



陈秀玲,王婕,钱春荣,等.生物防治在蔬菜绿色生产中的应用[J].黑龙江农业科学,2023(10):111-116.

生物防治在蔬菜绿色生产中的应用

陈秀玲¹,王 婕¹,钱春荣²,刘 昕¹,来永才³

(1.东北农业大学 园艺园林学院,黑龙江 哈尔滨 150030; 2.黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所,黑龙江 哈尔滨 150023; 3.黑龙江省农业科学院,黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要:中国是一个农业大国,蔬菜的生产量和消耗量巨大。在病虫害防治方面传统的化学防治已经无法满足当代社会大众对健康生活的迫切需求,绿色生产的重点之一在于病虫害防控,生物防治是病虫害绿色防控的重要手段。与化学防治相比,生物防治具有高效、环保、对人畜无害等优点,能够完美规避化学防治的缺陷与不足。本文总结了生物防治的主要策略及其在蔬菜绿色生产中用于病虫害防治的应用现状,探讨了生物防治在蔬菜绿色生产中的应用前景及今后的发展方向。

关键词:生物防治;蔬菜;绿色生产;病虫害

蔬菜是人们日常饮食中不可缺少的食物之一,其重要性仅次于粮食作物。蔬菜可提供多种维生素、抗氧化剂和矿物质等人体所必需的物质,特有的植物粗纤维可以起到助消化、防肠癌的作用,也能促进人体对蛋白质、脂肪、碳水化合物的吸收。园艺设施的广泛应用,虽使蔬菜生产不再受环境制约,实现了周年生产,产量得以提高,但长时间连续种植同种作物也产生了严重的连作障碍,影响蔬菜品质。同时,大棚温室中高温高湿的环境为植物病原菌和害虫提供了良好的繁殖条件,导致病虫害频发,蔬菜产量和质量也随之下降^[1]。

在蔬菜生产中病虫害种类繁多,危害面积广泛,且由于其自身特性,导致防治过程中可变的因素较多,如果没有采取正确的防治措施,易导致病虫害爆发造成严重的经济损失,甚至还有可能给蔬菜生产带来长期的负面影响^[2]。

为了防治蔬菜病虫害,生产者大剂量地使用杀菌剂和杀虫剂等化学物质。尽管这些化学物质能够在短时间内获得显著的效果,但从长远来看,化学防治不仅会使植物病原菌和害虫积累抗药性,导致病虫害防治的恶性循环,还会破坏土壤条件,污染生态环境,危害人类和动物的身体健康。因此,从高毒、高残留的化学农药转向更为绿色、

生态的防治手段,是蔬菜生产中亟待解决的问题。

随着社会的进步和经济的高速发展,人们已经不再满足于最基本的温饱,开始追求更健康、更高品质的饮食方式,对蔬菜品质的要求也越来越高,绿色生产已成为研究热点^[3]。蔬菜绿色生产是指在蔬菜生产过程中,以提高蔬菜质量、保护环境和改善农民收入为目标,积极采用新技术、新工艺、新种类、新品种、新肥料、新农药,实施科学的农业生产管理措施。以实现环境友好型、资源可持续利用、收益合理、质量安全和生态稳定的农业经济发展新思路。

生物防治既保证了蔬菜的产量和品质,又不会对生态环境产生负担,是种植业的未来发展趋势^[4]。本研究概述了生物防治的基本概念、蔬菜绿色生产中病虫害的生物防治策略,并对生物防治在蔬菜绿色生产中的发展前景进行了展望,以期减少农药使用,有效控制田间病虫害,从而实现绿色生产目标提供理论指导。

1 生物防治的概述

生物防治是指利用某些生物(植物、动物、微生物)或其代谢产物有效防治作物病虫害和杂草的一种手段。可以保证蔬菜的生产质量,提高蔬菜产量,增加农户效益,是一种经济、绿色、高效、符合生态发展需求的病虫害防控技术。

生物防治技术可以利用农作物自身产生的或具有抗病虫性能的生物物质,来抑制病虫害的发生和发展;或者利用天敌、病毒等病虫害的自然天敌,控制病虫害的发生和发展。具有不污染环境、难以引起抗药性、对人畜及农作物安全,易于在自

收稿日期:2023-05-04

基金项目:黑龙江省绿色有机农业协同创新与推广体系。

第一作者:陈秀玲(1981—),女,博士,副研究员,从事蔬菜作物生物防治研究。E-mail:chenx@neau.edu.cn。

通信作者:来永才(1964—),男,博士,研究员,从事粮食作物绿色生产理论与技术研究。E-mail:yame0451@163.com。

自然界中构建群体、复制和传播,与其他控制方法不冲突等优点。但在应用上也存在一定的局限性,由于生物防治技术涉及到天敌、寄主、环境之间的相互作用,关系比较复杂,受到多种因素的影响^[5]。特别是利用天敌、病毒等病虫害的自然天敌为手段的防治方法,由于依赖自然平衡的控制作用,往往不能在短期内达到理想的防治效果,必须利用人为因素予以加强^[6]。因此生物防治方法通常需要在适当的时间和条件下使用,以达到最佳的防治效果。

2 蔬菜绿色生产中病害的生物防治策略

2.1 利用生防细菌进行病害防治

生防细菌能够通过抑制植物病原菌的菌丝生长,有效防治蔬菜病害的发生、发展和蔓延,其作用机制主要包括竞争、抗生、诱导植物抗性等^[7]。其中芽孢杆菌属(*Bacillus*)和类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*)由于其性能稳定、抗逆性强、生长速度快且具有广谱抗性和促生效果,广泛应用于各类蔬菜生产中,可以防治黄瓜苗期猝倒病、马铃薯疮痂病、蔬菜苗期立枯病、菠菜枯萎病等多种蔬菜病害^[8]。研究人员发现,解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) SF1103 和枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*) SF1104 对黄瓜枯萎病菌具有十分强烈的拮抗作用,能有效抑制黄瓜枯萎病菌的繁殖蔓延,同时还能提高黄瓜中氨基酸和维生素含量,提升黄瓜品质^[9],促进黄瓜的生长;蜡样芽孢杆菌(*Bacillus cereus*) Y3F 也能分泌抑菌物质,显著降低黄瓜根际土壤中有害菌如尖孢镰孢菌的数量,以此减少黄瓜病害的发生频率^[10];侧孢芽孢杆菌 B113 能激活番茄植株体内酶活性,抵抗番茄早疫病的发生,同时增加土壤根系中有益微生物的数量,提高植株的抗病性^[11]。

芽孢杆菌作为生防细菌应用在农业防治领域已有数十年的历史,除此之外,假单胞菌(*Pseudomonas* spp.)、链霉菌(*Streptomyces* spp.)等也有很好的病害防治作用。近期发现黏细菌(*Mycobacteria*)可以直接捕食多种植物病原细菌和真菌以获取营养,阻止病原菌正常生理活动,对于部分植物病原菌和真菌均有良好的防治效果,现已逐渐投入使用^[12]。

2.2 利用生防真菌进行病害防治

目前被广泛应用的生防真菌大多都是通过竞争、重寄生和诱导植物抗性等方式来防治蔬菜病害,其中应用最多的是木霉菌(*Trichoderma*)。木霉菌的生物防治作用机制是多方面的,除了主

要机制重寄生,既与病原菌相互缠绕使病原菌菌丝变形破裂^[13],又可以通过与植物互作,改变植物的基因表达水平,使植株获取抗病抗逆性,从而显著提高自身防御能力,调节植物激素应答并抵抗病菌侵入^[14],是一种非常理想的生防真菌,多用于番茄灰霉病、香蕉枯萎病、小麦根腐病、玉米叶斑病等蔬菜病害防治中^[15]。除此之外,丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhiza*)也被证明能够减少植物病原菌造成的危害,同时增强植物对于相应病害的抗性^[16],因其能够有效防治多种病害及日本丽金龟(*Popillia japonica*)、斜纹夜蛾(*Prodenia litura*)等植食性昆虫,且对环境友好,所以其对于农业生态系统有着难以替代的调节作用^[17]。

比起单一菌种的作用,木霉菌和丛枝菌根真菌联合使用效果更佳,二者在抑菌方面具有明显的协同作用,能更加显著地防治蔬菜病害。研究发现,将尖孢镰刀菌接种到番茄上后,培养一段时间,发病率为 70.0%,之后只接种丛枝菌根真菌,发病率能降低到 20.0%,而若是与木霉菌联合接种则可完全抑制病害发生^[18]。

2.3 利用病毒进行病害防治

病毒防治技术在蔬菜的真菌性病害和细菌性病害的防治方面均有应用。可防治蔬菜真菌性病害的病毒是低毒病毒,此类低毒病毒通过寄生于真菌菌体内,明显减弱真菌的致病能力。目前已发现的低毒真菌病毒范围较广,如番茄矮病毒科(Tombusviridae)、葡萄孢欧尔密病毒科(Botourmiaviridae)等,寄主可选择性广,可以应用于多种蔬菜病害防治,极具生防潜力和研究价值^[19]。

噬菌体(Bacteriophage)则是一类感染专一细菌的病毒,是环境中能够显著调节菌种数量的微生物^[20]。它通过将病菌溶解,破坏细菌细胞或者直接侵染细菌,进行自身增殖,使病原菌无法正常进行生理活动,从而抑制植株被侵害。研究者在使用病原菌侵染马铃薯叶片 1 h 内施用噬菌体后,发现叶片软腐病的发病症状减轻 90%^[21]。将噬菌体与其他生物防治制剂相结合能够有效提高植株的防治效果^[22]。

2.4 利用微生物代谢产物进行病害防治

一些微生物除了可以通过自身生理活动消灭病原菌外,其代谢产物也具有一定的杀菌作用。随着木霉菌在农业生物防治中的广泛应用,其产生的抗生素代谢产物也引起了农业科研人员的关

注。自胶霉毒素于 1932 年被发现以来,从木霉菌中分离得到的次生代谢产物达 300 种以上,其中确定具有生防作用的产物也有 40 多种,这些均与菌株的生防功能息息相关^[23]。李苏冉等^[24]从市面售卖的黄豆酱中分离提取出一株解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*),通过全基因组测序发现了 6 个与次生代谢产物有关的抗真菌物质合成簇,对植物致病真菌具有强烈的抑制作用。

利用次生代谢产物研制出的生物制剂,不仅对病菌、害虫特异性强,不伤害天敌昆虫和有益生物,而且可以保证环境的可持续发展^[25]。另外,广泛分布于土壤中的放线菌(*Actinomycetes*)也能产生化学结构多样的、具有抗生素活性的代谢产物,其中的链霉菌属(*Streptomyces*),广泛应用于蔬菜软腐病的生物防治之中。灰色链霉菌(*S. griseocarneus*)R132 及其提取物还可有效抑制辣椒尖孢镰刀菌枯萎病和辣椒炭疽病,并促进辣椒植株的生长发育^[26]。

除了消杀病菌外,微生物代谢产物还可用作植物免疫诱抗剂。通过激活蔬菜植物自身的免疫反应,提高蔬菜抗病性。2017 年正式登记的阿泰灵,就是将寡糖与链蛋白复配而成,目前已在白菜、番茄、辣椒等多种作物上取得良好的效果^[27]。

3 蔬菜绿色生产中虫害的生物防治策略

3.1 利用生物特性进行虫害防治

昆虫通过神经活动对外界环境的刺激普遍具有一定的“趋”“避”行为,可以利用害虫的这些趋向性,有针对性地防治虫害。

昆虫信息素技术就是依据害虫的趋化性研制而成。昆虫信息素是由昆虫体内产生,分泌到体外,与同类昆虫进行交流沟通的一种物质。其种类多样,分为性信息素、聚集信息素和告警信息素等。在蔬菜种植区施加昆虫信息素,可以干扰害虫之间的交流或判断,从而达到大规模驱赶或诱捕害虫的目的。其无毒无害,不伤害其他动植物,不污染环境,是非常优质的生防制剂。但利用昆虫信息素也有一定的局限性,信息素具有高度专一性,利用此项技术防治害虫时需要准确判断为害昆虫的种类,成本较高,且易被氧化分解,应尽量和其他生物防治方法配合使用。

除了昆虫信息素,蔬菜生产中还应用了黄色粘虫板和诱虫灯诱杀害虫。前者利用害虫趋向黄色的生物学特性,后者则是利用害虫的趋光性。二者属于生物防治和物理防治的结合,具有高效低成本的特点^[28]。利用害虫对食物的趋性,比如

在蔬菜根部附近放置混有药剂的豆粉,也可以吸引消杀大量的地老虎等害虫^[29]。

3.2 利用天敌昆虫进行虫害防治

天敌昆虫源自大自然,利用天敌昆虫进行虫害防治,是有效利用生物界食物链法则的天然方法。我国天敌昆虫资源丰富,达 370 种之多^[30],而且中国是世界上最早开始利用天敌昆虫进行植物病虫害防治的国家,最早可追溯到 3 000 年前。北宋科学家沈括所著的《梦溪笔谈》中就有一篇《以虫治虫》,专门记录了利用天敌昆虫解决虫灾的事例。我国 1978 年从国外引进了丽蚜小蜂(*Encarsia formosa*),之后又陆续引进了多种天敌昆虫品种,但由于化肥农药的兴起而未受到广泛重视。直至二十世纪六七十年代,化学防治的副作用出现,生物防治才开始受到关注,各地开始调查天敌资源,为生物防控打下了基础^[31]。

针对蔬菜虫害的天敌昆虫主要分为寄生性和捕食性两大类。以寄生性为主要攻击方式的有赤眼蜂(*Trichogramma*)、丽蚜小蜂、侧沟茧蜂(*Microplitis* sp.)等^[32-33]。它们通过寄生在害虫体内,消耗寄主体内营养,使害虫无法正常繁殖和生长,从而达到控制害虫的目的。例如在白粉虱危害发生初期释放适量密度的丽蚜小蜂,可使白粉虱虫口减退率达到 80% 以上^[34]。以捕食害虫为主要攻击方式的有七星瓢虫(*Coccinella septempunctat*)、深点食螨瓢虫(*Stethorus punctillum* Weise)、蠋蝽(*Arma chinensis*)等,它们通过食用害虫来控制害虫的数量和繁殖过程。将单头异色瓢虫(*Harmonia axyridis*)和龟纹瓢虫(*Propylea japonica*)的 4 龄幼虫分别投放到每皿 20 头番茄潜叶蛾(*Tuta absoluta*) 1 龄幼虫的培养皿中,二者日捕食率可达到 98% 和 79%,且二者的捕食量会随着番茄潜叶蛾密度的增加而增大^[35];向田间投放瓢虫、草蛉等天敌昆虫,可以显著降低蚜虫种群密度^[36]。在二斑叶螨(*Tetranychus urticae* Koch)为害的蔬菜生产区投放智利小植绥螨、伪钝绥螨、胡瓜钝绥螨等捕食性天敌对二斑叶螨进行防控,不但效果显著,而且持续时间长^[37],具有良好的应用前景。

蔬菜害虫爆发具有一定的潜伏期,在利用天敌昆虫防控病虫害时,需要先明确每一种天敌昆虫所针对的蔬菜害虫,实时监测害虫的种类和数量,然后根据当地的生态环境和害虫的发生情况,选择适当的天敌昆虫进行投放,以实现最佳的防治效果^[38]。

3.3 利用鸟类进行虫害防治

利用鸟类进行虫害防治是农业生产中常用的生物防治方法,它能够通过捕食害虫来降低蔬菜害虫的种群密度,从而达到防治害虫的效果。据统计绝大多数益鸟均可以捕食危害蔬菜的虫类,而且鸟类的消化系统发达,新陈代谢速度快,食量大,统计发现1 000只处于繁殖期的棕鸟就可以消灭22 t的害虫;树麻雀可杀死生活范围内98%以上美国白蛾的成虫^[39]。通过定期投放鸟类进行防治,只需要少量鸟类个体,就能消灭大量害虫,能够显著抑制害虫数量的增长,从而达到防治害虫的效果。

我国鸟类资源丰富,鸟类养殖难度相对较低,故可以广泛应用于蔬菜生产并大面积推广。但值得注意的是,在长期施用化学农药的农田里,鸟类极有可能因摄食沾染农药的蔬菜叶片、草种或被化学药剂杀死的害虫而间接中毒死亡^[40]。因此,在应用鸟类进行蔬菜的病虫害防治时,需要了解过程中可能对鸟类出现的潜在危险,最大限度地保证防治的高效性和持续性。

3.4 利用微生物进行虫害防治

3.4.1 利用细菌进行蔬菜虫害防治 现如今,国内外均已经实现了芽孢杆菌属生物源杀虫剂的商品化生产,我国的苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, *Bt*)杀虫剂就是其中的一个典型代表,它是利用菌株产生的内毒素和外毒素作用于害虫,使得害虫停止进食、血液败坏、神经中毒的原理研制而成。其适用对象广泛,十字花科蔬菜、瓜类、茄果类均可使用此杀虫剂防治鳞翅目类虫害^[41-42]。张慧慧等^[43]研究表明,在西蓝花生产中,应用苏云金杆菌可湿性粉剂防治小菜蛾,防治效果均维持在70%~80%,防效显著。张桂芬等^[44]用不同浓度的*Bt* G033A处理蔬菜叶片饲喂番茄潜叶蛾1~3龄幼虫,96 h死亡率均可达95%以上。

3.4.2 利用真菌进行蔬菜虫害防治 针对蔬菜虫害的防治,丛枝菌根的研究较为全面深入,可以用来防治根结线虫(*Meloidogyne*)、甜菜夜蛾(*Spodoptera exigua* Hiibner)、蚜虫等蔬菜害虫,已经在番茄(*Solanum lycopersicum*)、甜椒(*Capsicum annuum*)、西瓜(*Citrullus lanatus*)等众多蔬菜品种上得以应用和验证^[45]。在面临害虫侵袭时,丛枝菌根真菌主要通过两种方式改变共生植物的应对机制:一是通过影响作物的茉莉酸途径和酶的活性,促使植物产生并积累次生代谢产物,加强作物对害虫的化学防御,同时影响植

物萜类化合物的浓度和组成,直接或间接地提高植物的抗虫性;二是通过改善植物结构、提高植物营养吸收利用能力和根系活力等方面提高植物对害虫的耐受性。

除了提高植株抗虫性,间接防控蔬菜虫害之外,真菌还能侵入昆虫体内,使昆虫产生疾病,直至死亡,这一类真菌统称为昆虫病原真菌^[46]。其主要应用形式为将真菌孢子溶于溶剂中,直接喷洒在蔬菜病叶上或是以颗粒状施加到田间土壤中^[47-48]。当具有杀虫活性的真菌孢子接触到害虫后,就会在一系列酶的作用下,穿透昆虫体壁,侵入寄主体内,吸收消耗虫体营养、破坏虫体结构并分泌次生代谢产物,致使害虫死亡^[49]。利用病原真菌进行生物防治已经广泛应用于生产实践中,如将球孢白僵菌制成孢子悬浮液喷洒在田间,连续3次,可使西花蓟马的种群数量降低65%~87%,防范作用与化学试剂相当,且处理60 d后,抑制率仍有70%^[50]。由于利用真菌防治虫害对生态友好、不易产生抗性,又能传播扩散,在害虫生物防治中具有重要作用。

3.4.3 利用病毒进行蔬菜虫害防治 利用昆虫病毒防治蔬菜虫害是蔬菜生物防治的一种手段,可用于虫害防治的主要有颗粒体病毒(Granulosis Virus, GV)、核型多角体病毒(Nuclear Polyhedrosis Virus, NPV)、质型多角体病毒(Cytoplasmic Polyhedrosis Virus, CPV)和昆虫痘病毒(Entomopox Virus, EPV)等,其中颗粒体病毒应用的比较广泛,可以用于防治菜青虫、小菜蛾和黏虫^[51]。昆虫病毒只有被寄主吸入才能引起致死,对幼虫的效果更好,而且残留少。但相对*Bt*而言,昆虫病毒具有更强的寄主特异性,因此对于虫害混发的种植区需要结合其他药剂来进行防治^[52]。

昆虫病毒与*Bt*混用具有很好的防治效果。粘虫颗粒体病毒(PuGV)对甜菜夜蛾没有致毒作用,但PuGV可以提高*Bt*对甜菜夜蛾的毒力,且PuGV对甜菜夜蛾中肠酶活性具有抑制作用^[53]。菜粉蝶颗粒体病毒(PrGV)与*Bt*复合制剂对菜粉蝶3龄、4龄幼虫的防效均在81%以上,显著高于单剂*Bt*处理,表明应用复合剂防治菜粉蝶有重要的杀虫潜力^[54]。

3.5 利用植物性农药进行防治

植物性农药是将某些植物中可抑制害虫生存繁衍的成分或者生物因子提取出来,施加到被感染病虫害的蔬菜作物上的一种药剂。由于植物性农药主要为生物成分,所以对于作物并没有害处,

即使药剂残留在蔬菜表面,也不会造成环境污染,有些甚至可以被微生物正常降解,不会增加蔬菜病菌害虫的抗药性,是优质的生防制剂。

从原产于缅甸和印度的印楝树中提取出一种高度氧化的柠檬素——印楝素,对多种昆虫具有触杀、驱避、拒食等效果,还可以影响害虫幼虫的生长发育,对烟粉虱有明显的防治效果^[55]。农业生产中应用比例相对较大的苦参碱,提取于豆科植物苦参中,是一种生物碱,它可以影响害虫正常捕获食物,对菜粉蝶的幼虫、黏虫也有胃毒麻醉作用^[56]。同样具有麻痹作用的还有除虫菊素,它可以麻痹昆虫中枢神经,相当于一种神经毒素,从而使害虫死亡^[57]。鱼藤酮类杀虫剂是我国另一大类植物性杀虫剂,我国已从 900 多种植物中筛选出 36 种含鱼藤酮类化合物的植物,如毛鱼藤、中华鱼藤、厚果鸡血藤、梭果豆、豆薯等。鱼藤酮通过影响昆虫细胞的钙离子浓度和膜电位,导致细胞凋亡,杀灭害虫,对蚜虫、螨虫、跳甲等防治效果较好^[58]。

植物源农药产品中含有大量的有机酸、酚类、矿物质及激素^[59],这些物质不但可以直接或间接杀死害虫,诱导蔬菜产生抗病抗逆性,还能调节蔬菜的生长发育,如大蒜素^[60]和萆苳烷碱^[61]就可以对多种蔬菜产生丰产、增产的效果。

中国自然资源丰富,拥有很多特有的植物资源,一旦在其中发现有价值的活性化合物,便可创制具有我国知识产权的农药。就目前而言,我国植物性农药应用品种较少、企业生产数量有限。但随着食品健康、生态环境安全意识的逐渐提升,植物性农药必将得到进一步发展。

4 展望

本文以蔬菜绿色生产为出发点,概括了近年来国内外生物防治技术在蔬菜病虫害防治中的应用与发展。针对蔬菜病害,采用较多的是生防细菌、真菌、病毒及其代谢产物;而虫害的防治方法则更为广泛,涉及植物、动物、微生物三大领域。因地制宜,将生物防治不同策略合理应用到蔬菜生产中,在获得绿色、优质蔬菜的同时,更能保护生态环境,实现蔬菜生产绿色、可持续性发展。

我国生物防治起步较晚,应用时间短,未得到大面积推广,而且相对于传统化肥农药,见效慢,受自然因素影响较大,市面上流通的生物产品良莠不齐,推广阻力较大^[62]。但随着绿色发展的理念深入人心,生物防治替代高污染的化学防治是必然的发展趋势。在今后的研究中,应当结合当

前的科技发展,进一步改进生物防治技术,以更加精准的技术措施,实现蔬菜的绿色生产,从而更好地保护环境、提高蔬菜质量、满足人们的需求。

参考文献:

- [1] 赵晓明. 大棚蔬菜病虫害防治措施[J]. 现代农村科技, 2022 (10): 30.
- [2] 张雪芹. 论蔬菜病虫害防治技术指导[J]. 农村实用技术, 2020(3): 74.
- [3] 石丽. 大棚蔬菜种植技术与病虫害防治措施探析[J]. 种子科技, 2022, 40(20): 91-93, 102.
- [4] 郭雷, 张玉. 生物防治在蔬菜病虫害防治中的应用分析[J]. 种子科技, 2021, 39(19): 89-90.
- [5] TARIQ M, KHAN A, ASIF M, et al. Biological control: a sustainable and practical approach for plant disease management [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2020, 70: 507-524.
- [6] ELNAHAL A S M, EL-SAADONY M T, SAAD A M, et al. The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: a review[J]. European Journal of Plant Pathology, 2022, 162 (4): 759-792.
- [7] 杨泰然, 吕海光, 王志臻. 生防菌防治植物病害的机理及其应用[J]. 现代农机, 2023(2): 86-88.
- [8] 杨得强, 周春发, 黄龙伟, 等. 内生芽孢杆菌对植物生长发育及病害防治的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(4): 11-14.
- [9] 卢胜国. 黄瓜细菌性角斑病的识别与防治[J]. 中国瓜菜, 2020, 33(6): 82-83.
- [10] 张婉菊, 谢太震, 陈梦多, 等. 根际细菌 LK2-3 对黄瓜枯萎病的生物防治作用[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(7): 25-30.
- [11] 孙一凡, 刘喆, 李海洋, 等. 侧孢芽孢杆菌 BL13 对番茄早疫病防治效果及机制 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 299-308.
- [12] 李周坤, 叶现丰, 杨凡, 等. 黏细菌捕食生物学研究进展及其在农业领域的应用潜力[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(2): 208-216.
- [13] 杨春霞, 哈佳欣, 徐克, 等. 胶孢炭疽菌生物防治研究进展[J]. 北方园艺, 2023(5): 132-139.
- [14] 王前程, 张迎迎, 戴陶宇, 等. 拟康宁木霉 T-51 菌株对番茄枯萎病的生物防治及其机理研究[J]. 西北植物学报, 2022, 42(6): 974-982.
- [15] 马明磊, 王秋霞, 马莹莹, 等. 木霉菌作用机制及其在药用植物上的应用研究进展和展望[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8): 8-16.
- [16] 赵志祥, 严婉荣, 王宝, 等. 辣椒枯萎病生物防治研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(4): 11-21.
- [17] 姜璇. 丛枝菌根真菌的定殖过程及其对辣椒疫病生物防治研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2019.
- [18] 薛宝娣, 李娟, 陈永宣. 番茄分子抗病育种研究进展[J]. 南京农业大学学报, 1995, 18(1): 31-36.
- [19] 姚宇多. 灰葡萄孢 IBc-230 菌株携带的病毒及其与寄主互作相关研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [20] 马俊秀, 闫更轩, 陈盛宇, 等. 蔬菜软腐病生物防治策略研究进展[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(13): 51-57.

- [21] MUTURI P, YU J P, MAINA A N, et al. Bacteriophages isolated in China for the control of *Pectobacterium carotovorum* causing potato soft rot in Kenya[J]. Virologica Sinica, 2019, 34(3): 287-294.
- [22] 唐艺玮. 青枯病对植物的为害及其生物防治研究[J]. 种子科技, 2023, 41(2): 105-107.
- [23] 李哲, 李璇, 崔婷婷, 等. 绿色木霉组蛋白去乙酰化酶编码基因 *TvRpd3* 在木霉生物防治作用中的功能分析[J]. 微生物学报, 2023, 63(9): 3560-3573.
- [24] 李苏冉, 李雪, 冯佳霖, 等. 生防菌解淀粉芽孢杆菌 SQ-2 全基因组测序及生物信息学分析[J]. 微生物学通报, 2023, 50(3): 1073-1097.
- [25] 杨力凡. 深绿木霉 *Trichoderma atroviride* 生物菌肥的研制及对油菜菌核病、根肿病的生物防治[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010.
- [26] LIOTTI R G, FIGUEIREDO M I, SOARES M A. *Streptomyces griseocarneus* R132 controls phytopathogens and promotes growth of pepper (*Capsicum annuum*) [J]. Biological Control, 2019, 138: 104065.
- [27] 何亚文, 李广悦, 谭红, 等. 我国生防微生物代谢产物研发应用进展与展望[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(3): 537-548.
- [28] 徐秋红. 浅析生物防治在蔬菜病虫害防治中的应用[J]. 种子科技, 2022, 40(13): 72-74.
- [29] 潘国良. 浅析绿色防控在蔬菜病虫害防治中的运用[J]. 河南农业, 2020(11): 19-20.
- [30] 张帆. 天敌昆虫资源的保护利用: 害虫控制的终极和谐之选[J]. 中国农村科技, 2015(10): 34-37.
- [31] 刘玉升. 害虫生物防控发展历程及其研究进展[J]. 农业工程技术, 2020, 40(1): 28-34.
- [32] 李志强, 吴晓云, 胡尊瑞. 天敌昆虫在蔬菜上的应用[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 14-15, 21.
- [33] 贾京珠, 张天柱. 绿色蔬菜病虫害的发生特点及综合防治技术[J]. 现代农业科技, 2020(4): 110, 112.
- [34] 李艳军, 于娅, 王飞, 等. 日光温室越冬茄子病虫害的发生与防治[J]. 乡村科技, 2021, 12(31): 59-61.
- [35] 杨桂群, 范苇, 张倩, 等. 异色瓢虫和龟纹瓢虫幼虫对番茄潜叶蛾低龄幼虫的捕食功能反应[J]. 中国生物防治学报, 2022, 38(4): 959-966.
- [36] 邛光伟, 任美伶, 任杰, 等. 冀北地区胡萝卜主要病虫害种类调查及防治对策[J]. 现代农业科技, 2019(4): 105-106.
- [37] 韩旸, 吴京城, 庞秋凌, 等. 我国二斑叶螨发生及防控研究概况[J]. 农药, 2023, 62(4): 235-239, 251.
- [38] 张学英. 农业病虫害防治中生物防治技术的应用[J]. 现代农机, 2022(5): 101-103.
- [39] 李艺锋. 鸟类招引防治人工油松林松毛虫实验[J]. 林业科技情报, 2022, 54(2): 48-52.
- [40] 张燕宁, 唐敬新, 张兰, 等. 防治黏虫药剂对日本鹌鹑的急性毒性研究[J]. 植物保护, 2017, 43(4): 233-235, 237-238.
- [41] 孙洪助, 吕凯军, 邵俊飞, 等. 设施蔬菜病虫害绿色防控技术[J]. 农业工程技术, 2022, 42(19): 27-30.
- [42] LACEY L A, GRZYWACZ D, SHAPIRO-ILAN D I, et al. Insect pathogens as biological control agents: back to the future[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2015, 162: 1-41.
- [43] 张慧慧, 陈安琪, 单提升, 等. 京郊西兰花小菜蛾的田间防治药剂筛选与评价[J]. 植物保护, 2020, 46(1): 262-265.
- [44] 张桂芬, 张毅波, 张杰, 等. 苏云金芽胞杆菌 G033A 对新发南美番茄潜叶蛾的室内毒力及田间防效[J]. 中国生物防治学报, 2020, 36(2): 175-183.
- [45] 李洋, 严俊鑫, 陈晓玲. AM 真菌对植物虫害防治作用研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2019, 27(9): 1692-1702.
- [46] 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.
- [47] WRIGHT S P, RAMOS M E. Delayed efficacy of *Beauveria bassiana* foliar spray applications against Colorado potato beetle: impacts of number and timing of applications on larval and next-generation adult populations[J]. Biological Control, 2015, 83: 51-67.
- [48] ZHANG X R, WU S Y, REITZ S R, et al. Simultaneous application of entomopathogenic *Beauveria bassiana* granules and predatory mites *Stratiolaelaps scimitus* for control of western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* [J]. Journal of Pest Science, 2021, 94(1): 119-127.
- [49] SANDHU S S, SHARMA A K, BENIWAL V, et al. Myco-biocontrol of insect pests: factors involved, mechanism, and regulation[J]. Journal of Pathogens, 2012, 126819: 1-10.
- [50] 杨磊, 邵雨, 李芬, 等. 缨翅目害虫蓟马生物防治的研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(3): 393-405.
- [51] 周荣华, 陈华, 程贤亮, 等. 虫病毒与苏云金杆菌混用研究应用进展[J]. 湖北植保, 2006(4): 41-43.
- [52] GRZYWACZ D. Basic and applied research: *Baculovirus* [M]//Microbial Control of Insect and Mite Pests. Academic Press, 2017: 27-46.
- [53] 刘琴, 徐建, 祁建航, 等. 粘虫颗粒体病毒与苏云金杆菌联合作用对甜菜夜蛾的影响[J]. 华东昆虫学报, 2009, 18(2): 124-129.
- [54] 段彦丽, 李志强, 张翌楠, 等. 利用菜粉蝶颗粒体病毒与 *Bt* 复合剂防治菜粉蝶研究[J]. 北京农业职业学院学报, 2021, 35(2): 30-35.
- [55] 党建成, 刘泽发, 刘秀. 南瓜常见病虫害的危害特征及生物防治措施综述[J]. 现代农业科技, 2022(24): 95-99.
- [56] 张德国. 绿色蔬菜病虫害生物防治新技术研究[J]. 农家参谋, 2020(8): 46.
- [57] 热依汗·阿布都克依木. 我国蔬菜害虫生物防治研究进展[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(3): 74-75.
- [58] 徐汉虹. 中国植物性农药的研究应用进展[J]. 世界农药, 2009, 31(S1): 10-16.
- [59] 张兴, 马志卿, 冯俊涛, 等. 植物源农药研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2015, 31(5): 685-698.
- [60] 梅四卫, 朱涵珍. 大蒜素的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(9): 97-101.
- [61] 庄占兴, 宋化稳, 田小卫, 等. 莒荻烷碱防治蔬菜根结线虫药效研究[J]. 农药科学与管理, 2001(5): 19-20, 32.
- [62] 张诺妮, 曹洋, 梅运鹏, 等. 烟草马铃薯 Y 病毒病发生规律及生物防治研究进展[J]. 北方农业学报, 2022, 50(2): 110-116.