



蔡曼丽, 刘玮, 漆欢欢, 等. 丛枝菌根真菌对猴樟幼苗生长及养分特征影响[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 924–934.
CAI M L, LIU W, QI H H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient characteristics of *Cinnamomum bodinieri* seedlings[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 924–934.

丛枝菌根真菌对猴樟幼苗生长及养分特征影响

蔡曼丽^{1,2}, 刘 玮^{1,2}, 漆欢欢¹, 温小波¹, 喻苏琴^{1,2*}

(1. 江西农业大学 园林与艺术学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西省森林培育重点实验室, 江西 南昌 330045)

摘要:【目的】探究丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AM 真菌)及其不同种类对猴樟幼苗生长和养分特征的影响, 为猴樟菌根化育苗技术提供参考依据。【方法】以当年猴樟播种幼苗为研究对象, 设置单接根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*, 简称 Ri)、单接摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, 简称 Fm)、两菌种双接(Ri-Fm)及不接种对照(CK)4种处理, 开展盆栽试验。测定了猴樟根茎叶的生长和氮磷钾养分指标, 并通过主成分分析进行综合评价。【结果】3种接菌处理对猴樟根系的侵染率为19.62%~28.15%, 以单接 Ri 的侵染率最高。接菌后约4个月时, AM 真菌开始明显促进猴樟地上部生长。处理8个月收苗时结果显示, 3种接菌处理均显著促进了猴樟根系生长, 增加了根系数量, 其中单接 Fm 促进作用最大。接菌处理也显著提高了猴樟生物量, Ri 单接、Fm 单接和双接处理的植株生物量分别是 CK 组的3.11倍、3.18倍和2.85倍。在养分特征上, AM 真菌显著提高了猴樟幼苗各器官 P 含量, 降低了 N、K 含量; 增大了 N、P、K 的累积; 提高了 N、K 利用效率, 降低了 P 素利用效率。主成分分析结果由优到劣排序为 Fm、Ri、Ri-Fm 和 CK。【结论】根内根孢囊霉、摩西斗管囊霉单接和双接都能不同程度促进猴樟幼苗生长及氮磷钾累积, 提高氮、钾利用效率。单接摩西斗管囊霉促进效应最大, 可考虑运用于产业化育苗中。

关键词: 猴樟苗; 丛枝菌根真菌; 生长效应; 养分特征

中图分类号: S687.1 文献标志码: A

文章编号: 1000-2286(2024)04-0924-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient characteristics of *Cinnamomum bodinieri* seedlings

CAI Manli^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, QI Huanhuan¹, WEN Xiaobo¹, YU Suqin^{1,2*}

(1. College of Landscape Architecture and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Forest Cultivation, Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] In this study, the effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) and their different species on the growth and nutrient characteristics of *Cinnamomum bodinieri* seedlings were

收稿日期: 2024-01-29 修回日期: 2024-03-03

基金项目: 江西省“双千计划”项目(jxsq2018102090)和江西省重点研发计划重点项目(2016BBF60075)

Project supported by the Jiangxi “Double Thousand Plan”(jxsq2018102090) and the Key Research and Development Plan of Jiangxi Province(2016BBF60075)

作者简介: 蔡曼丽, 硕士生, orcid.org/0009-0004-4682-3659, 1041293565@qq.com; *通信作者: 喻苏琴, 讲师, 博士, 主要从事植物营养研究, orcid.org/0000-0003-2395-1573, 717135517@qq.com。

©《江西农业大学学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

investigated to provide a reference for the mycorrhizal seedling technology of *C. bodinieri*. [Method] Taking current year seedlings of *C. bodinieri* as the research object, four kinds of treatments were designed to conduct potting experiments: single inoculated with Rhizophagus intraradices (Ri), single inoculated with Funneliformis mosseae (Fm), mixed inoculated with two strains (Ri-Fm) and no inoculation control (CK). The growth and nutrient indexes of nitrogen, phosphorus and potassium in the roots, stems and leaves of *C. bodinieri* were determined, and the comprehensive evaluation was conducted by principal component analysis. [Result] The infection rates of the three inoculation treatments on the roots of *C. bodinieri* were 19.62%–28.15%, and the infection rate of single inoculation with Ri was the highest. About 4 months after inoculation, AM fungi began to promote significantly the aboveground growth of *C. bodinieri*. When the seedlings were harvested after 8 months, the results showed that all three inoculation treatments promoted significantly the root growth of *C. bodinieri* and increased the number of roots, among which the single inoculation of Fm had the most significant promotion effect. The inoculation treatments also increased significantly the biomass of *C. bodinieri*, and the plant biomass of single-inoculation Ri, single-inoculation Fm and co-inoculation treatments was 3.11, 3.18 and 2.85 times higher than those of the CK treatment, respectively. In terms of nutrient characteristics, AM fungi significantly increased the P content and decreased the N and K content of each organ of *C. bodinieri* seedlings; it also increased the accumulation of N, P, and K; the utilization efficiency of N and K element, and decreased the utilization efficiency of P element. The results of principal component analysis were ranked as Fm>Ri>Ri-Fm>CK. [Conclusion] Both single and mixed inoculation of *F. mosseae* and *R. intraradices* can promote the growth of *C. bodinieri* seedlings and the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium to different degrees, and improved the utilization efficiency of nitrogen and potassium. The promoting effect of single inoculation with *F. mosseae* was the largest, which can be considered to be applied to industrial seedling.

Keywords: *Cinnamomum bodinieri* seedlings; arbuscular mycorrhizal fungi; growth effects; nutrient characteristics

【研究意义】丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AM真菌)能够与80%以上的陆生植物形成互利共生体系,通过其庞大的根外菌丝网络帮助宿主植物获取土壤中的氮、磷等矿质养分,从而促进植物生长^[1]。同时,AM真菌能分泌出一种球囊霉素相关土壤蛋白参与土壤团聚体的形成和稳定,从而起到改良土壤结构和养分状况的作用^[2]。因此在育苗和造林过程中,菌根能加快幼苗的生长速度,提高苗木质量,优化造林成效。猴樟(*Cinnamomum bodinieri* Levl.)是樟科樟属常绿乔木,其树形美观、材质坚实、种子可榨油、枝叶可用于提取芳香精油,是我国特有的优良材用、油用和园林绿化树种^[3-4]。探索猴樟菌根化育苗技术,筛选合适的共生菌种,对于缩短猴樟育苗进程、加速培育大苗壮苗,助力猴樟推广应用等方面具有重要的理论价值和实践指导意义。【前人研究进展】目前,关于AM真菌对植物生长影响的相关研究已开展众多。多数研究结果表明,AM真菌能促进宿主植物高、粗生长及生物量增加^[5-6],增强根系活力,利于根系生长发育^[7]。但不同宿主植物适合的菌种类不同^[8]。AM真菌通过活化土壤矿质养分,扩大根系吸养范围,提高土壤养分有效性,从而改善宿主植物营养状况。在所有的营养元素中,P与菌根形成的关系最为密切,AM真菌对植物吸收利用P素影响较大^[9],一般为正向促进效应。但对于包括N在内的其他元素,不同研究则结果不尽相同。研究表明,AM真菌显著提高了桢楠幼苗叶片的N、P、K含量^[10];降低了油茶幼苗全株的N含量^[11]。因此,不同的菌根共生体系中,AM真菌的效应不同。

【本研究切入点】虽然AM真菌能与多数植物共生,但不同植物的菌根依赖性有差异。那么,AM真菌对猴樟生长的影响是怎样的呢?不同菌种效应是否不同?截止本试验开展前,相关研究还未见报道。【拟解决的关键问题】通过开展盆栽接种试验,探究AM真菌不同种类、不同接种方式对猴樟幼苗生长及主要元素N、P、K吸收利用的影响效应,为环境友好型生物肥料在猴樟上的开发应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2018年2月,选择新鲜、饱满的猴樟种子,用3% H_2O_2 溶液浸泡10 min 杀菌消毒,无菌水冲洗,然后埋入经高温灭菌冷却后的河沙(121 °C灭菌0.5 h)中催芽。4月份挑选长势基本一致的健康猴樟幼苗开展盆栽试验。菌种选择根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*,简称Ri)和摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*,简称Fm),均购买自新疆石河子大学。

盆栽容器为上口径×下口径×高分别为9 cm×6 cm×8 cm的塑料花盆,灭菌后备用。栽培基质采用园土+草炭+河沙按体积比3:1:1混合均匀,用高压灭菌锅在121 °C、0.1 MPa下蒸汽灭菌2 h后冷却备用。该基质pH值为5.99,全N含量为1.90 g/kg,全P含量为0.75 g/kg, NH_4^+ -N含量为15.07 mg/kg, NO_3^- -N含量为4.21 mg/kg。

1.2 试验方法

采用单因素随机试验设计。设4种处理,分别为不接种(对照,CK)、Ri单接、Fm单接和Ri-Fm双接。在2018年4月13日上盆时进行接种处理。先统一在每盆中添加120 g灭菌基质,然后添加60 g相应菌剂(折合每盆600个左右AM真菌孢子),其中双接处理为Ri和Fm菌剂各30 g,对照组为60 g灭菌基质。接着放入猴樟幼苗1株,再覆盖60 g灭菌基质,将猴樟苗种植好,统一浇定根水200 mL/盆。每种处理25盆(株)苗,共100株苗。

试验在江西农业大学一间恒温无菌实验室中进行,室温维持在26 °C左右,视情况适时补光,根据盆土和苗情进行正常水分管理,所有浇水均使用纯水。各处理培养条件一致。试验时间为2018年4月至12月。盆栽初期猴樟平均苗高8.31 cm,带2~3片叶。

1.3 指标及测定方法

1.3.1 生长动态

2018年5—12月,每月月初左右逐株测量株高(钢卷尺)、地径(游标卡尺),记录叶片数。由于第1次测量时苗较细弱,故地径从6月初开始测量。

1.3.2 根系形态、生物量及菌根侵染率

2018年12月中旬收苗。将苗从盆中轻轻取出,先用自来水冲洗根部,再用纯水洗净,尽量保护根系。利用EPSON Scan根系扫描仪对根系进行扫描,再用WinRHIZO Pro 2016a根系图像分析软件分析根长、根表面积、根体积等形态指标。每处理挑选剪取一部分幼嫩新鲜的根系,保存于4 °C冰箱,用于菌根侵染率测定。然后将各苗的根茎叶分解称量,获取生物量数据。具体方法如下:

菌根侵染率:将根系剪成1 cm长左右的根段,经透明、漂泊、酸化、染色、脱色、制片等步骤,最后在光学显微镜下观察统计菌根侵染率^[12]。

$$\text{菌根侵染率} = (\text{总侵染交叉点数} / \text{总观察交叉点数}) \times 100\% \quad (1)$$

生物量:将苗株按根茎叶3个部分分解,经杀青(105 °C, 30 min)后在70 °C下烘至恒重,分别称量,获得各器官生物量干重。

$$\text{全株总生物量} = \text{根干重} + \text{茎干重} + \text{叶干重} \quad (2)$$

$$\text{根冠比} = \text{根干重} / (\text{茎} + \text{叶}) \text{干重} \quad (3)$$

1.3.3 氮磷钾养分特征

将猴樟根茎叶干样粉碎、过筛,使用 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮,全自动智能化学分析仪(SmartChem200)测N、P含量,火焰光度计测K含量^[13]。计算植株各元素累积量和养分利用效率^[14]:

$$\text{N(P,K)累积量} = \text{N(P,K)含量} \times \text{生物量} \quad (4)$$

$$\text{N(P,K)利用效率} = \text{全株生物量} / \text{全株N(P,K)累积量} \times 100\% \quad (5)$$

1.4 数据处理与分析

数据采用Excel 2016进行整理,利用SPSS Statistics 27.0软件进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析不同处理间差异,Duncan's法检验差异显著性($P < 0.05$);图表数据采用“均值±标准误差”的形式。用主成分分析法对各处理进行综合排序。采用Origin 2019绘图。

2 结果与分析

2.1 AM真菌对猴樟幼苗根系侵染率及生长的影响

2.1.1 菌根侵染率

观测结果表明,未接菌的对照组根系中没有AM真菌结构,3种接种处理间侵染率有差异($P<0.05$)。单接根内根孢囊霉(Ri)的侵染率最高,为28.15%,并且显著高于单接Fm(19.66%)和复合接种组(19.62%)。

2.1.2 地上部生长

图1展示了4种处理下猴樟幼苗的年生长动态。可以看出,3个接菌组猴樟苗的高粗、叶片生长基本都呈现出慢(5—8月)—快(8—10月)—慢(10—12月)的生长节律,对照组(CK)则一直缓慢生长,10月后叶片数甚至减少。在5—8月份,即处理后1~4个月,除双接组在株高上略有优势外,4组猴樟苗的苗高、茎粗和叶片数相差不大。8月份后接菌效应开始显现,且随时间延长效应越来越明显。至12月时,Ri组、Fm组和Ri-Fm组的平均株高分别是CK组的1.85倍、1.98倍和2.26倍;平均地径分别是CK组的1.35倍、1.49倍和1.41倍;平均叶片数分别是CK组的2.46倍、2.51倍和2.48倍。可见,2个菌种对猴樟幼苗的生长有较大的促进作用。3种接菌处理相比,Ri-Fm组在株高上始终最大,地径方面自9月开始是Fm组整体偏大,叶片数量上3个接菌组一直相近。综合来看,3个接菌处理之间的差异不大。

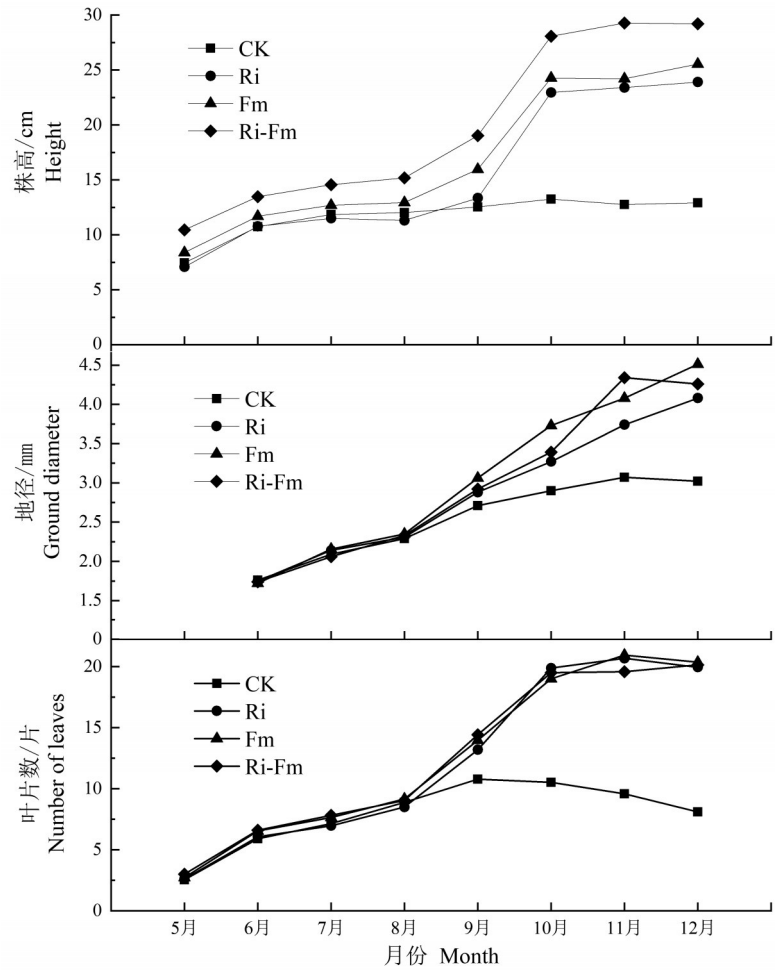


图1 AM真菌对猴樟幼苗株高、地径和叶片数的影响

Fig.1 Effects of AM fungi on plant height, ground diameter and leaf number of *C. bodinieri* seedlings

2.1.3 根系生长

与对照相比,Ri单接和Fm单接对猴樟幼苗根系生长有明显的促进作用,两处理下的总根长、根表面积、根体积和根尖数都有显著提高($P<0.05$),且Fm单接时促进作用更大(表1)。两菌种双接时(Ri-Fm)

只促进了根表面积和根尖数($P<0.05$)。可见在根系生长方面,2个菌种单接的促生效应强于双接。另外,无论是单接还是双接,在根系平均直径上都与对照无差异($P>0.05$),说明 AM 真菌对猴樟幼苗根系增粗影响不大,其促进根系生长是通过增加根系数量。

表 1 AM 真菌对猴樟幼苗根系生长的影响

Tab.1 Effects of AM fungi on root growth of *C. bodinieri* seedlings

处理 Treatments	总根长/cm Total root length	根表面积/cm ² Root surface area	根体积/cm ³ Root volume	平均根直径/mm Average root diameter	根尖数/个 Number of root tips
CK	777.14±41.83 ^c	156.20±12.43 ^c	2.55±0.28 ^b	0.65±0.03 ^a	2 777.70±205.53 ^c
Ri	1 031.88±38.09 ^b	223.88±8.02 ^a	4.13±0.44 ^a	0.73±0.06 ^a	4 345.03±443.09 ^b
Fm	1 207.28±26.67 ^a	235.13±7.21 ^a	3.69±0.18 ^a	0.63±0.01 ^a	5 787.08±343.77 ^a
Ri-Fm	880.88±32.98 ^c	189.44±4.89 ^b	3.35±0.27 ^{ab}	0.69±0.03 ^a	3 970.96±209.50 ^b

同列不同小写字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

2.1.4 生物量

由表 2 可知,与未接种对照(CK)相比,3种接菌处理均能显著增大猴樟幼苗的根、茎、叶生物量,进而显著提高全株生物量($P<0.05$)。其中,Ri 单接、Fm 单接和 Ri-Fm 复接处理的植株生物量分别是 CK 组的 3.01 倍、3.15 倍和 2.93 倍。而 3 个接菌处理之间没有显著差异。在生物量的分配上,对照处理下猴樟幼苗的根冠比显著大于其他 3 个接种处理,说明在没有 AM 真菌的不利条件下,猴樟幼苗将更多的碳同化物分配到地下,以保证有足够的根系吸收水分和养分。可见,接种 AM 真菌改变了猴樟幼苗的生物量分配格局。

表 2 AM 真菌对猴樟幼苗生物量的影响

Tab.2 Effects of AM fungi on biomass of *C. bodinieri* seedlings

处理 Treatments	生物量/g Biomass				根冠比 Root/Shoot ratio
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Gross	
CK	0.79±0.07 ^b	0.40±0.03 ^b	0.48±0.03 ^b	1.67±0.11 ^b	0.90±0.05 ^a
Ri	1.91±0.10 ^a	1.10±0.07 ^a	2.02±0.11 ^a	5.02±0.26 ^a	0.61±0.01 ^b
Fm	1.92±0.13 ^a	1.17±0.06 ^a	2.17±0.15 ^a	5.26±0.34 ^a	0.57±0.01 ^b
Ri-Fm	1.69±0.03 ^a	1.21±0.10 ^a	2.00±0.12 ^a	4.90±0.24 ^a	0.53±0.03 ^b

同列不同小写字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

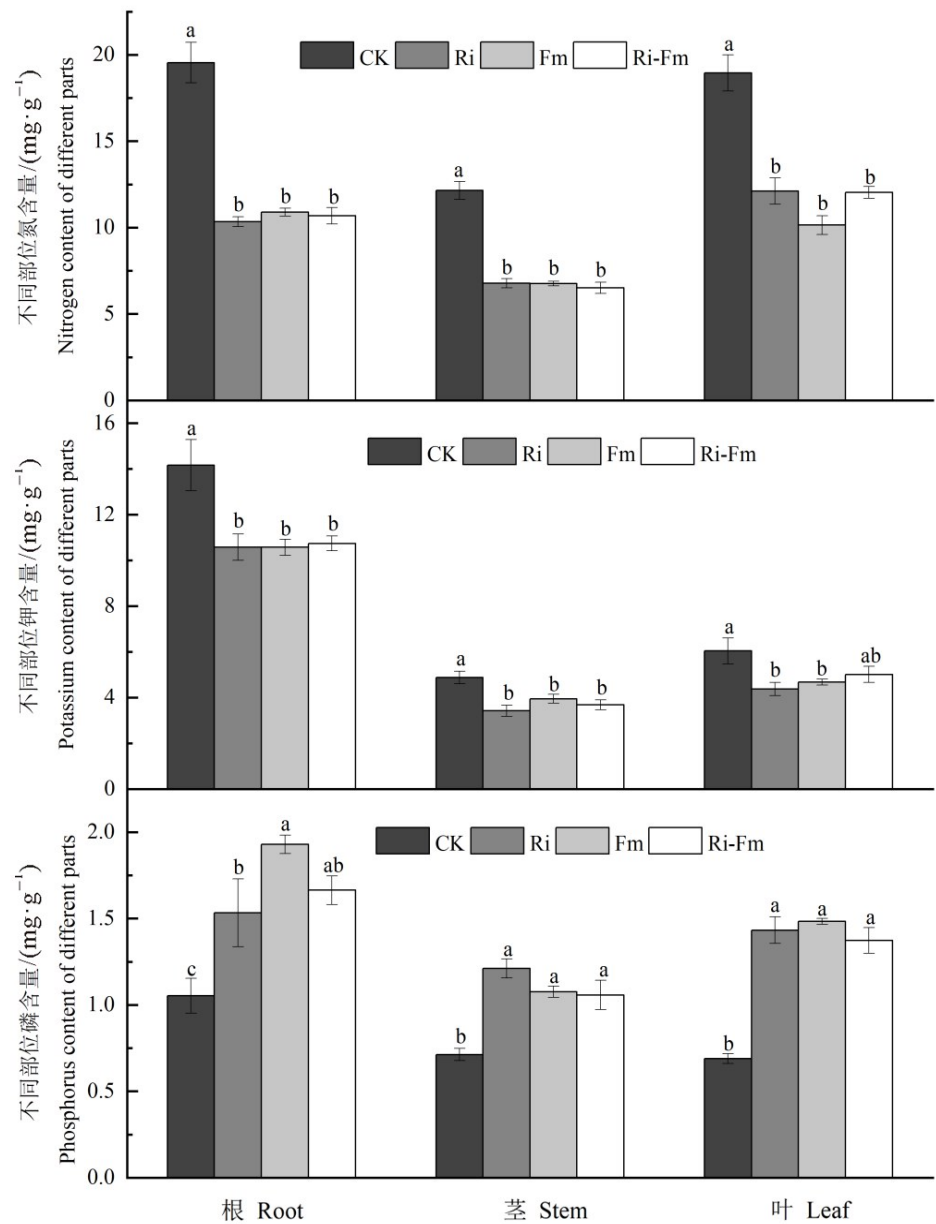
2.2 AM 真菌对猴樟幼苗养分特征的影响

2.2.1 氮磷钾养分含量

由图 2 可知,与对照 CK 相比,3 个接种处理均显著降低了猴樟幼苗根茎叶内 N、K 含量,但显著提高了 P 含量($P<0.05$)。Ri 组、Fm 组和 Ri-Fm 组的根系 P 含量分别是 CK 组的 1.46 倍、1.83 倍和 1.58 倍,茎和叶的 P 含量分别是 CK 组的平均 1.56 倍和 2.08 倍,可见 AM 真菌对猴樟苗磷素吸收有较大促进作用。3 种接种处理之间,除 Fm 组根系 P 含量显著高于 Ri 组之外,其余情况下均没有显著差异($P>0.05$)。

2.2.2 氮磷钾养分累积量

养分累积量是养分含量与生物量的乘积。由图 3 可知,对于磷素累积量,由于 3 个接菌处理相比对照均显著提高了根茎叶的生物量和磷含量,因此大幅提升了各器官的 P 累积量($P<0.05$)。对于 N、K 元素,虽然接种处理降低了猴樟体内 N、K 含量(图 2),但可能生物量提升幅度更大(表 3),结果显示,3 个接菌处理相比对照也提高了根茎叶的 N 累积量和 K 累积量(图 3)。因此对于全株总累积量而言,接菌处理是有显著提升效果的。Ri 组、Fm 组和 Ri-Fm 组猴樟幼苗的 N 素累积量分别是 CK 组的 1.76 倍、1.75 倍和 1.72 倍;P 素累积量分别是 CK 组的 4.94 倍、5.66 倍和 4.76 倍;K 素累积量分别是 CK 组的 2.06 倍、2.21 倍和 2.06 倍。



不同小写字母表示处理间各器官有显著差异($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate that there are significant differences in each organ between treatments ($P<0.05$).

图2 AM真菌对猴樟幼苗各器官N、P、K含量的影响

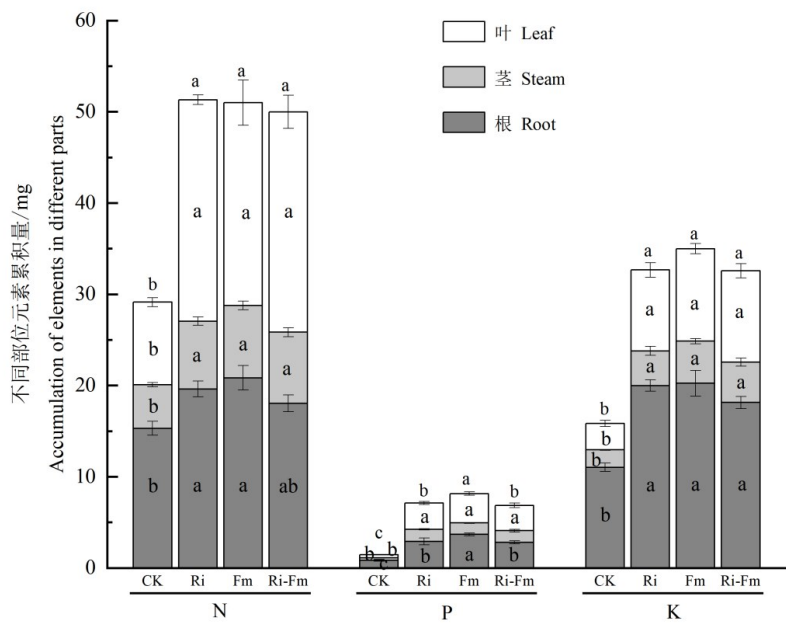
Fig.2 Effects of AM fungi on N, P and K contents in different organs of *C. bodinieri* seedlings

2.2.3 氮磷钾养分利用效率

通过计算及统计分析结果显示(图4),相比对照,3个接菌处理下猴樟幼苗的N素利用效率和K素利用效率显著提高,但P素利用效率显著降低($P<0.05$)。而3个接菌处理之间的N、P、K利用效率都没有显著差异。

2.3 主成分分析

将前述的所有生长和养分特征指标作为原始性状指标,采用主成分分析法对不同处理的效应进行综合评价,结果见表3。按特征值大于1的原则提取了3个主成分,这3个主成分能够解释全部方差的100%,说明能够反映原始指标的全部信息。从综合得分和排名来看,4个处理得分由高到低依次为Fm单接、Ri单接、Ri-Fm双接和CK。可见3种接菌方式都有益于猴樟幼苗生长及养分积累,其中单接摩西斗管囊霉促进效应最大,单接根内根孢囊霉其次,两菌种双接效应不如单接。



柱状图顶部小写字母表示处理间全株有显著差异($P<0.05$)。
The lowercase letters at the top of the bar chart indicate that there are significant differences in the whole plant between treatments($P<0.05$).

图3 AM真菌对猴樟幼苗N、P、K累积量的影响
Fig.3 Effects of AM fungi on N,P,K accumulation of *C. bodinieri* seedlings

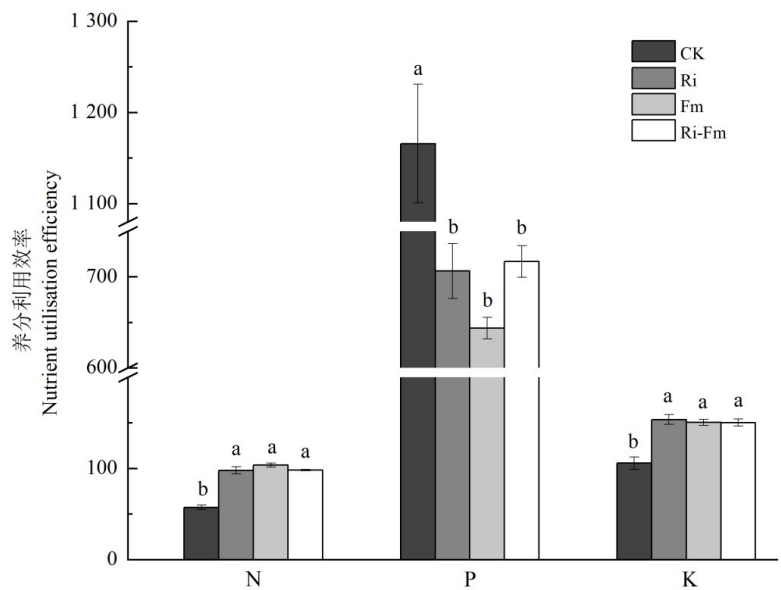


图4 AM真菌对猴樟幼苗养分利用效率的影响
Fig.4 Effects of AM fungi on nutrient utilization efficiency of *C. bodinieri* seedlings

表3 主成分分析得分表
Tab.3 Principal component analysis score table

处理 Treatments	第一主成分得分 First principal component score	第二主成分得分 Second principal component score	第三主成分得分 Third principal component score	综合得分 Comprehensive score	排名 Order
CK	-8.36	0.21	0.01	-7.51	4
Ri	2.8	-1.32	1.05	2.47	2
Fm	3.59	2.06	0.21	3.37	1
Ri-Fm	1.97	-0.95	-1.42	1.66	3

3 讨论与结论

3.1 AM真菌对猴樟幼苗根系的侵染及与促生效果关系

丛枝菌根真菌是一种普遍存在的根际微生物,在所有陆地生态系统中70%~90%的植物能被AM真菌定殖,形成菌根互惠共生体^[15]。本研究中,根内根孢囊霉(Ri)和摩西斗管囊霉(Fm)单接、双接均对猴樟幼苗根系产生了不同程度的侵染,说明两菌种能与猴樟形成共生关系。同时单接Ri的侵染率显著高于单接Fm,这是因为AM真菌与宿主具有一定的偏好和选择性,很多研究中也证实了不同菌种对同一宿主的侵染强度不同^[16-17]。多数研究^[18-19]表明,混合接种侵染率高于单接,其促生效应也更大。但本研究中Ri-Fm双接处理的侵染率和促生作用都低于单接,且侵染率低的单接Fm处理(相比单接Ri处理)表现出更大的促生效果,这与一些研究结果也是吻合的。例如温婷等^[20]对红花石蒜的研究结果表明,虽然Fm和Ri双接的侵染率高于Fm、Ri分别单接,但其对红花石蒜养分的改善效果不如2个单接处理。符力等^[21]研究中也指出,一些AM真菌对宿主的侵染强度与宿主植物生长没有协同效应,侵染率最高的反而没有促进宿主生长。这是因为侵染率高并不一定代表根外菌丝量大,受菌根活性、真菌根内外菌丝比例以及根外菌丝在根际的分布等多方面影响,致使侵染率与菌根效果有时一致,有时并不一致^[22]。

3.2 AM真菌对猴樟幼苗生长的影响

AM真菌通过活化土壤养分、扩大宿主根系吸收面积、增强光合作用、改善生理状态等,从而能够促进宿主植物生长。一项Meta分析结果显示,AM真菌让宿主植物的地上部、地下部和总生物量分别平均增加了36.3%、28.5%和29.7%^[23]。本研究中,3种接菌处理都不同程度地促进了猴樟幼苗的生长,表现在接菌幼苗的株高、地径、叶片数及根、茎、叶和全株生物量均较未接菌苗显著增加。这和毛红椿幼苗^[24]及紫花苜蓿等草地植物^[25]上的研究结果相符。AM真菌也促进了猴樟根系发育,两菌种单接时显著增大了猴樟苗的根系总长、总表面积和总体积,增加了根尖数量,这与李晴等^[26]对元宝枫的研究结果类似。根冠比表征了植物地上、地下生物量的分配。一般而言,植物处于逆境胁迫时会通过增加根系生物量占比来保证正常的水分养分吸收功能,即根冠比会增大。本研究中,接菌处理降低了猴樟苗的根冠比,说明菌根化改良了猴樟的生长状态,促使了更多的资源向地上部分分配,这与桑树^[27]和实蕲葱^[28]上的结果一致。改善根系构型,促进根系生长发育,增强根系养分吸收能力特别是促进了磷的吸收积累,可能是AM真菌促进猴樟幼苗生长的主要原因^[23,29]。

3.3 AM真菌对猴樟幼苗养分特征的影响

在菌根共生体中,AM真菌从宿主处获取碳源,作为回报,AM真菌协助宿主吸收水分和矿质养分^[30]。在所有矿质元素中,AM真菌对宿主磷素营养影响最大。一方面共生体诱导释放有机酸和土壤酶活化土壤磷;另外一方面,AM真菌磷酸盐转运蛋白与磷酸盐的亲合力高,菌丝中磷的转运速率比根中转运快。因此AM真菌能有效增强宿主磷吸收能力,大幅提高植物对土壤磷的利用效率^[31]。本研究中,3种接菌处理的猴樟苗根、茎、叶的P含量都高于对照,菌根苗P素累积量达到了CK组的4.76~5.66倍(图3)。AM真菌有效促进了猴樟幼苗P的吸收和积累,这与Wang等^[32]在皂荚幼苗上的结果一致。

一般认为,除了P之外,与菌根关系比较密切的还有N、S、Zn等^[33],K素与AM真菌关系相对较弱。氮是植物需求量最大的矿质元素之一,常成为作物生长的限制性元素。AM真菌可以通过根外菌丝吸收环境中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 和氨基酸,并转运给植物;也可以加速有机氮矿化,增加植物可利用氮源,从而改善宿主氮营养状态^[34]。然而,在已有研究中,AM真菌对宿主氮营养出现了正、负效应或无影响等不同结果,有些是在不同器官中表现不同。如康贻豪等^[35]研究结果显示,9种AM真菌中,1种真菌提高了香橙的氮含量,8种真菌降低了香橙氮含量;而在枳壳上,所有9种真菌均降低了其地上部氮含量,但大部分真菌提高了其根部氮含量。另有研究指出,AM真菌似乎不利于喜树幼苗的N素营养吸收^[36]。本研究中,3种接菌处理均降低了猴樟苗各部位的N、K含量,但这也不代表AM真菌一定是抑制了猴樟对N、K的吸收,因为有可能是“生长稀释效应”导致,即接菌下猴樟苗生物量增大,使干物质中N、K浓度被稀释而下降。从元素的最终累积量而言,接菌对猴樟N、K是正向促进的,这与李京晨等^[37]对柑橘的研究结果类似。

由于本试验采用的AM真菌种类有限,测定的内容也仅限于植物生长和氮磷钾养分方面,今后可更广泛开展多菌种及多方面内容研究,为猴樟产业中AM真菌资源的开发提供科学依据。

3.4 结论

根内根孢囊霉和摩西斗管囊霉都能对猴樟幼苗形成侵染,其中根内根孢囊霉单接时侵染率最高。两菌种单接和双接都能促进猴樟幼苗地上、地下生长和生物量累积,也能促进磷素吸收和积累,但降低了磷的利用效率。对于氮素和钾素,AM真菌虽然降低了它们的质量浓度,但最终增大了猴樟体内N和K的累积量,提高了N、K利用效率。3种接菌处理对猴樟幼苗均有正向促进效应,单接摩西斗管囊霉促进作用最大,两菌种单接效果优于混合接种。本研究结果为猴樟的菌根化育苗技术提供了科学参考。

参考文献 References:

- [1] 李芳,徐丽娇,谢伟,等.菌根化育苗对玉米生长和养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(1):42-50.
LI F, XU L J, XIE W, et al. Effects of seedling mycorrhization on the growth and nutrient uptake of maize[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2020, 26(1): 42-50.
- [2] 董立军.文冠果菌根化育苗效应研究[J].辽宁林业科技,2017(3):28-29.
DONG L J. Research on the effect of mycorrhizal seedling of *Xanthoceras sorbifolium* [J]. Liaoning forestry science and technology, 2017(3): 28-29.
- [3] 马一丹,肖祖飞,张琴,等.猴樟的研究进展[J].中国野生植物资源,2020,39(1):31-34.
MA Y D, XIAO Z F, ZHANG Q, et al. Research progress of *Cinnamomum bodinieri* Levl [J]. Chinese wild plant resources, 2020, 39(1): 31-34.
- [4] 刘珊,魏英,柯云芳,等.施镁对南方优良行道树种猴樟生长影响研究[J].江西农业大学学报,2021,43(1):106-115.
LIU S, WEI Y, KE Y F, et al. Effects of magnesium application on the growth of *Cinnamomum bodinieri*, a fine street tree species in South China [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(1): 106-115.
- [5] 王紫瑄,解甜甜,王雅茹,等.丛枝菌根真菌(AMF)对蒙古沙冬青幼苗的促生特性及作用机制[J].干旱区研究,2023,40(1):78-89.
WANG Z X, XIE T T, WANG Y R, et al. Growth promotion and mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on *Ammopiptanthus mongolicus* seedlings [J]. Arid zone research, 2023, 40(1): 78-89.
- [6] 侯颖,张立伟,王立涛,等.丛枝菌根真菌对香樟幼苗生长和抗寒生理指标的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(9):95-100.
HOU Y, ZHANG L W, WANG L T, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi on seedlings growth and physiological indexes of cold resistance in *Cinnamomum camphora* [J]. Journal of northeast forestry university, 2023, 51(9): 95-100.
- [7] 屈明华,俞元春,王佳,等.喀斯特土壤条件下丛枝菌根真菌侵染对红豆幼苗生物量分配和根系结构特征的影响[J].生态学杂志,2021,40(3):766-776.
QU M H, YU Y C, WANG J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on biomass distribution and root architecture characters of *Zenia insignis* seedlings in Karst soil [J]. Chinese journal of ecology, 2021, 40(3): 766-776.
- [8] 陈伟玉,麦志通,蔡开刚,等.不同丛枝菌根菌株对3种珍贵树种促生效应试验[J].广东农业科学,2017,44(11):13-19.
CHEN W Y, MAI Z T, CAI K L, et al. Study on promotion effects of different arbuscular mycorrhizas fungi on rare tree species [J]. Guangdong agricultural sciences, 2017, 44(11): 13-19.
- [9] 钟敏,黄益宗,伍文,等.丛枝菌根真菌群落对白三叶草植株生物量磷吸收和土壤磷酸单酯酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(9):1770-1776.
ZHONG M, HUANG Y Z, WU W, et al. Effect of AMF community on the biomass of White Clover, uptake of phosphorus and soil phosphomonoesterase activities [J]. Journal of agro-environment science, 2012, 31(9): 1770-1776.
- [10] 王介华,睢金凯,崔令军,等.AMF对盐胁迫下桉楠生长和生理特性的影响[J].中南林业科技大学学报,2023,43(6):51-58.
WANG J H, SUI J K, CUI L J, et al. Effects of AMF on the growth and physiological characteristics of *Phoebe zhennan* under salt stress [J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2023, 43(6): 51-58.
- [11] 王东雪,陈国臣,江泽鹏.丛枝菌根对油茶幼苗生长和氮磷吸收的影响[J].林业科技开发,2010,24(1):23-26.
WANG D X, CHEN G C, JIANG Z P. Effects of arbuscular mycorrhizae on the growth and absorption of nitrogen and phosphorus in *Camellia oleifera* seedlings [J]. Journal of forestry engineering, 2010, 24(1): 23-26.
- [12] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. Transactions of the British mycological society, 1970, 55(16): 158-161.

- [13] 张韞.土壤·水·植物理化分析教程[M].北京:中国林业出版社,2011:132-139.
ZHANG Y. Tutorial on physical and chemical analysis of soil, water and plants [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 132-139.
- [14] 葛礼姣,许建平,杨颜榕,等.施氮水平对不同切花菊品种生长及氮素累积和分配的影响[J].南京农业大学学报, 2024,47(2):222-231.
GE L J, XU J P, YANG Y R, et al. Effects of nitrogen levels on growth, nitrogen accumulation and allocation of different cut chrysanthemum varieties [J]. Journal of Nanjing agricultural university, 2024, 47(2): 222-231.
- [15] 庞芳,夏维康,何敏,等.固氮菌缓解氮限制环境中丛枝菌根真菌对加拿大一枝黄花的营养竞争[J].植物生态学报, 2020,44(7):782-790.
PANG F, XIA W K, HE M, et al. Nitrogen-fixing bacteria alleviates competition between arbuscular mycorrhizal fungi and *Solidago canadensis* for nutrients under nitrogen limitation [J]. Journal of plant ecology, 2020, 44(7): 782-790.
- [16] 李侠,叶诚诚,张俊伶,等.丛枝菌根真菌侵染指标与植物促生效应相关性分析[J].中国农业大学学报, 2021, 26(10):41-53.
LI X, YE C C, ZHANG J L, et al. Correlation analysis between arbuscular mycorrhizal fungi colonization indices and plant growth promoting effect [J]. Journal of China agricultural university, 2021, 26(10): 41-53.
- [17] 王东雪,刘善荣,曾祥艳.丛枝菌根对油桐幼苗生长和氮磷吸收的影响[J].林业科技开发, 2011, 25(2):56-58.
WANG D X, LIU S R, ZENG X Y. Effects of arbuscular mycorrhiza on the growth of *Vernicia fordii* seedlings and its absorption of nitrogen and phosphorus [J]. Journal of forestry engineering, 2011, 25(2): 56-58.
- [18] 谷文超,阳文武,张杰,等.混合接种丛枝菌根真菌对木香幼苗生长及化学成分的影响[J].中国实验方剂学杂志, 2020, 26(14):173-181.
GU W C, YANG W W, ZHANG J, et al. Effect of mixed inoculation of *Arbuscular mycorrhizal* on growth and chemical composition of *Aucklandia lappa* seedlings [J]. Chinese journal of experimental traditional medical formulae, 2020, 26(14): 173-181.
- [19] 程鑫,吴纯泽,韦庆钰,等.水曲柳丛枝菌根真菌接苗对干旱胁迫的生长和生理响应[J].林业科学, 2023, 59(2):58-66.
CHEN X, WU C Z, WEI Q Y, et al. Growth and physiological responses of *Fraxinus mandshurica* seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi to drought stress [J]. Scientia silvae Sinicae, 2023, 59(2): 58-66.
- [20] 温婷,吴靖,蔡军火,等.丛枝菌根真菌对红花石蒜植株及根际土壤养分影响[J].江西农业大学学报, 2023, 45(5):1196-1207.
WEN T, WU J, CAI J H, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant and rhizosphere soil nutrients of *Lycoris radiata* [J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(5): 1196-1207.
- [21] 符力,崔婧,冯固.土壤中重金属铅对不同AM真菌生长发育的直接效应研究[C]//第五次全国土壤生物和生物化学学术研讨会论文集, 2009.
FU L, CUI J, FENG G. Direct effects of lead contamination on the growth of arbuscular mycorrhizal fungi [C]//Proceedings of the fifth national symposium on soil biology and biochemistry, 2009.
- [22] 张旭红.丛枝菌根真菌在不同土壤环境因子下的适应性研究[D].保定:河北农业大学, 2003.
ZHANG X H. Adaptability of arbuscular mycorrhizal fungi under different soil environmental factors [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2003.
- [23] MURUGESAN C. A meta-analytical approach on arbuscular mycorrhizal fungi inoculation efficiency on plant growth and nutrient uptake [J]. Agriculture, 2020, 10(9):370.
- [24] 杜宣瑾,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.
DU X J, ZHU Y, ZHANG L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on seedling growth and drought resistance of *Toona ciliata* [J]. Journal of forest and environment, 2024, 44(1): 71-78.
- [25] 阚海明,徐恒康,鲁佳男,等.不同丛枝菌根真菌接种对3种草地植物生长特性的影响[J].草地学报, 2023, 31(7):1922-1930.
KAN H M, XU H K, LU J N, et al. The influence of different arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth characteristics of three forage species [J]. Acta agrestia Sinica, 2023, 31(7): 1922-1930.
- [26] 李晴,段文艳,李鑫,等.丛枝菌根真菌对元宝枫生长及其根系形态的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(1):79-86.
LI Q, DUAN W Y, LI X, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and root morphology of *Acer truncatum* [J].

- Journal of northwest A&F university(natural science edition), 2024, 52(1): 79-86.
- [27] 补春兰, 晏梅静, 董廷发, 等. 接种丛枝菌根真菌(AMF)对不同性别合栽模式下桑树生物量、光合及侵染率的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(11): 2181-2190.
- BU C L, YAN M J, DONG Y F, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on biomass, photosynthetic characteristics and infection rate of mulberry (*Morus alba*) in different combination groups[J]. Plant physiology journal, 2022, 58(11): 2181-2190.
- [28] 计怀峰, 林辰壹, 吾塔尼别克·卓马别克, 等. 丛枝菌根真菌对实蕲葱生长及化感作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 121-131.
- JI H F, LIN C Y, ZHUOMABIEKE·U, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and allelopathy of *Allium galanthum*[J]. Journal of northwest A&F university(natural science edition), 2024(6): 121-131.
- [29] 曹明昇, 张菲, 黄光明, 等. 丛枝菌根真菌对低磷胁迫下核桃幼苗根系磷吸收的影响及机制[J]. 林业科学, 2023, 59(12): 117-124.
- CAO M A, ZHANG F, HUANG G M, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on phosphorus uptake of walnut seedling roots under low phosphorus stress and the potential mechanisms[J]. Scientia silvae Sinicae, 2023, 59(12): 117-124.
- [30] 曹本福, 姜海霞, 刘丽, 等. 丛枝菌根菌丝网络在植物互作中的作用机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3385-3396.
- CAO B F, JIANG H X, LIU L, et al. Research progress on mechanism of arbuscular common mycorrhizal networks in plant-plant interactions[J]. Chinese journal of applied ecology, 2021, 32(9): 3385-3396.
- [31] 李芳, 郝志鹏, 陈保冬. 菌根植物适应低磷胁迫的分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1989-1997.
- LI F, HAO Z P, CHEN B D, et al. Molecular mechanism for the adaption of arbuscular mycorrhizal symbiosis to phosphorus deficiency[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(11): 1989-1997.
- [32] WANG J P, ZHONG H N, ZHU L J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi effectively enhances the growth of *Gleditsia sinensis* Lam. seedlings under greenhouse conditions[J]. Forests, 2019, 10(7): 567.
- [33] 李元敬, 刘智蕾, 何兴元, 等. 丛枝菌根共生体的氮代谢运输及其生态作用[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 861-868.
- LI Y J, LIU Z L, HE X Y, et al. Nitrogen metabolism and translocation in arbuscular mycorrhizal symbiote and its ecological implications[J]. Chinese journal of applied ecology, 2013, 24(3): 861-868.
- [34] 陈永亮, 陈保冬, 刘蕾, 等. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4807-4815.
- CHEN Y L, CHEN B D, LIU L, et al. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil nitrogen cycling[J]. Acta ecologica sinica, 2014, 34(17): 4807-4815.
- [35] 康贻豪, 张金莲, 温云英, 等. 9种丛枝菌根真菌对柑橘砧木枳和资阳香橙生长发育的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(9): 200-208.
- KANG Y H, ZHANG J L, WEN Y Y, et al. Effects of nine arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and development of *Poncirus trifoliata* Raf and *Citrus junos*. ex Tanaka seedlings[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2023(9): 200-208.
- [36] 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, 30(6): 947-953.
- ZHAO X, YAN X F. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and absorption of nitrogen and phosphorus in *Camptotheca acuminata* seedlings[J]. Chinese journal of plant ecology, 2006, 30(6): 947-953.
- [37] 李京晨, 王曙光, 郭佩佩, 等. 不同持水量和氮肥形态丛枝菌根真菌调节柑橘幼苗生长和氮积累的影响[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 130-137.
- LI J C, WANG S G, GUO P P, et al. Effect of different water holding capacity and nitrogen fertilizer forms on the regulation of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nitrogen accumulation of citrus seedlings[J]. Journal of Hainan university (natural science), 2024, 42(2): 130-137.