高温对芙新姬小蜂控制美洲斑潜蝇潜力的影响

王绮静[1,2]， 肖 悦[2,3]， 杜素洁[2]， 梁永轩[2]， 王福莲[1]， 郭建洋[2]， 刘万学[2*]

（1. 长江大学农学院，农林病虫害预警与调控湖北省工程技术研究中心，荆州 434025；2. 中国农业科学院植物保护研究所，植物病虫害综合治理全国重点实验室，北京 100193；3. 吉林农业大学农学院，长春 130118）

摘要 为明确高温条件对芙新姬小蜂 *Neochrysocharis formosa*（Westwood）成虫寿命以及行为的影响，以美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* Blanchard 2 龄末至 3 龄初幼虫为寄主，在补充非寄主食物 20%葡萄糖溶液的情况下，观察了芙新姬小蜂雌成虫在 26、30℃和 35℃ 3 个温度下的寿命及对美洲斑潜蝇的取食致死数、叮蛰致死数、寄生致死数和总致死数。结果显示：与 26℃相比，高温条件（30℃和 35℃）下，单头雌虫的日均取食致死数、日均叮蛰致死数、日均寄生致死数、日均总致死数均显著升高，并在 35℃达到最高值，分别为 9.6、12.2、5.5 头和 27.3 头。芙新姬小蜂雌成虫的寿命随着温度升高而显著缩短，26℃下的寿命（21.4 d）约为 30℃下寿命（11.4 d）的 1.9 倍和 35℃下寿命（9.6 d）的 2.2 倍。3 个温度下雌成虫一生的取食致死数、叮蛰致死数、寄生致死数、总致死数均无显著差异，总寄主致死数均达 230 头以上。表明 35℃高温对芙新姬小蜂控制美洲斑潜蝇的总潜力没有显著影响。

关键词 芙新姬小蜂； 温度； 美洲斑潜蝇； 致死寄主行为； 控害潜力

中图分类号： S 436.429 **文献标识码：** A **DOI：** 10.16688/j.zwbh.2021644

Impact of high temperature on the biocontrol potential of *Neochrysocharis formosa*（Westwood）（Hymenoptera：Eulophidae）against *Liriomyza sativae*

WANG Qijing[1,2]， XIAO Yue[2,3]， DU Sujie[2]， LIANG Yongxuan[2]， WANG Fulian[1]， GUO Jianyang[2]， LIU Wanxue[2*]

（1. *Hubei Engineering Research Center for Pest Forewarning and Management*，*College of Agriculture*，*Yangtze University*，*Jingzhou* 434025，*China*；2. *State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests*，*Institute of Plant Protection*，*Chinese Academy of Agricultural Sciences*，*Beijing* 100193，*China*；3. *College of Agriculture*，*Jilin Agricultural University*，*Changchun* 130118，*China*）

Abstract To evaluate the impact of high temperatures on the longevity and biocontrol behavior of *Neochrysocharis formosa*（Westwood），the late 2nd-instar and the early 3rd-instar larvae of *Liriomyza sativae* Blanchard were used as hosts to investigate the longevity，average number of host-feeding events，host-stinging events，parasitism events，and total host-killing events of *N. formosa* at 26℃，30℃，and 35℃ under the supplementation of 20% glucose solution. The results showed that，compared to 26℃，the average number of daily host-feeding events，daily host-sting events，daily parasitism events，and daily host-killing events per female increased significantly at higher temperatures（30℃ and 35℃），reaching a maximum of 9.6，12.2，5.5，and 27.3 larvae at 35℃，respectively. However，the longevity of parasitoids decreased significantly with increasing temperature，with the longevity at 26℃（21.4 d）being approximately 1.9 and 2.2 times longer than those at 30℃（11.4 d）and 35℃（9.6 d）. There was no significant difference in host-feeding events，host-sting events，parasitism events，and total host-killing events per female adult in their lifetime under three temperatures，and the total host mortalities were over 230 larvae at each temperature. In conclusion，high temperature（35℃）does not significantly affect the biocontrol potential of *N. formosa*.

Key words *Neochrysocharis formosa*； temperature； *Liriomyza sativae*； host-killing behavior； biocontrol potential

收稿日期： 2021－11－17 **修订日期：** 2022－02－23
基金项目： 国家自然科学基金（31772236；31972344）；中国农业科学院科技创新工程（caascx-2017-2022-IAS）
* 通信作者 E-mail：liuwanxue@caas.cn

芙新姬小蜂 *Neochrysocharis formosa*（Westwood），属膜翅目 Hymenoptera 姬小蜂科 Eulophidae，可寄生双翅目 Diptera 等 4 目 16 科 50 多种昆虫，是潜叶蝇类害虫的优势寄生蜂之一[1-5]，主要的寄主为美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* Blanchard、三叶草斑潜蝇 *L. trifolii*（Burgess）等斑潜蝇类害虫[6]。该蜂主要通过取食寄主（host-feeding）和叮蛰寄主（host-stinging）的非繁殖性致死行为，以及产卵寄生（parasitism）的繁殖性致死行为致死寄主幼虫[2-4]。芙新姬小蜂对温度适应范围广，在田间主要发生于夏季，在温室等保护地中的丰富度较高，具有很强的生防潜力[7-10]。

环境温度是影响寄生蜂生存、生活史性状和行为的关键外部因素之一[11-14]。一般来说，温度升高会促使寄生蜂体内的新陈代谢及发育速率加快，对寄生蜂的未成熟期发育、性别比例、成虫取食、寄主选择、产卵寄生等生命活动具有重要影响[15-17]。例如，高温通常导致昆虫的发育历期更短、成虫体型更小[11,18-19]；在成虫阶段，高温环境下寄生蜂的代谢速率加快，活动能力提高[14,19]，进而其取食寄主和产卵寄生的速率和频率提高[20]。高温也可能对寄生蜂产生负面影响，例如寿命缩短[15,21-22]、繁殖能力降低[22-23]、影响后代性比[17]等，进而影响其生防效果。因此，了解具有重要应用价值的寄生蜂的温度适应性对评价其控害潜力以及指导寄生蜂的田间应用有重要意义。

目前，芙新姬小蜂成虫对环境温度的适应性已有报道[5,24]。然而，这些研究仅观察了芙新姬小蜂对寄主的取食致死和寄生致死行为，忽略了叮蛰致死行为。本研究基于芙新姬小蜂的 3 种致死行为，比较了高温对芙新姬小蜂成虫生活史及其对美洲斑潜蝇控害潜力的影响，旨在评价其在高温环境下对潜叶蝇的控害效果，为田间规模化释放应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　供试虫源

美洲斑潜蝇初始种群于 2013 年 7 月采自中国农业科学院植物保护研究所廊坊试验站田间菜豆 *Phaseolus vulgaris*，在温室用菜豆继代饲养。芙新姬小蜂于 2014 年 9 月采自中国农业科学院植物保护研究所家属院，在人工气候箱里用“菜豆-美洲斑潜蝇（2 龄末～3 龄初幼虫）系统”继代饲养。寄生蜂和寄主的实验室种群稳定，成虫数量维持在 200 头以上；饲养条件为：温度（26±1）℃，相对湿度（45±5）%，光周期 L∥D＝14 h∥10 h。

1.2　寄生蜂寄主/食物的准备

将带有 2 龄末至 3 龄初美洲斑潜蝇幼虫（密度 35～45 头/叶）的菜豆叶片剪下放入培养皿（直径 9.0 cm，高 2.2 cm）中，在叶柄旁放一个蘸有 20%葡萄糖溶液的脱脂棉球，皿底用 1.2%琼脂保湿，用封口膜密封并在膜上均匀地扎 30～40 个孔以保持空气流通。

1.3　寄生蜂转接

试验共设置 3 个环境温度，分别为 26、30℃和 35℃。选取上午 8:00－10:00 羽化的健康活跃的单头芙新姬小蜂雌蜂，移入含有寄主/食物的培养皿中，编号，分别放入温度为 26、30℃和 35℃的 3 个人工气候箱中，设置环境相对湿度（45±5）%，光照周期 L∥D＝14 h∥10 h。每个温度处理设置 25 个有效重复。每日上午 8:00 前（在人工气候箱亮灯前）将前一天培养皿中的寄生蜂移入新的寄主/食物培养皿，直至寄生蜂死亡。移出寄生蜂的培养皿置于同样环境条件的人工气候箱中持续培养。

1.4　寄生蜂取食、叮蛰和寄生情况调查

首次接蜂的时间记为第 1 日，3 日（约 72 h）后在解剖镜下观察记录芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇的取食致死数、叮蛰致死数和寄生致死数。寄生蜂 3 种致死行为的判定参考肖悦等[25]和 Ye 等[26]的方法，即寄生蜂利用口器直接取食寄主幼虫体内血液和组织液至干瘪或部分干瘪记为取食致死；寄主幼虫体内有寄生蜂幼虫或卵记为寄生致死；寄主幼虫虫体僵硬死亡，但虫体饱满，体表伴有寄生蜂产卵器穿刺留下的黑刻点，且没有寄生蜂的卵或幼虫，记为叮蛰致死。试验期间，每日记录寄生蜂死亡数量及死亡时间。

1.5　数据统计与分析

试验数据采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，对不同温度下寄生蜂的寿命、取食致死数、叮蛰致死数、寄生致死数和总致死数等数据进行正态性检验和方差齐性检验，根据检验结果（正态性检验结果：不符合正态分布；方差齐性检验结果：方差不齐）采用非参数检验-多个独立样本比较的秩和检验（K

independent samples Kruskal-Wallis H test)进行分析。利用 Excel 分别统计取食致死数、叮蛰致死数、寄生致死数在总致死数中的占比,并绘制对应的柱状图;对数据进行反正弦转换后,根据正态性检验和方差齐性检验结果(正态性检验结果:符合正态分布;方差齐性检验结果:符合方差齐性),采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较同种致死行为的占比在 3 个温度下的差异;采用独立样本 t 测验(independent samples t-test)比较同一温度下非繁殖性致死数占比和繁殖性致死数占比的差异。所有的检验在 $\alpha=0.05$ 水平下进行。寄生蜂控害效应参数之间的关系采用线性回归(linear regression)分析。

2 结果与分析

2.1 不同温度下芙新姬小蜂成虫寿命及对美洲斑潜蝇的致死效果

2.1.1 寿命

温度对芙新姬小蜂雌成虫寿命有显著影响($H=29.601$,$df=2$,$P<0.001$);26℃下雌成虫的寿命最长,为 21.4 d,分别为 30℃和 35℃下的 1.9 倍和 2.2 倍,并且差异显著;而 30℃和 35℃两个温度处理下的雌成虫寿命无显著差异(表 1)。

表 1 芙新姬小蜂的成虫寿命及对美洲斑潜蝇幼虫的致死数($n=25$)[1)]

Table 1 Longevity and number of host-killing events per female of *Neochrysocharis formosa* against *Liriomyza sativae* larvae

温度/℃ Temperature	寿命/d Longevity	取食致死数/头 Number of host-feeding events	叮蛰致死数/头 Number of host-stinging events	寄生致死数/头 Number of parasitism events	总致死数/头 Total number of host-killing events
26	(21.4±1.7)a	(91.7±8.0)a	(96.6±12.1)a	(48.8±5.8)a	(237.1±23.7)a
30	(11.4±0.9)b	(97.4±8.3)a	(92.2±10.7)a	(51.5±5.6)a	(241.1±21.4)a
35	(9.6±0.6)b	(91.2±6.5)a	(118.5±10.7)a	(52.4±4.7)a	(262.1±19.3)a

1) 表中数据为平均值±标准误。同列数据后不同字母表示不同温度条件下的同一参数间差异显著($P<0.05$,多个独立样本比较的秩和检验);表 2 同。

Data in the table are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences in the same parameters among different temperatures ($P<0.05$; K independent samples Kruskal-Wallis H test). The same applies in Table 2.

2.1.2 取食致死寄主的效果

不同温度对芙新姬小蜂雌成虫取食致死数无显著影响($H=0.140$,$df=2$,$P=0.932$)(表 1),而温度升高显著影响了单雌日均取食致死数($H=50.108$,$df=2$,$P<0.001$)。单雌日均取食致死数呈现随着温度升高而升高的趋势,30℃和 35℃下的日均取食致死数均显著高于 26℃,而 30℃与 35℃下的日均取食致死数之间无显著差异(表 2)。此外,取食致死数在总致死数中的占比在不同温度下存在显著差异($F_{2,72}=3.838$,$P=0.026$),26℃与 30℃下取食致死数占比显著高于 35℃(图 1a)。

表 2 芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇幼虫的日平均致死数($n=25$)

Table 2 Numbers of daily host-killing events per female of *Neochrysocharis formosa* against *Liriomyza sativae* larvae

温度/℃ Temperature	日均取食致死数/头 Daily number of host-feeding events	日均叮蛰致死数/头 Daily number of host-stinging events	日均寄生致死数/头 Daily number of parasitism events	总致死数/头 Total number of host-killing events
26	(4.3±0.2)b	(4.4±0.4)c	(2.3±0.2)b	(11.0±0.6)c
30	(8.6±0.4)a	(8.2±0.7)b	(4.6±0.4)a	(21.4±1.0)b
35	(9.6±0.3)a	(12.2±0.6)a	(5.5±0.3)a	(27.3±0.7)a

3 个温度条件下,芙新姬小蜂取食致死数随日龄的增加整体呈现先增加后降低的趋势(图 2a)。在 26℃条件下,第 1~28 天的取食致死数在 3~6 头之间稳定波动,直至第 29 天达到最高峰(7.1 头),之后逐渐下降;30℃条件下,在第 5 天达到高峰(10.2 头),之后波动下降;35℃条件下,第 1~11 天的取食致死数呈现波动上升的趋势,并在第 11 天达到最高峰(14.3 头),之后逐渐下降。

2.1.3 叮蛰致死寄主的效果

不同温度对寄生蜂的叮蛰致死数无显著影响($H=3.847$,$df=2$,$P=0.146$)(表 1),但温度升高显著影响了单雌日均叮蛰致死数($H=43.823$,$df=2$,$P<0.001$)。单雌日均叮蛰致死数呈现随着温度升高而升高的趋势,3 个温度两两之间存在显著

性差异(表 2)。此外,叮蛰致死数在总致死数中的占比在不同温度下存在显著差异($F_{2,72}=4.267$,$P=0.018$),35℃下叮蛰致死数占比显著高于 26℃和 30℃(图 1a)。

26℃条件下,随寄生蜂日龄的增加,叮蛰致死数在 1～6 头之间呈现稳定、小幅度的波动。30℃和 35℃条件下,叮蛰致死数均在第 2 天达到最高峰(分别为 13.9 头和 17.6 头),之后呈波动下降趋势(图 2b)。

2.1.4　寄生致死寄主的效果

温度对寄生蜂的寄生致死数无显著影响($H=0.820$,$df=2$,$P=0.664$)(表 1),但温度升高显著影响了单雌日均寄生致死数($H=36.119$,$df=2$,$P<0.001$)。单雌日均寄生致死数呈现随着温度升高而升高的趋势,30℃、35℃处理下的日均寄生致死数均显著高于 26℃,而 30℃与 35℃处理之间无显著差异(表 2)。此外,不同温度下寄生致死数在总致死数中的占比无显著差异($F_{2,72}=0.238$, $P=0.789$)(图 1a)。

26℃条件下,雌成虫单日寄生致死数在第 3 天达到高峰(3.8 头),之后在 0.5～3.5 头之间呈较为平稳的波动趋势,直至为 0;30℃和 35℃条件下分别在第 2 天(7.8 头)和第 3 天(8.0 头)达到高峰,之后呈持续下降的趋势,直至为 0(图 2c)。

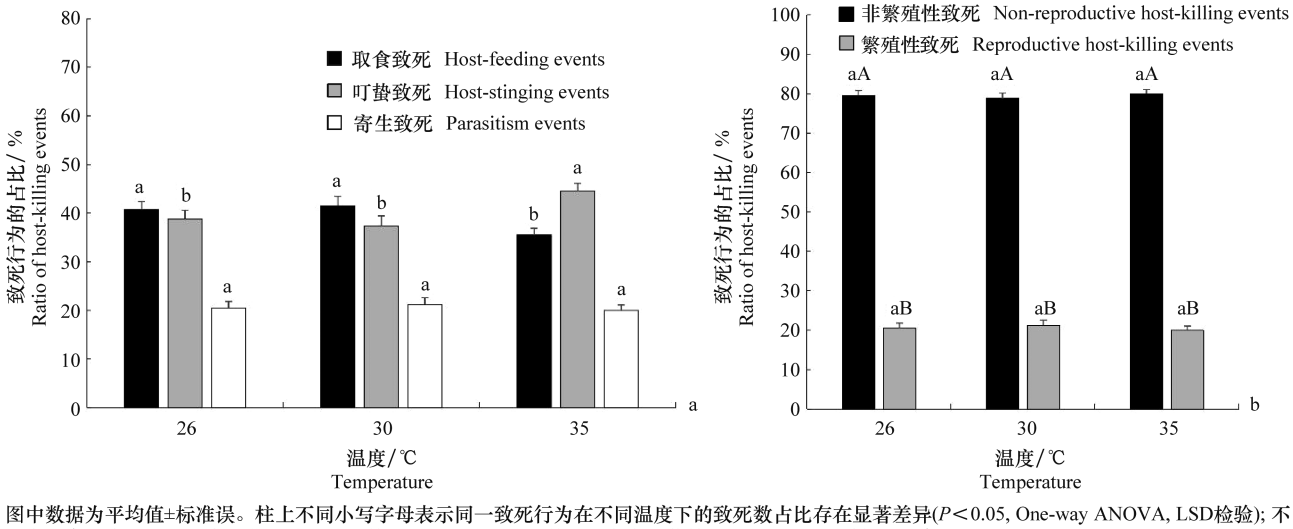
2.1.5　对寄主的总致死效果

3 个温度条件对寄生蜂的总致死数和日均总致死数的影响不同。3 个温度下的总致死数之间无显著差异($H=1.519$,$df=2$,$P=0.468$)(表 1);但 3 个温度处理的单雌每日总致死数均有显著差异($H=54.389$,$df=2$,$P<0.001$),呈现随着温度升高而升高的趋势(表 2)。整体来说,不同温度下的非繁殖性致死数占比($F_{2,72}=0.189$,$P=0.828$)以及繁殖性致死数占比($F_{2,72}=0.238$,$P=0.789$)均无显著差异;26℃($t_{1,48}=29.115$,$P<0.001$),30℃($t_{1,48}=26.299$,$P<0.001$)和 35℃($t_{1,48}=33.048$,$P<0.001$)3 个温度下寄生蜂的非繁殖性致死数在总致死数中的占比均显著高于繁殖性致死数占比(图 1b)。

26℃处理下第 1～28 天的日致死数在 3～15 头之间呈平稳的波动状态,第 29 天达到日致死高峰(14.9 头);30℃、35℃处理下分别在第 2 天(30.3 头)、第 4 天(33.2 头)达到最高峰,之后波动下降(图 2d)。

2.2　不同温度下取食与寿命、繁殖力、叮蛰致死寄主的相关性

3 个温度下芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇的取食致死数与寄生蜂寿命、叮蛰致死数、寄生致死数、总致死数呈显著正相关(表 3)。



图中数据为平均值±标准误。柱上不同小写字母表示同一致死行为在不同温度下的致死数占比存在显著差异($P<0.05$, One-way ANOVA, LSD检验); 不同大写字母表示同一温度下非繁殖性致死数占比与繁殖性致死数占比存在显著差异($P<0.05$, 独立样本t测验)

Data in the chart are mean±SE. Different lowercase letters indicate significant differences in the ratio of the same kind of host-killing events among different temperatures ($P<0.05$, One-way ANOVA followed by LSD test); different capital letters indicate significant difference between the ratio of non-reproductive host-killing events and the ratio of reproductive host-killing events at the same temperature ($P<0.05$, independent samples t-test)

图 1　芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇幼虫 3 种致死行为的数量占比

Fig. 1　Proportions of three kinds of host-killing events per female of *Neochrysocharis formosa* against *Liriomyza sativae* larvae

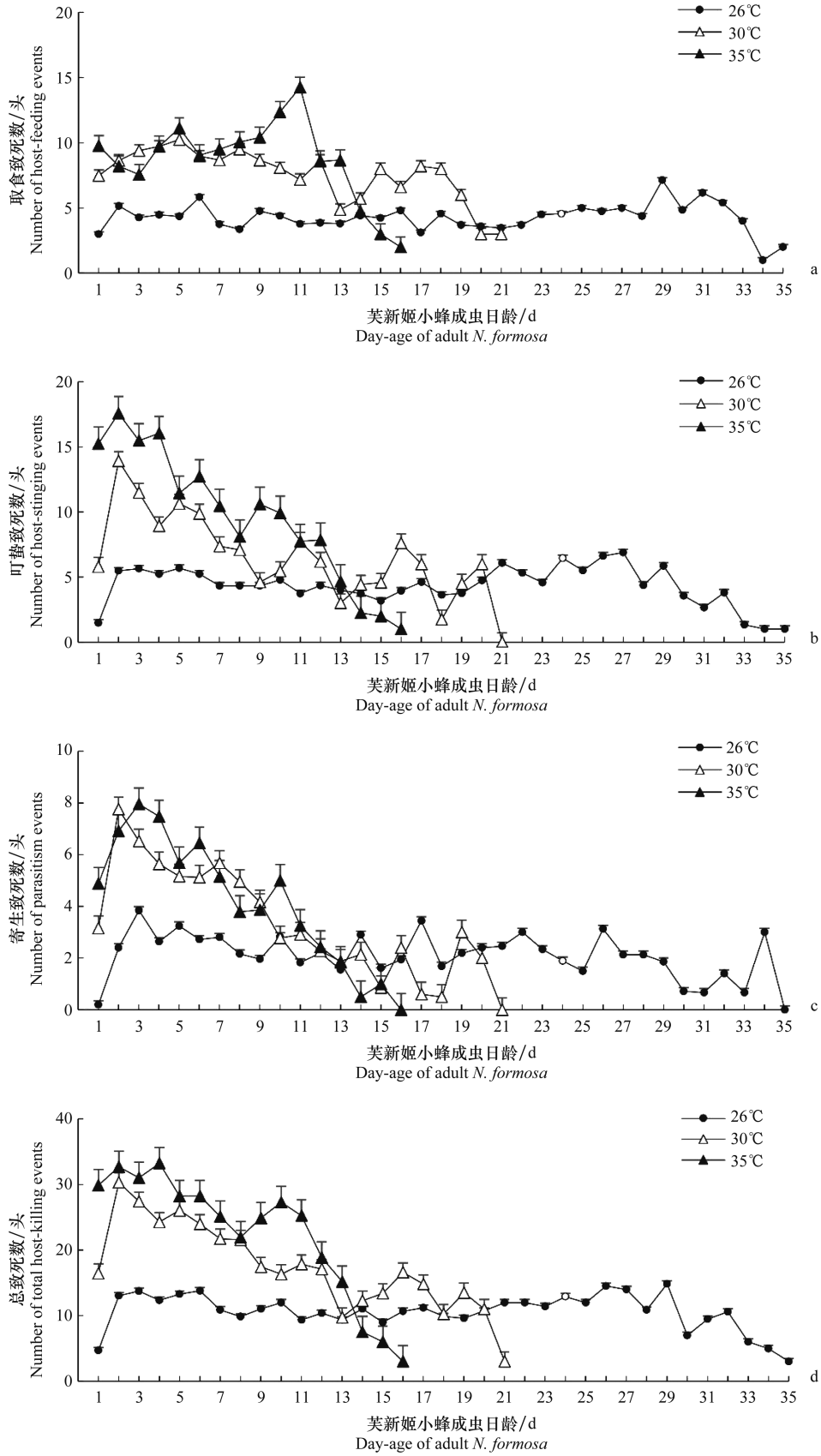


图 2 芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇幼虫取食致死数(a)、叮蛰致死数(b)、寄生致死数(c)和总致死数(d)的每日动态

Fig. 2 Daily numbers of host-feeding events (a), host-stinging events (b), parasitism events (c) and total host-killing events(d) per female of *Neochrysocharis formosa* against *Liriomyza sativae* larvae

表 3　芙新姬小蜂对美洲斑潜蝇取食致死数量与寿命、寄生致死、叮蛰致死、总致死数量的相关性

Table 3　Correlations between the number of host-feeding events and the longevity, parasitism events, and host-stinging events of *Neochrysocharis formosa* against *Liriomyza sativae* larvae

处理（n=重复次数）Treatments（n=Replication）	取食致死数量与寄生蜂寿命的相关性 Correlation between host-feeding events and longevity	取食致死数量与叮蛰致死数量的相关性 Correlation between host-feeding events and host-stinging events	取食致死数量与寄生致死数量的相关性 Correlation between host-feeding events and parasitism events	取食致死数量与总致死数量的相关性 Correlation between host-feeding events and total host-killing events
26℃（n=25）	$y=0.191x+3.944$，（$r^2=0.796$，$P<0.001$）	$y=1.293x-21.981$，（$r^2=0.731$，$P<0.001$）	$y=0.499x+3.024$，（$r^2=0.480$，$P<0.001$）	$y=2.763x-16.893$，（$r^2=0.880$，$P<0.001$）
30℃（n=25）	$y=0.092x+2.429$，（$r^2=0.727$，$P<0.001$）	$y=0.856x+8.769$，（$r^2=0.438$，$P<0.001$）	$y=0.437x+8.930$，（$r^2=0.412$，$P=0.001$）	$y=2.292x+17.699$，（$r^2=0.784$，$P<0.001$）
35℃（n=25）	$y=0.084x+1.852$，（$r^2=0.770$，$P<0.001$）	$y=1.127x+15.684$，（$r^2=0.472$，$P<0.001$）	$y=0.427x+13.448$，（$r^2=0.347$，$P=0.002$）	$y=2.554x+29.132$，（$r^2=0.752$，$P<0.001$）

3　结论与讨论

温度是影响寄生蜂寿命、繁殖力、控害能力等的重要环境因子[12-14]。本研究结果显示，温度对芙新姬小蜂成虫的影响主要体现在 3 个方面：一是环境温度越高，成虫寿命越短（表 1），类似的现象在其他寄生蜂中也有报道[22, 27]。二是成虫 3 种导致寄主死亡行为的日均致死数均随温度升高而显著升高（表 2），可能的原因是寄生蜂在高温下的代谢速率加快，活动能力增强[14, 19, 28]，进而提高了寄生蜂处理寄主的速率和频率。然而，尽管高温促进了芙新姬小蜂日均总致死数的增加，但同时也显著缩短了寄生蜂的寿命，因此 3 个温度下该蜂一生致死寄主总数无显著差异（表 1）。三是不同日龄成虫致死寄主数的差异，如图 2 所示，随着日龄增加，26℃下芙新姬小蜂每日的 3 种致死行为和总致死数趋于平稳，而在 30、35℃高温下，芙新姬小蜂的 3 种致死行为和总致死数波动幅度较 26℃大，在第 1～11 天明显增加并达到高峰，之后随着日龄增加而显著下降；推测高温环境下寄生蜂的寄主处理速度加快并在短时间内达到高峰，同时消耗大量能量，随着日龄的增加和机体能量的快速消耗，寄生蜂生命活动受限而导致寄主致死能力明显下降。

取食寄主和叮蛰寄主两种非繁殖性致死行为是寄生蜂的重要控害行为[3-4, 29-30]。本研究结果显示，26、30、35℃下芙新姬小蜂的非繁殖性致死寄主数在总致死数中的占比分别为 79.5%、78.8% 和 80.0%，显著高于 3 个温度下的繁殖性致死寄主数（图 1b），进一步说明了非繁殖性致死行为是芙新姬小蜂的主要控害方式。研究表明，取食有利于寄生蜂维持生命和促进繁殖[31-39]，本研究中芙新姬小蜂在 3 个温度条件下的取食致死数与寄生蜂的寿命、叮蛰致死数、寄生致死数、总致死数均呈显著正相关（表 3），说明随着取食寄主量的增加，芙新姬小蜂的寿命和控害效果显著提升，类似的现象在万氏潜蝇姬小蜂 *Diglyphus wani*[26] 和异角亨姬小蜂 *Hemiptarsenus varicornis*[29] 中亦有发现。叮蛰行为在潜叶蝇寄生蜂中比较常见[3-4, 26, 29-30]，该控害行为可能是通过降低植物叶片上害虫的存活率，避免叶片因被过度取食而出现干燥或脱落，有利于寄生蜂幼虫的存活[40]，或是为了杀死更多的寄主幼虫以提供食物储备[41]。本研究中，与 26℃和 30℃相比，在总致死效果无显著变化的情况下，35℃下芙新姬小蜂取食致死数占比显著下降，叮蛰致死数占比显著上升（图 1a），表明高温环境下芙新姬小蜂更倾向于以叮蛰的方式致死寄主，提示着不同温度可能会影响芙新姬小蜂在取食行为和叮蛰行为之间的权衡；而高温下叮蛰行为的占比增加可能是因为寄主幼虫在高温下的发育速率加快，很快不适合寄生，增加耗时较短的叮蛰行为有利于抢占食物资源用于未来的取食或繁殖活动[41]。

据报道，适当范围内的温度升高有利于增强寄生蜂的繁殖力[16]，但极端高温可能会导致寄生蜂繁殖力下降，进而降低其生防潜力[27]。例如，刘培培等[20]的研究表明，在仅提供寄主的条件下，高温（35℃）会降低脂类物质对芙新姬小蜂生殖的投入，进而产卵量下降；相似的结果在棉铃虫齿唇姬蜂 *Campoletis chlorideae*[15]、斯氏侧沟茧蜂 *Microplitis similis*[22]、*Diglyphus intermedius*[42] 等寄生蜂中也有发现。然而，本研究中芙新姬小蜂的总体寄生

致死数(表 1)及其在总致死数中的占比(20.0%～21.2%)在不同温度下无明显差异,说明高温并未降低该蜂的繁殖力,由此认为 30～35℃仍在适合芙新姬小蜂繁殖的温度范围内,进一步反映了芙新姬小蜂具有较强的耐热性,这也解释了该蜂在高温季节下是同样耐高温的美洲斑潜蝇和三叶草斑潜蝇的优势寄生蜂的现象[2, 7-8]。

综上所述,本研究明确了芙新姬小蜂在 3 个温度下对美洲斑潜蝇的控制效果,发现该蜂在不同温度下的控害效果无显著差异,但其控害的持效性有所不同。26℃条件下,芙新姬小蜂的寿命较长,每日的控害效果稳定,持效期长;但随着温度升高至 30℃和 35℃,该蜂寿命显著缩短,其在接蜂后 1～11 d 的控害效果明显提升,但持效期短。因此,在今后的实际防控中,可根据季节和环境温度制定芙新姬小蜂的田间释放策略,如在高温环境下进行适量、多次释放,适当缩短寄生蜂释放的时间间隔,以提高该蜂控制害虫的高效性和持效性。本研究的结果有助于更好地了解高温季节或高温环境下芙新姬小蜂对潜叶蝇类害虫的生防效果,为该蜂的田间应用提供参考。

参考文献

[1] OSMANKHIL M H, MOCHIZUKI A, HAMASAKI K, et al. Oviposition and larval development of *Neochrysocharis formosa* (Hymenoptera: Eulophidae) inside the host larvae, *Liriomyza trifolii* [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2010, 44(1): 33-36.

[2] 王伟, 王文霞, 刘万学, 等. 芙新姬小蜂生物学特性及应用研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2012, 28(4): 575-582.

[3] ZHANG Yibo, LU Shulong, LIU Wanxue, et al. Comparing immature development and life history traits in two coexisting host-feeding parasitoids, *Diglyphus isaea* and *Neochrysocharis formosa* (Hymenoptera: Eulophidae) [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(12): 2690-2700.

[4] LIU Wanxue, WANG Wenxia, ZHANG Yibo, et al. Adult diet affects the life history and host-killing behavior of a host-feeding parasitoid [J]. Biological Control, 2015, 81: 58-64.

[5] 钱景秦, 古琇芷, 张淑贞. 温度对华釉小蜂(膜翅目:釉小蜂科)族群增长与致死寄主能力之影响[J]. 植物保护学会会刊, 2005, 47(2): 87-101.

[6] SALEH A, ALLAWI T F, GHABEISH I. Mass rearing of *Neochrysocharis formosa* (Westwood) (Eulophidae: Hymenoptera), a parasitoid of leafminers (Agromyzidae: Diptera) [J]. Journal of Pest Science, 2010, 83(2): 59-67.

[7] HONDO T, KOIKE A, SUGIMOTO T. Comparison of thermal tolerance of seven native species of parasitoids (Hymenoptera: Eulophidae) as biological control agents against *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae) in Japan [J]. Applied Entomology and Zoology, 2006, 41(1): 73-82.

[8] AMANO K, SUZUKI A, HIROMORI H, et al. Relative abundance of parasitoids reared during field exposure of sentinel larvae of the leafminers *Liriomyza trifolii* (Burgess), *L. sativae* Blanchard, and *Chromatomyia horticola* (Goureau) (Diptera: Agromyzidae) [J]. Applied Entomology and Zoology, 2008, 43(4): 625-630.

[9] SAITO T, DOI M, TAGAMI Y, et al. Hymenopterous parasitoids of the exotic leafminers *Liriomyza trifolii* (Burgess) and *Liriomyza sativae* Blanchard (Diptera: Agromyzidae) in Shizuoka Prefecture, Japan [J]. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 2008, 52(4): 225-229.

[10] KATHIAR S, MUKUF N A A R, ABDULAMEER S H A, et al. Agromyzid leafminers and its natural enemies on vegetables (squash and tomato) in green houses [J]. Journal of Biodiversity and Environmental Sciences, 2018, 13(2): 353-357.

[11] 杨月梅, 杜素洁, 刘万学, 等. 芙新姬小蜂孤雌产雌品系和两性品系未成熟期生活史比较[J]. 植物保护, 2020, 46(3): 104-109.

[12] KENDRICK M R, BENSTEAD J P. Temperature and nutrient availability interact to mediate growth and body stoichiometry in a detritivorous stream insect [J]. Freshwater Biology, 2013, 58(9): 1820-1830.

[13] LEMOINE N P, DREWS W A, BURKEPILE D E, et al. Increased temperature alters feeding behavior of a generalist herbivore [J]. OIKOS, 2013, 122(12): 1669-1678.

[14] AUGUSTIN J, BOIVIN G, BOURGEOIS G, et al. The effect of temperature on host patch exploitation by an egg parasitoid [J/OL]. PLoS ONE, 2021, 16(7): e0254750. DOI: 10.1371/journal.pone.0254750.

[15] PANDEY A K, TRIPATHI C P M. Effect of temperature on the development, fecundity, progeny sex ratio and life-table of *Campoletis chlorideae*, an endolarval parasitoid of the pod borer, *Helicoverpa armigera* [J]. Biocontrol, 2008, 53(3): 461-471.

[16] DENIS D, PIERRE J S, BAAREN J V, et al. Physiological adaptations to climate change in pro-ovigenic parasitoids [J]. Journal of Theoretical Biology, 2012, 309: 67-77.

[17] NGUYEN T M, BRESSAC C, CHEVRIER C. Heat stress affects male reproduction in a parasitoid wasp [J]. Journal of Insect Physiology, 2013, 59(3): 248-254.

[18] COLINET H, BOIVIN G, HANCE T. Manipulation of parasitoid size using the temperature-size rule: fitness consequences [J]. Oecologia, 2007, 152(3): 425-433.

[19] GAUDON J M, ALLISON J D, SMITH S M. Factors influen-

cing the dispersal of a native parasitoid *Phasgonophora sulcata* attacking the emerald ash borer: implications for biological control [J]. BioControl, 2018, 63(6): 751 - 761.

[20] 刘培培，庄欣鑫，肖悦，等. 高温下成虫食物对芙新姬小蜂生活史及控害潜力影响[J]. 环境昆虫学报，2018，40(2)：452 - 460.

[21] ZHANG Yibo, ZHANG Guifen, LIU Wanxue, et al. Variable temperatures across different stages have novel effects on behavioral response and population viability in a host-feeding parasitoid [J/OL]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 38087. DOI: 10.1038/s41598-018-38087-0.

[22] YI Sijia, HOPKINS R J, CHEN Xuyang, et al. Effects of temperature on the development and fecundity of *Microplitis similis* (Hymenoptera: Braconidae), a parasitoid of *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Physiological Entomology, 2020, 45(2/3): 95 - 102.

[23] SCOTT M, BERRIGAN D, HOFFMANN A A. Costs and benefits of acclimation to elevated temperature in *Trichogramma carverae* [J]. Entomologia Experimentalis et Applicata, 1997, 85(3): 211 - 219.

[24] MOON H C, YONG K J, SUN W C, et al. Oviposition and host feeding characteristics of *Neochrysocharis formosa* (Hymenoptera: Eulophidae), an endoparasitoid of *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae) [J]. Korean Journal of Applied Entomology, 2004, 43(1): 21 - 26.

[25] 肖悦，王文霞，张毅波，等. 补充非寄主食物对芙新姬小蜂和潜蝇姬小蜂控害行为权衡的影响[J]. 环境昆虫学报，2016，38(6)：1231 - 1236.

[26] YE Fuyu, ZHU Chaodong, YEFREMOVA Z, et al. Life history and biocontrol potential of the first female-producing parthenogenetic species of *Diglyphus* (Hymenoptera: Eulophidae) against agromyzid leafminers [J/OL]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 3222. DOI: 10.1038/s41598 - 018 - 20972 - 3.

[27] HANCE T, BAAREN J V, VERNON P, et al. Impact of extreme temperatures on parasitoids in a climate change perspective [J]. Annual Review of Entomology, 2007, 52(1): 107 - 126.

[28] ABRAM P K, BOIVIN G, MOIROUX J, et al. Behavioural effects of temperature on ectothermic animals: unifying thermal physiology and behavioural plasticity [J]. Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2017, 92(4): 1859 - 1876.

[29] CHENG Xiaoqin, CAO Fengqin, ZHANG Yibo, et al. Life history and life table of the host-feeding parasitoid *Hemiptarsenus varicornis* (Hymenoptera: Eulophidae) [J]. Applied Entomology and Zoology, 2017, 52(2): 287 - 293.

[30] RIDLAND P M, UMINA P A, PIRTLE E I, et al. Potential for biological control of the vegetable leafminer, *Liriomyza* sativae (Diptera: Agromyzidae), in Australia with parasitoid wasps [J]. Austral Entomology, 2020, 59(1): 16 - 36.

[31] GIRON D, PINCEBOURDE S, CASAS J. Lifetime gains of host-feeding in a synovigenic parasitic wasp [J]. Physiological Entomology, 2004, 29(5): 436 - 442.

[32] WU Heping, LING Meng, LI Baoping. Effects of feeding frequency and sugar concentrations on lifetime reproductive success of *Meteorus pulchricornis* (Hymenoptera: Braconidae) [J]. Biological Control, 2008, 45(3): 353 - 359.

[33] JERVIS M A, ELLERS J, HARVEY J A. Resource acquisition, allocation, and utilization in parasitoid reproductive strategies [J]. Annual Review of Entomology, 2008, 53(4): 361 - 385.

[34] TENA A, PEKAS A, CANO D, et al. Sugar provisioning maximizes the biocontrol service of parasitoids [J]. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(3): 795 - 804.

[35] SCHMALE I, WÄCKERS F L, CARDONA C, et al. Control potential of three hymenopteran parasitoid species against the bean weevil in stored beans: the effect of adult parasitoid nutrition on longevity and progeny production [J]. Biological Control, 2001, 21(2): 134 - 139.

[36] IRVIN N A, HODDLE M S, CASTLE S J. The effect of resource provisioning and sugar composition of foods on longevity of three *Gonatocerus* spp., egg parasitoids of *Homalodisca vitripennis* [J]. Biological Control, 2007, 40(1): 69 - 79.

[37] WÄCKERS F L. A comparison of nectar- and honeydew sugars with respect to their utilization by the hymenopteran parasitoid *Cotesia glomerata* [J]. Journal of Insect Physiology, 2001, 47(9): 1077 - 1084.

[38] WILLIAMS L, ROANE T M. Nutritional ecology of a parasitic wasp: food source affects gustatory response, metabolic utilization, and survivorship [J]. Journal of Insect Physiology, 2007, 53(12): 1262 - 1275.

[39] 王伟，刘万学，程立生，等. 取食不同糖分对卵育型寄生蜂潜蝇姬小蜂雌蜂寿命和卵子发生的影响[J]. 昆虫学报，2012，55(8)：964 - 970.

[40] PATEL K J, SCHUSTER D J, SMERAGE G H. Density dependent parasitism and host-killing of *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae) by *Diglyphus intermedius* (Hymenoptera: Eulophidae) [J]. Florida Entomologist, 2003, 86(1): 8 - 14.

[41] BERNARDO U, PEDATA P A, VIGGIANI G. Life history of *Pnigalio soemius* (Walker) (Hymenoptera: Eulophidae) and its impact on a leafminer host through parasitization, destructive host-feeding and host-stinging behavior [J]. Biological Control, 2006, 37(1): 98 - 107.

[42] PATEL K J, SCHUSTER D J. Temperature-dependent fecundity, longevity, and host-killing activity of *Diglyphus intermedius* (Hymenoptera: Eulophidae) on third instars of *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae) [J]. Environmental Entomology, 1991, 20(4): 1195 - 1199.

（责任编辑：杨明丽）