

不同丛枝菌根真菌促进资阳香橙幼苗生长研究*

李果果¹, 刘金华², 宋娟³, 李铭燕^{3,4}, 李冬萍³, 刘升球⁵, 张金莲^{3,6**}, 陈廷速^{3**}

(1. 广西农业科学院 园艺研究所, 广西南宁 530007; 2. 浙江养生堂天然药物研究所有限公司, 浙江杭州 310007;

3. 广西农业科学院 微生物研究所, 广西南宁 530007; 4. 广西小藻农业科技有限公司, 广西防城港 538000;

5. 广西特色作物研究院, 广西桂林 541004; 6. 厦门大学 公共卫生学院, 福建厦门 361102)

摘要:【目的】筛选促进柑橘砧木资阳香橙盆栽幼苗生长的丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF), 为柑橘菌根种苗应用提供参考, 也为利用菌根柑橘种苗抑制柑橘黄龙病探索新途径。【方法】采用盆栽试验, 利用资阳香橙幼苗接种从广西土壤分离纯化获得的 15 株 AMF 菌株, 研究不同 AMF 对根系的侵染及对植株的促生效应。【结果】15 株 AMF 均能与资阳香橙根系形成共生关系。其中, 黄雷德克囊霉(*Redeckera fulvum*) 对植株根系的侵染率最高, 达到 81.27%; 脆梗囊霉(*Acaulospora delicata*) 的侵染率最低, 为 8.57%; 15 株菌株的平均侵染率为 50.97%。幼套近明球囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*) 和摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*) 可促进资阳香橙的生长, 其株高、茎粗、叶片数和叶绿素 SPAD 值均显著高于对照($P<0.05$)。【结论】幼套近明球囊霉和摩西斗管囊霉是促进资阳香橙生长的优势菌株。

关键词: 丛枝菌根真菌; 柑橘; 资阳香橙; 菌根侵染率; 促进生长

中图分类号: S 666.401

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2021) 06-1022-06

Research on Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Ziyang Xiangcheng Seedling

LI Guoguo¹, LIU Jinhua², SONG Juan³, LI Mingyan^{3,4}, LI Dongping³,

LIU Shengqiu⁵, ZHANG Jinlian^{3,6}, CHEN Tingsu³

(1. Horticulture Research Institute, Guangxi Academy of Agriculture Sciences, Nanning 530007, China;

2. Zhejiang Yangshengtang Institute of Natural Medication Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

3. Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;

4. Guangxi Xiaozao Agriculture and Technology Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China;

5. Guangxi Academy of Specialty Crops, Guilin 541004, China;

6. School of Public Health, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: [Purpose] Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) were screened to promote the growth of citrus rootstock Ziyang Xiangcheng potted seedlings, which provided a reference for the application of mycorrhizal citrus seedlings, and also explored a new way for the use of mycorrhizal citrus seed-

收稿日期: 2020-04-15

修回日期: 2021-04-29

网络首发时间: 2021-11-18 09:15:57

*基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科 AD20159001); 厦门大学联合项目(2017-21); 广西科技重大专项(桂科 AA17204046-4); 广西自然科学基金(2017GXNSFBA198055); 玉林市市校合作项目(YLSXZD2019016)。

作者简介: 李果果(1987—), 女, 河南平顶山人, 硕士, 副研究员, 主要从事柑橘土壤微生物研究。

E-mail: 421808088@qq.com

**通信作者 Corresponding authors: 张金莲(1978—), 女, 广西鹿寨人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事土壤微生物研究。E-mail: zhangjinlian1@126.com; 陈廷速(1966—), 男, 广西防城港人, 博士, 研究员, 主要从事土壤微生物研究。E-mail: chen20409@hotmail.com

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211117.1009.003.html>



lings to inhibit citrus Huanglongbing. [Method] To study the infection of different AMF on roots and their growth promoting effects on plants, Ziyang Xiangcheng seedlings were inoculated with 15 AMF, which were isolated and purified from soils in Guangxi. [Result] Fifteen AMF could form symbiotic relationship with the roots of Ziyang Xiangcheng. Among them, the highest infection rate was *Redeckera fulvum* 1 of 81.27%, the lowest infection rate was *Acaulospora delicate* of 8.57%, and the average infection rate of 15 AMF was 50.97%. *Claroideoglomus etunicatum* and *Funnelformis mosseae* could promoted the growth of Ziyang Xiangcheng, which was significantly higher than the control in plant height, stem diameter, leaf number and chlorophyll SPAD value ($P<0.05$). [Conclusion] *C. etunicatum* and *F. mosseae* were the superiority strains of Ziyang Xiangcheng.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; citrus; Ziyang Xiangcheng; infection rate of mycorrhizal; growth promotion

丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 是自然界中重要的土壤有益微生物, 能与绝大部分陆生植物根系形成共生关系^[1]。由于化学肥料和农药的大量使用, 中国农田土壤理化性质及微生物系统正在急剧恶化, 主要表现为土壤板结、肥力下降、有机质含量降低、盐渍化加剧和微生物活性下降, 从而造成农作物产量和品质下降等一系列问题^[2-6]。AMF 在改善土壤生态方面发挥着重要作用, 可以提高土壤 pH 值, 增加土壤中有机质含量, 影响宿主植物的根系生长, 促进宿主植物的营养吸收以及增强植物的抗逆性^[3, 7-12]。因此, 研究 AMF 在农业生产中的应用具有重要的生态学和经济学意义。

柑橘是菌根植物, 土壤 AMF 与柑橘根系建立共生关系^[13-14]。柑橘在田间栽培下依靠菌根促进根系对土壤养分和水分的吸收, 增强抗逆性^[15]。不同生态型 AMF 菌株在柑橘上的表现有差异^[16], 且 AMF 对不同宿主植物有偏好性, 宿主植物的种类会在很大程度上影响丛枝菌根的生长发育^[17]。资阳香橙 (*Citrus junosiebiae* Sieb. ex Tanaka) 为地方柑橘资源, 是宜昌橙与宽皮橘的天然杂种, 由于其具有抗碱、抗旱、与多数柑橘品种嫁接亲和、适应性强、早果性和丰产稳产性好等优点常用作柑橘砧木^[18]。近年来, 广西大规模种植杂交柑品种 (如沃柑和茂谷柑), 面积达 13.5 万 hm^2 , 带动了广西柑橘产业的发展, 其多采用资阳香橙为砧木。本研究以资阳香橙盆栽幼苗接种不同的 AMF 菌株, 筛选促进植株生长明显的优势菌株, 为菌根柑橘种苗的应用奠定基础, 也为利用菌根柑橘种苗抑制柑橘黄龙病探索新途径。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为柑橘砧木资阳香橙幼苗; 供试花盆为新购置花盆, 盆口直径 15 cm、盆高 12.5 cm、底部直径 11 cm; 供试基质为育苗有机质: 沙: 土按体积比 2: 1: 1 混匀后装入灭菌袋中进行高压蒸汽灭菌, 温度 121 $^{\circ}\text{C}$, 时间 120 min。

供试 AMF 菌株 (表 1) 为广西农业科学院微生物研究所土壤微生物课题组前期从广西土壤分离、纯化和保藏的菌株。经由三叶草扩繁后获得, 孢子密度为 20~100 个/g。

表 1 供试菌株
Tab. 1 Strain of test

序号 No.	代码 code	菌株 strain
1	AR	皱襞无梗囊霉 <i>Acaulospora rugousa</i>
2	PB	巴西类球囊霉 <i>Paraglomus brasilianum</i>
3	AS	无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i> sp.
4	SV	黏质隔球囊霉 <i>Septoglomus viscosum</i>
5	RF1	黄雷德克囊霉 1 <i>Redeckera fulvum</i> 1
6	RM	木薯根胞囊霉 <i>Rhizophagus manihotis</i>
7	AE	凹坑无梗囊霉 <i>Acaulospora excavata</i>
8	AB	双网无梗囊霉 <i>Acaulospora bireticulata</i>
9	RI	异型根胞囊霉 <i>Rhizophagus irregularis</i>
10	AD	脆无梗囊霉 <i>Acaulospora delicata</i>
11	FM	摩西斗管囊霉 <i>Funnelformis mosseae</i>
12	RF2	黄雷德克囊霉 2 <i>Redeckera fulvum</i> 2
13	CE	幼套近明球囊霉 <i>Claroideoglomus etunicatum</i>
14	CL	层状近明球囊霉 <i>Claroideoglomus lamellosum</i>
15	GS	球囊霉属 <i>Glomus</i> sp.

1.2 方法

1.2.1 植株种植

供试资阳香橙种子由 1‰ 高锰酸钾灭菌 2 min、28 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱催芽后在穴盘播种, 发芽后

选取高 10 cm、生长一致的植株移栽于花盆。先在花盆底部垫 1 张与底部大小一致的纸片，加入 1/2 已灭菌的基质。按照每盆 300 个孢子的接种量，在植株根部周围放置 AMF 接种体，使其与根系充分接触，继续加入基质至花盆的 3/4，同时保证基质没过根系，按菌株代码挂上标签。另设置 1 个对照组，共 16 个处理，每处理 15 盆，共 240 盆，每 14 d 淋 1 次 Hoagland 营养液。

1.2.2 测定指标

经过 120 d 生长后，测量不同 AMF 菌株处理后资阳香橙植株的茎粗、株高、叶片数和叶绿素含量。叶绿素含量用叶绿素 SPAD 值表示，利用叶绿素仪 SPAD-502 Plus 测量所得。

1.2.3 根系菌根染色

参考王幼珊等^[19]的方法并略作改进。将资阳香橙植株根系剪为长约 1 cm 的小段，放入组织包埋盒中，加 20% KOH，90 ℃ 水浴 0.5 h，清水冲洗 3 次；加入碱性 H₂O₂ 脱色 2 h，清水冲洗 3 次；加 5% 冰乙酸酸化 2 h；加 5% 墨水醋酸染液，66 ℃ 水浴染色 1 h；用清水漂洗 3~5 次，用清水浸泡 12 h 以上脱色，确保脱除植物组织颜色、保留菌丝等组织的颜色，以备测定侵染率。

1.2.4 根系菌根侵染率测定

菌根侵染率按照王幼珊等^[19]的方法，每处理取 30 条根系观察不同 AMF 对资阳香橙根系侵染

情况。使用尼康 Eclipse Ci-L 和 DS-Ri2 在显微镜下检查每条根段的侵染情况，按 1,10,20,……,100 逐等级打分，如：没有菌根结构的根段记为 0，只有一半长度被侵染的根段记为 50，全部被侵染的根段记为 100。记录各等级下根段的条数，根段条数与其等级乘积之和除以总根段数即为该样品的侵染率。

1.3 数据分析

数据采用 DPS v18.10 软件进行方差分析，并进行 Duncan’s 多重比较以分析不同 AMF 菌株处理之间的差异显著性。

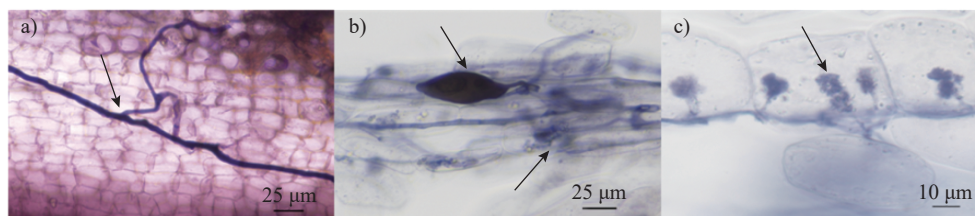
2 结果与分析

2.1 不同 AMF 对资阳香橙根系侵染率

由表 2 可知：供试的 15 株菌株均可对资阳香橙根系造成侵染，平均总侵染率为 50.97%，其中 14 株供试菌株的侵染率大于 10%，仅菌株 AD 的侵染率为 8.57%。15 株供试菌株中，观察到根外菌丝、根内菌丝、泡囊、丛枝、菌丝圈和侵入点的占比分别为 93.33%、100.00%、80.00%、100.00%、20.00% 和 40.00%。对照组 (CK) 未观察到真菌侵染的情况。菌株侵染资阳香橙的根外菌丝、根内菌丝、泡囊结构及丛植结构的染色图像如图 1 所示。

表 2 资阳香橙接种不同 AMF 的根系侵染情况
Tab. 2 The infection in the roots of Ziyang Xiangcheng with different AMF

编号 No.	根外菌丝/% external hyphae	根内菌丝/% internal hyphae	泡囊/% vesicles	丛枝/% arbuscule	菌丝圈/% hypha circle	侵入点数量 No. of entry	总侵染率/% total infection rate
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
RF1	2.63	81.27	0.00	67.83	0.00	0.00	81.27
AR	0.50	73.67	4.83	63.17	0.00	0.00	73.70
SV	0.20	72.67	13.83	69.83	0.00	0.23	72.67
AS	0.40	62.67	7.57	58.33	0.00	0.00	62.67
CE	10.87	58.27	18.50	52.27	0.00	0.20	58.93
RF2	0.37	57.23	14.60	42.50	0.00	0.00	57.23
RI	0.93	57.17	4.87	53.00	0.03	0.07	57.17
RM	0.27	51.03	0.00	48.67	0.50	0.00	51.03
FM	2.93	48.57	0.00	25.67	0.17	1.37	49.43
AE	1.00	48.67	7.23	45.70	0.00	0.27	48.67
GS	0.57	45.87	16.60	33.33	0.00	0.33	45.93
PB	1.00	41.33	18.53	41.33	0.00	0.00	41.50
CL	0.20	31.00	1.70	31.00	0.00	0.00	31.03
AB	0.23	24.67	8.17	17.17	0.00	0.00	24.77
AD	0.00	8.57	5.20	6.00	0.00	0.00	8.57
平均 average	1.47	50.84	8.11	43.72	0.05	0.16	50.97



注: a) AMF 形成的根外菌丝; b) AMF 形成的根内菌丝和泡囊; c) AMF 的丛枝结构。

Note: a) external hyphae of AMF; b) internal hyphae and vesicles of AMF; c) arbuscule of AMF.

图1 AMF 侵染资阳香橙根系

Fig. 1 The infection of AMF in Ziyang Xiangcheng roots

2.2 不同 AMF 菌株对资阳香橙生长的影响

2.2.1 对株高的影响

由图2可知: 对照组植株株高为 30.57 cm, 15 株菌株处理后植株的平均株高为 36.90 cm。其中, 菌株 CE、FM、RF1、SV、RI 和 GS 处理的植株株高均显著高于对照组 ($P<0.05$), 菌株 AD 和 AE 处理的植株株高显著低于对照组 ($P<0.05$), 其他处理组的株高与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

2.2.2 对茎粗的影响

由图2可知: 对照组植株茎粗为 2.63 mm, 15 株菌株处理后的植株平均茎粗为 2.88 mm。其中, 菌株 CE、RI、FM、SV 和 RF1 处理的植株茎粗均显著高于对照组 ($P<0.05$), 菌株 AD 处理的植株茎粗显著小于对照组 ($P<0.05$), 其他处理组的茎粗与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

2.2.3 对叶片数的影响

由图2可知: 对照组的叶片数为 26.65, 15 株菌株处理后植株的平均叶片数为 27.18。其中, 菌株 CE、FM、SV、GS 和 AR 处理的植株叶片数均显著高于对照 ($P<0.05$), 菌株 AE 和 AD 处理的植株叶片数显著少于对照 ($P<0.05$), 其他处理组的叶片数与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

2.2.4 对叶绿素 SPAD 值的影响

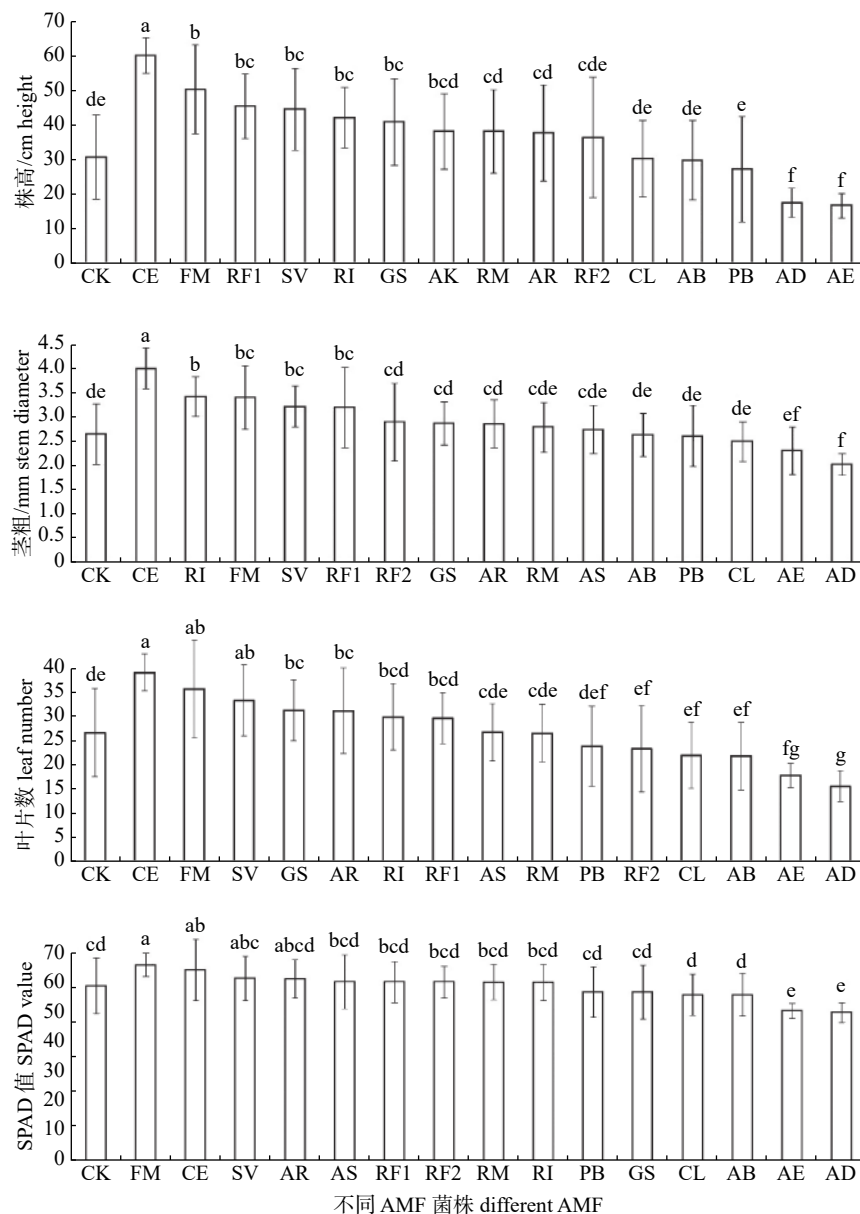
由图2可知: 对照组的 SPAD 值为 57.66, 15 株菌株处理后植株的平均 SPAD 值为 57.40。其中, 菌株 FM 和 CE 处理的植株 SPAD 值显著高于对照 ($P<0.05$), 菌株 AE 和 AD 处理的植株 SPAD 值显著低于对照 ($P<0.05$), 其他处理组的 SPAD 值与对照组无显著差异 ($P>0.05$)。

3 讨论

AMF 与 90% 以上的陆生植物根系形成菌根共生体, 促进了宿主植物水分和养分的吸收, 可改善根系构型和增强宿主植物的抗逆性^[1, 15, 20]。影

响菌根与植物根系共生的主要因素是共生双方的生物学特性及其环境因子^[21]。前人利用 4 种不同的 AMF 侵染洋葱, 其侵染速度和侵染率有明显的差异^[22], 说明不同菌株和宿主植物亲和性不同, 同时环境因子 (土壤酸碱度、理化性状和营养状况等) 均可以影响菌根侵染状况。柑橘是中国南方重要的果树之一, 其根毛少, 属于典型的丛枝菌根植物, 强烈依赖丛枝菌根对水分和养分的吸收功能^[15], 从柑橘根系能清楚地观察到泡囊、丛枝、侵入点、根内菌丝、根外菌丝和根外厚垣孢子等结构^[14]。不同柑橘品种或不同柑橘砧木对不同的菌根菌种具有明显不同的依赖性^[23]。李艳等^[24]研究表明: 不同基因型柑橘接种摩西球囊霉后, 菌根侵染率、土壤有效磷含量及土壤磷酸酶活性效应各不相同, 但均以资阳香橙的菌根效应最强, 其对摩西球囊霉的依赖性最强; 吴强胜等^[14]研究表明: 国庆 1 号温州蜜柑/枳的菌根侵染率为 16.01%~34.73%, 国庆 4 号温州蜜柑/枳的菌根侵染率为 20.65%~47.07%; 邓漂^[25]研究表明: 柑橘种苗接种摩西球囊霉和幼套球囊霉后, 根系菌根侵染率均达到 60% 以上。本研究利用从广西土壤中分离纯化获得的 15 株 AMF 接种资阳香橙种苗, 其根外菌丝、根内菌丝、泡囊、丛枝、菌丝圈和侵入点的占比分别为 93.33%、100.00%、80.00%、100.00%、20.00% 和 40.00%, 根系菌根总侵染率超过 70% 的菌株包括 SV、AR 和 RF1, 侵染率为 51%~70% 的菌株包括 RM、RI、RF2、CE 和 AS, 仅菌株 AD 的侵染率为 8.57%, 其余 6 种菌株的菌根侵染率在 20%~50%。

柑橘接种 AMF 能够改善根系构型, 促进根毛发生, 增加植物对水分和养分的吸收^[26-27], 所形成的菌根可增加植株对 H_2O_2 的清除能力, 显著增强柑橘抗旱性^[28-29]。AMF 通过诱导植物合成多种酶类、可溶性蛋白和类脂, 并调节酶活性,



注：不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: The lowercase letters mean significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同 AMF 菌株对资阳香橙生长的影响

Fig. 2 The effect on the plant growth of Ziyang Xiangcheng with different AMF

平衡植物内源激素，促进水分和矿质养分的吸收利用，增强光合作用，以提高植物抗旱性、抗病性和其他抗逆性，增加产量和改善品质^[30]。前人研究表明：幼套近明球囊霉 (*Claroideoglomus etunicatum*) 对柑橘^[31]、玉米^[32]和刺槐^[33]有一定的促生效果；摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*) 对花生^[34]、桑树^[35]、烟草^[36]、薰衣草^[37]和郁金香^[38]均有一定的促生或提高部分抗性效应。在本研究中，菌株 CE 和 FM 的菌根侵染率分别为 58.93% 和 49.43%，能够显著促进资阳香橙的生长；菌

株 CE、FM 和 SV 处理的资阳香橙株高、茎粗和叶片数均显著高于对照 ($P < 0.05$)；菌株 CE 和 FM 处理的资阳香橙叶绿素 SPAD 值显著高于对照 ($P < 0.05$)，说明菌株与寄主之间的亲和性与正效应不一定呈线性正相关。

4 结论

资阳香橙接种本研究中不同的 AMF 都能感染根系，平均侵染率为 50.97%。菌株幼套近明球囊霉 (*C. etunicatum*) 和摩西斗管囊霉 (*F. mosseae*)

对株高、茎粗、叶片数和叶绿素 SPAD 值的影响较优,说明这 2 株菌株是促进资阳香橙生长的优势菌株。

[参考文献]

- [1] 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: 227. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042110-103846.
- [2] 张映南,李润唐,谷洪源.冰糖橙低产劣质的原因及对策[J]. *中国南方果树*, 2001, 30(1): 8. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.2001.01.004.
- [3] 唐贤,梁丰,徐明岗,等.长期施用化肥对农田土壤 pH 影响的整合分析[J]. *吉林农业大学学报*, 2020, 42(3): 316. DOI: 10.13327/j.jjlau.2020.4506.
- [4] 杨杰.亚热带红壤不同施肥处理对根基土壤微生物硝化及反硝化作用的影响研究[D].长沙:湖南师范大学, 2019.
- [5] 李松硕.解淀粉芽孢杆菌 S3-1 的田间应用及表面活性素发酵工艺优化[D].上海:上海师范大学, 2017.
- [6] 陈乃祥,秦光蔚,陈爱晶.有机肥替代部分化肥对水稻产量及土壤有机质的影响[J]. *农业开发与装备*, 2018(11): 126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9205.2018.11.090.
- [7] 贾广军,郭先华,谷林静,等.AMF 接种与根系分隔对红壤上间作玉米生长及磷素吸收的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(4): 149. DOI: 10.13597/j.cnki.maize.science.2015.0426.
- [8] 冷东.丛枝菌根真菌对土壤有机物降解的影响[D].杭州:浙江大学, 2015.
- [9] 悦飞雪,李继伟,王艳芳,等.生物炭和 AM 真菌提高矿区土壤养分有效性的机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1325. DOI: 10.11674/zwyf.18511.
- [10] 陈静洁.绿肥预接种 AMF 对蔬菜生长及菌根侵染的影响[D].福州:福建农林大学, 2014.
- [11] 付先恒,岳献荣,夏运生,等.接种 AMF 对间作大豆生长及有机磷利用的影响[J]. *大豆科学*, 2016, 35(3): 442. DOI: 10.11861/j.issn.1000-9841.2016.03.0442.
- [12] 赵乾旭,史静,夏运生,等.AMF 与隔根对紫色土上玉米、大豆种间氮竞争的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(14): 2696. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.14.006.
- [13] SMITH S E, READ D J. *Mycorrhizal symbiosis*[M]. London: Academic Press, 1997.
- [14] 吴强盛,夏仁学.柑橘丛枝菌根形态结构观察[J]. *亚热带植物科学*, 2010, 39(2): 14. DOI: 10.3969/j.issn.1009-7791.2010.02.004.
- [15] WU Q S, SRIVASTAVA A K, ZOU Y N. AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164: 77. DOI: 10.1016/j.scienta.2013.09.010.
- [16] WU Q S, LIU C Y, ZHANG D J, et al. Mycorrhiza alters the profile of root hairs in trifoliate orange[J]. *Mycorrhiza*, 2016, 26: 237. DOI: 10.1007/s00572-015-0666-z.
- [17] GRAHAM J H, EISENSTAT D M. Host genotype and the formation and function of VA mycorrhizae[J]. *Plant and Soil*, 1994, 159: 179. DOI: 10.1007/BF00000107.
- [18] 刘建军,陈克玲,胡强,等.特色地方柑橘资源“资阳香橙”的初步研究[J]. *西南农业学报*, 2008, 21(6): 1658. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2008.06.049.
- [19] 王幼珊,张淑彬,张美庆.中国丛枝菌根真菌资源与种质资源[M].北京:中国农业出版社, 2012.
- [20] 吴强盛,邹英宁.柑橘丛枝菌根的研究新进展[J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(2): 279. DOI: 10.13836/j.jjau.2014044.
- [21] 张美庆,王幼珊,刑礼军.环境因子和 AM 真菌分布的关系[J]. *菌物系统*, 1999, 18(1): 25. DOI: 10.13346/j.mycosystema.1999.01.005.
- [22] SMITH F A, SMITH S E. Mutualism and parasitism: diversity in function and structure in the “arbuscular” (VA) mycorrhizal symbiosis[J]. *Advances in Botanical Research*, 1996, 22: 1. DOI: 10.1016/S0065-2296(08)60055-5.
- [23] 王明元.丛枝菌根真菌对柑橘铁吸收的效应及其作用机理[D].武汉:华中农业大学, 2008.
- [24] 李艳,吴强盛.菌根真菌对不同基因型柑橘根际有效磷含量和磷酸酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(6): 186. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2014.06.227.
- [25] 邓漂,曾明,李燕.盆栽柑桔苗接种丛枝菌根真菌的生长与钙氮吸收效应[J]. *中国南方果树*, 2016, 45(3): 55. DOI: 10.13938/j.issn.1007-1431.20150686.
- [26] LIU C Y, ZHANG F, ZHANG D J, et al. Mycorrhiza stimulates root-hair growth and IAA synthesis and transport in trifoliate orange under drought stress[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1978. DOI: 10.1038/s41598-018-20456-4.
- [27] ZHANG F, ZOU Y N, WU Q S. Quantitative estimation of water uptake by mycorrhizal extraradical hyphae in citrus under drought stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 229: 132. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.10.038.
- [28] WU Q S, ZOU Y N. Mycorrhiza has a direct effect on reactive oxygen metabolism of drought-stressed citrus[J]. *Plant Soil and Environment*, 2009, 55(10): 436. DOI: 10.1111/j.1365-3059.2009.02089.x.
- [29] HUANG Y M, SRIVASTAVA A K, ZOU Y N, et al. Mycorrhizal-induced calmodulin mediated changes in antioxidant enzymes and growth response of drought-stressed trifoliate orange[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2014, 5: 682. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00682.
- [30] 李瑞卿,刘润进,李敏.园艺作物菌根及其在生态农业的应用[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 24.
- [31] 雷卉.减量施肥下 AMF 对柑橘幼苗生长及根际土壤微生物的影响[D].重庆:西南大学, 2019.
- [32] 邱丹.接种 AM 真菌对玉米、蜈蚣草吸收转运 As 的影响[D].南宁:广西大学, 2017.
- [33] 何斐.黄土高原丛枝菌根真菌 (AMF) 提高刺槐抗旱性机制[D].杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- [34] 崔利,郭峰,唐朝辉,等.摩西斗管囊霉对连作花生叶片荧光参数及生理指标的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2020, 42(5): 851. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2019.187.
- [35] 邢丹,韩世玉,罗朝斌,等.接种丛枝菌根真菌对干旱条件下桑树生长及水分利用效率的影响[J]. *蚕业科学*, 2019, 45(4): 475. DOI: 10.13441/j.cnki.cykx.2019.04.002.
- [36] 车永梅,赵方贵,陈同金,等. AM 真菌、木霉和 PG-PR 组合的促生效应研究[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(2): 95. DOI: 10.3969/j.issn.1674-148X.2019.02.004.
- [37] 邢红爽,孙鹏飞,李峰,等.丛枝菌根真菌对薰衣草耐热性的影响[J]. *菌物学报*, 2019, 38(5): 698. DOI: 10.13346/j.mycosystema.180319.
- [38] 李文彬,卢文倩,谢佳委,等.丛枝菌根真菌对郁金香生长及其切花生理的影响[J]. *菌物学报*, 2018, 37(4): 456. DOI: 10.13346/j.mycosystema.180001.

责任编辑:何承刚