

噻虫嗪对昆虫病原线虫侵染韭菜迟眼蕈蚊能力的影响^{*}

武海斌^{1,3**} 凌 飞² 官庆涛¹ 付 丽¹ 许永玉^{3***} 孙瑞红^{1***}

(1. 山东省果树研究所, 泰安 271000; 2. 山东日照国际海洋城投资有限公司, 日照 276800;

3. 山东农业大学植物保护学院, 泰安 271018)

摘 要 【目的】为提高昆虫病原线虫对韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang 幼虫的防治效果, 将昆虫病原线虫与环境友好型化学杀虫剂混用是一条有效途径。【方法】测定了噻虫嗪与 6 个昆虫病原线虫品系混用对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果, 以及温度和土壤含水量对作用效果的影响, 并进行了田间验证。【结果】田间推荐浓度噻虫嗪 (100 mg·L⁻¹) 对 6 种供试线虫存活无显著影响。处理后 3 d, 低浓度噻虫嗪 (15 mg·L⁻¹) 分别与 6 品系线虫混合后处理韭菜迟眼蕈蚊幼虫, 其死亡率明显高于线虫和噻虫嗪单用处理。小卷蛾斯氏线虫 SF-SN+噻虫嗪、印度异小杆线虫 LN2+噻虫嗪和小卷蛾斯氏线虫 All+噻虫嗪 3 种组合发挥杀虫作用的最适温度范围分别为 20~25、25~30 和 25~30, 显著高于其他温度; 最适土壤含水量范围为 10%~18%, 也显著高于其他湿度。大田条件下, 施用后 7 d, 单用噻虫嗪、线虫+噻虫嗪组合处理对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果显著高于单线虫, 且以芜菁夜蛾斯氏线虫 SF-SN+噻虫嗪的防治效果最高, 达到 93% 以上。【结论】芜菁夜蛾斯氏线虫 SF-SN 品系与噻虫嗪组合联合防治韭菜迟眼蕈蚊效果最好。

关键词 昆虫病原线虫, 噻虫嗪, 韭菜迟眼蕈蚊, 混合使用

Evaluation of the effects of infection by different entomopathogenic nematodes and thiamethoxam on *Bradysia odoriphaga*

WU Hai-Bin^{1,3**} LING Fei² GONG Qing-Tao¹ FU Li¹ XU Yong-Yu^{3***} SUN Rui-Hong^{1***}

(1. Shandong Institute of Pomology, Tai'an 271000, China; 2. Shandong Rizhao International Ocean City Investment CO.

LTD, Rizhao 276800, China; 3. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract 【Objectives】To increase the effectiveness of controlling *Bradysia odoriphaga* with entomopathogenic nematodes, and to screen pesticides as synergists for entomopathogenic nematodes. 【Methods】The survival rate and infectivity of six entomopathogenic nematodes (*Steinernema carpocapsae* NC116, *S. carpocapsae* All, *S. longicaudum* X-7, *S. feltiae* SF-SN, *Heterorhabditis bacteriophora* H06 and *H. indica* LN2) were tested after dipping them in a commonly used pesticide (25% water dispersible granules of thiamethoxam). The effects of treatment with six nematodes and low concentrations of thiamethoxam (12 mg·L⁻¹) on 3rd instar larvae were determined. Interactions between three kinds of nematodes (*S. feltiae* SF-SN, *H. indica* LN2 and *S. carpocapsae* All), and low concentrations of thiamethoxam (30 mg·L⁻¹), were evaluated under various temperature and humidity conditions and further tested under greenhouse conditions. 【Results】The recommended concentration of thiamethoxam (100 mg·L⁻¹) had no effect on nematode survival. Mortality of *B. odoriphaga* treated with a combination of six nematodes and a low concentration thiamethoxam (12 mg·L⁻¹) was higher after 3 d than that of larvae that had been treated with thiamethoxam and any one nematode. Mortality of *B. odoriphaga* treated with *S. feltiae* SF-SN+ thiamethoxam, *H. indica* LN2+ thiamethoxam and *S. carpocapsae* All+ thiamethoxam was higher at 20–25°C, 25–30°C, and 25–30°C, respectively, than at other temperatures. The optimum substrate moisture level for these treatments was 10%–18%.

*资助项目 Supported projects: 公益性行业 (农业) 科研专项 (201303027); 山东省农业科学院青年科研基金 (2015YQN30)

**第一作者 First author, E-mail: jinghaijiangxuan@126.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xuyy@sdaa.edu.cn; sruihong@126.com

收稿日期 Received: 2016-11-01, 接受日期 Accepted: 2016-11-10

The results of greenhouse trials show that a combination treatment (*S. feltiae* SF-SN+ thiamethoxam) achieved > 93 % better control than treatment with thiamethoxam (100 mg·a.i./L) alone after 7 d. **[Conclusion]** The *S. feltiae* SF-SN+ thiamethoxam combination appears an effective way of controlling *B. odoriphaga*.

Key words entomopathogens nematodes, thiamethoxam, *Bradysia odoriphaga*, combination

韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* Yang *et al* Zhang 是主要的根蛆类害虫。该虫取食范围广, 可为害百合科、菊科、藜科、十字花科、葫芦科、伞形科等 7 科 30 多种蔬菜, 其中以韭菜受害最重 (李贤贤等, 2014)。该虫在华北露地每年发生 4~6 代, 世代重叠严重, 以幼虫在韭菜鳞茎内或韭根周围 3~4 cm 表土层休眠越冬, 春、秋两季发生最重。在保护地韭菜栽培中, 温湿度条件适合韭菜迟眼蕈蚊的生长发育, 故其能够持续猖獗危害 (王贵香等, 2012)。目前, 防治韭菜迟眼蕈蚊仍以化学杀虫剂为主, 常使用有机磷类, 氨基甲酸酯类和新烟碱杀虫剂, 如辛硫磷、吡虫啉和毒死蜱等进行灌根 (Ma *et al.*, 2013), 化学药剂的长期使用, 不仅导致抗药性产生, 还严重影响韭菜的食用品质, 甚至出现韭菜产品食用安全等一系列问题 (王萍等, 2011)。

昆虫病原线虫 (Entomopathogenic nematodes, EPNs) 作为一种有潜能的生物防治因子, 对寄主有主动搜寻能力, 可有效防治多种土栖性害虫 (Mason and Wright, 1997)。但是, 与化学杀虫剂相比, 昆虫病原线虫杀虫效果缓慢且不稳定 (Georgis and Gaugler, 1991), 故在生产上难于推广。为此, 研究人员开始将生物防治与化学防治结合来防治害虫, 并已取得较好效果。王玉东等 (2012) 将低浓度吡虫啉与长尾斯氏线虫 *Steinernema longicaudum* X-7 线虫混用后处理暗黑金龟 *Holotrichia parallela* 2 龄幼虫, 杀虫效果明显提高。除虫脲与长尾斯氏线虫 *S. longicaudum* X-7 线虫混用处理卵圆齿爪鳃金龟 *Holotrichia ovata* 3 龄幼虫, 表现为增效作用 (张中润等, 2006)。王果红等 (2007) 利用小卷蛾斯氏线虫 *S. carpocapsae* All 品系与毒死蜱、吡虫啉混用防治褐纹甘薯象 *Rhabdoscelus lineaticollis* 明显优于杀虫剂单用的防效。孙瑞红和李爱华 (2007) 利用印度异小杆线虫 *Heterorhabdits indica* LN2

与低毒化学药剂混用处理 4 龄韭菜迟眼蕈蚊, 杀虫效果明显提高。武海斌等 (2014) 在室内利用 3 种杀虫剂吡虫啉、毒死蜱和高效氯氟菊酯分别与 3 品系线虫嗜菌异小杆线虫 *H. bacteriophora* Taishan strain H06、小卷蛾斯氏线虫 All 和芜菁夜蛾斯氏线虫 *S. feltiae* SF-SN 混合后处理韭菜迟眼蕈蚊, 韭菜迟眼蕈蚊的死亡率明显高于线虫和杀虫剂单用处理。

随着人们对绿色无公害蔬菜需求量的增加, 积极推广无公害防治技术来减少农药使用量势在必行。然而昆虫病原线虫的应用受到线虫的种类及品系、寄主昆虫、环境条件、施用技术及与其他杀虫因子相互作用的影响 (魏洪义等, 2000)。温度和湿度决定了昆虫病原线虫的存活、生长发育、繁殖、迁移活动、性比, 直接影响到昆虫病原线虫寻找寄主行为过程, 从而影响对寄主的死亡速率 (Dunphy and Webster, 1986)。因此, 不同种 (品系) 线虫寻找寄主行为的最适温度、湿度不同 (李慧萍和韩日畴, 2007)。雷利平等 (2013)、刘树森等 (2010) 分别用嗜菌异小杆线虫 *H. bacteriophora* 线虫侵染二点委夜蛾 *Athetis lepigone* 幼虫和暗黑鳃金龟 *Holotrichia parallela* Motschulsky 幼虫, 发现以 25 和 30 的致病力较高。为进一步发挥昆虫病原线虫与农药联用防治害虫优势, 本研究探讨了低剂量化学杀虫剂噻虫嗪与不同品系的昆虫病原线虫混用对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果, 以及发挥两者混用的最适温度、湿度, 并在田间条件下验证了两者的混用对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果, 旨在完善田间应用防治技术。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫、昆虫病原线虫、杀虫剂

韭菜迟眼蕈蚊从山东泰安韭菜田采集, 在室内饲养 3 代后取 3 龄幼虫备用, 饲养条件为温度

(22 ± 1)、湿度 75%、自然光照。

斯氏线虫属: 小卷蛾斯氏线虫 NC116(简称 NC116)、小卷蛾斯氏线虫 All(简称 All)、长尾斯氏线虫 X-7(简称 X-7)、芜菁夜蛾斯氏线虫 *S. feltiae* SF-SN(简称 Sf); 异小杆线虫属: 嗜菌异小杆线虫 H06(简称 H06)、印度异小杆线虫 LN2(简称 LN2)。上述线虫均用大蜡螟 *Galleria mellonella* 老熟幼虫活体繁殖获得侵染期幼虫。

韭菜品种: 独根红, 山东省寿光市大丰种苗有限公司。

杀虫剂: 25% 噻虫嗪(Thiamethoxam: 简称 Th)) 水分散粒剂, 东莞市瑞德丰生物科技有限公司。

1.2 线虫的耐药性测定

参照武海斌等(2015)稀释线虫与药剂的方法, 用蒸馏水将 6 种昆虫病原线虫母液分别稀释为 $1\ 000\ \text{IJS} \cdot \text{mL}^{-1}$, 噻虫嗪的浓度设为 $100\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (田间推荐剂量)。线虫与噻虫嗪以 1:100 的比例均匀混合, 每个处理设 3 次重复, 放置在 200 mL 的玻璃烧杯内, 以蒸馏水配制的线虫悬浮液作空白对照。在(25 ± 1)的条件下放置 36 h, 每个重复摇匀后随机取 0.1 mL 混合液, 在显微镜下检查其中线虫的存活数量, 计算存活率。若药剂对线虫的致死作用或者亚致死作用不超过 10%, 则继续测定药剂对线虫侵染率的影响。

参照魏洪义等(1991)判定昆虫病原线虫对药剂的反应标准: (1) 死亡: 身体僵直或卷曲, 不活动, 对针刺无反应; (2) 亚致死: 身体卷曲, 由于药剂麻痹作用引起痉挛性或抽搐性活动, 对针刺无反应或反应非常迟缓; (3) 不受药剂影响: 与对照线虫一样, 身体活动舒展或静止不动, 静止的线虫经探针触碰后反应迅速。

1.3 韭菜迟眼蕈蚊室内毒力测定

根据噻虫嗪对 4 龄韭菜迟眼蕈蚊幼虫的 LC_{50} (张鹏等, 2014), 设噻虫嗪单独处理浓度为 $15\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、线虫(100 条/虫)单独处理、线虫(100 条/虫)与噻虫嗪($15\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)混合处理和清水对照。采用培养皿滤纸法(孙瑞红和李爱华, 2007), 即在直径 9 cm 的玻璃培养皿中放

两张中速滤纸, 放入 30 头 4 龄韭菜迟眼蕈蚊幼虫和适量韭菜茎段, 分别滴加各处理液 1.5 mL。置于温度(25 ± 1)、湿度(60 ± 10)%的培养箱内。每处理重复 4 次, 于处理后 3 d 用小毛笔尖轻触虫体, 不动者记为死亡, 计算死亡率和校正死亡率。

1.4 温度对韭菜迟眼蕈蚊毒力效果的影响

根据 1.3 试验筛选得到的高致病力线虫品系 Sf、LN2 和 All, 进行不同温度条件下对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的评价试验。试验设噻虫嗪单独处理($30\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、线虫(200 条/虫)单独处理、线虫(200 条/虫)与噻虫嗪($30\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)混合处理和清水对照。参照孙瑞红和李爱华(2007)小杯土壤测定法的基础上, 采用培养皿土壤测定法, 将取自田间的土壤(土壤成分沙 淤泥 黏土=50 35 15, pH6.5)经 120 °C 高温干燥。将干燥后的土壤装入直径 9 cm 的玻璃培养皿中, 每个培养皿中加入 15 g 土壤, 加入适量韭菜茎段后, 分别加入不同处理的悬浮液 1.67 mL 拌匀, 使土壤含水量为 10%。放入 30 头 3 龄韭菜迟眼蕈蚊, 分别置于 10、15、20、25、30 °C 的培养箱内。每处理重复 3 次, 于处理后 5 d 检查韭菜迟眼蕈蚊死亡虫数, 计算死亡率和校正死亡率。

1.5 土壤含水量对韭菜迟眼蕈蚊毒力效果的影响

利用 1.3 试验筛选得到高致病力线虫品系 Sf、LN2 和 All 品系, 进行不同土壤含水量条件下对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的评价试验。土壤含水量分别设置为 2%、6%、10%、14%和 18%, 盛放在玻璃培养皿内, 置于温度(22 ± 1) °C 的培养箱内。每处理重复 3 次, 其余处理方法同 1.4。于处理后 5 d 检查韭菜迟眼蕈蚊死亡虫数, 计算死亡率和校正死亡率。

1.6 噻虫嗪与线虫混用对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的田间测定

试验设在山东省果树所万吉山实验基地塑料大棚内, 试验地为疏松、通气性好的砂壤土。平均气温为 20.8 °C, 韭菜品种为独根红, 2 年生。试验前调查韭菜地韭菜迟眼蕈蚊幼虫数量, 选择

韭菜迟眼蕈蚊幼虫数量基本一致的地块进行试验, 小区面积 20 m², 不同处理间设置隔离区, 重复 4 次, 随机排列。分别用线虫、噻虫嗪、线虫+噻虫嗪悬浮液对韭菜进行灌根。试验设单用线虫(3 亿条/667 m²)、单用噻虫嗪(100 mg·L⁻¹)、线虫(1.5 亿条/667 m²)+噻虫嗪(30 mg·L⁻¹)及清水对照 4 个处理。分别于药后 3 d 和 7 d, 采用“Z”形取样法在每小区调查 5 个点, 每点调查 5 株。通过挖韭菜根的方法, 调查并记录每株韭菜迟眼蕈蚊幼虫活虫数, 计算防虫效果。防虫效果=[(空白对照区活虫数-处理区活虫数)/空白对照区活虫数]×100%。

1.7 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 表格处理软件和 SPSS Base Ver.19.0 统计软件进行数据分析。

由 χ^2 独立性检验判断线虫与化学药剂对韭菜迟眼蕈蚊的联合作用类型(张中润等, 2006; 王玉东等, 2012)。 $M = [M_N + M_I(1 - M_N)]$; $M_E = M \times N$; $\chi^2 = (M_{NI} - M_E)^2 / M_E$, 其中, M 、 M_E 分别表示线虫与各药剂混用对供试昆虫的期望致死率及致死数; M_N 和 M_I 分别为线虫和各药剂单独处理供试昆虫的校正死亡率; M_{NI} 为线虫与各药剂混用对供试昆虫的实际校正死亡率; N 为供试昆虫总数。

线虫与各药剂混用后联合作用类型的判断依据为: 当 $\chi^2 < 3.84$ ($df=1$ 和 $P=0.05$) 时, 显示两种杀虫因子混用表现为相加作用(Additivity), 即两种杀虫因子混用后的毒力和各因子毒力的总和相似; 当 $\chi^2 \geq 3.84$ ($df=1$ 和 $P=0.05$) 及 $M_{NI} < M_E$ 时, 显示两种杀虫因子混用表现为拮抗作用(Antagonism), 即两种杀虫因子混用后的毒力明显低于各因子毒力的总和; 当 $\chi^2 \geq 3.84$ ($df=1$ 和 $P=0.05$) 及 $M_{NI} > M_E$ 时, 显示两种杀虫因子混用表现为增效作用(Synergism), 即两种杀虫因子混用后的毒力明显超过各因子毒力的总和(王玉东等, 2012)。

2 结果与分析

2.1 噻虫嗪对昆虫病原线虫的影响

分别用噻虫嗪田间推荐剂量(100 mg·L⁻¹)药液连续浸泡 6 个供试线虫品系, 36 h 检查发现, 该浓度噻虫嗪对 6 种供试线虫均无亚致死作用, 只有不同程度的死亡现象, 但平均死亡率均低于 3%, 且噻虫嗪处理的线虫死亡率与空白对照差异不显著(图 1)。

2.2 线虫与噻虫嗪对韭菜迟眼蕈蚊的交互作用

不同品系的昆虫病原线虫对韭菜迟眼蕈蚊

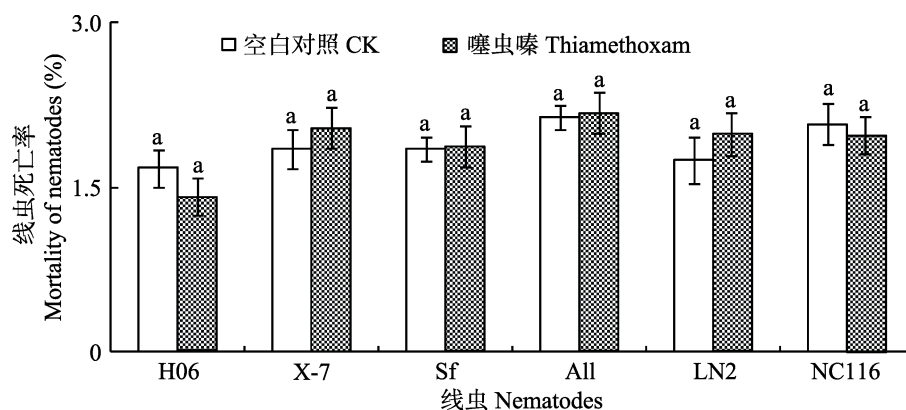


图 1 噻虫嗪对 6 种线虫品系的影响

Fig. 1 Effect of six EPN strains treated with thiamethoxam

柱上标有相同字母表示在 5% 显著水平下同种线虫在处理之间差异不显著 (Tukey 法检验: $P > 0.05$)。

H06、X-7、Sf、All、LN2 和 NC116 分别表示嗜菌异小杆线虫 H06、长尾斯氏线虫 X-7、茼蒿夜蛾斯氏线虫 SF-SN、小卷蛾斯氏线虫 All、印度异小杆线虫 LN2 和小卷蛾斯氏线虫 NC116。

Histograms with the same letters at the same nematodes are not statistically different at the 0.05 level by Tukey test. H06, X-7, Sf, All, LN2 and NC116 represent *H. bacteriophora* H06, *S. longicaudum* X-7, *S. feltiae* SF-SN, *S. carpocapsae* All, *H. indica* LN2 and *S. carpocapsae* NC116, respectively.

幼虫具有不同程度的致病力,致病力较高的品系是 LN2、Sf 和 X-7,其中致病力最高的是 LN2 品系。噻虫嗪(15 mg·L⁻¹)分别与 6 品系线虫混用后的杀虫效果比噻虫嗪同等浓度单用、线虫单用均明显提高,其中与 Sf、All、LN2 和 NC116 品系混用表现出增效作用,与 X-7 和 H06 品系表现出相加作用。噻虫嗪分别与 Sf、LN2 混用对韭菜迟眼蕈蚊作用效果显著高于与其他品系线虫的混用,且两者之间对韭菜迟眼蕈蚊幼虫的作用效果差异不显著(表 1)。

表 1 不同品系昆虫病原线虫与噻虫嗪对 4 龄韭菜迟眼蕈蚊的交互作用
Table 1 Interaction of various EPN species and thiamethoxam on 4th instar *Bradysia odoriphaga*

处理 Treatment	<i>D</i> _I (%)	<i>D</i> _N (%)	<i>D</i> _{NI} (%)	<i>M</i> _E	<i>M</i> _{NI}	χ ²	作用类型 Type of interaction
Sf+噻虫嗪 Sf+Th	55.46±2.94	17.65±2.84	91.60±2.17 c	75.98	109.92	15.15	增效 Synergistic
All+噻虫嗪 All+Th	55.46±2.94	12.61±3.14	89.08±2.87 bc	73.29	106.89	15.40	增效 Synergistic
X-7+噻虫嗪 X-7+Th	55.46±2.94	13.45±2.47	73.95±3.18 ab	73.74	88.74	3.05	相加 Additivity
LN ₂ +噻虫嗪 LN ₂ +Th	55.46±2.94	26.05±1.95	93.28±3.63 c	80.47	111.93	12.29	增效 Synergistic
H06+噻虫嗪 H06+Th	55.46±2.94	9.24±2.45	69.75±3.22 a	71.49	83.69	2.08	相加 Additivity
NC116+噻虫嗪 NC116+Th	55.46±2.94	10.08±3.15	74.79±2.33 ab	71.94	89.74	4.40	增效 Synergistic

表中不同字母表示在 5%显著水平下处理组之间差异显著(Tukey 法检验: $P < 0.05$)。*D*_I、*D*_N 和 *D*_{NI} 分别表示噻虫嗪、线虫、噻虫嗪+线虫混用下韭菜迟眼蕈蚊的校正死亡率。*M*_E 和 *M*_{NI} 分别表示噻虫嗪+线虫混用下韭菜迟眼蕈蚊的期望死亡数和校正死亡数。Th: 噻虫嗪。下表同。

Values in the same column followed by different letters are statistically different at the 0.05 level by Tukey test ($P > 0.05$). *D*_I、*D*_N and *D*_{NI} represent corrected mortality rate of *B. odoriphaga* treated with thiamethoxam, nematodes, thiamethoxam + nematodes, respectively. *M*_E and *M*_{NI} represent the expected mortality and the observed mortality of *B. odoriphaga* treated with thiamethoxam + nematodes respectively. Th: thiamethoxam. The same below.

2.3 不同温度条件下线虫、噻虫嗪和线虫+噻虫嗪对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的影响

在不同温度条件下,同一处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果不同,随着温度升高,单线虫、单噻虫嗪、线虫+噻虫嗪对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果显著提高。在 20、25、30 时,Sf 和 All 品系线虫对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果分别显著高于 10 和 15。在 25 和 30 时, LN2 品系线虫对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果达到了 40%以上,分别显著高于 10、15、20。因此, Sf、LN2 和 All 品系线虫发挥杀虫作用的最适温度范围分别为 20~30、25~30 和 20~30。在 20 和 25 时, Sf+噻虫嗪的防治效果显著高于 10、15、30,且 15 和 30 时防治效果差异不显著。在 25 和 30 时, LN2+噻虫嗪和 All+噻虫嗪的防治效果分别显著高于 10、15、20,且 25 和 30 时防治效果差异不显著。因此, Sf+噻虫嗪、LN2+噻虫嗪和 All+噻虫嗪 3 种组合发挥杀虫作用的最适温度范围分别为 20~25、25~30 和 25~30。

相同温度条件下,不同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果也不同。在 10、15 时, Sf+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果显著高于 LN2+噻虫嗪组合,与 All+噻虫嗪组合差异不显著。在 20 时, Sf+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果显著高于 LN2+噻虫嗪组合和 All+噻虫嗪组合。在 25 时, 3 种组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果差异不显著。而在 30 时, LN2+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果显著高于 Sf+噻虫嗪组合,与 All+噻虫嗪组合差异不显著。

2.4 不同土壤含水量条件下线虫、噻虫嗪和线虫+噻虫嗪对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的影响

图 3 结果表明,在不同湿度下,相同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果不同。随着土壤含水量提高,单线虫、单噻虫嗪、线虫+噻虫嗪对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果显著提高。在含水量 10%、14%和 18%时,单线虫、线虫+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果分别显著高于 2%和 6%。其中单线虫、线虫+噻虫嗪组合最适土壤含水量范围均为 10%~18%。

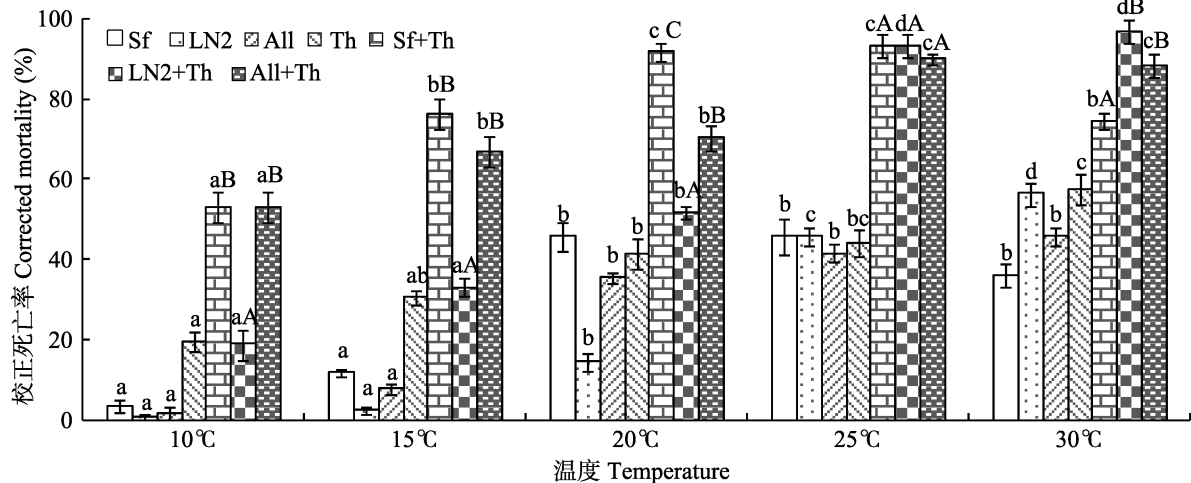


图 2 不同温度下不同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果

Fig. 2 Efficacy of different treatment in different temperature against *Bradysia odoriphaga*

柱上标有大写字母表示同一温度下 3 品系线虫与噻虫嗪混用对韭菜迟眼蕈蚊的交互作用的差异是否显著，柱上标有小写字母表示不同温度下同一处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果的差异是否显著；字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)，字母相同表示差异不显著 (Tukey 法检验: $P < 0.05$)。Sf、LN2、All、Th、Sf+Th、LN2+Th 和 All+Th 分别表示茼蒿夜蛾斯氏线虫 SF-SN、印度异小杆线虫 LN2、小卷蛾斯氏线虫 All、噻虫嗪、茼蒿夜蛾斯氏线虫 SF-SN+噻虫嗪、印度异小杆线虫 LN2+噻虫嗪和小卷蛾斯氏线虫 All+噻虫嗪。

Histograms with different uppercase letters indicate if the interaction of three EPN species and thiamethoxam on *B. odoriphaga* of in same temperature are significant different at the 0.05 level by Tukey test. Histograms with different lowercase letters indicate if the efficacy of the same treatment against *B. odoriphaga* in different temperature are significant different at the 0.05 level by Tukey test. Sf, LN2, All, Th, Sf+Th, LN2+Th and All+Th represent *S. feltiae* SF-SN, *H. indica* LN2, *S. carpocapsae* All, thiamethoxam, *S. feltiae* SF-SN+ thiamethoxam, *H. indica* LN2+ thiamethoxam and *S. carpocapsae* All+ thiamethoxam, respectively.

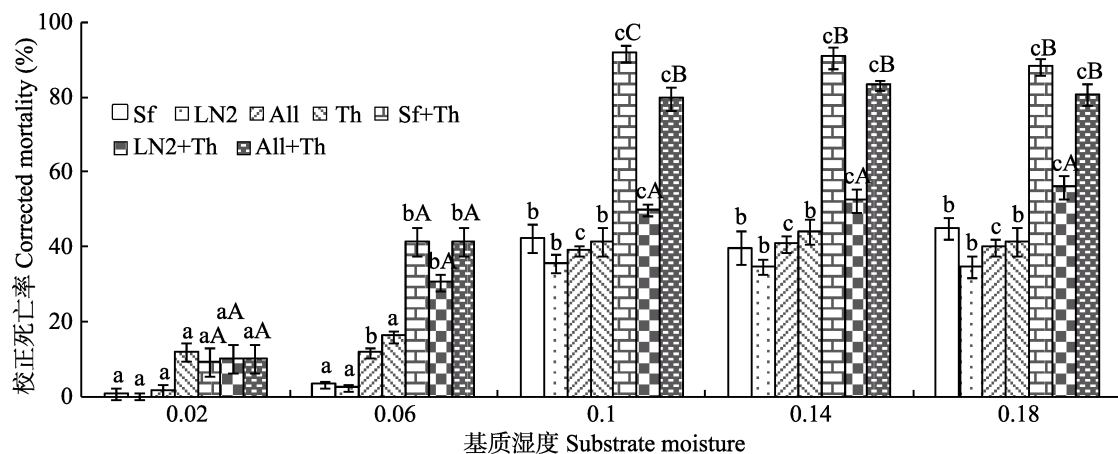


图 3 不同湿度下不同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果

Fig. 3 Efficacy of different treatment in different substrate moisture against *Bradysia odoriphaga*

柱上标有大写字母表示同一含水量下 3 品系线虫与噻虫嗪混用对韭菜迟眼蕈蚊的交互作用的差异是否显著，柱上标有小写字母表示不同含水量下同一处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果的差异是否显著；字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)，字母相同表示差异不显著 (Tukey 法检验: $P < 0.05$)。

Histograms with different uppercase letters indicate if the interaction of three EPN species and thiamethoxam on *B. odoriphaga* of in same substrate moisture are significant different at the 0.05 level by Tukey test. Histograms with different lowercase letters indicate if the efficacy of the same treatment against *B. odoriphaga* in different substrate moisture are significant different at the 0.05 level by Tukey test.

相同湿度下,不同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果也不同。在 2% 和 6% 含水量时,3 种线虫分别与噻虫嗪组合后对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果差异不显著。在 10%、14% 和 18% 含水量时, Sf+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果均显著高于 LN2+噻虫嗪组合,与 All+噻虫嗪组合差异不显著。

2.5 昆虫病原线虫与噻虫嗪组合防治韭菜迟眼蕈蚊的田间效果

图 4 结果表明:随着时间延长,各处理对韭菜迟眼蕈蚊的防治效果逐步提高。处理 3 d,单用噻虫嗪 ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Sf ($1.5 \text{ 亿条}/667 \text{ m}^2$) + 噻虫嗪 ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) All ($1.5 \text{ 亿条}/667 \text{ m}^2$) + 噻虫嗪 ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的防治效果显著高于单线虫 ($3 \text{ 亿条}/667 \text{ m}^2$) LN2 ($1.5 \text{ 亿条}/667 \text{ m}^2$) + 噻虫嗪 ($30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),且单噻虫嗪、Sf+噻虫嗪和 All+噻虫嗪之间差异不显著。处理 7 d,单用噻虫嗪、线虫+噻虫嗪组合防治效果显著高于单线虫,且 Sf+噻虫嗪的防治效果最高,达到 93% 以上,显著高于 LN2+噻虫嗪,但与单噻虫嗪、All+噻虫嗪组合的差异不显著,因此可取代单用噻虫嗪进行防治。

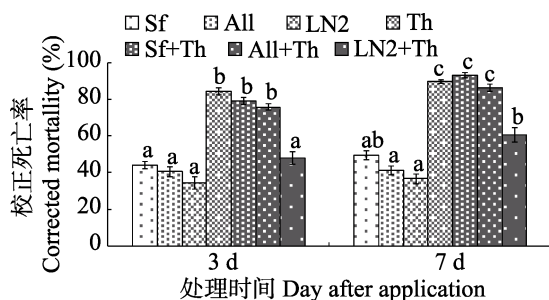


图 4 不同处理对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果

Fig. 4 Efficacy of different treatment against *Bradysia odoriphaga*

柱上标有相同字母表示在 5% 显著水平下同一时间内不同处理组之间差异不显著 (Tukey 法检验: $P > 0.05$)。

Histograms with the same letters at the same time are not statistically different at the 0.05 level by Tukey test.

3 讨论

昆虫病原线虫与环境友好型化学杀虫剂混用防治地下害虫是一个有效途径 (武海斌等,

2015), 其中选择对昆虫病原线虫安全的杀虫剂则是混用成功的关键 (王玉东等, 2012)。本研究中,利用田间推荐剂量的噻虫嗪药液浸泡昆虫病原线虫,发现噻虫嗪对 6 品系供试线虫均无亚致死作用,而且致死率很低,与空白对照差异不显著。前期研究表明,吡虫啉对小卷蛾斯氏线虫 All、茼蒿夜蛾斯氏线虫 SF-SN 和嗜菌异小杆线虫 H06 的存活同样无显著影响 (武海斌等, 2014)。由此可以推测,新烟碱类杀虫剂可作为一类与昆虫病原线虫混用的安全药剂。而筛选对韭菜迟眼蕈蚊高致病力的昆虫病原线虫品系,是线虫与杀虫剂混用的基础。本试验中 6 品系昆虫病原线虫均能侵染韭菜迟眼蕈蚊 3 龄幼虫,但不同昆虫病原线虫间致病力不同。致病力较高的品系为 *H. indica* LN2、*S. feltiae* SF-SN 和 *S. longicaudum* X-7。噻虫嗪 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别与 6 品系线虫混用的杀虫效果比噻虫嗪同等浓度单用、线虫单用均明显提高,且都表现出增效或相加作用。噻虫嗪分别与 *H. indica* LN2 和 *S. feltiae* 混用对韭菜迟眼蕈蚊的致死效果显著高于与其他品系线虫的混用。

本试验研究了线虫+噻虫嗪组合在不同温度、湿度条件下对韭菜迟眼蕈蚊作用效果的影响。其中 Sf+噻虫嗪、LN2+噻虫嗪和 All+噻虫嗪 3 种组合发挥杀虫作用的最适温度范围分别为 20~25、25~30 和 25~30,显著高于其他温度;而 3 种组合最适土壤含水量范围为 10%~18%,也显著高于其他湿度。结果表明,不同线虫品系+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊致病力的最适湿度范围基本一致,而最适温度范围不同。这也同样可以解释在同一湿度下,不同线虫品系与噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊的作用效果的差异是由于线虫+噻虫嗪组合作用于韭菜迟眼蕈蚊的最适温度范围不同所致。

一些研究发现,昆虫病原线虫与杀虫剂混用后,一方面可降低害虫对线虫的防御能力,利于线虫侵入;另一方面可能是药剂刺激线虫的感受神经,致使线虫兴奋,运动增加,导致线虫对害虫的搜索和攻击能力增强 (Fallon *et al.*, 2004)。本研究表明,在塑料大棚韭菜田噻虫嗪与不同品

系线虫混用的杀虫效果比线虫单用明显提高。施用后 7 d, 单用噻虫嗪、线虫+噻虫嗪组合防治效果显著高于单线虫, 且 *S. feltiae* Sf+噻虫嗪的防治效果最高, 达到 93% 以上, 显著高于 *H. indica* LN2+噻虫嗪, 与单噻虫嗪、*S. carpocapsae* All+噻虫嗪组合的差异不显著, 可取代单用噻虫嗪进行防治。此结果与室内研究结果一致, *H. indica* 品系是一种适合于较高温度条件下 (25~30 °C) 防治害虫的线虫 (Jagdale *et al.*, 2007), *S. feltiae* 品系则是一种低温型且用于防治双翅目害虫的重要天敌 (Peters, 1996)。同样, 韭菜迟眼蕈蚊属于一种低温型害虫, 在温度 10~15 °C 时即可进行生长发育并造成危害 (Zhang *et al.*, 2014)。另一方面, 试验时棚内平均气温为 20.8 °C, 适宜 *S. feltiae*-Sf 品系线虫发挥寄生韭菜迟眼蕈蚊的作用。因此可以初步将 *S. feltiae* Sf+噻虫嗪或 *S. carpocapsae* All+噻虫嗪组合作为防治韭菜迟眼蕈蚊的较好组合。这不仅能大幅提高对韭菜迟眼蕈蚊防治效果, 减少昆虫病原线虫与噻虫嗪施用剂量, 而且能降低农药对环境的破坏程度, 具有重要的生态和环保意义。但是, 本研究的不足之处在于作为天敌的昆虫病原线虫, 仅仅研究了施用后 7 d 时的防治效果。为有效发挥昆虫病原线虫存活、寄生以及繁殖等持续控制害虫的能力, 在田间条件下, 应进一步研究不同线虫品系+噻虫嗪组合对韭菜迟眼蕈蚊年发生情况的控制效果以及不同组合施用技术、施用剂量等因素对韭菜迟眼蕈蚊防治的影响。

参考文献 (References)

- Dunphy GB, Webster JM, 1986. Temperature effects on the growth and virulence of *Steinernema Felatae* strains and *Heterorhabditis Heliothidis*. *Journal of Nematology*, 18(2): 270–272.
- Fallon DJ, Solter LF, Keena M, Manus MM, Cate JR, Hanks LM. 2004. Susceptibility of Asian long horned beetle, *Anoplophora glabripennis* (Motschulsky) (Coleoptera: Cerambycidae) to entomopathogenic nematodes. *Biological Control*, 30: 430–438.
- Georgis R, Gaugler R, 1991. Predictability in biological control using entomopathogenic nematodes. *Journal of Economic Entomology*, 84(3): 713–720.
- Jagdale GB, Casey ML, Canas L, Grewal PS, 2007. Effect of entomopathogenic nematodes species, split application and potting medium on the control of the fungus gnat, *Bradysia difformis* (Diptera: Sciaridae), in the greenhouse at alternation cold and warm temperatures. *Biological Control*, 43 (1): 23–30.
- Lei LP, Nangong ZY, Li LT, Dong ZP, Wang QY, 2013. Efficacy of entomopathogenic nematodes against *Athetis lepigone*. *Natural Enemies of Insects*, 35(2): 171–175. [雷利平, 南宫自艳, 李立涛, 董志平, 王勤英, 2013. 昆虫病原线虫对二点委夜蛾致病力的研究. 环境昆虫学报, 35(2): 171–175.]
- Li HP, Han RC, 2007. Advances in the researches on the infective behaviors of entomopathogenic nematodes. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(5): 637–642. [李慧萍, 韩日畴, 2007. 昆虫病原线虫感染寄主行为研究进展. 昆虫知识, 44(5): 637–642.]
- Li XX, Ma XD, Xue M, Zhao HP, Li ZX, 2014. Toxic effects of clothianidin and other five kinds of insecticides to *Bradysia odoriphaga*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 41(2): 225–229. [李贤贤, 马晓丹, 薛明, 赵海鹏, 李朝霞, 2014. 噻虫胺等药剂对韭菜迟眼蕈蚊的致毒效应. 植物保护学报, 41(2): 225–229.]
- Liu SS, Li KB, Liu CQ, Wang YL, Yin J, Cao YZ, 2010. Virulence of *Heterorhabditis bacteriophora* strain Cangzhou to larvae of *Holotrichia parallela*. *Plant Protection*, 36(5): 96–100. [刘树森, 李克斌, 刘春琴, 王庆雷, 尹姣, 曹雅忠, 2010. 嗜菌异小杆线虫沧州品系对暗黑鳃金龟幼虫的致病力. 植物保护, 36(5): 96–100.]
- Ma J, Chen SL, Moens M, Han RC, Clercq PD, 2013. Efficacy of entomopathogenic nematodes (Rhabditida: steinernematidae and Heterorhabditidae) against the chives gnat, *Bradysia odoriphaga*. *Journal of Pest Science*, 86(3): 551–561.
- Mason JM, Wright DJ, 1997. Potential for the control of *Plutella xylostella* larvae with entomopathogenic nematodes. *Journal of Invertebrate Pathology*, 70(3): 234–242.
- Peters A, 1996. The natural host range of *Steinernema* and *Heterorhabditis* spp. and their impact on insect populations. *Biocontrol Science and Technology*, 6(3): 389–402.
- Sun RH, Li AH, 2007. Studies on combination effect of entomopathogenic nematode H06 and insecticide against *Bradysia odoriphaga*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 9(1): 66–70. [孙瑞红, 李爱华, 2007. 昆虫病原线虫 H06 与化学杀虫剂对韭菜迟眼蕈蚊的联合作用. 农药学报, 9(1): 66–70.]
- Wang GH, Han RC, Chen JH, Cao L, 2007. Combined efficacy of entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* All and pesticide against *Rhabdoscelus lineaticollis* (Heller). *Chinese Journal of Biological Control*, 23(3): 218–222. [王果红, 韩日畴, 陈静华, 曹莉, 2007. 利用昆虫病原线虫与化学农药混用防治褐纹甘薯象. 中国生物防治, 23(3): 218–222.]

- Wang GX, Pan YG, Zhu JH, Yu XB, 2012. Biological characteristics and integrated control methods of *Bradysia odoriphaga*. *Rural Economy and Science-Technology*, 23(6): 180–181. [王桂香, 潘运国, 朱继宏, 于孝保, 2012. 韭菜迟眼蕈蚊的生物学特性及综合防治技术. *农村经济与科技*, 23(6): 180–181.]
- Wang P, Qin YC, Pan PL, Li PY, 2011. The analysis of the volatile component from the sugar-acetic acid-ethanol water solutions and their trapping effects on *Bradysia odoriphaga*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 38(6): 513–520. [王萍, 秦玉川, 潘鹏亮, 李鹏燕, 2011. 糖醋酒液对韭菜迟眼蕈蚊的诱杀效果及其挥发物活性成分分析. *植物保护学报*, 38(6): 513–520.]
- Wang YD, Xiao C, Yin J, Cao YZ, Li KB, 2012. Evaluation of the impacts on infection ability of entomopathogens nematodes to grub, *Holotrichia parallela* for three chemical pesticides. *Chinese Journal of Biological Control*, 28(1): 67–73. [王玉东, 肖春, 尹皎, 曹雅忠, 李克斌, 2012. 三种化学杀虫剂对病原线虫侵染暗黑鳃金龟能力的影响. *中国生物防治学报*, 28(1): 67–73.]
- Wei HY, Li F, Wu DL, 2000. Factors affecting efficacy of entomopathogenic nematodes in fields. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 22(3): 334–340. [魏洪义, 李峰, 吴德龙, 2000. 影响昆虫病原线虫田间应用效果的有关因子. *江西农业大学学报*, 22(3): 334–340.]
- Wei HY, Wang GH, Pang XF, 1991. Toxicity of several insecticides to the entomopathogens nematodes *Steinernema feltiae*. *Natural Enemies of Insects*, 13(2): 92–95. [魏洪义, 王国汉, 庞雄飞, 1991. 几种杀虫剂对斯氏线虫的毒力. *昆虫天敌*, 13(2): 92–95.]
- Wu HB, Fan K, Xin L, Cao GP, Sun RH, 2015. Virulence and control effect of entomopathogenic nematodes against *Agrotis Ypsilon* Rottemberg. *Acta Phytophylacica Sinica*, 42(2): 244–250. [武海斌, 范昆, 辛力, 曹广平, 孙瑞红, 2015. 昆虫病原线虫对小地老虎致病力测定及防治效果. *植物保护学报*, 42(2): 244–250.]
- Wu HB, Xin L, Gong QT, Zhang KP, Cao GP, Sun RH, 2014. Evaluation of the effects of infection by different entomopathogenic nematodes and chemical pesticides on *Bradysia odoriphaga*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(4): 1060–1068. [武海斌, 辛力, 宫庆涛, 张坤鹏, 曹广平, 孙瑞红, 2014. 化学杀虫剂对昆虫病原线虫侵染韭菜迟眼蕈蚊能力的影响. *应用昆虫学报*, 51(4): 1060–1068.]
- Zhang ZR, Cao L, Liu XL, Wang GH, Xu ZF, Han RC, 2006. Screening of insecticides as synergists for entomopathogenic nematodes *Steinernema longicaudum* X-7. *Chinese Bulletin of Entomology*, 43(1): 68–73. [张中润, 曹莉, 刘秀玲, 王果红, 许再福, 韩日畴, 2006. 昆虫病原线虫 *Steinernema longicaudum* X-7 增效药剂的筛选. *昆虫知识*, 43(1): 68–73.]
- Zhang P, Chen CY, Li H, Liu F, Mu W, 2014. Selective toxicity of seven neonicotinoid insecticides to *Bradysia odoriphaga* and *Eisenia foetida*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 41(1): 79–86. [张鹏, 陈澄宇, 李慧, 刘峰, 慕卫, 2014a. 七种新烟碱类杀虫剂对韭菜迟眼蕈蚊幼虫及蚯蚓的选择毒力. *植物保护学报*, 41(1): 79–86.]
- Zhang P, Liu F, Mu W, Wang QH, Li H, Chen CY, 2014. Life table study of the effects of sublethal concentrations of thiamethoxam on *Bradysia odoriphaga* Yang and Zhang. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 111: 31–37.