

不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较

何海洋^{1,2}, 彭方仁^{1,2*}, 张瑞^{1,2}, 徐建南^{1,2}, 吴斌³, 李小飞^{1,2}, 苏文川^{1,2}

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学林学院, 江苏 南京 210037; 3. 镇江市京口区农业委员会, 江苏 镇江 212014)

摘要:为研究美国山核桃光合效率及不同品种间光合特性的差异, 采用光合测定系统对6个美国山核桃优良品种‘Mahan’、‘Pawnee’、‘Wichita’、‘Stuart’、‘Sauber’、‘Jinhua’1年生嫁接苗净光合速率日变化、月份变化及光响应曲线进行了测定。结果表明:不同品种美国山核桃1年生嫁接苗净光合速率(P_n)日变化均呈不对称双峰曲线, 但不同品种在不同月份的峰值大小及出现时间存在差异; ‘Mahan’、‘Pawnee’、‘Wichita’及‘Stuart’净光合速率变化呈双峰曲线, ‘Sauber’月份变化呈单峰曲线; ‘Mahan’最大净光合速率($P_{n,max}$)、光饱和点(L_{sp})分别为16.5和1 065 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 显著高于其他品种, 而光补偿点(L_{cp})显著低于其他品种, 表明‘Mahan’光适应范围大, 对低光利用能力强, 具有一定耐阴性; 各品种表观量子效率(A_{QY})和暗呼吸速率(R_d)间差异不显著, 不同品种光合效率排序为‘Mahan’>‘Jinhua’>‘Pawnee’>‘Wichita’>‘Sauber’>‘Stuart’; 相关性分析表明, 最大净光合速率($P_{n,max}$)与光饱和点(L_{sp})呈极显著正相关, 表观量子效率(A_{QY})与光补偿点(L_{cp})呈极显著负相关。

关键词:美国山核桃; 嫁接苗; 光合特性; 光响应曲线; 相关性分析

中图分类号: S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1000-2006(2015)04-0019-07

Photosynthetic characteristics of grafting plants of different pecan varieties

HE Haiyang^{1,2}, PENG Fangren^{1,2*}, ZHANG Rui^{1,2}, XU Jiannan^{1,2}, WU Bin³, LI Xiaofei^{1,2}, SU Wenchuan^{1,2}

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jingkou District Agriculture Committee of Zhenjiang City, Zhenjiang 212014, China)

Abstract: In this study, the photosynthetic efficiency and differences of photosynthetic characteristics among different pecan varieties were evaluated. The photosynthetic characteristics and light response curves of six one-year-old pecan varieties, including ‘Mahan’, ‘Pawnee’, ‘Wichita’, ‘Stuart’, ‘Sauber’ and ‘Jinhua’, were measured with LI-6400 portable photosynthesis instrument. The results showed that the diurnal variation of net photosynthetic rate (P_n) of all these 6 pecan varieties showed asymmetric double peak curve. However, the peak value and the peak time of different varieties, were different. Monthly variation of the net photosynthetic rate of ‘Mahan’, ‘Pawnee’, ‘Wichita’ and ‘Stuart’ showed bimodal curve. However, ‘Sauber’ showed single curve. The maximum net photosynthetic rate ($P_{n,max}$) and the light saturation point (L_{sp}) of ‘Mahan’ were the largest, 16.5 and 1 065 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively, they were significantly higher than that of the other varieties. While the light compensation (L_{cp}) was significantly lower than that of the other varieties, indicating that ‘Mahan’ had better light adaptation, higher efficiency of using weak light and better shade tolerance. The differences of apparent quantum yield (A_{QY}) and dark respiration rate (R_d) among different pecan varieties were not significant. The photosynthetic capacity of different varieties was ‘Mahan’>‘Jinhua’>‘Pawnee’>‘Wichita’>‘Sauber’>‘Stuart’. This study showed that there were significant positive correlation between $P_{n,max}$ and L_{sp} . While a significant negative correlation was found between A_{QY} and L_{cp} .

Keywords: *Carya illinoensis*; grafting plants; photosynthetic characteristics; light response curve; correlation analysis

收稿日期: 2015-03-02

修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目(201304711); 江苏省林业三新工程项目[Lyssx2014(047)]; 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者: 何海洋, 硕士生。* 通信作者: 彭方仁, 教授。E-mail: frpeng@njfu.edu.cn。

引文格式: 何海洋, 彭方仁, 张瑞, 等. 不同品种美国山核桃嫁接苗光合特性比较[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(4): 19-25.

美国山核桃(*Carya illinoensis*),又名薄壳山核桃、长山核桃,胡桃科(Juglandaceae)山核桃属(*Carya* Nutt.)落叶乔木,原产美国和墨西哥北部,是世界著名干果、高档木本食用油料、绿化林兼材用树种^[1-3]。我国自19世纪末20世纪初开始引种栽培美国山核桃,但多以实生引种为主,结果迟且品质差,产量低而不稳,致使美国山核桃应有的生产潜力没有得到充分发挥^[4]。与中国山核桃相比,美国山核桃具有果实个大、壳薄、出仁率高、取仁容易、产量高等特点;果实油脂含量高达70%以上,其中不饱和脂肪酸含量高达97%,优于山核桃、油茶及核桃等;氨基酸含量比油橄榄高,还富含维生素B1、B2及必需矿质元素等^[5-6]。美国山核桃树形高大、树姿优美,其木材质地坚韧、纹理细密,是良好的城乡绿化及材用树种^[7-8]。因种植美国山核桃经济价值高、受益期长,社会效益和生态效益明显,近年来我国对美国山核桃产业发展高度重视,加大了资金投入力度,已摸索出切实可行的栽培管理技术,如:优良品种的选择、富根容器育苗作砧木、高效芽接技术扩繁、科学配置授粉树、树形管理、肥水控制及病虫害防治等,但在生产实践中均未实现普遍推广,制约着美国山核桃产业的发展^[9]。其中优良品种的选择是一个关键问题,目前国内引进及自选优良品种100多个,各品种间生长及抗逆性差异显著。鉴于美国山核桃诸多优良特性及国内日益增长的种植需求,对美国山核桃不同品种的研究开发十分必要。笔者比较国内主要引种栽培的6个美国山核桃品种1年生嫁接苗的光合生理差异,以期对美国山核桃的推广栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于镇江句容市后白镇张庙村(119°9'6"E, 31°52'45"N),属典型的低山丘陵地区,土壤为黄棕壤,中性偏酸。北亚热带中部季风气候,四季分明,雨水充沛,光照充足。年均气温15.6℃,年均相对湿度78%,日平均气温 ≥ 10 ℃的作物生长期平均为226 d。年均降水量1 018.6 mm,其中夏季最多,降水量达497.6 mm,占49%;冬季最少,降水量为112.4 mm,占11%。年均日照2 152 h,活动积温4 840℃,无霜期229 d。春季盛行东风,夏季东南风,秋冬季盛行东北风。

1.2 试验材料

供试材料为从美国引进的5个优良品种及国

内选育的1个优良品种,均为1年生嫁接苗。品种分别为‘Mahan’(‘马汉’)、‘Pawnee’(‘波尼’)、‘Wichita’(‘威奇塔’)、‘Stuart’(‘斯图尔特’)、‘Sauber’(‘萨波’)、‘Jinhua’(‘金华’),其中品种‘金华’于1980年由浙江省科学院亚热带作物研究所选育。

2012年12月将从南京中山植物园美国山核桃实生大树上采集的种子进行沙藏,2013年1月将沙藏的种子进行温床催芽,3月芽苗截根移栽培育富根容器苗,用作砧木。当年8月进行本砧方块芽接,6个品种接穗均采自试验基地采穗圃。2014年2月剪砧、除萌,4月幼苗逐渐萌芽、长叶,5月底6月初叶片完全展开,11月下旬叶片基本凋落,无开花结果。

1.3 试验方法

1.3.1 净光合速率日变化、月变化测定

采用LI-6400(LI-COR, Inc. Lincoln, USA)便携式光合作用测定系统测定光合参数,选择生长良好且无病虫害的嫁接苗,取中上部复叶第3~5片完全展开叶,分别于2014年5月20日、6月19日、7月19日、8月18日、9月17日及10月17日6个天气晴朗的时间段,从7:00至17:00,每隔2 h测定1次,采用自然光源,每次测定重复3次,共测3株,1株2次。

1.3.2 光响应曲线测定

于2014年9月天气晴朗的上午,选取长势一致的1年生嫁接苗完全展开叶,用LI-6400便携式光合仪LED红蓝光源叶室进行测定,所有测定时的气体流量均为500 $\mu\text{mol}/\text{s}$,每次测定重复3次,共测3株,1株1次。光响应曲线分别于0、20、50、80、100、200、300、600、1 000、1 500、2 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的11个光强梯度下进行活体测定,由仪器自动记录相应的净光合速率(P_n)。根据光响应曲线经典Farquhar模型^[10]对最大净光合速率($P_{n,\text{max}}$)、光饱和点(L_{SP})、光补偿点(L_{CP})、暗呼吸速率(R_d)及表观量子效率(A_{QY})等光合参数进行拟合。

测量时,尽量使叶片均匀夹于叶夹内,并保持其角度、方向相同,确保均无遮阴且叶片受光方向一致。

1.4 数据处理

利用Excel 2007和SPSS 18.0对数据进行统计处理和数据分析,采用Sigma Plot 10.0绘图。

2 结果与分析

2.1 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光合速率日变化

净光合速率(P_n)是植物光合能力最直接的体现,其大小直接决定着植物光合作用的强弱^[11]。光合作用日变化是植物生长发育过程中物质积累与生理代谢的基本过程,也是分析外部环境因素影响植物生长和代谢的重要手段^[12]。由图1可知,6个美国山核桃品种1年生嫁接苗 P_n 日变化均呈不对称双峰型曲线,具有明显光合午休现象。‘Jinhua’、‘Pawnee’、‘Wichita’和‘Stuart’4个品种在9:00出现首峰,峰值分别为11.49、10.51、9.78和7.99 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而‘Mahan’和‘Sauber’首峰出现在11:00,分别为12.02和8.65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;随

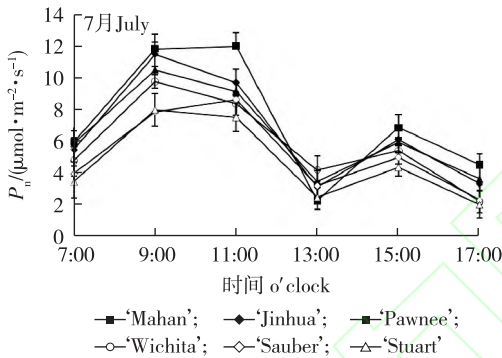


图1 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗净光合速率日变化

Fig.1 Diurnal variation of net photosynthetic rate of annual grafting plants with diverse varieties of pecans

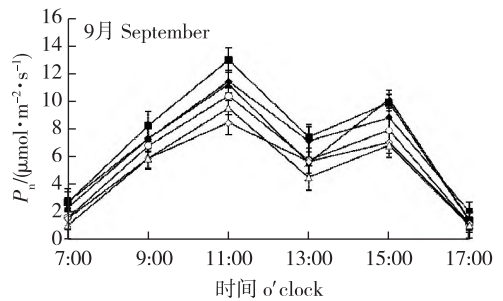
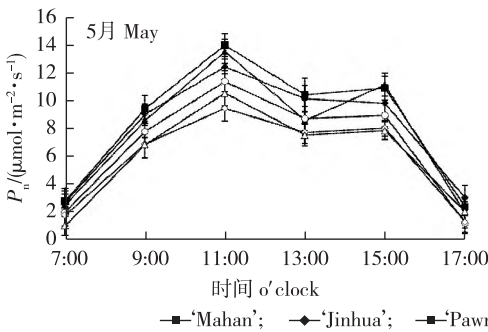


图2 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗不同月份净光合速率日变化

Fig.2 Diurnal variation of net photosynthetic rate of annual grafting plants with diverse varieties of pecans in different months

‘Mahan’、‘Pawnee’、‘Wichita’及‘Stuart’随月份变化呈双峰曲线,首峰高于次峰,而‘Jinhua’

后各品种 P_n 急速下降,均在13:00出现“午休”现象,此时 P_n 均小于 $4.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其中‘Mahan’下降幅度最大,过高的光强及温度使 P_n 下降至最低,这是美国山核桃对晴天中午前后高温环境的一种适应性表现。各品种 P_n 均在15:00出现次高峰,之后一直下降,此时是光照强度减弱和气孔导度迅速下降以适应夜间环境条件所致。6个美国山核桃品种1年生嫁接苗 P_n 日变化平均值排序为:‘Mahan’>‘Jinhua’>‘Pawnee’>‘Wichita’>‘Sauber’>‘Stuart’。

2.2 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光合速率月变化

光合作用日变化类型与品种有关,相同品种在不同季节光合作用日变化类型亦不同^[13-14]。植物叶片光合速率季节变化因叶片的生长发育及季节环境的不同而有所变化。6个美国山核桃品种1年生嫁接苗 P_n 日变化在不同月份均呈双峰曲线(图1、图2),但不同月份出现峰值的时间、峰值的大小及双峰显著程度存在差异,因5月和9月平均光强及温度低于7月,6个品种 P_n 均在11:00达到首峰,而7月份‘Jinhua’、‘Pawnee’、‘Wichita’和‘Stuart’4个品种已在9:00达到首峰。不同月份6个美国山核桃品种嫁接苗 P_n 均在13:00回落至谷值,谷值均值大小顺序为 $P_{n,5月} > P_{n,9月} > P_{n,7月}$ 。7月份6个美国山核桃优良品种 P_n 均是上午明显比中午、下午高,表明在江苏地区,美国山核桃营养物质的积累7月份主要靠上午的光合作用,下午其光合作用相对较弱;而在5月和9月,美国山核桃的营养物质则是靠全天的光合作用进行累积。

随月份变化呈单峰曲线,‘Sauber’则直线降低(图3)。6个美国山核桃品种嫁接苗随着月份变化,叶

片逐渐衰老, P_n 总体呈下降趋势, 均不显著, 其中5、6月份光合效率较强。各品种净光合速率随月份变化中, 表现为‘Mahan’ > ‘Jinhua’ > ‘Pawnee’ > ‘Wichita’ > ‘Sauber’ > ‘Stuart’。

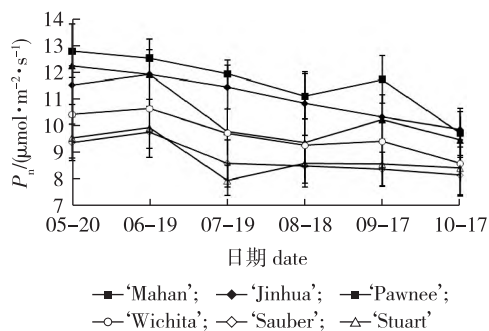


图3 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗净光合速率月份变化

Fig.3 Monthly variation of net photosynthetic rate of annual grafting plants with diverse varieties of pecans

2.3 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光响应曲线

光响应曲线反映了植物光合速率随着光合有效辐射(PAR)改变的变化规律。试验测定的不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光响应曲线见图4。由图4可知,6个美国山核桃品种1年生嫁接苗光合速率均随光强的增加而增加,达到一定数值后,光合速率趋于饱和。进一步分析 P_n 随 PAR 值的变化规律,当 PAR 低于 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,‘Pawnee’、‘Wichita’、‘Sauber’、‘Stuart’4个品种 P_n 均小于0,‘Mahan’和‘Jinhua’2个品种 P_n 小于1;在 PAR 为 $0 \sim 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,6个品种 P_n 间差异不显著,但‘Mahan’、‘Jinhua’略高于其他

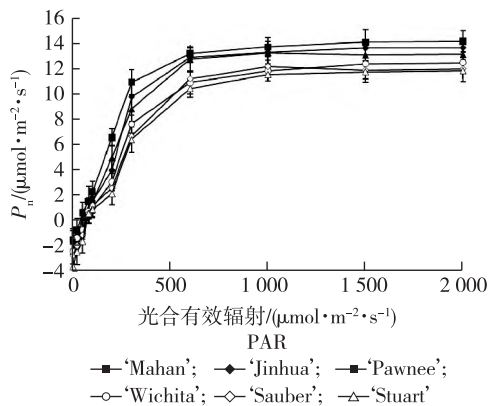


图4 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光响应曲线

Fig.4 Light-response curves of annual grafting plants with diverse varieties of pecans

品种,表明弱光条件下,‘Mahan’、‘Jinhua’的光合效率要强于其他品种;当 PAR 为 $100 \sim 600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各品种 P_n 差异增大,相同光强下‘Mahan’和‘Jinhua’的 P_n 始终最高;在 PAR 高于 $600 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,各品种 P_n 增幅均逐渐减小,光合速率趋于稳定。6个品种 $P_{n,\text{max}}$ 间存在显著差异,‘Mahan’的 $P_{n,\text{max}}$ 最大,表现出较强的光合能力,显著高于‘Stuart’和‘Sauber’,其他品种间差异不显著,光合能力相对较弱(表1)。

2.4 不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光响应曲线的特征参数

由光响应曲线可估算出最大净光合速率($P_{n,\text{max}}$)、光饱和点(L_{sp})、光补偿点(L_{cp})、表观量子效率(A_{QY})和暗呼吸速率(R_d)等光合参数,不同品种美国山核桃1年生嫁接苗光响应曲线特征参数见表1。由表1可知,6个品种嫁接苗光响应曲线特征参数间存在差异。在一定环境条件下, $P_{n,\text{max}}$ 反映了单叶光合能力的强弱,各品种间 $P_{n,\text{max}}$ 存在显著差异,‘Mahan’的 $P_{n,\text{max}}$ 值最大,显著高于‘Stuart’和‘Sauber’,其中‘Sauber’的 $P_{n,\text{max}}$ 值最小,与‘Mahan’相差 $1.5 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其余各品种 $P_{n,\text{max}}$ 值介于两者之间; L_{sp} 和 L_{cp} 反映了植物叶片对光照环境的适应性,分别体现植物对强光和弱光的利用能力,光补偿点低、光饱和点高的植物对光环境的适应性强,而光补偿点高、光饱和点低的植物对光强的适应范围窄^[15]。由表1可知,各品种间 L_{sp} 和 L_{cp} 存在显著或极显著差异,‘Mahan’的 L_{sp} 值最大,极显著高于‘Sauber’、‘Jinhua’和‘Pawnee’, L_{cp} 值极显著低于其他品种,可见‘Mahan’对光强的利用范围较广,能对强、弱光环境做出适应性反应,在早晚弱光及中午强光条件下能高效进行光合产物积累,‘Wichita’的 L_{sp} 值仅次于‘Mahan’,差异不显著,但 L_{cp} 值极显著高于‘Mahan’,可见其能有效利用强光,但耐阴性较差,‘Pawnee’的 L_{sp} 值最小,强光利用能力最弱,‘Sauber’、‘Stuart’和‘Wichita’的 L_{cp} 值显著高于其他品种,可见其对弱光环境适应性差; A_{QY} 是按照射到叶片上的光量子数计算的量子效率,反映了植物叶片在弱光条件下的光合能力, R_d 与叶片的生理活性有关^[16-18],各品种 A_{QY} 和 R_d 间均无显著差异(表1),其中‘Mahan’的 A_{QY} 高于其他品种,比‘Stuart’高43.8%。‘Stuart’的 R_d 最低,这将有利于光合产物的积累,一定程度上间接地提高了其光合效率,‘Pawnee’和‘Jinhua’的 R_d 值较高。

表 1 不同品种美国山核桃 1 年生嫁接苗光响应曲线特征参数

Table 1 Characteristic parameters of light response curves in one-year-old grafting plants with diverse varieties of pecans

品种 varieties	$P_{n,max}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$R_d/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$A_{QY}/$ ($\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$L_{sp}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	$L_{cp}/$ ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
‘Mahan’ ‘马汉’	16.5±1.054Aa	-1.562±0.140a	0.046±0.003a	1 065±62.653Aa	36.620±2.753Cd
‘Pawnee’ ‘波尼’	15.7±0.286Aab	-1.584±0.062a	0.039±0.001a	874±43.645Cd	49.046±0.836ABbc
‘Wichita’ ‘威奇塔’	14.8±1.032Aab	-1.476±0.078a	0.036±0.008a	1 042±24.872ABab	53.638±2.510ABab
‘Stuart’ ‘斯图尔特’	14.1±0.548Ab	-1.397±0.196a	0.032±0.005a	992±45.492ABbc	56.472±4.724Aa
‘Sauber’ ‘萨波’	14.0±0.378Ab	-1.463±0.201a	0.033±0.007a	956±34.861BCc	56.962±3.082Aa
‘Jinhua’ ‘金华’	15.4±1.102Aab	-1.680±0.054a	0.042±0.002a	946±21.047BCc	46.478±1.746Bc

注:同一列不同大小写字母分别表示不同品种间在 $P<0.01$ 与 $P<0.05$ 水平差异显著。

Note: Different capital and small letters in the same column indicated significant differences among different varieties at $P < 0.01$ and $P < 0.05$ level.

2.5 不同品种美国山核桃 1 年生嫁接苗光合生理参数的相关性分析

对 6 个美国山核桃品种 1 年生嫁接苗光合生理参数进行相关性分析(表 2),结果表明,光合生理各参数间存在显著相关性,其中, $P_{n,max}$ 与 A_{QY} 、 L_{sp} 呈显著或极显著正相关,与 L_{cp} 呈显著负相关,表明 A_{QY} 和 L_{sp} 越高, $P_{n,max}$ 也越大, L_{sp} 的增大提高了美国山核桃对光能的利用能力; R_d 与 A_{QY} 呈显著负相关,与 L_{cp} 呈显著正相关,可见叶片暗呼吸速率越大,其光补偿点也越高,光合量子效率则越低,弱光的利用能力低; A_{QY} 与 L_{cp} 呈极显著负相关,表明光补偿点低的美国山核桃品种,其光合量子效率高,对弱光利用能力强,多为较耐阴品种。

表 2 不同品种美国山核桃 1 年生嫁接苗光合生理参数的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of the photosynthetic and physiological parameters in one-year-old grafting plants with diverse varieties pecans

参数 parameters	$P_{n,max}$	R_d	A_{QY}	L_{sp}	L_{cp}
$P_{n,max}$	1.000				
R_d	-2.364	1.000			
A_{QY}	0.582 *	-0.614 *	1.000		
L_{sp}	0.736 **	-0.215	0.273	1.000	
L_{cp}	-0.546 *	0.523 *	-0.842 **	0.209	1.000

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

Note: * and ** indicate significant at 0.05 and 0.01 levels.

3 讨论

不同植物对环境资源的利用有不同的生态对策,生长在不同生境中的植物会表现出结构和特征上的差异,通常被认为是对特定生境的进化适应^[19]。不同品种在相同的外界条件下,对外界条

件的光合生理响应也会不同,这与品种本身长期对外界条件的适应性有关^[20]。凌骅等^[5]指出不同品种美国山核桃(*Carya illinoensis*)生长在相同的生境中亦会表现出不同的光合生理特性,在参试的 5 个品种中,‘Mandan’品种对弱光的适应能力好,能更好地适应在阴坡、沟谷或混交林等弱光环境下栽培。有学者对杂交水稻(*Triticum aestivum*)和冬小麦(*Oryza sativa*)的研究结果表明,基因型是造成不同品种间光合特性差异的重要因素^[21-22]。该试验对 6 个美国山核桃品种 1 年生嫁接苗光合特性测定结果表明,不同品种美国山核桃嫁接苗间光合特性存在差异,其光合效率‘Mahan’最大,其次依次为‘Jinhua’、‘Pawnee’、‘Wichita’、‘Sauber’和‘Stuart’。6 个美国山核桃品种 1 年生嫁接苗光合作用日变化均呈不对称双峰曲线,13:00 出现“午休”现象,主要由于过高的光强和温度,导致叶片水蒸气压亏缺增大,气孔导度值和胞间 CO_2 浓度急速下降;为减少水分过度消耗,蒸腾强度则下降,从而致使叶温升高,过高的叶温又使光合作用关键酶 Rubisco 活性受到抑制,促进了叶片的光呼吸消耗,致使 P_n 下降至最低,以上外界生态因子和植物内在的生理因素共同作用导致光合速率持续下降,亦是美国山核桃对晴天中午前后高温环境的一种适应性表现。不同品种、不同月份光响应曲线日变化峰值大小、出现时间及双峰显著程度存在差异,这与高云等^[7]对美国山核桃‘Elliott’和‘James’两个品种光合特性日变化研究结论相一致。‘Mahan’、‘Pawnee’、‘Wichita’及‘Stuart’净光合速率月份变化呈双峰曲线,而‘Jinhua’随月份变化呈单峰曲线,‘Sauber’则直线降低。5—6 月是美国山核桃光合作用的旺盛期,也是树体积累营养、增强树势的有利时期,此时要加强水肥管理,促进美国山核

桃迅速生长,且应注意通风透光,提高光合速率,增加光合产物。7—8月因温度过高,导致美国山核桃主要靠上午的光合作用进行营养物质积累。因此,在夏季干热天气下进行合理喷灌,可有效调节空气湿度,降低叶温及蒸腾速率,有利于苗木保护,并能提高光合速率,延长营养物质有效积累的时间,促进美国山核桃生长发育。

由光响应曲线模型的拟合结果来看, $P_{n,max}$ 以‘Mahan’最高,‘Pawnee’次之,‘Sauber’最低; L_{sp} 以‘Mahan’最高,‘Wichita’次之,‘Pawnee’最低。参数 $P_{n,max}$ 和 L_{sp} 反映植物在强光下的光合效率^[15],可见‘Mahan’对强光有较强的适应能力。 A_{QY} 和 L_{cp} 是体现植物在弱光条件下光合能力的重要指标^[23]。6个品种美国山核桃嫁接苗中,‘Mahan’的 A_{QY} 最高,而 L_{cp} 低于其他5个品种,表明‘Mahan’对弱光的利用能力强,光适应范围大,耐阴性强。‘Stuart’的 R_d 最低,这将有利于光合产物的积累,一定程度上间接地提高了光合效率,‘Pawnee’和‘Jinhua’的 R_d 值较高。植物叶片光合生理参数间具有显著联系, $P_{n,max}$ 与 L_{sp} 呈极显著正相关, A_{QY} 与 L_{cp} 呈极显著负相关。6个品种美国山核桃1年生嫁接苗的光合生理参数存在差异,正是光合作用过程中光能吸收、传递、转化的复杂性所在。

光合作用是作物产量形成的基础,环境条件与农艺措施往往通过改变叶片光合性能而影响光合产物的形成、运转、积累和分配,最终影响作物产量,叶片具较高光合速率则是作物高产的前提^[24]。该研究中‘Mahan’、‘Pawnee’和‘Jinhua’3个品种光合效率较高,具良好的高产基础,有明显的改良和推广潜力。‘Mahan’光适应范围大,适宜种植区亦相对较广。因美国山核桃为顶芽结果,需在夏冬季通过科学修剪增加树体群体叶面积大小,促进光合产物合成与积累,增加结果枝。在美国山核桃果园中,在保证一定单位面积株数的基础上,应着力增加单株结果数,提高果产量,但需合理疏花疏果,避免大小年现象。关于美国山核桃具体的光合产物分配机制及其他生理生化指标尚有待深入研究。

参考文献(References):

[1] Do Prado A C P, Manion B A, Seetharaman K, et al. Relationship between antioxidant and chemical composition of the oil and shell of pecan nuts (*Carya illinoensis* (Wangenh.) C. Koch) [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 45: 64–73.

[2] Lombardini L, Restrepo-Diaz H, Volder A. Photosynthetic light response and epidermal characteristics of sun and shade pecan

leaves [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2009, 134(3): 372–378.

- [3] 朱海军,刘广勤,曹福亮,等.施锌对薄壳山核桃幼苗生长及体内锌分配的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(4):75–78.
- Zhu H J, Liu G Q, Cao F L, et al. Effects of zinc application on seedling growth and zinc distribution in different organs of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2012, 36(4): 75–78.
- [4] 袁紫倩,杨先裕,凌骅,等.薄壳山核桃‘马汉’叶片主要矿质营养元素生育期动态变化特征[J].西北植物学报,2014,34(7):1443–1449.
- Yuan Z Q, Yang X Y, Ling H, et al. Dynamic changes of leaves' main mineral elements in pecan ‘Mahan’ s growth period [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(7): 1443–1449.
- [5] 凌骅,黄坚钦,温国胜,等.5种美国山核桃苗木叶片光合生理特性比较[J].林业科学,2014,50(8):174–178.
- Ling H, Huang J Q, Wen G S, et al. Comparison of leaf photosynthetic physiological characteristics in five *Carya illinoensis* varieties [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(8): 174–178.
- [6] 张汇慧,吴彩娥,李永荣,等.不同品种薄壳山核桃营养成分比较[J].南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(3):55–58.
- Zhang H H, Wu C E, Li Y R, et al. Comparison of nutritive compositions in different cultivars of pecans [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2014, 38(3): 55–58.
- [7] 高云,傅松玲.两个美国山核桃品种的光合生理特性比较[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(4):34–38.
- Gao Y, Fu S L. Research on the photosynthetic characteristics of two varieties of pecan [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2011, 35(4): 34–38.
- [8] 米冲,徐斌,潘新建.薄壳山核桃人工林木材的化学性质[J].东北林业大学学报,2014,42(6):79–82.
- Mi P, Xu B, Pan X J. Chemical properties of plantation wood in *Carya illinoensis* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(6): 79–82.
- [9] 彭方仁,李永荣,郝明灼,等.我国薄壳山核桃生产现状与产业化发展策略[J].林业科技开发,2012,26(4):1–4.
- Peng F R, Li Y R, Hao M Z, et al. Production status and industrialization development strategy of pecan in China [J]. China Forestry Science and Technology, 2012, 26(4): 1–4.
- [10] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. Models of photosynthesis [J]. Plant Physiology, 2001, 125(1): 42–45.
- [11] 李泽,谭晓风,袁军,等.4个油桐品种光合特性的日变化研究[J].中国农学通报,2013,29(25):12–15.
- Li Z, Tan X F, Yuan J, et al. The study on daily changes of photosynthetic characteristics of 4 cultivars of tung tree (*Vernicia fordii*) [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(25): 12–15.
- [12] 张舟,吕芳德,王森.不同枣品种光合特性的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2014,34(8):78–81.
- Zhang Z, Lv F D, Wang S. Comparative study on photosynthetic characteristics of different varieties of jujube [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology [J]. 2014, 34(8): 78–81.
- [13] 童方平,徐艳平,宋庆安,等.湿地松优良半同胞家系光和CO₂响应曲线特征参数的变异规律[J].南京林业大学学报:自然

科学版,2009,33(1):54-58.

Tong F P, Xu Y P, Song Q A, et al. The variance rule of character parameters responding to light and CO₂ of slash pine's half-sib [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2009, 33(1): 54-58.

- [14] Zhou Y M, Yang C P, Wang S J, et al. A study on photosynthetic characteristics of *Betula platyphylla* [J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(3): 209-212.
- [15] 俞继红. 3种彩叶植物的光合特性比较[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 21-25.
- Yu J H. A comparison of photosynthetic characteristics between three color-leafed plants [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(4): 21-25.
- [16] 许晨璐, 孙晓梅, 张守攻. 日本落叶松与长白落叶松及其杂种光合特性比较[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(4): 62-66.
- Xu C L, Sun X M, Zhang S G. Comparison in photosynthetic characteristics of *Larix kaempferi*, *L. olgensis* and their hybrids [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(4): 62-66.
- [17] 杨雨华, 宗建伟, 杨风岭. 3个核桃品种的光合-光响应特性[J]. 经济林研究, 2014, 32(2): 19-23.
- Yang Y H, Zong J W, Yang F L. Light response characteristics of photosynthesis in three *Juglans regia* cultivars [J]. Nonwood Forest Research, 2014, 32(2): 19-23.
- [18] 谭晓红, 彭祚登, 贾忠奎, 等. 不同刺槐品种光合光响应曲线的温度效应研究[J]. 北京林业大学学报, 2010(2): 64-68.
- Tan X H, Peng Z D, Jia Z K, et al. Influence of air temperatures on photosynthetic light-response curves of *Robinia pseudoacacia* L. [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 64-68.
- [19] 江浩, 周国逸, 黄钰辉, 等. 南亚热带常绿阔叶林林冠不同部位藤本植物的光合生理特征及其对环境因子的适应[J]. 植物生态学报, 2011, 35(5): 567-576.
- Jiang H, Zhou G Y, Huang Y H, et al. Photosynthetic characteristics of canopy-dwelling vines in lower subtropical evergreen broadleaved forest and response to environmental factors [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(5): 567-576.
- [20] 王玉佳, 姜华, 毕玉芬, 等. 紫花苜蓿光合作用对干热条件的生理响应[J]. 云南农业大学学报, 2011, 26(2): 190-193.
- Wang Y J, Jiang H, Bi Y F, et al. Photosynthesis physiological response to dry-hot environment in Alfalfa [J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2011, 26(2): 190-193.
- [21] 赵秀琴, 赵明, 陆军, 等. 热带远缘杂交水稻高光效后代在温带的光合特性观察[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 1-6.
- Zhao X Q, Zhao M, Lu J, et al. Research on photosynthetic characteristics at temperate of remote crossing progenies which present high photosynthesis at tropic [J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(3): 1-6.
- [22] 张其德, 蒋高明, 朱新广, 等. 12个不同基因型冬小麦的光合能力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 532-536.
- Zhang Q D, Jiang G M, Zhu X G, et al. Photosynthetic capability of 12 genotypes of *Triticum aestivum* [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(5): 532-536.
- [23] 曾小平, 赵平, 蔡锡安, 等. 25种南亚热带植物耐阴性的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(4): 88-95.
- Zeng X P, Zhao P, Cai X A, et al. Shade-tolerance of 25 low subtropical plants [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 88-95.
- [24] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 576-585.
- Lü P, Zhang J W, Liu W, et al. Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 576-585.

(责任编辑 田亚玲 郑琰燧)