

技术与应用

Technology & Application

纯磷化氢熏蒸对桃小食心虫的毒力作用

刘波¹, 詹国平¹, 任荔荔¹, 李柏树¹, 牛墨², 王跃进^{1*}

(1. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100029; 2. 牡丹江出入境检验检疫局, 牡丹江 157021)

摘要 桃小食心虫在我国温带水果主产区广泛分布, 严重威胁水果出口贸易。为明确纯磷化氢熏蒸处理桃小食心虫的可能性, 本文系统研究了纯磷化氢在不同温度条件下对桃小食心虫的毒力。耐受性分析结果表明, 桃小食心虫各虫态对磷化氢的耐受力有很大差别, 1~2 龄幼虫耐受性最弱, 5 龄老熟幼虫耐受性最强。室内毒力试验结果表明, 25℃, 0.14~0.70 mg/L 磷化氢熏蒸 5 龄老熟幼虫 81~199 h 或 15℃, 0.28~0.84 mg/L 磷化氢熏蒸 136~166 h, 桃小食心虫死亡率可达 99%; 在 25℃ 和 15℃ 下, 试虫达到一定死亡率的气体浓度、时间乘积(CT)关系式分别为 $k=C^{0.5}T$ 和 $k=C^{0.2}T$, 说明在本试验所取浓度范围内, 处理时间是影响磷化氢对桃小食心虫老熟幼虫毒力作用的主要因素, 相同条件下高温比低温更有利于磷化氢熏蒸杀虫。本文首次对不同温度条件下纯磷化氢熏蒸桃小食心虫的毒力作用进行了系统研究, 明确了纯磷化氢熏蒸技术在水果携带桃小食心虫的检疫处理中极具应用前景。

关键词 磷化氢; 熏蒸; 桃小食心虫; 毒力

中图分类号: S 433 **文献标识码:** B **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.06.035

Toxicity of pure phosphine to *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae)

Liu Bo¹, Zhan Guoping¹, Ren Lili¹, Li Baishu¹, Niu Mo², Wang Yuejin¹

(1. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100029, China; 2. Mudanjiang Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Mudanjiang 157021, China)

Abstract *Carposina sasakii* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae), widely distributed in pome fruit production areas in China, seriously threatens fruit export industry. In order to determinate the eliminated doses of pure phosphine against these pests for quarantine purpose, 1-d, 2-d, 3-d-old eggs and the first to fifth instar of *C. sasakii* larvae were fumigated with pure phosphine. The results showed that mature fifth instar were the most tolerant stage at room temperature. Then the mature fifth instar larvae of *C. sasakii* was fumigated over phosphine at different concentrations under different temperatures. 0.14, 0.28, 0.42, 0.56, 0.70 mg/L phosphine fumigation with 81-199 h period was required and 0.28, 0.42, 0.56, 0.70, 0.84 mg/L phosphine fumigation with 136-166 h period was required to achieve 99% mortality at 25℃ and 15℃, respectively. The expressions of $k=C^{0.5}T$ and $k=C^{0.2}T$ were obtained at 25℃ and 15℃, which indicated that exposure time was much more important than the concentration of phosphine to mortality of mature larvae of *C. sasakii*. In the similar conditions, higher temperature in environment was more effective to fumigation than lower temperature. All the results suggested that pure phosphine fumigation demonstrated promising application in *C. sasakii* control in fruit industry.

Key words phosphine; fumigation; *Carposina sasakii*; toxicity

桃小食心虫(*Carposina sasakii* Matsumura)属鳞翅目, 蛀果蛾科, 我国过去误订为 *Carposina niponensis* Walsingham, 在中国、日本、韩国和俄罗

斯远东地区等均有分布^[1], 是仁果类和核果类果树(如苹果、梨、桃、李、杏、山楂、枣、酸枣等)的重要害虫, 亦是我国苹果、梨等温带水果出口贸易中被

收稿日期: 2015-12-14 修订日期: 2016-01-06

基金项目: 2016 年度国家质检总局动植物检疫处理专项

* 通信作者 E-mail: wangyuejin@263.net.cn

美国、智利、南非、俄罗斯等出口国关注的检疫性有害生物。针对桃小食心虫的检疫处理措施,目前主要采用冷处理加溴甲烷熏蒸处理的综合处理方法^[2],但是溴甲烷因其消耗臭氧层将逐步被限用或禁用,因而,寻求替代溴甲烷熏蒸鲜活农产品的检疫处理新技术,已成为检疫处理研究领域的热点之一。

磷化氢作为杀虫性能较为优良的熏蒸剂,在防治储藏物害虫上已有 60 多年的应用历史^[3]。传统的磷化氢熏蒸主要是通过含有氨基甲酸铵和氧化铝的磷化铝片剂在空气中水解缓慢释放磷化氢气体来杀灭害虫,虽具有杀虫谱广、穿透力强、毒力高、施药安全、生产成本低等特点,但由于以此产生的磷化氢混有一定量的氨气,易对鲜活产品产生药害等损伤,因此一直未能在鲜活产品的检疫除害处理中使用。近几年随着磷化氢纯气制备技术的发展,其作为溴甲烷替代熏蒸剂在水果、蔬菜、花卉等货物的检疫处理上极具应用前景:有研究表明,在常温及低温条件下,纯的磷化氢气体熏蒸能够有效杀灭草莓、莴苣、鲜切花等携带的西花蓟马和蚜虫等害虫^[4-5],并对鲜花的品质没有影响^[6]。本实验室的研究亦证明,0℃下磷化氢熏蒸处理能有效杀灭桃小食心虫^[7],且对‘红富士’苹果品质没有明显影响^[8]。为了进一步明确磷化氢熏蒸对桃小食心虫的杀灭效果及在鲜食水果应用的可能性,本文就不同温度条件下磷化氢熏蒸对桃小食心虫的毒力作用进行系统研究,这对于探索一种水果熏蒸处理新方法,为我国苹果、梨等水果出口提供技术支撑具有重要的理论和实际意义。

1 材料与方法

1.1 试虫准备

桃小食心虫于 2005 年采自中国农业科学院果树研究所,每年复壮 1 次。试虫采用新鲜苹果饲养于光照恒温恒湿箱,饲养条件:温度(25±0.5)℃,相对湿度 60%±5%,光周期 L//D=14.5 h//9.5 h。

挑选试验用桃小食心虫老熟幼虫,在所需处理温度预置 12 h 后进行熏蒸处理。

1.2 试剂与仪器

磷化氢(PH₃)标准气体(1.03%,北京北氧特种气体研究所);恒温恒湿箱(KBF 720,德国 Binder 公司);气相色谱仪(6890N,安捷伦科技有限公司);体

视显微镜(SteREO Discovery V12,德国蔡司公司);Tedlar 气体采样袋(1L,大连德霖气体包装有限公司);250 mL 玻璃气密瓶(Z2630361PAK, Sigma-Aldrich 上海贸易有限公司);配有 24 mm 气密注射器取样阀的 250 mL 玻璃气密瓶配套瓶盖(Z33304, Sigma-Aldrich 上海贸易有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 磷化氢标准曲线制备

以 1.03% PH₃ 标准气按比例稀释成系列浓度并用气相色谱仪检测,建立峰面积与磷化氢浓度关系的标准曲线。

气相色谱条件:色谱柱为 Porapak Q 填充柱(80/100 目,安捷伦科技有限公司),3 m×0.317 5 cm;载气:H₂,流速 18 mL/min;参比气:H₂,30 mL/min;尾吹气:H₂,2 mL/min;进样口温度:150℃;炉温:70℃;TCD 检测器温度:200℃;进样量:500 μL。

1.3.2 最耐受虫态的筛选

固定时间收集桃小食心虫 6 h 内产在滤纸上的卵,分别于 25℃下保湿饲养 1、2 和 3 d,用于卵耐受性的测定,每个处理约 80 粒卵;将从苹果中剥出的 1~5 龄幼虫置于新切的苹果片(厚度约 3 mm,半径约 3.5 cm,每片约 7 g)上,用于不同龄期幼虫耐受性的测定,每个处理 30 头试虫。将卵片和苹果片密封于熏蒸器中,进行熏蒸处理,熏蒸剂量 0.56 mg/L,熏蒸时间为 30 h。每处理 3 个重复,每组试验另设装有试虫、未投药的对照和装有滤纸或苹果片但未装试虫、投药的空载各 1 个。

根据熏蒸器体积和所需药剂浓度计算投药体积。投药前,首先从熏蒸瓶中抽出与投药量等体积的空气,然后使用气密注射器注入磷化氢,并多次抽吸混匀气体,熏蒸计时开始。熏蒸过程中用气相色谱仪检测熏蒸瓶中 PH₃ 气体的浓度。投药后检测 1 次,随后每 6 h 监测熏蒸剂浓度变化。

熏蒸完毕散气 2 h 后,将卵片取出置于培养皿中、幼虫取出后放在新鲜苹果片上置于塑料盒中,放入光照恒温恒湿培养箱于(25±0.5)℃,湿度 60%±5%饲养。2 d 后检查卵死亡情况(死亡率=未孵化的卵数/总卵数×100%),5 d 后检查幼虫死亡率(死亡率=死亡虫数/总虫数×100%)。

1.3.3 熏蒸试验

根据桃小食心虫对磷化氢熏蒸耐受性试验结果,将桃小食心虫最耐受虫态置于 250 mL 熏蒸瓶

中,分别进行 25℃ 和 15℃ 熏蒸处理,25℃ 下,熏蒸剂量为 0.14、0.28、0.42、0.56、0.70 mg/L,熏蒸时间为 24、48、72、96、120 h;15℃ 下,熏蒸剂量为 0.28、0.42、0.56、0.70、0.84 mg/L,熏蒸时间为 48、72、96、120、144 h。每处理 3 个重复,每重复为随机选取的经试验温度条件下预处理的试虫 50 头。每组试验另设有试虫、未投药的对照和未装试虫、投药的空载各 1 个。试验前,将 250 mL 气密瓶敞口于处理温度下预置 12 h。熏蒸操作同 1.3.2,熏蒸过程将装有试虫的密封玻璃瓶置于恒温恒湿箱,以保持处理温度,直至熏蒸结束。

熏蒸结束后散气 2 h,将试虫置于温度(25±0.5)℃、相对湿度 60%±5% 的光照培养箱中饲养 5 d,记录死亡情况并计算死亡率,用毛笔轻触试虫,试虫无任何反应为死亡。

1.4 数据分析

依据每组对照死亡率对处理结果进行校正^[9],用校正后的死亡率数据使用 PoloPlus 软件进行死亡几率值回归分析^[10]。试验数据应用 Excel 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 各虫态桃小食心虫对磷化氢的耐受性

在常温下,使用 0.56 mg/L 磷化氢对桃小食心虫卵和不同龄期幼虫分别熏蒸 30 h,结果如表 1 所

示。不同虫态对磷化氢的耐受性差异较大:常温条件下,1~2 龄幼虫对磷化氢最敏感,5 龄老熟幼虫最耐受,而且幼虫随着虫龄的增加,其对磷化氢的耐受性也随之增加。因此,在后续室内毒力测定中采用 5 龄老熟幼虫作为试虫。

表 1 常温条件下,0.56 mg/L 磷化氢熏蒸不同虫态桃小食心虫 30 h 的死亡率¹⁾

Table 1 Mortality of *Carposina sasakii* at different life stages fumigated with 0.56 mg/L phosphine for 30 h exposure at room temperature

虫态 Life stage	龄期 Instar	总数/头 Number	死亡率±SE/% Mortality
卵 Egg	1 d	260	(68.6±2.5)b
	2 d	223	(72.8±1.7)b
	3 d	245	(70.3±3.4)b
幼虫 Larva	1~2 龄	79	(76.8±2.1)a
	3 龄	90	(58.5±2.7)c
	4 龄	90	(33.6±1.0)d
	5 龄早期	90	(13.1±1.2)e
	5 龄老熟	90	0

1) 同列数据后标不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。

The data in the same column with different letters were significantly different ($P<0.05$).

2.2 桃小食心虫的死亡率与浓度时间乘积(CT 值)

在 15、25℃,磷化氢熏蒸桃小食心虫 5 龄老熟幼虫的死亡率及其对应的浓度时间乘积(CT 值)如表 2 和表 3 所示。

表 2 25℃ 下磷化氢熏蒸桃小食心虫 5 龄老熟幼虫的死亡率及其浓度时间乘积(CT 值)

Table 2 Mortality and concentration-time product (CT value) of mature fifth-instar larvae fumigated with phosphine at 25℃

浓度/ mg·L ⁻¹ Concentration	48 h		72 h		96 h		120 h	
	死亡率/% Mortality	CT/mg· L ⁻¹ ·h						
0.14	43	5.28	70	7.92	81	10.56	96	13.2
0.28	47	12.32	74	18.48	87	24.64	100	30.81
0.42	53	18.72	85	28.08	91	37.44	100	46.80
0.56	62	24.96	91	37.44	98	49.92	100	62.42
0.70	66	30.72	94	46.08	100	61.44	100	76.80

表 3 15℃ 下磷化氢熏蒸桃小食心虫 5 龄老熟幼虫的死亡率及其浓度时间乘积(CT 值)

Table 3 Mortality and concentration-time product (CT value) of mature fifth-instar larvae fumigated with phosphine at 15℃

浓度/ mg·L ⁻¹ Concentration	72 h		96 h		120 h		144 h	
	死亡率/% Mortality	CT/mg· L ⁻¹ ·h						
0.28	46	18.72	76	24.96	97	31.20	100	37.44
0.42	54	28.80	82	38.40	98	48.01	100	57.60
0.56	60	38.88	88	51.84	100	64.80	100	77.76
0.70	64	48.96	90	65.28	100	81.62	100	97.92
0.84	68	59.04	91	78.72	100	98.40	100	118.08

从结果可以看出:25℃条件下,浓度在 0.28~0.70 mg/L 之间时,磷化氢熏蒸 120 h 或更长时间能完全杀灭桃小食心虫;15℃条件下,浓度在0.28~0.84 mg/L 之间时,磷化氢熏蒸 144 h 或更长时间能完全杀灭桃小食心虫。在相同温度下,桃小食心虫的死亡率随着熏蒸剂浓度的增加、熏蒸时间的延长而增加。比较不同死亡率的 CT 值可以看出,低浓度磷化氢熏蒸较长时间杀灭桃小食心虫的效果优于高浓度磷化氢熏蒸较短时间,如 25℃,0.70 mg/L 磷化氢熏蒸处理 48 h 不能完全杀灭试虫,但其 CT 值(30.72)与 0.28 mg/L 磷化氢熏蒸 120 h 完全杀灭桃小食心虫的 CT 值(30.81)接近。同样,15℃,

0.84 mg/L 磷化氢熏蒸处理 72 h 不能完全杀灭桃小食心虫,但其 CT 值(59.04)远高于 0.28 mg/L 磷化氢熏蒸 144 h 完全杀灭桃小食心虫的 CT 值(37.44)。因此,在磷化氢熏蒸实际应用中,应尽量选择较低浓度下熏蒸较长时间,以更好地实现处理的有效性和经济性。

2.3 磷化氢对桃小食心虫的毒力测定

15℃和 25℃下,磷化氢熏蒸桃小食心虫 5 龄老熟幼虫的毒力几率值分析结果(表 4)表明,在 25℃和 15℃下,各处理组 χ^2/df 值均接近 1,且 <2 ,P 值均 >0.05 ,毒力作用回归方程均拟合较好。

表 4 25℃和 15℃下不同浓度磷化氢熏蒸处理对桃小食心虫 5 龄老熟幼虫的毒力

Table 4 Toxicity of phosphine at different concentrations to the mature fifth-instar larvae at 25℃ and 15℃

温度/℃ Temperature	浓度/ mg·L ⁻¹ Concentration	斜率±SE Slope±SE	χ^2/df	P	LT ₅₀ (95%置信区间)/h LT ₅₀ (95%CI)	LT ₉₀ (95%置信区间)/h LT ₉₀ (95%CI)	LT ₉₉ (95%置信区间)/h LT ₉₉ (95%CI)
25	0.14	3.88±0.40	1.26	0.28	50.09(43.89~56.01)	107.08(93.62~128.05)	198.93(160.19~272.35)
	0.28	3.99±0.39	1.69	0.13	44.44(34.27~53.70)	93.07(76.00~126.95)	170.03(125.13~297.66)
	0.42	3.91±0.40	1.30	0.26	38.71(33.22~43.83)	82.34(72.28~97.21)	152.33(124.17~204.18)
	0.56	4.06±0.47	0.87	0.50	32.02(26.93~36.63)	66.26(57.85~79.01)	119.89(97.04~164.42)
	0.70	3.90±0.68	0.09	0.99	20.43(14.53~24.94)	43.53(36.95~54.32)	80.65(62.44~129.74)
15	0.28	6.58±0.83	1.38	0.25	73.52(67.72~79.51)	115.15(103.27~135.59)	166.00(140.00~217.98)
	0.42	6.44±0.84	0.87	0.42	68.52(62.73~74.20)	110.70(99.01~131.18)	157.51(132.59~208.28)
	0.56	6.77±0.90	0.29	0.75	64.05(58.50~69.26)	99.01(89.41~115.48)	141.24(120.04~184.40)
	0.70	6.29±0.87	1.13	0.32	62.45(56.56~67.86)	99.83(89.58~117.86)	146.32(122.75~196.26)
	0.84	6.73±0.81	1.06	0.37	61.27(55.67~66.25)	95.01(86.86~107.58)	135.86(117.88~169.13)

25℃恒定温度下,毒力作用回归方程的斜率均为 3.9 左右,15℃下毒力作用回归方程的斜率均为 6.6 左右,表明在一定温度条件下不同恒定浓度熏蒸时,处理时间对试虫死亡率的影响趋势相似。

另一方面,0.28、0.42 mg/L 磷化氢熏蒸时,在 25℃和 15℃下,试虫达到 99%死亡率需要的时间基本相同;而 0.56、0.70 mg/L 磷化氢熏蒸时,25℃下试虫达到 99%死亡率需要的时间明显少于 15℃下所需时间,说明提高温度有助于杀虫,特别是在较高浓度时,这可能与较高温度下试虫呼吸速率增加,此时用高浓度磷化氢熏蒸会引起吸入量明显增加有关。

针对某一既定死亡率水平下,药剂浓度的对数与所需处理时间的对数作图得图 1。结果显示,25℃和 15℃下,在死亡率达 50%、90%、99%时分别求出的 n 值均小于 1,气体浓度和时间乘积(CT)关系式分别为 $k=C^{0.5}T$ 和 $k=C^{0.2}T$,说明磷化氢对桃

小食心虫老熟幼虫的毒力作用中,处理时间是影响试虫死亡率的主要因素,而浓度变化对死亡率的影响相对较小,这与 CT 值比较结果一致。

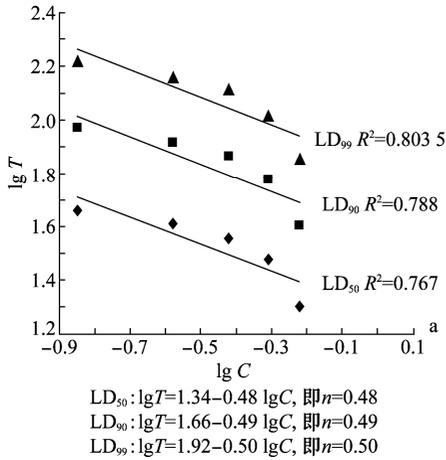
3 讨论

磷化氢熏蒸时影响其对昆虫毒力作用的因素主要有温度、气体浓度和处理时间。

熏蒸剂气体主要通过昆虫的气门进入昆虫呼吸系统,然后作用于昆虫体内相应的靶标位点而发挥其毒性作用^[11]。因此,一切增加昆虫呼吸速率的措施都可以通过增加熏蒸剂的吸入量而增加熏蒸剂对昆虫的毒性。通常来说,熏蒸过程中,试虫呼吸速率和温度呈正相关。本试验中,相同浓度处理,达到相同死亡率时,25℃下所需的处理时间比 15℃下所需的时间短,表明温度对磷化氢的毒力作用有一定影响,较高温度比较低温度更有利于熏蒸杀虫。

其次,在浓度与时间乘积相同的情况下,磷化

氢熏蒸采用长时间暴露比短时间熏蒸更为有效。比较不同熏蒸浓度与时间组合的 CT 值可以看出, 较高剂量、较短暴露时间条件下 (CT 值较高) 并不能有效杀灭桃小食心虫, 而较低剂量、较长暴露时



间 (较低 CT 值) 却可以完全杀灭害虫。这与常温下磷化氢熏蒸杀灭害虫的结果一致^[12-13], 亦和低温下, 磷化氢熏蒸杀灭西花蓟马的研究报道相符合^[5, 7]。

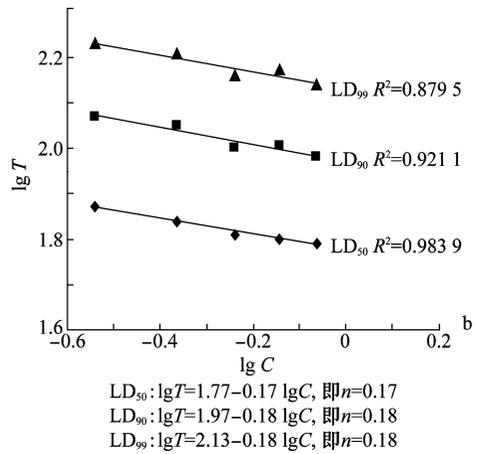


图 1 25°C (a) 和 15°C (b) 下, 磷化氢熏蒸老熟幼虫达 50%、90%、99% 死亡率时药剂浓度和暴露时间的关系

Fig. 1 Relationship between time and concentration for 50%, 90%, and 99% mortality of fifth-instar larvae fumigated with phosphine at 25°C (a) and 15°C (b)

Bell 在研究磷化氢对烟草粉斑螟 (*Ephestia elutella*) 滞育幼虫的毒力时提出了 $C^n T = k$ 的关系式^[14], 其中 k 为某一特定死亡率的常数, C 是药剂浓度, T 是暴露时间, n 是对数时间和对数浓度回归直线的斜率, 是某种昆虫对某个特定反应的关系特性, 又称毒性指数^[15]。

在恒定浓度试验中, 可以不考虑浓度的影响, 只考虑不同暴露时间对死亡率的作用, 死亡率几率值和 $\lg T$ 成比例^[16], 在达某一固定的死亡率水平要求下可求出 n 值。

本文通过某一既定的死亡率水平下, 熏蒸剂浓度的对数与处理时间的对数回归分析得出, 25°C, 0.14~0.70 mg/L PH₃ 熏蒸, 毒力指数为 0.5; 15°C, 0.28~0.84 mg/L PH₃ 熏蒸, 毒力指数为 0.2, 意味着 25°C 和 15°C 条件下, 磷化氢熏蒸杀虫同样是延长熏蒸时间更为重要。

桃小食心虫作为果树上的一种重要害虫, 在世界的分布仅限于东亚地区, 目前用于桃小食心虫检疫熏蒸处理方法主要是冷处理加溴甲烷熏蒸处理的综合处理方法, 可能携带桃小食心虫的苹果先要经过 $\leq 1.11^\circ\text{C}$ 条件下的冷处理 40 d 后, 再在 10°C 或 15°C 实施 2 h 的溴甲烷熏蒸处理^[2], 处理时间较长。本文采用的磷化氢熏蒸处理杀灭桃小食心虫的技术, 在 25°C, 0.70 mg/L PH₃ 熏蒸 120 h 和 15°C,

0.84 mg/L PH₃ 熏蒸 144 h 可以 100% 杀灭害虫, 虽然同西花蓟马^[17]、桃蚜和苹浅褐卷蛾 (*Epiphyas postvittana* Walker) 幼虫^[4] 对比, 桃小食心虫幼虫对磷化氢的敏感性稍小, 但同目前用于桃小食心虫检疫熏蒸处理方法相比, 磷化氢熏蒸处理仍具有处理时间短、经济有效、操作简便等优点。

早在 20 世纪 80 年代, 澳大利亚联邦气体公司就注册了商品名为 Phosfume™ 的磷化氢钢瓶气体, 由于目前溴甲烷在检疫用途上属于豁免范畴, 而磷化氢纯气成本也略高于溴甲烷, 所以国内检疫处理领域使用较少。但随着国际社会的持续关注, 溴甲烷生产、使用逐步受到限制, 其替代技术的研发迫在眉睫。同时, 本实验室对磷化氢纯气熏蒸‘红富士’苹果的呼吸强度、失水率、硬度、色泽、可溶性糖、可滴定酸、口感及熏蒸剂残留进行检测, 同对照相比, 熏蒸后‘红富士’苹果外观、内部品质均无显著变化, 不影响其商品性 (另有文章投稿)。因此, 该方法是一种极有潜力的替代溴甲烷熏蒸的检疫处理新方法。

参考文献

- [1] 花保祯. 桃小食心虫学名的更正[J]. 昆虫分类学报, 1992, 14 (4): 312-313.
- [2] U. S. Department of Agriculture. Treatment manual [OL/EB]. www.aphis.usda.gov/import_export/plants/manuals/ports/downloads/treatment.pdf, 2013.

- [3] Chaudhry M Q. A review of the mechanisms involved in the action of phosphine as an insecticide and phosphine resistance in stored-product insects [J]. *Pesticide Science*, 1997, 49(3): 213-228.
- [4] Horn F P, Sullivan J. Current practice in fresh fruit fumigation with phosphine in Chile [C] // Proceedings of 2005 Annual Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions. 31 October-3 November 2005, San Diego, CA.
- [5] Liu Yongbiao. Low temperature phosphine fumigation for postharvest control of western flower thrips (Thysanoptera: Thripidae) on lettuce, broccoli, asparagus, and strawberry [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2008, 101(6): 1786-1791.
- [6] 张凡华, 刘涛, 李丽, 等. 低温条件下磷化氢熏蒸对玫瑰采后品质的影响[J]. *植物检疫*, 2011(6): 1-4.
- [7] Liu Bo, Zhang Fanhua, Wang Yuejin. Toxicity of phosphine to *Carposina niponensis* Matsumura (Lepidoptera: Carposinidae) at low temperature [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2010, 103(6): 1988-1993.
- [8] 张凡华, 刘波, 王跃进. 低温条件下磷化氢熏蒸对不同水果品质的影响[J]. *食品科技*, 2010(5): 48-50.
- [9] Abbott W S. A method of computing the effectiveness of an insecticide [J]. *Journal of Economic Entomology*, 1925, 18: 265-267.
- [10] Robertson J R, Preisler H K, Russell R M. *Polo Plus; Probit and Logit analysis user's guide* [M]. LeOra Software, Petaluma, CA, USA. 2002.
- [11] Bond E J. *Manual of fumigation for insect control* [M]. FAO Plant Production and Protection Paper 54. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 1984.
- [12] Winks R G, Waterford C J. The relationship between concentration and time in the toxicity of phosphine to adults of a resistant strain of *Tribolium castaneum* (Herbst) [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1986, 22: 85-92.
- [13] 张凡华, 王跃进, 刘涛, 等. 磷化氢熏蒸对西花蓟马的毒力作用研究[J]. *植物检疫*, 2013(2): 49-52.
- [14] Bell C H. The efficiency of phosphine against diapausing larvae of *Ephestia elutella* (Lepidoptera) over a wide range of concentrations and exposure times [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1979, 15(2): 53-68.
- [15] Winks R G. The toxicity of phosphine to adults of *Tribolium castaneum* (Herbst): Time as a dosage factor [J]. *Journal of Stored Products Research*, 1984, 20(1): 45-56.
- [16] Rajendran S. Responses of phosphine-resistant strains of two stored-product insect pests to changing concentrations of phosphine [J]. *Pesticide Science*, 1994, 40(3): 183-186.
- [17] Karunaratne C, Moore G A, Jones R, et al. Phosphine and its effect on some common insects in cut flowers [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1997, 10(3): 255-262.

(责任编辑: 杨明丽)

(上接 180 页)

- [5] 黄惠玲, 梁海孙. 2000 年天等县玉米锈病暴发[J]. *广西植保*, 2001, 14(4): 28.
- [6] 吕印谱, 宋宝安, 李传礼, 等. 河南省 2004 年夏玉米锈病发生原因及防治对策[J]. *中国植保导刊*, 2005, 25(11): 15-17.
- [7] 刘骏, 马青, 于凯, 等. 我国玉米南方锈病发生区域和玉米品种田间抗性的研究[J]. *作物杂志*, 2009(3): 71-75.
- [8] 付家锋, 柳家友, 吴伟华, 等. 漯河市玉米南方锈病的发生与综合防治[J]. *农业科技通讯*, 2013(4): 134-135.
- [9] 阮义理, 胡务义, 何万娥. 玉米多堆柄锈菌的生物学特性[J]. *玉米科学*, 2001, 9(3): 82-85.
- [10] 郑明祥, 胡务义, 阮义理, 等. 玉米南方型锈病夏孢子的侵染时期[J]. *植物保护学报*, 2004, 31(4): 439-440.
- [11] 田耀加, 赵守光, 张晶, 等. 广州地区鲜食玉米锈病发生动态[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 3010-3014.
- [12] 汤少云, 徐曾娴, 胡冬梅, 等. 武汉市 2014 年秋玉米锈病发生特点与防治措施[J]. *湖北植保*, 2015(2): 46-47.
- [13] 韩群营, 黄明生, 李守荣, 等. 2014 年湖北蔡甸夏播鲜食玉米南方锈病暴发原因及综防对策[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(11): 104-106.
- [14] 刘立峰, 徐法三, 黄应辉. 不同药剂防治玉米南方锈病效果研究[J]. *现代农业科技*, 2013(7): 134-135.
- [15] Futrell M C, Hooker A L, Scott G E. Resistance in maize to corn rust controlled by a single dominant gene [J]. *Crop Science*, 1975, 15(4): 597-599.
- [16] Brewbaker J L, Kim S K, So Y S, et al. General resistance in maize to southern rust (*Puccinia polysora* Underw.) [J]. *Crop Science*, 2011, 51(4): 1393-1409.
- [17] 袁虹霞, 邢小萍, 李朝海, 等. 不同玉米品种对南方锈病的抗性比较[J]. *玉米科学*, 2010, 18(2): 107-109.
- [18] 李石初, 杜青. 玉米种质资源抗南方玉米锈病鉴定初报[J]. *现代农业科技*, 2010(21): 187-189.
- [19] Scott G E, King S B, Armour J W, Jr. Inheritance of resistance to southern corn rust in maize populations [J]. *Crop Science*, 1984, 24(2): 265-267.
- [20] Wanlayaporn K, Authrapun J, Vanavichit A, et al. QTL mapping for partial resistance to southern corn rust using RILs of tropical sweet corn [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2013, 4(4): 878-889.
- [21] Jines M P, Balint-Kurti P, Robertson-Hoyt L A, et al. Mapping resistance to southern rust in a tropical by temperate maize recombinant inbred topcross population [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2007, 114(4): 659-667.
- [22] Chen C X, Wang Z L, Yang D E, et al. Molecular tagging and genetic mapping of the disease resistance gene *RppQ* to southern corn rust [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2004, 108(5): 945-950.
- [23] 刘章雄, 王守才, 戴景瑞, 等. 玉米 P₂₅ 自交系抗锈病基因的遗传分析及 SSR 分子标记定位[J]. *遗传学报*, 2003, 30(8): 706-710.
- [24] Zhang Ya, Xu Li, Zhang Dengfeng, et al. Mapping of southern corn rust-resistant genes in the W2D inbred line of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Molecular Breeding*, 2010, 25(3): 433-439.

(责任编辑: 杨明丽)