

小菜蛾成虫对健康和机械损伤薄荷的嗅觉反应*

王志宇^{1**} 郝 赤¹ 王琛柱² 闫喜中^{1***}

(1. 山西农业大学农学院, 太谷 030801; 2. 中国科学院动物研究所, 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要 【目的】比较健康和机械损伤的薄荷 *Mentha spicata* 对小菜蛾 *Plutella xylostella* 成虫嗅觉反应的影响, 为筛选小菜蛾植物源驱避剂提供科学依据。【方法】利用触角电位 (EAG) 仪和 Y 型嗅觉仪分别测定小菜蛾雌、雄成虫对健康和机械损伤薄荷的触角电位和嗅觉行为反应, 通过田间试验测定雌蛾产卵选择的忌避反应。【结果】健康薄荷和机械损伤薄荷均能引起小菜蛾雌、雄成虫触角电位反应, 但损伤薄荷引起的触角电位反应值显著高于健康薄荷 ($P < 0.05$); 室内行为选择试验结果显示, 损伤薄荷对小菜蛾雌性成虫有显著驱避作用 ($P < 0.05$), 驱避指数为 53.33%, 对雌性成虫有极显著驱避作用 ($P < 0.01$), 驱避指数达到 80%; 田间产卵选择试验发现, 损伤薄荷对小菜蛾雌成虫产卵有极显著驱避作用 ($P < 0.01$), 产卵忌避指数达到 71.32%。但是健康薄荷对小菜蛾雌、雄成虫的行为选择和雌性成虫的产卵选择均无显著驱避作用 ($P > 0.05$)。【结论】机械损伤薄荷对小菜蛾成虫有较强的驱避效果, 可以对其进行驱避活性挥发物质的筛选或作为驱避源来防治小菜蛾的危害。

关键词 小菜蛾; 薄荷; EAG 反应; 行为反应; 产卵忌避

Olfactory responses of *Plutella xylostella* adults to intact and mechanically damaged *Mentha spicata* plants

WANG Zhi-Yu^{1**} HAO Chi¹ WANG Chen-Zhu² YAN Xi-Zhong^{1***}

(1. Agricultural College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract [Objectives] The olfactory responses of *Plutella xylostella* adults to intact and mechanically damaged *Mentha spicata* plants were compared in order to provide information to facilitate screening plant-volatiles repellent to this pest. [Methods] The electroantennogram (EAG) and behavioral responses of adult male and female *P. xylostella* to intact and mechanically damaged *M. spicata* plants were studied using EAG and a Y-tube olfactometer. Oviposition by female adults on intact and mechanically damaged *M. spicata* to was measured in the field. [Results] Both sexes of *P. xylostella* adults showed EAG responses to intact and mechanically damaged *M. spicata* plants but the EAG response induced by damaged plants was significantly higher than that induced by intact plants ($P < 0.05$); The results of indoor behavioral experiments show that damaged *M. spicata* were significantly repellent to adult male *P. xylostella* ($P < 0.05$, repellent index = 53.33%), and had an extremely significant repellent effect on female adults ($P < 0.01$, repellent index = 80%) A field oviposition selection experiment found that adult female *P. xylostella* had a highly significant aversion to laying eggs on damaged *M. spicata* plants ($P < 0.01$, oviposition index $\geq 71.32\%$). However, intact *M. spicata* did not significantly repel either adult female or male *P. xylostella* or oviposition by females ($P > 0.05$). [Conclusion] Mechanically damaged *M. spicata* is strongly repellent to adult *P. xylostella* and could be a source of plant volatiles to repel this pest, or used as a repellent plant to control this pest.

Key words *Plutella xylostella*; *Mentha spicata*; EAG response; behavioral response; oviposition repellence

*资助项目 Supported projects: 山西省基础研究项目 (201801D121250; 201901D111231); 农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室开放研究基金资助项目 (IPM1804); 山西农业大学引进人才科研启动基金 (2014ZZ08)

**第一作者 First author, E-mail: 15635453107@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: yanxizhong80@163.com

收稿日期 Received: 2019-09-16; 接受日期 Accepted: 2020-01-12

小菜蛾 *Plutella xylostella* (L.) 属鳞翅目菜蛾科 (Lepidoptera: Plutellidae), 是为害十字花科蔬菜的世界性害虫之一, 为害严重时可使十字花科蔬菜减产高达 90% 以上, 甚至绝收 (Macharia *et al.*, 2005), 全世界每年因小菜蛾造成的经济损失和防治费用高达 40-50 亿美元 (Zalucki *et al.*, 2012; Furlong *et al.*, 2013)。小菜蛾在我国各省区均有分布, 在长江流域及其以南地区为害尤为严重, 其在我国每年造成的经济损失和防治费用达到 7.7 亿美元 (Li *et al.*, 2016)。由于长期的使用化学农药, 且小菜蛾生活周期短, 年发生代数多等生物学特性, 使该虫已成为抗药性较为严重的害虫之一。到目前为止, 小菜蛾对涉及防治其为害的多种化学药剂产生了不同程度的抗性, 导致采用化学防治的手段治理该害虫存在很大的困难 (尤民生和魏辉, 2007; Balasubramani *et al.*, 2008; 李文萍, 2010; Furlong *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016)。因此, 寻求绿色友好的小菜蛾综合治理技术体系迫在眉睫。

植物气味在昆虫生命过程中起着重要作用, 通常昆虫利用寄主植物释放的挥发性物质寻找食物和产卵场所, 非寄主植物也可产生大量的次生代谢产物, 对昆虫表现为驱避、拒食、毒杀和生长抑制等作用 (魏辉等, 2004; Collatz and Dorm, 2013)。目前, 利用昆虫与植物间的这种“通讯”方式开发对害虫的防治技术已有很多报道。利用“推-拉”策略来防治害虫 (Cook *et al.*, 2007), 如在田间测定了大蒜 *Allium Sativum*、薄荷 *Mentha haplocalyx*、紫娇花 *Tulbaghia violacea* 等 7 种非寄主植物可以降低甘蓝蚜 *Brevicoryne brassicae*、小菜蛾 *Plutella xylostella* 和菜青虫 *Pieris rapae* 在甘蓝 *Brassica oleracea* 上的发生量 (孙梅梅等, 2016)。利用非寄主植物的提取物防治害虫, 如圣罗勒 *Ocimum sanctum*、薄荷 *Mentha piperita*、蓝桉 *Eucalyptus globulus* 和到手香 *Plectranthus amboinicus* 的乙醇提取物对埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 具有一定的驱避作用 (Lalthazuali and Mathew, 2016), 三叶蔓荆子 *Vitex trifolia* 提取物对小菜蛾有较强的拒食活性 (高燕等, 2012)。随着气相色谱-质谱联用 (Gas

chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 技术和气相色谱-触角电位联用 (Gas chromatography-electroantennographic detection, GC-EAD) 技术的发展与应用, 植物活性挥发物的筛选已经成为研究热点 (Rodriguez-Saona *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2015; 孙鹏等, 2019), 利用驱避活性物质来防治害虫的为害, 目前已经取得了很大进展 (Reddy and Guerrero, 2000)。

本课题组前期研究发现薄荷的乙醇提取物对小菜蛾有较强的驱避作用 (吴兰军等, 2016), 下一步将采用顶空法收集薄荷挥发物, 利用 GC-MS 和 GC-EAD 技术筛选薄荷对小菜蛾有驱避活性的挥发物。但有报道称寄主或非寄主植物在不同的生理状态下, 尤其在损伤或被取食后植物挥发物的种类与含量会发生显著变化 (Mulle and Hllker, 2000; 刘盟盟等, 2015; 马艳等, 2018), 那么, 我们应该在薄荷处于什么样的生理状态下进行顶空收集其挥发物或与十字花科蔬菜通过田间间作等方式对小菜蛾进行防控呢? 鉴于上述问题, 本研究利用触角电位仪、Y 型嗅觉仪、田间产卵忌避试验研究健康和机械损伤状态下薄荷对小菜蛾嗅觉行为的影响, 为下一步薄荷中活性挥发物质的筛选和通过农业防治措施来防控小菜蛾提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试昆虫 小菜蛾在山西农业大学农学院昆虫神经行为与感官生物学实验室的人工气候箱内饲养 (饲养条件为温度 25 °C, 相对湿度 70%±5%, 光照周期 14L : 10D), 采用蛭石萝卜 *Raphanus sativus* L. 苗饲养饲养。取新羽化 2-3 d 的未交配成虫作为供试虫源。

1.1.2 供试植物 以薄荷 *Mentha spicata* L. (品种为绿薄荷) 和小白菜 *Brassica chinensis* L. (品种为北京快菜) 作为供试植物, 均采用盆栽法种植于山西农业大学农学院实验站, 每盆种 1 株, 薄荷长至 10 cm 左右、小白菜 4-5 叶期作为供试植株。

1.2 方法

1.2.1 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的触角电位反应 选取鲜嫩的健康完整薄荷植株用蒸馏水清洗干净, 然后用洁净滤纸条将植株表面水分吸干, 再用打孔器在植株的叶缘部分随机打孔后轻缓置入干净的广口瓶中, 并用带有进气管和出气管的干净硅胶塞塞紧, 进气口和出气口用封口膜包好后作为损伤薄荷味源。试验过程中, 避免损伤处理后不同时间对挥发物的释放种类及释放量产生影响, 机械损伤薄荷源制备完毕后, 立即进行试验。健康薄荷味源制备除不损伤操作外, 其他步骤同上。将石蜡油 (Sigma-Aldrich) 滴到滤纸上置入广口瓶中作为对照味源。本试验供试植株均为 1 株, 6 次重复。

触角电位反应试验方法参照贾小俭等 (2017), 并稍作改进。触角电位仪为荷兰 Syntech 公司生产, 并用该公司生产的 Spike 软件采集数据。用指形管套取一只供试小菜蛾成虫, 先在 -20℃ 冰箱将其冻晕, 然后在体视显微镜下用手术刀将其触角自基部切下, 并切除触角端部的 2-3 个鞭节, 再用导电胶 (Spectra 360) 将处理好的触角两端分别连接在参考电极和记录电极上, 连续气流端口与触角相距约 1 cm, 放置供试味源广口瓶进气口用硅胶管与刺激气流发生装置相连, 出气口用硅胶管与巴斯德管相连。刺激时间为 0.5 s, 两次刺激时间间隔 30 s 以上, 以保证触角的活性完全恢复, 待基线平稳后开始测定。雌、雄成虫各重复进行 6 次试验。触角电位试验均在 17:00 - 22:00 时间段进行。

EAG 反应相对值 (V) 计算公式参照赵新成等 (2004), $V = \frac{2R}{C_1 + C_2}$, 其中 R 代表试验味源刺激物 EAG 反应值, C_1 、 C_2 分别代表试验前、后 2 次石蜡油的 EAG 反应值。

1.2.2 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的嗅觉行为反应 嗅觉行为反应试验方法参照马艳等 (2018), 并稍作改进。Y 型嗅觉仪的 Y 形管主臂长 20 cm, 内径 2.5 cm, 两侧臂长均为 15 cm, 内径 2.5 cm, 侧壁之间夹角 75°。将试验味源刺激物 (健康或损伤薄荷) 置于 Y 形管一个侧臂

上, 损伤薄荷制备方法与触角电位反应试验一致, 另一个侧臂以洁净空气作为对照, 气味源连接 QC-1B 型大气采样仪 (北京市劳动保护科学研究所), 空气流速设为 350 mL/min, 气流进入味源前, 经过活性炭过滤, 蒸馏水加湿。将小菜蛾成虫释放至 Y 形管的主臂基部进行试验, 将成虫进入试验组侧臂 10 cm 以上且停留超过 30 s 记为选择试验组, 将成虫进入对照组侧臂 10 cm 以上且停留超过 30 s 视为选择对照组, 否则视为不反应。每头供试成虫测试 5 min, 且只测试一次, 每 10 头雌虫或雄虫作为一组, 重复 3 次。每测试 5 头虫子, 调换 Y 形管两侧臂位置, 每测试一组, 用酒精彻底清洗 Y 形管, 每天测试完成后用丙酮 (天津市天力化学试剂有限公司) 清洗 Y 形管、洗气瓶与连接硅胶管。嗅觉行为反应试验均在 17:00 - 22:00 时间段进行。

小菜蛾成虫对健康和损伤薄荷挥发物的驱避指数、对照指数和反应指数计算公式参照严善春等 (2006)。

$$\text{驱避指数} = \frac{\text{选择对照臂小菜蛾总虫数}}{\text{参加测试小菜蛾总虫数}} \times 100\%,$$

$$\text{对照指数} = \frac{\text{选择试验臂小菜蛾总虫数}}{\text{参加测试小菜蛾总虫数}} \times 100\%,$$

$$\text{反应指数} = \frac{\text{选择对照臂小菜蛾总虫数} + \text{选择试验臂小菜蛾总虫数}}{\text{参加测试小菜蛾总虫数}} \times 100\%.$$

1.2.3 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的产卵忌避反应 产卵忌避反应试验方法参照 Wu 等 (2018), 并稍作改进。准备 3 个 1 m×1 m×1 m 的养虫笼, 分别命名为 A1、A2 和 A3, 在养虫笼底部的 4 个角落分别放置 2 盆小白菜植株, 养虫笼 A1 的一条对角线上分别放置 1 盆健康薄荷植株, 置于小白菜植株中间; 养虫笼 A2 的一条对角线上分别放置 1 盆损伤薄荷植株, 同样置于小白菜植株的中间; 养虫笼 A3 则不放薄荷植株, 作为对照。每笼接入新羽化 2-3 d 未交配的小菜蛾雌雄成虫 3 对, 24 h 后记录小白菜苗上落卵基数。试验设 6 个重复。

小菜蛾成虫对健康和损伤薄荷挥发物的产

卵忌避指数计算公式参照文献（纪明山等，2008）：

$$\text{产卵忌避指数} = \frac{\text{对照落卵量} - \text{处理落卵量}}{\text{对照落卵量} + \text{处理落卵量}} \times 100\%$$

对照落卵量为养虫笼 A1 和 A2 中对角线上未放置薄荷的小白菜苗上的落卵基数，处理落卵量为养虫笼 A1 和 A2 中对角线上放置薄荷的小白菜苗上的落卵基数。

1.2.4 数据分析 所有试验数据使用 SPSS19.0 进行数据分析，触角电位反应试验结果采用 *t*-检验（*t*-test）进行差异显著性分析；Y 型嗅觉仪行为选择反应试验结果采用卡方检验（*Chi-square test*）进行差异显著性分析；产卵忌避反应试验结果采用 *t*-检验（*t*-test）对产卵忌避指数进行差异显著性分析，采用 Duncan 氏多重比较法（Duncan's multiple range test）对产卵量进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的触角电位反应

测定了不同状态下的薄荷对小菜蛾雌、雄成虫的触角电位反应（表 1）。由表 1 可知，小菜蛾雌、雄成虫对健康和损伤薄荷挥发物均有电生理反应，雌虫对健康薄荷的触角电位反应相对值为（6.55±0.35），对损伤薄荷的触角电位反应相对值为（17.10±0.72），雄虫对健康薄荷的触角电位反应相对值为（3.84±0.23），对损伤薄荷的触角电位反应相对值为（14.50±0.92）。由此可见，小菜蛾雌、雄成虫对健康薄荷的触角电位反应显

著小于对损伤薄荷的反应（*P*<0.05），另外，雌虫对薄荷的触角电位反应普遍高于雄虫，且雌、雄成虫对健康薄荷的触角电位反应存在显著性差异（*P*<0.05）。

表 1 小菜蛾成虫对健康和损伤薄荷的触角电位反应
Table 1 Electroantennogram responses of *Plutella xylostella* adults to the intact and damaged *Mentha spicata*

不同状态薄荷 Different conditions of	触角电位反应相对值 Relative EAG response	
	雌虫 Female	雄虫 Male
健康薄荷 Intact <i>M. spicata</i>	6.55±0.35 bA	3.84±0.23 bB
损伤薄荷 Damaged <i>M. spicata</i>	17.10±0.72 aA	14.50±0.92 aA

表中数据为平均值±标准误；每列数据后标有不同小写字母表示同一性别的小菜蛾成虫对健康和损伤薄荷的 EAG 相对反应值存在显著性差异，每行数据后标有不同大写字母表示不同性别的小菜蛾成虫对健康或损伤薄荷的 EAG 相对反应值存在显著性差异（独立样本 *t*-检验，*P*<0.05）。

Data are mean ±SE. Values in the same column followed by different lowercase letters indicate the relative EAG responses of the same sex *P. xylostella* adults to the intact and damaged *M. spicata* are significantly different, and values within the same row followed by different capital letters indicate the relative EAG responses of the different sex *P. xylostella* adults to the intact or damaged *M. spicata* are significantly different (independent samples *t*-test, *P*<0.05).

2.2 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的嗅觉行为反应

测定了不同状态下的薄荷对小菜蛾雌、雄成虫的嗅觉行为反应（表 2）。由表 2 可知，小菜

表 2 小菜蛾雌、雄成虫对健康和损伤薄荷的行为反应

Table 2 Behavioral responses of *Plutella xylostella* adults to the intact and damaged *Mentha spicata*

不同状态薄荷 Different conditions of <i>M. spicata</i>	对照指数 (%) Control index		驱避指数 (%) Repellent index		反应指数 (%) Response index		卡方检验 <i>Chi-square test</i>	
	雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male	雌虫 Female	雄虫 Male
健康薄荷 Intact <i>M. spicata</i>	43.33	33.33	36.67	30.00	80.00	63.33	0.17 ^{n.s.}	0.05 ^{n.s.}
损伤薄荷 Damaged <i>M. spicata</i>	3.33	16.67	80.00	53.33	83.33	70.00	21.16 ^{**}	5.76 [*]

^{n.s.}: *P*>0.05; ^{*}: *P*<0.05; ^{**}: *P*<0.01.

蛾雌、雄成虫对健康薄荷的反应指数均超过了 60%, 但是经卡方检验发现健康薄荷对小菜蛾成虫无显著的驱避作用 ($P>0.05$)。小菜蛾雌、雄成虫对损伤薄荷的反应指数均超过了 70%, 损伤薄荷对雌性小菜蛾成虫的驱避指数最高, 达到 80%, 对雄性成虫也表现出了较强的驱避效果, 驱避指数为 53.33%, 经卡方检验, 损伤薄荷对小菜蛾雌、雄成虫分别有着极显著 ($P<0.01$) 和显著 ($P<0.05$) 的驱避效果。无论是对健康还是损伤薄荷, 雌性成虫比雄虫表现更加敏感, 即具有更高的反应指数和驱避指数。嗅觉行为反应测定结果基本与前面的触角电位反应结果一致。

2.3 小菜蛾成虫对不同状态下薄荷的产卵忌避反应

通过田间产卵忌避试验研究了不同状态下的薄荷对雌性小菜蛾成虫产卵选择行为的影响

(图 1)。结果显示, 健康薄荷对雌性小菜蛾成虫产卵选择的驱避效果较弱, 忌避指数仅为 7.81%, 而损伤薄荷对雌性小菜蛾成虫产卵选择则表现出很强的驱避效果, 忌避指数高达 71.32%, 二者存在极显著差异 ($P<0.01$) (图 1: A)。同时也比较了雌性小菜蛾成虫在无薄荷、健康薄荷和损伤薄荷 3 种处理下的平均落卵量, 结果发现在无薄荷和有健康薄荷的情况下, 雌性小菜蛾在小白菜幼苗上的平均落卵量分别为 (193.50 ± 4.97) 和 (181.17 ± 6.52) 粒, 二者无显著性差异 ($P>0.05$), 健康薄荷没有表现出理想的驱避效果。相比而言, 损伤薄荷却表现出较强的驱避效果, 在损伤薄荷处理下雌性小菜蛾成虫在小白菜幼苗上的平均落卵量明显降低, 数量为 (133.83 ± 4.06) 粒, 与前面无薄荷和健康薄荷两个处理组相比存在显著性差异 ($P<0.05$) (图 1: B)。产卵忌避反应测定结果基本与触角电位反应和嗅觉行为反应结果一致。

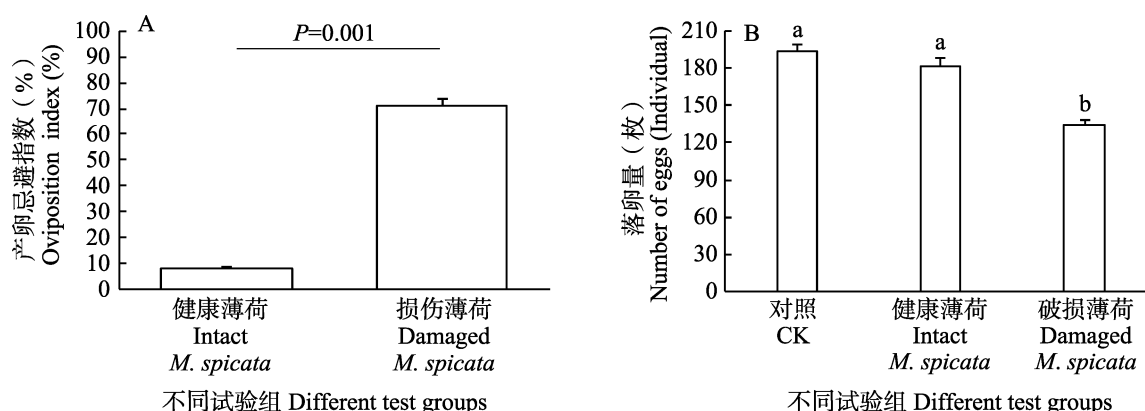


图 1 小菜蛾雌虫对健康和损伤薄荷的产卵忌避反应

Fig. 1 Oviposition repellence response of female *Plutella xylostella* to intact and damaged *Mentha spicata*

A. 雌蛾在不同试验组中的产卵忌避指数; B. 雌蛾在不同试验组中的平均落卵量。

A. The oviposition index of females in different test groups; B. The average number of eggs laid by females in different test groups.

柱上标有不同字母表示处理间经 Duncan 氏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 ($P<0.05$).

3 讨论

植食性昆虫对不同植物的取食选择行为是昆虫与植物长期协同进化过程中形成的重要生存策略。昆虫可利用植物组织的特异化学成分通过嗅觉或味觉识别寄主植物, 而植物也可以产生

大量的次生性化学物质对前来取食的昆虫造成拒避或拒食作用 (Adebisi *et al.*, 2019; 孙鹏等, 2019)。植物在遭受机械损伤、昆虫取食后会释放出一些与健康植株不同的挥发物 (沈应柏和平立岩, 2001)。一方面损伤诱导产生的挥发物可以对昆虫起到驱避、毒杀作用, 来实现植物的直

接防御,如当归 *Angelica sinensis* 在损伤后产生的挥发物对埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 具有驱避作用 (Champakaew *et al.*, 2015); 另一方面可以通过吸引昆虫的天敌来实现间接防御功能(高海波和沈应柏, 2005),如烟草 *Nicotiana tabacum* 在棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 和烟青虫 *Helicoverpa assulta* 取食后产生的挥发物对棉铃虫齿唇姬蜂 *Campoletis chloridae* 具有引诱效果(颜增光等, 2005)。

本研究利用触角电位仪、Y型嗅觉仪、田间产卵忌避试验研究了健康和机械损伤状态下薄荷挥发物对小菜蛾成虫嗅觉行为的影响, 结果发现损伤薄荷对小菜蛾雌、雄成虫均具有较强的驱避效果, 雄虫的Y型嗅觉仪行为反应的驱避指数为53.33%, 雌虫的行为反应的驱避指数高达80.00%, 且雌虫田间产卵选择忌避指数高达71.32%, 而健康薄荷对小菜蛾成虫无明显驱避效果。这说明小菜蛾成虫对不同生理状态下的薄荷植株有着不同的嗅觉反应, 与一些报道类似。损伤的落叶松 *Larix gmelinii* 对落叶松毛虫 *Dendrolimus superans* 幼虫取食和成虫产卵选择有一定的驱避作用(刘英胜等, 2009); 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 在遭受华北落叶松鞘蛾 *Coleophora sinensis* 危害后, 树体会产生一系列生理生化反应, 表现出强烈的抗虫性(薛皎亮等, 2000); 菜豆 *Phaseolus vulgaris* 在遭受二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 严重为害时释放的挥发物能够导致其它前来取食的二斑叶螨产生逃避行为(Dicke *et al.*, 1990); 对于机械损伤和被不同虫口密度的绿盲蝽 *Lygus lucorum* 雌虫刺吸后的寄主植物带花枣树 *Zizyphus jujub* 枝条, 健康花枣枝对绿盲蝽雌虫的引诱作用最强, 随着虫口密度的不断增加, 接虫具花枣枝对绿盲蝽雌虫会产生明显的驱避作用(耿冠宇等, 2012)。

损伤薄荷对小菜蛾雌、雄成虫均具有较强的驱避效果, 可能是因为薄荷受到机械损伤后其挥发物成分构成和相对含量产生了明显的改变, 这些挥发物里可能含有一些对小菜蛾具有驱避效果的化合物。有关研究表明寄主或非寄主植物在不同的生理状态下, 尤其是在损伤或被取食后植

物挥发物的种类与含量会发生显著变化(Muller and Hilker, 2000; 刘盟盟等, 2015; 马艳等, 2018)。如拟南芥 *Arabidopsis thaliana* 在受到机械损伤后, 许多挥发性组分的种类和含量都发生了巨大的改变(田云霞等, 2009)。通常, 植物受到损伤时释放的挥发物几乎是在受到损伤时立即从伤口释放到环境中(Pare and Tumlinson, 1997), 作为植物环境中许多生物体的即时信息信号(Ameye *et al.*, 2018)。据报道, 损伤的落叶松 *Larix gmelinii* 会产生对落叶松毛虫 *Dendrolimus superans* 具有驱避作用的挥发物(刘英胜等, 2009); 棉花 *Gossypium* spp. 受到棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 为害后, 叶内棉酚和单宁含量增加, 增强了棉花自身防御能力的(汤德良等, 1997); 马铃薯 *Solanum tuberosum* 植株遭受机械损伤或马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 危害后, 产生的挥发物反-2-己烯醛和反-2-己烯醇对马铃薯甲虫具有十分强烈的持续引诱效果(Bolter *et al.*, 1997); 机械损伤、茉莉酸甲酯处理及虫害等外界因素会导致新疆野苹果 *Malus sieversii* 树体内挥发性化合物组分在含量和物质种类上发生明显改变, 其中的醇类、酯类和萜烯类物质对苹果小吉丁虫 *Agrilus mali* 的引诱效果尤为显著(王明等, 2018)。

本研究明确了健康和机械损伤的薄荷植株对小菜蛾成虫嗅觉反应的影响, 发现健康薄荷能引起小菜蛾成虫微弱的触角电位反应, 但是室内行为选择和田间产卵选择试验结果显示健康薄荷对小菜蛾成虫无显著驱避效果, 而机械损伤薄荷对该虫则表现出较强的驱避效果, 本结论为建立新型的小菜蛾综合防控模式提供理论依据和技术支持。可利用损伤薄荷植株作为驱避源, 间作一些对小菜蛾具有强烈引诱作用的十字花科寄主植物组合成“推-拉”模式来防治小菜蛾。在本研究的基础上, 下一步将研究利用GC-MS和GC-EAD技术分析筛选损伤薄荷对小菜蛾产生强烈驱避作用的挥发性化学物质, 再用单品和组合进一步进行行为测定, 确定活性物质成分、配比和浓度, 为小菜蛾驱避剂等产品开发利用奠定基础, 为小菜蛾的有效防治提供新方法和

新思路。

参考文献 (References)

- Adebisi O, Dolma SK, Verma PK, Singh B, Reddy SGE, 2019. Volatile, non-volatile composition and insecticidal activity of *Eupatorium adenophorum* Spreng against diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), and aphid, *Aphis craccivora* Koch. *Toxin Reviews*, 38(2): 143–150.
- Ameye M, Allmann S, Verwaeren J, Smagghe G, Haesaert G, Schuurink RC, Audenaert K, 2018. Green leaf volatile production by plants: A meta-analysis. *New Phytologist*, 220(3): 666–683.
- Balasubramani V, Sayyed AH, Crickmore N, 2008. Genetic characterization of resistance to deltamethrin in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) from Indian. *Journal of Economic Entomology*, 101(6): 1911–1918.
- Bolter CJ, Dicke M, Loon JAV, Visser JH, Posthumus MA, 1997. Attraction of Colorado potato beetle to herbivore-damaged plants during herbivory and after its termination. *Journal of Chemical Ecology*, 23(4): 1003–1023.
- Champaew D, Junkum A, Chaithong U, Jitpakdi A, Riyong D, Sanghong R, Intirach J, Muangmoon R, Chansang A, Tuetun B, Pitasawat B, 2015. *Angelica sinensis* (Umbelliferae) with proven repellent properties against *Aedes aegypti*, the primary dengue fever vector in Thailand. *Parasitology Research*, 114(6): 2187–2198.
- Collatz J, Dorn S, 2013. A host-plant-derived volatile blend to attract the apple blossom weevil *Anthonomus pomorum*—the essential volatiles include a repellent constituent. *Pest Management Science*, 69(9): 1092–1098.
- Cook SM, Khan ZR, Pickett JA, 2007. The use of push-pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52: 375–400.
- Dicke M, Sabelis MW, Takabayashi J, Bruin J, Posthumus MA, 1990. Plant strategies of manipulating predator-prey interactions through allelochemicals: Prospects for application in pest control. *Journal of Chemical Ecology*, 16(11): 3091–3118.
- Furlong MJ, Wright DJ, Dosdall LM, 2013. Diamondback moth ecology and management: Problems, progress, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 58(1): 517–541.
- Gao HB, Shen YB, 2005. Temporal pattern of volatile emission in *Acer negundo* after mechanical damage. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 21(9): 299–301. [高海波, 沈应柏, 2005. 复叶槭机械损伤后不同时间挥发物释放规律的研究. 中国农学通报, 21(9): 299–301.]
- Gao Y, Sheng GW, Shen JX, Xiao C, 2012. Antifeeding activity of *Vitex trifolia* extracts against third-instar larvae of *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(5): 1298–1303. [高燕, 盛广为, 沈嘉祥, 肖春, 2012. 三叶蔓荆子提取物对小菜蛾的拒食活性. 应用昆虫学报, 49(5): 1298–1303.]
- Geng GY, Cui JZ, Li JQ, Zhang LJ, Gao ZL, 2012. Behavioral response of *Lygus lucorum* Meyer-Dur to volatiles of different host plants. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 27(2): 161–164. [耿冠宇, 崔建州, 李继泉, 张立娟, 高占林, 2012. 绿盲蝽对不同处理寄主挥发物的行为反应. 河北林果研究, 27(2): 161–164.]
- Ji MS, Liu SW, Gu ZM, Wei SJ, Wang YZ, 2008. Repellent activity of capsaicin and its effects on glutathione-S-transferase and Na⁺, K⁺-ATPase activity in *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Acta Entomologica Sinica*, 51(10): 1039–1043. [纪明山, 刘少武, 谷祖敏, 魏松江, 王英姿, 2008. 辣椒碱对小菜蛾的驱避活性及其体内谷胱甘肽-S-转移酶和 Na⁺, K⁺-ATP 酶活性的影响. 昆虫学报, 51(10): 1039–1043.]
- Jia XJ, Ma J, Gao B, Li XH, Zhang T, Chen SL, Wang RY, 2017. EAG and olfactory responses of *Cylas formicarius* (Coleoptera: Curculionidae) to volatiles from plants of different sweetpotato cultivars. *Acta Entomologica Sinica*, 60(11): 1285–1291. [贾小俭, 马娟, 高波, 李秀花, 张涛, 陈书龙, 王荣燕, 2017. 甘薯蚁象对不同甘薯品种植物挥发物的 EAG 和嗅觉反应. 昆虫学报, 60(11): 1285–1291.]
- Lalthazuali, Mathew N, 2016. Mosquito repellent activity of volatile oils from selected aromatic plants. *Parasitology Research*, 116(2): 821–825.
- Li WP, 2010. Insecticide resistance status and monitoring of diamondback moth (DBM) in Tianjin. *Tianjin Agricultural Sciences*, 16(4): 44–45. [李文萍, 2010. 天津市小菜蛾田间种群抗药性现状及监测. 天津农业科学, 16(4): 44–45.]
- Li ZY, Feng X, Liu SS, You MS, Furlong MJ, 2016. Biology, ecology, and management of the diamondback moth in China. *Annual Review of Entomology*, 61: 277–296.
- Liu MM, Jia L, Zang XL, Zhang RM, Gao Y, 2015. Mechanical damage on secondary metabolites from *Artemisia frigida* leaves. *Journal of Zhejiang A&F University*, 32(6): 845–852. [刘盟盟, 贾丽, 张洪芹, 臧晓琳, 张汝明, 高岩, 2015. 机械损伤对冷蒿叶片次生代谢产物的影响. 浙江农林大学学报, 32(6): 845–852.]
- Liu YS, Yan SC, Cheng H, Wang Q, Wen P, Wang YJ, 2009. Behavioural responses of *Dendrolimus superans* to dahurin larch and its nine volatiles. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(4): 72–77. [刘英胜, 严善春, 程红, 王琪, 文攀, 王艳军, 2009. 落叶松毛虫对兴安落叶松 9 种挥发性物质的行为反应. 林业科学, 45(4): 72–77.]
- 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.]
- Macharia I, Lohr B, Groote HD, 2005. Assessing the potential impact of biological control of *Plutella xylostella* L. in cabbage

- production in Kenya. *Crop Protection*, 24(11): 981–989.
- Muller C, Hilker M, 2000. The effect of a green leaf volatile on host plant finding by larvae of a herbivorous insect. *Die Naturwissenschaften*, 87(5): 216–219.
- Pare PW, Tumlinson JH, 1997. Induced synthesis of plant volatiles. *Nature*, 385(6611): 30–31.
- Reddy GVP, Guerrero A, 2000. Behavioral responses of the diamondback moth, *Plutella xylostella*, to green leaf volatiles of *Brassica oleracea* subsp. *capitata*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(12): 6025–6029.
- Rodriguez-Saona C, Poland TM, Miller JR, Stelinski LL, Grant GG, Groot PD, Buchan L, MacDonald L, 2006. Behavioral and electrophysiological responses of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, to induced volatiles of Manchurian ash, *Fraxinus mandshurica*. *Chemoecology*, 16(2): 75–86.
- Shen YB, Ping LY, 2001. Plant wound-induced volatiles and their signal functions. *Plant Physiology Journal*, 43(3): 261–266. [沈应柏, 平立岩, 2001. 植物创伤诱导挥发物及其信号功能. 植物生理学报, 43(3): 261–266.]
- Sun MM, Chen JH, Yao HY, Cai WG, 2016. Field repellent effects of several non-host plants on main cabbage pests. *Ningbo Agricultural Technology*, 28(8): 1374–1380. [孙梅梅, 湛江华, 姚红燕, 柴伟纲, 2016. 几种非寄主植物对甘蓝主要害虫的田间驱避作用比较. 宁波农业科技, 28(8): 1374–1380.]
- Sun P, Dilinuer AMT, Gou CQ, Feng HZ, 2019. EAG and olfactory behavioral responses of *Lygus pmtensis* to volatiles from seven host plants species. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(2): 316–326. [孙鹏, 迪丽努尔·艾麦提, 苟长青, 冯宏祖, 2019. 牧草盲蝽对七种寄主植物不同挥发物的 EAG 和行为反应. 应用昆虫学报, 56(2): 316–326.]
- Tang DL, Wang WG, Tan WJ, Guo YY, 1997. Changes of contents of some substances in cotton leaves induced by cotton boll worm *Helicoverpa armigera* (Hubner) attack. *Acta Entomologica Sinica*, 40(3): 332–333. [汤德良, 王武刚, 谭维嘉, 郭予元, 1997. 棉铃虫为害诱导棉花内物质含量变化. 昆虫学报, 40(3): 332–333.]
- Tian YX, Dai SJ, Chen SX, Yan XF, 2009. Effect of mechanical wounding on glucosinolate content and composition in rosette leaves of *Arabidopsis thaliana*. *Acta Ecologica Sinica*, 29 (4): 1647–1654. [田云霞, 戴绍军, 陈思学, 阎秀峰, 2009. 机械损伤对拟南芥莲座叶芥子油苷含量和组成的影响. 生态学报, 29(4): 1647–1654.]
- Wang M, Cui XN, Sun KK, Liu DG, 2018. Effects of different inducing conditions on volatiles released from *Malus sieversii* trees. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 46 (6): 1–11. [王明, 崔晓宁, 孙可可, 刘德广, 2018. 诱导条件对新疆野苹果树挥发物释放的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 46 (6): 1–11.]
- Wei H, Hou YM, Yang G, You MS, 2004. Repellent and antifeedant effect of secondary metabolites of non-host plants on *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 15(3): 473–476. [魏辉, 侯有明, 杨广, 尤民生, 2004. 非嗜食植物次生物质对小菜蛾产卵驱避和拒食作用的研究. 应用生态学报, 15(3): 473–476.]
- Wu H, Li RT, Dong JF, Jiang NJ, Huang LQ, Wang CZ, 2018. An odorant receptor and glomerulus responding to farnesene in *Helicoverpa assulta*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, doi: org/10.1016/j.ibmb.2018.11.006.
- Wu LJ, Li S, Xie JX, Sun XJ, Yan XZ, Hao C, 2016. Effects of stem and leaf ethanol extracts from *Mentha spicata* L. on antifeeding and antioviposition of diamondback moth *Plutella xylostella* (L.). *Journal of Plant Protection*, 43(6): 1007–1013. [吴兰军, 李霜, 谢俊昕, 孙学俊, 闫喜中, 郝赤, 2016. 绿薄荷茎和叶的乙醇提取物对小菜蛾拒食和产卵忌避活性的影响. 植物保护学报, 43(6): 1007–1013.]
- Xue JL, Xie YP, Liu JQ, Wang JS, Ji WR, 2000. A study on the variation of some chemical substances in the body of larch induced by the damage from the larch case-bearer. *Scientia Silvae Sinicae*, 36(4): 46–50. [薛皎亮, 谢映平, 刘计权, 王全胜, 冀卫荣, 2000. 鞘蛾危害后诱导华北落叶松体内化学物质变化的研究. 林业科学, 36(4): 46–50.]
- 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. [严善春, 程红, 杨慧, 袁红蛾, 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.]
- Yan ZG, Yan YH, Wang CZ, 2005. *Helicoverpa armigera* and *Helicoverpa assulta* feed-induced tobacco volatiles attract *Campoletis chloridae*. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1220–1227. [颜增光, 阎云花, 王琛柱, 2005. 棉铃虫和烟青虫取食诱导的烟草挥发物吸引棉铃虫齿唇姬蜂. 科学通报, 50(12): 1220–1227.]
- You MS, Wei H, 2007. *Plutella xylostella* Research. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House Press. 176–242. [尤民生, 魏辉, 2007. 小菜蛾的研究. 北京: 中国农业出版社. 176–242.]
- Zalucki MP, Shabbir A, Silva R, Adamson D, Liu SS, Furlong MJ, 2012. Estimating the economic cost of one of the world's major insect pests, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae): Just how long is a piece of string? *Journal Economic Entomology*, 105(4): 1115–1129.
- Zhang ZQ, Bian L, Sun XL, Luo ZX, Xin ZJ, Luo FJ, Chen ZM, 2015. Electrophysiological and behavioural responses of the tea geometrid *Ectropis obliqua* (Lepidoptera: Geometridae) to volatiles from a non-host plant, rosemary, *Rosmarinus officinalis* (Lamiaceae). *Pest Management Science*, 71(1): 96–104.
- Zhao XC, Yan YH, Wang R, Wang CZ, 2004. Techniques used in insect neurobiology research: Electroantennogram recording. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 41(3): 270–274. [赵新成, 阎云花, 王睿, 王琛柱, 2004. 昆虫神经生物学研究技术: 触角电位图记录. 应用昆虫学报, 41(3): 270–274.]