

以昆虫病原真菌为主的绿色农药生物防治技术与产品化研究

王娉婷 彭梅

湖南农业大学 植物保护学院, 中国·湖南 长沙 410000

摘要: 粮食安全, 国之大事。农药是防治病虫害的一项战略性物资, 是保障粮食安全的重中之重。绿色农药是绿色化学概念, 采用环保绿色原料, 生产开发更安全的农药, 生物防治是绿色农药的核心应用场景, 而作为生物防治的重要资源, 昆虫病原真菌在自然界分布广泛, 全球已报道的约有 100 属 800 多种。作为杀虫剂, 昆虫病原真菌具有显著生态价值和农业应用潜力, 至少已有 12 种被开发成害虫防治产品。论文从介绍昆虫病原真菌、分析以其为主的生物防治技术及产品化研究, 旨在为生物农药的规模化应用提供技术路径与理论支撑。

关键词: 昆虫病原真菌; 绿色农药; 生物防治; 农药产业

Research on Biological Control Technology and Commercialization of Green Pesticides, Primarily Utilizing Insect Pathogenic Fungi

Pingting Wang Mei Peng

College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: Food security holds national significance, and pesticides play a crucial role in safeguarding it by ensuring crop protection against diseases, pests, and weeds. Green pesticides, which are developed following the principles of green chemistry, utilize environmentally friendly materials to create safer alternatives. The core application of these green pesticides lies in biological control, where entomopathogenic fungi serve as a vital resource. These fungi are abundant in nature, with approximately 100 genera and over 800 species documented worldwide. As bioinsecticides, entomopathogenic fungi possess substantial ecological value and agricultural potential. At least 12 species have been formulated into pest management products. This paper explores entomopathogenic fungi, evaluates research on biological control technologies and product development centered around them, and aims to offer technical strategies and theoretical foundations to support the widespread use of biological pesticides.

Keywords: entomopathogenic fungi; green pesticides; biological control; pesticide industry

0 前言

据联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 估计, 全球农作物每年因病虫害损失 20%~40% 的产量^[1]。长期以来, 人类一直致力于寻找治理虫害的方法和手段, 迄今为止, 化学防治是快速控制害虫种群最成功的方法之一。然而, 长期大量使用化学农药导致害虫产生抗药性、农产品农药残留、生态失衡以及致畸致癌等多重负面影响。为了可持续保障作物产量和生态安全, 人们逐渐从根除害虫的目标转变为控制种群、生态管理害虫的理念。实现农业可持续发展, 农业绿色低碳转型已成为必然选择, 对绿色农药的需求也越来越大。

生物农药是绿色农药的重要部分, 指通过非传统毒性的机理, 用天然产生的某些物质干扰病虫害的生长和繁殖, 达到防治病虫害作用的农药, 具有高效、低毒、低残留等特点, 成为害虫综合治理领域中最具前景的方法之一。昆虫病原真菌被发现以来, 以其独特的侵染机制、广泛的宿主范围

和环保的特性, 成为害虫防治领域的研究热点, 具有良好的市场前景。

1 昆虫病原真菌概述

1.1 昆虫病原真菌的发展及应用

昆虫病原真菌是一类能侵入昆虫体内寄生、影响宿主发育和生殖过程并最终导致宿主死亡的真菌。是最大的昆虫病原微生物类群, 广泛分布于自然界中。据不完全统计, 全球已报道的昆虫病原真菌约 100 属 800 多种, 中国报道的达 400 余种^[2]。主要集中在半知菌门 (Deuteromycota) 和接合菌门 (Zygomycotina)、子囊菌门 (Ascomycota)、卵菌门 (Oomycota) 和壶菌门 (Chytridiomycota) 中。许多昆虫目都可能被它们感染, 鳞翅目、双翅目、直翅目、鞘翅目、膜翅目和半翅目是最常见的^[3]。而研究和应用最广的是白僵菌和绿僵菌, 能够感染多个昆虫目中的 700 多个物种^[4]。

自 19 世纪意大利细菌学家巴希 (Agostino Bassi) 的研

究首次揭示了球孢白僵菌是引起蚕白僵病的病原体, 奠定了真菌控制害虫的理念。随后, 1879 年梅契尼科夫 (Ilya Mechnikov) 观察到金龟子死后体表萌发出菌丝的现象, 并成功地将绿僵菌应用于金龟子的生物防治。这一开创性发现不仅为昆虫病害控制开辟了新路径, 还促进了绿僵菌孢子产品的规模化生产, 这些产品在生物防治领域内赢得了广泛赞誉与应用^[5]。

20 世纪 50 年代, 中国首次利用白僵菌防治农林害虫。近年来, 白僵菌属、绿僵菌属、棒束孢属和拟青霉属等昆虫病原真菌的研究和应用逐渐受到重视, 特别是在农作物害虫防治方面, 其应用愈发广泛^[2]。同样, 国外已登记注册的真菌生物农药产品, 如球孢白僵菌、金龟子绿僵菌等, 在田间害虫防治中取得了明显成效。这些病原真菌对多种农林害虫展现出高防治率和高致死率, 预示着它们在未来害虫管理中的巨大潜力。

1.2 昆虫病原真菌的致病机制

昆虫病原真菌种类丰富, 宿主范围广, 感染宿主的致病机制相对复杂, 一般分为以下几个阶段: 孢子附着于寄主表皮、孢子萌发、穿透表皮、菌丝在血腔内生长、毒素产生、寄主死亡、菌丝侵入寄主的所有器官、菌丝穿出表皮、产生孢子、侵染单位的扩散。在病毒感染中已被证明会诱导宿主的行为变化, 如信息素产生、嗅觉和运动的改变^[6]。而昆虫病原真菌能够通过操纵宿主行为来优化其孢子的传播效率, 进而增强自身的生存能力。虫霉目和肉座菌目的某些真菌, 能够通过感染昆虫并操控其神经系统或生理机制, 来改变宿主昆虫的正常行为模式^[4]。

在昆虫病原真菌致病的整个过程, 多因子作用导致了昆虫的死亡。①菌丝生长与扩散: 进入宿主昆虫病原真菌会随着单细胞或多细胞结构 (原生质体、芽生孢子、菌

丝体) 的进展而增殖, 它们消耗利用宿主的营养资源, 最终通过饥饿或产生毒素杀死宿主^[7]。②产生毒素: 病原真菌在侵染过程中会产生次生代谢物, 其大多是毒素。白僵菌 (*B. bassiana*) 入侵昆虫宿主后, 产生多种毒素, 这些毒素是次生代谢物, 如白僵菌素 (beauvericin)、白僵菌黄色素 (bassianin)、白僵菌环四肽 (bassianolide)、beauverolides、软白僵菌素 (tenellin)、卵孢霉素 (oosporein) 和草酸, 帮助白僵菌寄生并杀死宿主^[8]。③破坏组织与器官: 菌丝体的扩大营养生长使真菌能够侵入寄主昆虫的整个组织, 引起物理、组织溶解和病理变化, 最终导致寄主昆虫在感染后 3~7 天后死亡^[9]等, 见图 1。

2 以昆虫病原真菌为主的绿色生物防治技术

2.1 菌种选育技术

昆虫病原真菌的选育主要有传统选育技术和现代生物技术。在实际应用中, 通常会结合多种选育技术, 以获得综合性能更优的昆虫病原真菌菌株。

在传统选育技术中, 以自然选育和诱变为主。从自然界中分离和筛选具有优良性状的昆虫病原真菌菌株, 利用选择性培养基进行培养, 再结合形态学和生化鉴定等手段, 筛选出对目标害虫具有高毒力的菌株; 利用物理或化学诱变剂处理昆虫病原真菌, 增加其基因突变频率, 筛选出具有更优性状的突变株。

在现代生物技术中, 有基因工程育种、基因编辑技术和人工智能与机器学习技术。通过基因工程技术, 将外源基因导入昆虫病原真菌中, 实现对真菌性状的定向改造。从而更高效地改良其性状。之后, 也可将人工智能与机器学习技术应用于菌种选育, 可以实现对大量菌株数据的快速分析和处理, 从而更准确地预测和筛选出具有优良性状的菌株, 提高选育效率。

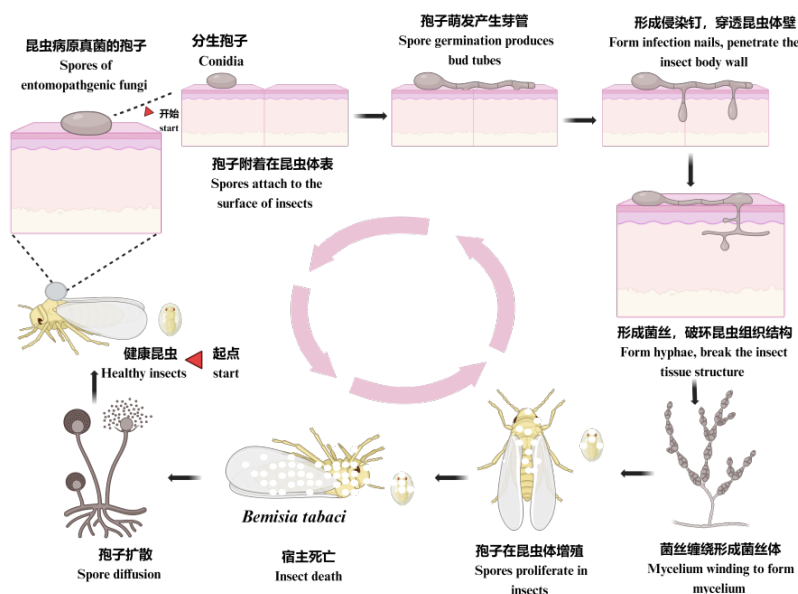


图 1 昆虫病原真菌侵染宿主机理 (注: 以侵染烟粉虱为例)

2.2 发酵培养技术

一般来说，不同的昆虫病原真菌，所运用的发酵技术也不同。选择正确的发酵技术可有利于快速增殖菌体，提高孢子产量和质量，提高生物防治制剂的稳定性并通过优化发酵工艺和设备，从而降低生产成本，使昆虫病原真菌的生物防治产品更具经济竞争力。表 1 为常见的三种真菌发酵技术。

2.3 制剂加工技术

微生物农药制剂加工工艺是将微生物活体物质作为活

性成分，以稀释剂和功能助剂适当稀释，加工成易储存、易运输、具有良好使用形态的产品，以及具有活性成分的生物活性和作用方式等影响因素的过程，在选择加工剂型时应考虑的影响因素，如喷雾、施粉或直接施用等使用方法，是将微生物活体物质作为活性成分，降低加工成本。环保，择市而动^[11]。然后一边选择剂型加工的种类，一边确定加工剂型会用到表面活性剂等添加剂，最后生产出能稳定两年的剂型产品。

表 1 昆虫病原真菌的主要发酵培养技术

发酵技术	原理	应用	优势
深层液体发酵技术	在液体培养基中，通过机械搅拌和通气，使真菌在深层液体中生长繁殖，形成大量孢子或菌丝体；可精确控制营养和环境因素，如温度、pH 值、溶氧等，以优化真菌生长和代谢	白僵菌和绿僵菌等昆虫病原真菌可通过深层液体发酵大量生产孢子 ^[10] ，用于制成生物农药	具有可扩展性强、生产效率高、成本相对较低等优点，适合大规模工业化生产
固体发酵技术	进行固体发酵，真菌在固体基质表面生长繁殖，形成孢子或菌丝体。固体基质可以是天然农副产品如麸皮、稻壳等，或者人工合成的物质	经固体发酵产生的孢子品质较高，保存后孢子的存活率较高，在干燥或紫外线照射等环境下具有更强的抵抗性。例如，绿色木霉菌的固体发酵生产分生孢子，用于制成生物农药制剂	发酵产品干燥后可直接制备成菌剂，工艺流程短，生产成本低，产品质量可靠
液固双相发酵技术	先进行液体发酵，然后在固体基质上接入液体发酵产物进行固体发酵，其结合了液体发酵和固体发酵的优点，既能够快速繁殖菌体，又能够利用固体基质的特性生产高质量的孢子	例如提高爪哇虫草菌产孢量的液固双相培养方法，通过先液体发酵后固体发酵，使爪哇虫草菌在固体基质上形成大量孢子	充分发挥两种发酵方式的优势，提高菌种的生长繁殖效率和产物质量

3 产品化研究

目前，至少已有 12 种真菌昆虫病原体被开发成约 170 种害虫防治产品，其中白僵菌（*Beauveria bassiana*）、绿僵菌（*Metarhizium anisopliae*）以及淡紫拟青菌（*Paecilomyces lilacinus*）等是主要的昆虫病原真菌杀虫剂^[12]。白僵菌已成功引入农林害虫防治体系，以及果树、茶树和蔬菜等经济作物的保护中，有效对抗了包括松毛虫、玉米螟、稻叶蝉、大豆食心虫、稻飞虱和地下害虫等多种害虫。而绿僵菌则在灭白蚁和蝗虫方面展现出卓越效果，其应用已成为国家重点推广的项目，广泛覆盖农田、林木、桥梁等多个领域。

3.1 产品质量标准

建立以病原昆虫真菌为主的绿色农药产品质量标准，其关键指标在于有效成分含量、孢子活力、杂质含量、稳定性等。通过采用科学、准确的检测方法例如，通过显微镜观察、孢子计数、生物测定等方法对相关指标进行准确检测；也可通过建立涵盖生产全过程的质量检测体系，从原材料采购、菌种培养、发酵生产到产品包装和储存等各个环节，完成相应的质量控制措施和检测标准，保证产品质量的持续性和稳定性。

3.2 产业化应用模式

以昆虫病原真菌为主的产品以产品开发与市场推广、技术合作与成果转化、生态农业与综合防治等多方面途径实

现产业化。中国农业科学院植物保护研究所的几丁质靶向生物农药项目^[13]，与企业合作进行成果转化，推动该产品的产业化进程；华东师范大学的杨青团队^[14]将几丁质脱乙酰基酶抑制剂相关专利以 5000 万元许可给企业，采用“分期支付+销售分成”模式，加速该绿色农药的产业化。昆虫病原真菌产品与其他化学农药合理搭配使用，形成互补优势，与天敌生物、植物抗虫品种、农业措施等相结合，形成多元化的害虫防治策略。

4 结论与展望

结论。通过传统选育和现代生物技术及其综合选育，昆虫病原真菌的毒力、适应性和安全性得到提高。发酵技术和制剂加工的成熟和创新，为昆虫病原真菌的大规模生产提供了可能，提高生产效率和产品质量。

展望。目前昆虫病原真菌实现产业化仍存在挑战，如孢子的活性易受环境因素如温度、湿度的影响，且通常需要两到三周才能对目标害虫产生显著效果，在快速控制害虫暴发时可能不够及时。另外，产品质量的稳定性、标准化生产等方面也需进一步完善。

未来应加大对昆虫病原真菌的基础生物学、生态学和分子机制研究的投入，为技术创新提供理论支持。在政策依托下，进一步优化发酵、提纯和制剂等生产工艺，确保产品质量的稳定性和一致性。最终使昆虫病原真菌作为绿色农药

在生物防治技术与产品化研究方面取得显著成果,此外,除农业害虫防治,可探索昆虫病原真菌在林业、养蜂业、公共卫生等领域的应用潜力。

参考文献:

- [1] 农向群,王广君,王以燕,等.生物农药白僵菌杀虫剂的研发进展[J].植物保护学报,2024,51(2):278-293.
- [2] 陈静,张璐璐,李娟.昆虫病原真菌在我国介壳虫防治领域的研究进展[J].农业工程,2025,15(2):83-87.
- [3] Ramanujam B, Rangeshwaran R, Sivakumar G, et al. Management of Insect Pests by Microorganisms[J]. Proceedings of the Indian National Science Academy,2014,80(2):455.
- [4] 威海迪,张定海,单立山,等.昆虫病原真菌感染昆虫宿主的机制和宿主昆虫的防御策略研究进展[J].生物多样性,2023,31(11):226-239.
- [5] Pedrini N, Fernandes ÉKK, Dubovskiy IM. Multifaceted Beauveria bassiana and Other Insect-Related Fungi[J]. J Fungi (Basel),2024,10(2):142.
- [6] Moyano A, Croce AC, Scolari F. Pathogen-Mediated Alterations of Insect Chemical Communication: From Pheromones to Behavior[J]. Pathogens,2023,12(11):1350.
- [7] Lovett B, St Leger RJ. The Insect Pathogens[J]. Microbiol Spectr,2017,5(2).
- [8] Wang H, Peng H, Li W, et al. The Toxins of Beauveria bassiana and the Strategies to Improve Their Virulence to Insects[J]. Front Microbiol,2021,26(12):705343.
- [9] Elkhateeb W A, Mousa K M, Elnahas M O, et al. Fungi against insects and contrariwise as biological control models[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control,2021(31):1-9.
- [10] 刘宗求,刘雨,彭继兰,等.球孢白僵菌催化苯甲酸合成对羟基苯甲酸液体发酵优化[J].中国调味品,2023,48(11):60-66.
- [11] 王从林.爪哇虫草IJ-tg19油悬浮剂的研制[D].太原:山西农业大学,2022.
- [12] 严森,任小云,王登杰,等.昆虫病原真菌在害虫防治中对天敌生物的影响研究进展[J].中国生物防治学报,2023,39(1):221-230.
- [13] 陈楠.发展绿色农药助力产业转型[N].农民日报,2024-10-19(006).
- [14] 李晨.从实验室到田间:全球首创绿色农药的20年征程[N].中国科学报,2025-02-17(004).

作者简介: 王娉婷(2004-),女,中国湖南永州人,本科,从事植物保护与生物防治学研究。

基金项目: 中国大学生创新创业训练项目,绿野“菌”踪——爪哇虫草菌 CJ01 生物制剂系列产品研发与推广(项目编号: s202410537152x)。