

苦竹叶片光合及水分利用率特性

张向峰, 王玉杰, 王云琦, 易琴, 郭平, 刘春霞

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 为了给经营管理苦竹者提供较好的科学理论依据, 作者采用 LI-6400XT 便携式光合测定仪, 以野生苦竹林为研究对象, 测定了其光合及水分利用率。结果表明: (1) 苦竹净光合速率和蒸腾速率日变化均为双峰型, 存在光合“午休”现象。(2) 气孔导度与净光合速率呈极显著的线性关系, 而且气孔导度是影响苦竹光合的主要限制因子, 所以苦竹光合“午休”主要受气孔因素限制。(3) 苦竹的水分利用率比较低, 节水抗旱能力比较差。(4) 苦竹的光补偿点为 $8.10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光饱和点为 $1\ 198.66 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 说明苦竹具有较强的耐阴能力, 能适应较宽的光照环境。

关键词: 苦竹; 光合速率; 水分利用率; 光饱和点; 光补偿点

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0122-05

中图分类号: S795.9

Characteristics of Photosynthesis and Water Utilization Efficiency of *Pleioblastus Amarus* Leaves

ZHANG Xiang-feng, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, YI Qin, GUO Ping, LIU Chun-xia

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Photosynthesis and water utilization efficiency of wild bitter bamboo (*Pleioblastus amarus*) were measured using portable photosynthetic analyzer LI-6400TX in order to provide a scientific basis for the management of Bitter Bamboo. Results showed that the curves for diurnal changes in net photosynthetic rate and stomatic conductance of Bitter Bamboo exhibited two peaks and the obvious phenomena of midday depression. Stomatic conductance had a significant linear relation with net photosynthetic rate. Stomatic conductance was found to be a key limiting factor for the photosynthesis of Bitter Bamboo and therefore, the midday depression was mainly regulated by the stomatic factor. Water utilization efficiency of Bitter Bamboo was relatively low, indicating that it is poor in water-saving and drought resistance. Light compensation point and light saturation point of Bitter Bamboo leaves were 8.10 and $1\ 198.66 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively, indicating that Bitter Bamboo is a shade-tolerant species and can adapt to a wider lighting condition.

Keywords: *Pleioblastus amarus*; photosynthetic rate; water utilization efficiency; light saturation point; light compensation point

竹类植物具有生长快、砍伐周期短、产量高、纤维长等优点, 在经济领域具有较大的开拓优势^[1]。竹类植物枝叶茂盛、根系发达, 具有涵养水源、保持水土、固土防冲等作用, 在保护人类生存环境方面具有非常重要的作用。重庆三峡库区苦竹分布较为广泛, 其用途多, 用于竹器制作、建筑及造纸等方面, 还用于解毒、清热等药用方面。福建、广东等地有食苦竹笋的习惯, 并有大量苦竹笋远销香港及东南亚地区^[2]。苦竹为禾本科植物, 植株呈小乔木或灌木状, 竿高 3~5

m, 粗 1.5~2 cm, 直立, 竿壁厚约 6 mm, 幼竿淡绿色, 具白粉, 老后渐转绿黄色, 被灰白色粉斑, 竿散生或丛生, 圆筒形。嫩叶、嫩苗、根茎等均可供药用, 夏、秋季采摘, 鲜用或晒干, 具有较好的经济、生态和社会效益。目前国内对苦竹的研究甚少。光合作用是植物重要生命特征之一, 它受到外界环境条件和内部因素的限制, 是一个复杂的生物物理化学过程^[3]。通过研究苦竹的光合特性, 不仅可以更深层次地了解它的生理生态特性, 而且对掌握苦竹的光合生产力等实际

收稿日期: 2011-04-19

修回日期: 2011-05-16

资助项目: 林业公益性行业科研专项“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005-01); “中央高校基本科研业务费专项资金”“基于分形理论土壤结构对坡面土壤抗侵蚀力学作用机理”(YX2011-26)

作者简介: 张向峰(1985—), 男(汉族), 山西省长治市人, 学士, 硕士研究生, 主要从事水土保持、山地灾害防治的研究。E-mail: z651584211@163.com。

通信作者: 王玉杰(1960—), 男(汉族), 北京市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持、山地灾害的研究。E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn。

问题具有重要的现实意义,也可以为苦竹的栽培生产和经营管理提供了理论依据。

1 研究区概况、材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于三峡库区缙云山自然保护区。保护区具有亚热带季风湿润性气候特征,气候温和,雨量充沛,森林植被覆盖率达 96.6%。土壤以三迭纪须家河组厚层石英砂岩、炭质页岩和泥质砂岩为母质风化而成的酸性黄壤及水稻土。

1.2 试验材料

研究对象为野生苦竹林,在竹林中分别选取 3 株长势相似且无病虫害的植株作为试验材料,高约 3.4 m,胸径约 2.2 cm。

1.3 试验方法

光合日变化测定:2010 年 7 月下旬(典型晴天),利用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400XT 便携式光合测定仪进行光合测定。每天 7:00 开始,18:00 结束,每隔 1 h 测定 1 次,连续测定 2 d 取平均值。测定 3 株,每株选 4 片相似并且成熟健康的叶子,每叶片重复测量 5 次取平均值。测定时用缓冲瓶使 CO_2 浓度处于相对稳定状态。测定的主要指标包括:叶片净光合速率 P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、胞间 CO_2 浓度 C_i (mol/L)、蒸腾速率 T_r [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、气孔导度 Cond [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、光合有效辐射 PAR [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、叶面温度 T_i ($^\circ\text{C}$)、相对湿度 RH (%) 等。叶片水分利用率(WUE)指单位水量通过叶片蒸腾散失时,光合所产生的有机物质量,取决于 P_n 与 T_r 的比值,是水分利用效率的理论值。计算公式为:

$$\text{WUE} = P_n / T_r = (C_a - C_i)(a + s) / (W_i - W_a)(a + s + i)$$

式中: P_n ——净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; T_r ——蒸腾速率 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; C_a ——大气 CO_2 浓度 (mol/L); C_i ——叶细胞间 CO_2 浓度 (mol/L); W_a ——大气水汽浓度 (mol/L); W_i ——叶肉间隙水汽浓度 (mol/L); a, s —— CO_2 和水蒸气扩散的边界层阻力和气孔阻力 [$(\text{m}^2 \cdot \text{s})/\text{mol}$]; i ——叶内 CO_2 阻力 [$(\text{m}^2 \cdot \text{s})/\text{mol}$]。

光响应测定:2010 年 7 月下旬(典型晴天),在上午 9:00—11:00,利用 LI-6400XT 便携式光合测定仪进行光响应的测定。测定时,大气 CO_2 浓度为 $360 \pm 5 \mu\text{mol}/\text{mol}$,叶室温度控制在 $28 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为 $55 \pm 1\%$ 。人工光源将有效辐射强度设置成 0, 20, 50, 100, 150, 200, 500, 700, 900, 1 100, 1 200, 1 300, 1 400, 1 500, 1 700, 1 900 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 16 个梯度,采用手动方法分别测量,每一个梯度记录完以后,再

进行下一个梯度的记录。

采用新型模型 $P_n = aI [(1-bI)/(1+cI)] - R^{[4]}$, 进行光响应曲线拟合处理。其中 I 指光合有效辐射; a 是光响应曲线的初始斜率(即在点 $I=0$ 时的斜率); 系数 c 为光响应曲线的初始斜率与植物最大光合速率之比,即 $c = a/P_{\text{max}}$ (P_{max} 为植物最大光合速率); R 为植物暗呼吸速率。

1.4 数据处理

所测数据应用 Excel,SPS,DPS 进行处理。

2 结果与分析

2.1 光合特性日变化

2.1.1 光合速率(P_n)与气孔导度(Cond) 由图 1 可以看出,苦竹光合速率与气孔导度均呈现明显的日变化,且均为双峰型。从 7:00 开始,光照强度不断增强,气温逐渐升高,部分气孔开始打开,所以光合速率明显增大,到 9:00 左右达到日最大值 [$10.128 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。11:00—12:00,由于光照强烈,温度较高,蒸腾过快,导致水分亏缺,部分气孔开始关闭,气孔导度下降,致使空气中的 CO_2 从叶片表面通过气孔扩散到叶内气室及细胞间隙受阻, CO_2 吸收量减少,从而导致光合速率变化较小,并保持在在一个相对较低的水平,在此时段出现低谷值,说明苦竹存在光合“午休”现象。光合“午休”是植物较普遍的现象^[5-6]。之后随着光照强度减弱,气温降低,部分气孔开始张开,气孔导度也逐渐升高,因而光合速率也慢慢上升,直到 13:00 左右又出现第 2 个峰值。气象因子的变化是气孔导度日变化主要原因,在 7:00—10:00 这一阶段,太阳辐射强度、气温及水分状况等比较适中,因而此阶段苦竹叶片的气孔导度较高;在 9:00 时,气孔导度出现日最大值 [$0.155 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],其后呈现下降的趋势;到 12:00 左右时,由于正午太阳辐射强,蒸腾作用强,气孔暂时关闭,因而气孔导度出现一个低谷;在 13:00 左右达到第 2 个峰值,随后开始逐渐下降,直到 18:00 时几乎接近于 0,这与大多数植物的气孔运动情况相符(大多数植物气孔运动规律是早晨开放,上午开得最大,中午略关闭,日落时关闭)。总体看来,苦竹气孔导度日变化和净光合速率日变化趋势基本一致,光合速率受气孔调节的影响,气孔是影响苦竹光合速率的重要因子。

2.1.2 光合速率(P_n)与蒸腾速率(T_r) 蒸腾作用对植物的水分状况有重要的影响,一般情况下,可以说明植物调节水分损失的能力及适应干旱环境的程度^[7]。水是植物光合作用的原料,蒸腾作用对植物的水分状况影响很大,因此研究蒸腾作用对植物光合作

用的影响有重要的意义。植物蒸腾速率与气温、光照强度呈正相关关系,其与相对湿度呈负相关关系。温度对蒸腾速率的影响很大,当大气温度升高时,叶温比气温高,致使叶内外蒸气压差增大,蒸腾速率增大;当气温过高时,叶片过度失水,气孔关闭,蒸腾减弱。光照强度对蒸腾作用的影响首先是引起气孔的开放,减少气孔阻力,从而增强蒸腾作用;其次,光可以增加叶内外蒸气压差,加快蒸腾速率。湿度在温度相同时,大气的相对湿度越大,其蒸气压就越大,叶内外蒸气压差就变小,气孔下腔的水蒸气不易扩散出去,蒸腾减弱;反之,大气的相对湿度较低,则蒸腾速率加快。由图 2 可以看出苦竹的蒸腾速率和光合速率呈现明显的日变化,均为双峰曲线。在早上与傍晚时,由于辐射强度弱,气温比较低,大气比较湿润,叶内外的水气压较小,因而蒸腾作用比较弱;从 7:00 开始,由于光照强度增高、气温升高和气孔开始开放,蒸腾速率逐渐增加,在 9:00 左右出现第 1 个峰值;在 11:00—12:00,由于气温过高,导致叶片过度失水,气孔关闭,所以在此阶段蒸腾作用变化不大,并出现低谷;午后太阳辐射减弱,在 13:00 左右出现第 2 个峰值。蒸腾速率的日变化与光合速率的日变化几乎一致,可见蒸腾作用与光合作用是相关的,也是引起光合速率变化的一个因素。

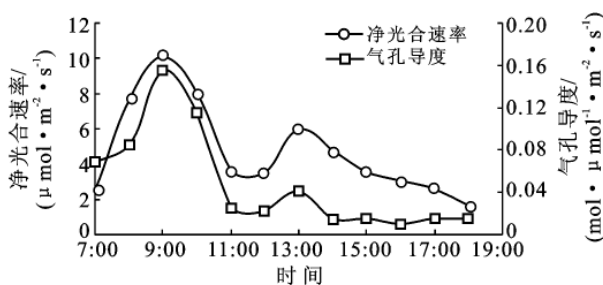


图 1 净光合速率与气孔导度日变化

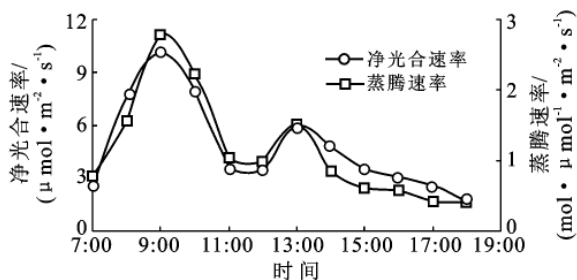


图 2 净光合速率与蒸腾速率日变化

一般而言,蒸腾作用受生物因素和环境要素两方面的制约,主要是通过分析环境要素来分析蒸腾作用,生物因素对其具体影响过程还需要进一步研究。

2.1.3 蒸腾速率(T_r)与气孔导度(Cond) 植物的蒸腾主要在叶片上进行,叶片蒸腾有 2 种:一种是通

过角质层的蒸腾,叫做角质蒸腾;另一种是通过气孔的蒸腾,叫做气孔蒸腾,一般成熟叶片的角质层蒸腾仅占总蒸腾量的 5%~10%,气孔蒸腾是植物蒸腾作用的最主要方式,而气孔关闭则是植物蒸腾作用大幅度下降的主要原因^[8-9]。由图 3 可以看出,苦竹的蒸腾速率日变化与气孔导度日变化均为双峰型,峰值与低谷出现的时间基本一致。从 7:00 开始,由于光照逐渐加强,气温不断升高,大气中的 CO_2 浓度也开始下降,致使部分气孔开始慢慢张开,气孔导度也逐渐变大,从而导致苦竹叶片内外的水汽压梯度增大,蒸腾速率加强;在 12:00 左右,由于光照强度强,叶片温度比较高,致使蒸腾作用越来越强烈,叶片过度的蒸腾导致其失水过多,当苦竹叶片中水分供应不充足时,其通过关闭气孔来减少水分散失,从而导致气孔阻力变大,气孔导度减小,蒸腾速率减小,所以在 12:00 左右时气孔导度和蒸腾速率日变化曲线均出现一个低谷。从苦竹蒸腾速率和气孔导度日变化趋势来看,可以推断两者存在线性关系。

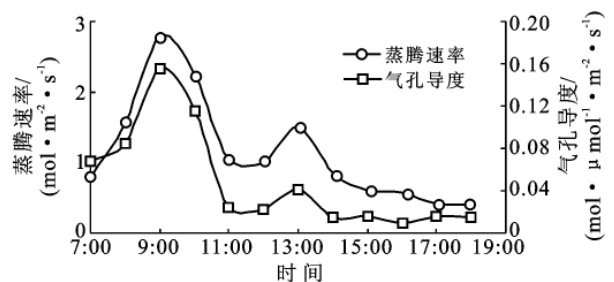


图 3 蒸腾速率与气孔导度日变化

2.2 苦竹叶片水分利用效率

水分是植物生长发育的主要因素之一,水分利用率可反映植物生长与水分利用之间的关系,常作为引进、选育高水分利用率的植物种类品种提供理论依据和筛选指标^[10]。植物叶片水分利用效率作为植物体生理活动过程中消耗水和形成有机物质之间的基本效率,已经成为确定植物体生长发育所需要的最佳水分供应的重要指标之一。通过对苦竹叶片水分利用率分析,为苦竹水分利用提供基础资料,从而为解决苦竹水分供需关系的矛盾提供理论指导。苦竹叶片水分利用率日变化如表 1 所示,在 7:00 时,叶片水分利用率最低,这主要是由于早晨光照弱,光合作用很低;在 8:00 时,叶片水分利用率出现明显的峰值,这主要是由于光照增强,气温升高,导致光合速率急剧上升的原因,另外由于空气的相对湿度还处于较高水平,叶内外气压差比较小,致使蒸腾作用处于相对较低的水平;9:00—13:00,叶片水分利用率比较低,这主要是由于太阳辐射加强,气温升高,空气相对湿度

比较低,致使蒸腾作用变化相对比较高,而光合速率处于相对较低的水平;14:00—17:00,叶片水分利用率相对较高,这主要是由于此阶段光合作用相对低一些;在 18:00 时,叶片水分利用率有所降低,这主要是由于傍晚时分,光照比较弱,光合作用非常低。由表 1 可以看出,在 0.05 水平下,叶片水分利用率与胞间 CO₂ 浓度呈现明显的负相关关系,与蒸腾速率、气孔导度、有效辐射均呈现简单的负相关关系。由于叶片

水分利用效率不仅受外部因素的影响,而且受植物内部因素的影响,所以苦竹水分利用率变化的具体情况还需要进一步研究。叶片水分利用率在一定程度上反映了植物的耗水性和抗旱性^[11],叶片水分利用率高的植物在吸收等量水分的情况下会比叶片水分利用率低的植物生产出更多的生物量。苦竹叶片水分利用率基本在 3~7 之间变化,相对低一些,所以可以认为苦竹节水能力比较低,水分生产力也比较低,抗旱性差。

表 1 苦竹水分利用率

	μmol/mmol											
时间	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
水分利用率	3.24	4.90	3.63	3.60	3.48	3.52	3.96	5.65	5.80	5.33	6.05	4.09

2.3 相关性分析

在植物光合作用分析中,分析各测定参数之间的关系,有利于植物光合特性的分析,所以使用 SPSS 进行了苦竹光合主要参数相关分析,分析结果如表 2 所示。

表 2 中分析结果表明,在 0.01 水平双侧检验下, C_i 与 Cond, T_r 与 Cond, RH 与 PAR_i 均呈现明显的线性相关关系,但后者 RH 与 PAR_i 呈负相关性;在 0.05 水平双侧检验, T_l 与 PAR_i, RH 与 T_l 均呈明显的线性相关关系,但后者呈负相关性;在 0.05 水平双侧检验, WUE 与 C_i 呈现明显的负线性相关。影响苦

竹光合作用的主要限制因子是气孔导度和蒸腾速率, Cond 与 P_n 呈极显著的线性关系, T_r 与 P_n 也呈极显著的线性关系,而光合与其他几个因子不存在显著的线性关系,说明苦竹的光合午休的主要因子是气孔导度和蒸腾速率。光合速率对气孔导度具有指示调节作用,光合作用处于优势时,气孔导度增大,劣势时气孔导度减小^[12-13]。许多植物光合速率日变化往往会出现“午休”现象,其中气孔的部分关闭是导致这种现象的一个重要原因^[14-15]。由于苦竹气孔导度是苦竹蒸腾速率主要限制因子,所以气孔导度是影响苦竹的光合作用的主要限制因子。

表 2 光合作用主要因子相关矩阵

生态因子	P _n	C _i	T _l	T _r	Cond	PAR _i	RH	WUE
P _n	1							
C _i	0.336	1						
T _l	-0.180	-0.548	1					
T _r	0.785**	0.544	-0.195	1				
Cond	0.770**	0.718**	-0.523	0.919**	1			
PAR _i	-0.098	0.025	0.658*	0.324	-0.003	1		
RH	-0.075	0.134	-0.683*	-0.430	-0.075	-0.915**	1	
WUE	0.105	-0.595*	0.255	-0.467	-0.482	-0.379	0.154	1

注: ** 为在 0.01 水平的双侧检验, * 为在 0.05 水平的双侧检验。P_n 为净光合速率; C_i 为气孔导度; T_l 为叶片温度; T_r 为蒸腾速率; Cond 为气孔导度; PAR_i 为光合有效辐射; RH 为大气相对湿度; WUE 为水分利用效率。

2.4 苦竹叶片光合作用的光响应曲线

光响应曲线可以反映植物光合速率随光照强度增减的变化规律,测定植物对光照强度的生理反映可以了解其对生态环境的适应性变化,光补偿点和光饱和点是植物光合特性的 2 个主要的指标^[16]。当光合有效辐射在 200 μmol/(m² · s) 以下时,对光响应进行线性回归,得 y=0.041x-0.332(R²=0.997)。苦竹光响应曲线的初始斜率是其表观量子效率,为 0.041。当苦竹净光合速率为 0(y=0)时,求得光补偿

点,其为 8.098 μmol/(m² · s),苦竹的光补偿点比较低。在一定范围内,光合速率随着光照强度的增强呈直线增加,但超过一定光强度后,光合速率增加幅度减缓;当达到某一光强时,光合速率就不再随光照强度增强而增加,这种现象称为光饱和现象。光合速率开始达到最大值时的光照强度称为光饱和点^[17]。通过 DPS 统计软件模拟运算,按照参考文献[4]可以求得苦竹光饱和点为 1 998.66 μmol/(m² · s)。光补偿点低说明植物利用弱光能力强,有利于有机物质的积

累,光补偿点低且光饱和点较高的植物,能适应多种光照环境^[18]。苦竹的光补偿点低且光饱和点较高,表明苦竹具有较强的耐阴能力,能适应较宽的光照环境,这与苦竹的在缙云山自然保护区生长环境条件相符。

3 结论

在自然条件下,植物光合作用的日变化曲线大体上有两种类型:一种是单峰型,中午光合速率最高;另一种是双峰型,上、下午各有一个高峰^[19]。苦竹的光合作用为双峰型,具有明显的光合“午休”现象。植物光合“午休”机理,国内外有许多观点,但对于不同植物来说,引起光合“午休”现象的原因不同^[20]。本试验中,苦竹气孔导度日变化与其净光合速率日变化趋势基本一致,两者第 1 个峰值均出现在上午 9:00 左右,第 2 个峰值均出现在 13:00 左右,均在 12:00 左右出现低谷,呈现明显的线性相关性,所以致使苦竹“午休”的主要限制因子是气孔导度的降低。

影响苦竹叶片水分利用率有内部因子和外部因子,如温度、CO₂ 浓度、光照、湿度等,但各因子的影响程度不同,但具体如何影响需要进一步研究。苦竹水分利用相对低一些,节水能力低,抗旱能力差,不宜在干旱、半干旱地区生长。

关于净光合速率和气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO₂ 浓度等因子之间的关系各学者持不同的观点^[16]。本次试验认为,苦竹发育时,气孔是其调节功能重要而复杂的器官,其中一个非常重要的功能是防止由于蒸腾作用引起水分过分损失,Cond 与 T_r 呈极显著的正相关关系。通过苦竹各因子相关性分析,只有 Cond, T_r 与 P_n 呈显著的正线性相关关系。

光饱和点和光补偿点是植物的 2 个重要光合生理指标,反映了植物光照条件的要求,是判断植物耐阴性的一个重要指标,光饱补偿点越低的植物利用弱光的能力越强,越有利于有机物的积累,而光饱和点越高的植物能更有效地利用光能^[21-22]。光补偿点低且光饱和点较高的植物,能适应多种光照环境,具有较强的耐阴性。苦竹的光饱和点较高,光补偿点较低,说明苦竹具有较强的耐阴能力,能适应较宽的光照环境。

[参 考 文 献]

- [1] 周益权,顾小平,李本祥. 川南地区 3 种丛生竹竹竿特性研究[J]. 福建林学院学报,2010,30(1):45-50.
- [2] 张琼珊,罗龙发,吴宏业. 苦竹是个优良的经济竹种[J]. 竹子研究汇刊,1998,17(4):51-53.
- [3] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,2002:129-137.
- [4] 叶子飘,于强. 一个光合作用光响应新模型与传统模型比较[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(6):771-775.
- [5] 傅金民. 夏大豆群体光合特性研究[J]. 大豆科学,1994,13(1):16-21.
- [6] 宋于洋,塔依尔,王炳举. 沙棘叶片光合速率与其环境因子的日变化规律研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(1):8-11.
- [7] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社,2002:86-95.
- [8] 陈润政,黄上志,宋松泉. 植物生理学[M]. 广州:中山出版社,1998:90-93.
- [9] 武维华,张蜀秋,袁明. 植物生理学[M]. 北京:科学出版社,2008:57-59.
- [10] 梁宗锁,康绍忠. 植物水分利用率及其提高途径[J]. 西北农林学报,1996,16(6):79-84.
- [11] 李国泰. 8 种园林树种光合作用特征与水分利用效率比较[J]. 林业科学研究,2002,15(3):291-296.
- [12] 陈模舜,柯世省,倪琼琼. 田间珊瑚树净光合速率及生态因子的日变化[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2004,27(3):299-300.
- [13] 陶俊,陈鹏. 银杏光合特性的研究[J]. 园艺学报,1999,26(3):157-160.
- [14] Cowan I R. Regulations and water use in relation to carbon gain in higher plants[M]. Lang L, Nobel P S, Qsmond C B(eds). Encyclopedia of Plant Physiology. New Series. Berlin: Springer-Verlay, 1982.
- [15] Loveys B R. Diurnal changes in water relations and abscisic acid in field-grown *Vitis vinifera* cultivars III: The influence of xylem-derived abscisic acid on leaf gas exchange[J]. New Phytologist, 1984, 98(4):563-573.
- [16] 尤扬,周建,贾文庆. 鹅掌柴叶片秋季光合特性[J]. 2009,37(9):25-26.
- [17] 张立军,梁宗锁. 植物生理学[M]. 科学出版社,2007:160-162.
- [18] 尤扬,贾文庆,周建. 黄栌叶片光合特性[J]. 东北林业大学学报,2009,37(7):25-26.
- [19] 李新国,许大全,孟庆伟. 银杏叶片光合作用对强光的响应[J]. 植物生理学报,1998,24(4):354-360.
- [20] 柯世省,金则新,陈贤田. 浙江天台山七子花等 6 种阔叶树光合生态特性[J]. 植物生态学报,2002,26(3):363-371.
- [21] 高鹤,宗俊勤,陈静波. 7 种优良观赏草光合生理日变化及光响应特征研究[J]. 草业学报,2010,19(4):87-93.
- [22] 时慧君,杜峰,张兴昌. 毛乌素沙地几种主要植物的光合特性[J]. 西北林学院学报,2010,25(4):29-34.