

黄粉虫幼虫对不同调味料挥发物的嗅觉选择反应*

张萌昊^{1**} 刘晓光^{1,2} 王 昆³ 郭线茹^{1,2} 张利娟^{1,2}
刘艳敏^{1,2} 王高平^{1,2} 李为争^{1,2***}

(1. 河南农业大学植物保护学院, 郑州 450002; 2. 河南省害虫绿色防控国际联合实验室, 河南农业大学, 郑州 450002; 3. 武汉乐道物流有限公司, 武汉 430000)

摘 要 【目的】筛选对黄粉虫 *Tenebrio molitor* 幼虫有行为调控活性的调味料种类, 为黄粉虫饲养或防除提供科学依据。【方法】采用 Y 形嗅觉仪测试了黄粉虫幼虫对 12 种调味料的嗅觉选择反应, 对八角 *Illicium verum* 粗提取物进行 GC-MS 分析, 用八角主成分制备了 3 个配方进行生物测定, 并测试了黄粉虫幼虫对反式茴香脑的剂量反应。【结果】12 种材料的提取物中, 唯有八角提取物对黄粉虫幼虫具有显著引诱活性 ($P=0.005\ 3$), 该提取物测试时, 选择处理、对照以及不反应的虫数分别为 30、3 和 7 头。八角提取物的主要成分是反式茴香脑(65.46%)、芳樟醇(7.00%)、(E)- β -石竹烯(4.58%)和(Z,E)- α -法尼烯(4.48%)。经过配方测试发现, 反式茴香脑单独可以解释八角挥发物对黄粉虫幼虫的引诱活性。然而, 黄粉虫幼虫对反式茴香脑的行为学剂量反应测试发现, 该物质在 0-5 μL 的剂量范围内, 存在“低剂量引诱、高剂量驱避”的特征。【结论】低剂量反式茴香脑可作为饲料添加剂, 用于改善黄粉虫人工饲料的嗅感特征。

关键词 黄粉虫; 调味料; 嗅觉选择; 反式茴香脑

Olfactory responses of *Tenebrio molitor* larvae to different plant volatiles

ZHANG Meng-Hao^{1**} LIU Xiao-Guang^{1,2} WANG Kun³ GUO Xian-Ru^{1,2} ZHANG Li-Juan^{1,2}
LIU Yan-Min^{1,2} WANG Gao-Ping^{1,2} LI Wei-Zheng^{1,2***}

(1. Plant Protection College, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan International Laboratory for Green Pest Control, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. Wuhan Ledao Logistics Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract [Aim] To determine the attractiveness of the volatile compounds of different spices to *Tenebrio molitor* larvae, thereby providing a scientific basis for the rearing or control of this pest. [Methods] Olfactory responses of larvae to 12 spices were tested in a Y-tube olfactometer. Crude extract of *Illicium verum* (star anise) was analyzed by GC-MS, and three blends based on its primary components were tested. The dose-response curves of *trans*-Anethole were quantified. [Results] Among the 12 spice extracts tested, only star anise extract was significantly attractive; 30 larvae preferred it to the control, 3 preferred the control and 7 had no obvious preference ($P = 0.005\ 3$). Gas chromatography-mass spectrometry analysis identified *trans*-Anethole (65.46%), linalool (7.00%), (E)- β -caryophyllene (4.58%), and (Z,E)- α -farnesene (4.48%), as the major components of the star anise extract. Of the three volatile blends tested, only *trans*-Anethole was as attractive to larvae as natural star anise extract. Dose-response assays revealed that within a range of doses from 0 to 5 μL , *trans*-Anethole was attractive to larvae at low doses and repellent at high doses. [Conclusion] Low-dose *trans*-Anethole may be used as a feed additive to improve the olfactory characteristics of diets for *T. molitor* larvae.

Key words *Tenebrio molitor*; flavorant; olfactory choice; *trans*-Anethole

*资助项目 Supported project: 烟仓害虫诱捕技术提升研究与应用 (2023JSYL4KJ-LD2-B-035)

**第一作者 First author, E-mail: zhang_mh2001@163.com

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

收稿日期 Received: 2024-04-29; 接受日期 Accepted: 2025-10-14

黄粉虫 *Tenebrio molitor* 是重要的仓库害虫之一,同时也是重要的资源昆虫(王圣朝和王敦, 2022)。例如,黄粉虫可以作为高蛋白饲料(如禽类、鱼类养殖及钓鱼饵料)、有机废弃物处理与塑料降解的环保工具。黄粉虫的蛹可以作为黑棒啮小蜂 *Tetrastichus howardi* 的人工饲料,规模化饲养后用于小菜蛾 *Plutella xylostella* 的田间防控(Moraes *et al.*, 2023)。了解黄粉虫对各种调味料精油及其所含化学物质的行为反应,可以为仓库中黄粉虫的绿色防控或作为资源昆虫的高效益饲养提供依据。

近 20 年来,包括各种调味料在内的芳香植物精油作为低风险杀虫剂,有驱避、杀虫、抑制生长等多种作用机制,已被用于收获前和收获后害虫的防治(Isman, 2006; Koul *et al.*, 2008; Regnault-Roger *et al.*, 2012)。当前,许多植物的精油、粗提物等对黄粉虫的杀灭活性也得到了大量的研究。例如,汪彤等(2021)研究了槲皮素(Quercetin)、芦丁(Rutin)、京尼平(Genipin)、绿原酸(Chlorogenic acid)对黄粉虫的触杀作用及生长发育的影响,发现京尼平对黄粉虫生长发育的抑制作用较强,使幼虫活动缓慢,蛹重下降,化蛹率低且畸形蛹较多,成虫产卵量仅为对照 40%,最佳组合为京尼平+槲皮素。阿魏 *Ferula assa-foetida* 精油对黄粉虫 10 龄幼虫有较好触杀活性,且能延迟蛹的生长发育(林楠, 2008)。博落回 *Macleaya cordata*、水葫芦 *Eichhornia crassipes* 等植物的溶剂粗提物对黄粉虫幼虫有触杀活性(周浓林等, 2012; 彭慧等, 2013)。巴基斯坦学者 Martínez 等(2018)发现,雪松 *Cedrus deodara* 精油对黄粉虫具有胃毒和拒食活性(Buneri *et al.*, 2019),肉桂和丁香精油对黄粉虫具有杀虫和驱避活性。对黄粉虫的不同虫态表现出明显亚致死活性的植物材料有细辛、黄芩花(孙彦珍, 2019),大蒜 *Allium sativum* 精油(Plata-Rueda *et al.*, 2017),丹皮 *Paeonia suffruticosa* 和泽泻 *Alisma plantago-aquatica* (韩群鑫和陈杰林, 2002),及一种莲叶桐 *Hazomalania voyronii* (Kavallieratos *et al.*, 2021)。

目前有关黄粉虫单纯的行为调控剂方面的筛选相对较少。李焰等(2001)将黄粉虫雌成虫的性引诱信息素鉴定为 4-甲基-1-壬醇。黄粉虫幼虫粪中的乳酸能够诱导幼虫的聚集行为(Weaver *et al.*, 1989)。银杏中的水杨醛(路露等, 2023)、牛至精油(Plata-Rueda *et al.*, 2021)对黄粉虫具有驱避活性。然而,人类的调味料也是一大类嗅感浓重的材料,很有可能成为黄粉虫行为调控剂的另一大来源(安靖靖, 2009)。由于黄粉虫对人类的作用既有正面的(作为资源昆虫),也有负面的(仓库害虫),这些材料无论是引诱活性还是驱避活性,在实践中均有较大的利用价值。为此,本文采用二项选择式行为测试装置,在室内测定了 12 种常见的调味料对黄粉虫幼虫趋向行为的影响,并采用 GC-MS 鉴定了引诱性材料八角 *Illicium verum* 的挥发性成分,并测试了黄粉虫对八角中活性挥发物反式茴香脑的行为学剂量反应。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

黄粉虫于室温下用麸皮饲养,养虫室温度约为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$,相对湿度约为 $60\% \pm 10\%$,光周期为 16 L : 8 D。由于黄粉虫幼虫生活环境稳定、幼虫移动能力相对较差,在幼虫个体发育史上嗅觉偏好性可能不会有太大的变化,故本研究采用 5-9 龄之间的个体测试,体长在 1.7-2.6 cm 之间。

1.2 供试材料

本试验的调味料孜然 *Cuminum cyminum*、黑胡椒 *Piper nigrum* (black)、八角、月桂 *Laurus nobilis*、白芷 *Angelica dahurica*、毕芨 *P. longum*、肉桂 *Cinnamomum cassia*、肉豆蔻 *Myristica fragrans*、茴香 *Foeniculum vulgare*、白胡椒 *P. nigrum* (white)、辣椒 *Capsicum annum*、蓝桉 *Eucalyptus globulus* 均为产自中国的市售产品,购自郑州当地供应商。芳樟醇(98%)购买于 Aladdin 试剂公司,反式茴香脑(98%)、(E)- β -

石竹烯 (>98%) 购买于 Sigma-Aldrich 公司。作为溶剂的二氯甲烷 (99.5%) 和 60-90 °C 沸程的液体石蜡购买于天津市科密欧 (Kermel) 化学试剂有限公司。

1.3 样品制备

采用索氏提取法制备不同材料的提取物。将晾干后的各种材料粉碎并过 40 目筛, 每种粉末取 30 g 放入索氏提取器 (上海亚荣玻璃仪器公司) 中, 并添加 225 mL 二氯甲烷。热源温度为 42 °C, 发生 5 次虹吸后停止提取。在 Heidolph 4011 旋转蒸发仪上减压浓缩至干燥, 并用 30 mL 液体石蜡将蒸馏后的残渣洗下来, 转移到棕色瓶中, 用于行为学测定。用于 GC-MS 鉴定的八角浓缩物, 则用 30 mL 二氯甲烷淋洗旋转蒸发之后的残渣。

1.4 生物测定

采用安靖靖等 (2009) 测试烟草甲 *Lasioderma serricorne* 趋性时类似的直管式生物测定装置。该装置用有机玻璃制作, 管径 7 cm, 长度 50 cm, 从正中央等分为左右两段。管道中央的壁上有一个 1 cm 直径的小孔, 用于安装抽气泵 (兼用于投放被试昆虫)。抽气速度为 1 500 mL/min, 从生物测定装置两端导入的每支气流流速为 750 mL/min。这两支气流首先用活性炭过滤, 然后导入蒸馏水瓶中加湿, 最后通过泰氟隆管 (直径 1 cm) 连接到生物测定装置的两端。将上述储备于棕色瓶中的样品每种取 15 μ L, 按照 1:9 (v/v) 分散到石蜡油中, 构成处理样品; 对照为 150 μ L 石蜡油。将供试样品溶液滴加在 2 cm $\times$ 1 cm 滤纸条上, 装入 1.5 mL 离心管, 然后悬挂在 200 mL 双口锥形瓶中央作为气味源。处理气味源和对照气味源分别放入 200 mL 双口锥形瓶中, 接入气流系统进行测试。

被试幼虫在测试前饥饿处理 48 h 并测量体长。测试时, 每次投放 1 头后立刻安装抽气泵并将装置遮黑处理。30 min 后检查幼虫所在位置。预试验在装置的两端仅通入湿润洁净气流, 发现 30 min 之后被试昆虫自由扩散的平均距离为 5 cm 左右。因此, 在调味料提取物测试之后,

仅爬行距离超越管道中点左右 5 cm 的个体才参与统计分析。嗅觉仪每测试 10 头之后, 拆下来用脱脂棉蘸无水乙醇擦拭干净, 然后在清水下冲洗, 并放在 100 °C 的烘箱中烘 2 h。然后, 更换一组新的试虫, 并轮换生物测定装置 2 个支臂的方向, 进行下一轮测试。每个样品重复测定 40 头。测试时间为 09:00-17:00。

1.5 化学分析

采用安捷伦气相色谱-质谱联用仪 (5977C GC/MSD) 分析八角粗提物的化学成分。该仪器配置 DB-5MS 色谱柱 (30.00 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m)。以氦为载气 (1.0 mL/min)。气化室的温度为 200 °C, GC-MS 传输线温度为 280 °C, 离子源温度为 230 °C, 四极杆温度为 150 °C。EI 模式, 离子能量为 70 eV, 扫描范围为 30-300 m/z。进样量为 1 μ L, 无分流模式进样。程序升温方法为柱初温 55 °C 保留 1 min, 以 5 °C/min 的升温速率上升至柱终温 220 °C, 并在该温度下保留 6 min。化合物与 NIST 14.L 谱库进行比较鉴定, 用面积归一法确定各种化合物的相对含量。

1.6 纯化合物生物测定

根据八角提取物的 GC-MS 的定量分析结果, 购买了反式茴香脑、芳樟醇、(E)- β -石竹烯 3 种试剂。设计了 3 个配方进一步在 Y 形嗅觉仪中进行生物测定。3 个配方如下: (1) 2 μ L 反式茴香脑+0.21 μ L 芳樟醇+0.13 μ L 的 (E)- β -石竹烯; (2) 2 μ L 反式茴香脑+0.21 μ L 芳樟醇; (3) 2 μ L 反式茴香脑。以石蜡油溶剂作为对照, 每个配方重复测定 40 头幼虫。

随后测试了黄粉虫幼虫对反式茴香脑的行为学剂量反应。最低剂量为 0 μ L, 即对照; 最高剂量为 5 μ L, 每隔 0.5 μ L 设置一个测试剂量。每个剂量水平重复测试 40 头。

1.7 数据分析

在每个样品测定的 40 头黄粉虫中, 统计每次测试结束后向着处理或对照端移动位移超过 5 cm 的个体, 然后对在处理端和对照端做出有

效选择的虫数进行 Yate 修正的 χ^2 检验。八角挥发物不同混剂的测试以及反式茴香脑的剂量反应数据, 也采用 Yate 修正的 χ^2 检验, 以反应指数的形式用折线图展示黄粉虫的行为反应随着反式茴香脑测试剂量的变化, 反应指数的计算公式为 $RI = (T - C) / (T + C)$ 。其中, RI 表示反应指数, 正值表示引诱活性, 负值表示驱避活性, T 和 C 分别表示每个剂量在测试时, 选择处理的虫数和选择对照的虫数。如果实测概率 $P < 0.05$, 视为显著; 实测概率 $P < 0.01$, 视为极显著。不反应的个体所占的百分比最多为 35%。所有分析在 SPSS for Windows 19.0 软件上进行。

2 结果与分析

2.1 黄粉虫对不同调味料提取物的选择反应

黄粉虫幼虫对不同调味料提取物的选择反应测试结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 当处理端和对照端均放置溶剂对照(即不含任何调味料提取物的纯溶剂)时, 装置两端分布的虫

数没有显著性差异($\chi^2=0.03$, $P=0.8597$), 说明生物测定装置不存在位置偏颇。在所有供试材料中, 仅八角对黄粉虫幼虫有着极显著的引诱作用, 即对处理端做出选择反应的虫数极显著多于选择对照端的虫数($\chi^2=7.76$, $P=0.0053$)。其他材料作为气味源时, 处理和对照端分布的虫数均无显著性差异, 包括孜然($\chi^2=0.35$, $P=0.5563$)、黑胡椒($\chi^2=0.15$, $P=0.7003$)、月桂($\chi^2=0.69$, $P=0.4047$)、白芷($\chi^2=0.97$, $P=0.3239$)、毕菱($\chi^2=1.09$, $P=0.2963$)、肉桂($\chi^2=0.11$, $P=0.7353$)、肉豆蔻($\chi^2=0.03$, $P=0.8551$)、茴香($\chi^2=0.00$, $P=1.0000$)、白胡椒($\chi^2=3.03$, $P=0.0817$)、辣椒($\chi^2=1.24$, $P=0.2652$)、蓝桉($\chi^2=0.03$, $P=0.8597$)。

2.2 八角粗提物成分的 GC-MS 分析

八角粉末索氏提取和旋转蒸发之后的浓缩物的 GC-MS 分析结果如表 1 所示。结果表明, 含量最高的物质是反式茴香脑(65.46%), 其次是芳樟醇(7.00%), 另外 2 种成分(*E*)- β -石竹烯(4.58%)和(*Z,E*)- α -法尼烯(4.48%)相对含量也较高, 其他成分含量则均在 3% 以下。

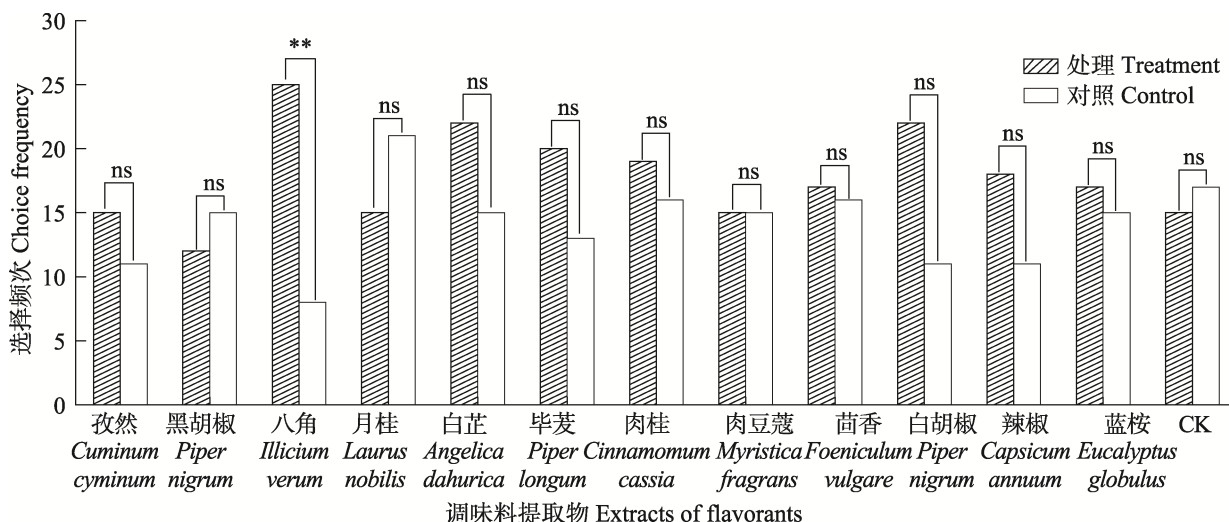


图 1 二项选择条件下黄粉虫幼虫对不同调味料提取物的选择频次

Fig. 1 Choice frequency of *Tenebrio molitor* larvae to different extracts of flavorants in dual-choice conditions

**表示相应处理和对照的选择虫数具有显著性差异($P < 0.01$, Yate 修正的卡方检验), ns 表示没有显著性差异($P > 0.05$, Yate 修正的卡方检验)。“CK”表示双空白测试, 在该组测试中, 作为嗅觉仪选项的“处理”和“对照”仅放置溶剂(石蜡油), 用于检验装置的对称性。下图同。

** indicates significant difference between larvae chosed treatment extracts and corresponding control ($P < 0.01$, Yate's corrected chi-square test), ns means no significant difference ($P > 0.05$, Yate's corrected chi-square test). “CK” indicates a double blank test, in which both the “treatment” and “control” options of the olfactometer are loaded only with solvent (paraffin oil), and it is used to verify the symmetry of the olfactometer. The same below.

表 1 八角提取物的 GC-MS 分析
Table 1 GC-MS analyses of *Illicium verum* extract

谱峰号 Peak no.	保留时间 (min) Retention time (min)	化学成分 Component	相对含量 (%) Relative content (%)
1	8.819	γ -萜品烯 γ -Terpinene	0.40
2	9.607	α -萜品油烯 α -Terpinolene	0.05
3	9.954	芳樟醇 Linalool	7.00
4	12.088	4-萜品醇 Terpinen-4-ol	0.87
5	12.882	反式茴香脑 <i>trans</i> -Anethole	65.46
6	14.154	大茴香醛 Anisic aldehyde	0.87
7	16.263	反式肉桂醇 (<i>E</i>)-Cinnamyl alcohol	0.06
8	16.703	对烯丙基苯酚 4-Allylphenol	0.30
9	16.914	2-萜烯 2-Carene	0.07
10	17.02	3-乙酰茴香醚 3-Methoxyacetophenone	0.05
11	17.491	对茴香酸甲酯 Methyl p-anisate	0.26
12	17.559	α -胡椒烯 α -Copaene	0.85
13	17.628	乙酸香叶酯 Geranyl acetate	0.17
14	17.714	茴香酮 Anisketone	0.43
15	17.776	对甲氧基苯基-2-丙醇 4-Methoxyphenylpropane-2-ol	0.07
16	17.919	(-)- β -榄香烯 (-)- β -Elemene	0.23
17	18.142	α -乙基-4-甲氧基苯甲醇 α -Ethyl-p-methoxybenzyl alcohol	0.06
18	18.465	反- α -香柠檬烯 <i>trans</i> - α -Bergamotene	1.91
19	18.645	(<i>E</i>)- β -石竹烯 (<i>E</i>)- β -Caryophyllene	4.58
20	18.961	(<i>Z,E</i>)- α -法尼烯 (<i>Z,E</i>)- α -Farnesene	4.48
21	19.122	乙酸肉桂醇酯 Cinnamyl acetate	0.24
22	19.278	对甲氧基苯乙酮 p-Methoxypropiophenone	0.06
23	19.395	顺- β -法尼烯 <i>cis</i> - β -Farnesene	1.22
24	19.482	反- β -法尼烯 (<i>E</i>)- β -Farnesene	1.28
25	19.588	香橙烯 Aromandendrene	0.06
26	19.631	顺-依兰油-4,5-二烯 <i>cis</i> -Muurolo-4(14),5-diene	0.03
27	19.929	α -倒捻子素 α -Amorphene	0.28
28	20.059	β -荜澄茄油烯 β -Cubebene	0.26
29	20.189	α -芹子烯 α -Selinene	0.03
30	20.636	α -法尼烯 α -Farnesene	2.04
31	20.673	β -红没药烯 β -Bisabolene	0.85
32	21.033	反-杜松-1,4-二烯 (<i>E</i>)-Cadina-1,4-diene	0.48
33	21.368	α -依兰油烯 α -Muurolene	0.04
34	21.945	橙花叔醇 Nerolidol	1.40
35	22.695	绿花白千层醇 Viridiflorol	0.08
36	23.558	γ -桉叶醇 γ -Eudesmol	0.10
37	23.775	1-表- α -荜澄茄醇 1- <i>epi</i> - α -Cadinol	0.40
38	23.986	β -桉叶醇 β -Eudesmol	0.54
39	24.073	α -荜澄茄醇 α -Cadinol	0.78
40	25.505	法尼醇 Farnesol	0.38
41	27.131	烯丙基邻甲苯基醚 2-Allyloxytoluene	0.01
42	28.471	环十二炔 Cyclododecyne	0.02

续表 1 (Table 1 continued)

谱峰号 Peak no.	保留时间 (min) Retention time (min)	化学成分 Component	相对含量 (%) Relative content (%)
43	29.581	14-甲基十五烷酸甲酯 14-Methyl pentadecanoic acid methyl ester	0.03
44	30.387	棕榈酸 Palmitic acid	0.57
45	32.757	(E9,E12)-亚油酸甲酯 (E,E)-Methyl octadeca-9,12-dienoate	0.02
46	33.092	植醇 Phytol	0.08
47	33.520	(Z9,Z12)-亚油酸 (Z9,Z12)-Linoleic acid	0.20
48	33.632	亚麻酸 Linoelaidic acid	0.28
49	35.244	油酸 Oleic acid	0.01
50	36.479	正二十烷醇 1-Eicosanol	0.07

2.3 八角主成分人工配方的测定结果

以八角 GC-MS 分析结果为基础制备了 3 组配方进行生物测定, 结果如图 2 所示。选择 3 个配方处理端的虫数总是显著多于相应的对照端 (配方 1: $\chi^2=11.28$, $P=0.000\ 8$; 配方 2: $\chi^2=8.26$, $P=0.004\ 1$; 配方 3: $\chi^2=7.03$, $P=0.008\ 0$)。这说明, 从三元配方中去除芳樟醇或(E)- β -石竹烯, 并不影响诱捕结果, 反式茴香脑一种物质即可解释八角提取物对黄粉虫幼虫的诱捕活性。

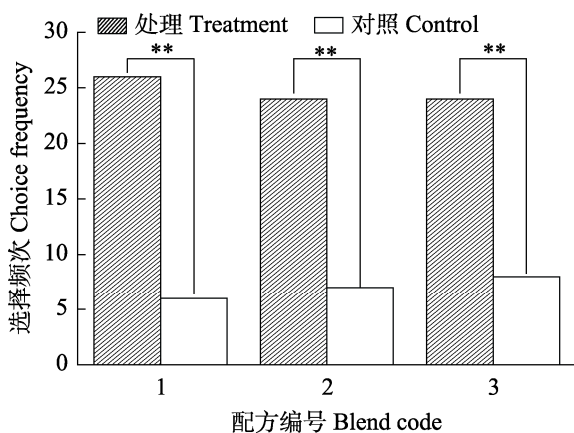


图 2 二项选择条件下黄粉虫幼虫对八角提取物主成分人工配方的选择频次

Fig. 2 Choice frequency of *Tenebrio molitor* larvae to three synthetic blends from major components of *Illicium verum* extracts in dual-choice conditions

配方 1: 2 μ L 反式茴香脑+0.21 μ L 芳樟醇+0.13 μ L 的 (E)- β -石竹烯; 配方 2: 2 μ L 反式茴香脑+0.21 μ L 芳樟醇; 配方 3: 2 μ L 反式茴香脑。对照为 2 μ L 的溶剂石蜡油。
Blend 1: 2 μ L *trans*-Anethole + 0.21 μ L Linalool + 0.13 μ L (E)- β -Caryophyllene; Blend 2: 2 μ L *trans*-Anethole + 0.21 μ L Linalool; Blend 3: 2 μ L *trans*-Anethole.
Control: 2 μ L Paraffin oil.

2.4 黄粉虫对反式茴香脑的行为学剂量反应

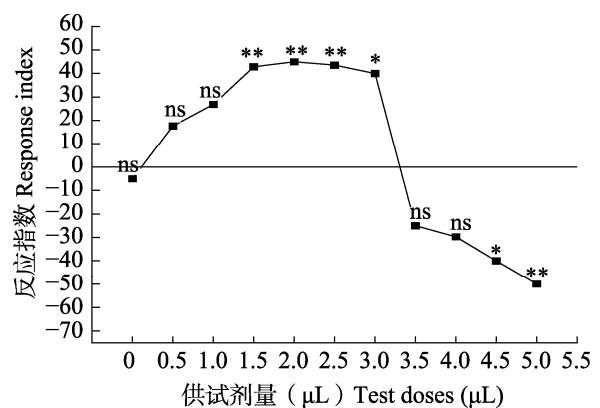


图 3 黄粉虫幼虫对不同剂量的反式茴香脑的反应指数

Fig. 3 Response indices of *Tenebrio molitor* larvae to different doses of *trans*-Anethole

3 讨论

本文测试了黄粉虫幼虫对 12 种调味料提取物的嗅觉选择反应。结果发现, 仅八角提取物释放的挥发物对黄粉虫幼虫表现为显著引诱作用, 其他材料既无显著引诱作用, 也无显著驱避作用。GC-MS 鉴定结果发现, 八角的二氯甲烷提取物中, 共鉴定出 50 种成分, 其中主要成分为反式茴香脑、芳樟醇、(E)- β -石竹烯和(Z,E)- α -法尼烯, 按照面积归一法定量分析结果, 这 4 种成分总含量已达 81.51%。反式茴香脑、芳樟醇和(E)- β -石竹烯组成的不同配方生物测定表明, 仅反式茴香脑一种成分, 即可解释八角提取物对黄粉虫的引诱活性, 但是远超八角提取物中自然浓度的反式茴香脑则对黄粉虫表现为驱避作用。

有趣的是,徐汉虹等(1996)采用GC-MS分析技术从八角茴香(学名与“八角”完全相同)精油中检出了35种成分,化学结构得到鉴定的有32种,反式茴香脑占88.78%,芳樟醇占1.69%。然而,他们发现,0.1%(w/w)剂量的八角茴香精油用于处理小麦或全麦粉,对黄粉虫的种群繁殖抑制率达到100.00%,而且浸卵法测试发现2%八角茴香精油对黄粉虫中期卵的校正杀卵率达到91.63%,很显然暗示着八角茴香精油对黄粉虫不同虫态的生存均是不利的。本研究尚未测试八角精油或者其主成分反式茴香脑对黄粉虫种群水平上的负面影响,但就现有生物测定数据而言,对黄粉虫幼虫表现为显著的引诱活性。这可能与本研究所用的生物测定方法及供试物质剂量同徐汉虹等(1996)的差异有关。

本文发现黄粉虫幼虫对肉桂、蓝桉等提取物的行为反应均是中性的,而徐汉虹和赵善欢(1995)报道肉桂精油对黄粉虫的卵有急性毒杀作用,陆驰宇等(2024)发现蓝桉叶油及其主要成分1,8-桉叶素对印度谷螟*Plodia interpunctella*幼虫均具有较好的熏蒸活性。这些结果说明,黄粉虫并不能准确地通过嗅觉识别出对自身生长发育有利或者有害的物质,可能是长期的人工饲养环境造成了嗅觉的钝化。本研究发现的黄粉虫幼虫有显著引诱活性的反式茴香脑,有可能用来改善黄粉虫人工饲料的嗅感。然而,由于黄粉虫幼虫对反式茴香脑不同剂量的反应具有“低剂量引诱、高剂量驱避”的明显特征,人工饲料中的加入量必须适当,才能起到应有的作用。

参考文献 (References)

- An JJ, 2009. Research on the behavioral responses of *Lasioderma serricorne* to plant-derived spices and their volatiles. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Agricultural University. [安靖靖, 2009. 烟草甲对植物源调味料及其挥发物的行为反应研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学.]
- An JJ, Li WZ, Yuan GH, You XF, Luo MH, 2009. Selection responses of *Lasioderma serricorne* adults to 20 plant materials and their corresponding extracts. *Journal of Henan Agricultural University*, 43(2): 186–190. [安靖靖, 李为争, 原国辉, 游秀峰, 罗梅浩, 2009. 烟草甲对20种植物材料及其提取物的选择反应. 河南农业大学学报, 43(2): 186–190.]
- Buneri ID, Yousuf M, Attaullah M, Afridi S, Anjum SI, Rana H, Ahmad N, Amin M, Tahir M, Ansari MJ, 2019. A comparative toxic effect of *Cedrus deodara* oil on larval protein contents and its behavioral effect on larvae of mealworm beetle (*Tenebrio molitor*) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(2): 281–285.
- Han QX, Chen JL, 2002. The effect of antagonistic storage of the Chinese herbs on the activities of some enzymes of *Tenebrio molitor* L. larvae. *Journal of Plant Protection*, 29(3): 235–238. [韩群鑫, 陈杰林, 2002. 中药材对抗贮藏对黄粉虫幼虫酶活性的影响. 植物保护学报, 29(3): 235–238.]
- Isman MB, 2006. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51: 45–66.
- Kavallieratos NG, Nika EP, Skourti A, Ntalli N, Boukouvala MC, Ntalaka CT, Maggi F, Rakotosaona R, Cespi M, Perinelli DR, Canale A, Bonacucina G, Benelli G, 2021. Developing a *Hazomalania voyronii* essential oil nanoemulsion for the eco-friendly management of *Tribolium confusum*, *Tribolium castaneum* and *Tenebrio molitor* larvae and adults on stored wheat. *Molecules*, 26(6): 1812.
- Koul O, Walia S, Dhaliwal GS, 2008. Essential oils as green pesticides: Potential and constraints. *Biopesticides International*, 4(1): 63–84.
- Li Y, Huang JH, Chen JX, Fang GS, 2001. Synthesis of the (R) and (S) sex-attractant of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) from bornanesultam. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 18(10): 828–830. [李焰, 黄锦霞, 陈祖兴, 方国苏, 2001. 苡烷磺内酰胺法合成(R)和(S)黄粉虫性引诱信息素. 应用化学, 18(10): 828–830.]
- Lin N, 2008. Insecticidal and antifungal activities of volatile oil from *Ferula ferulaeoidis*. Master dissertation. Shihezi: Shihezi University. [林楠, 2008. 阿魏植物精油杀虫抑菌活性的初步研究. 硕士学位论文. 石河子: 石河子大学.]
- Lu CY, Yuan ZZ, Wang S, Yuan MY, Li SQ, 2024. Fumigation activities of 14 kinds of essential oils and 1,8-cineole against the larvae of *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Chinese Cereals and Oil Association*, 39(8): 60–66. [陆驰宇, 袁志周, 王思, 袁梦宇, 李绍勤, 2024. 14种植物精油和1,8-桉叶素对印度谷螟幼虫熏蒸活性研究. 中国粮油学报, 39(8): 60–66.]
- Lu L, Liu Y, Chu GL, Du MX, Wang S, Luo YX, Qian JJ, 2023. Behavioral response of three pests to nine ginkgo volatile substances. *Journal of Northeast Forestry University*, 51(6): 115–118. [路露, 刘远, 储国林, 杜孟祥, 汪胜, 罗永旭, 钱晶

- 晶, 2023. 3 种害虫对 9 种银杏挥发性化合物的行为反应. 东北林业大学学报, 51(6): 115–118.]
- Martínez LC, Plata-Rueda A, Colares HC, Campos JM, dos Santos MH, Fernandes FL, Serrão JE, Zanuncio JC, 2018. Toxic effects of two essential oils and their constituents on the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Bulletin of Entomological Research*, 108(6): 716–725.
- Moraes RJSS, Silva-Torres CSA, Barbosa PRR, Torres JB, 2023. Olfaction response and fertility life table parameters of *Tetrastichus howardi* (Hymenoptera: Eulophidae) parasitizing *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) and the facultative host *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Neotropical Entomology*, 52(5): 921–931.
- Peng H, Zhang JX, Ni J, Xu LL, Xu LL, Zhu L, 2013. Bioactivity of ethanol extract from *Eichhornia crassipes* against the larvae of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Guangdong Agricultural Sciences*, 40(3): 63–65. [彭慧, 张建新, 倪俊, 许玲琳, 朱麟, 2013. 水葫芦乙醇提取物对黄粉虫幼虫的生物活性. 广东农业科学, 40(3): 63–65.]
- Plata-Rueda A, Martínez LC, Santos MHD, Fernandes FL, Wilcken CF, Soares MA, Serrão JE, Zanuncio JC, 2017. Insecticidal activity of garlic essential oil and their constituents against the mealworm beetle, *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Scientific Reports*, 7: 46406.
- Plata-Rueda A, Zanuncio JC, Serrão JE, Martínez LC, 2021. *Origanum vulgare* essential oil against *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae): Composition, insecticidal activity, and behavioral response. *Plants*, 10(11): 2513.
- Regnault-Roger C, Vincent C, Arnason JT, 2012. Essential oils in insect control: Low-risk products in a high-stakes world. *Annual Review of Entomology*, 57: 405–424.
- Sun YZ, 2019. Effect of extractions from 5 species plants on the pupation and eclosion of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Shanxi Forestry Science and Technology*, 48(3): 21–24, 66. [孙彦珍, 2019. 5 种植物粗提物对黄粉虫蛹化和羽化的影响. 山西林业科技, 48(3): 21–24, 66.]
- Wang SC, Wang D, 2022. Advances in the development and utilization of the yellow mealworm (*Tenebrio molitor*). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(4): 703–709. [王圣朝, 王敦, 2022. 黄粉虫开发利用研究进展. 应用昆虫学报, 59(4): 703–709.]
- Wang T, Shi DX, Zhang S, Du KJ, 2021. Effects of four plant secondary metabolites on the growth and development of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) and the synergistic effect of vitamin B₁. *Forestry and Ecological Sciences*, 36(1): 49–55. [汪彤, 史东霞, 张爽, 杜克久, 2021. 4 种植物次生物质对黄粉虫生长发育的影响及维生素 B₁ 的增效作用. 林业与生态科学, 36(1): 49–55.]
- Weaver DK, McFarlane JE, Alli I, 1989. Aggregation in yellow mealworms, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) larvae. *Journal of Chemical Ecology*, 15(5): 1605–1615.
- Xu HH, Zhao SH, 1995. Study on avoidance and ovicidal activity of five essential oils on pests in stored grain. *Journal of Chinese Cereals and Oil Association*, 10(1): 1–5. [徐汉虹, 赵善欢, 1995. 五种精油对储粮害虫的忌避作用和杀卵作用研究. 中国粮油学报, 10(1): 1–5.]
- Xu HH, Zhao SH, Zhou J, Ding JK, Yu XJ, 1996. Studies on insecticidal activity of the anise oil and analysis of its components. *Journal of Plant Protection*, 23(4): 338–342. [徐汉虹, 赵善欢, 周俊, 丁靖垠, 喻学俭, 1996. 八角茴香精油的杀虫活性与化学成分研究. 植物保护学报, 23(4): 338–342.]
- Zhou NL, Yu QL, Wu BY, Zhang M, Wu SS, 2012. Contact toxicity of root extracts from *Macleaya cordata* against *Tenebrio molitor* Linnaeus (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 40(7): 4041–4043. [周浓林, 于泉林, 武宝悦, 张敏, 吴珊珊, 2012. 博落回根提取物对黄粉虫的触杀活性. 安徽农业科学, 40(7): 4041–4043.]