



# 遮荫对江南油杉幼苗生长和 叶绿素荧光参数的影响

张培<sup>1,2</sup>, 庞圣江<sup>1</sup>, 刘士玲<sup>1,3</sup>, 湛红辉<sup>1\*</sup>, 段润梅<sup>1</sup>, 曾琪瑶<sup>1</sup>

(1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 广西凭祥 532600; 2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 广西凭祥 532600; 3 崇左凭祥友谊关森林生态系统广西野外科学观测研究站, 广西凭祥 532600)

**摘要:**为探究有利于江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*)幼苗生长发育的最适光照条件, 该研究以 1.5 年生江南油杉幼苗为研究对象, 对其进行为期 2 年不同光照强度(即全光照和遮荫率 40%、60%、80%)处理, 分析其形态生长、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、生物量积累及分配等对不同光环境的适应机制。结果表明: (1) 随遮荫程度的增强, 江南油杉幼苗的地径生长量、叶片厚度逐渐减小, 株高生长量、叶面积和比叶面积逐渐增大, 叶片干质量呈先升后降的趋势; (2) 遮荫造成叶片的叶绿素含量、初始荧光( $F_0$ )、PSII 潜在活性( $F_v/F_0$ )、PSII 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )、PSII 实际光化学量子产量 $[Y(II)]$ 、电子传递速率(ETR)均呈现显著增加的趋势; (3) 遮荫处理下幼苗的叶、茎、根生物量和总生物量总体表现出随着光照强度的降低而减小的变化趋势, 幼苗根生物量比和根冠比均减小, 而叶生物量比、茎生物量比以及光合组织与非光合组织生物量比均增大。研究发现, 全光照下江南油杉幼苗生长发育受到了抑制, 遮荫显著影响江南油杉苗期生长及叶绿素荧光特性, 适度遮荫能提高幼苗叶片的光捕获能力、光能利用效率, 增强幼苗光合能力, 促进生长; 江南油杉幼苗在遮荫率为 60% 的环境下受光胁迫较小, 其生长、叶片表观特征、光合能力以及生物量积累与分配等表现最优。

**关键词:** 江南油杉; 遮荫; 幼苗生长; 叶绿素荧光特性

中图分类号: S758.1

文献标志码: A

## Effects of Shading on Growth and Chlorophyll Fluorescence Characteristics of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* Seedlings

ZHANG Pei<sup>1,2</sup>, PANG Shengjiang<sup>1</sup>, LIU Shiling<sup>1,3</sup>,  
CHEN Honghui<sup>1\*</sup>, DUAN Runmei<sup>1</sup>, ZENG Qiyao<sup>1</sup>

(1 Experimental Center of Tropical Forestry, CAF, Pingxiang, Guangxi 536000, China; 2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600, China; 3 Chongzuo Pingxiang Friendship Pass Forest Ecosystem, Guangxi Field Science Observation and Research Station, Pingxiang, Guangxi 532600, China)

**Abstract:** In order to explore the optimal light conditions for the growth and development of *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* seedlings, we treated 1.5-year-old *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings with different light intensities (full light, shading rate 40%, 60% and 80%) for 2 years, and analyzed their morphological growth, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, biomass accumulation and distribution. The results showed that, (1) with the increase of shading, the growth of ground diameter and the thickness of leaves decreased, the growth of plant height, the leaf area and specific leaf area increased, the dry weight of the leaves increased first and then decreased. (2) The chlorophyll content, the initial fluorescence ( $F_0$ ), the potential activity of PS II ( $F_v/F_0$ ), the maximum photochemical quantum

收稿日期: 2022-12-27; 修改稿收到日期: 2023-07-06

基金项目: 国家林木种质资源共享服务平台项目(2005DKA21003)

作者简介: 张培(1984—), 女, 工程师, 主要从事林木良种选育研究。E-mail: 451484446@qq.com

\* 通信作者: 湛红辉, 高级工程师, 主要从事林木育种研究。E-mail: rlzcxhh@163.com

yield of PS II ( $F_v/F_m$ ), the actual photochemical quantum yield of PS II [ $Y(II)$ ], and the electron transfer rate (ETR) of leaves were all significantly increased due to shading. (3) The leaf, stem, root biomass and total biomass of seedlings under shading treatment showed a trend of decreasing with the decrease of light intensity. The root biomass ratio and root shoot ratio of seedlings decreased, while the leaf biomass ratio, stem biomass ratio and photosynthetic and non-photosynthetic tissue biomass ratio increased. The study found that the growth and development of *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings were inhibited under full light, and shading could significantly affect their growth and chlorophyll fluorescence characteristics, moderate shading could improve the light capture ability and light energy utilization efficiency of seedling leaves, enhance the photosynthetic capacity of seedlings and promote growth; the *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings were less stressed under 60% shading rate, and their growth, leaf phenotype characteristics, photosynthetic capacity, biomass accumulation and distribution were the best.

**Key words:** *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*; shading; seedling growth; chlorophyll fluorescence characteristics

光是植物生长发育所必需的环境因子之一。光对植物的影响主要有两方面,一是调节植物的形态建成,二是为其光合作用提供能量<sup>[1]</sup>。过强或过弱的光照强度都不适宜植物的生长,过强可能会出现光抑制而引起光合作用效率下降,从而导致植物生长速率下降<sup>[2]</sup>;过弱则会出现光缺乏现象,最终影响植物体的正常生长发育<sup>[3]</sup>。为适应光环境的变化,植物幼苗可通过改变生长量、叶片形态特征、光合色素含量、叶绿素荧光参数以及生物量分配策略等光合生理特征,以避免光抑制或光破坏<sup>[4]</sup>。而在植物光合作用机制中,光系统 II (PS II) 及其反应中心对光胁迫较敏感主要表现在叶绿素荧光特性变化上,叶绿素荧光参数信息对研究植物生长、反应机制和应对光胁迫的适应机制具有重要意义<sup>[5]</sup>。

江南油杉(*Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis*) 属松科(Pinaceae)油杉属(*Keteleeria*),为中国特有树种,产于云南东南部、贵州、广西西北部及东部、广东北部、湖南南部、江西西南部、浙江西南部,常生于海拔 340~1 400 m 山地<sup>[6]</sup>。江南油杉为阳性树种,其树干通直圆满、材色纹理美观、枝叶茂密浓绿、生长良好迅速,是珍贵的用材树种和优良的园林绿化观赏树种<sup>[7]</sup>,然而江南油杉天然更新能力较差,林下树荫常年遮盖,光照不足,致使幼苗过早消亡<sup>[8]</sup>。然而,刘雄盛等<sup>[9]</sup>研究发现江南油杉幼苗既能较好地适应阳生环境又对荫生环境具备一定的适应性。幼苗是植物生活史中最敏感脆弱的阶段,也是树木更新的重要阶段,幼苗对不同光照条件的适应性对森林植被的恢复和重建具有重要影响,也是决定其物种丰度和分布模式的重要因素<sup>[10-11]</sup>。光照是森林群落中幼苗更新、幼树存活及生长的重要限制因子,但其对江南油杉幼苗生长及生理指标影响的研究鲜有报道。

因此,本研究通过人工遮荫处理模拟不同光照

环境梯度,比较不同光照下江南油杉幼苗生长、叶片形态、光合色素含量、叶绿素荧光参数以及生物量积累与分配等的变化特征,探寻幼苗对不同光环境的适应机制,以期为江南油杉育苗、高效栽培和森林培育提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料与试验地概况

试验材料为江南油杉 1.5 年生实生苗,种子来源于广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站中国林科院热带林业实验中心哨平实验场 9 号优树。试验地设在中国林科院热带林业实验中心苗圃,地理坐标为 106°44'E, 22°7'N, 海拔 245 m。该地属南亚热带热带季风气候,年均气温 22℃, 7 月均温最高, 1 月均温最低; 年均降水量 1 400 mm, 8 月的降水量最大, 12 月降水量最少; 全年日照时间 1 200~1 300 h; 土壤类型为赤红壤土, 土层厚度大于 1 m。

### 1.2 试验设计

试验采用盆栽方法,于 2019 年 7 月选取生长健壮、长势一致的江南油杉幼苗 30 株,平均株高 (62.00±2.00) cm, 平均地径 (5.00±0.05) mm, 将其移栽到带有托盘的 5 加仑塑料花盆 (高 31 cm、上口口径 27.5 cm) 中, 培养介质为 70% 黄心土 + 30% 轻基质 (沤制的树皮), 单株定植, 将定植好的幼苗全部置于中心苗圃空旷地适应 30 d。黄心土为热带林业实验中心林区 20—40 cm 土层的土壤。

试验设置 4 种光照处理,以 100% 全自然光作为对照 ( $T_0$ ), 其余 3 个处理采用通过覆盖不同层数的黑色尼龙网 (2 针) 的遮荫网室 (长 4.5 m, 宽 2 m, 高 2 m), 来获得不同的光照强度, 分别为  $T_1$  (1 层遮阳网)、 $T_2$  (2 层遮阳网)、 $T_3$  (3 层遮阳网)。各遮荫网室间距为 3.0 m, 以减少处理间相互干扰。缓苗

结束后,盆栽苗随机分为4组,每一组6盆。使用Li-6400 便携式光合测定仪(LI-COR Inc. USA),于幼苗冠层上方5 cm 处随机选取3个点,测定各处理的光合有效辐射,并根据下式计算各处理的遮荫率。

$$R_s=(I_0-I)/I_0\times100\%$$

式中: $R_s$  为遮荫率; $I_0$  为全光照下的光合有效辐射; $I$  为各遮荫处理的光合有效辐射。

经测定,CK 遮荫率为0, $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理的遮荫率分别约为40%、60%和80%。试验处理持续时间为2019年8月初至2021年7月底,试验期间保证水肥管理一致,尽量排除其它无关变量的影响。试验处理结束后测定相关指标。

### 1.3 测定指标及方法

#### 1.3.1 生长指标

试验处理结束后,用钢卷尺(精度1 mm)和游标卡尺(精度0.01 mm)分别测量每棵幼苗的株高、地径,并计算高径比(苗高/地径)。

#### 1.3.2 叶片表型性状

于每株苗木中上部采集5片成熟叶片,先使用精度为0.01 mm的游标卡尺测定叶片厚度,避开叶脉在每张叶片中部测定1个点,然后取其平均数;再用万深LA-S叶面积仪扫描测得叶面积(TLA);最后将叶片放入80℃烘箱中烘干至恒重,用0.01 mg精度天平测定干质量(DMA),据此计算比叶面积SLA(TLA/DMA,cm<sup>2</sup>/g)。

#### 1.3.3 叶绿素含量及叶绿素荧光参数

采用便携式叶绿素仪(SPAD-502)活体测定叶片相对叶绿素含量(SPAD值),叶片选择方法同1.3.2,避开叶脉在每张叶片中部测定1个点,取其平均值。采用便携式脉冲调制叶绿素荧光仪PAM-2500,于9:00—11:00依次测定叶片的初始荧光( $F_0$ )、最大荧光( $F_m$ )、实际量子产量[Y(II)]、电子传递速率(ETR),计算PSⅡ最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )、PSⅡ潜在活性( $F_v/F_0$ )。

#### 1.3.4 幼苗生物量积累及分配

在试验结束时,将幼苗带回实验室洗净并分为根、茎、叶3部分,置于烘箱105℃下杀青30 min后,再在80℃烘干至恒重,称取各部分的干质量。计算幼苗总生物量、叶生物量比(leaf mass ratio, LMR,叶质量/总生物量)、茎生物量比(stem mass ratio, SMR,茎质量/总生物量)、根生物量比(root mass ratio, RMR,根质量/总生物量)、根冠比(root to shoot ratio, R/S,根质量/地上生物量)以及光合组织(叶)与非光合组织(根、茎)生物量比(photosynthesis and

non-photosynthesis biomass ratio, P/NP)等参数。

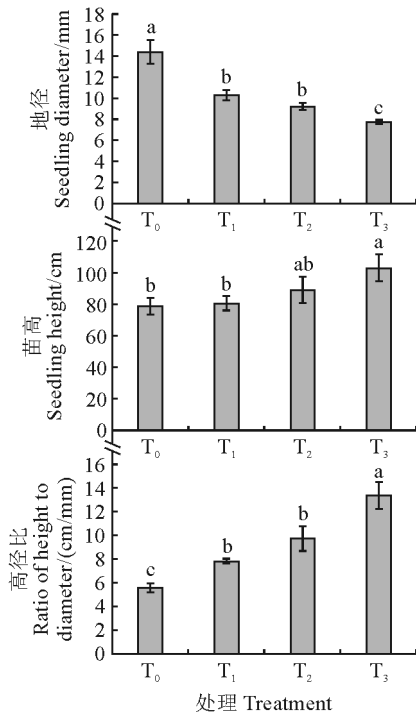
### 1.4 数据处理

采用Excel 2019、Origin 2019b 软件进行数据分析和图表处理,利用SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ )。图表数据为平均值±标准误。

## 2 结果与分析

### 2.1 遮荫对江南油杉幼苗生长的影响

如图1所示,江南油杉幼苗地径生长量随着遮荫程度的增强而逐渐减少,且各遮荫处理均比对照( $T_0$ )显著降低( $P<0.05$ ), $T_1\sim T_3$  遮荫处理分别降为 $T_0$ 的71.63%、64.12%、53.82%,而 $T_1$ 与 $T_2$ 之间差异不显著;苗高生长量随着遮荫程度的增强而逐渐增加, $T_1\sim T_3$  遮荫处理分别为 $T_0$ 的1.02、1.13、1.31倍,但仅 $T_3$  处理增加显著;高径比亦随着遮荫程度的增强而逐渐增加,各遮荫处理均显著高于 $T_0$ , $T_1$ 与 $T_2$ 之间差异不显著,但均与 $T_3$  差异显著。可见,遮荫显著抑制了江南油杉幼苗地径生长,促进了苗高生长,且地径的反应更敏感。



柱上标不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著( $P<0.05$ )。下同。

图1 不同遮荫处理下江南油杉幼苗生长量的变化  
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at 0.05 level ( $P<0.05$ ). The same below.  
Fig. 1 The growth of *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings under different shading treatments

2.2 遮荫对江南油杉叶片表型性状的影响

江南油杉叶片表型性状特征在不同遮荫处理下不同(图 2)。随着光照强度的减弱,叶片厚度呈逐渐下降趋势,且各遮荫处理均与  $T_0$  差异显著, $T_3$  处理叶片厚度仅为  $T_0$  的 45%;叶面积和比叶面积随着光照强度的减弱均呈逐渐上升趋势,且在  $T_2$  和  $T_3$  处理下均与  $T_0$  差异显著, $T_3$  处理的叶面积和比

叶面积分别为  $T_0$  的 2.30 倍和 1.66 倍;叶片干质量随着光照强度的减弱呈先升后降的趋势,各遮荫处理均不同程度高于  $T_0$ , $T_1$  和  $T_2$  处理增幅均达到显著水平,并以  $T_1$  处理最大(0.063 1 g),比  $T_0$  显著升高 70.08%( $P<0.05$ )。可见,各遮荫处理不同程度增加了江南油杉叶面积、比叶面积和叶片干重,却显著降低了其叶片厚度。

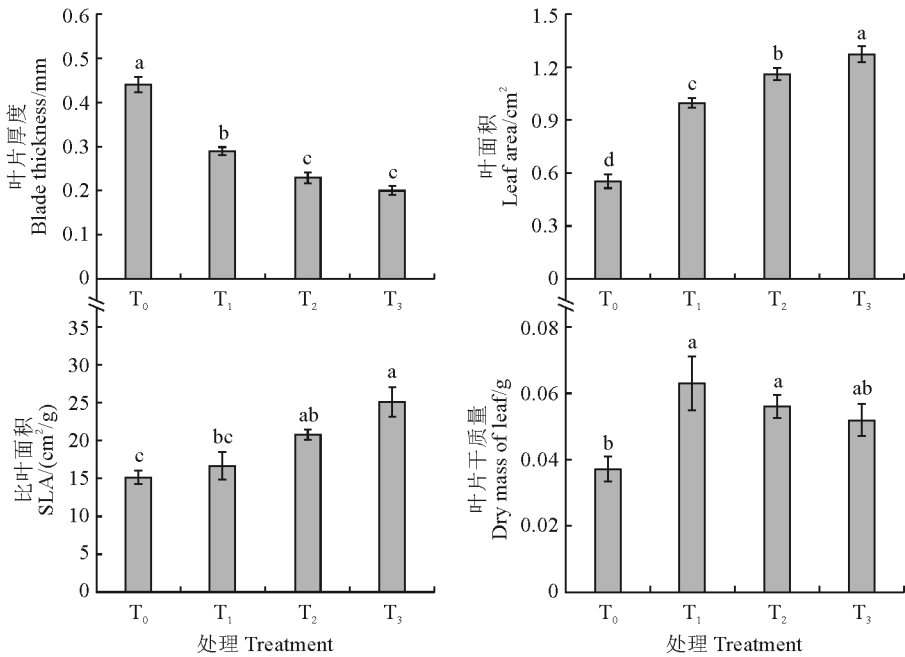


图 2 不同遮荫处理下江南油杉叶片表型性状的变化  
Fig.2 The phenotypic characters in leaves of *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings under different shading treatments

2.3 遮荫对江南油杉叶绿素含量及主要叶绿素荧光参数的影响

$F_0$  为初始荧光,是 PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量,它与叶片叶绿素浓度有关; $F_v/F_0$  表示 PS II 潜在活性;最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率,不受物种和生长条件的影响;实际光化学量子产量[Y(II)]常用来表示植物光合作用电子传递的量子产额,是对光能的有效转化能力,该值越大表明 PS II 光能转换率越高,PS II 活性越强<sup>[12]</sup>;ETR 是指 PS II 的电子传递速率,它的降低将会影响 PS II 的反应活性,进而抑制光合作用。图 3 显示,随着遮荫程度的增强,江南油杉幼苗叶片叶绿素相对含量(SPAD 值)、 $F_v/F_0$ 、 $F_v/F_m$ 、Y(II)和 ETR 均表现出逐渐增强的相似变化趋势,且各遮荫处理均显著高于相应  $T_0$ ,并在处理间有显著差异( $P<0.05$ );而各遮荫处理的  $F_0$  也均显著高于  $T_0$ ,但各遮荫处理间无显著

差异。

其中,各遮荫处理的  $F_v/F_m$  值均显著高于  $T_0$  (0.65), $T_2$  和  $T_3$  处理的  $F_v/F_m$  值均达到 0.75 以上。以上结果说明适度遮荫有利于维持江南油杉叶片较高叶绿素含量水平和 PS II 电子传递、光能转换效率,保证光合器官的正常功能和苗期生长。

2.4 遮荫对江南油杉生物量分配的影响

由图 4 可知,江南油杉幼苗叶、茎的生物量积累在各处理间均无显著差异;根生物量表现为各遮荫处理均显著低于  $T_0$ , $T_3$  处理又显著低于  $T_1$ 、 $T_2$  处理;总生物量表现为  $T_1$  处理稍低于  $T_0$ , $T_3$  处理显著低于  $T_0$ ( $P<0.05$ );幼苗的叶、茎、根生物量和总生物量总体表现出随着光照强度的降低而减小的变化趋势,遮荫处理均低于自然光照处理。同时,江南油杉幼苗在不同光照强度下的生物量分配也存在显著差异,叶生物量比和光合组织与非光合组织生物量比在  $T_3$  和  $T_3$  处理下均显著高于  $T_0$ ,茎生物量比

在  $T_1$  和  $T_3$  处理下均显著高于  $T_0$ , 而根生物量比和根冠比在各遮荫处理下均显著低于  $T_0$ ,  $T_3$  处理又显著低于  $T_1$  和  $T_2$  处理 ( $P < 0.05$ ); 随着光照强度的降低, 幼苗叶生物量比、茎生物量比以及光合组织

与非光合组织生物量比均逐渐增大, 而根生物量比和根冠比均逐渐减小。以上结果说明江南油杉幼苗生物量积累与分配在遮荫处理下, 表现为地下部分受到的影响显著大于地上部分。

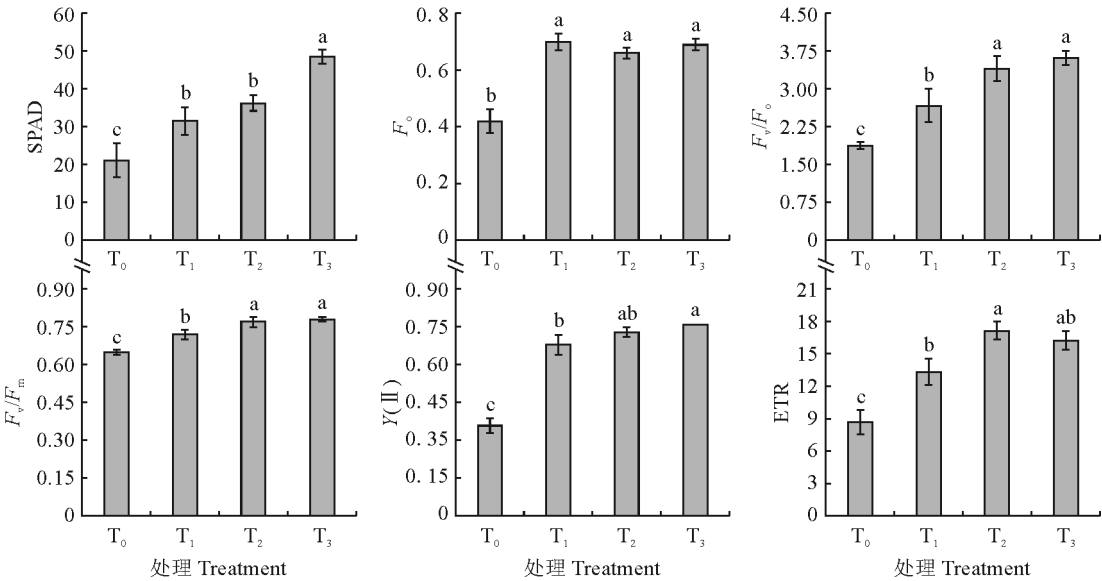


图 3 不同遮荫处理下江南油杉幼苗叶绿素含量和叶绿素荧光参数的变化

Fig. 3 The SPAD and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings under different shading treatments

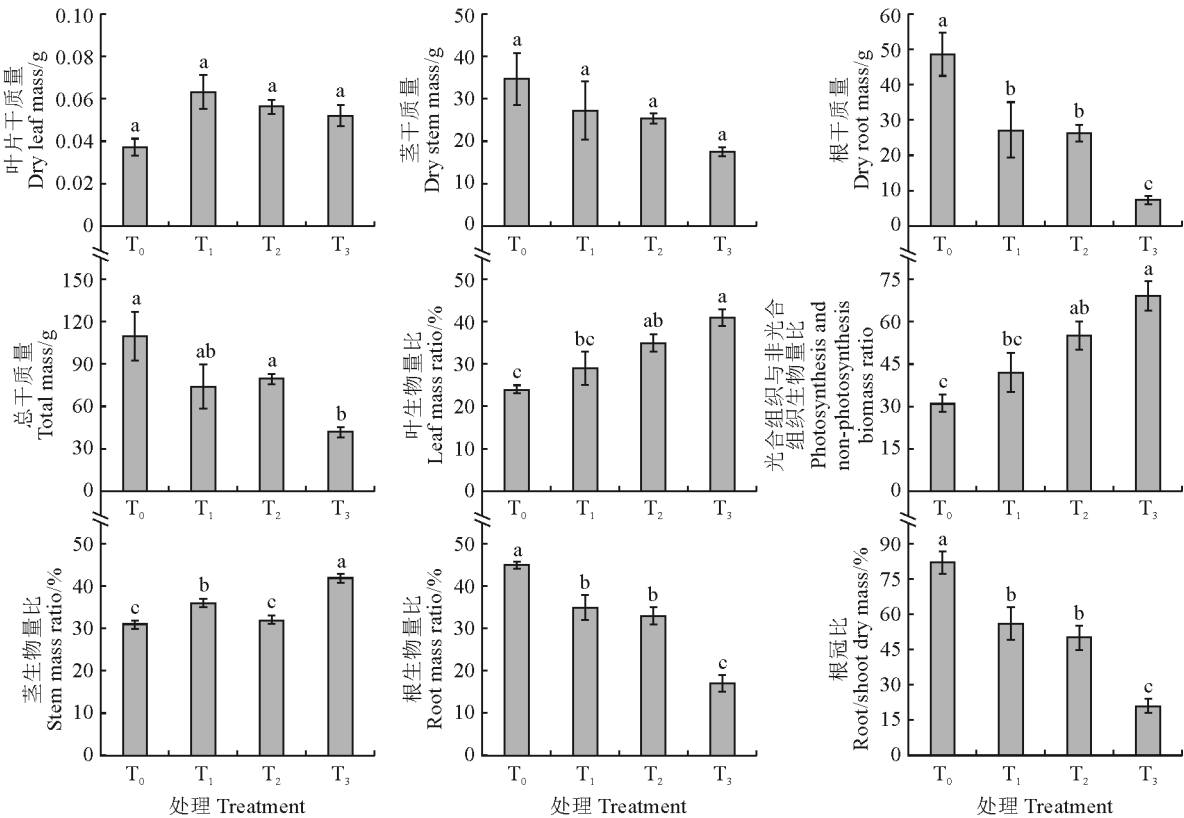


图 4 不同遮荫处理下江南油杉生物量积累与分配的变化

Fig. 4 The biomass accumulation and distribution of *K. fortunei* var. *cyclolepis* seedlings under different shading treatments



## 3 讨 论

### 3.1 江南油杉生长对遮荫的响应特征

光照是影响植物形态和功能的重要环境因子,对植物的生长、发育和形态建成具有极其重要的作用。在本试验中江南油杉幼苗的地径生长量随遮荫程度的增强而减小,而株高生长量则随遮荫程度的增强而增加,植株形态表现为“细长”的特征。大量研究<sup>[10,13-14]</sup>表明,弱光下生长的植物株高增长量较高,而地径增长量则较低,这有利于植物更快地向上生长以获取充足的光能,体现了植物对光环境改变的形态适应策略。

### 3.2 江南油杉叶片表型性状对遮荫的响应特征

叶片是植物应对外界环境变化最敏感的部位。弱光条件下,其叶片表型特征会发生明显的变化,耐荫植物可以通过减小叶片厚度、增大比叶面积、增强捕光能力以适应低光环境,使植物体的投入和收益尽量达到平衡点<sup>[15]</sup>。通过本研究发现,在遮荫处理下,江南油杉幼苗叶面积和比叶面积均增大,即叶片变大变薄,这是植物本身对弱光环境的响应。增大光合作用的叶面积有利于在有限的光照条件下截获更多的光能。江南油杉幼苗在自然光照强度下叶片小而厚,可能是由于过强的光辐射导致了光胁迫。

### 3.3 江南油杉叶绿素含量及主要叶绿素荧光参数对遮荫的响应特征

叶绿素是光合作用的光敏催化剂,与光合作用密切相关,是植物适应和利用环境因子的重要指标<sup>[16]</sup>。在本研究中,江南油杉幼苗相对叶绿素含量(SPAD 值)随着遮荫程度的增强而增加,再次验证了弱光下生长的植物通过提高叶绿素含量来增强对光能的吸收利用,增强幼苗光合能力<sup>[17]</sup>。

叶绿素荧光与光合作用各反应过程密切相关,环境胁迫对光合作用的影响可通过荧光参数反映出来。本研究中在自然光下 PS II 潜在光化学活性( $F_v/F_o$ )较低,反映出有活性的 PS II 反应中心数量较少,捕获及转化所需光能的能力较差。PS II 最大光化学量子产量( $F_v/F_m$ )反映了光系统 II 反应中心的光能转换效率,在健康生理状态下,绝大多数植物的  $F_v/F_m$  在 0.75~0.85 之间,但在逆境或受伤害时会明显降低<sup>[10,18]</sup>。本试验中只有 T<sub>2</sub> 和 T<sub>3</sub> 处理

使江南油杉幼苗叶片  $F_v/F_m$  保持在 0.75 以上,其他处理均显著降低,表明自然光环境下显著降低了叶片的 PS II 最大光化学效率,江南油杉幼苗受到了光胁迫,发生一定程度的光抑制。同样,相比于其他遮荫处理,自然光下江南油杉幼苗 Y(II)、ETR 显著降低,表明自然光下江南油杉幼苗叶片 PS II 反应中心活性和开放程度明显降低<sup>[5]</sup>,电子传递速率受到抑制,进而使光能转化效率下降,光合作用下降。

### 3.4 江南油杉生物量积累及分配对遮荫的响应特征

生物量分配格局是植物对所处环境条件响应和适应的结果。本研究发现江南油杉幼苗总生物量随着光照强度的降低显著减少,说明高光照强度有利于江南油杉幼苗生物量的积累,而在低光照强度下,江南油杉幼苗采取保守策略进行缓慢的资源获取和消耗,所以生物量积累较少。随着光照强度的降低,江南油杉幼苗减少根生物量分配,提高地上部分生物量投资,通过增加叶和茎生物量分配来增强光能捕获能力,促进江南油杉幼苗支持结构和运输结构的构建,以实现生长率的提高及光竞争能力和生存适合度的提高。遮荫处理下杉木<sup>[15]</sup>、金丝李<sup>[11]</sup>等植物上也有类似的研究结果。

## 4 结 论

自然光照下江南油杉幼苗生长发育受到了抑制,遮荫能显著影响苗期江南油杉生长及叶绿素荧光特性。遮荫处理下江南油杉幼苗叶绿素含量显著提高,以提升光能的利用能力。相比于自然光,遮荫处理能显著提高江南油杉幼苗  $F_v/F_m$ 、Y(II)、ETR 等荧光参数,增强幼苗光合能力,表明江南油杉幼苗对遮荫环境有较强的适应能力,其光捕获能力、光能利用效率随着遮荫程度的增强而增大。但随着遮荫程度的增强,幼苗接收到的光能也不断减少,过度缺乏光能也会限制幼苗的生长发育,不利于江南油杉干物质的积累。在遮荫率 60% (T<sub>2</sub>) 的遮荫处理下,江南油杉幼苗受胁迫较小,其生长、叶片表型特征、光合能力以及生物量积累与分配等表现最优。因此,在江南油杉苗木的培育管理实践中,建议采用适度的遮荫处理(以遮荫率 60% 为宜),以培育出优良健壮的苗木。

参考文献:

- [1] 潘瑞炽. 植物生理学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [2] 郑 坚, 吴朝辉, 陈秋夏, 等. 遮荫对降香黄檀幼苗生长和生理的影响[J]. 林业科学, 2016, **52**(12): 50-57.
- ZHENG J, WU Z H, CHEN Q X, *et al.* Influence of shading on growth and physiology of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(12): 50-57.
- [3] GEHRING C A. Growth responses to arbuscular mycorrhizae by rain forest seedlings vary with light intensity and tree species[J]. *Plant Ecology*, 2003, **167**(1): 127-139.
- [4] PEARCY R W, SIMS D A. Photosynthetic acclimation to changing light environments: Scaling from the leaf to the whole plant[M]//Exploitation of environmental heterogeneity by plants. Amsterdam: Elsevier, 1994: 145-174.
- [5] 陈 乾, 邓智文, 黄丽婷, 等. 遮荫对福建柏幼苗生理特性和叶绿素荧光特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, **50**(2): 223-229.
- CHEN Q, DENG Z W, HUANG L T, *et al.* Effects of shading on physiological characteristics and chlorophyll fluorescence characteristics of *Fokienia hodginsii* seedlings [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University* (Natural Science Edition), 2021, **50**(2): 223-229.
- [6] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第七卷[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [7] 蒋 赉, 刘 菲, 刘雄盛, 等. 珍贵乡土树种江南油杉种质资源保存评价及壮苗繁育体系构建技术[J]. 广西林业科学, 2022, **51**(1): 1-9.
- JIANG Y, LIU F, LIU X S, *et al.* Preservation and evaluation of germplasm resources of precious local tree species *Keteleeria fortunei* var. *cyclolepis* and construction of strong seedling breeding system [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2022, **51**(1): 1-9.
- [8] 张 烨, 韦铄星, 蒋 赉, 等. 27 年生江南油杉人工林天然更新及其幼苗生长特征[J]. 广西林业科学, 2016, **45**(3): 334-337.
- ZHANG Y, WEI S X, JIANG Y, *et al.* Natural regeneration and seedlings growth characteristics of 27-year-old *Keteleeria cyclolepis* plantation[J]. *Guangxi Forestry Science*, 2016, **45**(3): 334-337.
- [9] 刘雄盛, 肖玉菲, 王 勇, 等. 江南油杉营养器官的解剖结构及其生态适应性[J]. 植物科学学报, 2020, **38**(1): 39-46.
- LIU X S, XIAO Y F, WANG Y, *et al.* Anatomical structures of vegetative organs of *Keteleeria fortunei* (Murr.) Carr. var. *cyclolepis* (Flous) Silba and its ecological adaptability[J]. *Plant Science Journal*, 2020, **38**(1): 39-46.
- [10] 王树凤, 施 翔, 陈益泰, 等. 遮荫对弗吉尼亚栎苗木生长及光合-荧光参数的影响[J]. 林业科学研究, 2019, **32**(5): 99-106.
- WANG S F, SHI X, CHEN Y T, *et al.* Effects of shading on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Quercus virginiana* seedlings[J]. *Forest Research*, 2019, **32**(5): 99-106.
- [11] 张俊杰, 刘 青, 韦 霄, 等. 光强对金丝李幼苗生长及光合特性的影响[J]. 林业科学, 2022, **58**(5): 53-64.
- ZHANG J J, LIU Q, WEI X, *et al.* Influence of light intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Garcinia paucineervis* seedlings[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, **58**(5): 53-64.
- [12] 崔 波, 程邵丽, 袁秀云, 等. 低温胁迫对白及光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 热带作物学报, 2019, **40**(5): 891-897.
- CUI B, CHENG S L, YUAN X Y, *et al.* Effects of low temperature stress on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Bletilla striata* [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, **40**(5): 891-897.
- [13] 刘泽彬, 程瑞梅, 肖文发, 等. 遮荫对中华蚊母树苗期生长及光合特性的影响[J]. 林业科学, 2015, **51**(2): 129-136.
- LIU Z B, CHENG R M, XIAO W F, *et al.* Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Distylium chinense* seedlings [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(2): 129-136.
- [14] 代大川, 胡红玲, 陈 洪, 等. 遮荫对桢楠幼苗生长和光合生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, **48**(4): 56-64.
- DAI D C, HU H L, CHEN H, *et al.* Effects of shading on growth and photosynthetic characteristics of *Phoebe zhennan* seedlings[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science Edition), 2020, **48**(4): 56-64.
- [15] 刘青青, 马祥庆, 黄智军, 等. 光强对杉木幼苗形态特征和叶片非结构性碳含量的影响[J]. 生态学报, 2019, **39**(12): 4 455-4 462.
- LIU Q Q, MA X Q, HUANG Z J, *et al.* Effects of light intensity on the morphology characteristics and leaf non-structural carbohydrate content of Chinese fir seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(12): 4 455-4 462.
- [16] 王满莲, 韦 霄, 唐 辉, 等. 光强对 3 种喀斯特植物幼苗生长和光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(3): 604-610.
- WANG M L, WEI X, TANG H, *et al.* Effects of light intensity on growth and photosynthesis of three Karst plant seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(3): 604-610.
- [17] 唐星林, 刘光正, 姜 姜, 等. 遮荫对闽楠 1 年生和 3 年生幼树叶叶绿素荧光特性及能量分配的影响[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(10): 3 247-3 254.
- TANG X L, LIU G Z, JIANG J, *et al.* Effects of shading on the chlorophyll fluorescence characteristics and light energy partitioning of one-and three-year-old *Phoebe bournei* seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3 247-3 254.
- [18] 于明华, 马 烈, 孙 权, 等. 遮光下 5 个月季品种的叶片光合功能及叶绿素荧光特性[J]. 分子植物育种, 2022: 1-11.
- YU M H, MA L, SUN Q, *et al.* Photosynthetic function and chlorophyll fluorescence characteristics of five *Rosa* cultivars under shading[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022: 1-11; <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220105.1744.008.html>

(编辑: 裴阿卫)