

星天牛不同为害状态下山核桃挥发物成分的 GC-EAD 和行为反应*

马 艳^{1**} 史黎央¹ 赵 艺² 徐华潮^{1***}

(1. 浙江农林大学林业与生物技术学院, 临安 311300; 2. 陕西省渭南市大荔县红枣局, 大荔 715100)

摘 要 【目的】为了挖掘对星天牛 *Anoplophora chinensis* 有行为反应的山核桃 *Juglans mandshurica* 挥发物。【方法】采用动态顶空套袋吸附法收集不同为害状态[健康 (CK)、天牛取食、产卵和钻蛀后]山核桃释放的挥发物, 并运用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS)、气相色谱-触角电位测量系统 (GC-EAD) 及“Y”型嗅觉仪技术分析鉴定出对星天牛产生电生理及行为反应的挥发物。【结果】GC-EAD 反应结果表明: 星天牛成虫对不同为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、对二乙苯、萜品烯、壬醛、 α -萜品醇、五甲基苯、丙烯酸-2-乙基己酯、2,6-二甲基萘以及正十六烷 10 种挥发物产生显著的触角电位反应, 对其他挥发物无反应, 其中蒎烯和罗勒烯的反应较强。嗅觉反应结果表明: 蒎烯仅对星天牛雄虫产生显著的引诱作用 ($P \leq 0.05$), 罗勒烯对星天牛雌雄虫产生极显著的引诱作用 ($P \leq 0.01$); 丙烯酸-2-乙基己酯对星天牛雌虫产生显著的驱避作用 ($P \leq 0.05$), 对二乙苯仅对星天牛雄虫产生显著的驱避作用 ($P \leq 0.01$), 壬醛对星天牛雄虫产生显著的驱避作用 ($P \leq 0.05$)。【结论】本研究结果表明, 罗勒烯对星天牛雌成虫产生较强的引诱作用, 而丙烯酸-2-乙基己酯对其雌成虫产生较好的驱避作用; 蒎烯和罗勒烯对星天牛雄成虫产生较强的引诱作用, 而对二乙苯和壬醛则对其雄成虫产生较好的驱避作用。

关键词 星天牛; 山核桃; 植物挥发物; GC-EAD; Y 型嗅觉仪

GC-EAD and behavioral responses of *Anoplophora chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) to volatiles released from *Juglans mandshurica* plants after different types of damage

MA Yan^{1**} SHI LI-Yang¹ ZHAO Yi² XU Hua-Chao^{1***}

(1. School of Forestry and Biotechnology of Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China;

2. Jujube Bureau of Dali County, Dali 715100, China)

Abstract [Objectives] To explore volatiles of *Juglans mandshurica* and their effect on the brown mulberry longhorn beetle, *Anoplophora chinensis*, in order to provide a theoretical basis for screening attractants or repellents to control this insect pest. [Methods] Volatiles released from *J. mandshurica* subject to different kinds of damage [undamaged (CK), and plants subject to feeding, oviposition and boring damage by longicorn beetles] were collected using dynamic headspace adsorption, and those causing electrophysiological and behavioral responses in *A. chinensis* were identified by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), a gas chromatography-electrophysiological antennal detecting system (GC-EAD) and Y-tube olfactometer experiments. [Results] *A. chinensis* adults had significant electrophysiological responses to ten volatiles of *J. mandshurica*, including (1R)-(+)-alpha-pinene, ocimene, p-diethylbenzene, g-terpinene, nonanal, α -terpineol, pentamethyl phenyl, 2-ethylhexyl acrylate, 2,6-dimethylnaphthalene and hexadecane, but no response to the other volatiles. Female and male adults had stronger electrophysiological responses to terpenes and ocimene. The volatile (1R)-(+)-alpha-pinene caused a

*资助项目 Supported projects: 浙江省自然科学基金项目《山核桃天牛与植物源信息物质的通讯交流机制》(LY17C160005)

**第一作者 First author, E-mail: 851149644@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xhcinsect@zafu.edu.cn

收稿日期 Received: 2018-06-15; 接受日期 Accepted: 2018-11-08

significant olfactory reaction in male adults ($P < 0.05$), and ocimene was extremely attractive to female and male adults ($P < 0.01$). 2-ethylhexyl acrylate was strongly repellent to female adults ($P < 0.05$) and p-diethylbenzene was highly attractive to males ($P < 0.01$). Nonanal was repellent to male adults ($P < 0.05$). **[Conclusion]** Adult female *A. chinensis* are strongly attracted to ocimene and repelled by 2-ethylhexyl acrylate. Male adults are strongly attracted to (1R)-(+)-alpha-pinene and ocimene and repelled by p-diethylbenzene and nonanal.

Key words *Anoplophora chinensis*; *Juglans mandshurica*; plant volatiles; GC-EAD; Y-tube olfactory

星天牛 *Anoplophora chinensis* 又名花角虫、钻木虫、铁炮虫, 该虫在我国南方的柑橘园区、沿海防护林带和山核桃苗圃林均有发现 (萧刚柔, 1992; 骆有庆等, 2000, 2002; 魏建荣等, 2011), 并且被欧洲和北美国家等列为检疫对象 (Macleod *et al.*, 2002; Gaag *et al.*, 2010)。据报道, 在浙江杭州临安山核桃 *Juglans mandshurica* 产区主要山核桃被星天牛、桑天牛 *Apriona germari* 和云斑天牛 *Batocera horsfieldi* 等为害 (张冬勇等, 2016)。星天牛幼虫生活隐蔽且成虫体壁坚硬, 常规的防治方法很难控制其为害。

研究表明植物挥发物对天牛能够起到引诱或者驱避作用 (Paré and Tumlinson, 1999; Allison *et al.*, 2004)。植物释放的挥发物化学成分及比例的变化是构成特定化学信息联系的基础, 称为化学指纹图谱 (Chemical fingerprint) (Pichersky and Gershenzon, 2002)。化学指纹图谱可以调控昆虫定向选择、产卵、取食及交配等行为 (王红伟等, 2014)。如星天牛对寄主楝树 *Melia azedarach* L. 挥发物中的 β -蒎烯、左旋- α -蒎烯、月桂烯、丁苯以及桃金娘烯醇产生明显触角电位反应 (刘佳敏, 2013)。每种植物在自然状态下释放出挥发物一般不超过 30 种, 但当植物受到植食性昆虫为害或者机械损伤后其挥发物的成分组成和相对含量会产生变化 (Müller and Hilker, 2000), 这些变化会对昆虫的行为产生影响。如光肩星天牛 *A. glabripennis* 对受到机械或天牛咬食损伤后复叶槭 *Acer negundo* L. 产生了明显的驱避反应, 而对健康复叶槭所释放的挥发物则产生了显著的引诱作用 (李继泉等, 2003)。随着化学生态学的迅速发展, 国内外学者对昆虫和植物之间的化学联系越来越重视, 故可以从化

学生态学方向来研究如何防治星天牛。

利用 EAG 和 GC-EAD 方法可以确定植物挥发物对昆虫行为的影响 (Allison and Carde, 2008; Williams *et al.*, 2008; Ngumbi *et al.*, 2009), 故本研究采用活体植物动态顶空套袋吸附法收集不同为害状态下山核桃释放的挥发物, 利用 GC-MS 联用仪、GC-EAD 技术及 Y 型嗅觉仪技术, 分离鉴定出对星天牛产生 GC-EAD 及行为反应的化合物, 为筛选星天牛植物源引诱剂或驱避剂提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试植物和虫源

试验所用星天牛成虫和山核桃样树均来自浙江省杭州市临安区玲珑街道雅园村的山核桃苗圃基地 (30°12'N, 119°38'E, 平均海拔 113 m)。基地绝大部分为山核桃, 林下仅有杂草无其他植被, 其中山核桃树龄 5-20 年, 树高 3-15 m, 胸径约 8-25 cm, 林冠郁闭度约为 0.5。

虫源: 利用星天牛的假死性进行人工捕捉, 用山核桃枝条来喂养, 将其饲养在生物测定中心的养虫室 (25-28 °C, 光周期 14L: 10D) 中的木质养虫笼 (45 mm×45 mm×50 mm) 里。

气相色谱-质谱联用仪 (Agilent 6890N-5975N); TDS-3410 多功能热解吸装置 (北京华仪三谱仪器有限公司); ATDS-3400 型自动热解吸装置 (北京中仪宇盛科技有限公司); 聚乙烯采样袋 (406 mm×444 mm 微波专用袋, Reynolds, Richmond, VA, USA); QC-1B 型大气采样仪、Tenax-TA 采样管 (内填 200 mg 60-80 目 Tenax 吸附剂的 150 mm×5 mm ID 的不锈钢管)、活性炭玻璃过滤管 (内填 100 mg 20-40 目

活性炭吸附剂的 200 mm×5 mm ID 的玻璃管)以及硅胶管均购自北京劳动保护科学研究所;正十二烷、色谱纯正己烷、4 mL 的螺纹样品瓶(15 mm×25 mm)以及 Parafilm 封口膜均采购于阿拉丁试剂(上海)有限公司。

1.2 采用活体植物动态顶空套袋吸附法收集山核桃挥发物

在山核桃林中随机选取健康状态以及天牛取食、产卵和钻蛀为害状态的山核桃(树龄 5-10 年,树高 5-15 m,胸径 10-15 cm)各 3 株并标记,其中每株样树仅 1 种为害状。采用活体植物动态顶空吸附法在同一时间收集样树不同为害状态下山核桃释放的挥发物,采样 6 h (9:00-16:00),每种为害状重复 3 次,设空白对照 2 份。

将 Tenax-TA 采样管安装在 TDS-3410 多功能热解吸装置上,开启氮气,活化温度 300 °C,每根管在流速 100 mL/min 下,活化 30 min,最后放入 ATDS-3400 型自动热解吸装置上,用与分析样品相同的条件做空白试验,经气相色谱-质谱联用仪检验无干扰残留物质,立即用 Parafilm 封口膜将其两端密封,装入封口袋中并放置在在 4 °C 冰箱保存待用。

抽气:用无色无味的进口聚乙烯采样袋套住山核桃枝条(每个处理枝条大小、部位等尽量保持一致),将袋子下端的进口气用封口膜封紧,其中一个硅胶管用夹子夹紧,封闭进气口。通过另一个硅胶管与 QC-1B 型大气采样仪气流进口位置相连,打开采样仪电源,将空气流速调到最大将采样袋抽到没有空气为止。

充气:将大气采样仪的进口位置的硅胶管拔掉,并将其活性炭玻璃过滤管相连,然后接到大 气采样仪气流出口位置。打开大气采样仪将空气流量调至最大,使过滤后的空气注入采样袋中,当气体充到将采样袋填满时关闭采样仪电源,停止注气。

循环采气:将夹子拔掉,与 Tenax-TA 不锈钢采样管相连,然后接到大 气采样仪气流出口位置,将采样仪、过滤管、采样袋、采样管等用硅胶管连接成一个闭合的气路系统,打开电源开始

循环气体,气流维持 500 mL/min。采集后,立即拔掉 Tenax-TA 不锈钢采样管并用封口膜将两端密封,装入封口袋中,每个挥发物样品用含有以正十二烷(150 µg/L)为内标的色谱纯正己烷洗脱 3 次,每次 500 µL,将淋洗液收集于 4 mL 的螺纹样品瓶中,保存在 -5 °C 冰箱待用。

1.3 山核桃挥发物成分的鉴定以及星天牛成虫对不同为害状态下山核桃挥发物的 GC-EAD 反应

1.3.1 山核桃挥发物成分的鉴定 采用 Agilent 6890N-5975N 气相色谱-质谱联用仪对不同为害状态下山核桃挥发物洗脱液进行组分分析。色谱柱是 HP-5MS 毛细管柱(长×内径×膜厚=30 m×0.25 mm×0.25 µm)。每次进样 2 µL,不分流进样。柱温升温程序:40 °C 恒温 1 min,然后以 4 °C/min 的速度升温到 220 °C 恒温 3 min,共运行 49 min。溶剂延迟 3 min。检测器温度 280 °C,前进样口温度 220 °C,四级杆 150 °C,离子源温度 230 °C,电离方式 EI,质谱轰击电压为 70 eV,扫描质量范围为 35-450 m/z。

定性分析通过气质联用仪连接计算机的 NIST08 谱库来自动检索分析组分的质谱数据,并参考标准图谱对全部检索结果进行核对补充检索;定量分析采用峰面积归一化法确定各成分的相对含量。

1.3.2 星天牛成虫对不同为害状态下山核桃挥发物的 GC-EAD 反应 在中国科学院动物研究所实验室进行星天牛雌雄成虫对不同为害状态下山核桃枝条释放的挥发物洗脱液的 GC-EAD 实验。操作步骤:先用锋利的手术刀将活跃的星天牛雌雄成虫触角从基部剪下,切除端节的少许末梢,将触角横搭在事先沾有导电胶的叉状电极的两端上,触角两端浸没在导电胶内,最后将叉状电极插入 EAG 探头中。信号先经放大器(UN-06, Syntech),再接到 IDAC 转换器(Auto Spike, IDAC2/3, Syntech),最后接到计算机的硬件采集卡上,通过计算机软件(EAD 版本 2.3, Syntech)采集和分析数据。

GC-EAD 分析采用 Agilent 6890N 气相色谱,色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱(长×内径×膜厚=

30 m×0.25 mm×0.25 μm), 载气: 高纯度氮气, 流速 1 mL/min; 进样量 2 μL, 不分流进样, 进样口温度 220 °C, 氢火焰离子检测器, 检测器温度 280 °C。柱升温程序同 GC-MS。测试的样品为不同为害状态下山核桃枝条释放的挥发物洗脱液和对照正己烷溶剂, 试虫均为活体成虫, 重复 5 次, GC-EAD 色谱图上的化合物的峰形和保留时间进行对比, 再结合 GC-MS 结果, 从而鉴定出

对星天牛雌雄成虫触角产生电生理反应的物质。

1.4 星天牛成虫对 10 种标准挥发物的嗅觉反应

据星天牛成虫对不同为害状态下山核桃挥发物的 GC-EAD 反应, 选择有强烈触角电位反应的 10 种挥发物 (表 1), 用 1 mL 液体石蜡作溶剂将各化合物配制成浓度为 1 mol/L 的溶液, 浓度参照毕拥国等 (2017)。

表 1 10 种标准挥发物的名称、纯度和来源
Table 1 Name, purity and source of the ten standard volatiles

化合物 Compounds	纯度 Purity	CAS 号 CAS number	来源 Source of supply
蒎烯 (1R)-(+)-Alpha-pinene	99%	7785-70-8	阿拉丁 Aladdin
罗勒烯 Ocimene	≥90%	13877-91-3	阿拉丁 Aladdin
对二乙苯 p-Diethylbenzene	≥99.5%	105-05-5	阿拉丁 Aladdin
萜品烯 g-Terpinene	98%	99-85-4	南京草本源生物科技有限公司 Nanjing herb source Bio-Tech Co., Ltd
壬醛 Nonanal	96%	124-19-6	阿拉丁 Aladdin
α-萜品醇 α-Terpineol	≥96%	98-55-5	上海源叶生物科技有限公司 Shanghai yuanye Bio-Tech Co., Ltd
五甲基苯 Pentamethyl phenyl	≥98%	700-12-9	阿拉丁 Aladdin
丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate	≥99%	103-11-7	阿拉丁 Aladdin
2,6-二甲基萘 2,6-Dimethylnaphthalene	98%	581-42-0	阿拉丁 Aladdin
正十六烷 Hexadecane	98%	544-76-3	阿拉丁 Aladdin

Y 型嗅觉仪生物测定装置参照 Bertschy 等 (1997)、Yang 等 (2010,2011) 和王保新等 (2014) 改进而成。Y 型管主臂长 35 cm, 内径 4 cm; 两侧臂长 25 cm, 内径 3 cm, 夹角 75° (如图 1)。测试时, 用移液枪吸取 10 μL 有效挥发物和液体石蜡分别滴在 2 张 1 cm² 的定性滤纸上, 并置于球形陷阱中。通过硅胶管将活性炭空气过滤装置、QC-1B 型采样仪、蒸馏水加湿瓶、球形陷阱以及 Y 型管相连, 空气流速维持在 500 mL/min。每 30 头天牛成虫为一组, 每组重复 3 次。每次只放 1 头天牛进行行为选择, 每头天牛观察 5 min, 将进入选择臂 10 cm 以上并停留超过 30 s 的记为有选择, 否则记为无选择。每测试一组调换一次 Y 型管两侧的位置, 以消除周围环境光照、管臂位置对天牛选择行为产生的影响。测试完后, 用酒精彻底清洗干净, 晾干后进行下一组的试验。

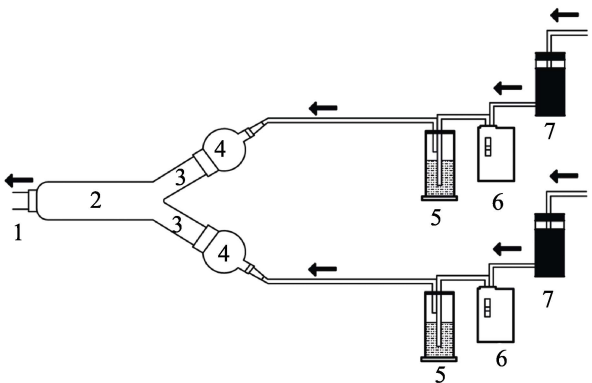


图 1 Y 型嗅觉仪生物测定装置结构图 (严善春, 2006)
Fig. 1 Structure diagram of Y-tube olfactometer-based biometri device (Yan, 2006)

- 1: 引虫口 Entomorph; 2: 主臂 Main arm; 3: 侧臂 Side arm; 4: 球形陷阱 Spherical trap; 5: 蒸馏水加湿瓶 Distilled water humidifying bottle; 6: QC-1B 采样仪 QC-1B sampling instrument; 7: 活性炭过滤装置 Activated carbon filtration unit.

1.5 数据分析

试验数据采用统计软件 SPSS19.0 for Windows 进行分析,用卡方检验来比较星天牛成虫对不同挥发物行为反应的差异显著性 (Hern and Dorn, 2004; Tooker *et al.*, 2005)。通过以下公式来计算选择率:

选择率(%) =

$$\frac{\text{气味臂内的总虫数或对照臂的总虫数}}{\text{测试的总虫数}} \times 100.$$

2 结果与分析

2.1 星天牛成虫对不同为害状态下山核桃挥发物的 GC-EAD 反应

星天牛成虫对不同为害状态下山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应,根据 5 次重复实验的图谱,每种为害状态选择一个产生较明显触角电位反应且具有重复的图谱 (图 2, 图 3)。

星天牛雌雄成虫对不同为害状态下山核桃

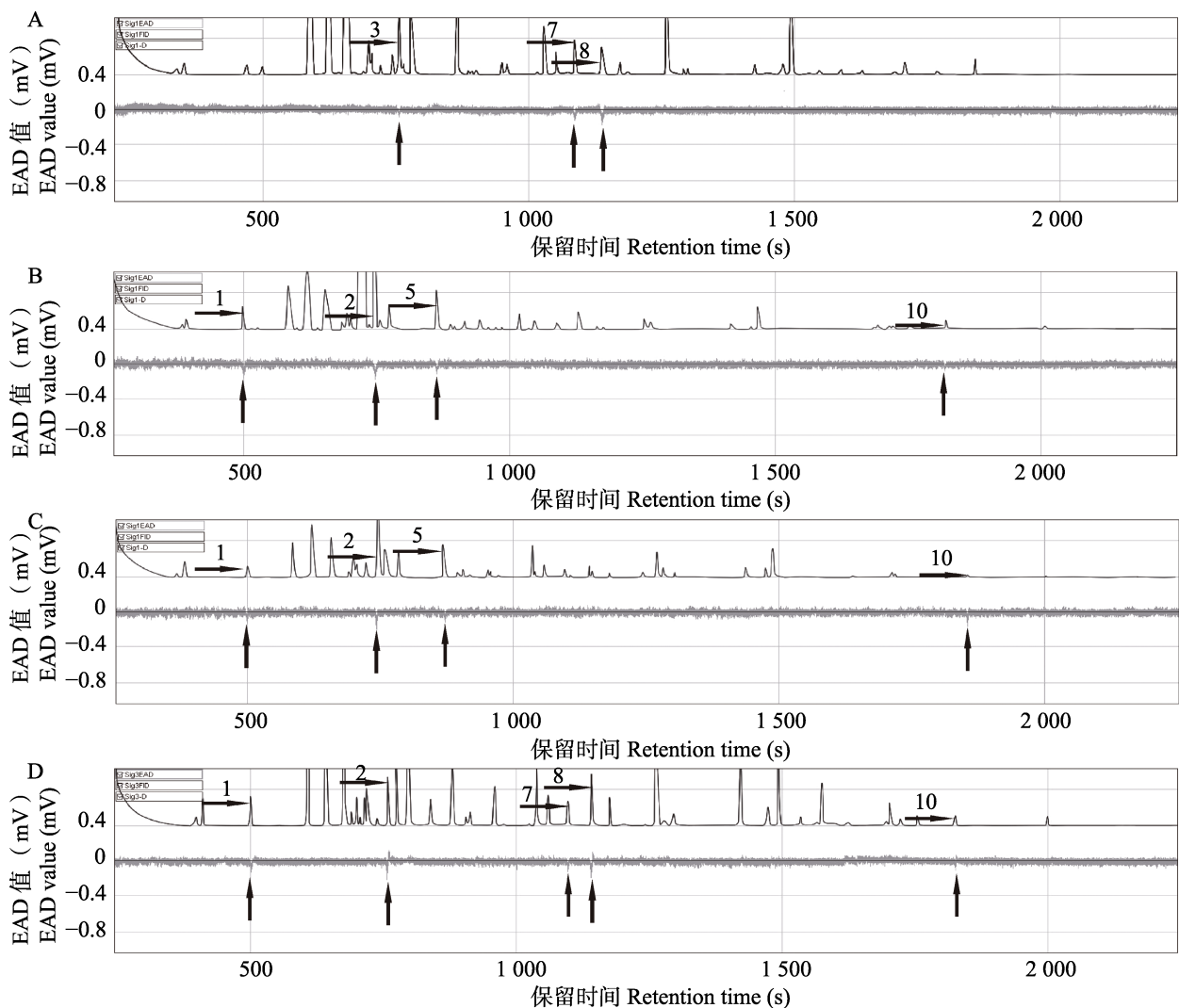


图 2 星天牛雌成虫对不同为害状态下山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应图谱

Fig. 2 Responses of female adults of *Anoplophora chinensis* to volatiles released from *Juglans mandshurica* in different damaged states detected by GC-EAD

A. 健康 Healthy; B. 取食为害 Feeding damage; C. 产卵为害 Oviposition damage; D. 钻蛀为害 Boring damage.

1: 蒎烯 (1R)-(+)- α -pinene; 2: 罗勒烯 Ocimene; 3: 对二乙苯 p-Diethylbenzene; 4: 萜品烯 g-Terpinene; 5: 壬醛 Nonanal; 6: α -萜品醇 α -Terpineol; 7: 五甲基苯 Pentamethyl phenyl; 8: 丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate; 9: 2,6-二甲基萘 2,6-Dimethylnaphthalene; 10: 正十六烷 Hexadecane. 图 3 同。The same as Fig. 3.

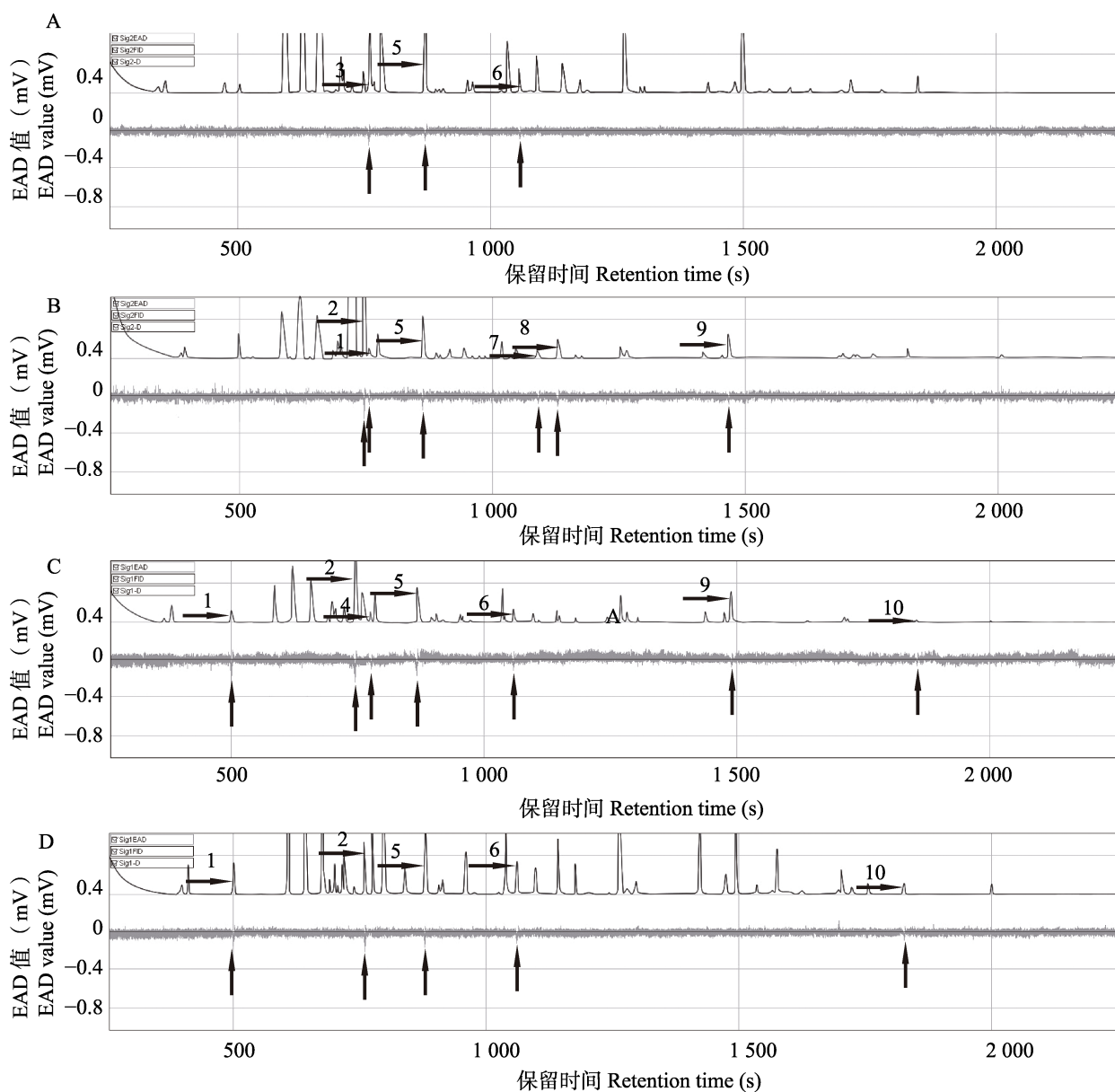


图3 星天牛雄成虫对不同为害状态下山核桃释放的挥发物的 GC-EAD 反应图谱
Fig. 3 Responses of male adults of *Anoplophora chinensis* to volatiles released from *Juglans mandshurica* in different damaged states detected by GC-EAD

A. 健康 Healthy; B. 取食为害 Feeding damage; C. 产卵为害 Oviposition damage; D. 钻蛀为害 Boring damage.

释放的挥发物的 GC-EAD 反应有差异。雌成虫的触角对健康山核桃释放的挥发物中的对二乙苯、五甲基苯以及丙烯酸-2-乙基己酯产生触角电位反应,雌成虫对取食为害以及产卵为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、壬醛以及正十六烷产生触角电位反应,雌成虫对钻蛀为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、五甲基苯、丙烯酸-2-乙基己酯以及正十六

烷产生触角电位反应(图2);雄成虫的触角对健康山核桃释放的挥发物中的对二乙苯、壬醛以及 α -蒎品醇产生触角电位反应,雄成虫对取食为害状态下山核桃释放的挥发物中的罗勒烯、蒎品烯、壬醛、五甲基苯、丙烯酸-2-乙基己酯以及2,6-二甲基萘产生触角电位反应,雄成虫对产卵为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、蒎品烯、壬醛、 α -蒎品醇、2,6-二甲基萘以

及正十六烷产生触角电位反应,雄成虫对钻蛀为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、壬醛、 α -萜品醇以及正十六烷产生触角电位反应(图3)。

综上,星天牛雌雄成虫的触角对蒎烯、罗勒烯、对二乙苯、萜品烯、壬醛、 α -萜品醇、五甲基苯、丙烯酸-2-乙基己酯、2,6-二甲基萘以及正十六烷产生显著的触角电位反应,其中蒎烯、罗勒烯的反应最强,而对其他挥发物无反应。

2.2 星天牛成虫对6种化合物的行为反应

卡方检验结果显示,罗勒烯对星天牛雌成虫有极显著的吸引力($P < 0.01$),雌成虫对其选择率是74.44%,而丙烯酸-2-乙基己酯对星天牛

雌成虫有显著的驱避作用($P < 0.05$),雌成虫对其选择率仅25.56%,其他8种物质对星天牛雌成虫没有产生显著的行为反应(图4);星天牛雄成虫对罗勒烯和对二乙苯有极显著的趋性($P < 0.01$),对蒎烯和壬醛有显著的趋性($P < 0.05$),其中罗勒烯和蒎烯对其表现引诱作用,雌成虫对其选择率分别是70.00%、76.67%,对二乙苯和壬醛则对其表现驱避作用,雌成虫对其选择率分别是73.33%、70.00%;其他6种物质对星天牛雄成虫没有产生显著的行为反应(图5)。这表明对星天牛成虫有电生理反应的挥发物不一定会对星天牛表现出显著行为反应,而且雌雄成虫之间表现出部分不同,这可能是星天牛触角的性二型导致的差异。

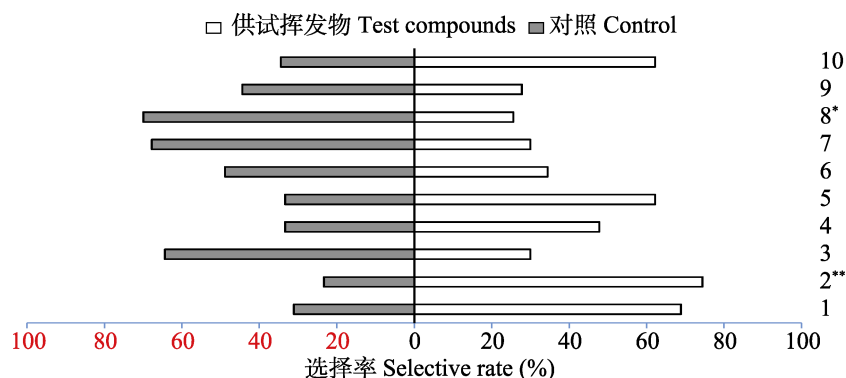


图4 星天牛雌成虫对10种标准挥发物的行为反应

Fig. 4 Behavioral responses of female adults of *Anoplophora chinensis* to ten standard volatiles

1: 蒎烯 (1R)-(+)- α -pinene; 2: 罗勒烯 Ocimene; 3: 对二乙苯 p-Diethylbenzene; 4: 萜品烯 g-Terpinene; 5: 壬醛 Nonanal; 6: α -萜品醇 α -Terpineol; 7: 五甲基苯 Pentamethyl phenyl; 8: 丙烯酸-2-乙基己酯 2-Ethylhexyl acrylate; 9: 2,6-二甲基萘 2,6-Dimethylnaphthalene; 10: 正十六烷 Hexadecane. * 表示差异显著($P < 0.05$), ** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

* indicates significant difference ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant difference. 图5同。The same as Fig. 5.

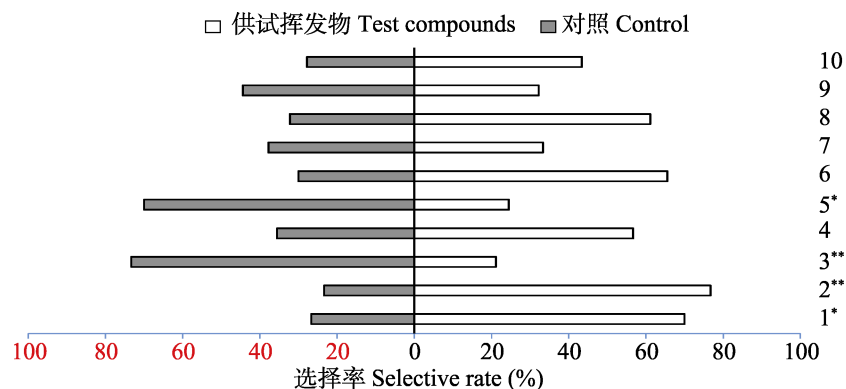


图5 星天牛雄成虫对10种标准挥发物的行为反应

Fig. 5 Behavioral responses of male adults of *Anoplophora chinensis* to ten standard volatiles

3 结论与讨论

星天牛成虫对在不同为害状态下山核桃释放的挥发物中的蒎烯、罗勒烯、对二乙苯、萜品烯、壬醛、 α -萜品醇、五甲基苯、丙烯酸-2-乙基己酯、2, 6-二甲基萘以及正十六烷这 10 种挥发物有显著的触角电位反应, 并且星天牛成虫对不同为害状态下山核桃释放的挥发物中的这 10 种挥发物存在种类和程度上不同的电生理反应。这可能这 10 种挥发物在不同为害状态下山核桃释放的挥发物中相对含量有差异相关。因为有报道认为植食性昆虫对同一物质的不同浓度可以表现出不同的触角电位反应 (Yang *et al.*, 2010), 这说明植物挥发物的种类、浓度及各挥发物之间的比例可能会影响昆虫反应。

嗅觉反应结果显示: 蒎烯对星天牛雄虫产生显著的引诱作用 ($P < 0.05$), 罗勒烯对星天牛雌雄虫产生极显著的引诱作用 ($P < 0.01$); 对二乙苯对星天牛雄虫产生极显著的驱避作用 ($P < 0.01$), 丙烯酸-2-乙基己酯对星天牛雌虫产生显著的驱避作用 ($P < 0.05$), 壬醛对星天牛雄虫产生显著的驱避作用 ($P < 0.05$), 这与 GC-EAD 反应结果相符, 触角电位反应越强其行为反应越显著。以上结论与一些学者的研究结果相似, 如刘佳敏 (2013) 报道, 寄主楝树挥发物中的 β -蒎烯、月桂烯、水芹烯以及桃金娘烯醇对星天牛成虫均产生较强的 GC-EAD 反应和较好的引诱作用; 朱宁等 (2017) 通过野外诱捕试验表明, 壬醛是光肩星天牛和星天牛的共享植物挥发物。

GC-EAD 和嗅觉试验中星天牛雌雄成虫对挥发物表现的行为反应有差异, 据报道星天牛在寻找寄主阶段主要通过嗅觉感受器对寄主植物特异性的化学指纹图谱的识别到达植物 (Barata *et al.*, 2002), 说明这可能与星天牛雌雄成虫的触角上感受器的种类、分布模式及数量的差异有关。此外, Tooker 等 (2005) 发现香草萼对黄峰 *Antisrophus rufus* 没有产生明显的引诱或驱避作用, 但其能够增强其他挥发物的引诱作用, 说明植物挥发物的某一挥发物本身可能对植食性昆虫不产生行为作用, 但其的存在可能会增强或者

抑制其他挥发物的作用, 如嗅觉反应中的萜品烯、 α -萜品醇、五甲基苯、2, 6-二甲基萘以及正十六烷。

昆虫对植物挥发物的识别是一个复杂过程, 单一挥发物对星天牛的行为反应还不足以配制植物源引诱剂或驱避剂, 那么将不同有效成分按照特定比例进行下一步野外诱捕试验是今后研究的重点。

参考文献 (References)

- Allison JD, Borden JH, Seybold SJ, 2004. A review of the chemical ecology of the Cerambycidae (Coleoptera). *Chemoecology*, 14(3/4): 123–150.
- Allison JD, Carde RT, 2008. Male pheromone blend preference function measured in choice and no-choice wind tunnel trials with almond moths, *Cadra cautella*. *Anim. Behav.*, 75(1): 259–266.
- Barata EN, Mustaparta H, Pickentt JA, Wadhams LJ, Araujo J, 2002. Encoding of host and non-host plant odours by receptor neurons in the eucalyptus woodborer, *Phoracantha semipunctata* (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Comp. Physiol.*, 188(2): 121–133.
- Bertschy C, Turlings TCJ, Bellotti AC, Dorn AS, 1997. Chemically-mediated attraction of three parasitoid species to mealybug-infested cassavaleaves. *Fla. Entomol.*, 80(3): 383–395.
- Bi YG, Guo L, Wang ZG, Lv F, Yan AH, 2017. Electroantennogram and behavioral responses of *Apriona germari* to five plant volatiles and their mixtures. *Sci. Sericult.*, 43(1): 32–38. [毕拥国, 郭丽, 王志刚, 吕飞, 阎爱华, 2017. 桑天牛对 5 种植物源挥发性化合物及其混合物的触角电位和行为反应. 蚕业科学, 43(1): 32–38.]
- Gaag DJ, Sinatra G, Roversi PF, Loomans A, Hérard F, Vukadin A, 2010. Evaluation of eradication measures against *Anoplophora chinensis* in early stage infestations in Europe. *Eppo Bulletin*, 40(2): 176–187.
- Hern A, Dorn S, 2004. A female-specific attractant for the codling moth, *Cydia pomonella*, from apple fruit volatiles. *Naturwissenschaften*, 91(2): 77–80.
- Li JQ, Fan H, Jin YJ, 2003. Behavior response of *Anoplophora glabripennis* (Motsh.) to the mechanical-wounded and herbivore-fed *Acer negundo* L. *J. Beijing For. Univ.*, 25(5): 42–46. [李继泉, 樊慧, 金幼菊, 2003. 光肩星天牛对损伤后复叶槭植株的行为反应. 北京林业大学学报, 25(5): 42–46.]
- Liu JM, 2013. Studies on the role *Anoplophora chinensis* (F.) by alluring adult with *Melia azedarach* L. Master dissertation.

- Lin'an: Zhejiang A & F University. [刘佳敏, 2013. 苦楝对星天牛的引诱作用研究. 硕士学位论文, 临安: 浙江农林大学.]
- Luo YQ, Huang JF, Li JG, 2000. Central achievements problems and prospects on poplar longhorned beetle in China. *Entomological Knowledge*, 37(2): 116–122. [骆有庆, 黄竞芳, 李建光, 2000. 我国杨树天牛研究的主要成就、问题及展望. 昆虫知识, 37(2): 116–122.]
- Luo YQ, Liu RG, Xu ZC, Sun CC, Wen JB, 2002. Theories and technologies of ecologically regulating poplar longhorned beetle disaster in shelter forest. *J. Beijing For. Univ.*, 24(6): 160–164. [骆有庆, 刘荣光, 许志春, 孙长春, 温俊宝, 2002. 防护林杨树天牛灾害的生态调控理论与技术. 北京林业大学学报, 24(6): 160–164.]
- MacLeod A, Evans HF, Baker RHA, 2002. An analysis of pest risk from an Asian longhorn beetle (*Anoplophora glabripennis*) to hardwood trees in the European community. *Crop Prot.*, 21(8): 635–645.
- Müller C, Hilker M, 2000. The effect of a green leaf volatile on host plant finding by larvae of herbivorous insect. *Naturwissenschaften*, 87(5): 216–219.
- Ngumbi E, Chen L, Fadamiro HY, 2009. Comparative GC-EAD Responses of a specialist (*Microplitis croceipes*) and a generalist (*Cotesia marginiventris*) parasitoid to cotton volatiles induced by two caterpillar species. *J. Chem. Ecol.*, 35(9): 1009–1020.
- Paré PW, Tumlinson JH, 1999. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiol.*, 121(2): 325–331.
- Pichersky E, Gershenzon J, 2002. The formation and function of plant volatiles: perfumes for pollinator attraction and defense. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 5(3): 237–243.
- Tooker JH, Crumrin AL, Hanks LM, 2005. Plant volatiles are behavioral cues for adult females of the gall wasp *Antistrophus rufus*. *Chemoecology*, 15(2): 85–88.
- Wang BX, Yang H, Yang W, Yang CP, Cai Y, Zhou M, He XH, 2014. EAG and behavioral responses of *Batocera lineolata* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae) to ten plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(2): 481–489. [王保新, 杨桦, 杨伟, 杨春平, 蔡艳, 周梦, 何晓华, 2014. 云斑天牛对 10 种植物挥发物的 EAG 和行为反应. 应用昆虫学报, 51(2): 481–489.]
- Wang HW, Yang W, Yang H, Yang CP, Zhu XQ, Liu FJ, Jiang LH, Shan CY, 2014. Electroantennogram and behavioral responses of *Tomicus minor* (Hartig) (Coleoptera: Scolytidae) to plant volatiles. *Chin. J. Ecol.*, 33(5): 1260–1266. [王红伟, 杨伟, 杨桦, 杨春平, 朱晓庆, 刘峰建, 蒋丽华, 山春燕, 2014. 横坑切梢小蠹对植物挥发物的电生理和行为反应. 生态学杂志, 33(5): 1260–1266.]
- Wei JR, Zhao WX, Zhang YA, 2011. Research progress on *Anoplophora chinensis*. *Plant Quarantine*, 25(5): 81–85. [魏建荣, 赵文霞, 张永安, 2011. 星天牛研究进展. 植物检疫, 25(5): 81–85.]
- Williams L, Rodriguez-Saona C, Castle SC, Zhu S, 2008. EAG-active herbivore-induced plant volatiles modify behavioral responses and host attack by an egg parasitoid. *J. Chem. Ecol.*, 34(9): 1190–1201.
- Xiao GR, 1992. Forest Insects of China. 2nd ed. Beijing: China Forestry Press. 454–455. [萧刚柔, 1992. 中国森林昆虫(第2版). 北京: 中国林业出版社. 454–455.]
- Yan SC, Cheng H, Yang H, Yuan HE, Zhang J, Chi DF, 2003. Effects of plant volatiles on the EAG response and behavior of the grey tiger longicorn, *Xylotrechus rusticus* (L.) (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomologica Sinica*, 14(2): 310–313. [严善春, 程红, 杨慧, 袁红娥, 张健, 迟德福, 2006. 青杨脊虎天牛对植物源挥发物的 EAG 和行为反应. 昆虫学报, 49(5): 759–767.]
- Yang H, Yang W, Liang XY, Yang MF, Yang CP, Zhu TH, Wu XL, 2011. The EAG and behavioral responses of *Batocera horsfieldi* (Coleoptera: Cerambycidae) to the composition of volatiles. *J. Kansas Entomol. Soc.*, 84(3): 217–231.
- Yang H, Yang W, Yang MF, Yang CP, Zhu TH, Huang Q, 2010. Effects of plant volatiles on the EAG and behavioral responses of *Batocera horsfieldi* Hope (Coleoptera: Cerambycidae). *J. Agric. Urban Entomol.*, 27(1): 20–32.
- Zhang DY, Liu JD, Wang JY, Zhu N, Xu HC, Fan JT, 2016. Two plant compound lures for trapping *Batocera horsfieldi* (Hope) in the field. *Chinese Journal Applied Entomology*, 53(4): 856–863. [张冬勇, 柳建定, 王菊英, 朱宁, 徐华潮, 樊建庭, 2016. 两种对云斑天牛有林间诱捕效果的植物源物质. 应用昆虫学报, 53(4): 856–863.]
- Zhu N, Zhang DY, Wu LP, Hu Q, Fan JT, 2017. Attractiveness of aggregation pheromones and host plant volatiles to *Anoplophora glabripennis* and *A. chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomol. Sin.*, 60(4): 421–430. [朱宁, 张冬勇, 吴利平, 胡琴, 樊建庭, 2017. 聚集信息素和寄主植物挥发物对光肩星天牛和星天牛的引诱作用. 昆虫学报, 60(4): 421–430.]