

枸杞红瘿蚊雌虫对三种枸杞的产卵选择性研究*

张雨晴^{1**} 孙浩月^{1,2**} 冯佳康¹ 徐常青¹ 刘 赛¹ 郭 昆¹
魏红爽¹ 徐 荣¹ 乔海莉^{1***} 陆鹏飞^{2***}

(1. 中国医学科学院, 北京协和医学院, 药用植物研究所, 北京 100193;

2. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要 【目的】枸杞红瘿蚊 *Gephyraulus lycantha* Jiao & Kolesik 是枸杞上的一种重要害虫。为探讨其对枸杞属 3 种寄主植物的产卵选择差异, 解析影响其寄主选择的信息化学物质。【方法】采用选择和非选择性测定方法, 观察枸杞红瘿蚊在宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞花蕾上的产卵选择性; 通过 Y 型嗅觉仪, 测定孕卵雌虫对这 3 种枸杞挥发物的行为选择偏好; 运用动态顶空吸附法和气相色谱-质谱联用技术, 分析影响枸杞红瘿蚊产卵选择的 3 种枸杞挥发物的成分差异。【结果】宁夏枸杞为枸杞红瘿蚊最嗜好的寄主植物, 孕卵雌虫对其幼嫩花蕾的产卵选择率和花蕾中的落卵量显著高于中华枸杞和黑果枸杞 ($P<0.05$)。无论是与空白对照相比, 还是 3 种枸杞挥发物相互比较, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞挥发物均具有显著的嗅觉选择偏好 ($P<0.05$)。3 种枸杞挥发物的种类和释放量存在一定差异, 宁夏枸杞与中华枸杞挥发物的组分较为相似, 均含有较高比例的酯类物质, 而酚类化合物是中华枸杞的特有种类; 黑果枸杞中的酯类物质含量很低, 但酮类物质的含量极高。【结论】3 种寄主植物中宁夏枸杞是枸杞红瘿蚊最嗜好的寄主植物, 不同枸杞花蕾挥发物中的特异性物质可能会引起枸杞红瘿蚊的选择行为差异。

关键词 枸杞红瘿蚊; 宁夏枸杞; 中华枸杞; 黑果枸杞; 植物挥发物; 寄主选择

Oviposition preferences of *Gephyraulus lycantha* (Diptera: Cecidomyiidae) females with respect to three *Lycium* spp. host plants

ZHANG Yu-Qing^{1**} SUN Hao-Yue^{1,2**} FENG Jia-Kang¹ XU Chang-Qing¹
LIU Sai¹ GUO Kun¹ WEI Hong-Shuang¹ XU Rong¹ QIAO Hai-Li^{1***} LU Peng-Fei^{2***}

(1. Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Science and Peking Union Medical College,

Beijing 100193, China; 2. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract 【Objectives】To investigate the oviposition preferences of gall midge, *Gephyraulus lycantha* Jiao & Kolesik (Diptera: Cecidomyiidae), females with respect to three different *Lycium* spp. host plants, and thereby clarify the effect of semiochemicals on host selection. 【Methods】Oviposition preferences for three host plants, *L. barbarum*, *L. chinense* and *L. ruthenicum*, were determined in both choice and no-choice experiments. The preference of gravid females for specific volatiles emitted from these three different host plant species was measured in a Y-tube olfactometer under laboratory conditions. Dynamic headspace collection and gas chromatography-mass spectrometry were used to analyze differences in the composition of volatiles emitted from the three different host plant species. 【Results】*L. barbarum* was the preferred host species with a significantly ($P<0.05$) higher oviposition selection rate and number of eggs laid on the young flower buds of this species than on *L. chinense* or *L. ruthenicum*. The results of Y-tube olfactory experiments showed that females also significantly ($P<0.05$) preferred volatiles from bud-bearing branches of *L. barbarum* to those of the other two species. There

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划 (2022YFC3501502); 国家自然科学基金 (81774015); 中国医学科学院医学与健康科技创新工程项目 (CIFMS 2021-I2M-1-031)

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: zhangyuqing6122023@163.com; haoyuesun2022@163.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors, E-mail: qhl193314@sina.com; lpengfei224@126.com

收稿日期 Received: 2023-01-12; 接受日期 Accepted: 2023-03-01

were significant differences in the volatiles emitted from healthy flower buds of the three *Lycium* species. Volatile components of *L. barbarum* and *L. chinense* were relatively similar in that both contain a higher proportion of esters, whereas *L. ruthenicum* volatiles were low in esters and high in ketones. [Conclusion] *G. lycantha* significantly preferred ovipositing on *L. barbarum* to *L. chinense* or *L. ruthenicum*. Differences in the volatiles emitted from flower buds of *L. barbarum* might be responsible for this preference.

Key words *Gephyraulus lycantha*; *Lycium barbarum*; *Lycium chinense*; *Lycium ruthenicum*; plant volatiles; host selection

植食性昆虫是通过感受不同种类植物释放的挥发性物质来判断对植物的适宜性, 寄主植物释放的挥发性信号物质在昆虫远程定位过程中起着重要作用。在自然界中, 植物挥发物会因其种类、生长阶段等因素的不同, 形成其独特化学指纹图谱, 而昆虫则通过嗅觉识别这些化学指纹图谱的差异, 来进行产卵前定位和搜寻 (Karageorgi *et al.*, 2017; Silva-Soares *et al.*, 2017; Billeter and Wolfner, 2018)。例如, 部分柑橘属 *Citrus* 植物释放的挥发性物质会吸引达摩凤蝶 *Papilio demoleus* 抱卵雌虫远程着落, 并刺激其产卵行为 (汪永乾, 2022)。顾亚欣等 (2022) 从日本女贞 *Ligustrum japonicum* 中提取的有机挥发物苯乙醛和 2-苯乙醇等对菜粉蝶 *Pieris rapae* 有较强烈的引诱作用, 驱使成虫对其产生选择和取食行为。十字花科植物挥发物中的异硫氰酸类会吸引寡食性害虫小菜蛾 *Plutella xylostella* 成虫进行远程寄主定位 (管维康, 2020)。

枸杞红瘿蚊 (又名枸杞花桥瘿蚊) *Gephyraulus lycantha* Jiao & Kolesik 属双翅目 Diptera 瘿蚊科 Cecidomyiidae, 桥瘿蚊属 *Gephyraulus* (Jiao *et al.*, 2020), 广泛分布于我国宁夏、新疆、内蒙古和甘肃等枸杞主要种植区, 是枸杞生产中的重要成灾害虫之一。该虫主要以成虫产卵于枸杞的幼嫩花蕾顶端, 待幼虫孵化后向下移动取食花蕾子房, 致使花蕾畸形膨大形成“灯笼状”虫瘿, 导致枸杞不能正常开花结果, 有“枸杞癌症”之称 (刘美珍等, 1987; 李锋等, 2006; 李建领等, 2015)。

枸杞红瘿蚊是典型的专食性致瘿昆虫, 已知寄主仅为枸杞属 *Lycium* 的 3 个主栽树种, 即宁夏枸杞 *L. barbarum*、中华枸杞 *L. chinense* 和黑果枸杞 *L. ruthenicum*。枸杞红瘿蚊对宁夏枸杞的

危害最严重, 研究也最深入, 在宁夏、甘肃、青海、新疆等宁夏枸杞主产区的危害率近 80% 以上 (徐常青等, 2014), 对中华枸杞和黑果枸杞的危害仅有零星报道 (张倩, 2015; 郝转, 2017), 但其危害程度较宁夏枸杞轻微, 分布区域也较少。其中, 本课题组前期调查发现, 中华枸杞仅在河北巨鹿地区有被枸杞红瘿蚊危害的现象; 黑果枸杞在其主要种植区, 除西藏外都有受到枸杞红瘿蚊的危害 (数据未发表)。而对于具有相同分布区域的枸杞属的这 3 个主栽树种, 枸杞红瘿蚊产卵时是否会对不同寄主树种做出不同选择? 不同寄主树种挥发物又是如何影响枸杞红瘿蚊进行产卵选择? 迄今尚知之甚少。

鉴于此, 本研究拟采用室内模拟自由选择方法, 测定枸杞红瘿蚊对宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞的产卵选择性, 通过 Y 型嗅觉仪测定其对 3 种枸杞挥发物的行为选择偏好, 并利用动态顶空吸附法与气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 技术, 分析 3 种枸杞树种挥发物的成分和差异, 以期阐明枸杞红瘿蚊对枸杞属不同寄主树种的产卵选择差异和影响因素, 进一步筛选对枸杞红瘿蚊具有不同适合度的寄主树种, 科学地筛选枸杞属抗虫树种, 为枸杞红瘿蚊的绿色安全防控提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫: 于宁夏回族自治区中宁县枸杞种植基地 (37°48'N, 105°71'E) 采集枸杞红瘿蚊成熟虫瘿带回室内, 装入带有沙土的玻璃瓶 (高 8 cm, 直径 2 cm) 中, 供虫瘿内的老熟幼虫自然离瘿并入土化蛹, 在人工气候箱 (PRX-450D, 宁波赛福实验仪器有限公司) 内饲养至成虫羽

化, 条件为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $60\% \pm 5\% \text{ RH}$, $L:D=16:8$ 。初羽化的成虫雌雄配对饲养在玻璃缸(高 30 cm, 直径 10 cm)中, 选择已交尾的雌虫用于行为实验。供试雌虫仅用一次, 实验前从未接触过任何寄主植物气味源的刺激(张凡等, 2020)。

供试植物: 试验所用宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞采自中国医学科学院药用植物研究所试验地($40^\circ 20' \text{ N}$, $116^\circ 16' \text{ E}$), 树龄均为 2 年。试验期间未施用任何化学农药。试验前约 30-60 min, 分别剪取带有幼嫩花蕾的 3 种枸杞健康枝条, 带回室内用于测试。

1.2 方法

1.2.1 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的产卵选择 采用选择和非选择测定方法, 观察枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞幼嫩花蕾的产卵选择性。测试条件为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, $30\% \pm 5\% \text{ RH}$, $L:D=16:8$ 。

选择性产卵: 将各自带有 10 个幼嫩花蕾的宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞健康枝条分别插入 3 个注入清水的玻璃瓶(直径 3 cm, 高 5 cm)内进行保湿, 然后将 3 个玻璃瓶置于同一养虫笼($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)中, 呈三角形随机摆放, 选择 30 头已交尾的枸杞红瘿蚊孕卵雌虫接种于养虫笼。于放虫的第 2 天起, 每天定时观察养虫笼内雌虫的产卵情况。待供试雌虫全部死亡后, 取出 3 种枸杞枝条上的花蕾进行解剖, 观察并记录花蕾内的卵粒数, 有卵的花蕾记录为有选择, 统计枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对枸杞花蕾的产卵选择率和花蕾的平均含卵量。试验重复 3 次。产卵选择率($\%$) = 单寄主植物的花蕾含卵总量/3 个寄主的总含卵量 $\times 100$; 平均含卵量 = 含卵总量/花蕾总数。

非选择性产卵: 将各自带有 15 个幼嫩花蕾的宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞健康枝条分别插入 3 个注入清水的玻璃瓶(直径 3 cm, 高 5 cm)内进行保湿, 然后将 3 个玻璃瓶分别置于 3 个大小相同的养虫笼($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)中, 选择 30 头已交尾的枸杞红瘿蚊孕卵雌虫分别接种于 3 个养虫笼。于放虫的第 2 天起, 每天定时观察养虫笼内雌虫的产卵情况。待供试雌虫全部死

亡后, 取出 3 种枸杞枝条上的花蕾进行解剖, 观察并记录花蕾内的卵粒数, 有卵的花蕾记录为有选择, 统计枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对枸杞花蕾的产卵选择率和花蕾的平均含卵量。试验重复 3 次。产卵选择率($\%$) = 单寄主植物的花蕾含卵总量/3 个寄主的总含卵量 $\times 100$; 平均含卵量 = 含卵总量/花蕾总数。

1.2.2 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞挥发物的行为选择偏好 采用 Y 型嗅觉仪测定枸杞红瘿蚊对宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞挥发物的行为反应。

供试味源: 宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞带有幼嫩花蕾的健康枝条。

Y 型嗅觉仪: 由 Y 型玻璃管、味源瓶、活性炭过滤瓶、蒸馏水加湿瓶、大气采样仪(QC-1 B 型, 北京市劳动保护科学研究所)和 Teflon 管连接组成。试验时, 由大气采样仪将空气泵入, 依次经过活性炭过滤瓶、蒸馏水加湿瓶, 以 100 mL/min 的流量进入味源瓶后, 通过 Y 型玻璃管的两臂, 吹向主臂内的待试昆虫。

测定方法: 试验前, 将待测的枸杞红瘿蚊孕卵雌虫置于 Y 型嗅觉仪所在室内, 适应 30 min 以上, 然后单头雌虫放入 Y 型玻璃管的主臂, 适应 2 min 后开始计时, 观察雌虫的逆风飞行行为。若每头雌虫越过某一侧臂 5 cm 的位置并保持 1 min 以上者, 记录为选择该气味源; 若 10 min 后待测雌虫仍不做出选择, 则记为无选择。每种气味源测试 20 头雌虫。每头雌虫只测试一次, 每测试 5 次交换一次味源瓶的位置, 避免方向差异的影响。测试时间为 9:00-16:00, 温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $30\% \pm 5\% \text{ RH}$, 光照强度为 240 lx。

1.2.3 3 种枸杞挥发物的收集 采用动态顶空吸附法收集宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞挥发物。

于晴天早上 8:00-9:00, 采集宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞带幼嫩花蕾的健康枝条, 放入洁净的玻璃味源瓶中。用大气采样仪将味源瓶中原有的空气抽成真空状态, 再将新鲜的空气经过活性炭、蒸馏水, 将洁净而潮湿的空气泵入收集系统中。30 min 后将装有 50 mg 吸附剂(Porapak Q)的吸附管连接到采集系统中, 开始循环采气。采集气流为 350 mL/min, 连续采集 8 h。采集完毕后, 用 400 μL 色谱纯重蒸正己烷淋溶洗脱。洗

脱后的样品置于 -20℃ 冰箱中保存备用。每种植物收集设 3 次重复。

1.2.4 3 种枸杞挥发物的成分分析 采用气相色谱-质谱联用仪 GC-MS (美国 Agilent 公司, GC 7890B/MS 5977A) 分析宁夏枸杞、中华枸杞、黑果枸杞挥发物的成分。

GC 条件: 色谱柱为 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, 美国 Agilent 公司)。载气为氦气, 流量 1.0 mL/min。进样口温度 250℃, 进样量 2 μL, 不分流进样。起始柱温为 50℃, 保持 1 min, 以 3℃/min 速度升温至 120℃, 不保持, 再以 10℃/min 速度升温至 240℃, 保持 10 min。

MS 条件: 检测器温度为 250℃, EI 电离源, 离子源温度 230℃, 离子能量 70 eV, 四级杆温度为 150℃; 扫描范围为 45-500 amu, 传输线温度 250℃。

1.3 数据分析

实验数据采用 SPSS 26 软件进行统计分析。采用单因素方差分析 (One-way ANOVA, LSD) 分析枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞、中华枸杞及黑果枸杞的产卵选择率和单个花蕾的平均含卵量, 在分析前均对数据进行了 $\log(x+1)$ 转换, 使数据符合方差齐性; Y 型嗅觉仪生测中, 采用卡方检验法分析不同枸杞挥发物对枸杞红瘿蚊

雌虫引诱和驱避的差异性 (郭钰等, 2012; 马艳等, 2018; 李彩虹等, 2022); 通过 NIST 11 质谱库检索, 使用 MSD ChemStation 数据分析软件 (Agilent Technologies Inc., Santa Clara, CA, USA) 鉴定和分析 3 种枸杞挥发物成分, 采用峰面积归一化法确定枸杞挥发物各成分的相对含量, 并对挥发物成分进行系统聚类分析。

2 结果与分析

2.1 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的产卵选择性

无论是选择性还是非选择试验, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞的幼嫩花蕾均有产卵行为, 但产卵选择的偏好程度存在差异。

2.1.1 选择性产卵 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫在选择性接虫试验中, 可以自由选择寄主植物进行产卵。解剖花蕾发现, 雌虫对 3 种枸杞幼嫩花蕾的产卵选择趋性存在差异 (图 1)。

从产卵选择率来看, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫显著趋向在宁夏枸杞花蕾上产卵, 产卵选择率占比 (84.00%) 显著高于中华枸杞 ($F=24.285$, $P<0.05$) 和黑果枸杞 ($F=24.285$, $P<0.05$); 对中华枸杞和黑果枸杞花蕾的产卵选择率较低, 分别为 11% 和 5.00%, 二者之间不存在显著性差异

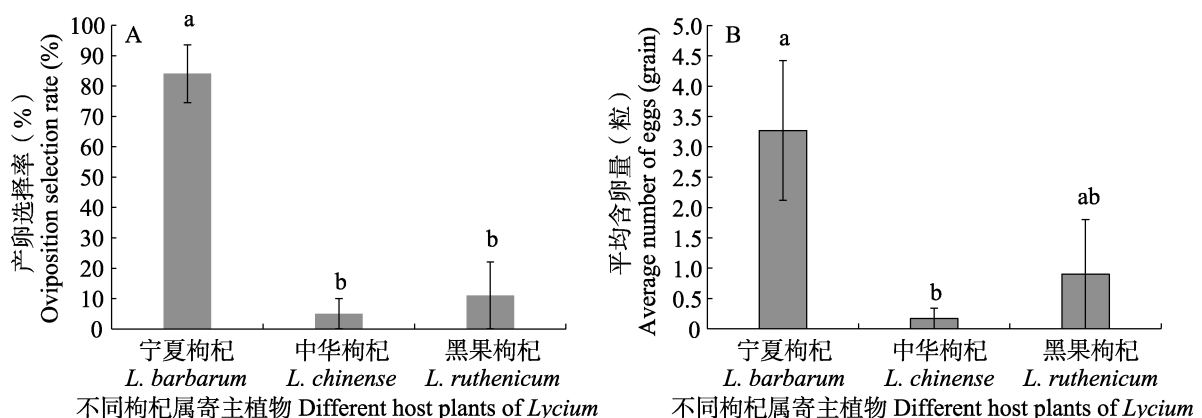


图 1 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的选择性产卵

Fig. 1 Selective oviposition of different host plants by *Gephyraulus lycantha*

A. 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的产卵选择率; B. 3 种枸杞花蕾上的平均含卵量。

A. Oviposition selection rate of different host plants of *Lycium* by *G. lycantha*.

B. Average number of eggs in different host plants of *Lycium*.

柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, 卡方检验法)。图 2 同。

Different letters above bars indicate significant differences ($P<0.05$, χ^2 test). The same as Fig. 2.

($F=24.285$, $P=0.650$) (图 1: A)。

从平均含卵量来看, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫在宁夏枸杞花蕾上的产卵量显著高于中华枸杞 ($F=3.682$, $P<0.05$), 高于黑果枸杞但不存在显著性差异 ($F=3.682$, $P=0.095$)。其中, 宁夏枸杞花蕾的平均含卵量最高, 单个花蕾中平均有 3

粒卵; 而中华枸杞和黑果枸杞花蕾的平均含卵量均不足 1 粒, 且二者之间不存在显著性差异 ($F=3.682$, $P=0.562$) (图 1: B)。

2.1.2 非选择性产卵 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫在非选择接虫试验中, 对 3 种枸杞的产卵选择率和花蕾的平均含卵量都有差异 (图 2)。

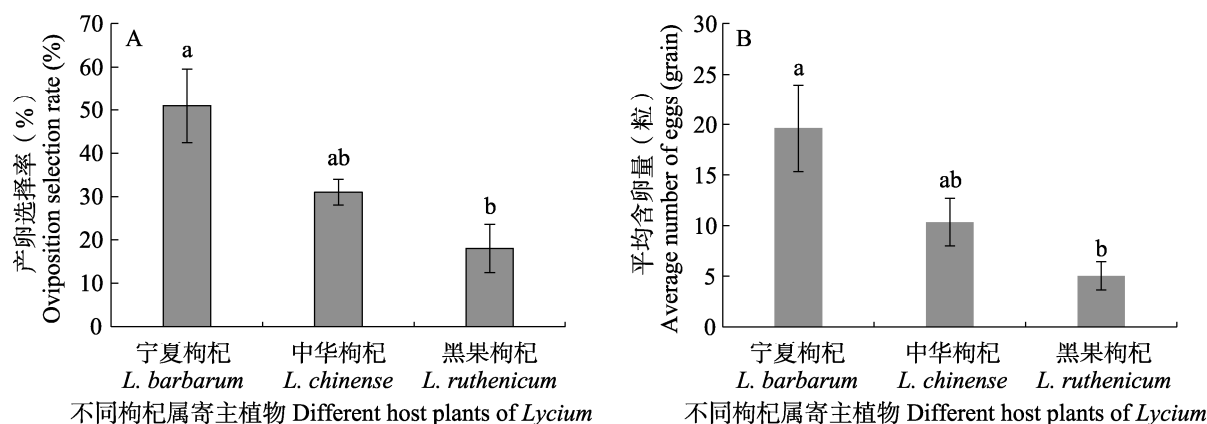


图 2 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的非选择性产卵

Fig. 2 Non-selective oviposition of different host plants by *Gephyraulus lycantha*

A. 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞的产卵选择率; B. 3 种枸杞花蕾上的平均含卵量。

A. Oviposition selection rate of different host plants of *Lycium* by *G. lycantha*.

B. Average number of eggs in different host plants of *Lycium*.

从产卵选择率来看, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞花蕾的产卵选择率最高 (51.00%), 对中华枸杞花蕾的产卵选择率次之 (31.00%), 对黑果枸杞花蕾的选择率最低 (18.00%)。其中, 枸杞红瘿蚊对宁夏枸杞的产卵选择率显著高于黑果枸杞 ($F=7.336$, $P<0.05$), 与中华枸杞之间没有显著差异性 ($F=7.336$, $P=0.061$), 而对中华枸杞与黑果枸杞之间的产卵选择率也不存在显著差异 ($F=3.984$, $P=0.153$) (图 2: A)。

从平均含卵量来看, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫在宁夏枸杞花蕾上的产卵量显著高于黑果枸杞 ($F=3.984$, $P<0.05$), 与中华枸杞之间没有显著差异 ($F=3.984$, $P=0.285$)。其中, 宁夏枸杞单个花蕾的平均含卵量最高, 为 20 粒; 中华枸杞单个花蕾的平均含卵量为 10 粒, 黑果枸杞单个花蕾的平均含卵量仅为 5 粒, 且二者之间不存在显著性差异 ($F=3.984$, $P=0.153$) (图 2: B)。

2.2 枸杞红瘿蚊对 3 种枸杞挥发物的行为反应

在行为生测中, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对 3 种

枸杞挥发物的选择率存在差异 (图 3)。

与空白对照相比, 当以宁夏枸杞作为气味源时, 供试雌虫在进入 Y 型玻璃管主臂后行为表现活跃, 并显著趋向于宁夏枸杞 ($P<0.05$), 选择率达 78%; 当以中华枸杞作为气味源时, 供试雌虫对中华枸杞的选择率较空白对照低, 但二者之间不存在显著差异性 ($P>0.05$); 当以黑果枸杞作为气味源时, 供试雌虫更趋向于空白对照, 而对于黑果枸杞的选择率极低, 且与空白对照相比差异达极显著水平 ($P<0.01$)。

3 种枸杞作为气味源相互比较时, 宁夏枸杞对供试雌虫的吸引力显著高于黑果枸杞 ($P<0.05$), 且与中华枸杞达到极显著差异水平 ($P<0.01$); 当中华枸杞和黑果枸杞同时存在时, 供试雌虫更趋向于选择黑果枸杞, 对中华枸杞的选择率极低, 二者之间差异达到极显著水平 ($P<0.01$)。

2.3 3 种枸杞挥发物的化学成分分析

根据 GC-MS 分析结果显示, 宁夏枸杞、中

华枸杞和黑果枸杞释放的挥发物组成成分之间 合物，包括醇类、醛类、酮类、酯类、酚类、烷
存在一定差异，其种类丰富，共鉴定出 70 种化 烃类、烯类和苯类 8 个类群（表 1）。

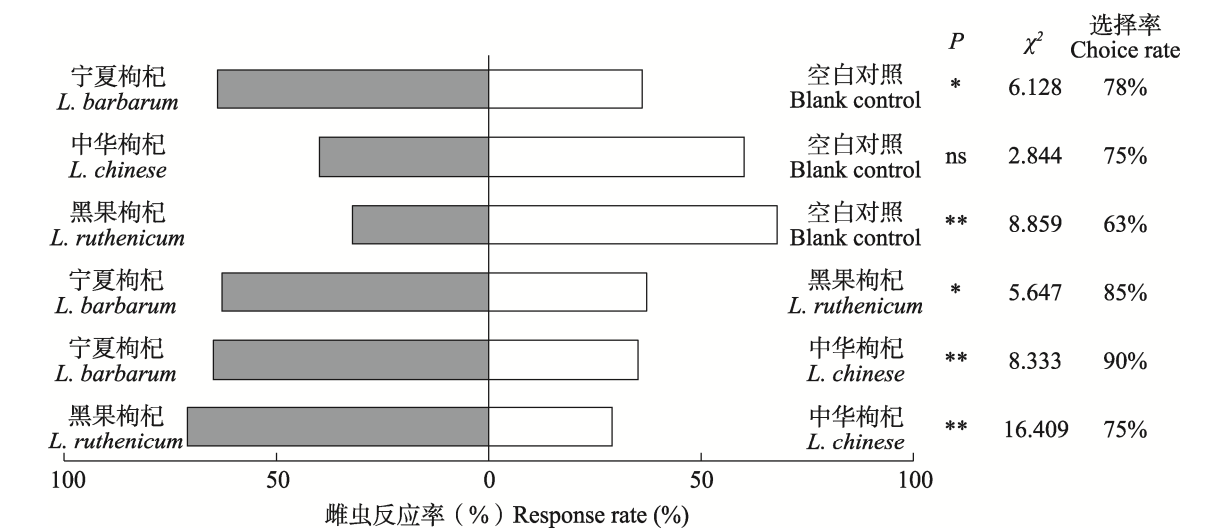


图 3 枸杞红瘿蚊对不同气味源的行为反应
Fig. 3 Olfactory responses of *Gephyraulius lycantha* females to different odors

ns 表示无显著差异；*表示差异显著（ $P<0.05$ ，卡方检验法）；**表示差异极显著（ $P<0.01$ ，卡方检验法）。
ns indicates no significant difference; * indicates significant differences at 0.05 levels by χ^2 test; ** indicates significant differences at 0.01 levels by χ^2 test.

表 1 3 种枸杞挥发物的组成及其相对含量
Table 1 Composition and relative contents of volatile compounds emitted from the branch with flower buds of *Lycium barbarum*, *Lycium chinense* and *Lycium ruthenicum*

化合物 Compound	相对含量（%）Relative content (%)		
	宁夏枸杞 <i>L. barbarum</i>	中华枸杞 <i>L. chinense</i>	黑果枸杞 <i>L. ruthenicum</i>
醇类 Alcohols			
正庚醇 1-Heptanol	—	0.25±0.02 Aa	0.20±0.03 Aa
1-辛烯-3-醇 oct-1-en-3-ol	—	0.60±0.07	—
2-乙基-1-己醇 2-ethyl-1-Hexanol	7.41±0.12 Aa	4.01±0.13 Aa	7.16±0.16 Aa
3-环己基-1-丙醇 3-Cyclohexyl-1-propanol	0.62±0.23	—	—
4-异丙基苯甲醇 p-Cymen-7-ol	1.68±0.21 Bc	7.62±0.94 Aa	3.78±0.34 Bb
α-松油醇(S)-(-)-α-terpineol	—	0.18±0.01	—
2-己基癸醇 1-Decanol,2-hexyl	2.12±0.27 Aa	3.30±0.50 Aa	—
醛类 Aldehydes			
苯甲醛 Benzaldehyde	1.01±0.33 Aa	0.42±0.06 Aa	1.09±0.30 Aa
庚醛 Heptanal	2.66±0.46 Aa	2.03±0.18 Aa	1.24±0.48 Ab
4-乙基苯甲醛 4-ethyl-Benzaldehyde	—	0.34±0.02 Aa	0.85±0.09 Aa
壬醛 Nonanal	4.55±0.61 Aa	4.35±0.85 Aa	4.25±0.13 Aa
癸醛 Decanal	2.38±0.20 Aa	1.36±0.06 Bb	1.87±0.14 ABa
酮类 Ketones			
苯乙酮 Acetophenone	1.16±0.04 Aa	0.83±0.04 Aa	0.91±0.03 Aa

续表 1 (Table 1 continued)

化合物 Compound	相对含量 (%) Relative content (%)		
	宁夏枸杞 <i>L. barbarum</i>	中华枸杞 <i>L. chinense</i>	黑果枸杞 <i>L. ruthenicum</i>
甲基庚烯酮 Sulcatone	0.75±0.11 Aa	0.94±0.07 Aa	0.74±0.09 Aa
5-乙烯基-5-甲基四氢呋喃-2-酮 2(3H)-Furanone, 5-ethenyldihydro-5-methyl-	—	—	0.48±0.03
6-甲基-2-庚酮 6-methyl-2-Heptanone	1.19±0.33 Aa	0.79±0.12 Aa	—
1,5,6,7-四氢-4H-吡咯-4-酮 1,5,6,7-Tetrahydro-4H-Indol-4-One	—	—	6.17±0.67
1,13-三甲基环己烯酮 Lsophorone	—	—	0.82±0.04
对乙基苯乙酮 p-ethylacetophenone	3.56±0.18 Bb	6.49±0.93 Bb	32.31±2.23 Aa
酯类 Esters			
乙酸异戊酯 Isoamyl acetate	—	—	3.62±0.08
乙酸戊酯 Acetic acid, pentyl ester	0.78±0.10 Aa	0.58±0.22 Aa	—
(Z)-己-2-烯基乙酸酯(Z)-2-hexen-1-ol,acetate	0.57±0.09 Aa	1.93±0.09 Bb	—
乙酸叶醇酯(Z)-3-hexen-1-ol, acetate	27.70±5.64 Aa	17.10±0.88 Aa	—
2-甲基丁酸丙酯 Butanoic acid, 2-methyl-, propyl ester	—	—	1.27±0.41
乙酸己酯 Acetic acid, Hexyl ester	7.03±0.49 Aa	5.99±0.66 Aa	0.45±0.15 Bb
正己酸乙酯 Hexanoic acid,ethyl ester	—	—	0.80±0.15
2-甲基丁酸丁酯 Butyl 2-methylbutanoate	—	—	0.33±0.07
己酸丙酯 Hexanoic acid, propyl ester	—	—	0.60±0.05
棕榈酸甲酯 Hexadecanoic acid, methyl ester	0.37±0.03 Aa	0.39±0.01 Aa	0.26±0.03 Ab
邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate	0.41±0.06 Bb	0.57±0.02 Bb	0.70±0.05 Aa
癸二酸二丁酯 Dibutyl sebacate	—	—	0.43±0.08
酚类 Phenols			
2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 4-methyl-2,6-di-tert-Butylphenol	—	1.11±0.08	—
烷烃类 Alkanes			
3-乙基-2-甲基庚烷 3-ethyl-2-methyl-Heptane	0.59±0.09 Aa	0.33±0.04 Aa	—
癸烷 Decane	0.43±0.07	—	—
十一烷 Undecane	0.46±0.07 Aa	0.42±0.09 Aa	—
2,2,4,6,6-五甲基庚烷 2,2,4,6,6-Pentamethylheptane	—	—	7.34±2.62
十二烷 Dodecane	0.71±0.05 Aa	0.66±0.11 Aa	0.66±0.04 Aa
4-甲基-十一烷 4-methyl-Decane	—	—	1.65±0.12
十三烷 Tridecane	1.26±0.06 Bb	0.67±0.02 Cc	1.72±0.11 Aa
十四烷 Tetradecane	2.37±0.14 Aa	1.86±0.08 Ab	2.22±0.04 Aab
2,6,10-三甲基十二烷 2,6,10-trimethyl-Dodecane	—	0.46±0.01	—
十五烷 Pentadecane	3.78±0.23 Aa	2.97±0.12 Aa	2.06±0.07 Bb
十六烷 Hexadecane	1.90±0.18 Bb	3.41±0.13 Aa	2.23±0.27 Bb
2-甲基二六烷 2-methyl-Hexadecane	—	0.62±0.01	—

续表 1 (Table 1 continued)

化合物 Compound	相对含量 (%) Relative content (%)		
	宁夏枸杞 <i>L. barbarum</i>	中华枸杞 <i>L. chinense</i>	黑果枸杞 <i>L. ruthenicum</i>
十七烷 Heptadecane	1.23±0.11 Aab	1.55±0.20 Aa	0.94±0.01 Ab
十八烷 Octadecane	1.14±0.27 Aa	0.87±0.06 Aab	0.53±0.08 Ab
十九烷 Nonadecane	—	0.50±0.04	—
2,6,10,14-四甲基十六烷 2,6,10,14-tetramethyl-Hexadecane	1.33±0.08 Aa	1.11±0.07 ABa	0.73±0.09 Bb
二十一烷 Heneicosane	0.80±0.02	—	—
烯类 Alkenes			
苯乙烯 Styrene	1.33±0.31 Ab	1.02±0.36 Ab	2.59±0.30 Aa
莰烯 Camphene	0.28±0.06 Aa	0.29±0.01 Aa	—
桉烯 Sabinene	—	—	0.15±0.03
α-蒎烯 α-Pinene	2.18±0.33 Aa	1.96±0.33 Aa	0.77±0.26 Ab
D-柠檬烯 D-Limonene	0.57±0.11 Bb	—	1.62±0.11 Aa
β-蒎烯 β-Pinene	0.46±0.05 Aa	0.55±0.04 Aa	0.14±0.03 Bb
(R)-氧化柠檬烯 Limonene 1,2-epoxide	—	—	0.41±0.07
1-十三烯 1-Tridecene	0.72±0.03 Aa	0.58±0.06 Aa	—
(E)-2-十四烯(E)-2-tetradecene	—	0.67±0.04	—
(-)-α-萜荳蔻烯(-)-α-Cubeben	—	0.57±0.03	—
β-石竹烯 β-Caryophyllene	—	1.20±0.15	—
朱桉倍半萜(+)-Valencene	—	—	0.37±0.01
1-十五烯 1-Pentadecene	—	1.48±0.07	—
苯类 Benzenoids			
对二甲苯 p-Xylene	1.17±0.03 Aa	1.19±0.09 Aa	1.75±0.53 Aa
3-乙基甲苯 3-Ethyltoluene	0.69±0.20 Aa	0.67±0.08 Aa	—
均三甲苯 Mesitylene	0.48±0.04 Bb	1.98±0.22 Aa	0.24±0.03 Cc
2-乙基甲苯 2-Ethyltoluene	0.49±0.04	—	—
联三甲苯 1,2,3-Trimethylbenzene	—	0.47±0.02	—
4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	0.74±0.07	—	—
1,3-二乙基苯 1,3-diethyl Benzene	8.36±0.32 Aa	9.76±0.48 Aa	1.51±0.13 Bb
1-甲基-3-异丙基苯 1-methyl-3-Isopropylbenzene	0.58±0.09 Aa	0.93±0.09 Aa	—

—表示该物质不存在；表中同一行数据后标有不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$ ，单因素方差分析)，不同小写字母表示差异显著($P<0.05$ ，单因素方差分析)。

—indicates nonexistent. Data with different capital letters in the same row indicate significant differences at 0.01 levels by LSD; while with different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 levels by LSD.

从宁夏枸杞挥发物中共提取鉴定出 43 种化合物 (表 1)，以酯类化合物的相对含量最高，约占挥发物释放总量的 36.86%；其次为烷烃类、苯类、醇类和醛类化合物，其相对含量均大于

10%；烯烃和酮类化合物的相对含量最低，仅占挥发物释放总量的 5.54% (图 4: A)。部分烷烃、苯环类和醇类是宁夏枸杞的特有物质，但其相对含量均低于 1% (表 1)。

中华枸杞挥发物的种类最多, 为 50 种 (表 1), 以酯类化合物的相对含量最高, 约占挥发物释放总量的 26.56%; 其次为醇类、烷烃和苯类化合物, 其相对含量均达挥发物释放总量的 15%; 其他一些化合物类群在中华枸杞挥发物中的相对含量很少, 均小于总挥发物释放量的 10%, 尤其以酚类物质的相对含量最少, 仅占挥发物释放总量的 1.11%, 但其是中华枸杞挥发物中所特有的物质 (图 4: B)。

从黑果枸杞挥发物中共提取鉴定出 43 种化合物 (表 1), 以酮类化合物占绝对优势, 其相对含量约占挥发物释放总量的 41.47%, 尤其以对乙基苯乙酮在黑果枸杞挥发物中的相对含量极显著高于宁夏枸杞和中华枸杞 ($P < 0.01$); 其次为烷烃类和醇类物质, 其相对含量分别为 20.08% 和 11.14%; 苯类化合物的相对含量最少, 仅占挥发物释放总量的 3.50%; 而酯类物质在黑果枸杞挥发物中的相对含量较宁夏枸杞和中华枸杞低很多, 仅占挥发物释放总量的 8.46% (图 4: C)。

2.4 3 种枸杞挥发物的系统聚类分析

利用平方欧式距离——组间均联法对收集的宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞挥发物进行系统聚类分析。如图 5 所示, 在欧氏距离 0-5 范围内将其分为 2 个集群: A 组, 包括宁夏枸杞 (A1) 和中华枸杞 (A2)。这两组挥发物的共同特征是均含有较高比例的酯类物质, 宁夏枸杞挥发物 (A1) 含有比例较高的乙酸叶醇酯 (Z)-3-hexen-1-ol,acetate) 和乙酸己酯 (Acetic acid, Hexyl ester); 中华枸杞挥发物 (A2) 含有比例较高的 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 (4-methyl-2,6-di-tert-Butylphenol), 且是中华枸杞所特有化合物。黑果枸杞挥发物被单独列为 B 组, 这组挥发物的特点是含有高比例的酮类物质, 如 1,5,6,7-四氢-4H-吲哚-4-酮 (1,5,6,7-Tetrahydro-4H-Indol-4-One) 和对乙基苯乙酮 (p-ethylacetophenone)。其中, 1,5,6,7-四氢-4H-吲哚-4-酮为黑果枸杞的特有化合物。

3 结论与讨论

本研究中, 无论是自由选择还是非选择试

验, 枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞的幼嫩花蕾都有产卵选择性, 只是选择的偏好程度存在差异。这与文献中枸杞红瘿蚊不仅危害宁夏枸杞, 而且会在中华枸杞和黑果枸杞上有轻微危害的报道一致 (徐常青等, 2014; 张倩, 2015; 郝转, 2017)。由此可见, 这 3 种枸杞树种无论分布区域是否重叠, 还是单一种植或者混合种植, 均有受到枸杞红瘿蚊危害的风险性, 需要加以重视。

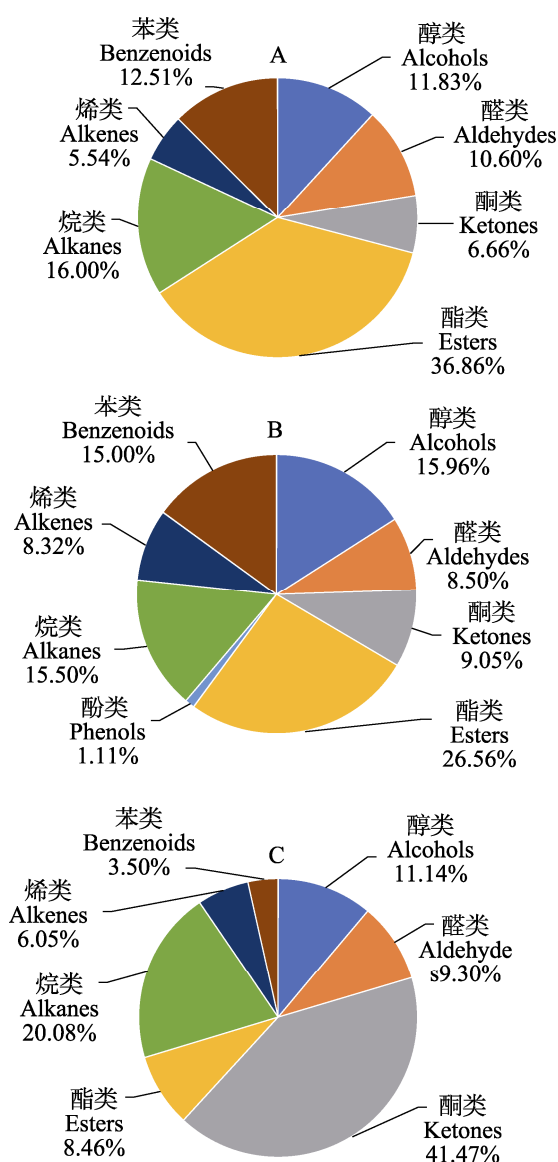


图 4 宁夏枸杞 (A), 中华枸杞 (B) 和黑果枸杞 (C) 挥发物中各类群化合物的相对含量差异

Fig. 4 The difference of relative contents of different groups in volatiles of *Lycium barbarum* (A), *Lycium chinense* (B) and *Lycium ruthenicum* (C)

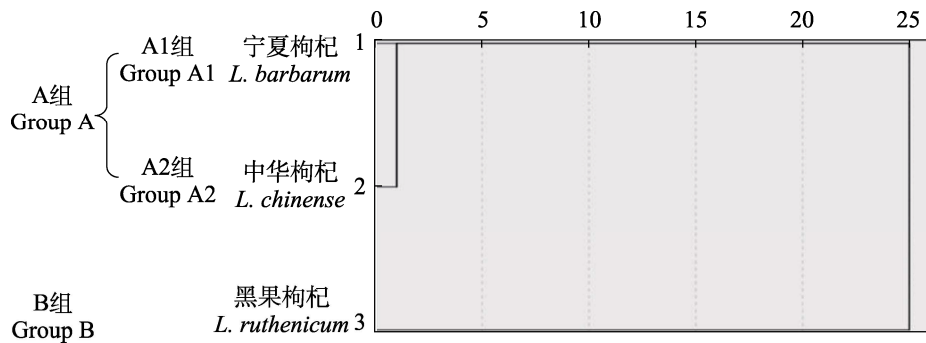


图 5 3 种枸杞挥发物种类的系统树图

Fig. 5 Phylogenetic tree of the volatile compounds emitted from *Lycium barbarum*, *Lycium chinense* and *Lycium ruthenicum*

植食性昆虫的孕卵雌虫在寄主植物上的落卵量直接影响其后代的种群数量,是研究植物抗性的一个重要指标。本研究中,无论是自由选择还是非选择试验,枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对宁夏枸杞的产卵选择率和在其花蕾中的落卵量均是最高,可见,宁夏枸杞为枸杞红瘿蚊最嗜好的寄主树种,抗性最差。而枸杞红瘿蚊对黑果枸杞和中华枸杞的产卵选择率和各自花蕾中的含卵量较宁夏枸杞低很多,且两树种之间不存在显著差异性。研究结果为进一步选育枸杞属植物对枸杞红瘿蚊的抗性品种,深入探讨抗性枸杞树种的抗虫机制,为科学防控枸杞红瘿蚊提供基础数据。

植食性昆虫对不同产卵寄主植物的选择性受诸多因素的影响,包括寄主植物种类、物理结构特征、数量、所含营养物质及寄主植物挥发物、遗传因素等 (Jallow and Zalucki, 1996; 梁薇等, 2022)。本研究中,宁夏枸杞、中华枸杞和黑果枸杞挥发物的种类和相对含量存在显著不同,并具有一定的特异性,而枸杞红瘿蚊孕卵雌虫对 3 种枸杞挥发物亦存在不同的趋向性。

宁夏枸杞挥发物对枸杞红瘿蚊孕卵雌虫具有最强的吸引力。无论是与空白对照相比,还是与寄主植物比较,枸杞红瘿蚊均是显著趋向于宁夏枸杞挥发物,而对中华枸杞和黑果枸杞挥发物并无明显的选择行为。由此推断,宁夏枸杞挥发物中存在能够吸引枸杞红瘿蚊的特异性化合物,这些化合物亦被称为资源指示气味 (Beyaert et al, 2010; Siderhurst and Jang, 2010),帮助孕卵雌虫更有效地定位寄主。本研究发现,宁夏

枸杞挥发物中的酯类物质含量最高,是所有挥发物中的重要组分,且较在中华枸杞和黑果枸杞中的含量有很大差别。由于酯类物质具有香味,一般是吸引昆虫的关键物质,可以引导昆虫产卵和取食 (樊瑞冬等, 2021),因此,这些较高含量的酯类物质有可能是宁夏枸杞吸引枸杞红瘿蚊产卵选择的特异性指示气味,为孕卵雌虫提供有效的定向指引。这种现象也有相关报道,如红铜丽金龟 *Anomala rufocuprea* 对邻氨基苯甲酸甲酯具有很强的趋向作用 (Maekawa et al, 1999); 蒲公英 *Taraxacum mongolicum* 花挥发物中的顺-3-己烯醇乙酸酯、苯甲酸苯酯对扁绿异丽金龟 *Anomala octiescostata* 有强烈的引诱作用 (Leal et al., 1994); δ -癸酸内酯能够吸引烟蓟马 *Thrips tabaci* 雌虫 (李彩虹等, 2022); 丁酸丁酯、乙酸叶醇酯对黄地老虎 *Agrotis segetum* 雌成虫有显著的引诱作用 (李琳等, 2020)。

中华枸杞挥发物对枸杞红瘿蚊孕卵雌虫具有一定的拒避作用。中华枸杞与宁夏枸杞的挥发物组分较为相似,虽然也含有较高比例的酯类物质,但同时含有一类特殊物质——酚类化合物,其相对含量最少,但却是中华枸杞挥发物中所特有的物质。由此推断,这种特有的酚类物质有可能是拒避枸杞红瘿蚊产卵选择的特异性化合物,以减少枸杞红瘿蚊雌虫的定位趋向。植物挥发物中的酚类物质作为拒避成分已有相关报道,如滇杨 *Populus yunnanensis* 的挥发物丁香酚在一定质量浓度范围内对马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* 产卵有驱避效果, 12 mg/L 时的产卵

驱避率高达 62.1% (马艳粉等, 2016); 香芹酚、丁香酚对烟蓟马表现出显著的趋避作用, 另有百里酚是对烟蓟马雌性成虫有高驱避效果的挥发物质 (李彩虹等, 2022)。

黑果枸杞挥发物对枸杞红瘿蚊孕卵雌虫同样具有拒避作用。黑果枸杞挥发物组分与宁夏枸杞和中华枸杞相比有显著不同, 酯类物质在黑果枸杞挥发物中的含量非常少, 但酮类物质含量极高, 这可能是枸杞红瘿蚊雌虫不喜好选择其挥发物的原因。类似研究已有报道, 如 1% (v/v) 浓度的茶香酮在一定程度上可诱发东亚飞蝗 *Locusta migratoria* 避免取食行为 (王鹏, 2019); 豇豆 *Vigna unguiculata* 花释放的 2-甲基-3-羟基-4-吡喃酮对普通大蓟马 *Megalurothrips usitatus* 具有极显著的驱避活性 (韩云, 2016); 苯乙酮对西部松大小蠹 *Dendroctonus brevicomis* 有强的驱避作用 (Erbilgin *et al.*, 2007)。

枸杞红瘿蚊对寄主植物的定位和识别是一个复杂的辨识过程, 研究植物挥发物在植食性昆虫寄主选择中的重要作用, 可为害虫防治新技术研究提供新思路, 深入研究以明确不同枸杞挥发物中对枸杞红瘿蚊有吸引或趋避作用的活性成分, 确定各活性成分的组成、比例和浓度等实现最佳配比, 以期开发枸杞红瘿蚊高效植物源引诱剂或驱避剂, 为进一步利用寄主植物挥发物调控枸杞红瘿蚊的行为和种群密度, 为实现枸杞红瘿蚊绿色防控提供依据。

参考文献 (References)

- Beyaert I, W Schke N, Scholz A, Varama M, Reinecke A, Hilker M, 2010. Relevance of resource-indicating key volatiles and habitat odour for insect orientation. *Animal Behaviour*, 79(5): 1077–1086.
- Billeter JK, Wolfner MF, 2018. Chemical cues that guide female reproduction in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Chemical Ecology*, 44(9): 750–769.
- Erbilgin N, Gillette NE, Mori SR, Stein JD, Owen DR, Wood DL, 2007. Acetophenone as an anti-attractant for the western pine beetle, *Dendroctonus brevicomis* LeConte (Coleoptera: Scolytidae). *Journal of Chemical Ecology*, 33(4): 81–823.
- 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. [樊瑞冬, 张益恺, 毕嘉瑞, 徐伟, 臧连生, 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.]
- Gu YX, Wang XX, Mu ZQ, Ren LN, Cui J, Tang XQ, 2022. Research Overview on the directional behavior of plant volatiles affecting herbivorous insects. *Journal of Guangxi Agriculture*, 37(2): 84–89. [顾亚欣, 王向向, 母泽祺, 任丽娜, 崔洁, 唐晓琴, 2022. 植物挥发物影响植食性昆虫的定向行为研究概述. *广西农学报*, 37(2): 84–89.]
- Guan WK, 2020. Study on the role of blades volatiles from *Ficus* in the tritrophic system among *Ficus-Phaouda flammans* (Walker)-*Gotra octocinctus* Ashmead. Master dissertation. Nanning: Guangxi University. [管维康, 2020. 榕树挥发物在榕树-朱红毛斑蛾-花胸姬蜂系统中的作用研究. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学.]
- Guo Y, Zeng L, Liang GW, 2012. Behavioral responses of *Latheticus oryzae* (Waterhouse) to six host grains and their volatiles. *Journal of Environmental Entomology*, 34(4): 432–440. [郭钰, 曾玲, 梁广文, 2012. 长头谷盗对 6 种寄主谷粉及其挥发物的行为反应. *环境昆虫学报*, 34(4): 432–440.]
- Han Y, 2016. Scanning electron microscopy of antennal and behavioral responses of *Megalurothrips usitatus* (Bagnall) to host volatile compounds. Master dissertation. Guangzhou: South China Agriculture University. [韩云, 2016. 普通大蓟马触角扫描观察及对寄主植物挥发物的行为反应. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]
- Hao Z, 2017. Cultivation techniques and pest control of Chinese wolfberry. *Agricultural Technology Service*, 34(18): 26–28. [郝转, 2017. 我国枸杞的栽培技术与病虫害防治. *农技服务*, 34(18): 26–28.]
- Jallow M, Zalucki MP, 1996. Within-and between-population variation in host-plant preference and specificity in Australian *Helicoverpa armigera* (Hubner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Australian Journal of Zoology*, 44(5): 503–519.
- Jiao KL, Zhou XY, Qiao HL, Wang H, Chen J, Liu BM, Bu WJ, Kolesik P, 2020. A new species of gall midge (Diptera: Cecidomyiidae) damaging flower buds of goji berry *Lycium barbarum* (Solanaceae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(4): 930–934.
- Karageorgi M, Bräcker LB, Lebreton S, Minervino C, Cavey M, Siju KP, Grunwald Kadow IC, Gompel N, Prud'homme B, 2017. Evolution of multiple sensory systems drives novel egg-laying behavior in the fruit pest *Drosophila suzukii*. *Current Biology*, 27(6): 847–853.
- Leal WS, Hasegawa M, Sawada M, Ono M, Ueda Y, 1994. Identification and field evaluation of *Anomala octiescostata* (Coleoptera: Scarabaeidae) sex pheromone. *Journal of Chemical*

- Ecology*, 20(7): 1643–1655.
- Li CH, Zhang T, Lu YH, 2022. Behavioral responses of adult female *Thrips tabaci* to different plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(1): 40–49. [李彩虹, 张涛, 陆宴辉, 2022. 烟蓟马成虫对不同植物挥发物的行为选择. 应用昆虫学报, 59(1): 40–49.]
- Li F, Sun HX, Li SX, Wang WG, Wu JX, 2006. Operation rules of cover isolation and control technology of *Jaapiella* sp. *Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2006 (4): 18. [李锋, 孙海霞, 李绍先, 王文国, 仵均祥, 2006. 枸杞红瘿蚊覆盖隔离防治技术操作规程. 宁夏农林科技, 2006(4): 18.]
- Li JL, Xu CQ, Qiao LQ, Liu S, Chen J, Qiao HL, Xu R, Lin C, Feng YF, 2015. The occurrence characteristics and control strategies of *Jaapiella* sp. of *Lycium barbarum* L. *Modern Chinese Medicine*, 17(8): 843–850. [李建领, 徐常青, 乔鲁芹, 刘赛, 陈君, 乔海莉, 徐荣, 林晨, 冯永飞, 2015. 宁夏枸杞红瘿蚊的发生特点与防治策略. 中国现代中药, 17(8): 843–850.]
- Li L, Xiu CL, Lu W, Lu YH, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of *Agrotis Segetum* adults to 15 plant volatiles. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 57(11): 2020–2027. [李琳, 修春丽, 陆伟, 陆宴辉, 2020. 黄地老虎成虫对 15 种植物挥发物的电生理和行为反应. 新疆农业科学, 57(11): 2020–2027.]
- Liang W, Ma YH, Chen LH, Wei HY, 2022. Research progress in the influence of host plants on the selection behaviors of herbivorous insects. *Biological Disaster Science*, 45(3): 299–304. [梁薇, 麻亚辉, 陈丽慧, 魏洪义, 2022. 寄主植物对植食性昆虫选择行为影响的研究进展. 生物灾害科学, 45(3): 299–304.]
- Liu MZ, Zhao YH, Zhang ZS, 1987. Preliminary report on the study of *Jaapiella* sp. *Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 1987(4): 25–28. [刘美珍, 赵怡红, 张宗山, 1987. 枸杞瘿蚊研究初报. 宁夏农林科技, 1987(4): 25–28.]
- Ma Y, Shi LY, Zhao Y, Xu HC, 2018. Comparison of volatiles released from the host *Juglans mandshurica* in different damaged states and the GC-EAD and behavioral responses of *Apriona germari* (Coleoptera: Cerambycidae) to these volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 61(5): 574–584. [马艳, 史黎央, 赵艺, 徐华潮, 2018. 不同危害状态下寄主山核桃挥发物成分的比较及桑天牛对其组分的 GC-EAD 和行为反应. 昆虫学报, 61(5): 574–584.]
- Ma YF, Zhang XM, Xu Y, Xiao C, 2016. Effect of volatiles from *Populus yunnanensis* on oviposition preference of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella*. *Plant Protection*, 42(2): 99–103. [马艳粉, 张晓梅, 胥勇, 肖春, 2016. 滇杨挥发物成分对马铃薯块茎蛾产卵选择的影响. 植物保护, 42(2): 99–103.]
- Maekawa M, Imai T, Tsuchiya S, Fujimori T, Leal WS, 1999. Behavioral and electrophysiological responses of the soybean beetle, *Anomala rufocuprea* Motschulsky (Coleoptera: Scarabaeidae) to methyl anthranilate and its related compounds. *Applied Entomology and Zoology*, 34(1): 99–103.
- Siderhurst MS, Jang EB, 2010. Cucumber volatile blend attractive to female melon fly, *Bactrocera cucurbitae* (Coquillett). *Journal of Chemical Ecology*, 36(7): 699–708.
- Silva-Soares NF, Nogueira-Alves A, Beldade P, Mirth CK, 2017. Adaptation to new nutritional environments: Larval performance, foraging decisions, and adult oviposition choices in *Drosophila suzukii*. *Bmc Ecology*, 17(21): 2–13.
- Wang P, 2019. Behavioral response of *Locusts* driven by plant volatile sensing at different range. Doctoral dissertation. Beijing: China Agricultural University. [王鹏, 2019. 飞蝗感受不同范围的植物挥发物的行为反应, 博士学位论文. 北京: 中国农业大学.]
- Wang YQ, 2022. Study on host volatiles regulating preference selection behavior of *Spodoptera frugiperda*. Master dissertation. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology. [汪永乾, 2022. 寄主挥发物调控草地贪夜蛾偏好选择行为的研究. 硕士学位论文. 新乡: 河南科技学院.]
- Xu CQ, Liu S, Xu R, Chen J, Qiao HL, Jin HY, Lin C, Guo K, Cheng HZ, 2014. Investigation of production status in major wolfberry producing areas of China and some suggestions. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 39(11): 1979–1984. [徐常青, 刘赛, 徐荣, 陈君, 乔海莉, 金红宇, 林晨, 郭昆, 程惠珍, 2014. 我国枸杞主产区生产现状调研及建议. 中国中药杂志, 39(11): 1979–1984.]
- Zhang F, Xu CQ, Chen J, Ma M, Lu PF, Liu S, Li JL, Qiao HL, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of gall midge, *Jaapiella* sp. to volatiles of host plant *Lycium barbarum*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(7): 2299–2306. [张凡, 徐常青, 陈君, 马妹, 陆鹏飞, 刘赛, 李建领, 乔海莉, 2020. 枸杞红瘿蚊对寄主植物挥发物的电生理和行为反应. 应用生态学报, 31(7): 2299–2306.]
- Zhang Q, 2015. The cultivation of *Lycium ruthenicum*. *Science and Technology News (Chinese)*, 2015-12-25 (003). [张倩, 2015. 黑枸杞种植. 新疆科技报 (汉), 2015-12-25 (003).]