

渗透胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的影响

陈友根¹, 李 昆^{1,2}, 孙永玉¹, 张春华¹

(1. 中国林业科学研究院 资源昆虫研究所, 云南 昆明 650224; 2. 国家林业局 云南元谋荒漠生态系统定位研究站, 云南 昆明 650224)

摘要: 为揭示干旱缺水对麻疯树 *Jatropha curcas* 幼苗生理生化特性的影响, 通过设置不同质量分数的聚乙二醇(PEG 6000)渗透胁迫, 研究了胁迫处理下幼苗各项生理指标的消长变化规律, 并进行相关分析。结果表明, 随胁迫时间的延长, 麻疯树幼苗叶片相对含水量在 5% 和 10% 处理时略微升高, 在 15%, 20% 和 30% 聚乙二醇(质量分数)处理时持续下降, 至 10 d 时分别下降了 40.7%, 46.0% 和 55.9%; 可溶性蛋白质量分数、活性氧($O_2\cdot^-$)产生速率、保护酶系统超氧化物歧化酶、谷胱甘肽还原酶、过氧化氢酶活性和叶绿素质量分数在各种不同处理条件下先升高后下降。而丙二醛质量分数在各种不同处理条件下随胁迫时间的延长逐渐增加, 至 10 d 时在 15% 处理时增加最显著($P < 0.01$), 与对照相比, 上升了 2.4 倍。相关分析表明, 相对含水量与丙二醛、超氧化物歧化酶活性和谷胱甘肽还原酶活性呈显著负相关($P < 0.05$); 可溶性蛋白则与保护酶系活性及叶绿素呈显著正相关($P < 0.05$); $O_2\cdot^-$ 产生速率、丙二醛分别与超氧化物歧化酶活性和谷胱甘肽还原酶活性呈极显著正相关($P < 0.01$); 3 种保护性酶活性之间及它们分别与叶绿素质量分数都呈极显著正相关($P < 0.01$)。综上所述, 渗透胁迫对麻疯树幼苗的影响是多种生理生化过程综合作用的结果, 幼苗通过诱导保护酶系提高抗旱性, 具有较强的渗透胁迫忍受能力。图 3 表 1 参 27

关键词: 森林生物学; 渗透胁迫; 生理生化特性; 相关分析; 抗旱性; 麻疯树

中图分类号: S718.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)05-0677-07

Physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* seedlings under osmotic stress

CHEN You-gen¹, LI Kun^{1,2}, SUN Yong-yu¹, ZHANG Chun-hua¹

(1. Research Institute of Resources Insects, The Chinese Academy of Forestry, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Yuanmou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: To reveal the effects of drought and water shortage on physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* seedlings, osmotic stress treatments (0, 5%, 10%, 15%, 20%, and 30% concentrations of PEG 6000) were applied. Also Duncan's multiple comparisons and a correlation analysis were carried out. Results showed that with prolonged stress (up to 10 d), the leaf relative water contents (RWC) with the 15%, 20%, and 30% osmotic treatments decreased significantly ($P < 0.01$). For all treatments, soluble protein and chlorophyll, $O_2\cdot^-$ production rate, and protective enzymes super-oxide dismutase (SOD), glutathione reductase (GR), and catalase (CAT) increased then decreased. Compared to the control, Malondialdehyde (MDA) content for the 15% osmotic treatment up to 10 d, significantly increased ($P < 0.01$). A correlation analysis showed significant negative correlations between RWC and 1) MDA ($r = -0.483$, $P < 0.05$), 2) SOD ($r = -0.464$, $P < 0.05$), and 3) GR ($r = -0.453$, $P < 0.05$); whereas significant positive ($P < 0.05$) correlations were found between soluble protein content and the protective enzyme activities and chlorophyll (chl). The $O_2\cdot^-$ production rate and MDA were significantly and positively ($P < 0.01$)

收稿日期: 2009-10-09; 修回日期: 2009-12-11

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD07A04, 2007BAD50B004)

作者简介: 陈友根, 从事生物能源麻疯树种质筛选研究。E-mail: cafchenyg@163.com。通信作者: 李昆, 研究员, 从事干热河谷植被恢复研究。E-mail: caflkun@163.com。

correlated with SOD or GR activities; while the protective enzymes system activities had significant positive ($P < 0.01$) correlations with chl. Thus, *J. curcas* seedlings resisted drought stress by increasing the protective enzyme activities which increased its tolerance to osmotic stress. [Ch, 3 fig. 1 tab. 27 ref.]

Key words: forest biology; osmotic stress; physiological and biochemical characteristics; correlation analysis; drought resistance; *Jatropha curcas*

干旱是影响植物生长发育的关键因子,更是影响植物分布和生产力高低的最重要因素之一^[1-2]。它主要通过渗透胁迫对植物造成伤害^[3]。目前,渗透胁迫对植物的影响已受到普遍关注,生物自由基伤害学说^[4]认为,在逆境条件下,植物细胞自由基产生和清除平衡被破坏,严重影响机体的正常生理代谢活动,如导致膜脂过氧化物丙二醛含量增加、叶片相对含水量降低以及叶绿素合成作用受阻等。但同时植物体内也存在对逆境的保护机制,主要形式包括增加渗透调节物质含量以及诱导保护酶活性提高等,上述指标的高低在判断植物抗旱性强弱的过程中起着重要的指示作用^[4-5]。麻疯树 *Jatropha curcas* 以其抗旱、速生、种子含油量高、油质近似柴油等优良特性,在目前生物能源开发领域中具有不可替代的地位^[6-7]。麻疯树自作为生物能源树种在中国西南干热河谷地区引种栽植以来,在生长势、种子产量、产油品质等方面表现拙劣,难以满足现阶段生物能源生产原料的需求,严重制约中国生物质能源产业的发展^[8]。究其原因,有研究认为,其一是缺乏优异栽培材料所致^[9],但更多的研究认为,栽培区立地条件恶劣(干旱、瘠薄环境)是影响麻疯树高产的重要原因^[10-11]。因此,关于麻疯树引种栽培的研究,胁迫环境下的生理生态适应性成为主要焦点。已有的研究从胁迫角度,开展了麻疯树冷适应^[12]、盐胁迫^[10]以及干旱胁迫下的光合、荧光生理^[11]方面的研究;但是,干旱引起的渗透胁迫对麻疯树生理生化特性的影响则未见报道。为此,本研究以麻疯树幼苗为试验材料,通过设置聚乙二醇(PEG-6000)渗透处理,模拟不同干旱缺水程度,研究幼苗各项生理生化指标在胁迫处理下的变化规律,探讨它们对干旱胁迫的生理生态适应性及耐受程度,旨在揭示干旱胁迫对麻疯树幼苗生理生化特性的伤害机制及植株自身的抗逆机制,以期能为干旱等逆境下麻疯树的推广栽植、栽培技术优化奠定理论基础。

1 材料和方法

1.1 材料培养

供试种子采至国家林业局云南元谋荒漠生态系统定位研究站麻疯树种质资源异地保存林。种子采回用 $5.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 高锰酸钾消毒后,用 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 温水浸泡 24 h,播入装有河沙的培养皿中,于光照培养箱中育苗。昼夜恒温为 $(25.0 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$,光照/黑暗周期 12 h/12 h,光强 $1\ 200 \text{ lx}$,相对湿度 $50\% \sim 55\%$,早晚喷水 $1 \text{ 次} \cdot \text{d}^{-1}$,保持培养基质湿润。在幼苗第 2 片真叶展开时,挑选长势一致的幼苗洗净移入三角瓶内用 Hoagland 营养液温室培养,重复 3 次·处理⁻¹,3 株·瓶⁻¹。至于大棚内自然光照,昼温为 $25 \sim 32 \text{ }^\circ\text{C}$,夜温 $15 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 $40\% \sim 45\%$ 。缓苗后,分别用含 0 (对照),5%,10%,15%,20%和 30% (质量分数)聚乙二醇(PEG 6000)的 Hoagland 营养液进行预试验。结果表明,各处理幼苗在 10 d 后生长差异明显,0 ~ 15% 处理长势良好;20% 处理叶片边缘变黄;而 30% 处理则出现明显萎蔫现象。因此,试验周期确定为 0 ~ 10 d,胁迫处理设置为 0 (对照),5%,10%,15%,20%和 30%。分别于胁迫处理后的第 0,2,4,6,10 天取幼苗生长点以下第 2 片展叶进行各项生理生化参数测定。为保证处理的稳定性和均匀性,处理期间每 2 d 更换 1 次相同体积的聚乙二醇营养液。

1.2 测定方法

叶绿素质量分数测定采用体积分数为 95% 乙醇浸提法;可溶性蛋白质量分数用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定; $\text{O}_2 \cdot^-$ 产生速率采用盐酸羟胺法测定;丙二醛及过氧化氢酶活力的测定参照高俊凤的方法^[13];超氧化物歧化酶活性测定用氮蓝四唑(NBT)光化还原法,以抑制光还原 50% 为 1 个酶活单位(1 U)^[14],然后根据 $1 \text{ U} = 16.67 \text{ nkat}$ 进行换算;谷胱甘肽还原酶活性测定参照 Krivosheeva^[15]方法;相对含水量以(饱和质量 - 干质量)/(饱和质量 - 干质量) $\times 100\%$ 表示^[13]。各项指标测定均重复 3 次,取平均值。

1.3 数据处理

所有数据采用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和相关分析，并采用 Duncan 法进行多重比较，采用 Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 渗透胁迫对麻疯树幼苗相对含水量与可溶性蛋白质的影响

植物组织相对含水量反映了植物体内水分亏缺程度。由图 1A 所示，5%~10% 轻度胁迫处理，麻疯树幼苗叶片相对含水量略微升高；而 15%~30% 重度胁迫处理时，幼苗叶片相对含水量则表现出持续下降的变化趋势，且胁迫处理质量分数越大，相对含水量下降幅度越大。10 d 时，15%、20% 及 30% 分别较对照极显著下降 40.7%、46.0% 和 55.9% ($P < 0.01$)。植物在胁迫条件下通常可通过增加溶质降低细胞水势的方法缓解渗透胁迫的伤害，比如可溶性蛋白质进行渗透调节被认为是一种抵抗水分胁迫的有效途径^[16]。结果显示(图 1B)，幼苗可溶性蛋白质质量分数与对照相比迅速上升，在 2 d 后各处理均达到最大值，其中 15%、20% 处理最高，达到极显著水平 ($P < 0.01$)，分别较对照上升了 2.7 倍和 3.3 倍。随着处理时间的延长，各处理可溶性蛋白质质量分数均呈现逐渐下降趋势，10 d 后，下降至与对照无显著差异水平。

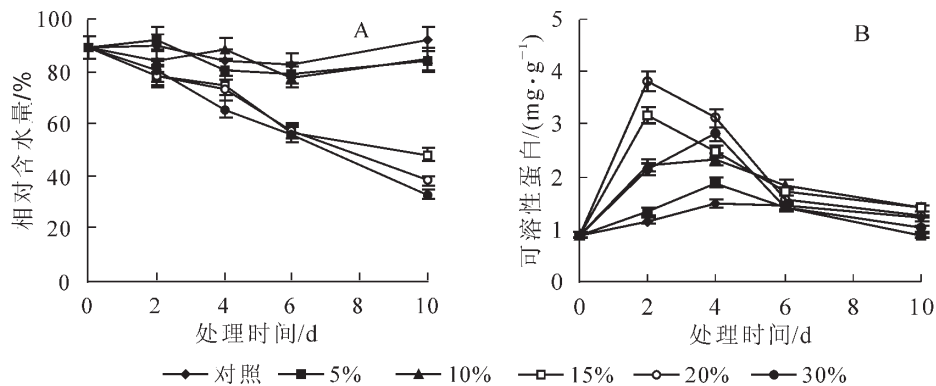


图 1 聚乙二醇渗透胁迫对麻疯树相对含水量(A)与可溶性蛋白(B)质量分数的影响

Figure 1 Effects of PEG osmotic stress on the relative water content(A) and Soluble protein(B) content in levels of *Jatropha curcas* seedlings

2.2 渗透胁迫对麻疯树幼苗活性氧代谢、丙二醛质量分数的影响

$O_2\cdot^-$ 伤害植物细胞的机制在于启动膜脂过氧化作用，在胁迫过程中 $O_2\cdot^-$ 产生速率变化(图 2A)。在不同处理下，麻疯树幼苗 $O_2\cdot^-$ 产生速率均较对照快速，随处理时间延长，各处理的 $O_2\cdot^-$ 产生速率呈先期迅速增大后期增幅减缓的趋势，在胁迫的第 4~6 天有一较长时间峰值出现，15% 和 30% 峰值维持在 $118.1 \sim 123.0 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ，与对照差异极显著 ($P < 0.01$)。渗透胁迫诱导麻疯树幼苗体内 $O_2\cdot^-$ 的增加，其中，5% 和 10% 处理在渗透处理的初期即达最大值，>15% 处理则在胁迫的中后期达到最大值。至胁迫后期，各处理增加缓慢，与对照相比仅显著水平差异 ($P < 0.05$)。

由图 2B 可知，麻疯树幼苗叶片丙二醛质量摩尔浓度在整个处理期间呈逐渐递增趋势，其中尤以 10% 和 15% 处理增幅最大，至胁迫的第 10 天，15% 处理增加最显著，较对照上升了 2.4 倍 ($P < 0.01$)。丙二醛能直接反映植物膜脂过氧化程度大小^[17]，丙二醛质量摩尔浓度的逐渐升高表明麻疯树幼苗在渗透胁迫下细胞持续受到伤害，叶片膜脂过氧化作用尚未得到缓解。

2.3 渗透胁迫对麻疯树幼苗抗氧化系统的影响

植物在遭受膜脂过氧化损伤时，往往启动超氧化物歧化酶、谷胱甘肽还原酶、过氧化氢酶等保护酶来清除活性氧或其他过氧化物自由基对细胞膜的伤害，这一原理已广泛应用于植物对逆境的响应机制研究^[18-19]。本研究，麻疯树幼苗保护酶系超氧化物歧化酶、谷胱甘肽还原酶和过氧化氢酶活性均呈现单峰变化趋势。超氧化物歧化酶在胁迫 4 d 时与对照相比增幅最大，15% 和 20% 分别增加 87.8%

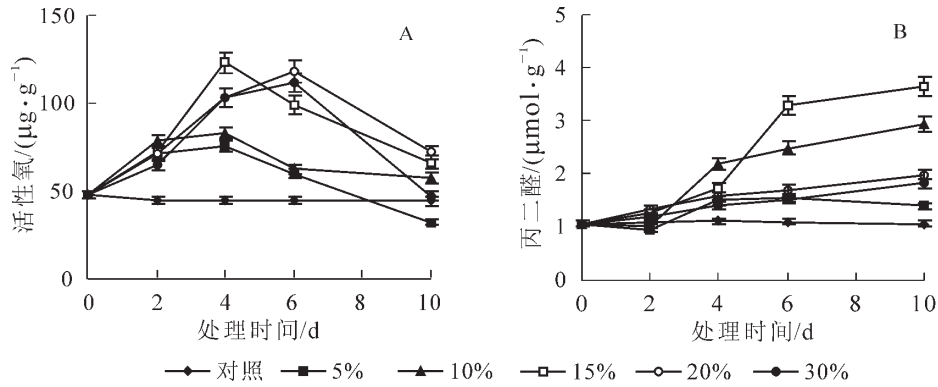


图2 聚乙二醇渗透胁迫对麻疯树幼苗活性氧(A)与丙二醛(B)质量摩尔浓度的影响

Figure 2 Effects of PEG osmotic stress on $O_2^{\cdot-}$ (A) and MDA (B) content in levels of *Jatropha curcas* seedling

和71.1%，差异极显著($P < 0.01$)，至第10天，各处理仍高于对照处理(图3A)。15%渗透处理谷胱甘肽还原酶在整个处理期间显著高于其他处理($P < 0.05$)，与对照相比，在处理的第4、6、10天分别较其提高了4.0、2.9和1.9倍($P < 0.01$)(图3B)。胁迫4d后，各处理过氧化氢酶活性升至最高点，10%、15%和20%处理分别比对照提高了49.5%、62.4%和30.8%($P < 0.01$)。10d后，各处理与胁迫处理前的对照相比，活性显著下降($P < 0.05$)(图3C)。

2.4 渗透胁迫对麻疯树幼苗叶绿素质量分数的影响

叶绿素是高等植物进行光合作用的物质基础，一旦叶绿素的合成与降解平衡受到破坏，光合能力就会下降，影响植物的生长发育。从图3D可以看出，在整个处理期间内，各处理的叶绿素质量分数随胁迫时间的延长呈现先升再降的过程。第4天，15%和20%处理达峰值，分别较对照增加87.7%和60.6%($P < 0.01$)。之后，各处理均缓慢下降，且处理质分数越高，降幅越明显。

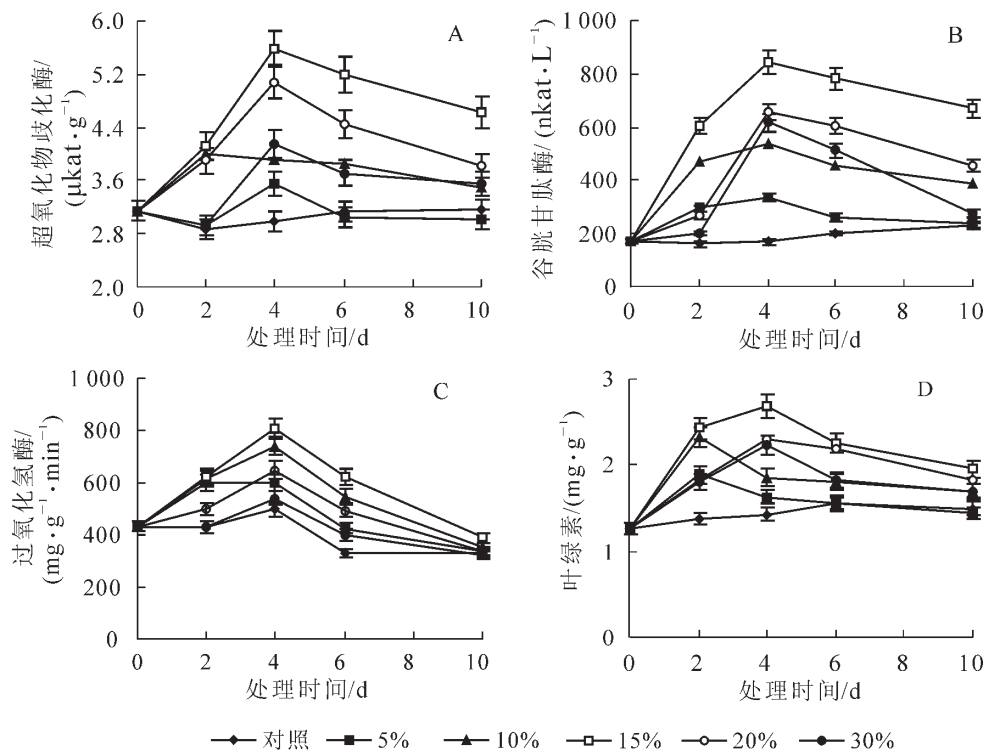


图3 PEG渗透胁迫对麻疯树幼苗超氧化物歧化酶(A)，谷胱甘肽还原酶(B)，过氧化氢酶活性(C)和叶绿素质量分数(D)的影响

Figure 3 Effects of PEG osmotic stress on SOD (A), GR (B), CAT (C) activity and chl content (D) in levels of *Jatropha curcas* seedlings

2.5 渗透胁迫条件下麻疯树幼苗生理生化指标间的相关分析

相关分析结果表明(表 1), 相对含水量与丙二醛质量分数、超氧化物歧化酶活性和谷胱甘肽还原酶活性呈显著负相关而与其他生理指标间相关性不显著, 说明在渗透胁迫中, 植物组织含水量的高低对膜脂过氧化物代谢及保护酶系活力的影响高于其他生理代谢活动。可溶性蛋白质质量分数则与保护酶系活性及叶绿素质量分数表现出显著或极显著相关性, 表明渗透调节物质的高低对保护酶系活力及叶绿素的调控作用明显。而丙二醛和 $O_2\cdot^-$ 产生速率分别与超氧化物歧化酶活性和谷胱甘肽还原酶活性呈极显著正相关。原因可能是渗透胁迫下, 植物细胞膜脂过氧化程度严重, 代谢产生过量的 $O_2\cdot^-$ 和丙二醛。上述酶系是清除膜脂过氧化产物的主要酶, 在此条件下植物细胞诱导超氧化物歧化酶和谷胱甘肽还原酶的大量产生。3 种保护性酶活性之间及它们分别与叶绿素质量分数也存在极显著正相关性, 说明三者清除自由基代谢过程中有着显著的协同作用并且对幼苗叶绿素的合成过程具有一定的保护作用。

表 1 麻疯树幼苗各生理生化指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analyses of physiological and biochemical indexes of *Jatropha curcas* seedlings

指标	相对含水量	可溶性蛋白	$O_2\cdot^-$	丙二醛	超氧化物歧化酶活性	谷胱甘肽还原酶活性	过氧化氢酶活性	叶绿素
相对含水量	1	0.044	-0.361	-0.483*	-0.464*	-0.453*	0.202	-0.317
可溶性蛋白		1	0.483*	-0.079	0.496*	0.42*	0.608**	0.635**
$O_2\cdot^-$			1	0.194	0.773**	0.821**	0.621**	0.802**
丙二醛				1	0.515**	0.553**	0.026	0.223
超氧化物歧化酶活性					1	0.939**	0.591**	0.844**
谷胱甘肽还原酶活性						1	0.599**	0.875**
过氧化氢酶活性							1	0.680**
叶绿素								1

说明: * 表示相关系数在 0.05 水平 ($P < 0.05$), ** 表示相关系数在 0.01 水平 ($P < 0.01$) (双尾法验证)。

3 结论与讨论

干旱对植物生长的影响涉及植物体内一系列生理生化变化^[20]。已有研究表明, 聚乙二醇模拟干旱胁迫在评价植物渗透调节物质含量、保护酶活性高低等抗旱性指标方面起着重要作用^[21-22], 并且植物在不同的胁迫强度下其响应机制也有所不同。轻度胁迫 (<15%) 下, 麻疯树幼苗叶片相对含水量略微上升, 渗透调节物质及保护酶活性随胁迫程度的升高而积极响应, 充分起到清除活性氧等自由基和抑制膜脂过氧化的作用; 但一旦超过这个阈值 (>15%), 由于细胞过度氧化损伤以致难以恢复, 保护酶系活性随即逐渐下降。这一结果表明, 15% 以下的聚乙二醇胁迫处于麻疯树耐受范围之内, 能够启动体内一系列保护机制, 清除渗透胁迫造成的细胞膜脂氧化损伤, 从而提高抗旱性, 促进植物生长发育。当聚乙二醇胁迫质量分数继续增大, 超过麻疯树的耐受范围时, 叶片相对含水量持续降低, 各项保护机制即遭受严重抑制。前人在对狼尾草 *Pennisetum alopecuroides*^[22] 进行渗透胁迫处理试验中也得出聚乙二醇胁迫处理存在阈值效应, 不同的是狼尾草的耐受阈值为 5% 处理, 而河北杨 *Populus hopeiensis*^[23] 各项抗性指标在不同渗透处理下的表现却不尽相同。

研究中, 各质量分数渗透胁迫处理对麻疯树的影响表现出基本一致的作用规律, 首先为叶片相对含水量的变化, 尤其是 >15% 时, 细胞吸水能力严重受阻, 叶片相对含水量持续降低(图 1A); 破坏了植物体自由基的产生和清除之间的平衡, 使得 $O_2\cdot^-$ 自由基在体内积累, 造成膜脂过氧化作用, 对植物造成伤害^[24]。继而诱导渗透调节物质的大量产生以及超氧化物歧化酶、谷胱甘肽还原酶、过氧化氢酶保护酶系的启动, 清除自由基氧化损伤的伤害。但至胁迫后期, 由于渗透调节物质的减少和保护酶系活性逐渐下降, 清除能力减弱, 膜脂过氧化作用对植物细胞造成了持续伤害, 产生的丙二醛持续累积(图 2A), 难以降解, 细胞氧化损伤严重, 叶绿素合成作用受到严重限制, 导致质量分数下降, 光

合作用严重受阻, 植株最终衰老死亡^[25-26]。

一般认为, 干旱对植物叶绿素的合成起抑制作用^[25], 但笔者研究发现, 渗透胁迫初期各处理叶绿素质量分数却出现增加趋势(图 3D)。原因可能是麻疯树长期生长在干旱、瘠薄的生境中, 细胞渗透势较低, 吸水能力强, 适当的渗透胁迫处理后, 营养液水势高于幼苗细胞水势, 根系吸水增强, 而营养液中又富含 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等叶绿素合成所必须的离子。因此, 适度的渗透胁迫可使细胞叶绿素合成作用加强, 质量分数增加, 这与已有的干旱胁迫下植物叶绿素降低的报道不符^[16, 25-26], 而与本研究类似的报道仅见于井春喜等^[27]对耐旱性春小麦 *Triticum aestivum* 品种的水分胁迫研究: 适当的土壤水分胁迫可导致类胡萝卜素含量增加。推测干旱胁迫下植物叶绿素质量分数的高低变化可能主要与植物本身的抗旱性强弱及生境相关, 但尚需进一步研究证明。

综上所述, 干旱引起的渗透胁迫对麻疯树的影响是多种生理生化过程综合作用的结果。幼苗在干旱胁迫下, 能有效诱导体内的保护酶系统, 清除体内的活性氧等自由基, 抑制膜脂氧化损伤, 一定程度上维持了植物正常的生理代谢活动。同时, 通过体内渗透调节物质的积累, 降低了细胞的水势, 起到了渗透调节的作用。正是保护酶系活性的启动以及渗透调节物质的产生使得麻疯树对干旱等逆境具有了较强的适应性。因此, 麻疯树作为生物能源领域重点发展的树种, 在干旱、瘠薄的荒山、坡地具有较好的引种栽培与开发利用潜力。

参考文献:

- [1] 姜英淑, 陈书明, 王秋玉, 等. 碳酸盐和干旱对欧李生理特性的影响[J]. 林业科学, 2009, **45** (3): 19 - 25.
JIANG Yingshu, CHEN Shuming, WANG Qiuyu, *et al.* Effect of NaHCO_3 and drought stress on physiological characteristics of *Cerasus humilises* [J]. *Sci Silvae Sin*, 2009, **45** (3): 19 - 25.
- [2] BARTELS D, SUNKAR R. Drought and salt tolerance in plants [J]. *Cri Rev Plant Sci*, 2005, **24**: 23 - 58.
- [3] 郝福顺, 崔香环, 赵世领, 等. 渗透胁迫对黑麦幼苗活性氧和抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学通报, 2007, **24** (5): 603 - 608.
HAO Fushun, CUI Xianghuan, ZHAO Shiling, *et al.* Effects of osmotic stress on the production of reactive oxygen species and change of antioxidant enzyme activities in seedlings of *Secale cereale* L. [J]. *Chin Bull Bot*, 2007, **24** (5): 603 - 608.
- [4] FRIDORICH I. Superoxide dismutase [J]. *Annl Rev Biochem*, 1975, **44**: 147 - 159.
- [5] 朱教君, 李智辉, 康宏樟, 等. 聚乙二醇模拟水分胁迫对沙地樟子松种子萌发影响研究[J]. 应用生态学报, 2005, **16** (5): 801 - 804.
ZHU Jiaojun, LI Zhihui, KANG Hongzhang, *et al.* Effects of polyethylene glycol (PEG)-simulated drought stress on *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seed germination on sandy land [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, **16** (5): 801 - 804.
- [6] CARVALHO C R, CLARINDO W R, PRACA M M, *et al.* Genome size, base composition and karyotype of *Jatropha curcas* L., an important biofuel plant [J]. *Plant Sci*, **174**: 613 - 617.
- [7] 林娟, 周选围, 唐克轩, 等. 麻疯树植物资源研究概况[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, **12** (3): 285 - 290.
LIN Juan, ZHOU Xuanwei, TANG Kexuan, *et al.* A survey of the studies on the resources of *Jatropha curcas* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2004, **12** (3): 285 - 290.
- [8] 李昆, 杨文云, 孙永玉, 等. 云南小桐子资源及其生物柴油原料林发展策略[J]. 生物质化学工程, 2006, **40** (增刊 1): 153 - 157.
LI Kun, YANG Wenyun, SUN Yongyu, *et al.* *Jatropha curcas* L. resource and development strategy in Yunnan Province [J]. *Bio Chem Eng*, 2006, **40** (supp 1): 153 - 157.
- [9] 郑玉龙, 类延宝, 李扬平, 等. 不同种群小桐子光合及形态特性的比较[J]. 生态学杂志, 2009, **28** (6): 1021 - 1027.
ZHEG Yulong, LEI Yanbao, LI Yangping, *et al.* Photosynthetic and morphological traits of different *Jatropha curcas* populations [J]. *Chin J Ecol*, 2009, **28** (6): 1021 - 1027.
- [10] 陈健妙, 郑青松, 刘兆普, 等. 麻疯树幼苗生长和光合作用对盐胁迫的响应[J]. 生态学报, 2009, **29** (3): 1356 - 1365.
CHEN Jianmiao, ZHENG Qingsong, LIU Zhaopu, *et al.* Growing and photosynthetic response of *Jatropha curcas* L. seedlings to salt stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (3): 1356 - 1365.