

槐绿虎天牛对柠条锦鸡儿 6 种挥发物的 EAG 和行为反应*

陈艳萍** 刘 强*** 李 敏 王星霖 张玲玲 曹丽娟 郅博蕊

(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) 对主要寄主植物柠条锦鸡儿 *Caragana koshinskii* (Kom.) 挥发物中醇类、醛类、烷类、酯类和萜烯类共 5 类 6 种化合物的生物活性。【方法】采用 EAG 和嗅觉行为生测技术, 测定槐绿虎天牛雌雄虫对 1-癸醇、正壬醛、正十六烷、乙酸-2-乙基丁酯、1-十六烯和 1-辛烯 6 种化合物单一组分 8 个浓度梯度及其 20 种组合配方的电生理和嗅觉行为反应。【结果】结果表明, 槐绿虎天牛雌雄虫对单一化合物和组合配方的 EAG 反应值与嗅觉行为反应选择率的变化趋势基本一致。组合配方中, 雌雄虫均对 S、P、Q、H、I 和 B 6 种配方的引诱活性与对照的差异性具有统计意义 ($P < 0.05$)。【结论】(1) 组合配方明显较单一组分配方对槐绿虎天牛的引诱效果好;(2) 由 1-癸醇、正十六烷和正壬醛组成的 S 配方引诱效果最好;(3) 1-癸醇、正十六烷、正壬醛和 1-十六烯 4 种化合物的最适浓度可以作为槐绿虎天牛植物源引诱剂的成分作进一步的研究。

关键词 槐绿虎天牛, 柠条锦鸡儿, 挥发物, EAG, 行为反应

EAG and behavioral responses of *Chlorophorus diadema* to six volatiles from *Caragana koshinskii*

CHEN Yan-Ping** LIU Qiang*** LI Min WANG Xing-Ji ZHANG Ling-Ling
CAO Li-Juan QIE Bo-Rui

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

Abstract [Objectives] To investigate the bioactivity of six volatile alcohols, aldehydes, alkanes, esters and terpenes, from the plant *Caragana koshinskii* (Kom.) to adult *Chlorophorus diadema* (Motschulsky). [Methods] Electroantennogram (EAG) and behavioral responses of adult *C. diadema* to eight different concentrations of 6 single chemicals (1-decanol, nonanal, hexadecane, 2-ethylbutyl acetate, 1-hexadecene and 1-octene), and 20 blends of these chemicals, were tested using an EAG and Y-tube olfactometer. [Results] Both EAG and olfactory behavioral responses of *C. diadema* adults to single volatile components and blends were basically the same. Six of the 20 blends, S, P, Q, H, I and B, were significantly attractive to female and male beetles ($P < 0.05$). [Conclusion] (1) Blended volatiles are more attractive than single compounds; (2) Compound S, which was comprised of 1-decanol, hexadecane and nonanal, was the most attractive substance tested; (3) A mixture of four components (1-decanol, hexadecane, nonanal and 1-hexadecene) can serve as a basic of attractant for *C. diadema* in further studies.

Key words *Chlorophorus diadema*, *Caragana koshinskii*, volatiles, EAG, behavioral response

槐绿虎天牛 *Chlorophorus diadema* (Motschulsky), 属鞘翅目 Coleoptera, 天牛科 Cerambycidae, 是一种危害多种经济林木和濒危植物的主要蛀干

害虫。在我国分布于 20 多个省市和地区, 国外的朝鲜、日本、西伯利亚、蒙古等地也有分布 (张嫣等, 2015)。已报道幼虫寄主有蒺藜科、蔷薇科、

*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: cytjnu@163.com

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

收稿日期 Received: 2015-12-25, 接受日期 Accepted: 2016-01-25

杨柳科、属李科、豆科等多达 9 科 15 种木本植物(李琳和刘强, 2010; 张嫣等, 2015)。2014 年作者在野外考察时发现, 槐绿虎天牛的成虫取食开花的牛心朴子 *Cynanchum komarovii* (Al.) 和红砂 *Reaumuria soongorica* (Maxim.)。在西鄂尔多斯国家级自然保护区, 槐绿虎天牛可能是造成我国特有濒危植物四合木 *Tetreaana mongolica* (Maxim.) 近期灭绝的主要威胁(李升和刘强, 2009); 在宁夏等地, 槐绿虎天牛对重要固沙植物柠条锦鸡儿 *Caragana kroshinskii* (Kom.) 5 年以上树龄的主干和枝条危害十分严重, 为害率最高达 90%(李占文等, 2008)。为了保护濒危植物四合木, 槐绿虎天牛的防治近年来已受到保护区管理部门和学者的的高度重视(李升和刘强, 2009; 王建伟等, 2009; 曹川健等, 2010), 但目前未见有效防治方法的报道。

植物在正常的生理状态下产生并释放具有种属特征的植物源挥发性物质, 在昆虫识别、区分寄主植物的过程中起着关键的通讯引导作用(杜家纬, 2001), 如寄主定向(Schoohoven *et al.*, 1998; Hammack, 2001)、交配(Zhuge *et al.*, 2010)、产卵(方宇凌和张钟宁, 2002)、取食(Chung *et al.*, 2004)等行为。已有的研究证实植物源挥发物对天牛科昆虫具有良好的引诱效果, 如松墨天牛 *Monochamus alternatus* (Hope)(郝德君等, 2006; Fan *et al.*, 2007)、青杨脊虎天牛 *Xylotrechus rustics* (Linnaeus)(严善春等, 2006; 张振等, 2010)、云斑天牛 *Batocera lineolata*

(Chevrolat)(Yang *et al.*, 2013; 王保新等, 2014)、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky)(李建光等, 2002; 范丽清等, 2013)、暗梗天牛 *Arhopalus trististo* (F.)(Suckling *et al.*, 2001) 和红缘天牛 *Asias halodendri* (Pallas)(魏丹等, 2012; 丁嘉文等, 2014; 曹丽娟等, 2015)等。近年来本实验室开展了一系列槐绿虎天牛寄主植物挥发物及引诱活性物质的研究(李琳和刘强, 2010; 张嫣等, 2015)。本文研究了槐绿虎天牛对柠条锦鸡儿 6 种挥发物 8 个浓度梯度及 20 种组合配方制剂的 EAG 和嗅觉行为反应, 旨在从柠条锦鸡儿挥发物中筛选出几种对槐绿虎天牛具有高引诱活性的化合物或组合配方, 期望为槐绿虎天牛引诱剂的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用槐绿虎天牛成虫均于 2014 年 7 月采自内蒙古自治区西鄂尔多斯国家级自然保护区四合木核心区, 采集后将雌雄虫单独饲养, 并保证通气良好; 室内温度、湿度分别保持在 (26±1)℃和 50%左右, 以沾有 0.5%蜂蜜水的脱脂棉球饲养, 备用。

试验用化合物根据刘鑫海(2011)通过分析柠条锦鸡儿挥发物得到的 60 种化合物中, 筛选醇类、醛类、烷类、酯类和萜烯类共 5 类 6 种, 尽可能在各类中选择 1~2 种分子量在 100~200 之间, 市场上能够买到的化合物(表 1)。

表 1 标准化合物的名称和来源
Table 1 Names and sources of standard chemicals

化合物 Compounds	纯度 Purity	来源 Source of supply
1-癸醇 1-decanol	98.0%	北京百灵威科技有限公司
正壬醛 Nonanal	96.0%	上海阿拉丁生化科技有限公司
正十六烷 Hexadecane	98.5%	北京百灵威科技有限公司
乙酸-2-乙基丁酯 2-ethylbutyl acetate	>98.0%	上海梯希爱化成工业发展有限公司
1-十六烯 1-hexadecene	94.0%	上海阿拉丁生化科技有限公司
1-辛烯 1-octene	98.0%	上海阿拉丁生化科技有限公司
液体石蜡 Paraffin	99.0%	天津市光复精细化工研究所

1.2 方法

将 6 种化合物以液体石蜡作溶剂配制成 0.0005%、0.001%、0.005%、0.01%、0.1%、1%、2.5%和 5% 8 个浓度梯度的单一组分制剂；分别

对槐绿虎天牛进行 EAG 和嗅觉行为实验，以液体石蜡为对照。根据单一组分化合物的实验结果，分别选出对雌雄虫具有较好引诱活性的化合物及其最佳活性浓度，以 2~6 种不同组合方式等体积配制成 20 种组合配方（表 2），再对槐绿

表 2 20 种组合配方的成分
Table 2 The formula of twenty groups of multi-components

配方 Formulas	组分 Components
A	1-癸醇 2.5%，乙酸-2-乙基丁酯 0.01% 1-decanol 2.5%, 2-ethylbutyl acetate 0.01%
B	1-癸醇 2.5%，1-十六烯 0.005% 1-decanol 2.5%, 1-hexadecene 0.005%
C	1-癸醇 2.5%，1-辛烯 0.01% 1-decanol 2.5%, 1-octene 0.01%
D	1-癸醇 2.5%，正十六烷 0.001% 1-decanol 2.5%, Hexadecane 0.001%
E	1-癸醇 2.5%，正壬醛 0.01% 1-decanol 2.5%, Nonanal 0.01%
F	1-癸醇 2.5%，乙酸-2-乙基丁酯 0.01%，1-十六烯 0.005%，1-辛烯 0.01%，正十六烷 0.001%，正壬醛 0.01% 1-decanol 2.5%, 2-ethylbutyl acetate 0.01%, 1-hexadecene 0.005%, 1-octene 0.01%, Hexadecane 0.001%, Nonanal 0.01%
G	1-癸醇 2.5%，乙酸-2-乙基丁酯 0.01%，1-十六烯 0.005%，正十六烷 0.001%，正壬醛 0.01% 1-decanol 2.5%, 2-ethylbutyl acetate 0.01%, 1-hexadecene 0.005%, Hexadecane 0.001%, Nonanal 0.01%
H	1-癸醇 2.5%，乙酸-2-乙基丁酯 0.01%，1-辛烯 0.01%，正十六烷 0.001%，正壬醛 0.01% 1-decanol 2.5%, 2-ethylbutyl acetate 0.01%, 1-octene 0.01%, Hexadecane 0.001%, Nonanal 0.01%
I	乙酸-2-乙基丁酯 0.01%，1-十六烯 0.005%，1-辛烯 0.01%，正十六烷 0.001%，正壬醛 0.01% 2-ethylbutyl acetate 0.01%, 1-hexadecene 0.005%, 1-octene 0.01%, Hexadecane 0.001%, Nonanal 0.01%
J	1-癸醇 1%，乙酸-2-乙基丁酯 0.001% 1-decanol 1%, 2-ethylbutyl acetate 0.001%
K	1-癸醇 1%，1-十六烯 2.5% 1-decanol 1%, 1-hexadecene 2.5%
L	1-癸醇 1%，1-辛烯 0.01% 1-decanol 1%, 1-octene 0.01%
M	1-癸醇 1%，正十六烷 2.5% 1-decanol 1%, Hexadecane 2.5%
N	1-癸醇 1%，正壬醛 0.01% 1-decanol 1%, Nonanal 0.01%
O	1-癸醇 1%，乙酸-2-乙基丁酯 0.001%，1-十六烯 2.5%，1-辛烯 0.01%，正十六烷 2.5%，正壬醛 0.01% 1-decanol 1%, 2-ethylbutyl acetate 0.001%, 1-hexadecene 2.5%, 1-octene 0.01%, Hexadecane 2.5%, Nonanal 0.01%
P	1-癸醇 1%，乙酸-2-乙基丁酯 0.001%，1-十六烯 2.5% 1-decanol 1%, 2-ethylbutyl acetate 0.001%, 1-hexadecene 2.5%
Q	1-癸醇 1%，乙酸-2-乙基丁酯 0.001%，1-十六烯 2.5%，1-辛烯 0.01% 1-decanol 1%, 2-ethylbutyl acetate 0.001%, 1-hexadecene 2.5%, 1-octene 0.01%
R	1-癸醇 1%，乙酸-2-乙基丁酯 0.001%，1-辛烯 0.01% 1-decanol 1%, 2-ethylbutyl acetate 0.001%, 1-octene 0.01%
S	1-癸醇 1%，正十六烷 2.5%，正壬醛 0.01% 1-decanol 1%, Hexadecane 2.5%, Nonanal 0.01%
T	乙酸-2-乙基丁酯 0.001%，1-十六烯 2.5%，1-辛烯 0.01%，正十六烷 2.5%，正壬醛 0.01% 2-ethylbutyl acetate 0.001%, 1-hexadecene 2.5%, 1-octene 0.01%, Hexadecane 2.5%, Nonanal 0.01%

配方 A~I、J~T 是分别根据雌虫、雄虫对 6 种化合物最佳 EAG 和行为反应浓度配制。

Formulas A-I and J-T are according to the optimal concentration of six compounds that EAG and behavioral responses of *C. diadema* females and males, respectively.

虎天牛雌雄虫分别进行电生理和行为反应实验。

触角电位测定: 触角电位仪(荷兰 SYNTECH 公司), 包括微动操作仪(SYNTECH MP-15)、刺激气流控制器(SYNTECH CS-55)、数据采集系统(SYNTECH IDAC-232)、触角电位记录显示输出装置。测定方法参照本实验室张嫣等(2015), 曹丽娟等(2015)。设置并连接好气体刺激控制装置。待基线平稳后进行实验。每根触角重复 3 次。

嗅觉行为测定: 由大气采样仪(QC-1S 型)、活性炭空气过滤装置、分流装置和 Y 型玻璃管(适应臂长 25 cm, 选择臂和对照臂长 20 cm, 内径为 2.5 cm, 两臂夹角为 60°, 交叉处采用标准磨口制成)构成, 各部件之间以橡胶管连接。实验方法参照本实验室张嫣等(2015), 曹丽娟等(2015)。实验在天牛活动时间(9:00—15:00)进行, 保证两臂光照均匀。供试雌雄虫 10 只一组, 每组重复 3 次。

1.3 数据分析

EAG 实验: 利用 Duncan's 多重分析法比较槐绿虎天牛雌、雄虫对化合物的 EAG 反应相对值的差异。参照公式 $V=2R/(C_1+C_2)$ (其中 V 代表 EAG 的反应相对值; R 代表刺激化合物的 EAG 反应值; C_1, C_2 分别代表该样品刺激前、后的对照反应值)(曹丽娟等, 2015; 张嫣等, 2015)。

嗅觉实验: 利用 χ^2 公式检验相对选择率的差异显著性。参照公式如下:

$$\chi^2 = \frac{(|b-c|-1)^2}{b+c}$$

相对选择率 = $\frac{b-c}{b+c} \times 100\%$, 其中 b 代表选择臂天牛的数量; c 代表对照臂天牛的数量(曹丽娟等, 2015; 张嫣等, 2015)。

2 结果与分析

2.1 槐绿虎天牛对不同浓度的 6 种化合物的 EAG 反应

雌虫对 6 种化合物的 EAG 峰值浓度及其峰值由高到低依次为 0.001% 的正十六烷 EAG 值为

1.63; 0.01% 的 1-十六烯 EAG 值为 1.59; 2.5% 的 1-癸醇 EAG 值为 1.37; 0.01% 乙酸-2-乙基丁酯 EAG 值为 1.24; 0.01% 1-辛烯 EAG 值为 1.17; 0.1% 正壬醛 EAG 值为 1.14, 结果见表 3。

雄虫对 6 种化合物的 EAG 峰值浓度及其峰值由高到低依次为 0.001% 的乙酸-2-乙基丁酯 EAG 值为 1.36; 0.01% 的 1-辛烯 EAG 值为 1.21; 1% 的正十六烷 EAG 值为 1.17; 1% 的 1-癸醇 EAG 值为 1.16; 1% 的 1-十六烯 EAG 值为 1.15; 0.01% 的正壬醛 EAG 值为 1.09。结果见表 4。

2.2 槐绿虎天牛对不同浓度的 6 种化合物的嗅觉行为反应

雌雄虫对 6 种化合物的相对选择率均表现出随着浓度的增加而逐渐增加, 当达到某一峰值后, 又随浓度增加缓慢下降, 分别如图 1 所示。

雌虫对 6 种化合物的相对选择率峰值浓度及其峰值由高到低依次为 2.5% 的 1-癸醇和 0.01% 的 1-辛烯相对选择率最高, 均达 33.33%; 0.005% 的 1-十六烯、0.001% 的正十六烷和 0.01% 的乙酸-2-乙基丁酯相对选择率均为 26.67%; 0.01% 的正壬醛相对选择率为 20.00%。

雄虫对 6 种化合物的相对选择率峰值浓度及其峰值由高到低依次为 1% 的 1-癸醇、0.001% 的乙酸-2-乙基丁酯和 0.01% 的 1-辛烯相对选择率最高, 均达 26.67%; 0.01% 的正壬醛和 2.5% 的正十六烷相对选择率均为 20.00%; 2.5% 的 1-十六烯相对选择率为 13.33%。

综合雌雄天牛单一化合物的行为测试实验结果, 6 种化合物的峰值浓度对雌雄虫都表现出较好的引诱活性, 其中以 1-癸醇的作用效果最好, 雌雄虫的 EAG 值均较高, 且 8 个浓度梯度的嗅觉行为反应均表现有引诱作用。但与对照相比 χ^2 值均小于 3.84, 差异不显著 ($P>0.05$) (表 5)。

2.3 槐绿虎天牛对 20 种组合配方的 EAG 反应

根据单一组分化合物的实验结果, 分别选出对雌雄虫具有较好引诱活性的化合物及其最佳活性浓度, 等体积配制成 20 种组合配方分别对雌雄虫进行 EAG 实验, 结果如表 6, 通过 Duncan's

表 3 槐绿虎天牛雌虫对不同浓度单一组分化合物的 EAG 反应

化合物 Compounds	Table 3 The EAG response of <i>Chlorophorus diadema</i> female to different concentrations of single components						
	EAG 反应相对值 EAG response relative values (mV)						
	0.0005%	0.001%	0.005%	0.01%	0.1%	1%	5%
1-癸醇 1-decanol	0.78±0.01 aA	0.74±0.03 aA	0.79±0.03 aA	0.98±0.04 bB	1.07±0.03 cBC	1.12±0.01 cCD	1.37±0.01 eE
正壬醛 Nonanal	1.03±0.04 abcAB	1.04±0.04 abcAB	1.10±0.03 bcAB	1.10±0.06 bcAB	1.14±0.02 cB	1.03±0.02 abcAB	0.99±0.03 abAB
正十六烷 Hexadecane	1.13±0.06 bAB	1.63±0.05 eD	1.43±0.01 dC	1.27±0.07 cBC	1.11±0.02 bAB	1.14±0.01 bAB	0.98±0.04 aB
乙酸-2-乙基丁酯 2-ethylbutyl acetate	0.98±0.01 bcABC	1.01±0.05 cdBC	1.10±0.02 dC	1.24±0.01 eD	1.01±0.04 cdBC	1.05±0.03 cdC	0.92±0.03 abAB
1-十六烯 1-hexadecene	0.83±0.03 aA	1.08±0.05 cBC	1.16±0.05 cD	1.59±0.07 dC	1.11±0.06 cBC	1.01±0.05 bcABC	1.08±0.08 cBC
1-辛烯 1-octene	0.98±0.01 cdBCD	1.07±0.03 deCD	1.10±0.07 deCD	1.17±0.06 eD	1.04±0.03 cdeCD	0.91±0.05 bcABC	0.80±0.03 abAB

表中数据为平均值 ± 标准误, 同行数据后标有不同字母表示差异达显著水平, Duncan's 多重比较检验, 小写字母表示 $P<0.05$, 大写字母表示 $P<0.01$ 。表 4, 表 6 同。

Data in the table are mean ± SE. Values followed by different letters within the same row are significantly different (small letters, $P<0.05$; capital letters, $P<0.01$; Duncan's multiple test). The same with Table 4 and Table 6.

表 4 槐绿虎天牛雄虫对不同浓度单一组分化合物的 EAG 反应

化合物 Compounds	Table 4 The EAG response of <i>Chlorophorus diadema</i> male to different concentrations of single components						
	EAG 反应相对值 EAG response relative values (mV)						
	0.0005%	0.001%	0.005%	0.01%	0.1%	1%	5%
1-癸醇 1-decanol	0.73±0.02 aA	0.91±0.01 bB	0.89±0.04 bB	0.97±0.02 bBC	1.06±0.03 cCD	1.16±0.03 dD	1.04±0.01 cC
正壬醛 Nonanal	0.89±0.03 aA	0.91±0.02 abA	0.91±0.02 abA	1.09±0.02 dC	1.03±0.02 cdBC	1.03±0.02 cdBC	0.97±0.04 bcAB
正十六烷 Hexadecane	0.86±0.01 aA	1.00±0.02 bB	0.88±0.02 aA	1.02±0.01 bBC	1.04±0.03 bBC	1.17±0.05 eD	1.13±0.01 cCD
乙酸-2-乙基丁酯 2-ethylbutyl acetate	1.12±0.02 dC	1.36±0.05 eD	1.08±0.04 dBC	1.02±0.03 bcdBC	0.95±0.02 bB	1.06±0.05 cdBC	0.96±0.03 bcB
1-十六烯 1-hexadecene	0.88±0.06 abAB	0.98±0.02 cBC	0.95±0.01 bcAB	0.93±0.01 bcAB	0.99±0.01 cBC	1.15±0.26 dD	1.07±0.02 dCD
1-辛烯 1-octene	0.91±0.04 abA	0.94±0.04 bA	1.05±0.02 cB	1.21±0.01 dC	1.05±0.03 cB	1.06±0.01 cB	1.04±0.02 cB

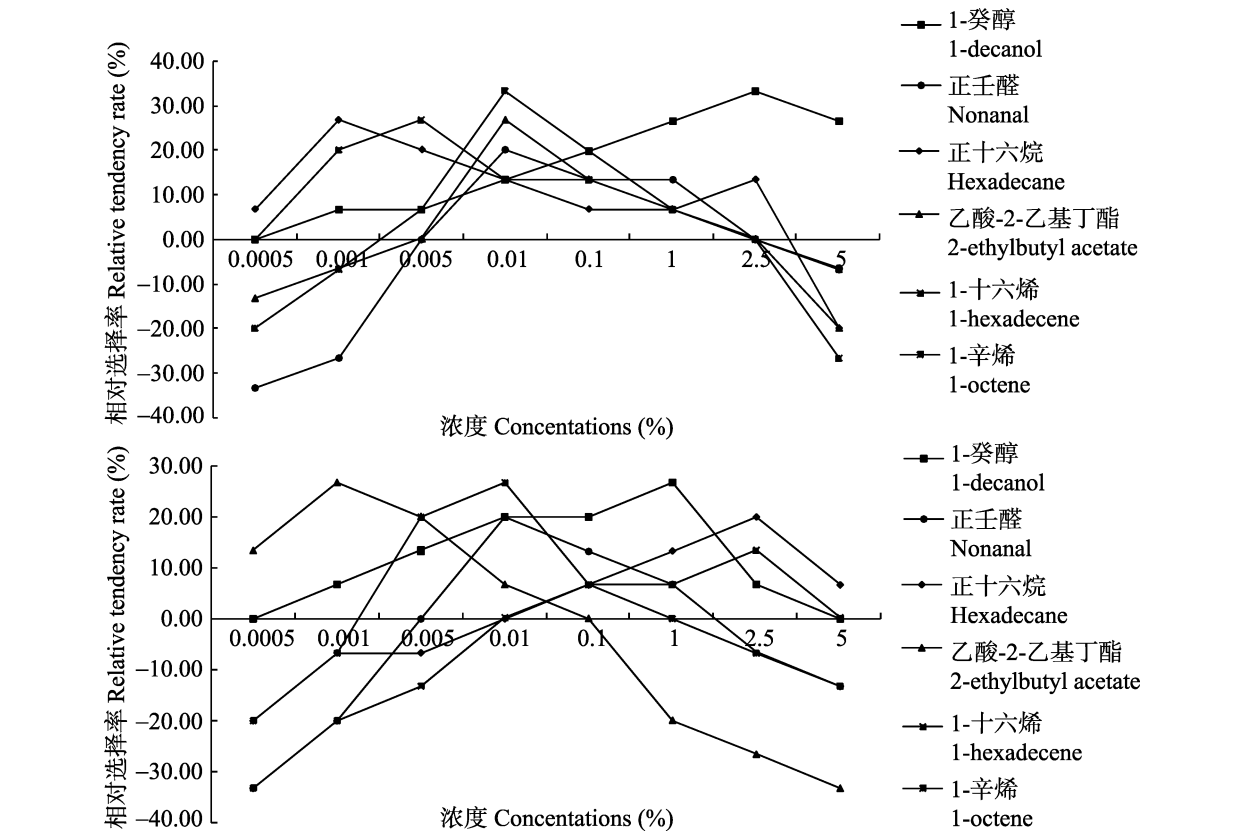


图 1 槐绿虎天牛对不同浓度单一组分化合物的行为选择反应

Fig. 1 The behavioral selectivity response of *Chlorophorus diadema* to different concentrations of single components

表 5 槐绿虎天牛对不同浓度单一组分化合物的行为选择反应

Table 5 The behavioral selectivity responses of *Chlorophorus diadema* to different concentrations of single components

化合物 Compounds	χ^2 值 χ^2 test															
	0.0005%	0.001%	0.005%	0.01%	0.1%	1%	2.5%	5%	0.0005%	0.001%	0.005%	0.01%	0.1%	1%	2.5%	5%
1-癸醇 1-decanol	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30	0.30	0.83	0.83	0.83	1.63	1.63	2.70	0.03	1.63	0.03
正壬醛 Nonanal	2.70	2.70	1.63	0.83	0.30	0.03	0.83	0.83	0.30	0.30	0.30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30
正十六烷 Hexadecane	0.03	0.83	1.63	0.03	0.83	0.03	0.30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30	0.30	0.83	0.83
乙酸-2-乙基丁酯 2-ethylbutyl acetate	0.30	0.30	0.03	1.63	0.03	0.83	1.63	0.03	0.30	0.03	0.03	0.83	0.03	1.63	0.83	2.70
1-十六烯 1-hexadecene	0.03	2.70	0.83	0.83	1.63	0.30	0.30	0.03	0.30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30	0.03	0.03
1-辛烯 1-octene	0.83	0.83	0.03	0.03	0.03	0.83	2.70	1.63	0.83	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	1.63	0.30

代表雌虫； 代表雄虫。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)。表 7 同。

由于表 5 中 χ^2 值均小于 $\chi^2_{0.05(1)}=3.84$ ，因此不做标注。

represents female; represents male. Values followed by * indicates significant difference at 0.05 levels, ** indicates extremely significant difference at 0.01 levels by χ^2 test. The same with Table 7. Table 5 χ^2 test values are less than $\chi^2_{0.05(1)}=3.84$, therefore not marked.

表 6 槐绿虎天牛对组合配方的 EAG 反应
Table 6 EAG response of *Chlorophorus diadema* to multi-component formulas

配方 Formulas	EAG 相对反应值 EAG response relative values (mV)	
	雌虫 Female	雄虫 Male
A	1.30±0.01bcABC	1.32±0.02bcdBCD
B	1.49±0.09cdBC	1.43±0.04cdefBCDE
C	1.47±0.10bcdBC	1.32±0.03bcBC
D	1.48±0.07cdBC	1.42±0.05cdeBCDE
E	1.36±0.08bcdABC	1.36±0.03bcdBCD
F	1.33±0.04bcABC	1.27±0.04bB
G	1.35±0.06bcABC	1.32±0.03bcdBCD
H	1.44±0.06bcdBC	1.41±0.05cdeBCDE
I	1.42±0.05bcdBC	1.44±0.05cdefBCDE
J	1.31±0.03bcABC	1.42±0.03cdeBCDE
K	1.43±0.06bcdBC	1.40±0.04cdeBCDE
L	1.28±0.04bAB	1.39±0.04bcdeBCDE
M	1.41±0.03bcdBC	1.42±0.04cdefBCDE
N	1.48±0.03cdBC	1.43±0.04cdefBCDE
O	1.39±0.03bcdBC	1.39±0.04bcdeBCDE
P	1.55±0.05Dc	1.49±0.03efDE
Q	1.41±0.05bcdBC	1.45±0.04cdefCDE
R	1.40±0.04bcdBC	1.32±0.01bcdBCD
S	1.48±0.07bcBC	1.55±0.05fE
T	1.42±0.06bcdBC	1.45±0.03defCDE
CK	1.11±0.07aA	1.05±0.05aA

图中配方字母 A~T 的意义同表 2。下表同。

The letters A-T indicate the formulas of Table 2. The same below.

多重比较表明,雌虫对配方 P 的 EAG 值最高,达 1.55,具有高度统计学意义 ($P<0.01$);对配方 B、S、D、N 具有统计学意义 ($P<0.05$)。雄虫对配方 S、P、T、Q、I、N 具有高度统计学意义 ($P<0.01$),其中,配方 S 的 EAG 值最高,达 1.55;对配方 B、M、J、D 具有统计学意义 ($P<0.05$)。综合实验结果,雌雄天牛均对配方 S、P、B、N、D 的 EAG 反应与对照 (CK) 相比差异具有统计学意义。

2.4 槐绿虎天牛对 20 种组合配方的嗅觉行为反应

槐绿虎天牛对 20 种组合配方的相对选择率均大于 0,即 20 种配方均表现为引诱作用,如

表 7 所示。

雌虫对配方 S 和 P 的相对选择率差异具有高度统计学意义 ($P<0.01$),其中,配方 S 的相对选择率最高,达 60.00%;对 I、Q、B、H 4 种配方的相对选择率差异具有统计学意义 ($P<0.05$)。雄虫对配方 H 和 S 的相对选择率最高,均为 53.33%,相对选择率差异具有高度统计学意义 ($P<0.01$),对 B、P、I、M、Q、T 6 种配方的相对选择率差异具有统计学意义 ($P<0.05$)。综合实验结果,雌雄天牛均对配方 S、P、Q、H、I、B 的嗅觉行为反应具有统计学意义。

3 结论与讨论

本研究实验结果表明,不同浓度的 6 种单一化合物中,雌虫对 0.001% 正十六烷和 0.01% 1-十六烯的 EAG 值与对照相比差异显著 ($P<0.05$),这 2 种化合物的其他浓度及其他 4 种化合物的各个浓度均与对照差异不显著 ($P>0.05$);而相对选择率与对照相比差异均不显著 ($P>0.05$)。组合配方中的 S、P、Q、H、I 和 B 6 种配方的嗅觉行为反应与对照的差异性具有统计意义 ($P<0.05$);说明组合配方对槐绿虎天牛的引诱活性好于单一组分,这与本实验室丁嘉文等 (2014) 的研究结果一致。组合配方中 S 配方的作用效果最好,该配方是由 1% 1-癸醇、2.5% 正十六烷和 0.01% 正壬醛组成,其中,正十六烷是广泛存在于槐绿虎天牛的多种寄主植物中的挥发物,如杨树皮 (程立超和迟德富, 2007)、国槐枝条 (薛皎亮等, 2008)、光皮桦植株 (杨桦等, 2011)、木枣的枣吊 (韩颖等, 2010)、泡桐花 (魏希颖等, 2008; 张玉玉等, 2010) 等。正壬醛也是广泛存在于槐绿虎天牛的多种寄主植物中的挥发物,如杨树的枝叶 (李建光等, 2002; 梁潇予, 2007)、国槐枝条 (薛皎亮等, 2008)、光皮桦植株和枝叶 (梁潇予, 2007; 杨桦等, 2011)、旱柳叶 (李建光等, 2002)、葡萄根 (杜远鹏等, 2009)、泡桐花 (张玉玉等, 2010) 等。这就说明越是广泛存在于多种寄主植物中的挥发物可能对其引诱活性越好,类似工作应尽可能关注这类物质的研究。S、P、Q、H 和 B 5 种配

表 7 槐绿虎天牛对组合配方的行为选择反应
Table 7 Behavioral selection of *Chlorophorus diadema* to multi-component formulas

配方 Formulas	雌虫 Female		雄虫 Male	
	相对选择率 (%) Relative choice rate	χ^2 检验 χ^2 test	相对选择率 (%) Relative choice rate	χ^2 检验 χ^2 test
A	6.67	0.03	13.33	0.30
B	40.00	4.03*	46.67	5.63*
C	6.67	0.03	6.67	0.03
D	20.00	0.83	13.33	0.30
E	33.33	2.70	20.00	0.83
F	20.00	0.83	26.67	1.63
G	26.67	1.63	33.33	2.70
H	40.00	4.03*	53.33	7.50**
I	46.67	5.63*	40.00	4.03*
J	6.67	0.03	20.00	0.83
K	13.33	0.30	13.33	0.30
L	26.67	1.63	6.67	0.03
M	33.33	2.70	40.00	4.03*
N	6.67	0.03	6.67	0.03
O	26.67	1.63	13.33	0.30
P	53.33	7.50**	46.67	5.63*
Q	46.67	5.63*	40.00	4.03*
R	33.33	2.70	20.00	0.83
S	60.00	9.63**	53.33	7.50**
T	26.67	1.63	40.00	4.03*

方中均含有 1-癸醇,在单一组分嗅觉实验中,1-癸醇 8 个浓度的嗅觉行为反应均对雌雄虫表现有引诱作用;也说明 1-癸醇对槐绿虎天牛具有较好引诱活性。除 1-癸醇、正十六烷和正壬醛之外,在 6 种活性较好的组合配方中,P、Q、I 和 B 4 种配方中均含有 1-十六烯,因此认为正十六烷、正壬醛、1-癸醇和 1-十六烯这 4 种化合物的最适浓度可以作为槐绿虎天牛植物源引诱剂的成分作进一步的最佳配方的研究。

参考文献 (References)

Cao CJ, Lei YS, LuoYQ, He SY, Wen JB, Song SX, 2010. Risk analysis of *Chlorophorus diadema*. *Forest Pest and Disease*, 29(3): 7–9. [曹川健, 雷银山, 骆有庆, 何善勇, 温俊宝, 宗世

祥, 2010. 槐绿虎天牛风险分析. *中国森林病虫*, 29(3): 7–9.]
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 (Natural Science Edition)*, 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 (自然科学版)*, 35(3): 84–88.]
Cheng LC, Chi DF, 2007. The impact of volatile from bark of ten species of poplar to *Xylotrechus rusticus* L. Master dissertation. Heilongjiang: Northeast Forestry University. [程立超, 迟德富, 2007. 十种杨树树皮挥发性物质对青杨脊虎天牛成虫的影响. 硕士学位论文. 黑龙江: 东北林业大学.]
Chung GP, Kyu CL, Dong WL, Ho YC, Albert PJ, 2004. Effects of purified persimmon tannin and tannic acid on survival and reproduction of bean bug, *Riptortus clavatus*. *Journal of Chemical*

- Ecology*, 30(11): 2269–2283.
- 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 (Natural Science Edition)*, 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(自然科学版), 34(2): 71–75.]
- Du JW, 2011. Plant-insect chemical communication and its behavior control. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 27(3): 193–200. [杜家纬, 2001. 植物-昆虫间的化学通讯及其行为控制. 植物生理学报, 27(3): 193–200.]
- 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 JT, Sun JH, Shi J, 2007. Attraction of the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus*, to volatiles from stressed host in China. *Annals of Forest Science*, 64(1): 67–71.
- Fan LQ, Yan SC, 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, 严善春, 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.]
- 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.]
- Hammack L, 2001. Single and blended maize volatiles as attractants for diabrotic corn root worm beet. *Journal of Chemical Ecology*, 27(7): 1373–1390.
- Han Y, Li XG, Yang LJ, Fan YL, Zhang XW, 2010. Volatiles of Chinese Jujube during different developmental phases. *Journal of Northwest Forestry University*, 25(5): 170–175. [韩颖, 李新岗, 杨立军, 范艳玲, 张学武, 2010. 枣树不同发育期挥发物研究. 西北林学院学报, 25(5): 170–175.]
- Hao DJ, Ma FL, Wang Y, Zhang YH, Dai HG, 2006. Electroantennogram and behavioral responses of *Monochamus alternatus* to the volatiles from *Pinus thunbergii* with different physiological status. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 17(6): 1070–1074. [郝德君, 马凤林, 王焱, 张永慧, 戴华国, 2006. 松墨天牛对不同生理状态黑松挥发物的触角电生理和行为反应. 应用生态学报, 17(6): 1070–1074.]
- Li JG, Jin YJ, Luo YQ, Shen YB, Chen HJ, 2002. Comparative analysis of volatile compounds from different host plants of *Anoplophora glabripennis* (Motsch.). *Journal of Beijing Forestry University*, 24(5/6): 165–169. [李建光, 金幼菊, 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 L, Liu Q, 2010. EAG response and effects of different attractions on *Chlorophorus diadema* (Motschulsky). *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 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 (自然科学版), 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.]
- Li ZW, Zhang AP, Yu J, Wang SQ, Sun HF, Yang HJ, Yang XR, Wu MX, 2008. The region of Nixia Lingwu discover the new trunk borer of *Caragana koshinskii*. *Plant Protection*, 34(3): 149–151. [李占文, 张爱萍, 于洁, 王素琴, 孙慧芳, 杨红娟, 杨学荣, 伍梅霞, 2008. 宁夏灵武发现为害柠条锦鸡儿的新蛀干害虫. 植物保护, 34(3): 149–151.]
- Liang XY, 2007. Preference of *Batoeera horsfieldi* (Hope) for host of supplementary feeding. Master dissertation. Sichuan: Sichuan Agricultural University. [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: 四川农业大学.]
- Liu XH, 2011. The development of Phyto-attractant of *Chlorophorus* sp. Master dissertation. Beijing: Beijing Forestry University. [刘鑫海, 2011. 柠条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.]
- Schoonhoven LM, Jermy T, van Loon JJA, 1998. Insect-plant biology: from physiology to evolution. Cambridge: Cambridge University Press. 136–138.
- Suckling DM, Gibb AR, Daly JM, Chen X, Brockerhoff EG, 2001. Behavioral and electrophysiological responses of *Arhopalus tristis* burnt pine and other stimuli. *Journal Chemical Ecological*, 27(6): 1091–1104.
- 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 JW, Ling JQ, Luo YQ, Bao HG, Liang J, 2009. Damage of two species of longicorn beetles on *Tetraena mongolica* in different vegetations. *Forest Pest and Disease*, 28(6): 9–11. [王

- 建伟, 苓建强, 骆有庆, 包会嘎, 梁军, 2009. 不同植被条件下两种天牛对四合木的危害. *中国森林病虫*, 28(6): 9–11.]
- Wei D, Qin Q, Xun F, Liu Q, 2012. EAG and behavioral response of different attractants and field trapping effect on *Asias halodendri* (Pallas). *Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition)*, 32(3): 71–75. [魏丹, 秦勤, 寻锋, 刘强, 2012. 红缘天牛对不同诱剂的 EAG 与野外诱集效果. *天津师范大学学报 (自然科学版)*, 32(3): 71–75.]
- Wei XY, Zhang YN, Bai LL, Liu T, Peng JF, 2008. Analysis of oil in the *Flospaulowniae* by GC-MS and study on antibacterial function. *Natural Product Research Development*, 20(1): 87–90. [魏希颖, 张延妮, 白玲玲, 刘陶, 彭菊芳, 2008. 泡桐花油的 GC-MS 分析及抑菌作用研究. *天然产物研究与开发*, 20(1): 87–90.]
- Xue JL, He J, Xie YP, 2008. Attractive effect of plant volatiles on *Harmonia axyridis* (Pallas). *Chinese Journal Applied Environmental Biological*, 14(4): 494–498. [薛皎亮, 贺琨, 谢映平, 2008. 植物挥发物对天敌昆虫异色瓢虫的引诱效应. *应用与环境生物学报*, 14(4): 494–498.]
- 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.]
- Yang H, Yang W, Yang CP, Zhu TH, Huang Q, Han S, Xiao JJ, 2013. Electrophysiological and behavioral responses of the white-striped longhorned beetle, *Batocera lineolata*, to the diurnal rhythm of host plant volatiles of holly, *Viburnum awabuki*. *Journal of Insect Science*, 13(85): 1536–2442.
- Yang H, Yang W, Yang MF, Yang CP, Yang LG, Xutang XK, 2011. Diurnal rhythm of *Viburnum awabuki* and *Betula luminifera* volatiles and electroantennogram response of *Batocera horsfieldi*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(2): 357–363. [杨桦, 杨伟, 杨茂发, 杨春平, 杨令国, 徐唐鑫科, 2011. 法国冬青和光皮桦挥发物日节律及云斑天牛的触角电位反应. *应用生态学报*, 22(2): 357–363.]
- Zhang Y, Liu Q, Zhu GP, Li M, 2015. Research on the EAG and behavioral responses of *Chlorophorus diadema* to eleven *Vitis vinifera* and *Prunus armeniaca* volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(5): 1113–1122. [张嫣, 刘强, 朱耿平, 李敏, 2015. 槐绿虎天牛对葡萄和杏 11 种挥发物的 EAG 及行为反应. *应用昆虫学报*, 52(5): 1113–1122.]
- Zhang YY, Sun BG, Huang MQ, Chen HT, 2010. Analysis of the volatile compounds from the flower of *Paulownia elongate*. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 30(3): 88–92. [张玉玉, 孙宝国, 黄明泉, 陈海涛, 2010. 兰考泡桐花的挥发性成分分析研究. *林产化学与工业*, 30(3): 88–92.]
- Zhang Z, Chi DF, Yu J, Li XC, Zhao XJ, 2010. EAG and behavioral responses of *Xylotrechus rusticus* to thirteen plant volatiles. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(10): 69–75. [张振, 迟德富, 宇佳, 李晓灿, 赵晓杰, 2010. 青杨脊虎天牛对种植物挥发物的电生理及行为反应. *林业科学*, 46(10): 69–75.]
- 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.