

温度对短额负蝗成虫存活率及抗氧化酶活性的影响

李文博^{1,4}, Nawaz Haider Bashir¹, 李新畅², 田睿林³,
史树森⁴, 张 星⁴, 陈欢欢^{1*}

(1. 曲靖师范学院/生物资源与食品工程学院, 云南曲靖 655011; 2. 承德市农林科学院, 河北承德 067055; 3. 内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 内蒙古自治区高等学校生物多样性保护与可持续利用重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010022; 4. 吉林农业大学植物保护学院, 长春 130118)

摘要:为明确不同温度对短额负蝗 *Atractomorpha sinensis* 成虫存活率以及体内抗氧化酶活性的影响。在 24~40°C 温度范围内, 将短额负蝗健康成虫分组, 分别置于生化培养箱处理 4 h。测定各温度处理下成虫存活率和抗氧化酶 (SOD、CAT、POD) 的活性、总抗氧化能力 (T-AOC) 以及丙二醛 (MDA) 含量的变化。成虫存活率在 24~34°C 范围内均高于 50%, 其他温度处理成虫存活率明显降低。试验温度范围内短额负蝗体内 3 种抗氧化酶活性随温度升高呈先增后减趋势。32°C 时雌、雄成虫的 SOD、POD 和 CAT 酶活值最高。T-AOC 活性与 MDA 含量与抗氧化酶活性变化趋势相似, 二者均在 34°C 时达最高。短额负蝗对不同温度的适应性存在差异, 温度过高不利于其种群存活, 此现象与其体内抗氧化酶活性密切相关。短额负蝗雌成虫抗氧化酶活性高于雄成虫, 更能适应温度的变化。

关键词: 短额负蝗; 温度; 抗氧化酶活性; 总抗氧化能力; 丙二醛; 环境适应性

中图分类号: Q968.1;S433 文献标识码: A

Effect of temperature on the survival rate and antioxidant enzymes activity of *Atractomorpha sinensis*

LI Wen-Bo^{1,4}, NAWAZ Haider Bashir¹, LI Xin-Chang², TIAN Rui-Lin³, SHI Shu-Sen⁴, ZHANG Xing⁴, CHEN Huan-Huan^{1*} (1. College of Biological Resource and Food Engineering, Qujing Normal University, Qujing 655011, Yunnan Province, China; 2. Chengde Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Chengde 067055, Hebei Province, China; 3. Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization for College and University of Inner Mongolia Autonomous Region, College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 4. College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In order to clarify the effects of different temperatures on the survival rate of adult *Atractomorpha sinensis* and the activities of antioxidant enzymes in vivo. In the temperature range of 24~40°C, the healthy adults of *A. sinensis* were divided into groups and treated in biochemical

基金项目: 云南省科技厅基础研究专项-青年项目 (202301AU070005); 曲靖师范学院校级创新团队支持计划资助

作者简介: 李文博, 男, 博士, 讲师, 研究方向为害虫综合治理, E-mail: 619162463@qq.com

*通讯作者 Author for correspondence: 陈欢欢, 女, 博士, 副教授, 研究方向为害虫综合治理, E-mail: 574209946@qq.com

收稿日期 Received: 2023-09-28; 接受日期 Accepted: 2024-04-30

incubator for 4 h. The survival rate of adults and the activities of antioxidant enzymes (SOD, CAT, POD), total antioxidant capacity (T-AOC) and malondialdehyde (MDA) content were measured under different temperature. The survival rate of adults was higher than 50 % in the range of 24~34°C, and the survival rate of adults treated at other temperatures was significantly reduced. In the temperature range of the experiment, the activities of three antioxidant enzymes in the *A. sinensis* increased initially and then decreased with the increase of temperature. The activities of SOD, POD and CAT in female and male adults were the highest at 32°C. The changes of T-AOC activity, MDA content and antioxidant enzyme activity were similar, and both of them reached the highest at 34°C. There were differences in the adaptability of *A. sinensis* to different temperatures. Excessively high temperature was not conducive to its population survival, and was this phenomenon was closely related to its antioxidant enzyme activity. The antioxidant enzyme activity of female adults was higher than that of male adults. Females were more adaptable to temperature changes.

Key words: *Atractomorpha sinensis*; temperature; antioxidant enzyme activity; total antioxidant capacity; malondialdehyde; environmental adaptability

短额负蝗 *Atractomorpha sinensis* 属直翅目 Orthoptera 锥头蝗科 Pyrgomorphidae 负蝗属 *Atractomorpha*, 是亚洲和北美洲诸多国家常见的食叶类害虫, 主要分布在中国、泰国、印度、越南、缅甸、日本、印度尼西亚、美国和加拿大等农林牧区 (Kevan and Lee, 1974; 夏凯龄, 1994; 姚世鸿, 2005; Kumar *et al.*, 2014; Ishikawa and Takahata, 2019)。短额负蝗危害我国农作物的记载始于 20 世纪 60 年代初江西莲塘地区, 历经半个多世纪陆续在至河北、山东、江苏、河南、浙江、江苏、江西、福建、广东、湖南、贵州、云南和广西等地均发现该种的分布 (陈茂才, 1965; 史树森, 2013)。短额负蝗食性广, 善跳跃或短距离飞行, 以若虫和成虫取食为害大豆、玉米、高粱、水稻、向日葵、马铃薯、棉花和花生等数十种经济作物的叶片进行为害 (史树森, 2013)。因此, 由于短额负蝗的广泛分布以及其对多种经济作物的危害, 有必要加强对其在不同环境条件下的基础生物学研究, 为短额负蝗的防控提供坚实的理论基础。

温度是决定昆虫发育、繁殖及区域分布的重要生态因子 (王文倩等, 2020)。全球气候格局骤变同时也影响着昆虫种群的生存、分布格局及发生规律 (Kharouba *et al.*, 2019)。从生理水平上研究短额负蝗对不同温度胁迫的响应, 可以揭示其生理特征变化对地理种群生态及扩散产生的重大影响 (Bodlah *et al.*, 2023)。适温条件下, 昆虫活性氧的产生与虫体抗氧化一直处于恒定状态, 虫体内超氧阴离子自由基 ($O_2^{\cdot-}$) 和过氧化氢 (H_2O_2) 含量往往在高温刺激下迅速生成活性氧 (Reactive oxygen species), 当虫体内活性氧急速增加时, 会导致昆虫氧化应激损伤, 且同时破坏细胞结构, 抑制昆虫生长发育 (李爽, 2016)。此时, 为了保护虫体细胞自由基动态平衡, 维持昆虫正常生命活动, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 和过氧化物酶 (POD) 共同协作, 承担保护任务 (Kashiwagi *et al.*, 1997)。同

时,测定总抗氧化能力(Total antioxidant capacity, T-AOC)和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)浓度亦能反映出虫体脂质的损伤程度(Lalouette *et al.*, 2011)。

短额负蝗成虫作为繁殖虫态对寄主生长期环境温度的适应,亦决定其低纬度(南线)区系分布与发生数量(彩万志等, 2001; 李文博, 2023)。近期,我国区域性极端温度频发,低纬度地区夏季 12:00-15:00 最高气温超过 35°C(Zhang *et al.*, 2015)。短额负蝗最适宜生长发育和繁殖的温度范围是 24~28°C, 过高温度不利于其生长和繁殖(Li *et al.*, 2020; 李文博, 2021)。然而,目前尚未见有研究探讨短额负蝗在高温条件下抗氧化酶活性的变化。因此,本研究旨在通过实验室测定短额负蝗成虫在高于最适温度(24°C)下抗氧化酶系统的响应和成虫存活率,以进一步了解该虫田间种群对高温刺激的生理响应机理。研究结果将有助于解析短额负蝗田间种群对夏季高温环境的生理适应性,也为有效监测其发生危害和扩散提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

1.1.1 供试昆虫

试验虫源采自广东农业科学院实验田(23°07'54.30"N, 113°15'32.48"E, 海拔 18 m),在曲靖师范学院昆虫生物学的研究室建立实验种群,选用新鲜油菜叶饲喂。试验开始前,将田间采集的短额负蝗成虫置于室内昆虫饲养笼(50 cm×50 cm×50 cm)中饲养,笼内虫口密度为 100 头/笼。饲养温度 25 ± 1°C、相对湿度 75% ± 5%以及光周期 16 L : 8 D。

1.1.2 试剂与仪器

试剂: SOD, POD, CAT, 总蛋白, T-AOC 活性和 MDA 含量试剂盒均购于南京建成生物工程公司实验室。

仪器: BIR-80DI 生化培养箱(上海三腾仪器有限公司)、YLE-2000 型恒温水浴锅(黄石市恒丰医疗器械有限公司)、SP-756P 紫外可见分光光度计(上海光谱有限公司)、Centrifuge 5430R 多功能离心机(Eppendorf 中国有限公司)、RE-52A 型旋转混匀仪(美国 SCIOGEX (赛洛捷克)公司)等。

1.2 试验方法

根据我国短额负蝗南方低纬度(22°07'54.30"N~33°08'26.48"N)分布区夏季最高平均气温(40.60 ± 2.0°C)(源于中国气象数据网),本试验设置 24、26、28、30、32、34、36、38 和 40°C 恒温梯度,相对湿度为 70% ± 5%,光周期 16 L : 8 D,室温 24°C 为对照处理。选取 7 日龄的雌、雄成虫分别置于高 20 cm, 底部直径 10 cm 的养虫罐内,每 10 头为一组,并于养虫罐底部放置与管底等面积湿润的海棉保持罐内湿度(模拟田间小气候),最后置于生化培养箱内处理 4 h。每个温度处理 60 头成虫(♀ : ♂ = 1 : 1), 3 次重复。用小毛笔轻

轻碰触虫体，观测经各温度处理后的试虫存活情况，能自由爬动（跳跃），视为存活，记录其存活数量。SOD、CAT、POD、T-AOC 活性及 MDA、总蛋白含量测定均参照试剂盒说明书操作测定。每个温度处理均随机称取去除触角、前后翅和腹部的成虫活虫 0.1 g 为测定样本，每个处理温度重复测定 3 次。

1.3 数据统计与分析

利用 Excel 2019 进行数据整理，DPS13.50 统计软件的单因素方差（One-way ANOVA）并结合 Tukey's 法检验不同温度条件下短额负蝗成虫存活率与抗氧化酶活性的差异显著性。而 T 检验分析雌、雄成虫在同一温度下抗氧化能力的差异显著性（ $P < 0.05$ ），并拟合一元非线性回归模型分析抗氧化酶活力与成虫存活率的关系，百分比数据分析前需经反正弦平方根转换处理。GraphPad Prism8.0.2 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同温度对短额负蝗成虫存活的影响

短额负蝗雌、雄成虫存活率随温度的升高呈先增后减的变化趋势（图 1）。温度升至 32°C 时雌、雄成虫存活率最高，均为 96.67%。同一温度处理下雌、雄成虫的存活率差异均不显著（ $P > 0.05$ ），不同温度处理下（24°C~38°C），雌、雄成虫存活率间均存在显著差异（雌成虫： $F_{9,14} = 26.568$ ， $P < 0.001$ ；雄成虫： $F_{9,14} = 32.568$ ， $P < 0.001$ ），40°C 温度处理 4 h 下后雄性成虫全部死亡，只有极少雌性成虫个体存活。试验温度范围内，雌成虫存亡率略高于雄成虫。

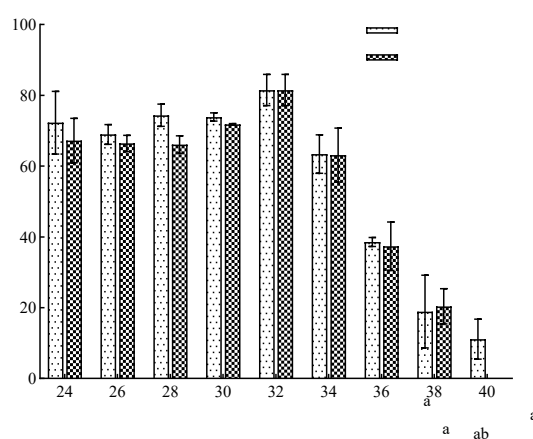


图 1 不同温度对短额负蝗成虫存活率的影响

Fig. 1 Effect of different temperatures on the survival rate of adults in the *Atractomorpha sinensis*

注：图中数据为平均数±标准误，柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著（ $P < 0.05$ ）。*表示同一温度下雌雄成虫之间存在显著差异（独立样本 t 检验， $P < 0.05$ ）。下图同。Note: Data were mean ± SE, histograms with different lowercase letters indicated significant difference among treatments at the 0.05. The asterisk represented significant difference in the enzyme activity between female and male adults at the same temperature ($P < 0.05$,

independent samples *t*-test). The same below.

2.2 不同温度对短额负蝗成虫体内抗氧化酶活性的影响

不同温度下（24~38℃），短额负蝗雌、雄成虫体内的SOD、POD、CAT的活性均随温度的升高呈先增后减的变化趋势（图2）。雌、雄成虫的SOD、POD和CAT酶活值均在32℃时最高，且与其他温度处理下的活性值差异显著（雌成虫SOD： $F_{9,14}=96.876$ ， $P<0.001$ ；POD： $F_{9,14}=12.514$ ， $P<0.001$ ；CAT： $F_{9,14}=8.564$ ， $P<0.001$ ；雄成虫SOD： $F_{9,14}=128.736$ ， $P<0.001$ ；POD： $F_{9,14}=17.791$ ， $P<0.01$ ；CAT： $F_{9,14}=30.726$ ， $P<0.001$ ）。同一温度处理下雌、雄成虫SOD活性差异不显著（ $P>0.05$ ），而雌、雄成虫CAT活性则差异显著（ $P<0.05$ ），POD活性只有在34℃时存在显著差异（ $P<0.05$ ）。

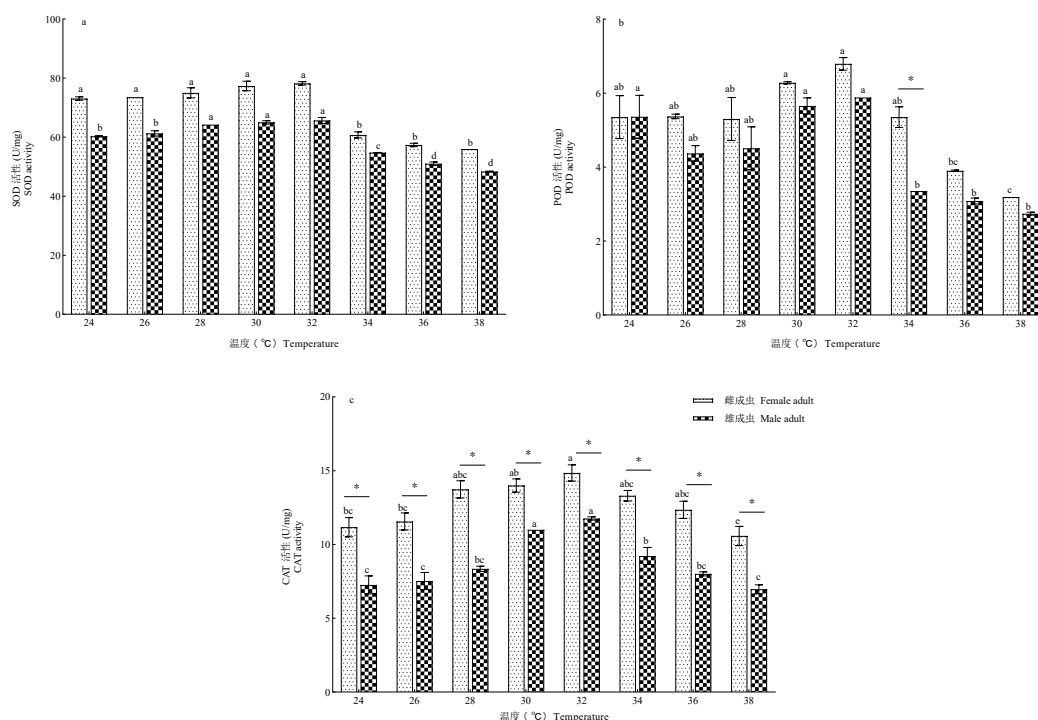


图2 不同温度对短额负蝗成虫体内SOD (a)、POD (b)和CAT (c)活性的影响

Fig. 2 Effects of different temperatures on the activities of SOD (a), POD (b), and CAT (c) in *Atractomorpha sinensis* adults

2.3 不同温度对短额负蝗成虫体内总蛋白含量的影响

不同温度条件下（24~38℃），短额负蝗雌、雄成虫体内总蛋白含量随温度的升高呈先增后减的变化趋势（图3）。温度升至32℃时总蛋白含量最高且与其他温度处理下的总蛋白含量差异显著（雌成虫： $F_{9,14}=31.090$ ， $P<0.001$ ；雄成虫： $F_{9,14}=10.192$ ， $P<0.001$ ），同一温度处理下雌、雄成虫总蛋白含量差异均不显著（ $P>0.05$ ）。雌成虫的总蛋白含量整体高于雄成虫。

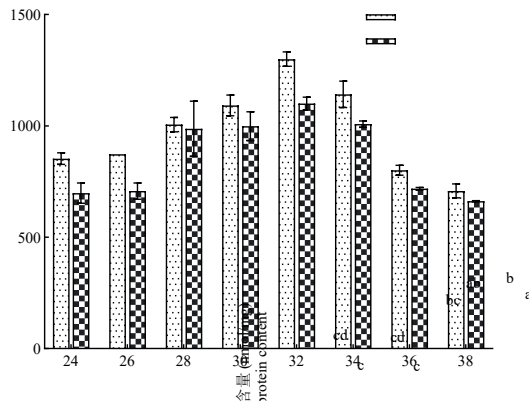


图 3 不同温度对短额负蝗成虫的总蛋白含量影响

Fig. 3 Effects of different temperatures on the contents of total protein in *Atractomorpha sinensis* adults

2.4 不同温度对短额负蝗成虫体内 T-AOC 活性的影响

不同温度条件下 (24~38°C), 短额负蝗雌、雄成虫体内的 T-AOC 的活性随温度的升高呈先增后减的变化趋势 (图 4)。温度升至 34°C 时雌、雄成虫 T-AOC 活性最高, 较对照 24°C 分别增高 48.59% 和 50.52%, 且与 30°C 和 32°C 下的 T-AOC 活性差异不显著 ($P > 0.05$), 不同温度处理下 (24~38°C), 雌、雄成虫 T-AOC 活性间均存在显著差异 (雌成虫: $F_{9,14} = 14.611$, $P < 0.001$; 雄成虫: $F_{9,14} = 15.580$, $P < 0.001$), 这可能是成虫受到温度胁迫, 其体内的抗氧化机制被激发而导致。雌成虫的 T-AOC 活性整体高于雄成虫。

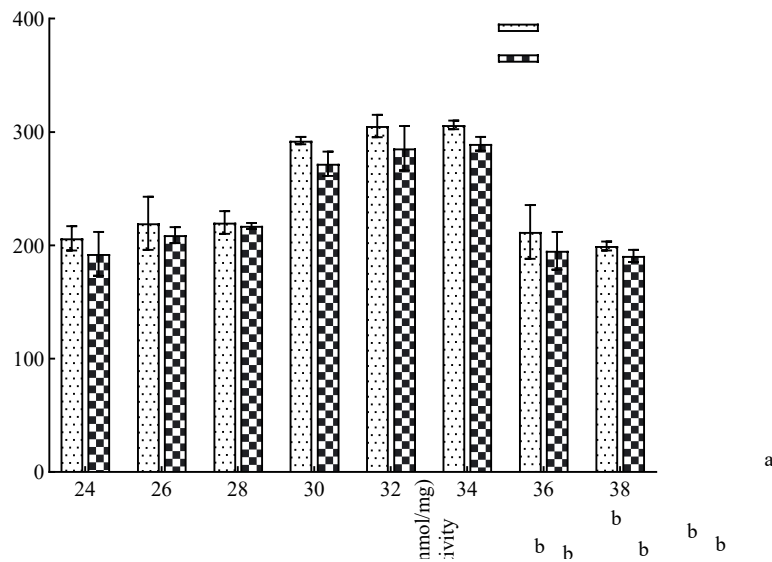


图 4 不同温度对短额负蝗成虫的 T-AOC 活性影响

Fig. 4 Effects of different temperatures on the activities of T-AOC in *Atractomorpha sinensis* adults

2.5 不同温度对短额负蝗成虫体内 MDA 含量的影响

不同温度条件下 (24~38°C), 短额负蝗雌、雄成虫体内的 MDA 的含量随温度的升高呈先增后减的变化趋势 (图 5)。温度升至 34°C 时雌、雄成虫 MDA 含量最高, 较对照 24°C 分别增高 75.82% 和 50.52%, 同一温度处理下 MDA 含量在 28°C、30°C 和 36°C 处理温度下雌、雄成虫间差异显著 ($P > 0.05$)。不同温度处理下 (24~38°C), 雌、雄成虫 MDA 含

量间均存在显著差异（雌成虫： $F_{9,14} = 13.429$, $P < 0.001$ ；雄成虫： $F_{9,14} = 55.709$, $P < 0.001$ ）。雌成虫的 MDA 含量整体高于雄成虫。

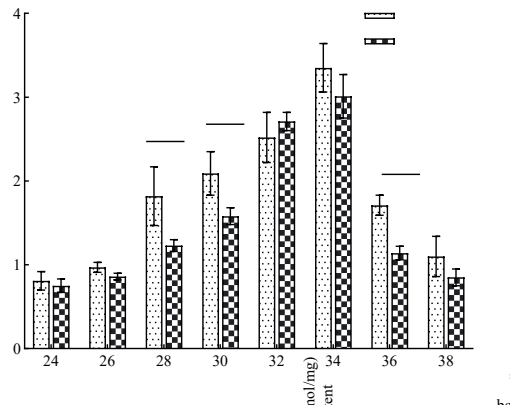


图 5 不同温度对短额负蝗成虫的 MDA 含量影响

Fig. 5 Effects of different temperatures on the contents of MDA in *Atractomorpha sinensis* adults

2.6 短额负蝗成虫存活率与抗氧化酶活力相关性分析

成虫存活率与其抗氧化酶活力相关性分析结果如表 1 所示。除了雌、雄成虫 CAT 活性外，其他酶活力与雌、雄成虫的存活率均呈显著正相关（ $P < 0.05$ ）。

表 1 不同温度下短额负蝗成虫存活率与抗氧化酶的相关性

Table 1 Correlation between adult survival rate and antioxidant enzymes of *Atractomorpha sinensis* at different temperatures

性别	抗氧化酶	方程模型	显著性检验		
Sex	Antioxidant enzyme	Equation regression	Significance test		
雌虫 Female	SOD	$y=10090.3558/(1+\exp^{(5.3711-0.006239x)})$	$R=0.9085$	$F=11.8184$	$P=0.0127$
	POD	$y=7010.6190/(1+\exp^{(7.9409-0.011524x)})$	$R=0.9053$	$F=23.8908$	$P=0.0028$
	CAT	$y=1628.4523/(1+\exp^{(5.0837-0.003812x)})$	$R=0.6492$	$F=1.8209$	$P=0.2546$
雄虫 Male	SOD	$y=1115.3608/(1+\exp^{(3.2382-0.005815x)})$	$R=0.9618$	$F=14.5341$	$P=0.0083$
	POD	$y=6238.9435/(1+\exp^{(8.1624-0.014572x)})$	$R=0.8849$	$F=9.1204$	$P=0.0125$
	CAT	$y=4799.0099/(1+\exp^{(6.7611-0.007541x)})$	$R=0.4416$	$F=1.9769$	$P=0.2330$

3 结论与讨论

21 世纪初全球变暖日益加剧，气候格局的骤变对昆虫地理分布格局及繁殖灾变规律产生重大改变（Kharouba *et al.*, 2019）。昆虫是变温动物里规模庞大的类群，历经数亿年进化逐步演化出一系列面对极端环境温度的保护机制，抗氧化酶应激变化是虫体响应不同温度刺激的重要策略之一（Bafana *et al.*, 2011）。昆虫在适温条件下的活性氧的产生与抗氧化过程一直处于平衡状态，但过高的温度会使昆虫体内产生大量的活性氧，虫体氧化损伤严重，抑制昆虫发育直至死亡（王梦龙等，2014；郭娜等，2020）。逆境之下虫体细胞识别改变膜结构使电子传递解耦联，间接或直接增加超氧阴离子自由基、过氧化氢和羟自由基等氧化代谢物含量（Bi and Felton, 1995），这些氧自由基会造成膜脂过氧化、碱基突变和蛋白质损伤

等, 造成生物氧毒害(张青等, 2016)。SOD、CAT 和 POD 构建的保护酶系统承担起维护虫体细胞自由基动态平衡的责任, 保护其正常生命活动(Kashiwagi *et al.*, 1997)。本研究结果表明短额负蝗成虫对短时高温刺激具有一定耐受性, 38°C以下对其无完全致死效应。随温度升高短额负蝗成虫体内 SOD、CAT、POD、T-AOC 活性及 MDA 含量的耐受性与对照组存在显著差异, 说明这些抗氧化物质对减轻热应激产生的活性氧起到一定作用。

SOD 存在于大多数生物细胞中, 是生物活体内抵御氧化胁迫的重要物质(Sharma and Mathur, 2020)。研究腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 对高温适应性的研究表明成虫的 SOD 活性在短时的高温胁迫下出现短暂的升高, 当温度超过 45°C后 SOD 活性降低, 其作者推测腐食酪螨体内产生大量活性氧, 从而使腐食酪螨细胞受到伤害(王静等, 2019)。本研究也获得相似的结果, 36°C时短额负蝗成虫 SOD 活性开始下降, 虫体细胞超氧阴离子自由基平衡被打破, 无法及时将其转化为 H₂O₂, 导致成虫生命活动逐渐减弱, 酶活性下降, 存活率急剧降低(图 2)。温度过高迫使虫体超氧阴离子自由基和 H₂O₂ 含量产生速率快于相关酶的清除速率, 引发机体活力减弱。

CAT 和 POD 共同承担昆虫体内 H₂O₂ 的清除工作, 当 H₂O₂ 浓度较高时 CAT 发挥主要作用, 而 H₂O₂ 浓度较低时 POD 起主要作用(王小莉等, 2019)。本试验结果表明短额负蝗成虫在 24~32°C温度范围内 CAT 与 POD 活性显著升高, 且各处理均保持着较高活性, 而 34°C后二者活性显著下降, 推测其原因是当温度高于 34°C时仅依靠 CAT 清除成虫体内产生多余的 H₂O₂。雌、雄成虫于 32°C条件下的过氧化物水平最高, 随着温度继续升高, 成虫体内增加的活性氧超出虫体内抗氧化酶的代谢范围, 虫体超氧阴离子自由基和过氧化氢含量增加速率快于相关酶的清除速率, 致使虫体生理功能紊乱, 酶活被抑制而下降, 生长发育随之被抑制(An and Choi, 2010; Mahmud *et al.*, 2010)。此外, 各温度处理下雌成虫体内 3 种抗氧化酶活性值总体高于雄成虫, 推测其雌成虫清除活性氧速率略高于雄成虫, 说明在同一温度下, 雌成虫相较于雄成虫能通过促进体内的抗氧化酶的活性(图 2), 推测其原因是雌成虫对温度敏感程度较低, 体型较大, 体内能量储备充足, 相比于雄成虫更耐高温。郭娜等(2020)对亚洲小车蝗 *Oedaleus asiaticus* 研究中也发现, 抗氧化酶活性均在 30°C时达最大值, 表明虫体在 30°C时过氧化物水平最高, 成虫抗氧化代谢与温度呈正相关, 如果超出适温范围, 其生命活动会减弱甚至死亡。李爽(2016)研究意大利蝗 *Calliptamus italicus* 成虫对温度的响应也表明在 27~51°C范围内, 成虫体内 3 种抗氧化酶活性也呈现先增后减趋势, 且雌成虫抗氧化代谢能力高于雄成虫。短额负蝗成虫存活率与其抗氧化酶活力均呈显著正相关, 说明存活率受到抗氧化酶的调控。高温迫使虫体超氧阴离子自由基和过氧化氢含量增加, 机体活力减弱, 生长发育随之被抑制。

T-AOC 是评价生物机体活性物质的抗氧化能力重要参数(Ghiselli *et al.*, 2000)。T-AOC 活性随温度的升高呈现先增加而后降低的特征, 在高温 34°C时达最高。此外, T-AOC 活性的最高胁迫温度(34°C)略高于其他抗氧化酶, 说明成虫体内还存在其他诸如热激蛋白、甘

油、海藻糖和山梨醇等抗氧化物质协助抵御自由基活性氧损害,具体原因有待进一步探索(崔娟等,2021)。MDA是细胞过氧化多不饱和脂肪酸的主要氧化产物,反映机体内脂质过氧化程度(Rael *et al.*,2004)。本研究结果表明,短额负蝗成虫经32~34°C高温胁迫后,MDA含量有所增加但差异并不显著,说明MDA的含量提高可能是由于清除体内多余的脂质过氧化导致其抗氧化酶活性的增强,推测短额负蝗在较高的温度刺激下伴随脂质过氧化和其他对氧化胁迫的反应(崔娟,2020)。T-AOC活性和MDA含量抗氧化酶在亚洲小车蝗 *O. decorus asiaticus*、龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 与筛豆龟蝽 *Megacopta cribraria* 等害虫研究中已有许多报道(Zhang *et al.*,2015;郭娜等,2020;崔娟等,2021)。此外,相同处理温度下,由于雌成虫比雄成虫诱导的抗氧化反应多,清除多余脂质的过氧化力比雄成虫更强,因此,雌成虫T-AOC活性与MDA含量整体高于雄成虫。

综上所述,温度过高不利于短额负蝗种群生长存活,且成虫存活率与其体内抗氧化酶活性密切相关。短额负蝗成虫能够有效抵御高温胁迫诱导的活性氧,进而表现出一定的高温适应性,这与其分布于我国南方大豆产区的生态学特征相一致,短额负蝗长时间适应栖息地生态环境使其机体具有较强的耐热性。本研究结果为开展短额负蝗田间预测预报、区域分布及高温环境适应的分子机制研究提供科学依据。

参考文献 (References)

- An MI, Choi CY. Activity of antioxidant enzymes and physiological responses in ark shell, *Scapharca broughtonii*, exposed to thermal and osmotic stress: Effects on hemolymph and biochemical parameters [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology*, 2010, 155 (1): 34-42.
- Bafana A, Dutt S, Kumar A, *et al.* The basic and applied aspects of superoxide dismutase [J]. *Journal of Molecular Catalysis B-Enzymatic*, 2011, 68 (2): 129-138.
- Bi JL, Felton GW. Foliar oxidative stress and herbivory: Primary compounds, secondary metabolites, and reactive oxygen species as components of induced resistance [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 21 (10): 1511-1530.
- Bodlah MA, Iqbal J, Ashiq A, *et al.* Insect behavioral restraint and adaptation strategies under heat stress: An inclusive review [J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2023, 22 (6): 327-350.
- Cai WZ, Pang XF, Hua BZ, *et al.* General Entomology. Beijing: China Agricultural University Press [M]. 2001: 391-402. [彩万志, 庞雄飞, 花保祯, 等. 普通昆虫学 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 391-402]
- Chen MC. A preliminary study on *Atractomorpha* [J]. *Entomological Knowledge*, 1965, 3: 153-156. [陈茂才. 负蝗的初步研究 [J]. 昆虫知识, 1965, 3: 153-156]
- Cui J, Qiao F, Hu YL, *et al.* Antioxidant responses of *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae) adults exposed to high temperature stress [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2021, 43 (5): 1244-1249. [崔娟, 乔方, 胡英露, 等. 高温胁迫对筛豆龟蝽成虫抗氧化能力的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (5): 1244-1249]
- Cui J. The response of *Megacopta cribraria* to Temperature Changes and Its Physiological and Biochemical Mechanisms [D]. Changchun: Jilin Agricultural University PhD Dissertation, 2020. [崔娟. 筛豆龟蝽对温度变化的响应及其生理生化机制 [D]. 长春: 吉林农业大学博士学位论文, 2020]
- Ghiselli A, Serafini M, Natella F, *et al.* Total antioxidant capacity as a tool to assess redox status: Critical view and experimental data [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2000, 29 (11): 1106-1114.
- Guo N, Gao SJ, Wang N, *et al.* Effects of temperature on the activities of respiratory metabolism-related and antioxidant enzymes in adults of *Oedaleus asiaticus* (Orthoptera: Acridoidea) [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2020, 63 (11): 1358-1365. [郭娜, 高书晶, 王宁, 等. 温度对亚洲小车蝗成虫体内呼吸代谢相关酶和抗氧化酶活性的影响 [J]. 昆虫学报, 2020, 63 (11): 1358-1365]
- Ishikawa T, Takahata K. Insect and mite pests of pepino (*Solanum muricatum* Ait.) in Japan [J]. *Biodiversity Data Journal*, 2019, 7: e36453.
- Kashiwagi A, Kashiwagi K, Takase M, *et al.* Comparison of catalase in diploid and haploid *Rana rugosa* using heat and chemical

- inactivation techniques [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology B-Biochemistry & Molecular Biology*, 1997, 118 (3): 499-503.
- Kevan DKM, Lee SK. *Atractomorpha sinensis sinensis* Bolivar (Orthoptera: Pyrgomorphidae) and its nymphal stage [J]. *Oriental Insects*, 1974, 8 (3): 337-364.
- Kharouba HM, Lewthwaite JMM, Guralnick R, *et al.* Using insect natural history collections to study global change impacts: Challenges and opportunities. *Philosophical transactions-Royal Society [J]. Biological Science*, 2019, 374 (1763): 20170405.
- Kumar H, Usmani MK, Kumari R. Taxonomic significance of male supra-anal plate, cerci and subgenital plate in the classification of Indian Pyrgomorphidae (Orthoptera: Pyrgomorphoidea) [J]. *Journal of the Entomological Research Society*, 2014, 16 (1): 21-26.
- Lalouette L, Williams CM, Hervant F, *et al.* Metabolic rate and oxidative stress in insects exposed to low temperature thermal fluctuations [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology A-Molecular & Integrative Physiology*, 2011, 158 (2): 229-234.
- Li S. Differences in Heat Tolerance and Physio-biochemical Mechanisms between Female and Male *Calliptamus italicus* Adults (Orthoptera:Acrididae) [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University MSc Thesis, 2016. [李爽. 雌雄意大利蝗耐高温差异及其生理生化响应对策研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学硕士学位论文, 2016]
- Li WB, Gao Y, Cui J, *et al.* Effects of temperature on the development and fecundity of *Atractomorpha sinensis* (Orthoptera: Pyrgomorphidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2020, 113 (5): 2530-2539.
- Li WB. The Differentiation of Geographical Populations of *Atractomorpha sinensis* (Orthoptera: Pyrgomorphidae) and Their Adaptability to Environmental Temperature [D]. Changchun: Jilin Agricultural University PhD Dissertation, 2021. [李文博. 短额负蝗地理种群分化及其对环境温度适应性 [D]. 长春: 吉林农业大学博士学位论文, 2021]
- Mahmud SA, Hirasawa T, Shimizu H. Differential importance of trehalose accumulation in *Saccharomyces cerevisiae* in response to various environmental stresses [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, 109 (3): 262-266.
- Rael LT, Thomas GW, Craun ML. Lipid peroxidation and the thiobarbituric acid assay: Standardization of the assay when using saturated and unsaturated fatty acids [J]. *Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology*, 2004, 37 (6): 749-752.
- Sharma G, Mathur, V. Modulation of insect induced oxidative stress responses by microbial fertilizers in *Brassica juncea* [J]. *Fems Microbiology Ecology*, 2020, 96 (34): 40-45.
- Shi SS. Principles and Techniques of Soybean Pest Comprehensive Prevention and Control [M]. Changchun: Jilin Publishing Group Co. Ltd., 2013: 145. [史树森. 大豆害虫综合防控理论与技术 [M]. 长春: 吉林出版集团有限责任公司, 2013: 145]
- Wang J, Que SQ, Xi JF, *et al.* Effect of temperature stress on the antioxidant capacity of *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (4): 687-693. [王静, 阙生全, 奚剑飞, 等. 温度胁迫对腐食酪螨抗氧化能力的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2019, 56 (4): 687-693]
- Wang ML, Zhu W, Zhang JH, *et al.* Oxidative damage is one of the most important causes of death of *Thitarodes xiaojinensis* (Lepidoptera: Hepialidae) larvae under heat stress [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (7): 769-776. [王梦龙, 朱未, 张继红, 等. 氧化损伤是热胁迫下小金蝠蛾幼虫不能存活的重要原因 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (7): 769-776]
- Wang WQ, Zheng YQ, Chen B, *et al.* Effects of different host plants on the growth, development and fecundity of potato tuber moth *Phthorimaea operculella* based on the age-stage two-sex life table [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (3): 488-496. [王文倩, 郑亚强, 陈斌, 等. 基于年龄-阶段两性生命表的不同寄主对马铃薯块茎蛾生长发育和繁殖力的影响 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (3): 488-496]
- Wang XL Zhang XJ, Zhang X, *et al.* Effects of different strains on the activities of antioxidant enzymes in *Oxya chinensis* [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2019, 47 (4): 665-667. [王小莉, 张雪娟, 张欣, 等. 不同菌株对中华稻蝗抗氧化酶活性的影响 [J]. 山西农业科学, 2019, 47 (4): 665-667]
- Yao SH. The kinds and distribution of locusts in Guizhou [J]. *Journal of Guizhou Normal University* (Natural Science Edition), 2005, 23 (1): 6-13, 123-126. [姚世鸿. 贵州蝗虫的种类与分布 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, 23 (1): 6-13, 123-126]
- Zhang Q, Tu YQ, Liu H, *et al.* Effects of temperature stress on antioxidant enzymes in *Hepialus xiaojinensis* (Lepidoptera: Hepialidae) larva [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (1): 47-53. [张青, 涂永勤, 刘怀, 等. 温度胁迫对小金蝠蛾幼虫抗氧化酶活性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (1): 47-53]
- Zhang S, Fu WY, Li N, *et al.* Antioxidant responses of *Propylaea japonica* (Coleoptera: Coccinellidae) exposed to high temperature stress [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2015, 73: 47-52.
- Zhang W, Chang XQ, Hoffmann AA, *et al.* Impact of hot events at different developmental stages of a moth: The closer to adult stage, the less reproductive output [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5 (1): 10436.