

暗黑鳃金龟成虫对梨树挥发物的行为选择

王容燕, 焦文哲, 高波, 李秀花, 张涛, 陈书龙, 马娟*

(河北省农林科学院植物保护研究所, 河北省农业有害生物综合防治工程技术研究中心, 农业农村部华北北部作物有害生物综合治理重点实验室, 河北省作物有害生物综合防治国际科技联合研究中心, 河北保定 071000)

摘要: 为了明确暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* 成虫趋性行为与梨树挥发物的相关性, 解析暗黑鳃金龟成虫嗅觉偏好行为。基于前期暗黑鳃金龟成虫在梨树+核桃+蓖麻+甘薯的生态系统中偏好趋向梨树的研究结果, 利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测定梨树挥发物, 利用气相色谱-触角电位联用仪 (GC-EAD) 测定暗黑鳃金龟雌雄成虫触角对梨树挥发物的电位反应, 采用嗅觉行为装置和罩笼试验分别测定暗黑鳃金龟雌雄成虫对梨树主要挥发物的趋性。试验结果表明, 梨树挥发物的主要成分为(E)- β -罗勒烯、(3E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (DMNT)、乙酸-顺-3-己烯酯、2-乙基己醇、芳樟醇和 α -法尼烯。暗黑鳃金龟雌雄成虫触角对梨树挥发物(E)- β -罗勒烯、DMNT、2-乙基己醇、 α -法尼烯产生强电位反应, 对芳樟醇、乙酸-顺-3-己烯酯产生弱电位反应。雌虫对(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯有显著趋性, 雄虫对(E)- β -罗勒烯、2-乙基己醇和 α -法尼烯有显著趋性。这一研究结果为利用引诱剂有效控制暗黑鳃金龟成虫提供了理论依据。

关键词: 暗黑鳃金龟; 成虫; 梨树; 植物挥发物; 行为选择

中图分类号: Q965

文献标识码: A

Behavioral preference of dark black chafer, *Holotrichia parallela* (Coleoptera: Scarabaeidea) adult to volatiles of pear plant

WANG Rong-Yan, JIAO Wen-Zhe, GAO Bo, LI Xiu-Hua, ZHANG Tao, CHEN Shu-Long, MA Juan* (Plant Protection Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences/IPM Centre of Hebei Province/Key Laboratory of IPM on Crops in Northern Region of North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/International Science and Technology Joint Research Center on IPM of Hebei Province, Baoding 071000, China)

Abstract: In order to clarify the correlation between the behavioral preference of *Holotrichia parallela* adult and plant volatiles, and to analyze the olfactory recognition of the adult. Based on

基金项目: 国家甘薯产业技术体系(CARS-10); 河北省省级科技计划 (21326517D); 河北省农林科学院创新工程项目 (2022KJCXZX-ZBS-5)

作者简介: 王容燕, 女, 1971年生, 硕士, 研究员, 研究方向为病虫害综合防治, E-mail: rongyanw@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 马娟, 女, 博士, 研究员, 研究方向为病虫害综合防治 E-mail: majuan_206@126.com

收稿日期 Received: 2024-03-14; 接受日期 Accepted: 2024-05-22

the result *H. parallela* adults prefer to feeding and mating towards pear in the ecosystem of pear + walnut + castor + sweetpotato in the previous studies. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the main components of volatiles in pear plants. Gas chromatography-electroantennogram (GC-EAD) was used to evaluation the electrophysiological responses of the antennae of *H. parallela* to pear plant volatiles. The preferences of *H. parallela* adults to different volatiles were assessed in the binary-choice tube and artificial cage. The results showed that main compounds from the volatiles in pear plants are (E)- β -ocimene, (3E)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene (DMNT), (Z)-3-hexenyl acetate, 2-ethyl-1-hexanol, linalool and α -farnesene. The GC-EAD experiment showed the relative EAG response values of male and female of *H. parallela* to pear plant volatiles (E)- β -ocimene, DMNT, 2-ethyl-1-hexanol, and α -farnesene were higher while those were lower to Linalool and (Z)-3-hexenyl acetate. The female of *H. parallela* exhibited significant preference tendency to (E)- β -ocimene and α -farnesene while the male showed the significant preference tendency to (E)- β -ocimene, 2-ethyl-1-hexanol and α -farnesene. These research findings provide a theoretical basis for the effective control of *H. parallela* adult using attractants.

Key words: *Holotrichia parallela*; adult; pear; plant volatile; behavioral preference

暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* 属于鞘翅目 Coleoptera 金龟子总科 Scarabaeidea 鳃金龟科 Melolonthidae, 分布广泛, 危害严重。暗黑鳃金龟幼虫是危害花生、甘薯、马铃薯等多种作物的主要地下害虫 (Ju *et al.*, 2017), 危害后造成大而圆且较深的孔洞, 导致果夹、薯块染病腐烂, 严重影响产量。目前生产上对该害虫的防治技术主要是采用土壤施用化学药剂防控其幼虫, 来减轻对作物的危害 (Kunkel *et al.*, 2001), 该技术不能有效针对成虫开展防控, 存在一定的局限性。

植物释放的挥发物影响昆虫的取食、交配和产卵等行为 (Reddy *et al.*, 2004; Knolhoff and Heckel, 2014)。利用植物挥发物开展成虫诱集防治, 是害虫生态治理的有效策略, 尤其对地下害虫的防治, 可以提高防治效率, 减少化学品的应用。目前应用成虫引诱剂防控金龟子最成功的范例是对日本丽金龟 *Popillia japonica* 开发的两性引诱剂, 其组分是香叶醇、丁子香酚、丙酸苯乙酯按 3:7:3 比例配制混合物 (Ladd *et al.*, 1980), 将该混合物与性信息素 japonilure 混合使用, 在该虫的诱杀与监测中得到广泛应用 (Ladd *et al.*, 1981)。由于暗黑鳃金龟成虫偏好选择在花生田产卵, 其幼虫已成为花生田的主要地下害虫, 有学者通过 GC-EAD 和田间诱集试验, 证实花生挥发物 β -石竹烯和己醛以 2:1 的比例混合对于暗黑鳃金

龟雌雄成虫有良好的引诱力 (Zhang *et al.*, 2021)。因此, 根据昆虫的偏好性, 研究植物挥发物成分与昆虫行为的相关性, 对害虫的生态防控意义重大。

暗黑鳃金龟成虫属于后补营养类型的昆虫, 除危害农作物外, 也是林业上的重要害虫。其食性杂, 对取食的树种不仅有广泛性, 且有很强选择性。相关报道表明, 相比于杨树叶, 更偏好于取食榆树叶 (罗益镇和崔景岳, 1995)。为了明确甘薯田中暗黑鳃金龟成虫的行为趋性, 我们在梨树+核桃+蓖麻+甘薯混合种植区开展了多年调查, 结果表明, 相较于甘薯、核桃和蓖麻, 暗黑鳃金龟成虫更偏好取食梨树叶片, 并在其上交配。为了深入研究这一行为偏好与植物挥发物的关系, 本研究测定了梨树叶片挥发物与暗黑鳃金龟成虫触角电位反应、成虫趋性行为的相关性, 以期为暗黑鳃金龟成虫行为调控产品研发提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试昆虫

暗黑鳃金龟成虫采自田间, 饲养于塑料盒中 (68 cm×40 cm), 盒顶罩纱网 (高 50 cm), 盒底铺厚度约 8 cm 的潮湿细土, 每盒 200 头虫, 饲喂新鲜榆树枝叶, 在室内条件下 (26℃) 饲养。用于 GC-EAD 和趋性行为选择测定的暗黑鳃金龟为交配后的成虫。

1.2 暗黑鳃金龟成虫的田间发生调查

2021 年和 2022 年, 在河北省保定郊区 (38.89 °N, 115.65 °E) 调查暗黑鳃金龟成虫在各种植物上的数量。田间种植植物为甘薯 *Ipomoea batatas*、蓖麻 *Ricinus communis*、梨树 *Pyrus bretschneideri*、核桃 *Juglans regia*, 总面积 1 440 m²。其分布示意图见图 1。甘薯为当年 5 月中旬种植, 品种为‘烟薯 25’; 蓖麻为当年 5 月中旬种植; 梨树龄为 3 年, 树高 2.5~3 m; 核桃树龄为 3 年, 树高 2.5~3 m。调查方法: 甘薯每次随机调查 3 个点, 每点面积 4 m², 蓖麻、梨树、核桃每次随机各调查 3 棵。于夜间八点统计各调查点上暗黑鳃金龟成虫数量, 取调查点虫量平均值作为对单一植物趋向的虫量。

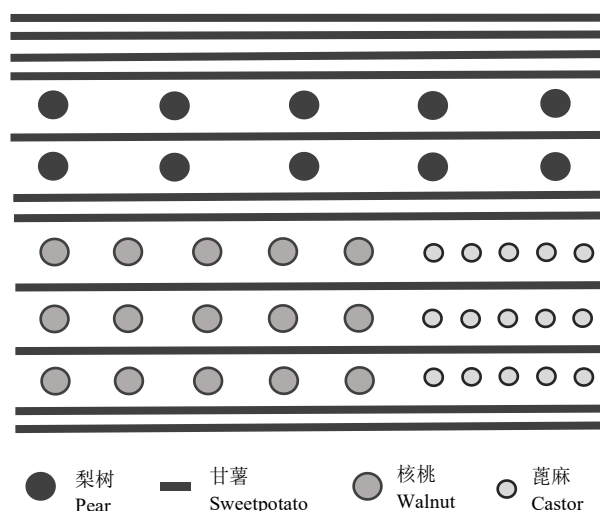


图 1 田间种植植物分布情况示意图

Fig. 1 Distribution map of plants grown in the field

1.3 梨树植物挥发物的采集

采用 QC-1B 型气体采样仪（购自北京市劳动保护科学研究所）和采样管（Chrompack, Φ 0.6 cm \times 16 cm）对梨树枝叶挥发物进行动态顶空收集。每根采样管填充 50 mg 吸附剂 Porapak Q（Waters Co., 美国）。具体操作如下：采集新鲜健康的梨树枝叶 500 g，用脱脂棉擦拭干净后放入到玻璃容器中（H 40 cm, Φ 30 cm），采用顶空取样法进行取样。具体方法：在玻璃容器的一端连接装有吸附剂的采样管，一端连接装有活性炭吸附剂的玻璃管。采样管的另一端连接气体采样仪的进气口。所有连接处均用特氟龙管连接。采样气流为 300 mL/min，采集时间为 24 h。采集后的采样管用 1 mL 色谱纯正己烷洗脱至样品瓶中，置于 -20°C 保存备用。

1.4 植物挥发物鉴定

采用气相色谱-质谱联用仪（GC-MS, Agilent 6890A-5975C, 美国）对梨树挥发物进行鉴定。具体 GC-MS 条件：进样量 1 μL ，载气氮流速为 1.0 mL/min，无分流进样，毛细管柱 DB-wax（30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm ; Agilent, 美国）。程序升温： 50°C （1 min）至 180°C （ $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 2 min），然后至 230°C （ $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 5 min）；进样口和 FID 温度设为 250°C 。MS 工作条件：电离能 70 eV，质量扫描范围 50~400 m/z，离子源与传输线温度为 230°C 。将获得的质谱与 NIST14 数据库中（v2.0）的质谱进行初步鉴定，并与真实标准品进行比较，进一步确认化合物。

1.5 暗黑鳃金龟触角电位反应

采用气相色谱（GC, Shimadzu GC2030, 日本）和触角电位（EAD, Syntech, 德国）联用仪测定暗黑鳃金龟触角对梨树挥发物的电位反应。具体的 GC-EAD 检测条件：GC 条件同 1.4；分离的样品分为相同的两部分，分别进入 FID（flame ionization detection）检测器和 EAD 检测器。载气氮流速为 1.0 mL/min，其余条件同 1.4。EAD 检测系统由 CS-55 刺激控制器、IDAC-4 放大器接口盒和一对电极探头组成。使用 GC-EAD 软件（V4.6, Syntech, Kirchzarten, 德国）记录并分析 FID 和 EAD。

1.6 暗黑鳃金龟成虫的嗅觉行为测定

采用嗅觉行为测定装置测定暗黑鳃金龟雌雄成虫对 EAG 筛选的挥发物成分的选择偏好（Ma *et al.*, 2020）。使用一根长 50 cm，内径 5.0 cm 的玻璃管，中心开一个直径 0.5 cm 的小孔，两侧用纱布封闭，作为嗅觉仪装置。每次测试前，用酒精清洗玻璃管，并在 100°C 下加热 30 min。每次试验结束后，将处理侧和对照侧进行交换，以消除偏差。暗黑鳃金龟成虫的行为生测在成虫出土时间（夜间 8:00-10:00，黑暗条件）进行。每管接入 1 头成虫，将梨树不同活性挥发物分别用石蜡油稀释，最终剂量为 20、100 和 500 μg ，将不同剂量的挥发物加入到滤纸上放入一端，另一端以石蜡油（溶剂）作空白对照，10 min 后记录成虫的选择性。成虫过单侧臂 1/2 处，即为趋性。测定时室温为 26°C \pm 1°C，测定过程用遮光布遮盖嗅觉行为测定装置。

1.7 罩笼条件下暗黑鳃金龟成虫的趋性

采用单对角线法，选取健康的雌雄成虫作为供试虫源，每个处理各 10 头。在纱网笼（55 \times 55 \times 55 cm）底部放入含水量 18%~20%的潮湿细土，厚度 3 cm，中间放入成虫并埋入土中；用 0.1%吐温水稀释待测化合物至 50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ，浸 20 片榆叶 2 min，取出并晾干，放入笼子对角线一端的土表面，另一端放清水对照处理的榆叶。试验于下午 18:00 开始，第 2 天早晨 8:30 调查。若成虫进入任一侧表示对该处理有选择，若滞留在笼内则记录为无选择。两个笼子之间间隔 2 m，每个处理重复 3 次，每次重复将对照和处理标样调换方向。

1.8 数据分析

使用 SPSS 26 进行数据分析。采用卡方检验分析昆虫对气味挥发物及对照间的选择差异。采用 t 检验分析罩笼试验中昆虫的选择率差异。

2 结果与分析

2.1 暗黑鳃金龟成虫的田间发生调查

2021年和2022年6-7月，在梨树+核桃+蓖麻+甘薯的生态系统中，暗黑鳃金龟成虫在夜间8:00左右出土，绝大部分种群趋向于梨树，在梨树上交配、取食的虫量占有所有虫量的91%~97%以上（图2）。在核桃上约占2%~7%，在甘薯和蓖麻上很少发现。暗黑鳃金龟成虫可危害至7月上旬，导致梨叶片受害严重，梨坐果受阻，到7月中旬，梨树出现二次开花。

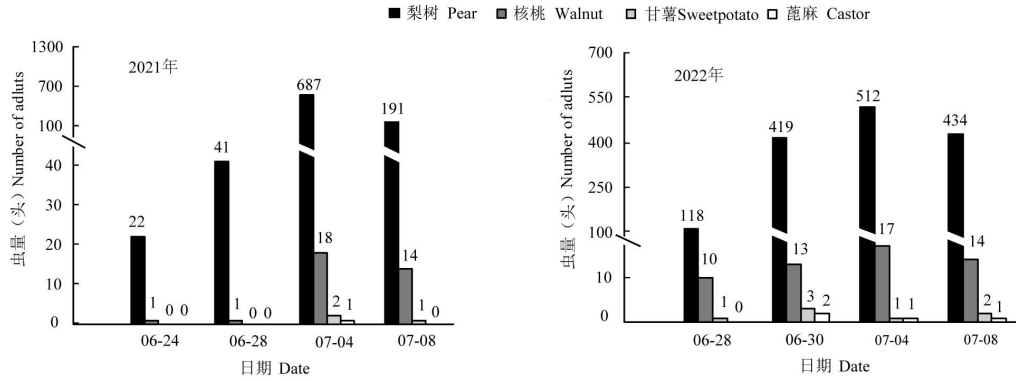


图2 在不同植物上暗黑鳃金龟成虫的数量

Fig. 2 The number of *Holotrichia parallela* adults on different plants

2.2 梨树挥发物鉴定和成虫触角电位反应

经 GC-MS 鉴定，梨树挥发物主要成分包括(E)- β -罗勒烯、(3E)-4,8-二甲基-1,3,7-壬三烯 (DMNT)、乙酸-顺-3-己烯酯、2-乙基己醇、芳樟醇和 α -法尼烯 6 种化合物。

通过 GC-EAD 测定，暗黑鳃金龟雌雄成虫触角对梨树挥发物(E)- β -罗勒烯、DMNT、2-乙基己醇、 α -法尼烯、芳樟醇和乙酸-顺-3-己烯酯均产生电位反应。其中，对(E)- β -罗勒烯、DMNT、2-乙基己醇、 α -法尼烯的触角电位反应强于芳樟醇、乙酸-顺-3-己烯酯的反应（图3）。由于 DMNT 没有纯品，未进行以下行为学试验。

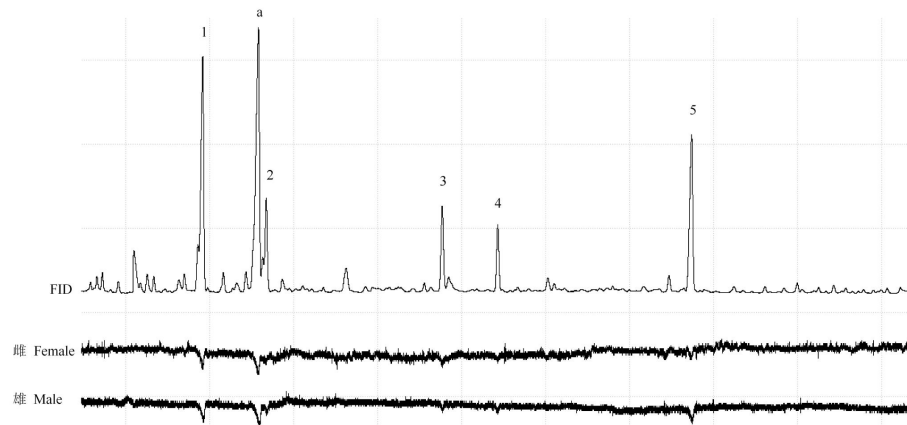


图3 暗黑鳃金龟成虫触角对梨树挥发物的 GC-EAD

Fig. 3 GC-EAD responses of *Holotrichia parallela* adult antennae to pear volatiles

注：1, (E)- β -罗勒烯；a, DMNT；2, 乙酸-顺-3-己烯酯；3, 2-乙基己醇；4, 芳樟醇；5, α -法尼烯。Note: 1, (E)- β -Ocimene; a, (3E)-4,8-dimethyl-1,3,7-nonatriene; 2, (Z)-3-Hexenyl acetate; 3, 2-Ethyl-1-hexanol; 4, Linalool; 5, α -Farnesene.

2.3 暗黑鳃金龟成虫对不同挥发物的行为选择性

采用嗅觉行为测定装置分别测定暗黑鳃金龟成虫对 20、100、500 μg 气味化合物（见表 1）行为选择（图 4）。在 500 μg 剂量下，与对照溶剂石蜡油相比，雌虫对 5 种化合物的趋向性均不显著（ $P > 0.05$ ）；雄虫对(E)- β -罗勒烯的趋性极显著（ $P < 0.01$ ），对 α -法尼烯的趋性显著（ $0.05 > P > 0.01$ ）。在 100 μg 处理中，雌虫对 α -法尼烯的趋性极显著（ $P < 0.01$ ），对(E)- β -罗勒烯的趋向性显著（ $0.05 > P > 0.01$ ）。雄虫对 2-乙基己醇的趋性极显著（ $P < 0.01$ ），对(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯的趋性显著（ $0.05 > P > 0.01$ ）。在 20 μg 处理中，雌虫对 2-乙基己醇的趋向性极显著（ $P < 0.01$ ），对(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯的趋向性显著（ $0.05 > P > 0.01$ ）。雄虫对(E)- β -罗勒烯的趋性极显著（ $P < 0.01$ ），对 α -法尼烯和 2-乙基己醇的趋性显著（ $0.05 > P > 0.01$ ）。

从暗黑鳃金龟成虫对 5 种梨树挥发物嗅觉行为测定结果的总体趋势分析，雌虫对(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯的趋性较为明显，雄虫对(E)- β -罗勒烯、2-乙基己醇和 α -法尼烯的趋性较为明显。

表 1 本研究所用的挥发性化合物

Table 1 Volatile compounds used in this study

编号 No.	挥发性化合物 Volatile	来源 Source	CAS 登记号 CAS no.	纯度 (%) Purity
1	(E)- β -罗勒烯 (E)- β -ocimene	Aladdin*	13877-91-3	≥ 90
2	乙酸-顺-3-己烯酯 (Z)-3-hexenyl acetate	Aladdin	3681-71-8	98
3	2-乙基己醇 2-ethyl-1-hexanol	Aladdin	104-76-7	≥ 99.5
4	芳樟醇 linalool	Aladdin	78-70-6	98
5	α -法尼烯 α -farnesene	Aladdin	502-61-4	98

注：*上海阿拉丁生化科技股份有限公司。Note: Shanghai Aladdin biochemical technology Co., LTD.

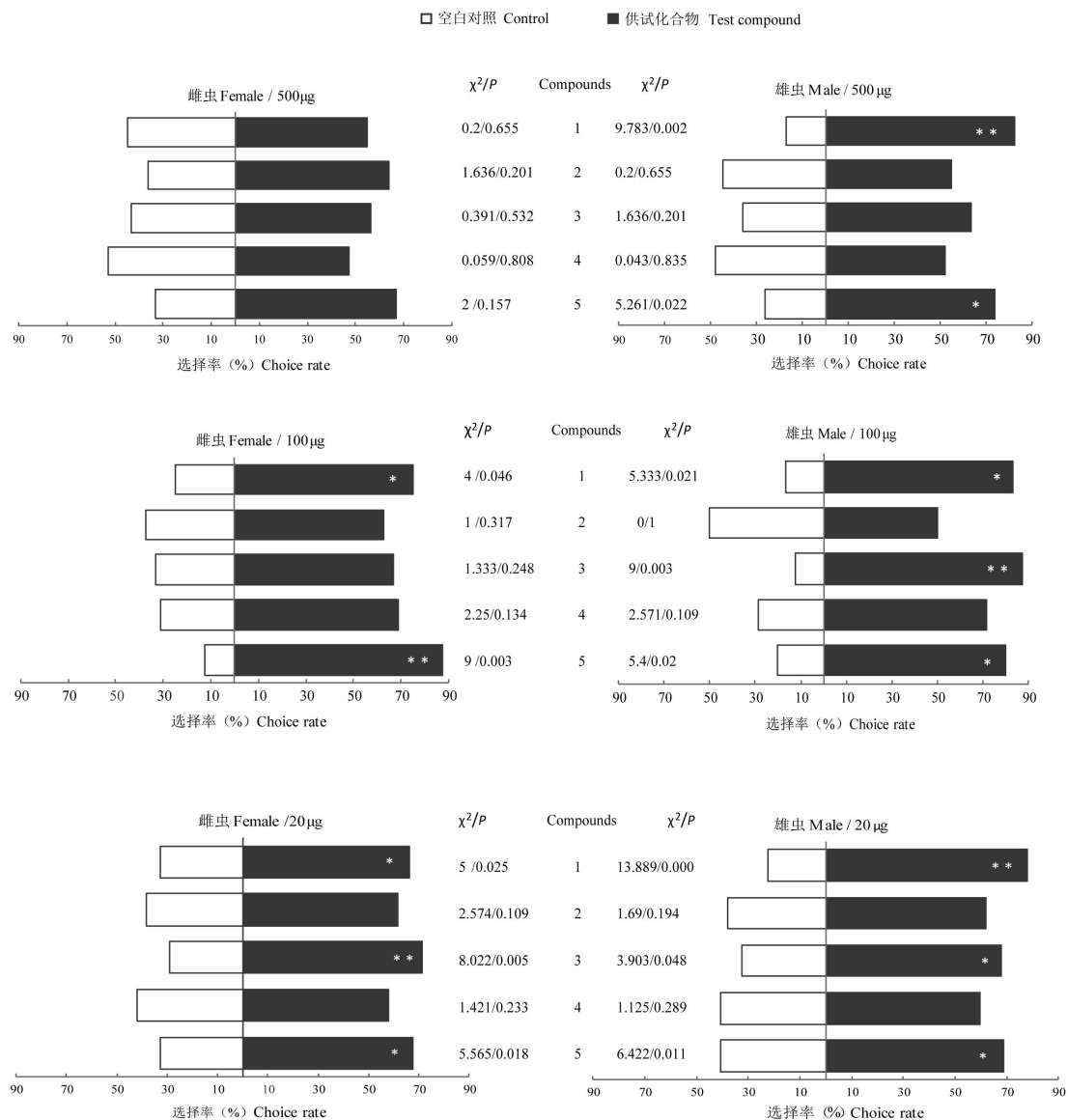


图 4 嗅觉行为装置测定暗黑鳃金龟雌雄成虫对 5 种挥发物的选择性

Fig. 4 Choice of *Holotrichia parallela* females and males to five compounds in the binary-choice tube

注: 1, (E)- β -罗勒烯; 2, 乙酸-顺-3-己烯酯; 3, 2-乙基己醇; 4, 芳樟醇; 5, α -法尼烯。Note: 1, (E)- β -ocimene; 2, (Z)-3-hexenyl acetate; 3, 2-ethyl-1-hexanol; 4, linalool; 5, α -farnesene.

2.4 罩笼测定暗黑鳃金龟成虫对气味化合物选择性

在罩笼条件下暗黑鳃金龟成虫对不同气味化合物 (见表 1) 的选择行为结果见图 5, 暗黑鳃金龟雌虫对(E)- β -罗勒烯有极显著趋性 ($P < 0.01$), 对 α -法尼烯有显著趋性 ($0.01 < P < 0.05$)。雄虫对 2-乙基己醇有极显著趋性 ($P < 0.01$), 对(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯有显著趋性 ($0.01 < P < 0.05$)。与 2.3 嗅觉行为测定结果比较可知, 雌虫对 2-乙基己醇没有显著趋性。另外, 除乙酸-顺-3-己烯酯外, 雄虫对其余 4 个化合物的选择率均高于雌虫。

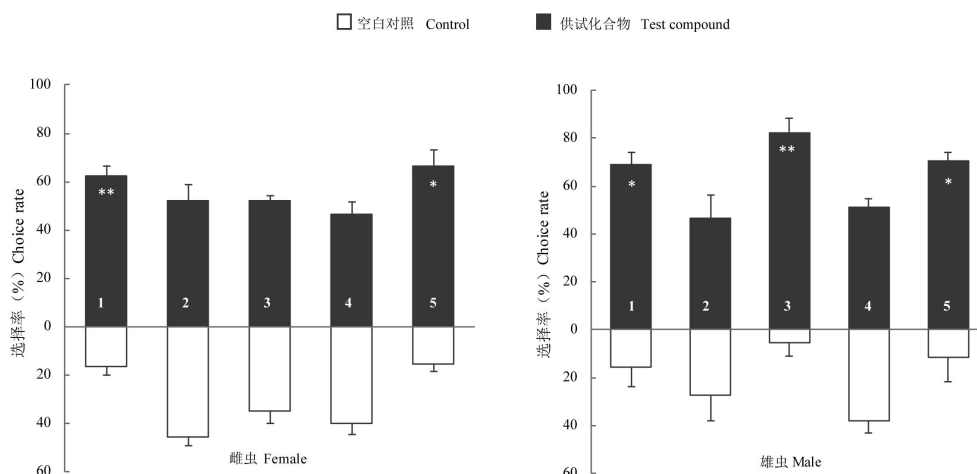


图5 罩笼测定暗黑鳃金龟雌雄对5种气味化合物的选择性

Fig. 5 Choice of *Holotrichia parallela* females and males to five compounds in cage

注: 1, (E)- β -罗勒烯; 2, 乙酸-顺-3-己烯酯; 3, 2-乙基己醇; 4, 芳樟醇; 5, α -法尼烯。Note: 1, (E)- β -Ocimene; 2, (Z)-3-Hexenyl acetate; 3, 2-Ethyl-1-hexanol; 4, Linalool; 5, α -Farnesene.

3 结论与讨论

植物挥发物作为植食性昆虫与植物间的通讯信号, 扮演着防御和吸引的双重角色, 对昆虫的取食、交配和产卵的行为起着重要的调节作用 (Bruce *et al.*, 2005)。深入研究昆虫与植物间的互动, 开发调控昆虫行为的相关物质, 对于害虫防控具有重要意义 (Reddy and Guerrero, 2000; Fetting *et al.*, 2012; Knolhoff and Heckel, 2014)。本研究针对暗黑鳃金龟成虫严重危害梨树这一现象, 对梨树挥发物进行了测定分析, 同时测定了暗黑鳃金龟雌雄成虫对植物挥发物的触角电位反应, 明确了暗黑鳃金龟成虫对梨树挥发物的趋性。这一研究结果为利用引诱剂调控暗黑鳃金龟成虫行为提供了理论依据。

暗黑鳃金龟成虫对不同植物挥发物的触角电位反应已有相关研究报道 (李为争等, 2013; Ju *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021)。李为争等 (2013) 提取了非寄主蓖麻的挥发物, 并证实邻苯二甲酸二丁酯、肉桂醛、2-苯乙醇、苯甲醇、顺-3-己烯-醇可引起暗黑鳃金龟成虫的触角电位反应, 其中苯甲醇激发雌虫和雄虫的 EAG 反应相对值最高。Ju 等 (2017) 测试了暗黑鳃金龟成虫对月桂酸、十二醛、法尼醇、 α -法尼烯、(Z)-3-己烯-1-醇、(E)-2-己烯-1-醇、(Z)-3-乙酸叶醇酯、(E)-2-乙酸叶醇酯、苯甲酸甲酯和苯甲醛等 14 种植物挥发物的触角电位反应, 其中, 乙酸-顺-3-己烯酯、乙酸-反-2-己烯酯可引起雌雄成虫较强的触角电位反应。Zhang 等 (2021) 分析鉴定了 12 种花生挥发性化合物, (Z)- β -罗勒烯、己醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、壬醛、二氢月桂烯醇、芳樟醇、 β -石竹烯、水杨酸甲酯和四种未鉴定化合物均可引起

暗黑鳃金龟成虫的触角电位反应。本研究结果对上述研究进行了有益补充,不但进一步证实了(E)- β -罗勒烯、 α -法尼烯、芳樟醇、乙酸-顺-3-己烯酯可引起暗黑鳃金龟成虫的触角电位反应,还证实了 DMNT、2-乙基己醇也可引起暗黑鳃金龟成虫的触角电位反应,说明引起昆虫触角电位反应的化学物质的多样性。

利用 Y 型嗅觉仪和嗅觉行为装置测试昆虫趋性反应是昆虫行为学研究的主要手段。趋性测定结果表明,来自不同植物的挥发物邻苯二甲酸二正丁酯、L-脯氨酸甲酯、 β -石竹烯、L-异亮氨酸甲酯、(E)-2-乙酸己烯酯、(Z)-3-乙酸己烯酯、己醛、顺-3-己烯-醇和苯乙醛等对暗黑鳃金龟均具有引诱效果(李为争等, 2013; 王玉彬, 2013; Ju *et al.*, 2017; 衣建坤, 2019; Zhang *et al.*, 2021)。本研究进一步发现暗黑鳃金龟雌虫对梨树中的挥发物(E)- β -罗勒烯和 α -法尼烯有显著趋性,雄虫对(E)- β -罗勒烯、2-乙基己醇和 α -法尼烯有显著趋性。说明暗黑鳃金龟的趋性物质具有显著的异质性,这可能源于暗黑鳃金龟在与不同寄主植物长期进化演变而成。

暗黑鳃金龟对不同寄主植物的选择和昆虫所处的植物生态系统有关。在单独的寄主选择中,暗黑鳃金龟相对于花生、甘薯等作物,对蓖麻具有较高的选择性,选择率高达 89%,即使在有寄主植物存在的情况下,对蓖麻的趋向率仍达 60%以上(李为争等, 2010; Zhang *et al.*, 2018)。但本研究发现,在梨树+核桃+蓖麻+甘薯的生态系统中,成虫不选择蓖麻,而直接选择梨树,并可对梨树造成严重危害。因此,在利用昆虫趋性控制害虫技术时,应当在当地典型的农田生态系统中进行测试,以确保技术的可靠性与有效性。

参考文献 (References)

- Bruce TJ, Wadhams LJ, Woodcock CM. Insect host location: a volatile situation [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10 (6): 269-274.
- Fettig CJ, McKelvey SR, Dabney CP, *et al.* Responses of *Dendroctonus brevicomis* (Coleoptera: Curculionidae) in behavioral assays: Implications to development of a semiochemical-based tool for tree protection [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2012, 105: 149-160.
- Ju Q, Guo XQ, Li X, *et al.* Plant volatiles increase sex pheromone attraction of *Holotrichia parallela* (Coleoptera: Scarabaeoidea) [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2017, 43: 236-242.
- Knolhoff LM, Heckel DG. Behavioral assays for studies of host plant choice and adaptation in herbivorous insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2014, 59: 263-278.
- Kunkel BA, Held DW, Potter DA. Lethal and sublethal effects of bendiocarb, halofenozide, and imidacloprid on *Harpalus pennsylvanicus* (Coleoptera: Carabidae) following different modes of exposure in turfgrass [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2001, 94 (1): 60-67.

- Ladd TLJ, Klein MG, Tumlinson JH. Phenethyl propionate + eugenol + geraniol (3:7:3) and japonilure: A highly effective joint lure for Japanese beetles [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1981, 74: 665-667.
- Ladd TLJ, McGovern TP. Japanese beetle: A superior attractant, phenethyl propionate + eugenol + geraniol 3:7:3 [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1980, 73: 689-691.
- Li WZ, Yang L, Shen XW, *et al.* Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (21): 6895-6903. [李为争, 杨雷, 申小卫, 等. 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (21): 6895-6903]
- Li WZ, Yuan YH, Yuan GH, *et al.* Selection and feeding responses of *Holotrichia parallela* adults to the leaves of non-host *Ricinus communis* and several host plants [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2010, 44 (4): 438-442. [李为争, 袁莹华, 原国辉, 等. 暗黑鳃金龟成虫对非寄主蓖麻和几种寄主叶片的选择和取食反应 [J]. *河南农业大学学报*, 2010, 44 (4): 438-442]
- Li YY, Chen L, Wei HY. Host preference and EAG response of 4 scarab beetles to head space volatiles of host and non-host plants [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (6): 1328-1334. [李娅娅, 陈立, 魏洪义. 4 种金龟甲的寄主偏好性及对不同植物挥发物的 EAG 反应 [J]. *环境昆虫学报*, 2018, 40 (6): 1328-1334]
- Luo YZ, Cui JY. Soil entomology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 181-188. [罗益镇, 崔景岳. 土壤昆虫学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 181-188]
- Ma C, Cui S, Bai Q, *et al.* Olfactory co-receptor is involved in host recognition and oviposition in *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. *Insect Molecular Biology*, 2020, 29 (4): 381-390.
- Reddy GVP, Guerrero A. Behavioral responses of the diamond back moth, *Plutella xylostella*, to green leaf volatiles of *Brassica oleracea* subsp. *Capitata* [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48: 6025-6029.
- Reddy GVP, Guerrero A. Interactions of insect pheromones and plant semiochemicals [J]. *Trends in Plant Science*, 2004, 9 (5): 253-261.
- Wang YB. Studies on the Attractancy and Toxicity of Plant Source Chemicals to *Holotrichia parallela* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University Master Thesis, 2013. [王玉彬. 植物源物质对暗黑鳃金龟引诱和杀虫活性的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2013]
- Yi JK. Preference to Plant Volatiles and Comparison between Male and Female Antennal Transcriptomes of *Holotrichia parallela* [D]. Changchun: Jilin University Master's thesis, 2019. [衣建坤. 暗黑鳃金龟对植物挥发物偏好性及雌雄触角转录组差异分析 [D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2019]
- Zhang H, Li W, Luo Q, *et al.* Fatal attraction: *Ricinus communis* provides an attractive but risky mating site for *Holotrichia parallela* beetles [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2018, 44: 965-974.
- Zhang M, Cui Z, Zhang N, *et al.* Electrophysiological and behavioral responses of *Holotrichia parallela* to volatiles from peanut [J]. *Insects*, 2021, 12 (2): 158.