热带作物学报 2025, 46(6): 1480–1490
Chinese Journal of Tropical Crops

5 种丛枝菌根真菌对香蕉组培苗生长及枯萎病的影响

汪　靓[1,2]，张金莲[2]，康贻豪[2]，黄海思[2]，覃晓娟[2*]，蒋金平[1*]，陈廷速[2]

1. 桂林理工大学环境科学与工程学院，广西桂林　541004；2. 广西壮族自治区农业科学院微生物研究所，广西南宁　530007

摘　要：由古巴专化型尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*）引起的枯萎病是目前影响全球香蕉产业可持续健康发展最严重的病害。为筛选到对香蕉组培苗具有显著促生和抗病作用的优势丛枝菌根（arbuscular mycorrhizal, AM）真菌菌株，本研究在盆栽试验条件下对比了从广西香蕉主产区香蕉根际土壤分离的 5 种 AM 真菌对香蕉组培苗生长和枯萎病的影响。结果表明：接种 AM 真菌的香蕉组培苗根系菌根侵染率为 15.00%~95.00%，依次为 BNMJ-1 (*C. etunicatum*)>BNTJ-6 (*G. mosseae*)>HTJ2-60 (*C. lamellosum*)>BDQJ-2 (*G. fulvum*)>GZXJ-10 (*Paraglomus* sp.)；除 GZXJ-10 处理外，其他接种处理均能显著促进香蕉组培苗生长，隶属函数综合分析结果显示，BNMJ-1 处理的促生效果最为显著，其株高、茎径、叶片数、最大根长、总生物量较对照组分别增加 68.60%、44.54%、40.67%、12.05%和 65.15%，BNTJ-6 处理的促生效果次之；BNMJ-1 处理的枯萎病防治效果最佳，其次是 BNTJ-6 处理，较对照组病情指数分别下降 93.37%和 89.03%，防效分别达 93.64%和 88.85%。综上所述，供试的 5 种 AM 真菌中对香蕉组培苗促生、抗病效果较好的菌株为 BNMJ-1 和 BNTJ-6。因此，本研究筛选获得香蕉组培苗的促生抗病优势 AM 真菌菌株，为后期开发香蕉菌根种苗以及专用菌根真菌菌剂、菌肥等产品奠定基础。

关键词：香蕉；土壤；丛枝菌根真菌；促生；枯萎病

中图分类号：S668.1　　**文献标志码：**A

Effects of Five Arbuscular Mycorrhizal Fungi Species on the Growth and *Fusarium* Wilt Disease of Banana Tissue Culture Seedlings

WANG Liang[1,2], ZHANG Jinlian[2], KANG Yihao[2], HUANG Haisi[2], QIN Xiaojuan[2*], JIANG Jinping[1*], CHEN Tingsu[2]

1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China

Abstract: Wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* is currently the most serious disease affecting the sustainable and healthy development of the global banana industry. To screen superior arbuscular mycorrhizal (AM) fungi that significantly promote the growth and disease resistance of banana tissue culture seedlings, this study compared the effects of five dominant AM fungi isolated from the main banana producing areas in Guangxi on the growth and *Fusarium* wilt of banana tissue culture seedlings under pot conditions. The results showed that the mycorrhizal infection rate of banana tissue culture seedlings inoculated with AM fungi ranged from 15.00% to 95.00%, they were as follows: BNMJ-1 (*C. etunicatum*) > BNTJ-6 (*G. mosseae*) > HTJ2-60 (*C. lamellosum*) > BDQJ-2 (*G. fulvum*) > GZXJ-10 (*Paraglomus* sp.). All the inoculation treatments significantly promoted the growth of banana tissue culture seedlings except for the GZXJ-10 treatment, and the results of membership function comprehensive analysis showed that the BNMJ-1 treatment had the most significant growth-promoting effect, which increased plant height, stem diameter, number of leaves, maximum root length and total biomass by 68.60%, 44.54%, 40.67%, 12.05% and 65.15%, respectively, compared with the control, followed by the BNTJ-6 treatment. BNMJ-1 treatment was the most effective in wilt

收稿日期　2024-12-27；**接受日期**　2025-02-21

基金项目　广西自然科学基金项目（No. 2022GXNSFAA035591）；广西农业科学院基本科研业务专项（桂农科 2024YP026，桂农科 2023YM96）。

作者简介　汪　靓（2001—），女，硕士研究生，研究方向：土壤环境与污染修复。*通信作者（Corresponding author）：覃晓娟（QIN Xiaojuan），E-mail：qxj3249302@163.com；蒋金平（JIANG Jinping），E-mail：jiangjinping74@163.com。

control, followed by BNTJ-6 treatment, which decreased the disease index by 93.37% and 89.03% compared to the control and the preventive efficacy reached 93.64% and 88.85%. In summary, among the five AM fungi for testing, the strains with better disease-promoting resistance to banana seedlings grown in tissue culture were BNMJ-1 and BNTJ-6. Therefore, screening to obtain the advantageous AM fungal strains for banana tissue culture seedlings lays the foundation for the later development of banana mycorrhizal seedlings as well as special mycorrhizal fungal fungicides and fungal fertilizers.

Keywords: banana; soil; arbuscular mycorrhizal fungi; growth promoting; *Fusarium* wilt disease

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.06.020

香蕉（*Musa nana* Lour.）是热带、亚热带地区重要的果粮兼用作物，是世界鲜果贸易量最大的水果[1]，2021 年全球香蕉收获面积达 533.69 万 hm^2[2]。我国是世界重要的香蕉生产国，香蕉种植面积位居世界第六，产量居第二[3]，已成为热带作物产值最高的产业之一[4]。香蕉枯萎病是一种由古巴专化型尖孢镰刀菌（*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*）侵染香蕉根部引起植株凋萎的毁灭性真菌土传病害[5]，可使香蕉植株黄化萎蔫、维管束褐变至整株枯亡[6]，在无寄主的情况下，病原菌以厚垣孢子的形式在土壤中能存活长达 30 a[7-8]，目前尚无有效的化学农药和优质高抗香蕉品种对该病害进行彻底防控[9]，是当前全球香蕉产业可持续健康发展的主要制约因素[10]。生物防治是一种安全、环境友好且有潜力的植物病害防控方法，被认为是目前防治香蕉枯萎病的有效工具和重要策略[11]，已成为近年香蕉枯萎病防控研究的热点。

丛枝菌根（arbuscular mycorrhizal, AM）真菌是一种具有重要生态功能的土壤真菌，能与 80%的高等植物根系形成互惠共生体——丛枝菌根[12]。AM 真菌与植物根系共生后，在植物根际形成庞大的菌丝网络系统，协助宿主植物获取根际的碳、氮养分和水分[13]，稳定并改善根际土壤团粒结构，修复土壤生态[14]，从而促进植物生长、提高植物产量和宿主抗病抗逆性，AM 真菌是农业生产上防控土传病害的重要有益微生物资源[15-16]。已有研究证明，接种摩西球囊霉（*G. mosseae*）、根内球囊霉（*G. intraradices*）和幼套球囊霉（*G. etunicatum*）可显著促进茅苍术苗的营养生长，对根腐病的防效高达 62.94%[17]。接种摩西球囊霉（*G. mosseae*）可显著增加番茄幼苗地上部鲜质量、干质量，降低根结线虫病病情指数[18]。接种根内孢囊霉（*R. intraradices*）可显著提高枸杞株高、茎粗、鲜质量和总叶绿素含量，对根腐病的防治效果达 62.79%[19]。接种 AM 真菌可显著增加香蕉植株地上部分和根系的干质量[20]，显著减少根际土壤周围尖孢镰刀菌数量，降低香蕉枯萎病发病率和病情指数[21-23]，且混合接种剂的促生和防病效果好于单一接种剂[24]。

目前已证实的可有效控制植物土传病害的 AM 真菌超过 30 种[25]，但不同的 AM 真菌对同一种植物所表现的效果不同，宿主植物和 AM 真菌之间存在相互选择性[26]。广西是我国重要的香蕉主产区及优质货源地，本研究从广西香蕉主产区的香蕉植株根际土壤中分离获得 5 种 AM 真菌菌株，在温室盆栽条件下探讨其对香蕉组培苗生长及枯萎病的影响，筛选获得目标优势 AM 真菌菌株，以期为利用 AM 真菌改善蕉园土壤生态和实现香蕉枯萎病的绿色防控提供科学依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　材料

香蕉组培苗：桂蕉 1 号，购自广西植物组培苗有限公司。

花盆：盆口直径 12.0 cm、盆高 10.5 cm、底部直径 5.0 cm，用多菌灵浸泡处理；基质：以育苗有机质∶沙∶土=2∶1∶1 混匀，然后装入灭菌袋中进行高压蒸汽灭菌，温度为 121 ℃，时间 120 min。

供试菌株：AM 真菌由广西农业科学院微生物研究所分离、保存、扩繁，具体菌株编号及名称见表 1。病原菌（尖孢镰刀菌古巴专化型 4 号生理小种，FOC4）由广西农业科学院植物保护研究所香蕉病害研究团队提供。

1.2　方法

1.2.1　试验设计　2023 年 8 月在广西农业科学院微生物研究所温室进行盆栽试验。选取 4~5 叶龄且长势一致的香蕉苗移栽于花盆。共设置 6 个处

理，以未接种 AM 真菌的处理作为对照（CK），处理组分别接种 5 种 AM 真菌（表 1），每个处理 3 个重复，每个重复 12 株蕉苗。移栽时，先在花盆底部垫一张与底部大小一致的纸片，加入花盆 1/2 灭菌基质。在植株根围放置 AM 真菌接种体，接种量约为 300 个孢子/盆，使其与根系充分接触，继续加入基质至花盆 3/4，并确保基质覆盖香蕉根系，浇足定根水；CK 中加入用于扩繁 AM 真菌的灭菌基质。每盆按照菌株编号做好标记，干湿交替法浇水，每 2 周补充 1 次 Hoagland 营养液。

表 1 供试菌株

Tab. 1 Test strains

菌株编号 Strain No.	中文名 Chinese name	学名 Scientific name	菌株来源 Source of strain
BDQJ-2	黄球囊霉	*Glomus fulvum*	分离自南宁市丁当镇德清农场香蕉园
BNMJ-1	幼套球囊霉	*Claroideoglomus etunicatum*	分离自南宁市那马镇香蕉园
BNTJ-6	摩西球囊霉	*Glomus mosseae*	分离自南宁市那桐镇香蕉园
HTJ2-60	层状近明球囊霉	*Claroideoglomus lamellosum*	分离自南宁市武鸣区华侨农场香蕉园
GZXJ-10	类球囊霉属	*Paraglomus* sp.	分离自百色市祥周镇香蕉园

1.2.2 项目测定及方法 （1）香蕉根系采集。用剪刀剪下约 1/3 香蕉根系，采集老、嫩、粗、细各种根段，用自来水清洗干净后再用去离子水清洗数次，浸泡于 50%酒精中保存，用于观察 AM 真菌的侵染情况。

（2）根系染色及侵染率测定。分别于接种 30、60 d 后，采集香蕉根系。参考覃晓娟等[27]的墨水醋染色法对根系进行染色，参考 TROUVELOT 等[28]的方法检测根系，使用尼康 Eclipse Ci-L 和 Ds-Ri2 观察菌根侵染情况。用侵染率、侵染强度、相对丛枝丰度 3 个参数描述菌根侵染状况。

（3）生长性状。接种 60 d 后采样，每处理取 12 株蕉苗。测定各处理的株高、茎径、有效叶片数和最大根长。从香蕉植株球茎至最上端叶片分叉处的距离为株高，采用游标卡尺测量距根部 5 cm 处的茎围粗为茎径，有效叶片数为除子叶外的所有成熟叶片数量，采用直尺量取最长主根或侧根垂直长度为最大根长。

（4）生物量。接种 60 d 后，用自来水将植株洗净，将植株地上部与地下部分装至信封袋于 105 ℃烘箱内杀青 30 min、70 ℃烘干至恒重后称得干质量，并在生物量的基础上，计算菌根依赖性指数（MD）[29]。计算公式如下：

$$MD=\frac{\text{接种株生物量}}{\text{未接种株生物量}}\times 100\%$$

根据 NEMEC[30]的分类方法，可将植物对菌根的依赖程度分为 3 级：MD≥300%，为高强度依赖；200%≤MD<300%，为中等强度依赖；100%≤MD<200%，为弱依赖或无依赖。

（5）AM 真菌的盆栽防效测定。接种 AM 真菌 60 d 后，选取长势良好的蕉苗进行病原菌接种，每个处理设置 3 个重复，每个重复取 8 株蕉苗。接种时，用解剖刀沿香蕉根围进行对称伤根处理，每株蕉苗接种 40 mL 孢子浓度为 1×10^6 个/mL 的尖孢镰刀菌分生孢子悬浮液。常规管理，接种病原菌 21 d 后，调查发病情况，计算各处理发病率、病情指数和防治效果。依据蕉苗球茎纵剖面的褐变面积占比确定病级：0 级为球茎无褐变；球茎褐变面积≤25%为 1 级；25%<球茎褐变面积≤50%为 3 级；50%<球茎褐变面积≤75%为 5 级；球茎褐变面积>75%为 7 级[31]。

发病率=发病植株数/总株数×100%

$$\text{病情指数}=\frac{\sum(\text{各级发病株数}\times\text{该级代表值})}{(\text{总株数}\times\text{最高级代表值})}\times 100$$

$$\text{防治效果}=\frac{(\text{对照病情指数}-\text{处理病情指数})}{\text{对照病情指数}}\times 100\%$$

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 软件对数据进行整理，用 SPSS 24.0 软件进行方差分析、相关性分析，采用最小显著差异（LSD）法进行多重比较。

根据周福平等[32]运用的模糊数学中的隶属函数法对不同性状指标进行综合分析。首先求出各指标隶属函数值，然后进行累加并求其平均值，平均值越大，则说明该菌株的促生效果越好，从而筛选出香蕉优势 AM 真菌菌株。隶属函数值计算公式如下：

$$\text{隶属函数值}=\frac{(X-X_{\min})}{(X_{\max}-X_{\min})}\times 100\%$$

式中，X 为某一指标的测定值，$X_{\min}$ 为某一指标测定值中的最小值，$X_{\max}$ 为某一指标测定值中的最大值。

2　结果与分析

2.1　接种不同 AM 真菌的香蕉组培苗根系侵染情况

不同 AM 真菌对香蕉根系侵染情况如表 2 所示。供试的 5 株 AM 真菌均能侵染香蕉根系，但不同菌株之间的侵染率、侵染强度和丛枝丰度均存在差异。在接种 60 d 时，菌株 BNMJ-1 的侵染率、侵染强度和丛枝丰度均最高，分别为 95.00%、35.05%和 26.82%；其次为菌株 BNTJ-6，其侵染率、侵染强度和丛枝丰度分别为 80.00%、24.65%和 15.07%；菌株 GZXJ-10 的侵染率、侵染强度和丛枝丰度最低，分别为 15.00%、3.60%和 1.80%，CK 未检测到 AM 真菌侵染。AM 真菌菌丝、泡囊和丛枝结构的侵染染色情况见图 1。

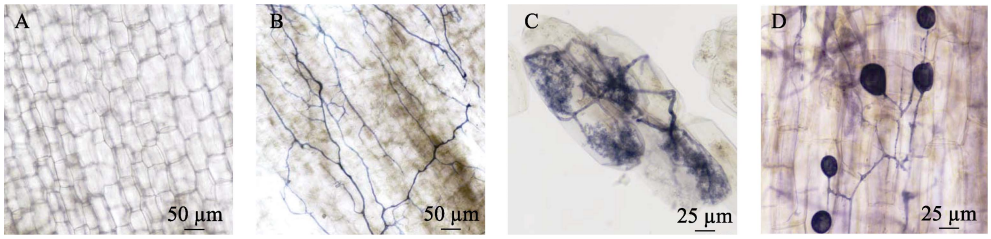
表 2　不同 AM 真菌对香蕉根系的侵染情况

Tab. 2　Infection status of different AM fungi on banana root system　%

处理 Treatment	30 d			60 d		
	侵染率 Infection rate	侵染强度 Colonization intensity	丛枝丰度 Arbuscular abundance	侵染率 Infection rate	侵染强度 Colonization intensity	丛枝丰度 Arbuscular abundance
CK	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
BDQJ-2	12.84±2.25^{b}	4.48±1.12^{c}	0.17±0.16^{c}	39.33±4.30^{c}	8.63±1.49^{c}	4.30±0.21^{c}
BNMJ-1	36.11±5.81^{a}	11.42±1.88^{a}	9.10±1.60^{a}	95.00±3.04^{a}	35.05±5.98^{a}	26.82±1.22^{a}
BNTJ-6	32.76±5.14^{a}	8.56±0.63^{b}	3.59±0.84^{b}	80.00±3.72^{b}	24.65±4.47^{b}	15.07±1.16^{b}
HTJ2-60	6.80±1.41^{c}	1.00±0.45^{d}	0.13±0.12^{c}	40.00±6.01^{c}	4.88±1.49^{cd}	2.29±0.24^{d}
GZXJ-10	4.26±0.43^{cd}	0.81±0.26^{d}	0.00±0.00^{c}	15.00±1.80^{d}	3.60±0.93^{cd}	1.80±0.29^{d}

注：同列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 between different treatments (P<0.05).



A：CK；B：菌丝；C：丛枝；D：泡囊。

A: CK; B: Hyphae; C: Arbuscular; D: Vesicles.

图 1　香蕉根系 AM 真菌侵染

Fig. 1　Infection of AM fungi in banana roots

2.2　不同 AM 真菌对香蕉组培苗营养生长的影响

由表 3 可知，接种菌株 BDQJ-2、HTJ2-60 的香蕉各项营养生长指标均显著高于 CK（P<0.05），BNMJ-1、BNTJ-6 处理组的株高、茎径、叶片数均显著高于 CK（P<0.05），其最大根长略高于 CK，但差异不显著。而 GZXJ-10 处理的株高、叶片数和最大根长均显著低于 CK（P<0.05），茎径略低于 CK，差异不显著。可见，接种菌株 BDQJ-2、BNMJ-1、BNTJ-6、HTJ2-60 均能有效促进香蕉组培苗生长，其中以菌株 BNMJ-1 和 BNTJ-6 的促生效果最为显著，与 CK 相比，株高分别增加了 68.60%和 76.30%，茎径分别增加了 44.54%和 38.05%，叶片数分别增加了 40.67%和 44.44%，最大根长分别增加了 12.05%和 4.48%。

接种菌株 BDQJ-2、BNMJ-1、BNTJ-6、HTJ2-60 均能显著增加香蕉组培苗地上干质量、地下干质量和生物量，其中 BNMJ-1、BNTJ-6 处理的地上干质量增加效果显著（P<0.05），较 CK 分别提高了 61.45%和 62.79%；以 BNMJ-1、BNTJ-6 和 HTJ2-60 处理的地下干质量增加效果显著（P<

0.05），较 CK 分别提高了 65.71%、62.50%和 66.67%；以 BNMJ-1 处理的生物量增加效果显著（P<0.05），较 CK 提高了 65.15%。GZXJ-10 处理的地上干质量和生物量略低于 CK，但无显著差异，地下干质量显著低于 CK（P<0.05）。香蕉组培苗对不同接种处理的菌根依赖性存在差异，以接种菌株 BDQJ-2、BNMJ-1、BNTJ-6、HTJ2-60 处理的菌根依赖性较高，达到中度依赖级别，MD 指数依次为 224%、287%、248%、222%，而 GZXJ-10 的菌根依赖级别较弱，MD 指数仅为 78%（表 4）。

表 3 不同 AM 真菌对香蕉组培苗生长的影响

Tab. 3 Influence of different AM fungi on the growth of banana tissue cultured seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎径 Stem diamete/cm	叶片数 Leaf number	最大根长 Maximum root length/cm
CK	6.88±0.97^{c}	5.86±1.30^{b}	4.50±1.09^{b}	12.95±3.12^{b}
BDQJ-2	9.86±0.28^{b}	8.68±0.88^{a}	6.25±1.29^{a}	15.14±1.16^{a}
BNMJ-1	11.60±1.47^{a}	8.47±0.93^{a}	6.33±0.49^{a}	14.51±1.93^{ab}
BNTJ-6	12.13±1.30^{a}	8.09±0.50^{a}	6.50±0.91^{a}	13.53±1.77^{ab}
HTJ2-60	10.07±1.03^{b}	8.25±0.95^{a}	5.92±0.67^{a}	15.31±2.04^{a}
GZXJ-10	5.87±0.62^{d}	5.66±0.53^{b}	3.50±1.17^{c}	8.99±1.68^{c}

注：同列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 between different treatments (P<0.05).

表 4 不同 AM 真菌对香蕉组培苗生长质量指标的影响

Tab. 4 Influence of different AM fungi on the growth quality indicators of banana tissue cultured seedlings

处理 Treatment	地上干质量 Aboveground dry weight/g	地下干质量 Underground dry weight/g	生物量 Biomass/g	MD/%	MD 级别 MD level
CK	0.32±0.10^{c}	0.12±0.04^{c}	0.46±0.06^{d}		
BDQJ-2	0.77±0.17^{ab}	0.24±0.05^{b}	1.03±0.13^{c}	224	中
BNMJ-1	0.83±0.11^{a}	0.35±0.06^{a}	1.32±0.11^{a}	287	中
BNTJ-6	0.86±0.20^{a}	0.32±0.06^{a}	1.14±0.08^{b}	248	中
HTJ2-60	0.66±0.16^{b}	0.36±0.10^{a}	1.02±0.10^{c}	222	中
GZXJ-10	0.25±0.07^{c}	0.04±0.01^{d}	0.36±0.08^{d}	78	弱

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant difference between different treatments (P<0.05).

通过对各处理的蕉苗生长指标和生物量等进行隶属函数分析，除 GZXJ-10 处理外，其他接菌处理的隶属函数平均值均高于 CK（表 5）。可见，除了菌株 GZXJ-10 对香蕉组培苗生长具有抑制作用外，其余菌株均能促进植株生长，促生效果依次为 BNMJ-1>BNTJ-6>BDQJ-2>HTJ2-60（图 2）。

表 5 隶属函数值及综合排名

Tab. 5 Membership function value and comprehensive ranking

处理 Treatment	隶属函数值 Membership function value									排名 Order
	株高 Plant height	茎径 stem diamete	叶片数 Leaf number	最大根长 Maximum root length	地上干质量 Aboveground dry weight	地下干质量 Underground dry weight	生物量 Biomass	MD	平均函数值 Average function value	
CK	0.16	0.07	0.33	0.63	0.11	0.25	0.10	0.11	0.22	5
BDQJ-2	0.64	1.00	0.92	0.97	0.85	0.63	0.70	0.70	0.80	3
BNMJ-1	0.92	0.93	0.94	0.87	0.95	0.97	1.00	1.00	0.95	1
BNTJ-6	1.00	0.80	1.00	0.72	1.00	0.88	0.81	0.81	0.88	2
HTJ2-60	0.67	0.86	0.81	1.00	0.67	1.00	0.69	0.69	0.79	4
GZXJ-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6

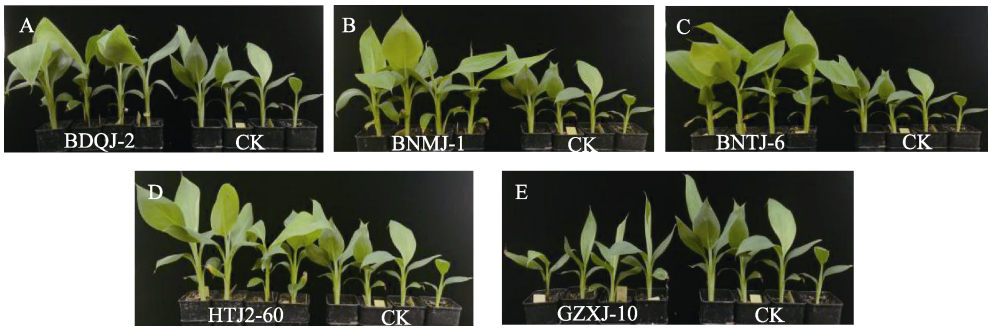


图 2　不同 AM 真菌对香蕉组培苗的促生效果

Fig. 2　Effects of different AM fungi on the growth of banana tissue cultured seedlings

2.3　不同 AM 真菌对香蕉组培苗枯萎病发生和防效的影响

香蕉组培苗接种枯萎病菌 21 d 后，CK 的病情指数最高，为 53.33，接种 AM 真菌的各处理的病情指数均有所下降，其中菌株 BNMJ-1、BNTJ-6、HTJ2-60 达到显著差异（P<0.05，表 6），病情指数由低到高为 BNMJ-1<BNTJ-6<HTJ2-60<BDQJ-2<GZXJ-10<CK。植株枯萎病发病情况见图 3，5 个 AM 真菌对香蕉枯萎病均有一定的防治效果，其中以菌株 BNMJ-1 和 BNTJ-6 的防治效果较好，防效分别达 93.64%和 88.85%。

2.4　香蕉组培苗生长和病情指数与菌根侵染的相关性

通过相关性分析表明（表 7），侵染率与株高和生物量呈显著正相关（P<0.05），与病情指数呈极显著负相关（P<0.01），与茎径、叶片数和最大根长均无显著相关性；侵染强度、丛枝丰度与株高、茎径、叶片数、最大根长、地下干质量和生物量均无显著相关性，而与病情指数呈极显著负相关（P<0.01）。

表 6　不同 AM 真菌对香蕉枯萎病发生和防效的影响

Tab. 6　Influence of different AM fungi on incidence and disease prevention effect of banana wilt disease

指标 Index	CK	BDQJ-2	BNMJ-1	BNTJ-6	HTJ2-60	GZXJ-10
病情指数	53.33±2.89^{a}	49.00±6.56^{ab}	3.33±1.53^{c}	5.85±2.42^{c}	42.89±3.39^{b}	50.10±1.85^{a}
防效/%		7.87±13.63^{b}	93.64±3.28^{a}	88.85±5.18^{a}	15.19±0.81^{b}	5.88±6.10^{b}

注：同行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 row indicate significant difference between different treatments (P<0.05).

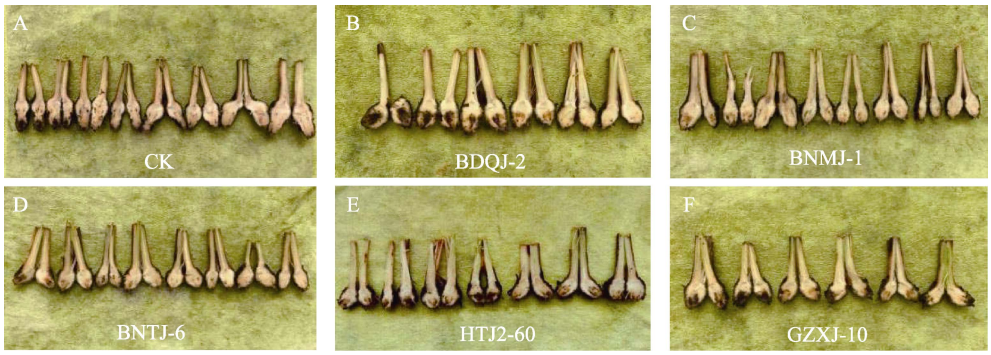


图 3　不同 AM 真菌对香蕉组培苗球茎褐变的影响

Fig. 3　Influence of different AM fungi on browning of banana seedling corms

3　讨论

AM 真菌和宿主植物之间存在一定的相互选择性[33]，良好的共生关系是发挥菌根效应的基础。根系侵染率反映了 AM 真菌在植物根系内的生长和发育情况，是宿主植物与 AM 真菌共生关系的重要指标，侵染率越高说明共生关系越好[34-35]。本研究中的 5 株 AM 真菌均能侵染香蕉根系，形成菌根结构，其中菌株 BNMJ-1 和 BNTJ-6 表现

表 7 不同 AM 真菌处理香蕉组培苗生长和病情指数与菌根侵染的相关性

Tab. 7 Correlation between growth and disease index of banana tissue cultured seedlings treated with different AM fungi and mycorrhizal infection

项目 Item	株高 Plant height	茎径 Stem diamete	叶片数 Leaf number	最大根长 Maximum root length	地下干质量 Underground dry weight	生物量 Biomass	病情指数 Disease index
侵染率	0.908*	0.751	0.785	0.449	0.789	0.903*	–0.945**
侵染强度	0.793	0.587	0.651	0.308	0.635	0.792	–0.963**
丛枝丰度	0.734	0.534	0.592	0.287	0.598	0.754	–0.937**

注：*表示显著相关（$P<0.05$）；**表示极显著相关（$P<0.01$）。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

出较高的侵染水平，侵染率分别达到 95.00%和 80.00%，说明这 2 株 AM 真菌与香蕉的共生关系较强，为菌根效应的充分发挥奠定了基础。

AM 真菌能促进宿主植物的营养生长，改善植物的产量和品质[36-39]，并在诱导植物抗病性方面作用显著[40-41]。已有多项研究表明，摩西球囊霉（*G. mosseae*）对植物具有显著的促生抗病作用，有较好的应用前景。杨凡等[42]在黄瓜育苗过程中接种摩西球囊霉，结果显示，与未接种处理相比，接种处理的壮苗指数和最大侧根长分别增加了 46.34%和 62.45%，枯萎病的发病率和病情指数分别降低了 87.14%和 80.27%。周昱[16]研究发现，接种摩西球囊霉对白皮云杉的促生和抗病效果最佳，株高、径粗、地径及地上部干质量较对照分别增加了 53.31%、25.11%、71.46%、71.42%，根腐病病情指数下降 37.53%。曹敏等[17]研究表明，摩西球囊霉、根内球囊霉（*G. intraradices*）和幼套球囊霉（*G. etunicatum*）对茅苍术苗均具有促生和抗病效应，其中幼套球囊霉的促生作用最为显著，摩西球囊霉对地下部物质积累的促进作用更大，摩西球囊霉和幼套球囊霉对根腐病的防治效果较好。本研究结果表明，除 GZXJ-10 外，其他菌株处理均能促进香蕉组培苗生长，并降低枯萎病病情指数，从隶属函数分析来看，促生效果最好的菌株为 BNMJ-1，其株高、茎径、叶片数、最大根长、总生物量比 CK 分别增加 68.60%、44.54%、40.67%、12.05%和 65.15%，菌株 BNTJ-6 的促生作用次之，本结果与前人的研究[16-17, 42]具有一定的相似性。菌根依赖性是一种衡量植物对菌根真菌生长效应的指标，MD 值越大，说明菌根真菌对植物的生长促进效应就越显著[43]。本研究中，促生作用较明显的菌株 BDQJ-2、BNMJ-1、BNTJ-6 和 HTJ2-60，其 MD 值均大于 200，达到中度依赖级别，进一步表明这些菌株对香蕉组培苗的生长具有促进效应，能积累更多的生物量；防治效果最好的菌株是 BNMJ-1,其次是 BNTJ-6，其病情指数比 CK 分别下降 93.37%、89.03%，防效分别达到 93.64%和 88.85%。梁昌聪等[44]研究表明，接种 AM 真菌能够降低巴西蕉枯萎病的发病率和病情指数，且混合接种摩西球囊霉、聚丛球囊霉（*G. aggregatum*）、幼套球囊霉比单接种摩西球囊霉的抗病效果要明显，其病情指数较对照降低 70.00%，病情指数的降幅略低于本研究，其原因可能是不同 AM 真菌与特定植物的亲和性不同导致其侵染率存在差异，进而造成对植物生物量和抗病性的影响存在明显差异。

本研究相关分析显示，侵染率与株高、生物量呈显著正相关，与病情指数呈极显著负相关，说明随着侵染率的增加,植物菌根化程度也随之提高，AM 真菌对植物生长的促进作用也越明显[45]，该结果与张延旭等[29]和李侠等[46]的研究结果一致。有研究表明，AM 真菌抵御植物土传病害的前提是在病原物入侵之前 AM 真菌与植物间已形成菌根并发育良好[47]，且 AM 真菌抗病性的诱导依赖于较高的菌根侵染率（>50%）[48-49]。本研究中抗病效果较好的菌株 BNMJ-1、BNTJ-6 在香蕉根系的侵染率均远高于 50%，抗病效果较差的菌株 BDQJ-2、HTJ2-60 和 GZXJ-10 的侵染率均低于 50%，与前人研究结果[48-49]一致。综上所述，可选择 BNMJ-1、BNTJ-6 作为香蕉绿色生态栽培应用的备选优势 AM 真菌菌株。

4 结论

本研究在盆栽条件下，以从香蕉根际土壤中分离筛选到的 5 种 AM 真菌为供试菌株，对比了不同 AM 真菌对香蕉组培苗的促生和抗病作用，结果表明，接种 AM 真菌可显著促进香蕉组培苗的生长，降低香蕉植株枯萎病病情指数，提高枯

萎病的防控效果，以供试菌株 BNMJ-1 和 BNTJ-6 的促生和抗病效果最佳。因此，今后可将菌株 BNMJ-1 和 BNTJ-6 作为香蕉促生和枯萎病防控的备选 AM 真菌优势菌株，为后期开发菌根种苗以及专用菌根真菌菌剂、菌肥产品，实现香蕉产业的绿色生态健康发展奠定基础。

参考文献

[1] ZHANG L, YUAN L B, STAEHELIN C, LI Y, RUAN J X, LIANG Z W, XIE Z P, WANG W, XIE J H, HUANG S Z. The LYSIN MOTIF-CONTAINING RECEPTOR-LIKE KINASE 1 protein of banana is required for perception of pathogenic and symbiotic signals[J]. New Phytologist, 2019, 223(3): 30-46.

[2] 农业农村部科技教育司, 财政部科教和文化司, 农业农村部科技发展中心. 中国农业产业技术发展报告 2022[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2023.
Department of Science, Education and Culture, Ministry of Finance, Science and Technology Development Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China agricultural industry technology development report 2022[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2023. (in Chinese)

[3] 王芳, 谢江辉. 我国香蕉产业“十三五”回顾与“十四五”展望[J]. 中国热带农业, 2022(3): 15-22.
WANG F, XIE J H. Review of Chinese banana industry during the 13th Five-Year Plan period and outlook of this industry during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Tropical Agriculture, 2022(3): 15-22. (in Chinese)

[4] 张妙宜, 周登博, 起登凤, 魏永赞, 陈宇丰, 冯筠庭, 王尉, 谢江辉. 香蕉枯萎病综合防控研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2024, 54(10): 1843-1852.
ZHANG M Y, ZHOU D B, QI D F, WEI Y Z, CHEN Y F, FENG J T, WANG W, XIE J H. Research progress on the integrated control of *Fusarium* wilt disease in banana[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2024, 54(10): 1843-1852. (in Chinese)

[5] 李晓娜, 曾小红, 张慧坚, 李一萍, 曾安逸, 董定超, 曾筱芬, 谢龙莲. 世界香蕉枯萎病防治研究进展[J]. 中国热带农业, 2017(6): 71-73.
LI X N, ZENG X H, ZHANG H J, LI Y P, ZENG A Y, DONG D C, ZENG X F, XIE L L. Research progress on the control of banana wilt worldwide[J]. China Tropical Agriculture, 2017(6): 71-73. (in Chinese)

[6] 周红玲, 陈石, 郑加协. 香蕉抗枯萎病机理的研究进展[J]. 中国园艺文摘, 2013, 29(1): 55-57.
ZHOU H L, CHEN S, ZHENG J X. Research progress on the mechanism of banana resistance to *Fusarium* wilt[J]. Chinese Horticulture Abstract, 2013, 29(1): 55-57. (in Chinese)

[7] 张俊芳, 李铮, 李晓慧. 香蕉抗枯萎病研究现状及展望[J]. 热带农业科学, 2015, 35(12): 108-112.
ZHANG J F, LI Z, LI X H. Current situation and prospects of banana resistance to *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2015, 35(12): 108-112. (in Chinese)

[8] PLOETZ R C. *Fusarium* wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp *cubense*[J]. Phytopathology, 2006, 96(6): 653-656.

[9] 张妙宜, 陈志杰, 陈宇丰, 冯仁军, 高祝芬, 张锡炎. 1 株拮抗细菌的分离鉴定及其对香蕉枯萎病等病原菌的抑制活性测定[J]. 热带作物学报, 2017, 38(11): 2151-2159.
ZHANG M Y, CHEN Z J, CHEN Y F, FENG R J, GAO Z F, ZHANG X Y. Screening, identification of an antagonistic bacteria and determinning a method to inhibit 12 pathogenic fungus, such as *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(11): 2151-2159. (in Chinese)

[10] DITA M, BARQUERO M, HECK D, MIZUBUTI E S G, STAVER C P. *Fusarium* wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1468.

[11] BUBICI G, KAUSHAL M, PRIGIGALLO M I, CABANÁS C G L, MERCADO-BLANCO J. Biological control agents against *Fusarium* wilt of banana[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10(11): 616.

[12] WALDER F, VAN DER HEIJDEN M G A. Regulation of resource exchange in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Nature Plants, 2015, 1(11): 1-7.

[13] WU S L, FU W, RILLIG M C, CHEN B D D, ZHU Y G, HUANG L B. Soil organic matter dynamics mediated by arbuscular mycorrhizal fungi: an updated conceptual framework[J]. New Phytologist, 2024, 242(4): 1417-1425.

[14] ZHANG H J, DONG L Z, YAO X D, WANG W. Soil fertility shifts the relative importance of saprotrophic and mycorrhizal fungi for maintaining ecosystem stability[J]. Global Change Biology, 2023, 29(4): 1206-1216

[15] 侯劭炜, 胡君利, 吴福勇, 林先贵. 丛枝菌根真菌的抑病功能及其应用[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(5): 941-951.
HOU S W, HU J L, WU F Y, LIN X G. Bio-fertilizer optimization and its control effect on banana *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(5): 941-951. (in Chinese)

[16] 周昱. 不同丛枝菌根真菌对云杉生长及根腐病的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 102-105.
ZHOU Y. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of spruce and root rot[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(14): 102-105. (in Chinese)

[17] 曹敏, 胡开治, 刘燕琴, 杨小玉, 韩蓉蓉, 余米. 丛枝菌根真菌对茅苍术实生苗生长及根腐病发生的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2022, 49(3): 418-423.
CAO M, HU K Z, LIU Y Q, YANG X Y, HAN R R, YU M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the seedling growth and root rot of *Atractylodes lancea* (Thunb.) DC.[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2022, 49(3): 418-423. (in Chinese)

[18] 周丽颜, 陆建增, 黄馨怡, 孙兆智, 吴凤芝, 高丹美. 丛枝菌根真菌对番茄生长和根结线虫病的影响[J]. 中国蔬菜, 2024(2): 100-105.
ZHOU L Y, LU J Z, HUANG X Y, SUN Z Z, WU F Z, GAO D M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on tomato growth and root-knot nematode disease[J]. China Vegetables, 2024(2): 100-105. (in Chinese)

[19] 李柄霖, 丁德东, 何静, 李彦湘, 赵吉桃, 候彩霞, 赵倩. 丛枝菌根真菌对枸杞生长及抗根腐病的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(4): 547-552.
LI B L, DING D D, HE J, LI Y X, ZHAO J T, HOU C X, ZHAO Q. Effects of arbuscular mycorrhizal on the growth of *Lycium barbarum* and its resistance to root rot[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2022, 37(4): 547-552. (in Chinese)

[20] 姚青, 朱红惠, 羊宋贞. 丛枝菌根真菌对香蕉试管苗植株生长和矿质营养吸收的影响[J]. 果树学报, 2004(5): 425-428.
YAO Q, ZHU H H, YANG S Z. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on mineral nutrients uptake and growth of micro-propagated banana plantlets[J]. Journal of Fruit Science, 2004(5): 425-428. (in Chinese)

[21] 张敏瑜. 丛枝菌根真菌与香蕉 Foc4 的互作效应及其抗枯分子机制[D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
ZHANG M Y. Interaction effect and moleculer mechanism of AM fungi resistance to Foc4 in banana[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019. (in Chinese)

[22] JAIZME-VEGA M C, PINOCHET J. Growth response of banana to three mycorrhizal fungi in *Pratylenchus goodeyi* infested soil[J]. Nematropica, 1997, 27(1): 69-76.

[23] MOHANDAS S, MANJULA R, RAWAL R D, LAKSHMIKANTHA H C, CHAKRABORTY S, RAMACHANDRA Y L. Evaluation of arbuscular mycorrhiza and other biocontrol agents in managing *Fusarium oxysporum* f. sp *cubense* infection in banana cv. Neypoovan[J]. Biocontrol Science and Technology, 2010, 20(2): 165-181.

[24] 李岚岚, 李增平. 海南香大蕉丛枝菌根真菌研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(9): 1631-1639.
LI L L, LI Z P. Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungus associated with *Musa* spp. in Hainan province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(9): 1631-1639. (in Chinese)

[25] WENG W F, YAN J, ZHOU M L, YAO X, GAO A N, MA C, CHENG J P, RUAN J J. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi as a biocontrol agent in the control of plant diseases[J]. Microorganisms, 2022, 10(7): 1266.

[26] LEE E H, EO J K, KA K H, EOM A H. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi and their roles in ecosystems[J]. Mycobiology, 2013, 41(3): 121-125.

[27] 覃晓娟, 陈廷速, 李冬萍, 张金莲, 龙艳艳, 仇惠君. 香蕉根系丛枝菌根(AM)真菌染色方法比较[J]. 基因组学与应用生物学, 2017, 36(6): 2447-2451.
QIN X J, CHEN T S, LI D P, ZHANG J L, LONG Y Y, QIU H J. Comparison of staining methods on arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in banana roots[J]. Genomics and Applied Biology, 2017, 36(6): 2447-2451. (in Chinese)

[28] TROUVELOT A, KOUGH J, GIANINAZZI-PEARSON V. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systeme radiculaire. Recherche de methodes d'Proc estimation ayant une significantion fonctionnelle[C]//GIANINAZZI-PEARSON V, GIANINAZZI S. Physiological and genetical aspects of mycorrhizae. Paris: INRA, 1986.

[29] 张延旭, 毕银丽, 郭楠, 宋子恒, 李向磊, 苗春光. 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.
ZHANG Y X, BI Y L, GUO N, SONG Z H, LI X L, MIAO C G. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Medicago falcata*[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3815-3822. (in Chinese)

[30] NEMEC S. Response of six citrus rootstocks to three species of *Glomus*, a mycorrhizal fungus[J]. Proceedings America Phytopathological Society, 1997, 4: 127.

[31] 杜婵娟, 杨迪, 潘连富, 叶云峰, 张晋, 付岗. 香蕉枯萎病生防菌肥的优化及其防病促生效果研究[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(3): 396-404.
DU C J, YANG D, PAN L F, YE Y F, ZHANG J, FU G. Bio-fertilizer optimization and its control effect on banana *Fusarium* wilt[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2020, 36(3): 396-404. (in Chinese)

[32] 周福平, 史红梅, 张海燕, 杨彬, 闫凤霞. 应用模糊隶属函数法对高粱种质资源的农艺性状和品质性状进行综合评价[J]. 种子, 2022, 41(1): 94-98.
ZHOU F P, SHI H M, ZHANG H Y, YANG B, YAN F X.

Comprehensive evaluation of agronomic and qualitative traits of sorghum germplasm resources based on fuzzy membership function method[J]. Seed, 2022, 41(1): 94-98. (in Chinese)

[33] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 北京科学出版社, 2000.
LIU R J, LI X L. Arbuscular mycorrhiza and its applications[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

[34] 康贻豪, 张金莲, 温云英, 尚鹏祥, 莫惠捷, 宋娟, 程通, 陈廷速. 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, SHANG P X, MO H J, SONG J, CHENG T, CHEN T S. Effects of nine arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and development of *Poncirus trifoliate* Raf. and *Citrus junos*. ex Tanaka seedlings[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(9): 200-208. (in Chinese)

[35] 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.
WANG Y S, ZHANG S B, ZHANG M Q. China's arbuscular mycorrhizal fungi resources and germplasm resources[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2012. (in Chinese)

[36] 郭兰萍, 汪洪钢, 黄璐琦, 蒋有绪, 朱永官, 孔维栋, 陈保冬, 陈美兰, 林淑芳, 方志国. 泡囊丛枝菌根(AM)对苍术生长发育及挥发油成分的影响[J]. 中国中药杂志, 2006(18): 1491-1496.
GUO L P, WANG H G, HUANG L Q, JIANG Y X, ZHU Y G, KONG W D, CHEN B D, CHEN M L, LIN S F, FANG Z G. Effects of arbuscular mycorrhizae on growth and essential oil of *Atractylodes lancea*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2006(18): 1491-1496. (in Chinese)

[37] 李文彬, 卢文倩, 谢佳委, 刘艳敏, 刘润进, 郭绍霞. 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): 456-465.
LI W B, LU W Q, XIE J W, LIU Y M, LIU R J, GUO S X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and cut flower physiology of *Tulipa gesneriana*[J]. Mycosystema, 2018, 37(4): 456-465. (in Chinese)

[38] 梁雪飞, 唐梦君, 吕立新, 赵翔宇, 戴传超. 三种丛枝菌根真菌对茅苍术的生长、生理及主要挥发油成分的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(6): 1871-1879.
LIANG X F, TANG M J, LYU L X, ZHAO X Y, DAI C C. Effects of three arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) species on the growth，physiology，and major components of essential oil of *Atractylodes lancea*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(6): 1871-1879. (in Chinese)

[39] 许凌峰, 黄艳萍, 郭冬琴, 杨敏, 张杰, 赵晶晶, 周浓. 菌根真菌与不同苗龄滇重楼幼苗的共生效应[J]. 西南农业学报, 2021, 34(7): 1444-1450.
XU L F, HUANG Y P, GUO D Q, YANG M, ZHANG J, ZHAO J J, ZHOU N. Symbiotic effects of mycorrhizal fungi and different seedling ages of *Paris polyphylla* var. *yunnanensis*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(7): 1444-1450. (in Chinese)

[40] 王小坤, 郭绍霞, 李敏, 赵洪海. 丛枝菌根真菌提高植物抗病性的分子机制[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2012, 29(3): 170-175.
WANG X K, GUO S X, LI M, ZHAO H H. Molecular mechanisms of improving plant disease resistance by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2012, 29(3): 170-175. (in Chinese)

[41] 武祥玉, 崔新仪. 丛枝菌根真菌对植物生长及果实品质的影响[J]. 天津农业科学, 2016, 22(6): 116-119.
WU X Y, CUI X Y. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and fruit quality[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016, 22(6): 116-119. (in Chinese)

[42] 杨凡, 牛莉莉, 唐艳领, 马凯, 王晨阳, 米国全, 孙天梅, 史宣杰. 丛枝菌根真菌对黄瓜苗期枯萎病防治及生长的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(2): 75-80.
YANG F, NIU L L, TANG Y L, MA K, WANG C Y, MI G Q, SUN T M, SHI X J. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi on cucumber *Fusarium* wilt disease control and plug seedlings growth[J]. China Fruit & Vegetable, 2022, 42(2): 75-80. (in Chinese)

[43] 郭佳, 王丹, 黄炜, 贺佳, 代威. 不同丛枝菌根对白三叶草生长的影响[J]. 北方园艺, 2014(2): 66-70.
GUO J, WANG D, HUANG W, HE J, DAI W. Influence of different arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological and biochemical indicators of *Triolium repens*[J]. Northern Horticulture, 2014(2): 66-70. (in Chinese)

[44] 梁昌聪, 刘磊, 郭立佳, 杨腊英, 王国芬, 张建华, 黄俊生. 球囊霉属 3 种 AM 真菌对香蕉枯萎病的影响[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 731-736.
LIANG C C, LIU L, GUO L J, YANG L Y, WANG G F, ZHANG J H, HUANG J S. Effects of three arbuscular mycorrhizal fungi on *Fusarium* wilt of banana[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(4): 731-736. (in Chinese)

[45] 刘欢. 不同丛枝菌根真菌对四种植物生长特性影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
LIU H. Effect of various arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth characteristics[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[46] 李侠, 叶诚诚, 张俊伶, 李海港, 王幼珊. 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, LI H G, WANG Y S. Correlation analysis between arbuscular mycorrhizal fungi colonization indices and plant growth promoting effect[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(10): 41-53. (in Chinese)

[47] 李海燕, 刘润进, 束怀瑞. 丛枝菌根真菌提高植物抗病性的作用机制[J]. 菌物系统, 2001(3): 435-439.
LI H Y, LIU R J, SHU H R. Mechanism of increaseing plant diseae resistance by AM fungi[J]. Mycosystema, 2001(3): 435-439. (in Chinese)

[48] KHAOSAAD T, GARCíA-GARRIDO J M, STEINKELLNER S, VIERHEILIG H. Take-all disease is systemically reduced in roots of mycorrhizal barley plants[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(3): 727-734.

[49] SLEZACK S, DUMAS-GAUDOT E, PAYNOT M, GIANINAZZI S. Is a fully established arbuscular mycorrhizal symbiosis required for bioprotection of *Pisum sativum* roots against *Aphanomyces euteiches*?[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2000, 13(2): 238-241.