

# 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇耐热性的热动力学分析

李柏树, 詹国平, 王跃进\*, 任荔荔, 刘波, 李天秀

(中国检验检疫科学研究院, 北京 100029)

**摘要:** 果实蝇属是重要的检疫性有害生物之一, 其中桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel)、木瓜实蝇 *B. papayae* Drew & Hancock 和番石榴实蝇 *B. correcta* (Bezzi) 近几年在口岸检出率居高。本研究利用热水浸泡处理法比较这 3 种实蝇的卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫在 44 ~ 47°C 下的耐热性, 利用热动力学模型和活化能比较每种实蝇的耐热虫态以确定耐热种。结果表明: 在测定温度范围内, 3 种实蝇卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫的死亡率都与处理时间呈正相关。热动力学系数取 0.5 时, 最适合热动力学模型预测 3 种实蝇在各实验温度  $LT_{99.9968}$  的致死时间。3 种实蝇在 44 ~ 47°C 耐热性均为: 卵 > 1 龄幼虫 > 3 龄幼虫。番石榴实蝇在 3 种实蝇中最耐热。本研究结果为实蝇热处理指标的制定提供了实验依据。

**关键词:** 桔小实蝇; 木瓜实蝇; 番石榴实蝇; 耐热性; 热致死时间; 热动力学

中图分类号: Q965 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2013)12-1404-09

## Thermal death kinetics of fruit flies *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* (Diptera: Tephritidae)

LI Bai-Shu, ZHAN Guo-Ping, WANG Yue-Jin\*, REN Li-Li, LIU Bo, LI Tian-Xiu (Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Fruit fly is one of the most serious quarantine pests. In recent years, *Bactrocera dorsalis* Hendel (oriental fruit fly), *B. papayae* Drew & Hancock (papaya fruit fly) and *B. correcta* (Bezzi) (guava fruit fly) were intercepted frequently in the port of entry. In this study, we detected and compared the heat tolerance of eggs, the 1st instar and 3rd instar larvae of the three fruit flies at temperatures ranging from 44°C to 47°C using a hot water immersion technique. The species with the highest heat tolerance were determined through thermal death kinetic model and activity energy. The results showed that there was a positive relation between the mortalities of eggs, the 1st and 3rd instar larvae of all the three species and the exposure time at the experimental temperature. The 0.5 order kinetic model fitted best to predict the  $LT_{99.9968}$  lethal time at all the treatment temperatures. The order of heat tolerance stage for all the three species was egg > 1st instar larva > 3rd instar larva. The thermal death time (TDT) curves showed that the egg of *B. correcta* had the highest heat-resistance among all life stages of three species. This study provides an experimental basis for the development of heat quarantine treatment indicators of fruit flies.

**Key words:** *Bactrocera dorsalis*; *Bactrocera papayae*; *Bactrocera correcta*; heat tolerance; thermal death time (TDT); thermal kinetics

实蝇类害虫寄主范围广, 繁殖力和适应力强, 可对多种水果造成重大经济损失, 因此许多国家都将其列为进境检疫性有害生物(李志红等, 2002)。中国是水果生产大国, 也是水果进口大国, 中国-东盟自贸区水果实施零关税后, 水果进口量明显增

长, 随之而来的果实蝇属害虫入侵风险也大幅提高, 2004 年以来桔小实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel)、木瓜实蝇 *B. papayae* Drew & Hancock、番石榴实蝇 *B. correcta* (Bezzi)、南亚实蝇 *B. (Zeugodacus) tau* (Walker) 等一直保持较高截获批

基金项目: 中国检验检疫科学研究院专项资助资金项目(2011JK014); 国家质检总局科技计划项目(CAIQ\_2013IK296)

作者简介: 李柏树, 女, 1980 年 8 月生, 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 助理研究员, 研究方向为检疫处理技术, E-mail: libaishu@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangyuejin@263.net.cn

收稿日期 Received: 2013-03-28; 接受日期 Accepted: 2013-05-10

次(梁广勤等, 2008; 马兴莉等, 2012)。2012 年从芒果、莲雾、番石榴等进境货物中截获果实蝇属有重要经济价值的桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇就达 1 000 余次。

实蝇类害虫对农林业生产安全存在极大安全隐患, 各国都大力开发实蝇除害处理技术, 包括熏蒸处理、辐照处理、热处理和冷处理。其中热处理作为安全环保积极有效的检疫除害处理技术(Vincent *et al.*, 2003), 包括热水处理、蒸热处理、强制热空气处理和微波处理等形式, 在新鲜果蔬携带实蝇防治的研究中有广泛应用(Armstrong, 1982; Sharp *et al.*, 1989; McGuire, 1991a; Heard *et al.*, 1992; Corcoran *et al.*, 1993; Heather *et al.*, 1997, 2002; Mangan and Ingle, 1994; 梁帆等, 2006; Varith *et al.*, 2007)。

热处理指标需针对最耐受实蝇品种的最耐受虫态进行研究。因此不同处理温度与时间组合的筛选必不可少。耐受昆虫种类和耐受虫态确定主要通过模型预测和计算活化能进行分析比较。热处理数据可选择热动力学模型、Probit 模型、Logit 模型和 Log-Log 等模型进行分析预测, 热动力学模型是用来描述昆虫受热后存活数量随时间变化的关系, 将处理后害虫的存活率与处理时间转换成直线相关, 更适合分析实蝇热处理结果(Thomas and Mangan, 1997; 周月等, 2011)。昆虫活化能是指昆虫受热致死所需要的最低能量, 也用来确定昆虫对温度变化的敏感性。美国针对水果携带桔小实蝇有明确的热处理技术要求(USDA, 2012), 我国针对出口荔枝、芒果中的桔小实蝇, 进口木瓜中携带木瓜实蝇的应用热处理技术有一定研究(梁帆等, 2006; 林明光等, 2010, 2012), 但对于近年来截获量较大的番石榴实蝇耐热性未见报道, 且对桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇之间耐热性差别也不可不知。鉴于此, 本研究以近几年口岸截获量较大的有重要经济危害的桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇为研究对象, 采用热水浸泡处理方法测试实蝇耐热能力, 比较这 3 种实蝇的耐热性, 并筛选不同温度下 3 种实蝇的耐受虫态, 为制定果实蝇属害虫除害处理技术提供支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试虫来源

桔小实蝇采自广州花都水果市场被实蝇危害的

番石榴果实; 木瓜实蝇来自广州口岸截获; 番石榴实蝇采自云南被实蝇危害的番石榴果实。各种实蝇分别在室内培养至第 3 代使用, 人工饲料配方参考 Vargas 等(1984)略作改动。养虫室光暗周期为 14L:10D, 温度为  $25 \pm 2$  °C, 相对湿度为 60%~70%。

### 1.2 热水处理

木瓜皮盅取卵 2 h(周月等, 2011), 根据 3 种实蝇预实验结果, 卵收集后置于培养皿中养虫室内保湿, 至所需时间进行热水处理, 桔小实蝇卵为 18 h, 木瓜实蝇卵和番石榴实蝇卵为 24 h。各处理温度设置处理时间见表 1。

处理前取不少于 100 粒卵置于一块 10 cm × 10 cm 黑色细纹棉布上, 棉线绳封口。1 龄幼虫为卵收集后在培养皿内加营养液保湿培养 48 h, 热处理前吸取不少于 100 头放入透析膜中。3 龄幼虫是将收集卵放入人工饲料培养, 至非取食阶段, 每滤纸袋中放入 100 头。

热水浸泡处理时, 热水处理设备(德国 Julabo 公司, FK30-SL, 温度精度  $\pm 0.005$  °C)稳定在所需温度, 放入样品, 至所需时间后取出, 置于 25 °C 水中 2 min; 对照为放置在 25 °C 水浴中, 放置时间为其所在组中设定的最长处理时间 + 2 min。每处理重复 3 次。

处理后, 立即将卵和 1 龄幼虫转移至铺有滤纸的 9 cm 培养皿中, 加入蒸馏水或幼虫培养液移至养虫室内培养; 3 龄幼虫小心转移至装有含水量为 20%~30% 沙土的 500 mL 塑料盒中, 移至养虫室待其化蛹。

### 1.3 存活率检验

实蝇的卵、幼虫和蛹存活率分别在处理后 4 d, 24 h 和 7 d 后检查。卵和幼虫的存活率在体式显微镜(SteREO Discovery V12, 德国 Zeiss 公司)下镜检完成。初孵幼虫完全脱离卵壳视为存活; 1 龄幼虫用毛笔轻触可活动视为存活; 3 龄幼虫正常化蛹视为存活。

### 1.4 数据分析

热动力学模型与地中海实蝇、印度谷螟等热死亡率分析中相似, 公式为: 依据每组对照死亡率对处理结果进行校正(Abbott, 1925), 用校正后的数据进行分析。

$$\frac{d\left(\frac{N}{N_0}\right)}{dt} = -k \frac{N^n}{N_0} \quad (1)$$

其中  $N_0$  为试虫总数;  $N$  为存活试虫数;  $t$  为处理时

表 1 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇不同虫态热水处理的温度和时间组合

Table 1 The temperature and time combinations in hot water treatment in *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta*

实蝇种类 Fruit fly species	温度(℃) Temperature	虫态 Developmental stage	处理时间 (min) Treatment time	
<i>B. dorsalis</i>	44	卵 Egg	15, 22, 29, 36, 49, 56, 66, 76, 86, 90	
		1 龄幼虫 1st instar larva	15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	10, 15, 20, 25, 30, 35	
	45	卵 Egg	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 70, 80	
		1 龄幼虫 1st instar larva	10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	12, 15, 18, 21, 24	
	46	卵 Egg	3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27	
		1 龄幼虫 1st instar larva	5, 9, 13, 17, 21, 25, 33	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18	
	47	卵 Egg	3, 5, 7, 9, 12, 15, 18	
	<i>B. papayae</i>	44	卵 Egg	28, 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84, 90, 110
			1 龄幼虫 1st instar larva	28, 36, 44, 52, 60, 68, 76, 84
3 龄幼虫 3rd instar larva			15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
45		卵 Egg	10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55	
		1 龄幼虫 1st instar larva	10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	12, 15, 18, 21, 24, 27, 30	
46		卵 egg	4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 30	
		1 龄幼虫 1st instar larva	7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18	
47		卵 Egg	1, 3, 5, 7, 9, 10, 13, 15	
<i>B. correcta</i>		44	卵 Egg	30, 45, 60, 75, 90, 100, 105, 110, 120, 130
			1 龄幼虫 1st instar larva	30, 45, 60, 75, 90, 100, 105
	3 龄幼虫 3rd instar larva		15, 20, 25, 28, 30, 32, 35, 40	
	45	卵 Egg	15, 25, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80	
		1 龄幼虫 1st instar larva	15, 25, 30, 40, 45, 50, 55	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	12, 15, 18, 21, 24, 27, 30	
	46	卵 Egg	16, 20, 25, 30, 35, 38, 40, 45	
		1 龄幼虫 1st instar larva	7, 10, 13, 16, 20, 25, 30	
		3 龄幼虫 3rd instar larva	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24	
	47	卵 Egg	3, 6, 9, 12, 15, 18	

间, 单位为 min;  $k$  为热动力学常数, 单位为  $\text{min}^{-1}$ ;  $n$  为动力学反应系数。

公式 1 中动力学反应系数  $n$  取值不同时, 可变为以下形式:

$$\begin{aligned} \ln(N/N_0) &= -kt + c \quad (n = 1) \\ (N/N_0)^{1-n} &= -kt + c \quad (n \neq 1) \end{aligned} \quad (2)$$

每个处理温度中, 反应系数分别赋值 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 以存活率和相对时间进行回归分析, 根

据可决系数  $r^2$  的值确定最终反应系数。

每个温度与实验中其对应试虫达到 100% 死亡所需最短时间以半对数坐标作图, 得到温度死亡时间曲线(TDT), 依据此曲线根据以下公式(Tang *et al.*, 2000)可计算得出活化能:

$$E_a = \frac{2.303RT_{\min}T_{\max}}{z} \quad (3)$$

其中:  $R$  为气体常数 8.314 J/molK,  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  分别

代表实验中最高和最低温度的绝对温度( $K$ ),  $z$  表示死亡率变化 10 倍时所需温度, 其值为 TDT 曲线斜率负倒数。

数据计算与分析在 Excel 2007 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 热动力学模型系数确定

热动力学模型中系数  $n$  需要人为赋值, 其最适合的取值由可决系数  $r^2$  决定,  $r^2$  越接近 1, 热动力学模型回归直线拟合越好, 在理想条件下, 时间为 0 时, 存活数量等于初始昆虫数, 方程 2 中截距应该等于 0 或 1。而实际拟合度最好的曲线却可能不通过这个点。表 2, 3 和表 4 分别列出热动力学系数  $n$  取不同值时, 各供试实蝇卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫在每种处理温度下的  $r^2$  值。在用热动力学模型分析地中海实蝇 *Ceratitis capitata* (Wiedemann)、墨西哥实蝇 *Anastrepha ludens* (Loew)、桔小实蝇和瓜实蝇 *B. cucurbitae* Coquillett 等(Armstrong, 1982; Sharp *et al.*, 1989; Gazit *et al.*, 2004; Armstrong *et al.*, 2009)耐热性时, 反应系数取值 0.5, 各温度都能得到最高的  $r^2$  值。因此, 尽管实验中  $n=0.5$  时, 个别处理  $r^2$  值非最高, 仍选择  $n=0.5$  对 3 种实蝇卵( $r^2=0.8451$ )、1 龄幼虫( $r^2=0.9118$ )和 3 龄幼

虫( $r^2=0.9106$ )进行后续分析。从  $n=0.5$  时, 3 种实蝇卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫在各种温度条件下存活率和回归直线(图 1~3)可以看出, 模型对木瓜实蝇各虫态的拟合更好。

### 2.2 3 种实蝇耐热能力比较

从图 1~3 中可以看出桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫致死时间都随温度升高而缩短, 各虫态的存活率与温度和处理时间密切相关。表 5~7 比较了 3 种实蝇在  $n=0.5$  时,  $LT_{99}$  和  $LT_{99.9968}$  模型预测值及 95% 置信区间和实验观测到的 100% 死亡所需时间。木瓜实蝇和番石榴实蝇在 44℃~46℃ 时, 都是卵致死时间最长, 1 龄次之, 3 龄最短, 桔小实蝇除了在 46℃ 时卵和 1 龄致死时间接近, 其余条件下致死时间均为卵 > 1 龄幼虫 > 3 龄幼虫。从表 8 活化能数值也可看出, 3 种实蝇卵的活化能数值均为各虫态中最高, 因此, 在 44~46℃ 范围内, 卵为各实蝇最耐受虫态。

从表 5 可以看出, 44~47℃ 番石榴实蝇卵耐热性最强, 桔小实蝇在 44℃ 时耐热性低于木瓜实蝇, 但随温度升高, 耐热性相近。桔小实蝇卵活化能值最低, 说明同样温度条件下其易死亡, 但桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇的  $z$  值分别为 4.2, 3.5 和 3.5℃, 说明木瓜实蝇和番石榴实蝇对温度有相似敏感性, 且温度升高对这两种实蝇的影响要大于

表 2 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇卵在 4 种温度条件下热动力学模型不同  $n$  值对应的可决系数  
Table 2 Coefficients of determination ( $r^2$ ) from kinetic order ( $n$ ) models for thermal mortality of eggs of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at four temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(℃) Temperature	$n=0$	$n=0.5$	$n=1$	$n=1.5$	$n=2$
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	0.4952	0.7310	0.7083	0.3793	0.2682
	45	0.7689	0.9451	0.7446	0.6672	0.4731
	46	0.4157	0.7310	0.8113	0.4631	0.3304
	47	0.3957	0.5278	0.7318	0.8041	0.7175
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	0.8859	0.9550	0.9180	0.6269	0.4540
	45	0.8999	0.9907	0.8046	0.4344	0.3111
	46	0.8982	0.9703	0.8913	0.4941	0.3044
	47	0.8293	0.9255	0.8909	0.5094	0.3821
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	0.9834	0.9545	0.6335	0.2990	0.2265
	45	0.9403	0.9574	0.8336	0.5959	0.4124
	46	0.8320	0.9165	0.9378	0.5756	0.3763
	47	0.4524	0.5366	0.7023	0.6000	0.4866
平均值 Mean		0.7331	0.8451	0.8007	0.5374	0.3952

表 3 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇 1 龄幼虫在 3 种温度条件下热动力学模型不同  $n$  值对应的可决系数Table 3 Coefficients of determination ( $r^2$ ) from kinetic order ( $n$ ) models for thermal mortality of the 1st instar larvae of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at three temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(°C) Temperature	$n=0$	$n=0.5$	$n=1$	$n=1.5$	$n=2$
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	0.6516	0.8483	0.9437	0.5693	0.3971
	45	0.8864	0.9427	0.7814	0.3786	0.3084
	46	0.5520	0.7608	0.9807	0.8772	0.6821
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	0.7266	0.9036	0.9132	0.6128	0.4466
	45	0.8983	0.9550	0.8274	0.4211	0.3185
	46	0.8766	0.9719	0.8894	0.5816	0.4268
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	0.9391	0.9641	0.8658	0.5553	0.3603
	45	0.8065	0.9882	0.9848	0.9569	0.9215
	46	0.6867	0.8716	0.9682	0.7072	0.5436
平均值 Mean		0.7804	0.9118	0.9061	0.6289	0.5056

表 4 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇 3 龄幼虫在 3 种温度条件下热动力学模型不同  $n$  值对应的可决系数Table 4 Coefficients of determination ( $r^2$ ) from kinetic order ( $n$ ) models for thermal mortality of the 3rd instar larvae of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at three temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(°C) Temperature	$n=0$	$n=0.5$	$n=1$	$n=1.5$	$n=2$
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	0.8359	0.7756	0.5909	0.4533	0.4306
	45	0.8235	0.9076	0.8145	0.5563	0.5053
	46	0.8300	0.9435	0.9357	0.7385	0.5482
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	0.8331	0.9336	0.9448	0.5924	0.4045
	45	0.7517	0.9026	0.9182	0.5476	0.4143
	46	0.7846	0.9345	0.9127	0.5525	0.4077
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	0.8613	0.9688	0.8880	0.6114	0.4424
	45	0.7453	0.8938	0.9482	0.7695	0.5826
	46	0.7717	0.9355	0.8761	0.5445	0.3742
平均值 Mean		0.8041	0.9106	0.8699	0.5962	0.4566

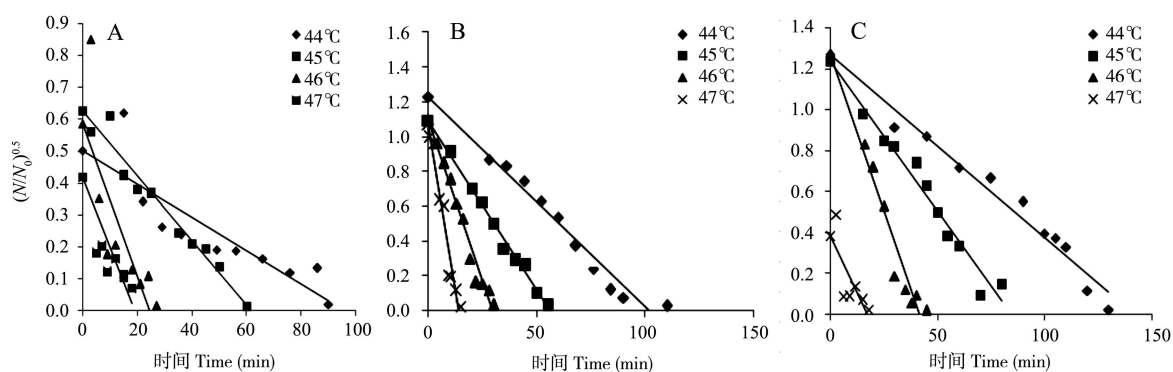


图 1 系数为 0.5 时桔小实蝇(A)、木瓜实蝇(B)和番石榴实蝇(C)卵在各温度条件下温度和死亡率曲线

Fig. 1 Thermal mortality curves of eggs of *Bactrocera dorsalis* (A), *B. papayae* (B) and*B. correcta* (C) by the 0.5 kinetic model

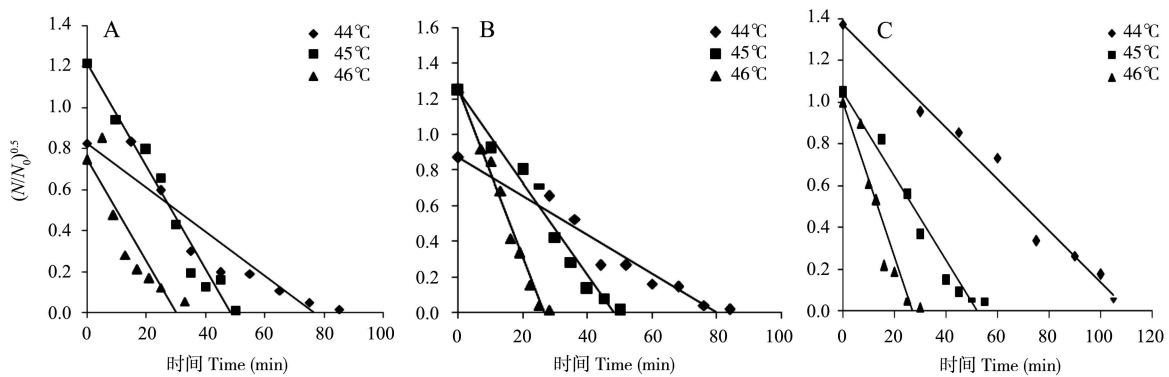


图2 系数为0.5时桔小实蝇(A)、木瓜实蝇(B)和番石榴实蝇(C)1龄幼虫在各温度条件下温度和死亡率曲线  
Fig. 2 Thermal mortality curves of the 1st instar larvae of *Bactrocera dorsalis* (A), *B. papayae* (B) and *B. correcta* (C) by the 0.5 kinetic model

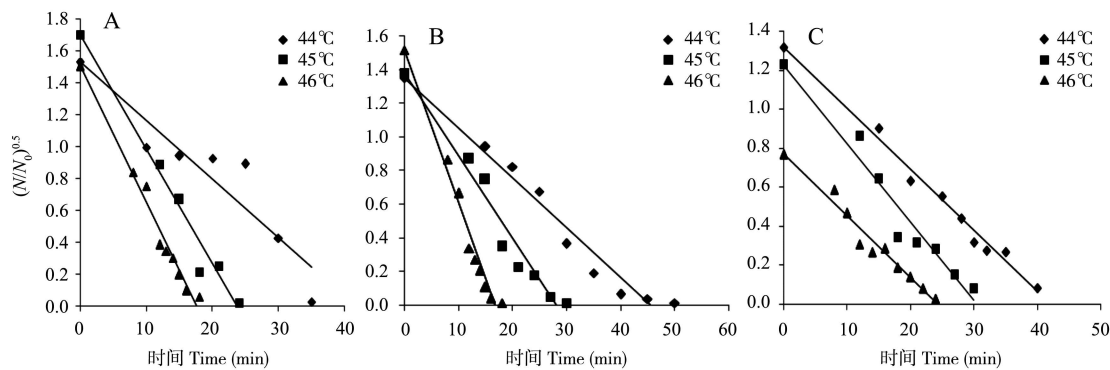


图3 系数为0.5时桔小实蝇(A)、木瓜实蝇(B)和番石榴实蝇(C)3龄幼虫在各温度条件下温度和死亡率曲线  
Fig. 3 Thermal mortality curves of the 3rd instar larvae of *Bactrocera dorsalis* (A), *B. papayae* (B) and *B. correcta* (C) by the 0.5 kinetic model

桔小实蝇。1龄幼虫中,桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇对温度敏感性有差别( $z$ 值分别为4.9, 4.2和3.7 $^{\circ}\text{C}$ ),因此,尽管44 $^{\circ}\text{C}$ 时番石榴实蝇耐热性最强,但温度升高后3种实蝇耐热性相似;3龄幼虫中3种实蝇对温度敏感性相差较大,桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇分别为6.9, 4.5和8.3 $^{\circ}\text{C}$ ,番石榴实蝇虽然活化能较低,但温度变化对其影响远小于其余2种实蝇。通过TDT曲线计算活化能(表8)可以看出,番石榴实蝇1龄幼虫活化能为3种实蝇中最高,木瓜实蝇卵耐热性与番石榴实蝇相同,桔小实蝇各虫态耐热性为3种实蝇中最差。

### 3 讨论

关于实蝇耐热性比较报道很多,其中果实蝇属多种重要经济危害种类,在47 $^{\circ}\text{C}$ 以下时,末期卵与1龄幼虫耐热性相似,且都强于3龄幼虫。本实验

中桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇在44 $^{\circ}\text{C}$ , 45 $^{\circ}\text{C}$ 和46 $^{\circ}\text{C}$ 的耐热性均为卵>1龄幼虫>3龄幼虫,这与同属瓜实蝇、昆士兰实蝇、辣椒果实蝇 *Bactrocera latifrons* (Hendel)、库克果实蝇 *B. melanotus* (Coquillett)、斐济果实蝇 *B. passiflorae* (Froggatt)、黄条果实蝇 *B. xanthodes* (Broun)和汤加果实蝇 *B. facialis* (Coquillett)等相似(Armstrong *et al.*, 1995, 2009; Jang *et al.*, 1999)。

研究发现马来西亚实蝇、地中海实蝇、瓜实蝇、墨西哥实蝇和桔小实蝇  $LT_{99.83}$ 和  $LT_{99.9968}$ 在高温条件下差异逐渐减小,50 $^{\circ}\text{C}$ 时耐热性差别可以忽略不计(Armstrong *et al.*, 2009),而实际应用中,48 $^{\circ}\text{C}$ 或50 $^{\circ}\text{C}$ 短时间处理,虽能够有效杀灭热带水果中实蝇的各种虫态,但国际贸易涉及实蝇危害的水果蔬菜,部分品种不适合高温处理(McGuire, 1991b; Corcoran *et al.*, 1993; Jacobi *et al.*, 2001),因此研究较低温度实蝇耐热性对热处理技术更具应用价值。

表 5  $n=0.5$  时桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇卵在 4 种温度条件下热动力学模型预测致死的时间与实验中 100% 死亡时间的比较

Table 5 Comparison of lethal time obtained by the 0.5 kinetic model and observed minimum time for 100% mortality of eggs of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at four temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(°C) Temperature	达到 100% 死亡率 最短时间(min) Minimum time for 100% mortality	$n=0.5$ 时热动力学预测结果 Predicted results of 0.5 order kinetic model			
			LT <sub>99</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI	LT <sub>99.9968</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	90	76.98	53.22 – 100.75	95.04	67.72 – 122.35
	45	80	60.80	48.10 – 73.51	73.45	59.03 – 87.86
	46	27	20.21	12.99 – 27.44	24.13	14.87 – 33.40
	47	18	14.46	7.05 – 21.87	18.75	15.12 – 29.86
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	110	92.97	80.10 – 105.85	100.76	92.18 – 109.33
	45	55	50.56	48.56 – 52.56	55.38	53.01 – 57.74
	46	30	26.65	24.18 – 29.13	29.18	26.87 – 31.49
	47	15	12.61	10.75 – 14.46	13.84	11.72 – 15.96
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	130	130.71	107.57 – 153.86	141.31	128.78 – 153.84
	45	>80 (99.29%) *	77.37	66.64 – 88.10	83.80	75.84 – 91.76
	46	45	38.27	34.68 – 41.85	41.36	37.15 – 45.58
	47	18	12.62	5.47 – 19.78	16.86	6.32 – 27.40

\* 括号内数据表示处理最长时间死亡率 The value in brackets is the mortality at the longest treatment time. 表 6 和 7 同 The same for Tables 6 and 7.

表 6  $k=0.5$  时桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇 1 龄幼虫在 3 种温度条件下热动力学模型预测的致死时间与实验中 100% 死亡时间的比较

Table 6 Comparison of lethal time obtained by the 0.5 kinetic model and observed minimum time for 100% mortality of the 1st instar larvae of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at three temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(°C) Temperature	达到 100% 死亡率 最短时间(min) Minimum time for 100% mortality	$n=0.5$ 时热动力学预测结果 Predicted results of 0.5 order kinetic model			
			LT <sub>99</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI	LT <sub>99.9968</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	85	67.33	55.19 – 79.47	76.09	61.42 – 90.76
	45	50	44.42	40.06 – 48.78	48.17	43.11 – 53.22
	46	>33 (99.72%) *	26.03	18.10 – 33.95	29.83	20.06 – 39.61
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	84	70.72	63.05 – 78.40	79.37	69.68 – 89.05
	45	50	44.34	40.51 – 48.17	47.99	43.57 – 52.41
	46	28	24.37	22.72 – 26.02	26.35	24.45 – 28.26
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	>105 (99.60%) *	103.22	94.19 – 112.25	110.88	100.50 – 121.27
	45	>55 (99.78%) *	47.27	42.21 – 56.32	51.98	45.96 – 58.01
	46	30	24.31	19.73 – 28.88	26.85	21.45 – 32.25

Armstrong 等 (2009) 通过热模块 (heating block system) 法, 处理位于夏威夷群岛实验室饲养桔小实蝇品系, 其 44°C 卵 LT<sub>99.9968</sub> 为 67.7 min, 46°C 卵

LT<sub>99.9968</sub> 为 18.5 min, 与本实验所得 44°C 卵 LT<sub>99.9968</sub> 为 95.04 min, 46°C 卵 LT<sub>99.9968</sub> 为 24.13 min 差别较大。以活化能作为筛选耐热种类常用参考指标,

表 7  $n=0.5$  时桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇 3 龄幼虫在 3 种温度条件下热动力学模型预测的致死时间与实验中 100% 死亡时间的比较

Table 7 Comparison of lethal time obtained by the 0.5 kinetic model and observed minimum time for 100% mortality of the 3rd instar larvae of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta* at three temperatures

实蝇种类 Fruit fly species	温度(℃) Temperature	达到 100% 死亡率 最短时间(min) Minimum time for 100% mortality	$k=0.5$ 时热动力学预测结果 Predicted results of 0.5 order kinetic model			
			LT <sub>99</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI	LT <sub>99.9968</sub> (min)	95% 置信区间 95% CI
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	44	35	38.84	25.07 – 52.60	41.40	25.91 – 56.88
	45	24	22.29	18.75 – 25.82	23.60	19.48 – 27.71
	46	> 18 (99.66%) *	16.42	15.35 – 17.50	17.52	16.24 – 18.81
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	44	50	42.22	38.22 – 46.22	45.40	40.81 – 50.00
	45	30	26.01	23.06 – 28.96	27.93	24.47 – 31.39
	46	18	15.59	14.57 – 16.60	16.63	15.43 – 17.83
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	44	> 40 (99.30%) *	38.78	36.43 – 41.12	41.78	38.98 – 44.58
	45	> 30 (99.30%) *	28.05	24.38 – 31.72	30.40	25.98 – 34.82
	46	24	21.07	19.22 – 22.91	24.03	21.29 – 26.46

表 8 桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇卵、1 龄幼虫和 3 龄幼虫活化能

Table 8 Activation energy for eggs, the 1st instar larvae and 3rd instar larvae of *Bactrocera dorsalis*, *B. papayae* and *B. correcta*

实蝇种类 Fruit fly species	活化能 Activation energy (kJ/mol)		
	卵 Egg	1 龄幼虫 1st instar larva	3 龄幼虫 3rd instar larva
桔小实蝇 <i>B. dorsalis</i>	497.2	396.9	278.8
木瓜实蝇 <i>B. papayae</i>	553.5	460.8	427.9
番石榴实蝇 <i>B. correcta</i>	551.6	526.7	234.3

Armstrong 等(2009)通过 44 ~ 50℃ 加热块实验计算桔小实蝇 3 龄幼虫活化能为 641.3 kJ/mol, 是瓜实蝇、马来西亚实蝇、地中海实蝇和桔小实蝇卵和 3 龄幼虫中最耐受虫态。本实验通过活化能比较发现, 番石榴实蝇卵活化能 551.6 kJ/mol, 为 3 种实蝇各发育阶段中最耐受的虫态和虫态; 桔小实蝇 3 龄幼虫活化能仅为 278.8 kJ/mol, 与 Armstrong 等(2009)研究结果存在较大差异。本实验桔小实蝇卵活化能为 497.2 kJ/mol, 与 Jang 等(1999)45℃ ~ 48℃ 热水处理夏威夷群岛桔小实蝇所得活化能 957 kJ/mol 也存在较大差异, 实蝇品系、处理方式、实

验设置等多种生物和非生物因素或许是引起研究结果差异的原因。同时, 试验通过比较活化能和  $z$  值发现, 由于不同实蝇种类及实蝇不同虫态之间对温度敏感性存在较大差异, 因此, 实蝇耐热性比较应当只限于一定温度范围内, 不能简单地外延推论。

实蝇种类丰富, 热处理技术在除害处理中具有重要意义, 通过耐热性测试确定实蝇耐热种类和耐热虫态是热处理技术研究中的必要步骤 (FAO, 2004)。而在统一实验和分析方法基础上, 建立一个完善的实蝇耐热性数据库, 能够加快实蝇热处理技术的研究和发展 (Jang *et al.*, 1999; Armstrong *et al.*, 2009)。桔小实蝇、木瓜实蝇和番石榴实蝇都属于东南亚国家主要经济危害实蝇种类, 本实验确定了番石榴实蝇卵为 3 种实蝇中最耐受虫态, 为制定实蝇热处理技术指标, 加快检疫性实蝇热处理技术研究提供了实验依据。

### 参考文献 (References)

- Abbott WS, 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18: 265 – 267.
- Armstrong JW, 1982. Development of a hot-water immersion quarantine treatment for Hawaiian-Grown ‘Brazilian’ bananas. *Journal of Economic Entomology*, 75(5): 787 – 790.
- Armstrong JW, Hu BKS, Brown SA, 1995. Single temperature forced hot-air quarantine treatment to control fruit flies (Diptera: Tephritidae) in papaya. *Journal of Economic Entomology*, 88(3): 678 – 682.



- Armstrong JW, Tang J, Wang S, 2009. Thermal death kinetics of Mediterranean, Malaysian, melon and Oriental fruit fly (Diptera: Tephritidae) eggs and third instars. *Journal of Economic Entomology*, 102(2): 522–532.
- Corcoran RJ, Heather NW, Heard TA, 1993. Vapor heat treatment for zucchini infested with *Bactrocera cucumis* (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 86(1): 66–69.
- FAO, 2004. Regional standards for phytosanitary measures, guidelines for the development of heat disinfestations treatments of fruit fly host commodities. APPPC RSPM NO.1, Bangkok.
- Gazit Y, Rossler Y, Wang S, Tang J, Lurie S, 2004. Thermal death kinetics of egg and third instar Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 97(5): 1540–1546.
- Heard TA, Heather NW, Peterson PM, 1992. Relative tolerance to vapor heat treatment of eggs and larvae of *Bactrocera tryoni* (Diptera: Tephritidae) in mangoes. *Journal of Economic Entomology*, 85(2): 461–463.
- Heather NW, Corcoran RJ, Kopittke RA, 1997. Hot air disinfestation of Australian 'Kensington' mangoes against two fruit flies (Diptera: Tephritidae). *Postharvest Biology and Technology*, 10: 99–105.
- Heather NW, Kopittke RA, Pike EA, 2002. A heated air quarantine disinfestation treatment against Queensland fruit fly (Diptera: Tephritidae) for tomatoes. *Animal Production Science*, 42: 1125–1129.
- Jacobi KK, MacRae EA, Hetherington SE, 2001. Postharvest heat disinfestations treatments of mango fruit. *Scientia Horticulturae*, 89: 171–193.
- Jang EB, Nagata JT, Chan HT, Laidlaw WG, 1999. Thermal death kinetics in eggs and larvae of *Bactrocera latifrons* (Diptera: Tephritidae) and comparative thermo tolerance to three other tephritid fruit fly species in Hawaii. *Journal of Economic Entomology*, 92(3): 684–690.
- Li ZH, Gong P, Chen HJ, Chen NZ, 2002. Molecular biology research progress of oriental fruit fly. *Plant Quarantine*, 16(3): 165–166. [李志红, 龚鹏, 陈洪俊, 陈乃中, 2002. 桔小实蝇分子生物学研究进展. 植物检疫, 16(3): 165–166]
- Liang F, Liang GQ, Wu JJ, Li AD, Hu XN, Mo RH, Guo Q, 2006. Applied hot water treatment technical for pest treatment of entry papaya fruits. *Plant Quarantine*, 20(3): 139–140. [梁帆, 梁广勤, 吴佳教, 李仰调, 胡学难, 莫仁浩, 郭权, 2006. 应用热水处理技术对进境木瓜作杀虫处理. 植物检疫, 20(3): 139–140]
- Liang GQ, Liang F, Zhao JP, Hu XN, Wu JJ, 2008. Overview of the study on fruit flies quarantine in China. *Journal of Environmental Entomology*, 30(4): 361–369. [梁广勤, 梁帆, 赵菊鹏, 胡学难, 吴佳教, 2008. 中国实蝇检疫研究概况. 环境昆虫学报, 30(4): 361–369]
- Lin MG, Wang XJ, Ao S, Han YC, Liu FX, Xu W, Zeng L, 2012. Study on vapor heat treatment to disinfest Oriental fruit fly and Melon fruit fly in Chinese papaya fruits for export to foreign countries. *Plant Quarantine*, 26(3): 5–9. [林明光, 汪兴鉴, 敖苏, 韩玉春, 刘福秀, 徐卫, 曾玲, 2012. 中国番木瓜出口蒸热杀虫处理研究. 植物检疫, 26(3): 5–9]
- Lin MG, Zeng L, Wang XJ, Li WD, Han YC, Ao S, Xu W, Liu FX, 2010. Study on vapor heat treatment to disinfest Oriental fruit fly in Chinese mango fruits for exporting to foreign countries. *Chinese Bulletin of Entomology*, 47(3): 479–485. [林明光, 曾玲, 汪兴鉴, 李伟东, 韩玉春, 敖苏, 徐卫, 刘福秀, 2010. 中国芒果输出蒸热杀虫处理研究. 昆虫知识, 47(3): 479–485]
- Ma XL, Liu HJ, Li ZH, Hu XN, Chen K, 2012. The analysis of information on fruit flies from ASEAN intercepted at Chinese ports. *Plant Quarantine*, 26(5): 82–87. [马兴莉, 刘海军, 李志红, 胡学难, 陈克, 2012. 我国口岸截获东盟实蝇疫情分析. 植物检疫, 26(5): 82–87]
- Mangan RL, Ingle SJ, 1994. Forced hot-air quarantine treatment for grapefruit infested with Mexico fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 87(6): 1574–1579.
- McGuire RG, 1991a. Concomitant decay reductions when mangoes are treated with heat to control infestations of Caribbean fruit flies. *Plant Disease*, 75(9): 946–949.
- McGuire RG, 1991b. Market quality of grapefruit after heat quarantine treatment. *HortScience*, 26(11): 1393–1395.
- Sharp JL, Ouye MT, Ingle SJ, Hart WG, Enkerlin WRH, Celedonio HH, Toledo JA, Stevens L, Quintero E, Reyes JF, Schwarz A, 1989. Hot-water quarantine treatment for mangoes from the state of Chiapas, Mexico infested with Mediterranean fruit fly and *Anastrepha serpentina* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 82(6): 1663–1666.
- Tang J, Ikediala JN, Wang S, Hansen JD, Cavalieri RP, 2000. High-temperature, short-time thermal quarantine methods. *Postharvest Biology and Technology*, 21: 129–145.
- Thomas DB, Mangan RL, 1997. Modeling thermal death in the Mexican fruit fly (Diptera: Tephritidae). *Journal of Economic Entomology*, 90(2): 527–534.
- USDA, 2012. Animal and Plant Health Inspection Service, Plant Protection and Quarantine. Treatment Manual. USDA, Washington, DC. [http://www.aphis.usda.gov/import\\_export/plants/manuals/ports/downloads/treatment.pdf](http://www.aphis.usda.gov/import_export/plants/manuals/ports/downloads/treatment.pdf).
- Vargas RI, Miyashita D, Nishida T, 1984. Life history and demographic parameters of three laboratory-reared tephritids (Diptera: Tephritidae). *Annals of Entomological Society of America*, 77: 651–656.
- Varith J, Sirikajornjaru W, Kiatsiroat T, 2007. Microwave-vapor heat disinfestation on oriental fruit fly eggs in mangoes. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31: 253–269.
- Vincent C, Hallman G, Panneton B, Fleurat-Lessard F, 2003. Management of agricultural insects with physical control methods. *Annual Review of Entomology*, 48: 261–281.
- Zhou Y, Li BS, Wang YJ, Gao XW, Zhan GP, Ren LL, 2011. Comparison among models in analysis of heat response of oriental fruit fly. *Plant Quarantine*, 25(3): 6–11. [周月, 李柏树, 王跃进, 高希武, 詹国平, 任荔荔, 2011. 桔小实蝇热响应数学模型比较. 植物检疫, 25(3): 6–11]

(责任编辑: 袁德成)