

文章编号: 1001-1498(2009)01-0021-05

云南松与华山松人工混交林针叶光合速率对光及 CO₂ 浓度的响应特征

梁军生, 陈晓鸣*, 杨子祥, 刘娟, 王健敏, 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型便携式光合作用测定系统测定了人工混交林中云南松、华山松光合作用对光、CO₂ 浓度的响应曲线, 阐述了云南松、华山松光合作用对光和 CO₂ 浓度的响应特征。结果表明:云南松、华山松光合速率随光强或 CO₂ 浓度的提高而增大, 均可用非直角双曲线拟合, 并得出一些光合响应特征参数, 两树种间差异显著 ($P < 0.05$); 云南松、华山松具有较高的光饱和点 (LSP) 和补偿点 (LCP), 表现为典型的喜阳性特点, 具有较强的光能利用能力。在 CO₂ 饱和下, 云南松、华山松最大净光合速率 (P_{max}) 分别可达 14.768、10.289 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与光饱和下相比, 最大净光合速率 (P_{max}) 分别提高了 56.9% 和 62.0%。与华山松及几个北方针叶树相比, 云南松具有较高的光饱和点、最大净光合速率、RuBP羧化效率 (CE)、光呼吸速率 (R_p)、CO₂ 饱和点 (CSP), 以及较低的暗呼吸速率 (R_d)、光补偿点、CO₂ 补偿点 (CCP)。云南松具有高光效和高 CO₂ 利用率等光合特性, 属于高光能生产潜力的针叶树种。

关键词:云南松; 华山松; 混交林; 光合作用; 响应特征

中图分类号: S791.257 S791.241

文献标识码: A

Photosynthesis Rate in Response to Light Intensity and CO₂ Concentration in the Mixed Plantation of *Pinus yunnanensis* and *Pinus amandii*

LANG Jun-sheng, CHEN Xiaoming*, YANG Zi-xiang, LIU Juan, WANG Jian-min, 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: The response of photosynthetic rate to light intensity and CO₂ concentration in *Pinus yunnanensis* and *P. amandii* were measured with Licor-6400. The results indicated that these responses could be fitted by non-rectangle hyperbola equations. The characteristic parameters calculated from those equations were found to differ significantly between *P. yunnanensis* and *P. amandii*. There were high light saturation point (LSP) and light compensation point (LCP) which were showed as typical heliophytes. It was indicated that the two coniferous trees had good adaptability of high photosynthetic active radiation (PAR) in southwest China; The maximum net photosynthetic rates of *P. yunnanensis* and *P. amandii* could reach 14.768 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and 10.289 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ respectively at the CO₂ saturation point, and they were improved by 56.9% and 62.0% respectively at the light saturation point (LSP). Compared with *P. amandii* and several northern coniferous trees, *P. yunnanensis* displayed higher light saturation point (LSP), maximum net photosynthetic rate, carboxylation efficiency (CE), photorespiration rate (R_p), CO₂ saturation point and lower dark respiration rate (R_d), light compensation point and

收稿日期: 2008-10-20

基金项目: 云南省应用基础研究重点项目 (2006C0015Z) “利用蛀干害虫作为指示昆虫诊断森林健康研究”

作者简介: 梁军生 (1981—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生。

*通讯作者。

CO₂ compensation point (CCP). *P. yunnanensis* belongs to the high light energy potential productivity tree for its photosynthetic characteristics of high photosynthetic efficiency and high CO₂ utilization ratio

Key words: *Pinus yunnanensis*; *Pinus amandii*; mixed forest; photosynthesis; response curves

云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.)、华山松 (*P. amandii* Franch.) 是我国西南地区主要的荒山造林树种,具有适应性广、生态功能齐全的特性。国内有关云南松、华山松的研究多集中在品种资源、引种试验、水分利用、品种区域试验、生态建设等方面^[1-5]。关于云南松、华山松光合生理的研究,特别是光照强度和 CO₂ 浓度对其光合作用的影响研究目前未见报道。国内外对其它森林树种光合作用的研究多集中在幼树等易于观测的对象上,对林分中高大乔木的研究较少。光合作用是植物生长发育的基础,同时又是对环境条件变化十分敏感的生理过程。光照强度和 CO₂ 浓度是影响植物光合作用的重要外界环境因素^[6]。本文采用 Licor-6400 型便携式光合作用仪测定了人工混交林中云南松、华山松光合作用指标,分析光照和 CO₂ 浓度等环境因子对云南松、华山松光合作用的影响。研究结果有助于探明云南松、华山松对西南高强辐射环境的适应,为云南松和华山松的育苗、林分的抚育管理以及森林生态系统生产力等相关研究提供基本的理论依据。

1 实验地概况与研究方法

1.1 实验地概况

实验地位于云南省昆明市金殿林区 (25°05'N, 102°47'E), 海拔 2 055 m。土壤为黄棕壤, 土层厚 40~60 cm, 腐殖质厚 2~10 cm, 土壤含水量 150~200 g·kg⁻¹, 林下植被主要有紫茎泽兰 (*Eupatorium adenophorum* Spreng.)、碎米花杜鹃 (*Rhododendron spiciferum* Franch.) 及禾本科杂草。年均气温 14.5℃, 年均降水量 1 035.3 mm, 年蒸发量 1 870.6 mm; 全年日照平均 2 448.7 h, 5—9 月为雨季, 10 月到次年 4 月为旱季; 太阳辐射年总量 123.5 kcal·cm⁻², 其中雨季 59.2 kcal·cm⁻², 旱季 64.3 kcal·cm⁻²。实验地为云南松、华山松人工混交林, 面积 40 m × 40 m, 郁闭度 0.7~0.8, 平均树高 5.0~6.0 m, 胸径 6.0~8.0 cm, 树龄 15 a。

1.2 研究方法

1.2.1 光合作用测定 选择长势一致的健康云南松、华山松各 3 株, 取树冠中部同一高度的向阳方位进行光响应和 CO₂ 响应的测定。2008 年 8 月 17—22 日上午进行光响应曲线测定, 8 月 25—30 日上午

进行 CO₂ 响应测定。测定选在晴天上午的 9:00—11:30 时进行, 此时云南松、华山松处于生长旺盛期。由于响应曲线的测定比较耗时 (每天上午只测云南松、华山松响应曲线各一条), 3 天重复测量 1 次, 即每株测定 2 次。为减少实验误差, 两树种采用平行测定。

仪器采用 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 ± 1)℃, CO₂ 浓度为 (400 ± 2) μmol·mol⁻¹, 空气相对湿度为 40% ± 2%, 应用 Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度 (PAR, μmol·m⁻²·s⁻¹), 分别在 PAR 为 2 000、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 μmol·m⁻²·s⁻¹ 下测定云南松、华山松光合作用最强的当年生针叶净光合速率 (P_n , μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹); 设定 PAR 为 1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 作为测定光强, 采用 Li-6400-01 液化 CO₂ 钢瓶提供不同的 CO₂ 体积分数, 分别在 CO₂ 浓度为 400、300、200、150、100、50、20、400、500、600、800、1 000、1 200 μmol·mol⁻¹ 的条件下测定针叶 P_n 。由于林内光环境可能不同, 测定前使用 1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹ 冷光源诱导针叶 30 min, 在每个光照强度或 CO₂ 浓度下平衡 60~200 s 后测定 P_n , 当测量变异率小于 0.05 时, 由红外气体分析仪自动记录, 结果取平均值^[7]。叶室采用 6400-07 针叶叶室, 叶面积测定使用 Li-3000A 叶面积仪。

1.2.2 测定数据统计分析 测定数据采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 云南松、华山松光合作用的光响应曲线

图 1 可见: 光强在 0~500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时, P_n 快速上升, 一般认为, 在低光照下, 随光照强度的

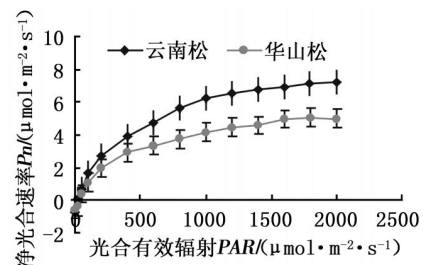


图 1 云南松、华山松针叶光合-光强响应曲线

增加而光合速率增加,这个区域 P_n 受限于光驱动的电子传递部分。当光照强度在 $500 \sim 1\ 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 升幅减弱。从图 1 可看出:华山松在 PAR 为 $1\ 800\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,净光合速率趋于饱和,而云南松在 PAR 为 $0 \sim 2\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时并未达到完全饱和,说明云南松、华山松潜在的光合能力均较大。与华山松相比,云南松耐高光合辐射的能力更强。

植物的光响应曲线可以用非直角双曲线模型进行拟合^[8-12],非直角双曲线模型为:

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

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; R_d 为暗呼吸速率。

补偿点较低、光饱和点较高的植物对光环境的适应性较强;而光补偿点较高、光饱和点较低的植物对光照的适应性较弱^[7]。由表 1 可知,两树种的光补偿点和近光饱和点均存在显著差异 ($P < 0.05$)。云南松光补偿点略低于华山松,但近光饱和点高于华山松。云南松近光饱和点与光补偿点之间较大的光强利用区间表明,云南松光能利用范围可塑性比华山松更大。

(1)式可以较好的模拟光合速率随光强的变化,云南松、华山松光响应曲线拟合方程的决定系数 (R^2) 都在 0.994 以上,拟合程度均达到极显著水平,模拟结果能够反映实际情况。利用公式(1)对测定数据进行拟合,并求出云南松、华山松光反应曲线的特征参数(表 1)。表观量子利用效率 ($AQY, \text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$) 是用光响应曲线中光强在 $200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下时的初始直线部分(图 2)的斜率表示^[13],拟合方程为:

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

2.1.3 光饱和下最大净光合速率和暗呼吸速率
两树种在光饱和下的 P_{\max} 差异极显著 ($P < 0.01$),云南松光饱和下的 P_{\max} 比华山松高 48.2%。光合产物的合成与运输都需要由呼吸来提供能量,从表 1 可以看出,云南松、华山松暗呼吸速率差异显著 ($P < 0.05$),云南松暗呼吸速率 ($0.307\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 低于华山松暗呼吸速率 ($0.438\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

当 $P_n = 0$ 时, PAR 即为光合作用的光补偿点 ($LCP, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),这里 R_d 为暗呼吸速率。方程拟合效果较好, R^2 均在 0.944 以上。将 $200\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下的线性方程(式 2)与非直角双曲线模型计算出的 P_{\max} 值这条平行直线 ($y = P_{\max}$) 相交,得出交点,该交点在 x 轴上的数值即为近光饱和点 ($Lk, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[7-8]。

2.2 云南松、华山松光合作用的 CO₂ 响应曲线

随着 CO₂ 浓度升高,云南松、华山松光合速率的变化也呈现一定趋势(图 3)。CO₂ 响应曲线的方程拟合方法同光响应曲线,且曲线拟合方程决定系数均在 0.995 以上,拟合程度达极显著水平 ($P < 0.01$),并在细胞间隙 CO₂ 浓度 ($C_i, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 为 $0 \sim 200\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 内对针叶 P_n-C_i 进行直线回归(图 4),其斜率为 RuBP 羧化效率 ($CE, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[7,15],拟合方程为:

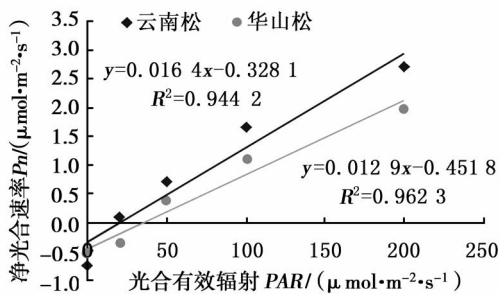


图 2 云南松、华山松针叶光合-低光强响应曲线

2.1.1 表观量子效率 云南松、华山松针叶表观量子效率 (AQY) 均为 $0.017\ \text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$ 左右,两树种的表观量子效率无显著差异,且均稍低于自然条件下一般植物的表观量子效率 ($0.03 - 0.06\ \text{CO}_2 \cdot \text{photon}^{-1}$)^[14]。

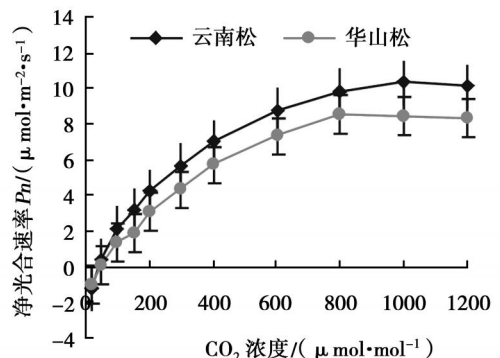


图 3 云南松、华山松针叶光合-CO₂ 响应曲线

2.1.2 光补偿点和近光饱和点 植物叶片的光饱和点和光补偿点反映了植物对光照条件的要求,光

$$P_n = CE \cdot C_i - R_p \quad (3)$$

当 $P_n=0$ 时, C_i 即为光合作用的 CO_2 补偿点 (CCP , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), 这里 R_p 为光下呼吸速率。

由于光下暗呼吸很小, 可以近似将光下叶片向无 CO_2 的空气中释放 CO_2 的速率看作光呼吸速率^[7,16]。将式 (3) 与模型拟合计算出的 P_{max} 值这条平行直线相交, 得出交点, 该交点在 x 轴上的数值即为 CO_2 饱和点 (CSP , $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

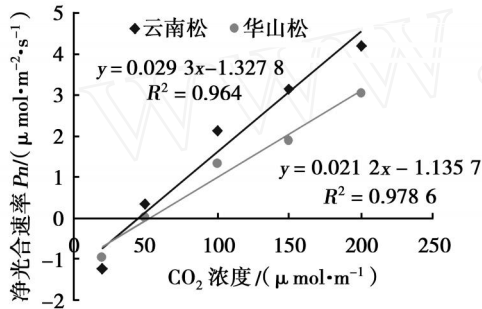


图 4 云南松、华山松针叶光合-低 CO_2 响应曲线

2.2.1 羧化效率及光呼吸速率 叶绿体的光合速率分为受 Rubisco 活性限制的光合速率和由 RuBP 再生速率限制的光合速率控制。云南松、华山松拟合的 RuBP 羧化效率 (CE) 分别为 0.044 、 $0.021 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 针叶 RuBP 羧化效率存在显著差异 ($P < 0.01$) (表 1), 表明云南松利用 CO_2 的效率显著高于华山松, 且相比地毯草、 C_3 植物天门冬等也高出许多^[17], 说明云南松具有较强的 CO_2 同化能力。

2.2.2 CO_2 饱和点 (CSP) 与 CO_2 补偿点 (CCP) 云南松、华山松的 CSP 、 CCP 有极显著差异 ($P < 0.01$) (表 1)。云南松的 CSP 高于华山松, 但 CCP 低于华山松。 CO_2 饱和下云南松、华山松最大净光合速率 (P_{max}) 分别可达 14.768 、 $10.289 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 分别比自然状态 (空气 CO_2 浓度约为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) 下光饱和时 P_{max} 提高了 56.9% 和 62.0% 。

表 1 云南松、华山松光合响应特征参数

项目	云南松	华山松	P 值
光饱和最大净光合速率 $P_{\text{max}} / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	9.412 ± 0.204	6.351 ± 0.100	0.000
CO_2 饱和最大净光合速率 $P_{\text{max}} / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	14.768 ± 0.646	10.289 ± 0.232	0.000
表观量子效率 $AQY / (CO_2 \cdot \text{photon}^{-1})$	0.017 ± 0.003	0.017 ± 0.002	1.000
RuBP 羧化效率 $CE / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.044 ± 0.005	0.021 ± 0.001	0.000
暗呼吸速率 $R_d / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	0.307 ± 0.097	0.438 ± 0.072	0.024
光呼吸速率 $R_p / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	1.836 ± 0.192	1.001 ± 0.042	0.000
近光饱和点 $L_k / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	690.780 ± 57.09	531.270 ± 43.64	0.000
光饱和点 $LSP / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	> 2000	1800	
光补偿点 $LCP / (\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	20.27 ± 3.92	31.78 ± 4.82	0.001
CO_2 饱和点 $CSP / (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	563.18 ± 9.73	533.07 ± 14.46	0.002
CO_2 补偿点 $CCP / (\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$	45.68 ± 2.72	51.77 ± 1.76	0.003

注: 表中数据除 LSP 外均由拟合方程计算而来, 数据为平均值 ± 标准差 ($n=6$)。 $P < 0.05$ 表示两树种间 T 检验差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

3 小结与讨论

(1) 光补偿点 (LCP) 和光饱和点 (LSP) 的高低, 反映了光合机构暗反应过程对同化力需求量的多少。暗反应能力越强所需要的同化力越多^[18]。光补偿点高, 可部分说明叶肉细胞光合活性低, 光补偿点低的植株其下部或株丛内部的叶片可利用较弱的光线进行光合作用, 保持生长, 提高整株植物的光合能力^[7]。云南松、华山松的 LCP 与吴家兵等研究的生长盛期的长白山红松 ($23 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 接近, 但明显低于长白山落叶松 ($86 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和日本落叶松 ($84 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 且云南松、华山松 LSP 均高于北方几种针叶树种, 云南松的 P_{max} 也高于几种针叶树

种^[15,19]。这说明在我国西南地区, 云南松、华山松对高光合有效辐射的适应性均较强。作物的产量与总干物质质量和净光合速率呈显著正相关^[20]。云南松较高的 P_n , 以及 LSP 与 LCP 之间较宽的光能利用区间, 在一定程度上解释了云南松枝干生产力高的原因^[3], 特别是在西南地区, 全年太阳辐射较强, 培育广幅光强适应性的针叶树种, 对于山地造林特别是西南干热河谷植被恢复具有积极意义。

(2) 表观量子效率 (AQY) 是植物对 CO_2 同化的表观光量子效率, 反映了植物对弱光的光能利用效率^[11]。研究发现, 云南松的 AQY 与华山松的 AQY 无显著差异, 表现在利用弱光的效率上相似, 但均比 6—8 月份生长的红松 ($0.038 CO_2 \cdot \text{photon}^{-1}$) 低, 且

远低于阔叶树^[15],可能是实验中选择的云南松、华山松长期生长在较为充足的光环境下形成了一种生态适应,从而导致其对强光耐受力强而对弱光利用效率反而下降,其原因有待进一步研究。暗呼吸速率(R_d)与叶片的生理活性有关^[7],本实验中云南松、华山松的 R_d 均低于8月份生长旺盛期的长白山红松($R_d = 1.79 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)^[15],较低的 R_d 在一定程度上也有利于云南松、华山松干物质的积累。

根据蔡年辉等^[5]的调查结果:在云南松天然林和人工林的林下,云南松幼苗很少出现,因而认为云南松属于衰退型种群。本实验中云南松较高的 LSP 和 LCP ,以及较低的 AQY 等参数进一步印证了这种现象。云南松、华山松相对较高的 LCP 表明其利用弱光的能力较弱,在一定程度上限制了其林内幼苗的更新。在营造云南松、华山松林分时应选择光照条件好的地块,并选择不同光合特性的树种配植。

(3)郭连旺等^[21]认为, C_3 植物的光呼吸(R_p)可能是耗散过剩光能,保护光合机构免于强光破坏的一个途径;同时,光呼吸的乙醇酸循环能促进无机磷(P_i)的周转,缓解由于 P_i 暂时亏缺而引起的对电子传递和光合磷酸化过程的限制。与华山松相比,云南松较高的 R_p ,表明 P_i 亏缺对电子传递和光合磷酸化过程的限制相对较小。实验中云南松、华山松在 CO_2 饱和浓度下最大净光合速率比光饱和下有较大幅度提高,进一步证实了两个针叶树种在强光下光合速率更大程度上受 CO_2 供应的限制;同时进一步表明 CO_2 的短期增效^[22],但云南松、华山松是否能够生长在高浓度 CO_2 条件下并保持长期增效有待于进一步研究。 CCP 低的作物常具有净光合速率高、产量高的特点,因此,低 CCP 也常被用作选育高产品种的指标^[23]。云南松比华山松具有较高的 L_k 、 P_{max} 及 CE ,较低的 CCP ,因而具有较高光效和高 CO_2 利用率等光合特性,是具有较高光能生产潜力的针叶树种。

(4)人工混交林林分的生理生态变化是一个复杂的动态变化过程,关于云南松、华山松光合作用的特性可能存在季节特性和生境差异,还需要进行不同冠层、多物种、多生境的对比分析。这类问题的研究有利于深入探讨物种光合生理以及个体形态特征对生态和环境因子适应的可塑性机理。

参考文献:

- [1] 吴征镒. 云南植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1987
- [2] 盛世法, 余丽云, 伍建榕, 等. 云南华山松人工林衰退现象研究 [J]. 西南林学院学报, 2000, 20(2): 94 - 99
- [3] 《云南松》编委会, 金振洲, 彭鉴. 云南松 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004
- [4] 何亚平, 费世民, 徐嘉, 等. 川西南山地云南松林窗边界木偏冠现象与影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 66 - 71
- [5] 蔡年辉, 李根前, 朱存福, 等. 云南松人工林与天然林群落结构的比较研究 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22(2): 1 - 4
- [6] 刘玉梅, 王云诚, 于贤昌, 等. 黄瓜单叶净光合速率对二氧化碳浓度和光照强度响应模型 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 883 - 887
- [7] 董志新, 韩清芳, 贾志宽, 等. 不同苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 品种光合速率对光和 CO_2 浓度的响应特征 [J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2272 - 2278
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 贾彩凤, 李艾莲. 药用植物金荞麦的光合特性研究 [J]. 中国中药杂志, 2008, 33(2): 129 - 132
- [13] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Ann Rev Plant Physiol, 1982, 33: 317 - 345
- [14] 蹇洪英, 邹寿青. 地毯草的光合特性研究 [J]. 广西植物, 2003, 23(2): 181 - 184
- [15] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林主要树种及群落冠层光合特征 [J]. 中国科学, 2006, 36(增刊 1): 83 - 90
- [16] 蔡时青, 许大全. 大豆叶片 CO_2 补偿点和光呼吸的关系 [J]. 植物生理学报, 2000, 26(6): 545 - 550
- [17] 杨兴洪, 邹琦, 赵世杰. 遮荫和全光生长的棉花光合作用和叶绿素荧光特征 [J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 8 - 15
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Faville M J, Silvester W B, Green T G A, et al. Photosynthetic characteristics of three Asparagus cultivars differing in yield [J]. Crop Science, 1999, 39: 1070 - 1077
- [21] 郭连旺, 沈允钢. 高等植物光合机构避免强光破坏的保护机制 [J]. 植物生理学通讯, 1996, 32(1): 1 - 8
- [22] 骆士寿, 李意德, 陈德祥, 等. 热带雨林恢复演替中优势树种黄桐气体交换对环境的响应 [J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1765 - 1772
- [23] 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