农业环境科学学报 2009,28(3):438-442
Journal of Agro-Environment Science

不同玉米品种对增强 UV-B 辐射与干旱复合胁迫的生理响应

王 芳[1],姬茜茹[1],邱宗波[1,2],岳 明[1]

(1.西部资源生物与现代生物技术省部共建教育部重点实验室,西北大学,陕西 西安 710069;2.河南师范大学生命科学学院,河南 新乡 453007)

摘 要:模拟了平流层臭氧减少 20%时辐射到地表的紫外线 B(UV-B,280~315 nm)和水分胁迫(20%聚乙二醇 PEG-6000 处理),考察了温室培养的玉米幼苗叶片对于增强的 UV-B 辐射联合干旱条件的生理响应。结果表明,两胁迫因子 UV-B 辐射和干旱单独作用 24 h 会导致玉米幼苗叶片渗透调节物脯氨酸和抗膜质过氧化系统(MDA,抗氧化酶 SOD,CAT 和 APX)的变化。这种变化随玉米品种的抗旱性不同差异显著。在复合作用下,抗旱品种脯氨酸量显著增加,CAT 和 APX 活性降低,受影响的程度并非单因子胁迫的加和,而是中和:单独胁迫对非抗旱品种造成的伤害在复合胁迫中加重,表现为叠加效应。结果证实抗旱品种确实也能抵御 UV-B 辐射的胁迫,并且调节渗透调节物和抗氧化酶削弱干旱造成的伤害,是抗旱品种更好适应环境的表现。

关键词:UV-B 辐射;干旱胁迫;复合胁迫;玉米品种;抗氧化系统
中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)03-0438-05

The Interactive Effects of Enhanced UV-B Irradiation and Water Deficit on Physiological Responses in Different Maize (*Zea mays*) Cultivars

WANG Fang[1], JI Qian-ru[1], QIU Zong-bo[1,2], YUE Ming[1]

(1.Key Laboratory of Resource Biology and Biotechnology in Western China (Northwest University), Ministry of Education, Xi'an 710069, China; 2.College of Life Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In the present paper, the physiological responses of maizes (*Zea mays*) seedling leaves to enhanced ultraviolet-B irradiation simulated a 20% stratospheric ozone depletion and drought stress produced by adding 25% polyethylene glycol (PEG-6000) alone or combined under greenhouse conditions were studied. The results showed that two different stress conditions led to changes of proline which was osmotic regulator and antioxidant system (MDA, antioxidant enzymes including SOD, CAT and APX). Feedbacks of two cultivars, drought-resistant R7 and drought-sensitive CS, to UV-B radiation and drought alone were consistent with their drought-withstand ability. The combined stresses reduced the activities of CAT and APX and improved the accumulation of proline in R7; Reversely, it debased proline content of CS in vivo significantly, which meant it relieved injures drought had worked on R7 and worsened damages in CS. Totally the results confirmed that the drought-resistant cultivar could also withstand enhanced UV-B radiation and relieved drought-harmed situations by regulating proline and oxidant enzymes, which manifested anti-drought cultivar was acclimatized to environment better.

Keywords: UV-B radiation; water deficit; combined stresses; maize cultivar; oxidant system

由于平流层臭氧(O)浓度的减少导致地表的紫外线(主要是 280~315 nm 的 B 区,简称 UV-B)增强,这一环境问题已引起人们普遍关注[7]。增强的 UV-B 辐射使植物细胞质膜的透性发生变化[24]。冯虎元[2]与陈拓[13]等人研究表明,UV-B 诱导的膜脂过氧化作用中有脂氧合酶和过氧化氢的参与,并推测脂氧合酶主导的酶促膜脂过氧化和自由基触发的非酶促过氧化作用在膜结构破坏中起重要作用。而细胞超氧化物歧化酶活性和多胺含量的改变,则是植物对 UV-B 伤害的一种适应性应激生理反应,是清除自由基减轻膜损伤的重要机制。其中过氧化物酶活性的增加能减缓植

收稿日期:2008-06-15
基金项目:国家自然科学基金(30670366)
作者简介:王 芳(1983—),女,江苏苏州人,硕士研究生,主要从事植物生理生态和分子生物学方面的研究。
E-mail:wangfangup2@yahoo.com.cn
通讯联系人:岳 明 E-mail:yueming@nwu.edu.cn

物的紫外辐射胁迫，可以增加植物对 UV-B 抗性[18,21]。

干旱胁迫下，植物可以迅速调整生理代谢以保证细胞的正常生理功能，如改变水分状况即叶片的水势、相对含水量和细胞膜的稳定性[17]。渗透物质及激素的积累和浓度的调节，包括脯氨酸、ABA 等也在抗旱过程中起了极为重要的作用[16]。同时膜系统保护酶包括超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）和过氧化氢酶（CAT）与抗坏血酸过氧化物酶（APX）协调一致，使活性氧维持在较低水平上，以维持植物正常的生命活动[23]。

有研究表明，增强的 UV-B 辐射和其他环境因子复合胁迫对植物造成的影响各有不同。杜英君等[14]发现 UV-B 辐射和 Hg^{2+} 复合处理对 MDA 和 H_2O_2 含量指标影响大于 Hg^{2+} 的单独处理。冯虎元等[15]考察小麦在两种复合胁迫下生理特征的变化，发现 UV-B 辐射不但没有加重水分胁迫，反而减轻了干旱对春小麦生长的胁迫。而早前的研究将 UV-B 对干旱的缓解作用描述为延迟或者降低失水率、气孔导度和叶面积的变化[9]。现今对于这两种胁迫拮抗作用机制的认识仍较模糊。

本文以玉米的抗旱品种 R7 和非抗旱品种 CS 为材料，研究具有不同抗旱性的品种对增强的 UV-B 与干旱的生理响应，以期从植物抗旱性不同解释 UV-B 如何在复合胁迫中削弱干旱对植物造成的伤害。

1　材料与方法

1.1 材料处理

选择非抗旱玉米品种 CS 和抗旱品种 R7（*Zea mays* L.）（中国种子集团公司）作为研究材料。种子用 75%酒精消毒后，室温 20 ℃预萌发 24 h。将萌发一致的种子摆放在直径 15 cm 的培养皿中，放置于人工气候室培养，定期浇灌 Hoagland 营养液。幼苗长出第 3 叶时，分成 4 组进行处理：对照（CK）、UV-B 辐射处理（UV）、干旱处理（D）和 UV-B 与干旱胁迫复合处理（UV+D）。处理 24 h 后取叶片测定各项指标，每项指标的测定不少于 3 次，实验重复 2 次。

1.2 UV-B 辐射和水分处理

UV-B 辐射增强的模拟方法见文献[6]，用紫外灯管（秦牌，波长峰值 313 nm，宝鸡光源研究所生产）照射植物，持续照射 24 h（10∶00—第 2 日 10∶00），累积辐射剂量为 48.025 kJ·m^{-2}（应用北京师范大学光学仪器厂的 UV-B 辐照计测定辐射强度，经 Caldwell[6]的经验公式转换，得到实际的生物有效辐射，UV-BBE）。

将培养皿中的营养液倒去，用吸水纸吸干根部水分后，倒入 25%（*w*/*v*）聚乙二醇（PEG-6000）至半淹没根部水平以模拟水分胁迫。前期实验表明，经过 24 h 的模拟胁迫后，植株出现明显的萎蔫失水[20]。

1.3 指标测定

脯氨酸的测定参考朱广廉等[25]的方法，称取 0.5 g 叶片进行测定。依照邱宗波等[20]的方法测定丙二醛含量和 SOD、CAT 的活性。APX 活性的测定则参照 Nakano 等[8]的方法。为方便实验，对 3 种酶活的测定方法稍作修改。称取 0.1 g 叶片，用 2 mL pH 7.8 的磷酸缓冲液研磨离心后，取上清液测定 3 种酶的活性。

1.4 数据分析

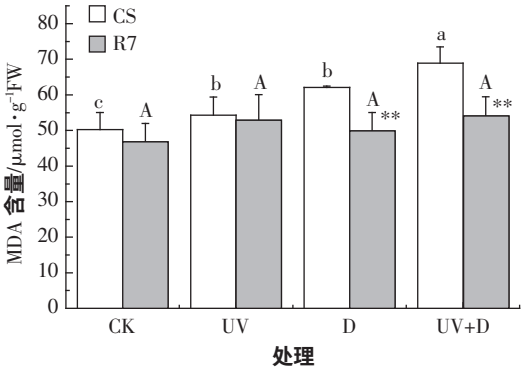
实验设计为随机实验。用两因素方差分析（Two-ways ANOVA）的方法分析品种和处理间的差异以及不同胁迫处理（UV 和 D）在不同处理水平下的差异，最小显著差异法（LSD）分析处理间差异，*t* 检验分析单个处理的品种间差异。差异显著水平用 $P<0.05$ 或 $P<0.01$，（$n=3$）表示。整个分析过程在 EXCEL 和 STATISTICA 软件系统下完成。

2　结果

对 UV 和干旱两个处理在不同胁迫水平的方差分析结果（表 1）表明，两个品种在增强的 UV 辐射（UV）和干旱（D）处理之间都没有表现出显著区别，而非抗旱品种 CS 中丙二醛（MDA）和脯氨酸（proline）的累积量在不同水平之间以及不同处理与不同处理水平交互作用下都有极显著差异（$P<0.01$），SOD 和 APX 活性在不同水平下表现出极显著差异（$P<0.01$），CAT 活性差异明显（$P<0.01$），3 种酶活在交互作用下均没有显著区别。抗旱品种 R7 体内的脯氨酸含量及 APX 活性在不同水平的不同胁迫下有极显著差异（$P<0.01$），同时 CAT 活性在不同水平和交互作用下都被极显著（$P<0.01$）的改变了。丙二醛和 SOD 活性则没有明显区别。

两种胁迫及其复合处理均使 CS 品种 MDA 积累量显著增加（$P<0.05$），且复合处理中表现为累加效应。然而，各处理均未使抗旱品种 R7 的 MDA 积累量有显著的变化。两个品种在干旱和复合处理时表现出极显著差异（图 1）。

CS 体内的脯氨酸在两种胁迫及其复合处理 24 h 后均显著高于对照组（$P<0.05$），UV-B 辐射与干旱胁迫复合处理时其脯氨酸含量比单独胁迫时显著降低（$P<0.05$），但仍然高于对照。而 R7 品种中的累计量与



注:不同的大小写字母表示不同品种的处理间差异按 LSD 检验达显著水平(P<5%)。相同处理条件下的品种间差异显著性水平用"*"(P<0.05)和"**"(P<0.01)表示,下同。

Note: Different capital and lowercase letters means significant difference between treatments of cultivars at 0.05 level. * and ** indicated the distinguish level were significant at 0.05 and 0.01 respectively. The same as below.

图 1 处理 24 h 后膜脂过氧化产物丙二醛含量变化

Figure 1 Changes of MDA contents after 24 h treatments

对照比较并不明显。在两胁迫单独进行时品种间的差异极显著(图 2)。

图 3、4、5 表明抗氧化酶系统 SOD、CAT 和 APX 活性的变化。无论单独胁迫还是复合处理都降低了 CS 的 SOD 活性,升高了 APX 活性,没有改变其 CAT 的活性。单独胁迫下抗旱品种 R7 的 CAT 和 APX 活性显著升高,且在干旱下显著高于 UV 辐射下,复合处理提高了 CAT 活性,与 UV 处理同水平,降低了 APX 活性,甚至低于 CK 水平。R7 的 SOD 酶活在各处理下没有显著变化。品种间比较表明,各条件下 SOD 和 APX 活性在品种间都存在显著差异,而只有干旱胁迫造成 R7 体内 CAT 显著高于 CS。

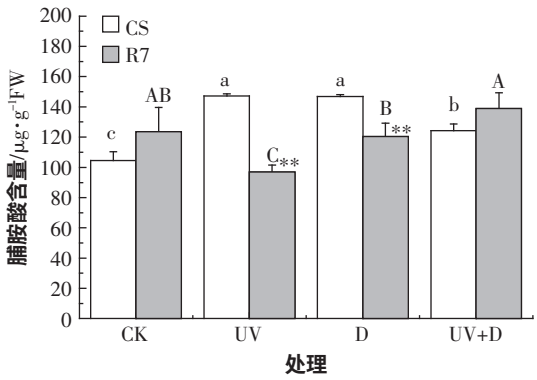


图 2 处理 24 h 后渗透调节物脯氨酸含量变化

Figure 2 Changes of proline contents after 24 h treatments

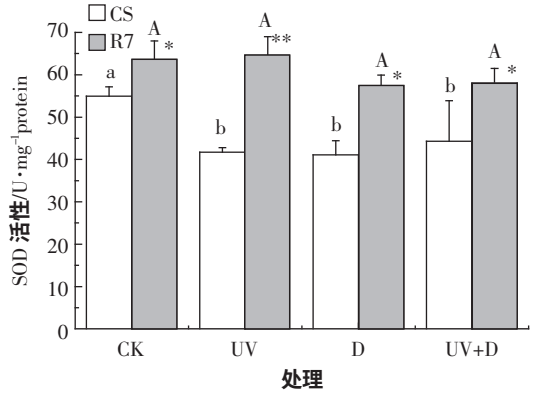


图 3 处理 24 h 后 SOD 活性变化

Figure 3 Changes of SOD activities after 24 h treatments

3 讨论

已有大量的报道表明平流层中的臭氧(O_3)被严重破坏,地表紫外线辐射(UV-B)因此剧增[4]。由此导致的全球气候变暖幅度将增加到 30%,大大加剧气候变暖的进程,所带来的日益加剧的干旱问题也越来越引人瞩目[12]。逆境下,渗透调节物是植物受到胁迫初

表 1 方差分析结果

Table 1 Results of ANOVA

指标	CS				R7		
	自由度(df)	处理(Treatment)	水平(Level)	处理×水平(Treatment×Level)	处理(Treatment)	水平(Level)	处理×水平(Treatment × Level)
丙二醛(MDA)	1,2,2	0.552 3	33.127 7**	20.098 5**	0.152 9	2.287 6	0.425 9
脯氨酸(Proline)	1,2,2	0.001 078	103.223 1**	41.645 4**	1.956 6	1.468 082	9.787 9**
SOD	1,2,2	0.005 887	8.519 5**	0.365 2	1.714 2	3.347 1	1.349 1
CAT	1,2,2	0.160 4	4.587 8*	3.084 65	3.631 7	41.887 3**	9.536 4**
APX	1,2,2	0.292 3	9.455 4**	0.429 6	2.903 5	2.363 9	170.288 1**

注:对两个处理:UV 和 D(在表中即处理),3 个处理水平:空白(CK)、单独处理(UV 和 D)和复合处理(UV+D)(在表中即水平)进行双因素方差分析。"*"为显著水平差异(P<0.05),"**"为极显著水平差异(P<0.01)。3 个自由度的顺序分别为处理、水平和处理×水平。

Note: Two factors (treatment in Tab. 1) UV and D and three levels that was blank (CK), individual treatment (UV and D) and combined treatment (UV+B) (level in Tab. 1) were analyzed in ANOVA. Results were obtained from EXCEL. * and ** indicated the distinguish level were significant at 0.05 and 0.01, respectively. Three df were ranged as treatment, level and treatment × level.

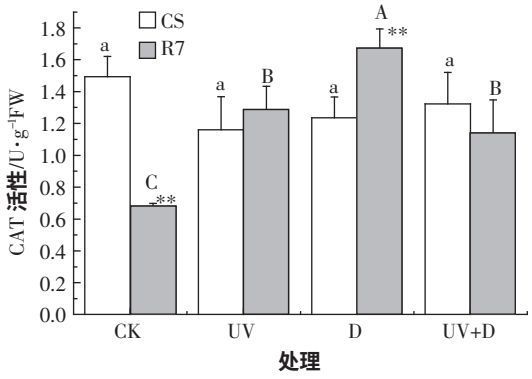


图 4 处理 24 h 后 CAT 活性变化

Figure 4 Changes of CAT activities after 24 h treatments

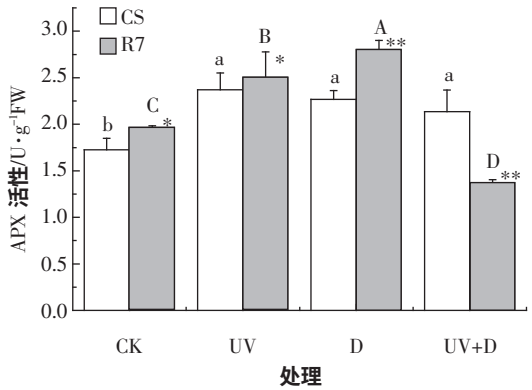


图 5 处理 24 h 后 APX 活性变化

Figure 5 Changes of APX activities after 24 h treatments

始调节渗透压减缓胁迫压力的手段[16]，而植物抗逆性与生物膜结构功能关系密切，膜脂质过氧化是各种胁迫导致玉米生理伤害的主要环节之一，而活性氧的产生导致氧化伤害，从而干扰新陈代谢[1,10]。而各种抗氧化酶类则在清除植物逆境下产生的活性氧并维持其平衡的过程中起着重要的作用[22,24]。MDA 和脯氨酸的测定结果表明 24 h 的胁迫对 CS 已经造成明显的伤害，而尚未严重伤害 R7 细胞膜（图 1、2）。两个品种对干旱胁迫的响应与在 UV 辐射下都是一致的，这是品种抗旱能力的表现。从表 1 可得知非抗旱品种的抗氧化酶对胁迫环境更为敏感，并且抗旱性不同对胁迫响应的酶不同，这是抗旱性不同的体现。品种间多种区别导致抗旱性不同的玉米对胁迫响应的不同。刘胜群等[19]证明不同耐旱性玉米根系解剖结构不同从而导致其对水分条件的敏感性不同。而不同植物细胞结构不同导致 UV-B 辐射对植物影响不同，并且不同种在叶片细胞膜结构，特别是叶绿体膜结构受 UV-B 辐射破坏的程度不同[26]，其中的机理尚有待研究。总体来说，本文结果可以证明，抗旱性不同的品种对 UV-B 辐射的敏感性不同。

自然界植物很少只受单一压力因子如 UV-B 辐射的作用，而总要对几种因子作出综合响应。对于复杂生态环境中植物如何抵御复合胁迫，即植物对于胁迫的交叉适应过程一直争论不休，对于增强的 UV 辐射与其他环境胁迫因子协同作用时对植物造成的伤害究竟以累加还是削弱的方式尚无定论[11,14-15]。冯虎元等[15]指出干旱与 UV-B 之间的相互关系对植物影响的阐明，有利于加深对平流层臭氧损耗的潜在作用的预见，正确预测未来全球变暖干旱加剧、UV-B 辐射增强对作物产量和生长能力的影响。他们的研究表明干旱和 UV-B 辐射复合作用下，干旱可以引起类黄酮含量升高，从而提供更多的 UV-B 吸收物质，增强了对 UV-B 辐射的保护作用，可能是两者产生相互作用减轻一种伤害的主要原因。UV-B 辐射则能提高植物的抗氧化酶活性[3,5]，也可理解为产生复合效应的原因之一。本研究结果中复合处理削弱了干旱对 R7 所造成的伤害，使 R7 体内去除 H_2O_2 的酶活降低，更好地适应 UV-B 和干旱共同胁迫的环境；而 CS 不仅未能改善反而加剧了干旱胁迫造成的影响，表现出胁迫的累加效应。因此可以认为增强的 UV-B 辐射对干旱的削弱作用随品种改变，是品种抗旱性在对增强 UV-B 辐射的体现。

综上所述，本研究结果表明，UV-B 和干旱单独作用 24 h 会导致玉米幼苗叶片渗透调节物脯氨酸和抗膜质氧化系统生理特征（MDA、抗氧化酶 SOD、CAT 和 APX）的变化。在复合胁迫下，抗旱品种受影响的程度并非单因子胁迫的加和，而是中和；单独胁迫对非抗旱品种造成的伤害恶化，表现为叠加效应。抗旱品种确实也能抵御 UV-B 辐射的胁迫，并且调节渗透调节物和抗氧化酶削弱干旱造成的伤害，是抗旱品种适应环境的表现。

参考文献：

[1] H B Shao, L Y Chu, C A Jaleel, et al. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants[J]. *C R Biologies*, 2008, 331(3): 215-225.

[2] H Y Feng, T Chen, S J Xu, et al. The effect of enhanced UV-B radiation on growth, yields, and stable carbon isotope composition of soybean[J]. *Acta Botanic Sinica*, 2001, 43(7): 709-713.

[3] I Santos, F Fidalgo, J M Almeida, et al. Biochemical and ultrastructural changes in leaves of potato plants grown under supplementary UV-B radiation[J]. *Plant Science*, 2004, 167(4): 925-935.

[4] J G Zaller, P S Searles, M M Caldwell, et al. Growth responses to ultraviolet-B radiation of two carex species dominating an Argentinian fen ecosystem[J]. *Basic Appl Ecol*, 2004, 5(2): 153-162.

[5] J H Sullivan, A H Teramura.Field study of the interaction between solar ultraviolet-B radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean[J]. *Plant Physiol*, 1990, 92 :141-146.

[6] J H Yang, T Chen, X L Wang. The effect of enhanced UV-B radiation on ABA and free praline contents of wheat leave[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (1) :39-42.

[7] L O Björn. Stratospheric ozone, ultraviolet radiation, and cryptogams[J]. *Biological conservation*, 2007, 135 :326-333.

[8] Y Nakano, K Asada. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific per-oxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22 (5) :867-88.

[9] S Nogués, D J Allen, J I L Morison, et al. Ultraviolet-B radiation effects on water relations, leaf development and photosynthesis in droughted pea plants[J]. *Plant Physiol*, 1998, 117 (1) :173-181.

[10] T D Ge, F G Sui, L L Bai, et al. Effects of water stress on the protective enzyme activities and lipid peroxidation in roots and leaves of summer maize[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5 (4) :291-298.

[11] V Alexieva, I Sergiev, S Mapelli, et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24 :1337-1344.

[12] 蔡锡安, 夏汉平, 彭少麟. 增强 UV-B 辐射对植物的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 1044-1052.
CAI Xi-an, XIA Han-ping, PENG Shao-lin. Effects of enhanced UV-B radiation on plants [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16 (3) : 1044-1052.

[13] 陈 拓, 安黎哲, 冯虎元, 等. UV-B 辐射对蚕豆叶膜脂过氧化的影响及其机制[J]. 生态学报, 2001, 21 (4) : 579-583.
CHEN Tuo, AN Li-zhe, FENG Hu-yuan, et al. The effect of UV-B radiation on membrane lipid peroxidation and mechanisms in broad bean leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (4) :579-583.

[14] 杜英君, 史 奕, 刘振伟. UV-B 辐射和 Hg^{2+} 复合处理对黑小麦生理代谢和生长的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23 (5) :111-115.
DU Ying-jun, SHI Yi, LIU Zhen-wei. Effect of UV-B radiation and Hg^{2+} combined treatment on physiological metabolism and growth of black wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (5) : 111-115.

[15] 冯虎元, 安黎哲, 陈书燕, 等. 增强 UV-B 辐射与干旱复合处理对小麦幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2002, 22 (9) :1564-1568.
FENG Hu-yuan, AN Li-zhe, CHEN Shu-yan, et al. The interactive effects of enhanced UV-B irradiation and water deficit on physiological properties of spring wheat seedling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22 (9) :1564-1568.

[16] 李德全,邹 琦,程炳嵩. 土壤干旱下不同抗旱性小麦品种的渗透调节和渗透调节物质[J]. 植物生理学报, 1992, 18 (1) :37-44.
LI De-quan, ZOU Qi, CHENG Bing-song. Osmotic adjustment and osmotlca of wheat cultivars with diferent drought resistance under soil drought[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1992, 18 (1) :37-44.

[17] 李锦树, 王洪春, 王文英, 等. 干旱对玉米叶片细胞透性及膜脂的影响[J]. 植物生理学报, 1983, 9 (3) :221-229.
LI Jin-shu, WANG Hong-chun, WANG Wen-ying, et al. Effects of drought on cell permeability and membrane lipid[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1983, 9 (3) :221-229.

[18] 梁婵娟, 陶文沂, 周 青. UV-B 辐射增强的环境植物学效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (4) :40-42.
LIANG Chan-juan, TAO Wen-yi, ZHOU Qing. Environment effects of enhanced ultraviolet-B radiation on plants[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12 (4) :40-42.

[19] 刘胜群, 宋凤斌. 不同耐旱性玉米根系解剖结构比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 86-91.
LIU Sheng-qun, SONG Feng-bin. A comparison of root anatomical structure of maize genotypes with different drought tolerance[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25 (2) :86-91.

[20] 邱宗波, 刘 晓, 李方民, 等. CO_2 激光预处理对干旱胁迫引起小麦幼苗脂质过氧化伤害的防护作用[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27 (1) :35- 39.
QIU Zong-bo, LIU Xiao, LI Fang-min, et al. Protective effect of CO_2 laser pretreatment on wheat seedlings lipid peroxidation under drought stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27 (1) :35- 39.

[21] 石江华, 王 艳, 李韶山. UV-B 对植物分子和细胞水平的效应[J]. 激光生物学报, 2002, 11 (4) :315-318.
SHI Jiang-hua, WANG Yan, LI Shao-shan. Recent advances of UV-B effects on plants at molecular and cellular levels[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2002, 11 (4) :315-318.

[22] 宋凤斌, 徐世昌. 玉米抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12 (1) :127-129.
SONG Feng-bin, XU Shi-chang. Study on the drought resistant identification indexes in maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12 (1) :127-129.

[23] 王爱国, 罗广华, 邵从本, 等. 大豆种子超氧化物歧化酶的研究[J]. 植物生理学报, 1983, 9(1): 77-83.
WANG Ai-guo, LUO Guang-hua, SHAO Cong-ben, et al. Study on superoxide dismutase of soybean seeds[J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 1983, 9 (1) :77-83.

[24] 王启明. 干旱胁迫对大豆苗期叶片保护酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (4) :918- 921.
WANG Qi-ming. Efects of drought stress on protective enzymes activities and membrane lipid peroxidation in leaves of soybean seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25 (4) :918- 921.

[25] 吴杏春, 林文雄, 郭玉春, 等. 植物对 UV-B 辐射增强响应的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9 (3) :36-39.
WU Xing-chun,LIN Wen-xiong,GUO Yu-chun, et al. Advance in research on the response of plants to the increased ultraviolet B radiation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9 (3) :36-39.

[26] 云 岚, 米福贵, 云锦凤, 等. 六个苜蓿品种幼苗对水分胁迫的响应及其抗旱性[J]. 中国草地, 2004,26 (2) :15-20.
YUN Lan, MI Fu-gui, YUN Jin-feng, et al. Drought resistance of six alfalfa varieties seedlings under water stress [J]. *Grassland of China*, 2004,26 (2) :15-20.

[27] 朱广廉, 邓兴旺, 左卫能. 植物体内游离脯氨酸的测定[J]. 植物生理学通讯, 1983, 1 :35-37.
ZHU Guang-lian, DENG Xing-wang, ZUO Wei-neng. Determination of proline in plants. Plant Physiology Communications, 1983, 1 :35-37.

[28] 朱素琴, 徐向明, 陈章和, 等. UV-B 辐射对几种木本植物幼苗生长和叶绿体超微结构的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10 (3) : 235-244.
ZHU Su-qin, XU Xiang-ming, CHEN Zhang-he, et al. Efects of UV-B radiation on seedling growth and chloroplast ultrastructure changes in some woody plants[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10 (3) :235-244.