

特 别 关 注

Special Focus

草地贪夜蛾绿色防控技术研究进展

王登杰¹, 任茂琼¹, 姜继红¹, 毕司进¹, 吴圣勇^{2*}

(1. 四川省绵阳市农业科学研究院, 绵阳 621000;

2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是一种重大的入侵性害虫, 具有很强的迁飞扩散和暴发取食能力。自 2019 年 1 月入侵我国云南后, 在不到一年的时间内, 已经扩散到了黄河流域及其以南的大部分地区, 严重威胁我国玉米产业的可持续发展。化学农药作为目前应急防控措施, 对抑制害虫种群、减轻玉米受害具有重要作用, 但长期大量使用, 必然会导致草地贪夜蛾的抗药性逐渐增强, 使防控难度增加。因此, 必须要寻求新的可持续治理策略以减少或替代化学农药。本文从农业防治、生物防治、物理防治、科学用药等方面总结国内外草地贪夜蛾的绿色防控技术进展, 以期为我国进一步做好草地贪夜蛾的绿色防控提供参考。

关键词 草地贪夜蛾; 入侵害虫; 化学抗性; 农业防治; 生物防治; 物理防治; 科学用药

中图分类号: S 435.132 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2019575

Research progress on green control technology for management of *Spodoptera frugiperda*

WANG Dengjie¹, REN Maoqiong¹, JIANG Jihong¹, BI Sijin¹, WU Shengyong^{2*}

(1. Mianyang Academy of Agricultural Sciences, Sichuan Province, Mianyang 621000, China;

2. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract The fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (FAW), one of the major invasive pests, has a highly migratory habit and heavily feeding capability. FAW was first found in Yunnan province, China in January 2019, and then rapidly spread to most parts in south of the Yellow River Basin in less than a year, seriously threatening the sustainable development of China's corn industry. Chemical pesticides as an emergency control measure played an important role in controlling the pest and reducing maize damage. However, with long-term and large-scale application, FAW will develop resistance to these chemical pesticides and make the management more difficult. Therefore, new sustainable strategies must be developed to reduce or replace chemical pesticides. In the paper, we summarized the recent research progress on green control technology for managing FAW at domestic and abroad, including agricultural practices, biological control, physical control and rational application of chemical insecticides. We hope to provide the reference for further improvement of green control of FAW in China.

Key words fall armyworm; invasive pest; insecticide-resistance; agricultural practices; biological control; physical control; scientific insecticide use

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 又称秋黏虫, 是一种原产于美洲热带和亚热带地区的跨境迁飞性重大害虫, 具有寄主范围广、繁殖能力强、迁飞扩散快、为害程度重和防控难度大等特点^[1-2]。2016 年草地贪夜蛾入侵非洲尼日利亚和加纳, 随后蔓延至撒哈拉沙漠以南的大部分地区, 导致

受害地区玉米大面积减产, 严重的达 50% 以上^[3]。亚洲地区于 2018 年首次在印度的卡纳塔克邦发现草地贪夜蛾为害, 随后在东南亚各国也相继暴发为害^[4-5]。2019 年 1 月, 草地贪夜蛾入侵我国云南, 在不到一年的时间内, 扩散到了黄河流域及其以南地区 20 多个省份, 严重威胁我国玉米产业的可持续发展^[6-7]。

收稿日期: 2019-10-25 修订日期: 2019-11-04

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2019YJ06); 绵阳市农业科学研究院创新基金(CXJJ64)

* 通信作者 E-mail: sywu@ippcaas.cn

面对来势汹汹的草地贪夜蛾,我国迅速启动应急防控机制,农业农村部印发了《全国草地贪夜蛾防控方案》,在全国范围内吹响了打赢草地贪夜蛾攻坚战的号角^[8]。当前,化学农药是应对草地贪夜蛾暴发为害的主要措施,在短期内对抑制害虫种群、减轻作物受害、保障粮食安全方面发挥了重要作用^[9-10]。但随着化学杀虫剂的长期大量使用,草地贪夜蛾的抗药性也会逐渐增强,防控难度将不断加大。从国外已有的报道看,在部分地区,草地贪夜蛾对多种化学农药已经产生了抗性,并且对部分药剂的抗性达到高抗水平^[11-15]。因此,随着草地贪夜蛾不断扩散和暴发,以化学农药为主的防控策略在草地贪夜蛾的种群控制中将面临严峻的挑战,必须要寻求新的防控手段以实现草地贪夜蛾的可持续治理。本文将重点从农业、生物、物理和科学用药等方面介绍国内外的绿色防控技术的新进展,并结合国内的实际情况探讨应对草地贪夜蛾的绿色防控策略。

1 农业防治

自出现农业生产以来,农民就开始利用农田及其周边的生物防治害虫^[16]。农业防治主要是采取综合措施调整和改善作物的生长环境,以增强作物对病、虫、草害的抵抗力,并创造不利于病原物、害虫和杂草生长发育或传播的条件,达到控制、避免或减轻病、虫、草危害的目的^[17]。

1.1 土肥管理

农作物对害虫的抵抗或忍受能力与土壤的理化性质及生物学特性有关^[18-20]。Morales等在危地马拉调查发现,在玉米田中使用无机肥料会导致包括草地贪夜蛾在内的害虫种类和数量增加^[18]。造成这一现象的原因可能是作物对无机肥料中氮的吸收猛增及叶面氮的产生,这对许多害虫具有很强的吸引力^[18-19]。此外,过度使用无机肥也可能导致作物营养失衡,从而使其对害虫的抵抗力降低^[19]。因此,做好田间土肥管理,特别是平衡施肥是减轻草地贪夜蛾为害的第一步。

1.2 免耕与地表覆盖

草地贪夜蛾具有迁飞性,繁殖能力强,且世代重叠,其蛹在合适的环境中无滞育现象,只需要几天就可以羽化,而耕作只在种植季开始时进行1次,对害虫的控制效果微乎其微^[17]。相比之下,免耕或少耕技术可有效降低草地贪夜蛾的发生。Kumar和Mihm研究发现,免耕玉米地草地贪夜蛾的发生比常规地减少了30%~60%,同时产量提高了10%左

右^[21]。Andrews等^[22]在哥斯达黎加,Baudron等^[23]在非洲的玉米田中也发现了类似的现象。另外,免耕的同时在地面覆盖秸秆等农业废弃物可以增加天敌的数量,可进一步减少草地贪夜蛾的为害并提高作物产量^[24-26]。当地面上有农业废弃物覆盖时,其特殊的物理结构不仅为天敌的生存创造了有利的微气候(如降低了温度、增加了湿度),还为其提供了庇护和狩猎的空间,尤其是蜘蛛等天敌特别偏好这样的场所^[17,26-27]。因此,采用免耕与地面秸秆覆盖结合的技术是防治草地贪夜蛾的一项非常有效的农业措施。

1.3 保护生境多样性

许多研究表明,提高保护地周边的生境多样性可以有效增加天敌数量,抑制害虫为害。Wheeler等^[28]在洪都拉斯研究了两个小农户管理的农田,发现由于周边的生境丰富,草地贪夜蛾的天敌寄生率一直处于较高水平。同样,Wyckhuys和O'Neil^[29]在秘鲁发现,田间周边的开花植物越多天敌种类和数量也越多,草地贪夜蛾的为害始终在经济阈值水平以下。Quispe等^[30]在评估玉米田周围庇护植物的质量时发现,分泌蜜露的植物中天敌的丰富度最高,并且叶片密度越高吸引的天敌也越多。Molina-Ochoa等^[31-32]的调查显示,玉米田附近生境多样性越高,寄生性天敌的多样性越丰富,对草地贪夜蛾的寄生率也越高。Meagher等^[33]在佛罗里达州的甜玉米田中发现,天敌对草地贪夜蛾平均寄生率在未喷洒农药的地区(44%±9.6%)比喷洒地区(15%±2.5%)高得多,并且在未喷洒农药的地区,植物多样性高的地方平均寄生率也越高。这些证据表明,保护田间生境的多样性可以提高自然天敌控制草地贪夜蛾的能力。

1.4 间作技术

间作已在农业生产中广泛应用,间作植物不仅可以改善田间小气候、改良土壤,促进作物旺盛生长,还可以抑制害虫在寄主作物间移动,减少害虫对寄主的为害。Altieri等^[34-35]研究发现,玉米一大豆间作地草地贪夜蛾幼虫对玉米的为害率比玉米单作地降低了14%,而对大豆的为害率降低了23%,并且提前一个月播种大豆还可以进一步降低草地贪夜蛾的为害。一些间作植物还有驱避害虫、吸引天敌并为天敌提供栖息地和庇护场所等作用。van Huis^[36]发现在玉米一大豆间作田中以草地贪夜蛾幼虫为食的蠼螋、蜘蛛等天敌的密度比单作田高。Perfecto和Sediles^[37]也发现在玉米一大豆间作田中蚂蚁的丰度比在玉米单作田中高。此外,没有间作植物时,保留一部分杂草也能起到类似的作用。

Portillo 等^[38]发现,使用过除草剂的田中草地贪夜蛾的为害要比未使用过的更严重。Penagos 等^[39]对已种植 20 d 的两块玉米地进行比较,发现干净地块中草地贪夜蛾发生率要比杂草地高出 2.5 倍以上,相反,杂草地中捕食性天敌的数量比干净地块要高出两倍多。当然,杂草并不是越多越好,必须要控制在合理的范围内,如果杂草过多,会与作物发生竞争,从而降低作物产量,反而会得不偿失^[17]。

由国际昆虫生理生态学中心(International Centre of Insect Physiology and Ecology, ICIPE)等机构推广的“推—拉”(push-pull)策略是间作技术中应用较为广泛并且防虫效果最有效的方式之一,其基本原理是综合利用昆虫行为调控物质来调控害虫及其天敌的分布,从而降低害虫对被保护作物的为害^[40]。Midega 等^[41]利用该原理在肯尼亚、乌干达和坦桑尼亚等干旱地区开发了一套适应当地气候并有效防治草地贪夜蛾的“推—拉”策略,该策略分别选用了旋扭山绿豆 *Desmodium intortum* (Mill.) Urb 和臂臂菜 *Bracharia* cv Mulato II 作为“推”和“拉”作物,并随机抽取了 250 户农户评估了该策略对草地贪夜蛾的防控能力,结果发现平均每株玉米上幼虫减少了 82.7%、损害减少了 86.7%,同时玉米单产提高了 2.7 倍,表明该策略在减少草地贪夜蛾对玉米的侵袭和为害方面具有明显优势。

1.5 选用抗性品种

种植抗性品种是控制害虫为害的重要策略之一。抗性品种分为天然抗性和转基因抗性品种。抗草地贪夜蛾品种的研究始于 20 世纪 70 年代,墨西哥、巴西、美国等国家的一些科研机构和大学通过改良热带/亚热带自交系玉米,开发了一系列对草地贪夜蛾有抗性的种质资源。墨西哥国际玉米和小麦改良中心(International Maize and Wheat Improvement Center, IMWIC)开发了 Pop. 304、Pop. 392 等抗草地贪夜蛾玉米育种品系^[42-43]。美国农业部农业研究局(密西西比州)利用来自加勒比海地区的 Antigua Gp1, Antigua Gp2D, Guadalupe Gp1A 和 Republica Dominica Gp1 品系开发了 Mp496、Mp701~Mp708 温带抗草地贪夜蛾玉米自交系^[44-49]。美国爱荷华州立大学的研究人员将来自阿根廷的 Maiz Amargo 与温带玉米杂交得到 B49、B52、B64、B68、B96 抗草地贪夜蛾自交系,部分已在美国广泛种植^[3]。

转基因技术是一项新兴的快速、高效开发抗性品种的重要手段。第一个抗草地贪夜蛾转基因玉米品种是从苏云金芽胞杆菌(Bt)中分离的杀虫晶体蛋白基因(*cry*)开发而来,Cry 蛋白的摄入对包括草地

贪夜蛾在内的许多鳞翅目幼虫具有致命性,其抗虫特性与常规有机农药的杀虫特性类似^[3]。此外,Bt 还会产生另一类对鳞翅目类有特异性的蛋白,称为植物杀虫蛋白(VIP),由 *vip* 基因编码,其中对草地贪夜蛾有特效的是 *vip3A* 基因。目前,世界上已经有许多商业化转基因抗虫玉米,如 *cry1A*、*cry1Ab*、*cry1F* 等转 Bt 玉米已有 20 多年的商业种植历史,巴西和北美的转 Bt 抗虫玉米种植最为广泛,占玉米生产总面积的 80%以上^[50]。与天然抗性相比,转基因抗性品种对草地贪夜蛾的抗性更强,效果更好。例如,Viana 等^[51]对比了 32 种常规玉米杂交种对草地贪夜蛾的天然抗性和 3 种转 Bt 基因品种的抗性水平,结果表明 6 个抗性最好的常规杂交种的戴维斯量表(Davis scale)得分在 2.8~4.1,3 个转 Bt 基因品种的得分均为 1,而商品化易感品种的得分高达 7。

需要指出的是,转基因抗虫玉米在种植初期对草地贪夜蛾的防控起到了很好的效果,避免了玉米的大面积减产^[52-53]。但是,随着时间的推移和种植面积的扩大,草地贪夜蛾的抗性逐渐增强。波多黎各草地贪夜蛾田间种群在短短 4 年间(2006-2010 年)对表达 Cry1F 的玉米品种‘TC1507’的抗性达到了 1 000~2 600 倍,导致该品种直接退出了当地市场^[54-55]。这是由于单一转基因品种大面积种植对害虫造成了较大的选择压力。相比于单一转基因品种,在作物中转入多种不同抗虫特性的基因对害虫的选择压力相对较小,害虫产生抗性的可能性更低,品种的使用寿命也将更长,这也将推动转基因玉米由转单一抗性基因向转多种抗性基因组合发展^[3]。

2 生物防治

2.1 天敌昆虫

草地贪夜蛾的天敌昆虫种类繁多,主要有寄生性天敌和捕食性天敌。寄生蜂和寄生蝇是主要的两大寄生性天敌。据不完全统计,全世界范围内,草地贪夜蛾的寄生蜂有 10 科 120 多种,我国已记载的种类有 16 种(表 1)^[56]。其中,夜蛾黑卵蜂 *Telenomus remus* (Nixon) 的应用范围广、防控效果最好,其通过寄生草地贪夜蛾的卵来有效控制幼虫对作物的为害。Cave 和 Acosta^[57]发现,玉米地每公顷释放 5 000~8 000 头夜蛾黑卵蜂可完全控制草地贪夜蛾的为害(寄生率达 78%~100%)。目前,巴西、墨西哥、委内瑞拉等拉丁美洲国家已广泛应用夜蛾黑卵蜂防控草地贪夜蛾,并取得了显著效果。我国也已发现夜蛾黑卵蜂的分布,并观察到其对草地贪夜蛾有寄生现

象^[58-60]。另外,缘腹绒茧蜂 *Cotesia marginiventris* (Cresson)和岛甲腹茧蜂 *Chelonus insularis* (Cresson)

应用也比较广泛,前者主要寄生草地贪夜蛾的1龄和2龄幼虫,后者属于跨卵-幼虫期寄生蜂^[56,61]。

表1 草地贪夜蛾寄生蜂概况及分布在我国种类¹⁾

Table 1 Profile of parasitic wasps of FAW and species distributed in China

科 Family	可寄生草地贪夜蛾的种类数量/种 No. of species that can parasite FAW	我国已有种类 Species in China
茧蜂科 Braconidae	39	台湾甲腹茧蜂 <i>Chelonus formosanus</i> Sonan 菜粉蝶盘绒茧蜂 <i>Cotesia glomerata</i> (Linnaeus) 螟蛉盘绒茧蜂 <i>Cotesia ruficrus</i> (Haliday) 马尼拉侧沟茧蜂 <i>Microplitis manilae</i> Ashmead 红腹侧沟茧蜂 <i>Microplitis rufiventris</i> Kokujev 灰灯蛾原绒茧蜂 <i>Prota panteles creatonoti</i> (Viereck) 截距滑茧蜂 <i>Homolobus truncator</i> (Say)
姬蜂科 Ichneumonidae	40	棉铃虫齿唇姬蜂 <i>Campoletis chloridae</i> Uchida 细颧姬蜂 <i>Enicospilus merdarius</i> (Gravenhorst) 盘背菱室姬蜂 <i>Mesochorus discitegerus</i> (Say) 红足黑瘤姬蜂 <i>Pimpla rufipes</i> (Miller)
赤眼蜂科 Trichogrammatidae	11	微小赤眼蜂 <i>Trichogramma minutum</i> Riley 短管赤眼蜂 <i>Trichogramma pretiosum</i> (Riley)
金小蜂科 Pteromalidae	3	N/A
姬小蜂科 Eulophidae	14	长距姬小蜂 <i>Euplectrus platyhypenae</i> Howard 突额姬小蜂 <i>Trichospilus diatraeae</i> Cherian and Margabandhu
小蜂科 Chalcididae	10	N/A
旋小蜂科 Eupelmidae	1	N/A
巨胸小蜂科 Perilampidae	1	N/A
广腹细蜂科 Platygasteridae	1	夜蛾黑卵蜂 <i>Telenomus remus</i> (Nixon)
肿腿蜂科 Bethyilidae	1	N/A

1) N/A(Not available):表示该科的寄生蜂种类在我国尚未发现或尚未报道。

N/A meas that the parasitic wasp species of this family has not been found or reported in China.

草地贪夜蛾的寄生蝇有4科66种,其中蜂虻科 Bombyliidae 1种、蚤蝇科 Phoridae 1种、麻蝇科 Sarcophagidae 6种、寄蝇科 Tachinidae 58种^[62]。目前,应用比较广泛的有温寄蝇 *Winthemia trinitatis* (Thompson)、大理纹始寄蝇 *Archytas marmoratus* (Townsend)和果树卷蛾菜寄蝇 *Lespesia archippivora* (Riley),三者都属于双翅目寄蝇科^[56]。温寄蝇主要寄生草地贪夜蛾的5~6龄幼虫,其田间寄生率可达30%左右^[3]。*A. marmoratus* (Townsend)属于幼虫-蛹期寄生蝇,其寄生方式属于幼虫寄生而非卵寄生,即成虫将卵产在寄主附近,卵孵化成幼虫后再寄生到寄主体内^[63]。*L. archippivora*是一种广谱性寄生蝇,可以寄生包括草地贪夜蛾在内的25种鳞翅目害虫^[3]。

草地贪夜蛾的捕食性天敌有鞘翅目瓢虫科 Coccinellidae、步甲科 Carabidae、革翅目的球螋科 Forficulidae、半翅目的猎蝽科 Reduviidae、长蝽科 Lygaeidae、花蝽科 Anthocoridae、姬蝽科 Nabidae、蝽科 Pentatomidae等^[3]。田间常见的捕食性瓢虫有大斑长足瓢虫 *Coleomegilla maculate* (De Geer)、集栖瓢虫 *Hippodamia convergens* (Guérin-Méneville)、

楔斑溜瓢虫 *Olla v-nigrum* (Mulsant)、血红环瓢虫 *Cycloneda sanguinea* (L.),捕食性蝽类有大眼长蝽 *Geocoris punctipes* (Say)、狡诈花蝽 *Orius insidiosus* (Say)、益蝽 *Podisus maculiventris* (Say)等^[56]。唐敏等^[64]报道了叉角厉蝽对草地贪夜蛾幼虫具有较强的捕食能力,尤其是5龄若虫以及雌、雄成虫的捕食能力最强。赵英杰等^[65]发现黄足肥螋成虫对草地贪夜蛾2龄幼虫具有较强的捕食作用,日最大捕食量为62.5头,并且对草地贪夜蛾2龄幼虫表现出一定的搜寻效应。

2.2 昆虫病原微生物

昆虫病原微生物是一类广泛存在于自然界且能引起多种昆虫疾病的微生物。自然界中草地贪夜蛾的昆虫病原微生物资源较为丰富,主要有昆虫病原真菌、细菌、病毒、线虫等,应用比较广泛的约47种^[66]。

2.2.1 病原真菌

目前,应用较为广泛的昆虫病原真菌有金龟子绿僵菌 *Metarhizium anisopliae*、莱氏绿僵菌 *Metarhizium rileyi*、球孢白僵菌 *Beauveria bassiana*等。Cruz-Avalos等^[67]测定了14株昆虫病原真

菌对草地贪夜蛾的毒力,发现在 1×10^8 个/mL 的孢子浓度下,3 株金龟子绿僵菌对草地贪夜蛾卵和幼虫的致死率均达 100%。郑亚强等^[68]对从野外采集的莱氏绿僵菌在室内进行生测发现,以 1×10^8 个/mL 孢子浓度接种草地贪夜蛾 3 龄幼虫,7 d 后致死率达 100%。然而,许多研究也指出,与其他鳞翅目害虫相比,草地贪夜蛾对球孢白僵菌并不敏感。例如,Carneiro 等^[69]测定了 13 株球孢白僵菌对草地贪夜蛾幼虫的毒力,仅有 4 株对 2 龄幼虫有致死性,并且只有 1 株的致死率超过 80%。Thomazoni 等^[70]研究发现 49 株球孢白僵菌菌株对 3 龄幼虫造成的死亡率均未超过 50%。

2.2.2 病原细菌

昆虫病原细菌中研究最深、应用最广的是苏云金芽胞杆菌,其主要是通过分泌杀虫蛋白(如 δ -内毒素晶体蛋白)达到杀虫目的^[3]。李国平等^[71]测定了 5 种常用 Bt 蛋白对草地贪夜蛾的致死作用,其致死顺序为 Vip3A > Cry1Ab > Cry1F > Cry2Ab > Cry1Ac,抑制草地贪夜蛾生长发育的顺序为 Cry1Ab > Cry1F > Vip3A > Cry1Ac > Cry2Ab。苏云金杆菌具有很强的选择性,并不是所有的 Bt 产品都可以用来防治草地贪夜蛾^[3]。Polanczyk 等^[72]发现,在各种 Bt 菌株中,草地贪夜蛾更容易受到 *Bt aizawai* 和 *Bt thuringiensis* 的感染,却对 *Bt kurstaki* 不敏感,而 Silva 等^[73]的研究显示 *Bt kurstaki* 对许多其他鳞翅目害虫均有较好的效果。因此,在田间应用 Bt 之前,应首先在室内对菌株进行筛选和毒力评价。

2.2.3 病原线虫

昆虫病原线虫在控制害虫发生方面具有寄主范围广、易于大量培养、使用方便、对人畜和环境安全并且对寄主具有主动搜寻能力等优点而受到广泛关注^[74]。常见的昆虫病原线虫主要有斯氏线虫属 *Steinernema* 和异小杆线虫属 *Heterorhabditis* 两大类,其作用机理是侵入寄主体腔后,释放出体内的共生菌,共生菌在寄主体内大量繁殖,与寄主形成营养竞争造成寄主患败血症而死^[75]。Raulston 等^[76]从草地贪夜蛾的蛹中分离出的斯氏线虫属线虫对草地贪夜蛾蛹的致死率达 46.1%。Molina-Ochoa 等^[77]和 Lezama-Gutierrez 等^[78]在墨西哥也先后发现了感染草地贪夜蛾的昆虫病原线虫,其中斯氏线虫属线虫分布最为广泛。Andaló 等^[79]从 17 个不同品系的昆虫病原线虫中筛选出了两种对草地贪夜蛾幼虫寄生率较高的线虫,温室应用的防效分别达 75.7% 和 86.5%。由于昆虫病原线虫对紫外线极其敏感,因此最好在早晨或傍晚使用^[80]。此外,在叶面喷施

时配合表面活性剂一同使用,可保证昆虫病原线虫的活动,防止昆虫病原线虫在搜寻到寄主之前由于干燥丧失活力,同时还能在一定程度上保护昆虫病原线虫不受紫外辐射的伤害^[74]。

2.2.4 病原病毒

昆虫病原病毒由于其高特异性、高毒力及对脊椎动物的高安全性而成为最具潜力的微生物制剂^[81-82]。目前,在草地贪夜蛾的生物防控中应用较为广泛的是颗粒体病毒和核型多角体病毒。害虫摄入带有病毒的食物后,病毒的多角体包埋物(PIB)会迅速水解,释放出病毒的感染粒子,感染粒子侵染昆虫中肠上皮细胞并在细胞核中繁殖,随后传播到体腔并感染其他组织,寄主一般感染后 6~8 d 死亡,并且感染期的寄主食量大大降低,仅为正常的 7% 左右^[3]。Behle 和 Popham^[83]比较了两株草地贪夜蛾核型多角体病毒(3AP2 和 sf3)在温室或田间的表现,发现 3AP2 的 LT₅₀ 比 sf3 要少 30 h 左右,并且死亡的幼虫明显偏小。

3 物理防治

3.1 性诱剂

草地贪夜蛾性信息素的研究始于 1967 年, Sekul 和 Sparks^[84-85]首次报道了草地贪夜蛾的性信息素为顺 9-十四乙酸酯(Z9-14:Ac),但其田间效果较差。1976 年他们又鉴定出顺 9-十二乙酸酯(Z9-12:Ac)也是草地贪夜蛾性信息素的组成部分^[85]。Tumlinson 等^[86]发现,当 Z9-14:Ac 与 Z9-12:Ac 的比例为 96.6:3.4 时引诱活性最强。田间应用时,诱捕器的形状、颜色等因素也显著影响其对草地贪夜蛾的诱集效果。Mitchell 等^[87]发现多种颜色组成的诱捕器诱捕效果强于单色诱捕器。Malo 等^[88]发现黄色诱捕器比蓝色和黑色诱捕器捕获的草地贪夜蛾数量更高。和伟等^[89]测定了 3 种诱捕器的田间诱捕效果,发现桶形诱捕器的诱捕量最高。

3.2 糖醋液

草地贪夜蛾成虫对糖醋液有一定的趋性,当田间虫口数量开始上升时,在每个田块放置 1 个糖醋液诱杀盆,可以起到很好的防控作用^[90]。另外,一些天敌对糖(醋)液也有一定的趋性,可以在作物上喷洒一定浓度的糖溶液,吸引周边的天敌,如蚂蚁、寄生蜂等进入田间,达到控害的目的。例如,Canas 和 O'Neil^[91]在洪都拉斯的连续 2 年田间试验发现,喷施蔗糖溶液的玉米上天敌密度明显高于纯水处理的玉米,天敌的自然控制作用使草地贪夜蛾平均发

生率降低了 18%，玉米平均叶面积损害率降低了 35%。Bortolotto 等^[92]在巴西进行的 3 组田间试验处理(水、水+糖、水+糖蜜)，结果表明三者之间的捕食性天敌数量无显著差异，但是水+糖和水+糖蜜处理中的寄生性天敌要高得多，寄生率达到 11.5%左右，而纯水处理的寄生率仅为 6.5%。

3.3 其他物理防控措施

夜蛾类昆虫的成虫对光都有一定的敏感性。do Nascimento 等^[93]比较了不同颜色的 LED(light-emitting diodes)杀虫灯对草地贪夜蛾成虫的诱集效果，发现红色和蓝色杀虫灯的效果最差；绿色杀虫灯的诱集效果最好，在 48 h 内，对雌雄成虫的诱集率分别为 50%和 52%。因此，在草地贪夜蛾成虫发生期，安装绿色杀虫灯可在一定程度上控制成虫数量。当草地贪夜蛾暴发为害时，可以采取人工压碎卵团和捕捉幼虫的方式进行防控，但这是一项劳动密集型工作，在种植规模较小且有空闲劳动力时可以选择此方法，不建议在大规模种植时使用^[17]。另外，调查发现，将砂和草木灰混合后倒入玉米叶芯中可有效杀死草地贪夜蛾幼虫，粮农组织正在将其作为一种低成本的防治手段加以推广^[94]。

4 科学用药

草地贪夜蛾作为外来入侵物种，具有突发性和暴发性。一旦暴发，以上绿色防控措施很难在短时间内降低害虫的种群数量，因此必须使用化学防控手段。草地贪夜蛾入侵我国后，农业农村部也紧急发布了草地贪夜蛾应急防控的用药推荐名单，包括甲氨基阿维菌素苯甲酸盐·茚虫威、四氯虫酰胺等 11 种化学单剂和甲氨基阿维菌素苯甲酸盐·茚虫威、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐·氟铃脲、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐·高效氯氟氰菊酯等 8 种复配制剂^[8]。国内学者也测定了其他化学药剂的防效。例如，赵胜园等^[95]在室内测定了 21 种常用化学药剂对草地贪夜蛾的防效，发现甲氰菊酯、啮虫酰胺、溴氰菊酯、高效氯氟氰菊酯和呋虫胺对草地贪夜蛾卵具有较高的毒杀活性，校正孵化抑制率可达 80%以上；甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、乙酰甲胺磷、乙基多杀菌素和甲氰菊酯对草地贪夜蛾 2 龄幼虫具有较强的毒杀作用，校正死亡率超过 90%。陈利民等^[96]测定了 15 种生物源、矿物源和昆虫激素类等绿色杀虫剂对草地贪夜蛾卵和 2 龄幼虫的室内毒杀效果，结果表明，灭幼脲、虱螨脲、短稳杆菌和苏云金杆菌是替代传统化学农药防控草地贪夜蛾的首选农药，其中尤以

低毒、易降解的昆虫激素类农药灭幼脲和活体微生物农药短稳杆菌最佳。这些药剂都是低毒或微毒的，按照要求使用均能达到绿色防控的要求。但是，若滥用、乱用容易对人畜、环境和生物多样性带来影响，并且易使害虫产生抗药性。因此，在使用时要科学用药，交替、轮换使用不同类型农药，协调使用化学农药和生物农药，延缓抗药性产生，提高防治效果。同时，按照安全间隔期施药，注意保护利用天敌，保护施药者安全、农产品质量和生态环境安全。

5 展望

草地贪夜蛾作为原发生于美洲地区的土著害虫，目前已经成为一种世界性重大害虫。针对草地贪夜蛾的防治，很多国家已经在农业防治、生物防治、物理防治、化学防治等方面积累了丰富的经验。由于草地贪夜蛾入侵我国的时间不长，在其防控技术的研究和应用上相对较为薄弱，目前仍然是采取以化学农药为主的防治思路。随着草地贪夜蛾在我国继续传播和扩散，应牢固树立“公共植保、绿色植保”的理念，根据我国不同区域的气候环境、种植模式以及草地贪夜蛾的发生为害规律，因地制宜，建立以农业和生态调控为基础、生物防治为核心、应急化学农药防控为辅的草地贪夜蛾综合防治技术体系^[97-98]。我国农业历史悠久，在害虫农业防治方面，如水肥管理、间套种技术上积累了丰富经验，可应用于草地贪夜蛾的防控中。此外，我国自然资源丰富，评价、筛选、扩繁和应用国内优势天敌昆虫是目前开展草地贪夜蛾防治工作的重要任务；我国病原微生物种类多，市场大，仅 Bt 生产厂家就超过 80 家，每年可为市场提供超过 3 万 t 产品，实际应用面积近 600 万 hm^2 ^[99]，可在草地贪夜蛾的大面积防控中发挥重要作用。因此，在借鉴国外的防控经验上，结合我国已有的研究和应用基础，在不久的将来，一定可以走出一条具有我国特点的草地贪夜蛾绿色防控之路。

参考文献

- [1] TODD E L, POOLE R W. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the Western Hemisphere [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1980, 73(6): 722–738.
- [2] PASHLEY D P, JOHNSON S J, SPARKS A N. Genetic population structure of migratory moths; the fall armyworm (*Lepidoptera*: Noctuidae)[J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1985, 78(6): 756–762.
- [3] PRASANNA B M, HUESING J E, EDDY R, et al. Fall armyworm in Africa: a guide for integrated pest management

- [M]. 2018. <https://www.researchgate.net/publication/323612839>.
- [4] KALLESHWARASWAMY C, ASOKAN R, SWAMY H, et al. First report of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest on maize in India [J]. *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 2018, 24(1): 23–29.
- [5] 郭井菲, 赵建周, 何康来, 等. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国[J]. *植物保护*, 2018, 44(6): 5–14.
- [6] 姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 等. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J]. *植物保护*, 2019, 45(6): 10–19.
- [7] 姜玉英, 刘杰, 朱晓明. 草地贪夜蛾侵入我国的发生动态和未来趋势分析[J]. *中国植保导刊*, 2019, 39(2): 33–35.
- [8] 中华人民共和国农业农村部. 全国草地贪夜蛾防控方案[EB/OL]. (2019-06-21)[2019-07-31]http://www.zzys.moa.gov.cn/tzgg/201907/t20190731_6321853.htm.
- [9] OKUMA D M, BERNARDI D, HORIKOSHI R J, et al. Inheritance and fitness costs of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to spinosad in Brazil [J]. *Pest Management Science*, 2018, 74(6): 1441–1448.
- [10] TOGOLA A, MESEKA S, MENKIR A, et al. Measurement of pesticide residues from chemical control of the invasive *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in a maize experimental field in Mokwa, Nigeria[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(5): 849.
- [11] WOOD K A, WILSON B H, GRAVES J B. Influence of host plant on the susceptibility of the fall armyworm to insecticides [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1981, 74(1): 96–98.
- [12] YU S J. Insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith)[J]. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 1991, 39(1): 84–91.
- [13] YU S J, MCCORD E Jr. Lack of cross-resistance to indoxacarb in insecticide-resistant *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) [J]. *Pest Management Science*, 2007, 63(1): 63–67.
- [14] GUTIÉRREZ-MORENO R, MOTA-SANCHEZ D, BLANCO C A, et al. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic insecticides in Puerto Rico and Mexico [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 112(2): 792–802.
- [15] 吴超, 张磊, 廖重宇, 等. 草地贪夜蛾对化学农药和 Bt 作物的抗性机制及其治理技术研究进展[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(3): 503–513.
- [16] HUANG H, YANG P. The ancient cultured citrus ant [J]. *BioScience*, 1987, 37(9): 665–671.
- [17] HARRISON R D, THIERFELDER C, BAUDRON F, et al. Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith) management: providing low-cost, smallholder friendly solutions to an invasive pest [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 243: 318–330.
- [18] MORALES H, PERFECTO I, FERGUSON B. Traditional fertilization and its effect on corn insect populations in the Guatemalan highlands [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 84(2): 145–155.
- [19] ALTIERI M A, NICHOLLS C I. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 72(2): 203–211.
- [20] VANLAUWE B, WENDT J, GILLER K E, et al. A fourth principle is required to define conservation agriculture in sub-Saharan Africa: the appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity [J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 10–13.
- [21] KUMAR H, MIHM J A. Fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae), southwestern corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) and sugarcane borer (Lepidoptera: Pyralidae) damage and grain yield of four maize hybrids in relation to four tillage systems [J]. *Crop Protection*, 2002, 21(2): 121–128.
- [22] ANDREWS K L. Latin American research on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. *Florida Entomologist*, 1988, 71(4): 630–653.
- [23] BAUDRON F, ZAMAN-ALLAH M, CHAIPA I, et al. Understanding the factors conditioning fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith) infestation in African smallholder maize fields and quantifying its impact on yield: a case study in Eastern Zimbabwe [J]. *Crop Protection*, 2019, 120: 141–150.
- [24] ROBERTS P M, ALL J N. Hazard for fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) infestation of maize in double-cropping systems using sustainable agricultural practices [J]. *Florida Entomologist*, 1993, 76(2): 276–283.
- [25] CLARK M S. Generalist predators in reduced-tillage corn: predation on armyworm, habitat preferences, and a method to estimate absolute densities [D]. Blacksburg, Virginia; Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993.
- [26] RIVERS A, BARBERCHECK M, GOVAERTS B, et al. Conservation agriculture affects arthropod community composition in a rainfed maize-wheat system in central Mexico [J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 81–90.
- [27] RIECHERT S E, BISHOP L. Prey control by an assemblage of generalist predators: spiders in garden test systems [J]. *Ecology*, 1990, 71(4): 1441–1450.
- [28] WHEELER G S, ASHLEY T R, ANDREWS K L. Larval parasitoids and pathogens of the fall armyworm in Honduran maize [J]. *BioControl*, 1989, 34(3): 331–340.
- [29] WYCKHUYS K A, O'NEIL R J. Social and ecological facets of pest management in Honduran subsistence agriculture: implications for IPM extension and natural resource management [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2010, 12(3): 297–311.
- [30] QUISPE R, MAZÓN M, RODRÍGUEZ-BERRÍO A. Do refuge plants favour natural pest control in maize crops? [J]. *Insects*, 2017, 8(3): 71.
- [31] MOLINA-OCHOA J, HAMM J J, LEZAMA-GUTIÉRREZ R, et al. A survey of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) parasitoids in the Mexican states of Michoacán, Colima, Jalisco, and Tamaulipas [J]. *Florida Entomologist*, 2001, 84(1): 31–36.
- [32] MOLINA-OCHOA J, CARPENTER J E, LEZAMA-GUTIÉRREZ R, et al. Natural distribution of hymenopteran parasitoids of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in Mexico [J]. *Florida Entomologist*, 2004, 87(4): 461–473.
- [33] MEAGHER R L Jr, NUSSLY G S, NAGOSHI R N, et al. Parasitoids attacking fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae)

- in sweet corn habitats [J]. *Biological Control*, 2016, 95: 66–72.
- [34] ALTIERI M A, FRANCIS C A, VAN SCHOONHOVEN A, et al. A review of insect prevalence in maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) polycultural systems [J]. *Field Crops Research*, 1978, 1: 33–49.
- [35] ALTIERI M M. Diversification of corn agroecosystems as a means of regulating fall armyworm [*Spodoptera frugiperda*] populations [J]. *Florida Entomologist*, 1980, 63(4): 450–456.
- [36] VAN HUIS A. Integrated pest management in the small farmer's maize crop in Nicaragua [D]. Wageningen; Mededelingen Landbouwhogeschool, 1981.
- [37] PERFECTO I, SEDILES A. Vegetational diversity, ants (Hymenoptera: Formicidae), and herbivorous pests in a neotropical agroecosystem [J]. *Environmental Entomology*, 1992, 21(1): 61–67.
- [38] PORTILLO H E, PITRE H N, MECKENSTOCK D H, et al. Langosta: a lepidopterous pest complex on sorghum and maize in Honduras [J]. *Florida Entomologist*, 1991, 74(2): 287–296.
- [39] PENAGOS D, MAGALLANES R, VALLE J, et al. Effect of weeds on insect pests of maize and their natural enemies in southern Mexico [J]. *International Journal of Pest Management*, 2003, 49(2): 155–161.
- [40] COOK S M, KHAN Z R, PICKETT J A. The use of push-pull strategies in integrated pest management [J]. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52(1): 375–400.
- [41] MIDEGA C A O, PITCHAR J O, PICKETT J A, et al. A climate-adapted push-pull system effectively controls fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), in maize in East Africa [J]. *Crop Protection*, 2018, 105: 10–15.
- [42] ORTEGA A, VASAL S K, MIHM J. Breeding for insect resistance in maize [M] // MAXWELL F G, JENNINGS P R, ed. *Breeding Plants Resistant to Insects*. New York; Wiley, 1980: 371–419.
- [43] MIHM J A. Insect resistant maize: recent advances and utilization; proceedings of an international symposium held at the international maize and wheat improvement center (CIMMYT) [C]. CIMMYT, 1997.
- [44] WILLIAMS W P, DAVIS F M. Registration of Mp703 germplasm line of maize (Reg. No. GP83) [J]. *Crop Science*, 1980, 20(3): 418.
- [45] SCOTT G E, DAVIS F M. Registration of Mp496 inbred of maize (Reg. No. PL 56) [J]. *Crop Science*, 1981, 21(2): 353.
- [46] SCOTT G E, DAVIS F M, WILLIAMS W P. Registration of MP701 and MP702 germplasm lines of maize (Reg. No. GP119 and GP120) [J]. *Crop Science*, 1982, 22(6): 1270.
- [47] WILLIAMS W P, DAVIS F M. Registration of Mp704 germplasm line of maize (Reg. No. GP116) [J]. *Crop Science*, 1982, 22(6): 1269–1270.
- [48] WILLIAMS W P, DAVIS F M. Registration of Mp705, Mp706, and Mp707 germplasm lines of maize [J]. *Crop Science*, 1984, 24(6): 1217.
- [49] WILLIAMS W P, DAVIS F M, WINDHAM G L. Registration of Mp708 germplasm line of maize [J]. *Crop Science*, 1990, 30(3): 757.
- [50] HORIKOSHI R J, BERNARDI D, BERNARDI O, et al. Effective dominance of resistance of *Spodoptera frugiperda* to Bt maize and cotton varieties: implications for resistance management [J/OL]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34864.
- [51] VIANA P A, GUIMARAES P D O, GONCALVES I D S, et al. Resistência nativa de híbridos experimentais de milho à *Spodoptera frugiperda* [C]. Embrapa Milho e Sorgo-Artigo em anais de congresso (ALICE), 2014.
- [52] BUNTIN G D. Corn expressing Cry1Ab or Cry1F endotoxin for fall armyworm and corn earworm (Lepidoptera: Noctuidae) management in field corn for grain production [J]. *Florida Entomologist*, 2008, 91(4): 523–531.
- [53] BERNARDI O, AMADO D, SOUSA R S, et al. Baseline susceptibility and monitoring of Brazilian populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) to Vip3Aa20 insecticidal protein [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107(2): 781–790.
- [54] BLANCO C A, PORTILLA M, JURAT-FUENTES J L, et al. Susceptibility of isofamilies of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to Cry1Ac and Cry1Fa proteins of *Bacillus thuringiensis* [J]. *Southwestern Entomologist*, 2010, 35(3): 409–416.
- [55] STORER N P, BABCOCK J M, SCHLENZ M, et al. Discovery and characterization of field resistance to Bt maize: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Puerto Rico [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2010, 103(4): 1031–1038.
- [56] 唐璞, 王知知, 吴琼, 等. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用 [J]. *应用昆虫学报*, 2019, 56(3): 370–381.
- [57] CAVE R D, ACOSTA N M. *Telenomus remus* Nixon: un parasitoide en el control biológico del gusano cogollero, *Spodoptera frugiperda* (Smith) [J]. *Ceiba*, 1999, 40(2): 215–227.
- [58] 唐雅丽. 夜蛾黑卵蜂的应用基础研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2011.
- [59] 霍梁霄, 周金成, 宁素芳, 等. 夜蛾黑卵蜂寄生草地贪夜蛾和斜纹夜蛾卵的生物学特性 [J]. *植物保护*, 2019, 45(5): 60–64.
- [60] 李志刚, 卢欣, 押玉柯, 等. 粤港两地田间发现夜蛾黑卵蜂与螟黄赤眼蜂寄生草地贪夜蛾 [J]. *环境昆虫学报*, 2019, 41(4): 760–765.
- [61] 卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 等. 草地贪夜蛾的生物防治及潜在入侵风险 [J]. *热带作物学报*, 2019, 40(6): 1237–1244.
- [62] MOLINA-CHOA J, CARPENTER J E, HEINRICHS E A, et al. Parasitoids and parasites of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas and Caribbean Basin: An inventory [J]. *Florida Entomologist*, 2003, 86(3): 254–289.
- [63] CARPENTER J, PROSHOLD F. Survival of *Archytas marmoratus* (Diptera: Tachinidae) from superparasitized corn earworm larvae (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Environmental Entomology*, 2000, 29(3): 606–611.
- [64] 唐敏, 邝昭琅, 李子园, 等. 叉角厉螭对草地贪夜蛾幼虫的捕食功能反应 [J]. *环境昆虫学报*, 2019, 41(5): 979–985.
- [65] 赵英杰, 符成悦, 徐天梅, 等. 黄足肥螋成虫对草地贪夜蛾 2 龄幼虫的捕食功能反应 [J]. *植物保护*, 2019, 45(6): 35–38.
- [66] 陈万斌, 李玉艳, 王孟卿, 等. 草地贪夜蛾的昆虫病原微生物资源及其应用现状 [J]. *植物保护*, 2019, 45(6): 1–9.
- [67] CRUZ-AVALOS A M, BIVIÁN-HERNÁNDEZ M D L Á, IBARRA J E, et al. High virulence of mexican entomopathogenic fungi against fall armyworm, (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 112(1): 99–107.

- [68] 郑亚强, 胡惠芬, 付玉飞, 等. 草地贪夜蛾莱氏绿僵菌的分离鉴定[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 65-70.
- [69] CARNEIRO A A, GOMES E A, GUIMARAES C T, et al. Molecular characterization and pathogenicity of isolates of *Beauveria* spp. to fall armyworm [J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2008, 43(4): 513-520.
- [70] THOMAZONI D F M A, ALVES L F. Pathogenicity of entomopathogenic fungi to *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Arquivos do Instituto Biológico, 2014, 81: 126-133.
- [71] 李国平, 姬婷婷, 孙小旭, 等. 入侵云南草地贪夜蛾种群对 5 种常用 Bt 蛋白的敏感性评价[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 20-25.
- [72] POLANCZYK R A, SILVA R F P D, FIUZA L M. Effectiveness of *Bacillus thuringiensis* strains against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2000, 31(3): 164-166.
- [73] DA SILVA S M B, SILVA-WERNECK J O, FALCÃO R, et al. Characterization of novel Brazilian *Bacillus thuringiensis* strains active against *Spodoptera frugiperda* and other insect pests [J]. Journal of Applied Entomology, 2004, 128(2): 102-107.
- [74] 颜珣, 谷星慧, 韩日畴. 昆虫病原线虫防治草地贪夜蛾的研究进展[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(4): 695-700.
- [75] KAYA H K, GAUGLER R. Entomopathogenic nematodes [J]. Annual Review of Entomology, 1993, 38(1): 181-206.
- [76] RAULSTON J, PAIR S, LOERA J, et al. Prepupal and pupal parasitism of *Helicoverpa zea* and *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) by *Steinernema* sp. in cornfields in the Lower Rio Grande Valley [J]. Journal of Economic Entomology, 1992, 85(5): 1666-1670.
- [77] MOLINA-OCHOA J, LEZAMA-GUTIÉRREZ R, GONZÁLEZ-RAMÍREZ M, et al. Pathogens and parasitic nematodes associated with populations of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in Mexico [J]. Florida Entomologist, 2003, 86(3): 244-253.
- [78] LEZAMA-GUTIÉRREZ R, HAMM J J, MOLINA-OCHOA J, et al. Occurrence of entomopathogens of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Mexican states of Michoacán, Colima, Jalisco and Tamaulipas [J]. Florida Entomologist, 2001, 84(1): 23-30.
- [79] ANDALÓ V, SANTOS V, MOREIRA G F, et al. Evaluation of entomopathogenic nematodes under laboratory and greenhouses conditions for the control of *Spodoptera frugiperda* [J]. Ciência Rural, 2010, 40(9): 1860-1866.
- [80] SHAPIRO-ILAN D I, GOUGE D H, PIGGOTT S J, et al. Application technology and environmental considerations for use of entomopathogenic nematodes in biological control [J]. Biological Control, 2006, 38(1): 124-133.
- [81] MOSCARDI F. Assessment of the application of baculoviruses for control of lepidoptera [J]. Annual Review of Entomology, 1999, 44(1): 257-289.
- [82] BARRERA G, SIMÓN O, VILLAMIZAR L, et al. *Spodoptera frugiperda* multiple nucleopolyhedrovirus as a potential biological insecticide: genetic and phenotypic comparison of field isolates from Colombia [J]. Biological Control, 2011, 58(2): 113-120.
- [83] BEHLE R W, POPHAM H J. Laboratory and field evaluations of the efficacy of a fast-killing baculovirus isolate from *Spodoptera frugiperda* [J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2012, 109(2): 194-200.
- [84] SEKUL A A, SPARKS A N. Sex pheromone of the fall armyworm moth; isolation, identification, and synthesis [J]. Journal of Economic Entomology, 1967, 60(5): 1270-1272.
- [85] SEKUL A, SPARKS A N. Sex attractant of the fall armyworm moth [M]. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service [Southern Grain Research Laboratory], 1976.
- [86] TUMLINSON J H, MITCHELL E R, TEAL P E, et al. Sex pheromone of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith): Identification of components critical to attraction in the field [J]. Journal of Chemical Ecology, 1986, 12(9): 1909-1926.
- [87] MITCHELL E R, AGEE H R, HEATH R R. Influence of pheromone trap color and design on capture of male velvetbean caterpillar and fall armyworm moths (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Journal of Chemical Ecology, 1989, 15(6): 1775-1784.
- [88] MALO E A, CRUZ-ESTEBAN S, GONZÁLEZ F J, et al. A home-made trap baited with sex pheromone for monitoring *Spodoptera frugiperda* males (Lepidoptera: Noctuidae) in corn crops in Mexico [J]. Journal of Economic Entomology, 2018, 111(4): 1674-1681.
- [89] 和伟, 赵胜园, 葛世帅, 等. 草地贪夜蛾种群性诱测报方法研究[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 48-53.
- [90] 王丹, 张琳丽, 李石力. 草地贪夜蛾的生物学特性及治理策略[J]. 植物医生, 2019, 32(4): 9-12.
- [91] CANAS L A, O'NEIL R J. Applications of sugar solutions to maize, and the impact of natural enemies on fall armyworm [J]. International Journal of Pest Management, 1998, 44(2): 59-64.
- [92] BORTOLOTTO O C, MENEZES JR A D O, HOSHINO A T, et al. Sugar solution treatment to attract natural enemies and its impact on fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in maize fields [J]. Interciencia, 2014, 39(6): 416.
- [93] DO NASCIMENTO I N, DE OLIVEIRA G M, DE SOUZA M D S, et al. Light-emitting Diodes (LED) as luminous lure for adult *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2018, 25(4): 1-8.
- [94] FAO. Integrated management of the fall armyworm on maize: A guide for farmer field schools in Africa [R]. Food and Agricultural Organisation of the United Nations, Rome, 2018.
- [95] 赵胜园, 孙小旭, 张浩文, 等. 常用化学杀虫剂对草地贪夜蛾防效的室内测定[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 10-14.
- [96] 陈利民, 黄俊, 吴全聪, 等. 绿色杀虫剂对草地贪夜蛾杀虫活性比较测定[J]. 环境昆虫学报, 2019, 41(4): 775-781.
- [97] 杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 1-6.
- [98] 郭井菲, 何康来, 王振营. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 361-369.
- [99] 陈学新. 21 世纪我国害虫生物防治研究的进展、问题与展望 [J]. 昆虫知识, 2010, 47(4): 615-625.