

文章编号: 1000-5692(2004)03-0247-07

# 白栎光合特性对二氧化碳浓度增加 和温度升高的响应

项文化, 田大伦, 闫文德, 罗 勇

(中南林学院 生命科学与技术学院, 湖南 株洲 412006)

**摘要:** 用 Li-Cor6400 光合测定系统测定自然生长白栎 *Quercus fabri* 的光合速率、蒸腾速率和气孔导度对二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 浓度增加和温度升高的响应。结果表明: 短期内  $\text{CO}_2$  浓度增加, 白栎的净光合速率增大。 $\text{CO}_2$  浓度为  $290 \sim 450 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 白栎的光补偿点、饱和点和最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 分别为  $90 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $1\ 500 \sim 1\ 700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $5.5 \sim 8.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $\text{CO}_2$  浓度倍增至  $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 光补偿点和饱和点均有所降低, 分别为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1\ 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大净光合速率增大, 为  $10.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。白栎光合作用在春季适宜温度为  $24\ ^\circ\text{C}$ , 相应的光饱和点和最大净光合速率分别为  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $9.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。夏季为  $28\ ^\circ\text{C}$ , 光饱和点和最大净光合速率分别为  $1\ 700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $12.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $24\ ^\circ\text{C}$  和  $28\ ^\circ\text{C}$  的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似。温度上升到  $32\ ^\circ\text{C}$  以后,  $\text{CO}_2$  补偿点、饱和点和净光合速率下降。 $32\ ^\circ\text{C}$ ,  $36\ ^\circ\text{C}$  和  $40\ ^\circ\text{C}$  的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似。温度变化幅度较大时, 与  $\text{CO}_2$  浓度相互作用效应明显。蒸腾速率与叶片的气孔导度表现出相同的变化规律, 随光合有效辐射增加而增大,  $\text{CO}_2$  浓度的增加而降低, 在低  $\text{CO}_2$  浓度时受光照强度的影响大于高  $\text{CO}_2$  浓度。温度是影响蒸腾速率的主要因子。春季白栎的蒸腾速率与光合作用对气孔调节的关系密切, 夏季则更多地反映对能量平衡的调控。 $\text{CO}_2$  和温度变化相互作用,  $24\ ^\circ\text{C}$  时白栎的蒸腾速率和气孔导度对  $\text{CO}_2$  浓度变化的响应幅度较小,  $28\ ^\circ\text{C}$  时随  $\text{CO}_2$  浓度增加而逐渐减少, 其他 3 种温度表现为抛物线关系。图 4 参 20

**关键词:** 白栎; 净光合速率; 蒸腾速率; 气孔导度;  $\text{CO}_2$  浓度; 温度

**中图分类号:** S718.51; Q945.11      **文献标识码:** A

大气二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 浓度增加和气温升高等全球变化现象预计将在不同尺度上对生态系统结构和功能产生较大的影响<sup>[1]</sup>。光合作用作为植物物质生产的生理过程, 连接植物生长、叶的化学特征、物候和生物产量分配对  $\text{CO}_2$  浓度升高的反应<sup>[2]</sup>。研究植物叶片尺度上的光合作用对大气  $\text{CO}_2$  增加和温

收稿日期: 2004-02-16; 修回日期: 2004-04-19

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(39899370); 国家林业局重点科研项目(2001-07); 湖南省自然科学基金资助项目(OOJJY2024)

作者简介: 项文化(1967-), 男, 湖北麻城人, 教授, 博士, 从事森林生态、自然资源管理与乡村发展研究。E-mail: xwl510@sohu.com

度升高的响应,是外推全球气候变化对生物圈影响的重要途径<sup>[3]</sup>,也是估算植被系统在全球气候变化过程中对CO<sub>2</sub>固定作用的基础。

CO<sub>2</sub>浓度增加和温度升高直接影响植物光合作用。CO<sub>2</sub>是Rubisco的主要底物,CO<sub>2</sub>浓度增加在短期内能促进植物的光合作用<sup>[1,2,4-9]</sup>。受光合产物的转移能力和可利用养分的限制,植物光合作用对CO<sub>2</sub>浓度升高的长期反应表现为下调现象,但光合速率仍然高于目前CO<sub>2</sub>浓度下的水平<sup>[1]</sup>。温度影响催化反应过程中酶的活性和膜的透性,从而影响植物的光合作用,大多数植物的光合作用表现出与其正常生长环境相适应的最适温度<sup>[7]</sup>。与此同时,CO<sub>2</sub>浓度增加和温度升高之间相互作用,对植物的光合作用、生长及生产力的影响更为复杂<sup>[8,9]</sup>。

白栎 *Quercus fabri* 分布在我国淮河以南、长江流域和华南、西南各地,生长于海拔1900 m以下丘陵山区,喜光,耐干燥瘠薄,萌芽性强,是用作水土保持和薪柴等用途的优良树种<sup>[10]</sup>。白栎林是在地带性森林植被受到破坏后的荒地或疏林地上,经过封禁而形成的先锋植被群落。该群落不稳定,必将被常绿阔叶林替代<sup>[11]</sup>。丁圣彦等<sup>[12]</sup>对白栎光补偿点和日光合速率等光合特性进行了研究,分析了这些特性与植物群落演替的关系。但作为早期先锋群落中的树种,白栎光合特性对大气CO<sub>2</sub>浓度增加和温度升高等生态因子变化的响应是否比其他地带性植物更为敏感,CO<sub>2</sub>浓度的变化对白栎光合特性的影响是否存在相互作用,国内还未见对这些问题的研究。本研究观测不同CO<sub>2</sub>浓度和温度下白栎光合特性的变化,为预测全球气候变化对白栎林群落结构和功能影响提供依据。

## 1 研究地区的自然概况

试验在湖南省中南林学院树木标本园内进行,地理位置为27°50'N,113°09'E,地处湘江中游、湘中偏东地带。海拔50~200 m,相对高度100 m,为典型的丘陵区。气候系亚热带湿润气候,年降水量为1185.8~1912.2 mm,平均降水量为1430.8 mm,降水量主要集中于4~7月份。年平均相对湿度为80%。年平均气温为17.4℃。试验地的土壤母岩以变质板页岩为主,风化程度较深。土壤为森林红壤,呈酸性。地带性植被为常绿阔叶林。

## 2 材料与方 法

试验材料为空旷地段自然生长的白栎树,被测定树木的树龄为6 a,胸径5.5 cm,树高3.8 m,树冠的枝轮数为5轮。试验采用美国生产的Li-Cor 6400便携式光合测定系统进行光合作用测定。该系统能自动记录光合速率、蒸腾速率、气孔导度等生理指标以及气温、叶温、CO<sub>2</sub>浓度、空气相对湿度和光合有效辐射等生态因子,具有可调和稳定光源、二氧化碳、水和温度等环境因子的性能。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。

分别于2003年4月15日、5月20日和8月8~10日选择同株白栎树冠中第2轮枝条最外部的3~5片叶,设置290, 350, 450和700 μmol·mol<sup>-1</sup>等不同的CO<sub>2</sub>浓度, 16, 20, 24, 28, 32, 36和40℃等不同的温度,其他环境因子为自然状态。用仪器已存的程序测定相应的光反应曲线或CO<sub>2</sub>反应曲线。光反应曲线的光照强度梯度设置为0, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 350, 500, 750, 1000, 1250, 1500和2000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。CO<sub>2</sub>反应曲线的CO<sub>2</sub>浓度梯度设置为50, 100, 280, 370, 450, 500, 700, 1000, 1200和1500 μmol·mol<sup>-1</sup>。测定的最少稳定时间为100 s,当测定结果变化率小于0.1时光合测定系统自动记录数据。测定的数据导入计算机后,用Excel程序绘制图形。

## 3 结果与分析

### 3.1 CO<sub>2</sub>浓度增加对白栎光合特性的影响

在温度为24℃和相对湿度为(65.0±5.2)%的条件下,白栎的净光合速率随光合有效辐射的增加而增大,到达一定光照强度后,增加幅度趋于减少,光合作用达到饱和状态(图1)。随CO<sub>2</sub>浓度

的增加, 白栎的净光合速率逐渐增大。CO<sub>2</sub> 浓度从 290 μmol·mol<sup>-1</sup> 升高到 450 μmol·mol<sup>-1</sup> 时, 光补偿点没有较大的变化, 为 90 ~ 100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 饱和点随 CO<sub>2</sub> 浓度的增加而略有增加, 从 1 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 上升到 1 700 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 光合有效辐射在 0 ~ 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 之间, 3 种 CO<sub>2</sub> 浓度间的净光合速率没有较大的差异。光合有效辐射大于 500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 后, 净光合速率的差异逐渐表现出来, 光照强度增强, 它们之间的差异增大, 相应的最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 5.5 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 6.2 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 8.2 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。CO<sub>2</sub> 浓度增加到 700 μmol·mol<sup>-1</sup> 时, 光补偿点和饱和点均有所降低, 分别为 10 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 1 300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 最大净光合速率为 10.6 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。光合有效辐射为 0 ~ 1 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时, 白栎净光合速率增加幅度远大于其他 3 种 CO<sub>2</sub> 浓度。

● 290 μmol·mol<sup>-1</sup> ▲ 350 μmol·mol<sup>-1</sup> × 450 μmol·mol<sup>-1</sup> ■ 700 μmol·mol<sup>-1</sup>

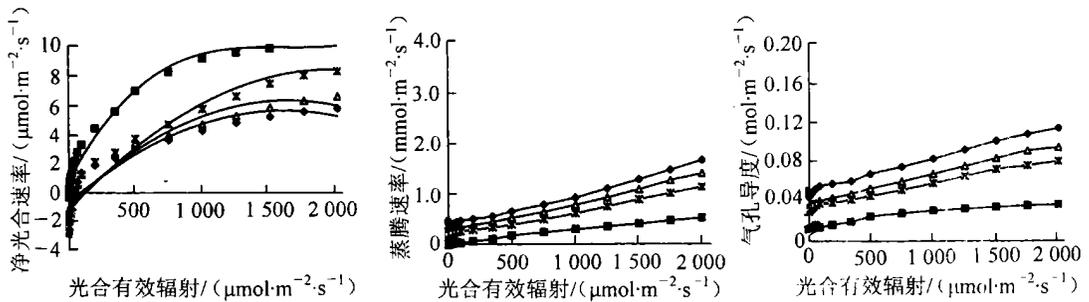


图 1 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下白栎光合特性变化

Figure 1 Changes in photosynthetic characteristics of *Quercus fabri* under different CO<sub>2</sub> concentrations

白栎叶片的气孔导度随光合有效辐射增加而增大。相同的光合有效辐射强度下, CO<sub>2</sub> 浓度的增加, 气孔导度降低 (图 1)。因为气孔是植物与外界进行气体交换的通道, 光合有效辐射的增加, 植物可利用能量的增加导致净光合速率增大<sup>[13]</sup>, 消耗 CO<sub>2</sub> 增大, 叶片为了弥补 CO<sub>2</sub> 的消耗, 气孔导度相应也增大来加速 CO<sub>2</sub> 向叶肉细胞内扩散。外界 CO<sub>2</sub> 浓度的升高, 植物叶片容易获得 CO<sub>2</sub> 进行光合作用, 为了保持胞间 CO<sub>2</sub> 分压始终低于大气 CO<sub>2</sub> 分压, 植物调节气孔导致气孔导度的降低<sup>[14]</sup>。蒸腾速率变化与叶片的气孔导度变化密切相关, 两者表现出相同的变化规律。与蒋高明等<sup>[15]</sup> 的研究结果相似, 在低 CO<sub>2</sub> 浓度时白栎的气孔导度和蒸腾速率受光照强度的影响大于高 CO<sub>2</sub> 浓度。

### 3.2 温度升高对白栎光合特性的影响

白栎净光合速率随温度升高表现出不同的变化规律 (图 2 和图 3)。在春季, 16 °C 和 20 °C 的净光合速率在光合有效辐射为 0 ~ 400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时没有差异, 随光合有效辐射增强而增大。光合有效辐射大于 400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 后, 净光合速率下降, 并维持在一定水平上, 其中 20 °C 的净光合速率高于 16 °C。在相同的光合有效辐射下, 温度上升到 24 °C 时, 白栎的净光合速率最大, 光饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 9.9 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。温度上升到 28 °C 后, 净光合速率随温度的增加而下降。28 °C 的光饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 700 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 7.4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 32 °C 的为 700 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 4.8 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 36 °C 的为 600 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 3.9 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

在夏季, 温度为 28 °C 的净光合速率最大, 其光饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 1 700 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 12.8 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。温度上升到 32 °C 后净光合速率逐步下降 (图 3), 32 °C 光饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 2 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 9.3 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 36 °C 的为 1 950 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 7.6 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 40 °C 的为 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 和 5.0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

许多研究结果表明, 植物的光合作用有一个适宜温度<sup>[13 16 17]</sup>, 温度过高抑制光合作用<sup>[18, 19]</sup>。美国科罗拉多州亚高山森林中山地松 *Pinus contorta*、恩氏云杉 *Picea engelmannii* 和亚高山冷杉 *Abies lasiocarpa* 3 个优势针叶树种的枝叶尺度上的光合速率在生长早期的最适温度为 10 °C, 生长后期为 15

℃<sup>[20]</sup>。白栎光合特性在不同季节随温度升高表现出类似的规律。春季白栎树叶萌发出后还处于发育完善阶段, 适宜于中光照强度环境, 其光饱和点和最大净光合速率比夏季低, 光合作用的适宜温度为 24 ℃。夏季白栎树叶发育完成, 能在全光照下进行光合作用, 净光合速率较高, 适宜温度为 28 ℃。

▲ 16 ℃ × 20 ℃ ◦ 24 ℃ ■ 28 ℃ • 32 ℃ ◻ 36 ℃

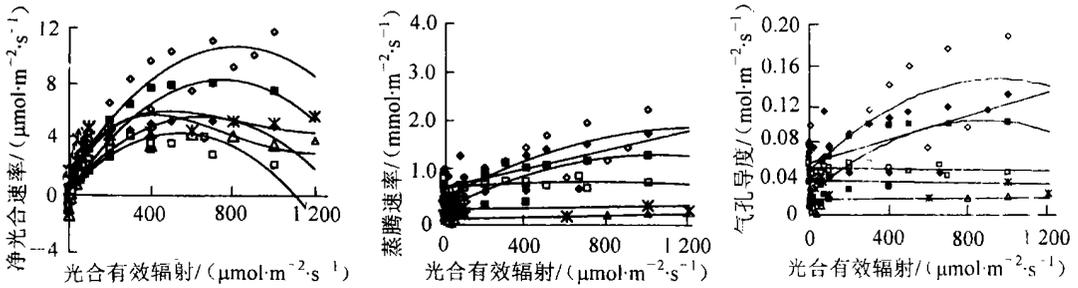


图2 春季不同温度下白栎光合特性变化

Figure 2 Changes in photosynthetic characteristics of *Quercus fabri* for different temperatures in spring

● 28 ℃ ◊ 32 ℃ ▲ 36 ℃ × 40 ℃

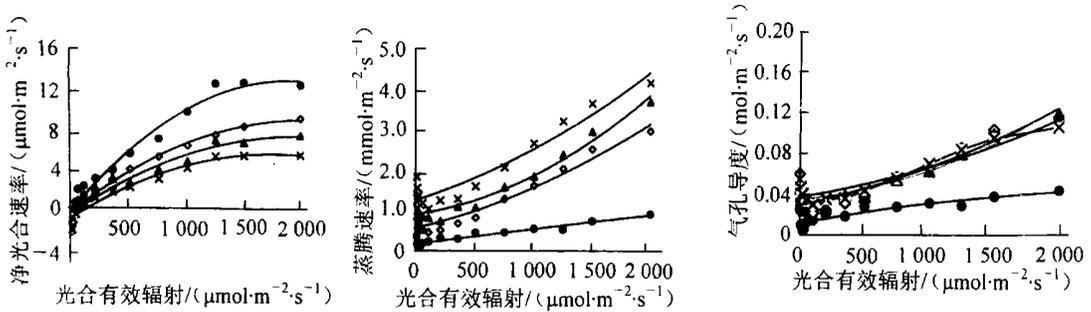


图3 夏季不同温度下白栎光合特性变化

Figure 3 Changes in photosynthetic characteristics of *Quercus fabri* for different temperatures in summer

春季白栎的蒸腾速率与气孔导度之间的变化规律相似, 在不同温度下表现出不同的变化规律 (图 2)。当光合有效辐射较低时 (0~100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 白栎的蒸腾速率随温度的增加而增大。光合有效辐射增大到 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  以后, 各温度下白栎蒸腾速率排列顺序为 24 ℃ > 32 ℃ > 28 ℃ > 36 ℃ > 20 ℃ > 16 ℃。其中, 16 ℃, 20 ℃和 36 ℃的蒸腾速率与光合有效辐射呈水平直线关系, 不随光照强度的变化而变化。夏季白栎的蒸腾速率随温度的升高和光照强度增加而增大 (图 3), 其中 28 ℃的蒸腾速率随光合有效辐射增大的变化幅度较小, 其他温度下变化幅度较大, 说明温度是影响蒸腾速率的主要因子<sup>[13]</sup>。在夏季, 由于温度较高, 当光照强度增加时, 蒸腾速率增大能消耗一部分能量来避免灼伤, 气孔导度相应增大。因此, 春季白栎的蒸腾速率与光合作用对气孔调节的关系密切, 夏季则更多地反映蒸腾作用对能量平衡的调控。

### 3.3 温度与 CO<sub>2</sub> 浓度变化的交互作用

光合有效辐射为 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 白栎的净光合速率随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加逐渐增大, 到达一定值后开始下降, 但不同温度的变化情况不同 (图 4)。相同 CO<sub>2</sub> 浓度, 28 ℃的净光合速率最大, 其 CO<sub>2</sub> 补偿点、饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  和 20.3  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。24 ℃的次之, 其 CO<sub>2</sub> 补偿点、饱和点和最大净光合速率分别为 75  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 1 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  和 16.8  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。温度上升到 32 ℃以后, CO<sub>2</sub> 补偿点、饱和点和净光合速率下降。32 ℃的 CO<sub>2</sub> 补偿点、饱和点和最大净光合速率 (CO<sub>2</sub>) 分别为 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 600  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  和 8.5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 36 ℃的分别为 8  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 730  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  和 10.4  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 40 ℃的分别为 10  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

$\text{mol}^{-1}$ ,  $670 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $7.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。24 °C 和 28 °C 的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似, 32 °C, 36 °C 和 40 °C 的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似, 表明温度变化幅度较大时, 与  $\text{CO}_2$  浓度相互作用效应明显。

蒸腾速率随温度升高而增大 (图 4)。 $\text{CO}_2$  浓度增加, 24 °C 的蒸腾速率变化幅度较小, 28 °C 的蒸腾速率逐渐减少, 其他 3 种温度表现为抛物线关系。气孔导度表现出与蒸腾速率相似的变化规律 (图 4)。

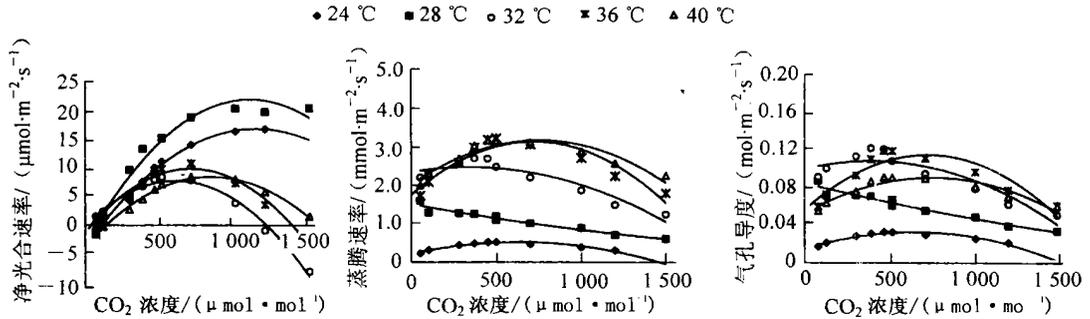


图 4 不同温度和  $\text{CO}_2$  浓度下白栎光合特性的变化

Figure 4 Changes in photosynthetic characteristics of *Quercus farbrri* for different  $\text{CO}_2$  concentrations and temperatures

## 4 结论

白栎的净光合速率随光合有效辐射的增加而增大, 到达一定光照强度后, 增加幅度趋于减少, 光合作用达到饱和状态。 $\text{CO}_2$  浓度增加, 白栎的净光合速率逐渐增大。 $\text{CO}_2$  浓度从  $290 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  升高到  $450 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 光补偿点  $90 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 变化较小, 饱和点和最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 有所增加, 分别从  $1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 从  $5.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $8.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $\text{CO}_2$  浓度倍增到  $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 光补偿点和饱和点均有所降低, 分别为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 为  $10.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见, 白栎为阳性喜光树种, 短期内  $\text{CO}_2$  浓度升高能增加其净光合速率,  $\text{CO}_2$  浓度倍增使白栎能在较弱的光照条件下进行光合作用。

白栎光合作用在春季适宜温度为 24 °C, 相应的光饱和点和最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 分别为  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $9.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。夏季为 28 °C, 相应的光饱和点和最大净光合速率分别为  $1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $12.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。白栎在春季适宜于中光照强度环境, 其光饱和点和最大净光合速率比夏季低。夏季能在全光照下进行光合作用, 其净光合速率较高。

24 °C 和 28 °C 的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似, 28 °C 的净光合速率最大, 其  $\text{CO}_2$  补偿点、饱和点和最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 分别为  $40 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $20.3 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。24 °C 的净光合速率次之, 其  $\text{CO}_2$  补偿点、饱和点和最大净光合速率 ( $\text{CO}_2$ ) 分别为  $75 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $16.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。温度上升到 32 °C 以后,  $\text{CO}_2$  补偿点、饱和点和净光合速率下降。32 °C, 36 °C 和 40 °C 的  $\text{CO}_2$  曲线变化趋势相似。温度变化幅度较大时, 与  $\text{CO}_2$  浓度相互作用效应明显。

白栎蒸腾速率变化与叶片的气孔导度变化密切相关, 两者表现出相同的变化规律, 随光合有效辐射增加而增大,  $\text{CO}_2$  浓度的增加而降低, 在低  $\text{CO}_2$  浓度时蒸腾速率和气孔导度受光照强度的影响大于高  $\text{CO}_2$  浓度。温度是影响蒸腾速率的主要因子, 春季白栎的蒸腾速率与光合作用对气孔调节的关系密切, 夏季则更多地反映对能量平衡的调控。春季白栎的蒸腾速率与气孔导度随温度变化的排列顺序为 24 °C > 32 °C > 28 °C > 36 °C > 20 °C > 16 °C。夏季随温度的升高和光照强度增加而增大。 $\text{CO}_2$  和温度变化相互作用, 24 °C 的蒸腾速率和气孔导度对  $\text{CO}_2$  浓度变化的响应幅度较小, 28 °C 的随  $\text{CO}_2$  浓度增加而逐渐减少, 其他 3 种温度表现为抛物线关系。

## 参考文献:

- [1] Ward J K, Strain B R. Elevated CO<sub>2</sub> studies: past, present and future [J]. *Tree Physiol*, 1999, **19**: 211—220.
- [2] Ceulemans R, Janssens I A, Jach M E. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on trees and forests: lessons to be learned in view of future ecosystem studies [J]. *Ann Bot*, 1999, **84**: 577—590.
- [3] Long S P. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentration: has its importance been underestimated? [J]. *Plant Cell Environ*, 1991, **14**: 729—739.
- [4] 蒋高明, 韩兴国, 林光辉. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物的直接影响—国外十余年模拟实验研究之主要手段及基本结论 [J]. *植物生态学报*, 1997, **21** (6): 489—502.
- [5] Poorter H, Pot S, Lambers H. The effect of an elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on growth, photosynthesis and respiration of *Plantago major* [J]. *Physiol Plant*, 1998, **73**: 553—559.
- [6] Sims D A, Cheng W, Luo Y, et al. Photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> in a sunflower canopy [J]. *J Exp Bot*, 1999, **50**: 645—653.
- [7] Lambers H, Chapin F S, Pons T L. *Plant Physiological Ecology* [M]. New York: Springer-Verlag, 1998. 58—59.
- [8] Kellomäki S, Wang K Y. Growth and resource use of birch seedlings under elevated carbon dioxide and temperature [J]. *Ann Bot*, 2001, **87**: 669—682.
- [9] 杨金艳, 杨万勤, 王开运, 等. 木本植物对 CO<sub>2</sub> 浓度和温度升高的相互作用的响应 [J]. *植物生态学报*, 2003, **27** (3): 304—310.
- [10] 中国树木志编委会. 中国树木志 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1982. 2 235—2 337.
- [11] 祁承经. 湖南植被 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990. 168—169.
- [12] 丁圣彦, 宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林演替系列优势种光合生理生态的比较 [J]. *生态学报*, 1999, **19** (3): 318—323.
- [13] Alexander J D, Donnelly J R, Shane J B. Photosynthetic and transpirational responses of red spruce understory trees to light and temperature [J]. *Tree Physiol*, 1995, **15**: 393—398.
- [14] 孙伟, 王德利, 王立, 等. 狗尾草蒸腾特性与水分利用效率对模拟光辐射增强和 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应 [J]. *植物生态学报*, 2003, **27** (4): 448—453.
- [15] 蒋高明, 林光辉, Marino B D V. 美国生物圈二号内生长在高 CO<sub>2</sub> 浓度下的 10 种植物气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率的变化 [J]. *植物学报*, 1997, **39** (6): 546—553.
- [16] Ali C, Stützel H, Kage H. Optimal nitrogen content and photosynthesis in cauliflower (*Brassica oleracea* L. botrytis) scaling up from a leaf to the whole plant [J]. *Ann Bot*, 2000, **85**: 779—787.
- [17] 刘世荣, 赵文栋, 马全林. 沙木蓼和沙枣对地下水水位变化的生理生态响应: II. 叶片光合作用及其对温度和光的反应 [J]. *植物生态学报*, 2003, **27** (2): 223—227.
- [18] 蔺琛, 马钦彦, 韩海荣, 等. 山西太丘山辽乐栎的光合特性 [J]. *生态学报*, 2002, **22** (9): 1 339—1 406.
- [19] 刘东焕, 赵世伟, 高荣孚, 等. 植物光合作用对高温的反应 [J]. *植物研究*, 2002, **22** (2): 205—212.
- [20] Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, et al. Temperature as a control over ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in a high-elevation, subalpine forest [J]. *Oecologia*, 2003, **134**: 537—546.

## Photosynthetic responses of *Quercus fabri* leaves to increase in CO<sub>2</sub> concentration and temperature

XIANG Wen-hua, TIAN Da-lun, YAN Wen-de, LUO Yong

(School of Life Science and Technology, Central South Forestry University, Zhuzhou 412006, Hunan, China)

**Abstract:** Li-Cor 6400 Photosynthesis Measure System was used to measure the responses of photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of *Quercus fabri* to increase in CO<sub>2</sub> concentration and temperature. The findings showed that net photosynthetic rate of *Quercus fabri* increased when the CO<sub>2</sub> concentration was increased in a very short time. When CO<sub>2</sub> concentration was 290—450 μmol·mol<sup>-1</sup>, the light compensation point ( $P_{LC}$ ), light saturation point ( $P_{LS}$ ), and maximum net photosynthetic rate ( $A_{max}$ ) were 90—100, 1 500—1 700 and 5.5—8.2 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively. When CO<sub>2</sub> was increased to 700 μmol·mol<sup>-1</sup>,  $P_{LC}$  and  $P_{LS}$  decreased to 10 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and 1 300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, but  $A_{max}$  increased to 10.6 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>. The optimum temperature for the photosynthesis of *Quercus fabri* in spring was 24 °C and the corresponding  $P_{LS}$  and  $A_{max}$  were 800 μmol·m<sup>-2</sup>

$\text{°s}^{-1}$  and  $9.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  respectively. The optimum temperature in summer was  $28 \text{ °C}$  and the corresponding  $P_{1S}$  and  $A_{\text{max}}$  were  $1700 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $12.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . The change of  $\text{CO}_2$  curve at  $24 \text{ °C}$  was similar to that at  $28 \text{ °C}$ . When the temperature was increased to  $32 \text{ °C}$ , the compensation point, saturation point and net photosynthetic rate decreased. The changes of  $\text{CO}_2$  curve at  $32 \text{ °C}$ ,  $36 \text{ °C}$  and  $40 \text{ °C}$  were similar. When the temperature was changed in a wide range, the interaction between it and  $\text{CO}_2$  concentration was significant. Transpiration rate and stomatal conductance of leaves showed the same changing rules. They increased with the increase in the effective photosynthetic radiation and decreased with the increase in  $\text{CO}_2$  concentration. The effect of light intensity on transpiration rate and stomatal conductance at low  $\text{CO}_2$  concentration were greater than those at high concentration. Temperature was the main factor effecting the transpiration rate. The transpiration rate of *Quercus fabri* in spring was closely related to the stomata regulated by photosynthesis. In summer, however, the transpiration response to temperature greatly reflected the energy balance. Temperature and  $\text{CO}_2$  interacted with each other. At the temperature of  $24 \text{ °C}$ , the range of transpiration rate and stomatal conductance responded to  $\text{CO}_2$  concentration was rather small. At  $28 \text{ °C}$ , transpiration rate and stomatal conductance decreased with the increase in  $\text{CO}_2$  concentration. At  $32 \text{ °C}$ ,  $36 \text{ °C}$  and  $40 \text{ °C}$ , the responses of transpiration rate and stomatal conductance took on shapes of parabolas. [Ch, 4 fig. 20 ref.]

**Key words:** *Quercus fabri*; net photosynthetic rate; transpiration rate; stomatal conductance;  $\text{CO}_2$  concentration; temperature