

交配和温度对草地贪夜蛾性信息素通讯的影响*

刘思若^{1**} 郭金梦¹ 郑树壕¹ 闫 祺¹ 郭慧芳² 董双林^{1***}

(1. 南京农业大学植物保护学院, 农作物生物灾害综合治理教育部重点实验室, 南京 210095;

2. 江苏省农业科学院植物保护研究所, 南京 210014)

摘 要 【目的】明确交配和温度对草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 性信息素通讯的影响, 为田间草地贪夜蛾的性信息素防治提供参考。【方法】采用溶剂浸提法提取草地贪夜蛾雌蛾性信息素腺体中的化学组分; 利用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术对提取物中的组分进行化学鉴定; 利用气相色谱 (GC) 技术分析雌蛾腺体中各组分的含量; 利用触角电位 (EAG) 技术测定雄蛾对腺体各组分及性信息素类似物的电生理反应。在不同温度 (20–35) °C 下饲养草地贪夜蛾, 以研究温度对其性信息素通讯的影响。

【结果】GC-MS 分析发现, 草地贪夜蛾雌蛾腺体内含有 Z7-12:Ac 等 7 种组分。交配实验表明, 雌蛾在 1 个暗期内只交配 1 次, 在羽化后 7 d 内可交配多次, 其中交配 2 次及以上的占 44% (单对放置) 和 67% (30 对放置)。交配显著抑制雌蛾在次日暗期 (交配后第 1 个暗期) 的求偶活动, 但在交配后第 2 个暗期基本恢复正常; 在交配后第 1 个暗期, 雌蛾腺体中主要组分 Z9-14:Ac 的含量和比例较对照雌蛾显著升高, 其他组分无显著变化。在 20–35 °C 的饲养温度范围内, 雌蛾腺体内 16:Ac 的含量在 35 °C 时最高, 在 20 °C 时未能检测出; 各测试温度下 Z11-16:Ac 的含量相差不显著; 其余 5 种组分均在 25 °C 时最高; 主要活性组分 Z7-12:Ac 和 Z9-14:Ac 在 35 °C 时显著降低。饲养温度对腺体内各组分的相对比例也有较大影响, 12:Ac、Z11-14:Ac、Z11-16:Ac 和 16:Ac 所占比例均在 30–35 °C 时较高, 而 Z9-14:Ac 则在 20–25 °C 时较高。不同饲养温度所得雄蛾对腺体主要组分的触角电位反应无显著差异。【结论】交配显著抑制草地贪夜蛾雌蛾在次日的求偶行为; 25 °C 饲养条件最适宜雌蛾腺体内性信息素等组分的合成。

关键词 草地贪夜蛾; 交配; 温度; 性信息素; 触角电位

Effects of mating and temperature on sex pheromone communication in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)

LIU Si-Ruo^{1**} GUO Jin-Meng¹ ZHENG Shu-Hao¹ YAN Qi¹
GUO Hui-Fang² DONG Shuang-Lin^{1***}

(1. Key Laboratory of Integrated Management of Crop Diseases and Pests, Ministry of Education,
College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract 【Objectives】To clarify the effects of mating and temperature on the sex pheromone communication system of *Spodoptera frugiperda*. 【Methods】Chemical components were extracted from the sex pheromone glands of female moths with hexane, and their chemical structure determined by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The content of each component was quantified by GC using the internal standard method. The electroantennogram (EAG) method was used to measure the responses of male antennae to glandular components and their analogs. The effect of temperature on pheromone communication was investigated by rearing moths at different temperatures (20–35 °C). 【Results】GC-MS analysis identified seven components (Z7-12:Ac and etc.) in the sex pheromone glands of female moths. The results of mating experiments indicate that female moths mate only once in each dark period, but many times within seven days after emergence; 44% of

*资助项目 Supported projects: 江苏省农业科技自主创新基金资助 (CX(20)2033); 国家重点研发计划资助 (2021YFD1400700)

**第一作者 First author, E-mail: 2873554197@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: sldong@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-03-07; 接受日期 Accepted: 2022-05-02

female moths housed with a single male mated twice or more compared to 67% of those kept in a population of 30 pairs. The mating activity of female moths was significantly lower on the first dark period after mating, but returned to almost normal levels during the second dark period after mating. The content and proportion of Z9-14:Ac, the main active component in the glands of mated female moths, was significantly higher than in those of control moths on the day after mating but there was no significant difference in the contents of the other six glandular components. Female moths raised at 35 °C secreted the most 16:Ac, whereas this was too low to be detected in those reared at 20 °C. There was no significant difference in the contents of Z11-16:Ac in moths reared at all test temperatures. The other five components were all highest in moths reared at 25 °C, and the content of two major active components (Z7-12:Ac and Z9-14:Ac) were significantly lower in moths reared at 35 °C. Temperature also affected the relative proportions of each component secreted, the ratios of 12:Ac, Z11-14:Ac, Z11-16:Ac and 16:Ac were higher in moths reared at 30-35 °C, whereas the ratio of Z9-14:Ac was higher in those reared at 20-25 °C. EAG test results indicate that temperature had no significant effect on the EAG responses of male moths to sex pheromones.

[Conclusion] Mating significantly inhibited the pheromone signaling behavior of female *S. frugiperda* in the next dark period. 25 °C was the optimum temperature for the synthesis of sex pheromones and other glandular components.

Key words *Spodoptera frugiperda*; mating; temperature; sex pheromone; electroantennography

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 属鳞翅目 (Lepidoptera) 夜蛾科 (Noctuidae), 是重要的迁飞性农业害虫。其原产地为美洲, 2016 年起传播至非洲及亚洲各国, 2018 年 12 月侵入我国云南, 2019 年 10 月已扩散到我国 26 个省份, 造成严重的经济损失 (姜玉英等, 2019)。根据受害的主要作物种类, 草地贪夜蛾可分为玉米型和水稻型, 入侵我国的为玉米型 (混有极少量的水稻型基因) (张磊等, 2019; Liu *et al.*, 2019), 尚未有大规模危害水稻的报道。性信息素已经普遍应用于草地贪夜蛾的种群监测与成虫诱捕, 成为草地贪夜蛾可持续防控的一项重要技术 (李强等, 2021)。

草地贪夜蛾性信息素的研究始于 1967 年 (Sekul and Sparks, 1967), 迄今从不同地理种群和寄主型的雌蛾腺体中共鉴定出 14 种组分, 但组分数量、活性组分种类及比例在地理种群和寄主型间存在差异 (江南纪和王琛柱, 2019; Wang *et al.*, 2022)。就活性组分而言, Z9-14:Ac 和 Z7-12:Ac 是大部分地理种群的主要活性组分, 其二元诱芯普遍应用于雄蛾诱杀防治; 但在一些地理种群中, Z11-16:Ac (Meagher *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2022)、Z9-12:Ac (Sekul *et al.*, 1976) 和 E7-12:Ac (Batista *et al.*, 2006; Unbehend *et al.*, 2014) 也在雄蛾引诱中发挥作用。除地理种群外, 环境温度、光周期和交配经历等因素也对昆虫的性信息素 (特别是组分的含量和比例) 产生影响

(张庆贺, 1993; Zhou *et al.*, 2000; 董双林和杜家纬, 2002; 余棋等, 2017)。如云杉卷叶蛾 *Choristoneura fumiferana* 雌蛾在交配 24 h 后, 腺体内性信息素含量显著下降并可持续 2 d (Delisle *et al.*, 2000)。对云杉卷叶蛾、家蚕 *Bombyx mori* 和茶尺蠖 *Ectropis oblique* 等多种昆虫的研究表明, 雄蛾在交配时传递给雌蛾的性肽 (Sex peptide) 抑制了雌蛾的求偶行为和性信息素的合成 (Delisle and Simard, 2002; Hirashima *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2011)。

鉴于草地贪夜蛾发生范围广、温度跨度大, 且雌虫交配与否直接影响田间有效卵量和幼虫量, 本文针对雌蛾交配状态和环境温度对草地贪夜蛾雌蛾性信息素的产生以及雄蛾对性信息素电生理反应的影响进行研究, 以期为草地贪夜蛾性信息素在测报和防治中的高效应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及饲养

草地贪夜蛾虫源于 2019 年采集自广州市郊区玉米地, 试虫采回后养于室内, 养虫室光暗周期比为 14L : 10D, 温度为 (26 ± 1) °C, 相对湿度为 60% ± 10%。幼虫用人工饲料饲养, 人工饲料配方参照文献 (黄春霞等, 2002), 5 龄前用饲养盒 (14 cm × 9 cm × 6 cm) 群养, 每盒约 80 头, 5 龄后移至塑料杯 (高 3 cm、下口直径 3.3 cm、

上口直径 4.6 cm) 单头饲养。幼虫化蛹后雌雄分开, 放入羽化笼 (25 cm×25 cm×35 cm)。每日检查羽化笼, 将当日羽化的成虫放入同一羽化笼中, 并饲以 10% 蜂蜜水, 待用。

1.2 主要仪器及试剂

GDN 型光照培养箱 (型号: GXZ-300/310) 由宁波江南仪器有限公司生产; 气相色谱仪 (型号: SCION 456-GC) 由美国 Bruker 公司生产; 气相色谱-质谱联用仪 (型号: 7890B-5977B) 由美国 Agilent 公司生产; 触角电位仪由荷兰 Syntech 公司生产。

色谱级正己烷 (纯度 $\geq 98\%$) 购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 无水硫酸钠 (纯度 $\geq 98\%$) 购于国药集团化学试剂有限公司; 十二碳烯乙酸酯 (12:Ac)、顺 7-十二碳烯乙酸酯 (Z7-12:Ac)、反 7-十二碳烯乙酸酯 (E7-12:Ac)、顺 9-十二碳烯乙酸酯 (Z9-12:Ac)、11-十二碳烯乙酸酯 (11-12:Ac)、十四碳烯乙酸酯 (14:Ac)、顺 9-十四碳烯醛 (Z9-14:Ald)、顺 9-十四碳烯乙酸酯 (Z9-14:Ac)、顺 10-十四碳烯乙酸酯 (Z10-14:Ac)、十六碳烯乙酸酯 (16:Ac)、顺 11-十六碳烯醛 (Z11-16:Ald) 和顺 11-十六碳烯乙酸酯 (Z11-16:Ac) 均购于常州宁录生物科技有限公司; 顺 11-十四碳烯乙酸酯 (Z11-14:Ac) 购于沈阳北欣贸易有限公司; 十一碳烯乙酸酯 (11:Ac) 购于 Sigma 公司。这些化合物纯度均在 95% 以上。

1.3 雌蛾交配次数测定

首先测定一个暗期内雌蛾的交配次数。根据前期对雌蛾求偶日节律的观察, 3 日龄 (羽化后第 3 天) 雌蛾的求偶率最高, 故对 3 日龄雌蛾的暗期进行测定。试虫分单对放置和群体放置两个处理。单对放置处理中, 将 2 日龄的雌蛾和雄蛾配对放入塑料杯 (高 13 cm、下口直径 5.7 cm、上口直径 9.5 cm) 内, 每杯一对, 共 30 杯 (重复)。在群体放置处理中, 将 2 日龄雌蛾和雄蛾各 30 头放入一个交配笼 (25 cm×25 cm×35 cm) 内, 共 3 笼 (重复)。塑料杯和交配笼内放有浸润 10% 蔗糖水的脱脂棉球供试虫补充营养。经过

一个暗期 (3 日龄暗期) 后, 解剖雌蛾检查精苞数, 确定交配次数。

其次测定整个成虫期雌蛾的交配次数。将 1 日龄成虫进行雌雄配对, 7 d 后雌蛾开始死亡, 停止实验, 检查结果。同样分单对放置和群体放置两个处理, 分别重复 40 杯和 3 笼, 具体方法同前。7 d 后解剖雌蛾检查精苞数。实验在室温 (25 ± 2) °C 下进行。

1.4 交配对雌蛾求偶行为的影响

在交配笼内放置 1 日龄处女雌蛾和雄蛾各 20 头, 共 4 笼, 在 2 日龄暗期检查交配情况, 将正在交配的成虫小心转移至透明塑料杯中, 每杯一对, 共 30 对, 杯中放置适量 10% 蜂蜜水湿润的脱脂棉球, 杯口用培养皿盖住。暗期结束后, 交配成虫自然分开, 将雄虫移走。从 3 日龄暗期开始, 逐日观察已交配雌蛾在暗期的求偶行为, 观察 4 d。以处女雌蛾为对照。

1.5 交配对雌蛾腺体组分的影响

在交配笼内放置 1 日龄雌蛾和雄蛾各 20 头, 共 3 笼, 经过一个暗期 (2 日龄暗期) 后将雌雄分开。在 3 日龄暗期 4 h 时, 进行腺体组分提取。剪取腺体的同时检查雌蛾的交配状况, 交配雌蛾与处女雌蛾 (对照) 分别提取。实验在室温 (25 ± 2) °C 下进行。

1.6 温度对雌蛾腺体组分含量及雄蛾 EAG 反应的影响

将初孵幼虫饲养在不同温度的光照培养箱内。温度设 15、25、30 和 35 °C 共 4 个处理, 相对湿度为 $60\% \pm 5\%$, 光周期为 14L:10D。幼虫及成虫饲养方法同 1.1。在雌蛾处于 3 日龄暗期 4 h 时, 进行腺体组分提取; 在雄蛾处于 3 日龄暗期 4 h 时, 进行 EAG 反应测定。

1.7 雄蛾触角电位 (EAG) 反应测定

试验开始前, 雄蛾一直放在各自不同温度的培养箱中。以正己烷作溶剂, 配制 15 种性信息素等组分的溶液, 浓度均为 $50 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 。具体测定方法参考 Yang 等 (2009)。EAG 测定时, 首

先测定正己烷, 然后测定各组分, 最后再测定 1 次正己烷。每个温度处理测定 12-17 头雄蛾, 每头雄蛾测定 1 根触角。测定在室温 (25 ± 2) $^{\circ}\text{C}$ 下进行。

1.8 腺体组分的提取及测定

1.8.1 腺体组分的 GC-MS 定性 在暗期 4 h 时对 3 日龄雌蛾进行提取, 提取方法参考叶占峰等 (2020)。剪取 80 个腺体放入一个加有 1 mL 正己烷的样品瓶中, 加密封盖, 室温下静置 0.5 h 后, 将样品瓶中的浸提液进行过滤并浓缩至 10 μL 。GC-MS 条件为: 起始温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 保持 2 min, 然后以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 160 $^{\circ}\text{C}$, 再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的升温速率升至 250 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min; 进样口温度为 220 $^{\circ}\text{C}$, 检测室温度为 250 $^{\circ}\text{C}$, 氦气作载气, 进样量为 2 μL , 不分流。

1.8.2 腺体组分的 GC 定量 在 1 个内衬管中加入 20 μL 含有内标 (11:Ac, 浓度 10 $\text{ng}\cdot\mu\text{L}^{-1}$) 的正己烷, 然后剪取 10 个腺体放入内衬管, 再将内衬管放入含有 1 mL 正己烷的样品瓶中, 加密封盖, 室温下静置 0.5 h 后进行 GC 分析。分析以氮气作载气, 进样量为 1 μL , 分流比 4 : 1,

其他同 1.8.1。采用内标法, 以峰面积比对各腺体组分进行定量。

交配对性信息素的影响实验中, 每个处理测定 5 个重复, 共 50 头雌蛾; 温度对性信息素的影响实验中, 每个处理测定 6-9 个重复, 共 60-90 头雌蛾。

1.9 数据分析

使用 Excel 2019 和 SPASS 22.0 软件对数据进行统计分析, 采用独立样本 t -检验 ($P < 0.05$) 和 Tukey's 单因素方差分析 ($P < 0.05$) 进行方差分析和多重比较。图表中数据均为平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果与分析

2.1 雌蛾腺体组分的鉴定

经 GC-MS 分析, 雌蛾腺体浸提液中主要存在 7 种组分, 通过与标准化合物保留时间和分子离子峰进行比对, 确定其分别为 Z7-12:Ac、Z9-14:Ald、12:Ac、Z9-14:Ac、Z11-14:Ac、Z11-16:Ac 和 16:Ac (图 1)。

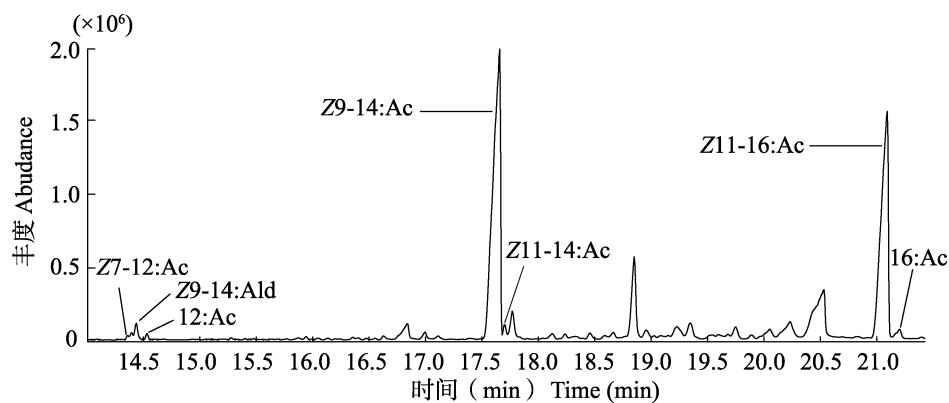


图 1 草地贪夜蛾雌蛾腺体提取液的总离子流图

Fig. 1 Total ion chromatogram of the pheromone gland extract of female *Spodoptera frugiperda*

2.2 交配对雌蛾求偶行为和腺体组分的影响

2.2.1 雌蛾的交配次数 精苞检查结果表明, 在 3 日龄暗期内, 不论单对放置还是群体放置, 雌蛾最多交配 1 次, 单对放置交配率为 56.7%, 群

体放置交配率为 79.5%。在整个成虫期 (羽化后 7 d) 内, 单对和群体放置处理中, 雌蛾均最多交配 6 次; 单对放置的交配率为 79.1%, 其中交配 1-2 次的最多 (占 55.8%), 交配 4 次以上的很少; 群体放置时交配率为 91.2%, 其中交配 1-4

次的雌蛾最多（占 82.5%），交配 5 次以上的很少（表 1）。

2.2.2 交配对雌蛾求偶行为的影响 雌蛾交配

后第 1 个暗期（3 日龄暗期）几乎不发生求偶行为，但第 2 个暗期基本恢复正常，虽然在前半个暗期的求偶率较对照雌蛾仍有所降低（图 2）。

表 1 草地贪夜蛾雌蛾在羽化后 7 d 内不同交配次数所占百分率

Table 1 Percentage of different mating times of female *Spodoptera frugiperda* in 7 days after emergence

处理 Treatments	交配次数 Mating times						
	0	1	2	3	4	5	6
单对放置 In individual pair	20.9	34.9	20.9	11.6	2.3	4.7	4.7
群体放置 In population	8.8	22.1	20.6	22.1	17.7	4.4	4.4

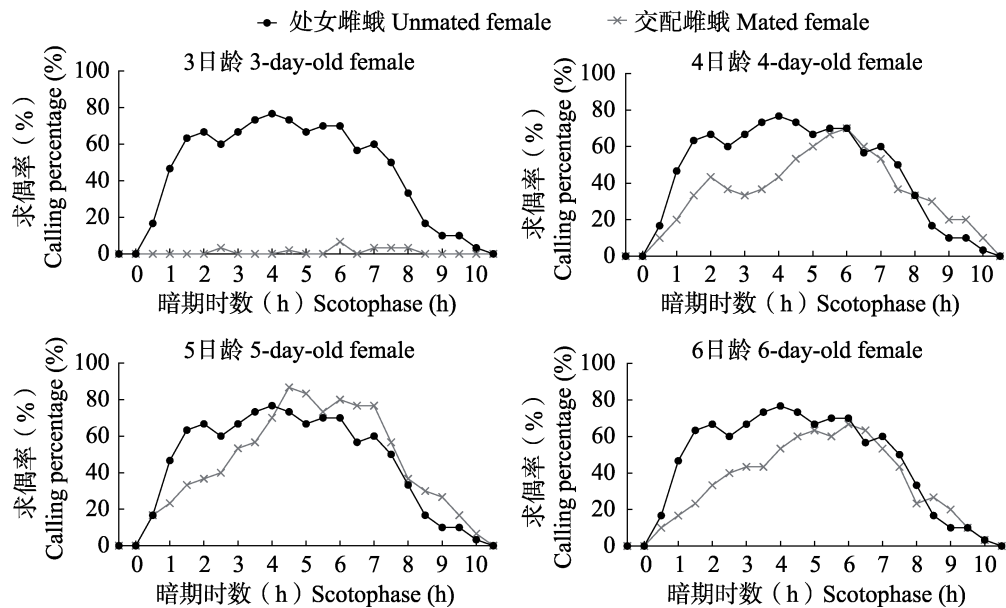


图 2 交配对草地贪夜蛾雌蛾求偶行为的影响
Fig. 2 Effects of mating on the calling behavior of female *Spodoptera frugiperda*

2.2.3 交配对雌蛾腺体组分含量及比例的影响
与同日龄处女雌蛾相比，雌蛾在交配后的第 1 个暗期，Z9-14:Ac 的含量显著升高 ($P<0.05$)，其他 6 种组分没有显著差异 ($P>0.05$)（图 3）。相应地，交配雌蛾中 Z9-14:Ac 的比例（占总量的百分比）显著升高 ($P<0.05$)，其他 6 种组分没有显著变化 ($P>0.05$)（表 3）。在 7 个组分中，Z7-12:Ac (A) 和 Z9-14:Ac (D) 二元混合物常用于田间雄蛾的诱杀防治，交配对这 2 种组分间的相对比例并没有显著影响 ($P>0.05$)（表 2）。

2.3 温度对雌蛾腺体组分含量和比例的影响

2.3.1 温度对雌蛾腺体内各组分含量和比例的影响
温度对草地贪夜蛾雌蛾腺体内各组分的

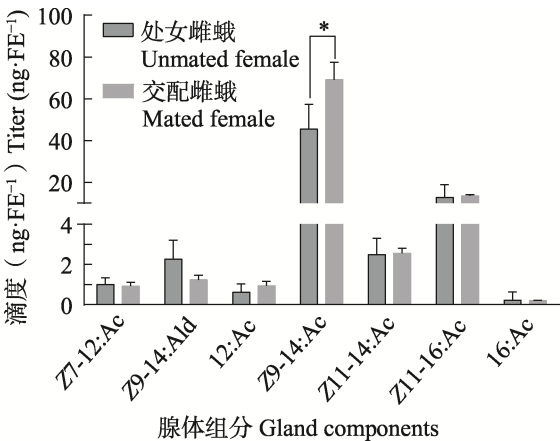


图 3 交配对草地贪夜蛾雌蛾腺体内各组分含量的影响
Fig. 3 Effects of mating on the titer of each gland component of female *Spodoptera frugiperda*

*表示差异显著 ($P<0.05$, t -检验)。
* indicates significant differences ($P<0.05$, t -test).

表 2 交配对草地贪夜蛾雌蛾腺体内各组分所占百分率的影响

Table 2 Effects of mating on the percentage of each gland component of female *Spodoptera frugiperda*

处理 Treatments	腺体组分 Gland components							A/(A+D)
	A	B	C	D	E	F	G	
处女雌蛾 Unmated	1.6±0.1	3.4±0.3	1.0±0.3	70.1±4.3	3.8±0.4	19.5±3.7	0.3±0.3	98.7±0.2
交配雌蛾 Mated	1.0±0.1	1.4±0.1	1.0±0.1	77.7±1.0*	2.9±0.1	15.7±1.3	0.2±0.0	97.8±0.1

A-G 分别代表 Z7-12:Ac、Z9-14:Ald、12:Ac、Z9-14:Ac、Z11-14:Ac、Z11-16:Ac 和 16:Ac。同列数据后标有*表示差异显著 ($P<0.05$, t -检验)。

A to G represents Z7-12:Ac, Z9-14:Ald, 12:Ac, Z9-14:Ac, Z11-14:Ac, Z11-16:Ac and 16:Ac, respectively. * indicates significant differences in same column ($P<0.05$, t -test).

含量具有较大的影响(图 4)。25 °C 时, Z7-12:Ac、Z9-14:Ald、12:Ac、Z9-14:Ac 和 Z11-14:Ac 的含量均高于其他 3 个温度下对应组分的含量。相较于 25 °C, 20 °C 时 12:Ac 的含量显著降低 ($P<0.05$), 16:Ac 的含量过低, 未能检测到; 30 °C 时, Z9-14:Ald 和 Z9-14:Ac 的含量显著降低 ($P<0.05$); 35 °C 时, Z7-12:Ac、Z9-14:Ald 和 Z9-14:Ac 的含量较 25 °C 时显著降低 ($P<0.05$),

16:Ac 的含量显著增加 ($P<0.05$)。

温度对各组分所占比例也有影响, 12:Ac、Z11-14:Ac、Z11-16:Ac 和 16:Ac 的比例均在 30-35 °C 时较高, 而主要活性组分 Z9-14:Ac 的比例则在 20-25 °C 时较高, Z7-12:Ac 和 Z9-14:Ald 的比例在 4 个温度间没有显著差异 ($P>0.05$)。温度对 2 个田间主要活性组分 (Z9-14:Ac 和 Z7-12:Ac) 的相对比例没有显著影响 ($P>0.05$) (表 3)。

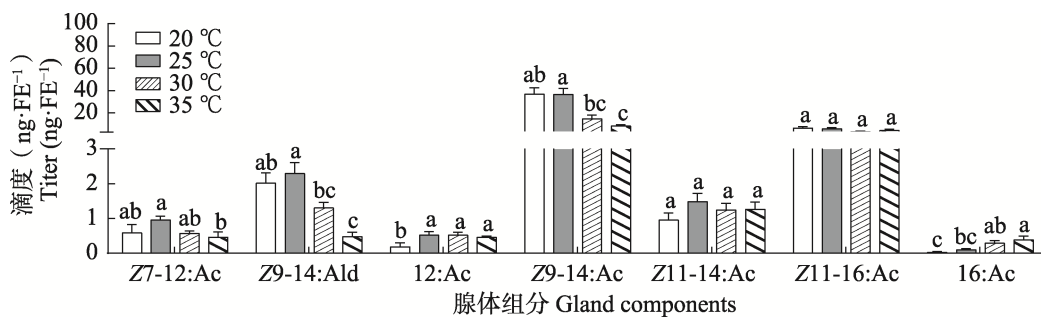


图 4 温度对草地贪夜蛾雌蛾腺体内各组分含量的影响

Fig. 4 Effects of temperature on the titer of each gland component of female *Spodoptera frugiperda*

同一组柱上标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Tukey's 单因素方差分析)。

Histograms with different letters for the same component indicate significant differences ($P<0.05$, Tukey's one-way ANOVA).

表 3 温度对草地贪夜蛾雌蛾腺体内各组分所占百分比的影响

Table 3 Effects of temperature on the percentage of each gland component of female *Spodoptera frugiperda*

温度 (°C) Temperature (°C)	腺体组分 Gland components							A/(A+D)
	A	B	C	D	E	F	G	
20	1.5±0.2a	5.7±0.8a	0.2±0.1b	78.8±1.4a	2.0±0.1c	11.8±1.1b	0.0±0.0c	98.1±0.3a
25	2.2±0.2a	4.9±0.5a	1.1±0.2b	76.4±1.4a	3.1±0.3c	12.1±1.6b	0.2±0.1bc	97.2±0.3a
30	3.1±0.5a	6.5±0.8a	2.6±0.4a	65.3±2.6b	5.9±0.5b	15.1±1.7ab	1.6±0.5ab	95.4±0.8a
35	3.9±1.8a	4.1±1.4a	3.3±0.6a	54.9±2.9c	8.1±0.7a	23.5±5.4a	2.3±0.5a	93.9±2.5a

同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Tukey's 单因素方差分析)。A-G 分别代表 Z7-12:Ac、Z9-14:Ald、12:Ac、Z9-14:Ac、Z11-14:Ac、Z11-16:Ac 和 16:Ac。

Data followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$, Tukey's one-way ANOVA).

A to G represents Z7-12:Ac, Z9-14:Ald, 12:Ac, Z9-14:Ac, Z11-14:Ac, Z11-16:Ac and 16:Ac, respectively.

2.3.2 温度对雄蛾感受性信息素的 EAG 反应的影响 在测试的 15 种草地贪夜蛾腺体组分及性信息素类似物中, 雄蛾对 Z7-12:Ac、Z9-12:Ac 和 Z9-14:Ac 的 EAG 反应较大 (图 5), 因此我们测定了不同温度下草地贪夜蛾雄蛾对这 3 种化合物的 EAG 反应 (图 6)。结果表明, 相较于 25 °C 条件下饲养的雄蛾, 20、30 和 35 °C 条件下饲养的雄蛾对 3 种性信息素的 EAG 反应均有所提高, 但统计分析均没有达到显著水平 ($P>0.05$)。

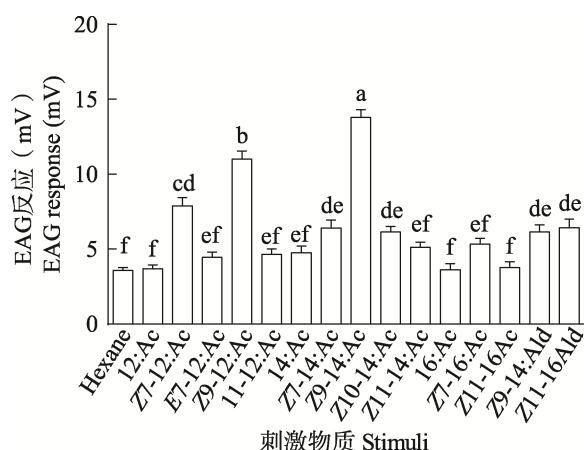


图 5 草地贪夜蛾雄蛾对雌蛾腺体组分及性信息素类似物的 EAG 反应

Fig. 5 EAG responses to gland components of the female moths and pheromone analogs by male *Spodoptera frugiperda*

柱上标有不同小写字母表示组分间差异显著 ($P<0.05$, Tukey's 单因素方差分析)。

Histograms with different lowercase letters between components indicate significant differences ($P<0.05$, Tukey's one-way ANOVA).

3 结论与讨论

利用性信息素进行害虫种群监测和诱杀防治是草地贪夜蛾综合防控的重要组成, 该技术的田间效果受到多种因素的影响。本文就雌蛾交配状态和昆虫饲养温度这两个影响因子展开研究, 发现交配显著抑制了雌蛾在次日暗期的求偶行为, 并使腺体中性信息素主要组分 Z9-14:Ac 的含量显著升高; 幼虫及成虫饲养温度为 25 °C 时, 所得雌蛾腺体内大部分组分的含量最高, 温度过低和过高均会抑制一些组分的合成。研究结果为

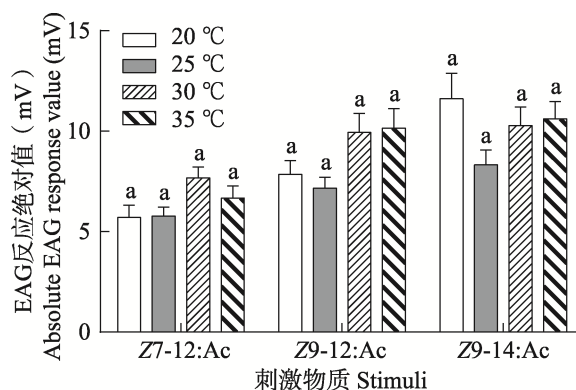


图 6 不同温度饲养所得雄蛾对 3 种组分的 EAG 反应
Fig. 6 EAG responses to three chemicals by the male moths reared under different temperatures

EAG 反应绝对值为被测组分的 EAG 值减去溶剂对照的 EAG 值, 同一组分柱上标有不同小写字母表示不同温度下差异显著 ($P<0.05$, Tukey's 单因素方差分析)。

The absolute EAG response value is the EAG response value to the measured component minus the EAG response value to the solvent control. Histograms with different lowercase letters in the same component indicate significant differences under different temperatures ($P<0.05$, Tukey's one-way ANOVA).

更有效地利用性信息素进行草地贪夜蛾种群测报和诱杀防治, 提供了重要参考。

在自然环境中, 昆虫性信息素的产生和释放受到多种生态因子的影响, 其中直接影响田间有效卵量的交配经历是最值得研究的因子之一。交配会干扰昆虫性信息素的生物合成和释放, 特别是对于那些单次交配的种类, 雌蛾在交配后即永久性停止性信息素的合成和求偶行为, 而多次交配的雌蛾在交配后其性信息素的合成通常只被短暂抑制 (Foster, 1993; Delisle *et al.*, 2000; Nagalakshmi *et al.*, 2007)。本研究中, 草地贪夜蛾雌蛾的交配显著抑制了次日暗期的求偶行为, 但在第 2 个暗期基本恢复正常, 说明同一头雌蛾在连续两个暗期内可能只交配 1 次; 有趣的是, 草地贪夜蛾雌蛾在交配后次日其腺体中性信息素主组分 Z9-14:Ac 的含量显著升高。这种交配后雌蛾的求偶行为被抑制但腺体内性信息素含量反而升高的现象, 在斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 中也有报道 (Yu *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2017)。其原因可能是交配对性信息素释放 (求偶行为) 的抑制作用较强, 而对性信息素合成的

抑制作用相对较弱,从而导致腺体内主组分的含量相对较高,待进一步研究证实。

环境温度也是影响雌蛾性信息素合成和释放的重要因素,尤其是成虫期的环境温度影响尤为明显,过低或过高均会抑制腺体内性信息素的产生(董双林和杜家纬, 2002; 余棋等, 2017)。本研究采用不同温度对草地贪夜蛾进行饲养,结果发现在雌蛾腺体的 7 个组分中,有 5 个组分的含量均在 25 °C 时最高,故 25 °C 是性信息素合成的最适温度。需要指出的是,本研究的温度处理是从初孵幼虫开始一直持续到成虫期,因此温度对性信息素合成的影响不仅仅包含短期效应(如影响性信息素合成相关酶类及其活性),也是长期作用(如影响性信息素腺体等器官或系统的正常发育)的结果。草地贪夜蛾性信息素合成的最适温度与成虫繁殖的最适温度 22-27 °C(鲁智慧等, 2019)吻合,这种一致性是昆虫对环境长期适应的结果。

关于温度影响雄虫对雌性信息素的反应的研究较少, Cerboneschi 等(1998)比较分析了不同地区采集的舞毒蛾 *Lymantria dispar* 雄蛾对性信息素的 EAG 反应,发现气候温度对雄蛾 EAG 反应没有影响,但该研究中试虫从野外不同温区采集后于室内在同一个温度下饲养,其结果可能难以反映温度与雄蛾 EAG 反应的实际关系。在本研究中,我们将试虫在不同温度条件下由初孵幼虫一直饲养到成虫测试前,得到类似的结论:饲养温度不影响雄蛾对性信息素组分的 EAG 反应。本研究进行 EAG 测定时的环境温度均为室温(25 °C),这种短暂的相同温度处理是否消除了不同饲养温度引起的差异?或者说测定温度是否影响雄蛾的 EAG 反应?需要进一步研究明确。

参考文献 (References)

- Batista-Pereira LG, Stein K, de Paula AF, Moreira JA, Cruz I, Figueiredo MDLC, Perri J, Corrêa AG, 2006. Isolation, identification, synthesis, and field evaluation of the sex pheromone of the Brazilian population of *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Chemical Ecology*, 32(5): 1085–1099.
- Cerboneschi A, Crnjar R, Liscia A, Majone R, Solari P, 1998. Influence of microclimatic variations on EAG responses of *Lymantria dispar* (Lepidoptera, Lymantridae) males to sex pheromone. *Italian Journal of Zoology*, 65(3): 267–272.
- Delisle J, Picimbon JF, Simard J, 2000. Regulation of pheromone inhibition in mated females of *Choristoneura fumiferana* and *C. rosaceana*. *Journal of Insect Physiology*, 46(6): 913–921.
- Delisle J, Simard J, 2002. Factors involved in the post-copulatory neural inhibition of pheromone production in *Choristoneura fumiferana* and *Choristoneura rosaceana* females. *Journal of Insect Physiology*, 48(2): 181–188.
- Dong SL, Du JW, 2002. Effects of mating experience and temperature on sex pheromone production of beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13(12): 1633–1636. [董双林, 杜家纬, 2002. 交配和温度对甜菜夜蛾 (*Spodoptera exigua*) 雌性性信息素产生的影响. 应用生态学报, 13(12): 1633–1636.]
- Foster SP, 1993. Neural inactivation of sex pheromone production in mated light brown apple moths, *Epiphyas ostvittana*. *Journal of Insect Physiology*, 39(3): 267–273.
- Hirashima A, Yamaji H, YoshiZawa T, Kuwano E, Eto M, 2007. Effect of tyramine and stress on sex-pheromone production in the pre-and post-mating silkworm moth, *Bombyx mori*. *Journal of Insect Physiology*, 53(12): 1242–1249.
- Huang CX, Zhu LM, Ni JP, Cao XY, 2002. A method of rearing the beet armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Entomologice Knowledge*, 39(3): 229–231. [黄春霞, 朱丽梅, 倪珏萍, 曹晓宇, 2002. 甜菜夜蛾的饲养方法介绍. 昆虫知识, 39(3): 229–231.]
- Jiang NJ, Wang CZ, 2019. Progress in sex pheromone communication of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(8): 993–1002. [江南纪, 王琛柱, 2019. 草地贪夜蛾的性信息素通讯研究进展. 昆虫学报, 62(8): 993–1002.]
- Jiang YY, Liu J, Xie MC, Li YH, Yang JJ, Zhang ML, Qiu K, 2019. Observation on law of diffusion damage of *Spodoptera frugiperda* in China in 2019. *Plant Protection*, 45(6): 10–19. [姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 李亚红, 杨俊杰, 张曼丽, 邱坤, 2019. 2019 年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测. 植物保护, 45(6): 10–19.]
- Li Q, Men XY, Jing C, Yu Y, Zhou XH, Dai XY, Lu SH, Li LL, 2021. Reaserch progress in emergency prevention and control of *Spodoptera frugiperda* in China. *Plant Protection*, 47(6): 21–27. [李强, 门兴元, 景春, 于毅, 周仙红, 代晓彦, 吕素洪, 李丽莉, 2021. 我国草地贪夜蛾应急防控研究进展. 植物保护, 47(6): 21–27.]
- Liu H, Lan T, Fang D, Gui F, Wang H, Guo W, Chen X, Chang Y, He

- S, Lyu L, Sahu SK, Chen L, Li H, Liu P, Fan G, Liu T, Hao R, Lu H, Chen B, Zhu S, Lu Z, Huang F, Dong W, Dong Y, Kang L, Yang H, Sheng J, Zhu Y, Liu X, 2019. Chromosome level draft genomes of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), an alien invasive pest in China. *bioRxiv*, <https://doi.org/10.1101/671560>.
- Lu Q, Huang LY, Liu FT, Wang XF, Chen P, Xu J, Deng JY, Ye H, 2017. Sex pheromone titre in the glands of *Spodoptera litura* females: Circadian rhythm and the effects of age and mating. *Physiological Entomology*, 42(2): 156–162.
- Lu ZH, He SQ, Yan NS, Zhao WJ, Yao WF, Chen YP, Yang T, Jiang YY, Gui FR, 2019. Effect of temperatures on the development and reproduction of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* Smith). *Plant Protection*, 45(5): 27–31. [鲁智慧, 和淑琪, 严乃胜, 赵文杰, 姚万福, 陈亚平, 杨通, 姜玉英, 桂富荣, 2019. 温度对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响. 植物保护, 45(5): 27–31.]
- Meagher RL, Agboka K, Tounou AK, Koffi D, Agbevohia KA, Amouze TR, Adjévi KM, Nagoshi RN, 2019. Comparison of pheromone trap design and lures for *Spodoptera frugiperda* in Togo and genetic characterization of moths caught. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(6): 507–516.
- Nagalakshmi VK, Applebaum SW, Zrielli A, Rafaeli A, 2007. Female sex pheromone suppression and the fate of sex-peptide-like peptides in mated moths of *Helicoverpa armigera*. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 64(3): 142–155.
- Sekul AA, Sparks AN, 1967. Sex pheromone of the fall armyworm moth: Isolation, identification, and synthesis. *Journal of Economical Entomology*, 60(5): 1270–1272.
- Sekul AA, Sparks AN, 1976. Sex attractant of the fall armyworm moth. *Technical Bulletins*, 45: 1–6.
- Unbehend M, Hänniger S, Vásquez GM, Juárez ML, Reisig D, McNeil JN, Meagher RL, Jenkins DA, Heckel DG, Groot AT, 2014. Geographic variation in sexual attraction of *Spodoptera frugiperda* corn- and rice-strain males to pheromone lures. *PLoS ONE*, 9(2): e89255.
- Wang C, Zhang S, Guo MB, Hou XQ, Yang B, Wang GR, 2022. Optimization of a pheromone lure by analyzing peripheral coding of sex pheromones of *Spodoptera frugiperda* in China. *Pest Management Science*, <https://doi.org/10.1002/ps.6924>.
- Yang MW, Dong SL, Chen L, 2009. Electrophysiological and behavioral responses of female beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner) to the conspecific female sex pheromone. *Journal of Insect Behavior*, 22(2): 153–164.
- Yang YQ, Gao XH, Zhang YZ, Zhang LW, Wan XC, 2011. Comparative mating strategies of male and female *Ectropis oblique* (Lepidoptera: Geometridae). *Florida Entomologist*, 94(1): 9–14.
- Ye ZF, Liao H, Liu XL, Dong SL, 2020. Comparative study of sex pheromone communication system in *Helicoverpa armigera* populations of different geographic origins. *Chinese Journal of Biological Control*, 36(5): 663–671. [叶占峰, 廖辉, 刘晓龙, 董双林, 2020. 棉铃虫不同地理种群性信息素通讯系统的比较分析. 中国生物防治学报, 36(5): 663–671.]
- Yu JF, Li C, Xu J, Liu JH, Ye H, 2014. Male accessory gland secretions modulate female post-mating behavior in the moth *Spodoptera litura*. *Journal of Insect Behavior*, 27(1): 105–116.
- Yu Q, Yan Q, Dong SL, 2017. Effect of temperature on the sex pheromone communication of *Chilo suppressalis* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28(11): 3784–3788. [余棋, 闫祺, 董双林, 2017. 温度对二化螟性信息素通讯的影响. 应用生态学报, 28(11): 3784–3788.]
- Zhang L, Jin MH, Zhang DD, Jiang YY, Liu J, Wu KM, Xiao YT, 2019. Molecular identification of invasive fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Yunnan province. *Plant Protection*, 45(2): 19–24. [张磊, 靳明辉, 张丹丹, 姜玉英, 刘杰, 吴孔明, 萧玉涛, 2019. 入侵云南草地贪夜蛾的分子鉴定. 植物保护, 45(2): 19–24.]
- Zhang QH, 1993. A review on the factors affecting emission and reception of sex pheromones by Lepidopterous moths. *Chinese Journal of Biological Control*, 9(2): 80–86. [张庆贺, 1993. 影响蛾类性信息素释放及接收的生态因子. 生物防治通报, 9(2): 80–86.]
- Zhou XF, Coll M, Applebaum SW, 2000. Effect of temperature and photoperiod on juvenile hormone biosynthesis and sexual maturation in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*: Implications for life history traits. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 30(8): 863–868.