

3 个中山杉杂种无性系及其亲本的光合特性比较

胡李娟¹, 余 华², 华建峰¹, 徐建华¹, 殷云龙^{1,①}

[1. 江苏省·中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014; 2. 南京大学, 江苏 南京 210093]

摘要: 对‘中山杉 405’(*Taxodium ‘Zhongshanshan 405’*)、‘中山杉 406’(*T. ‘Zhongshanshan 406’*)和‘中山杉 407’(*T. ‘Zhongshanshan 407’*)及其母本墨西哥落羽杉(*T. mucronatum* Tenore)和父本落羽杉[*T. distichum* (L.) Rich.]在7月份、9月份和10月份的光合参数进行了测定,并比较了3个无性系净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)和水分利用效率(WUE)的杂种优势。结果显示:不同月份3个无性系及其亲本的Pn值有明显差异,导致光响应曲线明显不同,但3个无性系的光响应曲线基本一致;3个无性系的Pn值在不同月份都高于落羽杉,且‘中山杉 405’的Pn值高于另2个无性系。3个无性系及其亲本的光补偿点总体上表现为7月份最高、10月份最低,其中7月份墨西哥落羽杉的光补偿点显著高于3个无性系及落羽杉($P < 0.05$);3个无性系和墨西哥落羽杉的光饱和点则为9月份最高、7月份最低,而落羽杉的光饱和点为9月份最高、10月份最低。7月份3个无性系与其亲本的Pn日变化曲线均呈不规则型,低谷出现在中午12:00左右;9月份和10月份3个无性系和墨西哥落羽杉的Pn日变化曲线均呈单峰型,峰值出现在上午10:00;落羽杉的Pn值从上午8:00开始呈持续降低的趋势,且全天都明显低于其他树种。不同月份3个无性系的Pn、Gs、Tr和WUE的杂种优势有明显差异,总体上看,‘中山杉 405’的Pn、Gs和Tr在3个月份中均保持较高的杂种优势率,而‘中山杉 406’9月份的杂种优势率最高,‘中山杉 407’则在7月份杂种优势率最高;3个无性系的WUE仅在10月份有明显的杂种优势,且‘中山杉 405’和‘中山杉 406’的杂种优势率远高于‘中山杉 407’;‘中山杉 405’各项指标的杂种优势率总体上高于另2个无性系。研究结果表明:3个中山杉无性系的光合能力接近其母本墨西哥落羽杉、高于父本落羽杉,其中‘中山杉 405’杂种优势明显。

关键词: 中山杉; 墨西哥落羽杉; 落羽杉; 光合特性; 净光合速率; 杂种优势

中图分类号: S791.34.01; Q945.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2012)03-0029-09

Comparison of photosynthetic characteristics of three clones of *Taxodium ‘Zhongshanshan’* and their parents HU Li-juan¹, YU Hua², HUA Jian-feng¹, XU Jian-hua¹, YIN Yun-long^{1,①} (1. Institute of Botany, Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Nanjing University, Nanjing 210093, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2012, 21(3): 29-37

Abstract: Photosynthetic parameters of *Taxodium ‘Zhongshanshan 405’*, *T. ‘Zhongshanshan 406’*, and *T. ‘Zhongshanshan 407’* and their female parent *T. mucronatum* Tenore and male parent *T. distichum* (L.) Rich. in July, September and October were determined, and heterosis of three clones in net photosynthetic rate (Pn), stomatal conductance (Gs), transpiration rate (Tr) and water use efficiency (WUE) were compared. The results show that Pn value of three clones and their parents in different months have a significant difference, which lead to a significant difference in their Pn light response curve, but Pn light response curve of three clones are generally consistent. Pn value of three clones in different months are all higher than that of *T. distichum* and that of *T. ‘Zhongshanshan 405’* is higher than that of other two clones. Light compensation point (LCP) of three clones and their parents appear generally a trend of the highest in July and the lowest in October, in which, LCP of *T. mucronatum* in July is significantly higher than that of three clones and *T. distichum* ($P < 0.05$). And light saturation point (LSP) of three clones and *T. mucronatum* appear generally a trend of the highest in September and the lowest in July, but that of *T. distichum* with the highest in September and the lowest in October. In

收稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家科学技术部农业科技成果转化资金项目(2011GB2C100004); 江苏省科技支撑计划(农业)项目(BE2012343)

作者简介: 胡李娟(1986—),女,安徽宣城人,硕士,主要从事观赏植物光合生理方面的研究。

①通信作者 E-mail: yinyi066@sina.com

July, Pn diurnal change curve of three clones and their parents all are irregular type and the valley value appears about at noon 12:00. In September and October, Pn diurnal change curve of three clones and *T. mucronatum* all are a single-peak curve and the peak value appears at 10:00 am, while Pn value of *T. distichum* declines continuously from 8:00 am and obviously lower than that of other trees during the whole day. Heterosis of three clones in Pn, Gs, Tr and WUE in different months exists an obvious difference. Generally, Pn, Gs and Tr of *T. 'Zhongshanshan 405'* keep a high heterosis rate in three months, those of *T. 'Zhongshanshan 406'* have the highest heterosis rate in September, while those of *T. 'Zhongshanshan 407'* have the highest heterosis rate in July. And WUE of three clones have an obvious heterosis only in October and that of *T. 'Zhongshanshan 405'* and *T. 'Zhongshanshan 406'* is much higher than that of *T. 'Zhongshanshan 407'*. Generally, heterosis of every indexes of *T. 'Zhongshanshan 405'* is higher than that of other two clones. It is suggested that photosynthetic capacity of three clones is close to their female parent *T. mucronatum* and better than that of their male parent *T. distichum*, in which, heterosis of *T. 'Zhongshanshan 405'* is obvious.

Key words: *Taxodium 'Zhongshanshan'*; *Taxodium mucronatum* Tenore; *Taxodium distichum* (L.) Rich.; photosynthetic characteristics; net photosynthetic rate (Pn); heterosis

杉科(Taxodiaceae)落羽杉属(*Taxodium* Rich.)植物为落叶或半常绿乔木,该属共有落羽杉[*Taxodium distichum* (L.) Rich.]、池杉(*T. ascendens* Brongn.)和墨西哥落羽杉(*T. mucronatum* Tenore)3个种,原产北美东南部和墨西哥,目前已被广泛引种到世界各地,成为重要的造林用材及防护和观赏树种^[1]。‘中山杉405’(*Taxodium 'Zhongshanshan 405'*)、‘中山杉406’(*Taxodium 'Zhongshanshan 406'*)和‘中山杉407’(*Taxodium 'Zhongshanshan 407'*)是从“墨西哥落羽杉(♀)×落羽杉(♂)”杂交组合中培育出的优良无性系,不仅拥有亲本的适应性广、抗逆性强等优点,其材积和生长量更是远超亲本,应用前景广阔^[2]。

中国引种落羽杉属树种已有近百年历史,近半个世纪以来,通过种间杂交和选择途径对本属树种进行遗传改良和优良品种选育,已培育出不少优良品种^[3]。迄今为止,围绕落羽杉属树种及其杂种后代耐水湿^[4-6]、耐盐碱^[7-8]、材质特性^[9-10]、扦插繁殖技术^[11-12]、形态变异^[13]及杂种鉴定^[14]等方面进行了大量的研究。

光合作用是植物生长和产量形成的生理基础,作为地球上“最重要的化学反应”受到人们的重视与关注^[15],光合作用的研究也逐渐成为林木改良工作的重要内容之一。对落羽杉属树种光合作用的研究基本都以落羽杉为研究对象。Anderson等^[16]和Elcan等^[17]分别研究了落羽杉光合作用效率对间歇性淹水和干旱条件的响应;Neufeld^[18]研究了遮光条件对落羽杉和池杉光合作用和生长的影响;李昌晓等^[19]和

汪贵斌等^[20]也对落羽杉的光合特性进行了报道。但目前对落羽杉属杂交树种“中山杉”光合特性的研究还较少。

作者对‘中山杉405’、‘中山杉406’、‘中山杉407’及亲本墨西哥落羽杉和落羽杉2年生幼苗的光合特性进行了测定,探讨夏、秋两季中山杉无性系与其亲本的光合特性差异,以期了解落羽杉属种间杂种的光合遗传变异,为其应用推广和栽培实践提供参考数据。

1 材料和方法

1.1 材料

实验于2010年7月至2010年10月在南京中山植物园苗圃内进行,该区域属北亚热带季风气候,四季分明,冬夏长而春秋短。雨量充沛,每年6月下旬至7月中旬为梅雨季节,年平均降水量1106 mm,年均温15.4℃。

供试材料为‘中山杉405’、‘中山杉406’、‘中山杉407’和母本墨西哥落羽杉、父本落羽杉的2年生盆栽苗。栽植容器为下径20 cm、上径30 cm、高25 cm的塑料花盆,于2010年4月将树苗从营养钵移入花盆定植,每盆栽植1株,每个树种16~20盆。花盆2/3埋入土中、1/3露出地面,露天栽植于苗圃。盆栽基质取自苗圃地,无特殊处理。根据植株生长状态和天气情况定量浇水、施肥。

1.2 方法

于2010年7月份、9月份和10月下旬的晴好天

气,选取完全展开的正常叶片测定光合参数。选择树冠中上层向阳位置当年生小枝上的叶片进行测定,每株1叶,叶位尽量保持一致。仪器为美国LI-COR公司生产的LI-6400便携式光合测定仪;内置LED红蓝光源,由内置小钢瓶提供CO₂,湿度控制在60%~70%。所有供试树苗在测定前一晚浇水,以保证水分供应。由于气候多雨及设备原因,6月份和8月份的光合参数未能进行测定。

光响应曲线测定设置12个光照强度梯度(0、25、50、75、100、200、400、600、800、1 000、1 200和1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),测定时在每一光照强度下停留2~3 min 读数;每一树种随机取6盆进行测定,重复测定6次。

在8:00至16:00测定各参数的日变化曲线,每隔2 h测定1次,参照外界实际光照强度设置测定时的光照强度。在每个测定月份的下旬选晴朗少云的天气进行测定,共测定3 d。根据测得的数据绘制净光合速率(Pn)日变化曲线。同时测定大气温度(Ta)。以全天中光合作用较强的时间段(即10:00左右)的测定值作为研究光合速率季节变化的数据,测定参数包括净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)等。

1.3 数据分析

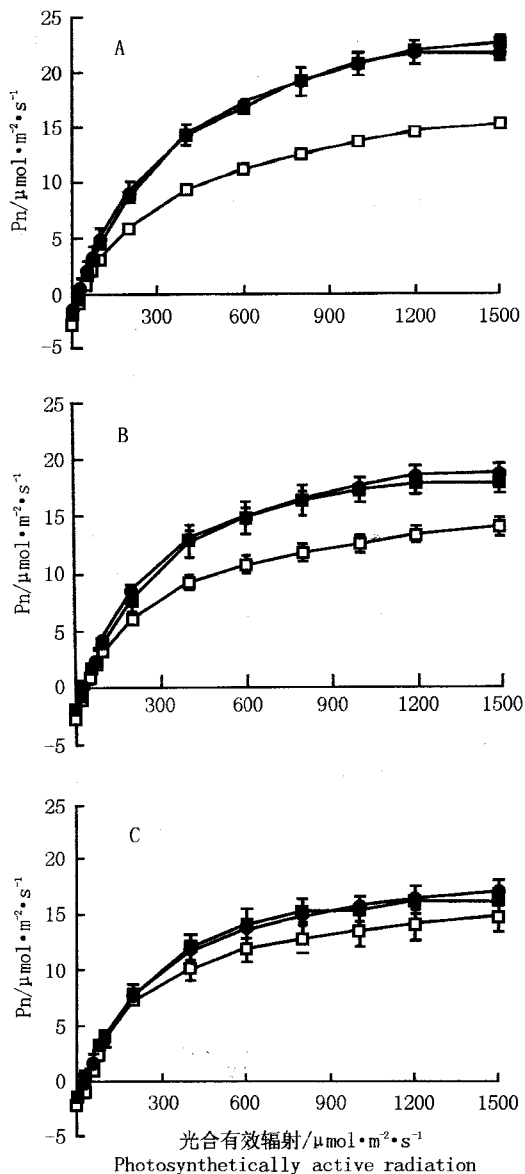
按以下公式^[21]计算各指标的杂种优势率和叶片的水分利用效率:杂种优势率=[(杂种光合指标值-双亲光合指标平均值)/双亲光合指标平均值]×100%;水分利用效率 $WUE = Pn/Tr$ 。

用Excel 2007和SPSS 16.0统计分析软件进行数据分析和作图;用Photosynthesis软件绘制Pn的光响应曲线,并计算光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)。采用Duncan法进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 中山杉无性系及其亲本净光合速率(Pn)的光响应曲线比较

光响应曲线可反映植物净光合速率(Pn)随光照强度增减的变化规律。‘中山杉405’、‘中山杉406’、‘中山杉407’和母本墨西哥落羽杉、父本落羽杉Pn的光响应曲线见图1和图2。结果表明:在光合有效辐射(PAR)为0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,



□—: 7月 July; ■—: 9月 September; ●—: 10月 October.

A: ‘中山杉 405’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 405’;
B: ‘中山杉 406’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 406’;
C: ‘中山杉 407’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 407’.

图1 不同月份3个中山杉无性系净光合速率(Pn)的光响应曲线
Fig. 1 Light response curve of net photosynthetic rate (Pn) of three clones of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’ in different months

3个无性系及其亲本的Pn均为负值;在PAR为0~200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,Pn值随PAR的增强呈线性迅速增大的趋势;随PAR的持续升高,Pn值继续升高并稳定在一定水平,整个光响应曲线呈抛物线状。

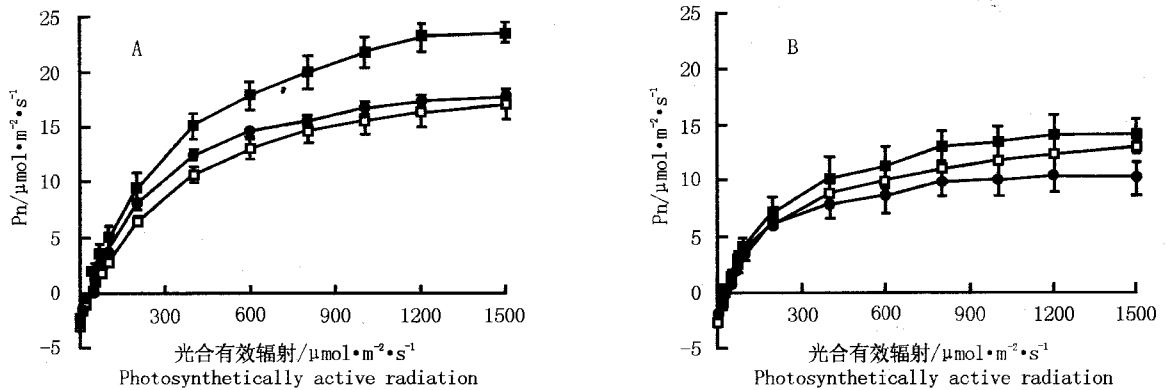
在7月份、9月份和10月份,3个无性系及其亲

本的 P_n 测定值有明显差异,导致光响应曲线明显不同。3个无性系的光响应曲线基本一致,9月份和10月份 P_n 的测定值差异不大,光响应曲线几乎重合;而7月份 P_n 值则均较低,但光响应曲线的趋势基本一致。墨西哥落羽杉9月份的 P_n 值最高,10月份有所下降,但略高于7月份。落羽杉9月份的 P_n 值最高,7月份居中,10月份则降到最低,可能是由于10月份落羽杉叶色变黄使其光合能力下降所致。

另外,在 PAR 600 ~ 1 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的条件下,‘中山杉405’的 P_n 值总体上高于另外2个无性系。此外,3个无性系的 P_n 值在不同月份都高于落羽杉;‘中山杉405’和‘中山杉406’仅在10月份 P_n 值高于其母本墨西哥落羽杉,其他月份3个中山杉无性系和落羽杉的 P_n 值均低于墨西哥落羽杉。特别是7月份墨西哥落羽杉的 P_n 值最高,说明墨西哥落羽杉比3个中山杉无性系及落羽杉耐高温,可能是

因为墨西哥落羽杉原产地在墨西哥的热带地区,对高温有更强的适应性。

不同月份3个中山杉无性系及亲本墨西哥落羽杉和落羽杉的光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP)见表1。由表1数据可知:3个无性系及其亲本的LCP总体上表现为7月份最高、10月份最低。7月份墨西哥落羽杉的LCP达到75.20 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显著高于3个无性系及落羽杉($P < 0.05$);而9月份和10月份它们的LCP差异不显著。与LCP不同,3个无性系和墨西哥落羽杉的LSP则是9月份最高、7月份最低;仅落羽杉的LSP为9月份最高、10月份最低,这可能与10月份落羽杉叶色转黄且叶片代谢功能衰退有关。此外,3个月份落羽杉的LSP均低于3个无性系及墨西哥落羽杉,而3个无性系的LSP更接近其母本墨西哥落羽杉,且7月份和10月份‘中山杉405’的LSP均超过其母本。综合来看,9月份墨西哥落羽



—□—: 7月 July; —■—: 9月 September; —●—: 10月 October.

A: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; B: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

图2 不同月份墨西哥落羽杉和落羽杉净光合速率(P_n)的光响应曲线

Fig. 2 Light response curve of net photosynthetic rate (P_n) of *Taxodium mucronatum* Tenore and *T. distichum* (L.) Rich. in different months

表1 不同月份3个中山杉无性系及其亲本的光补偿点(LCP)和光饱和点(LSP) ($\bar{X} \pm SE$, $n=3$)¹⁾

Table 1 Light compensation point (LCP) and light saturation point (LSP) of three clones of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’ and their parents in different months ($\bar{X} \pm SE$, $n=3$)¹⁾

树种 ²⁾ Tree species ²⁾	LCP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$			LSP/ $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$		
	7月份 July	9月份 September	10月份 October	7月份 July	9月份 September	10月份 October
405	48.98±6.99b	36.19±4.66a	30.22±1.04a	987.57±10.79a	1 260.82±68.05a	1 035.26±53.81a
406	40.97±2.64b	44.93±9.64a	28.46±3.01a	862.42±7.99b	1 139.36±83.17ab	968.92±35.44a
407	35.99±2.13b	39.93±11.42a	31.90±4.30a	857.72±25.65b	1 086.26±112.06ab	913.94±52.75a
F	75.20±13.88a	29.85±3.14a	26.59±1.58a	965.60±36.79a	1 302.94±164.01a	983.05±47.26a
M	40.98±2.65b	35.45±6.86a	22.92±1.70a	753.67±15.59c	912.00±96.00b	612.45±92.06b

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P \leq 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference ($P \leq 0.05$).

²⁾ 405: ‘中山杉405’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 405’; 406: ‘中山杉406’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 406’; 407: ‘中山杉407’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 407’; F: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; M: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

杉和3个无性系可利用的光强范围最大,7月份最小;而落羽杉稍有不同,9月份可利用的光强范围最大、10月份最小。

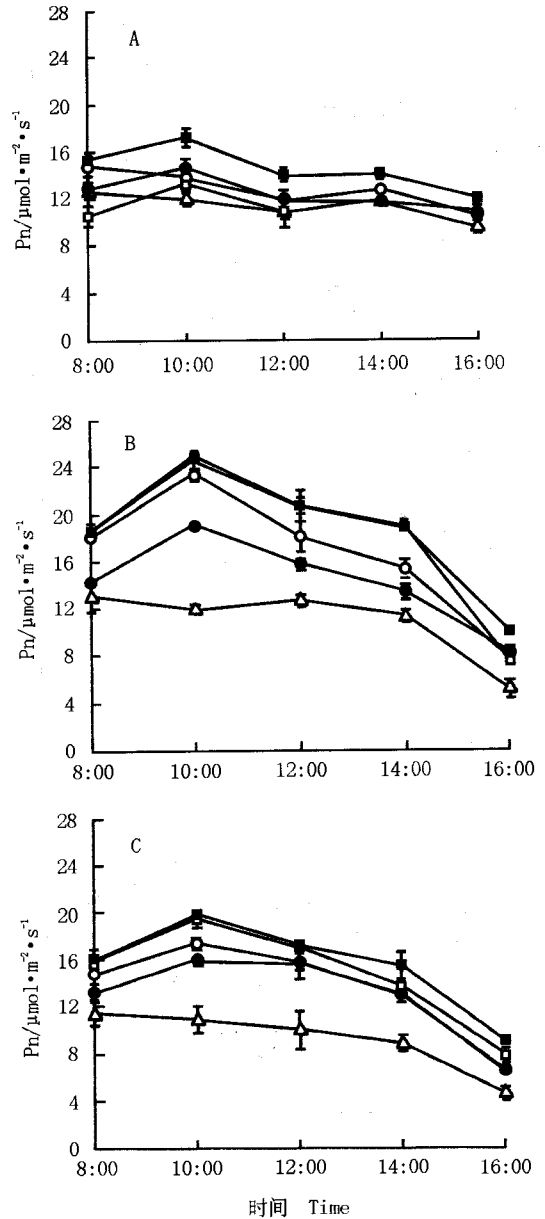
2.2 中山杉无性系及其亲本净光合速率(Pn)的日变化曲线比较

不同月份3个中山杉无性系及其母本墨西哥落羽杉和父本落羽杉净光合速率(Pn)的日变化曲线见图3。由图3可以看出:7月份3个无性系及其亲本的Pn日变化曲线均呈不规则型,且中午12:00左右出现低谷。其中,‘中山杉405’和‘中山杉407’及墨西哥落羽杉的日变化进程较相似,均在上午10:00达到全天最高值;而‘中山杉406’和落羽杉的Pn最高值则出现在早晨8:00,随着光合有效辐射的增加和气温的升高(图4),中午12:00左右Pn值降至低谷,而在下午14:00左右Pn值又有所回升,14:00至16:00Pn值均持续下降。总体上看,7月份‘中山杉405’全天的Pn值均明显高于其他树种。

由图3还可见:9月份和10月份5个树种Pn的日变化进程近似。3个无性系和墨西哥落羽杉的Pn日变化曲线均呈单峰型,峰值出现在上午10:00;此后一直到下午14:00Pn值逐渐下降,14:00以后迅速降低。而落羽杉的Pn值从上午8:00开始一直呈持续降低的趋势,且全天都明显低于其他树种。5个树种中,‘中山杉405’和墨西哥落羽杉的Pn值最高,‘中山杉406’和‘中山杉407’的次之,落羽杉的Pn值最低。7月份各树种的Pn值明显低于9月份和10月份,可能与7月份的极端高温有关(图4)。10月份各树种的Pn值均低于9月份,10月份‘中山杉405’、‘中山杉406’、‘中山杉407’和母本墨西哥落羽杉上午10:00的Pn峰值分别比9月份降低了23%、22%、12%和23%,各树种间Pn的差异也有所减小,这一变化与叶片生理状态的改变有关。

2.3 中山杉无性系及其亲本光合性能的比较及杂种优势的季节变化

2.3.1 净光合速率(Pn)的比较及其杂种优势率的变化
不同月份3个中山杉无性系及其母本墨西哥落羽杉和父本落羽杉净光合速率(Pn)的变化及3个无性系Pn的杂种优势率变化见图5。由图5可知:除落羽杉外,3个无性系及墨西哥落羽杉的Pn值均为7月份最低、9月份达到最高点、10月份则略有降低;落羽杉的Pn值虽然也在9月份达到顶点,但增加幅度不大,且在10月份降到最低,另外不同月份落羽杉的Pn



—■—: ‘中山杉405’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 405’; —□—: ‘中山杉406’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 406’; —●—: ‘中山杉407’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 407’; —□—: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; —△—: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

A: 7月份 July; B: 9月份 September; C: 10月份 October.

图3 不同月份3个中山杉无性系及其亲本净光合速率(Pn)的日变化曲线

Fig. 3 Diurnal change curve of net photosynthetic rate (Pn) of three clones of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’ and their parents in different months

值均显著低于其他树种。总体上,按Pn值从大至小5个树种依次排序为‘中山杉405’、墨西哥落羽杉、‘中山杉406’、‘中山杉407’、落羽杉,仅7月份‘中山

杉407'的Pn值超过墨西哥落羽杉和'中山杉406',但仍低于'中山杉405'。

供试3个中山杉无性系的Pn均表现出正向的杂种优势,但具有不同的规律。不同月份'中山杉405'的Pn杂种优势率均最高,且稳定在30%左右。'中

山杉406'的Pn杂种优势率7月份最低,为10.6%;至9月份达到最高点,为26.0%;而10月份则降至14.2%'中山杉407'的Pn杂种优势率则随时间推移逐步降低;在7月份较高,达到18.6%;10月份降至最低。

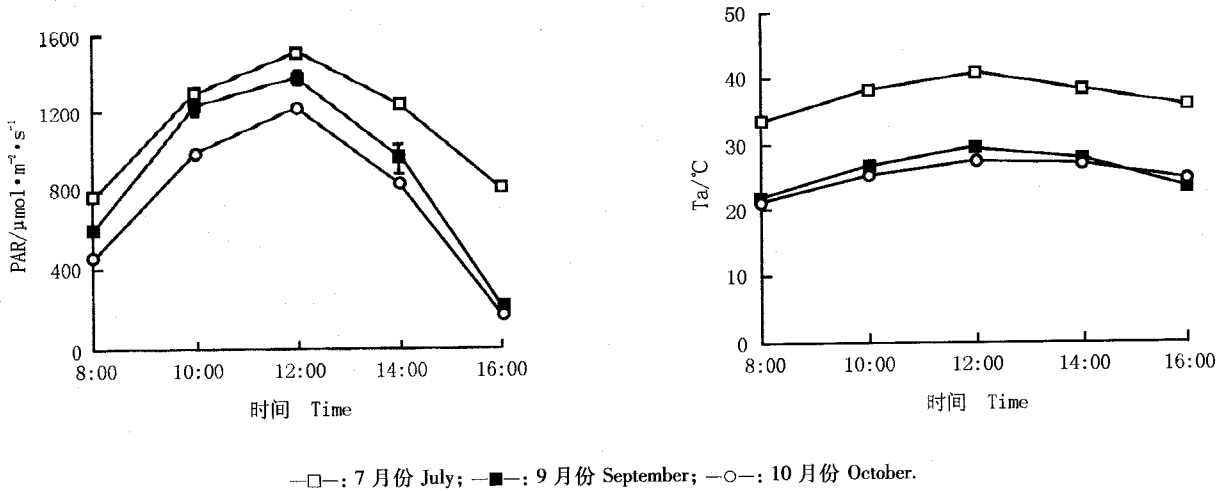


图4 不同月份光合有效辐射(PAR)和气温(Ta)的日变化曲线
Fig. 4 Diurnal change curve of photosynthetically active radiation (PAR) and air temperature (Ta) in different months

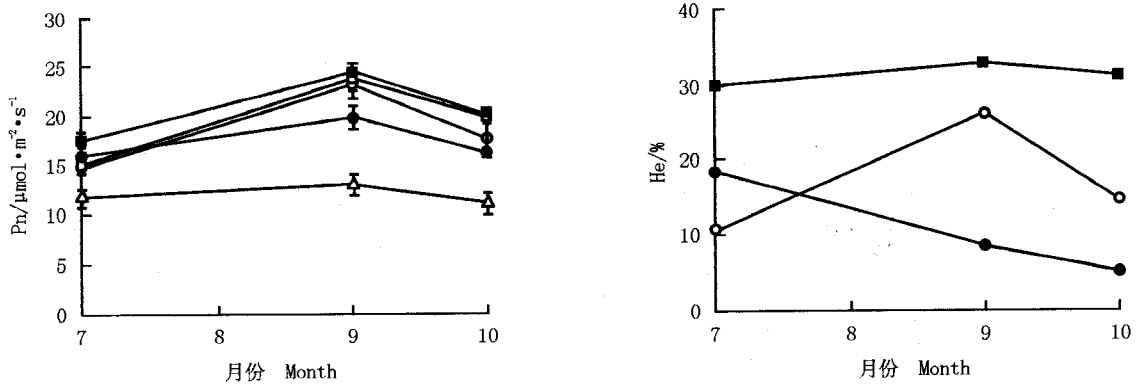


图5 不同月份3个中山杉无性系及亲本净光合速率(Pn)的变化及其杂种优势率(He)的比较
Fig. 5 Change of net photosynthetic rate (Pn) and comparison of heterosis rate (He) of three clones of *Taxodium* 'Zhongshanshan' and their parents in different months

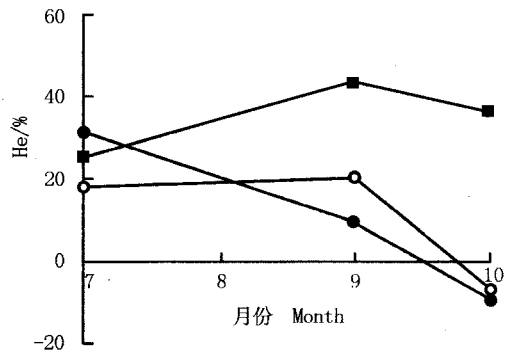
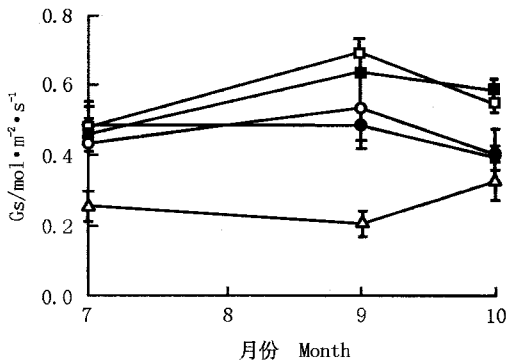
2.3.2 气孔导度(Gs)的比较及其杂种优势率的变化
不同月份3个中山杉无性系及其母本墨西哥落羽杉和父本落羽杉气孔导度(Gs)的变化及3个无性系Gs的杂种优势率变化见图6。由图6可以看出:'中山杉405'、'中山杉406'和墨西哥落羽杉的Gs均为7月份最低、9月份达到峰值、10月份又有所降低,基本上与Pn的变化同步;'中山杉407'的Gs则是7月份最

高、9月份略有降低、10月份降至最低;落羽杉的Gs变化随时间推移呈“V”型,7月份较高、9月份降至最低、10月份则达到最高,与Pn的变化规律相反,且不同月份落羽杉的Gs均明显低于其他树种。
3个中山杉无性系的Gs在7月份和9月份均表现为正向杂种优势;10月份'中山杉405'保持了杂种优势,而另2个无性系均未表现出杂种优势。

2.3.3 蒸腾速率(Tr)的比较及其杂种优势率的变化
不同月份3个中山杉无性系及其母本墨西哥落羽杉和父本落羽杉蒸腾速率(Tr)的变化及3个无性系 Tr 的杂种优势率变化见图7。由图7可见:从7月份至10月份,5个树种的 Tr 均呈逐渐下降的趋势,仅10月份落羽杉的 Tr 与9月份大致持平,且各月份落羽杉的 Tr 均为最低。相比之下,不同月份墨西哥落羽杉的 Tr 在5个树种中均最高,可能与该种原产热带有关。较高的蒸腾作用能有效降低叶片温度,避免植物

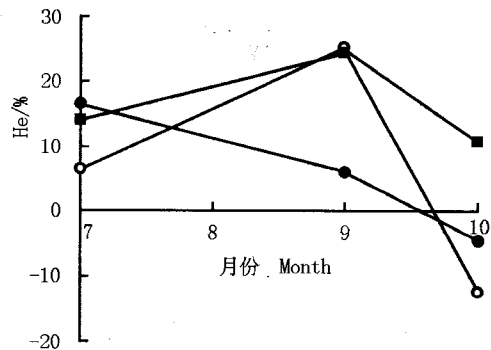
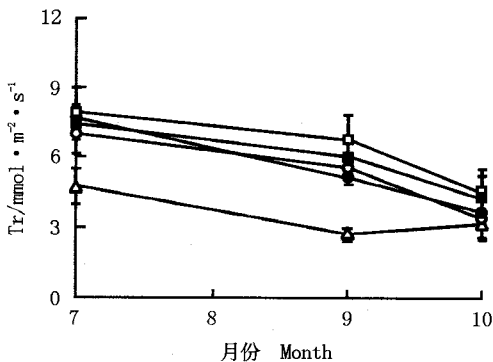
细胞遭受热害。

3个中山杉无性系的蒸腾特性均接近其母本墨西哥落羽杉。其中,9月份‘中山杉405’和‘中山杉406’的杂种优势率均超过20%,达到最高点;10月份‘中山杉405’的杂种优势率仍高于10%,但‘中山杉406’的杂种优势率却为负值,不具有杂种优势;‘中山杉407’的杂种优势率在7月份最高(为16.5%),9月份和10月份则逐渐降低至负值,明显不具有杂种优势。



—■—: ‘中山杉405’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 405’*; —○—: ‘中山杉406’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 406’*; —●—: ‘中山杉407’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 407’*; —□—: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; —△—: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

图6 不同月份3个中山杉无性系及亲本气孔导度(G_s)的变化及其杂种优势率(He)的比较
Fig. 6 Change of stomatal conductance (G_s) and comparison of heterosis rate (He) of three clones of *Taxodium ‘Zhongshanshan’* and their parents in different months



—■—: ‘中山杉405’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 405’*; —○—: ‘中山杉406’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 406’*; —●—: ‘中山杉407’ *Taxodium ‘Zhongshanshan 407’*; —□—: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; —△—: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

图7 不同月份3个中山杉无性系及亲本蒸腾速率(Tr)的变化及其杂种优势率(He)的比较
Fig. 7 Change of transpiration rate (Tr) and comparison of heterosis rate (He) of three clones of *Taxodium ‘Zhongshanshan’* and their parents in different months

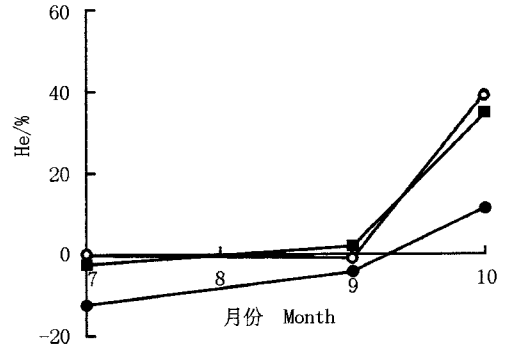
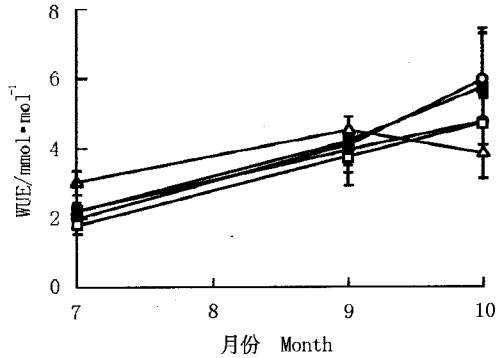
2.3.4 水分利用效率(WUE)的比较及其杂种优势率的变化
不同月份3个中山杉无性系及其母本墨西哥落羽杉和父本落羽杉水分利用效率(WUE)的变

化及3个无性系 WUE 的杂种优势率变化见图8。由图8可见:与蒸腾速率的变化相反,3个中山杉无性系及墨西哥落羽杉的 WUE 均随时间推移呈逐渐增大的

趋势;而7月份和9月份落羽杉的 WUE 呈上升趋势且均高于其他树种,但10月份则明显降低且在供试的5个树种中为最低。

7月份和9月份,3个中山杉无性系的 WUE 均未

表现出明显的杂种优势,而在10月份则表现出明显的杂种优势,且‘中山杉405’和‘中山杉406’的杂种优势率(34.1%和38.6%)远高于‘中山杉407’的杂种优势率(11.2%)。



—■—: ‘中山杉405’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 405’; —○—: ‘中山杉406’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 406’; —●—: ‘中山杉407’ *Taxodium* ‘Zhongshanshan 407’; —□—: 墨西哥落羽杉 *Taxodium mucronatum* Tenore; —○—: 落羽杉 *Taxodium distichum* (L.) Rich.

图8 不同月份3个中山杉无性系及亲本水分利用效率(WUE)的变化及其杂种优势率(He)的比较
Fig. 8 Change of water use efficiency (WUE) and comparison of heterosis rate (He) of three clones of *Taxodium* ‘Zhongshanshan’ and their parents in different months

3 讨论和结论

在自然条件下,受环境因素的影响,植物全天的光合速率是不断变化的。植物光合作用的日变化曲线大体有4种类型:正正规曲线型、平坦型、变动型和中午降低型^[22]。本研究中,3个中山杉无性系和母本墨西哥落羽杉在秋季(9月份和10月份)的净光合速率(Pn)日变化曲线均为典型单峰型,峰值出现在上午10:00左右,与杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]^[23]、板栗(*Castanea mollissima* Blume)^[24]相同;父本落羽杉秋季的Pn日变化曲线则较为不规则。3个中山杉无性系及其双亲在夏季的Pn日变化曲线均属于中午降低型,在中午12:00左右Pn值均不同程度下降,下午14:00左右又有所回升,与大部分植物Pn的典型双峰型曲线^[22,25]有所区别,这一差异可能与植物种类、测定时间和环境因子不同有关。

光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)反映了植物对光的需求。一般而言,光补偿点越低,表明植物对弱光的利用能力越强;光饱和点则反映了植物对强光的需求^[26],光饱和点高说明植物在光合作用过程中可以更有效地利用强光。在夏季(7月份),供试的3个中山杉无性系及其双亲的LCP均较高(35.99~75.20

$\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),且LSP相对较低(753.67~987.57 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);而在秋季(9月份),它们的LCP都比较低(29.85~44.93 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),LSP却普遍高于夏季,为912.00~1302.94 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,说明秋季3个中山杉无性系及其双亲利用光能的效率更高、生长速度更快。3个中山杉无性系的LSP均高于其父本落羽杉、接近甚至超过其母本墨西哥落羽杉,说明3个中山杉无性系的光合生理特性受母本影响较大,可以更好地利用强光。

光合作用是植物生物量形成的基础,90%~95%的植物干物质来自光合产物^[27-28]。净光合速率、蒸腾速率及气孔导度与树木的株高、胸径、单株材积等生长指标存在一定程度的正相关关系^[29]。由于不同月份主要环境因子及植物生理状态的差异,3个中山杉无性系的光合性能及杂种优势也呈现出一定的季节变化特征。供试的3个中山杉无性系不仅各项光合特征值表现不同,且杂种优势也表现出时间差异。‘中山杉405’的净光合速率、气孔导度以及蒸腾速率在7月份、9月份和10月份均呈现较高的杂种优势率,但波动幅度较小;‘中山杉406’的这3项光合特征值的杂种优势率则在9月份最高;而‘中山杉407’的杂种优势率在7月份最高。另外,7月份3个中山杉无性系的气孔导度都表现出较强的杂种优势,表明

此时期 CO₂更容易进入叶片进行光合作用,也意味着蒸腾作用更为强烈,可以有效降低叶面温度,说明供试的3个中山杉无性系对夏季高温具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] 殷云龙, 於朝广. 中山杉——落羽杉属树木杂交选育[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 1-10.
- [2] 於朝广, 殷云龙, 徐建华. 落羽杉属4个新品种[J]. 林业科学, 2011, 47(5): 181-182.
- [3] 於朝广, 殷云龙. 落羽杉属树木种间杂交选育研究进展[J]. 江苏林业科技, 2008, 35(2): 39-46.
- [4] 李昌晓, 耿养会, 叶兵. 落羽杉与池杉幼苗对多种胁迫环境的响应及其对三峡库区库岸防护林营建的启示[J]. 林业科学, 2010, 46(10): 144-152.
- [5] 刘春风, 汪贵斌, 曹福亮. 淹水胁迫对落羽杉等4个树种苗木生长的影响[J]. 林业科技开发, 2011, 25(1): 48-51.
- [6] 华建峰, 胡李娟, 杜丽娟, 等. 水分条件对中山杉406光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8/9): 1221-1225.
- [7] 王伟, 高捍东, 陆小青. 盐胁迫对4个中山杉无性系幼苗生长和光合作用的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(4): 7454-7457.
- [8] LI J Z, DAVID L C, KEN W K, et al. Can we improve the salinity tolerance of genotypes of *Taxodium* by using varietal and hybrid crosses? [J]. HortScience, 2010, 45(12): 1773-1778.
- [9] 虞华强, 费本华, 赵荣军, 等. 中山杉和落羽杉木材解剖性质研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(2): 213-217.
- [10] 汪贵斌, 曹福亮, 柳学军, 等. 落羽杉种源木材微纤丝角和纤维形态的变异[J]. 林业科学, 2007, 43(6): 117-122.
- [11] 陆小清, 毛志滨, 陈永辉, 等. 中山杉扦插繁殖技术[J]. 江苏林业科技, 2004, 31(6): 38-42.
- [12] 林海勤. 中山杉扦插育苗技术研究[J]. 宁波农业科技, 2007(1): 4-5.
- [13] 杨美凌, 殷云龙, 方炎明, 等. 落羽杉属种类、栽培变种及杂种的外部形态变异及亲缘关系研究[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 40-47.
- [14] 於朝广, 殷云龙, 徐建华. 用SRAP标记鉴定落羽杉属植物杂种[J]. 林业科学, 2009, 45(2): 142-146.
- [15] 沈允钢, 施教耐, 许大全. 动态光合作用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 126-152.
- [16] ANDERSON P H, PEZESHKI S R. The effects of intermittent flooding on seedlings of three forest species[J]. Photosynthetica, 1999, 37(4): 543-552.
- [17] ELCAN J M, PEZESHKI S R. Effects of flooding on susceptibility of *Taxodium distichum* L. seedlings to drought [J]. Photosynthetica, 2002, 40(2): 177-182.
- [18] NEUFELD H S. Effects of light on growth, morphology, and photosynthesis in baldcypress [*Taxodium distichum* (L.) Rich.] and pondcypress (*T. ascendens* Brongn.) seedlings [J]. Torrey Botanical Club, 1983, 110(1): 43-54.
- [19] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [20] 汪贵斌, 曹福亮. 土壤盐分及水分含量对落羽杉光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 14-18.
- [21] 李霞, 丁在松, 李连禄, 等. 玉米光合性能的杂种优势[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1049-1054.
- [22] 赵登超, 侯立群, 韩传明, 等. 我国核桃光合作用研究进展[J]. 山东林业科技, 2011(4): 107-111.
- [23] 肖文发, 徐德应, 刘世荣, 等. 杉木人工林针叶光合与蒸腾作用的时空特征[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 39-45.
- [24] 彭方仁, 黄宝龙. 密植板栗树光合特性的研究[J]. 浙江林学院学报, 1997, 14(2): 151-154.
- [25] 曾小平, 赵平, 彭少麟, 等. 三种松树的生理生态学研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 275-278.
- [26] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 长白山地区蒙古栎光合特性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(4): 548-554.
- [27] KRAUSS K W, CHAMBERS J L, ALLEN J A. Salinity effects and differential germination of several half-sib families of baldcypress from difference seed sources[J]. New Forests, 1998, 15(1): 53-68.
- [28] KRAUSS K W, CHAMBERS J L, CREECH D. Selection for salt tolerance in tidal freshwater swamp species: advances using baldcypress as a model for restoration [M] // CONNER W H, DOYLE T W, KRAUSS K W, et al. Ecology of Tidal Freshwater Forested Wetlands of the Southeastern United States. Dordrecht: Springer Verlag, 2007: 385-410.
- [29] 陆钊华, 徐建民, 陈儒香, 等. 桉树无性系苗期光合作用特性研究[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 575-580.

(责任编辑: 惠红)