网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.016

不同宿主植物和培养基质对AMF扩繁效果的影响

马思远,刘冠兰,闫思远,袁麒,辛颖,顾沛雯
(宁夏大学 农学院,宁夏 银川 750021)

[摘 要] 【目的】筛选适宜的宿主植物和培养基质,构建丛枝菌根真菌(AMF)的高效扩繁体系。【方法】以幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*,Ce)和摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*,Fm)两种AMF为试验材料,选用8种宿主植物和3种基质对两种AMF进行扩繁,测定AMF对宿主植物的侵染程度、孢子密度以及地下干质量和根系活力,筛选出最佳的扩繁宿主植物和基质。利用筛选出的宿主植物与培养基质对3个葡萄果园(宁夏志辉源石酒庄(ZH)、西鸽酒庄(XG)、立兰酒庄(LL))土著AMF菌群进行富集,测定土著AMF菌群对宿主植物的侵染程度,并对土著AMF菌群进行了鉴定。【结果】Ce和Fm两种AMF均能侵染定殖于8种植物,其中在宿主玉米(*Zea mays*)和三叶草(*Tifolium repens*)的侵染程度较明显,栽植培养60 d后Ce和Fm孢子密度分别可达770,605和745,540个/g,总定殖率分别为50.0%,44.0%和56.0%,49.0%。利用玉米和三叶草作为宿主植物,将其分别在3种基质中培养,当玉米在沙土混合基质中栽植时,Ce和Fm的扩繁效果最佳,孢子密度可达700和760个/g,总定殖率可达47.83%和50.17%。利用筛选的宿主植物和培养基质对3个葡萄果园(LL、ZH、和XG)土著AMF菌群进行富集,其中玉米对LL果园土著AMF菌群的富集程度最高,总定殖率为59.67%。形态学鉴定结果显示,3个果园扩繁的土著AMF菌群包含5属18种,其中球囊霉属(*Glomus*)为优势菌属。【结论】在本试验条件下,AMF扩繁的最佳宿主植物是玉米,其次是三叶草,最适基质是沙土混合基质,两者组合可高效扩繁果园土著AMF菌群。

[关键词] 丛枝菌根真菌(AMF);宿主植物;培养基质;孢子密度;土著AMF菌群
[中图分类号] S154.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0149-12

Effects of different host plants and medium on AMF inoculant propagation efficiency

MA Siyuan, LIU Guanlan, YAN Siyuan, YUAN Qi,
XIN Ying, GU Peiwen
(*School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to identify suitable host plants and medium to develop an efficient AMF inoculant propagation system. 【Method】 With two AMF strains-*Claroideoglomus etunicatum* (Ce) and *Funneliformis mosseae* (Fm) as test material, eight host plants and three medium were selected for AMF propagation. AMF colonization, spore yield, belowground biomass, and root activity were determined to identify the optimal host and medium for propagation. The identified host plants and medium were then used to enrich AMF communities from three orchard (Ningxia Zhihui Yuanshi Winery(ZY), Xige Winery(XG), Lilan Winery(LL)) soils, and the infection rate, propagation efficiency, and community composition were analyzed. 【Result】 AMF

[收稿日期] 2025-08-22 [修回日期] 2025-10-26
[基金项目] 宁夏重点研发计划项目"贺兰山东麓酿酒葡萄根部病害生物防控专用菌剂的研制与应用"(2023BCF01026)
[作者简介] 马思远(2000—),男,山东济宁人,在读硕士,主要从事生物防治与菌物资源利用研究。E-mail:msy1610443245m@163.com
[通信作者] 顾沛雯(1969—),女,宁夏银川人,教授,博士生导师,主要从事植物病理学、生物防治及微生物资源利用等研究。E-mail:gupeiwen2019@nxu.edu.cn

inoculants Ce and Fm infected and colonized all eight plant species, with the highest infection rates observed in maize (*Zea mays*) and clover (*Tifolium repens*). Ce colonization rate was 50.0% in maize and 44.0% in clover, and Fm colonization rate was 56.0% in maize and 49.0% in clover. After 60 days, Ce spore densities in maize and clover reached 770 and 605 spores/g, and Fm spore densities in maize and clover reached 745 and 540 spores/g. As host plants, maize and clover were cultured in three medium. The best propagation efficiency for Ce and Fm occurred in maize cultured in sandy growing medium, with colonization rates of 47.83% and 50.17%, and spore densities of 700 and 760 spores/g, respectively. Enrichment of native AMF communities from orchards LL, ZH, and XG under optimal conditions showed that the highest colonization rate (59.67%) was observed in LL. Morphological analysis identified 5 genera and 18 species, with *Glomus* as the dominant genus.【Conclusion】Under the experimental conditions, maize was the most effective host plant for AMF propagation, and the sandy growing medium was the optimal substrate. The combination of maize and sandy growing medium can effectively enrich the native AMF communities from orchard soils.

Key words: arbuscula rmycorrhizal fungi (AMF); host plants; medium; spore density; indigenous AMF community

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是生态系统中重要的土壤微生物之一,能与80%以上的陆生高等植物形成互惠共生关系[1]。AMF可以形成庞大的菌丝网络结构,不仅有利于宿主植物根系对养分的吸收,促进植物的生长发育,还可以提高植物的抗逆性[2]。由于AMF是专性活体营养微生物,至今还不能在离体条件下进行纯培养。在众多培养方法中,活体宿主植物盆栽培养法仍是经济、简易且可靠的AMF培养方法[3]。国内外已有学者对AMF扩繁条件开展了相关研究,发现AMF的扩繁和富集受培养基质、宿主植物、环境条件等因素的影响[4]。在国内,任伟等[5]研究发现,不同培养基质和宿主植物种类对AMF的侵染率、侵染强度、孢子密度等均有显著影响,其中根内球囊霉(*Rhizophagus irregularis*)和摩西球囊霉(*Funneliformis mosseae*)的最优宿主植物是玉米(*Zea mays*),最适基质是沙土混合物。何斐等[6]研究表明,根内根生囊霉(*Rhizophagus. irregularis*)在以魔芋(*Amorphophallus konjac*)为宿主植物的纯土基质中扩繁效果最佳,魔芋的菌根侵染强度和孢子密度分别达86.17%和76个/cm^3。胡静雯等[7]研究表明,湖南烤烟(*Nicotiana tabacum* L.)根系共生AMF菌根侵染特征均存在地域特异性和品种差异性,其中全钾、碱解氮、全磷和有机质是除品种因素外的主要环境影响因子。综上所述,筛选适合AMF扩繁的宿主植物和培养基质,得到高质量、低成本的菌剂,对研究利用AMF具有重要意义。

为此,本研究以幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*, Ce)和摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, Fm)为材料,探讨不同宿主植物和培养基质对AMF侵染和孢子密度的影响,并利用筛选出的宿主植物和基质对果园土著AMF菌群进行扩繁,为AMF生产体系的建立与应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

1.1.1 供试菌剂 幼套近明球囊霉BGSC53、摩西斗管囊霉BGSC73菌剂购自亚热带丛枝菌根(AMF)真菌资源保藏中心。

1.1.2 供试植物 禾本科植物有玉米(*Zea mays*)白糯甜708、小麦(*Triticum aestivum*)濮麦053、黑麦草(*Lolium perenne*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、湖南稷子(*Echinochloa frumentacea*),豆科植物有大豆(*Glycine max*)中黄57、三叶草(*Tifolium repens*)和紫云英(*Astragalus sinicus*),以上植物种子均购自宁夏银川市西夏区同心路综合市场。

1.1.3 供试基质 基质1为沙土,取自宁夏银川市西夏区采砂场,过筛(直径2 mm)后在160 ℃下灭菌3 h获得,其养分含量为有机质7.45 g/kg,速效磷22.63 mg/kg,碱解氮34.49 mg/kg,速效钾为72.64 mg/kg。基质2为营养土,购买于山东史丹利有限公司,其养分含量为有机质8.32 g/kg,速效磷24.52 mg/kg,碱解氮35.62 mg/kg,速效钾为77.25 mg/kg。基质3:将上述沙土与营养土按照1:1的体积比混合,作为沙土混合基质,于160 ℃干热灭菌3 h后用于栽培,其养分含量为有机质8.74 g/kg,速效磷25.43 mg/kg,碱解氮36.14 mg/kg,速效钾

为77.95 mg/kg。

1.1.4　*供试试剂*　氯化三苯基四氮唑法（TTC）定量检测试剂盒购自苏州科铭生物技术有限公司。

1.1.5　*果园土壤*　分别采自宁夏志辉源石酒庄（ZH）、西鸽酒庄（XG）、立兰酒庄（LL）葡萄园‘赤霞珠’0～20 cm土层的根际土200 g。采集前ZH葡萄园土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别为8.27 g/kg、81.55 mg/kg、46.07 mg/kg和81.25 mg/kg；XG葡萄园土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别为3.02 g/kg、33.84 mg/kg、34.37 mg/kg和67.59 mg/kg；LL葡萄园土壤的有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别为4.28 g/kg、46.19 mg/kg、19.40 mg/kg和89.12 mg/kg。

1.2　不同宿主植物和培养基质对AMF扩繁的影响

1.2.1　*宿主植物筛选试验*　参考景若楠等[8]的方法，试验设置接种Ce（Ce组）、接种Fm（Fm组）和不接菌（CK）3个处理，每个处理设8个重复，共72盆。培养盆钵为塑料花盆（上口径×下口径×高＝16 cm×12 cm×17 cm），用体积分数75%酒精反复擦拭消毒。挑选饱满的不同植物种子，将其先用体积分数75%酒精浸泡1 min，然后用质量分数10%次氯酸钠浸泡5 min后，将种子播种于灭菌的沙土混合基质中，出苗约1周后定苗，每盆中保留长势相近的植株8株进行接种AMF处理，其中Ce组和Fm组中每盆分别加入20 g Ce菌剂和20 g Fm菌剂于幼苗根系附近，CK中加入20 g灭菌AMF，以确保各处理中除AMF组以外的其他微生物区系总体保持一致。试验期间采用干湿交替原则，根据需要浇水。试验在宁夏大学农科实训基地连栋玻璃温室中进行培养，白天温度为（24±3）℃，夜晚温度为（15±3）℃，湿度控制在55%左右，扩繁培养时间为60 d[9]。

1.2.2　*培养基质筛选试验*　在1.2.1节试验基础上，分别对2种AMF进行3×2因子交叉试验，其中3因子为3种培养基质，分别为沙土、营养土、沙土混合基质；2因子为2种宿主植物，分别为玉米和三叶草，共12个处理，每个处理设8个重复。在接种前对所用基质进行160 ℃干热灭菌3 h，并用体积分数75%酒精对塑料花盆反复进行消毒。挑选饱满的植物种子，将其先用体积分数75%酒精浸泡1 min，然后用质量分数10%次氯酸钠浸泡5 min后，用蒸馏水清洗干净。播种时，每个花盆先装灭菌基质800 g，然后将20 g接种剂（Ce或Fm）平铺其上，再覆盖100 g的灭菌基质，将消毒的种子播种其上，每盆播种10粒种子。出苗约1周后定苗，每盆中保留长势相近的植株8株。试验期间采用干湿交替原则，根据需要浇水。试验在宁夏大学农科实训基地连栋玻璃温室中进行培养，白天温度为（24±3）℃，夜晚温度为（15±3）℃，湿度控制在55%左右，扩繁培养时间为60 d[9]。

1.3　测定指标与方法

1.3.1　*AMF侵染率*　采用PHILLIPS等[10]的方法，取生长60 d的宿主植物新鲜根样，用清水冲洗根系，每个样品选择100根直径1 cm左右的根段，利用台盼蓝染色液（台盼蓝0.05 g，甘油20 mL，乳酸60 mL，蒸馏水20 mL）进行染色，经透明、脱色、酸化、染色及室温脱色12 h后制片，对AMF侵染状况进行观察和拍照，每个根段观测20个视野，采用李玲[11]的方法测定不同植物根系AMF菌丝定殖率、泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度。

1.3.2　*AMF孢子密度*　栽培60 d后，每个处理随机选择3株植物，采集其根际土，风干后称50 g土样，采用湿筛倾析法[12]分离AMF孢子，然后于显微镜下统计孢子密度，每个样品10次重复，取平均值。

1.3.3　*宿主植物地下干质量*　于栽培60 d后，随机选择5株健康植株根系，冲洗后烘干，用电子天平称其干质量。

1.3.4　*宿主植物根系活力*　于栽培60 d后，随机选择5株长势一致的植株，将其根系用蒸馏水洗净，剪取大小基本一致的根尖部分，混合后称取0.1 g，放入10 mL离心管中，按照TTC定量检测试剂盒的操作说明测定根系活力，重复测定3次，取平均值。

1.4　果园土著AMF菌群的富集试验

1.4.1　*土著AMF采集与处理*　利用筛选出的最优宿主植物和培养基质对3个果园土著AMF菌群进行富集。取ZH、XG、LL葡萄园‘赤霞珠’0～20 cm土层的200 g风干根际土，进行CK、T1、T2 3种处理，每个处理重复3次，其中CK：剔除根系和杂质后，将根围土于121 ℃下灭菌2 h；T1处理：剔除根际土中的根系和杂质；T2处理：先剔除杂质，然后将根际土中的根系剪碎成1 cm后，再将其与根际土混匀。将CK、T1、T2处理土壤分别进行接种Ce、Fm和不接菌（CK）处理，采用双层接种法接种，播种时每个花盆先装沙土混合基质800 g，然后将50 g果园风干根际土平铺其上，再覆盖100 g的沙土混合

基质,将消毒的种子播种其上,每盆播种10粒种子。出苗约1周后定苗,每盆中保留长势相近的植株8株。采用李玲[11]的方法测定不同植物根系AMF菌丝定殖率、泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度。

1.4.2 酿酒葡萄根际土壤AMF的鉴定 采用湿筛倾析法[12],将分离得到的果园土著AMF孢子置于玻璃表面皿中,吸取5 μL于显微镜下观察孢子的直径、颜色、形状及连孢菌丝等形态,依照国际真菌保藏中心(INVAM)在http://invam.caf.wvu.edu/;http://www.zor.zut.edu.pl/上提供的最新分类描述及图片,并结合相关物种报道描述[13-15]进行AMF种属鉴定。

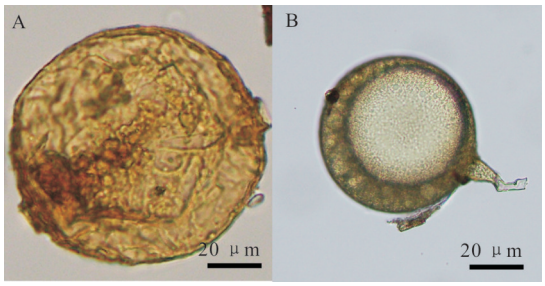
1.5 数据分析

用Excel软件整理数据,用IBM SPSS 25.0软件进行方差统计分析,并检验各处理之间的相关性。Duncan's法进行多重比较($P<0.05$),并利用GraphPad Prism 9.5.0软件做图。

2 结果与分析

2.1 不同宿主植物对AMF孢子密度的影响

观察结果显示,幼套近明球囊霉(Ce)孢子呈棕黄色,球形、近球形至不规则形(图1-A);摩西斗管囊霉(Fm)孢子呈浅黄至黄褐色,幼嫩孢子呈乳白色,球形、近球形(图1-B)。



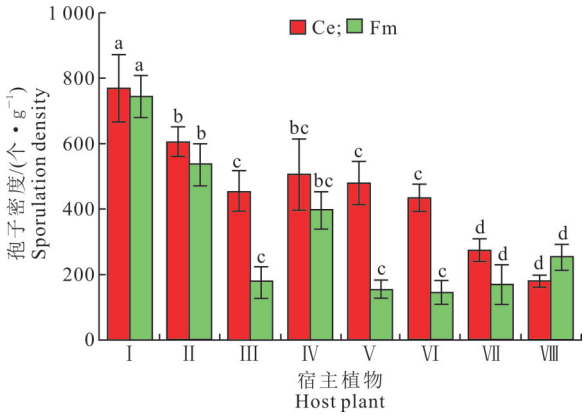
A. 幼套近明球囊霉(Ce);B. 摩西斗管囊霉(Fm)

A. *Claroideoglomus etunicatum*(Ce);B. *Funneliformis mosseae*(Fm)

图1 不同AMF孢子形态观察

Fig. 1 Spore morphology of different AMF agents

将8种宿主植物在沙土混合基质中进行扩繁,结果见图2。图2显示,不同宿主植物根系中的Ce和Fm孢子密度存在差异。Ce在8种宿主植物根系中的孢子密度,从大到小依次为玉米>三叶草>小麦>紫云英>大豆>黑麦草>高羊茅>湖南稷子。Fm在8种宿主植物根系中的孢子密度,从大到小依次是玉米>三叶草>小麦>湖南稷子>大豆>高羊矛>紫云英>黑麦草。可知,Ce和Fm在玉米和三叶草根系中的孢子密度均较高,为较优的宿主植物。



Ⅰ. 玉米;Ⅱ. 三叶草;Ⅲ. 大豆;Ⅳ. 小麦;Ⅴ. 紫云英;Ⅵ. 黑麦草;Ⅶ. 高羊茅;Ⅷ. 湖南稷子。Ce. 幼套近明球囊霉;Fm. 摩西斗管囊霉。图柱上标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Ⅰ. *Zea mays*; Ⅱ. *Tifolium repens*; Ⅲ. *Glycine max*; Ⅳ. *Triticum aestivum*; Ⅴ. *Astragalus sinicus*; Ⅵ. *Lolium perenne*; Ⅶ. *Festuca arundinacea*; Ⅷ. *Echinochloa frumentacea*. Ce. *Claroideoglomus etunicatum*; Fm. *Funneliformis mosseae*. Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments ($P<0.05$). The same below.

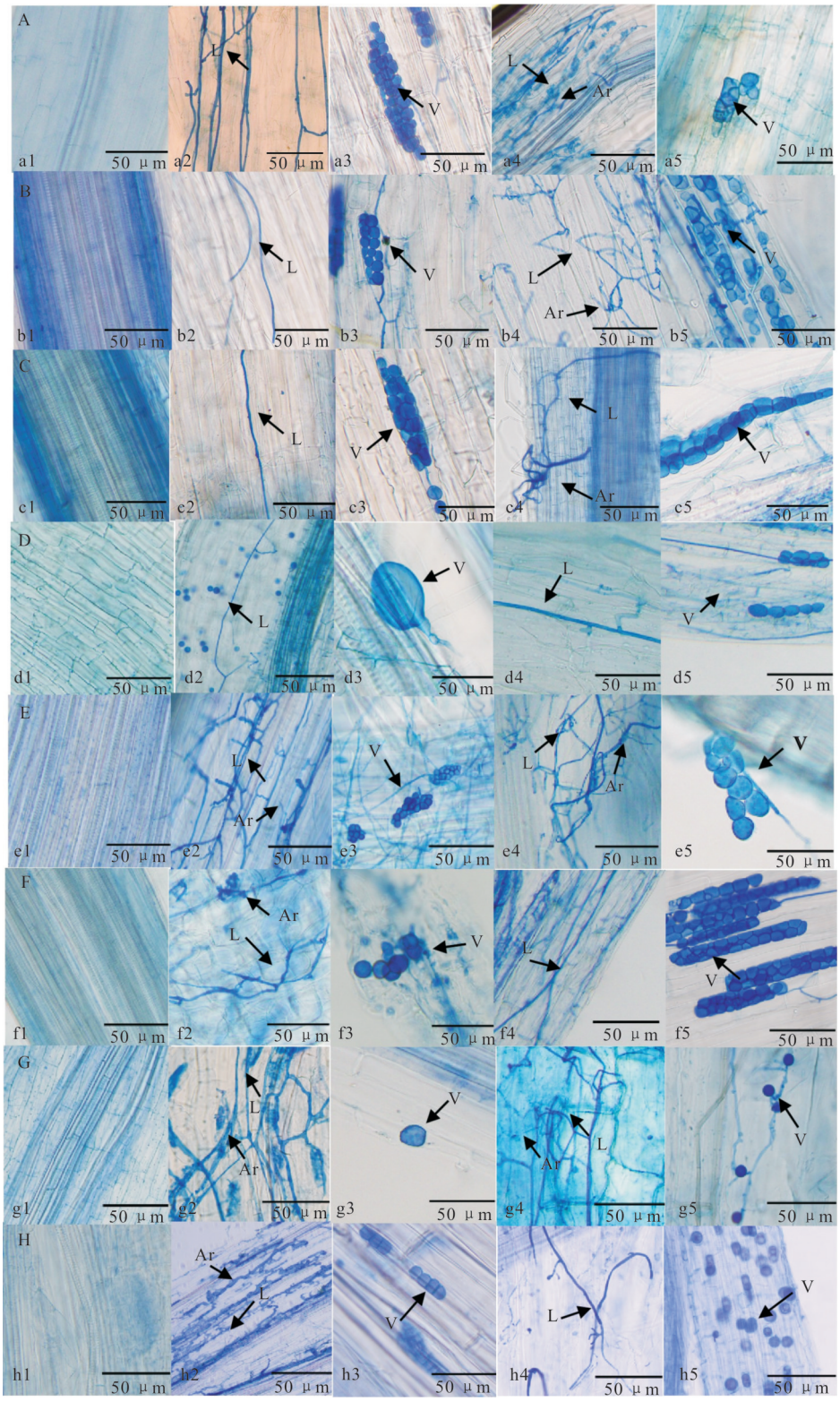
图2 不同宿主植物根系中的Ce和Fm孢子密度

Fig. 2 Spore density of Ce and Fm in different host plants

2.2 不同宿主植物对AMF侵染的影响

由图3可知,在无接种菌剂的条件(CK)下,8种植物根系中均无AMF的侵染。接种Ce和Fm后,两种AMF菌株均可侵染8种宿主植物根系,并且在宿主植物根系皮层细胞间隙延伸生长,形成大量孢间、胞内菌丝和泡囊。

不同宿主植物间,AMF菌丝形态各有差异,其中Ce组大豆、黑麦草、高羊茅、三叶草、湖南稷子和Fm组三叶草、玉米、湖南稷子菌丝多呈"直线型",Ce组小麦、玉米、紫云英和Fm组大豆、高羊茅、黑麦草、小麦、紫云英孢间菌丝呈"树枝状",孢内菌丝呈"丛枝状",之后菌丝连续二分叉式生长形成丛枝;菌丝顶端膨胀,在宿主植物根系皮层细胞内和细胞间隙内形成大小不等、形态多样的泡囊,其中Ce组大豆、高羊茅、黑麦草、小麦、玉米、湖南稷子和Fm组黑麦草、小麦、玉米泡囊形状多为圆形和椭圆形且聚集分布,呈"鱼卵状";Fm组大豆、高羊茅泡囊大且松散,多为不规则形,其中禾本科植物根系皮层细胞中的泡囊密集程度高于豆科植物,表明AMF与不同宿主植物能够建立良好的共生关系。



A. 大豆；B. 高羊茅；C. 黑麦草；D. 三叶草；E. 小麦；F. 玉米；G. 紫云英；H. 湖南稷子；L. AMF 菌丝；V. AMF 泡囊；Ar. 丛枝；a1～h1. CK；a2～h2、a3～h3. 接种 Ce；a4～h4、a5～h5. 接种 Fm。

A. *Glycine max*；B. *Festuca arundinacea*；C. *Lolium perenne*；D. *Tifolium repens*；E. *Triticum aestivum*；F. *Zea mays*；G. *Astragalus sinicus*；H. *Echinochloa frumentacea*；L. AMF hyphae；V. AMF vesicles；Ar. Arbuscules；a1－h1. CK；a2－h2，a3－h3. Inoculated with Ce；a4－h4，a5－h5. Inoculated with Fm.

图 3　不同宿主植物根系中 AMF 菌根形成观察

Fig. 3　AMF colonization in different host plants

不同宿主植物对两种 AMF 侵染的影响如图 4 所示。图 4 显示,在三叶草宿主上,Ce 和 Fm 菌丝定殖率均最高,分别为 36.83%,36.13%;在以玉米作为宿主时,Ce 和 Fm 泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度最高,分别为 36.0%,50.0%,56.43% 和 44.5%,55.5%,60.7%。综合而言,Ce 和 Fm 较适宜的繁殖宿主植物是玉米和三叶草。

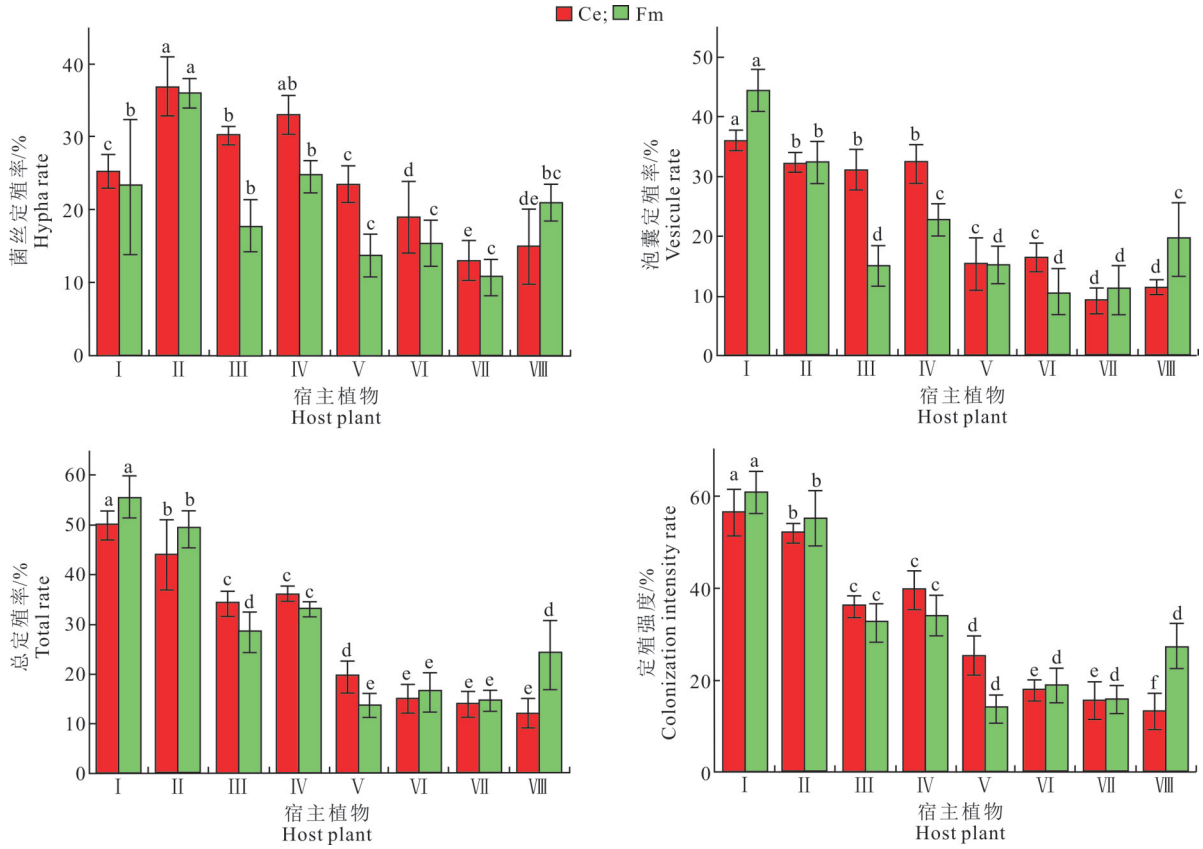


图 4 不同宿主植物对 AMF 侵染的影响

Fig. 4 Infection rates of AMF on different host plants

2.3 不同基质对 AMF 孢子密度的影响

筛选出较优宿主植物为玉米和三叶草,将其在 3 种培养基质下进行培养,分析不同处理对 AMF 孢子密度的影响,结果见图 5。

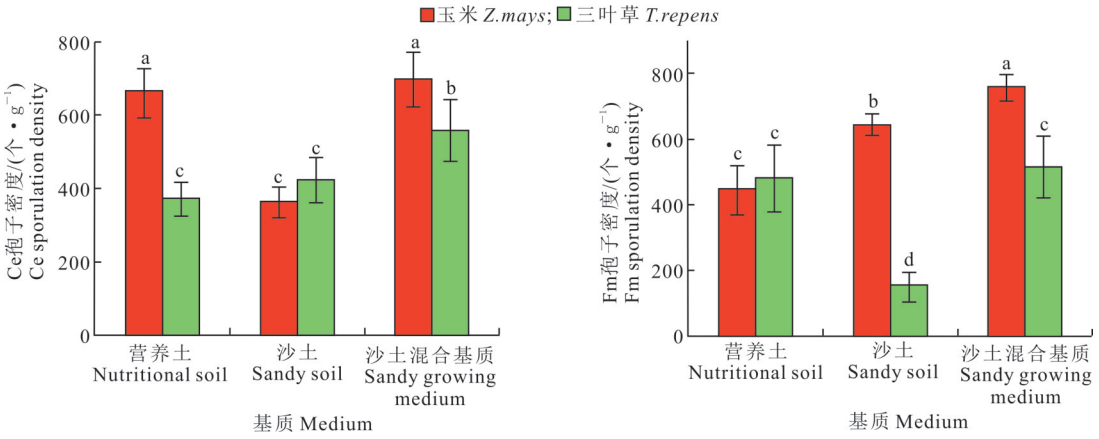


图 5 不同宿主植物和基质对 AMF 孢子密度的影响

Fig. 5 Effects of different host plants and medium on spore density of two AMF species

由图 5 可以发现,当以玉米作为宿主时,在 3 种基质中 Ce 的孢子密度表现为沙土混合基质>营养土>沙土;当以三叶草作为宿主时,Ce 孢子密度表现为沙土混合基质>沙土>营养土。当以玉米和

三叶草作为宿主时，Fm在沙土混合基质中的孢子密度均最高，分别为760和517个/g。综合而言，Ce和Fm最适合在沙土混合基质中培养。

不同宿主植物和基质对AMF孢子密度影响的方差分析结果见表1。

表1　不同宿主植物和基质对AMF孢子密度影响的方差分析结果

Table 1　Variance analysis results of the effects of different host plants and medium on the spore density of AMF species

菌种 Strain	基质 Medium	宿主植物 Host plant	基质×宿主植物 Medium×host plant
Ce	NS	*	NS
Fm	**	**	NS

注：*代表影响达到显著水平（$P<0.05$）；**代表影响达到极显著水平（$P<0.01$）；NS代表影响无差异（$P>0.05$）。下同。

Note：* represents statistically significant difference（$P<0.05$）；** represents statistically significant difference（$P<0.01$）；NS indicates no significant difference（$P>0.05$）. The same below.

表1表明，基质和宿主植物对Fm孢子密度有极显著影响（$P<0.01$），宿主植物对Ce孢子密度有显著影响（$P<0.05$），基质与宿主植物的交互作用对2种AMF孢子密度的影响不显著（$P>0.05$）。

2.4　不同宿主植物和基质对AMF侵染的影响

由表2可以看出，以三叶草和玉米作为宿主时，Ce在3种基质中的侵染强度均表现出相同趋势，即沙土混合基质＞营养土＞沙土。在沙土混合基质中，与玉米相比，以三叶草作为宿主的Ce菌丝定殖率最高，为30.17%；以玉米为宿主时，在沙土混合基质中扩繁的Ce泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度最高，分别为33.50%，47.83%和53.33%。在沙土混合基质中，以三叶草作为宿主的Fm菌丝定殖率最高，为31.37%。在沙土混合基质中，以玉米作为宿主的Fm泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度均最高，分别为41.33%，50.17%和55.67%。可知，以玉米和三叶草作为宿主时，在沙土混合基质中的AMF侵染率最高。

表2　不同宿主植物和基质对AMF侵染的影响

Table 2　Effects of different host plants and medium on AMF infection rate　%

菌种 Strain	宿主植物 Host plant	基质 Medium	菌丝定殖率 Hypha rate	泡囊定殖率 Vesicule rate	总定殖率 Total rate	定殖强度 Colonization intensity rate
Ce	玉米 *Z. mays*	沙土混合基质 Sandy growing medium	23.20±3.50 b	33.50±1.60 a	47.83±3.20 a	53.33±5.00 a
		营养土 Nutritional soil	17.00±4.60 d	24.83±2.00 b	41.17±4.30 b	46.27±1.90 b
		沙土 Sandy soil	12.00±2.90 c	16.50±4.20 d	29.83±8.20 d	35.00±3.70 c
	三叶草 *T. repens*	沙土混合基质 Sandy growing medium	30.17±2.30 a	26.20±3.80 b	39.00±4.10 bc	45.83±2.40 b
		营养土 Nutritional soil	24.37±2.30 b	21.50±2.30 b	33.33±3.00 cd	39.17±5.90 c
		沙土 Sandy soil	15.93±1.60 c	17.03±1.10 d	23.50±4.50 e	28.17±2.40 d
Fm	玉米 *Z. mays*	沙土混合基质 Sandy growing medium	25.43±2.40 b	41.33±2.00 a	50.17±2.10 a	55.67±4.30 a
		营养土 Nutritional soil	20.17±3.90 c	36.30±7.00 a	45.16±4.70 b	50.17±5.70 ab
		沙土 Sandy soil	14.73±1.60 d	25.17±6.00 bc	34.83±4.30 c	39.87±6.10 cd
	三叶草 *T. repens*	沙土混合基质 Sandy growing medium	31.37±4.10 a	29.40±4.20 b	44.57±3.00 b	48.50±7.10 b
		营养土 Nutritional soil	26.03±4.10 b	27.00±3.30 bc	42.83±2.90 b	44.50±5.40 bc
		沙土 Sandy soil	19.47±3.30 c	22.50±3.60 d	28.57±5.90 d	34.23±2.10 d

注：同列数据后标不同小写字母表示同一菌种不同处理间差异显著（$P<0.05$）。

Note：In the same column，data followed by different lowercase letters indicate significant differences in the same strain among different treatments（$P<0.05$）.

双因素方差分析结果（表3）表明，宿主植物对2种AMF的菌丝定殖率有极显著影响（$P<0.01$）；基质×宿主植物对2种AMF菌丝定殖率的影响不显著（$P>0.05$）；基质对Ce菌丝定殖率有显著影响（$P<0.05$），对Fm菌丝定殖率的影响不显著（$P>0.05$）。

表3 不同宿主植物和基质对AMF定殖率影响的方差分析

Table 3 Analysis of variance of the effects of different host plants and medium on AMF colonization rates

菌种 Strain	基质 Medium	宿主植物 Host plant	基质×宿主植物 Medium×host plant
Ce	*	**	NS
Fm	NS	**	NS

2.5 不同AMF和基质对宿主植物生长的影响

2.5.1 地下干质量 由图6可知,不同培养基质下玉米和三叶草地下干质量从大到小依次为沙土混合基质>营养土>沙土。在沙土混合基质中,Fm处理玉米地下干质量值最大,为1.07 g/株。以三叶草为宿主时,在3种基质中,均是接种Fm最有利于三叶草根系生长。综上可知,在沙土混合基质中,接种Fm明显有利于玉米和三叶草根系的生长。

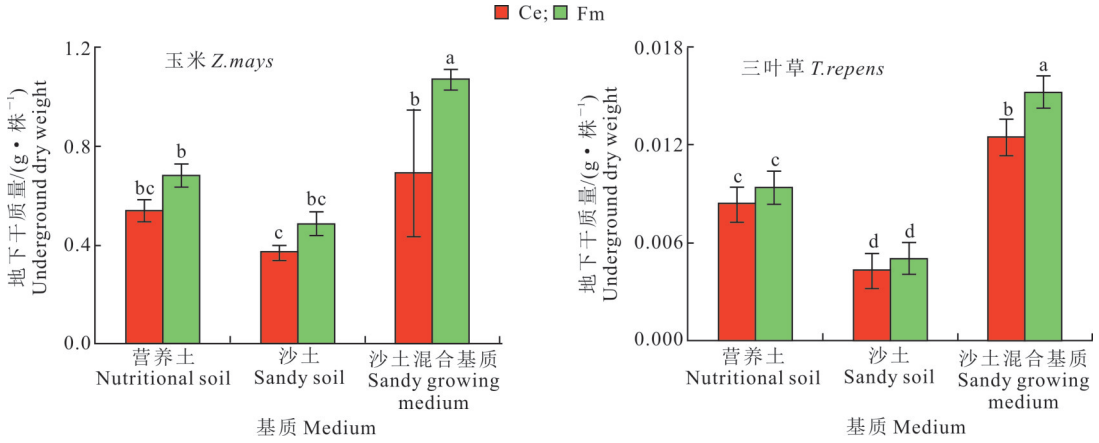


图6 AMF和基质对宿主植物地下干质量的影响

Fig. 6 Effects of AMF and medium on the underground dry weight of host plants

AMF和基质对宿主植物地下干质量影响的方差分析见表4。

表4 AMF和基质对宿主植物地下干质量影响的方差分析

Table 4 Variance analysis of the effects of AMF and medium on the underground dry weight of host plants

宿主植物 Host plant	基质 Medium	菌剂 Strain	基质×菌剂 Medium×Strain
玉米 *Z. mays*	**	*	NS
三叶草 *T. repens*	**	*	NS

从表4可以看出,基质对玉米和三叶草地下干质量均有极显著影响($P<0.01$)。菌剂对玉米和三叶草的地下干质量均有显著影响($P<0.05$)。基质和菌剂的交互作用对玉米和三叶草地下干质量的影响均不显著($P>0.05$)。

2.5.2 根系活力 AMF和基质对宿主植物根系活力的影响见图7。图7显示,3种培养基质下玉米和三叶草根系活力从大到小依次为沙土混合基质>营养土>沙土。在沙土混合基质下Fm处理玉米的根系活力最高,为0.97 mg/(g·h)。在3种基质中,与Ce相比,Fm处理三叶草根系活力值明显增加。综合3种基质下的AMF培养效果,可以发现Fm对宿主植株根系活力的影响高于Ce。

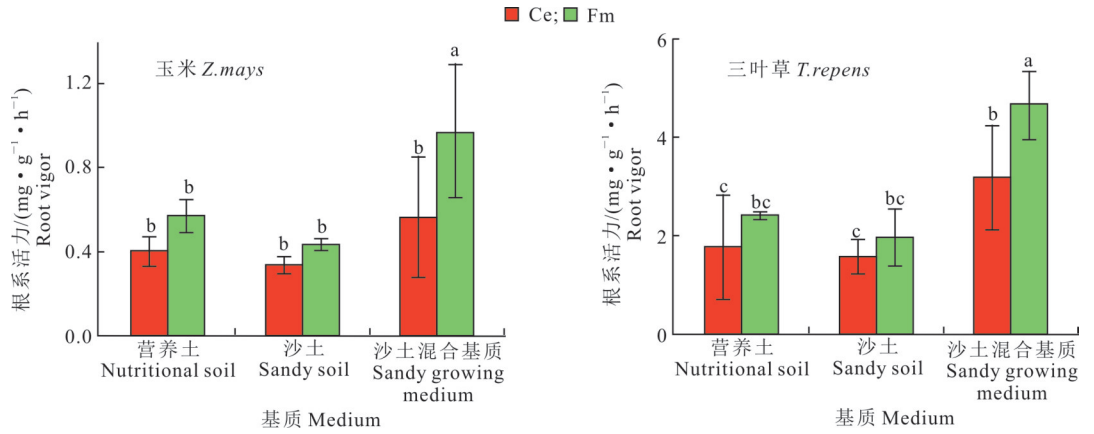


图7 AMF和基质对宿主植物根系活力的影响

Fig. 7 Effects of AMF and medium on host plant root vigor

AMF 和基质对宿主植物根系活力影响的方差分析见表 5。

表 5　AMF 和基质对宿主植物根系活力影响的方差分析

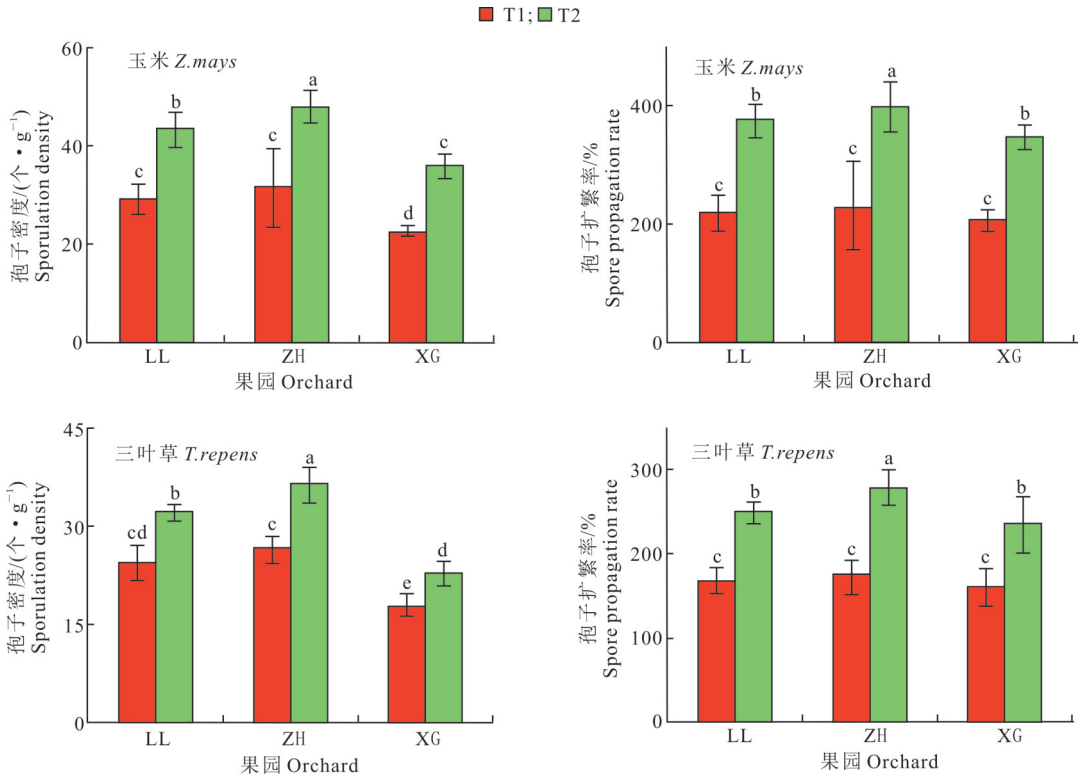
Table 5　Variance analysis of the effects of AMF and medium on host plant root vigor

宿主植物 Host plant	基质 Medium	菌剂 Strain	基质×菌剂 Medium×Strain
玉米 *Z. mays*	**	NS	**
三叶草 *T. repens*	**	NS	NS

表 5 表明，基质对玉米和三叶草根系活力均有极显著影响（$P<0.01$）；基质与菌剂的交互作用对玉米根系活力有极显著影响（$P<0.01$），对三叶草根系活力影响不显著（$P>0.05$）；菌剂对玉米和三叶草根系活力的影响均不显著（$P>0.05$）。

2.6　不同处理对果园土著 AMF 菌群富集的影响

利用前期筛选的宿主植物和培养基质，分析其对 3 个果园葡萄根围土著 AMF 菌群富集的影响，结果见图 8。图 8 显示，3 个果园 AMF 孢子密度从高到低依次为 ZH＞LL＞XG。T2 处理的孢子密度和扩繁率总体显著高于 T1 处理。表明相较于 T1 处理，T2 处理的扩繁效果更为显著。



LL. 立兰酒庄；ZH. 志辉源石酒庄；XG. 西鸽酒庄。

LL. Lilan Winery; ZH. Zhihui Yuanshi Winery; XG. Xige Winery.

图 8　不同处理对果园土著 AMF 菌群富集的影响

Fig. 8　Effects of different treatments on enrichment of indigenous AMF community in orchards

不同处理对果园土著 AMF 菌群侵染的影响如表 6 所示。表 6 显示，不同处理果园土著 AMF 侵染存在明显差异。以玉米为宿主时，LL 果园中 T2 处理的菌丝定殖率、泡囊定殖率、总定殖率和定殖强度均显著高于其他果园，增幅分别为 68.17%，51.50%，59.67% 和 66.03%。以三叶草为宿主时，ZH 果园中 T2 处理的菌丝定殖率和定殖强度均显著高于其他处理，增幅分别为 40.50% 和 53.00%。综合分析表明，在同一宿主中，与 T1 处理相比，T2 处理的侵染程度相对较高。

2.7　果园土壤土著 AMF 菌群的形态鉴定

根据孢子形态特征，对扩繁后 3 个果园葡萄根围土壤中的 AMF 孢子进行鉴定，共鉴定出 3 目 4 科 5 属 18 种 AMF（图 9），其中球囊霉属（*Glomus*）11 种，分别为黑球囊霉、何氏球囊霉、凹坑球囊霉、悬钩子球囊霉、长孢球囊霉、脆球囊霉、幼套球囊霉、缩球囊霉、网状球囊霉、白色球囊霉、晕环球囊霉；无梗囊霉属（*Acaulospora*）4 种，分别为蜜色无梗囊霉、格但无梗囊霉、细齿无梗囊霉、双网无梗囊霉；根孢囊霉属（*Rhizophagus*）1 种，为聚丛根孢囊霉；双

型囊霉属(*Ambispora*)1种,为薄壁双型囊霉;盾巨孢囊霉属(*Scutellospora*)1种,为美丽盾巨孢囊霉。

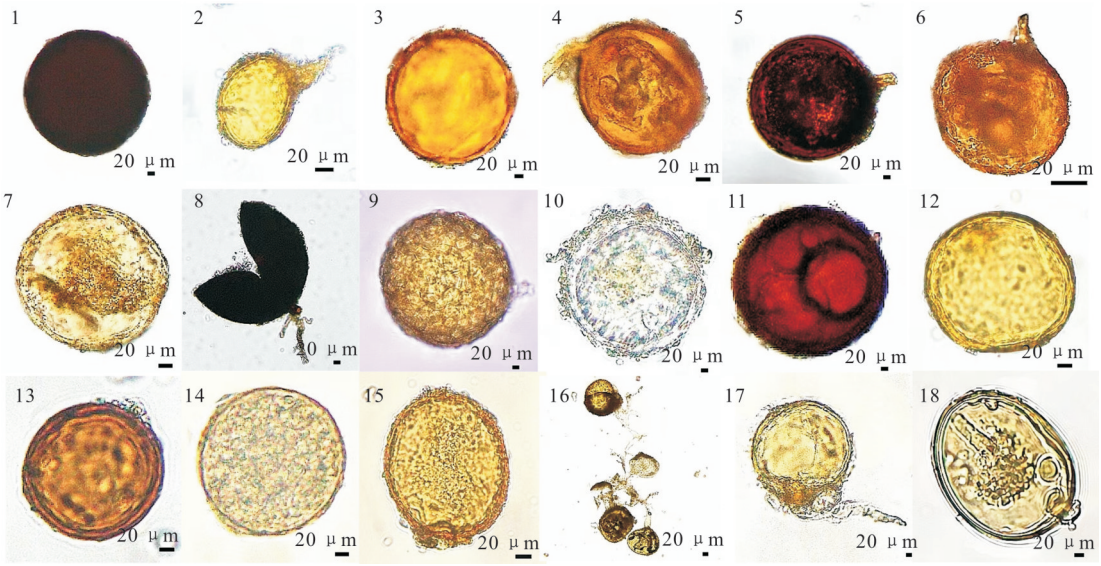
表6 不同处理对果园土著AMF菌群侵染的影响

Table 6 Effects of different treatments on colonization of indigenous AMF community in orchards %

果园 Orchard	宿主 Host plant	处理 Treatment	菌丝定殖率 Hypha rate	泡囊定殖率 Vesicule rate	总定殖率 Total rate	定殖强度 Colonization intensity rate
LL	玉米 *Z. mays*	T1	45.67±3.90 c	37.00±3.40 b	40.87±7.00 c	41.50±5.90 c
		T2	68.17±5.30 a	51.50±1.50 a	59.67±3.60 a	66.03±2.10 a
	三叶草 *T. repens*	T1	25.40±1.30 f	12.17±1.80 h	25.73±3.00 e	27.33±2.30 e
		T2	34.00±2.80 e	23.93±3.30 e	40.60±2.90 c	46.77±3.50 d
ZH	玉米 *Z. mays*	T1	32.17±1.50 e	28.23±2.00 d	33.27±2.10 d	34.67±6.90 d
		T2	45.30±2.70 c	37.33±8.00 b	47.83±2.80 b	49.67±5.00 b
	三叶草 *T. repens*	T1	27.03±1.80 f	19.86±1.40 f	24.70±2.90 e	30.77±3.60 d
		T2	40.50±3.50 d	20.03±2.00 f	41.53±6.60 c	53.00±4.30 b
XG	玉米 *Z. mays*	T1	23.93±3.70 f	16.03±1.70 g	23.17±3.80 e	25.70±3.20 e
		T2	49.23±2.20 b	31.50±1.20 c	43.83±4.20 bc	48.77±2.50 b
	三叶草 *T. repens*	T1	12.16±1.60 g	11.83±3.30 h	16.33±4.80 f	19.43±4.20 f
		T2	31.17±4.20 e	16.50±3.00 g	30.84±5.40 d	34.34±4.50 d

注:同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments($P<0.05$).



1. 黑球囊霉;2. 何氏球囊霉;3. 凹坑球囊霉;4. 悬钩子球囊霉;5. 长孢球囊霉;6. 脆球囊霉;7. 幼套球囊霉;8. 缩球囊霉;9. 网状球囊霉;10. 白色球囊霉;11. 晕环球囊霉;12. 蜜色无梗囊霉;13. 格但无梗囊霉;14. 细齿无梗囊霉;15. 双网无梗囊霉;16. 聚丛根孢囊霉;17. 薄壁双型囊霉;18. 美丽盾巨孢囊霉。

1. *Glomus melanosporum*; 2. *G. hoi*; 3. *G. multiforum*; 4. *G. rubiforme*; 5. *G. dolichosporuw*; 6. *G. fragile*; 7. *G. etunicatum*; 8. *G. constrictum*; 9. *G. reticulatum*; 10. *G. albidum*; 11. *G. halonatum*; 12. *Acaulospora mellea*; 13. *A. gedanensis*; 14. *A. denticulata*; 15. *A. bireticulata*; 16. *Rhizophagus aggregatus*; 17. *Ambispora leptoticha*; 18. *Scutellospora calospora*.

图9 鉴定的宿主土壤中土著AMF菌群孢子形态

Fig. 9 Morphology of indigenous AMF spores in the identified host soil

3 讨 论

AMF与不同宿主植物间存在特异性互作关系,二者亲和程度呈明显差异。具体而言,不同宿主植物对同一AMF的扩繁效应具有明显的种间特异性,而相同宿主植物对不同AMF的扩繁促进作用也呈现出显著的菌株特异性。梁天豪等[16]发现,宿主植物的根系发达程度间接影响着孢子密度的变化,进而影响菌剂的扩繁。本试验结果显示,幼套近明球囊霉(Ce)和摩西斗管囊霉(Fm)的最适宿主植物为玉米,这可能与玉米的根系相较于三叶草和黑麦草更为发达有关。MA等[17]的研究指出,发达的植物会分泌更多的根系分泌物,从而更有利于AMF孢子的侵染和定殖,且宿主植物根系的发达程度与其根系分泌物的分泌量呈正相关,这一特性显著促进了AMF孢子的侵染和定殖[16-17]。

研究表明，在不同基质条件下，AMF的定殖效率及其对宿主植物生长的影响存在显著差异，这主要源于基质特性（如通气性、pH值、持水性和养分状况）的不同，进而导致不同土壤质地中特定AMF菌株促生机制的多样性[18]。本研究发现，Ce和Fm 2种菌剂均不适宜采用沙土、营养土，较适宜的基质为沙土混合基质。这是因为纯沙基质虽然具有体积质量较大、结构稳定性强及通气状况良好的特点，但保水性差、营养物质含量低且易导致养分流失；营养土虽具有较高的有机质和矿质养分，能够为宿主植物提供充足的营养，但通气状况较差，且磷含量过高会抑制菌根共生，从而导致菌根侵染率下降；沙土混合基质不仅通气状况较优、透水性强且养分含量适中，既保证了宿主植物的基本生长需求，又不至于因养分过剩而抑制生长。从生理机制来看，AMF侵染宿主植物根系的过程伴随着剧烈的能量代谢活动，需要持续消耗大量营养物质以满足侵染过程中的能量代谢需求；此外，菌根共生体的生长发育进程在达到特定阶段后，其生长发育状态会受到可溶性糖、磷素或氮素等营养因子的影响[19]。沙土混合基质中不仅含有AMF扩繁所需要的营养物质，而且适宜的孔隙度与水分缓冲能力有助于菌根的延伸和扩展，这种特性使其能促进AMF孢子的扩繁。研究发现，培养基质和宿主植物是影响菌剂富集的关键因素，培养基质因其通气性和保水性及营养元素含量等不同对AMF富集产生显著影响[20]。这或许是沙土混合培养基质富集效果最优的缘由。

AMF在改善土壤理化性质、提高植物对生物胁迫和非生物胁迫的抵抗能力、增加次生代谢产物合成方面发挥重要作用[21]。果园土著AMF种类繁多，单株分离纯化复杂且成本较高，因此需要借助宿主植物对AMF进行大量扩繁。本研究通过筛选的宿主植物和基质对3个果园土著AMF菌群进行富集，结果发现，经过玉米扩繁后，果园土著AMF的侵染率和扩繁率均得到显著提升，其中T2处理（带根系）的扩繁效果较T1处理（剔除根系）更好。焦润安等[22]发现，生草提高了油橄榄根际土壤AMF多样性，这与本研究结果一致。本研究对3个果园土著AMF菌群孢子进行形态鉴定，共鉴定了5属18种AMF，其中球囊属为果园优势属，这与王占军等[23]对宁夏草原土壤AMF多样性研究结果一致。

4　结　论

本研究探讨了不同宿主植物和基质对AMF扩繁的影响，从中筛选出较优的宿主植物和基质，并对3个果园土著AMF菌群进行了扩繁，结果显示，当以玉米和三叶草为宿主、沙土混合为基质时，对Ce和Fm两种菌剂的扩繁效果较优，且有利于果园土著AMF菌群的富集，其中球囊霉（*Glomus*）为优势菌属，但其高效扩繁的机理尚需进一步研究。

[参考文献]

[1] 张亮，王晓娟，王强，等. 青藏高原高寒生境中丛枝菌根真菌研究进展[J]. 菌物研究，2017，15(1)：58-69.
ZHANG L，WANG X J，WANG Q，et al. Advances in the study of arbuscular mycorrhizal fungi in high altitude and cold habitats on Tibetan Plateau[J]. Journal of Fungal Research，2017，15(1)：58-69.

[2] 李以康，杜岩功，张正芝，等. 种子补播恢复退化草地研究进展[J]. 草地学报，2017，25(6)：1171-1177.
LI Y K，DU Y G，ZHANG Z Z，et al. Research progresses on seed reseeding to recover the degraded grassland[J]. Acta Agrestia Sinica，2017，25(6)：1171-1177.

[3] 周霞，崔明，秦永胜，等. 扩繁条件对3种丛枝菌根真菌（AMF）的影响[J]. 中国农学通报，2012，28(12)：83-87.
ZHOU X，CUI M，QIN Y S，et al. The effects of the propagation condition on the three kinds of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2012，28(12)：83-87.

[4] 李敖，郑旭，吴承勖，等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下核桃幼苗生长及生理的影响[J]. 园艺学报，2025，52(2)：423-438.
LI A，ZHENG X，WU C X，et al. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and physiological characteristics of walnut seedlings under salt stress[J]. Acta Horticulturae Sinica，2025，52(2)：423-438.

[5] 任玮，杨韧，唐明，等. 不同培养基质和宿主植物对AMF扩繁的影响[J]. 菌物研究，2017，15(1)：46-52.
REN W，YANG R，TANG M，et al. The effect of cultivating substrates and host plants on propagated condition of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Fungal Research，2017，15(1)：46-52.

[6] 何斐，雷雨俊，段园鹏，等. 宿主和培养基质对根内根生囊霉菌剂扩繁的影响及菌根化魔芋栽培[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2023，51(3)：84-92.
HE F，LEI Y J，DUAN Y P，et al. Effects of host and cultivating substrates on propagation of *Rhizophagus irregularis* and cultivation of *Amorphophallus konjac* with mycorrhization[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2023，51(3)：84-92.

[7] 胡静雯，周东波，张金莲，等. 湖南烤烟根系丛枝菌根真菌（AMF）侵染特征及其群落结构[J]. 中国烟草学报，2025，31

(3):123-133.
HU J W,ZHOU D B,ZHANG J L,et al. Infection characteristics and community structure of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in the root systems of flue-cured tobacco in Hunan[J]. Acta Tabacaria Sinica,2025,31(3):123-133.

[8] 景若楠,李晴,段文艳,等. 丛枝菌根真菌对元宝枫枯叶分解及其生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(11):40-47.
JING N N,LI Q,DUAN W Y,et al. Effects of AM fungi on litter decomposition and growth of *Acer truncatum*[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2024,52(11):40-47.

[9] 马玲,李惠霞,王浩宇,等. 秸秆配施不同形态氮肥对设施土壤养分转化的影响[J]. 北方园艺,2024(15):67-74.
MA L,LI H X,WANG H Y,et al. Effects of straw combined with different forms of nitrogen fertilizer on soil nutrient under facility cultivation condition[J]. Northern Horticulture, 2024(15):67-74.

[10] PHILLPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Trans Br Mycol Soc,1970,55:158.

[11] 李玲. 贺兰山东麓酿酒葡萄根系和根际土壤丛枝菌根真菌多样性及其与土壤因子相关性研究[D]. 银川:宁夏大学,2022.
LI L. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in root systems and inter-root soils of wine grapes at the eastern of the Helan mountains and their correlation with soil factors[D]. Yinchuan:Ningxia University,2022.

[12] 房文祎. 梨树土著丛枝菌根真菌的扩繁及其促生效应研究[D]. 南京:南京农业大学,2021.
FANG W Y. Propagation methods of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and their growth-promoting effects in pear[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2021.

[13] 苏丹,张春明,许榕凡,等. 江西乐安古樟林香樟根系及根际土壤AM真菌[J]. 菌物学报,2025,44(6):45-57.
SU D,ZHANG C M,XU R F,et al. AM fungi in the roots and rhizosphere soil of *Cinnamomum camphora* in ancient camphor forest of Le'an,Jiangxi Province[J]. Mycosystema,2025,44(6):45-57.

[14] 马莉,陈健鑫,康定旭,等. 干热河谷木棉丛枝菌根真菌鉴定及多样性分析[J]. 西北林学院学报,2023,38(1):131-138.
MA L,CHEN J X,KANG D X,et al. Identification and diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and microorganisms of *Bombax ceiba* in dry-hot valley[J]. Journal of Northwest Forestry University,2023,38(1):131-138.

[15] 周小勤,黄心铷,何俊良,等. 高磷土壤中丛枝菌根真菌的分离鉴定[J]. 微生物学通报,2022,49(11):4659-4673.
ZHOU X Q,HUANG X R,HE J L,et al. Isolation and identification of arbuscular mycorrhizal fungi from high phosphate soils[J]. Microbiology China,2022,49(11):4659-4673.

[16] 梁天豪,熊德成,刘源豪,等. 不同菌根类型树种的根系分泌物特征及其根际效应研究进展[J]. 植物生态学报,2025,49(7):1038-1052.
LIANG T H,XIONG D C,LIU Y H,et al. Research progress on root exudates and rhizosphere effects of tree species associated withdifferent mycorrhizal types[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2025,49(7):1038-1052.

[17] MA J Q,XIE Y,YANGg Y S,et al. AMF colonization affects allelopathic effects of *Zea mays* L. root exudates and community structure of rhizosphere bacteria[J]. Frontiers in Plant Science,2022,13:1050104.

[18] 黄小辉,陈道静,冯大兰,等. 不同基质条件下丛枝菌根真菌对桑树生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(3):9-16.
HUANG X H,CHEN D J,FENG D L,et al. The effects of arbuscular mycorrhiza fungi on the growth of mulberry in different nursery substrates[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2019,43(3):9-16.

[19] HODGE A, STORER K. Arbuscular mycorrhiza and nitrogen: implications for individual plants through to ecosystems[J]. Plant and Soil,2015,386(1):1-19.

[20] DAVID P, JANA R, RADKA S, et al. Soil compaction reversed the effect of arbuscular mycorrhizal fungi on soil hydraulic properties[J]. Mycorrhiza,2024,34(4):361-368.

[21] WANG J C,WANG J,HE J Z,et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and plant diversity drive restoration of nitrogen-cycling microbial communities[J]. Molecular Ecology,2021,30(16):4133-4146.

[22] 焦润安,李朝周,刘高顺,等. 生草对油橄榄根际土壤丛枝菌根真菌多样性的影响[J]. 生态与农村环境学报,2019,35(4):459-468.
JIAO R A,LI C Z,LIU G S,et al. The effect of sod-culture on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizospheric soil of olive[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2019,35(4):459-468.

[23] 王占军,马琨,崔慧珍,等. 土壤丛枝菌根真菌与宁夏主要草原类型植被群落分布间的相互关系研究[J]. 草业学报,2020,29(12):150-160.
WANG Z J,MA K,CUI H Z,et al. Correlations between arbuscular mycorrhizal fungi and distribution of main grassland types in Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica,2020,29(12):150-160.

(责任编辑:李小平)