

# 五种寄主植物挥发物的主要成分及华星天牛对 其电生理和行为反应

许 桐<sup>1</sup> 贺 密<sup>1</sup> 李 涵<sup>1</sup> 陆鹏飞<sup>1\*</sup> 乔海莉<sup>2\*</sup>

(1. 北京林业大学林学院, 林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083;  
2. 中国医学科学院北京协和医学院药用植物研究所, 北京 100193)

**摘要:** 为开发华星天牛 *Anoplophora chinensis* 引诱剂, 采用动态顶空吸附法收集浙江省慈溪市沿海防护林中华星天牛 5 种寄主植物(柑橘 *Citrus reticulata*、苦楝 *Melia azedarach*、黄山栾树 *Koelreuteria bipinnata*、木麻黄 *Casuarina equisetifolia*、金丝垂柳 *Salix×aureo-pendula*)的挥发物, 采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术对其进行鉴定和分析, 采用气相色谱-触角电位(gas chromatography-electroantennogram detection, GC-EAD)联用技术解析各植物中引起触角电生理反应的活性物质, 通过 Y 型嗅觉仪测定华星天牛对 5 种寄主植物和 7 种活性物质的行为反应。结果显示, 在 5 种寄主植物挥发物中共鉴定出 75 种化合物, 分为 8 个化学型; 5 种寄主植物可被分成 3 组, 不同组间挥发物的组成不同, 同组内不同植物种间有共有组分和特异组分; 在较为吸引华星天牛的柑橘和苦楝挥发物中, 菲烯类占比高。 $(\pm)$ -柠檬烯、 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和  $\alpha$ -法呢烯能引起华星天牛触角发生电位反应, $(\pm)$ -柠檬烯为柑橘挥发物独有成分; 金丝垂柳挥发物不能引起华星天牛触角电位反应。苦楝和柑橘对华星天牛的引诱作用较强, 显著高于黄山栾树和木麻黄; 金丝垂柳对华星天牛无引诱作用; $\beta$ -石竹烯和  $\gamma$ -松油烯对华星天牛有显著的引诱作用, 按照寄主植物挥发物比例混配的化合物对华星天牛的引诱作用强于单体化合物。

**关键词:** 华星天牛; 寄主定位; 植物挥发物; 气相色谱-触角电位联用; Y 型嗅觉仪

## Principal components of volatiles from five host plants and electrophysiological and behavioral responses of citrus longhorned beetle *Anoplophora chinensis*

Xu Tong<sup>1</sup> He Mi<sup>1</sup> Li Han<sup>1</sup> Lu Pengfei<sup>1\*</sup> Qiao Haili<sup>2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. The Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To develop attractants for citrus longhorned beetle *Anoplophora chinensis*, key active components of volatiles from five main host plants (*Citrus reticulata*, *Melia azedarach*, *Koelreuteria bipinnata*, *Casuarina equisetifolia* and *Salix×aureo-pendula*) of *A. chinensis* in Cixi coastal protective forest in Zhejiang Province were collected, their components were identified and analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) coupling technique, and their active components were identified using gas chromatography-electroantennogram detection (GC-EAD) coupling technique, and the behavioral response of *A. chinensis* to volatiles of the five plants and seven active substances was assayed using Y-tube olfactometer. The results showed that a total of 75 compounds were identified in the

基金项目: 国家自然科学基金(32371889), 国家重点研发计划(2021YFD1400900, 2017YFD0600103)

\* 通信作者 (Authors for correspondence), E-mail: lpengfei224@126.com, qhl193314@sina.com

收稿日期: 2022-04-08

volatile substances of the five plants, which were divided into eight chemical types and three groups. The composition of volatiles in different groups was significantly different, and there were either common or special components between different plant species in the same group. Terpenes accounted for a high proportion of volatiles in *M. azedarach* and *C. reticulata*, which attracted *A. chinensis*. ( $\pm$ )-limonene,  $\gamma$ -terpinene, nonanal,  $\beta$ -caryophyllene and  $\alpha$ -farnesene caused GC-EAD response from *A. chinensis*. ( $\pm$ )-limonene was a unique active component in *C. reticulata*. No EAD-active components were found in *Salix×aureo-pendula*. The volatiles of *M. azedarach* and *C. reticulata* had stronger attraction to *A. chinensis*, which was significantly higher than that to *K. bipinnata* and *C. equisetifolia*. *Salix×aureo-pendula* had no attraction to *A. chinensis*. *Anoplophora chinensis* was strongly attracted by  $\beta$ -caryophyllene and  $\gamma$ -terpinene. Compared with individual compounds, the mixed substances according to the proportion of components in plant volatiles were more attractive.

**Key words:** citrus long horned beetle; host selection; plant volatile; GC-EAD; Y-tube olfactory

华星天牛 *Anoplophora chinensis* 隶属于天牛科, 起源于东亚, 其成虫啃噬嫩枝树皮, 造成枝干干枯; 幼虫通常咬食寄主树干基部木质部或者对根部进行为害, 进而阻碍养分和水分的运输, 最终导致树势衰弱死亡(陈联云, 2017)。近年来, 华星天牛在我国东南沿海浙江省和福建省防护林大面积发生, 一般破坏林分20%~30%, 严重时破坏林分80%以上, 极大地削弱了防护林的效能(黄金水等, 2003; 蔡守平, 2017), 已有的化学方法防治效果差, 只能采取伐除受害木的方法, 既破坏了当地的生态环境, 又增加了人力负担。因此, 寻求科学、高效的防控手段迫在眉睫。

植物释放的挥发物直接影响华星天牛的取食和产卵等行为(Knolhoff & Heckel, 2014; Lemmen-Lechelt et al., 2018)。因此, 明确华星天牛寄主植物挥发物成分及对华星天牛行为的影响, 将其开发为植物源引诱剂或者趋避剂用来防控华星天牛具有重要的实践意义。华星天牛寄主植物苦楝 *Melia azedarach* 中的活性引诱分为醇类和芳香族化合物(黄金水等, 2001); 在自然状态下苦楝枝条挥发性气体主要成分是萜烯类化合物, 占比为97.71%, 其中左旋- $\alpha$ -蒎烯含量最高, 占比为89.07%(刘佳敏, 2013); 朱宁(2017)只在华星天牛寄主植物青皮垂柳 *Salix babylonica* 中检测到3-蒈烯和2-乙基己醛, 壬醛、苯乙烯和苯乙酮在青皮垂柳中的含量显著高于在华星天牛寄主植物复叶槭 *Acer negundo* 中的含量; 青皮垂柳枝条挥发物成分主要是萜烯和芳香化合物, 而树干挥发物成分主要是烯烃和烷烃。山核桃 *Juglans mandshurica* 挥发物中的蒎烯和罗勒烯对华星天牛有较强的引诱作用, 而丙烯酸-2-乙基己酯、二乙苯和壬醛对华星天牛有较好的驱避作用(马艳等, 2019); 华星天牛成虫触角对苦楝中 $\beta$ -蒎烯、左

旋- $\alpha$ -蒎烯、月桂烯、丁苯和桃金娘烯醇这5种化合物均在一定程度的电生理反应, 其中对 $\beta$ -蒎烯的电生理反应最强(刘佳敏, 2013); 华星天牛触角对砂糖橘 *Citrus reticulata* cv. Shatangju 枝叶浸提物中壬醛、 $\alpha$ -蒎烯、柠檬烯、芳樟醇、松油醇和石竹烯等挥发物成分均有不同程度的电生理反应, 其中对壬醛的电生理反应重复性最好(钱明惠等, 2018)。目前, 虽然关于华星天牛寄主植物挥发物成分的研究较多, 但关于华星天牛不同寄主挥发物成分共性及特性的总结较少。

在浙江省慈溪市沿海防护林样地中, 华星天牛主要为害柑橘 *Citrus reticulata*、苦楝、黄山栾树 *Koelreuteria bipinnata*、木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 和金丝垂柳 *Salix×aureo-pendula* 这5种植物, 且为害程度不同。基于此, 本研究以同域分布的华星天牛这5种寄主植物为研究对象, 采用动态顶空吸附法收集其枝条的挥发物, 采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术对其挥发物进行鉴定和分析, 识别不同树种挥发物之间的共同和特异组分, 用气相色谱-触角电位(gas chromatography-electroantennogram detection, GC-EAD)联用技术筛选这5种植物中对华星天牛有活性的化合物单体, 用Y型嗅觉仪分别测定华星天牛对这5种植物挥发物的偏好性及对7种标准化合物的行为反应, 以期确定华星天牛定位各寄主植物的本质, 进而为华星天牛防控提供思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试虫源和植物: 2019年5月下旬自浙江省慈溪市沿海防护林(30°10' N, 121°14' E)收集羽化的

华星天牛成虫,单头放入带孔的长80 mm、宽60 mm、高50 mm的塑料养虫盒中,用5%蜂蜜水喂养1个晚上,第2天选择活跃的华星天牛成虫供试。同时自浙江省宁波市慈溪市兴慈四路与兴慈三路、滨海五路与滨海六路之间试验样地内采集华星天牛5种寄主植物柑橘、苦楝、黄山栾树、木麻黄和金丝垂柳的直径为1 cm的多年生枝条,枝条长度约40 cm,置于干净、含有湿棉球的自封袋中,带回实验室供试。

试剂和仪器:≥95%石蜡、97%( $\pm$ )-柠檬烯、97% $\gamma$ -松油烯和95% $\alpha$ -法呢烯标准品,德国Sigma公司;96%壬醛标准品,美国Aladdin公司;98% $\beta$ -石竹烯标准品,日本TCL公司;Porapak Q吸附剂(孔径为150~180  $\mu\text{m}$ ),美国Supelco公司;纯度>98%正己烷,美国Sigma-Aldrich公司;其他试剂均为国产分析纯。长30 m、内径0.25 mm、膜厚0.25  $\mu\text{m}$ 的DB-WAX毛细柱,美国J & W Scientific公司;Agilent 6890 N气相色谱仪、Agilent 5977A气相质谱仪,美国Agilent公司;QC-1型大气采样仪,北京市劳动保护科学研究所;Y型嗅觉仪,由Y型玻璃管构成,直径7.5 cm,主臂长50 cm,侧臂长40 cm,夹角75°,北京玻璃仪器厂定制;触角电位仪由金属电极、TC-02控制器、INR-2便携式放大器、Type IDAC-4数据采集接口板和CS-55刺激气流控制器组成,荷兰Syntech公司。

## 1.2 方法

### 1.2.1 华星天牛5种寄主植物挥发物的收集

采用动态顶空吸附法收集柑橘、苦楝、黄山栾树、木麻黄和金丝垂柳5种植物健康枝条的挥发物。将植物枝条装到长40.6 cm、宽44.4 cm的聚四氟乙烯烤箱袋中,大气采样仪出气口气流为400 mL/min,气流依次通过活性炭过滤、蒸馏水加湿,把烤箱袋内植物挥发物带到含200 mg吸附剂Porapak Q的吸附管中,吸附管连接大气采样仪进气口。每个样品收集4.5 h,每种植株在相同时间内采集3~4次,以相同条件下收集未放植物的气体为空白对照。采样结束后,用350~400  $\mu\text{L}$ 色谱纯正己烷洗脱吸附管3次,收集挥发性气体至样品瓶中,-20 °C低温保存,用于GC-MS鉴定和GC-EAD反应。

### 1.2.2 华星天牛5种寄主植物挥发物的GC-MS鉴定

采用GC-MS联用仪对柑橘、苦楝、黄山栾树、木麻黄和金丝垂柳5种植物的气体挥发物成分进行分析,进样量2  $\mu\text{L}$ ,不分流。GC工作条件:色谱柱为DB-WAX毛细柱;载气为He,流速为1.5 mL/min;初始温度50 °C保持1 min,以3 °C/min的速率升至

120 °C,再以10 °C/min的速率升温到240 °C,保持10 min。MS工作条件:电子源为EI源,电子能为70 eV,发射电流34.6  $\mu\text{A}$ ,扫描质核比范围29~600 amu,接口温度250 °C。使用Turbo Mass 5.42软件对数据进行分析,根据标准品对比色谱保留时间和NIST数据库的质谱数据确定化合物种类。利用峰面积归一化法,计算每种挥发物的相对含量。从5种寄主植物挥发物中选择含量较高且种间差异显著的化合物进行主成分分析和聚类分析。

### 1.2.3 华星天牛对寄主植物挥发物的GC-EAD测定

GC工作条件同1.2.2。首先,用锋利剪刀将活跃的华星天牛雌雄成虫触角整根剪下,小心将鞭节顶端剪下约0.5 mm,用导电胶将触角固定到触角电位仪的Y型金属电极上;电极插入INR-2便携式放大器中,观察触角电位显示界面,当电位平稳,表明触角接触良好,可以开始测试。使用微量进样针进样2  $\mu\text{L}$ ,流入昆虫触角与火焰离子化检测器(fire ionization detector, FID)的气流比为2:1,CS-55刺激气流控制器产生的持续气流通过活性炭过滤和洗气瓶加湿将化合物带向触角;Syntech 4.4软件同时采集EAD信号和FID信号,生成气相色谱图和触角电位图。每个植物挥发物样品重复测试6根触角。

### 1.2.4 华星天牛对5种寄主植物挥发物的偏好性测定

2019年5月下旬开始每日8:00—17:00在光线充足的室内进行试验,试验持续7 d。室内温度为23~25 °C,相对湿度为70%~80%。Y型嗅觉仪的一个侧臂装有寄主植物挥发物,另一边侧臂为洁净空气(CK),主臂放置华星天牛。用大气采样仪将气流流速控制为500 mL/min,气流依次通过活性炭过滤、洗气瓶湿润、流量计、装有植物材料的陷阱和三通管到达试虫。放入试虫前先让气流流通6 min,以保证植物挥发物扩散到主臂中。每头试虫观察时间3 min,越过侧臂30 cm则认为华星天牛作出选择,其他情况则认为未作出反应,每个植物样本测试雌雄成虫各20头,每测试5头试虫调换两侧臂的位置,避免位置偏差,统计各臂试虫数量,计算选择率。每更换1次植物样品,用无水乙醇彻底清洗Y型嗅觉仪,烘干后下次使用。

### 1.2.5 华星天牛对5种植物挥发物的行为选择测定

根据1.2.3结果,选择引起华星天牛触角发生电位反应的化合物标准品,用液体石蜡作溶剂将标准品均配制成浓度为1 mol/L的溶液;根据1.2.2结果将苦楝和柑橘挥发物中引起华星天牛触角发生电位反应的化合物按照GC-MS结果的比例混合,用液体

石蜡将其配制成浓度为1 mol/L的溶液;用移液枪吸取10 μL溶液分别滴在长1 cm、宽2 cm的定性滤纸上,以滴有等量液体石蜡的定性滤纸为对照,将其分别放入Y型嗅觉仪的2个侧臂内,其余步骤、方法同1.2.4。

### 1.3 数据分析

采用Excel 2013及SPSS 22.0软件对试验数据进行统计分析,应用卡方检验法对华星天牛的选择率进行检验,使用Tukey法对不同植物挥发物的成分进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 华星天牛5种寄主植物挥发物的GC-MS鉴定

#### 2.1.1 寄主植物挥发物组成

经过GC-MS分析,从5种寄主植物枝条挥发物中共鉴定出75种化合物,其中醇类、醛类、烷烃类、烯烃类、萜烯类、酮类、酯类和芳香族化合物分别有7、5、8、4、20、4、6和21种(表1)。从柑橘挥发物中共鉴定出25种化合物,其中主要成分为(1S)-(-)- $\alpha$ -蒎烯、芳樟醇、壬醛、( $\pm$ )-柠檬烯、1,2-二甲苯和 $\beta$ -石竹烯,总含量为60.37%,相对含量分别为26.67%、

11.08%、8.97%、5.28%、4.51%和3.86%;从苦楝挥发物中共鉴定出25种化合物,其中主要成分为 $\alpha$ -法呢烯、 $\alpha$ -蒎烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯、 $\gamma$ -松油烯、正丙苯和2-异丙基-5-甲基茴香醚,总含量为51.69%,相对含量分别为13.15%、8.85%、7.15%、6.75%、5.91%、4.96%和4.92%;从木麻黄挥发物中共鉴定出37种化合物,其中主要成分为水杨酸辛酯、( $R$ )-(+)柠檬烯、邻甲基间羟基二苯胺、邻乙基甲苯、邻异丙基甲苯、 $\beta$ -罗勒烯和壬醛,总含量为44.21%,相对含量分别为10.67%、7.49%、6.21%、5.65%、5.16%、5.06%和3.97%;从黄山栾树挥发物中共鉴定出27种化合物,其中主要成分为壬醛、 $\alpha$ -法呢烯、芳樟醇、 $\gamma$ -松油烯、顺式-3-己烯基乙酸酯、正十一烷和3-乙基苯乙酮,总含量为52.17%,相对含量分别为11.59%、8.98%、7.92%、7.66%、5.54%、5.38%和5.10%;从金丝垂柳挥发物中共鉴定出30种化合物,其中主要成分为 $\alpha$ -法呢烯、 $\beta$ -石竹烯、仲丁基苯、4-乙基苯甲醛、邻乙基甲苯、对异丙基苯甲醇、正丙苯和月桂烯,总含量为52.38%,相对含量分别为13.01%、11.75%、4.99%、4.79%、4.69%、4.66%、4.43%和4.06%(表1)。

表1 华星天牛5种寄主植物枝条挥发物的GC-MS分析

Table 1 GC-MS analysis of the twigs from five host plants of *Anoplophora chinensis*

%

编号 No.	保留时间 Retention time	CAS号 CAS no.	化合物 Compound	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	金丝垂柳 <i>Salix×aureo-pendula</i>	黄山栾树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	苦楝 <i>Melia azedarach</i>	F
1	1.349	000078-78-4	异戊烷 2-methyl-butane	0	0	0	0	2.14±0.37	23.01**
2	2.459	000108-88-3	甲苯 Toluene	2.37±0.74	0	0	0	0	13.26**
3	3.237	000112-40-3	十二烷 n-dodecane	1.43±0.4	0	0	0	0	16.76**
4	3.388	001120-21-4	正十一烷 n-undecane	1.71±0.68	0	0	5.38±0.37	0	50.02*
5	3.455	018172-67-3	(1S)-(-)- $\beta$ -蒎烯 (1S)-(-)- $\beta$ -pinene	2.63±1.31	0	0	0.77±0.16	0	15.02*
6	3.455	000589-38-8	3-己酮 3-hexanone	0.76±0.21	0	0	0	0	17.76**
7	3.523	000111-66-0	1-辛烯 1-octene	0	0	1.16±0.48	0	0	3.92*
8	3.708	007785-26-4	(1S)-(-)- $\alpha$ -蒎烯 (1S)-(-)- $\alpha$ -pinene	0	26.67±3.23	0	4.5±0.52	3.12±0.80	62.36**
9	3.767	000111-65-9	正辛烷 n-octane	0	0	3.61±1.85	0.95±0.20	0	12.45*
10	3.943	000095-47-6	1,2-二甲苯 o-xylene	0	4.51±1.37	0	0	0	7.50**
11	4.292	000079-92-5	莰烯 Camphene	0	1.17±0.55	0	0	0	5.41*
12	4.497	000098-82-8	枯烯 (1-methylethyl)-benzene	0	0	0.93±1.65	0.74±0.08	3.18±1.07	1.87
13	4.514	019549-87-2	2,4-二甲基-1-庚烯 2,4-dimethyl-1-heptene	0	0	0.38±0.10	0.69±0.04	0	25.76**
14	4.882	000928-96-1	顺式-3-己烯-1-醇 <i>cis</i> -3-hexen-1-ol	0.66±0.19	0	0	4.74±1.15	0	17.35**
15	5.105	005989-27-5	(R)-(+)柠檬烯 (R)-(+)limonene	7.49±5.88	0	3.87±0.88	0	0	22.97*

续表1 Continued

编号 No.	保留时间 Retention time	CAS号 CAS no.	化合物 Compound	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	金丝垂柳 <i>Salix× aureo-pendula</i>	黄山栾树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	苦楝 <i>Melia azedarach</i>	F
16	5.225	000623-37-0	3-己醇3-hexanol	2.79±2.22	0	0	0	0	2.00
17	5.244	000103-65-1	正丙苯n-propylbenzene	0.42±0.09	2.74±1.15	4.43±1.24	3.33±0.73	4.96±0.64	32.77*
18	5.561	000611-14-3	邻乙基甲苯 2-ethyltoluene	5.65±2.17	0.64±0.46	4.69±1.00	4.3±0.21	2.84±0.59	12.76
19	5.623	000620-14-4	间乙基甲苯 m-ethyltoluene	0	0	0	0	2.65±1.05	4.45*
20	5.676	000617-29-8	邻甲基间羟基二苯胺 2-methyl-3-hexanol	6.21±4.24	0	0	0	0	2.69
21	6.220	000135-98-8	仲丁基苯 (1-methylpropyl)- benzene	0	0	4.99±1.02	0	0	11.43**
22	6.417	000100-42-5	苯乙烯Styrene	1.21±0.11	0	0	0	0	163.20**
23	6.498	000123-35-3	月桂烯Myrcene	0	3.76±0.72	4.06±1.15	0	0	8.51**
24	6.672	000300-57-2	烯丙苯 2-propenyl-benzene	0	0	1.67±0.71	0	0	3.25
25	6.828	000099-87-6	对伞花烃 p-isopropyltoluene	0	3.25±0.88	0	3.63±1.06	2.32±0.67	6.26**
26	6.843	000527-84-4	邻异丙基甲苯 o-cymene	5.16±4.45	1.43±0.30	0	0	3.23±0.78	21.50*
27	7.025	007785-70-8	(1R)-(+)- $\alpha$ -蒎烯 (1R)-(+)- $\alpha$ -pinene	1.39±0.28	0	0	2.29±0.36	1.65±0.46	20.32**
28	7.098	013877-91-3	$\beta$ -罗勒烯 $\beta$ -ocimene	5.06±0.54	0	0	0	0	111.39**
29	7.435	013151-34-3	3-甲基癸烷 3-methyldecane	2.84±1.20	0	0	0	0	7.14**
30	7.435	000589-34-4	3-甲基己烷 3-methyl-hexane	0	0	0	0	1.53±0.10	149.78**
31	7.824	001195-32-0	4-异丙烯基甲苯 4-isopropenyltoluene	3.01±1.70	0	0	0	0	3.95*
32	8.160	000105-05-5	对二乙苯 1,4-diethyl-benzene	0	3.53±0.29	0	0	0	178.86**
33	8.519	000127-91-3	$\beta$ -蒎烯 $\beta$ -pinene	0	2.78±0.59	3.98±1.70	0	0	6.34**
34	8.570	000135-01-3	1,2-二乙苯 1,2-diethyl-benzene	0.88±0.18	0	1.37±0.29	0	2.38±0.74	4.90*
35	9.099	000138-86-3	( $\pm$ )-柠檬烯 ( $\pm$ )-limonene	0	5.28±0.81	0	0	0	49.88**
36	9.671	003681-71-8	顺式-3-己烯基乙酸酯 <i>cis</i> -3-hexenyl acetate	0	0.36±0.12	0	5.54±0.34	3.33±1.19	11.62**
37	9.686	000874-41-9	1,3-二甲基-4-乙基苯 4-ethyl-m-xylene	0	0	3.86±1.58	0	0	4.15*
38	10.465	000099-85-4	$\gamma$ -松油烯 $\gamma$ -terpinene	3.31±2.02	2.32±0.65	0	7.66±0.71	5.91±0.91	9.66**
39	10.688	000496-11-7	茚满Indane	0	0	4.01±0.91	0	3.65±0.92	6.77**
40	10.761	000124-19-6	壬醛Nonanal	3.97±0.26	8.97±1.28	0	11.59±1.36	7.15±2.25	49.06**
41	12.098	003454-07-7	乙基苯 1-ethenyl-4-ethyl- benzene	0	0	2.53±0.42	0	2.21±0.59	8.33**
42	13.345	001686-14-2	$\alpha$ -环氧蒎烷 2,3-epoxypinane	0	0.37±0.08	0	0	0	24.69**
43	13.521	000078-70-6	芳樟醇Linalool	3.33±0.49	11.08±1.05	0	7.92±0.22	3.72±0.66	51.61**
44	13.940	003856-25-5	$\alpha$ -蒎烯 $\alpha$ -pinene	0	0.66±0.28	0	3.82±1.10	8.85±1.01	29.34**
45	14.455	000112-31-2	癸醛Decanal	1.97±1.16	0	0	0	0	3.77*
46	14.911	000119-64-2	1,2,3,4-四氢萘 Tetrahydronaphthalene	0	0	1.59±0.42	0	0	7.66*

续表1 Continued

编号 No.	保留时间 Retention time	CAS号 CAS no.	化合物 Compound	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	金丝垂柳 <i>Salix× aureo- pendula</i>	黄山栾树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	苦楝 <i>Melia azedarach</i>	F
47	15.840	011028-42-5	雪松烯 Cedrene	1.52±0.13	0	0	0	0	168.79**
48	15.846	000469-61-4	(-)- $\alpha$ -雪松烯 (-)- $\alpha$ -cedrene	0.39±0.13	0	0	0	0	12.38**
49	17.382	016491-36-4	(Z)-丁酸-3-己烯酯 <i>cis</i> -3-hexenyl butyrate	0	0	0	3.28±0.11	0	1 025.21**
50	17.973	000827-54-3	2-乙烯萘 2-vinylnaphthalene	2.03±0.44	0	0	0	0	27.28**
51	19.473	001076-56-8	2-异丙基-5-甲基茴香醚 Thymyl methyl ether	1.32±0.15	1.56±0.41	0	0	4.92±2.07	13.22*
52	20.545	000475-20-7	长叶烯 Longifolene	3.29±2.15	0	0	0	0	2.97
53	20.687	022699-70-3	3-乙基苯乙酮 1-(3-ethylphenyl) ethanone	0.81±0.19	0	2.16±0.69	5.10±0.59	1.67±0.19	14.56**
54	21.526	004748-78-1	4-乙基苯甲醛 4-ethylbenzaldehyde	2.03±0.86	0	4.79±0.96	2.96±1.18	0	3.61*
55	21.527	034246-54-3	3-乙基苯甲醛 3-ethylbenzaldehyde	3.20±0.20	0	0	0	0	322.05**
56	22.346	000275-51-4	甘菊蓝 Azulene	0	0	1.23±1.25	0	2.07±0.35	2.99
57	22.441	003290-53-7	2-甲基-3-苯基-1-丙烯 (2-methylallyl) benzene	0	0	0	2.90±0.44	0	45.91**
58	22.496	022927-13-5	2-乙基苯甲醛 2-ethylbenzaldehyde	0	0	2.33±0.75	0	0	3.78*
59	24.817	000782-92-3	4-(乙酰苯基)苯甲烷 4-phenylmethane	0.58±0.23	0	0	0	0	7.91**
60	25.641	000937-30-4	4-乙基苯乙酮 4-ethylacetophenone	3.37±1.78	0	1.80±0.44	0	0	4.11*
61	26.643	000087-44-5	$\beta$ -石竹烯 $\beta$ -caryophyllene	2.61±0.34	3.86±0.65	11.75±2.79	1.38±0.76	6.75±0.81	9.36**
62	27.027	339154-91-5	$\gamma$ -榄香烯 $\gamma$ -elemene	0	2.51±1.31	0	0	0	4.22*
63	27.315	000502-61-4	$\alpha$ -法呢烯 $\alpha$ -farnesene	2.31±0.27	3.40±0.93	13.01±1.32	8.98±2.49	13.15±1.21	14.21**
64	27.721	000089-74-7	2,4-二甲基苯乙酮 2,4-dimethylacetopheno- none	0	0	2.67±0.57	0	2.22±0.41	14.61**
65	28.454	010208-80-7	$\alpha$ -衣兰油烯 $\alpha$ -muurolene	0	3.30±1.21	0	0	0	8.61**
66	28.588	000536-60-7	对异丙基苯甲醇 4-isopropylbenzyl alcohol	0.55±0.23	2.59±0.64	4.66±1.05	2.30±0.38	0	5.35*
67	29.814	004602-84-0	法呢醇 Farnesol	0	1.17±0.74	0	0	0	3.00
68	29.824	077171-55-2	桉油烯醇 Spathulenol	0	2.10±0.71	0	0	0	10.27**
69	29.917	001139-30-6	氧化石竹烯 Caryophyllene oxide	0	0	1.31±0.47	0	0	4.85*
70	30.881	023676-09-7	对乙氧基苯甲酸乙酯 Ethyl 4-etoxybenzoate	0	0	1.36±0.62	1.77±0.54	0	4.06*
71	32.474	001009-61-6	1,4-二乙酰苯 1,4-diacytetylbenzene	1.08±0.64	0	2.43±0.67	0	0	8.55**
72	32.828	000118-60-5	水杨酸辛酯 2-ethylhexyl salicylate	10.67±0.68	0	2.89±1.07	0.94±0.19	1.41±0.19	41.91**
73	35.651	000084-74-2	邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	0	0	0	1.83±0.64	0	8.42**
74	36.434	005466-77-3	对甲氧基肉桂酸辛酯 Octyl 4-methoxycin- namate	0	0	0	0.70±0.12	0	34.15**

续表1 Continued

编号 No.	保留时间 Retention time	CAS号 CAS no.	化合物 Compound	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	金丝垂柳 <i>Salix× aureo-pendula</i>	黄山栾树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	苦楝 <i>Melia azedarach</i>	F
75	36.808	001075-38-3	3-叔丁基甲苯 3-tert-Butyltoluene	0	0	0.49±0.14	0	0	11.31**
		Total		100	100	100	100	100	

表中数据为平均数±标准差。\*和\*\*表示经 Tukey 法检验在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平差异显著。加粗为 GC-EAD 活性物质。Data are mean±SD. \* or \*\* indicates significant difference by Tukey test at  $P<0.05$  or  $P<0.01$  level, respectively. Components in bold are GC-EAD active substances.

### 2.1.2 寄主植物挥发物的主成分分析

按照含量较高且种间有显著差异为标准,最终从柑橘、苦楝、黄山栾树、木麻黄和金丝垂柳5种寄主植物的挥发物中选出17种化合物,分别为 $\gamma$ -松油烯、顺式-3-己烯基乙酸酯、 $\alpha$ -蒎烯、(R)-(+)-柠檬烯、 $\beta$ -石竹烯、 $\alpha$ -法呢烯、水杨酸辛酯、4-乙基苯甲醛、邻异丙基甲苯、 $\beta$ -罗勒烯、壬醛、(±)-柠檬烯、芳樟醇、

1,2-二甲苯、(1S)-(-)- $\alpha$ -蒎烯、仲丁基苯和正丙苯。这17种化合物水平轴对总挥发物的解释率为37.15%,垂直轴对总挥发物的解释率为28.33%(图1),17种化合物被聚为3组,其中金丝垂柳和木麻黄挥发物聚为I组;黄山栾树和苦楝挥发物聚为II组;柑橘挥发物单独聚为III组(图1)。

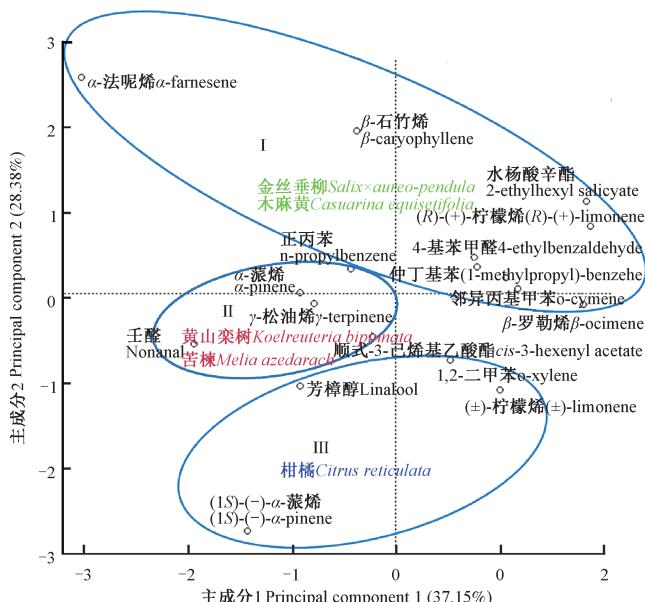


图1 华星天牛5种寄主植物挥发物的主成分分析

Fig. 1 Principal component analysis of volatile organic compounds of five host plants of *Anoplophora chinensis*

### 2.1.3 寄主植物挥发物的聚类分析

聚类分析结果与主成分分析结果一致(图2)。木麻黄和金丝垂柳聚为I组,均含有相对含量较高的(R)-(+)-柠檬烯(3.87%~7.49%)、 $\beta$ -石竹烯(2.61%~11.75%)、 $\alpha$ -法呢烯(2.31%~13.01%)、水杨酸辛酯(2.89%~10.67%)和4-乙基苯甲醛(2.03%~4.79%);在木麻黄中相对含量较高的邻异丙基甲苯(5.16%)、 $\beta$ -罗勒烯(5.06%)、壬醛(3.97%)和芳樟醇(3.33%)在金丝垂柳中不存在;金丝垂柳中萜烯类化合物的相对含量显著高于木麻黄中的( $P<0.05$ ),

木麻黄中醛类、酯类和醇类化合物的相对含量显著高于金丝垂柳中的( $P<0.05$ ,表2)。苦楝和黄山栾树聚为II组,均含有相对含量较高的壬醛(7.15%~11.59%)、 $\gamma$ -松油烯(5.91%~7.66%)、顺式-3-己烯基乙酸酯(3.33%~5.54%)和 $\alpha$ -蒎烯(3.82%~8.85%);苦楝中萜烯类化合物的相对含量显著高于黄山栾树中的( $P<0.05$ ),其中 $\beta$ -石竹烯(6.75%)在苦楝中的相对含量较高;烷烃、酮类和芳香族化合物的相对含量在两者之间差异不显著(表2)。柑橘作为华星天牛喜食植物,单独聚为III组,与其他4种寄主植物的挥发

物种组分有较大的差异;柑橘中萜烯类化合物的相对含量显著高于其他4种寄主植物中的( $P<0.05$ ,表2),其中(1S)-(-)- $\alpha$ -蒎烯的相对含量较高,为26.67%,显著高于其他4种寄主植物中的( $P<0.05$ ),

( $\pm$ )-柠檬烯为柑橘独有的组分,相对含量为5.28%,芳樟醇和1,2-二甲苯在柑橘中的相对含量也较高,分别为11.08%和4.51%(表1)。

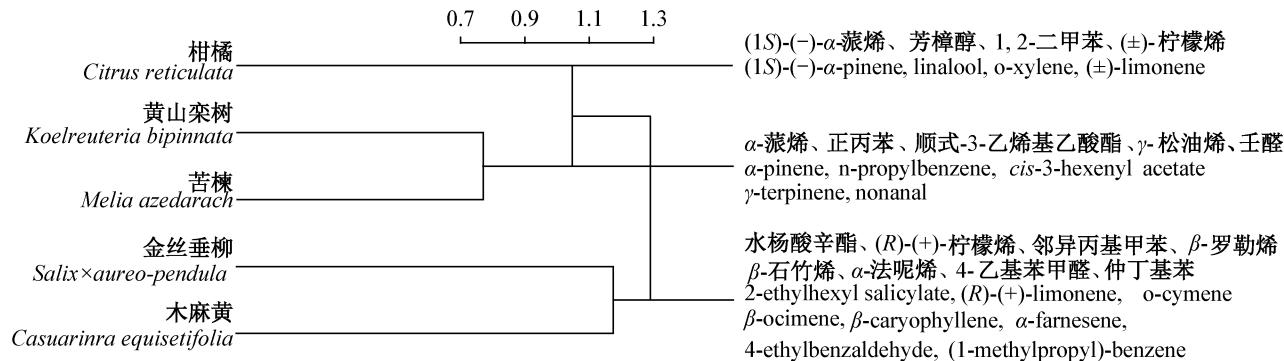


图2 华星天牛5种寄主植物挥发物的聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of volatile organic compounds from five host plants of *Anoplophora chinensis*

表2 华星天牛5种寄主植物枝条挥发物的含量

Table 2 Contents of volatile organic compounds of the twigs from five host plants of *Anoplophora chinensis* %

寄主植物 Host	醛类 Aldehyde compound	萜烯类 Terpene compound	酮类 Ketone compound	酯类 Ester compound	烷烃 Alkane compound	烯烃 Olefin compound	醇类 Alcohol compound	芳香族 Aromatic compound
木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	11.16±0.32 a	30.0±0.25 c	4.94±0.02 ab	10.67±0.01 a	3.72±0.21 a	1.21±0.05 b	13.54±0.04 a	24.76±3.05 ab
柑橘 <i>Citrus reticulata</i>	8.97±0.51 b	55.7±3.02 a	0.00±0.00 c	0.36±0.02 c	3.61±0.71 a	0.00±0.00 c	16.94±0.31 a	14.41±0.82 bc
金丝垂柳 <i>Salix × aureo-pendula</i>	7.12±1.01 b	38.91±1.04 b	6.63±0.01 a	4.25±0.01 b	3.61±0.62 a	1.54±0.08 b	4.66±0.81 b	33.28±4.04 a
黄山栾树 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	14.55±1.21 a	30.13±1.03 c	5.10±0.01 ab	14.06±0.01 a	9.96±0.01 ab	3.59±0.06 a	14.96±2.01 a	7.63±1.01 a
苦楝 <i>Melia azedarach</i>	7.15±0.92 b	42.6±2.01 b	3.89±0.58 b	4.74±0.51 b	5.99±1.01 b	0.00±0.00 c	3.72±0.31 b	31.91±4.03 a

表中数据为平均数±标准差。同列不同小写字母表示经Tukey法检验差异显著( $P<0.05$ )。Data are mean±SD. Different lowercase letters in the same column indicate significant difference by Tukey test ( $P<0.05$ )。

## 2.2 华星天牛对5种寄主植物挥发物的GC-EAD反应

华星天牛对柑橘的挥发物产生了5个电位反应峰,分别由( $\pm$ )-柠檬烯、 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯引起(图3-A);华星天牛对苦楝、黄山栾树和木麻黄的挥发物均产生4个电位反应峰,且均由 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯引起(图3-B~D);华星天牛对金丝垂柳无触角电位反应(图3-E)。

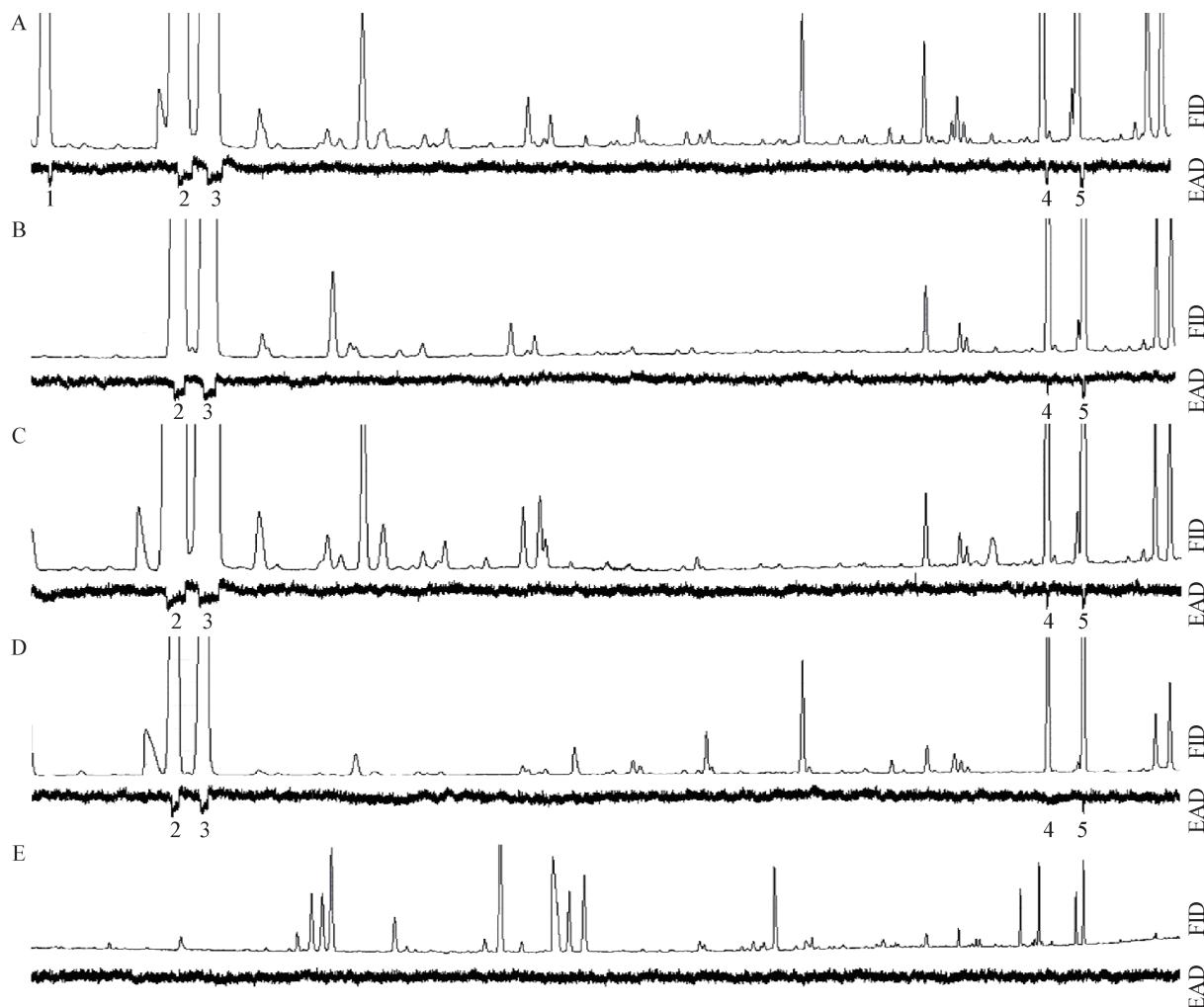
## 2.3 华星天牛对5种寄主植物挥发物的选择偏好性

金丝垂柳挥发物对华星天牛无引诱作用;柑橘、

苦楝、黄山栾树和木麻黄4种寄主植物挥发物对华星天牛有显著的引诱作用( $P<0.05$ 或 $P<0.01$ ),其中苦楝和柑橘2种寄主植物挥发物对华星天牛的引诱作用较强,选择率分别为83.74%和75.81%(图4)。

## 2.4 华星天牛对7种标准化合物配方的行为选择

在7种标准化合物配方中,华星天牛对苦楝混配和柑橘混配有极显著趋性( $P<0.01$ ),选择率分别为77.37%和75.60%,对 $\beta$ -石竹烯和 $\gamma$ -松油烯有显著趋性( $P<0.05$ ),选择率分别为58.82%和61.67%;对其他3种物质无行为反应(图5)。



A~E: 柑橘、苦棟、木麻黃、黃山柰樹、金絲垂柳。1~5:  $(\pm)$ -檸檬烯、 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯、 $\alpha$ -法呢烯。A-E: *Citrus reticulata*, *Melia azedarach*, *Casuarina equisetifolia*, *Koelreuteria bipinnata*, and *Salix×aureo-pendula*. 1-5:  $(\pm)$ -limonene,  $\gamma$ -terpinene, nonanal,  $\beta$ -caryophyllene, and  $\alpha$ -farnesene.

图3 华星天牛对5种寄主植物挥发物的GC-EAD反应

Fig. 3 GC-EAD responses of *Anoplophora chinensis* to volatiles of five host plants

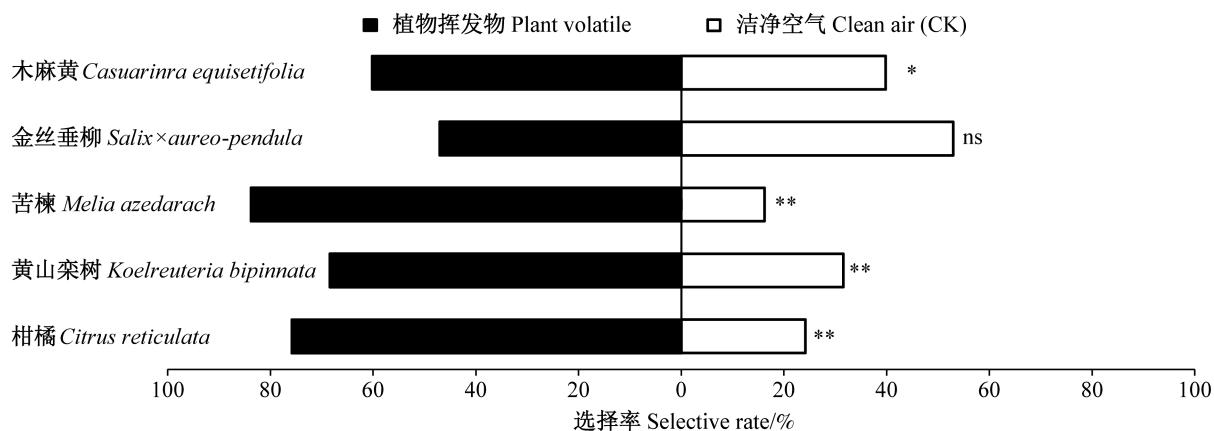


图4 华星天牛对5种寄主植物挥发物的选择率

Fig. 4 Selection rates of *Anoplophora chinensis* to volatiles of five host plants

\*和\*\*表示植物挥发物和对照经卡方检验法检验在P<0.05和P<0.01水平差异显著；ns表示差异不显著。\* or \*\* indicates significant difference between host plant odors and CK by  $\chi^2$  test at P<0.05 or P<0.01 level; ns indicates no significant difference.

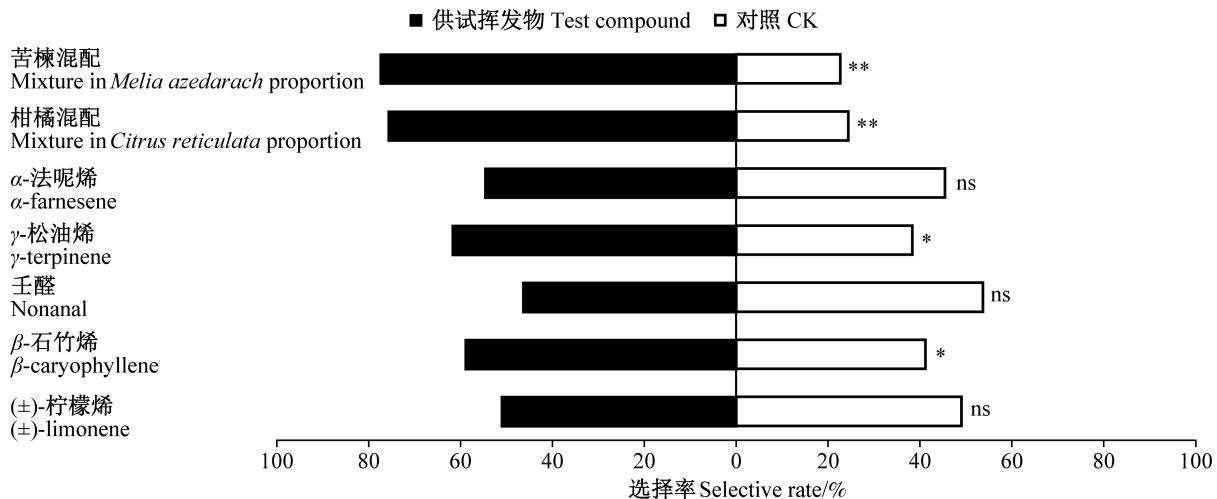


图5 华星天牛对7种标准化合物配方的选择率

Fig. 5 Selection rates of *Anoplophora chinensis* to seven standard compounds

\*和\*\*表示供试挥发物和对照经卡方检验法检验在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平差异显著；ns 表示差异不显著。\* or \*\* indicates significant difference between host plant odors and CK by  $\chi^2$  test at  $P<0.05$  or  $P<0.01$  level; ns indicates no significant difference.

### 3 讨论

昆虫高度敏感的嗅觉系统可检测到寄主挥发性次生代谢物质,进而接近或者避开寄主(Bruce & Pickett, 2011)。本研究结果显示,柑橘、苦棟、黄山柰树和木麻黄这4种寄主植物挥发物的共有组分为 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯,( $\pm$ )-柠檬烯为柑橘挥发物的特异组分,这些共有组分或特异组分均属于萜烯类物质。大多数萜烯类物质对昆虫取食或产卵均有诱集或刺激作用(王景顺等,2015)。Yasui(2009)研究表明,柑橘挥发物能引诱华星天牛雌雄成虫,因为柑橘挥发物与华星天牛雌雄成虫及鞘翅含有的倍半萜物质相同,其主要成分为 $\beta$ -榄香烯、 $\alpha$ -葎草烯、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯,因此在远距离定位或者寻偶时华星天牛雄成虫可能会被柑橘或者虫体本身释放的倍半萜信号吸引。此外,木麻黄对华星天牛的引诱作用较苦棟和柑橘差,这可能与其含有酮类物质3-己酮和4-乙基苯乙酮有关。王紫薇等(2016)发现在木麻黄、白蜡 *Fraxinus chinensis*、垂柳 *Salix babylonica*、苦棟、意大利杨 *Populus eurameviana* ‘I-214’这5种寄主植物中酮类含量较高,并推测木麻黄对光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis* 引诱作用差可能与其挥发物中酮类含量较高有关,与本研究结果一致。金丝垂柳既不包含特异组分( $\pm$ )-柠檬烯,也不包含共有组分 $\gamma$ -松油烯和壬醛,因此,华星天牛对金丝柳树挥发物无行为反应。

本研究结果显示,5种寄主植物挥发物聚为3组,柑橘的主要挥发物单独聚为一支,柑橘中( $1S$ )-(-)- $\alpha$ -蒎烯作为单独存在于黄山柰树中的挥发性物质是云斑天牛 *Batoc-*

$\alpha$ -蒎烯的相对含量显著高于其他4种寄主植物,目前( $1S$ )-(-)- $\alpha$ -蒎烯已被用作云南木蠹象甲 *Pissodes yunnanensis* 和短角幽天牛 *Spondylis buprestoides* 成虫的引诱剂(张真等,2012;泽桑梓等,2013),且对华星天牛雄成虫也有显著的引诱作用(马艳等,2019)。此外,本研究结果显示芳樟醇在柑橘中的相对含量也较高,作为柑橘独有的( $\pm$ )-柠檬烯以及芳香族类化合物1,2-二甲苯,可能是引诱华星天牛的关键物质,推测这2种物质对引诱华星天牛有增效作用;钱明惠等(2018)报道芳樟醇是华星天牛的活性物质,柠檬烯对华星天牛有引诱作用,与本研究结果一致;董子舒(2021)通过GC-MS和电生理反应试验表明挥发物活性物质对二甲苯与眉斑并脊天牛 *Glenea cantor* 行为有关。苦棟和黄山柰树挥发物聚为一支,除共有组分 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯外,正丙苯、 $\alpha$ -蒎烯和顺式-3-己烯基乙酸酯这3种物质占比很大,推测其在引诱华星天牛的过程中可能起着关键作用。如松墨天牛 *Monochamus alternatus* 植物源引诱剂就是以 $\alpha$ -蒎烯为主(朱诚棋等,2017), $\alpha$ -蒎烯对云南切梢小蠹 *Tomicus yunnanensis* 也具有引诱作用(严广等,2021);在桃 *Prunus persica* 挥发物中顺-3-己烯乙酸酯能使华北黑龟金龟甲 *Holotrichia oblita* 触角产生电生理反应(张诺等,2021),顺式-3-己烯基乙酸酯作为性信息素增效剂可显著提高对梨小食心虫 *Grapholita molesta* 的诱捕效果(于海利等,2015),顺-3-己烯醇作为单独存在于黄山柰树中的挥发性物质是云斑天牛 *Batoc-*

*era horsfieldi* 和华星天牛共享的相同植物源引诱成分(张冬勇,2016)。金丝垂柳和木麻黄挥发物中均含有相对含量较高的(*R*)-(+)-柠檬烯、4-乙基苯甲醛和水杨酸辛酯,故聚为一支。王菊英(2011)通过Y型嗅觉仪测定发现(*R*)-(+)-柠檬烯对锈色粒肩天牛 *Apriona swainsoni* 雌成虫有驱避作用;马双等(2011)研究发现4-乙基苯甲醛对苜蓿盲蝽 *Adelphocoris lineolatus* 成虫有极显著的驱避效果;李黄开媚等(2016)研究结果显示4-乙基苯甲醛也可以引起黏虫 *Mythimna separata* 的触角电位反应,且相对值较大;水杨酸甲酯也是蒙古栎 *Quercus mongolica* 挥发物的成分,其对栗山天牛 *Massicus raddei* 有引诱作用(宋慧华,2013)。木麻黄对华星天牛有引诱作用,这得益于木麻黄挥发物中含有一些传统的引诱物质,如 $\beta$ -罗勒烯、邻异丙基甲苯和(*1R*)-(+)- $\alpha$ -蒎烯等。如有研究表明 $\beta$ -罗勒烯对华星天牛有引诱作用(朱宁,2017;钱明惠等,2018;马艳等,2019);温娟等(2015)发现邻异丙基甲苯对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 有趋避作用;范丽清等(2013)研究结果显示光肩星天牛雌雄成虫触角对(*1R*)-(+)- $\alpha$ -蒎烯有明显的电位反应,该物质对光肩星天牛有明显的引诱作用;樊瑞冬等(2021)发现斑鞘豆肖叶甲 *Pagria signata* 成虫触角对(*1R*)-(+)- $\alpha$ -蒎烯有较强的电位反应,该物质对斑鞘豆肖叶甲有明显的驱避作用。

本研究结果显示,金丝垂柳挥发物未引起华星天牛触角发生电位反应,且对华星天牛引诱作用不强。 $\alpha$ -法呢烯和 $\beta$ -石竹烯作为5种寄主植物的共有组分在金丝垂柳挥发物中相对含量最高,故推测低浓度 $\alpha$ -法呢烯和 $\beta$ -石竹烯可能对华星天牛有引诱作用,而高浓度 $\alpha$ -法呢烯和 $\beta$ -石竹烯可能对华星天牛有驱避作用。很多物质在不同浓度时发挥的作用不同,如云南松 *Pinus yunnanensis* 含有较高含量的 $\beta$ -蒎烯和柠檬烯,所以其能抵御云南切梢小蠹的攻击,而当 $\beta$ -蒎烯和柠檬烯浓度较低时对云南切梢小蠹有引诱作用(严广等,2021);己醛是白木香 *Aquilaria sinensis* 嫩叶中的一种微量成分,在高浓度时可以拒避该植物的主要食叶害虫黑纹黄野螟 *Heortia vites-soides*,但在低浓度时,该物质在黄野螟定位白木香过程中起着关键作用,除去微量己醛后黄野螟雌成虫的趋性行为显著降低(Qiao et al., 2012);草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 雌成虫对1  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$  氧化芳樟醇有明显的选择偏好性,而雄成虫对10  $\mu\text{g}/\mu\text{L}$  氧化芳樟醇有明显的排斥行为(钟永志等,2020);当寄主

杨树中松节油的浓度为0.6  $\mu\text{mol}/\mu\text{L}$  时,其对青杨脊虎天牛 *Xylotrechus rusticus* 雌成虫的驱避效果最佳,当浓度为0.12  $\mu\text{mol}/\mu\text{L}$  时,其对雌成虫表现为引诱作用;当寄主杨树中另一种物质水杨醛浓度低于0.95  $\mu\text{mol}/\mu\text{L}$  时,其对青杨脊虎天牛雌成虫无明显的定向作用,但当高于此浓度时则对青杨脊虎天牛雌成虫表现为驱避作用(严善春等,2006)。本研究结果表明( $\pm$ )-柠檬烯、 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯会引起华星天牛触角发生电位反应。刘佳敏(2013)和钱明惠等(2018)研究结果显示柠檬烯和石竹烯是GC-EAD活性物质,与本研究结果一致,但刘佳敏(2013)和钱明惠等(2018)研究表明壬醛、 $\alpha$ -蒎烯、芳樟醇、4-松油烯醇、松油醇、苯并噻唑、 $\beta$ -蒎烯、月桂烯、丁苯和桃金娘烯醇10种成分是引起华星天牛触角发生电位反应的活性物质,本研究的挥发物成分中虽然也存在 $\alpha$ -蒎烯和芳樟醇,却并未引起华星天牛触角产生电位反应,推测一方面是虫源不同,本研究的华星天牛成虫样品采自野外混交林,羽化后接收的气味复杂,可能导致其嗅觉对一些气味不敏感;另一方面可能是挥发物的收集方法不同,钱明惠等(2018)采用植物枝叶浸提方法,而本研究采用动态顶空吸附法,收集方法不同,即使收集的物质相同,但浓度不同,进而引发的反应也不同。

综上所述,在浙江省宁波市慈溪市沿海防护林中华星天牛为害严重,柑橘、黄山栾树、苦楝、木麻黄和金丝垂柳5种寄主植物受害程度不同,这与其挥发物物质不同有关。柑橘、苦楝、黄山栾树和木麻黄4种寄主植物挥发物中能吸引华星天牛的有 $\gamma$ -松油烯、壬醛、 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯,这4种物质在引诱华星天牛的过程中发挥着重要作用;而在室内不吸引华星天牛的寄主金丝垂柳可能不存在共有组分 $\gamma$ -松油烯和壬醛,抑或特有组分 $\beta$ -石竹烯和 $\alpha$ -法呢烯的浓度太高,因此华星天牛在林间虽然也为害金丝垂柳,但与其他4种寄主植物相比受害程度较轻。Hansen et al.(2015)在华星天牛雄成虫顶空挥发物中检测到4-庚氧基丁醇和4-庚氧基丁醛,华星天牛雌成虫对4-庚氧基丁醇有强烈的触角电位反应,利用该物质在野外能够成功诱捕到华星天牛雌成虫。基于此,朱宁(2017)将聚集信息素与苦楝挥发物混合(4-庚氧基丁醇+4-庚氧基丁醛+莰烯+顺-3-己烯-1-醇+罗勒烯+ $\beta$ -石竹烯)制成引诱剂,在野外林间对华星天牛的引诱效果较单体化合物引诱剂好。因此,下一步可以将这些共有的植物挥发物和华星天牛的聚集素进行混配,可以大大提高引诱效果。同

时,除挥发物外,昆虫在近距离接触寄主时,寄主植物的表面结构及营养物质含量也会影响昆虫的寄主选择行为,下一步可从多角度探究华星天牛的寄主选择行为。预先将5种寄主植物挥发物的关键成分和昆虫触角中气味结合蛋白(odorant binding protein, OBP)结合,从分子层面上分析不同OBP与寄主植物挥发物的分子作用方式、作用力类型、结合关键位点及自由结合能等评价参数,找出这些OBP与其结合效果最佳的配体,这将加快活性物质的筛选进程(吴伟伟等,2021)。

### 参考文献 (References)

- Bruce TJA, Pickett JA. 2011. Perception of plant volatile blends by herbivorous insects: finding the right mix. *Phytochemistry*, 72(13): 1605–1611
- Cai SP. 2017. Researches on screening, application of high pathogenicity *Metarhizium anisopliae* against *A. chinensis* larvae and transcriptome analysis of immune response to the infection. PhD thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese) [蔡守平. 2017. 星天牛高致病力绿僵菌菌株筛选、应用及免疫响应的转录组分析. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学]
- Chen LY. 2017. Discussion on the occurrence law and control measures of *Anoplophora citricola*. *South China Agriculture*, 11(29): 24, 28 (in Chinese) [陈联云. 2017. 浅谈柑橘星天牛的发生规律及防治措施. 南方农业, 11(29): 24, 28]
- Dong ZS. 2021. Behavior and mechanism on oviposition selection of *Glenea cantor* Fabricius. PhD thesis. Nanning: Guangxi University (in Chinese) [董子舒. 2021. 眉斑并脊天牛的产卵选择行为机制研究. 博士学位论文. 南宁: 广西大学]
- 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 (in Chinese) [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]
- Fan RD, Zhang YK, Bi JR, Xu W, Zang LS. 2021. Electroantennogram and behavioral responses of *Colposcelis signata* adults to non-host plant volatiles. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(4): 740–748 (in Chinese) [樊瑞冬, 张益恺, 姚嘉瑞, 徐伟, 藏连生. 2021. 斑鞘豆叶甲成虫对非寄主植物挥发物的触角电位和行为反应. 中国生物防治学报, 37(4): 740–748]
- Hansen L, Xu T, Wickham J, Chen Y, Hao DJ, Hanks LM, Millar JG, Teale SA. 2015. Identification of a male-produced pheromone component of the citrus longhorned beetle, *Anoplophora chinensis*. *PLoS ONE*, 10(8): e0134358
- Huang JS, He XY, Ding B, Xu DH, Gao ML. 2003. Study on development of pupa and adult supplement nutrient of *Anoplophora chinensis*. *Scientia Silvae Sinicae*, 39(S1): 148–152 (in Chinese) [黄金水, 何学友, 丁玲, 许东辉, 高美玲. 2003. 星天牛蛹的发育及成虫补充营养特性的研究. 林业科学, 39(S1): 148–152]
- Huang JS, He XY, Ye JX, Huang YQ, Gao ML. 2001. Studies on the control of *Anoplophora chinensis* (F.) by alluring adult with *Melia azedarach* L. *Scientia Silvae Sinicae*, 37(4): 58–64 (in Chinese) [黄金水, 何学友, 叶剑雄, 黄衍庆, 高美玲. 2001. 苦楝引诱防治星天牛研究. 林业科学, 37(4): 58–64]
- Knolhoff LM, Heckel DG. 2014. Behavioral assays for studies of host plant choice and adaptation in herbivorous insects. *Annual Review of Entomology*, 59: 263–278
- Lemmen-Lechelt JK, Wist TJ, Evenden ML. 2018. State-dependent plasticity in response to host-plant volatiles in a long-lived moth, *Caloptilia fraxinella* (Lepidoptera: Gracillariidae). *Journal of Chemical Ecology*, 44(3): 276–287
- Li HKM, Huang YQ, Lei CL. 2016. Behavioral study of *Mythimma separata* (Walker) by active components of plant crude extracts.// Chen WQ. Science and technology innovation of plant protection and precision poverty alleviation in agriculture: Academic Annual Conference of Botanical China Society of Plant Protection in 2016. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, pp. 442–443 (in Chinese) [李开媚, 黄求应, 雷朝亮. 2016. 植物粗提物活性组分对黏虫的行为学研究 //陈万权. 植保科技创新与农业精准扶贫: 中国植物保护学会2016年学术年会论文集. 北京: 中国农业科学技术出版社, pp. 442–443]
- Liu JM. 2013. Studies on the role of *Anoplophora chinensis* (F.) by alluring adult with *Melia azedarach* L. Master thesis. Lin'an: Zhejiang A&F University (in Chinese) [刘佳敏. 2013. 苦楝对星天牛的引诱作用研究. 硕士学位论文. 临安: 浙江农林大学]
- Ma S, Wang SY, Gu SH, Hao ZB, Zhang YJ, Guo YY. 2011. Odorant binding characteristics of chemosensory protein alin-CSP6 in luceine plant bug, *Adelphocoris lineolatus* (Goeze). *Scientia Agricultura Sinica*, 44(14): 2926–2934 (in Chinese) [马双, 王松莹, 谷少华, 郝再彬, 张永军, 郭予元. 2011. 苜蓿盲蝽化学感受蛋白 Alin-CSP6 的气味结合特性. 中国农业科学, 44(14): 2926–2934]
- Ma Y, Shi LY, Zhao Y, Xu HC. 2019. GC-EAD and behavioral responses of *Anoplophora chinensis* (Coleoptera: Cerambycidae) to volatiles released from *Juglans mandshurica* plants after different types of damage. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(3): 530–538 (in Chinese) [马艳, 史黎央, 赵艺, 徐华潮. 2019. 星天牛不同为害状态下山核桃挥发物成分的GC-EAD 和行为反应. 应用昆虫学报, 56(3): 530–538]
- Qian MH, Huang YH, Huang ZH, Fang HP, Li KY, Huang HY, Huang HH. 2018. GC-EAD response of longhorned beetle, *Anoplophora chinensis* to extraction from host plant branches and leaves. *Journal of Environmental Entomology*, 40(3): 690–694 (in Chinese) [钱明惠, 黄咏槐, 黄泽翰, 方海鹏, 李琨渊, 黄华毅, 黄焕华. 2018. 星天牛对寄主植物枝叶浸提物的触角电位反应. 环境昆虫学报, 40(3): 690–694]
- Qiao HL, Lu PF, Chen J, Ma WS, Qin RM, Li XM. 2012. Antennal and behavioural responses of *Heortia vitessoides* females to host plant volatiles of *Aquilaria sinensis*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 143(3): 269–279

- Song HH. 2013. The research of volatile organic compounds from host and non-host of the *Massicus raddei* (Blessig). Master thesis. Changchun: Northeast Normal University (in Chinese) [宋慧华. 2013. 栗山天牛寄主与非寄主挥发物的研究. 硕士学位论文. 长春: 东北师范大学]
- Wang JS, Wu QF, Lu ZF. 2015. Research progress on plant secondary metabolites and insect resistance of forest trees. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 43(8): 4–7 (in Chinese) [王景顺, 吴秋芳, 路志芳. 2015. 植物次生代谢物与林木抗虫性研究进展. 江苏农业科学, 43(8): 4–7]
- Wang JY. 2011. Preliminary studies on host selection mechanism of *Apriona swainsoni* (Hope). Master thesis. Tai'an: Shandong Agricultural University (in Chinese) [王菊英. 2011. 锈色粒肩天牛寄主选择机制初步研究. 硕士学位论文. 泰安: 山东农业大学]
- Wang ZW, Xu HC, Zhang WW, Wang PX. 2016. *Anoplophora glabripennis* host-plant selection with main host-plant volatile chemical component analysis. *Journal of Zhejiang A&F University*, 33(4): 558–563 (in Chinese) [王紫薇, 徐华潮, 张娓娓, 王佩星. 2016. 光肩星天牛对寄主的选择及主要寄主挥发物的化学成分分析. 浙江农林大学学报, 33(4): 558–563]
- Wen J, Zhi JR, Lü ZY, Li SX. 2015. Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* to tomato plants infested with *Tetranychus urticae* and analysis of the volatile compounds of tomato plants. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(4): 968–976 (in Chinese) [温娟, 郅军锐, 吕召云, 李顺欣. 2015. 西花蓟马对二斑叶螨为害后番茄的行为反应及挥发物成分分析. 应用昆虫学报, 52(4): 968–976]
- Wu WW, Qiao HL, Hao EH, Gao CY, Shi J, Lu PF. 2020. Identification and expression patterns of olfactory receptor co-receptor *SnocOrco* in *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae), an invasive insect pest. *Journal of Plant Protection*, 47(5): 1088–1098 (in Chinese) [吴伟伟, 乔海莉, 郝恩华, 高慈元, 石娟, 陆鹏飞. 2020. 入侵害虫松树蜂嗅觉共受体 *SnocOrco* 基因的鉴定及其表达模式分析. 植物保护学报, 47(5): 1088–1098]
- Yan G, Zhang MD, Qian LB, Ze SZ, Yang B, Li ZB. 2021. Electrophysiological and behavioral responses of *Tomicus yunnanensis* to plant volatiles from primarily infected *Pinus yunnanensis* in Yunnan, Southwest China. *Journal of Environmental Entomology*, 43(6): 1389–1397 (in Chinese) [严广, 张梦蝶, 钱路兵, 泽桑梓, 杨斌, 李宗波. 2021. 云南切梢小蠹对初侵害云南松挥发物的电生理和行为反应. 环境昆虫学报, 43(6): 1389–1397]
- 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 tiger longicorn, *Xylotrechus rusticus* (L.) (Coleoptera: Cerambycidae). *Acta Entomologica Sinica*, 49(5): 759–767 (in Chinese) [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]
- Yasui H. 2009. Chemical communication in mate location and recognition in the white-spotted longicorn beetle, *Anoplophora malasiaca* (Coleoptera: Cerambycidae). *Applied Entomology and Zoology*, 44(2): 183–194
- Yu HL, Zhang QW, Xu HL. 2015. (Z)-3-hexenyl acetate synergizes the response of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck) (Lepidoptera: Tortricidae) to female sex pheromone. *Journal of Fruit Science*, 32(3): 469–473 (in Chinese) [于海利, 张青文, 徐环李. 2015. 乙酸叶醇酯对梨小食心虫性信息素的增效作用. 果树学报, 32(3): 469–473]
- Ze ZS, Zhao T, Yan ZL, Zhang XY, Ma HF, Ji M. 2013. Trap *Spondylis buprestoides* (L.) attractants: CN101961007B. 2013-03-13 (in Chinese) [泽桑梓, 赵涛, 袁争亮, 张星耀, 马惠芬, 季梅. 2013. 诱捕短角幽天牛成虫引诱剂: CN101961007B. 2013-03-13]
- Zhang DY. 2016. The damage investigation of *Carya cathayensis* long-horned beetles and study on plant attractant of *Batocera horsfieldi*. Master thesis. Lin'an: Zhejiang Agriculture and Forestry University (in Chinese) [张冬勇. 2016. 山核桃天牛危害调查及其云斑天牛植物源引诱物质研究. 硕士学位论文. 临安: 浙江农林大学]
- Zhang N, Chen L, Xie GL. 2021. Electrophysiological responses of *Holotrichia oblita* (Coleoptera: Melolonthidae) to peach tree volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 64(9): 1112–1119 (in Chinese) [张诺, 陈立, 谢广林. 2021. 华北大黑鳃金龟对桃树挥发物的电生理反应. 昆虫学报, 64(9): 1112–1119]
- Zhang Z, Wang B, Wang HB, Kong XB, Zhang PY. 2012. A *Pissodes yunnanensis* attractant: CN101822246B. 2012-09-26 (in Chinese) [张真, 王斌, 王鸿斌, 孔祥波, 张培毅. 2012. 一种云南木蠹象引诱剂: CN101822246B. 2012-09-26]
- Zhong YZ, Xie MH, Lin LL, Zhang GL, Xu LN, Wang ZY, Zhang JP, Zhang F, Su WH, Chen HL. 2020. Orientational response of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) to linalool oxide. *Plant Protection*, 46(4): 178–180, 222 (in Chinese) [钟永志, 谢明惠, 林璐璐, 张光玲, 徐丽娜, 王振营, 张金平, 张峰, 苏卫华, 陈浩梁. 2020. 草地贪夜蛾对氧化芳樟醇的趋性. 植物保护, 46(4): 178–180, 222]
- Zhu CQ, Chen JY, Ma T, Mou J, Qin WQ, Wen XJ. 2017. Research on release rates of semiochemicals of *Monochamus alternatus*. *Forest Research*, 30(2): 315–321 (in Chinese) [朱诚棋, 陈家颖, 马涛, 牟静, 秦文权, 温秀军. 2017. 松墨天牛信息化合物在不同缓释载体上的释放速率. 林业科学研究, 30(2): 315–321]
- Zhu N. 2017. Behavioral characteristics and attractant study of two species of *Anoplophora*. Master thesis. Lin'an: Zhejiang A&F University (in Chinese) [朱宁. 2017. 两种星天牛的行为特性和引诱剂研究. 硕士学位论文. 临安: 浙江农林大学]

(责任编辑:张俊芳)