

鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)苗期光合特性的研究*

郭志华 张宏达 李志安 胡宏伟

(中山大学生命科学学院 广州 510275)

摘要 用 CI-D-301PS 便携式光合作用测定仪的开放系统研究了生长于庐山山地上的鹅掌楸苗期叶片的光合特性及其对遮荫的响应与适应性。结果表明:①在夏季晴天、土壤供水充足的条件下,鹅掌楸苗期向阳叶片的光合速率有明显的午休现象,这可能与气孔限制和光抑制有关。②鹅掌楸苗期的光饱和点为 $1200\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$ 左右,光补偿点为 $20\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$ 左右。说明鹅掌楸苗期是具有一定耐荫能力的阳性植物。③鹅掌楸苗期叶片的羧化效率为 0.02 左右, CO_2 补偿点为 $60\mu\text{mol/mol}$ 。说明鹅掌楸为 C_3 型植物。④鹅掌楸向阳叶片的光能利用率较低,约为 0.94%。⑤鹅掌楸苗期叶片的蒸腾速率、气孔阻力和胞间 CO_2 浓度对遮荫的响应在一天中随时间而变化。⑥逐步回归分析表明,光合有效辐射、气孔阻力和胞间 CO_2 浓度等对鹅掌楸叶片光合速率的影响最大。

关键词 鹅掌楸, 光合速率, 光能利用率, 蒸腾速率, 气孔阻力, 胞间 CO_2 浓度。

THE PHOTOSYNTHETIC CHARACTERISTICS IN LEAVES OF *Liriodendron chinense* SEEDLINGS IN MT. LUSHAN

GUO Zhi-Hua ZHANG Hong-Da Li Zhi-An HU Hong-Wei

(Life Science School, Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China)

Abstract With the aid of the CI-301PS portable photosynthesis system, a field study on the photosynthetic characteristics in leaves of *Liriodendron chinense* seedlings was made. The midday photosynthetic depression was observed on sunny day in summer, which was possibly due to the stomatal limitation and photoinhibition of photosynthesis. The light compensation point was about $20\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$, the light saturation point was around $1200\mu\text{mol photons/m}^2\text{s}$, and the light-saturating photosynthetic rate was in a range of $8\sim 10\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\text{s}$. The CO_2 compensation concentration of photosynthesis was more than $60\mu\text{mol/mol}$. These indicated that although *L. chinense* was of a C_3 type, sun plant its seedling could tolerate shade to a certain level. The responses of transpiration, stomatal resistance and internal CO_2 concentration (C_i) of *L. chinense* to shade were different at different time in a day. By the stepwise multiple regression, it was found that PAR , R and C_i were the most dominant factors affecting the photosynthesis rate of *L. chinense*. Moreover, the solar energy utilization efficiency of *L. chinense* was about 0.94%.

* 华南师范大学地理系邓槐同志参加野外调查, 特此致谢。

收稿日期: 1997-05-11, 修改稿收到日期: 1998-05-07。

Key words *Liriodendron chinense* seedlings, photosynthesis, transpiration, stomatal resistance, solar energy utilization efficiency.

鹅掌楸(*Liriodendron chinense* (Hemsl.) Sarg.) 是我国稀有的第三纪孑遗树种, 属国家二级保护植物^[1], 主要分布于我国长江流域以南及越南北部^[2], 树皮可入药。它与分布于北美东南部的北美鹅掌楸(*L. tulipifera* Linn.) 一起构成了东亚和北美间断分布的典型代表^[3]。由于长期异域分布的物种常能改变性状, 从而形成生殖隔离, 但鹅掌楸和北美鹅掌楸虽已隔离了 1300 万 a, 至今却仍能互交可育、形态相似^[4]。这或许是由于两个异域分布的广布种, 如果两地的环境条件相似, 选择压力相同, 就很难产生趋异的缘故^[5]。在庐山, 鹅掌楸是常绿阔叶林、落叶阔叶混交林的优势种之一^[6,7], 最大的胸围在 1m 以上、树高 20m 以上, 这说明鹅掌楸是与当今生境相适应的。另一方面, 庐山气候属中亚热带湿润季风气候, 夏季降水多, 云雾多, 光合有效辐射 PAR 常常因云雾而频繁波动, 其值可以在短时间内从全光照的 $1500 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右下降到 $200 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$, 甚至更低。因此, 研究当今自然环境条件下鹅掌楸的光合特性及其对变化光照的响应和适应性, 一方面有利于加深对珍稀孑遗植物在变化环境中的响应和适应性认识和理解。另一方面, 也有利于促进对鹅掌楸的进一步研究及其资源的开发利用。

1 材料与方法

供试材料为栽培于庐山植物园(海拔 1100m)内的 2 年生鹅掌楸, 选向阳的当年生枝条的中位叶进行光合测定, 叶片重复 5~6 次, 每叶片重复 2~4 次。测定是在 7 月 6 日~7 月 12 日间进行。测定前连续降水, 土壤水分充足。

用美国 CID 公司生产的 CI-301PS 便携式光合作用测定仪进行测定。用其开放系统测定光合有效辐射 (PAR, $\mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$), 净光合速率 (P_n , $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), 蒸腾速率 (E , $\text{mmol/m}^2 \cdot \text{s}$), 气温 (T_a , $^{\circ}\text{C}$), 叶温 (T_l , $^{\circ}\text{C}$), 空气相对湿度 (RH, %), 胞间 CO_2 浓度 (C_i , $\mu\text{mol/mol}$) 和气孔阻力 (R , $\text{m}^2 \cdot \text{s/mol}$)。用天津气象海洋仪器厂生产的 MG-5 型温湿表校正 (1995 年 5 月由广东省气象局检定) 测得的气温和空气相对湿度。用开放系统测定植物光合作用, 可以有效地减少因叶室改变了测定叶周围的水气条件而造成的实验误差, 因此, 比以往用闭路系统测定的结果更为准确可靠。叶/气饱和水汽压差 Δe_w 可从表^[8]中求得。叶片用多层纱布均匀遮光, 直到 PAR 为 0, 每一梯度 PAR 的遮荫时间均为 40s, 总遮荫时间为 9~1min, 测得从高到低一系列 PAR 下叶片的 P_n 、 E 、 R 和 C_i 等。用 P_n 对光响应曲线的直线部分数据进行线性回归求得表观量子效率 (AQY, $\text{mol CO}_2/\text{mol photons}$)^[9-11]。用闭路系统测定在饱和光照 (PAR 为 $1400 \sim 1500 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$) 下不同 CO_2 浓度时叶片的光合速率, 对低 CO_2 浓度时的光合速率的数据进行线性回归, 求得羧化效率 (CE)。

本文所有数据处理均用作者自编的 C 语言程序在微机上进行。

2 结果与讨论

2.1 光合作用的日变化

鹅掌楸苗期叶片的净光合速率 (P_n) 在夏季晴天中午明显降低 (图 1A), 其曲线呈双峰型。而午休与空气相对湿度、胞间 CO_2 浓度和气孔阻力相关^[14,15]。早上 10:00 左右 P_n 最高, 为 $8.4 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 此时的 PAR 高达 $2000 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 以上。之后 PAR 和气温 T_a 继续增高, RH 和胞间 CO_2 浓度 C_i 降低, 气孔阻力 R 增大, 部分气孔关闭, 从而导致 P_n 下降。并且从晴天强光下 AQY 变化来看 (图 2), 10:00 以后 AQY 有所下降, 说明可能已有光抑制发生。 P_n 在中午 12:00 左右达到午休最低点, 之后逐渐升高, 到 14:00 左右又有一个较高的峰值, 约 $7.4 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 相当于 10:00 左右的 88%。此外, P_n 的午间降低也可能与大气 CO_2 浓度的日变化有关, 大气 CO_2 在中午 11:00 比早上 8:00 降低了约 $20 \mu\text{mol/mol}$ (图 1B)。而中午 11:00 的 CO_2 浓度只有 $310 \mu\text{mol/mol}$ 左右, 由于研究地未受城市大气污染和海拔较高的缘故, 它比平原地区低得多。所有这些鹅掌楸的光合测定结果都与生长于同一地区、相同生境下 3 年生的银杏 (*Ginkgo biloba*) 类似 (两者均在同一时间内进行测定), 只是后者光合作用“午休”的时间更长^[16]。

2.2 光合作用的光响应

鹅掌楸苗期叶片的早上光合作用饱和光强在 $1200 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 以上, 下午 13:00 以后降到 $1200 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 以下, 其光饱和点与典型阳性植物相当。其叶片光补偿点早上为 $20 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右, 13:00 为 $18 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右, 16:00 为 $16 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右(图 3), 光补偿点比银杏稍低($25 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右)^[16]。表明鹅掌楸苗期具有一定耐阴能力。鹅掌楸的 AQY 在上午 10:00 左右为 0.0502, 与自然条件下一般植物的表观量子效率值 $0.03 \sim 0.05$ ^[16] 基本相符。鹅掌楸大部分叶片在强光下的 P_n 为 $8 \sim 10 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 同时在其附近生长的短柄栎 (*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*) 的 P_n 为 $10 \sim 12 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$, 甜槠 (*Castanopsis eyrei*) 的 P_n 为 $9 \sim 10 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。由此可见, 作为庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林的优势种^[5,17], 鹅掌楸、短柄栎和甜槠的叶片光饱和 P_n 相似, 但比同一地区银杏叶片的 P_n ($5 \sim 7 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 稍高^[16]。

由于庐山夏季晴天的辐射很强, 一天中 PAR 大于 $2000 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 的时间可达 3h 以上(图 1B), 而鹅掌楸苗期叶片的光补偿点较低, 光饱和点也在 $1200 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右, 因此, 在鹅掌楸苗期的栽培过程中, 可适当遮荫, 以减少水分蒸腾和提高光能利用率。

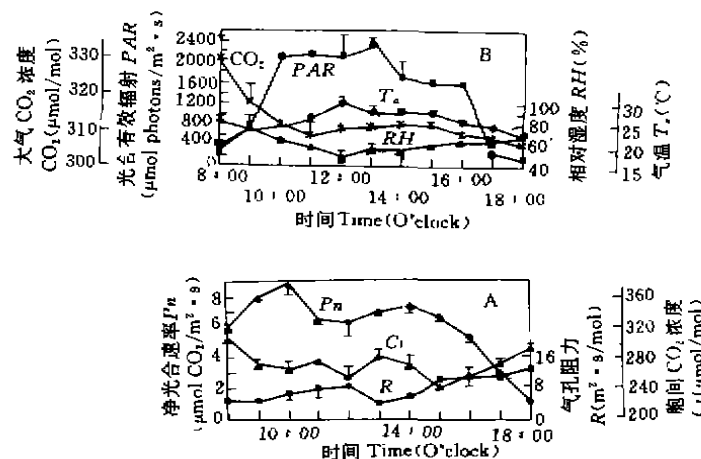


图 1 鹅掌楸苗期叶片净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度(A)和光合有效辐射、气温、相对湿度和大气 CO_2 浓度(B)的日变化

Fig. 1 Diurnal changes of net photosynthetic rate (P_n), stomatal resistance (R), internal CO_2 concentration (C_i) (A), photosynthetic active radiation (PAR), air temperature (T_a), relative humidity (RH), and air CO_2 concentration (B) in *L. chinense* seedlings' leaves.

2.3 光合作用的 CO_2 响应

根据叶片光合作用的 CO_2 响应数据, 计算得出鹅掌楸苗期叶片的羧化效率为 0.02 左右, CO_2 补偿点在 $60 \mu\text{mol/mol}$ 以上(图 4)。这与银杏的羧化效率相当, 但 CO_2 补偿点比银杏 ($>100 \mu\text{mol/mol}$) 低^[16]。结果表明, 鹅掌楸也属 C_3 植物。

2.4 光能利用率

从图 5 可知, 鹅掌楸向阳叶片的光能利用率以早上 8:00 左右为最高, 约为 $21.6 \text{mmol CO}_2/\text{mol photons}$; 此外, 下午 17:00 左右也有一个峰值, 约为 $11.2 \text{mmol CO}_2/\text{mol photons}$ 。中午 11:00~13:00 的光能利用率最低, 因为此时的 P_n 下降, 而 PAR 却很高(最高可达 $2358 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$)。从全天来看, 鹅掌楸苗期向阳叶片的光能利用率约为 $4.365 \text{mmol CO}_2/\text{mol photons}$ 。较低的光能利用率低, 可能是鹅掌楸苗期生长较慢的主要原因。

2.5 蒸腾速率、气孔阻力和胞间 CO_2 浓度对遮荫的响应

鹅掌楸苗期向阳叶片的蒸腾速率 E 、气孔阻力 R 和胞间 CO_2 浓度 C_i 在一天不同时间里对遮荫的响

应不同(图 6)。

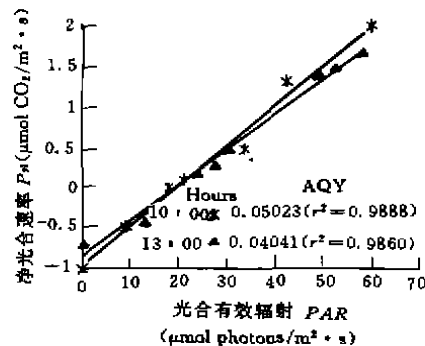


图 2 强光下鹅掌楸苗期叶片表观量子效率的变化图
Fig. 2 Variation of apparent quantum yield (AQY) in *L. chinense* seedlings' leaves under strong sunlight

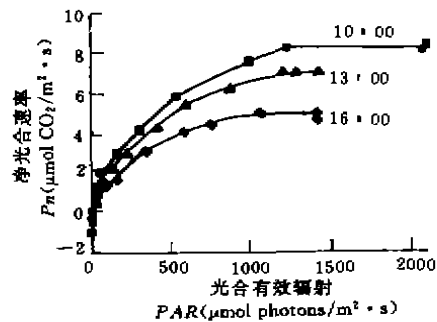


图 3 鹅掌楸苗期叶片光合作用的光响应
Fig. 3 Light response of photosynthesis in *L. chinense* seedlings' leaves

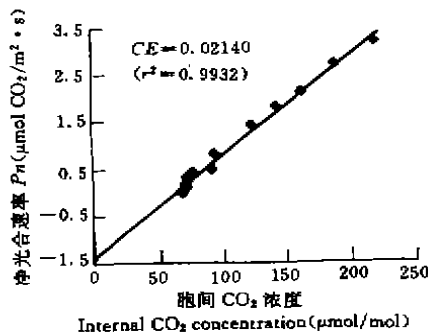


图 4 鹅掌楸苗期叶片光合作用的 CO₂ 响应
Fig. 4 CO₂ response of photosynthesis in *L. chinense* seedlings' leaves

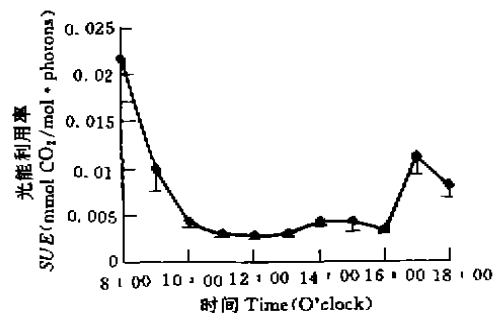


图 5 鹅掌楸苗期叶片光能利用率的变化
Fig. 5 Diurnal change of the solar energy utilization efficiency (SUE) in *L. chinense* seedlings

在早上 10:00 左右,遮荫对鹅掌楸蒸腾速率 E 影响不大,仅从全光照 ($PAR=2083.3 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$) 的 1.7 下降到 $1.5 \text{ mmol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ ($PAR=0$);甚至当 PAR 从全光照下降到 $1000 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$ 左右时, E 还略有增加(从 1.7 升到 $2.0 \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{s}$)。13:00 左右的遮荫引起了蒸腾速率的急剧下降,从全光照 ($PAR=1417.4 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$) 的 2.6 下降到 $0.8 \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{s}$ ($PAR=0$),下降了约 70%。16:00 时的遮荫使 E 下降了约 55%,从全光照 ($PAR=1415.7 \mu\text{mol photons/m}^2 \cdot \text{s}$) 的 1.8 下降到 $0.8 \text{ mmol/m}^2 \cdot \text{s}$ ($PAR=0$)。

鹅掌楸苗期叶片的气孔阻力 R 在早上 10:00 左右并不因遮荫而升高,反而明显下降。 R 从全光照的 8.7 下降到 $3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s/mol}$,下降了约 56%。但中午以后的遮荫却引起了 R 相反的变化,遮荫导致了 R 的显著增加,分别从 13:00 和 16:00 全光照的 5.1 和 12.6 增加到 10.0 和 $19.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s/mol}$,分别增加了约 96% 和 57%。

此外,无论何时的遮荫都会引起鹅掌楸苗期叶片胞间 CO_2 浓度 C_i 的升高,这与遮荫引起 P_n 的下降 (CO_2 同化减少)相联系。在 10:00,遮荫使 C_i 升高了约 $75 \mu\text{mol/mol}$,增加了约 31.3%;在 13:00,遮荫使 C_i 升高了约 $45 \mu\text{mol/mol}$,增加了约 16.5%;在 16:00 时,遮荫使 C_i 升高了约 $80 \mu\text{mol/mol}$,增加了约 31.2%。这表明午后 13:00 的遮荫引起的鹅掌楸叶片胞间 CO_2 浓度的增加量比早上和下午的遮荫引起的

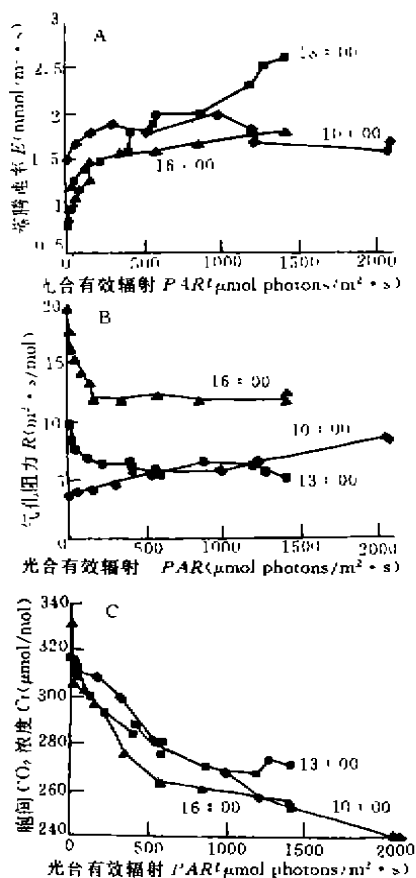


图6 鹅掌楸苗期叶片蒸腾速率、气孔阻力和胞间 CO_2 浓度对遮荫的影响

Fig. 6 Responses of E , R , and C_i of *L. chinense* seedlings to shade

C_i 的增加量小。

由此可见,鹅掌楸苗期叶片光合速率在每日高峰期(10:00左右),遮荫(直至 $PAR=0$)在导致 P_n 迅速下降的同时,仅使蒸腾速率 E 略有降低。这样,在低 PAR 下依然有较高的蒸腾速率,会引起水分的损失从而导致水分利用率的降低。与此同时,遮荫使气孔阻力 R 明显降低,气孔导度的增加有利于水分和 CO_2 从气孔的进出,从而为光照恢复后 P_n 的迅速恢复提供了条件。此外遮荫引起胞间 CO_2 浓度的较大幅度升高也为 P_n 的迅速恢复提供了物质基础。中午以后,遮荫引起鹅掌楸苗期叶片蒸腾速率 E 的显著降低、气孔阻力 R 的显著升高和胞间 CO_2 浓度 C_i 的升高。蒸腾速率的降低可以减少水分的损失,从而提高水分的利用率;但另一方面,气孔阻力的显著升高,将会阻碍水分和 CO_2 从气孔的进出,不利于恢复光照后 P_n 的迅速恢复,从而使光能的利用率降低。这些都与同一生境下的银杏有所不同¹⁾。

2.6 鹅掌楸叶片光合速率的影响因子分析

由于光合速率受气温 T_a 、叶温 T_l 、叶/气温差 Δt 、光合有效辐射 PAR 、相对湿度 RH 、蒸腾速率 E 、大气 CO_2 浓度 C_o 、胞间 CO_2 浓度 C_i 、气孔阻力 R 及叶/气饱和水汽压差 Δe_w 等的影响,并且不同因子对鹅掌楸苗期光合速率的影响程度不同。因此,可用逐步回归分析的方法找出对光合速率影响最大的因子^[17]。

本文根据 T_a 、 T_l 、 Δt 、 PAR 、 PAR^2 、 RH 、 E 、 C_o 、 C_i 、 R 和 Δe_w 等 12 个因子及 P_n 的 38 组观测数据进行逐步回归分析。

首先,当 $\alpha=0.05$ 时,取 $F1=3.78$, $F2=3.54$ 分别作为挑选和剔除因子的 F 检验临界值,得回归方程:

$$P_n = 34.1388 - 0.46439R - 0.1025C_i - 0.41005T_l + 0.46025\Delta e_w - 3.590PAR^2 \times 10^{-7} + 1.1052E + 0.03823C_o \quad (1)$$

显著性检验: $F=181.85 > F_{2,115(7,30)}=2.33$,复相关系数 $R=0.9884$ 。因此回归方程是显著的。

但此方程却表明:随着叶温 T_l 的增加,光合速率 P_n 下降,这显然与实际情况不符;此外象 PAR 这样的重要变量,在方程中却认为不重要。造成这样结果的原因主要是自变量间的相关性太大。如 PAR 与 PAR^2 、 T_a 、 T_l 、 Δt 、 Δe_w 、 E 之间和 Δt 与 Δe_w 等之间的相关系数均大于 0.6。这样,就有必要找出与已有生态学理论相符的回归效果好的回归方程来。逐渐增加 $F1$ 的值,当 $F1=9.6$ ($\alpha<0.01$) 时,得如下回归方程:

$$P_n = 29.1126 + 0.0004257PAR - 0.5264R - 0.07213C_i \quad (2)$$

显著性检验, $F=121.96$,复相关系数 $R=0.9565$ 。可见,回归方程(2)依然是显著的。

方程(2)虽然所选中的因子较少,但却较好地综合地反映了影响鹅掌楸叶片光合速率的最主要内外

1) 郭志华,王伯荪,张宏达. 银杏(*Ginkgo biloba*)的蒸腾特性及其对遮荫的响应. 植物学报,待发表。

因子。方程(2)表明: PAR 与 P_n 之间为正相关, R_{ci} 与 P_n 之间为负相关,即 P_n 随着 PAR 的增大而增大,随着 R 和 C_i 的增大而减小。实际上, PAR 和 P_n 的单相关系数在所有因子对中最高(0.701), R_{ci} 和 P_n 之间的单相关系数分别为-0.710和-0.270,也分别表现出很强和一定的负相关性。

回归方程(2)虽然没有包含其它因子,但不能就此排除这些因子对鹅掌楸叶片光合速率 P_n 的影响作用。在这些因子中,仅相对湿度 RH 与 P_n 的单相关系数最小,为-0.0524,但 RH 可能通过其他因子对 P_n 产生影响。其余试验的因子与 P_n 之间的单相关系数都在0.33以上,均大于 $r_{0.05(38)} \approx 0.31$,与 P_n 表现出显著的相关性。然而 PAR 与 PAR^2 、 Δew 、 Δt 、 TL 、 E 、 T_a 之间有更强的相关性。 PAR 与 PAR^2 、 Δew 、 Δt 之间的单相关系数均大于0.9,与 TL 、 E 、 T_a 等的相关系数也在0.65以上。这样, PAR 本身就包含了 PAR^2 、 Δew 、 Δt 、 TL 、 E 、 T_a 等对 P_n 的影响作用。同时,回归方程表明:当白天大气 CO_2 浓度在 $307 \sim 335 \mu\text{mol/mol}$ 之间波动时, CO_2 浓度对鹅掌楸的光合速率影响相对较小。事实上, C_o 与 P_n 之间的单相关系数在所试验的浓度范围内为0.3703,均大于它与其他因子之间的相关系数,反映了 CO_2 浓度与 P_n 的本质联系。

参 考 文 献

- 1 国家环境保护局自然保护司保护区与物种管理处. 珍稀濒危植物保护与研究. 北京:中国环境科学出版社, 1991. 166
- 2 中国科学院植物研究所. 中国高等植物图鉴(第一册). 北京:科学出版社, 1987. 735
- 3 吴征镒. 中国种子植物属的分布区类型. 云南植物研究(增刊N), 1991. 78
- 4 Parks C and Wendel J. Molecular divergence between Asian and North American species of *Liriodendron* (Magnoliaceae) with implications for interpretation of fossil floras. *Amer. J. Bot.* 1990, 77: 1243~1256
- 5 王伯荪, 彭少麟, 李鸣光. 植物种群学. 广州:广东高等教育出版社, 1995. 297
- 6 郭志华, 卓正大. 庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林的聚类分析与极值排序. 华南师范大学学报(自然版), 1994. (2): 85~92
- 7 郭志华, 卓正大等. 庐山常绿阔叶、落叶阔叶混交林乔木层优势种群的种间联结性研究. 植物生态学报, 1997, 21 (5): 424~432
- 8 国家气象局编. 湿度查算表(甲种本). 北京:气象出版社, 1989. 319
- 9 许大全, 王德耀, 邱国雄. 毛竹叶光合作用的气孔限制研究. 植物生理学报, 1987, 13(2): 154~160
- 10 邱国雄. 植物光合作用的效率. 见:植物生理学和分子生物学(余淑文主编). 北京:科学出版社, 1992. 236~243
- 11 Long S P and Hallgren J E. Measurement for CO_2 assimilation by plants in the field and in the laboratory. In: Hall D O, Scurlock J M O, Bohar-Nordenkamp H R et al. eds., *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: A Field and Laboratory Manual*. London: Chapman and Hall, 1993. 129~154
- 12 沈允钢, 许大全. 光合机构对环境的响应与适应. 见:植物生理学和分子生物学(余淑文主编). 北京:科学出版社, 1992. 225~235
- 13 Devis J E, et al. Rapid measurement of the assimilation rate versus internal CO_2 concentration relationship in green ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.). The influence of light intensity. *Tree Physiol.* 1987, 3: 387~398
- 14 Farquhar G D and Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 1980, 31: 317~345
- 15 许大全. 光合作用“午睡”现象的生态、生理与生化. 植物生理学通讯, 1990, 26(6): 5~10
- 16 郭志华, 张宏达. 银杏(*Ginkgo biloba*)光合特性的研究. 生态科学, 1997, 16(1): 30~33
- 17 方开泰, 全 辉, 陈庆云. 实用回归分析. 北京:科学出版社, 1988. 204~232