

氟吡菌酰胺对南方根结线虫的作用效果

迟元凯¹ 叶梦迪^{1,2} 赵伟¹ 曹舜¹ 汪涛¹ 戚仁德^{1*}

(1. 安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所, 合肥 230031;

2. 安徽农业大学植物保护学院, 合肥 230036)

摘要: 为明确琥珀酸脱氢酶抑制剂类(SDHI)杀线剂氟吡菌酰胺对南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* 的作用效果,在室内盆栽条件下研究不同剂量、不同施药时期该药剂对线虫侵入、根结和雌虫数量以及产卵量的影响。结果显示:在黄瓜幼苗移栽前进行土壤处理,氟吡菌酰胺施用剂量为 31.25 $\mu\text{g}/\text{株}$ 时,每株 2 龄幼虫侵染数量和根结数量分别为 11.3 条和 6.4 个,相比对照处理显著减少;在接种南方根结线虫后 0~11 d,以施药量为 125 $\mu\text{g}/\text{株}$ 的氟吡菌酰胺进行灌根时,可大幅减少根结数量,每株根结数量减少至 12.8~22.5 个,同时,施药后根系内未见成熟雌虫产生;在接种后 15 d,以施药量为 250 $\mu\text{g}/\text{株}$ 的氟吡菌酰胺进行灌根时,可大幅减少根内成熟雌虫数量,每株雌虫数量减少至 16.9 条;接种后 20 d 施药,施药量为 500 $\mu\text{g}/\text{株}$ 时可大幅减少根部产生的根结线虫卵块数量,每株卵块数量减少至 18.9 个。表明氟吡菌酰胺能抑制土壤内线虫对黄瓜根系的侵染并抑制根内线虫发育,但随着施药时间的推迟,防治已侵入根系的线虫需增加施药剂量,在生产上使用氟吡菌酰胺防治根结线虫病应在作物移栽前或线虫侵染早期施药效果更好。

关键词: 南方根结线虫; 氟吡菌酰胺; 侵染; 作用效果

Effect of fluopyram on root-knot nematode *Meloidogyne incognita*

Chi Yuankai¹ Ye Mengdi^{1,2} Zhao Wei¹ Cao Shun¹ Wang Tao¹ Qi Rende^{1*}

(1. Institute of Plant Protection and Agro-products Safety, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, Anhui Province, China; 2. College of Plant Protection, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui Province, China)

Abstract: In order to further clarify the effect of fluopyram, a succinate dehydrogenase inhibitor (SDHI) nematicide, on root-knot nematode *Meloidogyne incognita*, the efficacy of the agent on nematode infection, root galls formation, females and eggs production were investigated under the condition of pot culture. The results showed that treating soil with 31.25 $\mu\text{g}/\text{plant}$ of fluopyram, the number of nematode invasion and galls of cucumber roots were reduced to 11.3 and 6.4 per plant respectively. Root-irrigation with fluopyram 125 $\mu\text{g}/\text{plant}$ within 0–11 days after nematode inoculation, the number of galls was reduced to 12.8–22.5 per plant, and none female adult was observed in plant roots. Root-irrigation with fluopyram 250 $\mu\text{g}/\text{plant}$ at the 15th day after nematode inoculation, the number of female adults was reduced to 16.9 per plant. Root-irrigation with fluopyram 500 $\mu\text{g}/\text{plant}$ at the 20th day after nematode inoculation, the number of egg masses were reduced to 18.9 per plant. The results indicated that fluopyram could suppress both infection and development of *M. incognita*, however, with the delayed application of fluopyram, it was necessary to increase the dosage to control *M. incognita* in plant roots. Therefore, to control root-knot nematode with fluopyram, application should be carried out before transplantation or at early infection stage of root knot nematode.

基金项目: 安徽省农业科学院院长青年创新基金项目(17B1119), 国家自然科学基金(31721774)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: rende7@126.com

收稿日期: 2018-11-04

Key words: *Meloidogyne incognita*; fluopyram; infection; control effect

设施农业拓宽了农作物种植的时间和空间,同时也为多种病虫害的发生和流行提供了温床。近年来,根结线虫病在蔬菜、果树、中药材等多种作物上发生加重,已经严重威胁我国农业安全生产(赵磊等,2011;李克梅等,2015;赵传波等,2015)。在生产上可应用的抗根结线虫病基因较少,且大部分局限在番茄上(赵统敏等,2012),加上单一抗性品种的连续种植,已出现能够克服抗性基因的毒性群体(Tzortzakakis et al.,2005),因此化学防治仍然是根结线虫病最有效的防治方法之一。

随着苯线磷、呋喃丹等高毒、高残留杀线剂的禁用或限用,目前可用于防治瓜菜等作物根结线虫病的仅限于噻唑膦、阿维菌素等少数药剂,其中以10%噻唑膦颗粒剂防治效果最好,对黄瓜、豇豆、番茄等作物根结线虫病的防效可达80%以上(赵磊等,2011;李戌清等,2012;刘玉霞等,2014)。氟吡菌酰胺是一种琥珀酸脱氢酶抑制剂类(succinate dehydrogenase inhibitors, SDHI)低毒广谱杀菌剂,主要用于防治白粉病、灰霉病等真菌病害(张晓柯等,2015; Chawla et al.,2018);随着研究的深入,该药的杀线作用被发现,从而成为第1个对使用者和环境低毒的杀线虫剂,并于2015年在我国获得登记,用于防治番茄根结线虫病(陈香华等,2019)。氟吡菌酰胺的作用靶标为线粒体复合体II,通过阻断呼吸链使病原物体内能量耗尽而实现防病(Abad-Feuntes et al.,2015)。据报道,在溶液中氟吡菌酰胺对根结线虫2龄幼虫有较好的触杀作用,主要表现为麻痹作用,受药后的线虫活力下降直至虫体僵直死亡,但去除药剂后线虫的活力可得到恢复(Faske & Hubd,2015),这与作用靶标为乙酰胆碱酯酶的有机磷和氨基甲酸酯类杀线剂的作用机理相似(opperman & Chang,1990)。然而作为第1个作用于琥珀酸脱氢酶的杀线剂,氟吡菌酰胺对根结线虫的侵染能力以及线虫侵入寄主根系后的发育等影响鲜见报道。

为探究氟吡菌酰胺对南方根结线虫侵染和发育的作用,充分了解该药剂对根结线虫的毒杀效果,本研究通过对黄瓜幼苗人工接种南方根结线虫 *Meloidogyne incognita* 后,在线虫的不同发育阶段,使用不同浓度的氟吡菌酰胺灌根,观察统计线虫侵染和发育情况,以期为该药剂的科学使用提供参考文献。

1 材料与方法

1.1 材料

供试植物及线虫:本试验选取的黄瓜 *Cucumis sativus* 品种为博新535,种子经催芽后在育苗盘中培养10 d,单株移栽到含有400 cm³灭菌土壤的钵中,人工温室内继续培养10 d后用于接种,培养条件为温度25℃、光照周期L 16 h:D 8 h。南方根结线虫由本实验室田间采集、保存并繁殖于番茄 *Solanum lycopersicum* (品种为美国大红番茄)根部,黄瓜与番茄均于市场购买。取接种了南方根结线虫40 d后的番茄,用水洗净根系挑取卵块,置于25℃培养箱在黑暗条件下孵化24 h,收集孵化的2龄幼虫,在解剖镜下计数并使用无菌水配制成400条/mL的线虫悬浮液,备用。

供试土壤:土壤土质均为砂壤土。土壤处理试验中所使用的土壤为室内繁殖南方根结线虫的病土;接种试验中为无根结线虫的土壤,经121℃灭菌30 min后备用。

药剂及仪器:500 g/L 氟吡菌酰胺(fluopyram)悬浮剂,拜耳作物科学(中国)有限公司。1-14K 离心机,德国Sigma公司;BPC-70F 型号生化培养箱,上海一恒科学仪器有限公司;SMZ-171 型体式显微镜,中国麦克奥迪公司。

1.2 方法

1.2.1 药剂处理土壤中根结线虫对黄瓜根系的侵入情况

使用氟吡菌酰胺处理含有南方根结线虫的土壤后,再移栽黄瓜幼苗,染色观察南方根结线虫侵入数量。将含有南方根结线虫的病土与灭菌土壤按1:3均匀混合,并使用蔗糖漂浮法(李秀花等,2016)分离并统计土壤中的2龄幼虫数量为1.236条/cm³,每个盆钵中分装400 cm³土壤。将500 g/L 氟吡菌酰胺悬浮剂依次稀释为25、12.5、6.25、3.125、1.562 5、0.781 25 μg/mL 的药液,共6个药剂处理,每盆土壤灌药40 mL,施药量分别设置为1 000、500、250、125、61.5、31.25 μg/株,使用清水作为对照。施药3 d后移栽苗龄20 d的健康黄瓜幼苗,每盆1株,于移栽后5 d和10 d分别调查10盆,每处理20盆,洗净根系,统计黄瓜根系的根结数量,使用酸性品红染色(Byrd et al.,1983),在体视镜下观察统计根系内线虫侵染情况。

1.2.2 黄瓜接种根结线虫后施药对根结线虫发育的影响

使用南方根结线虫接种黄瓜苗,在接种后的不

同时期施药并观察根内线虫发育情况,以明确氟吡菌酰胺对根结线虫发育的影响。选取在钵钵中生长2周的健康黄瓜苗用于接种线虫,每盆1株。由于人工孵化的南方根结线虫2龄幼虫侵染能力相比土壤中线虫有所降低,为提高侵染量,每盆接种浓度为400条/mL的南方根结线虫2龄幼虫悬浮液2 mL。施药时期选择在接种线虫后0、3、7、11、15和20 d,施药时使用12.5 $\mu\text{g/mL}$ 氟吡菌酰胺悬浮剂40 mL灌根,以不施药作对照。在接种线虫后5、15、25和40 d使用酸性品红染色黄瓜根系,观察根内线虫发育情况,统计根内2龄幼虫、3~4龄幼虫和成熟雌虫数量,每次每处理调查10盆。

1.2.3 不同剂量和施药时期对根结线虫的影响

为进一步探究氟吡菌酰胺防治根结线虫的最适施药剂量和施药时期,按1.2.2方法对黄瓜幼苗接种南方根结线虫2龄幼虫,按1.2.1方法和浓度配制药剂,施药时期分别为接种线虫后0、3、7、11、15和20 d,每盆灌药40 mL,每个施药时期每个剂量施药10盆,以等量清水作为对照。接种线虫后40 d,洗净各处理的黄瓜根系,调查根结数量;使用酸性品红染色观察根内线虫发育情况,分别统计根内2龄幼虫、3~4龄幼虫和成熟雌虫数量;并计算每株黄瓜根部产生的卵囊数量,随机挑取10个卵囊,加入1%次氯酸钠涡旋3 min,5 000 r/min离心10 min收集并统计卵的数量,计算线虫在每株黄瓜中的产卵量,每个处理3次重复。

1.3 数据分析

试验数据利用SPSS 20软件进行统计分析,使用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 土壤经药剂处理后南方根结线虫的侵入情况

于黄瓜移栽后5 d对南方根结线虫的侵染情况进行调查,结果显示,对照的黄瓜根内有大量侵入的2龄幼虫,数量为120.6条,根结数量为54.4个,但未见发育的3~4龄幼虫出现;土壤经不同剂量氟吡菌酰胺药剂处理后,平均每株黄瓜根内侵入的南方根结线虫2龄幼虫数量为0~11.3条,根结数量为0~6.4个,线虫数量与根结数量均比对照均显著减少,其中施药量为250~1 000 $\mu\text{g/株}$ 时,根部均未见根结产生,根内未见线虫侵入(表1)。

于黄瓜苗移栽后10 d对南方根结线虫的侵入情况进行调查,结果显示,对照的黄瓜根内有大量的南方根结线虫2龄、3~4龄幼虫,数量分别为83.1条和80.9条;根结数量为97.2个。当施药量为31.25~125 $\mu\text{g/株}$ 时,黄瓜根内的2龄幼虫数量为7.7~29.3条,显著低于对照;在施药量31.25 $\mu\text{g/株}$ 和62.5 $\mu\text{g/株}$ 时3~4龄幼虫数量仅为6.7条和2.1条,其余药剂各处理的黄瓜根内均未见3~4龄幼虫(表1)。表明氟吡菌酰胺对南方根结线虫的侵染和侵入后的生长发育有明显的抑制作用,移栽前土壤处理可显著降低根结线虫的侵入数量,减少根结数量。

表1 黄瓜移栽前用氟吡菌酰胺处理土壤对南方根结线虫侵入的影响

Table 1 Effects of fluopyram treatment of soils before cucumber transplantation on *Meloidogyne incognita*

施用量 Dosage ($\mu\text{g/plant}$)	移栽后5 d 5 d after transplantation		移栽后10 d 10 d after transplantation		
	2龄幼虫数量/株 Number of J2s per plant	根结数量/株 Number of galls per plant	2龄幼虫数量/株 Number of J2s per plant	3~4龄幼虫数量/株 Number of J3s-J4s per plant	根结数量/株 Number of galls per plant
CK	120.6 $\pm$ 14.1 a	54.5 $\pm$ 5.7 a	83.1 $\pm$ 18.9 a	80.9 $\pm$ 14.0 a	97.2 $\pm$ 7.9 a
31.25	11.3 $\pm$ 8.1 b	6.4 $\pm$ 2.1 b	29.3 $\pm$ 5.6 b	6.7 $\pm$ 2.1 b	15.1 $\pm$ 3.2 b
62.50	10.2 $\pm$ 6.4 b	5.8 $\pm$ 1.6 b	21.7 $\pm$ 6.7 b	2.1 $\pm$ 0.7 c	13.2 $\pm$ 4.0 b
125.00	1.2 $\pm$ 0.4 c	1.8 $\pm$ 0.6 c	7.7 $\pm$ 1.5 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	3.7 $\pm$ 1.7 c
250.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d
500.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d
1 000.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d

表中数据为平均数 $\pm$ 标准差。同列不同字母表示经Duncan氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data in the table are mean $\pm$ SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.2 施药对南方根结线虫发育的影响

接种线虫后5 d的观察结果显示,对照的黄瓜根内有南方根结线虫2龄幼虫82.3条;而接种后0 d和3 d施药处理的黄瓜根内分别为6.2条/株和46.3条/株,显著低于对照。接种后15 d的观察结果显示,对照

的黄瓜根内同时存在2龄、3~4龄幼虫,2龄幼虫数量为43.5条/株,3~4龄幼虫数量为47.9条/株;接种后3 d和7 d施药处理的黄瓜根内2龄幼虫数量分别为62.6条/株和75.7条/株,显著高于对照,但3~4龄幼虫数量分别为0和13.5条/株,显著低于对照。接

种后 25 d 的观察结果显示,对照黄瓜根内 3~4 龄幼虫和成熟雌虫数量分别为 18.1 条/株和 57.2 条/株,而接种后 11、15、20 d 施药处理的黄瓜根内 3~4 龄幼虫数量为 37.6~44.2 条/株,显著高于对照,但雌虫数量为 0~38.7 条/株,显著低于对照,说明侵入后的线虫生长发育受到抑制。接种后 40 d,对照的黄瓜根内

2 龄幼虫、3~4 龄幼虫和雌虫数量分别为 165.6 条/株、44.3 条/株和 82.7 条/株,而施药处理比对照各个龄期线虫数量均显著减少(表 2)。表明在移栽或线虫接种后当天施药,可有效抑制线虫侵入根内,在接种后 7 d 内施药,可抑制 2 龄幼虫发育为 3~4 龄,而接种后 11 d 内施药,可抑制 3~4 龄幼虫发育为成熟雌虫。

表 2 氟吡菌酰胺于不同时间灌根施药后黄瓜根内不同虫龄南方根结线虫的数量

Table 2 The number of *Meloidogyne incognita* in cucumber roots at different development stages after drenching fluopyram

接种后施药时间 Drenching time after inoculation (d)	接种后 5 d 5 d after inoculation		接种后 15 d 15 d after inoculation		接种后 25 d 25 d after inoculation			接种后 40 d 40 d after inoculation		
	2 龄幼虫 数量/株 Number of J2s per plant	3~4 龄幼虫 虫数量/株 Number of J3s-J4s per plant	2 龄幼虫 数量/株 Number of J2s per plant	3~4 龄幼虫 数量/株 Number of J3s-J4s per plant	2 龄幼虫 数量/株 Number of J2s per plant	3~4 龄幼虫 数量/株 Number of J3s-J4s per plant	雌虫 数量/株 Number of females per plant	2 龄幼虫 数量/株 Number of J2s per plant	3~4 龄幼虫 数量/株 Number of J3s-J4s per plant	雌虫 数量/株 Number of females per plant
0	6.2±2.7 c	0.0±0.0	8.91±3.5 c	0.0±0.0 c	15.1±3.1 c	0.0±0.0 c	0.0±0.0 d	13.2±3.6 d	0±0.0 d	0±0.0 d
3	46.3±9.6 b	0.0±0.0	62.6±7.5 a	0.0±0.0 c	59.27±5.7 a	0.0±0.0 c	0.0±0.0 d	46.3±6.2 b	0±0.0 d	0±0.0 d
7	87.8±12.1 a	0.0±0.0	75.7±12.5 a	13.5±3.2 b	65.73±8.5 a	10.5±2.7 b	0.0±0.0 d	67.9±7.6 b	7.3±2.7 c	0±0.0 d
11	74.3±9.2 a	0.0±0.0	34.5±6.6 b	49.8±6.7 a	26.7±4.2 b	44.2±11.5 a	0.0±0.0 d	24.3±4.4 c	32.3±6.2 b	0±0.0 d
15	94.9±12.2 a	0.0±0.0	39.7±4.2 b	42.1±6.6 a	29.9±8.1 b	39.8±6.5 a	9.7±2.1 c	4.9±1.3 e	28.5±6.8 b	18.6±4.7 c
20	71.8±14.1 a	0.0±0.0	41.3±4.8 b	36.9±5.7 a	15.8±3.3 c	37.6±6.6 a	38.7±3.7 b	6.8±0.7 e	25.2±5.1 b	53.3±6.2 b
CK	82.3±9.8 a	0.0±0.0	43.5±8.6 b	47.9±12.9 a	16.6±3.1 c	18.1±4.2 b	57.2±6.7 a	165.6±22.9 a	44.3±7.4 a	82.7±11.8 a

表中数据为平均数±标准差。同列不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.3 施药剂量和施药时期对根结数量的影响

接种后 40 d 观察统计不同处理黄瓜根部产生的根结数量,发现对照的黄瓜根部的根结数为 109.2~127.9 个/株,而使用氟吡菌酰胺灌根施药后,根结数量显著减少,且随着施药时间推迟,药剂对根结产生的控制效果降低。接种后 7 d 施药,各施药量处理的根结数量为 0~52.1 个/株,施药量为 250~1 000 $\mu\text{g}/\text{株}$ 时根部未形成明显的根结;接种后 11~15 d 施药,施药量为 250~1 000 $\mu\text{g}/\text{株}$ 时根结数量为 16.6~33.2 个/株,

相比对照减少 74.0%~86.4%;而接种后 20 d 施药,不同施药量处理间无显著差异(表 3)。表明控制根结产生的适宜施药时间为接种后 0~11 d,施药剂量为 125 $\mu\text{g}/\text{株}$,根结数量减少至 12.8~22.5 个/株,相比对照减少 81.6%~88.6%。说明同一时期灌根,随着氟吡菌酰胺施药量的增加根结数量逐渐下降,对根结形成的抑制效果增强;随着施药时期的推迟根结数量逐渐上升,对根结形成的抑制效果下降。

表 3 氟吡菌酰胺不同施用剂量和施用时期对黄瓜根部根结数量的影响

Fig. 3 The effects of drenching dosage and time of fluopyram on galls number of cucumber roots

施药量 Dosage ($\mu\text{g}/\text{plant}$)	施药时间 Drenching time (d)					
	接种后 0 d 0 d after inoculation	接种后 3 d 3 d after inoculation	接种后 7 d 7 d after inoculation	接种后 11 d 11 d after inoculation	接种后 15 d 15 d after inoculation	接种后 20 d 20 d after inoculation
CK	113.1±13.8 a	125.1±11.7 a	109.2±15.4 a	122.6±8.9 a	127.9±11.4 a	117.6±17.1 a
31.25	52.0±5.4 b	50.9±9.5 b	52.1±8.5 b	60.5±12.2 b	67.4±8.1 b	62.8±11.5 b
62.50	41.8±5.4 b	44.3±11.8 b	39.9±10.8 c	41.0±5.7 c	47.6±8.5 c	57.9±13.4 b
125.00	12.8±2.6 c	20.1±5.1 c	21.8±6.7 c	22.5±6.4 cd	26.9±6.3 d	49.0±7.5 b
250.00	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	19.4±4.9 d	29.5±7.1 d	57.9±8.7 b
500.00	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	18.6±6.8 d	30.1±7.3 d	58.0±10.7 b
1 000.00	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	0.0±0.0 d	16.6±4.7 d	33.2±3.6 d	48.9±7.4 b

表中数据为平均数±标准差。同列不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.4 施药剂量和施药时期对雌虫及其产卵量的影响

统计接种后 40 d 不同处理的黄瓜根内南方根结线虫成熟雌虫数量,发现对照的黄瓜根内有大量成熟雌虫,数量为 78.6~88.9 条/株。在接种后 0~11 d 施药,当施药剂量为 31.25 条/株和 62.5 条/株时,雌虫数量分别为 32.1~52.8 条/株和 17.8~22.1 条/株,比对照分别减少 36.2%~61.2% 和 73.3%~85.7%;而施药量为 125~1 000 μg /株时根内均未见成熟雌虫。接种后 15 d 施药,施药量为 250、500 和 1 000 μg /株时的雌虫数量较低,分别仅为 16.9、16.7 和 18.6 条/株,均显著低于对照,但处理间差异不显著。接种后 20 d 施药,不同施药量处理间无显著性差异,雌虫数量为 49.2~59.1 条/株(表 4)。表明同一时期施药,施药量越大根内发育的雌虫数量越少;同一施药量下,根内雌虫随药剂灌根时间推迟而增加,说明越早施药效果越好。

统计接种 40 d 后不同处理黄瓜根部的南方根结

线虫卵块数量和卵块内的卵量,发现对照的卵块数量为 55.8~66.7 个/株。在接种后 0~11 d 施药,当施药量为 31.25 μg /株和 62.5 μg /株时的卵块数量分别为 31.3~44.0 个/株和 26.9~45.6 个/株,每个卵块内的卵量分别为 150.4~158.2 个和 82.1~91.7 个,卵块数和每卵块内的卵量相比对照均显著减少;而施药量大于 125 μg /株时,根部未见卵块产生。接种后 15 d 施药,当施药量为 125 μg /株时不能完全抑制线虫产卵,根部卵块数量为 33.6 个/株,每卵块内的卵量为 87.9 个,施药剂量大于 250 μg /株的处理黄瓜根部均未见卵块产生。接种后 20 d 施药,当施药量为 62.5~500 μg /株时的卵块数量为 18.9~43.4 个/株,相比对照显著减少,当施药量为 1 000 μg /株时才能完全抑制线虫产卵(表 5)。表明在同一时期进行灌根施药,随着施药量增加黄瓜根部的线虫卵块数量以及卵块内的卵量减少;而同一施药量下,随着灌根期推迟根内线虫卵块数和卵数均逐渐增加。

表 4 氟吡菌酰胺不同施药剂量和施药时期对南方根结线虫雌虫数量的影响

Fig. 4 The effects of drenching dosage and time of fluopyram on the number of female adults of *Meloidogyne incognita*

施药量 Dosage ($\mu\text{g}/\text{plant}$)	施药时间 Drenching time (d)					
	接种后 0 d 0 d after inoculation	接种后 3 d 3 d after inoculation	接种后 7 d 7 d day after inoculation	接种后 11 d 11 d day after inoculation	接种后 15 d 15 d day after inoculation	接种后 20 d 20 d day after inoculation
CK	82.7 $\pm$ 6.4 a	78.6 $\pm$ 9.7 a	88.9 $\pm$ 9.8 a	77.2 $\pm$ 6.2 a	79.0 $\pm$ 11.7 a	86.1 $\pm$ 12.9 a
31.25	32.1 $\pm$ 5.8 b	48.4 $\pm$ 7.2 b	41.1 $\pm$ 7.5 b	52.8 $\pm$ 6.6 b	58.6 $\pm$ 8.2 b	65.1 $\pm$ 7.5 b
62.50	19.8 $\pm$ 8.3 c	22.1 $\pm$ 7.3 c	17.8 $\pm$ 4.2 c	20.1 $\pm$ 7.3 c	42.2 $\pm$ 6.9 c	49.2 $\pm$ 8.1 c
125.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	45.1 $\pm$ 4.6 c	51.1 $\pm$ 6.6 c
250.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	16.9 $\pm$ 4.7 d	56.6 $\pm$ 8.6 c
500.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	16.7 $\pm$ 4.3 d	59.8 $\pm$ 8.7 c
1 000.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	18.6 $\pm$ 6.2 d	53.3 $\pm$ 7.4 c

表中数据为平均数 $\pm$ 标准差。同列不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean $\pm$ SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

3 讨论

不同杀线虫剂的作用机制不同,针对不同的药剂,应选择适当的施药剂量和施药时期,以充分利用药剂特性,更好地达到防病目的。刘俊生等(2010)使用阿维菌素和噻唑膦防治根结线虫病,认为土壤处理比灌根施药的效果好,本研究也有类似结论,即使用氟吡菌酰胺处理土壤效果优于接种后灌根,在黄瓜移栽前用施药剂量为 31.25 μg /株的氟吡菌酰胺进行土壤处理即可有效抑制南方根结线虫侵染。李戌清等(2012)试验结果显示,随着时间推移不同杀线剂的防效均会有所下降;本试验也发现,黄瓜在接种线虫后施药对根内线虫的发育有抑制作用,但防效随施药时期的推迟降低,接种后 11 d 内使用

125 μg /株的剂量灌根可显著减少根部根结形成的数量并抑制根内线虫的发育,接种后 11~20 d,用 250 μg /株的剂量灌根可有效抑制雌虫形成,而接种后 20 d 施药,施药量需在 500 μg /株以上时才能有效抑制雌虫产卵,表明氟吡菌酰胺能够有效杀灭土壤中的根结线虫,阻止其侵入植物根系,同时药剂可以进入植物根系,阻止根内的线虫发育。本研究明确了氟吡菌酰胺防治根结线虫病的作用特点,对指导氟吡菌酰胺的大田应用具有参考作用。

Faske & Hubd(2015)使用浸泡法研究了氟吡菌酰胺对南方根结线虫 2 龄幼虫的触杀作用,并将浸泡后的线虫接种番茄,发现线虫的侵染率降低。但杀线剂的药效除了与药剂本身毒力有关,在土壤中还受药剂的分布、迁移、分解等因素影响。在本试验

中使用氟吡菌酰胺处理土壤后,黄瓜根系中南方根结线虫侵染数量显著减少,表明氟吡菌酰胺对土壤中的南方根结线虫也有较好的触杀作用。本试验用相同施药量的氟吡菌酰胺进行土壤处理,发现该方法比种植后灌根施药的防效更好,同时,在接种后灌根施药,防效随施药时期推迟而降低。由于氟

吡菌酰胺在土壤和沉积物中的有机化学物质吸收常数 K_{oc} 为 266~460 (Chawla et al., 2018),其在土壤中的附着比较稳固,持效期较长,因此在移栽前使用氟吡菌酰胺处理土壤 3~5 d,可实现减少药剂用量,提高防效的目的。

表5 氟吡菌酰胺不同施药剂量和施药时期对南方根结线虫产卵数量的影响

Fig. 5 The effect of drenching dosage and time of fluopyram on the number of oviposition of *Meloidogyne incognita*

施药量 ($\mu\text{g/plant}$)	施药时间 Drenching time (d)											
	接种后 0 d		接种后 3 d		接种后 7 d		接种后 11 d		接种后 15 d		接种后 20 d	
	0 d after		3 d after		7 d after		11 d after		15 d after		20 d after	
	inoculation		inoculation		inoculation		inoculation		inoculation		inoculation	
	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass	卵块 数量 No. of egg- masses	卵量/ 卵块 Eggs per eggmass
CK	59.7 $\pm$ 5.9 a	221.7 $\pm$ 27.1 a	62.7 $\pm$ 6.4 a	235.9 $\pm$ 23.6 a	57.6 $\pm$ 8.1 a	199.7 $\pm$ 25.7 a	61.0 $\pm$ 6.2 a	209.5 $\pm$ 19.2 a	55.8 $\pm$ 8.8 a	227.8 $\pm$ 27.3 a	66.7 $\pm$ 13.4 a	211.4 $\pm$ 28.1 a
31.25	43.4 $\pm$ 4.9 b	150.4 $\pm$ 22.7 b	42.6 $\pm$ 15.7 b	153.8 $\pm$ 22.9 b	31.3 $\pm$ 6.7 b	158.2 $\pm$ 22.2 b	44.00 $\pm$ 8.1 b	150.4 $\pm$ 13.7 b	45.2 $\pm$ 6.3 ab	143.9 $\pm$ 17.2 b	68.0 $\pm$ 4.2 a	154.0 $\pm$ 15.1 b
62.50	26.9 $\pm$ 6.7 c	85.8 $\pm$ 14.9 c	27.4 $\pm$ 6.7 c	90.0 $\pm$ 13.2 c	38.9 $\pm$ 8.6 b	82.1 $\pm$ 12.5 c	45.60 $\pm$ 6.2 b	91.7 $\pm$ 12.7 c	42.0 $\pm$ 4.7 b	90.3 $\pm$ 16.7 c	43.4 $\pm$ 6.3 b	125.9 $\pm$ 16.3 bc
125.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	33.6 $\pm$ 5.2 c	87.9 $\pm$ 12.9 c	43.9 $\pm$ 5.9 b	105.3 $\pm$ 18.7 c
250.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	45.7 $\pm$ 4.5 b	72.8 $\pm$ 11.2 d
500.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	18.9 $\pm$ 3.1 c	75.1 $\pm$ 9.8 d
1 000.00	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 c	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 d	0.0 $\pm$ 0.0 e

表中数据为平均数 $\pm$ 标准差。同列不同字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean $\pm$ SE. Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

根结线虫属于固定的内寄生线虫,在寄生过程中,线虫选择植物分化区的原生木质部和原生韧皮部细胞作为取食位点 (Caillaud et al., 2008),因此杀线虫剂对根系内线虫的作用效果主要取决于药剂的渗透性、内吸性、传导性、代谢分解能力等特性,噻唑膦具触杀性和内吸性双重效果,因此能有效杀死土壤中和根内的根结线虫 (纪春涛等, 2010),而阿维菌素虽然不具有内吸性,但有很强的渗透性,因此其对根结线虫亦有较好的防效 (刘丹等, 2013)。本试验发现,接种南方根结线虫后在线虫不同发育阶段使用氟吡菌酰胺灌根能抑制根系内线虫的进一步发育,但随着施药时期的推迟,抑制效果降低,这可能是由于氟吡菌酰胺在植物体内有一定的内吸性和传导性,但其在木质部中的传导能力有限 (Chawla et al., 2018)。根结是由根结线虫侵入植物根系后,由线虫口针分泌物刺激植物细胞生长而产生的,其发

育自根结线虫侵入寄主 24 h 开始, 10~15 d 内完成,发育期间需要线虫口针分泌物的持续刺激 (Davis et al., 2000; Vanholme et al., 2004)。使用氟吡菌酰胺在接种线虫后 7 d 内灌根,黄瓜根系只产生少量根结,而在接种线虫 11 d 后施药,虽然高剂量的药剂能有效控制根内线虫的进一步发育,但根系仍存在较多根结,因此,对于以根部为收获物的作物,生产中应在移栽前或栽植早期施药以减少根结产生。本试验是固定在 400 cm³ 的封闭环境下进行的,所获结果对氟吡菌酰胺的田间使用有一定的指导意义,但大田生产环境是开放的,土壤中药剂的分布、浓度会受到降水、灌溉等诸多因素的影响,因此具体的田间应用尚需进一步研究验证。

参 考 文 献 (References)

Abad-Feuntes A, Ceballos-Alcantrallia E, Mercader JV, Agulló C,

- Abad-Somovilla A, Esteve-Turrillas FA. 2015. Determination of succinate dehydrogenase-inhibitor fungicide residues in fruits and vegetables by liquid-chromatography-tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 407(14): 4207–4211
- Byrd DW, Kirkpatrick JT, Barker KR. 1983. An improved technique for clearing and staining plant tissue for detection of nematodes. *Journal of Nematology*, 15(1): 142–143
- Caillaud MC, Dubreuil G, Quentin M, Perfus-Barbeoch L, Lecomte P, de Almeida EJ, Abad P, Rosso MN, Favory B. 2008. Root-knot nematodes manipulate plant cell functions during a compatible interaction. *Journal of Plant Physiology*, 165(1): 104–113
- Chawla S, Patel DJ, Patel SH, Kalasariya RL, Shah PG. 2018. Behavior and risk assessment of fluopyram and its metabolite in cucumber (*Cucumis sativus*) fruit and in soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(12): 11626–11634
- Chen XH, Jiang SH, Xiong ZZ, Cao KG, Fu YS, Wang HB, Zhou CY, Guo XS, Liu WZ, Zhang K, et al. 2019. Study efficacy of fluopyram SC against *Meloidogyne incognita*. *Journal of Jingling Institute of Technology*, 35(1): 84–87 (in Chinese) [陈香华, 蒋守华, 熊战之, 曹凯歌, 付佑胜, 王宏宝, 周长勇, 郭小山, 刘伟中, 张凯, 等. 2019. 氟吡菌酰胺 SC 防治番茄根结线虫的药效研究. 金陵科技学院学报, 35(1): 84–87]
- Davis EL, Hussey RS, Baum TJ, Bakker J, Schots A, Rosso MN, Abad P. 2000. Nematode parasitism genes. *Annual Review of Phytopathology*, 38: 365–396
- Faske TR, Hubd K. 2015. Sensitivity of *Meloidogyne incognita* and *Rotylenchulus reniformis* to fluopyram. *Journal of Nematology*, 47(4): 316–321
- Ji CT, Jiang XY, Fang F, Wang Y, Ge DQ, Li JH. 2010. The effect of fosthiazate on roots of cucumber seedling. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science)*, 41(1): 35–38 (in Chinese) [纪春涛, 姜兴印, 房锋, 王燕, 戈大庆, 李俊虎. 2010. 噻唑膦对黄瓜幼苗根系的影响. 山东农业大学学报(自然科学版), 41(1): 35–38]
- Li KM, Dong YQ, Cao XS, Bayier. 2015. Occurrence and identification of root-knot nematode on greenhouse vegetables in Xinjiang. *Plant Protection*, 41(6): 191–194 (in Chinese) [李克梅, 董艳秋, 曹雪松, 巴依尔. 2015. 新疆设施蔬菜根结线虫病发生调查及病原鉴定. 植物保护, 41(6): 191–194]
- Li XH, Geng YL, Ma J, Gao B, Wang RY, Chen SL. 2016. An accurate method for estimating the number of root-knot nematodes in soil. *Journal of Plant Protection*, 43(5): 768–733 (in Chinese) [李秀花, 耿亚玲, 马娟, 高波, 王容燕, 陈书龙. 2016. 一种准确测定土壤根结线虫种群数量的方法. 植物保护学报, 43(5): 768–733]
- Li XQ, Zheng JW, Zheng JR, Zhou YF, Wang H. 2012. Field efficacy trail of different nematicides on controlling cucumber root knot nematodes. *Journal of Changjiang Vegetables*, (12): 72–74 (in Chinese) [李戌清, 郑经武, 郑积荣, 周毅飞, 王宏. 2012. 几种药剂对黄瓜根结线虫的田间防效试验. 长江蔬菜(学术版), (12): 72–74]
- Liu D, Yan DD, Mao LG, Cao AC, Song DB, Zheng JQ. 2013. Advances in avermectin control of plant nematodes. *Journal of Hunan Agricultural University*, 39(1): 83–87 (in Chinese) [刘丹, 颜东东, 毛连纲, 曹勘程, 宋东宝, 郑建秋. 2013. 阿维菌素防治植物线虫的研究进展. 湖南农业大学学报, 39(1): 83–87]
- Liu JS, Li Y, Li YM, Quan QZ, Zhang F. 2010. Chemical control of cucumber root-knot nematode in greenhouse. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 56(1): 74–77 (in Chinese) [刘俊生, 李媛, 李英梅, 全清转, 张锋. 2010. 温室黄瓜根结线虫病药剂防治技术研究. 陕西农业科学, 56(1): 74–77]
- Liu YX, Meng L, Qi YH, Du H, Cao SF, Li MQ, Chen SL. 2014. Control effect of four nematicides against cowpea root-knot nematode disease. *Plant Protection*, 40(4): 177–180 (in Chinese) [刘玉霞, 孟丽, 漆永红, 杜蕙, 曹素芳, 李敏权, 陈书龙. 2014. 4种药剂对豇豆根结线虫病的防治效果. 植物保护, 40(4): 177–180]
- Opperman CH, Chang S. 1990. Plant-parasitic nematode acetylcholinesterase inhibition by carbamate and organophosphate nematicides. *Journal of Nematology*, 22(4): 481–488
- Tzortzakakis EA, Adam MAM, Blok VC, Paraskevopoulos C, Bourtzis K. 2005. Occurrence of resistance-breaking populations of root-knot nematodes on tomato in Greece. *European Journal of Plant Pathology*, 113(1): 101–105
- Vanholme B, de Meutter J, Tytgat T, van Montagu M, Coomans A, Gheysen G. 2004. Secretions of plant-parasitic nematodes: a molecular update. *Gene*, 332: 13–27
- Zhang XK, Han X, Ma WW, Zhang X, Zhang XR, Duan YB, Zhou MG, Chen CJ. 2015. Baseline sensitivity of fluopyram and its resistance risk assessment against *Botrytis cinerea* from strawberry in Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 38(5): 810–815 (in Chinese) [张晓柯, 韩絮, 马薇薇, 张雪, 张轩瑞, 段亚冰, 周明国, 陈长军. 2015. 江苏省草莓灰霉病菌对氟吡菌酰胺敏感性基线的建立及抗性风险评估. 南京农业大学学报, 38(5): 810–815]
- Zhao CB, Zheng XL, Ruan ZY, Ding S, Li DP, Xu CL, Xie H. 2015. Identification and population distribution of *Meloidogyne* species from the vegetable base in Shenzhen City. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 34(2): 41–48 (in Chinese) [赵传波, 郑小玲, 阮兆英, 丁莎, 李东平, 徐春玲, 谢辉. 2015. 深圳市蔬菜基地根结线虫的种类和分布. 华中农业大学学报, 34(2): 41–48]
- Zhao L, Duan YX, Bai CM, Chen LJ, Wang YY, Zhu XF. 2011. Occurrence and control of vegetable root-knot nematodes under protected cultivation in Liaoning Province. *Plant Protection*, 37(1): 105–109 (in Chinese) [赵磊, 段玉玺, 白春明, 陈立杰, 王媛媛, 朱晓峰. 2011. 辽宁省保护地蔬菜根结线虫发生规律及防治对策. 植物保护, 37(1): 105–109]
- Zhao TM, Wang YL, Yang ML, Zhao LP, Yu WG. 2012. Research progress in genes controlling root-knot nematode disease on tomato. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 28(6): 1492–1497 (in Chinese) [赵统敏, 王银磊, 杨玛丽, 赵丽萍, 余文贵. 2012. 番茄根结线虫病抗性基因的研究进展. 江苏农业学报, 28(6): 1492–1497]

(责任编辑:王璇)