

# 罗勒对玉米田害虫和天敌的影响及田间应用\*

李振豪<sup>1\*\*</sup> 翟鑫意<sup>1\*\*</sup> 金志熙<sup>1</sup> 鲁艳辉<sup>2</sup> 林奕雯<sup>1</sup>  
杨艺婷<sup>1</sup> 吕仲贤<sup>1,2</sup> 朱平阳<sup>1\*\*\*</sup>

(1. 浙江师范大学生命科学学院, 金华 321004; 2. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 杭州 310021)

**摘要** 【目的】本研究结合室内和田间试验, 评估罗勒 *Ocimum basilicum* 对玉米害虫寄生蜂的吸引力及其生态防控作用。【方法】通过测定罗勒花对玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostrinae*、螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis*、松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi*、稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum*、腰带长体茧蜂 *Macrocentrus cingulum* 和中红侧沟茧蜂 *Microplitis mediator* 6 种寄生蜂的嗅觉行为反应, 明确罗勒对寄生蜂的吸引力; 以罗勒花饲喂以上 6 种寄生蜂和玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua*、草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 及棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 4 种玉米主要鳞翅目害虫, 明确罗勒花对寄生蜂和害虫的寿命、寄生力或繁殖力的影响; 通过田间试验, 在玉米田间作罗勒验证罗勒在玉米田中的实际控害效果。【结果】罗勒花能显著吸引以上 6 种玉米关键害虫寄生性天敌, 延长除腰带长体茧蜂外的几种供试寄生蜂的寿命; 有罗勒花存在时, 螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂和玉米螟赤眼蜂的寄生力分别显著提升了 48.52% ( $P < 0.001$ )、71.21% ( $P = 0.001$ )、51.53% ( $P = 0.001$ ) 和 70.63% ( $P < 0.001$ )。此外, 罗勒仅对玉米螟雄蛾的寿命有显著促进作用 ( $P = 0.002$ ), 对其它供试鳞翅目害虫的寿命 (雌: 棉铃虫:  $P = 0.368$ ; 玉米螟:  $P = 0.877$ ; 甜菜夜蛾:  $P = 0.588$ ; 草地贪夜蛾:  $P = 0.069$ ; 雄: 棉铃虫:  $P = 0.253$ ; 甜菜夜蛾:  $P = 0.112$ ; 草地贪夜蛾:  $P = 0.433$ ) 及产卵量 (棉铃虫:  $P = 0.447$ ; 玉米螟:  $P = 0.447$ ; 甜菜夜蛾:  $P = 0.526$ ; 草地贪夜蛾:  $P = 0.526$ ) 均无显著影响。进一步田间试验表明, 罗勒能够显著增加玉米害虫的捕食性天敌 (95.12%) ( $P < 0.001$ ) 和寄生性天敌 (77.55%) ( $P < 0.001$ ) 的数量, 减少玉米害虫种群 (30.50%) ( $P < 0.001$ ), 并显著提升玉米的产量 (16.58%) ( $P < 0.001$ )。【结论】罗勒是对玉米害虫寄生性天敌有益的蜜源植物, 在田间可以提升玉米农田生态系统的控害功能, 并提升玉米的产量。本研究为罗勒在农业害虫管理中的应用提供了科学依据, 也为实现农业可持续发展提供了新的思路和方法。

**关键词** 罗勒; 蜜源植物; 寄生蜂; 鳞翅目害虫; 寿命; 控害能力

## The impact of basil (*Ocimum basilicum*) on pests and natural enemies in maize fields and its field application

LI Zhen-Hao<sup>1\*\*</sup> ZHAI Xin-Yi<sup>1\*\*</sup> JIN Zhi-Xi<sup>1</sup> LU Yan-Hui<sup>2</sup> LIN Yi-Wen<sup>1</sup>  
YANG Yi-Ting<sup>1</sup> LÜ Zhong-Xian<sup>1,2</sup> ZHU Ping-Yang<sup>1\*\*\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agriculture Sciences, Hangzhou 310021, China)

**Abstract** [Aim] To evaluate the benefits of co-planting basil, *Ocimum basilicum*, to protect maize crops from insect pests. [Methods] The olfactory behavioral responses of six parasitic wasps; *Trichogramma ostrinae*, *Trichogramma chilonis*, *Trichogramma dendrolimi*, *Trichogramma japonicum*, *Macrocentrus cingulum* and *Microplitis mediator* to *Oc. basilicum*, were determined. The effect of basil flowers on the longevity, parasitism and fecundity of the above six parasitic wasps and four main lepidopteran pests of maize (*Ostrinia furnacalis*, *Spodoptera exigua*, *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa armigera*),

\*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2023YFD1400800); 浙江省农业重大技术协同计划 (2023XTTGLY0101); 国家级大学生创新创业训练计划支持项目 (202410345056)

\*\*共同第一作者 Co-first authors, E-mail: 18768109978@163.com; 18135565987@163.com

\*\*\*通讯作者 Corresponding author, E-mail: zpy85@163.com

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

was also investigated and the effectiveness of planting basil was also tested in corn fields. **[Results]** *Oc. basilicum* significantly attracted all six parasitic wasp species, and prolonged the adult longevity of all species, except *Ma. cingulum*. It also enhanced the parasitic ability of the four *Trichogramma* species, with the parasitism of *T. chilonis*, *T. dendrolimi*, *T. japonicum*, and *T. pretiosum* increasing significantly by 48.52% ( $P < 0.001$ ), 71.21% ( $P = 0.001$ ), 51.53% ( $P = 0.001$ ), and 70.63% ( $P < 0.001$ ). Basil had no significant effect on the longevity (female: *H. armigera*:  $P = 0.368$ ; *Os. furnacalis*:  $P = 0.877$ ; *S. exigua*:  $P = 0.588$ ; *S. frugiperda*:  $P = 0.069$ ; male: *H. armigera*:  $P = 0.253$ ; *S. exigua*:  $P = 0.112$ ; *S. frugiperda*:  $P = 0.433$ ) or fecundity (*H. armigera*:  $P = 0.447$ ; *Os. furnacalis*:  $P = 0.447$ ; *S. exigua*:  $P = 0.526$ ; *S. frugiperda*:  $P = 0.526$ ) of the four lepidopteran maize pests, except for the longevity of *Os. furnacalis* male ( $P = 0.002$ ). The results of field experiments indicate that basil significantly increased the numbers of predatory (95.12%) ( $P < 0.001$ ), and parasitic (77.55%) ( $P < 0.001$ ), natural enemies of maize pests, reduced the abundance pest species (30.50%) ( $P < 0.001$ ), and significantly enhanced corn yield (16.58%) ( $P < 0.001$ ). **[Conclusion]** Basil is an effective nectar producing plant that is attractive to the parasitic natural enemies of maize pests, improves ecological pest control in maize crops, and increases maize yield. These results provide a scientific basis for co-planting basil for ecological pest management in maize fields, and new ideas and methods for sustainable agricultural development.

**Key words** *Ocimum basilicum*; nectar plant; parasitoids; lepidopteran pests; longevity; pest control ability

玉米作为我国的重要粮食作物, 长期遭受多种鳞翅目害虫的侵害, 如: 草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda*、甜菜叶蛾 *Spodoptera exigua*、玉米螟 *Ostrinia furnacalis*、棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 等 (宋翼飞和吴孔明, 2020; 吕亮等, 2022)。害虫防控过程中过度依赖化学农药, 会加剧害虫抗性, 并破坏农田生态系统 (郭继元等, 2024)。害虫生态防控是能够实现减少化学农药使用、避免对非目标种群造成负面影响的有效手段之一。释放和保育天敌寄生蜂作为害虫生态防控的重要途径, 其控害能力强, 在保证农产品安全方面发挥了重要作用 (Zang *et al.*, 2021; 丁瑞丰等, 2023)。其中, 螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis*、松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi*、稻螟赤眼蜂 *Trichogramma japonicum*、玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostriniae* 均能够有效寄生草地贪夜蛾、甜菜夜蛾、玉米螟和棉铃虫等主要玉米鳞翅目害虫 (袁曦等, 2022; 杜文梅等, 2023; 王金彦等, 2023), 而腰带长体茧蜂 *Macrocentrus cingulu*、中红侧沟茧蜂 *Microplitis mediator* 则是玉米螟和夜蛾科害虫的主要幼虫寄生蜂 (刘文旭等, 2018; 李宏梦等, 2019)。

近年来, 功能植物作为害虫生态防控的重要组成部分, 在我国得到了广泛的研究与应用。功能植物是指能在农林生态系统中通过释放化学物质驱避害虫 (Zhang *et al.*, 2024)、干扰害虫的行为和生长发育 (Fan *et al.*, 2023), 或为天

敌提供栖息场所、替代寄主、营养补充等功能来涵养天敌种群, 达到控制害虫种群数量的目的, 是生态农业和可持续农业中的重要组成部分, 主要可分为蜜源植物、诱集植物、驱避植物、库源植物、栖境植物、储蓄植物、护卫植物和指示植物等 (Jaworski *et al.*, 2019; 苏文雯等, 2020; 吴长兵等, 2022)。其中, 蜜源植物是指富含花粉或花蜜且能被天敌昆虫获取的显花植物 (Pyke *et al.*, 2020; Finkelstein *et al.*, 2022)。天敌昆虫通过补充营养, 可以有效提高其存活和控害能力。魏可等 (2016) 发现在白蜡吉丁肿腿蜂 *Scleroderma pupariae* 寄生前期补充血淋巴和蜂蜜可以促使寄生蜂卵的成熟, 显著延长其寿命, 对寄主害虫的控害作用也得以提升。伍和平和李保平 (2007) 发现无论是否有寄主存在, 补充葡萄糖、蔗糖和果糖都能显著提升斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* 的寿命和繁殖能力。营养充足的寄生蜂会更专注于寻找宿主, 而当寄生蜂缺乏营养时, 会减少对寄主的搜索频率, 降低寄生率 (Kugimiya *et al.*, 2010)。合适的蜜源植物是天敌昆虫重要的营养来源, 能够提升天敌昆虫的控害效果 (朱平阳等, 2021)。

蜜源植物还能通过其植物挥发物来调控昆虫的行为。蜜源植物的挥发性有机物, 例如: 万寿菊 *Tagetes patula* 所释放的 D-柠檬烯、蒎品烯, 可以有效引诱异色瓢虫 *Harmonia axyridis*, 显著增加天敌昆虫的多样性 (Song *et al.*, 2017; Hatt

et al., 2019; Li et al., 2019)。寄生蜂对特定挥发性有机物也存在趋性行为。松毛虫赤眼蜂能够被水杨酸甲酯、苯甲醛、氧化芳樟醇、己酸-3-己烯酯及其混合物显著吸引(Zhao et al., 2022)。中红侧沟茧蜂的气味结合蛋白与植物挥发物 2-十三酮、十二醛、十四酸和十一酸表现出较强的结合能力(宋玄等, 2019)。在玉米地里绿豆 *Vigna radiata* 所释放的 C6 烯炔类和 1-辛醇、乙醇等醇类挥发物可以有效增加玉米螟赤眼蜂的种群数量(周大荣等, 1997)。然而, 蜜源植物同样可能为害虫提供生存和繁衍所需资源(Harris-Shultz et al., 2022), 例如荞麦 *Fagopyrum esculentum*(Sigsgaard et al., 2013)、琉璃苣 *Borago officinalis*(Wäckers et al., 2007)能够显著延长草莓长翅卷叶蛾 *Acleris comariana* 的寿命。因此, 在评估蜜源植物的作用时, 还需要全面考虑其对害虫的影响。

罗勒 *Ocimum basilicum* 是唇形科 Lamiaceae 罗勒属 *Ocimum* 一年生草本植物, 具花期长、花蜜量大、易于种植等特点, 是害虫防控中极具潜力的蜜源植物。罗勒的挥发性有机物对多种植食性昆虫, 如印度谷蛾 *Plodia interpunctella* 的幼虫具有显著的触杀、趋避、拒食等作用(胡恒志等, 2022)。在茶园中, 间作罗勒可以有效减少主要害虫茶尺蠖 *Ectropis oblique hypulina* 的种群数量(张正群等, 2014)。此外, 罗勒还能显著吸引稻蟥沟卵蜂 *Trissolcus basalis* 雌蜂, 并显著增强稻蟥沟卵蜂的寄生能力(Foti et al., 2017)。然而, Ahmadpour 等(2021)研究发现, 罗勒精油对麦蛾柔茧蜂 *Habrobracon hebetor* 具有一定的致死和亚致死毒性, van Oudenhove 等(2023)的研究也发现罗勒精油对广赤眼蜂雌蜂有强烈的驱避作用, 能影响其活动和寄主定位能力。这种差异可能与罗勒挥发性有机物的化学组成及其对不同寄生蜂生理特性的影响有关。除了对植食性害虫和寄生蜂的作用, 罗勒对捕食性天敌也具有积极的促进作用。例如, 罗勒对于中华通草蛉 *Chrysopa sinica*、异色瓢虫等捕食性天敌的种群数量存在促进作用, 能显著减少棉蚜 *Aphis gossypii*、棉长管蚜 *Acyrtosiphon gossypii* 和棉黑

蚜 *Aphis craccivora* 的种群数量(米莹莹等, 2024; 彭雪凡等, 2024)。这表明罗勒不仅能通过挥发物直接影响害虫的种群增长, 还能通过促进天敌种群的繁衍间接增强害虫的生物防控效果。

尽管已有研究表明罗勒在害虫生态防控中具有多重作用, 但罗勒是否能作为玉米地害虫生态防控的功能植物仍需进一步验证。本研究拟结合室内与田间试验, 系统评估罗勒对玉米害虫及其关键寄生蜂的影响, 明确罗勒作为玉米地中发挥控害作用的蜜源植物的可行性, 以期为玉米害虫的生态防控提供理论依据与技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试植物

罗勒苗购自株洲市沪松区松苑苗木商行, 在实验室室温下培养直至始花期后用于试验, 选择健康、长势一致且盛开的罗勒花作为供试材料。

### 1.2 供试昆虫

试验所用的鳞翅目害虫, 棉铃虫、草地贪夜蛾、玉米螟、甜菜夜蛾购于河南省济源白云实业有限公司。螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂、玉米螟赤眼蜂均由浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所提供。腰带长体茧蜂由中山大学生命科学学院提供。中红侧沟茧蜂由河北省农林科学院植物保护研究所提供。

### 1.3 玉米害虫关键寄生蜂对罗勒的嗅觉行为反应

使用 Y 型嗅觉仪进行寄生蜂的嗅觉行为测定, Y 型嗅觉仪两臂分别通过 Teflon 管与味源瓶相连, 在气流进入味源瓶之前, 先经过活性炭过滤器和加湿瓶以净化和湿润空气。将盛开的罗勒花朵平铺于味源瓶底部。寄生蜂初羽(<4 h)雌蜂饥饿处理 2 h 后, 将其引入距 Y 管口 2 cm 处, 爬行至入口端 Y 管直管中点开始计时, 待其爬过 Y 管臂中点后 10 s 内未改变方向, 记为偏好该臂的味源, 每头寄生蜂观察 5 min, 5 min 内未做出反应的记为无偏好。每重复 5 次试验调换两臂方向, 每 10 次更换 Y 管, 每 15 次调换味源。处理重复 30 次。根据虫体大小选择 Y 管型号, 螟

黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂、玉米螟赤眼蜂用小号 Y 管(两臂及直管均长 15 cm, 内径 1 cm, 两臂夹角 75°), 腰带长体茧蜂和中红侧沟茧蜂使用大号 Y 管(两臂及直管均长 15 cm, 内径 1.8 cm, 两臂夹角 75°)。试验前, 用乙醇清洗 Y 管及味源瓶, 经 60 °C 恒温箱恒温烘干, 排除前一试验的余味。每次试验后更换活性炭, 将使用后的活性炭在烘箱内 100 °C 鼓风活化 2 h, 消除残留气味。提前 30 min 让寄生蜂适应室内环境。试验于(26 ± 1) °C 的实验室内进行, 整个 Y 管用一个单面开口的遮光罩(50 cm × 50 cm × 30 cm)罩住并固定, 在 Y 管正前安置一盏 40 W 白炽灯, 以控制光照及其他因素干扰。

#### 1.4 罗勒对玉米害虫关键寄生蜂寿命的影响

将初羽(< 4 h)的螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂、玉米螟赤眼蜂分雌雄后, 分别单头引入带有 5 朵罗勒花的 50 mL 指形管(27 mm × 108 mm)中, 花的切端用湿棉球包裹保持湿度, 并每天更换。以含 10% v/v 的蜂蜜水棉球作为阳性对照, 含清水的湿棉球为阴性对照。玻璃瓶口用纱布(120 目)封口。试验采取完全随机设计, 放置在温度(26 ± 1) °C、相对湿度 80% ± 10%、光周期 12 L : 12 D 的智能人工气候箱(宁波江南仪器厂制造, RXZ-100B 型)中, 每天记录寄生蜂的存活情况, 直至所有个体死亡。每处理重复 15 组。

对于个体较大的腰带长体茧蜂和中红侧沟茧蜂, 将 5 头初羽(< 6 h)的寄生蜂雌蜂引入圆柱形聚酯薄膜筒(高 25 cm、直径 10 cm, 顶部中央有直径 7 cm 且 200 目网纱封口的圆形开口)中, 将 5 束盛开的罗勒花连枝剪下插入装有 50 mL 清水的锥形瓶中, 瓶口用棉花固定, 以含 10% v/v 蜂蜜水的棉球处理作为阳性对照, 及含清水的湿棉球为阴性对照。每处理 6 个重复, 每 3 d 更换营养源, 每天记录寄生蜂存活情况, 直至所有个体死亡。圆柱形聚酯薄膜筒以完全随机设计放置在上述条件的智能人工气候箱(宁波江南仪器厂制造, RXZ-100B 型)中。并对初羽雄蜂进行与上述相同的试验。

#### 1.5 罗勒对玉米害虫关键寄生蜂寄生量的影响

将 5 束盛开的罗勒花插入装有 50 mL 清水的锥形瓶中, 放置在上述圆柱形聚酯薄膜筒中, 试验均以清水处理作为阴性对照。在靠近烧瓶的底部放一个培养皿(直径 3.5 cm), 内装一含有约 500 粒经过紫外线灭活的米蛾 *Corcyra cephalonica* 卵卡。每个筒中分别引入 5 头初羽(< 6 h)的雌性赤眼蜂(螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂或玉米螟赤眼蜂)和 1 头雄蜂。3 d 后, 将含有米蛾卵的培养皿盖上盖子。当赤眼蜂的卵由白色变为黑色时, 记录寄生卵的数量。所有设置在上述培养箱条件下采用完全随机设计。每处理重复 15 次。

#### 1.6 罗勒对玉米鳞翅目害虫的寿命和繁殖力的影响

将 5 束盛开的罗勒花插入装有 50 mL 清水的锥形瓶中, 瓶口用棉花固定, 放置在上述圆柱形聚酯薄膜筒中, 筒内壁围绕一圈 A4 纸(21 cm × 29.7 cm)供成虫产卵。以含 10% v/v 蜂蜜水溶液的棉球处理作为阳性对照, 及含清水的湿棉球为阴性对照。每个筒中分别引入 1 对初羽(< 24 h)的鳞翅目害虫成虫。所有设置在上述培养箱条件下采用完全随机设计。每处理重复 15 次。每天记录成虫寿命和产卵量, 每隔 3 d 更新营养源, 所有观测在 7:00-11:00 之间进行, 直至昆虫死亡, 在解剖镜下解剖死亡雌虫, 记录未产出卵量。

#### 1.7 罗勒对玉米田间害虫控害效果及玉米产量的影响

**1.7.1 田间试验设计** 田间试验在浙江省农作物病虫害监测网(金华区域站)的玉米田(29.018 12°N, 119.625 979°E)中进行, 试验面积为 35 m × 8 m。玉米品种选用雪甜 7401, 于 2024 年 7 月 25 日直播, 行间距为 50 cm。适时间苗与定苗, 每穴仅保留 1 株壮苗。罗勒于 2024 年 7 月 15 日播种育苗, 40 d 后移栽至田间与试验田玉米进行间作, 间作比例为 1 : 1, 株间距为 50 cm。设置两种处理: 玉米间作罗勒与玉米单作。每个处理设置 4 个重复小区, 每个小区尺寸

为 15 m × 2 m。为避免相互干扰,玉米单作区和间作罗勒小区之间留出 5 m 的缓冲带。

**1.7.2 罗勒对玉米节肢动物种群数量的影响** 用黄粘板 (25 cm × 20 cm) 进行田间昆虫的诱集和取样。黄板在田间放置高度约为距地面 145 cm。每小区块悬挂 4 张黄板,黄板之间间距 10 m 以上。悬挂 7 d 后黄板样品用保鲜膜覆盖贴上标签后带回实验室冷冻处理待后期鉴定。罗勒移栽 15 d 后进行黄板采集,间隔 15 d 后再收样一次,共收样 2 次。

**1.7.3 罗勒对玉米产量的影响** 在玉米收获期,选择连续晴天的 9:00-11:00 时段开展果穗采收。分别在玉米单作田和玉米-罗勒间作田中随机选取 10 株已完全成熟 (茎秆基部变黄、籽粒乳线消失) 的健康 (茎秆直立、无病虫害) 玉米植株,从基部完整掰取果穗,统一剥离外层苞叶后,立即使用经校准的电子秤 (精度 0.1 g) 逐穗称重。每完成 5 个样本称重后,使用标准砝码对电子秤进行零点校验,同步采用双人背对背记录模式:操作者报数后,记录员复述确认并录入电子表格。所有操作需在掰穗后 30 min 内完成,以避免组织失水导致鲜重数据偏差。

## 1.8 数据分析

寄生蜂的嗅觉行为反应数据分析用卡方检

验,用生存分析比较蜜源植物对寄生蜂寿命的影响,对生存函数的 Kaplan-Meier 估计进行 Log-rank 检验。害虫寿命采用单因素方差分析和 Turkey 多重比较,如方差不齐或不符合正态分布则采用非参数 Kruskal-Wallis  $H$  检验。对于玉米田间主要害虫及其节肢动物天敌种群数量的数据,根据昆虫特性进行功能分类,分为中性昆虫、植食性昆虫、寄生性天敌和捕食性天敌 4 个功能类群进行统计。寄生蜂寄生量、害虫繁殖力、节肢动物功能群数据和玉米鲜重的数据采用独立样本  $t$  检验进行分析比较,所有数据处理与统计分析均在 SPSS 26.0 软件中进行,图表绘制在 GraphPad Prism 9 软件中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 寄生蜂对罗勒花的嗅觉行为反应

与对照组对比,6 种寄生蜂雌蜂对罗勒花均有显著的正趋性 (螟黄赤眼蜂:  $\chi^2 = 11.279$ ,  $df = 1$ ,  $P < 0.001$ ; 松毛虫赤眼蜂:  $\chi^2 = 7.869$ ,  $df = 1$ ,  $P = 0.005$ ; 玉米螟赤眼蜂:  $\chi^2 = 5.406$ ,  $df = 1$ ,  $P = 0.019$ ; 稻螟赤眼蜂:  $\chi^2 = 6.667$ ,  $df = 1$ ,  $P < 0.010$ ; 腰带长体茧蜂:  $\chi^2 = 11.279$ ,  $df = 1$ ,  $P < 0.001$ ; 中红侧沟茧蜂:  $\chi^2 = 13.067$ ,  $df = 1$ ,  $P < 0.001$ ) (图 1)。

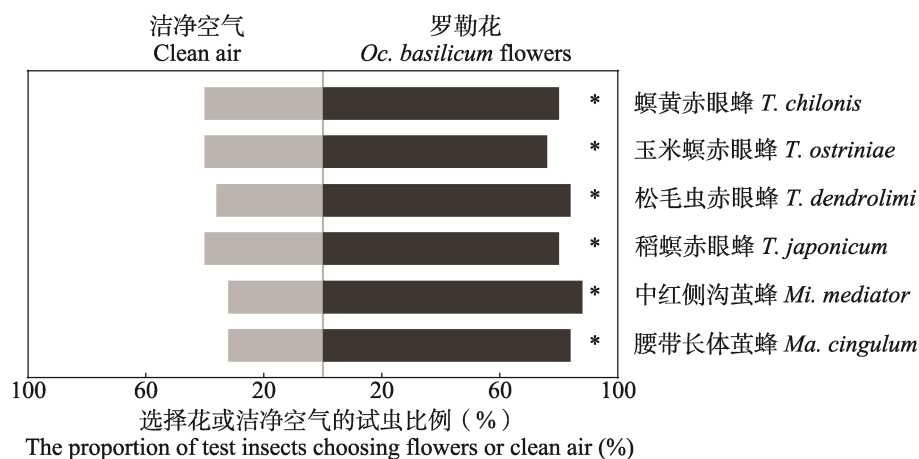


图 1 玉米鳞翅目害虫的关键寄生蜂对罗勒花朵的气味选择

Fig. 1 Selections of corn lepidopteran pest parasitoid wasps for *Ocimum basilicum* flowers

\*表示在  $P < 0.05$  水平有统计学差异 (卡方检验)。

\* indicates statistically significant difference at  $P < 0.05$  level ( $\chi^2$  test).

## 2.2 罗勒花对玉米鳞翅目害虫的关键寄生性天敌寿命的影响

与水对照相比, 罗勒的花能显著延长螟黄赤眼蜂 (雌蜂:  $\chi^2 = 14.477$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ; 雄蜂:  $\chi^2 = 14.542$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ) (图 2: A1, B1)、松毛虫赤眼蜂 (雌蜂:  $\chi^2 = 15.347$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ; 雄蜂:  $\chi^2 = 14.304$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ) (图 2: A2, B2)、稻螟赤眼蜂 (雌蜂:  $\chi^2 = 12.450$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ; 雄蜂:  $\chi^2 = 19.817$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ) (图 2: A3, B3)、玉米螟赤眼蜂 (雌蜂:  $\chi^2 = 4.271$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.039$ ; 雄蜂:  $\chi^2 = 9.194$ ,  $df = 15$ ,  $P = 0.002$ ) (图 2: A4, B4) 和中红侧沟茧蜂的寿命 (雌蜂:  $\chi^2 = 67.983$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ; 雄蜂:  $\chi^2 = 61.219$ ,  $df = 15$ ,  $P < 0.001$ ) (图 2: A6, B6)。

## 2.3 罗勒花对玉米鳞翅目害虫关键卵寄生蜂寄生量的影响

与水对照相比, 罗勒花能显著促进螟黄赤眼蜂 ( $t = 5.544$ ,  $df = 28$ ,  $P < 0.001$ )、松毛虫赤眼蜂 ( $t = 3.787$ ,  $df = 28$ ,  $P = 0.001$ )、稻螟赤眼蜂 ( $t = 3.702$ ,  $df = 28$ ,  $P = 0.001$ )、玉米螟赤眼蜂 ( $t = 4.298$ ,  $df = 28$ ,  $P < 0.001$ ) 的寄生能力 (表 1)。

## 2.4 罗勒花对玉米主要鳞翅目害虫寿命的影响

蜂蜜水能够显著延长棉铃虫 (雌蛾:  $F = 49.489$ ,  $df = 2$ ,  $P < 0.001$ ; 雄蛾:  $H = 4.568$ ,  $df = 2$ ,  $P < 0.001$ )、玉米螟 (雌蛾:  $H = 2.240$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.005$ ; 雄蛾:  $H = 12.841$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.002$ ) 和草地贪夜蛾 (雌蛾:  $F = 5.255$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.002$ ; 雄蛾:  $F = 1.635$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.025$ ) 的

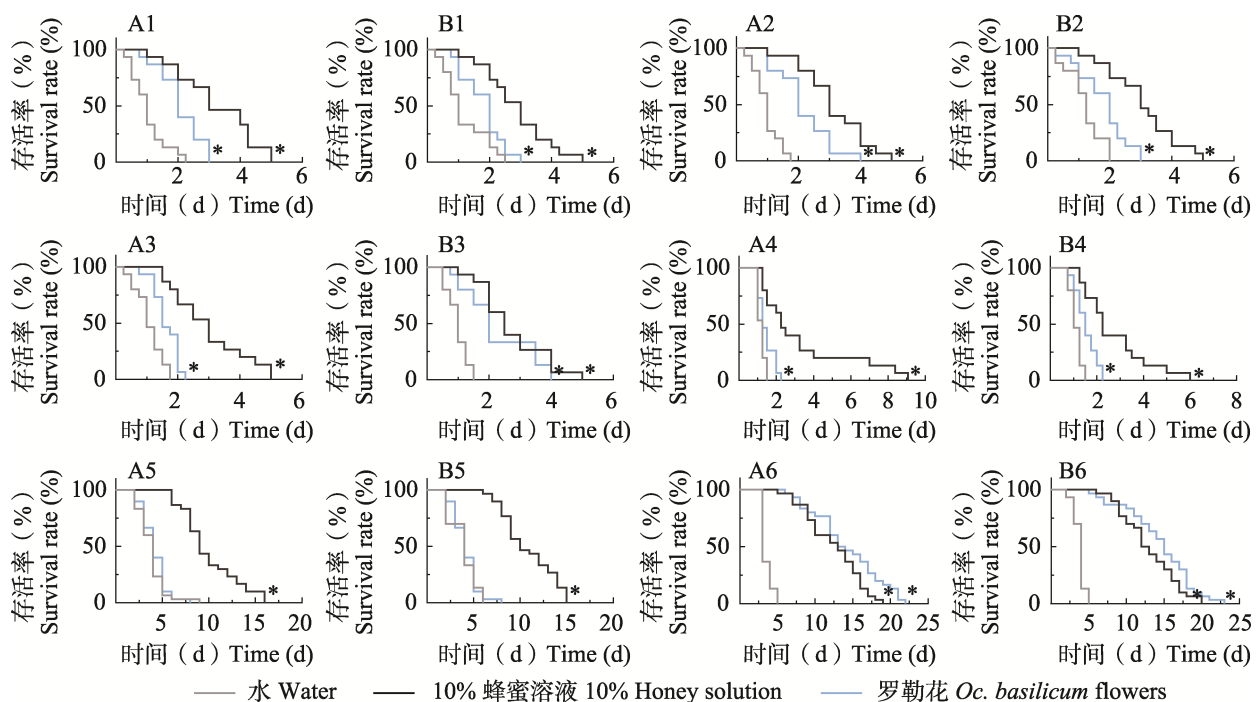


图 2 罗勒花对玉米鳞翅目害虫关键寄生性天敌寿命的影响

Fig. 2 Effects of *Ocimum basilicum* flowers on the survival of key parasitoids of maize lepidopteran pests

A1. 螟黄赤眼蜂雌蜂; B1. 螟黄赤眼蜂雄蜂; A2. 松毛虫赤眼蜂雌蜂; B2. 松毛虫赤眼蜂雄蜂;  
A3. 稻螟赤眼蜂雌蜂; B3. 稻螟赤眼蜂雄蜂; A4. 玉米螟赤眼蜂雌蜂; B4. 玉米螟赤眼蜂雄蜂;  
A5. 腰带长体茧蜂雌蜂; B5. 腰带长体茧蜂雄蜂; A6. 中红侧沟茧蜂雌蜂; B6. 中红侧沟茧蜂雄蜂。

\*表示在  $P < 0.05$  水平与对照处理相比存在统计学差异 (Log-rank 检验)。

A1. *T. chilonis* female; B1. *T. chilonis* male; A2. *T. dendrolimi* female; B2. *T. dendrolimi* male; A3. *T. japonicum* female; B3. *T. japonicum* male; A4. *T. ostrinae* female; B4. *T. ostrinae* male; A5. *Ma. cingulum* female; B5. *Ma. cingulum* male; A6. *Mi. mediator* female; B6. *Mi. mediator* male. \* indicates statistically significant difference at  $P < 0.05$  level (Log-rank test).

表 1 罗勒花对玉米鳞翅目害虫关键卵寄生蜂寄生力的影响  
Table 1 Effects of *Ocimum basilicum* flowers on the parasitism ability of key egg parasitic wasps of maize lepidopteran pests

| 寄生蜂种类<br>Parasitic wasp species | 寄生卵量 (粒/雌) Number of parasitized eggs (grains/female) |                                  | <i>t</i> | <i>df</i> | <i>P</i> |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|----------|-----------|----------|
|                                 | 水 Water                                               | 罗勒花 <i>Oc. basilicum</i> flowers |          |           |          |
| 螟黄赤眼蜂 <i>T. chilonis</i>        | 18.7 ± 1.8                                            | 39.9 ± 3.4                       | 5.544    | 28        | < 0.001  |
| 松毛虫赤眼蜂 <i>T. dendrolimi</i>     | 20.6 ± 1.6                                            | 35.3 ± 3.5                       | 3.787    | 28        | 0.001    |
| 稻螟赤眼蜂 <i>T. japonicum</i>       | 19.9 ± 1.8                                            | 30.2 ± 2.1                       | 3.702    | 28        | 0.001    |
| 玉米螟赤眼蜂 <i>T. ostriniae</i>      | 26.9 ± 2.6                                            | 45.9 ± 3.5                       | 4.298    | 28        | < 0.001  |

表中数据为平均值±标准误 (*t* 检验进行显著性分析)。表 2 同。  
Data in the table are presented as mean±SE (Significant difference analysis by *t*-test). The same for Table 2.

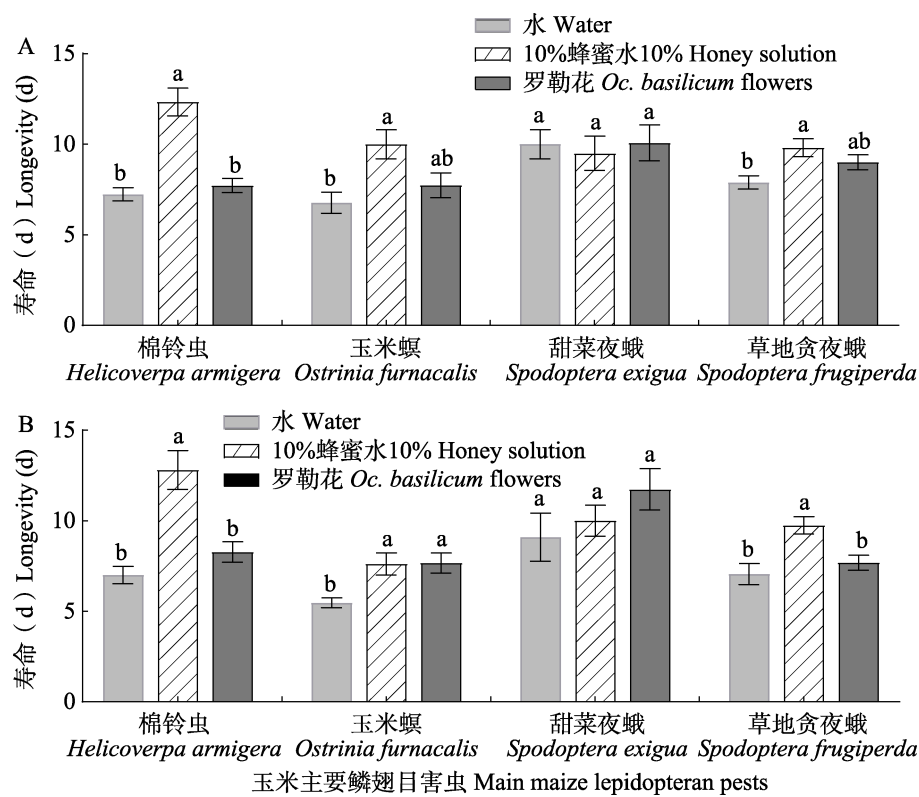


图 3 罗勒花对玉米主要鳞翅目害虫寿命的影响  
Fig. 3 Effects of *Ocimum basilicum* flowers on the longevity of main maize lepidopteran pests

A. 雌蛾; B. 雄蛾。图中数据为平均值±标准误, 柱上不同字母表示各组之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ , Turkey 检验)。  
A. Female; B. Male. The data in the figure are mean±SE. Different letters above bars indicate significant difference among treatment groups ( $P < 0.05$ , Turkey test).

寿命 (图 3: A, B)。有罗勒花存在时, 只有玉米螟雄蛾的寿命得以显著延长 ( $H = 12.841$ ,  $df = 13$ ,  $P = 0.002$ ), 而对其他害虫并无显著影响 (雌: 棉铃虫:  $F = 49.489$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.368$ ; 玉米螟:  $F = 1.629$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.877$ ; 甜菜夜蛾:  $F = 0.333$ ,

$df = 2$ ,  $P = 0.588$ ; 草地贪夜蛾:  $F = 5.255$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.069$ ; 雄: 棉铃虫:  $F = 18.970$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.253$ ; 甜菜夜蛾:  $F = 1.642$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.112$ ; 草地贪夜蛾:  $F = 1.635$ ,  $df = 2$ ,  $P = 0.433$ ) (图 3: A, B)。

## 2.5 罗勒花对玉米主要鳞翅目害虫繁殖力的影响

罗勒花对 4 种害虫的产卵量无显著影响(棉铃虫:  $t = 1.39$ ,  $df = 33$ ,  $P = 0.447$ ; 玉米螟:  $t = 1.53$ ,  $df = 30$ ,  $P = 0.447$ ; 甜菜夜蛾:  $t = 1.03$ ,  $df = 24$ ,  $P = 0.526$ ; 草地贪夜蛾:  $t = 0.995$ ,  $df = 27$ ,  $P = 0.526$ ) (表 2)。

## 2.6 罗勒对玉米地节肢动物及玉米产量的影响

玉米间作罗勒后, 玉米田内的植食性昆虫数量显著低于玉米单作田块 ( $t = 3.88$ ,  $df = 14$ ,  $P = 0.003$ ), 寄生性天敌数量显著高于玉米单作田 ( $t = 5.74$ ,  $df = 14$ ,  $P < 0.001$ ), 捕食性天敌的数量也显著高于玉米单作田 ( $t = 5.36$ ,  $df = 14$ ,  $P <$

0.001) (图 4)。另外, 间作罗勒的玉米田收获的鲜玉米每棒均重 ( $235.500 \pm 4.057$ ) g, 显著高于玉米单作田收获的鲜玉米每棒均重 ( $202.300 \pm 5.443$ ) g ( $t = 4.89$ ,  $df = 75$ ,  $P < 0.001$ )。

## 3 讨论

在现代农业生产中, 作物单一化种植模式导致了物种多样性的显著下降, 进而削弱了生态系统的复杂性及稳定性。这种单一作物的种植结构使得农田生态系统中的生物群落变得单一, 天敌种群的栖息与食物链基础受到破坏, 致使自然敌害控制功能的减弱, 从而影响了害虫的有效抑制与农田生态平衡的维持 (Liu *et al.*, 2019; Feng

表 2 罗勒花对玉米主要鳞翅目害虫繁殖力的影响

Table 2 Effects of *Ocimum basilicum* flowers on the fecundity of main maize lepidopteran pests

| 害虫种类<br>Pest species       | 产卵量 (粒/雌) Oviposition amount (grains/female) |                                  | $t$   | $df$ | $P$   |
|----------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------|-------|------|-------|
|                            | 水 Water                                      | 罗勒花 <i>Oc. basilicum</i> flowers |       |      |       |
| 棉铃虫 <i>H. armigera</i>     | 461.2 $\pm$ 47.2                             | 691.4 $\pm$ 60.4                 | 1.390 | 33   | 0.180 |
| 玉米螟 <i>Os. furnacalis</i>  | 231.9 $\pm$ 73.6                             | 319.3 $\pm$ 34.9                 | 1.530 | 30   | 0.138 |
| 甜菜夜蛾 <i>S. exigua</i>      | 1 038.4 $\pm$ 131.2                          | 1 182.60 $\pm$ 71.3              | 1.030 | 24   | 0.311 |
| 草地贪夜蛾 <i>S. frugiperda</i> | 686.2 $\pm$ 87.5                             | 985.1 $\pm$ 102.7                | 0.995 | 27   | 0.331 |

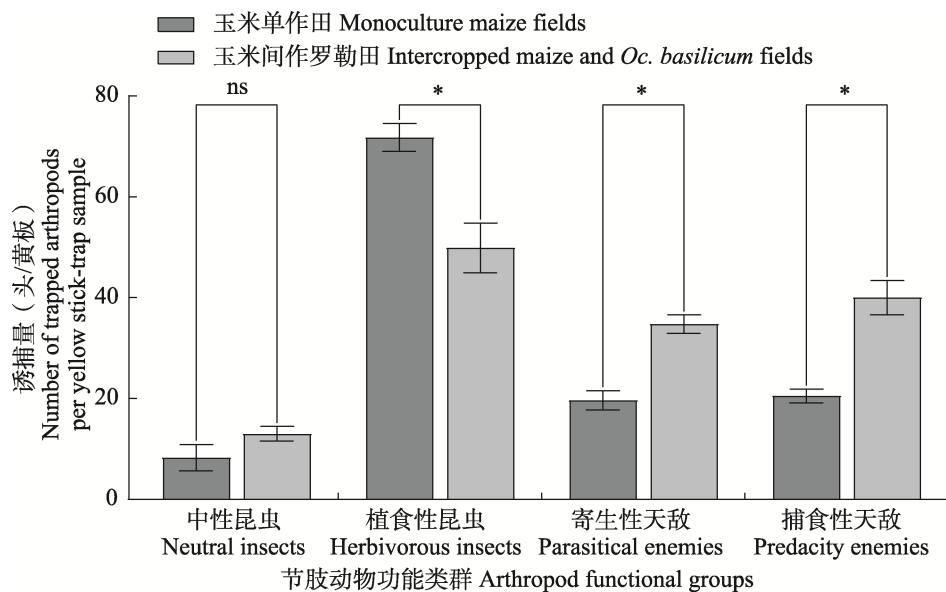


图 4 间作罗勒对玉米田内节肢动物功能类群的影响

Fig. 4 Effects of intercropping with *Ocimum basilicum* on the population of arthropod functional groups in the maize field

图中数据为平均值 $\pm$ 标准误。\*表示在  $P < 0.05$  水平有统计学差异, ns 表示无统计学差异 ( $P > 0.05$ ,  $t$  检验)。

The data in the figure are mean $\pm$ SE. \* indicates statistically significant difference at the  $P < 0.05$  level, while ns indicates no statistically significant difference ( $P > 0.05$ ,  $t$ -test).

*et al.*, 2022)。目前, 化学农药的过度使用不仅使害虫产生抗药性, 还对生态环境造成严重的负面影响 (Siviter *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2023), 不利于生态环境的可持续发展。早在 1981 年, 国际上就提出了“改变生态环境控制害虫”的理念 (Flint and van den Bosch, 1981), 旨在通过调整生态环境, 促进天敌昆虫的繁殖和种群数量的增加, 进而实现对害虫数量的有效控制。种植蜜源植物可为天敌提供更适宜的微观环境、更多的替代寄主或猎物等食物资源, 增加生态系统的多样性, 为可持续防治害虫提供了更多的可能 (陈学新等, 2014)。鉴于蜜源植物在农业生态系统中的重要作用, 筛选和推广更多种类的蜜源植物显得尤为关键。已知芝麻 *Sesamum indicum* (Zhu *et al.*, 2014)、波斯菊 *Cosmos bipinnatus* (Li *et al.*, 2021)、白三叶 *Trifolium repens* (魏淑花等, 2024) 等多种蜜源植物在维护和促进天敌种群及生态环境方面展现出了诸多正面效应。它们的花朵为天敌昆虫提供了丰富的蜜源和花粉, 成为这些昆虫赖以生存的重要食物补充。

罗勒是一种生命力顽强且花期持久的植物, 作为潜在的优质蜜源植物也备受关注。已有研究表明, 罗勒能有效吸引并促进草蛉 (Batista *et al.*, 2017)、异色瓢虫 (彭雪凡等, 2024) 等多种捕食性天敌的种群增长, 但关于其对寄生性天敌的影响, 目前开展的研究还十分有限。在自然生境中, 包括许多赤眼蜂和茧蜂在内的寄生性天敌, 能够通过寄生作用控制害虫数量, 对维护玉米田的生态平衡至关重要 (王连霞等, 2019; 牛洪涛等, 2021)。本研究选取了玉米螟赤眼蜂、螟黄赤眼蜂、松毛虫赤眼蜂、稻螟赤眼蜂、腰带长体茧蜂以及中红侧沟茧蜂作为研究对象, 评估了罗勒作为蜜源植物对玉米害虫关键寄生性天敌的影响, 结果显示, 罗勒对多数供试寄生蜂有积极影响: 除了腰带长体茧蜂外, 其他寄生蜂的寿命均得到明显延长, 同时 4 种赤眼蜂的寄生能力也大幅提升。这一积极效应或许与罗勒花蜜中丰富的糖类成分有关。

蜜源植物的挥发物在吸引寄生蜂取食方面发挥着重要的作用 (王建红等, 2015; Fataar *et al.*,

2019)。罗勒作为一种具有多种生态功能的植物, 其独特的芳香成分不仅对蜜蜂等授粉昆虫具有吸引力, 同时对一些寄生性天敌也表现出了显著的吸引效果。本研究通过对玉米鳞翅目害虫的 6 种关键寄生蜂进行嗅觉行为反应测定, 探究了罗勒对玉米寄生性天敌的吸引力。发现罗勒对 6 种关键的玉米寄生性天敌均展现出了显著的吸引力。这很可能与罗勒在开花期间释放的单萜化合物密切相关。这些化合物在寄生蜂寻找定位的过程中可能发挥了重要作用 (Jiang *et al.*, 2016)。已有研究表明, 植物挥发性化合物对于缘腹茧蜂 *Costesia marginiventris* (Fontana *et al.*, 2011)、大草蛉 *Chrysopa pallens* (杨亚洁等, 2023) 等天敌昆虫而言, 是重要的定位信号。然而蜜源植物虽然有利于天敌的生存和繁衍, 也可能为鳞翅目害虫提供食物, 增加其寿命, 如欧防风 *Pastinaca sativa* 会延长苹果蠹蛾 *Cydia pomonella* 的寿命 (Mátray and Herz, 2021), 使其造成更大的危害。因此, 本研究同时也对玉米主要鳞翅目害虫 (玉米螟、甜菜夜蛾、草地贪夜蛾、棉铃虫) 对罗勒的生态适应性进行了室内试验, 结果显示, 罗勒对玉米螟、甜菜夜蛾、草地贪夜蛾和棉铃虫这 4 种玉米主要鳞翅目害虫的寿命及产卵量并未产生增益作用。这可能与罗勒的挥发物有关, 罗勒的挥发物已被证实对印度谷蛾、长林小蠹 *Hylurgus ligniperda* 和茶尺蠖等害虫具有显著的驱避效应 (张正群等, 2014; 杨二妹等, 2021; 胡恒志等, 2022; Omar *et al.*, 2024; 王雅静等, 2024), 能直接影响害虫种群数量, 基于此, 推测罗勒的挥发物对玉米的主要鳞翅目害虫也可能具有相似的驱避效果, 从而导致这些害虫无法取食罗勒。

为了深入探究罗勒在农田环境中对寄生性天敌的吸引和控害能力, 本研究将罗勒间作于实际玉米田间环境中, 评估种植罗勒后玉米田中天敌和害虫的数量。结果表明, 罗勒能够显著增加捕食性天敌和寄生性天敌的数量, 在协调控制害虫种群数量方面发挥了重要作用。同时, 玉米田间种植罗勒还能显著提高玉米产量。这表明罗勒可以为玉米田内的天敌提供营养来源和栖息场

所,对玉米田间的害虫控制有促进作用,有助于提升农田的丰度和生态功能。研究表明,在玉米地中间作苜蓿 *Medicago sativa* 能够提供减少土壤侵蚀、改善土壤结构、提升土壤有机质含量等多种生态服务。然而,也有研究表明,玉米与苜蓿的间作会导致玉米籽粒产量和生物量显著下降,降幅在 14.0%-18.8%之间 (Berti *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2023)。玉米地间作苜蓿菜 *Sonchus arvensis* 能为捕食性天敌提供持续的营养补充,从而维持其种群数量的稳定 (苏文雯等, 2020)。玉米与花生 *Arachis hypogaea*、大豆 *Glycine max* 等豆科植物间作,不仅可以有效减少因过量施用氮肥对环境造成的负面影响,提高土壤养分利用效率,还能通过增加植被多样性和害虫栖息地的复杂性,吸引更多的自然天敌,如龟纹瓢虫 *Harmonia axyridis*、七星瓢虫 *Coccinella septempunctata*、袋小肥螋 *Euborellia annulata* 和猩红蜻蜓 *Crocothemis servilia* 等,这些天敌能有效抑制斜纹夜蛾 *S. litura*、豆荚斑螟 *Etiella zinckenella*、亚洲玉米螟、花生蚜虫 *Aphis gossypii* 等害虫的种群数量 (Li *et al.*, 2022; Fattah *et al.*, 2023; Fu *et al.*, 2023)。尽管苜蓿菜、豆科植物等蜜源植物在生态服务方面表现出色,但研究大多聚焦于捕食性天敌,对寄生性天敌昆虫的作用还鲜有报道。

与上述功能植物相比,罗勒具有种植简单、适应性强、操作简单、花期长且香味浓郁独特等优势,对玉米寄生蜂可能具有广泛的吸引作用,并且自身对害虫也具有一定的驱避作用,其病虫害发生率相对较低 (胡恒志等, 2022; Tibet *et al.*, 2022; Omar *et al.*, 2024)。罗勒的花期为 7-11 月,与我国大部分地区秋玉米的生长周期同步,能够为玉米田中的天敌昆虫提供持续的营养补充,有助于维持天敌昆虫种群的稳定。尽管罗勒为一年生植物,但因其结籽量大,自播能力强,若在玉米田边保留罗勒种植带,无需翻耕和除草,即可在第二年春季自然萌发,能够有效维持罗勒花带,为玉米田提供长期的生态支持。有条件的地区,建议每年与玉米同期重新播种,以确保花带的均匀性和天敌昆虫的持续供给。

除此之外,罗勒不仅是一种优质的蜜源植物,还具有药用、食用和观赏等多重价值。在传统医学中,罗勒被广泛用于治疗消化不良、呼吸道感染和皮肤问题等疾病。现代研究进一步表明,罗勒具有抗氧化、抗炎和抗菌等多种药理作用 (Purushothaman *et al.*, 2018; Yaldiz and Camlica, 2022)。罗勒还常被作为香料植物,其独特的芳香使其成为许多菜肴中不可或缺的调味品,常用于制作蒜香酱、沙拉酱等。从观赏角度来看,罗勒的圆锥花序长度通常为 10-20 cm,整体姿态挺拔且充满生机,具有较高的观赏价值,罗勒的美化环境功能可以为我国美丽乡村建设的乡村景观增添生态与美学价值,促进生态与人文的和谐发展。

综上所述,罗勒富含芳香型物质,可以显著吸引寄生性天敌。其花能够显著延长寄生性天敌的寿命和增强其寄生能力,且对害虫没有益处,可以为玉米种植系统中的天敌补充额外营养和提供适宜栖息场所,发挥其害虫控制作用,进而有助于玉米的安全生产。本研究充分证明,罗勒对玉米寄生性天敌具备良好的诱集和涵养功效,可以作为增效害虫生物防治的对天敌有益的蜜源植物,有效增强生物防治效果,助力农业绿色可持续发展。

## 参考文献 (References)

- Ahmadpour R, Rafiee-Dastjerdi H, Naseri B, Hassanpour M, Ebadollahi A, Mahdavi V, 2021. Lethal and sublethal toxicity of some plant-derived essential oils in ectoparasitoid wasp, *Habrobracon hebetor* Say (Hymenoptera: Braconidae). *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(1): 601-610.
- Batista MC, Fonseca MCM, Teodoro AV, Martins EF, Pallini A, Venzon M, 2017. Basil (*Ocimum basilicum* L.) attracts and benefits the green lacewing *Ceraeochrysa cubana* Hagen. *Biological Control*, 110(7): 98-106.
- Berti MT, Cecchin A, Samarappuli DP, Patel S, Lenssen AW, Moore KJ, Wells SS, Kazula MJ, 2021. Alfalfa established successfully in intercropping with corn in the Midwest US. *Agronomy*, 11(8): 1-18.
- Chen XX, Liu YQ, Ren SX, Zhang F, Zhang WQ, Ge F, 2014. Plant-mediated support system for natural enemies of insect pests.

- Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(1): 1–12. [陈学新, 刘银泉, 任顺祥, 张帆, 张文庆, 戈峰, 2014. 害虫天敌的植物支持系统. 应用昆虫学报, 51(1): 1–12.]
- Du WM, Pang JY, Wang L, Zhang JJ, Ruan CC, 2023. Control of *Ostrinia furnacalis* differed between field release methods of *Trichogramma dendrolimi*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(6): 1275–1281. [杜文梅, 庞佳瑶, 王琳, 张俊杰, 阮长春, 2023. 松毛虫赤眼蜂田间放蜂方法对亚洲玉米螟防治效果的影响. 中国生物防治学报, 39(6): 1275–1281.]
- Ding RF, Anorbayev AR, Wuwaishi·Akedan, Li HQ, Pan HS, Wang DM, Li HB, 2023. Current state of the integrated control tactics of major cotton insect pests in Central Asia. *Plant Protection*, 49(1): 73–81. [丁瑞丰, Anorbayev AR, 阿克旦·吾外士, 李海强, 潘洪生, 王冬梅, 李号宾, 2023. 中亚地区棉花主要害虫及其综合防治技术应用现状. 植物保护, 49(1): 73–81.]
- Fan ST, Wu MZ, Liu C, Li HH, Huang SH, Zheng ZJ, Ye XY, Tan JF, Zhu GH, 2023. Azadirachtin inhibits nuclear receptor *HR3* in the prothoracic gland to block larval ecdysis in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(42): 15497–15505.
- Fataar S, Kahmen A, Luka H, 2019. Innate and learned olfactory attraction to flowering plants by the parasitoid *Cotesia rubecula* (Marshall, 1885) (Hymenoptera: Braconidae): Potential impacts on conservation biological control. *Biological Control*, 132(5): 16–22.
- Fattah A, Salim, Arrahman A, Wahditiya AA, Yasin M, Widiarta IN, Nugraha Y, 2023. Effect of the number of rows and cultivars of soybeans on damage intensity of pest and predator populations in corn-soybean intercropping, south Sulawesi Indonesia. *Legume Research*, 46(8): 1087–1091.
- Feng L, Xu LY, Zhou ZY, Du JG, Wang DD, 2022. The influence of social preference and governments' strong reciprocity on agricultural green production networks under intensive management in China. *Sustainability*, 14(23): 16124.
- Finkelstein CJ, CaraDonna PJ, Gruver A, Welti EAR, Kaspari M, Sanders NJ, 2022. Sodium-enriched floral nectar increases pollinator visitation rate and diversity. *Biology Letters*, 18(3): 16.
- Flint ML, van den Bosch R, 1981. Introduction to integrated pest management//Mitchell ER (ed.). *Experimental Agriculture*. New York: Plenum Press. 107–119.
- Fontana A, Held M, Fantaye CA, Turlings TC, Degenhardt J, Gershenson J, 2011. Attractiveness of constitutive and herbivore-induced sesquiterpene blends of maize to the parasitic wasp *Cotesia marginiventris* (Cresson). *Journal of Chemical Ecology*, 37(6): 582–591.
- Foti MC, Rostás M, Peri E, Park KC, Slimani T, Wratten SD, Colazza S, 2017. Chemical ecology meets conservation biological control: Identifying plant volatiles as predictors of floral resource suitability for an egg parasitoid of stink bugs. *Journal of Pest Science*, 90(1): 299–310.
- Fu ZD, Chen P, Zhang XN, Du Q, Zheng BC, Yang H, Luo K, Lin P, Li YL, Pu T, Wu YS, Wang XC, Yang F, Liu WG, Song C, Yang WY, Yong TW, 2023. Maize-legume intercropping achieves yield advantages by improving leaf functions and dry matter partition. *BMC Plant Biology*, 23(1): 438.
- Guo JY, Pan CB, Pan ZP, Zhang XM, Chen XJ, Wang XW, Tang JH, Yan S, Wu SY, 2024. Control efficiency of three pesticides combined with *Beauveria bassiana* against *Melanaphis sacchari*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(2): 274–281. [郭继元, 潘昌滨, 潘自平, 张锡梅, 陈晓杰, 王小武, 唐继洪, 严森, 吴圣勇, 2024. 三种药剂与球孢白僵菌对高粱蚜虫的协同控制作用. 中国生物防治学报, 40(2): 274–281.]
- Harris-Shultz KR, Armstrong JS, Caballero M, Hoback WW, Knoll JE, 2022. Insect feeding on *Sorghum bicolor* pollen and Hymenoptera attraction to aphid-produced honeydew. *Insects*, 13(12): 1152.
- Hatt S, Xu QX, Francis F, Osawa N, 2019. Aromatic plants of East Asia to enhance natural enemies towards biological control of insect pests. A review. *Entomologia Generalis*, 38(4): 275–315.
- Hu HZ, Niu P, Liao JH, Liu J, Liu X, Anarguli·Aini, Li C, 2022. Bioactivities of essential oils of lavender and basil against larvae of *Plodia interpunctella*. *Journal of Chinese Cereals and Oils Association*, 37(11): 199–205. [胡恒志, 牛平, 廖江花, 刘娟, 刘霞, 阿娜尔古丽·艾尼, 李超, 2022. 薰衣草精油及罗勒精油对印度谷螟幼虫的生物活性分析. 中国粮油学报, 37(11): 199–205.]
- Jaworski CC, Xiao D, Xu QX, Ramirez-Romero R, Guo XJ, Wang S, Desneux N, 2019. Varying the spatial arrangement of synthetic herbivore-induced plant volatiles and companion plants to improve conservation biological control. *Journal of Applied Ecology*, 56(5): 1176–1188.
- Jiang YF, Ye JY, Li S, Niinemets Ü, 2016. Regulation of floral terpenoid emission and biosynthesis in sweet basil (*Ocimum basilicum*). *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(4): 921–935.
- Kugimiya S, Uefune M, Shimoda T, Takabayashi J, 2010. Orientation of the parasitic wasp, *Cotesia vestalis* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae), to visual and olfactory cues of field mustard flowers, *Brassica rapa* L. (Brassicaceae), to exploit food sources.

- Applied Entomology and Zoology*, 45(3): 369–375.
- Li H, Li JR, Dong YM, Hao HP, Ling ZY, Bai HT, Wang HF, Cui HX, Shi L, 2019. Time-series transcriptome provides insights into the gene regulation network involved in the volatile terpenoid metabolism during the flower development of lavender. *BMC Plant Biology*, 19(1): 313.
- Li HM, Liu KQ, He KL, Wang ZY, 2019. Functional response of *Macrocentrus cingulum* to *Ostrinia furnacalis* larvae. *Chinese Journal of Biological Control*, 35(3): 350–355. [李宏梦, 刘凯强, 何康来, 王振营, 2019. 腰带长体茧蜂对亚洲玉米螟幼虫的寄生功能反应. 中国生物防治学报, 35(3): 350–355.]
- Li LK, Duan RC, Li RZ, Zou Y, Liu JW, Chen FJ, Xing GN, 2022. Impacts of corn intercropping with soybean, peanut and millet through different planting patterns on population dynamics and community diversity of insects under fertilizer reduction. *Frontiers in Plant Science*, 13(1): 936039.
- Li S, Jaworski CC, Hatt S, Zhang F, Desneux N, Wang S, 2021. Flower strips adjacent to greenhouses help reduce pest populations and insecticide applications inside organic commercial greenhouses. *Journal of Pest Science*, 94(3): 679–689.
- Liu WX, Ma AH, Lu ZY, Ran HF, Li JC, 2018. Release of the parasitoid *Microplitis mediator* to control *Helicoverpa armigera* in corn and pepper fields. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(1): 39–43. [刘文旭, 马爱红, 路子云, 冉红凡, 李建成, 2018. 释放中红侧沟茧蜂对玉米、辣椒田棉铃虫的防治效果. 应用昆虫学报, 55(1): 39–43.]
- Liu ZM, Yang D, Wen T, 2019. Agricultural production mode transformation and production efficiency: A labor division and cooperation lens. *China Agricultural Economic Review*, 11(1): 160–179.
- Lü L, Xia HX, Guo L, Chang XQ, Wan P, Zhang S, 2022. Effect of feeding *Spodoptera frugiperda* corn or sorghum on oviposition site selection and fitness. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(3): 542–550. [吕亮, 夏红霞, 郭蕾, 常向前, 万鹏, 张舒, 2022. 草地贪夜蛾对玉米和高粱的产卵选择及寄主适合度. 应用昆虫学报, 59(3): 542–550.]
- Ma HM, Yu XQ, Yu Q, Wu HH, Zhang HL, Pang JY, Gao YZ, 2023. Maize/alfalfa intercropping enhances yield and phosphorus acquisition. *Field Crops Research*, 303: 109136.
- Mátray S, Herz A, 2021. Do floral resources affect fitness of adult *Cydia pomonella* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera: Tortricidae)? *Bulletin of Entomological Research*, 111(6): 726–732.
- Mi YY, Yang YJ, Wang S, Jin ZY, Li S, 2024. Detection of functional plants in relation to the population dynamics of natural predators and pests. *Journal of Environmental Entomology*, 46(2): 489–497. [米莹莹, 杨亚洁, 王甦, 金振宇, 李姝, 2024. 基于捕食性天敌及害虫种群动态筛选功能植物的研究. 环境昆虫学报, 46(2): 489–497.]
- Niu HT, Hu H, Zhang ZC, Zhao DX, Zhao J, Wang N, Guo HF, 2021. Investigation of the natural enemies of *Spodoptera frugiperda* and evaluation of their control effect in maize fields in Jiangsu Province. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(6): 1152–1159. [牛洪涛, 胡慧, 张志春, 赵冬晓, 赵静, 王娜, 郭慧芳, 2021. 江苏草地贪夜蛾天敌资源调查及其在玉米田控害作用评价. 中国生物防治学报, 37(6): 1152–1159.]
- Omar AF, Khalil FMA, Alomran MM, Ismail T, El-Tokhy AI, Abdelal K, Gharsan FN, Almozini RN, Abouelatta AM, 2024. Toxicity and enzymatic activity changes in rice weevil (*Sitophilus oryzae*) induced by basil (*Ocimum basilicum*) and cumin (*Cuminum cyminum*) essential oils. *Scientific Reports*, 14(1): 28684.
- Peng XF, Zhou XT, Weinire-Maihemuti, Shangguan YL, Ge F, Zhang JP, Cai ZP, 2024. Effects of different functional plants on cotton aphids and their predatory natural enemies. *Journal of Plant Protection*, 51(1): 39–49. [彭雪凡, 周晓通, 维尼热·买合木提, 上官一磊, 戈峰, 张建萍, 蔡志平, 2024. 不同功能植物对棉花蚜虫及其捕食性天敌的影响. 植物保护学报, 51(1): 39–49.]
- Purushothaman B, Srinivasan RP, Suganthi P, Ranganathan B, Gimbin J, Shanmugam K, 2018. A comprehensive review on *Ocimum basilicum*. *Journal of Natural Remedies*, 18(3): 71–85.
- Pyke GH, Kalman JRM, Bordin DM, Blanes L, Doble PA, 2020. Patterns of floral nectar standing crops allow plants to manipulate their pollinators. *Scientific Reports*, 10(1): 1660.
- Sigsgaard L, Betzer C, Naulin C, Eilenberg J, Enkegaard A, Kristensen K, 2013. The effect of floral resources on parasitoid and host longevity: Prospects for conservation biological control in strawberries. *Journal of Insect Science*, 13(1): 104.
- Siviter H, Bailes EJ, Martin CD, Oliver TR, Koricheva J, Leadbeater E, Brown MJF, 2021. Agrochemicals interact synergistically to increase bee mortality. *Nature*, 596(7872): 389–392.
- Song BZ, Liang YP, Liu SZ, Zhang LF, Tang GB, Ma T, Yao YC, 2017. Behavioral responses of *Aphis citricola* (Hemiptera: Aphididae) and its natural enemy *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae) to non-host plant volatiles. *Florida Entomologist*, 100(2): 411–421.
- Song X, Shan S, Wang SN, Tao YX, Li RJ, Zhang YJ, 2019. Prokaryotic expression and ligand binding characteristics of

- odorant binding protein MmedOBP18 of the parasitoid wasp *Microplitis mediator* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Entomologica Sinica*, 62(2): 150–159. [宋玄, 单双, 王山宁, 陶宇道, 李瑞军, 张永军, 2019. 中红侧沟茧蜂气味结合蛋白 MmedOBP18 的原核表达及配体结合特性. 昆虫学报, 62(2): 159–159.]
- Song YF, Wu KM, 2020. Investigation on controlling status of fall armyworm in sweet/waxy corn fields in western Yunnan Province. *Plant Protection*, 46(5): 217–222. [宋翼飞, 吴孔明, 2020. 滇西甜糯玉米草地贪夜蛾防治现状调查. 植物保护, 46(5): 217–222.]
- Su WW, Yang QF, Ouyang F, Men XY, Ge F, 2020. Characteristics and potential uses of the functional plant *Sonchus arvensis* L. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 57(1): 226–232. [苏文雯, 杨泉峰, 欧阳芳, 门兴元, 戈峰, 2020. 功能植物苣荬菜的特征及其应用潜能. 应用昆虫学报, 57(1): 226–232.]
- Tibet TP, Charoimek N, Teerakitchotikan P, Leksawasdi N, Jantanasakulwong K, Rachtanapun P, Seesuriyachan P, Phimolsiripol Y, Chaiyaso T, Ruksiriwanich W, Jantrawut P, Doan HV, Cheewangkoon R, Sommano SR, 2022. Volatile organic compounds from basil essential oils: Plant taxonomy, biological activities, and their applications in tropical fruit productions. *Horticulturae*, 8(2): 144.
- van Oudenhove L, Cazier A, Fillaud M, Lavoie AV, Fatnassi H, Perez G, Calcagno V, 2023. Non-target effects of ten essential oils on the egg parasitoid *Trichogramma evanescens*. *Peer Community Journal*, 3(e2): 1–26.
- Wang LX, Li DS, Luo BJ, Zhao XM, Zheng X, Yuan M, Jiang XJ, He KL, 2019. The effectiveness of releasing different *Trichogramma* species to control the Asian corn borer. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 56(2): 214–219. [王连霞, 李敦松, 罗宝君, 赵秀梅, 郑旭, 袁明, 姜晓军, 何康来, 2019. 释放不同种类赤眼蜂对亚洲玉米螟的防治效果比较. 应用昆虫学报, 56(2): 214–219.]
- Wang JH, Qiu LF, Che SC, Yu GY, Shao JL, Zhong L, 2015. The effects of floral resource plants on natural enemy insects and implications for biological control. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(2): 289–299. [王建红, 仇兰芬, 车少臣, 虞国跃, 邵金丽, 仲丽, 2015. 蜜粉源植物对天敌昆虫的作用及其在生物防治中的应用. 应用昆虫学报, 52(2): 289–299.]
- Wang JY, Zhang H, Ji XY, 2023. Functional response of three *Trichogramma* (Hymenoptera: Trichogrammatidae) to parasitizing *Spodoptera exigua* and *Plutella xylostella* eggs. *Environmental Entomology Journal*, 45(4): 1046–1053. [王金彦, 张浩, 季香云, 2023. 3 种赤眼蜂对甜菜夜蛾和小菜蛾卵的寄生功能反应. 环境昆虫学报, 45(4): 1046–1053.]
- Wang YJ, Chen HW, Xie D, Pan ZK, Chi DF, Yu J, 2024. Electrophysiological and behavioral responses of *Hylurgus ligniperda* to non-host plant essential oils. *Journal of Northeast Forestry University*, 52(10): 131–136. [王雅静, 陈焕文, 解丹, 潘自凯, 迟德富, 宇佳, 2024. 长林小蠹对非寄主植物精油的电生理和行为反应. 东北林业大学学报, 52(10): 131–136.]
- Wei K, Wang XY, Yang ZQ, 2016. Effects of supplementary nutrition on parasitism ability and developmental process of a gregarious parasitoid, *Scleroderma pupariae* (Hymenoptera: Bethyilidae). *Forest Research*, 29(3): 369–376. [魏可, 王小艺, 杨忠岐, 2016. 补充营养对白蜡吉丁肿腿蜂寄生效率和发育进程的影响. 林业科学研究, 29(3): 369–376.]
- Wei SH, Liu XQ, Wang Y, Liu C, Zhang R, 2024. Effects of intercropping alfalfa and functional plants on population of thrips and their natural enemies *Orius similis*. *Chinese Journal of Biological Control*, 40(1): 99–107. [魏淑花, 刘学琴, 王颖, 刘畅, 张蓉, 2024. 苜蓿草田间作功能植物对苜蓿蓟马及天敌小花蝽种群的影响. 中国生物防治学报, 40(1): 99–107.]
- Wu CB, Liu FY, Liu JX, Di N, Wang S, Jin ZY, Xu QX, 2022. Role of *Lagopsis supine* in conserving the arthropod natural enemies of pests. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 303–310. [吴长兵, 刘飞宇, 刘俊秀, 邸宁, 王甦, 金振宇, 徐庆宣, 2022. 夏至草对天敌昆虫控害能力的促进作用. 应用昆虫学报, 59(2): 303–310.]
- Wu HP, Li BP, 2007. Influence of supplementary food on longevity and feeding behavior of *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 23(2): 184–187. [伍和平, 李保平, 2007. 补充营养对斑痣悬茧蜂寿命和取食行为的影响. 中国生物防治, 23(2): 184–187.]
- Wäckers FL, Romeis J, van Rijn P, 2007. Nectar and pollen feeding by insect herbivores and implications for multitrophic interactions. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 301–323.
- Yaldiz G, Camlica M, 2022. Essential oils content, composition and antioxidant activity of selected basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes. *South African Journal of Botany*, 151(Part A): 675–694.
- Yang EM, Jia H, Zhou CX, Li HJ, 2021. Study on the insecticidal activity of five plant essential oils on *Sitophilus zeamais*. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 36(8): 66–73. [杨二妹, 贾浩, 周晨霞, 李慧静, 2021. 5 种植物精油对玉米象的杀虫活性研究. 中国粮油学报, 36(8): 66–73.]
- Yang QF, Ma JH, Yang F, Zheng H, Lu ZB, Qiao F, Zhang KN, Gong HR, Men XY, Li J, Ouyang F, Ge F, 2023. The hidden

- indirect environmental effect undercuts the contribution of crop nitrogen fertilizer application to the net ecosystem economic benefit. *Journal of Cleaner Production*, 426: 139204.
- Yang YJ, Li S, Fang Y, Wang S, Yue YL, Gu JJ, 2023. Olfactory behavioral response of *Chrysopa pallens* to aromatic plant *Ocimum basilicum* and its major volatiles in different periods. *Journal of Environmental Entomology*, 45(4): 1063–1071. [杨亚洁, 李姝, 方艳, 王甦, 岳艳丽, 顾俊杰, 2023. 大草蛉对不同时期芳香植物甜罗勒及其主要挥发物质的嗅觉行为反应. 环境昆虫学报, 45(4): 1063–1071.]
- Yuan X, Deng WL, Guo Y, Wang ZH, Li DS, 2022. Evaluation of the parasitism on eggs of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) by *Trichogramma chilonis*. *Journal of Environmental Entomology*, 44(2): 290–296. [袁曦, 邓伟丽, 郭义, 王志烘, 李敦松, 2022. 螟黄赤眼蜂对草地贪夜蛾卵寄生效果评价. 环境昆虫学报, 44(2): 290–296.]
- Zang LS, Wang S, Zhang F, Desneux N, 2021. Biological control with *Trichogramma* in China: History, present status and perspectives. *Annual Review of Entomology*, 66: 463–484.
- Zhang Y, Zhang T, Wang XH, Bian ZP, Zhang XF, Yang GQ, Lu YH, 2024. Volatiles from essential oils of three Lamiaceae plants repel the winged cotton aphid, disturb its feeding behavior and reduce its fecundity. *Pest Management Science*, 80(9): 4253–4263.
- Zhang ZQ, Sun XL, Luo ZX, Gao Y, Bian L, Xin ZJ, Cai XM, Chen ZM, 2014. Effect of 14 plant essential oils on the behavior of *Ectopis obliqua* (Prout). *Journal of Tea Science*, 34(5): 489–496. [张正群, 孙晓玲, 罗宗秀, 高宇, 边磊, 辛肇军, 蔡晓明, 陈宗懋, 2014. 14 种植物精油对茶尺蠖行为的影响. 茶叶科学, 34(5): 489–496.]
- Zhao JH, Liang MM, Wang ZY, Zhao YY, Cheng JL, Du YJ, 2022. Evaluation and optimization of blends for attracting *Trichogramma dendrolimi* based on semiochemicals mediating tritrophic interactions in the orchard habitat. *Biological Control*, 173(10): 104998.
- Zhou DR, Song YY, Wang ZY, He KL, Zheng L, Zhang GY, 1997. Study on the preference habitat of *Trichogramma ostrinae*: II. Effect of summer corn interplanted with creeping type mung bean on the parasitic rate. *Chinese Journal of Biological Control*, 13(2): 49–52. [周大荣, 宋彦英, 王振营, 何康来, 郑礼, 张广义, 1997. 玉米螟赤眼蜂适宜生境的研究与利用 II. 夏玉米间作匍匐型绿豆对玉米螟赤眼蜂寄生率的影响. 中国生物防治学报, 13(1): 49–52.]
- Zhu PY, Lu ZX, Heong K, Chen GH, Zheng XS, Xu HX, Yang YJ, Nicol HI, Gurr GM, 2014. Selection of nectar plants for use in ecological engineering to promote biological control of rice pests by the predatory bug, *Cyrtorhinus lividipennis* (Heteroptera: Miridae). *PLoS ONE*, 9(9): e108669.
- Zhu PY, Gao HY, Zhang FC, Chen GH, Xu HX, Geoff G, Lü ZX, 2021. Exploring the shared ecological traits of nectary plants for promoting parasitism of parasitoids. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 892–903. [朱平阳, 高慧颖, 张发成, 陈桂华, 徐红星, Gurr Geoff, 吕仲贤, 2021. 探索促进寄生蜂生殖力的蜜源植物共性特征. 中国生物防治学报, 37(5): 892–903.]