主持人：宋希强，任明迅　Open Access

光照强度对海南凤仙花叶片解剖结构和光合特性的影响

杨璨华[1,2,3#]，李和芹[2,3]，王云锦[2,3]，张培兰[1,2,3]，王　晋[2,3]，王梓昭[2,3]，张金玲[1,2,3*]

（1. 海南国家公园研究院/海南国家公园保护与发展重点实验室，海南 海口 570203 中国；2. 海南大学 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南大学 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室，海南 儋州 571737 中国；3. 海南大学 热带农林学院，海南 儋州 571737 中国）

摘　要：为了探究近危极小种海南凤仙花（*Impatiens hainanensis*）在生境光照强度阈值下的生理响应，研究了生境最高光照强度阈值（50% 光照强度）和生境最低光照强度阈值（20% 光照强度）对海南凤仙花生长、叶片解剖结构、光合和荧光特性的影响。结果表明：50% 光照强度下，海南凤仙花的地径、株高、冠幅、叶面积和比叶面积均小于 20% 光照强度；50% 光照强度下，叶片气孔密度显著低于 20 % 光照强度，而单个气孔器面积显著高于 20% 光照强度；20% 光照强度的叶片、上表皮、栅栏组织及韧皮部厚度均显著高于 50% 光照强度。与 50% 光照强度相比，20% 光照强度的叶色参数 a^*（红绿度）显著减小，H（色调角）显著增大，且其叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均较高，表明 20 % 光照强度下叶片更绿。在 20% 光照强度下，净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和最大光化学量子效率均显著提高，且 20% 光照强度下的光饱和点高于 50% 光照强度，但 20 % 光照强度下的暗呼吸速率和光补偿点均低于 50% 光照强度。以上结果表明，50% 光照强度（生境最高光照强度阈值）对海南凤仙花造成了一定的光抑制，20% 光照强度（生境最低光照强度阈值）可避免光抑制发生并保障光合作用的高效进行，更有利于海南凤仙花的生长发育。

关键词：光照强度；海南凤仙花；解剖结构；光抑制；光合响应

中图分类号：S682　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)05 − 0922 − 10

杨璨华, 李和芹, 王云锦, 等. 光照强度对海南凤仙花叶片解剖结构和光合特性的影响[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(5): 922−931.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20250141　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20250141

光是植物进行光合作用的必要条件，光合作用的正常运转为植物生长提供必要能量。光照强度的适当增加可以更好地促进植物生长[1]，过低的光照强度无法满足维持植物自身生长的需求，严重时会导致植株死亡[2−3]。然而过高的光照强度会抑制植物的光合作用，不利于植物正常生长。植物在过高的光照强度下吸收超出自身能利用的光能，这些光能会对叶片造成光氧化损伤并进一步破坏内部光合机构，导致植物遭受光抑制甚至是光破坏[4−6]。

阳生植物的生长发育过程对光照有较高的需求[7−8]，而适宜的低光照更有利于阴生植物的生长发育[9−10]，如改善植物形态特征（株高、地径和叶面积等）、提高不同部位生物量、增加光合色素含量以及调节叶片结构等[10−11]。例如阴生植物三七（*Panax notoginseng*）在 9.7% 透光率下拥有最大的株高、地径和单株叶面积[10]。植物的光合和荧光特性也可对不同光照强度做出快速响应。通常阴生植物的光饱和点和光补偿点相对较低，只有在其自身适宜的光照强度下才能表现出最佳的光合状态，过高或过低的光照强度均会影响其光合作用的高效进行。明日叶（*Angelica keiskei*）的最佳光照条件为 50% 中度遮阴，此条件下叶绿素含量提高，增强弱光捕获与利用能力，表现出较高的光能利用率与光合能力[12]。重度遮阴（10 % 光照强度）下，金花茶（*Camellia nitidissima*）的最大净光合速

CC BY 4.0
收稿日期：2025−10−16　**修回日期：**2025−11−20

基金项目：国家自然科学基金项目（32201282, 32371959）；海南大学科研启动项目（RZ2200002427）；海南省研究生创新科研课题（Qhys2023-213, Hyb2025-118）；海南省自然科学基金青年项目（322QN249）

#**第一作者：**杨璨华（1997—），女，海南大学热带农林学院 2024 级博士研究生。E-mail: yangcanhua0330@163.com

*通信作者：张金玲（1990—），女，副研究员，博士生导师。研究方向：植物生理生态。E-mail: zhangjinling@hainanu.edu.cn

率最高且光补偿点最低, 而高光照强度会显著抑制其最大荧光、可变荧光和最大光化学量子效率[13]。

海南凤仙花(*Impatiens hainanensis*)是凤仙花科(Balsaminaceae)凤仙花属(*Impatiens*)的多年生草本, 为近危极小种群野生植物, 是海南岛目前唯一自然分布的凤仙花属物种, 受到海南省重点保护[14−15]。海南凤仙花主要分布在海南热带雨林国家公园俄贤岭喀斯特地区(18°55′36.91″ ~ 19°01′33.44″ N, 109°03′46.80″ ~ 109°08′16.80″ E, 海拔 200 ~ 1 200 m)的光斑生境下[16]。野外调查发现, 海南凤仙花在长期的强光环境下无法生存, 光照强度是海南凤仙花生长过程中的限制因子。珍稀濒危植物种群在不同光环境下的生长状况和群落稳定性是生物多样性保护的研究热点[8,13,17]。目前, 海南凤仙花被《中国生物多样性红色名录》列为近危(NT)物种, 但近 5 年连续监测野生海南凤仙花种群发现, 种群极小且无显著扩大趋势, 推断种群成熟个体数少于 1 000, 已达到易危(VU)标准。因此, 探究海南凤仙花生长的最适光照强度, 对维护其在气候变化背景下的自然生长、稳定繁育和顺利更新有着重要意义。前期课题组野外调查结果表明, 海南凤仙花在天然生境下的光照强度约为全光照的 20% ~ 50 %, 据此, 本研究模拟天然生境光照强度的阈值, 设置 20% 和 50% 光照强度, 开展海南凤仙花生长、叶片解剖结构、光合和荧光特性的测定, 初步探讨适宜海南凤仙花生长的光照强度, 旨在为后续驯化、引种、栽培和保育海南凤仙花提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况　试验于海南省儋州市海南大学儋州校区农科实验基地(19°30′24.06″ N, 109°29′42.11″ E)进行, 该区属于热带湿润季风气候, 气温年较差和日较差较小, 旱雨季分明, 近 5 年年均气温保持在 24.94 ℃, 年均日照时数为 1 813.44 h, 年均降雨量达 1 827.34 mm[18]。

1.2　试验材料与设计　2023 年 1 月将海南凤仙花种子(2021 年 10 月野外取种后, 栽培的实生海南凤仙花 F_2 代)播种于 $V_{腐叶土}$∶$V_{珍珠岩}$∶$V_{蛭石}$∶$V_{陶粒}$= 1∶1∶1∶1 的混合基质中, 置于露天阴棚内统一管理, 2—3 月份开始陆续发芽, 4 月选取长势一致且健康的海南凤仙花(株高约 10 cm)进行盆栽(花盆高 11.8 cm, 直径 10.7 cm)试验。

缓苗 2 周后, 将海南凤仙花置于不同层数遮阳网(光照强度分别为全光照的 50% 和 20%)下培养, 每处理 5 株(盆), 处理 4 个月后测定植株各项指标。实验过程中, 每天移动花盆, 防止位置效应。

1.3　指标测定方法

1.3.1　生长指标测定　使用钢卷尺和游标卡尺测量每株海南凤仙花的株高、冠幅和地径。

1.3.2　叶片性状指标测定　每个处理选取 3 株, 每株选取 1 个成熟叶片(约为自上而下第 5 片叶), 利用数码相机进行拍照, 随后通过 ImageJ 软件计算叶面积。叶片鲜质量由电子天平测定, 随后将叶片放入烘箱中烘至恒重(105 ℃), 测定叶片干质量。

$$叶片含水量 = (叶片鲜质量 - 叶片干质量) / 叶片鲜质量 \times 100\%, \tag{1}$$

$$比叶面积 = 叶面积/叶片干质量。 \tag{2}$$

1.3.3　叶片解剖结构观察　每个处理选取 3 株, 每株选取 1 片成熟叶片, 选取叶片中间部位(避开主脉、侧脉和叶缘), 采用徒手撕片法制作上表皮和下表皮的临时玻片。在 SW380 光学显微镜(Motic, 中国)下观察气孔形态, 每张玻片随机选择 3 个视野, 每个视野随机观测 5 个气孔。通过显微成像测量系统测定气孔器长度、气孔器宽度。

$$单个气孔器面积 = \pi \times 气孔器长度 \times 气孔器宽度/4, \tag{3}$$

$$气孔密度 = 视野下气孔数/视野面积, \tag{4}$$

$$气孔开张比 = (开张气孔数/气孔总数) \times 100\%。 \tag{5}$$

将观测气孔的叶片(每处理 3 株, 每株 1 个叶片)用手术刀裁切叶片中间部位(过主脉)约 1 cm × 1 cm 的叶组织制成石蜡切片[19]。用光学显微镜拍照并测定叶片、上下表皮、栅栏组织、海绵组织、主脉、维管束、木质部及韧皮部厚度。

$$栅海比 = 栅栏组织厚度/海绵组织厚度, \tag{6}$$

$$叶片紧密度 = 栅栏组织厚度/叶片厚度, \tag{7}$$

$$叶片疏松度 = 海绵组织厚度/叶片厚度。 \tag{8}$$

1.3.4　叶色参数测定　使用 NR100C 便携式色差仪(3nh, 中国)测定叶色。每个处理下选取 3 片叶子(每株 1 片), 记录 L^*(亮度值)、a^*(红绿度, 正值为红色, 负值为绿色)、b^*(黄蓝度, 正值为黄色, 负

值为蓝色)、C^*(颜色饱和度)和 H(色调角)。

1.3.5 光合色素测定 叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素含量采用乙醇浸提法测定。每个处理选取 3 株(每株 1 片),挑选植株中部的成熟叶片,用剪刀取叶片中间部位(避开主脉和叶缘)0.2 g,剪碎避光浸泡在体积分数 95% 乙醇中 24 h,用 UV-5100B 紫外可见分光光度计(metash,中国)分别测定吸光度值 A_{664}、A_{649} 和 A_{470},并根据公式计算其含量。

$$\text{叶绿素a浓度} = 13.36\times A_{664} - 5.19\times A_{649}, \quad (9)$$

$$\text{叶绿素b浓度} = 27.43\times A_{649} - 8.12\times A_{664}, \quad (10)$$

$$\text{总叶绿素浓度} = \text{叶绿素a浓度} + \text{叶绿素b浓度}, \quad (11)$$

$$\text{类胡萝卜素浓度} = (1\,000\times A_{470} - 2.13\times C_a - 97.64\times C_b)/209, \quad (12)$$

$$\text{色素含量} = (\text{色素浓度}\times\text{提取液体积})/\text{叶片鲜质量}, \quad (13)$$

式中,叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素浓度单位均为 $mg\cdot L^{-1}$,叶片鲜质量单位为 g,提取液体积单位为 L,色素含量单位为 $mg\cdot g^{-1}$。

1.3.6 光合气体交换参数测定 使用 Li-6800 光合仪(Li-cor,美国)测定不同处理下每株海南凤仙花(每株 3 片)成熟叶片的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度。测定条件设置:光照强度 1 000 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$,$CO_2$ 浓度 400 $\mu mol\cdot mol^{-1}$,温度 30℃,相对湿度 60%,气体流速 500 $\mu mol\cdot s^{-1}$。

1.3.7 光响应曲线测定 使用 Li-6800 光合仪(Li-cor,美国)测定叶片光响应曲线(每处理 3 株,每株 1 个成熟叶片),按 1 800、1 500、1 200、900、600、300、200、150、100、70、30 和 0 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$ 设置光合有效辐射梯度。测定前植株完成充分饱和光诱导,其他测定条件同 1.3.6。光响应曲线拟合采用叶子飘[20] 的直角双曲线修正模型,得到最大净光合速率、光补偿点、光饱和点和暗呼吸速率。

1.3.8 叶绿素荧光参数测定 暗适应 30 min 后,用 Li-6800 光合仪(Li-cor,美国)测定不同处理下每株海南凤仙花成熟叶片(每株 1 片)的最大光化学量子效率,随后测定实际光化学量子效率、电子传递效率和非光化学淬灭系数。

1.4 数据处理 数据用 Microsoft Excel 2024 软件整理,均以平均值±标准误(Mean ± *SE*)的形式表示。采用 SPSS v27.0 软件进行数据处理,用独立样本 *T* 检验(Independent Two-sample *T*-test)比较分析,并用 Origin 2024 作图。

2 结果与分析

2.1 不同光照强度对海南凤仙花生长发育的影响

从图 1 可知,在 50% 和 20% 光照强度下,海南凤仙花的地径、株高和冠幅均无显著差异($P>0.05$),但 20% 光照强度下海南凤仙花的地径、株高和冠幅分别比 50% 光照强度提高了 16.3%、13.9% 和 21.2%。结果表明,50% 和 20% 光照强度对海南凤仙花的生长无显著影响,但相较于 50% 光照强度,20% 光照强度更有利于海南凤仙花的植株生长。

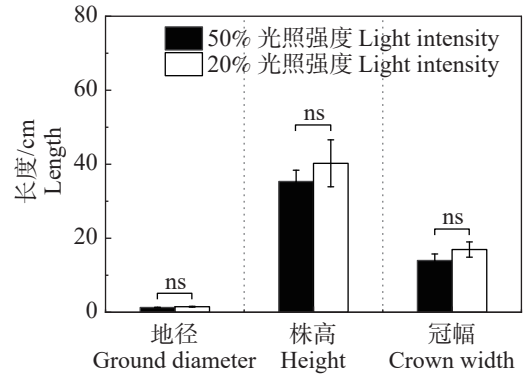


图 1 不同光照强度对海南凤仙花地径、株高和冠幅的影响

Fig. 1 Effects of different light intensities on ground diameter, height and crown width of *I. hainanensis*

注:ns 表示不同处理之间无显著差异,下同。

Note: ns indicates no significant difference between different treatments, similarly hereinafter.

2.2 不同光照强度对海南凤仙花叶片性状的影响

从表 1 可知,在 50% 和 20% 光照强度下,海南凤仙花的叶片性状参数均无显著差异($P>0.05$)。叶片鲜质量和叶片含水量在 20% 光照强度下分别比 50% 光照强度下上升了 2.2% 和 0.9%;20% 光照强度下叶面积和比叶面积也分别比 50% 光照强度下增加了 11.4% 和 10.9%。结果表明,20% 光照强度会略微提升海南凤仙花叶片鲜质量以及叶片中的水分含量,同时也会促进叶面积和比叶面积的增加。

2.3 不同光照强度对海南凤仙花叶片解剖结构的影响 海南凤仙花叶片表皮形态如图 2 所示,气孔仅存在于下表皮。由表 2 可知,20% 光照强度下,

表 1　不同光照强度对海南凤仙花叶片性状的影响

Tab. 1　Effects of different light intensities on leaf traits of *I. hainanensis*

光照强度 Light intensity	鲜质量/g Fresh weight	干质量/g Dry weight	含水量/% Water content	叶面积/cm^2 Leaf area	比叶面积/($cm^2 \cdot g^{-1}$) Specific leaf area
50 %光照强度	0.45±0.05[a]	0.05±0.01[a]	87.35±3.33[a]	15.70±2.11[a]	293.65±26.82[a]
20 %光照强度	0.46±0.05[a]	0.05±0.01[a]	88.17±1.53[a]	17.49±2.10[a]	325.67±20.87[a]

注: 相同小写字母代表同一指标下不同处理间无显著差异(P>0.05)。下同。

Note: The same lowercase letters indicate no significant differences in the same index between different treatments (P > 0.05), similarly hereinafter.

叶片的气孔密度显著大于 50% 光照强度, 而 20% 光照强度下的气孔器宽度和单个气孔器面积均显著小于 50% 光照强度(P<0.05)。气孔器长度和气孔开张比在 50% 和 20% 光照强度下无显著差异(P>0.05), 不过 20% 光照强度下的气孔器长度和气孔开张比均低于 50% 光照强度, 分别降低了 2.4% 和 11.0%。

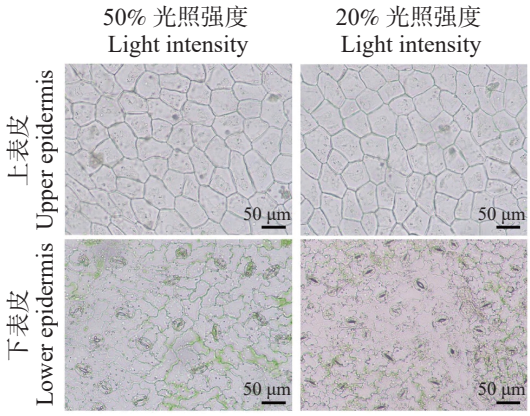


图 2　不同光照强度下海南凤仙花叶片表皮观测

Fig. 2　Observation of leaf epidermis of *I. hainanensis* under different light intensities

海南凤仙花叶片表皮角质层不明显, 具有清晰的栅栏组织和海绵组织(图 3)。栅栏组织中紧贴上表皮的下方, 分布着未知的薄壁大细胞。20% 光照强度下, 海南凤仙花的叶片厚度、上表皮厚度、栅栏组织厚度、韧皮部厚度均显著高于 50% 光照强度(P<0.05), 而下表皮厚度、主脉厚度、海绵组织厚度、栅海比、维管束厚度、木质部厚度、叶片紧密度和叶片疏松度在 20% 和 50% 光照强度下均无显著差异(P>0.05, 表 3)。

结果表明, 20% 光照强度显著提升了海南凤仙花叶片的气孔密度和叶片厚度等, 更有利于植株进行各项生理活动, 而 50% 光照强度下, 海南凤仙花叶片有较大的气孔器宽度、单个气孔器面积和气孔开张比, 也保障了其正常生理活动的进行。

2.4　不同光照强度对海南凤仙花叶色的影响　50% 和 20% 光照强度下, 海南凤仙花叶片的叶色参数 L^*、b^*、C^*均无显著差异(P>0.05), 表明光照强度对海南凤仙花叶片的亮度、黄蓝色差异及饱和度无显著影响(图 4)。20% 光照强度下海南凤仙花叶片的 a^*显著低于 50% 光照强度, 而 H 显著高于 50% 光照强度(P<0.05)。a^*代表红色与绿色程度, 正值代表叶片颜色偏红, 负值代表叶片颜色偏绿。H 代表色调, 为颜色在色轮上的位置, 0°表示红色, 90°表示黄色, 180°表示绿色, 270°表示蓝色。以上结果表明, 20% 光照强度下海南凤仙花叶片的绿色程度显著高于 50% 光照强度。

2.5　不同光照强度对海南凤仙花光合色素含量的影响　20% 光照强度下叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素含量均高于 50% 光照强度, 分别增长了 24.5%、8.3%、18.8% 和 16.7%, 但均未

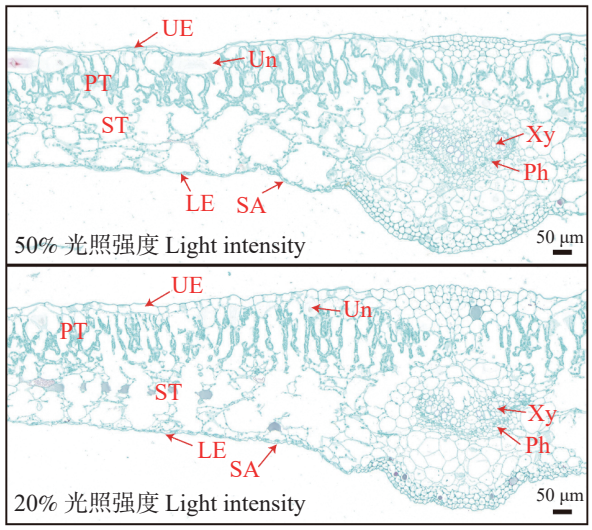
表 2　不同光照强度对海南凤仙花叶片气孔特征的影响

Tab. 2　Effects of different light intensities on stomatal characteristics of *I. hainanensis*

光照强度 Light intensity	气孔密度/(个·mm^{-2}) Stomata density	气孔器长度/μm Stomata length	气孔器宽度/μm Stomata width	单个气孔器面积/μm^2 Single stomata area	气孔开张比/% Opening stomata ratio
50%光照强度	127.86±5.32[b]	34.63±0.64[a]	26.47±0.40[a]	724.66±21.78[a]	89.70±2.81[a]
20%光照强度	179.87±6.81[a]	33.80±0.67[a]	22.32±0.41[b]	592.59±16.41[b]	79.80±7.56[a]

注: 不同小写字母表示同一指标下不同处理间差异显著(P<0.05), 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in the same index between different treatments (P < 0.05), similarly hereinafter.



UE.上表皮；LE.下表皮；PT.栅栏组织；ST.海绵组织；SA.气孔器；Ph.韧皮部；Xy.木质部；Un.未知。

UE. Upper epidermis; LE. Lower epidermis; PT. Palisade tissue; ST. Spongy tissue; SA. Stomatal apparatus; Ph. Phloem; Xy. Xylem; Un. Unknown.

图 3 不同光照强度下海南凤仙花叶片横切结构观测

Fig. 3 Observation of leaf cross-sectional structure of *I. hainanensis* under different light intensities

达到显著差异(P>0.05，图 5)。20% 光照强度下较高的光合色素含量，说明 20% 光照强度较 50% 光照强度更有利于海南凤仙花光合色素的积累。

2.6 不同光照强度对海南凤仙花光合气体交换参数的影响 由表 4 可知，20% 光照强度下海南凤仙花叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著高于 50% 光照强度(P<0.05)。20% 光照强度下胞间 CO_2 浓度比 50% 光照强度增加了 5.8%，但未达到显著差异(P>0.05)。由此表明，20% 光照强度更有利于海南凤仙花叶片气孔开张，增加 CO_2 的吸收，且蒸腾速率的增加是气孔开张的直接伴随效应，有助于叶片热量耗散与矿质运输，最终显著提升海南凤仙花的净光合效率。

2.7 不同光照强度对海南凤仙花光响应参数的影响 随着光合有效辐射的递增，50% 和 20% 光照强度下海南凤仙花的净光合速率均先增加后趋向稳定，光响应曲线的变化趋势相似(图 6)。当光合有效辐射>750 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 时，净光合速率均趋于平缓。

50% 和 20% 光照强度的暗呼吸速率、最大净光合速率、光补偿点及光饱和点均无显著差异(P>0.05，表 5)。20% 光照强度下暗呼吸速率和光补偿点分别比 50% 光照强度降低了 7.6% 和 21.0%，最大净光合速率和光饱和点分别比 50% 光照强度增加了 49.6% 和 18.5%。结果表明，相比于 50% 光照强度，20% 光照强度能更快地促使海南凤仙花进行光合积累，提高光合效率。

2.8 不同光照强度对海南凤仙花叶片叶绿素荧光参数的影响 如图 7 所示，20% 光照强度下海南凤仙花叶片的最大光化学量子效率显著高于 50% 光照强度(P<0.05)，实际光化学量子效率和电子传递效率也均高于 50% 光照强度，分别增长 47.8%

表 3 不同光照强度对海南凤仙花叶片横切面结构特征参数的影响

Tab. 3 Effects of different light intensities on characteristics parameters of leaf cross-sectional structure of *I. hainanensis*

指标 Index	50 %光照强度 50 %Light intensity	20 %光照强度 20 %Light intensity
叶片厚度 Thickness of leaf/μm	295.64±6.20[b]	333.87±10.28[a]
上表皮厚度 Thickness of upper epidermis/μm	10.12±1.01[b]	14.43±1.29[a]
下表皮厚度 Thickness of lower epidermis/μm	5.86±0.70[a]	6.12±0.62[a]
栅栏组织厚度 Thickness of palisade tissue/μm	137.22±5.81[b]	166.13±5.80[a]
海绵组织厚度 Thickness of spongy tissue/μm	141.76±7.22[a]	146.08±7.35[a]
栅海比 Palisade-to-spongy mesophyll ratio	1.02±0.09[a]	1.17±0.07[a]
主脉厚度 Thickness of midrib/μm	589.97±17.88[a]	656.43±31.87[a]
维管束厚度 Thickness of vascular bundle/μm	107.57±12.06[a]	136.33±8.07[a]
木质部厚度 Xylem thickness/μm	97.37±11.50[a]	122.1±8.76[a]
韧皮部厚度 Phloem thickness/μm	10.20±0.76[b]	14.23±0.87[a]
叶片紧密度 Palisade-to-leaf thickness ratio	0.47±0.02[a]	0.50±0.01[a]
叶片疏松度 Spongy-to-leaf thickness ratio	0.48±0.02[a]	0.44±0.01[a]

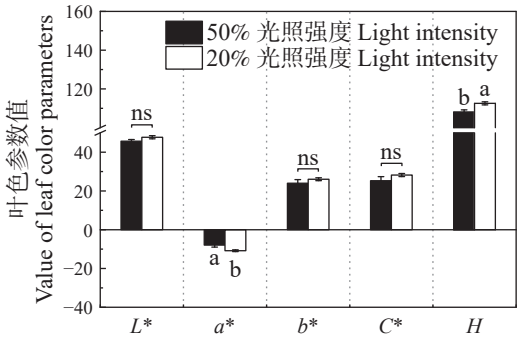


图 4　不同光照强度对海南凤仙花叶色参数的影响

Fig. 4　Effects of different light intensities on leaf color parameters of *I. hainanensis*

注: ns 表示不同处理之间无显著差异, 不同小写字母表示同一指标下不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: ns indicates no significant difference between different treatments, and different lowercase letters indicate significant differences in the same index different treatments (P < 0.05), similarly hereinafter.

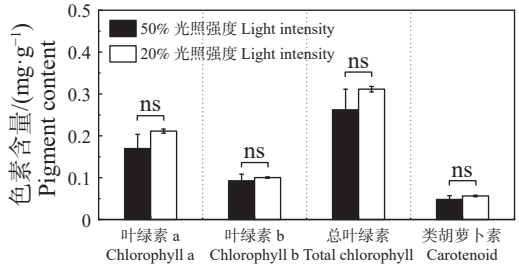


图 5　不同光照强度对海南凤仙花光合色素的影响

Fig. 5　Effects of different light intensities on photosynthetic pigment of *I. hainanensis*

和 47.7%。20% 和 50% 光照强度下非光化学淬灭系数无显著差异(P>0.05)。该结果表明, 20% 光照强度比 50% 光照强度更有利于海南凤仙花将所吸收的光能转化为化学能。

3　讨　论

光是植物进行光合作用所必需的驱动力, 植物正常的生长发育必须保证光能的充足。然而光照过强时, 植物无法将全部光能吸收利用, 进而造成光能过剩, 最终遭受光抑制, 影响植物的生长。陈笃伟[21]在对“陕茶 1 号”茶(*Camellia sinensis* 'Shancha 1')幼苗进行不同遮阴强度的研究中发现, 相比于全光照, 70% 光照强度下茶树幼苗有最高的株高和最多且最大的叶片。适宜的遮阴对植物生长有显著的促进作用[22]。本研究发现, 20% 光照强度相比于 50% 光照强度更有利于海南凤仙花的植株生长, 对海南凤仙花的地径、株高和冠幅均有促进作用。这与双升普等[10]的研究结果一致, 适当降低光照强度有利于阴生植物三七的生长发育, 能提升根、茎和叶的生长量。需注意的是, 低于植物最适光照强度后, 过低的光照强度无法满足植物对光能的最低需求, 这同样会抑制植物的生长。此外, 在低光照强度下, 植株也可能会为提高光能的获取而增加株高和冠幅[23]。较低的光照强度(20%)会促进海南凤仙花的生长, 这是海南凤仙花为捕获更多光能调整的生长策略, 还是低光照强度已满足海南凤仙花生长发育的光需求, 还需结合更多指标进行进一步分析。

20% 光照强度增大海南凤仙花叶面积和比叶面积, 这说明 20% 光照强度下的海南凤仙花可以更快更多地捕获光能[24−25]。韩云花等[26]同样观察到连香树(*Cercidiphyllum japonicum*)幼苗在低光照强度下比高光照强度下有更大的叶面积和比叶面积。适度的遮阴条件满足了植物对光的需求量, 可将植物体内累积的生物量进行最合理的分配, 或可能是为提高低光照强度下光能的充分捕获而改变叶片形态[27]。

植物的生长状况同样可以从叶片的解剖结构中体现[28−29]。一般来讲, 植物为了能在高光照强度下继续生存会选择增厚叶片和栅栏组织等[29]。张禹琪等[30]研究表明, 随着光照强度的降低, 南京椴(*Tilia miqueliana*)的叶片、表皮、海绵组织和栅栏组织的厚度均减小, 导致南京椴的光合速率降低。在本研究中, 20% 光照强度下海南凤仙花的叶片厚度及栅栏组织厚度均显著大于 50% 光照强度。栅栏组织作为植物进行光合作用的主要场所, 厚度的增加会提升植物光合作用的能力。此外, 叶片厚度及其他组织厚度的增加也会降低叶片水分的散失, 有利于气体交换并提高光合速

表 4　不同光照强度对海南凤仙花光合气体交换参数的影响

Tab. 4　Effects of different light intensities on photosynthetic gas exchange parameters of *I. hainanensis*

光照强度 Light intensity	净光合速率/(μmol·m⁻²·s⁻¹) Net photosynthetic rate	气孔导度/(mol·m⁻²·s⁻¹) Stomatal conductance	胞间CO_2浓度/(μmol·mol⁻¹) Intercellular CO_2 concentration	蒸腾速率/(mmol·m⁻²·s⁻¹) Transpiration rate/
50 %	3.59±0.33[b]	0.12±0.02[b]	299.97±9.59[a]	1.94±0.32[b]
20 %	6.50±0.36[a]	0.23±0.02[a]	317.32±6.11[a]	3.53±0.33[a]

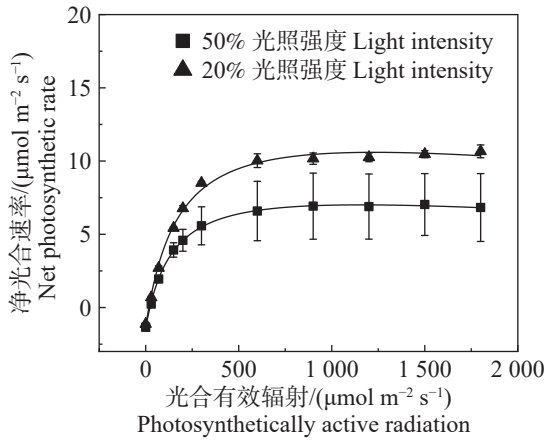


图 6 不同光照强度对海南凤仙花光响应曲线的影响

Fig. 6 Effects of different light intensities on light response curves of *I. hainanensis*

率。因此，相比于 50 % 光照强度，海南凤仙花叶片在 20% 光照强度下表现出更好的结构状态。徐意等[29] 的研究结果也表明，适度的遮阴条件可增加金叶银杏（*Ginkgo biloba* ‘Golden leaves’）的叶片、栅栏组织和海绵组织厚度，并发现其在 50% 光照强度时表现出最佳的生长效果。

气孔是叶片上的重要结构，控制着植物气体交换和水分蒸腾。研究表明，低光照环境会降低叶片气孔密度[30−32]，然而在本研究中，相比于 50% 光照强度，20% 光照强度会显著增大海南凤仙花叶片气孔密度并显著降低气孔器面积。刘雯雯等[33] 也同样发现 30% 光照强度下桫椤（*Alsophila spinulosa*）幼苗叶片的气孔密度最大，60% 光照强度下桫椤幼苗叶片会受到光抑制，叶片会通过降低气孔密度来缓解强光造成的光损伤。同样，50% 光照强度可能会对海南凤仙花造成一定光抑制，而低光照强度（20%）下海南凤仙花不必为了防御光抑制及高光照强度导致的叶片水分过度散失而降低气孔密度，其大量的气孔可以高效地吸收大量 CO_2 用于提高光合速率。同时，气孔器面积的降低也是一种防止气孔密度增多而导致过度吸收 CO_2 和散失水分的应对措施。

叶色同样会受到不同光照强度的影响。对于海南凤仙花，相比于 50% 光照强度，20% 光照强度会显著提升其叶片的绿色程度，这与光合色素含量的测定结果一致。20% 光照强度下的叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均高于 50% 光照强度，使叶片呈现更绿的色彩。这与韩睿婷等[34] 研究结论一致，其发现适度遮阴有利于叶绿素的积累，随着光照强度的降低，毛茛（*Ranunculus japonicus*）、华东唐松草（*Thalictrum fortunei*）和卵瓣还亮草（*Delphinium anthriscifolium* var. *savatieri*）的叶绿素含量均有所升高。该变化可以提升光能捕获能力，帮助植株快速适应弱光环境。本研究中，20% 光照强度下光合色素含量的增长同样有助于提升海南凤仙花的捕光能力，捕光能力的提升继而为后续高效进行光合作用做好准备。

通过分析不同光照强度下海南凤仙花光合气体交换参数的差异，可评估其光合作用的能力。与 50% 光照强度相比，20% 光照强度显著提升了海南凤仙花的净光合速率和蒸腾速率，表明低光照强度（20%）有利于提升海南凤仙花的光合能力。这可能是因为 50% 光照强度对海南凤仙花有一定的光抑制作用。同样，对 3 种石斛在不同光照强度下叶片光合特性的研究中发现，相比于高光照强度，低光照强度下霍山石斛（*Dendrobium huoshanense*）有最大的净光合速率[35]。霍山石斛是典型的阴生植物，对强光非常敏感，因此对于阴生植物，降低光照强度才能够高效促进其健康生长。20% 光照强度下海南凤仙花光补偿点低于 50% 光照强度，这表明海南凤仙花在低光照强度下能更早积累同化产物。同时，20% 光照强度下暗呼吸速率低于 50% 光照强度，也说明低光照强度可以减少海南凤仙花光合产物的消耗，这些变化均利于碳平衡的维护[7]。此外，20% 光照强度比 50% 光照强度有更高的光饱和点，表明 20% 光照强度下海南凤仙花比 50% 光照强度能充分利用更

表 5 不同光照强度对海南凤仙花光响应特征参数的影响

Tab. 5 Effects of different light intensities on light response parameters of *I. hainanensis*

光照强度 Light intensity	暗呼吸速率/(mol·m⁻²·s⁻¹) Dark respiration rate	最大净光合速率/(μmol·m⁻²·s⁻¹) Maximum net photosynthetic rate	光补偿点/(μmol·m⁻²·s⁻¹) Light compensation point	光饱和点/(μmol·m⁻²·s⁻¹) Light saturation point
50 %	1.45±0.15[a]	7.09±2.25[a]	22.11±2.79[a]	1 026.83±124.10[a]
20 %	1.34±0.08[a]	10.61±0.37[a]	17.47±0.98[a]	1 217.03±1.30[a]

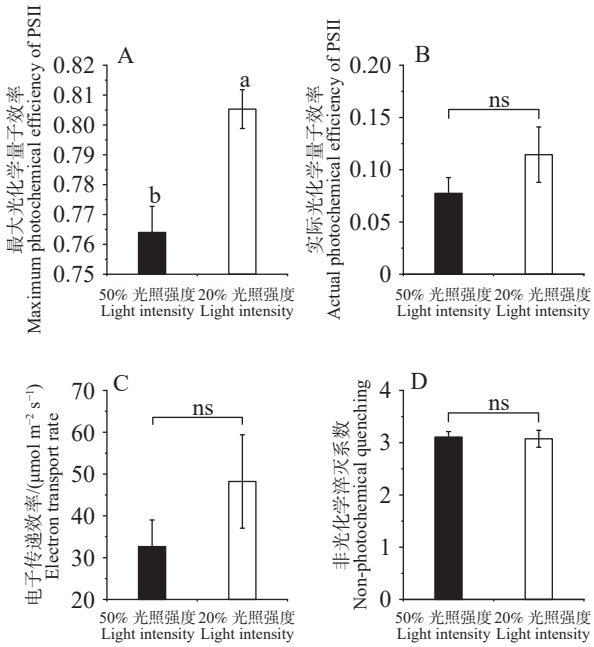


图 7　不同光照强度对海南凤仙花叶绿素荧光参数的影响

Fig. 7　Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence parameters of *I. hainanensis*

强的光能。若同时暴露在强光之下，长期生长在 50% 光照强度下的海南凤仙花会更快受到光抑制。综合来讲，20% 光照强度比 50% 光照强度更有利于海南凤仙花提高光合效率和积累光合产物，有助于其表现出更强的光适应能力。

叶绿素荧光参数同样可以揭示植物的光合信息。本研究中，海南凤仙花叶片的最大光化学量子效率在 20% 光照强度下显著高于 50% 光照强度，同时，20% 光照强度下光利用效率和电子传递效率均高于 50% 光照强度。卢建祥等[36] 也发现光照强度在 600 μmol·m^{-2}·s^{-1} 时陆地棉（*Gossypium hirsutum*）的最大光化学量子效率最高。这说明适当降低光照强度可以提高光合作用将光能转化为化学能的效率。同时，光抑制的发生往往伴随着光合电子传递速率的下降[6]。本研究结果表明，50% 光照强度对海南凤仙花有一定光抑制，这与上述海南凤仙花光合气体交换参数变化结果一致。

4　结　论

20% 光照强度（生境最低光照强度阈值）更有利于海南凤仙花的生长发育，会增大其气孔密度、叶片厚度、上表皮、栅栏组织和韧皮部厚度并降低单个气孔器面积。20% 光照强度下叶片的叶绿素含量和绿色程度更高，有助于提升其光合能力。同时，20% 光照强度有显著高的净光合速率、蒸腾速率和最大光化学量子效率，且有较高的光饱和点和较低的暗呼吸速率及光补偿点。综上，20% 光照强度是更有利于海南凤仙花生长的光照条件，这可为后续海南凤仙花引种驯化、人工栽培养护提供参考。本研究仅对 50% 和 20% 光照强度（生境最高和最低光照强度阈值）下海南凤仙花基本的生理指标进行了初步的分析比较，后续计划模拟海南凤仙花自然生境中的光斑环境，探究不同光斑条件对海南凤仙花生长、形态及光合特性的影响，从而为海南凤仙花的野外保护和栽植培育提供理论依据。

致谢：感谢宋希强教授、钟云芳副教授对论文的指导与建议，感谢陈英转、石俣同学在实验中的帮助。

参考文献：

[1] Wu W Y, Chen L, Liang R T, et al. The role of light in regulating plant growth, development and sugar metabolism: a review[J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 15: 1507628. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1507628

[2] 王鹏, 怀志文, 刘子涵, 等. 水椰幼苗适应低光照环境的生理响应及转录组差异变化的研究[J]. 热带生物学报, 2025, 16(3): 461−468. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.20240114

[3] 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. https://doi.org/10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20240319.004

[4] 周丽英, 付忠, 卜璐璐, 等. 植物光破坏防御机制研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2016, 45(3): 290−294. https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7791.2016.03.020

[5] Zhang M, Ming Y, Wang H B, et al. Strategies for adaptation to high light in plants[J]. aBIOTECH, 2024, 5(3): 381−393. https://doi.org/10.1007/s42994-024-00164-6

[6] 赵颖, 张厂, 王旭. 强光对小白菜光合作用能力的影响[J/OL]. 热带生物学报, 1−9[2025−04−26]. https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswxb.20250047

[7] 魏春燕, 李月灵, 金则新, 等. 遮荫对七子花幼苗光合特性和非结构性碳水化合物含量的影响[J]. 植物研究, 2022, 42(6): 1096−1105. https://doi.org/10.7525/j.issn.1673-5102.2022.06.020

[8] 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. https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202104.013

[9] 孙菲菲, 杨一山, 秦惠珍, 等. 3 种兜兰属植物光合特性的比较研究[J]. 广西科学院学报, 2022, 38(2): 155−162. https://doi.org/10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20220622.007

[10] 双升普, 张金燕, 寸竹, 等. 光照强度驱动典型阴生植物三七的生理生态响应特征[J]. 生态学报, 2022,

42(9): 3596−3612. https://doi.org/10.5846/stxb202104090918
[11] 常艳, 甄彩云, 王连军, 等. 遮阴对铁皮石斛生长与品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(2): 213−218. https://doi.org/10.13610/j.cnki.1672-352x.20230511.014
[12] 覃丽钊, 陈婷, 李宁鑫, 等. 遮阴对药食两用植物明日叶光合特性的影响 [J]. 南方农业学报, 2025, 56(8): 2565−2574. https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2025.11.003
[13] Chai S F, Tang J M, Mallik A, et al. Eco-physiological basis of shade adaptation of *Camellia nitidissima*, a rare and endangered forest understory plant of Southeast Asia[J]. BMC Ecology, 2018, 18(1): 5. https://doi.org/10.1186/s12898-018-0159-y
[14] 王发国, 秦新生, 陈红锋, 等. 海南岛石灰岩特有植物的初步研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(1): 45−54. https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3395.2006.01.008
[15] 海南省人民政府. 海南省人民政府关于公布海南省省级重点保护陆生野生动物名录和野生植物名录的通知: 琼府〔2024〕39 号[EB/OL]. (2024−10−20)[2024−10−23]. https://www.hainan.gov.cn/hainan/szfwj/202410/ee9c93503df24e98ac981f7b5a710039.shtml.
[16] 黄蔚霞, 孟新亚, 钟云芳, 等. 基于栅格尺度下喀斯特专性植物海南凤仙花生境水资源脆弱性时空分异变化[J]. 生态科学, 2024, 43(1): 113−123. https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2024.01.014
[17] 秦爱丽, 郭泉水, 马凡强, 等. 温度、光照和水分对珍稀濒危树种崖柏种子萌发的影响[J]. 种子, 2020, 39(2): 15−20. https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2020.02.015
[18] 儋州市统计局, 国家统计局儋州调查队. 儋州统计年鉴 (2024)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024:7.
[19] 石俣, 王云锦, 李和芹, 等. 海南凤仙花叶片光合特性及解剖结构对干旱胁迫的响应[J]. 亚热带植物科学, 2025,54(4):387−397.https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-7791.2025.04.003
[20] 叶子飘, 李进省. 光合作用对光响应的直角双曲线修正模型和非直角双曲线模型的对比研究[J]. 井冈山大学学报 (自然科学版), 2010, 31(3): 38−44. https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8085.2010.03.009
[21] 陈笃伟. 不同遮阴处理对安康富硒茶幼苗生长及生理特性的影响[J]. 农村科学实验, 2024(14): 178−180. https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-0743.2024.14.061
[22] 李韦柳, 唐秀桦, 韦民政, 等. 遮阴对淀粉型甘薯生长发育及生理特性的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(2):258−263.https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2017.02.012
[23] 傅国林, 李婷婷, 方庆, 等. 遮荫对极小种群植物浙江安息香幼苗生长和光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2025, 33(4): 381−389. https://doi.org/10.11926/jtsb.4984
[24] 杨欣蕊, 王庆, 李倩, 等. 不同光照条件下顶花板凳果的光合特性变化及耐阴性评价[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2025, 49(6): 162−170. https://doi.org/10.12302/j.issn.1000-2006.202412015
[25] 魏娟, 马永红, 毛平. 连香树幼苗对光照强度的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(6): 791−799. https://doi.org/10.11926/jtsb.4923
[26] 韩云花, 赵秋玲, 张晶, 等. 遮阴对连香树幼苗生长和碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 森林工程, 2024, 40(2):36−46.https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.005
[27] 王琳, 王满莲, 梁惠凌, 等. 遮阴对地枫皮幼苗生长和生物量分配的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2023, 31(5): 607−614. https://doi.org/10.11926/jtsb.4654
[28] 彭丽辉, 陈妮, 杨哲, 等. 三种珍稀濒危石斛属植物光合特性及叶片解剖结构的比较研究[J]. 中药材, 2024, 47(12): 2966−2973. https://doi.org/10.13863/j.issn1001-4454.2024.12.004
[29] 徐意, 王改萍, 赵群, 等. 金叶银杏叶表型及光合特征对遮阴的响应[J]. 经济林研究, 2024, 42(3): 177−187. https://doi.org/10.14067/j.cnki.1003-8981.2024.03.018
[30] 张禹琪, 沈永宝. 遮阴对南京椴容器苗叶片性状和光合生理的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(1): 58−69. https://doi.org/10.14067/j.cnki.1673-923x.2025.01.007
[31] 尹慧, 安莹, 陈雅君, 等. 不同遮阴强度下白三叶形态特征和生长动态[J]. 中国草地学报, 2015, 37(5): 86−91. https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5021.2015.05.015
[32] 王黎, 赵丹丹, 张鸽香. 遮阴对猫爪草光合特性及叶片解剖结构的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(7): 1055−1063. https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.20230640
[33] 刘雯雯, 饶丹丹, 吴二焕, 等. 遮阴对桫椤幼苗的叶片性状及光合特性的影响[J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2024, 44(2): 52−62. https://doi.org/10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202311002
[34] 韩睿婷, 赵丹丹, 王维艺, 等. 遮阴对三种毛茛科植物光合特性的影响及耐阴性评价[J]. 广西植物, 2024, 44(11): 2101−2112. https://doi.org/10.11931/guihaia.gxzw202310035
[35] 蔡永萍, 李合生, 骆炳山, 等. 霍山 3 种石斛的生长节律及其与生态因子关系的研究[J]. 武汉植物学研究, 2003,21(4):351−355.https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0837.2003.04.013
[36] 卢建祥, 高倩文, 高志强, 等. 植物工厂环境下光照强度对陆地棉生长发育的影响[J]. 激光生物学报, 2024, 33(2): 115−122. https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-7146.2024.02.003

Effects of light intensity on leaf anatomical structure and photosynthetic characteristics of *Impatiens hainanensis*

Yang Canhua[1,2,3#], Li Heqin[2,3], Wang Yunjin[2,3], Zhang Peilan[1,2,3], Wang Jin[2,3], Wang Zizhao[2,3], Zhang Jinling[1,2,3*]

（1. Hainan Institute of National Park/Key Laboratory of Protection and Development for Hainan National Park, Haikou, Hainan 570203, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants/Hainan Key Laboratory of Biology of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Danzhou, Hainan 571737, China; 3. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571737, China）

Abstract: An attempt was made to investigate the physiological response of *Impatiens hainanensis*, the near-threatened extremely small population, under the light intensity thresholds in habitat. *I. hainanensis* was treated with 50% light intensity (the maximum threshold in the habitat) and 20% light intensity (the minimum threshold in the habitat) to observe its growth, leaf anatomical structure, photosynthesis and fluorescence characteristics. The results showed that the ground diameter, height, crown width, leaf area and specific leaf area of *I. hainanensis* under the 50% light intensity were lower than those under the 20% light intensity. The stomatal density was significantly lower under the 50% light intensity than under the 20% light intensity, while single stomata area was significantly higher under the 50% than under the 20% light intensity. Compared with the 50% light intensity, the 20% light intensity significantly increased the leaf thickness, upper epidermal, palisade tissue and sponge tissue thickness. For leaf color and photosynthetic pigment content, the values of the color parameters a* (green-red axis) were significantly reduced and H (hue angle) significantly increased under the 20% light intensity compared with those under the 50% light intensity, and chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll contents were higher, indicating that leaves were greener under the 20% light intensity. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration rate and maximum photochemical quantum efficiency exhibited a significant increase under the 20% light intensity, and the light saturation point under the 20% light intensity was higher than that under the 50% light intensity, while the dark respiration rate and light compensation point under the 20% light intensity were both lower than those under the 50% light intensity. It is concluded that the 50% light intensity (the maximum threshold in the habitat) caused a certain degree of photoinhibition to *I. hainanensis*, while the 20% light intensity (the minimum threshold in the habitat) could avoid photoinhibition and guarantee the efficient photosynthesis. Thus, the 20% light intensity was more favorable to the growth and development of *I. hainanensis*.

Keywords: light intensity; *Impatiens hainanensis*; anatomical structure; photoinhibition; photosynthetic response

(责任编辑:潘学峰)