

DOI: 10.16211/j.issn.1004-390X(n).2015.02.012

## 叶面喷施脱落酸对提高星油藤幼苗耐旱性研究\*

苏志龙<sup>1,2</sup>, 罗银玲<sup>1,2</sup>, 毕廷菊<sup>1</sup>, 罗娅婷<sup>1</sup>, 赵艳<sup>1</sup>, 兰芹英<sup>2\*\*</sup>

(1. 普洱学院 生命科学系, 云南 普洱 665000;

2. 中国科学院 西双版纳热带植物园, 云南 勐腊 666303)

**摘要:** 为提高星油藤的抗旱性, 发展其种植业, 分析了 2~50  $\mu\text{mol/L}$  的脱落酸 (ABA) 预处理对星油藤幼苗抗旱性的影响。结果表明: ABA 预处理可降低脂质过氧化程度, 减缓超氧阴离子 ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) 的生成速率, 减少过氧化氢 ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 含量; 提高超氧化物歧化酶 (SOD)、愈创木酚过氧化物酶 (GPOX)、过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 和谷胱甘肽还原酶 (GR) 等抗氧化酶的活性; 且 ABA 的最合适浓度为 2~5  $\mu\text{mol/L}$ 。可见, ABA 预处理可通过诱导抗氧化酶活性来提高星油藤的抗旱性。因此, 外施 ABA 对星油藤的种植具有重要的实际应用意义。

**关键词:** 脱落酸; 星油藤; 干旱; 抗氧化酶; 活性氧

中图分类号: S 565.9 文献标志码: A 文章编号: 1004 - 390X (2015) 02 - 0239 - 06

## Spraying of Abscisic Acid on the Leaf Improved Drought Resistance of *Plukenetia volubilis* Seedling

SU Zhilong<sup>1,2</sup>, LUO Yinling<sup>1,2</sup>, BI Tingju<sup>1</sup>, LUO Yating<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>, LAN Qinying<sup>2</sup>

(1. College of Life Science, Puer University, Puer 665000, China;

2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, China)

**Abstract:** In order to improve the drought resistance of *Plukenetia volubilis* and develop its planting industry, we studied the effect of pretreatment of 2~50  $\mu\text{mol/L}$  abscisic acid (ABA) on the drought resistance of *P. volubilis* seedlings. The results showed that ABA pretreatment could decrease the level of lipid peroxidation, the generation rate of superoxide anion ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ), and content of the hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Meanwhile, ABA increased the activities of *antioxidase* including superoxide dismutase (SOD), guaiacol peroxidase (GPOX), catalase (CAT), ascorbic acid peroxidase (APX) and glutathione reductase (GR). We found that the most appropriate concentration was 2~5  $\mu\text{mol/L}$ . Therefore, ABA pretreatment can improve the drought resistance of *P. volubilis* by inducing the antioxidant enzyme activities. So we consider that spray of ABA on the *P. volubilis* leaves are of great importance and practical applications for its planting industry.

**Keywords:** abscisic acid; *Plukenetia volubilis*; drought; antioxidant enzyme; reactive oxygen species

收稿日期: 2014-01-01

修回日期: 2014-04-15

网络出版时间: 2015-03-13 15:56

\* 基金项目: 国家林业局“948”资助项目 (2011-4-54)。

作者简介: 苏志龙 (1978—), 男, 山东临沂人, 硕士, 讲师, 主要从事植物逆境生理相关的研究。

E-mail: 350065133@qq.com

\*\* 通信作者 Corresponding author: 兰芹英 (1966—), 女, 云南腾冲人, 高级实验师, 主要从事种子生物学研究。

E-mail: lqy@xtbg.org.cn

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20150313.1556.012.html>

星油藤 (*Plukenetia volubilis* L.) 又名印加果, 是大戟科 (Euphorbiaceae) 的一种木质藤本植物, 生长在南美洲安第斯 (Andes) 山脉地区的热带雨林中。星油藤生长迅速, 属于强需光性植物, 光照强度低时, 植株需要较长的时间完成生长周期<sup>[1]</sup>; 星油藤能适应 70 ~ 2 000 m 的海拔高度<sup>[2]</sup>, 位于低海拔 (< 900 m) 的星油藤, 其种子产量较高, 高海拔 ( $\geq 900$  m) 的星油藤种子具有较好的品质<sup>[3]</sup>。此外, 星油藤能够在 10 ~ 36℃ 的温度范围内生长良好<sup>[3]</sup>, 但过高的温度对其生长不利。星油藤种子中不饱和脂肪酸的含量高, 约占脂肪总含量的 92% 以上, 且富含氨基酸、生育酚、甾醇等活性成分<sup>[4]</sup>, 市场应用前景非常广泛。2006 年中国科学院西双版纳热带植物园从国外引入星油藤并成功种植, 西双版纳州政府提出了加快西双版纳州星油藤产业发展的规划。

自 2010 年云南出现严重干旱以来, 已连续四年遭遇干旱。长期干旱与低温是造成星油藤生长缓慢的主要原因<sup>[5]</sup>, 通过接种两种丛枝菌根真菌 (*arbuscular mycorrhizal fungus*, AMF) 到星油藤幼苗, 可提高星油藤幼苗的耐旱能力<sup>[6]</sup>, 但大面积的接种难以实施。植物激素脱落酸 (ABA) 可诱导植物的抗氧化能力, 在植物逆境胁迫过程中起着重要的作用<sup>[7]</sup>。因此, 本研究旨在通过检验 ABA 处理是否能增加星油藤的耐旱能力, 并检验其耐旱能力与星油藤的抗氧化系统之间的关系, 为提高星油藤的耐旱能力和发展星油藤种植业提供科学依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

星油藤种子于 2012 年 9 月在西双版纳热带植物园收集, 清洗晾干后运输到云南省普洱市普洱学院, 种植于装满腐殖土的盆内 (直径 15 cm, 高 15 cm); 种子萌发后, 每盆留 1 株幼苗, 放置在相对湿度为 (71.1 ± 4.1)% 的温室内, 室内最高气温、平均气温与最低气温分别为 (26.32 ± 1.71)℃, (21.65 ± 3.76)℃, (17.98 ± 0.87)℃。每隔 1 d, 给每盆星油藤幼苗浇水 500 mL。当幼苗长出 5 ~ 6 对叶片时, 用不同浓度 (0, 2, 5, 10, 50 μmol/L) 的 ABA 溶液喷施星油藤幼苗叶面。早上 8 点第 1 次喷施后, 于次日早上 8 点进行第 2 次喷施, 并在第 2 次喷施后给幼苗浇水。第 3 天起停止浇水, 对植株进行干旱

处理。停止浇水 2 d 后, 剪取第 3 对叶片, 一部分用来测定叶片的含水量与相对含水量, 另一部分保存在 -20℃ 的冰箱中, 用于测定各项生理生化参数。未进行 ABA 预处理且未进行干旱的幼苗记作对照 1 (CK1), 未进行 ABA 预处理但进行干旱处理的幼苗记作对照 2 (CK2)。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 含水量和相对含水量测定

叶片含水量采用称鲜重、烘干、称干重的方法测定, 取部分叶片, 称其鲜重 (FW); 然后在 100℃ 电热恒温箱中烘 48 h 至恒重 (DW), 其计算公式为

$$\text{含水量} = [(\text{FW} - \text{DW}) / \text{FW}] \times 100\%$$

叶片相对含水量采用常规饱和、烘干、称重的方法测定。取部分叶片, 称其鲜重 (FW); 然后放在蒸馏水中饱和 24 h, 称重 (TW); 在 100℃ 电热恒温箱中烘 48 h 至恒重 (DW)。计算方法为

$$\text{相对含水量} = [(\text{FW} - \text{DW}) / (\text{TW} - \text{DW})] \times 100\%$$

#### 1.2.2 $\text{O}_2^-$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 的测定

$\text{O}_2^-$  生成速率按照李忠光与龚明的方法进行<sup>[8]</sup>。称取约 0.5 g 叶片, 在液氮中磨成冻干粉后, 在 5 mL 50 mmol/L 磷酸钾缓冲液 (pH 7.8) 中匀浆, 以 10 000 r/min 离心 15 min。样品提取液 0.5 mL, 加入 0.5 mL 50 mmol/L 磷酸缓冲液, 100 μL 10 mmol/L 盐酸羟胺, 混匀, 置于 25℃ 水浴锅中 1 h, 各管再加入 1 mL 17 mmol/L 对氨基苯磺酸和 1 mL 7 mmol/L α-萘胺, 混匀, 置于 25℃ 水浴锅显色 20 min。在 530 nm 波长处测定吸光度。

过氧化氢的测定按照 PATTERSON 等<sup>[9]</sup>的方法进行。称取约 0.3 g 叶片, 在液氮中磨成冻干粉后, 于 5 mL 5% 三氯乙酸中匀浆, 匀浆液经 10 000 r/min 离心 10 min。取上清液 1 mL 加入 0.1 mL 5% (体积分数) 硫酸钛的浓盐酸溶液, 再加入 0.2 mL 浓氨水, 混匀后以 5 000 r/min 离心 10 min。将沉淀用 2 mL 1 mol/L 硫酸充分溶解后, 用紫外—可见分光光度计测定波长 410 nm 处的光吸收值。

#### 1.2.3 丙二醛的测定

丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量的测定按照罗银玲<sup>[10]</sup>的方法进行。称取约 0.4 g 叶片, 在液氮中磨成冻干粉后, 用 5 mL 5% 的三氯乙酸匀浆, 以 10 000 r/min 离心 15 min。取上清液 0.5 mL, 加入 1.5 mL 含有 0.5% 硫代巴比妥酸的

15% 三氯乙酸溶液中, 在 95 °C 水浴 30 min 后迅速冷却。经 10 000 r/min 离心 10 min 后, 取上清液分别在波长 600, 532, 450 nm 处测定光吸收值。

#### 1.2.4 抗氧化酶活性测定

超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX)、谷胱甘肽还原酶 (glutathione reductase, GR) 与脱氢抗坏血酸还原酶 (dehydroascorbate reductase, DHAR) 的测定按照 LUO 等<sup>[11]</sup>的方法进行。SOD 反应液为磷酸缓冲液 (pH 7.8), 含 13 mmol/L 甲硫氨酸, 75 mmol/L NBT, 16.7 μmol/L 核黄素, 0.1 mmol/L EDTA; 在波长 560 nm 处测定吸光值; SOD 活性以 1 mg 蛋白抑制 NBT 光化还原的 50% 作为 1 个酶活性单位。CAT 的反应体系为含有 30 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的 50 mmol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.0), 测定反应体系在 240 nm 处光吸收值的变化。APX 反应液为磷酸缓冲液 (pH 7.0), 含 1 mmol/L AsA, 4 mmol/L H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 与 0.1 mmol/L 乙二胺四乙酸 (ethylenediamine tetraacetic acid, EDTA); 测定反应体系在 290 nm 处光吸收值的变化。GR 反应体系为 50 mM 磷酸缓冲液 (pH 7.8), 含 5 mmol/L MgCl<sub>2</sub>, 1 mmol/L 氧化型谷胱甘肽 (oxidized glutathione, GSSG), 1 mmol/L EDTA 与 2 mmol/L 还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸 (NADPH); 测定反应体系在 340 nm 处光吸收值的变化。DHAR 反应体系为 50 mmol/L 磷酸缓冲液 (pH 7.0), 含 0.4 mmol/L 脱氢抗坏血酸

(dehydroascorbic acid, DHA), 3.5 mmol/L GSH 与 1 mmol/L EDTA; 测定反应体系在 265 nm 处光吸收值的变化。

愈创木酚过氧化物酶 (guaiacol peroxidase, GPOX) 的测定按照 CIA 等<sup>[12]</sup>的方法进行。GPOX 反应体系为 50 mmol/L 磷酸缓冲液 (pH 6.0), 含 0.5% (体积分数) 愈创木酚, 1% (体积分数) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>; 测定反应体系在 470 nm 处光吸收值的变化; GPOX 活性以每分钟光吸收值增加 1 作为 1 个酶活性单位。

酶活性以蛋白含量为基础表示, 蛋白含量参照 BRADFORD<sup>[13]</sup>的方法进行。

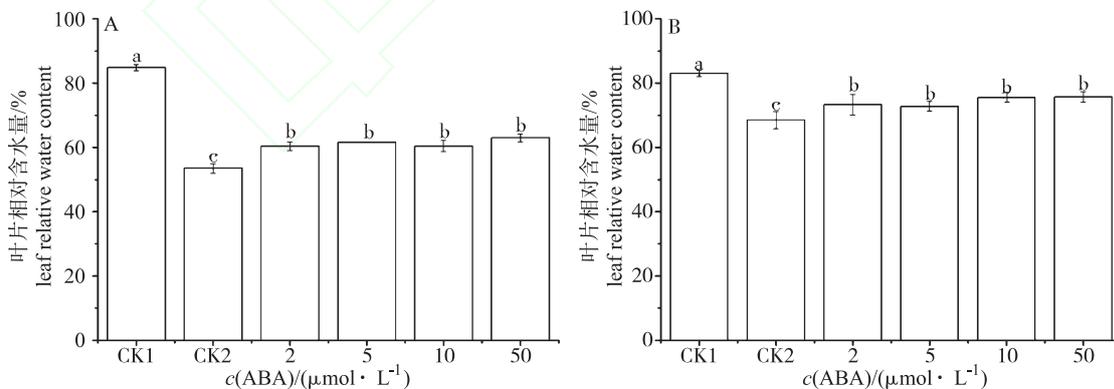
#### 1.3 统计分析

数据统计分析用 R 软件 (R i386 3.0.1) 进行, 采用方差分析来检验不同浓度 ABA 处理对各种参数的差异显著性, 并用 HSD 检验进行了多重比较分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 ABA 预处理对叶片含水量和相对含水量的影响

未干旱处理的星油藤幼苗 (CK1), 叶片相对含水量与含水量分别为 84.83% 与 83.02% (图 1); 干旱处理的幼苗 (CK2), 叶片相对含水量与含水量均显著降低 ( $P < 0.01$ ), 分别为 53.48% 与 68.50%。ABA 预处理能显著抑制干旱引起的含水量与相对含水量的降低 ( $P < 0.05$ ), 但不同浓度 ABA 对含水量的影响不存在显著差异 ( $P > 0.05$ )。



注: CK1. 未喷施 ABA, 未干旱的对照; CK2. 未喷施 ABA, 干旱处理的对照; 2, 5, 10, 50 μmol/L 的 ABA 预处理的幼苗均经过干旱处理。柱状图上不同的小写字母表示各处理之间差异显著 (0.05 水平); 下同。

Note: CK1. control without ABA application and drought; CK2. control without ABA application but the drought treatment; the seedlings with 2, 5, 10 and 50 μmol/L ABA pretreatment were treated by drought stress. The different lowercase letters on the histogram indicated that there was significantly different between the treatments; the same as below.

图 1 不同浓度 ABA 对干旱胁迫的星油藤幼苗的叶片相对含水量与叶片含水量的影响

Fig. 1 Effects of ABA of different concentrations on the leaf relative water contents and leaf water contents in drought-stress *P. volubilis* seedlings

2.2 ABA 预处理对幼苗叶片中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响

未干旱处理的星油藤幼苗 (CK1), 叶片中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率 (干重) 为 0.52 μmol/ (g · min) (图 2A); 干旱处理的幼苗 (CK2), 叶片中 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率 (干重) 显著增加 (P < 0.01), 达到 1.08 μmol/ (g · min), 增加率为 100%; ABA 预处理能显著抑制干旱导致的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率的增加 (P < 0.01); 不同浓度 ABA 对 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率的影响存在显著差异 (P < 0.05), 其中, 2 μmol/L 和 5 μmol/L 的 ABA 预处理使 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率降低

的程度不仅显著低于 10 μmol/L 和 50 μmol/L, 且显著低于 CK1。

未干旱处理的星油藤幼苗 (CK1), 叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量 (干重) 为 15.61 μmol/g (图 2B); 干旱处理的幼苗 (CK2), 叶片中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量 (干重) 显著增加 (P < 0.01), 达到 19.54 μmol/g; ABA 预处理能显著抑制干旱导致的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的增加 (P < 0.01), 且不同浓度 ABA 对 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响存在显著差异 (P < 0.05), 其中 5 μmol/L 和 10 μmol/L 的 ABA 预处理使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量降低的程度最大。

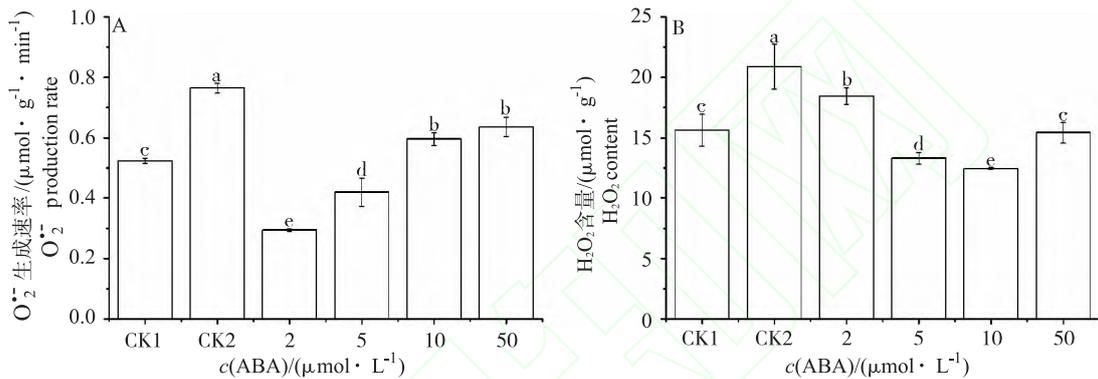


图 2 不同浓度 ABA 对干旱胁迫的星油藤幼苗的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 生成速率与 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响  
Fig. 2 Effects of ABA of different concentrations on the production rate of O<sub>2</sub><sup>-</sup> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> content in drought-stress *P. volubilis* seedlings

2.3 ABA 预处理对幼苗叶片中 MDA 含量的影响

未干旱处理的星油藤幼苗 (CK1), 叶片中 MDA 含量 (干重) 为 16.88 nmol/g (图 3); 干旱处理的幼苗 (CK2), 叶片中 MDA 含量显著增加 (P < 0.01), 达到 62.82 nmol/g。ABA 预处理能显著抑制干旱导致的 MDA 含量的增加 (P < 0.01), 且不同浓度 ABA 对 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量的影响存在显著差异 (P < 0.05), 其中 2, 5 与 10 μmol/L 的 ABA 预处理使 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量降低的程度最大。

理的干旱幼苗 (CK2) 高 (P < 0.05), 且以 2 μmol/L 和 5 μmol/L 的 ABA 预处理引起的酶活性最高; DHAR 的活性在 ABA 与处理以后变化较大, 2 μmol/L 和 5 μmol/L 处理引起酶活性降低, 50 μmol/L 处理导致酶活性增强。

2.4 ABA 预处理对幼苗叶片中抗氧化酶活性的影响

星油藤幼苗干旱处理后 (CK2), 叶片中 6 种抗氧化酶 (SOD, GPOX, CAT, APX, GR 与 DHAR) 的活性均低于未干旱处理的幼苗 (CK1), 除 SOD 酶活性的降低无显著差异外 (P > 0.05), 其他 5 种酶的酶活性均降低显著 (P < 0.01); ABA 预处理对 6 种抗氧化酶的影响不一致 (图 4); 其中, SOD, GPOX, CAT, APX 与 GR 的酶活性在 ABA 预处理后均比未进行预处理

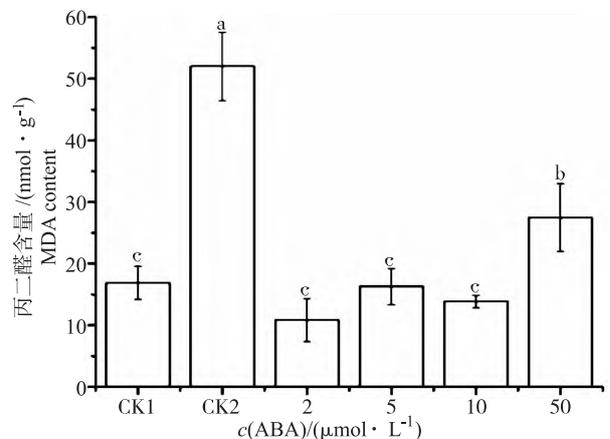


图 3 不同浓度 ABA 对干旱胁迫的星油藤幼苗的 MDA 含量的影响  
Fig. 3 Effects of ABA of different concentrations on MDA content in drought-stress *P. volubilis* seedlings

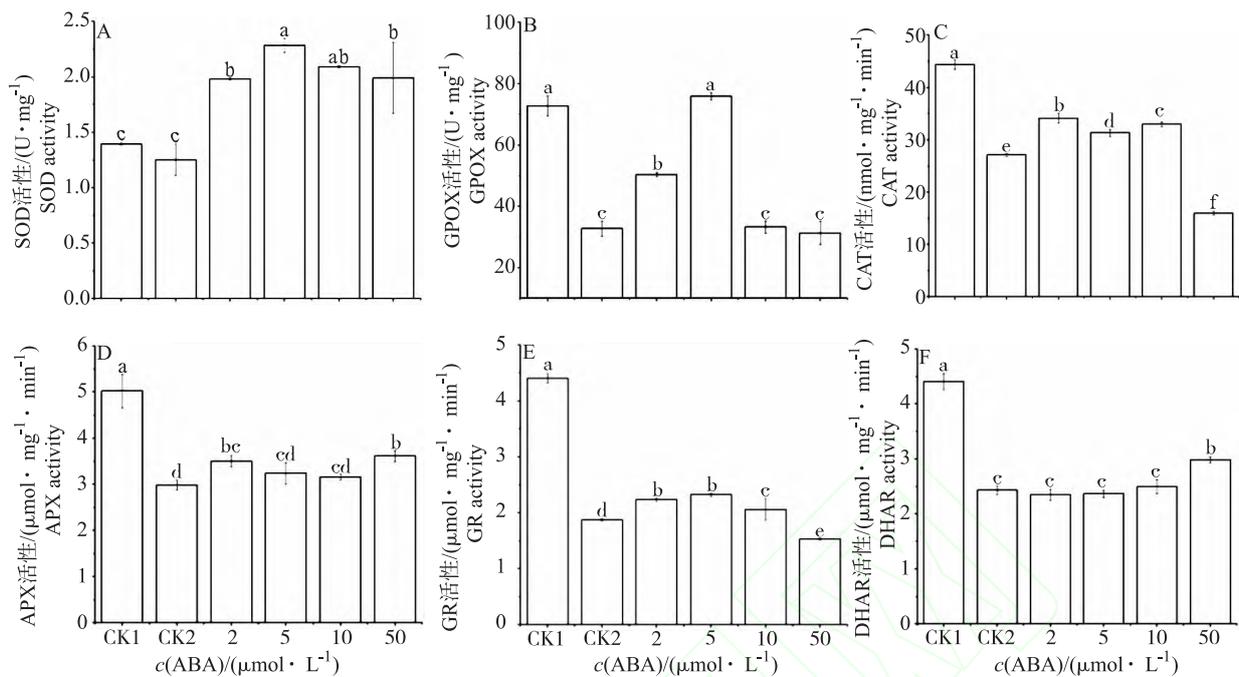


图4 不同浓度ABA对干旱胁迫的星油藤幼苗的抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of ABA of different concentrations on the activities of antioxidant enzymes in drought-stress *P. volubilis* seedlings

### 3 讨论

星油藤幼苗在干旱胁迫后, 叶片的含水量与相对含水量均显著下降; ABA 预处理的幼苗在干旱胁迫后, 叶片含水量与相对含水量下降程度显著减少。这些结果表明 ABA 预处理提高了星油藤幼苗的耐旱能力。这与 ABA 可提高茄苗 (*Solanum melongena* L.) 抗旱能力<sup>[14]</sup>、外施 ABA 可提高芝麻 (*Sesamum indicum* L.) 幼苗叶片的保水能力<sup>[15]</sup>、ABA 可提高三倍体狗牙草的耐旱能力<sup>[16]</sup>的研究结果相似。此外, 不同浓度 ABA 对保持叶片的含水量与相对含水量的影响无显著差异, 因此, 对提高星油藤幼苗的抗旱性而言, 外施 ABA 的最经济的浓度是 2  $\mu\text{mol/L}$ 。

植物在进行各种生命代谢活动时, 由于氧气 ( $\text{O}_2$ ) 未被完全还原, 就会产生某些氧化代谢产物及其衍生物, 这些分子都含有氧原子, 但比  $\text{O}_2$  具有更活泼的化学性质, 总称为活性氧 (reactive oxygen species, ROS)<sup>[17]</sup>。当植物遭遇各种不良环境胁迫时, 会产生更多的 ROS<sup>[18]</sup>。当星油藤幼苗遭遇干旱胁迫时, 叶片中  $\text{O}_2^{\cdot-}$  生成速率显著提高,  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量也显著增加, 但 ABA 处理显著抑制这两种 ROS 的增加, 表明干旱导致的 ROS 产生会被 ABA 引起的 ROS 清除系统中和, 从而使

得星油藤叶片中 MDA 含量降低约 80%; 而 TIAN 等<sup>[6]</sup>采用真菌处理星油藤后, 其 MDA 含量仅降低了约 50%。可见, 叶面喷施 ABA 更能降低氧化伤害, 提高了幼苗的抗旱性, 且相对接种真菌, 更容易操作。

能够有效清除 ROS 带来的伤害被认为是植物能抵抗各种胁迫的机制之一<sup>[19]</sup>。为了解释 ABA 预处理能提高星油藤幼苗的抗旱性以及这种作用与抗氧化之间的关系, 本研究测定了 6 种抗氧化酶的活性, 结果表明: 干旱植株中 6 种抗氧化酶的活性均低于未干旱植株, 这与 TIAN 等<sup>[6]</sup>的结果不一致。他们发现 GPX 与 CAT 的活性在干旱的植株中更高, 造成这种原因的差异可能是干旱处理的程度不同。TIAN 等幼苗的干旱是在 40% 相对土壤含水量中进行的, 而本研究在干旱结束时, 土壤的绝对含水量为 4%。可见, 星油藤幼苗抗氧化酶活性的高低, 不仅与干旱胁迫有关, 与胁迫程度也有关。ABA 能显著提高除 DHAR 外其他五种酶的活性, 这与其他研究中 ABA 处理能提高抗氧化酶活性<sup>[14-15,19]</sup>的结果也相符。

综上所述, 叶面喷施 ABA 提高了星油藤幼苗的抗氧化能力, 从而减少了干旱导致的氧化伤害。因此, 叶面喷施 ABA 对星油藤的种植有重要的实际应用意义。

## [参考文献]

- [1] CAI Z Q. Shade delayed flowering and decreased photosynthesis, growth and yield of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) plants [J]. Industrial Crops and Products, 2011, 34 (1): 1235 – 1237.
- [2] MANCO E I. Cultivo de Sacha Inchi [M]. Peru: INIEA-SUDIRGEB-EEA, 2006: 1 – 11.
- [3] CAI Z Q, JIAO D Y, TANG S X, et al. Leaf photosynthesis, growth and seed chemicals of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) plants cultivated along an altitude gradient [J]. Crop Science, 2012, 52: 1859 – 1867.
- [4] 蔡志全, 杨清, 唐寿贤, 等. 木本油料作物星油藤种子营养价值的评价 [J]. 营养学报, 2011, 33 (2): 193 – 195.
- [5] 蔡志全. 特种木本油料作物星油藤的研究进展 [J]. 中国油脂, 2011, 36 (10): 1 – 6.
- [6] TIAN Yaohua, LEI Yanbao, ZHENG Yulong, et al. Synergistic effect of colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves growth and drought tolerance of *Plukenetia volubilis* seedlings [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35: 687 – 696.
- [7] 郝格格, 孙忠富, 张录, 等. 脱落酸在植物逆境胁迫研究中的进展 [J]. 中国农学通报, 2009, 25 (8): 212 – 215.
- [8] 李忠光, 龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进 [J]. 云南植物研究, 2005, 27: 211 – 216.
- [9] PATTERSON B D, MACRAE E A, FERGUSON I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV) [J]. Analytical Biochemistry, 1984, 139 (2): 487 – 492.
- [10] 罗银玲, 宋松泉, 兰芹英. 酶促和非酶促抗氧化系统在玉米胚脱水耐性获得中的作用 [J]. 云南植物研究, 2009, 31 (3): 253 – 259.
- [11] LUO Y L, LAN Q Y, LU X, et al. Storage behaviour and antioxidant activities of *Mimusops elengi* L. seed subjected to different drying rates [J]. Seed Science and Technology, 2012, 40 (3): 354 – 364.
- [12] CIA M C, GUIMAR ES A C R, MEDICI L O, et al. Antioxidant responses to water deficit by drought-tolerant and -sensitive sugarcane varieties [J]. Annals of Applied Biology, 2012, 161 (3): 313 – 324.
- [13] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72: 248 – 254.
- [14] 汤日圣, 唐现洪, 钟雨, 等. 生物源脱落酸 (ABA) 提高茄苗抗旱能力的效果及机理 [J]. 江苏农业学报, 2006, 22 (1): 10 – 13.
- [15] 严寒, 许本波, 赵永福, 等. 脱落酸和水杨酸对干旱胁迫下芝麻幼苗生理特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26 (6): 163 – 166, 172.
- [16] SARVAJEET S G, NARENDRA T. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48 (12): 909 – 930.
- [17] 薛鑫, 张芊, 吴金霞. 植物体内活性氧的研究及其在植物抗逆方面的应用 [J]. 生物技术通报, 2013 (10): 6 – 11.
- [18] DAT J F, FOYER C H, SCOTT I M. Changes in salicylic acid and antioxidants during induction in thermotolerance in mustard seedlings [J]. Plant Physiology, 1998, 118: 1455 – 1461.
- [19] LU Shaoyun, SU Wei, LI Haihang, et al. Abscisic acid improves drought tolerance of triploid bermudagrass and involves H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>- and NO-induced antioxidant enzyme activities [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47 (2): 132 – 138.