

文章编号: 1001-1498(2010)01-0108-06

不同水分条件下麻疯树幼苗的光合生理适应性研究

刘永安^{1,2}, 骆晓铭², 魏建国², 杨洪彬³, 远藤利明⁴, 胡庭兴^{1*}

(1. 四川农业大学生态林业工程省级重点实验室, 四川 雅安 625014; 2. 凉山州林科所, 四川 西昌 615021;
3. 凉山州林业局, 四川 西昌 615000; 4. 日本森林综合研究所, 茨城县 305-8687)

摘要: 通过研究干旱和复水对麻疯树幼苗叶片的相对含水量、气体交换特性和叶绿素荧光特性的影响, 结果表明: 随着基质含水量的减小, 麻疯树叶片相对含水量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度持续下降, 胞间 CO₂ 浓度先下降后上升; 最大荧光产量、PSII 最大光量子产量、光化学猝灭系数和 PS 实际量子效率均呈现下降趋势, 初始荧光有小幅上升。复水后, 气体交换参数和荧光参数能很快恢复, 植株可以成活, 表明麻疯树有很强的自我调节能力, 对基质干旱有极强的适应能力。当基质含水量从 21.91% 下降到 15.22% 时, 各参数均无显著差异 ($P > 0.05$); 当基质含水量从 8.70% 下降到 6.83% 时, 各参数均有显著变化 ($P < 0.05$)。基质含水量为 8.70% 以上时, 麻疯树碳同化能力降低的原因主要是气孔限制; 基质含水量在 8.70% 以下时, 光合效率的降低主要受非气孔限制。

关键词: 麻疯树; 干旱胁迫; 复水; 气体交换参数; 叶绿素荧光

中图分类号: S723.1; S718.3

文献标识码: A

Photosynthetic Physiological Adaptation Mechanism of *Jatropha curcas* Seedling in Different Water Conditions

LIU Yong-an^{1,2}, LUO Xiao-ming², WEI Jian-guo², YANG Hong-bin³, Toshiaki Endo⁴, HU Ting-xing¹

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China;
2. Forest Institute of Liangshan Prefecture, Xichang 615021, Sichuan, China; 3. Forest Bureau of Liangshan Prefecture, Xichang 615000, Sichuan, China; 4. Forestry and Products Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, Japan 305-8687)

Abstract: Effects of drought and re-water on leaf relative water content (*LRWC*), gas exchange characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics of *Jatropha curcas* seedlings in different water conditions were studied. The results are as following: with the decreasing of soil volumetric water content (*SVWC*), the leaf relative water content, photosynthetic rate (*Pn*), transpiration rate (*Tr*), stomatal conductance (*Gs*) of *J. curcas* declined gradually. Intercellular CO₂ concentration (*Ci*) decreased at first, and then increased when *SVWC* was lower than 8.70%. Maximal fluorescence yield (*Fm*), PSII maximum quantum yield of light (*Fv/Fm*), photochemical quenching (*qP*) and actual quantum yield of PSII photochemistry (*PS*) were shown a downward trend, while the initial fluorescence (*Fo*) slightly increased. After re-water, the gas exchange parameters and fluorescence parameters could be quickly restored and the plant could survive, indicating that *J. curcas* has strong self-regulating ability and strong adaptability to the drought stress. When *SVWC* was between 21.91% and 15.22%, parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence were not significant ($P > 0.05$). As *SVWC* declined from 8.70% to 6.81%, parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence changed obviously. Therefore, it is suggested that

收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 中日技术合作四川省示范林营造项目(JICA); 国家科技部“十一五”科技支撑计划(2007BAD50B01); 四川省重点学科建设项目(SZD0419)资助

作者简介: 刘永安(1965—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事森林培育研究工作. E-mail: liuyong97@163.com

* 通讯作者: E-mail: hutx001@yahoo.com.cn

when *SVWC* was above 8.70%, the decreased carbon assimilation capacity of *J. curcas* was mainly due to stomatal limitation, and when *SVWC* was lower than 8.70%, the decreased carbon assimilation capacity of *J. curcas* was mainly due to non-stomatal limitation.

Key words: *Jatropha curcas* L.; drought stress; re-water; gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence

麻疯树 (*Jatropha curcas* L.) 为落叶灌木或小乔木, 在四川、云南、广东、广西、贵州、福建、台湾和海南等地均有分布, 四川主要分布于攀西地区的金沙江、雅砻江和安宁河流域等干热(暖)河谷地区。麻疯树结果率高, 种子萌发力强, 硬枝扦插容易生根, 发达的茎髓部具有很强的贮水能力, 是干热(暖)河谷地区荒山造林的优良树种; 其种子含油率达 60%, 可生产生物柴油, 是极具开发潜力的能源植物。气体交换参数是反映植物光合作用状况的最重要指标, 常作为光合系统“表观性”的指标^[1]; 叶绿素荧光信号包含了十分丰富的光合作用信息, 其极易随着外界环境条件的变化而变化的特性, 可以快速、灵敏和无损伤地研究和探测完整植株在胁迫下光合作用的真实行为, 具有反映光合系统“内在性”的特性^[2], 已在农业、园艺等方面得到了广泛应用^[3]。目前, 关于麻疯树的研究大多集中在资源分布、开发利用方面^[4-5]。近年来, 关于其生物学特性^[6-7]、光合生理^[8]和渗透胁迫^[9]等方面也有一些报道。本文在麻疯树适生地的气候条件下, 通过对干旱和复水的麻疯树幼苗叶片的气体交换特性、叶绿素荧光参数及植株水分状况等指标的测定, 探讨麻疯树对不同水分状况的适应机制, 为攀西地区大面积种植麻疯树的水分管理提供依据。

1 试验地概况

试验地设在四川省盐源县金河乡雅砻江边, 102°19' E, 27°53' N, 海拔 1 200 m。气温年较差小、日较差大。日温 10℃ 日数在 300 d 以上, 积温 > 6 500℃; 1 月平均气温 > 10℃, 极端最低气温不低于 - 1℃; 7 月平均气温 24 ~ 26℃, 极端最高气温 45℃。干、湿季分明, 年降水量 1 002 mm, 93% 降水集中在 5—10 月的雨季, 其中 6、7、8 三个月占全年降水量的 80% 以上。冬、春季为旱季, 特别是 3—5 月份, 随着气温和土温的迅速上升, 常伴以大风, 蒸发量极大, 年平均空气湿度在 40% 以下。

2 材料和方法

2.1 试验材料培育与处理

麻疯树种子采自盐源县金河乡, 种子用流水浸

种 12 h, 2008 年 3 月 5 日播种于河砂 + 红土 + 牛粪 (3:1:1, 体积比) 的基质内, 播种后 3 d 幼苗出土; 2008 年 3 月 12 日移植入聚乙烯塑料盆 (体积为 10 L) 培育, 每盆 1 株, 育苗基质为红土 + 泥炭 + 牛粪 (2:3:3, 体积比), 基质的风干体积含水量为 4%。露天育苗, 常规水分管理, 不施肥。在苗龄 183 d (平均苗高 40 cm, 平均地径 2.1 cm) 时, 选取均匀一致的幼苗移入塑料遮雨棚内进行干旱处理。每天对 5 盆苗停止浇水, 直到第一批停止浇水幼苗大量落叶时, 测定停止供水 0 (即对照)、3、6、9、12、15、18 d 基质的体积含水量及幼苗的各种生理指标。测定完成后恢复浇水, 复水期间采用常规水分管理, 复水后第 2、3 d 测定各处理的气体交换参数和荧光参数。

2.2 测定方法

2008 年 10 月 4 日采用 MiniTrase TDR 土壤水分测定仪 (SEC, 美国) 测定各干旱处理的基质体积含水量 (*SVWC*), 各处理测定 5 盆, 每盆重复测定 3 次, 计算各处理基质的平均体积含水量 (表 1)。统计各处理的叶片数量, 并用 LI-3100 便携式激光叶面积仪 (Li-cor, 美国) 测定各处理单株总叶面积。参照付凤玲等^[10]的方法 (饱和吸胀法) 测定和计算叶片相对含水量 (*LRWC*)。

2008 年 10 月 4 日上午 9:00—11:30, 用 LI-6400 便携式光合系统测定仪 (Li-cor, 美国) 测定各水分处理麻疯树叶片的的气体交换参数和荧光参数。各处理测定 5 株, 每株从顶端的第 1 片完全叶开始往根部选择 3 ~ 5 片叶, 处理间相互交叉测定^[11]。测定气体交换参数时, 用仪器配备的 LED 光源控制叶室, 光强设定为 $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 参比室 CO_2 浓度 $400\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 干燥管全旁路, 空气流量 $300\ \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[12]。将待测叶片暗适应 20 min 后, 先照射检测光 ($< 0.05\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 测定叶片的初始荧光 (*F₀*); 再用饱和白光 ($7\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 照射 1 s, 测定最大荧光产量 (*F_m*); 随后开启强度为 $1\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光化学光, 连续照射 25 min 后, 测定稳态荧光 (*F_s*); 再用饱和光照射, 测定光下最大荧光 (*F_m*); 关闭光化学活性光, 照射远红光, 以测量光适应下的初始荧光 (*F₀*)。光化学猝灭系数 $qP = (F_m - F_s) / (F_m - F_0)$, PSII 最大光

量子产量 $Fv/Fm = (Fm - Fo) / Fm$, PSII 实际光量子产量 $PS = (Fm - Fs) / Fm^{[21]}$ 。

2.3 数据分析

数据分析用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 结合进行, 干旱对基质含水量、叶片相对含水量、气体交换参数和叶绿荧光的影响采用单因素方差分析, 并进行 Duncan 多重比较。

3 结果与分析

3.1 基质含水量 (SWWC) 对麻疯树叶片水分状况及生长的影响

从表 1 可以看出: 麻疯树叶片的相对含水量 (LRWC) 随着基质含水量 (SWWC) 的下降而下降, 但下降幅度较小; SWWC 在 21.91% ~ 6.83% 时, LRWC 无显著差异 ($P > 0.05$); 当 SWWC 降到 5.12% 及以下时 (接近风干含水量 4%), 干旱处理植株的 LRWC

与对照相比显著降低 ($P < 0.05$)。这表明麻疯树具有很强的水分调节能力, 即使在土壤严重干旱的情况下 (SWWC 为 6.83%), 叶片仍能保持良好的水分状况。

在植株形态上, 停止供水后第 6 天 (SWWC 为 11.55%), 叶片开始出现萎蔫, 但无叶片凋落, 叶面积无明显变化。停止供水 12 d (SWWC 为 6.83%) 后, 麻疯树从基部叶片开始变黄并脱落, 随着干旱程度的加剧, 下部叶片变黄脱落的数量急剧增加, 但顶端叶片形态正常。这说明, SWWC 在 21.91% ~ 8.70% 范围内, 麻疯树通过叶片的暂时萎蔫来保持功能叶的水分, 以适应短时间的干旱; 在持续长时间干旱条件下, 基质含水量继续降低, 植株又通过其下部叶片的凋落来减少对水分、养分和能量的消耗, 直到凋落全部叶片, 进入休眠状态, 以度过较长时间的干旱。

表 1 不同干旱条件下各处理基质含水量、叶片相对含水量、叶面积和叶片数量

| 停止供水天数 / d | 基质含水量 (SWWC) / % | 叶片相对含水量 (LRWC) / % | 叶面积 / cm ² | 活体叶片数 / 片 |
|------------|------------------|--------------------|-----------------------|-----------|
| 0 (CK) | 21.91 ± 1.74 | 85.76 ± 3.71a | 1 378.41 ± 31.39a | 16 |
| 3 | 15.22 ± 1.44 | 84.93 ± 5.77a | 1 378.72 ± 25.70a | 16 |
| 6 | 11.55 ± 0.69 | 83.83 ± 2.32ab | 1 374.99 ± 25.81a | 16 |
| 9 | 8.70 ± 0.28 | 82.72 ± 0.05abc | 1 375.12 ± 32.99a | 16 |
| 12 | 6.83 ± 0.27 | 80.11 ± 2.64abc | 1 085.70 ± 54.72b | 14 |
| 15 | 5.12 ± 0.59 | 79.02 ± 3.29bc | 824.04 ± 90.34c | 10 |
| 18 | 4.22 ± 0.32 | 76.66 ± 2.79c | 519.66 ± 41.01d | 6 |

注: 表中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), ± 前的数值为平均值, ± 后为标准误。

3.2 干旱和复水对麻疯树气体交换的影响

由图 1 可以看出: 基质含水量 (SWWC) 由 21.91% 降至 15.22% 时, 麻疯树的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s) 和胞间 CO_2 浓度 (C_i) 变化均不显著 ($P > 0.05$), 其光合生理活动没有受到基质水分下降的影响。随着 SWWC 进一步降低, P_n 蒸腾速率 (T_r) 和 G_s 均显著下降 ($P < 0.05$); 当 SWWC 降至 5.12% 以下时, 其呼吸作用大于同化, P_n 为负值 (图 1A)。SWWC 从 21.91% 下降至 4.22%, G_s 由 $1.21 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.002 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1B), T_r 从 $5.03 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $0.09 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1D), 而叶片相对含水量 (LRWC) 仅从 85.76% 下降至 76.66%, 且相邻四个水分梯度间的麻疯树幼苗的 LRWC 均无显著差异 ($P > 0.05$) (表 1), 表明其气孔对水分具有很强的调节能力, 在此干旱条件下能维持功能叶较高水分状态。 C_i 随着 SWWC 的降低表现为先降后升, 在 SWWC 为 8.70% 时, C_i 降至最低 (图 1C), 然后随 SWWC 的下降而持

续显著升高 ($P < 0.05$), 而 G_s 仍然随着干旱加剧持续下降 (图 1B), 表明在 SWWC 降到 8.70% 以前, 叶肉细胞同化 CO_2 的量大于进入和呼吸放出的总量, 导致 C_i 的下降; 在 SWWC 降到 8.70% 以下时, 细胞同化消耗 CO_2 的量小于进入和呼吸放出的总量, 导致 C_i 的升高。

恢复正常浇水 24 h 后, 干旱期间出现萎蔫症状的叶片逐渐伸展、恢复, 气体交换参数 (图 1) 均有不同程度的恢复。断水处理 9 d 以下 (SWWC 为 15.22%、11.55% 和 8.70%) 的幼苗, 复水后的 P_n 、 T_r 、 C_i 和 G_s 与对照相比无显著差异 (图 1) ($P > 0.05$), 说明麻疯树已恢复了正常的生理过程。断水处理 12 d 以上 (SWWC 为 6.83%、5.12% 和 4.22%) 的麻疯树幼苗复水 24 h 后, 其 P_n 、 G_s 和 T_r 均比复水前有显著恢复 (图 1A, B, D), 但仍未恢复到对照水平, C_i 在复水 24 h 后, 与复水前相比有显著降低 ($P < 0.05$); 恢复正常浇水 48 h 后, 断水 12 d 幼苗的 P_n 、 C_i 和 T_r 与对照相比无显著差异 ($P > 0.05$),

表明受到干旱影响的生理过程得到恢复。干旱时间最长(18 d)的麻疯树幼苗(*SWWC*为 4.22%)的 P_n 、 G_s 和 T_r 分别从复水前的 $-0.22 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.002 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.09 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 提高到复水后的 $6.06 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $0.14 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.37 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, C_i 从复水前的 505.8

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 降为 $305.4 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 与对照相比差异仍然存在,但已从极重干旱胁迫恢复到相当于中度胁迫的程度^[13]。说明经 18 d 断水(*SWWC*为 4.22%)麻疯树幼苗的光合能力仍可恢复,表明麻疯树具有较强的抗干旱能力,但干旱程度越重、干旱时间越长,恢复其光合能力所需的时间越长。

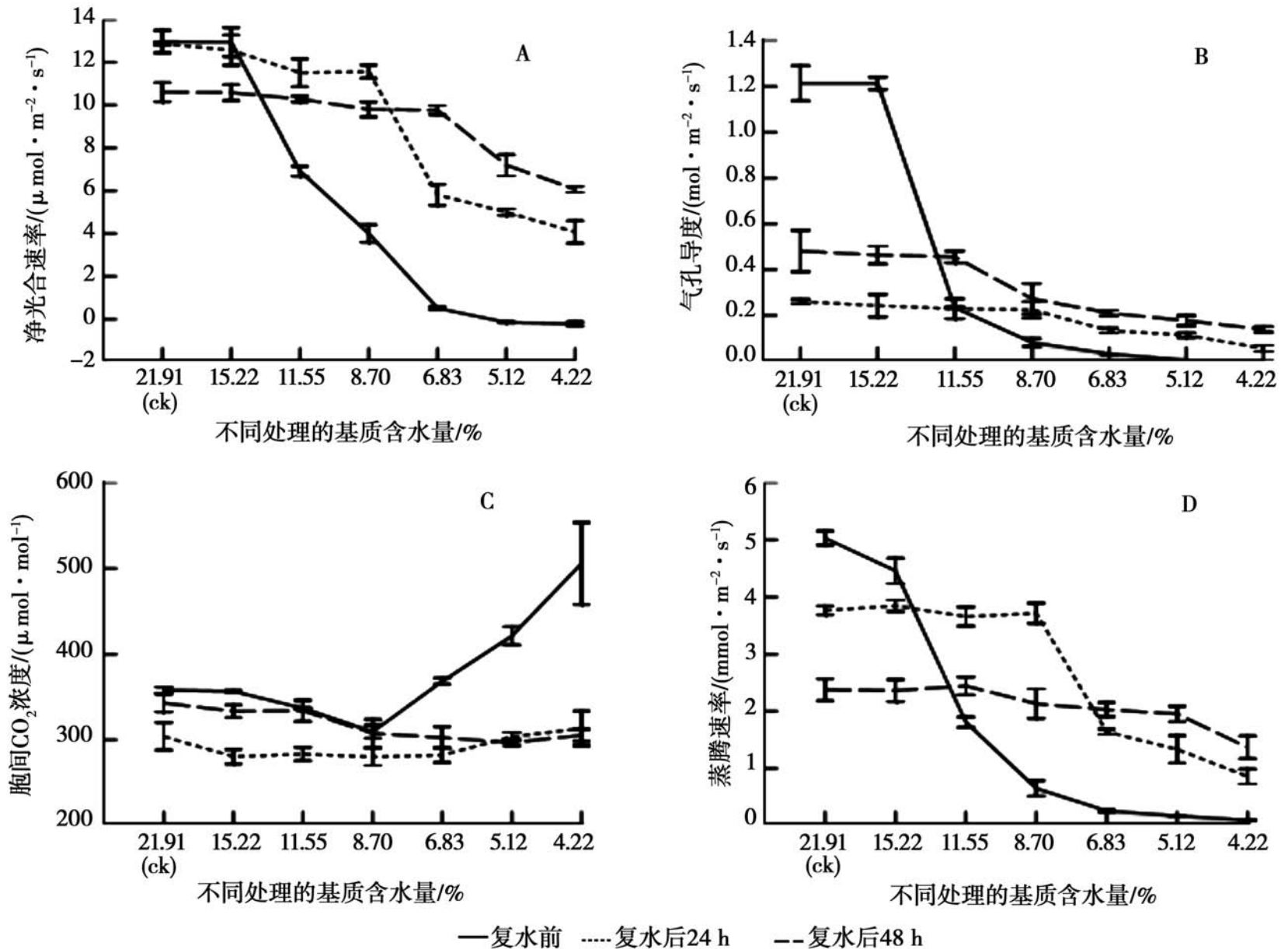


图 1 干旱和复水条件下麻疯树叶片气体交换参数的变化

3.3 干旱和复水对麻疯树荧光参数的影响

由图 2 可知:基质含水量(*SWWC*)从 21.91% 下降至 11.55%,麻疯树的初始荧光(F_o)、最大荧光产量(F_m)、PSII 最大光量子产量(F_v/F_m)、PSII 实际量子效率(PS)和光化学猝灭系数(qP)与对照间均无显著差异($P > 0.05$),说明其光合系统仍然正常,干旱并未损伤其叶绿素类囊体结构和电子传递。随着 *SWWC* 从 11.55% 下降到 4.22%,麻疯树幼苗的 F_m 、 F_v/F_m 、 qP 和 PS 显著下降($P < 0.05$),而 F_o 开始升高。 F_o 的上升表明干旱胁迫损伤了部分叶绿素类囊体膜结构,但升高不明显($P > 0.05$),说明干旱胁迫对麻疯树幼苗的叶绿素损伤较小。 F_m 的下降表明通过 PSII 的电子传递受到水分胁迫的影响, F_o 的升高和 F_m 的下降导致 F_v/F_m 的

降低,但主要是由于 F_m 的下降所致。 qP 的下降表明叶绿体 PSII 反应中心关闭部分的比例不断增大,因关闭部分的 PSII 反应中心不能进行稳定电荷分离,光合电子传递能力受到抑制。 PS 的降低表明其反应中心在环境胁迫中有部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率的下降^[2]。

复水 24 h 后,受干旱影响的荧光参数(除 F_o 外)均得到不同程度的恢复,但与对照相比仍有差异。恢复浇水 48 h 后,经干旱 9 d 以内(复水时 *SWWC* 为 15.22%、11.55% 和 8.70%)的麻疯树幼苗的荧光参数均与对照无显著差异($P > 0.05$),表明其叶肉细胞的光合活性已得到恢复。经干旱处理 12 d 以上(*SWWC* 为 6.83%、5.12% 和 4.22%)的荧光参数(除 F_o 外)也有不同程度的恢复,但与对照

相比仍有差异,说明麻疯树在短期重度干旱下受抑制的叶肉细胞的光合活性能够恢复,仍可存活,表明麻疯树具有较强的适应短期干旱能力,但干旱程度

越深、干旱时间越长,受损的叶肉细胞恢复光合活性所需要的时间越长。

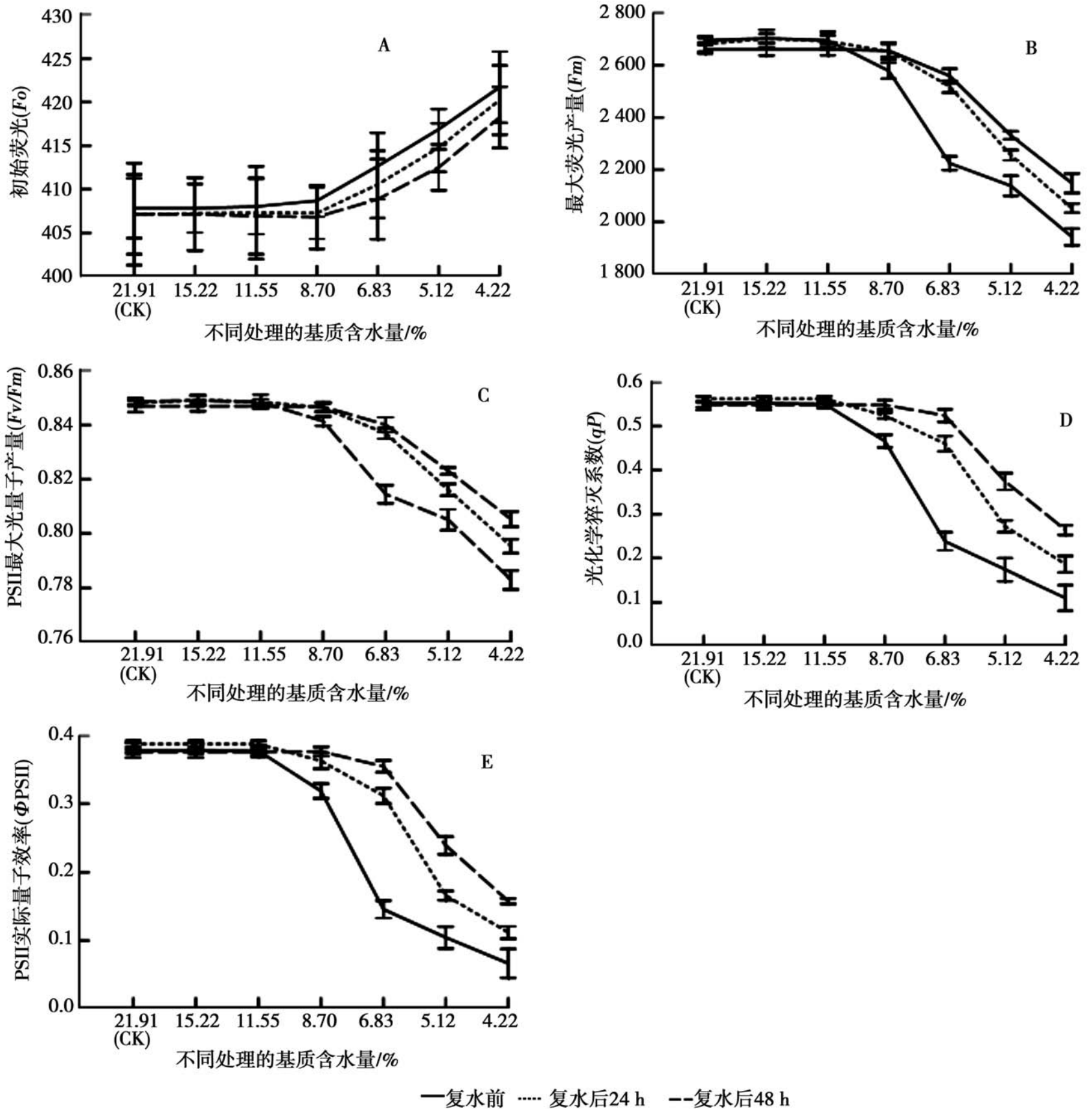


图2 干旱和复水条件下麻疯树叶片的荧光参数变化

4 结论与讨论

已有研究表明,干旱胁迫引起光合效率降低是气孔部分关闭导致的气孔限制和叶肉细胞光合活性下降导致的非气孔限制的双重结果,轻度胁迫下以气孔限制为主,严重胁迫下以非气孔限制为主^[14-15],只有当 G_s 下降而 C_i 同时上升才是非气孔限制,否则为气孔限制^[14,16]。在本试验中,基质含水量(SWC)从 21.91% 降至 8.70% 时, G_s 和 C_i 同

时下降; SWC 从 8.70% 继续下降时, G_s 持续下降而 C_i 显著上升 ($P < 0.05$), 复水后气体交换参数有不同程度的恢复。由此表明, SWC 在 8.70% 以上麻疯树的光合效率降低主要是由气孔部分关闭导致的气孔限制造成的; SWC 降到 8.70% 以下, 干旱胁迫造成 P_n 下降的主要原因是气孔限制和逐步加强的非气孔限制共同作用, 但以非气孔限制的加强为主。

本试验中, 基质含水量 (SWC) 15.22% 和 8.70% 是 2 个明显变化点。SWC 从 21.91% 下降

到 15.22%, 麻疯树叶片的 $LRWC$ 气体交换参数 (P_n , G_s 和 C_i 和 T_i) 和荧光参数 (F_o , F_m , qP , PS 和 F_v/F_m) 均无显著差异 ($P > 0.05$)。由此表明, $SWWC$ 在 21.91% 至 15.22% 麻疯树能正常生长; 基质含水量从 15.22% 下降到 8.70% 时, 干旱引起光合效率下降的主要原因是气孔限制, 干旱对麻疯树的伤害较小, 叶面积没有发生变化; 当基质含水量低于 8.70% 时, 麻疯树光合效率下降的主要原因是随干旱胁迫的加剧而不断加强的非气孔限制(代谢损伤), 荧光参数也显著变化, 麻疯树叶面积减少, 表明此阶段干旱已对麻疯树叶片的结构造成了损伤。据此推测, 麻疯树育苗适宜的 $SWWC$ 为 21.92% ~ 15.22%, $SWWC$ 低于 8.70% 给麻疯树造成代谢损伤, 长时间低于 8.70% 可能造成完全落叶甚至死亡。麻疯树幼苗停止浇水 18 d ($SWWC$ 降低至 4.22%), 恢复浇水 48 h 后, 气体交换参数和荧光参数均能较快恢复(图 1、2), 说明麻疯树对基质干旱具有很强的耐受能力, 这从光合生理上解释了麻疯树在攀西干旱河谷广泛分布的原因。

综合干旱和复水对麻疯树幼苗的形态、叶片相对含水量 ($LRWC$)、气体交换参数和荧光参数等的影响(表 1, 图 1、2), 可推测麻疯树对干旱胁迫的应对策略可能是: (1) 由于其茎髓部具有很强的贮水能力和叶片具有很强的水分调节能力, 可依据不同水分状况调节水分的蒸腾; 在轻度干旱状况下, 叶片失水后可通过体内水分再分配来维持较高 $LRWC$ 的水平; (2) 在干旱超过其自身调节能力后, 通过叶片脱落, 快速减少植株的蒸腾面积, 以减小水分的损失, 维持功能叶的水分状态, 减轻干旱对其功能叶叶肉的光合活性结构的损伤; (3) 长时间干旱下, 麻疯树脱落全部叶片进入休眠状态, 依靠体内的含水量来维持生命活动。

参考文献:

- [1] Hayes M M, Pereira J S, Maroco J, *et al.* How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth [J]. *Annals of Botany*, 2002, 89: 907 - 916
- [2] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-A practical guide [J]. *J Exp Bot*, 2000, 51: 659 - 668
- [3] 温国胜, 田海涛, 张明如, 等. 叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1973 - 1977
- [4] 于曙明, 孙建昌, 陈波涛. 贵州的麻疯树资源及其开发利用研究 [J]. *西部林业科学*, 2006, 35(3): 14 - 17
- [5] 刘杰, 李黔柱, 尹航, 等. 麻疯树植物资源的研究与开发利用进展 [J]. *贵州大学学报: 自然科学版*, 2006, 23(2): 105 - 109
- [6] 罗长维, 李昆, 陈友, 等. 元江干热河谷麻疯树开花结实生物学特性 [J]. *东北林业大学学报*, 2008, 36(5): 7 - 10
- [7] 徐嘉, 费世民, 何亚平, 等. 四川麻疯树种群数量特征和更新研究 [J]. *四川林业科技*, 2008, 29(1): 1 - 6
- [8] 夏亮, 邢杰, 王胜华, 等. 麻疯树光合生理特征研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2008, 45(2): 413 - 418
- [9] 龚新永, 吴国江, 黄红英, 等. 麻疯树幼苗对干旱胁迫的响应 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1425 - 1430
- [10] 付凤玲, 李晚忱, 潘光堂. 模糊隶属法对玉米苗期耐旱性的拟合分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(1): 83 - 85, 125
- [11] 许大全. 光合作用测定及研究中一些值得注意的问题 [J]. *植物生理学通讯*, 2006, 42(6): 1163 - 1167
- [12] Penuelas J, Filella I, Llusia J, *et al.* Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photobiology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(319): 229 - 238
- [13] Flexas J, Medrano H. Drought-inhibition of Photosynthesis in C_3 plants: Stomatal and non-stomatal limitation revisited [J]. *Annals of Botany*, 2002, 89: 183 - 189
- [14] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal Conductance and Photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317 - 345
- [15] 杨朝瀚, 王艳云, 周泽福, 等. 黄土丘陵区杠柳叶片气体交换过程对土壤水分的响应 [J]. *林业科学研究*, 2006, 19(2): 231 - 234
- [16] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题 [J]. *植物生理学通讯*, 1997, 33(4): 241 - 244