

包文杰, 申凌婕, 夏尚文, 等. pH 对木霉菌和镰刀菌生长及其竞争的影响. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2535–2542

Bao WJ, Shen LJ, Xia SW, et al. Effect of pH on the growth and competition of *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2535–2542

pH 对木霉菌和镰刀菌生长及其竞争的影响

包文杰¹ 申凌婕² 夏尚文¹ 杨效东^{1*}

(¹中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303; ²普洱学院, 云南普洱 665000)

摘要 由镰刀菌引起的茎基腐病对西番莲生产造成了严重威胁。然而目前缺乏对其有效的生物防治手段。木霉菌是目前应用最广泛的生防真菌,能够有效防治多种作物病害,但是其防治效果容易受到环境因素如土壤 pH 的影响。为筛选西番莲茎基腐病的潜在生防菌株并探究 pH 对木霉菌防治效果的影响,本研究选取从热带西双版纳西番莲种植区分离的 4 种木霉菌和 4 种镰刀菌作为材料,通过菌丝生长速率法测定不同菌株在不同 pH 条件下的生长动态,并采用平板对峙试验探究 pH 对木霉菌抑制镰刀菌生长效果的影响。结果表明:木霉菌的最适生长 pH 为 4~6,而镰刀菌的最适生长 pH 为 7~9。4 种木霉菌对 4 种镰刀菌的生长均具有显著的抑制作用,其中哈茨木霉的抑制效果最显著,抑制率可达 72%。此外,pH 对木霉菌的抑菌效果具有显著影响,且因木霉菌和镰刀菌种类的不同也表现出差异。因此,针对特定的病原菌和生防菌种类,在田间进行生物防治时需关注环境 pH 对生防菌防治效果的影响。

关键词 木霉菌; 镰刀菌; 生物防治; pH; 热带地区

Effect of pH on the growth and competition of *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. BAO Wenjie¹, SHEN Lingjie², XIA Shangwen¹, YANG Xiaodong^{1*} (¹Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China; ²Pu'er University, Pu'er 665000, Yunnan, China).

Abstract Collar rot caused by *Fusarium* spp. is a serious threat to the production of *Passiflora edulis*. However, biocontrol methods are lacking. *Trichoderma* spp., as the most widely applied biocontrol fungus, can be effective in managing crop diseases. The effectiveness is significantly influenced by environmental factors, such as soil pH. To screen potential biocontrol strains against collar rot of *P. edulis*, and to explore the effect of pH on the inhibition rate of *Trichoderma* spp., we selected four *Trichoderma* species and four *Fusarium* species isolated from *P. edulis* planting area in Xishuangbanna. The growth dynamics of different strains under different pH conditions were determined using the mycelial growth rate method. The effect of pH on the growth inhibition of *Fusarium* spp. by *Trichoderma* spp. was investigated using the plate confrontation assay. The results showed that the optimal growth pH range was 4–6 for *Trichoderma* spp. and 7–9 for *Fusarium* spp. All four *Trichoderma* strains exhibited significant inhibitory effects on the growth of the four *Fusarium* strains. *T. harzianum* showed the most notable inhibition, reaching up to a 72% inhibitory rate. Moreover, pH significantly influenced the inhibitory effect of *Trichoderma* spp., with variations observed depending on the specific species of *Trichoderma* spp. and *Fusarium* spp. Therefore, it is essential to consider the environmental pH impact on the efficacy of biocontrol agents when applying biological control measures in the field, tailored to the specific pathogen and biocontrol agent involved.

Keywords *Trichoderma*; *Fusarium*; biocontrol; pH; tropical region

农业可持续生产在过去几十年中因大量使用化学农药而遭到严重破坏^[1]。虽然化学防治是控制植物病害的有效方法,但长期大规模使用化学药剂会导致生物多样性丧失、土壤退化、病原菌抗药性增强、环境污染以及人类健康威胁等众多生态问

题^[2–3]。因此,制定环境友好型的生物防治策略是近年来研究的一个热点。微生物防治是指利用有益微生物及其代谢产物对植物病害进行有效防治的技术和方法^[4]。目前广泛应用于生物防治的微生物主要包括假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)、芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)、木霉菌(*Trichoderma* spp.)和链霉菌(*Streptomyces* spp.)等^[5–8]。

木霉菌在分类上隶属于半知菌亚门丝孢纲丛梗孢目丛梗孢科,广泛存在于土壤中,是目前研究最为

本文由云南省基础研究专项重点项目(202301AS070063)、云南省兴滇英才支持计划项目和国家自然科学基金项目(42061144005)资助。

2024-05-08 收稿, 2024-07-04 接受。

* 通信作者 E-mail: yangxd@xthg.ac.cn

详尽的生防真菌^[9]。能够用于防治植物病害的木霉菌主要包括哈茨木霉(*T. harzianum*)、绿木霉(*T. viride*)、钩状木霉(*T. hamatum*)、长枝木霉(*T. longibrachiatum*)、康氏木霉(*T. koningii*)、多孢木霉(*T. polysporum*)和棘孢木霉(*T. asperellum*)等。已有研究表明,这些木霉菌对于根腐病、枯萎病和黑穗病等诸多作物病害均具有显著的防治效果^[10~12]。据统计,木霉菌对镰刀菌(*Fusarium* spp.)、丝核菌(*Rhizoctonia* spp.)、疫霉菌(*Phytophthora* spp.)和轮枝孢菌(*Verticillium* spp.)等至少18个属29种病原菌具有不同程度的拮抗作用^[9]。木霉菌能够通过竞争、寄生、抗生和诱导植物抗性等多种机制抑制病原菌的繁殖和扩散,从而达到生物防治的目的^[9,12]。

西番莲(*Passiflora edulis*)为多年生常绿藤本果树,是西双版纳地区一种重要的热带经济作物,其果实具有丰富的营养价值和药用价值^[13]。然而,镰刀菌入侵导致西番莲生产遭受严重的茎基腐病威胁。镰刀菌能够通过伤口或自然孔口侵入植物组织,同时分泌真菌毒素(如赤霉烯酮、伏马菌素、呕吐毒素等),导致植株茎基部细胞死亡和组织腐烂,影响水分和营养物质的运输,最终导致整株枯萎死亡,严重时还可能引起种植区大面积连片枯死^[14~15]。因此,探究西番莲茎基腐病的高效无公害防治方法对热带地区经济作物可持续发展具有重要意义。目前采用生物方法防治西番莲茎基腐病的相关研究较少,Chen等^[16]研究发现2株枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)能够提高受腐皮镰刀菌(*F. solani*)侵染的西番莲幼苗的存活率。此外,Wang等^[17]发现贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)分泌的一种抗真菌肽能够有效地抑制引起西番莲茎基腐病的腐皮镰刀菌菌丝生长。木霉菌对于多种病原菌均具有拮抗作用,然而其是否可以作为潜在的生防菌防治西番莲茎基腐病,目前尚缺乏相关的研究。

值得注意的是,维持适宜的土壤pH条件对于控制作物病害发生具有重要作用。随着土壤pH的升高,香蕉和草莓枯萎病、十字花科根肿病等多种作物病害发生率会显著降低^[18~20]。通过施加适量的土壤改良剂,可以有效缓解土壤酸化,进而抑制三七根腐病的发生^[21]。然而,Liu等^[22]研究发现,降低土壤pH可以通过增加微生物群落中关键拮抗物种的相对丰度来间接地阻碍病原菌定殖,从而减少病害的发生。不同地区土壤性质和气候条件等的不同可能导致了上述差异^[20,23]。此外,pH也是影响微生物生长和竞争的重要因素,不同pH条件下微生物

的生长速度和代谢产物也会有所不同^[24]。以往研究表明,木霉菌更适宜在酸性条件下生长,而镰刀菌在弱酸性至碱性条件下均可生长^[25~26]。然而,上述研究主要集中于温带和亚热带地区,在热带地区开展的相关研究较少。热带地区的土壤通常偏酸性(pH在4~6)^[27],这种环境条件是否会影响木霉菌和镰刀菌适宜生长的pH范围以及木霉菌对镰刀菌的抑制作用,目前尚缺乏明确的证据。

本研究以热带西双版纳地区西番莲茎基腐病的4种病原镰刀菌及其根际土壤中分离的4种木霉菌作为研究对象,目的是探究:1)热带酸性土壤中分离的木霉菌和镰刀菌各自适宜生长的pH范围如何?2)木霉菌是否可作为潜在的生防菌株防治西番莲茎基腐病?3)pH是否会影响木霉菌对镰刀菌生长的抑制作用?本研究旨在更好地了解病原微生物与生防微生物的生态适应性和竞争关系,为筛选防治效果好、生态适合度广的木霉菌以及优化其生产和应用条件提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试菌株均从云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇西番莲种植区(21°55' N, 101°16' E)感病植株的果实、茎基部以及根际土壤中分离获得^[28]。镰刀菌包括腐皮镰刀菌(*F. solani*)、尖孢镰刀菌(*F. oxysporum*)、层出镰刀菌(*F. proliferatum*)和藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*),经柯赫氏法则证明其均具有茎基腐病致病性。木霉菌包括哈茨木霉菌、绿木霉、棘孢木霉菌和钩状木霉菌,均为根际土壤中分离出的优势种。以上菌株保存于中国科学院西双版纳热带植物园土壤生态组实验室。

所有真菌的培养均采用马铃薯葡萄糖琼脂培养基(PDA)购买自青岛海博生物技术有限公司。

1.2 pH对木霉菌和镰刀菌生长的影响试验

参考以往关于木霉菌和镰刀菌生物学特性测定的研究方法^[25~26],采用1.0 mol·L⁻¹的HCl和NaOH溶液将灭菌后培养基的pH值分别调至3、4、5、6、7、8、9、10和11。用直径5 mm的打孔器从培养5 d的菌落边缘取下菌块,并接种至平板中央。每个pH梯度设置4个重复,置于25 °C的恒温培养箱中避光培养。由于木霉菌的菌丝生长较快,于接种后第48小时通过十字交叉法测量4种木霉菌的菌落直径,并拍照记录其菌落大小、疏密和产孢量等培养性状。镰刀菌的菌丝生长较慢,于接种后第7天测量4种

镰刀菌的菌落直径,同时拍照记录其培养性状。

1.3 不同 pH 条件下木霉菌对镰刀菌的抑制作用比较试验

采用两点对峙培养法探究不同 pH 条件下 4 种木霉菌对 4 种镰刀菌的抑制作用^[29]。基于 1.2 的试验结果,选取最适宜镰刀菌和木霉菌生长的 pH 梯度,并按照 1.2 所述方法,将灭菌后的培养基 pH 分别调至 5、6 和 7。从培养 5 d 的木霉菌和镰刀菌的菌落边缘用直径 7 mm 的打孔器取菌块,并将木霉菌和镰刀菌分别接种于距培养基边缘 2 cm 处的位置。对照组仅在一侧接种镰刀菌,另一侧不接种任何菌。所有样品均在 25 ℃ 的恒温避光培养箱中培养,每处理重复 4 次,共计 240 个培养基。在接种后的第 2、4、7、10 和 15 天观察记录木霉菌对镰刀菌的抑制、包围、侵入并占领营养空间的过程及有无抑菌圈形成,同时测量处理组和对照组的镰刀菌菌落半径。木霉菌对镰刀菌生长抑制率(%) = (对照组菌落半径 - 处理组菌落半径) / 对照组菌落半径 × 100。

1.4 数据处理

采用 R(v4.3.2) 软件对数据进行统计分析和作图。采用 Kruskal-Wallis 非参数方法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$)。采样多因素方差分析探究 pH 及木霉菌和镰刀菌种类对木霉菌抑菌效果的影响。图表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 木霉菌在不同 pH 条件下的生长状况

木霉菌生长较快,接种后 24 h 即可观察到明显

的菌落生长。从图 1 和图 2 可以看出,4 种木霉菌在酸性条件下的生长状况显著优于碱性条件,但不同菌株适宜生长的 pH 范围存在一定的差异。哈茨木霉的菌丝在 pH 5~7 条件下生长最快,在 pH 11 的强碱性条件下生长最慢。绿木霉的菌丝生长在 pH 5 条件下显著最优。棘孢木霉和钩状木霉的菌丝在 pH 4~5 条件下的生长状况最好,在 pH 11 时菌落不生长。此外,相同 pH 条件下哈茨木霉的生长优于其它 3 种木霉菌,其菌落相对致密,菌丝生长比较旺盛。综上,4 种木霉菌更适宜在弱酸性条件下生长,其最适生长 pH 范围为 4~6。

2.2 镰刀菌在不同 pH 条件下的生长状况

相比于木霉菌,镰刀菌的生长缓慢,接种后 3 d 才观察到菌落较为明显的生长。从图 3 和图 4 可以看出,4 种镰刀菌在中性或弱碱性条件下的生长状况显著优于酸性条件。腐皮镰刀菌在 pH 3~4 条件下生长最慢,其最适生长 pH 为 6~7。尖孢镰刀菌和层出镰刀菌的菌落生长直径在 pH 3~7 范围内随着 pH 的增加而增加,而在 pH 7~11 范围内无显著差异,其最适生长 pH 为 7。藤仓镰刀菌在 pH 3~9 范围内随着 pH 的增加菌落生长直径也增加,其菌丝最适生长 pH 为 8~9。此外,相同 pH 条件下尖孢镰刀菌的生长优于其它 3 种镰刀菌,其菌落较厚,菌丝生长较浓密。综上,4 种镰刀菌更适宜在中性或弱碱性条件下生长,其最适生长 pH 范围为 7~9。

2.3 不同 pH 条件下木霉菌对镰刀菌的抑制作用

多因素方差分析结果表明,pH、木霉菌和镰刀菌种类均对木霉菌的抑制作用具有显著的独立影响,并且呈现出显著的交互作用(表 1)。

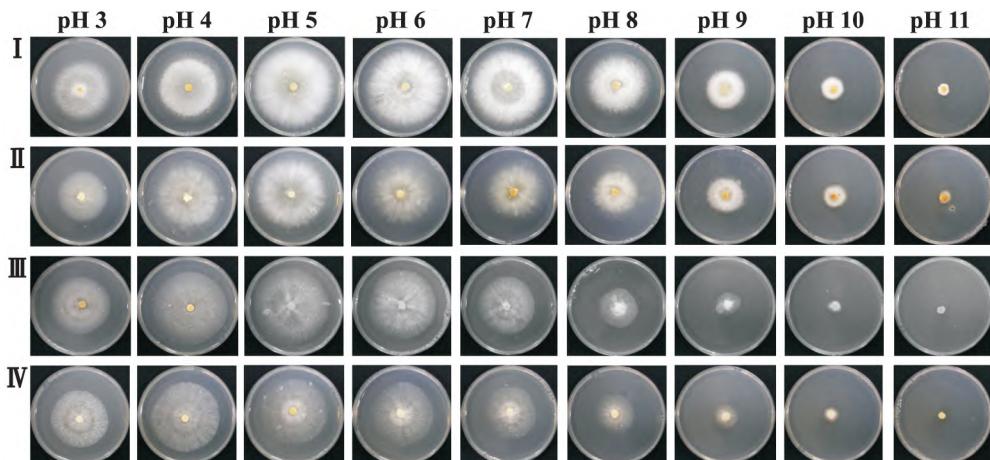


图 1 不同 pH 条件下 4 种木霉菌培养 48 h 后的菌落生长状况

Fig.1 Colonial growth of four *Trichoderma* spp. cultured for 48 hours under different pH conditions.

I: 哈茨木霉 *Trichoderma harzianum*; II: 绿木霉 *Trichoderma virens*; III: 棘孢木霉 *Trichoderma asperellum*; IV: 钩状木霉 *Trichoderma hamatum*. 下同 The same below.

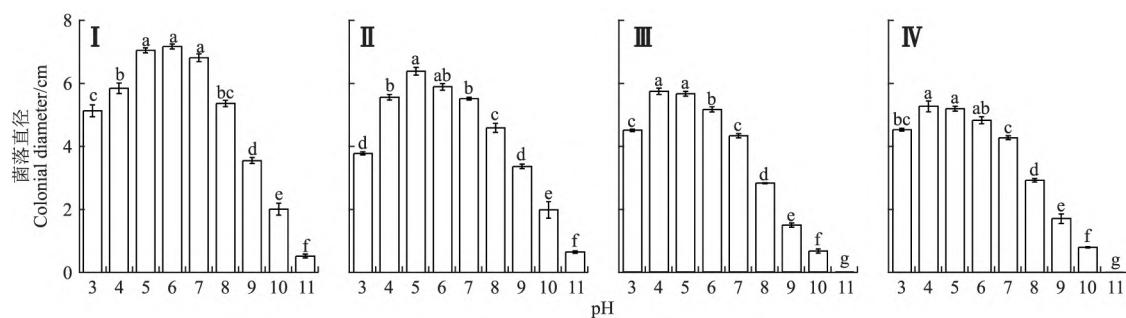


图2 不同pH条件下4种木霉菌的菌落直径(48 h)

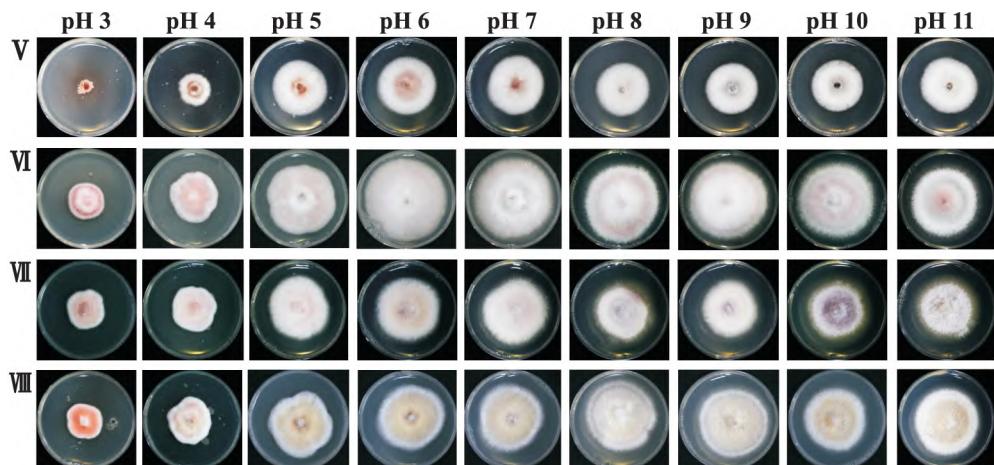
Fig.2 Colonial diameter of four *Trichoderma* spp. under different pH conditions (48 h).不同字母表示差异显著($P<0.05$)。Different letters meant significant difference at 0.05 level.下同 The same below.

图3 不同pH条件下4种镰刀菌培养7 d后的菌落生长状况

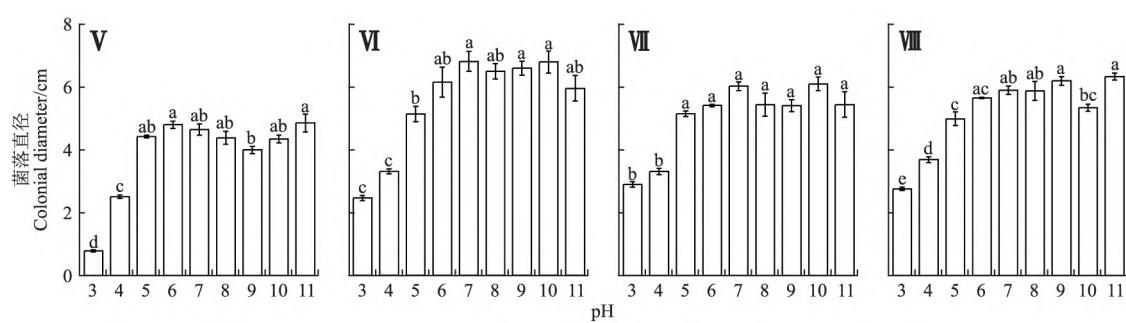
Fig.3 Colonial growth of four *Fusarium* spp. cultured for 7 days under different pH conditions.V: 腐皮镰刀菌 *Fusarium solani*; VI: 尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum*; VII: 层出镰刀菌 *Fusarium proliferatum*; VIII: 藤仓镰刀菌 *Fusarium fujikuroi*.
下同 The same below.

图4 不同pH条件下4种镰刀菌的菌落直径(7 d)

Fig.4 Colonial diameter of four *Fusarium* spp. under different pH conditions (7 d).

对峙培养结果显示，在pH为5~7条件下4种木霉菌对4种镰刀菌菌落的生长均表现了显著的抑制作用，且随着时间的推移，木霉菌对镰刀菌的拮抗作用逐步增强(图5)。对峙培养15 d后，对照组镰刀菌菌落已基本覆盖整个培养基，而处理组中镰刀菌的生长停滞，哈茨木霉和绿木霉的菌丝和孢子在镰刀菌菌落上方继续生长，棘孢木霉和钩状木霉与

镰刀菌菌落的交界处出现抑菌圈。

不同种类木霉菌对镰刀菌的抑制作用存在显著差异(表1)。以腐皮木霉为例，在pH 5条件下，哈茨木霉对其抑制效果最为显著，抑制率为71.9%。其余3种木霉菌的抑制率依次为棘孢木霉(68.9%)、绿木霉(68.1%)和钩状木霉(67.7%)，三者之间无显著差异(表2)。

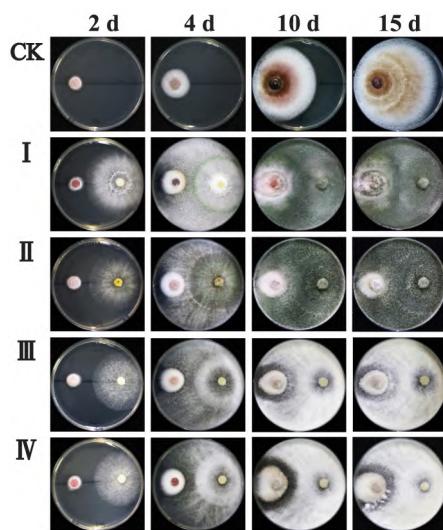


图 5 腐皮镰刀菌与 4 种木霉菌对峙培养的菌落形态(pH 5)

Fig.5 Colonial morphology of *Fusarium solani* and 4 *Trichoderma* spp. in dual culture (pH 5).

CK: 对照 Control. 下同 The same below.

表 1 pH 及木霉菌和镰刀菌种类对木霉菌抑制作用影响的多因素方差分析(8 d)

Table 1 Multivariate variance analysis of pH , *Trichoderma* and *Fusarium* species on the inhibition effect of *Trichoderma* spp. (8 d)

项目 Item	自由度 df	F	P
pH	2	18.41	<0.001
木霉菌 <i>Trichoderma</i> spp.	3	44.90	<0.001
镰刀菌 <i>Fusarium</i> spp.	3	15.38	<0.001
pH ×木霉菌 pH × <i>Trichoderma</i> spp.	6	2.33	0.036
pH ×镰刀菌 pH × <i>Fusarium</i> spp.	6	13.11	<0.001
木霉菌×镰刀菌	9	8.54	<0.001
<i>Trichoderma</i> spp. × <i>Fusarium</i> spp.			
pH ×木霉菌×镰刀菌	18	4.91	<0.001
pH × <i>Trichoderma</i> spp. × <i>Fusarium</i> spp.			

此外 pH 和镰刀菌种类也会对木霉菌的抑制作用产生显著影响(表 1 ,图 6 以哈茨木霉与腐皮镰刀菌为例呈现)。由图 7 可知 4 种木霉菌对腐皮镰刀菌的抑制率均在 pH 5 条件下最高(哈茨木霉

表 2 对峙培养 8 d 后 4 种木霉菌对腐皮镰刀菌抑制率的比较

Table 2 Comparison of inhibition rates of 4 *Trichoderma* spp. against *Fusarium solani* after cultured for 8 days

处理 Treatment	腐皮镰刀菌半径 Radius of <i>F. solani</i> /cm	抑菌率 Inhibition rate /%
CK	2.98±0.05a	0c
I	0.84±0.01b	71.9±0.4a
II	0.95±0.03b	68.1±1.0b
III	0.93±0.03b	68.9±1.1ab
IV	0.96±0.02b	67.7±0.8b

CK: 对照 Control; I: 哈茨木霉 *Trichoderma harzianum*; II: 绿木霉 *Trichoderma virens*; III: 棘孢木霉 *Trichoderma asperellum*; IV: 钩状木霉 *Trichoderma hamatum*. 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level.

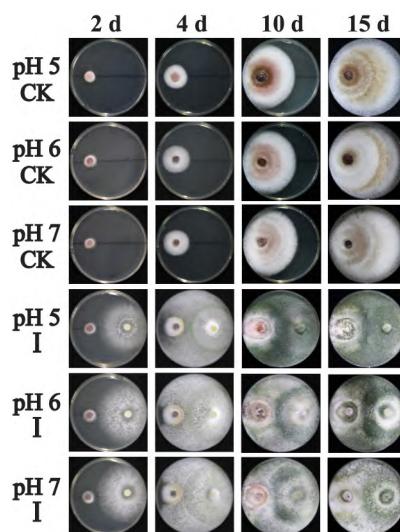


图 6 不同 pH 条件下哈茨木霉与腐皮镰刀菌对峙培养的菌落形态

Fig.6 Colonial morphology of *Trichoderma harzianum* and *Fusarium solani* in dual culture under different pH conditions.

71.9%; 绿木霉 68.1%; 棘孢木霉 68.9%; 钩状木霉 67.7%)。4 种木霉菌对尖孢镰刀菌的抑制率均表现为 pH 6 时最高(哈茨木霉 69.5%; 绿木霉 65.7%; 棘孢木霉 67.7%; 钩状木霉 67.9%)。哈茨木霉对层出

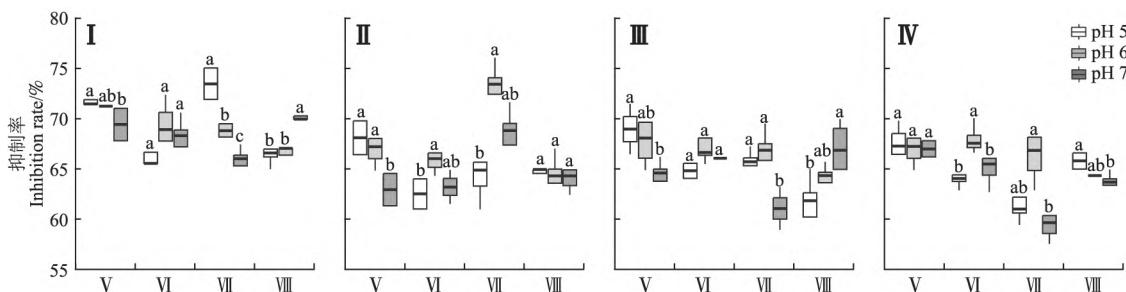


图 7 不同 pH 条件下 4 种木霉菌对 4 种镰刀菌抑制率的比较(8 d)

Fig.7 Comparison of the inhibition rate of 4 *Trichoderma* spp. against 4 *Fusarium* spp. under different pH conditions (8 d).

镰刀菌的抑制效率表现为 pH 5 时最高(73.4%) ,而绿木霉、棘孢木霉和钩状木霉均在 pH 6 时抑菌效果最佳(绿木霉 73.1%; 棘孢木霉 66.4%; 钩状木霉 66.1%)。针对藤仓镰刀菌 哈茨木霉和棘孢木霉对其抑制率在 pH 7 时最佳(哈茨木霉 70.2%; 棘孢木霉 67.1%) ,而钩状木霉在 pH 5 时最优(65.7%) 。

3 讨 论

3.1 木霉菌和镰刀菌适宜生长的 pH 范围不同

本研究表明 ,从热带酸性土壤中分离的木霉菌更适宜在酸性条件下生长 ,而镰刀菌在中性和弱碱性条件下生长最佳。这与其它地区对木霉菌和镰刀菌适宜生长的 pH 范围大致相符 ,如从温带地区土壤中分离的哈茨木霉菌丝生长的最适 pH 为 4 ,亚热带地区引起哈密瓜果腐病的变红镰刀菌(*F. incarnatum*) 的最适生长 pH 为 7~9^[25~26] 。这表明气候和地理分布区不会对木霉菌和镰刀菌的生物学特性产生显著影响。木霉菌和镰刀菌生长最适 pH 的差异可能源于这两种菌在进化过程中对各自生存环境的适应 ,这种适应反映了它们在不同环境条件下的生理和代谢差异^[30~31] 。这些结果揭示了木霉菌和镰刀菌在农田生态系统中的生态位差异 ,表明调节土壤 pH 是减少作物病害发生的一种可能途径。

3.2 木霉菌对 4 种镰刀菌均具有显著的抑制作用

从西番莲根际土壤分离的 4 种木霉菌对引起茎基腐病的 4 种镰刀菌均表现了显著的抑制作用。木霉菌是应用最广泛的生防真菌 ,能有效对抗多种病原菌 ,尤其是燕麦镰孢菌(*F. avenaceum*)、禾谷镰孢菌(*F. graminearum*) 和尖孢镰刀菌等土传病原真菌^[32] 。有研究表明 ,从禾草根际土壤中分离的 5 株木霉菌能显著抑制草坪镰刀枯萎病菌的生长^[33] 。另外 ,张丽荣等^[29] 在 22 株木霉菌中发现有 6 株对西瓜枯萎病菌具有显著的抑制作用 ,抑菌率高达 83.3% 。本研究中 ,与其它 3 种木霉菌相比 ,哈茨木霉对镰刀菌的抑制效果最佳 ,因此其作为生防菌防治西番莲茎基腐病的应用前景值得进一步探讨。

对镰刀菌和木霉菌对峙培养时的菌落生长状况进行观察发现 ,木霉菌生长迅速 ,对营养和空间具有很强的竞争能力。相较于对照组 ,处理组镰刀菌的菌落直径明显较小。哈茨木霉和绿木霉的菌丝生长迅速 ,能覆盖镰刀菌菌落并在其上方产孢 ,表明营养竞争是木霉菌作为生防菌抑制病原菌生长的一种重要机制^[34] 。木霉菌一旦定殖成功 ,便能迅速吸收营养占据空间 ,导致镰刀菌无法获取足够营养 ,进而有

效减少植物的发病率和坏死区域^[35~36] 。本研究中 ,棘孢木霉和钩状木霉在与镰刀菌菌落接触处形成了明显的抑菌圈 ,这可能是由于其分泌的抗菌物质抑制了病原菌生长 ,但具体作用机制还需进一步探讨。

3.3 pH 对木霉菌的抑菌效果具有显著影响

本研究中 ,pH 值会显著影响木霉菌对镰刀菌的抑制作用 ,并且这种影响在不同木霉菌和镰刀菌组合间也存在差异。以 4 种木霉菌对腐皮镰刀菌的抑制作用为例 ,当 pH 值为 5 时 ,抑制效果最显著 ,而 pH 升至 7 时 ,抑制效果有所减弱。这一现象可能源于木霉菌和镰刀菌的生态位(即适宜生长的 pH 范围) 差异。在酸性环境中 ,木霉菌展现出更强的生长优势 ,从而实现更有效的抑制作用; 而当 pH 值升高时 ,环境条件更有利腐皮镰刀菌 ,导致木霉菌的抑制效果相对减弱。然而 ,这一规律并非普遍适用于所有镰刀菌。例如 ,哈茨木霉和棘孢木霉在拮抗藤仓镰刀菌时 ,在 pH 7 的条件下表现出最佳的抑制效果。表明在不同环境条件下 ,木霉菌可能采用不同策略抑制特定的镰刀菌类群。例如 ,在中性 pH 条件下 ,某些木霉菌可能通过增加次生代谢产物来抑制病原菌的繁殖和生长。扈进冬等^[37] 的 Meta 分析强调了木霉菌种类、病害类型以及环境条件等因素会显著影响木霉菌的防治效果。同时 ,土壤 pH 值对木霉菌和镰刀菌在作物根部的定殖也具有重要影响^[38] 。因此 ,针对特定的植物病害及其病原菌种类 ,我们不仅需要筛选出高效的拮抗菌株 ,还需考虑土壤环境 pH 对其防治效果的影响 ,以实现更加精准和有效的病害管理。

3.4 生物防治建议与研究展望

基于本研究结果 ,我们为热带作物病害的生物防治措施提出以下几点建议: 1) 生防菌的筛选与生产: 哈茨木霉菌对病原菌的抑制作用显著高于其余 3 种木霉菌 ,因此可优先考虑将其作为生防菌 ,在 pH 为 4~6 的介质中进行培养以提高其生长效率和活性; 2) 土壤 pH 监测与调节: 将木霉菌作为生物防治菌剂用于防治镰刀菌引起的病害时 ,可通过施加有机肥等措施 ,适度增加土壤酸性 ,以抑制病原菌的繁殖和生长 ,同时提高木霉菌的防治效果。定期监测田间土壤 pH 以及镰刀菌和木霉菌的种群动态 ,有利于及时发现并控制病害; 3) 综合多因素考量制定生物防治策略: 进行生物防治时 ,必须充分考虑环境条件、生防菌和病原菌种类以及防治机理等因素 ,从而更好地利用微生物资源 ,制定更加高效、绿色、稳定的生物防治策略。

尽管本研究选取的 4 种木霉菌在室内控制条件下对病原镰刀菌均表现出较强的抑制能力,但在田间施用生防菌剂时容易受到温度、湿度、土壤养分等自然环境因素的干扰,从而影响木霉菌在作物根际的定殖存活与抵抗病原菌的能力。因此,未来需要进一步探讨不同生防菌株的抑病机理、定殖规律、田间施用方法以及生物安全等,为进一步开发生物农药用于防治植物病害提供数据支持。

4 结 论

本研究系统探究了不同 pH 条件下 4 种木霉菌和 4 种镰刀菌的生长动态以及 pH 对于木霉菌抑制镰刀菌生长效果的影响。研究结果明确了木霉菌的最适生长 pH 为 4~6, 镰刀菌的最适生长 pH 为 7~9。4 种木霉菌对 4 种镰刀菌的生长均具有显著的抑制作用, 其中哈茨木霉的抑制效果最显著。此外,pH 对木霉菌的抑菌效果也具有显著影响, 并且这种影响因木霉菌和镰刀菌种类的不同表现出差异。研究结果有利于我们更好地理解病原微生物与生防微生物的生态适应性和竞争关系, 同时为筛选防治效果好、生态适合度广的木霉菌以及优化其生产和应用条件提供数据支撑。然而, 本研究在室内控制条件下进行 缺乏田间的实际应用验证, 未来研究还需进一步对不同生防菌株的抑病机理、定殖规律、田间施用方法以及生物安全等加以探究, 从而为制定科学有效的病害管理策略提供理论依据和实践指导。

参考文献

- [1] Tudi M , Ruan HD , Wang L , et al. Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18: 1112
- [2] Dudley N , Attwood SJ , Goulson D , et al. How should conservationists respond to pesticides as a driver of biodiversity loss in agroecosystems? *Biological Conservation*, 2017, 209: 449–453
- [3] Nicolopoulou-Stamati P , Maipas S , Kotampasi C , et al. Chemical pesticides and human health: The urgent need for a new concept in agriculture. *Frontiers in Public Health*, 2016, 4: 148
- [4] Rahman SFSA , Singh E , Pieterse CMJ , et al. Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens. *Plant Science*, 2018, 267: 102–111
- [5] Walsh UF , Morrissey JP , Gara FO. Pseudomonas for biocontrol of phytopathogens: From functional genomics to commercial exploitation. *Current Opinion in Biotechnology*, 2001, 12: 289–295
- [6] 吴思炫, 高复云, 张锐澎, 等. 番茄青枯病生物防治的研究进展. *应用生态学报*, 2023, 34(9): 2585–2592
- [7] Zin NA , Badaluddin NA. Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 2020, 65: 168–178
- [8] 李晓芳, 田叶韩, 彭海莹, 等. 防治苦瓜枯萎病的拮抗放线菌分离筛选及鉴定. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3869–3879
- [9] 周晓梅, 刘强, 王瑛璐. 拮抗菌生物防治农作物病害的研究进展. *吉林师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(4): 36–39
- [10] 苏代发, 代庆忠, 严聪文, 等. 草莓根腐病及其生物防治研究进展. *江苏农业科学*, 2022, 50(24): 16–26
- [11] 沈海斌, 王前程, 陈捷, 等. 三株木霉对番茄枯萎病的防治效果和机理研究. *植物生理学报*, 2023, 59(5): 965–976
- [12] 陶新, 夏世斌, 刘秋梅, 等. 甘蔗黑穗病的微生物防治研究进展. *应用生态学报*, 2023, 34(3): 846–852
- [13] Dhawan K , Dhawan S , Sharma A. *Passiflora*: A review update. *Journal of Ethnopharmacology*, 2004, 94: 1–23
- [14] 宋晓兵, 崔一平, 彭埃天, 等. 广东西番莲茎基腐病病原的分离及鉴定. *南方农业学报*, 2019, 50(5): 1007–1012
- [15] Hao CH , Chai X , Wu FC , et al. First report of collar rot in purple passion fruit (*Passiflora edulis*) caused by *Neocosmospora solani* in Yunnan Province, China. *Plant Disease*, 2021, 105: 3750
- [16] Chen YH , Lee PC , Huang TP , et al. Biological control of collar rot on passion fruits via induction of apoptosis in the collar rot pathogen by *Bacillus subtilis*. *Phytopathology*, 2021, 111: 627–638
- [17] Wang C , Ye X , Ng TB , et al. Study on the biocontrol potential of antifungal peptides produced by *Bacillus velezensis* against *Fusarium solani* that infects the passion fruit *Passiflora edulis*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69: 2051–2061
- [18] Fang X , You MP , Barbetti MJ , et al. Reduced severity and impact of Fusarium wilt on strawberry by manipulation of soil pH, soil organic amendments and crop rotation. *European Journal of Plant Pathology*, 2012, 134: 619–629
- [19] Niwa R , Kumei T , Nomura Y , et al. Increase in soil pH due to Ca-rich organic matter application causes suppression of the clubroot disease of crucifers. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 778–785
- [20] Segura RA , Stoorvogel JJ , Sandoval JA , et al. The effect of soil properties on the relation between soil management and Fusarium wilt expression in Gros Michel bananas. *Plant and Soil*, 2022, 471: 89–100
- [21] Deng W , Gong J , Peng W , et al. Alleviating soil acidification to suppress *Panax notoginseng* soil-borne disease by modifying soil properties and the microbiome. *Plant and Soil*, 2024, DOI: 10.1007/s11104-024-06577-y
- [22] Liu L , Chen Z , Su Z , et al. Soil pH indirectly determines *Ralstonia solanacearum* colonization through its impacts on microbial networks and specific microbial groups. *Plant and Soil*, 2023, 482: 73–88
- [23] Watanabe K , Matsui M , Honjo H , et al. Effects of soil

- pH on rhizoctonia damping-off of sugar beet and disease suppression induced by soil amendment with crop residues. *Plant and Soil*, 2011, 347: 255–268
- [24] Xie L, Timonen S, Gange AC, et al. Effect of weather conditions, substrate pH, biochar amendment and plant species on two plant growth-promoting microbes on vegetated roofs and facades. *Heliyon*, 2022, 8: e09560
- [25] 梁松, 魏甜甜, 张静蕾, 等. 辣椒枯萎病生防木霉菌 T21 的分离鉴定及其生物学特性研究. *天津农业科学*, 2022, 28(5): 59–66
- [26] 杜莉芳, 曾晴, 徐晶, 等. 哈密瓜镰刀果腐菌的鉴定、生物学特性和室内防治药剂的筛选. *果树学报*, 2022, 39(5): 855–869
- [27] Li H, Ma Y, Liu W, et al. Soil changes induced by rubber and tea plantation establishment: Comparison with tropical rain forest soil in Xishuangbanna, SW China. *Environmental Management*, 2012, 50: 837–848
- [28] 包文杰. 西番莲茎基腐病病原菌对根际细菌群落的影响及生物防治初探. 硕士论文. 北京: 中国科学院大学, 2023
- [29] 张丽荣, 李鹏, 康萍芝, 等. 压砂西瓜枯萎病生防木霉菌筛选及其拮抗机制研究. *河南农业科学*, 2018, 47(5): 75–78
- [30] Contreras-Cornejo HA, Schmoll M, Esquivel-Ayala BA, et al. Mechanisms for plant growth promotion activated by *Trichoderma* in natural and managed terrestrial ecosystems. *Microbiological Research*, 2024, 281: 127621
- [31] Li M, Yu R, Bai X, et al. *Fusarium*: A treasure trove of bioactive secondary metabolites. *Natural Product Reports*, 2020, 37: 1568–1588
- [32] 王伟东, 高亚梅, 韩毅强, 等. 哈茨木霉对几种病原菌的拮抗作用及液体产孢培养条件的研究. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2010, 22(6): 4–8
- [33] 姚彦坡, 吕国忠, 张淑金, 等. 草坪镰刀枯萎病菌拮抗木霉菌的筛选及拮抗机制的研究. *中国草地学报*, 2006, 28(6): 56–60
- [34] 韩长志. 植物病原拮抗菌木霉属真菌的研究进展. *江苏农业学报*, 2016, 32(4): 946–952
- [35] Benítez T, Rincón AM, Limón MC, et al. Biocontrol mechanisms of *Trichoderma* strains. *International Microbiology*, 2004, 7: 249–260
- [36] Card SD, Walter M, Jaspers MV, et al. Targeted selection of antagonistic microorganisms for control of *Botrytis cinerea* of strawberry in New Zealand. *Australasian Plant Pathology*, 2009, 38: 183
- [37] 扈进冬, 刘敏敏, 安淑辉, 等. 木霉菌剂对植物病害防治效果及其影响因素的 Meta 分析. *安徽农业科学*, 2022, 50(10): 212–216
- [38] 孟素玲. 西瓜枯萎病菌与生防木霉根部定殖动态差异及其对土壤酸碱度和盐浓度的响应. 硕士论文. 银川: 宁夏大学, 2023

作者简介 包文杰, 男, 1998 年生, 硕士。主要从事土壤微生物研究。E-mail: baowenjie@xtbg.ac.cn

责任编辑 肖红