

## 秦岭火地塘林区锐齿栎光合、蒸腾特性

王翼龙<sup>1</sup>, 张硕新<sup>2</sup>, 雷瑞德<sup>2</sup>, 王得祥<sup>2</sup>, 张红星<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵, 712100; 2. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵, 712100)

**摘要:**以 Li-6400 便携式光合测定系统测定了秦岭火地塘林区主要成林树种锐齿栎的光合、蒸腾作用日进程、CO<sub>2</sub> 响应曲线、光响应曲线及其对 CO<sub>2</sub> 倍增的响应。结果表明:正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度下,锐齿栎叶片的光补偿点为 25 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,光饱和点为 1 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,表观光量子效率为 0.051 1;CO<sub>2</sub> 倍增情况下,叶片的光补偿点下降为 8 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,光饱和点上升为 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,表观光量子效率为 0.069 6,饱和光强下叶片最大净光合速率增加 121%。CO<sub>2</sub> 补偿点为 53 μmol·mol<sup>-1</sup>,CO<sub>2</sub> 饱和点为 1 000 μmol·mol<sup>-1</sup>;叶片的羧化效率为 0.081 7;锐齿栎叶片净光合速率及蒸腾速率日进程在晴天均表现为双峰曲线,在阴天均表现为单峰曲线。

**关键词:** 锐齿栎;光合作用;蒸腾作用;日进程;羧化效率

**中图分类号:** S718.43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2003)04-0009-04

### Characteristics of Photosynthesis and Transpiration of Sharptooth Oak in Huoditang Forest Zone of the Qinling Mountains

WANG Yi-long<sup>1</sup>, ZHANG Shuo-xin<sup>2</sup>, LEI Rui-de<sup>2</sup>, WANG De-xiang<sup>2</sup>, ZHANG Hong-xing<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, NW Sci-Tech Univ. of Agr. and For., Yangling, Shaanxi 712100, China;

万方数据

2. College of Forestry, NW Sci-Tech Univ. of Agr. and For., Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Sharptooth oak (*Quercus aliena* var. *acuteserrata*) is one of the most important afforestation tree species in Huoditang forest zone of the Qinling Mountains. Using Li-6400 portable photosynthesis system, light curve, CO<sub>2</sub> curve, diurnal courses of photosynthesis and transpiration of sharptooth oak were measured and analyzed in this paper. The main results are as follows: Under normal atmospheric CO<sub>2</sub>, the light compensation point, light saturation point and apparent quantum yield of sharptooth oak were about 25 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 1 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and 0.051 1 respectively. Under doubled CO<sub>2</sub>, the light compensation point, light saturation point and apparent quantum yield of sharptooth oak were about 8 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and 0.069 6 respectively. The maximum net photosynthetic rate at light saturation point increased 121%. The CO<sub>2</sub> compensation point and saturation point were 53 μmolmol<sup>-1</sup> and 1 000 μmolmol<sup>-1</sup> respectively. The carboxylation efficiency was 0.081 7. The diurnal courses of photosynthesis and transpiration were double peaked in sunny day and single peaked in cloudy day respectively.

**Key words:** sharptooth oak; photosynthesis; transpiration; diurnal courses; carboxylation efficiency

锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata*)为秦岭火地塘林区主要树种之一。锐齿栎林是秦岭林区落叶阔叶林的代表类型,分布广泛;主要分布于海拔 800-2 300 m 的中山地带<sup>[1]</sup>,对于该地区涵养水源,水土保持起着十分重要的作用。近年来,人们对

其生物量<sup>[1]</sup>、营养元素循环<sup>[2]</sup>、群落结构特征<sup>[3]</sup>等方面进行了深入的研究和总结,但有关锐齿栎的光合生理特性的研究还未见报道。本文通过研究锐齿栎光合、蒸腾特性,为该地区锐齿栎林的恢复和资源可持续发展提供理论依据。

收稿日期:2003-01-10

基金项目:国家林业局“十五”重点项目“陕西秦岭火地塘森林景观特征及生态功能研究”(2001-04)

作者简介:王翼龙(1978-),男,甘肃西和人,生态学硕士研究生,研究方向为树木光合生理生态。

### 1 研究方法 与 仪器

秦岭火地塘林场地处秦岭中段南坡,属北亚热带海洋气候区<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 锐齿栎各生理指标日进程测定

在 2002 年锐齿栎生长期中,在晴天较多的 9 月,选择生长正常的锐齿栎树冠南向中部外围枝条上的充分展开叶,分别选取晴朗无云天和阴天在自然条件下对其蒸腾强度、光合速率等主要生理指标进行连体测定,测定时间区段为 8:00 - 18:00 时,每 1 h 测一次,每个指标测定 3 个重复,每个重复记录 3 个数据,取平均值。由于测定前期连续降水,因此土壤水分充足。

#### 1.2 光响应 ( $P_n - PAR$ ) 曲线测定

选取晴天清晨,利用仪器 6400 - 02B 光源设定叶室中光合有效辐射强度分别为:2 000, 1 800, 1 600, 1 400, 1 200, 1 000, 800, 600, 400, 300, 200, 100, 50, 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。并利用 6400 - 01 液态  $\text{CO}_2$  小钢瓶为气源,控制叶室中  $\text{CO}_2$  浓度分别为 350 和 700  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,以对比测定锐齿栎在正常和倍增  $\text{CO}_2$  浓度下对光的响应特征,测定时在每一光合有效辐射强度下等待光合速率稳定时记录数据,每一光合有效辐射强度下记录 6 个数据,取其平均值。

#### 1.3 $\text{CO}_2$ 响应 ( $P_n - \text{CO}_2$ ) 曲线测定

利用仪器 6400 - 02B 光源设定叶室中为高光合有效辐射强度(1 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );以 6400 - 01 液态  $\text{CO}_2$  小钢瓶为气源,通过仪器控制叶室中  $\text{CO}_2$  浓度分别为 50, 80, 100, 200, 350, 500, 700, 1 000, 1 300, 1 500, 1 700, 2 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ;测定锐齿栎对  $\text{CO}_2$  浓度的响应特征,测定时在每一  $\text{CO}_2$  浓度下等待光合速率稳定时记录数据,每个  $\text{CO}_2$  浓度下记录 6 个数据,取其平均值。

#### 1.4 环境因子测定

在测定树木各光合生理指标的同时,由 Licor-6400 便携式光合测定系统测定环境因子(气温、相对湿度、光合有效辐射)。测定期内,日最高气温 25.93℃,日最低 15.57℃;日最大相对湿度 83.39%,日最小相对湿度 45.63%;日最大光合有效辐射强度为 1 800  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

#### 1.5 数据处理

用  $P_n - PAR$  响应曲线直线部分(光合有效辐射强度  $< 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的数据进行线性回归求得表观量子效率(AQY)<sup>[4]</sup>;对  $\text{CO}_2$  曲线中低

$\text{CO}_2$  浓度时的光合速率的数据进行线性回归,求得羧化效率(CE)<sup>[5]</sup>;根据水分利用效率的定义<sup>[6]</sup>,计算水分利用效率(WUE)。

### 2 结果与分析

#### 2.1 晴天光合速率、蒸腾速率的日变化

自然条件下植物的光合作用随着内外因子的变化而时刻发生变化<sup>[7]</sup>。由图 1 可看出,在晴天锐齿

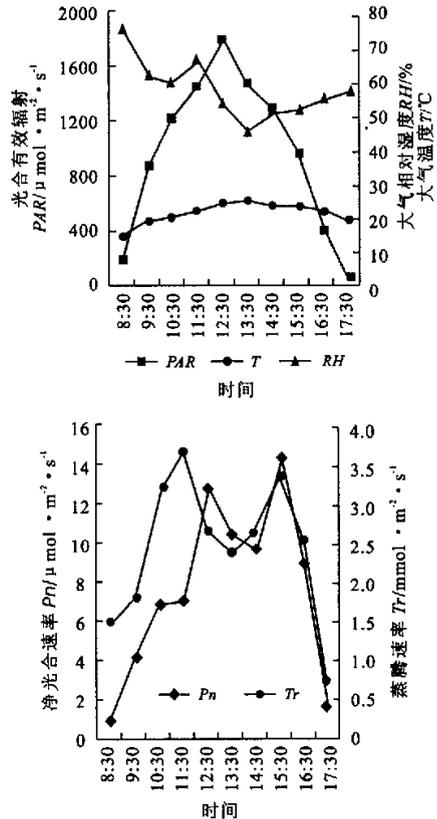


图 1 晴天锐齿栎光合、蒸腾速率及相关环境因子日进程

Fig. 1 Diurnal courses of net photosynthetic rate, transpiration rate of sharp-tooth oak and related environmental factors in sunny days

栎光合、蒸腾日进程都呈双峰曲线,其净光合速率峰值分别出现在 11:30 时和 15:30 时,并且第 1 峰值(14.56  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )大于第 2 峰值(13.48  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );蒸腾速率峰值分别出现于 12:30 和 15:30 时,第 1 峰值(3.206  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )小于第 2 峰值(3.620  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。蒸腾速率第 1 峰值比净光合速率第 1 峰值出现稍晚,说明在

晴天中午锐齿栎通过蒸腾散失水分降低叶温来适应午间高光强高温的逆境环境。中午的净光合速率有明显的下降,出现“午休”现象。这可能与晴天光合有效辐射强度、大气湿度、气温等生态生理指标在一天内变化剧烈,中午高光合有效辐射强度、高温及低大气湿度等综合作用导致叶片气孔关闭和光合活性下降有关。经计算,晴天日均净光合速率为  $9.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日均蒸腾速率  $1.915 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日均水分利用效率为 5.11。

### 2.2 阴天光合速率、蒸腾速率的日变化

由锐齿栎阴天光合、蒸腾日进程曲线(图2)可看出,在阴天其光合、蒸腾日进程总体趋势均呈单峰

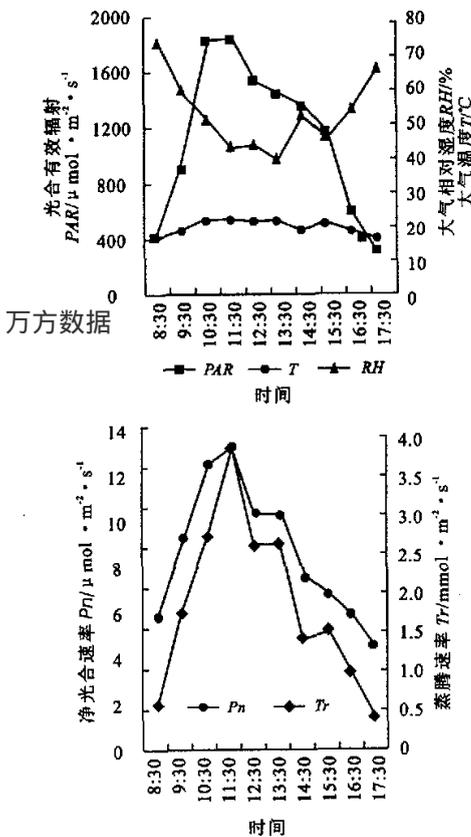


图2 阴天锐齿栎光合、蒸腾速率及相关环境因子日进程

Fig.1 Diurnal courses of net photosynthetic rate, transpiration rate of sharp-tooth oak and related environmental factors in cloudy days

型,峰值均出现在 11:30 时,光合、蒸腾速率峰值分别为  $13.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $3.78 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算可得,阴天锐齿栎日均净光合速率为 8.68

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日均蒸腾速率为  $1.826 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日均水分利用效率为  $4.75 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。由于阴天一天内相关生态生理指标变化缓和,光合、蒸腾均未出现“午休”现象,但由于各时段光合有效辐射强度均较低 ( $< 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),所以日均净光合速率、蒸腾速率及水分利用效率都低于晴天。这些光合日进程的差异是不同天气条件下各生理生态因子综合作用的结果,也体现了锐齿栎对不同天气条件的适应能力。

### 2.3 不同 CO<sup>2</sup> 浓度下净光合速率对光合有效辐射的响应

据所测两不同 CO<sup>2</sup> 浓度下锐齿栎 Pn- PAR 曲线(图3)可看出,CO<sup>2</sup> 浓度的增加对锐齿栎叶片的光合作用具有正效应,CO<sup>2</sup> 浓度的增加显著地提高了叶片的净光合速率。由图3 计算出锐齿栎叶片在正常 CO<sup>2</sup> 浓度下,其光补偿点和光饱和点分别为 25、120  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表观光量子效率为 0.051 1;在倍增 CO<sup>2</sup> 浓度下,光补偿点和光饱和点分别为 8、180  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表观光量子效率为 0.069 6。由此看出,CO<sup>2</sup> 浓度增加可使锐齿栎叶片光补偿点降低,光饱和点、表观光量子效率提高,试验结果与张小全等人<sup>[9]</sup>在 CO<sup>2</sup> 浓度倍增研究中的结论一致。这些光合生理指标的变化可能对于提高叶片在弱光和强光下的光合能力有很重要的意义。

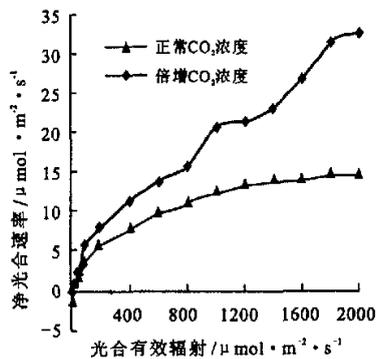


图3 两种不同 CO<sub>2</sub> 浓度下锐齿栎叶片净光合速率对光合有效辐射强度的响应

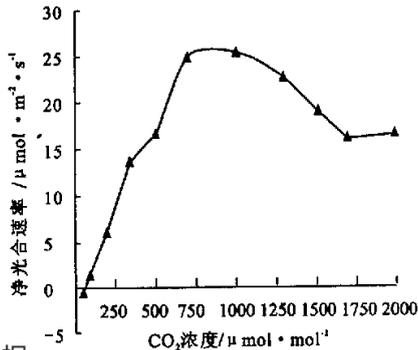
(测定时大气湿度 65% ~ 75%, 气温 23 ~ 25℃)

Fig.3 Net photosynthetic rate (Pn) -PAR curve of sharp-tooth oak in two CO<sub>2</sub> concentrations.

### 2.4 高光合有效辐射强度下净光合速率对 CO<sup>2</sup> 浓度的响应

由锐齿栎叶片净光合速率对 CO<sup>2</sup> 浓度的响应曲线(图4)可以看出,在低的 CO<sup>2</sup> 浓度下(50 ~ 700

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 锐齿栎叶片净光合速率随  $\text{CO}_2$  浓度增加而迅速增加; 当  $\text{CO}_2$  浓度大于  $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 其净光合速率增加缓慢, 当  $\text{CO}_2$  浓度达 1 000 时, 其净光合速率达最高值  $25.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 随着  $\text{CO}_2$  浓度继续增大 ( $\text{CO}_2$  浓度  $> 1 000$ ), 其净光合速率逐渐减小, 这可能是由于过高的  $\text{CO}_2$  浓度对锐齿栎叶片的光合作用产生了抑制作用的结果。根据锐齿栎叶片净光合速率对  $\text{CO}_2$  浓度的响应曲线 (图 4), 可得出  $\text{CO}_2$  补偿点为  $53 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  饱和点为  $1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 通过对低  $\text{CO}_2$  浓度时的光合速率的数据进行线性回归计算得出羧化效率为 0.081 7。



万方数据

图 4 锐齿栎叶片的净光合速率对  $\text{CO}_2$  浓度的响应  
(测定时光强  $1200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  
相对湿度 65% ~ 75%, 气温 23 ~ 25℃)

Fig. 4  $\text{CO}_2$  response of net photosynthetic rate of Sharp-toothed Oak.  
(The measurements were made under light intensity  
of  $1 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , air relative humidity of 65% ~ 75%,  
air temperature of 23 ~ 25℃)

### 3 结论

不同天气条件下对锐齿栎光合、蒸腾日进程的研究表明: 在晴天, 锐齿栎光合速率日进程和蒸腾速率日进程均呈双峰曲线, 表现出明显的“午休”现象; 在阴天则由于气温、湿度及光合有效辐射强度变化缓和表现为单峰曲线。晴天日最大净光合速率、日平均净光合速率分别为  $14.56 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.78 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日平均蒸腾速率为  $1.915 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日平均水分利用效率为  $5.11 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ; 阴天日最大净光合速率、日平均净光合速率分别为  $13.26 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $8.68 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日平均蒸腾速率为  $1.826 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 日平均水分利用效率为  $4.75 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

日最大净光合速率、日平均净光合速率、蒸腾速率和水分利用效率都表现为晴天  $>$  阴天。

正常  $\text{CO}_2$  浓度下锐齿栎的光补偿点、光饱和点和表观光量子效率分别为  $25$ 、 $120 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.051$ , 对光的需求较高, 属阳性喜光树种。倍增  $\text{CO}_2$  浓度下其最大净光合速率增加 121%, 光补偿点降低为  $8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光饱和点升高为  $1 800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、表观光量子效率升高为  $0.069$ , 说明  $\text{CO}_2$  浓度升高有助于提高锐齿栎对弱光和强光的利用能力和碳同化能力。但是本文测定仅限于锐齿栎叶片对倍增  $\text{CO}_2$  浓度的短期反应, 有研究表明<sup>[10]</sup> 随着植物在较高  $\text{CO}_2$  浓度下生长时间延长其光合速率出现回落现象。因此对于长期高浓度  $\text{CO}_2$  下锐齿栎光合生理生态特性的反应有待于进一步深入研究。

通过  $\text{CO}_2$  响应曲线估算可得锐齿栎叶片  $\text{CO}_2$  补偿点为  $53 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,  $\text{CO}_2$  饱和点为  $1 000 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 羧化效率为 0.081 7。

### 参考文献:

- [1] 陈存根, 龚立群, 彭鸿, 等. 秦岭锐齿栎林的生物量和生产力[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(增): 103-114.
- [2] 张颖新, 雷瑞德, 刘广全, 等. 秦岭火地塘林区主要森林类型的营养循环[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(增): 115-120.
- [3] 雷瑞德, 彭鸿, 刘建军, 等. 火地塘林区次生锐齿栎林类型和结构特征的研究[J]. 西北林学院学报, 1996, 11(增): 79-85.
- [4] 许大全, 徐宝基, 沈允钢. C3 植物光合效率的日变化[J]. 植物生理学报, 1990, 16(1): 1-5.
- [5] Devis J E, Arkebauer T J, Norman J M, et al. Rapid measurement of the assimilation rate versus internal  $\text{CO}_2$  concentration relationship in green ash (*Fraxinus pennsylvanica* Marsh.). The influence of light intensity [J]. Tree Physiol., 1987, (3): 387-398.
- [6] Fischer R A. Plant production in the arid and semiarid zones[J]. Annu. Rev. Plant Physiol., 1978, 29: 227-317.
- [7] 曾小平, 赵平, 彭少麟, 等. 5 种木本豆科植物的光合特性研究[J]. 植物生态学报, 1997, 21(6): 539-544.
- [8] Powles C B. Photoinhibition induced by visible light[J]. Annu. Rev. Plant Physiol., 1984, 35: 15-44.
- [9] 张小全, 徐德应, 赵茂盛, 等.  $\text{CO}_2$  增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 390-396.
- [10] 孙谷畴, 赵平, 曾小平, 等. 大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对香蕉光合作用及光合碳循环过程中叶氮分配的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 429-434.