

# 不同浇水量对毛乌素沙地沙柳幼苗气体交换过程 及其光化学效率的影响

肖春旺 周广胜

(中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 北京 100033)

**摘要** 利用毛乌素沙地优势灌木沙柳(*Salix psammophila*)幼苗, 研究气体交换及其PS II的光化学效率对4种浇水量响应。结果表明, 不同浇水量明显影响沙柳幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间CO<sub>2</sub>浓度和叶片温度日变化动态; 除幼苗叶片温度随着浇水量的增加而降低外, 其它以上因素均随浇水量的增加而增大。浇水量少时, 幼苗净光合速率明显有“午睡”现象, 而充足浇水能有效消除幼苗净光合速率的“午睡”现象; 浇水量增加降低了沙柳幼苗光补偿点, 提高了饱和光强和表观量子效率; 浇水量显著影响幼苗的PS II光化学效率, 随着浇水量减少, 幼苗的最大荧光、可变荧光、最大荧光比和最大光化学效率逐渐减小。相关分析反映了在不同施水量处理下, 环境因子光合有效辐射、大气温度、大气饱和水汽压差及其生理变量气孔导度、叶片温度、胞间CO<sub>2</sub>浓度均显著影响幼苗净光合速率。

**关键词** 浇水量 毛乌素沙地 沙柳 气体交换 光化学效率

## EFFECT OF DIFFERENT WATER SUPPLY ON GAS EXCHANGE PROCESSES AND PHOTOCHEMICAL EFFICIENCY IN *SALIX PSAMMOPHILA* SEEDLINGS IN THE MAOWUSU SANDLAND

XIAO Chun-Wang and ZHOU Guang-Sheng

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100033)

**Abstract** The effect of four different water supply levels on the gas exchange processes and photochemical efficiency in PS II were investigated in seedlings of *Salix psammophila*, a dominant shrub in the Maowusu arid sandy region. Increasing water supply levels had a strong influence on diurnal changes in photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, intercellular CO<sub>2</sub> concentration (all increasing) and leaf temperature (decreasing) of the seedlings. The photosynthetic rate of seedlings showed a strong midday depression under low water supply but not under full water supply. Increasing water supply decreased the light compensation point and enhanced the saturation light and apparent quanta efficiency. Water supply significantly influenced photochemical efficiency in PS II; maximal fluorescence, variable fluorescence, maximal fluorescence ratio and maximal photochemical efficiency all decreased with declining water supply. Correlation analysis showed that meteorological variables, such as photosynthetic active radiation, air temperature, air saturated water vapour pressure difference, and physiological variables, such as stomatal conductance, leaf temperature, intercellular CO<sub>2</sub> concentration, significantly affected the photosynthetic rates of the seedlings under varying water supply conditions.

**Key words** Water supply, Maowusu sandland, *Salix psammophila*, Gas exchange, Photochemical efficiency

自工业革命以来, 由于人类活动日益加剧, 使得 大气中的温室气体大幅度上升, 其中CO<sub>2</sub>浓度从原

收稿日期: 2000-09-05 接受日期: 2001-03-22

基金项目: 国家重点基础研究专项经费(G1999043407)、中国科学院知识创新工程项目(KSCX 2-1-07)和基金委“九、五”重点项目(49835010)

在论文完成过程中, 得到了张新时导师、董鸣、郑元润、蒋高明等博士及内蒙古鄂尔多斯林业局广大同志的帮助, 在此一并致谢!

E-mail: zwxiao@public 2. east. net. cn

来的  $280 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  升高到现在的  $360 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 从而造成气候全球性变化, 而温度和降水等气候因素的全球变化, 必然影响到现存的陆地生态系统分布格局和生产力 (Graham & Erimm, 1990; Tyree & Alexander, 1993; Dahlman, 1993; Houghton *et al.*, 1990)。毛乌素沙地处在我国北部沙区中部, 总面积  $4 \cdot 10^4 \text{ km}^2$ 。它的发展、历史变迁及现实状况, 很大程度代表中国半干旱、干旱沙区中人类活动与自然环境间相互关系中的许多典型问题, 特别是水分问题 (张新时, 1994; 姚洪林等, 1992)。同时, 毛乌素沙区生态系统以灌木为主, 其中沙柳 (*Salix psammophila*) 是优势灌木 (董学军等, 1997)。过去对自然状态下的沙柳叶水势、蒸腾速率、光合速率等光合水分生理特征以及群落特征进行了一些研究 (董学军等, 1994; 1997; 董学军, 1998; Jiang & He, 1999; 李新荣等, 1999)。而有关水分变化, 尤其干旱对该种的光合生理及其光化学效率的研究未见报道, 在干旱环境下, 不同植物所表现出的光合生理以及光化学效率的差异对理解植物适应干旱环境方式具有重要意义。目前国内外已报道了大量这方面工作 (许大全等, 1992; Epron *et al.*, 1993; Damesin & Rambal, 1995; Save *et al.*, 1995; Methy *et al.*, 1996; Torrecillas *et al.*, 1999; Luquez *et al.*, 1997; Filella *et al.*, 1998; 杨敏生等, 1999)。因此, 本研究是以沙柳幼苗为对象, 采用人为控制浇水法, 来探讨沙柳幼苗气体交换过程以及光化学效率对水分变化的响应策略, 为进一步了解毛乌素沙地沙柳生态系统变化过程提供科学依据, 也为沙柳幼苗栽培提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地点与物种

研究地点设在中国科学院植物研究所内蒙古伊克昭盟鄂尔多斯沙地草地生态研究定位站 (新站) 院内, 地理位置  $39^{\circ}29.66' \text{ N}$ ,  $110^{\circ}11.47' \text{ E}$ , 海拔 1295 m。年均温  $6.0 \sim 8.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最冷月 (1月) 均温  $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最热月 (7月) 均温  $22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年降水量 358.3 mm, 且 2/3 以上的降水集中于 6~9 月。该地区是荒漠-草原、草原-森林过渡地带。土壤以淡栗钙土和沙性淡栗钙土为主。详细资料见张新时 (1994) 文。

沙柳是杨柳科柳属落叶丛生中生性灌木或小乔木, 高可达 2~4 m, 单叶, 叶条形。主要分布于内蒙古、新疆、西藏、陕西, 具有良好的防风固沙性能, 可作为防护林的重要组成部分, 也是毛乌素沙地优势

灌木物种之一。

### 1.2 实验材料及其幼苗处理

1 年生沙柳幼苗来自鄂尔多斯生态站附近沙丘幼苗共生群。1999 年 5 月 3 日, 分别选取生长良好、大小一致的 80 株幼苗, 后幼苗被随机分成 4 组, 每组各 20 株, 后将每组幼苗分别植入 4 个深 67 cm、宽 1.5 m、长 2 m 的长方体水泥沙池 (下部有 1 个可控出水管道) 中。水泥池顶部挂有防水布阻碍自然降水, 四周通风, 以保持其它自然因子接近自然状况。每个水泥池装有 60 cm 深的沙土, 沙土来自附近沙丘。

沙柳幼苗在 4 种水分处理下, 培养 105 d, 即 5 月 24 日开始, 至 9 月 5 日结束。4 种水分处理为: 每种浇水处理的总浇水次数均相同, 且每次浇水均在同一天下午内完成, 即从 5 月 24 日下午 5:00~6:00, 完成第一次浇水, 后每隔 2 d 继续下一次浇水, 累积一共 35 次浇水, 但 4 种浇水处理的每次浇水量分别为 4.5 mm、9.0 mm、13.5 mm 和 18.0 mm, 故累积浇水总量分别为 157.5 mm、315.0 mm、472.5 mm 和 630.0 mm, 它们分别相当于温带典型荒漠地带、温带典型草原地带、温带草甸草原地带和温带落叶阔叶林地带在生长季节内的降水总量。实验期间, 白天天晴将防水布全打开, 阴天和夜晚将防水布遮盖, 以防自然降水; 同时进行等质精细管理, 并经常除草和防除病虫害。

### 1.3 测量方法

1999 年 7 月 31 日, 每种浇水量处理随机选取 3~5 株幼苗, 用 LCA4 型便携式分析仪对其中上位成熟完好的 5~6 片叶进行以下光合生理因子以及环境因子日进程的测定: 净光合速率 ( $P_n$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 蒸腾速率 ( $E$ ,  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 气孔导度 ( $g_s$ ,  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 叶片温度 ( $T_l$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), 胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 以及光合有效辐射 ( $\text{PAR}$ ,  $\mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 温度 ( $T_a$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), 水汽饱和水汽压差 ( $\Delta e_w$ , mbar)。同时, 利用净光合速率与蒸腾速率的比值, 求出水分利用率 ( $\text{WUE}$ ,  $\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$ )。

1999 年 8 月 6 日在 10:00 和 15:00, 分别对每种浇水量处理的幼苗中上位成熟完好叶片进行多层纱布均匀遮光 (郭志华等, 1999), 直到  $\text{PAR}$  为 0, 每一层纱布遮光时间均为 40 s, 总遮光时间约为 12 min。利用 LCA4 型便携式分析仪测得从高到低一系列  $\text{PAR}$  下叶片的  $P_n$ 。根据弱光下的  $\text{PAR}$  和  $P_n$  数据, 进行线性回归分析, 并算出光补偿点 ( $\text{LCPs}$ ,

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )和表观量子效率(AQY,  $\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )。同时利用光响应曲线判断出饱和光强(SL,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

1999年7月23日13:00~14:00,从每一浇水处理随机选取5株幼苗,用植物效能计(PEA, UK)测定幼苗PS I的初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、可变荧光( $F_v$ )、最大荧光时间( $T_m$ )、最大荧光比( $F_v/F_0$ )和最大光化学效率( $F_v/F_m$ )。

#### 1.4 数据处理

利用SPSS统计软件进行线性回归分析、相关分析和方差分析(卢纹岱等,1997)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气主要因子日变化

7月31日,毛乌素光合有效辐射从8:00( $18.2 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )迅速上升,10:00几乎达到最大值( $2136 \mu\text{mol photons} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),之后缓慢下降,到17:00后迅速下降,曲线呈明显单峰型(图1A)。大气温度也是从8:00( $21.8^\circ\text{C}$ )后迅速升高,到14:00达到最大值( $41.7^\circ\text{C}$ ),之后下降,曲线呈单峰型(图1B)。饱和水汽压差从早晨( $12.5 \sim 16.9 \text{ mbar}$ )一直上升,到14:00达最大值( $66.6$

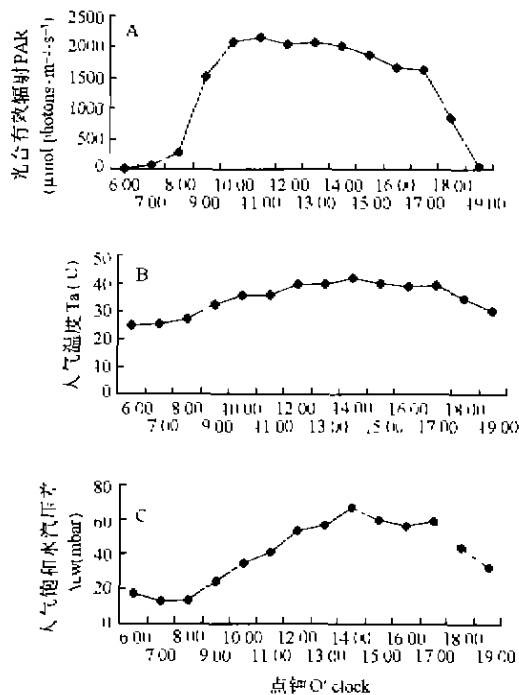


图1 毛乌素大气因子在1999年7月31日的日变化

Fig. 1 The diurnal changes of meteorological variables in Maowusu on 31 July, 1999

PAR, Photosynthetic active radiation; Ta, Air temperature  
 $\Delta_{sw}$ , Air saturated water vapour pressure difference

mbar),之后几乎呈下降趋势(图1C)。

### 2.2 不同浇水量对幼苗气体交换日变化的影响

不同浇水量的沙柳幼苗净光合速率 $P_n$ 日变化有很大差异(图2A)。随着浇水量增大, $P_n$ 逐渐增大,且日变化曲线逐渐从双峰型转变成偏单峰型。其中157.5 mm处理的幼苗 $P_n$ 曲线在10:00和15:00各有1个峰值,上午的峰值高于下午的峰值,在双峰之间,大约12:00有1个明显低谷。515 mm处理的幼苗 $P_n$ 曲线在12:00有1个弱谷,显然不如157.5 mm处理的幼苗低谷明显。172.5 mm和630.0 mm处理的幼苗 $P_n$ 曲线大体一致,曲线从6:00迅速上升到10:00,之后缓慢降低,到18:00后迅速下降。从以上结果可知,157.5 mm处理的幼苗光合作用有明显的“午睡”现象,显然受到很强的生理抑制作用。浇水量的增大能有效地消除幼苗“午睡”状况。当然,水分充足适应的幼苗 $P_n$ 曲线并非随着有效光台辐射同步变化,而是从10:00就开始下降,说明水分充足适应的沙柳幼苗其光合作用在中午期间仍受到一定的生理抑制作用。很多植物都表现出 $P_n$ “午睡”现象(Hodges, 1967; Schulze, 1986; 许大全, 1990; 张振贤等, 1994),造成其原因是多种的,主要是受到气孔限制、水分胁迫和高光强等。

不同浇水量处理的沙柳幼苗蒸腾速率 $E$ 日变化具有明显差异(图2B)。随着浇水量增大, $E$ 也逐渐增大,且 $E$ 日变化曲线从弱双峰型转变为正单峰型。其中157.5 mm处理的幼苗 $E$ 值最低,且在10:00和14:00各有1个弱峰,且前峰小于后峰,而在13:00有个弱谷。这表明幼苗受到明显水分胁迫。其它3种浇水量处理的幼苗 $E$ 日变化曲线十分相近,大致从6:00一直上升到14:00,之后下降。

不同浇水量处理的沙柳幼苗的气孔导度 $g_s$ 有显著差异(图2C)。随着浇水量的增大, $g_s$ 逐渐增加。4种浇水量的幼苗 $g_s$ 日变化曲线格局大体一致,8:00~9:00后,逐渐下降,尤其低浇水处理下降最显著。

不同浇水量对沙柳幼苗的胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$ 有一定影响(图2D)。虽然随着浇水量的增大, $C_i$ 有所增大。但4种浇水量的 $C_i$ 日变化曲线格局较一致,几乎从6:00开始逐渐下降,到17:00达最低值,之后迅速回升。

不同浇水量的沙柳幼苗之间叶片温度 $T_l$ 日变化有明显差异(图2E)。9:00以后,随着浇水量的增大, $T_l$ 逐渐降低。

不同浇水量处理的沙柳幼苗的水分利用率 WUE 日变化差异不明显(图 2 F)。4 种浇水量的幼苗 WUE 曲线格局较相似,6:00 开始迅速上升,9:00 后,尤其中午,明显下降。

### 2.3 不同浇水量的幼苗净光合速率的影响因子分析

植物的光合作用不仅受到诸多环境因子,如光合有效辐射 PAR、大气温度  $T_a$ 、大气饱和水汽压差  $\Delta e_w$  等的影响,还受到植物本身诸多生理变量,如气孔导度  $g_s$ 、胞间  $CO_2$  浓度  $C_i$ 、叶片温度  $T_l$  等的影

响。为了解在不同浇水量处理下影响沙柳幼苗净光合速率的环境生理变量,对 1999 年 7 月 31 日的各环境生理变量与净光合速率进行相关分析得到表 1,从表 1 可见,不同浇水量的净光合速率与环境因子光合有效辐射、大气温度、饱和水汽压差及其生理因素气孔导度、叶片温度、胞间  $CO_2$  浓度均达到显著性水平。其中胞间  $CO_2$  浓度与净光合速率呈负相关,其它环境生理因素与净光合速率均呈正相关。以上结果表明不同浇水量的沙柳幼苗净光合速率受

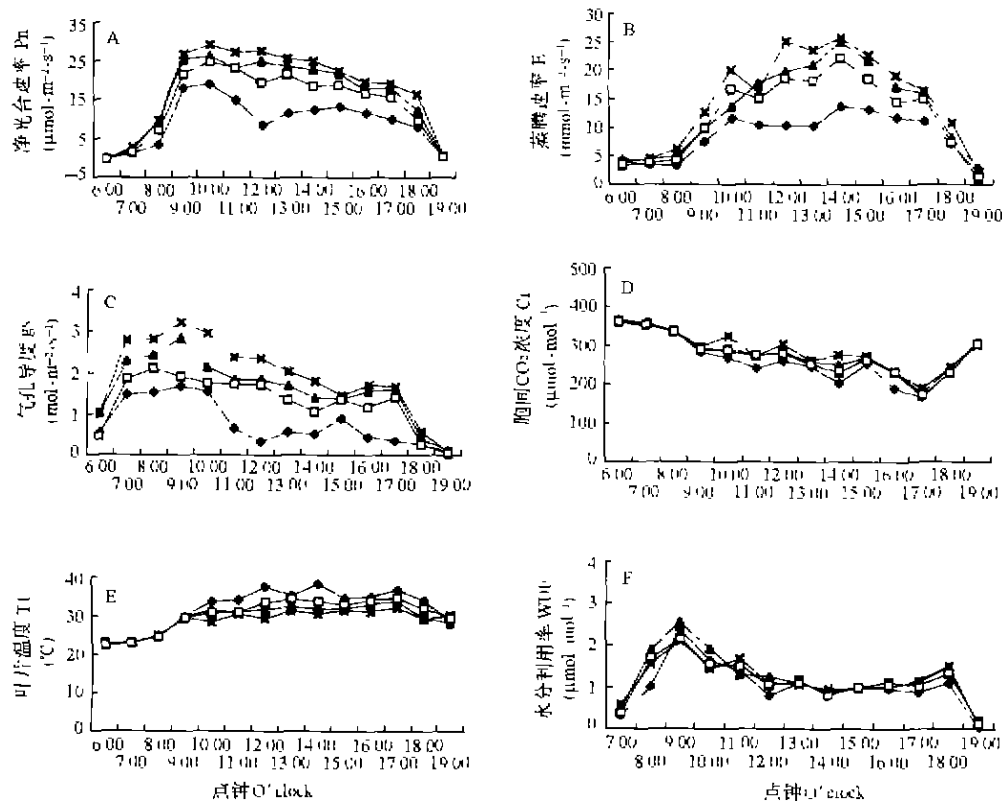


图 2 4 种浇水量的毛乌素沙柳幼苗的气体交换在 1999 年 7 月 31 日的日变化

Fig. 2 The diurnal changes in gas exchange of *S. psammophila* seedlings grown in four water supply treatments in Maowusu on 31 July, 1999

◆:157.5 mm □:315.0 mm ▲:472.5 mm ☆:630.0 mm

Tl: Leaf temperature Pn: Photosynthetic rate E: Transpiration rate

$g_s$ : Stomatal conductance WUE: Water use efficiency

表 1 4 种浇水量的沙柳幼苗净光合速率与环境因子及其它生理变量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between photosynthetic rate and meteorological variables and other physiological variables of *S. psammophila* seedlings grown in four water supply treatments

浇水量 Water supply	因素 Factor					
	气孔导度 $g_s$	胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i$	叶片温度 $T_l$	光合有效辐射 PAR	大气温度 $T_a$	水汽饱和水汽 压差 $\Delta e_w$
157.5 mm	0.865**	-0.561*	0.655*	0.870**	0.659*	0.464
315.0 mm	0.916**	-0.535*	0.706**	0.964**	0.773**	0.583*
472.5 mm	0.867**	-0.575*	0.808**	0.959**	0.796**	0.608*
630.0 mm	0.879**	-0.456	0.671**	0.959**	0.795**	0.610*

显著水平 Significant level \* :  $p < 0.05$  \*\* :  $p < 0.01$   $g_s, C_i, T_l$ : 见图 2 See Fig. 2 PAR,  $T_a, \Delta e_w$ : 见图 1 See Fig. 1

到环境生理诸多因素的影响。

2.4 不同浇水量对幼苗光补偿点、饱和光强和表观量子效率的影响

不同浇水量的沙柳幼苗光补偿点(LCPs)和饱和光强(SL)有明显不同(图3、表2)。随着浇水量的增加,幼苗的LCPs随之减小,SL逐渐增加。这些结果表明增加浇水量能够提高幼苗的光合能力。事实上630.0 mm的浇水量的沙柳幼苗生长非常迅速,本研究发

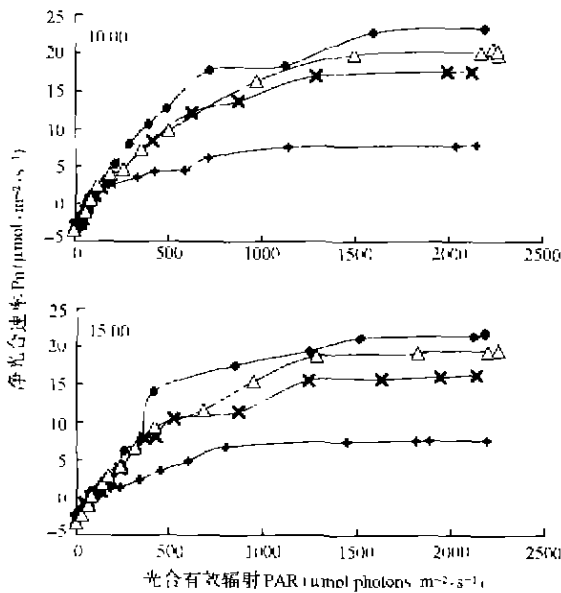


图3 4种浇水量的毛乌素沙柳幼苗在1999年8月6日10:00和15:00的光合响应曲线

Fig. 3 The light response of photosynthesis of *Salix psammophila* seedlings grown in four water supply treatments in Maowusu between 10:00 and 15:00 on 6 August, 1999

◆:630.0 mm △:472.5 mm ×:315.0 mm +:157.5 mm

表2 4种浇水量的沙柳幼苗在1999年8月6日10:00和15:00的光补偿点、饱和光强和表观量子效率

Table 2 Light compensation points (LCPs), saturation light (SL) and apparent quantum efficiency (AQY) of *S. psammophila* seedlings grown in four water supply treatments at 10:00 and 15:00 on 6 August, 1999

浇水量 Water supply	光补偿点 LCPs ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		饱和光强 SL ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		表观量子效率 AQY( $\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	
	10:00	15:00	10:00	15:00	10:00	15:00
157.5 mm	92	103	1441	503	0.0323	0.0210
315.0 mm	90	96	1289	1216	0.0373	0.0225
472.5 mm	79	96	1494	1292	0.0427	0.0384
630.0 mm	76	87	1591	1518	0.0419	0.0381

105 d 后幼苗高平均为 151 cm 左右,最高达 196 cm。另外,10:00~15:00,幼苗光补偿点具有增大趋势,而饱和光强有减小趋势,这反映了幼苗在下午可能受到生理抑制作用,这是因为下午温度增高、土壤中的含水量相对减少,可能导致叶片温度增高、气孔导度相对变小,从而影响光合作用。

不同施水量的沙柳的表观量子效率(AQY)也有明显差异。随着浇水量的增加,AQY 逐渐增大。这个结果表明增加浇水量有利于提高沙柳幼苗光合速率在低光时的上升速度和光合能力。另外,10:00~15:00,幼苗的AQY有减小趋势。但总的来说,沙柳幼苗的AQY基本符合自然条件下的其它植物的AQY值(0.03~0.05)。

2.5 不同浇水量对幼苗光化学效率的影响

浇水量对沙柳幼苗  $T_m$  影响不显著( $p > 0.05$ ),但却显著影响幼苗的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_m/F_0$  和  $F_v/F_m$  ( $p < 0.05$ ) (表3)。随着浇水量的减少,  $F_0$  而增大,而  $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_m/F_0$  和  $F_v/F_m$  却逐渐减少。其中,472.5 mm

表3 4种浇水量的沙柳幼苗在1999年7月23日中午的光化学效率特征

Table 3 Characteristics of photochemical efficiency of *S. psammophila* seedlings grown in four water supply treatments at noon on 23 July, 1999

浇水量 Water supply	$F_0$	$F_m$	$F_v$	$T_m$	$F_v/F_m$	$F_m/F_0$
157.5 mm	655.4 ± 16.9 <sup>a</sup>	2068.8 ± 70.98 <sup>b</sup>	1413.4 ± 59.7 <sup>b</sup>	334.2 ± 31.6	0.68 ± 0.006 <sup>c</sup>	3.16 ± 0.07 <sup>c</sup>
315.0 mm	565.8 ± 26.5 <sup>b</sup>	2198.9 ± 33.5 <sup>ab</sup>	1633.0 ± 19.3 <sup>b</sup>	316.4 ± 32.6	0.74 ± 0.009 <sup>b</sup>	3.91 ± 0.13 <sup>c</sup>
472.5 mm	358.2 ± 21.9 <sup>c</sup>	2025.2 ± 157.1 <sup>c</sup>	1672.0 ± 151.0 <sup>b</sup>	353.6 ± 56.5	0.82 ± 0.016 <sup>b</sup>	5.78 ± 0.46 <sup>b</sup>
630.0 mm	348.4 ± 10.5 <sup>c</sup>	2362.2 ± 40.4 <sup>c</sup>	2003.8 ± 33.5 <sup>c</sup>	280.6 ± 18.8	0.85 ± 0.003 <sup>b</sup>	6.80 ± 0.23 <sup>a</sup>
ANOVA	**	*	*	NS	*~	-*

表中数据为平均值±标准误差。Duncan 多重比较表明,具有相同字母的处理没达到显著性差异( $p < 0.05$ )。Data of the table represent average value ± standard error. Treatments with the same letters are not significantly different ( $p < 0.05$ ) according to Duncan multiple range test. NS, 无显著差异; No significant; \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . ANOVA, 方差分析; Analysis of variance

和 630.0 mm 浇水量的幼苗叶片  $F_v/F_m$  之间差异不显著,分别为 0.82 和 0.85,与很多植物的  $F_v/F_m$  相似(许大全等,1992)。而 157.5 mm 和 315.0 mm 浇水量的幼苗叶片  $F_v/F_m$  却显著低于 472.5 mm 和 630.0 mm 浇水量的幼苗叶片。这充分表明 157.5 mm 和 315.0 mm 浇水量的沙柳幼苗受到明显的光抑制现象。造成以上结果可能是因为随着浇水量的减少,逐渐加强了植物的水分胁迫,使得植物叶片气孔导度下降,进而影响了 PS II 的光量子电子传递和转换效率。Methy 等(1996)和 Filella 等(1998)得出以上类似结果。

### 3 结 论

不同浇水量明显影响沙柳幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间  $CO_2$  浓度和叶片温度日变化动态。浇水量的增加能有效增加幼苗净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $CO_2$  浓度,降低幼苗叶片温度。当少量水时,幼苗净光合速率明显有“午睡”现象,表明明显受到水分胁迫,而充足浇水能有效消除幼苗净光合速率的“午睡”现象。

不同浇水量处理下,环境因子光合有效辐射、大气温度、饱和水汽压差和生理变量气孔导度、叶片温度、胞间  $CO_2$  浓度均显著影响沙柳幼苗净光合速率。

不同浇水量显著影响沙柳幼苗光补偿点、饱和光强和表观量子效率。随着浇水量增加,沙柳幼苗光补偿点逐渐下降,而饱和光强和表观量子效率逐渐增大。这些结果表明浇水量的增加能提高沙柳幼苗的光合能力。

浇水量的增加能有效提高沙柳幼苗 PS II 的最大荧光、可变荧光、最大荧光比和最大光化学效率。

### 参 考 文 献

- Dahlman, R. C. 1993.  $CO_2$  and plants: revisited. *Vegetatio*, **104**: 339~355.
- Damesin, C. & S. Rambal. 1995. Field study of leaf photosynthetic performance by a Mediterranean deciduous oak tree (*Quercus pubescens*) during a severe summer drought. *Plant, Cell and Environment*, **131**: 159~167.
- Dong, X. J. (董学军). 1998. Experimental measurement of the water relations parameters of nine shrubs and some ecological interpretations. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **40**: 652~664. (in Chinese)
- Dong, X. J. (董学军), B. Z. Yang (杨宝珍), K. Guo (郭柯), Z. M. Liu (刘志茂), Alatangbao (阿拉腾宝), S. Han (韩松) & Y. X. Zhao (赵丙兴). 1994. An investigation on the water physiological characteristics of some psammophytes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **18**: 86~94. (in Chinese)
- Dong, X. J. (董学军), X. S. Zhang (张新时) & B. Z. Yang (杨宝珍). 1997. A preliminary study on the water balance for some sandland shrubs based on transpiration measurements in field conditions. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **21**: 208~225. (in Chinese)
- Epron, D., E. Dreyer & G. Aussenac. 1993. A comparison of photosynthetic responses to water stress in saplings from three oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl., *Q. rubra* L. and *Q. cerris* L.). *Annals of Forest Science*, **50**: 48~60.
- Filella, I., J. Llusi, J. Piñol & J. Peñuelas. 1998. Leaf gas exchange and fluorescence of *Phillyrea latifolia*, *Fistacia lentiscus* and *Quercus ilex* saplings in severe drought and high temperature conditions. *Environmental and Experimental Botany*, **39**: 213~220.
- Graham, R. W. & E. C. Erimin. 1990. Effects of global climate change on the pattern of terrestrial biological communities. *Trends in Ecology and Evolution*, **5**: 289~292.
- Guo, Z. H. (郭志华), H. D. Zhang (张宏达), Z. A. Li (李志安) & H. W. Hu (胡宏伟). 1999. The photosynthetic characteristics in leaves of *Larix dendron chinense* seedlings in Mt. Lushan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **19**: 164~169. (in Chinese)
- Hodges, J. D. 1967. Patterns of photosynthesis under natural environmental conditions. *Ecology*, **48**: 234~242.
- Houghton, J. T., G. J. Jenkins & J. J. Ephraim. 1990. Climate change: the IPCC scientific assessment. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jiang, G. M. & W. M. He. 1999. Species- and habitat-variability of photosynthesis, transpiration and water use efficiency of different plant species in Maowusu sand area. *Acta Botanica Sinica* (植物学报), **41**: 1114~1124.
- Li, X. R. (李新荣), Y. X. Zhao (赵丙兴), Z. Z. Yang (杨志忠) & H. P. Liu (刘和平). 1999. Study on evolution of air-seeding vegetation and habitat in Maowusu sandland. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **23**: 116~124. (in Chinese)
- Lu, W. D. (卢纹带), Y. L. Zhu (朱一力), J. Sha (沙捷) & H. B. Zhu (朱红兵). 1997. SPSS for Windows from rudiment to mastery. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 155~317. (in Chinese)
- Luquez, V. M., J. J. Guiamet & E. R. Montaldi. 1997. Net photosynthetic and transpiration rates in a chlorophyll-deficient isolate of soybean under well-watered and drought conditions. *Photosynthetica*, **34**: 125~131.
- Methy, M., C. Damesin & S. Rambal. 1996. Drought and photosystem II activity in two Mediterranean oaks. *Annals of Forest Science*, **53**: 255~282.
- Save, R., C. Biel, R. Domingo, M. C. Ruiz-Sanchez & A. Torrecillas. 1997. Some physiological and morphological characteristics of citrus plants for drought resistance. *Plant Science*, **110**: 167~172.
- Schulze, E. D. 1988. Carbon dioxide and water vapour exchange in

- response to drought in the atmosphere and in the field. *Annual Review of Plant Physiology*, **37**:247~274.
- Torrecillas, A., R. Gallego, A. Perez-Pastor & M. C. Ruiz-Sanchez. 1999. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions. *Journal of Agricultural Science*, **132**: 445~452.
- Tyree, M. T. & J. D. Alexander. 1993. Plant water relations and the effects of elevated CO<sub>2</sub>: a review and research. *Vegetatio*, **104/105**:47~62.
- Xu, D. Q. (许大全). 1990. Ecology, physiology and biochemistry of midday depression of photosynthesis. *Plant Physiology Communications*(植物生理学通讯), (6):5~10. (in Chinese)
- Xu, D. Q. (许大全), Y. Z. Zhang(张玉忠) & R. X. Zhang(张荣铨). 1992. Photoinhibition of photosynthesis in plants. *Plant Physiology Communications*(植物生理学通讯), **28**:237~243. (in Chinese)
- Yang, M. S. (杨敏生), B. H. Pei(裴保华) & Z. D. Zhu(朱之梯). 1999. Physiological study of double cross hybrid clones of white poplar under water stress. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), **19**: 312~317. (in Chinese)
- Yao, H. L. (姚洪亮), C. T. Wei(魏成泰) & M. C. Liao(廖茂彩). 1992. An introduction on the Maowusu sands exploitation and control research center. In: Wang, J. X. (王家祥) ed. *Collected papers of the Maowusu sands exploitation and control research center* (Vol. 1). Huhhot: Inner Mongolia University Press. 1~7. (in Chinese)
- Zhang, X. S. (张新时). 1994. Principles and optimal models for development of Maowusu sandy grassland. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), **18**:1~16. (in Chinese)
- Zhang, Z. X. (张振贤), S. H. Liang(梁书华) & L. P. Chen(陈利平). 1994. Study on diurnal change and midday depression of photosynthetic rate in Chinese cabbage leaves under field conditions. *Acta Botanica Sinica*(植物学报), **36**(Supp. 1):97~101. (in Chinese)

责任编辑:曹坤芳 责任编辑:孙冬花