八种桉属挥发油对玉米象和谷蠹的熏蒸与触杀活性及其活性化学成分研究*

陈晓露[1**] 汤 艳[1] 严 毅[2] 李 靖[1] 梁 倩[1***]

（1. 西南林业大学生物与食品工程学院，昆明 650224；2. 海口林场，昆明 650114）

摘 要 **【目的】** 筛选对玉米象 *Sitophilus zeamais* 和谷蠹 *Rhyzopertha dominica* 具有良好杀虫活性的挥发油及成分。**【方法】** 通过水蒸气蒸馏法提取挥发油，采用滤纸片熏蒸法和微量点滴法测定挥发油对玉米象和谷蠹的熏蒸及触杀活性。通过气相色谱-质谱法（GC-MS）测定挥发油的成分。**【结果】** 樟脑桉挥发油对玉米象 24 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 为 15.49 mg/L，大叶桉挥发油对玉米象 48 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 为 9.45 mg/L。三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 分别为 21.86 和 17.30 mg/L。三花桉挥发油对玉米象和谷蠹的 24 和 48 h 触杀活性最好，24 h 的 LD_{50} 分别为 33.33 和 6.60 μg/头，48 h 的 LD_{50} 分别为 29.67 和 4.13 μg/头。GC-MS 分析，樟脑桉挥发油主要成分为桉叶油醇（52.17%）、(+)-α-蒎烯（9.15%）和 α-松油醇（8.50%）。大叶桉挥发油的主要成分为(+)-α-蒎烯（39.91%）、α-水芹烯（9.69%）、(R)-(+)-苎烯（7.68%）、β-蒎烯（6.94%）和 4-异丙基甲苯（5.84%）。三花桉挥发油主要成分为(+)-α-蒎烯（18.31%）、桉叶油醇（9.26%）、4-异丙基甲苯（8.85%）和 α-松油醇（5.39%）。大叶桉挥发油中 4-松油醇对玉米象熏蒸活性最好，24 和 48 h 时的 LC_{50} 分别为 58.65 和 47.37 mg/L。三花桉挥发油中 α-松油醇对谷蠹熏蒸活性最好，24 和 48 h 时的 LC_{50} 分别为 32.87 和 33.03 mg/L。三花桉挥发油中 α-松油醇对玉米象触杀活性最好，24 和 48 h 时的 LD_{50} 分别为 153.97 和 94.06 μg/头。三花桉挥发油中 α-水芹烯对谷蠹的触杀活性最好，24 和 48 h 时的 LD_{50} 分别为 192.61 和 62.70 μg/头。**【结论】** 桉属植物挥发油及其活性成分可作为绿色储粮害虫防控剂的潜在选择，这类植物源杀虫剂具有良好的开发应用前景。

关键词 桉属挥发油；玉米象；谷蠹；熏蒸活性；触杀活性

Insecticidal activity of eight *Eucalyptus* essential oils and their components against *Sitophilus zeamais* and *Rhyzopertha dominica*

CHEN Xiao-Lu[1**] TANG Yan[1] YAN Yi[2] LI Jing[1] LIANG Qian[1***]

(1. College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. Haikou Forest Farm, Kunming 650114, China)

Abstract **[Aim]** To screen essential oils for insecticidal activity against *Sitophilus zeamais* and *Rhyzopertha dominica* . **[Methods]** Essential oils were extracted by the steam distillation method, and their fumigant and contact toxicities evaluated using the filter paper fumigation, and topical application, methods, respectively. The chemical composition of essential oils was analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). **[Results]** *Eucalyptus camphora* had the highest fumigant toxicity against *S. zeamais* after 24 h, with an LC_{50} of 15.49 mg/L. *E. robusta* essential oil had the strongest fumigant activity against *S. zeamais* after 48 h, with an LC_{50} of 9.45 mg/L. *E. triflora* essential oil had the highest fumigant toxicity against *R. dominica* at both 24 and 48 h, with LC_{50} values of 21.86 and 17.30 mg/L, respectively. *E. trifloral* essential oil had the strongest contact toxicity against both *S. zeamais* and *R. dominica* , with LD_{50} values of 33.33 and 6.60 μg/adult after 24 h,

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金（32460704）；云南省农业基础研究联合专项项目面上项目（202401BD070001-105）；云南省教育厅科学研究基金项目（2024Y578）

**第一作者 First author，E-mail：824157834@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：E-mail：liangqian533@163.com

收稿日期 Received：2025-07-11；接受日期 Accepted：2025-10-24

and 29.67 and 4.13μg/adult after 48 h, respectively. GC-MS analysis revealed that the major components of *E. camphora* essential oil were eucalyptol (52.17%), (+)-α-pinene (9.15%), and α-terpineol (8.50%). *E. robusta* essential oil of was mainly comprised of α-pinene (39.91%), α-phellandrene (9.69%), (R)-(+)-limonene (7.68%), β-pinene (6.94%) and 4-isopropyltoluene (5.84%). The principal constituents of *E. triflora* essential oil were α-pinene (18.31%), eucalyptol (9.26%), 4-isopropyltoluene (8.85%) and α-terpineol (5.39%). Among the individual compounds, 4-carvomenthenol from *E. robusta* essential oil had the highest fumigant toxicity against *S. zeamais*, with LC_{50} values of 58.65 and 47.37 mg/L at 24 and 48 h, respectively. In *E. triflora* essential oil, α-terpineol had the highest fumigant toxicity against *R. dominica*, with LC_{50} values of 32.87 and 33.03 mg/L at 24 and 48 h, respectively. Moreover, α-terpineol in *E. triflora* essential oil had the highest contact toxicity against *S. zeamais*, with LD_{50} values of 153.97 and 94.06 μg/adult after 24 and 48 h, respectively. In addition, α-phellandrene in *E. triflora* essential oil had the highest contact toxicity against *R. dominica*, with LD_{50} values of 192.61 and 62.70 μg/adult after 24 and 48 h, respectively. **[Conclusion]** These findings suggest that *Eucalyptus* essential oils and their bioactive components have potential as environmentally friendly grain storage pest control agents. Plant-derived insecticides from *Eucalyptus* species have promising potential for sustainable pest management applications.

Key words *Eucalyptus* essential oil; *Sitophilus zeamais*; *Rhyzopertha dominica*; fumigant activity; contact toxicity

粮食是人类生存的必需品，而储粮害虫是导致储藏期间粮食损失的主要原因之一。据调查，全球每年因此造成的损失约占总产量的5%-10%，在温暖地区或仓储条件差的发展中国家甚至高达25%（Manandhar *et al*., 2018）。害虫不仅蛀食粮食，其排泄物、幼虫和尸体会污染粮堆，降低品质，并可能引发霉变，危害消费者健康（李慧等，2023）。目前主要依赖磷化氢等熏蒸剂和马拉硫磷等防护剂进行防治，但长期单一使用导致害虫抗药性增强，防治难度加大（王争艳等，2021）。同时，化学农药带来残留、环境污染与食品安全等问题（闫硕和沈杰，2019）。因此，研发高效、安全、环保的新型防治剂成为迫切需求。玉米象 *Sitophilus zeamais* 是我国头号储粮害虫，广泛危害各类谷物及其加工品，蛀食籽粒造成空壳与碎屑，严重影响粮食安全和品质（Ukeh *et al.*，2012；吴雨晴，2023）。谷蠹 *Rhyzopertha dominica* 主要在我国南方危害稻谷、小麦等，蛀食后产生大量粉末，不仅导致粮食损失，还影响熏蒸效果，甚至引发粮堆发热（彭娟，2013）。

桉属 *Eucalyptus* 是桃金娘科乔木或灌木，原产于澳大利亚，全球有900多种。我国引种桉树300余种，人工林面积居世界第三，已成为三大造林树种之一（谢耀坚，2012）。桉属植物富含挥发油，研究表明多种桉树挥发油对仓储害虫、卫生害虫及农业害虫表现出熏蒸、触杀、驱避等多种生物活性（Danna *et al.*，2024）。比如赤桉挥发油对锯谷盗 *Oryzaephilus surinamensis*（Danna *et al.*，2024）、米象 *Sitophilus oryzae*（Negahban and Moharramipour，2007；Ebadollahi and Setzer，2020）、赤拟谷盗 *Tribolium castaneum*、四纹豆象 *Callosobruchus maculatus*（Negahban and Moharramipour，2007）具有熏蒸活性。樟脑桉挥发油对米象和锯谷盗具有熏蒸活性，对锯谷盗也具有触杀活性（周幸等，2024）。蓝桉挥发油对家蝇 *Musca domestica*（Kumar *et al.*，2012）、印度谷螟 *Plodia Interpunctella* 有触杀和熏蒸活性（Jesser *et al.*，2017）、对马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* 4龄幼虫有触杀和胃毒活性，也有拒食和生长抑制活性（Topiar *et al.*，2015）。蓝桉挥发油能显著降低巴西豆象 *Zabrotes subfasciatus* 和菜豆象 *Acanthoscelides obtectus* 的产卵量和成虫羽化率（Papachristos and Stamopoulos，2002；Franca *et al.*，2012）。直杆蓝桉挥发油对酱曲露尾甲 *Carpophilus hemipterus*（Abir *et al.*，2020）、米象（Abir *et al.*，2020；Mariam *et al.*，2022）、头虱 *Pediculus humanus capitis*（Toloza *et al.*，2010）和四纹豆象（Mariam *et al.*，2022）有熏蒸活性，且对米象和四纹豆象有驱避活性（Mariam *et al.*，2022）。小叶桉挥发油对米象和锯谷盗有触杀活性（周幸等，2024），对柑橘木虱 *Diaphorina citri*（Li *et al.*，2024）有触杀和驱避活性。大叶桉挥发油对德国

小蠊 *Blattella germanica*（Liu *et al.*，2011）有驱避活性，对柑橘木虱（Li *et al.*，2024）有触杀和驱避活性。三花桉挥发油对米象、锯谷盗有熏蒸和触杀活性（周幸等，2024）。奥米圆桉挥发油的杀虫活性未见报道。目前，关于桉属植物挥发油对仓储害虫杀虫活性的研究报道中，赤桉和蓝桉挥发油已经被证实对玉米象和谷蠹具有杀虫活性，而樟脑桉、直杆蓝桉、奥米圆桉、小叶桉、大叶桉和三花桉挥发油对这 2 种害虫的杀虫活性未见报道。

本研究基于对 8 种桉属挥发油对玉米象和谷蠹熏蒸与触杀活性的筛选，发现樟脑桉和大叶桉挥发油对玉米象的熏蒸活性最好，三花桉挥发油对谷蠹的熏蒸活性最好。三花桉挥发油对玉米象和谷蠹的触杀活性最好。通过气相色谱-质谱分析挥发油的成分，对 3 种桉树挥发油的化学成分进行杀虫活性的筛选，为桉属植物开发利用及玉米象和谷蠹的防治提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 植物样品 供试植物样品由西南林业大学生物与食品工程学院植物学教研室徐波副教授鉴定，植物样品名称、拉丁名、采集地点、采集时间和采集部位见表 1。植物样本存于西南林业大学生物与食品工程学院。

表 1 植物样品

Table 1 Plant samples

植物名称 Plant name	采集地点 Collection location	采集时间（年.月） Collection time (year. month)	采集部位 Collection part
赤桉 *Eucalyptus camaldulensis*	云南省昆明市西南林业大学 Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province	2023.7	叶子 Leaves
樟脑桉 *Eucalyptus camphora*	云南省昆明市海口林场 Haikou Forest Farm, Kunming, Yunnan Province	2023.8	叶子 Leaves
蓝桉 *Eucalyptus globulus*	云南省昆明市西南林业大学 Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province	2023.7	叶子 Leaves
直杆蓝桉 *Eucalyptus maidenii*	云南省昆明市西南林业大学 Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province	2023.7	叶子 Leaves
奥米圆桉 *Eucalyptus neglecta*	云南省昆明市海口林场 Haikou Forest Farm, Kunming, Yunnan Province	2023.8	叶子 Leaves
小叶桉 *Eucalyptus tereticornis*	云南省昆明市海口林场 Haikou Forest Farm, Kunming, Yunnan Province	2023.8	叶子 Leaves
大叶桉 *Eucalyptus robusta*	云南省昆明市西南林业大学 Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province	2023.7	叶子 Leaves
三花桉 *Eucalyptus triflora*	云南省昆明市海口林场 Haikou Forest Farm, Kunming, Yunnan Province	2023.8	叶子 Leaves

1.1.2 供试虫源 供试玉米象由西南林业大学生物多样性保护与利用学院昆虫学实验室提供。供试谷蠹购于河南省南阳市淅川县渠首天然趣味昆虫植物馆。养虫室饲养温度（28±1）℃，相对湿度 75%±5%，光照周期 16 L∶8 D。玉米象用玉米饲养，谷蠹用小麦饲养，饲养 7 d 后，筛去成虫，待新一代成虫羽化大量出现 7 d 左右，筛出成虫作为试虫。

1.1.3 供试仪器及化学试剂 HP7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪（美国 Agilent 公司）；RGX-250B 人工气候培养箱（上海坤天实验仪器有限公司）；DZTW 型电子调温电热套（上海力辰公司）；100.0 μL 移液枪（上海大龙医疗设备有限公司）和 1.0 μL 微量进样器（上海高鸽工贸

有限公司）。正己烷（天津市大茂化学试剂厂，分析纯）;（+）-α-蒎烯（≥98%）、α-水芹烯（≥85%）、桉叶油醇（≥99.5%）、α-松油醇（≥98%）、β-蒎烯（≥98%）、4-异丙基甲苯（≥99.5%）、（R）-（+）-苎烯（≥95%）、2-茨醇（98%）、4-松油醇（≥98%）、γ-松油烯（≥95%）和反式石竹烯（>80%）均购于上海麦克林科技有限公司。香橙烯（≥95%）和 β-桉叶油醇（≥95%）购于武汉中标科技有限公司。桉油烯醇（≥95%）购于云南西力生物技术股份有限公司。甲氰菊酯（含量为 20%，剂型：乳油）购于北京中科质检生物技术有限公司。

1.2　试验方法

1.2.1　挥发油的提取　8 种桉属植物新鲜叶子阴干剪碎，挥发油的提取参照中国药典附录 XD 中的甲法（国家药典委员会，2020）。3 L 的圆底烧瓶中加入提取样品，加入适量水，置电热套中，连接挥发油提取器及回流冷凝管，加热提取 5-6 h，至油量不再增加时停止加热，收集油状物，冷冻干燥，4 ℃冷藏备用。

1.2.2　气相-色谱质谱测定条件　气相色谱-质谱联用仪：HP7 890A-5 975C。HP-5MS 石英毛细管柱（30.00 m×0.25 mm×0.25 μm）。柱温：50 ℃保持 5 min，以 5 ℃/min 升至 250 ℃，保持 25 min。进样量 2 μL，分流比 20∶1，载气（He）。质谱条件：离子源 EI，电子能量 70 eV，气质接口温度 280 ℃，离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃。电子倍增器电压：1 894 V。

1.2.3　熏蒸活性测定　测定 8 种桉属挥发油及化合物对玉米象和谷蠹的熏蒸活性，通过预试验确定测试质量浓度范围。用正己烷将挥发油及化合物稀释成 5 个不同质量浓度梯度的溶液。将 10 头供试昆虫放入直径 2.5 cm，高 5.5 cm，体积 25 mL 的玻璃瓶中，将直径 2.0 cm 的滤纸用固体胶粘在瓶盖上，用移液枪吸取 10 μL 不同质量浓度的溶液均匀滴在滤纸片上，挥发 20 s 后，迅速拧紧瓶盖密封形成密闭空间（Chu *et al.*，2010）。正己烷为阴性对照，每组处理重复 5 次。处理后置于培养箱培养 24 和 48 h 后检查各组试虫死亡和存活情况。根据公式（1）和（2）计算死亡率和校正死亡率。

$$死亡率=\frac{死亡虫数}{处理总虫数}\times 100\% \quad (1)$$

$$校正死亡率=\frac{处理组死亡率-对照组死亡率}{1-对照组死亡率}\times 100\% \quad (2)$$

1.2.4　触杀活性测定　测定 8 种桉属挥发油及化合物对玉米象和谷蠹的触杀活性。通过预试验确定测试质量浓度范围，用正己烷将挥发油及化合物稀释成 5 个不同质量浓度梯度的溶液，用微量进样器取 0.50 μL 不同质量浓度的溶液滴在玉米象和谷蠹的前胸背板上，每个质量浓度处理 10 头试虫，重复 5 次，处理后转移到直径 2.5 cm，高度 5.5 cm 的玻璃瓶中，放入培养箱培养（Chu *et al.*，2010）。正己烷为阴性对照，甲氰菊酯为阳性对照。24 和 48 h 时分别检查各组试虫死亡和存活情况。根据公式（1）和（2）计算死亡率和校正死亡率。

1.3　数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2024 进行整理，SPSS 20.0 软件进行分析，计算玉米象和谷蠹的死亡率、校正死亡率、半数致死浓度 LC_{50}、半数致死剂量 LD_{50}、95%置信区间、卡方和标准误，Duncan 氏新复极差法检验进行显著性分析。

2　结果与分析

2.1　8 种桉属挥发油对玉米象的熏蒸活性

8 种桉属挥发油对玉米象的熏蒸活性见表 2。樟脑桉挥发油对玉米象 24 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 为 15.49 mg/L，大叶桉、赤桉、蓝桉、直杆蓝桉和三花桉挥发油对玉米象的熏蒸活性依次减弱，奥米圆桉和小叶桉熏蒸活性较弱。大叶桉挥发油对玉米象 48 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 为 9.45 mg/L。樟脑桉、赤桉、蓝桉、三花桉和直杆蓝桉对玉米象的熏蒸活性依次减弱，奥米圆桉和小叶桉熏蒸活性较弱。双因素方差分析表明，樟脑桉挥发油处理浓度（F=56.49，P<0.001）对玉米象的死亡率有显著影响，处理时间（F=1.39，

表 2 8 种桉属挥发油对玉米象的熏蒸活性

Table 2 Fumigant activity of eight *Eucalyptus* essential oils against *Sitophilus zeamais*

处理时间（h） Treatment time (h)	植物名称 Plant name	半数致死浓度（mg/L） LC_{50} (mg/L)	95%置信区间（mg/L） 95% Confidence interval (mg/L)	斜率±标误 Slope±SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	赤桉 *E. camaldulensis*	20.51	8.48-51.27	1.19±0.28	1.90	0.594
	樟脑桉 *E. camphora*	15.49	7.19-33.94	1.47±0.34	1.98	0.578
	蓝桉 *E. globulus*	30.11	15.79-59.73	1.99±0.47	1.33	0.723
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	37.60	19.97-73.76	2.10±0.51	4.15	0.245
	奥米圆桉 *E. neglecta*	>800.00	–	–	–	–
	小叶桉 *E. tereticornis*	>800.00	–	–	–	–
	大叶桉 *E. robusta*	19.73	8.90-46.53	1.34±0.31	3.83	0.280
	三花桉 *E. triflora*	50.04	17.31-260.84	0.87±0.25	0.57	0.903
48	赤桉 *E. camaldulensis*	10.18	3.53-25.39	1.11±0.28	4.02	0.260
	樟脑桉 *E. camphora*	9.50	4.14-20.49	1.46±0.35	2.45	0.485
	蓝桉 *E. globulus*	10.55	4.64-22.96	1.44±0.34	1.53	0.675
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	19.98	10.27-40.69	1.83±0.42	2.66	0.448
	奥米圆桉 *E. neglecta*	>800.00	–	–	–	–
	小叶桉 *E. tereticornis*	504.19	$89.20\text{-}4.85\times10^9$	0.60±0.26	0.19	0.980
	大叶桉 *E. robusta*	9.45	3.23-23.20	1.12±0.29	2.87	0.412
	三花桉 *E. triflora*	18.92	3.93-89.12	0.71±0.23	1.10	0.776

-表示无熏蒸活性。- indicates no fumigation activity.

P=0.245）对玉米象死亡率的影响不显著。大叶桉挥发油处理浓度（*F*=62.44，*P*<0.001）和处理时间（*F*=5.79，*P*=0.021）均对玉米象的死亡率影响显著，处理浓度要比处理时间的影响显著。

2.2 8 种桉属挥发油对谷蠹的熏蒸活性

8 种桉属挥发油对谷蠹的熏蒸活性见表 3。三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 的熏蒸活性均最好，LC_{50} 分别为 21.86 和 17.30 mg/L。樟脑桉、小叶桉、直杆蓝桉、大叶桉、赤桉、蓝桉和奥米圆桉挥发油 24 h 对谷蠹的熏蒸活性依次减弱。樟脑桉、蓝桉、小叶桉、直杆蓝桉、大叶桉、赤桉和奥米圆桉挥发油 48 h 对谷蠹的熏蒸活性依次减弱。双因素方差分析表明，三花桉挥发油处理浓度（*F*=30.88，*P*<0.001）对谷蠹的死亡率影响显著，处理时间（*F*=0.91，*P*=0.345）对谷蠹的死亡率影响不显著。

2.3 8 种桉属挥发油对玉米象的触杀活性

8 种桉属挥发油对玉米象的触杀活性见表 4。三花桉挥发油对玉米象 24 和 48 h 的触杀活性最好，LD_{50} 分别为 33.33 和 29.67 μg/头。奥米圆桉、赤桉、小叶桉、直杆蓝桉、蓝桉、樟脑桉和大叶桉挥发油 24 和 48 h 对玉米象的触杀活性依次减弱。三花桉挥发油对玉米象 24 h 触杀活性优于阳性对照甲氰菊酯的触杀活性。双因素方差分析表明，三花桉挥发油处理浓度（*F*=16.64，*P*<0.001）和处理时间（*F*=0.18，*P*=0.672）均对玉米象触杀活性的死亡率有一定的影响，处理浓度要比处理时间的影响较显著。

2.4 8 种桉属挥发油对谷蠹的触杀活性

8 种桉属挥发油对谷蠹的触杀活性见表 5。三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 的触杀活性最好，LD_{50} 分别为 6.60 和 4.13 μg/头。小叶桉、樟

表 3　8 种桉属挥发油对谷蠹的熏蒸活性

Table 3　Fumigant activity of eight *Eucalyptus* essential oils against *Rhyzopertha dominica*

处理时间（h）Treatment time (h)	植物名称 Plant name	半数致死浓度（mg/L）LC_{50} (mg/L)	95%置信区间（mg/L）95% Confidence interval (mg/L)	斜率±标误 Slope±SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	赤桉 *E. camaldulensis*	62.19	35.06-162.24	1.58±0.49	1.90	0.594
	樟脑桉 *E. camphora*	42.95	24.46-67.06	2.22±0.57	0.76	0.859
	蓝桉 *E. globulus*	93.93	58.02-185.43	1.95±0.53	3.10	0.377
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	49.40	31.93-75.39	2.53±0.59	0.69	0.876
	奥米圆桉 *E. neglecta*	384.85	125.32- 6.48×10^{116}	1.32±0.67	0.04	0.998
	小叶桉 *E. tereticornis*	43.89	28.61-93.03	2.39±0.67	2.44	0.487
	大叶桉 *E. robusta*	58.60	37.78-102.21	2.25±0.58	1.58	0.663
	三花桉 *E. triflora*	21.86	14.48-39.43	2.44±0.62	1.88	0.598
48	赤桉 *E. camaldulensis*	41.53	21.59-85.53	1.58±0.48	3.03	0.387
	樟脑桉 *E. camphora*	22.81	13.72-31.80	4.04±1.30	1.06	0.787
	蓝桉 *E. globulus*	26.38	15.92-37.06	3.55±1.01	1.85	0.603
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	30.64	22.61-42.12	4.80±1.24	1.20	0.753
	奥米圆桉 *E. neglecta*	176.61	87.39-5 194.95	1.63±0.61	1.35	0.717
	小叶桉 *E. tereticornis*	26.68	16.62-50.10	2.02±0.53	1.87	0.601
	大叶桉 *E. robusta*	39.55	26.56-58.63	2.84±0.66	1.01	0.800
	三花桉 *E. triflora*	17.30	11.79-27.60	2.74±0.65	4.12	0.248

表 4　8 种桉属挥发油对玉米象的触杀活性

Table 4　Contact toxicity of eight *Eucalyptus* essential oils against *Sitophilus zeamais*

处理时间（h）Treatment time (h)	植物名称 Plant name	半数致死剂量（μg/头）LD_{50} (μg/ind.)	95%置信区间（μg/头）95% Confidence interval (μg/ind.)	斜率±标误 Slope±SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	赤桉 *E. camaldulensis*	38.74	24.48-57.99	2.59±0.62	0.76	0.860
	樟脑桉 *E. camphora*	84.48	57.23-128.67	2.76±0.63	1.99	0.574
	蓝桉 *E. globulus*	76.19	40.76-142.58	1.70±0.50	2.69	0.442
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	63.73	32.28-124.44	1.59±0.48	0.73	0.866
	奥米圆桉 *E. neglecta*	38.26	23.49-61.28	2.23±0.56	3.66	0.301
	小叶桉 *E. tereticornis*	39.91	22.93-67.89	1.94±0.52	2.59	0.458
	大叶桉 *E. robusta*	103.77	67.53-161.35	2.50±0.61	2.95	0.400
	三花桉 *E. triflora*	33.33	18.05-79.90	1.54±0.48	0.80	0.849
	甲氰菊酯 Fenpropathrin	40.64	21.53-139.40	1.41±0.47	1.24	0.744
48	赤桉 *E. camaldulensis*	30.51	17.59-45.93	2.46±0.62	1.86	0.601
	樟脑桉 *E. camphora*	66.53	43.45-100.62	2.63±0.63	1.76	0.624
	蓝桉 *E. globulus*	56.57	31.65-91.00	2.07±0.55	1.63	0.652
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	32.99	10.33-58.33	1.58±0.51	1.68	0.642
	奥米圆桉 *E. neglecta*	29.88	18.01-45.77	2.41±0.61	2.93	0.403
	小叶桉 *E. tereticornis*	30.92	15.83-51.23	1.89±0.52	1.58	0.665
	大叶桉 *E. robusta*	70.62	42.69-107.56	2.42±0.60	0.94	0.815
	三花桉 *E. triflora*	29.67	14.15-79.12	1.36±0.47	1.40	0.705
	甲氰菊酯 Fenpropathrin	8.97	0.75-17.53	1.34±0.50	0.71	0.871

表 5 8 种桉属挥发油对谷蠹的触杀活性

Table 5 Contact toxicity of eight *Eucalyptus* essential oils against *Rhyzopertha dominica*

处理时间（h） Treatment tim (h)	植物名称 Plant name	半数致死剂量（μg/头） LD_{50} (μg/ind.)	95%置信区间（μg/头） 95% Confidence interval (μg/ind.)	斜率±标误 Slope±SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	赤桉 *E. camaldulensis*	37.79	21.70-60.59	2.11±0.54	1.18	0.758
	樟脑桉 *E. camphora*	29.54	2.29-58.44	1.04±0.47	5.63	0.131
	蓝桉 *E. globulus*	115.39	64.69-211.39	1.79±0.50	0.40	0.941
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	61.64	28.23-127.37	1.46±0.47	0.63	0.889
	奥米圆桉 *E. neglecta*	31.67	17.11-52.08	1.97±0.53	3.46	0.326
	小叶桉 *E. tereticornis*	17.88	11.48-26.98	2.59±0.62	0.96	0.811
	大叶桉 *E. robusta*	39.46	20.23-68.71	1.76±0.50	0.89	0.828
	三花桉 *E. triflora*	6.60	3.95-16.84	1.79±0.53	2.38	0.498
	甲氰菊酯 Fenpropathrin	1.65	1.05-2.70	2.24±0.54	2.61	0.457
48	赤桉 *E. camaldulensis*	24.84	12.52-38.48	2.25±0.62	1.71	0.635
	樟脑桉 *E. camphora*	12.17	0.00-25.56	1.86±0.83	0.14	0.986
	蓝桉 *E. globulus*	14.64	0.00-36.91	1.44±0.65	0.29	0.962
	直杆蓝桉 *E. maidenii*	26.72	15.78-37.74	2.11±0.60	5.40	0.145
	奥米圆桉 *E. neglecta*	17.41	6.24-28.09	2.05±0.62	0.60	0.897
	小叶桉 *E. tereticornis*	10.48	5.06-16.27	2.24±0.62	1.23	0.746
	大叶桉 *E. robusta*	26.27	13.31-41.08	2.17±0.59	1.75	0.626
	三花桉 *E. triflora*	4.13	2.34-8.38	1.70±0.49	2.55	0.467
	甲氰菊酯 Fenpropathrin	1.06	0.68-1.56	2.75±0.66	0.48	0.922

脑桉、奥米圆桉、赤桉、大叶桉、直杆蓝桉和蓝桉挥发油 24 h 对谷蠹的触杀活性依次减弱。小叶桉、樟脑桉、蓝桉、奥米圆桉、赤桉、大叶桉和直杆蓝桉 48 h 对谷蠹的触杀活性依次减弱。双因素方差分析表明，三花桉挥发油处理浓度（F=18.49，P<0.001）和处理时间（F=3.09，P=0.086）均对谷蠹的死亡率有一定的影响，处理浓度要比处理时间的影响显著。

2.5 樟脑桉挥发油的化学成分

樟脑桉挥发油的化学成分见表 6。樟脑桉挥发油中含量大于 1%的成分有 6 种。其中桉叶油醇（52.17%）、（+）-α-蒎烯（9.15%）和 α-松油醇（8.50%）为主要化合物。

2.6 大叶桉挥发油的化学成分

大叶桉挥发油的化学成分见表 7。大叶桉挥发油中含量大于 1%的化合物共有 8 种，其中（+）-α-蒎烯（39.91%）、α-水芹烯（9.69%）、（R）-（+）-苎烯（7.68%），β-蒎烯（6.94%）和 4-异丙基甲苯（5.84%）为主要成分。

表 6 樟脑桉挥发油的化学成分

Table 6 Chemical constituents of the essential oil from *Eucalyptus camphora*

序号 No.	保留时间（min） Retention time (min)	化合物 Compound	质量百分比（%） Mass percentage(%)
1	7.433	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	9.15
2	9.842	α-水芹烯 α-Phellandrene	2.36
3	11.067	桉叶油醇 Eucalyptol	52.17
4	16.720	α-松油醇 α-Terpineol	8.50
5	24.885	香橙烯 Aromandendrene	1.45
6	31.168	β-桉叶油醇 β-Eudesmol	2.58

表 7　大叶桉挥发油的化学成分

Table 7　Chemical constituents of the essential oil from *Eucalyptus robusta*

序号 No.	保留时间（min） Retention time (min)	化合物 Compound	质量百分比（%） Mass percentage (%)
1	7.565	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	39.91
2	8.864	β-蒎烯 β-Pinene	6.94
3	9.865	α-水芹烯 α-Phellandrene	9.69
4	10.580	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	5.84
5	10.741	（R）-（+）苎烯 (R)-(+)-Limonene	7.68
6	15.673	2-茨醇 Borneol	1.37
7	16.114	4-松油醇 4-Carvomenthenol	1.45
8	16.646	α-松油醇 α-Terpineol	4.51

表 8　三花桉挥发油的化学成分

Table 8　Chemical constituents of the essential oil from *Eucalyptus triflora*

序号 No.	保留时间（min） Retention time (min)	化合物 Compound	质量百分比（%） Mass percentage (%)
1	7.548	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	18.31
2	9.831	α-水芹烯 α-Phellandrene	1.27
3	10.666	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	8.85
4	10.901	桉叶油醇 Eucalyptol	9.26
5	11.874	γ-松油烯 γ-Terpinene	4.48
6	15.707	2-茨醇 Borneol	2.00
7	16.714	α-松油醇 α-Terpineol	5.39
8	24.290	反式石竹烯 β-Caryophyllene	2.27
9	29.120	斯巴醇 Spathulenol	2.32

2.7　三花桉挥发油的化学成分

三花桉挥发油的化学成分见表 8。三花桉挥发油中含量大于 1%的化合物共有 9 种，其中（+）-α-蒎烯（18.31%）、桉叶油醇（9.26%）、4-异丙基甲苯（8.85%）和 α-松油醇（5.39%）为主要成分。

2.8　樟脑桉和大叶桉挥发油中化合物对玉米象熏蒸活性的校正死亡率

樟脑桉和大叶桉挥发油中化合物对玉米象熏蒸活性的校正死亡率见表 9。樟脑桉挥发油中 α-松油醇对玉米象熏蒸活性最好，24 和 48 h 熏蒸活性的校正死亡率分别为 34.00%和 50.00%。

表 9　樟脑桉和大叶桉挥发油中化合物浓度为 40 mg/L 时对玉米象熏蒸活性的校正死亡率

Table 9　Compounds corrected mortality of fumigant activity from *Eucalyptus camphora* and *Eucalyptus robusta* essential oil against *Sitophilus zeamais* at 40 mg/L

植物名称 Plant name	序号 No.	化合物 Compound	校正死亡率（%）Corrected mortality (%)	
			24 h	48 h
樟脑桉 *E. camphora*	1	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	4.00±2.45 cd	8.00±2.00 cd
	2	α-水芹烯 α-Phellandrene	8.00±2.00 c	10.00±0.00 c
	3	桉叶油醇 Eucalyptol	16.00±2.45 b	24.00±2.45 b
	4	α-松油醇 α-Terpineol	34.00±2.45 a	50.00±0.00 a
	5	香橙烯 Aromandendrene	4.00±2.45 cd	6.00±2.45 cd
	6	β-桉叶油醇 β-Eudesmol	4.00±2.45 cd	12.00±2.00 c
大叶桉 *E. robusta*	1	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	4.00±2.45 cd	8.00±2.00 cd
	2	β-蒎烯 β-Pinene	2.00±2.00 cd	2.00±2.00 d
	3	α-水芹烯 α-Phellandrene	8.00±2.00 c	10.00±0.00 c
	4	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	4.00±2.45 cd	6.00±2.45 cd
	5	（R）-（+）苎烯 (R)-(+)-Limonene	0.00±0.00 d	2.00±2.00 d

续表 9 (Table 9 continued)

植物名称 Plant name	序号 No.	化合物 Compound	校正死亡率（%）Corrected mortality (%)	
			24 h	48 h
大叶桉 *E. robusta*	6	2-茨醇 Borneol	2.00±2.00 cd	8.00±2.00 cd
	7	4-松油醇 4-Carvomenthenol	40.00±0.00 a	52.00±2.00 a
	8	α-松油醇 α-Terpineol	34.00±2.45 a	50.00±0.00 a

表中数值为平均值±标准误。同一列数据后不同字母表示差异显著（P<0.05，Duncan 氏新复极差法检验）。下表同。
Data in the table are presented as mean±SE, and followed by the different letters within the same column indicate significant difference (P<0.05, Duncan's multiple range test). The same below.

大叶桉挥发油中 4-松油醇和 α-松油醇对玉米象熏蒸活性的最好。4-松油醇 24 和 48 h 熏蒸活性的校正死亡率分别为 40.00%和 52.00%。α-松油醇 24 和 48 h 熏蒸活性的校正死亡率分别为 34.00%和 50.00%。对 α-松油醇和 4-松油醇设置质量浓度梯度，计算 LC_{50}，见表 12。

2.9 三花桉挥发油中化合物对谷蠹熏蒸活性的校正死亡率

三花桉挥发油中化合物对谷蠹熏蒸活性的校正死亡率见表 10。三花桉挥发油中 α-松油醇对谷蠹熏蒸活性最好，24 和 48 h 熏蒸活性的校正死亡率分别为 70.00%和 70.00%。因此对 α-松油醇设置质量浓度梯度，计算 LC_{50}，见表 12。

表 10 三花桉挥发油中化合物浓度为 40 mg/L 时对谷蠹熏蒸活性的校正死亡率

Table 10 Compounds corrected mortality of fumigation activity from *Eucalyptus triflora* essential oil against *Rhyzopertha dominica* at 40 mg/L

序号 No.	化合物 Compound	校正死亡率（%） Corrected mortality (%)	
		24 h	48 h
1	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	8.00±2.00 c	12.00±2.00 de
2	α-水芹烯 α-Phellandrene	6.00±2.45 c	24.00±2.45 c
3	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	6.00±2.45 c	6.00±2.45 e
4	桉叶油醇 Eucalyptol	20.00±0.00 b	38.00±2.00 b
5	γ-松油烯 γ-Terpinene	8.00±2.00 c	10.00±0.00 de
6	2-茨醇 Borneol	4.00±2.45 c	12.00±2.00 de
7	α-松油醇 α-Terpineol	70.00±0.00 a	70.00±0.00 a
8	反式石竹烯 β-Caryophyllene	4.00±2.45 c	14.00±2.45 d
9	斯巴醇 Spathulenol	6.00±2.45 c	6.00±2.45 e

2.10 三花桉挥发油中化合物对玉米象和谷蠹触杀活性的校正死亡率

三花桉挥发油中化合物对玉米象和谷蠹触杀活性的校正死亡率见表 11。由表 11 可知，三花桉挥发油中反式石竹烯和 α-松油醇对玉米象的触杀活性最好，24 h 时校正死亡率分别为 56.00%和 52.00%。48 h 时 α-松油醇的校正死亡率为 70.00%。对谷蠹的触杀活性，24 h 时 α-水芹烯、4-异丙基甲苯、α-松油醇和反式石竹烯校正死亡率分别为 16.00%、16.00%、12.00%和 18.00%。48 h 时 α-水芹烯的触杀活性最好，校正死亡率为 50.00%。因此对 α-松油醇和 α-水芹烯设置质量浓度梯度，计算其对玉米象和谷蠹的 LD_{50}，见表 13。

2.11 α-松油醇和 4-松油醇对玉米象和谷蠹的熏蒸活性

α-松油醇和 4-松油醇对玉米象和谷蠹熏蒸活性的 LC_{50} 见表 12。由表 12 可知 4-松油醇对玉米象 24 和 48 h 熏蒸活性好于 α-松油醇的熏蒸活性。4-松油醇和 α-松油醇 24 和 48 h 对玉米象和谷蠹熏蒸活性随时间的增加活性逐渐增强。双因素方差分析表明，4-松油醇处理浓度（F=256.33，P<0.001）和处理时间（F=16.13，P<0.001）均对玉米象死亡率产生显著影响，处理浓度要比处理时间的影响显著。α-松油醇处理浓度（F=971.63，P<0.001）和处理时间（F=132.25，P<0.001）均对谷蠹的死亡率产生

表 11　三花桉挥发油中的化合物对玉米象（浓度为 100 μg/头）和谷蠹（浓度为 25 μg/头）触杀活性的校正死亡率

Table 11　Compounds corrected mortality of contact toxicity from *Eucalyptus triflora* against *Sitophilus zeamais* (at 100 μg/adult) and *Rhyzopertha dominica* (at 25 μg/adult)

序号 No.	化合物 Compound	玉米象 *S. zeamais* 校正死亡率（%） *S. zeamais* corrected mortality (%)		谷蠹 *R. dominica* 校正死亡率（%） *R. dominica* corrected mortality (%)	
		24 h	48 h	24 h	48 h
1	（+）-α-蒎烯 (+)-α-Pinene	4.00±2.45 d	4.00±2.45 f	4.00±2.45 c	8.00±2.00 e
2	α-水芹烯 α-Phellandrene	2.00±2.00 d	4.00±2.45 f	16.00±2.45 a	50.00±0.00 a
3	4-异丙基甲苯 4-Isopropyltoluene	6.00±2.45 d	6.00±2.45 ef	16.00±2.45 a	26.00±2.49 c
4	桉叶油醇 Eucalyptol	8.00±2.00 cd	32.00±2.00 c	6.00±2.45 bc	18.00±2.00 d
5	γ-松油烯 γ-Terpinene	24.00±2.45 b	54.00±2.45 b	8.00±2.00 bc	40.00±0.00 b
6	2-莰醇 Borneol	16.00±2.45 bc	16.00±2.45 d	6.00±2.45 bc	34.00±2.45 b
7	α-松油醇 α-Terpineol	52.00±2.00 a	70.00±0.00 a	12.00±2.00 ab	24.00±2.45 cd
8	反式石竹烯 β-Caryophyllene	56.00±2.45 a	56.00±2.45 b	18.00±2.00 a	18.00±2.00 d
9	斯巴醇 Spathulenol	2.00±2.00 d	14.00±2.45 de	2.00±2.00 c	10.00±0.00 e

表 12　4-松油醇和 α-松油醇对玉米象和谷蠹的熏蒸活性

Table 12　Fumigation activity of terpinen-4-ol and α-terpineol against *Sitophilus zeamais* and *Rhyzopertha dominica*

处理时间（h） Treatment time (h)	供试昆虫 Tested insect	化合物 Compound	半数致死浓度（mg/L） LC_{50} (mg/L)	95%置信区间（mg/L） 95% Confidence interval (mg/L)	斜率±标误 Slope±SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	玉米象 *S. zeamais*	α-松油醇 α-Terpineol	86.49	34.85-6.55 × 10^9	1.66±0.78	0.77	0.857
		4-松油醇 4-Carvomenthenol	58.65	33.76-109 124.37	2.76±1.27	3.51	0.320
	谷蠹 *R. dominica*	α-松油醇 α-Terpineol	32.87	24.41-54.70	5.17±1.78	0.99	0.805
48	玉米象 *S. zeamais*	α-松油醇 α-Terpineol	58.04	26.22-7 850.65	1.51±0.60	1.82	0.610
		4-松油醇 4-Carvomenthenol	47.37	28.00-546.81	2.45±0.94	2.56	0.465
	谷蠹 *R. dominica*	α-松油醇 α-Terpineol	33.03	17.55-273.72	1.55±0.54	2.80	0.423

表 13　α-松油醇和 α-水芹烯对玉米象和谷蠹的触杀活性

Table 13　Contact toxicity of α-terpineol and α-phellandrene against *Sitophilus zeamais* and *Rhyzopertha dominica*

处理时间（h） Treatment time (h)	供试昆虫 Tested insect	化合物 Compound	半数致死剂量（μg/头） LD_{50} (μg/ind.)	95%置信区间（μg/头） 95% Confidence interval (μg/ind.)	斜率±标误 Slope ± SE	卡方 χ^2	*P* 值 *P*-value
24	玉米象 *S. zeamais*	α-松油醇 α-Terpineol	153.97	74.03-11 266.65	1.80±0.71	4.91	0.178
	谷蠹 *R. dominica*	α-水芹烯 α-Phellandrene	192.61	78.87-1 504.94	1.08±0.77	0.21	0.977
48	玉米象 *S. zeamais*	α-松油醇 α-Terpineol	94.06	51.17-666.84	1.74±0.58	5.05	0.169
	谷蠹 *R. dominica*	α-水芹烯 α-Phellandrene	62.70	30.56-300.81	0.54±0.44	0.93	0.819

显著影响，处理浓度要比处理时间的影响显著。4-松油醇和 α-松油醇的化学结构见图 1（A，B）。

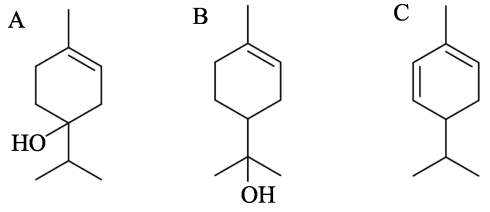


图 1　4-松油醇（A）、α-松油醇（B）、α-水芹烯（C）的化学结构式

Fig. 1　Structures of 4-carvomenthenol (A), α-terpineol (B), and α-phellandrene (C)

2.12　α-松油醇和 α-水芹烯对玉米象和谷蠹的触杀活性

α-松油醇和 α-水芹烯对玉米象和谷蠹的触杀活性见表 13。24 和 48 h，α-松油醇和 α-水芹烯对玉米象和谷蠹的触杀活性随时间的延长活性逐渐增强。双因素方差分析表明，α-松油醇的处理浓度（F=261.83，P<0.001）和处理时间（F=34.78，P<0.001）对玉米象死亡率均产生显著影响，处理浓度要比处理时间的影响显著。α-水芹烯的处理浓度（F=43.12，P<0.001）和处理时间（F=382.24，P<0.001）对谷蠹的死亡率均产生显著影响，处理时间要比处理浓度的影响显著。α-水芹烯的化学结构见图 1（C）。

3　结论与讨论

玉米象和谷蠹都是常见的仓储害虫，对小麦和玉米造成严重危害，导致重量减轻、营养价值和食用品质下降。本研究测定的樟脑桉挥发油对玉米象 24 h 熏蒸活性的 LC_{50} 为 15.49 mg/L（16.14 μL/L，樟脑桉挥发油 ρ=0.96 g/mL），大叶桉挥发油对玉米象 48 h 熏蒸活性的 LC_{50} 为 9.45 mg/L（10.27 μL/L，大叶桉挥发油 ρ=0.92 g/mL）。Rosa 等（2020）测定了莳萝 *Anethum graveolens*、孜然芹 *Cuminum cyminum*、茴香 *Foeniculum vulgare* 和欧芹 *Petroselinum crispum* 挥发油对玉米象 7 d 时的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 157.1、229.4、442.8 和 535.8 mg/L。Kang 和 Lee（2018）测定了肉桂 *Cinnamomum cassia* 挥发油 48 h 对玉米象的熏蒸活性，LC_{50} 为 57.59 mg/L。陈静（2022）测定了甘肃省山丹县小茴香籽挥发油 24 和 48 h 对玉米象的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 27.29 和 16.69 mg/L。Wanna 和 Khaengkhan（2023）测定了泰国曼谷小茴香籽挥发油 24 和 48 h 对玉米象的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 16.43 和 10.42 μL/L。Kim 和 Lee（2014）测定了罗勒油和橙皮油 24 h 对玉米象的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 14.0 和 106.0 mg/L。Wang 等（2011）测定了青花椒 *Zanthoxylum schinifolium* 新鲜果子、新鲜叶子和买的果子对玉米象 24 h 时的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 13.19、24.04 和 117.63 mg/L。樟脑桉挥发油对玉米象 24 h 的熏蒸活性以及大叶桉挥发油对玉米象 48 h 的熏蒸活性优于莳萝、孜然芹、茴香、欧芹、肉桂、小茴香籽、橙皮、青花椒新鲜叶子和买的果子挥发油的熏蒸活性，弱于罗勒和青花椒新鲜果子挥发油的熏蒸活性。草蒿脑（Estragole）、枯茗醛（Cuminaldehyde）、（+）-葑酮[（+）-Fenchone]和（S）-（+）-香芹酮[(S)-Carvone]对玉米象 7 d 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 501.20、484.80、424.80 和 51.80 mg/L（Rosa *et al.*，2020）。香豆素（Coumarin）和肉桂醛（Cinnamaldehyde）对玉米象 48 h 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 74.64 和 36.48 mg/L（Kang and Lee，2018）。β-月桂烯（β-Myrcene）、α-蒎烯（α-Pinene）、柠檬烯（Limonene）和芳樟醇（Linalool）对玉米象 24 h 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 274.0、264.0、122.0 和 16.0 mg/L（Kim and Lee，2014）。本研究测定大叶桉挥发油中的 4-松油醇对玉米象 24 和 48 h 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 58.65 和 47.37 mg/L，好于草蒿脑、枯茗醛、（+）-葑酮、香豆素、β-月桂烯、α-蒎烯和柠檬烯的熏蒸活性，弱于（S）-（+）-香芹酮、肉桂醛和芳樟醇的熏蒸活性。

本研究测定的三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 的熏蒸活性最好，LC_{50} 分别为 21.86 mg/L（22.77 μL/L，三花桉挥发油 ρ=0.96 g/mL）和 17.30 mg/L（18.02 μL/L）。Arab 等（2022）测定了香叶天竺葵 *Pelargonium graveolens* 对谷蠹

24 h 时的熏蒸活性，LC_{50} 为 590.7 mg/L。Souza 等（2016）测定了酸橙 *Citrus aurantium*、大戟科巴豆属植物 *Croton pulegiodorus*、留兰香 *Mentha spicata* 和罗勒 *Ocimum basilicum* 对谷蠹 48 h 的熏蒸活性，LC_{50} 分别为 69.36、48.66、27.51 和 17.67 μL/L。Jayakumar 等（2021）测定了莳萝 *Anethum graveolens* 和白千层 *Melaleuca cajuputi* 挥发油对谷蠹 24 h 的熏蒸活性，LC_{50} 为 13.71 和 25.60 μL/L。Aref 等（2016）测定了佛罗里达桉 *Eucalyptus floribundi* 挥发油 24 h 对谷蠹的熏蒸活性，LC_{50} 为 34.39 μL/L。杨悦玲等（2021）测定了土荆芥地上部分挥发油对谷蠹的熏蒸活性，24 h 的 LC_{50} 为 1.07 mg/L。三花桉挥发油对谷蠹的熏蒸活性优于香叶天竺葵、酸橙、大戟科巴豆属植物、留兰香、白天层和佛罗里达桉的熏蒸活性，不及罗勒、莳萝和土荆芥挥发油的熏蒸活性。芳樟醇、香叶醇和香茅醇对谷蠹 24 h 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 410.3、441.0 和 527.3 mg/L（Arab *et al.*，2022）。菖蒲酮（Calamusenone）对谷蠹 120 h 熏蒸活性的 LC_{50} 为 93.64 μL/L（Huang *et al.*，2011）。丁子香酚（Eugenol）和 β-罗勒烯[β-（Z）-Ocimene]对谷蠹 24 h 熏蒸活性的 LC_{50} 分别为 0.02 和 10.90 μL/L（Ogendo *et al.*，2008）。本研究中，α-松油醇对谷蠹 24 和 48 h 的 LC_{50} 分别为 32.87 和 33.03 mg/L，因此 α-松油醇对谷蠹的熏蒸活性要好于芳樟醇、香叶醇、香茅醇和菖蒲烯酮，弱于丁子香酚和 β-罗勒烯。

本研究测定的 8 种挥发油中，三花桉对玉米象 24 和 48 h 的触杀活性最好，LC_{50} 分别为 33.33 和 29.67 μg/头。Rosa 等（2020）测定了欧芹、孜然芹和莳萝挥发油对玉米象 7 d 时的触杀活性，LC_{50} 分别为 128.2、120.4 和 111.3 μg/头。Liu 等（2010）研究了茵陈蒿 *Artemisia capillaris* 和蒙古蒿 *Artemisia mongolica* 挥发油 7 d 时对玉米象的触杀活性，LD_{50} 分别为 105.95 和 87.92 μg/头。Chu 等（2010）测定了毛莲蒿 *Artemisia vestita* 挥发油 24 h 对玉米象的触杀活性，LD_{50} 为 50.62 μg/头。陈静（2022）测定了小茴香籽挥发油 24 和 48 h 对玉米象的触杀活性，LD_{50} 分别是 48.97 和 42.39 μg/头。Kim 和 Lee（2014）测定了罗勒和橙皮油 24 h 对玉米象的触杀活性，LD_{50} 分别为 130.0 和 74.0 μg/头。李敬丹等（2021）测定了土荆芥挥发油对玉米象 24 h 的触杀活性，LD_{50} 为 16.80 μg/头。三花桉挥发油对玉米象触杀活性优于欧芹、孜然芹、莳萝、茵陈蒿、蒙古蒿、毛莲蒿、小茴香、罗勒、橙皮挥发油，不及土荆芥挥发油的触杀活性。枯茗醛对玉米象 7 d 触杀活性的 LD_{50} 为 96.5 μg/头（Rosa *et al.*，2020）。β-月桂烯、α-蒎烯、柠檬烯、α-葎草烯（α-Humulene）、草蒿脑和芳樟醇对玉米象 24 h 触杀活性的 LD_{50} 分别为 372.0、347.0、187.0、40.0、39.0 和 34.0 μg/头（Kim and Lee，2014）。柠檬烯（Limonene）、香叶醇（Geranoil）、L-香芹酮（L-Carvone）、松油醇（Terpineol）、芳樟醇（Linalool）、柠檬醛（Citral）、3-蒈烯（3-Carene）、香茅醇（Citronellol）和 β-石竹烯（β-Caryophyllene）对玉米象 24 h 触杀活性的 LD_{50} 分别为 25.96、38.89、42.06、34.41、27.33、39.36、30.35、57.28 和 56.76 μg/头（Oyedeji *et al.*，2020）。本研究测定的 α-松油醇对玉米象 24 和 48 h 触杀活性的 LD_{50} 分别为 153.97 和 94.06 μg/头，可以看出 α-松油醇对玉米象的触杀活性优于枯茗醛、β-月桂烯，α-蒎烯、柠檬烯、α-葎草烯、草蒿脑和芳樟醇触杀活性，不及柠檬烯、香叶醇、L-香芹酮、松油醇、芳樟醇、柠檬醛、3-蒈烯、香茅醇和 β-石竹烯的触杀活性。

本研究测定的三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 触杀活性的 LD_{50} 分别为 6.60 和 4.13 μg/头。杨悦玲等（2021）测定了土荆芥挥发油对谷蠹的触杀活性，24 h 的 LD_{50} 为 16.09 μg/头。李冠华等（2011）测定了灰毛豆 *Tephrosia purpurea* 树皮、种子和叶片挥发油对谷蠹的触杀活性，24 h 的 LD_{50} 值分别为 25.00、27.90 和 27.80 mg/头。三花桉对谷蠹的触杀活性优于土荆芥挥发油、灰毛豆树皮、种子和叶片挥发油的触杀活性。本研究测定的三花桉挥发油中 α-水芹烯对谷蠹 24 和 48 h 触杀活性的 LD_{50} 分别为 192.61 和 62.70 μg/头，目前没有相似生物活性测定化合物对谷蠹触杀活性的报道。

本研究筛选的 4-松油醇、α-松油醇和 α-水芹烯对玉米象和谷蠹的熏蒸与触杀活性均弱于挥发油的熏蒸与触杀活性。原因是由于植物挥发油各成分之间具有协同作用，或者含量较低的化合物具有良好的杀虫活性。植物挥发油中活性较弱、没有活性、含量较低的化合物及化合物之间等各种因素的相互作用，致使挥发油呈现协同作用。Wu 等（2017）研究发现，百里香 *Thymus mongolicus* 挥发油对朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* 的杀虫活性成分为百里香酚。百里香挥发油和百里香酚对朱砂叶螨触杀活性的 LC_{50} 分别为 762.1 和 1 183.9 mg/L，百里香挥发油的杀螨活性要优于百里香酚。百里香酚与挥发油中活性较弱的芳樟醇、萜品烯、对伞花烃和香芹酚以及与没有活性的 α-蒎烯、苯甲酸和没食子酸乙酯混配，混剂的校正死亡率增大，且与百里香酚校正死亡率存在显著性差异。Chen 等（2021）研究发现，�completely欧鼠尾草 *Salvia hispanica* 挥发油对甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 杀虫活性成分为 α-侧柏酮、α-侧柏酮与活性较弱的桉树脑、茨酮、α-石竹烯、柠檬烯、对伞花烃、乙酸龙脑酯和芳樟醇以及与没有活性的茨烯、冰片、蓝桉醇、β-蒎烯、3-蒈烯和 β-石竹烯混配，混剂的校正死亡率增大，且与 α-侧柏酮校正死亡率存在显著性差异。Miresmailli 等（2006）研究发现从迷迭香挥发油中消除含量较低的化合物对伞花烃（0.9%）、α-松油醇（1.1%）和乙酸龙脑酯（2.2%）后，对寄生在菜豆 *Phaseolus vulgaris* 上二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 触杀活性的死亡率有显著影响，说明含量较低的化合物对挥发油的整体杀虫活性也有一定的协同作用。因此植物挥发油的生物活性并不总是取决于活性化合物，有时表现为所有化合物的相互作用，共同影响昆虫的生理和行为。植物挥发油的化学成分及组成复杂多样，研究其化合物之间的相互作用对害虫的联合触杀活性，在生物防治领域具有重要意义。

本研究通过对 8 种桉属挥发油对玉米象和谷蠹熏蒸和触杀活性的筛选，发现樟脑桉挥发油对玉米象 24 h 的熏蒸活性最好，大叶桉挥发油对玉米象 48 h 的熏蒸活性最好。三花桉挥发油对谷蠹 24 和 48 h 的熏蒸活性最好。三花桉挥发油对玉米象和谷蠹的 24 和 48 h 触杀活性最好，三花桉挥发油对玉米象 24 h 的触杀活性优于阳性对照甲氰菊酯。樟脑桉挥发油的主要成分为桉叶油醇（52.17%）、（+）-α-蒎烯（9.15%）和 α-松油醇（8.50%）。大叶桉挥发油的主要成分为（+）-α-蒎烯（39.91%）、α-水芹烯（9.69%）、（R）-（+）-苎烯（7.68%）、β-蒎烯（6.94%）和 4-异丙基甲苯（5.84%）。三花桉挥发油主要成分为(+)-α-蒎烯(18.31%)、桉叶油醇(9.26%)、4-异丙基甲苯（8.85%）和 α-松油醇（5.39%）。大叶桉挥发油中 4-松油醇对玉米象熏蒸活性最好。三花桉挥发油中 α-松油醇对谷蠹熏蒸活性最好，α-松油醇对玉米象触杀活性最好，α-水芹烯对谷蠹的触杀活性最好。综上所述，樟脑桉挥发油、大叶桉挥发油、三花桉挥发油、4-松油醇、α-松油醇和 α-水芹烯可作为开发天然储粮害虫防控剂的潜在候选挥发油和活性成分。

参考文献 (References)

Abir S, Ghozlene A, Islem Y, Samia H, Mariem BG, Emna B, Jouda MBJ, 2020. Fumigant toxicity of two cineole-rich essential oils and their combinations for the control of *Carpophilus hemipterus* Linnaeus and *Sitophilus oryzae* Linnaeus. *Annales de l'inrgref*, 21: 85–101.

Arab HR, Keratum AY, Abouelatta AM, El-Zun HM, Hafez Y, Abdelaal K, 2022. Fumigant and contact toxicity of some essential components against three stored product insects. *Fresenius Environmental Bulletin*, 31(10): 10136–1043.

Aref SP, Valizadegan O, Farashiani ME, 2016. The insecticidal effect of essential oil of *Eucalyptus floribundi* against two major stored product insect pests; *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Oryzaephilus surinamensis* (L.). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 19(4): 820–831.

Chen J, 2022. Insecticidal activity of essential oil from *Foeniculum vulgare* fruits against *Sitophilus zeamais*. Master dissertation. Zhengzhou: Henan Institute of Science and Technology. [陈静, 2022. 小茴香籽精油对玉米象的杀虫活性研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南科技学院.]

Chen YJ, Luo JX, Zhang N, Yu WJ, Jiang JX, Dai GH, 2021. Insecticidal activities of *Salvia hispanica* L. essential oil and combinations of their main compounds against the beet

armyworm *Spodoptera exigua*. *Industrial Crops and Products*, 162: 113271.

Chinese Pharmacopoeia Commission, 2020. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Vol Ⅳ. Beijing: China Medical Science Press. 233. [国家药典委员会, 2020. 中华人民共和国药典: 四部. 北京: 中国医药科技出版社. 233.]

Chu SS, Liu QR, Liu ZL, 2010. Insecticidal activity and chemical composition of the essential oil of *Artemisia vestita* from China against *Sitophilus zeamais*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 38(4): 489–492.

Danna C, Malaspina P, Cornara L, Smeriglio A, Trombetta D, Feo V, Vanin S, 2024. *Eucalyptus* essential oils in pest control: A review of chemical composition and applications against insects and mites. *Crop Protection*, 176: 106319.

Ebadollahi A, Setzer WN, 2020. Analysis of the essential oils of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. and *E. viminalis* Labill. as a contribution to fortify their insecticidal application. *Natural Product Communications*, 15(9): 1–10.

Franca SM, Olivera JV, Estevesfilho AB, Olivera CM, 2012. Toxicity and repellency of essential oils to *Zabrotes subfasciatus* (Boheman) (Coleoptera, Chrysomelidae, Bruchinae) in *Phaseolus vulgaris* L. *Acta amazonica*, 42(3): 381–386.

Huang YZ, Hua HX, Li SG, Yang CJ, 2011. Contact and fumigant toxicities of calamusenone isolated from *Acorus gramineus* rhizome against adults of *Sitophilus zeamais* and *Rhizopertha dominica*. *Insect Science*, 18(2): 181–188.

Jayakumar M, Ramachandran M, Krishnaven T, Nattudurai G, 2021. Toxicity and biochemical effects of essential oils of *Anethum graveolens* L. and *Melaleuca cajuputi* Powell against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(2): 945–951.

Jesser EN, Werdin-Gonzalez JO, Murray AP, Ferrero AA, 2017. Efficacy of essential oils to control the Indian meal moth, *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20(4): 1122–1129.

Kang MS, Lee HS, 2018. Acaricidal and insecticidal responses of *Cinnamomum cassia* oils and main constituents. *Applied Biological Chemistry*, 61(6): 653–659.

Kim SI, Lee DW, 2014. Toxicity of basil and orange essential oils and their components against two coleopteran stored products insect pests. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 17(1): 13–17.

Kumar P, Mishra S, Malik A, Satya S, 2012. Compositional analysis and insecticidal activity of *Eucalyptus globulus* (family: Myrtaceae) essential oil against housefly (*Musca domestica*). *Acta Tropica*, 122(2): 212–218.

Li GH, Wang SN, Zeng DQ, Yao ZW, Li YZ, 2011. The toxic action of essential oils from *Tephrosia purpurea* on *Rhyzopertha dominica*. *Journal of Hunan Agricultural University* (*Natural Sciences Edition*), 37(2): 181–184. [李冠华, 王苏宁, 曾东强, 姚振威, 李有志, 2011. 灰毛豆精油对谷蠹的毒杀作用. 湖南农业大学学报(自然科学版), 37(2): 181–184.]

Li H, Hong XW, Zhou YX, Zheng FX, Yan L, Wang YY, Ma XH, Cui WL, Wang DX, 2023. Investigation in species and distribution of grain storage insect in Fujian Province. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 38(10): 8–14. [李慧, 洪习文, 周玉香, 郑凤祥, 阎磊, 王艳艳, 马晓辉, 崔文莲, 王殿轩, 2023. 福建省储粮昆虫种类分布调查. 中国粮油学报, 38(10): 8–14.]

Li JD, Yang YL, Li CY, Yu WX, Qin ZX, Shan ZW, Huang YQ, Liang Q, 2021 . Fumigant and contact toxicity repellent activities of essential oil from *Dysphania ambrosioides* against *Sitophilus zeamais* and *Tribolium castaneum*. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 36(9): 172–178. [李敬丹, 杨悦玲, 李春燕, 余晚霞, 秦赵曦, 单正威, 黄逸秋, 梁倩, 2021. 土荆芥挥发油对玉米象和赤拟谷盗的熏蒸、触杀与驱避活性. 中国粮油学报, 36(9): 172–178.]

Li YJ, Liu TA, Zhao H, Yan H, Lou BH, Lei CY, Song YQ, Jiang HB, 2024. Repellency, toxicity, and chemical composition of plant essential oils from Myrtaceae against Asian citrus psyllid, *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). *Molecules*, 29(14): 3390.

Liu ZL, Chu SS, Liu QR, 2010. Chemical composition and insecticidal activity against *Sitophilus zeamais* of the essential oils of *Artemisia capillaris* and *Artemisia mongolica*. *Molecules*, 15(4): 2600–2608.

Liu ZL, Yu M, Li XM, Wan T, Chu SS, 2011. Repellent activity of eight essential oils of Chinese medicinal herbs to *Blattella germanica* L. *Records of Natural Products*, 5(3): 176–183.

Manandhar A, Milindi P, Shah A, 2018. An overview of the post-harvest grain storage practices of smallholder farmers in developing countries. *Agriculture*, 8(4): 57.

Mariam HC, Ferroudja MB, Karima TT, Djouda MB, 2022. Fumigant and repellent effects of *Eucalyptus cinerea* and *Eucalyptus maidenii* essential oils on *Callosobruchus maculatus* F. 1775 (Coleoptera: Bruchidae) and *Sitophilus oryzae* L. 1763 (Coleoptera: Curculionidae). *Bioactivity Science Research Bulletin*, 38(1): 44–53.

Miresmaill S, Bradbury R, Isman MB, 2006. Comparative toxicity of *Rosmarinus officinalis* L. essential oil and blends of its major constituents against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) on two different host plants. *Pest Management*

Science, 62(4): 366–371.

Negahban M, Moharramipour S, 2007. Fumigant toxicity of *Eucalyptus intertexta*, *Eucalyptus sargentii* and *Eucalyptus camaldulensis* against stored-product beetles. *Journal of Applied Entomology*, 131(4): 256–261.

Ogendo JO, Kostyukovsky M, Ravid U, Matasyoh JC, Deng AL, Omolo EO, Kariuki ST, Shaaya E, 2008. Bioactivity of *Ocimum gratissimum* L. oil and two of its constituents against five insect pests attacking stored food products. *Journal of Stored Products Research*, 44(4): 328–334.

Oyedeji AO, Okunowo WO, Osuntoki AA, Olabode TB, Ayo-Folorunso F, 2020. Insecticidal and biochemical activity of essential oil from *Citrus sinensis* peel and constituents on *Callosobruchus maculatus* and *Sitophilus zeamais*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 168: 104643.

Papachristos DP, Stamopoulos DC, 2002. Repellent, toxic and reproduction inhibitory effects of essential oil vapours on *Acanthoscelides obtectus* (Say) (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Stored Products Research*, 38(2): 117–128.

Peng J, 2013. Study on the effect of *Sitophilus oryzae* Linnaeus and *Rhyzopertha dominica* Fabricius on cereal quality indicators. Master dissertation. Zhengzhou: Henan University of Technology. [彭娟, 2013. 米象和谷蠹对粮食质量指标变化影响研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南工业大学.]

Rosa JS, Oliveira L, Sousa RMOF, Escobar CB, Fernandes-Ferreira M, 2020. Bioactivity of some Apiaceae essential oils and their constituents against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Bulletin of Entomological Research*, 110(3): 406–416.

Souza VN, Olivera CR, Matos CH, Almeida DKF, 2016. Fumigation toxicity of essential oils against *Rhyzopertha dominica* (F.) in stored maize grain. *Revista Caatinga*, 29(2): 435–440.

Toloza AC, Lucia A, Zerba E, Masuh H, Picollo MI, 2010. Eucalyptus essential oil toxicity against permethrin-resistant *Pediculus humanus capitis* (Phthiraptera: Pediculidae). *Parasitology Research*, 106(2): 409–414.

Topiar M, Sajfrtova M, Pavela R, Machalova Z, 2015. Comparison of fractionation techniques of CO_2 extracts from *Eucalyptus globulus*-composition and insecticidal activity. *The Journal of Supercritical Fluids*, 97: 202–210.

Ukeh DA, Woodcock CM, Pickett JA, Birkett MA, 2012. Identification of host kairomones from maize, *Zea mays*, for the maize weevil, *Sitophilus zeamais*. *Journal of Chemical Ecology*, 38(11): 1402–1409.

Wang CF, Yang K, Zhang HM, Cao J, Fang R, Liu ZL, Du SS, Wang YY, Deng ZW, Zhou L, 2011. Components and insecticidal activity against the maize weevils of *Zanthoxylum schinifolium* fruits and leaves. *Molecules*, 16(4): 3077–3088.

Wang ZY, Wang WF, Miao SY, Chen LX, Huang Y, Wang WY, Lu YJ, 2021. The use of grain protectants in pest control. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 497–507. [王争艳, 王文芳, 苗世远, 陈利香, 黄勇, 王文逸, 鲁玉杰, 2021. 储粮防护剂的应用现状及展望. 应用昆虫学报, 58(3): 497–507.]

Wanna R, Khaengkhan P, 2023. Insecticidal activity of essential oil from seeds of *Foeniculum vulgare* (Apiales: Apiaceae) against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) and its effects on crop seed germination. *Journal of Entomological Science*, 58(1): 104–116.

Wu LP, Huo X, Zhou XL, Zhao DY, He WZ, Liu SH, Liu HJ, Feng T, Wang C, 2017. Acaricidal activity and synergistic effect of thyme oil constituents against carmine spider mite [*Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval)]. *Molecules*, 22(11): 1873.

Wu YQ, 2023. Preliminary study on the prevention and control techniques of plant essential oil and inert powder against *Sitophilus zeamais*. Master dissertation. Hefei: Anhui Agricultural University. [吴雨晴, 2023. 植物精油与惰性粉对玉米象的防控技术初步研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽农业大学.]

Xie YJ, 2012. Study on Eucalyptus selection objectives and current situation of genetic resources in China. *Eucalypt Science & Technology*, 29(2): 33–39. [谢耀坚, 2012. 我国桉树种质资源现状及育种目标探讨. 桉树科技, 29(2): 33–39.]

Yan S, Shen J, 2019. Prospects for the application of nanotechnology in green pest control. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(4): 617–624. [闫硕, 沈杰, 2019. 纳米技术在害虫绿色防控领域的应用与展望. 应用昆虫学报, 56(4): 617–624.]

Yang YL, Yu WX, Li JD, Li CY, Wang K, Liang Q, 2021. Bioactivities of the essential oil from *Dysphania ambrosioides* against the two grain storage insects (*Rhyzopertha dominica* and *Sitophilus oryzae*). *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 36(12): 93–99. [杨悦玲, 余晚霞, 李敬丹, 李春燕, 王凯, 梁倩, 2021. 土荆芥挥发油对谷蠹和米象的熏蒸、触杀与驱避活性. 中国粮油学报, 36(12): 93–99.]

Zhou X, Zhan L, Kong B, Liang Q, 2024. Fumigation and contact toxicity of 11 plants essential oils against *Sitophilus oryzae* and *Oryzaephilus surinamensis*. *Journal of Biology*, 41(5): 54–60. [周幸, 詹丽, 孔波, 梁倩, 2024. 11 种植物挥发油对米象和锯谷盗的熏蒸与触杀活性研究. 生物学杂志, 41(5): 54–60.]