

西藏簇角缨象天牛对核桃树七种挥发物的 EAG 和行为反应*

毛祥忠^{1**} 杨 斌² 马云强² 赵 宁^{1,2***}

(1. 西南林业大学生命科学学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 昆明 650224)

摘 要 【目的】为研究西藏簇角缨象天牛 *Cacia cretifera tibetana* 雌雄成虫对寄主核桃树释放的 7 种挥发性化合物的电生理反应和嗅觉行为反应。【方法】选取寄主三台核桃 *Juglans sigillata* var *Santai* 树释放的 7 种挥发性成分分别对西藏簇角缨象天牛进行触角电位 EAG 和“Y”型嗅觉仪行为反应测定。【结果】EAG 测试结果表明, 7 种化合物在测试浓度范围内均能引起西藏簇角缨象天牛雌雄成虫的 EAG 反应。当化合物的浓度为 $0.000\ 4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 天牛成虫的 EAG 反应最弱, 当化合物浓度为 $0.4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 天牛的 EAG 反应最强, 其中对壬醛的 EAG 反应相对值最大, 分别为 1.84 和 1.74。“Y”型嗅觉行为反应测试表明, 在测试浓度范围内, α -蒎烯、 β -蒎烯、1-石竹烯、壬醛、桉叶油醇和反式-2-己烯醛 6 种化合物对天牛雌雄成虫具有引诱作用, 正己醛对天牛雌雄成虫具有趋避作用; 当浓度为 $2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 壬醛对雌性天牛成虫、 β -蒎烯对雄性天牛成虫的引诱率最高, 分别为 95% 和 87%, 正己醛对天牛雌雄成虫的趋避率最高为 87% 和 78%。【结论】核桃树释放的 7 种化合物均能引起西藏簇角缨象天牛雌、雄成虫的 EAG 反应, 且 α -蒎烯、 β -蒎烯、1-石竹烯、壬醛、桉叶油醇和反式-2-己烯醛对天牛雌雄成虫具有引诱作用, 正己醛有趋避作用。该研究结果可为西藏簇角缨象天牛林间引诱剂的研发提供一定的理论依据。

关键词 西藏簇角缨象天牛; 三台核桃; 挥发物; 触角电位反应; “Y”型嗅觉行为反应

EAG and behavioral responses of *Cacia cretifera tibetana* to seven walnut tree volatiles

MAO Xiang-Zhong^{1**} YANG Bin² MA Yun-Qiang² ZHAO Ning^{1,2***}

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Forest Biotechnology, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control in Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract [Objectives] To investigate the electroantennogram and olfactory behavioral responses of male and females of the beetle *Cacia cretifera tibetana* to seven volatile compounds derived from a host plant of this pest, the walnut *Juglans sigillata* var ‘Santai’. [Methods] Electroantennogram (EAG) and Y-tube olfactometer assays were employed to investigate the responses of *C. cretifera tibetana* to seven volatile components from *J. sigillata* var ‘Santai’. [Results] The EAG results show that the tested concentrations of all seven compounds elicited responses from both male and female beetles. The weakest EAG responses were to volatile concentrations of $0.000\ 4\ \text{mol/L}$ and the highest to concentrations of $0.4\ \text{mol/L}$. The strongest EAG responses by males and females, 1.84 and 1.74, respectively, were elicited by nonanal. Y-tube behavioral assays showed that, within a certain range of concentration, six compounds, including α -pinene, β -pinene, 1-caryophyllene, nonaldehyde, eucalyptus oil alcohol and trans-2-hexenal, were attractive to male and female beetles. N-hexyl aldehydes, however, had a repellent effect on both sexes. At a volatile concentration of $2\ \text{mol/L}$, females were most attracted by nonaldehyde whereas males preferred β -pinene; chemotaxis rates of each sex for each compound were 95% and 87%, respectively. N-hexaldehyde had a repellent effect on both sexes, eliciting chemotaxis rates of 87% and 78%, respectively. [Conclusion] All seven compounds induced an EAG response, and six, including α -pinene, β -pinene, 1-caryophyllene,

*资助项目 Supported projects: 云南省林业科技创新项目 ([2016] CX01); 西南林业大学科研基金项目 (XL21602)

**第一作者 First author, E-mail: 915506357@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lijiaingzhn@163.com

收稿日期 Received: 2019-09-15; 接受日期 Accepted: 2020-03-05

nonaldehyde, eucalyptus oil alcohol and trans-2-hexenal, were attractive to both sexes. Only one compound, n-hexenal, had a repellent effect. These results provide a foundation for further research on attractants for *C. cretifera tibetana*.

Key words *Cacia cretifera tibetana*; *Juglans sigillata* var ‘Santai’; volatile compounds; electroantennogram response; Y-type olfactory response

西藏簇角缨象天牛 *Cacia cretifera tibetana* 隶属于鞘翅目 Coleoptera 天牛科 Cerambycidae 沟胫天牛亚科 Lamiinae 缨象天牛属 *Cacia*, 是严重危害云南核桃等经济林木的主要蛀干害虫之一, 其主要分布在我国云南、四川、广西等省份和西藏自治区。西藏簇角缨象天牛的幼虫和成虫都能危害寄主植物, 成虫主要取食寄主嫩枝的树皮和叶子, 导致嫩枝枯死, 遇风容易折断 (陈玉祥和丁小菊, 2016); 幼虫先是蛀食寄主的韧皮部后钻入木质部, 切断输导组织, 使植物生长所需的养分不能正常运输, 阻碍树木的生长, 导致枯死, 最终带来严重的经济和生态环境损失 (Williams *et al.*, 2004; 蔡小娜和黄大庄, 2009)。目前, 国内外针对西藏簇角缨象天牛的防治主要是采取人工剪除枯枝、人工捕杀和化学防治等方法 (谭亮魁等, 2008; Nehme *et al.*, 2010), 现有的防治方法不仅成本高昂, 而且大量使用化学农药引起天牛抗药性, 难以取得良好的防治效果, 且对生态环境造成污染 (张宇凡和王小艺, 2019)。因此寻求一种绿色防控方法显得尤为重要。

植物释放的挥发性化合物在植食性昆虫寻找寄主、取食、交配产卵和补充营养等行为过程中具有调控作用 (张宇皓, 2016)。当前, 国内外学者研究并利用寄主植物释放的挥发性化合物开发植物源引诱剂或趋避剂已经成为防治天牛的新途径 (Wong *et al.*, 2017), 如刘鑫海 (2011) 研究表明柠条锦鸡儿 *Caragana korshinskii* 释放的单体化合物异氟尔酮对柠条绿虎天牛 *Chlorophorus caragana* 具有引诱作用; 罗亚萍 (2013) 研究表明壬醛、水芹烯和香叶基丙酮对光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 具有引诱作用。有关天牛和寄主植物之间化学通讯的研究已有大量报道, 曹丽娟等 (2015) 和阎雄飞等 (2016) 分别报道了红缘天牛 *Asias halodendri*

对沙棘和枣树释放的挥发物具有 EAG 行为反应, 但关于西藏簇角缨象天牛和寄主植物之间的化学通讯机制尚未见报道。毛祥忠等 (2020) 对西藏簇角缨象天牛寄主三台核桃树 *Juglans sigillata* var ‘San-tai’ 的挥发性物质进行了研究, 本研究选取 7 种可能对西藏簇角缨象天牛雌雄成虫具有 EAG 和嗅觉行为反应的挥发性化合物进行测试, 以期筛选出对西藏簇角缨象天牛具有引诱或趋避的活性单体化合物, 为西藏簇角缨象天牛的绿色防控奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫采集和饲养

2019 年 5 月下旬在云南省大理州弥渡县青石嘴 (N25°37'77", E100°67'58", 海拔 2 070 m) 核桃基地的三台核桃林中捕捉西藏簇角缨象天牛成虫, 将采集到的天牛装入 500 mL 透明塑料盒中, 每个塑料盒中只装 1 头天牛和新鲜树皮带回实验室。鉴别雌雄后将天牛放入 50 cm×50 cm×50 cm 的养虫笼中饲养备用, 室内饲养温度 25 °C, 相对湿度保持在 50%-60% (毕拥国等, 2017), 每天补充新鲜的核桃枝条。实验前, 供试昆虫均饥饿处理 12 h。

1.2 供试化合物

根据毛祥忠等 (2020) 对西藏簇角缨象天牛取食诱导寄主三台核桃挥发性成分的研究, 结合卓志航等 (2016) 对云斑天牛 *Batocera horsfieldi* 的研究筛选出 7 种单体化合物。将供试的 7 种标准样品用液体石蜡分别配制成 2.0、0.4、0.04、0.004、0.000 4 mol·L⁻¹ 5 个不同浓度的梯度溶液, 液体石蜡作为空白对照进行 EAG 和行为反应测试 (范丽清等, 2013)。7 种标准样品具体信息见表 1。

表 1 7 种标准品化合物的信息
Table 1 Information for seven standard compounds

化合物名称 Compound name	纯度 (%) Purity	来源 Source of supply
1-石竹烯 1-caryophyllene	95	Sigma 公司
壬醛 Nonanal	≥95	Sigma 公司
α-蒎烯 α-pinene	≥98	Sigma 公司
β-蒎烯 β-pinene	≥97	Sigma 公司
桉叶油醇 Cineole	99	上海晶纯试剂有限公司
反式-2-己烯醛 (2E)-hexenal	98	上海晶纯试剂有限公司
正己醛 Hexanal	97	上海晶纯试剂有限公司

1.3 触角电位反应

随机选取活跃度高的西藏簇角缨象天牛成虫,用灭过菌的解剖刀把天牛的触角从基部切下并切除末端 1 mm,用导电液把处理好的天牛触角搭在金属电极两端。用微量取样器抽取配置好的试剂 2 μL 均匀地滴在 2 cm×0.5 cm 的干净滤纸条上,放入 10 cm 长的气味样品管中(张霖等, 2016),待系统基线平稳后进行测定。测定方法参考严善春等(2006)和 Ikeda 等(1980)的测试方法,刺激气体流速和持续气流均设置为 300 mL/min,每次刺激时间 0.5 s,刺激间隔时间 30 s,每个浓度的化合物分别测试天牛的雌、雄成虫触角各 6 根,每样品平均刺激 4 次,设置 3 个实验重复(测试时标准品的浓度由低到高,每只天牛只取 1 根触角),每测试完一个浓度梯度的标准品都要换上干净的气味样品管,以叶醇作为标准参照,液体石蜡为空白对照(王保新等, 2014)。

EAG反应相对值=

$$\frac{(\text{待测样品的EAG反应值} - \text{空白对照的EAG反应值})}{(\text{标准参照的EAG反应值} - \text{空白对照的EAG反应值})}。$$

1.4 Y 型嗅觉行为反应生物测试

采用 Y 型嗅觉仪对西藏簇角缨象天牛进行行为反应生物测试,Y 型嗅觉仪测定装置由空气泵、活性炭、加湿瓶、玻璃转子流量计(LZB-II)和 Y 型管组成,并用医用硅胶管连接,其中 Y 型管主臂长 25 cm,两侧臂长 20 cm,内径 10 cm,两臂之间夹角 75°(苏艳梅等, 2011)。生测时两

臂的气流通过玻璃转子流量计控制在 600 mL/min,测试时间为 9:00-18:00,生测前先通气 5 min,再用微量取样器抽取配置好的单体化合物 4 μL 均匀地滴在 2 cm×1 cm 滤纸条上并放在测试臂中,对照臂中放入液体石蜡。取完整活跃的西藏簇角缨象天牛成虫放入主臂的入口处,观察该天牛成虫的行为反应。待天牛成虫爬过主臂口 3 cm 用秒表开始计时,5 min 内该天牛爬过测试臂或对照臂 10 cm 且停留 1 min 以上记为有选择,否则记为无选择。每种挥发物浓度测定天牛雌、雄成虫各 20 头,每个处理重复 3 次。更换不同浓度的单体化合物时要用蒸馏水清洗整个装置,且用酒精擦拭消毒、烘干后再进行下一组测试(Bertschy *et al.*, 1997; 李硕等, 2016)。

$$\text{引诱率} = \frac{\text{测试臂天牛总数}}{\text{测试的天牛总数}} \times 100\%,$$

$$\text{趋避率} = \frac{\text{对照臂天牛总数}}{\text{测试的天牛总数}} \times 100\%,$$

反应率=引诱率+趋避率。

1.5 数据处理

采用 SPSS19.0 软件对实验数据进行统计分析,其中,通过 Duncan's 分析法比较 EAG 反应值的显著性,T-检验分析生测数据显著性。

2 结果与分析

2.1 西藏簇角缨象天牛成虫对 7 种不同浓度梯度化合物的 EAG 反应

西藏簇角缨象天牛成虫对 7 种不同浓度梯

度的化合物均有 EAG 反应活性 (表 2)。由表 2 可以看出, 当化合物的浓度为 $0.000\ 4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 7 种化合物刺激天牛成虫 EAG 反应相对值最低; 当化合物浓度升至 $0.004\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, EAG 反应相对值均表现出增加的趋势。其中, 天牛成虫对桉叶油醇和反式-2-己烯醛的 EAG 反应相对值显著提高 ($P<0.05$), 而对其它 5 种化合物的 EAG 反应相对值无显著提高 ($P>0.05$); 当化合物浓度升至 $0.04\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 天牛成虫对 1-石竹

烯和壬醛 2 种化合物, 以及雄性成虫对 α -蒎烯和雌性成虫对反式-2-己烯醛的 EAG 反应相对值均极显著提高 ($P<0.01$); 当化合物浓度升至 $0.4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 天牛成虫对 7 种化合物 EAG 反应相对值均达到最大值且极显著提高 ($P<0.01$); 当挥发物浓度升至 $2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 除雄性成虫对 1-石竹烯和雌性成虫对反式-2-己烯醛的 EAG 反应相对值无明显下降 ($P>0.05$), 天牛成虫对其它化合物的 EAG 反应相对值均极显著降低 ($P<0.01$)。

表 2 西藏簇角纓象天牛雌雄成虫对 7 种化合物不同浓度的 EAG 反应
Table 2 EAG responses of male and female adults in *Cacia cretifera tibetana* to seven compounds at different concentrations from walnut

化合物 Compounds	性别 Sex	EAG 反应相对值 Relative EAG response				
		$0.000\ 4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.004\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.04\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$0.4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$2\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
α -蒎烯 α -pinene	雄性成虫 Adult male	$0.96 \pm 0.01\text{dD}$	$0.98 \pm 0.06\text{dD}$	$1.21 \pm 0.03\text{cC}$	$1.56 \pm 0.04\text{aA}$	$1.32 \pm 0.02\text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.94 \pm 0.02\ \text{cC}$	$0.94 \pm 0.01\ \text{cC}$	$0.99 \pm 0.02\ \text{cC}$	$1.52 \pm 0.08\ \text{aA}$	$1.31 \pm 0.02\ \text{bB}$
β -蒎烯 β -pinene	雄性成虫 Adult male	$0.95 \pm 0.01\ \text{cC}$	$1.01 \pm 0.04\ \text{cC}$	$0.99 \pm 0.05\ \text{cC}$	$1.44 \pm 0.04\ \text{aA}$	$1.20 \pm 0.07\ \text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.92 \pm 0.01\text{dD}$	$0.97 \pm 0.01\ \text{cdCD}$	$1.03 \pm 0.06\text{cdCD}$	$1.53 \pm 0.03\text{aA}$	$1.31 \pm 0.04\text{bB}$
1-石竹烯 1-caryophyllene	雄性成虫 Adult male	$0.89 \pm 0.01\text{cC}$	$0.96 \pm 0.01\text{cC}$	$1.24 \pm 0.07\text{bB}$	$1.72 \pm 0.08\text{aA}$	$1.58 \pm 0.04\text{aA}$
	雌性成虫 Adult female	$0.82 \pm 0.01\text{dD}$	$0.94 \pm 0.02\text{dD}$	$1.28 \pm 0.05\text{cC}$	$1.81 \pm 0.07\text{aA}$	$1.49 \pm 0.04\text{bB}$
壬醛 Nonanal	雄性成虫 Adult male	$0.93 \pm 0.01\text{dD}$	$0.93 \pm 0.01\text{dD}$	$1.22 \pm 0.03\text{cC}$	$1.74 \pm 0.03\text{aA}$	$1.35 \pm 0.03\text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.94 \pm 0.01\text{dD}$	$0.95 \pm 0.01\text{dD}$	$1.28 \pm 0.01\text{cC}$	$1.84 \pm 0.03\text{aA}$	$1.42 \pm 0.02\text{bB}$
桉叶油醇 Cineole	雄性成虫 Adult male	$0.89 \pm 0.01\text{deD}$	$0.97 \pm 0.01\text{cC}$	$0.95 \pm 0.01\text{cdC}$	$1.41 \pm 0.03\text{aA}$	$1.20 \pm 0.03\text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.88 \pm 0.01\text{dD}$	$0.94 \pm 0.01\text{cC}$	$0.96 \pm 0.01\text{cC}$	$1.43 \pm 0.02\text{aA}$	$1.21 \pm 0.02\text{bB}$
反式-2-己烯醛 (2E)-hexenal	雄性成虫 Adult male	$0.87 \pm 0.01\text{eD}$	$0.95 \pm 0.01\text{dCD}$	$1.07 \pm 0.05\text{cC}$	$1.52 \pm 0.02\text{aA}$	$1.39 \pm 0.01\text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.89 \pm 0.02\text{cC}$	$0.95 \pm 0.01\text{dC}$	$1.21 \pm 0.02\text{cB}$	$1.40 \pm 0.02\text{aA}$	$1.33 \pm 0.03\text{aA}$
正己醛 Hexanal	雄性成虫 Adult male	$0.87 \pm 0.02\text{dC}$	$0.94 \pm 0.01\text{cdC}$	$0.97 \pm 0.01\text{cC}$	$1.48 \pm 0.02\text{aA}$	$1.21 \pm 0.05\text{bB}$
	雌性成虫 Adult female	$0.91 \pm 0.02\text{dD}$	$0.91 \pm 0.01\text{dCD}$	$1.12 \pm 0.05\text{cBC}$	$1.54 \pm 0.06\text{aA}$	$1.31 \pm 0.01\text{bB}$

表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 同行数据后标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 同行数据后标有不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)。表 3 同。

Data in the table are mean $\pm$ SE, and followed by different small letters in the same row indicate significant difference at 0.05 level, while with different capital letters indicate extremely significant difference at 0.01 level. The same as table 3.

选择 EAG 反应最强浓度 ($0.4\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 比较天牛成虫对 7 种不同化合物的 EAG 反应相对值 (表 3), 从表 3 中可以看出, 西藏簇角纓象天牛雌、雄成虫对壬醛化合物的 EAG 反应相对值最大, 分别为 1.74 和 1.84, 在相同浓度下, 雌、雄成虫对同种化合物的 EAG 反应相对值没有差异性 ($P>0.05$), 西藏簇角纓象天牛成虫对壬醛的 EAG 反应相对值显著高于 α -蒎烯、 β -蒎

烯、桉叶油醇、反式-2-己烯醛和正己醛 5 种化合物的 EAG 反应相对值 ($P<0.05$), 与 1-石竹烯没有差异性 ($P>0.05$)。

2.2 西藏簇角纓象天牛雌雄成虫对 7 种化合物的嗅觉行为反应

由表 4 可以看出, 天牛成虫对 7 种化合物均表现出趋向性, 其中 α -蒎烯、 β -蒎烯、1-石竹烯、

表 3 西藏簇角缨象天牛雌雄成虫对不同化合物的 EAG 反应 ($0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 3 EAG responses of male and female adults in *Cacia cretifera tibetana* to different compounds from walnut ($0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

化合物 Compounds	EAG 反应相对值 Relative EAG response	
	雌性成虫 Adult female	雄性成虫 Adult male
α -蒎烯 α -pinene	$1.56 \pm 0.04\text{Ab}$	$1.52 \pm 0.08\text{Ab}$
β -蒎烯 β -pinene	$1.44 \pm 0.04\text{Abc}$	$1.53 \pm 0.03\text{Ab}$
1-石竹烯 1-caryophyllene	$1.72 \pm 0.08\text{Aa}$	$1.81 \pm 0.07\text{Aa}$
壬醛 Nonanal	$1.74 \pm 0.03\text{Aa}$	$1.84 \pm 0.03\text{Aa}$
桉叶油醇 Cineole	$1.41 \pm 0.03\text{Ac}$	$1.43 \pm 0.02\text{Abc}$
反式-2-己烯醛(2E)-hexenal	$1.52 \pm 0.02\text{A bc}$	$1.40 \pm 0.02\text{Ac}$
正己醛 Hexanal	$1.48 \pm 0.02\text{A bc}$	$1.54 \pm 0.06\text{Ab}$

壬醛、桉叶油醇和反式-2-己烯醛 6 种化合物为引诱作用,正己醛为趋避作用。化合物浓度为 $0.04 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,壬醛、桉叶油醇和反式-2-己烯醛 3 种化合物对天牛成虫引诱率和趋避率差异显著 ($P<0.05$),其中壬醛和反式-2-己烯醛对雌、雄成虫的引诱率和趋避率差异极显著 ($P<0.01$),随着浓度的增加,化合物的引诱率也逐渐增强。生测结果显示,西藏簇角缨象天牛对浓度为 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的化合物反应最强烈,其中壬醛和 β -蒎烯对雌、雄天牛成虫的引诱率和反应率最大,引诱率分别为 95%和 87%,反应率分别为 95%和 92%。正己醛对天牛成虫表现出趋避作用,浓度为 $0.000 4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,正己醛对天牛成虫的趋避率和引诱率差异不显著 ($P>0.05$),浓度超过 $0.004 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,正己醛对天牛成虫的趋避率和引诱率差异显著 ($P<0.05$)。正己醛浓度为 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对雌、雄成虫的趋避率和反应率最大,趋避率分别为 87%和 78%,反应率分别为 90%和 79%,趋避率和引诱率差异极显著 ($P<0.01$)。

3 讨论

电生理反应和嗅觉行为反应已经成为探索研究昆虫与寄主植物之间化学通讯机制的重要手段(刘勇等, 2005)。本研究表明,在 $0.000 4$ -

$2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 测试浓度范围内,核桃树释放的 7 种化合物均能引起西藏簇角缨象天牛成虫的 EAG 反应,当化合物在最低浓度时, EAG 反应变化不明显,但随着浓度的升高,天牛成虫的 EAG 反应也逐渐增大,表明雌、雄成虫对同种化合物的 EAG 反应趋势是基本一致的,当化合物浓度为 $0.4 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,天牛成虫对 7 种化合物 EAG 反应最强,超过此浓度后 EAG 反应降低,这说明,昆虫对植物的挥发物有一个最佳反应浓度范围,超出这个浓度范围,反应强度将会降低,这与王霞(2009)的研究结果一致。在此浓度下,雌、雄成虫对同种化合物的 EAG 反应相对值不存在显著性差异 ($P>0.05$),表明雌、雄成虫对寄主植物的挥发物具有相似的嗅觉感受能力 (Zhuge *et al.*, 2010)。浓度大于在 $0.04 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,除 α -蒎烯外,雌虫对其它 6 种化合物 EAG 反应值均高于雄虫,可能西藏簇角缨象天牛的雌虫触角比雄虫触角更灵敏,这一现象与贾小俭等(2017)研究甘薯蚁象 *Cylas formicarius* 对不同甘薯品种植物挥发物的 EAG 反应结果一致;西藏簇角缨象天牛雌、雄成虫对壬醛的 EAG 反应值最大,且在行为反应生物测试中壬醛对天牛成虫具有强烈的引诱作用,表明壬醛对西藏簇角缨象天牛寄主的定位选择发挥着重要作用(马艳等, 2018)。

植物挥发性物质在昆虫寄主定位中起着重要的作用,孙鹏(2018)研究表明 1-石竹烯和壬醛对牧草盲蝽 *Lygus pratensis* 有引诱作用,张嫣等(2017)研究表明,反式-2-己烯醛对红缘天牛成虫具有引诱作用,王保新等(2014)研究表明桉叶油醇对云斑天牛成虫有引诱作用, α -蒎烯、 β -蒎烯是天牛引诱剂中常见的化合物(郝德君等, 2009; 张霖, 2016)。本研究结果表明, α -蒎烯、 β -蒎烯、1-石竹烯、壬醛、桉叶油醇和反式-2-己烯醛对西藏簇角缨象天牛具有引诱作用,正己醛对西藏簇角缨象天牛具有趋避作用。

寄主植物释放的挥发性物质是由多种低浓度挥发性次生物质组合成的混合物,其对植食性昆虫的引诱或趋避行为是多种化合物协同作用的结果(严善春等, 2003)。本研究从核桃树中

表 4 西藏簇角缨象天牛雌雄成虫对 7 种化合物的行为反应
Table 4 Behavioral responses of male and female adults in *Cacia cretifera tibetana* to seven compounds from walnut

化合物 Compounds	浓度 (mol·L ⁻¹) Concentration	引诱率 (%) Luring rate		趋避率 (%) Repellent rate		反应率 (%) Response rate		T-检验 T-test	
		雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male
α-蒎烯 α-pinene	0.000 4	20	15	25	20	45	35	0.473	0.573
	0.004	30	25	20	15	50	40	0.407	0.571
	0.04	45	45	20	25	65	70	0.217	0.554
	0.4	65	55	25	30	90	85	0.036*	0.048*
	2	92	82	2	8	94	90	0.000**	0.000**
β-蒎烯 β-pinene	0.000 4	15	35	25	25	40	60	0.261	0.625
	0.004	30	35	15	30	45	65	0.542	0.831
	0.04	40	50	15	20	55	70	0.243	0.163
	0.4	60	70	10	15	70	85	0.032*	0.009**
	2	93	87	0	5	93	92	0.000**	0.001**
1-石竹烯 1-caryophyllene	0.000 4	10	15	20	10	30	25	0.407	0.573
	0.004	20	25	20	20	40	45	1.000	0.573
	0.04	40	30	25	20	65	50	0.389	0.647
	0.4	55	50	15	30	70	80	0.003**	0.046*
	2	87	82	3	5	90	87	0.000**	0.002**
壬醛 Nonanal	0.000 4	25	20	10	20	35	40	0.091	1.000
	0.004	35	25	10	10	45	35	0.018*	0.140
	0.04	45	40	15	10	60	50	0.002**	0.020*
	0.4	80	70	5	5	85	75	0.000**	0.001**
	2	95	82	0	2	95	84	0.000**	0.000**
桉叶油醇 Cineole	0.000 4	25	20	15	10	40	30	0.070	0.196
	0.004	30	20	20	25	50	45	0.158	0.482
	0.04	40	35	20	10	60	45	0.038 *	0.012*
	0.4	55	55	20	10	75	65	0.006**	0.001**
	2	88	80	0	2	88	82	0.000**	0.000**
反式-2-己烯醛 (2E)-hexenal	0.0004	25	20	15	10	40	30	0.288	0.435
	0.004	20	30	15	25	35	55	0.613	0.288
	0.04	45	50	15	25	60	75	0.021*	0.004**
	0.4	60	70	10	15	70	85	0.001**	0.004**
	2	83	80	2	0	85	80	0.000**	0.000**
正己醛 Hexanal	0.0004	15	10	25	20	40	30	0.070	0.196
	0.004	20	10	40	30	60	40	0.047*	0.036*
	0.04	35	30	55	45	90	75	0.026*	0.021*
	0.4	10	10	70	60	80	70	0.002*	0.001*
	2	3	2	87	78	90	79	0.000**	0.000**

*表示雌成虫或雄成虫的引诱率和趋避率差异显著 ($P<0.05$), **表示雌成虫或雄成虫的引诱率和趋避率差异极显著 ($P<0.01$)。
* indicates luring rate and repellent rate of male or females significant difference ($P<0.05$), ** indicates luring rate and repellent rate of male or females extremely significant difference ($P<0.01$).

筛选出 α-蒎烯、β-蒎烯、1-石竹烯、壬醛、桉叶油醇、反式-2-己烯醛及正己醛 7 种化合物均能引起西藏簇角缨象天牛嗅觉反应,但是哪几种化合物组合或以何种比例组合能够对天牛的嗅觉

反应活性更强,有待进一步的实验研究证明。本研究的结果为后期西藏簇角缨象天牛的植物源引诱或趋避剂开发提供了化合物选择的理论依据。西藏簇角缨象天牛仍然有很多基础性和应用

性研究尚未开展,下一步可对西藏簇角缨象天牛的嗅觉感器和嗅觉蛋白进行研究,利用化学生态学的技术阐述核桃挥发性物质与西藏簇角缨象天牛嗅觉反应的分子机制。

参考文献 (References)

- Bertschy C, Turlings TCJ, Bellotti AC, 1997. Chemically-mediated attraction of three parasitoid species to mealybug-infested cassava leaves. *Florida Entomologist*, 80(3): 383–395.
- Bi YG, Guo L, Wang ZG, Lu F, Yan AH, 2017. Electroantennogram and behavioral responses of *Apriona germari* to five plant volatiles and theirs mixtures. *Science of Sericulture*, 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.]
- Cao LJ, Liu Q, Zhu GP, Li M, Chen YP, Chen YT, Xie X, 2015. EAG and olfactory behavioral responses of *Asias halodendri* to seven volatiles from *Hippophae rhamnoides*. *Journal of Tianjin Normal University*, 35(3): 84–88. [曹丽娟, 刘强, 朱耿平, 李敏, 陈艳萍, 陈易彤, 谢晓, 2015. 红缘天牛对沙棘 7 种挥发物的 EAG 和嗅觉行为反应. 天津师范大学学报, 35(3): 84–88.]
- Cai XN, Huang DZ, 2009. Recognition and identification of damage features of main longhorn beetles in China. *Forest Pest and Disease*, 28(6): 37–40. [蔡小娜, 黄大庄, 2009. 中国主要天牛危害状识别鉴定研究. 中国森林病虫, 28(6): 37–40.]
- Chen YX, Ding XJ, 2016. Damage characteristics and comprehensive prevention and control technology of *Anoplophora nobilis*. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, (1): 43–45. [陈玉祥, 丁小菊, 2016. 黄斑星天牛危害特点及综合防控技术. 青海农林科技, (1): 43–45.]
- Fan LQ, Sun ZH, Meng ZJ, 2013. EAG and behavioral responses of asian longhorn beetle *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) to plant volatiles. *Chinese Journal of Ecology*, 32(1): 142–148. [范丽清, 孙宗华, 孟昭君, 2013. 光肩星天牛对植物源挥发物的触角电位和行为反应. 生态学杂志, 32(1): 142–148.]
- Hao DJ, Fan BQ, Tang JG, Wang Y, Ma FL, 2009. Screening of attractants for *Monochamus alternatus* and its attraction effects. *Journal of Northeast Forestry University*, 37(11): 86–87. [郝德君, 樊斌琦, 唐进根, 王焱, 马凤林, 2009. 松墨天牛引诱剂的筛选及其引诱作用. 东北林业大学学报, 37(11): 86–87.]
- Ikeda T, Enda N, Yamane A, Oda K, Toyoda T, 1980. Attractants for the japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* Hope. *Japanese Society of Applied Entomology and Zoology*, 15(3): 358–361.
- Jia XJ, Ma J, Gao B, Li XH, Zhang T, Chen SL, Wang RY, 2017. EAG and olfactory responses of *Cylas formicarius* (Coleoptera: Curculionidae) to volatiles from plants of different sweetpotato cultivars. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(11): 1285–1291. [贾小俭, 马娟, 高波, 李秀花, 张涛, 陈书龙, 王容燕, 2017. 甘薯象对不同甘薯品种植物挥发物的 EAG 和嗅觉反. 应用昆虫学报, 60(11): 1285–1291.]
- Li S, Gao W, Chen XC, Zhou YT, Cui WC, 2016. Electroantennogram response of *Anoplophora glabripennis* (Motsch.) to *Acer negundo* volatiles. *Forest Pest and Disease*, 35(2): 9–14. [李硕, 高薇, 程相称, 周艳涛, 崔伟婵, 2016. 光肩星天牛对复叶槭挥发物的触角电位及行为反应. 中国森林病虫, 35(2): 9–14.]
- Liu XH, 2011. The development of phyto-attractant of *Chlorophorus* sp. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [刘鑫海, 2011. 柠条绿虎天牛植物源引诱剂开发. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Liu Y, Guo GX, Chen JL, Ni HX, 2005. Behavioral and electrophysiological responses of four predatory insect species to semiochemicals of wheat. *Acta Entomologica Sinica*, 48(2): 161–165. [刘勇, 郭光喜, 陈巨莲, 倪汉祥, 2005. 瓢虫和草蛉对小麦挥发物组分的行为及电生理反应. 昆虫学报, 48(2): 161–165.]
- Luo YP, 2013. The host choice behavior of *Anoplophora glabripennis* and there search of lure from host. Master dissertation. Hangzhou: Zhejiang A & F University. [罗亚萍, 2013. 光肩星天牛的寄主选择行为和植物源引诱剂研究. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学.]
- Ma Y, Shi LY, Zhao Y, Xu HC, 2018. Comparison of volatiles released from the host *Juglans mandshurica* indifferent damaged states and the GC-EAD and behavioral responses of *Apriona germari* (Coleoptera: Cerambycidae) to these volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 61(5): 574–584. [马艳, 史黎央, 赵艺, 徐华潮, 2018. 不同危害状态下寄主山核桃挥发物成分的比较及桑天牛对其组分的 GC-EAD 和行为反应. 昆虫学报, 61(5): 574–584.]
- Mao XZ, Li ZB, Yang B, Zhao N, 2020. Changes on volatile components in walnut bark and leaves induced by *Cacia cretifera* thibetana. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*, 49(1): 18–23. [毛祥忠, 李宗波, 杨斌, 赵宁, 2020. 西藏簇角缨象天牛取食诱导核桃树皮和树叶挥发性成分的变化. 福建农林大学学报, 49(1): 18–23.]
- Nehme ME, Keena MA, Zhang A, Baker TC, Xu Z, Hoover K, 2010. Evaluating the use of male-produced pheromone components and plant volatiles in two trap designs to monitor *Anoplophora glabripennis*. *Environmental Entomology*, 39(1): 169–176.

- Su YM, Luo HF, Yang B, Yang DQ, Li XH, Yang FZ, 2011. Study on olfactory behavior of *spodoptera exigua* on *rosa chinensis* infected by *Podosphaera pannosa*. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 39(8): 4567–4569. [苏艳梅, 罗恒飞, 杨斌, 杨德强, 李向红, 杨发忠, 2011. 甜菜夜蛾对白粉菌侵染的中国月季的嗅觉行为研究. 安徽农业科学, 39(8): 4567–4569.]
- Sun P, 2018. Analysis of the volatiles of *Lygus pmtensis* host plants and its inducement. Master dissertation. Xinjiang: Tarim University. [孙鹏, 2018. 寄主植物挥发物分析及其对牧草盲蝽成虫的引诱作用. 硕士学位论文. 新疆: 塔里木大学.]
- Tan LK, Wang WK, Li CR, 2008. Progress on integrated control of longhorn beetles in China. *Hubei Agricultural Sciences*, 47(2): 232–237. [谭亮魁, 王文凯, 李传仁, 2008. 中国天牛综合防治研究进展. 湖北农业科学, 47(2): 232–237.]
- Wong JCH, Zou Y, Millar JG, Hanks LM, 2017. Attraction of cerambycid beetles to their aggregation-sex pheromones is influenced by volatiles from host plants of their larvae. *Environmental Entomology*, 46(3): 649–653.
- Wang BX, Yang S, Yang W, Yang CP, Cai Y, Zhou M, He XH, 2014. EAG and behavioral responses of *Batocera lineolata* Chevrolat 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.]
- Williams DW, Li GF, Gao RT, 2004. Tracking movements of individual *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae) adults: Application of harmonic radar. *Environmental Entomology*, 33(3): 644–649.
- Wang X, Xu J, Sheng YL, 2009. Electroantennogram responses of *Maruca testulalis* Geyer to plant volatiles and sexpheromone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(8): 1973–1979. [王霞, 徐静, 沈幼莲, 2009. 豆野螟成虫触角对植物挥发性和性信息素化合物的触角电位反应. 应用生态学报, 20(8): 1973–1979.]
- Yan SC, Chen H, Yang H, Yuan HE, Zhang J, Chi DF, 2006. Effects of plant volatiles on the EAG response and behavior of the grey tiger longicorn, *Xylotrechus rusticus* Linnaeus. *Acta Entomologica Sinica*, 49(5): 759–767. [严善春, 程红, 杨慧, 袁红娥, 张健, 迟德富, 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.]
- Yan SC, Sun JH, Chi DF, Zhang DD, Zhao QK, 2003. The repellency effects of plant volatiles to *Strobilomyia* spp. damaging larch cones. *Acta Ecologica Sinica*, 23(2): 314–319. [严善春, 孙江华, 迟德富, 张丹丹, 赵启凯, 2003. 植物挥发性物质对落叶松球果花蝇的趋避效果. 生态学报, 23(2): 314–319.]
- Yan XF, Liu YH, Li G, He Y, Liu XY, Liu L, 2016. EAG and olfactory behavioral responses of *Asias halodendri* to six volatiles from Chinese *Jujube* tree. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, (36): 177–181. [阎雄飞, 刘永华, 李刚, 贺英, 刘晓英, 刘列, 2016. 红缘天牛对枣树 6 种挥发物 EAG 和嗅觉行为反应. 中国农学通报, (36): 177–181.]
- Zhang L, Zhang LS, Zhang YF, Xu ZC, 2016. EAG and behavioral responses of *Arhopalus rusticus* Linn to *Pinus tabulaeformis* carr volatile. *Journal of Northeast Forestry University*, 44(9): 99–102. [张霖, 张连生, 张永福, 许志春, 2016. 褐梗天牛对油松挥发物的 EAG 和行为反应. 东北林业大学学报, 44(9): 99–102.]
- Zhang L, 2016. Study on the biology and attractants of *Arhopalus rusticus* (Linnaeus). Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [张霖, 2016. 褐梗天牛生物学特性和引诱剂的初步研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学.]
- Zhang Y, Wang XW, Zhang LL, Li M, Liu Q, 2017. EAG and behavioral responses of *Asias halodendri* to the volatiles of *Vitis vinifera*. *Journal of Tianjin Normal University*, 37(2): 30–35. [张嫣, 王星霖, 张玲玲, 李敏, 刘强, 2017. 红缘天牛成虫对葡萄挥发物的 EAG 和行为反应. 天津师范大学学报, 37(2): 30–35.]
- Zhang YF, Wang XY, 2019. Advances in biological control of *Anoplophora chinensis* Forster. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(1): 136–147. [张宇凡, 王小艺, 2019. 星天牛生物防治研究进展. 中国生物防治学报, 35(1): 136–147.]
- Zhang YH, 2016. Study on attractant effect of rice volatiles on *Chilo suppressalis* and rice parasitoid wasps. Master dissertation. Zhejiang: Zhejiang University. [张宇皓, 2016. 水稻挥发物对二化螟及稻田寄生蜂的引诱效果研究. 硕士学位论文. 浙江: 浙江大学.]
- Zhuge PP, Luo SL, Wang MQ, Zhang G, 2010. Electrophysiological responses of *Batocera horsfieldi* (Hope) adults to plant volatiles. *Journal of Applied Entomology*, 134(7): 600–607.
- Zhuo ZH, Yang W, Xu DP, Yang CP, Yang S, Liu CS, 2016. Volatile components in bark and leaf of host plant *Juglans regia* L. of *Batocera lineolata* Chevrolat. *Journal of Northwest A&F University*, 44(5): 205–214. [卓志航, 杨伟, 徐丹萍, 杨春平, 杨桦, 刘臣山, 2016. 云斑天牛寄主核桃树皮及树叶的挥发性成分. 西北农林科技大学学报, 44(5): 205–214.]