

# 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗生理特性的影响

聂磊<sup>1</sup>, 刘鸿先<sup>2</sup>, 彭少麟<sup>3</sup>

(1. 佛山科学技术学院农学系, 广东 南海 528231; 2. 中国科学院华南植物研究所, 广东 广州 510650;  
3. 中国科学院广州分院, 广东 广州 510070)

**摘要:** 水分胁迫下, 柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr.] 树苗叶片相对含水量(RWC)、水势( $\Psi_w$ )、净光合速率(Pn)、可溶性蛋白质和叶绿素(Chl)含量下降, 丙二醛(MDA)、脯氨酸(Pro)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性升高, 过氧化氢酶(CAT)活性先上升后下降, 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、抗坏血酸(AsA)和还原型谷胱甘肽(GSH)含量明显降低。叶绿素荧光参数中光系统 II 光化学原初效率(Fv/Fm)、光系统 II 电子传递量子效率( $\Phi_{PSII}$ )和光化学猝灭( $q_p$ )下降, 非光化学猝灭( $q_N$ )和热能耗散系数( $K_D$ )升高。显示膜系统和 PS II 是水分胁迫的主要抑制位点。抗旱性强的品种具有较高的活性氧清除能力。长期紫外线-B(UV-B)增强辐射能缓解水分胁迫下柚树苗叶片 RWC、 $\Psi_w$ 、APX 活性和 GSH、AsA 含量下降, 但对水分胁迫下的 Pro 含量、Pn 和叶绿素荧光特性作用不明显。初步推测: UV-B 和水分胁迫对植物有部分相同的作用机制, 都导致植株膜脂过氧化程度加剧和 PS II 的失活, 同时存在各自作用方式的特异性。

**关键词:** 柚; 树苗; 水分胁迫; UV-B 增强辐射; 生理特性

**中图分类号:** Q666.3; Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0978(2001)03-0019-06

**Effects of water stress on physiological characteristics in leaves of pomelo seedlings under long-term UV-B treatment** NIE Lei<sup>1</sup>, LIU Hong-xian<sup>2</sup>, PENG Shao-lin<sup>3</sup> (1. Department of Agricultural Sciences, Foshan University, Nanhai 528231, China; 2. South China Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Guangzhou Branch, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2001, 10(3): 19-24

**Abstract:** Under water stress, relative water content, water potential, net photosynthesis rate, soluble protein and chlorophyll contents in leaves of pomelo [*Citrus maxima* (Burm.) Merr.] seedlings were decreased, MDA and free proline contents, SOD activity were increased, CAT activity increased at first, then decreased. The activity of APX, the contents of AsA and GSH were declined. Chlorophyll fluorescence parameters Fv/Fm,  $\Phi_{PSII}$  and  $q_p$  were decreased,  $q_N$  and  $K_D$  were raised. It demonstrated that membrane and photosystem PS II were the important target of water stress. The capacity of getting rid of activated oxygen was higher in the drought-resistant variety than in the drought-sensitive one. Long-term enhanced UV-B radiation could delay the decrease of relative water content, water potential, APX activity and GSH, AsA contents in leaves of pomelo seedlings under water stress, but had no obvious effects on Pn, free proline content and chlorophyll fluorescence parameters. The results suggested that UV-B and water stress owned partial same functional model to plants with leading to membrane lipid peroxidation aggravation and PS II inactivation, meanwhile there were specific properties of individual action model were existed.

**Key words:** pomelo; *Citrus maxima* (Burm.) Merr.; seedlings; water stress; enhanced UV-B radiation; physiological characteristics

在自然条件下, 柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr.] 树常受到土壤缺水影响, 即使在华南地区, 也常遭受季节性干旱的胁迫。研究柚树在干旱条件下的生理反应, 对采取措施提高其抗旱能力有重要意义。20 世纪以来, 臭氧层减薄导致的 UV-B 辐射增加对高等植物的影响已受到广泛关注<sup>[1]</sup>。UV-B 辐射对植物生长、生理、营养、群体结构、生物量和产量

的影响均有报道<sup>[2,3]</sup>, 而未见柚树对 UV-B 生理反应的报道。在自然条件下植物往往遭受到多种环

收稿日期: 2000-11-13

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(3989970); 广东省科技创新百项工程项目(99B059002X)

作者简介: 聂磊(1973-), 男, 上海人, 博士, 讲师, 主要从事植物生理生态和环境生物学研究。

境因子的影响,因此对到达地球表面的 UV-B 辐射逐渐增强的趋势,植株对水分胁迫的反应会如何改变是一个值得关注的问题,而这方面的研究却很少<sup>[4]</sup>。本试验以较抗旱的酸柚和抗旱性较弱的沙田柚为试验材料,探讨柚树苗对水分胁迫的反应及增强 UV-B 辐射的整合效应。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料及处理

试验于 1999~2000 年进行,供试材料为柚的品 种酸柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr. cv. Suan Yu] 和沙田柚 [*Citrus maxima* (Burm.) Merr. cv. Shatian Yu] 的 2 年生盆栽实生苗。用人工光源 (UV-B310, 秦牌 Qin mode, 30 W) 增加 UV-B 辐射,开、关灯基本 与日出日落同步。每天照射约 12 h,处理期间,光源 与植株顶部距离始终保持 0.5 m 左右,适时浇水。 对照为自然条件下的太阳辐射,处理除自然界的太 阳辐射外,人工增加的 UV-B 辐射强度为 0.20  $J/(m^2 \cdot s)$ ,相当于大气  $O_3$  减少 36% 时增加的太阳 UV-B 辐射(按 Gerstl<sup>[5]</sup> 的方法计算,辐射放大因子为 2)。处理半年后,开始水分胁迫试验。每品种选择 12 盆生长一致的幼苗,其中 6 盆采取增强 UV-B 辐 射处理。分别取自然光辐射与增强 UV-B 辐射的幼 苗各 3 盆停止浇水,其余 6 盆正常浇水作为对照。 当自然光辐射下的柚苗出现中度缺水和严重缺水症 状时,同时取添加 UV-B 和未添加 UV-B 的柚苗试样 测定,中度缺水和严重缺水按 Hsiao 的划分标准进 行划分:相对含水量减低 10%~20% 属中度缺水, 减低 20% 以上的属严重缺水<sup>[6]</sup>。取样在早晨 8:00 ~9:00 进行,试样均取自当年春梢第 2~3 片叶。

### 1.2 测定方法

叶片水势( $\Psi_w$ )测定采用压力室法。叶片相对 含水量(RWC)按陈立松等的方法<sup>[7]</sup>测定。丙二醛 (MDA)含量测定参照 Raeri 等的方法<sup>[8]</sup>。可溶性蛋 白质含量按 Bradford 方法测定<sup>[9]</sup>,用牛血清蛋白作 标准曲线。净光合速率(Pn)和暗呼吸速率用氧电极 法测定。游离脯氨酸(Pro)用茚三酮比色法,在 751 分光光度计上 520 nm 比色测定。可溶性糖用王台 方法<sup>[10]</sup>提取,蒽酮法测定含量。叶绿素(Chl)含量参 照文献<sup>[11]</sup>方法测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性 测定采用氮蓝四唑法,过氧化氢酶(CAT)活性测定

参照 Aebi<sup>[12]</sup>的方法,抗坏血酸过氧化物酶(APX)活 性测定参照曾韶西等<sup>[13]</sup>的方法,叶绿素荧光参数光 系统 II 光化学原初效率(Fv/Fm)、光系统 II 电子传递 量子效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭( $q_p$ )、非光化学猝灭 ( $q_n$ )和热能耗散系数( $K_D$ )测定按 Schreiber 等<sup>[14]</sup>的 方法,采用脉冲调制荧光仪 PAM(Walz, Germany)测 定。谷胱甘肽(GSH)含量测定按曾韶西等<sup>[13]</sup>方法。 抗坏血酸(AsA)含量按 Tanaka 等<sup>[15]</sup>方法测定。以上 各项测定均重复 3 次以上。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片 相对含水量和水势以及叶绿素、可溶性蛋白质、可溶性 糖、脯氨酸含量的影响

水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片 RWC、 $\Psi_w$ 、Chl、Pro、可溶性蛋白质和可溶性糖含量的 影响见图 1、图 2 和表 1。

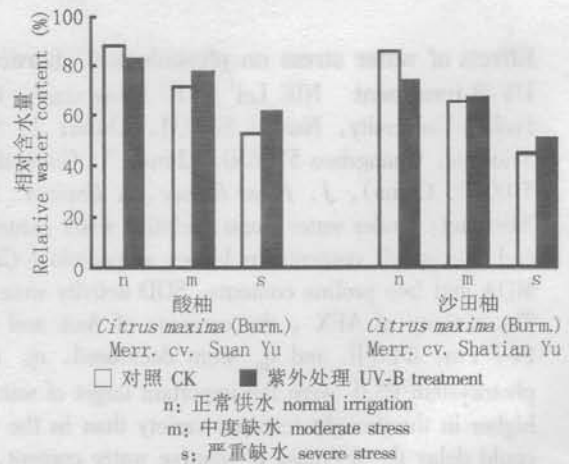


图 1 水分胁迫对柚树苗叶片相对含水量的影响  
Fig. 1 Effect of water stress on relative water content in leaves of pomelo seedlings

从图 1 及表 1 可知,正常供水条件下,2 个品种 间叶片相对含水量和水势差别不明显。水分胁迫处 理明显降低了相对含水量和水势,而其中抗旱性强 的酸柚下降幅度小于抗旱性弱的沙田柚。经 UV-B 处理后,叶片相对含水量和水势下降,酸柚分别下降 了 5.5% 和 33.3%,沙田柚分别下降 8.2% 和 37.5%。长期 UV-B 处理的柚苗在水分胁迫下叶片 相对含水量和水势均高于对照,UV-B 对酸柚的效果 较为明显。水分胁迫引起柚树苗叶片叶绿素、可溶 性蛋白质含量下降,可溶性糖和 Pro 含量升高。酸

柚在胁迫下的 Pro 含量明显高于沙田柚(图2)。UV-B 处理能缓解 Chl 和可溶性蛋白质含量的下降,但对 Pro 含量影响不大。

### 2.2 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片净光合速率和叶绿素荧光参数的影响

水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片 Pn 及叶绿素荧光参数的影响见图3和表2。图3显示,水分胁迫引起柚树苗叶片 Pn 下降,随胁迫程度加深 Pn 下降幅度增大。正常供水条件下,长期增加 UV-B 辐射同样导致 Pn 降低。水分胁迫时,增加 UV-B 辐射对 Pn 影响不大。

由表2可以看出,正常供水条件下,UV-B 辐射对 Fv/Fm、ΦPS II 和 q<sub>p</sub> 表现出抑制作用,同时 q<sub>N</sub> 和 K<sub>D</sub>

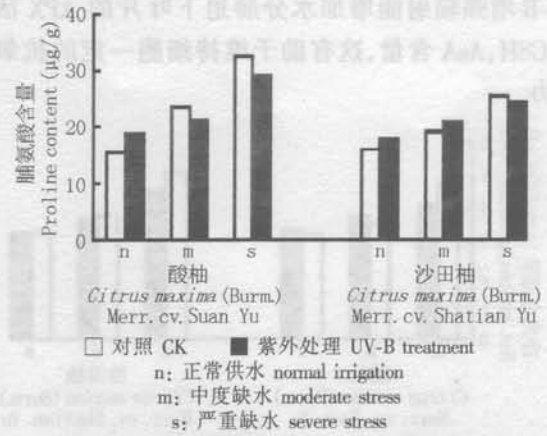


图2 水分胁迫对柚树苗叶片脯氨酸含量的影响  
Fig. 2 Effect of water stress on proline content in leaves of pomelo seedlings

表1 水分胁迫对柚树苗水势及叶绿素、可溶性蛋白质、可溶性糖含量的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of water stress on water potential and chlorophyll, soluble proteins, soluble sugar contents in leaves of pomelo seedling<sup>1)</sup>

处理 Treatment	水势 Water potential (mPa)	叶绿素 Chlorophyll (mg/g)	可溶性蛋白质 Soluble protein (µmol/g)	可溶性糖 Soluble sugar (mg/g)	
酸柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Suan Yu					
正常供水 Normal irrigation	对照 Control	-0.9±0.1(100.0)	2.304±0.365(100.0)	53.25±1.32(100.0)	23.11±0.48(100.0)
	UV-B	-1.2±0.2(133.3)	2.023±0.170( 87.8)	45.64±1.80( 85.7)	27.22±0.55(117.8)
中度缺水 Moderate stress	对照 Control	-1.6±0.2(177.8)	1.634±0.121( 70.9)	40.15±0.66( 75.4)	30.97±1.30(134.0)
	UV-B	-1.5±0.3(166.7)	1.812±0.155( 78.6)	38.29±1.12( 71.9)	35.61±0.82(154.1)
严重缺水 Severe stress	对照 Control	-2.2±0.3(244.4)	1.550±0.071( 67.3)	32.64±0.81( 61.3)	37.62±1.45(162.8)
	UV-B	-1.8±0.2(200.0)	1.722±0.049( 74.7)	31.27±1.23( 58.7)	38.18±1.72(165.2)
沙田柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Shatian Yu					
正常供水 Normal irrigation	对照 Control	-0.8±0.1(100.0)	2.417±0.085(100.0)	57.19±2.26(100.0)	21.06±0.31(100.0)
	UV-B	-1.1±0.1(137.5)	2.116±0.173( 87.5)	51.05±1.88( 89.3)	22.65±0.49(107.5)
中度缺水 Moderate stress	对照 Control	-2.0±0.2(250.0)	1.530±0.121( 63.3)	45.18±1.77( 79.0)	28.70±0.69(136.3)
	UV-B	-1.8±0.3(225.0)	1.728±0.076( 71.5)	47.90±1.36( 83.8)	26.05±0.53(123.7)
严重缺水 Severe stress	对照 Control	-2.8±0.4(350.0)	1.453±0.244( 60.1)	38.77±1.04( 67.8)	30.24±1.18(143.6)
	UV-B	-2.3±0.4(287.5)	1.401±0.182( 58.0)	36.42±0.95( 63.6)	33.00±0.76(156.7)

<sup>1)</sup> 括号内数值为相对值 Datum in brackets means relative value

升高。与此相同的是,水分胁迫同样引起 Fv/Fm、ΦPS II、q<sub>p</sub> 的降低和 q<sub>N</sub>、K<sub>D</sub> 的上升,只不过趋势更加明显。随着水分胁迫程度加深,上述变化进一步加剧。水分胁迫对酸柚叶绿素荧光特性的影响较沙田柚轻。在严重缺水情况下酸柚的 Fv/Fm 和 ΦPS II 分别下降 26.2% 和 25.5%,而沙田柚则下降 36.4% 和 33.9%。长期增加 UV-B 辐射对水分胁迫下的叶绿素荧光特性影响不明显。

### 2.3 水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片膜脂过氧化防御系统的影响

水分胁迫对长期 UV-B 辐射下柚树苗叶片膜脂

过氧化防御系统的影响见表3。可以看出,长期 UV-B 辐射造成柚树苗叶片 MDA 含量增高,SOD、CAT 活性及 AsA 含量下降。水分胁迫下,叶片 MDA 含量明显升高,随胁迫程度加大而上升,表明叶片膜脂过氧化水平加剧,SOD 活性具有相同的变化趋势,2 个品种叶片 CAT 活性在中度缺水时均提高,而在严重缺水时又急剧降低,表现出“先上升后下降”的趋势。水分胁迫明显地降低柚树苗叶片 APX 活性和 AsA、GSH 含量,其下降水平与胁迫程度有关,胁迫越重,降低的越多。此外还可以看出,抗旱性强的品种具有较高的 SOD、APX 活性及 AsA、GSH 含量。长期



UV-B 增强辐射能增加水分胁迫下叶片的 APX 活性和 GSH、AsA 含量,这有助于维持细胞一定的抗氧化能力。

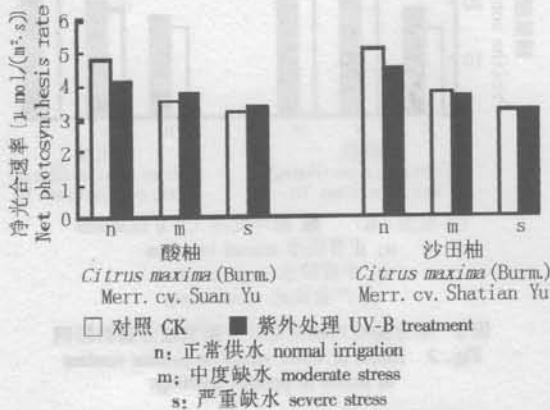


图3 水分胁迫对柚树苗叶片净光合速率的影响  
Fig. 3 Effects of water stress on net photosynthesis rate in leaves of pomelo seedling

### 3 讨论

干旱对植物的影响广泛而深刻,表现在生长发育的各个阶段<sup>[16]</sup>。本试验结果显示,水分胁迫导致叶片相对水含量、水势、叶绿素和可溶性蛋白质含量降低,可溶性糖和Pro含量升高,Pro的变化尤为显

著。可溶性糖是细胞内重要渗透调节物质,帮助提高细胞的渗透调节能力。植物体内 Pro 在干旱、盐渍、低温或大气污染等胁迫条件下会大量积累。有研究认为体外 Pro 具有清除活性氧的作用,进一步的试验表明环境胁迫下体内 Pro 也具有相同功能<sup>[17]</sup>。新近的报道称 Pro 对活性氧的清除具有一定的专一性,即只能清除·OH 和 O<sub>2</sub><sup>-</sup>,并认为氧化胁迫下 Pro 的积累很可能是植物抵抗氧化损伤的一种保护反应<sup>[18]</sup>。

卢从明等<sup>[19]</sup>指出,水分胁迫最先破坏 PS II。该试验结果表明,水分胁迫下,柚苗叶片叶绿素荧光参数 Fv/Fm, ΦPS II 和 q<sub>p</sub> 下降,同时 q<sub>N</sub> 和 K<sub>D</sub> 上升。这反映出 PS II 光化学效率、非环式电子传递效率、PS II 开放的反应中心比例和参与 CO<sub>2</sub> 固定的电子均减少,说明水分胁迫造成 PS II 部分失活,这与前人的研究一致<sup>[20-22]</sup>。2 个柚树品种的 q<sub>N</sub> 在水分胁迫处理后出现上升,说明叶绿素所吸收的激发能被用于热辐射耗散的份额增大,在处理开始时可能具有一定的保护功能,但随着水分胁迫的加剧有可能是调节失控的预兆<sup>[23]</sup>,因为同时 Pn 已明显下降。

表2 水分胁迫对柚树苗叶绿素荧光参数的影响<sup>1)</sup>

Table 2 Effects of water stress on chlorophyll fluorescence characteristics in leaves of pomelo seedling<sup>1)</sup>

处理 Treatment	光化学原初效率 Photochemistry original efficiency	量子效率 Quantum efficiency	光化学猝灭系数 Photochemistry quench coefficient	非光化学猝灭系数 Non-photochemistry quench coefficient	热能耗散系数 Dissipation coefficient of heat energy
酸柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Suan Yu					
正常供水 Normal irrigation					
对照 Control	0.692 ± 0.084 (100.0)	0.436 ± 0.029 (100.0)	0.781 ± 0.025 (100.0)	0.472 ± 0.026 (100.0)	0.468 ± 0.052 (100.0)
UV-B	0.638 ± 0.019 (92.2)	0.410 ± 0.081 (94.01)	0.723 ± 0.044 (92.3)	0.501 ± 0.039 (106.1)	0.493 ± 0.090 (105.1)
中度缺水 Moderate stress					
对照 Control	0.541 ± 0.050 (78.2)	0.377 ± 0.060 (86.5)	0.620 ± 0.013 (79.4)	0.587 ± 0.061 (124.4)	0.526 ± 0.088 (112.4)
UV-B	0.560 ± 0.010 (80.9)	0.363 ± 0.054 (83.3)	0.658 ± 0.029 (84.3)	0.564 ± 0.027 (119.5)	0.461 ± 0.031 (98.5)
严重缺水 Severe stress					
对照 Control	0.479 ± 0.016 (69.2)	0.319 ± 0.072 (73.2)	0.475 ± 0.064 (60.8)	0.693 ± 0.030 (146.8)	0.580 ± 0.027 (124.0)
UV-B	0.511 ± 0.055 (73.8)	0.325 ± 0.041 (74.5)	0.535 ± 0.076 (68.5)	0.645 ± 0.078 (136.7)	0.531 ± 0.016 (113.5)
沙田柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Shatian Yu					
正常供水 Normal irrigation					
对照 Control	0.745 ± 0.063 (100.0)	0.507 ± 0.029 (100.0)	0.826 ± 0.040 (100.0)	0.429 ± 0.014 (100.0)	0.415 ± 0.018 (100.0)
UV-B	0.669 ± 0.028 (89.8)	0.450 ± 0.037 (88.8)	0.770 ± 0.082 (93.2)	0.472 ± 0.005 (110.0)	0.464 ± 0.018 (111.8)
中度缺水 Moderate stress					
对照 Control	0.563 ± 0.012 (75.6)	0.417 ± 0.063 (82.2)	0.653 ± 0.079 (79.1)	0.602 ± 0.034 (140.3)	0.562 ± 0.035 (135.4)
UV-B	0.604 ± 0.085 (81.1)	0.382 ± 0.020 (75.3)	0.687 ± 0.015 (83.2)	0.581 ± 0.086 (135.4)	0.550 ± 0.043 (132.5)
严重缺水 Severe stress					
对照 Control	0.405 ± 0.049 (54.4)	0.324 ± 0.065 (63.9)	0.594 ± 0.008 (71.9)	0.638 ± 0.022 (148.9)	0.536 ± 0.082 (129.2)
UV-B	0.474 ± 0.031 (63.6)	0.335 ± 0.007 (66.1)	0.621 ± 0.025 (75.2)	0.644 ± 0.037 (150.1)	0.575 ± 0.009 (138.6)

1) 括号内数值为相对值 Datum in brackets means relative value

表3 水分胁迫对柚树苗叶片膜化过氧化防御系统的影响<sup>1)</sup>Table 3 Effects of water stress on membrane lipid peroxidative defensive system in leaves of pomelo seedling<sup>1)</sup>

处理 Treatment	丙二醛 Malonic dialdehyde ( $\mu\text{mol/g}$ )	超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase (Unit/mg)	过氧化氢酶 Catalase ( $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ )	抗坏血酸过氧化物酶 Ascorbic acid peroxidase ( $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{min})$ )	谷胱甘肽 Glutathione ( $\mu\text{mol/g}$ )	抗坏血酸 Ascorbic acid ( $\mu\text{mol/g}$ )
酸柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Suan Yu						
正常供水 Normal irrigation						
对照 Control	32.21 ± 1.69(100.0)	30.40 ± 0.72(100.0)	35.29 ± 1.02(100.0)	0.36 ± 0.02(100.0)	4.58 ± 0.06(100.0)	9.36 ± 0.24(100.0)
UV-B	40.83 ± 1.54(126.8)	25.88 ± 0.63(85.1)	31.47 ± 1.60(89.2)	0.35 ± 0.05(97.2)	4.81 ± 0.25(105.0)	7.85 ± 0.65(83.9)
中度缺水 Moderate stress						
对照 Control	56.22 ± 2.02(174.0)	41.23 ± 1.61(135.6)	50.40 ± 2.11(142.8)	0.25 ± 0.04(69.4)	3.46 ± 0.11(75.5)	7.02 ± 0.13(75.0)
UV-B	47.35 ± 1.61(147.0)	33.50 ± 0.80(110.2)	45.26 ± 0.89(128.3)	0.28 ± 0.03(77.8)	3.90 ± 0.28(85.2)	7.66 ± 0.42(81.8)
严重缺水 Severe stress						
对照 Control	78.05 ± 2.17(242.3)	47.27 ± 2.09(155.5)	29.05 ± 1.35(82.3)	0.18 ± 0.01(50.0)	2.40 ± 0.09(52.4)	4.27 ± 0.08(45.6)
UV-B	59.10 ± 2.03(183.5)	42.16 ± 1.32(138.7)	37.12 ± 0.44(105.2)	0.24 ± 0.03(66.7)	2.88 ± 0.12(62.9)	6.30 ± 0.51(67.3)
沙田柚 <i>Citrus maxima</i> (Burm.) Merr. cv. Shatian Yu						
正常供水 Normal irrigation						
对照 Control	41.50 ± 0.95(100.0)	26.58 ± 0.33(100.0)	45.17 ± 2.08(100.0)	0.29 ± 0.02(100.0)	4.21 ± 0.27(100.0)	8.90 ± 0.36(100.0)
UV-B	48.23 ± 1.86(116.2)	21.44 ± 0.25(80.7)	38.55 ± 0.62(85.2)	0.37 ± 0.01(110.3)	4.55 ± 0.06(108.1)	7.21 ± 0.49(81.0)
中度缺水 Moderate stress						
对照 Control	64.97 ± 1.20(156.1)	33.51 ± 1.07(126.1)	62.77 ± 2.49(138.9)	0.19 ± 0.03(65.5)	3.14 ± 0.20(74.6)	6.84 ± 0.17(76.9)
UV-B	60.55 ± 1.14(145.9)	29.28 ± 0.52(111.4)	53.28 ± 1.04(118.1)	0.22 ± 0.04(79.3)	3.36 ± 0.23(80.0)	6.50 ± 0.22(73.0)
严重缺水 Severe stress						
对照 Control	93.62 ± 3.22(225.6)	42.66 ± 0.86(161.0)	34.50 ± 0.76(76.4)	0.12 ± 0.02(41.4)	1.87 ± 0.14(44.4)	5.03 ± 0.10(56.5)
UV-B	81.50 ± 2.47(196.4)	43.08 ± 1.31(162.1)	46.21 ± 1.93(102.3)	0.20 ± 0.02(69.0)	2.69 ± 0.05(63.9)	5.62 ± 0.38(63.1)

<sup>1)</sup> 括号内数值为相对值 Datum in brackets means relative value

通常认为,植物的抗旱性与其体内活性氧清除能力有关,抗旱性强的品种有较强的活性氧清除能力和抗氧化能力<sup>[17,24]</sup>。水分胁迫下,酸柚具有较高的SOD、APX活性及AsA、Pn、GSH含量,说明其抗氧化能力比沙田柚强,相应的,酸柚的相对含水量、水势、净光合速率及叶绿素、可溶性蛋白质含量维持在较高的水平。

交叉抗性或交叉适应是指在某种逆境下生长的植物不仅具有抵抗该逆境胁迫的能力,而且具有抵抗其他逆境的能力,这已在许多植物上得到证明<sup>[25]</sup>。近年来一些研究发现,这种交叉抗性与植物体内活性氧清除系统存在密切关系<sup>[26,27]</sup>,各种逆境胁迫对植物的效应有一定共性。Sullivan等在大豆和小麦上的试验表明,UV-B仅仅对正常供水条件下的植物的生长和光合作用有抑制,水分胁迫下植物对UV-B未表现出反应。由此提出假设,水分胁迫处理使植物增强了抵御UV-B伤害的能力<sup>[4,28]</sup>。作者对长期增强UV-B辐射下的柚树苗对水分胁迫的反映的研究结果显示,UV-B辐射增加水分胁迫下叶片APX活性

和GSH、AsA含量,还能缓解叶片相对含水量和水势的下降。与此不同,UV-B辐射对水分胁迫下Pn和PS II活性的下降作用不大,也未影响水分胁迫下的Pro含量。UV-B长期辐射并未加剧水分胁迫对植物的伤害作用,或者说UV-B与水分胁迫并未表现出对植物的叠加效应。就本试验结果来看,UV-B和水分胁迫对植物的作用机制存在部分共性,也有各自的特异性。得出长期增强UV-B辐射能增强柚树苗抗旱性结论的依据尚不充分,UV-B和水分胁迫对植物的整合效应仍需深入研究。

#### 参考文献:

- [1] Madronich S. Changes in ultraviolet radiation reaching the earth's surface [J]. *Ambio*, 1995, 24(1): 143-152.
- [2] 李元,王勋陵. 增强UV-B辐射对植物生理生化的影响[J]. *环境科学学报*, 1998, 18(5): 504-509.
- [3] Caldwell M M, Teramura A H, Tevini M, et al. Effects of increased solar ultraviolet radiation on terrestrial plants [J]. *Ambio*, 1995, 24: 166-173.
- [4] Sullivan J H, Teramura A H. Field study of the interaction between

- supplemental UV-B radiation and drought in soybean [J]. *Plant Physiol*, 1990, 92(1): 141-146.
- [5] Gerstl S A, Zardecki A. Biologically damaging radiation amplified by ozone depletions [J]. *Nature*, 1981, 294(2): 352-354.
- [6] Hsiao T C. Plant responses to water stress [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1973, 24(3): 519-570.
- [7] 陈立松, 刘星辉. 水分胁迫对荔枝叶片内源激素的影响[J]. *热带作物学报*, 1999, 20(3): 31-35.
- [8] Raeri A, Lencioni L, Schenone G, et al. Gultathioe-ascorbic acid cycle in pumpkin plants grown under polluted air in open-up chambers [J]. *J Plant Physiol*, 1993, 142(3): 286-290.
- [9] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantity of protein utilizing the principle of protein dye binding [J]. *Anal Biochem*, 1976, 72(2): 248-254.
- [10] 王台, 肖翊华, 刘文芳. 光敏感核不育水稻育性诱导和转换过程中叶片碳水化合物的变化[J]. *作物学报*, 1991, 17(5): 369-374.
- [11] 林植芳, 孔国辉, 梁春. 生长光强和冬季低温对三种亚热带木本植物生理特性的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 1994, 2(3): 54-61.
- [12] Kalir A, Poljakoff-Mayber A. Changes in activity of malate dehydrogenase, catalase, peroxidase and superoxide dismutase in leaves of *Halimione portulacoids* (L.) Aellen exposed to high sodium chloride concentrations [J]. *Ann Bot*, 1981, 47(1): 75-85.
- [13] 曾韶西, 王以柔. 低温胁迫对黄瓜子叶抗坏血酸过氧化物酶和谷胱甘肽含量的影响[J]. *植物生理学报*, 1990, 16(1): 37-42.
- [14] Schreiber V, Schliwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and non-photochemical fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer [J]. *Photosyn Res*, 1986, 10(1): 51-62.
- [15] Tanaka K, Sud Y, Kondo N, et al. Ozone tolerance and the ascorate-dependent hydrogen peroxide decomposing system in chloroplasts [J]. *Plant Cell Physiol*, 1985, 26(8): 1425-1431.
- [16] 刘祖祺, 张石城. *植物抗性生理学* [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994, 31-58.
- [17] Smirnov N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation [J]. *New Phytol*, 1993, 125: 27-58.
- [18] 蒋明义. 渗透胁迫下水稻体内催化性铁刺激脯氨酸积累[J]. *植物生理学报*, 1997, 23(4): 347-352.
- [19] 卢从明, 张其德. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理[J]. *作物学报*, 1993, 20(5): 601-606.
- [20] 卢从明, 张其德. 水分胁迫对小麦光系统 II 的影响[J]. *植物学报*, 1994, 36(2): 93-98.
- [21] Schreiber U, Bilger W. Rapid assessments of stress effect on plant leaves by chlorophyll fluorescence measurements [A]. Tenhunen J D. *Plant Response to Stress* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1987. 27-54.
- [22] Lin S Q, Yang D N, Zhang Q D. Frost resistance of wheat and *Chla in vivo* fluorescence induction kinetics [A]. Baltscheffs R M. *Current Research in Photosynthesis, Vol 4* [M]. New York: Kluwer Academic Publisher, 1990. 647-650.
- [23] Van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress [J]. *Photosyn Res*, 1990, 25(1): 147-150.
- [24] 蒋明义, 荆家海, 王韶唐. 渗透胁迫对水稻幼苗膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. *植物生理学报*, 1991, 17(1): 80-84.
- [25] Pastori G M, Tripi V S. Oxidative stress induces high rate of glutathione reductase synthesis in a drought-resistant maize strain [J]. *Plant Cell Physiol*, 1992, 33(5): 957-961.
- [26] Foyer C H, Lelandais M, Kunert K J. Photooxidative stress in plants [J]. *Physiol Plant*, 1994, 92(4): 696-717.
- [27] Jagtap V, Bhargava S. Variation in antioxidant metabolism of *Moerch* exposed to high light, low water and high temperature stress [J]. *J Plant Physiol*, 1995, 145(2): 195-197.
- [28] Al-oudat M, Baydoun S A. Effects of enhanced UV-B on growth and yield of two Syrian crops wheat and broad beans under field conditions [J]. *Environ Exp Bot*, 1998, 40(1): 11-16.

(责任编辑:宗世贤)