

引用格式: 梁含云, 李先宽, 王广莘, 等. 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫酸枣幼苗的生理影响[J]. 西北植物学报, 2025, 45(1): 0000-0000. [LIANG H Y, LI X K, WANG G P, *et al.* Physiological effects of exogenous methyl jasmonate on jujube seedlings under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2025, 45(1): 0000-0000.] DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.20240547

# 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫酸枣幼苗的生理影响

梁含云<sup>1</sup>, 李先宽<sup>1</sup>, 王广莘<sup>2</sup>, 陈佳宁<sup>1</sup>, 张 坚<sup>1</sup>

(1 天津中医药大学 中药学院, 天津 301617; 2 山东现代学院, 济南 250104)

**摘要** 【目的】探究外施不同浓度茉莉酸甲酯(MeJA)对盐胁迫下酸枣幼苗生理特性的影响, 初步解析 MeJA 提高酸枣耐盐性的最佳浓度和机制。【方法】以酸枣幼苗为材料, 150 mmol/L NaCl 胁迫 10 d 后, 分别喷施 0, 100, 200, 400, 800  $\mu\text{mol/L}$  MeJA, 分析各处理下幼苗生长、光合参数、抗逆生理指标的变化。【结果】盐胁迫后酸枣幼苗株高、根长、相对含水量被抑制; 叶片叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率降低; 胞间  $\text{CO}_2$  浓度升高; 抗氧化酶 SOD、POD、CAT 活性, 丙二醛含量, 渗透调节物质脯氨酸、可溶性糖和还原性成分黄酮、多酚含量升高。外施 MeJA 可有效缓解盐胁迫对酸枣幼苗生长和光合效率产生的不利影响, 进一步提高抗氧化酶活性、渗透调节物质和还原性物质含量, 且随 MeJA 浓度升高缓解程度呈先上升后下降趋势, 以 200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 效果最佳。【结论】外源 MeJA 能够增强盐胁迫下酸枣幼苗光合效率、渗透调节能力和抗氧化酶防御功能, 有效缓解盐胁迫的生长抑制, 从而提高植株耐盐性。

**关键词** 酸枣实生苗; 盐胁迫; 茉莉酸甲酯; 生理指标

**中图分类号** Q945.78; S665.1 **文献标志码** A

## Physiological effects of exogenous methyl jasmonate on jujube seedlings under salt stress

LIANG Hanyun<sup>1</sup>, LI Xiankuan<sup>1</sup>, WANG Guangping<sup>2</sup>, CHEN Jianing<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>

(1 College of Traditional Chinese Materia Medica, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China; 2 Shandong Xiandai University, Ji'nan 250104, China)

**Abstract** [Objective] The study aims to investigate the effects of externally applied methyl jasmonate (MeJA) on the growth and physiological characteristics of jujube seedlings under salt stress, with a preliminary analysis of the optimal concentration and mechanism of MeJA in enhancing the salt tolerance of jujube. [Methods] After a 10-day treatment with 150 mmol/L NaCl, MeJA at concentrations of 0, 100, 200, 400, 800  $\mu\text{mol/L}$  was sprayed to analyze the changes of growth, photosynthetic parameters, and physiological indexes of jujube seedlings. [Results] Under salt stress, the height, root length, and relative water content of jujube seedlings were suppressed, and the chlorophyll content, net photosynthetic rate, stomatal conductance, and transpiration rate of leaves were reduced, while the inter-cellular  $\text{CO}_2$  concentration was elevated. The activities of antioxidant enzymes, including SOD, POD and CAT, as well as the levels of malondialdehyde, osmoregulatory substances proline, soluble sugar, and reducing components flavones, and polyphenols, were elevated. Exogenous MeJA alleviated the adverse effects of salt stress on the growth and photosynthetic efficiency of jujube seedlings, by increasing the activities of antioxidant en-

收稿日期: 2024-10-09; 修改稿收到日期: 2024-11-06

基金项目: 天津市科技计划项目“生态材料与低产土壤高价值利用技术研究”(23ZGCXQY00060)

作者简介: 梁含云(2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事中药资源与开发研究。E-mail: 17803292036@163.com

通信作者: 张 坚, 副教授, 硕士生导师, 主要从事中药资源和药用植物组织培养研究。E-mail: zhangjian\_tcm@163.com

zymes and the levels of osmoregulators and reducing substances, which showing a trend of first increase and then decrease with the increase in MeJA. The best effect was achieved at 200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA. [Conclusion] Exogenous MeJA can enhance the photosynthetic efficiency, osmoregulation ability, and antioxidant enzyme defense function of jujube seedlings under salt stress, effectively alleviating the growth inhibition caused by salt stress and enhancing the salt tolerance of plants.

**Key words** jujube seedlings; salt stress; methyl jasmonate; physiological indexes

酸枣 [*Ziziphus jujuba* Mill. var. *spinosa* (Bunge) Hu ex H. F. Chow] 为鼠李科枣属灌木或小乔木, 也称为“棘”、山枣、野枣等, 主要分布于河北、山西、山东等北方地区<sup>[1]</sup>, 是重要的栽培枣砧木, 对土壤要求不高, 可耐受一定的干旱和盐胁迫。传统上酸枣以种子(酸枣仁)入药, 为华北地区重要的道地药材, 其主要药效成分有皂苷类、黄酮类、生物碱类等, 具有改善睡眠、抗氧化、护肝、调节免疫力、抗肿瘤等药理作用, 其副产物果肉、叶、根、皮等也可入药, 是一种常用的药用植物<sup>[2]</sup>。

中国盐渍化土壤分布广泛, 总面积达到约  $1 \times 10^8$   $\text{hm}^2$ , 土壤改良和利用意义重大<sup>[3]</sup>。酸枣具有一定耐盐碱能力, 但过高的盐浓度会影响酸枣品质及药用成分积累, 对酸枣耐盐性内在机制进行研究, 寻找提高其耐盐性的方法, 为在盐渍化土壤种植酸枣提供依据, 同时有助于提高盐渍化土壤的利用率。外源喷施植物生长调节剂是一种有效改善盐胁迫对植物生长抑制的方法。茉莉酸甲酯(MeJA)是一种重要的植物内源性激素, 可以介导植物生长与发育, 提高植物对各种生物、非生物胁迫的防御<sup>[4]</sup>。研究证明 MeJA 是一种重要的抗逆激素, 可以提高植物对逆境胁迫的抵抗能力, 参与植物多种逆境响应。例如, 外源 MeJA 提高了盐胁迫下黄芩 (*Scutellaria baicalensis* Georg) 种子的发芽率、抗氧化酶活性和叶绿素含量, 增强其耐盐性<sup>[5]</sup>; 外源 MeJA 还可提高逆境胁迫下紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 的抗氧化能力和渗透调节能力<sup>[6]</sup>; 外源 MeJA 浸种也可有效提高连翘 [*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl.] 种苗的抗旱性<sup>[7]</sup>。但 MeJA 对酸枣幼苗耐盐性的影响鲜有报道。本试验通过喷施外源性 MeJA, 探究盐胁迫下 MeJA 对酸枣幼苗生长发育、光合特性、生理特性等的改善机制, 并筛选最佳外施 MeJA 浓度, 为酸枣在盐渍化土壤引种提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

酸枣种子采于天津市蓟州区山区。选取适量饱满且大小均匀的酸枣种子, 均匀散在铺有湿润滤纸

的培养皿中, 于 25  $^{\circ}\text{C}$  下催芽, 期间保持滤纸湿润状态。选出发芽状态良好的酸枣种子, 种植在以蛭石、珍珠岩按 1:1 体积比混合而成的育苗基质中, 使用 50 孔穴盘, 每孔播种 2~3 粒, 共 18 盘, 放置于培养室内[培养条件设定为光周期 16 h 光照/8 h 黑暗, 温度恒定在  $(23 \pm 2)$   $^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度保持在  $(50 \pm 5)\%$ ]。每周为植株喷施 1 次 1/2 MS 营养液, 并定期适量浇水, 期间进行间苗。35 d 后在幼苗中挑选长势一致且生长健康的植株, 每盘定苗 50 株进行试验处理。

### 1.2 试验方法

试验设置 6 个处理组, 各处理设置 3 次重复。其中, CK 组, 空白对照, 用相同体积的 1/2 MS 营养液浇灌; N 组, 盐胁迫对照组, 盐胁迫处理 10 d, 不喷施 MeJA; NaCl+MeJA 组, 盐胁迫处理 10 d, 叶面分别喷施 100, 200, 400, 800  $\mu\text{mol/L}$  的 MeJA, 分别以 M1、M2、M3、M4 表示。150 mmol/L NaCl 处理为重度盐胁迫, 浓度参考已有文献<sup>[8]</sup>, 并通过预实验确定, 盐溶液由 1/2 MS 营养液与分析纯 NaCl 配制。MeJA 以叶面喷施的方式连续喷施 7 d, 以酸枣幼苗叶片有水滴凝集为标准。连续喷施完成后对各处理组进行光合指标测定, 并分别采集各组酸枣幼苗的地上和地下部分, 进行生理指标测定。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 植物生长指标及含水量

试验期间, 每天定期观察记录植物的生长情况。随机选取各处理组植株 15 株, 用于测定地上和地下部分生物量、株高和根长。先用清水将采集样品清洗干净, 吸干表面水分后用刻度尺测量株高和主根长, 然后将植株根、茎、叶分开, 分别称取鲜重, 再经真空冷冻干燥处理 24 h 后, 称取干重。并依据干鲜重计算各器官的含水量。

#### 1.3.2 光合气体交换参数

随机选取各处理组 5 株酸枣幼苗, 用光合仪 (CIRAS-3) 在自然光照下测定自子叶起第 3—4 完全展开叶的光合气体交换参数净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 和胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ), 每处理重复 3 次。

### 1.3.3 叶绿素含量

随机选取各处理组 5 株酸枣幼苗的新鲜叶片,用 95% 乙醇提取后采用紫外分光光度法在 665 nm、645 nm 波长下测定吸光度值,并据此计算叶绿素 a、b 含量及叶绿素总含量,每处理重复 3 次。

### 1.3.4 抗逆生理指标

分别称取各处理组酸枣幼苗地上和地下部分鲜重各 0.2 g 进行抗逆生理指标测定。超氧化物歧化酶(SOD)活性使用检测试剂盒测定、过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法、过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法、游离脯氨酸含量测定采用茚三酮法、可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法、丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法,均参照李合生<sup>[9]</sup>的方法。总黄酮、总多酚含量测定均采用紫外分光光度法<sup>[10]</sup>。各指标测定每处理重复 3 次。

### 1.4 数据分析

用 Excel 2022 软件整理数据,用 SPSS 27.0 软件对相关数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),平均数间的多重比较采用 LSD 及 Duncan's 法,用 Origin 2021 软件和 Excel 2022 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 MeJA 对盐胁迫下酸枣幼苗生长发育的影响

各处理酸枣幼苗的生长状况可以通过株高、根长、相对含水量来评估。由表 1 可知,与 CK 组相比较,经 NaCl 胁迫处理(N)后,酸枣幼苗真叶数减少、叶片变小,株高、根长受到抑制,根、茎、叶相对含水量均降低,其中株高、根长分别显著降低 22.2% 和 18.4% ( $P < 0.05$ )。说明盐胁迫抑制了植株生长,使细胞内外渗透压失衡,导致细胞失水。

同时,随外施 MeJA 浓度增加,盐胁迫下酸枣幼苗生长受抑制状况得到缓解,株高、根长、器官相对含水量均呈先上升后下降趋势,且均不同程度地高于相应 N 处理,并在 M2 或者 M3 处理下达到最高值,此时株高、根长、器官相对含水量的增幅均达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),M2 处理株高、根长分别比 N 处理显著提高 29.1% 和 14.9%,酸枣幼苗生长情况得到明显改善,但除 M3 处理株高外都未完全恢复到正常状态。

表 1 MeJA 对盐胁迫下酸枣幼苗生长和相对含水量的影响

Table 1 Effects of MeJA on growth and relative water content of *Z. jujuba* var. *spinosa* seedlings under salt stress

处理 Treatment	真叶数 Number of real leaf	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	植株含水率/% Plant water content		
				根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	6	8.34 ± 0.43b	9.35 ± 0.26a	76.20	68.62	78.65
N	4	6.49 ± 0.39e	7.63 ± 0.37d	72.82	64.35	75.52
M1	4	7.09 ± 0.56d	8.17 ± 0.41c	73.34	65.35	76.76
M2	6	8.38 ± 0.35b	8.77 ± 0.35ab	74.44	67.99	78.80
M3	6	8.68 ± 0.47a	8.59 ± 0.47b	73.37	66.67	77.12
M4	4	8.16 ± 0.51c	8.22 ± 0.36c	72.58	65.05	76.03
处理 Treatment	单株干重/g Dry weight per plant			单株鲜重/g Fresh weight per plant		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK	1.4089 ± 0.195ab	2.1489 ± 0.215b	1.2129 ± 0.229c	5.9217 ± 0.247a	6.8495 ± 0.235b	5.6827 ± 0.262ab
N	1.3659 ± 0.279c	2.3358 ± 0.207a	1.2769 ± 0.196b	5.0257 ± 0.217c	6.5529 ± 0.244c	5.2176 ± 0.187d
M1	1.3247 ± 0.257d	2.0987 ± 0.178b	1.2214 ± 0.211c	4.9693 ± 0.232c	6.0574 ± 0.226d	5.2571 ± 0.206d
M2	1.3958 ± 0.177b	2.0698 ± 0.181b	1.1478 ± 0.237d	5.4628 ± 0.199b	6.4679 ± 0.189c	5.4158 ± 0.224bc
M3	1.4187 ± 0.209a	2.3374 ± 0.206a	1.2329 ± 0.197c	5.3275 ± 0.239bc	7.0132 ± 0.221a	5.3894 ± 0.199c
M4	1.3669 ± 0.213c	2.3671 ± 0.247a	1.3836 ± 0.201a	4.9864 ± 0.209c	6.7745 ± 0.237bc	5.7726 ± 0.301a

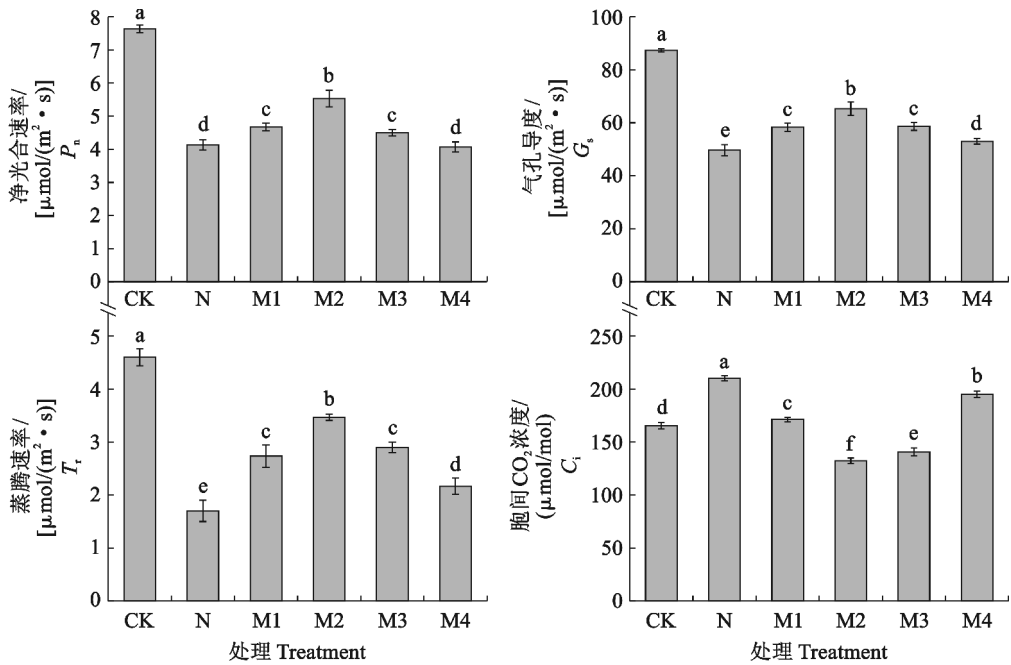
注:CK 为空白对照,N 为 150 mmol/L NaCl 处理,M1、M2、M3、M4 表示 150 mmol/L NaCl 胁迫 10 d 后分别叶面喷施 100、200、400、800  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 处理。同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note: CK is the control without NaCl and MeJA. N is 150 mmol/L NaCl treatment. M1, M2, M3, and M4 stand for the treatments of 150 mmol/L NaCl for 10 days, then foliar spraying of 100, 200, 400, and 800  $\mu\text{mol/L}$  MeJA, respectively. The different normal letters within the same column represent statistically significant differences between treatments at 0.05 level ( $P < 0.05$ ). The same as below.

另外,生物量也是评价各处理酸枣幼苗生长情况的重要指标。表1显示,各处理酸枣幼苗器官生物量的表现不尽相同。其中,与CK组相比较,N处理幼苗根、茎、叶鲜重及根部干重分别显著降低15.1%、4.3%、8.2%、3.1%,而茎和叶干重分别显著增加8.7%、5.3%,说明盐胁迫下植株内 $\text{Na}^+$ 浓度增加,细胞渗透压失衡,严重失水,鲜重降低,同时为应对盐胁迫植物细胞壁增厚,干重增加。外源施加MeJA后,与N组相比,各器官生物量有所恢复,M3处理根、茎、叶鲜重分别增加了6.0%、7.0%、3.3%,M2处理根部干重增加了2.2%,茎部和叶部干重却分别降低了11.4%、10.1%,说明适宜浓度MeJA有利于调节盐胁迫下植株体内生物量的分配,缓解盐胁迫对酸枣幼苗的生长抑制。

## 2.2 不同浓度MeJA对盐胁迫下酸枣幼苗光合作用的影响

如图1所示,与CK组相比,酸枣幼苗叶片的



不同小写字母表示处理间在5%水平差异显著。下同。

图1 不同处理下酸枣幼苗叶片 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 和 $C_i$

Different normal letters indicate significant difference between the treatments at the 5% level. The same as below.

Fig. 1  $P_n$ ,  $G_s$ ,  $T_r$ , and  $C_i$  of leaves of jujube seedlings under different treatments

## 2.3 不同浓度MeJA对盐胁迫下酸枣幼苗叶绿素含量的影响

由图2可得,与CK组相比,酸枣幼苗叶片叶绿素总量、叶绿素a、b含量在N处理下均显著降低,降幅分别为35.4%、35.8%、33.1%。与N处理相比,叶片叶绿素总量、叶绿素a、b含量在M1—M3处理下均显著增加,而在M4处理下均显著降低;随外施MeJA浓度增加,叶绿素总量、叶绿素a、b含量

$P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 经NaCl处理后分别显著降低了46.0%、43.0%、63.0%,而 $C_i$ 则显著提高21.4% ( $P < 0.05$ )。随外施MeJA浓度增加,叶片 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 均呈先上升后下降趋势,且大多显著高于相应的N处理,并均在M2处理下达到最高值,此时其 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 较N处理分别显著增长34.1%、31.0%、103.0% ( $P < 0.05$ ),但仍均显著低于CK组;同时,酸枣叶片 $C_i$ 随外施MeJA浓度增加呈现先下降后上升的趋势,且均显著低于N处理,并在M2处理下达到最低值,此时比N处理显著降低37.1%,各MeJA浓度处理间也均具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

以上结果说明盐胁迫显著降低了酸枣幼苗叶片 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ ,而显著提高了 $C_i$ ,外施MeJA能有效缓解盐胁迫造成的光合能力抑制,其中以200  $\mu\text{mol}/\text{L}$  MeJA处理效果最佳。

均呈先升高后下降趋势,并均在M2处理下达到最高值,此时相比N处理分别显著增加了42.5%、42.9%、39.8%,但仍显著低于CK。说明盐胁迫处理会显著抑制酸枣幼苗光合色素合成,施加适宜浓度的MeJA可以缓解盐胁迫下酸枣幼苗光合色素的降解,并以200  $\mu\text{mol}/\text{L}$  MeJA处理效果最佳,但过高的MeJA(800  $\mu\text{mol}/\text{L}$ )却会对植物产生毒害,叶绿素含量甚至低于NaCl处理组。

## 2.4 不同浓度 MeJA 对盐胁迫下酸枣幼苗抗逆生理指标的影响

### 2.4.1 抗氧化酶活性和丙二醛含量

由图 3 可知,与 CK 组相比,酸枣幼苗地上、地下部分 POD、CAT、SOD 活性经 NaCl 处理后均有不同程度增加,地上部分分别提高了 17.1%、117.4%、9.4%,地下部分分别提高 37.5%、26.9%、7.7%,且增幅大多达到显著水平,说明酸枣幼苗对盐胁迫有一定抵抗能力。

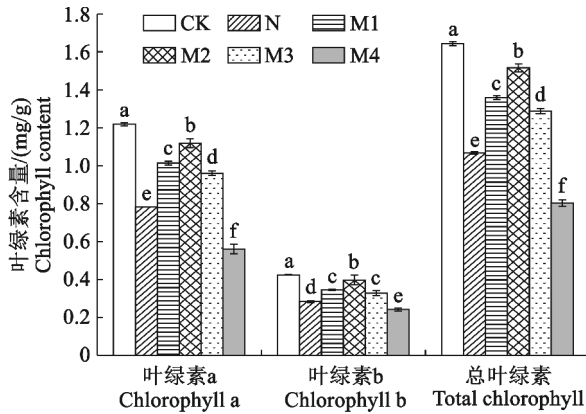


图 2 不同处理下酸枣幼苗叶片叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll content in leaves of jujube seedlings under different treatments

随外施 MeJA 浓度增加,酸枣幼苗地上和地下部分的 POD、CAT、SOD 活性均呈现先升高后降低的趋势,并均在 M2 处理达到最大值,且 CAT 活性变化幅度明显大于 POD 和 SOD 活性。其中, M2 处理组地上部分 POD、CAT、SOD 活性分别比 NaCl 处理显著增加 6.0%、86.0%、10.6%,地下部分活性则分别显著增加 32.9%、112.0%、28.3% ( $P < 0.05$ )。以上结果说明 MeJA 增强了盐胁迫下酸枣幼苗的抗氧化能力,并以 200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 处理效果最佳。

从图 3 还可知,酸枣幼苗 MDA 含量在不同处理组中存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。其中,与 CK 组相比,酸枣幼苗地上、地下部分的 MDA 含量在 N 处理下分别显著提高 104.0%、232.0%;外施不同浓度 MeJA 后,地上和地下部分的 MDA 含量均比 N 处理显著降低,并随 MeJA 浓度增加呈先下降后上升趋势,且 M2 处理达到最低,此时地上和地下部分 MDA 含量分别比 N 处理显著降低了 39.8%、64.0%。以上结果表明 MeJA 处理可以降低盐胁迫下酸枣幼苗叶片的 MDA 含量,进而缓解盐胁迫对酸枣幼苗的氧化损伤。

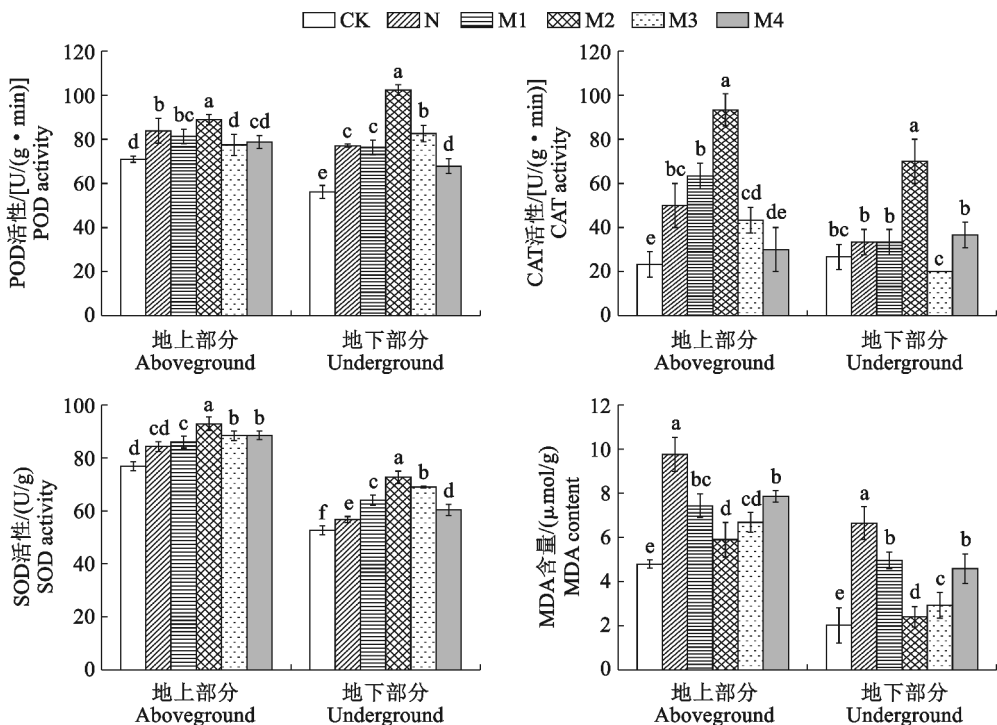


图 3 不同处理下酸枣幼苗地上、地下部分 POD、CAT、SOD 活性和丙二醛含量

Fig. 3 Activities of POD, CAT, and SOD and MDA content of the aboveground and underground parts of jujube seedlings under different treatments

### 2.4.2 渗透调节物质含量

图4显示,与CK组相比,酸枣幼苗地上、地下部分的脯氨酸、可溶性糖含量在NaCl处理后显著提高( $P < 0.05$ );与NaCl处理组相比,地上、地下部分的脯氨酸含量在各浓度外源MeJA处理后均显著升高,且随MeJA浓度增加而先上升后下降,并在M2处理达到最大值,此时增幅分别为18.0%、18.2%;地上部、地下部M2处理的可溶性糖含量也高于NaCl处理组,增幅分别为10.9%、15.6%,其余浓度MeJA处理大多低于NaCl处理组。可见,适宜浓度MeJA有利于提高盐胁迫下酸枣幼苗中渗透调节物质的含量,缓解对细胞膜造成的氧化胁迫,并以200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA处理效果最佳。

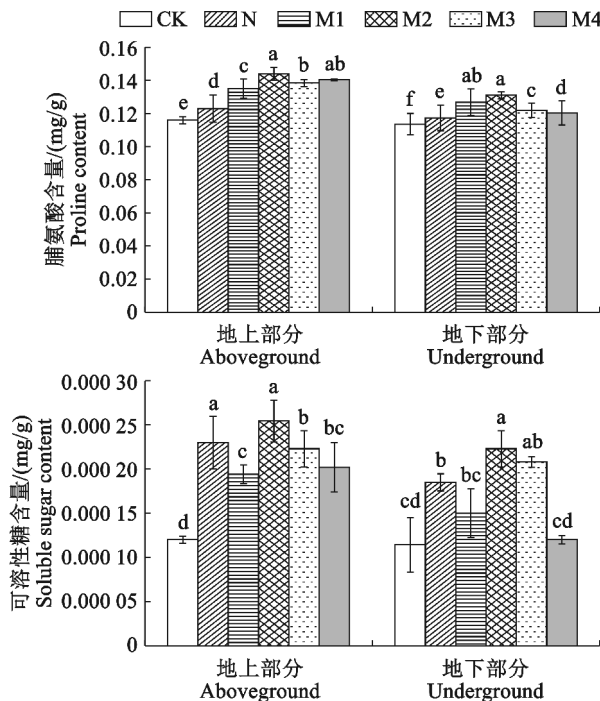


图4 不同处理下酸枣幼苗地上、地下部分脯氨酸和可溶性糖含量

Fig. 4 Contents of proline and soluble sugar of the aboveground and underground parts of jujube seedlings under different treatments

### 2.4.3 总黄酮和总多酚含量

如图5所示,酸枣幼苗地上、地下部分的总黄酮、总多酚含量经NaCl处理后均比CK组不同程度增加,地上、地下部分黄酮含量增幅分别为23.3%、147.0%,多酚含量增幅分别为62.9%、4.3%。与NaCl处理相比,各浓度外源MeJA处理幼苗地上、地下部分黄酮、多酚含量均不同程度增加,且大多达到显著水平;随着外源MeJA浓度增加,地上、地下部分黄酮、多酚含量均呈先上升后下降趋势,并在200

$\mu\text{mol/L}$ 时达到最高,此时黄酮含量分别比NaCl处理显著增加了66.9%、143.1%,多酚含量分别显著增加了22.7%、13.9%。由此可见,施加适宜浓度的MeJA有助于酸枣幼苗中还原性成分总黄酮、总多酚的积累。

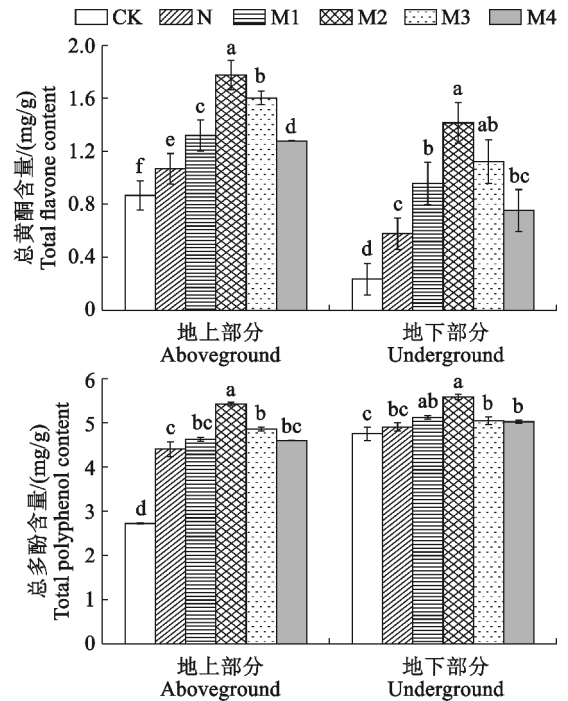


图5 不同处理下酸枣幼苗地上、地下部分总黄酮和总多酚含量

Fig. 5 Contents of total flavone and total polyphenol in the aboveground and underground parts of jujube seedlings under different treatments

## 3 讨论

### 3.1 外源MeJA促进盐胁迫下酸枣幼苗生长

多数植物幼苗在受到盐胁迫后会出现叶片卷缩以及株高、根长、含水量等降低的生理干旱现象,这是植株对逆境的适应,也是对自身的保护<sup>[11-12]</sup>。研究表明,盐胁迫影响植物的生长可能是因为 $\text{Na}^+$ 浓度过高,离子稳态失衡,产生渗透胁迫,导致营养吸收不均<sup>[13]</sup>。Danish等<sup>[14]</sup>在盐胁迫下对油菜(*Brassica napus* L.)叶面喷施MeJA和 $\text{GA}_3$ ,改善了植株的生长形态以及嫩枝数量、长度、可溶性碳水化合物总量等,有效缓解了盐胁迫对植株产生的危害。本研究中盐胁迫下酸枣幼苗表现出植株相对矮小、叶片缩小减少、相对含水量降低的情况,外施适宜浓度的MeJA缓解了盐胁迫下其生长的抑制和水分的损失,这与文献<sup>[15]</sup>中外源MeJA缓解盐胁迫对盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)生长伤害的结果一致。

### 3.2 外源 MeJA 提高盐胁迫下酸枣幼苗光合作用效率

植物受到盐胁迫后,对水分、营养成分吸收不足,细胞器被破坏,致使叶绿素含量降低,植株为应对盐胁迫会关闭气孔减少蒸腾作用,致使植物的光合效率降低<sup>[12]</sup>。在逆境胁迫下,植物光合速率下降多由气孔限制和非气孔限制所致,气孔限制特征表现为  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均显著下降,非气孔限制表现为  $P_n$ 、 $G_s$  显著下降, $C_i$  明显升高<sup>[16]</sup>。本研究中盐胁迫后酸枣幼苗的叶绿素含量降低, $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均显著降低, $C_i$  显著升高,说明盐胁迫下酸枣叶片受非气孔胁迫明显。这与王静等<sup>[17]</sup>探究盐胁迫对万寿菊(*Tagetes erecta* L.)幼苗光合特性的影响研究结果相似。外施 MeJA 有助于恢复盐胁迫下叶绿体结构和功能,维持叶绿素合成和降解平衡。同时酸枣叶片  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  呈先升高后下降趋势, $C_i$  先下降后升高,说明一定浓度的 MeJA(200  $\mu\text{mol/L}$  最佳)缓解了叶片的非气孔限制,提高了叶片的气孔导度,增强了对  $\text{CO}_2$  的利用和对光能的吸收,有效提高盐胁迫下酸枣的光合作用效率。

### 3.3 外源 MeJA 增强盐胁迫下酸枣幼苗抗氧化系统活性

盐胁迫下植物体内会产生大量的活性氧,造成细胞膜通透性改变、电解质外渗、丙二醛等有毒物质积累,此时植物体内会进行应激防御,调控如 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶活性来清除多余的活性氧<sup>[18]</sup>。SOD、POD、CAT 等协同作用将  $\text{O}_2^-$  转化为无毒的  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{O}_2$ ,有效抑制细胞的膜脂过氧化反应,减轻盐胁迫对细胞造成的损伤<sup>[19]</sup>。而黄酮类、多酚类等还原性次生代谢产物也具有一定的抗氧化作用,可直接与活性氧产生反应或作为底物参与活性氧的清除,从而提高植物对非生物胁迫的抵抗能力<sup>[20]</sup>。MDA 含量变化可以反映盐胁迫下植物细胞膜的完整性、膜脂化程度和膜系统的损伤程度,MDA 含量越高,细胞膜受损伤的程度就越大<sup>[21]</sup>。本研究中盐胁迫后酸枣幼苗 SOD、CAT、POD 活性以及总黄酮、总多酚含量升高,MDA 含量也随之升高,而外施 MeJA 后抗氧化酶活性和还原性次生代谢产物含量继续升高,MDA 含量却显著降低,这与 MeJA 可以提高黄芩植物体内的抗氧化酶活性<sup>[5]</sup>,可有效降低盐胁迫下小桐子(*Jatropha curcas* L.)幼苗叶片的 MDA 含量<sup>[22]</sup>的结果一致,说明酸枣幼苗在盐胁迫下细胞膜产生氧化损伤,但自身可诱导抗氧化酶

活性和还原性次生代谢产物含量升高,积极应对胁迫,减轻伤害。而适宜浓度的 MeJA 有效激活了酸枣幼苗的抗氧化酶防御系统,增强了抗氧化酶活性以清除多余的活性氧,减少 MDA 产生,提高了细胞活力和组织保水能力,降低了膜系统的过氧化程度,从而提高幼苗耐盐性,其中以 200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 效果最佳。

### 3.4 外源 MeJA 提高盐胁迫下酸枣幼苗渗透调节能力

植物在应对盐胁迫时会进行渗透调节,产生多种有机和无机渗透调节物质。脯氨酸、可溶性糖是重要的有机渗透调节物质,可以维持细胞内外渗透压和离子平衡,调节细胞膜的运输能力,保护和稳定抗氧化酶活性和结构,使植物组织免受盐胁迫伤害。陈运梁等<sup>[22]</sup>研究表明盐胁迫和 MeJA 使小桐子幼苗脯氨酸合成途径中吡咯啉-5-羧酸合成酶(P5CS)和鸟氨酸转氨酶(OAT)上调表达。本研究中,盐胁迫后酸枣幼苗体内脯氨酸、可溶性糖含量均显著升高,并随外施 MeJA 浓度升高,其含量呈先升高后下降趋势,这与 Dooz 等<sup>[23]</sup>对水仙的研究结果一致,其中以 200  $\mu\text{mol/L}$  的 MeJA 效果最佳,说明适宜浓度 MeJA 可能响应了盐胁迫下酸枣幼苗渗透调节物质的合成途径,诱导其产生和积累渗透调节物质,从而降低细胞渗透势,维持细胞的持水保水能力,缓解了盐胁迫带来的干旱胁迫伤害。

## 4 结 论

外源施加适宜浓度 MeJA 可有效缓解盐胁迫对酸枣幼苗生长的抑制,200~400  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 处理下株高、根长、相对含水量显著增加,细胞内外渗透压、水分等维持平衡,植株生理干旱现象缓解较为明显。外施 MeJA 可通过增强光合效率和渗透调节能力激活植株抗氧化酶防御系统来提高高盐环境下酸枣幼苗抗氧化和抗干旱能力,并以 200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 效果最佳。与 NaCl 胁迫对照组相比,200  $\mu\text{mol/L}$  MeJA 处理叶片  $P_n$  和总叶绿素含量分别显著增加 34.1%和 42.5%,地上、地下部分 CAT 活性分别显著增加 86.0%、112.0%,黄酮含量分别增加 66.9%、143.1%,多酚含量分别增加 22.7%、13.9%,脯氨酸含量分别增加 18.0%、18.2%,可溶性糖含量分别增加 10.9%、15.6%,MDA 含量分别降低 39.8%、64.0%。

## 参考文献:

- [1] 刘丽, 王永康, 苏万龙, 等. 中国酸枣种质资源收集保存、鉴定评价及筛选利用进展[J]. 西北农业学报, 2024, 33(2): 191-200.  
LIU L, WANG Y K, SU W L, *et al.* Advance of research in conservation, evaluation, utilization of wild jujube germplasm resources in China[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, 33(2): 191-200.
- [2] 解玉军, 李泽, 崔小芳, 等. 酸枣化学成分及药理作用研究进展[J]. 中成药, 2021, 43(5): 1269-1275.  
XIE Y J, LI Z, CUI X F, *et al.* Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Ziziphus jujuba* Mill. [J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2021, 43(5): 1269-1275.
- [3] 杨文涛, 王琦, 郭二丹, 等. 土壤盐渍化对植物影响的研究进展[J]. 农业与技术, 2024, 44(18): 95-99.  
YANG W T, WANG Q, GUO E D, *et al.* Research progress on the influence of soil salinization on plants[J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(18): 95-99.
- [4] QIU Y F, AN K, SUN J J, *et al.* Investigating the effect of methyl jasmonate and melatonin on resistance of *Malus crabapple* 'Hongjiu' to ozone stress[J]. *Environmental Science Pollution Research International*, 2019, 26(27): 27761-27768.
- [5] 李小玲, 华智锐. 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫下黄芩种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(11): 1603-1607.  
LI X L, HUA Z R. Effects of exogenous methyl jasmonate on the *Scutellaria baicalensis* seed germination and seedling physiological characteristics under salt stress [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 1603-1607.
- [6] 杨梅, 段新航, 王召誉, 等. 外源 MeJA 对低温、干旱和 NaCl 胁迫紫花苜蓿幼苗生理特性的影响[J/OL]. 分子植物育种, (2021-10-09) [2024-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211009.1223.004.html>.  
YANG M, DUAN X H, WANG Z Y, *et al.* Effects of exogenous methyl jasmonate on physiological changes of alfalfa under cold, drought and NaCl stresses[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, (2021-10-09) [2024-09-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211009.1223.004.html>.
- [7] 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.  
ZHAO Y L, LI D J, CUI X S, *et al.* Physiological and biochemical responses of *Forsythia suspensa* seedlings to exogenous methyl jasmonate under drought stress[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2020, 43(8): 1830-1834.
- [8] 陈丽靓, 孙军利, 常心怡, 等. 外源 ALA 对 NaCl 胁迫下酸枣幼苗叶绿素合成的影响[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(7): 1659-1665.  
CHEN L L, SUN J L, CHANG X Y, *et al.* Effects of exogenous ALA on chlorophyll synthesis in jujube seedlings under NaCl stress[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(7): 1659-1665.
- [9] 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.
- [10] 周茂福, 胡梦梅, 张元兵, 等. 紫外分光光度法测定温肺化纤汤中各大类成分的含量[J]. 时珍国医国药, 2014, 25(6): 1283-1285.  
ZHOU M F, HU M M, ZHANG Y B, *et al.* Determination of major components in Wenfeihuaxian formula by ultraviolet spectrophotometry [J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2014, 25(6): 1283-1285.
- [11] JAVED R. Salt stress by NaCl alters the physiology and biochemistry of tissue culture-grown *Stevia rebaudiana* Bertoni[J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2019, 43(1): 11-20.
- [12] 闫敏. 骏枣对混合盐碱胁迫的生理生化响应[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022.
- [13] HE X X, WAN Z L, JIN N, *et al.* Enhancement of cucumber resistance under salt stress by 2,4-epibrassinolide lactones[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1023178.
- [14] DANISH S, SANA S, HUSSAIN M B, *et al.* Effect of methyl jasmonate and GA<sub>3</sub> on canola (*Brassica napus* L.) growth, antioxidants activity, and nutrient concentration cultivated in salt-affected soils[J]. *BMC Plant Biology*. 2024, 24(1): 363.
- [15] 杨雨薇. 外源 MeJA 对盐肤木与泰山盐肤木幼苗耐盐性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [16] 乔梅生, 季志平. 沙枣幼苗在干旱胁迫下的光合特性研究[J]. 陕西林业科技, 2022, 50(2): 5-8.  
QIAO M S, JI Z P. Photosynthetic characteristics of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under drought stress[J]. *Shaanxi Forest Science and Technology*, 2022, 50(2): 5-8.
- [17] 王静, 蒋倩, 陶田田, 等. 外源钙对盐碱胁迫下万寿菊生长及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1345-1354.  
WANG J, JIANG Q, TAO T T, *et al.* Effects of exogenous calcium on growth and photosynthetic characteristics of *Tagetes erecta* under salt-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2024, 44(9): 1345-1354.
- [18] 武子璇, 王欣, 张永超, 等. 硅对盐胁迫下藜麦幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 现代农业科技, 2024(11): 1-6.  
WU Z X, WANG X, ZHANG Y C, *et al.* Effect of silica on growth and antioxidant enzyme activity of quinoa under salt stress[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(11): 1-6.
- [19] 李丽杰, 顾万荣, 李从锋, 等. DCPTA 对低温下玉米叶片抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1829-1841.  
LI L J, GU W R, LI C F, *et al.* Effect of DCPTA on antioxidant system and osmotic adjustment substance in leaves of maize seedlings under low temperature stress [J]. *Plant Physiology Journal*, 2016, 52(12): 1829-1841.
- [20] 谭雪艳. 高温胁迫对金钗石斛生理和次生代谢的影响及外源钙缓解效应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2022.
- [21] 董文堂, 陈艳, 邵登魁, 等. UV-B 胁迫对辣椒叶片防御酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 青海农林科技, 2024(2): 86-91.  
DONG W T, CHEN Y, SHAO D K, *et al.* Effects of UV-B stress on defense enzyme activity and malondialdehyde content in pepper leaves[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2024(2): 86-91.
- [22] 陈运梁, 邹竹荣, 杨双龙. 外源茉莉酸甲酯对盐胁迫下小桐子幼苗渗透调节和脯氨酸代谢的影响[J]. 西北植物学报, 2023, 43(5): 794-804.  
CHEN Y L, ZOU Z R, YANG S L. Effect of exogenous methyl jasmonate on osmotic adjustment capacity and proline metabolism of *Jatropha curcas* seedlings under salt stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(5): 794-804.
- [23] DOOZ, R T, NADERI D, KALATEHJARI S, *et al.* Methyl jasmonate's role in alleviating salt stress-induced challenges in *Narcissus* growth[J]. *Biology Bulletin*, 2024, 51(3): 586-601.