

小菜蛾的耐热性*

常向前¹ 马春森^{2**} 张舒¹ 吕亮¹

(¹湖北省农业科学院植保土肥研究所/农作物重大病虫草害防控湖北省重点实验室, 武汉 430064; ²中国农业科学院植物保护研究所/植物病虫害国家重点实验室, 北京 100193)

摘要 小菜蛾是世界范围内十字花科蔬菜上的重要害虫。临界高温(critical thermal maximum, CTMax)是昆虫耐热性的常用指标。采用动态加热方法,利用自行组装的装置测定了小菜蛾的临界高温,以此作为其耐热性指标,研究发育阶段、饲养温度、世代、性别和热激对小菜蛾耐热性的影响。结果表明:25℃下饲养的小菜蛾4龄幼虫的CTMax均值为50.31℃,显著高于1龄幼虫(43.03℃)、2龄幼虫(46.39℃)、3龄幼虫(49.67℃)以及雌性成虫(45.76℃)和雄性成虫(47.73℃);不同饲养温度(20、25和30℃)下成虫耐热性无显著差异;30℃下饲养1代、3代及6代的不同世代成虫CTMax也无显著变化;所有处理雌雄成虫的CTMax无显著差异;40℃下45 min热激可使5日龄雄成虫的CTMax值从45.51℃增加到46.49℃。

关键词 小菜蛾 临界高温 耐热性 动态加热 加热速率

文章编号 1001-9332(2012)03-0772-07 **中图分类号** Q968.1 **文献标识码** A

Thermal tolerance of diamondback moth *Plutella xylostella*. CHANG Xiang-qian¹, MA Chun-sen², ZHANG Shu¹, LÜ Liang¹ (¹Hubei Province Key Laboratory for Crop Diseases, Insect Pests and Weeds Control, Institute of Plant Protection & Soil Science, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; ²State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(3): 772–778.

Abstract: Diamondback moth *Plutella xylostella* is a worldwide important pest on cruciferous vegetables. Critical thermal maximum (CTMax) is often used as an index for the thermal tolerance of insects. By the method of dynamic heating, this paper measured the CTMax of *P. xylostella* in a self-assembled device, and studied the effects of development stage, rearing temperature, generation, sex, and heat shock on the thermal tolerance of *P. xylostella* based on the CTMax values. Reared at 25℃, the mean CTMax of the 4th larva (50.31℃) was significantly higher than that of the 1st larva (43.03℃), 2nd larva (46.39℃), 3rd larva (49.67℃), female adult (45.76℃), and male adult (47.73℃); reared at 20, 25, and 30℃, the adults had no significant difference in their CTMax; reared at 30℃ for 1-, 3-, and 6 generations, the CTMax of the adults also had no significant difference. In all the treatments, the CTMax of the female and male adults had less difference. Heat shock with 40℃ for 45 minutes could make the CTMax of 5 day-old male moth increased from 45.51℃ to 46.49℃.

Key words: *Plutella xylostella*; critical thermal maximum (CTMax); thermal tolerance; dynamic heating; heating rate.

小菜蛾(*Plutella xylostella*)是十字花科蔬菜重要害虫,具迁飞性^[1-4]。在我国长江以南的大部分地区,春季小菜蛾的种群密度较高,为害较重,而夏季高温季节日平均气温高于30℃的区域,虫口密度

小,危害轻^[5]。作者于2008—2010年连续3年在武汉、南京、合肥等地的十字花科蔬菜上调查小菜蛾种群动态时发现,进入6月后,上述地区田间小菜蛾种群数量显著降低,甚至为零;虽然高温季节这些地区普遍没有种植甘蓝(*Brassica oleracea*)等小菜蛾嗜好的大型十字花科蔬菜,但仍有小白菜(*Brassica rapa chinensis*)等小型十字花科蔬菜。在日本冲绳石垣岛

* 公益性行业(农业)科研专项(201103021)资助。

** 通讯作者. E-mail: ma_chunsen@ieda.org.cn

2011-05-06 收稿, 2011-12-19 接受。

连续种植甘蓝的菜地中,仲夏高温季节小菜蛾种群也很少或为零^[6]. 在夏季炎热地区,小菜蛾田间种群减少至极低水平甚至消失是否与高温密切相关尚不清楚。

迄今为止,关于温度对小菜蛾影响的研究多集中在耐寒性、越冬等低温生物学方面^[2,7-11],尚缺乏小菜蛾的耐热性、越夏等高温生物学的系统研究。在不同恒温梯度下对小菜蛾实验种群的研究发现,高温对小菜蛾发育、生殖的影响很大。当温度超过30℃,小菜蛾的内禀增长率迅速下降^[12];35℃以上高温对种群的幼虫化蛹及蛹羽化极为不利,且产生小型成虫^[13]。这些关于高温与小菜蛾关系的研究方法多为在恒定温度下研究小菜蛾的发育、繁殖、存活等生活史性状,而小菜蛾在田间环境的温度存在昼夜和季节的周期变化,因此用恒定高温试验所得的生物学数据解释田间种群动态易出现偏差。在温度季节性升高及日间逐渐升高的过程中,小菜蛾的耐热性是否随之变化反映了小菜蛾对高温适应能力的强弱,从而影响小菜蛾种群的夏季分布。

在对昆虫耐热性的研究中,Lutterschmidt和Hutchison^[14]定义了达到临界高温(critical thermal maximum, CTMax)时昆虫的标志行为后,出现了不少利用逐渐加热方法(动态方法)研究昆虫耐热性的报道^[15-18];本研究利用基于Calosi等^[15]的试验仪器改进后的加热装置,模拟田间温度实际变化的持续升温过程,首次尝试以小菜蛾在逐渐加热过程中发生痉挛后不能爬行或飞行时的温度即临界高温(CTMax)为衡量其耐热性的指标,从生理生态学角度试验虫龄、饲养条件、性别和热激对小菜蛾耐热性的影响,揭示小菜蛾耐热性的变化规律,阐明高温对小菜蛾的影响,为小菜蛾秋季发生预测、防治对策及研究小菜蛾夏季高温来临前的迁飞机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试昆虫

小菜蛾最初虫源为武汉田间采集,养虫室内以人工饲料(Southland Products Incorporated, USA)饲养繁殖3代以上。养虫室饲养条件为(25 ± 1)℃,相对湿度60%~70%,L:D=16:8,后文中提到的25℃小菜蛾种群均指此条件下饲养的小菜蛾种群。20、30℃小菜蛾种群源于上述条件下繁殖的小菜蛾所产卵在人工气候箱(LRH-400-GS I智能型,广东省医疗器械厂)中饲养所得,两台人工气候箱的条件

分别为(20 ± 0.5)℃,相对湿度70%,L:D=16:8;以及(30 ± 0.5)℃,相对湿度70%,L:D=16:8。后文中提到20、30℃小菜蛾种群均指此条件下用人工饲料饲养1~6代的小菜蛾种群。

1.2 加热方法

本试验利用对Calosi等^[15]的试验仪器改进后的加热装置(图1)测量小菜蛾的临界高温CTMax值。整个容器31 cm×24 cm×12 cm,浴池容积22.7 cm×10 cm×5.5 cm;升温速率在0.1~99℃·min⁻¹内调节。小菜蛾CTMax温度定义为在持续加热过程中,小菜蛾出现临界状态时的温度。临界状态定义为虫体发生痉挛后不能再爬行或飞行时的温度,大部分虫体行为表现为达到某一温度时突然痉挛,之后虫体腹部朝上静止躺在容器底部,少量背部朝上,成虫触角及四肢仍然颤动,随后在几秒内死亡(预备试验中,达临界温度时将虫体即刻取出放入25℃中,虫体随后并未立即死亡)。试验时将小菜蛾移入12孔培养板载物孔(12.5 cm×8.3 cm×2.2 cm,孔直径Φ=2.4 cm,TPP 92012)中,并对每个孔编号,便于记载每一头小菜蛾的临界温度。加盖后将培养板放入加热器(恒温加热仪L-119A,北京来亨公司)浴池里,浴池内放置一个温湿度自动记录仪Datalogger(AZ8829,台湾衡欣)用于记录加热器浴池内的实际温度变化,用一块透明有机玻璃板盖住整个加热器,防止热量损失,且利于肉眼直接观察试虫的活动情况。预设浴池最高温度为60℃,将浴池内温度从20、25和30℃缓慢升至预定温度;浴池上置光源。肉眼连续观察加热过程中每只小菜蛾的行为变化。由于加热速率影响昆虫的耐热性^[16],根据已做的预备试验,本研究中选择的加热速率均为0.25℃·min⁻¹。

1.3 小菜蛾不同虫态耐热性试验

将25℃饲养的小菜蛾种群1~4龄幼虫及羽化

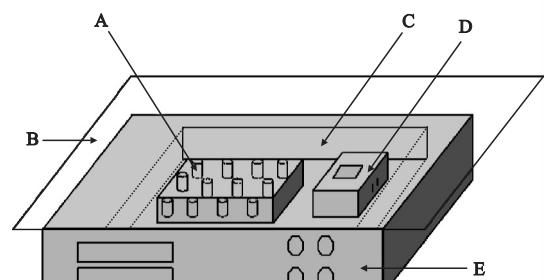


图1 组装的加热装置示意图

Fig. 1 Sketch of assembled heating device.

A:放虫容器 Moth container; B:有机玻璃盖板 Organic glass board; C:加热器浴池 Plunge bath; D:温湿度记录仪 Data logger; E:加热器 Heater.

24 h 内的雌雄虫成虫分别单头放在加热装置的 12 孔板中,记录在加热过程中每头小菜蛾达到临界状态时的温度,试验起始温度为 25 °C, 加热速率为 0.25 °C · min⁻¹. 每次同时观察 12 头虫,每种虫态重复 4 次.

1.4 不同饲养温度和不同世代的小菜蛾耐热性试验

将 20、30 °C 饲养的小菜蛾成虫放入加热装置的 12 孔板中,每孔同时放入 1 对雌雄成虫,起始温度分别为 20、30 °C. 观察 20 °C 饲养的小菜蛾种群第 1 代羽化 24 h 内的雌雄成虫(20_I)、30 °C 饲养的第 1 代(30_I)、第 3 代(30_{III})及第 6 代(30_{VI})羽化 24 h 内的雌雄成虫在加热装置中的行为变化,记录达到临界状态时的温度. 每处理重复 4 次,每次重复同时观察 24 头虫.

1.5 热激对小菜蛾耐热性的影响试验

将 25 °C 饲养的小菜蛾 5 日龄雄成虫,直接从 25 °C 放入 40 °C 温箱(韶关泰宏医疗器械有限公司)中热击 45 min,然后放入加热装置中测定临界高温值,起始温度为 25 °C. 同时直接测定 25 °C 饲养的 5 日龄雄成虫 CTMax 值.5 组重复,每组观察 12 头成虫. 比较经过热激和没有经过热激的雄成虫耐热性的差异.

1.6 数据处理

用 DPS 2000 的方差分析模块、Duncan 氏新复极差多重比较法对不同虫态、不同温度、不同世代和热激条件下小菜蛾的 CTMax 值进行比较;采用 T 测验模块对不同虫态 CTMax 均值与 CTMax50 值(累积死亡率为 50% 时的 CTMax 值)进行差异显著性比较,并检验热激对小菜蛾耐热性的影响.

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段小菜蛾的耐热性

25 °C 下饲养的小菜蛾种群不同发育阶段的 CTMax 均值及 CTMax50 见图 2. 方差分析表明,不同发育阶段小菜蛾种群的 CTMax 均值差异显著($F_{5,18} = 15.475, P < 0.05$), CTMax50 值也差异显著($F_{5,18} = 10.864, P = 0.0001$). 4 龄幼虫的 CTMax 均值及 CTMax50 显著高于 1、2 龄幼虫及雌成虫,但和 3 龄幼虫差异不显著. 各虫态的 CTMax 均值及 CTMax50 均超过 40 °C,但不高于 51 °C. 1 龄幼虫的 CTMax 均值及 CTMax50 最低,分别为 43.03 和 42.70 °C;2 龄幼虫的这两个指标分别上升到 46.39 和 45.45 °C;3 龄幼虫进一步上升到 49.67 及 49.53 °C;4 龄幼虫

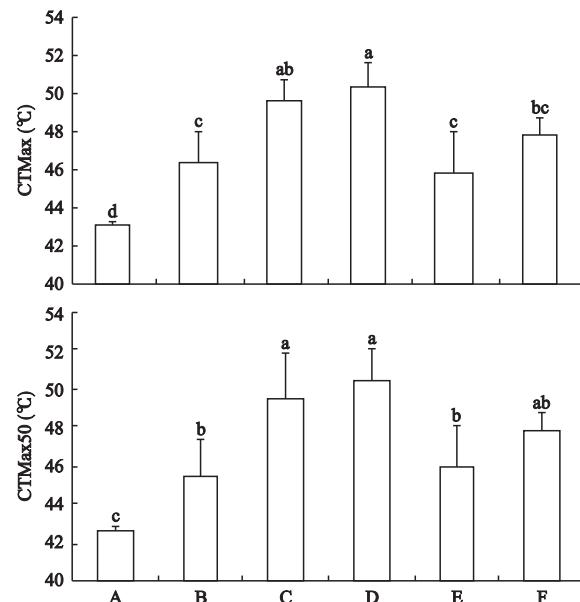


图 2 小菜蛾不同发育阶段的耐热性比较

Fig. 2 Thermal tolerance of *Plutella xylostella* at different development stages.

A:1 龄幼虫 1st larva; B:2 龄幼虫 2nd larva; C:3 龄幼虫 3rd larva; D:4 龄幼虫 4th larva; E: 雌成虫 Female adult; F: 雄成虫 Male adult. 不同字母表示差异显著($P < 0.05$) Different letters indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

的 CTMax 及 CTMax50 达到最高, 分别为 50.31 和 50.43 °C; 但雌雄成虫的 CTMax 及 CTMax50 则分别下降到 45.76 和 46.0 °C 以及 47.73 和 47.80 °C. 雄成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 略高于雌成虫, 但二者差异不显著.

经 T 检测, 不同发育阶段 CTMax 均值与 CTMax50 差异不显著(两处理方差齐性, $F = 1.212, P = 0.648; t = 0.194, P = 0.846$), 说明 CTMax 均值和 CTMax50 都可作为描述小菜蛾耐热性的特征指标.

2.2 不同温度条件下不同世代小菜蛾的耐热性

不同温度条件下小菜蛾雌雄成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 均高于 45 °C 低于 50 °C(图 3).

当饲养温度由 20 °C 增加到 30 °C 时, 经方差分析, 不同饲养温度($P = 0.929; P = 0.846$) 和性别($P = 0.502; P = 0.141$) 对小菜蛾成虫 CTMax 均值及 CTMax50 均没有显著影响, 二者互作也不显著($P = 0.071; P = 0.118$), 具体方差分析结果见表 1.

30 °C 饲养的第 1 代(30_I)、第 3 代(30_{III})及第 6 代(30_{VI})小菜蛾成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 值见图 4. 雌雄成虫的 CTMax 均值和 CTMax50 值均高于 45 °C 低于 50 °C. 25 °C 饲养多代的小菜蛾放入 30 °C 饲养后, 随着饲养代数的增加, 雌成虫与雄成虫的耐热性均有下降趋势. 方差分析表明, 30 °C 时不同世代($P = 0.575; P = 0.477$) 和性别($P = 0.467;$

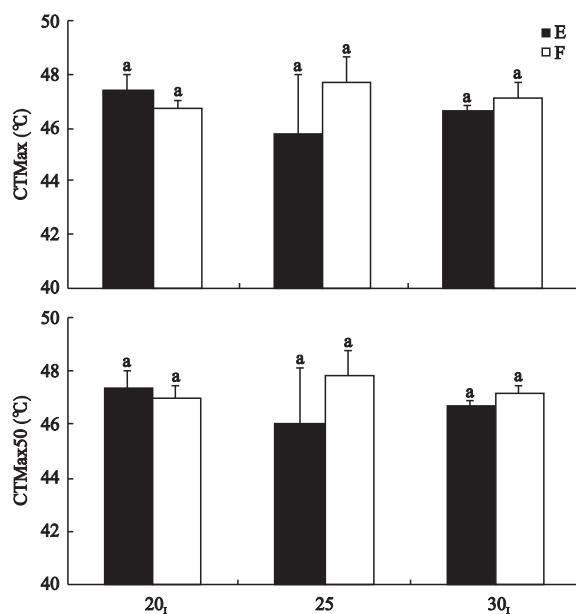


图3 不同温度条件下小菜蛾成虫 CTMax 均值及 CTMax50 值

Fig. 3 Means of CTMax and CTMax50 in different rearing regimes of adult *Plutella xylostella*.

20_I 和 30_I 分别表示 20 和 30 ℃ 饲养的第 1 代成虫, 25 表示 25 ℃ 饲养的繁殖 3 代以上的成虫 20_I 和 30_I represented the 1st generation adults reared at 20 ℃ and 30 ℃, respectively, while 25 represented adults more than 3 generations reared at 25 ℃.

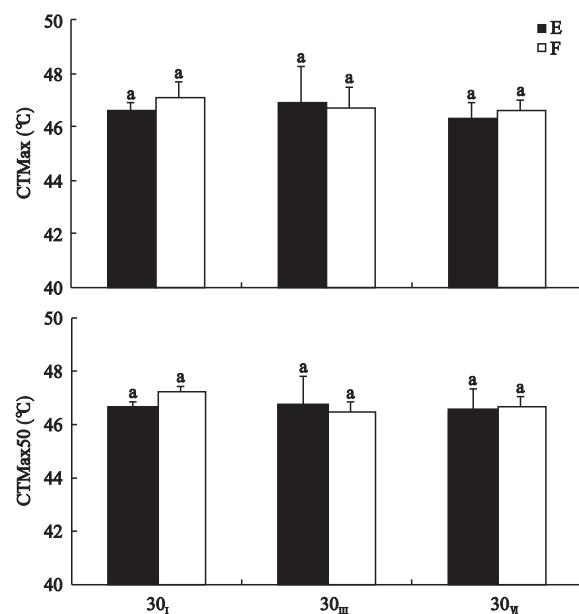


图4 30 ℃下饲养不同世代小菜蛾成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 值

Fig. 4 Means of CTMax and CTMax50 of adult *Plutella xylostella* reared at 30 ℃ for different generations.

30_I、30_{III}、30_{VI} 表示 30 ℃ 饲养的第 1 代、第 3 代、第 6 代成虫 30_I、30_{III} 和 30_{VI} represented the adults that were reared at 30 ℃ for 1 generation, 3 and, 6 generations, respectively.

表1 饲养温度和成虫性别对小菜蛾成虫 CTMax 均值及 CTMax50 值影响的方差分析

Table 1 Variance analysis on effects of rearing temperature regimes and sex on means of CTMax and CTMax50 of adult *Plutella xylostella*

来源 Source	自由度 df	平方和 SS		均方 MS		F 值 F value		显著水平 P	
		CTMax 均值 Mean of CTMax	CTMax50						
温度 Temperature	2	0.514	0.343	0.257	0.171	0.076	0.169	0.929	0.846
性别 Sex	1	2.224	2.406	2.224	2.406	0.656	2.365	0.502	0.141
温度×性别 Temperature×sex	2	6.776	4.893	3.388	2.446	3.075	2.405	0.071	0.118
误差 Error	18	19.833	18.315	1.101	1.017				
总变异 Total variance	23	29.349	25.958						

表2 30 ℃下饲养世代数和成虫性别对小菜蛾成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 值影响的方差分析

Table 2 Variance analysis on effects of generations reared at 30 ℃ and sex on means of CTMax and CTMax50 of adult *Plutella xylostella*

来源 Source	自由度 df	平方和 SS		均方 MS		F 值 F value		显著水平 P	
		CTMax 均值 Mean of CTMax	CTMax50						
世代 Generation	2	0.632	0.543	0.316	0.271	0.570	0.772	0.575	0.477
性别 Sex	1	0.305	0.051	0.305	0.051	0.551	0.146	0.467	0.706
世代×性别 Generation×sex	2	0.428	0.639	0.214	0.319	0.386	0.908	0.685	0.421
误差 Error	18	9.980	6.341	0.554	0.352				
总变异 Total variance	23	11.346	7.576						

$P=0.706$)的小菜蛾成虫的 CTMax 均值及 CTMax50 均没有显著差异,二者的交互效应也不显著 ($P=0.685; P=0.421$),具体方差分析结果见表 2.

2.3 热激对小菜蛾耐热性的影响

未经热激处理的 60 头 5 日龄雄成虫的 CTMax 最小值为 41.0 °C,最大值为 45.0 °C,而 60 头经 40 °C 45 min 热激处理的 5 日龄雄虫的 CTMax 最小值为 41.7 °C,最大值为 49.7 °C(在热激过程中有 4 头雄虫死亡,死亡率为 6.7%);经 40 °C 热激后 CTMax 均值由 (45.51 ± 1.45) °C 增加至 (46.49 ± 1.66) °C; T 检测二者差异显著(两处理方差齐性, $F_{60,56}=1.312, P=0.305; t=3.391, P=0.001$). 未经热激处理与热激处理的 CTMax50 值分别为 45.60 和 46.90 °C.

3 讨 论

以往小菜蛾对高温反应的研究多是将其置于恒定温度下,观察其存活、生殖、发育特征,Shirai^[19]利用恒温方法比较了亚热带及温带地区小菜蛾的耐热性. 然而,田间温度是不断变化的. 本研究中采取逐渐加热方法测定小菜蛾的耐热性更具生态学意义,且试验过程可更直观地反映其受高温的影响变化. 已有用逐渐加热方法测定欧洲龙虱 (*Deronectes* spp.)^[15]、淡足舌蝇 (*Glossina pallidipes*)^[16]、果蝇 (*Drosophila*)^[17]、瘤蚜属蚜虫 (*Myzus persicae*、*Myzus polaris*、*Myzus ornatus*)^[18] 等节肢动物的耐热性的研究报道. 但用逐渐加热方法测量小菜蛾的耐热性,本研究尚属首次.

临界高温 (CTMax) 可作为昆虫耐热性的指标之一^[20],在耐热性的研究中,达到临界高温时的标志,对于不同的昆虫及不同的实验装置有不同的定义. Lutterschmidt 和 Hutchison^[14]认为,以虫体发生痉挛 (onset of spasms) 时的温度作为临界温度值较为精确;Terblanche 等^[16]及 Mitchell 和 Hoffmann^[17]在蝇类耐热性的研究中以虫体击倒掉出 (knockdown) 时的温度作为临界温度;马罡和马春森^[21-22]在比较小麦蚜虫耐热性时,将蚜虫在温度梯度内从低温端向高温端爬行的过程中,受到热刺激后调转运动方向时的温度作为耐热性指标之一;Calosi 等^[15]则认为,以致死上限温度 (lethal limits) 作为欧洲龙虱 (*Deronectes*) 耐热性的标准比较可靠. 本研究发现,小菜蛾在持续加热过程中达到某一温度后会突然发生痉挛,很快死亡,以此现象作为达到临界高温时的标准易于客观记录,因此本试验采用突然发生痉挛时的

温度作为临界高温.

耐热性试验测定表明,小菜蛾的耐热性受多种因子影响. 不同发育阶段的小菜蛾耐热性不同,1~4 龄幼虫及雌雄成虫中 4 龄幼虫的耐热性最高;雌雄成虫之间没有显著差异;加热速率影响耐热性的测试结果,当加热速率慢时昆虫耐热性较高,但也有与此相反的结果^[16],因此对加热速率的选择最好和自然生态相关^[16,23]. 在本试验的预备试验中,当加热速率为 0.25、1 和 4 °C · min⁻¹ 时,CTMax 值依次降低(未发表数据),参考自动温湿度记录仪 Datalogger (AZ8829, 台湾衡欣) 记录武汉本地的温度变化速率,本试验采用的加热速率为 0.25 °C · min⁻¹. 在利用本试验装置进行加热的过程中发现,随着温度的升高,装置浴池内相对湿度不断降低,可能也会对小菜蛾的耐热性产生影响. Yamada 等^[24]研究认为,相对湿度变化对小菜蛾的卵孵化率、化蛹率及成虫羽化的影响不大,但本试验中最低相对湿度可达 9.0%,因此有必要针对相对湿度、温度对耐热性的交互效应进行深入研究;昆虫对温度的耐受性还受年龄影响^[20],本试验未比较不同日龄小菜蛾成虫的耐热性,不同日龄虫体耐热性如何变化,今后需要展开研究.

经过不同温度饲养后,小菜蛾是否随温度升高耐热性增加,表现出热适应性? 资料表明,不同的昆虫表现出的特点不一:不同温度饲养的瘤蚜属蚜虫 (*Myzus polaris*) 表现出明显的热适应性,随着饲养温度的升高耐热性增加^[18];提高饲养温度对次南极地区的象鼻虫 (*Curculionoidea*) 热适应性并没有明显的影响^[25];而在 25 °C 下饲养的阿根廷蚂蚁 (*Linepithema humile*) 耐热性高于 10、20 及 30 °C 下饲养的耐热性^[26]. 本研究中,在恒温 30 °C 下饲养的小菜蛾耐热性并不比 20 和 25 °C 显著升高; Shirai^[19]对亚洲从热带到温带的 9 个小菜蛾种群的产卵量及发育历期比较后认为,热带地区种群(高温种群)的耐热性并不比温带地区(低温种群)的高,这种观点和本试验的结果基本一致.

同一温度下连续饲养世代数的增加不一定增强昆虫的耐热性. Hazell 等^[18]研究认为,10 和 20 °C 连续饲养的第 3 代的桃蚜 (*M. persicae*)、瘤蚜属蚜虫 (*M. polaris*、*M. ornatus*) 耐热性并没有比第 1 代显著增加,而采自英格兰中部的桃蚜在 25 °C 饲养 3 代后耐热性则比第 1 代显著降低 ($P \leq 0.05$). 本研究中 30 °C 饲养的第 6 代成虫的耐热性没有显著提高,说明小菜蛾耐热性的可塑性不高,没有表现出对高

温的遗传适应能力。

热激蛋白是细胞或生物体在短时间内受到高于其正常生长温度时新合成或含量增加的一类蛋白质,诱导型热激蛋白决定着真核生物的耐热性^[27]。本研究中,利用突然高于饲养温度15℃的温度热激45 min,诱导小菜蛾产生热击蛋白,提高了其耐热性,但热击后耐热性的绝对值仍然没有超过50℃;同时在热激的过程中发现有成虫死亡,说明高温胁迫一方面对增加其耐热性产生有利影响,另一方面随着时间的延长对机体产生了热损伤。试验中所用成虫为5日龄成虫,高温胁迫对其他日龄成虫的影响尚待进一步研究。

Bale等^[28]研究昆虫越冬行为时认为,昆虫对自身温度调节的能力有限,因此需要采用相应的策略对抗环境温度的胁迫,包括自身季节性的耐寒性变化和迁飞行为。在春季发生的田间小菜蛾种群会面临夏季高温胁迫而采取一些对策,由于小菜蛾对高温的耐受性可塑性不强,而昆虫的耐热性又是影响其分布的关键因子^[17],因此,夏季高温可能一方面导致低龄幼虫个体的死亡,造成了田间种群迅速下降;另一方面,成虫可能会发生迁飞,寻找更适合的生境,这些可能都是引起夏季小菜蛾种群减少至极低水平甚至消失的最重要原因。

参考文献

- [1] Cheng X-N (程遐年). Recent advances in research on the migrating insects in China. *Chinese Bulletin of Entomology* (昆虫知识), 1992, **29**(3): 146–149 (in Chinese)
- [2] Honda K, Miyahara Y, Kegasawa K. Seasonal abundance and the possibility of spring immigration of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Linnaeus) (Lepidoptera: Yponomeutidae), in Morioka City, northern Japan. *Applied Entomology and Zoology*, 1992, **27**: 517–525
- [3] Coulson SJ, Hodkinson ID, Webb NR, et al. Aerial colonization of high Arctic islands by invertebrates: The diamondback moth *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) as a potential indicator species. *Diversity and Distributions*, 2002, **8**: 327–334
- [4] Chapman JW, Reynolds DR, Smith AD, et al. High-altitude migration of the diamondback moth *Plutella xylostella* to the U. K.: A study using radar, aerial netting, and ground trapping. *Ecological Entomology*, 2002, **27**: 641–650
- [5] Ding J-H (丁锦华), Su J-Y (苏建亚). Agricultural insect: South edition. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 276–279 (in Chinese)
- [6] Kohno K, Soemori H, Takahashi K. Seasonal occurrence of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) on Ishigaki-jima Island, with special reference to their sudden occurrence associated with a typhoon. *Applied Entomology and Zoology*, 2004, **39**: 119–125
- [7] Ma C-S (马春森), Chen R-L (陈瑞鹿). Overwintering and migration of diamondback moth, *Plutella xylostella*// Chinese Society of Plant Protection (中国植物保护学会), ed. Proceedings of 1st National Conference of Young Scientists in Plant Protection. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 1991: 294–300 (in Chinese)
- [8] Chen F-Z (陈非洲), Liu S-S (刘树生). Effects of low and subzero temperature on a *Plutella xylostella* laboratory population. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(1): 99–102 (in Chinese)
- [9] Ma C-S (马春森), Ma G (马 翩), Yang H-P (杨和平). Overwintering of the diamondback moth, *Plutella xylostella* in temperate countries. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(13): 3628–3636 (in Chinese)
- [10] Dosdall LM, Mason PG, Olfert O, et al. The origins of infestations of diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.), in Canola in western Canada// Proceedings of the Fourth International Workshop on the Management of Diamondback Moth and other Cruciferous Pests. Melbourne, Australia: Institute of Horticultural Development, 2004: 95–100
- [11] Gu HN. Cold tolerance and overwintering of the diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) in southeastern Australia. *Environmental Entomology*, 2009, **38**: 524–529
- [12] Dan J-G (但建国), Liang G-W (梁广文), Pang X-F (庞雄飞). Studies on the laboratory population of diamondback moth under different temperatures. *Journal of South China Agricultural University* (华南农业大学学报), 1995, **16**(3): 11–16 (in Chinese)
- [13] Ma C-S (马春森), Chen R-L (陈瑞鹿). Effect of temperature on the development and fecundity of *Plutella xylostella*. *Journal of Jilin Agricultural Sciences* (吉林农业科学), 1993(3): 44–48 (in Chinese)
- [14] Lutterschmidt WI, Hutchison VH. The critical thermal maximum: Data to support the onset of spasms as the definitive end point. *Canadian Journal of Zoology*, 1997, **75**: 1553–1560
- [15] Calosi P, Bilton DT, Spicer JI. Thermal tolerance, acclimatory capacity and vulnerability to global climate

- change. *Biology Letters*, 2008, **4**: 99–102
- [16] Terblanche JS, Deere JA, Clusella-Trullas S, et al. Critical thermal limits depend on methodological context. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, **274**: 2935–2942
- [17] Mitchell KA, Hoffmann AA. Thermal ramping rate influences evolutionary potential and species differences for upper thermal limits in *Drosophila*. *Functional Ecology*, 2010, **24**: 694–700
- [18] Hazell SP, Neve BP, Groutides C, et al. Hyperthermic aphids: Insights into behaviour and mortality. *Journal of Insect Physiology*, 2010, **56**: 123–131
- [19] Shirai Y. Temperature tolerance of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae) in tropical and temperate regions of Asia. *Bulletin of Entomological Research*, 2000, **90**: 357–364
- [20] Bowler K, Terblanche JS. Insect thermal tolerance: What is the role of ontogeny, ageing and senescence? *Biology Review*, 2008, **83**: 339–355
- [21] Ma G (马 罡), Ma C-S (马春森). Upper critical temperatures for behaviors of three species of cereal aphids in leaf temperature gradient. *Acta Ecologia Sinica (生态学报)*, 2007, **27**(6): 2449–2459 (in Chinese)
- [22] Ma G, Ma CS. Effect of acclimation on heat-escape temperatures of two aphid species: Implications for estimating behavioral response of insects to climate warming. *Journal of Insect Physiology*, 2011, doi:10.1016/j.jinsphys.2011.09.003
- [23] Lighton JRB, Turner RJ. Thermolimit respirometry: An objective assessment of critical thermal maxima in two sympatric desert harvester ants, *Pogonomyrmex rugosus* and *P. californicus*. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**: 1903–1913
- [24] Yamada H, Kawasaki K. The effect of temperature and humidity on the development, fecundity and multiplication of the diamondback moth, *Plutella xylostella* L. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 1983, **27**: 17–21
- [25] Klok CJ, Chown SL. Resistance to temperature extremes in sub-Antarctic weevils: Interspecific variation, population differentiation and acclimation. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2003, **78**: 401–414
- [26] Jumbam KR, Jackson S, Terblanche JS, et al. Acclimation effects on critical and lethal thermal limits of workers of the Argentine ant, *Linepithema humile*. *Journal of Insect Physiology*, 2008, **54**: 1008–1014
- [27] Wang H-H (王海鸿), Lei Z-R (雷仲仁). Current developments of heat shock proteins in insect. *Scientia Agricultura Sinica (中国农业科学)*, 2005, **38**(10): 2023–2034 (in Chinese)
- [28] Bale JS, Hayward SA. Insect overwintering in a changing climate. *Journal of Experimental Biology*, 2010, **213**: 980–994

作者简介 常向前,男,硕士,1979年,助理研究员。主要从事农业领域生态学研究。E-mail: changxiangqian@yahoo.com.cn

责任编辑 肖 红
