

文章编号: 1001-1498(2009)05-0677-06

思茅松干季光合生理日动态及光响应特征分析

刘娟, 梁军生, 王健敏, 陈晓鸣*, 杨子祥, 陈航

(中国林业科学研究院资源昆虫研究所, 国家林业局资源昆虫培育与利用重点实验室, 云南 昆明 650224)

摘要:采用 Licor-6400型便携式光合测定仪测定了思茅松干季的光合作用日变化及光响应特征,分析了光合生理与生态因子之间的相互关系。结果表明:思茅松净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)的日变化均呈三峰曲线, P_n 峰值分别出现在 12:00、14:00和 17:00,最高峰出现在光强最强、温度最高的时刻(14:00),胞间 CO_2 浓度(C_i)变化方向则相反。 P_n 、 T_r 和气孔导度($Cond$)与主要环境指标光合有效辐射(PAR)、空气温度(T_a)和大气相对湿度(RH)之间的关系符合二次曲线的变化规律。 P_n 、 T_r 与 PAR 、 T_a 和 RH 的相关程度都达到了极显著水平($P < 0.01$), $Cond$ 与 T_a 相关程度达到显著水平($P < 0.05$)。 PAR 是影响干季思茅松 P_n 和 $Cond$ 最主要的环境因子,而 T_r 是受 T_a 影响最强烈的生理因子。非直角双曲线拟合的思茅松光饱和点(LSP)为 $1800 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ 左右,表现为典型的阳性树种。

关键词:思茅松;干季;光合日动态;光响应

中图分类号: S794 文献标识码: A

Diurnal Change of Photosynthetic Characteristics and Response to Light Intensity of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon var. *langbianensis*

LIU Juan, LIANG Jun-sheng, WANG Jian-min, CHEN Xiao-ming, YANG Zi-xiang, CHEN Hang

(Research Institute of Resource Insects, CAF; Key Laboratory of Breeding and Utilization of Resource Insects of State Forestry Administration, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: Diurnal changes of photosynthesis and light response curve of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon var. *langbianensis* were measured with Licor-6400 in dry season, and the relationship among the photosynthetic physiological factors and the ecological factors were analyzed. The results showed that the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and Water Use Efficiency (WUE) of *P. kesiya* Royle ex Gordon var. *langbianensis* had a diurnal change with three peaks respectively in dry season, the peaks of P_n occurred at 12:00, 14:00 and 17:00 respectively when the light intensity and temperature reached the highest level (14:00), while intercellular CO_2 concentration (C_i) changed in an adverse way. The correlations between P_n and PAR , T_a , RH , T_r and PAR , T_a , RH , $Cond$ and PAR , T_a , RH fitted quadratic curve model respectively. There was a significant positive correlation between P_n and photosynthetic active radiation (PAR) ($P < 0.01$), air temperature (T_a) and relative humidity (RH), T_r and PAR , air temperature (T_a) and relative humidity (RH), and $Cond$ and T_a ($P < 0.05$). The same environmental factors had different effects on P_n , T_r and $Cond$. PAR was the most sensitive environmental factor effecting on the P_n and $Cond$ of *P. kesiya* Royle ex Gordon var. *langbianensis*. Among the test photosynthetic

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 云南省应用基础研究重点项目“利用蛀干害虫作为指示昆虫诊断森林健康研究”(2006C0015Z); 国家林业局林业公益性行业科研专项“中国森林对气候变化的响应与林业适应对策研究”(200804001); 国家林业局 948项目“利用昆虫诊断森林健康评价指标体系及技术引进”(2009-4-37)

作者简介: 刘娟(1968—),女,云南景东人,博士研究生,主要从事森林健康研究。

*通讯作者

parameters, T_r was the most sensitive to the T_a non-rectangle hyperbola equation that was fitted for light response curve of photosynthesis of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon var *langbianensis*. The high light saturation point (LSP) about $1\ 800\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ showed as typical heliophyte, and it belongs to the high light energy potential productivity tree for its photosynthetic characteristics of high photosynthetic efficiency.

Key words: *Pinus kesiya* Royle ex Gordon var *langbianensis*; dry season; diurnal variation of photosynthesis; light response

思茅松 (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon var *langbianensis*), 主要分布于云南省思茅地区, 常绿乔木, 速生, 是我国南亚热带山地林木的代表类型, 重要的速生用材树种和采脂松树, 云南省的主要用材树种。国内对思茅松的研究主要集中在松脂物理化学特征^[1-7]、优树选择、无性繁殖及生产模式等方面^[6-7]。有关针叶树光合作用的研究较多^[8-10], 关于思茅松光合生理生态学的研究未见报道。光合作用是植物生长发育的基础和生产力高低的决定性因素, 同时又是一个对环境条件变化很敏感的过程, 光合作用主要受到光合有效辐射、环境温度、 CO_2 浓度、叶片生理成熟度以及不同栽培措施的影响^[11-12]。光合速率与植物的产量密切联系, 已被广泛用来作为选择高产品种的重要标准^[13]。研究植物光合作用的日动态变化特征有利于反映其遗传特性和对环境的适应能力, 明确树木的生态学特性^[14-15]。

本文采用 Licor-6400 型便携式光合测定仪, 以普洱市信仿水库思茅松作为研究对象, 通过对其光合日动态及光响应的观测, 分析思茅松光合生理特性的日变化、光响应及其与生境生态因子之间的关系, 探讨该树种对我国南亚热带生态环境的适应, 为思茅松水源林的抚育管理提供参考。

1 实验地概况

实验地位于云南省普洱市信仿水库林区 ($22^\circ 43' \text{N}$, $100^\circ 57' \text{E}$), 海拔 $1\ 355\ \text{m}$, 主要为思茅松林。该区属南亚热带季风气候, 一年有明显的干季 (11 月至次年 4 月) 和雨季 (次年 5—10 月) 之分, 年均气温 17.7°C , 年均降水量 $1\ 535.4\ \text{mm}$, 年蒸发量 $1\ 400 \sim 1\ 900\ \text{mm}$; 全年日照平均 $2\ 159.7\ \text{h}$, 太阳辐射年总量 $533.4\ \text{kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$, 土壤以砖红壤为主, 冬季表土 ($0 \sim 20\ \text{cm}$) 有机质含量 $550\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $650\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷 $200\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $11.1\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $2.54\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $35.30\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $95.98\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 8.04

$\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 孔隙度 25.87% , 土粒密度 $2.56\ \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 细菌总数 4.2×10^3 个 $\cdot (100\ \text{g})^{-1}$, pH 值 5.02 。林下植被主要有: 茶梨 (*Anneslea* Wall)、红木荷 (*Schinus wallichii* Choisy)、粽叶芦 (*Thysanolaena agrostis*)、水锦树 (*Wendlandia uvariifolia* Hance)、多花野牡丹 (*Melastoma affine* D. Don)、来江藤 (*Barringtonia hookeriana* Hook f et Thoms)、滇青冈 (*Cyclobalanopsis glaucoides* Schotky)、漆树 (*Toxicodendron* (Tourm) Mill)、毛杨梅 (*Myrica esculenta* Buch-Ham)、杨翠木 (*Pittosporopsis kerri* Craib)。

2 研究方法

2.1 光合作用日动态测定

在天气晴好的 2008 年 12 月 20—22 日, 树龄 15 a, 采用 Licor-6400 型便携式光合测定仪, 测定思茅松光合作用较强的当年生叶片的各项光合指标的日变化, 以树干中部叶片代表整株树的光合。各指标包括净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、气孔导度 ($Cond$, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)、蒸腾速率 (T_r , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、叶面饱和蒸气压亏缺 (Vpd , Pa)、瞬时光合有效辐射强度 (PAR , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、空气温度 (T_a , $^\circ\text{C}$)、大气相对湿度 (RH , %) 等指标。当测量结果总变异率 < 0.01 时, 读取数据, 每次读取 10 个数据, 3 次重复, 分别取其均值为该时间点的光合参数, 再对不同的 2 d 结果取均值后分析。测定时间为 9:00—18:00, 1 h 测定 1 次。连续测定 2 d 取平均值^[16]。水分利用效率 (WUE) 计算公式为: $WUE = P_n/T_r$ 。叶面积测定使用 Li-3000A 叶面积仪。

2.2 光响应测定

天气晴好的 2008 年 12 月 20—22 日, 采用 Licor-6400 型便携式光合作用测定系统, 开放式气路, 设定温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, CO_2 浓度为 $(400 \pm 2)\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 应用 Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度 (PAR , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 分别在 PAR 为 $2\ 000$ 、 $1\ 600$ 、 $1\ 200$ 、 800 、 400 、 200 、 150 、 100

50.0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下测定思茅松光合作用较强的当年生叶片净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。当测量结果总变异率 < 0.05 时,由红外气体分析仪

自动记录,每株测定 2 次,取 3 株均值后分析。

植物的光响应曲线可以用非直角双曲线模型进行拟合^[17-20],非直角双曲线模型为:

$$P_n = \frac{AQY \cdot PAR + P_{\max} - \sqrt{(AQY \cdot PAR + P_{\max})^2 - 4K \cdot AQY \cdot PAR \cdot P_{\max}}}{2K} - Rd \quad (1)$$

式 (1) 中: P_n 为净光合速率; AQY 为表观量子效率; P_{\max} 为最大净光合速率; K 为曲角; Rd 为暗呼吸速率。参数初始值按下面方程拟合:

$$P_n = AQY \cdot PAR - Rd \quad (2)$$

2.3 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行统计分析和图表制作。

3 结果与分析

3.1 光合生理参数的日变化

3.1.1 净光合速率 (P_n) 日变化 思茅松 P_n 日变化呈三峰曲线 (图 1), 随着 PAR 的增强 (图 2), P_n 逐渐升高, 在 12:00 出现第 1 个高峰, 峰值为 $8.28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 第 2 个高峰在 14:00 出现, 峰值为 $9.69 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 13:00 P_n 为 $5.81 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 均低于前后两个时期的 P_n 值, 出现低谷证明思茅松存在短时间的光合午休现象。14:00 以后, 随着 PAR 的逐渐减弱和 RH 的不断降低, P_n 逐渐降低, 16:00 以后, 随着 RH 的升高, $Cond$ 的增大, P_n 又有所上升, 在 17:00 形成第 3 个高峰, 峰值为 $6.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 低于前两峰。17:00 后再次降低直至为负。思茅松净光合速率 1 d 出现 3 个高峰, 具有较强的光合能力。

3.1.2 气孔导度 ($Cond$) 日变化 思茅松气孔导度

的日变化在 9:00 至 14:00 呈小幅度震荡变化 (图 1), 13:00 后逐渐增大, 17:00 达最大值 ($0.112 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 而后降低。气孔导度受环境因子的影响很大, 适宜的光强和温度有利于气孔开张, 气孔阻力降低, 气孔导度增大, 有利于水、气交换。本实验结果表明: 气孔导度在 9:00 至 14:00 保持小幅震荡, 这期间正是 PAR 迅速增强, 空气温度 (T_a) 升高, 大气相对湿度 (RH) 降低 (图 2) 的时候, 14:00 后随着 PAR 迅速降低, 空气温度下降, 大气相对湿度升高, 气孔导度逐渐增大, 17:00 达到 1 天中最大值, 此时的净光合速率也出现了 1 个高峰。说明思茅松能针对外界环境条件变化与植株自身状况, 通过调节气孔的开闭程度适应湿热生境。

3.1.3 蒸腾速率 (Tr) 日变化 思茅松 Tr 的日变化曲线 (图 1) 与 P_n 的基本一致, 呈三峰曲线, 12:00 和 14:00 出现 2 个强峰, 峰值分别为 2.42 、 $2.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 17:00 出现第 3 个弱峰, 峰值为 $1.66 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。植物通过蒸腾作用运输矿物质, 调节叶面温度, 供应光合作用所需的水分, 利于 CO_2 的同化。 Tr 的日变化与 WUE 并不同步, 而与 V_{pd} 的变化趋势较为一致。

3.1.4 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 日变化 思茅松针叶的 C_i 日变化与 P_n 的变化相反 (图 1), 由于晚上的呼吸作用, 气孔导度较高, 导致早上 C_i 较高。在 9:00 至

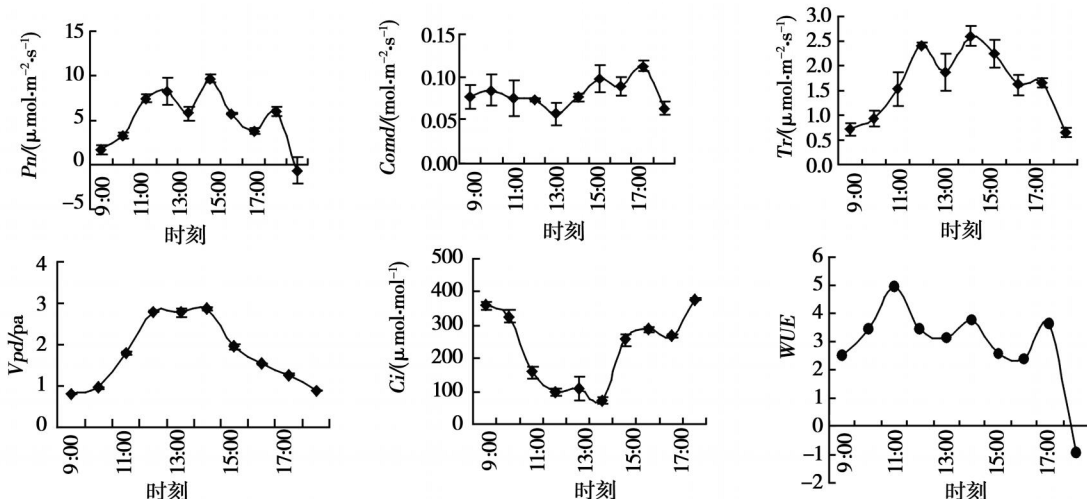


图 1 思茅松叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 ($Cond$)、蒸腾速率 (Tr)、胞间二氧化碳浓度 (C_i)、叶面饱和蒸汽压亏缺 (V_{pd}) 和水分利用效率 (WUE) 的日变化趋势

14:00,随着温度 (T_a)升高, PAR 的增强, P_n 逐渐升高,光合作用消耗了较多的 CO_2 , CO_2 同化加快,导致 C_i 从早上的最高点 ($358.9 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)下降到最低点 ($71.5 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 14:00以后,随着 PAR 的减弱, P_n 的降低, CO_2 同化利用率下降,加之细胞呼吸作用所释放 CO_2 积聚在细胞间隙中,使得 C_i 增加,思茅松 C_i 日变化呈凹峰型。

3.2 叶面微气象因子的日变化

思茅松光合作用的主要外部影响因子有 PAR 、 T_a 和 RH (图 2),由于思茅地区在该季节具有早上多雾的天气特征,9:00之前湿度较大且无明显光

照,直到 9:00以后, PAR 才由 $94.56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 迅速增大,12:00达到 $1574 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,13:00略有下降后,14:00出现 1天的最高峰,达 $1631 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,之后 PAR 逐渐下降,18:00下降到 $46.7 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 T_a 与 PAR 密切相关,由 9:00的 18°C 逐渐升高,12:00至 15:00维持在 25°C 左右,之后随着 PAR 的迅速下降, T_a 开始下降,18:00下降到 17°C 左右。 RH 的日变化趋势与 PAR 相反,随 PAR 的升高而迅速降低,12:00—14:00处于低谷,在 16%左右波动,而后稍有上升,18:00达到 49.7%。

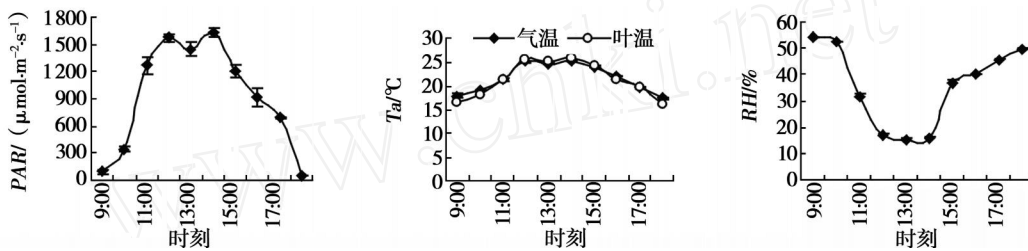


图 2 叶面光合有效辐射强度 (PAR)、气温、叶温 (T_a)和大气相对湿度 (RH)的日变化趋势

3.3 P_n 、 Tr 和 $Cond$ 对环境因子的响应

思茅松叶片的生理指标 P_n 、 Tr 和 $Cond$ 与主要叶面微气象指标 PAR 、 T_a 和 RH 之间的关系符合二次曲线的变化规律^[16](图 3)。 P_n 和 Tr 的变化与

PAR 、 T_a 的变化相一致,随着 PAR 的增强、 T_a 的升高而升高,当 PAR 达到最高点 ($1631 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), T_a 达最高温 (25.6°C)时, P_n 和 Tr 达到最大值 ($9.69 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.61 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

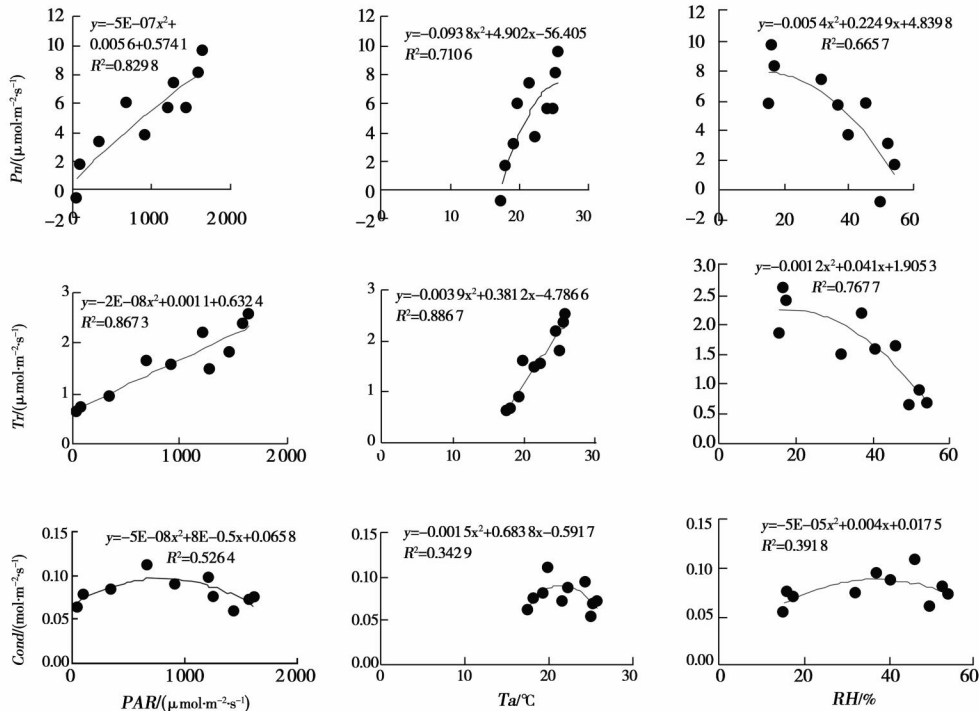


图 3 思茅松叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (Tr)和气孔导度 ($Cond$)对光合有效辐射强度 (PAR)、气温 (T_a)及大气相对湿度 (RH)的响应

之后随着 PAR 和 T_a 的下降而降低。

P_n 和 Tr 与 RH 呈负相关关系, 随其降低而升高。叶面微气象因子对植物的影响常常存在一个变化范围, 实验期间 PAR 的范围为 $700 \sim 1\,600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, T_a 为 $19 \sim 26$, RH 为 $16\% \sim 50\%$ 。 P_n 对 PAR 、 T_a 和 RH 的响应均达到极显著水平 (R^2 分别为 $0.829\,8$ 、 $0.710\,6$ 、 $0.665\,7$, $P < 0.01$)。 Tr 对 PAR 、 T_a 和 RH 的响应均达到极显著水平 (R^2 分别为 $0.867\,3$ 、 $0.886\,7$ 、 $0.767\,7$, $P < 0.01$)。 $Cond$ 的变化与 PAR 、 T_a 和 RH 的相关性达到显著水平 (R^2 分别为 $0.526\,4$ 、 $0.342\,9$ 、 $0.391\,9$, $P < 0.05$)。 P_n 、 Tr 和 $Cond$ 对叶面微气象因子的响应中, P_n 、 Tr 响应程度都较高, 说明其最易受叶面微气象因子的影响; $Cond$ 总体响应程度相对较低, 说明受叶面微气象因子的影响最微弱。

3.4 思茅松光合作用的光响应曲线

思茅松在光强 $0 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下, P_n

随着光强升高而直线地增高 (图 5), 这时光是唯一的外界环境限制因素, 光合量子效率为 $0.026 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。光照强度在 $200 \sim 1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 随着光强的升高而曲线式地增高, 这时温度、空气中的 CO_2 浓度等外界环境因素和活化的碳同化关键酶 Rubisco 数量以及光合电子传递组分的数量等叶片自身因素会成为限制因素。在大于 $1\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以后, P_n 不再随着光强的升高而增高, 即达到了光合作用的饱和阶段。表现为典型的阳性树种, 光补偿点 (LCP) 较低 ($7.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 光饱和点 (LSP) 较高 ($1\,800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 说明思茅松对光强利用范围较广。光响应曲线的非直角双曲线拟合结果表明: 公式 (1) 可以较好的模拟光合速率随光强的变化, 效果较好 ($R^2 = 0.999$), 拟合程度达到极显著水平, 能够反映实际情况。利用公式 (1) 对测定数据进行拟合, 求出思茅松光合反应曲线的特征参数 (表 1)。

表 1 思茅松光合响应特征参数

光饱和最大净光合速率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	暗呼吸速率 / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	K (曲角)	表观量子效率	近光饱和点	光饱和点 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光补偿点 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
11.85	0.35	0.1	0.045	456	1800	7.8

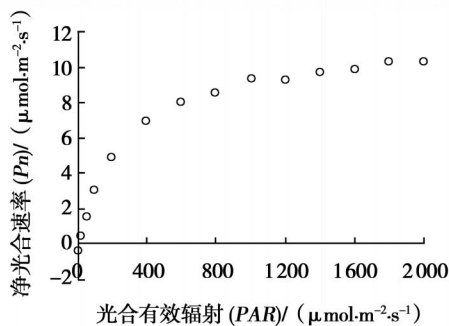


图 4 思茅松光合 - 光强响应曲线

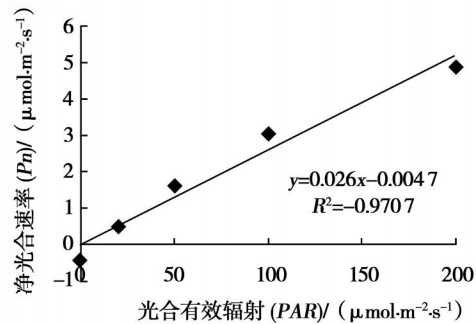


图 5 思茅松光合 - 弱光响应曲线

4 讨论

自然条件下植物的光合作用日变化均有规律可循, 变化曲线多数呈双峰型或单峰型, 单峰型中午光合速率最高, 双峰型上、下午各有一高峰^[21-22]。由于树种生物学特性和天气条件的差异, 使林木净光合速率的日变化类型变得复杂, 出现了三峰曲线^[23-26]。

植物的光合日动态变化反映了植物一天中光合作用随着环境变化而发生的变化, 是植物对特定环境条件的适应结果。思茅松一天中净光合速率的变

化虽然呈三峰曲线, 但最大值出现在 14:00, 正是光强最强、温度最高的时刻, 说明光强对思茅松光合作用具有较大的潜力, 思茅松在南亚热带生态环境条件下温度对其影响较小。进一步的光响应测定也表明, 思茅松光饱和点在 $2\,000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 这种光强在自然界很难达到, 思茅松较宽的光能利用幅度也有利于其生长在我国南亚热带光照资源充足的区域。

为了进一步了解思茅松 13:00 和 16:00 光合下降的原因, 应用传统的 Farquhar 和 Sharkey 判断方法^[14]: 当午间光合速率降低时, 如果胞间 CO_2 浓度

随之降低,而气孔限制值升高,则属于光合作用的气孔限制;当午间光合速率降低时,如胞间 CO_2 浓度上升,而气孔限制值下降,此时不管气孔导度如何变化,都属于非气孔限制因素。由图 1 可知,当光合“午休”出现时,伴随光合速率下降,胞间 CO_2 浓度上升与气孔导度的变化方向相反,说明光合两个时刻下净光合速率下降的原因是非气孔限制因素引起的,即因叶肉细胞光合能力下降引起的。换言之,尽管气孔导度降低,进入叶肉细胞间隙 CO_2 减少,但由于午间叶肉细胞光合能力的下降,对 CO_2 需求量更少,结果反而出现了 CO_2 供过于求。

参考文献:

- [1] 罗良才.滇产 9 种针叶材物理力学性质的研究 [J]. 西部林业科技, 2008, 37(2): 5 - 11
- [2] 段新芳,曹远林,曹永建,等. 漆酶活化处理对木材自由基变化的影响 [J]. 林业科学, 2007, 43(4): 134 - 136
- [3] 陈亚,邱明华,古昆,等. 思茅松松香中的一个新二萜 [J]. 云南植物研究, 2006, 28(3): 323 - 325
- [4] 耿树香,尹晓兵,马惠芬,等. 高 3 萜烯思茅松松脂的化学特征 [J]. 南京林业大学学报, 2005, 29(5): 85 - 87
- [5] 尹晓兵,耿树香,马惠芬,等. 思茅松脂松节油群体的物理及化学特征 [J]. 南京林业大学学报, 2005, 29(5): 80 - 84
- [6] 许玉兰,段安安,王大伟,等. 不同基质对思茅松扦插生根的影响 [J]. 四川林业科技, 2007, 28(2): 54 - 56
- [7] 邓桂香,雷玮,李江,等. 思茅松扦插繁殖潜在优势及生产模式探讨 [J]. 西南林学院学报, 2006, 26(2): 87 - 92
- [8] 梁军生,陈晓鸣,杨子祥,等. 云南松与华山松人工混交林针叶光合速率对光及 CO_2 浓度的响应特征 [J]. 林业科学研究, 2009, 22(1): 21 - 25
- [9] 虞沐奎,姜志林,谢会成,等. 火炬松光合生理生态特性研究 [J]. 河南大学学报, 2004, 34(2): 54 - 58
- [10] 赵溪竹,姜海风,毛子军. 长白落叶松、日本落叶松和兴安落叶松幼苗光合作用特性比较研究 [J]. 植物研究, 2007, 27(3): 361 - 366
- [11] 童平,杨世民,马均,等. 不同水稻品种在不同光照条件下的光合特性及干物质积累 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 505 - 511
- [12] Kumar R R, Manivel L, Marimuthu S. Longevity and factors influencing photosynthesis in tea leaves [J]. *Photosynthetica*, 1998, 35(1): 41 - 46
- [13] Medrano H, Keys A J, Lawlor D W, et al. Improving plant production by selection for survival at low CO_2 concentrations [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1995, 46: 1389 - 1396
- [14] 王文杰,祖元刚,杨逢建,等. 边缘效应带促进红松生长的光合生理生态学研究 [J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2318 - 2326
- [15] 李丽芳,吴晓敏,王立峰. 植物光合生理生态学研究进展 [J]. 山西师范大学学报:自然科学版, 2007, 21(3): 71 - 75
- [16] 林保花,刘金祥,肖生鸿,等. 粤西乡土香根草光合生理生态特征日动态分析 [J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2041 - 2045
- [17] 刘宇峰,萧浪涛,董建华,等. 非直线双曲线模型在光合响应曲线数据分析中的应用 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 76 - 79
- [18] 张弥,吴家兵,关德新,等. 长白山阔叶红松林主要树种光合作用的光响应曲线应用 [J]. 生态学报, 2006, 17(9): 1575 - 1578
- [19] Endo T, Okuda T, Tamura M, et al. Estimation of net photosynthetic rate based on in-situ hyperspectral data [J]. *Agricultural and forest Meteorology*, 2002, 41: 564 - 570
- [20] Walker D A. Automated measurement of leaf photosynthetic O_2 evolution as a function of photon flux density [J]. *Philosophical transactions of the Royal Society London B*, 1989, 323: 313 - 326
- [21] 李建栋,刘岩,高春雨,等. 苦碟子光合作用日变化及其与环境因子关系的研究 [J]. 人参研究, 2008(2): 12 - 15
- [22] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 3: 317 - 345
- [23] 张彩琴,杨持. 内蒙古典型草原几种不同植物的生长动态比较 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1712 - 1718
- [24] 施建敏,郭起荣,杨光耀. 毛竹蒸腾动态研究 [J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 101 - 104
- [25] 常美花,张小红,师占君,等. 加富 CO_2 和铺设反光膜对温室桃杏光合速率的影响 [J]. 北方园艺, 2006(4): 45 - 46
- [26] 贾宏涛,方光新,蒋平安,等. 围栏封育对巴音布鲁克草原两种建群草光合日变化的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2007, 30(3): 49 - 52