文章编号：1000-5773(2005)03-0235-06

高压处理后水稻抗氧化酶活性及对逆境胁迫的响应*

白成科[1,2]，李桂双[1]，段 俊[1]，彭长连[3]，翁克难[4]，徐世平[4]

(1.中国科学院华南植物园，广东广州 510650；2.陕西师范大学生命科学学院，陕西西安 710062；
3.华南师范大学生命科学学院，广东广州，510631；4.中国科学院广州地球化学研究所，广东广州 510640)

摘要：对经高静水压处理的水稻粤香占（*Oryza sativa* L. cv. Yuexiangzhan）种子播种后的植株进行了抗氧化酶活性的测定和对逆境胁迫响应的研究。结果表明，高压处理抑制了水稻生长早期(12 d)色素和蛋白质含量的增加，并使早期抗氧化酶活性表现较对照低。随着播种天数增加，经高压处理的材料中的色素、蛋白质含量不同程度地增加，抗氧化酶活性发生改变，至播种后32 d时，高压处理的叶绿素含量和可溶性蛋白含量都高于对照粤香占。在自然低温条件下，经高压(干压、湿压)处理的植株其Rubisco大、小亚基含量和光合色素含量较高，抗光抑制能力增强，具一定的耐低温性。

关键词：水稻；高静水压；抗氧化；胁迫

中图分类号：Q945.11；O521.9 **文献标识码**：A

1 引 言

高压作为一种重要的物理化学参数，在地学、物理学和材料科学研究中有着广泛的应用。近年来，高压在生物学研究领域得到了广泛应用，已逐渐成为高压生物学、生物化学和微生物学等学科的重要研究工具[1~3]。有研究表明，高压能够使蛋白质发生变性[4]，破坏细胞膜结构并使膜的流动性发生改变[5]。Yayanos等人发现，高压是深海中嗜压微生物的必需环境，离开高压环境，这些微生物的生存将受到严重威胁[3]，这使人们逐渐意识到高压对生物所起的积极作用。1998年，我们首次将高压应用于高等植物水稻中，研究其对水稻生长发育的影响。在利用高静水压处理萌动期的水稻种子时发现，静水高压影响到水稻的生长发育，经高压处理的水稻幼苗在前期生长较慢，而后的生长逐渐赶上并超过对照粤香占[6]，并在田间种植的后代中筛选到突变株[7,8]。进一步的研究表明，高压能够成为一种产生变异的育种方法。基于以上现象，本工作对高压处理当代的水稻幼苗进行抗氧化酶活性的测定和对环境胁迫的响应研究，旨在进一步对高压影响水稻生长发育的机理进行探讨，为物理高压手段在高等植物中的应用提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 材料

采用籼稻种子粤香占(*Oryza sativa* L. cv. Yuexiangzhan)。

* **收稿日期**：2004-08-05；**修回日期**：2004-11-26

基金项目：国家自然科学基金(30471002)；中国科学院农业项目办公室重点资助项目和国家重大基础研究发展项目(G1998010100)

作者简介：白成科(1976—)，男，博士，讲师，E-mail：baichengke@snnu.edu.cn

通讯作者：段 俊，男，博士生导师，主要研究方向：作物遗传育种与生物技术. E-mail：duanj@scbg.ac.cn

2.2 高压处理

在室温下将水稻种子浸种10 h,待其萌动后,在高压处理装置中(包括高压容器、手动试压泵、循环水加热系统和温度、压力测量控制系统,由中国科学院广州地球化学研究所提供),以75 MPa的静水压力处理12 h后卸去压力。冷胁迫响应试验中的"湿压"是指在高压处理前将种子预浸种,而"干压"则指处理前未经预浸种。试验以未经高压处理的种子为对照。各材料于2001年晚季常规方法催芽育秧,秧苗叶片达4～5片时种植于中国科学院华南植物园实验田中,株距18 cm,行距20 cm,常规水肥管理和病虫害防治。

2.3 光合色素含量

用打孔器打取水稻叶圆片10个,浸泡在80%丙酮中置于黑暗处浸提光合色素,直至叶圆片全部变为白色时,迅速于UV-Vis分光光度计(Lambda 25,Perkin Elmer Ins.,USA)下测定663、645、440 nm处的光吸收,按林植芳等[9]的方法计算叶绿素含量和类胡萝卜素含量。

2.4 可溶性蛋白质含量

按Bradford(1976)的方法[10]测量。用考马斯亮蓝G-250染色,以牛血清白蛋白作标准曲线,测定595 nm处的光吸收。

2.5 二磷酸核酮糖羧化/加氧酶Rubisco含量测定

参照刘拥海等[11]的方法测定。

2.6 抗氧化酶活性测定

取0.5 g鲜重的水稻叶片迅速剪碎后,在液氮中加少量石英砂研磨成粉末,加5 mL预冷的4 ℃磷酸缓冲液(50 mM,pH7.0和1% PVP)磨成匀浆,在4 ℃离心机(HITACHI,CR20B2)下13 000g离心30 min。上清液即为酶粗提液。超氧化物歧化酶SOD活性按Giannopolities和Ries[12]的方法,以抑制NBT光化还原50%为一个酶活性单位(单位:g^{-1} FW)。抗坏血酸过氧化物酶AsA-POD活性按Nakano和Asada[13]的方法,测定1 min内抗坏血酸AsA的吸收变化(减少)。

2.7 叶绿素荧光测定

叶绿素荧光动力学曲线:用脉冲调制荧光仪(PAM101/102/103,Walz,Germany)测定。测量前样品暗适应15 min,弱测量光0.04 μmol·m^{-2}·s^{-1},光化光250 μmol·m^{-2}·s^{-1},饱和闪光3 000 μmol·m^{-2}·s^{-1},闪光2 s,间隔30 s。参照Schreiber等[14]和Foyer等[15]的公式计算叶绿素荧光参数:$q_P=(F'_m-F_s)/F'_v$,$q_N=(F_m-F'_m)/F_m$,$\Phi_{PSII}=(F'_m-F_s)/F'_m$。其中,$q_P$为光化学猝灭系数,$q_N$为非光化学系数,$\Phi_{PSII}$代表经PSⅡ的线性电子传递的量子效率。$F_m$为最大荧光,$F'_m$为稳态的最大荧光,$F_s$为稳态时荧光,$F'_v$为稳态时的可变荧光。

3 结果与分析

3.1 对幼苗光合色素含量的影响

由表1知,粤香占种子经高静水压处理后,幼苗的光合色素含量因播种后天数不同而存在着差异。高压处理的种子播种后12 d的植株总叶绿素含量C_{Chl}和类胡萝卜素含量C_{Car}较低,分别为对照的62.2%和71.6%,与对照相比,经高压处理的$C_{Chl\,a}/C_{Chl\,b}$和C_{Car}/C_{Chl}比值略高。随播种后天数增加,处理与对照的色素含量均增加,且处理的增加程度大于对照,至播种后32 d时处理的总叶绿素含量超过对照粤香占1.5 %。

表1 高静水压处理的水稻光合色素含量的变化

Table 1 Change of photosynthetic pigment content in rice treated by HHP

Days after sowing/(d)	Treatment	$C_{Chl\,a}+C_{Chl\,b}$/(μg/g FW)	$C_{Chl\,a}/C_{Chl\,b}$	C_{Car}/(μg/g FW)	C_{Car}/C_{Chl}
12	YX-CK	618.07±89.57	2.25±0.02	135.9±13.9	0.22±0.006 0
	YX-HP	384.18±56.37(1)	2.35±0.02	97.3±12.4	0.25±0.005 0
32	YX-CK	2 376.25±20.60	2.62±0.04	414.4±8.8	0.17±0.001 0
	YX-HP	2 411.86±28.05(1)	2.60±0.03	394.4±5.3	0.16±0.000 3

Note: FW—Fresh Weight; YX-CK—Yuexiangzhan-Control; YX-HP—Yuexiangzhan-High pressure.

(1) indicating significant difference at 5% level (n=3)

3.2　对可溶性蛋白质含量的影响

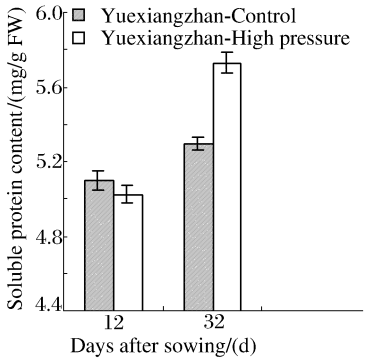


图 1　高静水压处理后水稻可溶性蛋白质含量变化

Fig. 1　Change of soluble protein content in rice treated by HHP

播种后 12 d 粤香占的蛋白质含量较经高压处理的高(图 1),随播种天数增加,经处理与对照的蛋白质含量也随之增加,但因高压处理增加的幅度 14.0%大于对照粤香占的增加幅度 4.0%;所以至播后 32 d,经高压处理的材料可溶性蛋白含量已明显超过对照 8.2%。

3.3　幼苗 SOD 活性和 AsA-POD 活性变化

植物在逆境条件下出现的伤害或植物对逆境的不同抵抗能力往往与体内 SOD 活性水平有关[16]。由图 2 知,经高静水压处理的粤香占种子在播后 12 d 时,植株的 SOD 活性低于对照粤香占,随播种后天数的增加,SOD 活性随之下降,但二者下降的程度存在差异,与 12 d 时相比,粤香占下降幅度较大(10.37 %),高压处理下降得较小(2.69 %),因此 32 d 时的 SOD 活性表现为高压处理高于对照粤香占。抗坏血酸过氧化物酶 AsA-POD 的活性播种后 32 d 与播种后 12 d 相比,粤香占基本持平,高压处理的 AsA-POD 活性则迅速提高,在播种后 32 d 时追赶上对照粤香占,与粤香占的 AsA-POD 活性水平相当。

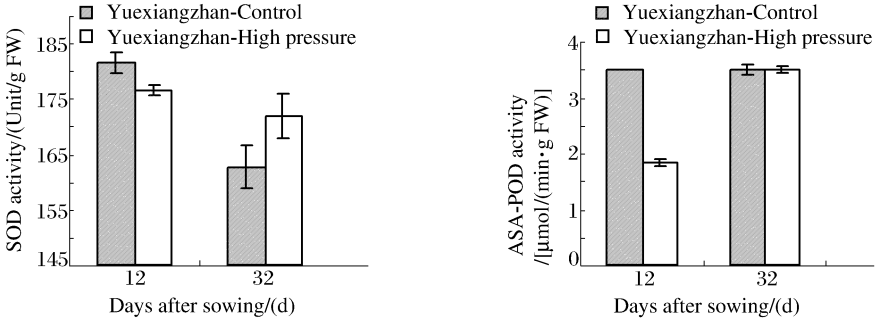


图 2　高压处理后水稻 SOD 活性和 AsA-POD 活性变化

Fig. 2　Changes of the activities of SOD and AsA-POD in rice treated by HHP

3.4　对冬季相对低温条件的响应

据广州地区的气象资料,2001 年 12 月初至 2002 年 1 月中下旬,广州地区出现少有的日均温小于 5 ℃的持续低温天气,12 月 15 日取材时材料正处于孕穗期,仅个别植株抽穗。试验以倒三叶为材料,测定水稻对自然界较低温度的响应。

3.4.1　水稻叶片中 Rubisco 含量变化

Rubisco(EC 4.1.1.39) 普遍存在于所有自养生物中,是光合作用中 CO_2 固定的关键酶和叶片中的主要贮存蛋白,由 8 个大亚基和 8 个小亚基组成[17],也是植物中一种主要储藏有机氮的形式,因此,Rubisco 含量对作物的生长发育有着重要的影响。从图 3 中可以知道,高压处理后 Rubisco 大、小亚基总含量增加,与对照比较,干压处理(Not Soaked)增加程度最大,增加了 44.70%,湿压处理(After Soaked)次之,增加 11.32%,其中的大、小亚

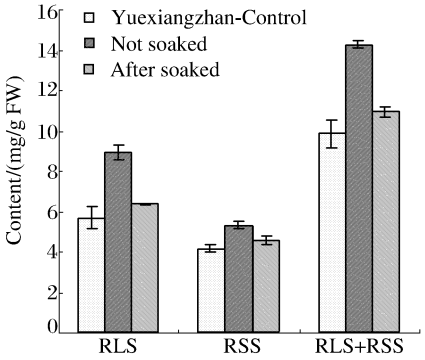


图 3　低温条件下水稻叶片中 Rubisco 的总含量以及大、小亚基的含量

Fig. 3　The content of Rubisco, including rubisco large subunit (RLS) and rubisco small subunit (RSS) content in rice leaves treated by HHP at low temperature

基含量也均较对照粤香占高，干压和湿压的大亚基分别增加56.49%和11.93%，小亚基增加28.37%和10.57%。

3.4.2 *水稻叶片 F_v/F_m 和 $\Phi_{PS\Ⅱ}$ 在低温下的日变化*

F_v/F_m的下降是光抑制发生的一个主要特征之一[18]，由图4(a)可见，粤香占以及干压、湿压处理的 F_v/F_m 在中午都表现下降，其中粤香占的 F_v/F_m 下降程度最大，由0.753下降到0.603，湿压处理的 F_v/F_m 由0.725下降到0.660，仅次于对照，干压处理下降的程度较小，由0.749降低到0.694。当下午18:00外界自然光强有所下降时，各处理 F_v/F_m 又较中午有所恢复，除对照粤香占未完全恢复至早上的水平外(恢复95.1%)，干压、湿压处理均能完全恢复至早上6:00的 F_v/F_m 水平。由此表明，在一天中光强相对较高的中午，水稻叶片均发生了光抑制，其中对照粤香占所受光抑制最强，湿压处理次之，干压处理受光抑制最小。$\Phi_{PS\Ⅱ}$ 在中午高光强条件下也有下降，晚上18:00时基本都能达到早上的 $\Phi_{PS\Ⅱ}$ 水平(图4(b))，具有100%的恢复能力。由此表明高压处理(干压、湿压)使低温条件下的耐胁迫能力较对照粤香占增强，而且，干压处理比湿压处理具有更强的耐寒性。

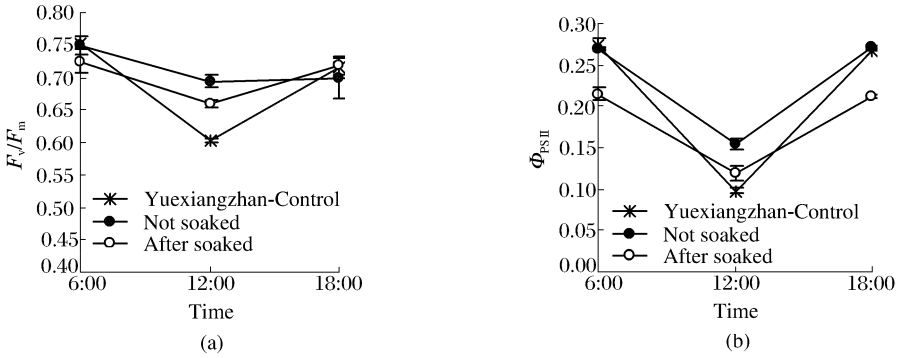


图4 低温下水稻叶片PSⅡ最大光化学效率(F_v/F_m)(a)和PSⅡ量子产量($\Phi_{PS\Ⅱ}$)(b)的日变化

Fig. 4 Daily changes of PSⅡ photochemistry efficiency (F_v/F_m) (a) and the quantum efficiency of PSⅡ ($\Phi_{PS\Ⅱ}$) (b) in rice leaves at low temperature

4 讨 论

有关微生物的研究表明，高压能抑制微生物的生长发育，破坏其细胞膜、细胞器等显微结构，扰乱生物的新陈代谢[5]，是微生物正常生长条件的一种逆境胁迫，能够使不适应高压环境的微生物停止生长、甚至死亡，但在高压条件下仍有部分微生物能抵抗压力的胁迫，因逐渐适应此环境而存活下来，经过胁迫筛选所存留的微生物，抗压性及其它抗性(如抗温性等)会明显提高[19]。利用高静水压处理水稻种子，也出现了类似上述的现象，如处理后种子的发芽率和成苗率显著下降、幼苗光合色素和蛋白含量较低、早期生长受到抑制等，但是植株后来的生长增幅速率加快，逐渐赶上并超过对照[8]。这说明高静水压处理对高等植物是一种环境胁迫，但到底是内部的什么生理机制导致出现了这样的现象呢？

逆境胁迫对植物的生长抑制常常伴随有细胞膜结构的破坏，主要由细胞内特别是线粒体或叶绿体中产生的超氧自由基($O_2\cdot^-$，·OH)攻击膜脂而造成的[16]。但是植物细胞内同时存在着清除这些自由基的途径，以减少自由基对其造成的伤害。正常情况下，植物体内自由基的产生和清除处于动态平衡状态。但处于逆境环境中时，这种平衡状态遭受破坏，不能被及时清除的活性氧的存在使细胞内出现氧化胁迫，进而引起生物大分子的氧化损伤和生物膜完整性的破坏[20,21]。SOD是存在于植物细胞中最重要的内源活性氧清除酶之一，它清除$O_2\cdot^-$生成H_2O_2[16]。逆境胁迫下，植物体动员保护系统抵御和清除活性氧，阻抑膜脂过氧化，维持膜系统稳定性[22]。经高静水压处理的水稻种子，播种后12 d其SOD活性、AsA-POD活性均表现低于对照粤香占，植株抗氧化水平低；32 d时处理植株的SOD活性高于对照，AsA-POD活性与对照粤香占相当，这说明此时高压处理后的植株抗氧化能力提高。进而促使参与光合作用光能吸收、传递和转化的重要色素和执行着重要生理功能的蛋白质含量较高。这可能是由于高压处理对植株产生的破坏和抑制在植株生长过程中逐渐得以修复，并对水稻起到了逆境锻炼的作用，提高了植株的抗逆性。

Rubisco 是 C_3 植物叶绿体可溶性蛋白的主要组分,其含量的增加可提高植株的光合作用效率。在冬季持续低温条件下的研究发现,光合作用的关键酶 Rubisco 在高静水压处理后的植株中,其大、小亚基含量增加。在中午高光强条件下植株遭受光抑制时,高压处理比对照有减缓光抑制的作用,且中午发生的 PSⅡ光化学效率的下降在傍晚时能够完全恢复。这表明高静水压处理可增强水稻对低温胁迫的抵抗能力,增强对外界光的吸收和过量光能的及时耗散,保证良好的光合作用,使逆境环境中的植株能够得以生存和正常的发育。

我们的研究发现,植株抗氧化性和耐温性的提高,可能归因于植物对胁迫的交叉保护效应,即当生物体遭受一种逆境胁迫后,在通过改变自身结构和调控基因的表达来适应这种胁迫的同时,会增加其对另一种胁迫的抗性[23,24]。Patricia 等(2004)曾报道经热激处理后的酵母菌 *S. cerevisiae*,对高静水压的耐压性明显提高,利用基因芯片技术进一步研究表明,200 MPa 压力处理 30 min 能够影响 273 个功能基因的表达,产生了一系列新的蛋白质[25]。高静水压由于迫使生物体、细胞体积减小和改变生化反应平衡向体积减小的方向进行,对植物体造成的这种胁迫导致了幼苗的叶绿素含量、蛋白质含量、Rubisco 含量、AsA-POD 和 SOD 活性都发生了变化,归根到底可能是高压处理诱导了水稻部分基因的表达,使处理的水稻产生了对胁迫的交叉保护效应,其作用的具体机理将有待于进一步的研究探讨。

References:

[1] Mozhaev V V, Heremans K, Frank J, et al. High Pressure Effects on Protein Structure and Function [J]. Proteins-Structure Function Genetics, 1996, 24: 81－91.

[2] Asaka M, Hayashi R. Activation of Polyphenol Oxidase in Pear Fruits by High Pressure Treatment [J]. Agric Biol Chem, 1991, 55(9): 2439－2440.

[3] Morishima I. Current Perspectives in High Pressure Biology [M]. London: Academic Press, 1987. 17－272.

[4] Shantha D S, Doulas M C, Ana J, et al. High Resolution NMR Study of the Pressure-Induced Unfolding of Lysozyme [J]. Biochemistry, 1992, 3: 7773－7778.

[5] Lellis F B, David L W. Strutural Change in Lipid Bilayers and Biological Membrane Caused by Hydrostatic Pressure [J]. Biochemistry, 1986, 25: 7484－7488.

[6] Li G S, Bai C K, Duan J, et al. Effect of High Hydrostatic Pressure Treatment on Physiological Characteristics of Rice Plants (*Oryza sativa* L.) [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2003, 17(2): 122－128. (in Chinese)
李桂双,白成科,段　俊,等. 静水高压处理对水稻植株生理特性的影响 [J]. 高压物理学报, 2003, 17(2): 122－128.

[7] Xu S P, Liao Y P, Weng K N, et al. Pressure Induced Rice Mutation and Effects of High Hydrostatic Pressure on the Growth and Development of Rice [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 241－248. (in Chinese)
徐世平,廖耀平,翁克难,等. 水稻压致变异和高压对水稻生长发育的影响 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 241－248.

[8] Bai C K, Li G S, Peng C L, et al. Preliminary Study of Rice Mutants Induced by High Hydrostatic Pressure [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2003, 11(2): 132－136. (in Chinese)
白成科,李桂双,彭长连,等. 高静水压诱导水稻变异的初步研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(2): 132－136.

[9] Lin Z F, Li S S, Lin G Z, et al. Superoxide Dismutase Activity and Lipid Peroxidation in Relation to Senescence of Rice Leaves [J]. Acta Botanica Sinica, 1984, 26: 605－615. (in Chinese)
林植芳,李双顺,林桂珠,等. 超氧化物歧化酶和脂质过氧化与水稻叶片衰老的关系 [J]. 植物学报, 1984, 26: 605－615.

[10] Bradford M M. A Rapid and Sentive Method for the Quantitation of Microgram Quantities of Protein Utilizing the Protein-Dye Binding [J]. Anal Biochem, 1976, 72: 248－254.

[11] Liu Y H, Peng X X, Li M Q. Degradation of Rubulose-1, 5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase in Rice Leaves under Oxidative Stress Induced by Methyl Viologen [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 2000, 26(6): 481－486. (in Chinese)
刘拥海,彭新湘,李明启. 水稻叶片中过氧化氢与核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶降解的关系 [J]. 植物生理学报, 2000, 26(6): 481－486.

[12] Giannopolities C N, Ries S K. Superoxide Dismutase Ⅱ. Purfication and Quantitative Relationship with Water-Soluble Protein in Seedings [J]. Plant Physiology, 1977, 59: 315－318.

[13] Nakano Y, Asada K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-Specific Peroxide in Spinach Chloroplasts [J]. Plant Cell Physiology, 1981, 22: 867－880.

[14] Schreiber U, Schliwa U, Rilger W. Continues Recording of Photochemical and Nonphotochemical Chlorophyll Fluorescence Quenching with a New Type of Modulation Fluorometer [J]. Photosynth Res, 1986, 10: 51－62.

[15] Foyes C H, Furbank R, Harbinson J. The Mechanisms Contributing to Photosynthetic Control of Electron Transport by Carbon Assimilation in Leaves [J]. Photosynth Res, 1990, 25: 83－100.

[16] Wang B S. Free Radical and Harm of Plant's Membrane [J]. Plant Physiology Communications, 1988, (2): 12－16. (in Chinese)
王宝山. 植物自由基与植物膜伤害 [J]. 植物生理学通讯, 1988, (2): 12－16.

[17] Yu S W, Tang Z C. Plant Physiology and Molecular Biology [M]. Beijing: Science Press, 1999. 224. (in Chinese)
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. 224.

[18] Oquist G. Stress and Adaptation in Photosynthesis [A]. Doulas R H, Moan J, Dall Acqua. Light in Biology and Medicine [C]. New York; London: Planum Press, 1988. 433.

[19] Amparo B, Georgia V, Maria C, et al. Variation in Resistance of Natural Isolates of *Escherichia coli* O157 to High Hydrostatic Pressure, Mild Heat, and Other Stresses [J]. Appl Environ Microb, 1999, 65(4): 1564－1569.

[20] Chia L S, McRae D C, Thompson J E. Light-Dependence of Paraquat-Initiated Membrane Deterioration in Bean Plant. Evidence for the Involvement of Surperoxide [J]. Physiologia Plantarun, 1982, 56: 492－499.

[21] Moran J F, Becana M, Iturbe-Ormaetxe I, et al. Drought Induces Oxidative Stress in Pea Plant [J]. Planta, 1994, 194: 346－352.

[22] Alscher R G, Hess J L. Antioxidants in Higher Plant [M]. Boca Raton: CRC Press, 1993. 59－60.

[23] Kayo C, Smorawinaka M, Li L, et al. Comparison of the Gene Expression of Aspartate Bate-D-Smialdehyde Dehydrogenase at Elevated Hydrostatic Pressure in Deep-Sea [J]. Bacteria J Biochem, 1997, 121(4): 717－723.

[24] Gordon W N, Christopher A M, Bernard M M. The Effects of Hydrostatic Pressure on Ribosome Conformation in *Escherichia coli*: An *in Vivo* Study Using Differential Scanning Calorimetry [J]. Microbiology, 1999, 145: 419－425.

[25] Fernandes P M B, Domitrovic T, Kao C M, et al. Genomic Expression Pattern in Saccharomyces Cerevisiae Cells in Response to High Hydrostatic Pressure [J]. FEBS Letters, 2004, 556: 153－160.

Activities of Antioxidative Enzymes and the Responds to Cold Stress of Rice Treated by High Hydrostatic Pressure

BAI Cheng-Ke[1,2], LI Gui-Shuang[1], DUAN Jun[1], PENG Chang-Lian[3], WENG Ke-Nan[4], XU Shi-Ping[4]

(1. *South China Botanic Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*;
2. *College of Life Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an* 710062, *China*;
3. *College of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou* 510631, *China*;
4. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*)

Abstract: Rice seeds (*Oryza sativa* L. cv. Yuexiangzhan) were soaked for 10 h or not soaked, then exposed to 75 MPa high hydrostatic pressure (HHP) for 12 h. The seeds treated by HHP and their control were sowed in the field. Activities of antioxidative enzymes (SOD, AsA-POD) in the leaves, Rubisco content, F_v/F_m and Φ_{PSII} were measured to evaluate the effect of HHP on the growth and development of rice. Results indicated that HHP inhibited the increasing of pigment and protein content in the early growth stage(12 d). Activities of antioxidative enzymes were lower than that of the control at the moment. With days after sowing increasing, the content of pigment and protein in the treatment were higher than that of the control (Yuexiangzhan). Antioxidative ability of rice treated by HHP was stronger than that of the control at the 32th days after sowing. The content of Rubisco, including Rubisco large subunit and Rubisco small subunit, was higher in the treated rice than that of the control at the natural low temperature. F_v/F_m and Φ_{PSII} of treatment and control decreased at noon but can recover at evening, and recovery of treatment was better than that of the control. These results suggested that difference in growth between the treatment and control was due to the effect of HHP on the activities of antioxidative enzymes of rice possibly. Furthermore, HHP may enhance rice's resistance to low temperature.

Key words: rice; high hydrostatic pressure; antioxidative; stress