



研究报告

丛枝菌根真菌对不同番茄品种抗根结线虫病的影响

晋治波^{*1} 解玲² 朱正杰¹ 刘芳¹¹ 百色学院农业与食品工程学院 广西 百色 533000² 中国农业大学资源与环境学院 北京 100193

摘要:【背景】根结线虫病严重制约我国设施蔬菜的生产。丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)作为土壤中最重要有益真菌之一,可以促进植物生长,提高植物抗病性,减轻土传真菌和线虫病害的发生。在蔬菜保护地栽培中,AMF对于植物线虫病防治作用的研究受到了广泛关注。【目的】针对番茄生产中危害最严重的南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)病害问题,研究AMF和番茄品种不同组合的抗线虫效应,以期为菌根真菌作为生物防治剂和生物菌肥应用于实际生产提供技术基础。【方法】在灭菌土壤中,人工接种根结线虫,比较不同菌种 *Rhizophagus intraradices* (Ri)、*Acaulospora mellea* (Am)及菌种组合 *Rhizophagus intraradices*+*Acaulospora mellea* (Ri+Am)在不同番茄品种(感病品种蒙特卡罗和抗线虫品种仙客1号)上对南方根结线虫侵染和繁殖的影响,研究AMF对根结线虫的拮抗效应。另外,采用南方根结线虫连作发病的土壤,在感病品种蒙特卡罗上接种AMF混合菌种 Ri+Am,番茄苗移栽入连作土壤中,测定各生长指标和调查根结和卵块数量,评价接种AMF处理对根结线虫病的防治效果。【结果】在灭菌土壤中,普通番茄品种蒙特卡罗的菌根效应显著优于抗线虫番茄品种仙客1号,表现为前者单位根重的根结和卵块的数量均比对照显著降低,而后者仅降低了卵块数量;蒙特卡罗上接种 Ri+Am 混合菌种的效果优于接种单一菌种 Am 和 Ri;而仙客1号上接种 Ri 的效果更好。接种线虫也显著影响了AMF的侵染,而且对抗性品种仙客1号的影响更为明显。但除了接种 Am 的处理,大多数处理收获时菌根侵染率仍维持较高的水平(70%以上)。在连作土壤中,感病品种蒙特卡罗接种混合菌种 Ri+Am 具有较好的抗/耐线虫效应,主要表现为促进植株生长,显著降低根结和卵块数量,但菌根侵染率较灭菌土壤低,约为40%。【结论】综合以上结果,表明菌根化苗能够在一定程度上减轻根结线虫病的危害。土壤灭菌条件下,在感病和抗线虫番茄品种上接种AMF能够减轻线虫的侵染和繁殖,而且在感病品种上的防治效果更加显著。在连作土壤中,在番茄感病品种上接种AMF也表现较好的抗线虫效果。

关键词: 番茄, 丛枝菌根真菌, 南方根结线虫, 病害防治

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0200200); Natural Science Foundation of Guangxi Zhuang Autonomous Region (2019GXNSFBA245017)

***Corresponding author:** Tel: 86-776-2873301; E-mail: jinzb999@aliyun.com

Received: 05-05-2020; **Accepted:** 26-05-2020; **Published online:** 07-08-2020

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200200); 广西壮族自治区自然科学基金(2019GXNSFBA245017)

***通信作者:** Tel: 0776-2873301; E-mail: jinzb999@aliyun.com

收稿日期: 2020-05-05; **接受日期:** 2020-05-26; **网络首发日期:** 2020-08-07

Effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) in tomato cultivars

JIN Zhibo^{*1} XIE Ling² ZHU Zhengjie¹ LIU Fang¹

1 College of Agricultural and Food Engineering, Baise University, Baise, Guangxi 533000, China

2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: [Background] Root-knot nematode (RKN) disease is one of main factors constraining tomato production under greenhouse conditions in China. The arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) contribute to the control of RKN and the growth of plant. [Objective] The effects of different AMF and combined inoculation on antagonizing the infection and propagation of *Meloidogyne incognita* were evaluated in two tomato cultivars differing in nematode susceptibility. [Methods] The two cultivars, one of which was susceptible cultivar (Monte Carlo) and the other (Xianke 1) was relatively resistant to root-knot nematode infection, were inoculated respectively by *Acaulospora mellea* (Am) and *Rhizophagus intraradices* (Ri) and the mixture of the two AMF species Ri+Am in the sterilized soil before inoculating root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*. The growth of plants and the suppression to nematode infection were investigated. Furthermore, the tomato “Monte Carlo” was inoculated with the mixture of AMF and transplanted in the continuous cropping field soil infested by RKN to evaluate the effects on the growth of tomato and the protective effects against RKN. [Results] The mycorrhizal efficiency of Monte Carlo to inhibit nematodes was greater significantly than that of Xianke 1. Different AMF treatments had different inhibition effects on nematodes. The cultivar of Monte Carlo inoculated by the mixture of two AMF species Ri+Am showed higher protective effects than any single AMF inoculation treatment, while Xianke 1 inoculated by Ri was higher than other treatments. The infection of nematode also greatly influenced AMF colonization, especially to the cultivar Xianke 1. But the AMF colonization of most treatments was still up to 70% in harvest time, except for the species of Am. The tomato “Monte Carlo” inoculated with the mixture of Ri+Am significantly reduced the number of galls and egg masses of RKN in the continuous cropping field soil containing *Meloidogyne incognita*, comparing to the controls. [Conclusion] The colonization of the mixture of AMF alleviated the infestation of the nematode disease of tomato better than single AMF colonization to a certain degree. The protective effects of susceptible cultivar inoculated with AMF against nematodes were greater than those of the resistant cultivar to nematode.

Keywords: tomato (*Lycopersicon esculentum*), arbuscular mycorrhizal fungi, *Meloidogyne incognita*, disease control

随着设施蔬菜栽培面积的扩大, 由于种植结构的调整和人为因素的影响, 根结线虫的危害成为蔬菜生产上的突出问题。根结线虫分布广泛, 能够危害番茄、黄瓜、茄子、菜豆、芹菜、白菜等多种蔬菜, 我国每年由根结线虫引起各种蔬菜直接和间接危害的损失巨大^[1]。番茄是对根结线虫比较敏感的作物, 受害后一般减产较为严重。引起番茄根结线虫病的病原主要有南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)、爪哇根结线虫(*M. javanica*)、花生根结线虫(*M. arenaria*)和北方根结线虫(*M. hapla*), 在北

方大棚以南方根结线虫为主, 而在南方 4 种根结线虫均有发生^[2-3]。在防治上, 选育和利用根结线虫的抗性品种是方便、有效的方法。目前, 番茄的抗病品种一般含有抗根结线虫基因(Mi), 对 3 种常见的根结线虫抗性较好, 如南方根结线虫、爪哇根结线虫和花生根结线虫, 但不抗北方根结线虫^[4-6]。然而, 番茄品种中抗根结线虫基因资源较少, 其他防治措施如嫁接抗性砧木、物理和化学防治等, 由于成本较高、危害环境且影响品质等缺点而较少应用。

生物防治是防治植物线虫病害有效可行的方法, 近年来相关研究较多并取得了很大进展^[7]。植物病原线虫的生物防治是利用寄生或捕食性的食线虫菌物、致病性病原、捕食性动物或拮抗性的根际微生物等作为防治剂的防控措施。丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)与多种植物根系形成共生体, 不仅参与植物根系水分和矿质元素的吸收和利用, 而且能够抑制线虫的侵染, 减轻线虫对植物的危害。大量的研究表明 AMF 真菌能提高植物对于线虫的抗性。接种 AMF 可以降低线虫对根系的侵染率, 阻止线虫在根内的扩散, 限制线虫的增殖, 从而减轻发病程度^[8]。很早便有研究报道接种束球囊霉(*Glomus fasciculatus*)番茄苗可显著减轻南方根结线虫的危害^[9], 后来发现不同的 AMF 真菌对病原线虫产生的效应存在差异, 抗线虫的能力也不同^[10-11]。此外, 番茄共同接种 AMF 和不同的根际微生物菌剂对于控制南方根结线虫危害也能起到直接或间接的辅助效果^[12-13], 而关于 AMF 真菌对番茄不同抗性品种抗线虫作用的研究则较少报道。

本研究选取番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill)对根结线虫病抗性不同的两个品种——敏感品种蒙特卡罗和抗线虫品种仙客 1 号作为寄主植物, 初步评价不同的 AMF 及组合对于不同番茄品种产生单独或协同抑制根结线虫的效应, 以期利用 AMF 防控番茄根结线虫病提供技术基础。

1 材料与方法

1.1 材料

番茄品种为蒙特卡罗和仙客 1 号, 由北京市种子分公司提供。供试 AMF 为 *Rhizophagus intraradices* (丛枝菌根真菌种质资源库编号: BGC BJ09), 简称 Ri; *Acaulospora mellea* (BGC BJ02A), 简称 Am, 由北京市农林科学院植物营养与资源研究所微生物室提供, 接种剂为以高粱为宿主扩大繁殖获得, 内含菌种孢子、根段及根外菌丝的土沙混合物。对照处理接入灭菌的接种剂和 10 mL 菌剂的过滤液,

以保证非接种处理提供除菌根真菌外的与接种处理相似的微生物区系。

南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)采自发病地块, 分离鉴定后, 用单卵块在寄主植物番茄上进行培养备用, 简称 Mi。

试剂为国产分析纯。显微镜、体视显微镜, Olympus 公司; 紫外可见分光光度计, 岛津公司。

1.2 育苗与移栽

育苗基质: 草炭蛭石以体积分数 1:1 混合均匀, 经 γ 射线灭菌。

普通土壤移栽基质: 低养分含量砂壤土采自中国农业大学昌平试验站, 其基本理化性状为: pH 8.4 (CaCl_2), 有机质 1.04%, 全氮 1.2 mg/kg, 有效磷 (Olsen-P) 5.29 mg/kg, 速效钾 148.2 mg/kg。为了提高土壤透气性, 利于根结线虫发生, 培养基质中掺入河沙。使用前将河沙用去离子水冲洗数遍, 晾干。将土壤和河沙过 2 mm 筛, 按体积分数 1:1 混合均匀, 并经 γ 射线灭菌备用。

连作土壤移栽基质: 病原土采自北京市大兴区番茄种植大棚, 土壤中线虫含量为每克土壤 7.3 条。其基本理化性状为: pH 7.5 (水浸), 有机质 14.55 g/kg, 碱解氮 110.30 mg/kg, 有效磷 (Olsen-P) 169.95 mg/kg, 速效钾 108.48 mg/kg。

为了保证番茄的正常生长, 混合均匀的基质中加入 200 mg-N/kg- NH_4NO_3 、50 mg-P/kg- $\text{KH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、200 mg-K/kg- K_2SO_4 、100 mg-Mg/kg- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、5 mg-Zn/kg- $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、5 mg-Mn/kg- $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 5 mg-Cu/kg- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 作为底肥。

采用 32 孔育苗盘进行育苗。育苗时将经过 γ 射线灭菌的草炭蛭石以体积分数 1:1 混合均匀, 每个孔穴装基质 50 g、菌剂 15 g, 采用层接的接种方式, 对照则加入等量的灭菌混合接种物和 10 mL 菌种滤液。

采用容积 1.5 L 的塑料盆(直径 14 cm, 高 16 cm)作为移栽后的培养容器, 每盆加入混合土壤 1.5 kg。当番茄苗在苗盘中长到 6-7 叶 1 心时(生长 45 d),

挑选生长状况相似的番茄苗移栽，每盆一棵。番茄菌根苗移栽定植一周后采用灌根法接种根结线虫，每盆接种二龄线虫(J₂) 2 500 条，生长 45 d 后收样。

1.3 灭菌土壤及连作土壤中番茄的 AMF 与线虫接种处理

灭菌土壤试验处理分别为 2 个番茄品种蒙特卡罗和仙客 1 号，3 种 AMF 接种处理 Am、Ri 及质量分数为 1:1 的 Ri 和 Am 的混合菌剂 Ri+Am，接种和不接种根结线虫 *Meloidogyne incognita* (Mi) 2 个水平以及不接种 AMF 真菌和根结线虫的绝对对照(CK)。即 2 个番茄品种分别单独接种 AMF 真菌 Ri、Am、Ri+Am 和 Mi，共同接种 AMF 和根结线虫 Ri+Mi、Am+Mi、Ri+Am+Mi 和绝对对照(CK)，共计 16 个处理，每处理重复 5 盆，共 80 盆，随机排列。

连作土壤试验处理选取番茄品种蒙特卡罗。接种 AMF 混合菌剂 Ri+Am，连作土壤中含有线虫，不进行人工接种线虫，共计 2 个处理，每处理重复 5 盆，共 10 盆，随机排列。

在育苗时接种 AMF，培育菌根苗。在番茄菌根苗移栽定植一周后，采用灌根法接种根结线虫。将寄主植物根系用自来水冲洗干净，然后用镊子从根系上挑取根结线虫的卵块，将其放置到铺在筛子上的滤纸上，筛子下面为玻璃培养皿，培养皿中注水至刚好浸没滤纸，在培养箱中放置 2 d 后收集培养皿中的二龄线虫用于接种。收集二龄线虫悬浊液，

将其浓度调整到 300 条/mL。在番茄茎基部周围 2 cm 打出约 2 cm 深的小孔，用加样器将悬浮液打入孔中，浇水，再将孔用土盖满。

1.4 指标测定与数据分析

在番茄幼苗移栽和接种线虫后采收植物样品，分别测定株高、茎粗、植株鲜重和干重等指标，计算根冠比和壮苗指数。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化，钒钼黄比色法测定植株磷含量。

根系用 0.05% 曲利苯蓝(Trypan blue)染色，根据 Grace 和 Stribley (1991)建立的方法测定 AMF 发育状况^[14]，显微镜下观察菌根侵染率、丛枝丰度等。

根结线虫卵块数测定参考刘维志(1995)的方法^[15]，将植物根系用清水洗净后放入 0.015% Phloxine B 溶液中浸泡 15 min，然后将根系取出用清水冲洗干净，以除去根系中残余的染色剂，直接计数亮红色根结线虫卵块。

用 SAS V8 统计分析软件进行显著性测定，LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 AMF 对番茄幼苗生长和磷含量的影响

不同处理的植株在播种后 45 d 即表现出生长量的差异(表 1)，大多数情况下，接种 AMF 可以显著提高植株的根系干重、根冠比和壮苗指数，但接种单一菌种对植株的地上部干重表现出负效应；相

表 1 AMF 真菌对番茄幼苗生长的影响
Table 1 Effects of AMF on the growth of tomato seedlings

品种	处理	根冠比	壮苗指数	地上部干重	根干重
Cultivars	Treatments	Ratio of root to shoot	Health index	Shoot dry weight (g)	Root dry weight (g)
蒙特卡罗	CK	0.11c	0.21b	1.57a	0.18b
	Ri	0.19a	0.31a	1.33b	0.25a
	Am	0.16b	0.30a	1.50ab	0.24a
	Ri+Am	0.17b	0.34a	1.67a	0.28a
仙客 1 号	CK	0.13b	0.33ab	2.06a	0.27ab
	Ri	0.18a	0.35ab	1.53b	0.28ab
	Am	0.18a	0.42a	1.90a	0.34a
	Ri+Am	0.15ab	0.29b	1.61b	0.24b

注：各列不同字母为 $P<0.05$ 水平差异显著($n=4$)
Note: Means in each column followed by different letters are significantly different based on LSD test ($P<0.05$, $n=4$)

对于蒙特卡罗, 抗线虫品种仙客 1 号的菌根响应相对较弱。接种 AMF 的番茄幼苗地上部和根系磷含量不同程度地高于不接种 AMF 的对照处理, 接种 Am 和混合菌种显著提高了仙客 1 号植株地上部磷含量, 接种 Ri 则对 2 个番茄品种的根系磷含量有明显促进作用(表 2)。

2.2 番茄菌根苗 AMF 的发育状况

如表 3 所示, 不同番茄品种间的菌根侵染率差异不显著, 而且对不同菌种的响应也基本一致。表现为: 3 种 AMF 接种处理对番茄根系的侵染率和丛枝着生率差异显著, 接种 Ri 和 Ri+Am 混合菌种的 2 种处理之间的侵染率和丛枝丰度无明显差异, 但二者显著高于接种 Am 的处理。3 种 AMF 接种处理的泡囊丰度无明显差异。

2.3 移栽后 AMF 和线虫对番茄植株生长的影响

如表 4 所示, 番茄苗定植后 45 d 时, 在不同处理的植株之间表现出生长量的显著差异。AMF、线虫、番茄品种及其任意 2 个因素的交互作用均显著影响了株高, 而线虫和 AMF 的交互作用显著影响

了茎粗; 另外, 番茄品种和 AMF、线虫与品种的交互作用对地上部生物量产生显著影响。总体来看, 在接种 AMF 的情况下, 无论接种根结线虫与否, 均以接种 Ri+Am 混合菌种促进番茄生长的效果最好, 而抗根结线虫品种仙客 1 号的株高和地上部干重显著高于普通品种蒙特卡罗。

进一步分析 AMF 和线虫对植株生长的影响发现, 接种 AMF 植株株高有降低趋势, 而接种线虫则具有增加趋势, 接种菌根与线虫对茎粗的影响都不显著, 接种线虫对生物量的效应受番茄品种的影响。未接种线虫情况下, 接种 Ri 和混合菌种显著增加了蒙特卡罗和仙客 1 号的地上部生物量; 而接种线虫后, 感病品种蒙特卡罗的 AMF 接种效应更加明显, 所有接种处理均显著增加了植株地上部的生物量, 而接种 Ri 和混合菌种显著增加了抗线虫品种仙客 1 号的地上部生物量(表 4)。接种 Ri+Am 混合菌种的效应最高, 仙客 1 号地上部干重比单接种根结线虫的植株增加了 22.7%, 蒙特卡罗则增加了 33.1%。

表 2 AMF 真菌对番茄幼苗地上部和根系磷含量的影响

Table 2 Effects of AMF on shoot and root phosphorus concentration of tomato seedlings

处理 Treatments	地上部磷含量 Shoot P concentration (%)		根系磷含量 Root P concentration (%)	
	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1
CK	0.08a	0.07b	0.10b	0.10b
Ri	0.09a	0.07ab	0.14a	0.14a
Am	0.10a	0.08a	0.12ab	0.09b
Ri+Am	0.09a	0.08a	0.12b	0.12ab

注: 各列不同字母为 $P<0.05$ 水平差异显著($n=4$)

Note: Means in each column followed by different letters are significantly different based on LSD test ($P<0.05$, $n=4$)

表 3 不同处理的番茄幼苗菌根发育状况

Table 3 Root colonization status of tomato seedlings by AMF in different treatments

处理 Treatments	菌根侵染率 AM colonization (%)		丛枝丰度 Arbuscule abundance (%)		泡囊丰度 Vesicle abundance (%)	
	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1
	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1	蒙特卡罗 Monte Carlo	仙客 1 号 Xianke 1
Ri	76.58a	80.00a	73.88a	78.83a	39.49a	41.51a
Am	45.98b	46.88b	45.55b	46.73b	41.93a	40.18a
Ri+Am	77.38a	77.83a	74.75a	76.71a	35.49a	38.96a

注: 各列不同字母为 $P<0.05$ 水平差异显著($n=4$)

Note: Means in each column followed by different letters are significantly different based on LSD test ($P<0.05$, $n=4$)

表 4 AMF 真菌和根结线虫对番茄株高、茎粗和地上部干重的影响

Table 4 Effects of AMF and root-knot nematode on shoot length, stem diameter and shoot dry weight of tomato

品种	接种根结线虫	接种菌根真菌	株高	茎粗	地上部干重
Cultivars	Inoculation with nematodes	Inoculation with AMF	Shoot length (cm)	Stem diameter (mm)	Shoot dry weight (g)
蒙特卡罗 Monte Carlo	-Mi	CK	112.28a	7.03a	13.72b
		Ri	98.17c	7.50a	15.91a
		Am	107.18b	7.50a	14.17b
		Ri+Am	96.87c	7.16a	16.30a
	+Mi	CK	112.52a	7.12a	12.07c
		Ri	100.21b	7.09a	15.56a
		Am	111.62a	7.04a	13.70b
		Ri+Am	95.22b	7.28a	16.15a
仙客 1 号 Xianke 1	-Mi	CK	113.89a	6.85a	13.22b
		Ri	104.71b	7.06a	16.95a
		Am	112.71a	7.11a	14.32b
		Ri+Am	104.96b	6.47a	17.12a
	+Mi	CK	113.30ab	6.70a	14.45b
		Ri	114.03c	6.64a	17.01a
		Am	120.80a	6.84a	15.36b
		Ri+Am	107.70c	7.12a	17.73a
方差分析					
Significance due to cultivars			<0.000 1	0.001 7	<0.000 1
Mi			0.001 0	0.339 6	0.861 0
AMF			<0.000 1	0.626 4	<0.000 1
cultivar×Mi			0.045 7	0.592 1	0.003 0
cultivar×AMF			0.001 6	0.944 2	0.927 9
Mi×AMF			0.018 8	0.047 4	0.812 5
cultivar×Mi×AMF			0.449 3	0.660 1	0.228 0

注：-Mi：未接种根结线虫处理；+Mi：接种根结线虫处理。各列不同字母为 $P<0.05$ 水平差异显著($n=4$)
Note: -Mi: Inoculation without *Meloidogyne incognita*, +Mi: Inoculation with *Meloidogyne incognita*. Means in each column followed by different letters are significantly different based on LSD test ($P<0.05$, $n=4$)

2.4 移栽后番茄植株的菌根侵染率

如图 1 所示，接种 Ri、Am 和 Ri+Am 的所有处理均能侵染 2 个品种的番茄根系。蒙特卡罗的菌根侵染率不受接种线虫的影响，均表现为 $Ri+Am>Ri>Am$ (图 1A)，而仙客 1 号接种线虫后菌根侵染率显著降低，菌种间变化为 $Ri>Ri+Am>Am$ (图 1B)。在接种根结线虫后，Am 对 2 个番茄品种的侵染率均有增加的趋势，而接种 Ri 和 Ri+Am 的处理 AMF 对根系的侵染率有降低的趋势。

2.5 AMF 对根结线虫侵染和繁殖的影响

如图 2、图 3 所示，接种 AMF 对根结线虫的侵染和繁殖表现出一定的抑制作用，不同 AMF 接种不同品种的效应也存在差异。接种 Ri+Am 混合菌种处理的效果优于接种单一菌种 Am 和 Ri 的处理；在番茄接种 AMF 对根结线虫侵染和繁殖所表现出的抑制作用方面，感病品种蒙特卡罗大于抗线虫品种仙客 1 号。不同 AMF 接种处理对仙客 1 号根系的根结数量无显著影响(图 3A)，但 Ri 处理显著降低了卵块数量(图 3B)。

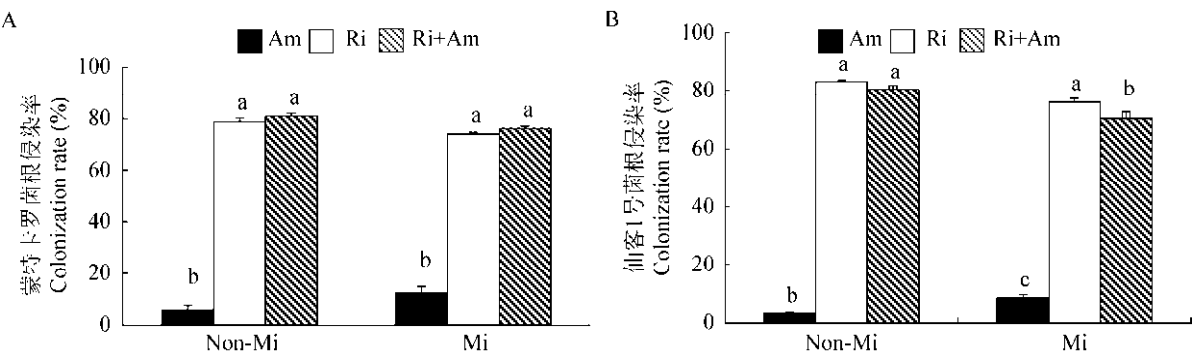


图 1 接种 *Meloidogyne incognita* (Mi)对蒙特卡罗(A)和仙客 1 号(B)根系菌根侵染率的影响
Figure 1 Root colonization rate of Monte Carlo (A) and Xianke 1 (B) inoculation with *Meloidogyne incognita* (Mi)

注: Non-Mi: 未接种根结线虫处理; Mi: 接种根结线虫处理; 不同小写字母表示接种不同菌根真菌的处理在 5% 水平上 LSD 多重比较平均值的显著性差异

Note: Non-Mi: Inoculation without *Meloidogyne incognita*; Mi: Inoculation with *Meloidogyne incognita*; Different small letters above columns denote significant difference by LSD multiple range test for inoculation treatments of three AMF at the 5% level. Bars represent SE (n=5). The same below

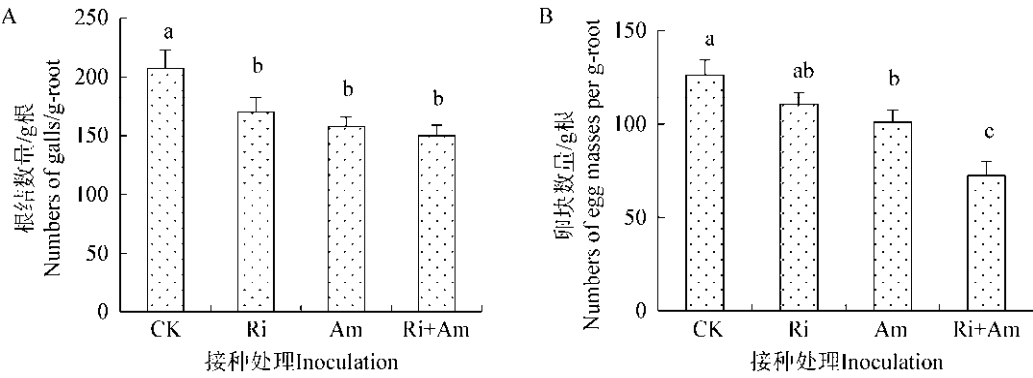


图 2 AMF 对蒙特卡罗根结线虫根结数(A)及卵块数(B)的影响
Figure 2 Effects of AMF on the numbers of galls (A) and egg masses (B) on the tomato cultivar Monte Carlo

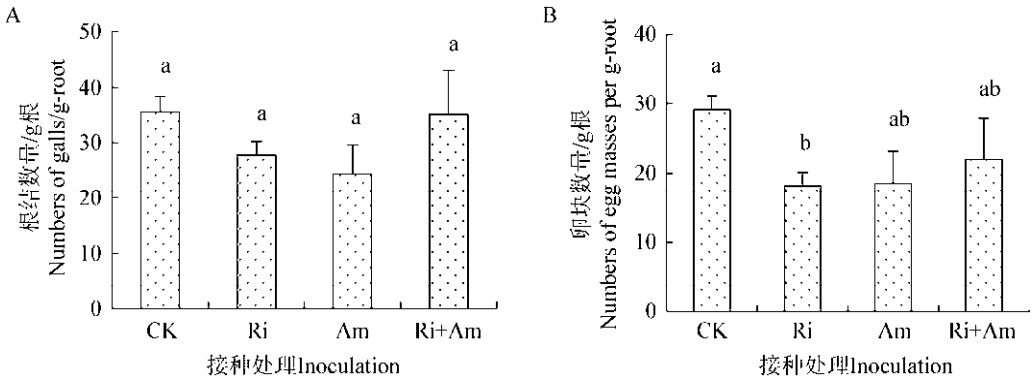


图 3 AMF 对仙客 1 号根结线虫根结数(A)及卵块数(B)的影响
Figure 3 Effects of AMF on the numbers of galls (A) and egg masses (B) on the tomato cultivar Xianke 1

注: 柱形上方标注不同小写字母表示接种不同菌根真菌的处理在 5% 水平上 LSD 多重比较平均值的显著性差异。柱形上方误差线表示 SE (n=5)

Note: Different small letters above columns denote significant difference by LSD multiple range test for inoculation treatments of three AMF at the 5% level. Bars represent SE (n=5)

2.6 连作土壤中 AMF 对根结线虫侵染繁殖的影响

如表 5 所示, 感病品种蒙特卡罗接种 AMF 显著提高了植株的地上部干重, 根系鲜重有所降低, 但不显著。总体上, 接种 AMF 对发生根结线虫病番茄的生长有明显促进作用, 但接种 AMF 对植株的地上部磷含量没有显著影响。实验还发现不接种的对照番茄根系没有菌根发育, 说明在连作土壤中土著的 AMF 没有形成可检测的侵染和定殖。

3 讨论与结论

未接种 AMF 的 2 个番茄品种苗期在植株形态、生长量和壮苗指数上本身具有差异, 主要表现是抗线虫品种仙客 1 号生长情况优于敏感品种蒙特卡罗。接种 AMF, 2 个品种生长情况变化趋势基本相近。即, 苗期地上部分生长量均有所减小, 但地下部分增加。随着植株成长, 这种影响逐渐减弱, 成株时则能够促进地上部的生长, 但接种 AMF 对植物生长的影响因菌种不同而有差异。在磷含量水平方面, 各种 AMF 处理对地上部磷水平影响不大, 而对于根系则有影响, 以 Ri 处理最高, Am 和 Ri+Am

处理次之, 但磷水平和壮苗指数无相关性。AMF 对番茄的侵染因菌种不同也会产生差异同时受到线虫侵染的影响。Ri 和 Am 对番茄的侵染率差异较大, 且接种根结线虫与否引起侵染率变化趋势不同。接种线虫和菌种 Ri 及混合菌种 Ri+Am 的侵染率略低于未接种线虫的对照, 而接种线虫和菌种 Am 的处理中 AMF 侵染率显著高于未接种线虫对照。在关于接种线虫对 AMF 的侵染率所产生效应的研究中, 分别有接种线虫会使 AMF 侵染率的显著降低和无显著影响的报道, 前者报道较多^[16-21]。在番茄上, 接种 *Funneliformis mosseae* 后再接种南方根结线虫 8 周后侵染率与对照组没有显著性变化。本试验 2 个菌种中, 特别是 Am 侵染率显著增高的现象尚不多见。上述现象表明线虫和 AMF 在寄主植物中的相互作用非常复杂。线虫和 AMF 的相互作用与 AMF 种类、线虫种类以及寄主植物等多种因素都有关系。有研究报道线虫的侵染会诱导番茄体内独角金内酯类激素(Strigolactones)的水平升高, 这类激素可以诱导植物对线虫产生抗性, 然而此类激素对 AMF 侵染寄主根部也具有刺激和促进分枝的作用, 这种效应可能是本试验中侵染性相对较弱的菌种 Am 侵染率增高的原因^[22-23]。

很多研究证明利用 AMF 控制蔬菜线虫病害具有较好防控效果^[24-25]。采用轮作、施肥、嫁接、抗性品种等多种农业技术配合 AMF 接种技术增强作物抗/耐病性是目前的发展趋势。在运用作物的不同品种结合 AMF 接种技术防控线虫病害的研究中, 有人曾在不同抗线虫特性的香蕉品种上接种 AMF 调查其对两种移栖性线虫侵染和繁殖的影响^[16]。另外, 结合嫁接技术, 对不同的抗线虫南瓜品种砧木接种 AMF 防控西瓜根结线虫病能够获得良好的防治效果^[26]。本试验采用 2 个番茄品种经过接种 AMF 能够显著降低线虫的侵染和繁殖, 表现为单位重量根上的卵块和(或)根结的数量显著低于不接种对照。另外, 接种 AMF 能够显著促进番茄成株的生长, 特别是在接种根结线虫后, 未接种 AMF 的处

表 5 AMF 在根结线虫连作土壤中对番茄生长和线虫侵染和繁殖的影响

Table 5 Effects of AMF on the growth of tomato plants and the infestation of root-knot nematodes in continuous cropping field soil

Item	CK	Ri+Am
地上部干重	11.37b	12.26a
Shoot dry weight (g)		
根鲜重	24.42a	22.80a
Root fresh weight (g)		
地上部磷含量	0.26a	0.25a
Shoot P concentration (%)		
菌根侵染率	0b	41a
AMF colonization (%)		
根结数/g 根	175a	140b
No. of galls/g-root		
卵块数/g 根	108a	85b
No. of egg masses/g-root		

注: 各列不同字母为 $P < 0.05$ 水平差异显著

Note: Means in each column followed by different letters are significantly different based on LSD test ($P < 0.05$, $n = 5$)

理地上部干重损失较大, 而接种 AMF 处理可以弥补病害引起的生长损失, 提高作物抗病性。感病番茄品种蒙特卡罗的菌根化苗对根结线虫侵染和繁殖的抑制作用显著大于相同处理的抗线虫番茄品种仙客 1 号; 不同 AMF 接种处理的效应也存在差异, 蒙特卡罗上接种 Ri+Am 混合菌种的处理的效果优于接种单一菌种 Am 和 Ri 的处理, 而仙客 1 号上 Ri 的效果更好。采用蒙特卡罗在发病的连作土壤中接种混合菌种的处理抗线虫效应尤其显著, 尽管在耕作土壤中微生物菌系比较复杂且土壤磷含量较高, AMF 侵染率有所降低。本试验在灭菌土壤和连作土壤采用 AMF 混合菌种接种均获得显著的抗线虫效果, 说明联合施用不同的 AMF 菌种组合能够取得更好的防治效果, 这可能与不同功能类型菌种的互补效应有关^[27]。不同的 AMF 菌种相互作用也存在差异, 某些菌种间具有互补协同效应, 而某些菌种组合可能没有增效作用, 曾有报道比较多个不同的 AMF 菌种组合对黄瓜根结线虫病的防治效果, 发现不同菌种组合效果差异很大, 进而筛选出最佳的 AMF 菌种组合^[28]。总之, 采用不同抗性品种结合 AMF 接种技术开展根结线虫病害的防控研究, 对于生产实践和理论研究都具有比较重要的意义。本研究结果对于防治设施栽培番茄线虫病害、增加产量和提高品质提供了理论和技术支持, 可以作为防控蔬菜土传病害的新技术手段, 具有较大的应用潜力。

REFERENCES

- [1] Duan YX, Wu G. The Control of Plant Nematode Diseases[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002 (in Chinese)
段玉玺, 吴刚. 植物线虫病害防治[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002
- [2] Peng DL. The integrate control of the vegetable diseases and pests 10: the occurrence and control of the vegetable nematode disease[J]. China Vegetables, 1998(4): 57-58 (in Chinese)
彭德良. 蔬菜病虫害的综合治理(十): 蔬菜线虫病害的发生和防治[J]. 中国蔬菜, 1998(4): 57-58
- [3] Wang RG, Jian H, Xiang HQ, Zheng JQ, Shi YC, Zhang Y. Identification of the root-knot nematode on vegetables in greenhouses in Beijing[J]. Plant Protection, 2007, 33(3): 90-92 (in Chinese)
王仁刚, 简恒, 向红琼, 郑建秋, 师迎春, 张芸. 北京地区保护地蔬菜根结线虫种类鉴定[J]. 植物保护, 2007, 33(3): 90-92
- [4] Peng DL, Tang WH. Advance of resistance gene Mi to root-knot nematodes in tomato[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(3): 220-223 (in Chinese)
彭德良, 唐文华. 番茄抗根结线虫 Mi 基因研究进展[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(3): 220-223
- [5] Bai CM, Duan YX, Chen LJ, Liu YF, Zhu XF. Evaluation of tomato resistance to *Meloidogyne incognita*[J]. China Vegetables, 2010(6): 33-37 (in Chinese)
白春明, 段玉玺, 陈立杰, 刘轶飞, 朱晓峰. 番茄品种对南方根结线虫的抗性评价[J]. 中国蔬菜, 2010(6): 33-37
- [6] Zheng JR, Hu QQ, Li XQ. Resistant evaluation of tomato breeding germplasms to *M. incognita* and detection of Mi-1 gene[J]. Molecular Plant Breeding, 2015, 13(4): 832-839 (in Chinese)
郑积荣, 胡浅浅, 李戌清. 番茄育种种质对南方根结线虫抗性评价及 Mi-1 基因检测[J]. 分子植物育种, 2015, 13(4): 832-839
- [7] Liu XZ, Zhang KQ, Li TF. The Biological Control of Plant Parasitic Nematodes[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)
刘杏忠, 张克勤, 李天飞. 植物寄生线虫生物防治[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004
- [8] Schouteden N, De Waele D, Panis B, Vos CM. Arbuscular mycorrhizal fungi for the biocontrol of plant-parasitic nematodes: A review of the mechanisms involved[J]. Frontier in Microbiology, 2015, 6: 1280
- [9] Bagyaraj DJ, Manjunath A, Reddy DDR. Interaction of vesicular arbuscular mycorrhiza with root knot nematodes in tomato[J]. Plant and Soil, 1979, 51(3): 397-403
- [10] Labeena P, Sreenivasa MN, Lingaraju S. Interaction effects between arbuscular mycorrhizal fungi and root-knot nematode *Meloidogyne incognita* on tomato[J]. Indian Journal of Nematology, 2002, 32(2): 118-120
- [11] Gera Hol WH, Cook R. An overview of arbuscular mycorrhizal fungi-nematode interactions[J]. Basic and Applied Ecology, 2005, 6(6): 489-503
- [12] Diedhiou PM, Hallmann J, Oerke EC, Dehne HW. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and a non-pathogenic *Fusarium oxysporum* on *Meloidogyne incognita* infestation of tomato[J]. Mycorrhiza, 2003, 13(4): 199-204
- [13] Liu RJ, Dai M, Wu X, Li M, Liu XZ. Suppression of the root-knot nematode [*Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood] on tomato by dual inoculation with

- arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria[J]. *Mycorrhiza*, 2012, 22(4): 289-296
- [14] Grace C, Stribley DP. A safer procedure for routine staining of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Mycological Research*, 1991, 95(10): 1160-1162
- [15] Liu WZ. *Research Techniques of Plant Nematology*[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1995 (in Chinese)
刘维志. 植物线虫学研究技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995
- [16] Elsen A, Baimey H, Swennen R, De Waele D. Relative mycorrhizal dependency and mycorrhiza-nematode interaction in banana cultivars (*Musa* spp.) differing in nematode susceptibility[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(2): 303-313
- [17] Umesh KC, Krishnappa K, Bagyaraj DJ. Interaction of burrowing nematode, *Radopholus similis* - (Cobb- 1893) Thorne 1949, and VA mycorrhiza, *Glomus fasciculatum* (Thaxt.) gerd and trappe in banana (*Musa acuminata* colla.)[J]. *Indian Journal of Nematology*, 1988, 18(1): 6-11
- [18] Pinochet J, Calvet C, Camprubí A, Fernández C. Interactions between migratory endoparasitic nematodes and arbuscular mycorrhizal fungi in perennial crops: A review[J]. *Plant and Soil*, 1996, 185(2): 183-190
- [19] Pinochet J, Fernández C, De Carmen Jaizme M, Tenoury P. Micropropagated banana infected with *Meloidogyne javanica* responds to *Glomus intraradices* and phosphorus[J]. *HortScience*, 1997, 32(1): 101-103
- [20] Jaizme-Vega MC, Pinochet J. Growth response of banana to three mycorrhizal fungi in *Pratylenchus goodeyi* infested soil[J]. *Nematropica*, 1997, 27(1): 69-76
- [21] Vos CM, Tesfahuna AN, Panisa B, De Waele D, Elsen A. Arbuscular mycorrhizal fungi induce systemic resistance in tomato against the sedentary nematode *Meloidogyne incognita* and the migratory nematode *Pratylenchus penetrans*[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 61: 1-6
- [22] Xu XC, Fang PP, Zhang H, Chi C, Song LX, Xia XJ, Shi K, Zhou YH, Zhou J, Yu JQ. Strigolactones positively regulate defense against root-knot nematodes in tomato[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(4): 1325-1337
- [23] Akiyama K, Matsuzaki KI, Hayashi H. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Nature*, 2005, 435(7043): 824-827
- [24] Zhang SB, Wang YS, Zou GY. Effect of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi suppresses root knot nematode on cucumber[J]. *Northern Horticulture*, 2011(19): 123-126 (in Chinese)
张淑彬, 王幼珊, 邹国元. 丛枝菌根真菌对黄瓜南方根结线虫病防治效应[J]. 北方园艺, 2011(19): 123-126
- [25] Zhang LD, Zhang JL, Christie P, Li XL. Pre-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi suppresses root knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on cucumber (*Cucumis sativus*)[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 205-211
- [26] Lyu XG, Liu RJ, Li M. Effects of AMF on resistance of grafted watermelon seedlings against root-knot nematodes[J]. *Mycosystema*, 2017, 36(7): 1018-1027 (in Chinese)
吕星光, 刘润进, 李敏. 丛枝菌根真菌对西瓜嫁接苗抗南方根结线虫病的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 1018-1027
- [27] Smith SE, Read DJ. *Mycorrhizal Symbiosis*[M]. 3rd ed. London: Academic Press, 2008
- [28] Wang WH, Xu L, Liu RJ. Effects of combined inoculation with various arbuscular mycorrhizal fungi on plant resistance to root-knot nematode disease in cucumber[J]. *Mycosystema*, 2017, 36(7): 1010-1017 (in Chinese)
王维华, 许琳, 刘润进. 不同 AMF 组合提高黄瓜抗根结线虫效果的比较[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 1010-1017