

◆ 开发与分析 ◆

新型斜纹夜蛾性信息素类似物的合成及活性研究

李璐¹, 尹姣¹, 王志敏¹, 丁万隆¹, 陈静², 宁君¹, 刘明¹, 折冬梅^{1*}, 梅向东^{1*}

(1. 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 2. 北京红泥乐现代农业有限公司, 北京 102200)

摘要:昆虫性信息素在害虫的生物防治中具有用量少, 防效良好, 对天敌无害等特点, 有助于减少化学农药的使用。本文以性信息素前体醇为原料, 设计并合成了4种结构新颖的斜纹夜蛾性信息素类似物, 包括反-11-十四碳烯丙酸酯、反-11-十四碳烯-2-氯乙酸酯, 反-9-十四碳烯-3-甲硫基丙酸酯和反-9-十四碳烯-2, 2-二氟乙酸酯。其结构经核磁共振(NMR)、红外(IR)和高分辨质谱(HR-MS)确证。触角电生理试验(EAG)初步测试结果显示, 4种性信息素类似物对斜纹夜蛾均具有一定的活性。

关键词:斜纹夜蛾; 性信息素类似物; 合成; 生物活性; 诱控

中图分类号: TQ 453 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1671-5284.2025.04.008

Synthesis and preliminary activity of novel sex pheromone analogs of *Spodoptera litura*

LI Lu¹, YIN Jiao¹, WANG Zhimin¹, DING Wanlong¹, CHEN Jing², NING Jun¹, LIU Ming¹, SHE Dongmei^{1*}, MEI Xiangdong^{1*}

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Beijing Hongni Le Modern Agriculture Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Insect sex pheromones have the characteristics of low dosage, good control effect, and harmless to natural enemies in the biological control of pests. They help to reduce the use of chemical pesticides. In this article, four structurally novel pheromone analogs were designed and synthesized, using sex pheromone precursor alcohols as raw materials, including trans-11-tetradecenepropionate, trans-11-tetradecene-2-chloroacetate, trans-9-tetradecene-3-methylthiopropionate, and trans-9-tetradecene-2,2-difluoroacetate. Their structures were characterized by NMR, IR and HR-MS. The results of the antennae electrophysiological test (EAG) showed that the four pheromone analogs all had certain activities against *Spodoptera litura* Fabricius.

Key words: *Spodoptera litura* Fabricius; sex pheromone analog; synthesis; bioactivity; inducement and control

斜纹夜蛾 (*Spodoptera litura* Fabricius) 隶属于鳞翅目夜蛾科, 其幼虫对农作物造成损害, 且具有杂食性以及暴食性的特点^[1-2]。其分布范围广泛, 在东北亚、美洲、东南亚、非洲等多个地区均有发生, 特别是在日本西南部、北非热带及亚热带区域, 斜纹夜蛾所造成的危害尤为严重。在中国, 斜纹夜蛾在各个耕作区均有分布, 尤其是长江中下游流域以及东部沿海诸多省份, 斜纹夜蛾经常发生且危害较为严重^[3]。长期以来, 人们主要依靠农药对斜纹夜蛾

进行化学防治, 其抗药性逐渐增强, 且化学防治会对人类健康和环境安全产生威胁, 因此应用受到限制^[4]。昆虫性信息素是一种化学信号, 它能够在昆虫个体与同一物种的其他成员间起到通讯的作用^[5]。相较于化学农药, 昆虫性信息素用量少, 灵敏度较高, 防治效果较为理想, 且不会对天敌造成伤害, 对生态环境友好。目前, 昆虫性信息素已广泛应用于虫情监测、干扰交配、害虫检疫及大量诱杀等方面, 成为害虫综合治理 (IPM) 的关键工具。

收稿日期: 2025-01-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFE0116500) 山东省科技型中小企业创新能力提升项目 (2022TSGC2293)

作者简介: 李璐 (2000—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 主要从事化学调控昆虫行为研究。E-mail: 1010278346@qq.com

通信作者: 折冬梅, 博士, 副研究员, 主要从事化学调控昆虫行为研究。E-mail: zdongmeishe@163.com

共同通信作者: 梅向东, 博士, 副研究员, 主要从事化学调控昆虫行为研究。E-mail: xdmei@ippcaas.cn

德国化学家阿道夫·布特南特在1959年首次从家蚕(*Bombyx mori*)雌蛾中分离并鉴定出其性信息素,命名为蚕蛾醇(bombykol)。目前,全球已鉴定出2 000多种昆虫性信息素,其中蛾类昆虫有700多种^[6]。斜纹夜蛾性信息素的相关研究开始时间相对较晚,1974年,Tamaki等科学家率先从日本种群斜纹夜蛾的雌蛾腹末粗提物中成功分离并鉴定出4种化合物。它们分别是:(顺,反)-9,11-十四碳二烯乙酸酯(A)、(顺,反)-9,12-十四碳二烯乙酸酯(B)、顺-9-十四碳烯乙酸酯(C)、反-11-十四碳烯乙酸酯(D)^[7-8]。Kawasaki^[9]经过后续深入的研究发现,在这些性信息素组分中,A组分是主要活性物质,对引诱雄蛾起到关键作用,而B组分具有独特功能,可以进一步提高整体的引诱效果。不仅如此,性信息素里各组分之间的配比,也是影响其引诱效果的关键因素。以上两组分对于雄蛾表现出极强的引诱效果,两者最佳质量比为9:1。但天然性信息素也伴随着一些使用问题,如田间释放速率快、易分解,以及长期单一使用天然性信息素进行防治易使害虫产生抗药性,进而降低其功效^[10-11]。

人工合成的性信息素类似物,其结构与天然性信息素组分相似,但具有更好的物理、化学和毒理学特性,能够调节昆虫的行为,影响昆虫的化学通讯^[12]。其通过干扰交配来控制害虫,是一种环境友好型的植物保护策略,为害虫的综合防治提供了一种新方法^[13]。研究人员设计并合成了一系列松异舟蛾

性信息素类似物,将其双键氢进行单氟取代所制得的类似物与性信息素混合,针对松异舟蛾成虫,其迷向率能够达到50%,而其丙酸酯类似物则表现出抑制作用。卤素可增强分子的脂溶性,尤其是氟代类似物对于干扰昆虫行为方面可能具有良好的效果,可以更有效地被昆虫嗅觉受体识别进而转化成电信号传导^[14]。樊一平^[15]通过Y型嗅觉仪测试了二点委夜蛾雄蛾对正己烷与性信息素混合组分(质量比3:7)、正己烷与性信息素类似物E3的行为选择。结果发现,与正己烷、性信息素混合组分(质量比3:7)相比,性信息素类似物E3能够极显著吸引二点委夜蛾($P < 0.001$)。将三氟甲基酮基团引入欧洲玉米螟(*Ostrinia nubilalis*)性信息素的主要成分(Z7)-十四碳烯-1-醇乙酸酯中,取代其极性基团,合成性信息素类似物。结果表明,三氟甲基酮类似物对欧洲玉米螟的触角电生理反应抑制率达到65.3%^[16]。

本文围绕斜纹夜蛾性信息素的主要成分——(顺,反)-9,11-十四碳二烯乙酸酯进行研究。依据这一成分的结构与性质特点,使其分别和含氟、氯、硫取代的酰氯或酸酐发生反应,进而成功合成了4种类似物(T1~T4,图1)。通过高分辨质谱(HR-MS)及核磁共振(NMR)等对所合成的类似物结构进行确证,并采用触角电生理试验(EAG)测试其生物活性。旨在筛选出生物活性较高的性信息素类似物,为后续斜纹夜蛾性信息素类似物的设计合成工作提供理论依据。

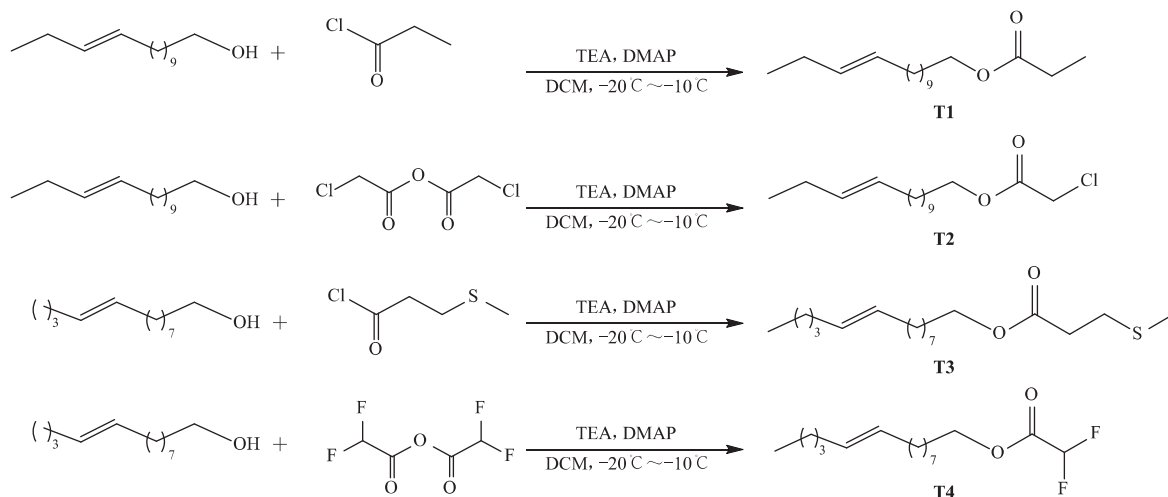


图1 T1~T4合成路线图

1 实验部分

1.1 仪器与材料

主要仪器有 Bruker AVANCE NEO 400 MHz型

核磁共振仪;Waters Xevo G2-S QTOF型质谱仪;Syntech型触角电位仪。

斜纹夜蛾成虫全部在实验室内饲养。饲养条件:光周期L/D=16 h/8 h,相对湿度为(70±10)%,温

度为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。使用10%蜂蜜水对成虫进行饲喂。实验所用试剂均为分析纯。

1.2 T1~T4的合成(以T4为例)

称取0.1 g (0.5 mmol) 反-9-十四碳烯-1-醇,将其溶于4 mL二氯甲烷中,向该溶液中加入0.081 g (0.8 mmol) 三乙胺及0.006 g 4-二甲氨基吡啶(DMAP)。将混合溶液置于冰盐浴中,搅拌,使其温度保持在 $-20^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 。缓慢向上述溶液中逐滴加入溶有0.139 g (0.8 mmol) 二氟乙酸酐的二氯甲烷溶液(500 μL)。滴加完毕后,使反应持续0.5 h。撤掉冰盐浴,将溶液室温搅拌过夜,薄层色谱(TLC)监测反应进程。反应完毕后,加入去离子水终止反应。有机相用饱和食盐水(10 mL $\times$ 3)洗涤,水相用二氯甲烷(15 mL $\times$ 3)进行萃取,用无水硫酸钠对合并的有机相进行干燥,最后旋转蒸发仪减压蒸馏去除溶剂,得到粗产物。预先配制洗脱剂,乙酸乙酯和石油醚体积比为1:50。将粗产物通过硅胶柱层析纯化,最终得到目标产物反-9-十四碳烯-2,2-二氟乙酸酯(T4)。按照以上类似操作方法合成T1~T3。

T1 淡黄色油状液体,收率38%。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 5.41~5.22 (m, 2H)、3.99 (t, $J=6.7$ Hz, 2H)、2.25 (q, $J=7.6$ Hz, 2H)、1.91 (dq, $J=14.0, 7.1$ Hz, 4H)、1.54 (q, $J=7.0$ Hz, 2H)、1.30~1.16 (m, 15H)、1.07 (t, $J=7.6$ Hz, 3H)、0.89 (t, $J=7.4$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 173.6、130.6、128.3、63.5、31.6、28.6~28.2 (6C)、27.6、26.6、24.9 (2C)、12.9、8.2; IR (cm^{-1}): 2920、2850、1740、1460、1350、1180、1080、965、804、733; HR-MS (ESI) m/z : $\text{C}_{17}\text{H}_{32}\text{O}_2\text{Na}$ ($[\text{M}+\text{Na}]^+$) 291.230 0 (计算值), 291.229 5 (实测值)。

T2 淡黄色油状液体,收率51%。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 5.41~5.27 (m, 2H)、4.11 (t, $J=6.7$ Hz, 2H)、3.99 (s, 2H)、1.91 (m, $J=13.6, 7.1$ Hz, 4H)、1.59 (m, $J=6.8$ Hz, 2H)、1.24 (m, $J=9.2$ Hz, 16H)、0.89 (t, $J=7.4$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 170.2、131.9、129.4、66.2、52.6、32.6、29.7~28.4 (6C)、25.7 (2C)、21.5、20.5、14.1; IR (cm^{-1}): 2920、2850、1740、1460、1340、1240、1170、1070、963、695; HR-MS (ESI) m/z : $\text{C}_{16}\text{H}_{29}\text{O}_2\text{ClNa}$ ($[\text{M}+\text{Na}]^+$) 311.175 4 (计算值), 311.174 8 (实测值)。

T3 淡黄色油状液体,收率37%。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 5.44~5.32 (m, 2H)、4.09 (t, $J=6.7$ Hz, 2H)、2.76 (t, $J=7.3$ Hz, 2H)、2.61 (t, $J=7.4$ Hz, 2H)、2.12 (s, 3H)、2.02~1.92 (m, 4H)、1.63 (p, $J=6.8$ Hz,

2H)、1.32 (tt, $J=8.1, 4.7$ Hz, 14H)、0.93~0.81 (m, 3H); ^{13}C NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 171.9、130.3 (2C)、64.8、34.5、32.6 (2C)、31.8、29.6~28.6 (6C)、25.87、22.16、15.41、13.93; IR (cm^{-1}): 2920、2850、1740、1430、1350、1240、1170、966、727; HR-MS (ESI) m/z : $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2\text{SNa}$ ($[\text{M}+\text{Na}]^+$) 337.217 8 (计算值), 337.217 2 (实测值)。

T4 淡黄色油状液体,收率69%。 ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 5.82 (t, $J=53.4$ Hz, 1H)、5.37~5.21 (m, 2H)、4.20 (t, $J=6.7$ Hz, 2H)、1.89 (m, $J=6.5, 6.1, 2.9$ Hz, 4H)、1.64 (m, $J=6.8$ Hz, 2H)、1.32~1.18 (m, 14H)、0.81 (t, $J=7.0$ Hz, 3H); ^{13}C NMR (400 MHz, CDCl_3) δ : 161.6、129.4 (2C)、129.2、65.9、31.6~27.3 (8C)、24.61、21.20、12.92; IR (cm^{-1}): 2920、2860、1770、1460、1230、1130、1080、966、796、722; HR-MS (ESI) m/z : $\text{C}_{16}\text{H}_{28}\text{O}_2\text{F}_2\text{Na}$ ($[\text{M}+\text{Na}]^+$) 313.195 5 (计算值), 313.195 0 (实测值)。

1.3 室内生物活性测试

选取羽化2~3 d未交配的斜纹夜蛾雄虫,实验前放置在黑暗环境中2 h,使雄虫的状态更贴合其在自然环境下所做出的反应^[17]。将雄虫触角完整切除,并用刀片去除触角端部大约1 mm的部分,确保在后续测试中电流畅通。采用导电凝胶将其固定在2个金属电极间,通过装有0.1 mol/L氯化钾溶液的玻璃电极连接,组成闭合回路。将(顺,反)-9,11-十四碳二烯乙酸酯(SP)及待测的4种类似物分别用色谱纯正己烷溶解,分别配制6个不同质量浓度梯度的溶液,质量浓度分别为0.001、0.01、0.1、1、10、100 g/L。吸取上述溶液10 μL ,分别将其均匀涂抹在滤纸条(3 cm $\times$ 0.5 cm)的凹槽部位,待滤纸条上溶剂完全挥发后将其放置于巴斯德管中。为进一步提升实验的精确度和可靠性,每只雄虫只取其1根触角来进行实验,每个处理3次重复。需要注意的是,滤纸条需用现配,以保证实验数据的可靠性。

对实验获取到的数据采用SPSS-24分析软件进行处理,其显著性分析则利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)。当发现不同处理之间存在显著性差异时,可以运用Duncan's法进行多重比较(显著性水平通常设为 $P < 0.05$)。最终结果通常用平均数 $\pm$ 标准误的形式表示。

2 结果与讨论

2.1 合成

董梦雅^[18]研究发现,分子结构中含有双键的性

信息素类似物的生物活性显著高于同类中不含双键的性信息素类似物,说明不饱和键对于维持性信息素的活性具有关键作用。因此,本研究根据斜纹夜蛾性信息素主要组分(顺,反)-9,11-十四碳二烯乙酸酯,分别保留其原始双键及酯基结构,对其极性基团进行卤素原子修饰。为了使合成过程中原料反应完全,醇与酸酐或酰氯的物质的量之比设置为1.0:1.2,同时由于酸酐和酰氯遇水易溶解,二氯甲烷经除水处理。反应需在冰盐浴中进行,以避免因醇与酰氯或酸酐接触瞬间温度升高导致副产物增多。合成T3的副产物较多,主要原因是目标化合物与杂质极性相近,需多次纯化,因此收率较低。

反应过程中添加少量的DMAP作为催化剂可以促进反应完全^[19]。DMAP上的吡啶氮原子亲核进攻酸酐或酰氯亲电的羰基碳,形成具有较高反应活性的酰基吡啶中间体。醇羟基与酰基吡啶中间体中吡啶相连接的酰基碳原子发生亲核加成,生成一种酯基中间体,其化学性质并不稳定。DMAP从不稳定的中间体上脱落,最终形成酯化产物^[20]。

具有卤素原子的性信息素类似物在合成时,氟原子电负性较强,使得分子极性增大,故含氟类似物的产率高于含氯类似物,且反应速度较快。氟原子和氢原子在结构方面存在着一定的相似性,使得氟原子能够定位到昆虫性信息素受体位点。同时,在氟原子强电负性的影响下,含氟类似物分子既具

有极性的一面,又具有非极性的一面,拥有双重特性;且引入氟原子之后,分子的脂溶性得到增强。因此,含有氟原子的类似物能够更为有效地被昆虫的嗅觉受体所识别,还可以进一步将其转化成为电信号,从而实现电信号的传导^[21]。基于这样的原理,推测含有氟原子的斜纹夜蛾性信息素类似物往往具备比较好的电生理活性。

2.2 表征

以T3为例,对目标产物进行了¹H NMR分析。与反式双键相连的2个氢的吸收峰出现在低场 δ 5.38附近,在两边相连的4个氢原子的影响下呈多重峰。由于羰基具有吸电子的作用,对与之相连的亚甲基上的氢原子产生影响,所对应的特征峰处于化学位移 δ 2.61附近,其在谱图中呈现出三重峰的形态。而对于与氧原子相连的碳上氢原子来说,受到氧原子电子云诱导效应的影响,氢原子的化学位移会向低场方向移动,特征峰位于 δ 4.09附近。与反式双键相连的2个碳原子上的氢原子受双键影响向低场移动,吸收峰出现在 δ 1.97附近。碳链末端的甲基与硫原子相连接,甲基上的氢原子会受到硫原子的影响,化学位移向低场方向移动,表现为单峰,位于 δ 2.12附近;而另一端甲基上的氢原子,由于相邻碳原子上氢原子的耦合作用,表现为三重峰,吸收峰在高场 δ 0.89附近。其余16个氢原子吸收峰位于高场 δ 1.32附近。

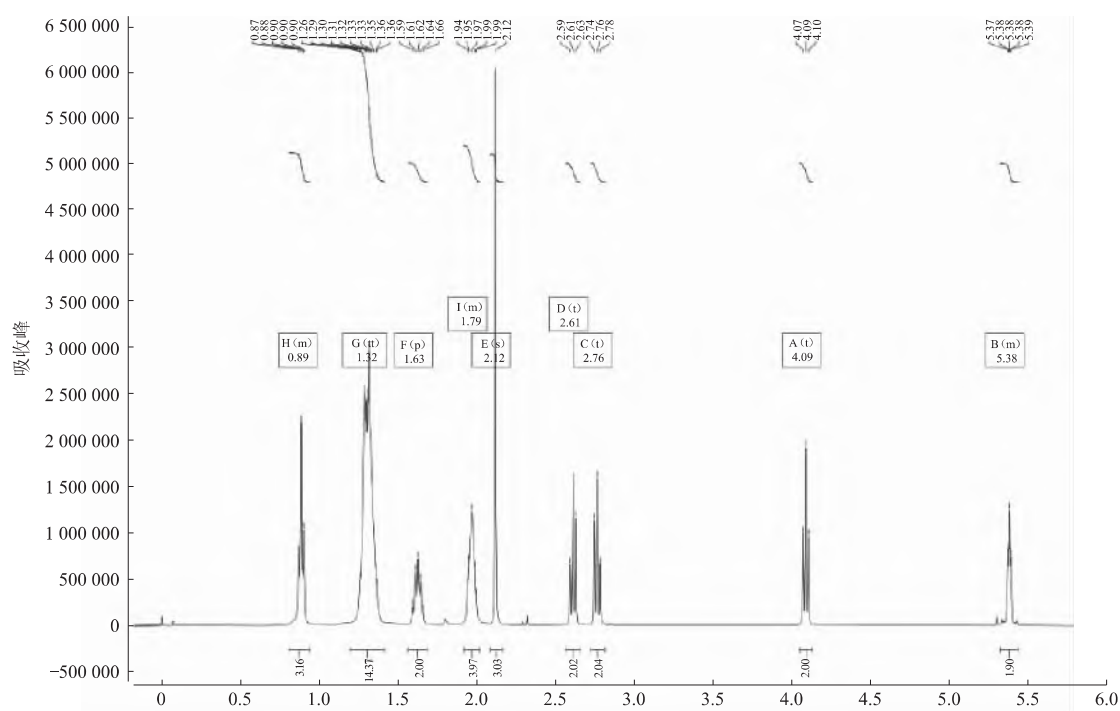


图2 化合物T3的¹H NMR谱图

2.3 EAG活性

不同处理浓度下,雄蛾对上述4种性信息素类似物的触角电生理反应结果见表1。

所有斜纹夜蛾性信息素类似物对斜纹夜蛾均具有一定的生物活性,但响应值均较小,均低于性

信息素的相对响应值。其中,性信息素类似物T3、T4的响应值具有较好的剂量-效应关系,在100 g/L质量浓度时EAG相对响应值达到最大,分别为 (0.41 ± 0.26) mV和 (0.51 ± 0.37) mV。所得实验结果对田间试验具有一定的指导作用。

表 1 SP、T1~T4 的 EAG 活性

化合物	EAG相对响应值/mV					
	0.001 g/L	0.01 g/L	0.1 g/L	1 g/L	10 g/L	100 g/L
SP	0.5 ± 0.34a	0.61 ± 0.45a	0.75 ± 0.45a	0.67 ± 0.39a	0.81 ± 0.38a	1.04 ± 0.35a
T1	0.11 ± 0.07b	0.10 ± 0.17b	0.21 ± 0.17b	0.12 ± 0.12b	0.45 ± 0.04a	0.27 ± 0.03ab
T2	0.21 ± 0.23a	0.15 ± 0.06a	0.19 ± 0.15a	0.12 ± 0.01a	0.23 ± 0.11a	0.19 ± 0.13a
T3	0.13 ± 0.14a	0.25 ± 0.21a	0.30 ± 0.15a	0.32 ± 0.10a	0.33 ± 0.18a	0.41 ± 0.26a
T4	0.05 ± 0.03c	0.13 ± 0.10bc	0.20 ± 0.08abc	0.45 ± 0.09ab	0.50 ± 0.09a	0.51 ± 0.37a

3 结论

本文设计并合成了4种结构新颖的斜纹夜蛾性信息素类似物(T1~T4),结构经过NMR和HR-MS确证。EAG测试结果表明,4种类似物对斜纹夜蛾均具有一定的生物活性,且随着类似物处理浓度增大,响应值不断增加。但电生理反应实验仅能部分反映昆虫对嗅觉化学刺激的行为反应,并不能完全模拟昆虫在自然环境中对各种气味的反应强度。对于性信息素类似物的田间应用效果,还需要开展更为深入的研究探讨。昆虫性信息素在害虫防治方面有着重要的应用价值,已然成为一种绿色防控的新策略。昆虫性信息素能够减少化学农药的使用量,这对环境和生态保护具有重要意义。本研究对斜纹夜蛾绿色防控具有一定指导意义。

参考文献

[1] 刘劲哲,樊永强,韩燕丽,等. 豌豆主要害虫的特点及防治措施[J]. 青海草业, 2023, 32(3): 41-44.

[2] 黄衍章,张西仲,周再军,等. 黔南烟田斜纹夜蛾的生物防治效果[J]. 烟草科技, 2016, 49(4): 21-25.

[3] 武承旭. 昆虫生态学和害虫综合治理及入侵防控[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

[4] 邹金城,杨勇,杨益众,等. 斜纹夜蛾核型多角体病毒研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(6): 800-806.

[5] DESCOINS C, PRIESNER E, GALLOIS M, et al. Sur la secretion pheromonale des femellesvierges de *Mamestra brassicae* L. et *Mamestra oleracea* L. (Lepidoptera, Noctuidae, Hadeninae) [J]. Comptes Rendus de l'Academie des Sciences (Serie D),1978, 286: 77-80.

[6] 闫祺,杨婷婷,董双林. 蛾类昆虫混合型性信息素研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2023, 60(2): 323-334.

[7] TAMAKI Y, YUSHIMA T. Biological activity of the synthesized sex pheromone and its geometrical isomers of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Appl Ent Zool, 1974, 9(2): 73-79.

[8] YUSUNVM T, NOGUCHI H, TAMAKI Y, et al. Mating and sex pheromone of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae): an introductory report[J]. Applied Entomology and Zoology, 1973, 8 (1): 18-26.

[9] KAWASAKI K. Electroantennogram responses of *Spodoptera litura* F. (Lepidoptera: Noctuidae) male moth to two female sex pheromone components[J]. Appl Ent and Zool, 1985, 20(1): 82-87.

[10] MITCHELL E R, JACOBSON M, BAUMHOVER A H. *Heliothis* spp: disruption of pheromonal communication with (Z)-9-tetradecen1-ol formate[J]. Environ Entomol, 1975, 4(4): 577-579.

[11] COOK S M, KHAN Z R, PICKETT J A. The use of push-pull strategies in integrated pest management[J]. Annu Rev Entomol, 2007, 52: 375-400.

[12] 施海燕,郑尊涛,朱国念. 斜纹夜蛾性信息素的研究进展[J]. 植物保护, 2004, 30(1): 17-20.

[13] 王安佳. 小菜蛾含氟性信息素类似物在干扰交配中的潜在应用[C]//中国植物保护学会. 绿色生态可持续发展与植物保护——中国植物保护学会第十二次全国会员代表大会暨学术年会论文集. 北京: 中国植物保护学会, 2017: 216-219.

[14] 王安佳,张开心,梅向东,等. 昆虫性信息素及其类似物干扰昆虫行为的机理和应用研究进展[J]. 农药学报, 2018, 20(4): 425-438.

[15] 樊一平. 一种性信息素类似物高效引诱雄性二点委夜蛾的机制[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.

[16] RIBA M, SABS A, SIKE J, et al. Antagonism of pheromone response of *Ostrinia nubilalis* males and implications on behavior in the laboratory and in the field[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(4):1158-1165.

[17] 张开心. 小菜蛾信息素类似物的合成与活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.

[18] 董梦雅. 小菜蛾性信息素拮抗剂的合成及活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

[19] 焦艳茹,倪力伟,邱文泽,等. DMAP催化2-(噻吩-2-基)乙基对甲苯磺酸酯反应机理及动力学研究[J]. 中国计量大学学报, 2022, 33(4): 567-572.

[20] 陈丹. 负载型4-二甲氨基吡啶(DMAP)催化合成维生素E琥珀酸酯[D]. 西安: 西北大学, 2019.

[21] 杨新玲,阚炜,黄文耀,等. 蚜虫报警信息素类似物的结构与生物活性关系[J]. 昆虫学报, 2003(5): 660-664.

(编辑:顾林玲)