

高温胁迫对异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊的致死作用及后续发育繁殖的影响*

罗茵** 祝国栋 孙夏 王新会 薛明***

(山东农业大学植物保护学院, 山东省蔬菜病虫害生物学重点实验室, 泰安 271018)

摘要 异迟眼蕈蚊 *Bradysia difformis* Frey 与韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang 是食用菌的两种重要的害虫, 对食用菌的质量及产量危害极大。高温处理是食用菌生产过程中常用的措施, 但其对眼蕈蚊害虫的防治效果研究尚未有报道。【目的】为明确高温胁迫对两种眼蕈蚊存活及繁殖的影响, 探究高温防治的可行性。【方法】本文探究了高温胁迫 (30~40 ℃) 对两种眼蕈蚊各虫态存活的影响, 并进一步分析短时高温胁迫对存活幼虫和成虫后续发育和繁殖的影响。【结果】当温度超过 36 ℃ 对各虫态产生明显的短时致死效应。4 种虫态中, 成虫耐热性最差, 蛹的耐热性最强。38 ℃ 下, 异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊成虫致死中时间 LT_{50} 分别为 0.493~0.553 h 和 1.335~1.431 h; 蛹 LT_{50} 分别为 1.402 h 和 2.356 h。经短时间高温胁迫后, 存活幼虫后续化蛹明显推迟, 成虫产卵量下降, 38 ℃ 处理 2 h, 存活异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊幼虫化蛹时间分别推迟 3.09 d 和 1.93 d, 产卵量较对照分别下降了 74% 和 60%。经高温胁迫后, 存活成虫后续的寿命缩短, 繁殖力下降。38 ℃ 处理 1 h, 存活异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊雌成虫寿命分别缩短了 1.60 d 和 1.57 d, 产卵量较对照分别下降了 59% 和 40%。【结论】高温胁迫 (≥ 36 ℃) 会影响两种眼蕈蚊各虫态存活, 并对存活个体后续发育繁殖有明显的抑制作用。因此, 高温处理可作为食用菌生产过程中防治眼蕈蚊的物理措施。

关键词 异迟眼蕈蚊, 韭菜迟眼蕈蚊, 高温胁迫, 致死作用, 生长发育, 繁殖

Lethal effects of heat stress on *Bradysia difformis* and *Bradysia odoriphaga* and its subsequent effects on development and fecundity

LUO Yin** ZHU Guo-Dong SUN Xia WANG Xin-Hui XUE Ming***

(College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Biology of Vegetable Pests and Diseases, Tai'an 271018, China)

Abstract *Bradysia difformis* Frey and *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang are important pests of edible mushrooms that cause significant economic losses to mushroom growers. Heat treatment is a common measure to prevent crop damage caused by these pests and other pathogens during the production of edible fungi. However, it remains unclear whether heat treatment is effective in controlling *B. difformis* and *B. odoriphaga* in mushroom houses. 【Objectives】To determine the effects of high temperature on the survival and fecundity of *B. difformis* and *B. odoriphaga*, and determine the practicality of using heat treatment to control these pests. 【Methods】We tested the effects of long- and short-term heat stress on the survival of *B. difformis* and *B. odoriphaga*, and on the development, longevity and fecundity of larvae and adults of both species. 【Results】Temperatures above 36 ℃ had rapid lethal effects on the survival of both *B. difformis* and *B. odoriphaga*. Of the four life-stages examined, pupae were the most tolerant to heat stress and adults were the most sensitive. At 38 ℃, the LT_{50} (the median lethal time) of *B. difformis* and *B. odoriphaga* adults were 0.493-0.553 h and 1.335-1.431 h respectively, while the

*资助项目 Supported projects: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201303027); 国家重点研发计划 (2017YFD0200900): 作物免疫调控与物理防控技术及产品研发

**第一作者 First author, E-mail: luoxiaoyin2015@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: xueming@sdaa.edu.cn

收稿日期 Received: 2017-08-08, 接受日期 Accepted: 2017-09-13

corresponding values for pupae were 1.402 h and 2.356 h, respectively. Short-term heat shock adversely affected the development and fecundity of surviving larvae. Exposure to 38 °C for 2 h delayed the development of surviving *B. difformis* and *B. odoriphaga* larvae by 1.93 d and 3.09 d, respectively, and reduced fecundity by 74% and 60%, respectively compared to the respective 25 °C control groups. Exposure to 38 °C for 1 h reduced the longevity of surviving *B. difformis* and *B. odoriphaga* adults by 1.60 d and 1.57 d, respectively, and fecundity by 59% and 40%, respectively compared to the respective 25 °C control groups. [Conclusion] Short-term heat shock (≥ 36 °C) had lethal effects on *B. difformis* and *B. odoriphaga* and also significantly inhibited the development and fecundity of surviving larva and adults. These results indicate that heat treatment can be used to control *B. difformis* and *B. odoriphaga* in mushroom houses.

Key words *Bradysia difformis* Frey, *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang, heat stress, lethal effect, development, fecundity

异迟眼蕈蚊 *Bradysia difformis* Frey 与韭菜迟眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang 是食用菌、蔬菜和以及花卉的重要害虫,对农业生产危害极大(薛明等,2005;张宏瑞等,2008;苟玉萍等,2015)。异迟眼蕈蚊主要取食危害平菇、香菇、茶树菇、金针菇等多种食用菌,同时也是韭菜等百合科蔬菜和花卉的重要害虫(张宏瑞等,2008;Hurley *et al.*, 2010;Han *et al.*, 2015;苟玉萍等,2015);韭菜迟眼蕈蚊主要取食百合科蔬菜(冯惠琴和郑方强,1987),也有研究发现此害虫是食用菌的重要害虫(师迎春等,2001;何嘉等,2005)。目前利用有机磷药剂、新烟碱药剂和部分植物源药剂等化学药剂是防治眼蕈蚊类害虫的主要方法(邓永振等,2012;李贤贤等,2014),但是化学药剂的长期使用,一方面会导致害虫抗药性的不断积累,防治效果逐渐下降,另一方面食用菌产品中农药残留问题较为突出,严重影响人类健康(韩奎兰和宋颖,1998;Denholm *et al.*, 2002)。此外,不恰当的施用化学药剂也会影响食用菌菌丝生长并影响品质(Wyatt, 1978; Cantelo *et al.*, 1982)。因此,在避免化学药剂使用的前提下,如何安全有效的控制菌蛆的为害,成为食用菌生产上亟待解决的问题。

昆虫是典型的小型变温动物,极易受到环境中各类胁迫因子的影响,而温度则是自然界中影响昆虫的繁衍、发生和分布的重要的非生物环境因子(Angilletta *et al.*, 2002;Umina *et al.*, 2005)。研究发现,高温胁迫会显著降低昆虫的存活率,昆虫经历高温后即使转移到正常温度下对其生长发育影响仍然均有严重影响,随后各龄期的发

育历期随着胁迫温度的升高和胁迫时间的延长而显著延长,卵孵化率、后代成虫寿命均显著下降(Chidawanyika and Terblanche, 2011;卢芙蓉等,2012;Ebrahimi and Fathipour, 2015)。鉴于高温对害虫存活及繁殖的不利影响,人为构建高温条件是部分害虫防治过程中重要的物理手段,例如蚜虫(Burke *et al.*, 2010)、西花蓟马(Li *et al.*, 2011)等。高温闷棚和高温堆肥也是菇房生产过程中病虫害防治的常用措施(仵均祥和李怡萍,2012)。但目前关于高温对食用菌眼蕈蚊害虫影响的研究报道较少,在实际应用中的研究同样较少。

本文研究 30 °C 以上高温环境对异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊不同虫态存活的影响,并对短时间热胁迫后存活试虫后续的发育和繁殖情况进行分析,以期明确高温胁迫对两种眼蕈蚊的影响,为在菇房中利用高温措施防治两种害虫提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试虫种群

异迟眼蕈蚊于 2014 年 11 月份由甘肃农业大学植物保护学院提供,韭菜迟眼蕈蚊于 2014 年 4 月份采自山东泰安韭菜田。经中国农业大学杨定教授鉴定后,采用平菇菌柄连续饲养 20 代以上。饲养方法参照薛明等(2002),卵、幼虫、蛹均在铺有润湿滤纸的直径 9 cm 玻璃培养皿中饲养;成虫羽化后,将成虫雌雄 1:1 配对,转移至铺有润湿滤纸的直径 3 cm 聚乙烯塑料盒中产卵,至成虫死亡保留虫卵继续饲养。试虫种群均

在光照培养箱中饲养,环境条件为温度(25 ± 1),相对湿度 $75\%\pm 5\%$,卵至成虫羽化前光照为全黑暗条件,成虫期光周期为 12L:12D。

1.2 长时间高温胁迫对两种眼蕈蚊存活的影响

选取异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊半日龄卵、蛹、成虫及 4 龄中期幼虫作为试虫。将试虫转移至铺有润湿滤纸的直径 9 cm 玻璃培养皿中,将培养皿转移至 30、32、34、36、38 光照培养箱(GXZ 型,宁波江南仪器厂)继续饲养。处理 12 h 后,将全部试虫转移至 25 下恢复 2 h,检查每处理下幼虫和成虫的存活情况。将卵、蛹转移至新的 9 cm 玻璃培养皿中,25 正常饲养,每天记录卵的孵化及蛹的羽化情况,直至全部试虫孵化或羽化。每种处理下包括 30 头雌虫所产卵分 3 个重复,幼虫、蛹及雌雄成虫(单一性别)各 100 头分 5 个重复。计算比较各温度胁迫下各虫态的存活率。

1.3 短时间高温胁迫对各虫态存活的影响

参照上述试验选择试虫。将卵、幼虫及蛹转移至 5 mL 离心管中,每离心管中放置 1 头雌虫所产卵、20 头幼虫或蛹;成虫转移至 10 mL 离心管中,每管 20 头成虫(单一性别)。将离心管转移至 36、38、40 恒温水浴锅中处理。36 处理 120 h,每 12 h 间隔取样,38 处理 4 h,每 0.5 h 间隔取样,40 处理 60 min,每 10 min 间隔取样。将全部离心管转移至 25 下恢复 2 h,检查幼虫和成虫存活情况。将卵、蛹转移至 9 cm 玻璃培养皿中,25 正常饲养,每天记录卵的孵化及蛹的羽化情况,直至全部试虫孵化或羽化。每种处理下包括 30 头雌虫所产卵分 3 个重复,幼虫、蛹及雌雄成虫各 100 头分 5 个重复。计算各处理致死中时间 LT_{50} (试虫数量死亡一半时所需要的时间)。

1.4 热胁迫对眼蕈蚊的生长发育以及繁殖影响

幼虫处理:参照 1.3 处理方法(36 和 38 处理 1 h 和 2 h),将存活的 4 龄中期幼虫置于直径 9 cm 玻璃培养皿中正常条件下饲养。每天记录幼虫的存活数量及化蛹数量,直至幼虫全部化

蛹。幼虫化蛹后,将每天所化蛹转移至新的培养皿中,记录成虫羽化时间,直至没有蛹继续羽化。成虫羽化后分别将同一天羽化的雌雄成虫 1:1 单头配对,放置于直径 3 cm 聚乙烯产卵盒中饲养,放置 1 cm 长菌柄以诱集产卵。每天观察记录成虫的产卵数目及存活情况,直至成虫全部死亡。统计各虫态发育历期、存活数和成虫寿命、产卵率、产卵量以及卵孵化率。每处理 5 个重复,每重复 20 头试虫。

成虫处理:参照 1.3 处理方法(36 和 38 下处理 1 h 和 2 h),将存活的雌雄成虫 1:1 配对,放置于直径 3 cm 聚乙烯产卵盒中,放置 1 cm 长菌柄以诱集产卵。转移至 25 恒温生化培养箱中进行后续饲养。每 12 h 记录各处理成虫的存活情况和产卵量,直至成虫全部死亡。统计各处理下雌雄成虫的寿命及产卵量。每处理 3 个重复,每重复 20 对成虫。

1.5 数据分析

用 SPSS19.0 数据处理系统进行数据分析,采用(Tukey-HSD, $P<0.05$)进行幼虫存活率、卵孵化率、幼虫化蛹时间、化蛹率、蛹历期、蛹羽化率以及成虫存活率、繁殖力的差异分析(将百分率进行反正弦转换后再进行差异分析)。

2 结果与分析

2.1 长时间高温胁迫对两种眼蕈蚊各虫态存活的影响

如图 1 中所示,12 h 高温胁迫会明显影响异迟眼蕈蚊各虫态的存活率。30,32,34 下 12 h 胁迫处理均不能对异迟眼蕈蚊幼虫、蛹和成虫造成明显的致死效应。其存活率均在 90%以上。但卵在 34 存活率明显下降,仅为 60%。当温度达到 36,异迟眼蕈蚊成虫全部死亡,卵、幼虫和蛹存活率均显著下降,分别为 40%、75%、73%。4 种虫态均不能在 38 下存活 12 h。

如图 2 所示,12 h 高温胁迫会明显影响韭菜迟眼蕈蚊各虫态的存活率。30,32,34 下 12 h 胁迫处理均不能对韭菜迟眼蕈蚊幼虫、蛹和成虫造成明显的致死效应。其存活率均在 90%以上。

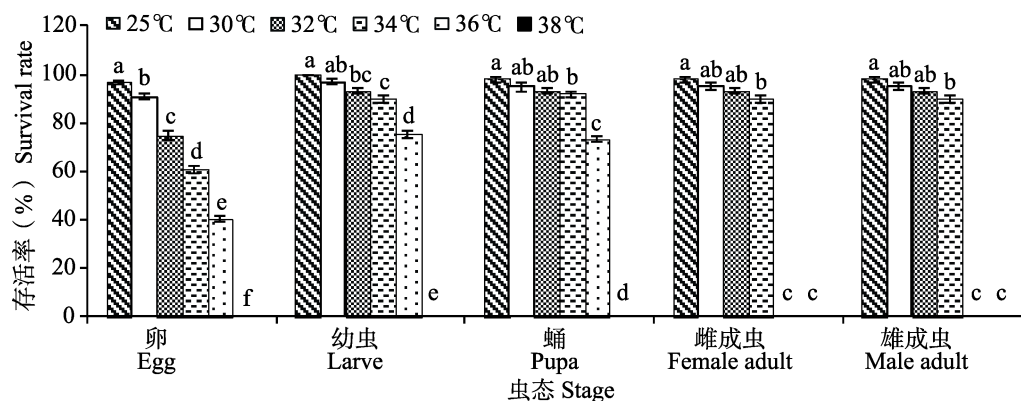


图 1 异迟眼蕈蚊经不同温度处理 12 h 后存活率

Fig. 1 The survival rate of *Bradysia difformis* after 12 h treatment at different temperatures

柱上标有不同字母表示温度间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Histograms with the different small letters indicate significant difference ($P < 0.05$) in survival rates of the same stage under different high temperature stress condition. The same below.

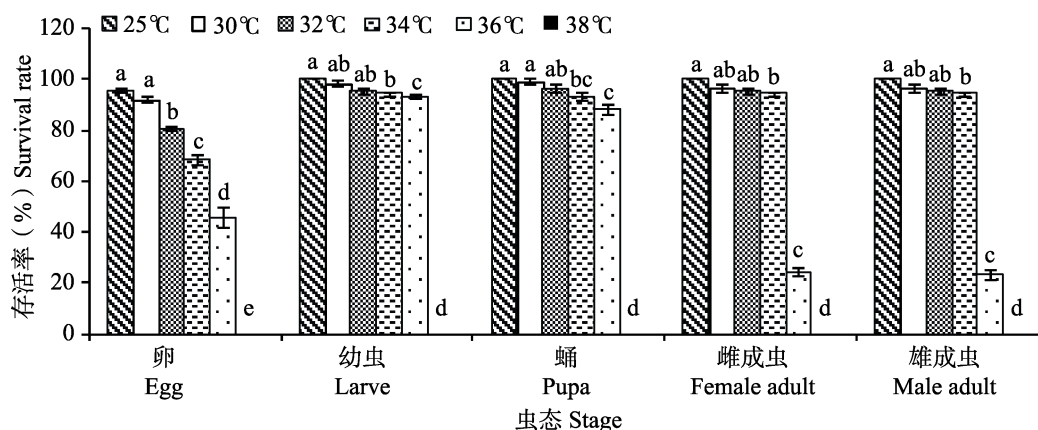


图 2 非菜迟眼蕈蚊经不同温度处理 12 h 后存活率

Fig. 2 The survival rate of *Bradysia odoriphaga* after 12 h treatment at different temperatures

卵在 34℃ 存活率明显下降, 仅为 68%。当温度达到 36℃, 异迟眼蕈蚊成虫全部死亡, 卵、幼虫和蛹存活率均显著下降分别为 46%、93%、88%。4 种虫态均不能在 38℃ 下存活 12 h。

2.2 短时间高温胁迫对两种蕈蚊各虫态存活的影响

36℃ 以上的高温对两种眼蕈蚊存活造成严重影响 (表 1)。38℃ 下, 两种眼蕈蚊成虫及卵对温度较为敏感。异迟眼蕈蚊的雌雄成虫、卵 LT_{50} 分别为 0.493, 0.553, 0.790 h, 非菜迟眼蕈蚊雌雄成虫、卵 LT_{50} 分别为 1.335, 1.431, 1.182 h。两种眼蕈蚊的 4 龄幼虫、蛹耐热性较强, 异迟眼蕈蚊 4 龄幼虫、蛹 LT_{50} 分别为 1.276 h, 1.402 h, 非菜迟眼蕈蚊 4 龄幼虫、蛹 LT_{50} 分别为 2.000 h,

2.356 h, 并且蛹的耐热性强于 4 龄幼虫。此外发现, 非菜迟眼蕈蚊耐热性强于异迟眼蕈蚊, 38℃ 下, 两种眼蕈蚊成虫的耐热性差异最大, 非菜迟眼蕈蚊与异迟眼蕈蚊雌雄成虫分别相差 0.837 h, 0.878 h, 差异显著。卵差异最小, 为 0.392 h。

40℃ 下, 异迟眼蕈蚊雌雄成虫 LT_{50} 不超过 8 min, 非菜迟眼蕈蚊雌雄成虫 LT_{50} 不超过 20 min, 两种眼蕈蚊蛹表现出较高的耐高温能力, 非菜迟眼蕈蚊与异迟眼蕈蚊蛹 LT_{50} 分别达到 72 min, 44 min。36℃ 下, 异迟眼蕈蚊雌雄成虫 LT_{50} 均达到 5 h 以上, 非菜迟眼蕈蚊雌雄成虫 LT_{50} 均达到 8 h 以上, 此温度下幼虫耐高温能力最强, 异迟眼蕈蚊、非菜迟眼蕈蚊幼虫 LT_{50} 分别达到 30 h, 75 h。

表 1 不同温度下异迟眼蕈蚊与非菜迟眼蕈蚊耐热能力
Table 1 Heat tolerance of *Bradyia difformis* and *Bradyia odoriphaga* at different temperatures

种类 Species	虫态 Stage	36 °C			38 °C			40 °C		
		回归方程 Regression equation	LT ₅₀ (95%CL) (h)	回归方程 Regression equation	LT ₅₀ (95%CL) (h)	回归方程 Regression equation	LT ₅₀ (95%CL) (h)	回归方程 Regression equation	LT ₅₀ (95%CL) (min)	回归方程 Regression equation
异迟眼蕈蚊 <i>Bradyia difformis</i>	卵 Egg	- 2.048+2.440x	10.049 (8.223-12.231)	- 2.051+2.053x	0.790 (0.736-0.843)	- 4.886+4.619x	11.423 (10.736-12.140)			
	4 龄幼虫 4 th instar	- 5.314+3.576x	30.620 (26.980-34.568)	- 0.794+7.505x	1.276 (1.182-1.366)	- 4.523+4.714x	9.108 (7.955-10.295)			
	蛹 Pupa	- 6.380±4.710x	22.626 (20.186-25.218)	- 1.184+8.065x	1.402 (1.308-1.493)	- 6.281+3.801x	44.921 (39.238-51.541)			
	雌成虫 Female adult	- 6.846+9.167x	5.582 (5.231-5.923)	2.013+2.845x	0.493 (0.423-0.556)	- 3.424+4.300x	6.256 (5.185-7.251)			
	雄成虫 Male adult	- 6.983+8.933x	6.049 (5.679-6.412)	1.651+2.790x	0.553 (0.482-0.619)	- 3.520+4.120x	7.151 (5.997-8.261)			
非菜迟 眼蕈蚊 <i>Bradyia odoriphaga</i>	卵 Egg	- 3.678+3.265x	13.389 (12.046-14.911)	- 0.523+7.199x	1.182 (1.106-1.255)	- 5.512+4.406x	17.823 (16.668-19.075)			
	4 龄幼虫 4 th instar	- 5.937+5.299x	75.026 (55.603-106.289)	- 2.338+7.769x	2.000 (1.885-2.114)	- 6.322+4.622x	23.336 (20.707-26.345)			
	蛹 Pupa	- 7.586+5.050x	31.785 (28.593-35.137)	- 2.822+7.581x	2.356 (2.228-2.488)	- 6.352+3.420x	72.007 (62.048-84.988)			
	雌成虫 Female adult	- 5.835+6.159x	8.861 (8.235-9.615)	- 0.684+2.366x	1.335 (1.197-1.467)	- 4.697+3.776x	17.531 (15.266-20.080)			
	雄成虫 Male adult	- 6.670+6.954x	9.103 (8.514-9.807)	- 0.918+2.565x	1.431 (1.316-1.542)	- 4.956+3.839x	19.543 (17.069-22.367)			

2.3 短时间高温胁迫对存活试虫后续发育及繁殖的影响

2.3.1 短时间高温胁迫对幼虫的影响 短时高温对异迟眼蕈蚊幼虫发育以及繁殖造成严重的影响(表 2)。幼虫历期明显缩短,以 38℃下处理 2 h 为例,异迟眼蕈蚊的幼虫化蛹时间(5.66 d)较对照(2.57 d)延长了 3.09 d;羽化成虫寿命缩短,繁殖能力明显下降,雌成虫寿命(1.33 d)较对照(2.67 d)缩短了 1.34 d,单雌产卵量为 24.33 粒,相较于对照(93.83 粒)下降了 74%,并且部分雌成虫不能产卵。此外,后代卵的孵化率(32.68%)明显下降,较对照

(94.57%)下降了 65%。对蛹的发育历期及羽化率则没有显著的影响。

如表 3 所示,经短时高温胁迫,存活韭菜迟眼蕈蚊的幼虫化蛹时间延长,以 38℃下处理 2 h 为例,韭菜迟眼蕈蚊的幼虫化蛹时间(7.49 d)较对照(5.56 d)延长了 1.93 d;成虫寿命缩短,繁殖能力明显下降,雌成虫寿命(1.92 d)较对照(3.25 d)缩短了 1.33d,单雌产卵量为 35.67 粒,相较于对照(96.33 粒)下降了 60%,此外,后代卵的孵化率仅为 42.02%,较对照(95.59%)下降了 56%。对蛹的发育历期及羽化率则没有显著的影响。

表 2 异迟眼蕈蚊幼虫经历热胁迫后的发育以及繁殖情况

Table 2 The development and fecundity of *Bradysia difformis* larvae after the thermal stress

指标 Index	36℃ 1 h	36℃ 2 h	38℃ 1 h	38℃ 2 h	CK (25℃)
高温处理幼虫存活率(%) Survival rate	85.00±1.41b	73.00±2.28c	62.00±2.28d	34.00±1.67e	97.21±0.20a
幼虫化蛹时间(d) Pupation time	2.69±0.08c	3.84±0.13b	4.22±0.11b	5.66±0.16a	2.57±0.09c
蛹历期(d) Pupal development time	3.44±0.08a	3.48±0.08a	3.51±0.08a	3.61±0.09a	3.40±0.08a
雌成虫寿命(d) Female longevity	2.50±0.14a	2.42±0.14ab	1.92±0.18b	1.33±0.14b	2.67±0.14a
雄成虫寿命(d) Male longevity	2.58±0.18ab	2.33±0.14ab	2.25±0.13ab	1.92±0.14b	2.75±0.24a
化蛹率(%) Pupation rate	97.00±1.10a	94.00±0.89a	96.00±1.67a	70.00±3.74b	97.00±1.10a
羽化率(%) Emergence rate	98.14±1.02a	96.57±1.10a	94.78±1.68a	94.64±2.08a	96.25±2.58a
产卵量(粒/雌) Fecundity (eggs/female)	83.58±3.15b	64.42±2.50c	46.17±4.10d	24.33±2.33e	93.83±3.70a
产卵率(%) Oviposition rate	86.23±1.49a	75.55±2.24b	72.12±2.45bc	69.21±2.16c	90.12±1.76a
孵化率(%) Hatching rate	94.65±1.20a	80.32±3.44b	59.23±2.69c	32.68±2.74d	94.57±1.41a

表中数据为平均值±标准误差,不同温度间进行差异分析,数据后标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Tukey-HSD),下表同。

Data in the table are mean ± SE, and those for the same temperature followed by different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$, Tukey-HSD). The same below.

表 3 韭菜迟眼蕈蚊幼虫经历热胁迫后的发育以及繁殖情况

Table 3 The development and fecundity of *Bradysia odoriphaga* larvae after the thermal stress

指标 Index	36℃ 1 h	36℃ 2 h	38℃ 1 h	38℃ 2 h	CK (25℃)
高温处理幼虫存活率(%) Survival rate	90.00±1.41b	82.00±1.10c	79.00±1.97c	60.00±2.00d	99.21±0.20a
幼虫化蛹时间(d) Pupation time	5.64±0.13b	5.98±0.12b	6.20±0.12b	7.49±0.14a	5.56±0.10b
蛹历期(d) Pupal development time	3.31±0.07a	3.37±0.07a	3.20±0.08a	3.22±0.08a	3.40±0.07a
雌成虫寿命(d) Female longevity	3.08±0.14a	2.33±0.14b	2.42±0.14b	1.92±0.14b	3.25±0.13a
雄成虫寿命(d) Male longevity	4.25±0.27ab	4.08±0.14a	3.75±0.17bc	3.08±0.14c	4.67±0.25a
化蛹率(%) Pupation rate	96.00±1.67a	95.00±1.41a	94.00±1.67a	92.00±1.79a	98.00±1.10a
羽化率(%) Emergence rate	97.88±1.18a	95.88±2.42a	95.09±2.30a	93.12±4.53a	98.55±0.92a
产卵量(粒/雌) Fecundity (eggs/female)	93.00±3.73a	79.08±2.74b	65.42±3.67c	35.67±2.31d	96.33±4.64a
产卵率(%) Oviposition rate	90.33±3.98bc	86.33±2.04bcd	84.33±2.98cd	82.33±2.04d	96.67±5.97a
孵化率(%) Hatching rate	95.50±0.99a	78.18±2.72b	83.62±3.25b	42.02±2.74c	95.59±1.96a

2.3.2 短时间高温胁迫对成虫的影响 短时高温对异迟眼蕈蚊成虫存活以及繁殖造成严重的影响(表4)。38℃下处理1 h,成虫存活率仅为41%,存活眼蕈蚊的成虫繁殖能力下降,以38℃

下处理1 h为例,雌成虫寿命(0.87 d)较对照(2.47 d)缩短了1.60 d,单雌产卵量为36.83粒,相较于对照(89.69粒)下降了59%,产卵率(40.00%)较对照(89.67%)下降55%。其次,后代卵的孵化率(39.44%)影响严重,较对照(95.14%)下降了59%。处理2 h,成虫全部

死亡。

如表5所示,短时高温对韭菜迟眼蕈蚊成虫存活以及繁殖造成严重的影响。38℃下处理2 h,成虫存活率仅为39.50%。存活成虫繁殖能力下降,以38℃下处理1 h为例,韭菜迟眼蕈蚊的雌成虫寿命(1.03 d)较对照(2.60 d)缩短了1.57 d,单雌产卵量为57.50粒,相较于对照(97.57粒)下降了40%,并且产卵率(53.33%)较对照(93.33%)下降43%。其次,对后代卵的孵化率(45.83%)影响严重,较对照(97.11%)下降了53%。

表4 短时间热胁迫对异迟眼蕈蚊存活成虫寿命及生殖的影响

Table 4 The effects of short-term heat shock on the longevity and fecundity of the survival *Bradysia difformis* adults

指标 Index	36℃ 1 h	36℃ 2 h	38℃ 1 h	38℃ 2 h	CK (25℃)
高温处理雌成虫存活率(%) Female survival rate	89.00±1.55b	80.50±1.11c	41.00±1.38d	0e	100.00a
高温处理雄成虫存活率(%) Male survival rate	90.50±0.22b	85.50±0.28b	42.50±0.32c	0d	100.00a
雌成虫寿命(d) Female longevity	1.93±0.11b	1.27±0.11c	0.87±0.09c	-	2.47±0.13a
雄成虫寿命(d) Male longevity	2.33±0.15b	2.27±0.11b	1.33±0.08c	-	2.93±0.18a
产卵量(粒/雌) Fecundity (eggs/female)	55.91±2.45b	48.33±2.33c	36.83±2.77d	-	89.69±2.64a
产卵率(%) Oviposition rate	73.33±2.31b	60.00±2.16c	40.00±2.31d	-	89.67±2.19a
孵化率(%) Hatching rate	77.34±1.95b	63.91±2.66c	39.44±2.06d	-	95.14±2.15a

表5 短时间热胁迫对韭菜迟眼蕈蚊存活成虫寿命及生殖的影响

Table 5 The effects of short-term heat shock on the longevity and fecundity of the survival *Bradysia odoriphaga* adults

指标 Index	36℃ 1 h	36℃ 2 h	38℃ 1 h	38℃ 2 h	CK (25℃)
高温处理雌成虫存活率(%) Female survival rate	95.00±1.00b	87.00±2.14c	82.00±1.26d	39.50±1.49e	100.00a
高温处理雄成虫存活率(%) Male survival rate	96.00±0.24b	92.50±0.41b	85.50±0.22c	43.50±0.28d	100.00a
雌成虫寿命(d) Female longevity	2.20±0.10a	2.13±0.16a	1.03±0.06b	0.73±0.11b	2.60±0.13a
雄成虫寿命(d) Male adult	2.66±0.18b	2.53±0.13b	1.27±0.11c	1.07±0.06c	3.27±0.18a
产卵量(粒/雌) Fecundity (eggs/female)	79.92±4.53b	76.30±4.04b	57.50±2.66c	35.40±1.82d	97.57±4.86a
产卵率(%) Oviposition rate	86.67±2.33b	66.67±2.04c	53.33±2.33d	33.33±2.04e	93.33±2.18a
孵化率(%) Hatching rate	87.25±1.14b	76.73±2.66c	45.83±3.06d	41.52±3.87d	97.11±1.05a

3 讨论

温度是影响昆虫种群动态和地理分布的重要环境因子,当温度超过或低于昆虫的适宜温度,短时间的温度胁迫即会引起昆虫的迅速死亡(Bowler and Terblanche, 2008)。本研究发现,异迟眼蕈蚊与韭菜迟眼蕈蚊均对高温胁迫较为敏感,当温度超过36℃,短时间高温胁迫即会引起各虫态的迅速死亡,38℃下各虫态LT₅₀均在2 h以内。此外在38℃下4 h,40℃下1 h,全部个体死亡。与我们结果较为类似的是,曲绍轩等

(2015)对食用菌另一重要害虫——厉眼蕈蚊 *Lycoriella ingenua* 的研究发现,当温度超过38℃,各虫态死亡严重;在40℃成虫、蛹、幼虫、卵全部死亡的暴露时间分别为:24,12,0.5,0.5 h。明确害虫的耐热水平使得高温处理可以应用于农业害虫的防治,目前已经在各种园艺昆虫(如蓟马、粉虱等)以及仓储害虫(如绿豆象)的防治中取得较好的结果(Cui et al., 2008; Li et al., 2011; 仲建锋等, 2013)。据此,我们也推断在食用菌生产过程中适当的高温处理能够有效控制眼蕈蚊害虫的发生。

短时间高温胁迫不仅会引起昆虫的迅速死亡,对部分存活昆虫还会产生持续的不利影响 (Huang *et al.*, 2007; Piyaphongkul *et al.*, 2012)。空心莲子草叶甲成虫在 36 和 39 ℃ 下经过 4.0 h 的热胁迫,存活成虫产卵量和卵的孵化率明显下降 (Zhao *et al.*, 2016)。Ebrahimi 等 (2015) 证实小菜蛾成虫在 30~40 ℃ (2~6 h) 热胁迫后寿命缩短,繁殖力下降。本研究发现,经过短时间的高温胁迫,两种眼蕈蚊存活幼虫发育历期延长,如异迟眼蕈蚊在 38 ℃ 下 2 h 处理后,幼虫发育历期延长 3.09 d,这可能是由于高温胁迫导致幼虫体内能量代谢的紊乱,并延缓化蛹需营养物质的积累 (Neven, 2000; Yukawa *et al.*, 2016)。此外,幼虫化蛹后成虫的寿命也较对照明显缩短,并且产卵量下降。同样的,短时间高温胁迫处理成虫会造成成虫寿命缩短,产卵量下降明显,产卵率以及孵化率都有一定程度下降。38 ℃ 下处理 1 h,韭菜迟眼蕈蚊单雌产卵量为 57.50 粒,相较于对照下降了 40%。Cheng 等 (2017) 研究指出在 33 ℃ 以上的高温下韭菜迟眼蕈蚊成虫的寿命和繁殖力均会受到明显的抑制,并且后代种群也会受到一定程度的影响。以上试验均说明高温胁迫会影响两种眼蕈蚊的存活及繁殖,幼虫的耐热性要强于成虫,相同的温度处理下,成虫的所受的不利影响更加严重。因此在应用高温措施实施害虫防治过程中,可优先考虑成虫期防治。此外,两种眼蕈蚊同属蔬菜和花卉的重要地下害虫,因此温室苗圃中也可采用高温处理防治两种害虫。

综上所述,高温胁迫对两种眼蕈蚊具有明显的致死效应,短时高温处理即引起明显的死亡,并且即使部分个体能够存活,后续的生命参数仍受到抑制。因此,食用菌生产过程中一定条件的高温处理能限制眼蕈蚊的发生,并对后续种群扩增有持续的控制作用。该措施对减少化学药剂使用,保证食用菌的绿色安全生产有重要意义。

参考文献 (References)

Angilletta MJ, Niewiarowski PH, Navas CA, 2002. The evolution of thermal physiology in ectotherms. *Journal of Thermal Biology*,

27(4): 249–268.

Bowler K, Terblanche JS, 2008. Insect thermal tolerance: what is the role of ontogeny, ageing and senescence? *Biological Reviews*, 83(3): 339–355.

Burke G, Fiehn O, Moran N, 2010. Effects of facultative symbionts and heat stress on the metabolome of pea aphids. *The ISME Journal*, 4(2): 242–252.

Cantelo, WW, Henderson D, Argauer RJ, 1982. Variation in sensitivity of mushroom strains to diazinon compost treatment. *Journal of Economic Entomology*, 75(1): 123–125.

Cheng J, Su Q, Jiao X, Jiao XG, Shi CH, Yang YT, Han HL, Xie W, Guo ZJ, Wu QJ, Xu BY, Zhang YJ, 2017. Effects of heat shock on the *Bradysia odoriphaga* (Diptera: Sciaridae). *Journal of Economic Entomology*, 110(4): 1630–1638.

Chidawanyika F, Terblanche JS, 2011. Rapid thermal responses and thermal tolerance in adult codling moth *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of Insect Physiology*, 57(1): 108–117.

Cui X, Wan F, Xie M, Liu T, 2008. Effects of heat shock on survival and reproduction of two whitefly species, *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* biotype B. *Journal of Insect Science*, 8(24): 1–10.

Denholm I, Devine GJ, Williamson MS, 2002. Insecticide resistance on the move. *Science*, 297(5590): 2222–2223.

Ebrahimi N, Talebi AA, Fathipour Y, 2015. Effects of short-term heat shock of eggs on the development and fecundity of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Journal of Crop Protection*, 4(1): 73–83.

Feng HQ, Zheng FQ, 1987. Study of the occurrence and control of *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang. *Journal of Shandong Agricultural University*, 18(1): 71–80. [冯惠琴, 郑方强, 1987. 韭蛆发生规律及防治研究. 山东农业大学学报, 18(1): 71–80.]

Gou YP, Liu Q, Liu CZ, 2015. Effects of different host plants on the growth, development and fecundity of *Bradysia difformis*. *Plant Protection*, 41(1): 28–32. [苟玉萍, 刘倩, 刘长仲, 2015. 不同寄主植物对异迟眼蕈蚊生长发育和繁殖的影响. 植物保护, 41(1): 28–32.]

Han KL, Song Y, 1998. Pollution-free and high yield cultivation technique of *Pleurotus ostreatus*. *Edible Fungi*, (5): 33–34. [韩奎兰, 宋颖, 1998. 平菇无公害高产栽培技术. 食用菌, (5): 33–34.]

Han QX, Cheng DM, Luo J, Zhou CZ, Lin QS, Xiang MM, 2015. First report of *Bradysia difformis* (Diptera: Sciaridae) damage to *Phalaenopsis orchid* in China. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 18(1): 77–81.

He J, Zhang T, Li ZY, Zhang HR, 2005. The studies on mushroom

- pests in China. *Edible Fungi of China* 24(1): 21–24. [何嘉, 张陶, 李正跃, 张宏瑞, 2005. 我国食用菌害虫研究现状. 中国食用菌, 24(1): 21–24.]
- Huang LH, Chen B, Kang L, 2007. Impact of mild temperature hardening on thermotolerance, fecundity, and *hsp* gene expression in *Liriomyza huidobrensis*. *Journal of Insect Physiology*, 53(12): 1199–1205.
- Hurley BP, Slippers B, Wingfield BD, Govender P, Smith JE, Wingfield MJ, 2010. Genetic diversity of *Bradysia difformis* (Sciaridae: Diptera) populations reflects movement of an invasive insect between forestry nurseries. *Biological Invasions*, 12(4): 729–733.
- Li HB, Shi L, Lu MX, Wang JJ, Du YZ, 2011. Thermal tolerance of *Frankliniella occidentalis*: Effects of temperature, exposure time, and gender. *Journal of Thermal Biology*, 36(7): 437–442.
- Li XX, Ma XD, Xue M, Zhao HP, Li ZX, 2014. Toxic effects of clothianidin and other five kinds of insecticides to *Bradysia odoriphaga*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 41(2): 225–229. [李贤贤, 马晓丹, 薛明, 赵海鹏, 李朝霞, 2014. 噻虫胺等药剂对韭菜迟眼蕈蚊的致毒效应. 植物保护学报, 41(2): 225–229.]
- Lu FP, Fu YG, Lai KZ, Zheng YF, Lu H, Xu XL, Chen Q, 2012. Effect of eggs high temperature exposure on the development and fecundity of *Mononychellus tanajoa* (Acari: Tetranychidae). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(21): 229–236. [卢芙萍, 符悦冠, 经福林, 赖开枕, 郑友枫, 卢辉, 徐雪莲, 陈青, 2012. 卵高温胁迫对木薯单爪螨发育与繁殖的影响研究. 中国农学通报, 28(21): 229–236.]
- Neven LG, 2000. Physiological responses of insects to heat. *Postharvest Biology and Technology*, 21(1): 103–111.
- Piyaphongkul J, Pritchard J, Bale J, 2012. Heat stress impedes development and lowers fecundity of the brown planthopper *Nilaparvata lugens* (Stål). *PLoS ONE*, 7(10): e47413.
- Qu SX, Ma L, Yuan Y, Song JD, Li JH, Hou LJ, 2015. Survival rates of the mushroom sciarid fly *Lycoriella ingenua* under adverse temperatures. *Journal of Environmental Entomology*, 37(3): 688–692. [曲绍轩, 马林, 袁野, 宋金梯, 林金盛, 李辉平, 侯立娟, 2015. 食用菌厉眼蕈蚊 *Lycoriella ingenua* 在温度逆境下的存活率. 环境昆虫学报, 37(3): 688–692.]
- Shi YC, Zheng JQ, Zhang Y, Shen GY, 2001. Survey of main harmful organisms in edible fungi in Beijing suburbs. *Plant Protection Technology and Extension*, 21(8): 18–19. [师迎春, 郑建秋, 张芸, 沈国印, 2001. 京郊食用菌主要有害生物调查简报. 植保技术与推广, 21(8): 18–19.]
- Umina PA, Weeks AR, Kearney MR, Kearny MR, Mckechnie, Hoffmann AA, 2005. A rapid shift in a classic clinal pattern in *Drosophila* reflecting climate change. *Science*, 308(5722): 691–693.
- Wu JX, Li YP, 2012. Pollution-free control techniques of edible fungus pests. *Northwest Horticulture*, (2): 37–38. [仵均祥, 李怡萍, 2012. 食用菌害虫无公害防治技术. 西北园艺(蔬菜), (2): 37–38.]
- Wyatt IJ, 1978. Principles of insecticide action on mushroom cropping: incorporation into casing. *Annals of Applied Biology*, 88: 89–103.
- Xue M, Pang YH, Wang CX, Li QL, 2014. Biological effect of liliaceous host plants on *Bradysia odoriphaga* Yang et Zhang (Diptera: Sciaridae). *Acta Entomologica Sinica*, 48(6): 914–921. [薛明, 庞云红, 王承香, 李强, 2005. 百合科寄主植物对韭菜迟眼蕈蚊的生物效应. 昆虫学报, 48(6): 914–921.]
- Yukawa J, Ichinose M, Kim W, Uechi N, Gyoutoku N, Fujii TI, 2016. Lower development threshold temperatures and thermal constants for four species of *Asphondylia* (Diptera: Cecidomyiidae) in Japan and their larval developmental delay caused by heat stress. *Applied Entomology and Zoology*, 51(1): 71–80.
- Zhang HR, Zhang XY, Shen DR, Zhang T, Li ZY, 2008. Study on biological characteristics of *Bradysia difformis* on edible mushrooms. *Edible Fungi of China*, 27(6): 54–56. [张宏瑞, 张晓云, 沈登荣, 张陶, 李正跃, 2008. 食用菌异迟眼蕈蚊 *Bradysia difformis* 的生物学特性. 中国食用菌, 27(6): 54–56.]
- Zhao MT, Wang Y, Zhou ZS, Wang R, Guo JY, Wan FH, 2016. Effects of periodically repeated heat events on reproduction and ovary development of *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(4): 1586–1594.
- Zheng YZ, Zhang XX, Li YH, Li ZL, Liu B, 2012. Toxicity determination of five biological pesticides against *Lycoriella pleuroti*. *Agrochemicals*, 51(10): 758–759. [邓永振, 张肖肖, 李永江, 李子玲, 刘斌, 2012. 5种生物农药对平菇厉眼蕈蚊的毒力测定. 农药, 51(10): 758–759.]
- Zhong JF, Wan ZH, Li L, Chen HW, Wu GH, 2013. Effect of low and high temperatures on controlling azuki bean beetle (*Callosobruchus chinensis* L., Coleoptera: Bruchidae) in storage. *Scientia Agricultura Sinica*, 46(1): 54–59. [仲建锋, 万正煌, 李莉, 陈宏伟, 伍广洪, 2013. 低温和高温对仓储绿豆象的防治效果. 中国农业科学, 46(1): 54–59.]