

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2013.02.012

甲酸乙酯对松材线虫的熏蒸效果

詹开瑞¹, 游源浅^{1,2}, 张晓燕¹, 陈艳^{1*}

¹福建出入境检验检疫局, 福建 福州 350001; ²福建农林大学植物保护学院, 福建 福州 350002

摘要:【背景】在溴甲烷面临禁用的情形下,探讨新熏蒸剂甲酸乙酯对松材线虫的处理效果,可以科学地评估甲酸乙酯的使用前景。【方法】采用松材线虫分离液和带疫松木段,设置甲酸乙酯5个剂量梯度、5个处理温度和5个处理时间,测定其对松材线虫的毒力及CT值。【结果】在25℃下处理3、6、12、24、48 h,甲酸乙酯对松材线虫的 LC_{50} 分别为2.63、1.60、0.99、0.41、0.20 mg·L⁻¹。温度对毒力有显著影响,在10~29℃,随温度升高,甲酸乙酯对松材线虫的毒力降低,19和29℃下,1.85 mg·L⁻¹甲酸乙酯处理松材线虫的死亡率分别为63%和100%。甲酸乙酯熏蒸12 h内,能完全杀灭木段中的松材线虫。在23℃下处理6和12 h,松材线虫死亡率达到99%时,甲酸乙酯的CT值分别为453.94和424.14 mg·h⁻¹·L⁻¹。【结论与意义】甲酸乙酯可用于松材线虫的检疫处理。

关键词: 甲酸乙酯; 松材线虫; 熏蒸

Study on the fumigation of ethyl formate against *Bursaphelenchus xylophilus*

Kai-rui ZHAN¹, Yuan-qian YOU², Xiao-yan ZHANG¹, Yan CHEN^{1*}

¹Fujian Entry-exit Inspection and Quarantine Bureau, Fuzhou, Fujian 350001, China; ²Plant Protection College, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract: 【Background】Studying the new fumigant, ethyl formate against *Bursaphelenchus xylophilus* can be useful in the advent of methyl bromide being phased out. 【Method】The toxicity and concentration-time product of ethyl formate were tested indoor against nematode isolated from pine wood. 【Result】The LC_{50} of *B. xylophilus* to ethyl formate in 3, 6, 12, 24 and 48 h at 25℃ were 2.63, 1.60, 0.99, 0.41 and 0.20 mg·L⁻¹, respectively. The toxicity of ethyl formate was significantly affected by temperature, with *B. xylophilus* mortality decreasing from 63% at 19℃ to 100% at 29℃ for a concentration of 1.85 mg·L⁻¹ ethyl formate treatment. The ethyl formate fumigation could completely kill nematodes with 12 hours exposure time. The LC_{t99} of ethyl formate for *B. xylophilus* were 453.94 mg·h⁻¹·L⁻¹ after 6 h exposure and 424.14 mg·h⁻¹·L⁻¹ after 12 h exposure. 【Conclusion and significance】The results confirm that ethyl formate could be used as a fumigant against *B. xylophilus*.

Key words: ethyl formate; *Bursaphelenchus xylophilus*; fumigation

松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 是引起松树萎焉病的一种病原生物。松树萎焉病是松树的一种毁灭性病害,在日本该病曾经对松树资源造成巨大的损失 (Kobayashi *et al.*, 1984; Mamiya, 1983)。松材线虫原产于北美,通过疫木的调运及货物木托板的运输扩散到世界各地,成为一种世界范围的检疫性有害生物。近年来,由于各种林木有害生物随货物木质包装在国际间不断传播,国际贸易中木包装检疫处理措施备受世界各国的重视。因此,国际植物保护公约组织 (IPPC) 制定

了国际植物检疫措施标准第 15 号《国际贸易中的木包装材料管理准则》(以下均简称 ISPM15),以防止有害生物随木包装传播 (伍艳梅等, 2008)。

当前对侵染松材线虫的疫木,包括托盘、垫木、条板、填塞块、圆筒、木箱、负荷板和活动木容器的处理方法主要包括热处理和溴甲烷熏蒸。其他手段有非溴甲烷熏蒸、辐照、化学加压浸透等 (Dwinell, 1997)。但热处理和辐照处理均需要较大的前期设施投入;溴甲烷熏蒸对线虫的处理效果好,但其已被列入《关于消耗臭氧层蒙特利尔协定

书》修正案的受控物质名单(赵云,2010);其他 IS-PM15 正在审议的熏蒸剂中,磷化氢和硫酰氟都需要较长的处理时间,且对线虫的熏蒸效果不理想(刘涛等,2010; Leesch *et al.*, 1989; Valmas & Ebert,2006)。因此,需要寻找一种对线虫有效并且环保的熏蒸剂。

近年来的研究表明,甲酸乙酯是一种有开发潜力的溴甲烷替代产品(Ren & Mahon,2006)。然而,现有甲酸乙酯的研究主要集中在对昆虫和螨类的毒力和处理方面,对线虫的熏蒸效果尚未见报道。因此,本文对甲酸乙酯的杀线活性进行评估,为开发新的除害熏蒸剂提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试虫 带有松材线虫的疫木采于漳州。用于生物测定的线虫通过改良后的贝尔曼漏斗进行分离。将分离出的线虫悬液在台式离心机上 $2000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,弃上清液,之后用去离子水稀释至 $0.1 \sim 0.2 \text{ 头} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 。

1.1.2 仪器 Photovac Voyage 便携式气相色谱仪,配备光离子化(PID)检测器;温湿度记录仪;Tedlar 气体采样袋;Hamilton 注射器(1 L,100 μL)。

1.1.3 试剂 98% 甲酸乙酯(CR,上海第一试剂有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 松材线虫毒力测定 将线虫液(800 μL ,约 100 头线虫)加入 20 mL 的玻璃小瓶并放入 500 mL 的广口瓶,广口瓶内用棉绳悬挂大小约 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 的滤纸供药剂挥发。设置 5 个甲酸乙酯剂量梯度($0.92, 1.84, 2.76, 3.69, 4.61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及不同处理时间(3、6、12、24、48 h)和处理温度(19、21、23、25、27、29 $^{\circ}\text{C}$)。广口瓶瓶盖用 Parafilm 膜包裹以防漏气,测定前 24 h 将供试线虫放入已设定好温湿度的人工气候箱内。处理结束 24 h 后检查死亡率。

1.2.2 熏蒸处理 熏蒸处理在有机玻璃箱($59 \text{ cm} \times 48 \text{ cm} \times 58 \text{ cm}$)中进行,箱体上设置 2 个采气口供熏蒸期间甲酸乙酯浓度的检测。处理前将松材线虫疫木段(半径 7 cm,长 15 cm)放置于箱内,熏蒸箱内放置 1 个 9 cm 的培养皿(内铺 1 层滤纸供甲酸乙酯挥发)。设置不同的投药剂量(18、23、28、33、38、43 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和处理时间(6、12 h),投药后

迅速将箱子盖上并在盖口接缝处用透明胶布封口,每个处理重复 3 次。熏蒸结束后通风散气 30 min 再将木段取出。

1.2.3 熏蒸过程中熏蒸剂的浓度与温湿度检测

气体标样的制作:将 20、40、60 μL 甲酸乙酯分别注入装有 1 L 超纯空气的 Tedlar 气体采样袋中,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下放置过夜,使其自然挥发后作为甲酸乙酯气体标样。

采用便携式气相色谱仪对熏蒸过程中的熏蒸剂进行浓度检测。色谱条件:环流注射(Loop)进样,泵抽时间 30 s,压力 82.74 kPa,检测器温度 60 $^{\circ}\text{C}$,柱温 60 $^{\circ}\text{C}$,分析时间 180 s。根据处理时间的长短分别在加药后 2、4、6、8、12 h 时检测箱体浓度,通过峰面积计算浓度值。本试验是在密闭条件较好的熏蒸箱内进行,故 CT 值采用下述公式计算。

$$CT(n, n+1) = [T(n+1) - T_n] \times [C_n + C(n+1)] \div 2$$

$$CT_{\text{总}} = \sum CT(n, n+1)$$

式中: T_n 是第 1 次测定浓度的时间(h); $T(n+1)$ 是第 2 次测定浓度的时间(h); C_n 是在 T_n 时的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $C(n+1)$ 是在 $T(n+1)$ 时的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $CT(n, n+1)$ 是 T_n 和 $T(n+1)$ 之间的 CT 值($\text{mg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}$)。

1.2.4 死亡率计算及数据分析 生测结束并散气 24 h 后观察线虫的死亡率。光照 5 min 后不活动且躯体僵硬,对拨动无反应者被认定为死虫。将死亡率数据按照校正死亡率公式校正后用 SPSS 13.0 进行回归分析,并计算 LC_{50} (Abbott, 1925)。

木段中线虫死亡率的计算:用于试验的木段事先被切为大小一致的尺寸(半径 7 cm,长 15 cm),并在试验前从供试木段上锯去 1 cm 长短的木片,劈碎后用贝尔曼漏斗分离线虫并烘干(80 $^{\circ}\text{C}$,24 h),以估算木段中的线虫数($\text{头} \cdot \text{kg}^{-1}$),计算公式为线虫数/干木重 $\times 1000$ 。处理后的木段用相同方法烘干、称重后计算每千克干木中的线虫数,计算死亡率后用 SPSS 13.0 进行回归分析并计算 LC_{t99} 。

2 结果与分析

2.1 甲酸乙酯对松材线虫的毒力

结果表明,甲酸乙酯对松材线虫具有较高的毒力(表 1)。除 12 h 外,松材线虫的 LC_{50} 和斜率随处理时间延长逐渐减小,表明随着处理时间延长,剂量对死亡率的影响越来越小。组间死亡率方差分析

也表明,增加剂量在短时间(3 和 6 h)处理下对死亡率的影响显著,但在长时间处理下,剂量的增加对死亡率无显著影响(表 2)。熏蒸温度对松材线虫死亡率有显著影响,松材线虫在较低温度处理下的死亡率显著高于较高温。19 ℃下,0.93 和 1.85 mg · L⁻¹ 的投药量对松材线虫的致死率最大。而死亡率随着

温度上升逐渐下降,0.93 和 1.85 mg · L⁻¹ 的投药量在 25 和 27 ℃下对线虫的致死率最低。随着温度升高,0.93 mg · L⁻¹ 投药量下线虫的死亡率再次显著升高,但 1.85 mg · L⁻¹ 投药量下的死亡率随着温度上升并无显著差异(表 3)。

表 1 不同处理时间下甲酸乙酯对松材线虫的 LC_{50}
Table 1 The LC_{50} of ethyl formate against *B. xylophilus* under different exposure times

处理时间 Exposure time (h)	斜率 ± SE Slope ± SE	截距 ± SE Intercept ± SE	LC_{50} (mg · L ⁻¹) (95% 置信区间) LC_{50} (mg · L ⁻¹) (95% confidence interval)
3	6.49 ± 0.11	-0.53 ± 0.10	2.63 (2.28 ~ 2.88)
6	3.26 ± 0.18	-0.66 ± 0.08	1.60 (1.37 ~ 1.79)
12	4.42 ± 0.23	0.02 ± 0.06	0.99 (0.82 ~ 1.13)
24	2.57 ± 0.25	0.99 ± 0.07	0.41 (0.30 ~ 0.51)
48	1.86 ± 0.26	1.29 ± 0.08	0.20 (0.02 ~ 0.44)

表 2 不同剂量下松材线虫的死亡率
Table 2 Mortality of *B. xylophilus* exposed to different concentrations of ethyl formate

投药剂量 Dosage (mg · L ⁻¹)	死亡率 Mortality (%)				
	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h
0.92	25.37 ± 10.77 ^{aa}	22.89 ± 3.50 ^{aa}	38.86 ± 0.87 ^{ab}	82.74 ± 5.87 ^{ac}	87.72 ± 6.71 ^{ac}
1.84	40.58 ± 5.22 ^{ba}	59.98 ± 12.88 ^{bb}	96.65 ± 0.73 ^{bc}	93.38 ± 2.49 ^{bc}	91.06 ± 2.68 ^{abc}
2.76	67.50 ± 3.25 ^{ca}	77.92 ± 10.29 ^{cb}	96.9 ± 0.64 ^{bc}	98.30 ± 0.73 ^{bcc}	98.76 ± 0.19 ^{cc}
3.69	84.53 ± 2.83 ^{da}	83.83 ± 2.31 ^{cda}	96.75 ± 0.87 ^{bb}	99.50 ± 0.43 ^{cbc}	100.00 ± 0.00 ^{cc}
4.61	98.38 ± 0.28 ^{ea}	96.29 ± 1.17 ^{db}	99.05 ± 0.38 ^{cac}	100.00 ± 0.00 ^{cde}	100.00 ± 0.00 ^{cc}

同一列数值后相同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异不显著;同一行数值后相同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异不显著。

Means in the same column followed by the same small letter are not significantly different at 0.05 level, by Duncan's multiple range test; Means in the same row followed by the same small letter are not significantly different at 0.05 level, by Duncan's multiple range test.

表 3 不同处理温度下松材线虫的死亡率
Table 3 Mortality of *B. xylophilus* exposed to two different ethyl formate concentrations and at different temperatures

温度 Temperature (℃)	死亡率 Mortality (%)	
	0.93 mg · L ⁻¹	1.85 mg · L ⁻¹
19	89.33 ± 0.58 ^a	100 ^a
21	81.00 ± 6.55 ^b	94.67 ± 1.52 ^{ab}
23	41.33 ± 4.93 ^d	92.00 ± 9.64 ^b
25	24.67 ± 1.52 ^e	62.00 ± 2.08 ^c
27	61.67 ± 3.21 ^c	61.00 ± 2.64 ^c
29	60.27 ± 12.89 ^c	63.00 ± 3.05 ^c

同一列数值后相同字母表示经邓肯氏新复极差法检验在 0.05 水平上差异不显著。

Means in the same column followed by the same small letter are not significantly different at 0.05 level, by Duncan's multiple range test.

2.2 熏蒸过程中甲酸乙酯的浓度及温湿度变化

熏蒸期间的平均温度和湿度分别为 23 ℃ ± 0.1 ℃和 47.9% ± 0.8%。投药 2 h 后所测甲酸乙酯浓度较大幅度低于投药浓度;4 h 后箱体内甲酸乙酯浓度有微弱的增长;但随着熏蒸时间的延长,

甲酸乙酯浓度持续下降,6、12 h 下熏蒸剂平均衰减率分别为 30.40%、48.07%(表 4)。

2.3 甲酸乙酯对木段中松材线虫的熏蒸效果

熏蒸后木段中松材线虫的死亡率见图 1。在 6 h 内,48 mg · L⁻¹ 的剂量并未完全控制松材线虫,可能是由于甲酸乙酯未能充分穿透木段或穿透后保留时间不足所致。而在 12 h 内,33 mg · L⁻¹ 的剂量就造成了线虫 99% 以上的死亡率。在 23 ℃ ± 0.1 ℃和湿度 47.9% ± 0.8% 的条件下,处理 6 和 12 h,甲酸乙酯对木段中的松材线虫的 LCt_{99} 分别为 453.94 和 424.14 mg · h⁻¹ · L⁻¹ (表 5)。2 个数值较为接近,符合 Haber 规律(Bliss, 1940)。由处理时间(x_1)、剂量(x_2)和死亡率(y)可以拟合出回归方程: $y = 25.84 + 2.581x_1 + 1.147x_2$ (表 6),由该方程可以推算出不同处理时间下完全控制松材线虫所需要的投药剂量。在 6 和 12 h 的处理时间下,甲酸乙酯的投药剂量至少要达到 51.15 和 37.65 mg · L⁻¹ 才能完全控制松材线虫。

表 4 处理期间甲酸乙酯的浓度
Table 4 Variation of ethyl formate concentrations during exposure

投药剂量 Dosage (mg · L ⁻¹)	处理时间 Exposure time (h)	甲酸乙酯浓度 Ethyl formate concentration (mg · L ⁻¹)			
		2 h	4 h	6 h	12 h
18	6	11.5 ± 0.7	12.4 ± 0.3	8.9 ± 0.4	—
23	6	16.2 ± 1.6	16.9 ± 0.7	14.1 ± 1.3	—
28	6	21.2 ± 1.2	22.4 ± 1.0	19.2 ± 0.4	—
33	6	28.5 ± 1.2	29.6 ± 2.1	25.7 ± 2.2	—
38	6	30.2 ± 1.2	31.8 ± 1.6	30.5 ± 1.1	—
43	6	34.0 ± 1.4	35.6 ± 1.5	32.3 ± 1.2	—
48	6	37.2 ± 1.6	39.2 ± 1.3	36.0 ± 0.9	—
18	12	13.3 ± 1.1	13.4 ± 0.7	10.1 ± 1.1	8.5 ± 0.6
23	12	18.7 ± 0.5	19.4 ± 1.3	17.9 ± 1.8	17.7 ± 0.9
28	12	18.9 ± 1.4	20.2 ± 0.8	17.5 ± 0.7	15.7 ± 0.8
33	12	22.4 ± 1.9	22.7 ± 2.1	22.0 ± 1.5	15.3 ± 1.0
38	12	24.2 ± 0.6	28.4 ± 1.6	26.6 ± 1.1	20.8 ± 1.8
43	12	28.3 ± 1.6	28.6 ± 1.6	26.7 ± 0.4	21.5 ± 1.1

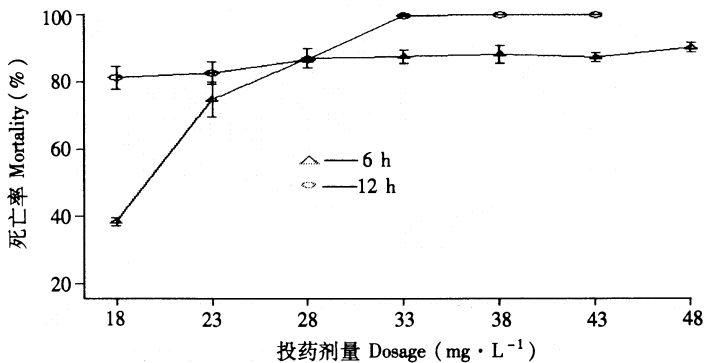


图 1 6 和 12 h 下甲酸乙酯熏蒸木段中线虫的死亡率
Fig. 1 The relationship between ethyl formate dosage and *B. xylophilus* mortality after 6 and 12 hours of exposure

表 5 6 和 12 h 下松材线虫的 LC_{t99}
Table 5 The and LC_{t99} of ethyl formate for *B. xylophilus* under 6 and 12 h fumigation at 23 °C ± 0.1 °C and 47.9% ± 0.8% r. h.

处理时间 Exposure time (h)	斜率 ± SE Slope ± SE	截距 ± SE Intecept ± SE	LC_{t99} (mg · h ⁻¹ · L ⁻¹) (95% 置信区间) LC_{t99} (mg · h ⁻¹ · L ⁻¹) (95% confidence interval)
6	2.48 ± 0.05	-5.14 ± 0.03	453.94 (361.45 ~ 609.52)
12	2.22 ± 0.10	-8.32 ± 0.17	424.14 (320.42 ~ 636.26)

表 6 松材线虫死亡率与投药剂量和处理时间的回归模型符合性检验
Table 6 Time and dosage regression model and coefficients of *B. xylophilus* mortality

因子 Factor	回归系数 ± SE Regression coefficient ± SE	t 测验 t-test	显著性 Significance
常数 Constant	25.84 ± 9.16	2.82	<0.5
处理时间 Exposure time	2.58 ± 0.63	4.09	<0.001
投药剂量 Dosage	1.15 ± 0.2	5.73	<0.001

3 讨论

生测结果表明,甲酸乙酯对松材线虫有较高的毒力,6 h 下松材线虫的 LC_{50} 仅为 1.60 mg · L⁻¹,大大低于碘甲烷(4.0313 mg · kg⁻¹)、1,3-二氯丙烯(4.2689 mg · kg⁻¹)、氯化苦(7.2655 mg · kg⁻¹)、阿

维菌素(9.0084 mg · kg⁻¹)、二甲基二硫醚(11.3440 mg · kg⁻¹)、威百亩(12.4225 mg · kg⁻¹)、毒死蜱(14.6896 mg · kg⁻¹)、硫酰氟(21.9580 mg · kg⁻¹)和环氧乙烷(51.686 mg · kg⁻¹)等常用的杀线剂和熏蒸剂(刘涛等,2010; 赵云,2010; Dwinell,1979)。

用于处理松材线虫的熏蒸剂中,溴甲烷在15 ℃、25%载量、24 h 的处理时间下完全杀灭木段中松材线虫所需的剂量为 60 mg · L⁻¹,而异硫氰酸甲酯和碘甲烷在相同条件下完全杀灭木板中松材线虫所需的剂量仅为 20 和 40 mg · L⁻¹(刘涛等 2010)。硫酰氟对松材线虫的熏蒸效果较差,75.5 g · m⁻³硫酰氟在 20 ℃单独熏蒸 24 h 才可杀灭木段中 99% 的松材线虫(刘涛等,2010)。本研究表明,甲酸乙酯完全控制木段中松材线虫所需的投药剂量小于溴甲烷。对松材线虫的生测结果表明,甲酸乙酯处理的松材线虫 12 h 的死亡率与 12 h 以上的死亡率并无显著差异,而在对木段的处理中仅用12 h就能以相对较低的剂量完全杀灭松材线虫。因此,甲酸乙酯熏蒸能够较快杀灭松材线虫,并且对松材线虫的毒力高于其他熏蒸剂。

对不同温度下甲酸乙酯对松材线虫的毒力的研究表明,与溴甲烷等熏蒸剂不同,甲酸乙酯在低温下对松材线虫表现出更高的毒力。但是,低温会影响甲酸乙酯的挥发,降低处理效果,因此在实际应用中可能需要额外的设备帮助其气化,如 Vapormate[®](BOC 公司产品,甲酸乙酯和二氧化碳混合物,通过压力将甲酸乙酯和二氧化碳的混合物喷出使其成为雾滴以加速其挥发)。

在实际处理中,熏蒸效果主要取决于处理期间熏蒸剂的浓度和处理时间;而熏蒸剂浓度变化主要受货物表面积、含水率等特性,载量和密封性等因素的影响。由于不同种类货物对熏蒸剂的吸附能力有较大差异,因此在处理不同材料时应充分考虑其对熏蒸剂吸附能力的强弱。在实际应用中应针对不同的货物种类采用不同的处理指标,并在熏蒸过程中对熏蒸剂浓度进行实时监测并及时补药,以确保达到预期的处理指标。

参考文献

刘涛, 张凡华, 李丽, 王跃进. 2010. 异硫氰酸甲酯和硫酰氟混用杀灭松材线虫的增效研究. 植物检疫, 24(3): 1-4.
伍艳梅, 黄荣凤, 吕建雄, 赵有科, 时玉龙. 2008. 世界贸

易中木包装材料检疫处理研究进展. 世界林业研究, 21(2): 26-31.
张晓燕, 陈艳, 詹开瑞, 李今中, 刘永胜. 2010. 环氧乙烷对松木片中松材线虫的熏蒸效果. 福建农林大学学报: 自然科学版, 39(2): 147-149.
赵云. 2010. 溴甲烷替代品种筛选及其作用特性研究. 昆明: 云南农业大学.
Abbott W S A. 1925. Method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economical Entomology*, 18: 265-267.
Bliss C I. 1940. The relationship between exposure time, concentration and toxicity in experiments on insecticides. *Annals of the Entomological Society of America*, 33: 721-766.
Dwinell L D. 1997. The pinewood nematode: regulation and Mitigation. *Annual Review of Phytopathology*, 35: 153-166.
Kobayashi F, Yamane A and Ikeda T. 1984. The Japanese pine sawyer beetle as the vector of pine wilt disease. *Annual Review of Entomology*, 29: 115-135.
Leesch J G, Davis R, Simonaitis R A and Dwinell L D. 1989. In-transit shipboard fumigation of pine woodchips to control *Bursaphelenchus xylophilus*. *EPPO Bulletin*, 19: 173-181.
Mamiya Y. 1983. Pathology of the pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Annual Review of Phytopathology*, 21: 201-220.
Ren Y L and Mahon D. 2006. Fumigation trials on the application of ethyl formate to wheat, spilt faba beans and sorghum in small metal bins. *Journal of Stored Products Research*, 42: 277-289.
Soma Y, Naito H and Misumi T. 2001. Effects of some fumigants on pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* infecting wooden packages 1: susceptibility of pine wood nematode to methyl bromide, sulfuryl fluoride and methyl isothiocyanate. *Research Bulletin of the Plant Protection Service Japan*, 37: 19-26.
Valmas N and Ebert P R. 2006. Comparative toxicity of fumigants and a phosphine synergist using a novel containment chamber for the safe generation of concentrated phosphine gas. *PLoS ONE*, 1: e130.

(责任编辑:彭露)

