

## 七子花苗期光合日进程及光响应

柯世省, 金则新, 李钧敏

(台州学院生物系, 浙江临海 317000)

**摘要:** 对七子花苗期光合日进程及光响应进行了研究, 结果表明: (1) 净光合速率的日进程曲线呈双峰型, 胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日进程基本与净光合速率相反, 中午胞间  $\text{CO}_2$  浓度增高表明净光合速率午间降低主要受非气孔限制因素的影响。暗呼吸速率日进程呈单峰曲线, 中午最高。光能利用效率以上午 7:00 为最高, 中午最低, 以后又逐渐上升。(2) 净光合速率最适温度为 25~30 °C, 高光合有效辐射和高温下光抑制加剧。(3) 29 °C 下饱和光强为  $890 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 表观量子效率为 0.032 5, 光补偿点为  $44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; 随着光合有效辐射的增强, 气孔阻力减小, 但光合有效辐射过高, 气孔阻力却有所上升。(4) 在 29 °C 的饱和光强下, 羧化效率为 0.035 1,  $\text{CO}_2$  补偿点为  $173 \mu\text{mol mol}^{-1}$ , 低于或高于饱和光强, 羧化效率下降,  $\text{CO}_2$  补偿点升高。

**关键词:** 光合日进程; 光响应; 七子花苗期; 天台山

**中图分类号:** Q945.79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2003)02-0175-04

## Photosynthetic diurnal variations and responses to light in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings

KE Shi-sheng, JIN Ze-xin, LI Jun-min

(Department of Biology, Taizhou college, Linhai 317000, China)

**Abstract:** The photosynthetic diurnal variations and responses to light in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings had been studied. The results are as follows: (1) The diurnal variations of net photosynthetic rates ( $A$ ) exhibited a twin-peaked pattern. The diurnal variations of internal  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ) were just opposite to  $A$ . The increasing of  $C_i$  at midday showed that the decreasing of  $A$  was mainly affected by non-stomatal restriction factors. Respiration rate ( $R$ ) was highest at midday, and its diurnal variations exhibited single-peaked pattern. Solar utilization efficiency (SUE) was highest at 7:00 and lowest at midday. SUE increased gradually in the afternoon. (2) The optimal temperature to  $A$  was between 25 °C and 30 °C. Photoinhibition of photosynthesis would aggravate under high photosynthetic active radiation ( $Q$ ) and high temperature. (3) Saturation light intensity in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings was  $890 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  at 29 °C, while apparent quantum yield (AQY) was 0.032 5 and light compensation point was  $44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  at 29 °C.  $r_s$  decreased with the increase of  $Q$ , but it increased a little when the  $Q$  were higher than saturation light intensity. (4) Carboxylation efficiency (CE) was 0.035 1, and  $\text{CO}_2$  compensation point was  $173 \mu\text{mol mol}^{-1}$  under saturation light intensity at 29 °C. CE decreased and  $\text{CO}_2$  compensation point increased when  $Q$  was higher or lower than saturation light intensity.

**Key words:** diurnal variation of photosynthesis; response to light; *Heptacodium miconioides* seedlings; Tian-

收稿日期: 2001-11-05; 修订日期: 2002-04-12

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(399203); 浙江省教育厅科研计划(19990367)项目。

作者简介: 柯世省(1965-), 男, 浙江临海市人, 副教授, 主要从事植物生理生态学研究。

七子花(*Heptacodium miconioides*)为落叶小乔木,属忍冬科的单型属植物,为我国特有种,是国家首批重点保护的2级植物,现资源极少。曾有学者对浙江天台山七子花群落特征及七子花种群结构等进行了研究<sup>[1,2]</sup>,对该群落的结构、种群的动态以及濒危现状有了初步的认识,在该群落林内很少见到七子花实生苗,七子花种群年龄结构属衰退型,濒危程度日益加重,急需对七子花进行切实有效的保护。人工培育七子花幼苗,是复壮七子花种群一条可行的途径。浙江天台山七子花一般从3月底开始展叶,11月陆续落叶,一年中生长期约7个月。七子花在夏天叶片成熟后,日均净光合速率达到一年生长期中的顶峰,此时是七子花物质积累,植株生长最重要的时期。天台山主峰华顶山(29°15'N、121°06'E),海拔1098 m,属亚热带季风性湿润气候,年降水量为1700 mm,平均相对湿度达85%以上,夏天天气变幻莫测,降水多,云雾多,光合有效辐射常常因云雾频繁波动,其值可以在短时间内从2000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右降到200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 左右,甚至更低,因此研究七子花对光照变化的响应和适应性,有利于加深对珍稀濒危植物对环境变化的响应和适应性的认识和理解。我们在晴天观察了七子花苗期的光合日进程,并在实验室条件下,保持其它环境因子的基本恒定,研究探讨七子花苗期光合特性的光响应,为七子花种群保护和苗期的培育管理提供参考。

## 1 材料和方法

2000年3月在浙江省天台山狮子岩坑七子花林缘挖取部分3年生七子花实生苗,移栽到花盆中,运回实验园地,常规管理。2001年5月中旬进行测试。每项指标重复测试生长状况相似的5~6个个体成熟叶片,结果取平均值。测试前每天傍晚浇水1次,连续1周,保持土壤水分充足。

使用英国ADC公司生产的LCA-4型便携式全自动光合测定系统对七子花苗期叶片进行不离体测试,测试时采用开放式气路。选择晴朗天气,从早上7:00~下午18:00每隔1 h测定环境光合有效辐射( $Q_e/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、叶片表面光合有效辐射( $Q_i/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、净光合速率( $A(\text{CO}_2)/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、暗呼吸速率( $R(\text{CO}_2)/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、叶温

( $\theta_l/^\circ\text{C}$ )、气温( $\theta_a/^\circ\text{C}$ )、饱和水汽压差( $\Delta_e/\text{mbar}$ )、空气 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_a/\mu\text{mol mol}^{-1}$ )、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i/\mu\text{mol mol}^{-1}$ )和气孔阻力( $r_s/\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$ )的日进程,计算光合作用的光能利用率( $\text{SUE}=A/Q_i$ )。实验室条件下测定不同光照强度下七子花叶片A和R对叶片温度的响应时,碘钨灯提供光源,使光合有效辐射 $Q_i$ 保持在 $700\pm20\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,设定光合测定系统自动调节进气 $\text{CO}_2$ 浓度为 $350\pm10\mu\text{mol mol}^{-1}$ 和相对湿度为 $40\%\pm3\%$ ,利用光合测定系统的控温装置调节叶室温度的范围在 $19\sim40^\circ\text{C}$ , $2\sim3^\circ\text{C}$ 为一个测试梯度,每个梯度停留5 min,测定叶片温度、净光合速率、气孔阻力、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度,用黑布完全遮光测定R。在叶片温度为 $29^\circ\text{C}$ ,空气 $\text{CO}_2$ 浓度为 $350\pm10\mu\text{mol mol}^{-1}$ ,相对湿度为 $40\%\pm3\%$ 条件下,测定叶片光合作用光响应,通过改变光源光线强弱和多层纱布均匀遮光相结合的方法调节光合有效辐射从 $1100\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 直到0,强光下每梯度为 $100\sim300\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、弱光下(小于 $160\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )为 $20\sim30\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,每梯度遮光持续3 min,测得从高到低一系列光合有效辐射下叶片的净光合速率、气孔阻力和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度等,实测某一温度下七子花叶片的饱和光强,从净光合速率—光合有效辐射曲线的初始斜率求得表观量子效率(AQY)<sup>[3,4]</sup>,计算光补偿点。在气温为 $29^\circ\text{C}$ ,相对湿度为 $40\%\pm3\%$ 条件下,测定不同光合有效辐射下七子花叶片光合作用对 $\text{CO}_2$ 浓度的响应,保持光合有效辐射分别为 $400\pm20$ 、 $700\pm20$ 和 $1200\pm20\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,用光合测定系统设定不同的进气 $\text{CO}_2$ 浓度,测定不同空气 $\text{CO}_2$ 浓度下的净光合速率和胞间 $\text{CO}_2$ 浓度,以净光合速率对系列胞间 $\text{CO}_2$ 浓度进行线性回归求得羧化效率(CE),计算 $\text{CO}_2$ 补偿点<sup>[3,4]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 七子花苗期光合作用日进程

在7月中旬晴朗天气下,七子花苗期叶片的净光合速率日变化呈“双峰”型(表1),第1峰出现在上午9:00左右,第2峰则在下午15:00左右,峰值约为第1峰的一半,而谷底则出现在中午11:00~12:00,此时光合能力下降很快,仅约为第1峰值

的 1/3。暗呼吸速率日进程则呈单峰曲线, 最高值出现在中午(13:00), 此时叶片温度达到一天中的高峰(表 2)。胞间  $\text{CO}_2$  浓度的日进程基本与净光合速率相反, 因为当净光合速率较大时, 固定的  $\text{CO}_2$  较多, 引起胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低。早上光合有效辐射逐渐增大有利于气孔张开, 气孔阻力降低, 叶片温度上升, 饱和水汽压差增大, 至午前 11:00 左右气孔阻力降至最低, 高蒸腾引起叶片失水过多, 促使气孔部分关闭, 气孔阻力又增大, 至 13:00 出现一个峰

值, 以后光合有效辐射减弱, 叶片温度下降, 气孔阻力又降低, 但 16:00 后, 光合有效辐射过弱, 气孔阻力很快升高。许大全等提出<sup>[5,6]</sup>, 引起植物叶片净光合速率午间降低的植物自身因素不外乎气孔的部分关闭(气孔限制)和叶肉细胞自身活性下降(非气孔限制)两类, 前者使胞间  $\text{CO}_2$  浓度降低, 而后者使胞间  $\text{CO}_2$  浓度增高。七子花苗期叶片在中午前后(10:00~14:00)胞间  $\text{CO}_2$  浓度增高(与 9:00 相比), 表明净光合速率降低并非由于  $\text{CO}_2$  不足(气孔

表 1 净光合速率及有关指标日变化

Table 1 The diurnal variations of  $A$  and related index

| 点钟<br>Time | 净光合速率<br>( $A/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | 暗呼吸速率<br>( $R/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度<br>( $C_i/\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) | 气孔阻力<br>( $r_s/\text{m}^2 \text{s mol}^{-1}$ ) | 光能利用率<br>( $\text{SUE}/\text{mmol mol}^{-1}$ ) |
|------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 7:00       | 2.47±0.13                                           | 1.09±0.07                                           | 259.5±14.2                                              | 19.36±0.73                                     | 12.93±0.69                                     |
| 8:00       | 5.58±0.19                                           | 1.39±0.06                                           | 219.2±15.4                                              | 15.24±0.79                                     | 8.13±0.71                                      |
| 9:00       | 6.34±0.27                                           | 1.59±0.10                                           | 202.5±13.9                                              | 11.87±0.67                                     | 5.15±0.38                                      |
| 10:00      | 3.91±0.21                                           | 1.90±0.09                                           | 241.5±17.5                                              | 9.46±0.66                                      | 2.48±0.18                                      |
| 11:00      | 2.16±0.16                                           | 2.05±0.12                                           | 293.6±16.8                                              | 7.57±0.49                                      | 1.24±0.11                                      |
| 12:00      | 2.33±0.18                                           | 2.20±0.10                                           | 299.0±14.6                                              | 13.57±0.76                                     | 1.28±0.08                                      |
| 13:00      | 2.46±0.15                                           | 2.69±0.11                                           | 287.5±16.4                                              | 15.60±0.64                                     | 1.43±0.07                                      |
| 14:00      | 2.74±0.16                                           | 2.41±0.16                                           | 244.8±12.1                                              | 14.40±0.75                                     | 1.81±0.10                                      |
| 15:00      | 3.53±0.21                                           | 2.23±0.10                                           | 218.4±11.7                                              | 12.00±0.71                                     | 2.76±0.12                                      |
| 16:00      | 2.80±0.19                                           | 2.12±0.08                                           | 231.9±9.3                                               | 15.30±0.73                                     | 3.16±0.15                                      |
| 17:00      | 2.22±0.13                                           | 1.58±0.09                                           | 228.3±10.8                                              | 26.07±1.89                                     | 5.50±0.27                                      |
| 18:00      | 0.36±0.05                                           | 1.33±0.06                                           | 308.6±18.4                                              | 39.28±2.68                                     | 6.51±0.41                                      |
| 平均 Mean    | 3.07±1.60                                           | 1.88±0.49                                           | 252.9±36.0                                              | 16.64±8.56                                     | 4.36±3.52                                      |

表 2 环境因子的日变化

Table 2 The diurnal variations of environmental factors

| 点钟<br>Time | 环境光合有效辐射<br>( $Q_e/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | 叶片表面光合有效辐射<br>( $Q_i/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | 空气 $\text{CO}_2$ 浓度<br>( $C_a/\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) | 饱和水汽压差<br>( $\Delta_e/\text{mbar}$ ) | 空气温度<br>( $\theta_a/^\circ\text{C}$ ) | 叶片温度<br>( $\theta_l/^\circ\text{C}$ ) |
|------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 7:00       | 234±13                                                   | 191±12                                                     | 401.6±1.65                                              | 1.51±0.08                            | 20.1±0.21                             | 20.98±0.24                            |
| 8:00       | 779±25                                                   | 686±23                                                     | 392.2±1.54                                              | 3.73±0.13                            | 24.4±0.19                             | 25.69±0.29                            |
| 9:00       | 1 399±46                                                 | 1 231±45                                                   | 366.9±1.71                                              | 7.74±0.38                            | 26.3±0.22                             | 28.53±0.32                            |
| 10:00      | 1 855±57                                                 | 1 578±51                                                   | 363.1±1.27                                              | 9.64±0.31                            | 27.5±0.21                             | 29.92±0.26                            |
| 11:00      | 1 980±49                                                 | 1 742±46                                                   | 347.2±1.62                                              | 11.68±0.58                           | 29.4±0.19                             | 31.91±0.23                            |
| 12:00      | 2 078±56                                                 | 1 829±50                                                   | 351.5±1.30                                              | 7.25±0.45                            | 32.2±0.24                             | 34.91±0.27                            |
| 13:00      | 1 956±95                                                 | 1 719±83                                                   | 360.1±1.28                                              | 7.16±0.59                            | 34.6±0.21                             | 36.49±0.32                            |
| 14:00      | 1 719±71                                                 | 1 518±64                                                   | 354.2±1.49                                              | 8.71±0.46                            | 34.0±0.26                             | 36.89±0.28                            |
| 15:00      | 1 452±86                                                 | 1 280±72                                                   | 347.5±1.36                                              | 9.56±0.51                            | 30.2±0.29                             | 32.52±0.39                            |
| 16:00      | 1 025±76                                                 | 886±66                                                     | 349.5±1.42                                              | 6.48±0.44                            | 29.3±0.26                             | 30.58±0.33                            |
| 17:00      | 459±39                                                   | 404±34                                                     | 352.9±1.59                                              | 3.81±0.29                            | 28.3±0.31                             | 28.54±0.30                            |
| 18:00      | 62±27                                                    | 55±24                                                      | 360.9±1.38                                              | 1.14±0.12                            | 25.1±0.36                             | 25.04±0.42                            |

限制)引起, 而是由于此时光照强烈, 使叶片光合作用出现光抑制<sup>[7,8]</sup>和光呼吸增强<sup>[9,10]</sup>(非气孔限制)造成的。Berry<sup>[11]</sup>认为, 高温引起  $\text{CO}_2$  溶解度、Rubisco(RuBP 羧化酶)对  $\text{CO}_2$  的亲合力、RuBP(1, 5-2-磷酸核酮糖)浓度以及光合机构关键成分稳定

性的降低, 影响羧化效率。中午空气  $\text{CO}_2$  浓度比早晨降低了约  $50 \mu\text{mol mol}^{-1}$ , 这也是净光合速率午间降低的一个原因。七子花苗期叶片的光能利用效率以早上最高, 中午最低, 因为此时的净光合速率下降, 而光合有效辐射却很高(最高可达  $1 829 \mu\text{mol}$

$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ), 以后又逐渐上升, 从全天来看, 平均光能利用效率为  $4 \text{ mmol mol}^{-1}$  左右, 较低的光能利用效率可能是七子花苗期生长缓慢的重要原因。

## 2.2 不同光合有效辐射下光合作用的温度响应

光合作用是一个十分复杂的生理过程, 叶片光合效率与自身因素如叶绿素含量、叶片厚度、叶片成熟程度密切相关, 又受光照强度、气温、空气相对湿度、土壤水分含量等外界因子影响。只有在实验室条件下严格控制环境因子, 才能观察七子花苗期光合作用在特定条件下的光响应。光合有效辐射为植物光合作用提供能源, 温度影响光合机构的光合活性, 它们都对光合作用施加极大的影响。在几个特定的光合有效辐射下, 温度对七子花净光合速率(当  $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=0$  时  $-A$  即为暗呼吸速率)的影响如图 1 所示。不同光合有效辐射下, 七子花苗期叶片净光合速率最适温度差别不大,  $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  和  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  下的最适温度在  $26\sim 30^\circ\text{C}$ , 而  $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  下的最适温度在  $25\sim 29^\circ\text{C}$ , 在高光合有效辐射下, 最适温度有所下降。低于或高于最适温度, 净光合速率都快速下降。在  $19\sim 40^\circ\text{C}$  的温度范围, 随着温度的升高暗呼吸速率增大, 但低于  $34^\circ\text{C}$ , 暗呼吸速率上升平缓, 高于  $34^\circ\text{C}$ , 暗呼吸速率上升较快。在高光合有效辐射下, 净光合速率低于中等强度光合有效辐射下的相应值, 而胞间  $\text{CO}_2$  浓度有所增加(数据未列出), 表明高光合有效辐射下光合作用已有光抑制发生, 并随着温度的升高光抑制加剧, 甚至当温度高于  $34^\circ\text{C}$  后, 其净光合速率已低于较低光合有效辐射( $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )相应温度下的值。

## 2.3 七子花苗期光合作用光响应

进行净光合速率的光响应测试可以获知植物叶片的饱和光强、光补偿点、暗呼吸速率和表观量子效率等光合参数。从以上观察结果可以看出,  $29^\circ\text{C}$  是七子花苗期光合作用的适宜温度。在  $29^\circ\text{C}$  下光合作用的光响应见图 2:A, 从中看出, 七子花苗期净光合速率的光响应曲线为二次多项式(抛物线), 其饱和光强为  $890 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。图 2:B 是低光合有效辐射下净光合速率—光合有效辐射的回归直线方程, 其斜率即为表观量子效率, 值为  $0.0325$ , 七子花的表观量子效率与自然条件下一般植物的表观量子效率( $0.03\sim 0.05$ )<sup>[12]</sup> 相比处于下限, 表明七子花利用光能的能力较弱, 植株生长缓慢。从图 2:A 和图 2:C 可以看出, 当光合有效辐射超过饱和光强后, 胞

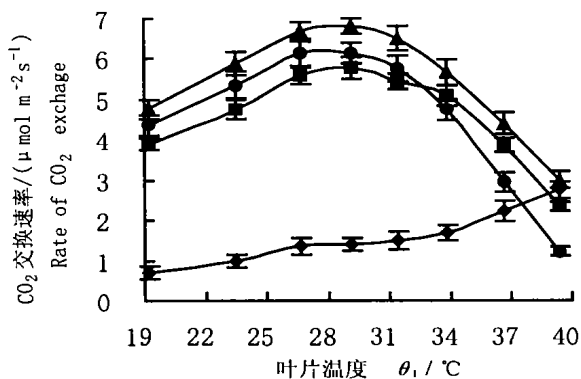


图 1 七子花苗期不同光合有效辐射下净光合速率的温度响应

Fig. 1 Response of  $A$  to  $\theta_l$  under different  $Q$  in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings

◆:  $R$ ; ■:  $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=400$ ; ▲:  $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=700$ ; ●:  $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=1400$

间  $\text{CO}_2$  浓度上升, 净光合速率反而下降, 表明此时净光合速率的下降不是由于  $\text{CO}_2$  供应不足而是由于叶肉细胞光合活性下降即光抑制引起的, 并随着光合有效辐射的增强光抑制加剧。由于晴天的光合有效辐射很强, 而七子花苗期叶片的饱和光强在  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以下, 因此在七子花苗期的栽培管理过程中, 可适当遮荫, 以降低叶片表面温度, 减小水分蒸腾和提高光能利用率, 减轻光抑制。图 2:B 的回归方程中, 当  $y=0$  时  $x$  的值即为光补偿点。七子花苗期光补偿点约为  $44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 比典型阳性植物高<sup>[13]</sup>, 表明七子花不耐荫, 在郁蔽度很高的林内其幼苗生长处于不利地位, 常因光合不足而饥饿死亡, 并且七子花种子休眠期长, 萌发率极低<sup>[14]</sup>, 使得七子花种群在群落中缺乏幼苗, 幼树也极少。由于七子花种群的幼苗储备严重不足, 天然更新困难, 种群的年龄结构属衰退型<sup>[1,2]</sup>, 这可能是导致该种成为濒危物种的原因之一。

气孔是一个对内部和外部因子敏感性极高、具有调节作用的阀口, 气孔开放有利于叶片光合作用的碳固定, 并由于蒸腾的降温作用使叶片在高温的情况下避免热损伤; 气孔关闭能减少水分的消耗, 降低由于过分失水而导致植物出现极度水分亏缺的危险。气孔行为总是以优先获得最大的碳收益, 尽量减少水分的消耗为特点<sup>[15]</sup>。在  $29^\circ\text{C}$  下, 随着光合有效辐射的增强, 气孔阻力减小(图 2:D), 净光合速率同时增高, 当光合有效辐射超过  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以后, 气孔阻力稍有增大, 而光合作用的光抑制加强。

## 2.4 不同光合有效辐射下七子花苗期净光合速率的 CO<sub>2</sub> 响应

CO<sub>2</sub> 是光合作用的基本原料, 空气中低浓度的 CO<sub>2</sub> 经常是光合作用的重要限制因素, 随着空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的降低, 引起胞间 CO<sub>2</sub> 浓度降低, 叶片的净光合速率也逐渐降低, 当  $A/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=0$  时, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度就是 CO<sub>2</sub> 补偿点, 以净光合速率—胞间 CO<sub>2</sub> 浓度作线性回归, 直线的斜率即为羧化效率。CO<sub>2</sub> 补偿点和羧化效率是衡量植物光合能力的重要参数。

羧化效率下降, CO<sub>2</sub> 补偿点升高, 引起光合能力下降。在 29 °C 时, 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (低光合有效辐射)、800  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (饱和光强) 和 1 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (超饱和光强) 下, 七子花苗期光合作用 CO<sub>2</sub> 响应见表 3。在饱和光强下, 七子花苗期叶片的羧化效率最高, CO<sub>2</sub> 补偿点最低; 低于饱和光强, 光量子供应不足, 引起羧化效率下降, CO<sub>2</sub> 补偿点升高; 高于饱和光强, 则光抑制加剧, 光呼吸增强, 使得羧化效率小幅下降, 但 CO<sub>2</sub> 补偿点升幅较大。

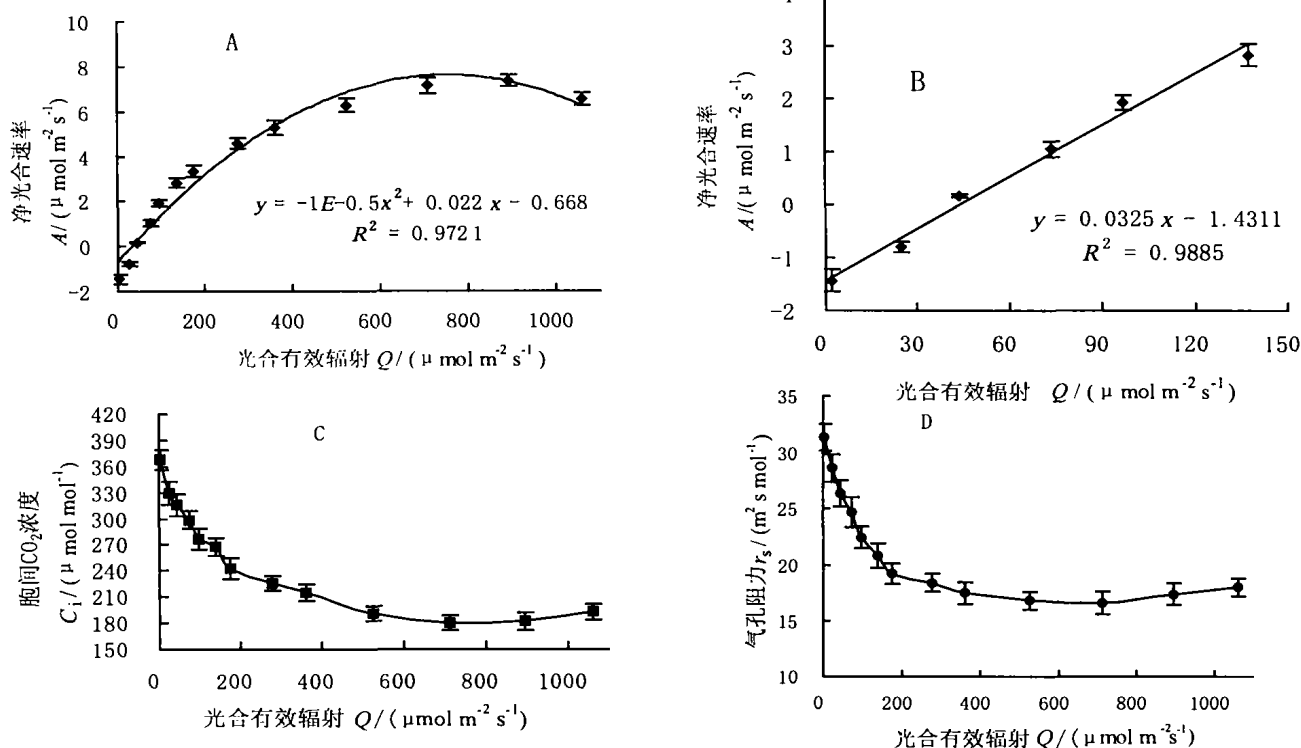


图 2 七子花苗期净光合速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度和气孔阻力光响应

Fig. 2 Response of  $A$ ,  $C_i$  and  $r_s$  to  $Q$  in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings

表 3 不同光合有效辐射下七子花苗期光合作用 CO<sub>2</sub> 响应

Table 3 Response of photosynthesis to  $C_i$  under different  $Q$  in leaves of *Heptacodium miconioides* seedlings

| 羧化参数 Carboxylation parameters                                                       | $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=400$           | $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=800$         | $Q/\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}=1\ 200$      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 回归方程 ( $A-C_i$ )<br>Regression equation                                             | $y=0.028\ 9\ x-5.924\ 5$<br>( $n=11, R^2=0.945\ 1$ ) | $y=0.0351\ x-6.072\ 3$<br>( $n=10, R^2=0.939\ 6$ ) | $y=0.030\ 5x-6.649\ 0$<br>( $n=11, R^2=0.915\ 2$ ) |
| 羧化效率 Carboxylation efficiency                                                       | 0.028 9                                              | 0.035 1                                            | 0.030 5                                            |
| CO <sub>2</sub> 补偿点 ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) CO <sub>2</sub> compensation point | 205                                                  | 173                                                | 218                                                |

## 3 结束语

本文通过对七子花苗期光合日进程和光响应的研究, 得出如下结论:

在晴朗天气下, 七子花苗期叶片的净光合速率

日变化呈“双峰”型, 第 1 峰出现在上午 9 : 00, 第 2 峰在下午 15 : 00, 谷底则出现在中午 11 : 00~12 : 00, 此时光合能力比 9 : 00 下降很大。胞间 CO<sub>2</sub> 浓度的日进程基本与净光合速率相反, 但在中午出现光合“午休”时, 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度却是增高的, 表明七子花苗期叶片净光合速率午间降低主要受非气孔限

制因素的影响,午间高光合有效辐射和高温度,使得光合作用的光抑制加剧,光呼吸增强。暗呼吸速率日进程则呈单峰曲线,最高值出现在中午,此时环境温度接近一天中的最高值。七子花苗期叶片的光能利用效率以早上 7:00 左右为最高,中午 11:00~13:00 的光能利用效率最低,以后又逐渐上升。较低的光能利用效率,可能是七子花苗期生长缓慢的主要原因。

实验室里控制其它环境因子保持不变,在不同光合有效辐射下,七子花苗期叶片净光合速率最适温度差别不大,最适温度在 25~30℃。高光合有效辐射下,光合作用出现光抑制,并随着温度的升高光抑制加剧。29℃下七子花苗期净光合速率的光响应曲线为二次多项式,其饱和光强  $890 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,表观量子效率为 0.0325,七子花的表观量子效率与自然条件下一般植物的表观量子效率相比处于下限,表明七子花利用光能的能力较弱。当光合有效辐射超过饱和光强后,净光合速率的下降由光抑制引起,并随着光合有效辐射的增强光抑制加剧。因此,在七子花苗期的栽培管理中,夏天晴天可适当遮荫。七子花苗期光补偿点约为  $44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ,表明七子花不耐荫,幼苗在林内生长处于不利地位,常因光合不足而饥饿死亡,并且七子花种子休眠期长,萌发率极低,使得七子花种群在群落中缺乏幼苗,幼树也极少,天然更新困难,种群的年龄结构属衰退型,这可能是引起七子花濒危的一个原因。随着光合有效辐射的增强,气孔阻力减小,当光合有效辐射超过  $700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以后,气孔阻力稍有增大。在 29℃ 的饱和光强下,七子花苗期叶片的羧化效率最高,CO<sub>2</sub> 补偿点最低;低于饱和光强,羧化效率下降,CO<sub>2</sub> 补偿点升高;高于饱和光强,则光抑制加剧,光呼吸增强,使得羧化效率小幅下降,但 CO<sub>2</sub> 补偿点升幅较大。

七子花分布范围狭窄,种群日趋缩小,濒危程度日益加重,在模式标本产地湖北兴山后来未能采到七子花标本就是一例<sup>[14]</sup>。造成七子花濒危的原因可能是多方面的,如过度的樵采,导致个体数的减少等,也与其自身生存能力和上述的生理特点有关。落叶树种七子花在生长季节平均净光合速率比伴生常绿树种低,加上生长期短,且树冠比较稀疏,叶量不大,使得七子花植株的总光合量较小,物质积累能力低,生长速度慢,在群落中很难占领空间取得优势地位。由于七子花光合能力低,竞争能力弱,因而在

水热条件优越的地段,往往被竞争能力强的常绿树种所占据,七子花难以与其它树种竞争,不得不退到土层浅薄、岩石裸露的沟谷等恶劣的生境中<sup>[16]</sup>。这可能是造成七子花的分布范围日趋缩小,成为濒危物种的原因之一。随着人类活动的进一步加剧,七子花现分布面积急剧缩小,如再遇过强的环境胁迫,或将现有个体数很少、面积很小的生境破坏掉,就很有可能导致该种的灭绝。因此,急需对七子花进行切实有效的保护。

### 参考文献:

- [1] 金则新. 浙江天台山七子花群落研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 127-132.
- [2] 金则新. 浙江天台山七子花种群结构和分布格局研究[J]. 生态学杂志, 1997, 16(4): 15-19.
- [3] 中国科学院上海植物生理研究所. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 89-95.
- [4] 郭志华, 张宏达, 李志安, 等. 鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)苗期光合特性研究[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 164-169.
- [5] 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.
- [6] Xu DQ, Shen YG. Diurnal variations in the photosynthetic efficiency in plants[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1997, 23(4): 410-416.
- [7] 许大全, 张玉忠, 张荣铨. 光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, 28(4): 237-243.
- [8] Aro E-M, Virgin I, Andersson B. Photoinhibition of photosystem II. Inactive, protein damage and turnover[J]. *Biochim Biophys Acta*, 1993, 1143: 113.
- [9] 郭连旺, 许大全, 沈允钢. 田间棉花叶片光合效率中午降低的原因[J]. 植物生理学报, 1994, 20(4): 360-368.
- [10] Oquist G. Stress and adaption in photosynthesis. In: Douglas RH, Moan J (eds), *Light in biology and medicine*, Vol I [M]. New York: Plenum Press, 1988, 433.
- [11] Berry JA, Downton WJS. Photosynthesis Vol II. Development, Carbon metabolism and plant productivity[M]. New York: Academic Press, 1982, 263.
- [12] 余叔文. 植物生理学和分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1992, 236-243.
- [13] Larcher W. (翟志席, 等译). 植物生态生理学(第 5 卷)(下转第 164 页 Continue on page 164)

90%。主要原因是热水的浸泡对种皮起到了一定的软化作用,使种子易于吸胀,打破种子的休眠,从而提高了萌发率。而 IBA 等生长素的处理对种子萌

发没有明显促进作用。

(3)播种基质对任木苗期生长有明显影响,在基质为酸性红壤土中的生长比在石灰土和园土中要差。

表 4 贮藏时间不同的土山种子萌发率及幼苗生长情况

Table 4 The germination rate and seedling growth of the seeds in different storage time

| 贮藏时间<br>Storage time<br>(a) | 处理<br>Treatments                               | 播种数量(粒)<br>Sowing seed<br>number | 发芽数(粒)<br>Germination<br>seed | 发芽率(%)<br>Germination<br>rate | 平均地径(cm)<br>Average<br>diameter | 平均株高(cm)<br>Average<br>height |
|-----------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 当年 In a year                | 直播 Sowing directly                             | 100                              | 29                            | 29                            | 0.405                           | 62.66                         |
| 当年 In a year                | 80 °C 热水浸泡 14 h<br>Dip in 80 °C water for 14 h | 100                              | 69                            | 69                            | 0.489                           | 77.70                         |
| 3                           | 直播 Sowing directly                             | 100                              | 77                            | 77                            | 0.483                           | 78.16                         |
| 3                           | 80 °C 热水浸泡 14 h<br>Dip in 80 °C water for 14 h | 100                              | 74                            | 74                            | 0.386                           | 80.23                         |

(4)种子耐贮藏,采收后干藏 3 a 的种子,其发芽率仍与新鲜种子相差不多。

(5)任木为强阳性树种,苗期都需要较强的光照。在全光照条件下,幼苗的生长比在林荫下快。

#### 参考文献:

- [1] 郭红艳. 依法保护和利用野生植物[J]. 大自然, 1999, (5): 2—3.
- [2] 傅立国. 中国植物红皮书——稀有濒危植物(第一册)[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

- [3] 赵瑞峰. 石山造林速生树种——任豆[J]. 广西植物, 1982, 2(2): 99—102.
- [4] 张祝平, 何道泉, 敖惠修, 等. 粤北石灰岩山地主要造林树种的生理生态学特性[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 2(17): 133—142.
- [5] 骆文华, 黄仕训, 李瑞棠, 等. 不同栽培对石山珍稀濒危植物苗期生长的影响[J]. 农村生态环境, 2001, 17(4): 12—16.
- [6] 覃肖民, 陈乐榜, 蒙金甫, 等. 石质山优良能源树——任豆[J]. 林业科技通讯, 1986, (5): 22—24.

(上接第 180 页 Continue from page 180)

- 版)[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1997, 78.
- [14] 徐根娣, 刘 鹏, 厉 萍. 七子花种质资源保护方法探索[J]. 浙江师大学报(自然科学版), 1998, 21(1): 71—76.
- [15] 赵 平, 曾小平, 彭少麟, 等. 海南红豆(*Ormosia*

*pinnata*)夏季叶片气体交换、气孔导度和水分利用效率的日变化[J]. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(1): 35—42.

- [16] 金则新. 浙江天台山七子花群落种群分布格局研究[J]. 广西植物, 1999, 19(1): 47—52.