

云斑天牛对 10 种植物挥发物的 EAG 和行为反应*

王保新^{1**} 杨桦¹ 杨伟^{1***} 杨春平¹ 蔡艳¹ 周梦² 何晓华³

(1. 四川农业大学森林保护重点实验室 雅安 625014; 2. 长宁县林业局 宜宾 644300; 3. 南充市林业科学研究所 南充 637000)

摘要 【目的】为了探明对云斑天牛 *Batocera lineolata* Chevrolat 成虫具有行为导向的寄主植物挥发物对成虫行为反应的影响。【方法】采用触角电位(EAG)和“Y”型嗅觉仪技术,测定云斑天牛成虫(未交配雌虫、未交配雄虫、已交配雌虫)对 10 种寄主植物挥发物的电生理和行为反应。【结果】所选化合物在特定浓度下,均能引起云斑天牛成虫较为明显的 EAG 反应,浓度为 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时,云斑天牛成虫对所测试的植物挥发物的 EAG 反应最强,其中未交配雌、雄及已交配雌虫对(Z)-3-己烯-1-醇的 EAG 反应相对值均为最大,分别达 2.35、2.31 和 2.22。行为反应生测中,(Z)-3-己烯-1-醇对未交配雌、雄虫可产生明显的引诱作用,芳樟醇则对两者具有明显的趋避作用,而已交配雌虫对所有化合物均无明显趋性。【结论】试验结果可为开发对其有效的林间引诱剂提供一定的理论依据。

关键词 云斑天牛, 植物挥发物, 触角电位反应, 行为反应, Y 型嗅觉仪

EAG and behavioral responses of *Batocera lineolata* Chevrolat (Coleoptera: Cerambycidae) to ten plant volatiles

WANG Bao-Xin^{1**} YANG Hua¹ YANG Wei^{1***} YANG Chun-Ping¹ CAI Yan¹
ZHOU Meng² HE Xiao-Hua³

(1. Provincial Laboratory of Forest Conservation, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China;

2. Changning Forestry Bureau, Yibin 644300, China; 3. The Forest Research Institute of Nanchong City, Nanchong 637000, China)

Abstract [Objectives] To verify the effects of the host plant volatiles on the behavior of adult *Batocera lineolata* Chevrolat. [Methods] The electroantennogram and behavioral responses of the *B. lineolata* adults (unmated females, unmated males and mated females) to 10 kinds of plant volatiles were tested with EAG and a Y-tube olfactometer. [Results] The ten test chemicals induced clear EAG responses. *B. lineolata* adults had the strongest EAG responses to the tested plant volatiles when the concentration was 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$. The EAG responses values of unmated female and male and mated female *B. lineolata* adults to (Z)-3-Hexen-1-ol were the highest, being 2.35, 2.31 and 2.22, respectively. As for behavioral responses, unmated female and male *B. lineolata* adults were strongly attracted to (Z)-3-Hexen-1-ol, whereas Linalool had an obvious repellent effect on unmated female and male *B. lineolata* adults. None of the compounds tested were attractive to mated female *B. lineolata* adults. [Conclusion] The results provide some theoretical basis for the development of effective attractants for *B. lineolata*.
Key words *Batocera lineolata* Chevrolat, plant volatiles, EAG response, behavioral responses, Y-tube olfactometer

云斑天牛 *Batocera lineolata* Chevrolat 又称 Cerambycidae 白条天牛属 *Batocera*, 是我国重要的林木蛀干害虫, 可以危害杨树 (*Populus*)

* 资助项目: 国家自然科学基金项目 (31270694); 四川省教育厅重点实验室专项 (2006ZD011); 德阳市重点科学技术研究项目 (2011NZ033)

**E-mail: wangbaoxin0101@163.com

***通讯作者, E-mail: ywei0218@aliyun.com

收稿日期: 2013-07-25, 接受日期: 2013-12-16

tomentosa)、核桃 (*Juglans regis*)、油橄榄 (*Olea europaea*)、板栗 (*Castanea mollissima*)、白蜡 (*Fraxinus chinensis*) 等近百种阔叶树木。由于云斑天牛隐蔽生活, 抗逆性强而防治困难, 一旦发生常常对许多天然林、经济林和城市园林树木造成毁灭性危害(梁潇予等, 2008; 李建庆等, 2009; 杨桦等, 2010)。

寄主植物挥发物对植食性昆虫行为有着重要的调控作用, 例如, 马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 依靠马铃薯 (*Solanum tuberosum*) 叶片气味对寄主进行定位 (Schoohoven *et al.*, 1998); 寄主植物白菜 (*Brassica pekinensis*) 的气味对桃蚜 *Myzus persicae* 有明显的引诱作用 (王雪娇等, 2012)。而植物挥发物组分组成和相对比例的不同也对植食性昆虫的行为产生影响, 如木枣 (*Ziziphus jujuba*) 枣吊受到人工机械损伤后对枣镰翅小卷蛾 *Ancylis sativa* 的趋向选择产生了驱避作用, 而健康和虫害枣吊释放的挥发性物质则具有明显的吸引作用 (杨立军等, 2012)。

本研究选择云斑天牛的补充营养寄主光皮桦 (*Betula luminifera*)、法国冬青 (*Viburnum awabuki*) 及核桃中的 10 种主要挥发物, 测定了云斑天牛成虫对这些挥发物不同浓度的 EAG 反

应, 并结合“Y”型嗅觉仪的生测结果确定了其 EAG 反应的生物学意义。为筛选出对云斑天牛成虫具有生物活性的植物源引诱剂, 以及实现对害虫的生态控制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

2012 年 4 月下旬, 于四川省德阳市罗江县采集刚羽化未交配的杨树云斑天牛成虫(已交配雄虫腹部绒毛磨损, 形成明显的交配斑; 已交配雌虫为背部绒毛磨损, 形成明显的交配斑)(嵇保中等, 1996), 鉴别雌雄后分别放入 60 cm×60 cm×60 cm 的不锈钢养虫笼内, 用水培法国冬青枝条室温下饲养备用。实验所用云斑天牛成虫生测前均作饥饿 24 h 处理。

1.2 供试化合物

根据梁潇予 (2007) 的研究, 选取云斑天牛嗜食补充寄主植物的挥发性气味物质 10 种 (化合物具体信息见表 1)。将供试的上述 10 种挥发性物质分别溶于液体石蜡 (化学纯, 成都市科龙化工试剂厂) 中, 在涡旋混合器上充分混合, 分别配制成 0.1、1、10、100 和 500 μg/μL 5 种不同浓度的溶液。以液体石蜡为对照。

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

化合物 Compounds	纯度 Purity	来源 Source of supply
桉叶油醇 Eucalyptol	99%	上海晶纯试剂有限公司
苯甲醛 Benzyl dehyde	98.50%	上海晶纯试剂有限公司
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	95%	上海晶纯试剂有限公司
芳樟醇 Linalool	98%	上海晶纯试剂有限公司
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexen-1-al	98%	上海晶纯试剂有限公司
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	95%	上海晶纯试剂有限公司
(Z)-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	98%	上海晶纯试剂有限公司
正己醇 1-Hexanol	分析纯 AR	成都科龙化工试剂
正己醛 Hexanal	97%	上海晶纯试剂有限公司
(R)-(+)-苾烯 (Z)-3-Hexen-1-ol	97%	上海晶纯试剂有限公司

1.3 触角电位 (EAG) 测定

测定用云斑天牛成虫触角鞭节最末 1 节, 测定前用解剖刀将其切下, 并切除尖端 1 mm; 用 SpectraR360 导电胶将其固定在 PR (Gain10×) 电极上, 气味管与触角相距 1 cm。测定方法按照杜永均等 (1994)。用微量取样器抽取 2 μL 提取物, 均匀地滴在 2 cm×0.5 cm 的滤纸条上, 放入 10 cm 长的样品管中, 样品管末端连接气体刺激控制装置。待基线稳定后给予刺激, 每次刺激时间为 0.5 s, 刺激间隔为 30 s, 以保证触角感受能够完全恢复。每处理测试 6 头天牛, 每头天牛取 1 支触角测试, 每样品平均刺激 5 次。以液体石蜡为对照, 将每一样品测定值的平均数除以前后 2 次对照测定值的平均值即得 EAG 反应相对值。实验所用触角电位仪由荷兰 Syntech 公司生产, 测定所需软件也由该公司提供。

1.4 行为反应测定

采用 Y 型嗅觉仪进行云斑天牛行为生测。Y 型嗅觉仪主臂 45 cm, 两侧臂 35 cm, 侧臂间夹角为 75°。主臂和侧臂内部直径均为 10 cm, 交叉处采用标准磨口制成。两侧臂分别用 Teflon 管与 250 mL 容量瓶相连。生测剂量 10 μL , 以液体石蜡作为对照。以 1 cm² 的定性滤纸作为试剂载体, 将滤纸分别置于 2 个容量瓶内。容量瓶用 Teflon 管依次与蒸馏水加湿瓶、空气净化瓶相连。空气流速调节为 0.5~0.6 L/min, 测量时间为 09:00—19:00, 测量温度为 (25±1) °C。生测时将云斑天牛由 Y 型管主臂管口引入, 待其爬过主臂管口 2 cm 后开始计时。云斑天牛在 Y 型管分叉处做出选择, 去向不同的侧臂。每头虫观察 5 min, 爬过侧臂 10 cm 并且停留 1 min 以上记为做出选择, 否则记为无选择。每测 5

头调换 Y 型管的位置, 以消除管臂位置对云斑天牛行为可能产生的影响, 每个处理测量完成后更换嗅觉仪, 用酒精彻底清洗 Y 型管和 Teflon 管及容量瓶, 自然晾干。每组共测试 30 头虫, 重复 3 次。

1.5 数据统计

所有实验数据采用 SPSS17.0 软件进行统计分析。利用 Duncan's 多重分析法比较不同浓度之间以及云斑天牛未交配雌成虫、雄成虫和已交配雌成虫各自对挥发物质 EAG 反应的差异。生测数据采用 χ^2 检验比较差异显著性。

2 结果与分析

2.1 云斑天牛成虫对 10 种不同浓度化合物的 EAG 反应

测定云斑天牛成虫对 10 种化合物不同浓度的 EAG 反应。从表 2 可以看出, 当化合物的刺激浓度为最低 (0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$) 时, 各物质引起的 EAG 反应都极其微弱; 当化合物的刺激浓度为 1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时, 云斑天牛成虫对各物质的 EAG 反应相对值都有提高, 其中云斑天牛未交配雌成虫对苯乙醛、(E)-2-己烯醛、(E)-2-己烯醛、正己醇、正己醛 5 种化合物的 EAG 反应相对值以及云斑天牛未交配雄成虫对 (E)-2-己烯醛、正己醛、(R)-(+)-苄烯 3 种化合物的 EAG 反应相对值有显著提高 ($P < 0.05$), 未交配雌成虫对桉叶油醇以及已交配雌成虫对苯乙醛、正己醛的 EAG 反应相对值有极显著提高 ($P < 0.01$), 而对其他化合物的 EAG 相对反应值与 0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时无显著差异 ($P > 0.05$); 当刺激浓度提高到 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时, 云斑天牛成虫对 10 种化合物的 EAG 反应相对值均达到最高值。当浓度提高到 500 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时, 云斑天牛成虫对 10 种化合物的 EAG 反应相对值均有所降低, 除了芳樟醇、(E)-2-己烯醛、(E)-2-

* 资助项目: 国家自然科学基金项目 (31270694); 四川省教育厅重点实验室专项 (2006ZD011); 德阳市重点科学技术研究项目 (2011NZ033)

**E-mail: wangbaoxin0101@163.com

***通讯作者, E-mail: ywei0218@aliyun.com

收稿日期: 2013-07-25, 接受日期: 2013-12-16

辛烯醛之外,未交配雌成虫对其他 7 种化合物的 EAG 反应相对值均有极显著的降低 ($P < 0.01$); 而已交配雌成虫仅对苯乙醛、(E)-2-己烯醛、正己醇、(R)-(+)-苊烯 4 种化合物的 EAG 反应相对值有极显著的降低,对正己醇的 EAG 反应相对

值有显著的降低 ($P < 0.05$),对其他化合物的 EAG 反应相对值则与 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 时无显著差异 ($P > 0.05$);未交配雄成虫除了对芳樟醇和 (Z)-3-己烯-1-醇无显著降低外,对其他 8 种化合物的 EAG 反应相对值均有极显著的降低。

表 2 云斑天牛成虫对 10 种化合物不同浓度的 EAG 反应
Table 2 EAG response of *Batocera lineolata* adults to 10 compounds at different concentration

化合物 Compounds	试虫 Test insects	EAG 反应相对值 Relative EAG response				
		0.1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	1 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	10 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$	500 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$
桉叶油醇 Eucalyptol	未交配雌虫 Unmated female	0.96±0.03cC	1.34±0.03bB	1.50±0.12bB	2.11±0.09aA	1.31±0.06bB
	未交配雄虫 Unmated male	1.03±0.02dD	1.09±0.08dCD	1.23±0.06bcBC	2.09±0.10aA	1.39±0.08bB
	已交配雌虫 Mated female	1.08±0.02bA	1.14±0.09bA	1.05±0.49bA	2.08±0.05aA	1.42±0.08abA
苯甲醛 Benzyl dehyde	未交配雌虫 Unmated female	0.88±0.05dD	1.02±0.08dD	1.30±0.03cC	2.02±0.03aA	1.69±0.05bB
	未交配雄虫 Unmated male	0.73±0.02cD	0.95±0.02cCD	1.22±0.08bBC	2.05±0.10aA	1.34±0.11bB
	已交配雌虫 Mated female	1.01±0.06cB	1.01±0.04cB	1.20±0.05bB	1.77±0.04aA	1.80±0.08aA
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	未交配雌虫 Unmated female	0.87±0.02cB	1.18±0.12bB	1.20±0.06bB	2.18±0.11aA	1.18±0.10bB
	未交配雄虫 Unmated male	0.95±0.17cB	0.99±0.14cB	1.01±0.04cB	2.06±0.17aA	1.28±0.01bB
	已交配雌虫 Mated female	0.80±0.07cC	1.10±0.03bB	1.15±0.07bB	2.08±0.06aA	1.12±0.06bB
芳樟醇 Linalool	未交配雌虫 Unmated female	1.09±0.04cC	1.22±0.05cC	1.61±0.05bB	2.30±0.10aA	2.11±0.08aA
	未交配雄虫 Unmated male	1.28±0.07cB	1.39±0.07bcB	1.49±0.07bB	2.19±0.08aA	2.00±0.05aA
	已交配雌虫 Mated female	1.27±0.03bB	1.23±0.08bB	1.75±0.12aA	2.05±0.10aA	2.01±0.12aA
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexen-1-al	未交配雌虫 Unmated female	0.96±0.05cC	1.23±0.05bBC	1.35±0.08bB	1.81±0.09aA	1.65±0.03aA

未交配雄虫	1.29±0.03cB	1.38±0.02bcB	1.46±0.04bcB	2.02±0.12aA	1.54±0.10bB
Unmated male					
已交配雌虫	0.99±0.07cC	1.08±0.10cC	1.76±0.06bB	2.14±0.08aA	1.82±0.01bB
Mated female					

续表 2 (Table 2 continued)

化合物 Compounds	试虫 Test insects	EAG 反应相对值 Relative EAG response				
		0.1 µg/µL	1 µg/µL	10 µg/µL	100 µg/µL	500 µg/µL
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	未交配雌虫	0.82±0.31dC	1.41±0.06cBC	1.74±0.09bcAB	2.33±0.09aA	2.08±0.10abAB
	Unmated female					
	未交配雄虫	1.18±0.03dD	1.39±0.05cCD	1.64±0.07bBC	2.28±0.06aA	1.73±0.06bB
	Unmated male					
	已交配雌虫	1.12±0.08cC	1.29±0.07cC	1.57±0.05bB	2.10±0.05aA	1.91±0.09aA
	Mated female					
(Z)-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	未交配雌虫	1.04±0.02dD	1.21±0.06dCD	1.54±0.12cC	2.35±0.09aA	1.89±0.01bB
	Unmated female					
	未交配雄虫	1.06±0.01bB	1.22±0.03bB	1.21±0.08bB	2.31±0.08aA	2.20±0.06aA
	Unmated male					
	已交配雌虫	1.15±0.08cC	1.27±0.09cBC	1.52±0.01bB	2.22±0.09aA	2.05±0.05aA
	Mated female					
正己醇 1-Hexanol	未交配雌虫	0.95±0.08dC	1.21±0.05cBC	1.43±0.06bB	2.10±0.08aA	1.44±0.05bB
	Unmated female					
	未交配雄虫	1.02±0.06cC	1.03±0.06cC	1.43±0.05bB	2.10±0.12aA	1.53±0.06bB
	Unmated male					
	已交配雌虫	1.07±0.05dD	1.21±0.03dCD	1.37±0.09bB	2.04±0.10aA	1.42±0.04cBC
	Mated female					
正己醛 Hexanal	未交配雌虫	1.03±0.05cC	1.14±0.07cC	1.58±0.03bB	2.24±0.08aA	1.74±0.09bB
	Unmated female					
	未交配雄虫	1.20±0.08dC	1.46±0.09cBC	1.82±0.10bAB	2.15±0.05aA	1.63±0.06bcB
	Unmated male					
	已交配雌虫	1.03±0.05eD	1.32±0.03dC	1.55±0.09cBC	1.93±0.05aA	1.74±0.02bAB
	Mated female					
(R)-(+)-苊烯 (Z)-3-Hexen-1-ol	未交配雌虫	1.04±0.02cC	1.27±0.08bcBC	1.59±0.05bB	2.08±0.11aA	1.44±0.19bBC
	Unmated female					
	未交配雄虫	1.08±0.05dC	1.33±0.03cC	1.70±0.04bB	2.10±0.10aA	1.64±0.09bB
	Unmated male					
	已交配雌虫	0.95±0.09cC	1.07±0.06cC	1.50±0.08bB	1.94±0.12aA	1.43±0.05bB

Mated female

注：表中数据为平均值±标准误；同行不同小写字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ），同行不同大写字母表示差异极显著（ $P < 0.01$ ）（Duncan's 多重比较法）。

Data in the table are mean ±SE, and followed by different small letters in the same row mean significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$), while followed by different capital letters in the same row mean extremely significant difference at 0.01 level by Duncan's mulitiple test.

比较 EAG 反应最强浓度（100 μg/μL）下云斑天牛成虫对不同化合物的 EAG 反应相对值。由表 3 可以看出，不同生理状态的云斑天牛成虫对(Z)-3-己烯-1-醇的 EAG 反应相对值均为最大，分别达 2.35、2.31 和 2.22。在此浓度下，未交配的云斑天牛雌、雄成虫对同种化合物的 EAG 反应相对值不存在显著差异（ $P > 0.05$ ）；而对于(E)-2-己烯醛、(E)-2-辛烯醛和正己醛 3 种化合物，云斑天牛未交配雌成虫与已交配雌成虫之间的 EAG 反应相对值存在显著差异（ $P < 0.05$ ）；云斑天牛未交配雄成虫对苯甲醛的 EAG 反应相对值与已交配雌成虫间存在显著差异。

2.2 云斑天牛成虫对不同化合物的行为反应生测
在 EAG 反应最强的浓度下，测定云斑天牛

成虫对不同化合物的行为反应。从生测结果可以看出，云斑天牛未交配雌成虫对芳樟醇、(E)-2-辛烯醛和(Z)-3-己烯-1-醇表现出明显的趋性（ $P < 0.05$ ）。其中芳樟醇为趋避作用，未交配雌成虫对其选择率仅为 27.78%，(E)-2-辛烯醛和(Z)-3-己烯-1-醇为引诱作用，未交配雌成虫对其选择率均高达 68.89%（表 4）。(Z)-3-己烯-1-醇对云斑天牛未交配雄成虫有明显的引诱作用，未交配雄成虫对其选择率为 68.89%，芳樟醇和正己醛则对云斑天牛未交配雌成虫有明显的趋避作用，未交配雄成虫对其选择率均仅为 28.89%（表 5）。而云斑天牛已交配雌成虫所有化合物均无明显趋性（表 6）。

表 3 云斑天牛成虫对不同化合物的 EAG 反应（100 μg/μL）
Table 3 EAG responses of *Batocera ineolata* adults to different volatiles (100 μg/μL)

化合物 Compounds	EAG 反应相对值 Relative EAG response		
	未交配雌虫 Unmated female	未交配雄虫 Unmated male	已交配雌虫 Mated female
桉叶油醇 Eucalyptol	2.11±0.09Aab	2.09±0.1Abc	2.08±0.05Aab
苯甲醛 Benzyl dehyde	2.02±0.03ABbc	2.05±0.10Ac	1.77±0.4Bb
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	2.18±0.11Aab	2.06±0.17Ac	2.08±0.06Aab
芳樟醇 Linalool	2.30±0.10Aab	2.19±0.08Aabc	2.05±0.10Aab
(E)-2-己烯醛(E)-2-hexen-1-al	1.81±0.09Bc	2.02±0.12ABc	2.14±0.08Aa
(E)-2-辛烯醛(E)-2-Octenal	2.33±0.09Aa	2.28±0.06ABab	2.10±0.05Bab
(Z)-3-己烯-1-醇(Z)-3-Hexen-1-ol	2.35±0.09Aa	2.31±0.08Aa	2.22±0.09Aa
正己醇 1-Hexanol	2.10±0.08Aabc	2.10±0.12Abc	2.04±0.10Aab

正己醛 Hexanal	2.24±0.08Aab	2.15±0.05ABabc	1.93±0.05Bab
(R)-(+)-苊烯(Z)-3-Hexen-1-ol	2.08±0.11Aabc	2.10±0.10Abc	1.94±0.12Aab

注: 表中数据为平均值±标准误; 同行数字后标有不同大写字母及同列数据后标有不同小写字母表示表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Data in the table are mean ±SE, and followed by different capital or small letters indicate significant difference in the same row or in the same column at 0.05 level by Duncan's multiple range test, respectively.

表 4 云斑天牛未交配雌成虫对挥发物的行为反应

Table 4 Behavioral responses of unmated female *Batocera lineolata* adults to different volatiles

化合物 Compounds	对味源的选择率 (%) Tendency rate for compounds	对 CK 的选择率 (%) Tendency rate for CK	χ^2 检验 χ^2 test	反应率 (%) Response rate
桉叶油醇 Eucalyptol	62.22	34.44	1.85 ^{n.s.}	96.66
苯甲醛 Benzyl dehyde	60.00	37.78	1.09 ^{n.s.}	97.78
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	64.44	34.44	2.16 ^{n.s.}	98.88
芳樟醇 Linalool	27.78	67.78	4.22 [*]	95.56
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexen-1-al	61.11	35.56	1.53 ^{n.s.}	96.67
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	68.89	27.78	4.43 [*]	96.67
(Z)-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	68.89	27.78	4.43 [*]	96.67
正己醇 1-Hexanol	60.00	37.78	1.09 ^{n.s.}	97.78
正己醛 Hexanal	33.33	64.44	2.37 ^{n.s.}	97.77
(R)-(+)-苊烯 (Z)-3-Hexen-1-ol	65.56	32.22	2.76 ^{n.s.}	97.78

注: χ^2 检验中的“n.s.”表示 $P > 0.05$, “*”表示 $P < 0.05$ 。下表同。

Significance levels of χ^2 test are indicated by “n.s.” ($P > 0.05$) and “*” ($P < 0.05$). The same below.

表 5 云斑天牛未交配雄成虫对挥发物的行为反应

Table 5 Behavioral responses of unmated male *Batocera lineolata* adults to different volatiles

化合物 Compounds	对味源的选择率 (%) Tendency rate for compounds	对 CK 的选择率 (%) Tendency rate for CK	χ^2 检验 χ^2 test	反应率 (%) Response rate
桉叶油醇 Eucalyptol	64.44	31.11	2.83 ^{n.s.}	95.55
苯甲醛 Benzyl dehyde	57.78	41.11	0.54 ^{n.s.}	98.89
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	57.78	41.11	0.54 ^{n.s.}	98.89
芳樟醇 Linalool	28.89	68.89	4.13 [*]	97.78
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexen-1-al	55.56	41.11	0.38 ^{n.s.}	96.67
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	67.78	30.00	3.64 ^{n.s.}	97.78

(Z)-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	68.89	27.78	4.43*	96.67
正己醇 1-Hexanol	63.33	36.67	1.63 ^{n.s.}	100.00
正己醛 Hexanal	28.89	68.89	4.13*	97.78
(R)-(+)-苜烯 (Z)-3-Hexen-1-ol	63.33	32.22	2.42 ^{n.s.}	95.55

表 6 云斑天牛已交配雌成虫对挥发物的行为反应

Table 6 Behavioral responses of mated female *Batocera lineolata* adults to different volatiles

化合物 Compounds	对味源的选择率 (%) Tendency rate for compounds	对 CK 的选择率 (%) Tendency rate for CK	χ^2 检验 χ^2 test	反应率 (%) Response rate
桉叶油醇 Eucalyptol	60.00	33.33	1.75 ^{n.s.}	93.33
苯甲醛 Benzyl dehyde	63.33	33.33	2.21 ^{n.s.}	96.67
苯乙醛 Phenylacetaldehyde	60.00	40.00	0.83 ^{n.s.}	100.00
芳樟醇 Linalool	36.67	60.00	1.24 ^{n.s.}	96.67
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexen-1-al	63.33	34.44	2.00 ^{n.s.}	98.89
(E)-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	64.44	32.22	2.59 ^{n.s.}	96.67
(Z)-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	67.78	30.00	3.64 ^{n.s.}	97.78
正己醇 1-Hexanol	61.11	33.33	1.90 ^{n.s.}	94.44
正己醛 Hexanal	42.22	56.67	0.37 ^{n.s.}	98.89
(R)-(+)-苜烯 (Z)-3-Hexen-1-ol	57.78	41.11	0.54 ^{n.s.}	98.89

3 讨论

实验结果表明,所测试的植物挥发物均可引起云斑天牛成虫的 EAG 反应(表 2),且成虫对(Z)-3-己烯-1-醇和(E)-2-辛烯醛的 EAG 反应最强,表明云斑天牛成虫对植物挥发物的反应具有广泛性和特异性,从而使云斑天牛成虫在寄主定位上更具有可塑性和灵活性(Hildebrand, 1995)。植食性昆虫对不同浓度的同一种植物挥发物表现出不同的生理活性,每种昆虫对于挥发性化合物都有一个最佳的剂量范围(樊慧等, 2004)。云斑天牛成虫对所测试化合物的 EAG 反应最强的浓度为 100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$; 该浓度下,云斑天牛未交配雌、雄成虫对的植物挥发性化合物的 EAG 无

显著性差异,说明雌、雄虫对寄主植物气味具有相似的嗅觉感受能力(Raguso *et al.*, 1996; Zhuge *et al.*, 2010)。云斑天牛未交配雌成虫与已交配雌成虫对相同浓度的某些化合物的 EAG 反应具有一定的差异性,表明不同生理状态的云斑天牛雌虫对寄主植物挥发物具有不同的敏感性,这与云斑天牛以前的报道相一致(Yang *et al.*, 2010)。(E)-2-辛烯醛仅对云斑天牛未交配雌成虫有明显的引诱作用,这可能是因为雌雄个体在寻找寄主、繁殖后代等行为中所起的作用不同而导致的(Raguso *et al.*, 1996; 金凤等, 2009)。交配后的云斑天牛雌成虫对所有化合物均无明显的趋性,表明交配经历可对云斑天牛雌成虫的行为反应产生一定的影响,在 Zhuge 等(2010)的研究中也有类似报道。光皮桦作为云斑天牛成虫的

嗜食补充营养寄主(梁潇予等, 2008), 但其挥发物芳樟醇对未交配云斑天牛雌、雄虫以及正己醛对未交配云斑天牛雄虫有明显的趋避作用, 其可能原因是该两种化合物在光皮桦中的含量很少(梁潇予, 2007), 不足以对云斑天牛起到趋避作用。

植物挥发物在天牛乃至许多昆虫的寄主定位中都起着关键作用(王霞等, 2009), 云斑天牛成虫羽化出孔后需要到补充营养寄主上进行补充营养后才能达到性成熟, 而云斑天牛成虫聚集到补充营养寄主上的另一个重要的原因是补充营养寄主能够提供较好的交配场所(Zhuge *et al.*, 2010)。能够引起云斑天牛成虫较强 EAG 及行为反应的(*Z*)-3-己烯-1-醇在产卵寄主杨树的挥发物中也有检测到(梁潇予, 2007), 表明云斑天牛成虫区分补充营养寄主与产卵寄主不单依靠植物挥发物; 未交配的云斑天牛成虫偏好于选择绿色, 对应于补充营养寄主的颜色, 已交配的云斑天牛雌成虫选择灰褐色的次数增加, 对应于产卵寄主杨树树皮的颜色, 说明视觉系统对于云斑天牛成虫定位补充营养寄主与产卵寄主也起着很重要的作用(另文发表)。

昆虫的嗅觉作用是对植物气味化学图谱的综合识别, 是一个非常复杂的辨识过程。植物挥发物的某一物质可能本身并不能引起较强 EAG 反应, 但其存在可以大大增强其他挥发物的 EAG 反应(张同心等, 2005), 香草烯不是黄蜂 *Antistrophus rufus* 定向的主要物质, 但其能够增强其他挥发物的引诱作用(Tooker *et al.*, 2005)。云斑天牛补充营养寄主挥发物中是否存在对云斑天牛成虫寄主定位有类似作用的关键物质还有待于进一步研究测定。

植物挥发物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), 昆虫的行为受到多种挥发物的协同影响, 因此, 将单一挥发物按不同比例配比研究其作用效果是昆虫引诱剂研制的重要环节(赵锦年等, 2001)。在本研究的基础上, 结合视觉系统的研究与前人对植物挥发物的研究(Yang *et al.*, 2010, 2011; Zhuge

et al., 2010), 开发云斑天牛高效植物源引诱剂并设计有效的诱捕装置将是今后研究的重点。

参考文献 (References)

- Hildebrand JG, 1995. Analysis of chemical signals by nervous systems. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 1(92): 67–74.
- Raguso R, Light D, Pichersky E, 1996. Electorantennogram responses of *Hyles lineate* (Sphingidae: Lepidoptera) to volatiles compounds from *Clarkia breweri* (Onagraceae) and other moth-pollinated flowers. *Journal of Chemical Ecology*, 10(22): 1735–1766.
- Schoonhoven LM, Jermy T, van Loon JJA, 1998. *Insect-Plant Biology: from Physiology to Evolution*. Cambridge: Cambridge University Press. 136–138.
- Tooker JH, Crumrin AL, Hanks LM, 2005. Plant volatiles are behavioral cues for adult females of the gall wasp *Antistrophus rufus*. *Chemoecology*, 2(15): 85–88.
- 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. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 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). *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 27(1): 20–32.
- Zhuge PP, Luo SL, Wang MQ, Zhang G, 2010. Electrophysiological responses of *Batocera horsfieldi* (Hope) adults to plant volatiles. *Journal of Applied Entomology*, 7(134): 600–607.
- 杜永均, 严福顺, 韩心丽, 张广学, 1994. 大豆蚜嗅觉在选择寄主植物中的作用. *昆虫学报*, 37(4): 385–392.
- 樊慧, 金幼菊, 李继泉, 陈华君, 2004. 引诱植食性昆虫的植物挥发性化合物的研究进展. *北京林业大学学报*, 26(3): 76–81.
- Fan H, Jin YJ, Li JQ, Chen HJ, 2004. Advances on plant volatile semiochemicals attracting herbivorous insects. *Journal of Beijing Forestry University*, 26(3): 76–81.]
- 金凤, 嵇保中, 刘曙雯, 田铃, 高洁, 2009. 昆虫产卵分泌物的产生方式、成分及功能. *昆虫学报*, 52(9): 1008–1016. [Jin F, Ji BZ, Liu SW, Tian L, Gao J, 2009. Deposition modes, components and functions of secretions associated with oviposition in insects. *Acta Entomologica Sinica*, 52(9): 1008–1016.]
- 嵇保中, 钱范俊, 严敖金, 1996. 云斑天牛研究方法的改进. *森林病虫害通讯*, (1): 45–46. [Ji BZ, Qian FJ, Yan AJ, 1996. Improvement of research method on *Batocera horsfieldi*. *Forest pest communication*, (1): 45–46.]
- 梁潇予, 2007. 云斑天牛对补充营养寄主的选择性研究. 硕士学

- 位论文. 四川雅安: 四川农业大学. [Liang XY, 2007. Preference of batocera horsfieldi for adults to feeding plants. Master Degree Thesis. Sichuan Yaan: Sichuan Agriculture University.]
- 梁潇予, 杨伟, 杨远亮, 杨春平, 杨毅, 2008. 云斑天牛对补充营养寄主的选择性. 昆虫知识, 41(1): 78–82. [Liang XY, Yang W, Yang YL, Yang CP, Yang Y, 2008. Preference of batocera horsfieldi for adults to feeding plants. *Chinese Bulletin of Entomology*, 41(1): 78–82.]
- 李建庆, 杨忠岐, 梅增霞, 张雅林, 2009. 云斑天牛的风险分析及其防控对策. 林业科学研究, 22(1): 148–153. [Li JQ, Yang ZQ, Mei ZX, Zhang YL, 2009. Pest risk analysis and control countermeasure of batocera horsfieldi. *Forest Research*, 22(1): 148–153.]
- 王霞, 徐静, 沈幼莲, 刘凤英, 杜永均, 2009. 豆野螟成虫触角对植物挥发物和性信息素化合物的触角电位反应. 应用生态学报, 20(8): 1–7. [Wang X, Xu J, Shen YL, Liu FY, Du YJ, 2009. Electroantennogram responses of aruca testulalis (Lepidoptera: Pyralidae) to plant volatiles and sex pheromone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 20(8): 1–7.]
- 王雪娇, 查友贵, 肖春, 叶敏, 2012. 桃蚜对不同植物挥发物的趋性选择研究. 云南农业大学学报, 27(2): 165–169. [Wang XJ, Zha YG, Xiao C, Ye M, 2012. Study on the preference selectivity of myzus persicae to different plant odour sources. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 27(2): 165–169.]
- 杨桦, 杨茂发, 杨伟, 杨春平, 董杰超, 沈远华, 2010. 杨树云斑天牛幼虫空间分布格局及生息坑道. 四川农业大学学报, 28(2): 148–152. [Yang H, Yang MF, Yang W, Yang CP, Dong JC, Shen YH, 2010. A study on the spatial distribution pattern and the living-inhabiting tunnel of the larvae of batocera horsfieldi (Hope). *Journal of Sichuan Agricultural University*, 28(2): 148–152.]
- 杨立军, 李新岗, 刘惠霞, 2012. 枣镰翅小卷蛾对枣树挥发物的行为反应. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 40(1): 71–78. [Yang LJ, Li XG, Liu HX, 2012. Behavior response of adult ancylis sativa Liu (Lepidoptera: Tortricidae) to the volatiles of ziziphus jujuba mill. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 40(1): 71–78.]
- 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 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.]
- 张同心, 崔为正, 孙绪良, 张卫光, 梁中贵, 2005. 松阿扁叶蜂对不同树种挥发物的触角电位反应. 昆虫学报, 48(4): 514–517. [Zhang TX, Cui WZ, Sun XL, Zhang WG, Liang ZG, 2005. Electroantennogram responses of acantholyda posticalis matsumura to volatiles of different trees. *Acta Entomologica Sinica*, 48(4): 514–517.]
- 赵锦年, 林长春, 姜礼云, 吴沧松, 姚剑飞, 俞盛明, 2001. M₉₉₋₁引诱剂诱捕松墨天牛等松甲虫的研究. 林业科学研究, 14(5): 523–529. [Zhao JN, Lin CC, Jiang LY, Wu CS, Yao JF, Yu SM, 2001. Study on trapping monochamus alternatus and other pine boring beetles with M₉₉₋₁ liquid attractant. *Forest Research*, 14(5): 523–529.]
- 周琳, 马志卿, 冯岗, 张兴, 2006. 天牛性信息素、引诱植物和植物性引诱剂的研究与应用. 昆虫知识, 43(3): 433–438. [Zhou L, Ma ZQ, Feng G, Zhang X, 2006. Sex pheromones, lure plants and plant attractants of cerambycid beetles (Coleoptera) and their applications. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(3): 433–438.]