



张宏园, 周文斌, 王思洁, 陈晓, 陈岗, 丁以纾, 方亮, 吴子云, 吴国星, 董文霞. 斜纹夜蛾幼虫虫粪粗提物对叉角厉蝽行为的影响及化学成分分析 [J]. 环境昆虫学报, 2026, 48 (2): 541-549. ZHANG Hong-Yuan, ZHOU Wen-Bin, WANG Si-Jie, CHEN Xiao, CHEN Gang, DING Yi-Shu, FANG Liang, WU Zi-Yun, WU Guo-Xing, DONG Wen-Xia. Behavioral effect of frass extract from *Spodoptera litura* on *Eocanthecona furcellata* and its chemical components analysis [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2026, 48 (2): 541-549.

斜纹夜蛾幼虫虫粪粗提物对叉角厉蝽行为的影响及化学成分分析

张宏园¹, 周文斌¹, 王思洁¹, 陈晓¹, 陈岗², 丁以纾², 方亮²,
吴子云², 吴国星¹, 董文霞^{1*}

(1. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201; 2. 云南省烟草公司楚雄州分公司, 云南楚雄 675000)

摘要: 【目的】为了探究斜纹夜蛾幼虫虫粪挥发物在叉角厉蝽定位猎物过程中的作用, 本研究分析了该虫粪对叉角厉蝽行为的影响并进行了化学成分鉴定。【方法】本研究使用溶剂浸提法对斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪中的化合物进行了提取, 通过Y型嗅觉仪测定了叉角厉蝽成虫对虫粪粗提物的行为反应; 利用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 和气相色谱 (GC) 对粗提物中的化学成分进行了定性定量分析; 还通过气相色谱-触角电位联用仪 (GC-EAD) 测试了叉角厉蝽成虫对粗提物的电生理反应。【结果】研究表明, 斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物对叉角厉蝽雌雄成虫均有吸引作用, 从斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪的粗提物中鉴定出10种化合物, 其中有8种能引起叉角厉蝽雌雄成虫的触角电位反应, 分别是尼古丁、新植二烯、十六酸、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇。【结论】这些结果表明, 在叉角厉蝽对斜纹夜蛾幼虫进行嗅觉定位过程当中, 来自虫粪中的烟草残渣和虫粪自身的挥发物均发挥作用, 而上述8种化合物可能起主要作用。

关键词: 斜纹夜蛾; 叉角厉蝽; 虫粪; 信息化合物; 嗅觉定位

中图分类号: Q965; Q966

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2026) 02-0541-09

Behavioral effect of frass extract from *Spodoptera litura* on *Eocanthecona furcellata* and its chemical components analysis

ZHANG Hong-Yuan¹, ZHOU Wen-Bin¹, WANG Si-Jie¹, CHEN Xiao¹, CHEN Gang², DING Yi-Shu², FANG Liang², WU Zi-Yun², WU Guo-Xing¹, DONG Wen-Xia^{1*} (1. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Tobacco Company Chuxiong Branch, Chuxiong 675000, Yunnan Province, China)

Abstract: 【Aim】 To clarify the role of volatiles from *Spodoptera litura* larval frass in mediating prey location by *Eocanthecona furcellata*, this study examined the behavioral effect of the frass extract on *E. furcellata* and analyzed its chemical composition. 【Methods】 Solvent extraction was used to obtain the frass extract from third instar larvae of *S. litura*, and the behavioral responses of adult *E. furcellata* to the extract were assessed using a Y-tube olfactometer. Then the compounds in the crude extract were identified and quantified using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and gas chromatography (GC), while the electrophysiological responses of *E. furcellata* to the extract were determined via gas chromatography coupled with electroantennographic detection (GC-EAD). 【Results】 The results showed that both female

基金项目: 中国烟草总公司云南省公司重点科技项目 (2023530000241012)

作者简介: 张宏园, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为昆虫生态学, E-mail: aiyuan2409@163.com

*通讯作者 Author for correspondence: 董文霞, 女, 研究员, 主要研究化学生态学, E-mail: dongwenxia@163.com

收稿日期 Received: 2024-10-07; 修回日期 Revision received: 2025-01-05; 接受日期 Accepted: 2025-01-09

and male *E. furcellata* were attracted to the frass extract, and ten compounds were identified from it. Among these, eight elicited GC-EAD responses in both sexes of *E. furcellata*: *L*-nicotine, neophytadiene, hexadecanoic acid, phytol, linoleic acid, ethyl linolenate, octadecanoic acid, and 1,5,9-Trimethyl-12-isopropyl-4,8,13-cyclotetradecatriene-1,3-diol. **[Conclusion]** The results suggest that both tobacco residue-associated odors in the frass and intrinsic frass volatiles, especially the eight compounds identified above, significantly contribute to the prey localization of *E. furcellata* via olfactory cues.

Key words: *Spodoptera litura*; *Eocanthecona furcellata*; frass; semiochemicals; olfactory location

斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 具分布地区广、食性杂等特点，是间歇性暴发的世界性害虫 (Meagher *et al.*, 2008; Ramaiah, 2018)。斜纹夜蛾是烟草上最重要的害虫之一，4龄幼虫进入暴食期，幼虫取食烟草叶片、茎秆、花蕾，常常造成烟草叶片缺刻严重，影响烟草的产量和质量 (Kumar and Ray, 2007)。为了提高烤烟产量和品质，喷施生物药剂和释放天敌昆虫是目前防治防控斜纹夜蛾的主要方法。叉角厉蝽 *Eocanthecona furcellata* 属半翅目 Hemiptera 蝽科 Pentatomidae 厉蝽属 *Eocanthecona*，主要捕食鳞翅目、膜翅目、鞘翅目、半翅目等多种害虫，偏好捕食鳞翅目幼虫，特别是对斜纹夜蛾幼虫具有较强的捕食能力，且对斜纹夜蛾 3~4 龄幼虫的捕食量较大 (Tuan *et al.*, 2016; Chaudhary *et al.*, 2022)。因此，斜纹夜蛾 3~4 龄幼虫是释放叉角厉蝽进行天敌防治的关键时期 (陈然等, 2015; 苑金戈等, 2024)。

捕食性天敌昆虫通过嗅觉来选择栖息地和寻找猎物，主要依赖于三个信息来源：猎物的寄主植物释放的气味、猎物及其排泄物或分泌物 (例如粪便、蜜露或其他分泌物) 的气味 (魏成梅等, 2021; Rusch *et al.*, 2022)。其中，猎物的粪便可以作为信息传递的媒介，是引发天敌的捕食定位行为的因素之一 (Weiss, 2003, 2006; Stewart-Jones *et al.*, 2006; 杨晓杰等, 2019)。“粪盾”是指部分昆虫利用自身粪便覆盖部分或全部身体部位，形成一种物理和化学的屏障，与没有粪盾覆盖的黄栌胫跳甲 *Ophrida xanthospilota* 相比，身披“粪盾”的黄栌胫跳甲更能吸引蠋蝽 *Arma custos* 对黄栌胫跳甲进行喙的刺探，在棉球上添加了黄栌胫跳甲虫粪提取物后加强了蠋蝽的刺探行为 (Huang *et al.*, 2023)。番茄潜叶蛾 *Tuta absoluta* 2 龄和 3 龄幼虫的新鲜粪便对它的捕食性天敌烟盲蝽 *Nesidiocoris tenuis* 成虫有显著的引诱作用 (Ayelo *et al.*, 2021)。与单独的烟草植株相比，添加了斜

纹夜蛾 3~4 龄幼虫虫粪的烟草植株对红彩真猎蝽 *Harpactor fuscipes* 成虫的引诱作用更强，且虫粪中的亚麻酸乙酯对其具有引诱作用 (朱丹荔, 2016)。已有研究表明，斜纹夜蛾幼虫的新鲜粪便、新鲜粪便的溶剂提取物能引起叉角厉蝽的伸喙反应，进一步的研究发现斜纹夜蛾幼虫粪便的溶剂提取物中含有叶绿醇，且人工合成的叶绿醇也能引起叉角厉蝽 4~5 龄若虫的伸喙反应 (Rani and Wakamura, 1993; Yasuda, 1997)。但是，除叶绿醇之外，斜纹夜蛾幼虫的虫粪中是否还有其它化合物在叉角厉蝽的猎物定位过程中起作用？

为了明确斜纹夜蛾幼虫虫粪中的化合物在叉角厉蝽捕食定位猎物中的作用，本研究利用溶剂浸法对斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪进行了提取；利用 Y 型嗅觉仪器测定了叉角厉蝽成虫对斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪粗提物的行为反应，利用 GC-MS 和 GC 对虫粪中的挥发性化合物进行了定性定量分析，利用 GC-EAD 测定了叉角厉蝽成虫对虫粪粗提物的电生理反应。本研究将为阐明叉角厉蝽对斜纹夜蛾幼虫的嗅觉定位机制提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试昆虫

叉角厉蝽来自云南农业大学昆虫饲养室中的大规模饲养群体，饲养条件 (27 ± 2) °C，相对湿度 (60 ± 20) %，光周期为 L : D = 14 : 10。以黄粉虫蛹饲喂叉角厉蝽，成虫在养虫笼里交配、产卵，将卵取出放入有湿棉球的培养皿单独饲养，饲养至 2 龄若虫放入养虫笼，直至死亡。

斜纹夜蛾蛹从公司购买，放置于养虫笼 (40 cm × 40 cm × 40 cm) 中，羽化后用 10% 蜂蜜水饲喂，在温度为 (27 ± 2) °C、相对湿度 (60 ± 20) %、光周期为 L : D = 14 : 10 的条件下饲养。幼虫放于

塑料养虫盒 (20 cm × 10 cm × 5 cm) 中喂新鲜烟草 (品种为 K326) 叶片, 直至化蛹。

1.1.2 供试化合物

供试标准化合物信息见表 1。

表 1 标准化化合物的纯度及来源

Table 1 Purity and sources of standard compounds

化合物 Compounds	纯度 (%) Purity	来源 Source
正己烷 Hexane	98.0	Merck
尼古丁 <i>L</i> -Nicotine	98	J&K
新植二烯 Neophytadiene	80	J&K
十六酸 Hexadecanoic acid	97.5	J&K
十八酸 Octadecanoic acid	98	J&K
叶绿醇 Phytol	90	J&K
亚油酸 Linoleic acid	99	J&K
亚麻酸甲酯 Methyl linolenate	99	J&K
亚麻酸乙酯 Ethyl linolenate	98	源叶

1.2 试验方法

1.2.1 虫粪挥发物的提取

试验于 2024 年 3–8 月在云南农业大学植物保护学院进行。将斜纹夜蛾 3 龄幼虫的虫粪收集于 4 mL 棕色样品瓶中, 取 0.5 g 虫粪浸泡于 1 mL 正己烷中, 浸泡 1 h 后, 吸出得到 250 μ L 粗提液于 2 mL 棕色样品瓶中, 将粗提液保存于 -20°C 的冰箱中备用。试验重复 3 次。

1.2.2 叉角厉蝽成虫对斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪粗提物的定向行为测定

采用 Y 型嗅觉仪 (嗅觉仪主臂、两侧臂长均为 15 cm、直径均为 3 cm, 侧臂间夹角为 60°) 分别对叉角厉蝽雌、雄成虫进行定向行为测定, 参照魏波等 (2020) 的方法, 取 40 μ L (即 20 mg 当量) 斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪粗提物作为处理, 等体积的正己烷作为对照。使用流量计测定通过嗅觉仪两侧臂的气流的速度, 使侧臂的气流速度均为 100 mL/min, 试验前通气 2 min, 使气味充满管道。每头叉角厉蝽仅测试 1 次, 5 min 内叉角厉蝽爬向任意一侧臂并停留 30 s 以上则记为选择, 反之则记为无选择, 有效选择次数 30 次。每测完 3 次重复后, 调换 Y 型嗅觉仪两侧臂的位置, 以避免位置效应的影响。测试 6 头成虫之后, 清洗和更换 Y

型嗅觉仪, 并分别更换加有虫粪粗提物和对照正己烷的滤纸条。以 30 W 的日光灯照明, Y 型嗅觉仪主臂以及两侧臂的光照强度为 300 lx, 试验温度为 $(25 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $(40 \pm 10)\%$ 。使用摄像机 (微学视 M11, 像素 1 200W) 捕捉叉角厉蝽雌、雄成虫在 5 min 内的行为活动。

1.2.3 斜纹夜蛾虫粪粗提物的化学组分鉴定及定量分析

通过气相色谱-质谱联用仪 GC-MS 与气相色谱 GC 对斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪粗提物成分进行鉴定及定量分析。GC 和 MS 条件同 Jiang 等 (2015) 的方法, 通过核对标准谱库 (Wiley7n.1) 与标准化化合物的质谱图, 根据标准化化合物的保留时间对提取物组分进行定性分析。毛细色谱柱是 HP-5 毛细管柱 (30 m × 0.32 mm × 0.25 μ m)。气相色谱 GC 升温程序: 柱温箱初始温度为 40°C , 以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 150°C , 再以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 200°C , 最后以 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 260°C , 维持此温度 25 min。进样口温度为 250°C ; 载气为高纯氦气, 流速 3 mL/min, 分流进样, 分流比是 10 : 1。质谱 MS 条件: 电离电压为 70 eV, 质子扫描范围 35–500 amu, 扫描速度 1 666 amu/s, 扫描间隔 0.3 s, 溶剂延迟 3 min, 离子源温度为 230°C , 接口温度为 250°C 。单次进样量 2 μ L。重复 3 次。

在 GC 上分别测定直链烷烃和待鉴定物质的保留时间, 采用 Zhang 等 (2019a) 的方法计算待鉴定物质的保留指数, 然后通过比对标准品的保留时间和查询 NIST 化学网络手册 (NIST Mass Spec Data Center, 2020) 的保留指数, 对粗提物中的化学成分进一步核对。通过峰面积比较法对全部的 10 种化合物进行相对定量分析, 采用绝对校正曲线法对有标准样品的尼古丁、新植二烯、十六酸、亚麻酸甲酯、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸 8 种化合物进行绝对定量分析。

1.2.4 叉角厉蝽成虫对斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪挥发物的 GC-EAD 反应

利用气相色谱 (GC, Agilent 7890A) - 触角电位联用仪 (EAG, Syntech) 测定叉角厉蝽成虫对虫粪粗提物的电生理反应。参考 Zhang 等 (2019b) 的方法, 将叉角厉蝽成虫整根触角从基部剪下, 用刀片在显微镜下削去触角端部的一小部分, 然后在金属电极上均匀涂抹导电胶 (Spectra 360

Electrode Gel, Parker Laboratories Inc.), 将触角的基部和端部搭在金属电极的两端上。等待EAD的基线稳定后便开始记录触角受刺激的信号。每个样品重复3次。GC条件同1.2.3。

1.2.5 数据处理

采用Excel对试验数据进行平均值和标准误差计算; 利用卡方检测分析叉角厉蝽雌、雄成虫分别选择嗅觉仪两臂之间的数目的显著性差异; 采用EthoVision XT 13软件绘制叉角厉蝽雌、雄成虫在Y型嗅觉仪两侧臂中停留时间的热区图; 对虫粪粗提物中的化合物含量进行单因素方差分析, 然后采用Tukey检验比较不同化合物含量的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 叉角厉蝽成虫对斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物的定向行为反应

在Y型嗅觉仪中, 叉角厉蝽雌、雄成虫选择斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物的数量显著多于对照正己烷(雌虫: $\chi^2 = 8.535$, $P = 0.004$; 雄虫: $\chi^2 = 4.800$, $P = 0.021$) (图1)。将叉角厉蝽雌、雄成虫在Y型嗅觉仪两侧臂中的停留时间做成热区图, 发现叉角厉蝽雌、雄成虫都是在放样品的一臂停留较久(图1)。结果表明, 斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物对叉角厉蝽成虫具有引诱作用。

2.2 斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪挥发物的成分定性和定量分析

2.2.1 斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪挥发物的成分定性分析

从斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪的粗提物中鉴定出10种物质: 尼古丁、新植二烯、西松烯、十六酸、亚麻酸甲酯、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸、(1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇)(图2, 表2)。

2.2.1 斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物的成分定量分析

在斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物中, 10种化合物的相对含量顺序为: 新植二烯 > 叶绿醇、亚麻酸乙酯 > 尼古丁、十六酸 > 1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇 > 亚油酸 > 亚麻酸甲酯 > 十八酸 > 西松烯(表3); 8种化合物的

绝对含量的顺序为: 新植二烯 > 亚油酸 > 十六酸 > 亚麻酸乙酯 > 叶绿醇 > 尼古丁 > 亚麻酸甲酯、十八酸(表3)。

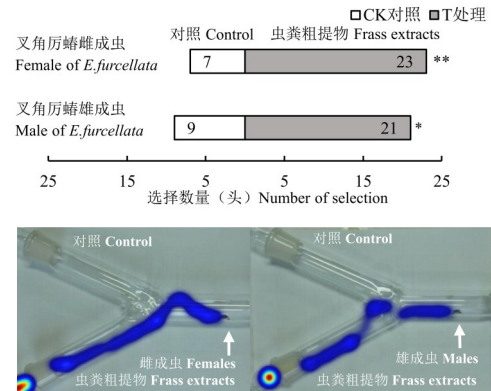


图1 叉角厉蝽成虫在Y型嗅觉仪中对斜纹夜蛾3龄幼虫虫粪粗提物的选择反应及停留时间的热区图

Fig. 1 Olfactory responses and heat map of resident time of adult of *Eocanthecona furcellata* to the frass extracts of third-instar *Spodoptera litura* larvae in a Y-tube olfactometer

注: *表示为差异显著 $P < 0.05$; **表示为差异极显著 $P < 0.01$; 图中Y型嗅觉仪热区图的颜色越深, 表明叉角厉蝽的停留时间越长。Note: * indicated significant difference at $P < 0.05$, and ** indicated significant difference at $P < 0.01$. The darker the color of heat map in a Y-tube olfactometer indicated the longer the resident time of *E. furcellata*.

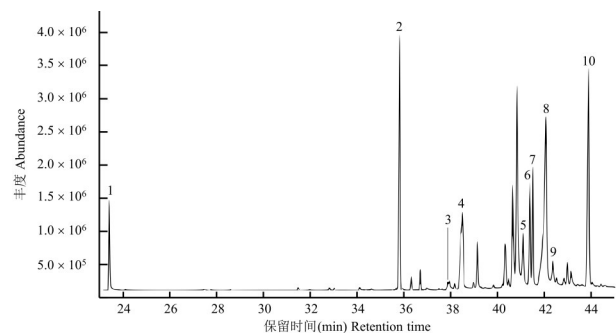


图2 斜纹夜蛾虫粪挥发物GC-MS鉴定图

Fig. 2 GC-MS chromatogram from hexane extracts of *Spodoptera litura* frass

注: 1, 尼古丁; 2, 新植二烯; 3, 西松烯; 4, 十六酸; 5, 亚麻酸甲酯; 6, 叶绿醇; 7, 亚油酸; 8, 亚麻酸乙酯; 9, 十八酸; 10, 1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇。Note: 1, *L*-Nicotine; 2, Neophytadiene; 3, 1, 3, 6, 10-Cyclotetradecatetraene; 4, Hexadecanoic acid; 5, Methyl linolenate; 6, Phytol; 7, Linoleic acid; 8, Ethyl linolenate; 9, Octadecanoic acid; 10, 1, 5, 9-Trimethyl-12-isopropyl-4,8,13-cyclotetradecatriene-1,3-diol.

表2 斜纹夜蛾幼虫粪挥发性化合物成分鉴定

Table 2 Identification of volatile compounds in the frass of *Spodoptera litura*

序号 No.	成分 Compounds	保留时间 (min) Retention time	保留指数 Retention index	参考保留指数 Retention index reference	鉴定方法 Identification methods
1	尼古丁 <i>L</i> -Nicotine	23.50	1 350	1 346	MS, RI, Std
2	新植二烯 Neophytadiene	35.84	1 837	1 834	MS, RI, Std
3	西松烯 1,3,6,10-Cyclotetradecatetraene	37.90	1 914	1 916	MS, RI
4	十六酸 Hexadecanoic acid	38.53	1 984	1 983	MS, RI, Std
5	亚麻酸甲酯 Methyl linolenate	41.12	2 054	2 095	RI, Std
6	叶绿醇 Phytol	41.41	2 110	2 113	MS, RI, Std
7	亚油酸 Linoleic acid	41.54	2 130	2 130	MS, RI, Std
8	亚麻酸乙酯 Ethyl linolenate	42.09	2 146	2 146	MS, RI, Std
9	十八酸 Octadecanoic acid	42.40	2 168	2 171	MS, RI, Std
10	1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇 1,5,9-Trimethyl-12-isopropyl-4,8,13-cyclotetradecatriene-1,3-diol	43.92	2 231	-	MS

注: Retention index 的计算由 HP-5 获得, Retention index reference 是 NIST 数据库 (NIST Mass Spec Data Center, 2020) 和文献 (Adams RP, 2001) 中的保留指数。Note: Retention index calculation was obtained by HP-5. Retention index reference was obtained from the NIST database (NIST Mass Spec Data Center, 2020) and literature (Adams RP, 2001).

表3 斜纹夜蛾幼虫粪挥发性化合物定量分析

Table 3 Amount of the identified compounds in the frass of *Spodoptera litura*

成分 Compounds	校正的浓度范围 ($\mu\text{g/mL}$) Calibration range	校准公式 Calibration equation	相关系数 (R^2) Correlation coefficient	峰面积 (%) Area	含量 ($\mu\text{g/g}$) Amount
尼古丁 <i>L</i> -Nicotine	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.0407x + 0.5775$	0.9979	13.59 ± 0.73 c	54.88 ± 3.35 f
新植二烯 Neophytadiene	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.1298x - 7.8862$	0.9981	23.09 ± 0.20 a	275.26 ± 2.05 a
西松烯 1,3,6,10-Cyclotetradecatetraene	-	-	-	0.17 ± 0.01 h	-
十六酸 Hexadecanoic acid	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.1146x + 16.05$	0.9972	12.95 ± 0.34 c	176.20 ± 3.75 c
亚麻酸甲酯 Methyl linolenate	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.0934x + 6.6546$	0.9988	3.54 ± 0.20 f	45.45 ± 2.08 g
叶绿醇 Phytol	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.0628x + 2.6803$	0.9991	15.39 ± 0.35 b	99.20 ± 1.52 e
亚油酸 Linoleic acid	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.1766x + 38.972$	0.9943	6.74 ± 0.24 e	193.41 ± 3.25 b
亚麻酸乙酯 Ethyl linolenate	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.1033x + 4.3372$	0.9908	14.82 ± 0.24 b	157.28 ± 1.84 d

续表 3 Continued table 3

成分 Compounds	校正的浓度范围 ($\mu\text{g/mL}$) Calibration range	校准公式 Calibration equation	相关系数 (R^2) Correlation coefficient	峰面积 (%) Area	含量 ($\mu\text{g/g}$) Amount
十八酸 Octadecanoic acid	100, 150, 200, 300, 350	$y = 0.1511x + 11.61$	0.9982	1.33 ± 0.09 g	42.71 ± 1.29 g
1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇 1,5,9-Trimethyl-12-isopropyl-4,8,13-cyclotetradecatriene-1,3-diol	-	-	-	8.38 ± 0.18 d	-

注：在显著性比较中，具有相同字母的化合物含量差异不显著。Note: In the significance comparisons, the same letter indicated no significant differences in the content of compounds containing.

2.3 叉角厉蜻对斜纹夜蛾三龄幼虫虫粪粗提物的 GC-EAD 反应

斜纹夜蛾 3 龄幼虫虫粪粗提物中有 8 种物质引起其叉角厉蜻雌、雄成虫的触角电位反应，分别

为：尼古丁、新植二烯、十六酸、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇（图 3）。

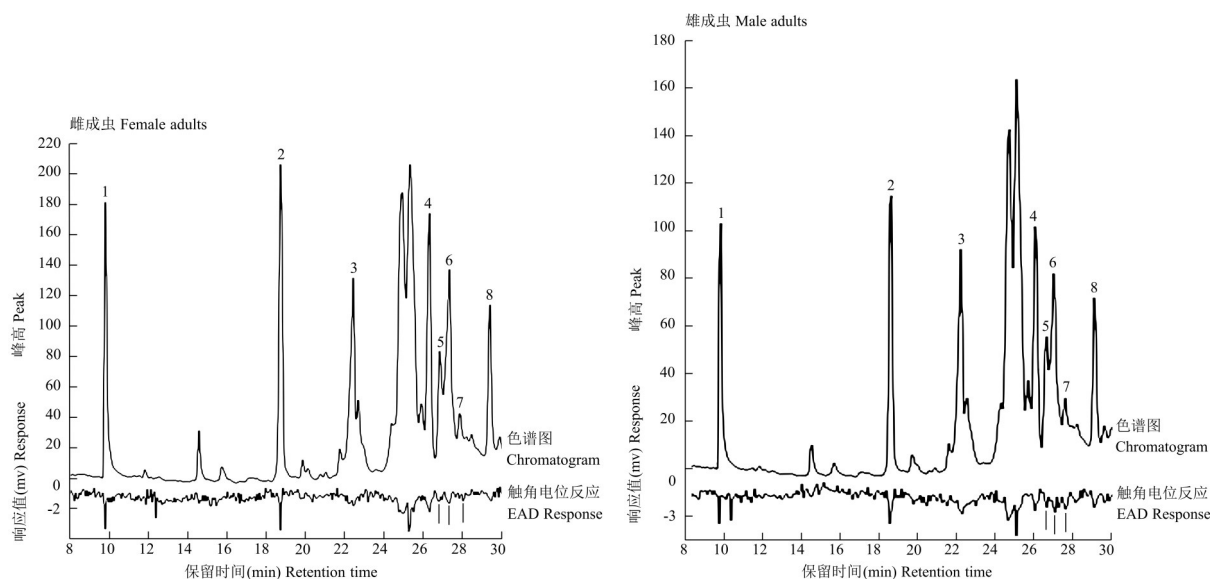


图 3 叉角厉蜻雌、雄成虫对斜纹夜蛾幼虫虫粪的 GC-EAD 反应

Fig. 3 GC-EAD responses of the female and male adults of *Eocanthecona furcellata* to the extracts of larval frass of *Spodoptera litura*
注：1, 尼古丁；2, 新植二烯；3, 十六酸；4, 叶绿醇；5, 亚油酸；6, 亚麻酸乙酯；7, 十八酸；8, 1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇。Note: 1, *L*-Nicotine; 2, Neophytadiene; 3, Hexadecanoic acid; 4, Phytol; 5, Linoleic acid; 6, Ethyl linolenate; 7, Octadecanoic acid; 8, 1,5,9-Trimethyl-12-isopropyl-4,8,13-cyclotetradecatriene-1,3-diol.

3 结论与讨论

本研究的 Y 型嗅觉仪结果表明，斜纹夜蛾 3 龄幼虫的虫粪粗提物能显著吸引叉角厉蜻雌、雄成虫，这说明虫粪粗提物中存在吸引叉角厉蜻向斜

纹夜蛾幼虫定位的挥发性信息物质。有研究表明，与取食白菜、豇豆、红薯叶片的斜纹夜蛾 6 龄幼虫相比，取食烟草的斜纹夜蛾 6 龄幼虫将植物组织转化为粪便的转化率最高 (Xue *et al.*, 2010)。但是，以烟草为食的斜纹夜蛾幼虫虫粪中含有更多或者

浓度更高的信息化合物,这些化合物是否对叉角厉蝽的行为有影响,还需要进一步的研究。

本研究从斜纹夜蛾3龄幼虫的虫粪粗提物中鉴定到10种化合物,分别是尼古丁、新植二烯、西松烯、十六酸、亚麻酸甲酯、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇。其中,尼古丁、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇,在前人研究的斜纹夜蛾4~5龄幼虫的虫粪提取物中也有报道(朱丹荔,2016)。前人对烟草挥发物的收集鉴定中发现,尼古丁、新植二烯、西松烯、叶绿醇、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇均属于烟草挥发物(Cai *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2012; Nie *et al.*, 2017; Popova *et al.*, 2018; Gao *et al.*, 2023),且烟草叶片和3种烟草废弃物(叶中脉、碎屑、粉尘)的挥发物中均含有尼古丁、新植二烯、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇(Banožić *et al.*, 2021)。本研究认为尼古丁、新植二烯、西松烯、叶绿醇、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇这5种化合物是烟草残渣或斜纹夜蛾幼虫取食烟草后未消化转化的化合物。十六酸、十八酸、亚油酸在以植物饲养的海灰翅夜蛾 *Spodoptera littoralis*、小地老虎 *Agrotis ipsilon*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera*、刺菜螟 *Ostrinia zealis*、马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella*、草地贪夜蛾 *Spodoptera rugiperda* 幼虫虫粪中均有报道(Xu *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008; Ahmed *et al.*, 2013; Pande *et al.*, 2019; Shah *et al.*, 2022)。为了排除植物挥发物的干扰, Li 和 Ishikawa (2004) 使用丙酮溶剂提取了用人工饲料喂养的刺菜螟、亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、麻田豆秆野螟 *Ostrinia scapularis*、虎杖螟 *Ostrinia latipennis* 幼虫的虫粪,从中仍然鉴定出十六酸、十八酸、亚油酸在内的5种脂肪酸,因此,本研究认为十六酸、十八酸、亚油酸来自于斜纹夜蛾幼虫的虫粪,而非来自于烟草植株。以上研究在鳞翅目害虫幼虫虫粪中也鉴定到了一些不饱和脂肪酸乙酯或甲酯类化合物,如十六酸甲酯或乙酯、十八酸甲酯或乙酯、油酸甲酯或乙酯等,所以本研究鉴定到的亚麻酸甲酯和亚麻酸乙酯也可能来源于斜纹夜蛾幼虫的虫粪本身。

GC-EAD结果表明,尼古丁、新植二烯、十六酸、叶绿醇、亚油酸、亚麻酸乙酯、十八酸、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇能引起叉角厉蝽雌、雄成虫的触角电位反应,说明叉角厉蝽成虫能感受到这些化合物。因此,本研究认为,在叉角厉蝽对斜纹夜蛾幼虫进行捕食定位的过程中,来自烟草和虫粪自身的挥发物都在发挥作用。有研究发现斜纹夜蛾幼虫虫粪中的亚麻酸乙酯能吸引红彩真猎蝽成虫,但尼古丁对其有驱避作用(朱丹荔,2016)。在对叉角厉蝽具有GC-EAD活性的8种化合物中,哪些具有引诱作用,哪些具有驱避作用或者没有作用?还需要进一步的行为测定才能确定。尽管已经有些研究证明猎物粪便的气味在捕食性天敌定位猎物中起着重要作用(Moraes *et al.*, 2012; Pietrantuono *et al.*, 2018),但是仅有少数研究明确了信息化合物的成分,例如,普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 利用小菜蛾 *Plutellax ylostella* 幼虫粪便中的二丙基二硫、二甲基二硫醚、异硫氰酸烯丙酯、二甲基三硫4种化合物向幼虫定位(Reddy *et al.*, 2002)。

已有研究表明植物挥发物在捕食性蝽的猎物定位中起着重要作用,例如,将番茄天蛾 *Manduca quinquemaculata* 取食烟草叶片后释放的部分挥发物成分(顺-3-己烯-1-醇、反- β -罗勒烯、外消旋芳樟醇、顺- α -香柠檬)混合后,涂抹于烟草植株茎部,能吸引天敌大眼长蝽 *Geocoris pallens* 取食烟草天蛾 *M. sexta* 的卵块和幼虫(Kessler and Baldwin, 2001);番茄潜叶蛾取食番茄植株产生的 α -蒎烯、3-蒎烯、 α -水芹烯和 β -罗勒烯的4组分混合物对它的天敌烟盲蝽有很强的引诱作用(Ayelo *et al.*, 2021)。在本研究中,虫粪中的尼古丁、新植二烯、西松烯、叶绿醇、1,5,9-三甲基-12-异丙基-4,8,13-环十四碳三烯-1,3-二醇这5种化合物来自斜纹夜蛾的寄主(烟草)挥发物,这些化合物的单组份或者混合组分是否在叉角厉蝽定位斜纹夜蛾幼虫中起作用,还需要进一步研究。而十六酸、十八酸、亚油酸、亚麻酸甲酯、亚麻酸乙酯来自于斜纹夜蛾幼虫的虫粪本身,这些脂肪酸是鳞翅目昆虫粪便中常见的化合物(Ahmed *et al.*, 2013; Pande *et al.*, 2019; Shah *et al.*, 2022),目前还未见这些物质对天敌昆虫行为影响报道,其作用还有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- Ahmed AAI, Hashem MY, Adel MM, *et al.* Impact of *Spodoptera littoralis* (Boisd.) and *Agrotis ipsilon* (Hufn.) larval frass on oviposition of conspecific insects [J]. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 2013, 46 (5): 575–592.
- Ayelo PM, Yusuf AA, Pirk C WW, *et al.* Terpenes from herbivore-induced tomato plant volatiles attract *Nesidiocoris tenuis* (Hemiptera: Miridae), a predator of major tomato pests [J]. *Pest Management Science*, 2021, 77 (11): 5255–5267.
- Banožić M, Aladić K, Jerković I, *et al.* Volatile organic compounds of tobacco leaves versus waste (scrap, dust, and midrib): extraction and optimization [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101 (5): 1822–1832.
- Cai J, Liu B, Ling P, *et al.* Analysis of free and bound volatiles by gas chromatography and gas chromatography – mass spectrometry in uncased and cased tobaccos [J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 947 (2): 267–275.
- Chaudhary D, Maurya RP, Dobhal P, *et al.* Preference of generalist predator, *Eocanthecona furcellata* (Wolff.) (Heteroptera: Pentatomidae) against live and larval extracts of three different insect pests [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 2022, 42 (4): 3057–3063.
- Gao W, Meng Q, Wang X, *et al.* Overexpression of GPS and FPS from *Chrysanthemum indicum* var. *aromaticum* resulted in modified trichome formation and terpenoid biosynthesis in tobacco [J]. *Plant Growth Regulation*, 2023, 99 (3): 553–566.
- Huang ZZ, Dong ZQ, Liang ZL, *et al.* The fecal shield is a double-edged sword for larvae of a leaf beetle [J]. *Current Zoology*, 2023, 69 (2): 173–180.
- Jiang XC, Dong WX, Chen B, *et al.* Electrophysiological and oviposition responses of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae), to compounds rinsed from the surfaces of sugarcane and maize leaves [J]. *European Journal of Entomology*, 2015, 112 (2): 295–301.
- Kessler A, Baldwin IT. Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature [J]. *Science*, 2001, 291 (5511): 2141–2144.
- Kumar S, Ray P. Biology of *Spodoptera litura* Fabricius (Lepidoptera: Noctuidae) on some of its major weed hosts [J]. *Association for Advancement of Entomology*, 2007, 32 (4): 287–290.
- Li G, Ishikawa Y. Oviposition deterrents in larval frass of four *Ostrinia* species fed on an artificial diet [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2004, 30 (7): 1445–1456.
- Liu M, Yu H, Li, G. Oviposition deterrents from eggs of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): chemical identification and analysis by electroantennogram [J]. *Insect Physiology*, 2008, 54 (4): 656–662.
- Meagher RL, Brambila J, Hung E. Monitoring for exotic *Spodoptera* species (Lepidoptera: Noctuidae) in Florida [J]. *Florida Entomologist*, 2008, 91 (4): 517–522.
- Moraes AR, Greeney HF, Oliveira PS, *et al.* Morphology and behavior of the early stages of the skipper, *Urbanus esmeraldus*, on *Urera baccifera*, an ant – visited host plant [J]. *Journal of Insect Science*, 2012, 12 (1): 52.
- Nie J, Yu G, Song Z, *et al.* Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction coupled with headspace solid-phase microextraction followed by GC-MS for the analysis of volatile compounds from tobacco [J]. *Analytical Methods*, 2017, 9 (5): 856–863.
- Pande R, Shah V, Verma P. First report on identification of volatiles from egg and larval frass of Indian strain of the American bollworm *Helicoverpa armigera* (Hübner) [J]. *African Entomology*, 2019, 27 (2): 403–409.
- Pietrantuono AL, Moreyra S, Lozada M. Foraging behaviour of the exotic wasp *Vespa germanica* (Hymenoptera: Vespidae) on a native caterpillar defoliator [J]. *Bulletin of Entomological Research*, 2018, 108 (3): 406–412.
- Popova V, Ivanova T, Stoyanova A, *et al.* Phytochemicals in leaves and extracts of the variety “Plovdiv 7” of Bulgarian oriental tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *Trends in Phytochemical Research*, 2018, 2 (1): 27–36.
- Ramaiah M, Maheswari TU. Biology studies of tobacco caterpillar, *Spodoptera litura* Fabricius [J]. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 2018, 6 (5): 2284–2289.
- Rani PU, Wakamura S. Host acceptance behaviour of a predatory pentatomid, *Eocanthecona furcellata* (Wolff) (Heteroptera: Pentatomidae) towards larvae of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. *International Journal of Tropical Insect Science*, 1993, 14(2): 141–147.
- Reddy GVP, Holopainen JK, Guerrero A. Olfactory responses of *Plutella xylostella* natural enemies to host pheromone, larval frass, and green leaf cabbage volatiles [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2002, 28 (1): 131–143.
- Rusch A, Barret M, Bardin M, *et al.* Extended Biocontrol [M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2022, 15–16.
- Shah V, Pande R, Verma P, *et al.* Identification of volatiles from larval faecal pellets of Indian strain of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) [J]. *Journal of Entomological Research*, 2022, 46 (4): 746–751.
- Stewart-Jones A, Hodges RJ, Farman DI, *et al.* Solvent extraction of cues in the dust and frass of *Prostephanus truncatus* and analysis of behavioural mechanisms leading to arrestment of the predator *Teretrius nigrescens* [J]. *Physiological Entomology*, 2006, 31 (1): 63–72.
- Sun JG, Huang LQ, Wang CZ. Electrophysiological and behavioral responses of *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae) to tobacco volatiles [J]. *Arthropod-Plant Interactions*, 2012, 6 (3): 375–384.
- Tuan SJ, Yeh CC, Atlihan R, *et al.* Linking life table and predation rate for biological control: a comparative study of *Eocanthecona furcellata* (Hemiptera: Pentatomidae) fed on *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) and *Plutella xylostella* (Lepidoptera:

- Plutellidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2016, 109 (1): 13–24.
- Wei B, Wei CM, Li YG, *et al.* The effect of egg extracts on the behavior of gravid female *Bactrocera dorsalis* and *Bactrocera correcta* and analysis of chemicals on the egg surfaces of these species [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2021, 58 (4): 885–893. [魏波, 魏成梅, 李云国, 等. 橘小实蝇和番石榴实蝇卵的提取物对两种实蝇行为的影响及化学成分分析 [J]. *应用昆虫学报*, 2021, 58 (4): 885–893]
- Wei CM, Zhang XG, Tang JC, *et al.* Progress in research on semiochemicals in insect frass [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2021, 58 (4): 810–821. [魏成梅, 张秀歌, 唐加菜, 等. 虫粪中信息化学物质的研究进展 [J]. *应用昆虫学报*, 2021, 58 (4): 810–821]
- Weiss MR. Defecation behavior and ecology of insects [J]. *Annual Review of Entomology*, 2006, 51 (1): 635–661.
- Weiss MR. Good housekeeping: why do shelter-dwelling caterpillars fling their frass? [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6 (4): 361–370.
- Xu H, Li G, Liu M, *et al.* Oviposition deterrents in larval frass of the cotton boll worm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae): Chemical identification and electroantennography analysis [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2006, 52 (3): 320–326.
- Xue M, Pang YH, Wang HT, *et al.* Effects of four host plants on biology and food utilization of the cutworm, *Spodoptera litura* [J]. *Journal of Insect Science*, 2010, 10 (1): 22.
- Yang XJ, You XF, Li WZ, *et al.* Ecological function of insect manure [J]. *Research on Insects in Central China*, 2019, 15: 64–74. [杨晓杰, 游秀峰, 李为争, 等. 虫粪的生态学功能 [J]. *华中昆虫研究*, 2019, 15: 64–74]
- Yasuda T. Chemical cues from *Spodoptera litura* larvae elicit prey-locating behavior by the predatory stink bug, *Eocanthecona furcellata* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 1997, 82 (3): 349–354.
- Yuan JG, Zhou ZJ, Yang Z, *et al.* Fitness analysis of *Eocanthecona furcellata* fed on frozen-treated *Tenebrio molitor* pupae [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2024, 46 (4): 814–821. [苑金戈, 周子杰, 羊展, 等. 叉角厉蝽对冷冻饲料黄粉虫蛹的适应性研究 [J]. *环境昆虫学报*, 2024, 46 (4): 814–821]
- Zhang XG, Li X, Gao YL, *et al.* Oviposition deterrents in larval frass of potato tuberworm moth, *Phthorimaea operculella* (Lepidoptera: Gelechiidae) [J]. *Neotropical Entomology*, 2019b, 48 (67): 496–502.
- Zhang XG, Wei CM, Miao J, *et al.* Chemical compounds from female and male rectal pheromone glands of the guava fruit fly, *Bactrocera correcta* [J]. *Insects*, 2019a, 10 (3): 78.
- Zhu DL. Studies on Artificial Rearing and Taxis Reaction to Volatile Phytochemicals of *Harpactor fuscipes* (Fabricius) [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. [朱丹荔. 红彩真猎蝽的人工饲养和其对信息化合物的趋性反应研究 [D]. 广州: 华南农业大学硕士论文, 2016]