

技术与应用

Technology & Application

磷化氢和溴甲烷复合熏蒸红心火龙果携带番石榴实蝇技术研究

马依莎^{1,2}, 张广平¹, 李柏树¹, 李 丽¹, 张相敏¹, 张俊争^{3*}, 刘 涛^{1*}

(1. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100123; 2. 默多克大学, 珀斯, 澳大利亚 6000;

3. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193)

摘要 本文研究了磷化氢(PH₃)和溴甲烷(MB)复合熏蒸对番石榴实蝇的毒力以及对红心火龙果采后品质的影响。结果表明,复合熏蒸方式下,各个浓度的磷化氢和溴甲烷均存在增效,当溴甲烷浓度为 4 g/m³时,复合熏蒸发挥最佳增效效果的磷化氢浓度为 1.42 g/m³。复合熏蒸番石榴实蝇仅需 13.19 g/m³的溴甲烷即可在 95%置信区间下达到致死率 99.996 8%。与对照相比,复合熏蒸对火龙果的外观和内部品质无显著影响,而与溴甲烷单独熏蒸相比,复合处理会显著降低呼吸强度并减少药害。因此,溴甲烷和磷化氢复合处理对番石榴实蝇具有协同效应,表明磷化氢和溴甲烷复合熏蒸有可能成为水果采后处理的一种新策略。

关键词 红心火龙果; 番石榴实蝇; 溴甲烷; 磷化氢; 复合熏蒸

中图分类号: S 482.6 文献标识码: B DOI: 10.16688/j.zwbh.2022061

Combined fumigation with phosphine and methyl bromide for phytosanitary treatment of *Bactrocera correcta* in red dragon fruit

MA Yisha^{1,2}, ZHANG Guangping¹, LI Baishu¹, LI Li¹, ZHANG Xiangmin¹, ZHANG Junzheng^{3*}, LIU Tao^{1*}

(1. Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100123, China; 2. Murdoch University, Perth 6000, Australia; 3. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Toxic effect of phosphine (PH₃) and methyl bromide (MB) by combined fumigation on *Bactrocera correcta* and the postharvest quality of red dragon fruits was investigated in this paper. Under the combined treatment, methyl bromide and all concentrations of phosphine were synergistic. When methyl bromide was 4 g/m³, the concentration of phosphine in combined treatment was 1.42 g/m³, which had the best synergistic effect. Using combined treatment for insects, only 13.19 g/m³ methyl bromide was required to achieve 99.996 8% mortality at the 95% confidence interval. The combined treatment had no adverse effect on the appearance or internal quality parameters of the fruits when compared to the control fruits, but it could significantly reduce the respiratory intensity and phytotoxicity when compared with the fruit treated with methyl bromide alone. Therefore, the combination of methyl bromide and phosphine had a synergistic effect on *B. correcta*, indicating that the combined treatment had great potential to be a novel strategy for postharvest treatment of fruits.

Key words red dragon fruit; *Bactrocera correcta*; methyl bromide; phosphine; combined fumigation

火龙果 *Hylocereus undatus* (Haw.) Britt. et Rose 隶属于仙人掌科,量天尺属,果皮颜色十分鲜艳,含有一般水果少有的植物性白蛋白、花青素等营养物质,是一种高纤维素、低糖、低脂的“一高两低”

的保健食品,受到人们的广泛喜爱^[1]。根据海关数据,中国火龙果进口量连续五年超过 50 万 t,主要来自越南等东南亚国家^[2]。因火龙果易传带多种有害生物并且进口量增加,我国口岸检疫部门在进口火

收稿日期: 2022-02-05 修订日期: 2022-03-14

基金项目: 中国检验检疫科学研究院基本科研业务费(2020JK045);国家重点研发计划(2021YFC2600404);2022 食品储运生物污染控制专项

* 通信作者 E-mail: 张俊争 zhangjz@cau.edu.cn; 刘涛 Liutao_caiq@126.com

龙果中多次截获危险性蚱虫和实蝇,其中以番石榴实蝇 *Bactrocera correcta* (Bezzi) 较为严重。番石榴实蝇隶属双翅目,实蝇科,寡毛实蝇亚科,寡毛实蝇族,果实蝇属。主要分布于泰国、越南、缅甸、尼泊尔、印度、巴基斯坦、斯里兰卡等地^[3]。实蝇成虫将虫卵散产于寄主植物的果实内部,成功孵化的幼虫除蛀食果肉对果实品质造成严重的直接危害外,蛀食行为还使果实感染霉菌,进而导致水果的腐烂和脱落,因此,番石榴实蝇的寄生不但会造成水果的品质下降,而且会严重影响水果产量^[4]。2003—2013年间,我国口岸从来自28个国家的进境水果中共截获番石榴实蝇3271种次^[5]。因此,必须在口岸实施有效的检疫处理措施以保证国门生物安全。

目前,熏蒸处理、温度处理和辐照处理广泛用于口岸防控番石榴实蝇。热处理具有环境友好、无残留的优点,但容易对热敏感水果产生不良影响^[6]。冷处理不仅需要先进的精密冷处理专业设备,且处理时间过长,除此之外,冷处理还不适用于某些不耐冷的热带果蔬^[7]。近年来,虽然我国的辐照处理技术发展迅速,但是设备昂贵、配套标准法规不完善、公众认可度低及部分水果对辐照不耐受和处理后不育活虫有效性难以确认等问题^[8],极大阻碍了辐照在商业上的进一步大规模应用。

熏蒸处理是国际上常用的检疫处理措施,具有便捷、高效的特点。溴甲烷(methyl bromide, MB)是使用最广泛的熏蒸剂,可用于土壤、储藏物、易腐水果和建筑物熏蒸,杀灭真菌、细菌、土传病毒和昆虫等多种有害生物^[9]。然而,溴甲烷可破坏大气臭氧层,其生产和使用受到《关于消耗臭氧层的蒙特利尔议定书伦敦修正案》管控。尽管目前在检疫中使用的溴甲烷仍属于豁免范围,但考虑到溴甲烷对环境的影响,溴甲烷的减量熏蒸技术已成为检疫处理领域研究的热点之一^[10]。

最近的研究表明,溴甲烷和磷化氢(phosphine, PH_3)熏蒸对仓储害虫具有协同增效作用^[11-12]。从而为农产品检疫处理中熏蒸剂的减量增效提供了新的技术路径。为此,本文测试了溴甲烷和磷化氢复合熏蒸对番石榴实蝇的毒性及其对火龙果品质的影响。

1 材料与方法

1.1 试验材料

越南进口红心火龙果采购自北京市场,挑选果皮颜色鲜艳,大小适中,成熟程度均匀,无机械损伤

的果实,于5℃储藏并在7d内进行试验。

番石榴实蝇从云南省元江县果园中采集,在中国检验检疫科学研究院原国家质检总局检疫处理重点实验室生物安全饲养室内饲养^[13]。生物安全饲养室温湿度为 $(26\pm1)^{\circ}\text{C}$, $(60\pm10)\%$ RH,光周期为L/D=14 h/10 h。内有专门进行番石榴实蝇饲养的养虫笼,其中的水、木瓜肉和成虫饲料(质量比为蔗糖:大豆蛋白胨:干酪素=9:3:1)定期更换,以供成虫取食。

试虫取卵按照周月等^[14]的方法进行。在火龙果表皮用打孔器打出直径1 cm深度0.5 cm的圆孔,每个火龙果打孔3个。用滴管转移约100个卵至圆孔内,用400目尼龙纱网兜套住接种后的火龙果。30 cm×20 cm×8 cm的塑料盒底部铺垫适量麦麸,用厨房用纸盖住麦麸后,将装有接种火龙果的网兜放入,置于饲养环境下7 d,使实蝇卵发育至3龄幼虫。

1.2 试验方法

1.2.1 试验试剂与仪器

溴甲烷(MB)原气(连云港死海溴化物有限公司);磷化氢(PH_3)气体:利用磷化铝片剂(国药集团化学试剂有限公司,含55%磷化铝、25%氨基甲酸铵、20%氧化铝)与温水制备获得^[15]。

气相色谱仪(Agilent 6890N,美国安捷伦公司);恒温恒湿培养箱(Climacell系列,德国MMM集团);气密针(美国安捷伦公司);恒温箱(KBF720, WTC Binder, 德国);色差计(Minolta CR-10, 日本柯尼卡美能达);糖度计(Pocket PAL-1, 日本爱拓);酸度计(GMK-708, 韩国G-WON公司);质构仪(美国FTC公司)。

1.2.2 熏蒸处理

1.2.2.1 复合熏蒸中最佳磷化氢浓度的确定

整个熏蒸过程在底部放有风扇的6 L熏蒸罐中进行^[16],熏蒸前火龙果及6 L熏蒸罐在25℃环境中平衡12 h。每个熏蒸罐中放入3个带有番石榴实蝇的火龙果,密闭后开启风扇。依次用气密针将设定体积的溴甲烷和磷化氢注入熏蒸罐内,开始熏蒸。具体处理程序见表1。

熏蒸开始后的10 min、3 h时分别检测溴甲烷和磷化氢气体浓度。根据高明等^[17]的方法检测磷化氢的气体浓度,磷化氢浓度检测使用安装有热导检测器(TCD)的气相色谱仪进行。检测条件为:进样口温度120℃,填充色谱柱Propark Q(80~100目),柱温:

表 1 番石榴实蝇熏蒸处理程序

Table 1 Fumigation procedure of *Bactrocera correcta*

处理类别 Processing category	预处理 Preprocessing	熏蒸处理条件 Fumigation treatment condition
CK	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 无熏蒸储存 3 h
MB	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷熏蒸 3 h
PH ₃	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 2.84 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-1	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 0.142 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-2	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 0.426 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-3	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 0.71 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-4	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 1.42 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-5	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 2.13 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h
M+P-6	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 4 g/m ³ 溴甲烷和 2.84 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h

70℃, TCD; 200℃, 载气: H₂, 柱流量: 25 mL/min。根据李丽等^[18]的方法检测溴甲烷的气体浓度, 溴甲烷浓度检测使用安装有火焰离子检测器(FID)的气相色谱仪进行。检测条件为: 进样口温度 150℃, 填充色谱柱 Propark Q(80~100 目), 柱温: 120℃, FID: 200℃, 载气: H₂, 柱流量: 30 mL/min。熏蒸 3 h 后, 将熏蒸罐移至通风橱内, 开罐散气 2 h。每个处理组设置 3 个独立重复。

散气结束后, 将带有番石榴实蝇 3 龄幼虫的红心火龙果置于底部铺有适量麦麸的塑料圆盒中, 后将塑料圆盒移至生物安全饲养室内。饲养 2 d 后进行解剖, 对其中的存活虫量及死亡虫量进行计数, 当用镊子轻触试虫表面无反应, 则判定试虫死亡。

1.2.2.2 红心火龙果中番石榴实蝇的剂量—死亡率关系

为确定剂量—死亡率响应规律, 在 25℃ 下, 分别使用 2、4、6、8、10、12 g/m³ 溴甲烷单独熏蒸和上述

试验结果所得磷化氢最佳浓度与 2、4、6、8、10、12 g/m³ 溴甲烷以复合熏蒸方式对火龙果中的番石榴实蝇 3 龄幼虫进行熏蒸处理。每个处理独立重复 3 次, 并另设未熏蒸的火龙果为对照。在熏蒸结束 3 d 后, 解剖火龙果, 统计并记录其中的 3 龄幼虫的存活数量及死亡数量。

1.2.3 红心火龙果的采后品质测定

1.2.3.1 水果熏蒸

整个熏蒸过程采用配有风扇的 55 L 不锈钢熏蒸箱进行。熏蒸前, 挑取 90 个红心火龙果分为 3 组, 并将红心火龙果及熏蒸箱在 25℃ 环境中平衡 12 h。将红心火龙果以相同的堆放方式分别放入各熏蒸处理方式的 55 L 熏蒸箱内, 密闭后开启风扇, 根据毒力试验结果, 使用气密注射器分别投入设定体积的磷化氢和溴甲烷气体, 开始熏蒸, 具体处理程序见表 2。熏蒸过程中, 分别于投药后 10 min、3 h 使用气相色谱仪检测药剂的气体浓度。

表 2 火龙果的分组和处理程序

Table 2 Grouping and processing procedures of dragon fruit

处理类别 Processing category	预处理 Preprocessing	熏蒸处理条件 Fumigation treatment condition
CK	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 无熏蒸储存 3 h
MB	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 38 g/m ³ 溴甲烷熏蒸 3 h
MB+PH ₃	25℃ 环境中平衡 12 h	25℃ 18 g/m ³ 溴甲烷和 1.42 g/m ³ 磷化氢熏蒸 3 h

熏蒸结束后, 水果在通风橱内散气 2 h 后先移至 4℃ 的环境控制室中储藏 14 d, 再移至 20℃ 的恒温恒湿培养箱中模拟货架期储藏 4 d。处理后每组分别在 4℃ 储藏的第 7、14 天和 20℃ 储藏的第 4 天, 拿出果实进行品质检测, 每个品质指标均独立重复 3 次。

1.2.3.2 硬度与可滴定酸、可溶性糖的测定

红心火龙果硬度、可溶性糖和可滴定酸测定参照李柏树等的方法^[19], 在红心火龙果赤道面选取 3

个点, 将质构仪圆柱形压力计探测头垂直对准果实赤道面, 开始穿刺, 待探测头刺入果肉后停止, 记录穿刺过程中最大力。火龙果去皮后取果肉榨成汁, 取澄清果汁用手持式糖度仪测其可溶性糖。取澄清果汁 0.3 mL, 加蒸馏水稀释至 30 mL, 利用酸度计测其可滴定酸。

1.2.3.3 呼吸强度

红心火龙果呼吸强度的测定参照赵天泽等的方

法^[20]。每组各取出 3 个固定的红心火龙果,作为 3 个重复,分别在 4℃ 储藏的第 7 天、第 14 天和 20℃ 储藏的第 4 天,测定 3 次呼吸强度。每次测定时,先将各组取出的 3 个果实置于电子天平上称量,后将其密封在各自的熏蒸罐中,并分别于密封后的 0、3 h 时,用安装热导检测器(TCD)的气相色谱仪检测二氧化碳(CO₂)浓度,检测条件为:进样口温度 120℃,填充色谱柱 Propark Q (80~100 目),柱温:70℃,TCD:200℃,载气:H₂,柱流量:25 mL/min。单位为 mL/(kg·h)。

呼吸强度=(3 h CO₂ 浓度-0 h CO₂ 浓度)×干燥器体积/(果重×密闭时间)。

1.3 数据处理

应用 Excel 2016 统计软件整理相关数据,利用 PoloPlus 0.03 对死亡率数据进行几率值分析^[21],用 SPSS 19.0 软件采用 Duncan 氏检验法对相关指标进行单因素方差分析和差异显著性测验。

2 结果与分析

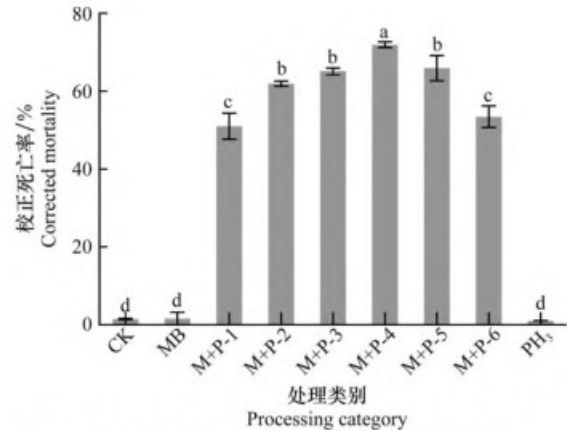
2.1 复合熏蒸中最佳磷化氢浓度的确定

为确定复合熏蒸中磷化氢最佳浓度,用不同浓度的磷化氢与 4 g/m³ 溴甲烷的复合熏蒸方式处理番石榴实蝇 3 龄幼虫。如图 1 所示,当磷化氢浓度为 0.142 g/m³ (M+P-1) 时,溴甲烷和磷化氢的死亡率显著增大,与单独溴甲烷相比,死亡率从 1.6% 升高到 51.02%。当磷化氢浓度为 1.42 g/m³ (M+P-4) 时,复合熏蒸的幼虫死亡率达到最大值 71.96%。当磷化氢浓度低于 1.42 g/m³ 时,死亡率随着浓度的升高而升高;而当磷化氢浓度高于 1.42 g/m³ 时,死亡率又会随浓度的继续升高而降低。当磷化氢浓度为 2.84 g/m³ (M+P-6) 时,复合熏蒸的死亡率为 53.48%,与磷化氢浓度为 0.142 g/m³ (M+P-1) 时的死亡率之间差异不显著。因此,在接下来的毒力试验中,采用 1.42 g/m³ 磷化氢与溴甲烷复合熏蒸番石榴实蝇 3 龄幼虫以探究熏蒸剂量与死亡率的关系。

表 3 复合熏蒸对红心火龙果中番石榴实蝇 3 龄幼虫的死亡率—几率值分析

Table 3 Mortality-probability value analysis of combined fumigation on the 3rd larvae of *Bactrocera correcta* in red dragon fruit

处理 Treatment	虫量/头 Total number of tested insects	斜率±标准误差 Slope±SE	异质系数 Heterogeneity coefficient	致死剂量的几率值分析/g·m ⁻³ Probit analysis of lethal dose					
				LD ₅₀	(95%CL)	LD ₉₉	(95%CL)	LD _{99.9968}	(95%CL)
MB	2 976	6.98±0.29	1.91	8.74	(8.32~9.13)	18.82	(17.48~20.64)	32.70	(28.73~38.51)
MB+PH ₃	3 405	7.51±0.41	4.00	3.87	(3.47~4.20)	7.90	(7.07~9.29)	13.19	(10.85~17.90)



对不同熏蒸方式进行基于Duncan氏检验的单因素方差分析,不同字母代表不同处理组之间差异显著($P<0.05$)。处理类别见表1。
The one-way analysis of variance based on Duncan's test was performed for different fumigation methods, and different letters represent significant differences between different treatment groups. Processing categories are same to Table 1.

图 1 磷化氢和溴甲烷熏蒸后红心火龙果中番石榴实蝇 3 龄幼虫的校正死亡率

Fig. 1 Corrected mortality of the 3rd larvae of *Bactrocera correcta* in red dragon fruits fumigated with phosphine and methyl bromide

2.2 红心火龙果中番石榴实蝇的剂量—死亡率关系

为满足检疫处理要求,利用溴甲烷单独熏蒸和溴甲烷磷化氢复合熏蒸处理番石榴实蝇。结果如表 3 所示,溴甲烷单独熏蒸达到试虫死亡率为 50%、99% 和 99.996 8% 所需浓度分别为 8.74、18.82 g/m³ 和 32.70 g/m³;复合熏蒸达到试虫死亡率为 50%、99% 和 99.996 8% 所需溴甲烷浓度分别为 3.87、7.90 g/m³ 和 13.19 g/m³。与复合熏蒸相比,溴甲烷单独熏蒸达到同样水平的试虫死亡率需要较高浓度。当以溴甲烷和磷化氢复合熏蒸处理幼虫 3 h,完全杀死番石榴实蝇所需剂量与溴甲烷单独熏蒸相比减少了 19.51 g/m³,仅为溴甲烷单熏的 40.34%。根据毒力测试的结果,接下来的品质试验采用 1.42 g/m³ 磷化氢和 18 g/m³ 溴甲烷复合熏蒸红心火龙果,以及 38 g/m³ 溴甲烷单独熏蒸火龙果。

2.3 复合熏蒸对红心火龙果品质的影响

在储藏期结束后,从外观品质看,仅溴甲烷单独熏蒸后的果实表面出现褐斑和白色霉状物的药害症状,复合熏蒸处理与对照组无明显变化(图2),表明过量的溴甲烷熏蒸易引起火龙果表面的药害,复合熏蒸则对火龙果表面无影响。

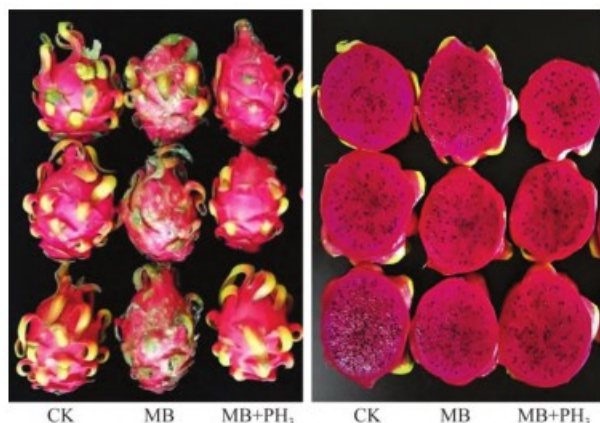
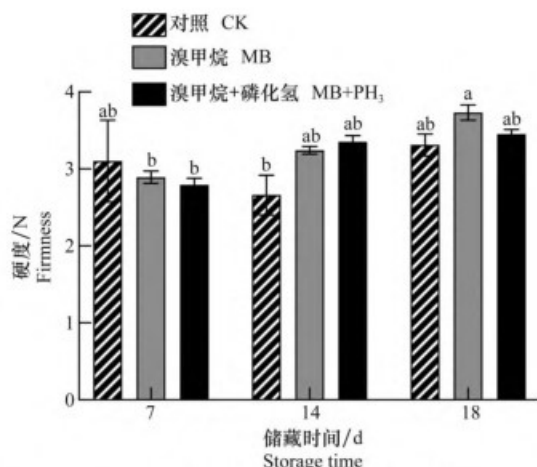


图2 磷化氢和溴甲烷熏蒸后储藏18 d的红心火龙果的外观品质

Fig. 2 Appearance quality of red dragon fruit fumigated with phosphine and methyl bromide after storage for 18 days

在整个储藏期间,各处理组和对照组的火龙果果实硬度之间差异不显著(图3),表明复合熏蒸和溴甲烷单独熏蒸对火龙果果实硬度无影响。



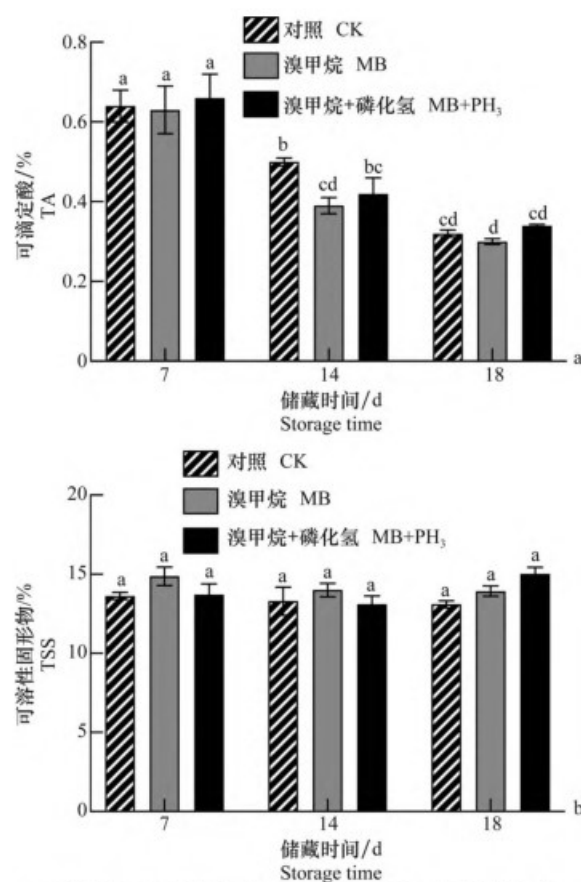
以95%置信区间计算的标准误的大小,用误差线的高低表示;对不同熏蒸方式进行基于Duncan氏检验的单因素方差分析,不同字母代表不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

The size of the standard error calculated with the 95% confidence interval was represented by the height of the error bar, the one-way analysis of variance based on Duncan's test was performed for different fumigation methods, and different letters represented significant differences among different treatment groups ($P < 0.05$). The same below.

图3 红心火龙果经熏蒸处理后储藏期间硬度的变化

Fig. 3 Changes in firmness of red dragon fruits after fumigation during storage

如图4所示,在整个冷藏期和储藏期期间,火龙果果实的可滴定酸(TA)质量分数逐渐降低,在冷藏期结束时(14 d),复合熏蒸的可滴定酸质量分数与对照组无显著性差异,溴甲烷单独熏蒸可滴定酸质量分数显著低于对照组。到整个储藏期结束时(18 d),各处理组与对照组的火龙果果实可滴定酸质量分数无显著性差异。说明复合熏蒸和溴甲烷单独熏蒸对火龙果的可滴定酸质量分数无影响。在整个储藏期间,火龙果果实的可溶性固形物(TSS)质量分数整体变化不明显,各处理组与对照相比无显著性差异。说明复合熏蒸和溴甲烷单独熏蒸对火龙果的可溶性固形物质量分数无影响。



a: 可滴定酸质量分数的变化; b: 可溶性固形物质量分数的变化。
a: Changes in titratable acids; b: Changes in total soluble solids.

图4 红心火龙果经熏蒸处理后储藏期间可滴定酸、可溶性固形物的变化

Fig. 4 Changes in titratable acids and total soluble solids of red dragon fruits after fumigation during storage

如图5所示,4℃低温冷藏期间,红心火龙果的呼吸强度保持稳定,且各处理组与对照组无显著性差异。当移至室温模拟货架期储藏时,火龙果的呼

吸强度大幅度上升。模拟货架期储藏4 d后,复合熏蒸的呼吸强度与对照组无显著性差异,经溴甲烷单独熏蒸的火龙果的呼吸强度显著高于对照组与复合熏蒸组。说明复合熏蒸对火龙果的呼吸强度无影响,而过量的溴甲烷熏蒸会刺激火龙果呼吸。

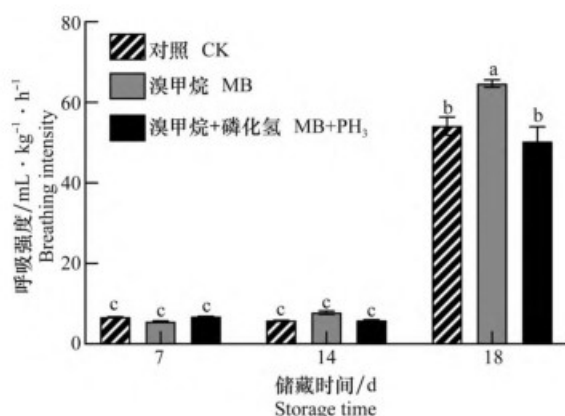


图5 红心火龙果经熏蒸处理后储藏期间的呼吸强度
Fig. 5 Breathing intensity of red dragon fruits after fumigation during storage

3 结论与讨论

由于水果和其他新鲜农产品具有携带有害生物的巨大风险,且不易储存,因此其收获后和出口前检疫处理一直是国际关注的热点^[22]。目前,溴甲烷熏蒸是处理红心火龙果携带的番石榴实蝇最有效、应用最广泛的技术。由于溴甲烷对环境的影响,近年来溴甲烷的减排和替代技术是国际检疫处理技术研究的热点。研究表明,赤拟谷盗成虫经溴甲烷和磷化氢按比例混合熏蒸处理5 h或10 h后,死亡率高于溴甲烷单独处理后的死亡率^[11]。Li等在20℃下,利用25.11 g/m³溴甲烷混合2.13 g/m³磷化氢熏蒸2.5 h,能够使橘小实蝇3龄幼虫的死亡率达99.996 8%,比溴甲烷单独熏蒸时所需溴甲烷浓度减少了近50%^[12]。由此可见,溴甲烷和磷化氢复合处理具有协同作用,通过采用复合处理技术可以减少溴甲烷的使用量。本试验中溴甲烷和磷化氢复合处理同样具有显著的增效作用。当磷化氢浓度为0.142 g/m³时,复合熏蒸的死亡率显著升高,与单独溴甲烷熏蒸相比,死亡率从1.6%升高到51.02%。

在对溴甲烷和磷化氢的复合熏蒸最佳磷化氢浓度探究中,试验结果表明,随着磷化氢浓度的增加,试虫死亡率先升后降。这是由于当使用过高浓度的磷化氢熏蒸会导致试虫休克同时陷入昏迷,减缓了试虫

对熏蒸剂的吸收,从而影响熏蒸效果^[23]。复合熏蒸所需的最佳磷化氢浓度范围为1.42~2.13 g/m³,与Li等^[12]利用溴甲烷联合磷化氢熏蒸橘小实蝇的结果一致。当以复合熏蒸方式处理幼虫3 h,完全杀死番石榴实蝇所需溴甲烷剂量为13.19 g/m³,仅为溴甲烷单独熏蒸的40.34%。因此,1.42 g/m³磷化氢加13.19 g/m³溴甲烷可用于番石榴实蝇的检疫处理。

在果实采后储藏期间,过量的溴甲烷熏蒸很容易导致水果的药害和商品价值的损失^[24-25]。例如,过量的溴甲烷熏蒸处理蓝莓,会增加蓝莓果实的腐烂率和呼吸速率^[26]。采用32 g/m³溴甲烷熏蒸‘Golden’ ‘Venus’和‘Sweety’3种火龙果2 h,火龙果表面出现药害^[27]。48 g/m³溴甲烷处理苹果2 h,苹果表面产生药害且呼吸速率显著提高^[28]。因此在评价熏蒸指标的可行性时,有必要考虑其对目标果实品质的影响。本试验中,与溴甲烷单独熏蒸相比,复合熏蒸无明显药害,且可显著降低红心火龙果的呼吸强度。复合熏蒸和溴甲烷单独熏蒸对红心火龙果的硬度、可溶性固形物、可滴定酸等内部品质均未造成不利影响。这与磷化氢单独熏蒸^[29]和溴甲烷单独熏蒸^[30]均未对果实内部品质造成不利影响的结果一致。因此,复合处理技术能保持火龙果在储藏过程中的有机质含量,延缓果实的衰老,弥补了溴甲烷单独熏蒸会缩短储藏期的问题^[27],该技术也可用于蓝莓、苹果等对溴甲烷熏蒸较为敏感的水果。

本研究探讨了溴甲烷和磷化氢对番石榴实蝇幼虫的杀灭效果和对红心火龙果采后品质的影响。试验结果表明,这两种熏蒸剂具有协同作用。与溴甲烷单独熏蒸相比,复合熏蒸仅需40.34%的溴甲烷剂量即可达到99.996 8%的死亡率,并显著降低呼吸强度且减少药害,能更好地保持水果品质。由此,可以证明磷化氢和溴甲烷复合熏蒸处理方式是一种非常具有潜力的检疫熏蒸处理技术。

参考文献

- [1] 罗萍, 师莉莎, 刘华忠. 火龙果汁体外抗氧化能力研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(20): 93-96.
- [2] 海关统计数据在线查询平台[DB/OL]. [2022-02-18]. <http://43.248.49.97/>.
- [3] BEZZI M. On the fruit-flies of the genus *Dacus* occurring in India, Burma and Ceylon [J]. Bulletin of Entomological Research, 1916, 7(2): 99-121.
- [4] 刘清国, 欧珍贵, 龚德勇. 贵州番石榴果实蝇防治技术研究初报[J]. 江西农业学报, 2011, 23(5): 100-102.

- [5] 陈云芳, 刘莉, 高渊, 等. 2003—2013 年全国进境水果截获疫情分析[J]. 中国植保导刊, 2016, 36(5): 61—66.
- [6] DOHINO T, HALLMAN G J, GROUT T G, et al. Phytosanitary treatments against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae): current situation and future prospects [J]. Journal of Economic Entomology, 2017, 110(1): 67—79.
- [7] PETERS D J, CONSTABEL C P. Molecular analysis of herbivore-induced condensed tannin synthesis: cloning and expression of dihydroflavonol reductase from trembling aspen (*Populus tremuloides*) [J]. The Plant Journal, 2002, 32: 701—712.
- [8] 任荔荔, 彭彩云, 刘波, 等. 气调处理技术在植物检疫中应用的研究进展[J]. 植物检疫, 2019, 33(5): 1—5.
- [9] RISTAINO J B, THOMAS W. Agriculture, methyl bromide, and the ozone hole: can we fill the gaps [J]. Plant Disease, 1997, 81(9): 964—977.
- [10] UNEP. Report of the technology and economic assessment panel quarantine and pre-shipment task force-final report [R]. 2009.
- [11] BOND E J, MORSE P M. Joint action of methyl bromide and phosphine on *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. Journal of Stored Products Research, 1982, 18: 83—94.
- [12] LI Li, ZHANG Guangping, LI Baishu, et al. Postharvest treatment of mandarin fruit using a combination of methyl bromide and phosphine against *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae) [J]. Pest Management Science, 2020, 76(5): 1938—1943.
- [13] 詹国平, 马晨, 刘海军, 等. 番石榴实蝇卵和幼虫的检疫辐照处理研究[J]. 植物检疫, 2019, 33(3): 33—38.
- [14] 周月, 李柏树, 王跃进, 等. 桔小实蝇响应数学模型比较[J]. 植物检疫, 2011, 25(3): 6—11.
- [15] 徐文雅. 磷化氢对黑腹果蝇靶标酶的影响及其分子机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [16] 高明, 李丽, 李柏树, 等. 低温磷化氢熏蒸对进口山竹粉蚧杀灭效果及果实品质的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 57—62.
- [17] 高明, 李丽, 邹海洋, 等. 磷化氢低温熏蒸对出口油桃品质的影响[J]. 植物检疫, 2018, 32(1): 70—74.
- [18] 李丽, 刘涛, 张凡华, 等. 溴甲烷熏蒸对山楂叶螨和桃蛀果蛾的毒力研究[J]. 植物检疫, 2012, 26(1): 6—9.
- [19] 李柏树, 李丽, 高明, 等. 溴甲烷熏蒸对几种柑橘果实储藏品质的影响[J]. 植物检疫, 2018, 32(5): 46—49.
- [20] 赵天泽, 高明, 张广平, 等. 磷化氢熏蒸对南洋臀纹粉蚧的杀灭效果和对进口菠萝品质的影响研究[J]. 植物检疫, 2019, 33(2): 48—52.
- [21] ROBERTSON J, PREISLER H, RUSSELL R. POLO: a user's guide to Probit or logit analysis [M]. Petaluma, CA, USA: PoloPlus, 2007.
- [22] ARMSTRONG J W. Fruit fly disinfestation strategies beyond methyl bromide [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 1992, 20(2): 181—193.
- [23] 曹阳, 宋翼, 孙冠英, 等. 磷化氢毒理学研究综述[J]. 郑州工程学院学报, 2002(2): 84—89.
- [24] 张凡华, 刘涛, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对不同苹果品种贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(10): 30—34.
- [25] SERAPIAN T, PRAKASH A. Comparative evaluation of the effect of methyl bromide fumigation and phytosanitary irradiation on the quality of fresh strawberries [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 109—117.
- [26] THANG K, AU K, RAKOVSKI C, et al. Effect of phytosanitary irradiation and methyl bromide fumigation on the physical, sensory, and microbiological quality of blueberries and sweet cherries [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 4382—4389.
- [27] ABDI N, MIZRAHI Y. Effects of methyl bromide and storage time on postharvest behavior of three different cultivars of pitaya fruit [J]. Israel Journal of Plant Sciences, 2012, 60(3): 319—324.
- [28] 张凡华, 刘涛, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对不同苹果品种贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2011, 36(10): 30—34.
- [29] 刘涛, 张凡华, 李丽, 等. 脐橙携带桔小实蝇低温磷化氢检疫熏蒸技术研究[J]. 植物检疫, 2012, 26(6): 1—4.
- [30] 高雪, 张广平, 李丽, 等. 溴甲烷熏蒸对火龙果储藏品质的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 60—66.

(责任编辑: 田)

(上接 265 页)

- [28] 张华, 任勇, 何员江, 等. 153 份四川小麦主推品种和后备品系抗病基因的分子检测[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(1): 26—35.
- [29] WELLINGS C R. *Puccinia striiformis* in Australia: a review of the incursion, evolution, and adaptation of stripe rust in the period 1979—2006 [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 2007, 58(6): 567—575.
- [30] TKEIN K, CAT A, AKAN K, et al. A new virulent race of wheat stripe rust pathogen (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on the resistance gene Yr5 in Turkey [J]. Plant Disease, 2021, 105(10): 3292.
- [31] NAGARAJAN S, NAYAR S K, BAHADUR P. Race 13 (67S8) of *Puccinia striiformis* virulent on *Triticum spelta* var. *album* in India [J]. Plant Disease, 1986, 70: 173.
- [32] ZHANG Gensheng, ZHAO Yuanyuan, KANG Zhensheng, et al. First report of a *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* race virulent to wheat stripe rust resistance gene Yr5 in China [J]. Plant Disease, 2020, 104(1): 284.
- [33] WANG Yong, XIE Jingzhong, ZHANG Huaizhi, et al. Mapping stripe rust resistance gene YrZH22 in Chinese wheat cultivar Zhoumai 22 by bulked segregant RNA-Seq (BSR-Seq) and comparative genomics analyses [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2017, 130: 2191—2201.
- [34] 习玲, 王昱琦, 朱微, 等. 78 份四川小麦育成品种(系)条锈病抗性鉴定与抗条锈病基因分子检测[J]. 作物学报, 2021, 47(7): 1309—1323.

(责任编辑: 田)