

DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2022.04.015

## 侧柏与2种丛枝菌根真菌的共生研究

韦满<sup>1</sup>, 金小霞<sup>1</sup>, 程康<sup>1</sup>, 唐明<sup>1,2</sup>, 张好强<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

**摘要:**【目的】探讨侧柏[*Platycladus orientalis* (L.) Franco]与丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)的共生情况, 为合理应用AMF进行侧柏育苗造林提供参考依据。【方法】以侧柏为试材, 在盆栽试验条件下, 设置不接种(CK)、接种根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, Ri)和接种摩西斗管囊霉(*Funnelformis mosseae*, Fm)3个处理, 研究了接种AMF在2周、4周和6周后对侧柏侵染、生长、养分吸收及叶绿素含量的影响。【结果】2种AMF均能够与侧柏形成共生, 接种2周后形成A-型丛枝结构, 菌根侵染率超过80%; Ri处理和Fm处理的菌根侵染强度、丛枝丰度由相对较低水平持续增长, 接种4周后趋于稳定, 分别约为20%和40%。接种2周、4周和6周后, 侧柏地上、地下部分生物量变化均不显著; 接种2周、4周、6周后与对照相比, Ri处理和Fm处理均显著提高侧柏磷含量, 分别提高57.99%和90.14%, 67.44%和121.98%, 64.06%和145.51%; 2种AMF均可提高侧柏叶绿素含量, 其中Fm处理效果优于Ri处理。【结论】2种AMF与侧柏存在共生关系, 可在短时间(6周)内改善侧柏的磷营养状况, 促进光合作用; 摩西斗管囊霉(Fm)与侧柏的选择适应性更佳, 具有开发为侧柏菌根菌剂的潜力。

**关键词:** 丛枝菌根真菌; 侧柏; 生长; 磷; 叶绿素

中图分类号: S791.38

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1003-4315(2022)04-0114-08



## The study on symbiosis between *Platycladus orientalis* and two arbuscular mycorrhizal fungi

WEI Man<sup>1</sup>, JIN Xiaoxia<sup>1</sup>, CHENG Kang<sup>1</sup>, TANG Ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Haoqiang<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Forest Plant Germplasm Innovation and Utilization, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** 【Objective】 In order to provide reference for the application of AMF in *P. orientalis* seedling cultivation and afforestation, the symbiosis between *Platycladus orientalis* (L.) Franco and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) was investigated. 【Method】 Three treatments were set in this study, i. e., no inoculation (CK), inoculation of *Rhizophagus intraradices* (Ri), and inoculation of *Funnelformis mosseae* (Fm), and the effects of AMF on the colonization rate, growth, nutrient absorption and chlorophyll concentration of *P. orientalis* seedlings were analyzed in the pot experiment at two, four, and six weeks after inoculation, respectively. 【Result】 Both AMF could form a symbiosis with *P. orientalis* seedlings and could form the

第一作者: 韦满, 硕士研究生。E-mail: weiman@nwfau.edu.cn

通信作者: 张好强, 副教授, 博士, 现主要从事丛枝菌根真菌多样性及调控植物抗逆性等研究工作。E-mail: zhanghaoqiang@nwsuaf.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700530)。

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-10-28

Arum-type arbuscular structure after 2 weeks of inoculation and the mycorrhizal colonization rates were more than 80%. Meanwhile, the intensity of mycorrhizal colonization and arbuscular abundance in Ri treatment and Fm treatment continued to increase from a relatively low level, and stabilized after 4 weeks of inoculation, about 20% and 40% respectively. The biomass changes of the aboveground and underground parts of *P. orientalis* seedlings showed no significant difference after 2 weeks, 4 weeks and 6 weeks of inoculation. Ri treatment and Fm treatment could effectively promote the absorption of phosphorus in *P. orientalis* after inoculation for 2, 4 and 6 weeks, which were 57.99% and 90.14%, 67.44% and 121.98%, 64.06% and 145.51%, respectively. Inoculation with AMF could increase the chlorophyll concentration of leaves, and the effect of Fm treatment was better than that of Ri treatment. 【Conclusion】 The symbiotic relationship between AMF and *P. orientalis* was confirmed. In a short inoculation time (6 weeks), both AMF improved phosphorus nutrition and promoted photosynthesis of *P. orientalis*. Our results indicated that both *Funneliformis mosseae* and *P. orientalis* had better selective adaptation, which hence could be developed as the potential mycorrhizal inoculants.

**Key words:** arbuscular mycorrhizal fungi; *Platycladus orientalis*; growth; phosphorus; chlorophyll

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)广泛分布于自然界中,能与约80%的植物形成丛枝菌根共生体<sup>[1]</sup>,与农林业生产关系密切<sup>[2]</sup>。以往研究表明,AMF不仅可以通过大量延伸的菌丝为宿主植物提供水分和氮、磷、钾等营养物质<sup>[3-6]</sup>,而且可直接合成或诱导宿主植物生成多种激素类物质<sup>[7]</sup>,同时,还能改善土壤理化性状,从而促进宿主植物在逆境中定植和生长,增强植物耐受干旱<sup>[8]</sup>、盐碱<sup>[9]</sup>、低温<sup>[10]</sup>、重金属<sup>[11]</sup>和病虫害<sup>[12]</sup>等各种逆境胁迫的能力,改善植物的生长状况<sup>[13-14]</sup>。不同AMF促生效应存在差异<sup>[15-16]</sup>,因此,选用适宜的AMF对恶劣环境中的生态恢复与重建、可持续发展具有深远意义。

侧柏[*Platycladus orientalis* (L.) Franco]为我国特有的柏科侧柏属常绿乔木,分布广泛,具有发达的根系且耐干旱瘠薄,抗盐碱能力较强<sup>[17]</sup>,对土壤要求不严,是西北地区绿化荒山的首选苗木之一,在人工植被建设中发挥着重要作用。同时,侧柏还是一种优良的木材,且在医药方面也极具价值,但它存在生长缓慢、植株纤细、培育周期长等问题。已有研究报道,AMF在造林中有很好的应用价值,能够加快植株生长速度,增加造林成功率,加速植被恢复,缩短苗木成林周期<sup>[18-19]</sup>。目前,对于侧柏林下土壤微生物类型、AMF群落分布、土壤理化性质及野外接种AMF对侧柏生长的影响方面已有一些研究报道<sup>[2,20]</sup>,且取得了较好进展。然而,有关接种AMF对侧柏幼苗根系侵染及生长影响的基础研究却鲜有报

道。因此,本研究采用温室盆栽试验的方法,探究2种AMF(根内根孢囊霉和摩西斗管囊霉)不同接种时间对侧柏的侵染情况及生长效应的影响,以期为AMF在侧柏育苗造林中应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究材料

1.1.1 供试菌剂 根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, Ri)和摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, Fm)菌剂均购自北京农林科学院植物营养与资源研究所,经车前草扩繁,收获根和培养基质(灭菌沙)的混合物作为菌剂(Ri和Fm的孢子密度分别为106个/10 g和86个/10 g)。

1.1.2 供试植物 侧柏种子购买于西北农林科技大学苗木种子市场。

1.1.3 供试基质 河沙过筛(直径2 mm)后,用自来水冲洗干净,于烘箱170℃灭菌4 h,蛭石于灭菌锅121℃、0.1 MPa下灭菌2 h,最后将沙和蛭石按体积比1:1混匀。

### 1.2 试验设计

试验设计为接种(Ri)、接种(Fm)和不接种对照(CK)3个处理,每个处理分别设置3个接种时间(2周、4周和6周),每个处理设4个重复,共计36盆,完全随机区组排列。

选择颗粒饱满的侧柏种子,先用90%酒精浸泡

1 min, 无菌水冲洗 3 次, 再用 5% NaClO 表面消毒 10 min, 无菌水充分冲洗 3 次。将种子均匀置于放有灭菌基质(沙子:蛭石=1:1)的托盘内, 并平铺上一层灭菌基质, 期间喷洒无菌水保持基质湿润, 在育苗间内催芽生长。侧柏种子 2 周后露白萌发, 2 个月后, 挑选长势一致的幼苗挪至穴盘中继续生长, 每个穴盘中种植幼苗 200 株, 每 3 d 浇水 1 次, 每周施 Hoagland 营养液 1 次, 每穴盘 500 mL, 生长 5 个月后进行接种处理。

将不同菌剂分别和灭菌基质按照体积比 1:9 充分混匀, 对照将灭活菌剂和灭菌基质按体积比 1:9 进行混匀, 混合好后装入塑料盆(直径×高=11 cm×9 cm)至 2/3 处。将穴盘中侧柏幼苗移植到塑料盆中, 每盆 8 株。塑料盆在使用之前, 用 5% NaClO<sub>3</sub> 溶液浸泡 24 h 并清洗晾干。接种 AMF 后, 每 3 d 浇水 1 次, 每周施 10% 磷的 Hoagland 营养液 1 次, 每盆 25 mL。分别在接种 2 周、4 周、6 周后收样, 每个处理收样 4 盆。整个试验过程在西北农林科技大学林学院森林微生物实验室育苗间进行, 培养温度 20~28 °C, 湿度 50%~75%, 光照强度 2000 lx, 光照 16 h/d。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 侧柏生物量 接种 2 周、4 周、6 周后, 每个处理分别随机收获 4 盆, 将地上部分和地下部分分开, 利用分析天平分别称取地上部分总鲜质量和地下部分总鲜质量, 预留部分样品置于液氮中, 并在 -70 °C 冰箱中保存。剩余地上部分样品进行称重, 在 80 °C 烘箱中烘干 48 h 至恒重。

1.3.2 侵染率 取侧柏新鲜根样, 用清水冲洗后剪取部分用 FAA 固定液固定(福尔马林:冰醋酸:70% 酒精=1:1:18), 经过台盼蓝染色后<sup>[21]</sup>, 取 30 个约 1.0 cm 的根段, 进行压片、镜检。参照 Trouvelot 等<sup>[22]</sup>的方法, 使用 MYCOCALC 软件计算  $F$ 、 $M$ 、 $m$ 、 $A$ 、 $a$ , 其中  $F$  表示含有真菌结构的根系占整个根系的比例(%),  $M$  表示整个根系的菌根侵染强度(%),  $m$  表示侵染根段的菌根侵染强度(%),  $a$  表示整个根系的丛枝丰度(%),  $A$  表示侵染根段的丛枝丰度(%).

1.3.3 侧柏地上部分中氮、磷、钾含量的测定 地上部分样品于 105 °C 下杀青 20 min, 80 °C 烘干 48 h 至恒重后磨样。称取 0.1 g 磨好干样于 100 mL 的消化管中, 用硫酸-过氧化氢消解后, 定容至 100 mL。采用自动凯氏定氮法测定氮含量, 采用钼锑抗比色法

测定磷含量, 采用火焰光度法测定钾含量<sup>[23]</sup>。

1.3.4 侧柏叶片叶绿素含量的测定 称取 0.05 g 磨好鲜样加入 3 mL 95% 乙醇, 置于暗处反应 24 h 后, 在 3 000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清并定容至 10 mL。叶绿素含量按照高俊凤等<sup>[24]</sup>的方法测定。

### 1.4 数据处理

使用 SPSS 26.0 统计软件进行数据分析; 采用 Duncan 法进行显著检验和多重比较, 显著水平  $\alpha=0.05$ ; 利用 Excel 2019 制图。

## 2 结果与分析

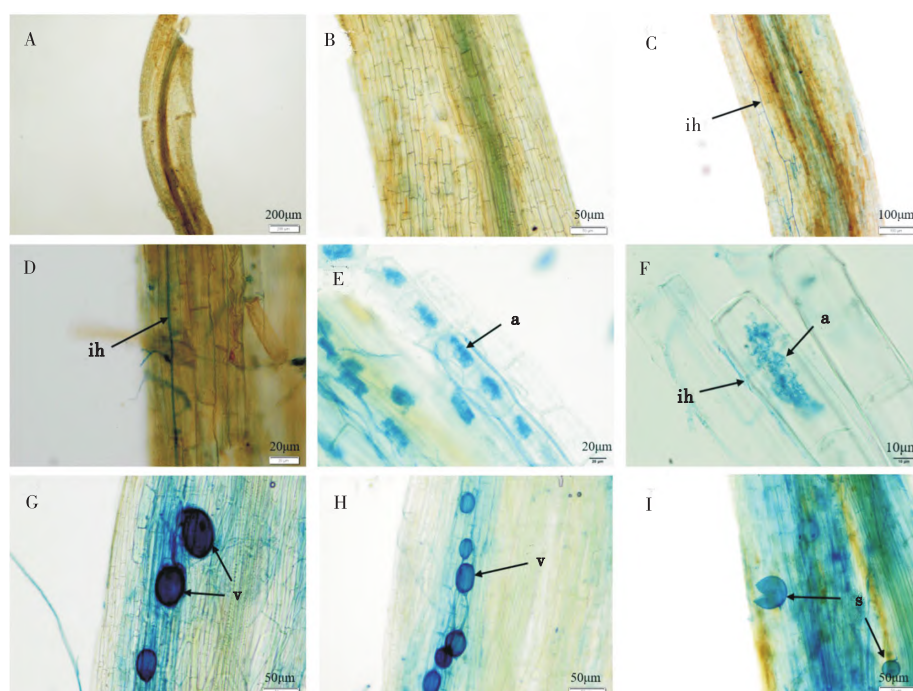
### 2.1 2 种 AMF 在侧柏中形成的侵染特征

接种  $F_m$  和  $R_i$  的侧柏根系, 2 周后均被侵染并形成根内菌丝(图 1-C、1-D)和丛枝(图 1-E、1-F)等典型丛枝菌根结构, 4 周后开始形成泡囊(图 1-G、1-H), 6 周后逐渐产生孢子(图 1-I), 接种 2 周、4 周和 6 周内均能观察到根内菌丝和丛枝结构。而 CK 处理的侧柏则无 AMF 侵染(图 1-A、1-B)。2 种 AMF 侵染侧柏形成的丛枝均为疆南星型(*Arum*-type, A-型)。

表 1 可知, 接种 4 周内,  $R_i$  处理和  $F_m$  处理的  $F$ 、 $M$ 、 $m$ 、 $A$ 、 $a$  均随接种时间增加而增加, 至 6 周时变化趋于平缓。接种 2 周后, 2 个处理的  $F$  均超过 80%, 随接种时间增加,  $R_i$  处理和  $F_m$  处理的  $F$  最高可达 94.17% 和 90.00%。从  $M$  来看, 接种 2 周时,  $R_i$  处理和  $F_m$  处理的菌根真菌结构在侧柏整个根系中占比较小, 且在菌根化根系中所占的比例也较小, 仅有 5% 左右, 之后根系菌根侵染强度均随时间增加而增大, 最高可达 18.89% 和 24.42%。 $R_i$  处理和  $F_m$  处理整个根系的丛枝发育良好, 接种 6 周后, 整个根系丛枝丰度( $a$ )分别为 41.14% 和 41.39%。在 4 周、6 周接种时间内,  $F_m$  处理的菌根侵染强度和丛枝丰度均优于  $R_i$  处理。

### 2.2 2 种 AMF 对侧柏生长的影响

从表 2 可知, 随接种时间增加, CK、 $R_i$  和  $F_m$  处理的侧柏地上部分鲜质量、地下部分鲜质量和总鲜质量呈现增长趋势。在 2 周、4 周、6 周接种时间内,  $R_i$  和  $F_m$  处理与 CK 处理的侧柏地上部分鲜质量、地下部分鲜质量和总鲜质量的无显著变化。随接种时



A~B:CK处理;C~I:Ri和Fm处理;ih:根内菌丝;a:丛枝;v:泡囊;s:孢子。

A~B:CK treatment; C~I:Ri and Fm treatment; ih: intraradical hyphae; a: arbuscule; v: vesicle; s: spore.

图1 侧柏根系的主要菌根结构

Figure 1 Arbuscular mycorrhizas in the root of *P. orientalis*

表1 2种AMF侵染侧柏的情况( $n=4$ )

Table 1 Colonization status of *P. orientalis* inoculated with 2 AMF( $n=4$ )

| 处理 Treatment      |     | 菌根侵染率/% AM colonization |              |              |               |              |
|-------------------|-----|-------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 时间/周<br>Time/Week | AMF | <i>F</i> /%             | <i>M</i> /%  | <i>m</i> /%  | <i>a</i> /%   | <i>A</i> /%  |
| 2                 | Ri  | 80.83±3.19 b            | 4.94±0.71 c  | 5.33±0.75 d  | 10.54±1.75 d  | 0.60±0.07 c  |
|                   | Fm  | 82.50±5.00 b            | 4.63±0.79 c  | 5.64±1.12 d  | 23.38±1.91 c  | 1.01±0.07 c  |
| 4                 | Ri  | 94.17±1.67 a            | 14.95±1.18 b | 15.81±1.11 c | 46.63±6.00 ab | 7.04±1.39 b  |
|                   | Fm  | 86.67±11.22 ab          | 18.74±2.30 b | 20.34±3.06 b | 49.11±3.52 a  | 9.36±1.97 ab |
| 6                 | Ri  | 92.50±3.19 a            | 18.89±4.82 b | 20.14±4.64 b | 41.14±6.17 b  | 8.07±3.34 ab |
|                   | Fm  | 90.00±6.09 ab           | 24.42±3.83 a | 25.62±3.66 a | 41.39±3.20 b  | 10.30±2.39 a |

同列数据中标有不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Different letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

间增加,CK和Fm处理的根冠比无显著变化,Ri处理的根冠比呈降低趋势。同一接种时间内,CK、Ri和Fm处理的根冠比并未有显著差异。

#### 2.4 2种AMF对侧柏地上部分氮磷钾元素含量的影响

从图2可知,随接种时间增加,CK、Ri和Fm处理侧柏地上部分氮含量和钾含量变化均不显著。在

接种2周、4周及6周时,Ri和Fm处理显著提高了侧柏地上部分磷含量,分别为57.99%和90.14%,67.44%和121.98%,64.06%和145.51%,并且Fm处理显著优于Ri处理( $P<0.05$ )。

#### 2.5 2种AMF对侧柏叶片叶绿素含量的影响

由图3可知,接种2周时,Ri处理和Fm处理叶绿素a含量显著提高,接种4周和6周时,仅Fm处

表2 2种AMF侵染后侧柏的生长影响( $n=4$ )Table 2 Growth effects of *P. orientalis* inoculated with 2 AMF( $n=4$ )

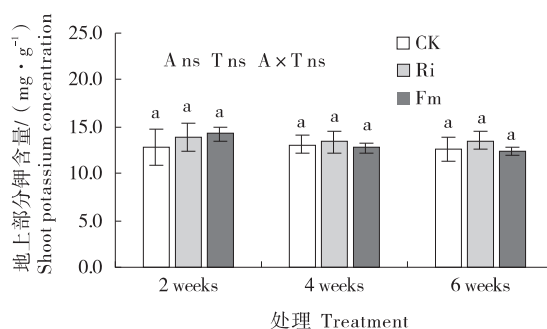
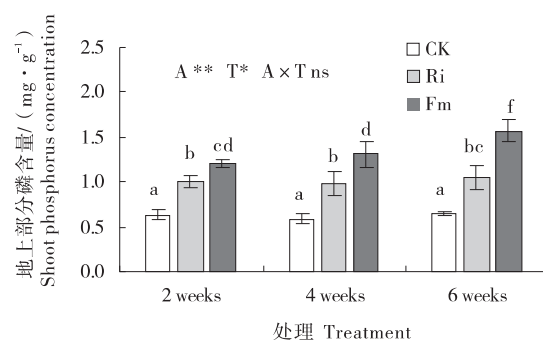
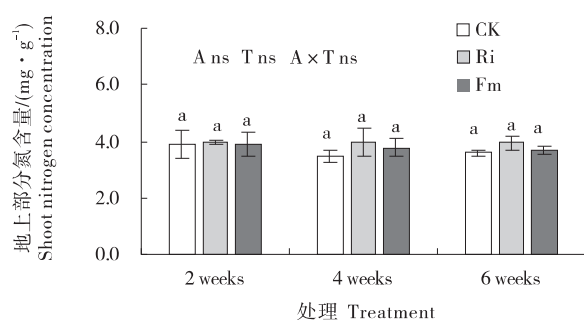
| 处理 Treatment |     | 地上部分鲜/g            | 地下部分鲜/g           | 总鲜重/g              | 根冠比              |
|--------------|-----|--------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 时间/周         | AMF | Shoot fresh weight | Root fresh weight | Total fresh weight | Root shoot ratio |
| 2            | CK  | 1.58±0.12 d        | 0.74±0.09 c       | 2.32±0.20 c        | 0.47±0.03 a      |
|              | Ri  | 1.60±0.16 d        | 0.72±0.07 c       | 2.32±0.21 c        | 0.45±0.05 a      |
|              | Fm  | 1.83±0.10 cd       | 0.80±0.10 bc      | 2.63±0.13 bc       | 0.44±0.06 ab     |
| 4            | CK  | 1.94±0.13 bc       | 0.84±0.08 abc     | 2.78±0.18 b        | 0.43±0.04 ab     |
|              | Ri  | 2.11±0.32 b        | 0.87±0.17 abc     | 2.98±0.48 b        | 0.41±0.03 ab     |
|              | Fm  | 1.98±0.09 bc       | 0.88±0.18 abc     | 2.86±0.26 b        | 0.44±0.07 ab     |
| 6s           | CK  | 2.59±0.15 a        | 1.01±0.12 a       | 3.61±0.25 a        | 0.39±0.03 abc    |
|              | Ri  | 2.77±0.24 a        | 0.91±0.18 abc     | 3.68±0.38 a        | 0.33±0.05 c      |
|              | Fm  | 2.70±0.12 a        | 0.99±0.08 ab      | 3.69±0.09 a        | 0.37±0.04 bc     |

同列数据中标有不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Different letters in the same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

理显著提高。Ri处理和Fm处理的叶绿素b含量在接种2周和6周时显著提高,叶绿素b含量明显低于叶绿素a。随接种时间增加,3个处理的叶绿素总含量均呈先上升后下降趋势,Fm处理在接种

2周、4周和6周时均显著提高,而Ri处理仅在接种2周时显著提高,Fm处理较Ri处理效果更好。接种6周时,Ri处理和Fm处理的叶绿素a/b显著降低。

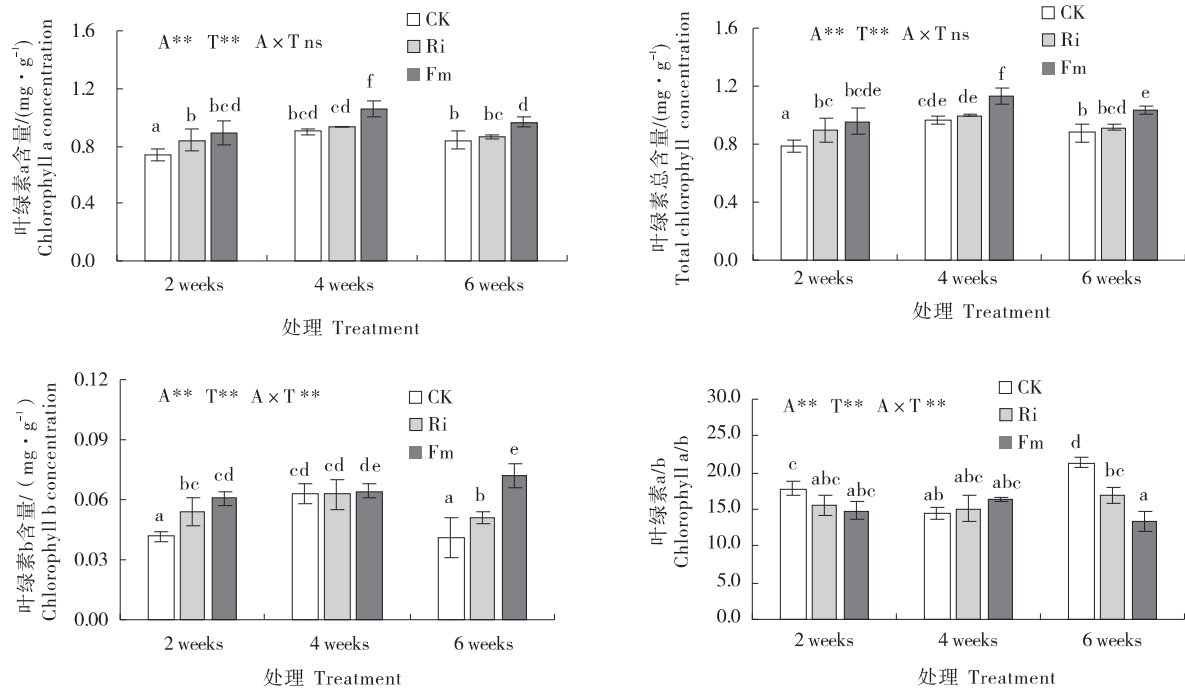


A表示接菌,T表示时间,A×T表示接菌×时间的交互作用。

A indicate AMF, T indicate time, A×T indicate AMF×time interaction.

图2 2种AMF对侧柏地上部分的氮磷钾养分元素含量的影响

Figure 2 Effects of 2 AMF on the concentration of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in the above ground part of *P. orientalis*



A表示接菌,T表示时间,A×T表示接菌×时间的交互作用。

A indicate AMF, T indicate time, A × T indicate AMF × time interaction.

图3 2种AMF对侧柏叶片叶绿素含量的影响

Figure 3 Effects of 2 AMF on the chlorophyll concentration of *P. orientalis* leaves

### 3 讨论

#### 3.1 不同接种时间AMF与侧柏的侵染情况

植物接种AMF后,建立共生关系是促进生长发育的前提,而根内菌丝、丛枝和泡囊的形成,是AMF侵染成功的标志<sup>[25-26]</sup>。本研究表明,温室盆栽条件下,接种2种AMF 2周后,侧柏根系均形成菌丝、丛枝等典型侵染结构,4周后开始产生泡囊结构,且均具有80%以上的菌根侵染率,确认AMF能够侵染侧柏根部,形成菌根共生体,建立了良好的共生关系。同时,丛枝是丛枝菌根共生互利关系的基础组织结构,在自然植物群落中的裸子植物多形成P-型(Paris-type)丛枝,生长迅速的栽培植物常形成A-型(Arum-type)丛枝<sup>[27-28]</sup>,而本研究中,2种AMF均能与侧柏形成A-型丛枝,这表明丛枝形态不仅受植物控制,还受AMF影响,前人在番茄(*Lycopersicon esculentum* Miller)上也验证了这一理论<sup>[29-30]</sup>。丛枝是AMF从侧柏体内获得足够碳源以及侧柏利用AMF获得更多营养物质的交流平台,它的形成为AMF和侧柏共生关系的建立提供坚实的组织结构学保证,

这进一步证实李少朋等<sup>[14]</sup>在煤矿区侧柏接种AMF的研究结果。

本研究中,侧柏根系的菌根侵染强度和丛枝丰度均随接种时间的增加而增加,至接种4周后无显著变化。于洋等<sup>[31]</sup>发现,接种AMF后菌根侵染率和侵染强度随时间的增加而增加,但增加至一定时间(28 d)时趋于稳定。说明随着菌根侵染强度的增强,丛枝丰度也随之增加,短时间(4周)内达到稳定。前人采用AMF接种黄顶菊(*Flaveria bidentis*)<sup>[32]</sup>和辣椒(*Capsicum annuum*)<sup>[33]</sup>也得到类似结果。一般认为,菌根侵染率越高,植物菌根化程度也会越高,对宿主植物的促生作用越明显。此外,在AMF接种4周后,接种摩西斗管囊霉的菌根侵染强度和丛枝丰度均高于接种根内根孢囊霉,说明AMF对宿主植物存在选择性,侵染率亦不同,侧柏与摩西斗管囊霉更具选择适应性,侵染效果更佳。

#### 3.2 不同接种时间AMF对侧柏生长效应的影响

AMF主要功能之一是增强植物养分吸收,促进植物生长发育。已有研究表明AMF能够促进宿主植物根部吸收营养物质,将吸收的营养运输至植物地上部分,以提供叶片光合代谢的需要,进而促进生

物量的积累<sup>[34-36]</sup>。本研究中,接种2种AMF后,随时间的增加,侧柏地上部分磷含量均显著提高,接种摩西斗管囊霉效果更佳,而氮、钾含量无显著变化,其原因可能是与菌种及宿主植物有关<sup>[37-38]</sup>。AMF能通过根外菌丝扩大侧柏根系的吸收范围,增强对磷营养元素的吸收,有效解决在低磷条件下,植物生长受限,发育缓慢等问题。此外,接种2种AMF均显著增加侧柏叶片叶绿素含量,且摩西斗管囊霉效果更佳,说明丛枝菌根的形成有利于增加叶绿素含量进而增强光合作用,促进光合产物积累,从而积累更高生物量<sup>[39-40]</sup>。由此可见,接种摩西斗管囊霉和侧柏之间选择适应性更好,能够更好地发挥共生体作用。

接种时间也是影响AMF促进植物生长发育的重要因素。本研究发现,接种2周、4周和6周后,2种AMF对侧柏并未产生显著促生作用。姜英等<sup>[41]</sup>研究表明,AMF接种任豆(*Zenia insignis*)幼苗1个月后,其苗高、地径均未出现显著性差异,而接种6个月后,其生长发育差异显著。Roldán等<sup>[42]</sup>研究发现,尖叶刺柏(*Juniperus oxycedrus*)在温室接种混合菌剂14个月后能够显著促进尖叶刺柏的生长。因此,侧柏作为多年生木本植物,生长缓慢,可能是短时间(6周)接种未产生显著促生作用的原因。舒玉芳等<sup>[43]</sup>的研究也得到了相似的结果。

## 4 结论

研究明确了温室盆栽条件下2种AMF与侧柏的共生关系,2种AMF均形成A-型丛枝,且接种摩西斗管囊霉菌根化程度更高。在短时间(6周)内2种AMF均显著提高侧柏地上部分磷含量及叶片叶绿素含量,且摩西斗管囊霉接种效果更佳。接种2种AMF能够改善侧柏的磷营养状况及促进光合作用,其中,摩西斗管囊霉更具开发潜力,对侧柏与AMF的深入研究具有重要意义,可为侧柏造林实践中菌根化育苗提供科学依据。

## 参考文献

- [1] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. 3rd. London: Elsevier Academic Publishers, 2008.
- [2] Chen X D, Tang M, Zhang X L, et al. Effects of plant neighborhood on arbuscular mycorrhizal fungal attributes in afforested zones[J]. Forest Ecology & Management, 2018, 422: 253-262.
- [3] Majewska M L, Rola K, Zubek S. The growth and phosphorus acquisition of invasive plants *Rudbeckia laciniata* and *Solidago gigantea* are enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Mycorrhiza, 2016, 27(2): 83-94.
- [4] 冯欢, 蒙盼盼, 豆青, 等. 菌根真菌与植物共生营养交换机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3596-3604.
- [5] 王岩, 邢丹, 宋拉拉, 等. AM真菌对石漠化地区桑树的促生及养分调控作用[J]. 热带作物学报, 2020, 41(1): 7-14.
- [6] 张学林, 吴梅, 李晓立, 等. 丛枝菌根真菌对灌浆前期玉米籽粒氮代谢及产量和品质的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 647-653.
- [7] 宋凤鸣, 刘建华, 刘登彪, 等. 3种丛枝菌根真菌对任豆生长和抗旱性的影响研究[J]. 西南林业大学学报, 2018, 38(6): 105-113.
- [8] Zhang Z F, Zhang J C, Huang Y Q. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the drought tolerance of *Cyclobalanopsis glauca* seedlings under greenhouse conditions[J]. New Forests, 2014, 45(4): 545-556.
- [9] 刘倩, 高娅妮, 柳旭, 等. 混合盐碱胁迫下接种丛枝菌根真菌和根瘤菌对紫花苜蓿生长的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(17): 6143-6155.
- [10] 徐冬梅, 贺忠群, 赵英鹏, 等. 低温胁迫下AMF对景天三七生长和生理特性的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(12): 2452-2464.
- [11] 何铮. 镉胁迫下丛枝菌根真菌对大叶女贞生长及镉耐受性的影响[J]. 西部林业科学, 2020, 1(1): 87-91.
- [12] 张钰, 唐明. 丛枝菌根真菌对青杨抗溃疡病生物量和抗病酶活性的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(5): 1110-1122.
- [13] Shi S M, Chen K, Gao Y, et al. Arbuscular mycorrhizal fungus species dependency governs better plant physiological characteristics and leaf quality of mulberry (*Morus alba* L.) seedlings[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1030.
- [14] Smith F A, Smith S E. What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonisation of many economically important crop plants[J]. Plant and Soil, 2011, 348(1/2): 63-79.
- [15] 张延旭, 毕银丽, 郭楠, 等. 接种不同丛枝菌根真菌对黄花苜蓿生长影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3815-3822.
- [16] 屈明华, 俞元春, 李生, 等. 喀斯特生境下AMF侵染

- 对任豆生长的影响[J]. 生态环境学报, 2020(2): 231-239.
- [17] 陈雪冬. 不同造林模式丛枝菌根真菌群落特征及其分解枯落物的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [18] 王亚军, 唐明, 郭渊, 等. 外生菌根真菌对杉木的接种效应[J]. 西北植物学报, 2006, 26(9): 1900-1904.
- [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] 李少朋, 毕银丽, 彭星. 接种丛枝菌根真菌对采煤沉陷区侧柏生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(6): 1491-1494.
- [21] Koske R E, Gemma J N. A modified procedure for staining roots detect VA mycorrhizas[J]. Mycological Research, 1989, 92(4): 486-488.
- [22] Trouvelot A, Kough J L, Gianinazzi P. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle [C] // Gianinazzi P, Gianinazzi S. Physiological and Genetics Aspects of Mycorrhizas. Paris, France: INRA, 1986: 217-221.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [25] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001.
- [26] Brundrett M C. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis[J]. Plant & Soil, 2009, 320(1/2): 37-77.
- [27] Smith F A, Smith S E. Structural diversity in (vesicular)-arbuscular mycorrhizal symbioses[J]. New Phytologist, 1997, 137(3): 373-388.
- [28] Yamato M, Iwasaki M. Morphological types of arbuscular mycorrhizal fungi in roots of understory plants in Japanese deciduous broadleaved forests[J]. Mycorrhiza, 2002, 12(6): 291-296.
- [29] Cavagnaro T R, Gao L L, Smith F A, et al. Morphology of arbuscular mycorrhizas is influenced by fungal identity[J]. New Phytologist, 2001a, 151(2): 469-475.
- [30] Kubota M, McGonigle T P, Hyakumachi M. Co-occurrence of *Arum*- and *Paris*-type morphologies of arbuscular mycorrhizae in cucumber and tomato[J]. Mycorrhiza, 2005, 15(2): 73-77.
- [31] 于洋, 于涛, 王洋, 等. 接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1370-1377.
- [32] 季彦华, 刘润进, 李敏. 自然入侵条件下黄顶菊丛枝菌根定殖及发育的研究[J]. 菌物学报, 2015, 34(1): 82-90.
- [33] 姜璇, 陶刚, 王甘, 等. 丛枝菌根真菌与大田辣椒定殖共生研究[J]. 北方园艺, 2019, 428(5): 56-60.
- [34] 张中峰, 张金池, 周龙武, 等. 丛枝菌根真菌对石漠化地区造林苗木生长的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 62-69.
- [35] 吴勇, 刘晓静, 童长春, 等. 施氮对西北荒漠灌区紫花苜蓿土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 58-64.
- [36] 任爱天, 鲁为华, 杨洁晶, 等. 不同磷水平下AM真菌对紫花苜蓿生长和磷利用的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 31(6): 1-7.
- [37] 赵昕, 阎秀峰. 丛枝菌根对喜树幼苗生长和氮、磷吸收的影响[J]. 植物生态学报, 2006(6): 947-953.
- [38] 韦素贞, 张好强, 胡文涛, 等. AM真菌和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 165-170.
- [39] 刘欢, 姚拓, 李建宏, 等. 丛枝菌根真菌对番茄生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(4): 75-81, 89.
- [40] Mathur S, Sharma M P, Jajoo A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology. B: Biology, 2018, 180: 149-154.
- [41] 姜英, 刘菲, 李娟, 等. 不同AM菌剂对石山树种任豆幼苗生长的影响[J]. 广西林业科学, 2019, 48(1): 51-56.
- [42] Roldán A, Diaz-vivancos P, Hernández J A, et al. Superoxide dismutase and total peroxidase activities in relation to drought recovery performance of mycorrhizal shrub seedlings grown in an amended semiarid soil[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(7): 715-722.
- [43] 舒玉芳, 叶娇, 潘程远, 等. 三峡库区桑树菌根发育特征及菌根对桑苗生长的促进作用[J]. 蚕业科学, 2011, 37(6): 978-984.

(责任编辑 胡文忠)