



文章编号: 1000-4025(2013)12-2507-06

## 盐分胁迫下杠柳叶片光合特性的光响应研究

李树朋<sup>1</sup>, 吴仁焯<sup>2</sup>, 朱艳菲<sup>3</sup>, 王艳英<sup>1</sup>, 黄龙飞<sup>1</sup>, 孟伟<sup>1</sup>, 邓传远<sup>1\*</sup>

(1 福建农林大学 园林学院, 福州 350002; 2 福建农林大学 作物科学学院, 福州 350002; 3 青岛农业大学, 山东青岛 266109)

**摘要:** 利用 CID 型便携式光合作用仪测定不同 NaCl 浓度下杠柳叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )、水分利用效率(WUE)及光能利用率(LUE)生理参数的光响应过程, 阐明盐分胁迫下其对光照响应的规律, 探讨有利于杠柳正常生长的盐分浓度和光照条件。结果表明: (1) 各盐分浓度下杠柳叶片光补偿点(LCP)在 21.89~65.05  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间变动, 介于阴性植物与阳性植物之间; 杠柳随土壤盐分的不同, 其光合作用参数对光照强度表现出一定的适应性和可塑性; 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐分浓度下杠柳光合同化能力最强, 最有利于其干物质的积累, 表现出一定的耐盐性。(2) 轻度的盐分胁迫(小于 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 可以提高杠柳叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、WUE 和 LUE, 而盐分胁迫对杠柳的  $T_r$  有抑制作用, 并随着盐分浓度的增加其抑制作用愈强烈。(3) 维持杠柳正常生长的土壤盐分浓度小于 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最佳 PAR 为 1 000~2 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 而保持杠柳最大 WUE 和 LUE 的光照强度分别为 800 和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**关键词:** 盐分胁迫; 杠柳; 光合特性; 光响应

中图分类号: Q945.79 文献标志码: A

## Light Response of *Periploca sepium* Bunge Leaves Physiological Parameters under Salt Stress

LI Shupeng<sup>1</sup>, WU Renyue<sup>2</sup>, ZHU Yanfei<sup>3</sup>, WANG Yanying<sup>1</sup>,  
HUANG Longfei<sup>1</sup>, MENG Wei<sup>1</sup>, DENG Chuanyuan<sup>1\*</sup>

(1 College of Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 College of Crop Science, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3 Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

**Abstract:** In order to clarify the regular pattern which *Periploca sepium* Bunge responds for the salt stress and investigate the optimum saline concentration and light condition for the growth of *P. sepium* Bunge, we measured the light response of photosynthetic parameters, such as net photosynthetic rate( $P_n$ ), transpiration rate( $T_r$ ), stomatal conductance( $G_s$ ), water use efficiency (WUE) and light use efficiency(LUE), to *P. sepium* Bunge in different saline concentrations with CID portable photosynthesis system. The results show: (1) The LCP of *P. sepium* Bunge varies from 21.89~65.05  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  under different of saline concentrations. It means that *P. sepium* Bunge is between the negative and positive plants. With the different of soil salinity, the photosynthesis of *P. sepium* Bunge for illumination intensity shows some adaptability and plasticity. The photo assimilation ability of *P. sepium* Bunge is stronger under the 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  of saline concentration. The accumulation of dry matter is enhanced and the plants show salt resistance to a certain extent. (2) The light salt stress less than 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  can improve the  $P_n$ ,  $G_s$ , WUE and LUE of *P. sepium* Bunge leaves, and the salt stress has inhibitory effect to  $T_r$ , and the inhibitory effect is

收稿日期: 2013-09-07; 修改稿收到日期: 2013-11-14

基金项目: 福建省教育厅科技项目(JB09295)

作者简介: 李树朋(1988-), 男, 在读硕士研究生, 主要从事功能性植物研究。E-mail: lishupeng2006123@163.com

\* 通信作者: 邓传远, 博士, 副教授, 主要从事园林植物分类与系统演化研究。E-mail: dengchuanyuan@163.com

positive related with the saline concentration. (3) In order to maintain the normal growth, the fitting saline concentration of soil is less than  $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and the optimum  $PAR$  is between  $1\ 000 \sim 2\ 000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the illumination intensity to maintain the high  $WUE$  and  $LUE$  is separately  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Key words:** salt stress; *Periploca sepium* Bunge; photosynthetic characteristics; light response

盐分是影响植物生长、分布和繁殖的重要环境因子。目前,中国盐碱土地约  $2.0 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,土壤盐渍化已成为重要的环境问题之一,尤以滨海或干旱地区最为严重<sup>[1-2]</sup>。杠柳(*Periploca sepium* Bunge)为萝藦科杠柳属缠绕灌木,根茎中含有丰富的化学成分,具有广泛的药用价值<sup>[3-4]</sup>;其喜光、耐寒、耐盐碱,是优良的水土保持树种;然而土壤盐分浓度的不同极大地影响了杠柳的正常生长发育。目前人们对杠柳的研究主要集中于种子萌发、栽培技术、药物开发及土壤水分胁迫下光合生理特性等方面<sup>[3-8]</sup>,而有关盐分胁迫下杠柳叶片生理参数光响应规律的研究还鲜见报道。因此,本试验系统研究了不同盐分浓度下杠柳叶片生理参数的光响应过程,分析确定维持较高水分利用效率和光能利用率的适宜盐分浓度及光照强度范围,以期对杠柳应用于盐碱地资源开发利用提供重要的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料采集与培养

2010年在山东沿海地带采集杠柳种子,自然风干后,选取饱满、大小均匀的种子,于  $4 \text{ }^\circ\text{C}$  下低温保存。于2011年3月,种子经  $0.1\% \text{ HgCl}_2$  消毒,蒸馏水冲洗数次后,播种于装有沙土的塑料盆中(盆高  $40 \text{ cm}$ ,直径  $30 \text{ cm}$ ,盆底有孔,土壤为当地林中的黄绵土)。每盆播种 10 粒,共种 30 盆。播种后于玻璃温室中培养,自然光照,昼夜温度分别为  $(25 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  和  $(15 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $(50 \pm 5)\%$ 。播种后定期养护,待出苗后,每盆定苗 3 株,培养至 8 月份从中选取 15 盆进行盐胁迫试验<sup>[9]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验设置 5 个  $\text{NaCl}$  浓度处理组,即  $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (对照,CK)、 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (轻度盐分胁迫,LS)、 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (中度盐分胁迫,MS)、 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (重度盐分胁迫,SS)和  $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  (极度盐分胁迫,ES)。每一处理组设 3 次重复,盐处理液为  $1/2$  Hoagland's 营养液( $\text{pH} 6$ )和分析纯  $\text{NaCl}$  配制<sup>[10]</sup>;对照组浇灌等量的  $1/2$  Hoagland's 营养液。每隔 3 d 灌溉 1 次处理液,并使大量处理

液从盆底渗出,以交换基质中的积余盐。

### 1.3 测定指标及方法

盐胁迫处理 30 d(期间 CK、LS、MS 组生长正常;SS、ES 组长势较弱)后,在晴朗天气选取杠柳幼苗中部 6 片生长健壮的成熟叶片,用 CID 型便携式光合作用仪(英国 PPS 公司),使用大气  $\text{CO}_2$  浓度,利用人工光源控制光合有效辐射强度( $PAR$ ),设定光强梯度  $2\ 000$ 、 $1\ 800$ 、 $1\ 600$ 、 $1\ 400$ 、 $1\ 200$ 、 $1\ 000$ 、 $800$ 、 $600$ 、 $400$ 、 $200$ 、 $100$ 、 $50$ 、 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在每个光强梯度测定时间为  $120 \text{ s}$ ,测定各处理组杠柳叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_n$ )、气孔导度( $G_s$ );由仪器自动记录各生理参数,每个叶片重复 3 次,取平均值,每个处理组测定  $1 \text{ d}$ <sup>[9,11]</sup>。

### 1.4 数据处理

使用 SPSS 18.0 及 Excel 软件对各项生理参数进行统计并采用非直角双曲线模型拟合光合作用的光响应曲线方程(1),结合  $PAR$  在  $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  区间的直线回归方程(2),全面分析杠柳盐分胁迫下光响应曲线的相关参数<sup>[11-12]</sup>。

$$P_n = \frac{\Phi PAR + A_{\max} - [(\Phi PAR + A_{\max})^2 - 4\Phi PAR k A_{\max}]^{1/2}}{2k} - R_d$$

(非直线双曲线模型) (1)

$$P_n = aPAR + b$$

(线性回归模型)(a、b 为参数) (2)

式中, $P_n$  为净光合速率, $PAR$  为光合有效辐射, $A_{\max}$  为最大净光合速率, $\Phi$ 、 $K$ 、 $R$  分别为表观量子效率、光响应曲线曲角、暗呼吸速率;并对  $P_n$ - $PAR$  曲线的初始部分( $PAR < 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )进行线性回归,结合光响应曲线可求得表观量子效率( $\Phi$ )、光补偿点( $LCP$ )、光饱和点( $LSP$ )等参数。叶片水分利用效率( $WUE$ )、光能利用效率( $LUE$ )用公式计算,即: $WUE = P_n/T_r$ , $LUE = P_n/PAR$ <sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐分胁迫下杠柳叶片净光合速率光响应特征

植物的  $P_n$  能较好地反映逆境下植物的生长状况。图 1 显示,各盐分胁迫处理杠柳叶片的  $P_n$  值随光合有效辐射( $PAR$ )增强的变化趋势相同,即快

速上升到最大值后又缓慢下降,且处理组间的  $P_n$  值始终表现为 LS( $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 处理最大, CK( $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 次之,其后依次为 MS( $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )、SS( $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和 ES( $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 处理。PAR 在  $0 \sim 1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理组杠柳的  $P_n$  值均随 PAR 的增加而显著上升。其中,在  $\text{PAR} < 50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理组的  $P_n$  值增长速率相近;当 PAR 在  $50 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,LS 处理的  $P_n$  值增长明显较快且速率与 CK 相近,而 MS、SS 和 ES 处理的  $P_n$  值增长速率缓慢;当 PAR 在  $200 \sim 1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理组的  $P_n$  值差异越来越大,且对 PAR 变化响应明显。PAR 在  $1\,200 \sim 2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理组杠柳的  $P_n$  响应曲线变化比较平稳,一直维持在较高水平上,表明此时已达到光饱和点。

综上所述, $0 \sim 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐分浓度可明显促进杠柳的光合作用效率,超过  $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  盐分浓度对杠柳的光合作用将产生抑制,并随着盐浓度的增大其抑制作用越明显。同时,杠柳叶片光合作用对光强的适应范围较广,PAR 在  $1\,200 \sim 2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  均能获得较高的光合作用效率。

## 2.2 盐分胁迫下杠柳叶片蒸腾速率的光响应特征

如图 2 所示,各盐处理组杠柳叶片  $T_r$  随 PAR 增大而升高,且变化趋势相同,处理组之间始终表现出随盐胁迫强度增加而降低的规律。其中,PAR  $< 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,以 LS 处理的  $T_r$  最高,PAR  $> 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时以 CK 的  $T_r$  最高。当 PAR  $> 1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,各处理组的  $T_r$  值均达到最大并趋于平稳,表明当 PAR 大于  $1\,200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,杠柳光合速率达到光饱和点,并开始出现光抑制,气孔部分关闭, $T_r$  增加不再明显。可见,随着光照强度的增大,会引起杠柳叶片蒸腾失水增多;而随着盐分浓度的增大,导致杠柳根部吸水困难;同时,该研究认为此蒸腾过程中杠柳叶片水分不断散失,其细胞内盐分浓缩,影响了液泡的水势,植物通过胞内信号转导机制作用于气孔,其作用程度与土壤盐分浓度有关,从而出现以上试验结果。

## 2.3 盐分胁迫下杠柳叶片气孔导度的光响应特征

气孔是植物与外界进行气体交换的最重要通道,植物通过调节气孔的开闭程度调节植物的光合作用与蒸腾作用的平衡<sup>[14]</sup>。由图 3 得知,各盐分处理组叶片  $G_s$  在 PAR  $< 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  下的增长速率缓慢,而在 PAR 为  $200 \sim 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内,适合杠柳光反应阶段对光照强度的需

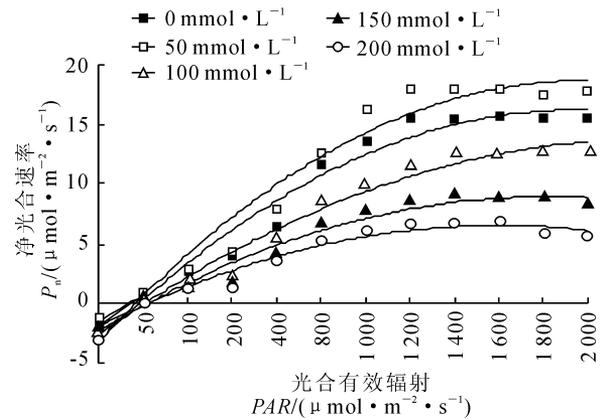


图 1 不同盐胁迫浓度下杠柳净光合速率光响应的实测值与拟合曲线

Fig. 1 Observed value and fitted light response curves of *P. sepium* Bunge  $P_n$  under salt stress

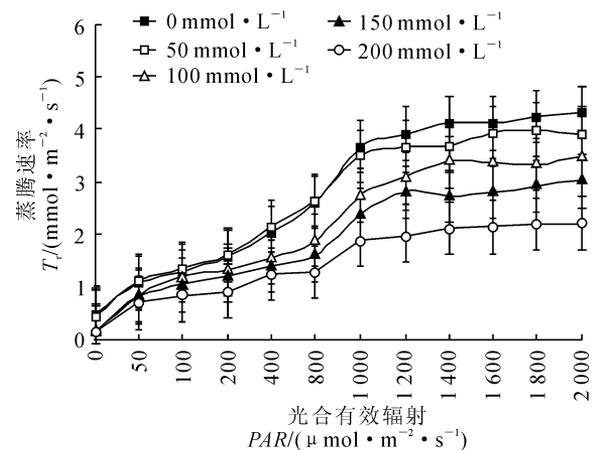


图 2 不同浓度盐分胁迫下杠柳叶片蒸腾速率光响应曲线  
Fig. 2 Light response characteristics of  $T_r$  in leaves of *P. sepium* Bunge under salt stress

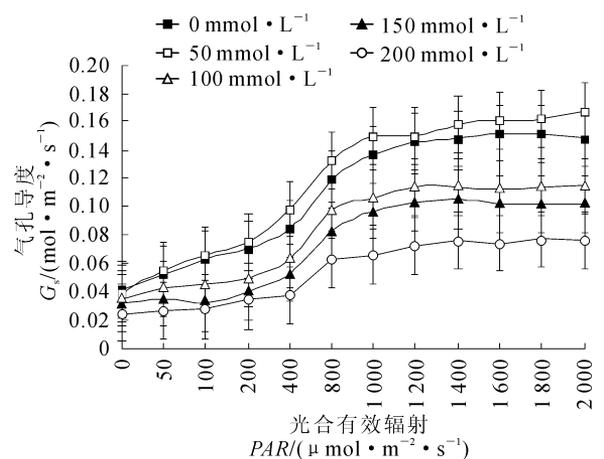


图 3 不同浓度盐分胁迫下杠柳叶片气孔导度光响应曲线  
Fig. 3 The light response characteristics of  $G_s$  in leaves of *P. sepium* Bunge under salt stress

要,同时加强了暗反应消耗  $\text{CO}_2$  量增多,通过信号转导机制进而表现出叶片调节气孔,增大  $G_s$  来加速空气中  $\text{CO}_2$  向叶肉细胞的扩散,以满足光合需要;当  $\text{PAR}$  大于  $1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,各处理组  $G_s$  的光响应曲线基本稳定,表明此时杠柳已达到光饱和点;杠柳各盐分处理组叶片  $G_s$  的光响应曲线表现为先增大后稳定趋势,与  $P_n$ 、 $T_r$  的光响应特征表现出一致性。实验发现  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐分浓度下相同  $\text{PAR}$  下杠柳的  $G_s$  较常态有所提高,表明轻度盐分胁迫有利于杠柳  $G_s$  的增强,这正是杠柳耐盐性的表现;而超过  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐分浓度时杠柳的  $G_s$  较常态下降,并随盐分浓度增大,下降趋势越明显,表明杠柳的耐盐性具有局限性。

#### 2.4 盐分胁迫下杠柳叶片水分利用效率的光响应特征

植物水分利用效率表示消耗单位水量所能固定的  $\text{CO}_2$  量,是衡量植物生长的重要指标之一,提高水分利用效率是提高作物产量的重要途径<sup>[8]</sup>。由图 4 可见, $\text{PAR}$  在  $0\sim 800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,各盐分处理组杠柳叶片的  $WUE$  均呈明显上升趋势; $\text{PAR}$  在  $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,LS 处理杠柳叶片的  $WUE$  明显高于其它各组,ES 盐分处理杠柳叶片的  $WUE$  在整个光响应过程始终最低。 $\text{PAR}$  在  $800\sim 1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时各处理组杠柳叶片的  $WUE$  均有所下降,但 LS 盐分处理杠柳叶片的  $WUE$  下降幅度最小。当  $\text{PAR}>1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,各处理组杠柳叶片的  $WUE$  基本趋于平稳。以上分析表明:随着光照强度的增加,各处理组杠柳叶片的  $WUE$  均表现出先增大后缓慢降低最后基本稳定的趋势,光照强度  $\text{PAR}$  在  $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,盐分浓度在  $0\sim 50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内,杠柳表现出最高的水分利用效率。

#### 2.5 盐分胁迫下杠柳叶片光能利用效率的光响应特征

光能利用效率是衡量植物生长状况的重要指标之一,随着  $\text{PAR}$  逐渐的增加,各盐分处理组杠柳叶片的  $LUE$  均呈现明显的单峰曲线(图 5)。其中, $\text{PAR}$  在  $50\sim 100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,各处理组叶片  $LUE$  均呈直线上升趋势;当  $\text{PAR}$  为  $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,CK、LS、MS 盐分处理的  $LUE$  均达到峰值,并以 LS 盐分处理的  $LUE$  始终最高,其中 LS 盐分处理的  $LUE$  比 CK 提高 11.43%,而 MS 和 SS 盐分处理的  $LUE$  分别比 CK 降低 25.71% 和 77.14%;MS 和 ES 处理叶片的  $LUE$  在  $\text{PAR}$  为

$400\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时达到峰值。以上分析可知,轻度盐分胁迫较常态条件下可提高杠柳叶片的光能利用率,但盐浓度超过  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  以后,杠柳的光能利用率随盐浓度的增加而越来越低。

#### 2.6 盐胁迫对杠柳叶片光合特征参数的影响

##### 2.6.1 光响应曲线特征参数

不同盐分浓度下杠柳叶片  $P_n$  光响应曲线(图 1)的模拟方程的决定系数  $R^2$  均在 0.916 以上,说明模型可以较准确地模拟杠柳叶片  $P_n$  的光响应过程。据此求得各盐分胁迫处理组杠柳叶片的光响应曲线特征参数的模拟值(表 1),它们在不同盐分浓度下存在差异。

杠柳叶片的最大净光合速率( $A_{\text{max}}$ )在  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐分浓度时达到最高值,此时相应的表观量子效率( $\Phi$ )也最高;CK 的  $A_{\text{max}}$  值仅次于  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  处理;超过  $50\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  盐分浓度时,随着盐

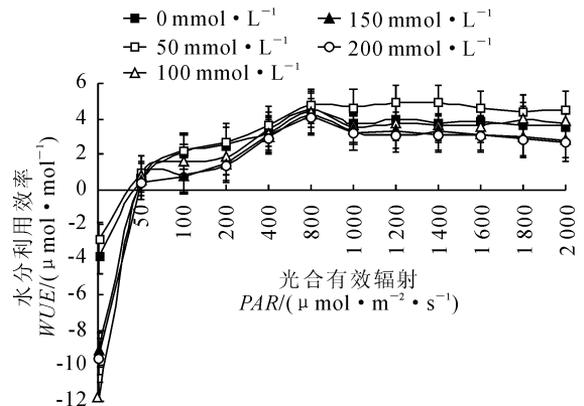


图 4 不同浓度盐分胁迫下杠柳水分利用效率光响应曲线  
Fig. 4 Light response of WUE in leaves of *P. sepium* Bunge under salt stress

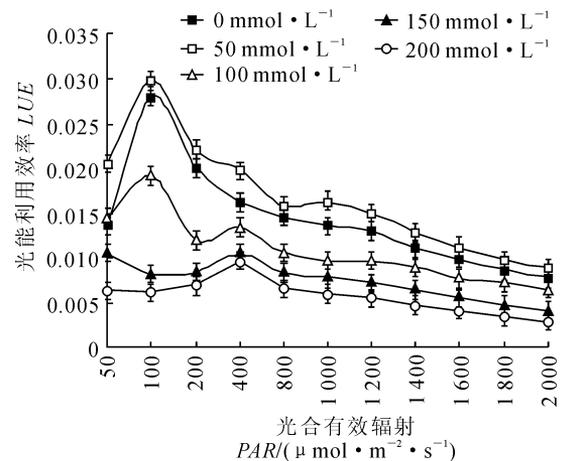


图 5 不同浓度盐分胁迫下杠柳光能利用率光响应曲线  
Fig. 5 Light response of LUE in leaves of *P. sepium* Bunge under salt stress

表 1 不同盐分浓度下杠柳叶片光响应曲线特征参数的模拟值

Table 1 Simulated value of characteristic parameters in light responses curves of *P. sepium* Bunge under different salt concentration

盐分浓度 Salt concentration /(mmol/L)	最大净光合速率 $A_{\max}$ /(\(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))	表观量子效率 $\Phi$ /(\(\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}\))	光补偿点 $LCP$ /(\(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))	光饱和点 $LSP$ /(\(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))
0	15.514	0.004	37.64	583.14
50	17.023	0.005	21.89	640.23
100	13.048	0.004	49.98	693.73
150	10.055	0.002	61.33	712.81
200	9.361	0.001	65.05	847.08

表 2 不同盐分浓度下杠柳叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $WUE$  和  $LUE$  平均值Table 2 The means of  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ ,  $WUE$  and  $LUE$  of *P. sepium* Bunge under different salt concentrations

盐分浓度 Salt concentration /(mmol/L)	净光合速率 $P_n$ /(\(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))	蒸腾速率 $T_r$ /(\(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))	气孔导度 $G_s$ /(\(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}\))	水分利用效率 $WUE$ /(\(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}\))	光能利用效率 $LUE$
0	13.712±3.274a	3.625±0.846a	0.135±0.023a	3.778±0.392a	0.011±0.003ac
50	15.787±3.685a	3.371±0.674ab	0.147±0.022a	4.655±0.551b	0.013±0.003a
100	10.687±2.734c	2.854±0.741bd	0.104±0.017b	3.755±0.331a	0.009±0.002cd
150	7.738±1.631b	2.457±0.621cd	0.093±0.017b	3.196±0.394c	0.006±0.002bd
200	5.793±0.919b	1.881±0.398c	0.067±0.013c	3.135±0.442c	0.005±0.002b

注:同列不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异。

Note: The different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level.

分浓度的增大其相应处理  $A_{\max}$  下降越明显。表明 50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分浓度下杠柳叶片对光能的利用效率较强,有利于杠柳干物质的积累,为其提高生物产量奠定了良好的物质基础,进而表现出一定的抗盐性。各盐胁迫处理组表观量子效率( $\Phi$ )值都小于理论上的最大量子效率(0.08~0.125 mol·mol<sup>-1</sup>);同时,各处理组杠柳叶片  $LCP$  在 21.89~65.05  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间变动,介于阴性植物( $LCP < 20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )与阳性植物(50  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} < LCP < 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )之间。超过 50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分浓度时,杠柳叶片相应的  $LCP$  和  $LSP$  都较 CK 有所提高,并随盐分浓度增大其增加幅度越明显,表明超过 50 mmol·L<sup>-1</sup> 的盐分浓度明显影响了杠柳正常的生长,迫使其通过增强呼吸速率来应对外界的恶劣生长环境;而 50 mmol·L<sup>-1</sup> 的盐分浓度却使杠柳的  $LCP$  和  $LSP$  都较 CK 有所下降,表明该盐分浓度对杠柳的正常生长有积极意义,促使呼吸速率降低,光合同化能力强,利于营养累积。可见,随着土壤盐分变化,杠柳幼苗叶片的光合作用对光照强度表现出一定的适应性和可塑性。

**2.6.2 光合生理参数** 表 2 显示,50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分处理杠柳叶片的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $LUE$  均值与对照(0 mmol·L<sup>-1</sup>)都无显著差异,而  $WUE$  均值显著

高于对照;100 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分处理的  $WUE$ 、 $LUE$  均值与对照无显著差异,但其他生理参数指标都显著低于对照;150 和 200 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分浓度处理的所有光合生理参数均显著低于对照。综合以上分析可将盐分浓度处理归为 I(0 和 50 mmol·L<sup>-1</sup>)、II(100 mmol·L<sup>-1</sup>)和 III(150 和 200 mmol·L<sup>-1</sup>) 3 类,并以 I 类生理参数均值最高,II 类次之,III 类最低。同时,比较各生理参数均值得知,50 mmol·L<sup>-1</sup> 盐分浓度有利于杠柳的正常生长,各生理参数均表现出最大值,进一步说明杠柳为耐盐碱植物。

### 3 讨论

一般情况下,盐分胁迫会抑制植物的光合作用,且盐分浓度越高,作用时间越长,抑制程度越大<sup>[10,14]</sup>。在本实验 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  光照强度下,轻度盐分胁迫处理(50 mmol·L<sup>-1</sup>)杠柳的  $P_n$  比对照组高出 23.43%,而中度和重度盐分胁迫处理(100 和 150 mmol·L<sup>-1</sup>)杠柳的  $P_n$  却分别比对照组降低 17.18%和 34.22%,这表明杠柳在轻度盐分胁迫下叶片的光合活动受到促进,但表现出盐碱适应局限性。许多研究表明,植物的根对盐分的胁迫较敏感。马建华等研究表明根对盐的过滤作用是最重要的拒盐机制,从而降低盐分对植物的伤害<sup>[15]</sup>。相同光照强度下杠柳各处理组的蒸腾速率

均低于对照组,认为杠柳的气孔蒸腾作用对土壤盐分浓度敏感,通过降低蒸腾速率来减少体内水分散失,缓解体内盐分浓缩程度以减轻对细胞自身的伤害,从而能更好地适应生长环境。

气孔导度影响植物的光合作用、呼吸作用及蒸腾作用。在高浓度盐胁迫下,植物通过信号转导机制促使气孔导度减少或部分关闭,从而减少植物叶片的蒸腾作用,但气孔的关闭也影响了植物叶片内的气体与外界气体的交换。但是本实验中杠柳叶片的光合速率在轻度盐胁迫下却增加,这也说明了轻度盐胁迫并没有影响叶片的光合机制。同时,轻度盐胁迫下杠柳的水分利用率高于对照组,说明杠柳对一定的盐胁迫具有适应性,即杠柳具有一定的耐盐性。有研究表明土壤在没有达到相对较高的盐浓度时,植物的水分利用效率不会被抑制,甚至

在较低盐胁迫时还会被促进。杠柳在盐胁迫下光合速率的变化也表现出这一特点,与王远志有关盐胁迫对阳桃光合特性影响的研究结果一致<sup>[10]</sup>。

综上所述,轻度的盐分胁迫(小于 50 mmol · L<sup>-1</sup>)可以提高杠柳叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $WUE$  和  $LUE$ ,而过度的盐分胁迫对杠柳的  $T_r$  有抑制作用,并随着盐分浓度的增加其抑制作用愈强烈;维持杠柳正常生长的土壤盐分浓度小于 50 mmol · L<sup>-1</sup>,最佳  $PAR$  为 1 200~2 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;而保持杠柳最大水分利用效率和光能利用效率的光照强度分别为 800 和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。杠柳随着土壤盐度和光照强度的不同,有规律地调节自身的生理活动实现对光照资源的充分利用,其光合生理参数的光响应值表现阈值表明其对土壤盐分和光强的适应能力较强,但有局限性。

#### 参考文献:

- [1] LI SH P(李树朋),XIA J B(夏江宝),WU R Y(吴仁焯),*et al.* The response of *Honeysuckle* intercellular CO<sub>2</sub> concentration to light and temperature under salt stress[J]. *Subtropical Agriculture Research* (亚热带农业研究),2013,9(2):102-105(in Chinese).
- [2] CHEN Y H(陈银华),ZHU H L(朱红林),SHA A H(沙爱华),*et al.* Research advance in plant tolerance to salinity stress[J]. *Natural Science Journal of Hainan University* (海南大学学报自然版),2007,25(1):11-13(in Chinese).
- [3] LUO J R(罗建蓉),QIAN J F(钱金猷). Advances of research on *Periploca* plants[J]. *Journal of Dali University* (大理学院学报),2006,5(8):54-58(in Chinese).
- [4] WANG L(王 磊),YIN ZH Q(殷志琦),ZHANG L H(张雷红). Chemical constituents from root barks of *Periploca sepium*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medic* (中国中药杂志),2007,32(13):1 300-1 302(in Chinese).
- [5] AN Y Y(安玉艳),LIANG Z S(梁宗锁),HAO W F(郝文芳). Growth and physiological responses of the *Periploca sepium* Bunge seedlings to drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报),2011,31(3):716-725(in Chinese).
- [6] MA CH(马 闯),ZHANG W H(张文辉),LIU X CH(刘新成). Effects of iso-osmotic potential salt and water stress on the seed germination of *Periploca sepium* Bge[J]. *Bulletin of Botanical Research* (植物研究),2008,28(4):465-470(in Chinese).
- [7] AN Y Y(安玉艳),HAO W F(郝文芳),GONG CH M(龚春梅). Effects of drying and re-watering on the photosynthesis and active oxygen metabolism of *Periploca sepium* seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报),2010,21(12):3 047-3 055(in Chinese).
- [8] YANG CH H(杨朝瀚),WANG Y Y(王艳云),ZHOU Z F(周泽福),*et al.* Response of gas exchange parameters of *Periploca sepium* Bunge to soil water content in Loess Plateau[J]. *Forest Research* (林业科学研究),2006,19(2):231-234(in Chinese).
- [9] XIA J B(夏江宝),ZHANG SH Y(张淑勇),ZHANG G C(张光灿),*et al.* Effects of soil moisture on the gas-exchange parameters and water use efficiency of *Lonicera japonica* Thunb. [J]. *Forest Research* (林业科学研究),2008,21(6):803-807(in Chinese).
- [10] LI T(李 田),SUN J K(孙景宽),TIAN J Y(田家怡),*et al.* Photosynthesis characteristics and antioxidant enzyme activity in *Periploca sepium* seedlings under drought stress[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报),2010,30(12):2 466-2 471(in Chinese).
- [11] XIA J B(夏江宝),ZHANG G C(张光灿),LIU J T(刘京涛). Responses of photosynthetic and physiological parameters in *Campsis radicans* to soil moisture and light intensities[J]. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报),2008,30(5):13-18(in Chinese).
- [12] LIU Y F(刘宇锋),XIAO L T(萧浪涛),TONG J H(童建华). Primary application on the non-rectangular hyperbola model for photosynthetic light-response curve[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (农业基础科学),2005,21(8):76-79(in Chinese).
- [13] ZHANG SH Y(张淑勇),ZHOU Z F(周泽福),XIA J B(夏江宝),*et al.* The responses of *Euonymus fortunei* var. *radicans* Sieb. leaf photosynthesis to light in different soil moisture[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报),2007,27(12):2 514-2 521(in Chinese).
- [14] 张继澍. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:414-414.
- [15] WANG J L(王建林),YU G R(于贵瑞),WANG B L(王伯伦),*et al.* Response of photosynthetic rate and stomatal conductance of rice to light and CO<sub>2</sub> concentration in Northern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报),2005,29(1):16-25(in Chinese).