

◆植物科学◆

光照强度对3种金花茶光合生理特性及生物量的影响^{*}朱舒靖^{1,2}, 江海都¹, 杨一山¹, 许爱祝¹, 邹蓉¹, 唐健民¹, 韦霄¹, 柴胜丰^{1**}

(1. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室, 广西桂林 541006; 2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006)

摘要:四季花金花茶(*Camellia perpetua*)、淡黄金花茶(*C. flavida*)和东兴金花茶(*C. tunghinensis*)隶属山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)金花茶组(*Camellia* Sect. *Chrysantha*), 为国家二级重点保护野生植物。这3个物种分布范围狭窄, 野生资源濒临灭绝, 探索其对不同光照环境的适应性, 寻找适宜其生长的光照强度, 可为这3种金花茶的人工繁育、种群恢复及迁地保护提供理论依据, 也可为其野生种群生境差异的原因提供部分解释。本研究以上述3种金花茶3年生扦插苗为试验材料, 采用人工遮阴方法研究不同光照强度(8%、20%、45%、100%)对其光合生理特性和生物量的影响。结果表明:(1)3种金花茶在低光照环境(8%和20%光照强度)下有较大的最大净光合速率(P_{max})、表观量子效率(AQY)、最大荧光(F_m)、最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率($\Phi PS II$)和光合电子传递速率(ETR), 表明其对低光照环境有较好的适应性。(2)四季花金花茶的 P_{max} 在45%光照强度下仍保持较高水平, 且光饱和点(LSP)随着光照强度的增加呈升高趋势; 而淡黄金花茶和东兴金花茶的 P_{max} 和LSP随光照强度的增加先升高后降低, 均在20%光照强度下达到最大值。(3)随着光照强度的增加, 3种金花茶叶片叶绿素总量(Chl)、叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)含量降低, Car/Chl值升高, Chl a/Chl b值先降低后升高。(4)3种金花茶根、茎、叶生物量和总生物量均随着光照强度的增加先升高后降低, 其中四季花金花茶在45%光照强度下最高, 而淡黄金花茶和东兴金花茶则在20%光照强度下最高。综上可知, 四季花金花茶对于强光的耐受性更强, 淡黄金花茶次之, 东兴金花茶最弱; 四季花金花茶喜中等光照环境(45%光照强度), 而淡黄金花茶和东兴金花茶偏好低光照环境(20%光照强度); 3种金花茶的光合特性符合其野生种群的分布地光环境特征。

关键词:金花茶; 光照强度; 叶绿素; 光合特性; 生物量

中图分类号: Q945.7 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2024)01-0031-10

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20240319.004

收稿日期: 2023-12-13

修回日期: 2024-01-07

^{*}国家自然科学基金项目(32160091, 32060248), 广西重点研发计划项目(桂科 AB21196018), 国家重点研发计划项目(2022YFF1300700), 桂林市创新平台和人才计划项目(20210102-3), “桂科学者”创新团队启动项目(CQZ-C-1902)资助。

【第一作者简介】

朱舒靖(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事濒危植物保育研究。

【**通信作者简介】

柴胜丰(1980—), 男, 研究员, 主要从事珍稀特色植物保育及持续利用研究, E-mail: sfchai@163.com。

【引用本文】

朱舒靖, 江海都, 杨一山, 等. 光照强度对3种金花茶光合生理特性及生物量的影响[J]. 广西科学院学报, 2024, 40(1): 31-40.

ZHU S J, JIANG H D, YANG Y S, et al. Effects of Light Intensity on Photosynthetic Physiological Characteristics and Biomass of Three Yellow *Camellia* Species [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2024, 40(1): 31-40.

金花茶组(*Camellia* Sect. *Chrysantha*)为山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)植物,多为常绿灌木或小乔木,高可达 3—4 m,是国家二级重点保护野生植物和世界珍稀观赏植物^[1,2]。山茶属植物的花瓣颜色多为红色、白色或复合色。20 世纪 60 年代初,金花茶首次被发现,其花瓣金黄色润,如上薄腊,形态优美,是唯一开黄色花朵的山茶属植物。金花茶的观赏价值和市场开发潜力极高,但种质资源十分有限,因此被誉为“茶族皇后”“植物界大熊猫”。广西是金花茶分布的中心,主要分布地在防城港、扶绥、凭祥等县市,广西因此又被誉为金花茶的故乡^[3,4]。金花茶具有较高的药用价值,其含有茶多糖、氨基酸、茶多酚以及皂苷等多种活性成分,此外,金花茶提取物具有抗肝癌、抗肿瘤和降血脂等作用^[5-8]。

光照是影响植物生存的重要环境因子,是植物存储物质和能量的重要来源之一。通过研究濒危植物的光合生理特性,可判断植物的生长发育情况,为种群恢复和保护提供理论依据^[9]。濒危植物与光环境之间的关系已被广泛关注^[10,11]。木兰(*Magnolia liliflora*)、毛果木莲(*Manglietia ventii*)幼苗夏季易受光胁迫,适当遮阴能提高其光合速率^[12,13];崖柏(*Thuja sutchuenensis*)在较高光照条件下有较好的光合性能,遮阴过度会因光照不足影响植株正常生长^[14]。目前,关于金花茶组植物光合特性方面已有一些研究。杨期和等^[15]对金花茶(*C. nitidissima*)光合生理特性的研究表明,夏季幼苗光合作用有午休现象,较喜热,光饱和点和补偿点较低,是典型的阴生植物;金花茶在 80%遮阴处理下叶片中的氮素和光合色素含量最高,净光合速率(P_n)最大。毛瓣金花茶(*C. pubipetala*)能忍受一定程度的强光(50%光照强度),在迁地保护时可选择相对开敞的环境^[10]。越南多毛金花茶(*C. hirsuta*)适宜在 20%—30%光照强度下生长^[11]。这些研究结果为濒危植物的保护与种群恢复提供了重要理论依据。

虽然金花茶组植物均为生长在林下的阴生植物,但其光需求特性及对不同光照强度的适应性仍存在差异。以往多对单个金花茶物种进行光合特性的研究,还缺乏相似材料、不同物种在相同环境下光合特性的比较研究,也没有从光合特性角度去分析不同金花茶物种生境差异的原因。为此,本研究通过搭建遮阴网,模拟不同光照强度,探究四季花金花茶(*C. perpetua*)、淡黄金花茶(*C. flavida*)和东兴金花茶(*C. tunghinensis*)在不同光照强度下的光合生理特

性和生长状况,分析 3 种金花茶对不同光照强度的适应性,拟为其人工繁育、种群恢复及迁地保护等提供理论依据,也为其生境差异的原因提供部分解释。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广西桂林市雁山区广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所。海拔 175 m,属中亚热带季风气候区,年平均气温 19.2 °C,最热月平均气温 28.4 °C,最冷月平均气温 7.7 °C,年平均降水量 1 854.8 mm(降水量多集中于 4—8 月,占全年降水量的 73%),年平均日照时数 1 680 h,年平均相对湿度 82%^[16]。试验地气候温和,雨量充沛,适合金花茶组植物的生长。

1.2 试验材料和处理

选取生长状况良好、长势基本一致且无病虫害的四季花金花茶、淡黄金花茶和东兴金花茶 3 年生扦插苗为试验材料,3 种金花茶苗高为 45—50 cm。光照强度设置参考柴胜丰等^[10]的方法,利用黑色尼龙搭建遮阴棚,光照强度分别设置为 8%、20%、45%和 100%(无遮阴)。将 3 种金花茶幼苗种植于内径 30 cm、深 25 cm 的塑料花盆中,栽培基质为林下表层土壤,每盆 1 株,每个处理 10 盆。将 3 种金花茶幼苗在 8%光照强度的遮阴棚中恢复生长 1 个月后,于 5 月中旬将每个处理幼苗分别放置于 4 个遮阴棚中,定期浇水施肥,统一管理,9 月中旬进行光合生理指标的测定。因 3 种金花茶在秋冬季抽稍,于翌年 3 月中旬进行生物量的测定。由于东兴金花茶在 100%光照强度下叶片脱落并逐渐死亡,因此没有进行该处理各试验指标的测定。

1.3 光合-光响应曲线的测定

于 2022 年 9 月 16 日(晴天)08:30—12:30,用 Li-6400XT 便携式光合系统(美国 Li-Cor 公司)进行光合-光响应曲线的测定。选取植株顶部健康完整的成熟叶片,在 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下诱导 30 min 以激活光合系统,设置光照强度梯度为 1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、20、0 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以光量子通量密度(PPFD)为横轴、净光合速率(P_n)为纵轴绘制光合-光响应曲线(P_n -PPFD 曲线),依据 Bassman 等^[17]的方法拟合 P_n -PPFD 曲线方程: $P_n = P_{\text{max}}(1 - C_0 e^{-\Phi \text{PPFD}/P_{\text{max}}})$,其中 P_{max} 为最大净光合速率,即光合能力, C_0 为度量弱光下净光合速率趋于 0 的指标, Φ 为弱光下光化学量子效率。通

过适合性检验,若拟合效果良好,则可用下式计算光补偿点(LCP): $LCP = P_{\max} \ln(C_0) / \Phi$,假定 P_n 达到 P_{\max} 的 99% 的 PPFD 为光饱和点(LSP),则 $LSP = P_{\max} \ln(100 C_0) / \Phi$ 。表观量子效率(AQY)为 $0-50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照强度范围内净光合速率与光照强度直线方程的斜率。每个处理测定 3 株,每株测定 1 片叶子。

1.4 叶绿素荧光参数的测定

将试验苗木于当天晚上移入室内黑暗环境中,次日凌晨用 Mini-Imaging-PAM-2100 调制叶绿素荧光成像系统(德国 WALZ 公司)测定叶片的叶绿素荧光参数。先用测量光(强度为 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)测定初始荧光 F_0 ,随后用饱和光 $6000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 脉冲(脉冲时间 0.8 s)激发产生最大荧光(F_m)。用光化光(强度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)诱导荧光动力学曲线,测定叶片光适应下的最小荧光(F'_0)、最大荧光(F'_m)和稳定荧光(F_s),并由 Wincontrol-3 软件计算光系统 II (PS II)最大光化学效率(F_v/F_m ,其中 F_v 为可变荧光)、实际光化学效率($\Phi_{\text{PS II}}$)和光合电子传递速率(ETR)。每个处理测定 6 株,每株测定 1 片叶子。

1.5 光合色素含量的测定

选取 3-5 片成熟度与测量方位一致、健康且完整的叶片进行光合色素指标测定。用 95% 乙醇提取叶片的光合色素,分别在 665、649、470 nm 波长下测

定提取液的吸光值,按照参考文献[18]计算叶绿素总量(Chl)、叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)、类胡萝卜素(Car)含量、叶绿素 a 与叶绿素 b 的比值(Chl a/Chl b)、叶绿素与类胡萝卜素的比值(Chl/Car),每个处理重复 3 次。

1.6 生物量测定

在试验结束后,每个处理取 5 株幼苗,洗净晾干后用枝剪将根、茎、叶分开放于信封袋,置于 80°C 烘箱烘干至恒重后,取出分别测定根生物量、茎生物量、叶生物量和总生物量,记录数据。

1.7 数据处理

利用 Excel 2016 进行数据统计,采用 SPSS 20.0 进行方差分析,并用 Duncan 法进行多重比较,绘图采用 Sigma plot 12.5。

2 结果与分析

2.1 环境因子日变化

3 种金花茶生长地环境因子日变化如图 1 所示。在 100% 光照强度下,光合有效辐射(PAR)最大值出现在 14:30 左右,为 $1408.40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在 45% 光照强度下,PAR 最大值为 $670.12 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在 20% 和 8% 光照强度下,PAR 最大值均在 $250 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。空气温度(T_a)和空气湿度(RH)均受到 PAR 的影响, T_a 变化趋势与 PAR 基本一致,而 RH 变化趋势与 PAR 相反。

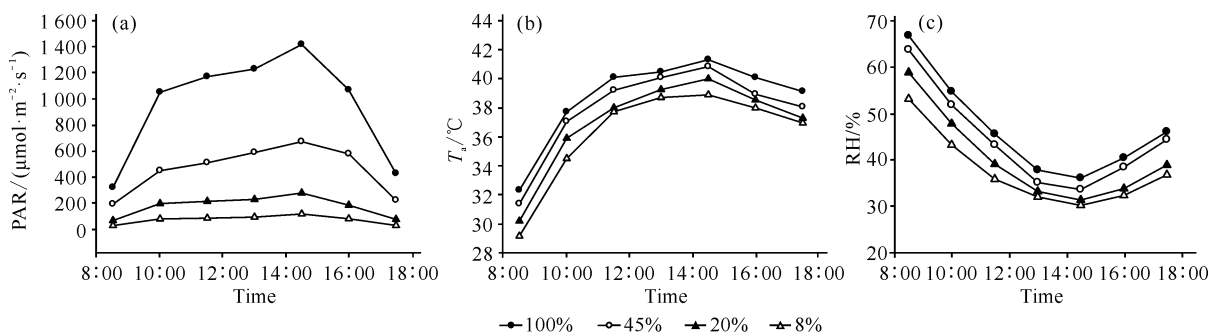


图 1 3 种金花茶生长地环境因子日变化

Fig. 1 Daily variation of environmental factors in the growing areas of three yellow *Camellia* species

2.2 光照强度对 3 种金花茶光合-光响应曲线的影响

四季金花茶和东兴金花茶 PPFD 在 $0-200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其 P_n 呈指数式上升;当 PPFD 在 $200-400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 缓慢上升;当 PPFD 大于 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 基本保持不变。淡黄金花茶在 20% 和 100% 光照强度下的 P_n 变化趋势与四季金花茶和东兴金花茶 P_n 变化趋

势基本一致。在 8% 和 45% 光照强度下,淡黄金花茶 PPFD 在 $0-150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,其 P_n 呈指数式上升;在 $150-200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 上升缓慢,后趋于平衡(图 2)。不同光照强度环境下 3 种金花茶的光合-光响应曲线随光照强度的变化趋势基本一致,但 P_n 大小存在差异:四季金花茶 P_n 表现为 $8\% > 20\% > 45\% > 100\%$,淡黄金花茶 P_n 表现为 $20\% > 8\% > 45\% > 100\%$,东兴金花茶 P_n 表现为

20% > 8% > 45%。

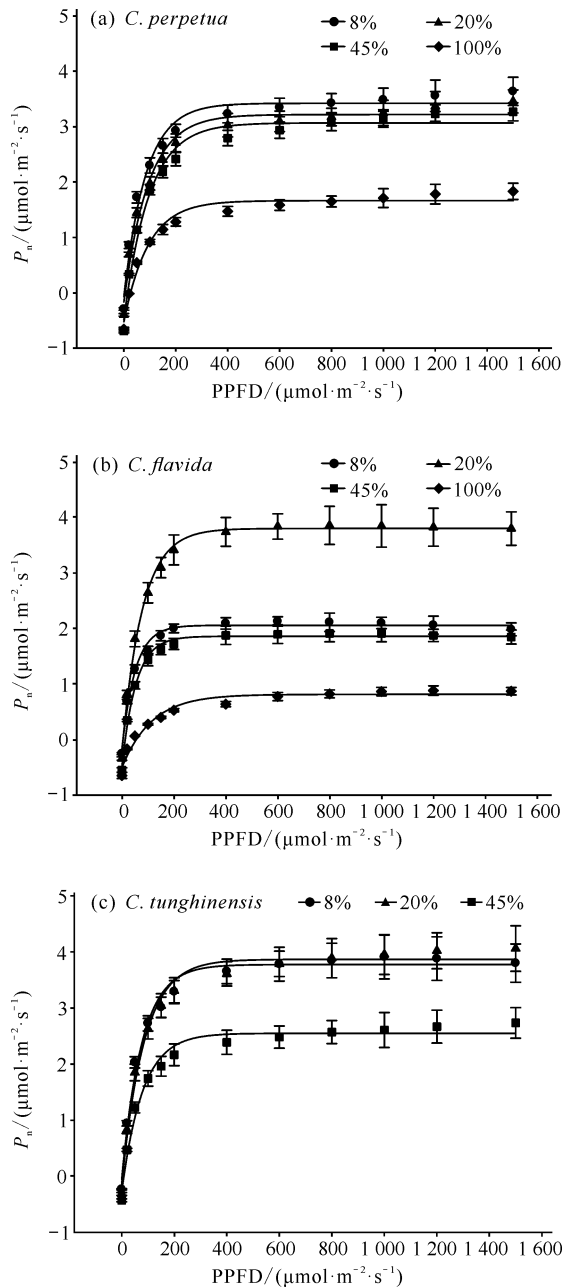


图2 不同光照强度处理下3种金花茶光合-光响应曲线

Fig. 2 Photosynthetic-light response curves of three yellow *Camellia* species under different light intensity treatments

四季花金花茶的 P_{\max} 随着光照强度的增加而表现出逐渐下降的趋势,100%光照强度下的 P_{\max} 显著低于其他3个处理($P < 0.05$),而其他3个处理间无显著差异($P > 0.05$)(表1)。淡黄金花茶和东兴金花茶的 P_{\max} 随着光照强度的增加则表现为先升高后降低的趋势,两者均在20%光照强度下达到最大值。

四季花金花茶的 LSP 随着光照强度的增加而升高,100%光照强度下的 LSP 为 $457.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显著高于8%光照强度下的 LSP ($386.50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)($P < 0.05$);淡黄金花茶和东兴金花茶的 LSP 随着光照强度的升高表现为先升高后降低的趋势,两者均在20%光照强度下达到最大值。3种金花茶的 LCP 均随着光照强度的增加而升高。四季花金花茶和东兴金花茶的 AQY 随着光照强度的增加呈下降趋势。与8%光照强度下的 AQY ($0.0394 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)相比,四季花金花茶在100%光照强度下的 AQY ($0.0236 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)显著下降($P < 0.05$);淡黄金花茶在20% ($0.0424 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)下的 AQY 则显著高于8%光照强度 ($0.0281 \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)($P < 0.05$)。淡黄金花茶的 AQY 随光照强度的升高呈先升高后降低趋势,在20%光照强度下 AQY 达到最大值。在20%光照强度下,东兴金花茶的 P_{\max} ($3.870 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)显著高于四季花金花茶 ($3.352 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)($P < 0.05$),而淡黄金花茶的 P_{\max} ($3.525 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)与两者之间无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 光照强度对3种金花茶叶绿素荧光参数的影响

3种金花茶叶绿素荧光参数如表2所示。随着光照强度的增加,四季花金花茶 F_0 表现为先增大后减小,但各处理间无显著差异($P > 0.05$); F_m 在8%光照强度有最大值、 F_v/F_m 则表现为逐渐下降的趋势,100%光照强度的 F_m (1200.67)和 F_v/F_m (0.716)显著低于其他3个处理($P < 0.05$),而其他3个处理间无显著差异($P > 0.05$)。四季花金花茶 ΦPSII 和 ETR 均随着光照强度的增加呈先升高后降低的趋势,20%光照强度下最大(分别为 0.611 和 51.37),100%光照强度下最小(分别为 0.445 和 37.20),100%光照强度下的 ΦPSII 和 ETR 显著低于其他3个处理($P < 0.05$);淡黄金花茶45%光照强度下的 F_m 、 F_v/F_m (分别为 1464.00 和 0.755)和100%光照强度下的 F_m 、 F_v/F_m (分别为 1095.33 和 0.677)显著低于8%光照强度下的 F_m 、 F_v/F_m (分别为 1893.33 和 0.807)和20%光照强度下的 F_m 、 F_v/F_m (分别为 1815.00 、 0.787);东兴金花茶 F_m 、 F_v/F_m 、 ΦPSII 和 ETR 随光照强度的增加均表现为下降趋势,45%光照强度下的 F_v/F_m (0.730)、 ΦPSII (0.463)和 ETR (36.76)显著低于其他2个处理。

表 1 不同光照强度下 3 种金花茶的光响应参数

Table 1 Light response parameters of three yellow *Camellia* species under different light intensities

种类 Species	光照强度/% Light intensity/%	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $P_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	表观量子效率/ ($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) AQY/($\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LSP/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) LCP/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
<i>C. perpetua</i>	8	3.415±0.297bc	0.039 4±0.002 3bc	386.50±25.99bc	2.04±0.35f
	20	3.352±0.230c	0.037 7±0.001 9c	408.64±28.65abc	7.33±1.07de
	45	3.241±0.347c	0.037 1±0.002 6c	439.38±46.04ab	14.61±1.97c
	100	1.664±0.243f	0.023 6±0.002 7f	457.01±42.55a	26.62±3.97b
<i>C. flavida</i>	8	2.059±0.084e	0.028 1±0.002 9e	285.51±10.80d	4.30±1.07ef
	20	3.525±0.047abc	0.042 4±0.002 8ab	362.58±27.26c	6.55±0.70de
	45	1.831±0.038ef	0.029 8±0.001 9de	261.23±10.42d	13.41±0.91c
	100	0.794±0.097g	0.012 3±0.002 2g	240.01±20.71d	48.66±5.13a
<i>C. tunghinensis</i>	8	3.780±0.220a	0.045 0±0.002 2a	365.70±22.04c	1.23±0.12f
	20	3.870±0.332ab	0.039 3±0.002 9bc	404.48±44.16abc	3.73±0.32ef
	45	2.549±0.172d	0.032 5±0.001 4d	371.24±29.06c	8.31±1.33d

Note: different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

表 2 不同光照强度下 3 种金花茶的叶绿素荧光参数

Table 2 Chlorophyll fluorescence parameters of three yellow *Camellia* species under different light intensities

种类 Species	光照强度/% Light intensity/%	F_0	F_m	F_v/F_m	ΦPS II	ETR
<i>C. perpetua</i>	8	326.00±38.57b	1 670.67±187.21ab	0.805±0.003ab	0.563±0.048ab	47.30±4.04ab
	20	367.00±34.64b	1 609.00±176.67ab	0.790±0.004ab	0.611±0.024a	51.37±1.96a
	45	387.00±30.45ab	1 647.00±196.92ab	0.776±0.007bc	0.523±0.053bc	44.5±3.84bc
	100	355.33±40.46b	1 200.67±125.46c	0.716±0.026ef	0.445±0.020d	37.20±1.65d
<i>C. flavida</i>	8	369.33±30.02b	1 893.33±190.95a	0.807±0.004a	0.359±0.028e	31.53±4.26e
	20	379.00±45.51b	1 815.00±208.43a	0.787±0.011ab	0.510±0.025cd	42.83±2.10bc
	45	392.33±24.01ab	1 464.00±88.96b	0.755±0.013cd	0.465±0.012d	39.07±0.99cd
	100	348.00±26.96b	1 095.33±117.01c	0.677±0.058f	0.273±0.065f	23.30±3.90f
<i>C. tunghinensis</i>	8	359.67±41.48b	1 855.00±131.64a	0.803±0.008ab	0.560±0.015ab	47.03±1.25ab
	20	363.00±28.79b	1 690.33±70.87ab	0.785±0.017ab	0.533±0.065bc	45.47±4.41a
	45	441.67±27.79a	1 627.67±70.03ab	0.730±0.008de	0.463±0.052d	36.76±4.61de

Note: different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

2.4 光照强度对 3 种金花茶光合色素含量及比例的影响

随着光照强度的增加, 3 种金花茶叶片 Chl *a*、Chl *b*、Chl 和 Car 含量均逐渐下降(表 3)。3 种金花茶叶片 Chl *a*/Chl *b* 值随着光照强度的增加表现为先降低后升高的趋势, 在 20% 光照强度下最低, 100% 光照强度最高(除东兴金花茶在 45% 光照强度最高外)。3 种金花茶的 Car/Chl 值均随着光照强度增加而升高, 45% 和 100% 光照强度下的 Car/Chl 值显著高于 8% 光照强度和 20% 光照强度(东兴金花茶

的 Car/Chl 值在 45% 光照强度下最高)($P < 0.05$)。在 20% 光照强度下, 3 种金花茶叶片 Chl 含量大小表现为东兴金花茶($1.935 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$) > 四季金花茶($1.309 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$) > 淡黄金花茶($0.996 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$)。

2.5 光照强度对 3 种金花茶生物量的影响

随着光照强度的增加, 3 种金花茶根生物量、茎生物量、叶生物量和总生物量均表现为先增加后降低趋势(表 4)。不同光照强度下四季金花茶的茎生物量、叶生物量和总生物量均表现为 45% > 20% > 8% > 100%, 45% 光照强度下的根生物量(14.51 g)、

茎生物量(15.37 g)、叶生物量(10.72 g)和总生物量(40.61 g)均显著高于其他3个处理($P < 0.05$),而100%光照强度下的叶生物量(4.44 g)显著低于其他处理($P < 0.05$)。不同光照强度下淡黄金花茶的茎生物量、叶生物量和总生物量表现为20% > 45% > 8% > 100%; 20%光照强度下的总生物量显著高于

8%和100%光照强度($P < 0.05$),100%光照强度下的总生物量显著低于其他处理($P < 0.05$)。东兴金花茶的茎生物量、叶生物量和总生物量表现20% > 8% > 45%,20%光照强度下的总生物量显著高于45%光照强度($P < 0.05$),而后两者间无显著差异($P > 0.05$)。

表3 不同光照强度下3种金花茶叶片光合色素含量及比例

Table 3 Content and proportion of photosynthetic pigments in three yellow *Camellia* species under different light intensities

种类 Species	光照强度/% Light intensity/%	Chl a/ (mg · g ⁻¹ FW)	Chl b/ (mg · g ⁻¹ FW)	Chl/ (mg · g ⁻¹ FW)	Car/ (mg · g ⁻¹ FW)	Chl a/Chl b	Car/Chl
<i>C. perpetua</i>	8	1.301±0.096b	0.633±0.032b	1.934±0.128b	0.220±0.013bc	2.052±0.048de	0.114±0.001d
	20	0.846±0.201c	0.463±0.089de	1.309±0.290cd	0.151±0.027de	1.819±0.079ef	0.116±0.005d
	45	0.462±0.074def	0.203±0.009fg	0.665±0.084efg	0.118±0.015ef	2.277±0.274bcd	0.171±0.009c
	100	0.219±0.059fg	0.091±0.024gh	0.311±0.079gh	0.074±0.013fg	2.429±0.380abc	0.241±0.021a
<i>C. flavida</i>	8	1.094±0.131b	0.510±0.060cd	1.604±0.188bc	0.197±0.029cd	2.146±0.090cde	0.122±0.004d
	20	0.628±0.088cd	0.368±0.054e	0.996±0.143de	0.132±0.014e	1.705±0.018f	0.134±0.006d
	45	0.296±0.042efg	0.121±0.027fgh	0.417±0.069fgh	0.083±0.012fg	2.476±0.217ab	0.200±0.020b
	100	0.190±0.015f	0.070±0.003h	0.260±0.003h	0.062±0.005g	2.704±0.220a	0.261±0.021a
<i>C. tunghinensis</i>	8	2.065±0.374a	0.977±0.186a	3.042±0.560a	0.398±0.070a	2.116±0.022cde	0.131±0.001d
	20	1.310±0.070b	0.626±0.024bc	1.935±0.092b	0.249±0.021b	2.094±0.063de	0.132±0.001d
	45	0.550±0.049de	0.219±0.017f	0.769±0.064ef	0.163±0.008de	2.509±0.136ab	0.213±0.010b

Note: different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

表4 光照强度对3种金花茶生物量的影响

Table 4 Effects of different light intensities on the biomass of three yellow *Camellia* species

种类 Species	光照强度/% Light intensity/%	根生物量/g Root biomass/g	茎生物量/g Stem biomass/g	叶生物量/g Leaf biomass/g	总生物量/g Total biomass/g
<i>C. perpetua</i>	8	10.52±0.98bc	11.50±1.20cd	7.72±1.08b	29.74±2.78de
	20	11.78±1.69b	12.82±0.73bc	8.67±1.42b	33.27±2.68cd
	45	14.51±1.58a	15.37±1.38a	10.72±0.33a	40.61±3.17a
	100	10.70±1.49bc	11.30±1.34cd	4.44±0.81c	26.45±3.32e
<i>C. flavida</i>	8	8.11±0.67d	11.88±2.05cd	8.05±0.51b	28.05±2.25e
	20	11.54±1.35b	15.26±1.04a	11.52±0.58a	38.33±1.38ab
	45	10.92±1.07b	14.85±1.25ab	9.14±1.19b	34.91±0.65bc
	100	8.85±0.68cd	11.05±1.56cde	1.53±0.29e	21.43±1.13f
<i>C. tunghinensis</i>	8	4.07±0.79e	8.73±1.86ef	3.73±0.38cd	16.53±2.91gh
	20	5.48±0.55e	9.95±0.35def	4.07±0.34cd	19.50±0.48fg
	45	4.32±0.81e	7.61±1.13f	2.83±0.95de	14.77±2.36h

Note: different letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 光照强度对3种金花茶光合特性的影响

了解植物的光合特征参数,可以更直观地了解植

物在光合作用过程中的光化学效率^[19]。 P_{max} 是判断植物潜在光合作用能力的重要指标^[20]。本研究中,3种金花茶在相对较高光照强度处理下的 P_{max} 显著低于低光照强度处理($P < 0.05$),这与对金丝李(*Gar-*

cinia paucineris)、葶叶紫金牛(*Ardisia violacea*)等植物的研究结果基本一致^[21,22]。长时间的高光照强度照射可能会引起PS II反应中心结构的破坏,降低Rubisco酶活性,导致吸收过量的光源成为应激源并增加活性氧(ROS),增加光呼吸和暗呼吸,从而导致光合速率下降^[23,24]。四季花金花茶在8%—45%光照强度范围内的 P_{max} 基本保持稳定,而淡黄金花茶和东兴金花茶在45%光照强度下的 P_{max} 显著低于20%光照强度,表明四季花金花茶能较好地适应低光照至中等光照环境,而淡黄金花茶和东兴金花茶对低光照环境适应能力更强。LCP和LSP是判断植物对光的利用范围,通常情况下,LSP越高,说明植物对强光的利用能力越强;LCP越低,说明植物在弱光环境下对光的利用能力越强^[25]。本研究中,随着光照强度的增加,四季花金花茶的LSP逐渐升高,表明四季花金花茶能通过提高LSP来部分适应高光照强度,其光合特性随光照强度的变化有一定的可塑性^[24],这与对老鸦瓣(*Amana edulis*)的研究结果一致^[26]。淡黄金花茶和东兴金花茶的LSP随光照强度增加表现为先升高后降低的趋势(20%光照强度下最大),表明这2种金花茶对高光照强度的适应能力较差^[27],这与王晓冰等^[28]对大百合(*Cardiocrinum giganteum*)的研究结果基本一致。AQY是光合作用中光能转化的指标之一,其值通常为0.02—0.05,值越高,植物在相应弱光下转换利用光能的效率就越高^[29]。本研究中,四季花金花茶和淡黄金花茶在100%光照强度下的AQY值显著低于其他光照强度,东兴金花茶在45%光照强度下的AQY值最低,表明生长在高光照强度下的3种金花茶对光的利用能力减弱。在8%光照强度下,东兴金花茶有最大的AQY和最小的LCP,表明其在低光照强度下对弱光的利用效率提高,更适应弱光环境^[30]。光合特性的研究结果与3种金花茶的野生种群分布地生境一致,四季花金花茶分布于石山中上部,喜相对开敞的遮阴环境;淡黄金花茶分布于石山山坳或山坡中下部,喜阴或半阴环境;东兴金花茶分布于土山中部沟谷或水沟旁荫蔽度较高的林下,喜阴湿环境;3种金花茶对不同生境的偏好可能与其光合能力大小及对不同光照强度的适应性有一定关系。

3.2 光照强度对3种金花茶叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光与光合作用反应密切相关,叶绿素荧光参数能有效反映植物光能捕获效率^[31]。初始荧光(F_0)是叶片暗适应后光系统II反应中心全部开放时

的荧光水平,最大荧光产量(F_m)反映了PS II的电子传递情况, $\Phi PS II$ 体现了实际光化学效率。本研究中,四季花金花茶和淡黄金花茶的 F_0 随着光照强度的增加基本表现出先升高后降低的趋势,这与义安油茶(*Camellia oleifera* var. 'nhge an')、西洋杜鹃(*Rhododendron hybridum*)随着光照强度的增加 F_0 逐渐升高的结果不同^[32,33],可能是这两种金花茶对100%光照强度适应能力比义安油茶、西洋杜鹃弱。在弱光下植物会通过提高PS II活性来抵御弱光胁迫,在高光照强度下 F_0 降低可能是类囊体膜受到损害,PS II反应中心受到伤害或发生不可逆失活造成的^[34]。在未受到外界环境条件影响的情况下, F_v/F_m 值一般为0.75—0.85^[35,36]。本研究结果显示,3种金花茶 F_v/F_m 值随着光照强度的增加逐渐降低,与吴飞燕等^[37]对石栎(*Lithocarpus glaber*)的研究结果类似。四季花金花茶在100%光照强度下、淡黄金花茶在45%和100%光照强度下、东兴金花茶在45%光照强度下的 F_v/F_m 值均显著低于其他处理,表明高光照强度可能破坏了PS II结构,降低了3种金花茶PS II光能转化效率,使光合速率下降。四季花金花茶的 F_v/F_m 值在8%—45%光照强度下无显著差异,表明其对中等光照强度有一定的适应性,这与 P_{max} 的变化一致。四季花金花茶和淡黄金花茶的ETR和 $\Phi PS II$ 均在20%光照强度下达到最大值,东兴金花茶在8%光照强度下达到最大值,表明在相应低光照强度下, $\Phi PS II$ 光能转化效率更高,吸收的光能更多地被用于光化学途径^[38]。3种金花茶中,东兴金花茶对低光照环境的适应性更好。

3.3 光照强度对3种金花茶光合色素含量的影响

叶绿素含量的高低可作为植物耐强弱光能力的重要指标。在一定的光照强度范围内,叶绿素含量随着光照强度的增加而减小^[39]。本研究中,3种金花茶随着光照强度的增加,叶绿素含量逐渐降低,这与前人研究结果基本一致^[40-42]。随着光照强度的增加,3种金花茶Chl a/Chl b值先降低后升高,最低值出现在20%光照强度,在相对弱光下叶绿素b的含量升高,有利于植物捕获更多光能用于合成有机物,促进植物生长^[25,43]。3种金花茶Car与Chl含量均随光照强度的增加而减少,而Car/Chl值表现为上升趋势,这是由于Car稳定性高于Chl。在高光照条件下,Car的增加能保护植物的光合结构,避免Chl光氧化遭到破坏^[24],这是其对强光胁迫的一种光保护调节机制。

3.4 光照强度对3种金花茶生物量的影响

光是控制植物生长发育的关键环境因子,影响着植物的生长和分布^[44]。一般情况下,光照可以促进植物的光合作用,有利于幼苗生物量的积累,但幼苗生物量的积累存在一个最佳光照强度范围,如光照强度过高,幼苗生物量积累则会受到抑制,导致生物量下降^[45]。本研究中,四季花金花茶在45%光照强度、淡黄金花茶与东兴金花茶在20%光照强度下的根、茎、叶生物量及总生物量均高于其他光照强度,这与朱成豪等^[16]和易伟坚等^[46]的研究结果一致。适当增加光照强度能促进金花茶的生长发育,光照过高或过低均不利于生物量的积累。3种金花茶中,四季花金花茶喜中等光照环境,而淡黄金花茶和东兴金花茶偏好低光照环境。

4 结论

四季花金花茶、淡黄金花茶和东兴金花茶在8%和20%光照强度下有较高的 P_{max} 、AQY、 F_m 、 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、ETR和Chl含量,以及较低的LCP,其对低光照环境有较好的适应性,其中东兴金花茶对低光照环境的适应性更强。3种金花茶对高光照环境的适应性存在一定差异,四季花金花茶对于强光的耐受性更强,淡黄金花茶次之,东兴金花茶最弱。在本研究中,四季花金花茶喜45%光照强度,而淡黄金花茶和东兴金花茶偏好20%光照强度。3种金花茶的光合特性符合其野生种群分布地的光环境特征。

参考文献

- [1] 彭国清,郭屹立,韦素娟,等. 弄岗淡黄金花茶种群年龄结构与空间分布格局[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2016,34(3):138-143.
- [2] 李文芳. 几种金花茶的引种栽培适应性研究[J]. 福建林业,2021(5):33-36,40.
- [3] 姜丽娜,李纪元,童冉,等. 金花茶组植物花色与细胞内重要环境因子的关系[J]. 广西植物,2019,39(12):1605-1612.
- [4] 刘林. 世界珍稀观赏植物:金花茶[J]. 广西林业科学,1999,28(2):94-96.
- [5] 王欣晨,李文兰,阎新佳,等. 金花茶化学成分及药理活性研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2018,34(5):522-527,563.
- [6] 李征征,何进勇,邝新红,等. 金花茶提取物对诱发性小鼠肝癌前病变预防作用研究[J]. 亚太传统医药,2017,13(16):3-6.
- [7] 黄悦,侯晓莹,郭恒,等. 金花茶提取物体内抗肿瘤作用研究[J]. 亚太传统医药,2016,12(14):8-11.
- [8] 黄永林,陈月圆,文永新,等. 不同溶剂提取及初步纯化的金花茶叶提取物降血脂功能实验研究[J]. 时珍国医国药,2009,20(4):776-777.
- [9] 郭彩霞,朱铨楠,杨佳曼,等. 3种山茶科植物苗期光合特性的研究[J]. 林业与环境科学,2021,37(5):97-101.
- [10] 柴胜丰,庄雪影,韦霄,等. 光照强度对濒危植物毛瓣金花茶光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2013,33(3):547-554.
- [11] 王坤,韦晓娟,刘凯,等. 越南多毛金花茶的光合特性和叶解剖结构对光照环境的适应[J]. 林业科学研究,2019,32(4):105-113.
- [12] 陈超,金则新,袁梦,等. 不同光照强度下濒危植物景宁木兰幼苗光合特性的季节变化[J]. 浙江农林大学学报,2022,39(5):950-959.
- [13] 徐清,闭鸿雁,崔光帅,等. 珍稀濒危植物毛果木莲幼苗光合特性及对遮阴处理的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(6):46-52.
- [14] 苑景淇,于忠亮,兰雪涵,等. 遮阴对濒危植物朝鲜崖柏光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(5):58-66.
- [15] 杨期和,李旭群,杨和生,等. 金花茶幼苗光合生理生态特性研究[J]. 北京林业大学学报,2010,32(2):57-63.
- [16] 朱成豪,唐健民,韦霄,等. 不同光强对药食两用鳞尾木幼苗生长及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(8):174-178.
- [17] BASSMAN J H, ZWIER J C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* clones [J]. Tree Physiology, 1991, 8(2):145-159.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [19] 夏婵,李何,王佩兰,等. 不同光照强度对赤皮青冈幼苗光合特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2021,41(7):72-79.
- [20] 周欢,韦如萍,李吉跃,等. 光照强度对乐昌含笑幼苗生长及光合特性的影响[J/OL]. 生态学杂志,2023:1-9 (2023-03-28)[2023-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230328.1344.004.html>.
- [21] 张云,夏国华,马凯,等. 遮阴对董叶紫金牛光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(7):1940-1948.
- [22] 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.
- [23] 王松,蔡艳飞,李枝林,等. 光照条件对高山杜鹃光合生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2012,32(10):2095-2101.

- [24] 刘柿良, 马明东, 潘远智, 等. 不同光强对两种桉木幼苗光合特性和抗氧化系统的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1062-1074.
- [25] LI X, ZHANG Q, HE J, et al. Photoacclimation characteristics of *Sargassum thunbergii* germlings under different light intensities [J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(5): 2151-2158.
- [26] 徐红建, 朱再标, 郭巧生, 等. 光强对老鸦瓣生长发育及光合特性的影响[J]. 中国中药杂志, 2012, 37(4): 442-446.
- [27] 黄伟燕, 冯志坚. 光照强度对蕨桐生长及光合特性的影响[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(4): 96-101.
- [28] 王晓冰, 宋雅迪, 庄静静, 等. 不同光照条件下大百合光合生理特性研究[J]. 中药材, 2019, 42(7): 1489-1493.
- [29] 罗光宇, 陈超, 李月灵, 等. 光照强度对濒危植物长序榆光合特性的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(4): 980-988.
- [30] 舒文将, 柴胜丰, 黎兆海, 等. 不同光强对棱角山矾幼苗生长及光合特性的影响[J]. 植物研究, 2017, 37(4): 556-562.
- [31] 陈连珠, 张雪彬, 白大娟, 等. 不同光照度下快白菜光合特性及叶绿素荧光日变化[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(5): 52-56.
- [32] 杨伟波, 付登强, 李艳, 等. 不同光强下义安油茶幼苗生长和叶绿素荧光特性分析[J]. 热带作物学报, 2012, 33(4): 651-654.
- [33] 吴玉香, 魏建康, 沈少炎, 等. 遮光对西洋杜鹃花期、光合参数、叶绿素荧光参数的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(8): 113-116.
- [34] 韩利红, 刘潮, 杨云锦, 等. 光强对罗平小黄姜生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 农学学报, 2022, 12(4): 47-53.
- [35] YI Z, CUI J, FU Y, et al. Effect of different light intensity on physiology, antioxidant capacity and photosynthetic characteristics on wheat seedlings under high CO₂ concentration in a closed artificial ecosystem [J]. Photosynthesis Research, 2020, 144(1): 23-34.
- [36] 朱婷婷, 王懿祥, 朱旭丹, 等. 遮光对木荷和枫香光合特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(1): 28-35.
- [37] 吴飞燕, 伊力塔, 李修鹏, 等. 不同光照强度对石栎幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(4): 88-92.
- [38] 张兰, 王静, 张金峰, 等. 辽东栎幼苗生长和生理特性对光照强度的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(11): 73-81.
- [39] 高辉, 黎云祥. 不同遮荫条件下峨眉岩白菜光合特性初探[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 1992-1997.
- [40] 吕伟伟, 田俊德, 郭郁娇, 等. 不同光照强度下玫瑰光合生理特性[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2021, 22(5): 581-587.
- [41] 崔波, 周一冉, 王喜蒙, 等. 不同光照强度下白及光合生理特性的研究[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(2): 276-284.
- [42] 何雪娇, 余智城, 郑少缘, 等. 遮荫对高山羊齿光合生理特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(2): 141-149.
- [43] 蒋运生, 柴胜丰, 唐辉, 等. 光照强度对广西地不容光合特性和生长的影响[J]. 广西植物, 2009, 29(6): 792-796, 723.
- [44] ALERIC K M, KIRKMAN L K. Growth and photosynthetic responses of the federally endangered shrub, *Lindera melissifolia* (Lauraceae), to varied light environments [J]. American Journal of Botany, 2005, 92(4): 682-689.
- [45] 陈圣宾, 宋爱琴, 李振基. 森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 365-370.
- [46] 易伟坚, 张海东, 叶绍明, 等. 光强对格木幼苗生长及光合特性的影响[J]. 南方林业科学, 2018, 46(1): 29-32, 37.

Effects of Light Intensity on Photosynthetic Physiological Characteristics and Biomass of Three Yellow *Camellia* Species

ZHU Shujing^{1,2}, JIANG Haidu¹, YANG Yishan¹, XU Aizhu¹, ZOU Rong¹, TANG Jianmin¹, WEI Xiao¹, CHAI Shengfeng^{1* * *}

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Functional Phytochemicals and Sustainable Utilization, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi, 541006, China; 2. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi, 541006, China)

Abstract: *Camellia perpetua*, *C. flavida* and *C. tunghinensis* belong to Theaceae, *Camellia* and *Camellia* Sect. *Chrysantha*. They are the second-class national key protected wild plants. The distribution range of these three species is narrow, and the wild resources are on the verge of extinction. Exploring their adaptability to different light environments and finding the light intensity suitable for their growth can provide a theoretical basis for the artificial breeding, population restoration and ex-situ protection of these three yellow *Camellia* species, and can also provide a partial explanation for the reasons for the habitat differences of their wild populations. This study used 3-year-old cuttings of the three yellow *Camellia* species as experimental materials and used artificial shading methods to study the effects of different light intensities (8%, 20%, 45%, 100%) on their photosynthetic physiological characteristics and biomass. The results showed that: (1) The three yellow *Camellia* species had higher maximum net photosynthetic rate (P_{max}), Apparent Quantum Yield (AQY), maximum fluorescence (F_m), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), actual photochemical efficiency ($\Phi PS II$) and photosynthetic Electron Transfer Rate (ETR) under low light conditions (8% and 20% light intensity), indicating that they had better adaptability to low light environment. (2) The P_{max} of *C. perpetua* remained at a high level under 45% light intensity, and the Light Saturation Point (LSP) showed an increasing trend with the increase of light intensity. However, the P_{max} and LSP of *C. flavida* and *C. tunghinensis* increased first and then decreased with the increase of light intensity, and both reached the maximum at 20% light intensity. (3) With the increase of light intensity, the contents of total chlorophyll (Chl), chlorophyll *a* (Chl *a*), Chlorophyll *b* (Chl *b*), and carotenoid (Car) in the three yellow *Camellia* species leaves decreased, Car/Chl values increased, and Chl *a*/Chl *b* values first decreased and then increased. (4) With the increase of light intensity, the root, stem, leaf biomass and total biomass of the three yellow *Camellia* species increased first and then decreased. Among them, the total biomass of the *C. perpetua* was the highest at 45% light intensity, while the *C. flavida* and *C. tunghinensis* were the highest at 20% light intensity. In summary, *C. perpetua* is more tolerant to strong light, followed by *C. flavida*, and *C. tunghinensis* is the weakest. *C. perpetua* prefers a medium light environment (45% light intensity), while *C. flavida* and *C. tunghinensis* prefer a medium to low light environment (20% light intensity). The photosynthetic characteristics of the three yellow *Camellia* species are consistent with the characteristics of the light environment of the wild population.

Key words: yellow *Camellia* species; light intensity; chlorophyll; photosynthetic characteristics; biomass