

修枝促接干对泡桐光合特性影响的研究*

王保平^{1,2}, 李吉跃², 乔杰¹, 文瑞均¹, 周海江¹, 胡昊²

(1 国家林业局泡桐研究开发中心, 河南 郑州 450003 2 北京林业大学资源与环境学院, 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用 Li6400 光合分析系统, 对修枝接干和对照泡桐不同冠层、不同方位叶片在不同光量子密度条件下的净光合速率 (P_n) 进行测定, 并采用经验方程对其光反应曲线进行拟合, 结果表明: (1) 修枝接干可明显提高泡桐植株整体的光合潜力和适应强光环境的能力, 其最大光合速率 (P_{max})、光饱和点 (LSP)、光补偿点 (LCP) 和光合幅度 (PR) 在修枝后分别达 $23.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.966.58 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $53.88 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.911.71 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 较对照分别高 11.85%、15.61%、29.06%、15.21%。(2) 修枝接干对泡桐诸光合指标的影响在树冠下层明显大于上层, 并且使其上下冠层之间的差异性显著减小。修枝后泡桐下层树冠的 P_{max} 、LSP、LCP、PR 较对照分别高 27.70%、36.74%、34.22%、36.80%, 而上层差异不显著。(3) 修枝接干对处于不同方位泡桐叶片的光合特性的影响在不同冠层具有不同程度的体现。在树冠上层的阳位与阴位间, 修枝接干后的 P_{max} 、LSP、LCP 和 PR 分别较对照有所提高, 但均不显著; 而在树冠下层, 修枝接干后其阳位叶的 P_{max} 、LSP、LCP 和 PR 分别较对照高 21.80%、39.02%、28.72% 和 39.26%, 阴位叶分别较对照高 42.18%、39.35%、48.70% 和 39.13%, 除了 LCP 在二处理间阳位的差异不显著外, 其余的差异性均显著。

关键词: 泡桐; 修枝接干; 光合速率

中图分类号: S718.3 文献标识码: A

Study on Effects of Pruning to Promote Trunk Extension on Photosynthetic Characteristics of Paulownia

WANG Bao ping^{1,2}, LI Ji yue², QIAO Jie¹, WEN Rui jun¹, ZHOU Hai jiang¹, HU Hao²

(1 Research and Development Center of Paulownia, State Forestry Administration, Zhengzhou 450003, Henan, China

2 College of Forestry Resource and Environment, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Using Li6400 portable photosynthesis system, the photosynthetic rate of various crowns and directions of paulownia of two treatments, responding to different photosynthetic photon flux density, were measured. Fitting and regression analysis with the equation $P_n = P_{max} (1 - C_0 e^{-\alpha PPF/D/P_{max}})$, the parameters were calculated and studied. The result showed (1) Technique of pruning to promote trunk extension could improve photosynthetic capacity and adaptive abilities of paulownia to deal with light surroundings. The max photosynthetic rate (P_{max}), light saturation point (LSP), light compensate point (LCP) and photosynthetic range (PR) of pruned paulownia were $23.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.966.58 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $53.88 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1.911.71 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Comparisons with the control, the value of the above parameters was 11.85%, 15.61%, 29.06%, 15.21% higher. (2) Technique of pruning to promote trunk extension had greater effect on lower crown than upper and made the differ

收稿日期: 2006-03-03

基金项目: “十五”国家科技攻关课题 (2002BA515B03) 部分研究内容

作者简介: 王保平 (1965-), 男, 河南新野人, 北京林业大学博士, 研究员。主要研究方向: 森林培育。地址: 河南省郑州市纬五路 3 号, 国家林业局泡桐研究开发中心, 邮编: 450003 电话: 0371-65833625, E-mail: bpingwan@sina.com

* 本研究承蒙李宗然研究员指导, 特致谢意!

ence between the two crowns shortened P_{max} , LSP, LCP and PR of lower crown of pruned paulownia were 27.70%, 36.74%, 34.22% and 36.80% higher than that of the control. But there was no significant difference between two treatments in the upper crown. (3) Effects of pruning to promote trunk extension on photosynthetic characteristics of various directions among the crowns were different. The parameters of P_{max} , LSP, LCP and PR of pruned shade leaves and sun leaves of upper crown were higher than that of the control. But all of them were not significant different. In the lower crown of paulownia P_{max} , LSP, LCP and PR of the treated sun leaves were 21.80%, 39.02%, 28.72% and 39.26% higher than that of the control and that of the treated shade leaves were 42.18%, 39.35%, 48.70% and 39.13% higher than that of the control. Except LCP, the differences of all the parameters between the two treatments were significant.

Key words paulownia pruning to promote trunk extension photosynthetic rate

光合特性是植物利用太阳光能进行光合作用和积累干物质能力的重要反映。目前,国内外许多学者对多种植物的光合特性进行了大量研究^[1-6],但对泡桐光合特性及其受培育措施影响的研究尚少见报道,仅有的报道也多限于对苗期的部分研究^[7-9]。泡桐是我国重要的优质、速生、多用途树种,在我国农林业生产、生态工程和出口创汇方面一直发挥着十分重要的作用。但由于泡桐的假二叉分枝特性及生长和冠形特点,其主干的自然延长和通直度常受到很大的限制,干形培育技术及其生理机理的研究也因此一直成为泡桐研究的重要课题^[10-11]。笔者的前期研究表明,在适当树龄修除顶部分杈枝和部分下层枝是促进泡桐接干生长和培育高干通直无节材的极有效的措施,并根据其对干、枝、叶生长的影响确定出适宜的起始修枝树龄和强度^[12-15]。本研究旨在分析采用该技术措施对泡桐不同冠层、不同方位叶片光合特性的影响,为揭示修枝促接干技术的光合作用机理提供重要依据。

1 试验地概况

试验地位于河南省商丘市梁园区国有林场, $34^{\circ}33'18''\sim 34^{\circ}34'28''$ N, $115^{\circ}34'44''\sim 115^{\circ}40'53''$ E,属暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,年平均气温 14.1°C ,极端最高、最低气温分别为 43.6°C 、 -13.9°C ,年平均降水量和蒸发量分别为 711.9mm 、 1756mm ,无霜期 213d ,土壤由黄河泛滥泥沙沉积形成,属粉沙土,以中孔隙为主,土壤密度 $1.40\sim 1.51\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,保水保肥性能差,地下水位 $1.5\sim 3.0\text{m}$; pH 值 $8.2\sim 9.2$,有机质、全 N、速效 P 含量分别为 $1.30\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.25\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $3.40\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验林采用豫林一号泡桐 (*Paulownia*

fortunei Yulinensis 1' Wang) 1年生苗于 1997年春营造,栽植株行距 $5\text{m}\times 6\text{m}$,1999年3月采用不同强度修除顶部分杈枝和部分下层枝的方法进行修枝促接干,其接干的高、径、接干形率在修枝当年分别达 5.7m 、 10.4cm 、 0.59 。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验设计

试验采用修枝接干(修除原主干顶部分杈枝和部分下层枝以促进接干发育和生长、保留 2~8枝、修枝强度平均 53.6%)和对照(未修枝)二种处理,各选取泡桐标准木 7株。根据泡桐冠形特点将树冠划分为上层和下层,对修枝接干处理,将新接干部分作为树冠上层,原苗干部分作为树冠下层;对对照处理,将苗干顶部分杈枝作为树冠上层,其下部分作为树冠下层。在方位确定上,由于测定时间在晴朗上午的 9:00—11:00,因此将树冠的东、南向定为阳位,西、北向定为阴位;在每一方位分别选取标准枝,测定其第 3~5轮叶片(由枝顶数起)的光合特性。

2.2 研究方法

2.2.1 测定方法 在修枝接干当年的 5—8月,采用 Li6400光合分析系统,在 $0\sim 2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光量子通量密度 (PPFD) 范围内,设定 $0, 10, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 等 9个梯度,分别处理、冠层和方位,测定净光合速率 ($P_n, \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 和相关参数(包括蒸腾速率、水分饱和亏缺、温度、湿度、 CO_2 浓度等)。

2.2.2 分析方法 数据处理和分析采用 Excel-2003和 SPSS12.0软件。

为避免环境因子对净光合速率 P_n 与 PPFD 之间关系的影响,参与统计分析的不同处理、冠层和方位的净光合速率均控制统一的温度(叶面温度 $30.0\pm$

2.0°C)、CO₂浓度 (380.0 ± 10.0 μmol·mol⁻¹) 和叶面水分饱和亏缺 (1.0 ± 0.1 kPa)。

不同部位叶片的净光合速率 P_n 与 PPFD 之间的关系 (光响应曲线) 采用经验方程 (1) 进行拟合^[16, 17]:

$$P_n = P_{max} (1 - C_0 e^{-aPPFD/P_{max}}) \quad (1)$$

上式中, P_{max} 代表最大净光合速率 (μmol·m⁻²·s⁻¹), a 和 C_0 为一度量弱光下净光合速率趋近于零的常数, $PPFD$ 为光量子通量密度 (μmol·m⁻²·s⁻¹), P_n 为特定 PPFD 条件下的净光合速率 (以下简称光合速率)。

通过适合性检验, 若方程良好 (达到 95% 显著水平), 则可用方程 (2)、(3) 和 (4) 分别计算光补偿点 (LCP, μmol·m⁻²·s⁻¹), 光饱和点 (LSR, μmol·m⁻²·s⁻¹) 和光合幅度 (PR, μmol·m⁻²·s⁻¹):

$$LCP = P_{max} \ln(C_0) / a \quad (2)$$

$$LSP = P_{max} \ln(100C_0) / a \quad (3)$$

$$PR = LSP - LCP \quad (4)$$

3 结果与分析

修枝接干对泡桐光合特性的影响主要表现在反映其光合作用能力高低的 P_{max} 、LSP 和 LCP 等 3 个光合特征参数上, 其中, P_{max} 、LSP 表示植物利用强光的能力, LCP 是植物利用弱光能力的标志。由于修枝接干对泡桐植株整体、不同冠层、不同方位叶片的生长和发育的影响不同, 从而使其对泡桐光合特性的影响在上述诸层面上表现出不同的特点。

3.1 修枝接干对泡桐植株总体光合特性的影响

分别修枝接干和对照处理, 对按控制条件各选定的 28 套 P_n 与 PPFD 关系数据分别进行拟合和分析的结果表明, 二种处理泡桐叶片的 P_n -PPFD 曲线均可采用方程 (1) 给予很好的拟合 (见图 1), 修枝接干使泡桐叶片的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 均有不同程度的提高。

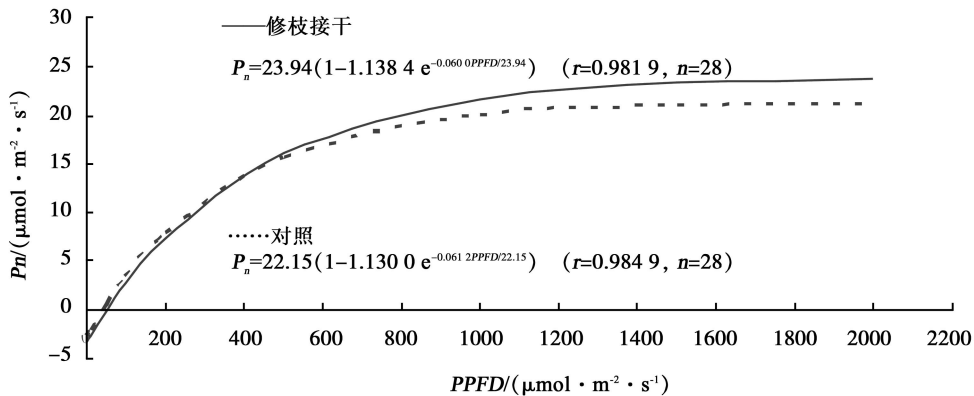


图 1 修枝接干对泡桐植株总体光合速率 (P_n) 与光量子通量密度 (PPFD) 关系的影响

其中, 反映泡桐光合潜力的 P_{max} 在修枝接干后平均达 23.93 μmol·m⁻²·s⁻¹, 较对照提高 11.85%; 反映泡桐利用光合有效辐射能力及范围的 LSR、LCP、PR 在修枝接干后分别平均达 1966.58、53.88、1911.71 μmol·m⁻²·s⁻¹, 与对照相比, 分别提高 15.61%、29.06%、15.21%。

由此可以看出, 泡桐有着较高的 LSR、较低的 LCP、较宽的 PR, 说明其是一强阳性树种, 同时又有较强的利用弱光的能力; 修枝接干对这些指标的影响表明泡桐在修枝后适应和利用光环境的能力有所提高, 尽管修枝后使其总叶面积平均降低幅度达 20.59%^[14], 但总光合产物生产却仅有约 11% 的减低, 并且使光合产物的分配向着有利于主干生长的

方面发展。

3.2 修枝接干对不同冠层光合特性的影响

对 56 套 P_n 与 PPFD 的关系曲线分别按其所属处理 (修枝接干和对照) 和冠层 (上、下) 进行分组, 并对其诸光合指标进行求解和统计分析, 表明修枝接干对泡桐诸光合指标的影响在树冠上层和下层有着相同的趋势, 但在影响显著性上存在明显差异 (见表 1)。

对泡桐上层树冠来说, 修枝接干处理的 P_{max} 、LSR、LCP、PR 等光合指标在该冠层内的变异系数与对照相比均有一定程度的降低。但从各光合指标的平均值来看, 修枝接干处理的 P_{max} 达 25.34 μmol·m⁻²·s⁻¹ 与对照相比仅高 0.72%, 修枝接干的

LSP、LCP、PR 分别达 2 096.57、66.83、2 029.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 较对照分别高 1.75%、26.11% 和 1.11%, 除 LCP 外, 其它光合指标在 2 处理之间均无

显著差异。由此可以看出, 修枝接干有降低上层树冠各光合指标冠内差异性的趋势, 但对其 P_{max} 、LSP、PR 水平的的影响在修枝接干当年尚无显著体现。

表 1 不同冠层泡桐光合指标求解和统计分析结果

| 参数 | 冠层 | 修枝接干处理 | | | 对照处理 | | | 差异 % | t 检验 |
|--|----|----------|--------|--------|----------|--------|--------|-------|--------|
| | | 平均 | 标准差 | 变异系数 % | 平均 | 标准差 | 变异系数 % | | |
| $P_{\text{max}} / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 上层 | 25.34 | 2.45 | 9.69 | 25.16 | 4.24 | 16.86 | 0.72 | 0.133 |
| | 下层 | 22.53 | 3.06 | 13.59 | 17.64 | 3.40 | 19.28 | 27.70 | 3.854* |
| LSP / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 2 096.57 | 422.53 | 20.15 | 2 060.48 | 508.24 | 24.67 | 1.75 | 0.197 |
| | 下层 | 1 834.58 | 421.61 | 22.98 | 1 341.66 | 286.30 | 21.34 | 36.74 | 3.487* |
| LCP / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 66.83 | 25.32 | 37.88 | 53.00 | 20.15 | 38.03 | 26.11 | 1.541 |
| | 下层 | 40.92 | 13.06 | 31.91 | 30.49 | 8.67 | 28.43 | 34.22 | 2.399* |
| PR / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 2 029.74 | 401.64 | 14 | 2 007.48 | 501.33 | 24.97 | 1.11 | 0.125 |
| | 下层 | 1 793.67 | 417.96 | 23.30 | 1 311.17 | 290.12 | 22.13 | 36.80 | 3.419* |

对泡桐下层树冠来说, 修枝接干处理的 P_{max} 平均达 22.53 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 与对照相比有极显著性提高, 提高幅度高达 27.70%, 并且在层内差异性上有一定程度降低的趋势; 从 LSP、LCP、PR 等 3 个光合指标来看, 修枝接干处理的分别平均达 1 834.58、40.92、1 793.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 较对照分别提高 36.74%、34.22%、36.80%, 均达极显著差异水平。由此可以看出, 修枝接干对泡桐下层树冠各光合指标的影响在修枝接干当年已得以显著体现。

从修枝接干和对照二种处理各自上、下冠层间的差异性情况来看, 修枝接干处理上层的 P_{max} 、LSP、LCP 和 PR 较其下层的分别高 12.47% ($t=2.585^*$ 、

自由度 $f=12$)、63.32% ($t=3.279^*$ 、 $f=12$)、14.28% ($t=1.583$ 、 $f=12$) 和 13.16% ($t=1.468$ 、 $f=12$); 而对照上层的 P_{max} 、LSP、LCP 和 PR 较其下层的分别高 42.63% ($t=4.989^*$ 、 $f=12$)、73.83% ($t=3.700^*$ 、 $f=12$)、53.58% ($t=4.443^*$ 、 $f=12$) 和 53.11% ($t=4.334^*$ 、 $f=12$), 均达极显著差异水平。由差异和差异性 t 值可以看出, 修枝接干使得各光合指标在上、下冠层之间的差异性显著减小。

3.3 对不同方位泡桐叶片光合特性的影响

分别处理(修枝接干和对照)、冠层(上层和下层)和方位(阳位和阴位), 对其诸光合指标进行分析表明, 修枝接干对处于不同方位泡桐叶片的光合特性的影响在不同冠层具有不同程度的体现(见表 2)。

表 2 泡桐不同方位光合指标求解和统计分析结果

| 指标 | 冠层 | 方位 | 修枝接干处理 | | | 对照处理 | | | 差异 % | t 检验 |
|--|----|----|----------|--------|--------|----------|--------|--------|-------|--------|
| | | | 平均 | 标准差 | 变异系数 % | 平均 | 标准差 | 变异系数 % | | |
| $P_{\text{max}} / (\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ | 上层 | 阳位 | 26.68 | 2.58 | 9.68 | 27.67 | 2.75 | 9.95 | -3.73 | 0.646 |
| | | 阴位 | 24.00 | 1.86 | 7.75 | 21.64 | 3.37 | 15.56 | 10.92 | 1.504 |
| | 下层 | 阳位 | 23.19 | 3.10 | 13.37 | 19.04 | 3.52 | 18.47 | 21.80 | 2.168* |
| | | 阴位 | 21.77 | 2.83 | 13.00 | 15.31 | 1.24 | 8.12 | 42.18 | 5.116* |
| LSP / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 阳位 | 2 276.92 | 432.05 | 18.98 | 2 199.73 | 518.02 | 23.55 | 3.51 | 0.280 |
| | | 阴位 | 1 916.23 | 389.88 | 20.35 | 1 865.53 | 423.21 | 22.69 | 2.72 | 0.216 |
| | 下层 | 阳位 | 1 997.51 | 507.50 | 25.41 | 1 436.90 | 317.19 | 22.07 | 39.02 | 2.294* |
| | | 阴位 | 1 648.38 | 146.79 | 8.91 | 1 182.92 | 102.91 | 8.70 | 39.35 | 6.359* |
| LCP / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 阳位 | 74.14 | 26.92 | 36.31 | 55.38 | 19.62 | 35.43 | 33.87 | 1.379 |
| | | 阴位 | 59.52 | 25.13 | 42.22 | 49.65 | 20.41 | 41.10 | 19.88 | 0.747 |
| | 下层 | 阳位 | 42.43 | 16.82 | 39.64 | 32.97 | 9.21 | 27.92 | 28.72 | 1.209 |
| | | 阴位 | 39.18 | 6.02 | 15.36 | 26.35 | 5.64 | 21.39 | 48.70 | 3.811* |
| PR / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) | 上层 | 阳位 | 2 202.78 | 406.71 | 18.46 | 2 144.35 | 513.35 | 23.94 | 2.72 | 0.219 |
| | | 阴位 | 1 856.71 | 372.41 | 20.06 | 1 815.88 | 413.93 | 22.79 | 2.25 | 0.180 |
| | 下层 | 阳位 | 1 955.08 | 502.86 | 25.72 | 1 403.93 | 323.84 | 23.07 | 39.26 | 2.257* |
| | | 阴位 | 1 609.19 | 146.76 | 9.12 | 1 156.57 | 106.85 | 9.24 | 39.13 | 6.107* |

3.3.1 对树冠上层不同方位叶片光合特性的影响

对照处理树冠上层阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较其阴位叶的高 27.89%、17.91%、11.53% 和 18.09%；修枝接干处理树冠上层阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较其阴位叶的高 11.13%、18.82%、24.57% 和 18.64%，经差异性检验，除对照阳位叶的 P_{max} 显著高于其阴位叶的之外 ($t = 3.398^*$ 、 $f = 12$)，其余的方位间的差异均未达到显著水平。由此表明在树冠上层阳位叶片的诸光合指标均有一定程度的高于阴位的趋势，且由于修枝接干使得反映光合潜力的 P_{max} 在阳位与阴位间的差异明显减小。

修枝接干处理树冠上层阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较对照高 -3.73%、3.51%、33.87% 和 2.72%，阴位叶的分别较对照高 10.92%、2.72%、19.88% 和 2.25%，此差异经 t 检验表明均不显著，从而说明修枝接干对树冠上层不同方位叶片的光合指标的影响在修枝接干当年尚未得以体现。

3.3.2 对树冠下层不同方位叶片光合特性的影响

修枝接干处理树冠下层阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较其阴位叶的高 6.53%、21.18%、8.29% 和 21.49%，对照处理阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较其阴位叶的高 24.35%、21.47%、25.10% 和 21.39%，经差异性检验，除对照处理树冠下层阳位叶的 P_{max} 显著高于其阴位叶的之外 ($t = 2.448^*$ 、 $f = 12$)，其余的方位间的差异均未达到显著水平。表明树冠下层与上层树冠一样，其叶片的诸光合指标也存在着阳位高于阴位的趋势，也同样由于修枝接干使得 P_{max} 在阳位与阴位间的差异明显减小。

修枝接干处理树冠下层阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较对照高 21.80%、39.02%、28.72% 和 39.26%，其阴位叶的分别较对照高 42.18%、39.35%、48.70% 和 39.13%， t 检验表明，除了 LCP 在二处理阳位间的差异未达到显著水平之外，其余的差异性均达显著以上水平。由此可以看出，修枝接干对树冠下层不同方位叶片诸光合指标的影响在修枝接干当年要明显大于树冠上层，这可能是由于通过修枝接干在较大程度上改善了该冠层的光环境条件和通风条件，进而提高了该冠层叶片的光合潜力，因此保证了对其接干生长尤其是前期生长的光合产物分配。

4 结论与讨论

(1) 从泡桐植株总体来说，适宜强度的修枝促接干措施（保留下层 2~8 枝，修枝强度平均 53.6%）可明显提高泡桐叶片的光合潜力和适应强光环境的能力，其最大光合速率 (P_{max})、光饱和点 (LSR)、光补偿点 (LCP) 和光合幅度 (PR) 在修枝接干后分别达 23.93、1.966、58.53、88 和 1.911、71 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，较对照的分别提高 11.85%、15.608%、29.06% 和 15.21%。

(2) 修枝接干对泡桐诸光合指标的影响在树冠下层明显大于上层，并且使其在上下冠层之间的差异性显著减小。修枝接干后泡桐下层树冠的 P_{max} 、LSR、LCP、PR 较对照分别高 27.70%、36.74%、34.22%、36.80%，而上层仅分别高 0.72%、1.75%、26.11% 和 1.11%。

(3) 修枝接干对处于不同方位泡桐叶片的光合特性的影响在不同冠层具有不同程度的体现。在上层，修枝接干后其阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 与对照无显著差异；而在下层，修枝接干后其阳位叶的 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 分别较对照高 21.80%、39.02%、28.72% 和 39.26%，阴位叶的分别较对照高 42.18%、39.35%、48.70% 和 39.13%，除了 LCP 在二处理阳位叶间的差异不显著之外，其余的差异性均达显著以上水平。

(4) 修枝接干对泡桐光合特性在不同层面的影响，是由于通过修枝接干使其光环境条件和通风条件（尤其在下层）得到有效改善，进而提高了泡桐叶片的光合潜力和适应强光环境的能力，从而保证了修枝接干后在其总叶面积平均减少 20.59% 的情况下，仍能通过合理的光合产物积累和分配而维持其下部主干的径生长和接干的快速发育和生长。

(5) 修枝接干对泡桐光合特性的影响表现在多个方面，除了 P_{max} 、LSR、LCP 和 PR 等指标外，它对于泡桐蒸腾特性的影响及其受环境条件影响的规律尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] 沈允钢, 施教耐, 许大全. 动态光合作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- [2] 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): 1~3
- [3] 潘瑞璋, 董惠得. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995

- [4] Kramer P T. 木本植物生理学 [M]. 王振儒译. 北京: 中国林业出版社, 1991
- [5] Coombs J, Hall D O, Long S P, *et al* 生物生产力和光合作用测定技术 [M]. 邱国雄等译. 北京: 科学出版社, 1986
- [6] 王孟本, 李洪建, 柴宝峰, 等. 树种蒸腾作用、光合作用和蒸腾效率的比较研究 [J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 401~410
- [7] 武禄光, 程绍荣. 泡桐生长发育机制研究: I 泡桐苗木 CO₂ 交换与部分内外因子的关系 [J]. 河南农业大学学报, 1988, 22(2): 174~180
- [8] 李树人. 泡桐苗期物质积累消耗和光能利用的研究 [J]. 河南农学院学报, 1980, 14(3): 10~17
- [9] 张清, 王振宇, 徐永荣, 等. 萌芽异常推迟对毛泡桐叶片光合特性影响的研究 [J]. 湖北农业科学, 2005(6): 90~93
- [10] 蒋建平. 泡桐栽培学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1999
- [11] 侯元凯, 翟明普. 泡桐干形培育研究进展 [J]. 林业科学, 1999, 35(3): 76~83
- [12] 王保平, 李宗然, 文瑞钧, 等. 泡桐修枝促接干技术及其效应的研究 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(2): 183~188
- [13] 王保平, 李吉跃, 文瑞钧, 等. 修枝接干对泡桐年生长期节律影响的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(4): 11~15
- [14] 王保平, 李吉跃, 乔杰, 等. 修枝促接干对泡桐叶片生长影响的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(5): 70~74
- [15] 王保平, 李吉跃, 孙志强, 等. 修枝促接干对泡桐枝生长动态影响的研究 [J]. 林业科学研究, 2005, 18(5): 609~14
- [16] Bassan J B, Zwier J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones [J]. Tree Physiol, 1991, 8: 145~149
- [17] 胡新生, 刘建伟, 王世绩. 四个杨树无性系在不同温度和相对湿度条件下净光合速率的比较研究 [J]. 林业科学研究, 1997, 33(2): 107~116