

哒螨灵和高温胁迫下截形叶螨的应激反应*

付文华** 乔万强 张翠文 张双红 王继组 俞才兰 王森山 宋丽雯***

(甘肃农业大学植物保护学院, 甘肃省农作物病虫害生物防治工程实验室, 兰州 730070)

摘要 【目的】测定截形叶螨 *Tetranychus truncatus* 敏感品系 (SS)、抗哒螨灵品系 (Py-R) 体内的自由基和保护酶的变化, 探究截形叶螨在药剂和高温的双重胁迫下的应激反应, 为叶螨的综合治理提供一定的理论基础。【方法】经哒螨灵和 38 °C 高温处理后, 测定截形叶螨不同品系体内的可溶性蛋白含量、超氧自由基 ($\cdot\text{O}_2^-$) 和超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性, 并分析自由基和 3 种保护酶的变化与药剂和高温双重胁迫的相关性。【结果】截形叶螨敏感品系和抗性品系经哒螨灵和高温处理后体内 $\cdot\text{O}_2^-$ 含量分别是对照的 5.519 2 倍和 1.346 2 倍, SOD 活性分别是对照的 5.344 7 倍和 7.105 2 倍, CAT 和 POD 活性也均高于对照。【结论】截形叶螨体内的 $\cdot\text{O}_2^-$ 、SOD、CAT 和 POD 与哒螨灵药物和高温胁迫有关, Py-R 在长期哒螨灵胁迫作用下对保护酶活性的诱导能力加强。

关键词 哒螨灵; 高温; 截形叶螨; 自由基; 保护酶

Stress response of *Tetranychus truncatus* to pyridaben and high temperatures

FU Wen-Hua** QIAO Wan-Qiang ZHANG Cui-Wen ZHANG Shuang-Hong
WANG Ji-Zu YU Cai-Lan WANG Sen-Shan SONG Li-Wen***

(College of Plant of Gansu Agricultural University, Biological Engineering Laboratory of
Crop Diseases and Pests of Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract [Objectives] To investigate changes in free radical and protective enzyme levels induced by exposure to pyridaben and a high temperature, in a sensitive (SS) and pyridaben-resistant (Py-R) strain of *Tetranychus truncatus*. [Methods] Soluble protein content and activity of the superoxide radical ($\cdot\text{O}_2^-$), superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), in the SS and Py-R strains were determined after treatment with pyridaben and exposure to 38 °C. The interaction between free radicals and three protective enzymes was also analyzed. [Results] The $\cdot\text{O}_2^-$ content of the SS and Py-R strains were 5.5192 and 1.3462 times higher than that of the control group after exposure to pyridaben and the high temperature, and SOD activity was 5.344 7 and 7.105 2 times higher. CAT and POD activity were also higher than in the control group. [Conclusion] $\cdot\text{O}_2^-$, SOD, CAT and POD levels in *T. truncatus* are affected by pyridaben and high temperature stress, and the Py-R strain has higher protective enzyme activity under long-term pyridaben stress.

Key words pyridaben; high temperature; *Tetranychus truncatus*; free radicals; protective enzyme

截形叶螨 *Tetranychus truncatus* Ehara, 又称棉红蜘蛛, 属叶螨科, 在我国北方主要为害玉米和棉花, 并成为我国黄淮海地区以及新疆地区的优势物种; 在我国南方是蔬菜上的常见为害种 (宋丽雯和沈慧敏, 2016; 郭燕飞, 2018), 主

要通过集聚于叶片的背部, 以吮吸汁液等方式对作物等产生危害, 使叶片出现细小白斑, 并导致植株逐渐枯萎, 甚至死亡 (曹骞等, 2010)。截形叶螨的生殖周期短、对杀虫剂的抗性强, 且在不同生态环境下易产生变种出现不同品系, 是一

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (31860503); 甘肃农业大学科技创新基金 (GAU-XKJS-2018-152)

**第一作者 First author, E-mail: 1607924244@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: songlw@gsau.edu.cn

收稿日期 Received: 2020-11-12; 接受日期 Accepted: 2021-04-06

种为害严重且难以防治的有害生物(王建伟, 2007)。由于甘肃省河西地区降水稀少且昼夜温差较大, 近年来, 日光温室、玉米种植面积、重茬数量增加, 使该地区玉米上截形叶螨数量不断增加, 为害日益严重, 给玉米制种业造成了巨大损失(宋丽雯, 2014)。

生物受到不利环境的干扰会产生自由基(李周直等, 1994)。正常情况下, 生物体内的自由基之所以可以保持在较低状态下, 主要是生物中产生的保护酶(如: SOD、CAT、POD 等)的相互作用, 使自由基的合成和消除保持动态平衡, 使生物体免受自由基的强氧化作用(Ries, 1977)。昆虫若受外部环境如微生物、农药等的刺激, 体内的保护酶活性以及保护酶系统则会发生相应的改变, 且改变幅度与刺激强度、耐药性、抗逆性等有关(Perić-Mataruga *et al.*, 1997; 张青, 2016)。有研究者针对朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* Boisduval 的抗高温品系和抗阿维菌素品系进行研究, 发现在高温、低温和药剂胁迫条件下, 朱砂叶螨敏感品系体内的保护酶活性的变化率低于抗高温品系和抗阿维菌素品系, 而自由基的产生速率与之相反(刘开林, 2007; 杨大兴, 2009; 冯宏祖等, 2010)。其它种类的叶螨在不同的抗性水平、药剂类型、环境温度等因素影响下, 体内保护酶的变化规律是否一致, 尚无文献报道。

本研究测定截形叶螨不同品系经哒螨灵和高温胁迫处理后体内自由基和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)的变化, 探究截形叶螨在药剂和高温的胁迫下的应激变化规律, 以期为截形叶螨的综合治理提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

截形叶螨敏感品系采集于未施用任何农药的玉米田, 在实验室内采用雌雄单系(一雌一雄在饲养台上饲养)繁殖饲养而成, 用盆栽豇豆苗连续饲养 90 代以上, 饲养期间不接触任何药剂。

截形叶螨抗哒螨灵品系由实验室前期抗性

筛选得到。敏感品系个体哒螨灵药剂进行汰选, 浓度保持在杀死种群 70% 左右个体的剂量, 将抗性指数(Resistant index, RI)为 19.14 的截形叶螨作为抗哒螨灵品系。

供试药剂: 15% 哒螨灵乳油(安徽金泰农药化工有限公司产品)。

1.2 截形叶螨耐药能力测定

使用叶片浸渍法测定截形叶螨耐药能力。从带有截形叶螨的豇豆苗中挑取 2-3 日龄雌成螨, 共设置 6 个浓度梯度和 1 个对照(双蒸水), 每个浓度处理 3 次重复, 每个重复 20 头雌成螨。

1.3 哒螨灵和高温胁迫对截形叶螨自由基和保护酶活性的影响

1.3.1 样本处理与酶源制备 从豇豆苗上挑取 2-3 日龄的截形叶螨抗哒螨灵品系(Py-R)和敏感品系(SS)的雌成螨各 600 头, 置于培养皿底部铺有经哒螨灵药液浸泡后的叶片中。待取食 8 h 后, 将存活的雌成螨挑入另一叶碟内并转移至 38 °C 条件下取食 2 h。每个处理挑取 200 头雌成螨至离心管内测定酶活性, 各处理重复 3 次, 对照组未经任何处理直接制备酶源。

截形叶螨在冷冻去离子水下冲洗并吸干表面水分, 置于预冷的 1.5 mL 离心管, 加入 1 mL 磷酸缓冲液(浓度 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH7.0), 冰水浴中的进行匀浆。匀浆后离心 10 min(离心机设置为 $8\ 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、4 °C), 取上清液用于保护酶活性测定(郭金梅, 2014)。

1.3.2 蛋白质含量的测定 使用考马斯亮蓝 G-250 染色法进行测定(Bradford, 1976)。将酶液提取 50 μL 转移到试管里(对照组为磷酸缓冲液), 加入 200 μL 考马斯亮蓝 G-250 并混合。将其置于 25 °C 恒温水浴中 2 min, 然后置于 $\lambda=595 \text{ nm}$ 波长下, 测量 OD 值。试验重复 3 次, 并取平均值, 再依照标准曲线计算蛋白质的含量($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)。

1.3.3 自由基的测定 羟胺氧化的原理是超氧阴离子自由基与盐酸羟胺反应生成 NO_2^- , NO_2^- 与对氨基苯磺酰胺和萘乙二胺盐酸盐反应产生红色偶氮化合物(冯宏祖等, 2008; 王爱国和罗

广华, 1990)。该化合物在 $\lambda=530$ nm 波长下具有显著的吸收, 根据所测得的 OD_{530} , 计算样品中 $\cdot O_2^-$ 的含量。

取截形叶螨雌成虫 200 头, 加 $65 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液 (pH7.8) 1 mL 于 1.5 mL 离心管中冰浴匀浆, 4°C , $12\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液 40 μL , 加入磷酸缓冲液 0.1 mL 和 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 羟胺氯化物 80 μL , 混匀并 25°C 水浴 20 min 后依次加入 $7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对氨基苯磺酸 60 μL 和 $7 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ α -萘胺 60 μL , 混匀并 25°C 水浴 20 min 后加入氯仿 100 μL , 混匀, $8\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 25°C 离心 5 min, 吸取上层水相 200 μL 至 96 孔板, 用酶标仪测定波长 530 nm 处的 OD 值。用磷酸缓冲液作空白对照, 配置不同浓度的亚硝酸钠作标准曲线, 求得 $\cdot O_2^-$ 产生速率, 以 $\text{nmol} \cdot \text{mg prot} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示。

$$O_2^- \text{ 产生速率} (\text{nmol} \cdot \text{mg prot} \cdot \text{min}^{-1}) = \\ 0.1 \times OD_{530} \div C_{pr} \times 1\,000$$

1.3.4 保护酶的活性测定 用已得到的粗酶提取液测定 SOD, CAT 和 POD 酶的活性。按照相应的试剂盒(上海优选生物科技有限公司, 上海)的测试步骤进行操作, 并用吸光度法分别测定

SOD、POD、CAT 的吸光值。

1.4 统计与分析

数据以平均值 $\pm$ 标准误 (mean $\pm$ SE) 表示, 数据统计分析使用 SPSS 22.0 软件进行, 采用 ANOVA 中的 Duncan 氏法进行显著性检验, 并用 SPSS 对截形叶螨抗哒螨灵品系和敏感种群经哒螨灵和高温双重胁迫后测定的自由基和保护酶活性进行 Pearson 相关性分析以直观体现各变量之间的相互关系。

2 结果与分析

2.1 截形叶螨的耐药性

哒螨灵对截形叶螨的毒力见表 1。敏感品系 (SS) 和抗哒螨灵品系 (Py-R) LC_{50} 分别是 $12.923\,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $247.408\,8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 耐药性强弱表现为 $\text{Py-R} > \text{SS}$, 哒螨灵的毒力回归系数 SS 和 Py-R 分别是 $-4.416\,6$ 和 $-1.615\,2$, Py-R 的毒力回归线坡度大于 SS (b 值分别为 $-4.416\,6$ 和 $-1.615\,2$), 表明 Py-R 群体的异质性变小, 对哒螨灵的敏感性较为均一。

表 1 哒螨灵对截形叶螨各品系毒力

Table 1 Toxicity of pyridaben to *Tetranychus truncatus* strains

品系 Strain	毒力回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	卡方值 χ^2	LC_{50} (mg/L) (95%置信区间) (95% confidence interval)
SS	$y = 0.341\,6x - 4.416\,6$	0.996 2	1.083 0	12.923 4 (8.078 6-14.361 9)
Py-R	$y = 0.005\,9x - 1.615\,2$	0.970 6	4.545 8	247.408 8 (174.036 6-484.859 3)

SS: 敏感品系; Py-R: 抗哒螨灵品系。

SS: Sensitive strain; Py-R: Pyridaben resistant strain.

2.2 可溶性蛋白质含量测定

经过哒螨灵和高温 38°C 处理后, 截形叶螨敏感品系和抗哒螨灵品系的可溶性蛋白质的含量存在一定的差异 (图 1)。经胁迫后, 抗哒螨灵品系处理后的蛋白质含量显著高于处理前 ($P < 0.05$), 在哒螨灵和高温的双重胁迫下总蛋白质含量明显增加, 达到了处理前的 2.419 3 倍, 而敏感品系的蛋白质虽增加量不及抗哒螨灵品系, 但显著高于处理前 ($P < 0.05$), 达到了处理

前的 2.090 3 倍。

2.3 哒螨灵和高温双重胁迫后截形叶螨体内自由基和保护酶的变化

2.3.1 双重胁迫对截形叶螨体内自由基的影响

截形叶螨经过药剂和高温双重胁迫之后, 含有的 $\cdot O_2^-$ 明显提高。经药剂和高温双重胁迫后, 敏感品系体内的 $\cdot O_2^-$ 与对照组间具有显著性差异 ($P < 0.05$), 为对照组的 5.519 2 倍, 而抗哒螨灵品系体内的 $\cdot O_2^-$ 为对照组的 1.346 2 倍, 但实际与对照

组未产生显著性差异 (图 2: A)。

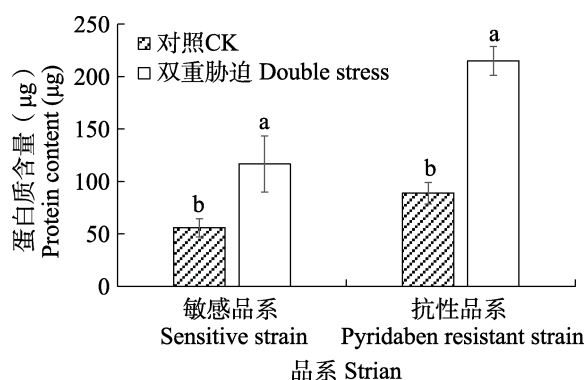


图 1 哒螨灵和高温双重胁迫对截形叶螨可溶性蛋白含量的影响

Fig. 1 Effects of pyridaben and high temperature on soluble protein content of *Tetranychus truncatus*

数据均以平均值±标准误表示。柱上标有不同小写字母表示经 Duncan 氏法检验差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Data are mean±SE. Histograms with different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's test. The same below.

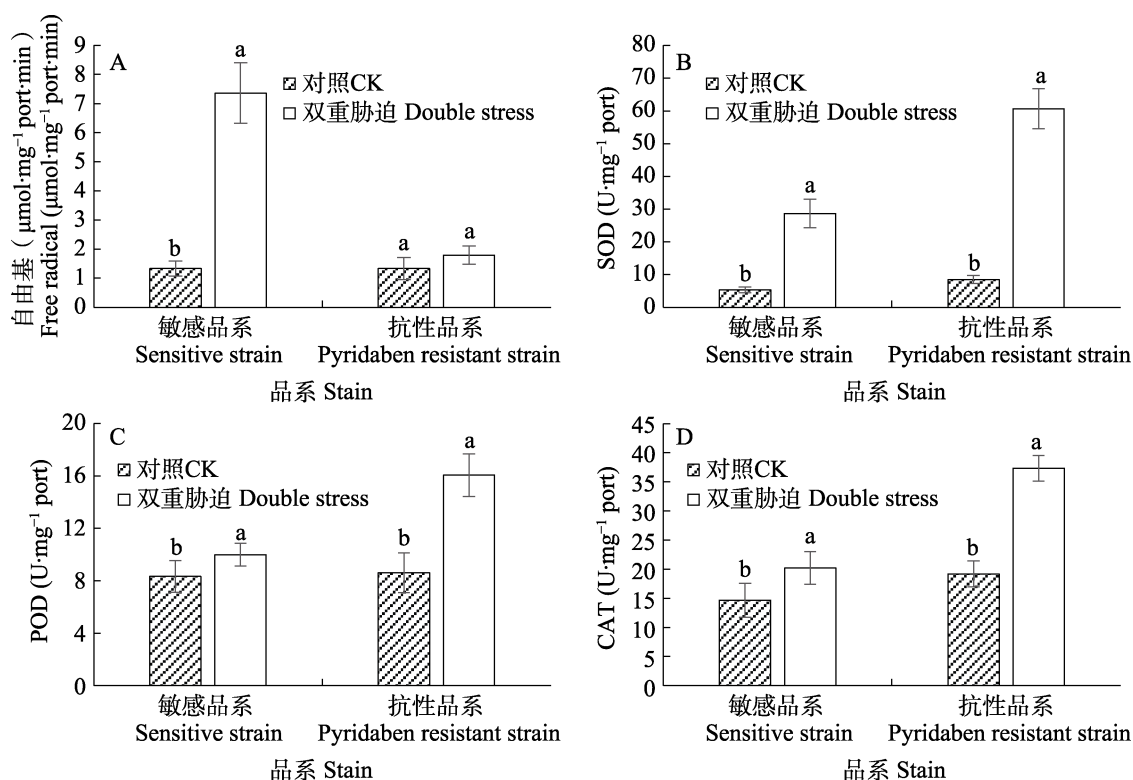


图 2 哒螨灵和高温双重胁迫对截形叶螨自由基和保护酶的影响

Fig. 2 Effects of pyridaben and high temperature treatment on free radicals and protective enzymes of *Tetranychus truncatus*

A. 自由基; B. 超氧化物歧化酶; C. 过氧化物酶; D. 过氧化氢酶。

A. Free radical ($\cdot\text{O}_2^-$); B. Superoxide dismutase (SOD); C. Peroxidase (POD); D. Catalase (CAT).

2.3.2 截形叶螨体内保护酶活性的变化 在药剂和高温双重胁迫下, 敏感品系的 SOD, CAT 和 POD 活性均高于对照组, SOD 的变化最为明显, 为对照组的 5.344 7 倍。抗哒螨灵品系在处理条件下 SOD、CAT 和 POD 的活性也有增长, 也以 SOD 的变化最为明显, 为对照组的 7.105 2 倍 (图 2: B-D)。

敏感品系和抗性品系经胁迫处理后, SOD 活性变化最强, POD 活性变化最小, 敏感和抗哒螨灵品系的 POD 变化分别为对照的 1.199 7 倍和 1.864 2 倍, CAT 活性变化分别为对照的 1.377 8 倍和 1.946 8 倍。经药剂和高温胁迫后, 保护酶活性变化大小顺序为 SOD>CAT>POD。

2.3.3 自由基、3 种保护酶活性间的相关性分析 Pearson 相关性分析结果见表 2。敏感品系中 POD 活性变化与 $\cdot\text{O}_2^-$ 、CAT、SOD 的相关性不显著, 与双重胁迫的相关性也不显著, 而 $\cdot\text{O}_2^-$ 与 CAT、SOD 三者间的相关性均达到显著 ($P <$

表 2 自由基、3 种保护酶活性间的相关性分析

Table 2 Correlation analysis between $\cdot\text{O}_2^-$ and three protective enzyme activities

品系 Strain		$\cdot\text{O}_2^-$	CAT	POD	SOD	双重胁迫 Double stress
SS	$\cdot\text{O}_2^-$	1	0.865*	0.546	0.843*	0.923**
	CAT		1	0.686	0.976**	0.969**
	POD			1	0.792	0.694
	SOD				1	0.977**
	双重胁迫 Double Stress					1
Py-R	$\cdot\text{O}_2^-$	1	0.450	0.339	0.469	0.520
	CAT		1	0.912*	0.995**	0.995**
	POD			1	0.946**	0.899*
	SOD				1	0.991**
	双重胁迫 Double stress					1

SS: 敏感品系; Py-R: 抗哒螨灵品系。*表示相关性在 0.05 水平上差异显著; **表示相关性在 0.01 水平上差异显著。

SS: Sensitive strain; Py-R: Pyridaben resistant strain. * indicates the correlation is significantly different at 0.05 level; ** indicates the correlation is significantly different at 0.01 level.

0.05) 或极显著水平 ($P<0.01$), 且除了 POD 与处理相关性不显著外, $\cdot\text{O}_2^-$ 、CAT、SOD 与双重胁迫间的相关性均达到极显著水平 ($P<0.01$)。

抗哒螨灵品系中 $\cdot\text{O}_2^-$ 与 POD、CAT、SOD 的相关性不显著, 与双重胁迫虽为正相关但不显著, 而 POD 与 CAT、SOD 三者间的相关性均达到显著 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$), 且除了 $\cdot\text{O}_2^-$ 与处理间相关性虽为正相关但表现不显著外, POD、CAT、SOD 与双重胁迫间的相关性均达到显著 ($P<0.05$) 或极显著水平 ($P<0.01$)。

3 讨论

昆虫的保护酶系统与昆虫的抗逆性和耐药性有关 (何林, 2003; 蒋志胜等, 2003), 在逆境条件下超氧自由基的增加, 诱导 SOD 活性增强, 催化超氧自由基的歧化反应, 生成的 H_2O_2 又可被生物体内的 POD 和 CAT 清除 (马新耀等, 2017), 所以在 SOD、POD、CAT 酶的协同作用下, 生物细胞内的自由基维持在一个较低水平, 从而防止自由基毒害 (Wang *et al.*, 2001; Lozinskaya *et al.*, 2004)。

经哒螨灵和非致死高温 (38 °C) 处理后, 截形叶螨体内的超氧阴离子 ($\cdot\text{O}_2^-$) 含量急剧升

高, 同时 SOD、CAT 和 POD 活性也显著高于对照虫体, 说明截形叶螨虫体内的 $\cdot\text{O}_2^-$ 、SOD、CAT 和 POD 与哒螨灵药物和热刺激有关。而且截形叶螨经哒螨灵和热刺激后, 敏感品系 (SS) 体内 $\cdot\text{O}_2^-$ 含量远高于抗哒螨灵品系 (Py-R), 而 SOD、CAT 和 POD 的活性皆低于 Py-R, 表明截形叶螨抗哒螨灵品系在长期哒螨灵的胁迫作用下诱导保护酶活性的能力加强, 使 Py-R 对哒螨灵药物和高温忍耐力强于敏感品系, 这可能是截形叶螨对不同胁迫存在双重耐性的原因之一。

冯宏祖 (2009) 的研究结果显示, 高温胁迫可导致朱砂叶螨两品系体内的 CAT、POD 和 SOD 的活性高于对照虫体。本研究结果表明, 截形叶螨敏感品系和抗哒螨灵品系的自由基和保护酶活性皆高于对照, 双重胁迫后敏感品系的 SOD、CAT 和 POD 活性分别是对照组的 5.344 7、1.199 7 和 1.377 8 倍, 而抗哒螨灵品系的酶活性在双重胁迫下敏感程度较高, 分别是对照组的 7.105 2、1.864 2 和 1.946 9 倍。可见抗哒螨灵品系对药剂和高温胁迫的抗逆能力略优。在试验中, 对哒螨灵和高温胁迫的应激反应最强的保护酶为 SOD, 因为 SOD 可歧化 $\cdot\text{O}_2^-$ 与 H_2O_2 来改变生物体中 $\cdot\text{O}_2^-$ 和 H_2O_2 的浓度, 可见其在体内活性

氧代谢中起着极为重要位置。从酶活性分析结果可得, CAT 受双重胁迫影响最弱, SOD 受影响最高, POD 表现与 CAT 较为接近, 但略高于 POD。在所测的 3 种保护酶活性变化率中, 抗哒螨灵品系皆高于敏感品系。表明截形叶螨长期处于不同环境胁迫下, 保护酶的诱导能力在体内不同, 使抗哒螨灵品系对哒螨灵和高温的双重胁迫的耐受性强于敏感品系。

本研究截形叶螨体内的自由基与保护酶活性变化之间的相关性表明, 敏感品系主要依靠体内的 SOD 与 CAT 来对抗逆境的双重胁迫, POD 活性在逆境中虽能较好地提升, 但与 $\cdot\text{O}_2^-$ 、SOD 和 CAT 之间的相关性不大, 推测哒螨灵和高温的双重胁迫可能会抑制 POD 对截形叶螨的影响。而抗性品系的忍受能力比敏感品系更强些, 体内的 3 种保护酶间均有显著或极显著的相关性, 且均与处理有显著或极显著的相关性, 从而使体内的 $\cdot\text{O}_2^-$ 虽略有提升但始终维持在一个相对较低的增幅频率内。

哒螨灵在昆虫和螨类体内的反应代谢非常复杂, 高温导致昆虫体内热激蛋白的不同种类及含量增加等, 而本研究仅测定保护酶系统的变化难以全面阐述其作用机制, 因此, 有关截形叶螨对哒螨灵和高温双重胁迫的应对模式仍需进一步研究。

参考文献 (References)

- Bradford MM, 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1/2): 248–254.
- Cao Q, Ma Y, Liu H, Li L, Adili S, Pan CD, 2010. Study on growth-decline and control efficacy of *Tetranychus truncatus* Ehara on *Zizyphus jujube*. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 33(6): 502–505. [曹骞, 马媛, 刘慧, 李兰, 阿地力·沙塔尔, 潘存德, 2010. 截形叶螨在枣树上的消长规律及其防治研究. 新疆农业大学学报, 33(6): 502–505.]
- Feng HZ, 2009. Studies on adaptive response of *Tetranychus cinnabarinus* to abamectin and high temperature stress. Doctoral dissertation. Chongqing: Southwest University. [冯宏祖, 2009. 朱砂叶螨适应阿维菌素、高温胁迫机制的研究. 博士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Feng HZ, Lin YH, He L, Lu RE, Yang DX, 2008. Effects of abamectin and temperature stresses on free radicals and protective enzyme activities in *Tetranychus cinnabarinus*. *Journal of Plant Protection*, 35(6): 530–536. [冯宏祖, 刘映红, 何林, 陆蕊娥, 杨大兴, 2008. 阿维菌素和温度胁迫对朱砂叶螨自由基及保护酶活性的影响. 植物保护学报, 35(6): 530–536.]
- Feng HZ, Liu YH, He L, Li M, Lu RE, 2010. Cross tolerance of carmine spider mite *Tetranychus cinnabarinus*, to abamectin and high temperature. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 36(2): 159–167. [冯宏祖, 刘映红, 何林, 李明, 陆蕊娥, 2010. 朱砂叶螨对阿维菌素及高温的交互耐性. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 36(2): 159–167.]
- Guo JM, 2014. Study on sublethal effects of tebufenpyrad and pyridaben to *Tetranychus truncatus*. Master dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [郭金梅, 2014. 吡螨胺和哒螨灵对截形叶螨的亚致死效应研究. 硕士学位论文. 甘肃: 甘肃农业大学.]
- Guo YF, 2018. Effects of host plant switch on fitness of four spider mite species. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [郭燕飞, 2018. 寄主转换对四种叶螨的适合度影响. 南京: 南京农业大学.]
- He L, 2003. Study on pesticide resistance mechanisms and resistant fitness of *Tetranychus cinnabarinus* (Boiduval). Doctoral dissertation. Chongqing: Southwest University. [何林, 2003. 朱砂叶螨 (*Tetranychus cinnabarinus*) 抗性机理及抗性适合度研究. 重庆: 西南农业大学.]
- Jiang ZS, Shang ZZ, Wan SQ, Xu HH, Zhao SH, 2003. ESR analysis of a photo-activated insecticide and its effects on superoxide dismutase, peroxidase and catalase activity in *Culex pipiens* Pallens. *Acta Entomologica Sinica*, 46(1): 22–26. [蒋志胜, 尚稚珍, 万树青, 徐汉虹, 赵善欢, 2003. 光活化杀虫剂 α -三嗪吩的电子自旋共振分析及其对库蚊保护酶系统活性的影响. 昆虫学报, 46(1): 22–26.]
- Li ZZ, Shen HJ, Jiang QG, Ji BZ, 1994. A study on the activities of endogenous enzymes of protective system in some insects. *Acta Entomologica Sinica*, 37(4): 399–403. [李周直, 沈惠娟, 蒋巧根, 1994. 几种昆虫体内保护酶系统活力的研究. 昆虫学报, 37(4): 399–403.]
- Liu KL, 2007. Adaptable mechanisms to high temperature impact of *Tetranychus cinnabarinus* with resistance to abamectin. Doctoral dissertation. Chongqing: Southwest University. [刘开林, 2007. 抗阿维菌素朱砂叶螨适应高温胁迫机理研究. 博士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Lozinskaya YL, Slepneva IA, Khramtsov VV, Glupov VV, 2004. Changes of the antioxidant status and system of generation of free radicals in hemolymph of *Galleria mellonella* larvae at microsporidiosis. *Journal of Evolutionary Biochemistry &*

- Physiology*, 40(2): 119–125.
- Ma XY, Liu YH, Cheng ZH, Li R, Li SC, 2017. Bioactivity effects of *Artemisia argyi* essential oil on survival and protective enzyme activities of *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: Tetranychidae). *Chinese Journal of Biological Control*, 33(2): 289–296. [马新耀, 刘耀华, 程作慧, 李锐, 李生才, 2017. 艾蒿精油对朱砂叶螨的生物活性及几种保护酶活性的影响. 中国生物防治学报, 33(2): 289–296.]
- Perić-Mataruga V, Blagojević D, Spasić MB, Ivanović J, Janković-Hladni M, 1997. Effect of the host plant on the antioxidative defence in the midgut of *Lymantria dispar* L. caterpillars of different population origins. *Journal of Insect Physiology*, 43(1): 101–106.
- Ries GSK, 1977. Superoxide dismutases I. occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2): 309–314.
- Song LW, 2014. Resistance inheritance patterns and risk assessment to pyridaben in *Tetranychus truncatus* Ehara. Doctoral dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [宋丽雯, 2014. 截形叶螨对哒螨灵抗性遗传方式及风险研究. 博士学位论文. 甘肃: 甘肃农业大学.]
- Song LW, Shen HM, 2016. Simulation of developmental rate and temperature trend, and assesment of resistance risk to pyridaben of *Tetranychus truncatus* Ehara. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 24(1): 105–111. [宋丽雯, 沈慧敏, 2016. 截形叶螨发育速率与温度关系模拟及对哒螨灵的抗性风险评估. 中国生态农业学报, 24(1): 105–111.]
- Wang AG, Luo GH, 1990. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants. *Plant Physiology Communications*, (6): 55–57. [王爱国, 罗广华, 1990. 植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, (6): 55–57.]
- Wang JW, 2007. Occurrence regularity and comprehensive control of *Tetranychus truncatus* Ehara. *Rural Science & Technology*, (2): 24. [王建伟, 2007. 截形叶螨发生规律及综合防治. 农村科技, (2): 24.]
- Wang Y, Oberley LW, Murhammer DW, 2001. Evidence of oxidative stress following the viral infection of two lepidopteran insect cell lines. *Free. Radic. Biol. Med.*, 31(11): 1448–1455.
- Yang DX, 2009. The effect of high temperature on the development and hsp70 expression of 3 different strains of *Tetranychus cinnabarinus*. Doctoral dissertation. Chongqing: Southwest University. [杨大兴, 2009. 高温对三个朱砂叶螨品系生长发育及热激蛋白的影响. 博士学位论文. 重庆: 西南大学.]
- Zhang Q, 2016. Effects of temperature on the activities of antioxidant enzymes and hsp70 mrna expression in *Hepialus xiaojinensis* (Lepidoptera: Hepialidae) larva. Master dissertation. Chongqing: Southwest University. [张青, 2016. 温度胁迫对小金蝠蛾幼虫抗氧化酶活性及 Hsp70 表达量的影响. 硕士学位论文. 重庆: 西南大学.]