

六星黑点豹蠹蛾性信息素活性成分的提取和初步鉴定*

刘红霞^{1**} 荆小院² 郑海霞³ 杨美红¹ 张金桐¹ 朱卫华⁴ 刘金龙^{1***}

(1. 山西农业大学(山西省农业科学院)基础部, 太谷 030801; 2. 山西农业大学(山西省农业科学院)生命科学学院, 太谷 030801; 3. 山西农业大学(山西省农业科学院)农学院, 太谷 030801; 4. 山西省怀仁市农业技术推广中心, 怀仁 035300)

摘要 【目的】初步鉴定六星黑点豹蠹蛾 *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera, Cossidae) 雌蛾性信息素活性成分。【方法】采用正己烷溶剂浸提法提取六星黑点豹蠹蛾性信息素腺体中的化学组分, 利用毛细管气相色谱(GC)和气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术分析性腺提取物, 并运用触角电位技术(EAG)测定提取物及标准化合物的电生理活性。【结果】GC结果显示六星黑点豹蠹蛾性腺体提取物中主要存在7种成分, 其中G组分在加入标准化合物反-2-顺-13-十八碳烯醇-1-乙酸酯(E2,Z13-18:Ac)后, 峰高和峰面积均相应增加。GC-MS分析结果证明G组分为E2,Z13-18:Ac。EAG结果显示7种组分均能引起雄蛾触角电位反应, 其中对E2,Z13-18:Ac的反应值最大。【结论】本研究初步鉴定出E2,Z13-18:Ac是六星黑点豹蠹蛾的性信息素主要组分, 为使用性信息素防治六星黑点豹蠹蛾奠定了基础。

关键词 六星黑点豹蠹蛾; 性信息素; 鉴定; 触角电位

The extraction and identification of active components of the sex pheromones of *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae)

LIU Hong-Xia^{1**} JING Xiao-Yuan² ZHENG Hai-Xia³
YANG Mei-Hong¹ ZHANG Jin-Tong¹ ZHU Wei-Hua⁴ LIU Jin-Long^{1***}

(1. Department of Basic Courses, Shanxi Agriculture University (Shanxi Academy of Agriculture Science), Taigu 030801, China; 2. College of Life Science, Shanxi Agriculture University (Shanxi Academy of Agriculture Science), Taigu 030801, China; 3. College of Agriculture, College of Life Science, Shanxi Agriculture University (Shanxi Academy of Agriculture Science), Taigu 030801, China; 4. Agricultural Technology Extension Service of Huai ren, Huai ren 035300, China)

Abstract 【Objectives】To identify the active components of the sex pheromone of female *Zeuzera leuconotum* Butler moths. 【Methods】Sex pheromones were extracted from the sex glands of female moths with n-hexane and the active components analyzed using gas chromatography (GC) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Electroantennograms (EAG) were used to examine the EAG responses of male antennae to extracts and standard components. 【Results】GC results indicate that there are 7 chemicals in the extract, and that the peak height and area of component G increased after the addition of standard compound E2,Z13-18:Ac. Based on GC-MS data, component G was identified as E2,Z13-18:Ac. The EAG results show that all compounds caused an antennal reaction, and that E2,Z13-18:Ac elicited the strongest EAG activity. 【Conclusion】E2,Z13-18:Ac was identified as the main component of the sex pheromone of *Z. leuconotum*. These results provide a theoretical basis for developing synthetic sex pheromone lures to control this pest.

Key words *Zeuzera leuconotum* Butler; sex pheromone; identification; EAG

*资助项目 Supported projects: 北京市科技计划“影响北京生态安全的重大钻蛀性害虫防控技术与示范”(Z171100001417005); 国家重点研发计划“人工林重大灾害防控关键技术研究”(2018YFD0600200)

**第一作者 First author, E-mail: liuhongxia0311@163.com

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

收稿日期 Received: 2020-05-29; 接受日期 Accepted: 2020-11-05

六星黑点豹蠹蛾 *Zeuzera leuconotum* Butler, 鳞翅目 (Lepidoptera), 木蠹蛾科 (Cossidae), 豹蠹蛾亚科 (Zeuzerinae), 是天津市林木上发生及分布的主要蛀干害虫之一 (刘晓琳等, 2013)。该虫食性极杂、寄主广泛, 主要以幼虫蛀食寄主植物的枝梢, 造成枝梢干枯断折, 严重者导致整株树木死亡 (田秀丽和孙彦辉, 2008)。六星黑点豹蠹蛾的为害不仅影响城市园林和行道的绿化美化效果, 且降低木材的使用价值和果树产量, 造成严重的经济损失 (刘璐等, 2010)。以往对该虫的防治主要是砍伐被害树枝树干、注射化学农药等措施, 但由于六星黑点豹蠹蛾幼虫蛀性极强, 危害范围广、种类多, 且有转移危害现象, 往往达不到预期的防治效果。另一方面, 六星黑点豹蠹蛾主要危害城市行道和公园生活区绿化观赏树木, 砍伐树枝树干不仅破坏景观, 而且损失较大。而施用有毒化学农药既伤害六星黑点豹蠹蛾的天敌又易造成环境污染, 损害人类的健康 (尹鸿刚等, 2009)。因此, 探索和研究高效、无毒、无污染、无公害的防治六星黑点豹蠹蛾新方法和新途径具有重要科学意义和应用前景。

昆虫性信息素具有灵敏度高、选择性强、对天敌无害、可保护环境等优点, 作为直接或者间接的害虫防治手段在国内外已被广泛使用。目前, 全世界已鉴定的昆虫性信息素或类似物达 1 000 多种 (Witzgall *et al.*, 2010), 我国投入使用的性信息素产品有 100 多种 (El-Sayed *et al.*, 2014), 如曹盼盼等 (2016) 使用绿盲蝽 *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) 性诱剂诱捕器了解害虫昼夜动态及季节消长规律, 便于确定最佳防治时期; 高成龙等 (2017) 构建了通过性信息素诱捕成虫以监测林间幼虫口数量的数学模型, 为航空、航天遥感的虫灾监测提供技术支撑。2010 至 2014 年, 我国使用性信息素产品防治梨小食心虫 *Grapholitha molesta* (Busck) 的果树种植面积占全国果树种植面积的三分之二 (Cui and Zhu, 2016)。另外, 美国成功使用性信息素交配干扰技术对鳞翅目害虫棉铃虫 *Pectinophora gossypiella* (Saunders), 舞毒蛾 *Lymantria dispar* (L.), 苹淡褐卷蛾 *Epiphyas postvittana*

和葡萄花翅小卷蛾 *Lobesia botrana* (Denis & Schiffermüller) 进行防控 (Lance *et al.*, 2016); 意大利在过去的 20 年里使用性信息素交配干扰技术有效防控当地苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* (Ioriatti and Lucchi, 2016); 新西兰使用新的性信息素交配干扰产品 “4-PlayTM” (包含苹果蠹蛾, 苹淡褐卷蛾 *Epiphyas postvittana*, 新西兰卷叶蛾 *Planotortrix octo*, 斜纹卷蛾 *Ctenopseustis obliquana* 4 种昆虫性信息素组分) 综合治理害虫, 以降低出口水果的农药残留 (Suckling *et al.*, 2016)。而所有昆虫性信息素产品开发应用的基础是昆虫性信息素化学组分结构的鉴定。本研究以六星黑点豹蠹蛾为研究对象, 通过气相色谱技术 (Gas chromatography, GC) 和气相色谱-质谱联用技术 (Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 测定雌蛾腺体提取物, 并结合触角电位技术 (Electroantennographs, EAG) 测定雌蛾性腺中的活性物质, 初步鉴定其性信息素组分, 为使用性信息素及其相关产品防治该害虫奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

六星黑点豹蠹蛾采自山东省东营市黄河路两旁绿化带白蜡树上, 将被害的枯枝带回养虫室, 绑缚于横挂的铁丝上, 模拟树体状态饲养, 养虫室光周期 L:D=14:10, 光期从 5:30 开始, 19:30 结束, 温度 19-32 °C, 相对湿度 75%-85%, 室内保持自然通风。待其羽化, 鉴别雌雄后分别置于单独的养虫笼 (50 cm×50 cm×60 cm) 内, 保证雌蛾全部为处女蛾, 以 10% 蜂蜜水饲喂。统计日龄, 以成虫羽化后 0-24 h 视为 1 日龄。

1.2 提取物样品的制备

通过对雌蛾腹尖的扫描电镜与组织切片的观察, 得知六星黑点豹蠹蛾性信息素分泌腺位于第 8-9 腹节之间的节间膜上。采用溶剂浸提法提取性信息素, 用手轻轻挤压雌蛾腹部, 待其第 8-9 腹节完全伸出腹尖, 用眼科手术剪快速剪下, 放入 5 mL 的具塞尖底试管中, 加入 0.5 mL 重蒸正己烷, 盖紧瓶塞, 室温下浸泡 1 h 后, 抽取提

取液并转移至样品管中,密封,置于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的冰箱内贮存,备用。

根据六星黑点豹蠹蛾求偶以及性信息素产生和释放的时辰节律,设计在不同时间段提取 2 日龄处女雌蛾性信息素分泌腺。分别于 6:00、10:00、14:00、18:00、22:00、24:00、2:00、4:00 依次选取 2 日龄处女雌蛾 5 头进行腺体提取,同上制备成 $1\text{ FE}/20\text{ }\mu\text{L}$ 的性信息素提取液,置于 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的冰箱内贮存,备用。

1.3 标准化合物和试剂

实验所用标准化合物 E2Z13-18:OH、E2Z13-18:Ac、Z2Z13-18:OH、Z2Z13-18:Ac、Z13-18:OH、Z13-18:Ac、Z7-12:OH、Z8-12:OH、Z7-12:Ac、Z8-12:Ac 均由山西农业大学化学生态研究所实验室合成,化合物经柱层析纯化,GC 分析纯度均达 95%以上;所用化学试剂和有机溶剂购自 Fisher Chemicals (New Jersey, Fair Lawn, USA) 和 Aldrich Chemicals (St. Louis, MO, USA)。有机溶剂使用前进行二次蒸馏,以保证其纯度。

1.4 六星黑点豹蠹蛾性信息素腺体提取物的分析

用毛细管气相色谱仪 (GC) 对各种提取物分别进行化学分离分析。毛细管气相色谱仪为美国 Agilent Technologies 公司生产的 GC-HP 6890N, 配备火焰离子检测器 (Flame ionization detector, FID) 和无分流进样器;两根熔融石英毛细管色谱柱: AL: (HP-1, $50\text{ m}\times 0.22\text{ mm}\times 0.33\text{ }\mu\text{m}$ film, Palo Alto, CA, USA); B: (BP-1, $50\text{ m}\times 0.42\text{ mm}\times 0.33\text{ }\mu\text{m}$, SGE Pty Ltd., Australia)。色谱升温程序: $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min, 然后以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, 恒温 15 min; 进样口和检测器温度设为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; 载气为高纯氮气, 线性流速控制在 46 cm/s 。

用气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 分析性信息素组分的化学结构。气相色谱-质谱联用分析仪为美国 Agilent Technologies 公司生产的 HP7890N-5937N。色谱柱为 DB-5MS 毛细管柱

($30\text{ m}\times 0.25\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$ film, J&W Scientice, Folsom, CA, USA), 手动进样, 进样量 $1\text{ }\mu\text{L}$, 无分流进样。色谱升温程序: $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保持 2 min, 然后以 $4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再以 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持 15 min; 进样口温度设为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$; 载气为高纯氮气, 线性流速控制在 33 cm/s 。质谱电离方式为 EI, 电离能量为 70 eV, 离子源发生器温度为 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, 质量扫描范围为 30-350 amu。

化学组分鉴定是通过 GC-MS 总离子流色谱图, 根据联机的 NIST02 数据库 (version 2.0a, the National Institute of Standards and Technology, USA) 检索并结合质谱图中分子离子峰和碎片离子峰来解析的, 再与相似的标准化合物质谱图比较。

1.5 性信息素提取物及标准化合物的 EAG 分析

取 2-3 日龄的六星黑点豹蠹蛾雄蛾成虫, 用手术剪将其触角从基部剪下, 再用单面刀片切掉尖端, 然后将处理好的触角用导电胶固定在电极上, 插入 EAG 探针内。以 $1\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的滤纸条作为溶剂载体, 正己烷作为对照, 测试时滴加 $10\text{ }\mu\text{L}$ 待测溶液于滤纸条上, 将其塞进巴斯德管内, 插入送气管外侧的小口, 并用脚踏板控制进行刺激, 刺激时间为 0.1 s, 且每两次刺激间至少间隔 60 s。每种样品测试 5 根触角, 每根触角平均测试 15-20 次。EAG 的大小由波形向下的峰的峰值幅度来确定。

2 结果与分析

2.1 六星黑点豹蠹蛾性信息素腺体提取物的 GC-MS 分析

用 GC-MS 分析处女雌蛾性信息素分泌腺提取物 (5 FE), 六星黑点豹蠹蛾性腺体主要存在 7 种成分, 依次分别标示为 A、B、C、D、E、F、G (图 1)。

由质谱检索结果中拟合度较高的分子中可推测: A 组分为 Z8-12:OH 的质谱图都具有分子离子峰 $m/z\ 166$, 即分子量一致, 都有明显的烯烃特征离子峰 $m/z\ 55, 67, 81, 95, 109, 123$,

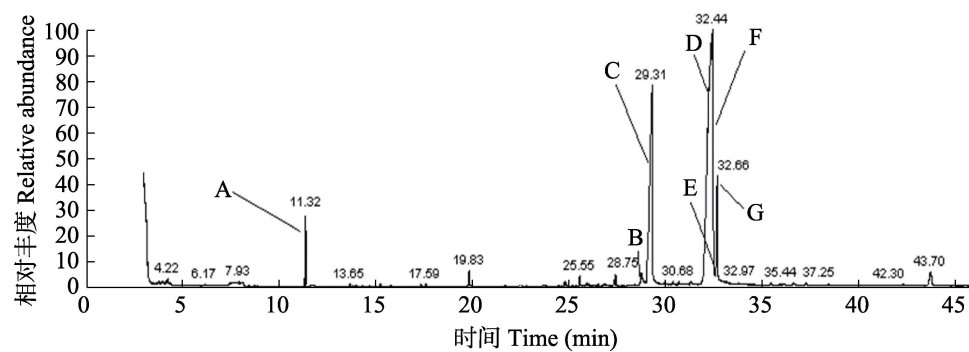


图 1 六星黑点豹蠹蛾雌性信息素腺体提取物 GC-MS 分析的总离子峰图 (TIC)

Fig. 1 Mass spectra with EI (70 eV) showing the TIC of sex pheromone gland extracts of *Zeuzera leuconotum*

A: 顺-8-十二碳烯-1-醇; B: 顺-9-十六碳烯-1-醇-乙酸酯; C: 顺-11-十六碳烯-1-醇-乙酸酯;
D: 顺-13-十八碳烯-1-醇; E: 顺-13-十八碳烯-1-醛; F: 顺-13-十八碳烯-1-醇-乙酸酯;
G: 反-2-顺-13-十八碳烯醇-1-乙酸酯。下图同。
A: Z8-12:OH; B: Z9-16: Ac; C: Z11-16:AC; D: Z13-18: OH; E: Z13-18: ald; F: Z13-18: AC;
G: E2,Z13-18: Ac. The same below.

表 1 合成化合物与性信息提取物质谱数据

Table 1 Mass data of components of sex pheromone-gland extract and standard compound

组分 Component	标准物 Standard	碎片特征离子峰 (相对丰度) [碎片结构] <i>m/z</i> (Relative intensity of major ions) [Assignment]
A	顺-8-十二碳烯-1-醇 Z8-12:OH	176([M+], 11), 166(6), 151(15), 137(21), 123(14.44), 109(38), 95(64), 81(92), 67(100), 54(68), 41(8)
B	顺-9-十六碳烯-1-醇-乙酸酯 Z9-16:Ac	222([M+], 48), 194(3), 166(8), 152(7), 138(16), 124(32), 110(34), 96(100), 82(63), 69(28), 67(60), 61(10), 55(53), 43(81)
C	顺-11-十六碳烯-1-醇-乙酸酯 Z11-16:AC	280([M+], 22), 226(52), 199(6), 164(18), 156(32), 128(18), 114(21), 96(97), 84(68), 72(100) 59(22), 54(37)
D	顺-13-十八碳烯-1-醇 Z13-18:OH	263([M+], 28), 252(26), 124(9), 109(42), 95(26), 82(56), 68(33), 54(42), 41(28), 29(43)
E	顺-13-十八碳烯-1-醛 Z13-18:ald	252([M+], 32), 207(7), 147(2), 96(14), 82(6), 68(6), 57(72), 43(100), 29(32)
F	顺-13-十八碳烯-1-醇-乙酸酯 Z13-18:AC	252([M+], 42), 221(14), 166(17), 96(53), 82(23), 61(67), 54(36), 45(20)
G	反-2-顺-13-十八碳烯醇-1-乙酸酯 E2,Z13-18:Ac	283([M+], 36), 252(46), 206(31), 184(35), 152(8), 127(41), 96(77), 85(34), 68(100), 54(73), 43(21)

138。B 组分和 C 组分可能为 16 碳不饱和醇或脂肪酸, Z9-16:Ac 与 Z11-16:AC。D、E、F 以及 G 组分的质谱图较为相似, 其中 D、E 和 F 组分分别为 Z13-18:OH, Z13-18:Ald 与 Z13-18:AC, G 组分与 E2,Z13-18:Ac 标准化合物均产生相同碎片离子峰 *m/z* 43, 54, 68, 85, 127, 可推测 G 组分为 E2,Z13-18:Ac (表 1)。

2.2 六星黑点豹蠹蛾腺体不同时间提取物的 GC 分析

由图 2 可知, 不同时间的提取物 GC 图谱上

都有 B 组分和 D 组分分离峰出现, 表明 B 组分和 D 组分为雌蛾性腺体本身所含有的物质, 不随雌蛾性行为的时辰节律而变化, 因而可推断 B 组分和 D 组分不是性信息素组分。C 组分和 F 组分在光期 (6:00-18:00) 的提取物 GC 图谱没有明显的分离峰, 但在暗期的各个时间的提取物 GC 图谱上均出现明显的分离峰, 并且随进入暗期时间的增加, 其峰高和峰面积明显增加, 在求偶时 (0:00-2:00) 达最大值, 随后降低, 至 4:00 几乎消失, 这两种组分的变化规律与求偶行为的时辰节律完全一致。由此推测, C 组分和 F 组分

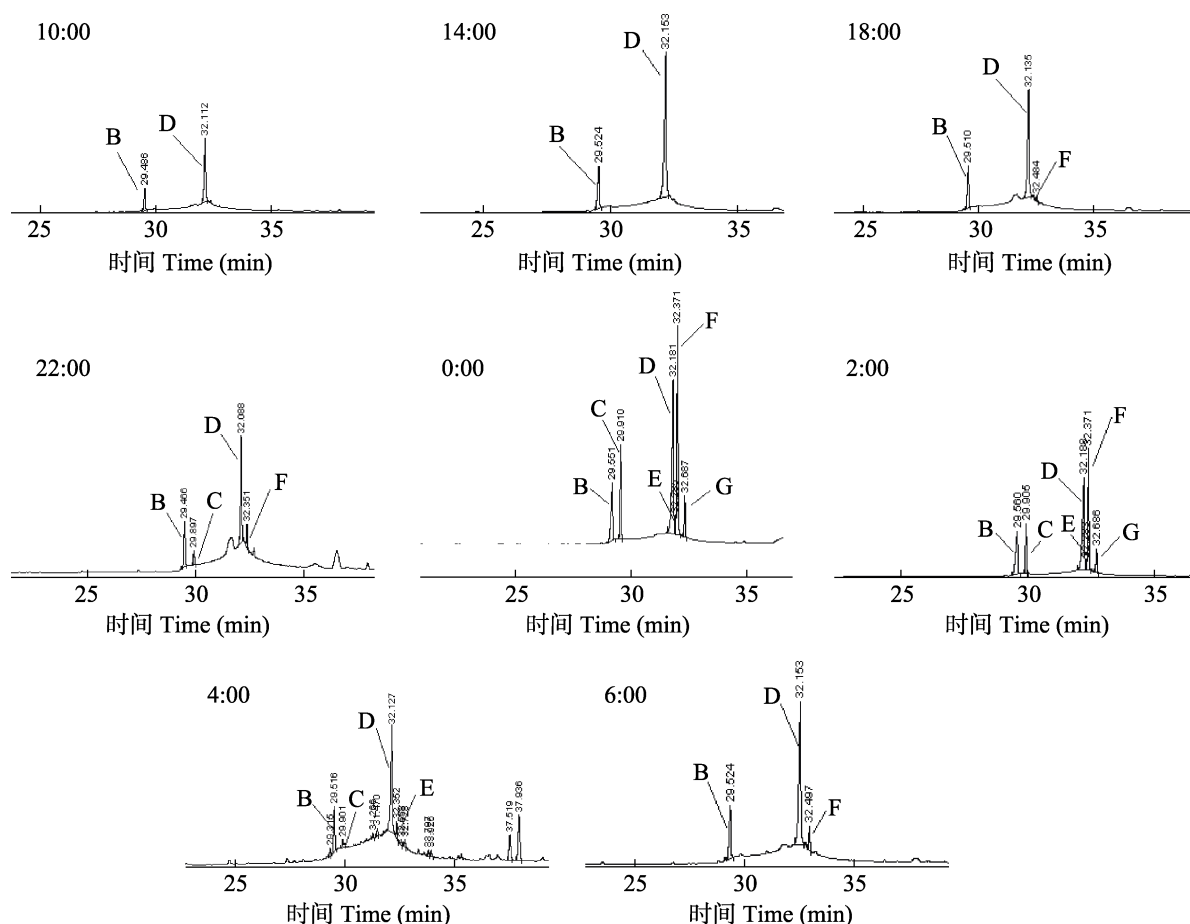


图 2 六星黑点豹蠹蛾 2 日龄处女雌蛾不同时间腺体提取物的气相色谱图

Fig. 2 Gas chromatogram of extracts from 2-day-old virgin females of *Zeuzera leuconotum* at different time periods

是参与雌蛾腺体的性信息素产生和释放行为的生物有机物质,但不是性信息素组分。

在 6:00、10:00、14:00、18:00 时的腺体提取物 GC 图谱上,均没有 E 组分和 G 组分,即在光期(6:00-18:00)的提取物 GC 图谱上,没有 E 组分和 G 组分分离峰;在 22:00 时(进入暗期 2 h)的提取物 GC 图谱上 G 组分出现微小的色谱峰,其峰高低于仪器设定的检测下限;在 0:00-2:00 时的提取物 GC 图谱上,E 组分和 G 组分有明显的分离峰(32.285 min, 32.686 min);4:00 和 6:00 时的提取物 GC 图谱上,E 组分和 G 组分的分离峰较弱。

2.3 标准化合物与提取物的 GC 分析比较

为了进一步鉴定性信息素的化学组分,在相同的升温程序下,用气相色谱比较性信息素提取物中各组分与标准化合物的保留时间。在性信息

素提取液(5 FE, 0.2 μ L)(图 3: B)中加入标准化合物(E2,Z13-18:Ac)(图 3: A)(10 ng/ μ L, 0.2 μ L)。经气相色谱分析显示,加入标准化合物后,组分 A-F 的峰高和峰面积均没有变化,而组分 G 的峰高由原来的 87.4 pA 增加到 198 pA,峰面积由 217.1 pA $\times$ min 增加到 613.3 pA $\times$ min,峰高和峰面积均相应增加(图 3: C)。进一步表明提取物中的 G 组分就是 E2,Z13-18:Ac。

2.4 标准化合物的 EAG 测试结果

由图 4 可以看出,雄蛾触角对各种性信息素类似物的 EAG 反应值不同,均低于腺体提取物的 EAG 值。其中 E2,Z13-18:Ac 的触角电位反应值最大,其次为 Z13-18:Ac, Z13-18:OH, Z2,Z13-18:Ac 和 Z8-12:OH,该 4 种成分的 EAG 反应值处于同一水平, Z9-12:OH 和 Z6-12:OH 的 EAG 反应值最小。

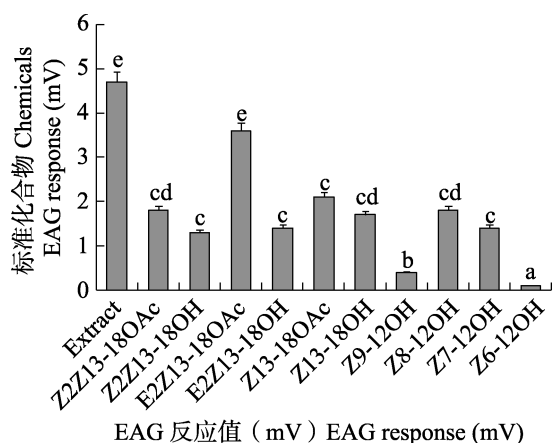


图4 六星黑点豹蠹蛾雄虫触角对系列标准化合物的EAG反应

Fig. 4 EAG responses of male *Zeuzera leuconotum* to different chemicals

柱上标有不同字母表示经 Duncan's 多重比较法检验差异显著 ($P < 0.05$)。

Histograms with different letters indicate significant difference by Duncan's multiple range test ($P < 0.05$).

的3日龄雌蛾的性腺提取物以及空气收集性信息素产生最强的EAG反应(陆鹏飞等, 2007); 沙柳木蠹蛾 *Holcocerus arenicola*、榆木蠹蛾 *Holcocerus vicarius*、芦笋木蠹蛾 *Isoceras sibirica* 羽化后即可释放性信息素, 2日龄信息素的释放量最大(Jing *et al.*, 2010; 杨美红等, 2010; Liu *et al.*, 2013)。这些不同昆虫性信息素释放节律的差异体现了昆虫性行为的特殊模式, 只有在雌蛾性信息素产生及释放高峰期时提取和分离的昆虫性信息素才能达到最佳引诱效果。本文通过分析比较处女雌蛾性腺体在不同时间提取物, 排除了性腺体提取物中一些非性信息素组分, 筛选出2种组分E和G, 该2种组分只在求偶召唤时间段内的腺体提取物中出现, 进一步通过雄蛾触角对标准化合物进行EAG测试, 其中触角电位反应值最大的是E2,Z13-18Ac。由此可见, 六星黑点豹蠹蛾的性信息素组分主要为E2,Z13-18:Ac。

本试验通过GC和GC-MS技术初步分析出六星黑点豹蠹蛾雌蛾腺体提取物中的性信息素组分为E2,Z13-18:Ac和Z8-12:OH, 进一步的EAG测试结果表明六星黑点豹蠹蛾雄蛾触角对E2,Z13-18:Ac的反应值最高, 因而认为E2,Z13-

18:Ac为六星黑点豹蠹蛾性信息素的主要组分。根据有害生物风险性分析, 六星黑点豹蠹蛾在天津地区属于重度危险的林业有害生物, 由于其寄主多为园林绿化树种, 由于苗木调运造成人为扩散速度相当快(田秀丽和孙彦辉, 2008)。昆虫性信息素具有高效、无毒、专一性强, 不伤害天敌和有益生物, 不污染环境以及与其他害虫防治措施联用表现出很好的相容性等特点, 已受到国内外学者的高度重视。如能应用性信息素诱捕雄蛾, 一可极大地减少六星黑点豹蠹蛾的交配率, 达到有效防控的目的; 二可用于进出口林木苗木的检疫, 严格控制带有六星黑点豹蠹蛾的绿化苗木的传入, 从源头上控制其危害。

参考文献 (References)

- Cao PP, Lu CK, Wang XQ, 2016. Field trapping assessment and population dynamics *Apolygus lucorum* in vineyards. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 523–524. [曹盼盼, 路常宽, 王晓勤, 2016. 绿盲蝽性诱剂在葡萄园诱捕效果及种群动态监测. 植物保护学报, 43(3): 523–524.]
- Cui GZ, Zhu JW, 2016. Pheromone-based pest management in China: Past, present, and future prospects. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 557–570.
- EL-Sayed AM, 2014. The pherobase: Database of insect pheromones and semiochemicals. <http://www.pherobase.com>.
- Gao CL, Du KM, Wang SM, Zhang LS, Ma YB, Lu PF, Luo YQ, 2017. Population dynamics of *Eogystia hippophaecolus* in Liaoning province. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 971–977. [高成龙, 杜凯名, 王胜梅, 张连生, 马云波, 陆鹏飞, 骆有庆, 2017. 沙棘木蠹蛾成虫种群发生动态与性诱剂诱捕剂监测技术. 应用昆虫学报, 54(6): 971–977.]
- Ioriatti C, Lucchi A, 2016. Semiochemical strategies for tortricid moth control in apple orchards and vineyards in Italy. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 571–583.
- Jing XY, Zhang JT, Luo YQ, Liu PH, Zong SX, Liu JL, Yang MH, 2010. Circadian rhythms of sexual behavior and pheromone titers of *Holcocerus arenicola* (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(3): 307–313.
- Lance DR, Leonard DS, Mastro VC, Walters ML, 2016. Mating disruption as a suppression tactic in programs targeting regulated lepidopteran pests in US. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 1–16.
- Liu HX, Zhao WM, Yang MH, Liu JL, Zhang JT, 2013. Diel rhythms of sexual behaviour and pheromone titres of *Isoceras*

- sibirica* Alpheraky (Lepidoptera, Cossidae). *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 84(1): 15–26.
- Liu JL, Zong SX, Zhang JT, Jing XY, Liu HX, Lv YL, 2011. Eproductive behavior character and sexual tendency of the adult *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Ecologica Sinica*, 31(17): 4919–4927. [刘金龙, 宗世祥, 张金桐, 荆小院, 刘红霞, 吕玉里, 2011. 六星黑点豹蠹蛾成虫生殖行为特征与性趋向. *生态学报*, 31(17): 4919–4927.]
- Liu L, Liu Q, Liu XC, Li C, Zhang YJ, Ma C, 2010. Studies on section behavior for transferring host of *Zeuzera leuconotum* Butler larvae. *Journal of Tianjin Normal University*, 30(2): 75–79. [刘璐, 刘强, 刘星辰, 李晨, 张玉杰, 马聪, 2010. 六星黑点豹蠹蛾幼虫转移寄主时的选择行为. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 30(2): 75–79.]
- Liu XL, Xu JY, Liu BS, Xu WH, Hu X, Zhang LQ, Bai CY, Gu XS, 2013. Species and damage characteristics of main trunk borers in forest trees of Tianjin city. *Modern Agricultural Science and Technology*, (11): 160–162. [刘晓琳, 许静杨, 刘宝生, 徐维红, 胡霞, 张立强, 白义川, 谷希树, 2013. 天津市林木主要蛀干害虫种类及为害特征. *现代农业科技*, (11): 160–162.]
- Lu PF, Qiao HL, Wang XP, Zhou XM, Wang XQ, Lei CL, 2007. Adult behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of the legume pod borer, *Maruca vitrata* (Fabricius) (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 50(4): 335–342. [陆鹏飞, 乔海莉, 王小平, 周兴苗, 汪细桥, 雷朝亮, 2007. 豆野螟成虫行为学特征及性信息素产生与释放节律. *昆虫学报*, 50(4): 335–342.]
- Suckling DM, El-Sayed AM, Walker JTS, 2016. Regulatory innovation, mating disruption and 4-Play TM in New Zealand. *Journal of Chemical Ecology*, 42(7): 584–589.
- Tian XL, Sun YH, 2008. Risk analysis and management of *Zeuzera leuconolum* Butler. *Tianjin Agriculture Science*, 14(1): 58–60. [田秀丽, 孙彦辉, 2008. 六星黑点豹蠹蛾风险性分析和管理措施. *天津农业科学*, 14(1): 58–60.]
- Witzgall P, Kirsch P, Cork A, 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36(1): 80–100.
- Witzgall P, Kirsch P, Cork A, 2010. Sex pheromones and their impact on pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 36(1): 80–100.
- Yang MH, Zhang JT, Liu JL, Jing XY, Luo YQ, Zong SX, Cao CJ, Li YH, 2010. Reproductive behavior and circadian rhythm of sex pheromone production and release of *Holcocerus vicarius* (Walker) (Lepidoptera: Cossidae). *Acta Entomologica Sinica*, 53(11): 1273–1280. [杨美红, 张金桐, 刘金龙, 荆小院, 骆有庆, 宗世祥, 曹川健, 李月华, 2010. 榆木蠹蛾成虫生殖行为及性信息素产生与释放节律. *昆虫学报*, 53(11): 1273–1280.]
- Yin HG, Gao P, Guo SR, Li Y, Li ZB, Dong X, 2009. Investigate of life history about *Zeuzera leuconolum* Butler Tianjin. *The Journal of Hebei Forest Science and Technology*, (2): 16–17. [尹鸿刚, 高鹏, 郭淑荣, 李燕, 李子博, 董晓, 2009. 天津地区六星黑点豹蠹蛾生活史调查. *河北林业科技*, (2): 16–17.]