

高温对松毛虫赤眼蜂发育和寄生能力的影响

熊 博¹ 李卓峻¹ 唐润轩¹ 刘小侠¹ 毛 刚² 李 贞^{1*}

(1. 中国农业大学植物保护学院昆虫学系, 北京 100193; 2. 公主岭吉农绿色农业高新科技发展有限公司, 公主岭 136100)

摘要: 为明确高温对松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 发育和寄生能力的影响, 采用生物学观察法在室内监测米蛾 *Corcyra cephalonica* 卵内不同发育时期的松毛虫赤眼蜂在经历高温 40℃ 处理 1 h 或 35℃ 处理 6 h 后其当代和子代蜂的世代历期、羽化率、寄生率和雌蜂率并进行分析。结果表明, 高温 40℃ 处理 1 h 有利于松毛虫赤眼蜂的发育, 于幼虫期处理后其当代蜂世代历期明显缩短, 于胚胎期和蛹期处理后其当代成蜂羽化率显著提高; 然而, 高温 35℃ 处理 6 h 对松毛虫赤眼蜂的发育和寄生能力具有显著的负面影响, 各发育时期经历高温处理后当代成蜂羽化率均显著降低, 幼虫期经历高温处理后其当代成蜂的雌蜂率、寄生率和子代成蜂的羽化率均显著降低。表明高温对松毛虫赤眼蜂具有显著影响, 繁育时适当优化温度可以提高扩繁效率, 但运输和释放时应避免高温暴晒以降低防控效率损失。

关键词: 卵寄生蜂; 温度胁迫; 发育繁殖; 控害能力; 生物防治

Impacts of high temperature on the development and parasitic capacity of pine caterpillar miunte egg parasite *Trichogramma dendrolimi*

Xiong Bo¹ Li Zhuojun¹ Tang Runxuan¹ Liu Xiaoxia¹ Mao Gang² Li Zhen^{1*}

(1. Department of Entomology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Gongzhuling Jinong Hi-tech Co., Ltd., Gongzhuling 136100, Jilin Province, China)

Abstract: To elucidate the impact of high temperature on the development and parasitic capacity of pine caterpillar miunte egg parasite *Trichogramma dendrolimi*, biological investigation was conducted to record the generation duration, emergence rate, parasitism rate and female rate of the treated generation and the offspring of *T. dendrolimi* after thermal treatment at 40℃ for 1 h and at 35℃ for 6 h. The results showed that high-temperature treatment at 40℃ for 1 h was beneficial to the development of *T. dendrolimi*. When *T. dendrolimi* was treated at larval stage, the generation duration of the treated wasps was shortened, and its adult emergence was increased when treated at embryo and pupal stages. However, high-temperature treatment at 35℃ for 6 h imposed significantly negative impacts on the development and parasitic capacity of *T. dendrolimi*. The adult emergence of the treated generation was notably lowered regardless of the developmental stages that were treated; the female rate and the parasitic capacity of the treated wasps and the emergence rate of the offspring were all significantly decreased when treated at the larval stage. The results indicated that high temperature had obvious impacts on *T. dendrolimi*. An optimized thermal treatment helps to enhance the efficacy of artificial rearing, and avoidance of high heat and solar exposure during transportation and release would prevent the loss of control efficacy.

Key words: egg parasitoid wasp; thermal stress; development and reproduction; pest control capacity; biological control

基金项目: 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系(CARS-28), 国家重点研发计划(2017YFD0201000)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: lizhencau@cau.edu.cn

收稿日期: 2020-07-24

人类活动造成大量温室气体排放,导致全球气候变暖。气候变暖不仅表现为平均气温的升高,还可能导致局部地区极端温度事件更加频繁出现,对动植物的生长造成不利影响(Karl & Trenbeth, 2003)。昆虫作为一种变温动物,其生理状态、生长发育、行为活动和生态适应性都与环境温度密切相关(Angilletta et al., 2002; Hance et al., 2007)。在适宜温度范围内,昆虫的发育繁殖水平均处于最佳状态,并随着环境温度的升高表现出发育速度加快、繁殖能力增强的趋势(杜尧等, 2007);而适温区以外的温度胁迫会改变昆虫体内的生理代谢、物质组成、激素水平和体内微生态条件等,进而对昆虫的发育历期、性比、交配繁殖、存活状况和种群分布等生物学特征与生态适应性造成显著负面影响(陈兵和康乐, 2005; Bennett & Moran, 2015; 史彩华等, 2017)。

气温变化对害虫发生的影响是虫情测报和虫害防控的重要依据,目前关于环境温度对天敌昆虫影响的研究主要服务于保育和工厂化生产,因此天敌生产的最适温度和储藏低温备受关注,而关于气候变暖导致的高温胁迫对天敌昆虫发育及控害能力影响的报道却很少(张俊杰等, 2018)。已有研究发现, 36℃持续 1 h 的短时高温处理会导致燕麦蚜茧蜂 *Aphidius avenae* 雌蜂寿命延长、死亡率下降,而雄蜂寿命缩短、死亡率提高的性别差异性影响(Roux et al., 2010); 39℃持续 4 h 的高温胁迫处理会导致斑痣悬茧蜂 *Meteorus pulchricornis* 幼虫存活率下降、发育历期延长,而且寄生蜂高龄幼虫对高温胁迫的敏感性显著高于低龄幼虫(孟倩等, 2017);每周 4 次及以上频率的 42℃高温会显著降低海氏桨角蚜小蜂 *Eretmocerus hayati* 的寿命、繁殖力和捕食能力,进而大大降低其控害效果(Zhang et al., 2019)。由此可见,掌握高温胁迫对天敌昆虫发育和控害能力的影响,对于在全球变暖条件下适时科学释放天敌、提高害虫生物防控效果具有重要的指导意义。

松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi* 是目前我国工厂化生产水平最高、应用范围最广的一种卵寄生蜂,该蜂寄主广泛,主要寄生鳞翅目夜蛾科、枯叶蛾科、卷叶蛾科、灯蛾科、天蚕蛾科、螟蛾科、刺蛾科、舟蛾科、尺蛾科和弄蝶科等昆虫,广泛应用于农林生产中的害虫防控(吴广范, 2014),对为害隐蔽的钻蛀性害虫玉米螟、水稻螟虫和果树食心虫的防控具有重要作用(罗成等, 2001; 许建军等, 2014; 许燎原等, 2016)。目前,松毛虫赤眼蜂在田间的释放主要通过设置松毛虫赤眼蜂已寄生的米蛾 *C. cepha-*

lonica 或柞蚕 *Antheraea pernyi* 卵卡,运输和释放过程中松毛虫赤眼蜂仍然处于发育状态。室内观测结果表明,松毛虫赤眼蜂发育的适宜温度范围为 22~28℃,相对湿度大于 50%(朱文雅等, 2016);在柞蚕卵中发育至蛹后期的松毛虫赤眼蜂对高温环境较敏感,经历 35℃持续 6 h 和 40℃持续 6 h 的高温处理后其成蜂羽化率和单卵出蜂数均显著降低,40℃高温处理 6 h 后几乎不能继续发育和羽化(耿金虎等, 2005; 曲忠诚等, 2010)。目前,还未见关于米蛾卵中松毛虫赤眼蜂的热胁迫反应和其各发育时期对高温的敏感性以及热胁迫处理对子代效应的相关报道,松毛虫赤眼蜂产品在运输和田间释放过程中经历高温环境是否会对其发育和控害能力造成影响也尚不清楚。

本研究采用米蛾卵作为松毛虫赤眼蜂寄主,通过设置田间可能出现的高温条件(40℃持续 1 h 和 35℃持续 6 h)分别处理在米蛾卵中处于胚胎期、幼虫期和蛹期的松毛虫赤眼蜂,并在处理后持续监测当代和子代蜂的发育及寄生能力,分析高温环境对松毛虫发育和控害能力的影响,以期为田间适时科学释放松毛虫赤眼蜂进行害虫防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试昆虫:米蛾引种于吉林农业大学生物防控研究所,参考黄文功等(2017)方法在人工气候箱中用人工饲料饲养数代,取新鲜的 2 日龄米蛾卵粘在贴有双面胶的打印纸上,制成 3 cm×3 cm 的米蛾卵卡,每张卡上约 30 粒卵,并在 30 W 紫外灯正下方 15 cm 处照射杀胚 60 min,即得供试卵卡。松毛虫赤眼蜂蜂种由公主岭吉农绿色农业高新技术发展有限公司提供,用米蛾卵卡在人工气候箱内繁殖多代后供试。昆虫饲养条件均为温度(25±1)℃、相对湿度(70±5)%、光周期 15 L:9 D。

蜂蜜和仪器:蜂蜜购自当地超市。PRX-1000L 人工气候箱,宁波海曙赛福实验仪器厂;SZ680T2L 连续变倍体视显微镜,重庆奥特光学仪器有限责任公司。

1.2 方法

1.2.1 松毛虫赤眼蜂的寄生和发育阶段界定

为获得试验所需松毛虫赤眼蜂,将制备好的米蛾卵卡单张放置于直径为 9 cm 的培养皿中,接入 10 头羽化 24 h 内且充分交配的松毛虫赤眼蜂雌蜂,放置在温度(25±1)℃、相对湿度(70±5)%、光周期 15 L:

9 D的人工气候箱中寄生处理 12 h。之后于相同处理条件下继续饲养,将寄生完成后的 12、48 和 144 h 分别鉴别为松毛虫赤眼蜂发育至胚胎期、幼虫期以及蛹期(王雷英等,2015)。

1.2.2 高温处理对松毛虫赤眼蜂发育的影响测定

将孕育着胚胎期、幼虫期以及蛹期松毛虫赤眼蜂的米蛾卵卡放入直径为 9 cm 的培养皿中,然后分别置于人工气候箱中在 40℃ 下持续处理 1 h 或在 35℃ 下持续处理 6 h。将处理后的松毛虫赤眼蜂转移至温度 (25±1)℃、相对湿度 (70±5)%、光周期 15 L:9 D 条件下继续饲养,将高温处理的当代赤眼蜂个体记为 G₀ 代。以全程在正常饲养条件下发育的松毛虫赤眼蜂作为对照组,1 个卵卡为 1 个重复,每个处理重复 5 次。于寄生处理后第 9 天开始逐日观察记录对照组与 6 个不同高温处理组 G₀ 代松毛虫赤眼蜂的成蜂羽化数、雌蜂数和世代历期(从寄生到成蜂羽化),直至寄生处理后 15 d 左右羽化成蜂完全死亡则停止观察记录。

1.2.3 高温处理对松毛虫赤眼蜂寄生能力的影响测定

为进一步分析高温胁迫对松毛虫赤眼蜂寄生能力的影响,取羽化 12 h 内且充分交配的 G₀ 代松毛虫赤眼蜂雌蜂单头于直径为 9 cm 的培养皿中饲养,用脱脂棉蘸取 10% 蜂蜜水作为营养补给,每皿提供 1 张 2 日龄的米蛾卵卡,置于温度 (25±1)℃、相对湿度 (70±5)%、光周期 15 L:9 D 的人工气候箱中饲养;每日更换卵卡,连续更换 3 日;每张卵卡于寄生处理后第 9 天开始每日观察记录 G₀ 代松毛虫赤眼蜂羽化

前后 3 d 的日寄生率,同时统计 3 d 内的累计寄生率(被寄生卵的总数除以所提供寄主卵的总数);持续观察 G₁ 代松毛虫赤眼蜂的羽化数、雌蜂数和世代历期,直至 G₁ 代羽化成蜂全部死亡。以在 25℃ 下发育并羽化的松毛虫赤眼蜂雌蜂作为对照组,1 头雌蜂为 1 个重复,每个处理重复 10 次。

1.3 数据分析

试验数据采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析。高温处理不同虫态后松毛虫赤眼蜂的世代历期、羽化率、雌蜂率和寄生率均进行单因素方差分析,方差齐的数据采用 Tukey 法进行差异显著性检验,方差不齐的数据采用 Games-Howell 法进行差异显著性检验,采用反正弦函数对不符合正态分布的羽化率和雌蜂率进行数据转换。

2 结果与分析

2.1 40℃ 处理 1 h 后松毛虫赤眼蜂的发育与寄生能力

松毛虫赤眼蜂于幼虫期经历 40℃ 高温处理 1 h 后,其 G₀ 代世代历期为 8.3 d,比对照的 8.9 d 显著缩短 ($F=6.833, df=3, 4, P<0.05$),而该蜂于胚胎期和蛹期经历 40℃ 高温处理 1 h 后 G₀ 代世代历期与对照无显著差异(图 1-A)。松毛虫赤眼蜂于胚胎期和蛹期经历 40℃ 高温处理 1 h 后的成蜂羽化率分别为 86.5% 和 84.0%,比对照的羽化率 69.0% 显著增加 ($F=4.648, df=3, 4, P<0.05$),而各处理的雌蜂率与对照组之间均无显著差异 ($F=0.417, df=3, 4, P=0.743$) (图 1-B)。

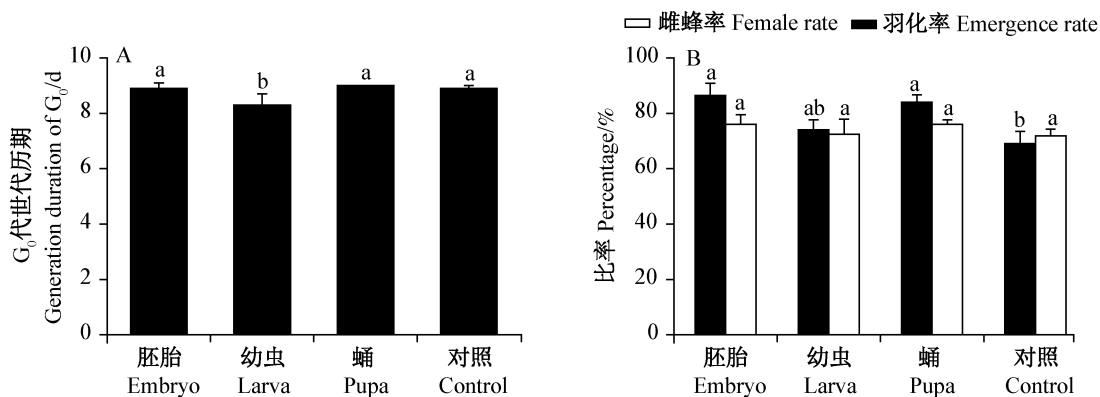


图 1 不同发育时期松毛虫赤眼蜂经历 40℃ 高温处理 1 h 后的 G₀ 代世代历期(A)、羽化率和雌蜂率(B)

Fig. 1 Generation duration (A), emergence and female rate (B) of *Trichogramma dendrolimi* G₀ generation after treated at 40℃ for one hour at different developmental stages

图中数据为平均数±标准误。同色柱上不同字母表示经 Tukey 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters on the same color bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by Tukey test.

松毛虫赤眼蜂的日寄生率随羽化天数的增加表现为逐渐下降的趋势,但在不同发育时期经历 40℃

高温处理 1 h 后 G₀ 代成蜂羽化后前 3 d 的日寄生率 ($F_{第1天}=0.465, df_{第1天}=3, 9, P_{第1天}=0.708; F_{第2天}=0.976,$

$df_{\text{第2天}}=3, 9, P_{\text{第2天}}=0.413$; $F_{\text{第3天}}=2.797, df_{\text{第3天}}=3, 9, P_{\text{第3天}}=0.051$)(图2-A)和累计寄生率($F=0.987, df=3, 9, P=0.408$)及其 G_1 代成蜂的羽化率($F=2.571, df=3, 9,$

$P=0.066$)和雌蜂率($F=1.899, df=3, 9, P=0.144$)均无显著差异(图2-B)。

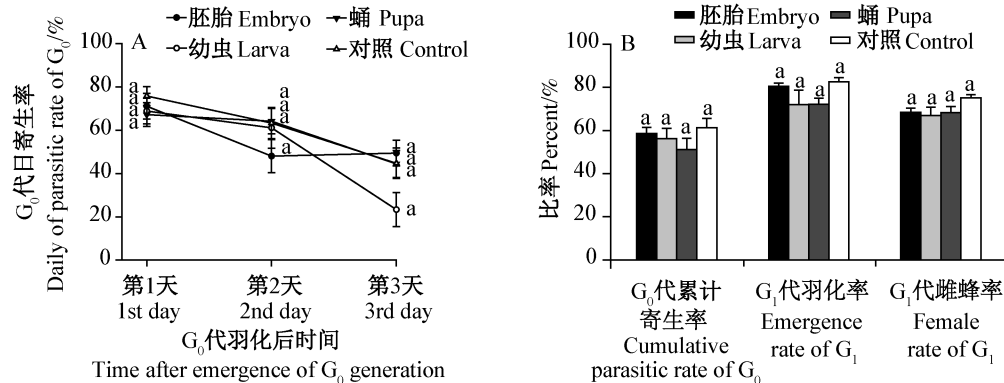


图2 不同发育时期松毛虫赤眼蜂经历40℃高温处理1 h后的日寄生率(A)和累计寄生率、羽化率及雌蜂率(B)

Fig. 2 Daily parasitic rate (A) and cumulative parasitic rate, emergence and female rate (B) of *Trichogramma dendrolimi* after treated at 40°C for one hour at different developmental stages

图中数据为平均数±标准误。不同小写字母表示经Tukey法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different letters on the same color bars indicate significant difference at $P<0.05$ level by Tukey test.

2.2 35℃处理6 h后松毛虫赤眼蜂的发育与寄生能力

松毛虫赤眼蜂于胚胎期、幼虫期和蛹期经历35℃高温处理6 h后 G_0 代世代历期分别为7.9、7.6和7.73 d,均显著短于对照的8.9 d($F=7.299, df=3, 4, P<0.003$),但不同发育时期处理之间无显著差异(图3-A)。胚胎期、幼虫期和蛹期松毛虫赤眼蜂经

历35℃高温处理6 h后其 G_0 代成蜂羽化率分别为33.4%、34.4%和37.1%,均显著低于对照的羽化率69.0%($F=13.131, df=3, 4, P<0.05$),但仅幼虫期经历35℃高温处理6 h后雌蜂率降低为43.6%,显著低于对照的77.8%($F=4.735, df=3, 4, P<0.05$),其他2个处理与对照均无显著差异(图3-B)。

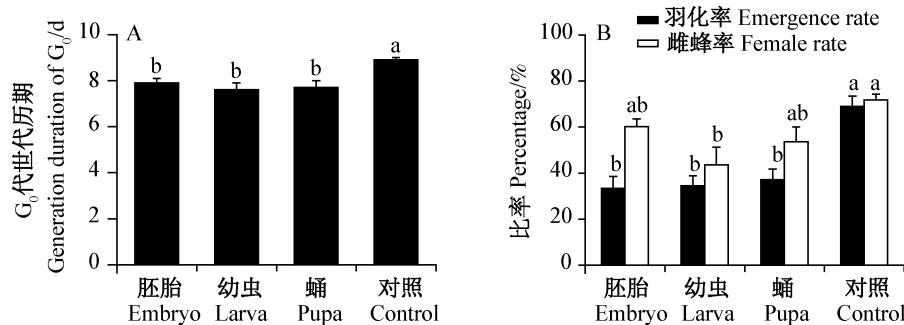


图3 不同发育时期松毛虫赤眼蜂经历35℃高温处理6 h后的 G_0 代世代历期(A)、羽化率和雌蜂率(B)

Fig. 3 Generation duration (A), emergence and female rate (B) of *Trichogramma dendrolimi* G_0 generation after treated at 35°C for six hours at different developmental stages

图中数据为平均数±标准误。世代历期和羽化率标注的不同小写字母表示经Tukey法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著,雌蜂率标注的不同小写字母表示经Games-Howell法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. Different lowercase letters in the generation duration and emergence rate indicate significant difference at $P<0.05$ level by Tukey test, and different lowercase letters in female rate indicate significant difference at $P<0.05$ level by Games-Howell test.

经35℃高温处理6 h后,随着羽化天数的增加松毛虫赤眼蜂的日寄生率表现出逐渐下降的趋势,并以幼虫期经历高温处理后其 G_0 代成蜂日寄生率降低幅度最大。 G_0 代成蜂羽化后第1天,胚胎期高温处理后的成蜂日寄生率为56.7%,显著低于幼虫

期处理的83.7%($F=4.956, df=3, 9, P<0.05$); G_0 代成蜂羽化后第2天,胚胎期高温处理后的成蜂日寄生率为31.3%,显著低于对照的63.7%($F=3.533, df=3, 9, P<0.05$); G_0 代成蜂羽化后第3天,幼虫期高温处理后的成蜂日寄生率为16.3%,显著低于对照的44.7%

($F=4.008$, $df=3, 9$, $P<0.05$); 而其他各处理与对照之间的日寄生率均无显著差异(图4-A)。

松毛虫赤眼蜂于幼虫期经35℃高温处理6 h后, G_0 代成蜂羽化后前3 d的累计寄生率及其 G_1 代成蜂的羽化率分别为16.3%和26.1%, 显著低于对照的44.7%和64.9% ($F_{\text{累计寄生率}}=4.057$, $df_{\text{累计寄生率}}=3, 9$,

$P_{\text{累计寄生率}}<0.05$; $F_{\text{羽化率}}=14.386$, $df_{\text{羽化率}}=3, 9$, $P_{\text{羽化率}}<0.05$), 其他发育时期经35℃高温处理6 h后, G_0 代成蜂羽化后前3 d的累计寄生率和 G_1 代成蜂的羽化率均与对照无显著差异; 而 G_1 代成蜂的雌蜂率在各处理间也均无显著差异($F=2.153$, $df=3, 9$, $P=0.111$) (图4-B)。

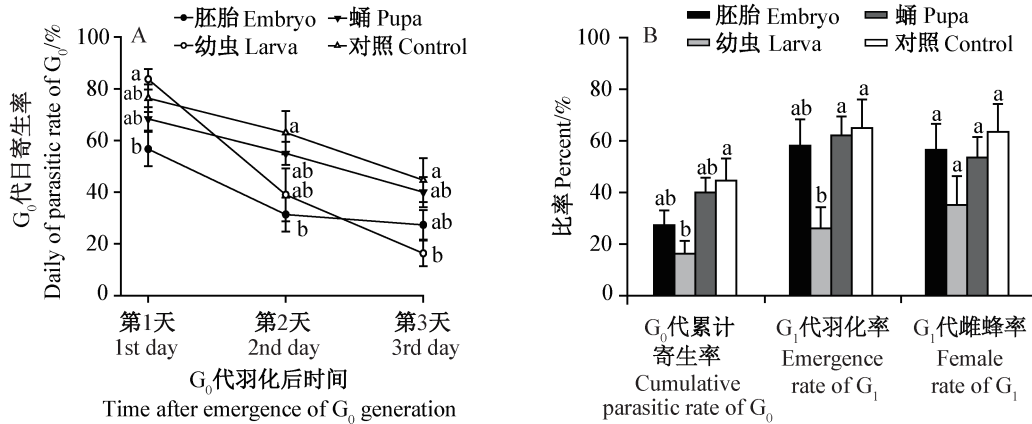


图4 不同发育时期松毛虫赤眼蜂经历35℃高温处理6 h后的单日寄生率(A)和累计寄生率、羽化率及雌蜂率(B)

Fig. 4 Daily parasitic rate (A) and cumulative parasitic rate, emergence and female rate (B) of *Trichogramma dendrolimi* after treated at 35℃ for six hours at different developmental stages

图中数据为平均数±标准误。 G_0 代成蜂羽化后第2天的日寄生率标注的不同小写字母表示经 Games-Howell 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著, 其他不同小写字母表示经 Tukey 法检验在 $P<0.05$ 水平差异显著。Data are mean±SE. The parasitic rates marked with different lowercase letters in G_0 generation of *Trichogramma dendrolimi* on the 2nd day after emergence indicate significant difference at $P<0.05$ level by Games-Howell test, and other different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ level by Tukey test.

3 讨论

全球气候变化导致害虫的发生、分布和为害模式均出现了变化, 这为当前气候条件下的植保工作提出了新的挑战。随着食品健康、农业可持续发展以及生态文明等理念逐渐深入人心, 生物防控技术的应用越来越受到重视。因此, 解析全球变暖和极端高温天气频发对天敌昆虫发育繁殖、寄生能力及其与害虫之间互作关系的影响对于开展科学有效的农林害虫防控具有重要意义 (Hance et al., 2007; 史彩华等, 2017)。本研究结果表明, 广泛应用于农林害虫防控的松毛虫赤眼蜂在经历高温后的表现与高温水平及其持续时间和松毛虫赤眼蜂所处发育时期均密切相关; 40℃处理1 h的短时高温有利于松毛虫赤眼蜂的发育, 幼虫期高温处理后其 G_0 代蜂世代历期显著缩短, 胚胎期和蛹期高温处理后其 G_0 代成蜂羽化率显著提高; 虽然各发育时期松毛虫赤眼蜂经历35℃持续处理6 h后 G_0 代蜂世代历期均显著缩短, 但此高温处理对松毛虫赤眼蜂发育和寄生能力

造成的负面影响更显著, 松毛虫赤眼蜂于发育时期经历高温处理后其 G_0 代成蜂羽化率均显著降低, 幼虫期经历高温处理后其 G_0 代成蜂的雌蜂率、寄生率和 G_1 代成蜂的羽化率均显著降低。

本研究发现, 经历40℃持续1 h和35℃持续6 h的高温处理后, 松毛虫赤眼蜂 G_0 代蜂的世代历期均有缩短的趋势。该结果与斑痣悬茧蜂经历39℃持续4 h高温胁迫处理后发育历期延长的表现正好相反 (孟倩等, 2017)。这种相反的表现可能与高温处理条件有所差异及不同蜂种在应对高温胁迫时采取的策略不同有关。40℃处理1 h和35℃处理6 h可能是松毛虫赤眼蜂可以耐受的极端温度条件, 这2个温度条件处理对松毛虫赤眼蜂造成的损伤也可能低于39℃持续4 h的高温胁迫; 松毛虫赤眼蜂在应对高温胁迫后采取了加快发育速度的策略, 以减少发育过程中遭受高温冲击的频次, 通过缩短发育时间尽快进入成熟期以保持种群在高温胁迫条件下的繁衍能力。然而, 发育速度的加快是需要付出代价的 (Hance et al., 2007; Roux et al., 2010), 虽然35℃持

续6 h的高温处理后松毛虫赤眼蜂的发育历期缩短了,但其羽化率显著降低,幼虫期高温处理后的 G_0 代成蜂寄生率及 G_1 代蜂羽化率也显著降低。

本研究结果显示,松毛虫赤眼蜂幼虫期对高温胁迫更加敏感,而耿金虎等(2005)和曲忠诚等(2010)研究发现松毛虫赤眼蜂蛹后期阶段对高温胁迫更加敏感。上述3个研究都采用了35℃持续6 h的高温处理条件,不同之处在于本研究中松毛虫赤眼蜂的寄主是个头很小、卵壳相对柔软的米蛾卵,而另外2个研究都采用个头较大、卵壳坚硬的柞蚕卵作为寄主。寄主卵壳的质地、卵内物质组成与含量的差异可能是导致不同寄主卵内寄生蜂各发育时期对高温敏感性差异的重要原因;另外,本研究设置了松毛虫赤眼蜂胚胎期、幼虫期和蛹期3个不同虫态的高温处理,而耿金虎等(2005)和曲忠诚等(2010)都仅设置了蛹中期和蛹后期2个蛹发育时期的高温处理,因此从这2个报道中无法获悉柞蚕卵中松毛虫赤眼蜂幼虫期对高温胁迫的敏感性。

本研究发现,40℃持续1 h的高温胁迫有利于松毛虫赤眼蜂的发育,于幼虫期经历高温处理后其 G_0 代蜂世代历期显著缩短,于胚胎期和蛹期经历高温处理后其 G_0 代成蜂羽化率显著提高,表明一定条件下的短时极端高温胁迫有利于在更短的时间内获得更多数量的松毛虫赤眼蜂成蜂。因此,在松毛虫赤眼蜂人工生产过程中可以适当增加特定发育时期的短时高温处理,以进一步优化生产技术,提高扩繁效率。与此同时,本研究还发现米蛾卵中各发育时期的松毛虫赤眼蜂在经历35℃持续6 h的高温处理后其 G_0 代成蜂羽化率均显著降低,幼虫期经历此高温胁迫后其 G_0 代成蜂的雌蜂率、寄生率和 G_1 代蜂羽化率均显著降低。该研究结果进一步证实了夏季田间的持续高温确实对松毛虫赤眼蜂的释放工作产生了显著的负面影响。因此,在运输松毛虫赤眼蜂产品时要注意保持环境温度,避免高温暴晒。田间放蜂时,要估算好寄主卵内松毛虫赤眼蜂的发育时间,尽量释放完成发育即将羽化的蜂卡;应避免在高温天气放蜂,可以选择凉爽的傍晚放蜂,蜂卡最好设置在田间、果园的背阴处或叶背面,为寄主卵内赤眼蜂后期的发育创造适宜的温度条件,以减少环境高温造成的出蜂损失。

田间的高温冲击可能是多频次的,每次的持续时间也有可能不同,后续关于高温冲击幅度和频率对松毛虫赤眼蜂发育和寄生能力的影响尚待进一步研究。另外,松毛虫赤眼蜂成蜂阶段遭受高温冲击

后是否会影响其搜索、定位寄主和寄生效率,以及相关的生态学与分子生物学机制等也有待进一步分析探索。

参考文献 (References)

- Angilletta MJ Jr., Niewiarowski PH Jr., Navas CA Jr. 2002. The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal of Thermal Biology*, 27(4): 249–268
- Bennett GM, Moran NA. 2015. Heritable symbiosis: the advantages and perils of an evolutionary rabbit hole. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(33): 10169–10176
- Chen B, Kang L. 2005. Adaptation and population differentiation of insects under environment thermal stress. *Progress in Natural Science*, 15(3): 265–271 (in Chinese) [陈兵, 康乐. 2005. 昆虫对环境温度胁迫的适应与种群分化. *自然科学进展*, 15(3): 265–271]
- Du Y, Ma CS, Zhao QH, Ma G, Yang HP. 2007. Effects of heat stress on physiological and biochemical mechanisms of insects: a literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 27(4): 1565–1572 (in Chinese) [杜尧, 马春森, 赵清华, 马罡, 杨和平. 2007. 高温对昆虫影响的生理生化作用机理研究进展. *生态学报*, 27(4): 1565–1572]
- Geng JH, Shen ZR, Li ZX, Zhang F. 2005. Effects of high temperature shocks on *Trichogramma dendrolimi* reared on *Antheraea pernyi* eggs. *Chinese Journal of Biological Control*, 21(4): 222–226 (in Chinese) [耿金虎, 沈佐锐, 李正西, 张帆. 2005. 高温冲击对柞蚕卵繁殖赤眼蜂的影响. *中国生物防治*, 21(4): 222–226]
- Hance T, van Baaren J, Vernon P, Boivin G. 2007. Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective. *Annual Review of Entomology*, 52(1): 107–126
- Huang WG, Zhang SQ, Liu Y, Chen S, Yao YB, Ren CY, Yuan XH. 2017. Selection of the artificial diets of *Corcyra cephalonica*. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (4): 41–43 (in Chinese) [黄文功, 张树权, 刘岩, 陈思, 姚玉波, 任传英, 原晓华. 2017. 米蛾人工饲料配方筛选. *黑龙江农业科学*, (4): 41–43]
- Karl TR, Trenberth KE. 2003. Modern global climate change. *Science*, 302(5651): 1719–1723
- Luo C, Wang SQ, Wu JW, Zhang ZL, Zhang JM. 2001. The ability of different strains of *Trichogramma* for biological control of *Ostrinia furnacalis* (Guenée). *Journal of Plant Protection*, 28(4): 377–378 (in Chinese) [罗晨, 王素琴, 吴钜文, 张芝利, 张君明. 2001. 不同地理种群赤眼蜂对亚洲玉米螟的控制潜能. *植物保护学报*, 28(4): 377–378]
- Meng Q, Meng L, Li BP. 2017. Effects of short-term heat stress on developmental parameters of *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae). *Acta Ecologica Sinica*, 37(8): 2838–2843 (in Chinese) [孟倩, 孟玲, 李保平. 2017. 短时高温胁迫对斑痣悬茧蜂发育指标的影响. *生态学报*, 37(8): 2838–2843]
- Qu ZC, Zhao KJ, Zhang SQ, Liang H, Zhao X, Han DW, Chi L, Yang

- Y, Xu J. 2010. Effects of heat stress on the growth behavior of *Trichogramma dendrolimi* Matsumura. Heilongjiang Agricultural Sciences, (12): 77–79 (in Chinese) [曲忠诚, 赵奎军, 张树权, 梁虹, 赵曦, 韩冬伟, 迟莉, 杨莹, 许健. 2010. 高温胁迫对松毛虫赤眼蜂生长发育的影响. 黑龙江农业科学, (12): 77–79]
- Roux O, Le Lann C, van Alphen JJM, van Baaren J. 2010. How does heat shock affect the life history traits of adults and progeny of the aphid parasitoid *Aphidius avenae* (Hymenoptera: Aphididae)? Bulletin of Entomological Research, 100(5): 543–549
- Shi CH, Hu JR, Zhang YJ. 2017. Effects of heat stress on insect reproduction-physiology and outlook in agricultural insect pests control. China Plant Protection, 37(3): 24–32 (in Chinese) [史彩华, 胡静荣, 张友军. 2017. 高温对昆虫生殖生理的影响及其在农业害虫防治中的展望. 中国植保导刊, 37(3): 24–32]
- Wang LY, Huang J, Dong XY, Zhang F, Li YX. 2015. Superparasitism and ontogeny of two *Trichogramma* species on *Corcyra cephalonica* (Stainton). Chinese Journal of Biological Control, 31(4): 481–486 (in Chinese) [王雷英, 黄静, 董新阳, 张帆, 李元喜. 2015. 两种赤眼蜂在米蛾卵上的过寄生及个体发育. 中国生物防治学报, 31(4): 481–486]
- Wu GF. 2014. Biological investigation of *Trichogramma dendrolimi*. Agriculture and Technology, 34(2): 104 (in Chinese) [吴广范. 2014. 松毛虫赤眼蜂生物学观察. 农业与技术, 34(2): 104]
- Xu JJ, Feng HZ, Li CM, Tuerxun, Wang L, Li ZG, He J, Guo WC. 2014. Effect of releasing *Trichogramma* to control the *Cydia pomonella* (L.) and *Grapholita molesta* (Busck). Chinese Journal of Biological Control, 30(5): 690–695 (in Chinese) [许建军, 冯宏祖, 李翠梅, 吐尔逊, 王兰, 李志刚, 何江, 郭文超. 2014. 释放赤眼蜂防治苹果蠹蛾、梨小食心虫效果研究. 中国生物防治学报, 30(5): 690–695]
- Xu LY, Zhao LW, Liu GL, Zhang XM, Li JJ, Xu YF, Chen YB. 2016. Effect of *Trichogramma* species and release quantity on control effect of *Cnaphalocrocis medinalis*. China Plant Protection, 36(8): 37–40 (in Chinese) [许燎原, 赵丽稳, 刘桂良, 张晓萌, 李军进, 徐云菲, 陈银宝. 2016. 赤眼蜂种类与释放数量对稻纵卷叶螟防治效果的影响. 中国植保导刊, 36(8): 37–40]
- Zhang JJ, Zhang X, Du WM, Ruan CC, Zang LS, Ren BZ. 2018. Effects of inducing initial stage, temperature and period on diapause induction and diapause termination of *Trichogramma dendrolimi*. Journal of Plant Protection, 45(6): 1308–1313 (in Chinese) [张俊杰, 张雪, 杜文梅, 阮长春, 臧连生, 任炳忠. 2018. 诱导始期、温度和历期对松毛虫赤眼蜂滞育诱导及解除滞育的影响. 植物保护学报, 45(6): 1308–1313]
- Zhang YB, Yang AP, Zhang GF, Liu WX, Wan FH. 2019. Effects of simulated heat waves on life history traits of a host feeding parasitoid. Insects, 10(12): 419
- Zhu WY, Lian ML, Li T, Zhang Y. 2016. Effect of temperature and humidity on the growth and reproduction of *Trichogramma dendrolimi*. China Plant Protection, 36(1): 16–19 (in Chinese) [朱文雅, 连梅力, 李唐, 张烨. 2016. 温湿度对松毛虫赤眼蜂生长发育和生殖力的影响. 中国植保导刊, 36(1): 16–19]

(责任编辑:李美娟)