茄无网蚜几种酶对溴氰菊酯与高温胁迫的应答*

张文霖[1**] 韩岚岚[1***] 赵奎军[1***] 肖建飞[1] 陈 娟[1]
高丽瞳[1] 朱 琳[1] 高云雷[1] 金明国[2]

（1. 东北农业大学农学院，哈尔滨 150030；2. 朝鲜桂应祥沙里院农业大学蚕学研究室，沙里院市 999903）

摘 要 【**目的**】通过研究茄无网蚜 *Acyrthosiphon solani*（Kaltenbach）在溴氰菊酯和高温 2 种胁迫方式下其单位虫体质量解毒酶、保护酶和代谢酶活力的变化情况，为茄无网蚜耐药性研究、发生期预测等提供相应的理论依据。【**方法**】本文用 LC_{50} 溴氰菊酯和 32 ℃高温分别胁迫 3 龄茄无网蚜 6、12、24、48 和 72 h，分析并比较其单位虫体质量谷胱甘肽-*S*-转移酶、过氧化物酶、羧酸酯酶和海藻糖酶的活力变化。【**结果**】过氧化物酶和羧酸酯酶对 2 种胁迫方式的响应剧烈，单位虫体质量的过氧化物酶活力在茄无网蚜被溴氰菊酯胁迫 6、24 和 48 h 后被显著抑制（$P<0.05$），在温度胁迫处理组中均高于对照组，且在 6、12 和 24 h 处理组差异显著（$P<0.05$）；羧酸酯酶活力在溴氰菊酯胁迫时有较大波动，在 6、24、48 和 72 h 处理组与对照差异显著（$P<0.05$）。海藻糖酶对 2 种胁迫方式的响应较剧烈，海藻糖酶活力在溴氰菊酯胁迫 6、24、48 和 72 h 处理组显著高于对照（$P<0.05$），在温度胁迫 6、12 和 72 h 处理组与对照组差异显著（$P<0.05$）。谷胱甘肽-*S*-转移酶对 2 种胁迫方式的响应相对较弱，谷胱甘肽-*S*-转移酶活力仅在溴氰菊酯胁迫 6 h 和 24 h 处理组与温度胁迫 24 h 处理组显著高于对照（$P<0.05$）。【**结论**】LC_{50} 溴氰菊酯胁迫比温度胁迫对茄无网蚜体内 4 种酶活力的影响更大；2 种胁迫方式对茄无网蚜体内 4 种酶活性均产生影响，过氧化物酶与羧酸酯酶参与度更高。

关键词 茄无网蚜；高温；溴氰菊酯；胁迫；酶活力

Responses of several enzymes in *Acyrthosiphon solani* (Kaltenbach) to deltamethrin and temperature stress

ZHANG Wen-Lin[1**] HAN Lan-Lan[1***] ZHAO Kui-Jun[1***] XIAO Jian-Fei[1]
CHEN Juan[1] GAO Li-Tong[1] ZHU Lin[1] GAO Yun-Lei[1] JIN Ming-Guo[2]

(1. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Sericultural Research Institute, Kye Ung Sang Sariwon Agricultural University, Sariwon-si 999903, Democratic People's Republic of Korea)

Abstract **[Objectives]** To investigate the activity of several detoxifying enzymes, protective enzymes and metabolic enzymes in the aphid *Acyrthosiphon solani* (Kaltenbach) induced by deltamethrin and high temperature stress, and thereby provide a theoretical basis for further research on pesticide resistance and predicting the occurrence of this pest. **【Methods】** Third instar nymphs of *A. solani* were treated with an LC_{50} dose of deltamethrin and exposed to 32 ℃ for 6, 12, 24, 48 and 72 h, after which the activity per unit mass of glutathione s-transferase, peroxidase, carboxylesterase and trehalase were measured and compared. **【Results】** Peroxidase and carboxylesterase activity were strongly affected by both deltamethrin and high temperature, the activity per unit mass of peroxidase was significantly inhibited by deltamethrin 6, 24 and 48 h ($P<0.05$) after treatment and was higher than the control in all temperature treatment groups, significantly so in the 6, 12 and 24 h treatment groups ($P<0.05$). Carboxylesterase activity was significantly different to the control 6, 24, 48 and 72 h after deltamethrin treatment ($P<0.05$). Trehalase activity was significantly higher than the control 6, 24, 48 and 72 h after deltamethrin treatment

*资助项目 Supported projects：天敌昆虫防控技术及产品研发（2017YFD0201000）；现代农业产业技术体系建设专项资金（CARS-04）；黑龙江省科学基金项目（C2018011）

**第一作者 First author，E-mail：2422880512@qq.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：hanll_neau@aliyun.com；kjzhao@163.com

收稿日期 Received：2020-01-19；接受日期 Accepted：2020-05-20

and after 6, 12 and 72 h exposure to 32 ℃ (P<0.05). Deltamethrin and temperature had relatively little effect on glutathione s-transferase activity which was only significantly different to the control 6 h and 24 h after deltamethrin treatment, and after 24 h exposure to 32 ℃ (P<0.05).【**Conclusion**】 An LC_{50} dose of deltamethrin had a greater effect on the enzyme activity of *A. solani* than exposure to 32 ℃; glutathione s-transferase, peroxidase, carboxylesterase and trehalase activity were all affected by both deltamethrin and temperature, but peroxidase and carboxylesterase were the most significantly affected.

Key words *Acyrthosiphon solani*; high temperature; deltamethrin; stress; enzyme activity

茄无网蚜 *Acyrthosiphon solani* (Kaltenbach) 属半翅目 Hemiptera 蚜科 Aphididae，在国内外很多地区均有分布。近年来，作者所在课题组田间调查结果显示茄无网蚜数量呈上升趋势，其与大豆蚜在时间和空间上可形成阶梯性危害，并能传播多种病毒（赵雪等，2014）。与大豆蚜相比较，茄无网蚜主要为害老叶，其口针刺吸大豆植株产生枯斑并逐渐扩大，亦能对大豆造成严重危害（郭井泉和张明厚，1989），因此对其防治不容忽视。

目前，蚜类等害虫的防治仍以化学防治为主，其中溴氰菊酯作为田间常用农药对蚜虫具有较好的杀伤力（罗守进，2012），其在杀死害虫同时，还能对存活害虫的代谢功能产生影响，进而影响其繁殖、扩散及抗性产生等。而全球变暖导致的温度上升与农药胁迫产生交互效应（Lin *et al.*，2017），进一步影响害虫的代谢功能，害虫对农药的抗性可能会增强（Guo *et al.*，2018），其种群生态和扩散区域也可能会发生改变（Jean-Christophe and Jean，2018）。因此，明确温度及农药对茄无网蚜的影响，将更有效精准地防治茄无网蚜的危害。

鉴于谷胱甘肽-*S*-转移酶（GST）参与昆虫对拟除虫菊酯杀虫剂的抗性形成（吴炯等，2014），而羧酸酯酶（CarE）、过氧化物酶（POD）与海藻糖酶（THL）均在正常生理活动中起着重要的作用（任娜娜等，2014；杨琼等，2015；唐斌等，2018）。因此，本研究比较分析温度和农药胁迫茄无网蚜后，其单位虫体质量谷胱甘肽-*S*-转移酶、过氧化物酶、海藻糖酶、羧酸酯酶活力的变化趋势，从昆虫生理水平揭示茄无网蚜受化学药剂和高温胁迫引起的作用机制（袁盛勇等，2016），为准确预测茄无网蚜发生期及其种群动态变化趋势，为减少农药用量、降低环境污染、减缓茄无网蚜抗药性的形成提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试虫源和药剂

1.1.1 试虫 供试虫源茄无网蚜采于黑龙江省哈尔滨市东北农业大学向阳农场。供试大豆品种为“东农 46”。在不接触任何药剂的前提下，选取大豆第一对真叶贴于 1%琼脂培养皿上，将茄无网蚜单头转接于大豆叶片上，并置于恒温光照培养箱中饲养扩繁，培养至性状稳定。培养条件为：温度（25±1）℃、光照 14 L∶10 D、相对湿度 RH 75%。

1.1.2 药剂 溴氰菊酯乳油（浙江威尔达化工有限公司，杭州市余杭区，25 g/L）、昆虫谷胱甘肽-*S*-转移酶酶联免疫分析试剂盒、昆虫过氧化物酶酶联免疫分析试剂盒、昆虫羧酸酯酶酶联免疫分析试剂盒、昆虫海藻糖酶酶联免疫分析试剂盒（江苏酶标生物科技有限公司）。

1.2 胁迫方法

1.2.1 溴氰菊酯胁迫 LC_{50} 溴氰菊酯浓度：将溴氰菊酯乳油（浙江威尔达化工有限公司产品，浓度为 25 g/L），稀释为 1.25×10^{-3} mg/L 至 1.95×10^{-5} mg/L 的 5 种浓度的系列浓度，采用浸叶法（梅承芳等，2013），取新鲜的、大小相近的大豆第一对真叶，分别浸入 5 个系列浓度溴氰菊酯溶液中 5 s、在室内自然晾干后放入培养皿中，接入 10 头 3 龄茄无网蚜/皿，每个浓度 3 次重复，根据不同浓度处理 36 h 时的死虫数，利用 DPS1.07 软件计算出 36 h 的致死中浓度（Lethal concentration 50%，LC_{50}）为 $0.151\ 4\times10^{-3}$ mg/L，作为本试验中胁迫茄无网蚜的浓度。

胁迫 3 龄茄无网蚜：采用上述浸叶法，用

LC_{50} 的溴氰菊酯胁迫 3 龄茄无网蚜，胁迫时长分别为 6、12、24、48 和 72 h，共 5 组处理，每个处理 3 次重复，每个重复接入 10 头 3 龄茄无网蚜，处理时间结束后将蚜虫装入 EP 管，称量虫体重量后置于 - 80 ℃冰箱保存。

1.2.2　高温胁迫　将装茄无网蚜的培养皿放入恒温培养箱中，温度设置为 32 ℃，光照 14 L∶10 D、相对湿度 RH 75%，培养持续时间分别为 6、12、24、48 和 72 h，共 5 组处理，每个处理 3 次重复，每个重复接入 10 头 3 龄茄无网蚜。处理时间结束后将蚜虫装入 EP 管，称量虫体重量置于 - 80 ℃冰箱保存。

1.2.3　对照处理　将装 3 龄茄无网蚜的培养皿放入温度（25±1）℃，光照 14 L∶10 D、相对湿度 RH 75%恒温培养箱中分别培养 6、12、24、48 和 72 h，为分别对应于 6、12、24、48 和 72 h 时长处理的溴氰菊酯和高温胁迫的对照处理，每个培养时长为 1 个处理，每个处理重复 3 次，每个重复 10 头茄无网蚜，处理时长结束后将蚜虫装入 EP 管，称量虫体重量置于 - 80 ℃冰箱保存。

1.3　酶活力测定

将经胁迫处理的虫体装入灭菌过的 1.5 mL EP 管中，置于冰上，加入 100 μL 1×PBS 缓冲液，充分研磨后，再加入 200 μL 1×PBS 缓冲液，于 4 ℃、8 000 r/min 条件下，离心 10 min，将上清液移入 1.5 mL EP 管中，置于冰上。参照江苏酶标生物科技有限公司生产的试剂盒说明书，分别测定胁迫处理后虫体的谷胱甘肽-*S*-转移酶、过氧化物酶、羧酸酯酶和海藻糖酶的活性，每个样品连续测定 3 次。

酶浓度的计算：用标准物的浓度与 OD 值计算出标准曲线的直线回归方程，将样品的 OD 值代入方程式，计算出样品浓度，再乘以 5 倍的稀释倍数得出样品的实际浓度。

各处理单位虫体质量酶活力=酶浓度×各处理研磨用 PBS 缓冲液体积/各处理茄无网蚜总质量。

1.4　数据处理

数据处理采用 DPS 1.07 软件进行，采用单因素方差分析法，完全随机设计，Tukey 法分析相同处理时间内各处理组酶比活力的差异显著性，置信区间 95%。

2　结果与分析

2.1　谷胱甘肽-*S*-转移酶活力变化

从图 1 可知，3 龄茄无网蚜单位虫体质量 GST 活力对温度和溴氰菊酯胁迫的响应存在差异。3 龄茄无网蚜在溴氰菊酯胁迫下其体内 GST 活力随处理时间延长呈降低后升高再降低的变化趋势，在 6 h 处理组最高（0.000 8 IU/mg），以 24 h 处理组为转折点；在 32 ℃高温胁迫下其体内 GST 活力随处理时间的延长呈升高后趋于稳定的变化趋势。

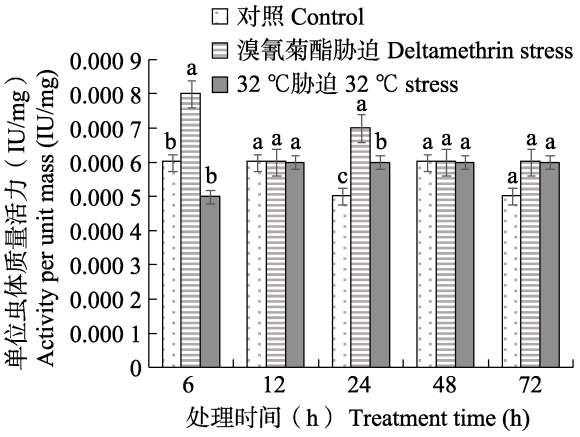

图 1　LC_{50} 溴氰菊酯和温度胁迫对 3 龄茄无网蚜单位虫体质量 GST 活力的影响

Fig. 1　The influence of deltamethrin at the dose of LC_{50} and temperature stress to the activity per unit mass of GST in 3rd instar nymphs of *Acyrthosiphon solani*

柱上标有不同小写字母表示经 Tukey 法检验差异显著（P<0.05），小写字母仅表示相同处理时间下各组差异。下图同。

Histograms with different lowercase letters indicate significant difference at the 0.05 level by Tukey test, the lowercase letters only represents the difference between groups with the same treatment time. The same as below.

在处理时间相同的条件下，6 h 溴氰菊酯胁迫处理组和 24 h 溴氰菊酯胁迫处理组 3 龄茄无网蚜体内单位虫体质量 GST 活力显著高于对照

组和温度胁迫处理组（$P<0.05$），24 h 高温胁迫处理组（0.000 6 IU/mg）显著高于对照组（$P<0.05$），其余处理组间差异不显著（$P<0.05$）。

2.2 过氧化物酶活性变化

从图 2 可知，3 龄茄无网蚜单位虫体质量 POD 活力对温度和溴氰菊酯胁迫的响应存在差异，茄无网蚜在溴氰菊酯胁迫下其体内 POD 活力随处理时间的延长呈升高再降低后升高的变化趋势，以 12 h 和 24 h 处理组为转折点，活力最高为 72 h 处理组（0.003 1 U/mg）；在温度胁迫下其体内 POD 活力随处理时间的延长呈升高后降低再升高的变化趋势，以 24 h 处理组为转折点。

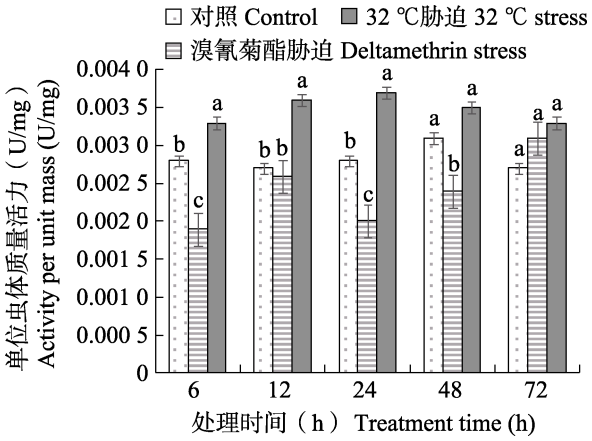

图 2 LC_{50} 溴氰菊酯和温度胁迫对 3 龄茄无网蚜单位虫体质量 POD 活力的影响

Fig. 2 The influence of deltamethrin at the dose of LC_{50} and temperature stress to the activity per unit mass of POD in 3rd instar nymphs of *Acyrthosiphon solani*

在处理时间相同条件下，6、24 和 48 h 溴氰菊酯胁迫处理组的茄无网蚜单位虫体质量 POD 活力显著低于对照组（$P<0.05$），在处理 6 h 达到最低（0.001 9 U/mg）；5 个处理时长的温度胁迫处理组的茄无网蚜体内 POD 活力均高于对照组，其中 12 h 和 24 h 温度胁迫处理组的茄无网蚜体内 POD 活力显著高于对照组（$P<0.05$），以 24 h 处理组最高（0.003 7 U/mg）；6、12、24 和 48 h 溴氰菊酯胁迫处理组的茄无网蚜体内 POD 活力显著低于温度胁迫处理组（$P<0.05$），其余处理组差异不显著（$P<0.05$）。

2.3 羧酸酯酶活性变化

由图 3 可知，3 龄茄无网蚜单位虫体质量 CarE 活力经溴氰菊酯胁迫呈波浪形变化，具体变化趋势为降低后升高再降低再升高，其中 6 h 处理组（0.002 3 U/mg）茄无网蚜体内 CarE 比活力最高；而温度胁迫处理组茄无网蚜体内 CarE 活力变化趋势为先升高后降低，并在 24 h 处理组达到最高（0.002 4 U/mg）。

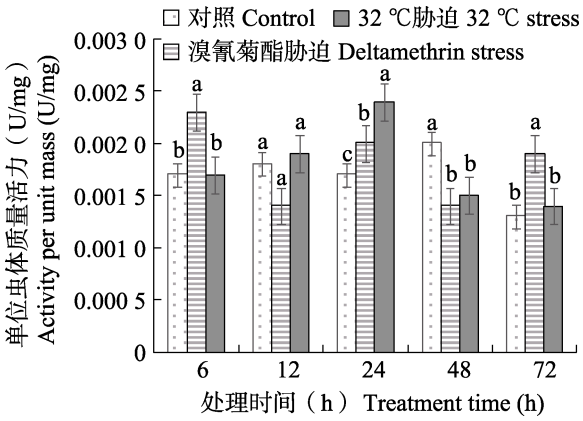

图 3 LC_{50} 溴氰菊酯和温度胁迫对 3 龄茄无网蚜单位虫体质量 CarE 活力的影响

Fig. 3 The influence of deltamethrin at the dose of LC_{50} and temperature stress to the activity per unit mass of CarE in 3rd instar nymphs of *Acyrthosiphon solani*

处理时间相同条件下，溴氰菊酯胁迫处理组的茄无网蚜单位虫体质量 CarE 活力在 6、24 和 72 h 处理组显著高于对照组（$P<0.05$），在 48 h 处理组则显著低于对照组（$P<0.05$）；温度胁迫处理组的茄无网蚜体内 CarE 活力在 24 h 处理组显著高于对照组（$P<0.05$），在 48 h 处理组显著低于对照组（$P<0.05$）；溴氰菊酯胁迫处理组的茄无网蚜体内 CarE 活力在 6 h 和 72 h 处理组显著高于温度胁迫处理组（$P<0.05$），在 24 h 处理组显著低于温度胁迫处理组（$P<0.05$），其余处理组差异不显著（$P<0.05$）。

2.4 海藻糖酶活性变化

从图 4 可知，3 龄茄无网蚜单位虫体质量 THL 活力经溴氰菊酯胁迫后的变化趋势为先升高后

降低，转折点为 24 h 处理组（0.004 4 IU/mg），且高于其它处理组；温度胁迫下茄无网蚜体内 THL 活力随处理时间的延长呈降低后升高再降低再升高的变化趋势，并在 12 h 处理组达到最低（0.002 7 IU/mg）。

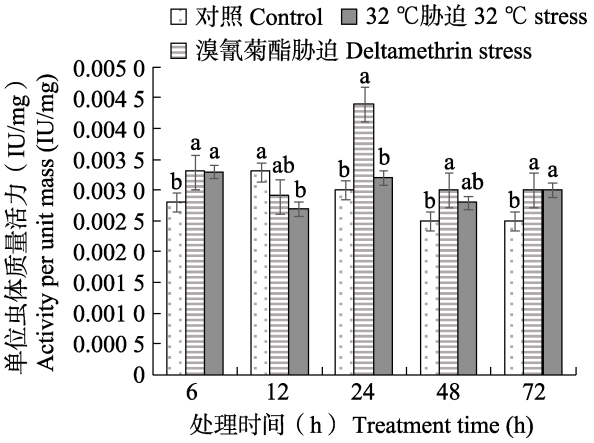

图 4　LC_{50} 溴氰菊酯和温度胁迫对 3 龄茄无网蚜单位虫体质量 THL 活力的影响

Fig. 4　The influence of deltamethrin at the dose of LC_{50} and temperature stress to the activity per unit mass of THL in 3rd instar nymphs of *Acyrthosiphon solani*

处理时间相同条件下，溴氰菊酯胁迫的茄无网蚜体内 THL 活力在 6、24、48 和 72 h 处理组显著高于对照组（$P<0.05$）；温度胁迫的茄无网蚜体内 THL 活力在 6 h 和 72 h 处理组显著高于对照组（$P<0.05$），在 12 h 处理组显著低于对照组（$P<0.05$）；溴氰菊酯胁迫的茄无网蚜体内 THL 活力在 24 h 处理组显著高于温度胁迫处理组（$P<0.05$），其余处理组间差异均不显著（$P<0.05$）。

3　讨论

本研究发现茄无网蚜经溴氰菊酯胁迫后，其单位虫体质量 GST 活力在溴氰菊酯胁迫 6 h 和 24 h 时与对照组差异显著（$P<0.05$），且在 6 h 处理组最高，即 GST 在茄无网蚜被溴氰菊酯胁迫后比较迅速做出了反应，但随着胁迫时间延长，GST 的参与程度降低，从处理持续 24-48 h 间开始与对照组无明显差异（$P<0.05$），可见茄无网蚜体内 GST 在溴氰菊酯胁迫较短时间内有响应，之后逐渐恢复到正常水平；胁迫后茄无网蚜体内 POD 和 CarE 的活力随胁迫时间延长呈频繁波动的变化趋势，POD 活力在 6、24 和 48 h 处理组被显著抑制（$P<0.05$），CarE 活力在 6、24、48 和 72 h 处理组显著高于或低于对照组（$P<0.05$），说明 POD 和 CarE 溴氰菊酯在代谢解毒代谢过程中起重要作用；茄无网蚜体内 THL 活力在胁迫 6、24、48 和 72 h 后显著响应（$P<0.05$），说明茄无网蚜体内 THL 在抵抗胁迫时发挥了较重要的作用，参与程度较高。

本研究表明，茄无网蚜对拟除虫菊酯类杀虫剂的抗性与其体内 POD 与 CarE 活性有关，这与任娜娜等（2014）、杨琼等（2015）及 Zhang 等（2015）的研究结果相似，吴伟等（2006）在用拟除虫菊酯类杀虫剂胁迫罗非鱼的研究中也发现了随着处理时间的延长，罗非鱼体内的 GST 活性呈现先升高后降低至正常水平，这与本研究的结果一致，说明 GST 参与抵抗拟除虫菊酯类杀虫剂代谢较早，其可能在维持相应代谢的稳定环境方面起一定的作用。茄无网蚜体内 GST 活性在胁迫 48 h 后开始降低至对照组水平，可能是茄无网蚜在长时间胁迫后失去一定调节能力的结果，但也有研究认为蚜虫会降低部分相关基因的表达量，是其主动调控的结果，是为发育和繁殖节省能量（Laramy *et al.*，2019）。茄无网蚜体内 THL 活力在溴氰菊酯胁迫的多数时长处理均较高，积极参与了茄无网蚜抗溴氰菊酯胁迫的过程，这与唐斌等（2012）认为昆虫海藻糖酶可通过调节糖类物质浓度发挥抗农药胁迫作用的观点一致。

此外，溴氰菊酯胁迫试验中发现，将茄无网蚜接入用溴氰菊酯处理过的叶片后，大多数蚜虫会在短时间内从叶片上跌落，无法移动，但随着时间延长部分蚜虫会重新爬回叶片取食，比例不定，其中 24 h 处理组爬回叶片取食茄无网蚜接近 10 成，72 h 处理组在 3 成左右。

本研究发现，3 龄茄无网蚜体内单位虫体质量 GST 活力在高温胁迫下变化较不明显，其中 GST 活力与对照组相比在多数时长处理中差距不显著（$P<0.05$），这与李宁等（2016）的结论相符，但袁盛勇等（2016）研究发现高温对棉粉蚧成虫 GST 活性有影响；经高温胁迫后，茄无

网蚜体内 POD 活性除 48 h 和 72 h 处理组外，在其余多数时长的处理组均显著高于对照组（$P<0.05$），这与张志虎等（2018）的研究结果相符，同时说明茄无网蚜体内的 POD 对高温胁迫的调节参与度更高，其应对高温的变化比 GST 更敏锐。张会娜等（2015）研究发现经高温锻炼的玉米象体内 POD 活性要比未经高温锻炼的玉米象体内 POD 活性高，李志明等（2010）研究表明椰心叶甲啮小蜂 *Tetrastichus brontispae* Ferrière 成虫体内 POD 活性随温度升高而增强，均说明了 POD 在昆虫抵抗高温代谢中发挥重要作用。本研究中高温胁迫下茄无网蚜体内 THL 比活力 6 h 和 72 h 时长的处理表现为显著高于对照（$P<0.05$），12 h 时长的处理显著低于对照（$P<0.05$），表现为受到抑制，之后回升至正常水平并有所升高，这可能是高温抑制了茄无网蚜体内 THL 活性，但长时间胁迫使昆虫适应了高温环境，THL 活性得到恢复，这与蒋丰泽等（2015）的观点相似。

在高温胁迫试验中，没有发现蚜虫因高温而表现出逃逸爬行及跌落的现象（王琳和马春森，2013），而是表现出高温处理 72 h 后死亡率在 6 成以上，未死亡的茄无网蚜仍能正常取食，说明该蚜具有一定的抗高温能力。

本研究表明，溴氰菊酯和温度胁迫均能对茄无网蚜体内的 GST、POD、CarE、THL 的活性产生影响，这 4 种酶在参与抵抗 2 种胁迫的代谢中响应的快慢及程度存在差异，POD 对上述 2 种胁迫的响应剧烈，参与度高，是抵抗胁迫代谢的关键酶，GST、THL 可能是在稳定抵抗胁迫的代谢环境的过程中发挥作用。

本文通过比较研究药剂和高温胁迫后茄无网蚜体关键酶的响应时间及深度，能够直观了解茄无网蚜应对这 2 种胁迫的主要代谢活动，从而为茄无网蚜体内几种酶在胁迫过程中所起作用的深入研究及其耐药性研究、发生期预测等提供理论依据。

参考文献 (References)

Guo JQ, Zhang MH, 1989. Study on the important vectors of soybean mosaic virus and their transmission efficiencies. *Soybean Science*, 8(1): 55–63. [郭井泉, 张明厚, 1989. 大豆花叶病毒(SMV)主要介体及其传毒效率研究. 大豆科学, 8(1): 55–63.]

Guo L, Su MM, Liang P, Li S, Chu D, 2018. Effects of high temperature on insecticide tolerance in whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) Q biotype. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 150(7): 97–104.

Jean-Christophe S, Jean P, 2018. Rapid evolution of aphid pests in agricultural environments. *Current Opinion in Insect Science*, 26(12): 17–24.

Jiang FZ, Zheng LY, Guo JX, Zhang GR, 2015. Effects of temperature stress on insect fertility and its physiological and biochemical mechanisms. *Journal of Environmental Entomology*, 37(3): 653–663. [蒋丰泽, 郑灵燕, 郭技星, 张古忍, 2015. 温度对昆虫繁殖力的影响及其生理生化机制. 环境昆虫学报, 37(3): 653–663.]

Lin OB, Julie V, Robby S, 2017. Integrating both interaction pathways between warming and pesticide exposure on upper thermal tolerance in high-and low-latitude populations of an aquatic insect. *Environmental Pollution*, 224: 714–721.

Laramy SE, Leslie CR, Tiffany MHM, Blair DS, Nicholas JM, 2019. Transcriptional responses of soybean aphids to sublethal insecticide exposure. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 118: 103285.

Li N, Zhang SZ, Liu TX, 2016. Effects of elevated CO_2 concentration and temperature on protective enzymes and detoxification enzymes of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Journal of Plant Protection*, 43(1): 99–104. [李宁, 张世泽, 刘同先, 2016. 二氧化碳浓度和温度升高对烟粉虱主要保护酶和解毒酶活性的影响. 植物保护学报, 43(1): 99–104.]

Li ZM, Chen Q, Jin QA, Tang C, Wen HB, Peng ZQ, 2010. Effect of high temperature on the protective enzymes of *Tetrastichus brontispae*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 31(6): 994–998. [李志明, 陈青, 金启安, 唐超, 温海波, 彭正强, 2010. 高温对椰心叶甲啮小蜂保护酶系活性的影响. 热带作物学报, 31(6): 994–998.]

Luo SJ, 2012. Study on application of deltamethrin. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2(3):45–48. [罗守进, 2012. 溴氰菊酯应用的研究. 农业灾害研究, 8(1): 55–63.]

Mei CF, Zhang BL, Liang YZ, Zhang HT, Zeng GQ, Xu MY, Sun GP, 2013. Toxicity evaluation of chlorpyrifos and dimethoate to silkworm variety (*Bombyx mori* L. 9·Fu) in south China. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(4): 685–688. [梅承芳, 张宝兰, 梁燕珍, 张宏涛, 曾国驱, 许玫英, 孙国萍, 2013. 毒死蜱和乐果对华南地区家蚕品种“9·芙”的毒性评价. 生态环境学报, 22(4): 685–688.]

Ren NN, Xie M, You YC, You MS, 2014. An overview on the study of insect carboxylesterases (COEs) and the COE-mediated resistance to insecticides. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (*Natural Science Edition*), 43(4): 337–344. [任娜娜, 谢苗, 尤燕春, 尤民生, 2014. 羧酸酯酶及其介导昆虫抗药性的研究进展. 福建农林大学学报(自然科学版), 43(4): 337–344.]

Tang B, Wei P, Chen J, Wang SG, Zhang WQ, 2012. Progress in gene features and functions of insect trehalases. *Acta Entomologica Sinica*, 55(11): 1315–1321. [唐斌, 魏苹, 陈洁, 王世贵, 张文庆, 2012. 昆虫海藻糖酶的基因特性及功能研究进展. 昆虫学报, 55(11): 1315–1321.]

Tang B, Zhang L, Xiong XP, Wang HJ, Wang SG, 2018. Advances in trehalose metabolism and its regulation ofinsect chitin synthesis. *Scientia Agricultura Sinica*, 51(4): 697–707. [唐斌, 张露, 熊旭萍, 汪慧娟, 王世贵, 2018. 海藻糖代谢及其调控昆虫几丁质合成研究进展. 中国农业科学, 51(4): 697–707.]

Wang L, Ma CS, 2013. Impacts of periodic repeated heat events on ecological performance in insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(6): 1499–1508. [王琳, 马春森, 2013. 周期性重复高温对昆虫的生态学效应. 应用昆虫学报, 50(6): 1499–1508.]

Wu J, Zhao RT, He JY, 2014. Advancement of research on several major subtypes of glutathione *S*-transferase in animals. *Journal of Zhejiang Ocean University* (*Natural Science*), 33(3): 278–283. [吴炯, 赵荣涛, 何建瑜, 刘慧慧, 2014. 动物中几种主要谷胱甘肽 *S*-转移酶亚型的研究进展. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 33(3): 278–283.]

Wu W, Chen JZ, Leng CM, Tong X, 2006. The effect of deltamethrin on glutathione and glutathione-*S*-transferase in the body of tilapia. *China Environmental Science*, 26(4): 474–477. [吴伟, 陈家长, 冷春梅, 佟欣, 2006. 溴氰菊酯对罗非鱼谷胱甘肽-*S*-转移酶的影响. 中国环境科学, 26(4): 474–477.]

Yang Q, Wang SH, Zhang WH, Yang TT, Liu YJ, 2015. Toxicity of commonly used insecticides and their influences on protective enzyme activity of multicolored Asian lady beetle *Harmonia axyridis* (Pallas). *Journal of Plant Protection*, 42(2): 258–263. [杨琼, 王淑会, 张文慧, 杨田堂, 刘永杰, 2015. 常用杀虫剂对异色瓢虫的毒力及其保护酶的影响. 植物保护学报, 42(2): 258–263.]

Yuan SY, Kong Q, Wu JY, Qin WX, Liu XH, Chen ZY, Ma TX, Ying JT, 2016. Effect of high temperature stress on enzyme activity of peroxidase and glutathione-*S*-transferases in adult of *Phenacoccus solenopsis* Tinsley. *Journal of Environmental Entomology*, 38(4): 723–727. [袁盛勇, 孔琼, 吴晶莹, 秦文旭, 刘小红, 陈振毅, 马廷霞, 尹久婷, 2016. 高温胁迫对扶桑绵粉蚧成虫过氧化物酶和谷胱甘肽-*S*-转移酶活性的影响. 环境昆虫学报, 38(4): 723–727.]

Zhang HN, Lü JH, Zhang CG, Bai XG, 2015. Effect of heat treatment on the special activities of protective enzymes in *Sitophilus zeamais* Motschulsky with high temperature hardening. *Journal of Henan University of Technology* (*Natural Science Edition*), 26(3): 76–80. [张会娜, 吕建华, 张晨光, 白旭光, 2015. 热处理对经历高温锻炼的玉米象保护酶活性的影响. 河南工业大学学报(自然科学版), 26(3): 76–80.]

Zhang JQ, Ge PT, Li DQ, Guo YP, Zhu KY, Ma EB, Zhang JZ, 2015. Two homologous carboxylesterase genes from *Locusta migratoria* with different tissue expression patterns and roles in insecticide detoxification. *Journal of Insect Physiology*, 77(3): 1–8.

Zhang ZH, Wang Z, Chen J, Han XQ, 2018. Effects of high temperature stress on total protein and two protective enzymes in adult *Monolepta hieroglyphica* (Motschulsky). *Journal of Environmental Entomology*, 40(2): 440–445. [张志虎, 王中, 陈静, 韩小强, 2018. 高温胁迫对双斑长跗萤叶甲成虫总蛋白和两种保护酶的影响. 环境昆虫学报, 40(2): 440–445.]

Zhao X, Han LL, Wang L, Zhu M, Zhao KJ, Sun WP, Xu ZX, 2014. Sequence characteristic and expression profiling of odorant binding protein 7 gene from *Acyrthosiphon solani*. *Chinese Journal of Biological Control*, 30(5): 639–646. [赵雪, 韩岚岚, 王玲, 朱明贺, 赵奎军, 孙文鹏, 徐忠新, 2014. 茄无网蚜 *Acyrthosiphon solani* 气味结合蛋白 OBP7 的序列特点及表达谱分析. 中国生物防治学报, 30(5): 639–646.]