

文冠果对干旱胁迫的光合生理响应

郭佳宝¹, 马明科², 张刚¹, 魏典典¹, 刘淑明¹

(1. 西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西省宝鸡市辛家山林业局, 陕西 宝鸡 721004)

摘要: 通过盆栽试验, 以抗旱性强弱不同的两个种源地文冠果为试验材料, 对干旱胁迫下文冠果的光合生理指标进行较为系统的研究, 结果表明: ① 干旱胁迫条件下两个种源地文冠果叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 ($Cond$)、蒸腾速率 (Tr)、叶绿素含量 (Chl) 都有不同幅度的下降。抗旱性强的文冠果 (新疆喀什) 随着干旱胁迫的加剧, 净光合速率、气孔导度和叶绿素含量下降较慢。② 轻度干旱胁迫下气孔限制是影响两个种源地文冠果 P_n 下降的主要因素; 中度和重度干旱胁迫下, 非气孔限制是两个种源地文冠果 P_n 下降的主要因素。③ 叶绿素荧光参数研究表明: 干旱胁迫条件下两个种源地文冠果 PS II 反应中心光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 潜在活性 (F_v/F_o) 均降低; PS II 光化学淬灭系数 (qP) 均降低, 而 PS II 非光化学淬灭系数 (qNP) 则增大。总体上, 与抗旱性弱的文冠果相比, 抗旱性强的文冠果的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 下降幅度较小, PS II 的光化学能力和 PS II 潜在活性均较强; PS II 光化学淬灭系数 (qP) 降低的幅度较小且 PS II 非光化学淬灭系数 (qNP) 降低幅度较大。

关键词: 文冠果; 干旱胁迫; 光合作用; 荧光参数

中图分类号: S794.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)05-0055-06

Photosynthetic physiological response of *Xanthoceras sorbifolia* under drought stress

WU Jia-bao¹, MA Ming-ke², ZHANG Gang¹, WEI Dian-dian¹, LIU Shu-ming¹

(1. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Forest Bureau of Xingjishan, Baoji, Shaanxi 721004, China)

Abstract: A pot-cultivation experiment was performed to investigate the photosynthetic physiology of *X. sorbifolia* under the drought stress. Two varieties of *X. sorbifolia* from different provenances were used to systematically study the photosynthetic physiology under the drought stress. The results showed that: (1) Under the drought stress, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and chlorophyll content decreased in varying degrees both in the leaves of *X. sorbifolia*. Compared to *X. sorbifolia* from Yan'an, Shaanxi with the low drought-resistance, the net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and chlorophyll content decreased more slowly. In the leaves of *X. sorbifolia* from Kaishi, Xinjiang with high drought-resistance. (2) Under the light drought stress, stomatal restriction was the main factor for the P_n 's decreased in the leaves of both the two varieties of *X. sorbifolia*, while the non-stomatal restriction was the main factor for the P_n ' decrease under the medium and severe drought stress. (3) The result of fluorescence experiment of PS II Reaction Center indicated F_v/F_m and F_v/F_o decreased in both *X. sorbifolia* under the drought stress, the quenching of chlorophyll fluorescence (qP) decreased, and non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence (qNP) increased for both *X. sorbifolia* under the drought stress. In general, compared to *X. sorbifolia* with the low drought-resistance, F_v/F_m and F_v/F_o had a smaller decrease, qP had a smaller decrease and qNP had a bigger increase in the leaves of *X. sorbifolia* under the drought stress.

Keywords: *Xanthoceras sorbifolia*; drought-stress; photosynthesis; fluorescence parameter

文冠果 (*Xanthoceras sorbifolia*) 又名木瓜、文登阁、僧灯毛道, 隶属于无患子科文冠果属, 为单种

属^[1]。文冠果在我国北方范围内分布广泛, 并具有耐寒、耐土壤贫瘠并且其种子油含量高特性, 使其

收稿日期: 2013-11-08

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2009JM3001)

作者简介: 郭佳宝 (1989—), 女, 宁夏银川人, 在读研究生, 研究方向为环境生物物理。E-mail: wjb_1121@126.com。

通信作者: 刘淑明 (1964—), 女, 陕西渭南人, 教授, 主要从事农林气象、环境植物学研究。E-mail: liusm99@sina.com。

成为山区绿化、退耕还林、防风固沙的首选油料、生态经济树种^[2]。光合作用是植物生长的基础,是植物生产力构成的最主要的因素,水分状况又是影响光合作用最重要的因子之一^[3]。干旱会导致叶片气孔关闭,严重时甚至损伤叶肉细胞、降低光合酶的活性、破坏叶绿体的结构^[4],降低叶绿素和类胡萝卜素的含量^[5]、使植物光合速率降低^[6]。近年来,叶绿素荧光技术应用于光合作用机理、植物抗逆性生理、作物增产潜力等方面已经取得了一定进展,越来越多的研究证明叶绿素荧光包含了十分丰富的光合信息,且对各种胁迫因子十分敏感,可以通过快速、灵敏和无损伤的技术,探测完整植株在胁迫条件下光合作用强弱和光合结构的改变^[7]。至今文冠果的研究大多局限在文冠果的繁殖技术^[8]、落花落果机理^[9]、药用价值^[10]等方面,对不同种源文冠果光合的研究则相对较少,而对文冠果荧光参数方面的研究更是未见报道。通过分析在不同干旱水平下文冠果的光合和叶绿素荧光变化,可以使人们深入了解认识干旱对文冠果伤害的内在规律和生理机制。本研究通过对抗旱性差异较大的文冠果进行盆栽水分处理试验,以了解两个种源地文冠果幼苗在干旱胁迫下光合和荧光指标的变化,以揭示水分变化对文冠果光合生理指标的影响,探讨文冠果生长对水分胁迫的适应机制,为文冠果的林木良种化原始资料的积累和推广提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料

根据对多个种源地文冠果种质资源抗旱性的鉴定结果^[11],选择抗旱性差异较大的两个种源地文冠果,即新疆喀什种源文冠果(抗旱性强)和陕西延安种源文冠果(抗旱性弱)。采集的种子在 2010 年冬进行沙藏处理,2011 年将露白的种子种于西北农林科技大学林学院苗圃中,培育试验所用文冠果植株幼苗。2012 年 3 月选取长势一致的文冠果幼苗移栽至塑料盆内。塑料盆上径为 34 cm,下径为 24 cm,高为 27 cm,每盆内移栽一株,培养基质为 3/4 壤土 + 1/4 沙子,每盆培养基质重为 18 kg。先期进行正常的控水管理,使文冠果苗得到充足的水分供应以恢复其正常生长,5 月份后进行水分胁迫控制试验。

1.2 试验处理

试验采用盆栽水分梯度法测定抗旱指标,干旱胁迫处理以根际水分胁迫为主。根据种源地的情况和谢志玉^[12]等在文冠果抗旱性方面的研究,试验设置充足水分(CK)、轻度水分胁迫(T1)、中度水分胁迫

(T2)、重度水分胁迫(T3)四个水分处理,即土壤含水量分别控制在田间最大持水量(23%)的 75% ~ 80%(CK)、55% ~ 60%(T1)、40% ~ 45%(T2)、30% ~ 35%(T3),每个处理 3 个重复。在控制土壤含水量过程中,晴天时移开防雨棚,雨天时遮挡防雨棚。采用称重法控制土壤含水量,每天下午 16:00 用电子秤进行称重,并补充消耗的水分,同时记录所消耗的水量,试验于 2012 年 9 月底结束。

1.3 测定方法

干旱胁迫 20 d 后,选择晴天天气上午 9:00—11:00,使用 Li-6400 便携式光合测定系统(LI-COR, USA),选取荧光叶室(2 cm²)。文冠果的叶片是奇数羽状复叶,在试验测定过程中选择了单个小叶,测定叶龄适中的各光合参数,测量过程中叶片控制温度为 28℃,光合有效辐射为 1 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,进行四次重复测定,记录净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度($Cond$)、胞间二氧化碳浓度等参数。荧光参数采用便携式调制叶绿素荧光仪(FMS-2, UK)进行测定,包括初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、光系统 II 的原初光能转化效率(F_v/F_m)等,并计算 PS II 潜在活性(F_v/F_0)、光化学淬灭系数 qP 、非光化学淬灭系数 qNP 等;同时测定叶绿素含量。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对文冠果叶片净光合速率的影响

P_n 的变化如图 1 所示。在正常供水条件下,新疆喀什的 P_n 值为 10.42 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。陕西延安的 P_n 值为 11.78 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。两个种源地文冠果的光合速率随土壤水分胁迫程度的不断加深呈下降趋势,且在重度胁迫下,光合速率和气孔导度达到最低值。新疆喀什文冠果 P_n 的下降幅度较小,在轻度、中度、重度干旱胁迫下,其 P_n 值分别下降了 10.84%、31.09%、42.41%。陕西延安文冠果下降幅度较大,尤其是重度胁迫下,与对照相比下降了 68.76%。方差分析表明,干旱胁迫对两个种源地文冠果 P_n 值差异显著(新疆喀什对照与轻度胁迫除外),见表 1,表明土壤干旱对文冠果叶片 P_n 影响较大。

2.2 干旱胁迫对文冠果蒸腾速率的影响

蒸腾速率的变化如图 2 所示。在正常供水条件下新疆喀什蒸腾速率值为 6.19 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,陕西延安的蒸腾速率值为 8.16 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着干旱胁迫程度的加重,两个种源地文冠果的蒸腾速率都有大幅度的下降,但不同处理间的下降趋势不同。

与对照相比,陕西延安文冠果在轻度胁迫时蒸腾速率下降幅度较大,在重度干旱胁迫时文冠果的蒸腾速率为 $1.57 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。与对照相比,新疆喀什文冠果蒸腾速率下降幅度较小,轻度、中度、重度胁迫下将幅度分别为(36.06%、49.83%、70.76%)。方差分析结果表明,两个种源地文冠果在不同水分胁迫下蒸腾速率差异均为极显著(见表1)。

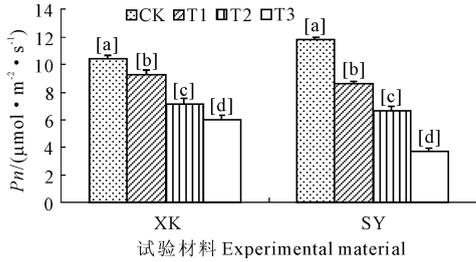


图1 干旱胁迫对文冠果叶片净光合速率的影响

Fig.1 Effect of drought stress on net photosynthetic rate in *X. sorbifolia* leaves

注:图中括号内的英文字母表示水分胁迫梯度间的差异性($P < 0.05$),下同。

Note: Different lowercase Letter show Significant differences among various treatments of drought stress($P < 0.05$). The same as below.

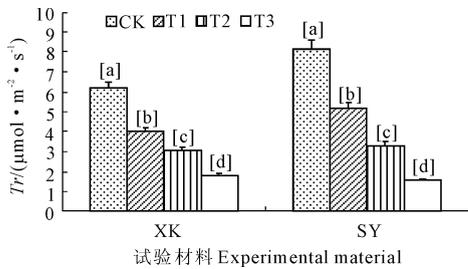


图2 干旱胁迫对文冠果叶片蒸腾速率的影响

Fig.2 Effect of drought stress on transpiration rate in *X. sorbifolia* leaves

2.3 干旱胁迫对文冠果气孔导度的影响

正常供水情况下陕西延安气孔导度相对较大,为 $0.191 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;新疆喀什气孔导度为 $0.176 \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。随着土壤干旱胁迫程度的加深,气孔导度呈下降趋势(如图3),与蒸腾速率的变化趋势基本一致。相关分析表明,正常供水及不同程度干旱胁迫下新疆喀什、陕西延安文冠果的气孔导度与蒸腾速率呈显著相关,相关系数分别为0.965,0.989。表明随着气孔导度的降低,文冠果的蒸腾速率下降,以减少蒸腾所消耗的水分。方差分析表明,新疆喀什文冠果轻度和中度、中度和重度之间差异不显著($P > 0.05$),陕西延安文冠果中度和重度胁迫之间差异不显著,其余胁迫程度之间差异显著(见表1)。

2.4 干旱胁迫对胞间二氧化碳浓度和气孔限制的影响

从图4可以看出,在轻度干旱胁迫条件下两个地方文冠果的叶片胞间二氧化碳浓度均显著下降,与对照相比,新疆喀什下降了16.27%,陕西延安下降了31.79%。其下降趋势与气孔导度的下降趋势相一致,表明气孔导开放程度影响了叶片细胞间的二氧化碳浓度。但是在中度、重度干旱胁迫条件下,叶片胞间二氧化碳浓度与轻度干旱胁迫相比有所上升,与气孔导度变化相反。根据求得的气孔限制值可知(见图5),气孔限制在轻度胁迫条件下,其显著增加,表明在轻度干旱胁迫条件下,气孔限制是影响光合作用重要因素。方差分析结果表明,两个种源地文冠果在轻度干旱胁迫条件下,胞间二氧化碳浓度和气孔限制与其它处理之间差异显著(见表1)。

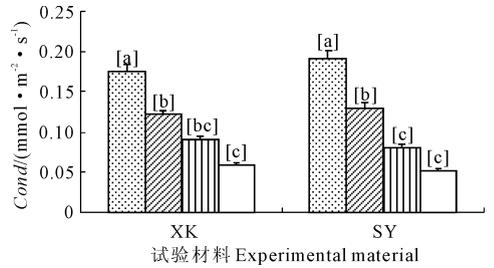


图3 干旱胁迫对文冠果叶片气孔导度的影响

Fig.3 Effect of drought stress on stomatal conductance in *X. sorbifolia* leaves

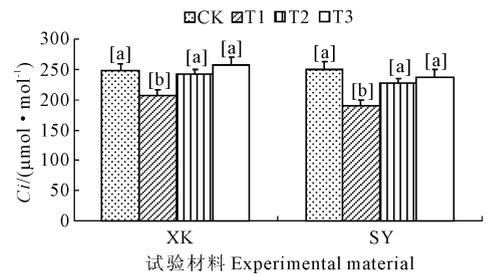


图4 干旱胁迫对文冠果叶片胞间二氧化碳浓度的影响

Fig.4 Effect of drought stress on stomatal conductance in *X. sorbifolia* leaves

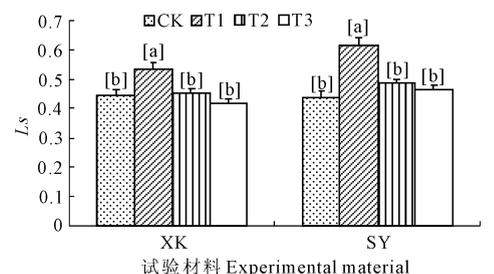


图5 干旱胁迫对文冠果叶片气孔限制的影响

Fig.5 Effect of drought stress on stomatal limitation value in *X. sorbifolia* leaves

2.5 干旱胁迫对文冠果叶片叶绿素含量的影响

叶绿体色素参与植物光合作用过程中光能的吸收、传递和转化,其含量直接影响植物的光合作用的能力^[13],由图 6,与对照相比,干旱胁迫下两个种源文冠果叶片叶绿素含量均降低,但新疆喀什文冠果在轻度干旱胁迫条件下叶绿素含量升高了 1.20%,表明轻度胁迫并未对文冠果叶片叶绿素含量造成影响。与对照相比,新疆喀什文冠果叶片在轻度和中度胁迫下下降幅度不大,在重度干旱胁迫条件下,下降了 32.06%;表明其对干旱胁迫的适应性较强。与对照相比,陕西延安文冠果叶片叶绿素含量下降幅度较大,其中轻度、中度、重度胁迫时下降幅度分别为(6.5%、24.7%、40.21%);表明随着干旱胁迫程度的加强,陕西延安文冠果叶片叶绿素含量对于干

旱胁迫更加敏感。方差分析结果表明,新疆喀什文冠果叶片叶绿素含量在对照与重度胁迫叶绿素含量有显著差异,其余叶绿素含量差异不显著;陕西延安文冠果叶绿素含量除对照与轻度胁迫之间差异不显著外,其余之间差异显著(见表 1)。

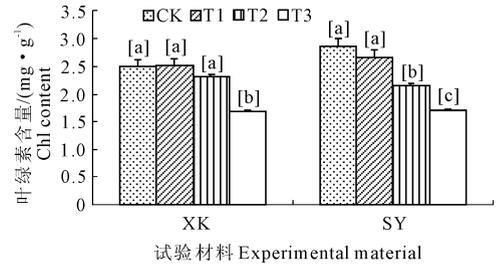


图 6 干旱胁迫对文冠果叶片叶绿素含量的影响

Fig.6 Effect of drought stress on chlorophyll content in *X. sorbifolia* leaves

表 1 干旱胁迫下文冠果光合生理特征

Table 1 Photosynthetic characteristics of *X. sorbifolia* subjected to drought stress treatment (means \pm SD)

项目 Items	新疆喀什种源 Kaishi, Xinjiang				陕西延安种源 Yan'an, Shaanxi			
	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
蒸腾速率 P_n $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	10.42 \pm 0.23a	9.2 \pm 0.26b	7.18 \pm 0.15c	6.00 \pm 0.13d	11.78 \pm 0.21a	8.58 \pm 0.10b	6.65 \pm 0.28c	3.68 \pm 0.25d
蒸腾速率 Tr $/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	6.19 \pm 0.31a	4.00 \pm 0.15b	3.07 \pm 0.24c	1.81 \pm 0.19d	8.17 \pm 0.21a	5.2 \pm 0.08b	3.32 \pm 0.12c	1.58 \pm 0.22d
气孔导度 $Cond$ $/(\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	0.18 \pm 0.020a	0.12 \pm 0.015b	0.09 \pm 0.007bc	0.05 \pm 0.011c	0.19 \pm 0.017a	0.13 \pm 0.006b	0.08 \pm 0.005c	0.05 \pm 0.002c
胞间二氧化碳浓度 $C_i/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	246.86 \pm 6.30a	206.68 \pm 4.02b	242.15 \pm 6.81a	257.02 \pm 5.31a	249.65 \pm 7.06a	190.27 \pm 5.49b	228.16 \pm 6.84a	236.64 \pm 8.47a
气孔限制 L_s	0.44 \pm 0.02b	0.53 \pm 0.01a	0.45 \pm 0.02b	0.42 \pm 0.01b	0.44 \pm 0.02b	0.61 \pm 0.02a	0.48 \pm 0.01b	0.47 \pm 0.01b
叶绿素含量 $Chl/(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})$	2.48 \pm 0.13a	2.51 \pm 0.15a	2.34 \pm 0.09a	1.68 \pm 0.07b	2.85 \pm 0.14a	2.67 \pm 0.08a	2.14 \pm 0.06b	1.71 \pm 0.11c

注:数值为平均值 \pm 标准误 (mean \pm SD),同一列数据中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Values represent means \pm SD. Different letters at the same period mean significant 5% level ($P < 0.05$). The same as below.

2.6 文冠果叶片荧光参数的变化

2.6.1 F_v/F_m 和 F_v/F_o 的变化 F_v/F_m 反映的是 PS II 反应中心内的光能转化效率,非环境胁迫条件下叶片的荧光参数 F_v/F_m 极少变化,不受物种和生长条件的影响,而遭受光抑制的叶片这一参数变化明显, F_v/F_o 则反映了 PS II 的潜在活性,它们是表明光化学反应状况的两个重要参数^[14]。本实验中,干旱胁迫下文冠果叶片 F_v/F_m 与 F_v/F_o 均显著降低(如图 7 和图 8),表明水分胁迫使 PS II 受到了伤害,降低了 PS II 原初光能转化效率,使文冠果幼苗 PS II 潜在活性中心受损,光合作用原初反应过程受抑制。但是两种文冠果 F_v/F_m 和 F_v/F_o 下降幅度不同,总体来说新疆喀什下降幅度较小,陕西延安下降幅度较大,即抗旱性弱的品种下降幅度大,其叶绿素荧光受到干旱胁迫影响程度也越大。与对照相比,轻度、中度、重度胁迫下文冠果的 F_v/F_m

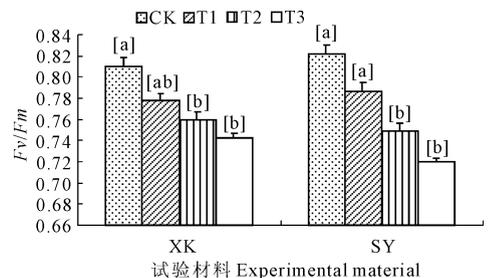


图 7 干旱胁迫对文冠果叶片 F_v/F_m 的影响

Fig.7 Effect of drought stress on F_v/F_m in *X. sorbifolia* leaves

下降幅度分别为:新疆喀什(4.93%、7.40%、8.64%);陕西延安(4.83%、8.89%、12.5%)。干旱胁迫下新疆喀什和陕西延安文冠果 P_n 与 F_v/F_m 呈显著正相关,相关系数分别为 0.992 和 0.977。与对照相比,轻度、中度、重度胁迫下文冠果的 F_v/F_o 下降幅度分别为:新疆喀什(19.8%、17.5%、29.0%

);陕西延安(20.8%、41.3%、51.4%)。以上数据表明,干旱胁迫迫使抗旱性差的文冠果 PS II 原初光能转化效率降低的程度较大,PS II 潜在活性中心受损较为严重。

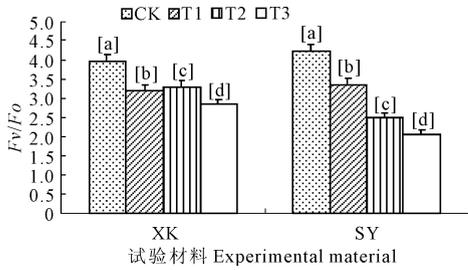


图 8 干旱胁迫对文冠果叶片 F_v/F_o 的影响

Fig.8 Effect of drought stress on F_v/F_o in *X. sorbifolia* leaves

2.6.2 干旱胁迫对文冠果叶片 qP 、 qNP 的影响

光化学猝灭系数 qP 值反映了 PS II 原初电子受体 QA 的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数目,其值越大,说明 PS II 具有较高的电子传递活性^[15]。 qP 表示 PS II 反应中心吸收的光能用于光化学电子传递的份额,所以光化学在一定程度上反映了 PS II 反应中心开放程度和活性状态^[16]。由图 9 可以看出,干旱胁迫下两个种源地文冠果的 qP 值总体呈下降趋势。轻度干旱胁迫条件下,与对照相比,新疆喀什文冠果 qP 下降不明显,而陕西延安文冠果 qP 值上升了 5.9%。随着干旱胁迫的加剧,新疆喀什种源文冠果下降趋势缓和,与对照相比,中度和重度干旱胁迫分别下降了 12.1%,24.3%;而陕西延安种源文冠果下降幅度较大,与对照相比,重度干旱胁迫下 qP 值下降了 35%。表明陕西延安种源文冠果在受到干旱胁迫时,PSII 反应中心活性中心受到了更多的抑制,减少了光能传递效率,导致了光合速率的下降。

qNP 则反映了 PS II 反应中心吸收的光能不能用于光合电子传递而是以热的形式耗散过多的激发能,缓解光能过剩给植物造成的不利影响^[17]。本试验研究结果表明,随着干旱胁迫的加剧,两个种源地文冠果 qNP 值均升高。在轻度干旱胁迫下,与对照相比,新疆喀什种源文冠果 qNP 值上升幅度较大;在中度和重度干旱胁迫条件下,与对照相比,陕西延安种源文冠果 qNP 值上升幅度较大(见图 10)。说明以热的形式耗散过多的过剩光能。表明相对于抗旱性弱的文冠果,抗旱性强的文冠果在中度和重度干旱胁迫下,PS II 反应中心开放程度和光电子传递效率更高,且具有更好的热耗散能力。

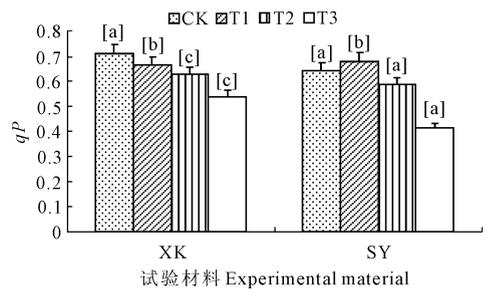


图 9 干旱胁迫对文冠果叶片 qP 的影响

Fig.9 Effect of drought stress on qP in *X. sorbifolia* leaves

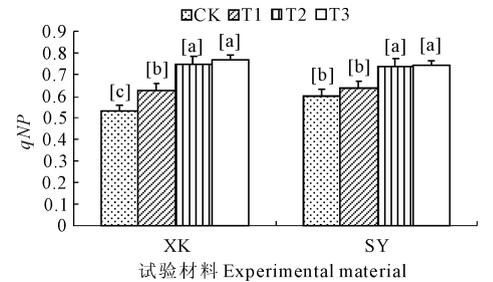


图 10 干旱胁迫对文冠果叶片 qNP 的影响

Fig.10 Effect of drought stress on qNP in *X. sorbifolia* leaves

表 2 干旱胁迫下文冠果荧光参数特征

Table 2 Chlorophyll fluorescence parameters characteristics of *X. sorbifolia* subjected to drought stress treatment (means \pm SD)

项目 Items	新疆喀什种源 Kaishi, Xinjiang				陕西延安种源 Yan'an, Shaanxi			
	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
F_v/F_m	0.81 \pm 0.03a	0.77 \pm 0.09ab	0.75 \pm 0.04b	0.74 \pm 0.06b	0.82 \pm 0.10a	0.78 \pm 0.04a	0.74 \pm 0.02b	0.71 \pm 0.04b
F_v/F_o	3.97 \pm 0.02a	3.19 \pm 0.03b	3.28 \pm 0.02c	2.82 \pm 0.05d	4.23 \pm 0.05a	3.35 \pm 0.03b	2.48 \pm 0.12c	2.05 \pm 0.07d
qP	0.71 \pm 0.01a	0.66 \pm 0.05b	0.62 \pm 0.01bc	0.53 \pm 0.03c	0.64 \pm 0.04a	0.67 \pm 0.01a	0.58 \pm 0.01a	0.41 \pm 0.01b
qNP	0.53 \pm 0.01c	0.62 \pm 0.02b	0.74 \pm 0.03a	0.77 \pm 0.06a	0.60 \pm 0.04b	0.63 \pm 0.03b	0.73 \pm 0.05a	0.74 \pm 0.05a

3 结论与讨论

影响植物光合作用的因素有气孔限制和非气孔限制之说,当 P_n 和 C_i 趋向相同时,都同时减小,且 L_s 增大,此时 P_n 的减小主要是由 $Cond$ 引起的;否则 P_n 的下降主要是由叶绿体活性、Rubisco 活性和

RuBP 羧化酶再生能力降低等非气孔限制影响^[18]。本研究表明在轻度干旱胁迫条件下,两个种源地文冠果叶片 P_n 下降的同时, C_i 也明显降低、且 L_s 升高幅度较大,表明轻度干旱胁迫条件下,气孔的开放程度变小,阻碍了气体交换,导致 C_i 减小,减少了二氧化碳供给,此时光合速率的降低主要是由于气孔

限制引起的;但是,在中度和重度干旱胁迫条件下,随着 P_n 和 C_i 的下降, L_s 与对照相比差异不显著,表明气孔限制影响较小,而同时叶绿素含量下降到最低值,PS II 原初光能转化效率显著减小,表明在中度、重度干旱胁迫条件下,导致 P_n 下降的因素主要是非气孔限制。但是非气孔限制的影响因素较多,还有待进一步深入研究。

正常情况下,叶绿素吸收的光能主要通过光合电子传递、叶绿素荧光和热耗散三种途径来消耗^[19]。这三种途径存在着此消彼长的关系,光合作用和热耗散的变化能引起荧光发射的响应变化,因此,可以通过对荧光的观测来探究光合电子的传递和热耗散^[20]。在干旱胁迫和强光条件下,植物吸收的光能大于光合所能利用的光能时,会发生光抑制, F_v/F_m 的降低常被作为是否发生光抑制的标准^[21]。许多研究者发现在许多植物中,非胁迫条件下 F_v/F_m 变化很小,但是受到环境胁迫和抑制的叶片 F_v/F_m 会明显降低^[22]。在本实验中,对照条件下两种文冠果的 F_v/F_m 稳定在 0.809 ~ 0.817 之间。随着干旱胁迫的加剧,两种文冠果 F_v/F_m 值显著降低。相关性分析表明,文冠果叶片 P_n 和 F_v/F_m 值呈显著正相关,表明文冠果的光化学效率是影响文冠果 P_n 下降的又一重要影响因子。

干旱胁迫对植物光合作用的影响是多方面的,不仅可以直接引发光合结构的损伤,同时也影响光合电子传递、光合磷酸化等过程。叶绿素干旱胁迫导致了文冠果 PS II 反应中心受损,PS II 潜在活性中心受到抑制,直接影响了光合电子传递和二氧化碳同化过程。本实验研究中,干旱胁迫下文冠果 PS II 原初光能转化效率显著减小,但同时 qNP 增大,增加对光能的耗散,这是一种自我保护机制,对光合结构起到了一定的保护作用。在轻度干旱胁迫条件下,陕西延安文冠果 qNP 值上升较大,而中度和重度干旱胁迫条件下新疆文冠果 qNP 值增加幅度高于陕西延安。这表明抗旱性强的文冠果在受到严重干旱胁迫时,其电子传递和 PS II 潜在热耗散能力都优于抗旱性弱的文冠果,有效地减轻了光合结构的损伤,在一定程度上提高了文冠果对于重度干旱胁迫的抵御能力。

参考文献:

- [1] 高述民,马凯,杜希华,李凤兰.文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)研究进展[J].植物学通报,2002,19(3):296-302,289.
- [2] 高启明,侯江涛,李阳,等.文冠果的栽培利用及开发前景[J].中国林副特产,2005,47(2):56-57.
- [3] 米海莉,许兴,李树,等.水分胁迫对牛心朴子、甘草叶片色素、可溶性糖、淀粉含量及碳氮比的影响[J].西北植物学报,2004,24(10):1816-1821.
- [4] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等.紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J].生态学报,2007,27(12):5229-5237.
- [5] 蒙祖庆,宋丰萍,刘振兴,等.干旱及复水对油菜苗期光合及叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(1):40-47.
- [6] 李伟,曹坤芳.干旱胁迫对不同光环境下的三叶漆幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J].西北植物学报,2006,26(2):266-275.
- [7] Janusz Ko cielniak, Wladyslaw Filek, Jolanta Biesaga-Ko cielniak. The effect of drought stress on chlorophyll fluorescence in *Lolium-Festuca* hybrids[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2006,28(2):149-158.
- [8] 戚建华,姚增玉.文冠果的生殖生物学与良种繁育研究进展[J].西北林学院学报,2012,27(3):91-96.
- [9] 丁明秀,敖妍.文冠果开花座果研究进展[J].中国农学通报,2008,24(10):381-384.
- [10] 刘新霞,纪雪飞,陆玲玲,等.文冠果果壳乙醇提取物对大鼠学习记忆障碍的改善作用[J].中草药,2007,38(12):1859-1863.
- [11] 张刚,魏典典,郭佳宝,等.干旱胁迫下不同种源文冠果幼苗的生理反应及其抗旱性分析[J].西北林学院学报,2014,(1):1-7,50.
- [12] 谢志玉,张文辉,刘新成,等.干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响[J].西北植物学报,2010,30(5):948-954.
- [13] 衣艳君,李芳柏,刘家尧.尖叶走灯藓(*Plagiommium cuspidatum*)叶绿素荧光对复合重金属胁迫的响应[J].生态学报,2008,28(11):5437-5444.
- [14] 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.
- [15] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J].植物学通报,1999,16(4):444-448.
- [16] 杨晓青,张岁岐,梁宗锁,等.水分胁迫对不同抗旱类型冬小麦幼苗叶绿素荧光参数的影响[J].西北植物学报,2004,24(5):812-816.
- [17] 张雷明,上官周平,毛明策,等.长期施肥对旱地小麦灌浆期叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,2003,14(5):695-698.
- [18] Osonubi W J, Davies. The influence of water stress on the photosynthetic performance and stomatal behaviour of tree seedlings subjected to variation in temperature and irradiance[J]. Oecologia, 1980,45(1):3-10.
- [19] 张秋英,李发东,刘孟雨,等.不同水分条件下小麦旗叶叶绿素 a 荧光参数与子粒灌浆速率[J].华北农学报,2003,18(1):26-28.
- [20] Michael Bradbury, Neil R. Baker. A quantitative determination of photochemical and non-photochemical quenching during the slow phase of the chlorophyll fluorescence induction curve of bean leaves[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) Bioenergetics, 1984,765(3):275-281.
- [21] 许大全,张玉忠,张荣铤.植物光合作用的光抑制[J].植物生理学通讯,1992,28(4):237-243.
- [22] 李敦海,宋立荣,刘永定.念珠藻葛仙米叶绿素荧光与水分胁迫的关系[J].植物生理学通讯,2000,36(3):205-208.