

文章编号: 1674-7054(2022)03-0309-06



虫生真菌防治农作物害虫的研究进展

王露露, 王辉, 熊焰, 周霞,

王军, 王健华, 伍苏然

(中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海口 571101)

摘要: 长期实践证明: 化学防治农作物害虫会带来药物残留且会对环境造成不同程度的污染, 而生物防治效果更为环保、安全。虫生真菌作为生物防治的重要手段可以在保护原有生态环境的基础上采用一定生物手段合理防控害虫, 不仅能促进农业生产的可持续发展, 同时保障了我国食品绿色、安全, 近年来在防治农作物害虫上发挥了出色的作用。本文分别介绍虫生真菌代表种: 白僵菌、绿僵菌、拟青霉、轮枝菌等菌落特征及防治对象, 从致病机理和毒力进行综合阐述, 并围绕了真菌制剂产品特点、产品创制以及开放利用, 系统总结虫生真菌在我国农业生产中的应用进展, 旨在为我国的生态安全以及虫生真菌的开发及应用提供参考。

关键词: 虫生真菌; 生物防治; 致病机理; 农业应用

中图分类号: S 476.12 **文献标志码:** A

引用格式: 王露露, 王辉, 熊焰, 等. 虫生真菌防治农作物害虫的研究进展 [J]. 热带生物学报, 2022, 13(3): 309-314. DOI: [10.15886/j.cnki.rdswx.2022.03.015](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswx.2022.03.015)

生物防治主要分为捕食性天敌、寄生性天敌、病原微生物和性诱技术。其中病原微生物防治是近年来发展较快的一项生防技术, 病原微生物能在农作物害虫间引起广泛流行病, 具有高度选择性、多数对人畜安全、对害虫天敌无危害、也不会对环境造成污染等特点, 具备了巨大的发展前景和推广价值, 是培养绿色、安全、高产农作物的首选农药。在自然界中, 对昆虫有致病和致死作用的病原微生物主要是真菌类, 其优点是扩散性强、杀虫高效, 在生产上应用最广的真菌杀虫剂是白僵菌、绿僵菌、蜡蚧轮枝菌等。虫生真菌是一类能寄生在昆虫体内、引起昆虫发病死亡最大的昆虫病原微生物群体, 被侵染的昆虫体表长出明显的菌丝、子实体或各种颜色的分生孢子。本文系统地综述了当前用于农作物害虫防治的虫生真菌的种类、制毒机制及应用情况。

1 虫生真菌的种类

世界上记载的虫生真菌达 100 多个属 800 多种, 我国已报道的有 405 种, 其中寄生昆虫的真菌种类达 215 种, 虫草属 80 种, 寄生线虫的真菌 10 种^[1]。在害虫的微生物防治中, 具有利用和开发价值的杀虫真菌包括两大类, 一是属于半知菌亚门的丝孢菌类 (*Hyphomycetes*), 包括许多已经广泛应用的种类, 如白僵菌、绿僵菌、拟青霉和蜡蚧轮枝菌等, 二是属于接合菌亚门的虫霉 (*Entomophthorales*) 真菌, 包含许多经常引发高强度害虫流行病的种类, 如虫疔霉、虫瘟霉、虫疫霉等^[2-3]。虫生真菌的种类多, 其中比较常见研究利用最多的属、种及代表种见表 1^[4-5]。

2 虫生真菌的制毒机制及毒力

虫生真菌的制毒过程 (从孢子萌发感染寄主

收稿日期: 2021-03-09

修回日期: 2021-11-19

基金项目: 国家重点研发计划子课题 (2020YFD1000601), 中央级公益科研院所基本科研业务费专项 (1630052020035)

第一作者: 王露露 (1986-), 女, 农学硕士. E-mail: wanglulutbb@163.com

通信作者: 伍苏然 (1982-), 男, 博士, 副研究员. 研究方向: 植物保护. E-mail: wusuran@itbb.org.cn

表 1 虫生真菌常见的属及代表种

主要代表种	菌落形态特征	防治对象	
白僵菌 <i>Beauveria</i>	球孢白僵菌 <i>Bwauveria bassiana</i> (Bais.) Vuill. 布氏白僵菌 <i>Beauveria brongniartii</i> (Saccardo)	直径1.15~2.00 μm,菌落表面白色至淡乳色,菌落平坦呈绒状、从卷毛至粉状。分生孢子梗球形,直径2.00~2.15 μm。 菌落表面为白色、乳色至淡黄色,絮状、粉状或瓶状,分生孢子呈椭圆形或亚圆形(纵径2.0~6.0 μm×横径1.5~3.0 μm)。	松毛虫、玉米螟、蝗虫、大豆食心虫、高粱条螟、稻飞虱、稻叶蝉、马铃薯甲虫、甘薯象鼻虫、松针毒蛾等。 花生蛴螬、十字花科蔬菜蚜虫等
绿僵菌 <i>Metarhizium</i>	金龟子绿僵菌 <i>Metarhizium anisopliae</i>	菌落最初白色,产生孢子阶段呈不同程度绿色,绒毛状或棉絮状,分生孢子长形至长椭圆形,分生孢子梗单生或聚集,呈分生孢子梗座。	白蚁、蝗虫、地下害虫、蛀干害虫、小菜蛾、菜青虫、桃小食心虫等。
拟青霉 <i>Paecilomyces</i>	淡紫拟青霉 <i>Paecilomyces lilacinus</i> 玫烟色拟青霉 <i>Paecilomyces fumosoroseus</i>	菌落最初白色,产生孢子阶段先为浅粉色后紫红色,圆形、粉状,分生孢子为椭圆形至纺锤形,孢梗具有瓶状不规则分枝或轮生分枝。 菌落随着菌龄从白色转为黄色,产孢子时从黑色至灰玫瑰或粉黑色,分生孢子呈纺锤形或近卵圆形,孢梗成束或分散。	大豆胞囊线虫、烟草根结线虫等。 蚜虫、粉虱、蚕蛾、云尺蛾等。
野村菌 <i>Nomuraea</i>	菜氏野村菌 <i>Nomuraea atypicola</i>	菌落随着菌龄从淡黄色渐转为橄榄绿、孔雀绿。分生孢子卵圆形或椭圆形,孢梗呈花装、单轴生。	大豆夜蛾、黎豆夜蛾、甜菜夜蛾等鳞翅目夜蛾科害虫。
轮枝菌 <i>Verticillium</i>	蜡蚧轮枝菌 <i>Verticillium lecanii</i>	菌落呈白色粉状,分生孢子柱形,末端圆且对称,单胞少双胞。	白粉虱、蚜虫、蓟马等刺吸式口器的害虫。
曲霉 <i>Aspergillus</i>	黑曲霉 <i>Aspergillus niger</i>	菌丛呈黑褐色,顶囊大球形,小梗双层,分生孢子为球状,呈黑、黑褐色,平滑或粗糙。	褐蚁、桃蚜等。
虫霉 <i>Entomophthora</i>	蝇虫霉 <i>Entomophthora muscae</i>	分生孢子呈钟罩形,顶端有一个小尖突,基部平截,孢梗不分枝,顶部膨大。	家蝇等蝇类。
虫疫霉 <i>Erynia</i>	蚜虫疫霉 <i>Erynia aphidis</i>	分生孢子椭圆形或近圆形,不对称两端稍尖,孢梗少有分枝。	蚜虫等。
虫疔霉 <i>Pandora</i>	新蚜虫疔霉 <i>Pandora oaphidis</i>	初生分生孢子无色透明,倒拟卵形或拟卵形,对称或不对称,乳突明显。孢梗二歧分支或掌状分支。	麦长管蚜等。

直至寄主体表产生孢子整个过程)包括10个阶段:(1)体表附着阶段(2)孢子萌发阶段(3)体表穿透阶段(4)寄主血腔内长出菌丝(5)分泌毒素(6)寄主致死阶段(7)菌丝体内定殖(8)菌丝穿出表皮(9)在寄主体表重新产生孢子(10)分生孢子扩散^[6]。其中完成了前4个阶段,虫生真菌就完成对寄主的入侵和感染;当菌丝在寄主血腔内大量繁殖同时分泌毒素(即第五阶段)时,就可导致寄主死亡^[7]。毒力是筛选出优良生防菌的基本依据,也是衡量菌株生物防治潜力的重要指标,受寄主种类、菌种来源、孢子剂量、温度和相对湿度等多种因子影响^[8]。同一菌株对不同寄主或者不同虫龄的同一寄主其毒力表现不同,例如白僵菌对1~6龄松毛虫的僵虫率分别为1~4龄幼虫99.58%,5龄幼虫73.33%,6龄老熟幼虫37.50%^[9];杀虫真菌对草

地贪夜蛾低龄幼虫具有杀虫活性,尤其能够降低草地贪夜蛾卵孵化率、快速杀灭新孵化草地贪夜蛾幼虫,但几乎不能侵染草地贪夜蛾高龄幼虫^[10];金龟子绿僵菌、球孢白僵菌等4种真菌对黄粉虫不同阶段虫态毒力存在明显差异^[11]。菌株来源对同种昆虫毒力存在较大差异,例如不同寄主来源的大丽轮枝菌对棉花的致病力具有显著差异^[12];用29株虫生真菌在同一处理时间下,对烟粉虱致死率存在差异^[13];用来自不同地区的15株绿僵菌同一处理下侵染相同虫龄斜纹夜蛾幼虫,结果寄主都有不同程度的致死率,各菌株毒力差异很大^[14]。菌株的孢子剂量及其温度往往也会影响毒力,例如随着蜡蚧轮枝菌孢子浓度的升高,总体对扶桑绵粉蚧的累计死亡率均上升,菌株对扶桑绵粉蚧的剂量效应与时间效应均显著^[15];同一菌株在

不同的温度下,对同一寄主毒力表现出不同,环境温度过高或过低都不适宜菌株生长和侵染,从而影响菌株发挥作用使得致病力降低^[16];此外,不同的培养基对虫生真菌的致病力也不同,例如粉质拟青霉在5种不同的培养基PDA、SMAY、IDA(虫粉培养基)、SDBAY和Czapek培养基中的致病力表现为在IDA上菌落生长最快,产孢量致病力最理想^[17];白僵菌的分生孢子只有蛋白胨的培养基中萌发率最低致病力较差^[18]。

3 虫生真菌防治农作物害虫的应用

真菌杀虫剂是一种利用虫生真菌做为生物防治手段,控制自然界中有害昆虫的生物活性制剂。经过多年研究,国内外共有170多个真菌杀虫剂登记注册,从其注册情况来看,真菌杀虫剂的种类向着多样化的方向发展^[19],涉及11种昆虫病原真菌(球孢白僵菌、布氏白僵菌、蜡蚧轮枝菌、金龟子绿僵菌、金龟子绿僵菌蝗变种、黄绿绿僵菌、莱氏野村菌、玫烟色拟青霉、汤普生被毛孢、新蚜虫疔霉和大链壶菌),其中50%以上是白僵菌和绿僵菌^[20]。

3.1 白僵菌在农业防治的应用 白僵菌具有致病性强、适应性强,同时随着作物生长进行大量繁殖传播,逐渐成为应用农、林害虫防治的热门真菌。白僵菌杀虫剂可广泛用于玉米、水稻、大豆、棉花、马铃薯、花生、甘蔗、白菜、甘蓝、番茄、辣椒、茄子、大葱等多种作物。白僵菌可寄生15个目约700多种昆虫和部分蜱螨类,是广谱性虫生真菌。白僵菌杀虫剂无毒无味、对害虫具有持续感染力,是对人、作物、环境等无害的生物农药^[21]。目前,我国已应用白僵菌成功防治40余种害虫,其中对玉米螟、茶小绿叶蝉和蛴螬等3种农业害虫防治产生了巨大的经济效益^[22]。最早19世纪50年代,“以菌治虫”植保路线得到快速发展,而国内研究利用白僵菌局限于室内、小区试验防治大豆食心虫,因白僵菌对家蚕产业的危害而不被推广^[23-24],随着白僵菌在生产工艺和应用技术的革新优化,开发固液两相一体化等新生产方式,利用飞机、机动喷粉炮等点片撒布,在全国十多个省份农林区成功地应用于防治松毛虫、玉米螟等害虫^[25-28]。到20世纪90年代,白僵菌在农作物上得到广泛应用并取得很大的效益,研制出可湿粉

剂、油剂、乳剂和微胶囊剂等多种生产工艺更大地满足市场多样性需求^[29-31]。进入21世纪,利用白僵菌生物制剂与传统农药搭配使用从而大大提高防治效果,并解决了对环境污染、杀虫不彻底等问题^[32-33]。目前,在农业实际生产应用中,往往高效低毒的药复配剂—白僵菌与其他菌剂混合使用,既提高了速效性,又保证了持效性,是更环保更高效的生物防治手段^[34-36]。白僵菌目前在农业部登记生产的厂家很多,剂型也有很多种,常见的有每克含150亿、300亿、400亿个孢子的可湿性粉剂;每克含50亿、150亿个孢子的悬浮剂;每克含100亿、200亿、300亿个孢子的可分散油悬浮剂;每克含400亿个孢子的水分散粒剂;每克含150亿个孢子的颗粒剂;每克含500亿个孢子的母液。

3.2 绿僵菌在农业防治应用 与白僵菌相比,绿僵菌的分生孢子具有较好的耐高温和耐旱性,在高温或低湿的环境下,绿僵菌的作用效果优于白僵菌,可广泛用于蔬菜和大田作物,如小麦、玉米、棉花、花生、大豆、马铃薯、番茄、茄子、辣椒等多种作物。绿僵菌是一类世界性生防真菌,可寄生5个目约200多种昆虫、线虫及螨类。绿僵菌致病力强、杀虫效果好,对天敌昆虫安全,对环境无毒害,绿僵菌杀虫剂防治规模仅次于白僵菌杀虫剂,主要用于防治蝗虫、甘蔗金龟子、蛴螬、小菜蛾、菜青虫、地下害虫和蛀干害虫等。早期绿僵菌田间应用直接采用发酵产品未加工成生物制剂,因此利用绿僵菌防治田间害虫未能推广。我国于20世纪80年代末研究开发绿僵菌^[19],比白僵菌起步较晚,中国农科院生防所、安徽省农业科学院等单位应用绿僵菌防治甘蔗金龟子、东亚飞蝗、梨虎等都获得了良好田间防治效果^[37-38]。进入21世纪,重庆大学基因工程研究中心历经5年成功研制并登记我国首个绿僵菌生物农药“杀蝗绿僵菌孢子母粉”“杀蝗绿僵菌油悬浮剂”,并在天津、河北、山东、河南等10省蝗虫多发区应用^[39],随后江西天人生态有限责任公司、重庆重大生物科技发展有限公司、中国农业科学院、重庆聚立信生物工程有限公司等多家单位研发并登记了金龟子绿僵菌油悬浮剂、金龟子绿僵菌水分散粒剂、金龟子绿僵菌可湿性粉剂、金龟子绿僵菌颗粒剂等生物杀虫剂,防治水稻、玉米、茶叶、果树、等多种害虫^[40-41]。目前登记生产厂家很多,剂型也很多,常

见剂型有每克含 100 亿、80 亿个孢子的绿僵菌可湿性粉剂,每克含 100 亿个孢子的油悬浮剂,每克含 80 亿个孢子的可分散油悬浮剂,每克含 2 亿个孢子的绿僵菌颗粒剂。

3.3 其他真菌在农业防治应用 拟青霉菌不仅是在病虫害防治上有重要作用,它的代谢产物能促进植物生长,且有些种类有药用功效^[42]。拟青霉菌能防治 40 多种昆虫,如稻飞虱、二化螟、小菜蛾、白粉虱、桃蚜、叶蝉、斜纹夜蛾等^[43]。粉质拟青霉和玫烟拟青霉在水稻、蔬菜等多种农作物防治上有良好的效果,但国内目前登记的拟青霉菌生防产品有“线虫必克”、阿维菌素和淡紫拟青霉菌剂,主要用于防治植物根结线虫病^[44-45]。

蜡蚧轮枝菌是一种重要的昆虫病原真菌,主要应用在蔬菜、花卉作物上防治蚜虫、粉虱、蓟马、菜青虫、小菜蛾、螨类等害虫,20 世纪 70 年代英国首个完成了蜡蚧轮枝菌的安全性评估,并投入了商业生产,随后国外多种蜡蚧轮枝菌菌剂产品问世,而我国虽在蜡蚧轮枝菌的生防开发利用上有成功经验,但是对其剂型加工仍需要不断地探索^[46-48]。

虫霉目真菌是昆虫专性病原真菌,目前记载有 150 多种,可寄生于蝗虫、蚜虫、蛾类、蝇类、介壳虫和螨类等多种害虫,因该菌可在短时间内引起高强度流行病,有很好的生防菌发展前景^[49]。我国 20 世纪 70 年代末用虫霉孢子田间防治花生蚜,由中国农科院生防所研制杀蚜菌剂,可用于防治棉蚜、麦蚜等多种蚜虫,已在河南地区广泛生产应用^[50-51]。随后出现的飞虱虫疔霉、新蚜虫疔霉和根虫疔霉等产品在防治蚜虫上取得很大进展^[52]。

4 展望

随着生活水平的提高,人们对无公害农产品以及绿色食品的需求增大,生物农药产品成为生物防治工作的热点研究,并迅速发展起来。虫生真菌做为昆虫病原微生物的最大种群,也是最早被研制成微生物杀虫剂的重要种群。因微生物杀虫剂具有与环境的相容性、易于工业化生产、可自然扩散以及持续控制害虫等优点成为化学农药的替代品,备受国内外学者及产业界的关注。我国的微生物杀虫剂产业化虽比国外晚了近 30 年,而随着我国生物农药产业品种结构调整、防治技术

进步、组织方式创新等措施的不断优化,我国在微生物杀虫剂方面已经取得了一定的成绩,如球孢白僵菌已被广泛应用于控制天牛、松毛虫、杨小舟蛾和美国白蛾;同时,昆虫病毒防治虫害的应用在我国取得了很大进步,如核多角体病毒(NVP)、质型多角体病毒(CVP)和颗粒体病毒(PXGV),应用于小菜蛾、甜菜夜蛾、棉铃虫、银纹夜蛾等防治^[53-54]。然而我国生物制剂存在着品种少、可选择性低、产品质量稳定性低、科技成果转化率低及田间应用率低等缺点,所以目前仍不能满足市场需求,因此,不断深入扩大研究虫生真菌,旨在为我国农业的可持续健康发展和构建生态平衡奠定根基。

参考文献:

- [1] 刘艳梅,杨航宇,张宗舟. 昆虫病原真菌的种类及致病机理[J]. 天水师学报, 2009, 29(2): 40-43.
- [2] 林华峰. 虫生真菌研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 1998, 25(3): 251-254.
- [3] 王联德,尤民生,黄建,等. 虫生真菌多样性及其在害虫生物防治中的作用[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(5): 920-927.
- [4] 李增智. 虫生真菌研究展望[J]. 安徽农业大学学报, 1987, 14(3): 61-72.
- [5] 杜广祖,李正跃,陈斌. 我国大陆自然保护区虫生真菌物种多样性研究概述[J]. 动物学研究, 2011, 32(s1): 276-280.
- [6] 余垚颖,郭应菊,杨雪,等. 我国利用虫生真菌的研究现状[J]. 四川农业科技, 2018(12): 27-29.
- [7] 何恒果,李正跃,陈斌,等. 虫生真菌对害虫防治的研究与应用[J]. 云南农业大学学报, 2004, 19(2): 167-173.
- [8] 杨运华,杜开书,石明旺. 虫生真菌的生物防治研究进展[J]. 河南科技学院学报, 2011, 39(1): 34-37.
- [9] 徐光余,江正明,方恩爱,等. 不同幼虫虫龄和林间白僵菌孢子量对松毛虫发生白僵病的影响[J]. 农技服务, 2008, 25(8): 148-150.
- [10] 彭国雄,张淑玲,夏玉先. 杀虫真菌对草地贪夜蛾不同虫态的室内活性[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(4): 729-734.
- [11] 徐玲,张鸭关,陈自宏,等. 4 种虫生真菌对储粮害虫黄粉虫不同虫态特征的生防研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1784-1789.
- [12] 陈志荣,赵小强,孙琦,等. 不同寄主大丽轮枝菌培养性状的比较及致病力分化的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(4): 457-466.
- [13] 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.
- [14] 陈自宏,徐玲,何馨成,等. 滇西不同地区绿僵菌对斜

- 纹夜蛾的毒力[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(3): 430-435.
- [15] 方大琳. 4株蜡蚧轮枝菌对扶桑绵粉蚧的致病力测定[J]. 福建林业, 2018(1): 42-45.
- [16] 刘银民, 程雨蒙, 李红梅, 等. 不同温度下绿僵菌对东亚飞蝗3龄蝗蝻的致病力影响[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(3): 642-647.
- [17] 安建梅. 虫生真菌粉质拟青霉(*Paecilomyces farinosus*)培养条件的研究[J]. 山西师范大学学报, 2013, 17(1): 72-76.
- [18] 王利军. 马铃薯甲虫的虫生真菌分离及其生防菌的筛选鉴定[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [19] 龙秀珍, 曾宪儒, 韦德卫, 等. 绿僵菌防治蛴螬的应用研究进展[J]. 南方农业学报, 2013, 44(1): 71-76.
- [20] 王滨, 李增智, 姚剑. 真菌杀虫剂产业的发展现状. 趋势与对策[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(12): 6269-6270.
- [21] 陈嘉恒, 吴国杰, 陈宗发, 等. 白僵菌及其在农业生产上的应用[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2012, 25(4): 66-69.
- [22] 刘健, 陈洪章, 李佐虎. 白僵菌杀虫剂生产工艺研究状况与展望[J]. 中国生物防治, 2003, 19(2): 86-90.
- [23] 徐庆丰, 冯真, 马淑丽. 应用白僵菌(*Beauveria bassiana*(Bals.) Vuill.)防治大豆食心虫(*Grapholitha glycinivorella* Mats.)的初步研究[J]. 昆虫学报, 1959, 9(3): 203-217.
- [24] 徐庆丰. 文化大革命的辉煌胜利——十年来全国应用白僵菌治虫的巨大成就[J]. 昆虫知识, 1972(4): 99-101.
- [25] 徐庆丰, 张荣, 桂承明. 利用白僵菌防治玉米螟的田间试验[J]. 昆虫学报, 1973, 16(2): 203-206.
- [26] 吕场仁, 赵天生. 白僵菌的研究、生产和应用[C]//中国虫生真菌研究与应用(第一卷). 北京: 学术期刊出版社, 1986: 33-36.
- [27] 徐庆丰, 宋益良, 杜长喜, 等. 白僵菌粉剂防治玉米螟研究[J]. 吉林农业科学, 1988(4): 44-46.
- [28] 中国农科院生防所白僵菌组. 白僵菌三种剂型防治玉米螟[C]//中国虫生真菌研究与应用(第二卷). 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 243.
- [29] 邓春生, 张爱文, 农向群, 等. 卵孢白僵菌对花生蛴螬的田间防治效果[J]. 中国生物防治, 1995, 11(2): 56-59.
- [30] 顾荣邦, 孙薇, 王有方, 等. 白僵菌粉生产工艺研究与应用[J]. 浙江林业科技, 1995, 15(5): 54-59.
- [31] 胡琼波, 任顺祥, 黄振. 蛴螬生物防治研究进展[C]//当代昆虫研究—中国昆虫学会成立60周年纪念大会与学术讨论会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 477-482.
- [32] 李春香, 顾丽婧, 张淑红, 等. 常见农药与球孢白僵菌复配对甜菜夜蛾的毒力研究[J]. 安徽农业科学, 37(9): 4086-4088.
- [33] 于洪春, 王雨薇, 张鑫琳, 等. 卵孢白僵菌与农药混用对蛴螬防治效果研究[J]. 北方园艺, 2013(1): 131-134.
- [34] 王志英, 孙丽丽, 张健, 等. 苏云金杆菌和白僵菌可湿性粉剂研制及杀虫毒力测定[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 34-41.
- [35] WRIGHT S P, RAMOS M E. Characterization of the synergistic interaction between *Beauveria bassiana* strain GHA and *Bacillus thuringiensis morrisoni* strain tenebrionis applied against Colorado potato beetle larvae [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2017, 144(3): 47-57.
- [36] 阙生全, 喻爱林, 刘亚军, 等. 白僵菌的应用研究进展[J]. 中国森林病虫, 2019, 38(2): 29-35.
- [37] 周素芬, 刘燕黔. 翠绿绿僵菌的应用研究[J]. 贵州农业科学, 1987, 15(3): 14-20.
- [38] 陆庆光, 邓春光, 陈长风, 等. 应用绿僵菌防治东亚飞蝗田间试验[J]. 昆虫天敌, 1996, 18(4): 147-150.
- [39] 王中康, 殷幼平, 彭国雄, 等. 真菌生防制剂研究现状与发展趋势[C]//第三届全国绿色环保农药新技术、新产品交流会暨第二届全国生物农药研讨会论文集, 2004: 43-45.
- [40] 农向群, 张英财, 王以燕. 国内外杀虫绿僵菌制剂的登记现状与剂型技术进展[J]. 植物保护学报, 2015, 42(5): 702-714.
- [41] 彭国雄, 张淑玲, 夏玉先. 金龟子绿僵菌 CQMa421 农药及应用情况[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(6): 850-857.
- [42] 唐美君. 拟青霉属虫生真菌的研究应用概况与展望[J]. 中国茶叶, 2001, 23(3): 32-33.
- [43] 冯玉云. 粉质拟青霉菌的主要特性与应用研究[J]. 林业调查规划, 2005, 30(5): 60-62.
- [44] 潘沧桑. 淡紫拟青霉菌剂的研究开发[J]. 精细与专用化学品, 2003, 11(6): 15-17.
- [45] 姜洋. 生物防治剂—淡紫拟青霉菌剂[J]. 黑龙江科学, 2016, 24(24): 12-12.
- [46] 李伟, 许维岸, 李照会. 蜡蚧轮枝菌(*Verticillium lecanii*)的致病机理及其生防应用研究新进展[J]. 安徽农业大学学报, 2001, 32(4): 561-565.
- [47] 谢明, 扈新萍, 万方浩. 国外蜡蚧轮枝菌应用研究新进展[C]//中国植物保护学会, 科技创新与绿色植保——中国植物保护学会2006年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006: 523-526.
- [48] 杨晓昱, 于蓉蓉. 蜡蚧轮枝菌防治植物病虫害研究进展[J]. 中国植保导刊, 2005, 25(5): 9-11.
- [49] 陈相波. 新蚜虫痂霉(虫霉目)共生细菌多样性研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014: 3-20.
- [50] 姚震. 真菌杀虫剂的应用现状及其产业化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 8-19.
- [51] 张启新. 生物农药——虫霉杀虫剂、病毒杀虫剂[J]. 中国农村科技, 1997(5): 14-14.
- [52] 李磊, 龙友华, 杨森, 等. 蚜虫虫生真菌种类、生物学特性及流行病学研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(2): 61-70.
- [53] 范月蕾, 赵晓勤, 陈大明, 等. 微生物杀虫剂研发现状

和产业化发展态势[J]. 生物产业技术, 2016(1): 54-58.

[54] 王云丹. 真菌杀虫剂在产业开发中的现状及展望[J]. 科技促进发展, 2019, 15(4): 357-361.

Advances in the control of crop pests by using entomopathogenic fungi

WANG Lulu, WANG Hui, XIONG Yan, ZHOU Xia, WANG Jun, WANG Jianhua, WU Suran
(Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: With the rapid development of economy, environmental problems have attracted much attention. Long-term practice has proved that chemical control of crop pests will produce pesticidal residues and cause pollution to the environment to some degrees, whereas biological control is much safer and environment-friendly. Entomopathogenic fungi, as an important biocontrol agent, can rationally control insect pests and protect the original ecological environment. They can not only promote the sustainable development of agricultural production, but also ensure the green production and safety of food in China. In recent years biocontrol has played an excellent role in the prevention and control of crop pests. In this review representative species of entomopathogenic fungi, such as *beauveria*, *metarhizium*, *paecilamyces* and *verticillium*, were described separately in terms of colony characteristics, control, pathogenesis and virulence, and a progress in application of the entomopathogenic fungi in agriculture in China was reviewed in respect of characteristics of biocontrol products, preparation of biocontrol products and their release for application. This review might provide reference for ecological security and development and application of entomopathogenic fungi in China.

Keywords: entomopathogenic fungi; biological control; fungal preparation; application in agriculture

(责任编辑:罗启香 责任编辑:叶 静)