

高剂量性信息素环境对草地贪夜蛾求偶和交配行为的影响

黄丽丽¹, 刘振东², 赵小英³, 杨志刚⁴, 郭前爽¹, 杜永均^{1*}

(1. 浙江大学农药与环境毒理研究所, 杭州 310058; 2. 植保中国协会(香港)北京办事处, 北京 100004;
3. 四川省眉山市东坡区农业农村局, 眉山 620010; 4. 四川省乐山市植保植检站, 乐山 614000)

摘要 本文在风洞中模拟形成高浓度性信息素 Z7-12:Ac, Z9-14:Ac 和 Z11-16:Ac 环境, 研究草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith) 的求偶和交配行为, 为进一步开发交配干扰技术提供技术参数和依据。研究结果表明, 在高剂量性信息素环境下, 草地贪夜蛾雄蛾的暗期活动时间延后, 而雌蛾的活动节律则没有变化, 雌雄蛾之间产生了活动节律的时间差。同时, 雌雄交配率和交配持续时间显著下降, 交配日龄则显著延迟 2 d。由于交配日龄延迟, 产卵量及其孵化率也相应降低。性信息素喷射时间间隔对草地贪夜蛾性信息素释放滴度有显著影响, 当间隔时间为 5、10、20 min 时, 雌蛾释放的性信息素滴度显著下降, 以 5 min 为最低。因此, 高剂量性信息素环境不仅影响雄蛾对性信息素的定向, 对雌雄蛾间化学通讯和交配也有显著影响。

关键词 草地贪夜蛾; 性信息素; 交配干扰; 求偶; 交配

中图分类号: S 433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2023121

Effect of the environment with a high dose of sex pheromone on the calling and mating behavior of *Spodoptera frugiperda* (Smith)

HUANG Lili¹, LIU Zhendong², ZHAO Xiaoying³, YANG Zhigang⁴, GUO Qianshuang¹, DU Yongjun^{1*}

(1. Institute of Pesticide and Environmental Toxicology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. China Plant Protection Association (Hongkong), Beijing Office, Beijing 100004, China; 3. Agricultural and Rural Bureau of Dongpo District, Meishan City, Sichuan Province, Meishan 620010, China; 4. Plant Protection and Inspection Station of Leshan City, Sichuan Province, Leshan 614000, China)

Abstract In this paper, a comprehensive study was conducted on the calling and mating behavior of *Spodoptera frugiperda* under the environment with a high dose of sex pheromones Z7-12:Ac, Z9-14:Ac and Z11-16:Ac, sprayed automatically at different time intervals in a wind tunnel, with the objective of laying a basis for the development of mating disruption technology. The results showed that, in the environment of high dose of sex pheromones, the activity of male moth begins later, while that of female moths remained unchanged, exhibiting a time disparity in the activity between male and female moths. In addition, both the mating rate and mating duration decreased significantly, and the mating day-age was significantly delayed for two days. The delay in the mating day-age caused a reduction in the number of egg production and hatchability rate. The time interval of spraying sex pheromones had a significant effect on the titer of sex pheromones released by *S. frugiperda*, when interval was 5, 10, or 20 min, the titer of sex pheromone released by female moths decreased significantly, with the lowest level at 5-minute interval. Therefore, the high-dose sex pheromone in the environment not only had a significant impact on the orientation behavior of male moths towards the sex pheromone source but also had a significant impact on the calling and mating behavior between female and male moths.

Key words *Spodoptera frugiperda*; sex pheromone; mating disruption; calling; mating

收稿日期: 2023-03-14

修订日期: 2023-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0300100); 浙江省重点研发计划(2020C02003)

* 通信作者 E-mail: yongjundu@zju.edu.cn

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (Smith), 属于鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae 灰翅夜蛾属 *Spodoptera*。该虫源于美洲热带和亚热带地区, 迁飞性强, 已经扩散至欧洲、非洲和亚洲的大多数国家^[1-3]。目前, 进入中国的草地贪夜蛾为玉米型, 主要为害玉米, 该虫在我国的云南、广西、广东、海南等省已经形成周年繁殖区, 每年从南方的这些地区迁飞至我国其他地区^[4]。草地贪夜蛾喜食幼嫩玉米, 食量大, 破坏性极强, 而且其生活史适应性强^[5]。雌雄交配次数多, 雌蛾产卵量大^[6], 因此, 农民打药次数多。对这些周年繁殖地区草地贪夜蛾的防控至关重要, 不仅要降低其对这些地区玉米的危害, 也要避免因为过度农药防控带来的抗药性而影响其他玉米主产区的防控^[7]。因此, 理想的防控方法是采用生物防治和精准施药^[8], 尽可能减少化学药剂的施用, 保护田间天敌, 避免害虫产生抗药性。

草地贪夜蛾雌蛾性信息素成分被鉴定为多种化合物组成的混合物, 其中主要成分为顺 9-十四碳烯乙酸酯[(Z)-9-tetradecenyl acetate, Z9-14:Ac]^[9-10], 次要成分为顺 7-十二碳烯乙酸酯(*cis*-7-dodecenyl acetate, Z7-12:Ac)^[11]。此外, 加入顺 11-十六碳烯乙酸酯[(Z)-11-hexadecenyl acetate, Z11-16:Ac]有一定的增效作用^[12-13]。配比和剂量以及其他微量组分在混合物的引诱力和专一性上起一定作用^[14-15], 也存在显著的性信息素地理区系差异^[16-18]。草地贪夜蛾性信息素有玉米型和水稻型 2 种生物型^[17-20], 两者在主要成分 Z9-14:Ac 和次要成分 Z7-12:Ac 及微量组分的配比和求偶行为的昼夜节律上显示一定差异, 采用群集诱杀存在性信息素配比精准的难题, 而且草地贪夜蛾是迁飞性强的害虫, 其成虫发育和交配状态复杂, 这更增加了诱捕的难度^[21]。此外, 玉米植株上的鳞翅目害虫种类较多, 有为害根部的小地老虎 *Agrotis ipsilon*, 北方一些地区还有二点委夜蛾 *Athetis lepigone*, 普遍发生的还有斜纹夜蛾 *Spodoptera litura*、甜菜夜蛾 *S. exigua*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、稻蛀茎夜蛾 *Sesamia inferens*、桃蛀螟 *Conogethes punctiferalis* 等。如果采用群集诱杀的方法, 因为性诱剂的专一性, 每个虫种需要自己单独的诱捕器, 诱芯不能捆绑共享一个诱捕器, 这样, 使用成本高且不方便。性信息素交配干扰技

术(mating disruption)可以把多种性信息素化合物混合在一个释放器上, 农民使用方便, 用工较少, 防效更高。

因此, 基于草地贪夜蛾性信息素技术的防控, 采用交配干扰技术将更有前景和意义。交配干扰法释放高剂量的有机合成的信息素混合物, 有效屏蔽了自然雌蛾释放的信息素在田间扩散的轨迹, 并可能通过嗅觉钝化或造成感觉不平衡来破坏雄蛾对雌蛾性信息素气味源的定向飞行和准确定位, 延迟或阻止交配。该方法已被证明对防治梨小食心虫 *Grapholita molesta*^[22]、棉红铃虫 *Pectinophora gossypiella*^[23]、柑橘潜叶蛾 *Phyllocnistis citrella*^[24-25]、葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana*^[26]、苹果蠹蛾 *Cydia pomonella*^[27]、舞毒蛾 *Lymantria dispar*^[28-30] 等害虫特别有效。交配干扰可以采用高剂量的单一性信息素组分, 并不一定需要完整组分, 一些害虫也可以采用抑制剂达到理想的防控效果。据报道, 在实验室环境下, Z9-14:Ac 对草地贪夜蛾交配有强烈的抑制作用^[10]。高剂量性信息素可以影响昆虫的嗅觉反应谱, 致使雄蛾无法识别其同种异性个体。但交配干扰的效果与昆虫的求偶、交配、产卵行为密切相关。目前相关研究主要关注信息素释放器的设计及其在田间的放置方法和防治效果评价上^[31]。在交配干扰的高剂量性信息素弥漫的环境下, 草地贪夜蛾的求偶、交配和产卵行为并不很清楚, 这些因子与交配干扰技术的防控效果密切相关。本文研究目的就是探究其中行为机理, 以期为更好地利用交配干扰技术防控草地贪夜蛾提供技术参数和依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

草地贪夜蛾幼虫采自绍兴市越城区沥海街道玉米田(30.14°N, 120.68°E), 在室温(25±2)℃, 光周期为 L//D=14 h//10 h(18:00 关灯)条件下饲养。当幼虫发育到 3 龄后, 将单个幼虫移入 50 mL 离心管中, 每天检查、更换幼虫食料(以大豆粉和麦胚粉为主要原料配制的人工饲料), 直至化蛹。待蛹羽化后, 分别将雌雄蛾移放至折叠养虫笼(28 cm×28 cm×32 cm)中, 每个养虫笼顶部放置含 10% 葡萄糖水的棉球为其补充营养。

风洞装置: 风洞四壁由透明的有机玻璃板制成。

风源进口处安装标准型风源净化工作台,包括过滤、净化装置。风速为 0.3 m/s,出口安装排气管,将气味排出室外。风洞温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,相对湿度为 60%~70%。

1.2 试验方法

采用电子机械控制的高剂量性信息素释放器(HDMD-S-001,宁波纽康生物技术有限公司)均匀、定时喷射性信息素化合物。释放的性信息素由 Z7-12:Ac, Z9-14:Ac 和 Z11-16:Ac(1:100:10)组成,活性组分占混合物总量的 10%。释放器放置在风洞上风口位置,喷射时间设置为 16:00 至次日 4:00,每次喷射的释放量为 40 μL 。试验设置 3 种不同释放间隔时间:1)5 min 喷射 1 次;2)10 min 喷射 1 次;3)20 min 喷射 1 次。以不做处理为对照。

1.2.1 高剂量性信息素释放频率对雌雄蛾暗期活动性的影响

行为测试仪为亚克力板制成的透明方盒(40 cm $\times$ 20 cm $\times$ 5 cm),中间放置含 10%葡萄糖水的棉花,两端使用纱布网封口,防止成虫逃逸。风源放置在纱网外侧一端,风速为 0.3 m/s。性信息素释放器放置在上风口位置,将待测试草地贪夜蛾成虫移入盒中间后调整摄像头高度及焦距直至画面完整、清晰。性信息素喷施在暗期开始之前 2 h(16:00)开始。喷射间隔分别设置为 5、10、20 min,以不做处理为对照。由于草地贪夜蛾成虫在暗期开始之后开始活动,所以设置视频录制时间从 18:00 开始,开启红光灯(25 lx),使用 Pylon Viewer 软件录制视频,相机为 Basler acA1300-75gm。录制帧率为 30 帧/s,每晚录制时长为 10 h,于 4:00 结束。视频录制完成后,使用 EthoVision XT 15(Noldus)视频软件分析暗期草地贪夜蛾每小时的移动距离和轨迹。每个处理重复观察 8 头试虫。

1.2.2 高剂量性信息素释放频率对交配率的影响

将当日羽化的草地贪夜蛾雌雄成虫,分别按 10 头雌蛾 10 头雄蛾配对后转移至可以折叠的养虫笼内,并把整个养虫笼放入风洞内。在风洞上风口位置放置性信息素释放器。喷射间隔分别设置为 5、10、20 min。每个试验重复 6 次。对照组不放置性信息素释放器。每日暗期开始之后每 20 min 观察 1 次雌雄交配情况,将交配的草地贪夜蛾用离心管小心移出后,记录交配时草地贪夜蛾日龄(羽化当日记为 0 d),交配开始时间和结束时间,并换算成进入

暗期后的小时数。

1.2.3 高剂量性信息素对雌蛾产卵量和卵孵化率的影响

每日暗期检查正在交配的草地贪夜蛾成虫,待其交配结束后将雌蛾装入两端开口的塑料管(直径 5 cm,长 10 cm)中,然后放入折叠好的滤纸片(2 cm $\times$ 5 cm)供其产卵,并喂食 10%葡萄糖水,两端用纱布封口(保持透气状态),分别置于放置性信息素释放器的风洞中,以不做任何处理为对照。5、10、20 min 喷施间隔处理分别观察 14、12 头和 19 头雌蛾,对照组观察 47 头雌蛾。每日 9:00 记录产卵量和孵化的卵量。卵孵化率=(孵化的卵量/总产卵量) $\times$ 100%。

1.2.4 高剂量性信息素对雌蛾释放性信息素滴度的影响

在高剂量性信息素释放的环境下,挑选 3 日龄雌蛾提取性信息素。以不处理为对照,重复 6 次,在提取性信息素时,轻轻挤压雌蛾的腹部使性信息素腺体暴露出来,采用固相微萃取(SPME)技术吸附后,用眼科剪刀剪下性腺,吸去多余体液后移入色谱瓶中。向瓶中加入 50 μL 重蒸分析纯正己烷,室温浸液 1 h 后移去腺体。加入 1 μL 正十七烷(10 ng/ μL)作为内标,用细微的高纯氮气浓缩至约 2 μL ,全部进样至气质联用仪中。GC/MS 仪器为 Agilent 6890GC-5975MS,配备 DB-35 毛细管柱(0.25 mm 30 m $\times$ 25 μm)。程序设置如下:60 $^\circ\text{C}$ 保持 1 min,然后 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 180 $^\circ\text{C}$,然后 3 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 210 $^\circ\text{C}$,之后 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 250 $^\circ\text{C}$,在 250 $^\circ\text{C}$ 保持 10 min。进样口温度为 250 $^\circ\text{C}$,离子源温度为 230 $^\circ\text{C}$,载气为氦气,碰撞能量为 70 eV。SPME 吸附法采用外标法定量性信息素滴度。

1.3 数据分析

采用 SPSS 17.0 进行数据分析。处理数据进行单因素方差分析,对多组均值的差异显著性测验采用 Duncan 氏新复极差法进行,在显著性分析中, $P < 0.05$ 表示差异显著。

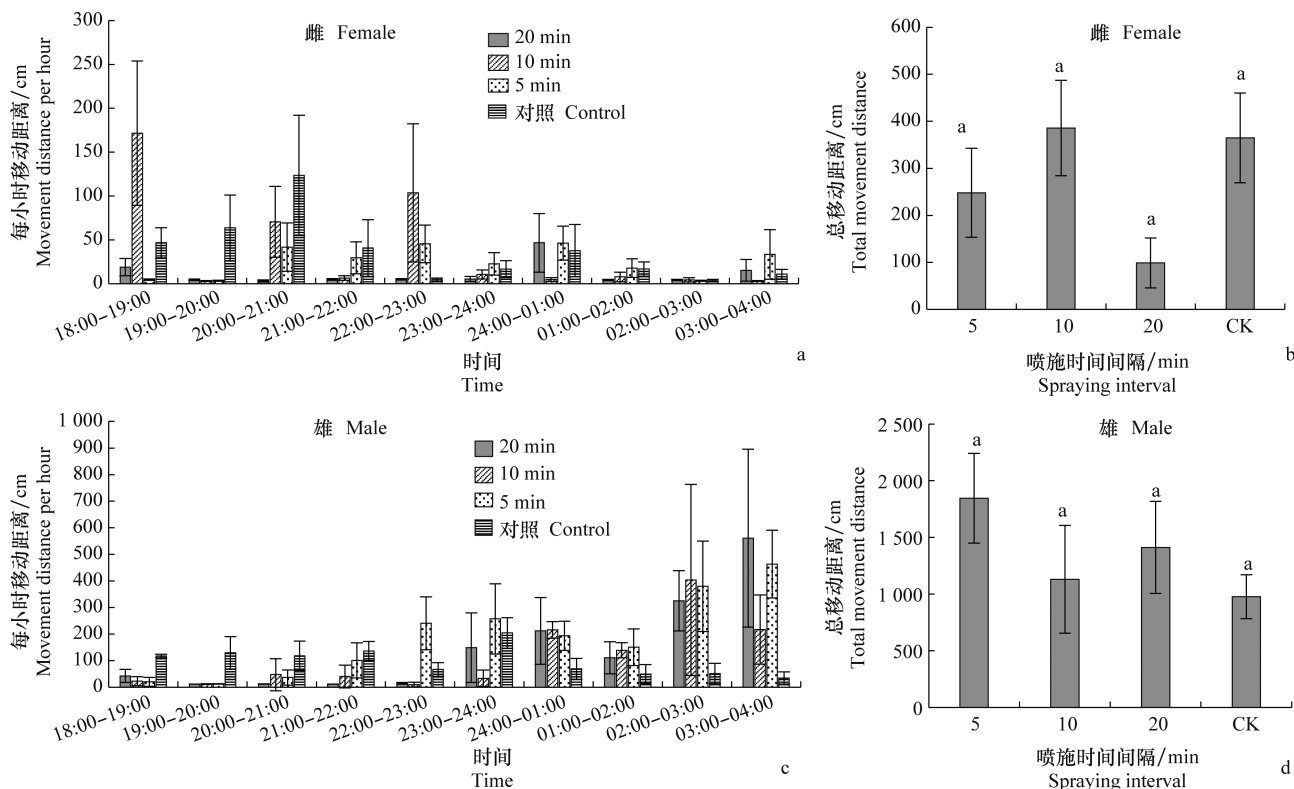
2 结果与分析

2.1 高剂量信息素环境下雌雄蛾的活动性

分析、比较处理组和对照组中雌蛾和雄蛾的总移动距离,发现高剂量性信息素对草地贪夜蛾雌蛾在暗期的总移动距离无显著影响($F_{3,25} = 2.2$, $P =$

0.12)。喷射间隔为 20 min 时,雌蛾总移动距离为 (98.7 ± 53.0) cm, 小于喷射间隔为 10 min 时雌蛾的总移动距离 (385.7 ± 101.5) cm, 但无显著差异

(图 1b)。高剂量性信息素对草地贪夜蛾雄蛾在暗期的总移动距离也无显著影响 ($F_{3,25} = 0.9$, $P = 0.47$) (图 1d)。



柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$, Duncan氏新复极差法)。下同。

Different letters above bars indicate significant difference among different treatments ($P < 0.05$, Duncan's new multiple range test). The same applies below.

图 1 性信息素不同释放间隔对草地贪夜蛾暗期总移动距离的影响

Fig. 1 The effect of different release intervals of sex pheromone on the total movement of *Spodoptera frugiperda* during the dark period

通过比较暗期每小时草地贪夜蛾的移动距离,发现不同喷射频率对雌蛾移动距离的影响不明显,暗期前 6 h 的活动性强于之后的时间段。但是在对照组中,雄蛾的活动时间发生在整个暗期,相对而言,暗期前 6 h 稍强一些,之后弱一些。而在高剂量性信息素环境下,雄蛾的活动时间明显延后,02:00 (暗期第 9 小时)至 03:00 移动距离最高,即雄蛾在高剂量性信息素环境下活动时间明显延后,也就是说雌雄蛾的活动性有时间上的差距(图 1a, c)。

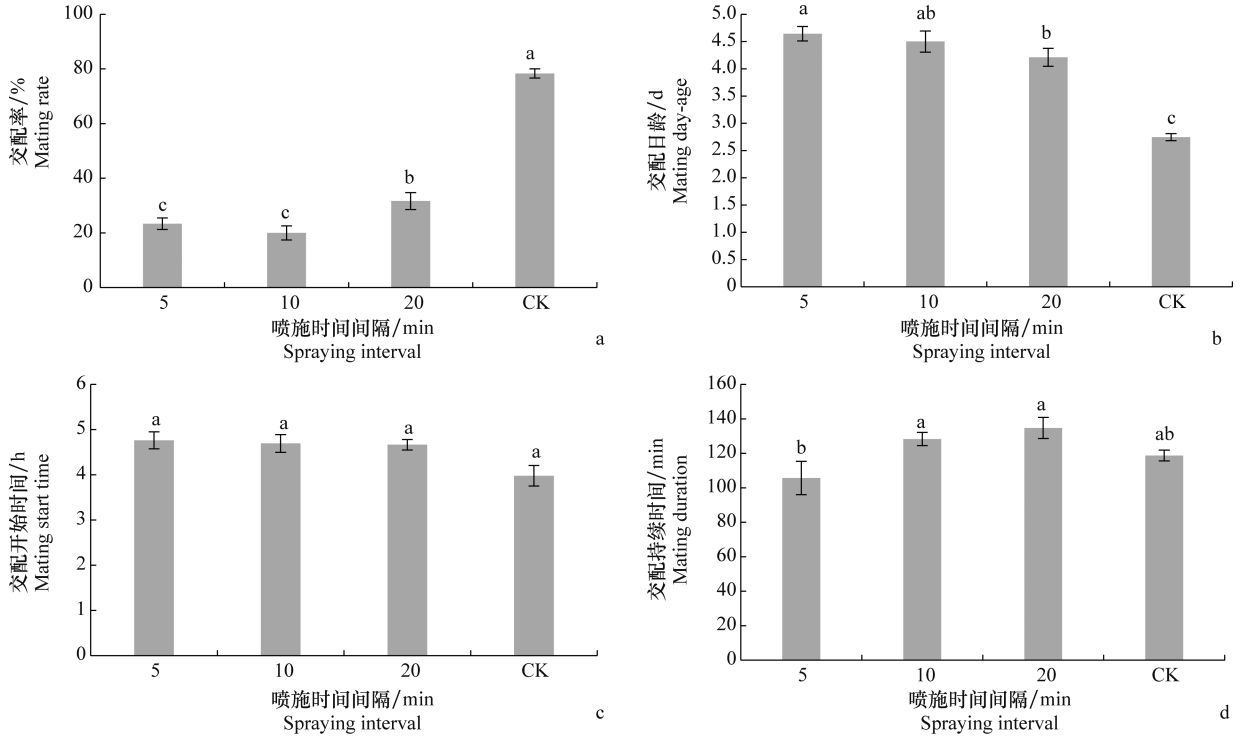
2.2 高剂量信息素环境下雌雄蛾的交配率

比较处理和对照组发现,高剂量性信息素显著影响草地贪夜蛾雌雄蛾的交配率 ($F_{3,20} = 126.0$, $P < 0.001$)。在对照组中,雌雄蛾的交配率为 (78.3 ± 1.7)%,显著高于性信息素释放器喷射处理组。在性信息素 20 min 喷射 1 次的环境下,交配率为 (31.7 ± 3.1)%,显著高于 5、10 min 喷射 1 次的雌

雄交配率,即喷射间隔时间短,空气中的性信息素气味分子浓度高,交配率被抑制程度越高(图 2a)。

高剂量性信息素喷射对草地贪夜蛾的交配日龄也有显著影响 ($F_{3,88} = 73.9$, $P < 0.001$),在对照组中,平均交配日龄为 (2.7 ± 0.1) d,显著短于 3 个性信息素喷射处理组。在 5、10、20 min 喷射 1 次性信息素的处理中,交配日龄分别为 (4.7 ± 0.1) (4.5 ± 0.2) d 和 (4.2 ± 0.2) d。随着喷射时间间隔缩短,交配日龄有逐渐增大的趋势;其中,5 min 喷射 1 次处理显著大于 20 min 喷射 1 次的处理(图 2b)。

同时,高剂量性信息素环境对草地贪夜蛾雌雄蛾的交配开始时间 ($F_{3,88} = 2.8$, $P = 0.05$) 没有显著影响(图 2c)。但对草地贪夜蛾的交配持续时间有显著影响 ($F_{3,88} = 4.3$, $P = 0.007$)。5 min 喷射 1 次性信息素处理的交配持续时间显著低于 10 min 和 20 min 喷射 1 次处理的交配持续时间(图 2d)。



交配日龄从成虫羽化开始计时, 交配开始时间从进入暗期开始计时。
The mating day-age starts counting from the emergence of adults, and the mating start time starts counting from entering the dark phase.

图 2 性信息素不同释放间隔对草地贪夜蛾交配率(a)、交配日龄(b)、交配开始时间(c)、交配持续时间(d)的影响
Fig. 2 Effects of different release intervals of sex pheromone on the mating rate (a), mating day-age (b), mating start time (c), and mating duration (d) of *Spodoptera frugiperda*

2.3 高剂量性信息素环境下的雌蛾产卵量

高剂量性信息素不同喷射间隔对草地贪夜蛾雌蛾的产卵量有显著影响($F_{3,88} = 37.6$, $P < 0.001$)。在对照组中, 雌蛾平均产卵量高达(809.4 ± 35.2)粒, 显著高于 3 个性信息素喷射处理组。在 5、10、20 min 喷射 1 次性信息素处理中, 雌蛾的平均产卵量分别为(339.4 ± 25.7) (369.1 ± 14.3) (433.2 ± 35.8)粒, 随着喷射时间间隔缩短, 产卵量有逐渐减少的趋势, 但差异不显著(图 3a)。分析交配后雌蛾的单日产卵量, 其每日的产卵量普遍下降(表 1)。

2.4 雌蛾所产卵的孵化率

进一步观察其产下卵的孵化率, 发现高剂量性信息素喷射时间间隔对草地贪夜蛾卵孵化率也有显著影响($F_{3,87} = 66.7$, $P < 0.001$), 在对照组中, 平均孵化率为(94.1 ± 2.1)%, 显著高于高剂量性信息素喷射处理组。在 5、10、20 min 喷射性信息素处理中, 卵孵化率分别为(51.5 ± 4.9)%、(57.4 ± 2.1)%和(49.1 ± 2.8)%(图 3b)。

2.5 雌蛾性信息素的滴度和释放量

性信息素喷射时间间隔对草地贪夜蛾释放的性信息素滴度有显著影响($F_{3,21} = 10.2$, $P < 0.001$)。在对照组中, 雌蛾性腺释放至表皮外的 Z9-14: AC 含量为(23.6 ± 4.7) ng, 而性信息素喷射间隔为 5 min 的处理中, 雌蛾分泌量只有(3.3 ± 0.4) ng, 两者差异显著($P < 0.001$)。喷射间隔为 10、20 min 处理之间则无显著差异, 均显著低于对照组, 但显著高于喷射间隔为 5 min 处理中的草地贪夜蛾性信息素分泌量(图 4a)。草地贪夜蛾性腺溶剂浸提的结果显示, 性信息素喷射时间间隔对草地贪夜蛾性腺中性信息素滴度(腺体内和释放到体外的之和)有显著影响($F_{3,21} = 4.9$, $P = 0.011$)。在对照组中, 雌蛾性腺中的 Z9-14: AC 总滴度为(104.5 ± 17.1) ng, 显著高于 3 个性信息素喷射处理组。而在喷射间隔 5、10、20 min 处理中, 雌蛾的 Z9-14: AC 总滴度分别为(40.3 ± 10.3) (48.7 ± 5.5) (62.3 ± 17.3) ng, 3 个处理间差异不显著(图 4b)。

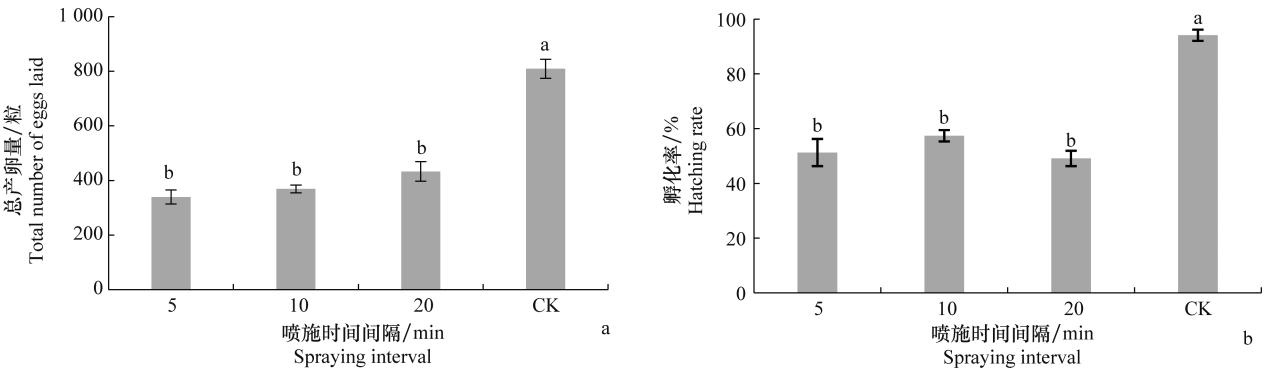


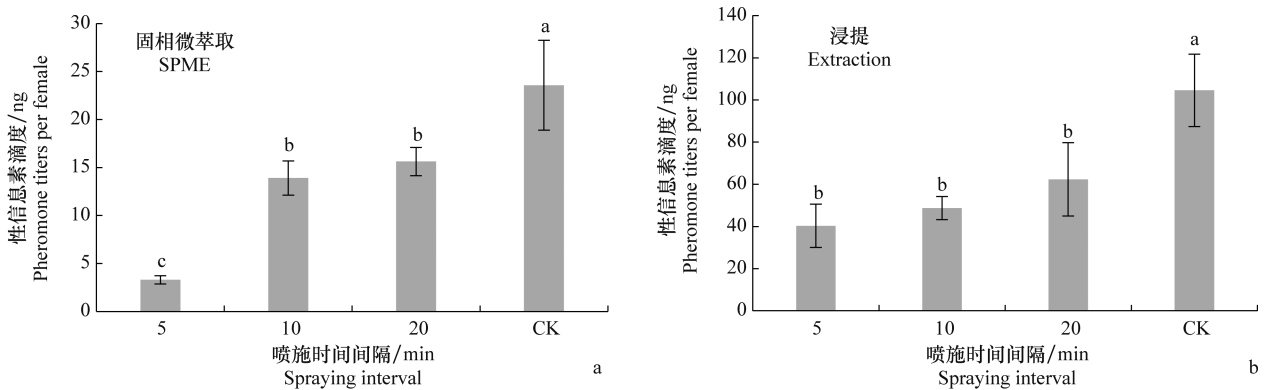
图 3 性信息素不同释放间隔对草地贪夜蛾总产卵量(a)和卵孵化率(b)的影响
Fig. 3 Effects of sex pheromone release intervals of sex pheromone on the total egg loads (a) and hatching rate of eggs (b) of *Spodoptera frugiperda*

表 1 性信息素不同释放间隔对草地贪夜蛾日产卵量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different release intervals of sex pheromone on daily egg loads of *Spodoptera frugiperda*

交配后天数/d Days after mating	日产卵量/粒 Daily egg production			
	对照 Control	5 min	10 min	20 min
1	(19.3±7.6)ef	(27.3±4.3)cd	(31.6±3.7)c	(0.7±0.7)d
2	(260.2±15.8)a	(88.9±11.2)a	(86.5±10.8)a	(144.9±14.1)a
3	(200.9±15.6)b	(82.4±9.7)ab	(88.7±8.3)a	(125.6±9.9)b
4	(164.1±13.2)c	(56.5±1.1)bc	(71.3±7.9)ab	(89.8±7.2)c
5	(90.7±7.1)d	(43.3±6.3)c	(56.8±7.3)b	(58.8±5.3)c
6	(46.8±2.6)e	(39.9±8.1)c	(34.2±7.8)c	(21.3±3.9)d
7	(26.6±3.3)ef	(7.5±4.4)d	(0.0±0.0)c	(0.0±0.0)d
8	(9.2±2.4)f	(0.0±0.0)d	(0.0±0.0)c	(0.0±0.0)d
9	(0.0±0.0)f	(0.0±0.0)d	(0.0±0.0)c	(0.0±0.0)d

1) 表中同列不同字母表示日产卵量差异显著($P<0.05$, Duncan 氏新复极差法)。
Different letters in same column indicate significant differences of daily egg loads ($P<0.05$, Duncan's new multiple range test).



a: 分泌至腺体外的量; b: 总滴度。
a: Amount emitted outside of the glands; b: Total titer.

图 4 性信息素释放间隔对草地贪夜蛾性信息素滴度和分泌的影响

Fig. 4 Effects of the release interval of sex pheromone on the total titer and emission of *Spodoptera frugiperda* sex pheromone

3 结论与讨论

本研究结果表明,在高剂量性信息素环境下,虽然草地贪夜蛾雌雄蛾的总活动时间和距离没有变

化,但雄蛾在暗期中的活动延后多个小时,而雌蛾的活动性则没有变化,这意味着雌雄蛾在活动时间上有了一定的差异。同时,还发现不仅草地贪夜蛾的交配率大幅度下降,而其交配日龄从 2.7 d 推迟到

4.7 d。随着雌雄蛾交配日龄的延迟,导致交配率下降,同时雌蛾的产卵量及卵的孵化率也随之下降,也就是说,其产下卵的数量和质量下降。因此,本试验中产卵量和卵孵化率下降的原因是因为高性信息素环境下的延迟交配。早期报道也证实,草地贪夜蛾延迟交配降低了交配成功率、产卵数、卵孵化率和雌蛾产卵期,同时延长了交配时间和寿命^[32]。性信息素干扰交配导致交配延迟的报道非常多,例如,苹果蠹蛾雌蛾如果延后交配,则雌蛾繁殖率会下降^[27];梨小食心虫的寿命和产卵前期随着交配延迟而增长,但交配率、产下受精卵的雌蛾百分比、产卵量、卵孵化率都下降^[33];小菜蛾 *Plutella xylostella* 的交配试验显示,同时延迟雌雄蛾的交配日龄对交配率、产卵量和卵孵化率的影响更大^[34-35];朱红毛斑蛾 *Phauda flammans* 交配延迟普遍降低了交配的成功率,雄性比雌性受到的影响更严重;交配延迟也降低了雌蛾的产卵量,但延迟交配对任何一种雌雄成虫的寿命都没有影响^[36]。葡萄花翅小卷蛾交配延迟显著影响了每日产卵的模式,较重的雌蛾较轻的雌蛾受到更多限制,并且雌蛾繁殖效率也显著降低,但雌蛾的寿命显著增加,产卵量则减少,因此繁殖力显著降低^[26]。

已有报道,草地贪夜蛾的雌蛾能检测到本身释放的性信息素,在田间,性信息素诱芯会偶尔会诱到其雌蛾^[37]。本研究表明,草地贪夜蛾雌蛾在高剂量性信息素环境下,既影响雌蛾腺体内的性信息素合成,又使分泌至腺体外的性信息素量显著降低。而且,环境中性信息素的浓度越高,抑制作用越强烈。性信息素释放量的下降最终会影响雌蛾对雄蛾的引诱作用。草地贪夜蛾雌蛾产下的是卵块,这一生物学特性是否意味着更需要注意草地贪夜蛾雌蛾在田间分布,有关机制还有待进一步的研究。也就是说,在田间虫口密度高时,通过抑制雌蛾的性信息素滴度和释放量,避免过多的雄蛾寻找该区域的雌蛾。在梨小食心虫和蔷薇斜条卷叶蛾 *Choristoneura rosaceana* (Harris)中,性信息素还会改变雌蛾的求偶节律^[38]。在恒定释放的信息素容器中求偶雌蛾的总比例减少了 1/2,产卵量也显著减少。在性信息素反 8-反 10-十二碳烯醇环境下,苹果蠹蛾雌蛾的求偶比例反而高,但没有改变其求偶的时间节律和产卵率^[39]。在另一个报道中,对于梨小食心虫和苹果褐卷蛾 *Pandemis pyrusana* 雌蛾,在性信息素预处

理后,交尾减少了,但求偶百分率没有减少。相反,对于苹果蠹蛾和蔷薇卷叶蛾则没有影响^[40]。因此,这种影响是依虫而异。

本文结果也证实了喷射时间间隔的影响,也就是空气中性信息素气味分子的浓度是一个重要因子。一般田间常用的方法是被动释放的交配干扰释放器,例如通过基质材料的各种聚乙烯管、聚乙烯片以及微胶囊等,这种被动的释放器受环境温度的影响较大,而且不管靶标害虫是否在活动,即使白天靶标害虫并不处于求偶时段也都在释放性信息素,浪费严重,在田间的设置点也比较多,农民用工较大。电子机械控制的喷射装置的优势是可以根据害虫的求偶时间和昼夜节律特点来控制释放量和时间,可以设置在昆虫求偶活动时间之前开始喷射,结束时则终止,释放量不受环境中温度的影响。我们的结果表明,不同释放间隔对草地贪夜蛾交配率、交配日龄、性信息素的滴度和释放量有显著影响。间隔 5 min 喷射,空气中的性信息素化合物浓度更高、更恒定。在实际田间应用中,间隔时间的设置是比较关键的。

综上所述,在高剂量性信息素环境中,性信息素干扰技术不仅可以干扰草地贪夜蛾雌、雄蛾对性信息素气味源的定向飞行行为反应,使雄蛾寻找配偶困难或不认识自己的配偶。同时,在时空上错过最佳的交配日龄和暗期活动时间,交配延迟还影响雌雄蛾的交配质量,降低了雌蛾的产卵量和卵孵化率,由此,大幅度地减少了下一代的有效卵量。虽然在高剂量性信息素环境中,草地贪夜蛾交配开始时间和交配持续时间没有显著影响,但降低了雌雄交配率,同时,影响雌蛾性信息素的滴度和分泌量,从而降低雌蛾在求偶时被雄蛾发现的几率。这些因素综合提高了交配干扰的防控效果。

参考文献

- [1] 吴秋琳,姜玉英,吴孔明. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 1-6.
- [2] BABENDREIER D, TOEPFER S, BATEMAN M, et al. Potential management options for the invasive moth *Spodoptera frugiperda* in Europe [J]. Journal of Economic Entomology, 2022, 115(6): 1772-1782.
- [3] VAN DEN BERG J, BREWER M J, REISIG D D. A special collection: *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm): Ecology and management of its world-scale invasion outside of the A-

- mericas [J]. Journal of Economic Entomology, 2022, 115(6): 1725–1728.
- [4] 江幸福, 张蕾, 程云霞, 等. 草地贪夜蛾迁飞行为与监测技术研究进展[J]. 植物保护, 2019, 45(1): 12–18.
- [5] WU Pengxiang, HEAD M L, LIU Chang, et al. The high invasion success of fall armyworm is related to life-history strategies across a range of stressful temperatures [J]. Pest Management Science, 2022, 78(6): 2398–2404.
- [6] GE Shishuai, SUN Xiaoxu, HE Wei, et al. Potential trade-offs between reproduction and migratory flight in *Spodoptera frugiperda* [J/OL]. Journal of Insect Physiology, 2021, 132: 104248. DOI: 10.1016/j.jinsphys.2021.104248.
- [7] 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.
- [8] CRUZ I, FIGUEIREDO M D, SILVA R B, et al. Using sex pheromone traps in the decision-making process for pesticide application against fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* [Smith] [Lepidoptera: Noctuidae]) larvae in maize [J]. International Journal of Pest Management, 2012, 58(1): 83–90.
- [9] JACOBSON M, REDFERN R E, JONES W A, et al. Sex pheromones of the southern armyworm moth: isolation, identification, and synthesis [J]. Science, 1970, 170(3957): 542–544.
- [10] HIRAI Y, MITCHELL E R. Sex pheromone of fall armyworm: Laboratory evaluation of male response and inhibition of mating by pheromone components [J]. Journal of Chemical Ecology, 1982, 8(1): 267–273.
- [11] 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.
- [12] JIANG Nanji, MO Baotong, GUO Hao, et al. Revisiting the sex pheromone of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*, a new invasive pest in South China [J]. Insect Science, 2022, 29(3): 865–878.
- [13] WANG Chan, ZHANG Sai, GUO Mengbo, et al. Optimization of a pheromone lure by analyzing the peripheral coding of sex pheromones of *Spodoptera frugiperda* in China [J]. Pest Management Science, 2022, 78(7): 2995–3004.
- [14] MITCHELL E, TUMLINSON J, MCNEIL J. Field-evaluation of commercial pheromone formulations and traps using a more effective sex-pheromone blend for the fall armyworm (Lepidoptera, Noctuidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 1985, 78(6): 1364–1369.
- [15] MEAGHER R L, NAGOSHI R N, ARMSTRONG J S, et al. Captures and host strains of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) males in traps baited with different commercial pheromone blends [J]. Florida Entomologist, 2013, 96(3): 729–740.
- [16] BATISTA-PEREIRA L G, STEIN K, PAULA A F, et al. Isolation, identification, synthesis, and field evaluation of the sex pheromone of the Brazilian population of *Spodoptera frugiperda* [J]. Journal of Chemical Ecology, 2006, 32(5): 1085–1099.
- [17] UNBEHEND M, HANNIGER S, MEAGHER R L, et al. Pheromonal divergence between two strains of *Spodoptera frugiperda* [J]. Journal of Chemical Ecology, 2013, 39(3): 364–376.
- [18] MEAGHER R L, NAGOSHI R N. Attraction of fall armyworm males (Lepidoptera: Noctuidae) to host strain females [J]. Environmental Entomology, 2013, 42(4): 751–757.
- [19] GROOT A T, MARR M, SCHOF L G, et al. Host strain specific sex pheromone variation in *Spodoptera frugiperda* [J/OL]. Frontiers in Zoology, 2008, 5: 20. DOI: 10.1186/1742-9994-5-20.
- [20] GROOT A T, MARR M, CHCKEL D G, et al. The roles and interactions of reproductive isolation mechanisms in fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) host strains [J]. Ecological Entomology, 2010, 35(S1): 105–118.
- [21] 冯波, 郭前爽, 毛必鹏, 等. 不同地区田间草地贪夜蛾卵巢的结构和发育[J]. 昆虫学报, 2020, 63(5): 639–648.
- [22] STELINSKI L L, MCGHEE P, HAAS M, et al. Sprayable microencapsulated sex pheromone formulations for mating disruption of four tortricid species: effects of application height, rate, frequency, and sticker adjuvant [J]. Journal of Economic Entomology, 2007, 100(4): 1360–1369.
- [23] DOU Xiaoyi, LIU Sijun, SOROKER V, et al. Pheromone gland transcriptome of the pink bollworm moth, *Pectinophora gossypiella*: comparison between a laboratory and field population [J/OL]. PLoS ONE, 2019, 14(7): e0220187. DOI: 10.1371/journal.pone.0220187.
- [24] STELINSKI L L, MILLER J R, ROGERS M E. Mating disruption of citrus leafminer mediated by a noncompetitive mechanism at a remarkably low pheromone release rate [J]. Journal of Chemical Ecology, 2008, 34(8): 1107–1113.
- [25] LAPOINTE S L, STELINSKI L L, ROBINSON R D. A novel pheromone dispenser for mating disruption of the leafminer *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillariidae) [J]. Journal of Economic Entomology, 2011, 104(2): 540–547.
- [26] LUCCHI A, SAMBADO P, JUAN ROYO A B, et al. Disrupting mating of *Lobesia botrana* using sex pheromone aerosol devices [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(22): 22196–22204.
- [27] JONES V P, WIMAN N G, BRUNNER J F. Comparison of delayed female mating on reproductive biology of codling moth and obliquebanded leafroller [J]. Environmental Entomology, 2008, 37(3): 679–685.

- [17] ILYUSHINA N, GOUMENOU M, STIVAKTAKIS P D, et al. Maximum tolerated doses and erythropoiesis effects in the mouse bone marrow by 79 pesticides' technical materials assessed with the micronucleus assay [J]. *Toxicology Reports*, 2019, 6: 105–110.
- [18] 许天衡. 苯醚甲环唑在土壤中的消解及其对土壤微生物和烟曲霉敏感性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [19] RUEEGG J, SIEGFRIED W. Residues of difenoconazole and penconazole on apple leaves and grass and soil in an apple orchard in north-eastern Switzerland [J]. *Crop Protection*, 1996, 15(1): 27–31.
- [20] 王飞菲, 赵恒科, 张剑峰, 等. 苯醚甲环唑对温室土壤微生物及土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 299–304.
- [21] 刘亚冬, 吕陈生, 申鸿, 等. 玉米种衣剂在土壤中的残留动态及对土壤酶活性和可培养细菌的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(6): 76–84.
- [22] FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ A J, CARDONI M, GÓMEZ-LAMA C C, et al. Linking belowground microbial network changes to different tolerance level towards *Verticillium* wilt of olive [J/OL]. *Microbiome*, 2020, 8: 11. DOI: 10.1186/s40168-020-0787-2.
- [23] GAO Min, XIONG Chao, GAO Cheng, et al. Disease-induced changes in plant microbiome assembly and functional adaptation [J/OL]. *Microbiome*, 2021, 9: 187. DOI: 10.1186/s40168-021-01138-2.
- [24] COYTE K Z, SCHLUTER J, FOSTER K R, et al. The ecology of the microbiome: Networks, competition, and stability [J]. *Science*, 2015, 350(6261): 663–666.
- [25] YUAN Jun, WEN Tao, ZHANG He, et al. Predicting disease occurrence with high accuracy based on soil macroecological patterns of *Fusarium* wilt [J]. *ISME Journal*, 2020, 14(12): 2936–2950.
- (责任编辑: 杨明丽)
-
- (上接 92 页)
- [28] LEONHARDT B A, MASTRO V C, LEONARD D S, et al. Control of low-density gypsy moth (Lepidoptera: Lymantriidae) populations by mating disruption with pheromone [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1996, 22(7): 1255–1272.
- [29] ONUFRIEVA K S, HICKMAN A D, LEONARD D S, et al. Efficacies and second-year effects of SPLAT GM™ and SPLAT GM™ organic formulations [J]. *Insects*, 2014, 6(1): 1–12.
- [30] LANCE D R, LEONARD D S, MASTRO V C, et al. Mating disruption as a suppression tactic in programs targeting regulated Lepidopteran pests in US [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2016, 42(7): 590–605.
- [31] KLASSEN D, LENNOX M D, DUMONT M J. Dispensers for pheromonal pest control [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 325 (Pt A): 116590. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116590.
- [32] WANG Yaling, ZHANG Hongyan, WANG Xiangping. Effects of delayed mating on the reproductive performance and longevity of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *Neotropical Entomology*, 2021, 50(4): 622–629.
- [33] FRASER H W, TRIMBLE R M. Effect of delayed mating on reproductive biology of the oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) [J]. *The Canadian Entomologist*, 2001, 133(2): 219–227.
- [34] SONG Wen, LIU Li, LI Pengyan, et al. Analysis of the mating and reproductive traits of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) [J/OL]. *Journal of Insect Science*, 2014, 14: 267. DOI: 10.1093/jisesa/ieu129.
- [35] WANG Xiangping, FANG Yuling, ZHANG Zhongning. Effects of delayed mating on the fecundity, fertility and longevity of females of diamondback moth, *Plutella xylostella* [J]. *Insect Science*, 2011, 18(3): 305–310.
- [36] ZHENG Xialin, LIU Junyan, LU Wen, et al. Mating delay reduces reproductive performance but not longevity in a monandrous moth [J/OL]. *Journal of Insect Science*, 2020, 20(2): 3. DOI: 10.1093/jisesa/ieaa009.
- [37] CRUZ-DIAZ M, ROBLEDO N, REYES-PRADO H, et al. *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) females can detect the sex pheromone emitted by conspecific females [J]. *Florida Entomologist*, 2022, 105(2): 126–132.
- [38] STELINSKI L, HOLDCRAFT R, RODRIGUEZ-SAONA C. Female moth calling and flight behavior are altered hours following pheromone autodetection: Possible implications for practical management with mating disruption [J]. *Insects*, 2014, 5(2): 459–473.
- [39] WEISSLING T J, KNIGHT A L. Oviposition and calling behavior of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae) in the presence of codlemone [J]. *Annals of the Entomological Society of America*, 1996, 89: 142–147.
- [40] KUHNS E H, PELZ-STELINSKI K, STELINSKI L L. Reduced mating success of female tortricid moths following intense pheromone auto-exposure varies with sophistication of mating system [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2012, 38(2): 168–175.
- (责任编辑: 杨明丽)