

利用虫生真菌生物防治柑橘木虱的研究进展

宋晓兵^{1,2}, 彭埃天^{1*}, 程保平¹, 陈霞¹, 凌金锋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, 广东 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, 广东 广州 510642

摘要: 柑橘木虱是柑橘黄龙病的重要传播虫媒。目前对柑橘黄龙病的防治尚缺有效的药剂和抗病品种, 加强对柑橘木虱的防治, 对控制柑橘黄龙病的蔓延具有重要意义。目前防治柑橘木虱多采用化学防治, 杀虫剂的频繁使用造成了农药残留、环境污染、生物多样性被破坏和害虫产生抗药性等诸多问题, 生物防治以其高效、低毒、低残留、不易产生抗药性等优点逐渐受到重视。昆虫病原真菌能侵入昆虫寄主体内, 导致昆虫发病死亡, 具有良好的病害流行潜力及生产应用便利性, 利用昆虫病原真菌防治柑橘木虱具有广阔的发展空间。本文总结了用于柑橘木虱生物防治的虫生真菌种类, 重点介绍了国内外利用球孢白僵菌、玫烟色棒束孢、淡紫紫孢菌、宛氏拟青霉、蜡蚧菌等虫生真菌在防治柑橘木虱中的应用, 并对虫生真菌防治柑橘木虱的发展前景进行了展望, 以期对柑橘黄龙病的防控提供借鉴。

关键词: 柑橘木虱; 虫生真菌; 生物防治; 柑橘黄龙病

Review of biological controls of *Diaphorina citri* using entomopathogenic fungi

Xiao-bing SONG^{1,2}, Ai-tian PENG^{1*}, Bao-ping CHENG¹, Xia CHEN¹, Jin-feng LING¹, Lian-hui ZHANG²

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of High Technology for Plant Protection, Plant Protection Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; ²Guangdong Province Key Laboratory of Microbial Signals and Disease Control, College of Agricultural, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract: *Diaphorina citri* is an important insect vector of Citrus huanglongbing. There currently is no effective drug and resistant varieties for Citrus huanglongbing. It is important to strengthen the prevention and treatment of *D. citri* for the controlling of Citrus huanglongbing epidemic. At present, chemical control methods are frequently used in the prevention and treatment of *D. citri*. Frequent use of pesticides leads to pesticide residues, environmental pollution, destruction of biodiversity, and pest resistance. Biological controls with high efficiency, low toxicity, low residue, and low resistance development are being gradually introduced. Entomopathogenic fungi can invade the host body, resulting in death of the insect. They have high potential spreading capacity and convenient to apply. This article reviews the entomopathogenic fungal species used for the biological control of *D. citri*, with a focus on the domestic and international applications of *Beauveria bassiana*, *Isaria fumosorosea*, *Purpureocillium lilacinum*, *Paecilomyces varioti*, *Lecanicillium lecanii*. It looks at the future prospect for the development of biological control of *D. citri* in order to provide reference for Citrus huanglongbing prevention and control.

Key words: *Diaphorina citri*; entomopathogenic fungus; biological control; Citrus huanglongbing

柑橘木虱 *Diaphorina citri* Kuwayama 隶属半翅目 Hemiptera 木虱科 Psyllidae (黄金萍等, 2015), 其成、若虫群集吸食芸香科植物的新芽嫩梢, 造成嫩

梢、嫩芽萎缩枯干, 新叶畸形易脱落, 严重影响植物生长, 若虫分泌的白色分泌物易引发煤污病。柑橘木虱不仅是柑橘上的重要害虫, 也是柑橘毁灭性病

收稿日期 (Received): 2016-02-05 接受日期 (Accepted): 2016-04-19

基金项目: 广东省农业领域引导项目 (2013B020309004); 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 (2016LM1077); 广东省科技计划项目 (2013B090700007)

作者简介: 宋晓兵, 男, 博士研究生。研究方向: 南方果树病害综合治理。E-mail: xbsong@126.com

* 通讯作者 (Author of correspondence), E-mail: pengait@163.com

害——柑橘黄龙病的重要传媒(杜丹超等,2011; Cen *et al.*, 2012)。当前对柑橘黄龙病尚缺乏有效的防治药剂和抗病品种(宋晓兵等,2013),加强对柑橘木虱的防治,对控制柑橘黄龙病的流行以及降低害虫本身对柑橘的危害都具有重要意义。目前对柑橘木虱的防治多采用化学防治,化学农药的频繁使用造成了农药残留、环境污染、生物多样性破坏和抗药性等诸多问题,而生物农药以其高效、低毒、低残留、无污染、不易产生抗药性等特性已逐渐引起人们的重视,建立一套以生物防治为主的绿色防控技术体系是今后柑橘木虱可持续控制的趋势。

虫生真菌是指在昆虫虫体上寄生的真菌,是真菌杀虫剂的直接材料来源,利用虫生真菌防治柑橘木虱具有良好的应用前景。在昆虫病原微生物中,真菌种类最多,约占昆虫病原微生物种类的 60%以上(林冠伦,1988),并且昆虫病原真菌具有较好的流行潜力和生产的便利性,利用昆虫病原真菌防治柑橘木虱有很大的发展空间。笔者根据国内外最新研究现状,较为系统地总结了当前用于柑橘木虱生物防治的虫生真菌种类及应用,并对利用虫生真菌防治柑橘木虱的发展趋势进行了展望,以期对柑橘木虱的防治及柑橘黄龙病的控制提供借鉴。

1 侵染柑橘木虱的虫生真菌种类

侵染柑橘木虱的病原真菌多为半知菌亚门,如球孢白僵菌 *Beauveria bassiana* (Balsamo) Vuillemin、玫烟色拟青霉 *Paecilomyces fumosoroseus* (Wize) Brown & Smith、蜡蚧轮枝菌 *Verticillium lecanii* (Zimmermann) Viégas、宛氏拟青霉 *Paecilomyces varioti* Bainier、桔形被毛孢 *Hirsutella citriformis* Speare、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* (Metchnikoff) Sorokin、蚜笋顶孢霉 *Acrostalagmus aphidium* Oud.、黄色镰孢 *Fusarium culmorum* (W. G. Smith) Sacc、匍柄霉 *Stemphylium* sp.、柑橘煤炱菌 *Capnodium citri* Berk. Et Desm. 等(陈祝安等,1985; Gandarilla-Pacheco *et al.*, 2013; Meyer *et al.*, 2008; Navarrete *et al.*, 2013)。

2 虫生真菌的侵染机制

虫生真菌侵染昆虫的过程涉及寄主识别、机械破坏、毒素分泌、代谢干扰等,多种因素共同作用导致寄主死亡(Clarkson & Charnley, 1996)。虫生真菌侵染寄主主要分 3 个阶段(吕丁丁等,2008; Wang *et al.*, 2005)。

(1) 体表附着阶段,在昆虫体表形成芽管。虫生真菌分生孢子附着到昆虫体表,一是通过分生孢子细胞壁与昆虫表皮上皮细胞的疏水作用进行被动附着,二是通过诱导分泌的胞外蛋白酶作用,使得分生孢子能够牢固地黏附在昆虫体壁上(Holder & Kevhani, 2005)。

(2) 体壁穿透阶段。在识别寄主后,孢子萌发芽管分化形成附着胞等侵染结构,在穿透昆虫体壁时,借助其形成的机械压力以及分泌的多种降解酶、代谢物质和毒素的联合作用侵染昆虫(Charnley & Leger, 1991)。在虫生真菌入侵过程中发现的酶类主要有蛋白质酶、几丁质酶、酯酶、脂酶、淀粉酶等(Robert & Messing-Al-Aidroos, 1985)。

(3) 体内定殖及致死阶段。芽管顶端的附着胞长出的侵入针产生巨大的机械压力,刺破体表进入血腔,在血腔中断裂为菌丝段,通过芽殖,菌丝段大量繁殖,同时分泌次生代谢物质等毒素,在毒素的协助下,虫生真菌击溃寄主的防御系统,并获取寄主体内的营养物质进行迅速繁殖,大量摄取昆虫体内营养最终导致寄主死亡(Gillespie *et al.*, 2000)。

3 柑橘木虱虫生真菌的应用

3.1 球孢白僵菌

球孢白僵菌是一种常见的寄生型真菌,其寄主范围广、致病性与适应性强,已记载的寄主包括 700 多种昆虫和 10 多种蜚和螨,是虫生真菌中研究和应用最多的种类(蒲蛰龙和李增智,1996)。该菌主要通过昆虫的体壁侵入,也可通过消化道、气门和伤口等途径侵入虫体(赫英伟,2010)。该菌对人畜相对安全,对环境无污染,对害虫致病力高,且易于培养和大量生产(张丽靖和冯明光,2004)。

张艳璇等(2011)开展了利用胡瓜钝绥螨搭载白僵菌控制柑橘木虱的研究,结果表明,白僵菌 I2 菌株对柑橘木虱卵、若虫、成虫均有很强的致病作用,第 3 天后死亡率达 100%,对低龄若虫致病率达 100%;捕食螨搭载白僵菌 I2 菌株孢子粉对柑橘木虱卵和成虫 3 d 后的致死率和致病率分别为 98.4% 和 98.8%,低龄若虫感染率达 100%。

张艳璇等(2013)测定了白僵菌菌株 CQBb111 对柑橘木虱成虫的毒力, 1.0×10^4 个孢子 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的孢子悬浮液处理柑橘木虱 10 d 后的累计校正死亡率为 92.68%,处理第 3 天的 LC_{50} 为 2.24×10^9 个孢

子 $\cdot\text{mL}^{-1}$,使用浓度为 1.0×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 处理时, LT_{50} 仅为2.88 d。

笔者于2014年从柑橘木虱罹病虫体分离到一株具有强致病性的虫生真菌,命名为GZMS-28,经鉴定为球孢白僵菌。侵染试验表明,菌株GZMS-28对柑橘木虱具有较强的致病性,柑橘木虱成虫经浓度为 1.0×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 的分生孢子悬浮液处理7 d后,其校正死亡率达到95.7%,说明菌株GZMS-28具有开发成生物制剂的潜能。

3.2 玫烟色棒束孢 *Isaria fumosorosea* (Wize)

玫烟色棒束孢原命名玫烟色拟青霉,是一种重要的昆虫病原真菌,具有较广泛的地理分布和较强的生态适应能力,玫烟色棒束孢寄主范围广,包括同翅目、鳞翅目、双翅目、鞘翅目、膜翅目等8个目40多种昆虫,特别是对同翅目蚜虫、粉虱等刺吸式口器害虫有很强的致病力(黄振等,2006;杨红明等,1991;Zimmermann,2008)。

国外对玫烟色棒束孢的研究较多,荷兰已经开发出专门防治粉虱类害虫的真菌制剂(Milner,1997)。Hoy *et al.* (2010)用浓度为 1×10^7 、 1×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 的玫烟色棒束孢菌液喷施柑橘木虱,其 LT_{50} 分别为111和102.5 h,喷施192 h后, LC_{50} 、 LC_{99} 分别为 6.8×10^5 、 2.2×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

代晓彦等(2014)测定了球孢白僵菌和玫烟色棒束孢对柑橘木虱的致病力,在 1.0×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下,柑橘木虱成、若虫的死亡率达90%以上。Lezama-Gutiérrez *et al.* (2012)测定了玫烟色棒束孢、球孢白僵菌和绿僵菌在田间对柑橘木虱的致病力,3种病原真菌对柑橘木虱成虫的侵染致死率分别是22%、42%和50%,对若虫的侵染致死率分别是35%、40%和60%,表明这3种真菌都是优良的柑橘木虱生防菌。

玫烟色棒束孢对多种害虫具有很强致病力,并有一定的杀卵活性,同时还可与低剂量吡虫啉、氰戊菊酯、灭幼脲等化学农药混用(景云飞和张仙红,2007),具有良好的应用前景。

3.3 淡紫紫孢菌 *Purpureocillium lilacinum* (Thom)

淡紫紫孢菌原命名淡紫拟青霉,是土壤及多种植物根系的习居菌,是植物寄生线虫如孢囊线虫、肾形线虫、穿孔线虫等的重要天敌,是一种极具推广潜力的生防菌和功能菌(赵培静等,2007)。

牡丹超等(2015)从柑橘木虱中分离出一株对柑橘木虱具强致病性的淡紫紫孢菌,并测定了该菌株对柑橘木虱的致病性。在同一浓度条件下,接种后培养时间越长,柑橘木虱的死亡率越高,接种3、7 d后, LC_{50} 分别为 5.77×10^9 、 2.20×10^4 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$;培养时间相同时,孢子悬浮液浓度越高,柑橘木虱的死亡率越高。

尽管淡紫紫孢菌在防治植物病虫害方面展现出了良好的应用前景,但在人畜免疫力低或缺失时,该菌会侵染人畜的皮肤和组织,从而引发疾病,常为医源性感染或外伤所致(Hall *et al.*,2004;Luangsa-Ard *et al.*,2011)。因此对人类存在一定的安全风险,在开发生防菌制剂前,必须先进行大量的安全性试验。

3.4 宛氏拟青霉

宛氏拟青霉隶属拟青霉属,是柑橘木虱的重要虫生真菌,但其研究报道较少。

2015年笔者从罹病柑橘木虱虫体分离得到一株具有强致病性的虫生真菌GZMS-11,经鉴定为宛氏拟青霉。测定该菌株对柑橘木虱的致病力、致死中浓度和致死中时间,表明分生孢子悬浮液浓度越高,对柑橘木虱的致死效果越好。在同一浓度条件下,接种后孵育时间越长,柑橘木虱的死亡率越高。接种后的第3、7、10天,对柑橘木虱的 LD_{50} 分别为 1.60×10^8 、 2.58×10^5 、 1.35×10^4 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 。分生孢子悬浮液浓度越高,对柑橘木虱的 LT_{50} 也越短,浓度为 1.0×10^4 、 1.0×10^8 个孢子 $\cdot\text{mL}^{-1}$ 的分生孢子悬浮液对柑橘木虱的 LT_{50} 为8.81、3.13 d。该菌株具有较好的生防前景,现已申请发明专利。

3.5 蜡蚧菌 *Lecanicillium lecanii* (Zimm.) Zare and Games

蜡蚧菌原名蜡蚧轮枝菌,是一种寄主范围极为广泛的昆虫病原真菌,可寄生介壳虫、蚜虫、温室白粉虱、飞虱、蓟马等多种昆虫(Skinner *et al.*,1991)。

谢佩华等(1988)发现蜡蚧菌具有侵染柑橘木虱的活性,室内在相对湿度90%~98%的条件下,其对柑橘木虱的致病率可达98%以上,田间试验中,相对湿度90%以上时,对成虫、若虫的致病率均为80%~90%。

鹿连明等(2015)的研究结果显示,蜡蚧菌或因地理来源和寄主品种的不同,种内表现出丰富的遗

传多样性,且不同菌株对相同的寄主表现出致病性分化。显微观察菌株 ZJVL-A 对柑橘木虱的侵染过程发现,吸附在寄主体表的分生孢子可在接种后 16 h 萌发入侵,42 h 后菌丝侵入血腔并在其中增殖,54 h 后可引起寄主死亡,60 h 后菌丝侵染并破坏寄主的内部组织器官,最后覆盖在虫体表面的菌丝又产生大量的分生孢子。

研究表明,在饱和湿度下,蜡蚧菌分生孢子萌发快而整齐,随着相对湿度的降低,不仅萌发率降低,萌发时间也相对延长(张仙红等,2000)。蜡蚧菌分生孢子萌发要求较高的相对湿度,这也是影响其田间应用的主要因素之一。

3.6 桔形被毛孢

Brady (1979) 首次在褐飞虱上发现桔形被毛孢。贾春生和洪波(2010)在广东省进行的昆虫病原真菌资源调查中发现,桔形被毛孢能在褐飞虱种群中引发流行病。

Meyer *et al.* (2007) 从佛罗里达柑橘园内的柑橘木虱上分离获得了具有侵染性的被毛孢菌,并在柑橘木虱体内观察到了被毛孢菌的有隔菌丝体,经系统发育分析,该菌与桔形被毛孢有较近的亲缘关系。Hall *et al.* (2012) 对桔形被毛孢进行了 2 年的田间调查,发现成熟叶片上 23% 的柑橘木虱成虫被桔形被毛孢侵染致死,被侵染的成虫呈干尸状,表面覆盖厚厚的菌丝。Étienne *et al.* (2001) 发现桔形被毛孢可侵染柑橘木虱成、若虫,侵染率可达 80% 以上,该菌不仅侵染柑橘木虱,还可侵染同翅目的其他一些昆虫。桔形被毛孢对柑橘木虱有良好的防控效果,值得进一步深入研发。

3.7 曲霉属真菌

对曲霉属真菌侵染柑橘木虱的研究报道较少,20 世纪 80 年代,陈祝安等(1985)从田间发病的柑橘木虱虫体上分离到了日本曲霉 *Aspergillus japonica* Saito,但未对其致病性进行验证。

鹿连明等(2013)从柑橘木虱虫体中分离得到一株曲霉属虫生真菌,菌株被初步鉴定为 *Aspergillus westerdijkiae* Frisvad & Samson。对柑橘木虱的致病性、培养特征和形态特征进行测定,结果显示,该菌株对柑橘木虱具有较强的致病性,柑橘木虱经浓度为 1.0×10^9 个孢子 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的分生孢子悬浮液处理 7 d 后,其校正死亡率达 98%。

然而,曲霉属真菌通常会产生多种对人和动物有害的毒素,如其产生的赭曲霉毒素通常对动物肾脏有危害,对免疫系统也有毒性,并有致畸、致突变和致癌作用(黄天培等,2011),因此难以在柑橘木虱的生物防治中推广应用。

4 研究展望

柑橘木虱的耐寒性较强,最低可耐受 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温,世代数也较多,在广东一年可发生 11~14 代(陈循渊和廖长青,1982)。在田间存在黄龙病株的情况下,柑橘木虱数量多,可能引发黄龙病的大流行(许长藩等,1994)。一直以来单纯的化学药剂防治柑橘木虱造成橘园天敌昆虫大量死亡、柑橘木虱产生抗药性、果园生态环境遭到破坏,因此要注重生物防治、物理防治和田间管理等多种综合防治措施(宋晓兵等,2015)。昆虫病原真菌具有主动侵染寄主、不易产生抗性和扩散能力较强等特点,被认为是潜力巨大的生物防治微生物而备受关注,充分开发和利用柑橘木虱虫生真菌资源,可为柑橘木虱的生物防治提供保证。

当前利用虫生真菌田间防治柑橘木虱的实例较少,多局限于室内毒力测定及致病菌株的筛选,球孢白僵菌和玫烟色拟青霉是目前柑橘木虱生物防治上使用较普遍的真菌,但尚没有较好的制剂产品可以应用。虫生真菌的田间应用存在诸多限制因素:一方面,虫生真菌的生长发育、孢子萌发以及致病力受到环境温湿度的制约(何恒果等,2004),孢子萌发和侵染过程中要求的适温、高湿条件是限制虫生真菌应用的主要因素之一(王清海等,2005;王联德等,2010),因此需要筛选出在较高温和较低湿度条件下的强致病菌株,利用基因工程技术,可以直接把强致病性、高产孢等性状基因转入目标菌株,筛选构建高效、稳定、多功能的工程菌株;另一方面,昆虫病原真菌与化学杀虫剂相比,其杀虫效果不稳定,受多种外界因素制约,需要使用合理的施药方法(胡奇等,2004)。柑橘木虱是刺吸式口器昆虫,根据其喜食嫩梢、幼虫群集和成虫易迁飞的生活习性,将虫生真菌直接喷洒在植物嫩梢表面,可喷洒孢子悬浮液、油剂等。

制备稳定、高效的真菌制剂是虫生真菌生物防治的一大难题,早期的喷雾法易堵塞喷头,撒粉法附着力差,乳剂、微胶囊剂及可湿性粉剂难储藏,制剂无标准化及商品化(何恒果等,2004)。以菜子

油、花生油或色拉油作溶剂对真菌孢子的活性影响小,有较好的应用效果(李农昌等,1996; Moore, 1995)。王成树等(1998)研究发现,与油剂、高孢粉相比,混合粉剂最好。随着人们环保意识的加强,以及对虫生真菌生物特性、致病机理、菌株改良以及产业应用等研究的深入,利用生防制剂进行柑橘木虱的可持续控制必将取得进展。

参考文献

- 陈循渊,廖长青,1982. 柑桔木虱生物学特性观察及其与黄龙病的关系. 中国柑桔(4): 14-17.
- 陈祝安,曹光照,许益伟,黄基荣,葛岚屏,1985. 柑桔害虫病原真菌资源的考察和生测. 微生物学通报, 12(5): 194-198.
- 代晓彦,任素丽,周雅婷,任顺祥,邱宝利,2014. 黄龙病媒介昆虫柑橘木虱生物防治新进展. 中国生物防治学报, 30(3): 414-419.
- 牡丹超,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.
- 牡丹超,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.
- 何恒果,李正跃,陈斌,文良柱,2004. 虫生真菌对害虫防治的研究与应用. 云南农业大学学报, 19(2): 167-173.
- 赫英伟,2010. 白僵菌的研究概况. 黑龙江农业科学(4): 145-147.
- 胡奇,刘骥,闫妍,2004. 昆虫病原真菌研究进展. 天津农学院学报, 11(4): 46-50.
- 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.
- 黄天培,何佩茹,潘洁茹,关雄,2011. 食品常见真菌毒素的危害及其防止措施. 生物安全学报, 20(2): 108-112.
- 黄振,任顺祥,吴建辉,2006. 玫烟色拟青霉和吡虫啉对烟粉虱种群的联合控制作用. 生态学报, 26(10): 3250-3257.
- 贾春生,洪波,2010. 一种潜在的褐飞虱生防真菌: 桔形被毛孢的分离、鉴定与培养. 东北农业大学学报, 41(7): 27-31.
- 景云飞,张仙红,2007. 昆虫病原真菌玫烟色拟青霉的研究进展. 山西农业科学, 35(9): 19-22.
- 李农昌,王成树,唐燕平,李增智,汤坚,黄长春,丁珊,1996. 白僵菌油剂剂型的研究. 安徽农业大学学报, 23(3): 329-335.
- 林冠伦,1988. 生物防治导论. 南京: 江苏科学技术出版社.
- 鹿连明,程保平,牡丹超,胡秀荣,蒲占滑,陈国庆,2015. 蜡蚧菌的遗传多样性及其对柑橘木虱的致病性. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 41(1): 34-43.
- 鹿连明,牡丹超,胡秀荣,蒲占滑,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.
- 吕丁丁,李增智,王成树,2008. 虫生真菌分子致病机理及基因工程改造研究进展. 微生物学通报, 35(3): 443-449.
- 蒲蛰龙,李增智,1996. 昆虫真菌学. 合肥: 安徽科学技术出版社.
- 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.
- 宋晓兵,彭埃天,陈霞,程保平,周娟,凌金锋,2015. 高效氯氟·噻虫嗪等6种药剂对柑橘木虱的防治效果. 农药, 54(12): 915-917.
- 王成树,李农昌,汤坚,李增智,1998. 球孢白僵菌混合制剂的加工研究. 植物保护, 24(3): 5-8.
- 王清海,万平平,黄玉杰,刘玉升,丁爱云,2005. 虫生真菌在害虫生物防治中的应用研究. 山东科学, 18(4): 37-41.
- 王联德,尤民生,黄建,周然,2010. 虫生真菌多样性及其在害虫生物防治中的作用. 江西农业大学学报, 32(5): 920-927.
- 谢佩华,苏朝安,林自国,1988. 柑桔木虱寄生菌——蜡蚧头孢菌初步研究. 生物防治通报(2): 92.
- 许长藩,夏雨华,柯冲,1994. 柑桔木虱生物学特性及防治研究. 植物保护学报, 21(1): 53-56.
- 杨红明,郑润兰,马俊,1991. 玫烟色拟青霉对昆明主要林木防治试验//刘杏忠,殷幼平,黄勃. 中国虫生真菌研究与应用. 北京: 中国农业科技出版社: 205-207.
- 张丽靖,冯明光,2004. 基于球孢白僵菌的真菌杀虫剂生产工艺与剂型述评. 浙江农业学报, 16(6): 395-399.
- 张仙红,贺运春,于桂风,李文英,宋东辉,2000. 昆虫病原真菌蜡蚧轮枝菌生物学特性初步研究. 山西农业大学学报, 20(3): 221-224.
- 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.
- 张艳璇,孙莉,林坚贞,陈霞,季洁,2013. 白僵菌CQBb111菌株对柑橘木虱和胡瓜新小绥螨的毒力差异. 中国生物防治学报, 29(1): 56-60.
- 赵培静,任文彬,缪承杜,张世清,黄俊生,2007. 淡紫拟青霉研究进展与展望. 安徽农业科学, 35(30): 9672-9674, 9793.
- Brady B L K, 1979. *Hirsutella citrififormis* [Descriptions of fungi and bacteria]. *IMI Descriptions of Fungi and Bacteria*, 61: 607.
- Cen Y J, Zhang L N, Xia Y L, Guo J, Deng X L, Zhou W J, Sequeira R, Gao J Y, Wang Z R, Yue J Q and Gao Y Q,

2012. Detection of ‘*Candidatus Liberibacter asiaticus*’ in *Cacopsylla* (*Psylla*) *citrisuga* (Hemiptera: Psyllidae). *Florida Entomologist*, 95(2): 304–311.
- Charnley A K and Leger R J S, 1991. The role of cuticle-degrading enzymes in fungal pathogenesis in insects// Cole E T and Hoch H C. *The Fungal Spore and Disease Initiation in Plants and Animals*. New York: Springer Press: 267–287.
- Clarkson J M and Charnley A K, 1996. New insights into the mechanisms of fungal pathogenesis in insects. *Trends in Microbiology*, 4(5): 197–203.
- Étienne J, Quilici S, Marival D and Franck A, 2001. Biological control of *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in Guadeloupe by imported *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae). *Fruits*, 56(5): 307–315.
- Gandarilla-Pacheco F L, Galán-Wong L J, López-Arroyo J I and Rodríguez-Guerra R, 2013. Optimization of pathogenicity tests for selection of native isolates of entomopathogenic fungi isolated from citrusgrowing areas of México on adults of *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Florida Entomologist*, 96(1): 187–195.
- Gillespie J P, Bailey A M, Cobb B and Vilcinskis A, 2000. Fungi as elicitors of insect immune responses. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 44(2): 49–68.
- Hall D G, Hentz M G, Meyer J M, Kriss A B, Gottwald T R and Boucias D G, 2012. Observations on the entomopathogenic fungus *Hirsutella citriformis* attacking adult *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae) in a managed citrus grove. *Bio-Control*, 57(5): 663–675.
- Hall V C, Goyal S, Davis M D P and Walsh J S, 2004. Cutaneous hyalohyphomycosis caused by *Paecilomyces lilacinus*: report of three cases and review of the literature. *International Journal of Dermatology*, 43(9): 648–653.
- Holder D J and Keyhani N O, 2005. Adhesion of the entomopathogenic fungus *Beauveria* (*Cordyceps*) *bassiana* to substrata. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9): 5260–5266.
- Hoy M A, Singh R and Rogers M E, 2010. Evaluations of a novel isolate of *Isaria fumosorosea* for control of the Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* (Hemiptera: Psyllidae). *Florida Entomologist*, 93(1): 24–32.
- Lezama-Gutiérrez R, Molina-Ochoa J, Chávez-Flores O, Ángel-Sahagún C A, Skoda S R, Reyes-Martínez G, Barba-Reynoso M, Rebollo-Domínguez O, Rufz-Aguilar G M L and Foster J E, 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.
- Luangsa-Ard J, Houbaken J, van Doorn T, Hong S B, Borman A M, Hywel-Jones N L and Samson R A, 2011. *Purpureocillium*, a new genus for the medically important *Paecilomyces lilacinus*. *FEMS Microbiology Letters*, 321(2): 141–149.
- Meyer J M, Hoy M A and Boucias D G, 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.
- Meyer J M, Hoy M A and Boucias D G, 2008. Isolation and characterization of an *Isaria fumosorosea* isolate infecting the Asian citrus psyllid in Florida. *Journal of Invertebrate Pathology*, 99(1): 96–102.
- Milner R J, 1997. Prospects for biopesticides for aphid control. *Entomophaga*, 42(1/2): 227–239.
- Moore D, Bateman R P, Carey M and Prior C, 1995. Long-term storage of *Metarhizium flavoviride* conidia in oil formulations for the control of locusts and grasshoppers. *Biocontrol Science and Technology*, 5(2): 193–200.
- Navarrete B, Mcauslane A, Deyrup M and Peña J E, 2013. Ants (Hymenoptera: Formicidae) associated with *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) and their role in its biological control. *Florida Entomologist*, 96(2): 590–597.
- Robert A and Messing-Al-Aidroos K, 1985. Acid production by *Metarhizium anisopliae*: Effects on virulence against mosquitoes and on detection of in vitro amylase, protease, and lipase activity. *Journal of Invertebrate Pathology*, 45(1): 9–15.
- Skinner M, Parker B L and Bergdahl D R, 1991. *Verticillium lecanii*, isolated from larvae of pear thrips, *Taeniothrips inconsequens*, in Vermont. *Journal of Invertebrate Pathology*, 58(2): 157–163.
- Wang C S, Hu G and Leger R J St, 2005. Differential gene expression by *Metarhizium anisopliae* growing in root exudate and host (*Manduca sexta*) cuticle or hemolymph reveals mechanisms of physiological adaptation. *Fungal Genetics and Biology*, 42(8): 704–718.
- Zimmermann G, 2008. The entomopathogenic fungi *Isaria fari-nose* (formerly *Paecilomyces farinosus*) and the *Isaria fumosorosea* species complex (formerly *Paecilomyces fumosoroseus*): biology, ecology and use in biological control. *Biocontrol Science and Technology*, 18(9): 865–901.