

曼陀罗光合特性研究

于晓霞^{1,2}, 阮成江^{2,①}

(1. 辽宁师范大学生命科学学院, 辽宁 大连 116029; 2. 大连民族学院生命科学学院, 辽宁 大连 116600)

摘要: 采用 LI-6400 型便携式光合测定仪对潜在能源植物曼陀罗 (*Datura stramonium* L.) 在 6 月份至 9 月份的光合特性指标 (净光合速率、光合有效辐射强度和气孔导度) 的日变化以及净光合速率和叶绿素含量的月平均值变化进行了研究, 并采用非直角双曲线对曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线进行了拟合。结果表明: 实验期间 (6 月份至 9 月份), 光合有效辐射强度和曼陀罗叶片净光合速率的日变化均呈“单峰型”, 峰值出现在 11:00 左右; 7 月份的净光合速率峰值最高, 为 19.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 气孔导度日变化呈“双峰型”, 最大峰值和次峰值分别出现在 12:00 和 14:00。不同月份的净光合速率月平均值有极显著差异 ($P < 0.01$), 其中 7 月份的净光合速率月平均值最大, 为 9.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 不同月份叶绿素的月平均含量变化与净光合速率月平均值的变化相似, 7 月份叶绿素的月平均含量也最高, 但叶绿素 *a*、*b* 及总叶绿素月平均含量有一定差异。曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线相似, 在光合有效辐射强度和 CO₂ 浓度较低条件下呈线性升高, 至饱和点后缓慢升高并趋于稳定; 曼陀罗叶片的光补偿点为 22.42 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光饱和点为 689.26 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; CO₂ 补偿点为 74.06 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, CO₂ 饱和点为 1 331.97 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。研究结果说明, 曼陀罗为具有一定耐阴能力的阳性植物, 但 CO₂ 同化能力较弱。

关键词: 曼陀罗; 净光合速率; 叶绿素含量; 光合有效辐射强度; 响应曲线

中图分类号: Q945.11; S681.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2011)01-0040-06

Study on photosynthetic characteristics of *Datura stramonium* YU Xiao-xia^{1,2}, RUAN Cheng-jiang^{2,①} (1. College of Life Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. College of Life Science, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2011, 20(1): 40-45

Abstract: From June to September, daily change of photosynthetic characteristics indexes (including net photosynthetic rate, photosynthetically active radiation intensity and stomatal conductance) and monthly average change of net photosynthetic rate and chlorophyll content of potential energy plant *Datura stramonium* L. were measured with LI-6400 portable photosynthesis system, and light and CO₂ response curves of net photosynthetic rate of the species were fitted with non-rectangular hyperbola. The results show that during experimental period (from June to September), daily change of photosynthetically active radiation intensity and net photosynthetic rate of *D. stramonium* leaves is “single peak type” with a peak occurring at about 11:00, and the peak value of net photosynthetic rate in July is the highest with a value of 19.01 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Daily change of stomatal conductance is “double peak type”, the highest and secondary peak values appear at 12:00 and 14:00, respectively. Monthly average of net photosynthetic rate among different months has extremely significant differences ($P < 0.01$), in which that in July is the highest with a value of 9.41 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Change of monthly average of chlorophyll content is similar to that of net photosynthetic rate among different months, and monthly average of chlorophyll content in July is also the highest, but monthly average of Chl*a*, Chl*b* and total chlorophyll contents has a certain difference. Light and CO₂ response curves of net photosynthetic rate of *D. stramonium* leaves

收稿日期: 2010-11-08

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAD09A04); 中国博士后科学基金特别资助项目(200801371); 辽宁省教育厅高等学校科研基金项目(2009A150); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(DC10020102)

作者简介: 于晓霞(1984—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事植物进化适应和遗传育种研究。

①通信作者 E-mail: ruan@dlnu.edu.cn

are similar, both of them increase linearly under low photosynthetically active radiation intensity and CO₂ concentration conditions, then increase slowly after reaching of a saturation point and tend to steady at last. Light compensation point and light saturation point of *D. stramonium* are 22.42 and 689.26 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, while CO₂ compensation point and CO₂ saturation point of the species are 74.06 and 1 331.97 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, respectively. It is concluded that *D. stramonium* is the heliophyte with a certain shade tolerance, but its CO₂ assimilation ability is weaker.

Key words: *Datura stramonium* L.; net photosynthetic rate; chlorophyll content; photosynthetically active radiation intensity; response curve

曼陀罗 (*Datura stramonium* L.) 属茄科 (Solanaceae) 曼陀罗属 (*Datura* L.) 1 年生直立大型草本植物, 主要分布于热带和亚热带地区, 温带地区也有分布, 常见于路边、草地和新翻地。曼陀罗种子含油量约 22.85%, 其种子脂肪油主要含亚油酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸、肉豆蔻酸等脂肪酸成分^[1-2], 是潜在的能源植物。资料显示^[3-6], 相关学者对于曼陀罗资源已经进行了大量研究, 不仅总结了曼陀罗的栽培技术和应用价值, 还在其化学成分和药理作用等方面取得了一些研究成果。目前, 野生曼陀罗的资源量处于急剧下降的状态, 因此, 对曼陀罗资源研究的首要任务就是对其资源的保护。首先是就地保护, 扼制过度采挖; 其次就是要加强对野生曼陀罗人工栽培技术的研究^[7]。

可再生能源植物的研究是当前新型能源研发的重要内容之一, 合理的人工栽培方式能够为曼陀罗的开发利用奠定基础。通过人工控制光照强度和 CO₂ 浓度等方式提高曼陀罗光合作用效率, 促进其生物量的积累, 有望提高曼陀罗的能源利用率。为此, 作者探讨了曼陀罗净光合速率的日、月变化及其对光合有效辐射强度和 CO₂ 浓度的响应, 旨在了解曼陀罗的光合生理基本特性, 为曼陀罗的人工栽培提供理论依据, 并为曼陀罗作为潜在能源植物的开发利用研究提供科学依据和实验基础。

1 材料和方法

1.1 材料

于 2010 年 6 月至 9 月在大连民族学院温室外选择野外自然生长的曼陀罗供试。该区域的土壤为棕壤土, 土壤酸碱度为 pH 7.91; 气候属北温带大陆性季风气候, 但具有海洋性气候特征; 年平均气温约 10 °C, 其中 8 月最热, 平均气温 24 °C, 年极端最高气温约 35 °C; 年平均降水量 550 ~ 950 mm。

1.2 方法

1.2.1 光合特性日、月变化的测定 于 2010 年 6 月至 9 月, 每月中旬选取典型晴朗天气 2 d, 采用 LI-6400 型便携式光合测定仪 (美国 LI-COR 公司生产) 进行光合指标的测定。实验在连体条件下进行^[8], 选用开路气流法 (气源引自地上空 3 m 处)^[9], 自然光源, 叶室面积 2 cm × 3 cm。在每个测定日选取大小、体形特征一致的植株 5 株, 每株按东、南、西、北 4 个方向各选 4 片成熟叶片^[10], 从当地时间 8:00 至 18:00 每隔 1 h 测 1 次净光合速率 (Pn), 同时测定叶片气孔导度 (Cs)、叶室内的光合有效辐射强度 (PAR) 等相关指标。每个指标重复测定 3 次, 结果取平均值。

1.2.2 叶绿素含量的测定 参照文献 [11] 的方法测定叶绿素含量。采集新鲜叶片, 擦净表面后剪碎 (去掉中脉), 混匀; 称取 0.3 g 剪碎的叶片, 置于 25 mL 体积分数 95% 乙醇中避光浸泡至叶片全部变白, 离心, 上清液用 Lambda25 型紫外/可见分光光度计 (美国 PerkinElmer 公司生产) 于波长 665 和 649 nm 处分别测定吸光值, 并计算叶绿素 a 和 b 的含量。实验设 3 次重复。

1.2.3 净光合速率的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的绘制 在实验期间选取典型晴朗天气 3 d, 于上午 9:00 至 12:00, 选长势基本一致的植株 3 株, 取从顶部数第 1 片完全展开成熟叶片进行净光合速率的测定, 结果取平均值。

利用 LI-6400 型便携式光合测定仪的自动 light-curve 曲线测定功能绘制净光合速率的光响应曲线。小钢瓶注入系统控制参比室的 CO₂ 浓度为 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 根据净光合速率日变化值, 确定其大概的饱和光强, 并将待测叶片在接近饱和光强下诱导 20 min (仪器自带的红蓝光源) 以充分活化光合系统, 然后参照文献 [12] 的测量水平和条件将红蓝光源从高到低设定一系列光合有效辐射强度 (PAR) 梯度

(1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、30、10、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 最小和最大等待时间分别为 60 和 180 s, CO_2 匹配值 20 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 测定曼陀罗叶片的净光合速率。

采用上述方法参照文献[12]的测量水平和条件, 利用 LI-6400 型便携式光合测定仪的自动 Aci-curve 曲线测定功能绘制净光合速率的 CO_2 响应曲线。红蓝光源设定的光合有效辐射强度为 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 考虑到植物对 CO_2 的适应性, 将 CO_2 浓度设定为 400、300、200、150、100、50、30、10、400、400、600、800、1 000、1 200、1 500、1 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 其他测定条件与光响应曲线的测定条件相同。

1.3 数据处理

所有数据均通过 Excel 软件进行整理, 使用 SPSS 17.0 软件进行数据的相关性分析、线性方程回归分析以及其他统计分析, 采用 Excel 软件进行图表处理。

净光合速率的光响应曲线采用非直角双曲线进行拟合^[13-14]。非直角双曲线模型理论公式为: $A = \frac{\alpha Q + A_{\max} - \sqrt{(\alpha Q + A_{\max})^2 - 4k\alpha Q A_{\max}}}{2k} - R_{\text{day}}$ 。其中: A 为净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); α 为表观量子效率; A_{\max} 为最大净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Q 为光合有效辐射强度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为响应曲线曲角; R_{day} 为暗呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。在 SPSS 软

件的数据编辑窗口中自动生成与光合有效辐射强度对应的净光合速率拟合预测值 (P_v), 全部设置完毕后运行 SPSS 进行迭代计算。根据 P_n 与 P_v 数值绘制光响应曲线。

在其他因子变化不大时, 净光合速率的 CO_2 响应曲线也采用非直角双曲线进行拟合, 公式同上, 其中: A 为净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); α 为羧化效率; A_{\max} 为最大净光合速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); Q 为 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); k 为响应曲线曲角; R_{day} 为暗呼吸速率 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

2 结果和分析

2.1 曼陀罗光合特性指标的日变化和月变化分析

2.1.1 各月份净光合速率的日变化 在 6 月份至 9 月份曼陀罗叶片净光合速率 (P_n) 的日变化见图 1。由图 1 可知, 实验期间, 曼陀罗净光合速率的日变化均表现为“单峰型”, 不存在显著的“午休”现象, 其净光合速率在上午逐渐升高, 中午达到最大, 下午逐渐降低。6、7 和 8 月份曼陀罗叶片净光合速率的峰值均出现在 11:00 左右, 平均峰值分别为 15.24、19.01 和 9.85 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 9 月份曼陀罗植株叶片净光合速率的峰值出现在 10:00 左右, 平均峰值为 6.30 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。7 月份的日净光合速率整体上高于其他 3 个月份。

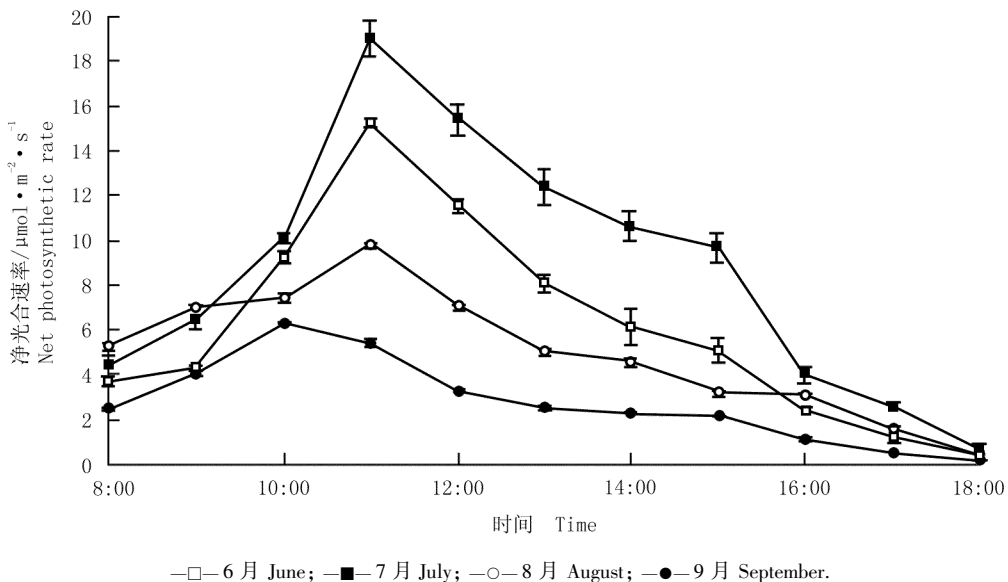


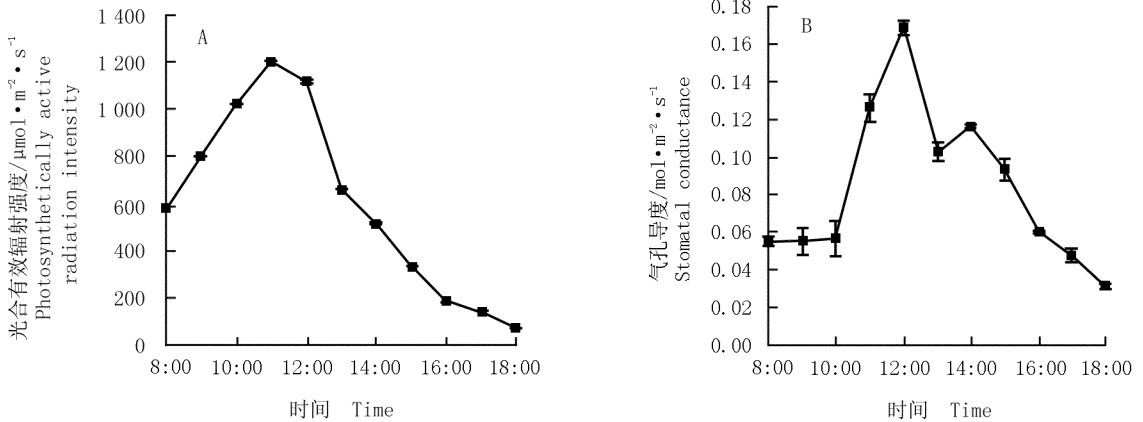
图 1 6 月份至 9 月份曼陀罗叶片净光合速率的日变化
Fig. 1 Daily change of net photosynthetic rate of *Datura stramonium* L. leaves from June to September

2.1.2 光合有效辐射强度和气孔导度的日变化 光合有效辐射强度和曼陀罗叶片气孔导度的日变化见图2-A和B。由图2-A可见:光合有效辐射强度的日变化趋势与净光合速率基本一致,为“单峰型”,均在达到最高值之后逐渐下降,峰值出现在11:00左右。曼陀罗叶片气孔导度的日变化则表现为“双峰型”(图2-B),在每天的早、晚较低,在上午随时间的推移气孔导度随之增高,并在12:00左右达到最高峰,随后开始下降,在14:00左右再次出现1个小的峰值,随后加速下降,直至傍晚时分气孔基本关闭,气孔导度降至最低值。

2.1.3 净光合速率和叶绿素含量的月变化 6月份

至9月份曼陀罗叶片净光合速率和叶绿素含量的月变化见表1。由表1可知:曼陀罗叶片的月平均净光合速率在6月份时较高,7月份达到最大,8月份开始下降,9月份则较低,植物开始出现枯萎现象。差异显著性分析结果显示,不同月份曼陀罗叶片的净光合速率月平均值均有极显著差异($P<0.01$)。

6月份至9月份曼陀罗叶片叶绿素含量(包括叶绿素a、b和总叶绿素)的月平均值的变化趋势与净光合速率月平均值的变化基本一致(表1),最高值也出现在7月份。9月份叶绿素含量较低,并与7月份含量具有极显著差异($P<0.01$)。但曼陀罗叶片叶绿素a、b和总叶绿素含量的月变化略有差异。



A: 光合有效辐射强度的日变化 Daily change of photosynthetically active radiation intensity;
B: 叶片气孔导度的日变化 Daily change of stomatal conductance of leaves.

图2 光合有效辐射强度和曼陀罗叶片气孔导度的日变化

Fig. 2 Daily change of photosynthetically active radiation intensity and stomatal conductance of *Datura stramonium* L. leaves

表1 6月份至9月份曼陀罗叶片净光合速率和叶绿素含量的变化¹⁾

Table 1 Changes of net photosynthetic rate and chlorophyll content of *Datura stramonium* L. leaves from June to September¹⁾

月份 Month	净光合速率/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Net photosynthetic rate	叶绿素 a 含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Chla content	叶绿素 b 含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Chlb content	总叶绿素含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Total content of chlorophyll
6月 June	6.62±0.04b	28.26±2.29a	12.61±2.41ab	2.04±0.24b
7月 July	9.41±0.04a	30.06±1.83a	18.67±2.91a	4.06±0.39a
8月 August	5.08±0.32c	29.81±2.58a	13.79±1.87a	3.62±0.37a
9月 September	2.82±0.17d	18.65±1.73b	7.30±0.81b	2.16±0.21b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示经 LSD 检验在 1% 水平上差异显著 Different small letters in the same column indicate the significant difference at 1% level by LSD test.

2.2 曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线分析

经 SPSS 软件统计分析,采用非直角双曲线模型理论公式对曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线进行拟合,得出公式中的 k 值为 0.951、 A_{max} 值为 19.805 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 R_{day} 值为 0.666 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 α 值

为 0.030,拟合曲线的 $R^2=0.968$ 。根据净光合速率的拟合预测值(P_v)绘制光响应曲线(图3-A),与净光合速率实测值(P_n)拟合结果较好,表明用非直角双曲线模型拟合得出的曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线较为理想,能够完整地反映出在外界良好空气条

件下叶片净光合速率随光合有效辐射强度的变化趋势。在低光合有效辐射强度下,曼陀罗叶片的净光合速率随光合有效辐射强度的增大呈线性升高,因此,在光合有效辐射强度小于 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下对曼陀罗叶片净光合速率(y)和光合有效辐射强度(x)进行直线回归分析^[15-16],得到的回归方程为: $y = -0.6659 + 0.0297x$, $R^2 = 0.9799$ 。由此方程计算得出:曼陀罗叶片的光补偿点为 $22.42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光饱和点为 $689.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 曼陀罗叶片净光合速率的 CO_2 响应曲线分析

采用非直角双曲线模型理论公式对曼陀罗叶片净光合速率的 CO_2 响应曲线进行拟合,得出公式中的 k 值为 1.000、 A_{max} 值为 $21.636 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 α 值为 0.017、 R_{day} 值为 $1.286 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,拟合曲线

的 $R^2 = 0.979$ 。根据净光合速率的拟合预测值(Pv)绘制 CO_2 响应曲线(图3-B),与净光合速率实测值(Pn)拟合效果较好,表明用非直角双曲线模型拟合得出的曼陀罗叶片净光合速率的 CO_2 响应曲线较为理想,能够完整反映出在适当光照条件下曼陀罗叶片净光合速率随 CO_2 浓度的变化趋势。在低浓度 CO_2 条件下,曼陀罗的净光合速率随 CO_2 浓度增大呈线性升高,因此,在 CO_2 浓度小于 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的条件下对曼陀罗叶片净光合速率(y)和 CO_2 浓度(x)进行直线回归分析,得到的回归方程为: $y = -1.2739 + 0.0172x$, $R^2 = 0.9844$ 。由此回归方程计算得出:曼陀罗植株叶片的 CO_2 补偿点为 $74.06 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, CO_2 饱和点为 $1331.97 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

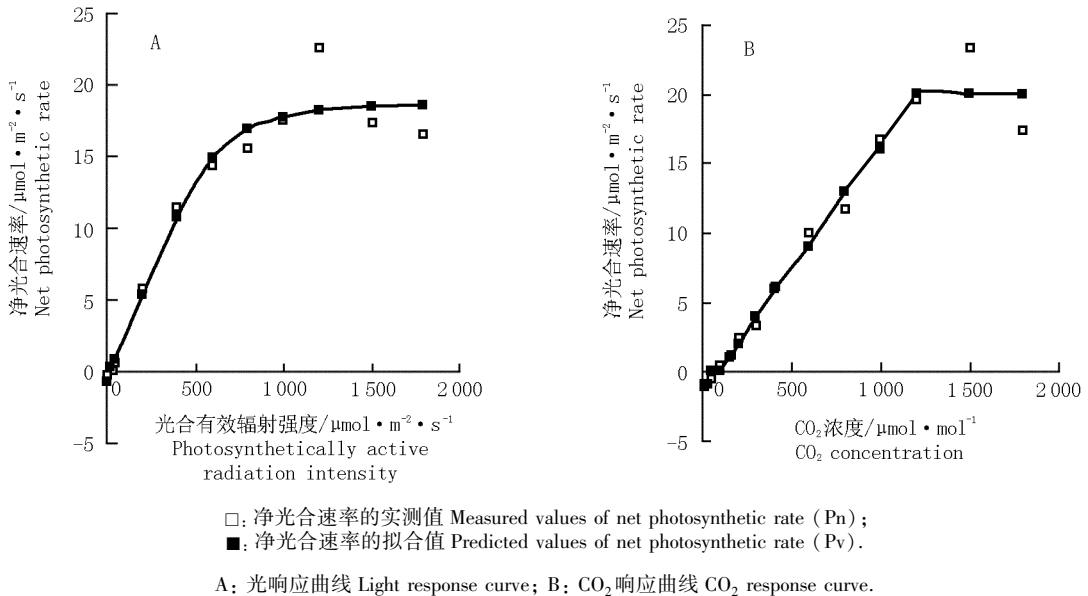


图3 曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线及 CO_2 响应曲线

Fig. 3 Light and CO_2 response curves of net photosynthetic rate of *Datura stramonium* L. leaves

3 讨论和结论

本研究结果表明,在6月份至9月份,曼陀罗叶片净光合速率的日变化均呈“单峰型”,峰值大约出现在11:00左右,其中,7月份的净光合速率峰值最高,为 $19.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。净光合速率和光合有效辐射强度的日变化均呈先升后降的趋势,这是因为光合有效辐射强度发生改变可引起气温、空气相对湿度等环境因子的变化,而空气相对湿度通过影响气孔开闭

来控制 CO_2 流量,从而影响植物的光合速率^[17-18]。朱秀苗^[7]的研究结果显示:产自青海省的曼陀罗叶片净光合速率的日变化呈“双峰型”,与作者的研究结果有所不同。由于植物光合作用是自身生理特性与环境条件综合作用的结果^[19],因此,应对不同产地及不同生境条件下曼陀罗叶片的光合作用特性进行比较后,才能对造成这种差异的具体原因加以验证。

在6月份至9月份间曼陀罗叶片的净光合速率月平均值有极显著差异($P < 0.01$),这可能是多种环境因子综合作用造成的。这几个月份曼陀罗叶片中

叶绿素含量的变化趋势与净光合速率的变化趋势基本一致。有研究者认为,正常情况下植物不会缺少光合作用所需的叶绿素,当叶绿素含量超过某一个限制值后,叶绿素含量的高低与净光合速率的大小则没有必然的相关性^[20]。关于曼陀罗叶片光合作用过程中叶绿素含量的限制值,以及达到限制值前后净光合速率对叶绿素含量的响应情况还需进一步研究。

本研究结果表明,曼陀罗叶片净光合速率的光响应曲线和 CO₂ 响应曲线的变化趋势基本一致,这与其他植物的光合特性是相同的^[12]。具体表现为:在一定阈值内,随着光合有效辐射强度的增加,净光合速率增大;当光合有效辐射强度超过该阈值后,随着光合有效辐射强度的进一步升高,净光合速率的增长速率变缓;当光合有效辐射强度达到一定数值后,净光合速率基本稳定在一定水平。净光合速率与 CO₂ 浓度之间也有同样的变化规律,随 CO₂ 浓度的升高,净光合速率首先表现为迅速升高,然后增长变缓,当 CO₂ 浓度增加到一定数值后,气孔阻力增大,CO₂ 出现饱和现象,净光合速率稳定在一定水平。

曼陀罗叶片光补偿点为 22.42 μmol · m⁻² · s⁻¹,光饱和点为 689.26 μmol · m⁻² · s⁻¹,说明曼陀罗应属于阳性植物,但具有一定的耐阴性。曼陀罗叶片的 CO₂ 补偿点为 74.06 μmol · mol⁻¹,CO₂ 饱和点为 1 331.97 μmol · mol⁻¹,比一般 C₃ 植物的 CO₂ 补偿点(30~70 μmol · mol⁻¹)^[21] 偏高,说明自然条件下曼陀罗的 CO₂ 同化能力较弱,不利于光合产物的积累。由于本研究仅在光合有效辐射强度 800 μmol · m⁻² · s⁻¹ 的条件下分析了 CO₂ 浓度对曼陀罗叶片净光合速率的影响,研究范围不够全面,因此,对在不同光合有效辐射强度条件下曼陀罗叶片净光合速率的变化尚需深入全面的研究,以便了解曼陀罗在各种条件下的光合特性^[22],从而为曼陀罗的人工栽培提供理论依据。

参考文献:

[1] 邢维贺,阮成江,李贺. 5种能源植物种子含油量与脂肪酸组成[J]. 可再生能源, 2010, 28(2): 62-66.
[2] 张美淑,金大勇. 曼陀罗在植保领域的利用现状及展望[J]. 中国林副特产, 2005(3): 80.

[3] 娄凤菊,连立峰,周玉秋,等. 曼陀罗的栽培技术及应用[J]. 特种经济动植物, 2004, 7(5): 30.
[4] 张宏利,杨学军,刘文国,等. 曼陀罗化学成分与生物活性研究现状及展望[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(2): 98-102.
[5] 边振考,王翠珍,李芹. 曼陀罗叶、种子可供药用的初步试验[J]. 时珍国医国药, 1998, 9(6): 521-522.
[6] 徐宁,冉俊祥,杨占臣,等. 曼陀罗毒性的研究进展[J]. 检验检疫科学, 2009, 19(1): 62-65.
[7] 朱秀苗. 青海省曼陀罗植物资源特性及开发利用前景的研究[D]. 西宁:青海师范大学生命与地理科学学院, 2009.
[8] 岳瑾. 菜用枸杞光合特性研究[D]. 保定:河北农业大学园艺学院, 2006.
[9] 阮成江,李代琼. 半干旱黄土丘陵区沙棘的光合特性及其影响因子[J]. 植物资源与环境学报, 2000, 9(1): 16-21.
[10] 王文佳,吕岩楨,郭传友. 构树光合生理特征的初步研究[J]. 安徽农学通报, 2010, 16(1): 53, 100.
[11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 1版. 北京:高等教育出版社, 2000: 134-137.
[12] 宋庆安,童方平,易霭琴,等. 虎杖光合生理生态特性研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(12): 71-76.
[13] 刘宇锋,萧浪涛,童建华,等. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 76-79.
[14] 陆佩玲,于强,罗毅,等. 冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 12-14.
[15] 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社, 1999: 89-91.
[16] Richardson A D, Berlyn G P. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA [J]. American Journal of Botany, 2002, 89(1): 88-94.
[17] 刘志龙,方建民,虞木奎,等. 三种林-茶复合林分中环境因子和茶的光合特性参数的日变化规律[J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(2): 62-67.
[18] 徐克章,曹正菊,陈星,等. 人参叶片光合作用和气孔开闭日变化的研究[J]. 植物生理学通讯, 1987(3): 35-36.
[19] 张颖,呼天明. 普那菊苣夏季光合速率日变化及其影响因子的研究[J]. 西北农业学报, 2007, 16(5): 184-187.
[20] 胡利明. 柑橘光合特性的研究及 C₄ 光合途径的初步探讨[D]. 武汉:华中农业大学园艺林学学院, 2007.
[21] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5版. 北京:高等教育出版社, 2004: 80-81.
[22] 孙存华,李扬,贺鸿雁,等. 藜的光合特性研究[J]. 西北植物学报, 2006, 26(2): 416-419.

(责任编辑:佟金凤)