

我国农业病虫害绿色防控技术综述

严海连, 白晓拴* (内蒙古师范大学, 内蒙古呼和浩特 010022)

摘要 面对农业生产中不规范使用农药和化肥而带来的环境污染以及农产品质量安全问题, 兼有资源节约和对环境较为友好优点的绿色防控技术是目前病虫害防治最科学合理的措施。针对有害生物绿色防控的理念, 对我国在农业病虫害防治中常用的有害生物绿色防控技术——生态调控技术、生物防治技术、理化防控技术及在未来具有极大的发展潜力的转基因防控技术、遗传防控技术和 RNA 干扰技术进行概述, 并就目前我国在绿色防控技术推广应用方面存在的问题提出建议。

关键词 生态调控技术; 生物防治技术; 理化防控技术; 转基因防控技术; 遗传防控技术; RNAi 技术

中图分类号 S43 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)24-0005-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.24.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Overview of Green Control Technology of Agricultural Pests and Diseases in China

YAN Hai-lian, BAI Xiao-shuan (Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022)

Abstract In the face of environmental pollution and quality and safety of agricultural products caused by irregular use of pesticides and fertilizers in agricultural production, green prevention and control technology with the advantages of resource conservation and environmental friendliness is undoubtedly the most scientific and reasonable measure for pest control. In view of the concept of green pest control, this paper summarizes the commonly used green pest control technologies in agricultural pest control in China: ecological regulation technology, biological control technology, physical and chemical control technology, and transgenic control technology, genetic control technology and RNA interference technology with great development potential in the future, and puts forward some suggestions on the problems existing in the promotion and application of green pest control technology in China.

Key words Ecological regulation technology; Biological control technology; Physical and chemical control technology; Transgenic control technology; Genetic control technology; RNAi technology

我国是农业大国,也是种植业大国,而农作物在生产和储存过程中都极易受到病、虫、草、鼠等有害生物的危害,且我国复杂的生态条件和多样的耕作制度更易引起农业有害生物的发生,从而造成农业生产的巨大损失^[1]。因此,人们为避免在农业生产上产生过大损失,在种植管理农作物时,容易盲目地过度防治,过度喷洒有机农药和施肥以取得最大的收益,而忽视了农产品和土地中农药残留量超标,甚至威胁人们自身的健康以及对环境造成严重污染。随着我国经济和人们生活水平的不断提高以及“绿色食品”“有机农产品”的流行等,人们的注意力开始转向食品安全、环境保护和治理,如何生产绿色食品、有机农产品及保护环境逐渐成为人们思考的问题。自“公共植保、绿色植保”理念提出以来,人们在绿色防控技术的发展和完善中表达了对这一理念的深刻认同^[2]。针对有害生物绿色防控的理念,该研究对我国在农业病虫害防治中常用的防控方法及在未来具有发展潜力的新防控技术进行概述和展望。

1 我国有害生物绿色防控研究现状

有害生物绿色防控是指在管理控制农作物病虫害时,使用对环境无害或将危害降到最低的方法对农作物进行保护,从而减少化学农药污染的一种保护行为和措施,其具体应用可分为生态调控、生物防治、物理治理、科学用药等方面^[3]。随着环境保护、可持续发展等观念的深入,绿色防控技术引

起了人们的广泛关注,从方法研究到应用实践,研究者们都做了大量的研究。虽然随着 2006 年我国农业部对“公共植保、绿色植保”新植保理念的提出,绿色防控的植保发展战略才正式确定^[4],但符合这一病虫害防治理念的方法在我国早已应用于实践。

在新中国成立初期,由于我国的化学工业体系还没有建成,化学农药尚未出现,主要采取优化作物布局,及时发现并清洁田园环境,改善土壤环境,加强水肥管理等生态调控技术对病虫害进行预防和调节控制。随后经历了化学防治阶段,但随着化学农药对环境的污染,并通过残留在农产品中的有毒有害物质危害人类健康等问题的出现,人们逐渐意识到使用化学农药产生危害的严重性,继而出现了生物农药、人工释放天敌昆虫、人工合成昆虫信息素及昆虫生长调节剂等以生物或其代谢物为基础的生物防治手段。尤其是生物农药的生产和天敌昆虫的利用在我国农业病虫害防治中逐渐稳步发展。20 世纪 80 年代我国生产出了苏云金芽孢杆菌(Bt)杀虫剂产品,改变了只能从国外引进菌株的状态^[5],随后绿僵菌、白僵菌、微孢子虫、蜡质芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌等微生物农药逐渐出现在我国对农业病虫害的生物防治中^[6];天敌昆虫则以寄生蜂和捕食螨的应用最为广泛,并取得了良好的防治效果^[4]。此外,利用光、热、电、声、温湿度等物理信息及化学信息素制成简便易行的防治工具,如捕虫板、诱虫灯、防虫网、性诱剂诱捕器、食物诱捕器等理化防控技术也渐渐在病虫害防治中受到广泛欢迎,并在有害生物防控体系中发挥着重要作用。随着生物技术的发展以及针对现有技术的局限性,经过研究者们不懈努力,转基因防控技术、遗传防控技术及 RNA 干扰(RNAi)技术等有害生物绿

基金项目 国家科技基础资源调查专项(2019FY100404);内蒙古师范大学 2021 年度研究生科研创新基金项目(CXJJS21149)。

作者简介 严海连(1994—),女,广西苍梧人,硕士研究生,研究方向:昆虫分类和昆虫生态。*通信作者,教授,博士,从事昆虫分类和昆虫生态研究。

收稿日期 2021-12-30

色防控新技术在我国的研究与应用中逐渐成熟。我国转基因作物商业化始于1997年^[4],但对转基因技术的研究目前还处于初始发展阶段,遗传防控技术也还需更深入的研究才能广泛应用于田园实践,而RNAi技术虽然还处于实验室研究阶段,但作为未来害虫防治的新技术具有极大的潜力^[7]。

2 绿色防控技术类型

2.1 生态调控技术

2.1.1 选用抗病虫品种。选用抗病虫品种在各类防治措施中是最经济易行且能较好地预防病虫害发生的一种方法,与化学类防治方法相比较,这一方法不会产生新的投资,也不会造成环境污染和农药残留,特别是对于大范围暴发且传播速度快的病虫害,防治效果更加显著^[7]。但在应用这一方法时要根据当地的农作物及其所引发的病虫害的不同,因地制宜地选用抗性品种,尽可能地减轻病虫害所造成的损失^[8]。抗病虫品种的培养主要是通过收集和鉴定相关种质资源,再利用杂交育种、诱变育种、回交转育等方法进行抗性品种的培育^[7]。基于抗病虫品种选育的复杂性,培养多抗品种及保持品种抗性的相对稳定和持久性依然是目前研究中的一个重要难题^[7]。

2.1.2 优化作物布局。在优化作物布局方面,可以通过对农作物进行合理的轮作、间作以及套种等达到控制病虫害的目的。如通过合理的轮作倒茬,不仅有利于平衡植物对土壤养分和水分的吸收利用,并可调节土壤的理化性状,提高土壤肥力,使农业资源得到充分的利用,作物的抗病虫能力也有所增强,从而减轻病虫害对主要农作物的危害^[7]。合理的间作套种也是防治病虫害的有效措施之一,通过不同农作物的穿插种植,可以增强农作物的整体抵抗力,降低病虫害的发生率^[8]。虽然这一方法较为传统,但通过不同作物的合理配套种植能很好地起到预防病虫害发生的作用,简单易行,因此始终是农民首选的预防方法之一。

2.1.3 加强栽培管理,控制病源。通过田园卫生的管理,可以使病原物接种体和害虫数量减少,达到减轻或控制病虫害的目的。具体措施可通过对土地进行深耕灭茬处理,及时去除已感染病虫害的植株、病叶、病虫梢或病花朵,及时清理发病中心和田间病虫残体等。此外,水肥管理与病虫害的消长有着极为紧密的联系。若施用的氮肥过多,则会使稻瘟病和水稻白叶枯病的发生加重,过少则易引起水稻胡麻斑病的发生^[7]。而水的管理不当亦不利于农作物生长,水又可以调节植物对肥料的利用效率,因此,水和肥的管理应结合进行,充分发挥水肥的综合调控作用,增强作物本身的抗害能力和调节能力,从而达到降低作物的受害率,提高田园生产量的目的^[9]。

2.2 生物防治技术

2.2.1 生物农药。生物农药主要是以生物体或其代谢产物为有效成分,亦或通过仿生合成能帮助农作物抵抗病虫害,降低其对农作物危害性的农药制剂^[10]。依据其来源和应用的不同,可将生物农药分为微生物源农药、植物源农药、动物源农药、抗生素农药、生化农药、天敌生物等几大类^[11]。经

过近70多年的发展,我国已经掌握了众多生物农药的关键技术及产品研制的技术路线^[12],在我国获批准登记的生物农药也逐年增多。据我国生物农药登记情况盘点显示,截至2020年,我国共批准登记了4564个生物农药产品。其中,属农用抗生素类农药最多,共获得3502项登记,占生物农药登记总数的76.73%,生物化学农药461项,微生物农药474项,植物源农药194项,天敌生物较少,仅为2项^[13]。在众多的生物农药中,井冈霉素、中生菌素、武夷菌素、苏云金杆菌、枯草芽孢杆菌、木霉菌、乙烯利、赤霉素、苦参碱等农药产品深受农户欢迎,田间应用较为广泛^[12]。

2.2.2 人工释放天敌昆虫。人工释放天敌昆虫是根据害虫一般都有一种或几种天敌的特点,通过捕食与被捕食的关系释放对应天敌,控制害虫数量,使农作物的受害率降到最低的一种防治方法^[14]。其中,应用最为广泛的是捕食螨、赤眼蜂、丽蚜小蜂、瓢虫等天敌昆虫,且已完全实现了商品化生产^[9]。其中,赤眼蜂在寄生性天敌中最为突出,其应用面积达到了82.53%,尤其对水稻二化螟和玉米螟的防效较好^[9]。李玉琴等^[15]通过释放赤眼蜂防治玉米螟,使玉米田的百秆被害株率减少了77.1%,其防治效果达到82.2%。而瓢虫捕食蚜虫的种类也较为丰富、捕食效率高,所以在捕食性天敌中也以瓢虫的应用面积最大^[10]。此外,以螨治螨目前也已经实现了商品化生产并大规模地在实际中应用。福建省农业科学院已经建成年生产能力达8000亿头的捕食螨商品化生产基地,这为我国柑橘有害螨的防治提供了有力的基础支撑^[16]。

2.2.3 昆虫信息素。昆虫信息素是一种由昆虫分泌的在相同或不同物种之间进行信息传递的一类调控物质。昆虫信息素因为具有防治效率高、不具毒性、对生态环境无污染、对益虫不造成伤害等优点而得到国内外的高度认可^[7]。昆虫信息素主要包括性信息素、聚集信息素、示踪信息素、报警信息素、疏散信息素以及蜂王信息素等^[17],目前主要应用于对害虫种群的监测、进行大批量诱杀、干扰交配或与其他方法配合防治等方面,而在众多信息素中属昆虫性信息素的应用最为广泛^[7]。如昆虫性信息素常用于鞘翅目、直翅目、同翅目等害虫的大量诱杀防治,被称为第三代农药,在害虫的防治上具有广阔的发展前景^[17]。我国对于昆虫信息素的研究始于1966年,到20世纪70年代研究工作全面展开,到目前为止,已有梨小食心虫、桃潜蛾、枣黏虫、小菜蛾、斜纹夜蛾、甜菜夜蛾、甘蓝夜蛾、棉铃虫、烟青虫、水稻二化螟、二点委夜蛾、黏虫和茶小卷叶蛾等150余种性信息素产品,使用类型有性诱剂、迷向丝、干扰交配释放器等,并获得数十项科技奖和技术专利^[18]。

2.2.4 昆虫生长调节剂。昆虫生长调节剂是一种阻碍害虫完成蜕皮、新表皮形成等生理发育的通路,使其不能正常发育,最终导致其死亡的一类新型特异性杀虫剂^[19]。昆虫生长调节剂被誉为第三代杀虫剂或新型昆虫控制剂,主要作用在由几丁质合成的部位上,如害虫的表皮、卵壳、口器,具有抑制虫卵孵化、破坏幼虫蜕皮、干扰成虫产卵的特点。通常

将昆虫的生长调节剂分为几丁质合成抑制剂、保幼激素类似物和蜕皮激素类似物等三大类^[20]。因其毒性低、污染少、对天敌及有益生物影响小等优点而常用于鳞翅目、鞘翅目、双翅目等害虫的防治^[21]。目前我国对几丁质合成抑制剂的研究较多,且部分已经广泛商业化使用,如除虫脲、氟虫脲、氟啶脲、氟铃脲、杀铃脲等^[22]。

2.3 理化防控技术

2.3.1 诱虫灯。诱虫灯主要是利用害虫的趋光特性对其进行诱杀,具有延缓有害生物抗性、防控成本低等优点,常用于农业害虫的预测预报和防控。而大多数诱虫灯诱杀的是害虫的成虫,故而能减少虫卵的产生,从根本上降低田间害虫的数量^[23]。其中,太阳能杀虫灯的使用较为便利,可大面积对害虫进行防治,适合的应用范围也相对比较广,因而被广泛地应用于害虫的防治^[24]。而频振式杀虫灯的原理则相对复杂,除了利用光以外,害虫还会对波、色、味等产生趋向性,因此频振式杀虫灯结合害虫的多种趋向性对害虫进行诱杀,较其他诱虫灯更具特异性,更能有针对性地诱杀害虫,并保护天敌^[25]。

2.3.2 捕虫板。捕虫板是一种正反面均具有无毒的黏合剂,并借助害虫对于色彩的趋向性来捕杀害虫的硬塑板^[26]。不同种类的害虫偏好的颜色也不尽相同,如黄板更适于蚜虫、粉虱、叶蝉、斑潜蝇等小型害虫的防治,而蓝板则可用于各种蝇和蓟马的防治^[8]。这一方法的使用也较为方便,只需将想要防治的害虫对应颜色的捕虫板悬挂于农作物中,害虫便飞向对应颜色的捕虫板,从而起到防治的作用。

2.3.3 防虫网。防虫网防虫是通过人工安装阻碍害虫与农作物接触的防御屏障的一种方法,而其原料是优质的聚乙烯,能够耐高温、耐腐蚀,且不易老化和不含有毒有害物质,废弃后也易于处理,使人们在防治病虫害中广泛接受这一方法^[8]。此外,其使用也较为便利和直接,可直接覆于地表或温室大棚的门窗,几乎能完全防止蚜虫、白粉虱、斑潜蝇等害虫的侵入,且能控制病毒害发生,还可保护天敌。因此,防虫网在蔬菜上的应用最广泛。

2.3.4 性诱剂诱杀。性诱剂诱杀害虫技术是通过人工合成的昆虫性信息素或仿造的一些化学物质扰乱雄虫与雌虫的交配行为,甚至诱杀雄虫,使雌虫无法交配而降低其产卵率,使其后代种群数量减少的一种方法^[27]。这种方法在风、雨等恶劣天气条件下,相比诱虫灯更能保证诱杀数量,从而达到有效防治;在害虫的监测中,也比诱虫灯更能真实地反映田间的虫量情况^[9]。此外,性诱剂是放置在诱捕器中实现其功能的,不直接接触植物和农产品,即不产生污染问题,同时性诱剂具有专一性和敏感性特点,不伤害益虫,因此在众多防治措施中是首选方法之一^[17]。使用性诱剂诱杀可有效控制玉米螟、小菜蛾、甜菜夜蛾、斜纹夜蛾、三化螟等害虫的成虫。

2.3.5 食诱。食诱剂是针对植食性害虫而言的,利用其对某种食物或者挥发物的喜好而配制的一类害虫诱杀剂^[28]。这一方法在 20 世纪初已有了实践,如人们利用发酵糖水、糖

醋酒液、植物伤口分泌液等多种鳞翅目、鞘翅目及双翅目的害虫进行诱杀,均表明诱杀效果是较为显著的^[29]。食诱剂与化学农药相比虽然没有农药残留的风险,但为了更好地达到防治目的,有些食诱剂仍然需要与化学杀虫剂混合使用,所以不能完全排除安全性问题,因此食诱剂的应用范围受到了一定的限制^[30]。

2.4 转基因防控技术 转基因防控技术主要有转基因昆虫和转基因农作物。转基因昆虫主要是通过基因重组使害虫产生能够使其致死或死亡的新性状,从而起到防治作用^[31]。目前,黑腹果蝇、地中海实蝇、埃及伊蚊、冈比亚按蚊等多种昆虫都有转基因昆虫技术的应用^[31]。此外,转基因技术还可以实现不同物种间的基因结合,如可将深海鱼抗冻基因转移到植物上,这也是区别于杂交技术的优点之一^[32]。转基因作物是指将目标基因通过一系列的分离和修饰后导入目标农作物的基因组中,从而产生抗虫、抗病、耐旱、耐寒、高产和优质等新性状,使作物自身更能抵抗病虫害。相比于前 2 种转基因技术,转基因农作物的应用更为广泛。我国对转基因技术的研究开始于 20 世纪,截至目前,我国也已基本具备对各种作物转基因进行研究的基础条件与能力,如我国已建立了水稻、小麦、玉米、棉花和油菜等主要转基因农作物的技术标准体系,并已批准 Bt 抗虫棉、抗病番木瓜、抗虫杨树的商业化种植^[33]。但是我国的转基因技术目前还处于初始发展阶段,还需加大这一方面的人才培养与研究力度^[7]。

2.5 遗传防控技术 遗传防控技术主要是基于遗传学原理,对害虫进行物理(辐射)、化学、遗传等方法的处理,再通过害虫的交配行为将特定基因引入野生种群中,以改变或取代其原遗传物质,降低其潜在生殖能力的一种方法^[7]。与化学防治相比,遗传防控技术同样具有专一性,经过遗传改造的昆虫仅限于与靶标昆虫的交配,对其他物种和生态环境无害^[34]。目前已经从基于辐射的不育调控技术发展到了基于遗传转化的调控技术,近年来不断成熟的昆虫基因编辑技术为种群遗传调控策略的实施提供了更为广阔的前景^[4]。害虫遗传防治已经成为当今国际上用于防治或根除重大害虫最有效的手段之一^[35]。截至目前,遗传调控技术已经在多个昆虫中进行研究并得到应用,如大豆食心虫、柑橘大食蝇、桃小食心虫等害虫已进行了田间试验和应用^[36]。但我国的遗传防控技术研究起步较晚,且遗传防控技术不论是在学科上,还是在应用上涉及的层面都高度交叉复杂,因此还需不断借鉴国外先进经验,并结合我国农业重大有害生物开展遗传防治的基础和应用研究,实现农作物病虫害的有效治理。

2.6 RNA 干扰防治技术 RNA 干扰(RNAi)技术主要是一种针对基因功能进行研究的工具,其对害虫的防治机理是通过外源双链 RNA 影响目的基因的翻译或转录,阻碍害虫的生长发育或使其死亡,以达到防治目的^[37]。自国际上第一例表达昆虫双链 RNA(dsRNA)的抗虫转基因玉米 MON87411 被批准后,利用 RNAi 技术防治害虫逐渐成为人们的研究热点^[38]。如王晖等^[39-43]均针对不同的害虫进行了 RNAi 研究。在 RNAi 技术中,dsRNA 进入害虫体内发挥作

用的常用方法是注射、饲喂和浸泡法^[44],因此具有作用高效、针对性强等优点。虽然大部分的 dsRNA 进入昆虫体内后存在核酸酶降解现象,但目前也已研究出可通过在 dsRNA 的外层用脂质体或纳米粒子进行包裹,保护其不被消化系统内的各种酶降解^[38]。综合已有利用 RNAi 技术对害虫进行控制的研究可知,这一技术目前虽然还处于实验室研究阶段,但 RNA 干扰技术已被公认为第四代杀虫剂的核心技术,因此在未来害虫防治的新技术应用中具有极大的潜力^[45]。

3 我国绿色防控技术整体推广成效

自绿色防控的新植保理念和“预防为主,综合防治”的植保方针提出以来,我国通过一系列措施的推广,经过各方面的努力也已取得了一定的成效。截至 2020 年底,全国共创建各类绿色防控应用示范区 11 000 多个、示范县 203 个、年核心示范面积超过 366.67 万 hm^2 ,带动绿色防控推广应用面积近 6 666.67 万 hm^2 ,年减少农药使用量超过 9 000 t,全国主要农作物病虫害绿色防控覆盖率达到 41.50%,比 2006 年提高 27.98 个百分点。此外,还推动了传统防控方法的改进和创新以及新技术的研发,促进不同防控技术的配套使用模式。如在南方稻田区形成了“统一翻耕+深水灭蛹+灯诱”“性诱+适时搁田+统防统治+高效低毒农药”防控模式;东北春玉米区形成了“秸秆粉碎还田+白僵菌封垛+灯诱”“性诱诱杀成虫+释放赤眼蜂+生物农药”防控模式;果菜茶优势区形成了“灯诱、色诱、性诱、食诱+生物防治+高效低毒农药”防控模式;在东亚飞蝗滋生区基本形成了以绿僵菌和微孢子虫为主的绿色防控技术模式等^[6]。

4 问题与建议

作为农业大国,我国农作物种类繁多,农作物病虫害也复杂多样。据统计,我国常见农作物病虫害有 1 700 多种,且由于近年来全球气候的变化,病虫害的发生规律也逐年复杂化,从而导致重大病虫害的监测和防控难度增大,每年都不可避免有重大病虫害的流行和暴发,农作物生产损失严重^[46]。因此,病虫害防治一直是我国备受关注的难题。随着人们对环境污染带来环境问题的严重性的认识,环境污染少或无污染的绿色防控技术逐渐替代化学防治,同时也成为一种不可避免的病虫害防治趋势。我国强调建设资源节约型、环境友好型农业,在各地政府的努力下,绿色防控技术的应用面积也逐年扩大,但依然存在一些推广应用和研究上的问题:一是各地方政府的宣传力度不够,推广模式不健全,农民对环境污染的认识、绿色防控理念的不理解,从而导致运用绿色防控技术进行农作物病虫害防治以及保护环境意识不强;二是在普通农户种植的作物区绿色防控体系过于单一,虽然目前已研发出多种防治方法配套应用,且取得了预期效果,但因成本高,田园应用技术不成熟,系统性不强等原因未能广泛普及;三是由于相关技术研发的自身缺陷和复杂性,我国对防控技术中的关键技术的研发与掌握还有所欠缺,创新性技术的田园应用较少;四是可企业化生产的绿色防控产品较少,如天敌昆虫的应用中仅有赤眼蜂、捕食螨、蚜茧蜂等少数几个品种实现了规模化生产,且由于运输、储存

等技术设施的欠缺,影响防治效果。

针对我国目前绿色防控的推行状况,建议如下:一是对于现有的适用性强、可大面积推广使用的绿色防控技术应加大宣传力度,使有害生物绿色防控理念深入人们的思想观念,倡导可持续发展和保护环境,让农民认识到盲目使用化学农药和化肥给环境带来的严重危害,并结合当地病虫害的发生情况和农户的经济情况帮助农户选择经济有效的防控方法。二是可通过对绿色植保技术基层人员进行培养,对接入户,针对不同农作物引发的病虫害,综合考虑各绿色防控技术的优点和缺点,取长补短,研发出科学合理且经济高效的配套防治技术,争取防治效果的最大化。三是转基因技术、遗传防控、RNA 干扰等技术虽然研发过程较为复杂,目前田间应用的难度还较大,但却是实现农业可持续发展的新路径,在未来绿色防控中具有广阔的发展前景,国家和政府应重视这一方面的人才培养,加大资金投入和政策扶持,促进关键技术的研发和创新;四是对于可企业化生产的绿色防控产品,可加大与企业的合作,给予相关政策支持,规范生产,对生物农药、性诱剂等绿色防控产品做好市场监督和登记等。

参考文献

- [1] 夏敬源.公共植保、绿色植保的发展与展望[J].中国植保导刊,2010,30(1):5-9.
- [2] 徐红星,杨亚军,郑许松,等.二十一世纪以来我国水稻害虫治理成就与展望[J].应用昆虫学报,2019,56(6):1163-1177.
- [3] 杨普云,熊延坤,尹哲,等.绿色防控技术示范工作进展与展望[J].中国植保导刊,2010,30(4):37-38.
- [4] 萧玉涛,吴超,吴孔明.中国农业害虫防治科技 70 年的成就与展望[J].应用昆虫学报,2019,56(6):1115-1124.
- [5] 杜晓映.农作物病虫害生物防治研究进展[J].南方农业,2018,12(3):44-46.
- [6] 刘万才,朱景全,赵中华,等.我国农作物病虫害绿色防控的研究进展[J].植物医生,2021,34(5):5-12.
- [7] 檀根甲.有害生物绿色防控[M].北京:中国农业出版社,2018:33-38,43,51-53,59,123-124.
- [8] 陈德来,刘长仲,张挺峰.近 10 年来绿色防控技术在我国植物保护中的应用[J].安徽农业科学,2019,47(5):29-32.
- [9] 高俊涛,张天柱.我国绿色防控技术应用状况及发展对策[J].现代农业科技,2019(9):115-117.
- [10] 杨子轩,张京峰.生物农药在果树病虫害防治中的应用[J].世界热带农业信息,2020(12):34-35.
- [11] 周蒙.中国生物农药发展的现实挑战与对策分析[J].中国生物防治学报,2021,37(1):184-192.
- [12] 刘晓漫,曹焜程,王秋霞,等.我国生物农药的登记及推广应用现状[J].植物保护,2018,44(5):101-107.
- [13] 我国生物农药登记情况盘点[EB/OL].(2020-12-03)[2021-11-13].http://www.agroinfo.com.cn/news_detail_14002.html.
- [14] 赵中华,尹哲,杨普云.农作物病虫害绿色防控技术应用概况[J].植物保护,2011,37(3):29-32.
- [15] 李玉琴,金春玉,金京玉,等.赤眼蜂防治玉米螟示范[J].农业开发与装备,2020(5):131,133.
- [16] 陈世平.福建:“以螨治螨”技术增收节支明显[J].中国果业信息,2015,32(12):36-37.
- [17] 王郁,邱乐忠.昆虫信息素的应用及前景[J].福建农业科技,2011(2):48-50.
- [18] 王蕾.昆虫性信息素在病虫害测报及防治中应用的特点与优势[J].乡村科技,2020(4):88,90.
- [19] 闫宁宁.作物病虫害绿色防控技术[J].河南农业,2020(2):25-26.
- [20] 王彦华,王鸣华.昆虫生长调节剂的研究进展[J].世界农药,2007,29(1):8-11.
- [21] 武迎红,曹颖霞.大豆有害生物绿色防控技术的研究[J].内蒙古民族大学学报(自然科学版),2010,25(6):643-647.

- [22] 熊强,李为众,童严严,等.昆虫生长调节剂的研究现状及其在白蚁防治中的应用进展[J].中华卫生杀虫药械,2018,24(3):288-291.
- [23] 邢万静,阙云超,乔惠丽.农业害虫生物防治的现状与发展趋势综述[J].安徽农业科学,2014,42(18):5803-5806.
- [24] 涂海华,余玉华,蔡荟,等.上犹茶园新型太阳能杀虫灯防控效果初报[J].中国茶叶,2020,42(12):48-51.
- [25] 吴天鹏,陈鹏,张强东.频振式杀虫灯对盛夏期苹果园昆虫的诱杀效果分析[J].甘肃林业,2020(5):43-44.
- [26] 刘东,王景一,王惠君,等.生态捕虫板应用技术研究[C]//辽宁省昆虫学会.辽宁省昆虫学会 2006 年年会论文集.沈阳:辽宁省昆虫学会,2006:38.
- [27] 毛玲荣,张育青,李云明.性诱剂诱杀甘蔗大螟效果试验[J].基层农技推广,2020,8(9):25-27.
- [28] 卢亚菲,阙海礼,李丽莉,等.生物食诱剂对山东省莒南县花生田夜蛾科成虫监测与诱杀效果的初步评价[J].植物保护,2020,46(2):248-253.
- [29] 周国珍,滕永梅,谢龙.蔬菜害虫种类及其理化诱控技术[J].湖北植保,2019(6):48-51.
- [30] 张巧丽,李天娇.应用生物食诱剂控制小麦越冬代棉铃虫效果初探[J].中国植保导刊,2019,39(5):58-59,91.
- [31] 黄晨燕,郑茹萍,章明华,等.昆虫转基因技术应用研究和展望[J].农业技术与装备,2017(5):11-12.
- [32] 唐先玺.生物技术在现代农业生产中的应用[J].乡村科技,2020,11(24):66-67.
- [33] 凌闯.浅谈转基因植物在我国农业上的应用现状及未来[J].上海农业科技,2020(6):10-13.
- [34] 徐雪娇,何玮毅,胡婕,等.害虫遗传防控技术的研究与应用[J].中国科学:生命科学,2019,49(8):938-950.
- [35] 严盈,万方浩.害虫遗传防治的研究历史与现状[J].生物安全学报,2015,24(2):81-93,74.
- [36] 毕洪论.斜纹夜蛾种群的遗传调控[D].福州:福建农林大学,2016.
- [37] 徐雪亮,王奋山,刘子荣,等.RNA 干扰技术在昆虫学领域研究进展[J].生物技术通报,2021,37(1):255-261.
- [38] 胡少茹,关若冰,李海超,等.RNAi 在害虫防治中应用的重要进展及存在问题[J].昆虫学报,2019,62(4):506-515.
- [39] 王晖,张珉,张小红,等.利用 RNAi 技术沉默麦长管蚜与桃蚜细胞色素 P450[J].中国农业科学,2012,45(17):3463-3472.
- [40] 张淑静,王高振,刘爽,等.利用 RNAi 技术沉默东方粘虫 V-ATP 酶 H 亚基研究[J].西北农业学报,2015,24(1):170-174.
- [41] OMAR M A A, LI M Z, LIU F L, et al. The roles of DNA methyltransferases 1 (DNMT1) in regulating sexual dimorphism in the cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* [J]. *Insects*, 2020, 11(2): 1-15.
- [42] 赵凤,杜娟,李尚伟,等.利用 RNAi 技术沉默稻纵卷叶螟膜结合型海藻糖酶基因[J].西南农业学报,2020,33(6):1105-1112.
- [43] GU Q L, ZHANG Y, FU X M, et al. Toxicity and metabolism of 3-bromopyruvate in *Caenorhabditis elegans* [J]. *Journal of Zhejiang University: Science B*, 2020, 21(1): 77-86.
- [44] 郭强,范仲学,褚栋,等. RNA 干扰技术在农作物害虫防治中的应用[J].山东农业科学,2012,44(12):16-18,23.
- [45] 张建珍,柴林,史学凯,等. RNA 干扰技术与害虫防治[J].山西大学学报(自然科学版),2021,44(5):980-987.
- [46] 王桂荣,王源超,杨光富,等.农业病虫害绿色防控基础的前沿科学问题[J].中国科学基金,2020,34(4):374-380.

(上接第4页)

- [43] 张科,袁玲,施娟,等.不同植烟模式对烤烟产质量、土壤养分和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):124-128.
- [44] 晋艳,杨宇虹,段玉琪,等.烤烟轮作、连作对烟叶产量质量的影响[J].西南农业学报,2004,17(51):267-271.
- [45] 谭玉兰,曾庆飞,韦兴迪,等.不同牧草品种与烤烟轮作对植烟土壤养分及物理性状的影响[J].江苏农业科学,2019,47(19):275-279.
- [46] 贾健,朱金峰,杜修智,等.不同种植模式对土壤酶、烤烟生长及烟叶致香成分的影响[J].中国农业科技导报,2016,18(3):141-149.
- [47] 贾健,朱金峰,杜修智,等.不同种植模式对烤烟根际土壤微生物、土壤养分和烟叶质量的影响[J].西南农业学报,2016,29(10):2300-2306.
- [48] 贾志红,易建华,苏以荣,等.烟区轮作与连作土壤细菌群落多样性比较[J].生态环境学报,2010,19(7):1578-1585.
- [49] 齐虹凌,贺国强,李恒全,等.轮作与连作对烤烟不同生育期根际土壤细菌群落结构的影响[J].中国烟草学报,2015,21(5):42-48.
- [50] 陈浩,魏立本,王亚麒,等.烤烟不同种植施肥模式对土壤养分、酶活性及细菌多样性的影响[J].南方农业学报,2019,50(5):982-989.
- [51] 杨洋,杨懿德,贺小蓉,等.烟草-玉米轮作对烟草病毒病的影响[J].江苏农业科学,2020,48(12):88-93.
- [52] 白羽祥,朱媛,杨焕文,等.烟草酚酸和有机酸对黑胫病菌生长的影响[J].西南农业学报,2017,30(6):1364-1368.
- [53] 赵新梅,王罕,莫静静,等.三种作物茎叶枯落物水浸液对烟草幼苗生长的化感效应[J].草业学报,2016,25(9):37-45.
- [54] 刘有聪,张立猛,焦永鸽,等.大蒜与烤烟轮作对烟草黑胫病的防治效果及作用机理初探[J].中国烟草学报,2016,22(5):55-62.
- [55] 张立猛,方玉婷,计思贵,等.玉米根系分泌物对烟草黑胫病菌的抑制活性及其抑菌物质分析[J].中国生物防治学报,2015,31(1):115-122.
- [56] 叶协锋,邵惠芳,李琰琰,等.植物化感作用研究现状及其在烟草栽培中的作用展望[J].中国烟草学报,2009,15(6):75-80.
- [57] 吴凯,陈国军,闫慧峰,等.籽粒苋与烟草间作还田对烟草钾吸收和土壤钾有效性的影响[J].草业学报,2017,26(6):45-55.
- [58] 时安东,李建伟,袁玲.轮间作系统对烤烟产量、品质和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):411-418.
- [59] 付学鹏,吴凤芝,吴瑕,等.间套作改善作物矿物质营养的机理研究进展[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2):525-535.
- [60] 李妮,宋付朋,杨岩,等.轮作年限对大蒜根际土壤微生物群落的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):209-213,218.
- [61] 张继光,郑林林,石屹,等.不同种植模式对土壤微生物区系及烟叶产量与质量的影响[J].农业工程学报,2012,28(19):93-102.
- [62] 涂勇,杨文钰,刘卫国,等.大豆与烤烟不同套作年限对根际土壤微生物数量的影响[J].作物学报,2015,41(5):733-742.
- [63] 李忠俊,罗会斌,龙友华,等.烟草根际微生物区系分析[J].耕作与栽培,2012(3):35,39.
- [64] 冯俊喜,王树声,石屹,等.山东烟区不同种植模式土壤微生物群落特征研究[J].中国烟草科学,2011,32(2):38-42.
- [65] 张开虹,桑维钧,何世芳,等.不同作物间作对烤烟根际土壤细菌群落组成及功能的影响[J].贵州农业科学,2020,48(4):80-86.
- [66] 刘冰冰,郭书贤,陈兴,等.烤烟 K326 与香料植物间作模式下根际土可培养细菌多样性及功能[J].微生物学通报,2020,47(8):2436-2449.
- [67] 朱锦惠,董坤,杨智仙,等.间套作控制作物病害的机理研究进展[J].生态学杂志,2017,36(4):1117-1126.
- [68] 周挺,梁颀捷,张炳辉,等.间套作防控烟草病虫害研究进展[J].中国烟草科学,2020,41(5):105-112.
- [69] 薛超群,牟文君,奚家勤,等.烤烟不同间作对烟草黑胫病防控效果的影响[J].中国烟草科学,2015,36(3):77-79.
- [70] 周德海,高峰,王在军,等.间作桔梗对烤烟主要农艺性状及效益的影响[J].山东农业科学,2014,46(9):60-62.
- [71] 徐洁,余萍,董超,等.玫瑰与烟草间作对烟叶蛋白质影响的生物信息学分析[J].中国烟草学报,2016,22(5):104-110.
- [72] 李枝桦,王超,王邵坤,等.烟草与香原料植物间栽后烟叶致香物质的变化分析[J].分子植物育种,2014,12(5):982-991.