

# 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆膜脂过氧化作用的影响

钟 鹏<sup>1</sup>, 吴俊江<sup>1</sup>, 刘丽君<sup>1</sup>, 林蔚刚<sup>1</sup>, 董德建<sup>1</sup>, 王建丽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>黑龙江省农业科学院大豆研究所;<sup>2</sup>黑龙江省农业科学院草业研究所, 黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘 要:**以不同磷效率基因型大豆黑河 27、黑河 29 为材料,在控制磷素供应水平的条件下,通过控制灌水量的盆栽试验,研究了干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆膜脂过氧化作用的影响。结果表明:随土壤干旱强度增加,磷高效基因型大豆叶片丙二醛(MDA)含量、细胞膜透性和  $O_2^-$  含量递增的幅度明显小于磷低效基因型,超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性及过氧化物酶(POD)活性降低的幅度显著小于磷低效基因型,渗透调节物质可溶性糖(SS)、脯氨酸(Pro)随干旱胁迫强度增大而增加,磷高效基因型大豆的渗透调节能力要明显大于磷低效基因型。表明大豆耐旱性与其抗氧化酶活性相关,渗透调节物质是构成其耐旱性的重要物质基础,磷高效基因型膜脂过氧化程度小于磷低效基因型,并且表现出显著性差异。

**关键词:**大豆;干旱;磷效率;膜脂过氧化

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2008)04-0610-06

## Effect of Drought Stress on Lipid Peroxidation in Soybean Varieties with Different P Efficiency

(ZHONG-Peng<sup>1</sup>, WU Jun-jiang<sup>1</sup>, LIU Li-jun<sup>1</sup>, LIN Wei-gang<sup>1</sup>, DONG De-jian<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>2</sup>)

(<sup>1</sup>Soybean Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; <sup>2</sup>Institute of Pratacultural Sciences, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Soybean cultivars with high phosphorus efficiency adapt to P stress environment easily. Previous studies have focused on the mechanism of soybean's adaptation to low P stress. But the coupling effect of water and phosphorus on different P efficiency genotypic soybean is less documented. Therefore, pot experiments were conducted in 2007 year, with P high efficient soybean Heihe 27 and P low efficient soybean Heihe 29 as materials, to determine the influence of water and P coupling on lipid peroxidation characters of different genotypic soybean at seedling stage. Two P (applied P and without P) and four water (100%, 70%, 50% and 30% of the maximum field water holding capability) treatments were designed and endosmosis permeability,  $O_2^-$  content, malondialdehyde (MDA) content, relative conductivity, Superoxide dismutase (SOD), peroxidase enzyme (POD) activity, catalase enzyme (CAT) activity, proline content, soluble sugar content were determined. As drought stress increased, the MDA, relative conductivity and  $O_2^-$  content of P high efficient soybean increased and the increasing scope was obviously smaller than that of P low efficient soybean; the decrease scope of SOD, POD and CAT activity of P high efficient soybean was remarkably smaller than that of P low efficient soybean; proline and soluble sugar content of P high efficient soybean increased obviously. The results indicate that antioxidant enzymes are related to drought tolerance and the osmotic adjustment materials are the inherent basis of superior drought tolerance of different phosphorus efficient soybean, and the lipid peroxidation degree of P high efficient soybean is significantly reduced.

**Key words:** Soybean; Drought stress; Phosphorus efficiencies; Lipid peroxidation

植物生长发育经常会受到逆境胁迫的影响。植物在逆境胁迫下,体内活性氧产生与清除的代谢系统失调,导致活性氧过量积累而造成伤害。植物为

保护自身免受活性氧的伤害,形成了内源保护系统,包括抗氧化酶类和非酶抗氧化剂,维持体内活性氧代谢的平衡<sup>[1-2]</sup>。此外,植物在水分胁迫下积累脯

收稿日期:2008-01-03

基金项目:黑龙江省“十一五”科技攻关资助项目(GA06B101-2-5, GA06B101-1-2);“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD21B01-6);黑龙江省自然科学基金资助项目(C2007-13);农业部948项目子课题。

作者简介:钟鹏(1978-),男,硕士,助理研究员,主要从事大豆高产栽培理论与技术研究。E-mail: zhongpengvip@163.com。

通讯作者:吴俊江,副研究员。E-mail: nkywuji@126.com。

氨酸等进行渗透调节,维持膨压以利于生理过程的正常进行而抵抗伤害<sup>[3]</sup>。因此,植物体所具有的保护体系、渗透调节功能及其它一些机制是某些抗旱植物在长期进化过程中所演化出的适应干旱的机制和策略,是其能够忍耐长期干旱胁迫的重要物质基础<sup>[4]</sup>。

大豆是黑龙江省播种面积最大的作物之一,而大豆主产区多分布在干旱或半干旱地区,水和磷资源的缺乏是这些地区大豆生产的主要限制因子,并且这种形势日益严峻。相关领域的学者已开展很多研究工作,力图挖掘抗旱和高效利用土壤磷的种质资源,通过一种安全高效的途径解决水和磷缺乏的问题<sup>[5-6]</sup>。低磷胁迫对作物生长发育的影响方面研究比较系统<sup>[7-8]</sup>。然而,综合考虑干旱和低磷胁迫对作物生长发育的影响,目前尚缺少系统的研究<sup>[9-11]</sup>。以不同基因型大豆为材料,研究了干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆膜脂过氧化作用影响的研究,探讨水分和磷素共同作用下植株生长和体内生化指标的差异,以期为进一步筛选适宜在干旱半干旱地区特定生境中生产应用的大豆品种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验于 2007 年 3 月~10 月在黑龙江省农业科学院盆栽试验场进行。选用不同磷素营养效率的 2 个基因型大豆品种:磷高效基因型黑河 27 与磷低效基因型黑河 29。取饱满、无病虫害的大豆种子,经 0.1% HgCl<sub>2</sub> 溶液消毒 10 min 后,用蒸馏水反复冲洗干净,在 20% 的 PEG-6000 溶液中吸胀 8 h 后播种。

### 1.2 试验设计

供试土壤取 100 cm 以下深层黑土+粘土,土壤含有机质 5.3 g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮 32.6 mg·kg<sup>-1</sup>、速效磷 2.3 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾 45.5 mg·kg<sup>-1</sup>,每盆装土 14 kg。

试验设 2 个供磷水平,即施磷(+P),低磷(-P);4 个水分处理:田间最大持水量(W1)、田间最大持水量的 70%(W2),50%(W3)和 30%(W4)。施磷处理每盆磷酸二铵 4.56 g,尿素 1.52 g,硫酸钾 1.60 g,低磷处理施入尿素 1.52 g,硫酸钾 1.60 g,不施磷肥。肥料分底肥和追肥两次施入,底肥施入总施肥量的 2/3,追肥施入总施肥量的 1/3。采用随机区组排列,3 次重复。2006 年 5 月 1 日播

种,在适宜水分下大豆出苗后开始水分处理,每天称重控制水分,出苗后 30 d 取样。

### 1.3 测定内容及方法

细胞膜透性采用电导仪法测定,用 DDS-307 电导率仪测定电导率,经换算获得细胞膜透性指标;用硫代巴比妥(TBA)提取法测定丙二醛(MDA);用磺基水杨酸法测定游离脯氨酸含量;可溶性糖含量采用按蒽酮法进行测定;超氧阴离子(O<sub>2</sub><sup>-</sup>)含量根据王爱国等所采用的羟胺氧化法测定<sup>[12-14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆细胞膜透性的影响

黑河 27 和黑河 29 在干旱和磷素胁迫下,细胞膜透性变化如图 1。低磷胁迫能使两磷效率基因型大豆相对电导率增加,-PH 与 +PH 相比,相对电导率增加了 19.81%,细胞膜透性变化不显著;而 -PL 与 +PL 相比,相对电导率增加了 59.47%,细胞膜透性变化呈极显著水平;+PH 与 +PL 相比,相对电导率变化无显著性差异。在相同条件下进行不同程度干旱胁迫,+PH 与 -PH 处理相比较,在轻度和中度干旱胁迫下,细胞膜透性变化不显著,而在重度干旱胁迫下,细胞膜透性变化达极显著水平;+PL 与 -PL 处理相比较,细胞膜透性变化较大,随着干旱胁迫程度增加细胞膜透性急剧增加,差异达极显著水平。说明在磷素缺乏下,干旱胁迫对磷高效基因型黑河 27 细胞膜结构破坏程度相对较小,而对磷低效基因型黑河 29 细胞膜结构破坏程度较大,致使电解质大量外渗,导致细胞内部环境破坏,生理功能代谢紊乱。因此,低磷和干旱双重胁迫下,细胞膜结构破坏程度依次为 -PL > -PH > +PL > +PH。

### 2.2 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆丙二醛积累的影响

从图 2 可以看出,低磷胁迫能使大豆叶片中 MDA 含量升高,-PH 与 +PH 相比,MDA 含量升高了 5.11%,但差异性不显著;而 -PL 与 +PL 相比,MDA 含量升高 31.48%,差异性达极显著水平;+PH 与 +PL 相比,MDA 含量无显著性差异。在相同条件下进行不同程度干旱胁迫,随着干旱胁迫强度的增加,各处理植株叶片中 MDA 含量均增加,与细胞膜透性变化趋于一致。+PH 与 -PH 处理相比,在轻度干旱胁迫下 MDA 含量变化不显著,而在

中度和重度干旱胁迫下 MDA 含量变化达显著水平;而 + PL 与 - PL 处理相比,MDA 含量变化差异达极显著水平。

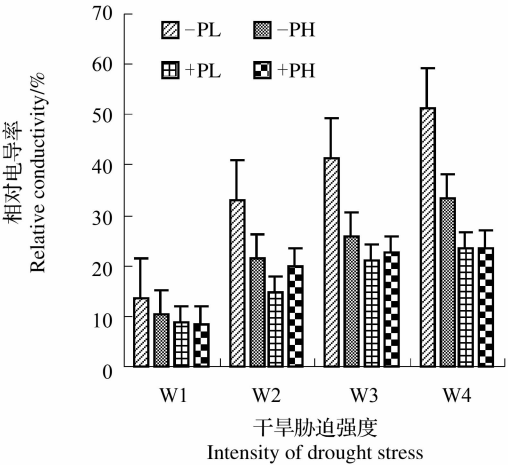


图1 不同干旱胁迫强度下大豆叶片  
相对电导率变化

Fig. 1 Relative conductivity under different  
intimidation of drought treatment

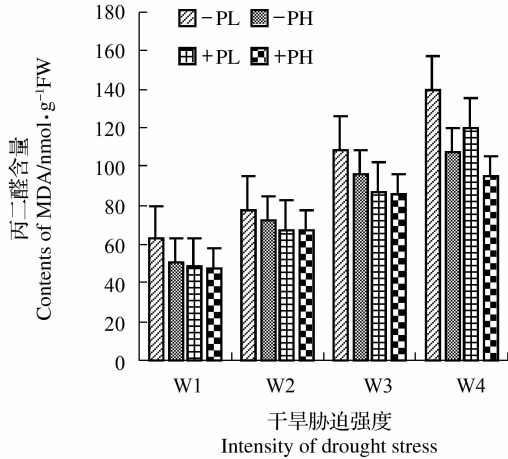


图2 不同干旱胁迫强度下大豆叶片  
MDA 含量变化

Fig. 2 Content of MDA under different intimidation  
of drought treatment

2.3 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆叶片细胞内  $O_2^-$  含量的影响

由图3可见,在低磷胁迫下,大豆叶片细胞中  $O_2^-$  含量增加, - PH 与 + PH 相比较,  $O_2^-$  含量增加了 15.38%, - PL 与 + PL 相比较,  $O_2^-$  含量增加了 19.46%。在相同条件下进行干旱胁迫,大豆叶片细胞中  $O_2^-$  含量增加,变化趋势与 MDA 含量明显呈正相关( $R=0.931$ )。可见,膜脂过氧化过程是由过剩

的  $O_2^-$  所诱导的。由此可见,低磷胁迫对两基因型的伤害程度差异不够明显,但在干旱和低磷双重胁迫下,  $O_2^-$  大量积累,积累的速度依次为 - PL > - PH > + PL > + PH。

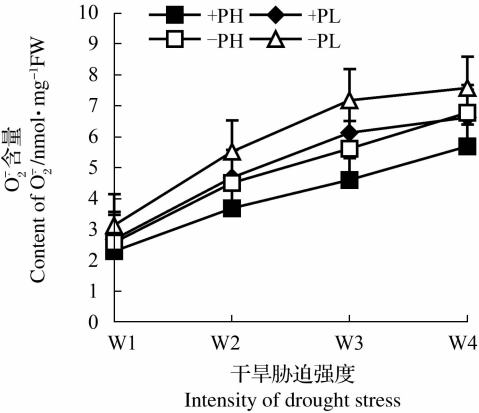


图3 不同干旱胁迫强度下大豆叶片  
细胞活性氧含量

Fig. 3 Content of  $O_2^-$  under different intimidation  
of drought treatment

2.4 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆保护酶的影响

SOD、CAT 和 POD 等酶类是细胞抵御活性氧伤害的重要保护酶系统,它们在清除超氧自由基、过氧化氢和过氧化物以及阻止或减少羟基自由基形成等方面起着重要作用。

不同磷效率基因型大豆在低磷和干旱胁迫下 SOD 活性变化如图4所示,低磷胁迫能使大豆细胞中 SOD 活性降低, - PH 与 + PH 相比,SOD 活性下

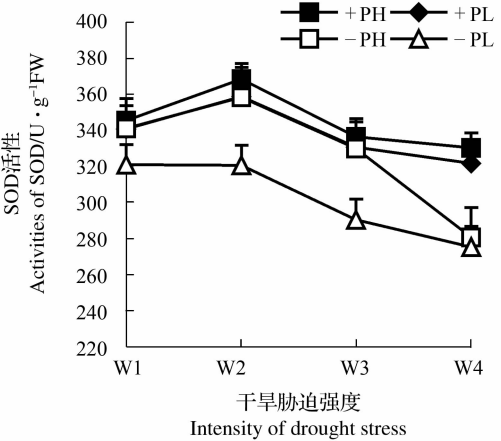


图4 不同干旱胁迫强度下大豆叶片  
SOD 活性变化

Fig. 4 Content of SOD under different intimidation  
of drought treatment

降了 1.80%，-PL 与 +PL 相比下降了 5.89%。在相同条件下进行干旱处理，+PH、-PH 和 +PL 处理 SOD 活性变化曲线相似，SOD 活性都随干旱胁迫程度的加强而先增加后下降。经数据分析可得，不同干旱胁迫过程中，+PH 与 -PH 处理相比较 SOD 活性变化不明显，+PL 与 -PL 处理 SOD 活性变化达极显著水平( $P < 0.01$ )。

由图 5 可见，低磷胁迫能使大豆叶片细胞内 POD 活性降低，-PH 与 +PH 处理相比较，POD 活性降低了 7.0%，-PL 与 +PL 处理相比降低了 16.09%。在相同条件下进行不同程度干旱胁迫，+PH 与 +PL 处理的两基因型大豆 POD 活性随干旱程度呈波浪式变化，产生这种现象的原因可能是，全磷营养培育条件下，在短期干旱胁迫内 POD 分解体内的  $H_2O_2$  需要一个缓冲的过程，表现出较强的应变能力。磷高效基因型有升高的表现而磷低效基因型始终呈下降趋势，并且下降的速度随干旱强度增加而加快。

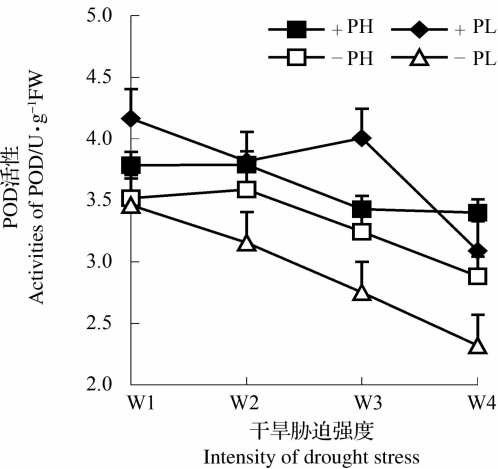


图 5 不同干旱胁迫强度下大豆叶片 POD 活性变化

Fig. 5 Activities of POD under different intimidation of drought treatment

由图 6 可见，叶细胞中 CAT 酶活性的变化速率不同于 POD 与 SOD，它以一个较高的水平迅速下降到一个很低水平。CAT 既可清除体内过量的  $H_2O_2$ ，又是脂肪酸  $\beta$ -氧化的参与酶，因而代谢旺盛的叶片需保持高水平的 CAT 酶活性以维持自由基代谢平衡。CAT 活性在叶片细胞中的变化反映了低磷和干旱胁迫对物质代谢的影响和组织内自由基水平的提高。从图中可以看出，低磷胁迫下，大豆叶片细胞中 CAT 活性下降，-PH 与 +PH 处理相比，

CAT 活性下降了 2.84%，-PL 与 +PL 处理相比下降了 25.69%。在相同条件下进行不同程度干旱处理，两基因型 CAT 活性迅速降低。

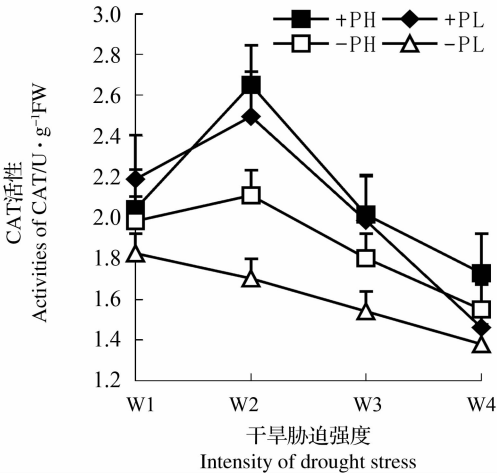


图 6 不同干旱胁迫强度下大豆叶片 CAT 活性变化

Fig. 6 Activities of CAT under different intimidation of drought treatment

### 2.5 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆脯氨酸含量变化的影响

如图 7 所示，低磷胁迫能使大豆叶片中脯氨酸含量增加，-PH 与 +PH 处理相比，脯氨酸含量增加 36.05%，差异达极显著水平；-PL 与 +PL 处理相比，脯氨酸含量增加 10.76%，变化不显著。+PH 与 +PL 处理比较，脯氨酸含量积累无显著差异。相同条件下进行不同程度干旱胁迫，脯氨酸含量随干旱胁迫程度的增加和时间的延续呈先增后降的趋势。

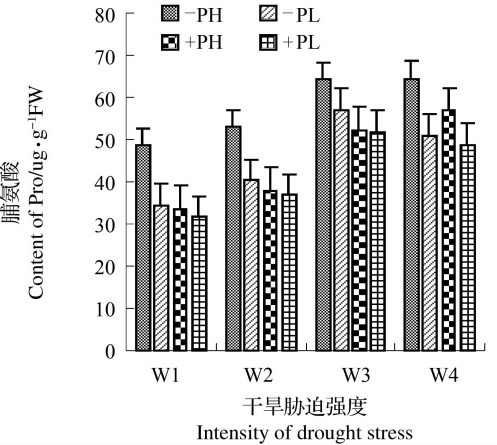


图 7 不同干旱胁迫强度下大豆叶片脯氨酸含量变化

Fig. 7 Content of Pro under different intimidation of drought treatment

势。+PH 和 -PH 处理在轻度和中度干旱胁迫下,脯氨酸含量变化呈极显著水平;而在重度干旱胁迫下脯氨酸含量变化呈显著水平;+PL 和 -PL 处理在干旱胁迫下,体内脯氨酸含量变化差异呈不显著水平。

2.6 干旱胁迫对不同磷效率基因型大豆可溶性糖含量变化的影响

如图 8 所示,在低磷胁迫条件下大豆体内可溶性糖含量变化较明显,-PH 与 +PH 处理比较,可溶性糖含量增加 39.68%,达极显著水平;-PL 与 +PL 处理相比,可溶性糖含量增加 32.96%,也达到显著水平;+PH 与 +PL 处理相比较,总体上无显著差异。相同条件下进行不同程度干旱处理,则可溶性糖含量变化非常明显,随干旱胁迫程度和时间的延续,可溶性糖含量急剧增加。+PH 与 -PH 处理进行比较,随干旱胁迫程度的加剧,可溶性糖含量变化都达极显著水平;而 +PL 与 -PL 处理进行比较,随干旱胁迫程度的加剧,可溶性糖含量变化不稳定;+PH 与 +PL 处理相比较,+PH 处理下可溶性糖含量高于 +PL 处理。

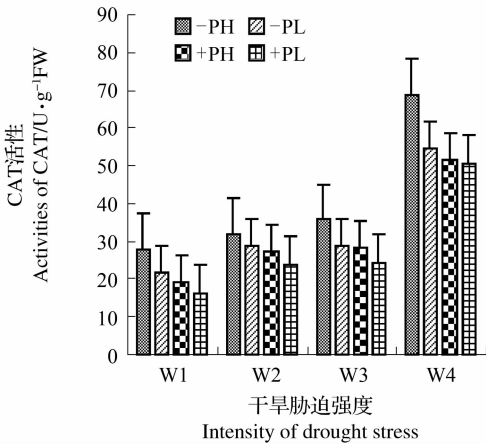


图 8 不同干旱胁迫强度下大豆叶片可溶性糖含量变化

Fig. 8 Content of soluble sugar under different intimidation of drought treatment

3 结论与讨论

植物体内游离脯氨酸、可溶性糖的含量与植物的抗逆生理密切相关。一般认为,在干旱胁迫下这些物质是作为渗透调节物质和防脱水剂而起作用的,通过调节而降低细胞水势和保持膨压<sup>[15]</sup>。当植物受到环境胁迫时会使植物体内游离脯氨酸和可溶

性糖积累增加<sup>[16]</sup>。试验结果表明,干旱胁迫下,不同磷效率基因型大豆叶片中的游离脯氨酸和可溶性糖都有明显的积累。且其积累量与磷效率基因型的耐低磷能力之间呈正相关,即磷效率高的基因型游离脯氨酸和可溶性糖积累越多,渗透调节能力越大,抗旱性越强,反之抗旱性越弱。同时发现,在干旱胁迫处理过程中,游离脯氨酸和可溶性糖积累进程不同,-PH 积累的量比 -PL 要多。由此可见,磷高效基因型能有效利用自身有限的磷素增加游离脯氨酸和可溶性糖的积累,提高渗透调节能力,维持细胞一定的膨压保证体内正常生理功能运行。

MDA 含量高低和细胞质膜透性变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标<sup>[17]</sup>。+PH 与 -PH 处理相比,在轻度干旱胁迫下 MDA 含量变化不显著,而在中度和重度干旱胁迫下 MDA 含量变化达显著水平;而 +PL 与 -PL 处理相比,MDA 含量变化差异达极显著水平。说明 MDA 含量随干旱强度的增加,而不断积累,导致大豆植株的衰老进程在加速。但磷高效基因型黑河 27MDA 含量的积累是逐渐达到显著水平的,所以保护能力或修复能力强,生物膜受损程度低,有缓冲功能,细胞膜脂过氧化程度较小。而磷低效基因型黑河 29 在较短的时间内积累了大量的 MDA,则保护能力或修复能力相对较低,因而受损非常严重,从而膜的透性增大。所以对生物膜自我保护或修复能力的强弱也是不同基因型重要差别。

SOD 以催化  $O_2^-$  发生歧化作用起到清除  $O_2^-$  的解毒作用,超氧化物歧化酶将  $O_2^-$  歧化产生的  $H_2O_2$  由细胞内 CAT 和 POD 清除<sup>[18]</sup>。结果表明,几种保护酶活性在干旱处理期间都有变化,随干旱胁迫程度的增加,+PH 与 +PL 处理的两基因型大豆 POD 活性随干旱程度呈波浪式变化,产生这种现象的原因可能是,全磷营养培育条件下,在短期干旱胁迫内 POD 分解体内的  $H_2O_2$  需要一个缓冲的过程,表现出较强的应变能力。SOD 活性在轻度干旱胁迫条件下升高,随干旱胁迫程度的增加逐渐降低。CAT 活性变化与 SOD 相似。说明在水分胁迫下,植物体内保护酶系统的活力和平衡受到破坏,使活性氧累积,启动并加剧膜脂过氧化而造成整体膜的损伤。磷高效基因型大豆对保护酶系统的动态平衡影响相对较小,变化也相对平缓,对膜脂的过氧化及膜透性的影响也相对较小。保护酶系统对自由基的清除能力的

变化可能是植物抗逆性的共同机制。植物体在逆境胁迫下保护酶的作用可能是通过它们之间相互协调且保持一个稳定的平衡态所进行的。

从试验结果来看,干旱胁迫下大豆叶片膜脂过氧化作用和渗透调节物质含量的变化基本上能够反映磷高效基因型能够长期适应干旱、半干旱生境具有较强耐旱能力的特性,这对于全面揭示大豆抗旱机理具有重要的意义。

## 参考文献

- [1] Bowler C, Van Montagu M, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. *Annual Reviews in Plant Physiology and Plant Molecular*, 1992, 43: 83-116.
- [2] Fridovich I. Superoxide dismutase[J]. *Annual Reviews in Biochemistry*, 1975, 44: 147-159.
- [3] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 366-382. (Yu S W, Tang Z C. *Plant physiology and molecular biology*[M]. Beijing: Science Press, 1999: 366-382.)
- [4] 汤章城, 王育启, 吴亚华, 等. 不同抗旱品种高粱苗中脯氨酸累积的差异[J]. *植物生理学报*, 1986, 12(2): 154-162. (Tang Z C, Wang Y Q, Wu Y H, et al. The difference in proline accumulation between the seedlings of two varieties of sorghum with different drought resistance[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1986, 12(2): 154-162.)
- [5] 王庆仁, 李继云, 李振声. 植物对土壤磷素利用效率的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(3): 417-421. (Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 417-421.)
- [6] 赵其国. 中国东部红壤地区土壤退化的时空变化、机理及调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 142-146. (Zhao Q G. *Change and control of degraded soil of red soil region of east China*[M]. Beijing: Science Press, 2002: 142-146.)
- [7] 梁银丽, 陈培元. 土壤水分和氮磷营养对小麦根系生理特性的影响[J]. *植物生态学报*, 1996, (20): 255-262. (Liang Y L, Chen P Y. Adjustment of physiological characters of root system of wheat by soil moisture and nitrogen and phosphorus[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, (20): 255-262.)
- [8] Rodriguez D, Goudriaan J, Oyarzabal M, et al. Phosphorus nutrition and water stress tolerance in wheat plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19: 29-39.
- [9] 沈玉芳, 王保莉, 曲东. 水分胁迫下磷营养对玉米苗期根系导水率的影响[J]. *西北农林科技大学学报*, 2002, 30(5): 11-15. (Shen Y F, Wang B L, Qu D. Effects of phosphorus on root hydraulic conductivity of corn under water stress[J]. *Journal of North west Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2002, 30(5): 11-15.)
- [10] 刘厚诚, 邝炎华, 陈日远. 缺磷胁迫下长豇豆幼苗膜脂过氧化及保护酶活性的变化[J]. *园艺学报*, 2003, 30(2): 215-217. (Liu H C, Kuang Y H, Chen R Y. Changes of lipid peroxidation and activities of protective enzymes in asparagus bean seedling under phosphorus-deficiency stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, 30(2): 215-217.)
- [11] 潘晓华, 刘水英, 李锋, 等. 低磷胁迫对不同水稻品种叶片膜质过氧化及保护酶活性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2003, 17(1): 57-60. (Pan X H, Liu S Y, Li F, et al. Effect of low-phosphorus stress on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities in rice leaves of different cultivars[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2003, 17(1): 57-60.)
- [12] 张宪政. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 5-96. (Zhang X Z. *Guide of phytophysiological experiment*[M]. Beijing: Agricultural Press, 2000: 5-96.)
- [13] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1990: 5-8. (Zhang Z L. *A Guide of phytophysiological experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990: 5-8.)
- [14] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 59-60, 173-174. (Zou Q. *Guide of Phytophysiological Experiment*[M]. Beijing: Agricultural Press, 2000: 59-60, 173-174.)
- [15] Tuner N C. Concurrent comparisons of stomata behavior, water status, and evaporation of maize in soil at high or low water potential[J]. *Plant Physiology*, 1990, (55): 932-936.
- [16] 蒋明义, 郭绍川. 水分亏缺诱导的氧化胁迫和植物的抗氧化作用[J]. *植物生理学通讯*, 1996, 32(2): 144-150. (Jiang M Y, Guo S C. Oxidative stresses and antioxidation induced by water deficiency in plants[J]. *Plant Physiology Communication*, 1996, 32(2): 144-150.)
- [17] 张木清, 陈如凯, 于松烈. 水分胁迫下蔗叶活性氧代谢的数学分析[J]. *作物学报*, 1996, 22(6): 729-735. (Zhang M Q, Chen R Q, Yu S L. Mathematics analysis for the activity oxygen metabolism in the drought stress leaves of sugar cane[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1996, 22(6): 729-735.)
- [18] 万美亮, 邝炎华, 陈建勋. 缺磷胁迫对甘蔗膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 1999, 2(2): 58-61. (Wan M L, Kuang Y H, Chen J X. Effect of phosphorus deflection membrane-lipid peroxidation and the activity of defense enzymes systems in sugar cane[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1999, 2(2): 58-61.)