

短时高温暴露对草地贪夜蛾存活及生殖的影响

李祥瑞[#], 陈智勇[#], 巴吐西, 殷新田, 朱 勋, 张云慧^{*}

(中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193)

摘要 本文研究短时高温暴露对草地贪夜蛾存活和生殖的影响, 为其夏季的预测预报及综合防治提供技术支持。分别以卵、不同龄期幼虫、蛹、成虫作为研究对象进行不同时间高温暴露处理, 研究高温暴露处理后幼虫和成虫的成活率, 幼虫的化蛹率、羽化率、蛹重以及成虫的生殖能力。结果表明: 37℃对卵的孵化率无显著影响, 40℃暴露 4 h 卵的孵化率显著降低, 45℃暴露 3 h 卵的孵化率降低到 7.29%, 暴露 4 h 及以上卵不能孵化。37~40℃对蛹的成活率无显著影响, 每天 43℃高温暴露 4 h 连续处理 5 d 蛹的成活率显著降低, 每天 46℃高温暴露 4 h 处理 5 d 后蛹的成活率为 61.29%。37~43℃短时高温暴露对不同龄期幼虫和成虫的成活率、化蛹率、羽化率、寿命、生殖力等生命参数影响较小, 但不同龄期幼虫高温暴露对蛹重具有显著影响, 5、6 龄幼虫 37℃高温暴露 4 h 其蛹重显著降低, 随着温度的升高, 暴露龄期的增加对蛹重的影响加大, 6 龄幼虫 46℃高温暴露 2 h 的蛹重为 111.54 mg, 是对照 (205.42 mg) 蛹重的 54.30%。成虫期高温暴露对卵的孵化率也有显著影响, 40℃每天高温暴露 4 h 连续处理 3 d 卵的孵化率显著降低, 随着温度升高, 处理时间延长, 卵的孵化率逐渐降低, 46℃高温暴露 4 h 卵的孵化率降低到 12.34%。上述结果表明草地贪夜蛾不同虫态都具有很强的耐热性, 高温对其种群的抑制作用具有一定的时滞效应。

关键词 草地贪夜蛾; 短时高温; 成活率; 繁殖力

中图分类号: S435.132 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2020651

Effects of short-term heat stress on the survival and fecundity of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae)

LI Xiangrui[#], CHEN Zhiyong[#], Batuxi, YIN Xintian, ZHU Xun, ZHANG Yunhui^{*}

(State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract The objective of this study is to clarify the effects of short-term exposure to high temperature on the survival and fecundity of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, and provide a technical support for the prediction of the occurrence and integrated control of this pest in summer. The eggs, larvae of different stages, pupae and adults were treated under the condition of short-time high temperature, respectively, and their effects on the survival rate, pupation rate, eclosion rate, pupal weight and reproduction were determined. The results showed that the 37℃ had no significant effect on the hatching rate of eggs; the hatchability of eggs treated at 40℃ for 4 h was significantly inhibited; the hatching rate of eggs exposed to 45℃ for 3 h was 7.29%, and eggs exposed to 45℃ for more than 4 h could not hatch. Exposure to 37–40℃ had no significant effect on the survival rate of pupae, but continuous treatment for five days with daily exposure to 43℃ for 4 h significantly reduced the survival rate of pupae. The survival rate of pupae treated at 46℃ for 4 h every day in continued five days was 61.29%. The survival rate, pupation rate, eclosion rate, adult life span and fecundity were less affected by high-temperature exposure at 37–43℃; however, the pupal weight gradually decreased with increasing exposure temperature and larvae age; the pupal weights of the 5th- and 6th-instar larvae treated at 37℃ for 4 h significantly reduced, and the pupal weight of the 6th-instar larvae exposed to 46℃ for 2 h decreased to 111.54 mg, which was

收稿日期: 2020-12-07 修订日期: 2021-01-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0300102); 国家自然科学基金(31972260); 国家现代农业(小麦)产业技术体系(CARS-03); 中国农业科学院重大任务联合攻关(CAAS-ZDRW202007)

* 通信作者 E-mail: yhzhang@ippcaas.cn

为并列第一作者

54.30% of the control (205.42 mg). The hatching rates of eggs were significantly reduced when the adult stage was treated at 40°C for four hours per day in three days; the hatching rate of eggs gradually decreased with increasing temperature and duration of high-temperature treatment, and the hatching rate of eggs treated for 4 h at 46°C decreased to 12.34%. These results indicated that *S. frugiperda* had a strong heat tolerance, and the inhibition effect of high temperature on its population had a time lag effect to some degree.

Key words *Spodoptera frugiperda*; short-term high temperature; survival rate; fecundity

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 是一种原产于美洲热带和亚热带地区的多食性及迁飞性害虫,由于缺乏滞育机制,在美洲只能在南佛罗里达州和得克萨斯州的温和气候中越冬,通过远距离迁飞扩散造成危害^[1]。2016 年 1 月,草地贪夜蛾首次入侵非洲,并迅速蔓延到撒哈拉以南的 44 个国家^[2]。2018 年 5 月入侵印度,并从印度蔓延到东南亚及中国南部为主的亚洲地区^[3],截至目前,草地贪夜蛾的发生为害已横跨美洲、非洲、亚洲和大洋洲,成为世界性的迁飞害虫。室内研究显示草地贪夜蛾适宜生存的温度范围较广,在 20~36°C 范围内均能完成生长发育和生殖^[4-5]。据中国气象局气象数据监测,在我国长江以南地区,夏季草地贪夜蛾田间取食为害阶段,日最高温度可持续多天超过 35°C,甚至部分地区日最高气温可达 40°C。在晴天,由于太阳的直射或是地表热辐射,田间地表或是近地表温度一般较气象站百叶箱中测得的气温数据偏高 3°C 以上(延庆气象站田间监测数据),草地贪夜蛾作为一种在热带和亚热带地区终年繁殖的昆虫不可避免地遭受短时高温的影响。

昆虫世代周期普遍较短,通常一年中可完成一个甚至几个世代,因此短时的温度改变就可对昆虫的生长发育、地理分布、行为和生殖等产生深远影响^[6]。例如 39°C 以上的高温导致马铃薯甲虫 *Leptinotarsa decemlineata* (Say) 羽化率下降,使其不能在吐鲁番地区成功定殖,从而阻碍了其种群继续向东扩散^[7];麦无网长管蚜 *Metopolophium dirhodum* (Walker) 成蚜在超过 36°C 时,随着时间延长其寿命、产仔量都随之显著下降^[8];33°C 的高温对棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner) 的生存影响较小,但明显影响其产卵量和交配能力^[9]。草地贪夜蛾自 2018 年 12 月入侵我国以来,我国科研工作者研究明确了温度对其生长发育的影响,全世代发育起点温度,以及在我国的发生区与不同区域的发生世代、迁飞过程和时空分布范围。对于短时高温对其的影响报道较少,张红梅等^[10]测定了卵和蛹期高温 38°C

以上持续 6 h 或 42°C 以上持续 2 h 以上草地贪夜蛾种群生长会受到抑制,对于幼虫和成虫的影响未有报道。近年来在全球气候变暖的趋势下,极端高温事件的发生频次和强度加强,过高的环境温度常使昆虫的生长发育、生殖及存活等受到严重影响,对这种影响缺乏了解就会降低害虫测报的准确性。本文分别对草地贪夜蛾的卵、幼虫、蛹和成虫进行短时高温暴露处理,研究高温暴露对草地贪夜蛾的存活和生殖等生物学特性的影响,明确草地贪夜蛾对高温的耐受性,为其预测预报和有效防控提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

草地贪夜蛾种群采自云南省德宏州玉米田(由中国农业科学院植物保护研究所棉虫组提供),在室内用新鲜小麦苗继代饲养,成虫用 5% 的蜂蜜水饲喂,收集所产卵块,作为供试虫源。本试验所用幼虫用新鲜小麦苗饲养。

1.2 试验条件

RXZ 智能型人工气候箱,宁波江南仪器厂生产,温差为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。养虫室温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、光周期 L//D=14 h//10 h、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 、光照强度为 18 000 lx。卵、幼虫、蛹、成虫室内饲养条件同上。

1.3 卵的短时高温暴露处理

选取草地贪夜蛾雌虫第 2~3 天初产、大小均匀一致的卵块(平均卵粒 300 头左右),直接放入温度 37、40、43、44、45°C,相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 的培养箱(因 46°C 下卵全部死亡,因此试验设置了 44、45°C 梯度),分别处理 3、4、5 h,处理后的卵块放入充有空气的保鲜袋内,放到养虫室 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 让其自然孵化,第 4 天(对照卵块已全部孵化)将保鲜袋放入冰箱冷冻处理,以冻死初孵幼虫,方便统计初孵幼虫和未孵化卵粒数量。每个处理 5 个卵块,重复 6 次。以未做短时高温暴露处理自然孵化的卵块作为对照,饲养条件和处理一致。

1.4 蛹的短时高温暴露处理

在养虫室条件下,在长 30 cm×宽 20 cm×高 8 cm 的塑料盒里放置 5 cm 深(含水量为 10%~14%)细沙土^[11],放入高龄幼虫和新鲜小麦苗,让幼虫自主入土化蛹,等全部幼虫化蛹后,清除多余小麦苗。将塑料盒分别放入温度 37、40、43、46℃,相对湿度为(70±5)%的培养箱,连续处理 4 h,分别处理 1、3、5 d 后放回养虫室,处理结束后第 2 天检查蛹的成活率,以消毒的镊子触碰蛹体,以腹节末端可以自由活动的为活蛹。每个处理 30 头蛹,重复 4 次。以未做短时高温暴露处理的蛹作为对照,饲养条件和处理一致。

1.5 幼虫的短时高温暴露处理

每个龄期的幼虫为单头饲养,取蜕皮当天的幼虫(初孵幼虫不饲喂,2 龄及以上幼虫以新鲜小麦苗饲喂)供试。采用 9 cm 的培养皿,里面放置新鲜小麦苗,1~3 龄幼虫每处理接入 10 头,重复 9 次;4 龄及以上幼虫每处理接入 1 头,每个龄期测定 30 头,重复 3 次。将培养皿分别放入温度 37、40、43、46℃(因 46℃处理 4 h 后,除 1 龄幼虫外,其他龄期全部死亡,因此,46℃设置了 1、2、3 h,3 h 除 1 龄幼虫成活率为 45.16%,其他龄期幼虫全部死亡,本试验只统计了处理 2 h 的结果)的培养箱,分别处理 4 h 后放回养虫室,2 h 后检查记录幼虫的存活情况,将成活的幼虫放入培养皿内用新鲜小麦苗单头饲养,后期统计幼虫的成活率、化蛹率、蛹重和羽化率。以未做短时高温暴露处理的幼虫作为对照,饲养条件和处理一致。

1.6 成虫的短时高温暴露处理

将羽化当天的成虫按照雌雄 1:1 的比例放入上

口直径 12 cm,高 7 cm,底部直径 8 cm 的 1 次性环保圆形餐盒内,上面覆盖纱布,并饲喂 5%的蜂蜜水,将圆形餐盒分别放入温度 37、40、43、46℃,相对湿度为(70±5)%的培养箱(因 46℃处理 3 d 成虫全部死亡,因此设置处理为 1、2、3 d),每天高温处理 4 h 后放回养虫室,分别处理 1、3、5 d,处理结束第 2 天检查成虫的成活率。每个处理 30 对成虫,重复 3 次,成虫开始产卵后,每日更换纱布,记录每日单雌产卵量,直到成虫(雌雄)死亡。以未做短时高温暴露处理的成虫(雌雄)作为对照,饲养条件和处理一致。

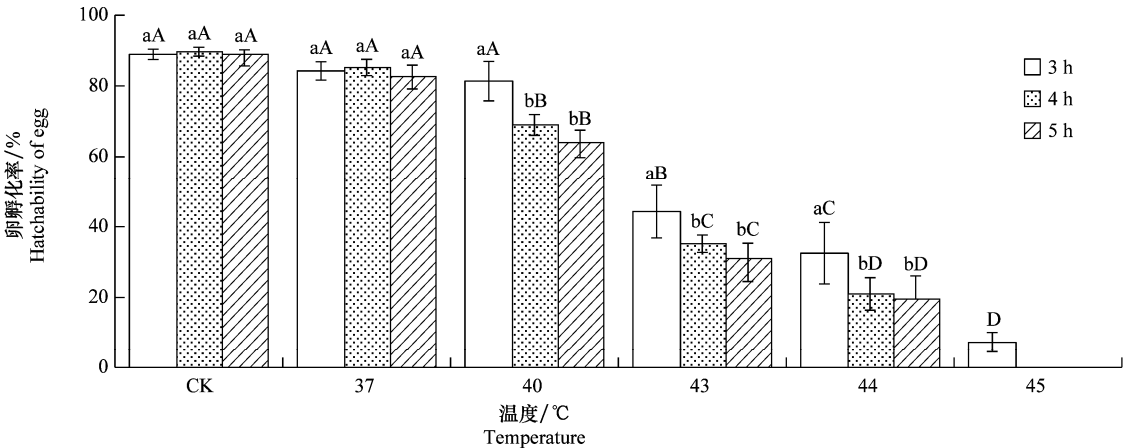
1.7 数据处理

利用 SPSS 19.0 软件对草地贪夜蛾的不同温度和处理时间卵的孵化率、蛹的羽化率、成虫的成活率、寿命、产卵前期、产卵历期、平均单雌产卵量和不同温度和处理龄期对幼虫的成活率、化蛹率、蛹重、羽化率进行双因素方差分析,各参数均值采用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 卵和蛹期短时高温暴露对其成活率的影响

暴露温度和时间对卵的孵化率有显著影响(温度: $F = 2.413, P < 0.05$; 时间: $F = 4.618, P < 0.05$),温度和时间交互作用对卵的孵化率也有显著影响($F = 2.187, P < 0.05$),37℃处理对卵的孵化率没有显著影响,40℃处理 4~5 h 卵的孵化率显著降低,随着温度升高,处理时间延长卵的孵化率逐渐降低。45℃处理 3 h 卵的孵化率降低到 7.29%,处理 4 h 及以上卵不能孵化(图 1)。



图中数据为平均值±标准误差,相同温度下不同处理时间之间标有不同小写字母,相同时间不同温度处理之间标有不同大写字母分别表示经Duncan氏新复极差法多重比较在0.05水平差异显著($P < 0.05$)。下同
Data in the chart are mean±SE. Different lowercase letters in the same temperature and different capital letters in same treatment time, respectively, indicate significant difference based on Duncan's multiple comparisons ($P < 0.05$). The same applies below

图1 草地贪夜蛾卵期短时高温暴露对卵孵化率的影响

Fig. 1 Effect of short-term heat stress on the hatchability of *Spodoptera frugiperda* eggs

蛹在 37℃ ($F=1.0341, P>0.05$) 和 40℃ ($F=1.4918, P>0.05$) 高温每天暴露 4 h, 分别连续处理 1、3、5 d, 蛹的成活率为 86.95%~96.70%, 与对照无显著差异。43℃ 连续处理 5 d 蛹的成活率显

著降低。温度越高对蛹的成活率影响越大, 46℃ 每天处理 4 h, 连续处理 3 d 及以上蛹的成活率显著降低, 但 46℃ 连续处理 5 d 蛹的成活率仍然可以达到 61.29%(图 2)。

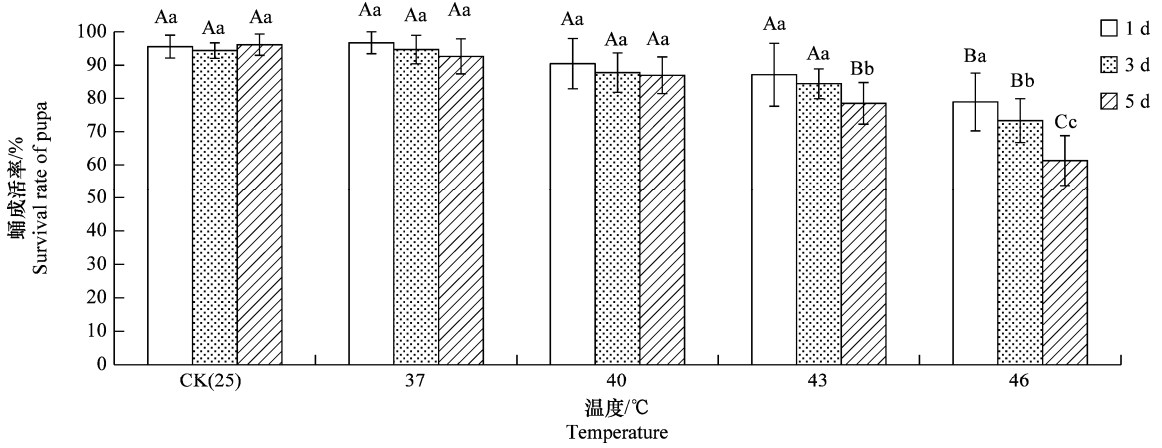


图 2 草地贪夜蛾蛹期短时高温暴露 4 h 对蛹成活率的影响

Fig. 2 Effect of short-term high temperature exposure for four hours on the survival rate of *Spodoptera frugiperda* pupae

2.2 幼虫期短时高温暴露对其不同虫态成活率和蛹重的影响

表 1 结果表明, 不同龄期幼虫经 37℃ ($F=5.372, P>0.05$), 40℃ ($F=7.421, P>0.05$), 43℃ ($F=11.329, P>0.05$) 高温暴露 4 h 处理对其成活率无显著影响, 除 1 龄幼虫 46℃ 高温暴露 2 h, 幼虫成活率与对照无显著差异外, 其他龄期幼虫高温暴露后成活率显著降低。不同龄期幼虫经 37℃ ($F=8.391, P>0.05$), 40℃ ($F=5.428, P>0.05$), 43℃ ($F=13.157, P>0.05$) 高温暴露 4 h 处理对化蛹率无显著影响, 1~4 龄幼虫 46℃ 高温暴露 2 h, 其化蛹率与对照无显著差异, 5、6 龄幼虫高温暴露后化蛹率显著降低。不同龄期的幼虫经 37℃ ($F=4.593, P>0.05$), 40℃ ($F=9.164, P>0.05$) 高温暴露 4 h 处理对羽化率无显著影响, 1~5 龄幼虫经 43℃ 高温暴露 4 h 对羽化率无显著影响, 6 龄幼虫高温暴露后羽化率显著降低。1~4 龄幼虫 46℃ 高温暴露 2 h 对羽化率无显著影响, 但 5、6 龄幼虫高温暴露后羽化率显著降低。不同龄期幼虫经 37℃ ($F=2.164, P<0.05$), 40℃ ($F=1.037, P<0.05$), 43℃ ($F=1.892, P<0.05$), 46℃ ($F=0.875, P<0.05$) 高温暴露对蛹重影响显著, 相同温度下, 龄期越高影响越显著, 5、6 龄幼虫经 37℃ 高温暴露 4 h 后蛹重显

著降低。随着温度的升高, 龄期的增加, 对蛹重的影响逐渐增加, 其中 6 龄幼虫 46℃ 高温暴露 2 h 蛹重降低到 111.54 mg, 是对照 (205.42 mg) 蛹重的 54.30%。

2.3 成虫期短时高温暴露对其成活率和繁殖力的影响

成虫每天经 37℃ ($F=8.527, P>0.05$), 40℃ ($F=11.581, P>0.05$) 高温暴露 4 h, 分别连续处理 1、3、5 d 对成活率无显著影响; 每天经 43℃ 暴露 4 h, 连续处理 5 d 或连续 1~3 d 每天 46℃ 高温暴露 4 h 成活率均显著降低, 其中, 连续 2 d 每天 46℃ 暴露 4 h, 成活率降低到 3.79%, 连续处理 3 d 成虫全部死亡。成虫经 37℃ ($F=2.143, P<0.05$), 40℃ ($F=0.974, P<0.05$), 43℃ ($F=1.273, P<0.05$), 46℃ ($F=0.879, P<0.05$) 高温暴露处理后寿命显著降低, 同一温度下处理时间越长, 寿命越低; 成虫经 37℃ ($F=4.251, P<0.05$), 40℃ ($F=4.972, P<0.05$), 43℃ ($F=3.269, P<0.05$), 46℃ ($F=2.104, P<0.05$) 高温暴露处理产卵前期显著缩短, 同一温度下处理时间越长, 产卵前期越短。成虫经 37℃ ($F=6.931, P>0.05$) 高温暴露处理对产卵历期无显著影响, 但经 40℃ ($F=3.642, P<0.05$), 43℃ ($F=2.194, P<0.05$), 46℃ ($F=1.916, P<0.05$) 高温暴露处理后产卵历期显著缩短。成虫经 37℃ ($F=16.714,$

$P<0.05$)高温暴露 4 h,处理 1 d 其平均单雌产卵量与对照无显著差异,但连续处理 3、5 d 平均单雌产卵量显著高于对照。 40°C ($F=9.724,P>0.05$) 高温暴露处理 1、3、5 d 或 43°C 高温暴露处理 1 d 对成虫的单雌产卵量无显著影响; 43°C 处理 3 d 及以上,平均单雌产卵量显著降低, 46°C 暴露 4 h 处理 1 d 平均单雌产卵量降低到 270.71 粒,处理 3、5 d 的成虫

不能产卵。成虫经 37°C ($F=6.983,P>0.05$), 40°C ($F=1.146,P<0.05$), 43°C ($F=2.013,P<0.05$), 46°C ($F=0.945,P<0.05$) 高温暴露处理后,除 37°C 外, 40°C 以上的高温暴露处理对卵的孵化率均有显著影响。随着温度升高,处理时间的延长,卵的孵化率逐渐降低; 46°C 暴露 4 h 处理 1 d 卵的孵化率降低到 12.34%,处理 3、5 d 卵不能孵化(表 2)。

表 1 草地贪夜蛾幼虫不同龄期短时高温暴露 4 h 对其成活率和蛹重的影响¹⁾

高温处理 High temperature exposure		成活率/% Survival rate	化蛹率/% Rate of pupation	羽化率/% Rate of emergence	蛹重/mg Pupal weight
温度/ $^{\circ}\text{C}$ Temperature	龄期 Stage				
37	1	(91.76±1.94)a	(91.37±2.37)a	(83.54±2.75)a	(201.37±56.34)a
	2	(92.55±2.16)a	(86.36±3.41)a	(85.49±3.04)a	(206.45±43.19)a
	3	(90.77±1.98)a	(90.48±1.67)a	(82.81±2.34)ab	(203.72±67.38)a
	4	(93.33±1.81)a	(87.65±2.13)a	(84.11±4.12)a	(196.68±43.25)a
	5	(89.78±2.36)a	(88.44±2.67)a	(84.05±2.01)a	(176.49±39.72)b
	6	(91.44±1.73)a	(88.10±3.72)a	(84.22±3.43)a	(171.36±40.31)bc
	25(CK)	(93.37±1.48)a	(90.27±1.28)a	(83.82±2.37)ab	(205.42±43.12)a
40	1	(88.89±2.04)ab	(85.28±3.18)ab	(82.21±1.76)a	(195.46±50.43)a
	2	(91.11±1.28)a	(85.80±2.73)ab	(87.68±2.34)a	(197.43±38.14)a
	3	(87.11±2.75)ab	(84.76±2.18)ab	(86.86±1.56)a	(186.94±60.37)ab
	4	(88.56±3.04)ab	(85.23±2.31)ab	(84.06±4.10)a	(174.34±38.97)b
	5	(86.67±1.96)ab	(83.71±3.42)ab	(80.22±3.97)ab	(160.27±29.41)c
	6	(87.78±2.13)ab	(83.24±2.89)ab	(79.96±4.19)ab	(153.21±30.86)cd
	25(CK)	(93.37±1.48)a	(90.27±1.28)a	(83.82±2.37)ab	(205.42±43.12)a
43	1	(89.63±3.17)a	(86.67±3.17)a	(82.74±2.83)ab	(204.73±62.38)a
	2	(90.55±2.61)a	(84.67±4.32)ab	(80.62±3.67)ab	(198.56±55.49)a
	3	(89.26±3.72)ab	(82.67±3.81)ab	(83.09±4.38)ab	(188.04±46.22)ab
	4	(87.64±4.16)ab	(83.78±2.76)ab	(84.09±4.12)a	(187.53±26.41)ab
	5	(89.43±3.67)a	(84.55±2.34)ab	(80.29±3.76)ab	(152.42±18.22)cd
	6	(88.63±4.13)ab	(81.50±3.63)ab	(76.34±2.44)b	(130.77±19.36)e
	25(CK)	(93.37±1.48)a	(90.27±1.28)a	(83.82±2.37)ab	(205.42±43.12)a
46	1	(86.67±2.98)ab	(83.67±4.18)ab	(80.54±3.04)ab	(188.76±28.64)ab
	2	(80.15±3.14)b	(82.33±5.04)ab	(85.71±2.51)a	(182.25±30.86)ab
	3	(60.21±2.46)c	(79.33±4.83)ab	(86.36±3.82)a	(174.82±40.23)b
	4	(52.22±1.17)d	(81.34±3.27)ab	(80.68±4.31)ab	(170.61±42.13)bc
	5	(79.51±2.79)b	(73.89±4.53)b	(75.36±1.96)b	(141.23±18.67)d
	6	(81.78±3.24)b	(72.81±3.92)b	(63.11±3.42)c	(111.54±20.04)f
	25(CK)	(93.37±1.48)a	(90.27±1.28)a	(83.82±2.37)ab	(205.42±43.12)a

1) 表中 46°C 为处理 2 h 的结果,其他温度为处理 4 h 的结果。数据均为平均值±标准误,相同温度处理下并列数据后不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法多重比较在 0.05 水平差异显著($P<0.05$)。下同。
Larvae were treated for 2 h at 46°C and 4 h at other temperatures. The data in the table are mean±SE, and the data followed by different lowercase letters in the same column under same temperature are significantly different at 0.05 level by multiple comparison of Duncan's new complex range method. The same applies below.

表 2 成虫期每天短时高温暴露 4 h 对草地贪夜蛾成活率和繁殖力影响

Table 2 Effects of short-term high temperature exposure for four hours on the adult survival rate and fecundity of *Spodoptera frugiperda*

高温处理 High temperature exposure		成活率/% Survival rate	成虫寿命/d Adult life span	产卵前期/d Pre-oviposition period	产卵历期/d Oviposition period	单雌产卵量/粒 Number of eggs laid per female	卵孵化率/% Hatchability of eggs
温度/℃ Temperature	处理天数/d Days of treatment						
37	1	(99.04±1.86)a	(14.55±0.68)a	(4.81±0.21)a	(7.45±0.41)a	(960.93±59.30)b	(86.76±1.57)a
	3	(98.76±2.04)a	(14.30±0.82)ab	(4.90±0.37)a	(7.43±0.51)a	(1164.66±90.68)a	(88.49±2.03)a
	5	(98.37±1.42)a	(13.93±1.49)b	(3.13±0.17)b	(7.26±0.51)a	(1108.81±78.63)a	(84.31±1.76)ab
	25(CK)	(98.42±2.14)a	(15.11±0.93)a	(5.12±0.18)a	(7.89±0.34)a	(949.19±56.47)b	(88.94±2.17)a
40	1	(96.18±3.25)a	(14.39±1.50)b	(4.61±0.42)ab	(6.57±0.49)b	(963.64±78.93)a	(84.32±1.98)ab
	3	(97.61±4.21)a	(13.47±0.85)bc	(3.27±0.14)b	(6.43±0.37)b	(928.93±59.30)a	(79.64±2.24)b
	5	(98.24±2.38)a	(13.07±0.63)c	(3.03±0.17)c	(6.40±0.43)b	(885.23±58.49)ab	(73.48±1.77)b
	25(CK)	(98.42±2.14)a	(15.11±0.93)a	(5.12±0.18)a	(7.89±0.34)a	(949.19±56.47)a	(88.94±2.17)a
43	1	(97.37±3.42)a	(13.94±0.66)b	(3.85±0.29)b	(6.42±0.46)b	(909.48±93.68)a	(62.95±1.24)b
	3	(96.42±4.51)ab	(12.59±0.65)c	(3.64±0.19)bc	(6.57±0.35)b	(851.09±84.23)b	(54.60±1.32)b
	5	(91.27±4.32)b	(12.08±0.88)cd	(3.11±0.15)c	(5.79±0.32)bc	(827.03±74.51)b	(33.79±1.04)c
	25(CK)	(98.42±2.14)a	(15.11±0.93)a	(5.12±0.18)a	(7.89±0.34)a	(949.19±56.47)a	(88.94±2.17)a
46	1	(27.26±1.13)b	(11.14±0.64)b	(3.28±0.23)b	(5.07±0.21)b	(270.71±18.74)b	(12.34±0.87)b
	2	(3.79±0.87)c	—	—	—	—	—
	3	0	—	—	—	—	—
25(CK)		(98.42±2.14)a	(15.11±0.93)a	(5.12±0.18)a	(7.89±0.34)a	(949.19±56.47)a	(88.94±2.17)a

3 讨论

夏季日最高温度很大程度上影响了田间昆虫的取食和热逃逸行为及存活率,从而决定了夏季昆虫的种群消减及地理分布^[12]。阐明昆虫应对短时极端高温的生活史策略,对研究全球气候变化下极端高温事件频发对昆虫地理分布、种群动态的预测和模拟非常关键^[13]。大多数学者认为活动能力较差的卵期和蛹期更应该具有耐热性以应对不可躲避的环境,因此对卵和蛹期高温耐热性的研究较多,如棉铃虫卵经高温 40.5℃ 热激 4 h,卵孵化率降为 23.58%^[14],亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 卵高温处理 6 h 的半致死温度为 40.24~40.44℃^[15],稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 蛹期经 41℃ 连续热激 7 h 及以上持续 3 d 后几乎不羽化^[16]。本研究结果显示,草地贪夜蛾卵在 40℃ 处理 4 h 其孵化率显著降低,45℃ 处理 3 h 卵的孵化率降低到 7.29%,处理 4 h 及以上卵不能孵化。这与张红梅等^[10]采用 38℃ 处理 6 h 卵孵化率显著降低,46℃ 处理 6 h 孵化率为 12.21% 的结果基本一致,差异主要为试验设置的温度梯度或虫源性质不同所引起。本试验中蛹的高温处理采用幼虫土中自然化蛹后进行高温暴露处理,因此,46℃ 暴露 4 h 连续处理 5 d 蛹的成活率仍然为 61.29%。这和前期的研究中^[10]把

蛹直接放入培养皿中 46℃ 处理 2 h 以上蛹的孵化率就显著降低不同,本试验蛹的高温暴露更接近田间自然状态,土中化蛹对蛹起到一定的保护作用。

昆虫的抗热能力是昆虫抗逆能力的重要组成部分,了解昆虫对高温的生态适应性,对昆虫抗逆机理研究及对害虫控制都具有重要的参考价值^[15]。草地贪夜蛾作为一种在热带地区终年繁殖的迁飞性害虫,对高温具有相对较强的适应性,前期研究显示,草地贪夜蛾最佳发育温度为 26~32℃^[17],本研究也显示,不同龄期幼虫和成虫 37~43℃ 短时高温暴露其成活率与对照无显著差异,幼虫的化蛹率、羽化率和成虫寿命、产卵前期、产卵历期等生命参数与对照相比差异较小。37℃ 短时高温暴露对雌虫的生殖能力具有一定的促进作用,这和 30℃ 高温处理绿盲蝽产卵量增加^[18],在一定温度范围内,短时的高温有利于草地贪夜蛾繁育^[10]的研究结果相似。但 46℃ 短时高温对幼虫和成虫都具有很强的杀伤性,1 龄幼虫在 46℃ 暴露 3 h 其成活率降低到 45.16%,其他龄期幼虫全部死亡,成虫高温暴露 4 h 成活率降低到 27.26%,每天暴露 4 h 持续 3 d 成虫全部死亡。鲁智慧等^[4]的研究也显示在 42℃ 条件下饲养仅 1 龄幼虫能完成发育,即 1 龄幼虫具有相对较强的耐热性。

尽管数小时的高温不会对昆虫产生即时致死效应,但高温对昆虫的影响具有一定的时滞效应。

Zhang 等在小菜蛾 *Plutella xylostella* (Linnaeus) 的短时高温处理中发现小菜蛾成虫受到短时高温暴露可以通过母代将负面影响传递给后代而影响卵的孵化率^[19]。草地贪夜蛾在卵期和蛹期持续 6 h 以上经历 38℃ 高温或持续 2 h 以上经历 42℃ 高温, 其种群生长会受到抑制^[10]。本研究结果显示, 不同龄期幼虫受到短期高温暴露对后期蛹重的影响较大, 龄期越高影响越大, 5 龄以上幼虫经 37℃ 高温暴露 4 h 就能显著降低蛹重, 46℃ 暴露 2 h 蛹重降低到 111.54 mg (对照 205.42 mg)。成虫期的高温暴露主要影响后期卵的孵化率, 这和小菜蛾的研究结果一致, 成虫每天 40℃ 高温暴露 4 h, 持续处理 3 d 后其卵的孵化率显著降低, 温度越高、处理时间越长卵的孵化率越低, 数据统计时经常出现整块卵块不能孵化的现象, 这主要是由于高温除了导致昆虫部分机体损伤外, 生殖机能对高温相对敏感, 短时高温会直接影响精子的形成过程或卵子的发生过程^[9,20]。

极端温度直接影响昆虫的行为、存活、生长发育速度和繁殖等, 从而最终决定了昆虫的种群动态和分布^[21]。尽管草地贪夜蛾不同虫态都具有很强的耐热性, 但实际上高温对其种群仍然存在抑制作用, 这种抑制作用具有一定的时滞效应。飞行行为研究也显示飞行能力最强的成虫饲养温度为 32℃, 说明环境的高温能增加其迁飞逃离不利环境的倾向^[22]。因此, 在草地贪夜蛾的预测预报中, 应将短期的高温效应纳入到种群动态预测模型, 以提高预测准确度, 改进防治策略。

参考文献

- [1] SPARKS A N. Fall armyworm symposium: a review of the biology of the fall armyworm [J]. Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82–87.
- [2] KEBEDE M. Out-break, distribution and management of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Africa: The status and prospects [J]. Academy of Agriculture Journal, 2018, 3(10): 551–568.
- [3] LI X J, WU M F, MA J, et al. Prediction of migratory routes of the invasive fall armyworm in eastern China using a trajectory analytical approach [J]. Pest Management Science, 2020, 76(2): 454–463.
- [4] 鲁智慧, 和淑琪, 严乃胜, 等. 温度对草地贪夜蛾生长发育及繁殖的影响[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 27–31.
- [5] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 18–26.
- [6] RAZA M M, KHAN M A, ARSHAD M, et al. Mushtaq. Impact of global warming on insects [J]. Archives of Phytopathology, Plant Protection, 2015, 48(1): 84–94.
- [7] 李超, 程登发, 刘怀, 等. 温度对马铃薯甲虫分布的影响——以新疆吐鲁番地区夏季高温对其羽化的影响为例[J]. 中国农业科学, 2013, 46(4): 737–744.
- [8] MA C S, HAU B, POEHLING H M. The effect of heat stress on the survival of the rose grain aphid, *Metopolophium dirhodum* (Hemiptera: Aphididae) [J]. European Journal of Entomology, 2004, 101(2): 327–332.
- [9] 郭慧芳, 陈长棍, 李国清. 高温胁迫对雄性棉铃虫生殖力的影响[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(1): 30–33.
- [10] 张红梅, 王燕, 尹艳琼, 等. 卵和蛹短时高温对草地贪夜蛾生长发育的影响[J]. 植物保护学报, 2020, 47(4): 831–838.
- [11] 刘旭, 刘昌华, 陈庆东, 等. 草地贪夜蛾半人工饲料及其制备方法和饲养方法: CN201911001972.1 [P]. 2019–10–21.
- [12] HOFFMANN A A, BLOWS M W. Species borders: ecological and evolutionary perspectives [J]. Trends in Ecology and Evolution, 1994, 9(6): 223–227.
- [13] ESTAY S, LIMA M, LABRA F. Predicting insect pest status under climate change scenarios: combining experimental data and population dynamics modeling [J]. Journal of Applied Entomology, 2009, 133(7): 491–499.
- [14] MIRONIDIS G K, SAVOPOULOU-SOULTANI M. Effects of heat shock on survival and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera Noctuidae) adults [J]. Journal of Thermal Biology, 2010, 35(2): 59–69.
- [15] 全玉东, 何康来, 王振营, 等. 短时极端高温对亚洲玉米螟卵、初孵幼虫和成虫的影响[J]. 植物保护学报, 2015, 42(6): 985–990.
- [16] 廖怀建. 高温热击对稻纵卷叶螟的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 33–42.
- [17] SCHLEMMER M. Effect of temperature on development and reproduction of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [D]. Evanston: North-West University, 2018.
- [18] 李国平, 封洪强, 黄博, 等. 短时高温暴露对绿盲蝽和中黑盲蝽存活及生殖的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 3939–3945.
- [19] ZHANG Wei, ZHAO Fei, HOFFMANN A A, et al. A single hot event that does not affect survival but decreases reproduction in the diamondback moth, *Plutella xylostella* [J/OL]. PLoS ONE, 2013, 8(10): e75923. DOI: 10.1371/journal.pone.0075923.
- [20] 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(4): 393–404.
- [21] CALOSI P, BILTON D T, SPACER J L. Thermal tolerance, acclimatory capacity and vulnerability to global climate change [J]. Biology Letters, 2008, 4(1): 99–102.
- [22] 谢殿杰, 张蕾, 程云霞, 等. 温度对草地贪夜蛾飞行能力的影响[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 13–17.

(责任编辑: 杨明丽)