



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.

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

陈 鹏^{1,2}, 刘奇志^{2*}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 山东省病虫害生物防治工程技术研究中心, 济南 250100;

2. 中国农业大学植物保护学院, 北京 100193)

摘要: 本文旨在探究二斑叶螨 *Tetranychus urticae* 为害对草莓 *Fragaria × ananassa* Duch. 叶片内过氧化氢 (H_2O_2)、丙二醛 (MDA) 含量以及部分防御酶活性的影响。在草莓苗上接种不同数量 (5~25 头) 的二斑叶螨, 分别在接种后的 24 h、48 h 和 72 h 取样, 分析草莓叶片内 H_2O_2 、MDA 的含量以及部分防御酶的活性。结果显示, 二斑叶螨为害的草莓叶片内 H_2O_2 和 MDA 的含量以及超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性随着时间的延长而呈现先升后降的趋势, 在二斑叶螨持续为害草莓叶片 24 h、48 h 和 72 h 时, 受损草莓叶片中 H_2O_2 的含量均显著高于对照 ($P < 0.05$), 不同密度二斑叶螨为害的草莓叶片中 H_2O_2 的含量均显著高于对照 ($P < 0.05$), 但与取食时间关系不大。当为害时间达到 48 h 时, MDA 的含量和 SOD 的活性均达到最高峰, 此时它们均与二斑叶螨的密度密切相关。当二斑叶螨为 25 头/叶时, MDA 的含量和 SOD 的活性分别约是对照的 3.6 倍和 10 倍。过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的活性随时间延长不断升高, 均在二斑叶螨为害 72 h 时达到最高峰。同时, 二斑叶螨的为害时间和为害密度之间存在一定的交互作用。以上结果表明草莓叶片主要通过调节其体内 H_2O_2 和 MDA 的含量以及各种防御酶活性的变化, 对二斑叶螨的为害产生应激反应。

关键词: 二斑叶螨; 草莓; 过氧化氢; 丙二醛; 防御酶活性

中图分类号: Q965; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 03-0697-07

Effects of *Tetranychus urticae* feeding on the H_2O_2 , MDA content and some defensive enzyme activities in strawberry leaves

CHEN Peng^{1,2}, LIU Qi-Zhi^{2*} (1. Shandong Provincial Engineering Technology Research Center on Biocontrol of Crops Diseases and Insect Pest, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: This paper aimed to explore the effects of *Tetranychus urticae* damage on the content of hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA) and some defensive enzyme activities in strawberry leaves. Inoculate strawberry seedlings with different numbers (5~25) of *T. urticae*, and sample at 24 h, 48 h and 72 h after inoculation. The content of H_2O_2 , MDA and the changes of some defensive enzyme activities in strawberry leaves were analyzed. The results showed that the content of H_2O_2 and MDA in the leaves of strawberries damaged by *T. urticae* and the activity of superoxide dismutase (SOD) showed a trend of first increasing and then decreasing with time. When *T. urticae* continued to damage strawberry

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2014BAD16B0702); 山东省农业科学院农业科技创新工程 (CXGC2021B13, CXGC2022E04)

作者简介: 陈鹏, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: cpengchina@126.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 刘奇志, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: lqzzyx126@126.com

收稿日期 Received: 2021-02-19; 接受日期 Accepted: 2021-04-09

leaves for 24 h, 48 h and 72 h, H_2O_2 content in the damaged strawberry leaves was significantly higher than control ($P < 0.05$). The content of H_2O_2 in strawberry leaves damaged by different densities of *T. urticae* was significantly higher than control ($P < 0.05$), but it had little relationship with feeding time. When the damage time reached 48 h, MDA content and SOD activity both reached the highest peaks. At this time, they were closely related to the density of *T. urticae*. When there were 25 spider mites per leaf, the content of MDA and the activity of SOD were about 3.6 times and 10 times than control, respectively. The activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) continued to increase with time, and both reached their peaks at 72 h after the damage of *T. urticae*. At the same time, there was a certain interaction between the damage time and damage density of *T. urticae*. The results indicated that strawberry leaves had a stress response to the damage of *T. urticae* by regulating the contents of H_2O_2 and MDA and the changes in the activities of various defense enzymes in their bodies.

Key words: *Tetranychus urticae*; strawberry; hydrogen peroxide; malondialdehyde; defensive enzyme activity

草莓是蔷薇科 Rosaceae 草莓属 *Fragaria* 的多年生草本植物, 属于经济和营养价值极高的浆果类果树。随着人们生活水平的提高, 草莓受到越来越多人的青睐, 已逐渐成为国民水果。近年来, 我国草莓栽种面积越来越大, 与之相伴的草莓病虫害也是日益严重, 给果农带来了巨大的经济损失。其中, 叶螨是草莓生产中面临的主要害虫之一 (徐可, 2019)。

草莓生产过程中可以受到多种叶螨危害, 如截形叶螨 *Tetranychus truncatus* (洪雪, 2012)、朱砂叶螨 *Tetranychus cinnabarinus* (杨金生等, 1990) 和二斑叶螨 *T. urticae* (朱亮等, 2013) 等。二斑叶螨是危害最为广泛和严重的一种。曹利军等 (2018) 将华北、华中、华东和西南地区中 12 个草莓产区危害的叶螨进行分子鉴定后发现, 这些地区的为害叶螨均为二斑叶螨, 其种内遗传多样性不高 (曹利军等, 2018)。

二斑叶螨主要为害草莓植株的茎、叶和花等, 主要位于叶片的背面刺吸汁液, 导致叶片表面出现黄色斑点, 最终致使整个草莓叶片变得干枯而呈褐色, 受害草莓植株会出现矮化早衰、果实萎缩等现象 (杨金生等, 1990)。近年来, 由于化学农药的不规范使用, 大大加速了该螨对多数化学药剂的抗药性 (刘学辉等, 2008; 耿书宝等, 2014), 因此迫切需要新的绿色防控方式。寄主植物与害虫之间的相互作用关系是生态系统的重要组成部分之一, 也是目前研究热点问题。利用植物自身防御机制抗螨是目前农业研究的热点领域之一, 可以很好的避免化学防治所带来的诸多问

题, 对促进农业的可持续发展具有重要意义。

当寄主植物遭受害虫胁迫时, 植物会通过改变自身体内的一系列生理生化反应来进行防御 (张廷伟等, 2013; 帕提玛·乌木尔汗等, 2016)。虫害导致植物大量释放活性氧, 如 H_2O_2 等, 从而引发植物细胞发生氧化胁迫 (Mittapalli *et al.*, 2007)。丙二醛 (MDA) 能够与细胞内的各种成分发生反应, 可以用来指示细胞膜脂的过氧化程度, 超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 是植物氧化酶促清除系统中的抗氧化酶, 参与活性氧自由基的清除 (Tewari *et al.*, 2002; 谭永安等, 2010; 李林懋等, 2014)。因此, 当植物遭受害虫侵害后体内 MDA 的含量以及 SOD、POD 和 CAT 等酶活性会发生显著变化 (从春蕾等, 2014; 陈丽慧, 2016)。如二斑叶螨为害棉花 *Gossypium* spp. 和番茄 *Lycopersicon esculentum* 等时, 植物体内的 POD 和 CAT 等防御酶活性可被诱导升高 (帕提玛·乌木尔汗等, 2016; 温娟等, 2017)。端大蓟马 *Megalurothrips distalis* 为害豆科植物后, 其叶片内的 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 的含量均发生变化 (沈登荣等, 2017)。

本文主要研究二斑叶螨为害草莓叶片所引发的草莓体内过氧化氢 (H_2O_2)、丙二醛的含量及部分防御酶超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性的变化规律, 探讨草莓叶片对二斑叶螨为害的生理生化响应机制, 以期揭示二斑叶螨与寄主草莓植株之间的相互作用关系奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

二斑叶螨虫源取自北京农林科学院林业果树科学研究院内草莓大棚并经过鉴定的野生品种。经鉴定后,在人工气候培养箱(光周期 L:D = 14:10; 相对温度 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; 相对湿度 70% ~ 80%) 利用豇豆 *Vigna unguiculata* (Linn.) Walp. 植株连续饲养多代。

本实验选用草莓品种“红颜”,草莓植株采用聚乙烯盆栽(16 cm × 15 cm),每个盆中加入约 2 kg 沙壤土,选择长势相对一致的草莓苗进行定植,其它条件均与草莓大棚中相一致。

1.2 二斑叶螨接种实验

选取长势一致、健康的草莓苗(叶片大小、数量基本一致)进行接种实验。选用的二斑叶螨为雌成螨,按 5 头/叶、15 头/叶和 25 头/叶的虫口密度分别进行接种,叶片边缘涂抹聚四氟乙烯。以未接种二斑叶螨的叶片作为对照。以接种时间为起始,分别在接种后的 24 h、48 h 和 72 h 进行取样,各处理重复 3 次,液氮速冻, -80°C 冰箱保存备用。

1.3 H_2O_2 和丙二醛(MDA)含量测定

H_2O_2 存在 390 nm 的吸收峰,利用 KI 法测定草莓叶片中 H_2O_2 的含量;按照李合生(2000)的方法,使用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)的含量(李合生,2000)。

1.4 草莓叶片防御酶活性测定

超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定参考萧浪涛等(2005)的氮蓝四唑(NBT)法;过氧化物酶(POD)活性的测定参考李合生(2000)愈创木酚法;过氧化氢酶(CAT)活性测定参考李合生(2000)的方法。

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2016、GraphPad Prism 7.0 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理和分析。二斑叶螨不同时间和虫口密度为害对草莓叶片 H_2O_2 和 MDA 的含量及部分防御酶活性的影响进行非参数单因素 ANOVA 检验,利用 Kruskal-Wallis 法比较不同处理间的显著性。

2 结果与分析

2.1 二斑叶螨为害对草莓叶片 H_2O_2 含量的影响

与对照草莓相比,在二斑叶螨持续为害草莓叶片 24 h、48 h 和 72 h 时,不同密度的二斑叶螨均会导致草莓叶片 H_2O_2 的含量显著升高($P < 0.05$);当为害时间分别为 24 h 和 48 h 时,二斑叶螨密度分别为 15 头/叶和 25 头/叶时的受损叶片中 H_2O_2 的含量没有显著性差异;为害时间为 72 h 时,二斑叶螨为 5 头/叶和 25 头/叶时的受损叶片中 H_2O_2 的含量没有显著性差异,二斑叶螨密度为 25 头/叶的受损叶片中 H_2O_2 的含量比 15 头/叶中下降了约 15.45%。不同密度的二斑叶螨为害的草莓叶片中 H_2O_2 的含量均显著高于对照($P < 0.05$),但与取食时间关系不大($P > 0.05$)(图 1)。

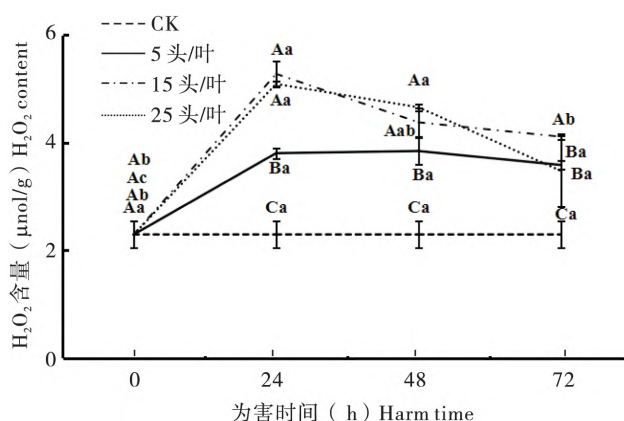


图 1 二斑叶螨为害对草莓叶片中 H_2O_2 含量的影响

Fig. 1 Effect of the damage of *Tetranychus urticae* on H_2O_2 content in strawberry leaves

注:图中大写字母不同表示在同一时间不同为害密度下在 0.05 水平上差异显著,小写字母不同表示在同一密度不同时间为害下在 0.05 水平上差异显著。下同。Note: Different upper-case letters indicated significant difference at the same feeding time but different population densities ($P < 0.05$); different lower-case letters indicated significant difference at the same population density but different feeding time ($P < 0.05$). Same below.

2.2 二斑叶螨为害对草莓叶片 MDA 含量的影响

草莓受到二斑叶螨为害后,草莓叶片 MDA 的含量随着时间的延长而呈现先升后降的趋势,仅在 48 h 时发生显著变化(图 2)。当为害时间达到 48 h 时,MDA 的含量达到最高峰,此时 MDA 的含量与二斑叶螨的密度密切相关。当二斑叶螨密度

为 15 头/叶时, MDA 的含量比对照增加了 75.28%, 25 头/叶时, MDA 的含量约是对照的 3.6 倍。其它为害时间, 各虫口密度二斑叶螨为害下草莓叶片的 MDA 含量均未发生明显变化 ($P > 0.05$)。

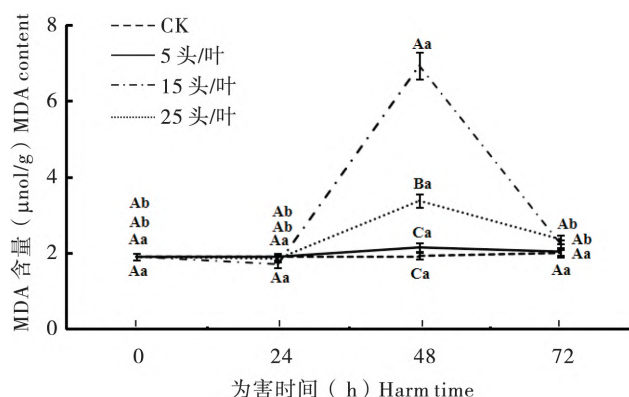


图2 二斑叶螨为害对草莓叶片中MDA含量的影响

Fig. 2 Effect of the damage of *Tetranychus urticae* on MDA content in strawberry leaves

2.3 二斑叶螨为害对草莓叶片SOD活性的影响

草莓叶片SOD的活性与为害的二斑叶螨密度密切相关。与对照相比, 草莓叶片受到二斑叶螨持续为害24 h、48 h和72 h, 当二斑叶螨的密度达到15头/叶和25头/叶时, 草莓叶片内的SOD活性显著升高 ($P < 0.05$); SOD的活性在48 h时达到最高峰, SOD活性的约是对照的10倍(图3)。当二斑叶螨密度为5头/叶时, SOD活性在为害时间达到48 h和72 h时显著性高于对照; 15头/叶时, SOD活性仅在为害时间达到24 h和48 h时显著性高于对照, 72 h时有所下降; 25头/叶时, 24 h、48 h和72 h SOD活性的活性均高于对照, 并随时间呈现先升后降的趋势(图3)。

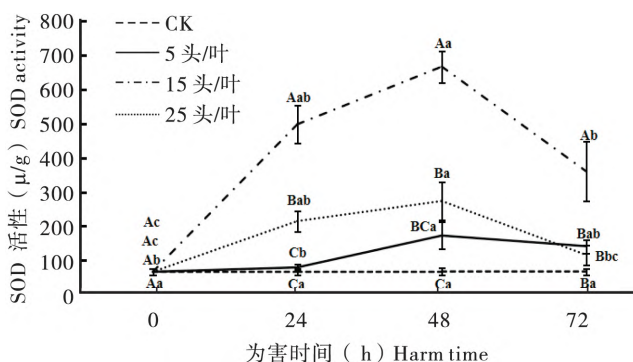


图3 二斑叶螨为害对草莓叶片中SOD活性的影响

Fig. 3 Effect of the damage of *Tetranychus urticae* on SOD activity in strawberry leaves

2.4 二斑叶螨为害对草莓叶片POD活性的影响

二斑叶螨取食24 h后, 仅当二斑叶螨的密度达到15头/叶, 草莓叶片POD活性显著高于对照; 为害时间为48 h时, 密度为15头/叶和25头/叶为害的草莓叶片POD活性显著高于对照, 但两者之间没有显著差异; 为害时间为72 h时, 3种密度下POD活性均显著高于对照, 三者之间没有显著差异。不同二斑叶螨密度为害的草莓叶片POD活性均随着时间的延长而有所升高。不同密度的二斑叶螨均在为害72 h时达到最高峰, 但二斑叶螨密度为25头/叶时, POD最高峰的活性显著低于5头/叶和15头/叶时的活性 ($P < 0.05$)。当密度为5头/叶时, POD活性仅在72 h显著升高; 15头/叶时, POD活性在48 h和72 h均显著升高; 当密度为25头/叶时, POD在第24 h即可被显著激活, POD活性达到对照的2倍(图4)。

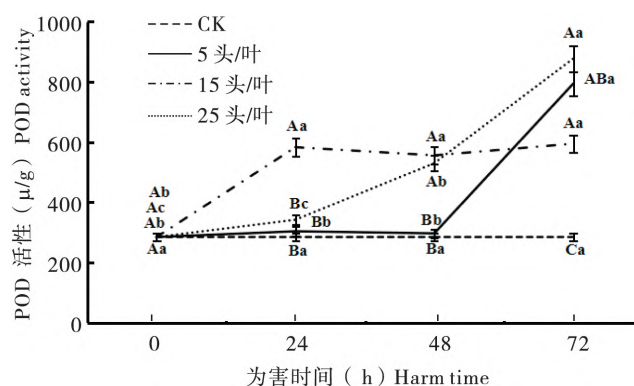


图4 二斑叶螨为害对草莓叶片中POD活性的影响

Fig. 4 Effect of the damage of *Tetranychus urticae* on POD activity in strawberry leaves

2.5 二斑叶螨为害对草莓叶片CAT活性的影响

草莓叶片中CAT的活性与为害二斑叶螨的密度有关。当草莓叶片受到二斑叶螨持续为害24 h时, 3个密度下CAT活性均显著高于对照, 但15头/叶和25头/叶为害的叶片CAT活性没有显著差异; 为害48 h和72 h时, 二斑叶螨密度为15头/叶和25头/叶时, CAT活性显著高于对照和5头/叶。二斑叶螨密度为5头/叶时, CAT的活性仅在24 h时有所升高, 比对照增加约44.15%。当二斑叶螨密度达到15头/叶和25头/叶时, 草莓叶片CAT活性显著升高 ($P < 0.05$), 且随为害时间的延长其活性持续升高, 72 h达到最高峰, 分别是对照的2.39倍和4.27倍(图5)。

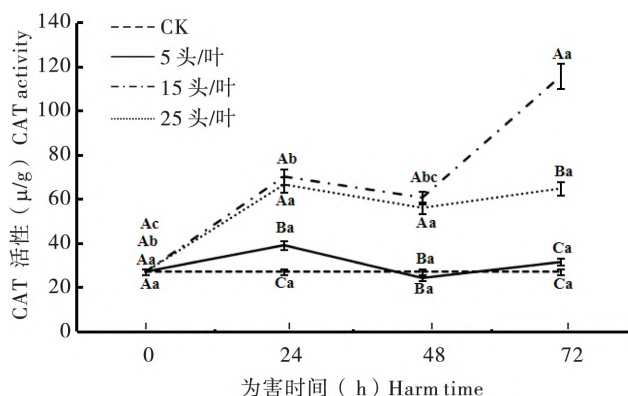


图5 二斑叶螨为害对草莓叶片中 CAT 活性的影响

Fig. 5 Effect of the damage of *Tetranychus urticae* on CAT activity in strawberry leaves

3 结论与讨论

植物进化过程中逐步形成了一套复杂完整的抵御害虫侵害的防御机制, 其中诱导防御策略是植物自我保护的重要一种 (温娟等, 2017)。植物体内部分物质和防御酶活性的改变, 均可以达到抗虫的目的 (杨振德等, 2003; 李新岗等, 2008)。本文研究发现, 二斑叶螨为害的草莓的叶片内 H_2O_2 和 MDA 的含量以及 SOD 的活性随着时间的延长而呈现先升后降的趋势, POD 和 CAT 的活性随时间延长不断升高, 同时这些变化均与虫口密度有关。

植物体内 H_2O_2 和 MDA 的含量是植物遭受逆境胁迫时衡量细胞损伤程度的重要指标 (Yamamoto, 2001; Jones *et al.*, 2006)。 H_2O_2 在植物抗逆过程中发挥着重要作用, 植物在遭受胁迫时体内会产生 H_2O_2 , H_2O_2 与植物的过敏反应 (HR) 密切相关。研究表明 H_2O_2 对植物体同时具有保护和毒害的双重作用, 低浓度时可以作为信号分子参与植物胁迫响应, 而当植物细胞内 H_2O_2 浓度较高时则会对细胞产生毒害作用 (Hancock, 2002)。 H_2O_2 在植物抗虫过程中可以起着一定作用, 如能够减轻其玉米螟 *Ostrinia nubilalis* 对转基因玉米的危害 (Ramputh *et al.*, 2002)。本文研究中, 二斑叶螨为害的草莓叶片中 H_2O_2 含量在持续为害 24 h 即有所升高, 这应该是草莓抵御不良环境的一种有效方式。草莓叶片中 H_2O_2 含量的变化与二斑叶螨的虫口密度密切相关, 但当密度大于

15 头/叶时, 不再具有密度效应。MDA 用来表示植物遭受胁迫时细胞膜的损伤程度, 是植物体内脂质过氧化作用的产物 (韩忠明等, 2016)。本文研究表明二斑叶螨为害可以引发 MDA 含量的增加, 造成细胞损伤。二斑叶螨为害过程中, 仅在 48 h 时 MDA 的含量达到最大值, 此时与虫口密度密切相关, 之后恢复到初始含量, 此结果与端大蓟马取食胁迫不同豆科植物后 MDA 的含量变化基本类似, 后者在 72 h 达到最大值, 之后开始下降 (沈登荣等, 2017)。

当植物细胞受到过氧化损伤时, 植物会主动调节自身保护酶活性来消除活性氧自由基带来的伤害 (桑子阳等, 2011; 蒋林等, 2012; 姜宗庆等, 2019)。SOD、POD 和 CAT 是植物遭受环境胁迫时起到抵御作用的主要保护酶 (陈璐等, 2014; 井大炜, 2014)。SOD 是植物在逆境条件下最主要的自由基清除剂, 主要的生理功能是延缓衰老 (Youn *et al.*, 1996)。POD 是植物抗逆反应过程中酶促防御系统的关键酶之一, 在植物抗虫反应起重要作用 (Tschamtker *et al.*, 2001; 温娟等, 2017)。CAT 是植物防御体系一种重要的保护酶, 主要用于 H_2O_2 分解, 清除体内多余的 H_2O_2 (帕提玛·乌木尔汗等, 2016)。植物体内的 SOD 主要用于催化体内超氧阴离子的歧化反应, 从而产生氧气和过氧化氢, POD 和 CAT 则可以清除生物体内产生的多余的 H_2O_2 (Saitanis *et al.*, 2002)。本文研究中, 二斑叶螨为害草莓叶片中 SOD 活性随二斑叶螨密度的增加而升高, 当达到 25 头/叶时更为显著, 随时间变化则呈现先升后降的趋势。POD 和 CAT 的活性与二斑叶螨的危害密度有关, POD 活性的密度效应主要出现在持续为害 24 h 和 48 h, CAT 活性变化具有显著的低密度效应, 当虫口密度小于 15 头/叶时更为显著。此外, 两者均随着时间的推移其活性不断升高。二斑叶螨为害叶片内 H_2O_2 含量的升高与 SOD 活性的升高密切相关, POD 和 CAT 活性显著升高, 则可能与二斑叶螨为害叶片内 H_2O_2 显著升高的原因, 主要用于分解多余的 H_2O_2 。这些结果与此前有关害虫为害植物的结果相似, 如皖棉小黄花 *Jasminum nudiflorum* Lindl. 叶片在绿盲蝽 *Apolygus lucorum* Meyer-Dür. 为害后, 叶片中的 POD 活性显著增加; 二斑叶螨侵害番茄叶片后, 叶片 POD 活性随着密度的增加

逐步升高, 随时间延长而先升后降; 朱砂叶螨取食豇豆幼苗前期, CAT 活性显著升高 (梁为等, 2010; 毛红等, 2011; 温娟等, 2017)。

本文重点研究了二斑叶螨为害所导致的草莓体内生理生化的反应。当遭遇虫害胁迫时, 草莓可以通过改变自身体内化学成分的含量 (如 H_2O_2) 以及激活防御酶活性 (如 SOD、POD 和 CAT) 来抵抗虫害胁迫。但草莓体内这些变化对二斑叶螨所产生的影响, 还有待于进一步研究。

参考文献 (References)

- Cao LJ, Zhou XY, Gong YJ, *et al.* Molecular identification and genetic diversity of spider mites on strawberry from 12 regions of China [J]. *Plant Protection*, 2018, 44 (4): 158–161. [曹利军, 周晓怡, 宫亚军, 等. 我国 12 个地区草莓叶螨种类分子鉴定及遗传多样性 [J]. 植物保护, 2018, 44 (4): 158–161]
- Chen J, Lai QX, He BL, *et al.* Production of activated oxygen and antioxidant enzyme activity in ornamental species under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica*, 2014, 34 (7): 1390–1396. [陈珺, 赖齐贤, 何宝龙, 等. 土壤干旱对观赏植物活性氧产生和抗氧化酶活性的影响 [J]. 西北植物学报, 2014, 34 (7): 1390–1396]
- Chen LH, Patima W, Cui YH, *et al.* Effect of *Aphis gossypii* feeding on defense enzyme activity in different varieties of cotton [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52 (10): 1866–1871. [陈丽慧, 帕提玛·乌木尔汗, 崔燕华, 等. 棉蚜取食对不同品种棉花防御酶活性的影响 [J]. 新疆农业科学, 2015, 52 (10): 1866–1871]
- Cong CL, Zhi JR, Liao QR, *et al.* Effects of thrips feeding, mechanical wounding, and exogenous methyl salicylate and jasmonic acid on defense enzyme activities in kidney bean leaf [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2014, 57 (5): 564–571. [丛春蕾, 邹军锐, 廖启荣, 等. 蓟马取食、机械损伤以及外源水杨酸甲酯和茉莉酸对菜豆叶片防御酶活性的影响 [J]. 昆虫学报, 2014, 57 (5): 564–571]
- Geng SB, Chen HJ, Zhang JY, *et al.* The observation of selectivity of the two-spotted mite, *Tetranychus urticae* on several plants [J]. *Journal of Fruit Science*, 2014, 5: 917–921. [耿书宝, 陈汉杰, 张金勇, 等. 二斑叶螨对几种植物的选择性观察 [J]. 果树学报, 2014, 5: 917–921]
- Han ZM, Xu MM, Wang YH, *et al.* Effect of drought stress on leaf protective enzyme activities, contents of osmoregulation substances and quality of *Saposhnikovia divaricate* [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2016, 37 (6): 91–97. [韩忠明, 胥苗苗, 王云贺, 等. 干旱胁迫对防风叶片保护酶活性、渗透调节物质含量及药材品质的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37 (6): 91–97]
- Hancock DJ. Hydrogen peroxide signaling [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2002, 5 (5): 388–395.
- Hong X. Strawberry in the shed to prevent red spiders [J]. *Northern Fruit Tree*, 2012, 2: 9. [洪雪. 棚室草莓严防红蜘蛛 [J]. 北方果树, 2012, 2: 9]
- Jiang L, Yu YP, Liu KC, *et al.* Effect of PEG-6000 on physiological characteristics of *Michelia alba* seedlings [J]. *Northern Horticulture*, 2012, 24: 85–87. [蒋林, 於艳萍, 刘昆成, 等. 聚乙二醇-6000 对山白兰苗木生理特性的影响 [J]. 北方园艺, 2012, 24: 85–87]
- Jiang ZQ, Li CZ, Yu Le, *et al.* Effects of drought stress on MDA content and 3 antioxidant enzymes activities in leaves of *Carya illinoensis* [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2019, 35 (1): 12–15. [姜宗庆, 李成忠, 余乐, 等. 干旱胁迫对薄壳山核桃叶片丙二醛含量和 3 种抗氧化酶活性的影响 [J]. 上海农业学报, 2019, 35 (1): 12–15]
- Jing DW. Response of photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in poplar seedlings to drought stress [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28 (3): 532–539. [井大炜. 杨树苗木叶片光合特性和抗氧化酶对干旱胁迫的响应 [J]. 核农学报, 2014, 28 (3): 532–539]
- Jones DL, Blancaflor EB, Kochian LV, *et al.* Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots [J]. *Plant Cell & Environment*, 2006, 29: 1309–1318.
- Li HS. Experimental Principles and Techniques of Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [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 LM, Men XY, Ye BH, *et al.* Defense enzyme activity of winter jujube at different stages induced by the damage of *Apolygus lucorum* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (1): 191–198. [李林懋, 门兴元, 叶保华, 等. 不同生长期冬枣受绿盲蝽危害后应激防御酶活性的变化 [J]. 中国农业科学, 2014, 47 (1): 191–198]
- Li XG, Liu HX, Huang J. Molecular mechanisms of insect pests – induced plant defense [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (4): 893–900. [李新岗, 刘惠霞, 黄建. 虫害诱导植物防御的分子机理研究进展 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (4): 893–900]
- Liang W, Cheng J, Shi GL, *et al.* Physiological response of strawberry to *Tetranychus cinnabarinus* [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2010, 37 (Suppl.): 2112. [梁为, 成军, 师光禄, 等. 草莓对朱砂叶螨危害的生理响应 [J]. 园艺学报, 2010, 37 (增刊): 2112]
- Liu XH, Li ZX, Yin SY, *et al.* The development and fecundity of *Tetranychus urticae* Koch (Acari-formes: Tetranychidae) on four different plants and their relationship with the chemical components of plant leaves [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2007, 50 (11): 1135–1139. [刘学辉, 李中新, 尹淑艳, 等. 四种树种上二斑叶螨生长发育及繁殖差异及其与植物叶片化学组成的关系 [J]. 昆虫学报, 2007, 50 (11): 1135–1139]

- Mao H, Chen H, Liu XX, *et al.* Effects of *Apolygus lucorum* feeding and mechanical damage on defense enzyme activities in cotton leaves [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (5): 1431–1436. [毛红, 陈瀚, 刘小侠, 等. 绿盲蝽取食与机械损伤对棉花叶片内防御性酶活性的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (5): 1431–1436]
- Mittapalli O, Neal JJ, Shukle RH. Antioxidant defense response in a galling insect [J]. *Plant Cell*, 2007, 104: 1889–1894.
- Patima WH, Chen LH, Cui YH, *et al.* Effects of *Tetranychus urticae* damage on stress defense – enzymes activity of cotton [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2016, 38 (6): 1185–1191. [帕提玛·乌木尔汗, 陈丽慧, 崔燕华, 等. 二斑叶螨危害对棉花应激防御酶活性的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2016, 38 (6): 1185–1191]
- Ramputh AI, Arnason JT, Cass L, *et al.* Reduced herbivory of the European corn borer (*Ostrinia nubilalis*) on corn transformed with germin, a wheat oxalate oxidase gene [J]. *Plant Science*, 2002, 162: 431–440.
- Saitanis CJ, Karandinos MG. Effect of ozone on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) varieties [J]. *Journal of Agroomy and Crop*, 2002, 188 (1): 51–58.
- Sang ZY, Ma LY, Chen FJ. Growth and physiological characteristics of *Magnolia wufengensis* seedlings under drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali – Occidentalia Sinica*, 2011, 31 (1): 109–115. [桑子阳, 马履一, 陈发菊. 干旱胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2011, 31 (1): 109–115]
- Shen DR, He C, Xu HQ, *et al.* Effects of *Megalurothrips distalis* feeding stress on the activities of defense enzymes and MDA content in leguminous plants [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2017, 44 (4): 716–719. [沈登荣, 何超, 徐慧琼, 等. 端大蓟马取食对豆科植物防御酶活性及丙二醛含量的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44 (4): 716–719]
- Tan YA, Bai LX, Xiao LB, *et al.* Herbivore stress by *Lygus lucorum* inducing protective enzyme activity and MDA content on different cotton varieties [J]. *Cotton Science*, 2010, 22 (5): 479–485. [谭永安, 柏立新, 肖留斌, 等. 绿盲蝽危害对棉花防御性酶活性及丙二醛含量的诱导 [J]. 棉花学报, 2010, 22 (5): 479–485]
- Tewari RK, Kumar P, Sharma PN, *et al.* Modulation of oxidative stress responsive enzymes by excess cobalt [J]. *Plant Science*, 2002, 162 (3): 381–388.
- Tscharntke T, Thiessen S, Dolch R, *et al.* Herbivory, induced resistance, and interplant signal transfer in *Alnus glutinosa* [J]. *Biochemical Systematics & Ecology*, 2001, 29: 1025–1047.
- Wen J, Zhi JR, Lv ZY, *et al.* 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): 172–181. [温娟, 郅军锐, 吕召云, 等. 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): 172–181]
- Xiao LT, Wang SG. Experimental Technology of Plant Physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005. [萧浪涛, 王三根. 植物生理学实验技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005]
- Xu K. The main pest and comprehensive management of facility strawberry [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019, 58 (1): 53–55. [徐可. 设施草莓主要病虫害及综合治理 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58 (1): 53–55]
- Yamamoto Y. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots [J]. *Plant Physiology*, 2001, 125 (1): 199–208.
- Yang JS, Shu ZL, Yang LP, *et al.* Occurrence and control strategies of strawberry red spider [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 1990, 6: 45–47. [杨金生, 束兆林, 杨丽萍, 等. 草莓红蜘蛛的发生与防治对策 [J]. 江苏农业科学, 1990, 6: 45–47]
- Yang ZD, Zhu L, Zhao BG. Chemical ecology of insect in plant protection [J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2003, 27 (5): 93–98. [杨振德, 朱麟, 赵博光. 昆虫化学生态学与植物保护 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2003, 27 (5): 93–98]
- Youn HD, Kim EJ, Roe JH, *et al.* A novel nickel – containing superoxide dismutase from *Streptomyces* spp. [J]. *Biochemical Journal*, 1996, 318 (3): 889–896.
- Zhang TW, Shen HM, Qian XJ, *et al.* Effects of *Tetranychus urticae* feeding on the chlorophyll content and two kinds of protective enzyme of white clover [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 2: 395–400. [张廷伟, 沈慧敏, 钱秀娟, 等. 二斑叶螨刺吸胁迫对白三叶叶绿素含量和两种保护酶的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2013, 2: 395–400]
- Zhu L, Kang ZJ, Wei SJ, *et al.* Investigation of occurrence of *Tetranychus urticae* Koch in different areas of Beijing in 2012 [J]. *Northern Horticulture*, 2013, 4: 120–123. [朱亮, 康总江, 魏书军, 等. 2012年北京各区县不同寄主上二斑叶螨发生调查 [J]. 北方园艺, 2013, 4: 120–123]