

## 安徽省江淮丘陵地区 3 个长山核桃品种的光合特性

王陆军<sup>1</sup>, 周米生<sup>1</sup>, 蔡新玲<sup>1</sup>, 沈军城<sup>2</sup>, 肖莉<sup>3</sup>, 王辰<sup>3</sup>,  
杜杰<sup>3</sup>, 胡方伟<sup>3</sup>, 杨蓉<sup>3</sup>, 刘西军<sup>3\*</sup>

(1. 安徽省林业科学研究院, 合肥 230031; 2. 安徽省顺源农业有限公司, 合肥 231137;  
3. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

**摘要:** 为探讨安徽省江淮丘陵地区长山核桃结果期的光合特性及差异性, 利用 Li-6400 便携式光合作用测定仪对波尼(Pawnee)、马汉(Mahan)和威奇塔(Wichita) 3 个主栽品种的光合指标进行了测定。结果表明: 3 个品种的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  日变化曲线均呈不对称双峰型,  $C_i$  日变化曲线呈不规则倒“W”型;  $P_n$  日变化平均值大小依次为威奇塔>马汉>波尼, 说明威奇塔的光合利用能力要强于马汉和波尼; WUE 日变化平均值由大到小顺序依次为威奇塔、波尼及马汉, 说明马汉抗旱能力要弱于其他品种; 威奇塔的最大净光合速率 ( $A_{max}$ ) 和光饱和点 ( $L_{SP}$ ) 分别为 14.708 和 1 973.75  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 显著高于其他品种 ( $P < 0.05$ ), 光补偿点 ( $L_{CP}$ ) 则显著低于其他品种 ( $P < 0.05$ ), 表明威奇塔对光的利用范围广, 且对弱光环境的适应性强, 栽培范围广; 3 个品种的表现量子效率 ( $A_{QY}$ ) 和暗呼吸速率 ( $R_d$ ) 无显著差异性 ( $P > 0.05$ ); 相关分析和通径分析表明, 光合有效辐射 (PAR) 和大气  $\text{CO}_2$  浓度是影响 3 个长山核桃品种  $P_n$  日变化的主要因素。研究结果将帮助确定冠层光截存的最优水平, 为长山核桃结果期发展冠层管理实践提供依据。

**关键词:** 长山核桃; 光合特性; 日变化; 光合-光响应曲线; 相关性分析

中图分类号: S664.101; S718.43

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)06-0931-07

## Comparison of the photosynthetic physiological characteristics of three pecan cultivars in Jianghuai hilly region, Anhui Province

WANG Lujun<sup>1</sup>, ZHOU Misheng<sup>1</sup>, CAI Xinling<sup>1</sup>, SHEN Juncheng<sup>2</sup>, XIAO Li<sup>3</sup>, WANG Chen<sup>3</sup>,  
DU Jie<sup>3</sup>, HU Fangwei<sup>3</sup>, YANG Rong<sup>3</sup>, LIU Xijun<sup>3</sup>

(1. Anhui Academy of Forestry, Hefei 230031; 2. Anhui Shunyu Agriculture Co., Ltd., Hefei 231137;  
3. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** In order to explore the photosynthetic characteristics in fruiting period of pecan, we measured the photosynthetic indices of 10-year-old grafted pecan plants of three pecan main cultivars (Pawnee, Mahan and Wichita) grown in Jianghuai hilly region of Anhui Province using Li-6400 portable photosynthesis systems. The results were as follows. The morphological trait of net photosynthetic rate ( $P_n$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of three cultivars showed a strong asymmetric and bimodal distribution, while intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ) showed an irregular inverted "W" pattern with two peaks at 10:00 and 16:00. The order of three diurnal average values of WUE in pecan from the highest to the lowest was Wichita, Pawnee and Mahan, showing that the drought resistance of Mahan was weaker than that of other cultivars. Wichita had the maximum net photosynthetic rate ( $A_{max}$ ) and light saturation point ( $L_{SP}$ ) with 14.708 and 1 973.75  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , separately, which were significantly higher than those of the other two cultivars ( $P < 0.05$ ). However, the light compensation point ( $L_{CP}$ ) of Wichita was significantly lower than other two cultivars ( $P < 0.05$ ), which indicated that Wichita had the highest light use efficiency and photosynthetic rate under the low light environment. There was not significant difference in both apparent quantum yield ( $A_{QY}$ ) and dark respiration rate among three cultivars ( $P > 0.05$ ). The correlation analysis and path analysis showed that photosynthetically available radiation (PAR) and the  $\text{CO}_2$

收稿日期: 2020-03-17

基金项目: 十三五国家科技支撑子课题项目 (2015BAD07B050303) 资助。

作者简介: 王陆军, 博士, 助理研究员。E-mail: wanglujun1984@126.com

\* 通信作者: 刘西军, 博士, 副教授。E-mail: liuxj104@ahau.edu.cn

concentration were the main impact factors. These results would help determine the optimal levels of canopy light interception and develop canopy management practices.

**Key words:** pecan (*Carya illinoensis*); photosynthetic characteristics; diurnal variation; photosynthesis light-response curve; correlation analysis

长山核桃 [*Carya illinoensis*(Wangenh.) K. Koch], 又名薄壳山核桃、美国山核桃, 商品名为“碧根果”, 属胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya Nutt*) 植物, 原产美国和墨西哥北部, 是著名的木本油料树种和世界重要的干果树种之一<sup>[1-2]</sup>, 兼有食用、材用、观赏等特性。长山核桃坚果因可食用性已广泛栽培世界温带气候区域<sup>[3]</sup>。长山核桃具有坚果大、壳薄、出仁率高、油脂含量高及经济价值高等特点, 我国引种长山核桃栽培历史超过 100 年。长山核桃树姿挺拔、树形高大、优美且木材纹理细密, 还可作为材用树种和优良的绿化树种<sup>[2, 4]</sup>。截至 2019 年, 全国长山核桃发展规模接近 667 km<sup>2</sup>, 主要发展区域是安徽、云南和江苏等省。近几年, 国内长山核桃发展十分迅速, 已从国外采购了大量种子, 进一步推动了国外长山核桃的市场发展<sup>[5]</sup>。安徽省长山核桃规模化发展始于 2013 年, 目前发展规模占到全国栽植面积一半左右, 其中江淮丘陵地区是安徽省长山核桃发展重点区域。

作为重要的木本油料树种, 品种选择是保障经济收益的关键环节, 国内已引进和选育的长山核桃品种超过 100 个<sup>[6]</sup>, 因此, 评价各个品种在不同地区的生长表现显得尤为必要。目前, 国内栽植面积较为广泛的品种有马汉 (Mahan)、波尼 (Pawnee) 和威奇塔 (Wichita) 等。“马汉”起源于美国密西西比州, 为雌先型品种, 因具有大果型、壳薄等特点, 已作为美国长山核桃种植主要栽培种之一<sup>[7]</sup>, 我国于 1982 年将其引入浙江地区栽培, 也是最早引进的品种之一<sup>[8]</sup>。自 1930 年起, “马汉”成为美国农业部长山核桃育种计划常用的亲本之一, 其中波尼和威奇塔均是马汉的子代<sup>[1]</sup>。

光合作用是绿色植物物质积累过程, 也是植物生长发育和开花结实的基础, 可作为评价品种选育的重要指标之一<sup>[9]</sup>。关于长山核桃的不同品种光合特性研究已有一些报道<sup>[6, 10-15]</sup>, 重点是对不同品种苗期的光合生理特征进行的探讨, 但尚缺乏对区域品种结果期的光合特征研究。因此, 作者以江淮丘陵地区处于结果期的 3 个长山核桃主栽品种作为研究对象, 通过测定分析其生理指标差异性, 以期确定冠层光截存的最优水平, 为长山核桃结果期发展冠层管理实践与推广提供理论与生产依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地设置在江淮丘陵地区的合肥市长丰县青峰岭村安徽顺源农业有限公司长山核桃试验基地, 种植面积 1.33 km<sup>2</sup>, 地处北纬 32°08', 东经 117°02'。研究区地处暖温带向亚热带的过渡地带, 为亚热带湿润季风气候, 四季分明, 气候温和, 雨量适中。年平均降水量 900~1 000 mm, 年相对湿度 75%, 年均温度 15.7 °C, 年日照时效 2 400 h, 无霜期达到 230 d, 地带性土壤为粘盘黄棕壤、黄褐色土, 质地粘重, 易旱、易渍。

### 1.2 供试材料

试验材料为波尼、马汉和威奇塔 3 个品种, 2014 年造林, 造林苗木为 2+2 嫁接苗, 株行距为 4 m × 8 m, 林间套种小麦和大豆作物, 树高 6.5~7.5 m, 冠幅直径 7~8 m, 地径为 14.5~16.5 cm, 单株产量 10~15 kg, 试验基地树木实施了夏季轻剪、秋季施复合肥等日常管理措施。

### 1.3 方法

**1.3.1 光合指标测定** 2018 年 8 月 16—17 日, 天气晴朗无云, 利用 Li-6400 (LI-COR, Lincoln, USA) 便携式光合测定仪测定长山核桃光合指标。每个品种标记生长正常的 3 株作为待测株, 每株测定 5 枚树冠中层不同方向且无病虫害和完整的叶片。测定时间从 6:00 到 18:00, 每片叶隔 2 h 测定 1 次, 取平均值。光合指标有净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ), 及光合有效辐射 (PAR)、空气中的温度 ( $T_a$ )、CO<sub>2</sub> 浓度和相对湿度 (RH) 等环境因子指标。水分利用效率公式:  $WUE=P_n/T_r$ 。

**1.3.2 光响应曲线测定及拟合** 光响应曲线测定于 2018 年 8 月 17 日进行, 每株待测株测定一枚叶片, 重复 3 次, 测定时间为 9:00—12:00, 气体流量设定 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ 。采用 Li-6400 便携式光合仪 LED 红蓝光源, 设置光照强度在 0~1 800 范围内 11 个梯度, 分别为 0、20、50、100、150、200、500、800、1 000、1 500 和 1 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 每次间隔 90 s, 仪器自动记录相应的  $P_n$  值。根据直角双曲线修正模型<sup>[9]</sup>, 对最大净光合速率 ( $A_{\text{max}}$ )、光补偿点 ( $L_{\text{CP}}$ )、光饱和点 ( $L_{\text{SP}}$ )、暗呼吸速率 ( $R_d$ ) 及表观量子效率 ( $A_{\text{QY}}$ )

等光合参数进行拟合。

**1.3.3 数据统计分析** 数据统计分析运用 Excel2016 和 SPSS25.0 软件, 利用 Origin8.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 环境因子日变化

由图 1a 可知, 光合有效辐射 (PAR) 在 6:00—12:00 持续上升, 12:00 达到最大值 ( $1\ 101.5\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 在 18:00 时 PAR 值下降为  $91.4\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 接近于 6:00 时的 PAR 值。CO<sub>2</sub> 浓度变化早晨达到最高值 ( $440.7\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), 之后逐渐下

降, 在 14:00 时后, 逐渐上升 (图 1b)。大气温度 ( $T_a$ ) 日变化趋势与 PAR 变化趋势一致, 6:00 时温度最低 ( $32.6\text{ }^\circ\text{C}$ ), 12:00 时达到最高值 ( $40.6\text{ }^\circ\text{C}$ ), 之后逐渐降低, 18:00 时降到了  $36.2\text{ }^\circ\text{C}$ , 总体温度较高 (图 1c)。图 1d 反映了相对湿度 (RH) 的日变化趋势, 从 6:00 (70.4%) 至 12:00 呈下降趋势, 12:00 时降至最低值 (50.5%), 随着气温下降, RH 值略有回升, 18:00 时 RH 值为 58.9%。空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度在 6:00 达到最大值 ( $440.7\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), 之后呈现下降和升高趋势。

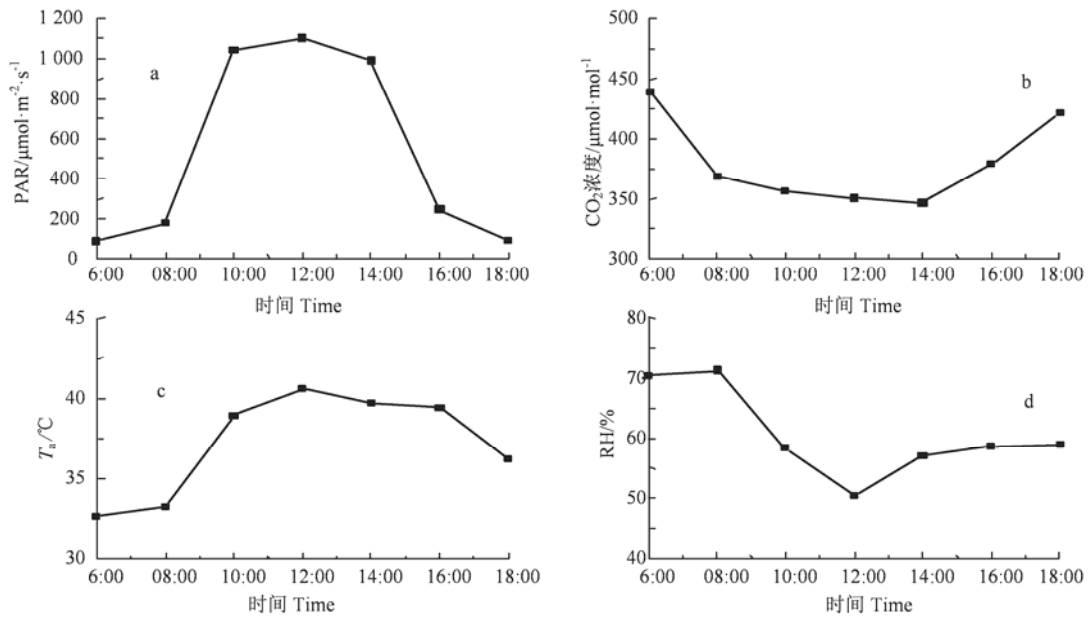


图 1 环境因子指标日变化

Figure 1 Diurnal variations of environmental factor indexes

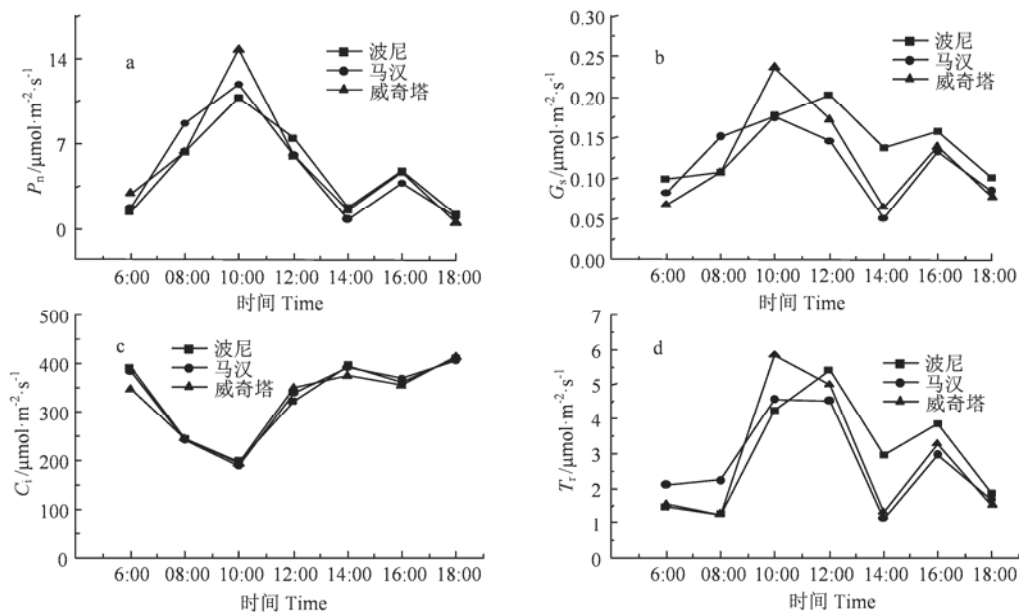


图 2 安徽江淮丘陵地区 3 个长山核桃品种光合日变化

Figure 2 Comparison of the diurnal variations of photosynthetic parameters of 3 *Carya illinoensis* cultivars in Jianghuai hilly region, Anhui Province

### 2.2 长山核桃3个品种光合参数指标的日变化比较

净光合速率 ( $P_n$ ) 是指植物总光合速率与呼吸速率的差值, 受到外界环境条件和内部因素的综合影响, 其大小反映了植物光合作用能力强弱<sup>[7]</sup>。由图 2a 可知, 3 个长山核桃品种的  $P_n$  日变化呈现不对称“双峰型”曲线, 具有明显的“光午休”现象, 与其他学者对长山核桃净光合速率日变化的研究结果基本一致<sup>[6,10]</sup>。3 个长山核桃品种的  $P_n$  值在 10:00 时出现了第一峰值, 波尼、马汉和威奇塔的峰值分别为 10.76、11.86 和 14.74  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 随着光强的增加和温度的升高, 3 个长山核桃品种  $P_n$  值下降趋势明显, 至 14:00 时,  $P_n$  值下降到一个较低状态; 不同品种在 16:00 出现了第二小峰值, 之后受到光照强度降低和 气孔导度下降的影响,  $P_n$  值逐渐下降。3 个长山核桃品种  $P_n$  日变化平均值大小依次为威奇塔 ( $5.24 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) > 马汉 ( $4.83 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) > 波尼 ( $4.81 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 说明威奇塔的光合利用能力要强于马汉和波尼。气孔导度 ( $G_s$ ) 表示气孔张开的程度, 与  $\text{CO}_2$  浓度具有一定关系, 反映了植物叶片传导能力, 其变化规律与外界环境因子变化有关, 对植物光合速率、蒸腾速率和呼吸速率具有一定影响<sup>[16-17]</sup>。图 2b 反映了波尼、马汉和威奇塔的  $G_s$  的日变化趋势, 呈双峰曲线, 其中马汉和威奇塔第一和第二峰值分别在 10:00 和 16:00 时, 而波尼的第一峰值出现在 12:00, 比马汉和威奇塔延迟 2 h 出现, 峰值低于威奇塔而高于马汉。3 个品种的胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 日变化曲线与  $P_n$  日变化曲线相反, 呈不规则的倒“W”型, 早晚高于其他时间段, 3 个品种差异不明显, 与外界  $\text{CO}_2$  浓度日变化趋势相似(图 2c)。随着温度升高、光合有效辐射增加及气孔开张程度增强,  $C_i$  在早晨保持一个较高值, 随后下降, 在 10:00 时, 此时净光合速率达到最高值,  $C_i$  值降到最低, 在 16:00 时之后, 随着光合有效辐射降低, 光合速率逐渐降低, 3 个品种出现了缓慢上升阶段。 $T_r$  表示植物叶片单位面积在一段时间蒸腾的水量, 其值大小反映植物对水分调节能力, 可以防止叶片温度承受过高的温度而造成灼烧的现象<sup>[18-19]</sup>。3 个品种蒸腾速率 ( $T_r$ ) 日变化曲线呈双峰型, 在 6:00 后, 随着温度升高和空气湿度下降, 蒸腾作用增强, 威奇塔和马汉在 10:00 达到最高值, 分别为 5.8 和 4.5  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 波尼在 12:00 达到了峰值 ( $5.39 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 其值低于威奇塔高于马汉, 在 16:00 时, 3 个品种达到了第 2 个峰值, 之后随着光照强度减弱、温度降低和湿度增加,  $T_r$  逐渐下降。

### 2.3 水分利用效率日变化 (WUE)

不同长山核桃品种 WUE 日变化曲线结果 (图 3) 显示, 3 个长山核桃的 WUE 日变化趋势相似, 在 8:00 时均达到最高值, 原因是此时由于光照强度增强、温度逐渐升高、气孔导度较低、空气相对湿度较大、蒸腾速率处于低水平及净光合速率增加较快。之后随着光照强度增加、温度上升、空气相对湿度下降及蒸腾速率上升等原因, WUE 值明显下降, 16:00 时略有回升, 随后呈下降趋势。3 个品种 WUE 日变化平均值由大到小顺序依次为威奇塔 ( $1.93 \mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ )、波尼 ( $1.77 \mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ ) 及马汉 ( $1.60 \mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ )。

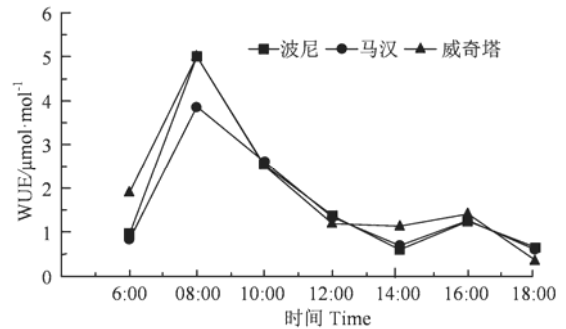


图 3 江淮丘陵地区 3 个长山核桃品种水分利用效率日变化  
Figure 3 The diurnal variations of water use efficiencies of 3 pecan cultivars in Jianghuai hilly region

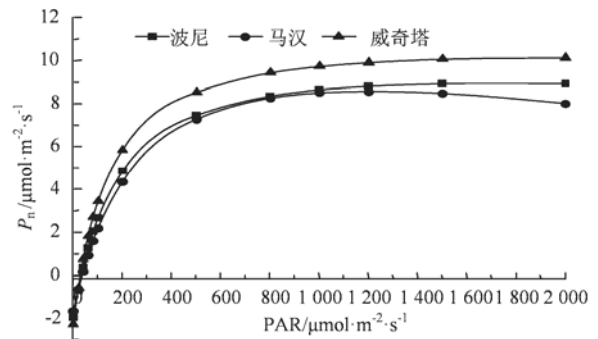


图 4 江淮丘陵地区 3 个长山核桃光响应曲线  
Figure 4 Light response curves of 3 *Carya illinoensis* cultivars in Jianghuai hilly region

### 2.4 长山核桃光响应曲线的比较

处于结果期的 3 个长山核桃品种的光响应曲线如图 4 所示: 3 个品种的光响应曲线变化趋势基本一致, 在光合有效辐射小于  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $P_n$  值与 PAR 呈线性关系, 随着光合有效辐射增强,  $P_n$  值迅速增加, 当 PAR 超过  $1000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时,  $P_n$  值的上升趋势趋于平缓。由图 4 可知, 当 PAR 大于  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 威奇塔品种的  $P_n$  值一直高于马汉和波尼品种, 说明威奇塔对光的利用能力强于其

他 2 个品种, 更适合在光照资源丰富的地区栽培。当 PAR 大于  $1\ 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 马汉的光响应曲线出现向下弯曲趋势, 可能达到了光饱和, 出现光抑制现象。

3 个长山核桃品种的光合-光响应特征参数见表 1。表观量子效率 ( $A_{\text{QY}}$ ) 指标反映植物叶片在弱光条件下的光合能力, 而暗呼吸速率 ( $R_{\text{d}}$ ) 与叶片的生理活性有关<sup>[20]</sup>。威奇塔的  $A_{\text{QY}}$  和  $R_{\text{d}}$  值均高于其他 2 个品种, 威奇塔的  $A_{\text{QY}}$  和  $R_{\text{d}}$  比马汉分别高 30.23% 和 26.67%, 但 3 个品种间的  $A_{\text{QY}}$  和  $R_{\text{d}}$  无显著差异 ( $P>0.05$ )。最大净光合速率 ( $A_{\text{max}}$ ) 反映了叶片最大光合能力, 威奇塔的  $A_{\text{max}}$  值为  $14.71\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

波尼和马汉分别为  $9.82$  和  $8.57\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 波尼和马汉无显著差异 ( $P>0.05$ ), 分别与威奇塔呈显著差异 ( $P<0.05$ )。光补偿点 ( $L_{\text{CP}}$ ) 和光饱和点 ( $L_{\text{SP}}$ ) 反映植物叶片对强光和弱光的利用能力, 光饱和点低、光补偿点高的植物对光强的适应范围窄, 而光饱和点高、光补偿点低的植物对光强的适应范围宽<sup>[6]</sup>。由表 1 可知, 威奇塔的  $L_{\text{CP}}$  和  $L_{\text{SP}}$  与波尼和马汉存在显著差异, 其  $L_{\text{SP}}$  值高于其他两个品种, 而  $L_{\text{CP}}$  低于波尼和马汉, 说明威奇塔对强光和弱光利用范围宽, 马汉的  $L_{\text{CP}}$  和  $L_{\text{SP}}$  分别为  $36.793$  和  $1\ 208.710\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 其中  $L_{\text{CP}}$  值在 3 个品种最高, 而  $L_{\text{SP}}$  最低, 说明马汉的光强适应范围比波尼和威奇塔窄。

表 1 3 个长山核桃品种的光合-光响应特征参数比较

Table 1 Comparative study on the parameters of photosynthetic-light response of 3 pecan cultivars

品种 Cultivar	表观量子效率 $A_{\text{QY}}$	最大净光合效率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ $A_{\text{max}}$	暗呼吸速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ $R_{\text{d}}$	光补偿点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ $L_{\text{CP}}$	光饱和点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ $L_{\text{SP}}$
波尼 Pawnee	$0.03\pm 0.002^{\text{a}}$	$9.82\pm 0.805^{\text{a}}$	$1.95\pm 0.044^{\text{a}}$	$34.70\pm 2.071^{\text{a}}$	$1\ 733.48\pm 98.913^{\text{a}}$
马汉 Mandan	$0.03\pm 0.003^{\text{a}}$	$8.57\pm 0.669^{\text{a}}$	$1.64\pm 0.203^{\text{a}}$	$36.79\pm 6.219^{\text{a}}$	$1\ 208.71\pm 65.146^{\text{a}}$
威奇塔 Wichita	$0.04\pm 0.007^{\text{a}}$	$14.71\pm 1.129^{\text{b}}$	$2.24\pm 0.282^{\text{a}}$	$29.79\pm 2.213^{\text{b}}$	$1\ 973.75\pm 100.543^{\text{b}}$

注: 同列不同小写字母表示不同品种在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercases at the same column refer to significant difference among different cultivars at the 0.05 level.

表 2 3 个长山核桃品种的净光合速率与生态因子相关性和通径分析

Table 2 Correlation coefficients and path analyses of net photosynthetic rates of 3 pecan cultivars and ecological factors

品种 Cultivar	相关系数 Correlation coefficient				直接通径系数 Direct path coefficient				
	光辐射 PAR	气温 $T_{\text{a}}$	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> content	相对湿度 RH	决定系数 $R^2$	光辐射 PAR	气温 $T_{\text{a}}$	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> content	相对湿度 RH
波尼	0.88*	0.35	-0.86*	-0.26	0.95	0.37	0.35	0.04	0.15
马汉	0.74*	0.08	-0.89*	0.22	0.96	0.43	0.03	-0.72	0.02
威奇塔	0.73*	0.21	-0.86*	-0.04	0.97	0.26	0.25	-0.85	-0.06

\*  $P<0.05$ .

## 2.5 净光合速率与生态因子的关系

3 个江淮丘陵地区长山核桃品种不同时间段的净光合速率 ( $P_{\text{n}}$ )、光合有效辐射 (PAR) 与大气温度 ( $T_{\text{a}}$ )、大气 CO<sub>2</sub> 浓度及大气相对湿度 (RH) 4 个生态因子的相关分析与通径分析结果 (表 2) 显示, 3 个品种的  $P_{\text{n}}$  与 PAR、大气 CO<sub>2</sub> 浓度分别呈显著正相关和显著负相关 ( $P<0.05$ ), 而与气温、相对湿度相关性未达到显著水平。通径分析表明, 线性回归模型的决定系数在 0.95~0.97, 说明除了 4 个生态因子外, 尚有其他因素对净光合速率产生影响。3 个品种的 PAR 与大气温度的直接通径系数均为正值, 除了马汉外, 二者基本接近。大气 CO<sub>2</sub> 浓度的直接通径系数 (波尼为正值) 多为负数, 大气湿度 RH 的通径系数 (威奇塔为负值) 多为正值, 但相对均较小。因此, PAR 和大气 CO<sub>2</sub> 浓度对净光

合作用速率影响最大。

## 3 讨论与结论

已有研究表明, 不同长山核桃品种的光合作用日变化与光合光响应曲线在相同的外界条件或不同地理区域上存在一定的差异性, 这可能与品种长期对外界的环境适应及基因型差异有关<sup>[6, 21-22]</sup>。光合作用日变化曲线大致有 3 种类型: 单峰曲线、双峰曲线和三峰曲线<sup>[23]</sup>。从图 2 中可以看出, 3 个品种的  $P_{\text{n}}$ 、 $G_{\text{s}}$  和  $T_{\text{r}}$  指标的日变化曲线呈不规则的双峰型,  $C_{\text{i}}$  日变化曲线呈不规则倒“W”型;  $P_{\text{n}}$ 、 $G_{\text{s}}$  和  $T_{\text{r}}$  3 个指标呈明显的正相关性, 均与  $C_{\text{i}}$  呈负相关。从 3 个品种光合参数指标日变化结果中可以看出,  $P_{\text{n}}$  日变化平均值大小依次为威奇塔>马汉>波尼, 说明威奇塔的光合利用能力要强于马汉和波尼。3

个品种均在 14:00 时出现了明显的“午休”现象是植物对外界环境做出的生理反应,主要是由于中午时刻的光强和温度过高,导致叶片胞间  $\text{CO}_2$  迅速下降及气孔关闭的自我保护,这与以往研究者对长山核桃的研究结果相似<sup>[6,10]</sup>。光合作用的限制因子受到气孔和非气孔限制,当气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  同时下降时,气孔限制引起净光合速率的下降,如果胞间  $\text{CO}_2$  浓度升高,净光合速率值下降,则非气孔因素限制了光合作用<sup>[24]</sup>。根据 3 个品种的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $C_i$  日变化可知,在  $P_n$  降低的过程中,伴随  $G_s$  下降和  $C_i$  升高,说明 3 个长山核桃品种在中午时刻的  $P_n$  下降受到气孔和由叶肉细胞活性变化的非气孔因素限制<sup>[23]</sup>,安徽省江淮丘陵地区在夏季易出现干旱和高温天气。因此,在长山核桃管理中合理喷灌,可有效调节外界环境因子,减轻“午休”现象,提高光合效率和树体营养物质的积累,利于长山核桃生长发育和提高效益。

光合-光响应曲线是反映光照强度对光合速率影响的曲线。目前,常用直角双曲线、非直角双曲线和直角双曲线修正等模型来模拟植物光响应曲线,并用来估算光饱和点、光补偿点、净最大光合速率、暗呼吸速率和表观量子效率等生理指标。不同模型各有优缺点,如直角曲线和非直角曲线模型在估算受到光抑制的树种时,最大净光合速率偏大和光饱和点偏低,而直角双曲线修正模型可以更好的估算出光饱和点<sup>[25-26]</sup>。本试验采用直角双曲线修正模型所获得结果能较好地模拟 3 个长山核桃品种的光合-光响应曲线,这与李晓锐等人对长山核桃不同品种光响应模型拟合结果相一致<sup>[12]</sup>。由图 2 和表 2 可知,最大净光合速率和光饱和点以威奇塔最高,波尼次之,马汉最低。最大净光合速率和光饱和点是用来反映植物在强光下的光合效率<sup>[21]</sup>,可见威奇塔对强光的适应能力较强。表观量子效率和光补偿点是反映植物对弱光的利用能力的指标<sup>[6]</sup>。由表 2 还可知,威奇塔的表现量子效率高于波尼和马汉,而光补偿点低于波尼和马汉,说明威奇塔利用弱光能力强,结合最大净光合速率和光饱和点指标,威奇塔的光利用范围比波尼和马汉要宽,能较好地适应强光和弱光环境。何海洋等<sup>[6]</sup>对威奇塔、波尼和马汉等 5 个品种一年生嫁接苗光合特性研究中得出马汉的最大净光合速率和光饱和点高于威奇塔和波尼,这与本次试验结果不一致,可能原因是所测的环境条件和树龄不一样。2018 年安徽省江淮丘陵地区自 7 月份持续高温干旱 3~4 个月,通过调研发现,10 年油茶林分死亡率达到 70%,长山核桃出现不同

程度的落果现象,而干旱会导致植物叶片叶肉细胞膜损伤、叶绿素含量下降及光合系统损伤,从而使植物的光合速率下降<sup>[27]</sup>。水分利用效率(WUE)可以作为一个有效的抗旱性指标,WUE 越高,说明植物抗旱性能越强<sup>[28]</sup>。由图 3 可知,马汉的 WUE 低于威奇塔和波尼,说明马汉的抗旱能力较低,可能对马汉的光合速率产生较大影响。李永荣等<sup>[29]</sup>对南京地区 3 个品种果实形状进行分析,发现马汉(11.36 g)的单果重要远远高于威奇塔(7.72 g)和波尼(7.10 g),其中马汉对水肥要求更高,水分不足易导致大量落果和形成大小年现象<sup>[8]</sup>。后续可以通过合理灌溉及研究相关土壤理化性质来进一步分析不同品种的光合效率。

对 3 个长山核桃品种不同时间段的  $P_n$  与 PAR、 $T_a$ 、RH 及大气  $\text{CO}_2$  浓度进行相关分析和通径分析。结果表明,除了 4 个因素外,其他因素对  $P_n$  有一定影响,其中 PAR 和大气  $\text{CO}_2$  浓度对 3 个品种的  $P_n$  影响较大,为主要影响因子。

综上所述,通过对江淮丘陵地区的长山核桃 3 个品种的光合日变化、光合-光响应曲线及与 4 个生态因子关系研究,发现 3 个品种在光合特性上存在一定差异性,威奇塔对光的利用范围比马汉和波尼宽,并且光的利用能力也强于马汉和波尼,更适应于江淮丘陵地区气候和土壤条件。因此,今后需综合考虑土壤基本理化性质、水肥管控、树体管控、环境条件因素及遗传基因等方面研究植物的光合生理特性。

## 参考文献:

- [1] SPARKS D. Pecan cultivars: the orchard's foundation [J]. Pecan Production Innovations, 1992, 30(9): 443.
- [2] 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.
- [3] WAKELING L T, MASON R L, BRUCE R, et al. Composition of pecan cultivars Wichita and Western Schley [*Carya illinoensis*(Wangenh.) K. Koch] grown in Australia [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49(3):1277-1281.
- [4] 米沛,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.
- [5] MAROZZI G, SÁNCHEZ S, BENUCCI G M N, et al. Mycorrhization of pecan (*Carya illinoensis*) with black truffles: *Tuber melanosporum* and *Tuber brumale*[J]. Mycorrhiza, 2016, 27(3): 303-309.
- [6] 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): 22-28.
- [7] THOMPSON T E, CONNER P J. Pecan[M]//Fruit breeding. Boston, MA: Springer US, 2011: 771-801.

- [8] 张瑞, 李永荣, 彭方仁. 薄壳山核桃品种“马汉”的栽培适应性及其评价[J]. 经济林研究, 2013, 31(2): 184-188.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 凌骅, 黄坚钦, 温国胜, 等. 5 种美国山核桃苗叶片光合生理特性比较[J]. 林业科学, 2014, 50(8): 174-178.
- [12] 李晓锐, 刘壮壮, 孔德仪, 等. 薄壳山核桃不同品种光响应过程及模型拟合[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(5): 42-48.
- [13] LOMBARDINI L, RESTREPO-DIAZ H, VOLDER A. Photosynthetic light response and epidermal characteristics of Sun and shade pecan leaves[J]. J Amer Soc Hort Sci, 2009, 134(3): 372-378.
- [14] 杨标, 刘壮壮, 彭方仁, 等. 干旱胁迫和复水下不同薄壳山核桃品种的生长和光合特性[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 991-998.
- [15] 李健, 凌骅, 杨先裕, 等. 美国引进的 6 个薄壳山核桃品种光合生理特性比较[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(2): 258-262.
- [16] 韩永伟, 拓学森, 高馨婷, 等. 阿拉善荒漠草原梭梭与白刺光合特征比较研究[J]. 草地学报, 2010, 18(3): 314-319.
- [17] 杨模华, 李志辉, 黄丽群, 等. 银杏光合特性的日变化[J]. 经济林研究, 2004, 22(4): 15-18.
- [18] 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.
- [19] 马艺杰, 苏世平, 李毅. 不同核桃品种光合参数比较[J]. 中国农学通报, 2019, 35(5): 64-69.
- [20] 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.
- [21] 李永华, 张开明, 于红芳. 10 个秋菊品种的光合特性及净光合速率与部分生理生态因子的相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2012, 21(1): 70-76.
- [22] 周强, 胡淑宝, 王青青, 等. 6 种生态型香根草光合光响应特征及光合参数日变化的比较[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 690-696.
- [23] 袁军, 袁德义, 谭晓风, 等. 海南油茶 5 个无性系光合特性比较研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(5): 1-6.
- [24] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annu Rev Plant Physiol, 1982, 33(1): 317-345.
- [25] 刘强, 李凤日, 谢龙飞. 人工长白落叶松冠层光合作用-光响应曲线最优模型[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2420-2428.
- [26] 张赟齐, 高世轮, 卫星杓, 等. 光合模型对无患子叶片光合响应参数计算结果的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 36-44.
- [27] 陈梦园, 李迎超, 王利兵, 等. 2 个种源栓皮栎对干旱及复水的光合生理响应[J]. 生态学杂志, 2019, 38(10): 2950-2958.
- [28] 刁凯, 李宏, 程平, 等. 不同枣树品种光合特性日变化测定与分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1296-1301.
- [29] 李永荣, 刘永芝, 翟敏, 等. 薄壳山核桃品种果质性状变异及选择改良研究[J]. 江苏林业科技, 2011, 38(3): 6-11.