

氟吡菌酰胺不同施药方式对水稻拟禾本科根结线虫的防治效果

周建宇¹ 袁 涛¹ 叶 姗¹ 黄文坤² 李忠彩³ 丁 中^{1*}

(1. 湖南农业大学植物保护学院, 湖南省生物农药与制剂加工工程技术研究中心, 长沙 410128;

2. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;

3. 湖南省汉寿县农业局, 常德 415900)

摘要: 为评价41.7%氟吡菌酰胺悬浮剂防治水稻拟禾本科根结线虫 *Meloidogyne graminicola* 的应用潜力, 将氟吡菌酰胺与吡虫啉种衣剂混合后采用种子包衣法及喷洒法研究其对水稻拟禾本科根结线虫的田间防效, 并测定了不同施药方法对水稻生长和产量的影响。结果表明, 氟吡菌酰胺4.2、8.3、12.5 g (a.i.)/kg 种子与吡虫啉18.0 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理, 播种后35 d其根结抑制率和防效分别为41.0%~51.8%和47.4%~58.6%, 土壤中2龄幼虫减退率为38.6%~40.4%, 显著高于单施吡虫啉18.0 g (a.i.)/kg 种子处理。水稻播种后连续3次以氟吡菌酰胺250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm²进行土壤喷洒, 最后1次施药后7 d, 其根结抑制率和防效分别为81.0%~89.9%和65.9%~74.3%, 土壤中2龄幼虫减退率为65.4%~73.4%, 均显著高于对照药剂克百威1 800.0 g (a.i.)/hm²处理。氟吡菌酰胺各处理对水稻苗期生长均有较好的保护作用, 能显著提高千粒重和有效穗数, 产量比空白对照增加50.0%~61.2%, 保产效果显著。水稻播种后35 d采用氟吡菌酰胺对稻田进行1次喷洒, 对水稻具有一定的保护作用, 保产效果不明显。表明采用氟吡菌酰胺与吡虫啉混合包衣种子处理及在水稻苗期进行喷洒处理对水稻拟禾本科根结线虫防效显著, 具有显著的保产效果。

关键词: 氟吡菌酰胺; 种子包衣; 喷洒; 拟禾本科根结线虫; 防治效果

Evaluation on the control effect of fluopyram on the root-knot nematode in rice with different spraying methods

Zhou Jianyu¹ Yuan Tao¹ Ye Shan¹ Huang Wenkun² Li Zhongcai³ Ding Zhong^{1*}

(1. Hunan Provincial Engineering & Technology Research Center for Bio-pesticide and Formulation Processing, College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan Province, China; 2. State Key

Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 3. Agricultural Bureau of Hanshou County,

Hunan Province, Changde 415900, Hunan Province, China)

Abstract: To evaluate the potential of 41.7% fluopyram SC in controlling *Meloidogyne graminicola*, field trials were conducted by seed coating combined with imidacloprid FS (flowable concentrate for seed coating) and spraying methods to compare their control efficacy and effects on growth and yield of rice. Compared with the control, seed-coating with fluopyram SC at the rate of 4.2, 8.3, 12.5 g (a.i.)/kg seeds + imidacloprid FS at 18.0 g (a.i.)/kg seeds reduced root galling by 41.0%–51.8%, galling index by 47.4%–58.6%, juvenile densities of *M. graminicola* in the soil by 38.6%–40.4% at 35 d after sowing, which were significantly higher than that of imidacloprid FS at 18.0 g (a.i.)/kg seeds. Spraying fluo-

pyram three times in the period of seeding at the rate of 250.2, 375.3, 500.4 g (a.i.)/hm² reduced root gallings by 81.0%–89.9%, gallings index by 65.9%–74.3%, juvenile densities of *M. graminicola* in the soil by 65.4%–73.4% at 7 d after the last application, which were significantly higher than those when spraying carbofuran at the rate of 1 800.0 g (a.i.)/hm². Fluopyram treatments exhibited evident efficacy in controlling *M. graminicola* in the field, and the average yield increased by 50.0%–61.2%, due to improved 1 000-grain weight, effective panicle number per hill. Spraying fluopyram at 35 d after sowing had a certain protective effect on rice, but the yields exhibited no significant difference from that of the negative control. The results indicated that fluopyram could be used to control *M. graminicola* effectively using seed coating combined with imidacloprid and spraying methods in the period of rice seedling.

Key words: fluopyram; seed coating; spraying; *Meloidogyne graminicola*; control effect

为害水稻的根结线虫 *Meloidogyne* sp. 种类主要有拟禾本科根结线虫 *M. graminicola*、南方根结线虫 *M. incognita*、爪哇根结线虫 *M. javanica*、水稻根结线虫 *M. oryzae*、花生根结线虫 *M. arenaria* 和萨拉斯根结线虫 *M. salasi* (Khan et al., 2014; 谢家廉等, 2017), 其中拟禾本科根结线虫被认为是对水稻最具威胁的植物寄生线虫。该种线虫多分布在热带和亚热带地区 (Bridge & Page, 1982; Pankaj et al., 2010), 在我国广东、广西、海南、云南、福建等省区均有发生 (刘国坤等, 2011a)。近年来, 该线虫病害在湖南省益阳、常德、衡阳、岳阳、株洲和长沙等市频繁发生, 对水稻生产造成了严重威胁; 受害植株的典型症状表现为叶黄化、矮小、发育不良, 受害根尖膨大呈钩状或短棒状 (赵洪海等, 2001; Pokharel et al., 2007; 刘国坤等, 2011b), 在间歇性淹水条件下受害水稻产量损失约为 11%–73% (Soriano et al., 2000)。因缺乏抗病品种, 加之气候条件和播种方式的改变 (Mantelin et al., 2017), 拟禾本科根结线虫为害日益严重, 并已成为东南亚水稻主产区产量的重要制约因素 (黄文坤等, 2018), 亟需开发高效低毒的杀线虫药剂及有效的防治技术。

化学防治具有防效好、见效快的特点, 一直是防治植物寄生线虫病害的主要手段。以往多使用有机磷或氨基甲酸酯类等非熏蒸性杀线虫药剂, 如利用克百威、甲拌磷等来防治水稻拟禾本科根结线虫, 但该类杀线虫药剂毒性高、残留时间长、易污染环境 (Khan et al., 2012; 黄文坤等, 2018); 芮凯等 (2015) 报道噻唑膦和阿维菌素播前沟施对水稻拟禾本科根结线虫具有较好的防效, 但施用方法费时费力。随着农村劳动力的流失和高毒农药相继在我国被禁用或限制使用, 开发简单、省力的防治技术和筛选高效低毒的杀线虫剂已是迫在眉睫。

氟吡菌酰胺是近年上市的一种低毒、安全的杀

线虫剂, 作用于线粒体呼吸电子传递链上的复合体 II, 对植物寄生线虫表现出良好的防效 (Faske & Hurd, 2015), 更由于其作用靶标独特, 且与其它杀线虫剂无交互抗性而得到广泛应用 (周大纲, 2016), 目前尚未见关于其防治水稻拟禾本科线虫的报道及应用。因此, 本试验拟开展不同施药方式下氟吡菌酰胺对水稻拟禾本科根结线虫的田间防治效果评价, 旨在为科学防治水稻拟禾本科根结线虫提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻: 水稻品种为早优 73, 由上海天谷生物科技股份有限公司培育。试验地设在湖南省汉寿县军山铺镇, 采用水直播法种植水稻, 土壤类型为轻壤, 肥力中等, 往年水稻拟禾本科根结线虫发生比较严重, 于 2017 年 4 月 4 日翻耕平整土地。每个小区大小为长 3 m×宽 5 m, 每处理重复 4 次, 随机区组排列。4 月 7 日浸种催芽, 4 月 9 日排干田间水分后播种, 播种量为 22.5 kg/hm²。试验期间保持稻田土壤湿润, 不要求保水; 施肥及病虫草害防治与当地其它农田一致。

供试药剂及仪器: 41.7% 氟吡菌酰胺 (fluopyram) 悬浮剂、600 g/L 吡虫啉 (imidacloprid) 种衣剂, 拜耳作物科学 (中国) 有限公司; 3% 克百威 (carbofuran) 颗粒剂, 湖南海利化工股份有限公司。SZ61 显微镜, 日本奥林巴斯公司。

1.2 方法

1.2.1 种子包衣处理及施药方法

种子包衣处理: 采用供试药剂氟吡菌酰胺+吡虫啉对种子进行包衣处理, 设置 0+18.0、4.2+18.0、8.3+18.0、12.5+18.0、12.5+3.0 g (a.i.)/kg 种子共 5 个处理, 另设不施任何药剂处理作为空白对照, 播种前

经人工均匀拌种后自然晾干备用,每处理重复4次。

连续3次土壤喷洒处理:供试药剂氟吡菌酰胺按250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm²于播种当天、播种后14 d、播种后28 d对土壤进行喷洒处理,每小区兑水6.8 L后采用洒水壶均匀喷洒,于播种当天人工均匀撒施克百威1 800.0 g (a.i.)/hm²作为药剂对照,另设等量清水作空白对照,每处理重复4次。

播后35 d进行1次土壤喷洒处理:供试药剂氟吡菌酰胺按250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm²于播种后35 d对土壤进行喷洒处理;施药方法同上。

1.2.2 不同处理方式对根结线虫的控制效果

于播种后35 d对种子包衣处理和连续3次土壤喷洒处理的各小区进行调查,采用五点取样法,每点采集4株,每小区共采集20株水稻植株及其根际土壤。将水稻根洗净后,统计水稻根系的根结数;观察根部根结线虫发病情况,按照根结线虫病分级标准记录各小区发病株数,计算根结抑制率、根结指数和防治效果。病情分级标准采用0~10级的分级标准(Poudyal et al., 2005):0级:健康,无根结;1级:根结小且数量极少,不易观察;2级:根结小,根结数量稍多,易观察;3级:根结小,数量较多且盘绕,根系功能未受影响;4级:根结数量较多,有较大根结,大部分根系功能健康;5级:25%~49%的根系上有根结,小部分根系功能未受影响;6级:50%~74%的根系上有根结,根系正常功能受到影响;7级:75%以上根系有根结,失去根系功能;8级:无健康根系,植株仍存活;9级:整个根系出现腐烂,植株趋于死亡;10级:植株死亡。根结抑制率=(1-处理组根结数/对照组根结数)×100%;根结指数=Σ(各级病株数×相应级数值)/(调查总株数×最高级代表值)×100;防治效果=(1-处理组根结指数/对照组根结指数)×100%。将根际土壤混匀后取100 mL土样,采用浅盘法(Schindler, 1961)分离土壤中的根结线虫2龄幼虫,显微镜下计数并计算土壤中2龄幼虫减退率。土壤中2龄幼虫减退率=(1-处理组2龄幼虫数/对照组2龄幼虫数)×100%。

于播种后70 d,对种子包衣处理、连续3次土壤喷洒处理及播后35 d进行1次土壤喷洒处理的各小区进行调查,应用五点取样法采集5株水稻植株及其根际土壤,混匀后取100 mL土样,采用浅盘法分离并统计土壤中的2龄幼虫,计算土壤中2龄幼虫减退率。

1.2.3 不同处理方式对水稻生长的影响

播种后35 d,对种子包衣处理和连续3次土壤

喷洒处理的各小区水稻生长情况进行调查,测量1.2.2采集的各小区20株水稻的株高和鲜重;播种后70 d,对种子包衣处理、连续3次土壤喷洒处理及播后35 d进行1次土壤喷洒处理的各小区进行调查,测量1.2.2采集的所有处理小区5株水稻的株高、鲜重和分蘖数。

1.2.4 不同处理方式对水稻产量的影响

于2017年8月15日收获并测产。每个小区采集1 m²的样方,调查样方内的水稻穴数;于室内进行考种,测定有效穗数、着粒数、结实数和千粒重等指标,并计算理论产量和增产率。理论产量(t/hm²)=(每平方米有效穗数×每穗着粒数×千粒重×结实率×10 000 m²/hm²)/(1 000粒×2 000 000 g/t);增产率=(处理组理论产量-对照组理论产量)/对照组理论产量×100%。

1.3 数据分析

运用SPSS 20.0软件对所有数据进行统计分析,采用Duncan氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 包衣处理对根结线虫的控制效果

播种后35 d调查结果表明,氟吡菌酰胺4.2、8.3、12.5 g (a.i.)/kg种子与吡虫啉18.0 g (a.i.)/kg种子混合包衣处理对水稻拟禾本科根结线虫具有显著的控制效果,其根结抑制率和防效分别为41.0%~51.8%和47.4%~58.6%,土壤中2龄幼虫减退率为38.6%~40.4%,均显著高于单独使用吡虫啉种衣剂处理(表1)。播种后70 d,氟吡菌酰胺与吡虫啉混合包衣处理的土壤中2龄幼虫减退率为29.1%~41.3%。低剂量的吡虫啉3.0 g (a.i.)/kg种子与氟吡菌酰胺12.5 g (a.i.)/kg种子混合包衣处理对水稻拟禾本科根结线虫也具有显著的控制效果(表1),但其处理后的水稻生长状况、增产效果总体上要低于高剂量吡虫啉18.0 g (a.i.)/kg种子与氟吡菌酰胺混合包衣处理,故后文对该处理不再进行详细分析。

2.2 播后喷洒处理对根结线虫的控制效果

播种后连续3次采用氟吡菌酰胺悬浮剂250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm²对稻田进行土壤喷洒处理,播种后35 d(即最后1次施药后7 d),处理的根结抑制率和防效分别为81.0%~89.9%和65.9%~74.3%,显著高于对照药剂克百威颗粒剂1 800.0 g (a.i.)/hm²的根结抑制率(63.9%)和防效(40.8%);播种后35、70 d(即最后1次施药后42 d),土壤中2龄幼虫减退率分别为65.4%~73.4%和68.2%~78.9%,显著

高于对照药剂克百威颗粒剂处理(表2)。

2.3 发病后喷洒处理对根结线虫的控制效果

水稻播后 35 d,水稻已发病时再采用氟吡菌酰 胺悬浮剂 250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm²对稻田进行 1 次土壤喷洒处理,能减少土壤中的 2 龄幼虫数量, 施药后 35 d,2 龄幼虫减退率为 22.0%~42.9%(表3)。

表1 氟吡菌酰胺包衣处理对水稻拟禾本科根结线虫的控制效果

Table 1 Control efficacy of seed-coating with fluopyram on *Meloidogyne graminicola*

药剂名称 Nematicide	用量 Dose (g (a.i.)/ kg seeds)	播种后 35 d 35 d after sowing					播种后 70 d 70 d after sowing	
		根结 抑制率 (%) Inhibition rate	根结指数 Galling index	防效 (%) Control effect	2 龄幼虫 数/cm ³ 土 Number of J2/cm ³ soil	2 龄幼虫 减退率 (%) Reduction rate of J2	2 龄幼虫 数/cm ³ 土 Number of J2/cm ³ soil	2 龄幼虫 减退率 (%) Reduction rate of J2
氟吡菌酰胺+	4.2±18.0	41.0±10.8 b	38.6±1.0 c	47.4±2.0 b	4.2±1.0 b	39.8±14.9 a	4.1±0.5 bc	29.1±8.1 ab
吡虫啉	8.3±18.0	42.2±6.0 b	35.3±4.3 cd	52.0±5.4 ab	4.3±0.6 b	38.6±10.0 a	3.4±0.4 c	41.3±3.4 a
Fluopyram+	12.5±18.0	51.8±9.9 ab	30.5±5.4 d	58.6±7.1 a	4.1±0.6 b	40.4±10.5 a	4.0±0.9 bc	31.5±15.1 ab
imidacloprid	12.5±3.0	60.1±4.3 a	31.1±3.5 d	57.6±4.9 a	4.2±0.5 b	39.1±6.8 a	4.0±0.5 bc	32.4±10.7 ab
吡虫啉	18.0	-16.8±19.5 c	67.5±1.8 b	8.0±2.6 c	6.3±0.8 a	7.8±19.5 b	4.8±1.4 b	19.6±16.6 b
Imidacloprid								
对照 CK	-	-	73.4±1.1 a	-	7.0±0.8 a	-	5.9±0.6 a	-

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 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.

表2 氟吡菌酰胺土壤喷洒处理对水稻拟禾本科根结线虫的控制效果

Table 2 Control efficacy of soil spray with fluopyram on *Meloidogyne graminicola*

药剂名称 Nematicide	用量 Dose (g (a.i.)/ hm ²)	播种后 35 d 35 d after sowing					播种后 70 d 70 d after sowing	
		根结 抑制率 (%) Inhibition rate	根结指数 Galling index	防效 (%) Control effect	2 龄幼虫 数/cm ³ 土 Number of J2/cm ³ soil	2 龄幼虫 减退率 (%) Reduction rate of J2	2 龄幼虫 数/cm ³ 土 Number of J2/cm ³ soil	2 龄幼虫 减退率 (%) Reduction rate of J2
氟吡菌酰胺	250.2	81.0±4.0 b	25.1±4.2 c	65.9±5.3 c	2.4±0.2 a	65.4±3.2 a	1.4±0.6 b	74.8±9.5 a
Fluopyram	375.3	85.9±1.4 ab	21.9±2.5 d	70.2±3.4 b	1.8±0.5 a	73.4±8.8 a	1.9±0.4 b	68.2±4.9 a
	500.4	89.9±1.1 a	18.9±2.5 e	74.3±3.2 a	1.9±0.3 a	72.0±6.4 a	1.3±0.6 b	78.9±7.1 a
克百威	1 800.0	63.9±5.2 c	43.5±1.6 b	40.8±1.4 d	4.5±0.5 b	34.9±12.1 b	5.1±0.3 a	12.0±10.4 b
Carbofuran								
对照 CK	-	-	73.4±1.1 a	-	7.0±0.8 c	-	5.9±0.6 a	-

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 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.

表3 发病后氟吡菌酰胺土壤喷洒处理对水稻拟禾本科根结线虫数量和水稻生长的影响

Table 3 Effects of soil spray with fluopyram after infection on the densities of *Meloidogyne graminicola* 2nd-stage juveniles in the soil and rice growth

药剂名称 Nematicide	用量 Dose (g (a.i.)/hm ²)	施药后 35 d 35 d after pesticide application				
		2 龄幼虫数/cm ³ 土 Number of J2/cm ³ soil	2 龄幼虫减退率 (%) Reduction rate of J2	株高 (cm) Shoot height	株鲜重 (g) Shoot fresh weight	分蘖数 No. of tillers
氟吡菌酰胺	250.2	4.5±0.5 b	22.0±13.0 b	45.8±0.9 c	13.8±2.0 a	6.9±1.3 a
Fluopyram	375.3	4.3±0.4 b	25.6±12.1 ab	49.0±0.8 b	10.6±1.9 b	6.0±1.5 ab
	500.4	3.4±0.5 c	42.9±5.1 a	51.3±1.6 a	10.6±1.8 b	5.7±0.8 ab
对照 CK	-	5.9±0.6 a	-	37.5±0.9 d	7.9±2.8 b	5.0±0.9 b

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 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 各施药处理对水稻生长的影响

氟吡菌酰胺 4.2、8.3、12.5 g (a.i.)/kg 种子与吡虫啉 18.0 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理,对水稻苗期生长均有较好的保护作用,水稻在播后 35、70 d 的株高、鲜重和分蘖数均显著高于空白对照和单独施用吡虫啉 18.0 g (a.i.)/kg 种子处理(表 4)。高剂量吡虫啉与氟吡菌酰胺混合包衣处理对水稻苗具有显著的壮苗和促分蘖作用,吡虫啉 18.0 g (a.i.)/kg 种子与氟吡菌酰胺 4.2、8.3、12.5 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理,水稻播后 35 d 的株高、鲜重及播后 70 d 的分蘖数均高于吡虫啉 3.0 g (a.i.)/kg 种子与氟吡菌酰胺

12.5 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理。

采用 250.2、375.3、500.4 g (a.i.)/hm² 氟吡菌酰胺悬浮剂对稻田连续进行 3 次土壤喷洒处理,对水稻苗期生长具有较好的保护作用,播后 35 d 和 70 d 的水稻株高、鲜重和分蘖数均显著高于空白对照,但与对照药剂克百威 1 800.0 g (a.i.)/hm² 处理无显著差异(表 4)。

水稻发病后再施用氟吡菌酰胺进行土壤喷洒处理,对水稻具有一定的保护作用,与空白对照相比较,其株高、鲜重和分蘖数均有不同程度的增加(表 3)。

表 4 不同施药处理方式对水稻生长的影响

Table 4 Effects of different nematicide treatments on rice growth

药剂 Nematicide	用量 Dose	播种后 35 d 35 d after sowing		播种后 70 d 70 d after sowing		
		株高 (cm) Shoot height	株鲜重 (g) Shoot fresh weight	株高 (cm) Shoot height	株鲜重 (g) Shoot fresh weight	分蘖数 No. of tillers
氟吡菌酰胺+吡虫啉 Fluopyram+	4.2+18.0	20.8±1.4 ab	1.2±0.3 ab	61.6±7.3 a	28.1±3.4 ab	12.5±2.4 abc
imidacloprid	8.3+18.0	21.2±0.8 a	1.3±0.2 a	63.4±2.0 a	27.3±6.7 b	12.5±1.9 abc
(g (a.i.)/kg seeds)	12.5+18.0	20.1±0.5 abc	1.1±0.2 ab	67.7±7.4 a	38.5±8.3 a	13.7±1.9 a
吡虫啉 Imidacloprid	12.5+3.0	18.9±0.9 bcd	0.9±0.1 bc	64.5±6.5 a	34.1±8.5 ab	13.3±2.4 ab
(g (a.i.)/kg seeds)	18.0	16.5±2.3 ef	0.4±0.1 d	43.3±5.8 b	7.9±3.0 c	5.1±1.3 d
氟吡菌酰胺 Fluopyram	250.2	18.4±0.5 cde	0.8±0.1 c	64.0±7.5 a	32.2±8.4 ab	11.8±1.4 abc
(g (a.i.)/hm ²)	375.3	18.8±1.2 bcd	1.0±0.2 bc	65.3±1.4 a	36.4±2.8 ab	11.4±1.8 abc
克百威 Carbofuran	500.4	19.5±1.3 abcd	1.1±0.2 bc	62.3±2.9 a	33.0±14.1 ab	9.8±1.2 c
(g (a.i.)/hm ²)	1 800.0	17.8±1.4 de	0.9±0.1 c	64.2±4.3 a	28.3±3.7 ab	10.6±1.9 bc
对照 CK	—	14.8±1.6 f	0.4±0.1 d	37.5±0.9 b	7.9±2.8 c	5.0±0.9 d

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写字母表示经 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 differences at $P<0.05$ level by Duncan's new multiple range test.

2.5 各施药处理对水稻产量的影响

水稻产量的调查统计结果表明,氟吡菌酰胺与吡虫啉混合包衣处理,以及连续 3 次采用氟吡菌酰胺对稻田进行土壤喷洒处理,均能显著提高水稻的千粒重和有效穗数,具有显著的保产效果,产量比空白对照增加 50.0%~61.2%,显著高于对照药剂克百威的增产率 20.8%(表 5)。

发病后采用氟吡菌酰胺对稻田进行土壤喷洒处理,氟吡菌酰胺各处理的千粒重明显高于空白对照,但其产量与空白对照相比较,差异不明显。

3 讨论

根结线虫病因其侵染特点主要采取土壤熏蒸和播前沟施进行防治,目前在国内使用阿维菌素、噻唑膦和土壤杀线熏蒸剂棉隆均能有效防治根结线虫

病,但其成本较高、施用手段相对复杂,限制了其在水稻生产中的实际应用(芮凯等, 2015; 张文娟等, 2015); 而氟吡菌酰胺由于其靶标独特,对大多数植物寄生线虫具有较高的杀线虫活性,目前通过种子包衣处理、土壤处理和灌根处理等能有效防治大豆孢囊线虫 *Heterodera glycines* (Kandel et al., 2017)、小麦孢囊线虫 *Heterodera avenae* (迟元凯等, 2017)、南方根结线虫和肾形肾状线虫 *Rotylenchulus reniformis* (Faske & Hurd, 2015; Jones et al., 2017)。本试验评价了氟吡菌酰胺不同处理方式、不同施药时期对水稻拟禾本科根结线虫的防效,发现氟吡菌酰胺不论是作为种子包衣处理还是药液喷洒进行土壤处理对水稻拟禾本科根结线虫均具有较好的防效,并都能有效降低根结指数,减少土壤中的水稻拟禾本科根结线虫数,保产效果明显。

表5 不同施药处理方式对收获期水稻产量的影响

Table 5 Effects of different nematicide treatments on rice yield at harvest

药剂 Nematicide	用量 Dose	穗粒数 Grains per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	有效穗数 Effective panicle (m ²)	产量 Yield (t/hm ²)	增产率 Yield growth rete (%)
氟吡菌酰胺+	4.2+18.0	93.8±15.8 cde	77.5±1.9 ab	29.4±0.3 a	275.1±21.2 a	2.9±0.3 a	57.4±19.4 a
吡虫啉	8.3+18.0	90.2±7.9 de	75.1±1.6 abcd	28.7±0.6 abc	295.0±21.6 a	2.9±0.5 a	55.3±31.1 a
Fluopyram+	12.5+18.0	92.8±4.4 cde	76.0±8.2 abc	28.9±0.4 ab	294.9±25.5 a	3.0±0.4 a	61.2±24.6 a
imidacloprid	12.5+3.0	87.2±6.4 de	79.9±16 a	27.8±0.4 bcd	277.1±15.4 a	2.7±0.2 ab	44.9±4.6 abc
(g (a.i.)/kg seeds)	18.0	120.7±16.8 a	66.5±5.8 bcd	26.3±0.5 ef	174.9±15.1 ce	1.8±0.1 c	-1.2±7.7 d
吡虫啉							
Imidacloprid							
(g (a.i.)/kg seeds)							
氟吡菌酰胺	250.2	86.9±11.7 de	82.1±2.0 a	28.7±0.6 abc	276.3±34.9 a	2.8±0.5 a	51.9±16.6 ab
Fluopyram	375.3	80.5±14.0 e	83.5±3.3 a	28.7±0.5 abc	289.1±32.1 a	2.8±0.7 a	50.0±28.3 abc
(g (a.i.)/hm ²)	500.4	87.8±4.5 de	77.4±1.4 ab	28.7±0.3 abc	288.9±20.2 a	2.8±0.3 a	51.8±9.6 ab
克百威	1 800.0	105.3±13.4 abcd	73.8±11.2 abcd	27.6±1.0 cde	212.5±22.5 b	2.2±0.4 bc	20.8±13.7 bcd
Carbofuran							
(g (a.i.)/hm ²)							
氟吡菌酰胺	250.2	103.3±6.4 abcd	63.9±0.6 d	26.8±1.4 def	207.5±17.9 bc	1.8±0.1 c	-1.0±3.6 d
Fluopyram	375.3	113.4±13.9 ab	67.6±4.4 bcd	26.7±1.1 def	207.3±18.1 bcd	2.1±0.4 c	14.1±15.1 d
(g (a.i.)/hm ²)	500.4	97.9±9.4 bcde	79.4±4.6 a	27.2±0.3 de	213.3±15.1 b	2.3±0.3 bc	21.3±11.9 bcd
对照CK	-	116.4±6.3 ab	65.2±2.5 cd	25.7±0.5 f	190.3±15.7 bcde	1.9±0.1 c	-

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

高剂量吡虫啉(18.0 g (a.i.)/kg 种子)具有壮苗、促进根系生长和提高稻苗鲜重的作用,而且不会产生药害,可提高水稻产量(宣日成等,2000;李国君等,2014)。本研究采用高剂量吡虫啉与氟吡菌酰胺混合包衣处理,不仅能够有效防治水稻拟禾本科根结线虫,还能促进水稻生长,提高水稻产量。试验结果表明,吡虫啉 18.0 g (a.i.)/kg 种子与氟吡菌酰胺 4.2、8.3、12.5 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理的分蘖数和水稻产量高于氟吡菌酰胺土壤喷洒处理,究其原因可能与土壤微生物群落结构的改变有关。氟吡菌酰胺属于杀菌剂和杀线剂,对多种真菌病害有较好的防治效果,同时较高剂量的氟吡菌酰胺还会抑制土壤中微生物的活性,改变土壤微生物的群落结构和功能多样性,降低土壤中真菌和革兰氏阴性菌,增加呼吸商,减少土壤微生物量碳(Zhang et al., 2014),从而影响水稻的生长。

播种后 70 d 的调查中发现水稻根结数急剧减少,其主要原因是水稻拟禾本科根结线虫大多分布在土壤 0~20 cm 的范围,线虫主要从水稻幼根根冠后分生区或伸长区侵入根系(Perry & Moens, 2011; 刘国坤等, 2011a, b);根系下扎后使得大部分幼嫩根系避开了水稻拟禾本科根结线虫活动范围,从而避

免了水稻拟禾本科根结线虫的侵染。

本研究结果表明,水稻发病后土壤喷洒处理的保产效果并不明显,后期施药虽然能一定程度降低土壤中水稻拟禾本科根结线虫的数量,但作物感病后再实施防治措施已难以控制线虫为害,即使施用较高剂量的杀线虫剂也难以将线虫种群密度降至经济阈值以下(Perry & Moens, 2011)。因此在实际生产中建议使用氟吡菌酰胺 4.2 g (a.i.)/kg 种子与吡虫啉 18.0 g (a.i.)/kg 种子混合包衣处理,不仅能够有效抑制线虫发生,而且能兼治水稻上的其它害虫和病害,减少施药成本并解放劳动力。

参 考 文 献 (References)

- Bridge J, Page SLJ. 1982. The rice root-knot nematode, *Meloidogyne graminicola*, on deep water rice (*Oryza sativa* subsp. *indica*). *Revue de Nematologie*, 5(2): 225-232
- Chi YK, Wang T, Zhao W, Peng DL, Huang WK, Qi RD. 2017. Control efficacy of fluopyram and avermectin compounded dress seeds on wheat cyst nematode disease.//Academic Annual Conference of Botanical China Society of Plant Pathology in 2017. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, pp. 455 (in Chinese) [迟元凯, 汪涛, 赵伟, 彭德良, 黄文坤, 戚仁德. 2017. 氟吡菌酰胺与阿维菌素复配拌种对小麦孢囊线虫病的田间防

- 治效果.//中国植物病理学会2017年学术年会论文集.北京:中国农业科学技术出版社, pp. 455]
- Faske TR, Hurd K. 2015. Sensitivity of *Meloidogyne incognita* and *Rotylenchulus reniformis* to fluopyram. *Journal of Nematology*, 47(4): 316–321
- Huang WK, Xiang C, Liu Y, Ding Z, Peng DL. 2018. Research progress on the occurrence and controlling of root knot nematode *Meloidogyne graminicola* in rice. *Acta Phytopathologica Sinica*, 48(3): 289–296 (in Chinese) [黄文坤, 向超, 刘莹, 丁中, 彭德良. 2017. 水稻拟禾本科根结线虫发生与防治研究进展. *植物病理学报*, 8(3): 289–296]
- Jones JG, Kleczewski NM, Desaegeer J, Meyer SLF, Johnson GC. 2017. Evaluation of nematicides for southern root-knot nematode management in lima bean. *Crop Protection*, 96: 151–157
- Kandel YR, Wise KA, Bradley CA, Chilvers MI, Byrne AM, Tenuta AU, Faghihi J, Wiggs SN, Mueller DS. 2017. Effect of soybean cyst nematode resistance source and seed treatment on population densities of *Heterodera glycines*, sudden death syndrome, and yield of soybean. *Plant Disease*, 101(12): 2137–2143
- Khan MR, Haque Z, Kausar N. 2014. Management of the root-knot nematode *Meloidogyne graminicola*, infesting rice in the nursery and crop field by integrating seed priming and soil application treatments of pesticides. *Crop Protection*, 63: 15–25
- Khan MR, Zaidi B, Haque Z. 2012. Nematicides control rice root-knot, caused by *Meloidogyne graminicola*. *Phytopathologia Mediterranea*, 51(2): 298–306
- Li GJ, Zhuo XG, Guo R, Luo CL, Deng DH. 2014. 60% imidacloprid suspension seed dressing agent (Gaoqiao) against rice plant-hopper and virus disease. *Biological Disaster Science*, 37(3): 254–259 (in Chinese) [李国君, 卓晓光, 郭荣, 罗彩莲, 邓德海. 2014. 60%吡虫啉悬浮拌种剂(高巧)对防治水稻飞虱和预防病毒病的效果评价. *生物灾害科学*, 37(3): 254–259]
- Liu GK, Wang Y, Xiao S, Zhang SS. 2011b. Pathogen identification and infection sources of rice root-knot disease. *Chinese Journal of Rice Science*, 25(4): 420–426 (in Chinese) [刘国坤, 王玉, 肖顺, 张绍升. 2011b. 水稻根结线虫病的病原鉴定及其侵染源的研究. *中国水稻科学*, 25(4): 420–426]
- Liu GK, Xiao S, Zhang SS, Zhang DF, Wang Y. 2011a. Infection characteristic and life cycle of rice root-knot nematode, *Meloidogyne graminicola* in rice root. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 32(4): 743–748 (in Chinese) [刘国坤, 肖顺, 张绍升, 张敦富, 王玉. 2011a. 拟禾本科根结线虫对水稻根系的侵染特性及其生活史. *热带作物学报*, 32(4): 743–748]
- Mantelin S, Bellafiore S, Kyndt T. 2017. *Meloidogyne graminicola* a major threat to rice agriculture. *Molecular Plant Pathology*, 18(1): 3–15
- Pankaj, Sharma HK, Prasad JS. 2010. The rice root-knot nematode, *Meloidogyne graminicola*: an emerging problem in rice-wheat cropping system. *Indian Journal of Nematology*, 40(1): 1–11
- Perry RN, Moens M. 2011. *Plant nematodes*. Jian H, translated. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [佩里, 莫恩斯. 2011. *植物线虫学*. 简恒, 译. 北京: 中国农业大学出版社]
- Pokharel RR, Abawi GS, Zhang N, Duxbury JM, Smart CD. 2007. Characterization of isolates of *Meloidogyne* from rice-wheat production fields in Nepal. *Journal of Nematology*, 39(3): 221–230
- Poudyal DS, Pokharel RR, Shrestha SM, Khatri-Chetria GB. 2005. Effect of inoculum density of rice root knot nematode on growth of rice cv. Masuli and nematode development. *Australasian Plant Pathology*, 34(2): 181–185
- Rui K, Wang HF, Fu MY, Chen MC. 2015. Evaluation of six nematicides against root-knot nematodes on rice. *Agrochemicals*, 54(8): 613–615 (in Chinese) [芮凯, 王会芳, 符美英, 陈绵才. 2015. 6种杀线剂对水稻根结线虫的防效评价. *农药*, 54(8): 613–615]
- Schindler AF. 1961. A simple substitute for a Baermann funnel. *Plant Disease Reporter*, 45(9): 747–748
- Soriano IR, Prot JC, Matias DM. 2000. Expression of tolerance for *Meloidogyne graminicola* in rice cultivars as affected by soil type and flooding. *Journal of Nematology*, 32(3): 309–317
- Xie JL, Yang F, Huang WK, Peng DL, Peng YL, Ji HL. 2017. Advances in major rice parasitic nematodes in recent years. *Journal of Plant Protection*, 44(6): 940–949 (in Chinese) [谢家廉, 杨芳, 黄文坤, 彭德良, 彭云良, 姬红丽. 2017. 近年水稻主要线虫病害的研究进展. *植物保护学报*, 44(6): 940–949]
- Xuan RC, Wang QQ, Zheng W, Liu HJ, Liu WP. 2000. Study on the adsorption of imidacloprid in soils and the interaction mechanism. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 20(2): 72–75 (in Chinese) [宣日成, 王琪全, 郑巍, 刘惠君, 刘维屏. 2000. 吡虫啉在土壤中的吸附及作用机理研究. *环境科学学报*, 20(2): 72–75]
- Zhang WJ, Qi HL, Ren YP, Mu W, Liu F. 2015. Effects of formulations, irrigation volumes and loose degree of soils to the distribution of emamectin benzoate in soils on root-knot nematode *Meloidogyne* spp. *Journal of Plant Protection*, 42(3): 440–446 (in Chinese) [张文娟, 齐浩亮, 任玉鹏, 慕卫, 刘峰. 2015. 剂型、灌水量和土壤疏松度对甲维盐在土壤中分布及防治根结线虫效果的影响. *植物保护学报*, 42(3): 440–446]
- Zhang Y, Xu J, Dong FS, Liu XG, Wu XH, Zheng YQ. 2014. Response of microbial community to a new fungicide fluopyram in the silty-loam agricultural soil. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 108: 273–280
- Zhao HH, Liu WZ, Liang C, Duan YX. 2001. *Meloidogyne graminicola*, a new record species from China. *Acta Phytopathologica Sinica*, 31(2): 184–188 (in Chinese) [赵洪海, 刘维志, 梁晨, 段玉玺. 2001. 根结线虫在中国的一新纪录种——拟禾本科根结线虫 *Meloidogyne graminicola*. *植物病理学报*, 31(2): 184–188]
- Zhou DG. 2016. A new generation of excellent nematicide, fluopyram. *World Pesticide*, 38(5): 61–63 (in Chinese) [周大纲. 2016. 新一代优秀杀线虫剂氟吡菌酰胺. *世界农药*, 38(5): 61–63]

(责任编辑:李美娟)