

# 外源物质对干旱复水平邑甜茶抗氧化酶的影响

权 静<sup>1</sup>, 张 林 森<sup>1</sup>, 李 雪 薇<sup>1</sup>, 张 海 亭<sup>2</sup>, 张 立 新<sup>2</sup>, 李 丙 智<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 生命学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以苹果砧木平邑甜茶 2 a 生实生苗为材料进行盆栽试验, 研究比较了干旱复水条件下外源甜菜碱(GB)、脱落酸(ABA)和硝普钠(SNP, NO 供体)对平邑甜茶幼苗抗氧化防护酶活性的影响。结果表明:外源 GB、ABA 和 NO 显著降低了干旱胁迫下平邑甜茶幼苗叶片质膜相对透性和 MDA 含量, 重度胁迫时与 CK 相比, 分别降低了 13.5%、12.2%、18.4% 与 32.4%、14.4%、37.6%; 外源 GB、ABA 和 NO 提高了叶片中 SOD、CAT 和 POD 的活性, 在田间持水量 30% 时分别达到最大, 与同期 CK 相比, POD 活性分别增加 13.5%、13.4% 和 24.4%, SOD 活性分别增加 15.3%、13.7% 和 16.2%, CAT 活性则分别增加 63.2%、53.7% 和 95.3%, 之后酶活性开始下降。外源 GB、ABA 处理后 GR、DHAR、APX 和 MDHAR 的变化趋势与 CAT 等趋势相同, 同样在田间持水量 30% 时酶活分别达到最大; NO 处理后, GR、DHAR、APX 的变化趋势亦相同, 虽然 NO 对 MDHAR 活性比干旱处理有所升高, 但差异不显著。复水后, 不同外源物质下植物的抗旱生理指标变化趋势不尽相同。表明喷施外源 GB、ABA 和 NO 可有效的提高叶片的抗氧化系统酶的活性, 增强平邑甜茶幼苗的抗旱能力。比较 GB、ABA 和 NO 处理, NO 在提高平邑甜茶抗旱性方面效果最好, GB 处理其次, ABA 处理最低。

**关键词:**外源物质; 平邑甜茶; 干旱复水; 抗氧化防护酶

**中图分类号:**S 661.104<sup>+</sup>.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)18-0005-06

苹果一直在我国果树种植业中占据优势地位, 作为北方干旱半干旱地区的重要经济树种, 主要栽培在丘陵山地, 利用工程抗旱具有较大的难度。因此, 研究利用生物抗旱技术提高苹果抗旱能力有一定的必要性。

**第一作者简介:**权静(1986-), 女, 陕西西安人, 在读硕士, 现主要从事果树生理生态研究工作。E-mail: quanjing1986@163.com.

**责任作者:**张林森(1964-), 男, 江苏镇江人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 现主要从事旱地果树树体水分吸收与根际灌溉施肥及果树栽培与营养生理等的研究工作。E-mail: linsenzhang@163.com.

**基金项目:**国家苹果产业技术体系资助项目(CARS-28); 农业部公益性行业专项资助项目(Nyhyzx07-024); 陕西省科技厅重大攻关资助项目(2011KTZB02-02-05)。

**收稿日期:**2012-05-14

前人研究发现植物遭受逆境后, 体内生长调节物质或者渗透调节物质大量积累, 缓解了逆境对植物造成的伤害, 对于提高植物抗性, 维持其正常生长具有重要的意义。因此, 对于这类物质的研究引起人们的广泛关注, 人们试图利用外源物质保护植物免受逆境伤害, 并已取得了一定成果。外施 ABA 可以缓解植物伤害, 减小质膜透性和丙二醛含量, 提高抗氧化系统酶活性<sup>[1-3]</sup>。一氧化氮(NO)作为植物体内重要的信号分子和植物生长调节物质, 参与了植物光形态建成、种子萌发、叶片扩展、衰老、气孔运动以及植物对胁迫的响应等生命过程<sup>[4-6]</sup>。一定浓度的外源 NO 可诱导抗氧化酶基因的表达, 降低植物体内 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量以保护细胞免受胁迫的伤害, 发挥抗氧化功能<sup>[7-8]</sup>; 低外源 NO 可以缓解逆境对植

stress plastic shelter were investigated in 6 cultivars. The significantly related indicators were screened with the heat injury by the membership function method. The results showed that 4 indexes, were significant negative correlation with the heat injury index, could be used to identify the heat resistance of Chinese flowering cabbages. It included the HT-PH, HT-SSLN, HT-TW and HT-SR in heat stress plastic shelter during the cultivars harvesting time. The heat tolerance of the tested 6 cultivars could be divided into three types. The 'Sijiu-19caixin' and 'Sijiu Huangcaixin' were heat resistant type, 'Youlv50tiancaixin' and 'Youlv501caixin' were general heat tolerance, 'Youlv701caixin' and 'Teqingchixin 4' were heat-sensitive.

**Key words:** Chinese flowering cabbage; heat tolerance; heat injury index; comprehensive membership function method

物体带来的伤害,降低膜脂过氧化,诱导脯氨酸积累及SOD、CAT、APX等酶活性的上升,从而减轻水分胁迫对植物的伤害<sup>[9-12]</sup>。干旱和盐渍逆境条件下,植物体内会大量积累渗透调节物质-甜菜碱(GB),其是植物对逆境适应的产物,具有一定的保水作用<sup>[13]</sup>。逆境条件下对植物叶面喷施、根施一定浓度的甜菜碱,或用甜菜碱溶液浸种均能提高植物的抗逆性<sup>[14-17]</sup>。上述研究还表明ABA、NO和GB都具有浓度效应,低浓度促进植物生长,诱导抗氧化酶基因的表达,提高植物抗逆性;高浓度则抑制植物生长发育。轻、中度干旱不能使植物致死,植物生长代谢和抗旱机制也未被彻底破坏,复水会解除胁迫,植物通过自身各种生理生化反应主动恢复到最佳状态,而且干旱后复水对作物生长在一定程度上具有补偿效应<sup>[18-23]</sup>。

近年来国内外有关GB、ABA和NO提高植物抗性的最新进展,主要集中在研究逆境条件下单一施入外源物质对植物抗逆性的提高、抗氧化防御酶活性的影响等方面,关于外源施入GB、ABA和NO对干旱复水后平邑甜茶的抗旱效果及抗氧化系统的影响的比较研究尚未见系统报道。该试验以平邑甜茶为材料,通过外源添加GB、ABA和NO,分析平邑甜茶幼苗在干旱复水条件下叶片抗氧化酶活性的动态变化,旨在比较3种物质对苹果树抗旱性的提高程度及物质作用效果,为探讨植物抗旱机理、提高作物抗旱能力的研究和旱地苹果生产和管理提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

于2011年3~9月在西北农林科技大学苹果产业技术体系示范苗圃的防雨棚(E 108°02', N 34°18')中进行,海拔538 m,年平均气温12.9℃,日照2 196 h,无霜期141 d,属大陆性暖温带季风气候。

### 1.2 试验材料

供试材料为2 a生平邑甜茶[*Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd.]实生苗。于2011年3月15日将40株生长一致的平邑甜茶移入试验盆中,每盆栽植1株,供试土壤为杨凌农田耕层土、专用基质和细沙的混合物,按体积比例为3:1:1混匀,其田间持水量为32%,之后定期进行浇水,使其正常生长。

### 1.3 试验方法

试验共4个处理,每处理10次重复,于2011年7月15日干旱处理前进行甜菜碱(GB)、脱落酸(ABA)和硝普钠(SNP, NO供体)喷施,连喷4 d,上午9:00进行。对照(CK),叶面喷清水;处理1(T<sub>1</sub>)叶面喷100 mg/L GB;处理2(T<sub>2</sub>)叶面喷100 μmol/L ABA;处理3(T<sub>3</sub>)叶面喷200 μmol/L 硝普钠,配置处理液分别加0.5%吐温-20作

为表面活性剂;试验开始前对植株进行一次饱和灌水,结束喷施当天开始停止灌水,进行持续干旱处理,采用称重法控制土壤含水量,每天傍晚称重记录并计算土壤含水量,当达到田间持水量的25%时进行复水,复水至田间持水量的75%。分别在停水后第3、6、10、16、19天和复水后第2、5天进行随机采样,即田间持水量的75%(正常)、60%(轻度胁迫)、45%(中度胁迫)、30%、25%(重度胁迫)和复水的75%、65%,样品在-80℃保存待测。

### 1.4 项目测定

1.4.1 叶水势 于晴天上午9:00选取顶叶往下第3~5片成熟叶,用MODEL-1000型压力室(美国PMS公司生产)进行叶水势测定。

1.4.2 抗氧化酶 超氧化物歧化酶(SOD)活性根据Giannopolitis等<sup>[24]</sup>的方法测定;过氧化物酶(POD)活性根据Chance等<sup>[25]</sup>的方法测定;过氧化氢酶(CAT)活性参照Aebi<sup>[26]</sup>的方法测定;抗坏血酸过氧化物酶(APX)和脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性按Nakano等<sup>[27]</sup>的方法测定;单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR)活性根据Arrigoni等<sup>[28]</sup>的方法测定;谷胱甘肽还原酶(GR)活性测定根据Foyer等<sup>[29]</sup>的方法测定。

1.4.3 丙二醛(MDA)含量和质膜相对透性 MDA含量测定参考李合生<sup>[30]</sup>的方法;细胞质膜相对透性的测定,用DDS-307+电导率仪测定电导率,以相对电导率来表示细胞膜相对透性。

1.4.4 可溶性蛋白含量 可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝G-250染色法<sup>[31]</sup>。

### 1.5 数据分析

试验结果均为5次重复的平均值±标准差表示(Mean±SE),采用Excel对数据进行描述性分析,采用SPSS V 17.0统计分析软件对数据进行One-Way ANOVA方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源物质对干旱复水下平邑甜茶叶片水势的影响

由表1可知,随着干旱的不断加剧,叶片水势不断下降,严重干旱时叶片水势降低至-2.85,CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>比正常(75%)分别降低70.7%、47.1%、53.4%和34.8%,经T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>处理后水势变化明显变缓,同时复水后叶片水势也能较快的恢复。不同水分条件下,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>与CK相比,水势都有一定程度的提高,轻度胁迫(60%)时,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>比CK分别提高3.9%、3.0%和8.6%,中度胁迫(45%)分别提高8.8%、6.1%和14.1%,处理之间差异明显;重度干旱(25%)时,则分别提高10.2%、4.2%和14.4%;复水后各处理水势均能很快恢复至正常水平。

表 1

外源物质对干旱复水下苹果砧木叶片水势的影响

Table 1

Effect of exogenous substances on leaf water potential of drought stress and rewater

田间持水量 Field water capacity	叶水势 Leaf water potential/ Mpa						
	75%	60%	45%	30%	25%	复水至 75%	65%
CK	-1.67±0.10a	-2.33±0.07b	-2.62±0.10c	-2.72±0.13d	-2.85±0.13e	-1.81±0.09ab	-2.36±0.11b
T <sub>1</sub>	-1.74±0.07a	-2.24±0.08b	-2.39±0.09c	-2.42±0.12c	-2.56±0.11d	-1.61±0.10a	-2.22±0.09b
T <sub>2</sub>	-1.78±0.07a	-2.26±0.10b	-2.46±0.14c	-2.59±0.09d	-2.73±0.10e	-1.74±0.14a	-2.31±0.14b
T <sub>3</sub>	-1.71±0.10ab	-2.13±0.13b	-2.25±0.13c	-2.33±0.12d	-2.44±0.09e	-1.66±0.07a	-1.96±0.07b

注:CK:自然干旱不灌水,田间持水量 25%时复水;T<sub>1</sub>:喷施 100 mg/L GB,自然干旱不灌水,田间持水量 25%时复水;T<sub>2</sub>:喷施 100 μmol/L ABA,自然干旱不灌水,田间持水量 25%时复水;T<sub>3</sub>:喷施 200 μmol/L SNP,自然干旱不灌水,田间持水量 25%时复水。

## 2.2 外源物质对干旱复水下平邑甜茶叶片 CAT、POD、SOD 酶活性的影响

由图 1-a 可知,随着胁迫程度的增加,CAT 活性呈现先升高后降低的趋势,经 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理后的 CAT 活性均高于 CK,在田间持水量 30%时达到最高,与同期 CK 相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理下 CAT 活性分别增加 63.2%、53.7%和 95.3%,之后 CAT 活性开始下降;复水至田间持水量 75%,CAT 活性明显下降,但仍显著高于正常,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理组 CAT 活性分别为 CK 的 159.8%、150.1%和 200.8%,外源处理组与对照呈现显著或极显著

差异,其中 T<sub>3</sub> 处理的酶活性最高,T<sub>1</sub> 处理其次,T<sub>2</sub> 处理最低。

由图 1-b,1-c 可以看出,随着胁迫程度的加剧,POD、SOD 活性的变化趋势与 CAT 活性变化趋势相同,同样在田间持水量 30%时达到最高,与 CK 相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理组 POD 活性分别增加 13.5%、13.4%和 24.4%,SOD 活性分别增加 15.3%、13.7%和 16.2%,之后酶活性开始下降。复水后,POD 和 SOD 的活性均明显下降,显著高于正常水平,CK 处理的酶活性最低,T<sub>3</sub> 处理的酶活性仍保持最高。

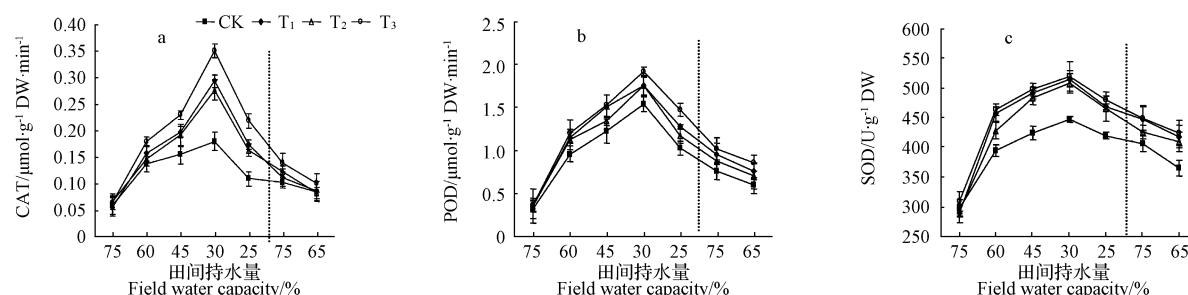


图 1 外源物质对干旱复水下苹果砧木 CAT、POD 和 SOD 活性的影响

Fig. 1 Effect of exogenous substances on CAT, POD and SOD activity in apple leaves to the drought stress and rewater

## 2.3 外源物质对干旱复水下平邑甜茶叶片 GR、DHAR、APX 和 MDHAR 活性的影响

由图 2 可知,随着胁迫程度加剧,GR、DHAR、APX 和 MDHAR 活性均有所增加,田间持水量 30%时达到最大,之后开始下降;复水后各酶活性仍高于正常水平。经 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理后 GR、DHAR、APX 和 MDHAR 活性进一步提高,在田间持水量 30%时分别达到最大,均高于 CK,GR 比 CK 分别高 44.7%、27.2%,DHAR 分别高 52.5%、36.7%,APX 分别高 97.4%、85.6%,MDHAR 分别高 157.0%、125.2%,之后开始下降;复水至田间持水量 75%时,各酶活性明显下降,但仍显著高于正常,且比同期 CK 高。T<sub>3</sub> 处理的叶片中 GR、DHAR、APX 与 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 处理的变化趋势相同,在田间持水量 30%时比 CK 分别高 61.4%、93.8%和 111.6%,差异极显著,MDHAR 活性与 CK 比较有所升高,但差异不显著。

## 2.4 外源物质对干旱复水下平邑甜茶质膜相对透性、可溶性蛋白和 MDA 含量的影响

由图 3-a 可知,干旱导致植物细胞遭受氧化胁迫,膜系统遭到损伤,从而相对膜透性显著上升,与正常(75%)相比,不同水分条件下相对膜透性分别增加 35.8%、69.8%、133.6%,复水后有一定的恢复,但仍比正常高 73.2%、56.0%。T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理下质膜相对透性比 CK 有所降低,轻度胁迫(60%)时分别降低 3.6%、2.4%和 4.8%,中度胁迫(45%)时分别降低 9.1%、7.0%和 12.5%,处理之间差异显著;严重胁迫(25%)时,CK、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 质膜相对透性为正常(75%)的 233.6%、193.1%、196.3%和 177.3%,分别比同期 CK 降低 13.5%、12.2%和 18.4%,差异极显著;复水后质膜相对透性均有所下降,但仍高于正常,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 处理质膜相对透性恢复较 CK 快。

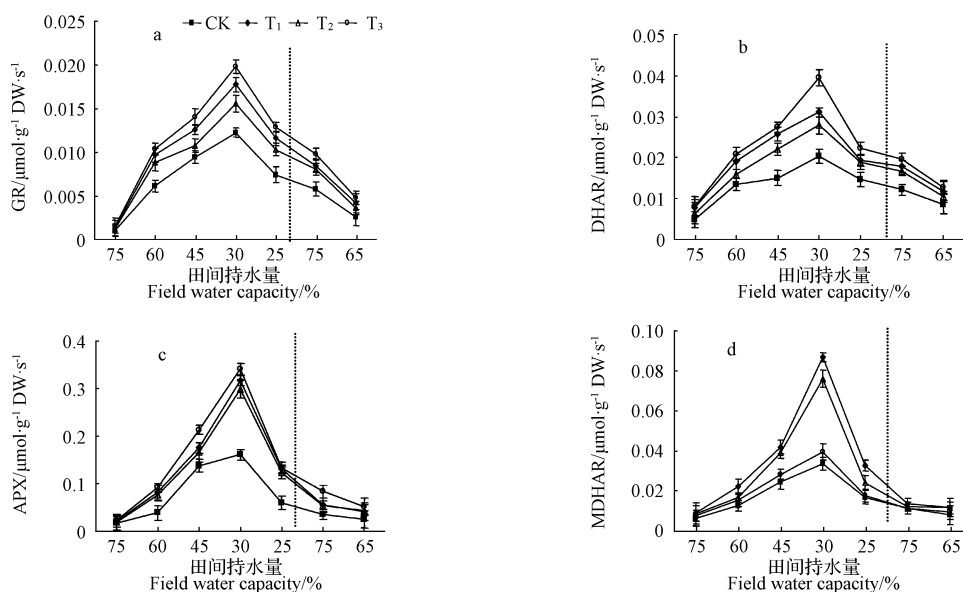


图2 外源物质对干旱复水下苹果砧木 GR、DHAR、APX 和 MDHAR 活性的影响

Fig. 2 Effect of exogenous substances on GR, DHAR, APX and MDHAR activity in apple leaves to drought stress and rewater

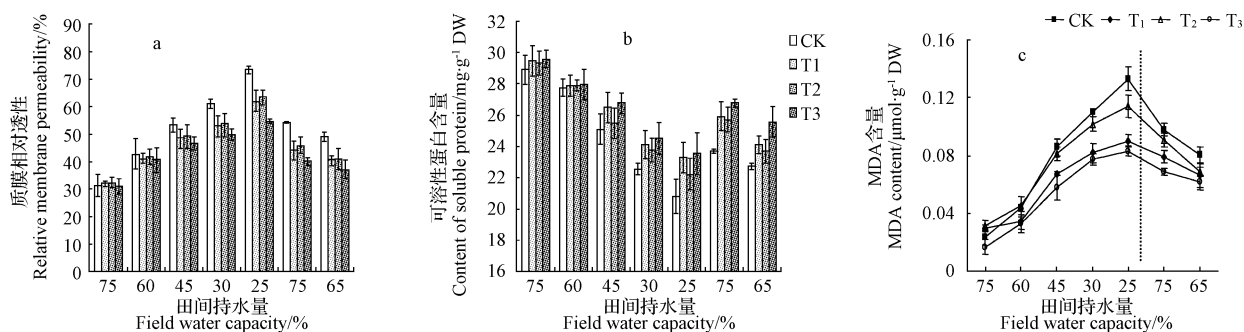


图3 外源物质对干旱复水下苹果砧木叶片可溶性蛋白含量、相对膜透性和 MDA 含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous substances on content of soluble protein, relative membrane permeability and MDA contents in apple leaves to the drought stress and rewater

由图 3-b 可知,干旱致使可溶性蛋白(Pro)发生降解,含量不断降低,从而对平邑甜茶造成伤害。轻度胁迫(60%)时, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 与 CK 相比 Pro 分别增加 0.5%、0.5%和 0.7%,差异不显著;中度胁迫(45%)时与 CK 相比分别增加 5.6%、1.5%和 6.6%,差异显著;严重干旱(25%)时,CK、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 的 Pro 含量为正常的 72.0%、79.0%、75.7%和 79.5%,比 CK 则分别增加 11.8%、6.7%和 13.1%,差异亦显著。复水后 Pro 显著恢复,复水 75%时分别恢复为正常的 85.3%、92.9%、92.2%和 95.7%,外源处理组较 CK 恢复的更快一些,其中  $T_3$  处理效果最明显。

由图 3-c 可知,MDA 含量在干旱胁迫过程中显著上升,而经  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理比 CK 明显减少,表明干旱胁迫引发的膜质过氧化得到缓解,从而保护植物体免受伤害。轻度胁迫(60%)时,MDA 含量在 CK 与  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理之间没有明显差异;中度胁迫(45%), $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处

理则比 CK 分别下降 21.2%、5.0%和 32.4%,差异显著;严重干旱(25%)时, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理比同期 CK 分别降低 32.4%、14.4%和 37.6%,差异极显著。复水后,MDA 含量下降,但仍高于正常水平, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理降幅明显; $T_3$  与  $T_1$ 、 $T_2$  相比,效果更明显。

### 3 讨论与结论

水分胁迫条件下,植物体内 ABA 会得到大量诱导积累,而外施 ABA 处理会进一步促进植物内源 ABA 的合成,促使植物叶片气孔关闭,减少水分的蒸发,诱导抗旱基因的表达、新蛋白的合成,并提高相关抗氧化酶的活性,从而增强植株抵抗逆境的能力<sup>[32-34]</sup>。外源 NO 能够对逆境胁迫下植物叶片膜脂过氧化有明显的缓解效应,并降低 MDA 含量,提高抗氧化系统酶活性,从而增强植株抵抗逆境的能力<sup>[35-37]</sup>。外源 NO 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗的生长和氧化损伤也具有明显的保护作用<sup>[38]</sup>。甜菜碱作为大分子渗透调节物质参与了植物的抗逆性



研究。外源施用甜菜碱可以有效抑制逆境胁迫下棉花<sup>[39]</sup>、小麦<sup>[40-41]</sup>、黄瓜<sup>[42]</sup>等的丙二醛含量的积累,提高抗氧化酶活性,从而增强植株抵抗逆境的能力,具有缓解植物受逆境伤害的效应。

该研究表明,外源喷施 GB、ABA 和 SNP(NO 供体)提高了干旱造成的叶片水势的降低,减缓了可溶性蛋白的降解速度,诱导 SOD、POD、CAT、DHAR、APX 和 GR 活性的升高,加强植物活性氧的清除能力,从而降低了膜脂的过氧化程度,MDA 含量比干旱处理显著降低,细胞膜透性也显著降低。在田间持水量的 30% 时,外源 GB、ABA 和 SNP 处理显著提高, SOD、POD、CAT、DHAR、APX 和 GR 的活性且达到最大,之后酶活性开始下降。复水后,平邑甜茶自身的补偿效应使得 SOD、POD、CAT、DHAR、APX 和 GR 活性降低,但仍显著高于干旱处理;另外 GB、ABA 和 SNP 处理后的叶片水势较干旱处理恢复的更快一些,可溶性蛋白也有一定程度的恢复,MDA 含量、质膜相对透性也能较快恢复到或接近正常水平。外源 GB 和 ABA 处理对叶片 MDHAR 活性的影响与对 SOD 等的影响相同,同时外源 NO 对 MDHAR 活性与干旱处理相比有所升高,但差异不显著。综合考虑,该研究表明外源 GB、ABA 和 NO 处理显著提高了干旱复水下抗氧化酶的活性,从而有效的缓解了干旱对平邑甜茶造成的伤害和对其生长的抑制作用,增强了平邑甜茶幼苗抵御干旱胁迫的能力和自身的防护机制。该试验对 100 mg/L GB、100  $\mu$ mol/L ABA 和 200  $\mu$ mol/L SNP 3 种物质作用效果的比较结果显示,在增强平邑甜茶对干旱胁迫抗性方面,NO 的效果明显最优,GB 处理其次,ABA 处理最低。

最新研究表明,ABA 通过诱导叶片的 NO 产生来调节气孔关闭,而且这一信号传导过程还有赖于体内信号分子的合成。生物体内信号传导是一个复杂而又精细的结构体系,这一过程中还有许多问题有待从细胞和分子水平进行深入研究;另外,GB、ABA 和 NO 对抗氧化系统酶基因诱导的先后顺序和对抗性基因表达量的影响也有待进行 PCR 定量分析,重要的是 3 种物质的应用问题的解决将给农业带来可观的经济效益和社会效益。

### 参考文献

- [1] 许树成,丁海东,鲁锐,等. ABA 在植物细胞抗氧化防护过程中的作用[J]. 中国农业大学学报,2008,13(2):11-19.
- [2] 木合塔尔·扎热,齐曼·尤努斯,山中和典. 干旱胁迫下外源脱落酸和硅对沙枣幼苗叶片水势及保护酶活性的影响[J]. 植物研究,2010,30(4):468-472.
- [3] 胡秀丽,杨海荣,李潮海. ABA 对玉米响应干旱胁迫的调控机制[J]. 西北植物学报,2009,29(11):2345-2351.
- [4] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide stimulates seed germination and deetiolation, and inhibits hypocotyl elongation, three light~inducible responses in plants [J]. *Planta*, 2000, 210(2): 215-221.
- [5] Zhang H, Shen W B, Xu L L. Effects of nitric oxide on the germination of wheat seeds and its reactive oxygen species metabolisms under osmotic stress[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(8): 901-905.
- [6] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide interferes with plant photo-oxidative stress by detoxifying reactive oxygen species [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2002, 25(6): 737-748.
- [7] 陈明,沈文彪,阮海华,等. 一氧化氮对盐胁迫下小麦幼苗根生长和氧化损伤的影响[J]. 植物生理与分子生物学报,2004,30(5):569-576.
- [8] 王宪叶,沈文彪,徐朗莱. 外源一氧化氮对渗透胁迫下小麦幼苗叶片膜脂过氧化的缓解作用[J]. 植物生理与分子生物学报,2004,30(2):195-200.
- [9] 张艳艳,刘俊,刘友良. 一氧化氮缓解盐胁迫对玉米生长的抑制作用[J]. 植物生理与分子生物学报,2004,30(4):455-459.
- [10] 王森,李秋荣,付士磊,等. 一氧化氮对杨树耐旱性的影响[J]. 应用生态学报,2005,16(5):805-810.
- [11] 刘建新,王鑫,李博萍. 外源一氧化氮供体 SNP 对 NaCl 胁迫下黑麦草幼苗叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J]. 草业学报,2010,19(2):82-88.
- [12] 樊怀福,郭世荣,焦彦生,等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J]. 生态学报,2007,27(2):546-557.
- [13] 张立新,李生秀. 甜菜碱与植物抗旱/盐性研究进展[J]. 西北植物学报,2004,24(9):1765-1771.
- [14] 邱念伟,杜斐,郝爽,等. 叶面喷施甜菜碱在烟草叶片保水和耐脱水中的作用[J]. 中国农业科学,2008,41(10):3363-3370.
- [15] 马新蕾,王玉军,谢胜利,等. 根施甜菜碱对水分胁迫下烟草幼苗光合机构的保护[J]. 植物生理与分子生物学报,2006,32(4):465-472.
- [16] 王一鸣,王有年,师光禄. 外源甜菜碱对水分胁迫下桃树生理响应的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(3):542-548.
- [17] 赵博生,衣艳君,刘家尧. 外源甜菜碱对干旱/盐胁迫下的小麦幼苗生长和光合功能的改善[J]. 植物学通报,2001,18(3):378-380.
- [18] 周雪英,邓西平. 旱后复水对不同倍性小麦光合及抗氧化特性的影响[J]. 西北植物学报,2007,27(2):278-285.
- [19] 安玉艳,郝文芳,梁宗锁,等. 干旱-复水处理对红柳幼苗光合作用及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3047-3055.
- [20] Chaves M M, Oliverir A M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture [J]. *Journal of Experiment Botany*, 2004, 55: 2366-2380.
- [21] 郭相平,刘展鹏,王青梅. 采用 PEG 模拟干旱胁迫及复水玉米光合补偿效应[J]. 河海大学学报,2007,35(3):286-289.
- [22] 周白云,梁宗锁,李硕. 干旱-复水对酸枣相对含水量、保护酶及光合特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(1):93-97.
- [23] 王志强,梁威威,范雯雯. 不同土壤肥力下冬小麦春季干旱的复水补偿效应[J]. 中国农业科学,2011,44(8):1628-1636.
- [24] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants [J]. *Plant Physiology*, 1977, 59: 309-314.
- [25] Chance B, Maehly A C. Assay of catalases and peroxidases [M]. *Methods Enzymol*, 1955(2): 764-817.
- [26] Aebi H. Catalase *in vitro* [M]. *Meth Enzymol*, 1984, 105: 121-126.
- [27] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. *Plant Cell Physiology*, 1981, 22: 867-880.
- [28] Arrigoni, Dipierros, Borracono. Ascorbate free radical reductase, a key enzyme of the ascorbic acid system [J]. *FEBS Letters*, 1981, 125: 242-244.
- [29] Foyer C H, Halliwell B. The presence of glutathione and glutathione

- reductase in chloroplasts; a proposed role in ascorbic acid metabolism[J]. *Planta*, 1976, 133: 21-25.
- [30] 李合生, 孙群, 赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 260-263.
- [31] 高俊凤. 植物生理学实验指导书[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [32] Jiang M Y, Zhang J H. Role of abscisic acid in water stress induced antioxidant defence in leaves of maize seedlings[J]. *Free Radical Res*, 2002, 36: 1001-1015.
- [33] Shao H B, Liang Z S, Shao M A. Changes of anti-oxidative enzymes and membrane peroxidation for soil water deficits among 10 wheat genotypes at seedling stage[J]. *Colloids Surfaces*, 2005, 42: 107-113.
- [34] 李长宁, Srivastava M K, 农倩, 等. 水分胁迫下外源 ABA 提高甘蔗抗旱性的作用机制[J]. 作物学报, 2010, 36(5): 863-870.
- [35] 王罗霞, 赵志光, 王锁民. 一氧化氮对水分胁迫下小麦叶片活性氧代谢及膜脂过氧化的影响[J]. 草业学报, 2006, 15(4): 104-108.
- [36] 毛亚斌, 魏小红. 外源 NO 对干旱胁迫下板蓝根叶片氧化损伤的保护作用[J]. 草业科学, 2010, 27(6): 97-101.
- [37] 汤绍虎, 周启贵, 孙敏, 等. 外源 NO 对渗透胁迫下黄瓜种子萌发、幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 419-425.
- [38] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 575-581.
- [39] Meloni D A, Oliva M A, Martinez C A. Photosynthesis and activity of superoxide dismutase, peroxidase and glutathione reductase in cotton under salt stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49: 69-76.
- [40] 马千全, 邹琦, 李永华, 等. 根施甜菜碱对水分胁迫下小麦幼苗水分状况和抗氧化能力的改善作用[J]. 作物学报, 2004, 30(4): 321-328.
- [41] Bajji M, Lutts J M. Water deficit effect on solution contribution to osmotic adjustment as a function of leaf aging in three durum wheat (*Triticum durum* Desf) cultivars performing differently in arid conditions[J]. *Plant Science*, 2001, 160: 669-681.
- [42] 李芸瑛, 梁广坚, 李永华, 等. 外源甜菜碱对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(6): 673-676.
- (该文作者还有马锋旺, 单位同第一作者。)

## Effect of Exogenous Substances on Antioxidant Protection Enzyme Activity of Drought Stress and Rewater for *Malus hupehensis*

QUAN Jing<sup>1</sup>, ZHANG Lin-sen<sup>1</sup>, LI Xue-wei<sup>1</sup>, ZHANG Hai-ting<sup>2</sup>, ZHANG Li-xin<sup>2</sup>, LI Bing-zhi<sup>1</sup>, MA Feng-wang<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. College of Science, Northwest Agricultural and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** An experiment was set up, the effect of exogenous GB, ABA and NO to the antioxidant protection enzyme activity after drought and rewater using two-year-old *Malus hupehensis* for materials were studied and compared. The results showed that exogenous GB, ABA and NO significantly reduced the relative membrane permeability and MDA content in leaves of *Malus hupehensis* after drought stress and rewater. Compared with CK, in severe drought, the relative membrane permeability and MDA content respectively decreased by 13.5%, 12.2%, 18.4% and 32.4%, 14.4%, 37.6%; exogenous GB, ABA and NO improved the activities of SOD, CAT and POD in leaves of *Malus hupehensis*, in field moisture capacity 30% they respectively achieved the maximum, compared with the same period CK, POD activity respectively increased by 13.5%, 13.4% and 24.4%, SOD activity respectively increased by 15.3%, 13.7% and 16.2%, CAT activity respectively increased by 63.2%, 53.7% and 95.3%, then the enzyme activity decreased. Exogenous GB, ABA treatment made the DHAR, APX, GR, MDHAR activity and the CAT activity had a same changing trends, also in field moisture capacity 30% they respectively achieve the maximum; exogenous NO treatment also made the DHAR, APX, GR activity had the same change tendency, although NO treatment made the MDHAR activity higher than the single drought treatment, but not reached significant differences. After rewater, the variation tendencies of the drought resistance and physiological indexes of *Malus hupehensis* was the same, which treaded with the different exogenous substances. The results clearly explained that exogenous GB, ABA and NO can effectively increase the antioxidant protection enzyme activity of the leaves, enhance the drought resistance of *Malus hupehensis*. Comparison between GB, ABA and NO treatment showed that, in the improvement of drought resistance of *Malus hupehensis*, NO treatment was the best one, GB treatment was next, ABA was the last one.

**Key words:** exogenous substances; *Malus hupehensis*; drought stress and rewater; antioxidant protection enzyme