

外源茉莉酸甲酯对干旱胁迫下甘蓝生理特性及 *BoPRX* 基因表达的影响

李美慧, 周甜甜, 宋泽政, 闫 帅, 孔 依, 王玉书

(齐齐哈尔大学生命科学与农林学院 黑龙江齐齐哈尔 161006)

摘 要: 为探究茉莉酸甲酯(MeJA)对干旱胁迫下甘蓝幼苗的缓解效应和调节机制,以结球甘蓝秋甜二号幼苗为材料,设置 CK(正常生长管理)、T1(15% PEG8000 干旱胁迫)、T2(25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA 喷施后进行 15% PEG8000 干旱胁迫)3 种处理,测定各处理 0、3、6、12、24 h 的叶绿素含量、相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)含量、抗氧化酶活性及过氧化物酶基因 *PRX* 表达量。结果表明,与 CK 相比,T1 处理的幼苗叶片叶绿素含量降低,而 REC 和 MDA 含量升高,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)(处理 24 h 除外)活性随着胁迫时间延长不断升高;而 T2 处理的叶绿素含量及 SOD、POD、CAT 活性较 T1 处理有所升高,REC、MDA 含量与 T1 处理相比有所降低。5 个 *BoPRX* 基因在 T1 和 T2 处理前期均迅速上调表达,在 12 h 或 24 h 后又下调表达,除 *BoPRXII3* 外,其他 4 个 *BoPRX* 基因在 T2 处理下的表达水平低于 T1 处理。综上,外源 MeJA 可通过维持叶绿素含量、降低细胞膜损伤程度、调控抗氧化酶活性及 *BoPRX* 基因表达,缓解干旱胁迫对甘蓝幼苗的伤害,增强其抗旱性。本研究结果为甘蓝抗旱栽培提供了理论依据。

关键词: 结球甘蓝; MeJA; 干旱胁迫; 生理效应; *PRX* 基因

中图分类号: S635.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)08-031-06

Effects of exogenous methyl jasmonate on physiological characteristics and *BoPRX* gene expression of cabbage under drought stress

Li Meihui, Zhou Tiantian, Song Zezheng, Yan Shuai, Kong Yi, Wang Yushu

(College of Life Science, Agriculture and Forestry, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China)

Abstract: To investigate the alleviation effect and regulatory mechanism of methyl jasmonate (MeJA) on cabbage seedlings under drought stress, the seedling of Qiu Tian 2 cabbage was used as experimental materials. Three treatments were established: CK (normal growth conditions), T1 (15% PEG8000-induced drought stress), and T2 (drought stress with 15% PEG8000 was applied after spraying with 25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MeJA). Chlorophyll content, relative electrical conductivity (REC), malondialdehyde (MDA) content, antioxidant enzyme activity, and the expression patterns of peroxidase genes (*PRX*) were measured at 0, 3, 6, 12, and 24 h post-treatment. The results indicated that compared with CK, chlorophyll content in T1-treated seedlings decreased, while REC and MDA content increased. Activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), and catalase (CAT) (except treatment for 24 h) progressively increased over time under stress conditions. However, after T2 treatment, chlorophyll content, as well as the activity of SOD, POD, and CAT was higher than that in T1, while the REC and MDA content were reduced compared to the T1 treatment. The expression of the five *BoPRX* genes rapidly and were up-regulated expression in the early stages of both T1 and T2 treatments but were down-regulated expression after 12 or 24 h. Notably, except for *BoPRXII3*, the expression level of other four *BoPRX* genes under T2 treatment were lower than those under T1 treatment. In conclusion, exogenous MeJA can alleviate the damage of drought stress to cabbage seedlings and enhance their drought resistance by maintaining chlorophyll content, reducing cell membrane damage, regulating the activity of antioxidant enzymes, and modulating the expression of *BoPRX* genes. The findings of this study provide a theoretical basis for drought-resistant cultivation of cabbage.

Key words: Cabbage; MeJA; Drought stress; Physiological effect; *PRX* gene

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(PL2024C036); 黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划(UNPYSCT-2017155); 国家级大学生创新创业项目(202510232150X)

作者简介: 李美慧, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为园艺作物抗逆生理。E-mail: lee03062025@163.com

通信作者: 王玉书, 女, 教授, 主要从事园艺植物分子生物学研究。E-mail: wangys1019 @126.com

结球甘蓝(*Brassica oleracea* L.var. *capitata*)为十字花科芸薹属重要的蔬菜之一,耐贮性强且营养丰富,在全国广泛种植^[1]。甘蓝幼苗期对外界环境较为敏感,干旱、高盐、低温、高温和病虫害等逆境胁迫常影响其生长发育。干旱灾害严重影响植物的生长发育及产量,对植物造成的伤害远超过其他逆境胁迫,且在全球广泛存在并仍有不断扩大的趋势^[2]。因此,减轻干旱胁迫对甘蓝幼苗生理损伤对其抗逆栽培具有重要意义。

茉莉酸甲酯(MeJA)是一种新型植物生长调节物质,参与调控种子萌发、生长发育、结果和衰老等不同的生理过程,当植物受到逆境胁迫时可调节植物保护酶和次生代谢酶的合成,启动抗逆基因表达,从而增强植物对逆境的抗性^[3-5]。MeJA 通过诱导植物自身抗氧化酶系统来缓解干旱胁迫诱导的 ROS 对植物带来的生理损伤,如过氧化氢、超氧阴离子自由基等^[6]。干旱胁迫下外源 MeJA 处理影响叶片的净光合速率和叶绿素荧光参数,从而增强水稻(*Oryza sativa* L.)幼苗的抗旱性^[7]。MeJA 作为干旱胁迫中的信号分子,在提高拟南芥^[8]、狗牙根^[9]、玉米^[10]等耐旱性中具有重要作用。然而,关于 MeJA 在甘蓝抗旱栽培中的应用鲜有报道。III类过氧化物酶(PRX)基因家族作为过氧化物酶超家族的一个植物特有成员,与细胞增长和细胞壁松弛、木质化和木栓化、植物衰老、非生物胁迫应答等多种生理过程密切相关^[11]。鉴于此,笔者以秋甜 2 号甘蓝幼苗为试验材料,使用 PEG 模拟干旱胁迫,测定叶片叶绿素含量、相对电导率、丙二醛含量及抗氧化酶活性,同时检测 *BoPRX* 不同处理下的表达模式,探讨 MeJA 对干旱逆境胁迫下生理及分子机制的影响,以期为甘蓝抗逆栽培提供理论支持和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

试验于 2025 年 4 月在齐齐哈尔大学园艺基地

玻璃温室进行。选用寿光欣欣然园艺有限公司培育的结球甘蓝品种秋甜 2 号作为供试材料。浸种催芽后将其播种于含营养土(草炭土、蛭石体积比 2:1)的营养钵中,正常田间管理至 4 叶 1 心期,采用完全随机设计,选用长势一致、无病虫害的幼苗,每个处理 10 株幼苗,3 次重复,共设 3 个处理:(1)CK:正常生长管理;(2)干旱胁迫(T1):每株幼苗浇灌 20 mL 15% PEG8000 溶液;(3)MeJA+T1(T2):25 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MeJA 喷施叶片,以叶片正、反面均布满溶液为准,然后每株幼苗浇灌 20 mL 15% PEG8000 溶液。分别于以上各处理 0、3、6、12、24 h 取全株叶片混合进行后续试验,并于处理 24 h 结束后拍照,记录植株表型。

1.2 生理指标测定

参考李嘉文等^[12]的方法,采用 80% 丙酮提取后测定叶绿素含量;采用电导仪法测定相对电导率(REC);分别采用氮蓝四唑还原法、愈创木酚法和紫外吸收法测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性;采用硫代巴比妥酸法测量丙二醛(MDA)含量^[13]。

1.3 过氧化物酶基因表达量测定

利用 RNAprep pure Plant Kit(天根生化科技有限公司,北京)试剂盒提取各处理叶片的总 RNA,利用 Rever Tra Ace® qPCR RT Kit(诺唯赞生物科技股份有限公司,南京)反转录成 cDNA,设计 5 个 *BoPRXs* 基因的 qRT-PCR 引物,以甘蓝 *BoActin* 为内参基因(表 1),利用 ChamQ SYBR qPCR Master Mix Without ROX 试剂盒(诺唯赞生物科技股份有限公司)建立 20 μL 的 qRT-PCR 反应体系,包括 2 $\times$ ChamQ SYBR qPCR Master Mix 10 μL ,正向引物和反向引物各 1 μL ,cDNA 模板 1 μL ,ddH₂O 7 μL 。荧光定量反应程序为:95 $^{\circ}\text{C}$ 3 min;95 $^{\circ}\text{C}$ 10 s,60 $^{\circ}\text{C}$ 30 s,95 $^{\circ}\text{C}$ 15 s,45 个循环;65 $^{\circ}\text{C}$ 60 s。每个样品设置 3 个生物学重复和技术重复。通过 $2^{-\Delta\Delta\text{CT}}$ 法计算 *BoPRXs* 基因的表达量^[14]。

表 1 实时荧光定量 PCR 引物
Table 1 Primer information for qRT-PCR

基因名称 Gene name	正向引物序列 Forward primer sequence	反向引物序列 Reverse primer sequence
<i>BoActin</i>	CGTGACCTTACTGACTACC	CTCCATCTCCTGCTCGTA
<i>BoPRX12</i>	TCTACGACAGTTCATGCCCAAACG	GTGGAAGTGAAGACGAAGGATGCTC
<i>BoPRX44</i>	CCAGAGCGACCAAGAGTTGTTCTC	TCCTTGTCATTGCGTCCACGAAC
<i>BoPRX100</i>	GTCCGATGCTCAACTTACACCTACC	GTGGAAGTGAAGACGAAGGATGCTC
<i>BoPRX113</i>	TCAGTCGAGTTGGCAGGAGGTC	AAGCGTGAAGAATGGAGCAGGAAG
<i>BoPRX116</i>	CCAGAGCGACCAAGAGTTGTTCTC	TTCCCATCCTTTTCATTGCCTCCAC

1.4 数据处理

采用 Excel 和 GraphPad Prism 软件进行数据分析和作图。

2 结果与分析

2.1 外源 MeJA 对干旱胁迫后甘蓝幼苗表型的影响

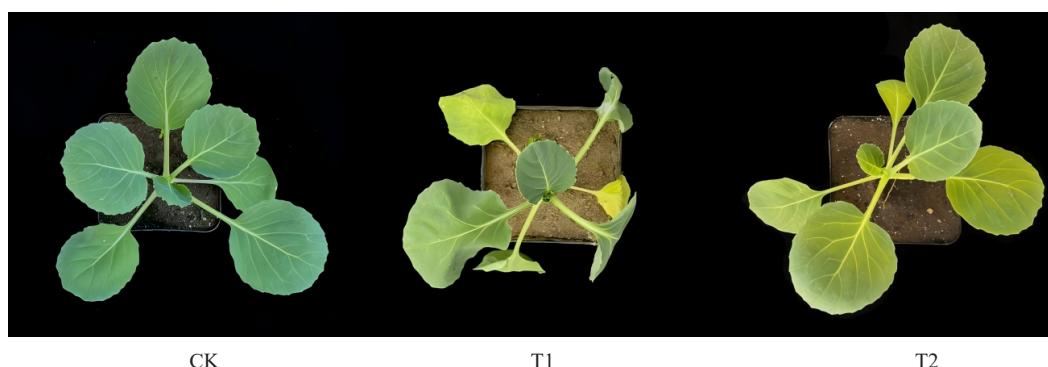
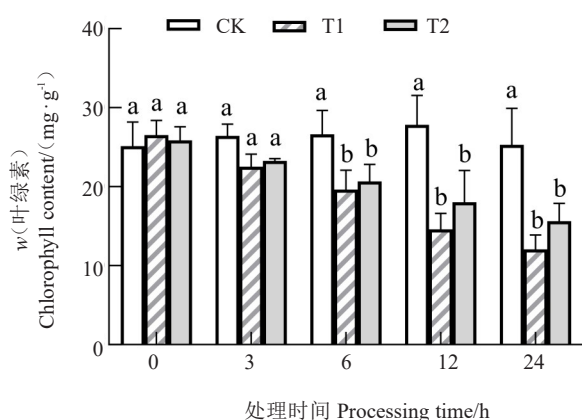


图 1 不同处理 24 h 后的甘蓝幼苗表型

Fig. 1 Phenotypic of cabbage seedlings of different treatments for 24 h

2.2 外源 MeJA 对干旱胁迫下甘蓝叶片叶绿素含量的影响

由图 2 可知,正常管理(CK)条件下,甘蓝幼苗叶绿素含量无明显变化;随着胁迫时间的延长,T1 和 T2 处理的甘蓝叶片叶绿素含量逐渐下降,其中处理 6、12、24 h 的 T1 和 T2 的叶绿素含量均显著低于 CK;喷施 MeJA 的 T2 处理在 3~24 h 均高于同时时间段的 T1 处理,但差异不显著。以上结果说



注:不同小写字母表示同一时间的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments of the same time at 0.05 level. The same below.

图 2 不同处理的甘蓝叶片叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll content in cabbage leaves under different treatments

如图 1 所示,干旱处理 24 h 后,CK 生长状态良好,株型挺拔,叶片舒展、饱满有光泽,叶色深绿,无萎蔫、黄化现象;T1 处理的植株出现较严重萎蔫,叶片变软失去光泽,外缘叶片褪绿黄化,生长停滞;而喷施 MeJA 的 T2 处理同样出现萎蔫但程度明显轻于 T1 处理,株型较挺拔,仅下部少数叶片轻微黄化,生长速度虽缓慢但仍可维持生长。

明,外源喷施 MeJA 可有效减缓干旱胁迫下结球甘蓝叶片的叶绿素降解。

2.3 外源 MeJA 对干旱胁迫下甘蓝叶片细胞膜透性的影响

随着干旱胁迫时间的延长,T1 处理的甘蓝叶片的相对电导率(REC)呈逐渐上升趋势(图 3-A),而喷施 MeJA 后进行干旱胁迫的 T2 处理的叶片 REC 随着时间延长也呈上升趋势,但均显著低于同一时间下的 T1 处理,而显著高于同一时间的 CK。胁迫后 24 h,T1、T2 处理的叶片 REC 均达到峰值,分别为 34.89%和 24.52%,二者较 CK 分别显著提高 20.12 和 8.75 百分点。

由图 3-B 可知,在干旱胁迫(T1)条件下,结球甘蓝叶片的 MDA 含量呈逐渐升高的趋势。经过 MeJA 预处理后的甘蓝叶片 MDA 含量表现为相同的变化趋势,但均显著低于同时时间的 T1 处理,胁迫 24 h 后,T2 处理的 MDA 含量较 T1 处理显著降低 34.82%。

2.4 外源 MeJA 对干旱胁迫下甘蓝叶片抗氧化酶活性的影响

随着干旱胁迫时间的延长,甘蓝幼苗叶片 SOD 活性呈逐渐上升趋势(图 4-A),各时间点 T2 处理的 SOD 活性均高于 T1 处理,其中处理 12 h 和 24 h 的 T2 显著高于 T1 处理,胁迫后 24 h,T1 和 T2 处理的叶片 SOD 活性达到峰值,分别为 51.31 和

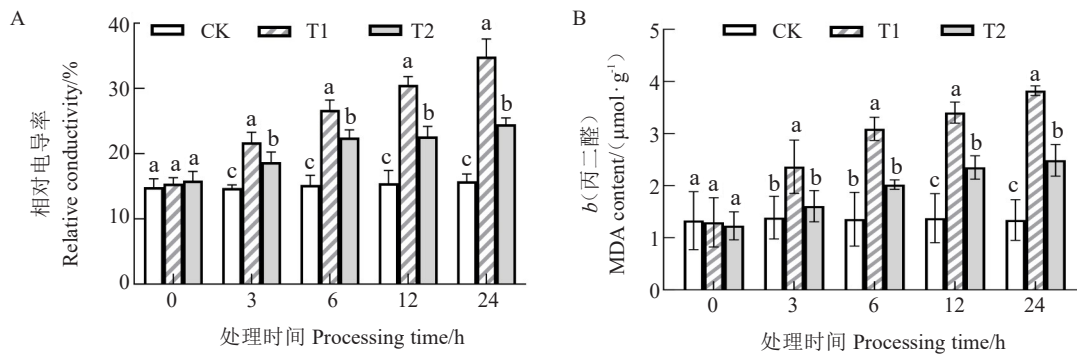


图3 不同处理下甘蓝叶片相对电导率(A)和MDA含量(B)

Fig. 3 The relative electrical conductivity(A)and MDA content(B)in cabbage leaves under different treatments

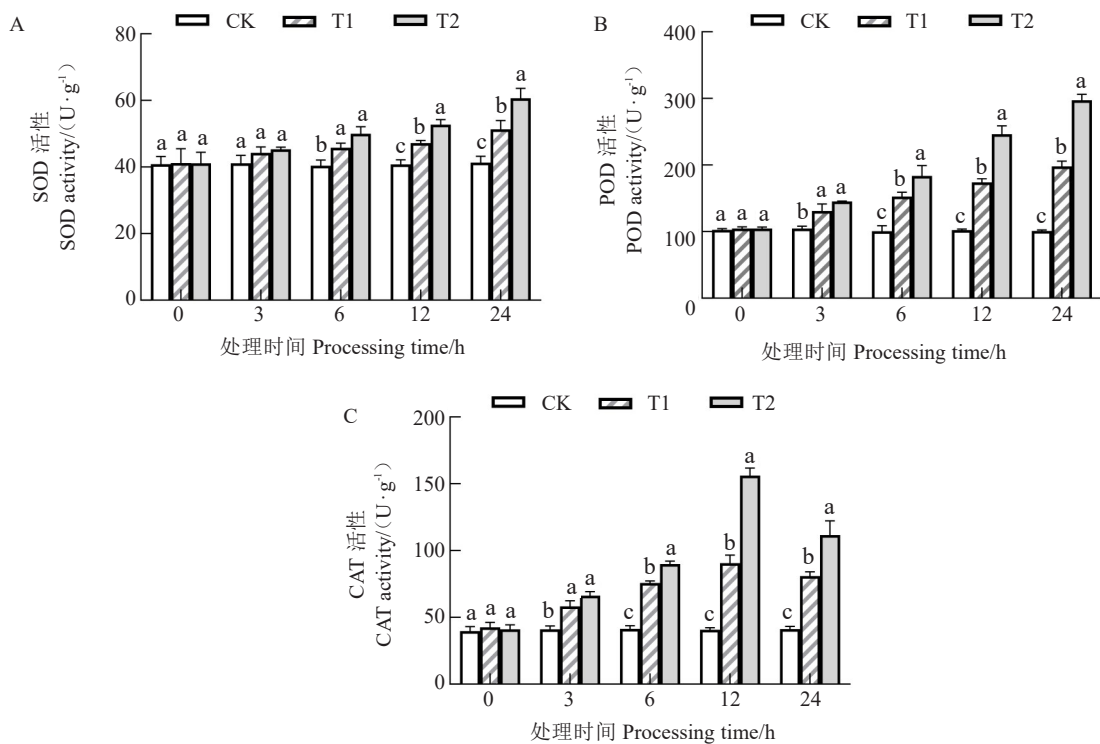


图4 不同处理下甘蓝叶片SOD(A)、POD(B)和CAT活性(C)

Fig. 4 SOD(A), POD(B)and CAT activity(C)in cabbage leaves under different treatments

60.65 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$;甘蓝幼苗叶片 POD 活性的变化趋势与 SOD 活性相同,随着胁迫时间延长呈逐渐上升趋势(图 4-B),胁迫后 24 h,T1 和 T2 处理的叶片 POD 活性达到峰值,分别为 197.78 和 297.32 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,各时间点 T2 处理均高于 T1 处理,其中胁迫 6~24 h,T2 处理均显著高于 T1 处理;随着干旱胁迫时间延长,甘蓝幼苗的叶片 CAT 活性先逐渐升高,在 12 h 达到峰值,T1 和 T2 处理分别为 90.53 和 156.00 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$,然后呈下降趋势,其中胁迫 6~24 h,T2 处理均显著高于 T1 处理(图 4-C)。

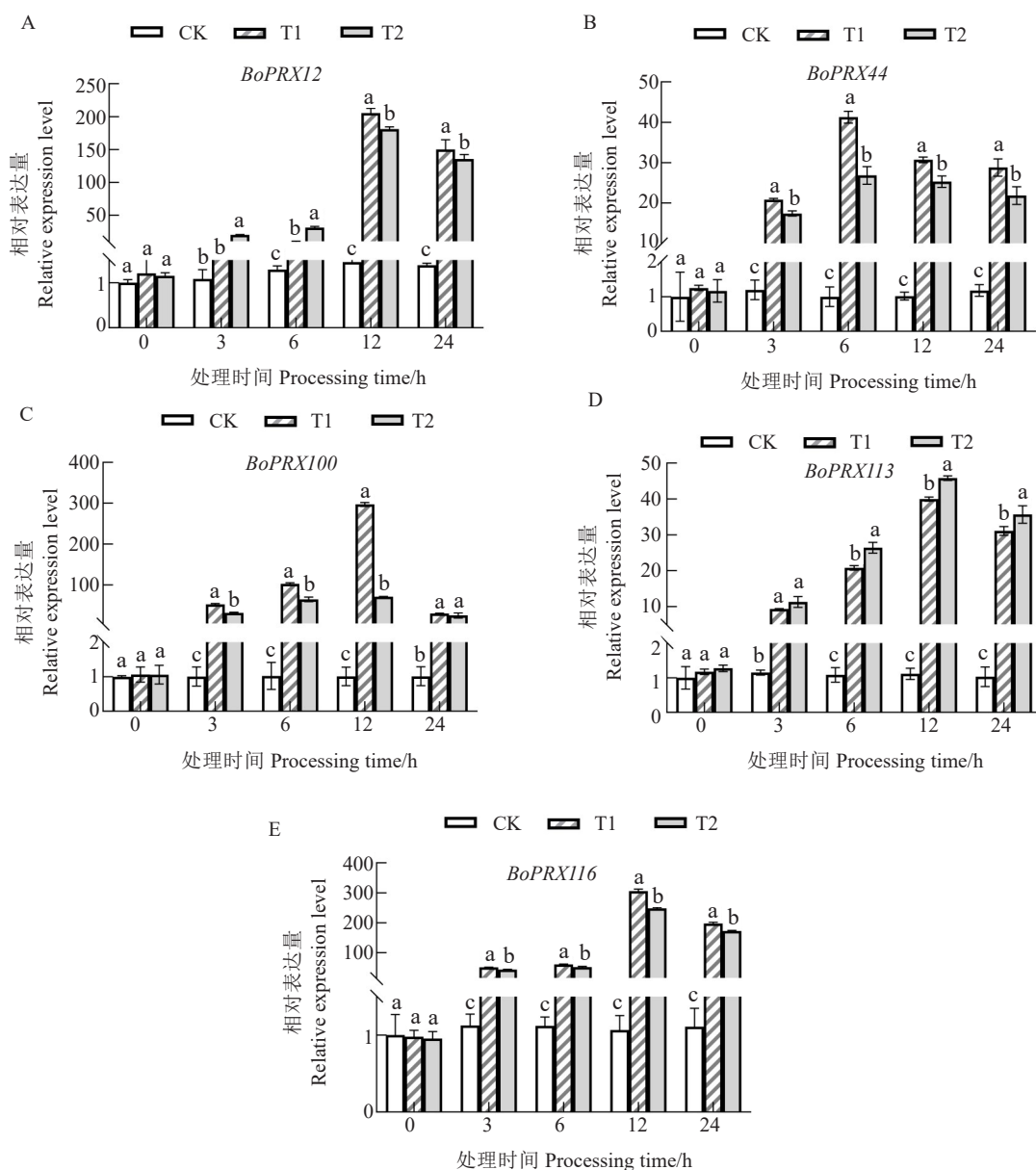
2.5 外源 MeJA 对干旱胁迫下 *BoPRX* 基因表达的影响

由图 5 可以看出,5 个 *BoPRX* 基因(*BoPRX12/*

44/100/113/116)对模拟干旱胁迫的 T1 处理均表现出不同程度的响应,干旱初期表达量明显上调,胁迫 12 或 24 h 后又下调表达,其中 *BoPRX116* 在胁迫 12 h 的表达量约为 0 h 的 300 倍。5 个 *BoPRX* 基因表达量在 T2 处理中同样呈先升高后降低的变化趋势,除 *BoPRX113* 外,其他 4 个 *BoPRXs* 基因在胁迫 12 h 的表达量均显著低于 T1 处理。

3 讨论与结论

当植物受到逆境胁迫时会诱导体内发生一系列生理生化反应以提高自身抗逆性^[10]。由于过量的氧自由基和过氧化物会破坏生物大分子结构,导致膜脂过氧化物产物 MDA 的积累,抗氧化物酶作为

图5 不同处理对 *BoPRX* 基因表达的影响Fig. 5 Effects of different treatments on the expression of *BoPRX* gene

清除活性氧(ROS)的主要参与者之一,其活性对植物抵抗逆境具有至关重要的作用^[15]。笔者发现在模拟干旱胁迫条件下通过外源喷施 MeJA 溶液后,结球甘蓝叶片的 MDA 含量显著降低,SOD、CAT 和 POD 活性显著升高,说明结球甘蓝可通过提高自身抗氧化酶活性来降低胁迫带来的膜损伤。这与冬青^[16]及柑橘^[17]中的研究结果类似,揭示了 MeJA 在植物抗逆机制中的普遍性作用。

在植物受到逆境胁迫时,MeJA 通过胁迫信号转导途径在细胞内被诱导合成,并进一步激活一系列与抗性相关的基因表达,从而调控植物的逆境应答机制^[18]。过氧化物酶(PRX)基因家族是一类重要的抗性基因,能够催化过氧化氢作为电子受体参与

氧化还原反应,对活性氧(ROS)的产生和消除发挥重要作用^[19]。笔者分别对结球甘蓝 5 个 *PRX* 基因在不同处理的表达量进行分析,结果表明,干旱胁迫下 5 个 *PRX* 基因都被诱导表达,表达量整体呈先升高后降低的趋势。经 MeJA 处理能够降低 *BoPRX12*、*BoPRX44*、*BoPRX100*、*BoPRX116* 在胁迫 12~24 h 的表达量,可以推测上述基因在 MeJA 预处理后的差异表达可能是由于 MeJA 缓解了甘蓝幼苗的干旱胁迫,从而导致 *PRX* 基因对干旱胁迫的响应程度降低。以上结果从基因表达水平印证了外源施加 MeJA 可以缓解干旱胁迫对作物造成的损伤。

综上所述,与正常生长相比,干旱胁迫处理的幼苗叶片叶绿素含量降低,相对电导率和 MDA 含

量升高,SOD、POD 和 CAT 活性增强;而经过 MeJA 预处理后再进行干旱胁迫,叶绿素含量及 SOD、POD、CAT 活性较干旱胁迫均有所升高,而 REC 和 MDA 含量有所降低,表明 MeJA 通过增强抗氧化酶活性减轻干旱胁迫带来的损伤;干旱胁迫诱导 *PRX* 基因的上调表达,而 MeJA+干旱处理下的表达水平在胁迫 12~24 h 低于干旱胁迫处理。本研究结果为干旱条件下的甘蓝生产提供了理论依据与实践路径。

参考文献

- [1] 唐旭. 结球甘蓝的主要虫害及其绿色防控技术[J]. 上海蔬菜, 2023(2):50-52.
- [2] 张建新, 葛淑芳, 吴玉环, 等. 干旱胁迫对紫金牛叶片碳氮代谢的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):278-282.
- [3] Horbowicz M, Kosson R, Wiczowski W, et al. The effect of methyl jasmonate on accumulation of 2-phenylethylamine and putrescine in seedlings of common buckwheat (*Fagopyrum esculentum*) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33 (3) : 897-903.
- [4] Sobhy E S, Huqail A A A, Khan F, et al. Elicitation of salicylic acid and methyl jasmonate provides molecular and physiological evidence for potato susceptibility to infection by *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*[J]. Heliyon, 2024, 10 (10) : e30929.
- [5] Ho T T, Murthy H N, Park S Y. Methyl jasmonate induced oxidative stress and accumulation of secondary metabolites in plant cell and organ cultures[J]. International Journal of Molecular Science, 2020, 21(3):716.
- [6] Yu X X, Zhang W J, Zhang Y, et al. The roles of methyl jasmonate to stress in plants[J]. Functional Plant Biology, 2019, 46 (3):197-212.
- [7] 董桃杏, 蔡昆争, 曾任森. 干旱胁迫下茉莉酸甲酯对水稻叶片质膜透性及无机离子含量的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25 (1):136-140.
- [8] Arbona V, Argamasilla R, Gomez-Cadenas A. Common and divergent physiological, hormonal and metabolic responses of *Arabidopsis thaliana* and *Thellungiella halophila* to water and salt stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167 (16) : 1342-1350.
- [9] 孙晓梵, 张一龙, 李培英, 等. 喷施茉莉酸甲酯对干旱胁迫下狗牙根生理特性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10):2811-2818.
- [10] 忽雪琦, 李东阳, 严加坤, 等. 干旱胁迫下外源茉莉酸甲酯对玉米幼苗根系吸水的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6) : 991-998.
- [11] 马鑫磊, 许瑞琪, 索晓曼, 等. 谷子 III 型 *PRX* 基因家族全基因组鉴定及干旱胁迫下表达分析[J]. 作物学报, 2022, 48(10) : 2517-2532.
- [12] 李嘉文, 麻冬梅, 苏立娜, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下燕麦幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(2):396-403.
- [13] 王秀香. 土壤水分胁迫对不同品种蓖麻叶片丙二醛含量的影响[J]. 科技资讯, 2012(16):137-138.
- [14] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2^{-ΔΔCT} method[J]. Methods, 2001, 25(4):402-408.
- [15] 赵英力, 李冬杰, 崔旭盛, 等. 干旱胁迫下连翘种苗对外源茉莉酸甲酯的生理生化响应[J]. 中药材, 2020, 43(8):1830-1834.
- [16] 陈燕琼, 沈琄, 范佳露, 等. 茉莉酸甲酯对干旱及复水下落叶冬青苗叶片抗氧化水平的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6):35-43.
- [17] Xiong B, Wang Y, Zhang Y, et al. Alleviation of drought stress and the physiological mechanisms in *Citrus* cultivar (Huangguogan) treated with methyl jasmonate[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2020, 84(9):1958-1965.
- [18] 杨艺. 茉莉酸甲酯对干旱胁迫下棉花的生理生化特性和基因表达的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2015.
- [19] 葛雯冬, 王腾辉, 马天意, 等. 结球甘蓝 *PRX* 基因家族全基因组鉴定与逆境条件下的表达分析[J]. 生物技术通报, 2023, 39 (11):252-260.