

· 专论与综述 ·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2023.0048

我国微生物农药的研发与应用研究进展

张慧¹, 许宁¹, 曹丽茹², 王蕊¹, 张凯^{*1}

(1. 农业农村部科技发展中心, 北京 100122; 2. 河南省农业科学院, 郑州 450002)

摘要: 病虫害危害粮食生产, 大量施用化学农药导致农药残留、环境污染等问题日益严峻。微生物农药作为生物农药主要类型之一, 因其具有残留少、对人畜毒害性低等特点近年来得到迅速发展。本文梳理了我国微生物杀虫剂、杀菌剂和除草剂在生防菌株筛选、产品创制与应用等方面的研究进展, 并对微生物农药的发展提出了建议和展望, 可为行业相关单位和研究人员提供参考。

关键词: 微生物杀虫剂; 微生物杀菌剂; 微生物除草剂; 研发与应用; 研究进展

中图分类号: S482 文献标志码: A

Review on research and utilization of microbial pesticides in China

ZHANG Hui¹, XU Ning¹, CAO Liru², WANG Rui¹, ZHANG Kai^{*1}

(1. Development Center of Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122, China;
2. Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Pests, diseases and weeds are detrimental to grain production; and the overuse of chemical pesticides has led to increasingly serious problems such as pesticide residues and environmental pollution. As one of the main types of biological pesticides, microbial pesticides have been developing rapidly in recent years due to their low residues and low toxicity to humans and animals. This paper summarizes the progress of microbial pesticides, fungicides and herbicides in the screening of biocontrol strains, product creation and application in our country, additionally, suggestions and prospects are made for the development of microbial pesticides which aims to provide reference for industry-related units and practitioners.

Keywords: microbial pesticides; microbial fungicides; microbial herbicides; research and utilization; review

我国农作物种植面积广阔, 种植作物种类多样, 在农业生产中, 农作物常常受到多种病虫害的危害。化学农药因其适用范围广、作用效果迅速、使用方便等被广泛用于防治各类病虫害

害, 但使用化学农药也容易造成人畜中毒、杀害有益生物等, 同时由于化学农药的滥用使得部分害虫、致病菌和杂草的抗药性增强, 导致防治难度加大。相比于化学农药, 以真菌、细菌和病毒

收稿日期: 2022-07-01; 录用日期: 2023-04-05; 网络首发日期: 2023-05-31.

Received: July 1, 2022; Accepted: April 5, 2023; Published online: May 31, 2023.

URL: <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2023.0048>

<http://www.nyxxb.cn/cn/article/doi/10.16801/j.issn.1008-7303.2023.0048>

基金项目: 国家财政项目“专业机构管理费”(2069999).

Funding: Supported by National Financial Fund "Managerial Fee for Professional Institution" (No. 2069999).

第一作者 (First author): 张慧, vghv111@163.com. *通信作者 (Corresponding author): 张凯, zhangkai6868@126.com.

The authors declare that they have no competing interests.



等生物活体或其代谢产物为主要成分的生物农药对生物和环境更加友好,自 20 世纪 80 年代以来,生物农药迅速发展,行业市场规模逐步扩大。

生物农药可分为微生物农药、植物源农药和生物化学农药等,经农业农村部农药检定所查询,截至 2022 年 12 月 31 日,我国在有效登记状态的农药登记产品为 45 172 个,其中生物农药产品 2159 个^[1](未包括农用抗生素和天敌),占全部农药总数的 4.78%,占比非常低。在生物农药中,微生物农药是研究热点之一。在《农药登记资料要求》中规定,微生物农药是指以天然的或经基因修饰的细菌、真菌和病毒等微生物活体为有效成分的农药,按用途可分为微生物杀虫剂、微生物杀菌剂和微生物除草剂等。该类农药具有有效成分来源广泛、选择性强、对人畜毒性低等优点。经农业农村部农药检定所查询,截至 2016 年 12 月 31 日,我国已登记微生物农药有效成分 42 个^[2],到 2022 年 12 月 31 日,已达 56 种^[1,3],可见微生物农药呈逐年增长趋势。我国的微生物农药发展已经进入了一个相对快速发展的阶段,生防微生物不断增多,各种新型微生物农药也不断涌现。已有研究对微生物农药常见剂型种类及特点^[4]、产品质量、安全性评价和使用技术相关标准^[5]、助剂研发^[6]、管理现状^[7]、产业发展^[8]等方面进行了详尽的阐述,但尚缺乏典型微生物农药在防治重大病虫害方面应用情况的综述报道。鉴于此,本文梳理了我国近几年一些原创的、新型的微生物杀虫剂、杀菌剂和除草剂在生防菌株筛选、产品创制与应用等方面的研究进展,并对微生物农药发展提出建议和展望,旨在为行业相关单位和人员提供参考。

1 微生物杀虫剂

1.1 细菌杀虫剂

细菌杀虫剂主要是指利用某些杀虫细菌对各类害虫达到致病或致死效果的微生物农药,其主要有效成分有苏云金杆菌 *Bacillus thuringiensis* (Bt)、短稳杆菌 *Empedobacter brevis* 和球形芽孢杆菌 *Bacillus sphaericus* 等,这些细菌可分泌毒素蛋白^[9-10],影响害虫生长发育。其中苏云金杆菌是目前应用最广泛的细菌杀虫剂有效成分,我国登记的含有苏云金杆菌的杀虫剂达 246 种^[11]。

作为应用最多的细菌杀虫剂,苏云金杆菌对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、根结线虫 *Meloidogyne* 和二化螟 *Chilo suppressalis* 等严重危害农作物发育和生产的害虫具有良好的防治效果。草地贪夜蛾是近年来新发现的入侵物种,繁殖力强、寄主广泛、迁飞能力强、食量大,严重危害农业生产,2019 年首次传入我国。截至 2022 年 12 月 31 日,已有 6 种 Bt 杀虫剂可用于防治草地贪夜蛾^[11]。作为国内首个获得批准登记用于防治草地贪夜蛾的 Bt 产品,KN11 商业化制剂产品“无敌小子”(32 000 IU/mg 苏云金杆菌)在防治草地贪夜蛾方面效果显著。数据显示,2019 年科诺生物生产的 KN11 产品,国内销售额约为 1900 万元,其中仅在用于防治草地贪夜蛾上的销售额就已超过 500 万元^[12]。另外,该 Bt 制剂在防治二化螟、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee 和菜青虫 *Pieris rapae* 等害虫上也具有显著效果,并已在华中、华东和珠三角地区等区域进行推广应用^[12]。在防治草地贪夜蛾的菌株筛选方面,发现了多株对其具有高毒力的菌株,这些菌株均含有 4 种杀虫基因 *vip3Aa*、*cry2Ab*、*cry1Ac* 和 *cry11a*,其中菌株 KN50 对草地贪夜蛾的防效与化学农药相当,药后 7 d,在 3 kg/hm² 和 6 kg/hm² 下对 1~3 龄幼虫的防效分别可达 86.1% 和 95.2%^[13]。

Bt 菌株不仅在防控草地贪夜蛾方面具有良好的应用效果,其在防治其他危害性较为严重的农业害虫上也有很大潜力。试验证明,Bt 菌株对于斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* (Fab.)、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 等主要农作物害虫具有毒杀活性^[14],未来可利用 Bt 菌株进一步研发,创制新的农药产品。

1.2 真菌杀虫剂

真菌杀虫剂是除细菌杀虫剂以外应用最多的一类微生物杀虫剂。目前,真菌杀虫剂的有效成分主要有球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*、金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae* 和淡紫拟青霉 *Paecilomyces lilacinus* (Thom.) Samson 等,这些真菌具有很强的侵染性,能够通过菌丝对虫体的入侵和酶类水解作用^[15]、抑制昆虫免疫^[16]等途径达到杀虫效果。

近年来,我国真菌杀虫剂注册的产品类型越来越多样,防治对象也越来越广,但在剂型的研发和有效成分的创制上进展仍然比较缓慢。目

前,应用较广的有效成分主要有球孢白僵菌和金龟子绿僵菌。截至2022年12月31日,以上述2种真菌为有效成分获批登记的农药品种共46个^[11],这些产品可用于防治小菜蛾 *Plutella xylostella*、草地贪夜蛾、松毛虫 *Dendrolimus*、玉米螟和茶小绿叶蝉 *Empoasca pirusuga* Matumura 等多种害虫,其中部分产品可防治多种害虫,如金龟子绿僵菌 CQMa421 高毒力菌株对多种害虫均有致病性,可以高效侵染鳞翅目、鞘翅目、直翅目、双翅目、膜翅目、半翅目和缨翅目的30多种重要农业害虫,但不侵染蜻蜓、寄生蜂、螳螂和瓢虫等天敌^[17-18]。截至2022年12月31日,已利用该菌株研制出金龟子绿僵菌 CQMa421 杀虫剂产品5个^[11],这些产品能用于防控21种(类)作物的23种(类)害虫,包括木虱 *Psyllidae*、叶蝉 *Cicadellidae*、绵蚜 *Eriosoma*、盲蝽蟊、稻飞虱、天牛 *Cerambycidae* 和茶小绿叶蝉等,解决了许多重要害虫无“生物农药”可用的难题。其中,2017年获批登记的金龟子绿僵菌 CQMa421 可分散油悬浮剂在生物防治方面表现出色,在900~1350 mL/hm² 剂量下,对褐飞虱 *Nilaparvata lugens*、稻纵卷叶螟和二化螟防效达60%~85%;在600~1200 mL/hm² 剂量下,对草地贪夜蛾防效达65.7%;在1200~1800 mL/hm² 剂量下,对茶小绿叶蝉的防效达72.2%~87.7%,对茶蓟马 *Scirtothrips dorsalis* Hood、茶毛虫 *Euproctis pseudoconspersa* Strand 和茶尺蠖 *Ectropis oblique*、茄子蓟马也具有良好的控制效果;该制剂与其他生物农药、化学农药也具有较好的兼容性,联用时对害虫的防效更高;2018—2020年,金龟子绿僵菌 CQMa421 可分散油悬浮剂被多个省市列为推荐农药,在重庆、广东、海南、贵州等14个省(市)的水稻上大面积推广示范与应用,应用面积达13.3万 hm²^[17]。金龟子绿僵菌 CQMa421 系列产品的研制极大地拓宽了真菌杀虫剂的杀虫谱,为其他国家广谱型真菌杀虫剂的研发提供了参考。

球孢白僵菌作为另一种广泛应用的真菌杀虫剂有效成分,可以侵染多种昆虫,其孢子附着昆虫虫体后,可通过孢子生长、机械入侵、酶类水解等作用杀灭害虫^[15]。近几年,球孢白僵菌杀虫剂数量逐渐增多,防治范围也越来越广,截至2022年12月31日,共有29种以球孢白僵菌为有效成分的农药获批登记,可防治小菜蛾、松毛

虫、玉米螟、美国白蛾 *Hyphantria cunea*、蛴螬 *Trypoxylus dichotomus*、草地贪夜蛾、二化螟和蚜虫等农作物害虫^[11]。研究发现,球孢白僵菌在防治蓟马^[19]、灰茶尺蠖 *Ectropis griseascens*^[20]、蝗虫^[21]、稻纵卷叶螟和褐飞虱^[22]等害虫上具有良好的效果。2018年获批的150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂在防治蓟马方面效果显著。蓟马作为一种世代周期短、繁殖能力强、食性杂、对观赏植物和蔬菜危害严重的害虫,2018年以前还没有可用于防控蓟马的真菌杀虫剂,而当施用3000 g/hm²的球孢白僵菌可湿性粉剂时,药后7 d其对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的防效达到了98.13%;喷施2400 g/hm²,药后7 d对葱蓟马 *Thrips alliorum* 防效为96.16%,药后14 d对花蓟马 *Frankliniella intonsa* 的防效为82.62%,该球孢白僵菌可湿性粉剂与其他生防产品联合应用时,明显提高了对蓟马的防治效果,目前,该产品的害虫防治种类和试验作物还在不断增加,示范面积累计已达100 hm²^[19]。

1.3 病毒杀虫剂

病毒杀虫剂主要通过病毒的生命活动对昆虫造成致病或致死效果,我国研究历史较长的病毒杀虫剂有效成分有杆状病毒科的核型多角体病毒 nuclear polyhedrosis virus, NPV、颗粒体病毒 *Granulosis virus* 以及呼肠孤病毒科的质型多角体病毒 Cytoplasmic polyhedrosis virus, CPV。截至2022年12月31日,我国已登记有效成分中含有核型多角体病毒的杀虫剂共65种,包括棉铃虫核型多角体病毒 *Helicoverpa armigera* NPV、甜菜夜蛾核型多角体病毒 *Spodoptera exigua* NPV、斜纹夜蛾核型多角体病毒 *Spodoptera litura* NPV、苜蓿银纹夜蛾核型多角体病毒 *Autographa californica* NPV、甘蓝夜蛾核型多角体病毒 *Mamestra brassicae* NPV 等,是种类最多的病毒杀虫剂类型,可防治甜菜夜蛾、棉铃虫、烟青虫 *Heliothis assulta* Guenee、稻纵卷叶螟、玉米螟和地老虎 *Agrotis* sp.等多种农业害虫;而以颗粒体病毒和质型多角体病毒为有效成分的杀虫剂分别有6种和3种,主要防治对象为小菜蛾、菜青虫 *Pieris rapae*、稻纵卷叶螟及松毛虫等^[11]。

在利用病毒杀虫剂进行生物防治上,研究表明,核型多角体病毒对防治草地贪夜蛾具有显著效果。截至2022年12月31日,我国共有2种核型多角体病毒杀虫剂获批登记,用于防控草地贪

夜蛾^[11]。其中,江西新龙生物登记的 20 亿 PIB/mL 甘蓝夜蛾核型多角体病毒悬浮剂,当按有效成分 750 mL/hm² 和 900 mL/hm² 施用,药后 7 d,其对草地贪夜蛾的防治效果均达到了 85% 以上^[23]。类承凤等^[24]分离了一株亚洲玉米螟核型多角体病毒 *Ostrinia furnacalis* NPV,其对草地贪夜蛾 3 龄幼虫的半数致死剂量是甘蓝夜蛾核型多角体病毒的 3.86 倍,该项研究为开发防治草地贪夜蛾的高效病毒杀虫剂提供了依据。张海波等^[25]也发现了多种核型多角体病毒对草地贪夜蛾有毒害作用。未来可利用核型多角体病毒开发更多针对草地贪夜蛾的病毒杀虫剂。

由于杆状病毒感染宿主一般具有专一性,我国现登记的棉铃虫核型多角体病毒、甜菜夜蛾核型多角体病毒、斜纹夜蛾核型多角体病毒和苜蓿银纹夜蛾核型多角体病毒的防治对象也较为单一,主要用于防治甜菜夜蛾、斜纹夜蛾、棉铃虫和烟青虫,但甘蓝夜蛾核型多角体病毒具有相对的广谱性,可感染 30 多种鳞翅目昆虫^[24],可利用甘蓝夜蛾核型多角体病毒开发广谱性病毒杀虫剂。截至 2022 年 12 月 31 日,我国已有 6 种有效成分为甘蓝夜蛾核型多角体病毒的产品获批登记,可防控草地贪夜蛾、小菜蛾、棉铃虫、玉米螟、稻纵卷叶螟、茶尺蠖、烟青虫和地老虎等害虫^[11]。当施用 20 亿 PIB/mL 甘蓝夜蛾核型多角体病毒悬浮剂 750 mL/hm² 时,药后 7 d 对稻纵卷叶螟的防治效果达 90.08%,且不影响蜘蛛、隐翅虫 *Staphylinidae latreille*、黑肩绿盲蝽 *Cyrtorhinus lividipennis* 等天敌种群数量^[26]。甘蓝夜蛾核型多角体病毒系列产品已广泛应用于湖南、辽宁、新疆、上海和广西等 21 个省(市、区)蔬菜、水稻和棉花等作物的病虫害防治,我国也已实现甘蓝夜蛾核型多角体病毒杀虫剂产业化,建成了年产 2000 t 昆虫病毒制剂生产线^[27]。

1.4 微孢子虫

微孢子虫 *Microsporidia* 是一类专性寄生的单细胞原生动物,能够在组织细胞中发育并分裂,可反复无限增殖,具有传染性^[28]。微孢子虫会在寄主细胞中大量增殖,逐步取代寄主细胞质,使寄主细胞内的内质网、线粒体和细胞核等细胞器受到严重破坏,使得细胞的代谢功能严重受损,最后导致细胞破碎死亡^[29-30]。

我国用于农林害虫防治的微孢子杀虫剂主要

有蝗虫微孢子虫、云杉卷叶蛾微孢子虫和行军虫微孢子虫 3 种类型^[31],其中研究和应用较多的是蝗虫微孢子虫。在蝗虫个体内,蝗虫微孢子虫主要是通过侵袭蝗虫脂肪体,破坏蝗虫脑神经,影响蝗虫的生长发育和代谢,而在种群内,微孢子虫能够通过被感染蝗虫产下的卵和被感染蝗虫的尸体及粪便以及残草碎屑等途径传播,从而造成蝗虫种群疾病长期流行,达到防控蝗虫的目的^[32]。截至 2022 年 12 月 31 日,我国仅有 2 种有效成分为蝗虫微孢子虫的微孢子虫杀虫剂获批登记,应用于草地和滩涂的蝗虫防控^[11]。曹国兵等^[33]发现,蝗虫微孢子虫能够持续控制蝗虫种群密度,在草原蝗虫灾害爆发不严重时,可采用 600 mL/hm² 微孢子虫悬浮剂进行蝗虫防治,第 14 天时,防治效果即可达到 70% 以上^[32]。目前,我国已制定了适合我国不同草原蝗虫蝗区和不同农区飞蝗蝗区的蝗灾持续治理对策和技术体系,达到国际先进水平^[34]。

1.5 基因工程细菌杀虫剂

除利用自然存在的菌株研发微生物农药外,现代分子技术手段的应用也加快了新型农药的研究进度,丰富了农药产品的类型。如基因工程技术,基因工程能够按照科研生产实际需要,对生物进行定向改造,生产出符合人类需要的产品,由于基因工程技术在基因编辑上具有可控性和定向性,越来越多的研究希望利用这种技术生产出药效稳定、防虫谱广的农药。

利用基因工程技术已获得了多种工程菌种,如米曲霉 *Aspergillus oryzae*、黑曲霉 *Aspergillus niger* 和苏云金杆菌等,其中苏云金杆菌是国内外使用最广的工程菌之一。通过电击转化的方法,将对鞘翅目叶甲科害虫高毒力的 *cry3Aa7* 基因,导入 Bt 野生菌株 G03 中,采用不同时空表达的启动子,实现双基因的共表达,构建了对鞘翅目叶甲科马铃薯甲虫和鳞翅目小菜蛾等重要农业害虫具有高毒力的双价基因工程菌^[35],并利用该工程菌开发出了我国首例基因工程微生物杀虫剂——苏云金杆菌 G033A,该产品也是我国首个对鞘翅目害虫有效的 Bt 产品,可防治 8 种(类)作物的 7 种(类)害虫,包括小菜蛾、斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、黄条跳甲 *Phyllotreta* spp.、草地贪夜蛾、甲虫 *Coleoptera*、棉铃虫^[11]等。2017 年 8 月该产品获得农药登记证,目前已应用于十字花科蔬菜、

玉米和花生等作物的害虫防治,并在安徽、广州、湖北、吉林和山东等地推广使用。

2 微生物杀菌剂

2.1 细菌杀菌剂

细菌杀菌剂是主要的微生物杀菌剂类型之一,也是应用最多的微生物杀菌剂。目前,我国登记的细菌杀菌剂中有效成分主要包括荧光假单胞杆菌 *Pseudomonas fluorescens*、枯草芽孢杆菌 *Bacillus subtilis*、解淀粉芽孢杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens* 和蜡质芽孢杆菌 *Bacillus cereus* 等,其中大多数是以枯草芽孢杆菌为有效成分的杀菌剂。截至 2022 年 12 月 31 日,共有 96 种含枯草芽孢杆菌的杀菌剂获批登记,这些产品可用于防治番茄灰霉病、水稻稻瘟病、小麦白粉病、柑橘绿霉病、烟草黑胫病和白菜软腐病等病害^[11]。研究发现,枯草芽孢杆菌可分泌抗生素、细胞壁降解酶类、几丁质酶等物质,抑制病原菌孢子萌发和菌丝生长,当其吸附在病原真菌菌丝上时,会与病原菌共同生长并产生溶菌物质消解菌丝体,溶解孢子细胞壁等^[36-37]。目前发现了多株芽孢杆菌菌株资源,这些菌株可有效防治油菜根肿病^[38]、马铃薯黑胫病^[39]、小麦赤霉病^[40]、黄瓜棒孢叶斑病^[41]、黄瓜炭疽病^[36]、甘薯茎腐病^[42]、番茄匍柄霉叶斑病^[43]和番茄白粉病^[44]等。

除了从陆地土壤和植物中筛选芽孢杆菌外,细菌杀菌剂生防菌株的选择范围和类型也正逐渐变广。张致军等^[45]以海洋生境芽孢杆菌 Txc2-1 为研究对象,制备了 30 亿 CFU/g Txc2-1 可湿性粉剂(Txc2-1 WP),稀释 300 倍施用,药后 60 d 对白菜根肿病的田间防效可达 66.8%,该研究结果为将 Txc2-1 开发成首个防治根肿病的海洋微生物杀菌剂奠定了基础。此外,2019 年还有 2 种以光合细菌为有效成分的杀菌剂获批登记,分别为 2.0 亿 CFU/mL 嗜硫小红卵菌 HNI-1 悬浮剂和 2 亿 CFU/mL 沼泽红假单胞菌 PSB-S 悬浮剂^[11]。其中,嗜硫小红卵菌 HNI-1 悬浮剂是全球首个获得登记证的光合细菌类农药,可用于防治水稻细菌性条斑病、水稻稻曲病、番茄根结线虫和番茄花叶病,田间防效表明,在 2700~3600 mL/hm² 剂量下对番茄花叶病防治效果为 55%~70%,在 6000~9000 mL/hm² 剂量下对番茄根结线虫防治效果为 60%~75%^[46-47];而沼泽红假单胞菌 *Rhodospseudomonas*

palustris 的胞外蛋白能有效抑制稻瘟病菌的生长、附着胞形成以及在寄主上的致病力^[48],施用沼泽红假单胞菌 PSB-S 悬浮剂可有效防治水稻稻瘟病^[49]、辣椒花叶病等。植物线虫作为另一种危害范围极广的虫害,可侵害 100 多种植物,给农林业生产发展造成的损害仅次于真菌病害,每年造成的经济损失高达数亿元。针对线虫病,我国目前已研发出商业化防线虫 Bt 制剂 HAN055(注册商标“壁垒”),该制剂对南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* (Kofold & White) Chitwood 和大豆孢囊线虫 *Heterodera glycines* 均有良好的防治效果,田间试验证明,该产品对南方根结线虫和大豆孢囊线虫的最高防效达到 80% 以上^[50],为我国植物线虫的绿色防控提供了新的防治途径。

近年来,我国针对小麦全蚀病、水稻细菌性条斑病和水稻白叶枯病等以往缺乏生物防制剂的多种农业病害,研制了一系列具有自主知识产权的以生防微生物菌株为有效成分的微生物杀菌剂产品,如防治水稻细菌性条斑病、水稻白叶枯病的解淀粉芽孢杆菌 LX-11 悬浮剂,防治设施番茄枯萎病的解淀粉芽孢杆菌 B1619 水分散粒剂,防治小麦全蚀病的井冈·枯芽菌可湿性粉剂,防治烟草赤星病的多粘菌·枯草菌可湿性粉剂,防治草莓白粉病的枯草芽孢杆菌可湿性粉剂等^[11]。其中,2019 年获批登记的 60 亿芽孢/mL 解淀粉芽孢杆菌 LX-11 悬浮剂,是国内外率先将解淀粉芽孢杆菌应用于防治水稻细菌性病害的杀菌剂,也是我国第一个以解淀粉芽孢杆菌为有效成分登记的防治水稻细菌性条斑病和白叶枯病的微生物杀菌剂^[51]。此外,该悬浮剂还能够防治白菜软腐病、番茄青枯病,目前已在江苏、安徽、福建和云南等省大面积推广应用^[11]。这些杀菌剂产品将小麦全蚀病、水稻细菌性条斑病、水稻白叶枯病、番茄枯萎病等病害列入靶标防治对象,扩大了我国微生物杀菌剂的防治范围。

2.2 真菌杀菌剂

目前,我国获批登记的真菌杀菌剂数量少、类型少、有效成分少。真菌杀菌剂的有效成分主要有木霉菌 *Trichoderma* spp.、厚孢轮枝菌 *Verticillium chlamydyosporium* 和哈茨木霉菌 *Trichoderma harzianum* 等^[11]。其中,木霉菌因抗菌范围广^[52],抑菌效果强,生长速度快,产孢能力强^[53]受到较多研究,是目前利用较多的真菌杀

菌剂。木霉菌可通过竞争作用、溶菌作用、重寄生和抗生作用等对病原菌进行抑制或杀灭^[37,54]。研究发现,木霉菌可有效防治马铃薯黑痣病^[54]、小麦白粉病^[55]、辣椒根腐病、番茄枯萎病和豇豆枯萎病^[52]等病害,且效果显著。截至2022年12月31日,有22种木霉菌杀菌剂获批登记^[11]。除了木霉菌杀菌剂这类广谱杀菌剂外,还有一些专用型真菌杀菌剂,用于防治菌核病等危害性极强的病害。菌核病是由核盘菌 *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary 等真菌引起的世界性病害,其病原菌核盘菌寄主广泛,危害性大,能侵染400多种植物,如油菜、大豆和烟草等^[56]。目前我国仅有2种获批登记用以防治菌核病的真菌杀菌剂,有效成分分别为小盾壳霉 CGMCC8325 和盾壳霉 ZS-1SB^[11]。其中,盾壳霉 ZS-1SB 可湿性粉剂对油菜菌核病有较好的防治作用,可以减少病原菌对油菜花、叶片和茎部的感染,抑制病斑扩展^[57],目前已在湖北、安徽、四川、江西、江苏、重庆、陕西和青海等油菜主产区进行了示范推广。

3 微生物除草剂

目前,在微生物除草剂的研发应用方面利用最广的微生物是真菌,我国最早将真菌应用到杂草防治上的微生物制剂是于1963年研制的“鲁保一号”,其能有效防控菟丝子 *Cuscuta chinensis* Lam.,是我国第一个大规模应用的微生物除草剂^[58]。

近年来,已筛选出多株对牛筋草 *Eleusine indica* (L.) Gaertn.、稗草 *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv.、千金子 *Leptochloa chinensis* (L.) Nees 和马唐 *Digitaria sanguinalis* (L.) Scop. 等杂草有致病菌的菌种资源,其对杂草致病的同时,对棉花、小麦和水稻等作物安全,但利用这些菌株研发的除草剂产品较少,近3年无微生物除草剂获批登记。稗草作为我国水稻生产中主要的农田杂草之一,仍然缺乏可广泛使用的微生物除草剂。张亚鑫等^[59]采用组织分离法获得10株对稗草致病性较强的优势菌株,其中有5株为国内首次从稗草中分离得到;陈勇等^[60]从水稻田稗草叶片上分离并通过紫外诱变得到1株诱变尖角突脐孢菌 *Exserohilum monoceras*,该菌株对稗草也具有防治作用。这些菌株丰富了我国防治稗草病原菌的生物资源,未来有望进一步研发为防除稻田稗草的除草剂。此外,还有能有效防控禾本科杂草、一年

生莎草、阔叶杂草的双色平脐孢菌 *Bipolaris bicolor* SYNJC-2-2^[61]、嘴突凸脐孢菌 *Exserohilum rostratum*^[62]、山田平脐孢菌 *Bipolaris yamadae* (Y.Nisik.) Shoemaker HXDC-1-2^[63]、派伦霉属真菌 *Peyronellaea glomerata*^[64] 等。其中,山田平脐孢菌菌株防控范围和使用范围极广,能用于控制马唐、狗尾草 *Setaria viridis* (L.) Beauv.、牛筋草、虬子草 *Leptochloa panicea* (Retz.) Ohwi、野燕麦 *Avena fatua* L.、假高粱 *Pseudosorghum zollingeri* (Steud.) A. Camus 和柔枝莠竹 *Microstegium vimineum* (Trin.) A. Camus 等禾本科杂草、一年生莎草以及部分阔叶杂草,可以在粮食、蔬菜、花卉和果树等作物田安全使用,控制效果可达80%以上;派伦霉属真菌致病力较为迅速,接种3d后,即能形成明显叶部病斑,对禾本科杂草具有良好的防效。这些菌株类型丰富、防控范围广、生物安全性高、作用效果明显,具有进一步开发成各种经济作物、油料作物等农作物除草剂的潜力。

在已有微生物除草剂产品应用方面,有研究表明,从加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* L. 白绢病病株上分离得到的齐整小核菌 *Sclerotium rolfsii* 可用于禾本科作物田、草坪的阔叶杂草以及加拿大一枝黄花的生物防治^[65]。齐整小核菌菌株 SC64 与生物除草剂克稗霉联合使用扩大了杀草谱,提高了除草效果;在剂型改进方面,利用以秸秆粉与齐整小核菌菌丝混合制成固体颗粒剂型,用于防治一枝黄花,处理剂量为600 kg/hm²时,7d的株防效最高能达到100%^[66]。粘质沙雷氏菌颗粒剂、克稗霉和草茎点霉水分散剂剂等微生物除草剂产品的研发,也为防除马唐、稗草和鸭跖草 *Commelina communis* L. 等杂草提供了新的手段^[67-69]。

4 对微生物农药发展的建议

近年来,各项政策的颁布与实施给予了生物农药登记、生产许可、应用推广更为宽松和有利的发展条件,极大地推动了我国生物农药的发展,而现代技术的应用更加快了在生防微生物选育与创制、微生物与病虫草害互作机制、微生物农药产品研发与生产等方面的脚步。2017年,我国成立了全国农药标准化技术委员会生物农药分技术委员会,通过了《农药管理条例》。《农药管理条例》调整了农药生产管理职责,简化、明

确了生产方面的手续;在2020年2月6日农业农村部印发的《2020年种植业工作要点》中,提出了要完善农药登记审批“绿色通道”政策,为生物农药、高毒农药替代产品等用药登记创造良好环境;2021年8月,在农业农村部等6部门联合印发的《“十四五”全国农业绿色发展规划》中指出,要推行绿色防控,推广应用高效低毒低残留新型农药,这些政策为我国微生物农药的发展提供了良好的机遇。针对微生物农药的发展,未来可从以下3方面进一步加强。

1) 加强创新, 抢占研发高地

目前,大多数微生物制剂防治对象较为单一,往往一种微生物农药只能防治一种病虫害,这样的产品防治面窄、适用范围小,对农户来说性价比低,而且无形中也增加了企业的研发成本,同时也造成了有些微生物制剂难以大规模使用,未来应当加大对广谱性微生物的筛选,研发药效更高、防治面更广、性价比更高的微生物农药;同时,市场中存在较多低水平、重复性的产品,未来应进一步提升原始创新能力,把握前沿研究方向,加大对生物除草剂等市场空白产品的研究,提前布局相关内容的研究,抢占国际国内市场。

2) 抓住机遇, 推动产品商业化

目前已筛选到多种具有生防效果的微生物菌株,但实际生产和登记的产品数量仍然较少,微生物农药产品的商业化能力和产业化能力还较弱,多数缺少中试环节。2022年1月,农业农村部等8部门联合印发的《“十四五”全国农药产业发展规划》中,指出优化生产布局,提高产业集中度,调整产品结构,推行绿色清洁生产,优先发展生物农药产业,重点培育一批绿色农药制剂加工企业。各企业应抓住机遇,转型升级,加强技术创新,对现在突出的微生物农药产品保质期短,受环境影响药效降低,助剂加工配方不合理,缺乏合适的载体、表面活性剂、助剂等方面,进一步优化工艺设计和生产流程,提高生产效率和产品质量,推动微生物农药商业化和产业化。

3) 多点发力, 促进产品广泛应用

除了研发和生产端,后续的政策支持、知识产权保护、经营管理、服务推广体系的建立等方面都会影响产品的推广应用。各级政府、农技部门等应建立完善的推广服务体系,一方面应加强

科普宣传工作,加大微生物农药的施用技术培训,提高农民、新型经营主体等用户的使用意愿;另一方面可通过典型示范,带动大面积应用;同时,也要进一步规范经营管理,完善安全使用、贮藏运输等标准,降低运输环境不达标、储存条件不到位、施用技术不规范等对产品效用的影响,确保研发效果和使用效果的一致性。

5 展望

尽管目前微生物农药的使用比例还较低,但在国家政策支持力度加大、市场需求增长等有利因素的影响下,预计微生物农药产业会进一步发展。2020年9月30日农业农村部农药管理司发布的《关于推进实施农药登记审批绿色通道管理措施的通知》(农农(农药)(2020)78号)文件中,提出要将微生物农药纳入登记审批绿色通道,优先安排技术审查,在保障质量和安全的前提下加快技术审查进程,预计未来微生物农药的研发进度和审批登记速度将进一步加快。同时,农业农村部、国家发展改革委等部门也制定并实施了一系列政策措施,扶持发展生物源农药产业,如设立专项资金补贴农民使用生物源农药,对符合条件的生物源农药企业予以税收优惠等,《“十四五”全国农药产业发展规划》也明确提出将微生物农药列入优先发展目录,加大微生物农药的研发力度,并重点培育一批生物农药优势企业,预计未来企业的研发能力将进一步增强,微生物农药的使用比例和市场占有率也将逐步提高。另外,随着产业的发展,微生物农药还可能在推动病虫害绿色防治、农产品的优质安全生产、生物多样性保护、土壤质量提升等领域进一步发挥作用。

参考文献 (References):

- [1] 白小宁,李友顺,赵安楠,等. 2021年及近年我国农药登记情况和特点分析[J]. 农药科学与管理, 2022, 43(1): 1-11.
BAI X N, LI Y S, ZHAO A N, et al. Analysis on the situation and characteristics of pesticide registration in China in 2021 and recent years[J]. Pestic Sci Admin, 2022, 43(1): 1-11.
- [2] 袁善奎,王以燕,师丽红,等. 我国生物源农药标准制定现状及展望[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(1): 1-7.
YUAN S K, WANG Y Y, SHI L H, et al. Current situation and prospects of biological pesticides related standards in China[J]. Chin J Biol Control, 2018, 34(1): 1-7.
- [3] 王以燕,袁善奎,农向群,等. 浅谈微生物农药管理的规范化[J]. 农药, 2021, 60(6): 391-394.
WANG Y Y, YUAN S K, NONG X Q, et al. Discussion on standardization of microbial pesticide management[J]. Agroche-

- micals, 2021, 60(6): 391-394.
- [4] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 等. 我国微生物农药常见剂型种类及管理[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(4): 640-645.
WANG Y Y, YUAN S K, NONG X Q, et al. Main types and management of common formulations of microbial pesticides in China[J]. Chin J Biol Control, 2021, 37(4): 640-645.
- [5] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 等. 我国微生物农药产品质量、安全性评价和使用技术相关标准[J]. 农药, 2021, 60(12): 872-877.
WANG Y Y, YUAN S K, NONG X Q, et al. Current situation of standards for quality control, risk assessment and application technology of microbial pesticides in China[J]. Agrochemicals, 2021, 60(12): 872-877.
- [6] 刘振华, 邢雪琨. 微生物农药助剂研究进展[J]. 基因组学与应用生物学, 2016, 35(8): 2109-2113.
LIU Z H, XING X K. Research progress of microbial pesticide additives[J]. Genom Appl Biol, 2016, 35(8): 2109-2113.
- [7] 束长龙, 曹蓓蓓, 袁善奎, 等. 微生物农药管理现状与展望[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(3): 297-303.
SHU C L, CAO B B, YUAN S K, et al. The present situation and prospect of microbial pesticide management[J]. Chin J Biol Control, 2017, 33(3): 297-303.
- [8] 邱德文. 生物农药的发展现状与趋势分析[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 679-684.
QIU D W. Analysis of the development situation and trends of biological pesticides in China[J]. Chin J Biol Control, 2015, 31(5): 679-684.
- [9] 韩光杰, 徐灵环, 李传明, 等. 苏云金杆菌Bt-59菌株cry/cyt毒素蛋白鉴定及杀虫活性[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(3): 458-464.
HAN G J, XU L H, LI C M, et al. Characteristics of cry and cyt proteins and insecticidal activity in *Bacillus thuringiensis* Bt-59[J]. Chin J Biol Control, 2020, 36(3): 458-464.
- [10] 杨丽丽. 苏云金芽孢杆菌和球形芽孢杆菌主要杀虫毒蛋白的克隆及表达[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2014.
YANG L L. Cloning and expression of the main mosquitocidol protein of *Bacillus thuringiensis* and *Bacillus sphaericus*[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2014.
- [11] 中国农药信息网. 数据中心[DB/OL]. [2022-12-30]. <http://www.chinapesticide.org.cn/zwb/dataCenter>.
China pesticide information network. Data center[DB/OL]. [2022-12-30]. <http://www.chinapesticide.org.cn/zwb/dataCenter>.
- [12] 胡斌, 伍淼, 张晓明, 等. 高效苏云金杆菌KN11杀虫剂产品开发及应用[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(6): 842-846.
HU X, WU M, ZHANG X M, et al. Development and application of efficient *Bacillus thuringiensis* KN11 insecticides[J]. Chin J Biol Control, 2020, 36(6): 842-846.
- [13] 刘华梅, 胡斌, 王应龙, 等. 对草地贪夜蛾高毒力的苏云金杆菌菌株筛选[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 721-728.
LIU H M, HU X, WANG Y L, et al. Screening for *Bacillus thuringiensis* strains with high toxicity against *Spodoptera frugiperda*[J]. Chin J Biol Control, 2019, 35(5): 721-728.
- [14] 王开梅, 廖先清, 周荣华, 等. 一株对夜蛾科害虫具有高毒杀活性的苏云金芽孢杆菌及应用: CN112695001B[P/OL]. 2021-10-08[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
WANG K M, LIAO X Q, ZHOU R H, et al. *Bacillus thuringiensis* with high toxic activity on Noctuidae pests and application: CN112695001B[P/OL]. 2021-10-08[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [15] 张啸, 刘佳, 杨亦桦, 等. 球孢白僵菌侵染中黑盲蝽致病过程的电镜观察[J]. 应用昆虫学报, 2021, 58(5): 1190-1198.
ZHANG X, LIU J, YANG Y H, et al. Electron microscopic observation of infection of *Adelphocoris suturalis* by *Beauveria bassiana*[J]. Chin J Appl Entomol, 2021, 58(5): 1190-1198.
- [16] WANG B, KANG Q J, LU Y Z, et al. Unveiling the biosynthetic puzzle of destruxins in *Metarhizium* species[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109(4): 1287-1292.
- [17] 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.
PENG G X, ZHANG S L, XIA Y X. *Metarhizium anisopliae* CQMa421 and its application status[J]. Chin J Biol Control, 2020, 36(6): 850-857.
- [18] 夏玉先, 彭国雄. 一种杀虫绿僵菌菌株及其应用: CN102212483B[P/OL]. 2012-08-01[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
XIA Y X, PENG G X. Pesticidal *Metarhizium anisopliae* strain and application thereof: CN102212483B[P/OL]. 2012-08-01[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [19] 王海鸿, 刘胜, 王帅宇, 等. 150亿孢子/g球孢白僵菌可湿性粉剂的研发及对西花蓟马的防治应用[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(6): 858-861.
WANG H H, LIU S, WANG S Y, et al. Research and development of wettable powder of *Beauveria bassiana* and its control and application to *Frankliniella occidentalis*[J]. Chin J Biol Control, 2020, 36(6): 858-861.
- [20] 王逸帆. 高致病力球孢白僵菌筛选及对灰茶尺蠖的生物学影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
WANG Y F. Screening of *Beauveria bassiana* strains against *Ectropis grisescens* and biological effects on the insect pest[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [21] 刘海洋, 刘龙, 刘新宇, 等. 两株杀虫真菌对陕西榆林草原蝗虫的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(2): 380-384.
LIU H Y, LIU L, LIU X Y, et al. The control efficacy of two fungal strains against locusts of grassland in Yulin, Shaanxi[J]. Chin J Biol Control, 2021, 37(2): 380-384.
- [22] 魏琪, 朱旭晖, 何佳春, 等. 5种微生物杀虫剂对3种水稻主要害虫的室内毒力比较及致死表型观察[J]. 植物保护, 2022, 48(4): 165-174.
WEI Q, ZHU X H, HE J C, et al. Toxicity comparison and lethal phenotypes of five microbial insecticides against three major rice pests in laboratory research[J]. Plant Prot, 2022, 48(4): 165-174.
- [23] 占军平, 张安明, 邓方坤, 等. 甘蓝夜蛾核型多角体病毒悬浮剂防治草地贪夜蛾的应用与推广[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(6): 872-873.
ZHAN J P, ZHANG A M, DENG F K, et al. Application and promotion of *Mamestra brassicae* nucleopolyhedrovirus suspension for control of *Spodoptera frugiperda*[J]. Chin J Biol Control, 2020, 36(6): 872-873.
- [24] 类承凤, 姜干明, 彭玲, 等. 亚洲玉米螟核型多角体病毒分离株鉴定及其对草地贪夜蛾的室内毒力测定[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(5): 741-746.
LEI C F, JIANG G M, PENG L, et al. Identification of an isolate of *Ostrinia furnacalis* nucleopolyhedrovirus and its bioactivity against *Spodoptera frugiperda* larvae[J]. Chin J Biol Control, 2019, 35(5): 741-746.
- [25] 张海波, 王凤良, 陈永明, 等. 核型多角体病毒对玉米草地贪夜蛾的控制作用研究[J]. 植物保护, 2020, 46(2): 254-260.
ZHANG H B, WANG F L, CHEN Y M, et al. Study on the control effect of nucleopolyhedrovirus on *Spodoptera frugiperda*[J]. Plant Prot, 2020, 46(2): 254-260.
- [26] 郑静君, 黄立胜, 李国君, 等. 甘蓝夜蛾核型多角体病毒对水稻稻纵卷叶螟防治作用初探[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(11): 39-42.
ZHENG J J, HUANG L S, LI G J, et al. Effect of *Mamestra brassicae*

- NPV on the control of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee[J]. *China Plant Prot*, 2016, 36(11): 39-42.
- [27] 张忠信. 一种用昆虫病毒研发高效安全的新型生物农药正在全面推广——中国科学院广谱高效昆虫杆状病毒杀虫剂的研制和应用[J]. *科技促进发展*, 2016, 12(1): 46-50.
- ZHANG Z X. Research and development of efficient and safe biological pesticide by taking advantage of insect virus-development and application of a novel baculovirus bio-pesticide[J]. *Sci Technol Dev*, 2016, 12(1): 46-50.
- [28] 王以燕, 袁善奎, 农向群, 等. 微生物农药常见术语及释义[J]. *中国生物防治学报*, 2022, 38(2): 283-288.
- WANG Y Y, YUAN S K, NONG X Q, et al. Terminologies and definitions of microbial pesticides[J]. *Chin J Biol Control*, 2022, 38(2): 283-288.
- [29] 杨鹤鹤, 石洁, 张海剑, 等. 一种二点委夜蛾微孢子虫的致病机理[J]. *中国生物防治学报*, 2017, 33(4): 571-574.
- YANG Y H, SHI J, ZHANG H J, et al. Pathogenic mechanism of a microsporidium strain isolated from *Athetis lepigone*[J]. *Chin J Biol Control*, 2017, 33(4): 571-574.
- [30] 胡微蕾, 徐青叶, 唐斌, 等. 微孢子虫致病与传播及其对昆虫免疫繁殖作用的研究进展[J]. *环境昆虫学报*, 2014, 36(6): 1040-1045.
- HU W L, XU Q Y, TANG B, et al. Advance of study of the pathogenicity and transmission of microsporidia to insects' immune and reproduction[J]. *J Environ Entomol*, 2014, 36(6): 1040-1045.
- [31] 袁兵兵, 张海青, 陈静. 微生物农药研究进展[J]. *山东轻工业学院学报*, 2010, 24(1): 45-49.
- YUAN B B, ZHANG H Q, CHEN J. Research advance on microbial pesticides[J]. *J Shandong Inst Light Ind Nat Sci Ed*, 2010, 24(1): 45-49.
- [32] 秦丽萍, 白文丽, 姜有威, 等. 微孢子虫对草原蝗虫的防治效果试验[J]. *畜牧兽医杂志*, 2021, 40(3): 16-18.
- QIN L P, BAI W L, JIANG Y W, et al. Experiment on the control effect of *Nosema locustae* on grassland grasshoppers[J]. *J Animal Sci Vet Med*, 2021, 40(3): 16-18.
- [33] 曹国兵, 于红妍. 2种不同剂型蝗虫微孢子虫防治草地蝗虫的药效研究[J]. *畜牧与饲料科学*, 2018, 39(8): 53-55.
- CAO G B, YU H Y. Control efficacy of two formulations of *Nosema locustae* against grasshoppers[J]. *Animal Husb Feed Sci*, 2018, 39(8): 53-55.
- [34] 张龙, 严毓骅. 以生物防治为主的蝗灾可持续治理新对策及其配套技术体系[J]. *中国农业大学学报*, 2008, 13(3): 1-6.
- ZHANG L, YAN Y H. New strategies and technical systems for sustainable management of locust and grasshopper mainly based on biocontrol[J]. *J China Agric Univ*, 2008, 13(3): 1-6.
- [35] 刘华梅, 许国建. 微生物农药苏云金杆菌G033A[J]. *农药科学与管理*, 2018, 39(4): 59-60.
- LIU H M, XU G J. Microbial pesticide *Bacillus thuringiensis* G033A[J]. *Pestic Sci Admin*, 2018, 39(4): 59-60.
- [36] 李玲. 枯草芽孢杆菌BH-8对番茄灰霉病防病机理及其促生作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- LI L. The control mechanisms of *Bacillus subtilis* BH-8 against tomato grey mould and its promoting effect[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [37] 甘金佳, 毛莉莉, 孙成荣, 等. 枯草芽孢杆菌在番茄病害防治上的应用与研究进展[J]. *长江蔬菜*, 2021(8): 42-48.
- GAN J J, MAO L L, SUN C R, et al. Application and research progress of *Bacillus subtilis* in tomato disease control[J]. *J Chang Veg*, 2021(8): 42-48.
- [38] 张凯妮, 张蕾, 黄小琴, 等. 芽孢杆菌Bam22对油菜根肿病的防治效果研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(34): 104-109.
- ZHANG K N, ZHANG L, HUANG X Q, et al. Effect of *Bacillus* Bam22 on club root of oilseed rape[J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2020, 36(34): 104-109.
- [39] 孟焕文, 赵远征, 梁东超, 等. 马铃薯黑胫病生防菌株的筛选与鉴定[J]. *中国植保导刊*, 2020, 40(8): 24-29.
- MENG H W, ZHAO Y Z, LIANG D C, et al. Selection and identification of biological control agents for *Pectobacterium atrosepticum*[J]. *China Plant Prot*, 2020, 40(8): 24-29.
- [40] 陈小洁, 王其, 张欣悦, 等. 杜仲内生细菌拮抗小麦赤霉病菌研究[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(5): 766-776.
- CHEN X J, WANG Q, ZHANG X Y, et al. Study on endophytic bacteria isolated from *Eucommia ulmoides* with antimicrobial activity against *Fusarium graminearum*[J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2019, 31(5): 766-776.
- [41] 赵昱榕, 李磊, 谢学文, 等. 贝莱斯芽胞杆菌ZF₂对多主棒孢病菌防治效果[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(2): 217-225.
- ZHAO Y R, LI L, XIE X W, et al. Biocontrol effect of *Bacillus velezensis* strain ZF₂ against *Corynespora cassicola*[J]. *Chin J Biol Control*, 2019, 35(2): 217-225.
- [42] 王璐瑶. 甘薯茎腐病有效杀菌剂筛选及拮抗菌株的筛选鉴定[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- WANG L Y. Screening of antagonistic strains and bactericide for bacterial stem and root rot of sweet potato[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [43] 李新宇, 李磊, 陈利达, 等. 番茄柄腐霉叶斑病拮抗细菌的筛选与鉴定[J]. *园艺学报*, 2020, 47(4): 741-748.
- LI X Y, LI L, CHEN L D, et al. Screening and identification of antagonistic bacteria against gray leaf spot of tomato caused by *Stemphylium solani*[J]. *Acta Hort Sin*, 2020, 47(4): 741-748.
- [44] 武君洁, 吴毅歆, 何鹏搏, 等. 枯草芽孢杆菌YN2014090悬浮剂的研制[J]. *中国生物防治学报*, 2019, 35(5): 777-784.
- WU J J, WU Y X, HE P B, et al. Development of antagonistic *Bacillus subtilis* YN2014090 suspension concentrate[J]. *Chin J Biol Control*, 2019, 35(5): 777-784.
- [45] 张致军, 罗远婵, 章真, 等. 防治白菜根肿病的新型海洋微生物农药——解淀粉芽孢杆菌Txc2-1可湿性粉剂配方优化及药效研究[J]. *农药学报*, 2020, 22(1): 145-153.
- ZHANG Z J, LUO Y C, ZHANG Z, et al. Formulation optimization of the wettable powder of *Bacillus amyloliquefaciens*: a novel marine microbial pesticide for the control of cabbage clubroot[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2020, 22(1): 145-153.
- [46] 符伟, 刘勇, 张德咏, 等. 2.0亿CFU/mL嗜硫小红卵菌HNI-1悬浮剂研发与应用[J]. *中国生物防治学报*, 2020, 36(6): 866-868.
- FU W, LIU Y, ZHANG D Y, et al. Preparation and application of 200 million CFU/mL HNI-1 suspension concentrate[J]. *Chin J Biol Control*, 2020, 36(6): 866-868.
- [47] 2.0亿CFU/mL嗜硫小红卵菌HNI-1悬浮剂[J]. *农药科学与管理*, 2020, 41(2): 49-50.
- 200 million CFU/mL suspension concentrate of *Rhodopseudomonas sulphophilus* HNI-1[J]. *Pestic Sci Admin*, 2020, 41(2): 49-50.
- [48] 吴希阳, 罗路云, 谭新球, 等. 沼泽红假单胞菌Atp2蛋白的原核表达及稻瘟病菌的互作蛋白初步筛选[J]. *中国生物防治学报*, 2020, 36(3): 421-428.
- WU X Y, LUO L Y, TAN X Q, et al. Prokaryotic expression of Atp2 protein of *Rhodopseudomonas palustris* and preliminary screening of interaction protein in *Magnaporthe oryzae*[J]. *Chin J Biol Control*, 2020, 36(3): 421-428.
- [49] 罗路云, 张卓, 王培, 等. 光合细菌菌剂对稻曲病和稻瘟病的田间药效试验[J]. *湖南农业科学*, 2019(11): 69-71.
- LUO L Y, ZHANG Z, WANG P, et al. Field efficiency of photosynthetic bacteria against rice false smut and rice blast[J]. *Hunan Agric Sci*, 2019(11): 69-71.

- [50] 孙明, 聂相涛, 张争名, 等. 防治大豆孢囊线虫和南方根结线虫的苏云金芽孢杆菌及制剂与应用: CN108070535B[P/OL]. 2020-10-30[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- SUN M, NIE X T, ZHANG Z M, et al. *Bacillus thuringiensis* for controlling *Heterodera glycines* and *Meloidogyne incognita* as well as preparation and applications: CN108070535B[P/OL]. 2020-10-30[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [51] 解淀粉芽孢杆菌LX-11[J]. 农药科学与管理, 2019, 40(6): 65-66. *Bacillus amyloliquefaciens* LX-11 [J]. Pestic Sci Admin, 2019, 40(6): 65-66.
- [52] 申君, 杨绍丽, 谷清义, 等. 一株辣椒根腐病拮抗木霉菌Tb1的筛选与鉴定[J]. 东北农业科学, 2022, 47(5): 62-66. SHEN J, YANG S L, GU Q Y, et al. Isolation and identification of an antagonistic fungus Tb1 against *Fusarium solani*(Mart.) causing pepper root rot[J]. J Northeast Agric Sci, 2022, 47(5): 62-66.
- [53] 李纪顺, 陈凯, 王贻莲, 等. 防治西洋参立枯病木霉菌株的筛选鉴定及其小区防治效果[J]. 山东科学, 2019, 32(5): 62-70. LI J S, CHEN K, WANG Y L, et al. Screening and identification of *Trichoderma* spp. against seedling blight of *Panax quinquefolium* L. and its control efficiency on the plot[J]. Shandong Sci, 2019, 32(5): 62-70.
- [54] 王天君, 陈志垚, 杨霞, 等. 木霉菌对马铃薯黑痣病菌的拮抗作用及防效研究[J]. 黑龙江八一农大学学报, 2021, 33(5): 22-29. WANG T J, CHEN Z Y, YANG X, et al. Antagonistic and protective effect of *Trichoderma* spp. on potato black scurf[J]. J Heilongjiang Bayi Agric Univ, 2021, 33(5): 22-29.
- [55] 李玲, 杨凯, 陈凯, 等. 木霉菌对小麦白粉病防治效果研究[J]. 中国植保导刊, 2021, 41(7): 9-13. LI L, YANG K, CHEN K, et al. Study on control efficiency of *Trichoderma* strains against wheat powdery mildew[J]. China Plant Prot, 2021, 41(7): 9-13.
- [56] BOLAND G J, HALL R. Index of plant hosts of *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. *Can J Plant Pathol*, 1994, 16(2): 93-108.
- [57] 盾壳霉ZS-1SB[J]. 农药科学与管理, 2019, 40(9): 55-56. *Coniothyrium minitans*[J]. Pestic Sci Admin, 2019, 40(9): 55-56.
- [58] 刘志海, 朱全让. 鲁保一号菌[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1980: 1-179. LIU Z H, ZHU Q R. Lubao No. 1 strain[M]. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1980: 1-179.
- [59] 张亚鑫, 肖婉, 张峥, 等. 稻田稗属杂草致病菌的分离与鉴定[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(6): 1276-1287. ZHANG Y X, XIAO W, ZHANG Z, et al. Isolation and identification of plant pathogens of barnyard grass in the paddy fields[J]. Chin J Biol Control, 2021, 37(6): 1276-1287.
- [60] 陈勇, 钟锦, 董朝霞, 等. 一株诱变尖角突脐孢菌及其在防治稗草中的应用: CN109735457B[P/OL]. 2020-04-14[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>. CHEN Y, ZHONG J, DONG Z X, et al. A strain of *Exserohilum monoceras* and its application in the control of barnyardgrass: CN109735457B[P/OL]. 2020-04-14[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [61] 陈世国, 肖婉, 强胜, 等. 一种具有除草活性的双色平脐孢菌及其应用: CN111471596B[P/OL]. 2021-11-12[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>. CHEN S G, XIAO W, QIANG S, et al. *Bipolaris bicolor* (Mitra) Shoem with herbicidal activity and application thereof: CN111471596B[P/OL]. 2021-11-12[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>
- [62] 陈勇, 俞雯雯, 卢文涛, 等. 一株嘴突凸脐孢菌及其在防治水田杂草千金子中的应用: CN109735456B[P/OL]. 2020-03-27[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>. CHEN Y, YU W W, LU W T, et al. A strain of *Exserohilum rostratum* and its application in the control of *Leptochloa chinensis* (L.) Nees: CN109735456B[P/OL]. 2020-03-27[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>
- [63] 强胜, 谭敏. 一种山田平脐孢菌菌株、其筛选和鉴定方法及其用途: CN111518702B[P/OL]. 2022-04-12[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>. QIANG S, TAN M. A *Bipolaris yamadae* (Y. Nisik.) Shoemaker strain, its screening, identification and application: CN111518702B [P/OL]. 2022-04-12[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [64] 李健, 李美, 高兴祥, 等. 一种杂草生防菌及其应用: CN111394262B [P/OL]. 2022-03-08[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>. LI J, LI M, GAO X X, et al. Weed biocontrol bacterium and application thereof: CN111394262B[P/OL]. 2022-03-08[2023-02-21]. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [65] 唐伟, 朱云枝, 强胜. 室内模拟旱直播稻田环境下齐整小核菌 *Sclerotium rolfsii* 菌株SC64致病力的影响因子及除草效果的研究[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(1): 109-115. TANG W, ZHU Y Z, QIANG S. Factors affecting pathogenicity of *Sclerotium rolfsii* isolate SC64 to broadleaf weeds under simulated dry-seeded rice condition[J]. Chin J Biol Control, 2012, 28(1): 109-115.
- [66] 庄超. 生物除草剂菌克阔剂型及其除草效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014. ZHUANG C. The formulation of bioherbicide junkekuo and the field evaluation of weed control[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [67] 邹益泽. 草茎点霉水分散剂的研发及其对鸭跖草防除效果研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. ZOU Y Z. Development of *Phoma herbarum* WG and its control effect against *Commelina communis* L. [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [68] 庄超, 张羽佳, 唐伟, 等. 齐整小核菌和禾长蠕孢菌稗草专化型复配防除直播稻田杂草的试验研究[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(2): 242-249. ZHUANG C, ZHANG Y J, TANG W, et al. Field evaluation of cooperative application of *Sclerotium rolfsii* and *Helminthosporium gramineum* Rabenh. f. sp. *echinochloae* to control weeds in dry direct-seeded rice[J]. Chin J Biol Control, 2015, 31(2): 242-249.
- [69] 杨娟. 粘质沙雷氏菌(*Serratia marcescens*)Hal菌株及其代谢产物除草活性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014. YANG J. Herbicidal activity of granules and metabolites of *Serratia marcescens* Hal[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.

(责任编辑: 曲来娥)