植物源挥发物对麦田非作物生境天敌的诱集效果*

李艳红[1,2**] 张兴瑞[1] 苏建伟[3] 许永玉[2] 王小洲[1,2] 戈 峰[1***]

（1. 山东省农业科院植物保护研究所，山东省农业有害生物绿色防控重点实验室，济南 250100；2. 山东农业大学植物保护学院，泰安 271000；3. 中国科学院动物研究所，动物多样性保护与有害动物防控全国重点实验室，北京 100101）

摘 要 **【目的】** 比较 7 种植物源挥发物反式-β-法尼烯、橙花叔醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、顺-3-己烯乙酸酯、丁香酚、芳樟醇、顺式茉莉酮及其组合在麦田周围树林中对天敌的诱集效果，为麦田生态防控提供参考。**【方法】** 在 2024 年春季的麦田周围，将 7 种植物源挥发物组合制作成为天敌引诱球，利用在引诱球下方悬挂白色粘虫板来捕获天敌，调查被诱集的天敌数量。**【结果】** 浓度为 10%的单一植物源挥发物橙花叔醇对食蚜蝇的诱集效果显著（P=0.046）高于对照（无植物源挥发物），比对照多 87%。浓度为 6.98%的橙花叔醇+6-甲基-5 庚烯-2-酮组合对食蚜蝇的诱集效果显著（P=0.040）高于对照，比对照多 810%；浓度为 4.76%的橙花叔醇+反式-β-法尼烯对食蚜蝇（P=0.045）、瓢虫（P=0.038）的诱集效果显著也显著高于对照，分别比对照多 767%和 725%；但在这两个组合中再分别加入反式-β-法尼烯和 6-甲基-5-庚烯-2-酮后，反而对害虫天敌的诱集效果与对照无显著差异（P>0.05）。**【结论】** 橙花叔醇与 6-甲基-5 庚烯-2-酮组合对食蚜蝇的诱集效果最好，橙花叔醇与反式-β-法尼烯效果次之，橙花叔醇+反式-β-法尼烯对瓢虫诱集效果最好。

关键词 麦田；非作物生境；植物源挥发物；天敌昆虫；诱集效果

Attractiveness of plant volatiles on natural enemies in non-crop habitats in wheat fields

LI Yan-Hong[1,2**] ZHANG Xing-Rui[1] SU Jian-Wei[3] XU Yong-Yu[2]
WANG Xiao-Zhou[1,2] GE Feng[1***]

(1. Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China; 3. State Key Laboratory of Animal Biodiversity Conservation and Integrated Pest Management, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract **[Aim]** Compare the attracting effects of seven kinds of plant volatile compounds, including *trans*-β-Farnesene, nerolidol, 6-Methyl-5-hepten-2-one, *cis*-3-Hexenyl acetate, eugenol, linalool, *cis*-Jasmonanone, and their combinations on natural enemies in the woods around wheat fields, so as to provide a reference for the ecological prevention and control of wheat fields. [**Methods**] In the spring of 2024 around the wheat field, the seven plant volatiles were combined to create lure balls for natural enemies. Natural enemies were captured by hanging sticky traps under the lure balls to assess the number of captured natural enemies. [**Results**] The attracting effect of the single plant-derived volatile compound, nerolidol with a concentration of 10%, on hoverflies is significantly higher (P=0.046) than that of the control group (without plant-derived volatile compounds), being 87% more than the control. The combination of nerolidol at a concentration of 6.98% and 6-Methyl-5-hepten-2-one also shows a significantly higher (P=0.040) attracting effect on hoverflies than the control, being 810% more than the control. The combination of nerolidol at a concentration of 4.76% and *trans*-β-Farnesene has a

*资助项目 Supported projects：山东省顶尖人才“一事一议”项目资助（2023YSYY-006）；国家重点研发计划资助（2023YFD1400800）；国家自然科学基金（32402473）；山东省自然科学基金（ZR2024QC274）

**第一作者 First author，E-mail：ersan0@163.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：gef@ioz.ac.cn

收稿日期 Received：2025-02-10；接受日期 Accepted：2025-04-07

significantly higher attracting effect on hoverflies (P=0.045) and ladybirds (P=0.038) than the control, being 767% and 725% more than the control respectively. However, after adding *trans*-β-Farnesene and 6-Methyl-5-hepten-2-one respectively to these two combinations, there is no significant difference in the attracting effect on natural enemies of pests compared with the control (P>0.05). [**Conclusion**] The combination of nerolidol and 6-Methyl-5-hepten-2-one exhibits the best attraction effect on hoverflies, followed by the combination of nerolidol and *trans*-β-Farnesene. The combination of nerolidol and *trans*-β-Farnesene exhibits the best attraction effect on ladybirds.

Key words wheat field; non-crop habitat; plant volatile; natural enemies; attraction effect

小麦是我国华北地区的主要农作物。麦二叉蚜 *Schizaphis graminum*、禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi*、麦长管蚜 *Sitobion avenae* 是我国小麦上最主要的害虫，全国所有麦区均有发生（曹雅忠等, 2006；Hadi *et al.*，2011）。小麦常用的杀虫剂是新烟碱类杀虫剂例如吡虫啉、噻虫嗪等，但近些年由于杀虫剂的滥用导致“3R”问题（害虫抗药性 Resistance、害虫再猖獗 Resurgence、农药残留 Residue）愈发严重。杀虫剂在杀灭害虫后，会趋避或直接致死非靶标生物如瓢虫、草蛉、食蚜蝇等天敌昆虫，同时临近非施药区的害虫将后续迁入，造成害虫再猖獗，进一步导致农田生态景观系统严重失衡（高希武等，2006；Montiel-León *et al.*, 2019；戈峰, 2020；Atta *et al.*, 2021）。因此保护、利用自然天敌，减少化学杀虫剂的使用已然成为农业可持续发展的迫切需求。

植物-害虫-天敌三者在漫长的演化过程中形成了一张复杂的食物网，受害植物会对害虫直接做出防御反应，还会释放挥发物来吸引天敌，同时害虫也会对植物的防御作用产生抵抗或适应（Kessler *et al.*，2004；Dudareva *et al.*，2006；戈峰等，2011）。植物在生长发育过程中已进化出通过产生和释放挥发性化合物吸引周围环境中的天敌来防御害虫的危害（Heil, 2008；Eberl *et al.*，2017）。植物受到攻击后会释放大量挥发性化合物，可以吸引害虫天敌昆虫如瓢虫、寄生蜂、食蚜蝇等天敌进行控害（Drukker *et al.*, 2000；Kessler *et al.*，2001）。其中，瓢虫、食蚜蝇、草蛉是蚜虫、飞虱、粉虱等农业害虫的主要天敌，冬季在作物周围的生境越冬，如瓢虫较多在农田附近石头缝隙中越冬，食蚜蝇和草蛉较多以成虫、卵在树皮缝隙或落叶中越冬（陆自强等，1985；王小艺等，2002；许永玉等，2002；郭海波等，2006）。因此如何高效利用植物源挥发物吸引非作物生境的天敌进入农田，提前压低害虫的虫源基数，是当下害虫治理中亟待解决的问题。

植物源挥发物如橙花叔醇、丁香酚、反式-β-法尼烯、芳樟醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、顺式茉莉酮和顺-3-己烯乙酸酯等，在植物与昆虫间信息交流起到重要作用（Knudsen *et al.*，2006；杨伟伟等，2008；Chen *et al.*，2020）。天敌昆虫对植食性昆虫释放的化学线索的识别不仅具有特异性，而且在自然界中普遍存在（张瑛等, 1998；王冰等，2021）。植物源挥发物，是植物对抗植食性昆虫攻击的重要手段，不仅影响植物与捕食者之间的相互作用，还可能影响植物间的通信和系统性防御响应（方宇凌等, 2002；刘芳等, 2003；王振华等，2008）。例如反式-β-法尼烯对桃蚜 *Myzus persicae* 有明显驱离和抑制进食的作用（张钟宁等，1989，1997）。橙花叔醇对玉米田的多种天敌昆虫均有较好诱集效果，反式-β-法尼烯对龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 诱集效果较好（苏建伟等，2020）。七星瓢虫 *Coccinella septempunctata* 与龟纹瓢虫对虫害诱导的小麦挥发物 6-甲基-5-庚烯-2-酮的 EGA 反应较大（刘勇等, 2005）。顺-3-己烯乙酸酯对异色瓢虫 *Harmonia axyridis* 具有明显吸引作用（乔飞等，2020）。但有关这些挥发物对田间天敌昆虫的引诱作用报道仍不多。

将麦田周围越冬的天敌昆虫吸引到麦田或者功能植物上，以涵养天敌并发挥其对麦蚜的前期压低作用，是麦田生态防控的重要策略与手段。尽管已经有各种单一的植物源挥发物对天敌昆虫诱集能力有了一些研究，但是在实际农业生产中植物往往在遭受侵害后会释放多种物质，协同对天敌昆虫起到吸引或趋避作用。因此，本研究通过设置各种组合的植物源挥发物，系统地比较单一或者不同挥发物组合对非作物生境天敌

的诱集效果，从而确定应用于田间吸引天敌昆虫作用更加显著的挥发物组合，为构建以“以草（功能植物）养虫（天敌）、以虫（天敌）治虫（害虫）”为核心的生态防控体系提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验用地

本试验于 2024 年 4-6 月在山东省昌邑市柳疃镇生态防控示范区（36°94′N，119°40′E）进行，该地区主要为冬小麦与夏玉米轮作，试验共选取两块林地，一块地为麦田旁的榆树林地，面积为 0.3 hm^2。另一块地是麦田旁的海棠林地，面积为 0.1 hm^2。二地块间隔大于 5 km，地块周边均为冬小麦-夏玉米轮作大田。

1.2 试验材料

购自 Sigma 公司和 Aldrich 公司的色谱级试剂包括：橙花叔醇、丁香酚、反式-β-法尼烯、芳樟醇、6-甲基-5-庚烯-2-酮、顺式茉莉酮和顺-3-己烯乙酸酯试剂，26 cm×20 cm 的白色粘虫板（北京科云公司），1.5 m 竹竿，大孔吸附树脂（天津浩聚树脂科技有限公，AB-8 型），直径 8 cm 多孔塑料小球（江苏正洁环保有限公司），7 cm×10 cm 无纺布袋。

1.3 田间试验设计

本试验日期与各处理详见表 1，天敌引诱球的制作采用如下方式：供试化合物溶质与 1 000 μL 石蜡油溶剂充分混合均匀，以大孔吸附树脂作为载体，将混合溶液吸附于载体之上后，置入多孔塑料小球的无纺布袋内，以此制备成含测试化合物的引诱球。同时，设立仅含 1 000 μL 石蜡油溶剂的引诱球作为对照。

每个含测试化合物的处理组以及空白对照，均设置 4 个重复。各重复在田间采用完全随机化的方式进行分布，彼此间处理间距设定为 20 m，避免相互干扰。此外，将制备好的引诱球悬挂于长度为 1.5 m 的竹竿顶端，下方悬挂粘虫板，用于捕获被引诱而来的害虫天敌，便于后续观测与

表 1 试验处理

Table 1 Treatment

日期（月/日） Date（month/day）	处理 Treatment	对照 Contral
4/9-4/20	单一植物源挥发物处理（分别为反式-β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 100 μL、橙花叔醇 Nerolidol 100 μL、6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 100 μL、顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 100 μL、丁香酚 Eugenol 100 μL、芳樟醇 Linalool 100 μL、顺式茉莉酮 *cis*-Jasmonanone 100 μL）	1 000 μL 石蜡油
4/22 - 5/11	双组分物挥发物处理（分别为顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 50 μL+6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 50 μL、顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 50 μL+反式-β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 25 μL、顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 50 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL、6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 50 μL+反式-β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 25 μL、6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 50 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL、反式-β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 25 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL）	1 000 μL 石蜡油
5/16-5/31	双组分植物挥发物处理（分别为顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 50 μL+甲基-5-庚烯-2-酮 50 μL、顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 50 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL、甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 50 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL）；三组分植物挥发物处理（分别为顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 25 μL+6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 50 μL+橙花叔醇 Nerolidol 12.5 μL、6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 25 μL+反式-β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 12.5 μL+橙花叔醇 Nerolidol 25 μL）；四组分植物挥发物处理（即顺-3-己烯乙酸酯 *cis*-3-Hexene acetate 25 μL+6-甲基-5-庚烯-2-酮 6-Methyl-5-hepten-2-one 25 μL+反式 β-法尼烯 *trans*-β-Farnesene 12.5 μL+橙花叔醇 Nerolidol 12.5 μL）	1 000 μL 石蜡油

数据收集。

1.4　调查方法

在所有植物源挥发物诱集效果对比试验中，每 5 d 调查 1 次白色粘虫板上的天敌数量。每次调查结束后更换粘虫板以确保后续数据监测的准确性，避免因粘虫板的空间不足或天敌残体干扰数据准确性。

1.5　数据分析

针对收集的试验数据利用 SPSS 25.0 进行 ANOVA 方差分析与 LSD 最小显著差数法进行多重比较，显著水平设为 $P < 0.05$，并用 Origin 21.0 软件作图。

2　结果与分析

2.1　单一植物源挥发物诱集效果比较

7 种植物源挥发物制作的引诱球及对照组（不带有挥发物）在榆树林地对害虫天敌的诱集结果如图 1 所示，橙花叔醇对食蚜蝇的诱集的效果显著高于对照（F=1.083 3，P=0.046，df=88），比对照高 87%。但对其他天敌的诱集效果与对照相比无显著差异（P>0.05；图 1）。

2.2　2 种植物源挥发物组合对天敌的诱集效果比较

以橙花叔醇为基础，添加了其它不同的植物源挥发物，两种植物源挥发物组合在榆树林对中天敌诱集效果如图 2 所示。在榆树林地，橙花叔醇+6-甲基-5 庚烯-2-酮（F=4.189 4，P=0.040，df=77）、橙花叔醇+反式-β-法尼烯（F=4.106 1，P=0.045，df=77）这两种化合物组合对食蚜蝇的诱集效果显著高于对照组，分别比对照组多 576%和 564%。对于瓢虫，橙花叔醇+反式-β-法尼烯这两种化合物组合的诱集效果显著好于对照组（F= - 0.659 0，P=0.038，df=77），比对照组多 725%。而对于其他天敌则与对照组周围粘虫板上诱集到的天敌数量没有显著差异（P>0.05）。

在海棠林地，橙花叔醇+反式-β-法尼烯（F= - 4.666 7，P=0.041，df=77）、橙花叔醇+6-甲基-5 庚烯-2-酮（F=-5.083 3，P=0.023，df=77）这两种化合物组合对食蚜蝇的诱集效果显著好于对照组，分别比对照组多 1 120%和 1 220%。而对于其他天敌则与对照组周围粘虫板上诱集到的天敌数量没有显著差异（P>0.05）（图 2：A，B）。

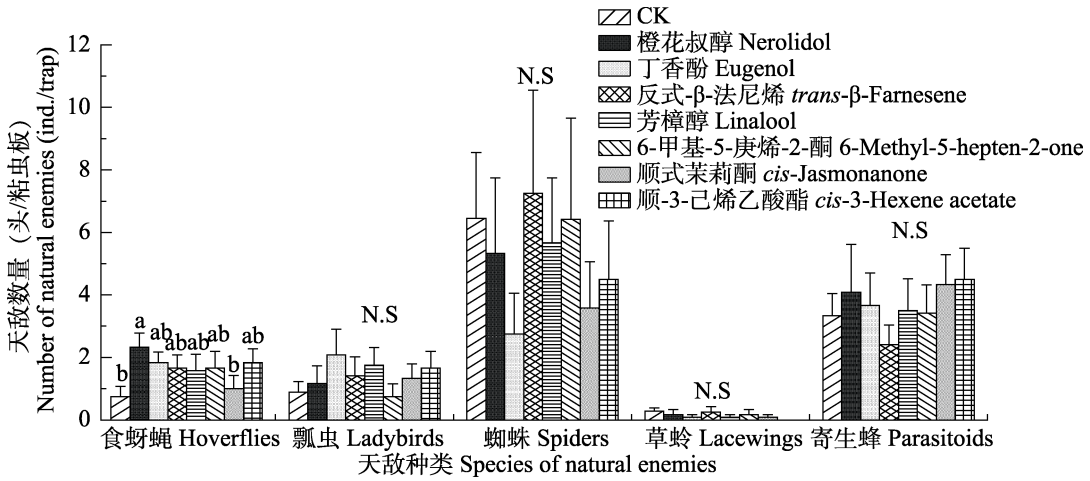

图 1　植物源挥发物单一组分处理诱集天敌效果比较

Fig. 1　Comparison of natural enemies trapped with single plant volatiles

图中数据为平均值+标准误。经 LSD 最小显著差异法检验，柱上标有不同小写字母表示显著差异（P<0.05），N.S 表示无显著差异。下图同。

Data are presented as mean+SE. Difference was tested using the least significant difference (LSD) method. Different lowercase letters above bars indicate significant difference (P<0.05), while N.S. denotes no significant difference. The same below.

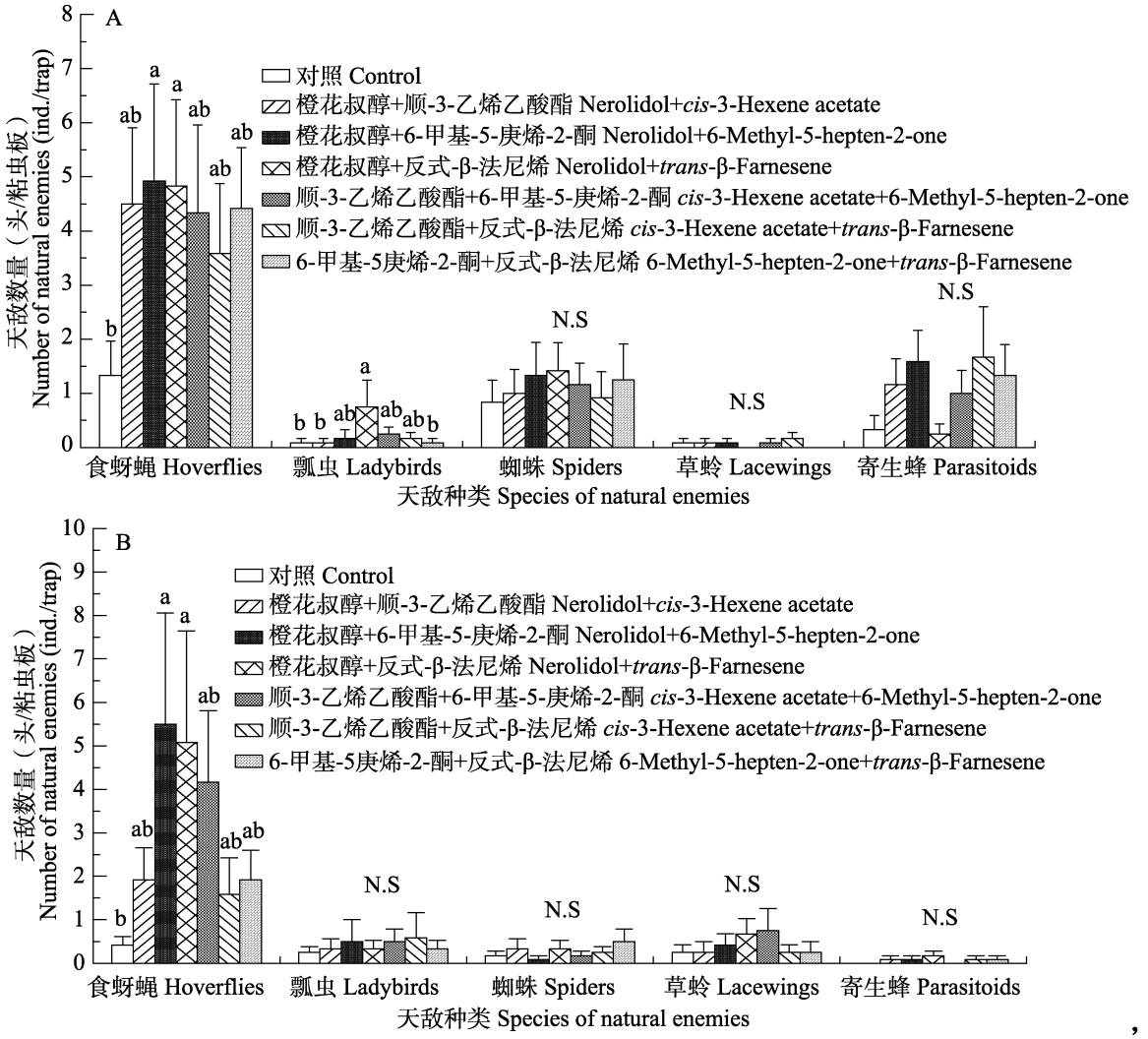

图 2　2 种混合的植物源挥发物组合在榆树林地（A）、海棠林地（B）的诱集天数量比较

Fig. 2　Comparison of the number of natural enemies attracted by two mixed combinations of plant-derived volatiles in elm woodland (A) and crabapple woodland (B)

2.3　多种植物源挥发物组合对天敌的诱集效果比较

在橙花叔醇+反式-β-法尼烯，橙花叔醇+6-甲基-5-庚烯酮对天敌引诱效果较好的基础上，进一步加入顺-3-己烯乙酸酯等多种挥发物组合后，它们对害虫天敌诱集效果如图 3 所示。结果显示，在榆树林地、海棠林地两个地块中，各个处理吸引的害虫天敌与对照组均无显著差异（P>0.05）（图 3：A，B）。

3　结论与讨论

已有的研究表明，植物受到攻击后会释放大量挥发性化合物，可以吸引瓢虫、寄生蜂、食蚜蝇等天敌进行控害（Drukker *et al.*, 2000；Kessler *et al.*，2001）。在本试验发现，单一橙花叔醇表现出明显的对食蚜蝇的引诱性。橙花叔醇作为单一挥发物时表现出较强的引诱效果，这可能与它们在自然界中作为昆虫信息素的活性成分有关。同时也发现，6-甲基-5-庚烯-2-酮对有翅蚜有显著趋避效果（王振华等，2008；孙晓玲等，2012；）。植物源挥发物通过引导植食性昆虫取食或干扰昆虫性信息素来忌避昆虫产卵，从而间接防御其危害行为，同时释放挥发性物质吸引天敌昆虫来控制害虫数量（苏茂文等，2007；Eberl *et al.*，2017；苏建伟等，2020），已经广泛地应用在害

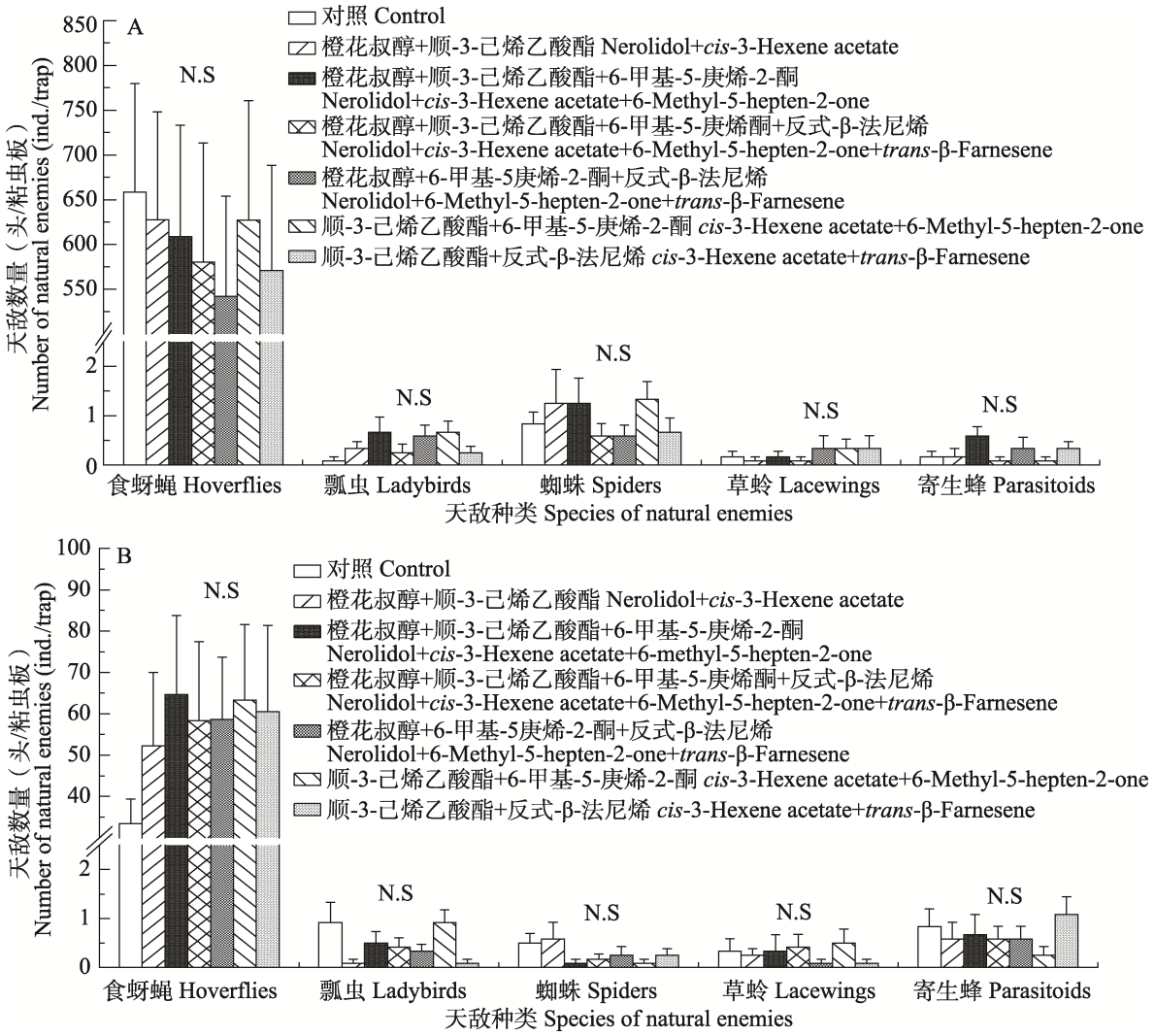

图 3　多种植物源挥发物组合在榆树林地（A）、海棠林地（B）的诱集害虫天敌数量比较

Fig. 3　Comparison of the number of pest natural enemies attracted by multiple combinations of plant-derived volatiles in elm woodland (A) and crabapple woodland (B)

虫防控的“推-拉”策略上。这些具有信号作用的诱导性化合物质是一个复杂的谱系，对多种食性的天敌均有吸引作用（Dicke *et al.*，1990；Turlings *et al.*，1993）。例如反式-β-法尼烯具有显著的对蚜虫趋避作用，以及吸引七星瓢虫作用（刘英杰等，2016）。黑带食蚜蝇能够识别蚜虫释放的报警信息素反式-β-法尼烯，并因此被诱导产生产卵行为（王冰等，2021）。

不同挥发物之间可能存在的协同效应，这种增效现象往往通过化合物间的功能互补或信号增强机制实现“1+1>2”的非线性叠加特征（Ishiwari *et al.*，2007）。本试验中橙花叔醇+6-甲基-5-庚烯-2-酮、橙花叔醇+反式-β-法尼烯两种组合的植物源挥发物均表现出明显的对食蚜蝇的引诱性。这可能是因为不同挥发物可以模拟自然界中昆虫的复杂信息素混合物，从而提高引诱效果。例如在反式-β-法尼烯对巢菜修尾蚜 *Megoura viciae* 的吸引作用在加入 α-蒎烯后明显增强（苏建伟等，2020）。如赤眼蜂受水杨酸甲酯、顺-3-己烯-1-醇和苯乙醇混合物的吸引作用强于单个化合物的吸引作用（Braasch *et al.*，2012）。茶尺蠖 *Ectropis oblique* 的取食行为可诱导茶树释放挥发性次生代谢产物 S-芳樟醇和 β-罗勒烯释放量显著增加，这两种挥发物能够激发茶尺蠖寄生性天敌绒茧蜂的强烈的 EAG 反应，改变其在嗅觉仪中的行为选择模式，显著提高绒

茧蜂对挥发物来源方向的趋向性和搜索行为频率，对绒茧蜂产生显著的吸引效应（Liu *et al.*，2024）。混合的植物挥发物相较于单一挥发物可以吸引更多小花蝽（Gebreziher *et al.*，2016）。

然而，多种挥发物之间可能存在相互拮抗的作用，尤其是当混合挥发物的种类数量超过昆虫嗅觉系统的处理阈值时，这种拮抗现象更为明显。本文在效果较好的橙花叔醇+6-甲基-5-庚烯-2-酮、橙花叔醇+反式-β-法尼烯的处理基础上，进一步加入其他挥发物后天敌吸引效果不显著。当多种挥发物混合时，它们之间会发生复杂的相互作用，这些作用可能抑制或掩盖彼此吸引天敌昆虫的效果，进而致使组合后的挥发物对天敌昆虫的吸引力降低（王冰等，2021）。昆虫的化学感受系统可能对特定类型的挥发物有特定的受体。当多种挥发物同时存在时，可能会超过受体的识别能力，导致受体饱和或交叉反应，从而影响昆虫对挥发物的识别和行为响应（张夏瑄等，2020）。

瓢虫、食蚜蝇等害虫天敌主要在农田周围的非作物生境上越冬。利用植物挥发物将早春麦田周围的天敌昆虫吸引到麦田或功能植物上，通过前期的“以草养虫、以虫治虫”涵养天敌，充分发挥其对麦蚜的前期压低作用，是麦田生态防控的重要基础，本文对此进行了探索。过往研究往往侧重于对单一化合物作用的研究探讨，缺乏对多种化合物协同作用的深入研究。本文通过 3 次试验，采用不同的化合物组合，探索橙花叔醇等 7 种化合物在不同组合下对早春越冬天敌昆虫的吸引情况，希望通过确定最具吸引力的植物源挥发物组合，将其应用于实际农业生产中，为建立起以植物源挥发物为核心的早春害虫生态防控体系提供技术支撑，减少对化学杀虫剂的依赖，有助于优化农业生态系统的稳定性与多样性，通过增强自然控制力实现害虫种群的长期可控性，将对粮食安全和农业可持续发展产生积极作用。

参考文献 (References)

Atta B, Rizwan M, Sabir AM, Gogi MD, Farooq M, Jamal A, 2021. Lethal and sublethal effects of clothianidin, imidacloprid and sulfoxaflor on the wheat aphid, *Schizaphisn graminum* (Hemiptera: Aphididae) and its coccinellid predator, *Coccinella septempunctata*. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(1): 345–358.

Braasch J, Wimp GM, Kaplan I, 2012. Testing for phytochemical synergism: Arthropod community responses to induced plant volatile blends across crops. *Journal of Chemical Ecology*, 38(10): 1264–1275.

Cao YZ, Li KB, Yin J, Zhang KC, 2006. Occurring dynamics and sustainable management strategies and practices of wheat major insect pests. *China Plant Protection*, 26(8): 11–14. [曹雅忠, 李克斌, 尹姣, 张克诚, 2006. 小麦主要害虫的发生动态及可持续控制的策略与实践. 中国植保导刊, 26(8): 11–14.]

Chen S, Zhang L, Cai X, Li X, Bian L, Luo Z, Li Z, Chen Z, Xin Z, 2020. (E)-Nerolidol is a volatile signal that induces defenses against insects and pathogens in tea plants. *Horticulture Research*, 7(1): 52.

Dicke M, Sabelis MW, Takabayashi J, Bruin J, Posthumus MA, 1990. Plant strategies of manipulating predatorprey interactions through allelochemicals: Prospects for application in pest control. *Journal of Chemical Ecology*, 16(11): 3091–3118.

Drukker B, Bruin J, Jacobs G, Kroon A, Sabelis MW, 2000. How predatory mites learn to cope with variability in volatile plant signals in the environment of their herbivorous prey. *Experimental and Applied Acarology*, 24(12): 881–895.

Dudareva N, Negre F, Nagegowda DA, Orlova I, 2006. Plant volatiles: Recent advances and future perspectives. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(5): 417–440.

Eberl F, Gershenzon J, 2017. Releasing plant volatiles, as simple as ABC. *Science*, 356(6345): 1334–1335.

Fang YL, Zhang ZN, 2002. Influence of host-plant volatile components on oviposition behavior and sex pheromone attractiveness to *Helicoverpa armigera*. *Acta Entomologica Sinica*, 45(1): 63–67. [方宇凌, 张钟宁, 2002. 植物气味化合物对棉铃虫产卵及田间诱蛾的影响. 昆虫学报, 45(1): 63–67.]

Gao WX, Peng LN, Liang DY, 2006. Factors causing the outbreak of brown planthopper (BHP) *Nilapavat alugens* in China in 2005. *Plant Protection*, 32(2): 23–25. [高希武, 彭丽年, 梁帝允, 2006. 对 2005 年水稻褐飞虱大发生的思考. 植物保护, 32(2): 23–25.]

Ge F, Wu KM, Chen XY, 2011. Major advance on the interaction mechanism among plants, pest insects and natural enemies in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 48(1): 1–6. [戈峰, 吴孔明, 陈学新, 2011. 植物-害虫-天敌互作机制研究前沿. 应用昆虫学报, 48(1): 1–6.]

Ge F, 2020. The ecological regulation and management of pests.

Chinese Journal of Applied Entomology, 57(1): 10–19. [戈峰, 2020.论害虫生态调控策略与技术. 应用昆虫学报, 57(1): 10–19.]

Gebreziher HG，Nakamuta K, 2016. A mixture of herbivore-induced plant volatiles from multiple host plant species enhances the attraction of a predatory bug under field-cage conditions. *Arthropod-Plant Interactions*, 10(6): 507–515.

Guo HB, Xu YY, Ju Z, Li MG, 2006. Seasonal changes of cold hardiness of the green lacewing, *Chrysoperla sinica* (Tjeder) (Neuroptera: Chrysopidae), *Acta Ecologica Sinica*, 26(10): 3238–3244. [郭海波, 许永玉, 鞠珍, 李明贵, 2006. 中华通草蛉成虫抗寒能力季节性变化. 生态学报, 26(10): 3238–3244.]

Hadi BAR, Flanders KL, Bowen KI, Murphy JF, Halbert SE, 2011. Species composition of aphid vectors (Hemiptera: Aphididae) of barley yellow dwarf virus and cereal yellow dwarf virus in alabama and western florida. *Journal of Economic Entomology*, 104(4): 1167–1173.

Heil M, 2008. Indirect defence via tritrophic interactions. *New Phytologist*, 178(1): 41–61.

Ishiwari H, Suzuki T, Maeda T, 2007. Essential compounds in herbivore- induced plant volatiles that attract the predatory mite. *Journal of Chemical Ecology*, 2007(33):1670–1681.

Kessler A, Baldwin IT, 2001. Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature. *Science*, 291(5511): 2141–2144.

Kessler A, Halitschke R, Baldwin IT, 2004. Silencing the jasmonate cascade: induced plant defenses and insect populations. *Science*, 305(5684): 665–668.

Knudsen JT, Eriksson R, Gershenzon J, Ståhl B, 2006. Diversity and distribution of floral scent. *The Botanical Review*, 72(1): 1–120.

Liu F, Lou YG, Cheng JA, 2003. Herbivory insect induced plant volatiles: Evolutionary products of plant-herbivore-natural enemy interactions. *Entomological Knowledge*, 40(6): 481–486. [刘芳, 娄永根, 程家安, 2003. 虫害诱导的植物挥发物:植物与植食性昆虫及其天敌相互作用的进化产物. 昆虫知识, 40(6): 481–486.]

Liu GH, Wang Q, Chen H, Wang YX, Zhou XG, Bao DM, Wang N, Sun J, Huang FY, Yang M, Zhang H, Yan P, Li X, Shi J, Fu JY, 2024. Plant-derived monoterpene S-linalool and β-ocimene generated by CsLIS and CsOCS-SCZ are key chemical cues for attracting parasitoid wasps for suppressing *Ectropis obliqua* infestation in *Camellia sinensis*. *Plant, Cell & Environment*, 47(3): 913–927.

Liu Y. Guo GX, Cheng JL, Ni HX, 2005. Behavioral and electrophysiological responses of four predatory insect species to semiochemicals of wheat. *Acta Entomologica Sinica*, 48(2): 161–165. [刘勇, 郭光喜, 陈巨莲, 倪汉祥, 2005. 瓢虫和草蛉对小麦挥发物组分的行为及电生理反应. 昆虫学报, 48(2): 161–165.]

Liu YJ, Chi BJ, Lin FJ, Maigret Olivier, Zeng LF, Liu Y, 2016. Ecological functions of E-β-farnesenene on aphids and their natural enemies in potato field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27(8): 2623–2628. [刘英杰, 迟宝杰, 林芳静, MAIGRET Olivier, 郑鹭飞, 刘勇, 2016. 反-β-法尼烯对马铃薯蚜虫及其天敌的生态效应. 应用生态学报, 27(8): 2623–2628.]

Lu ZQ, Hang SB, Liu YB, Wang X, 1985. A study on hoverflies in Yangzhou Area. *Acta Phytophylacica Sinica*, 12(3): 165–169. [陆自强, 杭杉葆, 刘友邦, 王迅, 1985. 扬州地区食蚜蝇的研究. 植物保护学报, 12(3): 165–169.]

Montiel-León JM, Munoz G, Vo DS, Do DT, Vaudreuil MA, Goeury K, Guillemette F, Amyot M, Sauvé S, 2019. Widespread occurrence and spatial distribution of glyphosate, atrazine, and neonicotinoids pesticides in the st. Lawrence and tributary rivers. *Environmental Pollution*, 2019(250): 29–39.

Qiao F, Cai ZP, Su JW, 2020. Herbivore-induced wheat volatiles facilitate biocontrol of the cereal aphid by the multicolored *Harmonia axyridis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 189–195. [乔飞, 蔡志平, 苏建伟, 2020. 虫害诱导的小麦挥发物促进异色瓢虫对麦蚜的控制作用. 应用昆虫学报, 57(1): 189–195.]

Su JW, Cai ZP, Qiao F, Miao L, Yin SQ, Zheng PQ, 2020. Numbers of natural enemies of corn pests attracted by plant volatile lures. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 196–205. [苏建伟, 蔡志平, 乔飞, 苗麟, 殷三强, 郑培清, 2020. 植物源挥发物对玉米田天敌昆虫的诱集效果比较. 应用昆虫学报, 57(1): 196–205.]

Su MW, Zhang ZN, 2007. Development of application for insects semiochemicals. *Chinese Bulletin of Entomologyical Knowledge*, 44(4): 477–485. [苏茂文, 张钟宁, 2007. 昆虫信息化学物质的应用进展. 昆虫知识, 44(4): 477–485.]

Sun XL, Gao Y, Chen ZM, 2012. Behavior regulation of herbivores by herbivore induced plant volatiles (HIPVs). *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(6): 1413–1422. [孙晓玲, 高宇, 陈宗懋, 2012. 虫害诱导植物挥发物(HIPVs)对植食性昆虫的行为调控. 应用昆虫学报, 49(6): 1413–1422.]

Turlings TCJ, McCall PJ, Alborn HT, Tumlinson JH, 1993. An elicitor in caterpillar oral secretions that induces corn seedlings to emit chemical signals attractive to parasitic wasps. *Journal of*

Chemical Ecology, 19(3): 411–425.

Wang B, Li HM, Cao HQ, Wang GR, 2021. Mechanisms and applications of plant-herbivore-natural enemy tritrophic Interactions mediated by volatile organic compound. *Scientia Agricultura Sinica*, 54(8): 1653–1672. [王冰, 李慧敏, 操海群, 王桂荣, 2021. 挥发性化合物介导的植物-植食性昆虫-天敌三级营养级互作机制及应用. 中国农业科学, 54(8): 1653–1672.]

Wang XY, Shen ZR, 2002. Progress of applied research on multicolored *Harmonia axyridis*. *Entomologyical Knowledge*, 39(4): 376–379. [王小艺, 沈佐锐, 2002. 异色瓢虫的研究概况. 昆虫知识, 39(4): 376–379.]

Wang ZH, Zhao H, Li JF, Zeng XD, Chen JJ, Feng HL, Xu JW, 2008. Synergism of plant volatiles to insect pheromones and related mechanisms. *Chinese Joumal of Applied Ecology*, 19(11): 2533–2537. [王振华, 赵晖, 李金甫, 曾宪东, 陈建军, 冯汉利, 徐家文, 2008. 植物源挥发物对昆虫信息素的增效作用及其增效机制. 应用生态学报, 19(11): 2533–2537.]

Xu YY, 2001, Diapause mechanism and application of *Chrysoperla sinica* (Tjeder). Doctor dissertation. Hangzhou: Zhejiang University. [许永玉, 2001. 中华通草蛉的滞育机制和应用研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学.]

Yang WW, Li ZJ, An Y, Xie QQ, Zhao YQ, Shen YB, 2008. Advances in plant volatile organic compounds (VOCs) research. *Chinese Journal of Ecology*, 27(8): 1386–1392. [杨伟伟, 李振基, 安钰, 谢清清, 赵玉强, 沈应柏, 2008. 植物挥发性气体(VOCs)研究进展. 生态学杂志, 27(8): 1386–1392.]

Zhang XX, Wang GR, 2020. Advances in research on the identification and function of ionotropic receptors in insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(5): 1046–1055. [张夏瑄, 王桂荣, 2020. 昆虫离子型受体的鉴定及功能研究进展. 应用昆虫学报, 57(5): 1046–1055.]

Zhang Y, Yan FS, 1998. Pest-induced plant volatile secondary metabolites and Their roles in plant defense. *Acta Entomologica Sinica*, 41(2): 93–103. [张瑛, 严福顺, 1998. 虫害诱导的植物挥发性次生物质及其在植物防御中的作用. 昆虫学报, 41(2): 93–103.]

Zhang ZN, Du XS, Zhang GX, Liu X, 1989. Synthesis of aphid alarm pheromones and their analogues and their effects on the settlement behavior of *Myzus persicae*. *Acta Entomologica Sinica*, 32(3): 376–379. [张钟宁, 陈晓社, 张广学, 刘珣, 1989. 蚜虫报警信息素与类似物的合成及其对桃蚜定居行为的影响. 昆虫学报, 32(3): 376–379.]

Zhang ZN, Tu MH, Du YJ, Fang YL, Lu Y, Liu X, Lu H, 1997. Behavioral and electrophysiological responses of *Myzus persicae* to (E)-β-farnese. *Acta Entomologica Sinica*, 40(1): 40–44. [张钟宁, 涂美华, 杜永均, 方宇凌, 陆翊, 刘珣, 路虹, 1997. 桃蚜对[反]-β-法尼烯的行为及电生理反应. 昆虫学报, 40(1): 40–44.]