

六点始叶螨为害对橡胶树叶片主要生理生化指标的影响

高蕊^{1,2}, 郑丽旧², 符悦冠^{1,3}, 林江^{1*}, 陈俊谕^{2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571737; 2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所, 海南海口 571101;
3. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572000

摘要: 六点始叶螨 (*Eotetranychus sexmaculatus* Riley) 是橡胶树上的重要害螨, 该螨为害致橡胶树叶片由局部褪绿黄斑扩展至全叶黄化, 严重时造成叶片大量脱落, 影响正常割胶, 造成产量损失。然而, 橡胶树叶片受螨害后生理生化指标的变化及其与螨口密度、为害时间的关系尚未明确。本研究旨在揭示六点始叶螨不同密度及为害时间对橡胶树叶片生理生化指标的影响, 为该螨监测预警和精准防控提供理论依据。本研究以热研 7-33-97 品系橡胶盆栽苗为材料, 分别设置六点始叶螨不同螨口密度和不同为害时间的胁迫处理, 测定叶螨为害后橡胶树叶片丙二醛 (MDA)、可溶性糖、可溶性蛋白及保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性的影响, 同时结合双因素方差分析法分析六点始叶螨螨口密度与为害时间的交互作用。研究结果表明, 在膜脂过氧化损伤方面, 螨口密度与为害时间均显著影响 MDA 含量且随为害时间的延长呈先升后降趋势, 40 头/叶处理 15 d MDA 含量达到峰值(73.91±1.89)nmol/g, 与 CK 相比上升 43.15%, 为害 20 d 时 MDA 含量下降, 含量为(65.09±0.29)nmol/g。可溶性糖和可溶性蛋白含量均表现为随着螨口密度增加和为害时间延长而下降。当螨口密度为 40 头/叶持续为害 20 d 时, 可溶性糖和可溶性蛋白含量均降至最低值, 分别为(34.42±1.43)mg/g 和(17.74±0.63)mg/g, 分别较 CK 显著下降 44.20%和 45.30%。在应对螨害诱导的氧化胁迫时, 橡胶树叶片保护酶中 SOD、POD 和 CAT 的活性总体表现为在螨害早期呈显著上升趋势, 且高密度螨口处理 (30 头/叶与 40 头/叶) 的酶活性峰值出现时间更早。其中, 40 头/叶为害 5 d 时 SOD 活性达到峰值(13 086.92±613.39)mg/g, 较 CK 显著增加 91.74%; 30 头/叶与 40 头/叶在第 10 天时 POD 活性达到小高峰[(6293.13±80.75)U/(min·g), (6655.54±51.44)U/(min·g)], 随后呈下降再上升趋势; CAT 活性在 40 头/叶处理 10 d 达到峰值(165.77±0.41)μmol/(min·g), 较 CK 上升 62.74%。交互作用分析结果表明, 螨口密度与为害时间的交互作用对可溶性糖 ($F=21.296$, $P<0.001$)、可溶性蛋白 ($F=17.782$, $P<0.001$) 含量以及 SOD ($F=20.252$, $P<0.001$)、POD ($F=9.821$, $P<0.001$) 和 CAT ($F=145.095$, $P<0.001$) 活性产生极显著影响。六点始叶螨的螨口密度与为害时间均可对橡胶树叶片的 MDA、可溶性糖、可溶性蛋白、保护酶 (SOD、POD、CAT) 生理生化指标含量造成影响, 且受螨口密度和为害时间二者交互作用极显著 ($P<0.001$)。本研究证实胁迫强度与持续时间并非独立作用, 而是以复杂的协同方式共同决定了橡胶树叶片的生理损伤程度、营养状态及抗氧化防御效能。

关键词: 六点始叶螨; 丙二醛; 营养物质; 保护酶

中图分类号: S763.46

文献标志码: A

Effects of *Eotetranychus sexmaculatus* Infestation on Key Physiological and Biochemical Parameters in Rubber Leaves

GAO Rui^{1,2}, ZHENG Lijiu², FU Yueguan^{1,3}, LIN Jiang^{1*}, CHEN Junyu^{2*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China; 2. Environment and Plant Protection Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Sanya Research Academy, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572000, China

收稿日期 2025-06-12; 接受日期 2025-09-18

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630042022006); 橡胶产业技术体系虫害防控岗位项目 (No. CARS-33-BC2); 热作重大病虫害预警监测与防治指导及示范推广项目 (No. 21240082)。

作者简介 高蕊 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 热带雨林生物资源与利用。*通信作者 (Corresponding author): 林江 (LIN Jiang), E-mail: 180152@hainanu.edu.cn; 陈俊谕 (CHEN Junyu), E-mail: jychencn@163.com。

Abstract: *Eotetranychus sexmaculatus* Riley is an important pest mite on rubber trees, it causes damage to rubber leaves, causing localized chlorotic spots to spread to the entire leaf, resulting in severe yellowing. Severe infestations result in massive leaf drop, disrupting normal tapping operations and leading to yield losses. However, the changes in physiological and biochemical indicators of rubber tree leaves after mite damage, and the relationship with mite population density and infestation duration, remain unclear. This study aimed to reveal the effects of varying mite densities and infestation durations on physiological and biochemical traits in rubber tree leaves, and to elucidate the defense mechanisms of rubber trees, thereby providing a theoretical basis for mite monitoring and early warning and precise prevention and control of the mite. In this study, the effects of malondialdehyde (MDA), soluble sugars, soluble proteins and protective enzymes (SOD, POD, CAT) activities on the leaves of rubber trees with different infestation times were determined on the rubber potted seedlings of the same length of Thermo Scientific 7-33-97 rubber seedlings inoculated with different mite densities in the greenhouses. The two-way analysis of variance (ANOVA) was used to reveal the interaction between mite population density and infestation time. Regarding membrane lipid peroxidation damage, both mite population density and infestation duration significantly influenced MDA content, exhibiting an initial increase followed by a decrease as infestation time prolonged. MDA levels peaked at $(73.91 \pm 1.89) \text{ nmol/g}$ after 15 days of treatment with 40 mites per leaf, representing a 43.15% increase compared to the control. MDA levels began to decline to $(65.09 \pm 0.29) \text{ nmol/g}$ after 20 days. Both soluble sugar and soluble protein contents decreased with increasing mite density and duration of infestation. At a mite density of 40 mites/leaf with 20 days of continuous feeding, soluble sugar and soluble protein contents reached the lowest values at $(34.42 \pm 1.43) \text{ mg/g}$ and $(17.74 \pm 0.63) \text{ mg/g}$, respectively, representing significant decreases of 44.20% and 45.30% compared to the control. In response to mite-induced oxidative stress, the protective enzyme activities (SOD, POD, CAT) in rubber tree leaves generally showed a significant upward trend during the early stages of mite infestation across different mite density and duration treatments. Enzyme activity peaks occurred earlier under high mite density treatments (30 mites/leaf and 40 mites/leaf). Specifically, SOD activity peaked at $(13\ 086.92 \pm 613.39) \text{ mg/g}$ after 5 days of 40 mites/leaf infestation, representing a 91.74% increase compared to the control. POD activity reached minor peaks at 10 days post-infestation in both 30 and 40 mites/leaf treatments $(6293.13 \pm 80.75) \text{ U}/(\text{min} \cdot \text{g})$ and $(6655.54 \pm 51.44) \text{ U}/(\text{min} \cdot \text{g})$, respectively, followed by a decline before rising again. CAT activity peaked at 10 days in the 40 mites/leaf treatment $(165.77 \pm 0.41) \mu\text{mol}/(\text{min} \cdot \text{g})$, representing a 62.74% increase compared to the control. Interaction analysis revealed that the interaction between mite density and damage duration significantly affected soluble sugar content ($F=21.296$, $P<0.001$), soluble protein ($F=17.782$, $P<0.001$), and significantly affected SOD ($F=20.252$, $P<0.001$), POD ($F=9.821$, $P<0.001$), and CAT ($F=145.095$, $P<0.001$) activities. Both the mite population density and the duration of damage inflicted by the *E. sexmaculatus* leaf mite can influence the physiological and biochemical indicators in rubber tree leaves, including malondialdehyde, soluble sugars, soluble proteins, and protective enzymes (SOD, POD, CAT). Furthermore, a significant interaction exists between mite population density and duration of damage ($P<0.001$). This confirms that stress intensity and duration do not act independently, but they jointly determine the physiological damage degree, nutritional status, and antioxidant defense efficiency of rubber tree leaves through a complex synergistic mechanism.

Keywords: *Eotetranychus sexmaculatus*; MDA; nutrients; protective enzyme

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.12.015

六点始叶螨 (*Eotetranychus sexmaculatus* Riley) 隶属蛛形纲 (Arachnida) 蜱螨目 (Acarina) 叶螨科 (Tetranychidae), 俗称落叶蜘蛛、橡胶黄蜘蛛或“过火风”^[1]。六点始叶螨是我国橡胶树重要害螨种类, 由于全球气候变化、橡胶树种植模式改变等因素, 该螨在我国海南、云南、广东等植胶区危害程度呈逐年加重趋势。该害螨体型微小、世代周期短、繁殖能力强、兼具有性与孤雌生殖, 除橡胶树外亦可侵害柑桔、油梨、油桐、樱桃与梅等多种经济作物^[2-3]。

六点始叶螨以口针刺吸橡胶树叶肉组织, 自

叶背基部沿中脉和侧脉扩散, 诱发叶绿素降解与组织黄化, 形成典型的斑块, 进而导致叶片脱落、枝条枯萎, 严重影响光合作用和乳胶产量^[1]。为了抵御螨害, 寄主植物通过改变营养物质分配、调控膜脂过氧化及激活抗氧化酶系统等多重机制, 以降低损伤程度^[4-12]。先前研究已证实, 害虫 (螨) 胁迫能显著影响寄主叶片中丙二醛 (MDA) 含量、营养物质含量以及超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 等保护酶活性, 诱导产生规律性的响应^[13]。在营养物质代谢层面, 多数研究表明害虫 (螨) 取食

会导致寄主叶片的营养物质含量呈下降趋势。例如, 斜纹夜蛾 (*Spodoptera litura* Fabricius) 为害大豆和烟粉虱 (*Bemisia tabaci* Gennadius) 刺吸棉花时, 可溶性糖、蛋白质等营养物质含量均随虫口密度增加和为害时间延长呈下降趋势, 且表现出明显的密度依赖性和时间依赖性^[14-15]; 而木薯受到朱砂叶螨 (*Teranychus cinnabarinus* Boisduval) 侵害后, 可溶性糖、可溶性蛋白含量虽呈先增后减的趋势, 但总体仍以消耗为主要趋势^[16]。在抗氧化防御响应方面, SOD、POD、CAT 等保护酶作为重要防御物质, 其活性则常被诱导增强, 且诱导幅度通常与胁迫强度呈正相关。例如, 在机械损伤、斜纹夜蛾、二斑叶螨和西花蓟马不同处理下, 菜豆植株未受害叶片 CAT 活性分别在特定时间显著提升^[17]; 大豆蚜 (*Aphis glycines* Matsumura) 取食大豆和烟粉虱刺吸棉花时, CAT 活性则随为害呈递增趋势^[15, 18]; 而具有抗性特性的木薯品种在 SOD、POD 活性提升幅度上显著高于敏感品种, 体现出寄主抗性与酶活性响应的关联性^[16]。MDA 是植物膜脂过氧化的标志性物质, 其含量变化可反映胁迫损伤程度。随着害虫密度增加, 寄主植物的 MDA 往往升高。例如, 贾尊尊等^[15]发现在不同虫口密度与为害时间下, MDA 含量则呈先降后升趋势, 且随着为害时间延长, 植株的防御反应呈渐进式增强的特征。然而, 上述研究多聚焦于大豆、菜豆、棉花等作物与害虫 (螨) 的研究, 迄今为止, 针对不同螨口密度的六点始叶螨为害对橡胶树叶片生理生化响应规律的研究仍较为缺乏。

因此, 本研究通过设置不同梯度螨口密度, 结合不同刺吸胁迫时间处理, 测定橡胶树叶片关键生理生化指标包括丙二醛、可溶性糖、可溶性蛋白及保护酶 (SOD、POD、CAT) 活性的影响研究, 揭示橡胶树应对六点始叶螨胁迫的生理生化机制, 为该螨监测预警和精准防控提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

供试螨源: 六点始叶螨采自海南省儋州市宝岛新村橡胶种植园, 采用健康橡胶树离体叶片在实验室内[温度为(27±1)℃, 湿度为(75±5)%]连续饲养数代作为供试螨源^[19-20]。橡胶树叶片每 3~4 d 更换 1 次。

供试寄主: 供试盆栽橡胶植株品种为热研

7-33-97, 由中国热带农业科学院橡胶研究所提供, 种植基质为砖红壤土和草炭 (砖红壤土: 草炭=3:1)。所有橡胶盆栽植株在大棚中统一管理种植, 选取生长到稳定期^[21]的健康橡胶盆栽作为供试寄主。在试验接螨前, 所用植株均经过仔细检查, 确保无病虫害 (螨) 害发生。

1.2 方法

在供试橡胶苗中部分别选取 4 片复叶的中间小叶作为接螨叶片, 设置 4 个初始螨口密度梯度: 10 头/叶 (雌雄成螨各 5 头/叶)、20 头/叶 (雌雄成螨各 10 头/叶)、30 头/叶 (雌雄成螨各 15 头/叶)、40 头/叶 (雌雄成螨各 20 头/叶)^[1], 以不接螨作为对照 (CK)。每个螨口密度设置 4 个为害时间, 分别为 0、5、10、15、20 d, 每个处理重复 3 次。接螨操作步骤: 使用 0 号毛笔将成螨准确接引至叶片正面, 然后用带有凡士林的脱脂棉包裹叶片叶柄处, 以形成物理屏障防止叶螨逃逸; 随后, 使用 500 目尼龙网袋套住整张叶片, 防止叶片受到其他害虫侵害。取样时, 用剪刀从叶柄基部剪下处理叶片, 用铝箔纸包裹并放入自封袋中, 标记处理编号、采集时间等, 并置于液氮中速冻后转移至-80℃的超低温冰箱进行存储, 以备后续生理生化指标测定。

1.2.1 丙二醛 (MDA) 测定 MDA 含量测定采用硫代巴比妥酸法 (TBA)^[22]。MDA 在高温、酸性条件下, 与硫代巴比妥酸缩合, 生成红色产物, 在 532 nm 波长下有最大吸收峰, 进行比色后可估测样品中过氧化脂质的含量; 同时测定 600 nm 波长下的吸光度, 利用 532 nm 与 600 nm 波长下的吸光度的差值计算 MDA 的含量。MDA 含量的单位为 nmol/g。

1.2.2 营养物质测定 可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[23]。称取 0.1 g 橡胶树叶片, 先加入 0.8 mL 的 80%乙醇, 冰浴匀浆, 倒入离心管中, 再用 80%乙醇冲洗研钵并转移至同一 EP 管中, 使 EP 管中粗提液终体积定容为 1.5 mL; 置 50℃水浴 20 min, 冷却后, 12 000 r/min, 室温离心 10 min, 取上清液, 在 620 nm 波长下测定吸光值。可溶性糖含量的单位为 mg/g。可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[24]。称取 0.1 g 橡胶树叶片, 加入 1 mL 提取液冰浴匀浆, 12 000 r/min, 4℃离心 10 min, 取上清, 即待测液。在 600 nm 波长下测定吸光值。可溶性蛋白含量的单位为 mg/g。

1.2.3 保护酶活性测定 取 0.1 g 橡胶树叶片, 加

入 1 mL 提取液,在冰浴状态下研磨成匀浆。4 ℃, 12 000 r/min 离心 10 min, 取上清作为待测液。超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性单位为 U/g。在黄嘌呤氧化酶耦联反应体系中抑制率为 50%时,反应体系中的 SOD 酶活性定义为 1 个酶活性单位^[25]。过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法^[26]。POD 活性单位为 U/(min·g), 即酶活性定义为每克组织每分钟在反应体系中使 470 nm 波长下吸光值增加 1 为 1 个酶活性单位。过氧化氢酶 (CAT) 活性测定采用紫外吸收法^[27]。CAT 活性单位为 μmol/(min·g), 酶活定义为在 25 ℃, 每克组织每分钟催化分解 1 μmol H₂O₂ 为 1 个酶活性单位。测定所用试剂均购自苏州格锐思生物科技有限公司。

1.3 数据处理

采用 Office 2021、SPSS 27.0、Origin 2024 软件进行数据统计分析和图表绘制。六点始叶螨不同时间和密度为害对橡胶树叶片丙二醛、营养物

质含量和防御酶活性的影响采用双因素方法分析 (two-way ANOVA)、单因素 ANOVA 方差分析并通过 Duncan’s 新复极差法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 六点始叶螨为害对橡胶树叶片丙二醛 (MDA) 含量的影响

螨口密度与为害时间对橡胶树叶片 MDA 含量具有显著影响 (表 1)。六点始叶螨为害 5 d 时,高螨口密度 (40 头/叶) 处理下的 MDA 含量显著高于其他处理,为(60.12±2.63)nmol/g,表明高螨口密度早期即可诱导 MDA 快速积累。总体上,在不同螨口密度处理下,MDA 含量随为害时间延长均呈现先上升后下降趋势。在为害 15 d 时达到峰值,如 40 头/叶六点始叶螨为害 15 d,叶片 MDA 含量最高,约为(73.91±1.89)nmol/g,较 CK 升高 43.15%;六点始叶螨继续刺吸胁迫至 20 d,叶片 MDA 含量虽较 15 d 有所降低,但仍然显著高于 CK。

表 1 六点始叶螨为害对橡胶树叶片丙二醛含量的影响
Tab. 1 Effect of *E. sexmaculatus* damage on MDA content of rubber leaves

为害时间 Damage time/d	丙二醛含量 MDA content/(nmol·g ⁻¹)				
	CK	10/(mites·leaf ⁻¹)	20/(mites·leaf ⁻¹)	30/(mites·leaf ⁻¹)	40/(mites·leaf ⁻¹)
0	51.99±0.32 ^{aA}	51.13±0.75 ^{dA}	51.08±1.08 ^{cA}	51.31±0.65 ^{dA}	51.63±0.38 ^{dA}
5	50.71±0.26 ^{aB}	52.12±0.67 ^{cdB}	53.02±1.45 ^{cB}	53.35±1.40 ^{cdB}	60.12±2.63 ^{cA}
10	51.11±2.04 ^{aC}	53.43±0.86 ^{cC}	54.21±0.50 ^{cBC}	57.54±3.86 ^{cAB}	58.49±0.58 ^{cA}
15	51.27±1.10 ^{aC}	61.35±1.39 ^{aB}	64.57±2.00 ^{aB}	73.50±5.14 ^{aA}	73.91±1.89 ^{aA}
20	50.82±2.18 ^{aD}	57.22±1.11 ^{bC}	60.07±4.56 ^{bBC}	63.08±2.35 ^{bAB}	65.09±0.29 ^{bA}

注: 同行不同大写字母表示相同为害时间不同螨口密度差异显著 (P<0.05); 同列不同小写字母表示相同螨口密度不同为害时间差异显著 (P<0.05)。
Note: Different uppercase letters in the same row indicate significant difference at the same time treated with different mite population densities (P<0.05); Different lowercase letters in the same column indicate significant difference treated with the same mite population density at different time (P<0.05).

2.2 六点始叶螨为害对橡胶树叶片营养物质的影响

2.2.1 可溶性糖含量 螨口密度和为害时间均可显著影响橡胶树叶片可溶性糖含量 (表 2), 总体表现为, 随着六点始叶螨螨口密度增加、为害时间延长, 叶片可溶性糖含量逐渐降低。密度高的处理组随着为害时间的延长, 其可溶性糖含量降低更加明显, 其中, 40 头/叶处理下为害 5 d 至为害 20 d 的可溶性糖从(55.50±0.26)mg/g 降至(34.42±1.43)mg/g, 降幅达 37.98%, 但为害 15 d 与 20 d 差异不显著。在同样的为害时间下, 螨口密度越大, 叶片可溶性糖含量下降越明显, 40 头/叶处理下为

害 20 d 可溶性糖含量仅为(34.42±1.43)mg/g, 较 10 头/叶处理降低了 34.04%, 较 CK 降低了 47.99%。
2.2.2 可溶性蛋白含量 橡胶树叶片可溶性蛋白含量与六点始叶螨螨口密度、为害持续时间关系紧密 (表 3)。当螨口密度为 10、30、40 头/叶, 可溶性蛋白含量均表现为随着为害时间延长呈先降低后升高再下降的趋势, 高密度螨口对叶片可溶性蛋白影响更显著。在螨口密度达到 40 头/叶, 为害 5 d 叶片可溶性蛋白含量下降显著, 为(20.03±0.76)mg/g, 与为害 10 d 时差异不显著, 为害 20 d, 可溶性蛋白含量降至(17.74±0.63)mg/g, 显著低于其他处理组, 与 CK 相比降幅高达

45.30%，表明高密度、长时间螨害胁迫对橡胶植株蛋白代谢产生严重的负面影响。当螨口密度为 20 头/叶，叶片可溶性蛋白含量表现为随着为害时间的延长出现先下降而后小幅度上升的趋势，为害 10 d 时，含量为(18.37±1.02)mg/g，相较于为害

5 d 时可溶性蛋白含量下降了 26.87%，在为害时间持续至 20 d，可溶性蛋白含量逐步上升至 (21.53±1.57)mg/g，推测在该螨口密度处理下，为害 5~15 d 期间触发了植物强烈的防御反应，而后逐步恢复适应性。

表 2 六点始叶螨为害对橡胶树叶片可溶性糖含量的影响
Tab. 2 Effect of *E. sexmaculatus* damage on soluble sugar content of rubber leaves

为害时间 Damage time/d	可溶性糖含量 Soluble sugar content/(mg·g ⁻¹)				
	CK	10/(mites·leaf ⁻¹)	20/(mites·leaf ⁻¹)	30/(mites·leaf ⁻¹)	40/(mites·leaf ⁻¹)
0	62.00±0.29 ^{aA}	61.92±0.41 ^{aA}	62.21±0.35 ^{aA}	62.04±0.88 ^{aA}	61.68±0.70 ^{aA}
5	62.34±0.63 ^{aA}	56.42±2.65 ^{bB}	54.34±0.87 ^{bBC}	51.55±3.14 ^{bC}	55.50±0.26 ^{bB}
10	63.15±1.40 ^{aA}	51.59±0.98 ^{cC}	49.26±2.12 ^{cC}	50.57±3.14 ^{bC}	55.20±1.24 ^{bB}
15	61.88±1.11 ^{aA}	50.73±3.10 ^{cB}	47.41±2.99 ^{cDB}	43.04±1.57 ^{cC}	35.46±1.18 ^{cD}
20	62.34±1.12 ^{aA}	49.15±3.83 ^{cB}	44.95±2.50 ^{dC}	42.18±0.65 ^{cC}	34.42±1.43 ^{cD}

注：同行不同大写字母表示相同为害时间不同螨口密度差异显著（ $P<0.05$ ）；同列不同小写字母表示相同螨口密度不同为害时间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different uppercase letters in the same row indicate significant difference at the same time treated with different mite population densities ($P<0.05$); Different lowercase letters in the same column indicate significant difference treated with the same mite population density at different time ($P<0.05$).

表 3 六点始叶螨为害对橡胶树叶片可溶性蛋白含量的影响
Tab. 3 Effect of *E. sexmaculatus* damage on soluble protein content of rubber leaves

为害时间 Damage time/d	可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)				
	CK	10/(mites·leaf ⁻¹)	20/(mites·leaf ⁻¹)	30/(mites·leaf ⁻¹)	40/(mites·leaf ⁻¹)
0	33.41±2.67 ^{aA}	32.34±0.71 ^{aA}	32.61±0.58 ^{aA}	32.85±0.54 ^{aA}	32.43±0.98 ^{aA}
5	35.87±2.22 ^{aA}	27.84±1.73 ^{cB}	25.12±0.67 ^{bC}	22.61±1.36 ^{bcCD}	20.03±0.76 ^{bD}
10	34.54±0.96 ^{aA}	30.94±2.25 ^{abB}	18.37±1.02 ^{dD}	31.00±1.05 ^{aB}	21.46±1.72 ^{bC}
15	33.40±0.85 ^{aA}	28.85±0.65 ^{bcB}	19.51±1.23 ^{dD}	23.64±1.56 ^{bC}	19.44±0.94 ^{bcD}
20	32.48±1.82 ^{aA}	26.97±1.36 ^{cB}	21.53±1.57 ^{cC}	20.99±1.07 ^{cC}	17.74±0.63 ^{cD}

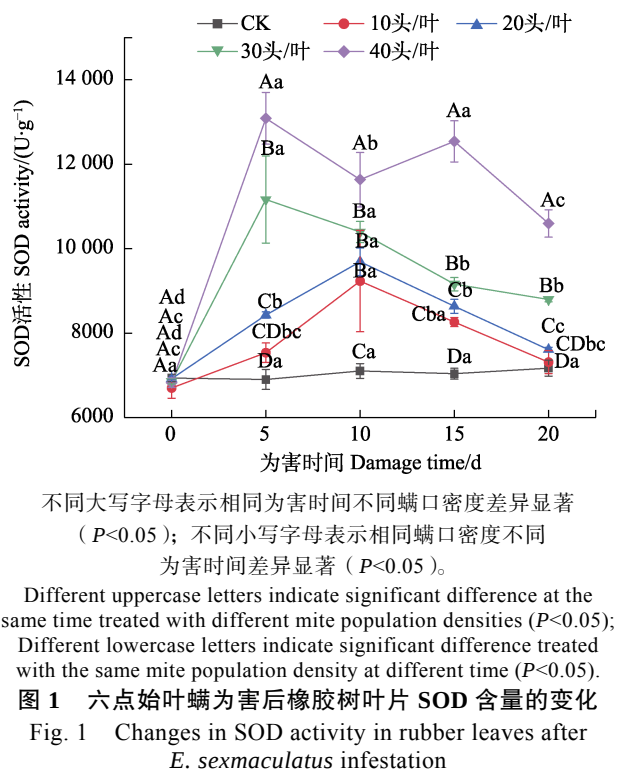
注：同行不同大写字母表示相同为害时间不同螨口密度差异显著（ $P<0.05$ ）；同列不同小写字母表示相同螨口密度不同为害时间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different uppercase letters in the same row indicate significant difference at the same time treated with different mite population densities ($P<0.05$); Different lowercase letters in the same column indicate significant difference treated with the same mite population density at different time ($P<0.05$).

2.2.3 可溶性糖与可溶性蛋白交互影响分析 由表 4 的方差分析可知，螨口密度对橡胶树叶片可溶性糖（ $F=129.868$ ， $P<0.001$ ）和可溶性蛋白（ $F=182.659$ ， $P<0.001$ ）含量具有极显著影响，为害持续时间同样可显著改变这 2 种营养物质含量（ $F=171.905$ ， $P<0.001$ ； $F=94.996$ ， $P<0.001$ ）。不同螨口密度下，六点始叶螨为害时间对可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响程度不同；不同为害时间下，螨口密度对可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响也存在差异，其中可溶性糖对时间胁迫更敏感（ $F=171.905$ ），可溶性蛋白含量对螨口密度更敏感（ $F=182.659$ ）。总的来说，六点始叶螨的为害密度、为害时间及其交互作用均极显著影响

橡胶树叶片可溶性糖与可溶性蛋白含量。
2.3 六点始叶螨为害对橡胶树叶片保护酶活性的影响
2.3.1 SOD 活性 在相同的为害时间下，橡胶树叶片 SOD 活性与六点始叶螨密度呈正相关关系，随着螨口密度增加，叶片 SOD 活性增加（图 1）。螨口密度为 40 头/叶，在不同为害时间下，叶片 SOD 活性均显著高于其他处理（ $P<0.05$ ），且在不同为害时间呈不规则的动态变化，为害 5 d 时 SOD 活性最高，为(13 086.92±613.39)U/g，较 CK 增加 91.74%。当螨口密度为 20~30 头/叶时，随着为害时间延长，橡胶树叶片 SOD 活性均表现为先增加后下降的趋势。其中，20 头/叶时，SOD

表 4 六点始叶螨不同密度和时间为害处理对橡胶树叶片营养物质的方差分析
Tab. 4 Two-way ANOVA of nutrients in rubber leaves affected by different mite densities and damage time treatments of leaf mites *E. sexmaculatus*

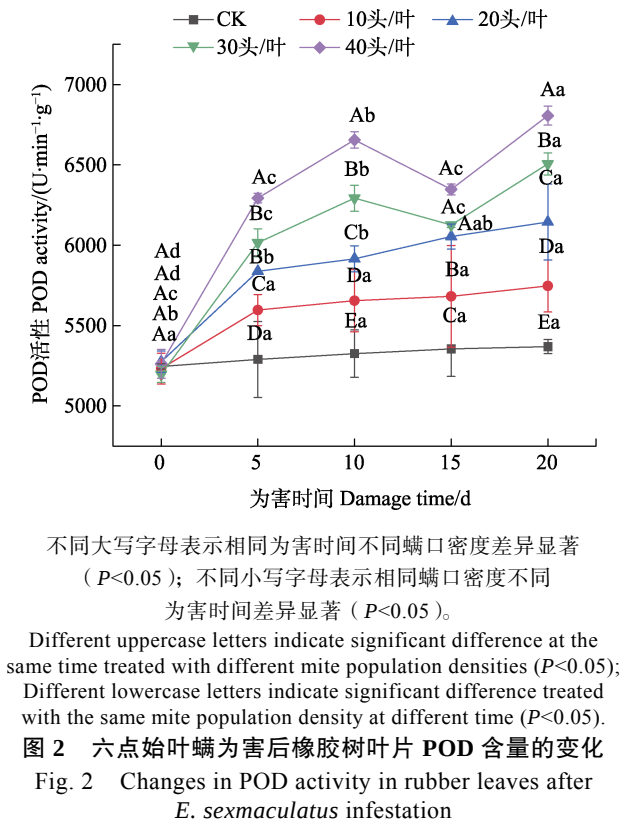
偏差来源 Deviation resource	自由度 Degree of freedom	可溶性糖 Soluble sugar		可溶性蛋白 Soluble protein	
		F	P	F	P
螨口密度	4	129.868	<0.001	182.659	<0.001
为害时间	4	171.905	<0.001	94.996	<0.001
螨口密度×为害时间	16	21.296	<0.001	17.782	<0.001
误差	50				
总计	75				



活性高峰出现在为害 10 d 时, 为(9689.39±327.66)U/g, 显著高于其他时间处理; 30 头/叶密度处理下叶片 SOD 活性高峰出现在为害 5 d 时, 为(11165.06±1031.06)U/g, 随后逐渐下降。

2.3.2 POD 活性 六点始叶螨为害橡胶树叶片后过氧化物酶 (POD) 活性的变化如图 2 所示。在相同的为害时间下, 橡胶树叶片 POD 活性表现为随螨口密度增加而呈上升趋势。在螨口密度为 40 头/叶, 为害 20 d 时橡胶树叶片 POD 活性最高, 为(6806.42±59.42)U/(min·g), 显著高于其他处理, 较 CK 增加 29.34%。在不同螨口密度下, POD 活性受为害时间影响呈现不同动态变化。在螨口密度为 30 头/叶和 40 头/叶时, POD 活性均表现为在前期先上升, 在为害 15 d 时显著下降, 分别为(6126±15.41)U/(min·g)和(6347.63±33.73)U/(min·g),

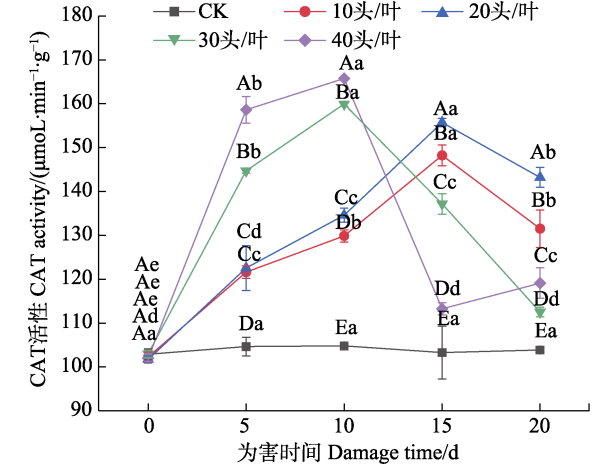
为害 20 d 时显著上升, 分别为(6505.86±67.84)U/(min·g)和(6806.42±59.42)U/(min·g); 在螨口密度为 10 头/叶和 20 头/叶时, POD 活性均表现为随着为害时间延长, 活性逐步增加的趋势, 为害 20 d 时, 叶片 POD 活性分别达到(5746.84±162.22)U/(min·g)和(6144.32±236.42)U/(min·g), 均显著高于 CK。



2.3.3 CAT 活性 橡胶树叶片 CAT 活性受六点始叶螨的螨口密度和为害时间影响显著 (图 3), 低密度和高密度螨口处理在不同为害时间下的 CAT 活性有所不同。当螨口密度为 10 头/叶和 20 头/叶时, 在为害 0~15 d 期间, CAT 活性逐渐上升, 在 15 d 时活性最高, 分别为(148.24±2.38)μmol/(min·g)和(155.74±0.96)μmol/(min·g),

较 CK 分别提高了 44.06%和 51.35%;为害时间延长至 20 d 时, CAT 活性出现下降, 下降幅度分别较 15 d 减少了 11.27%和 8.05%。当螨口密度为 30 头/叶和 40 头/叶时, 为害 10 d 时叶片 CAT 活性均达到峰值, 分别为 $(159.95\pm0.59)\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g})$ 和 $(165.77\pm0.41)\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g})$, 继续为害至 15~20 d, CAT 活性均出现显著下降, 表明橡胶树叶片在高螨口密度(30 头/叶, 40 头/叶)胁迫下会产生更强烈的早期氧化应激。

2.3.4 SOD、POD、CAT 交互影响分析 六点始叶螨的螨口密度、为害时间及其交互作用均极显著影响橡胶树叶片 SOD ($F=20.252, P<0.001$)、POD ($F=9.821, P<0.001$)、CAT 活性 ($F=145.095, P<0.001$)。其中, SOD ($F=201.815$) 和 CAT ($F=387.463$) 活性受螨口密度影响更敏感, POD 对为害时间的响应相对较弱 ($F=105.002$) (表 5), 六点始叶螨不同螨口密度与为害时间的协同作用导致橡胶树叶片保护酶活性发生变化。



不同大写字母表示相同为害时间不同螨口密度差异显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示相同螨口密度不同为害时间差异显著 ($P<0.05$)。

Different uppercase letters indicate significant difference at the same time treated with different mite population densities ($P<0.05$); Different lowercase letters indicate significant difference treated with the same mite population density at different time ($P<0.05$).

图 3 六点始叶螨为害后橡胶树叶片 CAT 含量的变化

Fig. 3 Changes in CAT activity in rubber leaves after *E. sexmaculatus* infestation

表 5 六点始叶螨不同密度和时间为害对橡胶树叶片防御酶活性的方差分析

Tab. 5 Two-way ANOVA of defensive enzyme activity in rubber leaves affected by different mite densities and damage time treatments of leaf mites *E. sexmaculatus*

偏差来源 Deviation resource	自由度 Degree of freedom	超氧化物歧化酶 SOD		过氧化物酶 POD		过氧化氢酶 CAT	
		F	P	F	P	F	P
螨口密度	4	201.815	<0.001	130.009	<0.001	387.463	<0.001
为害时间	4	113.597	<0.001	105.002	<0.001	527.985	<0.001
螨口密度×为害时间	16	20.252	<0.001	9.821	<0.001	145.095	<0.001
误差	50						
总计	75						

3 讨论

在长期的协同进化过程中, 植物逐渐发展出多层次的化学防御体系以应对害虫(螨)的胁迫压力, 如通过改变本身的次生代谢物合成及营养物质等策略, 实现对害虫(螨)的有效抵御^[28-32]。本研究通过不同螨口密度和为害时间处理, 揭示了六点始叶螨为害对橡胶树叶片生理生化特征的动态诱导效应。

螨害胁迫可加速植物细胞膜脂的过氧化反应, MDA 含量随胁迫时间延长而呈先升后降的波动变化^[25]。本研究中, 在六点始叶螨为害过程中, 不同螨口密度处理的叶片 MDA 含量均在第 15 天达到峰值后回落, 反映出植物在遭受强胁迫后可能启动自我修复机制。这与棉花对烟粉虱持续取食后 MDA 含量波动趋势相近^[15]。同样地, GOLAN 等^[33]

研究表明罗勒植物不同品种受到二斑叶螨为害时 MDA 含量均呈先上升后下降趋势。其中在罗勒 ‘Fino verde’ 的叶子观察到该化合物的显著提高, 这种反应在感染 2 周后达到最高(增加 11.5 倍), 这与本研究结果类似。

植物生长发育过程中营养物质必不可少。通常, 昆虫利用刺吸口器刺穿植物组织以获取蛋白质等营养物质, 从而导致受害叶片中蛋白质含量降低^[18]。在本研究中, 螨口密度与为害时间的交互作用对可溶性糖和可溶性蛋白含量产生极显著影响。可溶性糖对为害时间的响应程度显著高于可溶性蛋白对为害时间的响应程度, 这表明在螨害胁迫下, 橡胶树碳代谢相较于氮代谢更易受到胁迫时间的影响。同时, 研究结果显示, 六点始叶螨为害 20 d 时, 可溶性糖与可溶性蛋白含量均

显著下降(最小值出现在 40 头/叶处理),推测可溶性糖与可溶性蛋白作为重要的碳氮代谢产物,其合成过程受到抑制且分解过程加剧,最终导致含量显著降低。而六点始叶螨在 30 头/叶为害 10 d、40 头/叶为害 5 d 时可溶性蛋白含量曾短暂增高,推测为较高的螨口密度会加速植物防御响应的启动,但长期高强度的害螨胁迫超出了植株的补偿能力阈值。该现象揭示了橡胶植株在害螨胁迫下短期防御补偿与长期胁迫损伤的动态变化过程。前人研究成果也印证了这一结论,如二斑叶螨为害番茄导致营养物质出现类似的变化趋势^[34],沙棘受栉黄枯叶蛾(*Trabala vishnou gigan-tina* Yang)取食为害后可溶性糖显著下降^[35]。绿盲蝽(*Apolysus lucorum* Meyer-Dür)侵害桃叶时,叶片中可溶性糖和蛋白质含量均呈先下降后增高的动态变化^[36]。李润红等^[37]在研究豆蚜为害对寄主黄芪的影响中,发现 10、20、30 头/株的虫口密度试验组中,植物组织内可溶性蛋白与可溶性糖含量的动态变化呈相似规律:随着害虫取食时长的增加,两类物质含量先呈递减趋势,继而有所回升,随后再次降低。

SOD、POD、CAT 是清除活性氧的 3 个核心酶。SOD 是自由基清除剂,可以生成 H_2O_2 和 O_2 。POD 是木质素合成的关键酶之一,可以氧化各种次生代谢过程中的物质^[34]。本研究发现在防御酶活性方面,螨口密度与为害时间的交互作用对 SOD、POD 和 CAT 活性也产生极显著影响。这一结果暗示不同保护酶系统在应对螨害的时序进程中存在功能分工。CAT 在面对螨口密度变化时的高响应程度,暗示其可能作为橡胶树应对早期氧化应激的关键酶,在螨害发生初期迅速启动防御反应。研究还发现所有处理组中 SOD、POD 和 CAT 活性均在螨害早中期呈上升趋势。六点始叶螨高密度处理与低密度处理相比,SOD 和 CAT 活性峰值出现更早更高。表明螨口密度是影响抗氧化系统敏感性的关键因素。随着螨虫对橡胶树叶片胁迫持续,SOD 和 POD 活性在后期有所回落,但高密度螨口条件下的酶活性仍维持相对较高优势。本研究观察到的 SOD 活性在六点始叶螨胁迫下呈先上升后下降的趋势,与曹小艳等^[38]报道的植物响应虫害胁迫时 SOD 活性变化规律一致;且与杨春等^[39]的研究结论一致,绿盲蝽取食胁迫下,茶树对照组与处理组的保护酶活性表现显著的差异。其中叶片中 POD 与 CAT 活性会随

着叶片受害程度的加重而持续上升。CAT 作为重要保护酶之一,可以通过诱导防御机制来保护植物细胞,但当 CAT 过量也同时会导致植物体过氧化损伤^[40]。CAT 的活性与六点始叶螨的螨口密度有关,40 头/叶的螨口密度处理与其他螨口密度处理变化趋势显著不同,这与陈鹏等^[41]研究结果不同,后者 CAT 活性有显著的低密度效应,无论为害时间多长,螨口密度为 15 头/叶时 CAT 活性始终高于螨口密度为 25 头/叶,甚至在为害 48 h 时,5 头/叶的 CAT 活性低于对照组的活性。而本研究螨口密度为 40 头/叶在为害时间为 5 d 和 10 d 始终高于其他螨口密度,而且螨口密度为 10 头/叶时 CAT 活性显著高于 CK。本研究中 CAT 活性的密度响应模式体现了在高密度螨虫胁迫下,CAT 在早期持续维持在高水平。这表明橡胶叶片在高密度螨害胁迫下,可能优先维持甚至增强抗氧化能力以应对持续的氧化压力,反映了其对重度损伤的积极抵御策略。这为解析橡胶树抗螨生理基础及筛选高抗性品种提供参考依据。

4 结论

本研究证实六点始叶螨为害胁迫诱导橡胶树叶片的 MDA 含量随为害时间呈显著升高后回落的趋势,但不同螨口密度处理组的 MDA 含量均高于 CK,其含量与螨口密度呈正相关,表明高螨口密度、长时间刺吸胁迫引发更严重的膜脂过氧化损伤。可溶性糖与可溶性蛋白含量均随螨口密度增加和为害时间延长而呈显著下降趋势,下降幅度与胁迫强度(螨口密度 $\times$ 为害时间)呈正相关,反映了螨害导致的代谢资源掠夺与失衡。关键保护酶(SOD、POD、CAT)活性在胁迫早期便显著升高,且高螨口密度处理组酶活性峰值更高、出现更早。其中,SOD 活性响应最为迅速(5 d 达到峰值),酶活性升高幅度与螨口密度在早期阶段呈正相关,体现了植物防御投入对初始胁迫强度的敏感性。同时,六点始叶螨的胁迫效应受到螨口密度和为害时间的影响,且二者交互作用显著。这证实胁迫强度与持续时间并非独立作用,而是以复杂的协同方式共同决定了橡胶树叶片的生理损伤程度、营养状态及抗氧化防御效能。然而,寄主植物生理生化变化对六点始叶螨取食行为的反馈影响及其分子调控机制尚未阐明。后续研究可结合多组学进一步解析关键代谢物和基因的调控途径,并探索内源信号物质在螨害诱导中

的作用, 为该螨的监测预警与精准防控提供更全面的理论基础。

参考文献

- [1] 陈邓, 黄所, 陆绍德. 橡胶树危险性虫害防治初报[J]. 中国热带农业, 2009(6): 54-55.
CHEN D, HUANG S, LU S D. A preliminary report on the control of dangerous pests of rubber trees[J]. China Tropical Agriculture, 2009(6): 54-55. (in Chinese)
- [2] 贾静静, 符悦冠, 张方平, 周世豪, 聂跃, 陈俊谕. 尼氏真绥螨对三种橡胶叶螨的控害效能评价[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(4): 718-727.
JIA J J, FU Y G, ZHANG F P, ZHOU S H, NIE Y, CHEN J Y. Evaluation of *Euseius nicholsi* as a biological control for three species of spider mites in rubber plantations[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2019, 56(4): 718-727. (in Chinese)
- [3] 张方平, 朱俊洪, 李磊, 韩冬银, 牛黎明, 陈俊谕, 符悦冠. 不同生长期橡胶叶对六点始叶螨选择性及种群增长影响[J]. 热带作物学报, 2016, 37(1): 153-157.
ZHANG F P, ZHU J H, LI L, HAN D Y, NIU L M, CHEN J Y, FU Y G. Effect of rubber leaves on the selectivity and growth stages of *Eotetranychus sexmaculatus* at different growing period[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(1): 153-157. (in Chinese)
- [4] 黄欣, 李小珍, 姚志文, 肖斌, 徐凡舒, 王广利. 油茶蓝翅天牛为害与寄主油茶内营养物质和次生物质含量的关系[J]. 应用昆虫学报, 2021, 58(1): 132-141.
HUANG X, LI X Z, YAO Z W, XIAO B, XU F S, WANG G L. Interrelation between *Chreonoma atritarsis* Pic. and the nutrient content and secondary metabolites of the host plant *Camellia oleifera*[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2021, 58(1): 132-141. (in Chinese)
- [5] 胡大星, 李成, 吴碧球, 黄所生, 凌炎, 黄芊, 黄凤宽, 龙丽萍. 褐飞虱为害对不同抗性水稻品种苗期根系几种营养物质和总酚含量的影响[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(2): 413-419.
HU D X, LI C, WU B Q, HUANG S S, LING Y, HUANG Q, HUANG F K, LONG L P. Influence of brown planthopper on the contents of several nutrients and total phenols in roots of different resistant rice varieties at seedling stage[J]. Journal of Environmental Entomology, 2021, 43(2): 413-419. (in Chinese)
- [6] 韦婉玲, 何文, 阮丽霞, 梁振华, 杨海霞, 陈会鲜, 李恒锐, 黄珍玲. 华南 205 木薯二倍体及其同源四倍体对朱砂叶螨取食胁迫的生理响应[J]. 植物保护学报, 2024(2): 456-466.
WEI W L, HE W, RUAN L X, LIANG Z H, YANG H X, CHEN H X, LI H R, HUANG Z L. Physiological responses of cassava SC205 diploids and their autotetraploids to feeding stress by carmine spider mite *Tetranychus cinnabarinus*[J]. Journal of Plant Protection, 2024(2): 456-466. (in Chinese)
- [7] RODE P D A, SCHNEIDER J R, MARIANO C J C, MATTHES R D, FERLA N J. Injuries caused by phytophagous mites on apple trees (*Malus domestica*: Rosaceae)[J]. Systematic and Applied Acarology, 2024, 29(12): 1622-1628.
- [8] 钱宇汀, 薛晓峰, 曾燕如, 陈文允, 叶晓明, 喻卫武, 戴文圣. 香榧瘿螨为害对香榧叶片结构及叶绿素质量分数的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020(2): 296-302.
QIAN Y T, XUE X F, ZENG Y R, CHEN W Y, YE X M, YU W W, DAI W S. Leaf structure and chlorophyll content in *Torreya grandis* 'Merrillii' with *Nalepella abiesis* infestation[J]. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2020(2): 296-302. (in Chinese)
- [9] BUFFON G, BLASI É A D R, LAMB T I, ADAMSKI J M, SCHWAMBACH J, RICACHENEVSKY F K, BERTOLAZI A, SILVEIRA V, LOPES M C B, SPEROTTO R A. *Oryza sativa* cv. Nipponbare and *Oryza barthii* as unexpected tolerance and susceptibility sources against *Schizotetranychus oryzae* (Acari: Tetranychidae) mite infestation[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 613568.
- [10] VIBIJA C P, NERAVATHU R. Injurious status of *Schizotetranychus schizopus* (Zacher, 1913) (Acari: Tetranychidae) on Indian Thorny Bamboo[J]. Systematic and Applied Acarology, 2021, 26(2): 343-352.
- [11] RUFFATTO K, DA SILVA L C O, NEVES C D O, KUNTZLER S G, DA LIMA J C D, ALMEIDA F A, SILVEIRA V, CORREA F M, MINELLO L V P, JOHANN L, SPEROTTO R A. Unravelling soybean responses to early and late *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae) infestation[J]. Plant Biology, 2024, 26(7): 1223-1239.
- [12] YARI S, HAJIQANBAR H, FATHIPOUR Y, FARAZMAND A, RASHED A. Damage caused by *Tetranychus urticae* and *Frankliniella occidentalis* on rose plant: effect of different initial population densities[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2024, 18(1): 117-127.
- [13] 金永玲, 刘吉利, 王丽艳, 肖晗, 赵航. 13 个红小豆品种对红叶螨抗性筛选及评价方法[J]. 环境昆虫学报, 2024(1): 253-260.
JIN Y L, LIU J L, WANG L Y, XIAO H, ZHAO H. Screening and evaluation methods for resistance of 13 adzuki bean varieties to *Tetranychus pueraricola*[J]. Journal of Environmental Entomology, 2024(1): 253-260. (in Chinese)
- [14] 龙莹, 刘建萍, 李晓红. 斜纹夜蛾取食为害对大豆农艺性

- 状和土壤酶活性的影响[J]. 植物保护, 2022, 48(5): 122-128.
- LONG Y, LIU J P, LI X H. Effects of *Spodopyra litura* feeding on soybean agronomic characters and soil enzyme activities[J]. Plant Protection, 2022, 48(5): 122-128. (in Chinese)
- [15] 贾尊尊, 付开赞, 丁新华, 吐尔逊·阿合买提, 姜卫华, 王小武, 郭文超. 烟粉虱持续取食对棉花叶片防御酶活性、营养物质和代谢产物含量的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(4): 916-924.
- JIA Z Z, FU K Y, DING X H, AHEMAITI T E X, JIANG W H, WANG X W, GUO W C. The influence of *Bemisia tabaci* (Gennadius) stress on the enzyme activity, nutrient and metabolite content of cotton leaves[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(4): 916-924. (in Chinese)
- [16] 杨娟, 周琼, 黄京华, 邹海霞, 陈宇鑫, 邱静思, 王国全. 朱砂叶螨不同侵染时间对木薯生理指标的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(11): 1969-1975.
- YANG J, ZHOU Q, HUANG J H, ZOU H X, CHEN Y X, QIU J S, WANG G Q. Effects of *Tetranychus cinnabarinus* infection time on physiological parameters of cassava[J]. Journal of Southern Agriculture, 2017, 48(11): 1969-1975. (in Chinese)
- [17] 岳文波, 郅军锐, 刘利, 叶茂, 张向前, 曾广. 害虫取食和机械损伤对菜豆不同部位叶片防御酶活性的影响[J]. 昆虫学报, 2018(7): 860-870.
- YUE W B, ZHI J R, LIU L, YE M, ZHANG X Q, ZENG G. Effects of pest insect feeding and mechanical damage on the defensive enzyme activities in leaves at different parts of kidney bean plants[J]. Acta Entomologica Sinica, 2018(7): 860-870. (in Chinese)
- [18] 王兴亚, 周俐宏, 陈彦, 赵彤华, 徐蕾, 许国庆. 大豆蚜危害胁迫对大豆叶片几个重要生理指标的影响[J]. 应用昆虫学报, 2011(6): 1655-1660.
- WANG X Y, ZHOU L H, CHEN Y, ZHAO T H, XU L, XU G Q. The activity of some physiological indexes of soybean leaves fed by *Aphis glycines*[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2011(6): 1655-1660. (in Chinese)
- [19] 郑丽旧, 符悦冠, 张方平, 吴知, 王建赞, 叶政培, 韩冬银, 李磊, 陈俊谕. 六点始叶螨在不同橡胶树品系上的种群适合度[J]. 热带作物学报, 2023, 44(10): 2110-2117.
- ZHENG L J, FU Y G, ZHANG F P, WU Z, WANG J Y, YE Z P, HAN D Y, LI L, CHEN J Y. Population fitness of *Eotetranychus sexmaculatus* on different rubber tree strains[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(10): 2110-2117. (in Chinese)
- [20] 刘雅, 郑丽旧, 符悦冠, 张方平, 陈俊谕. 短时高温胁迫对六点始叶螨繁殖能力和子代适合度的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(2): 386-393.
- LIU Y, ZHENG L J, FU Y G, ZHANG F P, CHEN J Y. Effects of short-term exposure to high temperature on the reproductive capacity and offspring fitness of *Eotetranychus sexmaculatus*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(2): 386-393. (in Chinese)
- [21] 李文秀, 贺军军, 张华林, 罗萍. 橡胶树叶蓬物候研究进展[J]. 广东农业科学, 2019, 46(11): 37-44.
- LI W X, HE J J, ZHANG H L, LUO P. Research progress in the phenology of *Heava brasiliensis* leaf[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(11): 37-44. (in Chinese)
- [22] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- LI H S. Experimental principles and techniques of plant physiology and biochemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [23] 陈毓荃. 生物化学实验方法和技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 171-174.
- CHEN Y Q. Experiments and technology of biochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2002: 171-174. (in Chinese)
- [24] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantization of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(9): 248-254.
- [25] 姚文涛. 二斑叶螨为害后不同寄主的生理生化变化[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
- YAO W T. Physiological and biochemical changes of different hosts after infestation by *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae)[D]. Nanning: Guangxi University, 2024. (in Chinese)
- [26] 哈尔滨工业大学. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- Harbin Institute of Technology. Plant physiological experiments[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [27] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- XIONG Q E. Plant physiology[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2003. (in Chinese)
- [28] 张哲, 陈青, 梁晓, 伍春玲, 陈谦, 张银东. 朱砂叶螨为害前后抗、感木薯品种叶组织营养物质含量差异分析[J]. 热带作物学报, 2020, 41(9): 1865-1869.
- ZHANG Z, CHEN Q, LIANG X, WU C L, CHEN Q, ZHANG Y D. Analysis on difference of nutrient content in leaf tissue of resistant and sensitive cassava varieties before and after damage to *Tetranychus cinnabarinus*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(9): 1865-1869. (in Chinese)

- [29] ROSA-DIAZ I, ROWE J, CAYUELA-LOPEZ A, ARBONA V, DÍAZ I, JONES M A. Spider mite herbivory induces an ABA-driven stomatal defense[J]. *Plant Physiology*, 2024, 195(4): 2970-2984.
- [30] ROSA-DIAZ I, SANTAMARIA M E, ACIEN J M, DÍAZ I. Jasmonic acid catabolism in *Arabidopsis* defence against mites[J]. *Plant Science*, 2023, 334: 111784.
- [31] XU Z, QI C, ZHANG M, ZHU J, HU J, FENG K Y, SUN J Y, WEI P, SHEN G M, ZHANG P, HE L. Selenium mediated host plant-mite conflict: defense and adaptation[J]. *Pest Management Science*, 2021, 77(6): 2981-2989.
- [32] BUFFON G, BLASI É A D R, RATIVA A G S, LAMB T I, GASTMANU R, ADAMSKI J M, SCHWAMBACH J, RICACHENEVSKY F K, HERINGER A S, SILVEIRA V, LOPES M C B, SPEROTTO R A. Unraveling rice tolerance mechanisms against *Schizotetranychus oryzae* mite infestation[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1341.
- [33] GOLAN K, KOT I, GARRIDO-JURADO I, KMEC K. Physiological response of basil plants to two spotted spider mite (Acari: Tetranychidae) infestation[J]. *Journal of Economic Entomology*, 2019, 112(2): 948-956.
- [34] 温娟, 郅军锐, 吕召云, 张羽宇. 二斑叶螨为害对番茄叶片主要营养物质和防御酶活性的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2017, 39(1): 172-180.
- WEN J, ZHI J R, LYU Z Y, ZHANG Y Y. Effects of *Tetranychus urticae* feeding on the contents of main nutrient and defensive enzymes activities of tomato leaves[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2017, 39(1): 172-180. (in Chinese)
- [35] 高飞, 张佳佳, 高拖弟, 刘永华. 两种害虫危害对沙棘生理生化指标的影响[J]. *陕西农业科学*, 2022, 68(3): 32-37.
- GAO F, ZHANG J J, GAO T D, LIU Y H. Effects of two pests on physiological and biochemical indexes of *Hippophae rhamnoides*[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 68(3): 32-37. (in Chinese)
- [36] 苏敏, 谭秀梅, 王吉青, 孙冬, 门兴元, 周洪旭. 绿盲蝽为害对不同空间位置桃叶生理指标的影响[J]. *植物保护学报*, 2015, 42(4): 612-618.
- SU M, TAN X M, WANG J Q, SUN D, MEN X Y, ZHOU H X. Effects of the damage by *Apolygus lucorum* (Meyer-Dür) on physiological indexes of peach leaves in different spatial positions[J]. *Journal of Plant Protection*, 2015, 42(4): 612-618. (in Chinese)
- [37] 李润红, 高娜, 孙永军. 豆蚜为害对黄芪叶片总叶绿素及营养物质含量的影响[J]. *植物保护*, 2024, 50(2): 93-99, 136.
- LI R H, GAO N, SUN Y J. Effects of *Aphis craccivora* feeding on the contents of total chlorophyll and nutrients in the leaves of *Astragalus membranaceus*[J]. *Plant Protection*, 2024, 50(2): 93-99, 136. (in Chinese)
- [38] 曹小艳, 叶晓琴, 阿地力·沙塔尔. 核桃果皮对苹果蠹蛾为害的防御响应[J]. *林业科学研究*, 2023, 36(6): 126-133.
- CAO X Y, YE X Q, SATTAR A D L. Defensive response of walnut husk to *Cydia pomonella*[J]. *Forest Research*, 2023, 36(6): 126-133. (in Chinese)
- [39] 杨春, 孟泽洪, 李帅, 沈强, 张小琴, 陈正武. 绿盲蝽取食对茶树营养物质及防御酶活性的影响[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(9): 159-164.
- YANG C, MENG Z H, LI S, SHEN Q, ZHANG X Q, CHEN Z W. Effects of feeding by *Apolygus lucorum* on nutrients and defense enzymes activities in tea leaves[J]. *Shandong Agricultural Science*, 2023, 55(9): 159-164. (in Chinese)
- [40] 于威, 郝天龙. 几种防御性酶在植物抗病方面的研究进展[J]. *北京农业*, 2014(36): 133-134.
- YU W, HAO T L. Research progress of several defense enzymes in plant disease resistance[J]. *Beijing Agriculture*, 2014(36): 133-134. (in Chinese)
- [41] 陈鹏, 刘奇志. 二斑叶螨为害对草莓叶片 H_2O_2 、MDA 含量以及部分防御酶活性的影响[J]. *环境昆虫学报*, 2022, 44(3): 697-703.
- CHEN P, LIU Q Z. Effects of *Tetranychus urticae* feeding on the H_2O_2 , MDA content and some defensive enzyme activities in strawberry leaves[J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2022, 44(3): 697-703. (in Chinese)