

亚洲小车蝗对三种植物源化合物的嗅觉行为反应*

石丹妮^{1,2**} 康 鹏^{1**} 常 静¹ 马崇勇³ 嘎丽娃³
韩 丽⁴ 戴桂香⁵ 李海平^{1***}

(1. 内蒙古农业大学园艺与植物保护学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古包头市农牧科学研究院, 包头 014000;
3. 内蒙古自治区林业和草原有害生物防治检疫总站, 呼和浩特 010020; 4. 内蒙古自治区呼和浩特市林业和草原保护中心, 呼和浩特 010030; 5. 内蒙古自治区乌兰察布市草原工作站, 集宁 012000)

摘 要 【目的】明确 3 种植物源化合物——瑞香狼毒根石油醚提取物、百里香酚和印楝素对亚洲小车蝗 *Oedaleus decorus asiaticus* 3 龄蝗蛹的行为反应影响。【方法】采用叶碟法进行了拒食作用测定, 使用 Y 形嗅觉仪和浸叶法对亚洲小车蝗的行为选择进行测定, 通过触角电位仪测定了亚洲小车蝗对 3 种化合物的触角电位反应。【结果】48 h 时, 瑞香狼毒根石油醚提取物、百里香酚和印楝素对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹选择性的拒食中浓度 (AFC₅₀) 分别为 0.461、0.213 和 0.106 mg·mL⁻¹。Y 形嗅觉仪中, 百里香对成虫的驱避率为 86.67%, 瑞香狼毒地上部、根部和全株的驱避率分别为 83.33%、81.67%和 80.00%。3 种化合物的驱避率随浓度增大而增加, 最大浓度时均超过 85%。触角电位反应值随浓度增加而增强, 在 0.3 mg·mL⁻¹ 时, 百里香酚的 EAG 值 (0.67 mV) 高于瑞香狼毒素和印楝素 (均为 0.33 mV)。【结论】3 种植物源化合物对亚洲小车蝗均有明显驱避作用, 在草原蝗虫绿色防控中具有良好的开发前景。

关键词 瑞香狼毒; 百里香; 印楝素; 亚洲小车蝗; 嗅觉行为反应

Olfactory behavioral responses of *Oedaleus decorus asiaticus* to three plant compounds

SHI Dan-Ni^{1,2**} KANG Peng^{1**} CHANG Jing¹ MA Chong-Yong³ GA Li-Wa³
HAN Li⁴ DAI Gui-Xiang⁵ LI Hai-Ping^{1***}

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2. Agricultural and Animal Husbandry Sciences Research Institute of Baotou City in Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014000, China;
3. Forestry and Grassland Pest Control and Quarantine Station of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010020, China;
4. Forestry and Grassland Protection Center of Hohhot City in Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010030, China;
5. Grassland Station of Ulanqab City in Inner Mongolia Autonomous Region, Jining 012000, China)

Abstract [Aim] To determine the effects of petroleum ether extracts from *Stellera chamaejasme*, *Thymus mongolicus* and azadirachtin, on the behavioral responses of the 3rd instar *Oedaleus decorus asiaticus* larvae. [Methods] The leaf dish dipping method was used to test the antifeeding effect of plant extracts. Behavioral responses were measured using a Y-tube olfactometer and the leaf immersion method. Antennal responses of *O. decorus asiaticus* to plant extracts was measured with an electroantennogram (EAG). [Results] The median selective antifeedant concentrations (AFC₅₀) of petroleum ether extracts from the roots of *S. chamaejasme*, *T. mongolicus* and azadirachtin were 0.461, 0.213 and 0.106 mg·mL⁻¹, respectively after 48 h. In the Y-tube olfactometer, the repellence of thymol from *T. mongolicus* to adult *O. decorus asiaticus* was 86.67%, whereas the repellence of the aerial part, root, and entire *S. chamaejasme* plant, was 83.33%, 81.67%, and 80.00%, respectively. The repellence of plant compounds

*资助项目 Supported project: 草原生态保护修复治理——瑞香狼毒毒害草监测与防控项目

**共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 1357803515@qq.com; 841827817@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: lihaiping5820@hotmail.com

收稿日期 Received: 2025-03-28; 接受日期 Accepted: 2026-03-22

increased with concentration, exceeding 85% at the maximum tested concentration. The EAG responses of *O. decorus asiaticus* also increased with plant extract concentration. At 0.3 mg·mL⁻¹, the EAG value in response to thymol from *T. mongolicus* (0.67 mV) was higher than that of neochamaejasmine A and azadirachtin (both 0.33 mV). **[Conclusion]** Three plant extracts were sufficiently repellent to *O. decorus asiaticus* to have potential for development for use in the environmentally-friendly control of grassland locusts.

Key words *Stellera chamaejasme*; *Thymus mongolicus*; azadirachtin; *Oedaleus decorus asiaticus*; olfactory behavioral response

内蒙古是我国草原的重要分布区,草原面积约占全国草原面积的 1/4 左右(马崇勇等,2018)。蝗虫是危害草原的重要害虫之一,对草原生态环境和畜牧业影响大。特别是 2020 年初在非洲暴发的沙漠蝗 *Schistocerca gregaria*,波及非洲、亚洲的多个国家和地区,给当地的农业生产和生态环境带来了巨大影响(FAO, 2020),也给人们敲响了蝗虫危害的警钟。对草原造成危害的蝗虫种类很多,亚洲小车蝗 *Oedaleus decorus asiaticus* 是我国北方草原的优势种蝗虫之一(陈永林, 2007; 杜桂林等, 2018),在内蒙古草原广泛分布。

近些年来,草原蝗虫的防治逐渐转向以绿色综合防控为主(张龙, 2011; 涂雄兵等, 2021; 徐超民等, 2021)。植物源杀虫剂因其不易使害虫产生抗药性、对人畜安全、易在环境中降解等优点,成为绿色防控的重要方向(张兴等, 2015; 赖城玲等, 2022)。这类杀虫剂的作用方式多样,其中拒食和驱避作用尤为常见。例如,肖波等(2005)和张可君等(2005)的研究结果表明,瑞香狼毒 *Stellera chamaejasme* 对菜粉蝶 *Pieris rapae* 幼虫有较好的拒食活性。孙骊珠等(2017)的研究表明,马樱丹 *Lantana camara* 叶片提取物对黄胸散白蚁 *Reticulitermes flaviceps* 均有驱避作用,浓度增加驱避作用增强。这些特性使植物源杀虫剂在草原蝗虫绿色防控中具有推广应用潜力。

瑞香狼毒是内蒙古草原上一种重要的毒害草,具有杀虫、抗菌和抗病毒等功效(Li *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2020),百里香 *Thymus mongolicus* 在我国青海、内蒙古、甘肃和新疆等地均有分布,具有一定的杀虫、消毒等作用(Isman, 2000; Miresmailli and Isman, 2014)。印楝素是从印楝 *Azadirachta indica* 的种子和表

皮中提取出来的活性物质,目前已经证实对多种害虫具有很好的杀灭作用(Morgan, 2009; Lai *et al.*, 2014)。

瑞香狼毒和百里香是内蒙古草原上常见的两种植物,具有一定的杀虫活性。印楝素是已被应用的植物源杀虫剂。然而,目前尚缺乏关于这 3 种植物对亚洲小车蝗的拒食、驱避及触角电生理反应的系统比较研究。已有的研究多集中于单一类型化合物或单一作用方式,且较少将行为测定与电生理测定相结合。为此,本研究选择瑞香狼毒根石油醚提取物、百里香酚和印楝素作为供试物质,以化学农药高效氯氰菊酯为阳性对照,采用叶碟法、Y 形嗅觉仪、浸叶法和触角电位仪,从拒食、驱避和嗅觉 3 个层面系统评估亚洲小车蝗对这 3 种植物源化合物的行为反应。研究结果有助于筛选出对该蝗虫活性较强的植物源化合物,揭示其驱避作用的嗅觉基础,为开发草原蝗虫绿色防控药剂提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试昆虫 亚洲小车蝗 1-2 龄蝗蛹于 2021 年 6-7 月采集自内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗草原。采回后在实验室养虫网内饲养,饲喂内蒙古农业大学农场种植的未经药剂处理的玉米叶片。实验室饲养条件为:温度(28±1)℃,相对湿度 60%±5%,光周期 14 L:10 D。实验时挑选虫体大小一致、健康活跃的 3 龄蝗蛹或成虫(日龄≤7 d)作为供试虫源,雌雄各半。

1.1.2 供试植物 瑞香狼毒和百里香,2020 年 6 月采自四子王旗草原。将采集到的瑞香狼毒和百里香清洗干净,放到阴凉干燥处阴干。

1.1.3 供试化合物 将瑞香狼毒根部用粉碎机粉碎,将粉碎的瑞香狼毒根粉与石油醚按照 1:8 (w/v) 的配比加入到密封的玻璃瓶中,室温下浸泡 5-6 d。将浸泡好的瑞香狼毒根粉在 50 °C 水浴中搅拌浸提后抽滤,得到的棕黄色油状物即为瑞香狼毒根石油醚提取物。95%高效氯氰菊酯、95%百里香酚、95%瑞香狼毒素、95%印楝素(上海泽叶生物科技有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 3 种植物源化合物对亚洲小车蝗 3 龄蝗蚱选择性拒食活性测定 选择性拒食活性的测定采用叶碟法(吴文君,1988)。将瑞香狼毒根石油醚提取物用丙酮溶解为 10 mg·mL⁻¹ 母液,用蒸馏水稀释成 4、2、1、0.5 mg·mL⁻¹ 不同的浓度;将 95%百里香酚、95%印楝素用丙酮溶解为 1 mg·mL⁻¹ 母液,蒸馏水稀释成 0.5、0.4、0.3、0.2、0.1 mg·mL⁻¹ 不同的浓度;将 95%高效氯氰菊酯用丙酮溶解为 0.1 mg·mL⁻¹ 母液,用蒸馏水稀释成 0.04、0.02、0.01、0.005、0.001 mg·mL⁻¹ 不同的浓度。将打好的玉米叶碟分别放入不同浓度的供试药液浸泡 3 s 后取出晾干,以等量丙酮+蒸馏水浸蘸的叶碟作为对照,分别放入养虫笼的两侧作为处理和对照,间隔 50 cm。每侧放入 3 片玉米叶碟,每笼放入 10 头饥饿 6 h 的亚洲小车蝗 3 龄蝗蚱,重复 3 组,将试虫置于养虫笼中央位置。分别于 24 和 48 h 后用方格坐标纸测量取食面积,计算拒食率和拒食中浓度(AFC₅₀)。

$$\text{选择性拒食率} = \frac{\text{对照组叶面积} - \text{处理组叶面积}}{\text{对照组叶面积} + \text{处理组叶面积}} \times 100\%。$$

1.2.2 亚洲小车蝗成虫对不同植物、化合物的嗅觉反应测定 对亚洲小车蝗成虫的嗅觉反应测定参照李晓峰等(2019)的方法。试验采用 Y 型嗅觉仪,仪器由 1 根主臂和 2 根对称侧臂组成,两根侧臂末端端口分别定义为 A 口和 B 口,主臂端部为试虫释放 Y 管口。实验前,将供试昆虫饥饿 6 h,用 Y 型嗅觉仪进行趋向选择性实验,设置气流速度为 300 mL·min⁻¹,供试植物为瑞香狼毒和百里香(各取 10 g 新鲜地上部分),供试化合物为瑞香狼毒根石油醚提取物、95%百里香酚、95%印楝素和 95%高效氯氰菊酯。将瑞香狼

毒根石油醚提取物用丙酮溶解为 20 mg·mL⁻¹ 母液,稀释成 10、5、1 mg·mL⁻¹;其余 3 种化合物用丙酮溶解为 10 mg·mL⁻¹ 母液,稀释成 8、5、1 mg·mL⁻¹。实验时,A 口连接装有供试植物(或 10 μL 供试化合物溶液滴于滤纸片上)的味源瓶,B 口连接装有等量溶剂(丙酮-蒸馏水混合液)的对照瓶。将供试昆虫放到 Y 管口,每次引入一头供试昆虫进行观察,每组 10 头,重复 6 次,每次重复有效观察至昆虫选择了 A 或 B 口,观察时间在 3 min 之内,观察后记录数据结果。每次重复实验后清洗干净连接管和嗅觉仪并晾干。根据公式计算驱避率。

$$\text{驱避率} = \frac{\text{选择对照气味源的虫数}}{\text{试虫总数}} \times 100\%。$$

1.2.3 4 种化合物对亚洲小车蝗成虫的驱避反应测定 对亚洲小车蝗成虫的驱避反应测定采用浸叶法(张雪梅等,2016)。供试昆虫为饥饿 6 h 的亚洲小车蝗成虫。药剂浓度设置同 1.2.2 节。将玉米叶片于供试药液或清水中浸泡 3 s,晾干后放入养虫笼两侧,间距 30 cm。将 20 头供试成虫置于养虫笼中央位置。每侧 5 片叶,重复 3 次。每隔 6 h 观察并记录叶片上的虫数,计算驱避率。

1.2.4 亚洲小车蝗成虫对 3 种植物源化合物的触角电位反应 亚洲小车蝗成虫对 3 种不同植物源药剂的触角电位反应参照刘永梅等(2020)。将 95%瑞香狼毒素、95%百里香酚、95%印楝素用丙酮溶解为 0.5 mg·mL⁻¹ 母液,稀释成 0.3、0.25、0.2、0.1、0.05 mg·mL⁻¹;将 95%高效氯氰菊酯稀释成 0.25、0.2、0.1、0.05、0.025 mg·mL⁻¹。将亚洲小车蝗成虫的触角用剪刀从根部剪下,用锋利的手术刀将触角端部切下一小段,将触角与蘸有少许的 Spectra 360 电极胶固定,并将触角的顶部与记录电极相连,端部与参比电极相连,然后将两个电极与触角电位仪连接。将大小适中且干净的滤纸条放入巴斯德管中,将 10 μL 供试液滴加在 1 cm×4 cm 滤纸条上,放入巴斯德管中。以 10 μL 丙酮作为对照进行校准。固定好整个装置,待信号稳定后开始测定,在 150 mL/min 通气流量下每间隔 1 min 测定一次,每个浓度重复测定 10 根触角(每根触角重复刺激 3 次),取

平均值。记录反应绝对值, 最终 EAG 相对值=(处理反应值-对照反应值)/对照反应值。

1.3 数据分析

用 Excel 2010 软件对数据进行处理和绘图, 采用 Duncan 氏新复极差法(Duncan’s new multiple range test) 进行多重比较, 显著水平设 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 3 种植物源化合物对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹的选择性拒食毒力

3 种植物源化合物对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹选择性拒食毒力结果见表 1。3 种植物提取物对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹的拒食中浓度 AFC_{50} 为: 瑞香狼毒根石油醚提取物>百里香酚>印楝素。高效氯氰菊酯对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹 AFC_{50} 最小, 选择性拒食作用最强。

2.2 亚洲小车蝗成虫的嗅觉反应

2.2.1 亚洲小车蝗成虫对瑞香狼毒和百里香的嗅觉反应 亚洲小车蝗成虫对 2 种植物的嗅觉反应结果见图 1 (A-D)。瑞香狼毒不同部分和百里香对亚洲小车蝗均有极显著的驱避作用 ($P<0.01$), 百里香的驱避率最大, 为 86.67%。瑞香狼毒不同部位对亚洲小车蝗成虫的趋避率不同, 瑞香狼毒地上部驱避率 (83.33%)>瑞香狼毒根部驱避率 (81.67%)>瑞香狼毒全株驱避率

(80.00%)。

2.2.2 亚洲小车蝗成虫对 3 种植物源化合物的嗅觉反应

亚洲小车蝗成虫对不同化合物的嗅觉反应见图 2 (A-D), 瑞香狼毒根油醚提取物、印楝素和高效氯氰菊酯最大浓度分别为 10、8 和 $8\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 驱避率均为 86.67%, 百里香酚在最大浓度 $8\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时的驱避率 85.00%。亚洲小车蝗成虫对 3 种不同植物源化合物的选择性随着药剂浓度的增加而降低。

2.3 亚洲小车蝗成虫对 3 种植物源化合物的驱避作用

图 3 (A-D) 显示了亚洲小车蝗成虫对 3 种植物源化合物的驱避结果。随着药剂浓度增加和药剂作用时间延长, 驱避率也逐渐增加。48 h 时瑞香狼毒根石油醚提取物、百里香酚和印楝素在最大浓度时驱避率均为 83.33%, 高效氯氰菊酯在最大浓度下, 驱避率为 76.67%。

2.4 亚洲小车蝗成虫对 3 种植物源化合物的触角电位反应

亚洲小车蝗成虫对不同化合物的触角电位反应结果见图 4 (A-D)。亚洲小车蝗对 3 种植物源化合物的触角电位反应随着化合物浓度的增加电位值增加, 且不同浓度间电位值存在显著性差异 ($P<0.05$)。在化合物最大浓度为 $0.3\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时, 百里香酚最大电位值为 0.67 mV ; 印楝素和瑞香狼毒素最大电位值为

表 1 3 种化合物对亚洲小车蝗 3 龄蝗蛹的选择性拒食毒力
Table 1 Selective antifeedant toxicity of three plant-derived compounds to 3rd instar larvae of *Oedaleus decorus asiaticus*

化合物 Compounds	拒食中浓度及 95%置信区间 ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) AFC_{50} and 95% confidence interval ($\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)	
	24 h	48 h
瑞香狼毒根石油醚提取物 Petroleum ether extract from root of <i>Stellera chamaejasme</i>	0.686 (0.596-0.773)	0.461 (0.403-0.516)
百里香酚 Thymol	0.246 (0.210-0.284)	0.213 (0.188-0.239)
印楝素 Azadirachtin	0.117 (0.091-0.138)	0.106 (0.058-0.143)
高效氯氰菊酯 Beta-cypermethrin	0.007 (0.004-0.010)	0.004 (0.003-0.006)

AFC_{50} : 拒食中浓度 Fiducial limit.

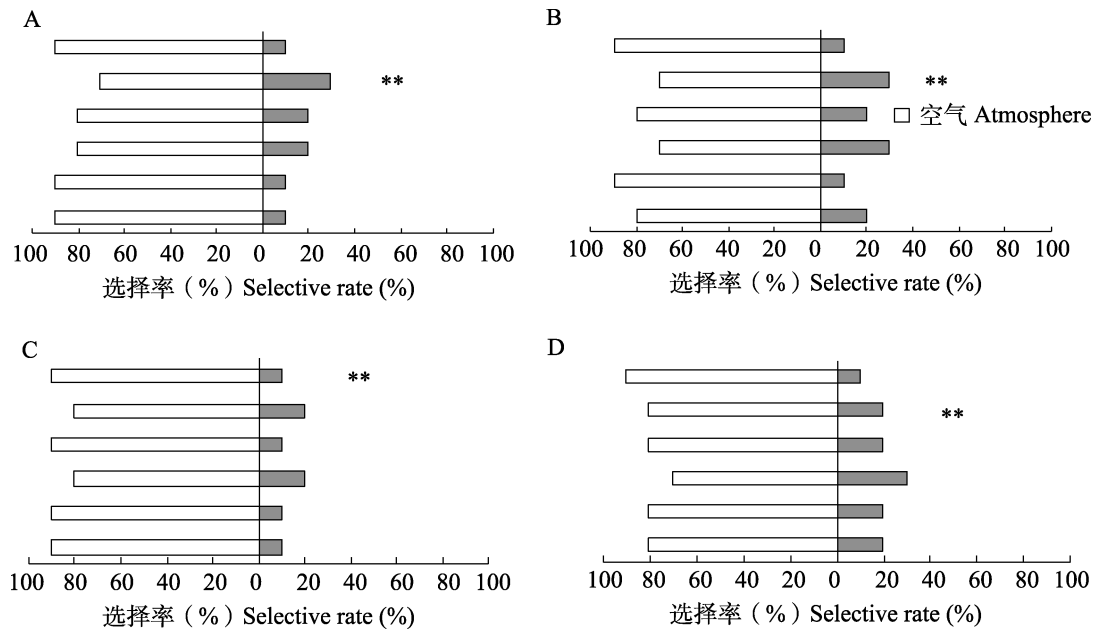


图 1 亚洲小车蝗对瑞香狼毒根地上部 (A)、瑞香狼毒根 (B)、百里香整株 (C)、瑞香狼毒整株 (D) 的选择率
Fig. 1 Selection rates of *Oedaleus decorus asiaticus* to overground part of *Stellera chamaejasme* (A), root of *Stellera chamaejasme* (B), *Thymus mongolicus* (C) and *Stellera chamaejasme* (D)

柱旁符号表示处理与对照间的差异显著 (** $P < 0.01$, 卡方检验)。

Symbols beside bars indicate the significance of difference between treatment and the control ($P < 0.01$, Chi-square test).

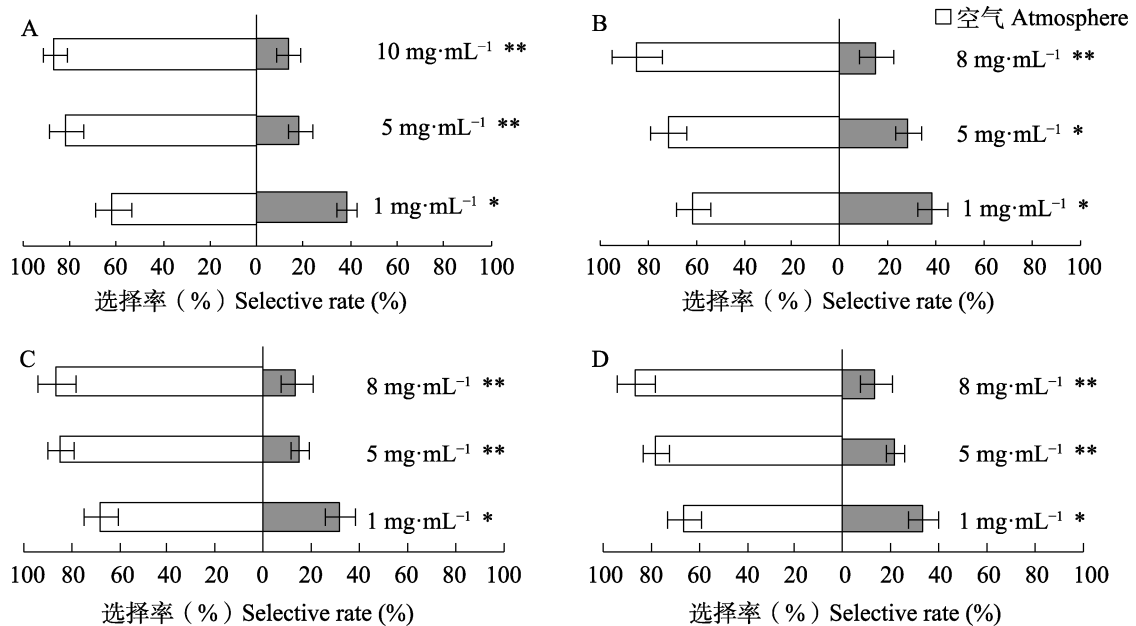


图 2 亚洲小车蝗对瑞香狼毒根石油醚提取物 (A)、百里香酚 (B)、印楝素 (C) 和高效氯氟菊酯 (D) 的选择率
Fig. 2 Selection rates of *Oedaleus decorus asiaticus* to petroleum ether extract of *Stellera chamaejasme* root (A), thymol (B), azadirachtin (C) and beta-cypermethrin (D)

图中数据为平均值±标准误, 下图同; 柱旁符号表示处理与对照间的差异显著性 (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 卡方检验)。

Data in the figure are mean±SE, the same below. Symbols beside bars indicate the significance of difference between treatment and the control (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, Chi-square test).

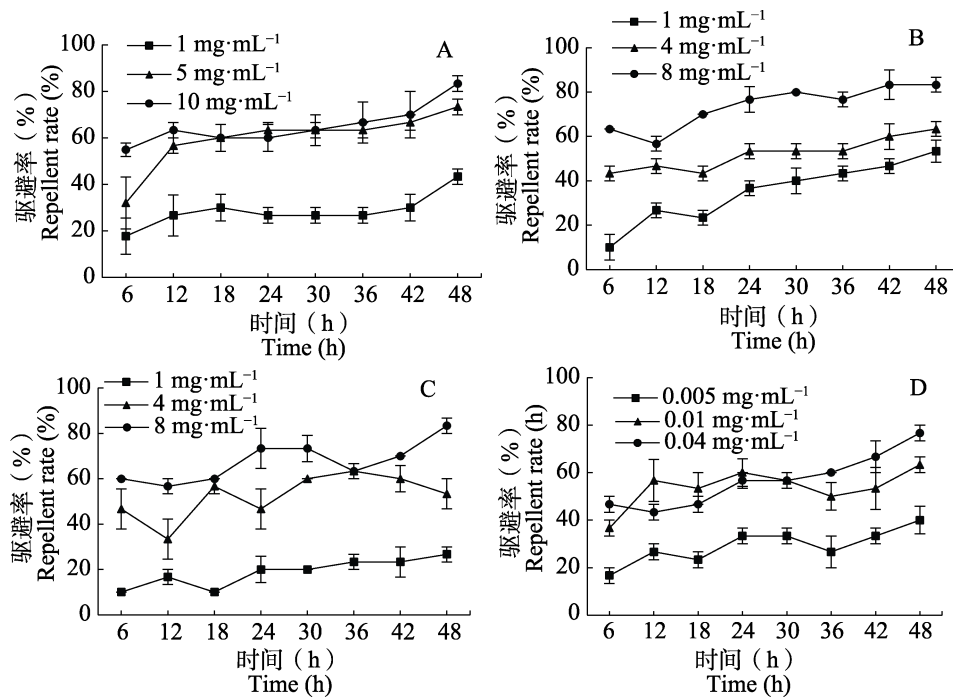


图3 亚洲小车蝗对瑞香狼毒根石油醚提取物 (A)、百里香酚 (B)、印楝素 (C) 和高效氯氟菊酯 (D) 的驱避作用
Fig. 3 Repelling effect of *Oedaleus decorus asiaticus* to petroleum ether extract of *Stellera chamaejasme* root(A), thymol(B), azadirachtin(C) and beta-cypermethrin(D)

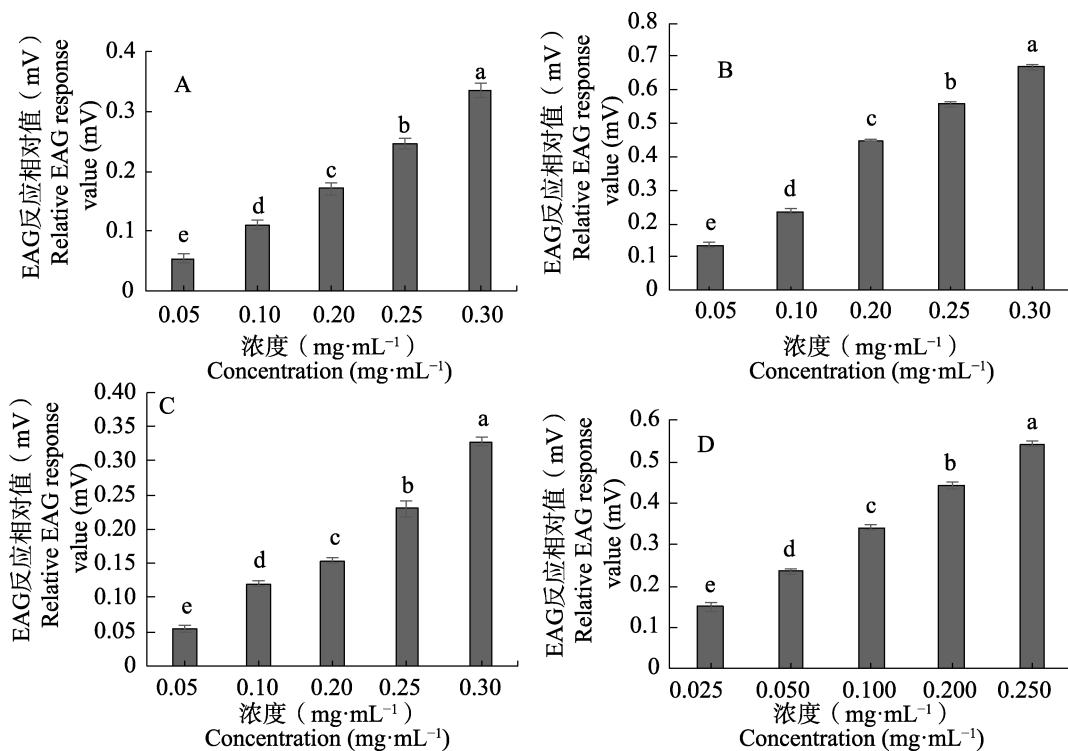


图4 亚洲小车蝗对瑞香狼毒根石油醚提取物 (A)、百里香酚 (B)、印楝素 (C) 和高效氯氟菊酯 (D) 的 EAG 反应

Fig. 4 EAG responses of *Oedaleus decorus asiaticus* to petroleum ether extract of *Stellera chamaejasme* root(A), thymol(B), azadirachtin(C) and beta-cypermethrin(D)

柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan 氏新复极差法)。

Different lowercase letters above bars indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's new multiple range test).

0.33 mV; 高效氯氰菊酯在 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 最大电位值为 0.54 mV。

3 讨论

植物型农药的作用方式多样化, 拒食和忌避是主要作用方式之一。亚洲小车蝗对 3 种植物源化合物 (瑞香狼毒根石油醚提取物、百里香酚、印楝素) 均表现出显著的拒食和驱避活性, 且具有浓度依赖性, 这与前期研究结果一致。高嫚璐等 (2013) 研究表明, 瑞香狼毒活性成分对东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 具有多种作用, 但拒食作用最为显著。田仁君等 (2005) 也发现水稻大螟 *Sesamia inferens* 幼虫对瑞香狼毒乙醇提取物有较强的拒食活性, 拒食中浓度 (AFC_{50}) 为 274.21 mg/L 。本研究中瑞香狼毒根石油醚提取物对亚洲小车蝗的 AFC_{50} ($0.461 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 相对较高, 推测可能原因包括: 1) 蝗虫体型较大, 取食量相应较大; 2) 石油醚提取物中具体拒食活性成分含量较低; 3) 不同昆虫种类对同一化合物的敏感性存在差异, 可能与各自口器感受器分布及神经传导通路不同有关。印楝素目前已经广泛应用于害虫的防治, 拒食作用、抑制生长发育和诱导细胞自噬和凋亡是印楝素的主要作用, 其中拒食作用最明显 (徐汉虹等, 2017)。林素坤等 (2020) 研究发现, 0.3% 印楝素乳油处理草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 3 龄幼虫 3 d 后, 拒食中浓度 AFC_{50} 为 0.12 mg/L 。本研究结果与之相近, 说明直翅目和鳞翅目昆虫均对印楝素有较强的拒食作用。已有研究表明, 印楝素的拒食作用主要通过激活昆虫口器味觉感受器中的拒食神经元来实现。印楝素可降低昆虫糖感受细胞的敏感性, 导致其错误评估食物的营养状况。这一作用机制在不同昆虫类群中具有普遍性, 因此本研究观察到的印楝素强拒食活性与此一致。

Y 形嗅觉仪和浸叶法的结果均表明, 亚洲小车蝗成虫对 3 种化合物有明显的驱避作用。在 Y 形嗅觉仪实验中, 瑞香狼毒根石油醚提取物和印楝素在最大浓度下的驱避率均为 86.67%, 百里香酚为 85.00%。浸叶法实验中, 3 种化合物在最

大浓度处理 48 h 后驱避率均为 83.33%。瑞香狼毒地上部的驱避率 (83.33%) 略高于根部 (81.67%), 全株的驱避率最低 (80.00%)。这一差异提示瑞香狼毒的驱避活性成分可能在地上部更高, 而不同部位混合后可能产生拮抗作用。研究也报道过类似现象, 王秀芳等 (2011) 发现百里香油在稀释 20 倍的条件下, 48 h 后对烟草甲 *Lasioderma serricorne* 的驱避率为 52.78%。本研究使用纯品百里香酚, 驱避率 (85.00%) 高于该报道, 这可能与化合物纯度有关, 也可能反映了不同昆虫对百里香酚的敏感性存在差异。在自然界中, 昆虫通过嗅觉感知植物挥发物, 并据此选择寄主和食物。Y 形嗅觉仪常用于研究昆虫嗅觉与植物挥发物的关系 (任珍珍等, 2010)。已有研究表明, 多种植物及其提取物对害虫具有驱避作用。例如, 罗勒和荆芥对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 和烟蓟马 *Thrips tabaci* 有明显的驱避作用 (Ren *et al.*, 2020), 苍耳乙醇提取物对桃蚜 *Myzus persicae* 有驱避效果 (周琼等, 2005), 印楝素对朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 的驱避率可达 70% 以上 (张惠淳等, 2013)。本研究中, 百里香和瑞香狼毒不同部位对亚洲小车蝗的驱避率均在 80% 以上, 且化合物浓度越大, 驱避作用越强, 最大浓度时 3 种化合物对亚洲小车蝗的驱避率均在 75% 以上。

触角电位技术是直接检测昆虫触角对化学气味物质的反应活性和敏感性的电生理学方法, 触角电位反应表明了昆虫对药剂、提取物、挥发物等物质的嗅觉反应。在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度下, 百里香酚的 EAG 值 (0.67 mV) 最高, 瑞香狼毒素和印楝素的 EAG 值较低 (均为 0.33 mV)。陈湖海等 (2003) 也观察到亚洲小车蝗和鼓翅皱膝蝗对苯甲醛的 EAG 反应随浓度升高而增强, 与本研究结果一致。百里香酚的 EAG 反应最强, 可能与其分子结构有关。百里香酚为单萜酚类化合物, 分子量小, 挥发性强, 容易扩散到触角感受器表面。其酚羟基结构可能与嗅觉受体蛋白形成氢键, 增强结合亲和力。印楝素和瑞香狼毒素 (双黄酮类) 的分子较大, 挥发性较低, 因此实

际到达触角感受器的分子数量较少, EAG 反应相对较弱。在浸叶法驱避实验中, 三者驱避率相当, 说明驱避行为不仅依赖挥发性嗅觉信号, 还可能涉及接触性化学感受和刺激感受。

蝗虫是草原上重要的害虫之一, 亚洲小车蝗又是北方草原的优势种。寻找绿色环保有效的植物性农药防治亚洲小车蝗, 可以降低亚洲小车蝗对草原的破坏, 又能减少环境污染, 保护草原生态环境, 维持草原生态平衡, 有利于草原可持续发展。

参考文献 (References)

- Chen HH, Zhao YX, Kang L, 2003. Olfactory response of two species of grassland locusts in the same region to plant volatile compounds. *Science China (C)*, 33(5): 421–428. [陈湖海, 赵云鲜, 康乐, 2003. 两种同域分布的草原蝗虫对植物挥发性化合物的嗅觉反应. 中国科学(C 辑), 33(5): 421–428.]
- Chen YL, 2007. Ecological Management of Major Locusts and Locust Disasters in China. Beijing: Science Press. 112–115. [陈永林, 2007. 中国主要蝗虫及蝗灾的生态学治理. 北京: 科学出版社. 112–115.]
- Du GL, Zhao HL, Tu XB, Zhang ZH, 2018. Division of the inhabitable areas for *Oedaleus decorus asiaticus* in Inner Mongolia. *Plant Protection*, 44(6): 24–31. [杜桂林, 赵海龙, 涂雄兵, 张泽华, 2018. 亚洲小车蝗在内蒙古草原宜生区划分研究. 植物保护, 44(6): 24–31.]
- FAO, 2020. Desert locust crisis: Appeal for rapid response and anticipatory action in the greater horn of African. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gao ML, Wu L, Chen L, Zhou W, Tao K, Hou TP, 2013. Bioactivity and histopathology study of the active ingredients from *Stellera chamaejasme* L. against *Locusta migratoria manilensis* (Meyen). *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 50(4): 875–880. [高嫚璐, 吴朗, 陈龙, 周卫, 陶科, 侯太平, 2013. 瑞香狼毒活性成分对东亚飞蝗的生物活性和病理学研究. 四川大学学报(自然科学版), 50(4): 875–880.]
- Isman MB, 2000. Plant essential oils for pest and disease management. *Crop Protection*, 19(8/10): 603–608.
- Lai CL, Zhang J, Shen TXP, Hao PY, Pang K, Yu XP, 2022. Review of how secondary metabolites defend plants against herbivorous insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(5): 969–978. [赖城玲, 张珺, 申屠旭萍, 郝培应, 庞琨, 俞晓平, 2022. 植物次生代谢物对植食性昆虫防御作用的研究进展. 应用昆虫学报, 59(5): 969–978.]
- Lai D, Jin XY, Wang H, Yuan M, Xu HH, 2014. Gene expression profile change and growth inhibition in *Drosophila* larvae treated with azadirachtin. *Journal of Biotechnology*, 185: 51–56.
- Li XF, Li JQ, Qing JH, Yin J, Zhang S, Cao YZ, Li KB, 2019. Screening and field effect evaluation of semiochemical mixtures attracting *Holotrichia parallela* Motschulsky. Proceedings of the 2019 Annual Academic Conference of the Chinese Society for Plant Protection. Beijing: 1. [李晓峰, 李金桥, 秦健辉, 尹姣, 张帅, 曹雅忠, 李克斌, 2019. 暗黑鳃金龟引诱剂的筛选及大田效果评价. 中国植物保护学会 2019 年学术年会. 北京: 1.]
- Li YY, Dong SK, Liu SL, Wang XX, Wen L, Wu Y, 2014. The interaction between poisonous plants and soil quality in response to grassland degradation in the Alpine region of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Plant Ecology*, 215(8): 809–819.
- Lin SK, Liu KH, Wang RF, Liu BJ, Zhang Y, Wu JYZ, Cheng DM, Xu HH, Zhang ZX, 2020. Indoor toxicity of azadirachtin to *Spodoptera frugiperda* and its field control effect. *Journal of South China Agricultural University*, 41(1): 22–27. [林素坤, 刘凯鸿, 王瑞飞, 刘本菊, 张悦, 吴吉英子, 程东美, 徐汉虹, 张志祥, 2020. 印楝素对草地贪夜蛾的毒力测定及田间防效. 华南农业大学学报, 41(1): 22–27.]
- Liu X, Guan HR, Wang TS, Meng D, Yang YF, Dai JK, Fan N, Guo B, Fu YP, He W, Wei YH, 2020. ScPNP-A, a plant natriuretic peptide from *Stellera chamaejasme*, confers multiple stress tolerances in Arabidopsis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 149: 132–143.
- Liu YM, Li RY, Zhang XY, Zhang JZ, Ma EB, Wu HH, 2020. Electroantennogram and behavioral responses of *Locusta migratoria* to two graminaceous plant volatiles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(2): 329–336. [刘永梅, 李瑞莹, 张学尧, 张建珍, 马恩波, 吴海花, 2020. 飞蝗对两种禾本科植物挥发物的触角电位和行为反应. 应用昆虫学报, 57(2): 329–336.]
- Ma CY, Du GL, Zhang ZR, Yao GM, Luo JP, Na RH, 2018. Research of grassland locust regionalization and its green prevention-control matching technology in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Grassland*, 26(4): 804–810. [马崇勇, 杜桂林, 张卓然, 姚贵敏, 罗建平, 娜仁花, 2018. 内蒙古草原蝗虫区划及其绿色防控配套技术研究. 草地学报, 26(4): 804–810.]
- Miresmailli S, Isman MB, 2014. Botanical insecticides inspired by plant-herbivore chemical interactions. *Trends in Plant Science*,

- 19(1): 29–35.
- Morgan ED, 2009. Azadirachtin, a scientific gold mine. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 17(12): 4096–4105.
- Ren XY, Wu SY, Xing ZL, Gao YL, Cai WZ, Lei ZR, 2020. Abundances of thrips on plants in vegetative and flowering stages are related to plant volatiles. *Journal of Applied Entomology*, 144(8): 732–742.
- Ren ZZ, Liu XL, Hu MY, 2010. Structure and function of insect olfactory proteins. *Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 26(6): 531–537. [任珍珍, 柳晓磊, 胡美英, 2010. 昆虫嗅觉相关蛋白的结构和功能. 中国生物化学与分子生物学报, 26(6): 531–537.]
- Sun LZ, Xu WL, Luo L, Yuan ZL, 2017. Behavioral responses of *Reticulitermes flaviceps* to *Lantana camera* leaf extracts. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(2): 365–372. [孙骊珠, 徐伟丽, 罗兰, 袁忠林, 2017. 黄胸散白蚁对马缨丹叶片提取物的嗅觉行为反应. 应用昆虫学报, 54(2): 365–372.]
- Tian RJ, Ma J, Zhou L, Zhou YM, Zhao CG, Hou TP, 2005. Bioactivity of *Stellera chamaejasme* L. against *Sesamia inferens*. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 42(6): 1266–1270. [田仁君, 马均, 周丽, 周一民, 赵纯光, 侯太平, 2005. 瑞香狼毒对稻螟的生物活性研究. 四川大学学报(自然科学版), 42(6): 1266–1270.]
- Tu XB, Du GL, Zhang ZH, 2021. Integration and application of sustainable management system against locusts & grasshoppers in China. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 1–4. [涂雄兵, 杜桂林, 张泽华, 2021. 我国蝗虫绿色防控技术体系集成与应用. 植物保护学报, 48(1): 1–4.]
- Wang XF, Ren GW, Wang XW, Zhou XS, Chen D, 2011. Contact and fumigant activities of plant essential oils against *Lasioderma serricorne* (Coleoptera: Anobiidae). *Acta Tabacaria Sinica*, 17(2): 67–70. [王秀芳, 任广伟, 王新伟, 周显升, 陈丹, 2011. 植物精油对烟草甲触杀、熏蒸和驱避作用研究. 中国烟草学报, 17(2): 67–70.]
- Wu WJ, 1988. Bioassay of insect antifeedants. *Entomological Knowledge*, 25(6): 365–367. [吴文君, 1988. 昆虫拒食剂的生物测定方法. 昆虫知识, 25(6): 365–367.]
- Xiao B, Zhou S, Zhang KJ, Liu Q, Li WJ, Gong XX, Zhao CG, Hou TP, 2005. Separation and isolation of the extract from the root of *Stellera chamaejasme* L. against *Pieris rapae* L. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 42(3): 605–609. [肖波, 周俗, 张可君, 刘倩, 李文娟, 龚晓霞, 赵纯光, 侯太平, 2005. 瑞香狼毒中杀灭菜青虫活性成分的提取与分离. 四川大学学报(自然科学版), 42(3): 605–609.]
- Xu CM, Wang JT, Li S, Liu LL, Yao GM, Wei J, Wang KF, Wang WC, Tu XB, Zhang ZH, 2021. Research progresses in control technology of locust pests. *Journal of Plant Protection*, 48(1): 73–83. [徐超民, 王加亨, 李霜, 刘路路, 姚贵敏, 伟军, 王坤芳, 王文成, 涂雄兵, 张泽华, 2021. 蝗虫综合防控技术研究进展. 植物保护学报, 48(1): 73–83.]
- Xu HH, Lai D, Zhang ZX, 2017. Research and application of botanical pesticide azadirachtin. *Journal of South China Agricultural University*, 38(4): 1–11. [徐汉虹, 赖多, 张志祥, 2017. 植物源农药印楝素的研究与应用. 华南农业大学学报, 38(4): 1–11.]
- Zhang HC, Niu XL, Yang JC, 2013. Toxicity determination and repellency activity of azadirachtin against *Tetranychus cinnabarinus*. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2013(4): 27–29. [张惠淳, 牛雄雷, 杨金琛, 2013. 印楝素对朱砂叶螨室内毒力测定及驱避作用. 辽宁农业科学, 2013(4): 27–29.]
- Zhang KJ, He YG, Zhou S, Xiao B, Hou TP, 2005. Toxicity of the extract from the root of *Stellera chamaejasme* against *Pieris rapae*. *Journal of Plant Protection*, 32(3): 305–308. [张可君, 何义国, 周俗, 肖波, 侯太平, 2005. 瑞香狼毒素对菜粉蝶幼虫的杀虫活性. 植物保护学报, 32(3): 305–308.]
- Zhang L, 2011. Advances and prospects of strategies and tactics of locust and grasshopper management. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(4): 804–810. [张龙, 2011. 国内外蝗害治理技术现状与展望. 应用昆虫学报, 48(4): 804–810.]
- Zhang X, Ma ZQ, Feng JT, Wu H, Han LR, 2015. Review on research and development of botanical pesticides. *Chinese Journal of Biological Control*, 31(5): 685–698. [张兴, 马志卿, 冯俊涛, 吴华, 韩立荣, 2015. 植物源农药研究进展. 中国生物防治学报, 31(5): 685–698.]
- Zhang XM, Zu WL, Wang XG, Shi GL, Cheng J, 2016. Contact toxicity of chamaechromone from the root of *Stellera chamaejasme* against *Tetranychus cinnabarinus*. *Journal of Beijing University of Agriculture*, 31(2): 22–25. [张雪梅, 祖伟力, 王宣高, 师光禄, 成军, 2016. 瑞香狼毒根中狼毒色原酮对朱砂叶螨的触杀毒性. 北京农学院学报, 31(2): 22–25.]
- Zhou Q, Liang GW, Zeng L, Shen SP, Cen YJ, 2005. Controlling effects of plant extracts and pesticides on *Myzus persicae* and *Lipaphis erysimi* populations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(7): 1317–1321. [周琼, 梁广文, 曾玲, 沈叔平, 岑伊静, 2005. 植物提取物和药剂对蔬菜蚜虫实验和自然种群的联合控制作用. 应用生态学报, 16(7): 1317–1321.]