

高效新型杀松材线虫剂的筛选及其林间防效

张 扬 杨鼎超 李正昀 郝菲菲 张林平* 李 冬

(江西农业大学林学院, 南昌 330045)

摘要: 为筛选出新型的高效松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 防治药剂, 采用浸渍法室内测定了氯氟氰虫酰胺、阿维菌素、甲维盐、灭多威、特丁硫磷、甲基异柳磷和吡虫啉 7 种药剂对松材线虫的毒杀作用 and 对其繁殖能力的影响, 采用高效液相色谱仪测定氯氟氰虫酰胺在马尾松体内的输导分布, 并在林间开展树干注射氯氟氰虫酰胺抗松材线虫病试验。结果表明, 7 种药剂中氯氟氰虫酰胺对松材线虫的毒力最强, LC_{50} 为 0.019 mg/L, 阿维菌素和甲维盐次之, LC_{50} 分别为 0.0213 mg/L 和 0.0214 mg/L。氯氟氰虫酰胺树干注射 3 个月内能迅速从马尾松基部传导至树梢顶部, 树干边材东、南面的药剂含量显著高于西、北面, 且树干不同高度的氯氟氰虫酰胺含量均高于其 LC_{50} ; 氯氟氰虫酰胺制剂在林间注干后, 对人工接种病原松材线虫松树的防治效果为 73.33%, 自然感染松材线虫病松树的死亡率降至 2.00%, 而对照试验中人工接种松材线虫松树和自然感染松材线虫病松树的死亡率分别为 93.33% 和 19.67%。表明氯氟氰虫酰胺制剂能有效预防松树个体的松材线虫病发生与为害, 可以推广使用。

关键词: 氯氟氰虫酰胺; 松材线虫; 树干注射; 毒力测定; 预防

Screening and prevention effect of new and effective pesticides against pine wilt nematode *Bursaphelenchus xylophilus*

Zhang Yang Yang Dingchao Li Zhengyun Hao Feifei Zhang Linping* Li Dong

(Department of forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi Province, China)

Abstract: In order to screen out efficient new pesticides against pine wilt nematode *Bursaphelenchus xylophilus*, the toxicity and reproductive effect of seven pesticides, cyhalodiamide, abamectin, emamectin benzoate, methomyl, terbufos, isofenphosmethyl and imidacloprid, on *B. xylophilus* were measured with impregnation method. After the injection of cyhalodiamide, high performance liquid chromatography was used to examine its distribution with tree heights. The results showed that the LC_{50} of cyhalodiamide was 0.019 mg/L, which could poison and inhibit the *B. xylophilus* population, while the LC_{50} values of abamectin and emamectin benzoate were 0.0213 mg/L and 0.0214 mg/L, respectively. The medicament could be quickly transported from the base to top of the pine after cyhalodiamide injection in three months. The content of cyhalodiamide in east and south sides of the trunk was significantly higher than that in the west and north sides. The content of cyhalodiamide in different heights of tree trunks was higher than LC_{50} . The prevention effect of cyhalodiamide reached 73.33% in the tested pine trees inoculated with *B. xylophilus*, and the pine mortality rate decreased to 2.0% in the tested pines while it was 19.67% in the control pines naturally infected with pathogens, and 93.33% in the control pines inoculated with *B. xylophilus*. It indicated that cyhalodiamide could prevent pine wilt disease effectively.

Key words: cyhalodiamide; *Bursaphelenchus xylophilus*; trunk-injection; toxicity determination; prevention

基金项目: 江西省重大科技专项计划项目(20143ACF60005), 江西省林业厅创新专项项目(201411)

* 通讯作者 (Author for correspondence), E-mail: zlping619@163.com

收稿日期: 2017-01-19

松材线虫病是林业上一种毁灭性的检疫性病害,其病原是松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Bolla et al., 1986),可为害针叶树种,特别是松属植物,具有易传播、发病快、难防治等特点。该病在北美洲、欧洲和亚洲均有分布,最严重的为中国、日本、韩国等国家(Shin et al., 2004)。我国自1982年在南京市发生以来,现已扩散至15省(直辖市)的170多个县市(吴蓉等, 2003),且继续呈扩散蔓延趋势,而单株松树尚未有针对性的可实施精准保护的药物,防治工作较为严峻,对我国的国民经济、风景名胜区和森林生态系统造成了巨大损失(黄俊等, 2014)。

目前,我国松材线虫病的防治策略主要基于林间病死松树的秋冬季清理以及媒介松褐天牛 *Monochamus alternatus* 的天敌释放(杨远亮, 2012)和化学引诱剂诱捕(郑丽平, 2013),但费力费时,且在松材线虫病高度感染林区的防治效果十分有限。因此制订和推广有效的松材线虫病预防措施显得尤为迫切。赵博光(1996)注射苦豆碱于马尾松树干,发现对松材线虫病有一定的防治效果; Sousa et al. (2013)利用甲维盐注射马尾松树干后,对松材线虫病具有较好的防治效果,且对松褐天牛成虫的寿命和取食有极大的影响;来燕学等(2016)研究表明感染松材线虫病的濒死古松树的死亡过程能被复配药剂急救逆转。这些试验由于药剂成本和注射技术问题而未大量推广,同时,甲维盐等药剂长时间使用会导致松材线虫抗药性问题出现,防效明显下降(Zhao et al., 2006; 周利娟等, 2011)。因此,防治松材线虫病迫切需要高效、新型药剂的筛选与应用。

市场上一些新型高效杀虫剂,如氯虫苯甲酰胺(Lahm et al., 2001)、氟虫双酰胺(Tohnishi et al., 2005)和氰虫酰胺(Foster et al., 2012)等多为国外公司开发的产品。而氯氟氰虫酰胺是浙江省化工研究院有限公司自主研发的一类高效、作用机制独特的邻苯二甲酰胺类新型杀虫剂(朱冰春等, 2010),与传统杀虫剂无交互抗性,作用于昆虫鱼尼丁受体,促使昆虫细胞内源钙离子释放,影响肌肉收缩,进而导致昆虫死亡(Tohnishi et al., 2005)。已有研究表明,氯氟氰虫酰胺对水稻二化螟 *Chilo suppressalis*、稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 和小菜蛾 *Plutella xylostella* 等害虫表现出良好的杀虫活性,已广泛用于防治蔬菜、水果、水稻和棉花等作物上的鳞翅目害虫(Tohnishi et al., 2005; 邢家华等, 2015),表现出与氟虫双酰胺同等的室内杀虫活性和田间防效水平(李洋等, 2006)。目

前,国内外关于氯氟氰虫酰胺在林业病虫害防治方面的应用尚未见报道。因此,本试验选用氯氟氰虫酰胺、吡虫啉、灭多威、甲基异柳磷、特丁硫磷、甲维盐和阿维菌素7种药物,测定其对松材线虫的毒杀作用及在灰葡萄孢菌 *Botrytis cinerea* 上的繁殖能力,筛选出室内具有强力毒杀松材线虫的药剂;采用高效液相色谱法测定氯氟氰虫酰胺在马尾松体内的分布与含量,分析药剂在树体内的输导机制,并对林间马尾松进行接种和自然感染病原松材线虫的抗性测试,明确氯氟氰虫酰胺制剂对松材线虫病的防治效果,以期对松材线虫病的防治筛选新型注干药剂。

1 材料与方法

1.1 材料

供试松材线虫及植物:供试虫株分离自江西省新干县林间病死松树,在显微镜下鉴定为松材线虫,并于长满灰葡萄孢菌的马铃薯葡萄糖琼脂培养基上饲养后,保存于4℃冰箱备用。供试树种为10~35年的健康(依据松树松脂流量判断树木的健康程度)马尾松,树高为6~12 m。

供试培养基:马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基:马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼脂15~20 g、蒸馏水1 000 mL,自然pH。

药剂及仪器:98%吡虫啉(imidacloprid)原药、98%灭多威(methomyl)原药、67%甲基异柳磷(isofenphos-methyl)原药、89%特丁硫磷(terbufos)原药、72%阿维菌素(abamectin)原药、75%甲维盐(emamectin benzoate)原药、98%氯氟氰虫酰胺(cyhalodiamide)原药,江西大农化工有限公司。ACQUITY UPLC 高效液相色谱仪,美国沃特世公司;BX35奥林巴斯光学显微镜,奥林巴斯株式会社;LRH-250恒温培养箱,上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 不同药剂的配制及松材线虫室内毒力测定

将98%吡虫啉原药、98%灭多威原药、67%甲基异柳磷原药、89%特丁硫磷原药、72%阿维菌素原药、75%甲维盐原药和98%氯氟氰虫酰胺原药分别加入二甲基甲酰胺等助溶剂,分别配制成浓度为1%、10%、10%、10%、4.5%、4.5%和4.8%的乳油。每种浓度乳油再分别稀释成500、1 000、1 500、2 000、2 500倍液共5个不同浓度,并分别转入含有100条线虫的1.5 mL离心管中,于25℃恒温培养,24 h后在显微镜下检查各处理松材线虫的存活数和死亡数,计算致死率(张志超和赵博光, 2013),并进行毒

力回归分析,计算各药剂的半致死浓度 LC_{50} ,其值越小,药剂毒力越大。以清水处理作对照,每个处理5次重复。线虫致死率=(对照线虫平均存活数量-处理线虫平均存活数量)/对照线虫平均存活数量 $\times 100\%$ 。

1.2.2 不同药剂对松材线虫繁殖能力影响的测定

在浓度均为 10^{-5} mg/L的7种不同药剂中分别加入100头松材线虫成虫(50♀+50♂),浸泡5 h后用无菌水清洗3次,再加入到长满灰葡萄孢菌的PDA培养基上,于25℃恒温饲养,直至有1个培养皿中的灰葡萄孢菌被吃完,则全部停止饲养,观察不同处理松材线虫取食灰葡萄孢菌的情况;而后采用贝尔曼漏斗法分离培养皿中的松材线虫(Chawla & Prasad, 1975),统计并记录不同处理各个重复的线虫总数。不同处理下,灰葡萄孢菌被线虫取食面积越小、线虫数量越少,表明该药剂对松材线虫繁殖的抑制能力越强。每个处理5次重复,以清水处理作对照。

1.2.3 氯氟氰虫酰胺在树体内的输导试验

配制4.8%氯氟氰虫酰胺液体制剂并装入长喙塑料药瓶中,每瓶药剂量为50 mL,于2015年3月对10~15年生的马尾松进行注干,从离地面0.5 m高处打孔注入,孔深为6~8 cm,穿孔角度为斜向下方45°,用剪刀剪去药瓶尖嘴部分,并将药瓶头部插入注入孔,用挑针刺破药瓶底部。7月初截取松树0.5、2、4、6 m处圆盘(厚为10 cm)和顶梢枝条(近8 m),每个圆盘按东、西、南、北方向等1/4圆分开收集,阴干后分别粉碎,用甲醇作溶剂,对粉碎的圆盘中氯氟氰虫酰胺进行萃取,真空浓缩,采用液相色谱法检测浓缩液中药剂在树体各个部位不同方向的含量。液相色谱条件:色谱柱为Kro-masil C18柱(250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m),检测波长为254 nm;柱温为室温;流动相为甲醇:水=92:8(V/V),并加少量调整剂;流速为1.0 mL/min;进样量为20 μ L。

准确称取0.01 g氯氟氰虫酰胺标样于100 mL容量瓶中,用甲醇溶解定容至刻度,得100 mg/L标准储备液。用甲醇将标准储备液逐级稀释配制成0.5、1.0、5.0、10.0、15 mg/L的工作液,采用上述色谱条件,取20 μ L进样,每个浓度3次重复。以质量浓度为横坐标,以峰面积为纵坐标,绘制标准曲线。在空白木屑中添加一定量的氯氟氰虫酰胺标准品,添加水平分别为0.01、0.1、1.0、5.0 mg/kg,每个浓度3次重复,按上述方法对样品进行提取、净化,测定回收率。

1.2.4 氯氟氰虫酰胺的林间预防试验

林间试验在江西省新干县松材线虫病发生林地进行,开展树干注射试验前,对林地进行了全面清

理,不留枯松残枝。4.8%氯氟氰虫酰胺制剂于2015年3月5日在新干县金川镇化金川林场1号小班的马尾松林进行注射试验。试验林为马尾松纯林,林龄约15年,松材线虫病自然发生率为5%~25%。注射15株马尾松,每株注入氯氟氰虫酰胺制剂50 mL,另选取15株马尾松注射50 mL清水作对照。2015年6月,在上述30株马尾松树干1.5 m处不同方向斜向下方45°打孔2~3个,孔深5~6 cm,往孔内注射松材线虫悬浮液,并用黄泥填堵孔口,每株接种松材线虫2万~3万条。2015年11月根据松树流脂情况及病死松树针叶是否为黄褐色至红褐色,统计接种松材线虫松树存活情况。

1.2.5 氯氟氰虫酰胺对自然感病松树的抗性试验

自然感染抗性试验地分别为新干县金川镇化金川林场2号小班(林龄15年,自然发病率5%~25%,树高4~11 m,胸径5~20 cm)、湾里区江中药业有限公司8号小班(林龄20年,自然发病率5%~30%,树高4~15 m,胸径5~30 cm)和进贤县罗溪镇罗岭村1号小班(林龄30年,自然发病率5%~20%,树高5~13 m,胸径6~25 cm)。2015年3月在上述3个试验地分别用4.8%的氯氟氰虫酰胺注射马尾松100株,每株注射50 mL。自然状态下感染松材线虫,不进行人工接种,11月份检查发病情况,并分别在各个试验地相邻松林中标识100株马尾松作对照。

1.3 数据分析

采用SPSS 13.0软件对所得试验数据进行统计分析,采用Originpro 8.5分析不同药剂处理后PDA培养基上松材线虫数量并作图;对不同药剂间的差异进行单因素方差分析,采用 t 测验法进行不同药剂处理间的差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同药剂对松材线虫的毒力

7种药剂对松材线虫表现出了不同程度的毒力,处理24 h之后, LC_{50} 从大到小的顺序为吡虫啉>甲基异柳磷>灭多威>特丁硫磷>甲维盐>阿维菌素>氯氟氰虫酰胺,其中氯氟氰虫酰胺、阿维菌素和甲维盐的 LC_{50} 为0.0190、0.0213、0.0214 μ g/g,说明这3种药剂在室内对松材线虫的毒力很强;灭多威和特丁硫磷的 LC_{50} 为0.0801 μ g/g和0.0709 μ g/g,说明这2种药剂在室内对松材线虫的毒力较强,而吡虫啉与甲基异柳磷对松材线虫的毒力相对较弱(表1)。

2.2 不同药剂对松材线虫繁殖能力的影响

7种药剂对松材线虫繁殖能力的影响存在显著

差异。氯氟氰虫酰胺对松材线虫繁殖能力的影响最大,表现为松材线虫在灰葡萄孢菌培养基上取食面积最小,甲维盐和阿维菌素对松材线虫繁殖能力的影响次之,然后是吡虫啉,而特丁硫磷、灭多威和甲基异柳磷3种药剂处理的松材线虫在培养基上几乎完全取食灰葡萄孢菌,与对照较为接近(图1)。将培养皿内灰葡萄孢菌连同PDA培养基进行分离,氯氟氰虫酰胺处理的培养皿上分离获得的线虫平均数

量为296条/皿,甲维盐处理为634条/皿,阿维菌素处理为846条/皿,三者均显著低于其余处理和对照;吡虫啉处理为4 738条/皿,特丁硫磷、灭多威和甲基异柳磷处理分别为8 484、16 398和19 517条/皿,而对照为22 215条/皿(图2)。表明氯氟氰虫酰胺、甲维盐和阿维菌素对松材线虫的种群繁殖具有较强的抑制作用,而吡虫啉、特丁硫磷、灭多威和甲基异柳磷对松材线虫的种群繁殖影响较小。

表1 不同药剂对松材线虫的毒力测定结果
Table 1 The toxicity assay results of *Bursaphelenchus xylophilus* with different chemicals

药剂 Chemicals	回归方程 Regression equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient	LC ₅₀ (μg/g) Semi-lethal concentration	95%置信区间 (μg/g) 95% confidence interval
吡虫啉 Imidacloprid	$y=3.6918+1.0064x$	0.9984	0.1686	0.1209–0.2351
甲基异柳磷 Methyl isofenil	$y=7.9577+0.7689x$	0.9658	0.1438	0.0835–0.2506
灭多威 Methomyl	$y=17.5897+3.0733x$	0.9020	0.0801	0.0544–0.1234
特丁硫磷 Terbufos	$y=14.4717+2.2828x$	0.9124	0.0709	0.0585–0.0843
阿维菌素 Abamectin	$y=11.6559+1.4246x$	0.9716	0.0213	0.0114–0.0284
甲维盐 Emamectin benzoate	$y=25.3126+4.3494x$	0.9760	0.0214	0.0073–0.0296
氯氟氰虫酰胺 Cyhalodiamide	$y=20.4344+3.2692x$	0.9530	0.0190	0.0122–0.0236

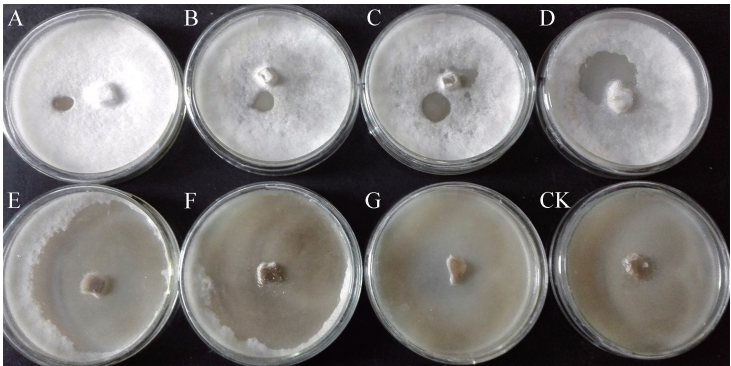


图1 松材线虫不同药剂处理后在培养皿内对灰葡萄孢菌的取食情况

Fig. 1 The acquisition feeding results of *Bursaphelenchus xylophilus* after different chemical treatments

A: 氯氟氰虫酰胺; B: 甲维盐; C: 阿维菌素; D: 吡虫啉; E: 特丁硫磷; F: 灭多威; G: 甲基异柳磷; CK: 对照。A: Cyhalodiamide; B: emamectin benzoate; C: abamectin; D: imidacloprid; E: terbufos; F: methomyl; G: methyl isofenil; CK: control.

2.3 氯氟氰虫酰胺在树体内的分布

采用高效液相色谱仪测定马尾松树干不同高度截面圆盘和顶梢中氯氟氰虫酰胺含量,结果表明质量浓度与峰面积具有良好的线性关系,回归方程为 $y=8.4780x+8.8107$,相关系数为0.9994,满足定量分析的要求。氯氟氰虫酰胺添加回收率在84.35%~94.58%之间,相对标准偏差在7.82%~9.37%之间,表明该方法准确度与精密度良好,可用作药剂残留分析。最低检测浓度为0.01 μg/g,符合农药残留检测的灵敏度要求。

氯氟氰虫酰胺主要集中在树干注入点以上的2、4、6 m高度边材,边材中平均含量分别为1.26、4.35、0.31 μg/g;边材东、南面含量显著高于边材西、北面,其中树干南面的氯氟氰虫酰胺含量较其它3个方向要高,4 m处南面的含量高达8.67 μg/g;树顶(8 m)东面枝条的含量可达0.30 μg/g,树顶南面枝条的含量达0.15 μg/g(表2)。表明树干注射氯氟氰虫酰胺后能被树干下部有效地传导至树体顶部,树体不同高度的氯氟氰虫酰胺含量均高于其LC₅₀,能有效抑制松材线虫在马尾松树体内的生长和繁殖。

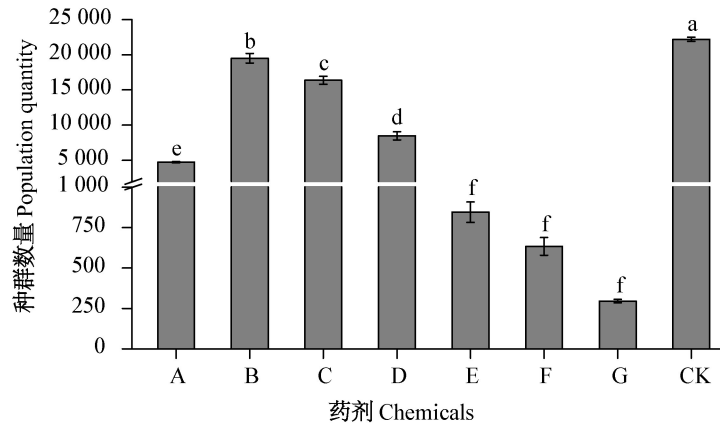


图2 不同药剂处理后培养皿内松材线虫的种群数量

Fig. 2 The population numbers of *Bursaphelenchus xylophilus* after different chemical treatments

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经 *t* 测验法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。A: 吡虫啉; B: 甲基异柳磷; C: 灭多威; D: 特丁硫磷; E: 阿维菌素; F: 甲维盐; G: 氯氟氰虫酰胺; CK: 对照。Data are mean±SE. Different letters on the bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by *t* test. A: Imidacloprid; B: methyl isofenil; C: methomyl; D: terbufos; E: abamectin; F: emamectin benzoate; G: cyhalodiamide; CK: control.

2.4 氯氟氰虫酰胺对人工接种线虫的防治效果

氯氟氰虫酰胺制剂注干后 5 h 内能全部流入树体内,再人工接入松材线虫后,注射氯氟氰虫酰胺组的 15 株马尾松中有 4 株发病死亡,死亡率为 26.67%,具有 73.33% 的防治效果;而对照组 15 株松树中有 14 棵枯死,死亡率为 93.33%,2 组间差异显著,表明氯氟氰虫酰胺对松材线虫是高度敏感药物,对松材线虫病的发生具有较好的预防作用。

2.5 氯氟氰虫酰胺林间对自然感染病原的抗性

进贤县、新干县和湾里区 3 个区域共注射松树 300 株,死亡 6 株,其中新干县 2 株、进贤县 3 株、湾里区 1 株;对照组松树 300 株,死亡 59 株,其中新干县 19 株、进贤县 24 株、湾里区 16 株。3 个区域处理组和对照组的松树平均死亡率分别为 2.00% 和 19.67%,2 组间差异极显著 ($df=1, 4; F=48.29; P=0.002$)。表明林间马尾松树干注射氯氟氰虫酰胺后,对松材线虫病的抗性显著提高,且自然感染松材线虫病原数量一般低于人工接种的线虫数量。

3 讨论

本试验采用浸渍法使得松材线虫能充分与药剂接触,毒力回归分析结果表明氯氟氰虫酰胺在室内对松材线虫具有非常强的毒杀作用,处理 24 h 后 LC_{50} 为 0.019 mg/L。近年来,国内外学者已筛选出一些对松材线虫具有毒力的药物,如甲维盐处理 24 h LC_{50} 为 0.23 mg/L (贾进伟, 2013)、鱼藤酮丙酮处理 24 h LC_{50} 为 2.80 mg/L (翁群芳等, 2005)、苦豆碱处理 120 h LC_{50} 为 26.30 mg/L (赵博光, 1996) 及 α -三噻

吩处理 5 d LC_{50} 为 1.89 mg/L (张志超和赵博光, 2013), 这些药剂的 LC_{50} 均远高于氯氟氰虫酰胺。因此,氯氟氰虫酰胺对松材线虫的室内毒力优于市场上常见杀线剂。本试验结果还显示,氯氟氰虫酰胺对培养皿中松材线虫种群的繁殖具有较强的抑制作用,处理 5 h 后松材线虫数量仅为 296 条/皿,而对照处理数量为 22 215 条/皿。此外,氯氟氰虫酰胺的毒力试验结果显示,其对家兔皮肤、眼睛无刺激性,Ames 试验、小鼠睾丸精母细胞染色体畸变试验和小鼠骨髓多染色红细胞微核试验均表现为阴性,表明该化合物属于低毒 (邢家华等, 2013)。因此,本研究将氯氟氰虫酰胺应用于松材线虫病的防治,对于推动我国新农药创制和林业病虫害防治工作具有重要意义。

树干注射技术在松材线虫病防治中效果较好,但在药物方面缺乏,因为高效药物既要高抗松材线虫,又要在树体内具有较好传导性。在实验室筛选防治松材线虫的高效药物,注入松树后并不一定能对松材线虫病产生防治作用,主要是健康松树体内充满松脂,针剂若不具脂溶性,注入的药物就不能与靶标松材线虫相接触,不可能有预防作用。本试验在常温下对松脂的溶解性进行了测定,结果表明氯氟氰虫酰胺制剂对松脂的溶解性达到 0.5 g/mL,注干后 3~5 h 内能被树体完全吸收,3 个月内在树干不同高度、不同方向的氯氟氰虫酰胺含量差异显著,树干南面较其它 3 个方向要高,且均高于氯氟氰虫酰胺 LC_{50} (0.019 μ g/g),表明氯氟氰虫酰胺在马尾松树体内具有较好的内吸传导性。本试验结果与 Takai et al. (2003) 研究结果一致,树干 4 m 处南面的药剂

含量高达8.67 μg/g,但树干底部药剂的含量也较高,可能与注药部位、时间和助剂类型有关。目前国内外尚未见氯氟氰虫酰胺在林木中残留的报道,而其在稻田水、土壤及水稻植株中的消解半衰期分别为4.8~7.7、5.2~8.3和1.5~15.4 d(曹梦超等,2015)。本试验中氯氟氰虫酰胺注干3个月内在树体内仍有较大残留量,因此下一步将重点研究其在马尾松树体内的动态变化和持效期,探讨该药剂在马尾松树体内的稳定性及树体对该药剂的代谢能力。

表2 氯氟氰虫酰胺在马尾松树体中的分布

Table 2 Distribution of cyhalodiamide in the pine tree

树体高度 (m)	树体方向	氯氟氰虫酰胺含量 (μg/g)
Tree height	Tree direction	Cyhalodiamide content
0.5	东面 East	4.76±0.62 a
	西面 West	0.41±0.07 b
	南面 South	5.93±0.62 c
	北面 North	2.09±0.36 d
	平均 Average	3.30±1.25 AB
2.0	东面 East	1.97±0.63 a
	西面 West	ND
	南面 South	2.48±0.41 b
	北面 North	0.57±0.046 b
	平均 Average	1.26±0.58 AB
4.0	东面 East	5.47±0.28 a
	西面 West	0.77±0.20 b
	南面 South	8.67±0.52 c
	北面 North	2.48±0.46 d
	平均 Average	4.35±1.74 B
6.0	东面 East	0.72±0.10 a
	西面 West	ND
	南面 South	0.53±0.06 b
	北面 North	ND
	平均 Average	0.31±0.19 A
8.0	东面 East	0.30±0.02 a
	西面 West	ND
	南面 South	0.15±0.04 b
	北面 North	ND
	平均 Average	0.11±0.07 A

表中数据为平均数±标准误。同列不同小写和大写字母分别表示经t测验法检验在同一高度不同方向间和不同高度上平均含量间在P<0.05水平差异显著。ND: 未检测到(仪器检测限为0.01 mg/L)。Data are mean±SE. Different lower-case or capital letters in the same column indicate significant difference among different directions at the same height or average contents at different heights at P<0.05 level by t test. ND: not detected (below 0.01 mg/L, the limit of detection).

目前,我国松材线虫病防治针剂的开发与研究

取得较大突破,如来燕学等(2000)在松材线虫病发生区,联合使用杀线虫剂和杀虫剂,可使感病马尾松急救成活率达83.3%,感病黑松成活率达75.0%,表明感染松材线虫病的濒死松树的死亡过程能被药物急救逆转。本试验在药物筛选和树体输导的基础上,选用氯氟氰虫酰胺制剂在林间进行树干注射抗松材线虫人工接种和自然感染病原试验,结果表明,在人工接种和自然感染条件下,氯氟氰虫酰胺针剂能均获得很高的预防效果,与来燕学等(2016)的研究结果一致。2%阿维菌素乳油(松线光)被引入中国生产,其林间药效试验证明能防治松材线虫病,但该药50 mL规格单价48元,每立方米松树体积需用药8~12 g(Mamiya, 1988; Takai et al., 2000),难以真正在市场上被推广与应用。本研究开发的氯氟氰虫酰胺预防松材线虫病注射剂,50 mL规格的售价为12元/支,每立方米松树体积用药1支就能达到预防松材线虫病效果,极大地降低了防治成本。因此,在松材线虫病发生林地每年松褐天牛羽化传播松材线虫前,树干打孔注射氯氟氰虫酰胺即可有效预防松材线虫发生与流行。松材线虫病预防注射针剂的研发成功,是松材线虫病防治技术的重大突破,将在我国风景名胜区松林和古松树保护中发挥重要作用。

参 考 文 献 (References)

Bolla RI, Winter REK, Fitzsimmons K, Linit MJ. 1986. Pathotypes of the pinewood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. The Journal of Nematology, 18(2): 230–238

Cao MC, Wang QS, Wang YH, Zhao Y, Xing JH, Wang MC, Zhu GN. 2015. Residue and dissipation of cyhalodiamide in rice paddy. Chinese Journal of Pesticide Science, 17(4): 447–454 (in Chinese) [曹梦超, 王全胜, 王义虎, 赵颖, 邢家华, 王蒙岑, 朱国念. 2015. 氯氟氰虫酰胺在稻田环境中的残留及消解特性. 农药学报, 17(4): 447–454]

Chawla ML, Prasad SK. 1975. Techniques in nematology. II. Comparative efficiency of sampling tools and nematode extraction methods. Indian Journal of Nematology, 4(2): 115–123

Foster SP, Denholm I, Rison JL, Portillo HE, Margaritopoulos J, Slater R. 2012. Susceptibility of standard clones and European field populations of the green peach aphid, *Myzus persicae*, and the cotton aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae), to the novel anthranilic diamide insecticide cyantraniliprole. Pest Management Science, 68(4): 629–633

Huang J, Zhang J, Li MJ, Xia TF. 2014. Evaluation on the effects of trunk-injection technique against the pine wood nematode disease. Forestry Science and Technology, 28(4): 118–120 (in Chinese) [黄俊, 张娟, 李明江, 夏天凤. 2014. 树干注药技术预防松材线虫病的效果评价. 林业科技开发, 28(4): 118–120]

Jia JW. 2013. Primary research on prevention mechanism of emamec-tin benzoate trunk injection against pine wilt disease. Master The-

- sis. Lin'an: Zhejiang A&F University (in Chinese) [贾进伟. 2013. 甲维盐注干施用对松材线虫病防治机理初探. 硕士学位论文. 临安: 浙江农林大学]
- Lahm GP, Myers BJ, Selby TP, Stevenson TM. 2001. Preparation of insecticidal anthranilamides: WO 2001070671. 2001-09-27
- Lai YX, He YQ, Chi SY, Wang YH, Zhang YF, Liu JD, Shen YL, Li GP, Lin MS. 2016. Concoction of two high effect anti-nematode drugs injected into pine tree for prevention of pine wilt disease and their effect in forest. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 38(5): 871–878 (in Chinese) [来燕学, 何月秋, 池树友, 王亚红, 张毅丰, 柳建定, 沈幼莲, 李国平, 林茂松. 2016. 高效松材线虫病预防注射药剂配制与林间药效研究. 江西农业大学学报, 38(5): 871–878]
- Lai YX, Yu LX, Zhou YP, Wang LY, Shen YL. 2000. First aid techniques and mechanism for dying pine trees damaged by pine wilt disease. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 17(4): 404–409 (in Chinese) [来燕学, 俞林祥, 周永平, 王良衍, 沈幼莲. 2000. 松材线虫病濒死树急救技术与救活机理. 浙江林学院学报, 17(4): 404–409]
- Li Y, Li M, Chai BS, Liu CL. 2006. A new insecticide flubendiamide. *Agrochemical*, 45(10): 698–699 (in Chinese) [李洋, 李森, 柴宝山, 刘长令. 2006. 新型杀虫剂氟虱虫酰胺. 农药, 45(10): 698–699]
- Mamiya Y. 1988. History of pine wilt disease in Japan. *Journal of Nematology*, 20(2): 219–226
- Shin SC, Choi KS, Park IK, Chung YJ, Kwon TS, Kim CS. 2004. Occurrence of pine wood nematode in Korea and development of diagnosis method. // *Plant Protection toward the 21st Century: Proceedings of the 15th International Plant Protection Congress*, Beijing, China, May 11–16, 2004. Beijing: Foreign Languages Press, pp. 11–16
- Sousa E, Naves P, Vieira M. 2013. Prevention of pine wilt disease induced by *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* by trunk injection of emamectin benzoate. *Phytoparasitica*, 41(2): 143–148
- Takai K, Soejima T, Suzuki T, Kawazu K. 2000. Emamectin benzoate as a candidate for a trunk-injection agent against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Pest Management Science*, 56: 937–941
- Takai K, Suzuki T, Kawazu K. 2003. Distribution and persistence of emamectin benzoate at efficacious concentrations in pine tissues after injection of a liquid formulation. *Pest Management Science*, 60(1): 42–48
- Tohnishi M, Nakao H, Furuya T, Seo A, Kodama H, Tsubata K, Fujioaka S, Kodama H, Hirooka T, Nishimatsu T. 2005. Flubendiamide, a novel insecticide highly active against lepidopterous insect pests. *Journal of Pesticide Science*, 30(4): 354–360
- Weng QF, Zhong GH, Qiu Q, Shui KJ, Hu MY. 2005. Biological activities of extracts of 28 species of plants against *Bursaphelenchus xylophilus*. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 24(5): 459–464 (in Chinese) [翁群芳, 钟国华, 丘麒, 水克娟, 胡美英. 2005. 28种植物提取物对松材线虫的毒杀作用. 华中农业大学学报, 24(5): 459–464]
- Wu R, Pang H, Liu GL, Zhou CQ. 2003. Occurrence, harm and countermeasure of *Bursaphelenchus xylophilus*. // Xu RM, Ye WH. *Bioinvasion: theory and practice*. Beijing: Chinese Science Press, pp. 159–185 (in Chinese) [吴蓉, 庞虹, 刘桂林, 周昌清. 2003. 松材线虫的发生、危害与对策. // 徐汝梅, 叶万辉. 生物入侵: 理论与实践. 北京: 科学出版社, pp. 159–185]
- Xing JH, Yuan J, Yu JP, Dong DZ, Hu DS, Chen J. 2015. Bioactivity and field efficacy of cyhalodiamide against *Helicoverpa armigera*. *Agrochemicals*, 54(11): 842–843 (in Chinese) [邢家华, 袁静, 郁季平, 董德臻, 胡冬松, 陈杰. 2015. 新型杀虫剂氯氟虱虫酰胺对棉铃虫的毒力和田间防效. 农药, 54(11): 842–843]
- Xing JH, Zhu BC, Yuan J, Yu JP, Dong DZ, Zhou DY, Hu DS, Chen J. 2013. Bioactivity and field efficacy of novel insecticide ZJ4042 against different lepidopterous pests. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 15(2): 159–164 (in Chinese) [邢家华, 朱冰春, 袁静, 郁季平, 董德臻, 周冬英, 胡冬松, 陈杰. 2013. 新型杀虫剂氯氟虱虫酰胺对不同鳞翅目害虫的毒力及田间防效. 农药学报, 15(2): 159–164]
- Yang YL. 2012. Studies on biological control of *Monochamus alternates* Hope by using insect natural enemies. Ph. D Thesis. Beijing: Chinese Academy of Forestry (in Chinese) [杨远亮. 2012. 利用天敌昆虫防治松褐天牛技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国林业科学研究院]
- Zhang ZC, Zhao BG. 2013. Nematicidal toxicity test of α -terthienyl against pine wood nematodes (*Bursaphelenchus xylophilus*) in laboratory. *Journal of Northeast Forestry University*, 41(11): 127–129 (in Chinese) [张志超, 赵博光. 2013. α -三噻吩对松材线虫的室内毒力测定. 东北林业大学学报, 41(11): 127–129]
- Zhao BG. 1996. Nematicidal activity of alopeperine against pine wood nematodes. *Scientia Silvae Sinicae*, 32(3): 243–247 (in Chinese) [赵博光. 1996. 苦豆碱对松材线虫杀线活性. 林业科学, 32(3): 243–247]
- Zhao JZ, Collins HL, Li YX, Mau RFL, Thompson GD, Hertlein M, Andaloro JT, Boykin R, Shelton AM. 2006. Monitoring of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to spinosad, indoxacarb, and emamectin benzoate. *Journal of Economic Entomology*, 99(1): 176–181
- Zheng LP. 2013. The evaluation and application of APF-I chemical attractant in monitoring and management of *Monochamus alternates* Hope. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University (in Chinese) [郑丽平. 2013. APF-I 型松墨天牛化学诱剂的评价和应用. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学]
- Zhou LJ, Huang JG, Xu HH. 2011. Insecticide resistance of *Plutella xylostella* from fields of Pearl River Delta. *Journal of South China Agricultural University*, 32(1): 45–48 (in Chinese) [周利娟, 黄继光, 徐汉虹. 2011. 珠三角地区小菜蛾田间种群的抗药性测定. 华南农业大学学报, 32(1): 45–48]
- Zhu BC, Xing JH, Xu TM, Zheng ZW, Chen J, Peng WL, Xu YH, Kong XL, Wei YC, Dong DZ, et al. 2010. Cyano group-containing phthalic acid amide compound, a preparation method and use of pesticides as agrochemicals: CN2010102797903. 2010-09-13 (in Chinese) [朱冰春, 邢家华, 许天明, 郑志文, 陈杰, 彭伟立, 许勇华, 孔小林, 魏优昌, 董德臻, 等. 2010. 一种含氰基的邻苯二甲酰胺类化合物、制备方法和作为农用化学品杀虫剂的用途: CN2010102797903. 2010-09-13]

(责任编辑: 李美娟)