



外源茉莉酸甲酯诱导的棉花防御对棉蚜及斜纹夜蛾发育的影响^{*}

马广民^{1**} 刘守柱¹ 杜学林¹ 戴明勋¹ 袁凤英¹ 门兴元^{2****}

(1. 聊城大学农学院, 聊城 252000; 2. 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100)

摘 要 【目的】明确外源茉莉酸甲酯 (Methyl jasmonate, MeJA) 诱导的棉花防御对棉蚜 *Aphis gossypii* 及斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 发育的影响。【方法】采用 4 种浓度 (0.5、1.0、2.0、4.0 mmol·L⁻¹) 的 MeJA 处理 4 片真叶期的棉苗, 在处理后的 1、3、5、7、15 d 测定棉叶中过氧化物酶 (POD)、多酚氧化酶 (PPO) 的活性及总酚含量; 选择 2 种浓度 (1.0 mmol·L⁻¹、2.0 mmol·L⁻¹) 的 MeJA 处理棉苗, 在处理后的棉苗叶片上接入棉蚜或斜纹夜蛾幼虫, 记录并统计棉蚜若蚜的发育历期及单雌产蚜量、斜纹夜蛾幼虫的发育历期及幼虫重量的变化。【结果】不同浓度的 MeJA 处理后, 棉苗 POD、PPO 活性及总酚含量均显著提高。0.5、1.0、2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 5 d 后, 棉苗 POD 活性达到最高水平, 分别为对照的 4.11 倍、5.71 倍、4.74 倍。4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗 15 d 后, 棉苗 POD 活性均显著高于对照 ($P<0.05$); 4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗 3 d 后, 棉苗 PPO 活性达到最高水平, 分别为对照的 1.7 倍、2.1 倍、2.16 倍、2.71 倍。2.0、4.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 15 d 后, 棉苗 PPO 活性均显著高于对照 ($P<0.05$); 0.5、1.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉花 15 d 后, 棉苗总酚含量达到最高水平, 分别为对照的 1.73 倍、1.58 倍。2.0、4.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 7 d 后, 棉苗总酚含量达到最高水平, 分别为对照的 1.6 倍、1.7 倍; 1.0、2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗后, 棉蚜若蚜的发育历期均为对照的 1.07 倍; 棉蚜单雌产蚜量比对照减少 20%、39.4%。斜纹夜蛾幼虫的重量比对照减少 12.7%、34.2%; 幼虫的发育历期为对照的 1.22 倍、1.25 倍。【结论】4 种浓度的外源 MeJA 处理均可显著提高棉花主要防御酶的活性及总酚含量, 外源 MeJA 诱导的棉花防御对棉蚜、斜纹夜蛾的发育具有显著的抑制作用。

关键词 茉莉酸甲酯, 棉花, 诱导防御, 棉蚜, 斜纹夜蛾

Effect of exogenous MeJA treatment of cotton on the development of *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) and *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)

MA Guang-Min^{1**} LIU Shou-Zhu¹ DU Xue-Lin¹ DAI Ming-Xun¹
YUAN Feng-Ying¹ MEN Xing-Yuan^{2****}

(1. College of Agriculture, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China;

2. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China)

Abstract [Objectives] To investigate the effect of exogenous MeJA treatment of cotton on the development of *Aphis gossypii* and *Spodoptera litura*. [Methods] The activity of defensive enzymes (POD and PPO) and the total phenol content of cotton seedling leaves treated with four concentrations of exogenous MeJA (0.5, 1.0, 2.0, and 4.0 mmol·L⁻¹) were determined 1, 3, 5, 7, and 15 d post treatment. *A. gossypii* or *S. litura* larvae were placed on cotton seedling leaves treated with one of two

*资助项目 Supported projects: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0201900); 山东省农科院创新工程 (CXGC2016A09)

**第一作者 First author, E-mail: maguangmin@luc.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: menxy2000@hotmail.com

收稿日期 Received: 2017-06-26, 接受日期 Accepted: 2018-01-28

concentrations ($1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) of exogenous MeJA and the developmental duration of nymphs, female fecundity, larval weight and the overall developmental duration of the two groups of larvae were measured. **[Results]** Defense enzyme activity and total phenol content of cotton seedling leaves treated with different concentrations of exogenous MeJA increased markedly. POD activity in cotton seedling leaves treated with the three concentrations of exogenous MeJA (0.5 , 1.0 , and $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) peaked 5 d post treatment at 4.11, 5.71, and 4.74 times that of control, respectively. POD Activity in cotton seedling leaves treated with four concentrations of exogenous MeJA was significantly higher than the control ($P < 0.05$) 15 d post treatment. PPO activity in cotton seedling leaves treated with four concentrations of exogenous MeJA peaked 3 d post treatment at 1.2, 2.1, 2.16, and 2.71 times that of control, respectively. PPO activity in cotton seedling leaves treated with 2.0 and $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous MeJA was significantly higher than the control ($P < 0.05$) after 15 d post treatment. The total phenol content of cotton seedling leaves treated with 0.5 and $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous MeJA peaked 15 d post treatment at 1.73, and 1.58 times that of control, respectively. The total phenol content of cotton seedling leaves treated with 2.0 and $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ exogenous MeJA peaked 7 d post treatment at 1.6 and 1.7 times that of control, respectively. The developmental duration of *A. gossypii* nymphs fed on cotton treated with 1.0 and $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA were 1.07 higher than that of the control and female fecundity was 20% and 39.4% lower than that of the control, respectively. The weight of *S. litura* larvae fed on cotton treated with 1.0 and $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA was 12.7% and 34.2% less than the control, respectively and the developmental duration of *S. litura* larvae was 1.22 and 1.25 times that of control, respectively. **[Conclusion]** Treatment of cotton seedling leaves with four concentrations of exogenous MeJA both significantly increased defensive enzyme activity and the total phenol content of the leaves, and also significantly inhibited the development of *A. gossypii* and *S. litura* larvae feeding on these leaves.

Key words methyl jasmonate, cotton, inducible defence, *Aphis gossypii*, *Spodoptera litura*

茉莉酸 (Jasmonic acid, JA) 及其衍生物茉莉酸甲酯 (Methyl Jasmonate, MeJA) 作为植物中的内源激素,不仅在植物生长发育中起着重要调节作用,而且也是植物诱导防御中的重要信号物质,其参与了植物诱导防御的直接防御与间接防御的过程 (Bari and Jones, 2009)。当植物受到外界不良环境因素 (病原物、害虫、有毒物质) 侵害时,植物中 JA 含量水平显著升高,进而启动植物系统性防御。相关研究表明,采用外源 MeJA 处理可以诱导不同植物抗虫性的提高。桂连友等 (2005) 采用外源 MeJA 喷雾法和暴露法处理茶树 *Camellia sinensis*, 茶尺蠖 *Ectropis obliqua* 取食处理的茶树叶片后体重增加量分别比对照低 17.21%、20.05%。舞毒蛾 *Lymantria dispar* 幼虫取食外源 MeJA 处理的杨树 *Populus deltoids* 幼苗的叶片 8 d 后,舞毒蛾幼虫的体重显著低于对照 (Hu et al., 2006)。褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 取食外源 MeJA 处理的水稻 *Oryza sativa* 后卵的孵化率显著降低 (Senthil-Nathan et al., 2009)。吴莹莹等 (2012) 用外源 MeJA 处理不同品种的水稻,提高了水稻对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 生物型的抗性。Sripontan

和 Hwang (2016) 研究报告,斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 幼虫取食外源 MeJA 处理的番茄 *Lycopersicon esculentum* 叶片后其相对生长率显著降低。

棉花是我国的主要经济作物之一,在我国的华北、华中、新疆等地区大面积种植。棉蚜 *Aphis gossypii*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 均为棉花上的主要害虫。目前对棉蚜的防治仍以化学防治为主 (崔丽等, 2016)。尽管转基因抗虫棉的种植显著减轻了以棉铃虫为代表的鳞翅目害虫的为害,但由于抗虫棉的长期大面积种植导致了抗虫性的下降 (孙璇等, 2016), 使得棉铃虫、斜纹夜蛾等害虫仍会在局部地区严重发生。本试验通过研究不同浓度外源 MeJA 诱导棉花主要防御酶活性及总酚含量的变化, 探讨不同浓度外源 MeJA 处理棉花后棉蚜和斜纹夜蛾发育的影响, 为制定棉花有害生物的防控措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

棉花为中棉 35, 浸种 1 d 后, 种子装有营养

土的塑料花盆中, 放置于人工气候室内, 温度 (26 ± 1), 相对湿度 50%-60%, 光周期为 16L: 8D。当棉花第 4 片真叶完全展开时进行试验。

棉蚜、斜纹夜蛾均采自聊城大学试验田。棉蚜用棉苗饲养, 斜纹夜蛾采用人工饲料饲养。养虫人工气候室温度 25-28, 相对湿度 50%-60%, 光周期为 16L: 8D。

1.2 方法

1.2.1 棉苗处理 把 MeJA (sigma)溶于无水乙醇兑水稀释成 0.5、1.0、2.0、4.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 4 个浓度。以清水加对应溶解 MeJA 乙醇量溶液处理为对照。共处理 30 株棉苗, 每处理 6 株。每株棉苗喷施 10 mL MeJA 溶液, 为防止 MeJA 的挥发, 用塑料罩套住处理棉株, 6 h 后去除。在喷施后的 1、3、5、7、15 d 摘取棉苗第 3 片真叶, 测定叶片中的各防御酶活性及总酚含量。

1.2.2 PPO 酶活测定 参照吕敏等 (2012) 方法。取 0.1 g 棉叶在液氮中研磨成粉加入到 5 mL 离心管中, 再加入 0.1 g 聚乙烯吡咯烷酮和 4 mL 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH 7.0 磷酸缓冲液, 4, 12 000 g 离心 20 min, 上清液用于活性测定。反应体系为: 反应缓冲液 600 μL , 底物 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 邻苯二酚 400 μL , 150 μL 酶液。于 420 nm 波长处, 用时间驱动程序自动监测 2 min 内的变化, 并记录反应速度 ($\text{OD}_{420} / \text{min}$)。

1.2.3 POD 酶活测定 参照吕敏等 (2012) 方法。取 0.1 g 棉叶在液氮中研磨成粉加入到 5 mL 离心管中, 再加入 0.1 g 聚乙烯吡咯烷酮和 4 mL 0.1 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH 7.0 磷酸缓冲液, 4, 12 000 g 离心 20 min, 上清液用于活性测定。反应体系为: 1 345 μL pH 7.5 缓冲液, 20 μL 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 愈创木酚, 20 μL 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 双氧水, 25 μL 酶液。于 470 nm 波长处, 用时间驱动程序自动监测 2 min 内的变化, 并记录反应速度 ($\text{OD}_{470} / \text{min}$)。

1.2.4 蛋白含量测定 参照 Bradford (1976) 考马斯亮兰 G-250 方法。以牛血清白蛋白为标准蛋白制作标准曲线。

1.2.5 总酚含量测定 参照 Folin 和 Denis

(1915) 方法。取鲜叶 0.1 g 于研钵中, 加入 3 mL 95%乙醇研磨成匀浆, 加入 5 mL 95%乙醇润洗, 用 95%乙醇定溶于 10 mL, 2 500 r/min 离心 5 min, 上清液即为提取液, 取 2 mL 提取液于 10 mL 离心管内, 加入 2 mL 福林试剂, 摇匀, 3 min 后加入 10% Na_2CO_3 2 mL。振荡。静置 1 h 后 700 nm 处比色。以儿茶酚作标准曲线。

1.2.6 棉苗处理及对棉蚜、斜纹夜蛾发育的影响

把 MeJA 溶于无水乙醇兑水稀释成 1.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 2 个浓度。每株棉苗喷施 10 mL MeJA 溶液。置于塑料罩内 6 h, 待叶片表面晾干后, 每株棉苗接 3 头待产成蚜, 当成蚜产出 3 头小若蚜时, 清除成蚜。4 d 后每 2 h 观察 1 次, 记录小若蚜发育成成蚜首次产蚜的时间。每株保留 2 头成蚜, 每天记录产蚜量, 记录后清除若蚜。以清水乙醇溶液处理为对照, 每个处理重复 10 次。

1.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 MeJA 处理棉苗后, 置于塑料罩内 6 h, 待叶片表面晾干后, 每株棉苗接入 2 头斜纹夜蛾 1 龄幼虫, 接虫 7 d 后称量记录幼虫体重, 幼虫化蛹时记录个处理化蛹时间。以清水乙醇溶液处理棉苗为对照, 每个处理重复 10 次。

1.3 数据分析

绘图采用 Excel 软件, 数据处理采用 SPSS 19.0 软件, 差异显著性分析采用 Tukey HSD 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 外源 MeJA 处理对棉苗 POD 活性的影响

实验数据显示, 4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗后均可显著提高棉苗 POD 活性水平 ($P < 0.05$) (图 1)。0.5、1.0、2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 处理棉苗 5 d 后, 棉苗 POD 活性达到最高水平, 分别为对照的 4.11 倍、5.71 倍、4.74 倍; 4 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 处理棉苗 3 d 后, 棉苗 POD 活性达到最高水平, 为对照的 4.28 倍。4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗 15 d 后, 棉苗 POD 活性均显著高于对照 ($P < 0.05$) (图 1)。

2.2 外源 MeJA 处理对棉苗 PPO 活性的影响

4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗后均可显著提高棉苗 PPO 活性水平 ($P<0.05$) (图 2)。4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗 3 d 后, 棉苗 PPO 活性达到最高水平, 分别为对照的 1.7 倍、2.1 倍、2.16

倍、2.71 倍。0.5 mmol·L⁻¹、1.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 7 d、15 d 后, 棉苗 PPO 活性与对照差异不显著 ($P>0.05$)。2.0 mmol·L⁻¹、4.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 7 d、15 d 后, 棉苗 PPO 活性显著高于对照 ($P<0.05$)。

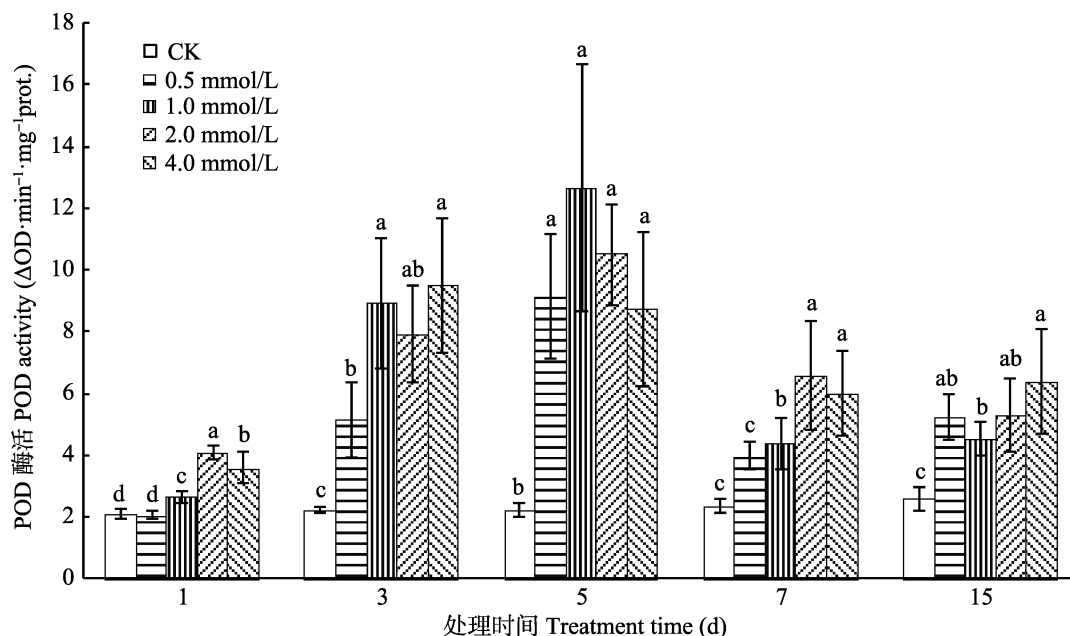


图 1 外源 MeJA 处理对棉苗 POD 活性的影响

Fig. 1 The POD activity of cotton seedling with exogenous MeJA treatment

数值均为均值±标准误。柱上标有不同字母表示不同处理在 $P=0.05$ 水平的差异显著性。下图同。

Data are means±SD. Histograms with different letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

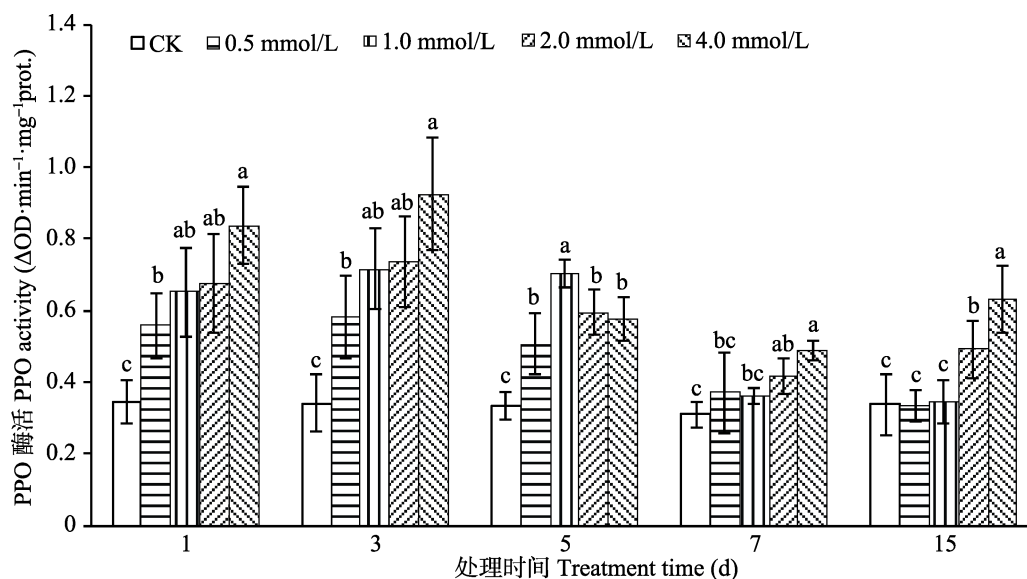


图 2 外源 MeJA 处理对棉苗 PPO 活性的影响

Fig. 2 The PPO activity of cotton seedling with exogenous MeJA treatment

2.3 外源 MeJA 处理对棉苗总酚含量的影响

4 种不同浓度 MeJA 处理棉苗后均可显著提高棉苗总酚含量 ($P<0.05$) (图 3)。0.5 mmol·L⁻¹、1.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 15 d 后, 棉苗总酚含量达到最高水平, 分别为对照的 1.73 倍、1.58 倍; 2.0 mmol·L⁻¹、4.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗 7 d 后, 棉苗总酚含量达到最高水平, 为对照的

1.6 倍、1.7 倍。

2.4 外源 MeJA 处理棉苗对棉蚜发育的影响

1.0 mmol·L⁻¹、2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗后, 棉蚜若蚜的发育历期显著长于对照 ($P<0.05$) (图 4), 均为对照的 1.07 倍。2 处理浓度对棉蚜若蚜的发育历期差异不显著 ($P>0.05$)。

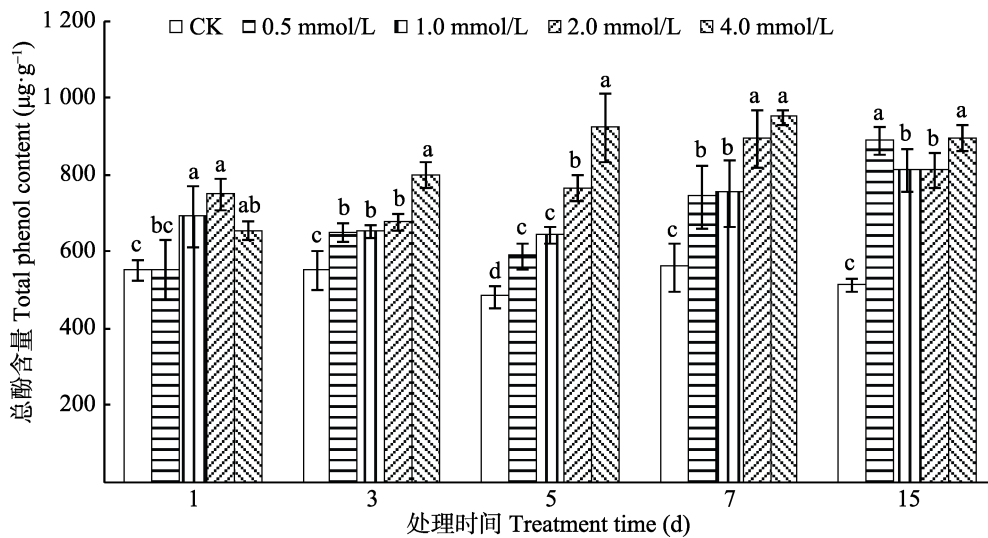


图 3 外源 MeJA 处理对棉苗总酚含量的影响

Fig. 3 The total phenol content of cotton seedling with exogenous MeJA treatment

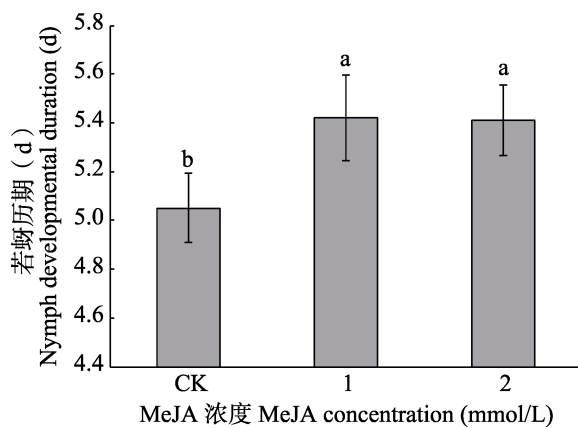


图 4 外源 MeJA 处理对棉蚜若蚜发育历期的影响

Fig. 4 The developmental duration of *Aphis gossypii* nymph fed on cotton seedling treated with MeJA

2 种浓度 MeJA 处理棉苗后, 棉蚜单雌产蚜量均显著少于对照 ($P<0.05$) (图 5), 分别比对照减少 20%、39.4%。2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉蚜单雌产蚜量显著少于 1.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理 ($P<0.05$)。

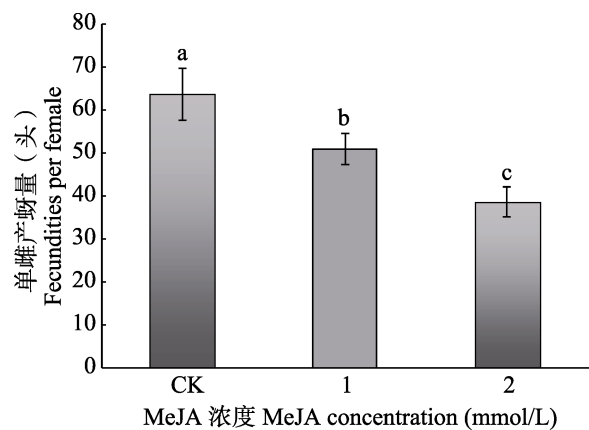


图 5 外源 MeJA 处理对棉蚜单雌产蚜量的影响

Fig. 5 The fecundities per female of *Aphis gossypii* nymph fed on cotton seedling treated with MeJA

2.5 外源 MeJA 处理棉苗对斜纹夜蛾发育的影响

1.0 mmol·L⁻¹、2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理棉苗后, 斜纹夜蛾幼虫的重量显著低于对照 ($P<0.05$) (图 6), 分别比对照减少 12.7%、34.2%。

2.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理斜纹夜蛾幼虫体重显著低于 1.0 mmol·L⁻¹ MeJA 处理 ($P<0.05$)。

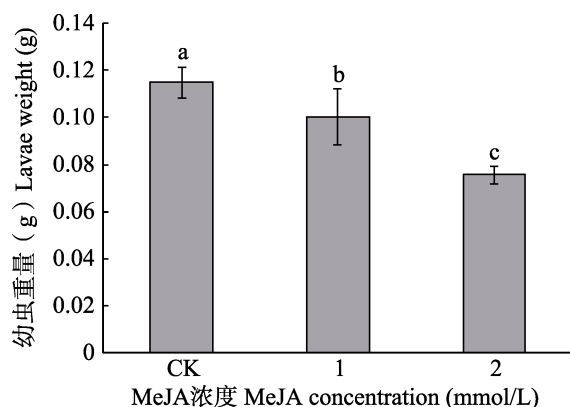


图6 外源 MeJA 处理对斜纹夜蛾幼虫体重的影响
Fig. 6 The larval weight of *Spodoptera litura* fed on cotton seedling treated with MeJA

2 种浓度 MeJA 处理棉苗后, 斜纹夜蛾幼虫的发育历期均显著长于对照 ($P<0.05$) (图 7), 分别为对照的 1.22 倍、1.25 倍。2 种浓度处理之间斜纹夜蛾幼虫的发育历期差异不显著 ($P>0.05$)。

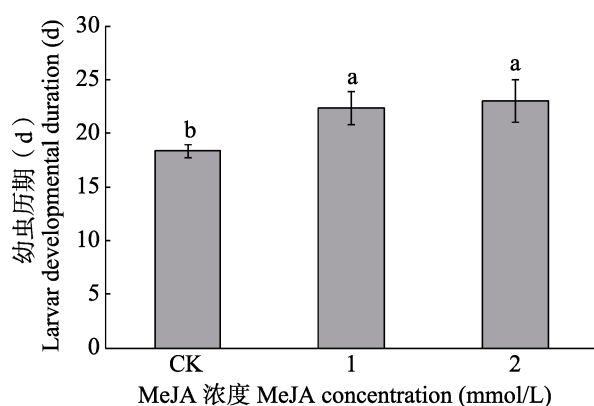


图7 外源 MeJA 处理对斜纹夜蛾幼虫历期的影响
Fig. 7 The developmental duration of *Spodoptera litura* fed on cotton seedling treated with MeJA

3 讨论

本研究显示, 外源 MeJA 可显著地诱导棉苗叶片 PPO、POD 活性的上升及总酚含量的增加。PPO 和 POD 是植物组织中 2 种主要的防御酶类。PPO 在植物受到胁迫时与底物生成醌, 醌类物质能共价修饰昆虫口腔和肠内的消化蛋白的自由

氨基和巯基, 阻止了烷基氨基酸的有效吸收, 减少了营养蛋白的含量 (Mayer, 1987)。POD 具有代谢 H₂O₂ 的功能, 还原酚类底物, 与木质素及木栓质的形成有关 (Graham and Graham, 1991)。2 种酶在植物中均参与了植物抗虫、抗病、抗逆境的过程。酚类物质是植物中主要的次生代谢产物, 酚类物质会与昆虫消化酶类结合降低其活性, 影响昆虫对食物的消化与吸收, 在植物的抗虫性上发挥着重要的作用 (Dixit *et al.*, 2017)。前人的研究表明, MeJA 或 JA 诱导的植物抗虫性的提高均与植物防御酶的活性及次生代谢产物含量增加有关。Sripontan 和 Hwang (2016) 研究报道, 外源 MeJA 处理番茄后, 番茄叶片中 PPO 的活性显著上升, 斜纹夜蛾幼虫取食 MeJA 处理的番茄叶片后其相对生长率显著降低。田旭涛等 (2013) 研究显示, 施用外源 JA 后菜豆 POD、PPO 活性显著升高, 显著降低了美洲斑潜蝇 *Liriomyza sativae* 成虫对菜豆 *Phaseolus vulgaris* 的取食和产卵选择性, 美洲斑潜蝇幼虫发育历期延长、蛹重减轻。吴莹莹等 (2012) 用外源 MeJA 处理不同品种的水稻, 水稻的总酚含量显著升高, 提高了对褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 生物型 II 的抗性。宫玉艳等 (2010a) 用外源 JA 处理枸杞 *Lycium barbarum* 苗木后, 枸杞叶片中单宁酸含量显著增加。在外源 JA 处理的枸杞上, 枸杞蚜 *Aphis sp.* 若虫的发育历期延长、体重下降, 成虫的繁殖量降低 (宫玉艳等, 2010b)。本研究显示 MeJA 处理的棉苗对棉蚜及斜纹夜蛾幼虫的生长发育均具有显著地抑制作用, 这也表明了 MeJA 诱导的防御酶活性及次生代谢产物含量的增加在提高棉花抗虫性上发挥着重要作用。

相关研究表明外源 MeJA 或 JA 对植物的诱导效应存在浓度的依赖性。不同浓度的 MeJA 或 JA 在植物上表现出不同的诱导效应。宫玉艳等 (2010a) 研究报道 0.01 mmol·L⁻¹ JA 对枸杞幼苗的诱导效果优于 0.01 mmol·L⁻¹ 及 0.1 mmol·L⁻¹ 处理。王杰等 (2015) 研究认为 1.0 mmol·L⁻¹ JA 在短期内 (1-10 d) 对长白落叶松 *Larix olgensis* 幼苗的诱导效应强于 0.01 mmol·L⁻¹ 处理。李顺

欣等 (2016) 研究显示 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ JA 处理的菜豆对西花蓟马 *Frankliniella occidentalis* 的驱避作用强于 0.1 、 0.01 、 $0.001 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理。另有研究表明, 不同浓度外源 JA 对同种作物不同品种的诱导效应也存在差异。 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ JA 对皖棉 28F1 幼苗的诱导效果最佳, 优于 $0.01 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理。而 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ JA 对 6 叶期的皖棉 16 幼苗的诱导效果最佳, 优于 $0.1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 (杨世勇等, 2013a, 2013b)。本研究显示, $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $4.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 处理对中棉 35 棉苗防御酶活性及总酚含量的诱导效果较 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 更为显著。从诱导抗虫性的表现来看, $2.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 处理对棉蚜产蚜量及斜纹夜蛾体重的抑制作用显著强于 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理。

综上可知, 外源 MeJA/JA 诱导的植物防御酶活性及次生代谢产物含量的增加提高了植物的抗虫性。但不同浓度的 MeJA/JA 对不同植物及同种植物的不同品种、不同发育期的诱导作用存在差异。因此在具体应用时 MeJA/JA 浓度的选择尤为重要。

参考文献 (References)

- Bari R, Jones JDG, 2009. Role of plant hormones in plant defence responses. *Plant Molecular Biology*, 69(4): 473–488.
- Bradford MM, 1976. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1): 248–254.
- Cui L, Zhang J, Qi HL, Wang QQ, Lu YH, Rui CH, 2016. Monitoring and mechanisms of imidacloprid resistance in *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) in the main cotton production areas of China. *Acta Entomologica Sinica*, 59(11): 1246–1253. [崔丽, 张靖, 齐浩亮, 王芹芹, 陆宴辉, 芮昌辉, 2016. 我国棉花主产区棉蚜对吡虫啉的抗性监测及抗性机理. 昆虫学报, 59(11): 1246–1253.]
- Dixit G, Praveen A, Tripathi T, Yadav VK, Verma PC, 2017. Herbivore-responsive cotton phenolics and their impact on insect performance and biochemistry. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 20: 341–351.
- Folin O, Denis W, 1915. A colorimetric method for the determination of phenols (and phenol derivatives) in urine. *The Journal of Biological Chemistry*, 22(2): 305–308.
- Gong YY, Duan LQ, Wang AQ, 2010a. Induced effects of jasmonic acid on the contents of biochemical substances and enzyme activity in wolfberry leaves. *Plant Protection*, 36(2): 61–65. [宫玉艳, 段立清, 王爱清, 2010. 茉莉酸诱导对枸杞叶生化物质及酶活性的影响. 植物保护, 36(2): 61–65.]
- Gong YY, Duan LQ, Wang AQ, Cui RJ, Qian YS, 2010b. Effects of exogenous jasmonic acid-induced resistance of wolfberry on the development and fecundity of wolfberry aphid *Aphis* sp. *Acta Entomologica Sinica*, 53(6): 670–674. [宫玉艳, 段立清, 王爱清, 崔瑞娟, 钱远松, 2010. 外源茉莉酸诱导枸杞对枸杞蚜生长发育和繁殖的影响. 昆虫学报, 53(6): 670–674.]
- Graham MY, Graham TL, 1991. Rapid accumulation of anionic peroxidases and phenolic polymers in soybean cotyledon tissues following treatment with *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycines* wall glucan. *Plant Physiology*, 97(4): 1445–1455.
- Gui LY, Chen ZM, Liu SS, 2005. Effect of exogenous MJA treatment of tea plants on the growth of geometrid larvae. *Scientia Agricultura Sinica*, 38(2): 302–307. [桂连友, 陈宗懋, 刘树生, 2005. 外源茉莉酸甲酯处理茶树对茶尺蠖幼虫生长的影响. 中国农业科学, 38(2): 302–307.]
- Hu ZH, Zhao L, Yang D, Shen YB, Shen FY, 2006. Influences of the *Populus deltoids* seedlings treated with exogenous methyl jasmonate on the growth and development of *Lymantria dispar* larvae. *Journal of Forestry Research*, 17(4): 277–280.
- Li SX, Zhi JR, Zeng G, Wen J, Lv ZY, 2016. Behavioral responses of *Frankliniella occidentalis* and *Orius similis* to kidney bean volatiles induced by exogenous jasmonic acid. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 53(5): 1065–1076. [李顺欣, 鄧军锐, 曾广, 温娟, 吕召云, 2016. 外源茉莉酸诱导菜豆对西花蓟马和南方小花蝽的行为反应. 应用昆虫学报, 53(5): 1065–1076.]
- Lv M, Sun HH, Gao XW, 2012. The study on the activities of polyphenol oxidase and peroxidase in cotton and corn induced by insects. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 28(6): 211–216. [吕敏, 孙姗姗, 高希武, 2012. 昆虫取食诱导棉花和玉米多酚氧化酶和过氧化物酶的活性研究. 中国农学通报, 28(6): 211–216.]
- Mayer AM, 1987. Polyphenol oxidase in plants-recent progress. *Phytochemistry*, 26(1): 11–20.
- Senthil-Nathan S, Kalaivani K, Choi MY, Paik CH, 2009. Effects of

- jasmonic acid-induced resistance in rice on the plant brownhopper, *Nilaparvata lugens* Stål (Homoptera: Delphacidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 95(2): 77–84.
- Sripontan Y, Hwang SY, 2016. Jasmonate-induced defense in tomato and cabbage deterred *Spodoptera litura* (Noctuidae) growth. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 19(4): 1125–1129.
- Sun X, Ma YB, Zhang SW, Duan C, Wang XS, Li YE, 2016. Research progress on the gene types and principles of the transgenic insect resistant cotton. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 44(1): 115–118. [孙璇, 马燕斌, 张树伟, 段超, 王新胜, 李燕娥, 2016. 转基因抗虫棉花基因类型及原理研究进展. *山西农业科学*, 44(1): 115–118.]
- Tian XT, Zhang J, Li D, Cheng WN, 2013. Effects of exogenous jasmonic acid on resistance of kidney bean to *Liriomyza sativae*. *Acta Phytophylacica Sinica*, 40(4): 345–349. [田旭涛, 张箭, 李丹, 成卫宁, 2013. 茉莉酸处理菜豆对美洲斑潜蝇抗性的影响. *植物保护学报*, 40(4): 345–349.]
- Wang J, Meng ZJ, Wang Q, Yan SC, Zhang XJ, 2015. Effects of exogenous jasmonic acid-based applications on defense protein activity in the needles of *Larix olgensis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 43(5): 84–89. [王杰, 孟昭军, 王琪, 严善春, 张晓娇, 2015. 外源茉莉酸诱导方式对长白落叶松针叶内防御蛋白活力的影响. *东北林业大学学报*, 43(5): 84–89.]
- Wu YY, Wu BQ, Chen Y, Huang SS, Huang FK, 2012. Relations between resistance of rice induced by methyl jasmonate, brown plant hopper (*Nilaparvata lugens*) and total phenol content. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 25(2): 462–466. [吴莹莹, 吴碧球, 陈燕, 黄所生, 黄凤宽, 2012. 茉莉酸甲酯诱导水稻对褐飞虱抗性与植株总酚含量的关系研究. *西南农业学报*, 25(2): 462–466.]
- Yang SY, Song FF, Xie JC, 2013a. Resistance of jasmonic acid-mediated cotton seedlings against the relative growth rate of *Helicoverpa armigera*. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 41(5): 66–74. [杨世勇, 宋芬芳, 谢建春, 2013. 茉莉酸诱导棉花幼苗抗虫性对棉铃虫相对生长率的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 41(5): 66–74.]
- Yang SY, Wang MM, Xie JC, 2013b. Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants. *Acta Ecologica Sinica*, 33(5): 1615–1625. [杨世勇, 王蒙蒙, 谢建春, 2013. 茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应. *生态学报*, 33(5): 1615–1625.]