

研究报告

DOI:10.14188/j.ajsh.20251230002

从食源性材料筛选火腿酪蝇防治药剂的研究

申时先^{1†}, 孟榆松^{2†}, 姜开梅¹, 王金凤¹, 张艳青¹, 段珩¹, 陈武³, 王兴红^{2*}

(1. 云南农业职业技术学院, 云南 昆明 650212;

2. 云南大学 生命科学学院, 云南 昆明 650091;

3. 昭通市农村能源管理站, 云南 昭通 657000)

摘要: 酪蝇(*Piophilidae casei*)是干腌火腿生产过程中最具危害性的害虫且防治难度极大, 针对其开发一种兼顾高效杀虫与食品安全的绿色防治方法。通过筛选具有显著驱避活性的植物材料, 利用其精油中可食性主要成分对酪蝇幼虫和成虫进行毒力测试, 并对主要活性成分进行复配增效研究, 最终通过工厂防虫实验与涂膜剂产卵趋避实验验证防治效果。结果显示, 橙皮、樟叶和紫苏叶对酪蝇具有显著驱避活性, 且其气味清淡, 不影响火腿原有香气。柠檬烯表现出良好毒力, 对成虫和幼虫的半致死浓度(LC₅₀)和半致死量(LD₅₀)分别为1.496 9 μ L/L和0.388 4 μ L/只。柠檬烯与甲酸戊酯按体积3:1复配后, 共毒因子和共毒系数分别为32.13和144.0, 显示出显著增效作用。工厂熏蒸实验表明, 该复配配方处理7 d后虫口减退率达80%以上, 持效期10~15 d; 与传统猪油涂膜剂结合使用后, 对酪蝇产卵趋避率达(82.26 $\pm$ 20.53)%。该复配剂对酪蝇防治效果良好, 且所有成分均符合国家标准, 具备良好的应用前景。

关键词: 干腌火腿; 酪蝇; 植物源杀虫剂

中图分类号: TQ450.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2026)02-0179-09

Screening of food-derived insecticides against *Piophilidae casei* in cured hamsSHEN Shixian^{1†}, MENG Yusong^{2†}, JIANG Kaimei¹, WANG Jinfeng¹, ZHANG Yanqing¹, DUAN Heng¹,
CHEN Wu³, WANG Xinghong^{2*}

(1. Yunnan Vocational College of Agriculture, Kunming 650212, Yunnan, China;

2. School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China;

3. Zhaotong Rural Energy Management Station, Zhaotong 657000, Yunnan, China))

Abstract: *Piophilidae casei* is the most destructive pest in dry-cured ham production and extremely difficult to control. This study aimed to develop a green control method that balances high insecticidal efficacy with food safety. The approach involved screening plant materials with significant repellent activity against *P. casei*, testing the toxicity of edible main components in their essential oils against both larvae and adults, optimizing synergistic formulations by combining key active ingredients, and validating the control effect through factory-based pest control experiments and oviposition repellency tests with coating agents. The results showed that orange peel, camphor leaves, and perilla leaves exhibited significant repellent activity against *P. casei*, with mild odors that did not affect the original aroma of the ham. Limonene demonstrated strong toxicity, with Median Lethal Concentration (LC₅₀) and Median Lethal Dose (LD₅₀) values of

收稿日期: 2025-12-30 修回日期: 2026-02-05 接受日期: 2026-04-15

作者简介: 申时先(1978-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事食品药品与大健康方向研究, E-mail: 913591482@qq.com; 孟榆松(1999-), 男, 硕士, 主要从事干腌火腿虫害防治方向研究, E-mail: mengyusong@stu.ynu.edu.cn; [†] 为共同第一作者, 对本文有相同贡献

* 通信作者: 王兴红(1966-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事发酵食品方向研究, E-mail: mengyusong@stu.ynu.edu.cn

基金项目: 云南农业职业技术学院科研项目(2024YNVC-ZD01)

引用格式: 申时先, 孟榆松, 姜开梅, 等. 从食源性材料筛选火腿酪蝇防治药剂的研究[J]. 生物资源, 2026, 48(2): 179-187.

Shen S X, Meng Y S, Jiang K M, et al. Screening of food-derived insecticides against *Piophilidae casei* in cured hams [J]. Biotic Resources, 2026, 48(2): 179-187.

1.4969 $\mu\text{L/L}$ and 0.3884 $\mu\text{L/larva}$ for adults and larvae, respectively. A 3:1 volume formulation of limonene and amyl formate showed significant synergistic effects, with a co-toxicity factor and co-toxicity coefficient of 32.13 and 144.0, respectively. Factory fumigation experiments indicated that after 7 days of treatment with this formulation, the pest population decreased by over 80%, with a residual efficacy lasting 10–15 days. When combined with traditional lard-based coating, the formulation achieved an oviposition repellency rate of $(82.26 \pm 20.53)\%$. The combined formulation exhibited effective control against *P. casei*, and all its components comply with the Chinese national standard, demonstrating promising application prospects.

Key words: dry-cured ham; *Piophilha casei*; botanical insecticides

0 引言

干腌火腿的生产周期较长,一般需要1~2年时间。在此过程中,虫害问题每年导致约10%的火腿损失,仅宣威地区因虫害造成的直接经济损失就高达数百万元^[1]。在众多虫害中,酪蝇(*Piophilha casei*)是火腿加工过程中危害最为严重的害虫之一^[2]。酪蝇繁殖能力极强,单只雌性个体在其生命周期内可产卵140~500粒^[3]。以宣威地区为例,酪蝇虫害通常每年5月开始发生,8月—9月达到高峰期,一年可繁殖约7~9代^[4]。其幼虫常聚集于火腿缝隙或钻入内部取食,导致受害部位湿度升高并发生褐变,严重影响火腿品质,甚至引发腐败。消费者若误食受幼虫或虫卵污染的火腿,可能引起胃肠道不适甚至肠道蝇蛆病。由于酪蝇生命周期短、繁殖速度快,其防治难度较大。目前,缺乏绿色、安全且高效的防治药剂,部分生产者因违规使用敌敌畏等农药而受到刑事处罚,进一步凸显了该问题的严峻性。

目前已有多种火腿虫害防治方法被报道,包括溴甲烷(CH_3Br)、硫酰氟(SF_6)、磷化氢(PH_3)等化学防治手段,以及食品级涂膜剂、低温处理、辐射、气调控制、空间隔离等物理方法^[5]。此外还有利用蝇蛹金小蜂(*Pachycrepoideus vindemmiae*)和蜡蚧轮枝菌(*Verticillium lecanii*)等生物防治手段^[6-7]。然而,这些方法普遍存在安全性不足、未获法律批准、操作复杂或防治效果有限等问题,难以在实际生产中有效控制酪蝇危害。

从食源性植物中筛选具有防虫活性的天然成分,因其安全性高、来源广泛,被视为理想的食品杀虫剂开发途径^[8-10]。本研究拟系统筛选多种食源性植物材料,旨在发掘具有高效抗酪蝇活性的天然成分,为开发绿色、安全的火腿虫害防治药剂提供理论依据与实践参考。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及其饲养

酪蝇成虫采自云南省昆明市味高食品有限公司

火腿晾挂间。在温度 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(60 \pm 10)\%$ 、光暗周期L:D=14:10 h的条件下进行饲养。以自制腌制猪肉块作为饲料,置于5 L透明塑料瓶中,按雌雄比1:1引入亲本成虫,使其在肉块表面产卵。幼虫孵化并发育至老熟后,在瓶中加入适量脱脂棉供其化蛹。蛹期结束后,将蛹挑出并移入小烧杯,杯口以透气封口膜密封,置于温暖、干燥且通风良好的环境中,直至成虫羽化。最终选取健康、活跃的成虫作为实验对象。

1.2 酪蝇驱避植物的筛选

植物样品采集于云南省昆明市禄劝彝族苗族自治县、云南省昆明市呈贡区周边或购买于昆明市呈贡区下庄社区农贸市场(样品信息及来源见表1)。

1.2.1 平皿初筛实验

将直径9 cm的圆形滤纸沿中线对半剪开。取适量植物样品充分研磨后,把其中一半滤纸浸入研磨物中均匀沾染样品,另一半不作处理作为对照。将两半滤纸置于直径相同的玻璃平皿中,放入10只酪蝇成虫。静置3 min以减少外界干扰对行为的影响,随后在3 min内观察成虫在两半滤纸区的分布与行为,据此评估样品的驱避强度。

若酪蝇明显倾向于在对照区域活动,则判定该样品具有驱避效果,记为“+”;驱避强度越高,“+”数量越多,最高为5个“+”(表示观察期内所有酪蝇完全不在样品处理区域活动)。若成虫在两区域间分布均匀、无明显偏好,则记为“—”。每种样品重复实验3次,初步筛选出对酪蝇成虫具有驱避作用且无刺激性气味的植物样品。

1.2.2 酪蝇驱避率测定

对初筛显示具有驱避活性的植物样品,采用自制“Y”型嗅觉仪测定其对酪蝇成虫的驱避率。装置结构主要由玻璃“Y”型管和抽气泵组成,两者通过橡皮管连接。“Y”型管每臂长15 cm,内径2 cm,两臂夹角为 60° 。实验时光源采用均匀的LED白光,自上向下照射,并在嗅觉仪下方铺设白色海绵垫,以消除环境色彩与纹理对酪蝇行为可能产生的干扰;抽

表 1 植物样本及其来源物种
Table 1 Plant samples and their source species

植物样本	来源物种	植物样本	来源物种
橙皮	甜橙[<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck]	姜根茎	姜(<i>Zingiber officinale</i> Roscoe)
清香木叶	清香木(<i>Pistacia weinmannifolia</i> J. Poisson ex Franch.)	胡椒果实	胡椒(<i>Piper nigrum</i> Linn.)
玫瑰花瓣	玫瑰(<i>Rosa rugosa</i> Thunb.)	樟叶	樟[<i>Cinnamomum camphora</i> (Linn.) Presl]
蒜瓣	蒜(<i>Allium sativum</i> Linn.)	天竺桂树皮	天竺桂(<i>Cinnamomum japonicum</i> Sieb.)
非洲菊花瓣	非洲菊(<i>Gerbera jamesonii</i> Bolus)	肉豆蔻果实	肉豆蔻(<i>Myristica fragrans</i> Houtt.)
韭叶	韭(<i>Allium tuberosum</i> Rottler ex Sprengle)	孜然芹种子	孜然芹(<i>Cuminum cyminum</i> Linn.)
柠檬叶	柠檬[<i>Citrus limon</i> (L.) Burm. F.]	夹竹桃叶	夹竹桃(<i>Nerium indicum</i> Mill.)
辣椒果实	辣椒(<i>Capsicum annuum</i> Linn.)	苏铁叶	苏铁(<i>Cycas revoluta</i> Thunb.)
黄连木叶	黄连木(<i>Pistacia chinensis</i> Bunge)	水杉叶	水杉(<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & W. C. Cheng)
石蒜叶	石蒜(<i>Lycoris radiata</i> (L'Hér.) Herb.)	侧柏叶	侧柏[<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco]
艾叶	艾(<i>Artemisia argyi</i> Lévl. et Van.)	桉叶	桉(<i>Eucalyptus robusta</i> Sm.)
迷迭香叶	迷迭香(<i>Rosmarinus officinalis</i> Linn.)	枫香叶	枫香树(<i>Liquidambar formosana</i> Hance)
罗汉松叶	罗汉松[<i>Podocarpus macrophyllus</i> (Thunb.) Sweet]	高山榕叶	高山榕(<i>Ficus altissima</i> Blume)
洋葱	洋葱(<i>Allium cepa</i> Linn.)	棕榈叶	棕榈[<i>Trachycarpus fortunei</i> (Hook.) H. Wendl.]
马尾松叶	马尾松(<i>Pinus massoniana</i> Lamb.)	鹅掌柴叶	鹅掌柴[<i>Heptapleurum heptaphyllum</i> (L.) Y. F. Deng]
云南金钱槭叶	云南金钱槭(<i>Dipteronia dyerana</i> Henry)	芫荽叶	芫荽(<i>Coriandrum sativum</i> Linn.)
肾蕨叶	肾蕨[<i>Nephrolepis auriculata</i> (L.) Trimen]	麦冬叶	麦冬[<i>Ophiopogon japonicus</i> (L. f.) Ker Gawl.]
毛竹叶	毛竹[<i>Phyllostachys edulis</i> (Carrière) J. Houzeau]	薰衣草花	薰衣草(<i>Lavandula angustifolia</i> Mill.)
大葱叶	大葱(<i>Allium.fistulosum</i> L.var.gigantum Makino)	酢浆草叶	酢浆草(<i>Oxalis corniculata</i> Linn.)
紫茎泽兰叶	紫茎泽兰(<i>Eupatorium adenophorum</i> Spreng.)	银杏叶	银杏(<i>Ginkgo biloba</i> Linn.)
青花椒果实	青花椒(<i>Zanthoxylum schinifolium</i> Sieb. et Zucc.)	月季花瓣	月季花(<i>Rosa chinensis</i> Jacq.)
烟草叶	烟草(<i>Nicotiana tabacum</i> Linn.)	紫苏叶	紫苏[<i>Perilla frutescens</i> (L.) Britton]

气泵控制气流速度为 800 mL/min。

实验开始前,使用 75% 乙醇溶液清洗玻璃管,待其完全干燥以消除残留气味。取两个大小适宜的医用脱脂棉球,一个均匀沾染研磨后的植物样品,置于“Y”型管一侧作为实验臂;另一个不作处理,置于另一侧作为对照臂。实验前先开启抽气泵运行 5 min,使样品气味充分充满实验臂。

正式实验时,从“Y”型管主干臂放入一只酪蝇成虫,立即连接气泵并保持抽气,观察其行为。记录 5 min 内酪蝇的活动情况:若成虫进入对照臂内 5 cm 以上区域并停留不少于 30 秒,则判定样品具有驱避效果;若进入实验臂相应区域并停留相同时间,则判定为引诱效果;若无明确选择行为,则记为无趋向性,每组测试使用 20 只成虫,每种样品重复 3 次。

1.3 酪蝇驱杀活性物质毒力测定

参照国家标准^[11],在有良好驱避活性的植物样

品精油的主要成分中,选择可作为食品添加剂使用的成分进行酪蝇的毒力测定。酪蝇成虫熏蒸活性测定按照农业行业标准进行测定^[12];酪蝇幼虫触杀活性测定按照农业行业标准^[13]进行测定。

1.4 柠檬烯增效配方筛选

将筛选到的最佳驱避成分与其他各活性成分按照 3:1、2:1、1:1、1:2、1:3 的比例进行复配,以熏蒸法进行活性测定,计算出各复配组合混剂的共毒因子^[14],选择具有协同增效效果的配方计算其共毒系数和增效倍数^[15]。计算公式如下:

共毒因子 =
$$\frac{(\text{实测死亡率} - \text{理论死亡率})}{\text{理论死亡率}} \quad (1)$$

式中,共毒因子>20 认为该组合有增效作用;−20≤共毒因子≤20 认为该组合为相加作用;共毒因子<−20 认为该组合有拮抗作用。

共毒系数测定公式如下:

相对毒力指数(TI)= $\frac{\text{标准药剂LC}_{50}}{\text{供试药剂LC}_{50}}$ (2)

复配药剂实际毒力指数(ATI)= $\frac{\text{标准药剂LC}_{50}}{\text{复配药剂LC}_{50}}$ (3)

复配药剂理论毒力指数(TTI)= $TI_A \times P_A + TI_B \times P_B$ (4)

共毒系数(CTC)= $\frac{ATI}{TTI}$ (5)

增效倍数= $\frac{ATI}{TTI} - 1$ (6)

式中, P_A 为药剂A在复配药剂中的百分含量; P_B 为药剂B在复配药剂中的百分含量。

共毒系数>120认为该组合有增效作用;80≤共毒系数≤120认为该组合为相加作用;共毒因子<80认为该组合有拮抗作用。计算时以复配组合中LC₅₀较大的药剂单剂为标准药剂。

1.5 工厂防虫实验

于云南省昆明市味高食品有限公司火腿晾挂仓库中开展酪蝇防虫实验。仓库长13.3 m、宽8.3 m、高4.3 m,内部悬挂干腌火腿约800只。实验期间库内温度为22~26℃,相对湿度为37%~53%。参照国家标准^[16]将实验仓库划分为8个标准间。使用筛选所得的增效配方配制杀虫剂,以3.5 μL/L的浓度喷洒于仓库地面进行熏蒸处理,分别于第0、15、25 d各施药一次。首次施药后连续监测1个月,定期记录各标准间内酪蝇成虫侵害率、阳性间蝇密度、虫口减退率、幼虫孳生率及幼虫孳生密度等指标。所有监测与统计方法均严格遵循国家标准执行^[16]。

1.6 含杀虫剂的猪油涂膜剂对酪蝇产卵趋避测试

酪蝇喜于火腿表面缝隙处产卵,使用涂膜剂涂抹缝隙可有效抑制其产卵行为。为探究传统猪油涂膜剂与复配杀虫剂联合使用的防治潜力,将柠檬烯-甲酸戊酯复配杀虫剂以100 μL/mL的浓度添加至猪油基涂膜剂中。选取5 cm×5 cm×5 cm的火腿肉块,在其表面斜切深度约1 cm的切口,模拟自然缝隙。设不封口肉块为空白对照,分别采用棕榈酸猪油涂膜剂及含复配杀虫剂的涂膜剂对切口进行封闭处理。随后将各肉块置于盛有50只酪蝇成虫(♂:♀=1:1)的纱笼(45 cm×45 cm×45 cm)中,48 h后取出,统计各肉块缝隙中酪蝇卵的数量,计算两种涂膜剂对产卵的驱避率,每组处理重复3次。驱避率计算公式如下:

产卵驱避率= $\frac{\text{对照组产卵量} - \text{实验组产卵量}}{\text{对照组产卵量}}$ (7)

2 结果与分析

2.1 酪蝇驱避植物筛选结果

在44种受试植物样品中,初步筛选出13种样品具有一定的驱避效果,其中橙皮、蒜瓣、大葱叶、樟叶和紫苏叶对酪蝇成虫的驱避效果较为明显(表2)。考虑到杀虫剂需要在干腌火腿中使用,应排除气味强烈的样品,故排除了蒜瓣与大葱叶,选择橙皮、樟叶和紫苏叶作为对象进行进一步的研究。

表2 各植物样品的酪蝇成虫驱避测试
Table 2 Repellency test of *P. casei* for various plant samples

植物样品	驱避效果	植物样品	驱避效果
橙皮	++++	烟草叶	—
清香木叶	+	姜根茎	—
玫瑰花瓣	—	胡椒果实	—
蒜瓣	++++	樟叶	+++
非洲菊花瓣	—	天竺桂树皮	—
韭叶	—	肉豆蔻果实	—
柠檬叶	++	孜然芹种子	—
辣椒果实	—	夹竹桃叶	—
黄连木叶	+	苏铁叶	—
石蒜叶	—	水杉叶	—
艾叶	+	侧柏叶	—
迷迭香叶	+	桉叶	+
罗汉松叶	—	枫香叶	—
洋葱	++	高山榕叶	—
马尾松叶	+	棕榈叶	—
云南金钱槭叶	—	鹅掌柴叶	—
肾蕨叶	—	芫荽叶	—
毛竹叶	—	麦冬叶	—
大葱叶	+++	薰衣草花	—
紫茎泽兰叶	—	酢浆草叶	—
青花椒果实	—	银杏叶	—
月季花瓣	—	紫苏叶	+++

使用“Y”型嗅觉仪量化3种植物样品的驱避效果(图1),结果表明橙皮、樟叶和紫苏叶均对酪蝇成虫具有明显的驱避活性,三者驱避率均达到了60%以上。

2.2 酪蝇驱杀活性物质毒力评价

从橙皮、樟叶与紫苏叶精油中,基于国家标准目录^[11],选取9种主要成分进行酪蝇成虫熏蒸毒力测试(表3)。结果显示,3-戊醇、芳樟醇、甲酸戊酯、罗勒烯、柠檬烯、松油醇及紫苏醛对酪蝇成虫均表现出较强的熏蒸活性。而壬醛的熏蒸活性较弱,且具有明显刺激性气味,故未予采用。

幼虫触杀毒力测试结果显示(表4),除芳樟醇

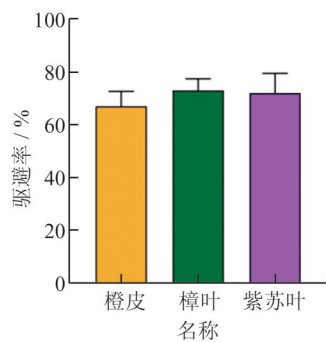


图1 橙皮、樟叶、紫苏叶对酪蝇的驱避率
Figure 1 Repellent rates of orange peel, camphor leaves, and perilla leaves against *P. casei*

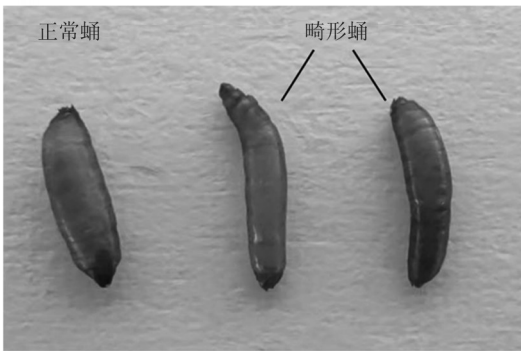


图2 正常蛹与畸形蛹示意图
Figure 2 Schematic diagram of normal pupae and malformed pupae

与柠檬烯外,其余测试成分对酪蝇幼虫均未表现出显著毒性。芳樟醇与柠檬烯的触杀活性较为接近,24 h的LD₅₀分别为0.400 5 μL/只和0.388 4 μL/只。在处理后存活幼虫中,部分个体在化蛹阶段出现发育畸形(图2)。柠檬烯处理组的致畸率较高,为31.85%;而芳樟醇处理组仅为3.33%,显著低于柠

檬烯。综上,柠檬烯对酪蝇成虫及幼虫均呈现出良好的毒力,且气味清新,不会对干腌火腿风味造成负面影响,适宜作为杀虫剂复配的基底。

2.3 柠檬烯增效配方筛选结果

以柠檬烯为基底成分,分别将其与3-戊醇、芳樟醇、甲酸戊酯、罗勒烯、松油醇及紫苏醛进行复配,并

表3 熏蒸24 h的酪蝇成虫半数致死浓度(LC₅₀)测定结果
Table 3 Determination of LC₅₀ for *P. casei* adults after 24 h fumigation

供试化合物	气味描述	毒力回归方程	LC ₅₀ /(μL·L ⁻¹)	95% 置信区间/(μL·L ⁻¹)
3-戊醇	甜味、水果和草药味	y=0.219x-0.197	3.182 6	1.750 9 ~ 5.708 9
α-蒎烯	辛辣、柠檬和清香的气味	y=0.212x-0.760	5.943 4	3.700 0 ~ 9.558 3
芳樟醇	类似柠檬与薰衣草	y=1.634x-0.682	0.723 7	0.331 0 ~ 1.592 9
甲酸戊酯	甜味、类似苹果香气	y=0.202x-0.047	2.707 9	0.876 9 ~ 4.933 8
罗勒烯	木香、草药味	y=0.620x-0.200	1.129 0	0.520 7 ~ 2.316 7
柠檬烯	清新的柑橘、柠檬香气	y=0.318x+0.024	1.496 9	0.590 9 ~ 3.248 8
壬醛	强烈的油脂气味	y=0.018x+0.021	26.611 1	8.351 7 ~ 103.571 4
松油醇	松香、陈腐的木材气味	y=0.316x+0.104	1.253 2	0.464 1 ~ 2.794 4
紫苏醛	油脂、紫苏香气	y=0.712x-0.052	0.775 3	0.326 8 ~ 2.402 6

表4 触杀24 h的酪蝇幼虫半数致死剂量(LD₅₀)测定结果
Table 4 Determination of LD₅₀ for *P. casei* larvae after 24 h contact toxicity exposure

供试化合物	毒力回归方程	LD ₅₀ /(μL·只 ⁻¹)	95 % 置信区间/(μL·只 ⁻¹)	处理后存活幼虫化蛹致畸率/%
3-戊醇	—	—	—	—
α-蒎烯	—	—	—	—
芳樟醇	y=1.473x-0.090	0.400 5	0.228 4 ~ 0.731 9	3.33
甲酸戊酯	—	—	—	3.55
罗勒烯	—	—	—	—
柠檬烯	y=1.483x-0.076	0.388 4	0.240 8 ~ 0.638 5	31.85
壬醛	—	—	—	—
松油醇	—	—	—	—
紫苏醛	—	—	—	—

“—”表示该物质对酪蝇幼虫无明显毒性
“—” indicates that the substance exhibits no significant toxicity to *P. casei* larvae

测定各混合药剂的共毒因子(表5)。结果显示,在柠檬烯与甲酸戊酯以3:1复配时,共毒因子为32.13,表现出协同增效作用;而其他复配组合均未显示增效效果,其中柠檬烯与芳樟醇复配表现出明显拮抗。因此,选取柠檬烯与甲酸戊酯按3:1比例进一步测定其共毒系数与增效倍数,以评估该配方

的增效程度。共毒系数测定结果,该复配配方的共毒系数为144.10,增效倍数为0.44,进一步证实了其协同增效作用(表6)。

2.4 增效配方工厂防虫效果验证

采用柠檬烯与甲酸戊酯按3:1比例复配的杀虫剂做工厂防虫实验,以评估其实际防治效果(图3)。

表5 柠檬烯与其他药剂复配的共毒因子测定
Table 5 Determination of co-toxicity factors for the combined application of limonene with other agents

复配成分		配比	浓度/ ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	查自毒力回归方程的死亡率/%		期望死亡率/%	实际死亡率/%	共毒因子
A	B			A	B			
柠檬烯	3-戊醇	3:1	3	73.16	0.00	73.16	55.00	-33.02
		2:1		66.00	2.20	68.2	56.67	-20.34
		1:1		50.10	13.15	63.25	50.00	-26.50
		1:2		34.20	24.10	58.3	68.33	14.68
		1:3		26.25	29.58	55.83	65.00	14.11
柠檬烯	芳樟醇	3:1	1	26.25	0.00	26.25	1.67	-1 471.86
		2:1		23.60	0.00	23.60	3.33	-608.71
		1:1		18.30	13.50	31.80	8.33	-281.75
		1:2		13.00	40.74	53.74	9.86	-445.03
		1:3		10.35	54.35	64.70	10.00	-547.00
柠檬烯	甲酸戊酯	3:1	2	50.10	5.40	55.50	73.33	32.13
		2:1		44.40	8.87	53.27	60.00	12.63
		1:1		34.20	15.50	49.70	46.66	-6.12
		1:2		23.60	22.23	45.83	25.00	-45.45
		1:3		18.30	25.60	43.90	23.33	-46.86
柠檬烯	罗勒烯	3:1	1	26.25	35.50	61.75	32.50	-47.37
		2:1		23.60	40.66	64.26	30.00	-53.31
		1:1		18.30	51.00	69.30	25.00	-63.92
		1:2		13.00	61.34	74.34	32.50	-56.28
		1:3		10.35	66.50	76.85	37.50	-51.20
柠檬烯	松油醇	3:1	2	50.10	26.20	76.30	25.00	-205.20
		2:1		44.40	31.47	75.87	61.67	-23.03
		1:1		34.20	42.00	76.20	83.33	8.56
		1:2		23.60	52.53	76.13	83.33	8.64
		1:3		18.30	57.80	76.10	88.33	13.85
柠檬烯	紫苏醛	3:1	1	26.25	12.60	38.85	43.33	11.53
		2:1		23.60	18.53	42.13	40.00	-5.06
		1:1		18.30	30.40	48.70	53.33	9.51
		1:2		13.00	42.30	55.30	40.00	-27.67
		1:3		10.35	48.20	58.55	56.67	-3.21

表6 共毒系数测定结果
Table 6 Co-toxicity coefficient determination results

复配成分		配比	毒力回归方程	$\text{LC}_{50}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$	95% 置信区间	共毒系数	增效倍数
A	B						
柠檬烯	甲酸戊酯	3:1	$y=0.349x+0.081$	1.200 6	0.618 3 ~ 2.231 1	144.10	0.44

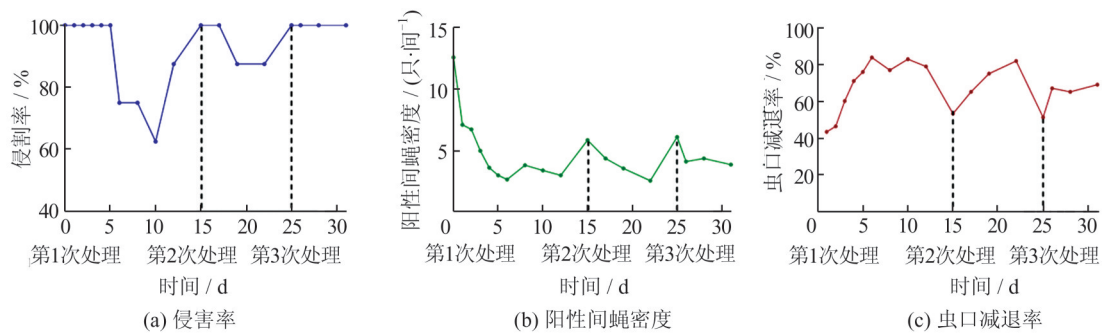


图3 实验期间酪蝇成虫各指标变化情况

Figure 3 Variations in *P. casei* adult indicators during the experimental period

结果表明,该复配杀虫剂对酪蝇成虫种群数量具有明显抑制效果。首次熏蒸后一周内,虫口减退率持续上升,侵害率与阳性间蝇密度均显著下降,并在处理后10~15 d内维持在较低水平。当成虫数量出现回升时,经第2次与第3次熏蒸处理后,种群数量再次得到有效控制,且能够在施药后一段时间内持续维持较低的虫害水平。

工厂实验期间酪蝇幼虫孳生率与孳生密度的变化情况如图4所示。在每次熏蒸处理约一周后,幼虫孳生率均出现明显下降;然而,孳生密度并未随之降低,反而呈现逐渐上升的趋势。这一现象可能与熏蒸药剂难以有效渗透至干腌火腿内部有关,导致已侵入火腿的酪蝇幼虫未能被彻底清除。

2.5 增效配方涂膜剂对酪蝇产卵的驱避测试

通过产卵趋避率评估了含复配杀虫剂的猪油涂膜剂对火腿肉块的保护效果(图5和表7)。

结果显示,涂膜处理显著降低了酪蝇在肉块中的产卵量,表明其具有良好的保护作用。普通猪油涂膜剂的产卵驱避率为 $(54.14 \pm 37.35)\%$,而添加复配杀虫剂后,驱避率提升至 $(82.26 \pm 20.53)\%$,说明复配杀虫剂能够显著增强涂膜剂对酪蝇产卵的驱避效果。

3 结论与讨论

农药联合复配是当前及未来农药创新利用与发展的重要趋势。通过多种有效成分的合理复配,能够实现对靶标病虫害的协同防控,从而提高防治效率,并延缓其抗药性产生^[17]。农药复配的增效机制较为复杂,既可能通过作用于多个毒性靶点以增强防治效果,也可能通过改善药剂的物理化学性状而提升其持效性^[18-19]。本研究筛选出的柠檬烯与甲酸戊酯复配组合在共毒因子和共毒系数上均表现出显著的协同增效作用,这一结果可能与两者在作用机

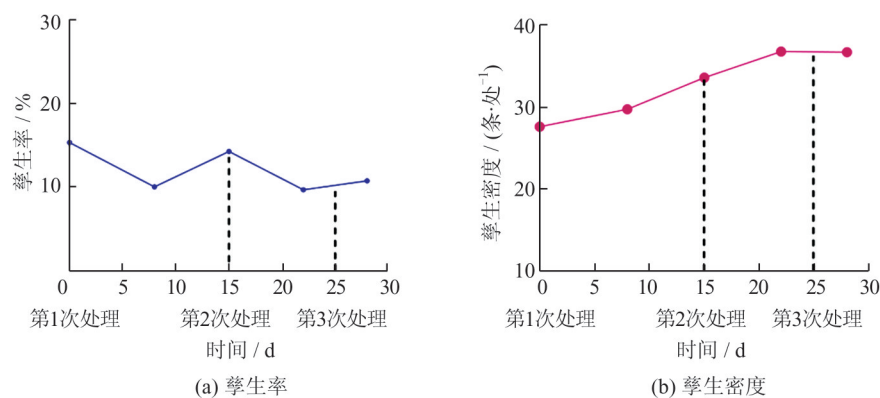


图4 实验期间酪蝇幼虫各指标变化情况

Figure 4 Variations in *P. casei* larva indicators during the experimental period

表7 各组产卵数及产卵驱避率

Table 7 Oviposition count and oviposition deterrence rate for each group

项目	对照组	猪油涂膜剂	复配杀虫剂猪油涂膜剂
产卵数量/个	156.75±57.52	59.75±49.60	23.75±29.87
产卵驱避率/%	—	54.14±37.35	82.26±20.53

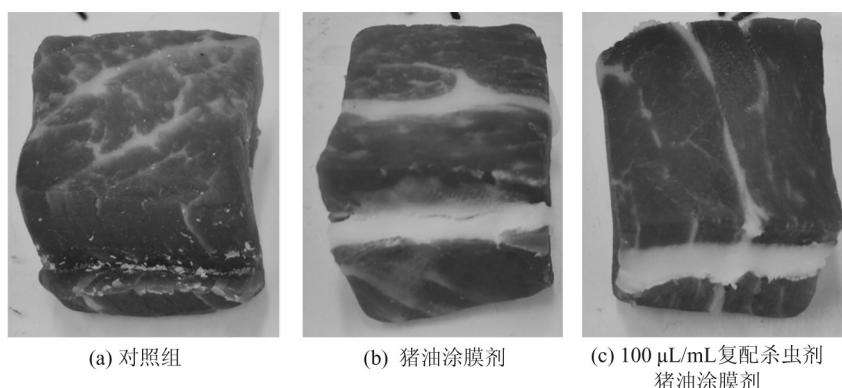


图5 涂膜剂的产卵预防实验示意图

Figure 5 Schematic diagram of the oviposition prevention experiment of coating agents

制上的互补性有关。柠檬烯作为单萜类化合物,主要通过干扰昆虫神经系统和呼吸代谢发挥熏蒸与触杀作用^[20];而甲酸戊酯作为酯类物质,可能通过破坏昆虫体表蜡质层或影响其嗅觉导向行为增强驱避效果。二者复配后可能通过多靶点作用提升对酪蝇的防治效率。此外,该复配组合所有成分均来源于可食性植物材料,在安全性方面具有明显优势。相比于传统化学农药或某些具有残留风险的熏蒸剂,本配方在达到良好防治效果的同时,避免了食品安全隐患与法律风险,适用于火腿等直接食用农产品的加工环节。

工厂防虫实验表明,复配药剂对酪蝇成虫种群具有显著控制作用,熏蒸处理后虫口减退率超过80%,持效期达10~15 d。然而,幼虫孳生密度在实验后期呈现上升趋势,说明熏蒸处理对已侵入火腿内部的幼虫防治效果有限。这一结果提示,酪蝇幼虫可能藏匿于火腿深层或缝隙中,难以通过气态药剂完全触杀。针对上述问题,本研究进一步将复配药剂与猪油涂膜剂结合使用,使产卵趋避率提升至82.26%,显著高于单一涂膜处理。这表明“熏蒸+涂膜”的联合防治策略具有可行性与增效潜力:熏蒸控制成虫种群,减少产卵来源;涂膜剂则直接阻断幼虫孳生环境,二者协同可望实现更全面的防治效果。未来研究可进一步优化药剂载体与施药方式,如开发缓释型涂膜材料或提高熏蒸剂的渗透性,以增强对隐蔽期幼虫的杀伤作用。另外,在实际推广中还应结合火腿加工周期与虫害发生规律,制定合理的施药计划。该配方亦可用于其他干腌肉制品的虫害防治,具有较好的扩展应用潜力。

参考文献

[1] 徐志强,葛长荣,李强,等.传统宣威火腿害虫的分布与综合防治[J].肉类研究,2009,23(5):3-5.

Xu Z Q, Ge C R, Li Q, et al. Distributions and preventing of ham pests on xuanwei ham [J]. Meat Research, 2009, 23(5): 3-5.

[2] 毕晟晖,朱秋劲,刘健锋.干腌火腿加工及虫害防治方法的研究[J].山地农业生物学报,2023,42(3):34-44.

Bi C H, Zhu Q J, Liu J F. Research on dry cured ham processing and pest control methods [J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2023, 42(3): 34-44.

[3] Zhao Y, Abbar S, Amoah B, et al. Controlling pests in dry-cured ham: a review [J]. Meat Science, 2016, 111: 183-191.

[4] 高德辉,葛长荣,李强.宣威火腿主要害虫生物学特性及其发生规律研究[J].西南农业学报,2009,22(5):1456-1459.

Gao D H, Ge C R, Li Q. Study on bionomics and occurrence of ham mian pests in xuanwei [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(5): 1456-1459.

[5] White S, Smith S W, Zhang X, et al. Uses and commercialization of food grade and effectiveness of coated ham nets to combat *Tyrophagus putrescentiae*: a review [J]. Textile Research Journal, 2024, 94 (5-6): 750-759.

[6] Missere D, Martini A, Burgio G. Evaluation of *Pachycrepoideus vindemiae* and *Muscidifurax raptor* (Hymenoptera: Pteromalidae) as biological control agents of *Piophilidae* (Diptera: Piophilidae) in ham production facilities [J]. Journal of Insect Science, 2023, 23(5): 12.

[7] 王凌超,高熹,王松田,等.罹病棕尾别麻蝇体上蜡蚧轮枝菌的生物学特性与致病性研究[J].安徽农业科学,2010,38(15):7909-7912.

Wang L C, Gao X, Wang S T, et al. Biological characteristics and pathogenicity of *verticillium lecanii* isolated from naturally died *Boettcherisca peregrina* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38 (15): 7909-

- 7912.
- [8] Assadpour E, Can K A, Fasamanesh M, et al. Application of essential oils as natural biopesticides: recent advances[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(19): 6477-6497.
- [9] Karabörklü S, Ayvaz A. A comprehensive review of effective essential oil components in stored-product pest management[J]. Journal of Plant Diseases and Protection, 2023, 130(3): 449-481.
- [10] Hasan W, Hussain G J, Doggalli G, et al. Plant-based products as control agents of stored product insect pests: prospects, applications and challenges[J]. International Journal of Plant & Soil Science, 2023, 35(22): 866-873.
- [11] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- National Health Commission, State Administration for Market Regulation. National Food Safety Standards Standards for the Use of Food Additives: GB 2760—2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [12] 中华人民共和国农业部. 农药室内生物测定试验准则 杀虫剂 第3部分: 熏蒸活性试验 锥形瓶法: NY/T 1154.3—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Pesticides guidelines for laboratory bioactivity tests Part 3: Erlenmeyer flask test for insecticide fumigant activity: NY/T 1154.3—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [13] 中华人民共和国农业部. 农药室内生物测定试验准则 杀虫剂 第1部分: 触杀活性试验 点滴法: NY/T 1154.1—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Pesticides guidelines for laboratory bioactivity tests Part 1: The topical application test for insecticide contact activity: NY/T 1154.1—2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [14] Mansour N A, Eldefrawi M E, Topozada A, et al. Toxicological studies on the Egyptian cotton leaf worm, *Prodenia litura*. VI. Potentiation and antagonism of organophosphorus and carbamate insecticides[J]. Journal of Economic Entomology, 1966, 59(2): 307-311.
- [15] Sun Y P, Johnson E R. Analysis of joint action of insecticides against house flies[J]. Journal of Economic Entomology, 1960, 53(5): 887-892.
- [16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 病媒生物密度监测方法 蝇类: GB/T 23796—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Surveillance methods for vector density-Fly: GB/T 23796—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [17] 徐重新, 张江兆, 胡晓丹, 等. 农药联合复配在农作物病虫害防治上的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 8-15.
- Xu C X, Zhang J Z, Hu X D, et al. Research progress of pesticide combination in crop diseases and insect pests control[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 8-15.
- [18] 杨石有, 张贝贝, 张蕊, 等. 添加芦荟精油对 150 g/L 茚虫威乳油防治草地贪夜蛾的增效作用[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 540-546.
- Yang S Y, Zhang B B, Zhang R, et al. Synergistic effect of aloe essential oil on 150 g/L indoxacarb in the control of *Spodoptera frugiperda*[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2021, 36(3): 540-546.
- [19] 金党琴, 田连生, 龚爱琴, 等. 苏云金杆菌与印楝素对水稻二化螟的灭杀协同增效作用研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(6): 963-967.
- Jin D Q, Tian L S, Gong A Q, et al. Synergistic effect of *Bacillus thuringiensis* and Azadirachtin against *Chilo suppressalis*[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2020, 35(6): 963-967.
- [20] Rattan R S. Mechanism of action of insecticidal secondary metabolites of plant origin[J]. Crop Protection, 2010, 29(9): 913.