



刘诗萌, 周金成, 何玥, 许竟文, 董辉. 短时极端高温对松毛虫赤眼蜂成虫致死作用及子代适合度的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (1): 199–205.

短时极端高温对松毛虫赤眼蜂成虫致死作用 及子代适合度的影响

刘诗萌^{*}, 周金成^{*}, 何玥, 许竟文, 董辉^{**}

(沈阳农业大学植物保护学院, 沈阳 110161)

摘要: 极端高温天气事件在高产作物种植区频繁发生, 潜在影响了寄生蜂对害虫的防控能力。为明确短时极端高温对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* Matsumura 成虫致死作用及子代发育适合度的影响, 本研究模拟夏季田间最高气温, 以 42℃ 高温处理松毛虫赤眼蜂成蜂 0.5 h 和 1 h, 统计并观测了各处理条件下母代蜂致死率、繁殖力、子代蜂寿命、羽化率、性比和畸形率。结果显示: 短时高温对松毛虫赤眼蜂有致死作用, 表现为雌、雄蜂直接死亡及子代羽化率降低。42℃ 处理 1 h, 雌、雄蜂死亡率分别为 40.28% 和 58.25%。短时极端高温导致松毛虫赤眼蜂子代适合度降低, 表现为雌蜂寿命缩短、繁殖力下降, 子代蜂畸形率增加及子代蜂雄性比上升。结果表明, 短时极端高温对松毛虫赤眼蜂适合度产生负面影响, 降低种群数量。本研究为夏季田间释放松毛虫赤眼蜂提供重要理论依据。

关键词: 松毛虫赤眼蜂; 短时极端高温; 致死作用; 繁殖力; 寄生蜂

中图分类号: Q968.1; S476

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 01-0199-07

Effects of short-term extreme heat on adult mortality and offspring fitness of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura (Hymenoptera: Trichogrammatidae)

LIU Shi-Meng^{*}, ZHOU Jin-Cheng^{*}, HE Yue, XU Jing-Wen, DONG Hui^{**} (College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: Extreme heat events are occurring more frequently in the world's most productive crop growing regions, and potentially affect the control efficacy of parasitoids against pests. To clarify the effects of short-term extreme heat on adult mortality and offspring fitness of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura (Hymenoptera: Trichogrammatidae), we simulated extreme high temperature under fields conditions, *T. dendrolimi* females and males were exposed to 42℃ for 0.5 h or 1 h respectively. Adult mortality, fecundity, offspring emergence rate, offspring females' lifespan, male ratio, and aberration rate were observed. The results showed: Adult mortality of short-term high temperature on *T. dendrolimi* were mainly reflected in the direct death of females or males and the decrease of offspring emergence rate. Mortality of females and males were 40.28% and 58.25% when they exposed to heat for 1 h. Short-term high temperature significantly affected offspring fitness. When females were exposed to 42℃, life span and fecundity of females were lower than those of the control group. When males were exposed to 42℃, male ratio of offsprings was significant higher than those of the control group. Our study showed that short-term

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0300307)

^{*} 共同第一作者: 刘诗萌, 女, 1995 年生, 硕士研究生, 从事害虫生物防治研究, E-mail: 834434839@qq.com; 周金成, 男, 1989 年生, 博士, 讲师, 从事害虫生物防治研究, E-mail: parasitoidswasp@163.com

^{**} 通讯作者 Author for corresponding: 董辉, 男, 1978 年生, 博士, 副教授, 从事害虫生物防治研究, E-mail: biocontrol@163.com

收稿日期 Received: 2019-12-04; 接受日期 Accepted: 2020-02-12

extreme heat negatively affected fitness of *T. dendrolimi*, and may consequently reduce the population. This study provides an important theoretical basis for the field application of *T. dendrolimi* in summer.

Key words: *Trichogramma dendrolimi*; short-term extreme heat; lethal effect; fecundity; parasitoid wasp

近年来,全球气候变暖导致极端气候事件发生的频率和强度逐渐增加 (IPCC, 2007)。其中,极端高温事件严重影响了世界上许多高产作物种植区的农业生产 (Taschetto *et al.*, 2009)。田间温度的变化不仅会对作物生长产生影响,也影响着天敌的控害能力 (Gilman *et al.*, 2010; Diehl *et al.*, 2013)。与其它昆虫相比,寄生性天敌昆虫不仅要应对温度变化的直接影响,还要应对温度变化影响下寄主质量的变化对其造成的间接影响 (Stireman *et al.*, 2005; 潘飞等, 2014; 陈丽芳等, 2015; Hance *et al.*, 2015)。寄生蜂对环境的适应能力直接决定了其在田间的控害能力 (Thomson *et al.*, 2010)。因此,通过探究短时极端高温对寄生蜂的影响,将为温度波动条件下寄生性天敌产品在田间的应用提供重要参考。

一般而言,高温对昆虫的负面影响主要表现为两种形式,即致死作用和非致死作用。对寄生蜂而言,短时极端高温对其致死作用主要表现在瞬时致死和延迟致死两方面,瞬时致死主要指短时高温对个体的瞬时击倒致死能力,表现为高温对当前发育阶段的瞬时致死率 (马罡和马春森, 2016)。而延迟致死主要表现在高温处理后对不同发育阶段或子代的致死作用,如子代蜂羽化率下降等 (Potter *et al.*, 2000; 杜尧等, 2007)。有研究表明,以 38℃ 高温处理阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* 成虫 2.5 h, 成虫存活率低于 60%, 子代羽化率低于 30% (郭俊杰, 2013)。39℃ 高温处理螟黄赤眼蜂 *Trichogramma chilonis* 成虫 2 h 后,其死亡率高达 60% 以上 (吴静, 2008)。松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 蛹经历 40℃ 以上高温处理后,其羽化率显著降低 (曲忠诚等, 2010)。除了致死作用外,短时极端高温还会导致寄生蜂个体适合度发生变化,主要表现为发育延缓、寿命缩短、雄蜂精子活力降低、雌蜂不育、繁殖力下降、雌性比降低等方面 (Klockmann *et al.*, 2017a, 2017b)。例如,39℃ 下处理 2 h 后,椰甲截脉姬小蜂 *Asecodes hispinarum* 寄生率下降了 40%, 子代羽化率和雌性比也显著降低 (金化亮等, 2010)。研究表明,高温胁迫处理斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* 幼虫后,其子代蜂幼虫发育历期延长,

成虫体型减小 (孟倩等, 2017)。另一研究发现,以 32℃ 处理玉米螟赤眼蜂 *Trichogramma ostrinae* 后,有 6.7% 的雌蜂不产卵,而当温度升至 35℃ 时,有 60% 的雌蜂不能进行正常的生殖活动 (陈科伟等, 2006)。因此,在研究短时极端高温对寄生蜂的影响时,需要从多个方面综合评价。

松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 属赤眼蜂科 Trichogrammatidae 赤眼蜂属 *Trichogramma*。该蜂是鳞翅目害虫的重要卵期寄生性天敌,在生物防治上应用范围最广 (Smith, 1996; 武琳琳, 2014; 张俊杰等, 2015)。在我国东北地区,玉米螟、黏虫、棉铃虫等鳞翅目害虫常发生于夏季作物生长时期 (赵培伟, 2015; 张行国等, 2017)。因此,7、8 月份的盛夏时期是田间释放赤眼蜂防治鳞翅目害虫的最佳时期 (张国红等, 2014; 刘秀军, 2018)。中国北方和南方 7 月至 8 月的日最高气温可达到 38℃ 甚至更高 (Zhou *et al.*, 2018)。田间由于太阳的直射,气温可较当地平均气温高 3℃ 左右 (Zhang *et al.*, 2013), 最高可达到 42℃。然而,以往的研究多关注于恒定高温对赤眼蜂的影响 (李莹等, 2013; 朱文雅等, 2016; Tian *et al.*, 2017), 虽然一些研究也探究了短时极端高温对赤眼蜂生长发育的影响 (陈科伟等, 2006; 曲忠诚等, 2010), 但短时极端高温对不同性别赤眼蜂及其交配和生殖的影响仍缺乏较详细的调查。

为探究短时极端高温对松毛虫赤眼蜂的影响,本试验选取 42℃ 高温处理不同性别松毛虫赤眼蜂成虫 0.5 h 和 1 h, 以 25℃ 恒定常温条件为对照,统计并观测了各处理条件下母代蜂存活率、繁殖力、子代蜂寿命、羽化率、性比和畸形率。研究结果将为夏季松毛虫赤眼蜂的田间应用技术提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试松毛虫赤眼蜂由沈阳农业大学植物保护学院害虫生物防治实验室提供,于通用环境实验箱 (25 ± 1℃, RH65% ± 5%, 光周期 L:D = 16:8) 内饲养。以新鲜米蛾 *Corcyra cephalonica* 卵为中间

寄主, 在室内繁育 20 代以上。

1.2 方法

本研究采用不平衡试验设计, 预设 2 种处理因素: (1) 短时高温处理时间 (处理 0.5 h 和 1 h) 和 (2) 高温处理方式 (处理雄蜂、处理雌蜂和处理雌、雄蜂), 两因素共组合成 6 种处理组合。同时设置以 25℃ 恒定常温饲养的赤眼蜂成蜂作为各处理组合的统一对照组。

为防止雌、雄蜂交配, 试验预先将待羽化的被寄生米蛾卵单卵切下后单管单卵培养。待赤眼蜂羽化后 24 h 内, 解剖镜下鉴定成虫性别。高温处理前 2 h, 提供 10% 蜂蜜水补充营养。试验将雌、雄蜂各分为 3 组, 1 组在常温下饲养作为对照组, 另两组分别置于 42℃ 条件下处理 0.5 h 和 1 h。处理结束后, 各组雌、雄蜂进行配对, 组合成 7 组处理: ①雌蜂和雄蜂均不经历高温的对照组 (25/25℃); ②雌蜂不经历高温而雄蜂经历高温 (25/42℃), 雄蜂处理 0.5 h; ③雌蜂不经历高温而雄蜂经历高温 (25/42℃), 雄蜂处理 1 h; ④雌蜂经历高温而雄蜂不经历高温 (42/25℃), 雌蜂处理为 0.5 h; ⑤雌蜂经历高温而雄蜂不经历高温 (42/25℃), 雌蜂处理为 1 h; ⑥雌、雄蜂均经历高温 (42/42℃), 雌、雄蜂处理 0.5 h; ⑦雌、雄蜂均经历高温 (42/42℃), 雌、雄蜂处理 1 h。每处理组合设 30 对雌、雄蜂配对重复。

本实验高温处理均在 42℃ 通用环境实验箱 (42 ± 1℃, RH65% ± 5%, 光周期 L:D = 16:8) 中进行。除高温处理外, 整个饲养过程均在常温条件下的通用环境实验箱 (25 ± 1℃, RH65% ± 5%, 光周期 L:D = 16:8) 中进行。

配对后的雌、雄蜂充分交配 2 h 后, 移除雄蜂。雌蜂每日供以足量米蛾卵的卵卡 (1 cm × 2 cm, 150 ± 50 粒米蛾卵), 并喂食 10% 蜂蜜水, 直至雌蜂死亡。将更换下的卵卡放入新的指型管中饲养, 直至子代蜂羽化。统计各雌蜂的繁殖力 (总寄生卵数)、寿命。子代羽化后, 统计子代羽化率 (羽化出蜂数/总寄生卵数)、子代雄性比 (雄蜂数/羽化数)。

1.3 数据分析

试验采用双因素方差分析, 检验不同高温处理时间和处理赤眼蜂性别对成虫瞬时存活率的影响。

雌、雄蜂配对后, 试验各高温处理组合均以同一组常温处理雌、雄蜂配对处理作为统一对照。

采用卡方检验 (Chi-square test) 分析了不同短时极端高温处理时间对雌、雄蜂死亡率的影响。采用预设比较组的单因素方差分析, 检验了短时极端高温处理时间和配对方式对雌蜂寿命、繁殖力、子代雄性比、子代畸形率的影响。采用 Duncan 氏检验对不同处理组合下的实验指标进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 短时极端高温对雌、雄蜂致死作用

不同短时高温处理对雌、雄蜂的致死作用存在显著影响。与对照相比, 短时高温处理雌、雄蜂致死率显著降低。42℃ 处理 0.5 h 的雌、雄蜂存活率显著高于处理 1 h 雌、雄蜂存活率 (表 1)。

表 1 42℃ 处理 0.5 h 和 1 h 对雌、雄蜂死亡率的影响

Table 1 Effects of different treatments on the adult survival of *Trichogramma dendrolimi*

成蜂性别 Sex of wasps	致死率 (%) Mortality		
	对照组 CK	高温处理 Heat treatments	
	0 h	0.5 h	1 h
雌蜂 Female	0.00 ± 0.00 a	11.75 ± 0.27 b	40.28 ± 0.32 c
雄蜂 Male	0.00 ± 0.00 A	13.55 ± 0.38 B	54.85 ± 0.56 C

注: 不同小写字母表示不同处理下雌蜂死亡率在 0.05 水平下的差异显著性, 不同大写字母表示不同处理下雄蜂死亡率在 0.05 水平下的差异显著性。Note: Different lowercase letters indicated the significant difference in females' mortality under different treatments at the level of 0.05, while different uppercase letters indicated the significant difference in males' mortality under different treatments at the level of 0.05.

2.2 短时极端高温对雌蜂繁殖力的影响

不同处理组对雌蜂繁殖力存在显著影响 ($\chi^2 = 311.93$, $df = 6$, $P < 0.001$) (图 1)。与对照相比, 高温处理的雌蜂繁殖力显著下降 ($z = -9.184$, $P < 0.001$)。处理 0.5 h 的雌蜂繁殖力显著高于处理 1 h 的雌蜂 ($z = 10.875$, $P < 0.001$)。此外, 高温处理雌蜂的繁殖力显著低于与高温处理雄蜂交配的雌蜂繁殖力 ($z = -4.135$, $P < 0.001$)。

2.3 短时极端高温对子代羽化率的影响

不同处理组对松毛虫赤眼蜂子代羽化率存在显著影响 ($\chi^2 = 79.563$, $df = 6$, $P < 0.001$) (图 2)。与对照相比, 高温处理后的子代羽化率

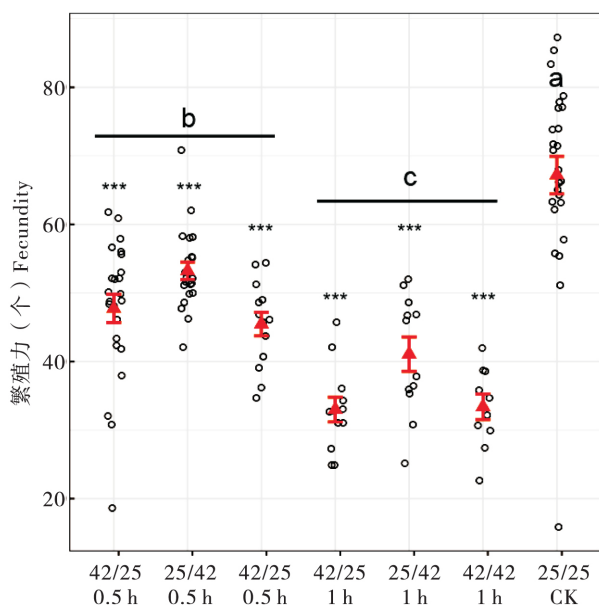


图1 不同处理组对雌蜂繁殖力的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on adult fecundity of *Trichogramma dendrolimi*

注 “42/25”，雌蜂经历而雄蜂不经历高温 “25/42”，雌蜂不经历高温而雄蜂经历高温 “42/42”，雌蜂和雄蜂均经历高温 “25/25” “CK”，雌、雄蜂均不经历高温的对照组。误差柄表示标准误差。红色三角符号表示平均值。不同小写字母表示不同处理时间下雌蜂繁殖力在 0.05 水平下的差异显著性。下图同 “*”、“**” 和 “***” 分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$, 代表不同短时高温处理分别与对照组间的差异显著性。

Not4 “42/25”，females were exposed to heat while males were not. “25/42”，males were exposed to heat while females were not. “42/42”，both females and males were exposed to heat. “25/25” “CK”，both females and males were not exposed to heat. The errorbars indicated the standard errors. The red triangles indicated the mean. Different lowercase letters indicated significant differences between different treatment time at the level of 0.05. “*”, “**”, and “***” means “ $P < 0.05$ ”, “ $P < 0.01$ ”, and “ $P < 0.001$ ”, respectively, and indicated significant differences between different treatment groups. The same below.

显著下降 ($z = -5.665$, $P < 0.001$)。42℃ 处理 0.5 h 的赤眼蜂子代羽化率显著高于 42℃ 处理 1 h 的子代羽化率 ($z = 8.446$, $P < 0.001$)。

2.4 短时极端高温对子代性比的影响

不同处理组对松毛虫赤眼蜂子代雄性比有显著影响 ($\chi^2 = 211.75$, $df = 6$, $P < 0.001$) (图3)。与对照相比, 高温处理的子代雄性比显著上升 ($z = 7.033$, $P < 0.001$)。42℃ 处理 0.5 h 的子代雄

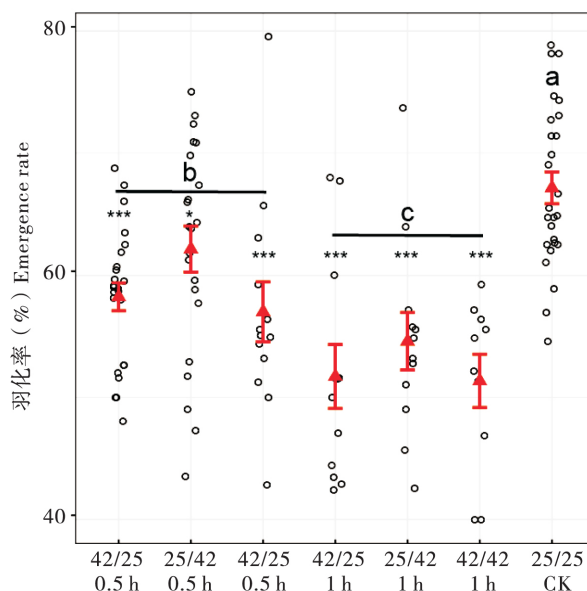


图2 不同处理组对子代羽化率的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on emergence rate of *Trichogramma dendrolimi* offsprings

性比显著低于 42℃ 处理 1 h 的雌蜂 ($z = -7.646$, $P < 0.001$)。与高温处理雄蜂交配的雌蜂子代雄性比显著高于与正常雄蜂交配的雌蜂子代雄性比 ($z = -4.978$, $P < 0.001$)。

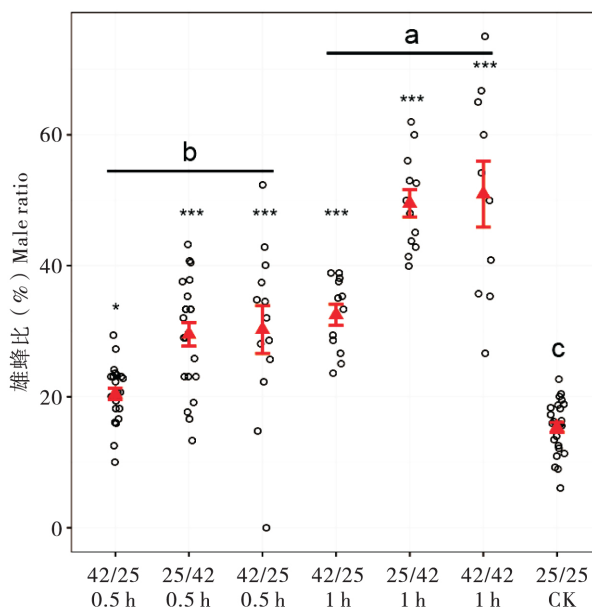


图3 不同处理组对子代雄性比的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on male ratio of *Trichogramma dendrolimi* offsprings

2.5 短时极端高温对松毛虫赤眼蜂子代畸形率的影响

不同处理组对松毛虫赤眼蜂子代畸形率有显

著影响 ($\chi^2 = 25.516$, $df = 6$, $P < 0.001$) (图4)。
与对照相比, 高温处理的子代畸形率显著上升
($z = 0.543$, $P < 0.001$)。

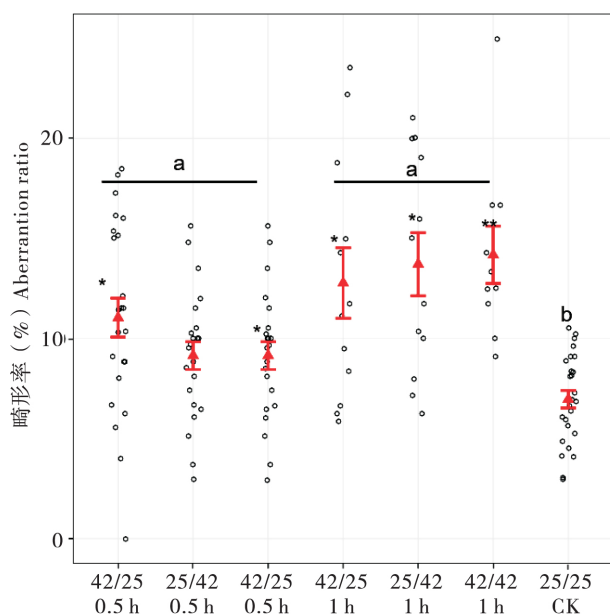


图4 不同处理组对子代畸形率的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on aberration rate of *Trichogramma dendrolimi* offsprings

2.6 短时极端高温对子代雌蜂寿命的影响

不同处理组对子代雌蜂寿命有显著影响
($\chi^2 = 25.516$, $df = 6$, $P < 0.001$)。高温处理后,
雌蜂寿命显著下降 ($z = -7.646$, $P < 0.001$)
(图5)。

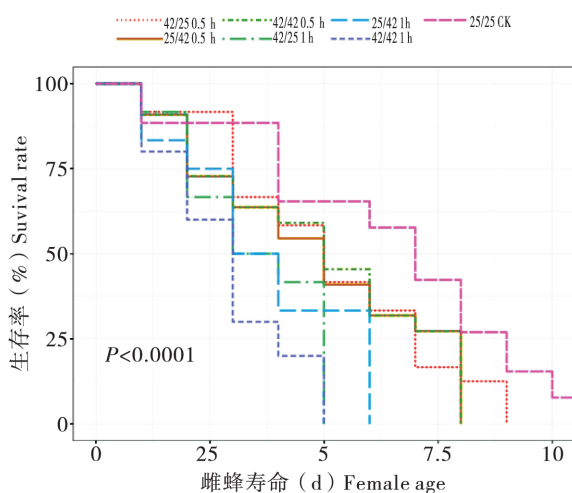


图5 不同处理组对子代雌蜂寿命的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on survivorship of *Trichogramma dendrolimi* adults

3 结论与讨论

短时高温对松毛虫赤眼蜂的负面影响主要表现为致死作用和非致死作用两种形式。在本试验中, 较长时间的高温处理会导致瞬时致死率和延迟致死率升高。这与大多数研究结果相符, 阳任峰 (2013) 发现, 随着短时高温处理时间的延长, 麦长管蚜 *Sitobion avenae* 死亡率上升。廖怀建 (2014) 探究了高温热激对稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的影响, 发现经历高温后的成虫所产卵的孵化率显著低于未经高温处理的成虫所产的卵。一般而言, 昆虫对其体温存在调节, 但当高温胁迫超过其体温调节能力范围后, 则表现出代谢紊乱, 各项生理指标失调, 主要表现为体内失水、细胞结构改变、体内酶失活等方面, 进而导致昆虫死亡 (杜尧等, 2007)。

本研究还发现短时高温下雄蜂的瞬时死亡率显著高于雌蜂。这与一些前人研究结果相符, 顾祥鹏 (2019) 发现瓜实蝇 *Bactrocera cucurbitae* 雌成虫对短时高温胁迫的耐受性稍强于雄成虫。朱绍光等 (2010) 探究短时高温对 Q 型烟粉虱 *Bemisia tabaci* 的影响时也得出相似结果。

研究还发现, 短时极端高温会降低松毛虫赤眼蜂的子代适合度。当高温处理不同性别的成蜂并以不同组合配对时, 对其子代适合度的影响不同。

对雌蜂而言, 高温处理雌蜂将导致其寿命缩短、繁殖力下降, 子代蜂畸形率增加。这与前人的大多数研究相符, Sorensen (2005) 和 Gruntenko (2003) 研究表明高温导致雌成虫停止分泌蜕皮激素和保幼激素, 进而阻碍了生殖细胞的成熟、抑制卵黄合成, 造成了繁殖力的降低。贾向风 (2014) 研究表明桃小食心虫 *Carposina niponensis* 雌成虫经历短时高温后, 其卵巢发育受到抑制, 卵巢管长度和卵巢鲜重下降, 进而造成产卵量与卵的孵化率显著下降。本研究推测, 高温导致赤眼蜂雌蜂生殖能力的衰退可能与生殖器官功能障碍有关, 尚需展开更深入的调查。高温处理雄蜂则导致子代蜂雄性比显著上升。一般认为, 赤眼蜂的性别由其胚胎染色体的倍性决定, 双倍体受精卵发育成雌性, 而未受精卵则发育为雄性 (潘雪红, 2007)。因此, 高温处理雄蜂可能导致雄蜂精子活力降低, 进而在交配时与雌蜂受精不

完全或精子功能发生障碍,进而导致子代雄性比升高。David (2005) 研究也发现极端高温会造成多种雄性果蝇 *Drosophila* spp. 不育。叶恭银 (2000) 和廖怀建 (2014) 研究均表明高温会造成雄虫精子生长受阻、活力减弱,精子数量明显下降。这些证据表明,精子活力降低导致子代卵受精不充分可能是子代雄性比例升高的原因,但这一假设仍需要更为深入的研究进行证明或证伪。

在中国以及世界的农作物种植区,夏季田间短时极端高温现象越来越普遍,本试验的研究结果表明短时极端高温将造成赤眼蜂死亡,适合度下降,进而影响其对鳞翅目害虫的防控效果。另一方面,短时极端高温在赤眼蜂的室内繁育、储藏、运输过程中也有可能发生,这种短时极端高温不仅会导致赤眼蜂死亡,也会导致赤眼蜂生殖功能发生障碍,导致雌蜂繁殖力下降,子代雄性比例升高,使赤眼蜂质量下降,进而影响其田间实际控害效果。本研究揭示了短时极端高温对赤眼蜂的潜在负面影响,研究结果将对温度影响下的赤眼蜂生产各环节的质量管控及其田间应用提供重要借鉴。

参考文献 (References)

- Chen KW, Zhou J, Gong J, *et al.* Effect of high temperature on laboratory *Trichogramma ostrinae* population [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (7): 1250–1253. 陈科伟, 周靖, 龚静, 等. 高温对玉米螟赤眼蜂实验种群的影响 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17 (7): 1250–1253]
- Chen LF, Shao DH, Duan JP, *et al.* Influence of temperature on insects [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science and Technology*, 2015, 41 (2): 57–61. 陈丽芳, 邵东华, 段景攀, 等. 温度对昆虫的影响 [J]. *内蒙古林业科技*, 2015, 41 (2): 57–61]
- David JR, Araripe LO, Chakir M, *et al.* Male sterility at extreme temperatures: A significant but neglected phenomenon for understanding *Drosophila* climatic adaptations [J]. *Journal of Evolutionary Biology*, 2005, 18: 838–846.
- Diehl E, Sereda E, Wolters V, *et al.* Effects of predator specialization, host plant and climate on biological control of aphids by natural enemies: A meta-analysis [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 50, 262–270.
- Du Y, Ma CS, Zhao QH, *et al.* Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanism of insects: A literature review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (4): 1565–1572. 杜尧, 马春森, 赵清华, 等. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展 [J]. *生态学报*, 2007, 27 (4): 1565–1572]
- Gilman SE, Urban MC, Tewksbury J, *et al.* A framework for community interactions under climate change [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010, 25, 325–331.
- Gruntenko N, Bownes M, Terashima J, *et al.* Heat stress affects oogenesis differently in wild-type *Drosophila virilis* and a mutant with altered juvenile hormone and 20-hydroxyecdysone levels [J]. *Insect Molecular Biology*, 2003, 12: 393–404.
- Gu XP, Huang YY, Zhang JY, *et al.* Effects of short-term high-temperature stress on growth, development and reproduction of melon fly [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2020, 42 (2): 391–399. 顾祥鹏, 黄禹禹, 张金永, 等. 短时高温胁迫对瓜实蝇生长发育及繁殖的影响 [J]. *环境昆虫学报*, 2020, 42 (2): 391–399]
- Guo JJ. The Effects of Temperature Stress to *Fupius arisanus* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. 郭俊杰. 温度胁迫对阿里山潜蝇茧蜂的影响 [D]. 福州: 福建农林大学, 2013]
- Hance T, Baaren J, Vornon P, *et al.* Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective [J]. *Annual Review of Entomology*, 2007, 52, 107–126.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jin HL, Chen Q, Jin QA, *et al.* Effects of heat stress on the development and fecundity of *Asecodes hispinarum* Boucek [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31 (4): 631–635. 金化亮, 陈青, 金后安, 等. 热胁迫对椰甲截脉姬小蜂生长发育和繁殖的影响 [J]. *热带作物学报*, 2010, 31 (4): 631–635]
- Jia XF, Wang HP. Fecundity and ovary development of peach fruit borer under short-term high temperature [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42 (6): 73–75. 贾向风, 王洪平. 短时高温处理桃小食心虫雌成虫的生殖力及卵巢发育 [J]. *贵州农业科学*, 2014, 42 (6): 73–75]
- Klockmann M, Günter F, Fischer K. Heat resistance throughout ontogeny: Body size constrains thermal tolerance [J]. *Global Change Biology*, 2017a, 23 (2): 686–696.
- Klockmann M, Kleinschmidt F, Fischer K. Carried over: Heat stress in the egg stage reduces subsequent performance in a butterfly [J]. *PLoS ONE*, 2017b, 12 (7): E0180968.
- Li Y, Dong H, Cong B, *et al.* Effect of temperature on reproductive potential and population parameters of different *Trichogramma dendrolimi* geographic populations [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2013, 29 (1): 11–16. 李莹, 董辉, 丛斌, 等. 温度对松毛虫赤眼蜂不同地理种群寄生潜能及种群参数的影响 [J]. *中国生物防治学报*, 2013, 29 (1): 11–16]
- Liao HJ. Effects of Heat Shock on Rice Leaf Folder *Cnaphalocrocis medinalis* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. 廖怀建. 高温热激对稻纵卷叶螟的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014]
- Liu XJ. Technology of controlling of *Pyrausta nubilalis* by *Trichogramma* [J]. *Xin Nongye*, 2018 (9): 13–14. 刘秀君. 赤眼蜂防治玉米螟技术 [J]. *新农业*, 2018 (9): 13–14]
- Ma G, Ma CS. The impacts of extreme high temperature on insect populations under climate change: A review [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2016, 46 (5): 556–564. 马罡, 马春森. 气候变化下极端高温对昆虫种群影响的研究进展 [J]. *中国科学: 生命科学*

- 学, 2016, 46 (5): 556–564]
- Meng Q, Meng L, Li BP. Effects of short-term heat stress on developmental parameters of *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (8): 2838–2843. 孟倩, 孟玲, 李保平. 短时高温胁迫对斑痣悬茧蜂发育指标的影响 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (8): 2838–2843]
- Pan F, Chen MC, Xiao TB, et al. Research advances on effect of variable temperature on growth, development and reproduction of insect [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2014, 36 (2): 240–246. 潘飞, 陈绵才, 肖彤斌, 等. 变温对昆虫生长发育和繁殖影响的研究进展 [J]. *环境昆虫学报*, 2014, 36 (2): 240–246]
- Pan XH, Chen KW, Lv YQ, et al. Sex determination and physiological effect induced by *Wolbachia* on *Trichogramma* wasps [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2007 (1): 32–36. 潘雪红, 陈科伟, 吕燕青, 等. *Wolbachia* 对赤眼蜂的性别调控机制及生理影响 [J]. *昆虫知识*, 2007 (1): 32–36]
- Potter KA, Davidowitz G, Arthur WH. Cross-stage consequences of egg temperature in the insect *Manduca sexta* [J]. *Functional Ecology*, 2011, 25 (3): 548–556.
- Qu ZC, Zhao KJ, Zhang SQ, et al. Effects of heat stress on the growth behavior of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010 (12): 77–79. 曲忠诚, 赵奎军, 张树权, 等. 高温胁迫对松毛虫赤眼蜂生长发育的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2010 (12): 77–79]
- Smith SM. Biological control with *Trichogramma*: Advances, successes, and potential of Their Use [J]. *Annual Review of Entomology*, 1996, 41 (1): 375–406.
- Sorensen JG, Nielsen MM, Kruhff M, et al. Full genome gene expression analysis of the heat stress response in *Drosophila melanogaster* [J]. *Cell Stress & Chaperones*, 2005, 10: 312.
- Stireman JO, Dyer LA, Janzen DH, et al. Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2005, 48, 17384–17387.
- Taschetto AS, England MH. An analysis of late twentieth century trends in Australian rainfall. [J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29, 791–807.
- Thomson LJ, Macfadyen S, Hoffmann AA. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pest [J]. *Biological Control*, 2010, 52 (3): 296–306.
- Tian JC, Wang ZC, Wang GR, et al. The Effects of temperature and host age on the fecundity of four *Trichogramma* Species, egg parasitoids of the *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2017, 110 (3): 949–953.
- Wu J. Effects of Heat Stress on the Growth and Parasitic Behavior of *Trichogramma chilonis* Ishii [D]. Shihezi: Shihezi University, 2008. 吴静. 高温胁迫对螟黄赤眼蜂生长发育及寄生行为的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2008]
- Wu LL. The Factory Production of *Trichogramma Dendrolimi* and Technology Research of Field Application [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2014. 武琳琳. 松毛虫赤眼蜂工厂化生产及田间应用技术研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014]
- Ye GY, Hu C, Gong H. Impact of high temperature on testicular growth and development of valuable silkworm *Antheraea yamamai* (Lepidoptera: Saturniidae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (3): 490–494. 叶恭银, 胡萃, 龚和. 高温对珍贵绢丝昆虫-天蚕卵巢生长发育的影响 [J]. *生态学报*, 2000, 20 (3): 490–494]
- Yang RF. Study on the Lethal Effect of *Sitobion avenae* (Fabricius) by High-Temperature-Short-Time [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013. 阳任峰. 短时间高温对麦长管蚜致死效应的研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2013]
- Zhang GH, Lu X, Zhou SX, et al. Comparative experiment on control of second generation *Pyrausta nubilalis* by *Trichogramma* [J]. *Xiandai Nongcun Keji*, 2014, 23: 50–52. 张国红, 鲁新, 周淑香, 等. 赤眼蜂防治二代玉米螟对比试验研究 [J]. *现代农村科技*, 2014, 23: 50–52]
- Zhang GX, Jia YF, Wen Y, et al. Behavioral rhythms of three Lepidopteran pests; *Mythimna separata*, *Agrotis ypsdon* and *Helicoverpa armiger* [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2017, 54 (2): 190–197. 张行国, 贾艺凡, 温洋, 等. 粘虫、小地老虎和棉铃虫三种鳞翅目害虫上灯行为节律研究 [J]. *应用昆虫学报*, 2017, 54 (2): 190–197]
- Zhang JJ, Ruan CC, Zang LS, et al. Technological improvements for mass production of *Trichogramma* and current status of their applications for biological control on agricultural pests in China [J]. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31 (5): 638–646. 张俊杰, 阮长春, 臧连生, 等. 我国赤眼蜂工厂化繁育技术改进及防治农业害虫应用现状 [J]. *中国生物防治学报*, 2015, 31 (5): 638–646]
- Zhang W, Zhao F, Homann AA, et al. A single hot event that does not affect survival but decreases reproduction in the diamondback moth, *Plutella xylostella* [J]. *PLoS ONE*, 2013, 8 (10), e75923.
- Zhao PW. Sex Pheromone Monitoring of Main Maize Pest and the Resistance of Maize Varieties to Insect Pests [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. 赵培伟. 玉米主要害虫的性诱剂监测和玉米品种的抗虫性研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2015]
- Zhou JC, Liu QQ, Han YQ, Dong, H. High temperature tolerance and thermal-adaptability plasticity of Asian corn borer (*Ostrinia furnacalis* Guenée) after a single extreme heat wave at the egg stage [J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2018, 21 (3): 1040–1047.
- Zhu SG, Li ZH, Wan FH. Effects of brief exposure to high temperature on survival and reproductive adaptation of *Bemisia tabaci* Q-biotype [J]. *Chinese Bulletin of Entomology*, 2010, 47 (6): 1141–1144. 朱绍光, 李照会, 万方浩. 短时高温暴露对Q型烟粉虱存活和生殖适应性的影响 [J]. *昆虫知识*, 2010, 47 (6): 1141–1144]
- Zhu WY, Lian ML, Li T, et al. Effect of temperature and humidity on the growth and reproduction of *Trichogramma dendrolimi* [J]. *China Plant Protection*, 2016, 36 (1): 16–19. 朱文雅, 连梅力, 李唐, 等. 温湿度对松毛虫赤眼蜂生长发育和生殖力的影响 [J]. *中国植保导刊*, 2016, 36 (1): 16–19]