

宛氏拟青霉与球孢白僵菌对柑橘木虱的致病力分析*

宋晓兵^{1, 2**} 彭埃天^{1***} 凌金锋¹ 崔一平¹ 程保平¹ 张炼辉²

(1. 广东省农业科学院植物保护研究所, 广东省植物保护新技术重点实验室, 广州 510640;

2. 华南农业大学农学院, 广东省微生物信号与作物病害防控重点实验室, 广州 510640)

摘要 【目的】比较宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱成虫的致病力, 为生防制剂的田间应用提供理论支持。【方法】采用孢子悬浮液浸没法比较研究了 2 种真菌对柑橘木虱的致病力, 并利用时间-剂量-死亡率模型估计了 2 种真菌对柑橘木虱的致死剂量与致死时间。【结果】宛氏拟青霉 WS-11 在孢子悬浮液浓度为 1×10^8 spores/mL 时, 累计死亡率达到 90.67%, 球孢白僵菌 QB-28 则达到 97.33%。时间-剂量-死亡率模型中 Hosmer-Lemeshow 方法拟合异质性检验表明模型拟合良好, 在接种后 9 d, 宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的 LC_{50} 分别为 7.57×10^6 spores/mL 和 8.39×10^5 spores/mL; 当孢子悬浮液浓度为 1×10^8 spores/mL 时, 2 种真菌对柑橘木虱的 LT_{50} 分别为 2.50 d 和 1.93 d。【结论】宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱均有较好的致病力, 具有较好的生防潜质, 其中球孢白僵菌对柑橘木虱的致病力高于宛氏拟青霉, 致死效率更高。

关键词 宛氏拟青霉, 球孢白僵菌, 柑橘木虱, 致病力, 生物防治

Pathogenicity of *Paecilomyces variotii* and *Beauveria bassiana* to *Diaphorina citri*

SONG Xiao-Bing^{1, 2**} PENG Ai-Tian^{1***} LING Jin-Feng¹ CUI Yi-Ping¹
CHENG Bao-Ping¹ ZHANG Lian-Hui²

(1. Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Guangzhou 510640, China; 2. Agricultural College of South China Agricultural University, Guangdong Province Key Laboratory of Microbial Signals and Disease Control, Guangzhou 510640, China)

Abstract 【Objectives】To compare the pathogenicity of *Paecilomyces variotii* and *Beauveria bassiana* WS-11 and QB-28 strains to *Diaphorina citri* adults, and provide theoretical support for the use of these biocontrol agents in the field. 【Methods】The spore fluid immersion method was used to compare the virulence of both kinds of fungi to *D. citri* adults. A time-dose-mortality model was used to estimate lethal doses and the lethal period of exposure to each fungus. 【Results】The highest concentration of *P. variotii* caused 90.67% mortality where as *B. bassiana* caused 97.33% mortality rate on concentration of 1×10^8 spores/mL. The time-dose-mortality model was a good fit to the data and could be used to estimate exposure time and dose effects. The estimated LC_{50} values after 9 days inoculation with *P. variotii* or *B. bassiana* were 7.57×10^6 spores/mL and 8.39×10^5 spores/mL, respectively, whereas at a concentration of 1×10^8 spores/mL LT_{50} values were 2.50 d and 1.93 d, respectively. 【Conclusion】Both fungi were highly pathogenic to *Diaphorina citri* adults and consequently should both be considered as potential biological control agents for controlling this pest. The virulence of *B. bassiana* was higher than that of

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0202005、2018YFD0201500); 广东省公益研究与能力建设项目 (2014B020203003); 广东省现代农业产业技术体系建设专项 (2017LM1077); 广东省现代农业柑橘黄龙病检测与综合防控产业技术研发中心 (粤农[2017]168 号)

**第一作者 First author, E-mail: xbsong@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: pengait@163.com

收稿日期 Received: 2018-04-20, 接受日期 Accepted: 2018-07-23

P. variotii, and it consequently has greater potential as a biological control than *P. variotii*.

Key words *Paecilomyces variotii*, *Beauveria bassiana*, *Diaphorina citri*, pathogenicity, biocontrol

柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 隶属半翅目 (Hemiptera) 木虱科 (Psyllidae) (黄金萍等, 2015), 成虫和若虫群集吸食为害柑橘、九里香等芸香科植物的新芽嫩梢, 是柑橘毁灭性病害—柑橘黄龙病的重要传播虫媒 (牡丹超等, 2011; Cen *et al.*, 2012)。当前对柑橘黄龙病尚无有效的防治药剂和抗病品种, 加强柑橘木虱的综合防控, 对于遏制柑橘黄龙病的扩散蔓延具有重要的意义 (宋晓兵等, 2013, 2016)。为应对化学农药频繁使用造成了农业“3R”等诸多问题, 遏制当前农业面源污染扩大趋势, 农业部提出了“一控两减三基本”目标, 以生物防治为主的绿色防控技术是今后柑橘木虱防治的大趋势, 而虫生真菌的开发与利用已成为生物防治柑橘木虱的重要途径之一。

宛氏拟青霉 *Paecilomyces varioti* Bainier 隶属拟青霉属, 我国有记载的拟青霉属虫生真菌共 16 个种或变种, 在植物病虫害防治中有重要作用, 研究较多的有粉质拟青霉 *Paecilomyces farinosus*、玫烟色拟青霉 *Paecilomyces fumosoroseus*、淡紫色拟青霉 *Paecilomyces lilacinus* (唐美君, 2001)。球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin 是一种常见的寄生型真菌, 在众多昆虫病原真菌中, 是寄主范围广、致病性与适应性强的一种昆虫病原真菌, 是国内外虫生真菌中研究和应用最多的种类 (蒲蛰龙和李增智, 1996)。目前, 国外已筛选出多个对柑橘木虱高致病力的菌株 (Meyer *et al.*, 2007; Moran *et al.*, 2011; Lezama Gutiérrez *et al.*, 2012; Pinto *et al.*, 2012; 张艳璇等, 2013; 宋晓兵等, 2017), 但尚未见商品化的宛氏拟青霉和球孢白僵菌制剂应用于田间柑橘木虱的防治。

本研究选择广东省植物保护新技术重点实验室筛选获得的宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28, 以柑橘木虱成虫作为试虫, 比较研究了宛氏拟青霉与球孢白僵菌对其致病力, 并将菌

株对柑橘木虱的时间效应和剂量效应统一到时间-剂量-死亡率 (Time-dose-mortality model, TDM) 模型中, 对数据进行模拟和参数估计, 结合侵染症状观察, 明确两种真菌的生防潜力及致病力差异, 以期利用宛氏拟青霉和球孢白僵菌作为柑橘木虱的生防制剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试真菌: 宛氏拟青霉 WS-11 菌株和球孢白僵菌 QB-28 由广东省植物保护新技术重点实验室保存。

供试虫源: 柑橘木虱为本实验室温室中九里香植株上常年继代饲养的种群。

培养基: PDA 培养基, 马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂 17 g、蒸馏水 1 L。

仪器: SteREO Discovery 体视显微镜, 德国 ZEISS 公司。

1.2 方法

1.2.1 供试真菌侵染柑橘木虱的症状观察 将分离纯化保存的 2 种真菌分别接种到 PDA 平板上, 于 27 °C 恒温条件下培养 10 d 后, 以灭菌水洗脱菌落上的分生孢子, 分别制备成孢子悬浮液, 用血球计数板确定孢子悬浮液的浓度, 以灭菌水进行稀释, 获得浓度为 1.0×10^8 spores/mL 的分生孢子悬浮液, 并向其中加入终浓度为 0.1% 的吐温 80。参照文献 (鹿连明等, 2013) 的孢子悬浮液浸没接种方法, 取健康柑橘木虱成虫浸没于孢子悬浮液中 10-15 s, 挑取仍能活动自如的柑橘木虱置于培养皿中的九里香幼嫩叶片上, 培养皿底部铺有两层用无菌水浸湿的滤纸, 其上放置一个带 10 个左右叶片的九里香嫩枝, 枝条底端以无菌水浸湿的脱脂棉包裹, 每菌株处理 5 个培养皿, 每个培养皿饲养 5 头木虱, 然后置于 27 °C 光照培养箱中 (L:D=14:10, RH>90%)

饲养。接种处理 1、3、5、7、9 d 后分别观察 2 种真菌对柑橘木虱的侵染和致死情况。

1.2.2 供试真菌对柑橘木虱的毒力测定 将上述配置好的孢子悬浮液以灭菌水进行系列稀释, 获得浓度分别为 1.0×10^4 、 1.0×10^5 、 1.0×10^6 、 1.0×10^7 和 1.0×10^8 spores/mL 的分生孢子悬浮液, 并向其中加入终浓度为 0.1% 的吐温 80。按照 1.2.1 的方法接种, 挑取处理后仍能活动自如的柑橘木虱放置于九里香幼嫩叶片上, 然后置于 27 °C 光照培养箱中 (L:D=14:10, RH>90%) 培养。上述每个孢子悬浮液浓度处理各重复 3 次, 每个重复为 25 头木虱。接种处理 1、3、5、7、9 d 后分别观察 2 种真菌对柑橘木虱的致死情况, 记录柑橘木虱的死亡数量。

1.3 数据处理与分析

采用时间-剂量-死亡率模型 (TDM) 处理各时段的测定结果 (张建明等, 2012; 孟豪等, 2014)。受试生物在时间 t_j ($j=1, 2, \dots, j$) 被供试因子剂量 d_i ($i=1, 2, \dots, i$) 致死的概率 $p_{ij}=1-\exp[-\exp(\tau_j+\beta \lg(d_i))]$, p_{ij} 是剂量 d_i 在第 j 个时间单位内产生的累计死亡概率 (Cumulative mortality probability), 待估参数 β 是与剂量效应有关的斜率, τ_j 为对应 t_i 的时间效应参数。由于累计死亡概率在时间上是连续的, 若直接拟合则不符合模型模拟变量的独立性假设, 因此转向考虑剂量 d_i 使受试个体在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内可

能发生的条件死亡概率 (Conditional mortality probability), $q_{ij}=1-\exp[-\exp(\gamma_j+\beta \lg(d_i))]$, β 的含义与上式相同, γ_j 是在时间区间 $[t_{j-1}, t_j]$ 内时间效应的待估参数, γ_j 和 β 可通过二项式分布变量的最大似然函数逼近法求得。

在任意时刻 t_j 死亡概率 p_{ij} 所对应的有效剂量为 $\theta_j=(\ln(-\ln(1-p_{ij}))- \tau_j)/\beta$, 当 $p_{ij}=0.5$, 即试虫死亡率为 50% 时, θ_j 所得对数值即为 $\lg(\text{LC}_{50})$, 同理当 $p_{ij}=0.9$, 即试虫死亡率为 90% 时, θ_j 所得对数值即为 $\lg(\text{LC}_{90})$ 。对应于剂量 d_i 的 $\text{LT}_{50}=t_j+(t_{j+1}-t_j)(0.5-p_{ij})/(p_{ij+1}-p_{ij})$, 同理可求出 LT_{90} 。

试验数据的计算与模拟均使用 DPS7.05 数据处理软件完成 (唐启义, 2010)。采用 t -检验法对处理剂量与时间效应参数进行差异显著性检验, 并采用 Hosmer-Lemeshow 方法对模型的拟合性进行检验。

2 结果与分析

2.1 宛氏拟青霉和球孢白僵菌侵染柑橘木虱的症状

柑橘木虱接种宛氏拟青霉 WS-11 后 3 d, 虫体行动迟缓或静止不动, 利用体视显微镜观察, 木虱体表出现白色球状菌丝团, 头部开始出现少量菌丝 (图 1:A); 5 d 后球状菌丝团增多增大, 木虱头部开始长出大量灰褐色菌丝 (图 1:B);

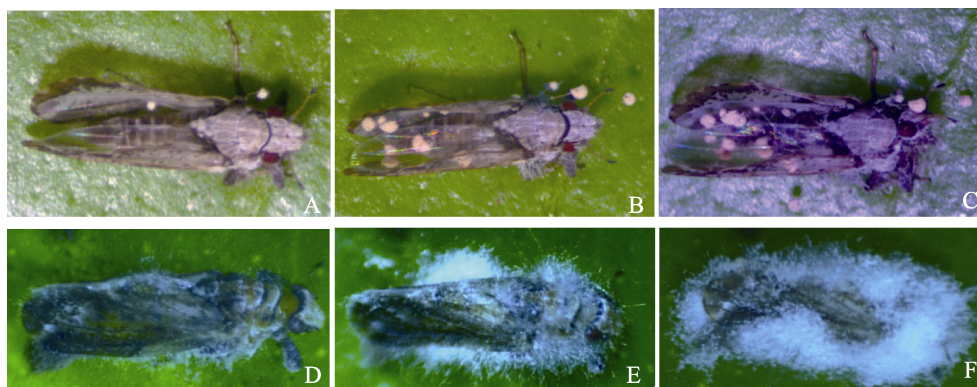


图 1 柑橘木虱成虫感染 2 种真菌后不同时期的外部症状

Fig. 1 The symptoms of the adults *Diaphorina citri* inoculated by WS-11 and QB-28 at different periods

A, B, C. 接种宛氏拟青霉 WS-11 后 3、5、7 d; D, E, F. 接种球孢白僵菌 QB-28 后 3、5、7 d。

A, B, C. 3, 5, and 7 days after inoculation with WS-11; D, E, F. 3, 5, and 7 days after inoculation with QB-28.

7 d 后木虱体表菌丝球状菌丝团增多, 大量褐色菌丝开始在虫体蔓延 (图 1:C)。

柑橘木虱接种球孢白僵菌 QB-28 后 3 d, 虫体基本处于静止状态, 利用体视显微镜观察, 在柑橘木虱虫体表面出现白色菌丝, 菌丝纤细呈无规则状伸展 (图 1:D); 处理后 5 d, 白色菌丝四处扩展, 菌丝纤细直立 (图 1:E); 7 d 后虫体出现大量微球状的白色分生孢子团, 肉眼可见球孢白僵菌 QB-28 的产孢结构, 整个木虱虫体已被白色菌丝包裹 (图 1:F)。

2.2 宛氏拟青霉和球孢白僵菌对柑橘木虱的致病力

柑橘木虱成虫分别接种宛氏拟青霉和球孢白僵菌 1、3、5、7、9 d 后, 累计死亡率均随着接种处理后的时间递增, 并且累计死亡率均随孢子剂量的提高而升高 (图 2, 图 3)。在宛氏拟青霉 WS-11 对柑橘木虱的处理中, 接种处理后 9 d 各剂量的累计死亡率达到最高值, 最高孢子悬浮液 (1.0×10^8 spores/mL) 处理后柑橘木虱的累计死亡率最高, 达到 90.67%。在球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的处理中, 9 d 各剂量的累计死亡率达到最高值, 最高孢子悬浮液 (1.0×10^8 spores/mL) 处理后柑橘木虱的累计死亡率最高, 达到 97.33%。相同孢子悬浮液浓度下, 宛氏拟青霉 WS-11 对柑橘木虱的累计死亡率均低于球孢白僵菌 QB-28, 说明球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的致病力更强。

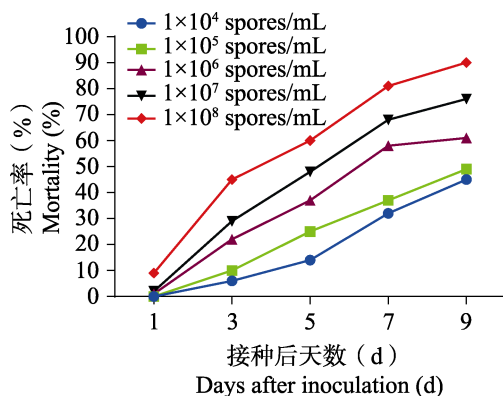


图 2 柑橘木虱接种不同浓度宛氏拟青霉后的累计死亡率

Fig. 2 Cumulative mortality probability of *Diaphorina citri* after inoculation with WS-11

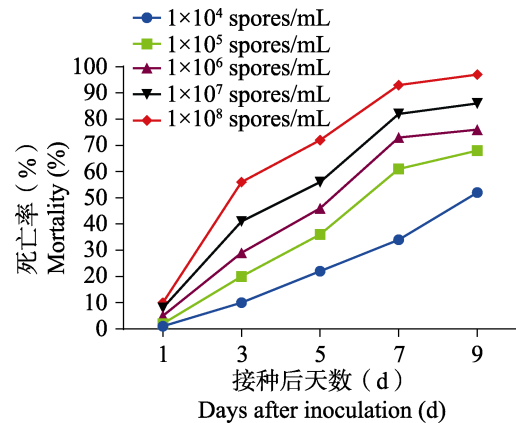


图 3 柑橘木虱接种不同浓度球孢白僵菌后的累计死亡率

Fig. 3 Cumulative mortality probability of *Diaphorina citri* after inoculation with QB-28

2.3 宛氏拟青霉和球孢白僵菌对柑橘木虱的致死效应

TDM 模型分析结果显示, 随着时间的增加, 侵染柑橘木虱所需的孢子浓度降低, LC_{50} 和 LC_{90} 也随之降低 (表 1)。球孢白僵菌 QB-28 在同一时间点的 LC_{50} 和 LC_{90} 均小于宛氏拟青霉 WS-11, 说明球孢白僵菌 QB-28 随时间变化的剂量-死亡效应优于宛氏拟青霉 WS-11, 即球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的致死效果强于宛氏拟青霉 WS-11。在接种后 9 d, 宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的 LC_{50} 分别为 7.57×10^6 和 8.39×10^5 spores/mL; 宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的 LC_{90} 分别为 1.18×10^9 和 2.97×10^8 spores/mL。

球孢白僵菌 QB-28 在同一时间点的 LT_{50} 均小于宛氏拟青霉 WS-11 (表 2), 结合柑橘木虱的感病症状观察, 表明球孢白僵菌 QB-28 侵入柑橘木虱的速度快于宛氏拟青霉 WS-11。随着孢子悬浮液浓度的增加, 两个真菌的 LT_{50} 值均减小。当孢子悬浮液浓度为 1.0×10^8 spores/mL 时, 宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱的 LT_{50} 分别为 2.50 d 和 1.93 d。宛氏拟青霉 WS-11 菌株对柑橘木虱的 TDM 模型的 $\chi^2 = 5.9474$ ($df=8$, $P=0.65313$), 球孢白僵菌 QB-28 菌株对柑橘木虱的 TDM 模型的 $\chi^2 = 4.7356$ ($df=7$, $P=0.69219$), 均小于 $\chi^2 = 15.51$, 说明这

表 1 接种 2 种真菌对柑橘木虱随时间而变化的剂量效应
Table 1 Time-dependent lg(LC₅₀), log(LC₉₀) of WS-11 and QB-28 against *Diaphorina citri*

接种后天数(d) Days after inoculation	WS-11		QB-28	
	lg(LC ₅₀)	lg(LC ₉₀)	lg(LC ₅₀)	lg(LC ₉₀)
1	14.995 7±1.058 6	18.198 4±1.325 0	12.820 2±0.644 9	15.944 1±0.863 8
3	8.837 9±0.318 9	12.040 6±0.594 4	7.785 8±0.197 6	10.909 7±0.397 3
5	7.225 7±0.195 4	10.428 3±0.437 9	6.365 2±0.143 2	9.489 1±0.290 4
7	5.615 3±0.171 2	8.818 0±0.292 4	4.522 1±0.190 5	7.646 1±0.172 5
9	4.874 2±0.203 1	8.076 9±0.235 8	3.912 0±0.220 1	7.036 0±0.148 9

表 2 接种 2 种真菌对柑橘木虱随剂量而变化的时间效应
Table 2 Concentration-dependent LT₅₀ and LT₉₀ of WS-11 and QB-28 against *Diaphorina citri*

菌株 Isolates	孢子悬浮液浓度(spores/mL)Spore suspension concentration	LT ₅₀	LT ₉₀
WS-11	1×10 ⁴	—	—
	1×10 ⁵	4.82	—
	1×10 ⁶	3.74	—
	1×10 ⁷	3.13	—
	1×10 ⁸	2.50	—
QB-28	1×10 ⁴	4.85	—
	1×10 ⁵	3.71	—
	1×10 ⁶	3.19	—
	1×10 ⁷	2.53	—
	1×10 ⁸	1.93	3.86

2 组数据均通过 Hosmer-Lemeshow 拟合度测验, 拟合模型的异质性不显著, 表明能够无偏描述不同浓度处理下 2 菌株对柑橘木虱的致病力。

3 结论与讨论

宛氏拟青霉隶属拟青霉属, 我国有记载的拟青霉属虫生真菌共 16 个种或变种, 在植物病虫害防治中有重要作用 (唐美君, 2001), 研究较多的有粉质拟青霉 *Paecilomyces farinosus*、玫烟色拟青霉 *Paecilomyces fumosoroseus*、淡紫色拟青霉 *Paecilomyces lilacinus* (安建梅, 2002; 吕利华等, 2007; 牡丹超等, 2015)。球孢白僵菌是一种重要的昆虫病原真菌, 对环境和脊椎动物无害, 杀虫谱广, 致病性强, 是目前国内外应用最广泛的昆虫病原真菌。Lezamagutiérrez 等 (2012) 测定了球孢白僵菌对柑橘木虱的致病

力, 结果表明球孢白僵菌对柑橘木虱成虫的致死率为 42%, 对柑橘木虱若虫的致死率为 40%。张艳璇等 (2011) 研究利用胡瓜钝绥螨搭载白僵菌控制柑橘木虱, 在两者共同作用下对柑橘木虱卵和成虫 3 d 后的死亡率和致病率分别为 98.4%和 98.8%, 对低龄若虫的感染率高达 100%。

TDM 模型最早用于化学杀虫剂的毒力测定, 以分析化学杀虫剂对昆虫的时间-剂量-死亡率数据 (Preisler and Robertson, 1989), 同样应用于分析虫生真菌对昆虫的生物测定数据分析 (冯明光等, 1996; Nowierski *et al.*, 1996)。虫生真菌的剂量效应与时间相关, 而时间又与剂量相关, 将时间-剂量-死亡率模型应用到分析病原真菌对昆虫的毒力测定, 把时间与浓度效应统一到同一个模型, 避免了几率分析中时间效应与浓度效应相互排斥的问题 (王联德等, 2003)。通

过时间-剂量-死亡率模型分析虫生真菌对昆虫的致病力,可以从多个角度衡量菌株的生物防治潜力,从而评价菌株的优劣。

本研究发现宛氏拟青霉 WS-11 和球孢白僵菌 QB-28 对柑橘木虱均具有较好的致病力,致死效率高,具有较好的生防潜力。结合 TMD 模型和侵染观察结果,最高剂量条件下 2 种真菌对柑橘木虱成虫的致死率最高,致死中时间最短,推荐孢子悬浮液 1×10^8 spores/mL 是较理想的施用防治浓度,未来可将本试验 2 种真菌开发成优良的生防菌制剂,促进柑橘木虱生防制剂的产业化进程。

参考文献 (References)

- An JM, 2002. Studies on pathogenesis of *Paecilomyces farinosus* infecting *Pieris rapae* (Linnaeus). *Plant Protection*, 28(4): 14–16. [安建梅, 2002. 粉质拟青霉侵染菜青虫致病过程的研究. 植物保护, 28(4): 14–16.]
- Cen YJ, Zhang LN, Xia YL, Guo J, Deng XL, Zhou WJ, Sequeira R, Gao JY, Wang ZR, Yue JQ, Gao YQ, 2012. Detection of 'Candidatus Liberibacter asiaticus' in *Cacopsylla* (Psylla) *citrisuga* (Hemiptera: Psyllidae). *Florida Entomologist*, 95(2): 303–309.
- Du DC, Lu LM, Hu XR, Huang ZD, Zhang LP, Chen GQ, 2015. Isolation and identification of *Purpureocillium lilacinum* and its pathogenicity against *Diaphorina citri*. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 27(3): 393–399. [杜丹超, 鹿连明, 胡秀荣, 黄振东, 张利平, 陈国庆, 2015. 淡紫紫孢菌菌株的分离、鉴定及其对柑橘木虱的致病性. 浙江农业学报, 27(3): 393–399.]
- Du DC, Lu LM, Zhang LP, Hu XR, Huang ZD, Chen GQ, 2011. Research progress in control technology of *Diaphorina citri*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 27(25): 178–181. [杜丹超, 鹿连明, 张利平, 胡秀荣, 黄振东, 陈国庆, 2011. 柑橘木虱的防治技术研究进展. 中国农学通报, 27(25): 178–181.]
- Feng MG, Tang QY, Hu GC, Huang SW, 1996. Susceptibility of seven species of aphids to *Beauveria bassiana* isolate: Analysis of time-dose-mortality model. *Journal of Applied Basic and Engineering Sciences*, 4(1): 22–33. [冯明光, 唐启义, 胡国成, 黄世文, 1996. 球孢白僵菌对七种蚜虫的感染反应——时间-剂量-死亡率模型分析. 应用基础与工程科学学报, 4(1): 22–33.]
- Huang JP, Huang JB, Gao W, Zen LX, Huang YM, Song YP, Cen YJ, 2015. Studies on the relationship between feeding sites and bacterium acquisition efficiency of *Diaphorina citri* on Huanglongbing-infected citrus. *Journal of South China Agricultural University*, 36(1): 71–74. [黄金萍, 黄建邦, 高娃, 曾丽霞, 黄有明, 宋银平, 岑伊静, 2015. 柑橘木虱取食黄龙病柑橘部位与获菌效率的关系. 华南农业大学学报, 36(1): 71–74.]
- Lezamagutiérrez R, Molinaochoa J, Chávezflores O, Ángelsahagún CA, Skoda SR, Reyesmartínez G, Barbareynoso M, Rebolledodominguez O, Ruízaguilar GML, Foster JE, 2012. Use of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae*, *Cordyceps bassiana* and *Isaria fumosorosea* to control *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in persian lime under field conditions. *International Journal of Tropical Insect Science*, 32(1): 39–44.
- Lv LH, He YR, Wu YJ, Feng X, Chen HY, 2007. The time-dose-mortality model of a *Paecilomyces fumosoroseus* isolate on the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Acta Entomologica Sinica*, 50(6): 567–573. [吕利华, 何余容, 武亚敬, 冯夏, 陈焕瑜, 2007. 玫烟色拟青霉对小菜蛾致病力的时间-剂量-死亡率模型模拟. 昆虫学报, 50(6): 567–573.]
- Lu LM, Du DC, Hu XR, Pu ZX, Zhang XY, Chen GQ, 2013. Isolation and identification of insect-fungi infected *Diaphorina citri*. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, (10): 1319–1322. [鹿连明, 杜丹超, 胡秀荣, 蒲占清, 张小亚, 陈国庆, 2013. 一株柑橘木虱虫生真菌的分离与鉴定. 浙江农业科学, (10): 1319–1322.]
- Meng H, Tian J, Fu SH, Diao HL, Ma RY, 2014. Pathogenicity of *Isaria fumosorosea* and *Beauveria bassiana* against the green peach aphid, *Myzus persicae*. *Journal of Plant Protection*, 41(6): 717–722. [孟豪, 田晶, 付淑慧, 刁红亮, 马瑞燕, 2014. 玫烟色棒束孢与球孢白僵菌对桃蚜致病力对比. 植物保护学报, 41(6): 717–722.]
- Meyer JM, Hoy MA, Boucias DG, 2007. Morphological and molecular characterization of a *Hirsutella* species infecting the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae) in Florida. *Journal of Invertebrate Pathology*, 95(2): 101–109.
- Moran PJ, Patt JM, Cabanillas HE, Adamczyk JL, Jackson MA, Dunlap CA, Hunter WB, Avery PB, 2011. Localized autoinoculation and dissemination of *Isaria fumosorosea* for control of the Asian citrus psyllid in South Texas. *Subtropical Plant Science*, 63: 23–35.
- Nowierski RM, Zeng Z, Jaronski S, Delgado F, Swearingen W, 1996. Analysis and modeling of time-dose-mortality of *Melanoplus*

- sanguinipes*, *Locusta migratoria migratorioides*, and *Schistocerca gregaria* (Orthoptera: Acrididae) from *Beauveria*, *Metarhizium* and *Paecilomyces* isolates from Madagascar. *Journal of Invertebrate Pathology*, 67(3): 236–252.
- Pinto APF, Filho AB, Almeida JEM, Wenzel IM, 2012. *Beauveria bassiana* pathogenicity to *Diaphorina citri* and compatibility of the fungus with phytosanitary products. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(12): 1673–1680.
- Preisler HK, Robertson JL, 1989. Analysis of time-dose-mortality data. *Journal of Economic Entomology*, 82(6): 1534–1542.
- Pu ZL, Li ZZ, 1996. Insect Mycology. Hefei: Anhui Science and Technology Press. 532–542. [蒲蛰龙, 李增智, 1996. 昆虫真菌学. 合肥: 安徽科学技术出版社. 532–542.]
- Song XB, Peng AT, Chen BP, Chen X, Ling JF, Zhang LH, 2016. Review of biological controls of *Diaphorina citri* using entomopathogenic fungi. *Journal of Biosafety*, 25(4): 255–260. [宋晓兵, 彭埃天, 程保平, 陈霞, 凌金锋, 张炼辉, 2016. 利用虫生真菌生物防治柑橘木虱的研究进展. 生物安全学报, 25(4): 255–260.]
- Song XB, Peng AT, Chen BP, Ling JF, Chen X, Zhang LH, 2017. Isolation and identification of a *Beauveria bassiana* strain infected *Diaphorina citri*. *Plant Protection*, 43(4): 139–144. [宋晓兵, 彭埃天, 程保平, 凌金锋, 陈霞, 张炼辉, 2017. 一株侵染柑橘木虱的球孢白僵菌的分离及鉴定. 植物保护, 43(4): 139–144.]
- Song XB, Peng AT, Chen X, Chen BP, Ling JF, 2013. Research advances of Citrus Huanglongbing pathogen culture and detection technology. *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(23): 65–69. [宋晓兵, 彭埃天, 陈霞, 程保平, 凌金锋, 2013. 柑橘黄龙病病原培养及分子检测技术研究进展. 广东农业科学, 40(23): 65–69.]
- Tang MJ, 2001. General situation and prospects of research, application, and development of *Paecilomyces* insect-fungi. *China Tea*, 23(3): 32–33. [唐美君, 2001. 拟青霉属虫生真菌的研究应用概况与展望. 中国茶叶, 23(3): 32–33.]
- Tang QY, 2010. DPS Data Processing System: Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining. Beijing: Science Press. 394–406. [唐启义, 2010. DPS 数据处理系统—实验设计、统计分析及数据挖掘. 北京: 科学出版社. 394–406.]
- Wang LD, Huang J, Lin GY, Liang ZS, 2003. The time-dose-mortality model of two *Verticillium lecanii* isolates on sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 32(2): 167–171. [王联德, 黄建, 林谷园, 梁智生, 2003. 蜡蚧轮枝菌对烟粉虱的时间-剂量-死亡率模型研究. 福建农业大学学报, 32(2): 167–171.]
- Zhang JM, Wang YP, Li XB, Li JY, Gao B, Ke QX, Zhong YP, Xu Q, Li S, 2012. Analysis of time-dose-mortality model of *Blattella germanica* infected by sulfuric fluoride. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides & Equipments*, 18(5): 397–400. [张建明, 王宇平, 李西标, 李金有, 高博, 柯秋璇, 郑燕平, 许卿, 李枢, 2012. 硫酰氟对德国小蠊的时间-剂量-死亡率模型研究. 中华卫生杀虫药械, 18(5): 397–400.]
- Zhang YX, Sun L, Lin JZ, Chen X, Ji J, 2011. Study on the predatory mites equipped with *Beauveria* sp. for control of *Diaphorina citri*. *Fujian Agricultural Science and Technology*, (6): 72–75, 117. [张艳璇, 孙莉, 林坚贞, 陈霞, 季洁, 2011. 利用捕食螨搭载白僵菌控制柑橘木虱的研究. 福建农业科技, (6): 72–75, 117.]