

油茶优良无性系光合日进程 及其与环境因子关系的研究

夏尚光,肖正东,丁增发,刘俊龙

(安徽省林业科学研究院,安徽 合肥 230031)

摘要:采用 Li-6400 光合作用测定系统,在自然环境条件下测定 4 个大别山系列油茶(*Camellia oleifera*) 的光合作用,研究其光合特性与环境因子的关系,为油茶的科学栽培提供理论依据。结果表明:(1) 4 个油茶 P_n 日进程都呈单峰型曲线, P_n 与 $Cond$ 、 C_i 和光强的关系均达到极显著或显著。(2) 4 个油茶 T_r 日进程均为单峰型曲线,但它们的 T_r 峰值出现时间不一致。影响 D_1 和 D_2 T_r 的主要环境因子是光强,影响 D_3 T_r 的主要环境因子是 $Cond$ 和 $Vpdl$,而影响 D_4 T_r 的主要环境因子是 $Cond$ 和 T_a 。(3) 4 个油茶 WUE 的日进程总体呈下降趋势, D_3 和 D_4 较耐旱,而 D_1 和 D_2 耐旱性较弱。 C_i 对 D_1 的 WUE 影响最大,其次是 T_a ;直接影响 D_2 WUE 的最大环境因子是 T_a ,其次是 C_i ;光强对 D_3 的 WUE 直接影响最大, T_a 、 $Vpdl$ 和 RH 对其 WUE 直接影响也很大;而 T_a 是对 D_4 的 WUE 直接影响最大的环境因子,其次是 C_i 。

关键词:油茶;光合作用;日进程;影响因子;相关关系

中图分类号:S794.401 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2011)05-0911-07

A Study on Daily Photosynthetic Course of Four Improved Clones of *Camellia oleifera* and Its Influencing Factors

XIA Shang-guang, XIAO Zheng-dong, DING Zeng-fa, LIU Jun-long

(Forestry Research Institute of Anhui Province, Hefei 230031, China)

Abstract: The photosynthesis of four improved clones of *Camellia oleifera* in Dabie mountain was measured by Li-6400 portable photosynthetic system under natural condition, meanwhile, the relations between Photosynthesis parameters and its influencing factors were studied. This provides a basis for cultivation. The results showed that: (1) the curves of P_n diurnal variation of the four clones were all a single peak. Under consistent condition the relationships between P_n and $Cond$, C_i , light intensity were very significant or significant. (2) The T_r daily courses of the four clones were also obvious one-peak curve, but the T_r peak value did not appear in the consistent time; the major environmental factor affecting T_r for D_1 and D_2 was light intensity, the major environmental factors affecting T_r for D_3 were $Vpdl$ and $Cond$, the major environmental factors affecting T_r for D_4 were T_a and $Cond$; (3) WUE daily courses of leaves from different clones all presented a one-peak curve decreasing at one side, D_3 and D_4 were more drought-tolerant by contrast. C_i was the largest factor influencing the WUE of D_1 , followed by T_a ; T_a was the largest factor influencing the WUE of D_2 , followed by C_i ; light intensity was the largest factor directly influencing the WUE of D_3 , followed by C_i ; the direct impact of T_a , $Vpdl$ and RH on its WUE were also very great; T_a was the largest factor influencing the WUE of D_4 , followed by C_i .

收稿日期:2011-01-10 修回日期:2011-07-11

基金项目:十一五国家科技支撑专项(2009BADB1B01-02-03)

作者简介:夏尚光(1968—),男,博士,高级工程师,主要从事森林生态、林木抗逆性、林木种质资源培育与利用研究,
E-mail:18956011560@163.com。

Key words: *Camellia oleifera*; photosynthesis; daily variation; influencing factor

油茶(*Camellia oleifera*)又名茶子树、油茶树,主要指山茶科山茶属植物中油脂含量较高且具有栽培经济价值的一类植物的总称,是我国南方特有的木本食用油料树种。油茶在我国具有栽培历史悠久、分布范围广、栽培面积大、用途多等特点。茶油及其副产品在工业、农业和医药等领域具有其他产品无法取代的价值和地位。据统计,全国现有油茶种植面积达到 366.67 万 hm^2 ,茶油产量达到 2.2 亿 kg,占整个木本食用油的 80% 以上^[1]。

目前,油茶栽培及品种选育研究取得了很大的进展,全国各油茶产区先后选育优良无性系 1 500 多号供油茶造林及更新^[2]。为筛选出适合安徽栽植、环境适应性强、生长迅速、产量高的品种,安徽省舒城县德昌良种苗木有限公司与安徽农业大学合作进行了油茶优良品种的选育工作,筛选出了 4 个适宜大别山区栽培的优良品种无性系,并被分别命名为大别山 1 号(D_1)、2 号(D_2)、3 号(D_3)及 4 号(D_4)。植物光合作用能力的强弱是其生长快慢的主要影响因素,也是植物重要的生物学特性之一^[3]。研究植物光合作用的日变化规律,不仅可以掌握植物与环境因子之间的关系,而且也能为栽培、育种提供理论依据^[4]。本试验通过对 4 个油茶光合作用及其与环境因子关系的研究,旨在为油茶的科学栽培和高效率育种提供理论依据。

1 试验地概况

试验地设在舒城县河棚村,位于安徽省中西部、大别山东北麓、巢湖西滨,介于东经 $116^{\circ}26' \sim 117^{\circ}15'$ 、北纬 $31^{\circ}01' \sim 31^{\circ}34'$;属北亚热带湿润气候区,四季分明,多年平均气温为 15.6°C ,多年平均日照 1 969 h 以上,平均总辐射热量每平方厘米为 470.668 KJ,平均无霜期 224 d,平均降雨量 1 100 mm 以上,土壤 pH 值在 4~6,非常适宜于油茶的生长。舒城县是安徽油茶第一大县,油茶面积超 8 400 hm^2 ,占全省油茶总面积四分之一。以舒城作为油茶品种类型、优良单株选择区域不仅在安徽,而且在整个大别山区均具有代表意义。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试验材料选取位于舒城县河棚油茶良种繁育基地的 4 个油茶优良品种无性系幼树,树龄 3 a,分别为大别山 1 号(D_1)、大别山 2 号(D_2)、大别山 3 号(D_3)、大别山 4 号(D_4)。

2.2 测定方法

光合作用测定采用美国 Li—cor 公司生产的 Li—6400 便携式光合测定系统进行活体测定,选择晴好无风天气,于 9 月 20 日测定一个日进程。测定时间从早上 08:00—18:00 每隔 1 h 测 1 次。主要测定指标:净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)、暗呼吸速率(R_d , $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)、气孔导度($Cond$, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、胞间 CO_2 浓度(C_i , $\mu\text{mol}/\text{mol}$)、蒸腾速率(T_r , $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)、叶面水汽压亏缺(V_{pdl} , Kpa)、空气温度(T_{air} , $^{\circ}\text{C}$)、叶面温度(T_{leaf} , $^{\circ}\text{C}$)、空气相对湿度(RHr , %)、叶室相对湿度(RHs , %)、光合有效辐射(PAR , $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)等。水分利用效率(WUE)的计算采用 Fischer and Turne 的方法,即 $WUE = P_n/T_r$ 。选择各品种生长状况基本一致、向阳的健康成熟叶片作供试材料,每项指标测 2 株树,每株树选取上部、中部、下部各 3 个叶样,取平均值。

2.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SAS 统计分析软件系统进行处理分析。

3 结果与分析

3.1 净光合速率日变化及其与环境因子的关系

净光合速率能够反映植物光合能力的大小,净光合速率日变化曲线的差异反映了植物的内在节律,也体现了各树种对环境的不同适应性^[5]。图 1 为 4 个油茶优良品种叶片的净光合速率日变化曲线,从图中可以看出 4 个油茶叶片的净光合速率日进程趋势一致,都呈单峰型,即从 08:00 开始,随光合有效

辐射增强,净光合速率逐渐增大,之后逐渐下降,到 18:00 降至最低值,不存在明显的光合午休现象。相对而言,早上的净光合速率明显高于傍晚时分的净光合速率^[6]。但 4 个油茶净光合速率的峰值出现时间和大小不同,D₁ 和 D₄ 峰值出现在 12:00,分别为 10.98 μmol/(m²·s) 和 12.27 μmol/(m²·s),D₂ 和 D₃ 峰值出现在 11:00,分别为 12.87 μmol/(m²·s) 和 11.09 μmol/(m²·s)。日均净光合速率 D₂ 最大,其次是 D₄,D₁ 和 D₃ 较小,这表明 D₂ 的光合能力最强。

光合作用是非常复杂的生理过程,植物进行光合作用,需要来自太阳的光能做能源,需要来自空气中的 CO₂ 和来自土壤中的水分、无机物作原料,也需要合适的温度等环境条件^[7]。因此,植物光合作用受内部生理状态和外界环境因子的共同制约。影响净光合速率(P_n)的环境因子主要有胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(Cond)、叶面水气压亏缺(Vp-dl)、光合有效辐射(PAR)、气温(Ta)、相对湿度(RH)及矿质营养等。这些环境因子对净光合速率的影响是综合的,而且它们之间也有相互作用。

表 1 是净光合速率与环境因子的相关分析数据,从表中相关系数可以看出,对 D₁ 净光合速率影响较大的因子是气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和光强,气孔导度和光强与净光合速率呈极显著的正相关,胞间 CO₂ 浓度与净光合速率呈极显著的负相关,而叶面水气压亏缺、气温和湿度的影响较小。影响 D₂ 净光合速率较大的因子是气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和光强,气孔导度和光强与净光合速率呈极显著的正相关,胞间 CO₂ 浓度与净光合速率呈极显著的负相关,叶面水气压亏缺、气温和湿度与净光合速率的相关性不显著。影响 D₃ 净光合速率最主要的环境因子是胞间 CO₂ 浓度和光强,其次是气孔导度。影响 D₄ 净光合速率最主要的环境因子是胞间 CO₂ 浓度,其次是气孔导度和光强。

表 1 净光合速率与环境因子的相关分析

Tab.1 Correlation analysis between Pn and environment factors

种类 Species	气孔导度 Cond	胞间 CO ₂ 浓度 C _i	叶面水气压亏缺 Vpdl	气温 Ta	湿度 RH	光强 PAR
D ₁	0.736 0**	-0.838 0**	0.365 2	0.247 7	0.073 8	0.797 0**
D ₂	0.860 3**	-0.845 9**	0.318 6	0.168 8	0.144 4	0.775 2**
D ₃	0.731 8*	-0.900 0**	0.464 3	0.260 2	-0.021 6	0.807 8**
D ₄	0.725 6*	-0.870 9**	0.333 6	0.193 2	0.063 5	0.717 6*

* 表示在 0.05 水平上显著,** 表示在 0.01 水平上显著。

3.2 蒸腾速率的日变化及其与环境因子的关系

图 2 显示的是 4 个油茶叶片蒸腾速率的日变化曲线,从图中可以看出蒸腾速率日变化曲线与净光合速率的日变化曲线一致,均为单峰型。早上 08:00,因气孔导度较低,且环境湿度较大,蒸腾速率较低;随后,随着光合有效辐射的增强,温度逐渐升高,湿度逐渐降低,导致叶片的蒸腾速率达到峰值;下午随着温度和光强的逐渐降低,气孔的开度减小,气孔阻力增大,使叶肉细胞内的 CO₂ 浓度下降,致使蒸腾速率逐渐减慢,至 18:00 降至最低。但 4 个油茶蒸腾速率峰值出现时间不一致,D₁ 峰值出现在 13:00,其它 3 个品种峰值出现在 14:00。4 个品种中,D₂ 蒸腾速率整体上较高,其次是 D₄、D₁、D₃。高蒸腾速率使叶片局部温度不至于太高而导致叶片受到灼伤,这种蒸腾作用机制有利于在高温下进行光合作用,使叶片的光合作用在高温下得以进行,能有效缓解高温胁迫^[8]。

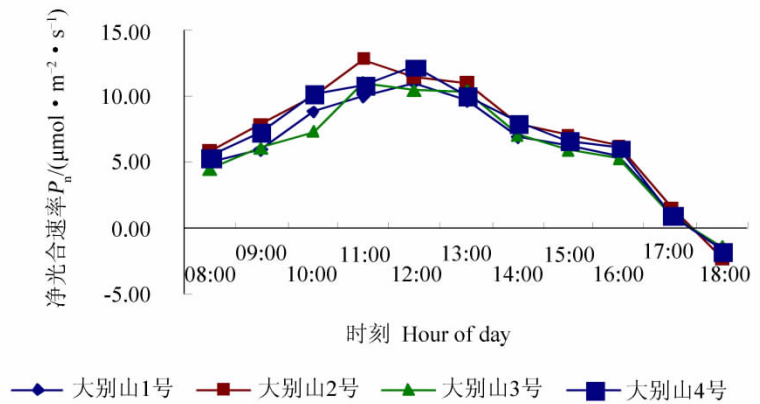


图 1 油茶净光合速率的日变化曲线

Fig. 1 Diurnal variation curves of Pn for *Camellia oleifera*

蒸腾作用的强弱除受本身生物特性影响外,主要受环境因子的制约,植物蒸腾速率受光照强度、湿度、温度等多因素综合影响,蒸腾速率的变化是环境因素与植物生理因素综合作用的结果^[5]。因此,研究蒸腾作用的变化,以及与环境因子的关系,有利于了解树木在不同条件下对水分的需求。通过对油茶蒸腾速率与环境因子的多元逐步回归分析(表2)可知,4个油茶蒸腾速率与环境因子的关系模型不相同,

但相关系数都比较高,表明蒸腾速率与影响因子之间的关系是紧密的。影响D₁和D₂蒸腾速率的主要环境因子是光强,影响D₃蒸腾速率的主要环境因子是气孔导度和叶面水气压亏缺,影响D₄蒸腾速率的主要环境因子是气孔导度和温度,光强也有一定的影响。

表2 蒸腾速率与环境因子的多元逐步回归分析

Tab.2 Multiple return analysis between Tr and environmental factors

树种 Species	回归方程 Return equation	相关系数 Correlation coefficient
D ₁	$T_r = -1.01941 + +0.00196 PAR$	0.9355
D ₂	$T_r = 0.71576 + 0.00243 PAR$	0.9759
D ₃	$T_r = -2.51531 + 34.46164 Cond + 0.76547 Vpdl$	0.9872
D ₄	$T_r = -7.36984 + 14.634 Cond + 0.226Ta + 0.00076 PAR$	0.9799

3.3 水分利用效率日变化及其与环境因子的关系

图3显示的是油茶叶片水分利用效率的日变化曲线,从图中可以看出4个油茶叶片水分利用效率的日变化规律一致,总体呈逐渐下降的趋势。水分利用效率最高值出现在08:00,此时光合有效辐射较强,气孔开度增大,净光合速率较高,而空气相对湿度较大,蒸腾速率处于较低的水平,所以WUE较高,之后,由于光照强度继续增强,气温上升,空气的相对湿度明显下降,叶内外水蒸气压差的上升,引起气孔部分关闭而限制了CO₂由气孔外向气孔内的扩散,而蒸腾作用持续上升,并超过净光合速率上升速度,导致WUE逐渐下降^[9]。到16:00以后有小幅上升,但上升空间不大。16:00—18:00水分利用效率迅速下降,18:00达到一天中最低值。4个品种中D₁和D₂水分利用效率较低,D₃和D₄较高,表明D₃和D₄较D₁和D₂耐旱。许多研究表明,在自然条件下,WUE受气候条件的影响,晴天WUE在清晨就达到最高点。随着太阳辐射的增强,温度升高,湿度降低和空气湍流的增强,WUE下降^[10]。这4个品种油茶WUE的日变化基本符合这一变化规律。

水分利用效率反映了植物的光合作用与蒸腾作用之间的关系,影响光合和蒸腾的环境因子都会影响到水分利用效率。表3至表6是4个油茶水分利用效率与环境因子的通径系数,从表中可以看出,对D₁水分利用效率影响最大的是

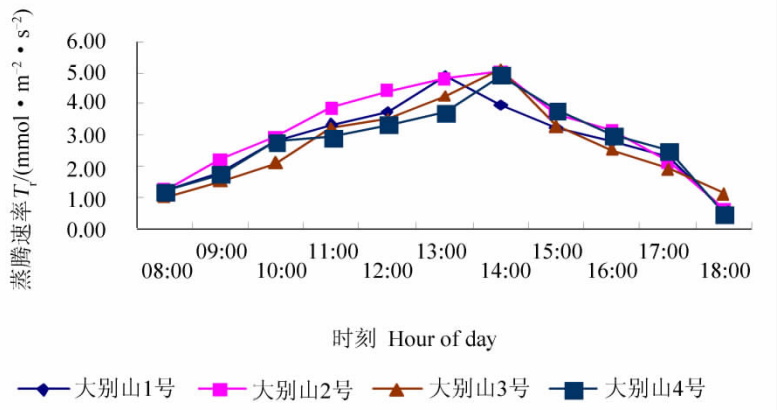


图2 油茶蒸腾速率的日变化曲线

Fig.2 Diurnal variation curves of Tr for *Camellia oleifera*

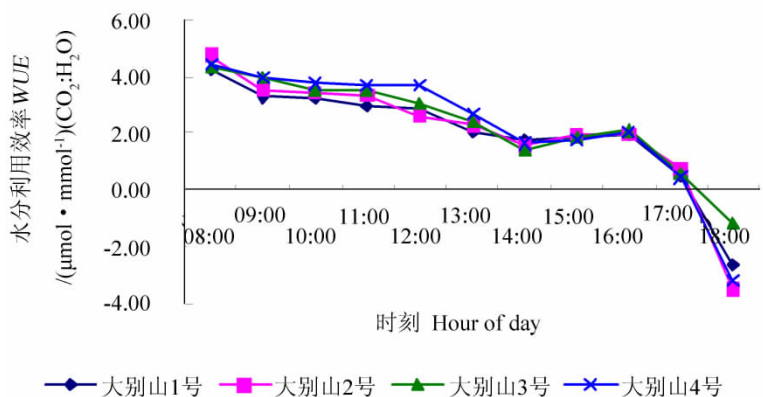


图3 油茶水分利用效率的日变化曲线

Fig.3 Diurnal variation curves of WUE for *Camellia oleifera*

胞间 CO_2 浓度, 它的直接途径系数为 -1.4806 , 主要是通过气温和光强间接影响植物, 其次是气温, 其间接作用主要是通过胞间 CO_2 浓度来体现的。气温是直接影响 D_2 水分利用效率最大的环境因子, 它的直接途径系数为 -0.7179 , 其间接作用主要是通过胞间 CO_2 浓度来体现的。胞间 CO_2 浓度是仅次于气温的直接影响因子, 它的直接途径系数为 -0.7007 , 其间接作用主要是通过气温和气孔导度来体现的, 并且气温和胞间 CO_2 浓度对 D_2 的直接影响大于间接影响。对 D_3 水分利用效率直接影响最大的是光强, 其间接作用主要是通过气温、叶面水气压亏缺和湿度来体现的。此外, 气温、叶面水气压亏缺和湿度对 D_3 水分利用效率的直接影响也很大。对 D_4 水分利用效率直接影响最大的环境因子是气温, 气温主要是通过光强和湿度间接影响植物。直接影响仅次于气温的是胞间 CO_2 浓度, 它间接作用主要通过气温和光强来体现的。

表3 D_1 水份利用效率与环境因子的途径系数Tab.3 Path coefficient analysis between WUE and environmental factors in D_1

环境因子 Environmental factor	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient					
		<i>Cond</i>	C_i	<i>Vdpl</i>	<i>Ta</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>
<i>Cond</i>	0.2146		0.7259	-0.0139	0.0101	0.0252	-0.2601
C_i	-1.4806	-0.1052		-0.4196	0.7220	0.0457	0.6876
<i>Vdpl</i>	0.5608	-0.0053	1.1079		-1.0295	-0.0879	-0.6146
<i>Ta</i>	-1.0949	-0.0019	0.9763	0.5273		-0.0928	-0.5406
<i>RH</i>	0.1034	0.0522	-0.6547	-0.4766	0.9823		0.3231
<i>PAR</i>	0.3231	0.0522	-0.6547	-0.4766	0.9823	0.1034	

表4 D_2 水份利用效率与环境因子的途径系数Tab.4 Path coefficient analysis between WUE and environmental factors in D_2

环境因子 Environmental factor	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient					
		<i>Cond</i>	C_i	<i>Vdpl</i>	<i>Ta</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>
<i>Cond</i>	0.5243		0.4677	-0.0033	-0.0195	-0.0791	-0.0864
C_i	-0.7007	-0.3500		0.0160	0.3924	-0.1066	0.1247
<i>Vdpl</i>	-0.0238	0.0715	0.4701		-0.6713	0.2454	-0.1152
<i>Ta</i>	-0.7179	0.0142	0.3830	-0.0223		0.2350	-0.1029
<i>RH</i>	-0.2940	0.1410	-0.2540	0.0199	0.5739		0.0528
<i>PAR</i>	-0.1439	0.3147	0.6071	-0.0191	-0.5136	0.1079	

表5 D_3 水份利用效率与环境因子的途径系数Tab.5 Path coefficient analysis between WUE and environmental factors in D_3

环境因子 Environmental factor	直接途径系数 Direct path coefficient	间接途径系数 Indirect path coefficient					
		<i>Cond</i>	C_i	<i>Vdpl</i>	<i>Ta</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>
<i>Cond</i>	0.3789		-0.5437	-1.5510	-1.4532	0.1867	3.1548
C_i	0.9927	-0.2075		2.4616	1.6421	-1.3784	-4.0259
<i>Vdpl</i>	-3.5078	0.1675	-0.6966		-3.0418	2.9683	3.9823
<i>Ta</i>	-3.2910	0.1673	-0.4953	-3.2422		3.0593	3.4099
<i>RH</i>	-3.4934	-0.0202	0.3917	2.9805	2.8821		-2.3526
<i>PAR</i>	4.5611	0.2621	-0.8762	-3.0627	-2.4604	1.8019	

表 6 D₄ 水份利用效率与环境因子的通径系数

Tab. 6 Path coefficient analysis between WUE and environmental factors in D₄

环境因子 Environmental factor	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient					
		<i>Cond</i>	<i>C_i</i>	<i>Vdpl</i>	<i>Ta</i>	<i>RH</i>	<i>PAR</i>
<i>Cond</i>	0.177 5		0.594 7	-0.062 0	-0.118 0	-0.026 0	0.226 3
<i>C_i</i>	-0.755 8	-0.139 7		0.219 3	0.493 5	-0.155 2	-0.428 1
<i>Vdpl</i>	-0.390 7	0.028 1	0.424 2		-0.968 9	0.444 6	0.453 2
<i>Ta</i>	-1.090 1	0.019 2	0.342 1	-0.347 2		0.451 9	0.409 8
<i>RH</i>	-0.510 3	0.009 1	-0.229 8	0.340 4	0.965 5		-0.294 2
<i>PAR</i>	0.536 0	0.075 0	0.603 7	-0.330 4	-0.833 5	0.280 1	

4 讨论与结论

(1) 国内外研究表明,光合作用中净光合速率的日变化进程有单峰、双峰、三峰等几种类型,因种类、品种、各项生态因子不同而异。本试验研究发现 4 个油茶品种的净光合速率日变化均为单峰曲线,不存在光合午休现象,这可能与油茶的发育时期以及光强、温度等环境因子有关。通常来说,植物上午光合速率要大于下午光合速率^[11-12],本试验也符合这一规律。这是因为下午温度远远高于上午温度,而此时较高的温度在减小了气孔导度的同时也减小了蒸腾散热,从而使叶片温度过高,最终导致光合速率下降。此外,植物通过一夜的呼吸,使环境中早上 CO₂ 浓度达到最大,而傍晚由于白天植物的光合作用使得环境中 CO₂ 浓度偏低,从而使早上光合速率显著高于下午光合速率^[6]。

(2) 植物净光合速率在一天中的动态变化是叶片光合能力与环境条件综合作用的结果,在不同的环境条件下,引起光合作用动态变化的原因也不同^[13];在相同的环境条件下,不同植物表现出的光合作用的动态变化的原因也不同^[14]。关于植物光合作用与各环境因子之间的关系,研究者之间针对不同植物持不同的观点。万素梅等^[15]研究得出净光合速率与光合有效辐射、气孔导度呈极显著正相关,与田间 CO₂ 浓度呈极显著负相关;王瑞^[16]、夏尚光等^[17]认为净光合速率与光照强度、大气 CO₂ 浓度呈正相关,与胞间 CO₂ 浓度呈负相关。本研究显示,4 个油茶的净光合速率与气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和光强的关系密切,其显著性均达到极显著或显著,与叶面水气压亏缺、气温和湿度关系不密切,其显著性均未达到显著水平。

(3) 植物蒸腾速率的日变化曲线主要有 2 种,在叶片水分充足时呈单峰曲线,在水分缺乏时为双峰曲线。本试验中 4 个油茶蒸腾速率日变化均为单峰曲线,说明叶片水分充足。植物蒸腾速率受光照影响较大,对于蒸腾作用来说,光照能同时增高大气温度和叶温,气温的提高能加快水分的蒸发,而叶温的提高通过促进气孔开放和增大叶内外的蒸汽压差使蒸腾速率加快,在蒸腾速率与环境因子的多元逐步回归分析中也说明了这一点。4 个品种中有 3 个与光强有直接的关系。同时 4 个油茶在光照较弱的早晚蒸腾速率较低,在光照较强的中午蒸腾速率较高。

(4) 水分利用效率的日变化总体呈逐渐下降的趋势,到 16:00 以后有小幅上升,随后迅速下降,18:00 达到一天中最低值。要提高水分利用效率需从提高光合速率和降低蒸腾速率两个方面进行。而在降低蒸腾速率方面,由于气孔是蒸腾作用水分散失的主要途径,所以使气孔关闭可以降低蒸腾速率,但气孔的关闭也必然同时限制 CO₂ 的进入,并不利于提高水分利用率,所以不能通过关闭气孔的方法实现水分利用率的提高,可以从温度、湿度等环境因素去考虑,另外水分利用效率低的品种不耐干旱,在栽植时应选择水分充足的立地条件才能发挥其产量优势。

(5) 4 个油茶优良品种叶片的净光合速率日变化曲线都呈单峰型,不存在明显的光合午休现象。气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和光强对净光合速率 P_n 影响较大,叶面水气压亏缺、气温和湿度对净光合速率 P_n 的影响较小。

(6) 4个油茶蒸腾速率 T_r 日进程均为单峰型曲线,但峰值出现时间不同。影响 D_1 和 D_2 蒸腾速率 T_r 主要环境因子是光强,影响 D_3 蒸腾速率 T_r 的主要环境因子是 $Cond$ 和 V_{pdl} ,而影响 D_4 蒸腾速率 T_r 的主要环境因子是 $Cond$ 和 T_a 。

(7) 4个油茶水分利用效率 WUE 的日进程总体呈下降趋势, D_3 和 D_4 较耐旱,而 D_1 和 D_2 耐旱性较弱。 C_i 对 D_1 的 WUE 影响最大,其次是 T_a ;直接影响 D_2 WUE 的最大环境因子是 T_a ,其次是 C_i ;光强对 D_3 的 WUE 直接影响最大, T_a 、 V_{pdl} 和 RH 对其 WUE 直接影响也很大;而 T_a 是对 D_4 WUE 直接影响最大的环境因子,其次是 C_i 。

参考文献:

- [1]胡冬南,游美红,袁生贵,等.不同配方施肥对幼龄油茶的影响[J].西北林学院学报,2005,20(1):94-97.
- [2]奚如春,邓小梅.我国油茶产业化发展中的现状、要素及其优化[J].经济林研究,2005,23(1):83-87.
- [3]李文文,黄秦军,丁昌俊,等.南方型和北方型美洲黑杨幼苗光合作用的日季节变化[J].林业科学研究,2010,23(2):227-233.
- [4]王瑞,陈永忠,王湘南,等.油茶无性系新梢生长期光合特性的研究[J].林业科学研究,2010,23(3):405-410.
- [5]Loomis R S, Rabbinge R N E. Explanatory models in crop physiology[J]. Annu Rev Plant Physiol, 1979, 30: 339-367.
- [6]苏军德,勾晓华,曹宗英,等.祁连圆柏光合作用日变化特征及其与生理生态因子的关系[J].西北植物学报,2011,31(5):1011-1017.
- [7]沈允钢.光合作用在世纪之交的研究动向[J].生物学通报,1999,34(6):1-4.
- [8]黄义松,牛德奎,赵中华,等.3个油茶优良无性系光合作用及生理特性研究[J].江西农业大学学报,2007,29(2):209-214.
- [9]Dias M C, Bruggemann W. Limitations of photosynthesis in *Phaseolus vulgaris* under drought stress: Gas exchange, chlorophyll fluorescence and Calvin cycle enzymes[J]. Photosynthetica, 2010, 48: 96-102.
- [10]梁淑英.部分城市绿化树种的生理特性及其对大气污染的响应[D].南京:南京林业大学,2008.
- [11]WANG J H, LIAO T S, SUN K H, et al. Seasonal variations in photosynthesis of *Picea morrissonicola* growing in the subalpine region of subtropical Taiwan[J]. Tree Physiology, 2005, 25: 973-979.
- [12]YAMORI W, NOGUCHI K, TERASHIMA I. Temperature acclimation of photosynthesis in spinach leaves: analyses of photosynthetic components and temperature dependencies of photosynthetic partial reactions[J]. Plant Cell Environ, 2005, 28: 536-547.
- [13]蔚荣海,赵颖君,徐克章,等.不同生境条件下人参、西洋参光合作用的日变化[J].华南农业大学学报,2009,30(4):7-11.
- [14]孔蓓蓓,刘超,尹伟伦,等.沙柳、黄柳和杞柳光合作用的日变化[J].河南科技大学学报,2009,30(3):79-83.
- [15]万素梅,贾志宽,杨宝平.苜蓿光合速率日变化及其与环境因子的关系[J].草地学报,2009,17(1):27-31.
- [16]王瑞,陈永忠,王湘南,等.油茶优良无性系光合作用的日变化[J].中国农学通报,2009,25(24):236-239.
- [17]夏尚光,张金池,梁淑英.南方岩榆光合作用日变化及其影响因子研究[J].亚热带植物科学,2007,36(3):8-11.