

# 山西太岳山辽东栎的光合特性

蔺 琛<sup>1</sup>, 马钦彦<sup>1\*</sup>, 韩海荣<sup>1</sup>, 曹文强<sup>1</sup>, 王治中<sup>2</sup>, 王占勤<sup>2</sup>, 张葆祥<sup>2</sup>

(北京林业大学资源环境学院, 北京 100083; 2. 山西太岳山森林经营局, 沁源 046505)

**摘要:**对自然生长的辽东栎林木用 LI-6400 测定其光合作用, 实验包括以下内容: 在完全接近自然生长的条件下测定辽东栎叶片光合作用的日变化规律; 控制光合有效辐射强度, 测定叶片在不同  $\text{CO}_2$  浓度下光合作用的变化规律; 控制温度比对应时间段的温度高  $2\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ , 并控制  $\text{CO}_2$  浓度在  $375\sim 700\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$  间变化, 测定辽东栎光合作用的变化情况。结果如下: ①自然状态下辽东栎光合作用的日变化有两个光合速率峰, 峰高接近, 上午的光合速率峰持续时间较下午的长。叶片气孔导度与光合速率间有很强的正相关, 且对胞内  $\text{CO}_2$  浓度和蒸腾速率有较大影响。气孔导度与叶片水压亏缺呈相反的变化趋势, 而水压亏缺受光合有效辐射、气温的影响较大。②在控制叶片温度、光合有效辐射不变的情况下, 辽东栎的叶片水压亏缺变化幅度很小, 气孔导度变化主要受  $\text{CO}_2$  浓度的调节, 表现出在目前  $\text{CO}_2$  浓度至加倍  $\text{CO}_2$  浓度下, 随浓度增加而增大的趋势, 与之对应光合速率增大, 同时光补偿点也有所提高。当  $\text{CO}_2$  浓度超过  $800\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$  继续上升时, 气孔导度、光合速率均下降, 光补偿点继续升高。③对辽东栎叶片进行升温和高  $\text{CO}_2$  浓度处理, 在试验进行时的温度 ( $28\sim 37\text{ }^\circ\text{C}$ ) 下, 发现在  $375\sim 700\text{ml}\cdot\text{m}^{-3}$  的  $\text{CO}_2$  浓度范围内, 升温均导致光合速率的降低。

**关键词:** 辽东栎; 光合特性;  $\text{CO}_2$  浓度; 光合有效辐射; 温度

## Photosynthesis Characteristic of *Quercus liaotungensis* in Taiyue Mountain Region

LIN Chen<sup>1</sup>, MA Qin-Yan<sup>1</sup>, HAN Hai-Rong<sup>1</sup>, CAO Wen-Qiang<sup>1</sup>, WANG Zhi-Zhong<sup>2</sup>, WANG Zhan-Qin<sup>2</sup>, ZHANG Bao-Xiang<sup>2</sup> (1. Environment and Resource Collage of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Forestry Administration of Shanxi Taiyue Mountain, Qinyuan 046505, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1399~1406.

**Abstract:** For the needs of evaluation of the reflection tendency of *Quercus liaotungensis* under the depression of greenhouse effect. The comparisons of photosynthesis characteristic in normal and controlled situations have been taken.

the main elements as photosynthesis active radiation ( $PAR$ ),  $\text{CO}_2$  concentration ( $\text{CO}_2$ ), air temperature ( $T_a$ ), leaf temperature ( $T_l$ ) *et al* have be Measured and logged by Li-6400 portable photosynthesis system. While the photosynthesis rate ( $P_n$ ), transpiration rate, stomatal conductance ( $Cond$ ), intercellar  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ), vapor pressure deficit ( $VPD$ ) *et al.* have been logged as well. Samples are taken every hour to determine the diurnal characters of them. During sunrise and sunset, the intervals are less than one hour. Keep the leaf temperature at about  $24\text{ }^\circ\text{C}$ , then set the photosynthesis active radiation and change the  $\text{CO}_2$  concentration can get the photosynthesis curve. Another content of the experiment is tracking the nature condition, then keeping all other environment factors unchanged and setting the temperature  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $4\text{ }^\circ\text{C}$  higher than nature condition in different  $\text{CO}_2$  concentrations to get the influence of temperatures in photosynthesis process. The results show that: (1) the diurnal variation of photosynthesis rate is midday

**基金项目:** 国家自然科学基金重大资助项目 (39899370); 国家林业局重点资助项目 (2001-03 太岳山生态定位站)

**致谢:** 本文写作过程中, 得到了北京林业大学高荣学先生的悉心指导, 谨表谢忱。

\* 通讯作者 Author for crrespondence, E-mail: maqinyan@bjfu.edu.cn

**收稿日期:** 2001-05-18; **修订日期:** 2002-06-26

**作者简介:** 蔺琛 (1977-), 女, 陕西渭南人, 硕士。主要从事植物生理生态学研究。

depression pattern,the two peaks have nearly the same height. The peak occurred in morning lasts longer than the one in the afternoon. The stomatal conductance is related to photosynthesis closely, and the two keep same change trend. The Cond also affects the intercellar CO<sub>2</sub> concentration and transpiration rate to some degree. The vapor pressure deficit is attributes to *PAR* and air temperature. The diurnal variation curves of photosynthesis rate,stomatal conductance and transpiration all are two peak pattern and show similar trend during the same time. (2) When keeping leaf temperature at 24 C , *VPD* changes very little, so CO<sub>2</sub> concentration is the main factor affecting the stomatal conductance. When CO<sub>2</sub> concentration is change between 300~800ppm, stomatal conductance,photosynthesis rate and light compensation point (*LCP*) keep same trend with CO<sub>2</sub> concentration. With the CO<sub>2</sub> concentration keeping increasing beyond 800 ppm, stomatal conductance and photosynthesis rate will drop while *LCP* still increases. Under controlling condition, transpiration rate show stronger relation to stomatal conductance than in natural condition. (3) Keeping all other environment factor as nature situation, increasing air temperature by 2 and 4 C and changing CO<sub>2</sub> concentration from 375 to 700ml · m<sup>-3</sup> show that photosynthesis rate will drop with the air temperature and rise with CO<sub>2</sub> concentrations at the same time. The main conclusion is; greenhouse effect will promote the photosynthesis process of *Quercus liaotungensis*.

**Key words:***Quercus liaotungensis*;photosynthesis rate;CO<sub>2</sub> concentration;photosynthesis active radiation; air temperature

文章编号:1000-0933(2002)09-1399-08 中图分类号:S718.43 文献标识码:A

辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是中国暖温带落叶阔叶林区的重要优势种之一,对区域植被的建成和群落演替有较大影响。光合作用是研究植物生长生理过程的基本内容之一。目前国内在辽东栎的光合特性方面所进行的研究多限于自然状态下的光合测定,注重对单个环境因子变化的响应<sup>[1~3]</sup>。本文通过光合有效辐射(*PAR*)、温度、CO<sub>2</sub>浓度等多因子的组合变化来提供多样的综合环境条件,观测在不同环境条件下辽东栎的光合响应情况,测定辽东栎林木光合作用的一些重要生理指标,预测在未来全球气候变化条件下,辽东栎林木光合特性的可能变化趋势。

1 材料及方法

试验于 2000 年 7~8 月间在山西太岳山森林经营局的灵空山林场进行。灵空山林场(东经 112°01′~112°15′,北纬 36°31′~36°43′)地势西高东低,海拔 1150m~2088m,平均 1500m,地貌属大起伏喀斯特侵蚀中山,岩石主要为石灰岩。土壤主要是褐土和棕壤。气候属暖温带大陆性季风气候,年均温 8 C,年日照 2600h;无霜期 125d 左右;年降雨量 600~650mm。试验林分为辽东栎纯林,林分密度 1100 株 · hm<sup>-2</sup>,平均胸径 20.0 cm,平均树高 15.5 m,郁闭度 0.8,海拔 1600m,坡向东,坡度 30°,坡位中,林下主要是胡枝子、伞花胡颓子、苔草和莎草。试验所选标准木胸径 20.1 cm,树高 15.3 m,位于林内。

光合作用采用美国产 Li-6400 便携式光合作用测定系统测定。测定过程中用 Li-cor 公司生产的 Li-6400-01 液化 CO<sub>2</sub> 钢瓶来提供不同的 CO<sub>2</sub> 浓度,Li-6400-02B 红蓝光光源提供不同的光合有效辐射强度。日变化每小时测定 1 次,早晚光合有效辐射变化较快时段内,测定时间间隔缩短。测定辽东栎在不同 CO<sub>2</sub> 浓度下的光合速率是在控制光合有效辐射不变的条件下连续进行的。模拟树种在 CO<sub>2</sub> 浓度加倍、气温上升的情况下的光合响应,是在一天的不同时间内对自然状态的测定完成后,控制其它因子不变,将自然温度加 2 C,加 4 C,并改变 CO<sub>2</sub> 浓度来进行测定的。

2 结果与分析

2.1 辽东栎光合作用的日变化规律

在叶片发育成熟且处于生长旺季的 7 月下旬选择晴好天气对当地温度、光合有效辐射强度及 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化进行测定(图 1、图 2)。由图可以看出光合有效辐射、温度均于中午 12:00 左右达最大值,CO<sub>2</sub> 浓度在早晚有较大幅度的升高,其它时间较为平稳。

于同一天内测定的辽东栎的日光合速率、蒸腾速率曲线见图 3。从图中可以看出辽东栎具有明显的光午休, 光合曲线呈双峰, 峰高接近, 上午的光合峰较下午的宽。由于试验前当地正值雨季, 降水较多, 因而估计被测个体具有两个高度接近的光合峰, 与测定时林木水分条件较好有关<sup>[4]</sup>; 两个峰宽不一致, 显示出植物体内的酶的昼夜节奏<sup>[5]</sup>, 即辽东栎调控光合作用的酶在经过一夜的调整后, 能够较长时间的保持高光合速率。这一结果表明, 在模拟 CO<sub>2</sub> 倍增和增温效应对树种的影响时需要对应一天不同的时间段进行, 以防酶自身的变化影响实验结果。另外蒸腾速率与光合速率间存在相同的变化趋势, 峰形接近, 这一结果与蒸腾速率同样受叶片气孔的调节有关。

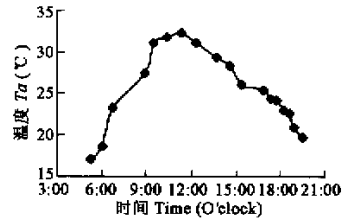


图 1 气温日变化

Fig. 1 Diurnal variation of temperature

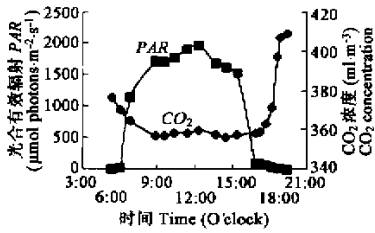


图 2 光合有效辐射、CO<sub>2</sub> 浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of PAR and CO<sub>2</sub> concentration

图 4 显示的是叶片气孔导度与叶片细胞内 CO<sub>2</sub> 浓度的日变化曲线, 与图 3 对照可看出叶片气孔导度与叶片光合速率的日变化趋势有很强的正相关关系, 呈平行变化趋势。这与许大全等学者提出的光合速率对气孔导度具有反馈调节作用, 在有利于叶肉细胞的光合时气孔导度增大; 不利于光合时, 气孔导度减小的看法一致<sup>[6,7]</sup>。比较图 2 和图 4 可以看出, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度在早晚期间均显示较高值, 在白天的其它测定时间内有小的波动, 图 2 显示大气 CO<sub>2</sub> 浓度值在正午 12:00 左右有一个小的峰值, 与光午休时间相对应; 而同时胞内 CO<sub>2</sub> 浓度则呈一谷值, 这与对应时段内气孔导度的下降有关。由此可以看出胞内 CO<sub>2</sub> 浓

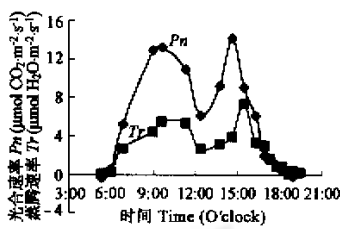


图 3 辽东栎光合速率、蒸腾速率日变化

Fig. 3 Diurnal variation of photosynthesis and transpiration rate

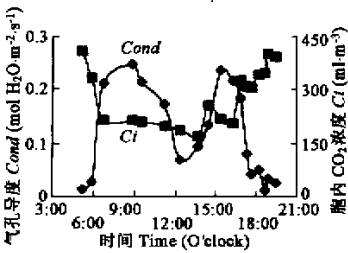


图 4 辽东栎叶片气孔导度和胞内 CO<sub>2</sub> 浓度日变化

Fig. 4 diurnal variation of stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration

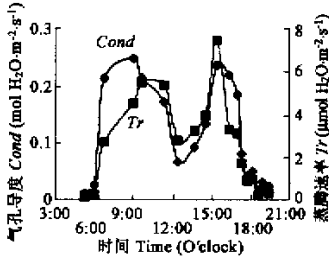


图 5 辽东栎气孔导度、蒸腾速率日变化

Fig. 5 Diurnal variation of stomatal conductance and transpiration rate

度受气孔活动的制约较大,在早晚期间能与大气 CO<sub>2</sub> 浓度值同样保持上升的变化趋势也与该时间段内气孔导度值的逐渐增大有关。图 5 将蒸腾速率与气孔导度间的关系做了对照,可以看出蒸腾速率在很大程度上决定于气孔的活动状态。与图 6 对照,显示出气孔导度与水压亏缺间呈相反的变化趋势,水压亏缺对应的峰值与气孔导度对应的谷值时间相一致,水压亏缺在一定程度上与叶温相关。将图 6 与图 2 相比较,可以看出水压亏缺与光合有效辐射的峰值对应时间、曲线基本走势有较强的相关性。

2.2 控制条件下的辽东栎叶片光合曲线

由图 7 可看出,在低光合有效辐射 (50μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 下,辽东栎的光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而下降,在该光合有效辐射下能达到的最大光合速率在所能提供的最低 CO<sub>2</sub> 浓度处。光合有效辐射增加 (300μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 时,光合速率在一定范围内随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而增加,到 CO<sub>2</sub> 浓度约为 500ml · m<sup>-3</sup> 时达该光合有效辐射下的最大光合速率,随后又随 CO<sub>2</sub> 浓度的加大而下降,在 CO<sub>2</sub> 浓度达 1000ml · m<sup>-3</sup> 前,下降幅度较低光合有效辐射下的下降幅度小,越过 1000ml · m<sup>-3</sup> 后,与低光合有效辐射下的下降趋势呈平行变化。光合有效辐射增至较强光合有效辐射 (800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 时,光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度变化的幅度加大,上升段加长,最大光合速率在 CO<sub>2</sub> 浓度为 800~1000ml · m<sup>-3</sup> 间,超过该浓度后开始下降,降幅较小。在试验过程中,在 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 附近的其它光合有效辐射下也对不同 CO<sub>2</sub> 浓度对光合作用的影响做了测定,在同一 CO<sub>2</sub> 浓度下,以 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 处所对应的光合速率为最大,所以认为东栎的光合能力值在光合有效辐射为 800μmol photonsm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 和 CO<sub>2</sub> 浓度为 1000ml · m<sup>-3</sup> 时达到。

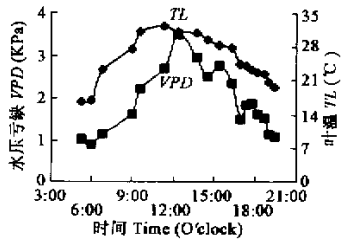


图 6 辽东栎叶温蒸腾速率日变化

Fig. 6 Diurnal variation of leaf temperature and transpiration rate

光合有效辐射增至强光 (1200μmol photonsm<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 时,光合曲线的上升段缩短,强光下光合曲线的下移,与光抑制有关。在此光合有效辐射下,最大光合速率在 CO<sub>2</sub> 浓度为 700~800ml · m<sup>-3</sup> 时达到,且上升幅度减小,这一现象和气孔的关闭调节有关。图 8 中外界 CO<sub>2</sub> 浓度对叶片气孔导度的变化曲线可用以提供依据。另外,从图 8 可知,在不同光合有效辐射下,气孔对 CO<sub>2</sub> 浓度变化的灵敏度也不同,但共同的变化趋势是气孔导度会随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而减小<sup>[8~10]</sup>。与图 7 对照可看出气孔导度与光合有效辐射、CO<sub>2</sub> 浓度的关系基本上和光合速率一致;与图 9 相比较,可发现蒸腾速率与气孔导度的变化趋势是完全相吻合的,与自然状态下辽东栎蒸腾速率与气孔导度的日变化关联相比,控制状态下两者的相关性更强。

图 10 显示的是水压亏缺对不同光合有效辐射、CO<sub>2</sub> 浓度的响应。这组试验是在控制叶温为 24℃ (由于控制条件下的试验在一天内完成,取早晨测定开始时气温 24℃ 为基准值。)的情况下进行的,与图 6 自然状态下的水压亏缺相比,变化幅度要小得多,但基本上显示出在同一光合有效辐射下,随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而加的趋势。这一趋势与气孔导度的变化趋势相反,符合一般认为的气孔导度受水压亏缺的影响且随水压亏缺的增加而减小的结论。但在这一状态下,可看出气孔导度受 CO<sub>2</sub> 浓度的影响较水分亏损大。这与控制状态下的恒温及短时间内大幅度改变 CO<sub>2</sub> 浓度的试验条件有关。

图 11 显示的是光合有效辐射为 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 时,CO<sub>2</sub> 浓度在 50~800ml · m<sup>-3</sup> 范围内的光合速率与 CO<sub>2</sub> 浓度间的关系,这一段曲线具有较好的线性关系,推导出直线方程:

$$y = 0.0193x - 0.6942 \quad R^2 = 0.9884$$

由此得出辽东栎的光呼吸速率为 0.6942μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub> 补偿点为 38.6ml · m<sup>-3</sup>。

图 12 是在不同 CO<sub>2</sub> 浓度下,光合速率随光合有效辐射变化的曲线,由图可知辽东栎对光合有效辐射的利用效率随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而增加。图中显示,在目前 CO<sub>2</sub> 浓度 (350ml · m<sup>-3</sup>) 下,辽东栎的光合速率在较低光合有效辐射下就已达到光补偿点,这可能是对目前 CO<sub>2</sub> 浓度长期适应的结果,但低 CO<sub>2</sub> 浓度下的曲线总体比较平缓<sup>[11]</sup>。同样在弱光条件 (0~200μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 下,高 CO<sub>2</sub> 浓度下的曲线随光合有

效辐射增加的斜率要大得多,这一现象符合一些学者提出的目前的  $\text{CO}_2$  浓度无法饱和植物体内 RubisCO 的假设,由于  $\text{CO}_2$  浓度加大,被饱和的酶数量增多,在一定的光合有效辐射下被激活参与碳固定的酶量也

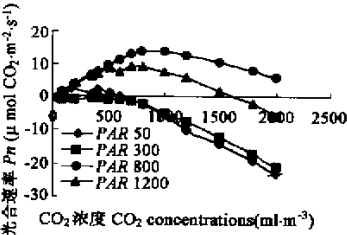


图 7 不同光合有效辐射下辽东栎叶片的光合速率与  $\text{CO}_2$  浓度的关系

Fig. 7 Photosynthesis rate in different PARs and  $\text{CO}_2$  concentrations

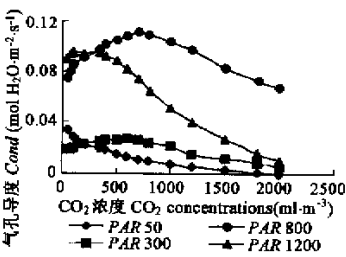


图 8 不同光合有效辐射下辽东栎叶片的气孔与  $\text{CO}_2$  的关系

Fig. 8 Variation of stomatal conductance with  $\text{CO}_2$  concentraion under different PARs

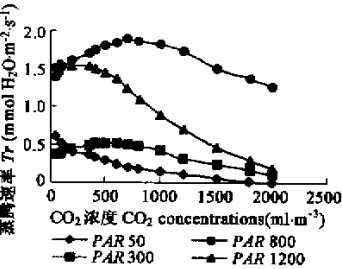


图 9 不同光合有效辐射下辽东栎叶片的蒸腾速率与  $\text{CO}_2$  的关系

Fig. 9 Variation of transpiration with  $\text{CO}_2$  concentration under different PARs

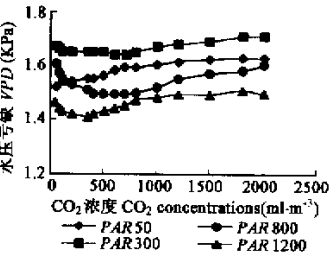


图 10 不同光合有效辐射下辽东栎叶片的空气-叶片水分亏缺与  $\text{CO}_2$  的关系

Fig. 10 Variation of VPD with  $\text{CO}_2$  under different PARs

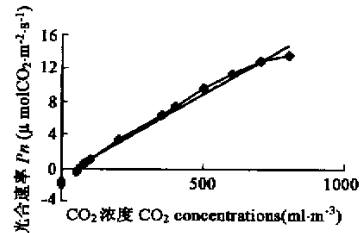


图 11 光合有效辐射  $800\mu\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时辽东栎叶片光合速率与  $\text{CO}_2$  浓度的关系

Fig. 11 Variation of photosynthesis with  $\text{CO}_2$  concentration under  $800\mu\text{mol photons m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

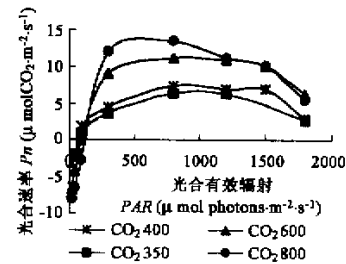


图 12  $400\sim 800\text{ml} \cdot \text{m}^{-3}\text{CO}_2$  下辽东栎叶片的光合速率与光合有效辐射的关系

Fig. 12 Variation of photosynthesis with PAR in middle  $\text{CO}_2$  concentrations



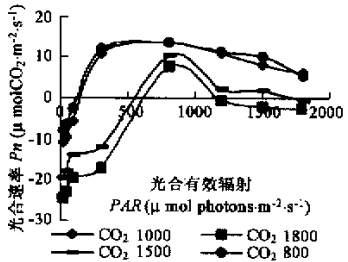


图 13 高 CO<sub>2</sub> 下辽东栎叶片的光合速率与光合有效辐射的关系

Fig. 13 Variation of photosynthesis with PARs in high CO<sub>2</sub> concentrations

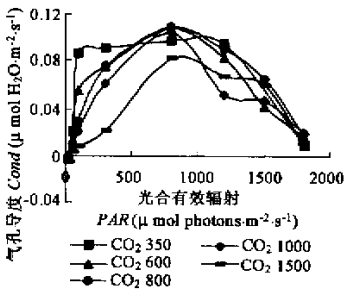


图 14 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下辽东栎叶片的气孔导度与光合有效辐射的关系

Fig. 14 Variation of stomatal conductance with PAR in different CO<sub>2</sub> concentrations

增多,因而光合有效辐射稍有增加时就导致光合速率大幅提高<sup>[12]</sup>。但由于植物本身的酶数量有限,光合速率不会随着 CO<sub>2</sub> 浓度的无限增加而增加。高 CO<sub>2</sub> 浓度下,光补偿点也有所提高说明在弱光下高 CO<sub>2</sub> 浓度会促进植物体的呼吸作用,这一试验结果与 Poorter 等人<sup>[13]</sup>在 CO<sub>2</sub> 浓度倍增研究中的结论一致。

图 13 显示光合速率不会随 CO<sub>2</sub> 浓度的上升而无限增加。当 CO<sub>2</sub> 浓度继续加大时,光合速率下降,一般认为这是由于植物体在高 CO<sub>2</sub> 浓度下,气孔导度减小造成的。对辽东栎而言,既能饱和和叶片内的 RubisCO,又不至于造成气孔大量关闭的 CO<sub>2</sub> 浓度在 800~1000ml · m<sup>-3</sup> 左右。这说明目前的 CO<sub>2</sub> 浓度尚不足以饱和辽东栎的 RubisCO 酶,是辽东栎光合作用的限制因子。未来 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,将对辽东栎的光合作用有所促进,长期处于高 CO<sub>2</sub> 浓度对辽东栎光合作用产生的适应效应还无法预测,但至少在短期内会出现光合速率增加的趋势。在图 12、13 所显示的 7 个 CO<sub>2</sub> 浓度下,光合速率均在光合有效辐射 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 左右达最大值,由此判断 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> 为光饱和点。曲线的后半段随光合有效辐射的增大,开始出现光抑制,进而表现出光合速率降低的趋势。

图 14 显示了在不同 CO<sub>2</sub> 浓度下气孔导度对光合有效辐射变化的响应,目前 CO<sub>2</sub> 浓度下的气孔导度在较低光合有效辐射下就迅速增加,与目前 CO<sub>2</sub> 浓度下的低光补偿点相一致,可能是一种适应性行为。但这时的气孔导度表现出峰宽大,峰高小的特点,随浓度的加大,气孔导度的峰宽度缩短,高度增加,直到很高的 CO<sub>2</sub> 浓度(1200ml · m<sup>-3</sup>)下,才开始出现气孔导度在所有光合有效辐射下的下调。

2.3 辽东栎叶片的光合速率对温度的响应

由于植物的生理活动具有节奏性,存在昼夜周期性变化。在测定升温对辽东栎叶片光合作用的影响时,为避免时间变化影响试验结果,试验在一天选取几个时段进行,测定叶片在该时段自然温度 *T* 下对应不同 CO<sub>2</sub> 浓度的光速率,然后迅速在此温度基础上加 2 C (*T*+2)、4 C (*T*+4),改变 CO<sub>2</sub> 浓度,测定光合速率的变化。

试验选接近光午休时至下午的光合高峰结束期间。所得结果见图 15。

试验结果显示,温度升高导致辽东栎光合速率的降低。由于试验是在夏季进行,选择的时间又正值一天温度最高时段,所以在 5 个 CO<sub>2</sub> 浓度下,升温都导致了光合速率值降低。

3 结论

3.1 辽东栎的光合速率在一天内有两个峰值,表现出明显的光午休,两个光合峰高度接近,上午的光合速率峰持续时间较下午的长。叶片气孔导度、蒸腾速率与光合速率间表现出较强的正相关,同样显示出双峰型的日变化曲线。叶片胞内 CO<sub>2</sub> 浓度受气孔导度和大气 CO<sub>2</sub> 浓度的双重影响,呈现出早晚大幅升高,正午有一小的峰值的日变化进程。气孔导度受到叶片水压亏缺的调节,与水压亏缺呈反向变化,而水压亏缺则显示出受光合有效辐射、气温的影响,与之同向变化的趋势。

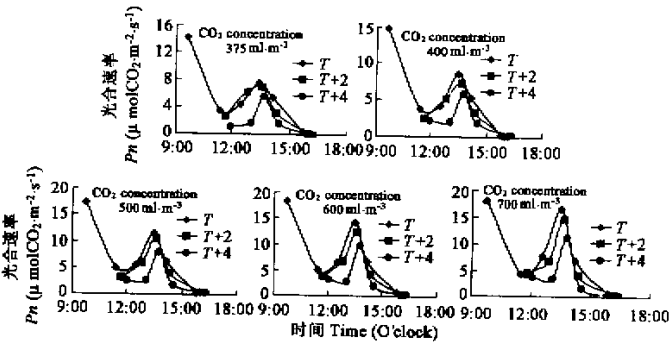


图 15 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下升温对光合速率的影响

Fig. 15 Photosynthesis rate at different temperatures in 5 CO<sub>2</sub> concentrations

3.2 在控制叶片温度、光合有效辐射不变的条件下,叶片气孔导度变化主要是由 CO<sub>2</sub> 浓度的改变引起的,在当前 CO<sub>2</sub> 浓度(350 ml · m<sup>-3</sup>)至 CO<sub>2</sub> 浓度加倍(800 ml · m<sup>-3</sup>)的范围内,叶片气孔导度有随 CO<sub>2</sub> 浓度增加而增大的趋势,与之相对应光合速率也随之增大,光补偿点升高。当 CO<sub>2</sub> 浓度超过倍增浓度且继续上升时(在 1000 至 2000 ml · m<sup>-3</sup>的范围内),气孔导度,光合速率逐步下调,但光补偿点继续升高。在控制状态下,蒸腾速率与气孔导度紧密相关,其相关程度比自然状态下高。

3.3 在试验的实际温度条件下(28~37℃),在 375、400、500、600、700ml · m<sup>-3</sup> 5 个 CO<sub>2</sub> 浓度处,温度升高均导致辽东栎光合速率降低。

4 讨论

4.1 在测定环境因子日变化规律时,温度与光合有效辐射几乎同步变化,这与通常所认为的温度应滞后的规律有偏差,估计是由于仪器在日光直射下,受光合有效辐射影响较大所致。

4.2 在控制条件下,低光合有效辐射(50μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)时,辽东栎的光合速率随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而下降,在该光合有效辐射下所能达到的最大光合速率在所能提供的最低 CO<sub>2</sub> 浓度处。说明这一光合有效辐射不能有效激活二磷酸核酮糖羧化氧化酶(RubisCO)同化 CO<sub>2</sub>,进行光合作用,CO<sub>2</sub> 浓度的加大影响了气孔的开闭程度,进而导致光合速率降低。比较光合有效辐射为 300μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>和 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>时的光合曲线可看出,在 300μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>时,光合曲线在前半段的斜率较小,这与该光合有效辐射下 RubisCO 的激活不充分有关,被活化酶的数量不足导致光合作用受限。在测定过程中得出辽东栎的光饱和点在 800μmol photons m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>左右,较其它树种<sup>[14]</sup>的研究结果略低,可能是由于树种间的差异及所测个体位于林内,长期受到部分遮荫所造成的。

4.3 在测定升温对辽东栎光合作用的影响时,由于升温过程带来的时间滞后,T+2 曲线对应点的光合速率比 T 曲线对应点的值要高,这可以从光合速率下降段 T+2 曲线对应点的下降幅度比上升段的大看出来。因为不管是在光合速率的上升段还是下降段,由控温引起的时间滞后是一样长的,在相等的时间间隔内,处于有利于光合作用的时间时上升幅度小,不利于光合作用的时间时下降幅度大,说明如果提供非常短的、可忽略的时间滞后,T+2 温度曲线的光合速率将比 T 曲线的低。另外,3 条温度曲线的峰值从高到低的排列顺序为 T,T+2,T+4,也证明了升温对光合速率的负影响。升温对光合速率在 T+2 温度下的影响较 T+4 温度下的小,T+4 温度曲线上的各点一直处于同一时间段内测定的 3 条曲线中的最低处。

由于试验时间正值一天温度最高的时段,可能已超过辽东栎光合作用的最适温度,因而显示出光合速率随升温而下降。建议在以后的测定中补充在温度较低的环境中的实时监测,拓展在未来升温情况下树木生长的变化趋势数据

4.4 根据以上测定结果可认为在未来光合有效辐射基本不变的情况下,辽东栎的生长会随 CO<sub>2</sub> 浓度的升

高而增加,在较高温度范围内(30.3~35.4℃)光合速率会随温度的增加而降低,但降低程度较CO<sub>2</sub>浓度倍增带来的光合速率的增加幅度小,因而认为在未来温室效应的情况下,辽东栎仍能保持好的生长趋势,在不考虑光合适应的影响时,光合速率会较目前水平高。

参考文献

[1] Lin S H (林舜华), Xiang B (项斌), Gao L M (高雷明), *et al.* The response of *Quercus liaotungensis* to doubled CO<sub>2</sub> concentration. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报), 1997, **21**(4): 297~303.

[2] Jiang G M (蒋高明), Qu C M (渠春梅). Photosynthetic response of six wood species to elevated CO<sub>2</sub> in *Quercus liaotungensis* forest in Beijing mountainous areas. *Acta Phytoecologica Sinica* (in Chinese)(植物生态学报), 2000, **24**(2): 204~208.

[3] Sun S C (孙书存), Chen L Z (陈灵芝). Leaf growth and photosynthesis of *Quercus liaotungensis* in Dongling Mountain region. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 2000, **20**(2): 212~217.

[4] Yang L T (杨丽涛), Timothy J. Arkebauer. Diurnal variation in gas exchange of aspen, hazelnut, jack pine and black spruce. *Acta Phytoecologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(4): 408~419.

[5] Dong Y D (董愚得). The physiological growth of plant. In: Pan R C (潘瑞炽), Dong Y D (董愚得) ed. *Plant physiology*(in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 1997. 235~270.

[6] Ma S R (马书荣), Yan X F (阎秀峰), Chen B L (陈伯林), *et al.* A comparative study on stomatal behavior of *Adenophora lobophylla* and *A. potaninii* under different shade treatment. *Bulletin of Botanical Research* (in Chinese)(植物研究), 2000, **20**(1): 63~68.

[7] Xu D Q (许大全). Aspects of photosynthesis and stomatal limitation. *Bulletin of Plant Physiology* (in Chinese)(植物生理学通讯), 1997, **33**(4): 241~244.

[8] Hamly G Jones. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. *Journal of Experimental Botany*, 1998, **49**: 387~398.

[9] Lin J K (林金科), Lai M Z (赖明志), Zhan Z J (詹梓金). Response of net photosynthetic rate to ecological factors in tea leaves. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 2000, **20**(3): 404~408.

[10] Sun G C (孙谷畴), Zhao P (赵平), Zeng X P (曾小平), *et al.* Photosynthetic responses of plants in different subtropical forests on increment of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.* (in Chinese)(应用与环境生物学报), 2000, **6**(1): 1~6.

[11] Zhang X Q (张小全), Xu D Y (徐德应), Zhao M S (赵茂盛), *et al.* The responses of 17-years-old *Chinese fir* shoots to elevated CO<sub>2</sub>. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 2000, **20**(3): 390~396.

[12] Shen Y G (沈允钢), Shi N J (施教耐), Xu D Q (许大全) ed. *Active Photosynthesis* (in Chinese). Beijing: Science Press, 12~25, 127~133.

[13] Poorter H, Gifford R M, Kriedemann P E, *et al.* A quantitation analysis of dark respiration and carbon contents factors in the growth response of plants to elevated CO<sub>2</sub>. *Australian Journal of Botany*, 1992, **40**: 501~513.

[14] Guo Z H (郭志华), Zhang H D (张宏达), Li Z A (李志安), *et al.* The photosynthetic characteristics in leaves of *Liriodendron chinense* seedlings in MT. Lushan. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese)(生态学报), 1999, **19**(2): 164~169.