

短时高温对截形叶螨体内糖类物质和游离氨基酸含量变化的影响*

李文亮** 张洁 吴霞 罗丽丹 刘磊 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】明确截形叶螨 *Tetranychus truncatus* 敏感品系 (SS)、抗哒螨灵品系 (Py-R) 不同螨态体内糖类物质和游离氨基酸含量的变化, 探究截形叶螨对短时高温胁迫的适应机理, 为叶螨的综合防治提供一定的理论依据。【方法】卵、若螨、雌成螨经高温 34、38 和 42 °C 分别处理 2、4 和 6 h 后, 测定叶螨敏感品系与抗哒螨灵品系体内糖类物质和游离氨基酸含量的变化, 并分析与高温胁迫的相关性。

【结果】截形叶螨敏感品系和抗性品系不同发育阶段经 38 °C 高温处理 6 h 后体内可溶性糖含量达到最大, 与对照存在显著差异 ($P<0.05$); 抗性品系雌成螨在不同处理温度下, 随着胁迫时间的延长, 糖原含量均高于敏感品系; 不同发育阶段抗性品系体内海藻糖、游离氨基酸含量在 34 和 38 °C 下均高于敏感品系, 42 °C 高温胁迫 2 h, 雌成螨抗性品系较敏感品系体内的糖类物质含量上升, 存在显著差异 ($P<0.05$)。

【结论】截形叶螨体内的糖类物质和游离氨基酸含量与高温胁迫有关, 且抗性品系的糖类物质含量在 34 和 38 °C 高温胁迫下比敏感品系高, 说明抗性品系在短时高温胁迫下具有较强的耐受能力, 当胁迫温度超过 42 °C 后, 抗性品系体内糖类物质含量较敏感品系有所变动, 说明极端高温对叶螨有不利影响。本研究结果对田间持续高温综合防控截形叶螨的策略具有一定指导意义。

关键词 截形叶螨; 高温胁迫; 糖类物质; 游离氨基酸

Effects of short-term high temperature on carbohydrate and free amino acid content in *Tetranychus truncatus*

LI Wen-Liang** ZHANG Jie WU Xia LUO Li-Dan LIU Lei
WANG Sen-Shan SONG Li-Wen***

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

Abstract 【Aim】To investigate the changes in carbohydrate and free amino acid content in the sensitive strain (SS) and pyridaben resistant strain (Py-R) of *Tetranychus truncatus* during different developmental stages, and explore the adaptation mechanism of *T. truncatus* to short-term high temperature stress, providing a theoretical basis for the comprehensive management of *T. truncatus*. 【Methods】Eggs, nymphs and female adults were exposed to 34, 38, and 42 °C for 2, 4, and 6 h, respectively. The content of carbohydrates and free amino acids in the sensitive and pyridaben-resistant *T. truncatus* strains was measured, and their correlation with high temperature stress analyzed. 【Results】The content of soluble sugar and glycogen in the sensitive and resistant strains of *T. truncatus* initially increased, then decreased following high temperature treatment, showing a significant difference to the control group ($P<0.05$). Additionally, the contents of trehalose and free amino acids decreased with an increase in temperature and exposure time. 【Conclusion】The content of carbohydrates and free amino acids in *T. truncatus* were influenced by high temperature stress. The pyridaben resistant strain had a higher content of stress-resistant substances compared to the sensitive strain, and demonstrated significant high temperature tolerance,

*资助项目 Supported project: 国家自然科学基金项目 (31860503)

**第一作者 First author, E-mail: 1475703746@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: 460132728@qq.com

收稿日期 Received: 2023-03-06; 接受日期 Accepted: 2024-01-12

enabling it to withstand short-term high temperature stress.

Key words *Tetranychus truncatus*; high temperature stress; carbohydrate; free amino acids

截形叶螨 *Tetranychus truncatus* 是农业生产中的重要害螨, 为害蔬菜、豆类、薯类、果树以及花卉等作物, 以成螨和若螨聚集在叶片背面吸食汁液, 有发生面积广、繁殖速度快和危害时间长等特点 (王少山等, 2002; 郑大浩和金大勇, 2015; 张洁等, 2023)。近几年, 随着甘肃制种玉米的种植面积不断扩大, 在玉米种植区发生较为严重 (常壮壮和孙荆涛, 2021; 付文华等, 2021)。哒螨灵是一种速效, 杀虫杀螨谱大的药剂, 在甘肃玉米种植区应用较为广泛。在截形叶螨的防治过程中, 由于长时间对哒螨灵药剂的使用, 叶螨对药剂产生了抗性, 且为害趋势愈发严重。玉米种植区温度较高, 抗哒螨灵叶螨在高温下发生面积广, 严重影响了甘肃制种玉米的产量和品质。因此, 明确截形叶螨在高温胁迫下抗哒螨灵品系和敏感品系体内糖类物质和游离氨基酸含量的动态变化, 对截形叶螨的有效治理提供一定的理论指导。

叶螨属型较小、生活史周期较短的变温节肢动物, 对田间环境温度的变化尤其是高温的变化非常敏感。因此, 温度的变动直接影响着叶螨的新陈代谢速度, 对其生命活动、物种丰富程度、遗传方式、地域分布、以及行为选择都有很大影响 (Lalouette *et al.*, 2010; Niederegger *et al.*, 2010; 潘飞等, 2014; 马罡和马春森, 2016)。叶螨可通过提高体内抗逆物质的含量增强对高温胁迫的适应性。在高温胁迫下, 叶螨通过提高机体内抗逆物质的含量增加自身对田间高温环境的耐受力。糖类物质作为有害生物体内主要的能量物质之一, 具有广泛的生物活性 (孙少磊和靖湘峰, 2023; 张洁等, 2023)。随着温度的改变, 昆虫体内的糖类物质参与到其他代谢途径中, 以保证其在逆境下的正常生命活动 (马俊等, 2013; 郭苏帆, 2018; 张洁等, 2023)。昆虫体内的糖类物质一般以多糖为主, 主要包括糖原和海藻糖。糖原主要存在于昆虫体内的骨骼肌和肝脏, 通过调节代谢过程中的关键酶活性, 使其参与合成和降解

过程, 从而达到对其的贮存和消耗的目的 (魏琪和苏建亚, 2016; 王广, 2019; 张洁等, 2023)。当酶失活后, 昆虫体内糖原不能正常代谢, 造成昆虫行为活动降低等现象; 海藻糖主要存在于血淋巴中, 具有稳定和干燥蛋白的功能 (秦加敏等, 2015; 张洁等, 2023)。当昆虫受到高温胁迫时, 体内海藻糖不仅可以作为蛋白质稳定剂起到保护作用 (胡慧芳和马有会, 2007), 而且细胞内海藻糖的含量也会不同程度上升, 提高细胞的耐热性, 增强对逆境的适应能力 (唐斌等, 2018; 朱江燕等, 2018; 王广, 2019; 张洁等, 2023)。游离氨基酸作为昆虫体内重要的生物活性分子, 对昆虫体内的细胞和组织起到了很好的构建作用 (梁瀚清等, 2014; 林珠凤等, 2015)。昆虫利用氨基酸促进血红蛋白氧转移酶和激素的分泌, 以维持和调节新陈代谢。然而, 截形叶螨在短时高温等因素影响下, 体内糖类物质和游离氨基酸含量的变化未见报道。

因此, 本研究通过测定截形叶螨不同品系截形叶螨卵、若螨、雌成螨经短时高温胁迫后, 体内糖类物质和游离氨基酸含量的变化, 来探究截形叶螨敏感品系与抗哒螨灵品系在高温胁迫下的生理响应机制, 为阐明截形叶螨适应高温的生理机制奠定了理论基础, 并为截形叶螨的有效治理提供了理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试叶螨 截形叶螨敏感品系 (SS): 自甘肃省河西玉米制种基地采集后长期饲养在甘肃农业大学植物保护学院昆虫饲养实验室, 温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、湿度 $70\% \pm 5\%$ 、光周期为 16 L : 8 D, 饲养期间从未接触任何化学药剂, 饲养时间为 3 年左右;

抗性品系 (Py-R): 抗性品系的筛选参考张洁等 (2023) 的方法。

1.1.2 试验器材 AL104 型的万分之一分析天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; 移液器, (上海) 国际贸易有限公司; 全波酶标仪, BioTek Instruments, Inc; B-60S 制冰机, 太仓市华利达实验设备有限公司; 高速冷冻离心机, BioTek Instruments, Inc; 96 孔板, Corning Incorporated; SPX-300 型光照培养箱, 上海跃进医疗器械有限公司; 干式恒温器, 杭州瑞成仪器有限公司。

1.2 测定方法

分别把截形叶螨敏感品系、抗性品系的卵、若螨、雌成螨置于 34、38 和 42 °C 恒温箱处理 2、4 和 6 h, 以 25 °C 作为对照。随后挑取 160 头处理过的卵、若螨和雌成螨放入 1.5 mL 离心管中称重。

1.2.1 糖类物质含量测定 糖原含量测定参照作均祥等 (2004) 的方法, 可溶性糖和海藻糖含量测定参考郭苏帆 (2018) 的方法, 部分稍作修改, 详细步骤如下。

1.2.1.1 样品处理 分别将截形叶螨两个品系置于 34、38 和 42 °C 恒温箱处理 2、4 和 6 h, 以 25 °C 作为对照。然后用零号毛笔挑取 160 头经高温胁迫后的卵、若螨、雌成螨于 1.5 mL 的 EP 管中称重, 后加入 50 μ L 10% 的三氯乙酸并用组织研磨仪充分研磨至匀浆, 用 700 μ L 10% 三氯乙酸分 2 次冲洗研磨棒, 所有操作在冰上进行, 然后在 4 °C, 10 000 r/min 离心 15 min, 取上清液。

1.2.1.2 葡萄糖标准曲线制作 参考张洁等 (2023) 的方法, 准备 6 支 1.5 mL 的 EP 管, 分别加入葡萄糖标准溶液 0、40、80、120、160 和 200 μ L, 之后加入 200、160、120、80、40 和 0 μ L 的 10% 三氯乙酸溶液, 再次加入 0.2% 蒽酮试剂 800 μ L。轻微振荡, 沸水浴 10 min, 冷却后置于 25 °C 恒温箱 20 min。将待测液转入 96 孔酶标板中, 在酶标仪 (BioTek Instruments, Inc) 上测定 630 nm 波长下的 OD 值。每处理重复 3 次。

1.2.1.3 海藻糖标准曲线 准备 6 支 1.5 mL 的 EP 管, 加入海藻糖标准溶液 0、10、20、30、

40 和 50 μ L, 再加入 1% 硫酸溶液 50、40、30、20、10 和 0 μ L。于 90 °C 水浴锅中 10 min, 冰水浴 3 min, 之后加入 30% 氢氧化钾溶液 50、40、30、20、10 和 0 μ L。90 °C 水浴锅 10 min, 冰水浴 3 min。各 EP 管最后加入 1 000 μ L 0.2% 蒽酮试剂, 90 °C 水浴锅 10 min, 冰水浴 3 min。在酶标仪 (BioTek Instruments, Inc) 上测定 630 nm 波长下的 OD 值。每处理重复 3 次。

1.2.1.4 可溶性糖含量测定 吸取 200 μ L 待测液加入 800 μ L 0.2% 的蒽酮试剂于 1.5 mL 新的 EP 管中, 轻微振荡, 之后沸水浴 10 min, 冷却后置于 25 °C 的恒温箱中 20 min。在酶标仪 (BioTek Instruments, Inc) 630 nm 下, 取 200 μ L 于 96 孔酶标板中进行 OD 值检测, 每个处理进行 3 次技术重复。虫体含糖量 (μ g $\cdot$ mg⁻¹) = [标准曲线查得的糖含量 (μ g/mL) $\times$ 样品稀释倍数] / [虫重 (mg)]。

1.2.1.5 糖原含量测定 将 1.2.2 节的上清液转移至新的 EP 管中, 将沉淀用 50 μ L 10% 三氯乙酸溶液冲洗沉淀后合并上清液最后加入 1 mL 的无水乙醇, 在 4 °C 冰箱中静置, 过夜后在 4 °C 离心机上 10 000 r/min 下离心 20 min, 吸取上清液后加入 500 μ L 的 ddH₂O 使沉淀得到充分溶解。重复 1.2.1.4 节的步骤。

1.2.1.6 海藻糖含量测定 从 1.3.3 节吸取 50 μ L 上清液于 1.5 mL 的 EP 管中, 加入 1% H₂SO₄ 溶液 50 μ L, 再加入 50 μ L 30% KOH 溶液, 最后加入 1 000 μ L 0.2% 蒽酮试剂 (每次加入试剂均需振荡均匀, 均在 90 °C 的水浴锅中 10 min, 冰水浴冷却 3 min), 630 nm 测定 OD 值, 每个处理重复 3 次, 根据海藻糖标准曲线计算海藻糖含量。

1.2.2 游离氨基酸含量测定 按照昆虫游离氨基酸检测试剂盒 (上海优选生物科技有限公司) 的试验步骤进行操作, 最后使用全波酶标仪 (BioTek Instruments, Inc) 测定游离氨基酸吸光值并计算含量。

1.3 统计与分析

数据采用 SPSS 23.0 软件进行分析, 截形叶

螨不同发育阶段的糖含量和游离氨基酸变化采用平均值 $\pm$ 标准误表示, 使用 One-sample Kolmogorov-Smirnov test 进行正态分布检验。符合正态分布的数据用 Levene'氏检验进行方差齐性检验, 并用独立方差 t 检验和单因素 ANOVA 检验分析显著性。

2 结果与分析

2.1 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内可溶性糖含量的影响

短时高温对截形叶螨不同品系体内可溶性糖含量的影响如图 1 (A-C) 所示。葡萄糖标准

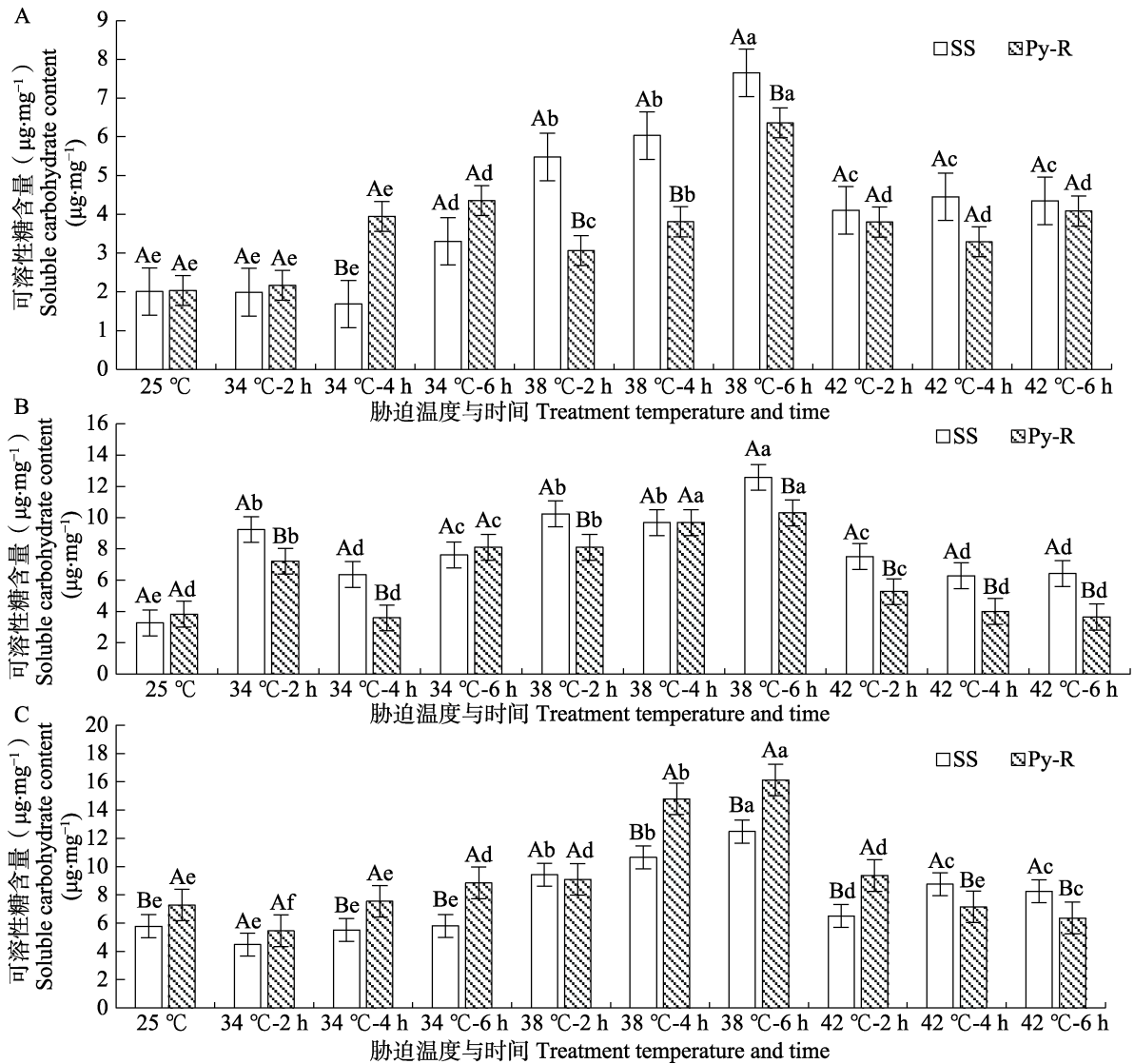


图 1 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内可溶性糖含量的影响

Fig. 1 Effects of short-term high temperature on soluble sugar content in *Tetranychus truncatus* at different developmental stages

A. 卵; B. 若螨; C. 雌成螨。SS 代表敏感品系, Py-R 代表抗哒螨灵品系。图中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 柱上的不同字母表示同行数据经 Duncan 氏新复极差法检验在 $\alpha=0.05$ 水平上差异显著。大写字母表示不同品系之间的差异显著; 小写字母表示同一品系在不同温度和时间上的差异显著。下图同。

A. Egg; B. Nymph; C. Female adult. SS stands for sensitive strain, and Py-R stands for pyridaben-resistant strain. Data are mean $\pm$ SE. Histograms with different letters indicate significant difference at 0.05 level by Duncan's new multiple range test. Capital letters indicate significant difference between different strains; lowercase letters indicate significant difference of the same strain at different temperatures and times the same below.

曲线为 $y=4.0952x+0.1675$ ($R=0.9913$)。整体上截形叶螨敏感品系和抗性品系各发育阶段经过短时高温胁迫后,体内的可溶性糖含量均呈现先上升后下降的趋势;两个品系不同发育阶段螨的可溶性糖含量均在 38°C , 6 h 达到最大。在 38°C 下两品系的可溶性糖含量呈现上升趋势,当温度达到 42°C 时,随着处理时间的延长,抗性品系可溶性糖含量在若螨(图 1: B)和雌成螨(图 1: C)体内均呈下降趋势;但敏感品系在卵和雌成螨体内呈现出先上升后下降的趋势,与若螨正好相反。随着温度的升高,截形叶螨敏感品系和抗性品系之间同样存在显著差异

($P<0.05$); 抗性品系卵从 34°C , 4 h 开始可溶性糖含量显著高于敏感品系 ($P<0.05$), 38°C 处理 2 h 后被敏感品系所超越,在 42°C 高温下,两品系无显著性差异 ($P>0.05$),而两个品系的若螨和雌成螨在不同高温处理 2、4 和 6 h 后,体内的可溶性糖含量均存在显著性差异 ($P<0.05$)。

2.2 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内糖原含量的影响

两个品系在经短时高温处理后,其体内糖原含量的变化如图 2 (A-C) 所示。两个品系不同发育阶段经高温处理 2、4 和 6 h 后,体内的糖

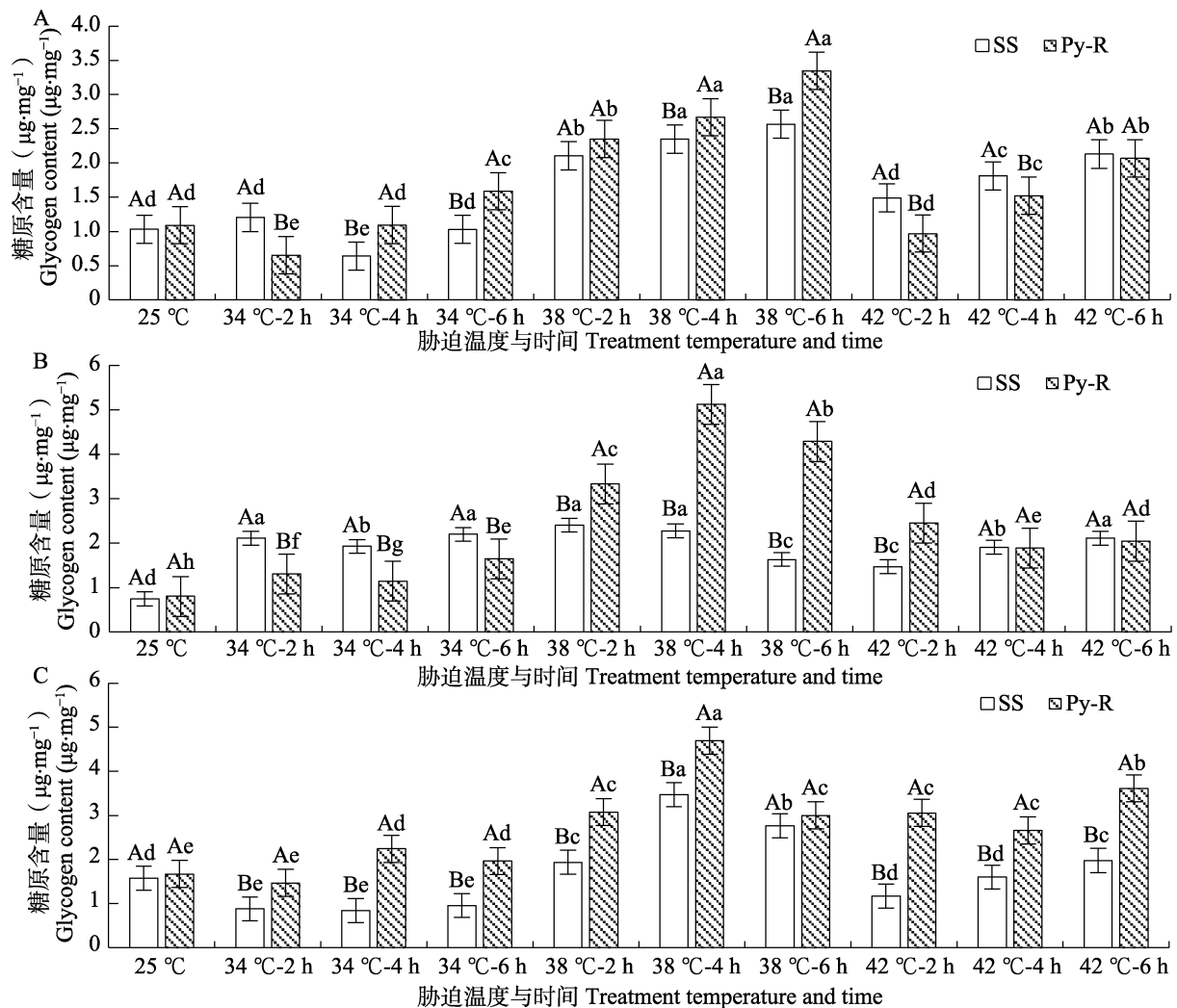


图 2 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内糖原含量的影响

Fig. 2 The effects of short-term high temperature on glycogen content of *Tetranychus truncatus* at different developmental stages

A. 卵; B. 若螨; C. 雌成螨。A. Egg; B. Nymph; C. Female adult.

原含量变化趋势与可溶性糖趋势一致,均呈现先上升后下降,而且温度达到 38 °C 时随温度上升涨幅最大。抗性品系雌成螨体内的糖原含量在不同高温与处理时间下均显著高于敏感品系 ($P<0.05$) (图 2: C); 若螨经 34 °C 高温处理下,敏感品系糖原含量显著高于抗性品系 ($P<0.05$), 38 °C 后,抗性品系表现出优势,含量显著高于敏感品系,随着温度的升高,在 42 °C 4 h 后,两者之间差异不显著 ($P>0.05$) (图 2: B)。在经历短时高温处理后,抗性品系卵和若螨,随着温度的升高和处理时间的延长,糖原含量逐渐上升,但当温度升高到 42 °C 时,糖原含量下降,后又随着温度升高和时间的延长,糖原含量开始逐步上升; 经高温胁迫后雌成螨糖原含量不稳

定,随着温度和处理时间的变化,呈现忽升忽降的趋势。而敏感品系,卵和若螨在 34 °C 高温胁迫下,糖原含量呈现先上升的趋势,然后随着高温时间的延长,逐渐下降,后随着温度的升高,又开始逐渐上升; 敏感品系雌成螨在 34 °C 高温胁迫下时,体内糖原含量随处理时间的延长无显著变化 ($P>0.05$), 38 °C 高温胁迫下,随着处理时间的延长,体内糖原含量呈现先上升再下降的趋势,但均高于 34 °C 处理。

2.3 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内海藻糖含量的影响

图 3 (A-C) 显示了不同品系截形叶螨经短时高温处理后体内海藻糖含量变化。海藻糖标准

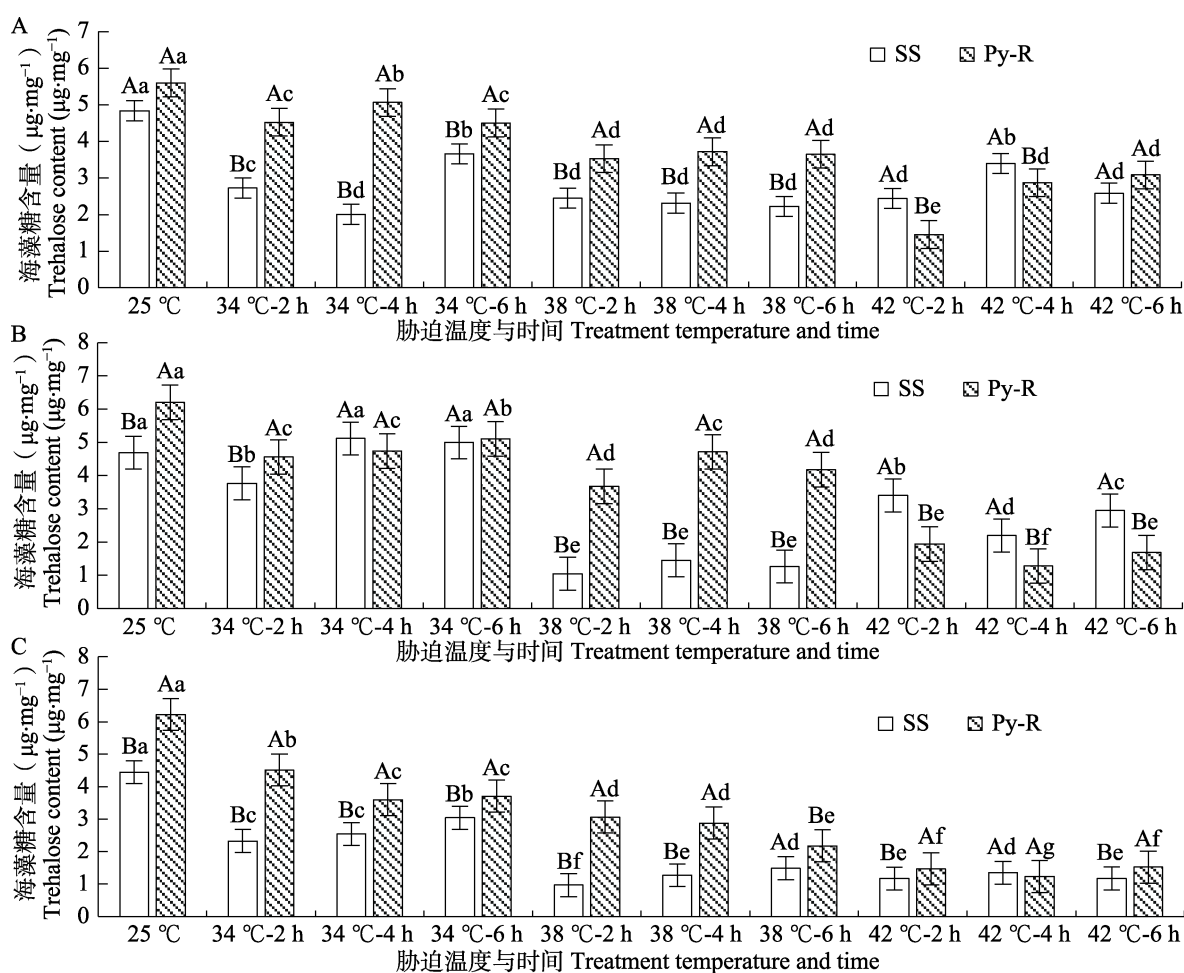


图 3 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内海藻糖含量的影响

Fig. 3 The effects of short-term high temperature on trehalose content in *Tetranychus truncatus* at different developmental stages

A. 卵; B. 若螨; C. 雌成螨。A. Egg; B. Nymph; C. Female adult.

曲线为 $y=0.0776x+0.2912$ ($R=0.9956$)。总体而言,在不同发育阶段的两个品系体内的海藻糖含量与对照相比,整体呈下降趋势,中间虽含量有所回升,但在高温 42°C 下,均显著低于对照水平 ($P<0.05$),说明在短时高温胁迫下,体内的海藻糖被消耗,保护叶螨不受高温胁迫造成的损伤。

2.4 短时高温对不同阶段截形叶螨体内游离氨基酸含量的影响

两个品系截形叶螨经短时高温处理后对其

体内游离氨基酸含量的变化如图 4 (A-C) 所示,游离氨基酸标准曲线为 $y=0.003x+0.4108$ ($R=0.9554$)。不同温度 (34°C 、 38°C 和 42°C) 处理下,敏感品系和抗性品系体内的游离氨基酸含量在同一温度胁迫处理下随着温度的升高和时间的延长呈下降趋势。在 34°C 、 38°C 和 42°C 处理 2 h 后,抗性品系卵内的游离氨基酸含量显著高于敏感品系 ($P<0.05$) (图 4: A); 敏感品系若螨从 34°C 2 h 开始,游离氨基酸含量显著低于抗性品系 ($P<0.05$),随着处理时间的延长和温度的升高,二者之间差异逐渐不显著 ($P>0.05$) (图 4: B)。

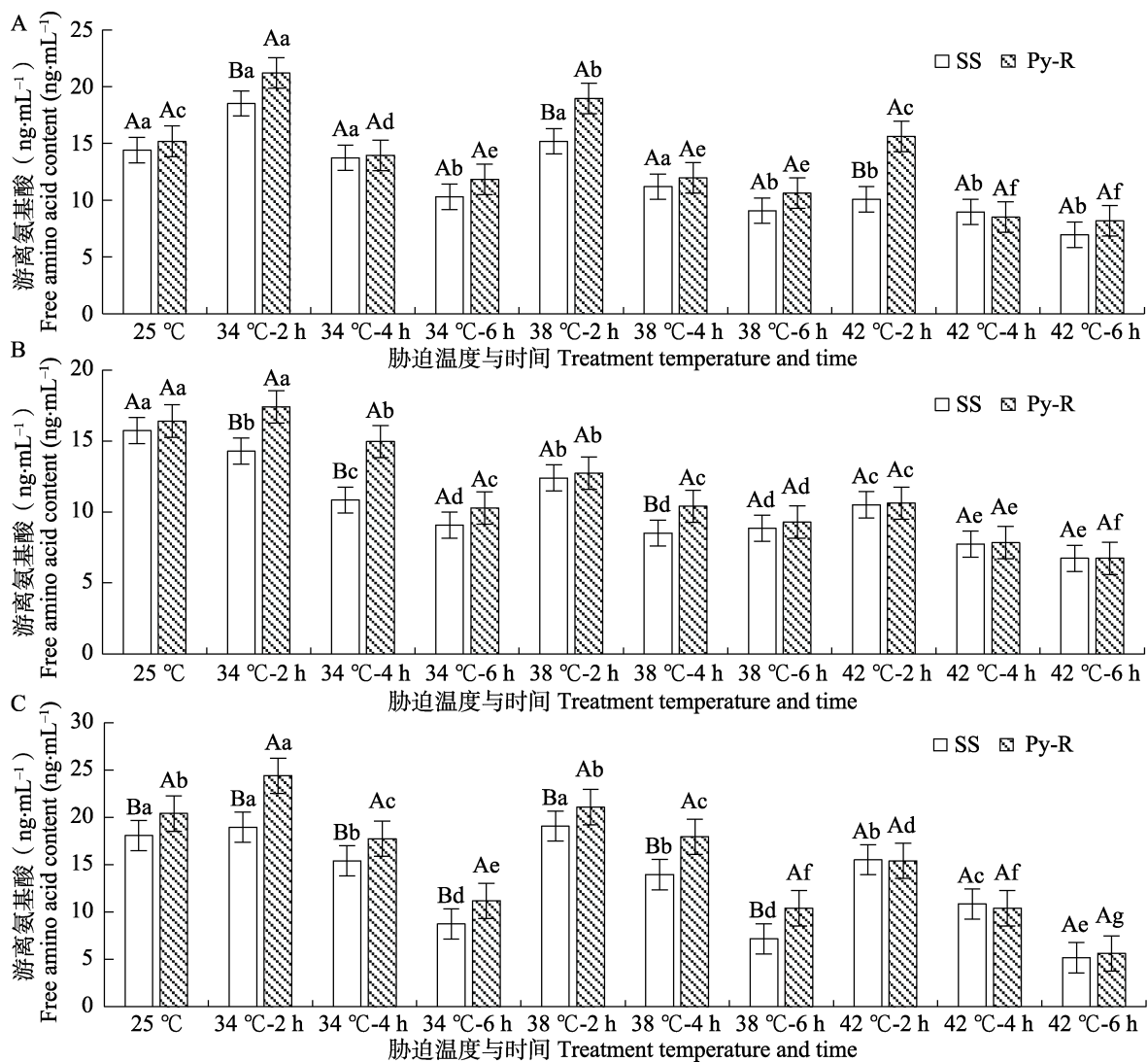


图 4 短时高温对不同发育阶段截形叶螨体内游离氨基酸含量的影响

Fig. 4 The effects of short-term high temperature on the content of free amino acids in different mite States of *Tetranychus truncatus*

A. 卵; B. 若螨; C. 雌成螨。A. Egg; B. Nymph; C. Female adult.

而两个品系成螨经 34 °C 和 38 °C 处理不同时间后的游离氨基酸含量差异显著 ($P < 0.05$), 后在 42 °C 高温下, 二者之间差异不显著 ($P > 0.05$), 抗性品系无高温适合度优势 (图 4: C)。

3 讨论

短时高温胁迫对不同品系的截形叶螨体内的可溶性糖和糖原含量均有显著的影响。在温度为 38 °C 时, 不同处理时长下其可溶性糖和糖原含量均高于其他处理, 说明高温条件下截形叶螨体内能量的动态变化在叶螨适应高温胁迫过程中发挥重要作用。有研究表明, 冈比亚按蚊 *Anopheles gambiae* 在处于逆境时为了更好的适应逆境胁迫, 并保护自身体内代谢正常, 能够合成大量海藻糖, 并被水解, 然后通过海藻糖转运蛋白基因 (*Tret1*) 的参与, 被转移到血淋巴中, 并且随着体内血淋巴循环被运送到各个组织器官中, 参与到冈比亚按蚊的各项生命活动中 (Liu *et al.*, 2013)。李艳红 (2014) 研究发现, 35 °C 处理 16、24 和 32 h 后, 斜纹夜蛾 *Prodenia litura* 3 龄幼虫体内的海藻糖含量下降; 若敲除 *Tret1* 基因, 昆虫体内海藻糖含量降低, 而体内可溶性糖含量呈上升趋势 (Zhou *et al.*, 2022)。同时, 截形叶螨可通过体内糖分的相互转化和消耗糖类物质保护自身来抵抗高温。这与郭苏帆 (2018) 的研究结果基本相同, 其研究结果显示, 两种眼蕈蚊 *Bradysia odoriphaga* 和 *Bradysia difformis* 经短时高温 34 °C 处理后, 体内的可溶性糖和糖原随着时间的增加呈上升趋势, 随后呈现下降趋势; 海藻糖则出现先上升后下降的趋势。

此外, 本试验发现敏感品系和抗性品系体内的游离氨基酸含量也随着温度的升高和时间的延长呈下降趋势, 推测其体内可能合成大量免疫蛋白和防御酶类, 导致游离氨基酸含量大幅度下降。经过短时高温处理后, 整体看敏感品系和抗性品系体内的游离氨基酸含量随着时间的延长呈下降趋势。马晓江等 (2018) 研究结果表明, 高温处理双斑长跗萤叶甲 *Monolepta hieroglyphica* 后, 随处理温度的升高和时间的延长, 双斑长跗萤叶甲雌虫体内的游离氨基酸含量

降低, 这与本研究结果一致。因此, 截形叶螨在高温胁迫下, 可通过消耗体内所积累的抗逆物质来提高本身的耐热性, 为进一步研究高温对截形叶螨影响的生理机制奠定基础。随着温度的升高, 抗性品系体内的海藻糖含量明显高于敏感品系, 说明海藻糖和游离氨基酸是主要参与抗高温胁迫的物质, 并且推测截形叶螨在药剂胁迫后, 有较强的高温耐受能力。

本研究发现高温胁迫下截形叶螨可通过积累抗逆物质, 提升自身对短时高温胁迫的耐受能力, 且截形叶螨抗性品系具有较强的高温耐受性。研究结果为探究截形叶螨的环境适应机理提供基础数据, 但截形叶螨体内对能量物质调节起重要作用的转运蛋白基因究竟在抵抗高温中有哪些重要功能等分子生物学机制还需进一步研究证实。

参考文献 (References)

- Chang ZZ, Sun JT, 2021. Susceptibility of *Tetranychus truncatus* to three acaricides. *Journal of Maize Sciences*, 29(4): 110–114. [常壮壮, 孙荆涛, 2021. 甘肃武威市凉州玉米产区截形叶螨对 3 种杀螨剂的敏感性测定. *玉米科学*, 29(4): 110–114.]
- Fu WH, Qiao WQ, Zhang CW, Zhang SH, Wang JZ, Yu CL, Wang SS, Song LW, 2021. Stress response of *Tetranychus truncatus* to pyridaben and high temperatures. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(5): 1152–1158. [付文华, 乔万强, 张翠文, 张双红, 王继祖, 俞才兰, 王森山, 宋丽雯. 2021. 哒螨灵和高温胁迫下截形叶螨的应激反应. *应用昆虫学报*, 58(5): 1152–1158.]
- Guo SF, 2018. Effects of high temperature on the growth, development and physiological metabolism of *Bradysia odoriphaga* and *Bradysia difformis* Frey. Master dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [郭苏帆, 2018. 高温对韭菜迟眼蕈蚊和异迟眼蕈蚊生长发育及生理代谢的影响. 硕士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学.]
- Hu HF, Ma YH, 2007. The latest research progress of trehalose. *Journal of Liaoning Agricultural Technical College*, 9(4): 26–28. [胡慧芳, 马有会, 2007. 海藻糖的最新研究进展. *辽宁农业职业技术学院学报*, 9(4): 26–28.]
- Lalouette L, Williams CM, Hervant F, Sinclair BJ, Renault D, 2010. Metabolic rate and oxidative stress in insects exposed to low temperature thermal fluctuations. *Comparative Biochemistry and Physiology (Part A)*, 158(2): 229–234.
- Li YH, 2014. Effects of short-term high or low temperature treatment on biology and metabolism of *Prodenia litura*

- Fabricius. Master dissertation. Yangling: Northwest A&F University. [李艳红, 2014. 短期高、低温处理对斜纹夜蛾生物学及代谢的影响. 硕士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学.]
- Liang HQ, Zhong YS, Chen FY, Yan HC, Lin JR, 2014. Research progress on insect diapause mechanism. *Guangdong Agricultural Sciences*, 41(20): 84–90. [梁瀚清, 钟杨生, 陈芳艳, 严会超, 林健荣, 2014. 昆虫滞育机制研究进展. 广东农业科学, 41(20): 84–90.]
- Lin ZF, Xie SH, Ji XC, Qin S, 2015. Research progress on main types and functions of insect storage proteins. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2015(6): 156–160. [林珠凤, 谢圣华, 吉训聪, 秦双, 2015. 昆虫贮存蛋白主要种类及功能研究进展. 黑龙江农业科学, 2015(6): 156–160.]
- Liu K, Dong YM, Huang YZ, Rasgon JL, Agre P, 2013. Impact of trehalose transporter knockdown on *Anopheles gambiae* stress adaptation and susceptibility to *Plasmodium falciparum* infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43): 17504–17509.
- Ma G, Ma CS, 2016. The impacts of extreme high temperature on insect populations under climate change: A review. *Scientia Sinica (Vita)*, 46(5): 556–564. [马罡, 马春森, 2016. 气候变化下极端高温对昆虫种群影响的研究进展. 中国科学: 生命科学, 46(5): 556–564.]
- Ma J, Zhou XM, Wang H, 2013. Inhibitory effect of four insecticides on trehalase activity in *Plutella xylostella*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 764–769. [马俊, 周小毛, 王翰, 2013. 小菜蛾海藻糖酶学特性及四种杀虫剂对其活性的抑制作用. 应用昆虫学报, 50(3): 764–769.]
- Ma XJ, Zhang ZH, Wang Z, Zhang YX, Chen J, 2018. Effects of brief exposure to high temperature on free amino acids, total sugar and trehalose of female adult *Monolepta hieroglyphica* (Motschulsky). *Plant Protection*, 44(2): 111–115. [马晓江, 张志虎, 王中, 张艳香, 陈静, 2018. 短时高温胁迫对双斑长跗蜚叶甲雌虫游离氨基酸、海藻糖和可溶性糖的影响. 植物保护, 44(2): 111–115.]
- Niederegger S, Pastuszek J, Mall G, 2010. Preliminary studies of the influence of fluctuating temperatures on the development of various forensically relevant flies. *Forensic Science International*, 199(1/3): 72–78.
- Pan F, Chen MC, Xiao TB, Ji XC, Xie SH, 2014. Research advances on effect of variable temperature on growth, development and reproduction of insect. *Journal of Environmental Entomology*, 36(2): 240–246. [潘飞, 陈绵才, 肖彤斌, 吉训聪, 谢圣华, 2014. 变温对昆虫生长发育和繁殖影响的研究进展. 环境昆虫学报, 36(2): 240–246.]
- Qin JM, Luo SD, He SY, Wu J, 2015. Researching in characters and functions of trehalose and trehalase in insects. *Journal of Environmental Entomology*, 37(1): 163–169. [秦加敏, 罗术东, 和绍禹, 吴杰, 2015. 昆虫海藻糖与海藻糖酶的特性及功能研究. 环境昆虫学报, 37(1): 163–169.]
- Sun SL, Jing XF, 2023. Research progress in protein-carbohydrate regulation in insects based on geometric framework model. *Acta Entomologica Sinica*, 66(5): 713–722. [孙少磊, 靖湘峰, 2023. 基于几何营养模型的昆虫蛋白质和碳水化合物调节的研究进展. 昆虫学报, 66(5): 713–722.]
- Tang B, Zhang L, Xiong XP, Wang HJ, Wang SG, 2018. Advances in trehalose metabolism and its regulation of insect 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 G, 2019. Regulating effects of trehalose-6-phosphatase synthase and trehalose on the trehalose and chitin metabolism in *Acyrtosiphon pisum* Harris. Master dissertation. Lanzhou: Gansu Agricultural University. [王广, 2019. 海藻糖合成酶和海藻糖酶对豌豆蚜海藻糖和几丁质代谢的调控研究. 硕士学位论文. 兰州: 甘肃农业大学.]
- Wang SS, Wang JY, Hao YL, 2002. Occurrence and Control of *Tetranychus truncatus* in Rocket Farm. *China Cotton*, 29(7): 36–37. [王少山, 王金友, 郝玉玲, 2002. 火箭农场截形叶螨的发生及防治. 中国棉花, 29(7): 36–37.]
- Wei Q, Su JY, 2019. Research advances in carbohydrate and lipid metabolism in insects. *Acta Entomologica Sinica*, 59(8): 906–916. [魏琪, 苏建亚, 2019. 昆虫糖脂代谢研究进展. 昆虫学报, 59(8): 906–916.]
- Wu JX, Yuan F, Su L, 2004. Change of carbohydrate contents in larvae of the wheat midge *Sitodiplosis mosellana* (Gehin) during mature and diapause stage. *Acta Entomologica Sinica*, 47(2): 178–183. [仵均祥, 袁锋, 苏丽, 2004. 麦红吸浆虫幼虫滞育期间糖类物质变化. 昆虫学报, 47(2): 178–183.]
- Zhang J, Liao TL, Xie K, Miao W, Yu CL, Song LW, 2023. Effect of different frequencies of high-temperature days on saccharides content in *Tetranychus truncatus*. *Journal of Gansu Agricultural University*, 58(6): 110–116. [张洁, 廖婷璐, 谢康, 苗旺, 俞才兰, 宋丽雯, 2023. 不同高温天频率对截形叶螨体内糖类物质含量变化的影响. 甘肃农业大学学报, 58(6): 110–116.]
- Zheng DH, Jin DY, 2015. Occurrence and Control of *Tetranychus truncatus* and *T. urticae* on corns of Yanbian area. *Hubei Agricultural Sciences*, 54(15): 3668–3670. [郑大浩, 金大勇, 2015. 延边玉米截形叶螨与二斑叶螨的危害及防治. 湖北农业科学, 54(15): 3668–3670.]
- Zhou HL, Lei GK, Chen YT, You MS, You SJ, 2022. PxTret1-like affects the temperature adaptability of a cosmopolitan pest by altering trehalose tissue distribution. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(16): 9019.
- Zhu JY, Huang JH, Shi M, Chen XX, 2018. Advances in research on the trehalose metabolism in insects. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 55(2): 145–152. [朱江燕, 黄健华, 时敏, 陈学新, 2018. 昆虫海藻糖代谢及其影响因素的研究进展. 应用昆虫学报, 55(2): 145–152.]