

红火蚁工蚁对跟踪信息素的触角电位和行为反应

朱会艳^{1,2}, 万树青¹, 陈立^{2,*}

(1. 华南农业大学天然农药与化学生物学教育部重点实验室, 广州 510642;

2. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘要: 【目的】测定红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 工蚁对其跟踪信息素的触角电位 (EAG) 及行为反应。【方法】解剖红火蚁工蚁的杜氏腺, 用正己烷溶剂提取其分泌的跟踪信息素进行气相色谱-质谱 (GC-MS) 分析, 并测定了红火蚁工蚁对杜氏腺提取物、工蚁提取物和合成的法尼烯混合物的 EAG 和招募行为反应。【结果】通过与合成的法尼烯混合物的气相色谱 (GC) 保留时间和质谱图比对, 发现杜氏腺提取物的主要成分并不是 *Z, E-α*-法尼烯。EAG 测定结果表明, 红火蚁工蚁对杜氏腺提取物、工蚁提取物及 100 μg 的法尼烯混合物均有较强的 EAG 反应, 其次为 10 μg 和 1 μg 的法尼烯混合物。在招募行为测定中, 杜氏腺提取物和工蚁提取物招募作用明显, 而 10, 1, 0.1 和 0.01 μg 法尼烯混合物的作用均不显著。【结论】*Z, E-α*-法尼烯不是红火蚁跟踪信息素的主要成分; 红火蚁工蚁对杜氏腺提取物、工蚁提取物有较强的 EAG 反应和明显的招募行为反应。

关键词: 红火蚁; 杜氏腺; 跟踪信息素; 触角电位; 行为反应

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2012)03-0303-06

EAG and behavioral responses of workers of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae) to its trail pheromones

ZHU Hui-Yan^{1,2}, WAN Shu-Qing¹, CHEN Li^{2,*} (1. Key Laboratory of Natural Pesticide and Chemical Biology, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract 【Aim】This study attempted to test electroantennographic (EAG) and behavioral responses of the workers of the red imported fire ant (RIFA), *Solenopsis invicta* Buren, to its trail pheromones.

【Methods】Dufour's gland of RIFA workers was dissected, and then extracted with hexane followed by GC-MS analysis. EAG and recruitment behavioral responses of the RIFA workers to Dufour's gland extract, extract of workers, and synthesized farnesenes were tested. 【Results】In comparison to farnesenes synthesized from (±)-nerolidol, the major component of Dufour's gland extract was not *Z, E-α*-farnesene as previously identified. Dufour's gland extract, extract of workers and different doses of synthesized farnesenes could elicit significant EAG responses in RIFA workers and there was no significant difference among Dufour's gland extract, extract of workers and 100 μg farnesenes. Dufour's gland extract and extract of workers elicited a significant recruitment behavior, but no recruitment response was elicited by synthesized farnesenes at various doses including 10, 1, 0.1 and 0.01 μg. 【Conclusion】*Z, E-α*-farnesene is not the major component of trail pheromones of *S. invicta*. Dufour's gland extract and extract of workers could elicit significant EAG and behavioral responses in RIFA workers.

Key words: *Solenopsis invicta*; Dufour's gland; trail pheromone; electroantennogram (EAG); behavioral response

红火蚁 *Solenopsis invicta* Buren 属于膜翅目 (Hymenoptera), 蚁科 (Formicidae), 切叶蚁亚科 (Myrmicinae), 火蚁属 *Solenopsis*, 原产于南美洲巴

拉纳河流域的巴西、巴拉圭、阿根廷等国家。2004 年在我国广东省吴川市发现入侵红火蚁以来, 已先后在香港、澳门、福建、湖南、广西等省(区)发现

基金项目: 国家自然科学基金项目(30970402)

作者简介: 朱会艳, 女, 1986 年生, 河南洛阳人, 硕士研究生, 主要从事化学生态学研究, E-mail: zhyorzhy@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenli@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2011-08-18; 接受日期 Accepted: 2012-02-24

红火蚁,并呈现迅速扩散趋势(薛大勇等,2005;曾玲等,2005)。红火蚁在其发生地区不仅叮咬人畜,破坏电力设施、通讯系统等,还会降低原生态区域的生物多样性,现已被列为世界上最危险的100种入侵有害生物之一(Allen *et al.*, 1995; 吴碧球等, 2008; 许益鏊等, 2009; 高燕等, 2011)。目前国内对红火蚁的防治多采用化学手段,较常用灌巢法和毒饵法(赵瑾等,2011);而4种寄生性蚤蝇作为主要的寄生性天敌已被引进到美国进行室内饲养和田间释放,田间种群已在美国南部大部分州定殖和扩散(Gilbert *et al.*, 2008; Callcott *et al.*, 2011; Porter *et al.*, 2011)。

红火蚁是典型的社会性昆虫,工蚁的跟踪信息素是一种非常精确的化学通讯形式,有着高效的觅食和招募功能(Wilson, 1962)。红火蚁的跟踪信息素是由杜氏腺(Dufour's gland)合成并通过螫针分泌的(Wilson, 1959),可用低极性有机溶剂如正己烷(Vander Meer *et al.*, 1981)、正戊烷(Barlin *et al.*, 1976)、二氯甲烷等提取(Walsh *et al.*, 1965)。Vander Meer等(1981)分离鉴定出红火蚁跟踪信息素的4个组分别为 $Z, E-\alpha$ -法尼烯, $E, E-\alpha$ -法尼烯, Z, E -高法尼烯和 E, E -高法尼烯。其中 $Z, E-\alpha$ -法尼烯为主要组分,化学合成的 $Z, E-\alpha$ -法尼烯在100 fg/cm(单位长度路线上信息素的量, $1 \text{ fg} = 10^{-9} \mu\text{g}$)水平有显著的追踪活性(Alvarez *et al.*, 1987)。Vander Meer等(1988)确认了杜氏腺中有招募、引诱活性的跟踪信息素是 $Z, E-\alpha$ -farnesene 和一个分子量为218的类倍半萜(homosquiterpene)。然而,Williams等(1981a)鉴定红火蚁杜氏腺中跟踪信息素的主要成分为 Z, Z, Z -异法尼烯。而化学合成的 Z, Z, Z -异法尼烯在0.5 fg/cm水平就有明显的追踪活性,其最佳活性时的水平为100~500 fg/cm(Williams *et al.*, 1981b)。可见红火蚁跟踪信息素的化学结构鉴定尚有争议。EAG是研究昆虫生态学的重要工具,对于鉴定昆虫的信息素有很大帮助,而且目前尚未见有关红火蚁工蚁对其跟踪信息素的EAG反应的报道。本研究以红火蚁为研究对象,对红火蚁跟踪信息素提取物进行了触角电位测定以及招募行为试验,并验证合成的 $Z, E-\alpha$ -法尼烯的行为功能。

1 材料和方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 供试虫源: 实验所用红火蚁 *S. invicta* Buren

采自广东省增城市华南农业大学科研教学基地。室内“滴水法”将蚁群从土中逼出,令其建造人工蚁巢。以“水试管”提供清水和10%蜂蜜水,每天饲供3~5头黄粉虫 *Tenebrio molitor*(吕利华等,2006)。

1.1.2 主要仪器: 美国 Agilent Technologies 公司 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS); 荷兰 Syntech 触角电位仪(EAG); 日本 Meiji 公司 DC 3-420 显微镜; 日本 Nikon 公司 Coolpix 4500 数码相机。

1.2 样品制备

1.2.1 工蚁杜氏腺的解剖与提取: 取20头红火蚁工蚁置于 -20°C 的冰箱中10 min,取出后在解剖镜下摘取杜氏腺(图1),将其浸泡于预先装有1 mL 色谱纯级正己烷的样品瓶中,室温下浸提48 h,后用氮气浓缩至200 μL ,配制成0.1 WE/ μL [WE: 单头工蚁所含跟踪信息素量(worker equivalent)]正己烷溶液,置于冰箱中低温(-4°C)保存备用。

1.2.2 工蚁提取物的制备: 称取1 g 红火蚁工蚁置于 -20°C 的冰箱中1 h,取出后置于色谱纯级正己烷中浸提48 h后取出浸提液,用氮气浓缩至1 mL后放入冰箱中备用。

1.2.3 法尼烯混合物的制备: 法尼烯混合物(farnesenes)由橙花叔醇[(\pm)-nerolidol]的DMSO溶液在 170°C 回流半小时制得,同时分别用顺式橙花叔醇和反式橙花叔醇的DMSO溶液在 170°C 回流制得成分较少的法尼烯混合物,通过化学成分的比较来鉴定由橙花叔醇合成的法尼烯混合物中各个组分的结构(Anet, 1970; Vander Meer *et al.*, 1981)。经GC-MS方法鉴定所合成的法尼烯混合物中含有 $Z, E-\alpha$ -法尼烯和 $E, E-\alpha$ -法尼烯。将所合成的法尼烯混合物配制成0.001, 0.01, 0.1, 1和10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 的正己烷溶液。

1.3 杜氏腺提取物和法尼烯混合物的GC-MS分析

杜氏腺提取物和法尼烯混合物的组分是在Agilent 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪上进行分析,色谱柱为HP-5MS 毛细管柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm film thickness, Agilent Technologies),进样量3 μL ,无分流进样。进样口温度 200°C ,程序升温为起始温度 50°C ,保持1 min,以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升至 140°C ,再以 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 150°C ,后以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 160°C ,再以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200°C ,保持4 min。电离方式EI,电离能量为70 eV,离子源温度为 230°C ,质量扫描范围为40~500 amu。载气为氮气,流速为1 mL/min。

1.4 红火蚁工蚁的触角电位(EAG)反应

EAG 测定所用的设备和技术同 Chen 和 Fadamiro (2007)。将红火蚁工蚁的头部切下,切口端与充满 Ringer's 溶液的参比电极相连,触角顶端连接记录电极,电极通过银-氯化银丝与信号放大器连接,信号通过探针监测(INR-II, Syntech®, the Netherlands),用 EAG2000 软件(Syntech®, the Netherlands)记录和分析数据。

取 10 μL 待测样品滴加于滤纸条上(5 mm \times 40 mm),待溶剂挥发 10 s 后放入巴斯德管中,平衡 40 s 后用于刺激。用正己烷作对照。样品的测试顺序按随机方式进行。重复 12 次。测试时刺激时间为 0.2 s,湿润空气的流速为 1 000 mL/min,每次刺激间隔为 2 min(Brindis *et al.*, 2008)。

1.5 红火蚁工蚁招募行为的测定

在一个平底塑料盆(15 cm \times 45 cm \times 55 cm)的中心画一个半径为 20 cm 的圆圈,在圆圈的中心接入 2 g 工蚁,待工蚁平衡 1 h 后,在圆圈上等距离的放置分别滴加了 10 μL 不同待测样品的 7 个滤纸片(2 cm \times 2 cm),滤纸片上画有直径 1.5 cm 的圆圈并将其放置在面积稍大的铝箔片上,每个重复中样品的位置随机放置。每隔 5 min 检查一次 1.5 cm 圆圈中工蚁的数目,记录 30 min,计算 30 min 内进入圆圈的工蚁总数。重复 6 次,每次重复要换用不同蚁巢的工蚁(Vander Meer *et al.*, 1988)。

1.6 数据统计分析

红火蚁工蚁的 EAG 反应值(平均值 \pm 标准误, $n=12$)用正己烷引起的 EAG 反应作空白对照,各测试样品的 EAG 反应采用 Tukey-HSD 多重比较检测差异显著性($P<0.05$)。在红火蚁工蚁招募行为测定中,招募工蚁数 = Σ 每 5 min 圆圈中工蚁数。各测试样品招募工蚁数(平均值 \pm 标准误, $n=6$)采用 Tukey-HSD 多重比较检测差异显著性($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 红火蚁工蚁杜氏腺的解剖

红火蚁杜氏腺器官附着在毒腺及其毒囊的基部,呈白色细长囊状,开口于毒囊基部,杜氏腺分泌物和毒腺分泌物共同由螫针排出体外(图 1)。

2.2 杜氏腺提取物和法尼烯混合物的 GC-MS 分析

使用 GC-MS 分析杜氏腺提取物(图 2)和合成的法尼烯混合物(图 3)。经过对比质谱图和保留时间,由(\pm)-橙花叔醇合成的法尼烯混合物中色谱

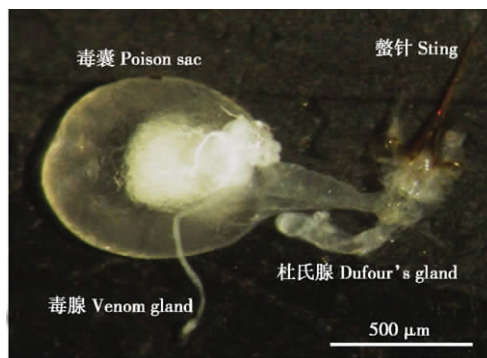


图 1 红火蚁工蚁杜氏腺解剖图

Fig. 1 Dufour's gland of *Solenopsis invicta* worker

峰的结构分别鉴定为 Z - β -法尼烯(2)、 E - β -法尼烯(3)、 Z , Z - α -法尼烯(4)、 Z , E - α -法尼烯(5)、 E , Z - α -法尼烯(6)、 E , E - α -法尼烯(7)(图 3)。很显然,图 2 中的色谱峰 a 的保留时间与图 3 中色谱峰 5(Z , E - α -法尼烯)相同,并且由图 4 可知两者的质谱图也相同,因此可断定色谱峰 a 为 Z , E - α -法尼烯。图 2 中色谱峰 1 的保留时间及质谱图(图 5)与图 3 中法尼烯的副产物色谱峰 1'一致,它们可能是同一化合物或结构极其相似的异构体,化学结构还需进行进一步的鉴定。

2.3 红火蚁工蚁的触角电位反应(EAG)

杜氏腺提取物(1 WE)可以引起较明显的 EAG 反应,EAG 绝对反应值为 0.24 ± 0.03 mV。工蚁提取物和 100 μg 法尼烯混合物引起的 EAG 反应略高于杜氏腺提取物,反应值分别为 0.29 ± 0.03 和 0.31 ± 0.02 mV,但差异不显著($P>0.05$)。红火蚁工蚁对 1 μg 和 10 μg 法尼烯混合物的 EAG 反应较小,反应值分别为 0.20 ± 0.02 和 0.22 ± 0.02 mV,与工蚁提取物及 100 μg 法尼烯混合物差异显著($P<0.05$)(图 6)。

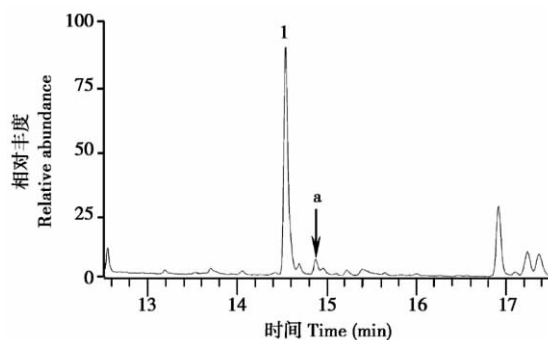


图 2 红火蚁工蚁杜氏腺提取物的总离子流量图

Fig. 2 Total ion chromatogram of Dufour's gland extract of *Solenopsis invicta* workers
a: Z , E - α -法尼烯 Z , E - α -farnesene.

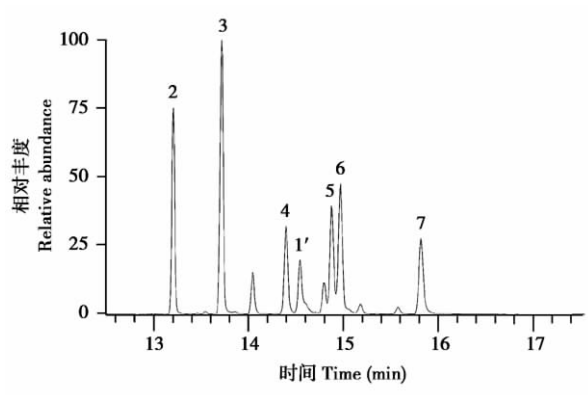


图3 法尼烯混合物的总离子流量图

Fig. 3 Total ion chromatogram of farnesenes

2: *Z*- β -法尼烯 *Z*- β -farnesene; 3: *E*- β -法尼烯 *E*- β -farnesene; 4: *Z*, *Z*- α -法尼烯 *Z*, *Z*- α -farnesene; 5: *Z*, *E*- α -法尼烯 *Z*, *E*- α -farnesene; 6: *E*, *Z*- α -法尼烯 *E*, *Z*- α -farnesene; 7: *E*, *E*- α -法尼烯 *E*, *E*- α -farnesene.

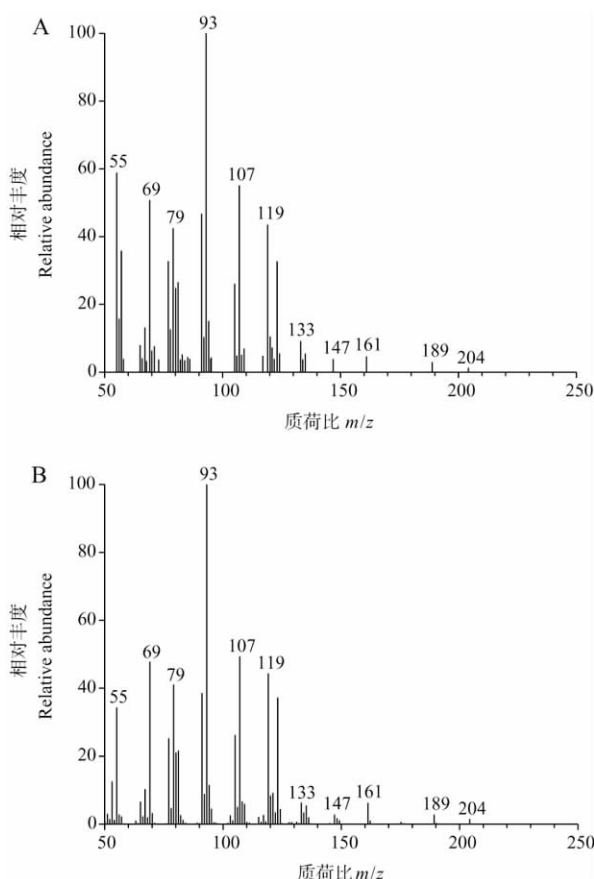
图4 红火蚁杜氏腺提取物色谱峰 a (A) 和 *Z*, *E*- α -法尼烯 (B) 的质谱图

Fig. 4 Mass spectra of Dufour's gland extract component a of *Solenopsis invicta* workers as in Fig. 2 (A) and *Z*, *E*- α -farnesene (B)

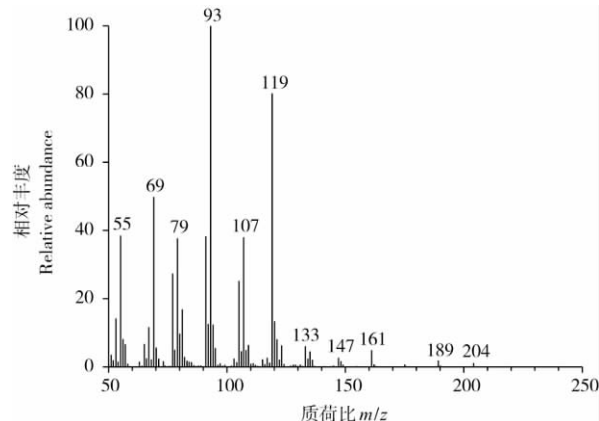


图5 红火蚁杜氏腺提取物色谱峰 1 的质谱图

Fig. 5 Mass spectra of Dufour's gland extract component 1 of *Solenopsis invicta* workers as in Fig. 2

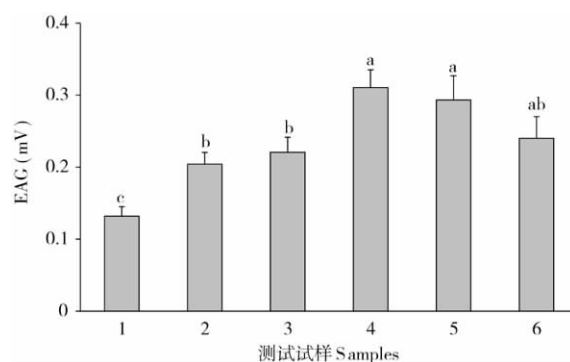


图6 红火蚁工蚁对各测试样品的 EAG 反应

Fig. 6 EAG responses of *Solenopsis invicta* workers to the odors tested

1: 正己烷 Hexane; 2: 1 μ g 法尼烯混合物 1 μ g farnesenes; 3: 10 μ g 法尼烯混合物 10 μ g farnesenes; 4: 100 μ g 法尼烯混合物 100 μ g farnesenes; 5: 工蚁提取物 Extract of workers; 6: 杜氏腺提取物 Dufour's gland extract. 图中数据是平均值 \pm 标准误, 柱上不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$, Tukey-HSD test)。Data are mean \pm SE, and different letters above bars indicate significant difference at the 0.05 level by Tukey-HSD test. 图7同 The same for Fig. 7.

2.4 红火蚁工蚁招募行为反应的测定

在招募行为测定中, 各测试样品对红火蚁的招募作用结果见图7。可以看出, 杜氏腺提取物和工蚁提取物有很强的引诱作用, 显著高于对照 ($P < 0.05$), 而法尼烯混合物在 0.01 ~ 10 μ g 的剂量变化范围内作用均不显著 ($P > 0.05$)。

3 讨论

本研究采用正己烷溶剂提取红火蚁工蚁杜氏腺分泌的跟踪信息素, 通过 GC-MS 分析得出跟踪信息

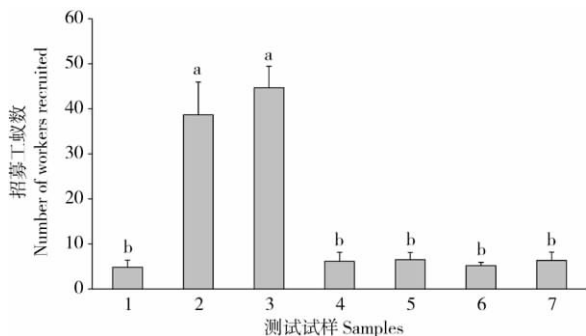


图7 各测试试样对红火蚁工蚁的招募作用

Fig. 7 Recruitment effect of tested odors attractive to

Solenopsis invicta workers

1: 正己烷 Hexane; 2: 杜氏腺提取物 Dufour's gland extract; 3: 工蚁提取物 Extract of workers; 4: 0.01 µg 法尼烯混合物 0.01 µg farnesenes; 5: 0.1 µg 法尼烯混合物 0.1 µg farnesenes; 6: 1 µg 法尼烯混合物 1 µg farnesenes; 7: 10 µg 法尼烯混合物 10 µg farnesenes.

素的主要成分为图2中的色谱峰1,由质谱图可以推断其分子量为204(图5)。Vander Meer等(1981)鉴定红火蚁工蚁杜氏腺的正己烷提取物的主要成分为 $Z, E-\alpha$ -法尼烯,而在对由橙花叔醇合成的法尼烯混合物分析(图3)中,鉴定出 $Z, E-\alpha$ -法尼烯所对应的色谱峰5与图2中色谱峰a的保留时间相符,说明 $Z, E-\alpha$ -法尼烯并不是跟踪信息素的主要成分,而是其中含量很低的一个组分;而Williams等(1981a)鉴定跟踪信息素的主要成分为 Z, Z, Z -异法尼烯,还有待验证。

红火蚁的杜氏腺提取物和工蚁提取物在1 WE的剂量均能引起较明显的EAG反应,较高剂量的法尼烯混合物的EAG反应也很明显。从EAG电生理的角度看,合成的法尼烯混合物中很可能含有跟踪信息素成分。红火蚁工蚁的招募行为是一个很复杂而精细的过程,具体分为3个步骤:吸引、定向和追踪(Vander Meer *et al.*, 1981, 1988, 1990),需要跟踪信息素中各组分共同作用来完成。在招募活性的测定中,杜氏腺提取物和工蚁提取物有极其显著的招募作用,而0.01~10 µg法尼烯混合物均没有显著的招募作用。由此可见合成的法尼烯混合物中可能不含有启动招募作用的跟踪信息素成分(orientation inducer pheromone)(Vander Meer *et al.*, 1990),但是也可能是合成的法尼烯混合物中存在某些抑制招募行为的物质,造成了EAG反应与招募行为的不一致性,因此需要对合成的法尼烯混合物进行进一步的分离纯化。由于红火蚁工蚁的跟踪信息素在杜氏腺内含量极少,很难对所提取的信息素成分进行分离提纯以便进行核磁共振谱鉴定,需

要合成法尼烯的类似物,利用EAG,GC-MS技术和行为测试进一步鉴定红火蚁跟踪信息素的化学结构。

致谢 本实验在中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室完成,得到了王睿老师的技术帮助,谨致谢意!

参考文献 (References)

- Allen CR, Lutz RS, Demarais S, 1995. Red imported fire ant impacts on northern bobwhite populations. *Ecological Applications*, 5(3): 632-638.
- Alvarez FM, Vander Meer RK, Lofgren CS, 1987. Synthesis of homofarnesenes: trail pheromone components of the fire ant, *Solenopsis invicta*. *Tetrahedron*, 43(13): 2897-2900.
- Anet EFLJ, 1970. Synthesis of (E, Z)- α -, (Z, Z)- α -, and (Z)- β -farnesene. *Australian Journal of Chemistry*, 23: 2101-2108.
- Barlin MR, Bulm MS, Brand JM, 1976. Fire ant trail pheromones: analysis of species specificity after gas chromatographic fraction. *Journal of Insect Physiology*, 22(6): 839-844.
- Brindis Y, Lachaud JP, Gomezy GB, Rojas JC, Malo EA, Cruz-Lopez L, 2008. Behavioral and olfactory antennal responses of *Solenopsis geminata* (Fabricius) (Hymenoptera: Formicidae) workers to their Dufour gland secretion. *Neotropical Entomology*, 37(2): 131-136.
- Calcott AMA, Porter SD, Weeks RD Jr, Graham LCF, Johnson SJ, Gilbert LE, 2011. Fire ant decapitating fly cooperative release programs (1994-2008): two *Pseudacteon* species, *P. tricuspis* and *P. curvatus*, rapidly expand across imported fire ant populations in the southeastern United States. *Journal of Insect Science*, 11(19): 1-25.
- Chen L, Fadamiro HY, 2007. Behavioral and electroantennogram responses of phorid fly *Pseudacteon tricuspis* (Diptera: Phoridae) to red imported fire ant *Solenopsis invicta* odor and trail pheromone. *Journal of Insect Behavior*, 20(2): 267-284.
- Gao Y, Lu LH, He YR, Qi GJ, Zhang JQ, 2011. Interference competition between the red imported fire ant (*Solenopsis invicta* Buren) and two native ant species (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Entomologica Sinica*, 54(5): 602-608. [高燕, 吕利华, 何余容, 齐国君, 张金强, 2011. 红火蚁与两种本地蚂蚁间的干扰竞争. *昆虫学报*, 54(5): 602-608]
- Gilbert LE, Barr C, Calixto AA, Cook JL, Drees BM, LeBrun EG, Patrock RJW, Plowes RM, Porter SD, Puckett RT, 2008. Introducing phorid fly parasitoids of red imported fire ant workers from South America to Texas: outcomes vary by region and by *Pseudacteon* species released. *Southwestern Entomologist*, 33(1): 15-29.
- Lu LH, Feng X, Chen HY, Liu J, Liu XY, He YR, 2006. A technique for field collecting and laboratory rearing red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(2): 265-267. [吕利华, 冯夏, 陈焕瑜, 刘杰, 刘晓燕, 何余容, 2006. 介绍红火蚁的野外采集和实验室饲养的方法. *昆虫知识*, 43

- (2): 265–267]
- Porter SD, Graham LC, Johnson SJ, Thead LG, Briano JA, 2011. The large decapitating fly *Pseudacteon litoralis* (Diptera: Phoridae): successfully established on fire ant populations in Alabama. *Florida Entomologist*, 94(2): 208–213.
- Vander Meer RK, Alvarez FM, Lofgren CS, 1988. Isolation of the trail recruitment pheromone of *Solenopsis invicta*. *Journal of Chemical Ecology*, 14(3): 825–838.
- Vander Meer RK, Alvarez FM, Lofgren CS, 1990. The orientation inducer pheromone of the fire ant *Solenopsis invicta*. *Physiological Entomology*, 15: 483–488.
- Vander Meer RK, Williams FD, Lofgren CS, 1981. Hydrocarbon components of the trail pheromone of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta*. *Tetrahedron Letters*, 22(18): 1651–1654.
- Walsh CT, Law JH, Wilson EO, 1965. Purification of the fire ant trail substance. *Nature*, 207: 320–321.
- Williams HJ, Strand MR, Vinson SB, 1981a. Synthesis and purification of the allofarnesenes. *Tetrahedron*, 37: 2763–2767.
- Williams HJ, Strand MR, Vinson SB, 1981b. Trail pheromone of the red imported fire ant *Solenopsis invicta* (Buren). *Experientia*, 37(11): 1159–1160.
- Wilson EO, 1959. Source and possible nature of the odor trail of fire ants. *Science*, 129: 643–644.
- Wilson EO, 1962. Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima* (Fr. Smith). 1. The organization of mass foraging. 2. An informational analysis of the odor trail. 3. The experimental induction of social responses. *Animal Behaviour*, 10: 134–164.
- Wu BQ, Lu YY, Zeng L, Liang GW, 2008. Influences of *Solenopsis invicta* Buren invasion on the native ant communities in different habitats in Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(1): 151–156. [吴碧球, 陆永跃, 曾玲, 梁广文, 2008. 红火蚁入侵对广东多种生境中蚂蚁类群的影响. *应用生态学报*, 19(1): 151–156]
- Xu YJ, Zeng L, Lu YY, Liang GW, 2009. Food content of refuse piles of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Ecologica Sinica*, 29(11): 5791–5798. [许益鏊, 曾玲, 陆永跃, 梁广文, 2009. 红火蚁弃尸堆的食物结构. *生态学报*, 29(11): 5791–5798]
- Xue DY, Li HM, Han HX, Zhang RZ, 2005. A prediction of potential distribution area of *Solenopsis invicta* in China. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 57–60. [薛大勇, 李红梅, 韩红香, 张润志, 2005. 红火蚁在中国的分布区预测. *昆虫知识*, 42(1): 57–60]
- Zeng L, Lu YY, He XF, Zhang WQ, Liang GW, 2005. Identification of red imported fire ant *Solenopsis invicta* to invade mainland China and infestation in Wuchuan, Guangdong. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(2): 144–148. [曾玲, 陆永跃, 何晓芳, 张维球, 梁广文, 2005. 入侵中国大陆的红火蚁的鉴定及发生为害调查. *昆虫知识*, 42(2): 144–148]
- Zhao J, Zhong PS, Zhan YH, Li JM, Zhang SS, Jiang H, 2011. The determination of hydramethylnon toxicity bait against *Solenopsis invicta* Buren. *Chinese Journal of Hygienic Insecticides and Equipments*, 17(2): 105–107. [赵瑾, 钟平生, 詹玉海, 李静美, 张颂声, 姜洪, 2011. 氟蚁踪饵剂对红火蚁的毒力测定. *中华卫生杀虫药械*, 17(2): 105–107]

(责任编辑: 武晓颖)