

海南石碌含笑濒危原因综合分析

陈仕铭^{1a}, 文香英², 王 晶³, 王晚双^{1a}, 周 璋⁴, 符杰雄⁵, 姚智强⁶, 王亚玲^{1a, 1b, ①}

- (1. 海南大学: a. 热带特色林花卉遗传与种质创新教育部重点实验室, b. 海南省热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南 海口 570228;
2. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650; 3. 棕榈生态城镇发展股份有限公司, 河南 郑州 450000;
4. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 5. 海南热带雨林国家公园管理局吊罗山分局, 海南 陵水 572400;
6. 海南天香木兰植物保育研究中心, 海南 儋州 571722)

摘要: 为进一步明确石碌含笑(*Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu)的濒危原因,连续3年对海南吊罗山国家森林公园野生石碌含笑种群的生存现状进行调查,同时对海南天香木兰植物保育研究中心栽培石碌含笑的生长特性进行统计分析,并对栽培和野生石碌含笑进行比较。结果表明:该野生石碌含笑种群共有296株个体,但开花植株仅占个体总数的7.1%,占成年(胸径在22.5 cm及以上)个体数的44.7%;开花和结实植株最小株距的中值分别为17.07和2.56 m,且罕见幼苗;生境遮光率均在96%以上。85%以上土壤的有机质、全氮、全钾及碱解氮含量在较丰富及以上水平,2/3以上土壤的速效钾含量在适量或较丰富水平,所有土壤的全磷含量在贫乏或极贫乏水平,半数以上土壤的有效磷含量在贫乏或极贫乏水平。野生石碌含笑生长较慢,株龄5 a的野生植株的平均株高与株龄2 a的栽培植株相近。经推算,野生和栽培石碌含笑的童期分别为20.3和10.8 a。观察结果显示:石碌含笑在花蕾形成期经过高温干旱天气后植株的开花物候期明显延迟,小孢子败育严重,花粉量急剧减少甚至无花粉。在遮光率90%处理下石碌含笑的净光合速率最高,株高增长量最大;而在遮光率99%处理下石碌含笑的净光合速率最低,株高和地径增长量最小。综合分析认为,海南吊罗山石碌含笑的濒危原因主要为外因,即碎片化生境导致植株花而不实,林下光照不足导致幼苗生长缓慢甚至死亡,种群更新困难。因此,石碌含笑是个被严重低估的濒危树种。

关键词: 石碌含笑; 生存现状; 濒危原因; 海南

中图分类号: Q944.43; Q945.3; S685.99 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)06-0032-08
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.06.04

Comprehensive analysis of endangered reasons of *Michelia shiluensis* in Hainan Province CHEN Shiming^{1a}, WEN Xiangying², WANG Jing³, WANG Wanshuang^{1a}, ZHOU Zhang⁴, FU Jiexiong⁵, YAO Zhiqiang⁶, WANG Yaling^{1a, 1b, ①} (1. Hainan University: a. Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, b. Key Laboratory of Germplasm Resources of Tropical Special Ornamental Plants of Hainan Province, Haikou 570228, China; 2. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 3. Palm Ecological Town Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 4. Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China; 5. Diaoluo Mountain Branch, Hainan Tropical Rainforest National Park Administration Bureau, Lingshui 572400, China; 6. Hainan Tianxiang Magnolia Plant Conservation Research Center, Danzhou 571722, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(6): 32-39

Abstract: To further clarify the endangered reasons of *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu, the current survival status of wild *M. shiluensis* populations in Diaoluo Mountain National Forest Park of Hainan

收稿日期: 2025-01-07

基金项目: 海南省重点研发项目(ZDYF2025XDNY071); 国际植物园保护联盟中国项目(BGCI30434); 陕西省科学技术厅创新人才推进计划-科技创新团队项目(2021TD-33); 海南省自然科学基金青年项目(322QN249)

作者简介: 陈仕铭(2000—),男,福建漳州人,硕士研究生,主要从事园林植物种质资源与遗传育种研究。

①通信作者 E-mail: 996216@hainanu.edu.cn

引用格式: 陈仕铭, 文香英, 王 晶, 等. 海南石碌含笑濒危原因综合分析[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(6): 32-39.

Province was investigated for three consecutive years, meanwhile, the growth characteristics of cultivated *M. shiluensis* in Hainan Tianxiang Magnolia Plant Conservation Research Center were statistically analyzed and a comparison was made between cultivated and wild *M. shiluensis*. The results show that there are 296 individuals in this wild *M. shiluensis* population, but the flowering plants account for only 7.1% of the total number of individuals and 44.7% of the number of adult individuals (diameter at breast height of 22.5 cm and above); the medians of minimum distance of flowering and fruiting plants are 17.07 and 2.56 m, respectively, with rare seedlings; the habitat shading rates are all greater than 96%. The contents of organic matter, total nitrogen, total potassium, and available nitrogen in more than 85% of soils are at relatively rich and greater levels, while the available potassium contents in over 2/3 of soils are at moderate or relatively rich levels, but the total phosphorus contents in all soils are at poor or extremely poor levels, and the available phosphorus contents in over half of the soils are at poor or extremely poor levels. Wild *M. shiluensis* grows relatively slowly, and the average height of wild plants with plant age of 5 a is similar to that of cultivated ones with plant age of 2 a. After calculation, the juvenile phases of wild and cultivated *M. shiluensis* are 20.3 and 10.8 a, respectively. The observation results show that the flowering phenology of *M. shiluensis* is obviously delayed after experiencing high temperature and drought weather during the bud formation period, and microspore abortion is serious, pollens decrease sharply or even no pollen. The net photosynthetic rate and height increment of *M. shiluensis* seedlings under 90% shading rate treatment are both the highest; while the net photosynthetic rate, height and ground diameter increments of *M. shiluensis* seedlings under 99% shading rate treatment are all the lowest. It is comprehensively analyzed that the primary endangered reasons of *M. shiluensis* in Diaoluo Mountain of Hainan are extrinsic, viz. habitat fragmentation-induced flowering without fruiting, insufficient understory light causing slow growth and even mortality of seedlings, and difficult population regeneration. So, *M. shiluensis* is a severely underestimated endangered species.

Key words: *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu; current survival status; endangered reason; Hainan Province

木兰科 (Magnoliaceae) 植物为古老植物类群, 具有很高的观赏和药用价值, 并具有重要的科研价值^[1], 还是亚热带常绿阔叶林和热带雨林的优势种和建群种^[2]。然而, 木兰科植物常遭到大量采挖或砍伐, 许多种类的自然居群数量急剧下降, 呈现零星分布, 加上自然分布区狭窄、自身繁殖能力差等原因, 种群更新能力严重衰退, 面临濒危风险^[3]。据国际植物园保护联盟 (Botanic Gardens Conservation International, BGCI) 调查, 全球 304 种木兰科植物中有 147 种在野外处于濒危状态, 占比超过 48%^[4]。2021 年公布的《国家重点保护野生植物名录》(简称《名录》) 显示: 24 种木兰科植物被列入《名录》中, 其中, 一级重点保护野生植物有 3 种, 二级重点保护野生植物有 21 种^[5]。

石碌含笑 (*Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu) 为木兰科含笑属 (*Michelia* Linn.) 常绿乔木。世界自然保护联盟 (International Union for Conservation of Nature, IUCN) 在 2007 年将石碌含笑列为极危种 (CR), 在 2016 年将其列为濒危种 (EN), 该种还是国家二级重点保护野生植物^[4-6]。相关调查结果显示: 海南省的野生石碌含笑只分布在鹦哥岭、南高岭、保

梅岭、五指山和吊罗山 5 个片区, 其中吊罗山种群是唯一具有完整年龄结构的种群, 但该种群属于衰退型种群^[7-8]。为了进一步明确石碌含笑的濒危原因, 对海南吊罗山国家森林公园的野生石碌含笑种群生存现状进行了调查分析, 对海南天香木兰植物保育研究中心栽培石碌含笑的生长情况进行了统计分析, 并对栽培和野生石碌含笑进行了比较, 以期对石碌含笑资源保育提供科学依据和技术指导, 并为木兰科其他濒危植物的保护提供参考资料。

1 材料和方法

1.1 材料

选取吊罗山国家森林公园内野生的石碌含笑种群及海南天香木兰植物保育研究中心圃地内栽培的实生幼苗 (株龄 2~3 a) 和开花植株进行实验。另选取海南天香木兰植物保育研究中心保存的栽培石碌含笑年轮标本 (胸径 29.25 cm) 和吊罗山标本馆保存的野生实生含笑年轮标本 (胸径 22.70 cm) 测算年轮增长速率和童期。吊罗山国家森林公园位于北纬 18°38'42"~18°50'22"、东经 109°41'38"~110°04'46",

海拔 900 m,区内气候分为旱雨两季,年均温 20.8 ℃,年降水量 2 566 mm。海南天香木兰植物保育研究中心位于北纬 19°29′、东经 109°40′,海拔 144 m,区内气候同样分为旱雨两季,年均温 25.1 ℃,年降水量 1 607 mm。

1.2 方法

1.2.1 野生石碌含笑生存现状调查 于 2022—2024 年的开花期(4 月)、果熟期(11 月)及花蕾形成期(1 月)对吊罗山国家森林公园内的野生石碌含笑进行踏查。

1.2.1.1 开花和结实情况调查 使用“两步路户外助手”手机软件检测并记录石碌含笑分布的经度、纬度、海拔等信息;使用胸径尺(精度 0.01 cm)测量所有植株的胸径,使用卷尺(精度 0.01 cm)测量胸径小于 7.5 cm 的幼树株高,参照魏亚情等^[8]的方法划分胸径等级,统计开花和结实植株数量,计算开花和结实植株占比;使用 ArcMap 10.8 软件测量最小株间距离,并计算最小株间距离的均值和中值;同时,观测并记录开花结实的物候情况。

1.2.1.2 生境遮光率调查 于每年 4 月下旬晴朗无云日的 11:00—12:00,使用 HP350 手持式光谱照度计(杭州双色智能检测仪器有限公司)检测河边、山坡、山顶和栈道旁林下野生石碌含笑(株龄 2~5 a)顶芽位置的光照强度,每种生境检测 3~5 株,每株重复检测 5 次。以无遮蔽空地的光照强度为对照,计算上述调查点生境的遮光率(SR),计算公式为 $SR = [1 - (E/E_0)] \times 100\%$ 。式中, E 为林下光照强度, E_0 为空地光照强度。

1.2.1.3 土壤养分情况调查及分级评价 依据代表性原则(尽量覆盖所有成年植株),在野生石碌含笑树干四周 1.5 m 范围内选择 3~5 个样点,采集各样点 20 cm 土层内土壤,共 26 份土壤样品。剔除石块和根系,将株距 5 m 以内植株的土壤样品混匀后作为 1 份样品。土壤样品自然风干后,过 10 目尼龙筛,用于有机质、全氮、全磷、全钾含量及 pH 值测定;取部分土样,过 100 目尼龙筛,用于碱解氮、有效磷、速效钾含量测定。采用 NY/T 1121.6—2006 中的方法测定土壤有机质含量,采用 LY/T 1228—2015 中的方法测定土壤全氮含量,采用 LY/T 1232—2015 中的方法测定土壤全磷含量,采用 LY/T 1234—2015 中的方法测定土壤全钾含量,采用 DB51/T 1875—2014 中的方法测定土壤碱解氮含量,采用 NY/T 1121.7—2014 中

的方法测定土壤有效磷含量,采用 LY/T 1236—1999 中的方法测定土壤速效钾含量,采用 NY/T 1121.2—2006 中的方法测定土壤 pH 值。每份土壤样品各指标重复测定 3 次。

参照“第二次全国土壤普查中国土壤养分分级标准”^[9],对土壤养分情况进行分级评价。每个指标均分成 6 个等级,I 级为极丰富,II 级为丰富,III 级为较丰富,IV 级为适量,V 级为贫乏,VI 级为极贫乏。

1.2.2 栽培石碌含笑生长情况观测

1.2.2.1 生殖生长情况观测 对圃地内所有石碌含笑开花植株的花期^[10]、异交授粉结籽率进行观察和统计。于 2022—2024 年 5 月采集圃地内所有栽培石碌含笑开花植株的花蕾(在花蕾处于佛焰苞及露白时采摘),每株采集 3 个花蕾。采用石蜡切片法^[1]进行固定和石蜡切片制作,使用莱卡 RM 2016 切片机(德国徕卡显微系统股份有限公司)切片,经番红-固绿染色并封片后,在 Nikon Eclipse E100 光学显微镜[尼康精机(上海)有限公司]下观察小孢子发育情况。同时,选用课题组筛选的最优花粉离体培养基(含 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 蔗糖、 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 硼酸和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ CaCl_2),在温度 25 ℃、空气相对湿度 90%的气候箱中培养花粉 6 h 后进行花粉活性检测,重复 3 次。以花粉管长度超过直径 1 倍视为花粉萌发,随机取 3 个视野进行观察和统计,每个视野的花粉数量不低于 50 粒。根据观察和统计结果计算离体萌发率(R_1),计算公式为 $R_1 = (n_1/n_2) \times 100\%$ 。式中, n_1 为萌发花粉数, n_2 为观察花粉总数。参考莫丽文等^[1]的方法,连续 3 年对栽培石碌含笑开株植株进行异株授粉,并根据观察和统计结果计算异交结籽率(R_2),计算公式为 $R_2 = (n_3/n_4) \times 100\%$ 。式中, n_3 为成熟种子数, n_4 为异交授粉总胚珠数。

1.2.2.2 旱季月均温和月降水量数据统计 从气象网站(<https://rp5.ru/>)下载儋州市 2021—2024 年旱季(上一年 12 月至当年 4 月)的月均温和月降水量,具体信息见表 1。

1.2.2.3 遮光对光合特性和生长的影响 根据吊罗山野生石碌含笑生境的遮光率,以株龄 2 a 的石碌含笑实生苗为研究对象,于 2024 年 5 月在圃地设置不同遮光率处理(表 2),共遮光处理 3 个月。每个处理组随机选取长势基本一致的石碌含笑植株 3 株,在处理前后测定株高和地径,计算株高和地径增长量,并在处理结束后选择晴朗无云日 8:00—11:00 测定净

表 1 调查期间海南儋州旱季的月均温和月降水量

Table 1 Monthly mean temperature and monthly precipitation in dry season in Danzhou of Hainan during the survey period

月份 Month	不同年份的月均温/℃ Monthly mean temperature in different years			不同年份的月降水量/mm Monthly precipitation in different years		
	2022	2023	2024	2022	2023	2024
上一年 12 月 Last December	18.8	17.3	19.8	66.54	14.97	22.11
1 月 January	20.4	17.0	19.6	45.50	30.10	13.85
2 月 February	17.6	21.6	21.8	51.83	14.38	12.96
3 月 March	24.4	23.8	24.1	65.75	21.98	33.18
4 月 April	24.6	26.9	30.0	74.57	59.92	24.32

表 2 不同遮光率处理下的正午光照强度($\bar{X} \pm SD$)Table 2 Noon light intensity under different shading rate treatments ($\bar{X} \pm SD$)

遮光率/% Shading rate	正午光照强度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})^1$ Noon light intensity ¹⁾
99	20.00±2.08e
90	263.00±7.57d
80	441.00±2.08c
50	1 105.33±28.49b
0	2 243.00±10.41a

¹⁾ 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)。选取植株从上往下的第 3 至第 6 枚健康、完整的叶, 使用 LI-6800 便携式光合测定仪 (美国 LI-COR 公司) 测定。根据各处理下光响应曲线的近饱和点, 设置近饱和和光合有效辐射为 $1\ 100\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 测定时, 叶面温度 $30\ ^\circ\text{C}$, 环境 CO_2 浓度 $400\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 空气流速 $500\ \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 空气相对湿度 70%。

1.2.3 栽培和野生石碌含笑比较

1.2.3.1 生长情况比较 在圃地内随机选取株龄 1 和 2 a 的石碌含笑实生苗各 30 株, 使用皮尺 (精度 0.01 cm) 测量株高, 使用游标卡尺 (精度 0.01 mm) 测量地径, 并计算株高和地径的年生长量。

1.2.3.2 童期比较 用砂纸将栽培和野生石碌含笑的年轮标本打磨光滑; 用水清洗干净后, 在圆盘上画

2 条通过髓心的垂线, 使用游标卡尺测量年轮宽度。分别计算栽培和野生石碌含笑的年轮增长速率, 并根据栽培和野生石碌含笑的年轮生长速率及开花植株最小胸径推算童期。其中, 年轮增长速率为各年份年轮宽度的总和与年轮数的商, 童期为开花植株最小胸径与年轮增长速率的商的一半。

1.3 数据处理与统计分析

利用 EXCEL 2010 软件处理相关数据, 利用 SPSS 26.0 软件进行方差分析。基于在线光合计算软件 (<https://photosynthetic.sinaapp.com/calc.html>) 中的光合计算模型进行光响应曲线拟合^[11], 确定近饱和和光合有效辐射。

2 结果和分析

2.1 野生石碌含笑种群的生存现状

2.1.1 开花和结实情况分析 调查发现, 海南吊罗山野生石碌含笑种群共有 296 株个体, 其中, 胸径 (DBH) 在 V 级及以上 (大于或等于 22.5 cm) 的成年植株有 47 株。统计结果 (表 3) 显示: 种群中的开花植株有 21 株, 占个体总数的 7.1%, 占成年个体数的 44.7%。说明该石碌含笑野生种群的开花植株集中在 V 级及以上, 据此认为 DBH 大于 22.5 cm 的石碌含笑成年植株。该种群的结实植株较少, 仅有 7 株, 占个体总数的 2.4%, 并占成年个体数的 14.9%。该

表 3 海南吊罗山石碌含笑野生种群开花和结实植株调查结果¹⁾Table 3 Investigation results of flowering and fruiting plants of wild population of *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu in Diaoluo Mountain of Hainan Province¹⁾

植株类型 Plant type	个体数 Individual number	P1/%	P2/%	最小株距统计 Statistics of minimum distance between plants		
				范围/m Range	均值/m Mean	中值/m Median
开花植株 Flowering plant	21	7.1	44.7	0.00–458.76	57.77±22.14	17.07
结实植株 Fruiting plant	7	2.4	14.9	0.00–11.08	5.16±5.01	2.56

¹⁾ P1: 占个体总数的比例 Proportion of the total number of individuals; P2: 占成年个体数的比例 Proportion of the number of adult individuals.

种群罕见幼苗,开花植株最小株距范围为 0.00 ~ 458.76 m,均值为 57.77 m,中值为 17.07 m;结实植株最小株距的范围(0.00~11.08 m)、均值(5.16 m)和中值(2.56 m)均明显小于开花植株,说明吊罗山野生石碌含笑种群的繁殖能力较弱,结实植株数量稀少且分布较为集中,可能存在传粉或种子扩散受限问题。

2.1.2 生境遮光率分析 检测结果(表4)显示:海南吊罗山5个调查点野生石碌含笑的生境遮光率均较高,均在96%以上,最高达到99.37%,说明野生石碌含笑均分布在极度荫蔽的环境中。

2.1.3 土壤养分分析 检测结果显示:吊罗山野生石碌含笑生境土壤的酸碱度为 pH(5.74±0.39),有机质、全氮、全磷、全钾含量分别为(44.55±21.77)、(2.58±1.05)、(0.25±0.07)、(40.02±12.95) g·kg⁻¹,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为(159.30±69.65)、(4.77±3.35)、(65.72±33.21) mg·kg⁻¹。

对各土壤样品的养分情况进行分级评价,结果见表5。从有机质含量看,I级占比最大(48.15%),II级和III级占比较大(分别为25.93%和18.52%),且缺少VI级;全氮含量在I级占比最大(81.48%),II级

(11.11%)次之,且缺少III级和VI级;全磷含量只在V级和VI级有分布,且V级占比高达81.48%;全钾和碱解氮含量均在I级占比最大(分别为85.19%和51.85%),在II级、III级和IV级间占比差距不大,且缺少V级和VI级;有效磷和速效钾含量均在IV级占比最大(分别为37.04%和51.85%),且缺少I级和II级。吊罗山野生石碌含笑生境85%以上土壤的有机质、全氮、全钾及碱解氮含量处于较丰富及以上水平,所有土壤的全磷含量处于贫乏或极贫乏水平,超半数土壤的有效磷含量处于贫乏或极贫乏水平,2/3以上的土壤速效钾含量达到适量或较丰富水平。

表4 海南吊罗山不同调查点野生石碌含笑的生境遮光率
Table 4 Habitat shading rate of wild *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu in different survey sites of Diaoluo Mountain of Hainan Province

调查点 Survey site	纬度 Latitude	经度 Longitude	遮光率/% Shading rate
河边 Riverside	N18°43'37"	E109°52'05"	98.99
山坡 Mountain slope	N18°43'49"	E109°52'03"	98.82
山顶 Mountaintop	N18°43'46"	E109°51'53"	99.37
栈道旁 Beside the plank road	N18°43'38"	E109°51'53"	96.36

表5 海南吊罗山野生石碌含笑生境土壤养分分级分析
Table 5 Classification analysis of habitat soil nutrients of wild *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu in Diaoluo Mountain of Hainan Province

养分 Nutrient	各等级的占比/% ¹⁾ Proportion of each grade ¹⁾					
	I	II	III	IV	V	VI
有机质 Organic matter	48.15($w>40$)	25.93($30<w\leq 40$)	18.52($20<w\leq 30$)	3.70($10<w\leq 20$)	3.70($6\leq w\leq 10$)	0.00($w<6$)
全氮 Total nitrogen	81.48($w>2.00$)	11.11($1.50<w\leq 2.00$)	0.00($1.00<w\leq 1.50$)	3.70($0.75<w\leq 1.00$)	3.70($0.50\leq w\leq 0.75$)	0.00($w<0.50$)
全磷 Total phosphorus	0.00($w>1.0$)	0.00($0.8<w\leq 1.0$)	0.00($0.6<w\leq 0.8$)	0.00($0.4<w\leq 0.6$)	81.48($0.2\leq w\leq 0.4$)	18.52($w<0.2$)
全钾 Total potassium	85.19($w>25$)	3.70($20<w\leq 25$)	7.41($15<w\leq 20$)	3.70($10<w\leq 15$)	0.00($5\leq w\leq 10$)	0.00($w<5$)
碱解氮 Available nitrogen	51.85($w>150$)	14.81($120<w\leq 150$)	18.52($90<w\leq 120$)	14.81($60<w\leq 90$)	0.00($30\leq w\leq 60$)	0.00($w<30$)
有效磷 Available phosphorus	0.00($w>40$)	0.00($20<w\leq 40$)	11.11($10<w\leq 20$)	37.04($5<w\leq 10$)	14.81($3\leq w\leq 5$)	37.04($w<3$)
速效钾 Available potassium	0.00($w>200$)	0.00($150<w\leq 200$)	14.81($100<w\leq 150$)	51.85($50<w\leq 100$)	22.22($30\leq w\leq 50$)	11.11($w<30$)

¹⁾ w : 含量 Content. 有机质、全氮、全磷和全钾含量的单位均为“g·kg⁻¹”,碱解氮、有效磷和速效钾含量的单位为“mg·kg⁻¹” The units of organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium contents are “g·kg⁻¹”, and the units of available nitrogen, available phosphorus and available potassium contents are “mg·kg⁻¹”.

2.2 栽培石碌含笑的生殖生长情况

观察结果显示:圃地内栽培石碌含笑的正常花期为4月至5月,花蕾形成期处在海南的旱季。相关研究显示:石碌含笑的正常物候期为2月现蕾、3月至4月始花^[12-13],而笔者在2023年和2024年对栽培石碌含笑观察时发现,植株的花期明显推迟,始花期最晚推迟到5月上旬,末花期最晚推迟到6月中旬,且小孢子严重败育(图1),表现为虽然能够正常开花但花粉量急剧减少甚至完全没有花粉,且花粉离体萌发率和异交授粉结籽率均较低(表6)。

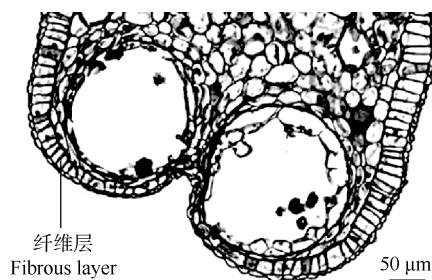


图1 栽培石碌含笑败育小孢子的解剖结构
Fig. 1 Anatomical structure of abortive microspore of cultivated *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu

表6 栽培石碌含笑的生殖生长情况

Table 6 Reproductive growth status of cultivated *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu

年份 Year	花期 Florescence	花粉离体萌发率/% <i>In vitro</i> germination rate of pollen	异交授粉结籽率/% Seed setting rate of cross-pollination
2022	4月中旬至5月中旬 Mid-April to mid-May	66.96	22.93
2023	4月下旬至6月上旬 Late April to early June	42.40	6.45
2024	5月上旬至6月中旬 Early May to mid-June	20.00	11.29

2.3 遮光对栽培石碌含笑光合特性和生长的影响

对5个遮光率处理下栽培石碌含笑的光合特性和生长进行比较,结果(表7)显示:遮光率90%处理下净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO₂浓度均最高,且除净光合速率外,其余指标均显著($P < 0.05$)高于其他遮光率处理;而遮光率99%处理下净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均最低,胞间CO₂浓

度也较低,且与遮光率80%、50%和0%处理下相应指标的差异基本上不显著。遮光培养3个月后,石碌含笑的株高增长量在遮光率99%处理下最小,在遮光度90%处理下最大,且仅在遮光率99%与遮光率90%、80%和50%处理间的差异显著;石碌含笑的地径增长量在遮光率99%处理下最小,在遮光率0%处理下最大,但在各遮光率处理间无显著差异。

表7 不同遮光率下石碌含笑的光合特性及生长比较($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 7 Comparison of photosynthetic characteristics and growth of cultivated *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu under different shading rates ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

遮光率/% Shading rate	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Net photosynthetic rate	蒸腾速率/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Transpiration rate	气孔导度/ ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Stomatal conductance	胞间CO ₂ 浓度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) Intercellular CO ₂ concentration	株高增长量/cm Height increment	地径增长量/mm Ground diameter increment
99	3.82±1.07c	0.76±0.21b	0.04±0.01b	241.04±4.96bc	4.67±1.80b	0.27±0.26a
90	11.10±0.97a	3.65±0.27a	0.21±0.02a	302.75±1.09a	19.77±4.55a	1.62±0.79a
80	8.39±0.48ab	1.78±0.13b	0.10±0.01b	248.99±2.57bc	15.47±6.33a	2.49±2.51a
50	6.90±2.15abc	1.86±0.76b	0.10±0.04b	257.30±25.14b	16.20±3.40a	2.38±0.59a
0	6.37±1.16bc	1.08±0.24b	0.06±0.01b	209.78±12.05c	10.10±7.48ab	2.95±2.65a

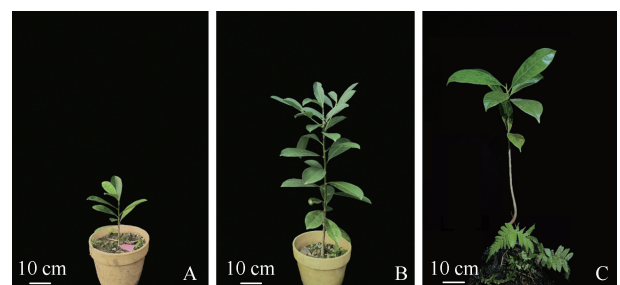
¹⁾ 同列中不同小写字母表示在不同遮光率处理间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different shading rate treatments.

2.4 栽培和野生石碌含笑的比较

2.4.1 营养生长情况比较 测量结果显示:株龄1a的栽培石碌含笑的平均株高为(32.74±10.12)cm,株龄2a的栽培石碌含笑的平均株高为(52.60±7.91)cm,株高年生生长量为(19.86±12.84)cm。野生石碌含笑生长较慢,株龄5a的野生植株的平均株高为(54.10±16.18)cm,与株龄2a的栽培植株的株高相近。并且,与栽培植株相比,野生植株的叶片大而少(图2)。

2.4.2 童期比较 计算结果显示:栽培石碌含笑的平均年轮增长速率为 $8.50 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,野生石碌含笑的平均年轮增长速率为 $5.18 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。根据2022年至2024年连续3年统计的栽培石碌含笑开花植株的最小胸径(18.4cm)推算出栽培石碌含笑的童期为10.8a。而在吊罗山林下极端荫蔽环境下,石碌含笑的正常生长受到阻碍,野生植株生长速度明显低于栽培植株。

根据野外调查统计结果,吊罗山野生石碌含笑开花植株的最小胸径为21.0cm,由此推算出野生石碌含笑的童期为20.3a。



A: 株龄1a的栽培植株 Cultivated plant with plant age of 1a; B: 株龄2a的栽培植株 Cultivated plant with plant age of 2a; C: 株龄5a的野生植株 Wild plant with plant age of 5a.

图2 栽培和野生石碌含笑营养生长情况比较

Fig. 2 Comparison on nutritional growth situation of cultivated and wild *Michelia shiluensis* Chun et Y. F. Wu

3 讨论和结论

野生植物的濒危原因可分为内因和外因^[14]。相关研究结果显示:木兰科植物濒危机制的主要内因包括生殖阶段广泛存在的大小孢子败育^[15-19]、缺乏有效传粉媒介^[20-25]、繁育系统原始^[26-27]和种胚败育^[28-30]导致的有效种子产率低,以及种子具有休眠特性,在自然生境中易失活、自然萌发率低^[23]等;而外因主要为竞争能力弱,具体表现在近交衰退及适应性窄导致的幼苗生长缓慢甚至死亡,以及种间竞争处于弱势地位^[31-34]。相较之下,在适宜气候条件下,石碌含笑通过人工授粉可以获得100%的坐果率和88%的萌发率^[1],说明其大小孢子和胚囊发育基本正常,其濒危的主要原因不是内因。结合调查与检测结果,笔者推测石碌含笑的濒危原因主要为外因,具体表现在以下3个方面:1)人为砍伐导致其生境碎片化,致使石碌含笑开花植株的株间距离增大,超出主要传粉昆虫的活动范围,造成大量植株自花授粉,导致自交不亲和的石碌含笑花而不实。2)在自然生境中,林下的光照条件不能满足石碌含笑的生长需求,造成幼苗生长缓慢或死亡;并且,石碌含笑的成年植株无法突破林冠层获得开花条件,不能正常开花和结实。3)与其他热带地区相似,高温和多雨加快了土壤的风化速率与磷元素的淋溶,导致土壤中的磷含量降低,不利于石碌含笑生长发育。

木兰科植物观光木(*Michelia odora* (Chun) Noot. et B. L. Chen)、合果木(*M. baillonii* (Pierre) Finet et Gagnep.)、乐昌含笑(*M. chapensis* Dandy)和灰木莲(*Manglietia glauca* Blume)幼苗均能够适应弱光环境^[35],但不同植物对弱光的适应性不同^[36]。研究表明:热带雨林的林下光照只有全光照的1%~6%^[37],森林下层植被获取的光合有效辐射通常不足全光照的2%^[38],而林窗可改善林内光照条件,增加林内光环境的异质性^[39]。华木莲(*Manglietia decidua* Q. Y. Zheng)为林窗依赖型植物,其种群更新主要依靠林窗或疏林(源于自然干扰或大树自然死亡)^[40]。文中研究结果显示:林下的光照条件无法满足石碌含笑幼苗正常生长需要,并且吊罗山野生石碌含笑幼苗多见于溪流沿岸、道路两侧以及山脊至山顶的疏林区域,而在郁闭度较高的密林环境中则较为罕见。由此推测,吊罗山野生石碌含笑种群自然更新可能对林窗的依

赖性较大。

极端气候事件对植物物候期,尤其是对春秋两季的生长发育,具有显著影响^[41]。温度和降水等是影响植物物候期的重要气候因子^[42]。例如:植物的开花高峰期与旱季末期首次显著降水密切相关^[43];早春澳门的极端强降水使植物盛花期明显提前或推迟^[44]。观察发现,2023—2024年石碌含笑的花期推迟且花量减少,分析这可能与当年花蕾形成期(旱季)的高温干旱天气有较大关系。

综上所述,海南吊罗山的石碌含笑种群个体不能适应现存的生境条件,导致其种群个体更新困难,种群个体数量急剧下降,因此,石碌含笑是个被严重低估的濒危树种。在石碌含笑的濒危保护实践中,建议通过辅助授粉、人工育苗、选择光照条件较好的林地近地回归保存等措施增加其种群个体数量。

参考文献:

- [1] 莫丽文, 赵莹, 宋希强, 等. 栽培石碌含笑的开花生物学与繁育特性[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(4): 540-548.
- [2] 倪健, 宋永昌. 中国亚热带常绿阔叶林优势种及常见种的水热分布类群[J]. 植物生态学报, 1997, 21(4): 349-359.
- [3] 薛晓明, 南程慧, 杨荣治, 等. 木兰科7种植物花粉的扫描电镜观察[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(6): 1098-1103.
- [4] RIVERS M, BEECH E, MURPHY L, et al. The Red List of Magnoliaceae: Revised and Extended [M]. Richmond: Botanic Gardens Conservation International, 2016: 38.
- [5] 国家林业和草原局. 国家重点保护野生植物名录[EB/OL]. (2021-09-07) [2025-06-19]. <http://www.forestry.gov.cn/main/5461/20210908/162515850572900.html>.
- [6] CICUZZA D, NEWTON A, OLDFIELD S. The Red List of Magnoliaceae [M]. Cambridge: Botanic Gardens Conservation International, 2007: 36.
- [7] 魏亚情, 宋希强, 赵莹, 等. 吊罗山石碌含笑群落木本植物种间关联性研究[J]. 热带作物学报, 2022, 43(12): 2606-2613.
- [8] 魏亚情, 洪峰, 袁浪兴, 等. 海南特有濒危植物石碌含笑的分布现状与种群年龄结构特征[J]. 热带作物学报, 2017, 38(12): 2280-2284.
- [9] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 111-112.
- [10] 宛敏渭, 刘秀珍. 中国物候观测方法[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 1-22.
- [11] YE Z P, SUGGETT D J, ROBAKOWSKI P, et al. A mechanistic model for the photosynthesis-light response based on the photosynthetic electron transport of photosystem II in C₃ and C₄ species[J]. New Phytologist, 2013, 199(1): 110-120.
- [12] 黄宏文. 中国迁地栽培植物志(木兰科)[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 311-312.

- [13] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第三十卷第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 181.
- [14] 姚志, 郭军, 金晨钟, 等. 中国纳入一级保护的极小种群野生植物濒危机制[J]. 生物多样性, 2021, 29(3): 394-408.
- [15] 王亚玲, 张寿洲. 香港木兰小孢子发生及雄配子体发育的研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 547-553.
- [16] 熊海燕, 刘志雄. 深山含笑大、小孢子发生和雌、雄配子体发育研究[J]. 植物研究, 2018, 38(2): 212-217.
- [17] 余道平, 李策宏, 李小杰, 等. 峨眉拟单性木兰雄性不育的细胞形态学及生理生化特性研究[J]. 广西植物, 2024, 44(1): 126-136.
- [18] 王 珊, 沈永宝, 鲍华鹏, 等. 宝华玉兰大小孢子发生和雌雄配子体发育过程中解剖结构的变化[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(3): 46-53.
- [19] 孙 阳. 广西白兰开花生物学特性研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023: 16-45.
- [20] 朱永莉, 张 杰. 上海市栽培乐昌含笑开花及传粉生物学[J]. 林业科学, 2024, 60(6): 86-93.
- [21] 王亚玲, 王 晶, 张寿洲. 濒危植物香港木兰野外生存现状与保护建议[J]. 亚热带植物科学, 2019, 48(1): 45-49.
- [22] 柴弋霞, 蔡梦颖, 金晓玲, 等. 紫花含笑传粉生物学初探[J]. 广西植物, 2017, 37(10): 1322-1329.
- [23] 龙桂根, 陈发菊, 陈应德, 等. 华木莲开花结实特性及其濒危的影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(10): 47-51.
- [24] 罗 峰, 金晓玲, 李瑞雪, 等. 桂南木莲繁育系统及其传粉适应性[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(3): 45-49, 53.
- [25] 潮 薇. 毛桃木莲开花生物学及繁育系统研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023: 46-55.
- [26] 付玉嫔, 陈少瑜, 吴 涛. 濒危植物大果木莲与中缅木莲的花部特征及繁育系统比较[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(4): 6-10.
- [27] 李宗艳, 郭 荣. 木莲属濒危植物致濒原因及繁殖生物学研究进展[J]. 生命科学研究, 2014, 18(1): 90-94.
- [28] PAN Y Z, LIANG H X, GONG X. Studies on the reproductive biology and endangerment mechanism of the endangered plant *Manglietia aromatica*[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 43(3): 311-316.
- [29] 王亚玲. 香港木兰 *Magnolia championii* Benth 的保护生物学研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006: 72.
- [30] 王 珊, 沈永宝, 鲍华鹏, 等. 宝华玉兰大小孢子体的发生和雌雄配子体发育过程中解剖结构的变化[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(3): 46-53.
- [31] 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]. 生态学杂志, 2024, 43(3): 709-715.
- [32] 沈徐悦. 白玉兰、望春玉兰和乐昌含笑幼苗的耐盐性评价研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020: 59.
- [33] 吴芳兰, 李书玲, 杨 梅, 等. LED 光质及光周期对香子含笑幼苗生长和光合特性的影响[J]. 广西植物, 2022, 42(12): 2167-2177.
- [34] 李芸瑛, 窦新永, 彭长连. 三种濒危木兰植物幼树光合特性对高温的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3789-3797.
- [35] 刘金焱, 招礼军, 朱栗琼. 遮阴对三种木兰科幼苗生长和光合特性的影响[J]. 广西植物, 2020, 40(8): 1159-1168.
- [36] 张 强, 陈军文, 陈亚军, 等. 西双版纳热带雨林中两种生态型蕨类植物的光合特性比较研究[J]. 植物学通报, 2008, 25(6): 673-679.
- [37] 吴律欣. 铜鼓岭热带滨海丘陵自然森林优势种群结构动态及林窗下幼苗的光合特性研究[D]. 海口: 海南大学, 2020: 12.
- [38] 张树梓. 塞罕坝华北落叶松人工林种群更新特征及影响因素[D]. 保定: 河北农业大学, 2014: 10.
- [39] 龙翠玲, 余世孝, 熊志斌, 等. 茂兰喀斯特森林林隙的植物多样性与更新[J]. 生物多样性, 2005, 13(1): 43-50.
- [40] 杨清培, 肖智勇, 胡晓东, 等. 珍稀植物华木莲的现代濒危机制: 探析与展望[J]. 广西植物, 2017, 37(5): 653-660.
- [41] 刘世婷, 刘明蕊, 李国娥, 等. 植物物候研究进展[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2402-2418.
- [42] 杨晓娟, 梁永延, 王禧龙, 等. 广西野生水松表型多样性及其与地理-气候因子的关系[J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(4): 61-70.
- [43] 陈心胜. 西双版纳热带雨林植物群落的繁殖生物学特性研究[D]. 勐腊: 中国科学院西双版纳热带植物园, 2008: 3-10.
- [44] 张健豪, 付 琳, 洪宝莹, 等. 澳门九澳山海滨群落10种植物盛花期物候对极端气候事件的响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(1): 74-82.

(责任编辑: 佟金凤)