



古开平, 吴伟, 胡琼波. 几种土壤真菌对烟粉虱的生物活性研究 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 1010–1018.

几种土壤真菌对烟粉虱的生物活性研究

古开平¹, 吴伟^{1,2}, 胡琼波^{1*}

(1. 华南农业大学植物保护学院, 广州 510642; 2. 浙江宜葆现代农业科技有限公司, 浙江嘉善 314199)

摘要: B型烟粉虱 *Bemisia tabaci* 是重大入侵害虫, 发展生物防治技术控制其危害具有重要意义。本研究采用浸渍法测定了9种20株土壤真菌对B型烟粉虱的室内活性, 结果表明, 供试菌株对B型烟粉虱都有一定致病活性, 1.0 ± 10^8 孢子/mL的分生孢子悬浮液处理10 d后, 烟粉虱2龄若虫的累计校正死亡率为53%~93%, 其中淡紫紫孢菌 *Purpureocillium lilacinum* PITS01、PIMS-42和PIMS-45菌株, 以及刀孢蜡蚧菌 *Lecanicillium psalliotae* LpTS01菌株引起B型烟粉虱91%以上的死亡率。进一步测定了PITS01和LpTS01菌株对烟粉虱的毒力, 结果表明PITS01和LpTS01对烟粉虱2龄若虫在处理第4天的 LC_{50} 分别为 2.8×10^7 孢子/mL和 3.6×10^7 孢子/mL, 第6天分别为 1.7×10^6 孢子/mL和 3.6×10^5 孢子/mL; 当孢子浓度为 1.0×10^7 孢子/mL时, PITS01和LpTS01菌株 LT_{50} 值分别为4.4 d和4.2 d。菌株PITS01和LpTS01对烟粉虱防治具有一定的应用潜力。

关键词: 土壤真菌; 淡紫紫孢菌; 刀孢蜡蚧菌; 烟粉虱

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 04-1010-09

Bioactive of soil fungi against whitefly

GU Kai-Ping¹, WU Wei^{1,2}, HU Qiong-Bo^{1*} (1. College of Plant Protection, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Zhejiang Ecopro Agro Technology Company, Ltd., Jiashan 314199, Zhejiang Province, China)

Abstract: The B-biotype of whitefly (*Bemisia tabaci*) is an important invasion pest. It is significant to develop biocontrol technology to overcome the pest damage. In current study, the bioactivities of 20 fungal strains in 9 species from soil against whitefly nymph were evaluated by means of immersion method. The results indicated that all the strains had certain pathogenicity to *B. tabaci*. After treated with 1.0×10^8 spores/mL for 10 days, the calibrated mortality of the 2nd instar nymphs of *B. tabaci* was 53%~93%. Among them, the three strains of *Purpureocillium lilacinum* PITS01, BbTs03, AuTS01 and the *Lecanicillium psalliotae* LpTS01 strain had higher bioactivity with whiteflies' mortality > 91%. Furthermore, the experiments of virulence tests indicated that the LC_{50} of PITS01 and LpTS01 to the 2nd instar nymph of *B. tabaci* were 2.8×10^7 spores/mL and 3.6×10^7 spores/mL on the 4th day after treatment, and 1.7×10^6 spores/mL and 3.6×10^5 spores/mL on the 6th day after treatment, respectively. Meanwhile, the LT_{50} values of PITS01 and LpTS01 at 1.0×10^7 spores/mL of the concentration, were respectively recorded as 4.4 d and 4.2 d. Obviously, the results suggested that the

基金项目: 广州市科技计划项目 (201903010067)

作者简介: 古开平, 男, 1998年生, 硕士研究生, 主要研究方向为农药学, E-mail: 1013910743@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 胡琼波, 男, 博士, 教授, 主要研究方向为真菌生物杀虫剂、虫生真菌毒素及其作用机理, E-mail: hqbscau@scau.edu.cn

收稿日期 Received: 2021-04-03; 接受日期 Accepted: 2021-07-09

strains PITS01 and LpTS01 had the potential for whitefly biocontrol.

Key words: Soil fungi; *Purpureocillium lilacinum*; *Lecanicillium psalliotae*; *Bemisia tabaci*; bioactivity

烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 是一种世界性害虫, 其生物型 B 型和 Q 型于上世纪九十年代和本世纪初入侵我国, 严重为害果树、蔬菜与花卉类作物, 可刺吸植物汁液造成直接危害, 并分泌蜜露引发煤污病, 最主要的是传播多种植物病毒造成巨大的间接危害, 从而造成植物减产甚至绝收, 自 2000 年烟粉虱在我国爆发以来, 其分布范围不断扩大, 在多省市爆发成灾 (Ren *et al.*, 2001; 王艳秋等, 2016; 王雨蒙等, 2020)。

烟粉虱体表密被腊质, 世代重叠严重, 繁殖速度快, 化学药剂难以防治, 烟粉虱的防治面临着巨大的挑战。目前已对多种化学药剂产生高抗性, 防治烟粉虱所需药剂的浓度越来越高, 对环境造成了巨大的压力 (Jia *et al.*, 2017; 景亮亮等, 2020)。化学农药不仅容易造成环境污染、生态平衡的破坏以及危害人类和其他生物安全等不良后果, 而且化学防治的效果有限, 已不能满足当前农业生产需要。因此对烟粉虱开展绿色防控技术研究意义重大 (Islam *et al.*, 2010)。

虫生真菌是烟粉虱的重要病原微生物, 在烟粉虱的防控中具有较高的潜在应用价值 (Cuthbertson *et al.*, 2005)。研究表明, 爪哇棒束孢菌 *Isaria javanica* 对非洲菊 *Gerbera jamesonii* 上的烟粉虱致病力高, 且大田防治效果好 (张志春等, 2020); 蜡蚧轮枝菌 *Verticillium lecanii* 对甜瓜 *Cucumis melo* 上烟粉虱有较好的防效 (谢文等, 2020); 玫烟色棒束孢菌 *Isaria fumosorosea* 可在温室和大田的烟粉虱种群中引起流行病 (Brunner-Mendoza *et al.*, 2016); 球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* 可应用于防治大田和园林植物上的烟粉虱 (Wei *et al.*, 2020; Sayed *et al.*, 2021)。此外, 虫生真菌对化学农药难以防治的植物病毒也有不错的防治效果, 如杀虫真菌爪哇棒束孢菌 *I. javanica* 不仅对烟粉虱具有直接致病力, 还能有效地降低烟粉虱的病毒传播能力, 减少病毒对生产作物的影响 (肖燕等, 2001)。已记载的虫生真菌有 100 多个属, 1 000 余种, 近年来陆续有发现新种的报道 (Wang *et al.*, 2017)。虫生真菌具有应用期长、不伤害天敌、安全有效和可反复侵染等优势, 因此在农业生产上虫生真菌的开发利用具有重要的经济意义和生态意义 (李增智, 2015; 陈中琴等,

2020)。

本文利用课题组分离得到的真菌, 测定其对烟粉虱的室内致病力, 为开发防控烟粉虱的真菌制剂提供候选菌种资源, 为今后利用虫生真菌防控烟粉虱提供基本的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试菌株

试验所用菌株均从不同环境的土壤中分离获得, 共计 20 株 (表 1)。

1.2 供试烟粉虱与饲养

B 型烟粉虱为饲养繁殖多代的种群。用吸虫器从养虫小棚内的植株 (一品红 *Euphorbia pulcherrima*、扶桑 *Hibiscus rosa-sinensis*) 上捕捉粉虱成虫, 释放到 60 cm × 60 cm × 60 cm 的养虫笼中, 养虫笼内置盆栽健壮无病虫害的扶桑苗, 已剪除老叶, 留下约 10 片左右新叶。按每片叶子 50 对释放虫量。在光照 14:10 (L:D)、温度 25 ± 1℃、相对湿度 70% ± 10% 条件下, 让烟粉虱成虫在笼中产卵 1 d, 而后驱走全部烟粉虱成虫。继续培养, 观察烟粉虱卵孵化情况, 待发育到 2 龄若虫期时 (约 7 d) 进行试验。

1.3 活性测定

1.3.1 分生孢子悬浮液制备

将供试斜面菌种接种于 PDA 平板上培养, 25℃ 下培养 14 d, 刮取分生孢子, 用 0.02% Tween-80 水溶液配制成 1.0 ± 10⁸ 孢子/mL 的孢子悬浮液备用。对照组为 0.02% Tween-80 水溶液。

1.3.2 浸渍处理

采用 FAO 推荐的浸渍法 (谢婷等, 2020), 用剪刀将被烟粉虱 2 龄若虫侵染的扶桑苗叶片剪下, 保留其叶柄长约 1 cm, 在 20 个不同菌株的分生孢子悬浮液 (浓度 1.0 ± 10⁸ 孢子/mL) 里浸渍 20 s, 取出后自然风干叶片表面水分, 用含有植物营养液的棉花包被叶柄, 放入培养皿中, 每皿 1 片叶, 皿底铺滤纸保湿, 对照叶片浸蘸 0.02% Tween-80 溶液, 置于光照培养箱中培养, 培养设定条件为光照 14:10 (L:D)、温度 25 ± 1℃, 相对湿度 70% ± 10%。从第 2 天开始, 每 48 h 在解剖镜下检查若虫死亡情况 (虫尸长出菌丝的死虫确认为

表 1 供试菌株信息

Table 1 Information of test strains

菌株 Strain	菌种 Species	采样地 Sampling place
AuTS01	曲霉菌 <i>Aspergillus</i> sp.	甘肃省永登县中川镇, 灌木丛
AuTS02	曲霉菌 <i>Aspergillus</i> sp.	甘肃省永登县中川镇, 灌木丛
BbTS03	球孢白僵菌 <i>Beauveria bassiana</i>	甘肃省酒泉市潮湖林场, 胡杨林
BbMS-25	球孢白僵菌 <i>Beauveria bassiana</i>	内蒙古巴林右旗西拉沐沦, 草地
BbH2802	球孢白僵菌 <i>Beauveria bassiana</i>	湖北省武汉市蔡甸区, 杂草地
IcGX32S01	环链棒束孢 <i>Isaria cateniannulata</i>	广西河池市金城江区, 松树
IfGZ4206	玫烟色棒束孢 <i>Isaria fumosorosea</i>	贵州毕节市七星关区鸭池镇, 荒地
IfGZ4304	玫烟色棒束孢 <i>Isaria fumosorosea</i>	贵州毕节市大方县百纳乡, 松树林
IfGX70A01	玫烟色棒束孢 <i>Isaria fumosorosea</i>	广西柳州市鹿寨县寨沙镇, 桉树林
IjH2702	爪哇棒束孢 <i>Isaria javanica</i>	湖北省孝感市应城市, 杂草地
LmMS-48	毒蝇蜡蚧菌 <i>Lecanicillium muscarium</i>	内蒙古锡林浩特市阿尔善保力格镇, 草地
LpTS01	刀孢蜡蚧菌 <i>Lecanicillium psalliotae</i>	甘肃省永登县中川镇, 灌木丛
MbGX33H05	球芽普可尼亚菌 <i>Metapochonia bulbilosa</i>	广西河池市南丹县城关镇, 荒地
PITS01	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	甘肃省永登县中川镇, 灌木丛
PIMS-10	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	内蒙古察哈尔右后旗, 草地
PIMS-12	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	内蒙古化德县城郊, 草地
PIMS-15	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	内蒙古锡林郭勒盟正镶白旗, 草地
PIFJ02	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	福建龙岩市连城冠豸山, 荒地
PIGD02	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	广东潮州市饶平县桥头, 菜地
PIGX21G01	淡紫紫孢菌 <i>Purpureocillium lilacinum</i>	广西南宁市青秀区伶俐镇, 甘蔗地

被真菌感染致死)。每个处理虫数 30 头, 每处理重复 3 次, 测定供试菌株对烟粉虱 2 龄若虫的致病活性。

经初步活性测定后, 选取致病力较高的真菌菌株, 进一步测定其对烟粉虱的生物活性。配制分生孢子悬浮液浓度系列, 以 0.02% Tween-80 水溶液同样处理叶片作为对照。具体处理方法同上。

1.3.3 侵染形态观察

采用浸渍法进行真菌生物毒力测定的同时, 对 13 株真菌侵染烟粉虱进行了观察。观察时间分

别为浸渍孢子悬浮液后的侵染初期 (4 d) 和侵染后期 (10 d), 在蔡司体式显微镜下观察其侵染烟粉虱的形态特征, 并拍照。

1.3.4 数据分析

根据下式计算累计死亡率和校正死亡率, 采用 SPSS v. 14.0 (IBM, USA) 软件进行方差分析和毒力回归分析, 采用邓肯氏新复极差法 (DMRT 法) 比较平均数差异, Probit 法构建毒力回归方程, 并估算半致死浓度 LC_{50} 与时间 LT_{50} 。

$$\text{累计死亡率}(\%) = \frac{\text{样本中死亡的总虫数}}{\text{样本总虫数}} \times 100$$

$$\text{累计校正死亡率}(\%) = \frac{\text{处理区死亡率} - \text{对照死亡率}}{1 - \text{对照死亡率}} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 供试菌株对烟粉虱的毒力

不同菌株对烟粉虱 2 龄若虫的室内测定结果显

示, 不同菌株在同一时间上致死率存在差异, 而同一菌株对烟粉虱的致死率随侵染时间的延长而增加 (表 2)。浸渍处理 4 d 后, 共计 5 个菌株的校正死亡率超过 50%, 其中 PITS01 的校正死亡率最高 (60.38%); 浸渍处理 6 d 后, 共计 11 个菌

表 2 供试菌株对 B 型烟粉虱 2 龄若虫累计校正死亡率
 Table 2 Calibrated mortality of the 2nd instar nymphs of *Bemisia tabaci* infected with fungal strain at 10⁸ spore/mL

菌株 Strain	累计校正死亡率(%) Calibrated mortality					LT ₅₀ (95%置信区间)(d) 95% Confidence interval of LT ₅₀	
	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d		
AuTS01	4.59 ± 0.58 c	56.87 ± 0.67 bc	59.37 ± 1.02 c	62.20 ± 1.72 c	63.63 ± 1.27 c	3.6(3.0 ~ 3.8)	
AuTS02	14.36 ± 1.40 b	58.19 ± 1.18 ab	73.76 ± 0.80 b	83.78 ± 0.68 b	87.77 ± 1.55 b	3.9(3.5 ~ 4.3)	
BbTS03	4.21 ± 0.12 c	54.75 ± 0.82 c	56.36 ± 1.90 d	60.41 ± 2.14 c	62.53 ± 1.25 c	3.5(3.0 ~ 3.8)	
BbMS-25	0	25.08 ± 8.33 c	60.52 ± 3.55 a	79.61 ± 3.88 ab	88.12 ± 3.54 a	5.3(5.0 ~ 5.6)	
BbH2802	0	8.59 ± 4.73 cde	45.34 ± 7.22 bc	81.54 ± 7.16 a	86.53 ± 5.58 a	6.4(5.8 ~ 7.1)	
IcGX32S01	0	28.45 ± 2.90 b	42.86 ± 1.47 bcd	51.40 ± 4.73 bc	58.57 ± 7.30 d	7.6(5.6 ~ 14.5)	
IcZ4206	0	15.98 ± 2.25 cd	45.90 ± 7.60 bc	59.01 ± 6.42 b	77.69 ± 1.59 abc	6.8(6.1 ~ 7.5)	
IcZ4304	0	37.17 ± 2.05 ab	56.12 ± 6.62 ab	75.42 ± 2.75 a	80.22 ± 3.98 ab	5.5(4.2 ~ 6.9)	
IcGX70A01	0	17.65 ± 2.98 c	44.26 ± 5.80 bc	60.10 ± 5.93 b	72.69 ± 4.80 bc	6.8(6.1 ~ 7.5)	
IjH2702	0	41.58 ± 5.07 a	60.22 ± 8.53 a	75.44 ± 6.38 a	82.21 ± 8.78 ab	5.2(3.4 ~ 7.3)	
LmMS-18	0	24.72 ± 6.46 c	68.29 ± 9.28 ab	79.95 ± 1.03 ab	89.87 ± 5.22 a	4.2(2.5 ~ 5.6)	
LpTS01	17.89 ± 0.62 a	57.78 ± 1.63 b	80.52 ± 0.81 a	88.98 ± 1.42 a	91.49 ± 0.66 a	3.6(3.2 ~ 4.0)	
MbCX33H05	0	3.39 ± 0.35 e	12.17 ± 0.70 e	73.94 ± 2.11 a	81.36 ± 2.72 ab	7.4(5.8 ~ 9.3)	
PITS01	18.01 ± 1.25 a	60.38 ± 0.82 a	80.23 ± 1.33 a	89.07 ± 1.00 a	92.78 ± 1.27 a	3.5(3.2 ~ 3.9)	
PIMS-10	0	16.36 ± 3.64 de	48.27 ± 6.92 cd	70.32 ± 4.91 abc	86.74 ± 2.84 a	6.2(5.7 ~ 6.7)	
PIMS-12	0	17.87 ± 3.82 c	59.85 ± 6.02 a	74.87 ± 4.73 a	92.39 ± 3.81 a	5.7(5.2 ~ 6.2)	
PIMS-15	0	18.62 ± 7.73 cd	61.42 ± 9.65 b	80.67 ± 06.25 ab	91.57 ± 6.33 a	4.5(3.0 ~ 5.4)	
PIFJ02	0	28.74 ± 7.25 b	37.31 ± 2.95 cd	45.72 ± 6.37 c	57.46 ± 6.53 d	8.1(5.8 ~ 12.8)	
PIGD02	0	10.19 ± 5.65 cde	30.15 ± 5.40 d	47.16 ± 2.39 c	53.02 ± 5.56 d	8.8(9.7 ~ 10.7)	
IFGX21C01	0	7.81 ± 2.24 de	37.21 ± 6.27 cd	54.33 ± 2.92 bc	65.62 ± 6.35 cd	7.7(6.8 ~ 8.8)	

注:表中数据为平均数 ± 标准差,同列数据后不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Note: Data were presented as mean ± SE, different lowercase letters after data at the same processing time indicated significant differences in pathogenicity among different strains ($P < 0.05$, DMRT).

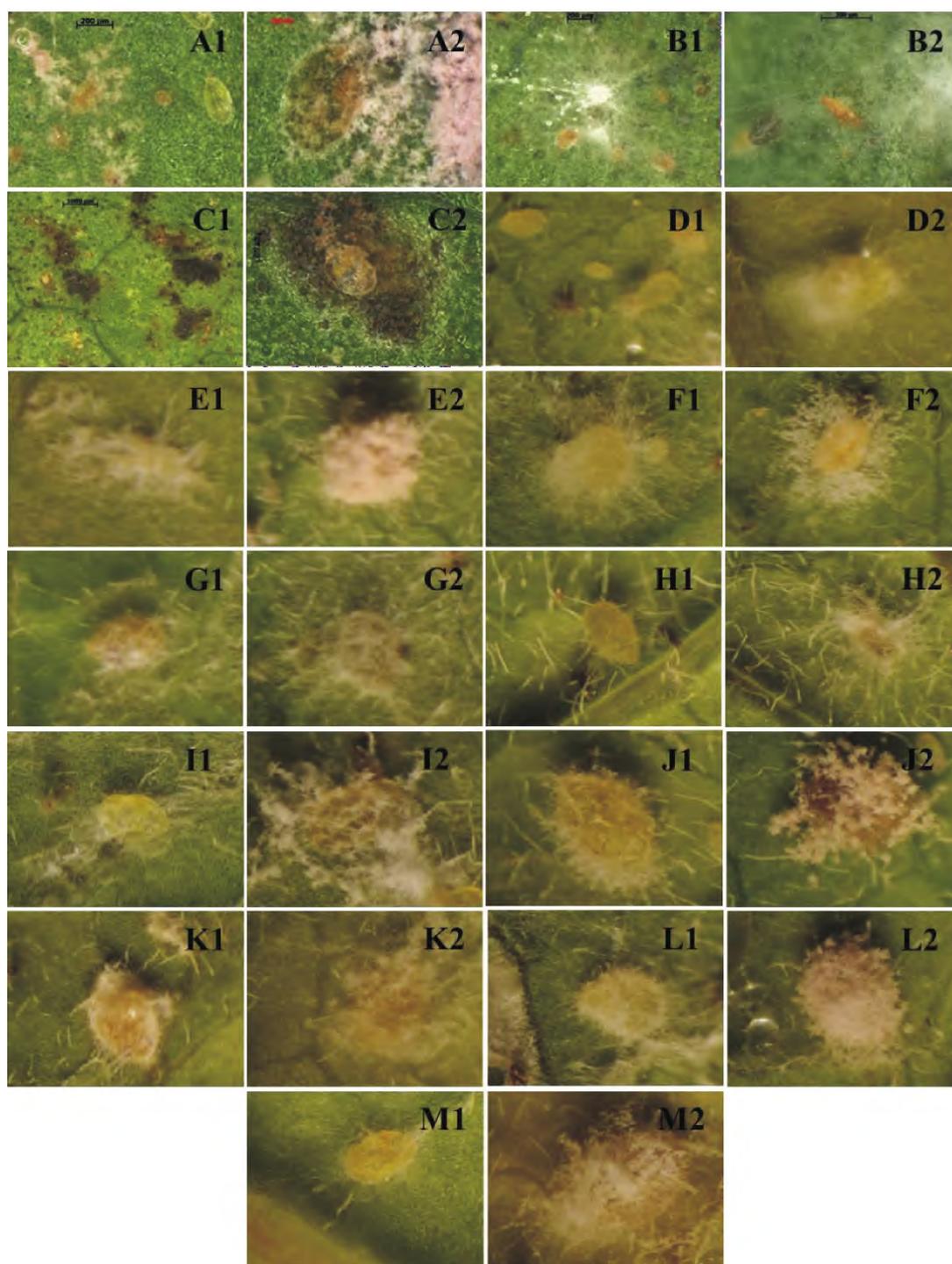


图1 烟粉虱2龄若虫受侵染后的形态变化

Fig. 1 Morphological changes following infestation with the 2nd instar nymphs of *Bemisia tabaci*

注: 1 为菌株侵染 4 d, 2 为菌株侵染 10 d。A1、A2, PITS01; B1、B2, LpTS01; C1、C2, AuTS02; D1、D2, IfGX70A01; E1、E2, IfGX21G01; F1、F2, PIH2802; G1、G2, IfGX33H05; H1、H2, IfGZ4206; I1、I2, IfGZ4304; J1、J2, PIFJ02; K1、K2, IjH2702; L1、L2, IfGD02; M1、M2, IcGX32S01。Note: The odd number showed that nymphs were infested for 4 days and the even number showed that nymphs were infested for 10 days.

株的校正死亡率超过 50%，其中菌株 PITS01 和 LpTS01 已超过 80%，其校正死亡率为 80.23% 和 80.52%；浸渍处理 8 d 后，共计 12 个菌株的校正

死亡率超过 70%，其中 5 个菌株 PIMS-15、BbH2802、AuTS02、LpTS01、PITS01 超过 80%；浸渍侵染 10 d 后，共计 12 个菌株的校正死亡率已

超过 80%，其中 8 个菌株 IfGZ4304、MbGX33H05、IjH2702、BbH2802、PIMS-10、AuTS02、BbMS-25、LmMS-18 的校正死亡率为 80.22% ~ 89.87%，其余 4 个菌株 LpTS01、PIMS-15、PIMS-12、PITS01 的校正死亡率均超过 90%，其中 PITS01 (92.78%) 菌株致死率最高。

时间上采用半数致死时间 (LT_{50}) 即致死中表示 20 株菌株对烟粉虱若虫的致死效果及速度，如表 2 所示，各菌株在同一浓度下 (1.0×10^8 孢子/mL) 处理烟粉虱 2 龄若虫，致死中时大约为 3 ~ 9 d。5 个菌株 PITS01、BbTS03、AuTS01、LpTS01、AuTS02 的半数致死时间为 3 ~ 4 d，其中 PITS01、BbTS03、AuTS01、LpTS01 四个菌株的半致死时间最短且接近，约为 3.5 d；6 个菌株 LmMS-18、PIMS-15、IjH2702、BbMS-25、IfGZ4304、PIMS-12 的半数致死时间为 4 ~ 6 d；其余 9 个菌株的半数致死时间均超过 6 d，其中 PIGD02 菌株的最长约为 9 d。

虫生真菌侵染烟粉虱 2 龄若虫后的形态特征具体见图 1。各菌株侵染初期 (4 d)，菌丝突出体壁向外生长，在虫体表面大量增殖，体态逐渐干瘪，体色由绿色向褐色转变；菌株侵染后期 (10 d)，若虫密被虫生真菌的菌丝体，部分菌丝已产生分生孢子，大部分若虫干瘪、体色变枯黄，小部分若虫体表虽未长出菌丝体，但其生长发育的速率

明显减慢。

2.2 菌株 PITS01 和 LpTS01 对烟粉虱的毒力

不同孢子浓度的 PITS01 和 LpTS01 孢子悬浮液处理烟粉虱若虫后，总体上，处理浓度越高，烟粉虱的病死率越高，不同孢子浓度处理后的病死率差异显著；且处理后时间越长，烟粉虱的病死率越高 (表 3)。在浓度 9.0×10^7 孢子/mL 时，两种菌对烟粉虱若虫均有良好的致病力，PITS01 药后 2、4、6、8 和 10 d 累计校正死亡率分别达到 18.43%、59.63%、78.45%、90.07% 和 92.31%，LpTS01 药后 2、4、6、8 和 10 d 累计校正死亡率分别达到 18.28%、56.54%、79.17%、88.41% 和 91.09%。

PITS01 和 LpTS01 菌株的毒力回归分析显示 (表 4)， P 值均大于 0.15，表明拟合的方程符合要求。PITS01 和 LpTS01 菌株的 LC_{50} 值随着处理时间的延长而逐渐减小，处理 4 d 后分别为 2.8×10^7 孢子/mL， 3.6×10^7 孢子/mL；处理 6 d 后分别为 1.7×10^6 孢子/mL， 3.6×10^5 孢子/mL。

两种菌株 LT_{50} 回归分析结果表明 (见表 5)， LT_{50} 值随着孢子浓度的增加而逐渐减少，孢子浓度为 1.0×10^7 孢子/mL 时，PITS01 和 LpTS01 菌株 LT_{50} 值分别为 4.4 d 和 4.2 d。

表 3 菌株 PITS01 和 LpTS01 对烟粉虱 2 龄若虫累计校正死亡率

Table 3 Calibrated mortality of the 2nd instar nymphs of *Bemisia tabaci* infected with PITS01 and LpTS01

菌株 Strain	浓度 (孢子/mL) Concentration	累计校正死亡率 (%) (Mean ± SD) Calibrated mortality				
		2 d	4 d	6 d	8 d	10 d
PITS01	1.1×10^6	1.26 ± 0.94 e	20.30 ± 1.38 e	47.81 ± 0.98 d	72.58 ± 1.06 e	79.82 ± 2.30 d
	3.3×10^6	4.89 ± 1.55 d	34.13 ± 0.70 d	61.43 ± 0.96 c	78.67 ± 1.68 d	85.72 ± 1.20 c
	1.0×10^7	12.36 ± 0.74 c	50.63 ± 2.25 c	68.68 ± 2.14 b	82.67 ± 0.97 c	88.36 ± 1.54 b
	3.0×10^7	15.16 ± 0.22 b	53.41 ± 0.95 b	77.25 ± 1.08 a	85.09 ± 2.00 b	90.70 ± 1.54 a
	9.0×10^7	18.43 ± 0.94 a	59.63 ± 1.89 a	78.45 ± 1.40 a	90.07 ± 1.59 a	92.31 ± 1.24 a
LpTS01	1.1×10^6	3.73 ± 1.48 e	32.03 ± 0.76 e	58.08 ± 1.10 e	72.70 ± 0.72 e	77.28 ± 1.36 d
	3.3×10^6	6.83 ± 0.65 d	37.09 ± 1.09 d	63.86 ± 0.77 d	78.54 ± 0.95 d	83.16 ± 1.08 c
	1.0×10^7	12.64 ± 0.97 c	47.11 ± 1.67 c	72.23 ± 1.56 c	83.03 ± 1.02 c	86.89 ± 1.34 b
	3.0×10^7	14.84 ± 1.31 b	50.66 ± 0.20 b	74.37 ± 0.84 b	85.07 ± 0.71 b	87.75 ± 1.73 b
	9.0×10^7	18.28 ± 1.27 a	56.54 ± 0.78 a	79.17 ± 0.35 a	88.41 ± 0.73 a	91.29 ± 1.24 a

注：表中数据为平均数 ± 标准差，同列数据后不相同字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。Note: Data were presented as mean ± SE, different lowercase letters after data at the same processing time indicated significant differences in pathogenicity among different strains ($P < 0.05$, DMRT).

表 4 两种真菌对烟粉虱 2 龄若虫的 LC₅₀ 回归方程和 LC₅₀ 值Table 4 LC₅₀ regression equation and LC₅₀ value of two fungi to second instar nymphs of *Bemisia tabaci*

菌株 Strain	处理时间 (d) Time	LC-p 方程	χ^2	P	LC ₅₀ 及其 95% 置信区间 (× 10 ⁶ 孢子/mL) 95% Confidence interval of LT50
PITS01	4	Y = 0.61X - 4.51	0.73	0.87	27.80 (20.90 ~ 38.70)
	6	Y = 0.50X - 3.09	2.64	0.45	1.66 (0.98 ~ 2.47)
	8	-	-	-	<0.50
LpTS01	4	Y = 0.35X - 2.66	1.60	0.66	36.00 (23.30 ~ 66.90)
	6	Y = 0.32X - 1.81	1.55	0.67	0.36 (0.07 ~ 0.92)
	8	-	-	-	<0.50

表 5 两种真菌对烟粉虱 2 龄若虫 LT₅₀ 回归方程和 LT₅₀ 值Table 5 LT₅₀ regression equation and LT₅₀ value of two fungi to second instar nymphs of *Bemisia tabaci*

菌株 Strain	浓度 (孢子/mL) Concentration	LT-p 方程	χ^2	P	LT ₅₀ 及其 95% 置信区间 (d) 95% Confidence interval of LT ₅₀
PITS01	1.1 × 10 ⁶	Y = 1.91X - 3.47	2.75	0.43	6.1 (5.9 ~ 6.3)
	3.3 × 10 ⁶	Y = 1.68X - 2.74	0.21	0.98	5.1 (4.8 ~ 5.4)
	1.0 × 10 ⁷	Y = 1.52X - 2.23	0.57	0.90	4.4 (4.1 ~ 4.6)
	3.0 × 10 ⁷	Y = 1.48X - 2.01	2.17	0.54	3.9 (3.7 ~ 4.1)
	9.0 × 10 ⁷	Y = 1.52X - 1.91	2.17	0.16	3.5 (3.3 ~ 3.7)
LpTS01	1.1 × 10 ⁶	Y = 1.54X - 2.66	4.87	0.18	5.6 (5.3 ~ 5.9)
	3.3 × 10 ⁶	Y = 1.55X - 2.50	4.57	0.21	5.0 (4.8 ~ 5.2)
	1.0 × 10 ⁷	Y = 1.45X - 2.09	4.71	0.19	4.2 (4.0 ~ 4.4)
	3.0 × 10 ⁷	Y = 1.43X - 1.97	4.20	0.24	4.0 (3.8 ~ 4.2)
	9.0 × 10 ⁷	Y = 1.46X - 1.88	2.70	0.44	3.6 (3.4 ~ 3.8)

3 结论与讨论

烟粉虱属于刺吸式口器害虫, Bt、细菌与昆虫病毒等“胃毒”性的微生物杀虫剂对其没有毒杀作用, 而虫生真菌可从表皮侵入昆虫体内, 具有类似“触杀作用”, 所以利用虫生真菌防治烟粉虱具有独特优势。国内外报道过的对烟粉虱具有活性的虫生真菌种类虽然比较多, 但实际应用种类主要是球孢白僵菌、玫烟色棒束孢、蜡蚧菌等少数几个种, 我国只有球孢白僵菌产品登记用于防治烟粉虱 (<http://www.chinapesticide.org.cn/>), 美国和欧洲等国家与地区则有球孢白僵菌、玫烟色棒束孢和蜡蚧菌产品登记与应用 (<https://www.epa.gov/>) (<https://ec.europa.eu/food/plant/>)

(谢文等, 2020)。本研究的 9 种 20 株分布于全国各地土壤中的虫生真菌, 全部对烟粉虱有一定生物活性, 说明烟粉虱的病原真菌在自然界比较多见, 可能对烟粉虱的自然种群有潜在的控制作用, 为生物农药的开发提供了重要的理论依据。

有研究表明球孢白僵菌 JAB07 和 LCMAP3790 对烟粉虱的卵和若虫均有较高的致病性, 用其孢子悬浮液处理后烟粉虱 2 龄若虫后, 死亡率分别为 96.68% 和 97.74%, 而球孢白僵菌 IBCB66 株的死亡率较差, 为 67.51% (David *et al.*, 2019)。本实验中的白僵菌 BbMS-25 最高死亡率可达 88.12%, 经对比说明其生物活性处于中等水平。而在沈祥祥的研究中, 用孢子悬浮液对烟粉虱 2 龄若虫处理后, 死亡率较高的菌株有 Bb84、Bb55, 分别为 80.6%、54.2%, 其中菌株 Bb84 的 LT₅₀ 为

3.68 d (沈祥祥, 2019); 李茂业的研究中, 筛出生防效果较好的菌株 Mf96 的死亡率最高, 可达 89.5%, LT_{50} 为 3.65 d (李茂业等, 2016)。本实验中菌株 PIMS-12、PITS01 和 LpTS01 死亡率最高均超过 90%, PITS01 和 LpTS01 的致死中时最小, LT_{50} 为 3.5 d, 而 PIMS-12 的 LT_{50} 较长为 5.7 d, 以上说明菌株 PITS01 和 LpTS01 的生物活性较优于已知生防菌 Bb84、Bb55 和 Mf96。张召荣研究中一株蜡蚧菌菌株对烟粉虱 2 龄若虫第 8 天的致死率为 86.9% (张召荣等, 2015), 与本实验中刀孢蜡蚧菌 LpTS01 对比, 其相同时间致死率为 88.98%, 这两株蜡蚧菌的生物活性相差不大。以上比较结果说明菌株 PITS01 和 LpTS01 对烟粉虱具有良好生防应用潜力, 值得进一步研究。

本研究首次报道了环链棒束孢 *I. cateniannulata*、球芽普可尼亚菌 *M. bulbilosa* 和淡紫紫孢菌 *P. lilacinum* 等 3 种对烟粉虱具有生物活性。有关环链棒束孢的研究不多, 曾有报导该菌对叶螨和蜡象 *Aspongopus chinensis* 有生物活性 (Rocha *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2018), 本研究拓宽了其潜在应用范围。关于球芽普可尼亚菌的研究也比较少, 该菌曾归类于普可尼亚属, 具有杀线虫活性 (Nicola *et al.*, 2014)。淡紫紫孢菌则是一个研究非常常见的真菌, 被广泛地用于植物线虫病防治 (Niu *et al.*, 2019), 其分布广泛, 易于加工生产成菌剂, 可见其用于防治烟粉虱具有较好的潜力。

未来虫生真菌的应用范围将更加广泛, 方法也将更加多样, 如何进一步有效利用筛选出的高致病力的菌株成为研究的热点。后续有必要研究生防菌与已知农药混配制成真菌制剂以提高防效 (Cuthbertson *et al.*, 2005; Wari *et al.*, 2020), 实现农药的减量增效, 为生防制剂的开发研究打下基础。

参考文献 (References)

- Brunner-Mendoza C, Navarro-Barranco H, León-Mancilla B, *et al.* Biosafety of an entomopathogenic fungus *Isaria fumosorosea* in an acute dermal test in rabbits [J]. *Cutaneous and Ocular Toxicology*, 2016, 36 (1): 1-7.
- Chen ZQ, Liang WL, Huang LP, *et al.* Identification of 29 strains of entomogenous fungi and their toxicity to *Bemisia tabaci* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2020, 41 (4): 57-67. [陈中琴, 梁文龙, 黄丽萍, 等. 29 株虫生真菌的鉴定及对烟粉虱的毒力 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41 (4): 57-67]
- Cuthbertson A, Walters K, Deppe C. Compatibility of the entomopathogenic fungus *Lecanicillium muscarium* and insecticides for eradication of sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* [J]. *Mycopathologia*, 2005, 160 (1): 35-41.
- David JLE, Igor HSDS, Rogério TD, *et al.* Potential of entomopathogenic fungi as biological control agents of whitefly (*Bemisia tabaci* biotype B) (Genn.) (Hemiptera: Aleyrodidae) [J]. *Journal of Experimental Agriculture International*, 2019, 36 (6): 1-8.
- Islam MT, Castle SJ, Ren S. Compatibility of the insect pathogenic fungus *Beauveria bassiana* with neem against sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*, on eggplant [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2010, 134 (1): 28-34.
- Jia ZZ, Wang XW, FU KY, *et al.* Biotype identification of *Bemisia tabaci* and 11 kinds of common pesticides resistance status in xinjiang main agricultural areas [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54 (2): 304-312. [贾尊尊, 王小武, 付开赞, 等. 新疆主要农区烟粉虱生物型鉴定及其对 11 种常用杀虫剂的抗性监测 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54 (2): 304-312]
- Jing LL, Jiang L, Xie T, *et al.* Influences of subculture on the virulence to *Bemisia tabaci* and conidial production of the entomopathogenic fungus *Verticillium lecanii* [J]. *Plant Protection*, 2020, 46 (5): 70-76. [景亮亮, 姜灵, 谢婷, 等. 不同培养基继代培养蜡蚧轮枝菌对产孢量和烟粉虱毒力的影响 [J]. 植物保护, 2020, 46 (5): 70-76]
- Li MY, Chen DX, Lin HF, *et al.* Integration of emulsifiable formulation metarhizium flavoviride with low-rate abamectin for control of *Bemisia tabaci* Q biotype [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (13): 2553-2560. [李茂业, 陈德鑫, 林华峰, 等. 黄绿绿僵菌悬乳剂与低剂量阿维菌素对 Q 型烟粉虱的联合防治作用 [J]. 中国农业科学, 2016, 49 (13): 2553-2560]
- Li ZZ. History, progress and current status of the application of fungi against pest insects in China [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31 (5): 699-711. [李增智. 我国利用真菌防治害虫的历史、进展及现状 [J]. 中国生物防治学报, 2015, 31 (5): 699-711]
- Nicola L, Tosi S, Savini D. *In vitro* evaluation of nematophagous activity of fungal isolates [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2014, 54 (1): 1-5.
- Niu X, Xie W, Zhang J, *et al.* Biodiversity of entomopathogenic fungi in the soils of South China [J]. *Microorganisms*, 2019, 7 (9): 30-44.
- Ren SX, Wang ZZ, Qiu BL, *et al.* The pest status of *Bemisia tabaci* in China and non-chemical control strategies [J]. *Insect Science*, 2010, 8 (3): 279-288.
- Rocha LN, Christian L. Activity of *Metarhizium* spp. and *Isaria* spp. from the central brazilian cerrado against *Triatoma infestans* nymphs [J]. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 2011, 105 (7): 417-419.
- Sayed S, Al-Otaibi S, El-Shehawi A, *et al.* Field evaluation of native fungus, *Beauveria bassiana* (Bals.) Vuillemin against some

- piercing-sucking insects on the grapevine [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2021, 24 (1): 158–164.
- Shen XX. Screening and Application of Highly Virulent Entomopathogenic Fungi from *Bemisia tabaci* [D]. Hefei: Anhui Agricultural University Master Thesis, 2019. [沈祥祥. 烟粉虱高毒力昆虫病原真菌筛选及其应用研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学硕士论文, 2019]
- Wang YQ, Zhou TT, Lin HF, et al. Time-dose-mortality of the *Beauveria bassiana* strain Bb84 on Q-biotype *Bemisia tabaci* [J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2016, 18 (4): 459–464. [王艳秋, 周婷婷, 林华峰, 等. 球孢白僵菌 Bb84 对 Q 型烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型分析 [J]. 农药学报, 2016, 18 (4): 459–464]
- Wang YM, He YZ, Liu SS, et al. Research progress on characteristics and mechanism of *Bemisia tabaci* transmitting plant virus [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65 (15): 1463–1475. [王雨蒙, 何亚洲, 刘树生, 等. 烟粉虱传播植物病毒特性及机制研究进展 [J]. 科学通报, 2020, 65 (15): 1463–1475]
- Wang C, Wang S. Insect pathogenic fungi: Genomics, molecular interactions, and genetic improvements [J]. *Annual Review of Entomology*, 2017, 62 (1): 73–90.
- Wari D, Okada R, Takagi M, et al. Augmentation and compatibility of *Beauveria bassiana* with pesticides against different growth stages of *Bemisia tabaci* (Gennadius); an *in vitro* and field approach [J]. *Pest Management Science*, 2020, 76 (9): 3236–3252.
- Wei QY, Li YY, Xu C, et al. Endophytic colonization by *Beauveria bassiana* increases the resistance of tomatoes against *Bemisia tabaci* [J]. *Arthropod-Plant Interactions*, 2020, 14 (8): 289–300.
- Xiao Y, Ren SX, Qiu BL. Current status in study on the control of *Bemisia tabaci* (Gennadius) with entomopathogenic fungi [J]. *Natural Enemies of Insects*, 2001, 23 (1): 30–34. [肖燕, 任顺祥, 邱宝利. 应用虫生真菌防治烟粉虱的现状 [J]. 昆虫天敌, 2001, 23 (1): 30–34]
- Xie W, Zhi JR, Zhou YM. Research and application progress of *Lecanicillium* spp. in biological control of small insect pests [J]. *China Plant Protection*, 2020, 40 (7): 31–37. [谢文, 邹军锐, 周叶鸣. 蜡蚧菌防治小型害虫研究与应用进展 [J]. 中国植保导刊, 2020, 40 (7): 31–37]
- Xie T, Jing LL, Zhang XX, et al. Compatibility of 8 common pesticides with *Lecanicillium lecanii* JMC-01 and the toxicity of different pesticide-L. *lecanii* combinations toxicity to *Bemisia tabaci* nymphs [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2020, 57 (3): 682–689. [谢婷, 景亮亮, 张晓霞, 等. 八种常用农药与蜡蚧轮枝菌 JMC-01 的相容性及对烟粉虱若虫的毒力测定 [J]. 应用昆虫学报, 2020, 57 (3): 682–689]
- Zhang ZC, Zhang Y, Shen YC, et al. Characteristics and control effects of insecticidal fungus *Isaria javanica* against *Bemisia tabaci* of *Gerbera jamesonii* [J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2020, 36 (6): 1398–1402. [张志春, 张怡, 沈迎春, 等. 杀虫真菌爪哇棒束孢对非洲菊烟粉虱作用特点和控害效果 [J]. 江苏农业学报, 2020, 36 (6): 1398–1402]
- Zhang X, Jin D, Xiao Z, et al. Laboratory and field evaluation of an entomopathogenic fungus, *Isaria cateniannulata* strain 08XS-1, against *Tetranychus urticae* (Koch) [J]. *Pest Management Science*, 2016, 72 (5): 1059–1066.
- Zhang XN, Guo JJ, Zou X, et al. Pathogenic differences of the entomopathogenic fungus *Isaria cateniannulata* to the spider mite *Tetranychus urticae* (Trombidiformes: Tetranychidae) and its predator *Euseius nicholsi* (Mesostigmata: Phytoseiidae) [J]. *Experimental and Applied Acarology*, 2018, 75 (1): 69–84.
- Zhang ZR, Zhang YJ, Xie M. Identification and biological characteristics of a *Lecanicillium* isolate originating from tropic region and its pathogenicity against *Bemisia tabaci* [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31 (1): 64–70. [张召荣, 张艳军, 谢明. 一株来自热带地区蜡蚧菌的鉴定、生物学特性及其对烟粉虱的致病力 [J]. 中国生物防治学报, 2015, 31 (1): 64–70]