

雌雄意大利蝗耐高温差异及其生理生化 响应对策*

李 爽** 王冬梅 李 娟 扈鸿霞 季 荣***

(新疆师范大学生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 中亚区域跨境有害生物
联合控制国际研究中心, 乌鲁木齐 830054)

摘 要 【目的】意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.) 是新疆荒漠、半荒漠草原优势危害种类之一, 前期研究表明其发生与新疆同期气候变暖显著相关, 且野外自然种群雌性个体数量明显多于雄性。本研究进一步探讨了雌雄意大利蝗高温耐受性差异及其生理生化机制。【方法】采用生理生化研究方法, 研究了在 27、30、33、36、39、42、45 和 48℃ 不同温度处理下, 雌雄意大利蝗体内自由水/结合水、海藻糖、游离蛋白质、不饱和脂肪酸(油酸、亚油酸和亚麻酸) 6 种抗逆保护物质的含量变化。【结果】不超过 39 时, 雌雄死亡率差异不显著 ($P > 0.05$), 超过 39 后雄虫死亡率显著高于雌虫 ($P < 0.05$), 51 时死亡率达到 100%; 随温度升高, 雌雄意大利蝗体内 6 种物质的含量均呈先增后减的变化趋势。但不同温度处理下, 雌雄成虫的自由水/结合水比值差异均不显著 ($P > 0.05$), 海藻糖、油酸的含量差异均显著 ($P < 0.05$)。除 45, 雌雄体内亚麻酸的含量差异均显著 ($P < 0.05$); 除 27、48, 雌雄体内游离蛋白质含量差异均显著 ($P < 0.05$), 亚油酸的含量变化则无明显规律。不同温度胁迫下, 雌雄意大利蝗体内 6 种物质增减速率不同, 以不饱和脂肪酸物质积累速率最大, 分别为 82.53% (雌)、117.13% (雄)。【结论】雌、雄意大利蝗个体可通过积累不同种类的抗逆保护物质, 以度过阶段性高温胁迫, 且雌性具有较强的高温耐受能力。**关键词** 意大利蝗, 高温耐受, 死亡率, 抗逆保护物质

Differences in heat tolerance and physio-biochemical mechanisms between adult female and male *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae)

LI Shuang** WANG Dong-Mei LI Juan HU Hong-Xia JI Rong***

(College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Key Laboratory of Conservation Biology and Management for Xinjiang
Special Species, National Central for International Joint Research on Cross-border Pest Management in Central Asia,
Urumqi 830054, China)

Abstract [Objectives] *Calliptamus italicus* is a major plague pest species in the arid and semi-arid grasslands of Xinjiang. Previous studies claimed that outbreaks of this pest were closely related to climate warming in Xinjiang since the 1980s. Females outnumbered males in natural populations. This study aimed to explore differences in heat tolerance between adult females and males, including the physiological and biochemical mechanisms underlying these differences. [Methods] The free water/combined water, trehalose, soluble protein, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid content of females and males was measured after adults were placed into a climate cabinet under consistent temperature regimes of 27–48 at 3 intervals for 4 h. [Results] Mortality of females and males did not significantly differ when exposed to < 39 ($P > 0.05$), whereas the mortality of males was significantly higher than that of females when exposed to temperatures > 39 ($P < 0.05$).

* 资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (U1120301); 国际科技合作专项 (2015DFR30290); 本研究得到自治区教育厅普通本科高等学校重点实验室资助

**第一作者 First author, E-mail: float1990@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: jirong@xjnu.edu.cn

收稿日期 Received: 2015-03-09, 接受日期 Accepted: 2015-06-09

Mortality of both sexes reached 100% at 51 °C. The contents of the six stress resistant substances in females and males showed a trend of first increasing, then decreasing, with temperature. Although the free water/combined water ratios of females and males were not significantly different under different temperatures ($P > 0.05$), their trehalose and oleic acid contents were significantly different ($P < 0.05$). The linolenic acid content of females and males was also significantly different ($P < 0.05$) at all temperatures other than 45 °C, and soluble protein content was also significantly different between the sexes ($P < 0.05$) at all temperatures other than 27 °C and 48 °C. There was no apparent regulation of the change in linoleic acid content. The accumulation rates of the six stress resistant substances differed with temperature; unsaturated fatty acids had the highest accumulation rate, peaking at 82.53% and 117.13% for females and males, respectively. [Conclusion] *C. italicus* can adapt to higher temperatures by accumulating stress resistant substances, and females have higher capacity for heat tolerance than males.

Key words *Calliptamus italicus* (L.), heat tolerance, mortality, stress resistant substances

作为变温动物,昆虫对温度适应能力的强弱在其分布、生殖、扩散和暴发中起着至关重要的作用。在较高温度条件下昆虫通过采取多种适应策略,仍可以保持较高的种群数量(陈瑜和马春森,2010; Thomson *et al.*, 2010)。其中,非常重要的生理生化机制之一就是在体内积累较多的抗逆保护物质(Anders *et al.*, 2006; Carstens and Knowles, 2007; Elizabeth and Nathan, 2007; Carly *et al.*, 2012)。很多研究报道,雌性昆虫比雄性具有更强的抗逆能力。例如,水椰八角铁甲 *Octodonta nipae* (Maulik) 雌性成虫耐力高于雄虫(翁章权, 2010); 烟粉虱 *Bemisia tabaci* (Gennadius) 雌性成虫耐热性显著大于雄虫(马方舟, 2014); 38 °C 高温下处理不同时间,阿里山潜蝇茧蜂 *Fopius arisanus* (Sonan) 雄蜂存活率显著低于雌蜂(郭俊杰等, 2014)。

意大利蝗 *Calliptamus italicus* (L.) 是新疆及周边国家和地区的优势蝗虫危害种类之一,给当地造成了严重的经济、社会和生态损失(张泉等, 1995)。前期研究报道,气候变暖有助于新疆草原蝗虫严重发生(杨洪升等, 2007, 2008),而且野外自然种群雌性数量明显多于雄性(数据未发表),但雌雄意大利蝗对高温耐受能力的差异及其生理生化机制还未见报道。

1 材料与方法

1.1 试虫采集

于 2014 年 7 月上旬意大利蝗严重发生期采

自新疆维吾尔自治区伊宁市察布查尔县(81°7'E, 43°45'N)。

1.2 不同温度处理

挑选健康的雌雄成虫,利用光照培养箱(GXZ-436B、宁波江南仪器厂)依次在 27、30、33、36、39、42、45、48 和 51 °C 下处理 4 h,室温 27 °C 恢复 1 h,液氮迅速冷冻处死移至 -80 °C 冰箱冻存。每个温度下处理 200 头蝗虫(雌雄各 100 头),记录各温度处理后的雌雄死亡率。根据意大利蝗生物学习性和生态学特征,设 27 °C 为对照组,各指标测定至少重复 3 次。

1.3 不同温度处理雌雄意大利蝗体内抗逆保护物质测定

1.3.1 自由水/结合水含量测定 参照韩瑞东等(2005)方法。取 5 头试虫称重,65 °C 恒温烘箱中干燥 24 h 至恒重,计算虫体自由水含量;然后 105 °C 烘干 24 h 至恒重,计算结合水含量。

1.3.2 海藻糖含量测定 参照易传辉等(2009)方法。称取 1.00 g 蝗虫粉末于离心管内,加 5 mL 10%三氯乙酸,离心转移上清液,重复抽提 1 次,合并上清液定容至 100 mL 待用,采用蒽酮比色法在波长 620 nm 处进行比色,葡萄糖作标准曲线计算海藻糖含量。

1.3.3 游离蛋白质含量测定 参照王学奎(2010)方法。称取 0.05 g 蝗虫粉末,加 1 mL 0.02 mol/L 磷酸缓冲液(pH 7.0)匀浆后至离心管内,用 6 mL

0.02 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.0) 冲洗匀浆器, 匀浆液在 25 ℃ 下放置 3 h 以上充分抽提, 在 5 000 r/min 离心 10 min, 上清液定容至 10 mL 待用。取 0.2 mL 定溶液, 加入 0.8 mL 0.02 mol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.0) 及 5.0 mL 考马斯亮蓝 G-250, 放置 2 min, 采用考马斯 G-250 法于波长 595 nm 处进行比色, 牛血清蛋白作标准曲线计算游离蛋白质含量。

1.3.4 不饱和脂肪酸含量测定 参照胡礼禹等 (2012) 和白希等 (2013) 的方法。称取 1.00 g 蝗虫粉末, 采用正己烷-索氏提取法提取粗提油, 称取 0.05 g 甲酯化, 取上清液进行 GC 分析。用油酸甲酯、亚油酸甲酯、亚麻酸甲酯标准液进行 GC 分析作标准曲线并计算 3 种不饱和脂肪酸含量。

色谱条件: 安捷伦 6890N 气相色谱仪。进样口温度: 250 ℃; 升温顺序: 50 ℃ 保持 2 min, 以 10 ℃/min 升至 170 ℃ 后, 保持 10 min, 以 4 ℃/min 升至 180 ℃, 保持 10 min, 以 2 ℃/min 升至 220 ℃, 保持 10 min。检测器温度 (FID) 300 ℃, 载气 N₂ 1.5 mL/min, H₂ 40 mL/min, 空气 450 mL/min, 尾吹 N₂ 45 mL/min, 进样量 1 μL。

1.4 数据处理

数据分析采用 SPSS17.0 软件, 不同温度下雌雄意大利蝗数据处理采用单因素方差分析 (ANOVA), 结合最小显著差数法 (LSD) 和多范围检验 (Duncan's 检验), 分析差异显著性 ($P < 0.05$)。同一温度下雌雄意大利蝗差异采用独立样本 *T* 检验分析差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同温度下雌雄意大利蝗死亡率差异

图 1 显示, 在 27~39 ℃ 范围内, 雌雄意大利蝗死亡率很小, 最大值分别为 3.17% 和 6.50%, 且差异均不显著 ($P > 0.05$); 随温度升高, 死亡率增加, 48 ℃ 时雌雄死亡率达到 38.83% 和 51.17%, 51 ℃ 时雌雄死亡率为 100%, 42~48 ℃, 雌雄之间死亡率差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同温度下雌雄意大利蝗体内自由水/结合水比值变化

随温度升高, 雌雄虫体内自由水/结合水呈先升高后下降趋势, 同一温度下雌雄之间自由水/结合水比值差异均不显著 ($P > 0.05$)。雌雄意大利蝗自由水/结合水比值分别在 39 ℃ 和 36 ℃ 达到最大值, 随后开始下降, 在 48 ℃ 降至最低。

2.3 不同温度下雌雄意大利蝗体内海藻糖和游离蛋白质含量变化

随温度升高, 雌雄意大利蝗体内海藻糖和游离蛋白质的含量呈先增后减的变化趋势 (图 1, 图 2)。不同温度雌雄个体间海藻糖含量差异均显著 ($P < 0.05$)。并分别在 36 ℃ 和 33 ℃ 达到最大值; 游离蛋白质含量在 33 ℃ 达到最大, 30~45 ℃, 雌雄个体间差异显著 ($P < 0.05$)。两种抗逆保护物质均在 48 ℃ 降至最低。

2.4 不同温度下雌雄意大利蝗体内不饱和脂肪酸含量变化

随温度升高, 雌雄意大利蝗体内 3 种不饱和脂肪酸含量呈先升高后下降的变化趋势 (表 1), 而且同一温度下雌雄个体间油酸含量差异均显著 ($P < 0.05$); 除 27、36、42 ℃, 雌雄个体间亚油酸含量差异显著 ($P < 0.05$); 除 42 ℃ 和 45 ℃, 雌雄个体间亚麻酸含量差异均显著 ($P < 0.05$)。

2.5 不同温度下雌雄意大利蝗体内抗逆物质积累速率差异

物质积累速率差异是指物质积累速率的快慢, 用一定时期内的增减量与对照组的比值表示。正、负值大小分别表示增加、减少的程度。表 2 结果表明, 6 种抗逆保护物质对高温胁迫的应激反应不仅速率不同, 而且雌雄性别亦存在差异。不同温度处理后, 雌雄意大利蝗体内增加或减少幅度最大的均为不饱和脂肪酸物质。其中, 雄性意大利蝗油酸的增、减幅率均最大, 分别为 117.131% (27~30 ℃) 和 -87.054% (45~48 ℃), 雌性个体在 27~30 ℃ 时亚油酸增幅率最大, 为

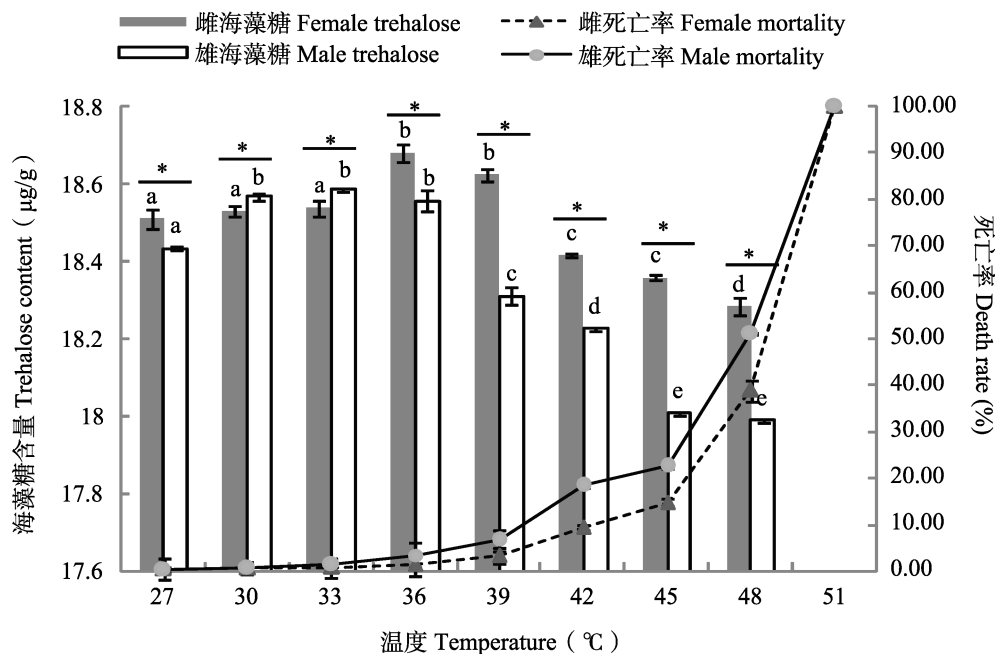


图 1 不同温度下雌雄意大利蝗体内海藻糖的含量变化

Fig. 1 Trehalose contents of females and males exposed to different temperatures in *Calliptamus italicus*

图中数据为平均值 ± 标准误, 同一组数据上方标有不同字母表示温度间存在显著差异 (最小显著差数法 LSD 和 Duncan's 检验, $P < 0.05$), *表示同一温度下雌雄之间存在显著差异 (独立样本 T 检验, $P < 0.05$)。下图同。

Data are presented as mean ± SE, and followed by different small letters indicate significant difference between different temperatures at the 0.05 level (LSD and Duncan's multiple range test, $P < 0.05$). *indicates significantly different at 0.05 level between females and males exposed to same temperatures in *C. italicus* (independent-sample T test, $P < 0.05$). The same below.

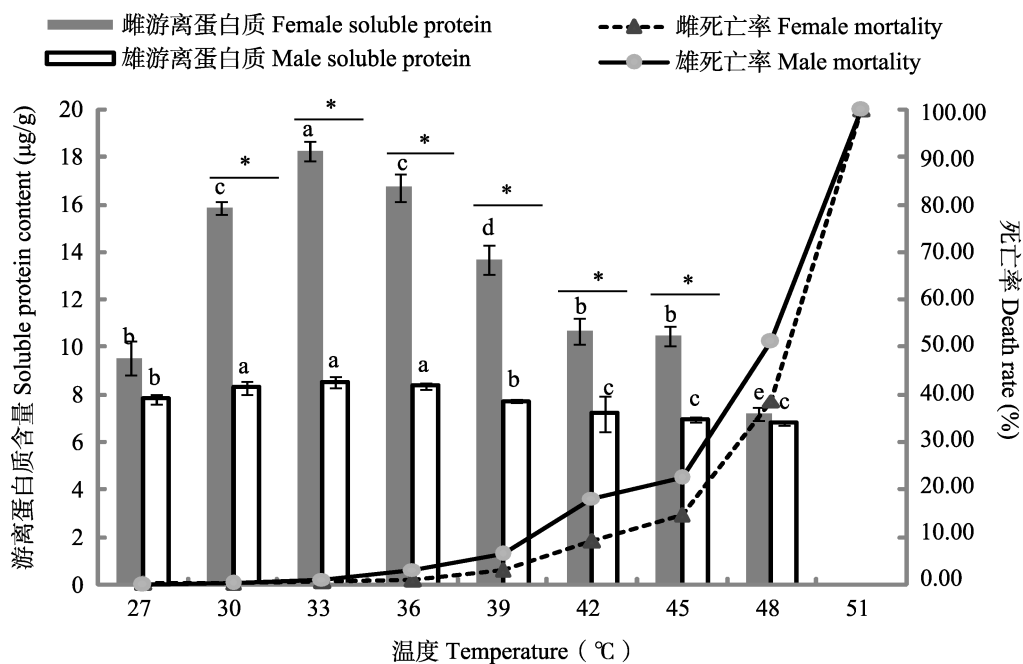


图 2 不同温度下雌雄意大利蝗体内游离蛋白质的含量变化

Fig. 2 Protein content of females and males exposed to different temperatures in *Calliptamus italicus*

表 1 不同温度下雌雄意大利蝗体内 3 种不饱和脂肪酸的含量变化及差异
Table 1 Contents of three unsaturated fatty acids in females and males exposed to different temperatures in *Calliptamus italicus*

温度 () Temperature	油酸含量 (mg/g) Oleic acid content		亚油酸含量 (mg/g) Linoleic acid content		亚麻酸含量 (mg/g) Lindenic acid content	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂
27	79.926±11.206abA	25.899±12.951abB	23.274±2.233aA	21.720±7.348aA	43.727±0.002aA	22.341±1.428abcB
30	107.442±9.187cA	56.234±7.082bB	42.483±1.070bcA	26.348±3.469aB	64.215±6.898cA	36.510±5.081cB
33	124.089±15.737cA	47.381±3.990abB	49.022±8.437cA	28.069±7.605aB	69.094±8.538cA	38.605±0.662cB
36	110.275±19.814bcA	30.498±15.264abB	44.349±8.018bcA	23.752±8.580aA	42.336±4.272bA	26.700±2.646abcB
39	97.008±8.900bcA	31.433±16.973abB	42.604±5.326bcA	22.607±1.843aB	45.201±4.390bcA	18.383±7.160abB
42	90.179±1.212bcA	23.212±11.610abB	33.384±3.068bcA	23.286±9.037aA	34.332±11.451bA	21.157±1.310abcA
45	61.947±3.888aA	20.694±10.370abB	29.630±2.033bcA	20.141±1.560aB	32.547±1.762bA	17.105±9.047abA
48	40.186±1.618aA	2.679±1.340aB	29.274±0.001aA	16.184±3.663aB	25.570±1.795abA	11.412±0.606aB

表中数据为平均值±标准误；同一列数据后标有不同小写字母表示温度间显著差异（最小显著差数法 LSD 和 Duncan's 检验， $P < 0.05$ ），同一不饱和脂肪酸的同一行数据后标有不同大写字母表示同温度间雌雄存在显著差异（独立样本 T 检验， $P < 0.05$ ）。

Data in the table are mean±SE, and followed by different small letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level (LSD and Duncan's test, $P < 0.05$). Data followed by different capital letters in the same row indicate significant difference at the 0.05 level between females and males (independent-sample T test, $P < 0.05$).

表 2 不同温度下雌雄意大利蝗体内各物质含量的增减率变化
Table 2 Increase rate of different substances in females and males of *Calliptamus italicus* exposed to different temperatures

温度 () Temperature	增/减率 Increase/Decrease rate (%)											
	自由水/结合水 Free water content/Combined water content		海藻糖 Trehalose content		游离蛋白质 Protein content		油酸 Oleic acid content		亚油酸 Linoleic acid content		亚麻酸 Lindenic acid content	
	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂	♀	♂
27-30	- 4.528	- 1.283	0.103	0.721	66.026	6.138	39.669	117.131	82.535	21.311	46.854	63.424
30-33	2.707	- 1.804	0.051	0.102	15.301	3.023	15.494	- 15.744	15.391	6.531	7.598	5.739
33-36	12.026	36.984	0.769	- 0.153	- 8.488	- 2.169	- 11.132	- 35.632	- 9.533	- 15.378	- 38.728	- 30.838
36-39	9.587	- 7.947	- 0.305	- 1.331	- 18.290	- 7.433	- 12.031	3.065	- 3.934	- 4.820	6.768	- 31.152
39-42	- 28.649	- 28.701	- 1.122	- 0.467	- 21.744	- 6.762	- 7.040	- 26.155	- 21.642	3.000	- 24.268	15.090
42-45	- 16.004	- 9.546	- 0.310	- 1.199	- 1.941	- 3.777	- 31.306	- 10.848	- 11.243	- 13.506	- 4.922	- 19.153
45-48	- 4.659	- 14.341	- 0.414	- 0.001	- 31.149	- 1.884	- 35.129	- 87.054	- 1.202	- 19.646	- 21.436	- 33.284

表中负值表示含量减少，正值表示含量增加。

The negative value and positive value indicate decrease and increase, respectively.

82.535%; 含量增、减幅率最小的是海藻糖, 分别为 0.051% (雌) 和 -0.001% (雄)。

3 讨论

多数研究表明, 雌性昆虫通常具有较强的耐高温耐受能力(吕志创, 2008; 鲍晓文, 2010; 李志明, 2010; 李鸿波, 2013), 本研究也得出雌性意大利蝗具有较强的耐高温耐受能力。同种昆虫雌雄个体间体型大小存在差异的现象很普遍, 被称之为性体型二型性(Blanckenhorn *et al.*, 2007), 通常是雌性个体大于雄性, 且体重较大的个体具有较强的逆境耐受能力(Cushman *et al.*, 1993; Stillwell *et al.*, 2010)。研究报道, 33 时雌性意大利蝗个体的平均体重(0.6~0.7 g)大于雄性个体(0.26~0.27 g)(赵忠伟等, 2013), 而且从本研究得出的同一温度下雌雄死亡率、抗逆保护物质积累及其速率差异的结果表明, 雌性意大利蝗较雄性个体的高温生态幅范围高 3 , 这可能是影响意大利蝗自然种群性比的原因之一。

在无法采取行为活动躲避高温时, 昆虫在高温胁迫下通常通过减少有机体自由水的含量以减轻高温胁迫的伤害, 即通过大量散失体内水分来降低体内及体表温度(Danks, 1971; Henry and Prange, 1996)。意大利蝗是生活在新疆荒漠、半荒漠草原上的典型物种, 该类型地区植被覆盖度低, 白天气温干燥炎热, 夏季地表温度超过 50 以上(任珺和陶玲, 2005)。本研究结果表明, 为度过阶段性高温胁迫, 雌雄意大利蝗都通过散失大量水分以减轻机体伤害, 这可能是导致不同温度处理下雌雄个体自由水/结合水比值差异不显著的原因。

海藻糖对膜结构的稳定效应具有专一性, 其作用较其他双糖、单糖或多元醇的作用更加明显(李毅平和龚和, 1998)。在高温胁迫下, 多数昆虫种类通过代谢增加海藻糖含量以度过逆境条件(Singer and Linquist, 1998; Jagdale and Grewal, 2003; 李娟等, 2014)。本文研究的 6 种抗逆保护物质中, 在不同温度处理下, 雌雄意

大利蝗体内的海藻糖含量变化幅度均最小, 这可能与意大利蝗在不同温度范围内都以糖类作为呼吸代谢消耗的底物有关(王冬梅等, 2014)。

高温使虫体细胞内蛋白质的数量和种类组成发生了变化, 导致正常温度下的蛋白质合成系统关闭, 而产生耐热性的蛋白质(如热激蛋白等)合成系统开启(李冰祥等, 1997; Feder and Hofmann, 1999), 已有研究报道高温下雌性梨小食心虫 *Grapholita molesta* Busck 体内 Gmhs70 和 Gmhs90 的合成时间较雄性个体更为提前(Chen *et al.*, 2014)。另一方面, 试验过程中, 对意大利蝗停止喂食, 而虫体内原有的蛋白质又被作为能量物质被消耗, 这都可能导致意大利蝗体内游离蛋白质含量减少。

6 种抗逆保护物质中, 雌雄个体均以不饱和脂肪酸对高温胁迫的应激响应最明显, 其含量增、减幅度最大。这在对西伯利亚蝗 *Gomphoceris sibiricus* 的研究中也得到相似结论(李娟等, 2014)。高温环境中, 有机体以能够维持体内水分平衡最为关键, 脂肪酸的烃链具有疏水作用, 昆虫表皮脂质含量越高, 其保水能力就越强, 而且昆虫体内脂肪在代谢过程中产生的代谢水可作为体内所需的水源(刘晓庚等, 2002; van Dooremalen and Ellers, 2010; Waterson *et al.*, 2014); 另一方面, 在逆境条件下, 有机体还可通过改变膜脂质成分及其含量以应对高低温胁迫(Morgan-Kiss *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2015)。

本研究得出, 高温胁迫下雌、雄意大利蝗均可通过积累不同种类的抗逆保护物质的含量, 提高自身对阶段性高温的耐受能力, 且雌性具有较强的高温耐受性。研究结果为进一步研究雌雄意大利蝗的生态适应机理提供基础数据, 但雌雄意大利蝗耐受高温的行为学和分子生物学的机制还待进一步探究。

致谢: 感谢新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州察布查尔县草原站樊泰山副站长对此研究野外工作的支持和帮助。

参考文献 (References)

- Anders M, Johannes O, Jacob GB, Jesper GS, Niels Chr N, Vaolker LMH, 2006. Metabolomic profiling of heat stress: hardening and recovery of homeostasis in *Drosophila*. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, 291(1): 205–212.
- Bai X, Liu C, Zhu HZ, Partigul, Yang CJ, Du WJ, 2013. Analysis of fatty acid and unsaponifiable matters in Jiashi plum kernel oil from Xinjiang. *Journal of Chinese Cereals and Oils Association*, 28(2): 73–76. [白希, 刘丛, 朱惠忠, 帕提姑丽, 杨长江, 杜为军, 2013. 新疆伽师酸梅杏仁油中脂肪酸及不皂化物组成分析. 中国粮油学报, 28(2): 73–76.]
- Bao XW, 2010. Effects of complementary nutriment and short-term heat treatment on adult's reproduction and longevity of oriental fruit moth, *Grapholita molesta* (Busck). Masteral dissertation. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University. [鲍晓文, 2010. 补充营养和短期高温对梨小食心虫生殖及成虫寿命的影响. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Blanckenhorn WU, Dixon AFG, Fairbairn DJ, Foellmer MW, Gibert P, van der Linde K, Meier R, Nylin S, Pitnick S, Schoff C, Signorelli M, Teder T, Wiklund C, 2007. Proximate causes of Rensch's rule: does sexual size dimorphism in arthropods result from sex differences in development time? *The American Naturalist*, 169(2): 245–257.
- Carly Z, Emily AR, Jonathan AN, 2012. Climate change and voltinism in Californian insect pest species: sensitivity to location, scenario and model choice. *Global Change Biology*, 18(9): 2771–2780.
- Carstens BC, Knowles LL, 2007. Shifting distributions and speciation: species divergence during rapid climate change. *Molecular Ecology*, 16(3): 619–627.
- Chen H, Xu XL, Li YP, Wu JX, 2014. Characterization of heat shock protein 90, 70 and their transcriptional expression patterns on high temperature in adult of *Grapholita molista* (Busck). *Insect Science*, 21(4): 439–448.
- Chen Y, Ma CS, 2010. Effect of global warming on insect: a literature review. *Acta Ecologica Sinica*, 30(8): 2159–2172. [陈瑜, 马春森, 2010. 气候变暖对昆虫影响研究进展. 生态学报, 30(8): 2159–2172.]
- Cushman JH, Lawton JH, Manly BFJ, 1993. Latitudinal patterns in European ant assemblages: variation in species richness and body size. *Oecologia*, 95(1): 30–37.
- Danks HV, 1971. Overwintering of some north temperate and arctic Chironomidae: the winter environment. *Canadian Entomologist*, 103(4): 589–604.
- Elizabeth PD, Nathan ER, 2007. The role of stress proteins in responses of a montane willow leaf beetle to environmental temperature variation. *Bioscience*, 32(3): 477–488.
- Feder ME, Hofmann GE, 1999. Heat-shock proteins, molecular chaperones, and the stress response: evolutionary and ecological physiology. *Annual Review of Physiology*, 61(1): 243–282.
- Guo JJ, Ji QH, Huang JC, Chen JH, 2014. Effect of cold acclimation on *Fopius arisanu* (Sonan). *Journal of Environmental Entomology*, 36(1): 28–32. [郭俊杰, 季清娥, 黄居昌, 陈家骅, 2014. 低温驯化对阿里山潜蝇茧蜂的影响. 环境昆虫学报, 36(1): 28–32.]
- Guo LX, Xu XM, Liang FR, Yuan JP, Peng J, Wu CF, Wang JH, 2015. Morphological observations and fatty acid composition of indoor-cultivated *Cordyceps sinensis* at a high-altitude laboratory on Sejila Mountain, Tibet. *PLoS ONE*, 10(5): e0126095.
- Han RD, Sun XG, Xu YY, Zhang WG, 2005. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larva of *Dendrolimus spectabilis* Butler (Lepidoptera Lasiocampidae). *Acta Ecologica Sinica*, 25(6): 1352–1356. [韩瑞东, 孙绪良, 许永玉, 张卫光, 2005. 赤松毛虫越冬幼虫生化物质变化与抗寒性的关系. 生态学报, 25(6): 1352–1356.]
- Henry D, Prange HD, 1996. Evaporative cooling in insects. *Journal of Insect Physiology*, 42(5): 493–499.
- Hu LY, Ma L, Hu LJ, Jiang Y, Wang H, 2012. Comparison of composition and content of fatty acids extracted from pupae of *Dendrolimus superans* (Lepidoptera: Lasiocampidae) with combinations of different extraction solvents and methods. *Acta Entomologica Sinica*, 55(1): 116–123. [胡礼禹, 马玲, 胡礼俊, 姜娜, 王慧, 2012. 不同提取溶剂和方法组合从落叶松毛虫蛹中提取的脂肪酸成分和含量的比较. 昆虫学报, 55(1): 116–123.]
- Jagdale GB, Grewal PS, 2003. Acclimation of entomopathogenic nematodes to novel temperature: trehalose accumulation and the acquisition of thermotolerance. *International Journal of Parasitology*, 3(2): 145–152.
- Li BX, Cai HL, Chen YL, 1997. Insect heat shock response and heat shock proteins. *Acta Entomologica Sinica*, 20(4): 417–427. [李冰祥, 蔡惠罗, 陈永林, 1997. 昆虫的热休克反应和热休克蛋白. 昆虫学报, 20(4): 417–427.]
- Li HB, 2013. Response to thermal stress in western flower thrips, *Fronkliniella Occidentalis*. Doctoral dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [李鸿波, 2013. 入侵害虫西花蓟马对温度胁迫的响应. 博士学位论文. 扬州: 扬州大学.]
- Li J, Li S, Wang DM, Ji R, 2014. Changes in contents of stress resistant substances in *Gomphocerus sibiricus* (Orthoptera: Acrididae) under high temperature stress. *Acta Entomologica Sinica*, 57(10): 1155–1161. [李娟, 李爽, 王冬梅, 季荣, 2014. 高温胁迫下西伯利亚蝗体内抗逆物质含量变化. 昆虫学报, 57(10): 1155–1161.]
- Li YP, Gong H, 1998. Insect Cryobiology: I The physiological adaption mechanism about resistant to cold in insect. *Entomological Knowledge*, 35(6): 364–369. [李毅平, 龚和, 1998. 昆虫低温生物学: I 昆虫耐冻的生理生化适应机制. 昆虫

- 知识, 35(6):364–369.]
- Li ZM, 2010. Preliminary studies on the mechanisms of thermal tolerance of *Tetrastichus brontispae* Ferrière. Masteral dissertation. Hainan: Hainan University. [李志明, 2010. 椰心叶甲啮小蜂耐热性机理初步研究. 硕士学位论文. 海南: 海南大学.]
- Liu XG, Liao XF, Xu MS, Chen MM, 2002. Development and using of insect oil and its functions. *Cereals and Oils*, (2): 24–27. [刘晓庚, 廖晓峰, 徐明生, 陈梅梅, 2002. 昆虫油脂及其功能性成分开发利用研究. 粮食与油脂, (2): 24–27.]
- Lv ZC, 2008. The screen of the differentially expressed genes and the functional identification of Hsps genes between *Bemisia tabaci* (Gennadius) B-biotype females and males under heat-shock condition. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [吕志创, 2008. 高温热激下雌雄B型烟粉虱差异表达基因的筛选和Hsps基因功能的鉴定. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Ma FZ, 2014. Heritability and evolvability on thermal tolerance traits in invasive *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) Mediterranean cryptic species. Doctoral dissertation. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. [马方舟, 2014. 烟粉虱 MED 隐种温度耐受性的遗传与进化特征. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院.]
- Mogan-Kiss RM, Priscu JC, Pocock T, Gudynaite-Savitch L, Huner NPA, 2006. Adaptation and acclimation of photosynthetic microorganisms to permanently cold environments. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 70(1): 222–252.
- Ren J, Tao L, 2005. Multivariate characterization of vegetation in Junnger Basin. *Acta Agrestia Sinica*, 13(2): 134–139. [任珺, 陶玲, 2005. 准噶尔盆地沙漠植被多特征分析. 草地学报, 13(2): 134–139.]
- Singer MA, Linquist S, 1998. Thermotolerance in *Saccharomyces cerevisiae* the Yin and Yang of trehalose. *Trends in Biotechnology*, 16(11): 460–468.
- Stillwell RC, Blanckenhorn WU, Teder T, Davidowitz G, Fox CW, 2010. Sex differences in phenotypic plasticity affect variation in sexual size dimorphism in insects: from physiology to evolution. *Annual Review Entomology*, 55: 227–245.
- Thomson LJ, Macfadyen S, Hoffmann AA, 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52(3): 296–306.
- van Dooremalen C, Eilers J, 2010. A moderate change in temperature induces changes in fatty acid composition of storage and membrane lipids in a soil arthropod. *Journal of Insect Physiology*, 56(2): 178–184.
- Waterson MJ, Chung BY, Harvanek ZM, Ostojic I, Alcedo J, Pletcher SD, 2014. Water sensor ppk28 modulates *Drosophila* lifespan and physiology through AKH signaling. *PNAS*, 111(22): 8137–8142.
- Wang DM, Li J, Li S, Hu HX, Ji R, 2014. Effects of temperature on the respiratory metabolism of *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Acta Entomologica Sinica*, 57(3): 373–378. [王冬梅, 李娟, 李爽, 扈鸿霞, 季荣, 2014. 温度对意大利蝗呼吸代谢的影响. 昆虫学报, 57(3): 373–378.]
- Wang XK, 2010. Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments (Version 2). Beijing: Higher Education Press. 199–201. [王学奎, 2010. 植物生理生化实验原理和技术(第2版). 北京: 高等教育出版社. 199–201.]
- Weng ZQ, 2010. The morphological character of *Octodonta nipae* (Maulik) and the effects of temperature and food utilization on its growth and development. Masteral dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [翁章权, 2010. 水椰八角铁甲形态观察及温度、食物利用对其生长发育的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农业大学.]
- Yang HS, Ji R, Wang T, 2008. Atmospheric circulation background and long-term prediction of grasshopper occurrence in Xinjiang. *Chinese Journal of Ecology*, 27(2): 218–222. [杨洪升, 季荣, 王婷, 2008. 新疆蝗虫发生的大气环流背景及长期预测. 生态学杂志, 27(2): 218–222.]
- Yang HS, Ji R, Xiong L, Yuan H, 2007. Effect of meteorological factors on locust occurrence in the North of Mt. Tianshan in Xinjiang. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(4): 517–520. [杨洪升, 季荣, 熊玲, 原慧, 2007. 气象因子对北疆地区蝗虫发生的影响. 昆虫知识, 44(4): 517–520.]
- Yi CH, Chen XM, Shi JY, Zhou CL, 2009. Change of carbohydrate contents in the non-diapause and overwinter adult of *Kallima inachus*. *Guangdong Agricultural Sciences*, (10): 162–164. [易传辉, 陈晓鸣, 史军义, 周成理, 2009. 枯叶蛱蝶非滞育成虫和越冬成虫体内糖类物质含量变化. 广东农业科学, (10): 162–164.]
- Zhang Q, Qiao Z, Xiong L, Bahtiyar D, Zhao Y, Dang HC, Zhang XS, Xiao HW, 1995. Study on biological behavioral of *Calliptamus italicus* (Orthoptera: Acrididae). *Xinjiang Agricultural Sciences*, (6): 256–258. [张泉, 乔璋, 熊玲, 巴哈提亚尔·达吾提, 赵勇, 党惠财, 张新生, 肖宏伟, 1995. 意大利蝗生物学特性研究. 新疆农业科学, (6): 256–258.]
- Zhao ZW, Zhang YC, Cao GC, Zhang ZH, 2013. Influence of temperature on the development of *Calliptamus italicus*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(2): 466–473. [赵忠伟, 张英财, 曹广春, 张泽华, 2013. 温度对意大利蝗生长发育的影响. 应用昆虫学报, 50(2): 466–473.]