng Chuang<sup>2,3</sup>, Jiang Bo<sup>3</sup>, Wang Zhigao<sup>3\*</sup>

(1. Jiande Forestry Bureau, Hangzhou 311600, China; 2. College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 3. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310013, China)

**Abstract:** Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can establish symbiotic relationships with plants, significantly enhancing their capacity of adaptation to environmental conditions. Three AMFs, including *Funneliformis mosseae* (Fm), *Claroideoglossum etunicatum* (Ce), *Rhizophagus intraradices* (Ri) were separately inoculated on the root of *Cupressus funebris* and a mixed inoculation treatment (MIX) was also set up by mixing the three AMFs in equal quantities. The growth and physiological indicators of *C. funebris* under continuous drought stress were measured and compared. The results showed that the root colonization rate of the mixed inoculation group was significantly higher than that of the single inoculation groups, being 1.63, 1.91 and 1.23 times that of the Fm, Ce, and Ri groups, respectively. Under the continuous drought stress, AMF inoculation could significantly improved the growth of *C. funebris*, with the growth by the mixed inoculation group being 4.36 times of CK in plant height, 2.36 times in root tip number and 2.47 times in root surface area. The root surface area caused by Fm, Ri, and Ce was 9.91%, 31.10%, and 32.99% larger than CK. The total chlorophyll content of *C. funebris* was increased by 4.17% to 9.13% by AMF treatment, and the average value of chlorophyll a/b was increased by 6.74%. The

收稿日期:2024-08-01;修回日期:2024-09-04

基金项目:浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目“浙江省困难立地造林关键技术研究示范”(2021SY08);浙江省“尖兵”“领雁”计划项目“受损森林生态系统快速修复和功能提升技术”(2022C02053)

作者简介:刘学松(1969-),男,浙江建德人,高级工程师。主要从事森林培育研究。

\*通信作者:王志高(1978-),男,安徽长丰人,副研究员,博士。主要从事森林生态和森林培育研究。

AMF treatment reduced cell damage during drought stress, with the MDA being 82.06% to 94.06% of that of CK. The content of protective enzymes and osmotic adjustment substances was significantly increased, with POD being 116.58% to 138.23% of that of and SP (soluble proteins) being 104.56% to 147.50% of that of CK. This study showed that that treatment with AMF, especially mixed inoculation, could significantly enhance the adaptability of *C. funebris* to drought stress and promote seedling growth.

**Key words:** Arbuscular mycorrhizal fungi; Drought stress; *Cupressus funebris*; Growth; Physiology

干旱是影响造林成活率的关键因子<sup>[1]</sup>。提高林木抗旱性可从施加土壤改良剂和提高苗木本身的抗旱性入手,而采取生物改良措施是土壤改良、提高林木抗旱性最安全有效的方法<sup>[2]</sup>。研究发现,80%以上的陆生维管植物根系与丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)形成共生关系<sup>[3]</sup>,AMF接种可显著缓解干旱胁迫对植物生长的抑制作用<sup>[4-5]</sup>,在节水抗旱造林方面具有广泛的应用价值。

AMF扩大了宿主根系吸收面积,如接种根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)、摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)、地表多样孢囊霉(*Diversispora versiformis*)和上述3种丛枝菌根真菌的混合菌剂后,干旱胁迫下文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)根系生物量分别增加了86.00%,51.00%,56.00%和110.00%<sup>[6]</sup>。用摩西管柄囊霉和根内根孢囊霉接种青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)幼苗,青冈根外菌丝可延伸至根外10—15 cm<sup>[7]</sup>。由于根系面积的扩大,对水分和养分的吸收能力得到增强,增强对干旱胁迫的适应能力,对榆树(*Ulmus pumila*)<sup>[8]</sup>、毛红椿(*Toona ciliata* Roem. var. *pubescens*)<sup>[9]</sup>、杜梨(*Pyrus betulifolia*)<sup>[10]</sup>等的研究发现,接种丛枝菌根真菌提高了植物的光合能力、保护性酶活性、调节内源激素代谢水平,促进了植物的生长。

柏木(*Cupressus funebris*)适应性强,在多种立地条件下均能生长,是优良的抗旱造林树种,但柏木生长缓慢,9年生柏木优树子代平均树高不足2 m、平均地径3.22 cm<sup>[11]</sup>,林分生产力相对较低<sup>[12]</sup>。柏木也是一种优良的珍贵用材树种,如何进一步提高其对干旱的适应能力、缩短培育周期,是柏木栽培面临的一项技术难题。柏木属的*C. atlantica*<sup>[13]</sup>和*C. arizonica*<sup>[14-15]</sup>可与丛枝菌根真菌形成菌根,降低水分胁迫对植物的损害。利用丛枝菌根真菌提高柏木生长的研究尚未见报道。鉴于丛枝菌根真菌在提高林木抗旱性、促进林木生长方面的作用,本研究以柏木为研究对象,开展用丛枝菌根真菌接种

苗木抗旱试验,分析不同丛枝菌根真菌接种对柏木生长和生理生化指标的影响,旨在研发柏木丛枝菌根真菌菌根苗,进一步增强柏木对干旱的适应能力,提高林分生产力提供新技术。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

所用菌种为摩西斗管囊霉、幼套近明囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*)、根内根孢囊霉,菌剂为孢子与白花车轴草(*Trifolium repens* Linn)侵染根段的沙土混合物,孢子密度分别为132,130,115个/10 g,由长江大学根系生物学研究所提供。柏木1年生苗由建德市欣林种苗有限公司提供,平均株高45.5 cm,平均地径0.39 cm。

栽培基质按蛭石:河沙:泥炭=5:2:2:1的体积比混合而成。基质的最大持水量为38.18%,全氮39 mg/kg、全磷136 mg/kg、全钾15 100 mg/kg,有效氮38 mg/kg、有效磷108 mg/kg、速效钾640 mg/kg, pH值为5。试验前经剂量为25 kGy射线辐照灭菌。栽培容器采用直径与盆高都为20 cm的控根容器,栽培前用75%的乙醇消毒。

### 1.2 试验设计

试验设置对照(CK)、摩西斗管囊霉接种(Fm)、根内根孢囊霉接种(Ri)、幼套近明囊霉(Ce)和混合接种(MIX)5个处理,其中CK为不接种菌剂但加入等质量的灭菌基质,混合接种为基质中加入上述3个菌种的等量混合菌剂。每盆先加入1/3的栽培基质,均匀铺上菌剂75 g,再放上清洗干净的植株,覆盖基质,定植。每个处理3个重复,每个重复15株。接种1个月后进行干旱胁迫试验。试验前1日浇水至土壤最大持水量,试验开始后停止浇水,持续进行干旱胁迫21 d,对照组土壤含水量保持土壤最大持水量的80%。

### 1.3 指标测定

参考刘润进等<sup>[16]</sup>方法进行丛枝菌根真菌根系浸染鉴定,具体为:在第21日时,选取各个处理的根

系各 50 条,剪成 1 cm 的小根段,经过 FAA 固定液固定,10%的 KOH 溶液于 90 °C 恒温水浴加热使根系透明化后,采用乳酸酚台盼蓝溶液染色,再置于乳酸酚脱色液中进行脱色处理,在显微镜下检查每条根段的侵染情况。侵染率(%)计算表达式为:

$$\text{侵染率}(\%) = \frac{\text{侵染根段数}}{50} \times 100$$

起始日和第 21 日采用卷尺和游标卡尺测量株高和地径,采用叶片与根系扫描仪(ScanMaker i800, China)测定根系性状。起始日及第 7, 14, 21 日时,采集柏木叶片,用南京建成生物试剂盒分别进行叶绿素、脱氢物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、丙二醛(MDA)和可溶性蛋白(SP)含量测定。其中叶绿素测定采用无水乙醇提取的分光光度计法,SOD 活性测定采用黄嘌呤氧化酶法,POD 活性的测定采用愈创木酚酶法,MDA 含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法进行测定,SP 的含量采用考马斯亮蓝法。

#### 1.4 数据统计

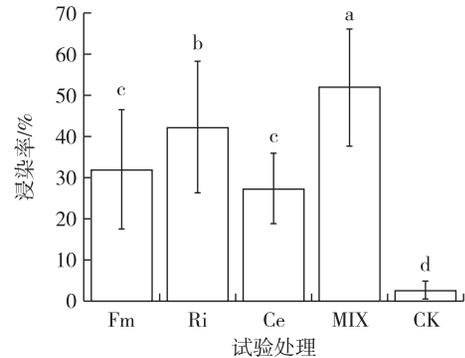
采用 Excel2016 进行数据统计,SPSS 26.0 进行单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系侵染与苗木生长

对照组柏木根系(CK)有少量丛枝菌根真菌侵染,各接种处理间的根系侵染率差异显著,其中混合接种组(MIX)根系侵染率显著高于单菌种接种,分别是摩西斗管囊霉接种组(Fm)、幼套近明囊霉接种组(Ce)和根内根孢囊霉接种(Ri)的 1.63, 1.91,

1.23 倍;单一接种处理中,根内根孢囊霉接种根系侵染率最高、幼套近明囊霉接种侵染率最低(如图 1)。



注:不同小写字母表示不同接种组及 CK 的侵染率结果之间,于 0.05 水平上的差异显著性

图 1 不同丛枝菌根真菌接种柏木根系侵染率

干旱胁迫下,不同菌种处理对于柏木的地径增长的影响差异不显著( $P > 0.05$ )。混合接种处理组的株高增长量、根尖数与根表面积显著高于对照组和单菌种接种( $P < 0.05$ ),分别是对照的 4.36, 2.36, 2.47 倍,而接种单菌种的处理组之间的株高增量差异不显著。从根表面积来看,Fm, Ce 和 Ri 组的根表面积分别是 CK 的 109.91%, 132.99% 和 131.90%;接种 Ri 与接种 Ce 的差异不显著,但明显高于接种 Fm 处理。接种 Fm 的根尖数显著高于接种 Ri, Ce 和 CK。这表明单菌种接种处理中,接种 Ce 与 Ri 可以增加植物根表面积,而接种 Fm 则在增加根尖数的方面作用更强(见表 1)。

表 1 不同接种处理下柏木幼苗生长情况

菌种处理	株高增长量/cm	地径增长量/cm	根表面积/cm <sup>2</sup>	根尖数/个
MIX	5.10±1.74 a	0.50±0.25 a	907.83±9.25 a	1499.67±85.45 a
Fm	3.60±1.25 b	0.38±0.20 a	422.22±10.16 c	976.67±148.71 b
Ce	3.00±1.55 b	0.88±0.48 a	510.87±3.41 b	659.33±59.77 c
Ri	3.37±2.86 b	0.28±0.12 a	506.70±4.35 b	622.33±96.53 c
CK	1.17±0.57 c	0.30±0.27 a	384.15±11.24 d	606.00±61.02 c

注:所有数据为平均值±标准误;结果数据同列后不同小写字母表示差异性显著( $P < 0.05$ )

### 2.2 叶绿素含量变化

由表 2 可见,随着干旱胁迫时间的增加,柏木的总叶绿素表现出先上升后下降的趋势,第 21 日时,丛枝菌根真菌接种组叶片叶绿素含量显著高于 CK,接种 MIX, Fm, Ce 和 Ri 的总叶绿素含量分别提高了

9.31%, 5.74%, 5.25% 和 4.17%。接种组叶绿素 a/b 表现逐渐增加的趋势,而对照组则为先下降后升高,第 21 日时,丛枝菌根真菌接种组叶片叶绿素 a/b 之间差异不显著,但显著高于 CK,平均高出 6.74%。

表 2 干旱胁迫对柏木叶绿素含量的影响

菌种处理	叶绿素	干旱胁迫时间/d			
		0	7	14	21
MIX	总叶绿素/(mg/g)	55.67±7.64 a	56.78±5.33 b	59.15±3.23 a	57.53±4.28 a
Fm		55.98±4.57 a	56.82±8.24 b	54.76±2.47 c	55.65±6.14 b
Ce		55.14±6.41 a	55.05±7.16 c	56.42±2.58 c	55.39±4.11 b
Ri		55.45±5.38 a	57.31±6.71 a	57.21±5.42 b	54.82±3.55 c
CK		55.21±7.18 a	56.24±8.37 b	55.79±4.15 c	52.63±6.60 d
MIX		叶绿素 a/b	2.55±0.32 b	2.66±0.24 a	2.79±0.43 a
Fm	2.60±0.41 a		2.61±0.32 b	2.76±0.49 a	2.87±0.29 a
Ce	2.61±0.76 a		2.59±0.28 b	2.78±0.24 a	2.84±0.44 a
Ri	2.51±0.56 b		2.50±0.36 c	2.64±0.18 b	2.82±0.51 a
CK	2.59±0.27 a		2.51±0.19 c	2.59±0.33 b	2.68±0.41 b

注:所有数据为平均值±标准误;数据后不同小写字母表示差异性显著( $P<0.05$ )

### 2.3 保护性酶与渗透调节物质变化

柏木在干旱胁迫下,SOD、MDA 先增加后下降,POD 与 SP 在整个干旱胁迫过程中,呈上升趋势(见表 3),这表明柏木在干旱胁迫过程中抗氧化酶系统被激活,渗透能力逐渐增加。在第 21 日时,SOD 含

量在各个处理间差异不显著,接种 MIX, Fm, Ce, Ri 的 POD 含量分别为 CK 的 138.23%, 116.68%, 131.29% 和 116.58%, MDA 含量分别为 CK 的 85.08%, 90.82%, 82.06% 和 94.06%, SP 分别为 CK 的 147.50%, 104.56%, 125.16% 和 119.09%。

表 3 干旱胁迫对柏木生理生化的影响

菌种处理	生化指标	干旱胁迫时间/d			
		0	7	14	21
MIX	SOD 含量/(mg/g)	302.74±5.37 b	341.37±19.63 a	341.75±13.01 a	311.78±4.06 b
Fm		317.09±15.00 a	337.94±8.62 b	339.21±5.81 a	320.13±10.88 a
Ce		298.26±17.75 b	348.59±6.46 a	331.91±15.99 b	310.13±7.92 b
Ri		289.00±10.71 c	335.31±10.72 b	332.76±18.60 b	317.19±9.16 a
CK		293.98±9.82 c	330.14±5.15 c	319.22±9.61 c	291.89±19.94 c
MIX		POD 含量/( $\mu$ g/g)	676.68±33.28 d	1013.02±55.61 a	1042.06±29.63 a
Fm	758.80±38.14 b		759.70±64.44 d	815.28±56.54 d	1153.22±45.60 b
Ce	713.57±47.05 c		792.63±51.58 c	917.35±90.23 v	1145.68±58.10 b
Ri	768.18±48.43 a		782.69±84.07 c	877.15±48.97 c	1017.15±68.97 c
CK	654.15±58.23 e		693.01±32.24 e	777.72±84.77 e	828.05±72.82 d
MIX	MDA 含量/(nmol/mg)		26.28±1.69 b	30.82±3.16 b	28.99±4.52 c
Fm		22.51±1.26 c	30.94±4.24 b	29.64±1.91 c	28.30±1.01 b
Ce		24.97±5.04 b	31.67±3.55 a	29.82±4.14 c	25.07±5.93 c
Ri		25.88±1.03 b	32.08±2.99 a	31.09±1.35 b	29.28±4.58 b
CK		28.92±2.48 a	32.85±4.16 a	33.04±2.43 a	31.17±2.01 a
MIX		SP 含量/(g/L)	4.14±1.30 a	5.79±1.30 a	6.23±1.64 a
Fm	2.77±1.07 c		2.87±1.07 c	4.05±1.16 d	4.81±1.94 c
Ce	3.07±0.69 b		3.67±0.69 b	4.69±0.58 c	5.63±1.30 b
Ri	3.06±0.49 b		3.11±0.49 c	4.80±0.65 b	5.16±0.65 b
CK	2.52±1.60 d		3.52±1.60 b	4.61±1.91 c	4.48±1.20 d

注:所有数据为平均值±标准误;数据后不同小写字母表示差异性显著( $P<0.05$ )

## 3 讨论

干旱胁迫是阻碍植物生长发育的重要非生物因子之一,而从枝菌根真菌可通过增大植物根系的

吸收范围并提高植物水分利用率、促进植物生长,增强抵御干旱胁迫的能力<sup>[17]</sup>。本研究发现丛枝菌根真菌混合接种对提高柏木的抗旱能力比单一菌种接种更强,与前人研究发现混合接种的浸染率较

高的结论一致<sup>[18-20]</sup>,这表明混合接种更容易形成菌根。丛枝菌根真菌混合接种促进植物抗逆性的提高,可能与不同 AM 真菌功能互补有关,多种丛枝菌根真菌在寄主植物根系内外共同形成菌丝网,协同帮助寄主植物从土壤中获得更多的水分和养分<sup>[21]</sup>,并且 AM 真菌能够诱导寄主植物根系产生内源激素和次生代谢产物<sup>[22]</sup>。本研究中地径增长量在试验期间在对照与接种之间差异不显著,可能与柏木的生长速率较慢和试验时间较短有关。

当植物受到干旱胁迫后,细胞质膜相对透性增加<sup>[23]</sup>、产生和积累活性氧(ROS)<sup>[24]</sup>,对植物产生伤害。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的重要产物,其含量可反映细胞膜受损程度<sup>[1]</sup>,如对 *Cupressus atlantica* 的研究发现,与对照相比,丛枝菌根真菌接种后的 MDA 含量下降了 8%<sup>[13]</sup>。柏木接种 AMF 后的 MDA 含量相对较低,证实了丛枝菌根真菌接种有助于减轻干旱胁迫对柏木细胞膜的损害。本研究中,干旱胁迫过程下 MDA 含量先上升后下降,说明干旱胁迫初期柏木细胞的膜脂过氧化程度较为严重;而后期 MDA 含量下降,一方面可能与柏木自身对干旱的适应性有关,另一方面可能与接种丛枝菌根真菌后的 SOD,POD 含量的增加有关。SOD、POD 是植物体内重要的抗氧化酶,主要作用是清除植物在遭受胁迫时产生的活性氧<sup>[25]</sup>。本研究中丛枝菌根真菌接种显著提高 SOD,POD 含量,表明丛枝菌根真菌接种有助于提高干旱胁迫下柏木体内保护酶含量,进而进一步提高抗旱性。对柏木属的 *C. atlantica*<sup>[13]</sup> 和 *C. arizonica*<sup>[14-15]</sup> 研究也发现接种丛枝菌根真菌可提高其 SOD 和 POD 的含量。可溶性蛋白是一种重要的分子,可作为渗透保护剂和营养来源<sup>[26]</sup>,以保证正常生理代谢活动的进行。本研究中,可溶性蛋白在整个干旱胁迫过程中,呈上升趋势,其中混合接种丛枝菌根真菌的可溶性蛋白含量最高,表明丛枝菌根真菌混合接种显著提高了可溶性蛋白的含量,这在毛红椿<sup>[9]</sup>、黄檀<sup>[27]</sup> 等的研究中也发现。

丛枝菌根真菌接种可以提高宿主植物的光合能力<sup>[9]</sup>。植物的叶绿素含量高低与植物的光合作用强弱密切相关,也是评价植物抗旱性的重要指标之一,但前期研究更多关注总叶绿素的变化<sup>[21]</sup>。本研究发现,随着干旱胁迫的加剧,丛枝菌根真菌接种显著提高了柏木叶片总叶绿素含量和叶绿素 a/b 值,这与对青山杨的研究结果一致<sup>[21]</sup>。干旱胁迫过

程中,叶绿素在活性氧的作用下更易被分解破坏<sup>[28]</sup>,叶绿素 a 主要吸收红光,叶绿素 b 是辅助光合色素,主要吸收红蓝光<sup>[29]</sup>。柏木属于阳生植物,为满足其生长的基本需求,需要吸收大量的红光,这说明丛枝菌根真菌接种下,柏木可能通过增加叶片叶绿素 a/b 比值进一步提高光合能力。

本研究发现,丛枝菌根真菌混合接种可以显著增加柏木根系面积和根尖数量、保护细胞膜的完整性,提升光合能力,促进株高生长,提高对干旱胁迫的适应能力。其中摩西斗管囊霉、根内根孢囊霉和幼套近明囊霉混合接种是培育柏木丛枝菌根真菌菌根苗的优良方法。但本研究是在盆栽试验条件下得出的结果,栽培基质与实际种植的土壤存在差异,后续的研究应进一步开展干旱立地条件下的种植试验,并可探索其他本土丛枝菌根真菌菌种提高柏木对干旱生境的适应性作用。

#### 参考文献:

- [1] 季孔庶,孙志勇,方彦.林木抗旱性研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(6):123-128.
- [2] 谭梦迪,冯天骄,王平等.近30年微生物菌剂改良土壤的研究进展[J].土壤学报,2024,11(7):1-20.
- [3] SMITH S E, SMITH F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. Annual Review of Plant Biology, 2011, 62(1): 227-250.
- [4] 刘婷.菌根真菌提高林木抗旱性研究进展[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2018,29(31):93-98.
- [5] 刘娜,赵泽宇,姜喜铃,等.菌根真菌提高植物抗旱性机制的研究回顾与展望[J].菌物学报,2021,40(4):851-872.
- [6] 贺琴,李钢铁,麻云霞.干旱胁迫下接种 AM 真菌对文冠果幼苗根系的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2024,11(7):1-13.
- [7] 张中峰,张金池,徐广平,等.接种菌根真菌对青冈栎水分吸收的贡献[J].生态学杂志,2018,37(8):2285-2292.
- [8] 张月欣,麻云霞,马秀枝,等.接种4种丛枝菌根真菌对榆树幼苗抗旱性的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(3):146-153.
- [9] 杜宜瑾,朱源,张露,等.接种丛枝菌根真菌对毛红椿幼苗生长及抗旱性的影响[J].森林与环境学报,2024,44(1):71-78.
- [10] 栗晗,江尚焘,彭海英,等.接种土著和外源 AM 真菌对杜梨抗旱性的影响及其适应机制[J].中国农业科学,2024,57(1):159-172.
- [11] 周琳.柏木优树子代遗传分析及优良家系评选[D].雅安:四川农业大学,2017.
- [12] 郑一,张振,金国庆,等.低肥力土壤施用氮磷钾肥影响柏木家系根系发育和养分吸收对钙肥的响应[J].植物营养与肥料

- 学报,2020,26(8):1501-1512.
- [13] AALIPOUR H, NIKBAKHT A, ETEMADI N, et al. Biochemical response and interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria during establishment and stimulating growth of Arizona cypress (*Cupressus arizonica* G.) under drought stress [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 261: 108923.
- [14] OUAHMANE L, HAFIDI M, THIOULOUSE J, et al. Improvement of *Cupressus atlantica* Gaussen growth by inoculation with native arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2007, 103(3): 683-690.
- [15] ZARIK L, MEDDICH A, HIJRI M, et al. Use of arbuscular mycorrhizal fungi to improve the drought tolerance of *Cupressus atlantica* G [J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2016, 339(6): 185-196.
- [16] 刘润进, 陈应龙. 菌根学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] YAN Q X, LI X Y, XIAO X F, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the growth and drought tolerance of *Cinnamomum migao* by enhancing physiobiochemical responses [J]. *Ecology and Evolution*, 2022, 12(7): e9091.
- [18] 唐超, 李敏, 刘永举, 等. 单一及复合 AM 真菌初侵染对番茄苗的生理影响 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(13): 114-119.
- [19] 张可可, 蒋德明, 余海滨, 等. 接种菌根菌剂对科尔沁沙地 4 种造林幼苗生长特性的影响 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1791-1800.
- [20] 赵祥, 曾广萍, 杨盼. 等. AM 真菌对红花生长及其有效成分的影响 [J]. *干旱区研究*, 2019, 36(4): 935-942.
- [21] 方静, 武帅, 孟昭军, 等. 两种丛枝菌根真菌复合接种对青山杨生长生理指标的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2024, 52(4): 17-22.
- [22] 张华, 孙纪全, 包玉英. 丛枝菌根真菌影响植物次生代谢产物的研究进展 [J]. *农业生物技术学报*, 2015, 23(8): 1093-1103.
- [23] 唐承财, 钟全林, 王健. 林木抗旱生理研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2008, 21(1): 20-26.
- [24] 王福祥, 肖开转, 姜身飞, 等. 干旱胁迫下植物体内活性氧的作用机制 [J]. *科学通报*, 2019, 64(17): 1765-1779.
- [25] 黎燕琼, 郑绍伟, 陈泓, 等. 林木抗旱性研究及其进展 [J]. *世界林业研究*, 2007, 20(1): 10-15.
- [26] 王紫瑄. 丛枝菌根真菌对蒙古沙冬青根系及幼苗生长的影响 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2023.
- [27] 邓创, 王志高, 朱锦茹, 等. 丛枝菌根接种对黄檀的抗旱性影响 [J]. *分子植物育种*, 2024, 22(15): 5107-5114.
- [28] 刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(12): 6439-6445.
- [29] 付佳琳, 蔡江平, 刘贺永, 等. 内蒙古草甸草原植物叶片光合色素对极端干旱的响应 [J]. *中国草地学报*, 2022, 44(4): 40-47.

## · 征订启事 ·

### 欢迎订阅 2025 年度《江苏林业科技》

《江苏林业科技》为国内外公开发行的综合性林业科学技术刊物。1974 年创刊。为科学引文数据库 (SCD) 和“中国应用型期刊”入库期刊、《中国学术期刊(网络版)》入编期刊、全国优秀期刊、江苏省优秀期刊、全国优秀农业期刊、华东地区优秀期刊。加入“万方数据——数字化期刊群”和中国期刊网等。

《江苏林业科技》主要刊登良种选育、育苗造林、园林绿化、林副特产、森林经营、森林保护、调查设计、野生动物等方面的学术论文、科研报告、经验总结, 以及林业新成果、新技术, 有较强的指导性、技术性、实用性, 是林业科研、教学工作者、管理部门及广大林业生产者不可少的参考资料。欢迎订阅, 欢迎投稿, 欢迎刊登广告, 宣传产品等。

《江苏林业科技》为双月刊, 大 16 开本, 国内外公开发行。国内统一刊号: CN 32-1236/S, 国际标准刊号: ISSN 1001-7380, 每期定价 15.00 元, 全年订费 90.00 元。全年办理订阅手续, 需订阅者请到当地邮局订阅或将订款汇至南京市江宁区东善桥江苏省林业科学研究院本刊编辑部, 邮政编码 211153。电话 (025) 52745438, 83602820, 83602060。由银行或邮局汇寄均可。开户银行: 中国农业银行南京金鹰支行, 户名: 江苏省林业科学研究院, 帐号: 10105101040000010。邮发代号: 28-303。