

· 植物保护 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250039



主持人: 缪卫国, 吴少英

Open Access

杀线剂叶面喷施处理防治番茄根结线虫病

惠仁杰[#], 廖雨祺, 余姿林, 丁晓帆^{*}

(海南大学 热带农林学院/热带农林生物灾害绿色防控教育部重点实验室, 海南 儋州 571737 中国)

摘要: 根结线虫(*Meloidogyne* spp.)是全球最常见的植物寄生线虫之一,严重威胁农业生产,化学药剂根围施药仍是其目前主要的防治手段。本研究采用叶面喷施杀线剂的方法探索其对番茄根结线虫的盆栽防效,以及根系分泌物(RE)和根系代谢物(RM)对二龄幼虫(J2s)和卵孵化的抑杀效果。结果表明,氟吡菌酰胺、噻唑磷、阿维菌素叶面喷施对番茄根结线虫病具有一定的盆栽防效;整体上根系分泌物较根系代谢物对J2s、卵孵化的抑杀效果好,其中,噻唑磷叶面喷施处理获得的RE对J2s表现出极强的抑杀作用,在施药后第1天致死率就达到84.10%。研究结果初步证明了叶面喷施杀线剂防治根结线虫的可行性,可为热带设施农业减少土壤施药、“老药新用”提供创新策略。

关键词: 南方根结线虫; 杀线剂; 叶面喷施; 根系分泌物; 根系代谢物

中图分类号: S482.293 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2025)05-0692-09

惠仁杰, 廖雨祺, 余姿林, 等. 杀线剂叶面喷施处理防治番茄根结线虫病 [J]. 热带生物学报, 2025, 16(5): 692-700. doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250039

植物寄生线虫(plant parasitic nematodes, PPNs)每年造成全球农作物经济损失高达1570亿美元,其中,根结线虫属(*Meloidogyne* spp.)严重威胁番茄等重要经济作物的安全种植。南方根结线虫(*Meloidogyne incognita*)作为番茄根结线虫病的主要病原,通过侵染根系导致植株生长受阻甚至死亡,每年造成番茄产量损失可达22%~30%^[1-3]。目前,根结线虫的防治方法包括生物防治、农业防治、物理防治、开发抗性作物和化学防治等^[4-8],其中以化学药剂通过拌土、灌根的施药方法为主。2020年,中国杀线剂农药登记48种,仅化学杀线剂就多达31种,占杀线剂种类的64.58%;其中,除了阿维菌素、噻唑磷、氟吡菌酰胺等少数产品之外,存在可供选择杀线剂种类较少、施药方法单一等问题,且不合理用药导致的环境安全和线虫抗药性也面临巨大挑战^[9-10]。已有研究表明,当植物受到外界因素干扰,会造成萜类、酚类、黄酮类、

生物碱和木质素类等与植物抗病和抗逆相关的次级代谢物质发生变化^[11]。植物的诱导抗性是指植物在诱导子(生物或非生物)的刺激或作用下激活自身防御机制,产生获得性免疫功能,以避免或减少病原物对植物的伤害^[12-14]。Hoysted等^[15]研究发现,蚜虫胁迫通过调控马铃薯根系分泌物组分抑制马铃薯白线虫(*Globodera pallida*)发育,进而影响线虫卵的孵化。Udalova等^[16]发现外源纳米硒通过参与植物根和叶中PR-6基因的表达和增加蛋白酶抑制剂的活性,诱导番茄对根结线虫的系统抗性,减少线虫侵害,抑制线虫发育。根系在植物生长过程中产生无机离子或小分子有机物,用于调节根际环境从而使植物更好生存,这部分物质统称为根系分泌物^[17]。根结线虫可以通过化学感受器,以根系分泌物为信号来定位寄主^[18]。特定的根代谢物可作为引诱剂和驱避剂来影响线虫的行为^[19]。茄科植物中的水杨酸甲酯是根结线

收稿日期: 2025-03-01

修回日期: 2025-03-12

基金项目: “PHC949 防治根结线虫田间药效试验”横向项目(HD-KYH-2024047)

[#]第一作者: 惠仁杰(1999—),男,海南大学热带农林学院2022级硕士研究生。Email: 1808066164@qq.com

^{*}通信作者: 丁晓帆(1979—),女,副教授,硕士生导师。研究方向: 植物病原线虫。Email: dingxiaofan526@163.com

虫二龄幼虫的强引诱剂^[20-21]。山柰酚、槲皮素和杨梅素等黄酮类化合物对南方根结线虫具有驱避作用^[22-23]。

本研究改变常见杀线剂传统的灌根、拌土等施药方法,采用叶面喷雾法,探索其对番茄根结线虫病的防治效果,并初步探究杀线剂叶面喷施处理后番茄根系分泌物及代谢物对南方根结线虫的抑杀效果。本研究打破传统杀线剂的施药方式,为杀线剂叶面喷施防治根结线虫病提供理论支持,有助于探索杀线“老药新用”的新路径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试线虫 南方根结线虫由海南大学热带农林学院植物线虫实验室分离鉴定,并在番茄(*Solanum lycopersicum*)上于 28 °C 温室中通过单卵块扩繁。

1.1.2 供试番茄 试验用番茄品种为感病品种‘改良摇钱 228 番茄’,广州亚蔬园艺种苗有限公司生产。

1.1.3 供试药剂 95% 噻唑磷原药,北京翰隆达科技发展有限公司生产;98% 氟吡菌酰胺原药,北京伊诺凯科技有限公司生产;97% 阿维菌素原药,海南省宝信生物科技有限公司生产;94% 甲维盐原药,海南海道森科技有限公司生产。

1.2 方法

1.2.1 杀线剂对南方根结线虫二龄幼虫的毒力测定 杀线剂系列浓度溶液配置:称取甲维盐、阿维菌素、氟吡菌酰胺、噻唑磷原药各 10 mg,溶于 1 mL 二甲基甲酰胺(N,N-dimethyl formamide, DMF),然后用 0.1%(v/v,下同)Tween-80 溶液将杀线剂依次稀释为:6.25、12.5、25、50、100 mg·L⁻¹。

供试二龄幼虫:洗净番茄病根,挑取卵囊,置于便携式线虫孵化装置^[24]、28 °C 孵育,逐日收集根结线虫二龄幼虫(J2s)备用。

毒力测定:在 12 孔细胞板中依次加入 0.5 mL 药液和 0.5 mL 根结线虫 J2s 悬液(200 条·mL⁻¹),药液终浓度分别为 3.125、6.25、12.5、25、50 mg·L⁻¹,同时以有机溶剂 0.1% Tween-80 溶液(含 5.0 mL·L⁻¹ DMF)作为对照(CK),共 21 个处理,每

个处理设置 3 个重复。置于 28 °C 恒温箱中孵育,24 h 后镜检统计线虫死亡情况,用细钢针(或睫毛针)反复触碰 J2 判断其死活,线虫缓慢扭动为存活,僵直不动为死亡,记录死虫数、活虫数,计算死亡率(1)和校正死亡率(2)^[25-26]。

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

$$\text{校正死亡率} = \frac{\text{处理死亡率} - \text{对照死亡率}}{1 - \text{对照死亡率}} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.2 杀线剂叶面喷施处理防治番茄根结线虫病

盆栽试验 试验设计:待番茄长至 3~4 片真叶时,移栽到装有 $V_{\text{无菌土}}:V_{\text{基质}}=3:1$ 的塑料花盆中(每盆 1 株)。定植 14 d 后进行药剂处理(单位:株)。OS(CK):0.1% Tween-80(含 6.0 mL·L⁻¹ DMF, 5 mL 叶面喷施);J20:20 mg·L⁻¹ 甲维盐(5 mL 叶面喷施);J40:40 mg·L⁻¹ 甲维盐(5 mL 叶面喷施);F20:20 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺(5 mL 叶面喷施);F40:40 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺(5 mL 叶面喷施);A20:20 mg·L⁻¹ 阿维菌素(5 mL 叶面喷施);A40:40 mg·L⁻¹ 阿维菌素(5 mL 叶面喷施);S30:30 mg·L⁻¹ 噻唑磷(5 mL 叶面喷施);S60:60 mg·L⁻¹ 噻唑磷(5 mL 叶面喷施);S30*:30 mg·L⁻¹ 噻唑磷(30 mL 灌根);J30*:20 mg·L⁻¹ 甲维盐(30 mL 灌根)。共设 11 个处理,每个处理 3 株,设 3 次重复,随机区组排列。施药后第 3 天接种线虫,接种量为 300 头·株⁻¹,接虫 7 d 后进行第 2 次施药(S30*和 J30*除外)。

结果统计:接种线虫 30 d 后测量植株根系鲜质量^[27]。统计每株根结数、卵块数并按以下分级标准和公式计算相对繁殖指数(3)、每克根结数(4)、相对防效(5)和病情指数(6)^[28-29]。

分级标准:

0 级,根部无根结;

1 级,根部有根结 1~3 个;

2 级,根部有根结 4~10 个;

3 级,根部有根结 11~30 个;

4 级,根部有根结 31~80 个,少数根结上有再次根结;

5 级,根部有根结 80 个及以上,多数根结相互连结成根结团块。

$$\text{相对繁殖指数} = \frac{\text{处理产生卵块数}}{\text{CK产生卵块数}}, \quad (3)$$

$$\text{每克根根结数} = \frac{\text{单株根结数}}{\text{单株根鲜质量}}, \quad (4)$$

相对防效 =

$$\frac{\text{CK每克根根结数} - \text{处理每克根根结数}}{\text{CK每克根根结数}} \times 100\%, \quad (5)$$

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{各级植株数} \times \text{级数})}{\text{调查总株数} \times \text{最高级数}} \times 100. \quad (6)$$

1.2.3 杀线剂叶面喷施处理的番茄根系分泌物及代谢物对南方根结线虫的影响

番茄根系分泌物及代谢物的获得: 选用 3~4 叶期的番茄苗, 小心取出整个根系洗净, 再用无菌水清洗 2~3 次。将番茄苗整个根系放入盛有 10 mL 无菌水的离心管中, 用封口膜封闭管口。分别配置氟吡菌酰胺、阿维菌素、噻唑磷梯度药液: 5、10、20、40 mg·L⁻¹, 以 0.1% Tween-80(含 4.0 mL·L⁻¹ DMF)作为对照(OS)。各取 5 mL 药液均匀喷施在番茄苗叶面上, 每处理 10 株。置于光照恒温培养箱(光: 暗=16 h: 8 h, 28 °C)中培养 72 h, 收集各处理番茄根系浸泡液、用滤纸过滤杂质后真空冷冻干燥适量浓缩, 按每克根浸泡液定容至 5 mL 后, 过 0.22 μm 滤膜获得根系分泌物(root exudates, RE)。各处理番茄根加入适量无菌水、用冷冻研磨仪充分研磨后, 5 000 r·min⁻¹ 离心 5 min 收集上清液、真空冷冻干燥浓缩上清液, 按每克根的上清液定容至 5 mL 后, 过 0.22 μm 滤膜获得根系代谢物(root metabolites, RM)。根系分泌物和根系代谢物均置于-80 °C 保存备用^[30]。

对 J2s 的毒杀作用: 分别取各处理收集的番茄根系分泌物(RE)和代谢物(RM)各 1.5 mL 和 0.5 mL J2s 悬浮液(200 条·mL⁻¹)加入到 12 孔培养板孔中混匀, 共设置 24 个处理, 并分别以 0.1% Tween-80(含 4.0 mL·L⁻¹ DMF)喷施番茄获得的 OS-RE 和 OS-RM 为对照, 各处理设 3 次重复。将 12 孔培养板置于 28 °C 培养箱中孵育, 于 72 h 统计线虫死亡情况, 并参照 1.2.1 计算校正死亡率。

对卵孵化的抑制作用: 挑取番茄病根上的根结线虫卵囊, 将卵囊置于 1.0% 次氯酸钠溶液中振荡 1 min 后 10 000 r·min⁻¹ 离心, 弃上清留底液, 用灭菌水清洗 3 次, 加水振荡后收集上清液得到单卵悬浮液^[31-32]。取 1.5 mL 各处理收集的番茄根系分泌物(RE)和 0.5 mL 卵悬浮液(200 粒·mL⁻¹)加

到 12 孔培养板中混匀, 共 12 个处理, 并以 0.1% Tween-80(含 4.0 mL·L⁻¹ DMF)获得的 OS-RE 为对照, 各处理设 3 次重复。置于 28 °C 的培养箱中孵育, 每 2 d 在体视显微镜(Leica 体视显微镜 SAPO)下观察孵化情况 1 次, 避免污染, 第 12 天统计每孔孵化幼虫数和未孵化卵数, 计算孵化率(7)、孵化抑制率(8)^[33-34]。

$$\text{孵化率} = \frac{\text{孵化总虫数}}{\text{孵化总虫数} + \text{未孵化单卵数}} \times 100\%, \quad (7)$$

$$\text{孵化抑制率} = \frac{\text{CK孵化率} - \text{处理孵化率}}{\text{CK孵化率}} \times 100\%. \quad (8)$$

1.2.4 杀线剂叶面喷施处理诱导番茄不同时段根系分泌物及代谢物对南方根结线虫 J2s 的致死作用

番茄根系分泌物及代谢物的获得: 参照 1.2.3, 分别将噻唑磷、氟吡菌酰胺、阿维菌素母液稀释为 20、40 mg·L⁻¹, 以 0.1% Tween-80(含 4.0 mL·L⁻¹ DMF)作为对照(OS), 在叶面喷施处理后的 6 d 内逐日收集番茄根系分泌物与代谢物。

对 J2s 的致死作用: 3 种药剂处理 6 d 内逐日收集的番茄根系分泌物(RE)、代谢物(RM)各 1.5 mL 和 0.5 mL J2s 悬浮液(200 条·mL⁻¹)加入到 12 孔培养板孔中混匀, 共 36×2 个处理, 并分别以 0.1% Tween-80(4.0 mL·L⁻¹ DMF)获得的 OS-RE 和 OS-RM 为对照, 每处理设 3 次重复。置于 28 °C 培养箱中孵育, 72 h 后观察统计线虫死亡情况, 并参照 1.2.1 计算校正死亡率。

1.3 数据分析 使用 SPSS 26.0 统计分析软件用于单因素方差分析(ANOVA)、Duncan 法进行多重比较和差异显著性检验, 显著性水平设置 P<0.05。通过概率回归模型进行毒力分析。利用 graphpad8.3 软件作图, 图表中数据均为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 4 种杀线剂对南方根结线虫的毒力 处理 24 h 后, 4 种药剂对南方根结线虫 J2s 的生物活性均较高(表 1)。氟吡菌酰胺杀线活性最好, 其 LC₅₀、LC₉₉ 值分别为 1.003、19.121 mg·L⁻¹, 阿维菌素次之, 分别为 1.693、20.565 mg·L⁻¹, 甲维盐和噻唑磷稍差, 但噻唑磷毒力方程的斜率最大, 说明 J2s 对噻唑磷的质量浓度变化表现最敏感, 噻唑磷在一定浓度变化区间即可快速提升 J2s 的致死率。

表 1 4 种杀线剂对南方根结线虫 J2s 的毒力

Tab. 1 Toxicity of nematicides against the second-stage juveniles of *Meloidogyne incognita*

药剂 Nematicide	斜率±标准误差 Slope±SE	LC ₅₀ (95%CL)/ (mg·L ⁻¹)	LC ₉₉ (95%CL)/ (mg·L ⁻¹)	自由度 df	P 值 P value	卡方值 Chi-square
甲维盐(J) Emamectin benzoate	2.315±0.174	2.490 (2.092 ~ 2.859)	25.235 (20.413 ~ 33.347)	13	0.692	10.018
阿维菌素(A) Abamectin	2.145±0.198	1.693 (1.277 ~ 2.076)	20.565 (16.293 ~ 28.461)	13	0.503	12.299
氟吡菌酰胺(F) Fluopyram	1.817±0.166	1.003 (0.592 ~ 1.410)	19.121 (14.543 ~ 29.008)	13	0.295	15.199
噻唑磷(S) Fosthiazate	3.145±0.169	4.654 (4.112 ~ 5.186)	25.557 (20.400 ~ 34.719)	13	0.014	26.646

2.2 杀线剂叶面喷施处理对番茄根结线虫病的盆栽药效 噻唑磷、氟吡菌酰胺、阿维菌素叶面喷施处理对番茄根结线虫有一定的盆栽防效(表 2)。与对照相比,噻唑磷、氟吡菌酰胺、阿维菌素叶面喷施处理减少了番茄根结的形成,各处理每克根根结数均比 CK 少,其中 F40、S60 显著降低番茄的每克根根结数;同时,药剂处理增加番茄根系鲜

质量。药剂叶面喷施处理或灌根处理后,线虫繁殖指数均小于 1,说明施药处理均能降低线虫的繁殖量。各药剂叶面喷施处理的相对防效虽不及灌根处理效果明显,但 F40 和 S60 叶面喷施处理的相对防效仍分别高达 43.98% 和 41.94%,显著高于其他低剂量叶面喷施处理。甲维盐叶面喷施处理无明显防治效果,因此在后续试验中未做测试。

表 2 杀线剂叶面喷施处理对番茄根结线虫的盆栽药效

Tab. 2 Control effect of foliar application of nematicides on *Meloidogyne incognita* in tomato in pots

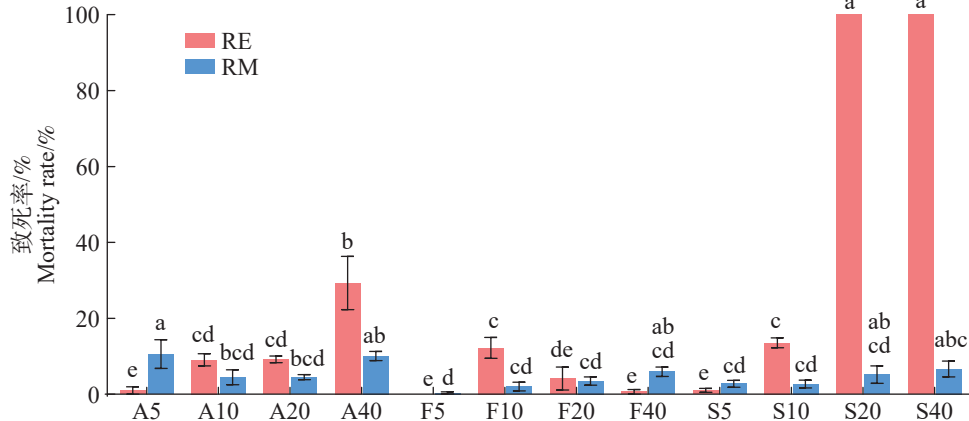
处理 Treatment	根系鲜质量增长率/% Growth rate of fresh root weight/%	每克根结数/(个·g ⁻¹) The number of root knot per gram root/(number·g ⁻¹)	相对繁殖指数 Relative reproduction index	病情指数 Disease index	相对防效/% Control efficiency/%
CK		(10.66±4.53) ^{abc}	—	(86.11±6.73) ^{ab}	—
J20	(21.42±4.18) ^b	(11.74±3.91) ^a	(0.58±0.33) ^a	(88.89±7.70) ^a	(-10.15±36.73) ^c
J40	(19.67±2.21) ^b	(11.36±2.08) ^{ab}	(0.53±0.33) ^{ab}	(87.22±7.52) ^{ab}	(-6.55±19.52) ^c
F20	(12.45±4.32) ^b	(8.31±3.46) ^{cd}	(0.53±0.59) ^{abcd}	(78.89±8.39) ^{abcd}	(22.04±32.45) ^{bcd}
F40	(-3.29±5.28) ^c	(5.97±2.58) ^d	(0.48±0.38) ^d	(68.89±7.70) ^d	(43.98±24.15) ^b
A20	(5.25±4.90) ^{bc}	(9.84±3.22) ^{abc}	(0.56±0.29) ^{abcd}	(79.44±5.89) ^{abcd}	(7.66±30.24) ^{dc}
A40	(14.23±6.55) ^b	(8.71±2.33) ^{bcd}	(0.71±0.65) ^a	(83.89±3.47) ^{abc}	(18.32±21.82) ^{cd}
S30	(-4.55±6.06) ^c	(8.60±3.01) ^{bcd}	(0.43±0.29) ^{bcd}	(76.11±3.47) ^{bcd}	(19.29±28.25) ^{cd}
S60	(5.70±4.55) ^{bc}	(6.19±2.74) ^d	(0.71±0.65) ^{cd}	(72.22±1.92) ^{cd}	(41.94±25.69) ^{bc}
J20*	(50.69±5.38) ^a	(1.60±1.10) ^e	(0.15±0.25) ^{bc}	(51.67±4.41) ^e	(84.99±10.37) ^a
S30*	(17.77±5.87) ^b	(0.23±0.21) ^e	(0.43±0.35) ^c	(16.67±8.82) ^f	(97.88±1.94) ^a

注: CK.0.1%Tween-80(含6.0 mL·L⁻¹ DMF, 叶面喷施); J20.20 mg·L⁻¹甲维盐(叶面喷施); J40.40 mg·L⁻¹甲维盐(叶面喷施); F20.20 mg·L⁻¹氟吡菌酰胺(叶面喷施); F40.40 mg·L⁻¹氟吡菌酰胺(叶面喷施); A20.20 mg·L⁻¹阿维菌素(叶面喷施); A40.40 mg·L⁻¹阿维菌素(叶面喷施); S30.30 mg·L⁻¹噻唑磷(叶面喷施); S60.60 mg·L⁻¹噻唑磷(叶面喷施); J20*.20 mg·L⁻¹甲维盐(灌根); S30*.30 mg·L⁻¹噻唑磷(灌根)。每个数值代表平均值±标准差(n=10),列中的每个字母代表显著差异程度;P<0.05。

Note: CK.0.1%Tween-80(Containing 6.0 mg·L⁻¹ DMF, foliar application); J20.20 mg·L⁻¹ Emamectin benzoate(Foliar application); J40.40 mg·L⁻¹ Emamectin benzoate(Foliar application); F20.20 mg·L⁻¹ Flupyram(Foliar application); F40.40 mg·L⁻¹ Flupyram(Foliar application); A20.20 mg·L⁻¹ Abamectin(Foliar application); A40.40 mg·L⁻¹ Abamectin(Foliar application); S30.30 mg·L⁻¹ Fosthiazate(Foliar application); S60.60 mg·L⁻¹ Fosthiazate(Foliar application); J20*.20 mg·L⁻¹ Emamectin benzoate(Root irrigation); S30*.30 mg·L⁻¹ Fosthiazate(Root irrigation). Each value represents mean ± standard deviation(n=10), and each letter in the column represents the degree of significant difference: P<0.05.

2.3 杀线剂叶面喷施处理的番茄根系分泌物 (RE) 及代谢物 (RM) 对南方根结线虫 J2s 的致死效果 20、40 mg·L⁻¹ 阿维菌素、噻唑磷叶面喷雾 3 d 后得到的 RE 对南方根结线虫有一定的致死效果(图 1)。与对照组相比,阿维菌素随着处理质量浓度的增加 RE 对 J2s 的致死率提高, A40-RE 致死率达到 29.3%; 而阿维菌素处理获得的

RM 对 J2s 的致死效果较差,且不稳定 20、40 mg·L⁻¹ 处理获得的 RE 对 J2s 的致死效果最好,随着处理质量浓度的提高而增加, S10-RE 致死率为 13.55% S20-RE 和 S40-RE 致死率均高达 100%, 但噻唑磷处理的 RM 对 J2s 效果较差; 氟吡菌酰胺处理获得的 RE 及 RM 均对 J2s 无明显致死效果。



RE.根系分泌物; RM.根系代谢物; A5.5 mg·L⁻¹ 阿维菌素; F5.5 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺; S5.5 mg·L⁻¹ 噻唑磷, 依此类推。

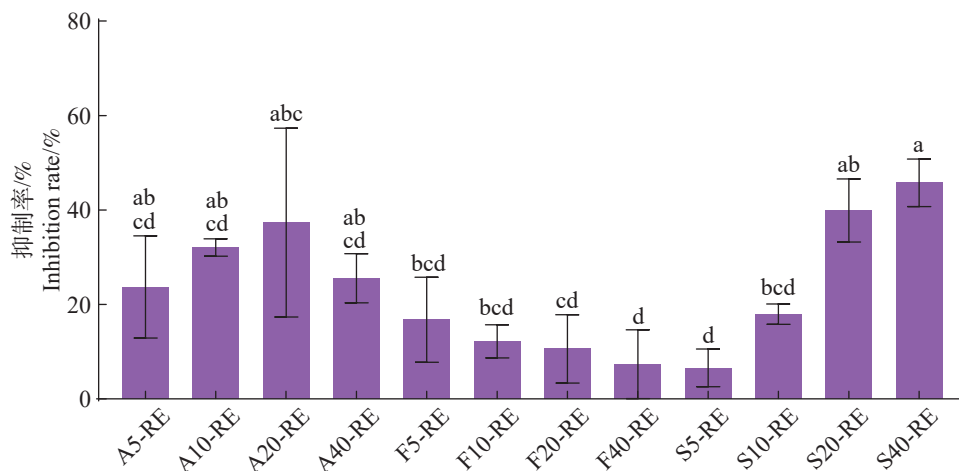
RE.Root exudates; RM.Root metabolites; A5.5 mg·L⁻¹ Avermectin; F5.5 mg·L⁻¹ Flupyrar; S5.5 mg·L⁻¹ Fosthiazate, and so on.

图 1 经杀线剂叶面喷施处理的番茄根系分泌物及代谢物对南方根结线虫 J2s 的致死效果

Fig. 1 Lethal effects of root exudates and root metabolites of tomato sprayed with nematocides on the second-stage juveniles of *Meloidogyne incognita*

2.4 杀线剂叶面喷施处理的番茄根系分泌物 (RE) 对南方根结线虫卵孵化抑制效果 叶面喷施杀线剂后,番茄 RE 对线虫卵孵化的抑制作用表现不同(图 2)。噻唑磷 RE 的抑制效果最好, S20-RE

和 S40-RE 处理对卵孵化的抑制率分别达 39.90% 和 45.78%; 阿维菌素 A20-RE 抑制率达到峰值 37.34%, 而 A40-RE 则下降至 25.56%; 氟吡菌酰胺 RE 效果最差。



RE.根系分泌物; A5.5 mg·L⁻¹ 阿维菌素; F5.5 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺; S5.5 mg·L⁻¹ 噻唑磷, 依此类推。

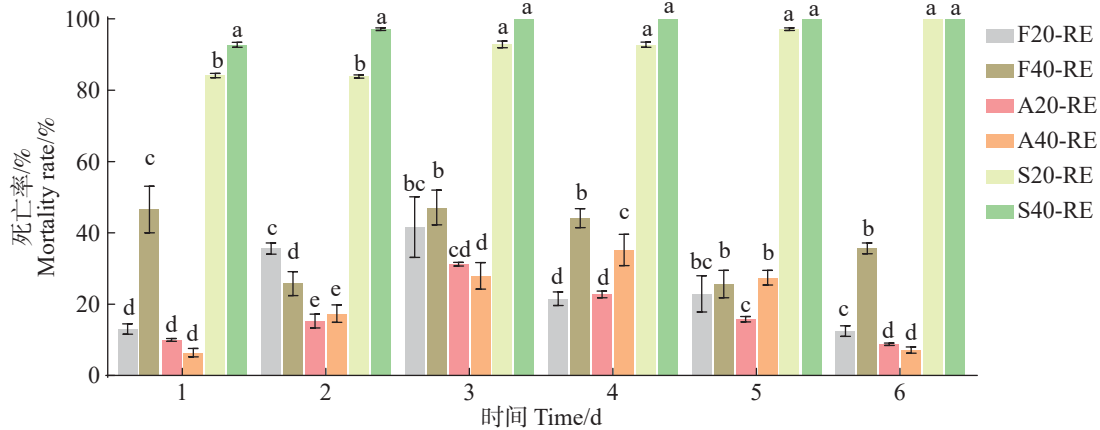
RE.Root exudates; A5.5 mg·L⁻¹ Avermectin; F5.5 mg·L⁻¹ Flupyrar; S5.5 mg·L⁻¹ Fosthiazate, and so on.

图 2 经杀线剂叶面喷施处理的番茄根系分泌物对南方根结线虫卵孵化的抑制作用(12 d)

Fig. 2 Inhibition effect of root exudates of tomato sprayed with nematocides on the eggs hatching of *Meloidogyne incognita* (12 d)

2.5 杀线剂叶面喷施处理的番茄不同时段根系分泌物 (RE) 对南方根结线虫 J2s 的致死作用 番茄喷施杀线剂后不同时段提取的 RE 对 J2s 的致死效果差异显著(图 3)。噻唑磷处理组对 J2s 的致死效果显著高于阿维菌素和氟吡菌酰胺, S20-RE

对 J2s 的致死率随着 RE 获取时间的延长而上升, 至第 6 天达 100%, 而 S40-RE 在第 3 天致死率就达 100%。F40-RE 在第 3 天达到峰值, 为 47.12%, A40-RE 在第 4 天达到峰值, 仅为 35.21%, 两者均显著低于噻唑磷。

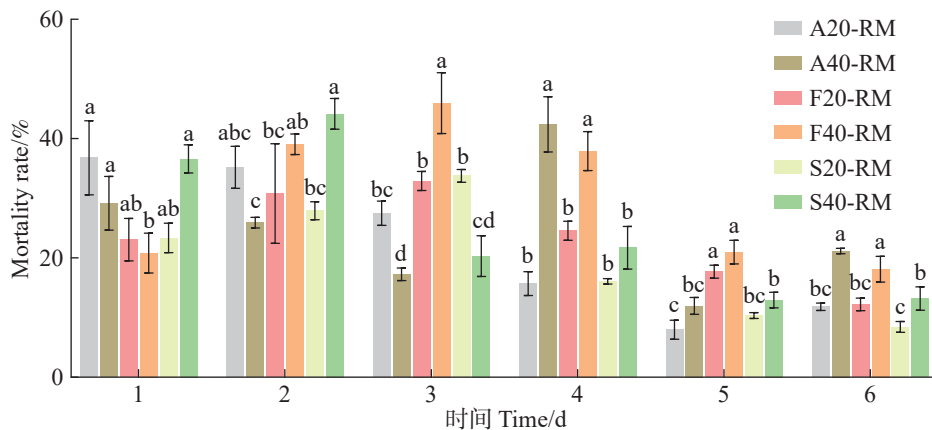


RE.根系分泌物; A20.20 mg·L⁻¹ 阿维菌素; F20.20 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺; S20.20 mg·L⁻¹ 噻唑磷, 依此类推。
RM.Root metabolites; A20.20 mg·L⁻¹ Avermectin; F20.20 mg·L⁻¹ Flupyrim; S20.20 mg·L⁻¹ Fosthiazate, and so on.

图 3 杀线剂叶面喷施处理诱导番茄不同时段根系分泌物对南方根结线虫 J2s 的致死效果
Fig. 3 Lethal effects of tomato root exudates induced by foliar application of nematocides leaf different time on J2s of *Meloidogyne incognita*

2.6 杀线剂叶面喷施处理的番茄不同时段根系代谢物 (RM) 对南方根结线虫 J2s 的致死作用 喷施杀线剂后不同时段提取的 RM 对 J2s 的致死效果不同(图 4)。阿维菌素处理组 RM 对 J2s 致死

效果整体呈现随着时间延长而下降; 氟吡菌酰胺处理组 RM 整体呈现先增后减的趋势, 且 F40-RM 在第 3 天达峰值 45.97%; 噻唑磷 S40-RM 在第 2 天达最高 44.15%, 随后呈下降趋势。



RM.根系代谢物; A20.20 mg·L⁻¹ 阿维菌素; F20.20 mg·L⁻¹ 氟吡菌酰胺; S20.20 mg·L⁻¹ 噻唑磷, 依此类推。
RM. Root metabolites; A20.20 mg·L⁻¹ Avermectin; F20.20 mg·L⁻¹ Flupyrim; S20.20 mg·L⁻¹ Fosthiazate, and so on.

图 4 杀线剂叶面喷施处理诱导番茄不同时段根系代谢物对南方根结线虫 J2s 的致死效果
Fig. 4 Lethal effects of tomato root metabolites induced by foliar application of nematocides at different time on J2s of *Meloidogyne incognita*

3 讨论

根结线虫是世界十大重要植物寄生线虫之首^[2], 不仅难以防治而且易与其他植物病原体相互作用

用, 形成复合侵染^[35]。目前根结线虫主要仍以噻唑磷、氟吡菌酰胺等化学药剂防治为主, 通过拌土、灌根进行施药^[6,9]。有研究者发现, 噻唑磷可在番茄体内进行内吸输导, 通过根部施药可兼治地上

部害虫如蚜虫、叶螨、蓟马等^[36-37]; 氟吡菌酰胺具有优异的内吸传导性, 通过叶或根吸收后在植物体内传导达到抑菌效果^[38]。在本研究中, 氟吡菌酰胺、噻唑磷叶面喷施处理对番茄根结线虫病均具有一定防治效果, 同时, 叶面喷施处理获得的根系分泌物(RE)对 J2s 和卵孵化均有较好的抑杀效果, 推测与氟吡菌酰胺和噻唑磷从番茄茎叶向根部输导有关。

当植物受到外界因素干扰时, 会引起植物产生抗性相关次级代谢物质, 可作为引诱剂和驱避剂来影响线虫行为^[11,19]。蚜虫取食马铃薯后, 其根系分泌会抑制马铃薯白线虫(*Globodera pallida*)卵的孵化, 在暴露于受更多蚜虫侵染的马铃薯植株根系分泌物的孢囊中, *Gpa-nep-1* 的上调显著减弱^[15]。氟吡菌酰胺处理大豆幼苗后, 出现多个与系统抗性相关的基因差异表达, 这表明氟吡菌酰胺除了已知的杀线虫活性外, 存在诱导大豆系统抗性的可能^[39]。纳米硒喷施番茄植株叶面后, 根系分泌物能够抑制根结线虫卵的孵化, 且对根结线虫具有显著的盆栽防效^[3]。本研究发现噻唑磷叶面喷施处理得到的 RE 对 J2s 具有极高的致死率, 推测除了药剂的内吸性之外, 噻唑磷可能诱导番茄合成了毒性代谢物(如黄酮类), 从而对南方根结线虫起到杀伤作用。而噻唑磷处理诱导的根系代谢物(RM)对 J2s 的作用不佳, 推测与采用水溶性提取方法导致非水溶性活性物质提取失败有关。因此, 后续将完善 RM 的提取方法, 并开展探索噻唑磷叶面喷施处理诱导番茄抗根结线虫的机制。

参考文献:

- [1] COYNE D L, CORTADA L, DALZELL J J, et al. Plant-parasitic nematodes and food security in sub-Saharan Africa[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2018, 56: 381 – 403.
- [2] 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.
- [3] DAOUSH A S M, HENDAWAY M H, YASEEN R, et al. Effect of biosynthesized nanoselenium on controlling tomato root-knot nematode *Meloidogyne incognita*[J]. *Agronomy*, 2023, 13(7): 1668.
- [4] WASWA S J, WACEKE J W, MWANGI M. Compatibility of velum® (synthetic nematicide) with endophytic *Colletotrichum nigrum* and commercial *Trichoderma asperellum* against root-knot nematodes on tree tomato[J]. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2024, 36(11): 278 – 292.
- [5] QIAO K, LIU Q C, ZHANG S A. Evaluation of fluazaindolizine, a new nematicide for management of *Meloidogyne incognita* in squash in calcareous soils[J]. *Crop Protection*, 2021, 143: 105469.
- [6] BROWN C R, MOJTAHEDI H, JAMES S, et al. Development and evaluation of potato breeding lines with introgressed resistance to Columbia root-knot nematode (*Meloidogyne chitwoodi*)[J]. *American Journal of Potato Research*, 2006, 83(1): 1 – 8.
- [7] NICO A I, JIMÉNEZ-DÍAZ R M, CASTILLO P. Control of root-knot nematodes by composted agro-industrial wastes in potting mixtures[J]. *Crop Protection*, 2004, 23(7): 581 – 587.
- [8] TALAVERA M, VERDEJO-LUCAS S, ORNAT C, et al. Crop rotations with *Mi* gene resistant and susceptible tomato cultivars for management of root-knot nematodes in plastic houses[J]. *Crop Protection*, 2009, 28(8): 662 – 667.
- [9] 刘晓艳, 闵勇, 饶犇, 等. 杀线虫剂产品研究进展[J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37(3): 592 – 597.
- [10] 张玉龙, 邹俊杰, 唐艳梅. 根结线虫防治技术研究[J]. *现代农村科技*, 2023(7): 52 – 53.
- [11] CAO W H, LIU J, ZHOU Q Y, et al. Expression of tobacco ethylene receptor NTHK1 alters plant responses to salt stress[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(7): 1210 – 1219.
- [12] RYALS J A, NEUENSCHWANDER U H, WILLITS M G, et al. Systemic acquired resistance[J]. *The Plant Cell*, 1996, 8(10): 1809.
- [13] VALLAD G E, GOODMAN R M. Systemic acquired resistance and induced systemic resistance in conventional agriculture[J]. *Crop Science*, 2004, 44(6): 1920 – 1934.
- [14] DA ROCHA A B, HAMMERSCHMIDT R. History and perspectives on the use of disease resistance inducers in horticultural crops[J]. *HortTechnology*, 2005, 15(3): 518 – 529.
- [15] HOYSTED G A, BELL C A, LILLEY C J, et al. Aphid colonization affects potato root exudate composition and the hatching of a soil borne pathogen[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1278.
- [16] UDALOVA Z V, FOLMANIS G E, KHASANOV F K, et al. Selenium nanoparticles-an inducer of tomato resistance to the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* (kofoed et white, 1919) chitwood 1949[J]. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 2018, 482(1): 264 – 267.
- [17] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3496 – 3504.
- [18] BIRD D M. Signaling between nematodes and plants[J].

- Current Opinion in Plant Biology*, 2004, 7(4): 372 – 376.
- [19] REYNOLDS A M, DUTTA T K, CURTIS R H C, et al. Chemotaxis can take plant-parasitic nematodes to the source of a chemo-attractant *via* the shortest possible routes[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2011, 8(57): 568 – 577.
- [20] KIHKA R, MURUNGI L K, COYNE D, et al. Parasitic nematode *Meloidogyne incognita* interactions with different *Capsicum annum* cultivars reveal the chemical constituents modulating root herbivory[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2903.
- [21] MURUNGI L K, KIRWA H, COYNE D, et al. Identification of key root volatiles signaling preference of tomato over spinach by the root knot nematode *Meloidogyne incognita*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(28): 7328 – 7336.
- [22] SIKDER M M, VESTERGÅRD M. Impacts of root metabolites on soil nematodes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 10: 1792.
- [23] KIRWA H K, MURUNGI L K, BECK J J, et al. Elicitation of differential responses in the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* to tomato root exudate cytokinin, flavonoids, and alkaloids[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(43): 11291 – 11300.
- [24] 丁晓帆, 邵雨, 范瑞琦, 等. 一种便携式线虫孵化装置: 中国, 211064709U[P]. 2020-07-24. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [25] 王曦苗, 汪来发, 孟繁丽, 等. 淡紫拟青霉航天诱变菌株对南方根结线虫的致病力[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(2): 216 – 220.
- [26] 李秋捷, 陆秀红, 黄金玲, 等. 不同药剂对南方根结线虫的室内毒力测定[J]. *浙江农业科学*, 2018, 59(8): 1432 – 1433.
- [27] 刘勇鹏. 不同杀线虫剂对日光温室番茄根结线虫病防效研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018.
- [28] 高倩圆, 胡飞龙, 祝红红, 等. 蓖麻提取物和淡紫拟青霉对南方根结线虫的防治作用[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2250 – 2256.
- [29] 席先梅, 白全江, 李玉民, 等. 41.7% 氟吡菌酰胺悬浮剂不同施药时期对黄瓜根结线虫的防治效果[J]. *植物保护*, 2021, 47(5): 314 – 319.
- [30] 肖靖秀, 郑毅, 汤利. 小麦-蚕豆间作对根系分泌低分子量有机酸的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1739 – 1744.
- [31] AKHTAR H, ANITA S, PRABHAT KUMAR S. Studies on the management of root-knot nematode, *Meloidogyne incognita*-wilt fungus, *Fusarium oxysporum* disease complex of green gram, *Vigna radiata* cv ML-1108[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2005, 6(8): 736 – 742.
- [32] 陆秀红, 刘志明, 黄金玲, 等. 白花曼陀罗叶提取物对南方根结线虫生长发育的影响[J]. *广西农业生物科学*, 2006, 25(2): 136 – 139.
- [33] GIANNAKOU I O, KARPOUZAS D G, ANASTASI-ADES I, et al. Factors affecting the efficacy of non-fumigant nematicides for controlling root-knot nematodes[J]. *Pest Management Science*, 2005, 61(10): 961 – 972.
- [34] 漆永红, 曹素芳, 吕和平, 等. 不同药剂对南方根结线虫卵孵化及2龄幼虫活性的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(9): 184 – 189.
- [35] LI D, JI J, YUAN Y J, et al. Toxicity comparison of nanopolystyrene with three metal oxide nanoparticles in nematode *Caenorhabditis elegans*[J]. *Chemosphere*, 2020, 245: 125625.
- [36] 李翠英. 福气多[J]. *湖南农业*, 2011(7): 16.
- [37] LIN S K, ZHOU Y, WU J Y Z, et al. Dissipation and residue of fosthiazate in tomato and cherry tomato and a risk assessment of dietary intake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(6): 9248 – 9256.
- [38] CHAWLA S, PATEL D J, PATEL S H, et al. Behaviour and risk assessment of fluopyram and its metabolite in cucumber (*Cucumis sativus*) fruit and in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(12): 11626 – 11634.
- [39] ROCHA L F, SUBEDI A, PIMENTEL M F, et al. Fluopyram activates systemic resistance in soybean[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1020167.

Foliar application of nematicides in the control of root-knot nematodes infecting tomato in pots

HUI Renjie[#], LIAO Yuqi, YU Zilin, DING Xiaofan^{*}

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University / Ministry of Education Key Laboratory of Green Prevention and Control of Tropical Plant Diseases and Pests, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: Root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) are one of the most important plant parasitic nematodes worldwide, which seriously threatens agricultural production. Application of nematicides around the root-zone is still the main control method. Tomato plants in pots were foliar sprayed with nematicides to explore the pot control efficacy of the nematicides against root-knot nematodes in tomato and the inhibitory effects of root exudates (RE) and root metabolites (RM) on the second-stage juveniles (J2s) and egg hatching. The results showed that foliar application of fluopyram, fosthiazate, and abamectin had certain pot control efficacy against root-knot nematodes in tomato. On the whole, RE had better inhibitory effect on J2s and egg hatching than RM. RE obtained by foliar application of fosthiazate showed extremely high inhibitory effect on J2s, with a mortality rate of 84.10% on the first day after application. The results preliminarily proved the feasibility of foliar application of nematicides for the control of root-knot nematodes, which might provide an innovative strategy for reducing soil application and "reusing old nematicides" in tropical facility agriculture.

Keywords: *Meloidogyne incognita*; nematicide; foliar application; root exudates; root metabolites

(责任编辑:钟云芳)