

三氟吡啶胺对三种作物根结线虫病的效果评价

柴秋源¹, 田宝华², 徐英³, 贾少锋², 祝海燕⁴,
李娜⁵, 杨丽荣¹, 张洁¹

(1. 河南省农业科学院 植物保护研究所/河南省生物农药工程研究中心/河南省农用微生物创新中心, 郑州 450002;
2. 先正达(上海)作物保护科技有限公司, 上海 200131; 3. 新乡市种业发展服务中心, 河南 新乡 453003;
4. 中牟县农业技术推广中心, 郑州 451450; 5. 杞县农业技术推广中心, 河南 开封 475200)

摘要: 植物寄生线虫是严重威胁全球农业生产的重要病原物,其中南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)是分布最广、危害最重的种类之一。由南方根结线虫引起的根结线虫病在世界范围内对番茄、西瓜、胡萝卜等多种蔬菜与经济作物的产量和品质产生影响,是严重威胁世界粮食安全的关键土传病害之一。为探索高效、可持续的防控新策略,本研究系统评价了新型琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀线剂——三氟吡啶胺对南方根结线虫的室内毒力。在此基础上,本研究于2023年在河南省不同经济作物产区开展了规范的田间药效试验,采用450 g/L的三氟吡啶胺悬浮剂,以推荐剂量(555 mL/hm²)分别对三种作物进行灌根处理,以验证其在番茄、胡萝卜和西瓜上的田间防治效果。室内毒力测定结果显示,三氟吡啶胺对南方根结线虫二龄幼虫(J2)具有较强的毒力,其LC₅₀为0.35 mg/L,毒力显著高于对照药剂噻唑膦(LC₅₀=19.8 mg/L)与氟吡菌酰胺(LC₅₀=2.15 mg/L),为其田间应用提供了强有力的药效学基础。田间试验结果表明,采用450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂以555 mL/hm²剂量进行灌根处理,能够显著降低三种作物的根结指数,其对番茄、胡萝卜和西瓜根结线虫病的防治效果分别为82.50%、72.92%和79.07%,同时能够显著促进作物根系与植株生长,体现了该药剂在防控病害的同时兼具促进作物生长的积极作用。在产量方面,经三氟吡啶胺处理的番茄、胡萝卜和西瓜的产量分别达到134.55、76.71、40.24 t/hm²,增产率依次为64.11%、55.95%和24.12%,说明三氟吡啶胺具有显著的保产增收潜力。为进一步探索重病区的最佳施用剂量,本研究增设了1155 mL/hm²的高剂量处理组(以西瓜为对象)。结果显示,提高剂量后三氟吡啶胺对西瓜根结线虫病的防治效果进一步提升至86.05%,西瓜产量达42.77 t/hm²,增产31.92%,表明适当提高用药量可在重发病区实现更优防控。综上,三氟吡啶胺对南方根结线虫兼具卓越的室内毒力与稳定的田间防效,并能显著促进作物生长与增产,且通过剂量调节可满足不同发病程度的防控需求。本研究结果证实,三氟吡啶胺作为一种作用机制新颖、高效且环境风险相对较低的新型杀线剂,可作为当前抗性管理及根结线虫病综合防治体系中的有效替代工具,具有重要的推广应用价值。

关键词: 三氟吡啶胺; 南方根结线虫; 毒力测定; 防治效果; 新型琥珀酸脱氢酶抑制剂

中图分类号: S435.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)02-0329-09

Efficacy Evaluation of Cyclobutrifluram Against Root-Knot Nematode Disease of Three Crops

CHAI Qiuyuan¹, TIAN Baohua², XU Ying³, JIA Shaofeng², ZHU Haiyan⁴,
LI Na⁵, YANG Lirong¹, ZHANG Jie¹

(1. Institute of Plant Protection/Henan Biopesticide Engineering Research Center/Henan Agricultural Microbiology Innovation Center, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Syngenta (Shanghai) Crop Protection Technology

收稿日期: 2025-11-17

修回日期: 2026-01-22

接受日期: 2026-01-23

基金项目: 河南省科技研发计划联合基金(优势学科培育类)项目(242301420139);河南省重点研发专项(241111112800);河南省农业科学院科技创新团队专项(2023TD15);河南省农业科学院基础性科研工作项目(2025JC13)

作者简介: 柴秋源(1995-),女,助理研究员,硕士,主要从事植物病害生物防治

通信作者: 张洁(1988-),女,副研究员,博士,主要从事作物土传病害和生防菌互作机制研究, E-mail: zhangjie656@126.com

引用格式: 柴秋源,田宝华,徐英,等. 三氟吡啶胺对三种作物根结线虫病的效果评价[J]. 河南科学, 2026, 44(2): 329-337.

Chai Q Y, Tian B H, Xu Y, et al. Efficacy evaluation of cyclobutrifluram against root-knot nematode disease of three crops[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 329-337.

Co. Ltd., Shanghai 200131, China; 3. Xinxiang Seed Industry Development Service Center, Xinxiang 453003, Henan China;
4. Zhongmou County Agricultural Technology Extension Center, Zhengzhou 451450, China;
5. Qi County Agricultural Technology Extension Center, Kaifeng 475200, Henan China)

Abstract: Plant-parasitic nematodes are recognized as important pathogens that pose a persistent and serious threat to global agricultural production. Among them, *Meloidogyne incognita* is one of the most widely distributed and destructive species. Root-knot nematode disease caused by *M. incognita* has an impact on the yield and quality of various vegetables and economic crops such as tomato, watermelon, carrot worldwide, and thus emerging as a key soil-borne disease that seriously endangers global food security and agricultural sustainability. To explore a novel control strategy for highly efficient and sustainable prevention and control, this study systematically evaluated the laboratory toxicity of cyclobutrifluram, a novel succinate dehydrogenase inhibitor (SDHI) nematicide, against *M. incognita*. On this basis, standardized field efficacy tests were conducted in 2023 across different economic crop production areas of Henan Province. The 450 g/L cyclobutrifluram concentrate was applied via root-irrigation with the recommended dosage of 555 mL/hm² to verify its field control efficacy on tomato, carrot and watermelon. Laboratory toxicity assays demonstrated that cyclobutrifluram exhibited strong toxicity against the second-stage juveniles (J2) of *M. incognita*, with the median lethal concentration (LC₅₀) value of 0.35 mg/L, which was significantly higher than that of fosthiazate (LC₅₀=19.8 mg/L) and fluopyram (LC₅₀=2.15 mg/L), providing a robust pharmacodynamic basis for its field application. Field test results showed that soil drenching with 450 g/L cyclobutrifluram concentrate at a dosage of 555 mL/hm² could significantly reduce the root-knot indices of the three crops, and the control efficacies against root-knot nematode disease of tomato, carrot and watermelon were 82.50%, 72.92% and 79.07% respectively. At the same time, it could remarkably promote the growth of crop roots and plants, reflecting the agent's dual benefits of disease control and plant growth promotion. In terms of yield performance, the yields of tomato, carrot and watermelon treated with cyclobutrifluram reached 134.55, 76.71, 40.24 t/hm², with corresponding yield increase rates of 64.11%, 55.95% and 24.12%, respectively, indicating the significant potential of cyclobutrifluram in increasing yield and income. To further explore the optimal application dosage for severely infested areas, an additional high-dosage treatment group of 1155 mL/hm² was set up with watermelon as the test crop. The results indicated that increasing the dosage could further improve the control efficacy of cyclobutrifluram against watermelon root-knot nematode disease to 86.05%, with the yield reaching 42.77 t/hm² and the yield increase rate rising to 31.92%. This finding suggests that appropriately increasing the application dosage can achieve better control effects in heavily infested fields. In conclusion, cyclobutrifluram exhibits excellent laboratory toxicity and stable field control efficacy against *M. incognita*, can significantly promote crop growth and yield improvement, and its dosage adjustment can meet the control requirements of fields with different infestation severities. The results of this study confirms that as a novel nematicide with a unique mode of action, high efficiency and relatively low environmental risk, cyclobutrifluram can be served as an effective alternative agent for current nematode resistance management and integrated root-knot nematode disease control, and has great value for popularization and application.

Key words: cyclobutrifluram; *Meloidogyne incognita*; toxicity assay; control efficacy; succinate dehydrogenase inhibitor (SDHI)

0 引言

植物寄生线虫作为全球最具破坏力的土传植物病原物之一,其侵染可导致作物根系结构破坏、养分和水分吸收受阻,并诱发复合性土传病害,严重威胁

世界粮食安全和作物健康,每年造成农业经济损失超过1000亿美元^[1-3]。其中,南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)是分布最广、破坏性较重的种类之一,其寄主范围涵盖番茄、西瓜、胡萝卜等多种重要经济作物。在我国,西瓜、番茄和胡萝卜作为重要的

经济作物,受长期集约化栽培与连作模式的影响,连作障碍问题日益突出,加剧了根结线虫病的发生,发病率普遍达30%~80%。受害植株常表现为植株矮化、叶片黄化、根系畸形,进而影响作物品质,最终导致作物减产20%~40%,严重地块甚至出现绝收现象,已成为制约我国设施农业可持续发展的重要因素之一^[4-6]。

目前,根结线虫病的防治方法主要有化学防治^[7]、生物防治^[8]和种植抗性品种^[9]。目前,化学防治仍是防控根结线虫病的主要手段,而专门用于防治根结线虫病的化学药剂便是杀线虫剂。杀线虫剂主要分为熏蒸性杀线虫剂和非熏蒸性杀线虫剂。传统熏蒸性杀线虫剂普遍存在毒性大、操作风险高等问题,如氯化苦、二溴氯丙烷等药剂因环境安全性问题已被多数国家和地区禁用,目前仅有威百亩、棉隆等少数药剂仍在有限范围内使用^[10-12]。非熏蒸性杀线虫剂中,噻唑膦和氟吡菌酰胺是目前用于防治根结线虫病的两种有效杀线虫剂,但长期连续使用导致靶标线虫种群抗药性持续增强、防效显著下降、在土壤中残留期长、污染环境等问题^[13-14]。因此,筛选新型作用机制、高效低毒、与环境相容性好的替代性杀线剂,已成为线虫综合治理领域的迫切需求。

三氟吡啶胺(Cyclobutrifluram)作为一种新型琥珀酸脱氢酶类抑制剂(Succinate Dehydrogenase Inhibitor, SDHI)类杀线虫剂,其作用机制与传统神经毒性药剂不同。该药剂通过抑制线虫线粒体中的琥珀酸脱氢酶,阻断其能量代谢中的ATP合成途径,从而导致线虫死亡^[15]。该药剂还具有内吸性强、持效期长、对哺乳动物及非靶标生物毒性低等优点,且与现有药剂无交互抗性,显示出良好的应用前景。目前,三氟吡啶胺已在番茄、黄瓜等作物上获得登记^[16],并在防治黄瓜根结线虫病^[17]、松材线虫病^[18]、甘薯根结线虫病^[19]和茎线虫病^[20]等方面展现出良好防控效果,但其对南方根结线虫在其他寄主作物上的系统防效评价尚待进一步完善。

针对我国经济作物根结线虫危害严重、常用药剂抗性加剧的现状,本研究以番茄、胡萝卜和西瓜为供试作物,通过室内毒力测定与田间药效试验,系统评价三氟吡啶胺对南方根结线虫的致死活性及田间防治效果,以期为该药剂的科学利用及线虫抗性治理提供理论依据和实践支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试线虫与培养

从河南省安阳市内黄县严重发生根结线虫病的番茄大棚中采集发病植株根结,将根结用清水洗净,剪成3 cm的小段后于体视镜下用无菌牙签挑取卵囊,然后将卵囊置于1% NaClO中消毒2 min,用无菌水冲洗3次后收集卵粒,28℃培养7 d后收集二龄幼虫并将其配制成200条/mL线虫液备用。

1.1.2 供试药剂

450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,先正达(中国)投资有限公司;41.7%氟吡菌酰胺悬浮剂,拜耳作物科学公司;40%噻唑膦水乳剂,河北三农农用化工有限公司。

1.1.3 供试作物

胡萝卜供试品种为“吉红”;番茄供试品种为“粉果,瑞赢”;西瓜供试品种为“星研7号”。

1.2 三氟吡啶胺对南方根结线虫的室内毒力测定

采用12孔板进行毒力测定。每孔加入1 mL二龄幼虫(J2)悬浮液(200条/mL)及2 mL药液,于25℃恒温培养24 h后,在体视显微镜下观察线虫总数和死亡数。线虫死亡标准判定为:轻敲孔板后线虫身体无弯曲摆动等活动反应,且用针刺时虫体无应激反应。供试药剂为三氟吡啶胺,并以氟吡菌酰胺和噻唑膦作为阳性对照,无菌水作为阴性对照。三氟吡啶胺与氟吡菌酰胺设定相同的质量浓度梯度(0.05、0.1、0.2、0.4、0.8、1.6 mg/L),噻唑膦的质量浓度梯度设定为1、2、5、10、20、50 mg/L,每个质量浓度水平均设3个重复孔,每个试验重复3次。根据式(1)和式(2)计算线虫的死亡率和校正死亡率,然后根据校正死亡率建立毒力回归方程,并据此计算半数致死浓度(LC₅₀)。

$$\text{死亡率}(\%) = \frac{\text{死亡线虫数}}{\text{总线虫数}} \times 100\% \quad (1)$$

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

1.3 三氟吡啶胺对三种作物根结线虫病的田间防效测定

1.3.1 试验地概况

田间药效试验于2023年在河南省不同经济作物产区开展。西瓜试验于2023年2月在郑州市中牟

县大棚进行,番茄和胡萝卜试验于2023年7月分别在安阳市内黄县毫城乡东永建村大棚和开封市祥符区范村乡蔡岗村大棚进行。所有试验田块地势平整,肥力中等,栽培管理措施一致,且均因长期连作致使根结线虫病发生严重。供试土壤类型分别为沙壤土(西瓜、番茄)与沙土(胡萝卜)。

1.3.2 试验设计

所有试验均采用随机区组设计,设3次重复,小区面积为200 m²(10 m×20 m)。各作物具体处理如表1所示。

1.3.3 调查方法与指标

1)根结指数与防治效果的调查方法。分别于胡萝卜收获前的第10 d、番茄拉秧前的第7 d、西瓜施药后的第90 d与120 d进行病情调查。每小区采用三点取样法调查植株发病情况。根结分级标准参考文献[21]中的方法,分为0~5级。根据式(3)和式(4)计算根结指数和防治效果。

根结指数 = [
$$\frac{\sum(\text{各级病株数} \times \text{级数})}{(\text{调查总株数} \times \text{最高级数})}] \times 100。$$
(3)

防治效果(%) =
$$\frac{\text{对照根结指数} - \text{处理根结指数}}{\text{对照根结指数}} \times 100%。$$
(4)

2)作物产量及增产率的调查方法。胡萝卜于成熟期一次性收获,采用三点取样法,每点收取1 m双行范围内的胡萝卜称重;番茄采用三点取样法,每点划定1 m双行区域,在整个采收期内分批收获所有番茄称重;西瓜于第一茬瓜成熟期采用三点取样法,每点随机选取10个成熟西瓜称重。最后结合小区面积与作物种植株数计算各小区作物总产量,并根据式(5)计算增产率。

增产率(%) =
$$\frac{\text{处理组产量} - \text{对照组产量}}{\text{对照组产量}} \times 100%。$$
(5)

1.4 数据处理

用SPSS 29.0对试验数据进行处理和分析,用最小显著差数法(LSD)分析各处理组之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 三氟吡啶胺对南方根结线虫的室内毒力测定
室内毒力测定结果(表2)表明,三氟吡啶胺对

表1 田间防效试验的处理组设计
Tab.1 Design of treatment groups for the field efficacy trials

供试作物	各处理组施用的药剂、药量及施药方法				
	处理组 A	处理组 B	处理组 C	处理组 D	处理组 E
胡萝卜	450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,555 mL/hm ² 施用剂量,于移栽后第二次浇水时随水冲施	40%噻唑膦水乳剂,7500 mL/hm ² 施用剂量,于移栽后第二次浇水时随水冲施(阳性对照)	等量清水于移栽后第二次浇水时随水冲施(阴性对照)		
番茄	450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,555 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施	40%噻唑膦水乳剂,7500 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施(阳性对照)	等量清水于移栽当日随水冲施(阴性对照)		
西瓜	450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,555 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施	40%噻唑膦水乳剂,7500 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施(阳性对照)	等量清水于移栽当日随水冲施(阴性对照)	450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,1155 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施	41.7%氟吡菌酰胺悬浮剂,1500 mL/hm ² 施用剂量,于移栽当日随水冲施(阳性对照)

注:本研究中,田间药效试验设定的450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂的施用剂量为555 mL/hm²,该用量范围与相关文献报道^[19-20]及中国农药信息网的推荐用量范围基本一致。因试验选取的西瓜地块发病情况较重,为更全面探究不同施用剂量对重病田的防效,以西瓜为对象额外设置了处理组D和处理组E;而胡萝卜、番茄地块发病程度相对较轻,因此仅以处理组B作为阳性对照开展试验。

表2 不同药剂对南方根结线虫二龄幼虫(J2)的毒力比较
Tab.2 Toxicities of different nematocides against second-stage juveniles (J2) of *Meloidogyne incognita*

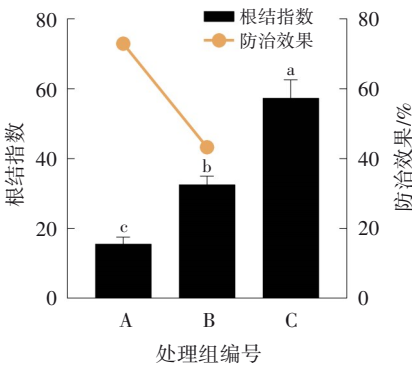
药剂	毒力回归方程	LC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)	95%置信区间	R ² 值
三氟吡啶胺	y=2.02x+5.91	0.35	0.278 7~0.444 9	0.980 9
噻唑膦	y=1.354x+3.24	19.8	15.632 8~25.080 7	0.990 1
氟吡菌酰胺	y=1.68x+4.41	2.15	1.507 8~3.053 7	0.975 8

南方根结线虫二龄幼虫(J2)表现出极强的致死活性,其 LC_{50} 值仅为0.35 mg/L,显著高于氟吡菌酰胺(LC_{50} =2.15 mg/L)和噻唑膦(LC_{50} =19.8 mg/L)的致死活性。三氟吡啶胺的毒力回归方程为 $y=2.02x+5.91$, $R^2=0.9809$,显示其浓度与致死率间具有良好的线性关系。综上结果可知,三氟吡啶胺在较低浓度下即可对南方根结线虫二龄幼虫产生高效抑制作用。

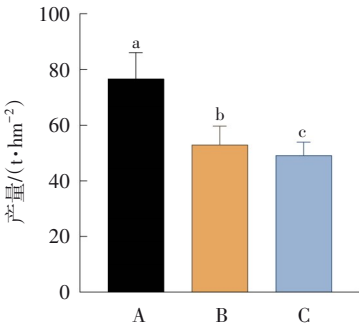
2.2 三氟吡啶胺对三种作物根结线虫病的田间防治效果

2.2.1 三氟吡啶胺对胡萝卜根结线虫病的田间防治效果

田间试验结果(图1)表明,处理组A对胡萝卜根



(a)根结指数和防治效果



(b)作物产量

注:图中不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

图1 三氟吡啶胺对胡萝卜根结线虫病的田间防治效果

Fig.1 The control effect of cyclobutrifluram on root-knot nematode disease in carrot under field conditions



(a)处理组A



(b)处理组B



(c)处理组C

图2 不同处理组番茄根症状

Fig.2 Root symptoms of tomato plants in different treatment groups

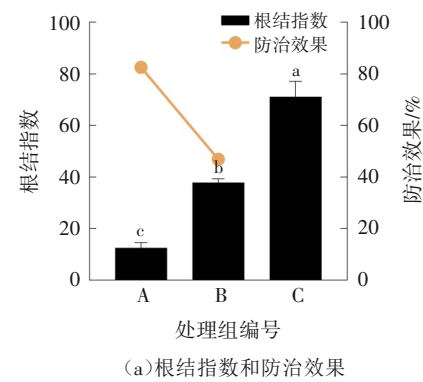
结线虫病的防治效果达72.92%,显著优于处理组B(防治效果为43.22%)和处理组C,且其根结指数最低,为15.53。在产量方面,处理组A所在小区的胡萝卜产量为76.71 t/hm²,增产率为55.95%,均显著高于处理组B和处理组C,这说明采用450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂以555 mL/hm²剂量对胡萝卜进行灌根处理,可显著降低胡萝卜的根结指数,提升其对胡萝卜根结线虫病的防治效果,同时能够显著提升胡萝卜的产量。综上可知,三氟吡啶胺对胡萝卜根结线虫病的田间防控效果显著,且增产作用突出,具备良好的推广应用价值。

2.2.2 三氟吡啶胺对番茄根结线虫病的田间防治效果

从图2可以看出,经三氟吡啶胺悬浮剂处理后的番茄根发病最轻、根结最少。结合图3结果可知,三个处理组中,处理组A的根结指数最低,为12.45,且其防治效果最高,达82.50%,同时其对番茄根结线虫病的田间防效显著优于7500 mL/hm²噻唑膦水乳剂(处理组B的根结指数为37.78,防治效果为46.88%)。在产量方面,处理组A所在小区的番茄产量为134.55 t/hm²,增产率达64.11%,显著高于处理组B和处理组C,说明以555 mL/hm²剂量施用450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂,不仅可显著降低番茄的根结指数、提升其对番茄根结线虫病的防治效果,还可显著提升番茄的产量。以上结果表明,三氟吡啶胺对番茄根结线虫病具有优良的防控与增产作用,展现出良好的应用潜力。

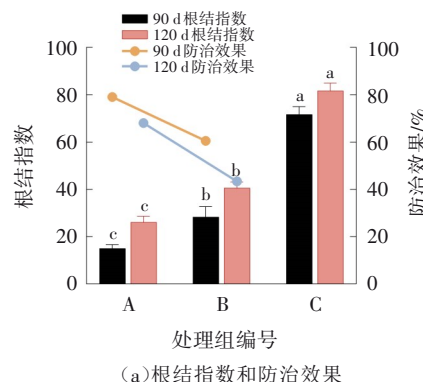
2.2.3 三氟吡啶胺对西瓜根结线虫病的田间防治效果

田间试验结果表明,施药后的第90 d,处理组A的西瓜根发病最轻,根结最少(图4)。由图5可知,各处理组中只有处理组A的根结指数最低(15.00),防治效果最好(施药后的第90 d和第120 d的防治效果分别为79.07%和68.03%),且处理组A的根结指数和防治效果均显著优于处理组B和处理组C,说明450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂(施用剂量555 mL/hm²)对



(a)根结指数和防治效果

注:图中不同小写字母表示在5%水平上差异显著。



(a)根结指数和防治效果

注:图中不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

图3 三氟吡啶胺对番茄根结线虫病的田间防治效果

Fig.3 The control effect of cyclobutrifluram on root-knot nematode disease in tomato under field conditions

图5 三氟吡啶胺对西瓜根结线虫病的田间防治效果

Fig.5 The control effect of cyclobutrifluram on root-knot nematode disease in watermelon under field conditions

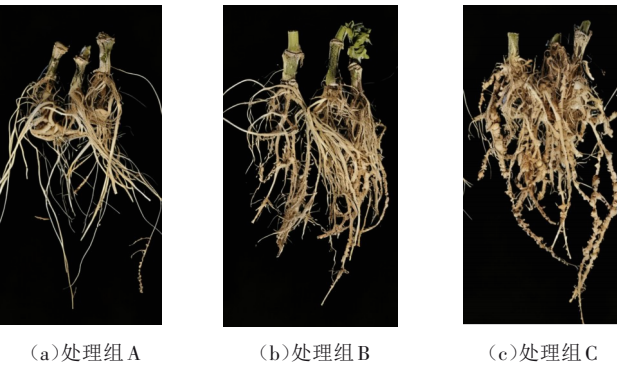


图4 不同处理组西瓜根症状

Fig.4 Root symptoms of watermelon plants in different treatment groups

西瓜根结线虫病具有良好的防效与持效性。在产量方面,处理组A的产量(40.24 t/hm²)和增产率(24.12%)均最高,且均显著高于处理组B和处理组C,说明三氟吡啶胺对西瓜具有显著的增产作用。综上所述,三氟吡啶胺在供试剂量(555 mL/hm²)下对西瓜根结线虫病具有优良的防治效果和增产作用。

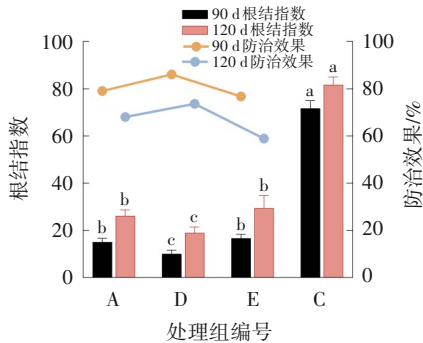
2.2.4 不同施药剂量对西瓜根结线虫病的田间防治效果

为进一步明确根结线虫重病区的防控策略,本

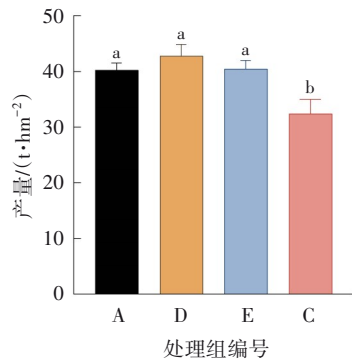
研究以西瓜为供试作物,增设了1155 mL/hm²的高剂量处理组。结果表明,提高三氟吡啶胺施用剂量后,其对西瓜根结线虫病的防治效果进一步提升(施药后的第90 d和第120 d的防治效果分别为86.05%和76.87%),施药后的第120 d西瓜产量达到42.77 t/hm²,增产31.92%(图6),且处理组D的根结指数和防治效果均显著优于处理组A、处理组E和处理组C。同时从图7可以看出,将450 g/L三氟吡啶胺悬浮剂以1155 mL/hm²剂量施用后的第120 d,西瓜植株生长状态仍较好,地上部分植株叶片依旧保持翠绿(图7)。该结果不仅表明适当提高用药量可在根结线虫病重发病区实现更优防控,也证实了剂量调整对提升根结线虫病防控效果的可行性以及三氟吡啶胺良好的持效作用。

3 结论与讨论

本研究通过室内毒力测定与田间试验,系统评价了三氟吡啶胺对番茄、胡萝卜和西瓜南方根结线虫病的防治效果。结果表明,三氟吡啶胺对南方根结线虫二龄幼虫具有极高的毒力(LC₅₀=0.35 mg/L),



(a)根结指数和防治效果



(b)作物产量

注:图中不同小写字母表示在5%水平上差异显著。

图6 不同剂量三氟吡啶胺对西瓜根结线虫病的田间防治效果

Fig.6 Field control effects of different doses of cyclobutrifluram on root-knot nematode disease in watermelon

毒力显著高于噻唑膦($LC_{50}=19.8\text{ mg/L}$)和氟吡菌酰胺($LC_{50}=2.15\text{ mg/L}$)。田间试验进一步证实,450 g/L的三氟吡啶胺悬浮剂在555 mL/hm²的施用剂量下对番茄、胡萝卜和西瓜三种作物根结线虫病的防效分别为82.50%、72.92%和79.07%,并可显著促进作物增产,表现出优异的田间应用潜力。同时研究结果显示,将450 g/L的三氟吡啶胺悬浮剂的施用剂量提高至1155 mL/hm²时,其对西瓜根结线虫病的防治效果进一步提升,且西瓜产量也可进一步提升,表明适当提高用药量可在根结线虫病重发病区实现更优防控,证实了剂量调整对提升根结线虫病防控效果的可行性。

长期以来,噻唑膦和氟吡菌酰胺是我国防治根结线虫的主要药剂。然而,本研究显示,噻唑膦对番茄、胡萝卜和西瓜三种作物根结线虫病的防效均显著低于三氟吡啶胺,氟吡菌酰胺对西瓜根结线虫病的防效虽然也低于三氟吡啶胺,但两者差异不显著。噻唑膦作为有机磷类杀线剂,通过抑制乙酰胆碱酯



(a)处理组 C



(b)处理组 D

图7 不同处理组西瓜植株症状

Fig.7 Symptoms of watermelon plants in different treatment groups

酶(AChE)导致线虫麻痹死亡,但其连续使用已引起多地线虫种群AChE及解毒酶GST活性上调,导致靶标敏感性下降与抗药性发展^[22-23]。氟吡菌酰胺虽同为琥珀酸脱氢酶类抑制剂杀线剂,但其亚致死剂量对线虫的移动及繁殖抑制能力有限,防效稳定性不足,抗性风险逐渐显现^[14]。本研究中噻唑膦和氟吡菌酰胺在连作年限长、线虫基数大的田块中防效不佳,可能与上述抗性机制密切相关。

相比之下,三氟吡啶胺作为新一代琥珀酸脱氢酶类抑制剂杀线剂,通过抑制线虫线粒体复合体Ⅱ,阻断能量代谢,不仅能快速导致线虫死亡,还能抑制线虫虫卵孵化^[24]。此外,三氟吡啶胺与传统神经毒剂无交叉抗性,为其在高抗性地区的应用提供了优势。本研究中,三氟吡啶胺在三种作物上的防效均稳定在72%以上,最高达86.05%,且可显著促进作物增产,与陈昆圆等^[25]在甘薯、刘坤等^[11]在西瓜等的研究结果一致,进一步验证了其可靠性和广谱性。此外,其在西瓜田用药120 d后仍保持68.03%(施用剂量555 mL/hm²)和76.87%(施用剂量1155 mL/hm²)的防效,说明其具备良好的持效性,有助于减少施药次数,降低用药成本。结合三氟吡啶胺在三种作物中带来的显著增产效益(增产率在24.12%~64.11%之间)认为,该药剂在提升作物产量与品质方面亦展现出较大潜力,具有重要的推广应用价值。

综上所述,三氟吡啶胺以其独特的作用机制、高效的杀线活性、持久的防治效果,在当前线虫防治中

展现出显著优势。从生产实际与综合效益出发,现有研究表明其在不同用量条件下均可有效控制病害损失,降低经济成本。针对线虫病害发生程度不同的种植区,可结合实际发生情况科学调整用药策略。在实际应用中建议遵循“预防为主、综合防治”的原则,将其与不同作用机制的药剂轮换或混合使用,并结合农业措施和生物防治手段,构建可持续的线虫综合治理体系,延缓抗药性发展,保障农业安全生产。

参考文献:

[1] Jones J T, Haegeman A, Danchin E G J, et al. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology[J]. *Molecular Plant Pathology*, 2013, 14(9):946-961.

[2] Pires D, Vicente C S L, Menéndez E, et al. The fight against plant-parasitic nematodes: Current status of bacterial and fungal biocontrol agents[J]. *Pathogens*, 2022, 11(10):1178.

[3] Elling A A. Major emerging problems with minor *Meloidogyne* species[J]. *Phytopathology*, 2013, 103(11):1092-1102.

[4] Oladeji O A, Atungwu J J, Otusanya M O, et al. Agroecological soil amendment in watermelon systems: Synergistic effects of rock dust and poultry manure on nematode suppression and yield improvement[J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2025, 21(5):1148-1159.

[5] 金娜,陈永攀,刘倩,等. 我国蔬菜根结线虫发生、致害和绿色防控研究进展[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(1):424-438.

Jin N, Chen Y P, Liu Q, et al. Research progresses in occurrence, diagnoses, pathogenic mechanisms and integrated management of vegetable root-knot nematodes in China[J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1):424-438.

[6] 封云涛,李长松,李林,等. 胡萝卜根结线虫病防治药剂筛选试验[J]. *山西农业科学*, 2011, 39(8):856-857.

Feng Y T, Li C S, Li L, et al. Screening of nematocides for control of root-knot nematode in carrot[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2011, 39(8):856-857.

[7] 崔江宽,任豪豪,孟颢光,等. 我国烟草根结线虫病发生与防治研究进展[J]. *植物病理学报*, 2021, 51(5):663-682.

Cui J K, Ren H H, Meng H G, et al. Research progress on the occurrence and control of tobacco root knot nematode in China[J]. *Acta Phytopathologica Sinica*, 2021, 51(5):

663-682.

[8] 柴秋源,张洁,李晓强,等. 植物寄生线虫生防菌株 YB-366 的种类鉴定及防效测定[J]. *河南农业科学*, 2025, 54(6):92-99.

Chai Q Y, Zhang J, Li X Q, et al. Identification of biocontrol strain YB-366 and its control effect against plant-parasitic nematodes[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2025, 54(6):92-99.

[9] 王东,张妞,赵远征,等. 内蒙古马铃薯主栽品种对腐烂茎线虫病的室内抗性评价[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(9):105-116.

Wang D, Zhang N, Zhao Y Z, et al. Indoor resistance evaluation of major potato cultivars to *Ditylenchus destructor* in Inner Mongolia[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(9):105-116.

[10] 方文生,王秋霞,颜冬冬,等. 土壤熏蒸剂棉隆防治土传病害研究进展及未来发展趋势[J]. *植物保护学报*, 2023, 50(1):40-49.

Fang W S, Wang Q X, Yan D D, et al. Research progresses and future development trends of soil fumigant dazomet in control of soil-borne diseases[J]. *Journal of Plant Protection*, 2023, 50(1):40-49.

[11] 刘坤,周成方,席昕,等. 不同杀线虫剂对南方根结线虫的田间防效[J]. *中国植保导刊*, 2024, 44(2):65-67.

Liu K, Zhou C F, Xi X, et al. Preliminary study on the field control effect of different nematicides against *Meloidogyne incognita*[J]. *China Plant Protection*, 2024, 44(2):65-67.

[12] 曹塙程,方文生,李园,等. 我国土壤熏蒸消毒 60 年回顾[J]. *植物保护学报*, 2022, 49(1):325-335.

Cao A C, Fang W S, Li Y, et al. Review on 60 years of soil fumigation and disinfestation in China[J]. *Journal of Plant Protection*, 2022, 49(1):325-335.

[13] 吴青松. 南方根结线虫对噻唑膦的抗药性分析及其抗性治理策略初探[D]. 北京:中国农业科学院, 2016.

Wu Q S. Analysis on fosthiazate-resistance of *Meloidogyne incognita* and resistance management strategy[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2026.

[14] Wram C L, Zasada I A. Short-term effects of sublethal doses of nematicides on *Meloidogyne incognita*[J]. *Phytopathology*, 2019, 109(9):1605-1613.

[15] Avenot H F, Michailides T J. Progress in understanding molecular mechanisms and evolution of resistance to succinate dehydrogenase inhibiting (SDHI) fungicides in phytopathogenic fungi[J]. *Crop Protection*, 2010, 29(7):643-651.

- [16] 王燕燕. 三氟吡啶胺的专利布局概况[J]. 世界农药, 2024,46(10):20-25.
Wang Y Y. Overview of the patent layout of cyclobutrifluram[J]. World Pesticides, 2024,46(10):20-25.
- [17] 刘林芳,潘官友,冯泉实,等. 3种新药剂对黄瓜根结线虫病的防效研究[J]. 湖北植保, 2025(2):43-45.
Liu L F, Pan G Y, Feng Q S, et al. Study on the control effect of three new drug agents on cucumber root knot nematode disease[J]. Hubei Plant Protection, 2025(2):43-45.
- [18] Liu W Y, Shao H D, Qi D N, et al. The new nematicide cyclobutrifluram targets the mitochondrial succinate dehydrogenase complex in *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024,25(13):6914.
- [19] 雷志远,邢诚,陆昭金,等. 不同药剂防治甘薯根结线虫病的田间药效评价[J/OL]. 热带生物学报, 2025.<https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.20250113>.
Lei Z Y, Xing C, Lu Z J, et al. Field efficacy evaluation of different nematicides against root-knot nematode disease in sweet potato[J/OL]. Journal of Tropical Biology, 2025. <https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdsxb.20250113>.
- [20] 张自启,韩瑞华,王淑枝,等. 50%三氟吡啶胺FS对甘薯茎线虫病的田间药效评价[J]. 农药, 2024,63(3):209-211.
Zhang Z Q, Han R H, Wang S Z, et al. Field efficacy of cyclobutrifluram 50% FS against sweet potato stem nematode disease[J]. Agrochemicals, 2024,63(3):209-211.
- [21] Garabedian S, Van Gundy S D. Use of avermectins for the control of *Meloidogyne incognita* on tomatoes[J]. Journal of Nematology, 1983,15(4):503-510.
- [22] 刘阳,李长洋,姚志浩,等. 作物根结线虫病化学防治研究进展[J]. 农药学报, 2024,26(1):8-22.
Liu Y, Li C Y, Yao Z H, et al. Advances in chemical control of crop root-knot nematode disease[J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2024,26(1):8-22.
- [23] Fujikawa A, Perry R N, Toyota K. Occurrence of a population of the root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*, with low sensitivity to two major nematicides, fosthiazate and fluopyram, in Japan[J]. Pest Management Science, 2025,81(2):698-706.
- [24] Flemming A, Guest M, Luksch T, et al. The discovery of cyclobutrifluram, a new molecule with powerful activity against nematodes and diseases[J]. Pest Management Science, 2025,81(5):2480-2490.
- [25] 陈昆圆,焦永吉,王毓琦,等. 新型杀线剂对甘薯腐烂茎线虫的防治效果[J]. 农药, 2023,62(11):838-843.
Chen K Y, Jiao Y J, Wang Y Q, et al. Control efficacy of new nematicides to *Ditylenchus destructor* of sweet potato[J]. Agrochemicals, 2023,62(11):838-843.

(编辑 杨晓燕)