

## 18 种槭树科树种光合特性及叶绿素荧光参数的比较

王雪梅

(福州植物园,福建 福州 350012)

**摘要:**为探究不同槭树科树种的光合特性及叶绿素荧光参数差异,以三尾青皮槭、桂林槭、宁波三角槭、樟叶槭、金钱槭、长尾秀丽槭、长裂葛萝槭、元宝槭、革叶槭、薄叶槭、飞蛾槭、青榨槭、罗浮槭、五裂槭、光叶槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭 18 个槭树科树种为研究对象,比较不同槭树光合作用与叶绿素荧光参数的差异,并探讨二者之间的相关性。结果表明,18 种槭树的光合特性及水分利用效率差异均达极显著水平( $P<0.01$ ),其中三尾青皮槭、元宝槭、金钱槭的净光合速率较高,革叶槭、飞蛾槭、青榨槭、罗浮槭的水分利用效率较高。18 种槭树的叶绿素荧光参数差异显著( $P<0.05$ ),飞蛾槭、罗浮槭、光叶槭的 PSⅡ 潜在活性( $F_v/F_o$ )和 PSⅡ 最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )较高。相关分析表明,不同槭树的胞间  $CO_2$  浓度与净光合速率之间呈极显著负相关,与气孔导度之间呈极显著正相关;不同槭树树种的水分利用效率与净光合速率、PSⅡ 潜在活性及 PSⅡ 最大光能转换效率之间存在显著的正相关关系。可见,水分利用效率高的彩叶树种具有较高的光合效率,其生态适应性强,建议在福建扩大引种三尾青皮槭、光叶槭、罗浮槭和飞蛾槭等彩叶树种,对改善福建生态环境具有重要意义。

**关键词:**彩叶树种;净光合速率;水分利用效率;叶绿素荧光参数;相关分析

**中图分类号:**S792.35

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)06-0123-07

### Comparison of Photosynthetic Characteristics and Chlorophyll Fluorescence Parameters Among 18 Aceraceae Species

WANG Xue-mei

(Fuzhou Botanical Garden, Fuzhou 350012, Fujian, China)

**Abstract:** In order to explore the differences in photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters among different Aceraceae species, 18 species were selected as the research objects, including *Acer cappadocicum* var. *tricaudatum*, *A. kweilinense*, *A. buergerianum* var. *ningpoense*, *A. cinnamomifolium*, *Dipteronia sinensis*, *A. elegantulum* var. *macrurum*, *A. grosseri* var. *hersii*, *A. truncatum*, *A. coriaceifolium*, *A. tenellum*, *A. oblongum*, *A. davidii*, *A. fabri*, *A. oliverianum*, *A. laevigatum*, *A. serrulatum*, *A. palmatum*, and *A. paxii*. The differences in photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters among different species were compared, and the correlations between them were discussed. The results showed that the differences in photosynthetic characteristics and water use efficiency (WUE) among 18 species were significant ( $P<0.001$ ). *A. cappadocicum* var. *tricaudatum*, *A. truncatum*, and *Dipteronia sinensis* had higher net photosynthetic rate ( $P_n$ ), while *A. coriaceifolium*, *A. oblongum*, *A. davidii*, and *A. fabri* had higher WUE. The differences in chlorophyll fluorescence parameters among 18 species were significant ( $P<0.05$ ). *A. oblongum*, *A. fabri* and *A. laevigatum* had higher PSⅡ potential activity ( $F_v/F_o$ ) and PSⅡ maximum light energy conversion efficiency ( $F_v/F_m$ ). Correlation a-

收稿日期:2023-07-08 修回日期:2023-08-26

基金项目:福建省科学技术厅农业引导性(重点)项目(闽财指[2021]728号)。

第一作者:王雪梅,高级工程师。研究方向:森林培育。E-mail:43178214@qq.com

analysis showed that intercellular  $\text{CO}_2$  concentration ( $C_i$ ) was significantly and negatively correlated with net  $P_n$ , but significantly and positively correlated with stomatal conductance. There was a significant and positive correlation between WUE and  $P_n$ , potential activity of PS II ( $F_v/F_o$ ) and maximum light energy conversion efficiency ( $F_v/F_m$ ). Therefore, Aceraceae species with higher WUE had higher photosynthetic efficiency, which showed strong ecological adaptability. It is suggested to introduce colorful leaf species such as *A. cappadocicum* var. *tricaudatum*, *A. laevigatum*, *A. fabri* and *A. oblongum*, which is of great significance to improve the ecological environment of Fujian Province.

**Key words:** Colored-leaf tree species; net photosynthetic rate; water use efficiency; Chlorophyll fluorescence parameters; correlation analysis

彩叶树种是指在整个生长发育过程中,叶片颜色会发生周期性改变的本木植物。由于彩叶树种叶片具有明显的呈色期、落叶期及观赏期,目前在园林规划、景观配置等方面得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。槭树科树种作为彩叶树种的代表树种,主要分布于长江以南区域,数量超过 100 种,其生态效益好、经济价值高、应用前景广,是我国重要的观赏树种之一<sup>[3]</sup>。然而,由于缺乏科学管理,盲目引种槭树树种导致了一系列问题的出现,如存活率低、树种类型单一、景观效率差等<sup>[4-5]</sup>。如何提高彩叶树种的栽培管理水平,提高景观配置效益及生态效益,是目前亟待解决的重要问题。

植物的光合作用是一种重要的生物化学过程,能够为植物生长提供基本的能量和营养物质,光合效率的高低决定着植物的生长、存活及生产力水平<sup>[6]</sup>。叶绿素荧光动力学参数与植物光合作用密切相关<sup>[7]</sup>,可快速、准确、无损伤地检测植物的光合作用状况,已广泛应用在植物光合水平的相关研究中<sup>[8]</sup>。如果植物光合系统反应中心受到破坏,叶绿素初始荧光( $F_o$ )会升高,最大荧光产量( $F_m$ )、PS II 潜在活性( $F_v/F_o$ )及 PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )则会不断下降<sup>[9-10]</sup>。槭树科树种栽植范围广泛,盲目引种导致某些槭树树种生态适应性变差,光合效率及生产力水平下降。因此,开展多种槭树树种引种后光合生理特性的研究,对于揭示彩叶树种的光合机理、提高科学引种及管理水平具有重要理论及现实意义。

本研究以槭树科(Aceraceae)槭树属(*Acer*)、金钱槭属(*Dipteronia*)18 种槭树为研究对象,研究了引种不同槭树树种之间光合特性及叶绿素荧光动力学参数的差异,探讨了叶片光合特性与叶绿素荧光参数之间的相关关系,为槭树科树种的科学引种与合理栽培提供理论支撑。

## 1 试验区概况

试验地处于福州植物园宦溪林场苗圃,地理位

置为  $25^{\circ}57' - 26^{\circ}24'E$ ,  $119^{\circ}17' - 119^{\circ}41'N$ , 海拔 408 m, 属典型的亚热带季风气候,气温适宜,温暖湿润,阳光充足,雨量充沛,霜少无雪,夏长冬短,无霜期 326 d; 年平均日照数 1 700~1 980 h, 年平均降水量 900~2 100 mm, 年平均气温 20~25  $^{\circ}C$ , 最冷月 1—2 月, 平均气温达 6~10  $^{\circ}C$ , 最热月 7—8 月, 平均气温为 33~37  $^{\circ}C$ , 极端气温最高 42.3  $^{\circ}C$ , 最低 -2.5  $^{\circ}C$ 。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

2022 年 12 月上旬,在福州植物园宦溪林场选取 2022 年春季引种的 18 个槭树科树种作为研究对象,分别是三尾青皮槭(*Acer cappadocicum* var. *tricaudatum*)、桂林槭(*A. kweilinense*)、宁波三角槭(*A. buergerianum* var. *ningpoense*)、樟叶槭(*A. cinnamomifolium*)、金钱槭(*Dipteronia sinensis*)、长尾秀丽槭(*A. elegantulum* var. *macrurum*)、长裂葛萝槭(*A. grosseri* var. *hersii*)、元宝槭(*A. truncatum*)、革叶槭(*A. coriaceifolium*)、薄叶槭(*A. tenellum*)、飞蛾槭(*A. oblongum*)、青榨槭(*A. davidii*)、罗浮槭(*A. fabri*)、五裂槭(*A. oliverianum*)、光叶槭(*A. laevigatum*)、彩岑槭(*A. serrulatum*)、鸡爪槭(*A. palmatum*)、金沙槭(*A. paxii*)。所选树种林龄 2~3 a、平均树高 110~200 cm、平均胸径 1.0~1.9 cm,长势良好,无病虫害,其中青榨槭、罗浮槭、五裂槭、光叶槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭树种叶片有变色,呈非绿色。

### 2.2 指标测定

2.2.1 叶片光合数据的测定 2022 年 12 月中旬(槭树树种叶片处于变色期),在晴朗天气 9:00—11:00,利用美国 PP 公司生产的 CIRAS-3 型光合测定系统对 18 个槭树树种进行光合参数的测定。测定前先对仪器进行预热自检 30 min,并将仪器的光合系统  $\text{CO}_2$  浓度设置为 390  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,选择仪器自带的固定光源。采用活体测量的方法,从以上

18种槭树中选择冠层中部朝南方向完全展开的健康叶片,待净光合速率稳定时,开始记录净光合速率( $A, \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率( $E, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i, \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、气孔导度( $G_s, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )等光合指标。叶片水分利用效率(WUE,  $\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )为叶片净光合速率( $A$ )与蒸腾速率( $E$ )的比值。每种槭树9个重复(每种槭树3株×每株3次重复)。

2.2.2 叶绿素荧光参数的测定 利用手持式叶绿素荧光仪(OP-30P)进行叶绿素荧光参数的测定,选择高度一致朝南方向发育良好的叶片,测定时将叶片置于暗盒中进行20 min的暗适应,测定不同槭树树种叶片的初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、最大可变荧光( $F_v, F_v = F_m - F_0$ )、PS II 潜在活性( $F_v/F_0$ )和PS II 最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )。每种槭树9个重复(每种槭树3株×每株3次重复)。

## 2.3 数据处理

不同槭树树种之间光合特性及叶绿素荧光参数

的差异采用单因素方差分析和 Duncan's 多重比较( $P < 0.05$ ),光合特性各指标与叶绿素荧光参数之间的相关性采用 Pearson 相关分析法。采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对所有数据进行处理和统计。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同槭树树种叶片光合指标的差异

图1表明18个槭树树种的净光合速率、蒸腾速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度和气孔导度差异均达极显著水平( $P < 0.001$ )。净光合速率是衡量叶片光合潜力的重要指标。其中三尾青皮槭、宁波三角槭、金钱槭、元宝槭的净光合速率  $> 12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著高于其余14个槭树种;青榨槭、罗浮槭、五裂槭、光叶槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭的净光合速率  $< 4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著低于其他槭树树种。最高净光合速率(三尾青皮槭:  $18.06 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )是最低(彩岑槭:  $0.83 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的21.76倍。

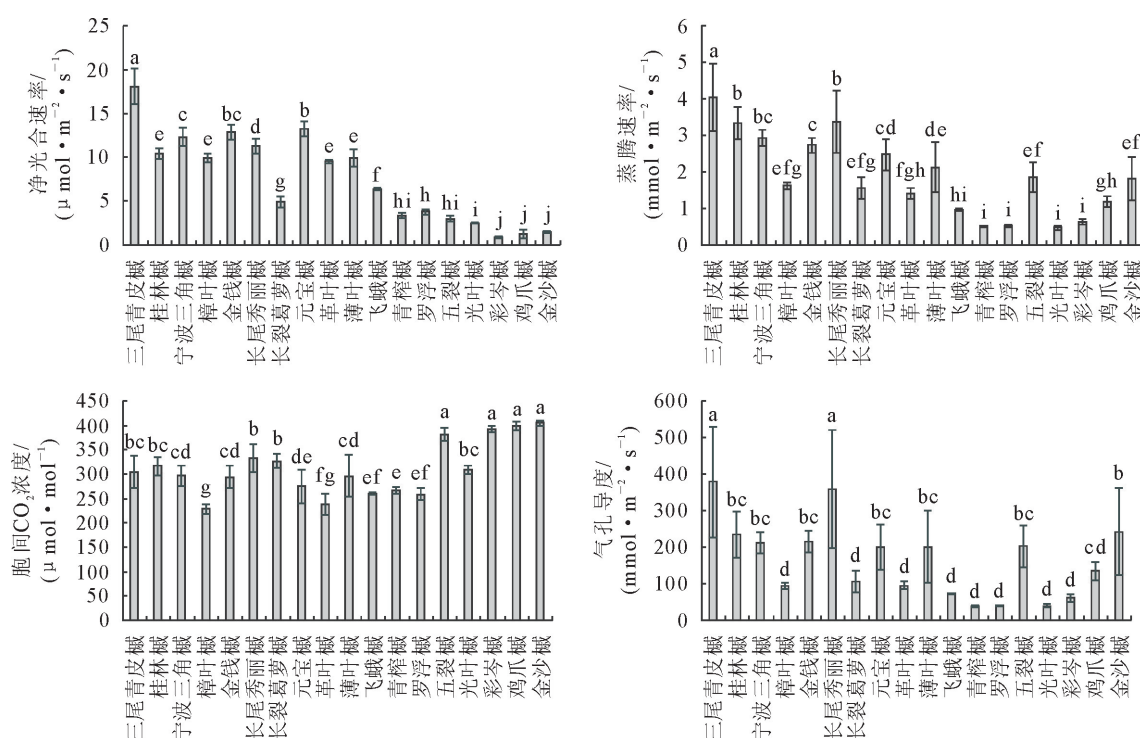


图1 不同槭树树种净光合速率、呼吸速率、胞间  $\text{CO}_2$  浓度和气孔导度的比较

Fig.1 Comparison of net photosynthetic rate,transpiration rate,intercellular  $\text{CO}_2$  concentration, and stomatal conductance among different Aceraceae species

植物蒸腾速率是指水分通过植物体内经过叶片以气体的方式散发到大气中的速度。蒸腾会产生蒸腾拉力,蒸腾拉力是植物(尤其是高大乔木)吸水与转运水分的重要动力。三尾青皮槭、桂林槭、长尾秀丽槭的蒸腾速率  $> 3 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著高于除宁波三角槭以外的14个槭树种。而青榨槭、罗

浮槭、光叶槭、彩岑槭的蒸腾速率  $< 0.8 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著低于其他除飞蛾槭外的13种槭树。蒸腾速率的最大值(三尾青皮槭:  $4.03 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )是最小值(光叶槭:  $0.47 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的8.57倍。

胞间  $\text{CO}_2$  浓度是  $\text{CO}_2$  同化速率与气孔导度的

比值,其值大小会影响光合作用暗反应阶段的羧化速率。五裂槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭的胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $>380 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,均显著高于其余的 14 个槭树种,樟叶槭、革叶槭、飞蛾槭、青榨槭、罗浮槭的胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $<270 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,显著低于其他除元宝槭以外的 12 个槭树种。胞间  $\text{CO}_2$  浓度最大值(金沙槭:  $405.56 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )是最小值(革叶槭:  $238.22 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )的 1.70 倍。

气孔导度是表征气孔张开程度的重要指标,是反映植物耐旱性能的重要指标。三尾青皮槭、长尾秀丽槭的气孔导度  $>300 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著高于其余的 16 个槭树种,樟叶槭、长裂葛萝槭、革叶槭、飞蛾槭、青榨槭、罗浮槭、光叶槭、彩岑槭的气孔导度  $<120 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,显著低于其他除鸡爪槭以外的 9 个槭树树种。气孔导度最大值(三尾青皮槭:  $378.00 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )是最小值(38.33  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )的 9.86 倍。

### 3.2 不同槭树树种叶片水分利用效率的差异

本研究的水分利用效率(WUE)为净光合速率(A)与蒸腾速率(E)的比值,水分利用效率的高低取决于  $\text{CO}_2$  净同化效率与蒸腾速率,是衡量植物水分利用和光合作用关系的一种重要生理指标。18 种槭树水分利用效率差异亦达极显著水平 ( $P < 0.001$ )(图 2)。其中,革叶槭、飞蛾槭、青榨槭、罗浮槭的水分利用效率  $>6.5 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,显著高于除樟叶槭以外的 13 种槭树,其中罗浮槭的水分利用效率最高,为  $7.17 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。五裂槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭的水分利用效率  $<2 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,显著低于其他 14 种槭树,其中金沙槭的水分利用效率最低,约为  $0.89 \text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。水分利用效率的最大值是最小值的 8.06 倍。

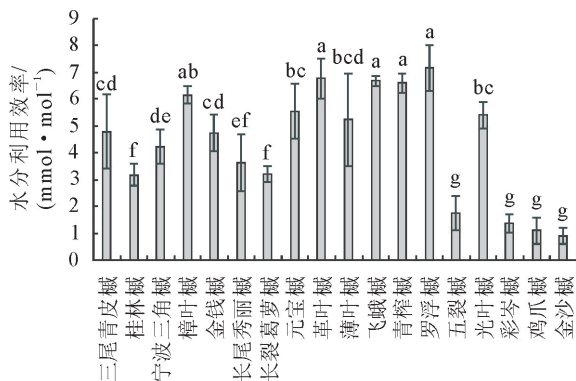


图 2 不同槭树树种水分利用效率的差异

Fig. 2 Comparison of water use efficiency among different Aceraceae species

### 3.3 不同槭树树种叶绿素荧光参数的比较

单因素方差分析结果表明(图 3),不同槭树树种的初始荧光  $F_0$ 、最大荧光  $F_m$ 、可变荧光  $F_v$ 、PSII 潜在

活性  $F_v/F_0$  和 PSII 最大光能转换效率  $F_v/F_m$  的影响均达极显著水平 ( $P < 0.001$ )。初始荧光  $F_0$  是 PSII 反应中心处于完全开放时的荧光产量,它与叶绿素含

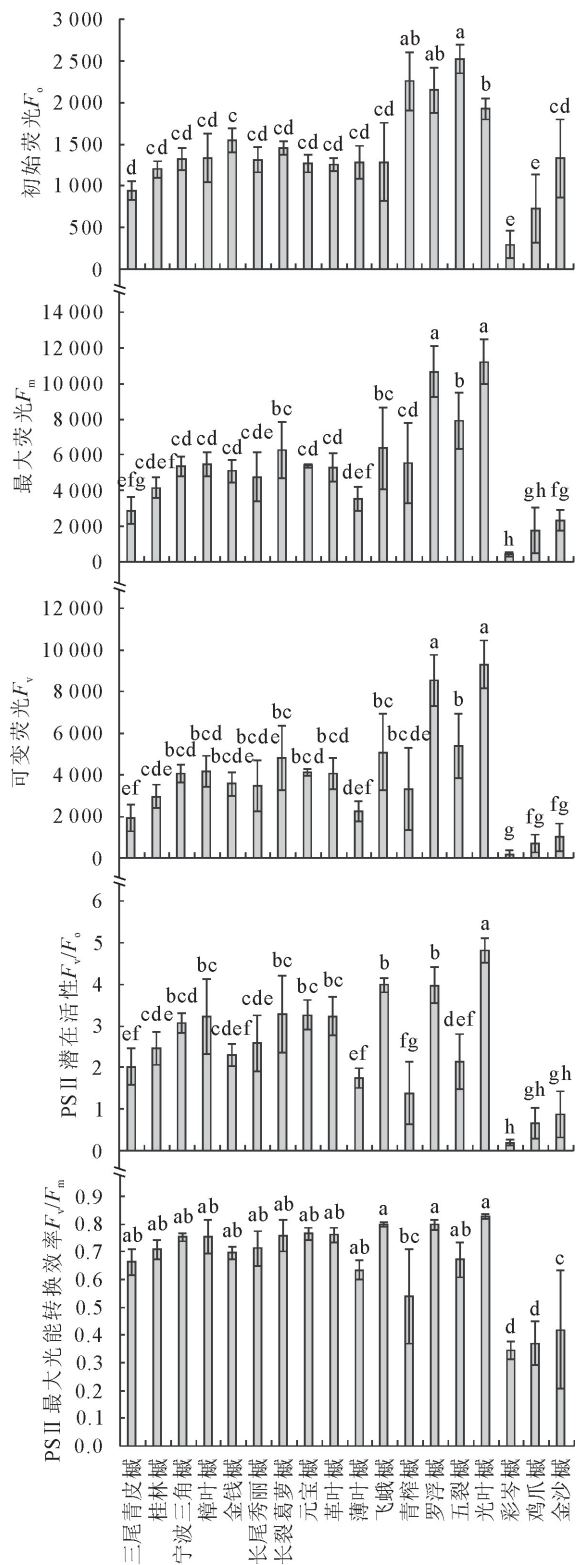


图 3 不同槭树树种初始荧光、最大荧光、可变荧光、PSII 潜在活性和 PSII 最大光能转换效率的比较

Fig. 3 Comparison of initial fluorescence, maximal fluorescence, variable fluorescence, PSII potential photochemical efficiency, and PSII maximal maximum light energy conversion efficiency among different Aceraceae species

量有关,其变化情况可以推测光反应中心的状态以及光保护机制。一般认为当反应中心失活或者遭到破坏时, $F_o$  会上升。青榨槭、罗浮槭、五裂槭、光叶槭的  $F_o > 1\,800$ , 显著高于其他 14 种槭树。彩岑槭、鸡爪槭的  $F_o < 600$ , 显著低于其他 16 种槭树,初始荧光的最大值(五裂槭为 2 521.60)是最小值(彩岑槭为 295.40)的 8.54 倍。

最大荧光  $F_m$  是 PSII 反应中心处于完全关闭时的荧光产量,可反映经过 PSII 的电子传递情况。罗浮槭、光叶槭的  $F_m > 10\,000$ , 显著高于其他 16 种槭树。三尾青皮槭、彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭的  $F_m < 3\,000$ , 显著低于  $F_m < 5\,000$  的 11 个槭树种,最大荧光的最大值(光叶槭为 11 230.00)是最小值(彩岑槭为 407.20)的 27.58 倍。

可变荧光  $F_v$  可作为 PSII 反应中心活性大小的相对指标。罗浮槭和光叶槭的  $F_v > 8\,000$ , 显著高于其他 16 个槭树种,彩岑槭、鸡爪槭、金沙槭的  $F_v < 1\,500$ , 显著低于  $F_v > 2\,500$  的 13 个槭树种,可变荧光的最大值(光叶槭为 9 302.00)是最小值(彩岑槭为 185.33)的 51.30 倍。

$F_v/F_o$  值和  $F_v/F_m$  分别反应了 PSII 反应中心潜在的光化学活性和最大的光能转化效率,是衡量

植株胁迫程度的常用指标。光叶槭的  $F_v/F_o$  和  $F_v/F_m$  均最高,分别为 4.81 和 0.83,显著高于其他 17 种槭树。彩岑槭的  $F_v/F_o$  和  $F_v/F_m$  最低,为 0.19 和 0.34,显著低于其他 17 种槭树。18 种槭树 PSII 潜在活性的最大值是最小值的 19.24 倍,PSII 最大光能转换效率的最大值是最小值的 4.88 倍。综上可知,光叶槭具有较高的光合电子传递活性,其叶片能把所捕获的光能较高效地转化为生物化学能。

3.4 不同槭树光合特性与叶绿素荧光参数之间的相关性分析

不同槭树树种光合特性及叶绿素荧光参数的相关性分析见表 1。结果表明,胞间  $CO_2$  浓度与气孔导度呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),但与净光合速率、水分利用效率、 $F_m$ 、 $F_v$ 、 $F_v/F_o$  及  $F_v/F_m$  呈极显著负相关。气孔导度与净光合速率和蒸腾速率极显著正相关,与水分利用效率、 $F_m$ 、 $F_v$  及  $F_v/F_o$  显著负相关( $P < 0.05$ )。净光合速率与蒸腾速率、水分利用效率和  $F_v/F_m$  极显著正相关。蒸腾速率与水分利用效率、 $F_m$ 、 $F_v$  极显著负相关。水分利用效率与所有叶绿素荧光参数均显著正相关。不同荧光参数之间均极显著正相关。

表 1 不同槭树树种光合特性及叶绿素荧光参数的相关系数分析

指标	胞间 $CO_2$ 浓度	气孔导度	净光合速率	蒸腾速率	水分利用效率	$F_o$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_o$
气孔导度	0.362**								
净光合速率	-0.488**	0.480**							
蒸腾速率	0.136	0.917**	0.728**						
水分利用效率	-0.960**	-0.411**	0.381**	-0.247**					
$F_o$	-0.203	-0.131	-0.152	-0.179	0.276**				
$F_m$	-0.300**	-0.302**	-0.183	-0.328**	0.382**	0.756**			
$F_v$	-0.284**	-0.359**	-0.213	-0.385**	0.365**	0.619**	0.988**		
$F_v/F_o$	-0.555**	-0.230*	0.194	-0.106	0.559**	0.318**	0.801**	0.849**	
$F_v/F_m$	-0.587**	-0.009	0.404**	0.162	0.561**	0.388**	0.682**	0.703**	0.872**

注: \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

4 结论与讨论

4.1 讨论

本研究发现,18 种槭树光合特性差异均达极显著水平,其中三尾青皮槭、元宝槭、金钱槭的净光合速率较高(图 1),说明这 3 种槭树生产力水平高,引种后生态适应性相对于其他槭树更强。光叶槭、彩岑槭、金沙槭、鸡爪槭的净光合速率明显偏低,意味着这些槭树树种生产力水平低,对生态环境的适应性差,本结果与纵丹等<sup>[6]</sup>和胡欢甜等<sup>[10]</sup>的研究结果一致,体现了不同槭树树种的生产力及对生态环境的适应性存在明显差异。彩叶树种叶片颜色随季节

变化而改变,叶色变化与光合特性也密切相关<sup>[11]</sup>,然而,本次试验选择在叶色变化的秋冬季开展,未对不同季节之间的光合特性进行对比分析,具有一定的局限性,接下来将开展槭树不同季节之间光合特性的动态研究。

PSII 潜在活性( $F_v/F_o$ )和 PSII 最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )被认为是叶片光合效率的重要衡量指标,PSII 潜在活性( $F_v/F_o$ )反映了植物的光合机构是否完整,PSII 最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )反映了植物叶片利用光能的能力<sup>[12-13]</sup>。本研究中,不同槭树树种的叶绿素荧光参数差异均达极显著水平,其中光叶槭、罗浮槭和飞蛾槭的 PSII 潜在活性( $F_v/F_o$ )

$F_v/F_m$ )和PSⅡ最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )均较高(图3),说明这3种槭树利用光能的能力强、光系统结构保存完整,叶片的潜在活力较高,体现了较高地适应引种地生态环境的能力。而彩叶槭、鸡爪槭、金沙槭的Ⅱ潜在活性( $F_v/F_m$ )和PSⅡ最大光能转换效率( $F_v/F_m$ )均较低,说明这3种槭树利用光能的能力较弱、光系统结构不完整、叶片的潜在活力较差,秋冬季停止生长处休眠期,生长力弱,慢生。值得说明的是光叶槭的叶绿素荧光参数表现出较高的生态适应特性,但其光合速率、蒸腾速率等光合特性却表现不良,这主要与此时光叶槭处于变色期有关,不同槭树的呈色期不同,建议动态监测不同槭树生长期的光合特性,全面反映不同槭树的生长状况。

相关性分析表明(图1),不同槭树的气孔导度、净光合速率、蒸腾速率三者之间呈极显著正相关,与宿炳林<sup>[14]</sup>的研究结果一致。气孔是植物与大气之间进行气体交换的通道,控制着植物的光合速率和蒸腾速率,树种通过提高气孔导度来促进气体交换,进而提高其净光合速率和蒸腾速率<sup>[15]</sup>。植物的水分利用效率是表征植物叶片水分利用特征的基本生理参数,反映了植物对所处环境的适应能力<sup>[16]</sup>。在本研究中,不同槭树的水分利用效率与净光合速率呈显著正相关,但与蒸腾速率呈显著负相关,该结果与韩丽冬等<sup>[17]</sup>的研究结论一致,说明其水分利用效率同时受到光合作用和蒸腾作用的综合影响,通过加强彩叶树种的光合速率可进而提高其水分利用效率,提高对外界环境的抗性水平。不同槭树的 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_m$ 与水分利用效率之间存在极显著正相关,该结果与徐蕊等<sup>[18]</sup>的结论一致,表明槭树体内光合结构的完整性是保证其光合能力的基础,在水分利用效率较低的槭树种中,其光合结构受损,干扰了光合电子的传递能力<sup>[19]</sup>。与此同时,不同槭树树种胞间 $CO_2$ 浓度与净光合速率呈极显著负相关,可能是由于叶肉细胞光合活性增大导致光合速率增加,进而导致胞间 $CO_2$ 浓度的降低,与桂琴等<sup>[20]</sup>关于不同林下生境对滇黄精叶光合特性的研究结果一致,然而胞间 $CO_2$ 浓度与净光合速率的关系是非常复杂的,亦存在正相关和无相关的可能<sup>[21]</sup>。

## 4.2 结论

本研究发现18种槭树树种的光合特性(净光合速率、蒸腾速率、胞间 $CO_2$ 浓度、气孔导度、水分利用效率)以及叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ 、可变荧光 $F_v$ 、PSⅡ潜在活性、PSⅡ最大光能转换效率)差异均达极显著水平。不同槭树树种净光合速率与水分利用效率、气孔导度、蒸腾速率及PSⅡ最大光能转换效率等指标呈极显著正相关关系,槭树的各项叶

绿素荧光参数之间呈极显著正相关。研究表明,三尾青皮槭的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均最高,光叶槭、罗浮槭和飞蛾槭的水分利用效率较高,其PSⅡ潜在活性和PSⅡ最大光能转换效率也最高,说明这4种槭树对于引种地的生态环境具有良好的适应性,适合扩大栽培。该试验结果对于揭示彩叶树种的光合机理和叶绿素荧光特性、进而指导彩叶树种的引种及栽培具有重要科学意义。

## 参考文献:

- [1] 刘嘉君,王志刚,阎爱华,等.12种彩叶树种光合特性及固碳释氧功能[J].东北林业大学学报,2011,39(9):23-25,30.  
LIU J J, WANG Z G, YAN A H, *et al.* Photosynthetic characteristics and functions of carbon fixation and oxygen release of twelve species of colorful plants[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(9): 23-25, 30. (in Chinese)
- [2] 彭玉信,李淑文.9种彩叶树种在北京的适应性及观赏性评价[J].安徽农业科学,2021,49(5):122-124,127.  
PENG Y X, LI S W. Evaluation on ecological adaptability and ornamental character of nine color-leaf trees species[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2021, 49(5): 122-124, 127. (in Chinese)
- [3] 杨星宇,申磊磊,黄磊,等.长江流域槭属植物资源分布及应用[J].中南农业科技,2022,43(6):100-102.
- [4] 李倩中,刘晓宏,苏家乐.我国槭树科植物研究进展[J].江苏农业科学,2008,266(6):184-186.
- [5] 陈蕊.福州市城市园林景观设计槭树科植物的应用研究[J].林业调查规划,2019,44(2):159-163.
- [6] 纵丹,王静敏,张焱,等.西南地区9种乡土杨树的秋季光合特性比较[J].西北林学院学报,2022,37(4):57-63.  
ZONG D, WANG J M, ZHANG Y, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics of nine polar species in Southwest China in autumn[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 57-63. (in Chinese)
- [7] 孙光闻,朱祝军,方学智,等.镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):700-703.  
SUN G W, ZHU Z J, FANG X Z, *et al.* Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2005, 11(5): 700-703. (in Chinese)
- [8] GUANTER L, ZHANG Y G, JUNG M, *et al.* Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(14): E1327-E1333.
- [9] 孙敏,李树斌,唐飘,等.干旱胁迫对杉木无性系叶绿素荧光特性的影响[J].森林与环境学报,2018,38(2):202-208.  
SUN M, LI S B, TANG P, *et al.* Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence characteristics of Chinese fir clones[J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(2): 202-208. (in Chinese)
- [10] 胡欢甜,邱岭军,林宇,等.滨海沙地4种相思不同叶龄春季叶

- 叶绿素荧光参数日动态[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 34-39, 86.
- HU H T, QIU L J, LIN Y, *et al.* Diurnal changes of chlorophyll fluorescence parameters of different leaf ages of four *A-cacia* species in southeast coastal area in spring[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 34-39, 86. (in Chinese)
- [11] 张阳, 钱多, 马喆. 彩叶树种叶色影响因素及光合特性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(20): 12-17.
- ZHANG Y, QIAN D, MA Z. Research advances in leaf coloration mechanism and photosynthetic characteristics of colored leaf tree[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2022, 50(20): 12-17. (in Chinese)
- [12] 武传兰, 隆小华, 金善钊, 等. 盐胁迫对不同品系杨树幼苗生长和叶绿素荧光的效应[J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1347-1352.
- WU C L, LONG X H, JIN S Z, *et al.* Effects of NaCl stress on the growth and chlorophyll fluorescence characteristics of poplar seedlings[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1347-1352. (in Chinese)
- [13] SARIJEVA G, KNAPP M, LICHTENTHALER H K. Differences in photosynthetic activity, chlorophyll and carotenoid levels, and in chlorophyll fluorescence parameters in green sun and shade leaves of *Ginkgo* and *Fagus* [J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(7): 950-955.
- [14] 宿炳林. 遮阴对美人蕉光合作用的影响[J]. 山西林业科技, 2016, 45(1): 26-29.
- SU B L. Effect of shade on photosynthesis of *Canna indica* L. [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2016, 45(1): 26-29. (in Chinese)
- [15] 刘洋, 贝蓓, 黄大庄, 等. 藏川杨与中林 46 光合特性比较[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 69-72.
- LIU Y, BEI B, HUANG D Z, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics between *Populus szechuanica* and fast growing poplar[J]. Journal of Beihua University: Natural Science, 2010, 11(1): 69-72. (in Chinese)
- [16] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 植物叶片水分利用效率研究综述[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3882-3892.
- CAO S K, PENG Q, SI J H, *et al.* Summary on the plant water use efficiency at leaf level[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3882-3892. (in Chinese)
- [17] 韩丽冬, 沃晓棠, 刘延坤. 不同坡向红松光合特性分析[J]. 林业科技, 2022, 47(5): 41-43.
- [18] 徐蕊, 马国飞, 尚艳, 等. 小喇叭口至灌浆期水分胁迫对玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2022, 326(10): 44-49.
- XU R, MA G F, SHANG Y, *et al.* Effects of water stress on yield structure and water use efficiency of corn from small bell mouth stage to grain filling stage[J]. Water Saving Irrigation, 2022, 326(10): 44-49. (in Chinese)
- [19] 李俊贞, 何乐祖, 赵春梅, 等. 盐胁迫对黄果厚壳桂幼苗荧光和生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(8): 919-923.
- LI J Z, HE L Z, ZHAO C M, *et al.* Effects of salt stress on the photosynthetic and physiological characteristics of *Cryptocarya concinna* seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(8): 919-923. (in Chinese)
- [20] 桂琴, 郭其强, 谢娜, 等. 不同林下生境对滇黄精叶表型及光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 119-126.
- GUI Q, GUO Q Q, XIE N, *et al.* Effects of different habitats on the phenotype and photosynthesis characteristics of *PolYGONATUM KINGIANUM* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2023, 38(4): 119-126. (in Chinese)
- [21] 陈虹宇, 任子蓓, 黄炳旭, 等. 不同地域连翘的光合特性研究[J]. 林业与生态科学, 2023, 38(2): 218-226.
- CHEN H Y, REN Z B, HUANG B X, *et al.* Study on photosynthetic characteristics of *Forsythia suspensa* in different regions[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2023, 38(2): 218-226. (in Chinese)