



崔娟, 乔方, 胡英露, 田鑫月, 赵丽娜, 史树森. 高温胁迫对筛豆龟蜡成虫抗氧化能力的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2021, 43 (5): 1244–1249.

高温胁迫对筛豆龟蜡成虫抗氧化能力的影响

崔娟^{1,2}, 乔方¹, 胡英露², 田鑫月², 赵丽娜¹, 史树森^{2*}

(1. 吉林农业科技学院农学院, 吉林 132101; 2. 吉林农业大学植物保护学院, 长春 130118)

摘要: 为探索筛豆龟蜡 *Megacopta cribraria* (Fabricius) 对高温的耐受性及其体内抗氧化系统对极端高温胁迫的响应机制。以 25℃ 为对照温度, 经高温 37℃、40℃、43℃ 和 46℃ 胁迫处理 4 h 后, 测定筛豆龟蜡成虫存活率及其体内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 的活性以及总抗氧化 (T-AOC) 能力和丙二醛 (MDA) 含量的变化。在 37℃~46℃ 高温胁迫下, 筛豆龟蜡成虫存活率与对照无显著差异, 其体内 SOD 和 CAT 活性较对照组均显著增加, 其中, SOD 活性在 37℃ 最高, 随着温度进一步升高, 其活性有所下降, 但仍显著高于对照。CAT 一直保持较高活性, 随着处理温度的升高 CAT 活性呈逐渐升高趋势, 在极端高温 46℃ 时其活性最高。POD 活性在 37℃~40℃ 显著高于对照, 43℃ 和 46℃ 处理与对照无显著差异。T-AOC 活性在各处理温度下均显著高于对照, 且随着处理温度的升高 T-AOC 活性呈先升高后降低趋势。各处理 MDA 含量与对照无显著差异。筛豆龟蜡体内 3 种抗氧化酶的活力、总抗氧化能力和 MDA 在适应高温胁迫过程中发挥了重要作用。

关键词: 筛豆龟蜡; 高温胁迫; 抗氧化酶活性; 环境适应性

中图分类号: Q965; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2021) 05-1244-06

Antioxidant responses of *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae) adults exposed to high temperature stress

CUI Juan^{1,2}, QIAO Fang¹, HU Ying-Lu², TIAN Xin-Yue², ZHAO Li-Na¹, SHI Shu-Sen^{2*} (1. College of Agriculture, Jilin Agriculture Science and Technology College, Jilin 132101, Jilin Province, China; 2. College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: This study aims to explore the tolerance of *Megacopta cribraria* to high temperature, so as to investigate the mechanism of antioxidant system in response to extreme high temperature stress. In this study, we investigated the effect of high temperatures (37℃, 40℃, 43℃ and 46℃) for 4 h on the survival rate and activities of antioxidant enzymes, including superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidases (POD) and total antioxidant capacity (TAC) as well as malondialdehyde (MDA) concentrations in *M. cribraria* adults. A control group was reared at 25℃. Under the high temperature stress from 37℃ to 46℃, there was no significant difference in adult survival rate between the treatment and the control, but the activities of SOD and CAT in *M. cribraria* adults were significantly increased as compared with the control. The activity of SOD was the highest at 37℃, and then its activity decreased with the temperature increased, which was still significantly higher than the control. CAT activity was significantly rose from 37℃ to 46℃, kept a high level in the treatment groups compared with the control,

项目基金: 国家现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-04); 吉林省农业科技学院博士启动基金项目 (吉农院合字第 [20200007] 号)

作者简介: 崔娟, 女, 1982 年生, 吉林德惠人, 博士, 讲师, 研究方向为昆虫生态与害虫综合治理, E-mail: cuijuanjilin@163.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 史树森, 博士, 教授, 研究方向为昆虫生态与害虫综合治理, E-mail: sss-63@263.net

收稿日期 Received: 2020-06-08; 接受日期 Accepted: 2021-05-27

reached the highest value at extreme high temperature (46°C). There was significant difference in POD activity of *M. cribraria* adults from 37°C to 46°C compared with that in the control, except 43°C and 46°C. T-AOC activity was a significant increase for all treatment temperatures compared to the control, it was increasing firstly and then decreased, and reached the highest at 40°C and the lowest at 46°C. There was no significant difference in MDA content of *M. cribraria* adults for all treatment temperatures compared to the control. The activity, total antioxidant capacity and MDA of the three kinds of antioxidant enzymes play an important role in adapting to high temperature stress.

Key words: *Megacopta cribraria*; high temperature stress; antioxidant enzyme activity; environmental adaptability

筛豆龟蜡 *Megacopta cribraria* (Fabricius) 属半翅目 Hemiptera 龟蜡科 Plataspidae, 是大豆等豆科作物的一种重要刺吸类害虫 (Shi *et al.*, 2014)。目前, 已知该害虫分布于我国及澳大利亚、美国、印度、印度尼西亚、日本、韩国、马来西亚、缅甸等国家, 并有进一步扩展蔓延的趋势 (Eger *et al.*, 2010), 已成为世界性害虫。筛豆龟蜡喜温暖和湿润的环境 (Liang *et al.*, 2018), 25°C 条件下, 成虫寿命 75 d, 产卵前期 35 d, 单雌产卵量 160 粒, 世代重叠严重, 是我国南方各大豆产区的重要害虫 (Shi *et al.*, 2014), 主要以成虫、若虫刺吸大豆茎秆, 豆荚和叶片, 为害严重时, 田间被害株率达到 70% ~ 80% (Ruberson *et al.*, 2013), 不防治的田块可造成大豆减产 60% (Seiter *et al.*, 2013)。

温度是影响昆虫生理代谢、个体发育、行为特征、种群结构乃至群落组成的最重要的环境因素之一 (Zhang *et al.*, 2015)。昆虫在适宜的温度范围, 生长发育有利, 而超过这个范围, 可能会遭受生理上的损害 (Jerbi-Elayed *et al.*, 2015)。高温是限制昆虫分布、生存、繁殖的关键因子 (Stanley *et al.*, 1980), 而极端高温则对昆虫种群造成严重不利影响 (Chown *et al.*, 2010)。高温环境会使昆虫产生大量的活性氧 (Reactive oxygen species, ROS), 从而对虫体造成严重的氧化损伤 (Joanisse and Storey, 1996), 是昆虫不能正常存活的重要原因 (王梦龙等, 2014)。为了减少氧化胁迫, 昆虫在长期的进化过程中形成了一整套高效清除活性氧的保护机制 (Felton and Summers, 1995)。抗氧化酶是活性氧清除系统中最重要的组成部分 (Dubovskiy *et al.*, 2008), 其中超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 可以催化 O_2^- 发生歧化反应生成 O_2 和 H_2O_2 , 过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 和过氧化物酶 (Peroxidase,

POD) 均能分解 H_2O_2 , 二者共同作用将 H_2O_2 维持在较低水平 (Sørensen *et al.*, 2003); 总抗氧化能力 (Total antioxidant capacity, T-AOC) 是衡量昆虫体内所有抗氧化物质和抗氧化酶的能力 (Ghiselli *et al.*, 2000)。丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 是生物体遭受氧化胁迫发生脂质过氧化的产物之一, 通过测定其浓度可反映脂质损伤程度 (Meng *et al.*, 2009)。

近年来, 全球气候变暖导致我国南方区域性极端温度频发 (马罡和马春森, 2016), 夏季最高气温往往超过 40°C, 尤其是中午到午后的 3 ~ 4 个小时 (Zhang *et al.*, 2015)。由于农田的开放式结构, 夏季大豆田冠层温度较高, 白天田间微生境较周围环境高 0.9°C ~ 4.5°C (Grant and Lamp, 2018)。如此高温环境对筛豆龟蜡种群的生存和发展影响如何? 在全球气候变暖的大背景下, 筛豆龟蜡对高温环境的适应性又如何? 目前尚不清楚, 而深入了解这些问题对明确其潜在分布区的预警和综合管理具有重要意义。

本研究测定了筛豆龟蜡在梯度高温胁迫下的存活情况及其体内 SOD、CAT、POD、T-AOC 的活性变化及 MDA 的含量变化, 以期了解筛豆龟蜡成虫对极端高温环境的适应能力, 进而明确其田间种群对极端高温环境的适应性, 为研究该害虫的生态适应性评价及其全球区域性分布扩张趋势分析提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试昆虫

筛豆龟蜡采自南京农业大学江浦试验基地大豆田 (32°26'25"N, 118°50'23.47"E), 室内饲养。养虫室环境温度 25°C ± 1°C, 相对湿度 65% ~

75%，光周期 16 L : 8 D。成虫饲养在养虫笼 (0.6 m × 0.6 m × 0.6 m) 内，每笼 50 头，以结荚初期的盆栽大豆植株进行饲养，每笼 2 盆，每盆 5 株大豆，待成虫产卵孵化后，采集大豆叶片上同期初孵若虫，用小毛笔轻轻将其挑到开花期的大豆植株上饲养，每笼 100 头，15 d 更换一次盆栽大豆，待若虫羽化，每 50 头同期羽化成虫放入新的养虫笼内饲养 10 d 备用。

1.1.2 仪器材料

主要试剂: SOD、POD、CAT、T-AOC、MDA 和总蛋白含量试剂盒均购于南京建成生物工程公司。

主要仪器: BIR-80DI 生化培养箱 (上海三腾仪器有限公司); 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); AL-204 电子天平 (梅特勒-托利多仪器上海有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 试虫处理

根据中国中南部 (筛豆龟蜡分布区) 夏季最高气温可达到 44℃，通常持续 3 个小时 (Chen *et al.*, 2014)，本试验选择 37℃、40℃、43℃、46℃ 为高温梯度胁迫温度，处理时间 4 h，以适温 25℃ (Shi *et al.*, 2014) 为对照处理。取 10 日龄雌雄成虫置于干净无菌的小型有机玻璃养虫罐 (10 cm × 15 cm) 内，每罐雌雄虫各 10 头，养虫罐底部放置等体积湿润的海棉保持罐内湿度 (模拟田间小气候)，将上述养虫罐分别置于生化培养箱内进行相应温度处理。

1.2.2 高温胁迫对筛豆龟蜡存活的影响

观察上述各温度处理后试虫的存活情况，用小毛笔轻轻碰触虫体，可以自由爬动，则视为存活，记录各处理成虫存活数量。

1.2.3 抗氧化酶活性、总抗氧化能力和 MDA 含量测定

每个温度随机抽取处理后的雌雄成虫各 5 头为测定样本，3 次重复。

酶液提取: 准确称量各处理活虫质量，按照质量与 0.86% 生理盐水 1:9 (m/v) 的比例配置装入离心管，将离心管放置冰水混合物内，用微量研磨仪机械研磨成 10% 组织匀浆，将匀浆液在高速冷冻离心机 4℃ 下冷冻离心 15 min (12 000 r/min)，所得上清液为酶提取液。

蛋白质含量测定: 参考 Bradford (1976) 方

法，对蛋白质进行提取和测定。以牛血清蛋白为标准品制作蛋白质标准曲线。根据标准曲线计算出各样品总蛋白含量。

SOD、CAT、POD、T-AOC 活性和 MDA 含量的测定，均参照南京建成生物工程研究所试剂盒说明书进行。

1.2.4 数据统计与分析

使用单因素方差分析 (ANOVA) 分析不同处理温度下筛豆龟蜡成虫存活率及抗氧化酶活性的差异显著性 ($P < 0.05$)，并采用 LSD 测验进行多重比较。采用 SPSS 18.0 统计软件对数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 高温胁迫对筛豆龟蜡成虫存活的影响

筛豆龟蜡对高温适应性比较强，在 37℃、40℃、43℃ 和 46℃ 下处理 4 h 后，成虫存活率均为 100%，与对照无显著差异。

2.2 筛豆龟蜡成虫体内抗氧化酶活性对高温胁迫的响应

2.2.1 筛豆龟蜡成虫 SOD 活性对高温胁迫的响应

各高温处理对 SOD 活性 ($F = 57.974$; $df = 4, 10$; $P < 0.001$) 影响显著，其活性均显著高于对照。其中，37℃ 处理的 SOD 活性最高，较 25℃ 时增加了 97.41%，随着温度进一步升高，SOD 活性有所下降，在 40℃ ~ 46℃ 范围内，各处理间 SOD 活性仍然显著高于对照 (图 1-A)。

2.2.2 筛豆龟蜡成虫 CAT 活性对高温胁迫的响应

各高温处理对 CAT 活性 ($F = 14.96$; $df = 4, 10$; $P < 0.001$) 亦有显著影响，各高温处理 CAT 活性均显著高于对照。37℃ ~ 46℃ 范围内，随着处理温度的升高 CAT 活性呈逐渐升高趋势，但各处理间无显著差异。在极端高温 46℃ 时，CAT 活性最高，较 25℃ 时增高 78.97%，较 37℃ 时增高 14.90% (图 1-B)。

2.2.3 筛豆龟蜡成虫 POD 活性对高温胁迫的响应

在 37℃ ~ 40℃ 范围内，各温度处理 POD 活性 ($F = 12.236$; $df = 4, 10$; $P = 0.001$) 显著高于对照。随着处理温度进一步升高，POD 活性显著降低，43℃ 和 46℃ 处理两者间无显著差异，也分别与对照无显著差异，且 POD 活性分别较 25℃ 增高 20% 左右 (图 1-C)。

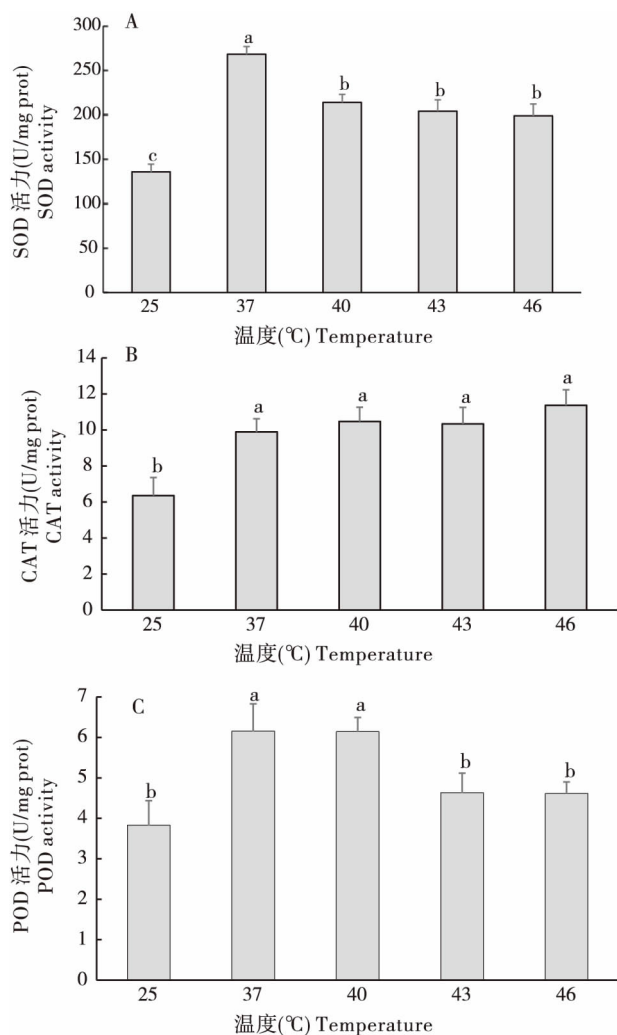


图1 不同温度处理对筛豆龟蜡成虫 SOD (A)、CAT (B) 和 POD (C) 活性影响

Fig. 1 Effects of different temperatures on the activities of SOD (A), CAT (B), and POD (C) in *Megacopta cribrari* adults
 注: 图中数据为平均数 ± 标准差, 柱上标有不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。
 Note: Data were mean ± SD, histograms with different lowercase letters indicated significant difference among treatments at the 0.05. The same for the following figures.

2.3 高温胁迫对筛豆龟蜡成虫体内 T-AOC 活性的影响

各温度处理对 T-AOC 活性 ($F = 33.63$; $df = 4, 10$; $P < 0.001$) 影响显著, 各高温胁迫处理后其活性均显著高于对照。37℃ ~ 46℃ 范围内, 随着处理温度的升高 T-AOC 活性呈先升高后降低趋势。当温度为 40℃ 时 T-AOC 活性最高, 较对照 25℃ 时增高 54.55%, 在极端高温 46℃ 时其活性最低, 显著低于其它处理, 但仍较对照增高 22.24% (图 2)。

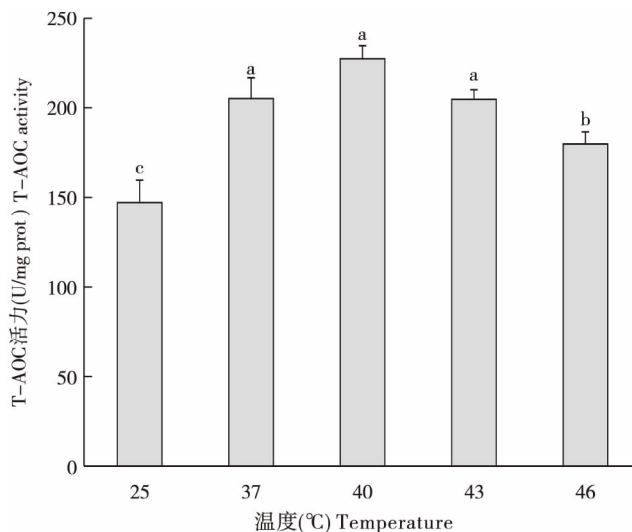


图2 不同温度处理对筛豆龟蜡成虫 T-AOC 活性影响

Fig. 2 Effects of different temperatures on the activities of T-AOC in *Megacopta cribrari* adults

2.4 高温胁迫对筛豆龟蜡成虫体内 MDA 含量的影响

各温度处理 MDA 含量存在一定差异 ($F = 5.398$; $df = 4, 10$; $P = 0.017$)。在 37℃ ~ 46℃ 范围内, MDA 含量与对照无显著差异, 随着处理温度的升高 MDA 含量呈先升高后降低趋势, 当温度升高到 40℃ 时 MDA 含量最高, 随着温度进一步升高, MDA 含量降低, 当温度达到 46℃ 时 MDA 含量最低, 显著低于 40℃ 时 MDA 的含量, 且较对照降低 5.58% (图 3)。

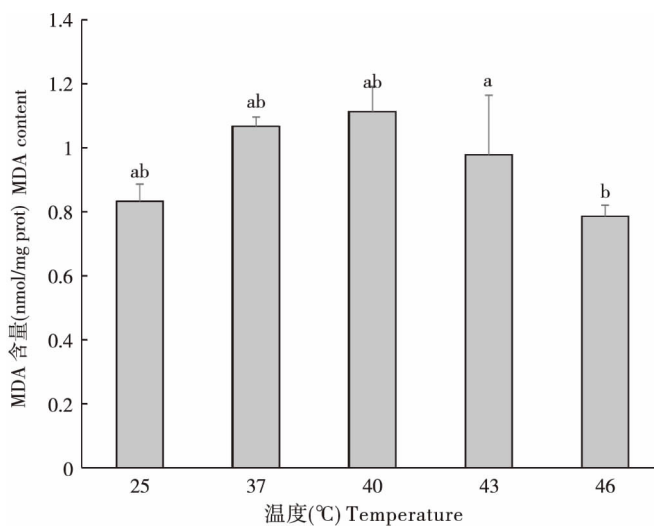


图3 不同温度处理对筛豆龟蜡成虫 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effects of different temperatures on the contents of MDA in *Megacopta cribrari* adults

3 结论与讨论

在昆虫的长期进化过程中,形成了一系列适应环境温度的保护机制,其中抗氧化酶的应激变化是虫体响应温度胁迫的重要策略之一 (Bafana *et al.*, 2011)。筛豆龟蜡存在世代重叠现象,任何一个发育阶段或整个世代都可能遭遇阶段性高温胁迫,而其成虫有较长的寿命,终生可繁殖 (Shi *et al.*, 2014)。在本研究中,筛豆龟蜡对高温有较强的耐受能力,46℃ 以下短时的高温胁迫对其无致死效应,而高温胁迫下筛豆龟蜡成虫的抗氧化酶 SOD、CAT、POD、T-AOC 活性及 MDA 含量均发生了不同程度的变化,表现出虫体受到外界高温环境干扰达到一定程度时所产生的应激反应,说明这些抗氧化酶在减轻热应激产生活性氧 ROS 对虫体的不利影响方面具有积极作用,进而有效提高了对环境高温的适应性。

SOD 几乎存在于所有的生物细胞中,是生物体内最重要的抵御氧化胁迫的物质 (Celino *et al.*, 2011)。广聚萤叶甲 *Ophraella communa* 在短期高温胁迫下,其成虫的 SOD 活性整体显著升高 (Chen *et al.*, 2018),在对茶淡黄刺蛾 *Darna trima* 的研究中也有类似的现象 (李品武等, 2016)。本研究结果显示,筛豆龟蜡在高温胁迫后 SOD 活性也显著增加,温度超过 40℃, SOD 活性虽有显著下降,但仍显著高于对照,表明高温胁迫能诱导筛豆龟蜡增强 SOD 活性,从而提高筛豆龟蜡的耐热能力。

CAT 和 POD 均能清除昆虫体内过氧化氢 (H_2O_2), H_2O_2 浓度较高时 CAT 发挥主要作用,而 H_2O_2 浓度较低时 POD 发挥主要作用,二者共同作用将 H_2O_2 维持在较低的水平 (Li *et al.*, 2003)。筛豆龟蜡受温度胁迫后 POD 和 CAT 活性同时增加,但在高于 43℃ 后 POD 活性显著下降而 CAT 活性无显著变化,双斑长跗萤叶甲 *Monolepta hieroglyphica* 的 POD 活性表现为随温度的升高呈先升高后降低的变化 (张志虎等, 2018)。说明在高温 37℃ ~ 40℃ 时,筛豆龟蜡体内产生的 H_2O_2 主要以 CAT 和 POD 共同发挥作用,高于 43℃ 后 H_2O_2 浓度较高则主要由 CAT 清除。

T-AOC 是指有机体体内的总抗氧化能力 (Ghiselli *et al.*, 2000)。筛豆龟蜡成虫 T-AOC 活性随着胁迫处理温度的升高,表现为先增加而后降低,但均显著高于对照,表明筛豆龟蜡成虫在高温条件下诱导的抗氧化反应较多。T-AOC 活性在

高温 40℃ 时达最高,而 SOD 和 POD 在 37℃ 时活性最高, CAT 在 43℃ 时最高, T-AOC 活性与 SOD、POD、CAT 活性最大值的胁迫温度并不一致,说明筛豆龟蜡还存在其他的抗氧化机制,在昆虫体内,海山梨醇、海藻糖、热激蛋白等已被发现与抗氧化酶共同抵御活性氧的伤害 (Cui *et al.*, 2011; 唐维媛等, 2016)。随着温度的升高, T-AOC 活性又有所下降,表明部分抗氧化机制可能被抑制。

MDA 是脂质过氧化物的主要分解产物,作为氧化应激的一个常用指标,可通过 MDA 了解膜脂过氧化的程度,以间接测定膜系统受损程度 (Rael *et al.*, 2004)。本研究结果显示,筛豆龟蜡经高温胁迫后 37℃ ~ 43℃ 体内的 MDA 含量有所增加但差异并不显著,说明 MDA 的正常水平可能是由于抗氧化酶活性的增强,可以清除多余的脂质过氧化。随着温度的增加,MDA 含量总体呈下降趋势,这与高温胁迫对龟纹瓢虫 *Propylaea japonica* 和腐食酪螨 *Tyrophagus putrescentiae* 的影响结果类似 (Zhang *et al.*, 2015; 王静等, 2019),筛豆龟蜡在较高的温度胁迫下伴随着脂质过氧化和其他对氧化胁迫的反应,抗氧化能力逐渐增强,从而清除了体内过多的活性氧。

综上所述,抗氧化酶在高温胁迫的抗氧化反应过程中发挥着重要作用,筛豆龟蜡成虫可有效处理热胁迫诱导的活性氧进而表现出对环境高温较强的适应性。这与筛豆龟蜡主要分布在中国南方地区的生态学表现是一致的,通过对生态环境的长期适应,形成了自身机体具有较强的耐热性。从本研究筛豆龟蜡成虫可对 46℃ 极端高温仍有相当积极生理响应的结果看,在全球气候持续变暖条件下,高温对该害虫种群分布及在农田发生危害的不利影响是有限的,随着温度的升高,该害虫有可能通过迁移扩散扩大其空间分布范围,危害进一步加重。本研究较全面测定分析了在极端高温条件下筛豆龟蜡抗氧化防御系统的响应,该结果为进一步开展筛豆龟蜡预测预报和在全球气候持续变暖的环境下深入探讨其种群动态变化、分布范围以及其对高温环境适应的分子机制研究提供了科学依据。

参考文献 (References)

- 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.

- Bradford MM. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72 (1-2): 248-254.
- Chen HS, Solangi GS, Guo JY, et al. Antioxidant responses of ragweed leaf beetle *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae) exposed to thermal stress [J]. *Frontiers in Physiology*, 2018, 9: 808.
- Chen HS, Zheng XW, Luo M, et al. Effects of high temperature on body size and weight of *Ophraella communa* [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2014, 24 (8): 882-890.
- Chown SL, Hoffmann AA, Kristensen TN, et al. Adapting to climate change: A perspective from evolutionary physiology [J]. *Climate Research*, 2010, 43 (1): 3-15.
- Cui YD, Du YZ, Lu MX, et al. Antioxidant responses of *Chilo suppressalis* (Lepidoptera: Pyralidae) larvae exposed to thermal stress [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2011, 36: 292-297.
- Dubovskiy IM, Martemyanov VV, Vorontsova YL, et al. Effect of bacterial infection on antioxidant activity and lipid peroxidation in the midgut of *Galleria mellonella* L. larvae (Lepidoptera, Pyralidae) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C*, 2008, 148 (1): 1-5.
- Eger JE, Ames LM, Suiter DR, et al. Occurrence of the Old World bug *Megacopta cribraria* (Fabricius) (Heteroptera: Plataspidae) in Georgia: A serious home invader and potential legume pest [J]. *Insecta Mundi*, 2010, 121: 1-11.
- Felton GW, Summers CB. Antioxidant systems in insects [J]. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 1995, 29: 187-197.
- Ghiselli A, Serafini M, Natella F, Scaccini C. 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.
- Grant IJ, Lamp W. Degree day requirements for kudzu bug (Hemiptera: Plataspidae), a pest of soybeans [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2018, 111 (2): 700-706.
- Jerbi-Elayed M, Lebdi-Grissa K, Foray V, et al. Using multiple traits to estimate the effects of heat shock on the fitness of *Aphidius colemani* [J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2015, 155: 18-27.
- Joanisse DR, Storey KB. Oxidative stress and antioxidants in overwintering larvae of cold-hardy goldenrod gall insects [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1996, 199 (7): 1483-1491.
- Li D, Blasevich F, Theopold U, et al. Possible function of two insect phospholipid-hydroperoxide glutathione peroxidases [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2003, 49 (1): 1-9.
- Li PW, Fu XL, Chen SC, et al. Effect of temperature stress on four protective enzymes and overall antioxidant capacity in *Darna trima* (Moore) [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2016, 53 (4): 809-816. [李品武, 付雪莲, 陈世春, 等. 温度胁迫对茶淡黄刺蛾四种保护酶活性和总抗氧化力的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2016, 53 (4): 809-816]
- Liang WW, Tra LT, Washington-Allen R, et al. Predicting the potential invasion of kudzu bug, *Megacopta cribraria* (Heteroptera: Plataspidae), in North and South America and determining its climatic preference [J]. *Biological Invasions*, 2018, 20: 2899-2913.
- Meng JY, Zhang CY, Zhu F, et al. Ultraviolet light-induced oxidative stress: Effects on antioxidant response of *Helicoverpa armigera* adults [J]. *Journal of Insect Physiology*, 2009, 55 (6): 588-592.
- Ma G, Ma CS. The impacts of extreme high temperature on insect populations under climate change: A review [J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 46: 556-564. [马罡, 马春森. 气候变化下极端高温对昆虫种群影响的研究进展 [J]. 中国科学: 生命科学, 2016, 46: 556-564]
- Rael LT, Thomas GW, Craun ML, et al. Lipid peroxidation and the thiobarbituric acid assay: Standardization of the assay when using saturated and unsaturated fatty acids [J]. *Journal of Biochemistry and Molecular Biology*, 2004, 37: 749-752.
- Ruberson J, Takasu K, Buntin GD, et al. From Asian curiosity to eruptive American pest: *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae) and prospects for its biological control [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2013, 48: 3-13.
- Seiter NJ, Greene JK, Reay-Jones FP. Reduction of soybean yield components by *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae) [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2013, 106: 1676-1683.
- Shi S S, Cui J, Zang LS. Development, survival, and reproduction of *Megacopta cribraria* (Heteroptera: Plataspidae) at different constant temperatures [J]. *Journal of Economic Entomology*, 2014, 107: 2061-2066.
- Sørensen JG, Kristensen TN, Loeschcke V. The evolutionary and ecological role of heat shock proteins [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6 (11): 1025-1037.
- Stanley SM, Parsons PA, Spence GE, et al. Resistance of species of the *Drosophila melanogaster* subgroup to environmental extremes [J]. *Australian Journal of Zoology*, 1980, 28: 413-421.
- Tang WY, Qiang FQ, Xing CC, et al. Research progress of adverse environmental stress on antioxidant enzymes in insects [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2016, 44 (1): 75-79. [唐维媛, 强奉群, 邢丛丛, 等. 不利环境对昆虫抗氧化酶影响的研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2016, 44 (1): 75-79]
- 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蚕蝠蛾幼虫不能存活的重要原因 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (7): 769-776]
- Wang J, Que SQ, Xi JF, et al. Effect of temperature stress on the antioxidant capacity of *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank) [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]
- Zhang SZ, Fu WY, Li N, Zhang F, 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 A, 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: 10436.
- Zhang ZH, Wang Z, Chen J, et al. Effects of high temperature stress on total protein and two protective enzymes in adult *Monolepta hieroglyphica* (Motschulsky) [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2018, 40 (2): 440-445. [张志虎, 王中, 陈静, 等. 高温胁迫对双斑长跗蛱蝶幼虫总蛋白和两种保护酶的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2018, 40 (2): 440-445]