广西植物 Guihaia Jan. 2026, 46(1): 39-51 http://www.guihaia-journal.com

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202506037

彭丽辉, 杨哲, 江海都, 等, 2026. 不同繁殖方式金花茶幼苗生长生理特性及叶片显微结构的比较 [J]. 广西植物, 46(1): 39-51.

PENG LH, YANG Z, JIANG HD, et al., 2026. Comparison on growth and physiological characteristics, and leaf microstructure of *Camellia nitidissima* seedlings under different propagation methods [J]. Guihaia, 46(1): 39-51.

不同繁殖方式金花茶幼苗生长生理特性及叶片显微结构的比较

彭丽辉[1], 杨 哲[1,2], 江海都[1], 韦伶芝[1,2], 李 婷[3], 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. 桂林理工大学旅游与风景园林学院, 广西 桂林 541006; 3. 广西壮族自治区南宁树木园, 南宁 530031)

摘 要: 为探明不同繁殖方式培育的金花茶幼苗的生长能力,该研究以 3 种繁殖方式(组培培养、扦插繁殖、种子繁殖)的金花茶(*Camellia nitidissima*)2 年生幼苗为材料,对其生长性状、光合能力、叶绿素含量、叶片结构等进行测定。结果表明:(1)组培苗光合能力最强,实生苗次之,扦插苗最低;组培苗最大净光合速率和光强适应范围均显著高于其他 2 种苗木;实生苗的表观量子效率值(0.083 9 mol · mol^{-1}),对弱光的利用能力最强。(2)扦插苗和组培苗叶片的叶绿素含量(分别为 30.83 mg · g^{-1} 和 28.26 mg · g^{-1})显著高于实生苗(22.23 mg · g^{-1})。(3)实生苗气孔密度(115.37 ind. · mm^{-2})最低但气孔面积(150.1 μm^2)最大,更适合荫生环境。(4)组培苗根系组织最发达,比根长最大,根组织密度最低;组培苗生长指标总体表现最优(总干重 68.87 g、株高 85.75 cm、地径 14.27 mm 均最大),实生苗次之,扦插苗最差。综上表明,金花茶幼苗生长能力与繁殖方式密切相关;金花茶组培幼苗生长能力明显优于实生苗和扦插苗,因此可将组培繁殖的金花茶苗推广并应用到实际生产中。该研究为金花茶良种扩繁和保护提供了科学依据。

关键词: 金花茶, 繁殖方式, 光合特性, 叶绿素含量, 叶片显微结构, 生长特性

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2026)01-0039-13

Comparison on growth and physiological characteristics, and leaf microstructure of *Camellia nitidissima* seedlings under different propagation methods

PENG Lihui[1], YANG Zhe[1,2], JIANG Haidu[1], WEI Lingzhi[1,2], LI Ting[3], WEI Xiao[1], CHAI Shengfeng[1*]

收稿日期: 2025-09-28 **接受日期:** 2025-10-20

基金项目: 广西植物功能物质与资源持续利用重点实验室自主研究课题(ZRJJ2024-12); 国家重点研发计划项目(2022YFF1300700); 广西重点研发计划项目(桂科 AB22080097); 国家自然科学基金(32460103, 32160091)。

第一作者: 彭丽辉(1992—),硕士,助理研究员,研究方向为植物保育生物学,(E-mail) 2466608599@qq.com。

*通信作者: 柴胜丰,研究员,博士,主要从事珍稀濒危药用植物可持续利用研究,(E-mail) sfchai@163.com。

(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 541006, Guangxi, China; 2. *College of Tourism and Landscape Architecture*, *Guilin University of Technology*, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. *Nanning Arboretum*, *Guangxi Zhuang Autonomous Region*, Nanning 530031, China)

Abstract: This study aimed to explore the growth capacity of *Camellia nitidissima* seedlings propagated under different methods, two-year-old *C. nitidissima* seedlings propagated via three methods (tissue culture, cutting propagation, and seed propagation) were used as materials, and the growth trait, photosynthetic capacity, chlorophyll content, and leaf structure were determined. The results were as follows: (1) Tissue-cultured seedlings had the strongest photosynthetic capacity, followed by seed-propagated seedlings, while cutting-propagated seedlings had the lowest. Both the maximum net photosynthetic rate and light intensity adaptation range of tissue-cultured seedlings were significantly higher ($P<0.05$) than those of the other two types of seedlings. Seed-propagated seedlings exhibited the highest apparent quantum yield value (0.083 9 mol · mol^{-1}) and the strongest ability to utilize weak light. (2) The chlorophyll content in leaves of cutting-propagated seedlings and tissue-cultured seedlings (30.83 mg · g^{-1} and 28.26 mg · g^{-1}, respectively) was significantly higher than that of seed-propagated seedlings (22.23 mg · g^{-1}). (3) Seed-propagated seedlings had the lowest stomatal density (115.37 ind. · mm^{-2}) and the largest stomatal area (150.1 μm^2), making them more suitable for shady environments. (4) Tissue-cultured seedlings had the most developed root system, the largest specific root length, and the lowest root tissue density. In terms of growth indicators, tissue-cultured seedlings showed the best overall performance, with the highest total dry weight (68.87 g), plant height (85.75 cm), and ground diameter (14.27 mm); seed-propagated seedlings ranked second, while cutting-propagated seedlings performed the worst. In conclusion, the growth capacity of *C. nitidissima* seedlings is closely related to the propagation method; the growth capacity of tissue-cultured *C. nitidissima* seedlings is significantly superior to that of seed-propagated and cutting-propagated seedlings. Therefore, tissue-cultured *C. nitidissima* seedlings can be promoted and applied in practical production. This study provides a scientific basis for the propagation of superior varieties and protection of *C. nitidissima*.

Key words: *Camellia nitidissima*, propagation methods, photosynthetic characteristics, chlorophyll content, leaf microstructure, growth characteristics

金花茶(*Camellia nitidissima*)为山茶科(Theaceae)山茶属(*Camellia*)常绿小乔木或灌木,其药用价值高,具有降血脂、降血压、抗癌、抗氧化、清热解毒和止痢等功效(陈永欣等,2013;陈瑶等,2022)。同时,金花茶观赏价值极高,其花大艳丽,是世界珍稀濒危观赏植物,素有“植物界的大熊猫”和“茶族皇后”等美誉。金花茶主要分布于中国广西南部及越南北部亚热带南缘和热带北缘的热带季风气候区,生长于排水良好和土壤疏松的阴湿沟谷和林下溪旁,具有耐荫喜湿和忌强光的特性(张本能和黄广宾,1986),自然结果率和繁殖能力较低,生长相对缓慢,加之森林砍伐和野生苗被大量挖取,野生资源日趋减少,已被列入国家二级重点保护野生植物(国家林业和草原局 农业农村部,2021),因此加强对金花茶的保护及研究已刻不容缓。近年来,金花茶受到大众追捧,其产业不断扩大,截至 2022 年仅防城港全市种植金花茶面积约4 333 hm^2,金花茶相关行业综合产值超过 10 亿元(王凛,2023)。金花茶自然繁殖率低,生长速度慢,导致其产能受到严重制约。刘益兴等(2010)研究表明,繁殖方式对作物产能有极大的影响。但是,该类研究在金花茶领域仍存在缺口,因此研究不同繁殖方式下金花茶苗木的生长能力对其种群延续、保护和大规模的良种扩繁及生产具有重要意义。

利用种子萌发、组织培养、扦插等繁殖方式可实现植物物种延续的目的,但不同繁殖方式培育的植株个体在外观形态、环境适应能力与资源获取存在差异(Pokhrel et al.,2021)。植物的外部形态是植物生长状况的直接反应,而光合作用、叶绿素含量、叶片解剖结构特征对植株生长状况的影响会直观地反映到植物外部形态上。光合作用是影响植物产量的关键因素之一(王頔等,2019),光合能力越强的植株长势越好生长速度越快;而在

光合作用过程中叶绿素负责光能吸收与转化，扮演源头和桥梁的角色（Wittmann et al.，2001；胡根海等，2010；周荧，2018）；叶片则是植物蕴藏叶绿素并进行光合作用、气体交换和水分蒸腾的重要场所（张德巧等，2008）。因此，对植株幼苗生长生理特性及叶片显微结构进行比较研究是探究不同繁殖方式对植株生长影响的关键。不同繁殖方式所培育的同种苗木在生长生理特性方面存在差异性。王頔等（2019）对不同繁殖方式蓝莓（*Vaccinium* ssp.）苗木生长生理特性的研究表明，组培苗蓝莓的各项生理特性指标明显优于扦插苗。王健等（2019）已证实一年生油橄榄（*Olea europaea*）实生苗相较于扦插苗的根系更为发达，吸收土壤中的矿质营养能力强，生物量积累多。李林鑫等（2024）从根系角度深入揭示了不同繁殖方式培育的杉木幼苗对土壤资源的吸收利用效率存在差异性，实生苗根系表现出探索寻觅土壤空间资源的生长策略，组培苗和扦插苗根系则表现出增强对已占据空间资源吸收利用效率的生长策略。可见，不同繁殖方式对乔木和灌木的表型性状及对土壤有限资源的吸收利用效率均有较大差异。目前，许多专家学者在金花茶光合特性和叶片形态结构等方面做了较多研究（王坤等，2019；江海都等，2023；陈妮等，2024），但针对不同繁殖方式对金花茶苗木的生长生理特性影响的研究报道却较少，仅江海都等（2023）对引种回归的实生苗和扦插苗金花茶的生理特性及叶片显微结构进行了比较，并且该研究仅表明金花茶回归苗木中实生苗的光合能力和生长量积累优于扦插苗，而扦插苗的叶绿素含量高于实生苗，缺乏对组培苗的研究，因此繁殖方式对金花茶生长影响的研究存在一定的局限性。然而，组培繁殖是实现快速繁殖优良品种、遗传改良与育种及保护濒危植物的重要技术手段。因此，本研究从组培培养、扦插繁殖、种子繁殖的角度全面性揭示不同繁殖方式金花茶苗木生长生理特性及叶片显微结构的差异性，进一步加强金花茶有关产能提升、科学保育等方面的研究。

本研究以 3 种方式繁育（组培培养、扦插繁殖、种子繁殖）的金花茶 2 年生幼苗为材料，利用光合仪测定其光合能力，用乙醇提取法测定其叶绿素含量，通过显微观察其叶片结构，分析不同繁殖方式培育的金花茶幼苗的生长特性，拟探讨以下问题：（1）不同繁殖方式金花茶幼苗的光合能力、叶绿素含量、叶片结构、生长特性的差异性及相关性；（2）从苗木生长生理特性及叶片显微结构等角度深入揭示导致 3 种不同繁殖方式金花茶幼苗生长能力差异化的主要原因，为良种扩繁及产业化生产筛选出最佳繁殖方式。以期为实现金花茶快繁及丰产探索到适宜的繁殖方式提供理论依据，同时对金花茶科学保护具有重要的指导意义。

1　材料与方法

1.1 材料

试验材料均由广西植物研究所金花茶种质资源圃提供，于 2006 年引自防城金花茶国家级自然保护区的同一金花茶种源。试验共设 3 个处理，即处理 A 为组培苗、处理 B 为扦插苗、处理 C 为实生苗，其中组培苗采用种子为外植体培育而成，3 种试验苗木均为 2 年生。每个处理随机选取 15 株样苗，其中组培苗平均冠幅（17.45±1.13）cm、平均地径（0.34±0.08）cm、平均苗高（42.20±1.73）cm；实生苗平均冠幅（16.22±0.95）cm、平均地径（0.33±0.05）cm、平均苗高（40.92±2.48）cm；扦插苗平均冠幅（15.35±1.33）cm、平均地径（0.30±0.06）cm、平均苗高（37.10±2.06）cm。3 种处理苗木的初始规格差异较小，对其后期生长指标影响较小。试验过程进行统一管理，遮阴棚透光率为 25%，试验于 2023 年 4 月开始，于 2024 年 10 月对试验苗进行光合特性、叶片形态结构、叶绿素含量、生长性状指标的测定。

1.2 方法

1.2.1 光合-光响应曲线的测定　选择晴朗天气的上午 8：00—11：00 期间，每个处理组分别挑选 5 株长势好的苗木并将苗木顶部第三片的成熟叶片作为测试对象，用 Li-6400 便携式光合仪（LI-COR 公司，美国）测定植株光响应曲线数据。将待测叶片置于 600 μmol · m^{-2} · s^{-1}的光强下诱导 30 min，空气流速为 0.5 L · min^{-1}，CO_2浓度控制在 400 μmol · m^{-2} · s^{-1}，每一光强测定停留 180 s。光强梯度设定为 0、20、50、100、150、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500 μmol · m^{-2} · s^{-1}。以净光合速率（net photosynthetic rate，P_n）为纵坐标，以光量子通量密度（photosynthetic photon flux density，PPFD）

为横坐标绘制光合-光响应曲线图,通过适合性检验,确保拟合效果良好,采用叶子飘(2010)直角双曲线模型拟合,并计算光饱和点(light saturation point, LSP)、最大净光合速率(maximum net photosynthetic rate, P_{max})、光补偿点(light compensation point, LCP),具体如下:

$$P_n=\alpha\times\left(\frac{1-\beta\times I}{1+\gamma\times I}\right)\times I-R_d \quad (1)$$

$$\mathrm{LSP}=\frac{\sqrt{(\beta+\gamma)/\beta}-1}{\gamma} \quad (2)$$

$$P_{max}=\mathrm{AQY}\times\left(\frac{\sqrt{\beta+\gamma}-\sqrt{\beta}}{\gamma}\right)^2-R_d \quad (3)$$

$$\mathrm{LCP}=\frac{\mathrm{AQY}-\gamma\times R_d-\sqrt{(\gamma\times R_d-\mathrm{AQY})^2-4\times\beta\times\mathrm{AQY}\times R_d}}{2\times\alpha\times\beta} \quad (4)$$

式中:α 为光响应曲线的初始斜率(无量纲);β 和 γ 为系数;I 为光合有效辐射;R_d 为暗呼吸速率(拟合参数值);AQY 为表观量子效率(拟合参数值)。

1.2.2 叶绿素含量测定 每株苗木选取 3~5 枚成熟叶片(与光合指标测定时所选苗木及方位一致)进行叶绿素含量的测定。利用打孔器取 20 片 1 cm^2的小叶片,并将叶片捣碎装入 25 mL 容量瓶内,用 95% 乙醇(天津市致远化学试剂有限公司)定容,将定容瓶统一放置在黑暗环境中 24 h 后提取叶片的光合色素,用 UH5200 紫外可见分光光度计(Perkin Elmer 公司,美国)测定提取液的吸光值(波长 665 nm 和 649 nm),根据公式(柴胜丰等,2015)计算出叶绿素 a(chlorophyll a, Chla)、叶绿素 b(chlorophyll b, Chlb)、叶绿素(a+b)[chlorophyll a+b, Chl(a+b)]含量及叶绿素 a 与 b 的比值[chlorophyll a/chlorophyll b, Chla/Chlb]。

1.2.3 叶片解剖结构参数的测定 针对光合测定后的植株选取与光合指标测定时方位一致的成熟叶片各 3 片,横切叶片中脉取 5 mm × 5 mm 的样品,参考李冬林等(2019)的方法制作石蜡切片,用蔡司正置显微镜 Axio Imager M2(卡尔·蔡司公司,德国)扫描切片并拍照,用图形分析软件 CaseViewer2.4 记录叶片厚度、栅栏组织厚度等指标。

每株苗木选取成熟叶片各 3 片(与光合指标测定时所选苗木及方位一致),沿中脉至叶缘剪取 1 cm × 1 cm 的样品用于脱水、干燥及镀金(陈妮等,2024),用 EVO 18 扫描电子显微镜(卡尔·蔡司公司,德国)拍照记录叶片上表皮、下表皮。采用图形分析软件 Axio Vision SE64Rel.4.9.1 对气孔长轴长度和气孔短轴长度进行测定,计算气孔密度和单个气孔面积(陈妮等,2024)。

1.2.4 植株生长状况指标测定 每个处理各随机选定 6 株幼苗进行形态指标测定,包含冠幅和株高(卷尺测量)、叶片数和分枝数(目测法观察)、地径(卷尺测量)等指标的测定。关于植株根系形态指标的测定:用蒸馏水将采回的根部样品洗净并排列在透明板上,并使用 Epson Perfection V850 Pro 扫描仪(Seiko Epson Corporation 公司,日本)以 400 dpi 的分辨率进行扫描。使用 RHIZ0 TronMF 2012 图像分析软件对总根长度、总根体积、根尖数等指标进行测定。上述测定完成后,对植株生物量指标开展进一步测定,将植株的叶、茎、根部样品分类放入 80 ℃烘箱内烘干 48 h 至质量恒定,用分析天平(精度 0.001 g)称量根、茎、叶等干重指标,参考李石一宁等(2022)的方法计算根生物量比、叶生物量比、支持结构生物量比、根冠比、比根长(specific root length, SRL)、根组织密度(root tissue density, RTD)等指标。

1.2.5 数据处理 对上述统计或测定的所有指标,采用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析,用 Duncan 法进行多重比较,并进行 Pearson 相关性分析,用 Origin 9.2 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 光合-光响应曲线及参数比较

对不同繁殖方式金花茶各 PPFD 下对应的净光合速率(P_n)采用叶子飘(2010)的双曲线修正模型进行拟合,结果见图 1。3 种苗木的光合-光响曲线拟合效果均表现良好[决定系数(R^2)均在 0.95 以上]。由图 1 可知,当 3 种类型的金花茶苗木的 PPFD 在 0 ~ 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}时 P_n随着 PPFD 的增加而呈线性增长;PPFD 为 200 ~ 400 μmol·m^{-2}·s^{-1}时 P_n缓慢升高。3 种类型金花茶的 P_{max}、LCP、LSP 均存在显著性差异($P<0.05$),P_{max}表现为组培苗(4.735 6 μmol·m^{-2}·s^{-1})>实生苗(3.766 9 μmol·m^{-2}·s^{-1})>扦插苗(2.631 8 μmol·m^{-2}·s^{-1}),LSP 表现为组培苗(1 109.26 μmol·m^{-2}·s^{-1})>扦插苗(747.57 μmol·m^{-2}·s^{-1})>实生苗(534.79 μmol·

$m^{-2}\cdot s^{-1}$），LCP 表现为组培苗（7.41 μmol·$m^{-2}\cdot s^{-1}$）<实生苗（9.91 μmol·$m^{-2}\cdot s^{-1}$）<扦插苗（14.49 μmol·$m^{-2}\cdot s^{-1}$）（表 1）。实生苗金花茶在达到光饱和点之后 P_n 呈明显的下降趋势，组培苗和扦插苗金花茶在达到光饱和点之后 P_n 趋于平缓，说明实生苗金花茶在强光下有明显的光抑制现象。组培苗金花茶的 LCP 与 LSP 差值最大，为1 101.85 μmol·$m^{-2}\cdot s^{-1}$，表明其光适应范围最大。组培苗和扦插苗的 AQY 显著低于实生苗金花茶；扦插苗与实生苗金花茶的 R_d 无显著性差异（$P>0.05$）但均显著高于组培苗金花茶。

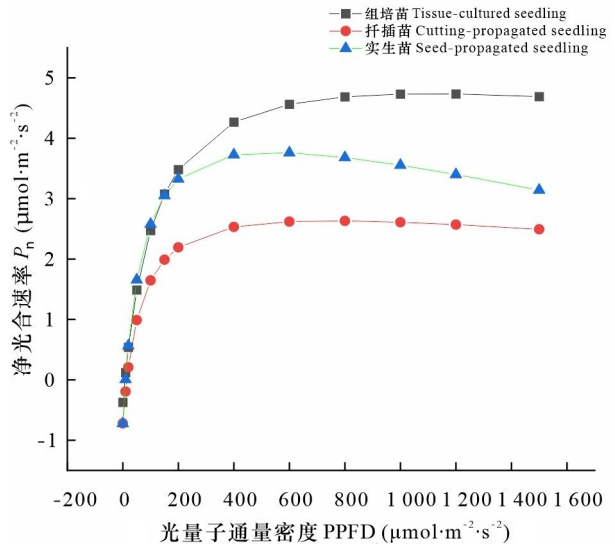


图 1　不同繁殖方式金花茶叶片的光合-光响应曲线

Fig. 1　Photosynthetic light-response curves of *Camellia nitidissima* leaves under different propagation methods

2.2 叶绿素含量比较

由图 2 可知，组培苗和扦插苗金花茶叶片的 Chla、Chlb、Chl（a+b）含量无显著性差异（$P>0.05$），但两者均显著（$P<0.05$）高于实生苗金花茶；3 种金花茶叶片的 Chla/Chlb 比值无显著性差异（$P>0.05$）。

2.3 不同繁殖方式金花茶叶片显微结构比较

2.3.1 叶片解剖结构特征　由图 3 可知，3 种不同类型金花茶的叶片均是典型异面叶植物，包含叶表皮、叶肉和叶脉 3 部分。叶肉包含海绵组织和栅栏组织，前者细胞形状不规则且间隙较大，排列疏松，后者排列较为紧密。由表 2 可知，3 种不同类型金花茶的叶片厚度，上表皮、下表皮细胞厚度存在一定差异性，并表现为实生苗>扦插苗>组培苗；扦插苗与实生苗金花茶的栅栏组织厚度无显著性差异（$P>0.05$），但均显著（$P<0.05$）高于组培苗金花茶；组培苗和扦插苗金花茶的海绵组织厚度无显著性差异（$P>0.05$），但两者显著（$P<0.05$）低于实生苗金花茶。

2.3.2 气孔特征　3 种不同苗木类型金花茶叶片气孔均分布在下表皮（图 4），并且 3 种苗木类型金花茶叶片气孔密度（stomatal density，SD）、气孔长轴长度[stomatal length（long axis），SL]、气孔短轴长度[stomatal width（short axis），SW]、单个气孔面积（single stoma area，SA）均存在一定的差异性；组培苗的 SD 最大，其次是扦插苗，最小的是实生苗，其中组培苗和扦插苗金花茶两者 SD 差异较小；SA 大小表现为实生苗>扦插苗>组培苗，其中实生苗 SA 是组培苗的 1.70 倍（表 3）。

2.4 不同繁殖方式金花茶生长状况比较

2.4.1 不同繁殖方式金花茶根系比较　由表 4 可知，组培苗金花茶在总根长度、总根表面积、根平均直径、总根体积方面显著（$P<0.05$）高于扦插苗和实生苗。组培苗的根尖数、比根长分别是扦插苗和实生苗的 1.63 倍、1.59 倍和 1.46 倍、1.33 倍；根组织密度表现为扦插苗>实生苗>组培苗。

2.4.2 不同繁殖方式金花茶植株形态比较　由表 5 可知，组培苗金花茶的地径、分枝长、分枝数、叶片数、总叶面积显著（$P<0.05$）高于扦插苗和实生苗，并且以上指标分别是扦插苗的 1.38 倍、4.03 倍、3.00 倍、1.53 倍、3.27 倍；扦插苗的地径、分枝数、叶片数、比叶重与实生苗无显著性差异（$P>0.05$）。

2.4.3 不同繁殖方式金花茶生物量比较　由图 5 可知，组培苗金花茶的根、茎、叶干重及总干重显著高于扦插苗，分别是扦插苗的 2.22 倍、1.58 倍、2.45 倍、1.92 倍；组培苗和扦插苗的根生物量比和根冠比均与实生苗金花茶呈显著性差异（$P<0.05$），并表现为组培苗>扦插苗>实生苗；实生苗和扦插苗的支持结构生物量比显著高于组培苗金花茶。

2.5 光合参数、叶绿素含量、叶片显微结构特征与生长特征的相关性分析

由图 6 可知，不同繁殖方式金花茶植物的光合作用与其叶片数量、叶面积、叶片显微结构和气孔特征、根系组织、生长性状关系密切。P_{max} 与 RTD、

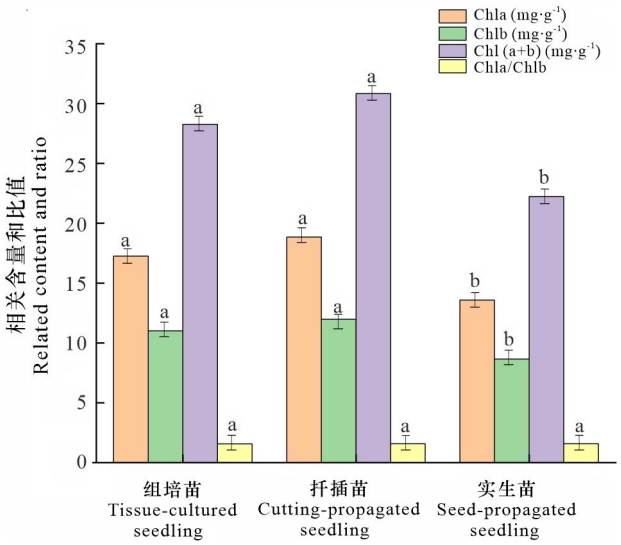
表 1 不同繁殖方式金花茶叶片的光合参数比较

Table 1 Photosynthetic parameter comparison on *Camellia nitidissima* leaves under different propagation methods

不同繁殖方式苗木 Seedlings under different propagation methods	表观量子效率 AQY (mol · mol^{-1})	最大净光合速率 P_{max} (μmol · m^{-2} · s^{-1})	光饱和点 LSP (μmol · m^{-2} · s^{-1})	光补偿点 LCP (μmol · m^{-2} · s^{-1})	暗呼吸率 R_d (μmol · m^{-2} · s^{-1})
组培苗 Tissue-cultured seedling	0.053 5±0.003b	4.735 6±0.104a	1 109.26±10.845a	7.41±0.052c	0.372 8±0.063b
扦插苗 Cutting-propagated seedling	0.061 1±0.016b	2.631 8±0.296c	747.57±16.000b	14.49±0.310a	0.721 8±0.040a
实生苗 Seed-propagated seedling	0.083 9±0.009a	3.766 9±0.117b	534.79±22.896c	9.91±0.046b	0.723 3±0.030a

注：同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，下同。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences (P<0.05), the same below.

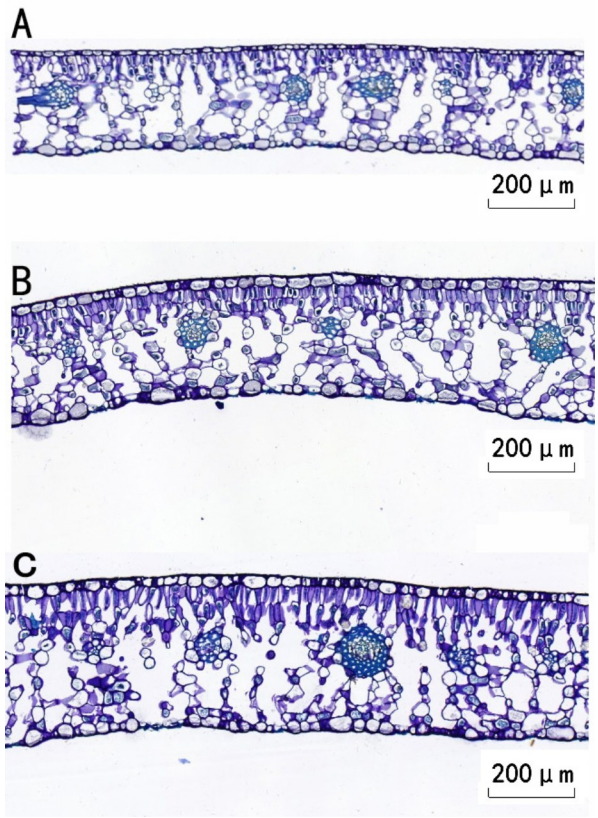


Chla. 叶绿素 a；**Chlb**. 叶绿素 b；**Chl(a+b)**. 叶绿素(a+b)；**Chla/Chlb**. 叶绿素 a 和叶绿素 b 的比值。不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，下同。

Chla. Chlorophyll a; **Chlb**. Chlorophyll b; **Chl (a+b)**. Total chlorophyll (a + b); **Chla/Chlb**. Ratio of chlorophyll a to chlorophyll b. Different lowercase letters indicate significant differences (P<0.05), the same below.

图 2 不同繁殖方式金花茶叶片的叶绿素含量

Fig. 2 Chlorophyll content in *Camellia nitidissima* leaves under different propagation methods



A. 组培苗叶片横切面；**B**. 扦插苗叶片横切面；**C**. 实生苗叶片横切面。

A. Cross-section of tissue-cultured seedling leaf; **B**. Cross-section of cutting-propagated seedling leaf; **C**. Cross-section of seed-propagated seedling leaf.

图 3 不同繁殖方式金花茶叶片解剖结构

Fig. 3 Leaf anatomical structures of *Camellia nitidissima* under different propagation methods

LN、TLA、LDW、TDW 呈极显著正相关(P<0.01)，与 LCP、PTT/STT 则呈极显著负相关(P<0.01)。LSP 与 TRL、RDW 呈极显著正相关(P<0.01)，并与 SD、SRL、TRSA、RAD、LN 呈显著正相关(P<0.05)，但与 R_d、SA 呈显著负相关(P<0.05)。TDW 与 P_{max}、SRL、LDW、TLA、SDW 呈极显著正相关(P<0.01)，但与 PTT/STT 呈极显著负相关(P<0.01)。

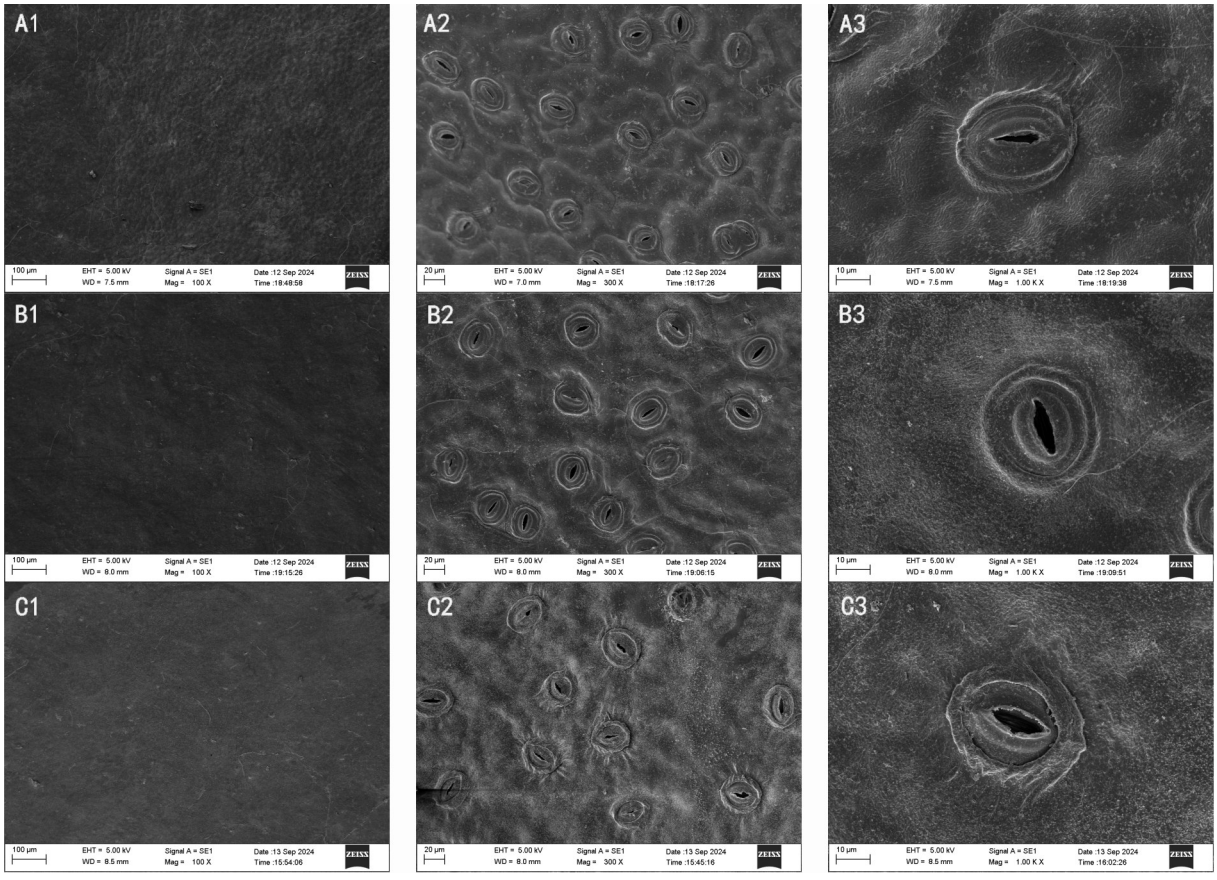
表 2　不同繁殖方式金花茶叶片解剖特征

Table 2　Leaf anatomical characteristics of *Camellia nitidissima* under different propagation methods

不同繁殖方式苗木 Seedlings under different propagation methods	LT (μm)	UET (μm)	LET (μm)	PTT (μm)	STT (μm)	PTT/STT
组培苗 Tissue-cultured seedling	289.23±21.23b	19.80±2.85b	35.90±2.46c	36.90±2.01b	196.00±10.81b	0.19±0.01b
扦插苗 Cutting-propagated seedling	320.93±25.99ab	30.27±1.56a	41.43±1.26b	46.90±1.48a	202.33±5.10b	0.23±0.01a
实生苗 Seed-propagated seedling	352.07±10.45a	33.07±2.71a	50.03±3.85a	45.20±2.82a	223.76±7.26a	0.20±0.01b

注：**LT**. 叶片厚度；**UET**. 上表皮细胞厚度；**LET**. 下表皮细胞厚度；**PTT**. 栅栏组织厚度；**STT**. 海绵组织厚度；**PTT/STT**. 栅海比。

Note：**LT**. Leaf thickness；**UET**. Upper epidermis thickness；**LET**. Lower epidermis thickness；**PTT**. Palisade tissue thickness；**STT**. Spongy tissue thickness；**PTT/STT**. Palisade-to-spongy tissue ratio.



A1、A2、A3 分别为组培苗成熟叶上表皮、下表皮和气孔；B1、B2、B3 分别为扦插苗成熟叶上表皮、下表皮和气孔；C1、C2、C3 分别为实生苗成熟叶上表皮、下表皮和气孔。

A1, A2, A3 are upper epidermis, lower epidermis, and stomata of mature leaf of tissue-cultured seedling, respectively; B1, B2, B3 are mature leaf upper epidermis, lower epidermis, and stomata of cutting-propagated seedling, respectively; C1, C2, C3 are mature leaf upper epidermis, lower epidermis, and stomata of seed-propagated seedling, respectively.

图 4　不同繁殖方式金花茶叶片气孔特征

Fig. 4　Stomatal characteristics of *Camellia nitidissima* leaves under different propagation methods

表 3 不同繁殖方式金花茶气孔特征

Table 3 Stomatal characteristics of *Camellia nitidissima* under different propagation methods

不同繁殖方式苗木 Seedlings under different propagation methods	气孔密度 SD (ind.·mm^{-2})	单个气孔面积 SA (μm^2)	气孔长轴长度 SL (μm)	气孔短轴长度 SW (μm)
组培苗 Tissue-cultured seedling	157.78±5.09a	88.45±12.13b	36.51±1.96ab	3.09±0.24b
扦插苗 Cutting-propagated seedling	142.51±6.93ab	90.64±9.81b	35.43±2.21b	3.22±0.73b
实生苗 Seed-propagated seedling	115.37±5.88b	150.10±7.39a	39.35±1.33a	4.84±0.86a

表 4 不同繁殖方式金花茶根系指标

Table 4 Root system characteristics of *Camellia nitidissima* under different propagation methods

不同繁殖方式苗木 Seedlings under different propagation methods	总根长度 Total root length (cm)	总根表面积 Total root surface area (cm^2)	根平均直径 Root average diameter (mm)	总根体积 Total root volume (cm^3)	根尖数 Root tip number per plant	比根长 Specific root length (cm·g^{-1})	根组织密度 Root tissue densityh (g·cm^{-3})
组培苗 Tissue-cultured seedling	3 250.10±38.57a	541.61±33.54a	5.14±0.91a	21.95±4.44a	4 620±476a	160.49±1.25a	0.90±0.06b
扦插苗 Cutting-propagated seedling	950.20±14.51b	237.41±23.56b	2.46±0.61b	5.87±1.29b	2 835±394b	100.73±1.49b	1.51±0.1a
实生苗 Seed-propagated seedling	1 020.58±15.01b	259.58±28.67b	2.43±0.21b	6.15±1.07b	3 169±410ab	120.72±1.36ab	1.31±0.08ab

表 5 不同繁殖方式金花茶形态指标

Table 5 Morphological characteristics of *Camellia nitidissima* under different propagation methods

不同繁殖方式苗木 Seedlings under different propagation methods	株高 Plant height (cm)	地径 Ground basal diameter (mm)	分枝长 Branch length (cm)	分枝数 Branch number per plant	叶片数 Leaf number per plant	总叶面积 Total leaf area (cm^2)	冠幅 Canopy spread (cm)	比叶重 Leaf mass per area (g·cm^{-2})
组培苗 Tissue-cultured seedling	85.75± 5.32a	14.27± 1.28a	70.00± 7.68a	3.75± 0.46a	41.25± 2.50a	3 407± 8.57a	33.69± 1.04a	0.010± 0.00a
扦插苗 Cutting-propagated seedling	76.25± 6.62b	10.36± 1.20b	17.38± 2.49c	1.25± 0.25b	27.00± 4.97b	1 041± 13.09c	29.30± 4.05b	0.012± 0.00a
实生苗 Seed-propagated seedling	82.25± 9.18a	10.84± 3.22b	32.75± 3.80b	1.75± 0.30b	30.75± 5.11b	2 415± 11.10b	34.79± 1.98a	0.009± 0.00a

3 讨论与结论

3.1 繁殖方式对金花茶苗木光合特性的影响

植物的光合特征参数能够反映植物的光合能力及其对不同光照环境的响应对策,以及植物对环境的适应能力(Yokoya et al.,2007)。通常 P_{max} 值越高,越有利于植物积累有机物(Mahmud et al.,2018;Vincenzav et al.,2018)。本研究结果显示,3种类型苗木的 P_{max} 呈显著性差异($P<0.05$),并且表现为组培苗>实生苗>扦插苗,表明组培苗金花茶积累有机物的能力最高,生长速率相对更快,这与云南红豆杉(臧传富等,2010)的研究结果一致,但与周荧(2018)对蓝莓的研究结果有差异,该研究显示扦插蓝莓幼苗的 P_n 高于组培蓝莓幼苗。这应该是物种差异性导致的不同。金花茶属于木本,其组培苗的根系组织较扦插苗发达,能快速吸收营养更有利于叶等营养器官生长从而提升光合效率(江海都等,2023);而蓝莓属于灌木,扦插更易生根,其组培苗的叶绿素含量和根系活力等低

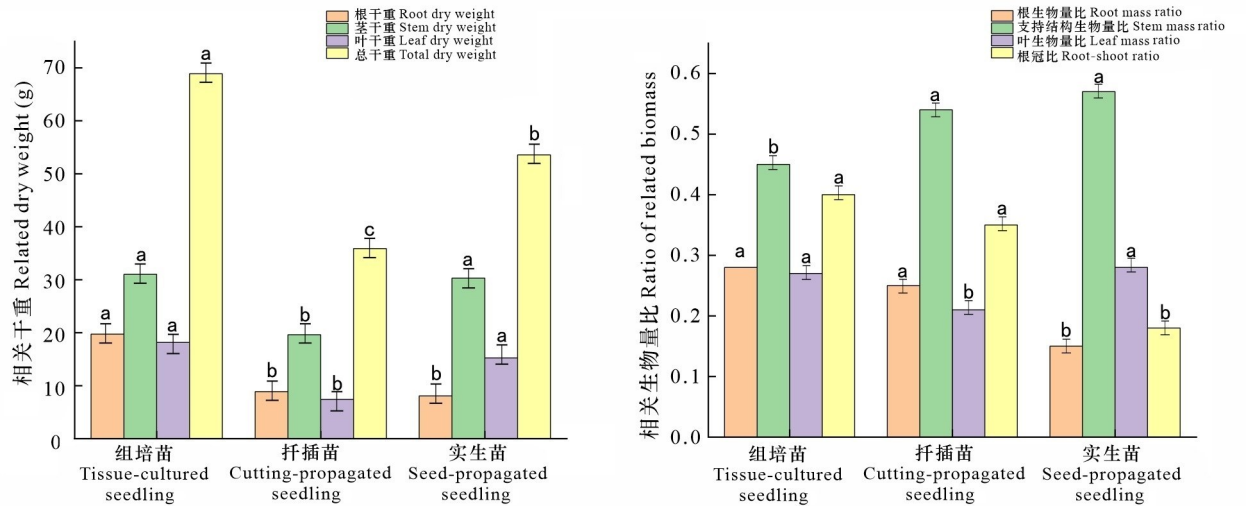


图 5　不同繁殖方式金花茶生物量指标

Fig. 5　Biomass allocation of *Camellia nitidissima* seedlings under different propagation methods

于扦插苗，因此蓝莓组培苗光合转化能力相对扦插苗偏弱。LSP 越高表明植物对强光适应能力越强，LCP 与 LSP 相差越大，植物对光的适应范围则越广（冷寒冰等，2014；秦惠珍等，2022）。组培苗的 LSP 分别是扦插苗和实生苗的 1.48 倍和 2.07 倍，表明组培苗金花茶对强光的适应能力最强；LCP 与 LSP 差值表现为组培苗>扦插苗>实生苗，这表明组培苗金花茶光强适应范围最广。AQY 与植物对弱光利用能力成正比（Richardson & Berlyn，2002），R_d与植物在无光条件下消耗的能量成反比（Gyimah & Nakao，2007；Pastur et al.，2007）。实生苗的 AQY 显著高于组培苗和扦插苗，表明实生苗对弱光的利用能力最强，实生苗的 R_d是组培金花茶的 1.94 倍，表明实生苗在暗呼吸过程中消耗有机物的能力也相对较大。综上所述，组培苗金花茶光合能力最强，其 P_{max}和光强适应范围均最大，其次是实生苗，再次是扦插苗。

3.2 繁殖方式对金花茶苗木叶绿素含量的影响

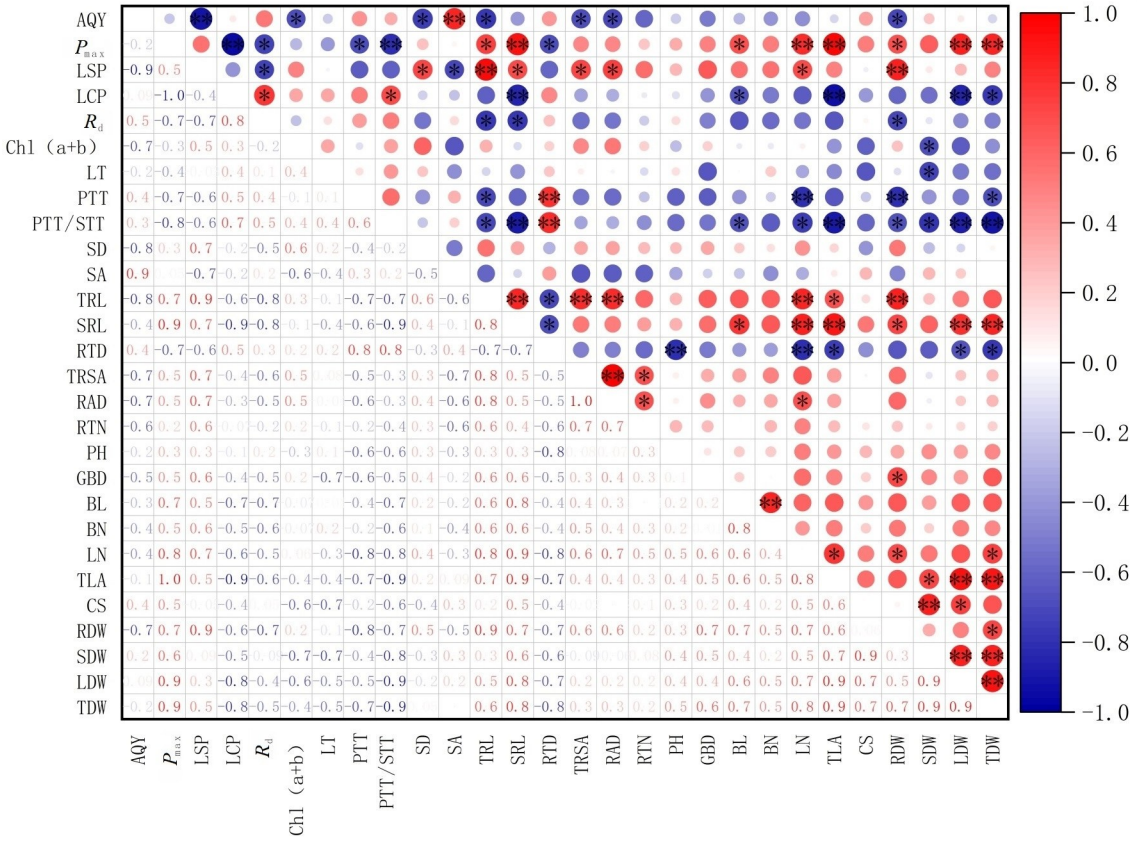
叶绿素含量水平是反映植物生长的重要生理指标，通常情况下叶绿素含量越高，光合作用越强（徐薪璐等，2025）。本研究中，扦插苗金花茶的 Chla、Chlb、Chl（a+b）的含量均显著高于实生苗金花茶，这与江海都等（2023）对回归金花茶苗木研究结果较为类似；Chl（a+b）含量最高的扦插金花茶幼苗的 P_{max}最低，并且相关性分析结果显示不同繁殖方式金花茶的 P_{max}和叶绿素含量无显著相关，因此叶绿素含量并不能单独作为判断净光合速率强弱的标准（陈妮等，2024），需结合其他生理指标进行综合评判。

3.3 繁殖方式对金花茶苗木叶片解剖结构的影响

叶片解剖结构的变化与植物的生长密切相关，适合弱光环境下生长的植物往往都具有较低的气孔密度及较大气孔的特性（许爱祝等，2024），本研究中，实生苗金花茶的 SD 最小，SA 最大，这与其 AQY 和 R_d最高相呼应，表明实生苗金花茶更适合弱光环境生长。相关研究表明，较厚的表皮细胞和发达的栅栏组织有利于植物通过保持其内部水分以促进自身的生长发育（杜成凤等，2011），栅海比与植物光合效率通常呈正相关（李冬林等，2019）。本研究中，栅栏组织厚度、栅海比均与 P_{max}呈负相关，实生苗金花茶的叶片厚度、栅栏组织厚度均显著高于组培苗金花茶，但实生苗的 P_{max}显著低于组培苗，这与宋碧玉等（2017）对蜡梅（*Chimonanthus praecox*）及许爱祝等（2024）对地宝兰属（*Geodorum*）植物的栅栏组织厚度、栅海比均与 P_{max}呈正相关的结果不一致，出现此差异化的原因应该是影响植物 P_n的因素存在多样性。有研究表明，叶干重、叶片数量、叶面积等植物生长特性也可能是影响植物整体光合能力的重要因素（陶汉之等，2000；臧传富等，2010）。

3.4 繁殖方式对金花茶苗木生长特性的影响

根系是植物探索土壤和汲取土壤养分的主要



＊和＊＊分别表示相关性达到显著(P<0.05)和极显著(P<0.01)水平。红色和蓝色色块分别代表正相关和负相关,颜色越深,相关性越强。数字部分同样表示相关性强弱,数值越接近−1 表示负相关越强,数值越接近 1 表示正相关越强。**AQY**. 表观量子效率; P_{max}. 最大净光合速率; **LSP**. 光饱和点; **LCP**. 光补偿点; R_d. 暗呼吸速率; **Chl**(**a+b**). 叶绿素(a+b) ; **LT**. 叶片厚度; **PTT**. 栅栏组织; **STT**. 海绵组织; **PTT/STT**. 栅海比; **SD**. 气孔密度; **SA**. 单个气孔面积; **TRL**. 总根长度; **SRL**. 比根长; **RTD**. 根组织密度; **TRSA**. 总根表面积; **RAD**. 根平均直径; **RTN**. 根尖数; **PH**. 株高; **GBD**. 地径; **BL**. 分枝长; **BN**. 分枝数; **LN**. 叶片数; **TLA**. 总叶面积; **CS**. 冠幅; **RDW**. 根干重; **SDW**. 茎干重; **LDW**. 叶干重; **TDW**. 总干重.

＊ and ＊＊ indicate significant correlations at P < 0.05 and P < 0.01 levels, respectively. Red and blue color blocks represent positive and negative correlations, with darker hues indicating higher absolute correlation coefficients. The numerical part also indicates the strength of the correlation, with values closer to −1 indicating a stronger negative correlation and values closer to 1 indicating a stronger positive correlation. **AQY**. Apparent quantum yield; P_{max}. Maximum net photosynthetic rate; **LSP**. Light saturation point; **LCP**. Light compensation point; R_d. Dark respiration rate; **Chl**(**a+b**). Chlorophyll a + b; **LT**. Leaf thicknes; **PTT**. Palisade tissue thickness; **STT**. Spongy tissue thickness; **PTT/STT**. Palisade-to-spongy tissue ratio; **SD**. Stomatal density; **SA**. Single stoma area; **TRL**. Total root length; **SRL**. Specific root length; **RTD**. Root tissue density; **TRSA**. Total root surface area; **RAD**. Root average diameter; **RTN**. Root tip number; **PH**. Plant height; **GBD**. Ground basal diameter; **BL**. Branch length; **BN**. Branch number; **LN**. Leaf number; **TLA**. Total leaf area; **CS**. Canopy spread; **RDW**. Root dry weight; **SDW**. Stem dry weight; **LDW**. Leaf dry weight; **TDW**. Total dry weight.

图 6 不同繁殖方式金花茶叶片光合参数、显微结构特征、叶绿素含量与生长特征的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis among leaf photosynthetic parameters, microstructure characteristics, chlorophyll content, and growth traits in *Camellia nitidissima* under different propagation methods

器官,是作物生长的物质基础,能够直接影响植物的生长发育(张亚兴等,2020),总根长度、根表面积、比根长、根组织密度、根尖数等是反映作物吸收养分能力的重要指标(吴俊等,2024)。比根长反映了植物根系活力,与植物吸收水分和养分的效率成正比(Bergmann et al.,2020)。根组织密度通常越高,根系吸收能力越弱,根部承担运输和储藏能力会更强(胡香玉等,2017;Bergmann et al.,2020)。组培苗金花茶的比根长最高、根组织密度最低,表明组培苗根系活力强,能更好地吸收养分

和水分，从而促进植株地上部分生长，与相关性分析中比根长与总叶面积、叶片数、叶干重、总干重等呈极显著正相关（$P<0.01$）这一结果相呼应。组培苗金花茶的根干重和根生物量比分别是实生苗金花茶的 2.45 倍和 1.87 倍，表明组培苗根系生物量积累显著强于实生苗，这与周荧（2018）对蓝莓及李林鑫等（2024）对杉木（*Cunninghamia lanceolata*）的研究结果较为类似。根尖数与细根数通常成正比，细根是植物吸收养分和水分的主要器官，具有较快的周转速率，从而成为植物地下器官最活跃的部分（金朝斌等，2024）。组培苗金花茶的根尖数分别是实生苗和扦插苗金花茶的 1.46 倍和 1.63 倍，表明其具有发达的细根组织。本研究中，组培苗金花茶拥有发达的根系组织，其次是实生苗，扦插苗最差，这主要是由于繁殖途径不同所致，组培苗通过体外定向诱导直接刺激根原基分化，侧根数量多，有利于幼苗生长。金花茶是直根系树种，实生苗属于胚根直接形成主根，具有天然的向地优势，但其侧根相对较少，根系发展条件相对弱于组培苗；扦插苗是靠扦插穗繁殖，茎基部愈伤组织分化出不定根，缺乏实生苗的胚源性主根，导致根系分布浅，侧根分支少，根系组织相对较弱（唐文秀等，2009；藏传富等，2010；王宇飞和亢秀萍，2020）。综上所述，组培苗金花茶具有发达的根系组织，其次是实生苗金花茶，这对促进幼苗地上部分的生长发育非常有利。

生物量是衡量苗木质量的重要指标之一。前人的研究中已证明叶干重、叶面积等叶性状指标会对植物光合作用产生影响，叶干重是植物生态适应性及获取资源的主导因子（李娟霞和田青，2022）；叶面积大的植物能够捕获更多的光能用于光合作用，而叶面积小的植物普遍蒸腾速率较低，光合能力也相应较弱（陶汉之等，2000）。本研究中，组培苗的总叶面积、叶干重与 P_{max} 呈极显著正相关，其总叶面积、叶干重、P_{max} 分别是扦插苗的 3.27 倍、2.45 倍、1.80 倍，分别是实生苗的 1.41 倍、1.20 倍、1.26 倍，说明叶面积和叶干重是影响光合能力的重要因子。总干重亦是评判植株总体长势的重要指标，总干重值越大表明植株总体生长优势越显著。本研究中 3 种繁殖方式金花茶幼苗的总干重呈显著性差异（$P<0.05$），并表现为组培苗>实生苗>扦插苗，表明组培金花茶幼苗生长优势显著优于实生苗和扦插苗金花茶，这与其较小的气孔面积及较高的气孔密度、发达的根系组织、更强的光合能力有关。

3.5 结论

金花茶幼苗生长能力与繁殖方式密切相关，组培金花茶幼苗生长能力显著优于实生苗和扦插苗金花茶，可将组培繁殖的金花茶推广并应用到商业化种植中。但是，在有限的技术和经济条件下，种子繁殖和扦插繁殖也是不可或缺的繁殖手段，同时种子繁殖能更好地维持物种遗传多样性，适合野外种群引种回归。本研究为金花茶良种扩繁及产业化应用、科学高效保护提供了科学依据。目前，仅探究了相同生长环境下不同繁殖方式金花茶幼苗生长、生理特性及叶片显微结构的差异性，今后还将继续深入开展不同繁殖方式下金花茶的繁殖率、对逆境胁迫的适应性、遗传稳定性及成分含量等方面的研究，进一步为金花茶的保护与产业化发展提供科学依据。

参考文献：

BERGMANN J, WEIGELT A, PLAS F, et al., 2020. The fungal collaboration gradient dominates the root economics space in plants [J]. Science Advances, 6: 7357.

CHAI S F, ZHUANG X Y, WANG M L, et al., 2015. Comparison of photosynthetic characteristics between an endangered species *Camellia pubipetala* and its widespread congener *C. sinensis* [J]. Guihaia, 35(5): 623-630. [柴胜丰, 庄雪影, 王满莲, 等, 2015. 濒危植物毛瓣金花茶与其同属广布种茶光合特性的比较 [J]. 广西植物, 35(5): 623-630.]

CHEN N, JIANG H D, PENG L H, et al., 2024. Comparison of photosynthetic characteristics and leaf microstructure of three species of sect. *Chrysantha* Chang [J/OL]. Molecular Plant Breeding: 1-17 [2025-11-12]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240812.1627.008. [陈妮, 江海都, 彭丽辉, 等, 2024. 3 种金花茶组植物光合特性及叶片显微结构的比较 [J/OL]. 分子植物育种: 1-17 [2025-11-12]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20240812.1627.008.]

CHEN Y, GONG S X, XU X, et al., 2022. Research progress on chemical constituents and pharmacological studies of *Camellia nitidissima* [J]. Drug Evaluation Research, 45(3): 575-582. [陈瑶, 龚苏晓, 徐旭, 等, 2022. 金花茶化学成分和药理作用研究进展 [J]. 药物评价研究, 45(3): 575-582.]

CHEN Y X, LÜ S J, WEI J B, 2013. Research progress on chemical constituents and pharmacological studies of *Camellia nitidissima* [J]. Guangxi Journal of Traditional Chinese Medicine, 36(1): 4-6. [陈永欣, 吕淑娟, 韦锦斌, 2013. 金花茶化学成分和药理作用研究进展 [J]. 广

西中医药, 36(1): 4-6.]
DU C F, LI C H, LIU T X, et al., 2011. Response of anatomical structure and photosynthetic characteristics to low light stress in leaves of different maize genotypes [J]. Acta Ecologica Sinica, 31(21): 6633-6640. [杜成凤, 李潮海, 刘天学, 等, 2011. 遮荫对两个基因型玉米叶片解剖结构及光合特性的影响 [J]. 生态学报, 31(21): 6633-6640.]
GYIMAH R, NAKAO T, 2007. Early growth and photosynthetic responses to light in seedlings of three tropical species differing in successional strategies [J]. New Forests, 33(3): 217-236.
HU G H, WANG Z W, WANG Q L, et al., 2010. Differences research of changing law about chlorophyll content both island cotton and upland cotton [J]. Journal of Biology, 27(4): 31-34. [胡根海, 王志伟, 王清连, 等, 2010. 海岛棉与陆地棉叶绿素含量变化的差异研究 [J]. 生物学杂志, 27(4): 31-34.]
HU X Y, GUO J X, TIAN G L, et al., 2017. Effects of different nitrogen supply patterns on root morphological and physiological characteristics of rice [J]. Chinese Journal of Rice Science, 31(1): 72-80. [胡香玉, 郭九信, 田广丽, 等, 2017. 不同供氮模式对水稻根系形态及生理特征的影响 [J]. 中国水稻科学, 31(1): 72-80.]
JIANG H D, CHAI S F, XIONG Z C, et al., 2023. Growth, photosynthetic characteristics and leaf morphological characteristics of *Camellia nitidissima* reintroduction plants [J]. Guangxi Sciences, 30(6): 1180-1189. [江海都, 柴胜丰, 熊忠臣, 等, 2023. 金花茶回归苗木的生长、光合特性和叶片形态特征 [J]. 广西科学, 30(6): 1180-1189.]
JIN C B, WEI X M, XU H D, et al., 2024. The direct effect and mechanism of fine root traits on soil nutrient availability: A case study of subtropical Chinese fir and broad-leaved mixed forest [J]. Research of Agricultural Modernization, 45(3): 520-530. [金朝斌, 魏晓梦, 徐海东, 等, 2024. 细根性状对土壤养分有效性的直接影响与机制——以亚热带杉阔混交林为例 [J]. 农业现代化研究, 45(3): 520-530.]
LENG H B, QIN J, YE K, et al., 2014. Comparison of photosynthetic light-response models of lotus leaves under different light environments [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 25(10): 2855-2860. [冷寒冰, 秦俊, 叶康, 等, 2014. 不同光照环境下荷花叶片光合光响应模型比较 [J]. 应用生态学报, 25(10): 2855-2860.]
LI D L, JIN Y Q, CUI M F, et al., 2019. Photosynthetic characteristics and leaf anatomical structure of *Cercidiphyllum japonicum* seedlings under shading condition [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 39(6): 1053-1063. [李冬林, 金雅琴, 崔梦凡, 等, 2019. 遮光对连香树幼苗光合特性及其叶片解剖结构的影响 [J]. 西北植物学报, 39(6): 1053-1063.]
LI S Y N, XIONG D C, YAO X D, et al., 2023. Morphology and nutrient contents of fine roots from different orders in Fagaceae species in an evergreen broad-leaved forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 41(5): 833-840. [李石一宁, 熊德成, 姚晓东, 等, 2022. 常绿阔叶林中壳斗科树种细根形态与养分含量的序级变化特征 [J]. 生态学杂志, 41(5): 833-840.]
LI J X, TIAN Q, 2022. Leaf morphology and photosynthetic physiological characteristics of six garden plants in Lanzhou [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 50(1): 72-80. [李娟霞, 田青, 2022. 兰州市6种园林植物叶片形态和光合生理特征 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 50(1): 72-80.]
LI L X, YANG G Y, GUO H L, et al., 2024. Effects of propagation methods on biomass, morphological traits and carbon and nitrogen contents of fine roots at different orders of Chinese fir seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 60(7): 47-55. [李林鑫, 杨贵云, 郭昊澜, 等, 2024. 繁殖方式对杉木幼苗根系不同序级生物量、形态性状和碳氮含量的影响 [J]. 林业科学, 60(7): 47-55.]
LIU Y X, HE C P, LI Z M, et al., 2010. Effect of different reproductive way on *Vemicia fordii* body structure and its output [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 30(5): 61-66. [刘益兴, 贺赐平, 李正茂, 等, 2010. 不同繁殖方式对油桐树体结构及产量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 30(5): 61-66.]
MAHMUD K, BELINDA E M, REMKO A D, 2018. Inferring the effects of sink strength on plant carbon balance processes from experimental measurements [J]. Biogeosciences, 15(13): 4003-4018.
National Forestry and Grassland Administration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 2021. List of national key protected wild plants [EB/OL]. (2021-09-08) [2025-10-27]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/10746.jhtml. [国家林业和草原局 农业农村部, 2021. 国家重点保护野生植物名录 [EB/OL]. (2021-09-08) [2025-10-27]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/10746.jhtml.]
PASTUR G M, LENCINAS M V, PERI P L, et al., 2007. Photosynthetic plasticity of *Nothofagus pumilio* seedlings to light intensity and soil moisture [J]. Forest Ecology and Management, 243(2): 274-282.
POKHREL S, MEYERING B, BOWMAN K, et al., 2021. Horticultural attributes and root architectures of field-grown 'Valencia' trees grafted on different rootstocks propagated by seed, cuttings, and tissue culture [J]. HortScience, 56(2): 163-172.
QIN H Z, ZOU R, CHAI S F, et al., 2022. Study on seed germination and seedling photosynthetic characteristics of a rare and endangered plant *Camellia indochinensis* [J]. Seed, 41(8): 27-34. [秦惠珍, 邹蓉, 柴胜丰, 等, 2022. 濒危植物东兴金花茶种子萌发及幼苗光合特性研究 [J]. 种子, 41(8): 27-34.]
RICHARDSON A D, BERLYN G P, 2002. Spectral reflectance and photosynthetic properties of *Betula papyrifera* (Betulaceae) leaves along an elevational gradient on Mt. Mansfield, Vermont, USA [J]. American Journal of Botany, 89(1): 88-94.
SONG B Y, ZHOU L Y, PU G L, et al., 2017. Effects of pruning on photosynthesis and leaf anatomical characteristics of *Chimonanthus praecox* [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 43(5): 533-538. [宋碧玉, 周兰英, 蒲光兰, 等, 2017. 修剪对蜡梅光合作用和叶片解剖特征的影响 [J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 43(5): 533-538.]

TAO H Z, LI Z, MENG C P, et al., 2000. Studies on distribution of leaf area, transpiration rate and water use efficiency in oppositifolious maize [J]. Acta Agronomica Sinica, 26(1): 65-70. [陶汉之, 李展, 孟彩萍, 等, 2000. 对生玉米叶面积分布、蒸腾速率和水分利用率的研究 [J]. 作物学报, 26(1): 65-70.]

TANG W X, PAN B, MAO S Z, et al., 2009. Studies on the reproductive methods of *Camellia impressinervis* and *C. tunghinensis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 24(2): 63-67. [唐文秀, 盘波, 毛世忠, 等, 2009. 凹脉金花茶和东兴金花茶的繁殖试验研究 [J]. 西北林学院学报, 24(2): 63-67.]

VINCENZA V, VITTORIA D, CARLI A, et al., 2018. Comparative analysis of photosynthetic and respiratory parameters in the psychrophilic unicellular green alga *Koliella antarctica*, cultured in indoor and outdoor photobioreactors [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 24(6): 1139-1146.

WANG D, ZHOU Y, WEN G Q, et al., 2019. The study on physiological characteristics of seedling growth for different reproductive mode of blueberry [J]. Seed, 38(4): 47-50. [王頔, 周荧, 文光琴, 等, 2019. 不同繁殖方式蓝莓苗木生长生理特性研究 [J]. 种子, 38(4): 47-50.]

WANG J, LU B, ZHAO M, et al., 2019. Comparisons of growth characteristics of seedlings and cutting seedlings in *Olea europaea* [J]. Non-wood Forest Research, 37(4): 144-148. [王健, 陆斌, 赵敏, 等, 2019. 油橄榄实生苗与扦插苗生长特性比较 [J]. 经济林研究, 37(4): 144-148.]

WANG K, WEI X J, LI B C, et al., 2019. Relationship between leaf anatomical structure and drought resistance of *Camellia* sect. *Chrysantha* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 39(12): 34-39. [王坤, 韦晓娟, 李宝财, 等, 2019. 金花茶组植物叶解剖结构特征与抗旱性的关系 [J]. 中南林业科技大学学报, 39(12): 34-39.]

WANG L, 2023. Research on the development countermeasures of *Camellia petelotii* industry in Fangchenggang City [D]. Nanning: Guangxi University. [王凛, 2023. 防城港市金花茶产业发展对策研究 [D]. 南宁: 广西大学.]

WANG Y F, KANG X P, 2020. Effects of different propagation methods on seedling quality of *Ocimum basilicum* in Jinzhong region [J]. Modern Agricultural Science and Technology (6): 67,70. [王宇飞, 亢秀萍, 2020. 晋中地区不同繁殖方式对罗勒幼苗质量的影响 [J]. 现代农业科技(6): 67,70.]

WITTMANN C, ASCHAN G, PFANZ H, 2001. Leaf and twig photosynthesis of young beech (*Fagus sylvatica*) and aspen (*Populus tremula*) trees grown under different light regime [J]. Trees, 15(2): 105-114.

WU J, YU X F, GAO J L, et al., 2024. Regulatory effect of deep tillage and straw returning on morphological characteristics of maize roots at high planting density [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 45(3): 11-21. [吴俊, 于晓芳, 高聚林, 等, 2024. 深翻秸秆还田对高种植密度下玉米根系形态特征的调控效应 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 45(3): 11-21.]

XU A Z, JIANG H D, PU Q K, et al., 2024. Comparative study on leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of three *Geodorum* species [J]. Guihaia, 44(1): 113-125. [许爱祝, 江海都, 浦乾琨, 等, 2024. 三种地宝兰属植物叶片解剖结构及光合特性的比较研究 [J]. 广西植物, 44(1): 113-125.]

XU X L, KONG S X, LÜ Z, et al., 2025. The relationship of appearance, structure and photosynthetic characteristics of different leaf color phenotypes of *Sasaella glabra* 'Albostriata' [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 49(1): 145-154. [徐薪璐, 孔淑鑫, 吕卓, 等, 2025. 靓竹叶色表型叶片形态、结构与光合特性相关性研究 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 49(1): 145-154.]

YE Z P, 2010. A review on modeling of responses of photosynthesis to light and CO_2 [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 34(6): 727-740. [叶子飘, 2010. 光合作用对光和 CO_2 响应模型的研究进展 [J]. 植物生态学报, 34(6): 727-740.]

YOKOYA N S, NECCHI O, MARTINS A P, et al., 2007. Growth responses and photosynthetic characteristics of wild and phycoerythrin-deficient strains of *Hypnea musciformis* (Rhodophyta) [J]. Journal of Applied Phycology, 19(3): 197-205.

ZANG C F, SU J Y, ZHANG Z J, 2010. Research of photosynthetic characteristics and the growth of seedlings and cutting stocks of *Taxus yunnanensis* [J]. Forest Research, 23(3): 411-416. [臧传富, 苏建荣, 张志钧, 2010. 云南红豆杉扦插苗和实生苗的生长及光合特性 [J]. 林业科学研究, 23(3): 411-416.]

ZHANG B N, HUANG G B, 1986. Taxonomy and geographical distribution of *Camellia nitidissima* [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 4(1): 31-41. [张本能, 黄广宾, 1986. 金花茶的分类和地理分布 [J]. 武汉植物学研究, 4(1): 31-41.]

ZHANG D Q, XU Z L, CHU X F, et al., 2008. Study on leaf anatomical structure indexes related to drought resistance of blueberry [J]. Journal of Fruit Science, 25(6): 864-867. [张德巧, 徐增莱, 褚晓芳, 等, 2008. 蓝莓叶片与抗旱性相关的解剖结构指标研究 [J]. 果树学报, 25(6): 864-867.]

ZHANG Y X, ZHU L W, LIU N, 2020. C, N, and P concentrations and their stoichiometry of leaves and roots with different life forms in Hainan Province [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 28(2): 131-135. [张亚兴, 朱丽薇, 刘楠, 2020. 海南不同生活型植物叶片和根系 C、N、P 化学计量特征 [J]. 热带亚热带植物学报, 28(2): 131-135.]

ZHOU Y, 2018. Research on growth, physiological and leaf anatomy characteristics for blueberry seedlings in different productive way [D]. Guiyang: Guizhou University. [周荧, 2018. 蓝莓不同繁殖方式苗木生长、生理特性及叶片解剖学研究 [D]. 贵阳: 贵州大学.]

(责任编辑　李　莉　王登惠)