

槐绿虎天牛对葡萄和杏 11 种挥发物的 EAG 及行为反应*

张 嫣** 刘 强*** 朱耿平 李 敏

(天津市动植物抗性重点实验室, 天津师范大学生命科学学院, 天津 300387)

摘 要 【目的】为了研究槐绿虎天牛 *Chlorophorus diadema* (Motschulsky) 成虫对寄主植物葡萄 6 种挥发物和非寄主杏 5 种挥发物的引诱活性。【方法】通过触角电位 (EAG) 和嗅觉行为测定, 分析槐绿虎天牛对 11 种挥发物单组分和其 19 种组合配方的 EAG 和行为反应。【结果】结果显示对槐绿虎天牛具引诱活性有 10 种单组分和 12 种组合配方, EAG 反应结果中, 各组分反应强弱依次为: N (非寄主配方)、M (非寄主配方)、B (寄主配方)、O (非寄主配方)、反式-2-己烯-1-醇、K (非寄主配方)、反-2-己烯醛、亚油酸甲酯、A (寄主配方)、D (寄主配方)、J (非寄主配方)、丁酸丁酯、1-戊烯-3-醇、R-柠檬烯、S-柠檬烯、3-萜烯、异戊醇、4-甲基-1-戊醇、E (寄主配方)、F (寄主配方); 行为测定结果中, 相对选择率在 30% 以上的组分是: J (非寄主配方)、F (寄主配方)、A (寄主配方)、反式-2-己烯-1-醇、反-2-己烯醛、R-柠檬烯、D (寄主配方)、N (非寄主配方)、E (寄主配方)、B (寄主配方), 其它组分 1-戊烯-3-醇、异戊醇、4-甲基-1-戊醇、K (非寄主配方)、亚油酸甲酯、3-萜烯、M (非寄主配方)、丁酸丁酯、S-柠檬烯则次之。因此引诱性好的组分依次为: N (非寄主配方)、A (寄主配方)、D (寄主配方)、J (非寄主配方)、F (寄主配方)、反式-2-己烯-1-醇、反-2-己烯醛、R-柠檬烯。【结论】(1) 寄主植物挥发物引诱活性不都是绝对地高于非寄主植物挥发物; (2) 含有某种化合物成分的组合配方的引诱活性有时低于单一组分; (3) 总体来看组合配方引诱活性高于单一组分。本研究为槐绿虎天牛植物源引诱剂的研发提供了重要的理论依据。

关键词 槐绿虎天牛, 寄主植物, 非寄主植物, 挥发物, 生理, 行为, 引诱活性

Research on the EAG and behavioral responses of *Chlorophorus diadema* to eleven *Vitis vinifera* and *Prunus armeniaca* volatiles

ZHANG Yan** LIU Qiang*** ZHU Geng-Ping LI Min

(Tianjin Key Laboratory of Animal and Plant Resistance, College of Life Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract [Objectives] To study the effects of six volatiles from the host-plant *Vitis vinifera*, and five from the non-host plant *Prunus armeniaca*, on EAG and behavior of adult *Chlorophorus diadema* (Motschulsky). [Methods] The electroantennogram and behavioral responses of *C. diadema* adults to 11 single components and 19 blends of these were tested using an EAG meter and a Y-tube olfactometer. [Results] 10 single components and 12 blends induced obvious EAG and behavioral responses. The relative levels of EAG response to different compounds were, in decreasing order; N (non-host formula), M (host formula), B (host formula), O (host formula), trans-2-hexen-1-ol, K (host formula), trans-2-hexenal, methyl linoleate, A (host formula), D (host formula), J (non-host formula), Butyl butyrate, 1-Penten-3-ol, (R)-(+)-limonene, (S)-(-)-limonene, 3-carene, 3-methyl-1-butanol, 4-methyl-1-pentanol, E (host formula) and F (host formula). In behavioral tests, the relative attractiveness of components with more than 30% relative attractiveness were, in decreasing order; J (host formula), F (host formula), A (host formula), trans-2-hexen-1-ol, trans-2-hexenal, (R)-(+)-limonene, D (host formula), N

* 资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金资助项目 (31272359)

**第一作者 First author, E-mail: 1181240523@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lqtinu@126.com

收稿日期 Received: 2015-03-23, 接受日期 Accepted: 2015-04-17

(non-host formula), E (host formula) and B (host formula). Others compounds, including 1-penten-3-ol, 3-methyl-1-butanol, 4-methyl-1-pentanol, K (host formula), methyl linoleate, 3-carene, M (host formula), butyl butyrate, (S)-(-)-limonene, and C (host formula), were less attractive than those previously mentioned. Therefore, the 8 most attractive components to *C. diadema* were N (host formula), A (host formula), D (host formula), J (host formula), F (host formula), trans-2-hexenal, trans-2-hexen-1-ol, and (R)-(+)-limonene. **[Conclusion]** We conclude that (1) The attractiveness of host plant volatiles is not absolutely higher than that of non-host plant volatiles; (2) The EAG response to a particular compound was sometimes less than the relative attractiveness of that component in Y-tube olfactometer tests; (3) Overall, blends of different volatiles were more attractive than that of single compounds in Y-tube olfactometer tests. These results provide a theoretical background for the development of attractants for *C. diadema*.

Key words *Chlorophorus diadema*, hostplant, non-hostplant, volatiles, phylogeny, EAG response, behavioral response, activity

槐绿虎天牛 *Chlorophorus diadema* (Motschulsky) 隶属鞘翅目, 天牛科, 天牛亚科, 虎天牛族, 绿虎天牛属昆虫。该虫分布很广, 国内分布于东北、华北、华中、华东、华南、西北等地 (张世权, 1994; 王直诚, 2003; 李升和刘强, 2009)。国外如朝鲜、日本、西伯利亚、蒙古等地。已知其寄主有 15 种 (蒋书楠, 1987; 张世权, 1994; 祁城进, 1998; 王直诚, 2003)。由于该蛀干害虫以幼虫蛀食我国特有植物四合木的枝干和根部, 造成植株死亡, 一些地段危害率最高可达 95.35% (李升和刘强, 2009)。已成为濒危植物四合木近期灭绝的主要威胁 (李升和刘强, 2009)。对该虫采用的化学防治几乎没有效果 (李琳和刘强, 2010)。目前对天牛等蛀干害虫防治, 采用诱杀是比较有效的方法 (范仁俊等, 1993; 唐蒙昌等, 1993a, 1993b; 孙逢海等, 1994; 郭百平和王子科, 1998; 王大洲和王金华, 2002)。李琳和刘强 (2010) 曾采用糖醋等配制的 14 种诱剂对槐绿虎天牛进行过诱杀, 并筛选出一种比较有效的配方。以往关于昆虫植物源引诱剂的研究主要关注寄主挥发物活性成分的研究, 例如, 对松墨天牛引诱剂和林间的引诱效果的研究 (郝德君等, 2009); 光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* Motschulsky 对寄主植物挥发物的选择机制 (张凤娟等, 2009); 光肩星天牛寄主复叶槭挥发物部分组分对光肩星天牛的 EAG 测定 (李建光等, 1999, 2002); 褐梗天牛 *Arkopalus ictusi* Linaeus 寄主挥发性物质的分析和林间引诱实验的研究 (泽桑梓等, 2011) 等; 通过对复叶槭进行干旱胁迫和机械损伤处理后, 发现其挥

发物的组成发生了很大的变化, 不仅表现在挥发物的释放量上, 而且还产生了一些新的挥发物种类, 如机械损伤后产生的萜类物质如 α -法尼烯、(E)- β -罗勒烯等, 其中 α -法尼烯被认为是植物在遭受损伤后普遍产生的产物 (Gabler *et al.*, 1991; Hopke *et al.*, 1994), 这些挥发物很可能对光肩星天牛的寄主选择起着重要的作用; 烟草夜蛾雌虫随年龄和交配地位的变化对植物挥发物的行为反应的研究也针对的是寄主植物挥发物 (Mechaber *et al.*, 2002); 对豌豆飞蛾 *Cydia nigricana* Fabricius 雌虫对不同植物的行为线索研究采用 4 种寄主植物挥发物 (Thöming and Norli, 2015)。本文通过槐绿虎天牛寄主植物葡萄和非寄主植物杏挥发物对其引诱活性的研究, 期望能够为该类害虫引诱剂的研究提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料和仪器

槐绿虎天牛 *Chlorophorus diadema* 成虫均为 2014 年 7 月从西鄂尔多斯国家级自然保护区四合木核心区采集。将成虫分雌雄每 10 只置于室内打孔处理过的矿泉水塑料瓶中, 瓶身加标签, 并按时放入切成小条的西瓜喂养, 供实验用。

11 种植物挥发物的选取是根据高海波 (2007) 对葡萄健康株和机械损伤株以及杜远鹏等 (2009) 对葡萄离体根段挥发物分析结果; 任龙等 (2013) 对衰弱杏树以及隋学良等 (2012) 对杏树木段的挥发物的分析结果。这些化合物的纯度和来源如表 1。液体石蜡 (99%, 天津市光

表 1 种标准化合物的名称、纯度和来源
Table 1 Name, purity and sources of eleven standard volatiles

植物种类 Sort of plant	化合物 Compounds	纯度 Purity	来源 Source of supply
葡萄 <i>Vitis vinifera</i>	反-2-己烯醛 Trans-2-hexenal	98%	阿拉丁
	1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol	>97%	百灵威科技
	反式-2-己烯-1-醇 Trans-2-hexen-1-ol	96%	百灵威科技
	亚油酸甲酯 Methyl linoleate	>95%	百灵威科技
	桉油精 1,8-cineole	>98%	百灵威科技
	4-甲基-1-戊醇 4-methyl-1-pentanol	99%	百灵威科技
杏 <i>Prunus armeniaca</i>	S-柠檬烯(S)-(-)-limonene	96%	百灵威科技
	R-柠檬烯(R)-(+)-limonene	95%	百灵威科技
	丁酸丁酯 Butyl butyrate	98%	百灵威科技
	异戊醇 3-methyl-1-butanol	98.5%	百灵威科技
	3-萜烯 3-carene	90%	百灵威科技

复精细化工研究所)。

触角电位仪由荷兰 SYNTECH 公司生产。“Y”型嗅觉仪由大气采样仪(QC-1S 型)、分流装置和“Y”型玻璃管构成。“Y”型管,其测试臂长 20 cm,内径为 2 cm,两臂夹角为 90°。

1.2 方法

以液体石蜡油作溶剂,将 11 种化合物分别配制成 5%、2.5%、1%、0.1%、0.01%、0.005%、0.001%、0.0005%这 8 个浓度,可根据情况增设浓度。分别对槐绿虎天牛进行行为和生理活性测定。然后根据单组分中对槐绿虎天牛雌虫有引诱活性的化合物再进行两两、三三、四四、五五之间等体积配制成组合配方,对槐绿虎天牛进行触角电位和嗅觉行为测定。

触角电位测定(EAG):参照文献(方宇凌和张钟宁,2002;严善春等,2006),连续气体流量设置为 300 mL/min,刺激气流流量为 20 mL/min,刺激时间 30 s。用刀片将槐绿虎天牛触角基部切下,然后切除触角基部和顶端各 1 节,用导电胶横搭在电极上。将配制好的溶液 10 μL 均匀滴在折好的呈‘之’字形 4 cm×1 cm 的滤纸条上,放入长 8 cm 的材料管内,气味混合管与触角相距 1 cm,待基线平稳后给予刺激。实验以液体石蜡混合气体为对照。

在测定槐绿虎天牛对不同浓度的同种挥发物的 EAG 反应时,刺激顺序按浓度由低到高进行。不同化合物测试要换用另一个清洁的材料管。

嗅觉行为测定:在“Y”型管的选择臂放化合物味源,以面积为 4 cm² 普通滤纸作味源载体,对照臂则以洁净空气做对照。实验过程中,在出气口接有活性炭管,气流速度设置为 1.5 L/min,以保证气流清洁。供试天牛 10 只一组,每组实验重复 3 次。每只槐绿虎天牛观察 3~5 min,以天牛到达选择臂末端或在选择臂中停留 20 s 以上即可视为选择,否则视为非选择。每做 1 次,调换选择臂和对照臂位置,5 min 后继续实验,以减少前者残留气味引起的干扰。同一化合物味源的测试浓度也是由低到高进行,用酒精棉擦拭味源处,更换不同化合物味源时,要彻底清洗整个装置,干燥后继续进行试验。

根据 EAG 测定值,参照公式(赵新成等,2004;陆鹏飞等,2007) $V=2R/C_1+C_2$ (其中 R 代表刺激物 EAG 反应值, C₁ 代表刺激物前一个对照反应值, C₂ 代表刺激物后一个对照反应值) 计算出 EAG 反应相对值。每只天牛只取 1 只触角进行测试,每个样品重复 3 次以求得平均 EAG 反应相对值。

选择率 = $\frac{b}{b+c} \times 100\%$;

$$\text{相对选择率} = \frac{b-c}{b+c} \times 100\%$$

根据卡方公式 $\chi^2 = \frac{(|b-c|-1)^2}{b+c}$ 检验显著性差异。其中 b 为选择臂天牛的数量, c 为对照臂天牛的数量。当 $\chi^2_{0.05(1)} \geq 3.84$ 时, 差异显著; 当 $\chi^2_{0.01(1)} \geq 6.63$ 时, 差异极显著; 反之, 则没有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 对寄主植物挥发物单组分的 EAG 反应

槐绿虎天牛成虫对 6 种化合物单组分的 EAG 反应在 8 个浓度梯度范围内表现出明显的差异 (图 1), 具活性的 5 种化合物单组分在槐绿虎天牛成虫 EAG 反应相对值达到峰值的使用浓度分别为: 反-2-己烯醛为 0.1%; 1-戊烯-3-醇、亚油酸甲酯和 4-甲基-1-戊醇均为 0.01%; 反式-2-己烯-1-醇 0.001%。

2.2 对非寄主植物挥发物单组分的 EAG

槐绿虎天牛成虫对 5 种化合物单组分的 EAG 反应 (图 2), 在 8 个浓度梯度范围内表现出明显的差异, 具活性的 5 种化合物单组分在槐绿虎天牛成虫的 EAG 反应相对值达到峰值的使用浓度分别为: 3-萜烯、丁酸丁酯和异戊醇均为 2.5%; R-柠檬烯为 1%; S-柠檬烯为 5%。

2.3 对寄主植物挥发物单组分的行为反应

槐绿虎天牛成虫对 6 种寄主挥发物单组分不同浓度的嗅觉行为反应的结果 (图 3): 反-2-己烯醛在 0.005% 至 2.5% 内对槐绿虎天牛表现为引诱作用, 其它浓度范围则表现为趋避性; 1-戊烯-3-醇在 0.001% 至 0.01% 时, 表现为引诱作用, 其它浓度表现为趋避; 4-甲基-1-戊醇在 0.001% 至 0.01% 时, 表现为引诱作用, 其它浓度表现为趋避; 反式-2-己烯-1-醇在 0.0005% 至 0.01% 内对其表现为引诱作用, 0.01% 时则对槐绿

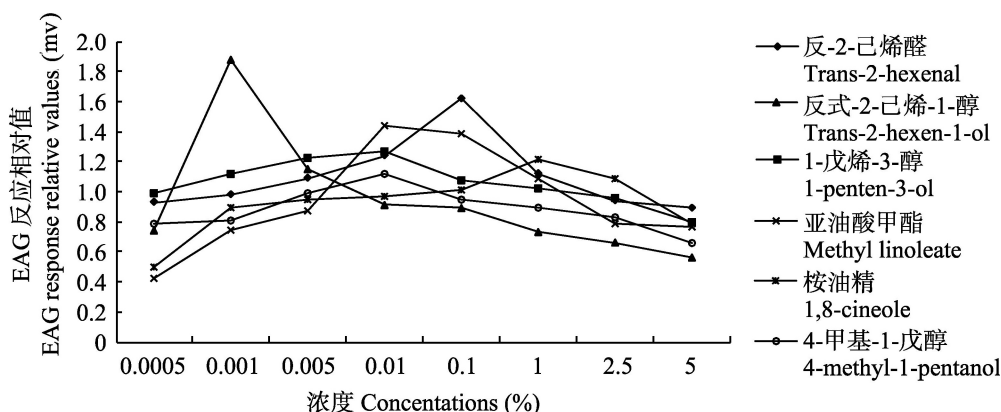


图 1 槐绿虎天牛成虫对寄主挥发物单组分不同浓度下的 EAG 反应

Fig. 1 The EAG response of *Chlorophorus diadema* adults to different single components of host plant volatiles

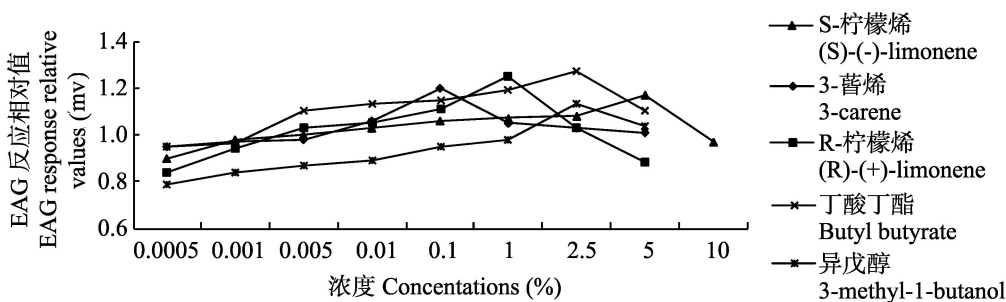


图 2 槐绿虎天牛成虫对非寄主挥发物单组分不同浓度下的 EAG 反应

Fig. 2 The EAG response of *Chlorophorus diadema* adults to different single components of non-host plant volatiles

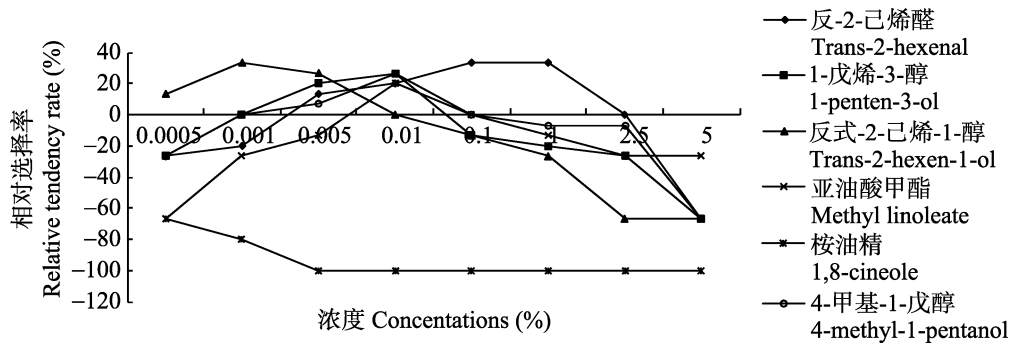


图 3 槐绿虎天牛成虫对寄主植物挥发物单组分的行为选择反应

Fig. 3 The behavioral response of *Chlorophorus diadema* adults to the single components of host plant volatiles

虎天牛无明显的趋性反应, 浓度大于 0.01% 表现为趋避; 亚油酸甲酯仅在 0.01% 表现为引诱作用, 其它浓度则表现为不同程度的趋避作用; 桉油精则在各浓度范围内均表现为明显的趋避作用。5 种有引诱活性的化合物最高活性浓度分别为: 反-2-己烯醛为 0.1%; 1-戊烯-3-醇、亚油酸甲酯和 4-甲基-1-戊醇均为 0.01%; 反式-2-己烯-1-醇 0.001%。

2.4 对非寄主植物挥发物单组分的行为反应

5 种非寄主植物挥发物单组分对槐绿虎天牛成虫均表现出引诱活性, 但是不同浓度引诱活性不同 (图 4), 3-萜烯和 R-柠檬烯均在 0.01% 至 2.5% 浓度范围内对槐绿虎天牛表现为引诱作用, 其它浓度则表现为不同程度的趋避作用; 反式-2-己烯-1-醇则在 0.0005% 至 0.01% 范围表现为引诱作用, 超过 0.01% 的浓度会明显地表现为趋避作用; 丁酸丁酯在 1% 至 2.5% 范围内表现为引诱作用, 其它浓度则表现为趋避作用; 异戊醇在

1% 至 5% 的浓度表现为引诱作用, 其它浓度下为趋避作用。各种化合物最高引诱活性的浓度分别为: 3-萜烯为 0.1%; R-柠檬烯为 1%; S-柠檬烯为 5%; 丁酸丁酯、异戊醇为 2.5%。

2.5 对寄主和非寄主植物挥发物多组分配方的 EAG 反应

根据以上单组分测定结果, 用具有引诱活性的 10 种化合物, 以 2~5 种化合物等比例配制成 A~S 共 19 种配方如表 2 所示, 分别对槐绿虎天牛雌雄成虫进行 EAG 测定, 结果 (图 5) 显示: 对配方 B、M、N 的 EAG 反应相对值在 2 以上, 其它配方除 C 和 L 对雄虫的 EAG 相对值小于 1 外, 均大于 1。

2.6 对寄主和非寄主多组分配方的行为反应

经“Y”形嗅觉仪测定, 槐绿虎天牛成虫对 A、E、F 和 J 4 种配方的选择率较高, 分别为 70%、70%、76.67%、80%。槐绿虎天牛雌虫对前两种

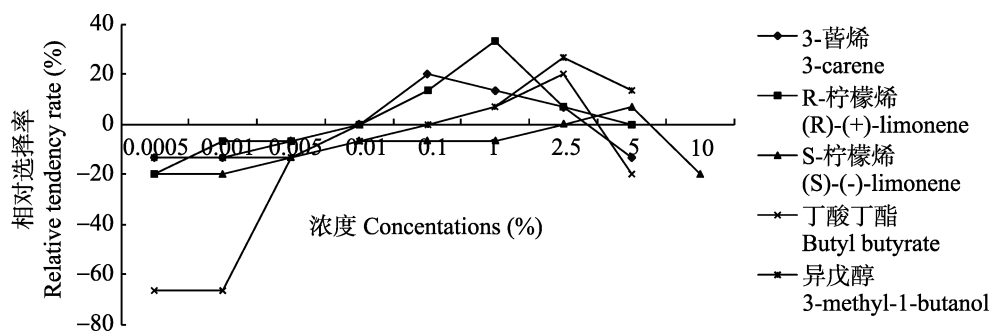


图 4 槐绿虎天牛成虫对非寄主植物挥发物单组分的行为选择反应

Fig. 4 The behavioral response of *Chlorophorus diadema* adults to the single components of non-host plant volatiles

表 2 植物挥发物多组分配方
Table 2 Multi-component formulas of plant volatiles

类别 Categories	配方 Formulas	组分 Components
寄主挥发物配方 Host volatiles formulas	A	反-2-己烯醛：1-戊烯-3-醇 Trans-2-hexena：1-penten-3-ol
	B	1-戊烯-3-醇：反式-2-己烯-1-醇 1-penten-3-ol：Trans-2-hexen-1-ol
	C	1-戊烯-3-醇：亚油酸甲酯：4-甲基-1-戊醇 1-penten-3-ol：Methyl linoleate：4-methyl-1-pentanol
	D	反-2-己烯醛：1-戊烯-3-醇：反式-2-己烯-1-醇：4-甲基-1-戊醇 Trans-2-hexena：1-penten-3-ol：Trans-2-hexen-1-ol：4-methyl-1-pentanol
	E	反-2-己烯醛：反式-2-己烯-1-醇：4-甲基-1-戊醇 Trans-2-hexena：Trans-2-hexen-1-ol：4-methyl-1-pentanol
	F	反式-2-己烯-1-醇：亚油酸甲酯：4-甲基-1-戊醇 Trans-2-hexen-1-ol：Methyl linoleate：4-methyl-1-pentanol
	G	反式-2-己烯-1-醇：4-甲基-1-戊醇 Trans-2-hexen-1-ol：4-methyl-1-pentanol
	H	1-戊烯-3-醇：反式-2-己烯-1-醇：4-甲基-1-戊醇 1-penten-3-ol：Trans-2-hexen-1-ol：4-methyl-1-pentanol
	I	反-2-己烯醛：反式-2-己烯-1-醇：亚油酸甲酯：4-甲基-1-戊醇 Trans-2-hexena：Trans-2-hexen-1-ol：Methyl linoleate：4-methyl-1-pentanol
	J	3-萜烯：S-柠檬烯 3-carene：(S)-(-)-limonene
非寄主挥发物配方 Non-host volatiles formulas	K	R-柠檬烯：S-柠檬烯 (R)-(+)-limonene：(S)-(-)-limonene
	L	丁酸丁酯：异戊醇 Butyl butyrate：3-methyl-1-butanol
	M	3-萜烯：丁酸丁酯：异戊醇 3-carene：Butyl butyrate：3-methyl-1-butanol
	N	3-萜烯：R-柠檬烯：S-柠檬烯：异戊醇 3-carene：(R)-(+)-limonene：3-methyl-1-butanol
	O	3-萜烯：R-柠檬烯：S-柠檬烯：丁酸丁酯：异戊醇 3-carene：(R)-(+)-limonene：(S)-(-)-limonene：Butyl butyrate：3-methyl-1-butanol
	P	R-柠檬烯：S-柠檬烯：丁酸丁酯 (R)-(+)-limonene：(S)-(-)-limonene：Butyl butyrate
	Q	S-柠檬烯：丁酸丁酯：异戊醇 (S)-(-)-limonene：Butyl butyrate：3-methyl-1-butanol
	R	3-萜烯：R-柠檬烯：异戊醇 3-carene：(R)-(+)-limonene：3-methyl-1-butanol
	S	R-柠檬烯：3-萜烯：丁酸丁酯：异戊醇 (R)-(+)-limonene：3-carene：Butyl butyrate：3-methyl-1-butanol

配方达到了显著选择效果 ($P < 0.05$)，对后两种则达到了极显著的选择效果 ($P < 0.01$)；而槐绿

虎天牛雄虫对这 4 种的选择效果均很显著 ($P < 0.05$)。从图 6 中可以看到，槐绿虎天牛成

虫对组合配方中 B、C、D、K、L、M、N 和 O 8 种的选择率较前 4 种低, 但选择率均在 50% 以

上。对其余 7 种选择率则均低于 50%。具体结果如表 3 所示。

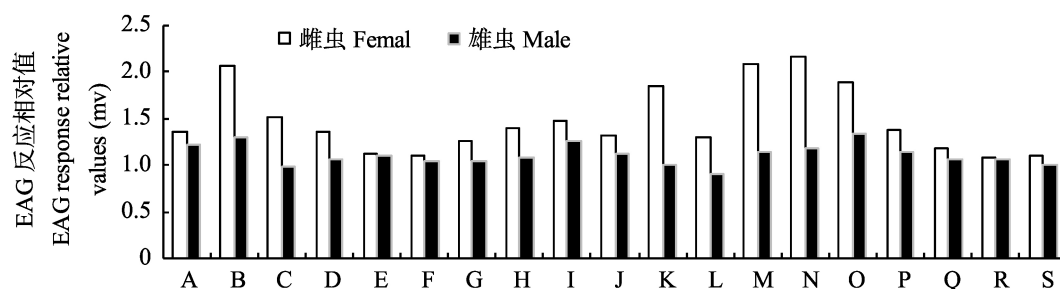


图 5 槐绿虎天牛雌雄成虫对植物挥发物组合配方的 EAG 反应

Fig. 5 The EAG response of *Chlorophorus diadema* adults to plant volatiles formulas

图中横坐标的字母的意义同表 2。下图同。

The letters A-S indicates the formulas of Table 2. The same below.

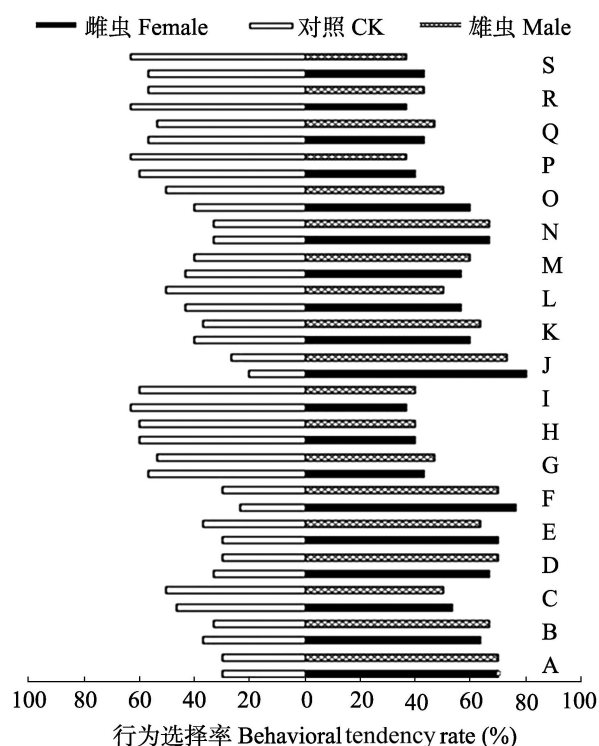


图 6 槐绿虎天牛对组合配方的行为选择率 (%)

Fig. 6 Behavioral tendency rate of *Chlorophorus diadema* to multi-component volatiles formulas

从以上槐绿虎天牛对组合配方和单组分的 EAG 和嗅觉行为实验结果来看, 组合配方中对槐绿虎天牛雌雄成虫均具有较好引诱活性的依次是 N、M、B、O、K、A、D、J、E、F; 单组分中对槐绿虎天牛具较好引诱活性的依次是反-2-己烯-1-醇、反-2-己烯醛、亚油酸甲酯、丁酸丁酯、1-戊烯-3-醇、R-柠檬烯、S-柠檬烯、3-萜

烯、异戊醇、4-甲基-1-戊醇。

3 结论与讨论

在 19 种组合配方中, 其中 9 种是寄主植物挥发物配方, 对槐绿虎天牛成虫具较好引诱活性的组合配方是 A、B、C、D、E、F, 非寄主植物的 10 种组合配方中, 对槐绿虎天牛具较好引诱活性的组合配方是 J、L、M、N、O, 单组分中有 10 种对槐绿虎天牛具较好引诱活性, 为反-2-己烯-1-醇、反-2-己烯醛、亚油酸甲酯、丁酸丁酯、1-戊烯-3-醇、R-柠檬烯、S-柠檬烯、3-萜烯、异戊醇、4-甲基-1-戊醇。槐绿虎天牛对这 10 种单组分和 12 种组合配方的反应情况如下, EAG 反应结果中各组分反应强弱依次为: N (非寄主配方)、M (非寄主配方)、B (寄主配方)、O (非寄主配方)、反-2-己烯-1-醇、K (非寄主配方)、反-2-己烯醛、亚油酸甲酯、A (配方)、D (配方)、J (非寄主配方)、丁酸丁酯、1-戊烯-3-醇、R-柠檬烯、S-柠檬烯、3-萜烯、异戊醇、4-甲基-1-戊醇、E (寄主配方)、F (寄主配方); 行为测定结果中, 相对选择率在 30% 以上的组分是: J (非寄主配方)、F (寄主配方)、A (寄主配方)、反-2-己烯-1-醇、反-2-己烯醛、R-柠檬烯、D (寄主配方)、N (非寄主配方)、E (寄主配方)、B (寄主配方), 其它组分 1-戊烯-3-醇、异戊醇、4-甲基-1-戊醇、K (非寄主配方)、亚油酸甲酯、3-萜烯、M (非寄主配方)、丁酸

表 3 槐绿虎天牛对配方的行为选择反应
Table 3 Behavioral selection of *Chlorophorus diadema* to multi-component formulas

类别 Categories	化合物 配方 Formulas	雌性成虫 Adult female					雄性成虫 Adult male				
		选择臂 Chooosen arm	对照臂 Control arm	相对选择 率 (%) Relative tendency rate for formulas	选择率 (%) Tendency rate for formulas	χ^2 检验 χ^2 test	选择臂 Chooosen arm	对照臂 Control arm	相对选择 率 (%) Relative tendency rate for formulas	选择率 (%) Tendency rate for formulas	χ^2 检 验 χ^2 test
寄主挥发 物配方 Host volatiles formulas	A	21	9	40.0	70.0	4.03*	21	9	40.0	70.0	4.03*
	B	19	11	26.7	63.3	1.63	20	10	33.3	66.7	2.70
	C	16	14	6.7	53.3	0.03	15	15	0	50.0	0.03
	D	20	10	33.3	66.7	2.70	21	9	40.0	70.0	4.03*
	E	21	9	40.0	70.0	4.03*	19	11	26.7	63.3	1.63
	F	23	7	53.3	76.7	7.50**	21	9	40.0	70.0	4.03*
	G	13	17	- 13.3	43.3	0.30	14	16	- 6.7	46.7	0.03
	H	12	18	- 20.0	40.0	0.83	12	18	- 20.0	40.0	0.83
	I	11	19	- 26.7	36.7	1.63	12	18	- 20.0	40.0	0.83
非寄主挥 发物配方 Non-host volatiles formulas	J	24	6	60.0	80.0	9.63**	22	8	46.7	73.3	5.63*
	K	18	12	20.0	60.0	0.83	19	11	26.7	63.3	1.63
	L	17	13	13.3	56.7	0.30	15	15	0	50.0	0.03
	M	17	13	13.3	56.7	0.30	18	12	20.0	60.0	0.83
	N	20	10	33.3	66.7	2.70	20	10	33.3	66.7	2.70
	O	18	12	20.0	60.0	0.83	15	15	0	50.0	0.03
	P	12	18	- 20.0	40.0	0.83	11	19	- 26.7	36.7	1.63
	Q	13	17	- 13.3	43.3	0.30	14	16	- 6.7	46.7	0.03
	R	11	19	- 26.7	36.7	1.63	13	17	- 13.3	43.3	0.30
	S	13	17	- 13.3	43.3	0.30	11	19	- 26.7	36.7	1.63

数据后*表示差异显著 ($P<0.05$), **表示差异极显著 ($P<0.01$) (χ^2 检验)。

*indicates significant difference at 0.05 levels, ** indicates extremely significant difference at 0.01 levels by χ^2 test.

丁酯、S-柠檬烯则次之。

植食性昆虫凭借植物挥发物的化学指纹图谱辨别寄主和非寄主植物 (Bernays and Chapman, 1994; Brodmann *et al.*, 2012)。但是本研究发现寄主植物挥发物引诱活性不是绝对地高于非寄主植物挥发物。例如, 非寄主植物挥发物配方中 N 引诱活性要好于寄主植物挥发物配方 B; 在单一成分中, 非寄主植物挥发物单组分 R-柠檬烯、异戊醇引诱活性也好于寄主植物挥发物单组分 4-甲基-1-戊醇。而已有文献记载, 非寄主植物对其成虫寻找寄主、选择产卵场所及产卵过程起着

干扰作用 (张茂新等, 2003), 所以其中原因尚需深入探讨。

一般寄主植物挥发物的组合配方对天牛类的引诱活性高于其中的单一成分 (郝德君等, 2009; 丁嘉文和刘强, 2013); 但是本研究中一些含有某种化合物的组合配方对槐绿虎天牛的引诱活性低于单一成分。例如: 槐绿虎天牛对寄主植物挥发物的 EAG 和行为反应结果中, 有反-2-己烯醛的组合配方 D、E 引诱活性要小于单一成分时的反-2-己烯醛。槐绿虎天牛对非寄主植物挥发物的 EAG 和行为反应结果中, 同样也发

现在非寄主植物挥发物的组合配方 R 活性要低于它们中的任一单组分如 R-柠檬烯、3-萜烯、异戊醇。

在植物挥发物组分对槐绿虎天牛的生物学活性测定中, EAG 反应强度并没有完全与行为反应选择率高低结果一致, 例如植物挥发物配方 EAG 反应强度大的配方 N、M 在行为测定结果中, 选择率反而要低于 EAG 反应强度低的植物挥发物配方 J ($P<0.01$)、F ($P<0.05$)、A ($P<0.05$), 可能原因是多组分的挥发物气味对槐绿虎天牛的行为是极其复杂的, 除了有定向作用外, 还可能存在抑制和增效作用, 这与李玲等 (2013) 的研究结果, EAG 电位并不能代表昆虫的行为反应是一致的。

植物所释放的气味是多种微浓度的挥发次生物质组成的复杂混合物 (严善春等, 2003), 昆虫所能感受到的气味是多种挥发物协同影响的结果。室内条件下, 组合配方中 EAG 反应相对值大于 1, 行为相对选择率在 30% 以上, 且槐绿虎天牛的 EAG 和行为的生物学活性测定一致的对槐绿虎天牛雌雄成虫均具有良好引诱活性的 N、A、D、J、F, 可以为筛选更优引诱剂控制槐绿虎天牛的危害提供信息。

如何获得野外条件下对槐绿虎天牛的高效经济的引诱剂, 不仅要考虑一些已知的寄主植物挥发物, 还可以考虑从一些非寄主植物的挥发物中筛选。

参考文献 (References)

- Bernays EA, Chapman RF, 1994. Host Plant Selection by Phytophagous Insects. New York: Chapman & Hall. 1-312.
- Brodmann J, Emer D, Ayasse M, 2012. Pollinator attraction of the wasp-flower *Scrophularia umbrosa* (Scrophulariaceae). *Plant Biology*, 14(3): 500-505.
- Ding JW, Liu Q, Zhu GP, Chen YT, Xie X, Chen YP, 2014. EAG and behavioral response of *Asias halodendri* to 8 compounds in *Elaeagnus angustifolia* flower. *Journal of Tianjin Normal University*, 34(2): 71-75. [丁嘉文, 刘强, 朱耿平, 陈易彤, 谢晓, 陈艳萍, 2014. 红缘天牛对沙枣花中 8 种化合物的 EAG 及行为反应. 天津师范大学学报, 34(2): 71-75.]
- Du YP, Zheng QL, Zhai H, Jiang ES, Wang ZY, 2009. Selectivity of *Phylloxera viticola* Fitch (Homoptera: Phylloxeridae) to grape

- with different resistance and the identification of grape root volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 52(5): 537-543. [杜远鹏, 郑秋玲, 翟衡, 蒋恩顺, 王忠跃, 2009. 根瘤蚜对不同抗性葡萄的选择性及葡萄根系挥发性物质的鉴定. 昆虫学报, 52(5): 537-543.]
- Fan RJ, Dong JM, Cao M, Liu Y, 1993. To control of the longicorn in seabuckthorn orchard. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 21(1): 58-61. [范仁俊, 董晋明, 曹满, 刘英, 1993. 沙棘红缘天牛综合防治. 山西农业科学, 21(1): 58-61.]
- Fang YL, Zhang ZN, 2002. Influence of host-plant volatile components on oviposition behavior and sex pheromone attractiveness to *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomologica Sinica*, 45(1): 63-67. [方宇凌, 张钟宁, 2002. 植物气味化合物对棉铃虫产卵及田间诱蛾的影响. 昆虫学报, 45(1): 63-67.]
- Gäbler A, Boland W, Preiss U, Simon H, 1991. Stereochemical studies on homoterpene biosynthesis in higher plants: mechanistic, phylogenetic, and ecological aspects. *Helv. Chim. Acta*, 74(8): 1773-1798.
- Gao HB, 2007. Comparison of volatiles of grapevine induced by insect herbivore and mechanical wounding. *Acta Agriculture Jiangxi*, 19(10): 72-73. [高海波, 2007. 昆虫取食与机械损伤对葡萄挥发物的诱导差异. 江西农业学报, 19(10): 72-73.]
- Guo BP, Wang ZK, 1998. The harm and prevation of *Asias halodendri* to *Hippophae rhamnoides*. *Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi*, (4): 34-35. [郭百平, 王子科, 1998. 沙棘红缘天牛的为害与防治. 山西水土保持科技, (4): 34-35.]
- Hao DJ, Fan BQ, Tang JG, Wang Y, Ma F, 2009. Screening of attracts for *monochamus alternatus* and its attaction effets. *Journal of Northesat 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.]
- Hopke J, Donath J, Bleichert S, Boland W, 1994. Herbivore-induced volatiles: the emission of acyclic homoterpenes from leaves of *Phaseolus lunatus* and *Zea mays* can be triggered by a β -glucosidase and jasmonica acid. *FEBS Lett.*, 352(2): 146-150.
- Jiang SN, 1997. China Longicorn Beetles Larvae. Chongqing: Chongqing Pubishing House. 7-8, 109-110. [蒋书楠, 1987. 中国天牛幼虫. 重庆: 重庆出版社. 7-8, 109-110.]
- Li JG, Jin YJ, Luo YQ, Shen YB, Chen HJ, 2002. Comparative analysis of volatilecompounds from different host plants of *Anoplophora glabripennis* (Motsch). *Journal of Bei Jing Forestry University*, 24(5/6): 165-169. [李建光, 金友菊, 骆有庆, 沈应柏, 陈华君, 2002. 光肩星天牛不同寄主树种挥发性物质的比较分析. 北京林业大学学报, 24(5/6): 165-169.]
- Li JG, Luo YQ, Jin TJ, 1999. Electroantennogram activity of ash-leaf maple (*acer negundo*) volatiles to *Anoplophora glabripennis* (Motsch). *Journal of Bei Jing Forestry University*, 21(4): 1-5. [李建光, 骆有庆, 金幼菊, 1999. 复叶槭挥发性物质对光肩星天牛的触角电位反应. 北京林业大学学报, 21(4): 1-5.]

- Li L, Chi DF, Pei YQ, Zhang Z, Zhang Q, Wang GL, Li XC, 2013. Influence of EAG (Electroantennogram) and behavior of *Xylotrechus rusticus* L. from the bark essential oils of its host. *Journal of Northeast Forestry University*, 41(3): 115–121. [李玲, 迟德富, 裴永强, 张振, 张琦, 王广利, 李小灿, 2013. 寄主挥发物对青杨脊虎天牛 EAG 和行为的影响. 东北林业大学学报, 41(3): 115–121.]
- Li L, Liu Q, 2010. EAG response and effects of different attractions on *Chlorophorus diadema* (Motschulsky). *Journal of Tianjin Normal University*, 30(1): 68–70. [李琳, 刘强, 2010. 槐绿虎天牛对不同诱剂的 EAG 反应及诱剂的诱捕效果. 天津师范大学学报, 30(1): 68–70.]
- Li S, Liu Q, 2009. Damage of two species of longicorn beetles to *Tetraena mongolica*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 46(3): 407–410. [李升, 刘强, 2009. 二种天牛对濒危植物四合木的危害. 昆虫知识, 46(3): 407–410.]
- Lu PF, Qiao HL, Wang XP, Zhou XM, Zhu F, Lei CL, 2007. Effect of male and female adult age on the mating success and male EAG response to sex pheromones of the legume pod borer, *Maruca vitrata*. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(5): 665–670. [陆鹏飞, 乔海莉, 王小平, 周兴苗, 朱芬, 雷朝亮, 2007. 豆野螟成虫日龄对交尾的影响及雄蛾对性信息素的触角电位反应. 昆虫知识, 44(5): 665–670.]
- Mechaber W, Capaldo CT, Hildebrand JG, 2002. Behavioral responses of adult female tobacco hornworms, *Manduca sexta*, to hostplant volatiles change with age and mating status. *J. Insect Sci.*, 2(3): 5.
- Qi CJ, 1998. Longicorn Beetles of China's Shandong. Jinan: Shandong Forestry and Technology Publishing House. 52, 56–57. [祁城进, 1998. 山东天牛志. 济南: 山东林业科学技术出版社. 52, 56–57.]
- Ren L, Xu ZC, Tian CM, 2013. Volatiles constituents of five rosaceous host plants of *Scolytus seoulensis*. *Xinjiang Agriculture Sciences*, 50(1): 100–105. [任龙, 许志春, 田呈明, 2013. 蔷薇科中种多毛小蠹寄主植物的挥发物成分研究. 新疆农业科学, 50(1): 100–105.]
- Sui XL, Xu ZC, Tian CM, 2012. Analysis of *Prunus armeniaca* volatiles and the electroantennogram responses induced by them in *Lcolytus rugulosus*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 980–985. [隋学良, 许志春, 田呈明, 2012. 杏树挥发物成分的鉴定及其对杏树皱小蠹的触角电位的测定. 应用昆虫学报, 49(4): 980–985.]
- Sun FH, Fang AC, Sun XH, Yang SY, Li DJ, Yan DC, 1994. The observation of biological characteristics to *Asias halodendri* (Pallas). *Shandong Forestry Technology*, (3): 40–41. [孙逢海, 房爱成, 孙宪华, 杨士一, 李东军, 阎大成, 1994. 红缘天牛生物学特性观察. 山东林业科技, (3): 40–41.]
- Tang MC, Wang GD, Liu YP, 1993a. A preliminary study of *Asias halodendri* (Pallas). *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 22(2): 21–25. [唐蒙昌, 王国栋, 刘永平, 1993a. 红缘天牛的初步研究. 内蒙古林业科技, 22(2): 21–25.]
- Tang MC, Wang GD, Tian RM, 1993b. The study of spatial distribution type and sampling technology to *Asias halodendri* (Pallas) larva. *Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 22(4): 29–32. [唐蒙昌, 王国栋, 田润民, 1993b. 红缘天牛幼虫空间分布型及抽样技术的研究. 内蒙古林业科技, 22(4): 29–32.]
- Thöming G, Norli HR, 2015. Olfactory cues from different plant species in host selection by female pea moths. *J. Agr. Food Chem.*, 63(8): 2127–2136.
- Wang DZ, Wang JH, 2002. The occurrence and prevention and control technology of *Asias halodendri* (Pallas). *Hebei Forestry Technology*, 30(4): 30. [王大洲, 王金华, 2002. 红缘天牛的发生与防治技术. 河北林业科技, 30(4): 30.]
- Wang ZC, 2003. Longbeetles of China's Northerneast. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House. 169. [王直诚, 2003. 东北天牛志. 长春: 吉林科学出版社. 169.]
- Yan SC, Cheng H, Yang H, Yuan HE, Zhang J, Chi DF, 2006. Effects of plant volatiles on the EAG response and behavior of the grey tigerlongicorn, *Xylotrechus rusticus* (L.) (Coleoptera: Cerambycidae). *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. dam-aging larch cones. *Acta Entomologica 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驱避效果. 生态学报, 23 (2): 314–319.]
- Ze SZ, Zhao T, Ji M, Zhang XY, Run ZL, 2011. Isolation and identification of host pheromone and field attracting effect to *Ahopalus rusticus* Linnaeus. *Zoological Research*, 32(4): 139–146. [泽桑梓, 赵涛, 季梅, 张星耀, 闰争亮, 2011. 褐梗天牛寄主挥发性成分分析和林间引诱效果. 动物学研究, 32(4): 139–146.]
- Zhang FJ, Jin YJ, Chen HJ, Wu XY, 2006. The selectivity mechanism of *Anoplophora glabripennis* on four different species of maples. *Acta Entomologica Sinica*, 26(3): 870–877. [张凤娟, 金幼菊, 陈华君, 武晓颖, 2006. 光肩星天牛对 4 种不同槭树科寄主植物的选择机制. 生态学报, 26(3): 870–877.]
- Zhang MX, Ling B, Pang XF, 2003. Progress and application of oviposition deterrents of non-preferable plants on insect. *Natural Enemies of Insects*, 25(1): 28–36. [张茂新, 凌冰, 庞雄飞, 2003. 非嗜食植物中的昆虫产卵驱避物及其利用. 昆虫天敌, 25(1): 28–36.]
- Zhang SQ, 1994. Longbeetles of China's Northern and Its Control. Beijing: China Forestry Publishing House. 50. [张世权, 1994. 华北天牛及其防治. 北京: 中国林业出版社. 50.]
- Zhao XC, Yan YH, Wang R, Wang CZ, 2004. Techniques used in insect neurobiology research: electroantennogram recording. *Entomological Knowledge*, 41(3): 270–274. [赵新成, 阎云花, 王睿, 王琛柱, 2004. 昆虫神经生物学研究技术: 触角电位图记录. 昆虫知识, 41(3): 270–274.]