

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.03.003

构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及主要引诱成分分析

贾平凡^{1,2,3,4}, 张潇钰^{1,2,3,4}, 季清娥^{1,2,3,4*}

¹福建农林大学生物防治研究所, 福建 福州 350002; ²联合国粮农组织/国际原子能机构实蝇防控中国合作中心, 福建 福州 350002; ³教育部生物农药与化学生物学重点实验室, 福建 福州 350002; ⁴闽台作物有害生物生态防控国家重点实验室, 福建 福州 350002

摘要:【目的】南亚实蝇被多个国家列为检疫性害虫,其雌虫在野外被发现取食构树果实。本研究拟初步明确构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及其主要引诱成分。【方法】通过室内诱捕试验,测试构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果;采用气质联用仪(GC-MS)与Y型嗅觉仪,测定构树果实中引起南亚实蝇雌虫行为反应的成分。【结果】构树果实对南亚实蝇雌虫的诱捕率高达81.11%;从构树果实气味中测定出29种挥发性成分,其中,0.500 mg·mL⁻¹的2-正戊基呋喃,0.005 mg·mL⁻¹的反-2-己烯醛和0.050 mg·mL⁻¹的正庚醛能显著引起南亚实蝇雌虫的趋向行为。【结论】构树果实具有作为南亚实蝇雌虫食诱剂的潜力,构树果实中的2-正戊基呋喃、反-2-己烯醛和正庚醛可能是引诱南亚实蝇雌虫的主要成分。

关键词: 南亚实蝇; 构树; 诱捕率; 食诱剂



开放科学标识码
(OSID 码)

Analysis of the attractant effect and main attractant compounds of *Broussonetia papyrifera* on females of *Zeugodacus tau*

JIA Pingfan^{1,2,3,4}, ZHANG Xiaoyu^{1,2,3,4}, JI Qing'e^{1,2,3,4*}

¹Biological Control Research Institute, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; ²The Joint FAO/IAEA FAO Division Cooperation Center for Fruit Fly and Control in China, Fuzhou, Fujian 350002, China; ³Key Laboratory of Biopesticide and Chemical Biology Ministry of Education, Fuzhou, Fujian 350002, China; ⁴State Key Laboratory of Ecological Pest Control for Fujian and Taiwan Crops, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract:【Aim】*Zeugodacus tau* has been listed as a quarantine pest in many countries. The females feed on the polythalamic fruits of *Broussonetia papyrifera*. The aims of the study were to determine the attractant effect and main attractant compounds of *B. papyrifera* fruit to *Z. tau* females.【Method】Trapping bioassays were used to determine the attractant effect of *B. papyrifera* fruits on *Z. tau* females. GC-MS (gas chromatography-mass spectrography) and Y-tube olfactometry were used to identify and determine the compounds in *B. papyrifera* fruits that induce behavioral responses in *Z. tau* females.【Result】*B. papyrifera* fruit could attract *Z. tau* females effectively, and the attractive rate was up to 81.11%. Twenty-nine compounds were identified and isolated from *B. papyrifera* fruit odor. Among these, 2-pentyl-furan (0.500 mg·mL⁻¹), (E)-2-hexenal (0.050 mg·mL⁻¹), and heptanal (0.050 mg·mL⁻¹) were effective at inducing attractive behavioral responses in *Z. tau* females.【Conclusion】*B. papyrifera* has the potential to be used as a female attractant for controlling *Z. tau* females. 2-Pentyl-furan, (E)-2-hexenal, and heptanal may be the main components attracting female flies.

Key words: *Zeugodacus tau*; *Broussonetia papyrifera*; attractive rate; food lure

南亚实蝇 *Zeugodacus tau* (Walker), 亦称南瓜实蝇、南亚果实蝇、南亚寡鬃实蝇, 隶属于双翅目 Diptera 实蝇科 Tephritidae 喙果实蝇属 *Zeugodacus*,

Walker 1849 年首次报道于中国福建, 现广泛分布于亚洲和大洋洲各个国家, 是多食性果蔬害虫, 被日本、韩国、印度尼西亚、巴基斯坦、约旦、美

收稿日期(Received): 2023-06-25 接受日期(Accepted): 2023-10-26

基金项目: IAEA CRP 项目(D41027)

作者简介: 贾平凡, 男, 博士研究生。研究方向: 农业昆虫与害虫防治。E-mail: pingfanjia0920@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 季清娥, E-mail: jiqing@yeah.net

国等多个国家列为检疫性对象(张艳和陈俊谕, 2018; Jaleel *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2022)。南亚实蝇以雌虫产卵与幼虫取食的方式危害瓜果, 直接造成果实损伤及脱落(张艳和陈俊谕, 2018)。已有研究表明, 南亚实蝇严重为害葫芦科 Cucurbitaceae、桑科 Moraceae、桃金娘科 Myrtaceae、山榄科 Sapotaceae、茄科 Solanaceae、番木瓜科 Caricaceae、西番莲科 Passifloraceae 等 16 科 80 余种作物果实(张艳和陈俊谕, 2018; Jaleel *et al.*, 2018)。开发雌虫引诱剂是未来最有潜力的有效控制实蝇类害虫的方式之一, 目前, 已经筛选出对苹果绕实蝇 *Rhagoletis pomonella* (Walsh)、地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann)、橘小实蝇 *Bactrocera dorsalis* Hendel、番石榴实蝇 *B. correcta* (Bezzi)、昆士兰实蝇 *B. trynoi* (Forggater)、瓜实蝇 *Z. cucurbitae* (Coquillett)、柑橘大实蝇 *B. minax* (Enderlein)、墨西哥按实蝇 *Anastrepha ludens* (Loew) 等多种实蝇雌虫有引诱作用的化合物(林嘉等, 2021; Jaleel *et al.*, 2019; Mas *et al.*, 2020)。由此开发出的引诱剂分别在苹果绕实蝇、瓜实蝇、地中海实蝇、枣实蝇等实蝇的田间诱捕中取得了较好的引诱效果(梁萌等, 2020; 林嘉等, 2021)。

构树 *Broussonetia papyrifera* (Linn.) 是一种适生能力强、生长迅速的多年生桑科 Moraceae 落叶乔木, 主要分布在中国、泰国、缅甸、波利尼西亚和美国等国家(Li *et al.*, 2014; Niu *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2011)。构树可作为造纸、中药、牲畜饲料的原料以及应用于生态修复等方面; 用构树果加工制成的引诱剂被用于室外诱捕淡色库蚊 *Culex pipiens pallens* Coquillett, 此外, 未见构树应用于其他害虫防控的报道(Ding *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2022; Nong *et al.*, 2023)。但在野外调查过程中, 常能发现大量南亚实蝇雌虫聚集取食构树成熟果实现象。明确构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果及其果实气味中引诱南亚实蝇雌虫的有效成分, 可为南亚实蝇雌虫引诱剂的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

供试南亚实蝇雌虫, 来源于实验室建立的室内稳定种群。各虫态饲养方法及条件参照潘靖等(2013)。因为产卵期的南亚实蝇雌虫危害最显著, 根据南亚实蝇的习性, 选择羽化后 26 d 处于产卵高

峰期的雌虫进行试验(张艳和陈俊谕, 2018)。试验在 $(26 \pm 1) ^\circ\text{C}$ 、RH $(65 \pm 10) \%$ 、L : D = 12 h : 12 h 条件下进行。

1.2 供试构树果实

成熟的构树果采集自福建农林大学校园。试验前, 使用无菌水将果实冲洗 3 遍。使用电子天平称取 100 g 构树果置入小型果汁机(九阳牌)中, 加入 100 mL 无菌水, 打制 1 min 即获得混合均匀的果浆, 用于后续试验。

1.3 供试化合物

试验用化合物主要为反式-2-己烯醛、正庚醛、2-正戊基呋喃、反-2-辛烯醛、壬醛、反, 顺-2, 6-壬二烯醛、反式-2-壬烯醛、液体石蜡, 所有化合物纯度均大于 95%, 除液体石蜡来自 Macklin[®], 其余均来自 Aladdin[®]。

1.4 构树果实引诱南亚实蝇雌虫

采用室内诱捕法测试构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果, 试验方法参照 Jia *et al.* (2023)。取 45 头 26 d 南亚实蝇雌虫, 置于亚克力试验笼(30 cm×30 cm×30 cm)中。称取 1.2 中的构树果浆 10 g, 放入自制诱捕器中; 同时, 量取 10 mL 无菌水加入另一个自制诱捕器中, 作为对照。自制诱捕器为直径 5.7 cm 容量 250 mL 的塑料瓶, 在 2 cm 高度处的瓶壁上开一个进虫孔, 塞入一个去掉底部 1/3 长度的 2 mL 离心管(直径 1.0 cm)作为进虫通道(防止进入后的成虫逃逸); 照此操作, 于该孔位置的对面上部 3 cm 处, 设置另一个进虫孔与进虫通道, 在瓶盖中央设置第三个进虫孔与进虫通道。将盛有构树果浆和无菌水的诱捕器分列于试验笼内两侧。放置 8 h (9:00-17:00)后取出, 同时, 盖上离心管的盖子, 于冰柜中冷冻 2 h 后取出, 计数各诱捕器中诱捕的南亚实蝇雌虫数, 计算诱捕率(诱捕率% = 诱捕雌虫数/供试雌虫总数×100)。每处理 6 个重复。

1.5 构树果实挥发性气味测定与成分分析

采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术对构树果实果浆气味进行挥发性成分鉴定和定量分析, 方法主体步骤参照 Jia *et al.* (2023)。精确称取 1.2 中打制的构树果浆 5.0 g, 放入 40 mL 顶空进样瓶中, 并用硅橡胶垫密封, 在 40 °C 恒温水浴中平衡 10 min, 使用固相微萃取纤维头萃取吸附 50 min。色谱条件: Shimadzu GCMS-QP2020NX 气质联用仪, Rtx-5MS (30 m×0.25 mm ID, 0.25 μm) 色谱柱; 氦

气为载气,分流比例 2:1,流速 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;程序升温:初始温度 $40 \text{ }^\circ\text{C}$,保留 5 min,以 $3 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升至 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,保留 3 min,再以 $5 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率升至 $150 \text{ }^\circ\text{C}$,最后以 $15 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$,保留 5 min。质谱条件:进样口温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$;检测器温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$;MSD 温度 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。EI 电离源,电子能量 70 eV ;离子源温度 $230 \text{ }^\circ\text{C}$;扫描范围 $35 \sim 550 \text{ amu}$ 。四极杆温度 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。对质谱图用计算机 NIST 2017 谱库检索,结合软件进行人工解析、色谱保留指数和标准化化合物比对鉴定。采用相应质谱图计算机检索方法进行检索确定挥发物成分,并采用面积归一法计算相对含量。

1.6 南亚实蝇雌虫对挥发性成分的嗅觉行为反应

使用改进后的 Y 型嗅觉仪筛选引起南亚实蝇雌虫行为反应的挥发性成分。Y 型嗅觉仪主体框架及试验方法主要步骤参照林嘉等(2019)。Y 型嗅觉仪系统包括气泵、活性炭瓶、蒸馏水瓶、流量计、味源瓶、Y 型玻璃管、连接用硅胶管、自制释放器以及环境隔离罩。Y 型玻璃管主臂长 20 cm,两侧臂长 20 cm,夹角 60° ,内径 3 cm。环境隔离罩为白色聚丙烯塑料中空板制作的长方体(长 80 cm,宽 28 cm,高 30 cm)。Y 型玻璃管和味源瓶被笼罩在环境隔离罩内,以隔绝周围环境不均衡对产卵雌虫选择行为的干扰。在味源瓶与硅胶管连接处插入一层无菌医用纱布($2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$),防止雌虫穿过味源瓶进入硅胶管,干扰气流。在环境隔离罩外部,味源瓶摆放位置的正上方,放置一个 30 W 荧光灯,保证光线能够透过隔离罩板均匀照射在 Y 型玻璃管的两侧臂。自制释放器由体积为 10 和 50 mL 的 2 个离心管组成,10 mL 离心管自中间剪去底部,插入 50 mL 离心管的盖子中间,用于自饲养笼中抓取每组所需数量的雌虫,50 mL 离心管底部开透气用条纹,便于气流通畅,释放时,打开 50 mL 该释放器的盖子,接入 Y 型管主臂,使雌虫进入主臂进行后续的选择。每次试验前,Y 型嗅觉仪系统通气 5 min,空置味源瓶不加试剂或者溶剂,释放一组供试雌虫(20 头),以测定系统组装正确并且 2 侧臂气流平衡。每组雌虫在试验前均放置于试验环境 30 min 以适应环境。嗅觉行为试验在 9:00–17:00 的黑暗环境中进行。每种化合物使用液体石蜡稀释成 4 个浓度梯度的试剂(5.000 、 0.500 、 0.050 、 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$),以液体石蜡作对照。

用移液器分别吸取 $200 \text{ } \mu\text{L}$ 试剂和溶剂分别滴加在味源瓶中的滤纸($2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$)上,5 min 后释放南亚实蝇供试雌虫,观察 30 min 内雌虫的行为反应。南亚实蝇雌虫向 Y 型管主臂移动 3 cm 视为反应雌虫,进入某一侧臂 3 cm 持续 30 s 视为做出有效选择。分别在 10、20、30 min 时持续观察 30 s 并记录 2 侧臂及主臂上雌虫的数量。将 3 次观察的平均值作为该组处理的有效值,并依此计算做出不同选择雌虫的百分比(反应率% = 反应雌虫数/雌虫总数 $\times 100$;选择率% = 有效选择数/雌虫总数 $\times 100$;趋向率% = 处理臂的有效选择虫数/雌虫总数 $\times 100$;忌避率% = 对照臂的有效选择虫数/雌虫总数 $\times 100$)。每组试验中的雌虫只使用一次,每次试验后的 Y 型玻璃管和味源瓶用无水乙醇清洗干净,置于 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱内干燥 20 min,冷却后备用。一组试验完毕后,更换干净的 Y 型玻璃管和味源瓶,并将试剂和溶剂的滴加位置对调,以尽可能排除位置偏差的影响。每种浓度的试剂重复 4 次。

1.7 数据处理与分析

使用 Excel 整理数据,用 IPM SPSS 21.0 软件进行数据分析。使用 Origin version 8 绘制相对离子强度图,使用 Inkscape 软件绘制装置示意图。使用 GraphPad Prism version 8 将统计分析后数据绘制成图。构树果实气味引诱南亚实蝇雌虫试验与 Y 型嗅觉仪行为反应试验数据使用配对卡方(χ^2)检验(McNemar's)。

2 结果与分析

2.1 构树果实对南亚实蝇雌虫的引诱效果

构树果实制成的果浆对南亚实蝇雌虫的引诱率高达 81.11%,显著高于对照组的 4.44% ($\chi^2 = 68.710, p = 0.000$)。可知,构树果实对南亚实蝇产卵雌虫具有强烈的吸引力。

2.2 构树果实挥发性气味成分

如表 1 和图 1 所示,采用 GC-MS 从构树果实果浆挥发性气味鉴定出 29 种化合物,其中醛类物质种类最丰富(10 种),相对含量最高(58.46%);醇类物质(8 种),相对含量 17.61%;烯烃(2 种)种类数量低于烷烃类(3 种),但烯烃相对含量(13.64%)高于烷烃类(3.94%);2 种酯类物质的相对含量(1.42%)低于仅 1 种的杂环类物质(2.13%);酮类和酚类各有 1 种,酮类相对含量(2.52%)高于酚类(0.28%)。

表1 构树果实挥发性化合物成分及其相对含量

Table 1 The compositions and relative content of volatile compounds from the fruits of *B. papyrifera*

序号 No.	保留时间 Retention time /min	CAS 编号 CAS number	化合物 Compounds	保留指数 Retention index	相对含量 Relative content/%
1	5.48	66-25-1	正己醛 Hexanal	871	23.87
2	7.68	6728-26-3	反-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	940	1.84
3	8.52	111-27-3	正己醇 1-Hexanol	966	1.69
4	10.19	111-71-7	正庚醛 Heptanal	1014	3.52
5	13.67	18829-55-5	反-2-庚烯醛 (E)-2-Heptenal	1102	1.75
6	15.04	3391-86-4	1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	1137	1.85
7	15.27	106-68-3	3-辛酮 3-Octanone	1143	2.52
8	15.47	3777-69-3	2-正戊基呋喃 2-Pentyl-furan	1148	2.13
9	15.72	10405-85-3	反-4-壬烯 (E)-4-Nonene	1154	0.48
10	15.88	105-31-7	1-己炔-3-醇 1-Hexyn-3-ol	1159	2.01
11	16.13	124-13-0	正辛醛 Octanal	1165	0.61
12	17.22	61142-36-7	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯 3-Ethyl-2-methyl-1,3-hexadiene	1193	13.16
13	17.30	470-82-6	桉叶油醇 Eucalyptol	1195	3.79
14	17.79	122-78-1	苯乙醛 Benzene acetaldehyde	1208	0.42
15	18.04	16747-50-5	1-乙基-1-甲基环戊烷 1-Ethyl-1-methyl-cyclopentane	1215	3.25
16	18.51	2548-87-0	反-2-辛烯醛 (E)-2-Octenal	1228	13.32
17	18.98	17699-16-0	(E)-桉烯水合物 (E)-Sabinene hydrate	1241	0.59
18	19.97	83212-30-0	6-甲基庚烯-4-醇 6-Methyl-hept-2-en-4-ol	1268	4.29
19	20.19	78-70-6	芳樟醇 Linalool	1274	1.76
20	20.36	124-19-6	壬醛 Nonanal	1279	4.72
21	21.66	29803-82-5	反-1-甲基-4-(1-甲基乙基)-2-环己烯醇 (Z)-Para-2-menthen-1-ol	1316	0.15
22	22.04	557-48-2	反,顺-2,6-壬二烯醛 (E,Z)-2,6-Nonadienal	1327	1.02
23	22.30	18829-56-6	反式-2-壬烯醛 (E)-2-Nonenal	1334	7.39
24	23.45	10482-56-1	alpha-松油醇 L-alpha-terpineol	1368	1.48
25	28.13	62016-37-9	2,4,6-三甲基-辛烷 2,4,6-Trimethyl-octane	1521	0.23
26	34.74	16387-18-1	新戊酸 2-乙基己酯 2-Ethylhexyl pivalate	2313	1.28
27	35.93	104-66-5	1,2-二苯氧乙烷 1,2-Diphenoxyethane	2534	0.46
28	36.37	84-69-5	邻苯二甲酯 Diisobutyl phthalate	2616	0.14
29	38.76	80-07-5	双酚 A Bisphenol A	3058	0.28

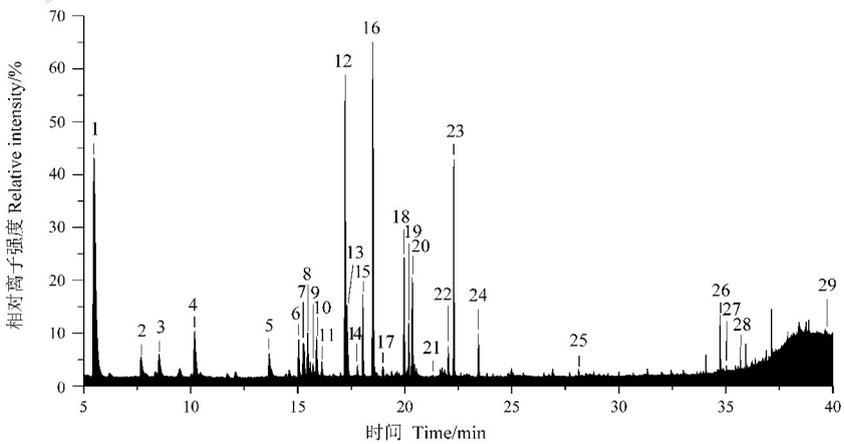


图1 构树果实挥发性成分相对离子强度图

Fig.1 Relative intensity chromatogram of volatile compounds of from the fruits of *B. papyrifera*

离子峰图上数字编号对应的物质与表1中序号对应的物质一致。

The number on the peak chromatogram represents the compound consistent with the number in Table 1.

2.3 南亚实蝇雌虫对7种挥发性成分的行为反应

如图2所示,采用Y型嗅觉仪测试了7种具有特征香气的挥发性成分对南亚实蝇雌虫行为反应

的影响,结果表明,反,顺-2,6-壬二烯醛、2-正戊基呋喃、反-2-己烯醛和正庚醛能显著引起南亚实蝇雌虫的嗅觉行为反应。其中,5.000 mg · mL⁻¹的反,

顺-2,6-壬二烯醛能够引起南亚实蝇雌虫的忌避行为反应($\chi^2 = 12.414, p = 0.001$); $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 2-正戊基呋喃、 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的反-2-己烯醛与

$0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的正庚醛均能引起南亚实蝇雌虫趋向行为反应($\chi^2 = 9.104, p = 0.004$; $\chi^2 = 5.032, p = 0.033$; $\chi^2 = 5.785, p = 0.024$)。

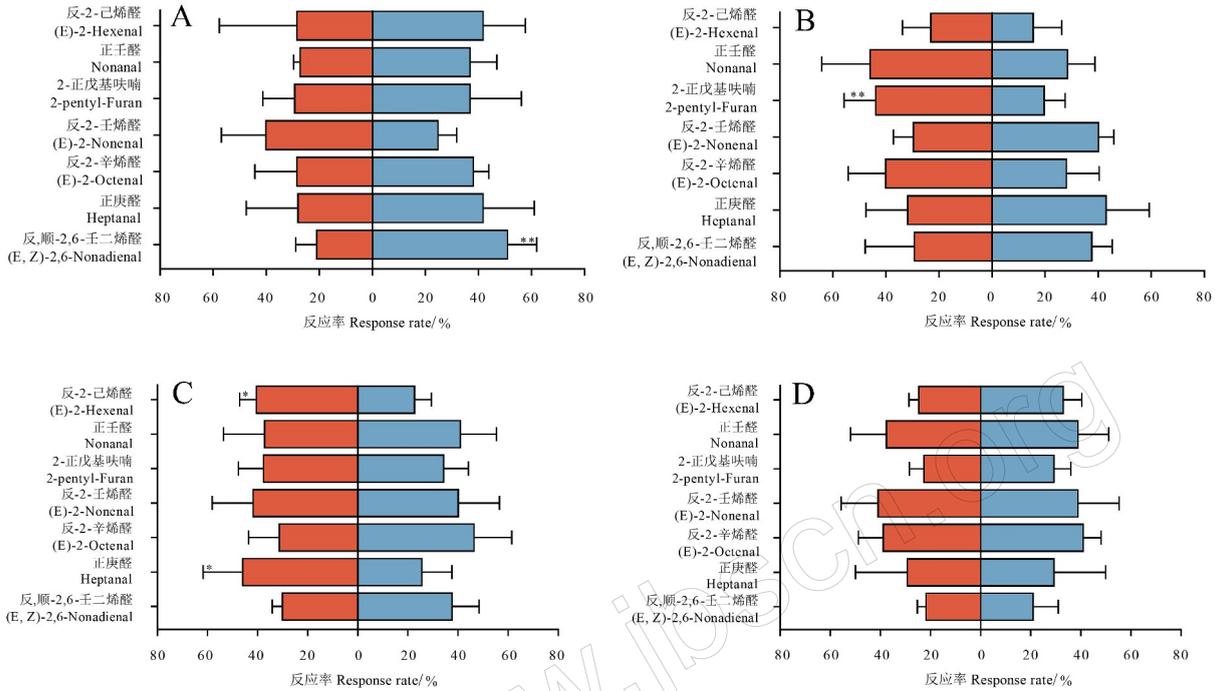


图 2 南亚实蝇雌虫对 7 种化合物的嗅觉行为反应

Fig.2 Olfactory-behavior responses of *Z. tau* females to seven compounds

A: $5.000 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; B: $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; C: $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; D: $0.005 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$. 图中数据为平均值±标准偏差。橙色柱子表示选择处理组的南亚实蝇雌虫百分数,蓝色柱子表示选择对照组的南亚实蝇雌虫百分数。*表示反应率经卡方(χ^2)检验在 $p < 0.05$ 水平上差异显著,

表示反应率经卡方(χ^2)检验在 $p < 0.01$ 水平上差异显著。*与所在组南亚实蝇雌虫总反应率超过 65%。

A: $5.000 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; B: $0.500 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; C: $0.050 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$; D: $0.005 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$. Data presented as mean±SE. Dark orange bars showed the percentage of *Z. tau* females in selected treatment group, blue bars showed the percentage of *Z. tau* females in selected control group.

*: The significant difference in response rates at 0.05 level by Chi-square tested; **: The significant difference in response rates at 0.01 level by Chi-square tested. The total response rates of gravid female *Z. tau* were more than 65% in * and ** group.

3 讨论与结论

实蝇雌虫通常选择将卵产在最适宜其子代生长发育的寄主植物上,而植物气味是实蝇识别与定位寄主的关键因素 (Benitez-Herrera *et al.*, 2023)。因此,在缺乏有效的雌虫引诱剂的情况下,可将黄瓜 *Cucumis sativus* L.、葡萄 *Vitis vinifera* L.、番石榴 *Psidium guajava* L.等实蝇寄主果实初步加工成果汁或者果浆,利用其散发出的独特气味可诱捕到靶标实蝇雌虫 (Cornelius *et al.*, 2000; Mangan & Thomas, 2014)。本研究发现,构树的果实对南亚实蝇雌虫具有显著引诱效果,较之空白对照,构树果实诱捕南亚实蝇雌虫的诱捕率超过 80%,因此,构树果实具有作为南亚实蝇雌虫田间诱饵的潜力。

实蝇依靠嗅觉进行远距离的植物识别与定位,依靠视觉进行近距离的植物判断与选择 (Wang *et*

al., 2022)。当颜色与气味交互作用时,实蝇对单一因素的偏好表现并不显著 (Brévault & Quilici, 2009)。研究表明,南亚实蝇雌虫偏好在黄绿色的寄主上产卵 (Khan *et al.*, 2011)。但研究人员发现,在野外大量的南亚实蝇雌虫取食构树成熟的红色果实,这种差异是否为气味与颜色的交互作用造成的,仍需进一步研究。

能引起实蝇电生理或者行为反应的植物气味中的化学成分,被认为是实蝇识别植物的关键线索 (林嘉等, 2021)。具有这些特定化学成分的植物,多具有能够满足实蝇成虫或幼虫生长发育所需的营养成分 (Shamshir & Wee, 2019)。通常,实蝇的雌虫引诱剂成分主要从寄主植物的挥发性成分中筛选,来源于天然食物源植物的化合物能有效诱捕实蝇雌虫 (林嘉等, 2021)。石豆兰属 *Bulbophyllum*

植物中的诱蝇醚 Methyl eugenol (ME)、覆盆子酮 Raspberry ketone (RK)与姜酮 Zingerone (ZN)被发现能促进实蝇雄虫的交配竞争力,从而引起橘小实蝇、瓜实蝇等实蝇雄虫强烈的趋向反应,被用于雄虫的诱捕(汪恩国等,2013; Shamshir & Wee, 2019)。南亚实蝇雌虫长期取食的天然食物源植物较少报道,因而从这类植物的挥发性气味中筛选能引起南亚实蝇雌虫行为反应的化合物的研究较少(Jaleel *et al.*, 2018)。本研究从构树的果实挥发性气味中鉴定出29种化合物,其中,反,顺,-2,6-壬二烯醛、反-2-壬烯醛等化合物具有南亚实蝇寄主——黄瓜的香气特征。因此,仅选择反,顺,-2,6-壬二烯醛等7种具有果蔬香气特征的物质进行了嗅觉行为反应试验。本研究从嗅觉行为反应试验中发现了4种能够引起南亚实蝇雌虫行为反应的化合物,其中包括3种能引起南亚实蝇雌虫趋向反应的化合物。研究表明,南亚实蝇的天然食物源植物中存在的引起南亚实蝇雌虫趋向行为反应的化合物,或许是南亚实蝇雌虫识别该类食物源植物的特征化合物。尽管如此,构树果实挥发性气味中其他化合物是否也能显著影响南亚实蝇雌虫的行为反应,需要后续试验进行验证。

在高浓度情况下,反,顺,-2,6-壬二烯醛引起了南亚实蝇雌虫的忌避行为反应;但低浓度时,并未显著引起南亚实蝇雌虫的趋向行为反应,说明该物质可能并不是南亚实蝇雌虫识别构树果实的特征化合物。Webster *et al.* (2009)研究表明,将10种能够引起黑豆蚜 *Aphis fabae* (Scopoli)忌避行为的化合物混合,反而对黑豆蚜具有很好的引诱效果。同时,反,顺,-2,6-壬二烯醛并不是构树果实挥发性气味中相对含量较高的成分,这或许是反,顺,-2,6-壬二烯醛并未干扰南亚实蝇雌虫取食构树果实的原因。与反,顺,-2,6-壬二烯醛不同,反-2-己烯醛、2-正戊基呋喃、正庚醛能够引起南亚实蝇雌虫的趋向行为,说明3种物质可能是南亚实蝇雌虫识别构树果实的特征化合物。反-2-己烯醛能够引起横线尾夜蛾 *Chlumetia transverse* (Walker)和绿盲蝽 *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür)的触角电位反应,且能明显诱发雌性绿盲蝽的趋向行为反应,并能显著诱集雌性绿盲蝽(田厚军等,2012;张尚卿等,2011)。在橘小实蝇雌虫的植物源引诱剂中,添加反-2-己烯醛也能显著提升橘小实蝇雌虫触角电位

活性值(刘奕来等,2018)。2-正戊基呋喃对斑翅果蝇 *Drosophila suzukii* (Matsumura)产生驱避作用(Cha *et al.*, 2021),而在筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria* (Fabricius)取食大豆的过程中却发挥引诱取食的作用(Lahiri *et al.*, 2020)。

化合物引起不同昆虫的行为反应差异,或许更有利于开发针对特定靶标害虫的驱避剂或引诱剂。低浓度的正庚醛能够促进马铃薯块茎蛾 *Phthorimaea operculella* (Zeller)产卵,而高浓度时会使马铃薯块茎蛾产生忌避反应(Ma & Xiao, 2013)。将正庚醛与桉树醇或印楝素组合使用,能够调控马铃薯块茎蛾的行为,获得害虫防治的“推-拉”效果(Ma & Xiao, 2013)。本研究中4种化合物引起南亚实蝇雌虫的行为反应不同,为南亚实蝇雌虫的驱避剂与引诱剂的研发提供了参考。若能组合4种化合物调控南亚实蝇雌虫的行为,并结合有效的南亚实蝇诱集植物,构建出“推-拉”效果,或许能有效降低南亚实蝇雌虫对瓜果的危害。

参考文献

- 梁萌,阿不都瓦哈·艾再孜,阿地力·沙塔尔,2020. 枣实蝇对枣果挥发物的选择行为. 林业科学研究, 33(2): 145-153.
- 林嘉,蔡普默,张贺贺,宋学森,张琪文,仪传冬,敖国富,杨建全,季清娥,2019. 橘小实蝇雌虫对其肠道共生菌发酵液的嗅觉行为反应. 中国生物防治学报, 35(6): 891-899.
- 林嘉,杨德庆,郝旭兴,蔡普默,季清娥,2021. 实蝇引诱剂研究进展. 环境昆虫学报, 43(6): 1398-1407.
- 刘奕来,陶芳怡,翟啸雨,吴慧明,2018. 橘小实蝇雌虫的植物源引诱剂筛选. 浙江农业科学, 59(8): 1429-1431.
- 潘靖,洪静芳,季清娥,陈家骅,2013. 南亚实蝇幼虫人工饲料研究. 武夷科学, 29: 198-202.
- 田厚军,陈艺欣,魏辉,邱良妙,刘其全,石妍,占志雄,2012. 芒果不同部位挥发物及横线尾夜蛾对其触角电位反应. 生物安全学报, 21(2): 142-147.
- 汪恩国,王永才,余山红,王会福,2013. 临海柑橘园橘小实蝇种群数量消长规律. 生物安全学报, 22(2): 91-96.
- 张尚卿,高占林,党志红,李耀发,潘文亮,2011. 绿盲蝽对四种挥发性物质的触角电位和行为反应. 华北农学报, 26(3): 189-194.
- 张艳,陈俊谕,2018. 南亚果实蝇国内研究进展. 热带农业科学, 38(11): 70-77.
- BENITEZ-HERRERA L N, CRUZ-LÓPEZ L C, MALO E A, ROMERO-LÓPEZ A A, ROJAS J C, 2023. Olfactory responses of *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae) to

- mango fruits as influenced by cultivar and ripeness stages. *Environmental Entomology*, 52(2): 210–216.
- BRÉVAULT T, QUILICI S, 2009. Oviposition preference in the oligophagous tomato fruit fly, *Neoceratitis cyanescens*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 133: 165–173.
- CHA D H, ROH G H, HESLER S P, WALLINGFORD A, STOCKTON D G, PARK S K, LOEB G M, 2021. 2-Pentylfuran: a novel repellent of *Drosophila Suzukii*. *Pest Management Science*, 77(4): 1757–1764.
- CORNELIUS M L, DUAN J J, MESSING R H, 2000. Volatile host fruit odors as attractants for the oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 93(1): 93–100.
- DING Y M, HU Y, YU B T, MO X C, MO J C, 2016. Laboratory evaluation of differential attraction of *Culex pipiens pallescens* to fruit-based sugar baits. *Acta Tropica*, 163: 20–25.
- JALEEL W, LU L H, HE Y R, 2018. Biology, taxonomy, and IPM strategies of *Bactrocera tau* Walker and complex species (Diptera: Tephritidae) in Asia: a comprehensive review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 25(20): 19346–19361.
- JALEEL W, HE Y R, LÜ L H, 2019. The response of two *Bactrocera* species (Diptera: Tephritidae) to fruit volatiles. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 22(3): 758–765.
- JIA P F, ZHANG X Y, WANG B, JI Q E, 2023. Evaluation of the attractant effect of *Solanum muricatum* (Solanales: Solanaceae) on gravid female adults of *Zeugodacus tau* (Diptera: Tephritidae) and screening of attractant volatiles. *Insects*, 14(7): 591.
- KHAN M, TAHIRA-BINTE-RASHID, HOWLADER A J, 2011. Comparative host susceptibility, oviposition, and colour preference of two polyphagous tephritids: *Bactrocera cucurbitae* (Coq.) and *Bactrocera tau* (Walker). *Research Journal of Agriculture & Biological Sciences*, 7(3): 343–349.
- LAHIRI S, REISIG D D, DEAN L L, REAY-JONES F P F, GREENE J K, CARTER T E, MIAN R, FALLEN B D, 2020. Mechanisms of soybean host-plant resistance against *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae). *Environmental Entomology*, 49(4): 876–885.
- LI Y, SHANG X Y, NIU W N, XU C L, QIN C G, 2014. Inhibitory activity of the extract from *Broussonetia papyrifera* fruits to cellular lipid peroxidation *in vitro*. *Asian Journal of Chemistry*, 26(1): 201–204.
- LIU H, WANG X Y, CHEN Z H, LU Y Y, 2022. Characterization of cold and heat tolerance of *Bactrocera tau* (Walker). *Insects*, 13(4): 329.
- MA Y F, XIAO C, 2013. Push-pull effects of three plant secondary metabolites on oviposition of the potato tuber moth, *Phthorimaea operculella*. *Journal of Insect Science*, 13(1): 128.
- MANGAN R L, THOMAS D B, 2014. Comparison of torula yeast and various grape juice products as attractants for Mexican fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 107(2): 591–600.
- MAS F, MANNING L A, SINGLET M, BUTLERR, MILLE C, SUCKLING D M, 2020. Electrophysiological and behavioral responses of Queensland fruit fly females to fruit odors. *Journal of Chemical Ecology*, 46(2): 176–185.
- NIU K M, KHOSRAVIC S, WANG Y F, ZHAI Z Y, WANG R X, LIU J P, CAI L C, LI J X, DENG LP, WU X, 2022. Multi-omics-based functional characterization of hybrid fermented *Broussonetia papyrifera*: a preliminary study on gut health of laying hens. *Fermentation*, 8(10): 547.
- NONG H J, LIU J, CHEN J Z, ZHAO Y L, WU L, TANG Y C, LIU W S, YANG G Y, XU ZH G, 2023. Woody plants have the advantages in the phytoremediation process of manganese ore with the help of microorganisms. *Science of the Total Environment*, 863: 160995.
- SHAMSHIR R A, WEE S L, 2019. Zingerone improves mating performance of *Zeugodacus tau* (Diptera: Tephritidae) through enhancement of male courtship activity and sexual signaling. *Journal of Insect Physiology*, 119: 103949.
- SUN J, ZHANG C S, YU L N, JIE B, LIU S F, FENG Z, YANG Q L, 2011. Chemical composition of *Broussonetia Papyrifera* flowers. *Advanced Materials Research*, 1267(236/237/238): 2581–2585.
- WANG Y H, FANG G Q, XU P H, GAO B L, LIU X J, QI X W, ZHANG G J, CAO S, LI Z H, REN X M, WANG H R, CAO Y H, PEREIRA R, HUANG Y P, NIU C Y, ZHAN S, 2022. Behavioral and genomic divergence between a generalist and a specialist fly. *Cell Reports*, 41(7): 111654.
- WEBSTER B, BRUCE T, PICKETT J, HARDIE J, 2009. Volatiles functioning as host cues in a blend become nonhost cues when presented alone to the black bean aphid. *Animal Behaviour*, 79(2): 451–457.