

干旱胁迫对吉首蒲儿根光合机构的影响

周 强, 向 芬, 田向荣, 陈功锡, 唐 丽

(吉首大学 植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室, 湖南吉首 416000)

摘 要: 为了探讨干旱胁迫对吉首蒲儿根光合机构的影响, 通过大棚盆栽实验于 7 月测量了阴生环境中吉首蒲儿根的叶片相对含水量(RWC)、净光合速率(P_n)等光合作用气体交换参数及初始荧光(F_0)等叶绿素荧光参数在土壤自然干旱过程中的变化。结果显示: (1) 随着干旱处理时间的延长, 吉首蒲儿根叶片相对含水量持续下降; 于干旱处理第 12 天时, 叶片相对含水量低于 15%, 且吉首蒲儿根植株已经死亡。 (2) 自然干旱处理下, 吉首蒲儿根叶片 P_n 、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r) 大幅降低, 胞间 CO_2 浓度(C_i) 增加或与对照接近; 非气孔因素是导致其 P_n 下降的主要原因。 (3) 停止灌水第 9~12 天时, 吉首蒲儿根叶片 PSII 的最大光化学效率(F_v/F_m)、PSII 实际光量子效率 [$Y(II)$] 显著降低, PSII 非调节性能量耗散 [$Y(NO)$] 显著增加, PSII 已损伤严重, 叶片吸收的光能逐渐向非光化学途径分配增加。研究表明, 在夏秋高温季节, 吉首蒲儿根对土壤干旱较为敏感, 其 PSII 受到了一定的伤害, 光能分配发生改变, 严重影响其光合作用和生长发育, 这可能是其分布受到限制的重要原因。

关键词: 吉首蒲儿根; 光合作用; 叶绿素荧光; 干旱胁迫

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

Effects of Drought Stress on Photosynthetic Apparatus in *Sinosenecio jishouensis*

ZHOU Qiang, XIANG Fen, TIAN Xiangrong, CHEN Gongxi, TANG Li

(Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Utilization(Jishou University), College of Hunan Province, Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: *Sinosenecio jishouensis* D. G. Zhang, Y. Liu & Q. E. as a new species belongings to Asteraceae, is considered to be a severely endanger species, whose natural populations were only discovered in Dehang canyon in Hunan Province, so far, our previous studies had indicated that low light intensity and high relative humidity are not the restricting factors to their distribution. Here, we further investigated impacts of drought stress on photosynthetic apparatus including the leaf relative water content(RWC), photosynthesis parameters and chlorophyll fluorescence parameters by using the plants of *S. jishouensis* which lives in shade. Results showed that: (1) RWC of *S. jishouensis* decreased continuously with the drought stress proceeding. When no watering sustained for 12 days, the RWC was less than 15% and plants could not survive. (2) Net photosynthetic rate(P_n), stomatal conductance(G_s) and transpiration rate(T_r) had decreased dramatically, while intercellular CO_2 concentration(C_i) had increased or no significantly change under drought. The results suggested the main reason for P_n decreasing was non-stomatal restriction. (3) When no watering sustained for 9~12 days, the value of the maximum efficiency of PSII (F_v/F_m), effective quantum yield of PSII photochemistry [$Y(II)$] had decreased significantly and quantum yield of nonregulated energy

收稿日期: 2014-03-03; 修改稿收到日期: 2014-06-08

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(31300337); 湖南省教育厅高等学校科学研究项目(09A073, 12C0300, 09B082); 湖南省重点学科建设项目(JSU0713Z21)和吉首大学人才引进项目(jsdxrcykyxm201105)

作者简介: 周 强(1981—), 男, 博士, 讲师, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: zhouqiang1981@tom.com

dissipation in PS II [$Y(NO)$] had increased obviously. These mean the PS II were serious damaged and the non-photochemical quenching increased significantly. Conclusively, these results proved that *S. jishouensis* is sensitive to drought stress, which is probably the key cause for its distributing limit.

Key words: *Sinosenecio jishouensis*; photosynthesis; chlorophyll fluorescence; drought stress

吉首蒲儿根 (*Sinosenecio jishouensis* D. G. Zhang, Y Liu & Q. E. Yang) 为菊科 (Compositae) 蒲儿根属 (*Sinosenecio* B. Nord) 多年生草本植物, 叶椭圆状披针形 (此性状有别于其它蒲儿根属植物), 羽状叶脉, 上表皮有绒毛, 根系为须根, 较短^[1]。其分布范围极其狭窄, 目前仅发现在湖南省吉首市德夯河谷的潮湿阴生环境中为数个小规模种群分布, 为河谷特殊生境专性种, 属濒危植物^[2]。其对蒲儿根属植物的系统发育研究和河谷生境物种的形成分化适应研究具有重要的学术意义^[1]。

此前, 邓涛等^[2]和徐亮等^[3]对吉首蒲儿根的繁殖、种群生态学进行了初步研究, 一定程度上解释了其濒危的可能原因。最近我们对不同生境吉首蒲儿根的叶片形态和叶绿素荧光参数的研究发现, 光照、空气湿度并不是限制其分布的主要生态因子^[4]。为了进一步探究限制吉首蒲儿根分布的主要生态因子, 我们就水分因子对其生长的影响展开研究。基于干旱胁迫是限制植物生长的主要环境因子, 其极大影响了植物的光合作用、叶片大小等形态结构和生理生化活动^[5]。同时光合作用是植物关键的生理代谢活动, 其对于干旱胁迫的耐受程度也部分反映了植物对于干旱胁迫的耐受能力^[6-7]。所以, 本研究测量了干旱胁迫下吉首蒲儿根的净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 等光合作用参数和初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m)、PS II 的最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 实际光量子效率 [$Y(II)$]、PS II 调节性能量耗散 [$Y(NPQ)$]、PS II 非调节性能量耗散 [$Y(NO)$] 等叶绿素荧光参数, 以探讨吉首蒲儿根对于干旱胁迫的耐受能力。

1 材料和方法

1.1 材料与培养

试验在湖南省吉首市吉首大学沙子坳校区的遮阴大棚内进行, 其位于 $E109^{\circ}30' \sim 110^{\circ}04'$, $N28^{\circ}08' \sim 28^{\circ}29'$, 属亚热带季风湿润气候^[8]。试验用吉首蒲儿根于 2012 年 4 月采自野生自然种群, 将其移栽于花盆中, 覆土培养, 并一直在遮阴大棚内生长。试验于 2013 年 7 月展开, 中午遮阴大棚的光照强度为 $(204.6 \pm 15.1) \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 空气温度为 $(33.8 \pm 1.4) ^{\circ}C$ 。试验设置对照组和处理组, 每组

设 8 个重复, 每盆植苗 4~5 株。处理组于试验开始后停止灌水, 对照组每日灌水 1 次。分别于试验干旱处理的第 0、3、6、9、12 天取样测定相关指标。并于干旱处理第 6、9、12 天将部分处理组的吉首蒲儿根进行复水处理, 观察不同干旱时间处理后的吉首蒲儿根的存活状态。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 叶片相对含水量和土壤含水量 采用 Coleman 等^[9]的方法测量叶片相对含水量 (RWC)。于上午取吉首蒲儿根第 4~5 叶位成熟叶片, 每个试验组取叶片 5 片, 将其洗净擦干后称重得到鲜重 (FW), 然后将叶片浸在去离子水中, 置于 $4 ^{\circ}C$ 冰箱中保持 24 h 后, 擦干后称重得到饱和鲜重 (TW), 接着再将叶片置于烘箱中 $105 ^{\circ}C$ 杀青 15 min, 最后于 $80 ^{\circ}C$ 烘干至恒重称重得到干重 (DW)。叶片相对含水量 (RWC) 按照公式计算: $RWC = (FW - DW) / (TW - DW) \times 100\%$ 。土壤含水量 (SWC) 采用烘干称重法测定。用打孔器在花盆四周取土, 混合后取适量土壤称重 (W), 然后 $80 ^{\circ}C$ 烘干至恒重, 称干重 (DW), 再按公式计算土壤含水量。 $SWC = (W - DW) / W \times 100\%$ 。

1.2.2 光合作用气体交换参数 在试验的第 0、3、6、9、12 天上午 9:00~10:00, 采用 LI-6400 便携式光合仪 (LICOR, 美国) 测量吉首蒲儿根第 4~5 叶位成熟叶片的光合作用气体交换参数, 每个试验组取 5 片叶片进行测量。试验期间空气温度为 $(31.4 \pm 0.8) ^{\circ}C$ 、空气相对湿度为 $(55.0 \pm 1.7)\%$ 、空气二氧化碳浓度为 $(412.4 \pm 4.2) \mu mol \cdot mol^{-1}$, 光照强度为 $(86.7 \pm 6.6) \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。采用叶室 LED 红/蓝光源提供光照, 根据环境光照强度, 光照强度设置为 $90 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

1.2.3 叶绿素荧光参数 于试验的第 0、3、6、9、12 天上午 9:00~11:00, 采用便携式调制叶绿素荧光仪 PAM-2500 (Walz, 德国) 进行快速光响应曲线的测定。梯度作用光强设置为 8、14、29、82、151、299、540、710 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 作用时间为 30 s。对吉首蒲儿根的第 4~5 叶位成熟叶片暗适应 20 min 后进行测量, 每个试验组重复 5 次。其初始荧光 (F_0)、最大荧光 (F_m)、PS II 的最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 光化学能量转化的有效量子产量 Y

(II)、PS II 调节性能量耗散 $Y(NPQ)$ 、PS II 非调节性能量耗散 $Y(NO)$ 等参数数值由仪器直接读取。

1.3 数据分析

试验设置 5 次重复,用 SPSS 13.0 进行均值、标准误、差异显著性分析($P < 0.05$),数据表示为平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果与分析

2.1 干旱处理对吉首蒲儿根叶片及植株存活状态的影响

图 1 显示,干旱处理第 3 天,吉首蒲儿根叶片未表现出明显受害症状;而干旱处理第 6 天,其叶片和叶柄均萎蔫,此时再次灌水 3 d 后,叶片恢复舒展挺拔状态;干旱处理第 9 天,其叶片皱缩、呈现褐色,此

时复水 3 d 后,叶片的绝大部分已损伤缺失,但叶柄能够恢复至挺拔状态,茎尖处能见新芽;干旱处理第 12 天,叶片严重枯萎,此时复水 3~9 d,叶片依然皱缩,未见恢复,且无新芽出现。以上结果表明,停止灌水 0~9 d,吉首蒲儿根植株依然存活,但干旱处理 12 d 后,吉首蒲儿根植株已经死亡,即短期的干旱胁迫就能给吉首蒲儿根造成严重的伤害,并能威胁其生存。

2.2 干旱处理对吉首蒲儿根的叶片相对含水量的影响

图 2, A 显示,吉首蒲儿根对照组的土壤含水量一直维持在 29.06%~31.64%之间,且在整个处理过程中均无显著差异;而处理组在停止灌水后,土壤含水量随处理时间逐渐下降,在第 3 天,土壤含水量



图 1 不同干旱处理时间吉首蒲儿根叶片的形态特征

NW₀~NW₁₂ 则分别表示干旱胁迫处理 0、3、6、9、12 d

Fig. 1 Leaf morphological characteristics of *S. jishouensis* in different drought treatment times

NW₀—NW₁₂ show drought treatment for 0, 3, 6, 9 d, respectively

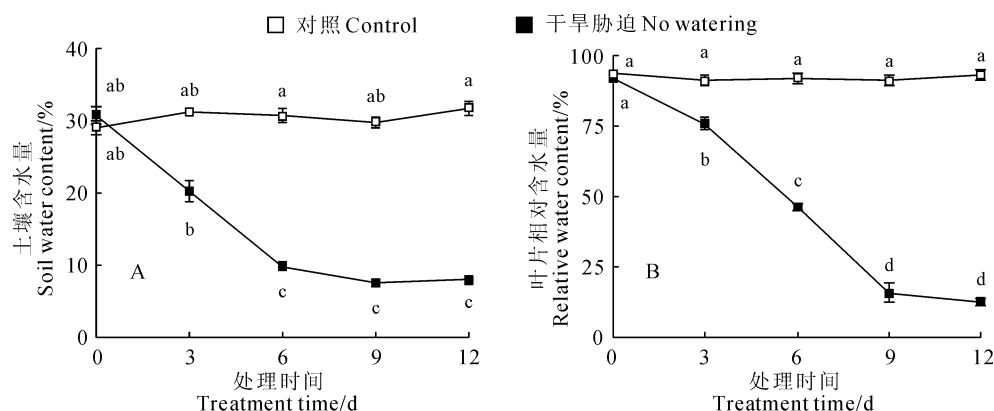


图 2 对照和处理组土壤含水量(A)和吉首蒲儿根叶片(B)相对含水量的变化

图中数据表示为平均值 $\pm$ 标准误;不同小写字母表示处理间或者处理时间之间在 0.05 水平存在显著性差异;下同

Fig. 2 Changes of soil water content(A) and leaf relative water content(B) of

S. jishouensis under control and no watering treatment

Values are means $\pm$ SE(n=5). The different small letters show significant difference among

treatment groups or times at 0.05 level. The same as below

即大幅下降,从第 6 天起,土壤含水量基本稳定在 9.55%~7.85%,但比对照显著降低。随着处理时间延长,吉首蒲儿根对照组的叶片相对含水量维持在 91.23%~94.49%,在整个处理过程中无显著变化(图 2,B)。干旱胁迫组吉首蒲儿根的叶片相对含水量随处理时间逐渐大幅下降,其在处理第 3 天时叶片相对含水量已显著低于对照;胁迫处理第 6 天叶片相对含水量降至 46.26%;干旱处理第 9、12 天,叶片相对含水量仅为 15.95%、12.76%(图 2, B)。可见,自然干旱胁迫处理显著降低了吉首蒲儿根植株立地土壤含水量和叶片相对含水量,严重抑制了其正常生长发育。

2.3 干旱处理对吉首蒲儿根光合作用的影响

试验过程中,对照组吉首蒲儿根的净光合速率无显著变化,维持在 $2.2 \sim 2.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。与对照组相比,处理组停止灌水第 3 天,吉首蒲儿根的净光合速率即显著下降了 26.3%;在干旱处理第 6 天,其净光合速率继续大幅下降至 $0.496 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,仅为对照的 17.5%;在干旱处理的第 9 天,其净光合速率甚至降低为负值;在干旱处理的第 12 天,其净光合速率的测量值几乎为 0(图 3,A)。对照组吉首蒲儿根的气孔导度和蒸腾速率在试验中仅有小幅的波动,但并没有出现显著的变

化。处理组的气孔导度和蒸腾速率变化基本一致,在停止灌水后,两者均呈现持续下降的趋势,并在干旱处理第 3 天就出现显著降低;在干旱处理第 6、9 天,两参数继续小幅下降,但与干旱处理第 3 天的数值相比无显著差异;在干旱处理第 12 天,两者数值趋近于 0(图 3,B,C)。处理组胞间 CO_2 浓度的变化趋势有别于以上 3 参数,在干旱处理第 0、3、6 天,其与对照无显著差别,但在第 9、12 天显著高于对照(图 3,D)。以上结果说明吉首蒲儿根光合生理参数对于干旱胁迫较为敏感,其净光合速率、气孔导度和蒸腾速率在停止灌水第 3 天即出现大幅下降,并随着干旱程度的加强和持续时间的延长受害程度不断加深;在干旱处理第 12 天,以上 3 参数趋近于 0。

2.4 干旱处理对吉首蒲儿根叶绿素荧光参数的影响

对照组吉首蒲儿根的 F_0 、 F_m 和 F_v/F_m 在试验过程中均保持基本稳定。处理组在停止灌水后第 0~9 天,吉首蒲儿根的 F_0 与对照接近;但其在干旱处理第 12 天大幅下降,仅为对照的 58.79%。在干旱处理第 0~6 天,吉首蒲儿根的 F_m 虽有下降的趋势,但与对照无显著差别,其从干旱处理第 9 天才开始显著下降,在干旱处理第 12 天时比对照下降了 82.1%。而 F_v/F_m 从处理的第 3 天开始即呈现下

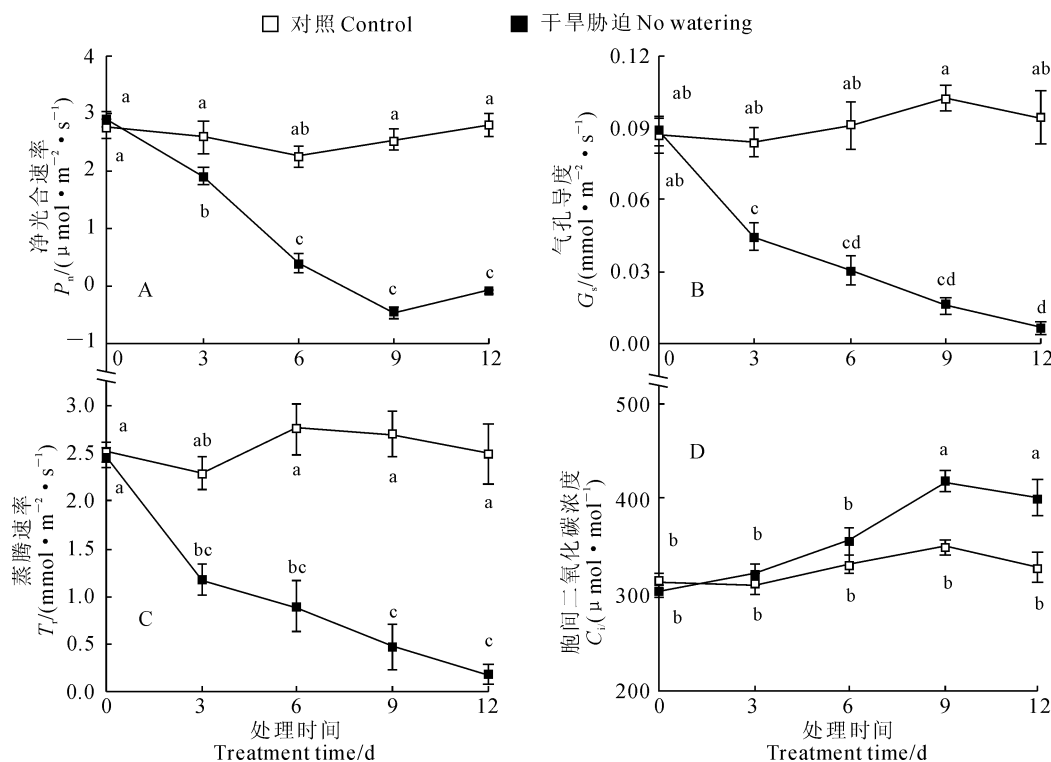


图 3 干旱胁迫下吉首蒲儿根净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度的变化

Fig. 3 Effects of water deficit on P_n , G_s , T_r and C_i in leaves of *S. jishouensis*

降趋势,如其在干旱处理的第 6 天时为 0.738 并显著低于对照,且随着干旱处理时间延长,其持续下降,至于干旱处理第 12 天仅为 0.249,为对照的 7.2% (表 1)。

同时,通过快速光响应曲线发现,对照组和处理组吉首蒲儿根的 PS II 实际光量子效率 $Y(II)$ 均随着光强的增加而降低,且在试验第 0、3 天,它们之间无显著差异,但停止灌水 6 d,处理组吉首蒲儿根的 $Y(II)$ 有所降低;停止灌水处理第 9、12 天,处理组吉首蒲儿根的 $Y(II)$ 则显著低于其它各组;尤其是在光照强度大于 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 后,其数值均小于 0.2,不足对照的 30%(图 4,A)。与 $Y(II)$ 的变化趋势相反,对照组和处理组吉首蒲儿根的 PS II 调节性能量耗散 $Y(NPQ)$ 则随着光强的增加而升高。在停止灌水 0~3 d,处理组吉首蒲儿根的 $Y(NPQ)$ 与对照相似;但在干旱处理第 6 天,其明显高于对照;对于干旱处理第 9、12 天吉首蒲儿根的 $Y(NPQ)$ 而言,在光强小于 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时两者均显著高于对照,但当光强大于 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时干旱处理第 9 天的 $Y(NPQ)$ 与对照无显著差别(图 4,B)。同时,当光照强度大于 $30\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,对照组和处理组吉首蒲儿根的非调节

性能量耗散 $Y(NO)$ 均基本保持稳定,不再随光照强度的增加而显著变化。干旱处理第 0、3、6 天吉首蒲儿根的 $Y(NO)$ 与对照相似;而干旱处理第 9、12 天的吉首蒲儿根 $Y(NO)$ 则显著高于对照,其在胁迫处理第 12 天的 $Y(NO)$ 数值达 0.65 以上(图 4,C)。

以上结果说明干旱胁迫对吉首蒲儿根的 PS II 产生了一定伤害,光能分配发生改变。在干旱处理第 0~3 天,其受到影响较小, F_0 、 $Y(II)$ 等参数均与正常值接近;但随着干旱处理时间的延长,PS II 的损伤逐渐加剧,特别是在干旱处理第 12 天,各参数均显著劣于对照。

表 1 干旱胁迫下吉首蒲儿根初始荧光、最大荧光和 PS II 的最大光化学效率的变化

Table 1 Effects of water deficit on F_0 , F_m and F_v/F_m in leaves of *S. jishouensis*

处理 Treatment	F_0	F_m	F_v/F_m
CK ₀	0.169±0.004a	0.737±0.009a	0.770±0.005a
CK ₃	0.163±0.006a	0.716±0.013a	0.772±0.006a
CK ₆	0.172±0.005a	0.722±0.010a	0.762±0.004ab
CK ₉	0.171±0.004a	0.720±0.011a	0.762±0.004ab
CK ₁₂	0.165±0.011a	0.721±0.017a	0.771±0.010a
NW ₀	0.165±0.011a	0.735±0.016a	0.771±0.007a
NW ₃	0.169±0.009a	0.713±0.012a	0.763±0.004ab
NW ₆	0.182±0.005a	0.683±0.031a	0.732±0.004b
NW ₉	0.153±0.006a	0.405±0.040b	0.621±0.011c
NW ₁₂	0.097±0.014b	0.129±0.022c	0.245±0.009d

注:CK₀~CK₁₂ 分别表示对照(正常灌水)处理 0、3、6、9、12 d;NW₀~NW₁₂ 则分别表示干旱胁迫处理 0、3、6、9、12 d;图 4 同;同列不同字母表示 0.05 水平显著性差异。

Note: CK₀—CK₁₂ show watering treatments (control) for 0, 3, 6, 9 d; NW₀—NW₁₂ show drought treatments for 0, 3, 6, 9 d, respectively; The same as Fig. 4; The different small letters in the same column show significant difference among treatment groups or times at 0.05 level.

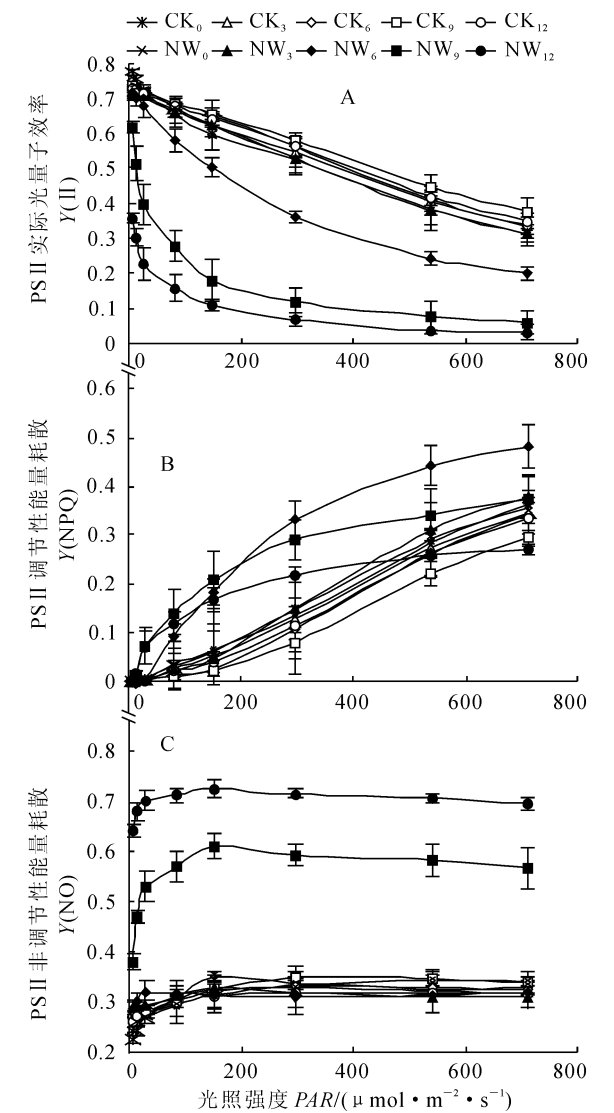


图 4 干旱胁迫下吉首蒲儿根 $Y(II)$ 、 $Y(NPQ)$ 、 $Y(NO)$ 快速光响应的变化

Fig. 4 Changes of rapid light-response curve of $Y(II)$, $Y(NPQ)$ and $Y(NO)$ in leaves of *S. jishouensis* under control and no watering treatment

3 讨 论

3.1 吉首蒲儿根对干旱胁迫较为敏感

叶片相对含水量反映了植物组织的水分状况,较高的叶片相对含水量可以保护叶绿体的结构和 PS II 的活性,维持较高的光合作用效率^[10]。 F_v/F_m 也常作为植物受伤害程度的参数,一般认为正常条件下植物叶片的 F_v/F_m 在 0.75~0.85^[11]。本试验发现在停止灌水第 6 天,吉首蒲儿根的叶片相对含水量即降到 50% 以下,其 F_v/F_m 也小于 0.75,净光合速率仅为对照的 17.5%,此时已受到一定的干旱胁迫伤害;在停止灌水第 12 天,土壤含水率为 7.85%,约是对照组土壤含水量的 1/4,此时的叶片相对含水量和 F_v/F_m 仅为 12.76% 和 0.245,净光合速率几乎为 0,其受害严重,此时的复水结果也表明吉首蒲儿根植株已死亡。由此可见,即使在阴生环境下,吉首蒲儿根对干旱胁迫也较为敏感。由于吉首蒲儿根的根系较浅,多集中在土壤表层,而在高温少雨的夏秋季,在缺少地表径流的情况下,土壤的表层含水量持续数天低于 10% 的概率较大,这样的环境显然不适宜吉首蒲儿根生存。

3.2 非气孔因素是导致干旱胁迫下吉首蒲儿根净光合速率下降的主要原因

干旱胁迫导致植物净光合速率的降低,主要是由气孔部分关闭引起的气孔因素和由羧化效率、PS II 活性降低等引起的非气孔因素造成。一般而言,在干旱胁迫初期或轻度干旱胁迫下,气孔因素是限制净光合速率的主要原因;在中度或严重干旱胁迫下,非气孔因素是影响净光合速率的主要因子^[12-14]。也有研究表明,PS II 最大光化学效率 F_v/F_m 在轻度干旱胁迫下变化较小,仅在较严重的干旱胁迫下才明显降低^[15-17]。本研究结果显示,在停止灌水处理后,吉首蒲儿根的净光合速率大幅下降(图 3, A)。此时尽管吉首蒲儿根的气孔部分关闭,气孔导度显著下降(图 3, B),但其胞间 CO_2 浓度显著高于对照或与对照相近(图 3, D),所以,气孔因素并不是直接导致干旱胁迫下吉首蒲儿根净光合速率降低的主要因素。同时,本研究还发现 PS II 的最大量子产量 F_v/F_m 在停止灌水处理 6 d 后显著降低(表 1)。这表明在干旱处理 6 d 以上的吉首蒲儿根净光合速率的下降主要是非气孔因素造成的,其中 PS II 的损害是重要原因。以上结果同时也说明,停止灌水 6 d

处理对于吉首蒲儿根已经是较为严重的干旱胁迫。

3.3 干旱胁迫下吉首蒲儿根的光能分配发生了改变

F_0 在干旱胁迫下有上升或下降的报道,但 F_m 在干旱胁迫下一般呈降低趋势^[18-19]。本实验中发现,吉首蒲儿根的 F_0 在停止灌水 0~9 d 基本保持稳定,仅在干旱处理 12 d 才大幅降低;而 F_m 从干旱处理第 6 天就开始逐渐下降,并导致 F_v/F_m 的显著降低(表 1),进而影响了吉首蒲儿根对光能的利用。 $Y(\text{II}) + Y(\text{NPQ}) + Y(\text{NO}) = 1$,其可代表植物对光能的利用策略,其中, $Y(\text{II})$ 表示 PS II 将吸收的光能转化为化学能的效率; $Y(\text{NPQ})$ 代表 PS II 以热耗散等保护性调节机制消耗的光能占总吸收光能的比例,是光保护的重要指标; $Y(\text{NO})$ 表示植物不通过保护性调节机制,而是以其他形式减少进入光化学途径的光能占总吸收光能的比例,是光损伤的重要指标^[20]。干旱胁迫下,吉首蒲儿根在光能分配产生了一定差异。在低光照强度下(小于 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),停止灌水处理 3 d,吉首蒲儿根的光能分配与对照类似,光化学途径占主要部分 [$Y(\text{II})$ 超过 0.5]; 干旱处理第 6 天,仅在光照强度小于 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,光化学途径占主要部分;而光照强度大于 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $Y(\text{NPQ})$ 、 $Y(\text{NO})$ 等非光化学途径逐渐成为主要部分; 当干旱处理第 9、12 天,光照强度大于 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, $Y(\text{NO})$ 超过 0.5, 其与 $Y(\text{NPQ})$ 之和超过 0.6, 非光化学途径占主要部分。这说明吉首蒲儿根在轻度干旱胁迫条件下,光能分配以光化学途径转化为主,但随着干旱胁迫的加剧,其光能分配逐渐以热、荧光等能量耗散为主。 $Y(\text{II})$ 、 $Y(\text{NPQ})$ 的相对降低和 $Y(\text{NO})$ 的相对增高表明植物叶片光化学转化途径、保护性能量耗散调节机制受到较大影响,光损伤严重,植物已难以处理吸收的光能^[21-22]。本试验结果表明,干旱处理第 9、12 天,吉首蒲儿根的光能利用系统受到严重的伤害,已难以有效处理吸收的能量。这可能会进一步产生氧化胁迫伤害^[23]。

综上所述,在高温的夏秋季节,吉首蒲儿根的光合机构对干旱胁迫较为敏感。停止灌水第 6 天,吉首蒲儿根 PS II 即受到显著伤害,光化学途径利用的光能减少,净光合速率趋近于 0。处理第 12 天,吉首蒲儿根植株已死亡。所以,我们认为高温季节的土壤干旱可能是限制吉首蒲儿根分布的重要原因。

参考文献:

- [1] ZHANG D G, LIU Y, YANG Q E. *Sinosenecio jishouensis* (Compositae), a new species from North-west Hunan, China[J]. *Botanical Studies*, 2008, **49**(3): 287—294.
- [2] DENG T(邓 涛), CHEN G X(陈功锡), ZHANG D G(张代贵), *et al.* The reproductive ecological characteristics of *Sinosenecio jishouensis* (Compositae) and its endangerment mechanisms[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(15): 4 318—4 326 (in Chinese).
- [3] XU L(徐 亮), CHEN G X(陈功锡), LIU H J(刘慧娟), *et al.* Characteristics of soil nutrients and distribution pattern of *Sinosenecio jishouensis* population[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2012, **32**(8): 1 664—1 670 (in Chinese).
- [4] XIANG F(向 芬), ZHOU Q(周 强), TIAN X R(田向荣), *et al.* Leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Sinosenecio jishouensis* in different habitats[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(2): 337—344 (in Chinese).
- [5] UMEZAWA T, FUJITA M, FUJITA Y, *et al.* Engineering drought tolerance in plants; discovering and tailoring genes to unlock the future[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, **17**(2): 113—122.
- [6] CHAVES M M, FLEXAS J, PINHEIRO C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell[J]. *Annals of Botany*, 2009, **103**(4): 551—560.
- [7] WANG N N(王宁宁), HU Z H(胡增辉), SHEN Y B(沈应柏). Photosynthetic characteristics of *Davidia involucrata* Baill. seedlings under soil drought stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2011, **31**(1): 101—108 (in Chinese).
- [8] CHEN G X(陈功锡), LIU SH B(刘世彪), AO CH Q(敖成齐), *et al.* On endemic genera to China of spermatophytic flora from Mt. Wulingshan region[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2004, **24**(5): 865—871 (in Chinese).
- [9] COLEMAN W K. Evaluation of wild *Solanum* species for drought resistance: 1. *Solanum gandarillasii* Cardenas[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **62**(3): 221—230.
- [10] COLOM M R, VAZZANA C. Photosynthesis and PS II functionality of drought-resistant and drought-sensitive weeping lovegrass plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, **49**(2): 135—144.
- [11] YAMAZAKI J Y, KAMATA K, MARUTA E. Seasonal changes in the excess energy dissipation from Photosystem II antennae in overwintering evergreen broad-leaved trees *Quercus myrsinaefolia* and *Machilus thunbergii*[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, **104**(1—2): 348—356.
- [12] YORDANOV I, VELIKOVA V, TSONEV T. Plant responses to drought and stress tolerance[J]. *Bulg Journal of Plant Physiology*, 2003, (S): 187—206.
- [13] GALMÉS J, ABADÍA A, MEDRANO H, *et al.* Photosynthesis and photoprotection responses to water stress in the wild extinct plant *Lysimachia minoricensis*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **60**(3): 308—317.
- [14] DIAS M C, BRÜGGEMANN W. Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: gas exchange, chlorophyll fluorescence and Calvin cycle enzymes[J]. *Photosynthetica*, 2010, **48**(1): 96—102.
- [15] MAROCO J P, RODRIGUES M L, LOPES C, *et al.* Limitations to leaf photosynthesis in field-grown grapevine under drought-metabolic and modelling approaches[J]. *Functional Plant Biology*, 2002, **29**(4): 451—459.
- [16] LU J R(鲁建荣), LI X Y(李向义), XUE W(薛 伟), *et al.* Characteristics of leaf dehydration on water relation and photosystem II activity in two desert plants[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(7): 1 427—1 434 (in Chinese).
- [17] LI J(李 娟), PENG ZH H(彭镇华), GAO J(高 健), *et al.* Photosynthetic parameters and chlorophyll fluorescence characteristics of *Pleiblastus kongosanensis* f. *aureostriatus* under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(6): 1 395—1 402 (in Chinese).
- [18] WU G L(吴甘霖), DUAN R Y(段仁燕), WANG ZH G(王志高), *et al.* Effects of drought stress and rehydration on chlorophyll fluorescence characteristics in *Fragaria* × *ananas* Duch[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(14): 3 941—3 946 (in Chinese).
- [19] WANG Z X, CHEN L, AI J, *et al.* Photosynthesis and activity of photosystem II in response to drought stress in Amur Grape (*Vitis amurensis* Rupr.)[J]. *Photosynthetica*, 2012, **50**(2): 189—196.
- [20] KRAMER D M, JOHNSON G, KIIRATS O, *et al.* New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes[J]. *Photosynthesis Research*, 2004, **79**(2): 209—218.
- [21] MOUSTAKAS M, SPERDOULI I, KOUNA T, *et al.* Exogenous proline induces soluble sugar accumulation and alleviates drought stress effects on photosystem II functioning of *Arabidopsis thaliana* leaves[J]. *Plant Growth Regulation*, 2011, **65**(2): 315—325.
- [22] SPERDOULI I, MOUSTAKAS M. Spatio-temporal heterogeneity in *Arabidopsis thaliana* leaves under drought stress[J]. *Plant Biology*, 2012, **14**(1): 118—128.
- [23] XIONG L, ZHU J K. Molecular and genetic aspects of plant responses to osmotic stress[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, **25**(2): 131—139.