

药源植物在草地贪夜蛾防控中的应用研究进展

葛 阳¹ 孙嘉惠¹ 王铁霖¹ 石旺鹏² 袁庆军^{1*} 郭兰萍^{1*}

(1. 中国中医科学院中药资源中心道地药材国家重点实验室培育基地, 北京 100700;

2. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193)

摘要: 草地贪夜蛾作为世界重大迁飞性害虫, 自2019年侵入我国, 已对我国的玉米、甘蔗等多种作物造成了较大经济损失。采用化学合成农药防治草地贪夜蛾的弊端已逐步显现, 找到可以替代化学合成农药的手段十分必要, 其中植物源药剂是重要的替代途径。目前, 全世界已报道了80余种在草地贪夜蛾防控中具有应用前景的药源植物, 以菊科植物资源最丰富, 还有唇形科和豆科等植物; 这些植物的提取物中包含对草地贪夜蛾具有控制作用的活性组分, 主要包括萜类、类黄酮、生物碱、脂肪酸类等, 其对草地贪夜蛾的作用方式主要包括胃毒、触杀、生长发育调节、拒食、抑制细胞增殖、诱导细胞凋亡等。药源植物提取物在对草地贪夜蛾的防控中具有持续防效明显、作用靶标多样、不易产生抗药性和环境友好等特点, 开发应用前景广阔。

关键词: 草地贪夜蛾; 药源植物; 杀虫成分; 作用方式

Progress in researches and applications of medicinal herbs for management of fall armyworm *Spodoptera frugiperda*

GE Yang¹ SUN Jiahui¹ WANG Tielin¹ SHI Wangpeng² YUAN Qingjun^{1*} GUO Lanping^{1*}

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Dao-di Herbs, National Resource Center for Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China; 2. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Fall armyworm (FAW) *Spodoptera frugiperda* is a major migratory pest in the world. Since migrating to China in 2019, it has caused great economic losses to various crops, such as corn and sugarcane. The disadvantages of using chemical pesticides to control *S. frugiperda* have emerged. There is a need to develop approaches that can replace synthetic pesticides, and botanical insecticides are one of the most important alternative. At present, more than 80 species of medicinal plants have been evaluated and shown activity against FAW around the world. Among them, plant species with detected pesticide properties in family of Asteraceae is the most abundant, followed by Lamiaceae and Leguminosae. The insecticidal compounds identified from the extracts of the host plants mainly include terpenoids, flavonoids, alkaloids, fatty acids, etc. The mode of action of these compounds on FAW comprise of ingested poisoning, contact poisoning, growth regulation, antifeeding, inhibition of cell proliferation, and induction of cell apoptosis, etc. Medicinal plant extracts have shown many advantages like environmentally friendly, sustainable control efficiency, diverse target sites in FAW, and difficult for FAW to develop resistance. Therefore, the botanical pesticide against FAW has broad development and application prospects.

Key words: *Spodoptera frugiperda*; herb; insecticidal compound; mode of action

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(ZZXT202009), 国家重点研发计划(2017YFC1703700, 2017YFC1703704)

* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: yuanqingjun@icmm.ac.cn, glp01@126.com

收稿日期: 2020-05-20

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 起源于美洲热带及亚热带地区,是世界重大迁飞性农业害虫(赵胜园等,2019),幼虫可造成玉米 *Zea mays* 产量降低 15%~73%,每年造成的经济损失超过 4 亿美元(Guerrero et al.,2014)。草地贪夜蛾是一种多食性害虫,其寄主植物还包括金盏花 *Calendula officinalis*、红花 *Carthamus tinctorius*、芫荽 *Coriandrum sativum*、胜红蓟 *Ageratum conyzoides*、紫菀 *Aster tataricus* 等近百种中药材(Montezano et al.,2018),草地贪夜蛾的入侵和定殖可能对我国中药材产业造成一定影响。当前主要采用化学合成农药来防治草地贪夜蛾,然而入侵定殖我国的草地贪夜蛾已经对拟除虫菊酯、有机磷、氨基甲酸酯和烟碱类化学杀虫剂产生了很高的抗药性(吴超等,2019),大面积使用酰胺类等为数不多的高防效杀虫剂将很快引起该虫的抗药性问题(吴孔明,2020)。化学杀虫剂的大量使用还会降低传粉昆虫和天敌等有益昆虫的数量,并带来一系列环境生态问题(赵胜园等,2019)。植物中含有多种抵御害虫的次生代谢物质等,利用化学分离纯化等技术分离制备植物中的杀虫活性物质,开发出用于害虫防治的

植物源杀虫药剂,具有对环境及非靶标影响小、迅速降解(林素坤等,2020)、可再生等优点(Sosa et al.,2019)。近年来,有大量研究报道了对草地贪夜蛾有防治效果的植物源药剂及其主要作用方式,本文对具有防治草地贪夜蛾潜力的植物资源及其主要杀虫活性成分的常见作用机制进行总结,以期防治草地贪夜蛾的植物源药剂的开发和应用研究提供参考,并促进药用植物在植物源杀虫剂方面的应用。

1 具有开发潜力的植物资源

目前已经明确具有开发应用前景的防治草地贪夜蛾的植物资源超过 80 种,共来自 33 个科(图 1)。其中,以菊科 Asteraceae(11 种)中植物资源最多,其次是唇形科(8 种)、豆科(6 种)、楝科(6 种)和禾本科(5 种)。许多植物资源在全世界范围都有分布,如藿香蓟 *Ageratum conyzoides* 原产于中南美洲,但在非洲及我国均有种植;茴香 *Foeniculum vulgare*、蓖麻 *Ricinus communis* 等在我国分布十分广泛(Rioba & Stevenson,2020)。

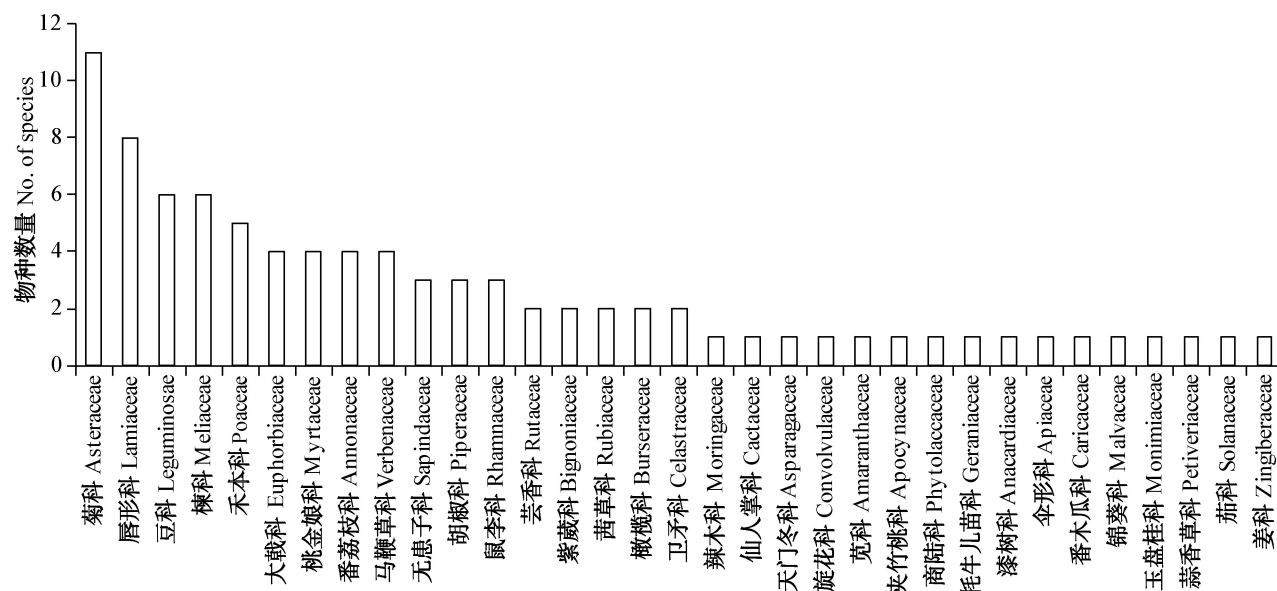


图 1 可用于防治草地贪夜蛾的植物资源

Fig. 1 Plant species against *Spodoptera frugiperda*

2 直接毒杀草地贪夜蛾的药源植物及其主要活性物质

目前已经明确对草地贪夜蛾具有直接毒杀作用的植物有 60 多种,其中明确其主要活性成分有 20 余种(表 1),包括:(1)苯丙烷类化合物:番荔枝科端心

木属 *Duguetia lanceolata* 树皮的二氯甲烷浸提物对草地贪夜蛾的致死中浓度 LC_{50} 为 295 $\mu\text{g/mL}$,*D. lanceolata* 中主要有 2 种苯丙烷类物质对草地贪夜蛾具有毒杀作用,分别为反细辛脑和 2,4,5-三甲氧基苯乙烯,混合后饲喂草地贪夜蛾,96 h 死亡率为 100%(Alves et al.,2020)。芸香 *Ruta graveolens* 叶片提取

物对草地贪夜蛾幼虫的毒杀作用也主要与其中的活性物质香豆素-补骨脂素有关,在1 mg/mL浓度下,补骨脂素会造成幼虫100%的死亡率(Ayil-Gutiérrez et al., 2015; Alves et al., 2020)。1 mg/mL 罗勒 *Ocimum selloi* 精油施用48 h后会造成草地贪夜蛾幼虫100%的死亡率,说明苯丙烷类化合物甲基-胡椒酚对草地贪夜蛾的乙酰胆碱酯酶活性具有抑制作用,抑制率为74.84%,与农药灭多威的抑制率(79.86%)接近(De Menezes et al., 2020)。(2)萜类化合物:印楝素属于四环三萜类化合物,易分解,对哺乳动物和环境伤害小,但其在紫外光下不稳定,其田间持续效果较差(Rioba & Stevenson, 2020)。仙人掌科龙神柱 *Myrtillocactus geometrizans* 的根和地上部分的甲醇提取物对草地贪夜蛾幼虫也具有毒杀作用,致死剂量在100~200 ppm之间,其中发挥作用的主要是萜烯类物质青霉素和仙人掌甾醇(Céspedes et al., 2005)。紫葳科叉叶木 *Crescentia alata* 中也包含对草地贪夜蛾具有显著毒杀活性的萜烯类物质,如宁朴素、 β -谷甾醇等(Céspedes et al., 2005; Valladares et al., 2014)。禾本科曲序香茅 *Cymbopogon flexuosus* 精油的主要成分单萜柠檬醛,对草地贪夜蛾具有毒杀作用,且柠檬醛对非靶标毒性较低,有较好的应用前景(Oliveira et al., 2018)。马鞭草科龙至木属 *Lippia graveolens* 的叶片已烷提取物的主要成分是单萜百里酚和香芹酚,分别占70.6%和22.8%,对草地贪夜蛾成虫具有毒杀作用,10~100 ppm浓度

处理下会导致成虫畸形,这是目前仅有的关于植物提取物对草地贪夜蛾成虫具有毒杀作用的报道(Guevara et al., 2018)。(3)生物碱类化合物:豆科羽扇豆属 *L. montanus*、*L. stipulatus*、*L. aschenbornii* 植物叶片中富含生物碱,对草地贪夜蛾具有明显的毒杀作用,LD₅₀为16~70 ppm,主要包括羽扇豆碱、鹰爪豆碱、茶碱、 α -鹰爪豆碱等;其中 *L. montanus* 和 *L. aschenbornii* 中鹰爪豆碱含量较高,分别为640 μ g/g和780 μ g/g, *L. stipulatus* 中鹰爪豆碱含量较少,但富含茶碱,茶碱对草地贪夜蛾幼虫的毒性相对较好且作用效果快,取食 *L. stipulatus* 提取物7 d后草地贪夜蛾的LD₅₀为20 μ g/mL(Bermúdez-Torres et al., 2009)。

还有部分植物提取物已证实对草地贪夜蛾具有毒杀作用,但目前尚未鉴定出其中的杀虫活性成分。如牛蒡果 *Talisia esculenta*、无患子 *Sapindus saponaria*(Rioba & Stevenson, 2020)、解醉茶 *Peumus boldus*、牡荆属的 *Vitex mollis*(Rodríguez-López et al., 2007)、万寿菊 *Tagetes erecta*、灯头菊属的 *Lychnophora ericoides*、毛瓣柄泽兰属的 *Trichogonia villosa*(Tavares et al., 2010)、天竺葵属的 *Pelargonium graveolens*、龙至木属的 *Lippia alba*(Tavares et al., 2010)、商陆科商陆属的 *Phytolacca dodecandra*(Sisay et al., 2019)、番荔枝 *Annona squamosa*、烟草 *Nicotiana tabacum* 和龙至木属的 *L. javanica*(Phambala et al., 2020)等,需要进一步明确其杀虫活性成分。

表1 对草地贪夜蛾具直接毒杀作用的植物资源

Table 1 Plant species that showed insecticidal activity against *Spodoptera frugiperda*

科 Family	属 Genus	种 Species	作用时期 Action period	活性成分 Active component
菊科 Asteraceae	灯头菊属 <i>Lychnophora</i>	<i>Lychnophora ericoides</i>	卵 Egg	未知 Unknown
		毛瓣柄泽兰属 <i>Trichogonia</i>	卵 Egg	未知 Unknown
番荔枝科 Annonaceae	番荔枝属 <i>Annona</i>	番荔枝 <i>Annona squamosa</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
夹竹桃科 Apocynaceae	牛角瓜属 <i>Calotropis</i>	金玉桃 <i>Calotropis procera</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
仙人掌科 Cactaceae	龙神柱属 <i>Myrtillocactus</i>	龙神柱	幼虫 Larva	青霉素、仙人掌甾醇
		<i>Myrtillocactus geometrizans</i>		Peniocerol, macdougallin
大戟科 Euphorbiaceae	蓖麻属 <i>Ricinus</i>	蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	幼虫 Larva	蓖麻油、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、亚麻酸等
				Castor oil, linoleic acid, palmitic acid, stearic acid, linolenic acid etc.
楝科 Meliaceae	印楝属 <i>Azadirachta</i>	印楝 <i>Azadirachta indica</i>	幼虫 Larva	印楝素 Azadirachtin
桃金娘科 Myrtaceae	杯番樱属 <i>Siphoneugena</i>	<i>Siphoneugena densiflora</i>	幼虫 Larva	类黄酮 Flavonoid
禾本科 Poaceae	玉蜀黍属 <i>Zea</i>	<i>Zea diploperennis</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
鼠李科 Rhamnaceae	枣属 <i>Ziziphus</i>	<i>Ziziphus joazeiro</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
茜草科 Rubiaceae	木巴戟属 <i>Morinda</i>	海滨木巴戟 <i>Morinda citrifolia</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown

续表 1 Continued

科 Family	属 Genus	种 Species	作用时期 Action period	活性成分 Active component
无患子科 Sapindaceae	莽渔木属 <i>Magonia</i>	<i>Magonia pubescens</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
紫葳科 Bignoniaceae	葫芦树属 <i>Crescentia</i>	叉叶木 <i>Crescentia alata</i>	幼虫 Larva	β -谷甾醇、宁朴素、环烯醚萜苷 β -sitosterol, ningpogenin, iridoid glycoside
芸香科 Rutaceae	芸香属 <i>Ruta</i>	芸香 <i>Ruta graveolens</i>	幼虫 Larva	补骨脂素、2-十一烷酮 Psoralen, 2-undecanone
楝科 Meliaceae	洋椿属 <i>Cedrela</i>	<i>Cedrela salvadorensis</i>	幼虫 Larva	格杜宁、感光蛋白、香柏醇 Gedunin, photogedunin epimeric mixture, cedrelanoide
		<i>Cedrela dugessi</i>	幼虫 Larva	格杜宁、感光蛋白、香柏醇 Gedunin, photogedunin epimeric mixture, cedrelanoide
楝科 Meliaceae	楝属 <i>Melia</i>	<i>Melia abyssinica</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
商陆科 Phytolaccaceae	商陆属 <i>Phytolacca</i>	<i>Phytolacca dodecandra</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
唇形科 Lamiaceae	牡荆属 <i>Vitex</i>	<i>Vitex mollis</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
豆科 Leguminosae	羽扇豆属 <i>Lupinus</i>	<i>Lupinus montanus</i>	幼虫 Larva	羽扇豆碱、鹰爪豆碱、茶碱、 α - 鹰爪豆碱等 Lupanine, sparte- ine, aphylline, α -sparteine etc.
		<i>Lupinus stipulatus</i>	幼虫 Larva	羽扇豆碱、鹰爪豆碱、茶碱、 α - 鹰爪豆碱等 Lupanine, sparte- ine, aphylline, α -sparteine etc.
		<i>Lupinus aschenbornii</i>	幼虫 Larva	羽扇豆碱、鹰爪豆碱、茶碱、 α - 鹰爪豆碱等 Lupanine, sparte- ine, aphylline, α -sparteine etc.
马鞭草科 Verbenaceae	龙至木属 <i>Lippia</i>	<i>Lippia alba</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
		<i>Lippia javanica</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
牻牛儿苗科 Geraniaceae	天竺葵属 <i>Pelargonium</i>	香叶天竺葵 <i>Pelargonium graveolens</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	凹脉鼠尾草 <i>Salvia microphylla</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	棕榈酸、油酸、 γ -谷甾醇、(Z, Z,Z)-9,12,15-十八碳三烯-1- 醇棕榈酸 Oleic acid, γ -sitosterol, (Z,Z, Z)-9,12,15-octadecatrien-1- ol, palmitic acid
苋科 Amaranthaceae	腺毛藜属 <i>Dysphania</i>	土荆芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
夹竹桃科 Apocynaceae	牛角瓜属 <i>Calotropis</i>	金玉桃 <i>Calotropis procera</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
番荔枝科 Annonaceae	番荔枝属 <i>Annona</i>	番荔枝 <i>Annona squamosa</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
天门冬科 Asparagaceae	丝兰属 <i>Yucca</i>	<i>Yucca periculosa</i>	蛹 Pupa	白藜芦醇、3,3,5,5-四羟基-4- 甲氧基二苯乙烯等 Resveratrol, 3,3',5,5'-tetrahy- droxy-4-methoxystilbene etc.
无患子科 Sapindaceae	莽渔木属 <i>Magonia</i>	<i>Magonia pubescens</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
马鞭草科 Verbenaceae	龙至木属 <i>Lippia</i>	<i>Lippia graveolens</i>	成虫 Adult	百里酚、香芹酚 Thymol, carvacrol
漆树科 Anacardiaceae	肖乳香属 <i>Schinus</i>	肖乳香 <i>Schinus molle</i>	/	未知 Unknown
菊科 Asteraceae	藿香蓟属 <i>Ageratum</i>	藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	/	未知 Unknown
	柳菀属 <i>Baccharis</i>	<i>Baccharis genistelloides</i>	/	未知 Unknown

续表 1 Continued

科 Family	属 Genus	种 Species	作用时期 Action period	活性成分 Active component
菊科 Asteraceae	蒿属 <i>Artemisia</i>	南艾蒿 <i>Artemisia verlotiorum</i>	/	未知 Unknown
	伞蟹甲属 <i>Roldana</i>	<i>Roldana barba-johannis</i>	/	Sargachromenol, sargahydroquinoic acid, sargaquinoic acid
伞形科 Apiaceae	铁鸪菊属 <i>Vernonia</i>	<i>Vernonia holosenicea</i>	/	未知 Unknown
	茴香属 <i>Foeniculum</i>	茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	/	未知 Unknown
番木瓜科 Caricaceae	番木瓜属 <i>Carica</i>	番木瓜 <i>Carica papaya</i>	/	油酸、棕榈酸、硬脂酸等 Oleic acid, palmitic acid, stearic acid etc.
卫矛科 Celastraceae	牛杞木属 <i>Maytenus</i>	<i>Maytenus disticha</i>	/	1 α , 6 β , 8 α -triacetoxy-dihydro- β -agarofuran
		<i>Maytenus boaria</i>	/	未知 Unknown
旋花科 Convolvulaceae	虎掌藤属 <i>Ipomoea</i>	<i>Ipomoea murucoides</i>	/	未知 Unknown
大戟科 Euphorbiaceae	麻风树属 <i>Jatropha</i>	麻风树 <i>Jatropha curcas</i>	/	未知 Unknown
	大戟属 <i>Euphorbia</i>	一品红 <i>Euphorbia pulcherrima</i>	/	未知 Unknown
唇形科 Lamiaceae	罗勒属 <i>Ocimum</i>	罗勒 <i>Ocimum selloi</i>	/	甲基-胡椒酚 Methyl chavicol
	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>Salvia keerlii</i>	/	未知 Unknown
		<i>Salvia ballotiflora</i>	/	石竹烯氧化物、 β -石竹烯 Caryophyllene oxide, β -caryophyllene
锦葵科 Malvaceae	牡荆属 <i>Vitex</i>	<i>Salvia connivens</i>	/	未知 Unknown
		<i>Vitex polygama</i>	/	类黄酮、鞣酸 Flavonoid, tannin
槭葵科 Meliaceae	锦葵属 <i>Malva</i>	锦葵 <i>Malva cathayensis</i>	/	未知 Unknown
楝科 Meliaceae	帚木属 <i>Trichilia</i>	鸚鵡花 <i>Trichilia pallens</i>	/	未知 Unknown
玉盘桂科 Monimiaceae	解醉茶属 <i>Peumus</i>	解醉茶 <i>Peumus boldus</i>	/	未知 Unknown
桃金娘科 Myrtaceae	桉属 <i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus staigeriana</i>	/	未知 Unknown
		蓝桉 <i>Eucalyptus globulus</i>	/	未知 Unknown
蒜香草科 Petiveriaceae	蒜香草属 <i>Petiveria</i>	蒜香草 <i>Petiveria alliacea</i>	/	未知 Unknown
胡椒科 Piperaceae	胡椒属 <i>Piper</i>	<i>Piper swartzianum</i>	/	棕榈酸、油酸 Palmitic acid, oleic acid
				未知 Unknown
禾本科 Poaceae	香茅属 <i>Cymbopogon</i>	柠檬草 <i>Cymbopogon citratus</i>	/	未知 Unknown
		曲序香茅 <i>Cymbopogon flexuosus</i>	/	柠檬醛 Citral
无患子科 Sapindaceae	牛蒡果属 <i>Talisia</i>	牛蒡果 <i>Talisia esculenta</i>	/	未知 Unknown
	无患子属 <i>Sapindus</i>	无患子 <i>Sapindus saponaria</i>	/	未知 Unknown
茄科 Solanaceae	烟草属 <i>Nicotiana</i>	烟草 <i>Nicotiana tabacum</i>	/	未知 Unknown
番荔枝科 Annonaceae	端心木属 <i>Duguetia</i>	<i>Duguetia lanceolata</i>	/	反细辛脑、2,4,5-三甲氧基苯乙烯 <i>Trans</i> -asarone, 2, 4, 5-trimethoxystyrene
				未知 Unknown
马鞭草科 Verbenaceae	马缨丹属 <i>Lantana</i>	马缨丹 <i>Lantana camara</i>	/	未知 Unknown
姜科 Zingiberaceae	姜属 <i>Zingiber</i>	姜 <i>Zingiber officinale</i>	/	未知 Unknown

3 具亚致死作用的药源植物及其主要活性物质

亚致死作用是针对直接致死作用而言的,是指用药一段时间后,杀虫药剂对存活个体的作用主要表现在害虫生长发育、生殖、生态行为的变化及抗药

性的发展等(王小艺,2004)。因此,杀虫药剂的亚致死作用在害虫防治中发挥着重要作用,有助于协调田间的化学及生物防治,对预测药剂在田间的实际效果意义重大(韩文素等,2011)。研究发现药源植物除了对草地贪夜蛾有直接致死作用外,还有生长发育调节、拒食等多种亚致死作用,这些亚致死作用

涉及草地贪夜蛾的多个生长发育阶段(Govindachari et al., 1995; Vera-Curzio et al., 2009)。

3.1 具生长发育调节作用的药源植物及主要活性成分

一般认为植物源杀虫剂可以干扰害虫正常的内分泌系统,导致其生长发育出现异常,如卵无法孵化、影响幼虫化蛹或蜕皮等,从而达到控制害虫种群的目的(辛正等, 2018)。目前,对草地贪夜蛾具有明显生长调节作用且其主要活性成分已明确的植物有30余种(表2),端心木属的*D. lanceolata*的二氯甲烷浸提物导致草地贪夜蛾幼虫期延长、体重降低,但对成虫没有影响(Alves et al., 2020);印楝素既能干扰草地贪夜蛾卵的胚胎发育(Correa et al., 2013),并可导致幼虫生长发育速率降低、化蛹时间延长(Govindachari et al., 1995); Guedes et al. (2020)报道了胡椒*Piper marginatum*精油及其中的香叶醇也会干扰草地贪夜蛾卵的胚胎发育;豆科香漆豆属的*Copaifera langsdorffii*的叶片、树干、果皮的甲醇提取物会造成草地贪夜蛾卵发育能力下降,其中叶片和果皮的甲醇提取物还会造成卵的气孔和小孔发育畸形(Rioba & Stevenson, 2020);凹脉鼠尾草*S. microphylla*精油会引起草地贪夜蛾幼虫期延长(Romo-Asunción et al., 2016);旋花科番薯属的*Ipomoea murucoides*酒精提取物会造成5龄草地贪夜蛾幼虫重量降低59.6%,幼虫期和蛹期延长,对成虫产卵量也有影响(Vera-Curzio et al., 2009);香茅*C. winterianus*精油能抑制草地贪夜蛾幼虫的生长发育(Silva et al., 2013);罗勒精油会降低草地贪夜蛾蛹重量,延长蛹期(De Menezes et al., 2020)。柠檬桉*Eucalyptus citriodora*叶片的甲醇提取物会导致草地贪夜蛾蛹期缩短,表现出早熟现象(Céspedes-Acuña et al., 2015);龙至木属己烷提取物会使草地贪夜蛾成虫发生形变、出现畸形;橄榄科裂榄属的*B. copallifera*的甲醇提取物和*B. lancifolia*的乙酸乙酯提取物会导致蛹及成虫畸形(Cardenas et al., 2012; Hernández-Carlos & Gamboa-Angulo, 2019);茴香*F. vulgare*、丁香罗勒*O. gratissimum*、桃金娘科桉属的*E. staigeriana*精油能降低草地贪夜蛾蛹重量,延长蛹期,同时缩短产卵期和成虫存活率(Cruz et al., 2016)。

对草地贪夜蛾具有生长发育调节作用的植物源主要活性成分包括:(1)萜类化合物:如仙人掌科龙神柱根和地上部分的甲醇提取物中的青霉素和仙人掌甾醇(Céspedes et al., 2005)、曲序香茅精

油的主要成分单萜柠檬醛(Oliveira et al., 2018)和胡椒精油中的倍半萜烯等(Guedes et al., 2020)。(2)脂肪酸类化合物:如番木瓜*Carica papaya*种子包含的油酸(45.97%)、棕榈酸(24.1%)及硬脂酸(8.52%)和唇形科凹脉鼠尾草中的棕榈酸、油酸及Y-谷甾醇(Pérez-Gutiérrez et al., 2011; Romo-Asunción et al., 2016)等。(3)醇类化合物:如豆科决明属的*Senna crotarioides*的氯仿提取物主要由醛类、脂类、脂肪醇等22种化合物组成,其中脂肪族脂肪醇1-十八烷醇是最主要的化合物,占63.245%(Zavala-Sánchez, 2020)。(4)类黄酮化合物:如菊科蛇黄花属*Gutierrezia microcephala*地上部分的甲醇和正己烷提取物中的5,7,4-三羟基-3,6,8-三甲氧基黄酮等(Calderón et al., 2001)。(5)二苯基乙烯类化合物:如丝兰属*Yucca periculosa*树皮的甲醇提取物中的白藜芦醇和3,3,5,5-四羟基-4-甲氧基二苯乙烯等(Torres et al., 2003)。

目前,已证实许多植物源提取物对草地贪夜蛾具有生长发育调节作用,但尚未鉴定出其中的活性成分,如一品红*Euphorbia pulcherima*叶片提取物可延长草地贪夜蛾幼虫发育历期、降低幼虫和蛹的重量及卵的发育活性(Phambala et al., 2020);金玉桃*Calotropis procera*、凤树*Jatropha curcas*、亚香茅*C. nardus*、番荔枝、莽蓀木属的*Magonia pubescens*等植物提取物会引起草地贪夜蛾蛹重量下降(Rioba & Stevenson, 2020);玉蜀黍属的*Zea diploperennis*的酒精提取物会影响草地贪夜蛾蛹的大小(Farias-Ricera et al., 2003);摄取楝*Melia azedarach*中的毒性物质可造成草地贪夜蛾生长发育延缓、化蛹时间延长、蛹变小或成虫畸形(Bullangpoti et al., 2012)。

3.2 有驱避及拒食作用的药源植物及主要活性成分

驱避作用是指药剂对害虫产生抑制性刺激,影响其对栖息或产卵场所的选择(辛正等, 2018)。报道发现草地贪夜蛾对不同寄主植物的取食和产卵有偏好性,草地贪夜蛾1~4龄幼虫取食偏好性总体表现为玉米>婆婆纳*Veronica polita*>鹅肠菜*Myosoton aquaticum*>泽漆*Euphorbia helioscopia*(李定银等, 2019)。草地贪夜蛾在玉米上的产卵量也最高,显著高于薏米*Coix chinensis*、荞麦*Fagopyrum esculentum*、菜豆*Phaseolus vulgaris*(李定银等, 2019),以及鹅肠菜、泽漆、婆婆纳(姚领等, 2020)。钟永志等(2020)报道了草地贪夜蛾6龄幼虫对芳樟醇具有显著趋性,芳樟醇的氧化产物——氧化芳樟醇对草地贪夜蛾也有引诱作用,氧化芳樟醇是薰衣草、龙眼花等植物中挥发物的主要成分。

表 2 对草地贪夜蛾具生长发育调节作用的药源植物及其主要活性成分

Table 2 Plant species that showed growth regulation activity against *Spodoptera frugiperda*

科 Family	属 Genus	种 Species	作用时期 Action period	活性成分 Active component
菊科 Asteraceae	蛇黄花属 <i>Gutierrezia</i>	<i>Gutierrezia microcephala</i>	蛹 Pupa	5, 7, 4'-三羟基-3, 6, 8-三甲氧基 黄酮、5, 7, 2-三羟基-3, 6, 8, 4', 5'- 五甲氧基异黄酮、5, 7, 2', 4'-四羟 基-3, 6, 8, 5'-四甲氧基异黄酮 5, 7, 4'-trihydroxy-3, 6, 8-trimethoxy- flavone, 5, 7, 2'-trihydroxy-3, 6, 8, 4', 5'-pentamethoxyflavone, 5, 7, 2', 4'-tetrahydroxy-3, 6, 8, 5'-tetra- methoxyflavone
仙人掌科 Cactaceae	龙神柱属 <i>Myrtillocactus</i>	龙神柱 <i>Myrtillocactus geometrizans</i>	蛹 Pupa	青霉素、仙人掌甾醇 Penicoceryl, macdougallin
天门冬科 Asparagaceae	丝兰属 <i>Yucca</i>	<i>Yucca periculosa</i>	幼虫 Larva	白藜芦醇、3, 3, 5, 5-四羟基-4-甲 氧基二苯乙烯 Resveratrol, 3, 3', 5, 5'-tetrahydroxy-4-methoxystilbene
禾本科 Poaceae	香茅属 <i>Cymbopogon</i>	亚香茅 <i>Cymbopogon nardus</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	未知 Unknown
		<i>Cymbopogon winterianus</i>	幼虫 Larva	香茅油 Citronella oil
旋花科 Convolvulaceae	虎掌藤属 <i>Ipomoea</i>	<i>Ipomoea murucoides</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
夹竹桃科 Apocynaceae	牛角瓜属 <i>Calotropis</i>	金玉桃 <i>Calotropis procera</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
番木瓜科 Caricaceae	番木瓜属 <i>Carica</i>	番木瓜 <i>Carica papaya</i>	幼虫 Larva	油酸、棕榈酸、硬脂酸等 Oleic acid, palmitic acid, stearic acid, etc.
大戟科 Euphorbiaceae	蓖麻属 <i>Ricinus</i>	蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	蓖麻油、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、 亚麻酸 Castor oil, linoleic acid, palmitic acid, stearic acid, linolenic acid
	大戟属 <i>Euphorbia</i>	一品红 <i>Euphorbia pulcherrima</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	未知 Unknown
	麻风树属 <i>Jatropha</i>	麻风树 <i>Jatropha curcas</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
无患子科 Sapinduceae	莽渔木属 <i>Magonia</i>	<i>Magonia pubescens</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	未知 Unknown
豆科 Leguminosae	香漆檀属 <i>Copaifera</i>	<i>Copaifera langsdorffii</i>	成虫、卵 Adult, egg	未知 Unknown
	决明属 <i>Senna</i>	<i>Senna crotalarioides</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	1-十八烷醇、脂肪酸等 1-octacosanol, palmitic acid etc
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	<i>Salvia ballotiflora</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	石竹烯氧化物、 β -石竹烯 Caryophyllene oxide, β -caryoph- yllene
		凹脉鼠尾草 <i>Salvia microphylla</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	油酸、 γ -谷甾醇、(Z, Z, Z)-9, 12, 15- 十八碳三烯-1-醇棕榈酸 Oleic acid, γ -sitosterol, (Z, Z, Z)-9, 12, 15-octadecatrien-1-ol, palmitic acid
	罗勒属 <i>Ocimum</i>	丁香罗勒 <i>Ocimum gratissimum</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	柠檬油精、茴香脑、丁香油酚、 α -松萜等 Limonene, (E)-ane- thole, eugenol, α -pinene, etc.
楝科 Meliaceae	楝属 <i>Melia</i>	楝 <i>Melia azedarach</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
	洋椿属 <i>Cedrela</i>	<i>Cedrela salvadorensis</i>	幼虫、蛹、成虫 Larva, pupa, adult	格杜宁、感光蛋白、香柏醇 Gedunin, photogedunin epimeric mixture, cedrelanoid

续表 2 Continued

科 Family	属 Genus	种 Species	作用时期 Action period	活性成分 Active component
楝科 Meliaceae	洋椿属 <i>Cedrela</i>	<i>Cedrela dugessi</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	格杜宁、感光蛋白、香柏醇 Gedunin, photogedunin epimeric mixture, cedrelanoide
		印楝属 <i>Azadirachta</i> 印楝 <i>Azadirachta indica</i>	卵 Egg	印楝素 Azadirachtin
桃金娘科 Myrtaceae	桉属 <i>Eucalyptus</i>	柠檬桉 <i>Eucalyptus citriodora</i>	幼虫 Larva	5,7-二羟基黄酮、毛地黄黄酮、桉树素、桉精、白桦脂酸、齐墩果酸等 Chrysin, luteolin, quercetin, betulinic acid, oleanolic, ursolic acid, etc.
	桉属 <i>Eucalyptus</i>	<i>Eucalyptus staigeriana</i>	蛹、成虫 Pupa, adult	未知 Unknown
伞形科 Apiaceae	茴香属 <i>Foeniculum</i>	茴香 <i>Foeniculum vulgare</i>	蛹、成虫 Pupa, adult	未知 Unknown
胡椒科 Piperaceae	胡椒属 <i>Piper</i>	毛脉树胡椒 <i>Piper hispidum</i>	卵 Egg	未知 Unknown
		边缘胡椒 <i>Piper marginatum</i>	胚胎 embryo	香叶醇 Geraniol
鼠李科 Rhamnaceae	枣属 <i>Zizyphus</i>	<i>Zizyphus joazeiro</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
禾本科 Poaceae	玉蜀黍属 <i>Zea</i>	<i>Zea diploperennis</i>	幼虫 Larva	未知 Unknown
茜草科 Rubiaceae	木巴戟属 <i>Morinda</i>	海滨木巴戟 <i>Morinda citrifolia</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
	九节属 <i>Psychotria</i>	<i>Psychotria deflexa</i>	蛹 Pupa	未知 Unknown
橄榄科 Burseraceae	裂榄属 <i>Bursera</i>	<i>Bursera copallifera</i>	幼虫 Larva	萜类、类黄酮 Terpenoids, flavonoids
		<i>Bursera lancifolia</i>	幼虫 Larva	萜类、类黄酮 Terpenoids, flavonoids
番荔枝科 Annonaceae	端心木属 <i>Duguetia</i>	<i>Duguetia lanceolata</i>	幼虫 Larva	反细辛脑、2,4,5-三甲氧基苯乙烯 <i>Trans</i> -asarone, 2, 4, 5-trimethoxy-styrene
	番荔枝属 <i>Annona</i>	米糕果 <i>Annona mucosa</i>	幼虫、蛹 Larva, pupa	未知 Unknown

拒食作用是指药剂中的活性成分直接或间接地抑制了害虫的味觉感受功能,影响昆虫对嗜好食物的识别,使其找不到食物或憎恶食物,直至饥饿死亡(辛正等,2018)。对于草地贪夜蛾具有拒食活性的植物提取物较多,主要拒食活性成分包括以下几种(表3), (1)萜类:如0.3%印楝素乳油处理后3 d, 2龄和3龄草地贪夜蛾幼虫的拒食中浓度(median anti-feeding concentration, AFC₅₀)分别为0.30 mg/L和0.12 mg/L(林素坤等,2020),且印楝素的拒食作用明显高于烟草和龙至木属的*L. javanica*等植物(Phambalaet al., 2020);鹰爪藤属的*Dolichandra cynanchoides*中天然蜡质二十七酸二十烷酯对草地贪夜蛾的取食有抑制作用(Díaz et al., 2016);柑橘中的柠檬苦素(Ruberto et al., 2002)和植物精油中常见的单萜芳樟醇、侧柏酮、柠檬油精、香叶醛都具有拒食作用(Cruz et al., 2016);千里光*Senecio salignus*提取物中的 γ -谷甾醇(Romo-Asunción et al., 2016)、万寿菊精油中的柠檬烯、罗勒烯、松萜等(Salinas-

Sánchez et al., 2012)等对草地贪夜蛾的拒食活性明显。(2)黄酮类:如柠檬桉叶片甲醇提取物中包含的5,7-二羟基黄酮、毛地黄黄酮、类黄酮等对草地贪夜蛾有拒食作用(Cespedes-Acuña et al., 2015)。(3)醇类:如霹雳果属的*Rollinia emarginata*的酒精提取物对草地贪夜蛾幼虫有较强的拒食作用,其中的活性成分包括吐叶醇、去氢吐叶醇等(Colom et al., 2007);万寿菊精油中的香叶醇(Salinas-Sánchez et al., 2012)和千里光中的羽扇豆醇(Romo-Asunción et al., 2016)对草地贪夜蛾拒食作用明显。此外,毒鼠豆*Gliricidia sepium*中的苯丙烷类物质香豆素(Dougoud et al., 2019)、千里光中的脂肪酸类物质棕榈酸(Romo-Asunción et al., 2016)、端心木属的*D. lanceolata*中的反细辛脑和2,4,5-三甲氧基苯乙烯(Alves et al., 2020)都对草地贪夜蛾具有拒食作用。

辣木精油对草地贪夜蛾也具有拒食作用(Kamel, 2010)。目前尚未鉴定出活性物质的拒食植物

还有凹脉鼠尾草、麻风树属 *J. gossypifolia* 和楝等 (Bullangpoti et al.,2012)。

表3 对草地贪夜蛾具拒食作用的药源植物及其主要活性成分
Table 3 Plant species that showed antifeeding activity against *Spodoptera frugiperda*

科 Family	属 Genus	种 Species	活性成分 Active component
菊科 Asteraceae	千里光属 <i>Senecio</i>	<i>Senecio salignus</i>	γ -谷甾醇、羽扇豆醇、 β -香脂素、棕榈酸 γ -sitosterol, lupeol, β -amyrin, palmitic acid
	万寿菊属 <i>Tagetes</i>	万寿菊 <i>Tagetes erecta</i>	柠檬烯、沉香醇、 α -松萜、香叶醇等 Limonene, linalool, α -pinene, geranoil, etc.
	滨菊属 <i>Leucanthemum</i>	滨菊 <i>Leucanthemum vulgare</i>	未知 Unknown
大戟科 Euphorbiaceae	麻风树属 <i>Jatropha</i>	棉叶珊瑚花 <i>Jatropha gossypifolia</i>	未知 Unknown
楝科 Meliaceae	印楝属 <i>Azadirachta</i>	印楝 <i>Azadirachta indica</i>	印楝素 Azadirachtin
	楝属 <i>Melia</i>	楝 <i>Melia azedarach</i>	未知 Unknown
桃金娘科 Myrtaceae	桉属 <i>Eucalyptus</i>	柠檬桉 <i>Eucalyptus citriodora</i>	5,7-二羟黄酮、毛地黄黄酮、桉树素、桉精、 白桦脂酸、齐墩果酸等 Chrysin, luteolin, quercetin, betulinic acid, oleanolic, ursolic acid, etc.
马鞭草科 Verbenaceae	龙至木属 <i>Lippia</i>	<i>Lippia javanica</i>	未知 Unknown
茄科 Solanaceae	烟草属 <i>Nicotiana</i>	烟草 <i>Nicotiana tabacum</i>	未知 Unknown
辣木科 Moringaceae	辣木属 <i>Moringa</i>	辣木 <i>Moringa oleifera</i>	未知 Unknown
芸香科 Rutaceae	柑橘属 <i>Citrus</i>	柠檬 <i>Citrus limon</i>	柠檬苦素、诺米林等 Limonoids limonin, nomilin, etc.
紫葳科 Bignoniaceae	鹰爪藤属 <i>Dolichandra</i>	<i>Dolichandra cynanchoides</i>	二十七酸二十烷酯 Pentacosyl heptacosanoate
	端心木属 <i>Duguetia</i>	<i>Duguetia lanceolata</i>	反细辛脑、2,4,5-三甲氧基苯乙烯 Trans-asarone, 2,4,5-trimethoxystyrene
	霹雳果属 <i>Rollinia</i>	<i>Rollinia emarginata</i>	吐叶醇、去氢吐叶醇、布卢门醇、黑麦草内 酯、7-黑麦草素、香草醛、异榄香脂素 Vomifoliol, dehydrovomifoliol, blumenol C, loliolide, 7-epiloliolide, vanillin, isoelemicin
唇形科 Lamiaceae	鼠尾草属 <i>Salvia</i>	凹脉鼠尾草 <i>Salvia microphylla</i>	未知 Unknown
禾本科 Poaceae	香茅属 <i>Cymbopogon</i>	柠檬草 <i>Cymbopogon citratus</i>	未知 Unknown
豆科 Leguminosae	毒鼠豆属 <i>Gliricidia</i>	毒鼠豆 <i>Gliricidia sepium</i>	香豆素 Coumarins

3.3 具抑制细胞增殖的药源植物及主要活性成分

研究表明,多种生物碱对草地贪夜蛾细胞系具有抑制作用,如东北天南星 *Arisaema amurense* 生物总碱能抑制草地贪夜蛾 Sf21 细胞增殖,并诱导细胞凋亡(刘丽华等,2020);20 μ g/mL 骆驼蓬 *Peganum harmala* 总碱对草地贪夜蛾卵巢细胞系 Sf9 有明显的毒杀活性(李金梅等,2017);喜树碱和羟基喜树碱对草地贪夜蛾 Sf9 细胞增殖具有较好的抑制作用(杨菁菁等,2013),而乌头碱、次乌头碱、伪石榴皮碱、马钱子碱和吴茱萸碱对草地贪夜蛾 Sf9 细胞也具有一定毒性,但不具有明显的剂量效应(杨菁菁等,2013);印楝素和鱼藤酮对草地贪夜蛾 Sf9 细胞增殖也具有较好的抑制作用,处理

12 h 后对细胞的抑制作用最强(杨菁菁等,2013);海芋凝集素对草地贪夜蛾 Sf9 细胞也具有较强的毒杀作用(潘科等,2007);姜黄 *Curcuma longa* 中的姜黄色素对草地贪夜蛾 Sf9 细胞具有毒性,造成 Sf9 细胞的自我吞噬作用和核吞噬作用(Veeran et al.,2019)。

3.4 具增效作用的药源植物及主要活性成分

植物提取物除了直接影响靶标害虫外,还可与其它植物提取物或杀虫剂混配,起到一定的增效作用(辛正等,2018)。目前,在草地贪夜蛾防治上,植物源农药及植物提取物的应用十分有限,关于其增效作用的研究较少(赵胜园等,2019)。麻风树属的 *J. gossypifolia* 和楝的酒精提取物对草地贪夜蛾幼虫

的直接毒杀效果不太理想,但这2种物质对氯氰菊酯有增效作用且成本较低,主要通过抑制草地贪夜蛾体内的解毒酶和乙酰胆碱酯酶活性,对农药起到增效作用,有较大的应用潜力(Bullangpoti et al., 2012)。辣木科辣木精油中可皂化和非皂化组分对草地贪夜蛾具有协同增效拒食作用(Kamel, 2010)。此外,很多植物中包含的反-茴香脑与香茅醛、 α -松油烯和百里香酚等化合物之间也有增效作用,能提高对草地贪夜蛾的拒食活性(Cruz et al., 2016)。

4 常见植物源药剂对草地贪夜蛾的防治效果

目前,对草地贪夜蛾有防治效果的常见植物源药剂主要包括0.3%印楝素乳油、0.5%苦参碱水剂、1%苦皮藤素乳油、6%鱼藤酮微乳剂、0.5%藜芦碱乳油、1.5%除虫菊素水乳剂等。其中1%苦皮藤素乳油对草地贪夜蛾初孵幼虫、3龄、5龄幼虫的毒杀效果均较好,0.5%苦参碱水剂仅对其初孵幼虫有明显毒杀活性(Zanardiet al., 2015);6%鱼藤酮微乳剂及0.5%藜芦碱乳油对其卵及各龄幼虫的毒杀活性均不明显(赵胜园等, 2019)。赵胜园等(2019)和鲁艳辉等(2019)的研究结果表明0.3%印楝素乳油对草地贪夜蛾卵和3龄幼虫的毒杀活性不明显,但Tavares et al.(2010)报道了印楝油对4~6日龄草地贪夜蛾幼虫的致死率可达80%;Sisay et al.(2019)发现草地贪夜蛾幼虫取食喷施了印楝种子水提物的玉米叶片72 h后,其死亡率高达98.3%。印楝素对草地贪夜蛾的天敌昆虫南美洲瓢虫*Eriopis corlnexa*的毒性较低,在巴西已被推荐用于草地贪夜蛾的防控。不同研究发现印楝素乳油及印楝提取物对草地贪夜蛾防治效果不同,可能主要与其有效成分的差异有关(赵胜园等, 2019)。

5 展望

植物源药剂的开发和应用是替代化学农药来控制病虫害,解决农药残留超标、次要害虫再猖獗、害虫抗药性增强及环境污染等的最有效手段之一。全球可作为植物源农药应用的植物有2 000多种,我国有1 000多种,而且数字还在增加;我国大多数植物源农药都是从医用中草药中发掘而来,但是目前植物源农药品种少,企业生产量低,且产量有起伏变化,其销售多为局部市场,仅鱼藤酮、苦参碱、烟碱等

被作为农药进行登记生产,而且大都是与化学合成农药混配施用,丧失了植物源杀虫剂的绿色环保优势,并且存在药源植物原料来源短缺、活性物质不稳定等问题。因此,开发天然、稳定及原材料充足的农用生物制剂日益迫切。

目前已报道的对草地贪夜蛾有防治效果的植物提取物只有几十种,被揭示的主要活性成分也只有萜类、类黄酮、二苯基乙烯类、脂肪酸、生物碱类等几十个,同时也面临着大量药用植物中杀虫活性物质不明确、易分解、原材料不足、登记产品少等问题,因此急需进一步开展以下方面的研究:第一,筛选对草地贪夜蛾有稳定防治效果的药源植物并鉴定其主要的防虫活性成分;第二,开展增加和改善活性物质稳定性方面的研究,如加入稳定剂或在其分子内部用耐光部分代替对光不稳定部分等;第三,科学系统地评价这些活性成分对草地贪夜蛾的田间防治效果及其对非靶标生物的影响,与化学农药对比防治效果及成本;第四,研发高效制剂,优化生产工艺,扩大生产规模,为草地贪夜蛾的绿色防控提供新技术。

参 考 文 献 (References)

- ALVES DS, COSTA VA, MACHADO ART, OLIVEIRA DF, CARVALHO GA. 2020. *Duguetia lanceolata* A. St. Hil. Stem bark produces phenylpropanoids lethal to *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Crop Protection*, 127: 104965
- AYIL-GUTIÉRREZ B, VILLEGAS-MENDOZA JM, SANTES-HERNANDEZ Z, PAZ-GONZÁLEZ A, MIRELES-MARTINEZ M, ROSAS-GARCIA N, RIVERA G. 2015. *Ruta graveolens* extracts and metabolites against *Spodoptera frugiperda*. *Natural Product Communications*, 10(11): 1955–1958
- BERMÚDEZ-TORRES K, HERRERA JM, BRITO RF, LEGAL L. 2009. Activity of quinolizidine alkaloids from three Mexican *Lupinus* against the lepidopteran crop pest *Spodoptera frugiperda*. *Bio-Control*, 54(3): 459–466
- BULLANGPOTI V, WAJNBURG E, AUDANT P, FEYEREISEN R. 2012. Antifeedant activity of *Jatropha gossypifolia* and *Melia azedarach* senescent leaf extracts on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and their potential use as synergists. *Pest Management Science*, 68(9): 1255–1264
- CALDERÓN JS, CÉSPEDES CL, ROSAS R, GÓMEZ-GARIBAY F, SALAZAR JR, LINA L, ARANDA E, KUBO I. 2001. Acetylcholinesterase and insect growth inhibitory activities of *Gutierrezia microcephala* on fall army worm *Spodoptera frugiperda* JE Smith. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 56(5/6): 382–394
- CARDENAS R, REGUERA SJ, LLANOS-ROMERO E, AGUIRRE-

- HERNANDEZ E, HERRERA-SANTOYO J, ZUNIGA B, RODARTE B, ALBA-LOIS L, GUEVARA-FEFER P. 2012. Effects of organic extracts of *Bursera copallifera* and *B. lancifolia* leaves in the development of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Entomology*, 9(2): 115–122
- CÉSPEDES CL, SALAZAR JR, MARTÍNEZ M, ARANDA E. 2005. Insect growth regulatory effects of some extracts and sterols from *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae) against *Spodoptera frugiperda* and *Tenebrio molitor*. *Phytochemistry*, 66(20): 2481–2493
- CESPEDES-ACUÑA CL, SALAZAR JR, MORALES PT, SERRATO B, DOMINGUEZ M, ALARCON J. 2015. Insect growth regulator (IGR) effects of *Eucalyptus citriodora* Hook (Myrtaceae). *Boletín latinoamericano y del Caribe de plantas medicinales y aromáticas*, 14(5): 403–422
- COLOM OA, POPICH S, BARDON A. 2007. Bioactive constituents from *Rollinia emarginata* (Annonaceae). *Natural Product Research*, 21(3): 254–259
- CORREIA AA, WANDERLEY-TEIXEIRA V, TEIXEIRA ÁA, OLIVEIRA JV, GONÇALVES GG, CAVALCANTI MG. 2013. Microscopic analysis of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) embryonic development before and after treatment with azadirachtin, lufenuron, and deltamethrin. *Journal of Economic Entomology*, 106(2): 747–755
- CRUZ GS, WANDERLEY-TEIXEIRA V, OLIVEIRA JV, LOPES FSC, BARBOSA DRS, BREDA MO, DUTRA KA, GUEDES CA, NAVARRO DMAF, TEIXEIRA AAC. 2016. Sublethal effects of essential oils from *Eucalyptus staigeriana* (Myrtales: Myrtaceae), *Ocimum gratissimum* (Lamiales: Lamiaceae), and *Foeniculum vulgare* (Apiales: Apiaceae) on the biology of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(2): 660–666
- DE MENEZES CWG, CARVALHO GA, ALVES DS, DE CARVALHO AA, AAZZA S, DE OLIVEIRA RAMO V, PINTO JEBP, BERTOLUCCI SK. 2020. Biocontrol potential of methyl chavicol for managing *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), an important corn pest. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(5): 5030–5041
- DÍAZ NG, CARPINELLA MC, PALACIOS SM. 2016. Insecticidal properties of a highly potent wax isolated from *Dolichandra cynanchoides* Cham. *Molecules*, 21(8): 1039
- DOUGOUD J, TOEPFER S, BATEMAN M, JENNER WH. 2019. Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4): 37
- FARIAS-RIVERA LA, HERNANDEZ-MENDOZA JL, MOLINA-OCHOA J, PESCADOR-RUBIO A. 2003. Effect of leaf extracts of teosinte, *Zea diploperennis* L., and a Mexican maize variety, criollo ‘Uruapeño’, on the growth and survival of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomologist*, 86(3): 239–243
- GOVINDACHARI TR, NARASIMHAN NS, SURESH G, PARTHO PD, GOPALAKRISHNAN G, KUMARI GNK. 1995. Structure-related insect antifeedant and growth regulating activities of some limonoids. *Journal of Chemical Ecology*, 21(10): 1585–1600
- GUEDES CA, TEIXEIRA VW, DUTRA KA, NAVARRO DMAF, CRUZ GS, LAPA NC, CORREIA AA, SANDES JM, BRAYNER FA, ALVES LC, et al. 2020. Evaluation of *Piper marginatum* (Piperales: Piperaceae) oil and geraniol on the embryonic development of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in comparison to formulated products. *Journal of Economic Entomology*, 113(1): 239–248
- GUERRERO A, MALO EA, COLL J, QUERO C. 2014. Semiochemical and natural product-based approaches to control *Spodoptera* spp. (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Pest Science*, 87(2): 231–247
- GUEVARA P, REYNA-SEGURA J, ZUÑIGA-RUIZ B, LLANOS-ROMERO RE, ANDRÉS-YEVES MF, BARAJAS-GUZMÁN MG, ECHEVERRI F, LEÓN-RIVERA I. 2018. Biocidal effect of a hexane-soluble extract of *Lippia graveolens* Kunth (Verbenaceae). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 1(17): 342–349
- HAN WS, WANG LH, SUN HH, GAO XW. 2011. Research progress on sublethal effects of insecticides on insect. *China Plant Protection*, 31(11): 15–19 (in Chinese) [韩文素, 王丽红, 孙姗姗, 高希武. 2011. 杀虫剂对昆虫的亚致死效应的研究进展. *中国植保导刊*, 31(11): 15–19]
- HERNÁNDEZ-CARLOS B, GAMBOA-ANGULO M. 2019. Insecticidal and nematocidal contributions of Mexican flora in the search for safer biopesticides. *Molecules*, 24(5): 897
- KAMEL AM. 2010. Can we use the moringa oil as botanical insecticide against *Spodoptera frugiperda*? *Academic Journal of Entomology*, 3(2): 59–64
- LI DY, ZHI JR, ZHANG T, YE JQ, YU YC, HU CX. 2019. Preference of *Spodoptera frugiperda* to four host plants. *Plant Protection*, 45(6): 50–54 (in Chinese) [李定银, 郅军锐, 张涛, 叶佳琴, 禹云超, 胡朝兴. 2019. 草地贪夜蛾对4种寄主植物的偏好性. *植物保护*, 45(6): 50–54]
- LI JM, MU K, JIANG SL, LI DK, LI WY, MA TF, LI YM. 2017. Toxicity effects of total alkaloids of *Peganum harmala* against *in vitro* cultured Sf9 cells and larvae blood corpuscles of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Northeast A&F University (Natural Science Edition)*, 45(4): 127–133 (in Chinese) [李金梅, 木魁, 姜双林, 李登坤, 李文雍, 马同富, 李永民. 2017. 骆驼蓬总碱对草地贪夜蛾离体细胞系和幼虫血细胞的毒性作用. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 45(4): 127–133]
- LIN SK, LIU KH, WANG RF, LIU BJ, ZHANG Y, WU JYZ, CHENG DM, XU HH, ZHANG ZX. 2020. Indoor toxicity of azadirachtin of *Spodoptera frugiperda* and its control effect in field. *Journal of South China Agricultural University*, 41(1): 22–27 (in Chinese) [林素坤, 刘凯鸿, 王瑞飞, 刘本菊, 张悦, 吴吉英子, 程东美, 徐汉

- 虹, 张志祥. 2020. 印楝素对草地贪夜蛾的毒力测定及田间防效. 华南农业大学学报, 41(1): 22–27]
- LIU LH, YU Y, BAI Y, LIU YH, YU KG, DING N. 2020. Effect of *Arisaema amurense* alkaloids on apoptosis of *Spodoptera frugiperda* cell (Sf 21). Journal of Tonghua Teachers College, 41(2): 9–12 (in Chinese) [刘丽华, 于洋, 白岩, 刘业辉, 于凯歌, 丁宁. 2020. 东北天南星生物碱对草地贪夜蛾 Sf 21 细胞凋亡的影响. 通化师范学院学报, 41(2): 9–12]
- LU YH, TIAN JC, ZHENG XS, XU HX, YANG YJ, YANG TY, SHI ZY, LÜ ZX. 2019. Laboratory toxicity of 26 insecticides against different instar larvae of *Spodoptera frugiperda*. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 31(12): 2049–2056 (in Chinese) [鲁艳辉, 田俊策, 郑许松, 徐红星, 杨亚军, 杨太源, 石兆云, 吕仲贤. 2019. 二十六种杀虫剂对不同龄期草地贪夜蛾幼虫的室内毒力. 浙江农业学报, 31(12): 2049–2056]
- MONTEZANO DG, SPECHT A, SOSA-GÓMEZ DR, ROQUE-SPECHT VF, SOUSA-SILVA JC, PAULA-MORAES SV, PETERSON JA, HUNT TE. 2018. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. African Entomology, 26(2): 286–300
- OLIVEIRA ER, ALVES DS, CARVALHO GA, DE OLIVEIRA BM-RG, SMAIL A, BERTOLUCCI SK. 2018. Toxicity of *Cymbopogon flexuosus* essential oil and citral for *Spodoptera frugiperda*. Ciência e Agrotecnologia, 42(4): 408–419
- PAN K, HUANG BQ, HOU XW. 2007. Purification of a lectin from *Alocasia macrorrhiza* and its toxic effect on four cultured insect cell line. Journal of Anhui Agricultural Science, 35(18): 5484–5485, 5495 (in Chinese) [潘科, 黄炳球, 侯学文. 2007. 海芋凝集素的纯化及其对4种昆虫细胞的毒杀作用. 安徽农业科学, 35(18): 5484–5485, 5495]
- PÉREZ-GUTIÉRREZ S, ZAVALA-SÁNCHEZ MA, GONZÁLEZ-CHÁVEZ MM, CÁRDENAS-ORTEGA NC, RAMOS-LÓPEZ MA. 2011. Bioactivity of *Carica papaya* (Caricaceae) against *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Molecules, 16(9): 7502–7059
- PHAMBALA K, TEMBO Y, KASAMBALA T, KABAMBE VH, STEVENSON PC, BELMAIN SR. 2020. Bioactivity of common pesticidal plants on fall armyworm larvae (*Spodoptera frugiperda*). Plants, 9(1): 112
- RIOBA NB, STEVENSON PC. 2020. Opportunities and scope for botanical extracts and products for the management of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) for smallholders in Africa. Plants, 9(2): 207
- RODRÍGUEZ-LÓPEZ V, FIGUEROA-SUÁREZ MZ, RODRÍGUEZ T, ARANDA E. 2007. Insecticidal activity of *Vitex mollis*. Fitoterapia, 78(1): 37–39
- ROMO-ASUNCIÓN DM, ÁVILA-CALDERÓN MA, RAMOS-LÓPEZ MA, BARRANCO-FLORIDO JE, RODRÍGUEZ-NAVARRO S, ROMERO-GOMEZ S, ALDECO-PÉREZ EJ, PACHECO-AGUILAR JR, RICO-RODRÍGUEZ MA. 2016. Juvenomimetic and insecticidal activities of *Senecio saliginus* (Asteraceae) and *Salvia mycrophylla* (Lamiaceae) on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Florida Entomologist, 99(3): 345–351
- RUBERTO G, RENDA A, TRINGALI C, NAPOLI EM, SIMMONDS MS. 2002. *Citrus limonoids* and their semisynthetic derivatives as antifeedant agents against *Spodoptera frugiperda* larvae. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(23): 6766–6774
- SALINAS-SÁNCHEZ OD, ALDANA-LLANOS L, VALDÉS-ESTRADA ME, GUTIÉRREZ-OCHOA M, VALLADARES-CISNEROS G, RODRÍGUEZ-FLORES E. 2012. Insecticidal activity of *Tagetes erecta* extracts on *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Florida Entomologist, 95(2): 428–432
- SILVA G, RODRÍGUEZ JC, BLANCO CA, LAGUNES A. 2013. Bioactivity of a water extract of boldus (*Peumus boldus* Molina) against *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) and *Helicoverpa zea* Boddie (Lepidoptera: Noctuidae). Chilean Journal of Agricultural Research, 73(2): 135–141
- SISAY B, TEFERA T, WAKGARI M, AYALEW G, MENDESIL E. 2019. The efficacy of selected synthetic insecticides and botanicals against fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, in maize. Insects, 10(2): 45
- SOSA A, DIAZ M, SALVATORE A, BARDON A, BORKOSKY S, VERA N. 2019. Insecticidal effects of *Vernonanthurus nebularum* against two economically important pest insects. Saudi Journal of Biological Sciences, 26(5): 881–889
- TAVARES WS, COSTA MA, CRUZ I, SILVEIRA RD, SERRÃO JE, ZANUNCIO JC. 2010. Selective effects of natural and synthetic insecticides on mortality of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its predator *Eriopis connexa* (Coleoptera: Coccinellidae). Journal of Environmental Science and Health: Part B, 45(6): 557–561
- TORRES P, AVILA JG, DE VIVAR RA, GARCÍA AM, MARIN JC, ARANDA E, CÉSPEDES CL. 2003. Antioxidant and insect growth regulatory activities of stilbenes and extracts from *Yucca periculosa*. Phytochemistry, 64(2): 463–473
- VALLADARES-CISNEROS MG, RIOS-GOMEZ MY, ALDANA-LLANOS L, VALDES-ESTRADA MAE, OCHOA MG. 2014. Biological activity of *Crescentia alata* (Lamiales: Bignoniaceae) fractions on larvae of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Florida Entomologist, 97(2): 770–777
- VEERAN S, CUI GF, SHU BS, YI X, ZHONG GH. 2019. Curcumin-induced autophagy and nucleophagy in *Spodoptera frugiperda* Sf9 insect cells occur via PI3K/AKT/TOR pathways. Journal of Cellular Biochemistry, 120(2): 2119–2137
- VERA-CURZIO LG, HERNÁNDEZ-VELÁZQUEZ VM, LEÓN-RIVERA I, GUEVARA-FEFER P, ARANDA-ESCOBAR E. 2009. Biological activity of methanolic extracts of *Ipomoea murucoides* Roem et Schult on *Spodoptera frugiperda* JE Smith. Journal of Entomology, 6(2): 109–116

- WANG XY. 2004. Sublethal effects of insecticides on insect. World Pesticides, 26(3): 24–27 (in Chinese) [王小艺. 2004. 杀虫剂对昆虫的亚致死效应. 世界农药, 26(3): 24–27]
- WU C, ZHANG L, LIAO CY, WU KM, XIAO YT. 2019. Research progress of resistance mechanism and management techniques of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* to insecticides and Bt crops. Journal of Plant Protection, 46(3): 503–513 (in Chinese) [吴超, 张磊, 廖重宇, 吴孔明, 萧玉涛. 2019. 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. 植物保护学报, 46(3): 503–513]
- WU KM. 2020. Management strategies of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in China. Plant Protection, 46(2): 1–5 (in Chinese) [吴孔明. 2020. 中国草地贪夜蛾的防控策略. 植物保护, 46(2): 1–5]
- XIN Z, WANG D, ZHANG X, WANG YM, LIU HY. 2018. Review on current development and prospect of botanical hygienic insecticides. Capital Journal of Public Health, 12(1): 13–17 (in Chinese) [辛正, 王东, 张晓, 王永明, 刘慧媛. 2018. 植物源卫生杀虫剂开发利用与前景展望. 首都公共卫生, 12(1): 13–17]
- YANG JJ, JIANG HY, ZHANG L, SHEN BB. 2013. Cytotoxicity determination of several plant-derived compounds against insect cells. Plant Protection, 39(2): 112–116 (in Chinese) [杨菁菁, 蒋红云, 张兰, 沈斌斌. 2013. 几种植物源活性物质对昆虫细胞的毒力测定. 植物保护, 39(2): 112–116]
- YAO L, FANG M, LI XM, LI GT, TANG QF. 2020. Oviposition and feeding selectivity of *Spodoptera frugiperda* to three weeds. Plant Protection, 46(4): 181–184 (in Chinese) [姚领, 房敏, 李晓萌, 李桂亭, 唐庆峰. 2020. 草地贪夜蛾对三种杂草的产卵和取食选择性. 植物保护, 46(4): 181–184]
- ZANARDI OZ, RIBEIRO LDP, ANSANTE TF, SANTOS MS, BORDINI GP, YAMAMOTO PT, VENDRAMIM JD. 2015. Bioactivity of a matrine-based biopesticide against four pest species of agricultural importance. Crop Protection, 67: 160–167
- ZAVALA-SÁNCHEZ MÁ, RODRÍGUEZ-CHÁVEZ JL, FIGUEROA-BRITO R, QUINTANA-LÓPEZ CM, BAH MM, CAMPOS-GUILLÉN J, BUSTOS-MARTÍNEZ JA, ZAMORA-AVELLA D, RAMOS-LÓPEZ MA. 2020. Bioactivity of 1-octacosanol from *Senna crotalarioides* (Fabaceae: Caesalpinioideae) to control *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). Florida Entomologist, 102(4): 731–737
- ZHAO SY, YANG XM, SUN XX, ZHANG HW, ZHANG S, WU KM. 2019. Laboratory control efficacy of commonly-used bioinsecticides against *Spodoptera frugiperda*. Plant Protection, 45(3): 21–26 (in Chinese) [赵胜园, 杨现明, 孙小旭, 张浩文, 张生, 吴孔明. 2019. 常用生物农药对草地贪夜蛾的室内防效. 植物保护, 45(3): 21–26]
- ZHONG YZ, XIE MH, LIN LL, ZHANG GL, XU LN, WANG ZY, ZHANG JP, ZHANG F, SU WH, CHEN HL, et al. 2020. Orientational response of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) to linalool oxide. Plant Protection, 46(4): 178–180 (in Chinese) [钟永志, 谢明惠, 林璐璐, 张光玲, 徐丽娜, 王振营, 张金平, 张峰, 苏卫华, 等. 2020. 草地贪夜蛾对氧化芳樟醇的趋性. 植物保护, 46(4): 178–180]

(责任编辑:王璇)