

豫西刺槐能源林培育的光合生理生态理论基础

谭晓红,王 爽,马履一*,彭祚登,贾忠奎

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083)

摘要:采用 LI-6400 便携式光合作用测量系统对豫西丘陵区当年生 5 个品种的刺槐叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)等光合生理参数及光响应过程进行了测定,结果表明:(1)5 个刺槐能源林品种在 7 月中旬、8 月中旬及 9 月底的净光合速率日变化峰值大都分别出现在 12:00、08:00 或 10:00、10:00。(2)不同刺槐品种生长节律间具有明显的差异,品种 83002、8048、8044 在 7 月份处于生长盛期,而品种 3-I 在 9 月份进入生长盛期;84023、3-I 及 83002 具有相对良好的光合物质积累能力,具有刺槐能源林高产品种的光合特征。(3)供试刺槐品种在 7 月中旬更多地表现为非气孔限制为主导因素的光合限制,而在 8 月中旬及 9 月底则均表现为气孔限制和非气孔限制两种因素交替主导。(4)5 个供试品种所测得的光饱和点均在 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,供试品种在 7 月中旬均不会出现强光抑制情况,品种 83002 出现午休现象的原因可能是温度上升与湿度下降综合作用的结果。

关键词:刺槐;净光合速率;光响应曲线;品种效应

A preliminary study on the photosynthetic characteristics of varied cultivars of *Robinia pseudoacacia* L. energy forest in the west of Henan Province

TAN Xiaohong, WANG Shuang, MA Lüyi*, PENG Zuodeng, JIA Zhongkui

The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China

Abstract: Photosynthesis is the basis of other physiological activities including growth, development, and food formation in trees. In order to discuss the photosynthetic theoretical basis for the cultivation of *Robinia pseudoacacia* L. energy forest, the photosynthetic parameters, i. e. P_n , Tr , G_s , etc, as well as photosynthetic light-response curves of 5 varieties of *Robinia pseudoacacia* were measured using the Li-6400 portable photosynthesis system in the west of Henan Province, China. Four main conclusions were gotten. The peak value of net photosynthetic rate (P_n) of 5 varieties of *Robinia pseudoacacia* occurred at noon, 08:00 or 10:00 a. m., 10:00 a. m. in mid-July, mid-August and late September respectively. Obvious difference existed among growth dynamics of 5 varieties, and varieties 83002, 8048 and 8044 showed fast growth rate in July, while variety 3-I grew fastly in September. Varieties 84023, 3-I and 83002 were found having relatively high photosynthetic accumulation capacity and had the high-yield photosynthetic characteristics. Based on the tendency of changes in P_n , intercellular CO_2 concentration (C_i), stomatal conductance (G_s) and stomatal limitation (L_s), we speculated that *Robinia pseudoacacia* were restricted in photosynthetic ability mainly by non-stomatal factors in mid-July, while they were restricted mainly by both stomatal factors and non-stomata factors in mid-August and the end of September. Light is the power in photosynthesis. Light compensation point is a critical value, over this value plant still can maintain photosynthesis. Light saturation point is a limit value, over this value photosynthetic rate does not increase, even decrease. Light saturation point (LSP) of *Robinia pseudoacacia* varieties were all greater than $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and so, these tested varieties all could not suffer restriction from strong light occurred in mid-July. Photosynthesis is related to temperature, light radiation and CO_2 concentration, which are necessary to valuate photosynthetic capacity. Except variety 83002, net photosynthetic rate (P_n) of other four varieties of *Robinia pseudoacacia* had only one peak, only variety 83002

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD18B0103);高等学校科技创新工程重大培育资金项目(706007)

收稿日期:2010-01-07; **修订日期:**2010-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

had two peaks, one at 10:00 a. m. and the other at 02:00 p. m. Transpiration rate (Tr) of varieties 83002 and 84023 had two peaks, the others had one peak only. The phenomenon of “photosynthesis sleep at noon” of variety 83002 might be explained as the combined result of both increment in temperature and drop of relative humidity. It was suggested that in order to estimate photosynthetic accumulation capacity and select one quality variety, the photosynthetic characteristics of varied cultivars of *Robinia pseudoacacia* L. energy forest could be analyzed.

Key Words: *Robinia pseudoacacia* L.; net photosynthetic rate; light-responses curve; effect of *R. pseudoacacia* cultivars

随着石油资源的日益枯竭,在 20 世纪 70 年代初世界上发生了能源危机^[1],人们对生物能源的开发利用更为关注,各国开始注意木质能源的地位和作用。近 30a 来,我国经济快速增长,已成为能源的第二大消费国,能源短缺问题十分突出,可再生能源的研究、开发和利用已成为我国实现可持续发展的关键^[2-3]。木质能源是重要的可再生能源之一,人们通常将专门为提供木质能源而经营的森林称为能源林^[1]。瑞典、美国、新西兰等国家分别以柳树^[4]、杨树^[5]、桉树^[6]等树种作为重要的木质能源树种进行了较系统的研究。在木质能源林营造树种选择方面,我国业已筛选出柳树、杨树、柞柳、刺槐、沙棘、紫穗槐等多个树种^[7-8]。对于木质能源林树种的研究,目前主要围绕树种选择与改良、立地条件控制、造林整地方式、造林密度控制、林地水肥管理等方面展开^[2-3, 8]。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)系豆科(*Leguminosae*),蝶形花亚科(*Papilionoideae*),刺槐属(*Robinia* L.),落叶乔木,浅根系树种,具有适应性强、耐干旱、耐贫瘠、易繁殖、生长快等特点,1989 年从欧洲引进。在我国北纬 23—46°、东经 86—124°的广大区域内均有栽培。国内在刺槐遗传改良^[9]、栽培技术措施^[10]、病虫害防治^[10]、利用途径^[11]等方面已展开了广泛的研究,对刺槐光合生理的相关研究也已逐步展开^[12-13],虽取得了系列技术成果,对刺槐能源林的建设起到较为明显的科技支撑作用,但仍欠缺对刺槐品种光合生理的探讨。然而将刺槐作为能源林树种进行培育的科学技术支撑体系总体尚显薄弱,尤其是在刺槐能源林培育的生理生化、生理生态理论基础研究方面更显欠缺。光合作用是植物生物量积累的根本途径,取决于环境因素以及与树种遗传品质相关的因素,是能源林培育的生物学基础。鉴于此,本试验以豫西丘陵区 5 个不同刺槐能源林品种为试材,探讨了不同刺槐品种光合作用的日变化、季变化规律以及光响应曲线特征,以期为刺槐能源林培育提供生理生态理论基础,并为刺槐能源林品种筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于河南省孟津县牛步河能源林试验种植园内。地处豫西丘陵地区,属亚热带和温带的过渡地带,季风环流影响明显,春季多风常干旱,夏季炎热雨量充沛,秋高气爽日照长,冬季寒冷雨雪稀少。1 月最冷,平均为 -0.5℃,7 月最热平均为 26.2℃。年平均气温 13.7℃,年平均降水量为 650.2mm。土壤为褐土。

1.2 供试材料和方法

供试刺槐品种均选育于河南,5 个刺槐品种分别为 83002(品种 1)、8048(品种 2)、8044(品种 3)、3-I(品种 4)、84023(品种 5)。均于 2008 年春埋根繁殖,栽植株行距为 0.5m×0.5m,立地条件一致,生长环境相同,采用常规肥水管理。每个品种选择具有代表性的地块(10m×10m)为标准地,在标准地内选取长势一致的健康植株 3 株作为标准株,挂牌。5 个品种在 7、8、9 月份连续 3 个月的平均树高、平均冠幅、平均地径如表 1 所示。在 2008 年 7 月中旬、8 月中旬及 9 月底典型晴朗天气里,选择中等大小、健康植株 3 株,选取树冠南向中上部中等大小、颜色正常的复叶第 4—6 片小叶(自上而下),每株标记 3 片叶。采用 Li-6400 便携式光合系统仪进行连体测定,日变化测定时间为 08:00—18:00,每 2h 测定 1 次,同时测定参数有:光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、光合有效辐射(PAR)、气孔导度(G_s)、气温(T_a)、大气相对湿度(RH)、大气 CO_2 浓度(Ca)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等。气孔限制值(L_s)按公式计算 $L_s = 1 - C_i / Ca$ ^[14]。

1.3 光响应曲线数据采集方法

为避免因环境变化引起不同品种光合光响应曲线的不可比性,在7月中旬5个多云天气进行光合光响应曲线测定。每一品种均选择3株生长良好的植株作重复,每株选择功能叶2片即南向中上部的中等大小、颜色正常的复叶第4、5或6片小叶(自上而下),结果取3次测定数据的平均值。采用Li-6400-02B红蓝光源提供不同的光合有效辐射强度:2 000、1 800、1 500、900、600、300、150、100、60、30、10、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,样本室 CO_2 浓度控制为 $(400 \pm 1) \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,空气温度控制为 $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$,空气相对湿度 $(40 \pm 8)\%$ 。利用Li-6400自动“light-cure”曲线测定功能,为尽量避免误差,每一品种在测定2条曲线后即转到另一品种。测定前对不同刺槐品种进行30 min光合有效辐射强度为1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光诱导^[15]。

表1 不同刺槐品种当年生苗木在7、8、9月份的平均生长量(平均值 $\pm$ 标准差)

Table 1 Growth of *R. pseudoacacia* cultivars in July, August and September of 2008 (mean $\pm$ SD)

品种 Varieties	7月 Jul.			8月 Aug.			9月 Sep.		
	树高/cm Tree height	地径/mm Ground diameter	冠幅/cm Crown diameter	树高/cm Tree height	地径/mm Ground diameter	冠幅/cm Crown diameter	树高/cm Tree height	地径/mm Ground diameter	冠幅/cm Crown diameter
1	144.0 $\pm$ 23.9	11.60 $\pm$ 3.03	54.5 $\pm$ 14.5	257.5 $\pm$ 16.1	16.91 $\pm$ 1.48	92.9 $\pm$ 14.8	264.7 $\pm$ 16.8	20.13 $\pm$ 2.26	67.9 $\pm$ 17.0
2	183.0 $\pm$ 17.3	12.27 $\pm$ 2.14	58.4 $\pm$ 13.5	304.6 $\pm$ 26.5	23.22 $\pm$ 2.27	118.2 $\pm$ 15.6	334.0 $\pm$ 24.6	23.33 $\pm$ 2.21	96.2 $\pm$ 33.8
3	166.0 $\pm$ 17.3	11.59 $\pm$ 2.28	51.7 $\pm$ 14.3	256.5 $\pm$ 16.8	18.37 $\pm$ 2.01	99.3 $\pm$ 15.2	291.1 $\pm$ 19.5	21.29 $\pm$ 4.34	94.9 $\pm$ 36.7
4	64.7 $\pm$ 13.0	8.37 $\pm$ 1.66	51.9 $\pm$ 14.4	175.4 $\pm$ 5.3	22.03 $\pm$ 1.29	122.2 $\pm$ 11.1	304.6 $\pm$ 22.5	28.06 $\pm$ 3.74	164.4 $\pm$ 24.0
5	74.5 $\pm$ 14.1	8.38 $\pm$ 1.22	50.5 $\pm$ 10.9	150.8 $\pm$ 8.7	17.37 $\pm$ 1.86	95.3 $\pm$ 10.6	263.2 $\pm$ 23.6	24.01 $\pm$ 4.02	134.5 $\pm$ 34.9

1.4 数据处理方法

统计分析采用SAS软件对光响应曲线进行模拟计算。

第1种(I)利用Prioul和Chartier建立的非直角双曲线模型对几个品种刺槐叶片净光合速率(P_n)与光合有效辐射(PAR)之间的关系进行拟合。非直角双曲线模型理论公式^[16]为:

$$P_n = \frac{\varphi PAR + P_{n_{\max}} - \sqrt{(\varphi PAR + P_{n_{\max}})^2 - 4k\varphi PAR P_{n_{\max}}}}{2k} - R_d \quad (1)$$

第2种(II)拟合模型选择直角双曲线修正式^[17],表达式如下:

$$P_n = \frac{\varphi PAR(1 - \beta PAR)}{\gamma PAR + 1} - R_d \quad (2)$$

式中, P_n 为叶片净光合速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), φ 为初始量子效率($\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$), PAR 为光合有效辐射($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), $\gamma = \varphi/P_{\max}$, $P_{\max}$ 为最大净光合速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), R_d 为暗呼吸速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),光响应曲线曲角(k); β 为修正参数,当 $\beta=0$ 时,(2)式回复为直角双曲线。

2 结果与分析

2.1 不同刺槐品种净光合速率的日、季节变化特征

光合作用日变化是植物生产过程中物质积累与生理代谢的基本过程,也是研究植物生长和代谢环境响应的重要手段。图1-A、B、C是光合有效辐射(PAR)和刺槐生长环境因子的测定结果。可以看出,光合有效辐射、温度、湿度日变化均表现为典型的单峰曲线,且显然7月份具有高温、高湿、低光合有效辐射的特征,而8、9月份的3项环境因子较为接近。由图2可见,在7月份仅品种1叶片净光合速率(P_n)日变化存在明显的光合“午休”现象,峰值分别出现在10:00及14:00,其他4个品种的刺槐叶片净光合速率(P_n)日变化均呈单峰曲线,最大值大多出现在12:00;在8月份,5个品种净光合速率最大值出现时间明显提前,大多发生在08:00或10:00,其后则表现出明显的光合速率下降现象,结合环境因子变化来看,这可能与8月份高光强与低湿共同抑制作用有关。进入至9月份,5个刺槐品种均表现为单峰态,最大值均出现在10:00。

从图2可以看出,品种1、品种2、品种3在7月中旬的净光合速率要远远高于8月中旬和9月底,而品种

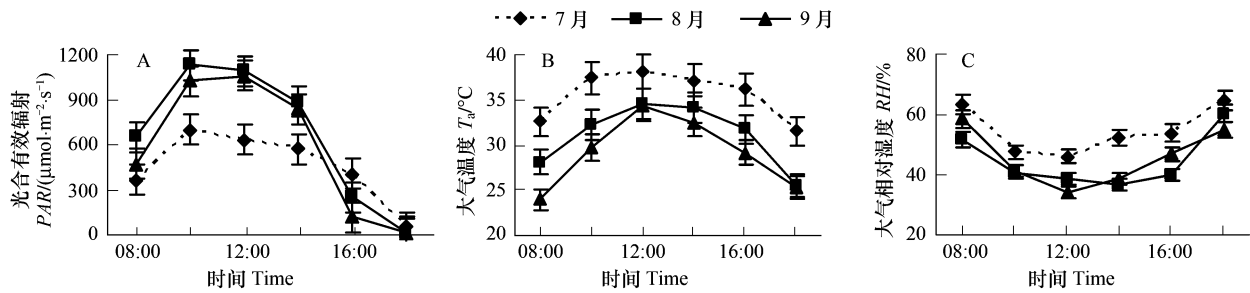


图1 刺槐5个品种光合有效辐射(PAR)、大气温度(T_a)和大气相对湿度(RH)的日变化和季变化

Fig. 1 Diurnal and seasonal variations in photosynthetically active radiation (PAR), air temperature (T_a) and relative humidity (RH) of *R. pseudoacacia* cultivars

5 在7月中旬和9月底的净光合速率较为接近,但均高于8月中旬,值得注意的是,品种4的净光合速率在9月底要高于7月中旬和8月中旬。这表明不同刺槐品种的生长节律具有明显的差异,品种1、品种2、品种3在7月份处于生长盛期,而品种4在9月份进入生长盛期。

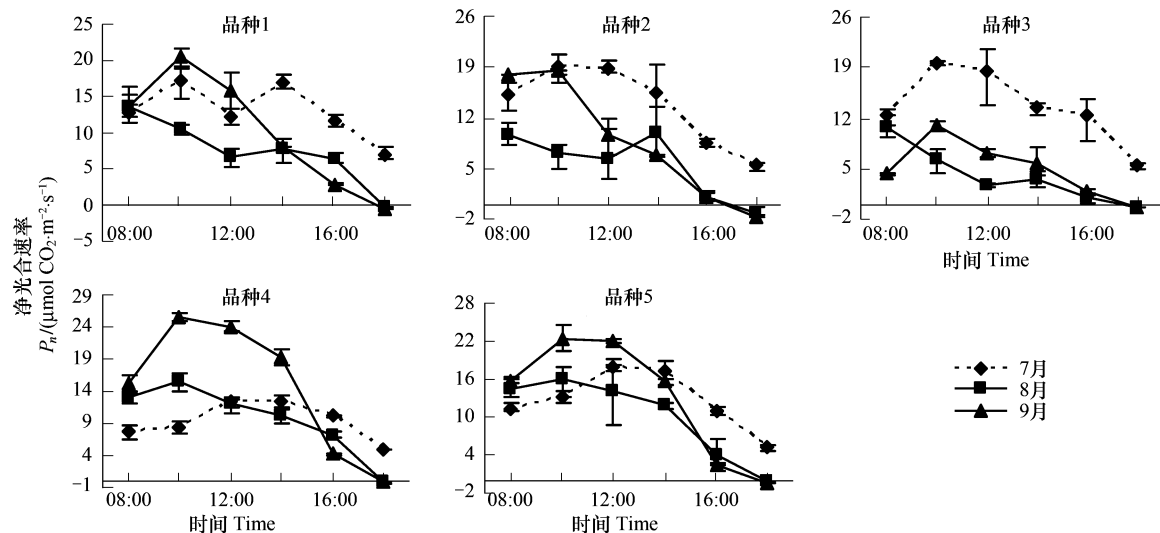


图2 不同刺槐叶片净光合速率(P_n)的日变化和季变化

Fig. 2 Diurnal and seasonal variations of net photosynthetic rate (P_n) of *R. pseudoacacia* cultivars

在高温、高湿、低光强的7月中旬,5个品种净光合速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)日均值大小排序为:品种2(13.72) > 品种3(13.64) > 品种1(12.96) > 品种5(12.59) > 品种4(9.34),单因素多重比较分析结果表明,品种4的净光合速率显著低于另外4个品种;在8月份中旬,5个品种净光合速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)日均值大小排序为:品种5(10.03) > 品种4(9.69) > 品种1(7.48) > 品种2(5.51) > 品种3(3.98),其中,品种4、品种5的净光合速率显著高于品种2和品种3,品种1显著高于品种3;到9月底,5个品种净光合速率($\mu\text{molCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)日均值大小排序为品种4(14.66) > 品种5(13.00) > 品种1(10.06) > 品种2(8.74) > 品种3(4.93),5个品种两两之间均具显著差异。可以发现,不同品种在不同月份的大小排序位置具有明显差异,品种5在3个月均表现出良好的光合作用能力,品种4的净光合速率除在7月中旬较低外,其在8月中旬及9月底均相对较高,品种1在3个月份的净光合速率大小排序位置相对稳定。如将5个品种在不同月份的净光合速率日均值分别求平均,发现净光合速率大小排序结果与8月中旬完全一致,这表明,品种5、品种4及品种1具有相对良好的光合物质积累能力,具备入选刺槐能源林高产品种的光合特征。

2.2 不同刺槐品种蒸腾速率的日、季节变化特征

蒸腾作用影响着植物水分状况,在一定程度上反映了植物调节水分损失的能力及适应干旱环境的方式。从图3可以看出刺槐蒸腾速率(T_r)的日变化曲线为单峰型和双峰型。7月品种1和品种5的 T_r 日变化为“双峰型”;8月品种1和品种2的 T_r 日变化表现为不完整的“双峰型”曲线,品种3的 T_r 日变化则呈缓慢的直线下降特征;9月份各品种 T_r 日变化均呈“单峰型”。结合图2可以发现刺槐叶片的 P_n 和 T_r 日变化过程基本一致。总地来看,7月份蒸腾速率(T_r)日均值相对较8、9月份2个月的高,这与净光合速率日均值表现亦相同。

2.3 不同刺槐品种光合作用气孔限制分析

气孔是植物进行 CO_2 和水汽交换的主要通道,气孔的开闭会对植物叶片的光合和蒸腾产生影响。气孔导度(G_s)是指植物气孔传导 CO_2 和水的的能力,是反映气孔行为最为重要的生理指标^[18]。当 P_n 和 G_s 下降的同时, C_i 亦下降则表明光合限制以气孔限制为主导因素;否则当 P_n 和 G_s 下降的同时, C_i 上升则表明光合限制以非气孔限制为主导因素。

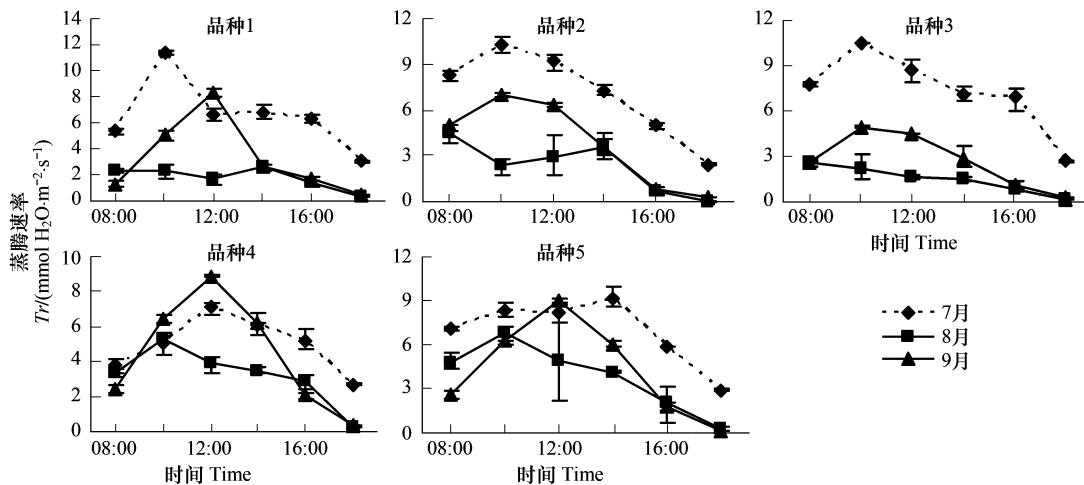


图3 不同品种刺槐叶片蒸腾速率(T_r)的日变化、季变化

Fig. 3 Diurnal and seasonal variations of transpiration rate (T_r) of *R. pseudoacacia* cultivars

以7月份为例,5个刺槐品种的 G_s 变化从清晨到傍晚基本呈现下降趋势(图4-B1—B5)。除品种4外,其它品种的 G_s 日变化幅度较大。 P_n 日变化达到最低值, PAR 接近0时,各品种 C_i 显著增大(图4-A1—A5)。通过对 P_n 、 G_s 和 C_i 的同步分析可以发现,供试的5个品种绝大部分时期的光合限制均是非气孔限制因素占据主导作用,仅品种3和5在12:00—16:00表现为气孔限制。供试品种均在16:00—18:00出现非气孔限制。此外,可以发现品种1光合午休现象主要是由非气孔因素所决定。

8月份各品种均为气孔限制和非气孔限制两种因素交替主导,品种1、2、3(8:00)出现气孔限制比品种4和5(10:00)早2h,除品种1在16:00出现非气孔限制外,其它4个品种均在14:00出现非气孔限制。9月份各品种亦表现为气孔限制和非气孔限制两种因素交替主导,品种2、5非气孔限制时段在10:00—12:00、14:00—18:00,气孔限制时段在12:00—14:00;品种3和4气孔限制时段在08:00—12:00,非气孔限制时段在12:00—18:00;品种1气孔限制时段在12:00—14:00,非气孔限制时段在16:00—18:00。综合以上分析,不难看出7月份的高温高湿条件下,非气孔因素对品种1的光合午休现象发生起主要作用,各月份不同品种均在16:00—18:00出现非气孔限制。

2.4 不同刺槐品种光合作用光响应曲线分析

图5描述了2种拟合方式对5个刺槐品种光合光响应曲线的模拟效果。从图5中可以直观的看出两种模型对5个刺槐品种均有较好的拟合效果,尤其是对于品种2、品种4及品种5。品种3在强光阶段具有明显

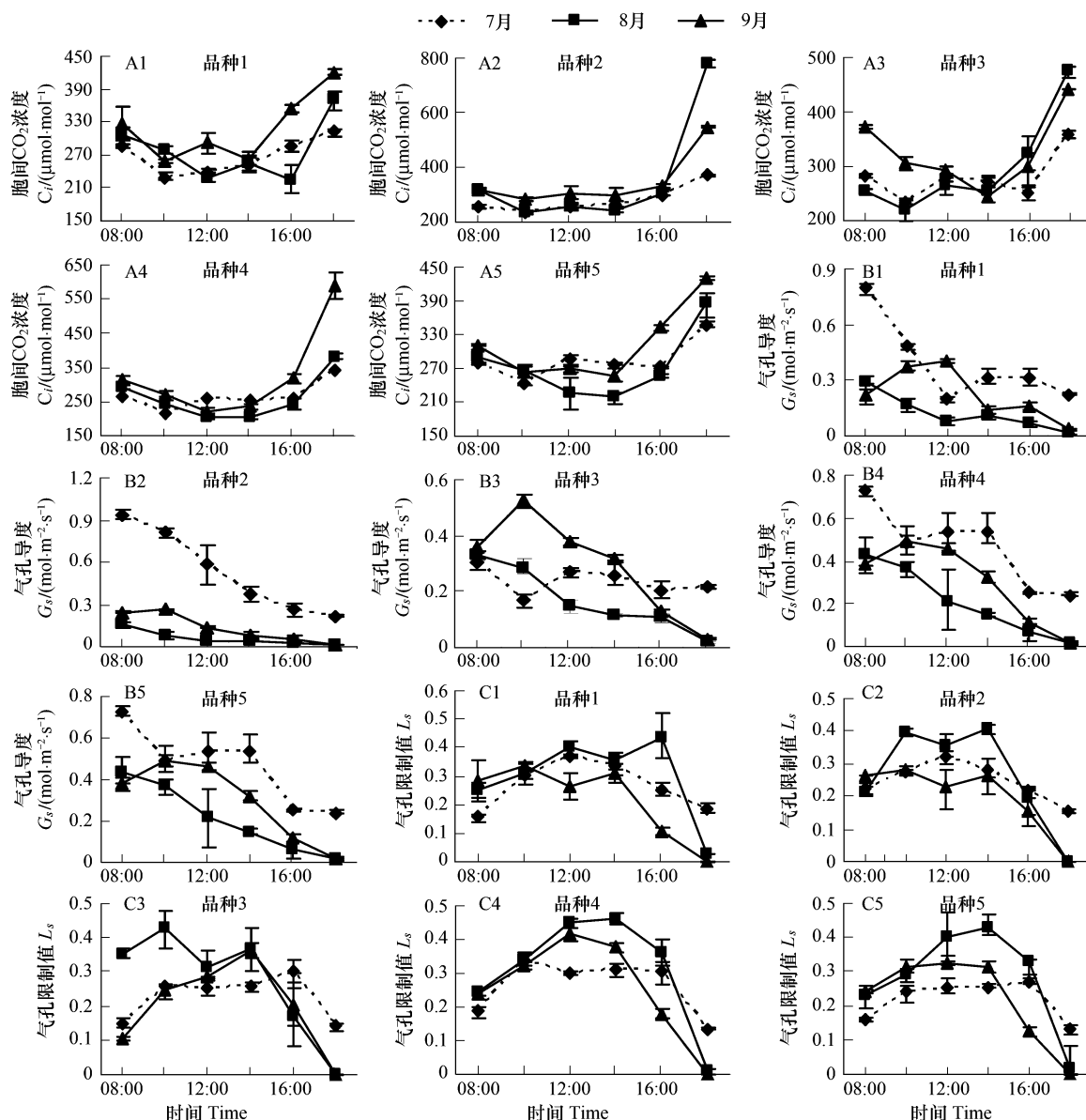


图4 不同品种刺槐叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s) 和气孔限制值 (L_s) 的日变化、季变化

Fig. 4 Diurnal and seasonal variations of intercellular CO_2 concentration (C_i), stomatal conductance (G_s) and stomatal limitation (L_s) of *R. pseudoacacia* cultivars

的光抑制现象。从图5中分析得到,品种1和3均在有效光辐射达 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时,光响应曲线变化幅度趋于稳定。品种2、4、5净光合速率在有效光辐射达 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 后仍具有一定的缓慢上升趋势。这表明不同刺槐能源林品种的光合作用受光强的影响程度存在明显不同。

表2是采用非直角双曲线和直角双曲线修正式两个不同模型分别对5个品种刺槐光响应曲线进行模拟而得到的不同刺槐能源林品种光合光响应曲线特征参数。可以发现,采用非直角双曲线和直角双曲线修正式拟合得到的 $P_{n_{\max}}$ 、 LCP 、 R_d 和 φ 均十分接近,但对 LSP 的拟合值出现较大的差异,很明显,采用直角双曲线修正式较非直角双曲线得到的拟合值更接近实测值,通过非直角双曲线模拟方式得到的光饱和点均明显低于实际实测值(图5)。各品种的 LCP 均低于 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明刺槐对弱光具有较高的利用率。

由表2可知,5个供试品种所测得的光饱和点均在 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其中以品种3及品种1最小。由于实际测定 PAR 值小于 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,可以初步断定在7月中旬5个刺槐品种均不会出现强光抑制

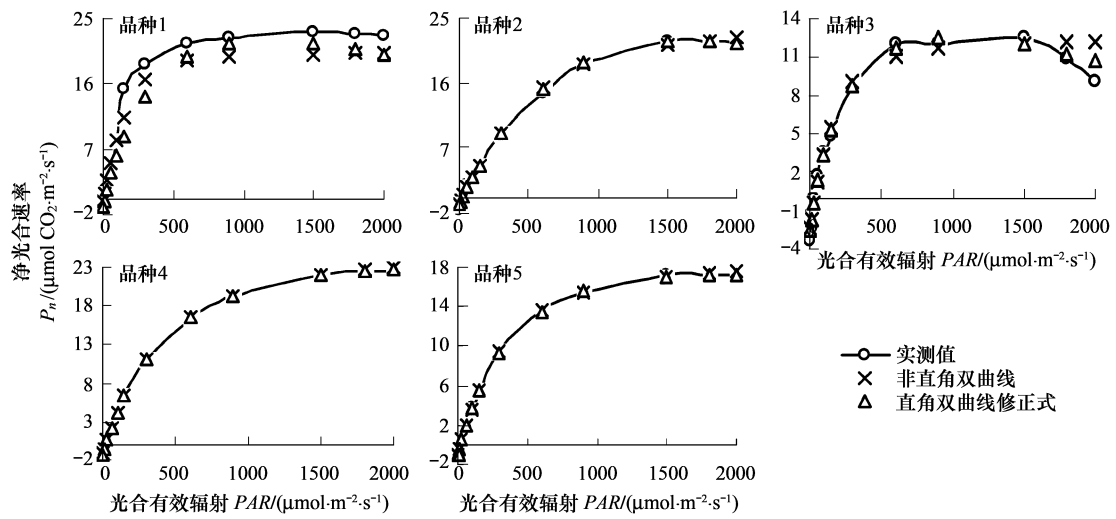


图5 不同品种刺槐光响应曲线模型拟合效果比较

Fig. 5 Relationship between two fitting effects of light-response curves for *R. pseudoacacia* cultivars

情况,这就表明导致品种1出现午休现象的原因可能是温度上升与湿度下降综合作用的结果。将采用两种方式分别得到的5个供试品种最大净光合速率进行平均并排序,其结果为品种4>品种2>品种1>品种5>品种3,这一排序结果与7月中旬各品种净光合速率日均值大小排序显然具有较大差别,这表明刺槐潜在光合作用能力的高低并不能确切地代表其实际光合作用能力的大小。

表2 不同品种刺槐净光合速率光响应曲线模拟参数比较

Table 2 Comparison between two photosynthetic parameters of light-response curves for *R. pseudoacacia* cultivars

品种及拟合方式		最大净光合速率		光补偿点	光饱和点	暗呼吸速率	拟合系数
Variety and fitting modal		Maximum net photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	初始量子效率/ (mol/mol)	Light compensation point / ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	Light saturation point / ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	Dark respiration rates / ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)	Model fitting coefficient
1	I	20.72	0.090	0.53	229.67	-0.047	0.986 1
	II	22.11	0.090	12.15	1175.26	-1.06	0.959 6
2	I	25.16	0.037	21.96	711.30	-0.80	0.997 5
	II	21.90	0.041	24.15	1672.72	-0.97	0.999 1
3	I	14.97	0.064	36.15	270.00	-2.31	0.985 4
	II	12.54	0.081	35.08	1012.52	-2.52	0.994 5
4	I	27.90	0.061	18.34	437.93	-1.12	0.999 9
	II	22.93	0.065	18.78	2447.83	-1.17	0.999 9
5	I	20.48	0.052	17.78	378.18	-0.92	0.999 8
	II	17.31	0.058	18.19	1915.69	-1.01	0.999 8

3 结论与讨论

环境的复杂多变,使植物必须在生理上发生与之相应的改变来适应变化的光环境,光合能力的大小是衡量植物适应生境的重要指标。本文对同一树种刺槐的5个不同品种间光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)等光合生理指标做了分析研究,得到以下结论:

(1)在7月中旬,不同刺槐品种净光合速率日变化最大值大多出现在12:00,而在8月中旬大多发生在08:00或10:00,在9月底,最大值均出现在10:00。

(2)不同刺槐品种的生长节律具有明显的差异,品种1、2、3在7月份处于生长盛期,而品种4在9月份进入生长盛期。84023、3-I及83002具有相对良好的光合物质积累能力,具备入选刺槐能源林高产品种的光合

特征。

(3) 供试刺槐品种在 7 月中旬光合作用在一天当中均存在气孔限制和非气孔限制两种主导因素,在 8 月中旬及 9 月底则均表现为气孔限制和非气孔限制两种因素交替主导。

(4) 采用直角双曲线修正式较非直角双曲线得到的光合光响应曲线参数更接近实测值;5 个供试品种所测得的光饱和点均在 $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,这表明 5 个刺槐品种在 7 月中旬均不会出现强光抑制情况,品种 1 出现午休现象的原因可能是温度上升与湿度下降综合作用的结果。(5) 刺槐潜在光合作用能力的高低并不能确切地代表其实际光合作用能力的大。

根据 Farquhar 和 Sharkey^[14]的传统观点分析,限制光合速率的因素主要归纳为气孔因素和非气孔因素,当 P_n 和 G_s 下降的同时, C_i 亦下降发生气孔限制,而当 P_n 和 G_s 下降的同时, C_i 上升发生非气孔限制。一般认为,“午休”是由于强光导致温度过高或过度失水, G_s 下降, C_i 亦下降,影响 CO_2 的进入,使 P_n 下降^[19],且对于不同的植物引起光合午间效率降低的原因可能是不同的^[20]。本研究在 7 月中旬,83002 在正午时分 G_s 明显下降,但 C_i 不但没有降低反而升高,气孔的关闭没有减少对叶片 CO_2 的供应,说明“午休”现象的形成不是由于气孔导度的下降所造成的,而在非气孔因素中,强光因素显然并不具备,这就很可能是高温导致过度失水 Tr 过高造成的^[21],当然这一结论尚需得到进一步验证。宋庆安^[22]等对刺槐光合生理的研究中也发现刺槐的光合“午休”现象,但发生时间及时间的长度不同,且品种不详。刺槐品种、环境因子、地理状况都可能是导致光合“午休”现象发生及其发生时间长短的因素。

References:

- [1] Li H Q, Ma W Y, Li H Y, Li Y M. Developments and prospects of energy wood in China. *World Forestry Research*, 1999,12(4):51-53.
- [2] Lu W, Wang C F, Wang G S, Yu G S, Zhang C H, Zhang D H, Liu J L. Preliminary research of wood energy development potential in China. *Energy of China*, 2005,27(11):21-26.
- [3] Wan J, Fang S Z. The development of wood energy. *Modern Agriculture Sciences and Technology*, 2006,(10):14-17.
- [4] Fang S Z, Huang B L. A brief introduction to willow energy forest research and plantations in Sweden. *World Forestry Research*, 1997,(3):66-71.
- [5] Zeng S Z, Wu Y X, Xie X M, Zhang D Q, Chen H P. Literature review of researches on biomass energy tree species. *Nonwood Forest Research*, 2008,26(4):109-113.
- [6] Kang S Z, Jia L M, Peng Z D, He B H. Progress on the species choice and silvicultural practices of fuel energy forest. *World Forestry Research*, 2007,20(3):27-33.
- [7] Fu Z, Zhou Z S, Wang H S, Li L. A study on net-photosynthetic rate and water utilization ratio of 7 species of energy-forest plants. *Research of Soil and Water Conservation*, 1992,(1):91-96,116.
- [8] Wan J, Fang S Z, Zhai X C. A primary study on energy forest of seven Poplar clones. *China Forestry Science and Technology*, 2008,22(3):35-38.
- [9] Xun S H, Qiao Y L, Zhang J T, Zhang L J, Bai J, Dou Y Q. Research progress and development tactics on genetics breeding of *Robinia Pseudoacacia* L. in China. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 2009,(1):92-96.
- [10] Gong R, He Y, Sun J H, Zhong C D. *Robinia pseudoacacia* L. fast-growing, high yield demonstration forest cultivation techniques. *Journal of Shandong Forestry Science and Technology*, 1996(6):14-15.
- [11] Song Y F. *Robinia pseudoacacia* L. development and utilization. *China Forestry Science and Technology*, 2002,16(5):11-13.
- [12] Yang W W, Zhang X P, Wang H Y. Study on *Robinia pseudoscacia* L. transpiration, photosynthesis and water use efficiency. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006,13(1):72-75.
- [13] Liu J J, Li J Y. The photosynthetic influence of trees under doubled CO_2 concentration on *Acer truncatum* and *Robinia pseudoacacia*. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences)*, 2008,32(6):143-146.
- [14] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982,33:317-345.
- [15] Chen G Y, Yu G L, Chen Y, Xu D Q. Exploring the observation methods of photosynthetic responses to light and carbon dioxide. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006,32(6):691-696.
- [16] Graham D F. Models of photosynthesis. *Plant Physiology*, 2001,125:42-45.

- [17] Duan A G, Zhang J G. Selection of models of photosynthesis in response to irradiance and definition of attribute of weak light. *Forest Research*, 2009,22(6):765-771.
- [18] Zhang X Q, Xu D Y. Effects of temperature on the photosynthetic physio-ecology of 18-year-old Chinese fir(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.). *Scientia Silvae Sinicae*, 2002,38(3):27-33.
- [19] Zhu W Z, Wang J X, Xue J H, Yan W X. Study on the photosynthetic physiological characteristics of *Alnus cremastogyne*. *Journal of Southwest Forestry College*, 2001,21(4):196-204.
- [20] Ge M J, Ke S S. Primary study of causes of midday decline of photosynthetic efficiency in *Viburnum odoratissimum* leaves. *Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences)*, 2002,25(3):294-298.
- [21] Zhou Q, Xu C C, Zhao S J, Meng Q W. The role of SOD in protecting the photosynthetic apparatus of soybean leaves from midday high light stress. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1995,21(4):397-401.
- [22] Song Q A, Tong F P, Yi A Q, Zou L W, Li G. Studies on eco-physiological characteristics of photosynthetic of diurnal variation of *Robinia pseudoacacia*. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008,24(9):156-160.

参考文献:

- [1] 李慧卿,马文元,李慧勇,李玉敏. 我国能源林发展与展望. *世界林业研究*,1999,12(4):51-53.
- [2] 吕文,王春峰,王国胜,俞国剩,张彩虹,张大红,刘金亮. 中国林木生物质能源发展潜力研究(1). *中国能源*,2005,27(11):21-26.
- [3] 万劲,方升佐. 能源林的发展概述. *现代农业科技*,2006,(10):14-17.
- [4] 方升佐,黄宝龙. 瑞典柳树能源林的研究及发展概况. *世界林业研究*,1997,(3):66-71.
- [5] 曾淑珍,吴延旭,谢晓敏,张党全,陈鸿鹏. 生物质能源树种的研究进展. *经济林研究*,2008,26(4):109-113.
- [6] 康树珍,贾黎明,彭祚登,何宝华. 燃料能源树种选育及培育技术研究进展. *世界林业研究*,2007,20(3):27-33.
- [7] 傅左,周泽生,王哈生,李立. 七种能源林植物的净光合速率及其水分利用率的研究. *水土保持研究*, 1992,(1):91-96,116.
- [8] 万劲,方升佐,翟学昌. 7个杨树能源林无性系的初步选择. *林业科技开发*,2008,22(3):35-38.
- [9] 荀守华,乔玉玲,张江涛,张丽君,白金,窦永琴. 我国刺槐遗传育种现状与发展对策. *山东林业科技*,2009,(1):92-96.
- [10] 宫锐,何勇,孙建辉,仲崇说. 刺槐速生丰产示范林栽培技术总结. *山东林业科技*,1996:(6):14-15.
- [11] 宋永芳. 刺槐资源的开发利用. *林业科技开发*,2002,16(5):11-13.
- [12] 杨文文,张学培,王洪英. 晋西黄土区刺槐蒸腾、光合与水分利用的试验研究. *水土保持研究*,2006,13(1):72-75.
- [13] 刘娟娟,李吉跃. CO₂浓度倍增对元宝枫和刺槐光合特性的影响刺槐光合特性的研究. *南京林业大学学报:自然科学版*,2008,32(6):143-146.
- [15] 陈根云,俞冠路,陈悦,许大全. 光合作用对光和二氧化碳响应的观测方法探讨. *植物生理与分子生物学学报*,2006,32(6):691-696.
- [17] 段爱国,张建国. 光合作用光响应曲线模型选择及低光强属性界定. *林业科学研究*,2009,22(6):765-771.
- [18] 张小全,徐德应. 温度对杉木中林龄针叶光合生理生态的影响. *林业科学*,2002,38(3):27-33.
- [19] 朱万泽,王金锡,薛建辉,鄢武先. 四川桉木光合生理特性研究. *西北林学院学报*,2001,21(4):196-204.
- [20] 葛明菊,柯世省. 珊瑚树叶片光合效率午间降低的原因初探. *浙江师范大学学报(自然科学版)*,2002,25(3):294-298.
- [21] 邹琦,许长成,赵世杰,孟庆伟. 午间强光胁迫下 SOD 对大豆叶片光合机构的保护作用. *植物生理学报*,1995,21(4):397-401.
- [22] 宋庆安,童方平,易霭琴,邹丽伟,李贵. 刺槐光合生理生态特性日变化研究. *中国农学通报*,2008,24(9):156-160.