

小卷蛾斯氏线虫对辣椒烟粉虱的控制作用

陈向荣¹, 徐彩霞², 韩杜斌¹, 赵明¹, 周福才^{1*}

(1. 扬州大学园艺与植物保护学院, 扬州 225009; 2. 浙江绿神天敌生物科技有限公司, 杭州 310000)

摘要: 本文研究了小卷蛾斯氏线虫 *Steinernema carpocapsae* 对烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的侵染能力以及对田间辣椒烟粉虱的控制作用。结果表明, 室温 (28±2) °C, 空气湿度 (60±5) %, 辣椒叶背面湿润的条件下, 线虫约在 4 h 侵入烟粉虱若虫体内, 2~3 d 内致其死亡。不同浓度线虫对烟粉虱若虫的控制效果不同, 小卷蛾斯氏线虫 All 品系 22、16 和 13 IJs/mL 对烟粉虱高龄 (3 龄和 4 龄) 若虫的致死率分别为 42.79%, 34.74%, 29.31%, 对低龄 (1 龄和 2 龄) 若虫的致死率分别为 44.58%、41.66%、39.61%。助剂 5% d-柠檬烯可溶液剂与线虫联合使用具有促进效果, 线虫稀释 22 IJs/mL, 配合 1000 倍液 5% d-柠檬烯可溶液剂时效果最佳, 高龄若虫和低龄若虫的致死率分别达到 60.61% 和 61.55%。田间辣椒叶片表面施水量对烟粉虱的防治效果存在明显的影响, 在田间施水 1.5、1、0.5 L/m² 的条件下, 高龄若虫校正死亡率分别为 66.49%、66.50%、47.78%, 低龄若虫校正防治效果分别为 69.30%、58.52%、51.83%。综上, 喷施小卷蛾斯氏线虫对烟粉虱有一定的控制效果, 配合助剂 5% d-柠檬烯可溶液剂有促进作用, 保持辣椒叶片表面湿润可以提高对烟粉虱的防治效果。

关键词: 辣椒; 烟粉虱; 昆虫病原线虫; 小卷蛾斯氏线虫

中图分类号: S433.3 文献标识码: A 文章编号: 1005-9261(2021)01-0110-07

Control of *Bemisia tabaci* in Pepper by *Steinernema carpocapsae*

CHEN Xiangrong¹, XU Caixia², HAN Dubin¹, ZHAO Ming¹, ZHOU Fucui^{1*}

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Zhejiang Lvshen Natural Enemy Biological Technology Co., Ltd, Hangzhou 310000, China)

Abstract: Infection of *Bemisia tabaci* by *Steinernema carpocapsae* was evaluated by artificial inoculation and field control efficacy was assessed on pepper plants. Our results showed that the nematodes invaded into the whitefly nymphs in 4 h and caused nymph death in 2—3 d at the conditions of (28±2) °C, humidity of 60%, and humid pepper leaf back. The nematodes showed concentration-dependent control of *B. tabaci*. The mortalities caused by 22, 16, and 13 nematodes/mL of the nematode-containing fluids were 42.79%, 34.74%, and 29.31% in elder (third and fourth instar), respectively, and 44.58%, 41.66%, and 39.61% in younger (first and second instar) nymphs of *B. tabaci*, respectively. The combined use of adjuvant 5% d-limonene SL with the nematodes increased the control. The optimal result was observed when 300-fold dilution of nematodes was combined with 1000-fold dilution of the adjuvant, which exhibited the highest mortalities of 60.61% and 61.55% in the elder and younger nymphs, respectively. The control was also significantly affected by the humidity on the leaf surface. When water was sprayed at 1.5 L, 1 L, and 0.5 L per square meter in the field, the corrected control were 66.49%, 66.50%, and 47.78% for old nymphs, and 69.30%, 58.52%, and 51.83% for younger nymphs, respectively. Our results indicate that the nematodes have the potential control *B. tabaci*, which can be promoted by adding

收稿日期: 2020-04-18

基金项目: 江苏省科技支撑计划 (BE2017347, BE2017379-3); 江苏省农业科技自主创新资金 (CX-17-2004); 江苏省现代农业产业技术体系瓜菜创新团队 (JATS[2019]454)。

作者简介: 陈向荣, 硕士研究生, E-mail: 862809405@qq.com; *通信作者, 研究员, E-mail: fczhou@yzu.edu.cn。

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2021.01.011

adjuvants and keeping leaf surface humid.

Key words: chili; *Bemisia tabaci*; entomopathogenic nematodes; *Steinernema carpocapsae*

烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 是蔬菜上的重要害虫之一。该虫可通过吸食植物汁液造成营养流失、分泌蜜露诱发煤污病、传播植物病毒引发植物病毒病等方式使蔬菜产量和品质下降^[1,2]。随着蔬菜种植结构的改变和蔬菜种植条件的改善, 烟粉虱呈加重发生的趋势^[3]。目前生产上对烟粉虱的防控虽然有物理措施(防虫网、黄板等)和农业措施, 但由于这些措施控制效果相对较差, 加之烟粉虱发育历期短、繁殖量大、隐蔽性强, 世代重叠严重, 具有暴发为害特性, 生产上对烟粉虱的防控仍以化学措施为主^[4-7]。研究发现, 近十年来, 烟粉虱抗药性迅速增强, 传统单一的化学农药的防治效果逐年下降^[8,9], 并增加了蔬菜产品上农药残留超标的风险。因此, 探索更安全有效的防治方法越来越受到关注。

利用病原线虫防治害虫已有较长的历史, 20 世纪 30 年代就有利用线虫防治害虫的报道^[10]。20 世纪 80 年代以来, 德国、美国、澳大利亚、巴西、印度等国在昆虫病原线虫的生物学、生态学、行为学、侵染机制及在害虫防治等方面的研究取得了较快的进展^[11]。我国在昆虫病原线虫的基础和应用研究领域也卓有成效^[12], 在利用嗜菌异小杆线虫 *Heterorhabditis bacteriophora* 防治核桃云斑天牛 *Batocera lineolata* Chevrolat、印度异小杆线虫 *H. indica* LN2 防治韭蛆 *Bradysia ordoriphaga* 和小卷蛾斯氏线虫 *S. carpocapsae* A24 防治小猿叶甲 *Phaedon brassicae* Baly 等方面均取得了显著成果^[13,14]。斯氏线虫科 Steinernematidae 和异小杆线虫科 Heterorhabditidae 寄主广泛, 其体内携带共生菌具有较高毒性^[15], 能在 16~48 h 内使寄主昆虫患败血症或败毒症致死^[16], 该类线虫易于人工大量培养, 可以控制许多地下害虫和其他害虫, 因而成为害虫生物防治中较有潜力的类群^[17]。近年来, 这两类线虫已在蔬菜及其他经济作物上, 如梨小食心虫 *Grapholitha molesta* (Busck)、韭蛆、黄曲条跳甲 *Phyllotreta striolata* (Fabricius) 等害虫的防控中得到了广泛的应用^[18-20]。

近十多年来, 一些专家开始探索利用线虫防控蔬菜烟粉虱, 并取得了较好的进展。Cuthbertson 等^[21]研究发现, 在线虫处理过的番茄植株上, 烟粉虱的死亡率明显高于对照; 昆虫病原线虫 *Steinernema feeliae* 对甘薯粉虱也有较强的控制潜力, 其中对粉虱 2 龄若虫的致死率较高^[22]。另外, 生物农药(矿物油、杀虫皂、球孢白僵菌、伊斯里亚毛霉菌)和昆虫病原线虫组合能提高对烟粉虱的控制效果^[23]。但利用病原线虫进行辣椒烟粉虱的防控研究尚未见报道。本文利用小卷蛾斯氏线虫探讨了病原线虫对辣椒烟粉虱的控制作用及其田间的使用技术, 以期对蔬菜烟粉虱的绿色防控提供新的手段。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

小卷蛾斯氏线虫: All 品系, 由浙江绿神天敌生物科技有限公司生产。

助剂: 5% d-柠檬烯可溶液剂, 奥罗阿格瑞国际有限公司生产。

烟粉虱: 原始虫源采自扬州大学园艺与植物保护学院蔬菜试验地的辣椒上, 在人工气候培养箱中用非供试品种辣椒饲养 3 代以上供试(饲养条件为温度 25℃±1℃, 相对湿度 70%±5%, 光照周期 18L:6D)。

辣椒: 品种为苏椒 15, 由江苏省农业科学院蔬菜研究所提供。辣椒在普通大棚中种植, 供试时辣椒为结果期。

1.2 小卷蛾斯氏线虫的配制

取 3 个直径约 1 cm 的线虫饲养海棉球放入烧杯中, 加 300 mL 蒸馏水, 摇晃均匀, 配制成线虫母液, 感染期线虫浓度约为 6600 IJs/mL。分别用移液器吸取 0.33、0.25、0.2 mL 母液到 3 个 100 mL 烧杯中, 加蒸馏水稀释成 22、16 和 13 IJs/mL 供试浓度。

1.3 小卷蛾斯氏线虫对烟粉虱的侵染

采集主叶脉附近具有约 80 头烟粉虱若虫的新鲜辣椒叶片, 用润湿的脱脂棉球包裹辣椒叶柄, 叶片背面向上, 放置在直径 12 cm 的玻璃培养皿中。用小型喷雾器在辣椒叶片背面喷雾, 每张叶片喷试液 2 mL,

喷雾后在室温 (28 ± 2) °C 条件下用体视显微镜连续观察线虫的侵染过程, 并同步录像。试验设线虫 16 IJs/mL、线虫 16 IJs/mL+助剂 5% d-柠檬烯 1000 倍液两个处理, 每处理 3 个重复, 每次观察线虫较多区域的烟粉虱高龄 (3 龄和 4 龄, 下同) 和低龄 (1 龄和 2 龄, 下同) 若虫 20 头。若观察到烟粉虱若虫血腔内组织发生位移, 或能观察到线虫活体及虫体轮廓, 则认为侵染成功。观察期间每 2 h 给辣椒叶片喷 1 mL 蒸馏水, 以保持辣椒叶片表面湿润。

1.4 小卷蛾斯氏线虫对烟粉虱存活率的影响

采集具有烟粉虱若虫 80 头以上的新鲜辣椒叶片, 用润湿的脱脂棉球包裹辣椒叶柄, 叶片背面向上, 放置在直径 12 cm 培养皿中供试。试验设小卷蛾斯氏线虫 All 品系 22、16 和 13 IJs/mL 3 个处理, 用小喷雾器喷在辣椒叶片背面, 每张叶片喷试液 3 mL, 喷清水作对照。处理 1、2、3 d 后调查辣椒上烟粉虱的死亡率。为了减少水分蒸发, 保持辣椒叶片表面湿润, 在培养皿上覆盖保鲜膜, 保鲜膜上用解剖针打 20~30 个小孔, 以保证线虫和叶片呼吸所需的氧气。每天查虫后在叶片上喷 5 mL 蒸馏水, 以保持辣椒叶片表面湿润。

1.5 小卷蛾斯氏线虫和助剂联用对烟粉虱死亡率的影响

处理方法同 1.4。试验设线虫 22、16 和 13 IJs/mL 分别与助剂 d-柠檬烯 1000 倍液联用, 喷清水作对照。用小型喷雾器在辣椒叶片背面喷雾, 每张叶片喷试液 3 mL, 喷雾后 1、2、3 d 调查烟粉虱死亡率。

1.6 不同喷水量对小卷蛾斯氏线虫田间控制烟粉虱的影响

试验分小区进行, 每个小区 10 m²。试验使用 22 IJs/mL 的线虫悬液 100 mL/m², 喷线虫前先在辣椒叶片背面喷清水 0.5、1.0、1.5 L/m² 3 个处理, 不喷水作对照。处理 1、2、3 d 后调查各处理烟粉虱高龄和低龄若虫的死亡率。试验重复 3 次。

1.7 数据统计与分析

死亡率 (%) = 死亡数/观察总数 × 100%。死亡判定标准为: 虫体皱缩, 体色变暗。虫口减退率 (%) = (药前虫口基数 - 药后虫口基数) / 药前虫口基数 × 100%; 校正防治效果 (%) = (处理区虫口减退率 - 对照区虫口减退率) / (1 - 对照区虫口减退率) × 100%。

用 DPS 统计软件进行数据分析和 Microsoft Excel 软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 小卷蛾斯氏线虫对烟粉虱若虫的侵染

线虫能够成功侵染烟粉虱若虫虫体, 加入助剂 d-柠檬烯后线虫侵染所需时间显著减少 ($P < 0.05$)。喷施线虫初期, 线虫在液体环境中游动, 之后聚集在烟粉虱若虫的周围, 头部朝向烟粉虱虫体, 借助于液体环境游动产生动力, 试图钻破体壁。线虫在约 24 h 侵入若虫体内, 而加入助剂后线虫约 4 h 即可侵入烟粉虱若虫体内, 并不断在烟粉虱虫体内部搅动。高龄若虫可见虫体内部组织呈流动状态, 低龄若虫可见虫体内部两个黄色小点发生位移错位, 且能看见活线虫虫体轮廓 (表 1)。

表 1 不同时间被线虫侵入的烟粉虱若虫的数量

Table 1 Number of *B. tabaci* nymphs invaded by *S. carpocapsae* at different times

处理 Treatments	被线虫侵入的若虫数量 (头) Number of nymphs invaded by EPNs at different treatment times							
	0.5 h	1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h	72 h
16 IJs/mL	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	2.67 ± 0.33	4.33 ± 0.33	6.67 ± 0.33
16 IJs/mL + 5% d-柠檬烯 1000 倍液	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	1.33 ± 0.33*	2.33 ± 0.33*	4.00 ± 0.58*	6.33 ± 0.33*	9.33 ± 0.33*

注: 同列数字后 “*” 表示经 *t* 测验差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: “*” indicated significant differences between the same column by the *t* test ($P < 0.05$).

2.2 小卷蛾斯氏线虫对烟粉虱若虫死亡率的影响

线虫处理对烟粉虱若虫死亡率有明显的影响。22 IJs/mL 线虫处理后 3 d 烟粉虱低龄和高龄若虫的死亡率分别达到 44.58% 和 42.79% (表 2)。烟粉虱的死亡率随着线虫处理时间的延长而呈现上升的趋势, 22、16 和 13 IJs/mL 线虫处理 3 d 后, 烟粉虱低龄若虫的死亡率分别是处理后 1 d 的 1.28、1.34 和 2.42

倍。烟粉虱的死亡率随着线虫浓度的提高而呈现上升的趋势, 22 和 16 IJs/mL 线虫处理 3 d 后, 烟粉虱低龄若虫的死亡率分别是 13 IJs/mL 线虫的 1.68 和 1.54 倍; 高龄若虫的死亡率分别是 13 IJs/mL 线虫的 1.46 和 1.19 倍。

表 2 线虫处理后烟粉虱若虫的死亡率
Table 2 Mortality of *B. tabaci* nymphs after *S. carpocapsae* treatment

线虫浓度 Nematode concentration (IJs/mL)	死亡率 Mortality rate (%)					
	1 d		2 d		3 d	
	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph
CK	-2.71±2.79 c	-6.86±2.33c	-2.17±3.50 c	-8.26±3.72 b	-1.46±4.43 c	-10.87±2.05 b
22	19.48±0.55 a	25.71±3.06 a*	30.05±1.74 a	33.49±1.83 a	42.79±2.49 a	44.58±1.19 a
16	17.83±0.40 a	18.41±1.59 ab	24.39±2.20 ab	32.77±3.57 a*	34.74±2.75 b	41.66±0.96 a*
13	11.58±0.87 b	16.31±2.54 b*	18.14±2.61 b	30.88±0.86 a*	29.31±1.65 b	39.61±2.54 a*

注: 表中数据为平均值±标准误, 表中每列数据后不同字母表示 0.05 水平下差异显著。数字后面“*”表示同一处理、同一时间高龄和低龄若虫的死亡率经 *t* 测验差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Data in the table were mean±SE, different lowercase letters followed data in the same column indicated significant difference at 0.05 level. The “*” after the number indicated that the death of the old and young nymphs in the same treatment at the same time was significantly different by the *t* test ($P<0.05$).

不同浓度线虫处理对低龄和高龄若虫死亡率的影响也存在一定的差异(表 3)。高浓度线虫处理, 前期低龄若虫的死亡率高于高龄若虫, 随着处理时间的延长, 这种差异逐渐减小; 但低浓度线虫处理, 高龄和低龄若虫之间死亡率差异显著。如 22 IJs/mL 线虫处理 1 d, 低龄若虫的死亡率比高龄若虫高 32.00%, 明显高于低龄若虫, 而处理 3 d 时, 低龄若虫和高龄若虫死亡率之间没有明显差异; 但 13 IJs/mL 线虫处理 1 d, 低龄若虫的死亡率比高龄若虫高 40.85%, 而处理 3 d 时, 低龄若虫的死亡率比高龄若虫高 35.14%, 高龄和低龄若虫间死亡率存在明显的差异。

表 3 线虫和助剂组合处理后烟粉虱若虫的死亡率
Table 3 Mortality of *B. tabaci* nymphs after combined treatment with *S. carpocapsae* and additives

处理 Treatment	死亡率 Mortality (%)					
	1 d		2 d		3 d	
	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph
CK	0.34±1.25 b	-4.86±1.98 c	-1.96±1.26 c	-6.87±2.53 d	-4.21±1.49 c	-12.71±3.68 c
22 IJs/mL+5% d-柠檬烯 1000 倍液	26.23±5.36 a	26.48±2.54 a	40.24±0.88 a	40.35±1.78 a	60.61±2.08 a	61.55±3.33 a
16 IJs/mL+5% d-柠檬烯 1000 倍液	19.13±2.01 a	20.67±1.04 ab	26.23±2.38 b	30.07±1.28 b	53.20±4.20 ab	51.69±3.25 ab
13 IJs/mL+5% d-柠檬烯 1000 倍液	14.82±2.12 a	16.96±2.45 b	23.37±2.25 b	22.34±2.67 c	43.37±3.35 b	44.52±3.44 b

注: 表中数据为平均值±标准误, 表中每列不同字母表示 0.05 水平下差异显著。数字后面“*”表示同一处理、同一时间高龄和低龄若虫的死亡率经 *t* 测验差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Data in the table were mean±SE, different lowercase letters followed data in the same column indicated significant difference at 0.05 level. The “*” after the number indicates that the death of the old and young nymphs in the same treatment at the same time was significantly different by the *t* test ($P<0.05$).

2.3 小卷蛾斯氏线虫和助剂联用对烟粉虱的控制作用

线虫和助剂 5% d-柠檬烯 1000 倍液联合使用能明显提高烟粉虱的死亡率。线虫的死亡率随着联用线虫浓度的升高和处理时间的延长而上升(表 3), 在相同线虫处理时间下, 烟粉虱若虫死亡率随线虫稀释倍数的增加而降低, 22 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂处理 3 d 后, 烟粉虱高龄若虫死亡率比 16 IJs/mL 线虫+

1000 倍液助剂和 13 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂分别高 7.41%、17.24%，比低龄若虫死亡率分别高 9.86%、17.03%。在相同浓度线虫处理下，烟粉虱若虫死亡率随线虫处理时间的延长而升高，22 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂处理 3 d 后，烟粉虱高龄若虫死亡率分别比处理 1、2 d 的高 34.38%、20.41%，比低龄若虫死亡率分别高 35.07%、21.02%（表 4）。

综合表 2 和表 3 可以看出，线虫和助剂联合使用能显著提高对烟粉虱的杀虫效果。与没有助剂相比，22 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂处理 3 d 后，高龄若虫和低龄若虫的死亡率比第 1 d 分别提高了 41.65%和 38.07%；16 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂处理 3 d 后，高龄若虫和低龄若虫的死亡率分别提高了 35.37%和 33.28%；13 IJs/mL 线虫+1000 倍液助剂处理 3 d 后，高龄若虫和低龄若虫的死亡率分别提高了 48.00%和 12.40%。

2.4 田间不同喷水量对线虫控制辣椒烟粉虱的影响

在实验室内进行线虫侵入试验中发现，在湿度较小的环境中线虫较难侵入烟粉虱，并且线虫容易死亡，为此在田间应用时，线虫处理前先对辣椒叶喷水，以增大蔬菜表面湿度。研究发现，线虫施用对辣椒田间烟粉虱有一定的控制作用，以 16 IJs/mL 的浓度处理 3 d 后，对烟粉虱高龄若虫和低龄若虫的田间防效分别达到 47.78%和 51.83%。在施用线虫前先在辣椒上喷水可以显著提高对烟粉虱的防效，在试验设置的喷水量 0.5~1.5 L/m² 的范围内，随着喷水量的增加防效呈上升趋势。喷施线虫 ALL 3 d 后，喷水 0.5、1.0 和 1.5 L/m² 处理的辣椒上高龄若虫的校正防治效果比对照分别提高了 17.72%、24.57%和 35.54%，低龄若虫的校正防治效果比对照分别提高了 26.22%、30.61%和 41.39%。喷水 1.5 L/m² 时，高龄若虫的校正防治效果显著高于其他喷水处理 ($P < 0.05$)，而低龄若虫的防治效果则不如高龄若虫。

表 4 不同喷水量对线虫感染烟粉虱若虫的影响

Table 4 Effects of spray water volumes on the mortality of *B. tabaci* nymphs

喷水量 Water volumes (L/m ²)	校正防治效果 Correction effectiveness (%)					
	1 d		2 d		3 d	
	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph	高龄 Elder nymph	低龄 Younger nymph
CK	30.95±1.76 c	27.91±3.18 a	41.29±2.80 bc	39.47±3.44 bc	47.78±3.11 b	51.83±4.41 bc
0.5	30.66±1.64 d	41.44±3.35 b	40.25±1.79 c	49.59±4.26 c	48.67±1.70 c	54.13±4.31 c
1.0	36.04±1.61 b	48.32±1.09 a	49.21±1.66 b	54.16±2.07 ab	55.52±2.11 b	58.52±3.39 ab
1.5	55.44±2.65 a*	54.76±1.48 a*	64.36±3.47 a*	64.95±3.03 a*	66.49±3.72 a*	69.3±3.74 a*

注：表中数据为平均值±标准误，表中每列不同字母表示 0.05 水平下差异显著。数字后面“*”表示同一处理、同一时间高龄和低龄若虫的死亡率经 *t* 测验差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Data in the table were mean±SE, different lowercase letters followed data in the same column indicated significant difference at 0.05 level. The “*” after the number indicated that the death of the old and young nymphs in the same treatment at the same time was significantly different by the *t* test ($P < 0.05$).

3 讨论

通常认为，如果侵染期线虫处于合适的活动环境，植物叶面湿润时他们会在寄主周围的水膜中游动寻找侵入位点（如肛门、气门、伤口等）进入寄主体内^[24]，随后释放肠腔中的共生菌，共生菌迅速繁殖产生破坏昆虫生理防御机能的毒素和抑菌物质以抑制杂菌生长，最终使寄主在 48 h 内死于败血症，寄主尸体被共生菌产生的胞外酶分解，为线虫生长发育和繁殖提供营养。线虫生存和侵染与环境温度、湿度等密切相关，适宜的侵染温度是 25 ℃左右，病原线虫喜欢高湿环境，但并非越高越好^[25]。本研究发现，小卷蛾斯氏线虫 24 h 内能够侵入烟粉虱若虫体内，并且能在 3 d 左右杀死若虫，但在侵染过程中需要一定的环境湿度。助剂能提高病原线虫抗干燥能力^[26]，且对烟粉虱也有一定的杀灭作用^[27]，因此加入助剂能缩短线虫侵入的时间，提高侵染成功率，这与本文研究的结果一致。

昆虫病原线虫作为一种生物杀虫剂的潜力很大, 具有能主动寻找寄主并快速杀死寄主的特点, 且寄主范围广, 杀虫能力强, 适合人工大量饲养, 对脊椎动物、植物、人类无害, 对环境安全, 对环境和人体没有有毒残留物^[15], 对目标有害生物有效等^[24], 因此在生物防治中占有一席之地^[7]。昆虫病原线虫是一种生物活体, 易受温度、湿度、紫外线等环境因子的影响, 而大部分线虫不耐干燥和高温。研究发现, 温度和湿度影响病原线虫的产量和侵染期线虫出现的时间, 昆虫病原线虫最佳的培养温度因线虫品系的不同而异, 一般范围为 19 °C~28 °C, 而最适的相对湿度一般为 95%~99%^[28]。昆虫病原线虫对环境温度和湿度的要求较高, 这缩短了线虫的货架期, 降低了田间的控虫效果, 因此影响了它在生产上的推广应用^[29,30]。为此, 一些专家期望通过线虫转基因、分子改良等手段培育耐热、耐干燥的优良线虫品系, 提高线虫的抗逆性, 寻找合适的抗蒸发剂、紫外保护剂等^[26]增强对线虫的保护以扩大线虫的生产和应用范围。

本试验发现, 在干燥的辣椒叶片上, 线虫的侵染力相对较弱, 叶片一旦干燥后, 未侵入烟粉虱的线虫将很快死亡, 而侵入烟粉虱的线虫受环境湿度的影响较小。但在辣椒背面喷水后再喷施线虫, 可以提高辣椒生长小环境中的湿度, 保持叶片表面湿润, 从而提高线虫对田间辣椒烟粉虱的控制效果。因此, 在条件许可的情况下, 在使用线虫防控烟粉虱时, 可以先向目标蔬菜上喷水后再喷施线虫。露地蔬菜可以选择在雨后喷施线虫, 或在落日后喷水, 喷水后及时喷施线虫, 以提高线虫的侵入率, 从而提高对烟粉虱的防控效果。

参 考 文 献

- [1] 褚栋, 张友军. 近 10 年我国烟粉虱发生为害及防治研究进展[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 56-60.
- [2] 杨爱民, 周福才, 胡其靖, 等. 烟粉虱对辣椒产量和品质的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2014, 34(1): 77-80.
- [3] 司升云, 李芒, 潘鹏亮, 等. 蔬菜主要害虫 2013 年发生概况及 2014 年发生趋势[J]. 中国蔬菜, 2014, 1(3): 1-4.
- [4] 林双喜, 丁志宽, 李瑛, 等. 大棚辣椒病虫害全程绿色防控技术[J]. 现代农业科技, 2018(5): 108-110.
- [5] 时海五, 郭利萍, 冶晓瑞, 等. 棚室蔬菜烟粉虱发生规律及综合防治对策[J]. 华中昆虫研究, 2016, 12: 321-324.
- [6] 袁培祥. 烟粉虱的发生特点与综合防治措施[J]. 河南农业, 2010(3): 25.
- [7] 肖留斌, 谭永安, 柏立新. 不同措施对大棚烟粉虱成虫的防治效果[J]. 江苏农业科学, 2010(4): 114-115.
- [8] 郑鹏华, 沈卫新, 张建明, 等. 不同杀虫剂对大棚西瓜烟粉虱的防治效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(9): 1523-1524.
- [9] Wang R, Che W, Wang J, et al. Monitoring insecticide resistance and diagnostics of resistance mechanisms in *Bemisia tabaci* Mediterranean (Q biotype) in China[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2020, 163: 117-122.
- [10] San-Blas E. Progress on entomopathogenic nematology research: abibliometric study of the last three decades:1980—2010[J]. Biological Control, 2013, 66(2): 102-124.
- [11] 李星月, 李其勇, 符慧娟, 等. 新型生防因子——昆虫病原线虫的研究进展[J]. 四川农业科技, 2019(1): 37-39.
- [12] 张宇凡, 王小艺. 星天牛生物防治研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(1): 134-145.
- [13] 武海斌, 刘海峰, 宫庆涛, 等. 昆虫病原线虫防治地下害虫的应用及影响因子[J]. 落叶果树, 2015, 47(5): 24-27.
- [14] 陈贤群, 刘奇志, 曹景富, 等. 两种昆虫病原线虫防治核桃云斑天牛田间效果评价[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(4): 456-461.
- [15] 王立霞, 杨秀芬, 简恒, 等. 昆虫病原线虫共生细菌的代谢产物[J]. 微生物学报, 2001, 41(6): 753-756.
- [16] 付俊瑞, 刘奇志, 李星月. 昆虫病原线虫异小杆属新种 *Heterorhabditis beicherriana* 共生菌的分离及致病性[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(1): 133-140.
- [17] 唐璞, 王知知, 吴琼, 等. 草地贪夜蛾的天敌资源及其生物防治中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 370-381.
- [18] 严凯, 罗泽丽, 胡芳丽, 等. 昆虫病原线虫防治梨小食心虫田间试验[J]. 农业研究与应用, 2017(3): 58-59, 67.
- [19] 刘天英, 赵国玉, 张利焕, 等. 以虫治虫技术的应用——生物天敌昆虫病原线虫防治韭蛆[J]. 长江蔬菜, 2018(3): 56-57.
- [20] 王连华, 胡辉, 许峰. 昆虫病原线虫防治黄条跳甲试验[J]. 上海蔬菜, 2019, 165(2): 52-53.
- [21] Andrew G S, Cuthbertson J H, Keith F A, et al. The efficacy of the entomopathogenic nematode, *Steinernema feltiae*, against the immature stages of *Bemisia tabaci*[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2003, 83(3): 267-269.

- [22] Cuthbertson A G S, Walters K F A, Northing P, *et al.* Efficacy of the entomopathogenic nematode, *Steinernema feltiae*, against sweetpotato whitefly *Bemisia tabaci* (Homoptera: Aleyrodidae) under laboratory and glasshouse conditions[J]. Bulletin of Entomological Research, 2007, 97(1): 9-14.
- [23] Rosemarije B, Michael B, Angela B, *et al.* How to start with a clean crop: biopesticide dips reduce populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) on greenhouse poinsettia propagative cuttings[J]. Insects, 2016, 7(4): 48.
- [24] 董国伟, 刘贤进, 余向阳, 等. 昆虫病原线虫研究概况[J]. 昆虫知识, 2001, 38(2): 107-111.
- [25] 吴文丹, 尹姣, 曹雅忠, 等. 我国昆虫病原线虫的研究与应用现状[J]. 中国生物防治学报, 2014, 30(6): 817-822.
- [26] 金永玲, 韩日畴, 丛斌. 昆虫病原线虫应用研究概况[J]. 环境昆虫学报, 2003, 25(4): 175-183.
- [27] 胡亚萍, 赵驾浩, 梁启好. 5% d-柠檬烯可溶剂防治甜椒烟粉虱药效试验[J]. 上海蔬菜, 2017(5): 45.
- [28] 李春杰. 昆虫病原线虫大量繁殖技术研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
- [29] Ehlers R U, Osterfeld K H, Krasomil O K, *et al.* In vitro production of *Heterorhabditis megidis* (strain HSH) in laboratory scale bioreactors[J]. Nematologica, 1992, 38: 409.
- [30] Westerman P R. Penetration of the entomopathogenic nematode *Heterorhabditis* spp. into host insects at 9 and 20 degrees C[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 1998, 72(3): 197-205.

(责任编辑: 张莹)