主持人：宋希强，任明迅　Open Access

濒危植物诗琳通含笑与石碌含笑正反交后的代表型与光合特性

郭照彬[1#]，王晚双[2,3]，韦建杏[1]，容骁颉[2,3]，王亚玲[2,3*]

（1. 海南省枫木实验林场，海南屯昌 571600 中国；2. 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；3. 海南大学 热带农林学院，海南 海口 570228 中国）

摘　要：为探究诗琳通含笑（*Michelia sirindhorniae*）与石碌含笑（*M. shiluensis*）正反交亲和性及杂交 F_1 代表型与光合生理特性，于盛花期进行人工控制杂交，统计坐果率与结籽率，开展杂交后代种子萌发试验，观察后代表型特征，测定光响应曲线。结果发现，诗琳通含笑异交对照组的坐果率、结籽率和萌发率分别为 26.67%、5.48% 和 25.0%，石碌含笑异交对照组的相应指标分别为 100%、22.93% 和 86.67%。反交组合石碌含笑♀×诗琳通含笑♂的坐果率达 100%、结籽率 18.69% 和种子萌发率 23.89%，均显著高于正交组合诗琳通含笑♀×石碌含笑♂的相应结果（15%、2.92% 和 0.51%）；尽管反交的坐果率与结籽率结果与母本石碌含笑异交对照组相近，但两个杂交组合的种子萌发率均显著低于各自母本的异交对照组。杂交后代的形态学特征显示，正反杂交后代形态特征均与诗琳通含笑相近。光合及生长特性分析表明，正反杂交后代在光饱和点（>2 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）及株高、地径等生长指标上均表现出明显的杂种优势；最大净光合速率 P_{nmax} 的排序为：诗琳通含笑（9.71 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）>反交组合（7.10 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）>石碌含笑（6.73 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）>正交组合（4.76 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$）。结果表明诗琳通含笑和石碌含笑正反杂交存在不同程度的隔离，杂交后代具速生、耐强光等优势。研究为濒危木兰科植物的种质创新与高效利用提供了重要的技术指导。

关键词：诗琳通含笑；石碌含笑；杂交后代；形态鉴定；光合特性

中图分类号：Q944.4　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674 − 7054(2026)05 − 0888 − 08

郭照彬, 王晚双, 韦建杏, 等. 濒危植物诗琳通含笑与石碌含笑正反交后的代表型与光合特性[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(5): 888−895.　DOI: 10.15886/j.cnki.rdswxb.20260027　CSTR: 32425.14.j.cnki.rdswxb.20260027

木兰科（Magnoliaceae）作为被子植物中较古老的类群，不仅因其树形优美、花色艳丽而具有极高的观赏价值，更是研究植物系统进化的关键材料[1]。据国际植物园保护联盟（Botanic Gardens Conservation International）调查，全球 304 种木兰科植物中，147 种在野外处于濒危状态，占比达 48%[2]。2021 年《国家重点保护野生植物名录》显示，24 种木兰科植物被列入，其中，一级重点保护植物有 3 种，二级重点保护植物有 21 种[3]。

人工杂交育种是实现木兰科植物种质创新、优良性状整合及濒危资源可持续利用的重要途径，目前已围绕木兰科植物开展了大量杂交育种研究，证实该科植物属内种间杂交具备较高的亲和性潜力，且杂种后代常表现出显著的生长、抗逆等杂种优势[4]。在正反杂交研究中，最早可追溯到 1963 年，中国南京林业大学叶培忠教授率先开展鹅掌楸属（*Liriodendron*）种间杂交研究，成功实现中国鹅掌楸（*L. chinense*）与北美鹅掌楸（*L. tulipifera*）的跨大陆人工杂交，培育出杂种鹅掌楸（亚美马褂木 *L. sino-americanum*）。该杂种后代在光合效率、生长速率上均显著超越亲本，且适应性、抗逆性更强，叶色更深绿，花朵更艳丽，目前已实现产业化栽培，成为重要的园林绿化和工业原料林树种[5]。除鹅掌楸属外，含笑属（*Michelia*）、木

CC BY 4.0
收稿日期：2026−01−27　**修回日期：**2026−06−09

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）；中央财政林业草原改革发展资金（林业草原科技推广）项目（琼 [2025]TG-5，琼 [2023]TG03 号）

#**第一作者：**郭照彬（1979—），男，林业中级工程师。研究方向：木兰科植物产业化推广。E-mail: gzb1229@163.com

*通信作者：王亚玲（1971—），女，研究员。研究方向：木兰科资源保护和利用。 E-mail: 996216@hainanu.edu.cn

莲属(*Manglietia*)等也取得了显著进展。例如,紫花含笑(*Michelia crassipes*)与云南含笑(*M. yunnanensis*)、金叶含笑(*M. foveolata*)与紫花含笑等组合均成功获得杂交后代,表现出不同程度的亲和性与杂种优势[6]。这些研究为探讨种间杂交的亲和机制、性状遗传规律及杂种优势利用提供了重要参考。

诗琳通含笑(*M. sirindhorniae*)是木兰科含笑属的常绿乔木,其野生种群分布于泰国极为有限的淡水沼泽森林中,生境独特[7]。由于分布区狭窄且栖息地持续遭受破坏,该物种已被世界自然保护联盟(IUCN)评估为濒危(EN)等级[8]。诗琳通含笑具有生长迅速、树形优美、花量繁茂等观赏特性,更因其作为极少数能耐水湿的木兰科树种,被视为耐湿、耐热育种的珍贵亲本材料。石碌含笑(*M. shiluensis*)作为海南特有种,其野生种群分布局限,野生植株仅 258 株[9]。该种树冠浓密、枝叶茂盛,树形紧凑优美,观赏价值高,且适应性强,在园林绿化和树种改良中具有重要潜力。张鹏等[10]对 6 种木兰科濒危植物光合特性的研究结果显示,诗琳通含笑的综合光合能力更强,其净光合速率(年均 6.69 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)和固碳能力(年均 11.20 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)在所有参试植物中均居首位,同时其较高的蒸腾速率(年均 3.02 $mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)也表明其具备更强的水分运输与生态功能;而石碌含笑虽然在上述 3 项指标上低于诗琳通含笑,但光能利用能力在参试植物中排名第二,且在弱光环境下具有更为突出的光利用效率。对这两个物种进行正反杂交,旨在培育出既有诗琳通含笑耐湿的优良特性,又有石碌含笑密集树形的完美杂交后代。

目前对两个物种的研究主要集中在生理生态特性方面,尚无关于杂交亲和性及杂种后代性状表现的研究,缺乏对性状遗传规律和杂交优势利用潜力的全面了解。通过人工杂交可实现优良遗传特性的互补,获得在光合性能、生长速率或环境适应性方面优于双亲的杂交后代,对实现濒危物种的可持续保护和利用具有重要意义。在鹅掌楸属的研究中,中国鹅掌楸(*L. chinense*)与北美鹅掌楸(*L. tulipifera*)的杂交后代的光合效率均有显著提高[11]。

本研究拟通过诗琳通含笑和石碌含笑人工杂交的正反交实验,系统研究杂种后代的表型特征和光合特性,探讨两种植物正反杂交后代的性状表达和杂交亲和性差异。研究内容包括开展正反杂交实验获得杂种种子,培育杂种实生苗并观测其表型性状差异,测定杂种后代的光合参数、光响应曲线。本研究系统开展诗琳通含笑与石碌含笑的杂交试验,比较后代的表型与光合特性差异。研究成果对于促进两种濒危植物资源的可持续利用具有重要的理论价值和实践意义。

1　材料与方法

1.1　试验地点　试验地在海南儋州天香木兰园,海拔 132 ~ 148 m,属热带季风气候,日照充足,年平均高温 30 ℃,年平均低温 23 ℃,年平均降雨 1 815 mm,雨季主要在 5—10 月。

1.2　试验材料　杂交试验材料选取栽培圃地的 2 棵诗琳通含笑(A 树和 B 树),2 棵石碌含笑(C 树和 D 树)。树龄均超 10 年,生长良好(图 1)。幼苗表型测定及光合试验供试材料为二年生杂交 F_1 代实生苗,对照组为二年生诗琳通含笑与石碌含笑实生幼苗。

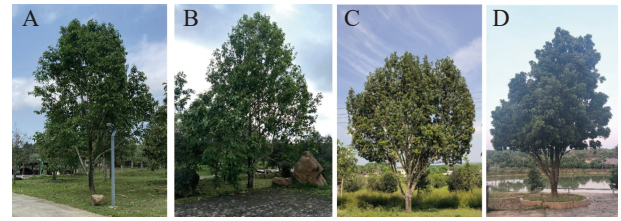


图 1　诗琳通含笑(A、B)和石碌含笑(C、D)全株照片(拍照时间 2023.3.14)

Fig. 1　Photos of trees of *M. sirindhorniae* (A and B), *M. shiluensis* (C and D) (Photographed on March 14, 2023)

1.3　试验方法

1.3.1　杂交授粉　在 2023 年和 2024 年 4—5 月盛花期开展授粉工作,授粉组合见表 1。人工授粉前,采用 MTT 染色法对花粉活性进行检测,选用活力值不低于 60% 的优质花粉用于后续授粉实验。9—10 月收集各授粉组合的果实,统计坐果率、结籽率,分别以诗琳通含笑和石碌含笑异花授粉的坐果率、结籽率作为正反杂交实验的对照(表 1)。

1.3.2　种子萌发特性　于 2023 年 9—10 月,采集成熟开裂的蓇葖果内部的种子。种子放入水中剔除漂浮的空瘪种子,清洗后立即播种。播种基质 $V_{草炭土}:V_{珍珠岩}$=1:1。播种 60 d 后,每天统计种子的出苗率,直至最大值。

表 1 杂交处理组合

Tab. 1 Hybrid treatment combinations

授粉组合(♀×♂) Pollination combination (♀×♂)	花粉来源 Source of pollen	授粉数/朵 Number of pollinations
诗琳通含笑A×B *M. sirindhorniae* A × B	天香木兰园 Tianxiang Magnolia Garden	20
石碌含笑C×D *M. shiluensis* C × D	天香木兰园 Tianxiang Magnolia Garden	20
诗琳通含笑A×石碌含笑C *M. sirindhorniae* A × *M. shiluensis* C	天香木兰园 Tianxiang Magnolia Garden	20
石碌含笑C×诗琳通含笑A *M. shiluensis* C × *M. sirindhorniae* A	天香木兰园 Tianxiang Magnolia Garden	20

1.3.3 F1 代表型观察 参考英国皇家园艺学会(Royal Horticultural Society of the United Kingdom, RHS)比色卡(920 色)记录叶色。观测并记录杂交后代与亲本的叶尖(leaf apex, LA)、叶基(leaf base, LB)、叶缘(leaf margin, LM)、茎被毛(stem indumentum, SI)、顶芽被毛(terminal bud indumentum, TBI)，以及叶长、叶宽、叶脉数等性状。

1.3.4 F1 代光合及生长特性测定 2026 年 1 月中旬，使用卷尺与游标卡尺测定株高(0.01 cm)与地径(0.01 mm)；使用手持式 SPAD 叶绿素仪测定相对叶绿素含量；使用 LI−6800 便携式光合仪，于晴朗无云的 8:00—11:00 测定全光照条件下诗琳通含笑、石碌含笑及其正反交 F_1 代幼苗(各 3 株)的光响应曲线。测定光强梯度为 0、20、50、100、200、400、600、800、1 000、1 200、1 500、2 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。通过拟合光响应曲线获取光补偿点(light compensation point, LCP)、光饱和点(light saturation point, LSP)、最大净光合速率(maximum net photosynthetic rate, P_{nmax})、表观量子效率(apparent quantum yield, AQY)及暗呼吸速率(rate of dark respiration, Rd)等参数。测定时，设定叶片温度 20℃，环境 CO_2 浓度 400 $\mu mol \cdot mol^{-1}$，空气流速 500 $\mu mol \cdot s^{-1}$，相对空气湿度 70%。

1.4 数据统计 采用 Excel 2019 和 SPSS v26.0 软件进行数据整理与统计分析。

2 结果与分析

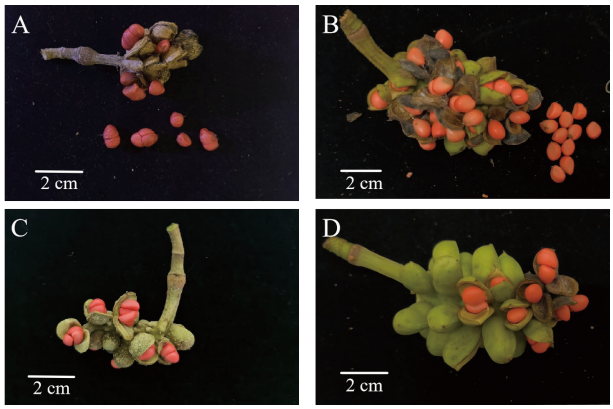
2.1 杂交结实率和种子萌发特性 诗琳通含笑异交对照组(诗琳通含笑 A × 诗琳通含笑 B)的坐果率为 26.67%、结籽率为 5.48%、萌发率为 25.0%；石碌含笑异交对照组(石碌含笑 C × 石碌含笑 D)的坐果率为 100%、结籽率为 22.93%、萌发率为 86.67%。在杂交组合中，正交组合(诗琳通含笑 A × 石碌含笑 C)的坐果率仅 15%，结籽率为 2.92%，萌发率仅 0.51%；而反交组合(石碌含笑 C × 诗琳通含笑 A)的坐果率达 100%，结籽率为 18.69%，萌发率为 23.89%(见表 2、图 2)。总体来看，反交组合的 3 项指标均高于正交组合；正交组合的坐果率与结籽率低于诗琳通含笑异交对照组，而反交组合的坐果率、结籽率与石碌含笑异交对照组相近；但两个杂交组合的种子萌发率均明显低于相应母本的异交对照组，表明正反交均存在一定程度的杂交障碍。

2.2 杂交后代表型鉴定 形态观察表明，亲本诗琳通含笑幼苗茎具褐色绒毛、顶芽被毛，叶片上表面绿色(RAL6025)、下表面浅绿色(RAL6011)，叶形卵形，叶基阔楔形，叶缘波状，叶尖急尖，托叶痕约为叶柄长的 2/3；而石碌含笑的幼苗茎与顶芽均

表 2 诗琳通含笑和石碌含笑不同杂交组合结实与种子萌发情况

Tab. 2 Fruiting and seed germination of different hybrid combinations of *Michelia sirindhorniae* and *M. shiluensis*

授粉组合 Pollination combination	数量/朵 Number of flowers	坐果率/% Fruit set	结籽率/% Seed set	萌发率/% Germination
诗琳通含笑A×B *M. sirindhorniae* A × B	20	26.67	5.48±2.21	25.00
石碌含笑C×D *M. shiluensis* C × D	20	100	22.93	86.67
诗琳通含笑A×石碌含笑C *M. sirindhorniae* A × *M. shiluensis* C	20	15	2.92±1.63	0.51
石碌含笑C×诗琳通含笑A *M. shiluensis* C × *M. sirindhorniae* A	20	100	18.69±5.01	23.90



A.诗琳通含笑 A×B; B.石碌含笑 C×D; C. 诗琳通含笑♀×石碌含笑♂; D. 石碌含笑♀×诗琳通含笑♂。

A. *M. sirindhorniae* A×B; B. *M. shiluensis* C×D; C. *M. sirindhorniae*♀× *M. shiluensis*♂; D. *M. shiluensis*♀× *M. sirindhorniae*♂.

图 2　诗琳通含笑与石碌含笑不同杂交组合结实情况

Fig. 2　Seed set in different cross combinations of *M. sirindhorniae* and *M. shiluensis*

无毛，叶片上表面深绿色(RAL6002)、下表面灰绿色(RAL6021)，叶形倒卵状长圆形，叶基楔形，叶缘平整，叶尖骤尖，无托叶痕。

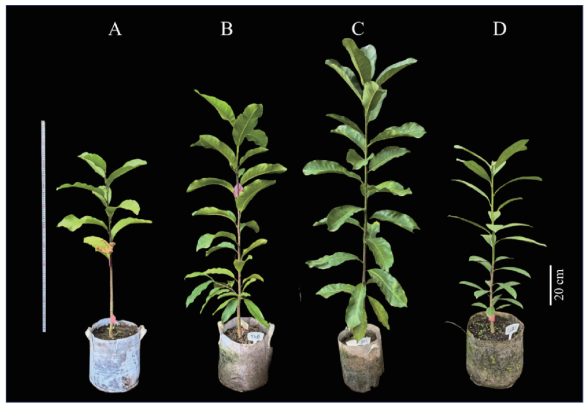
形态比较结果(表 3)表明，诗琳通含笑♀×石碌含笑♂的 F_1 代在茎、顶芽被毛、叶形、叶基、叶尖和叶缘等所有观测性状上均与母本诗琳通含笑高度相似。石碌含笑♀×诗琳通含笑♂的 F_1 代在叶长、叶形上类似诗琳通含笑，其叶缘波状、叶尖急尖、茎与顶芽被毛等性状类似父本(诗琳通含笑)，且叶片上下表面叶色(RAL6002, RAL6021)与母本(石碌含笑)一致(图 3、图 4、图 5)。

2.3　杂交后代的生长特性和光合特性　株高、地径等生长量测定结果显示，在相同栽培条件下，二年生实生幼苗的平均株高：石碌含笑♀×诗琳通含笑♂(146.62 cm)＞诗琳通含笑♀×石碌含笑♂(112.63 cm)＞石碌含笑(85.08 cm)＞诗琳通含笑(81.67 cm)。观测植株的平均地径：石碌含笑♀×诗琳通含笑♂(25.19 mm)＞诗琳通含笑♀×石碌含笑♂(20.52 mm)＞诗琳通含笑(18.36 mm)＞石碌含笑(18.06 mm)。而相对叶绿素含量：石碌含笑♀×诗琳通含笑♂(58.07)＞诗琳通含笑♀×石碌含笑♂(56.77)＞诗琳通含笑(52.77)＞石碌含笑(49.10)。即正反杂交组合幼苗生长量均高于父母

表 3　诗琳通含笑和石碌含笑杂交苗与父母本的形态特征比较

Tab. 3　Comparison of morphological characteristics between hybrid seedlings and their parents of *M. sirindhorniae* and *M. shiluensis*

形态特征 Morphological characteristics	诗琳通含笑 *M. sirindhorniae*	石碌含笑 *M. shiluensis*	诗琳通含笑(♀)×石碌含笑(♂) *M. sirindhorniae* (♀) × *M. shiluensis* (♂)	石碌含笑(♀)×诗琳通含笑(♂) *M. shiluensis* (♀) × *M. sirindhorniae* (♂)
上表面叶色 Leaf adaxial colour	RAL6025	RAL6002	RAL6002	RAL6002
下表面叶色 leaf abaxial colour	RAL6011	RAL6021	RAL6011	RAL6021
叶型 Leaf-blade shape	卵形 Ovate	倒卵状长圆形 Obovate-oblong	卵形 Ovate	卵形 Ovate
叶脉数/条 Vein number	25	25	29	25
叶长 Leaf length/cm	21.8(18.5 ~ 24.3)	18.3(15.4 ~ 22.6)	25.5(21.9 ~ 28.2)	25.7(17.0 ~ 33.5)
叶宽 Leaf width/cm	8.3(6.3 ~ 16.0)	6.7(6.0 ~ 7.1)	10.6(8.6 ~ 12.4)	11.6(9.4 ~ 14.4)
托叶痕长/叶柄长 Ratio of stipular scar to petiole length	1/3	—	1/3	—
节间距/mm Internode length	19.7	8.2	15.47	25.02
叶尖 Leaf apex	急尖 acute	骤尖 apiculate	急尖 acute	急尖 acute
叶基 Leaf base	阔楔形 broadly cuneate	楔形 cuneate	阔楔形 broadly cuneate	阔楔形 broadly cuneate
叶缘 Leaf margin	微波状 slightly undulate	无波状 none	微波状 slightly undulate	微波状 slightly undulate
茎、顶芽毛被 Pubescence of stems and terminal buds	褐色毛 brown	无 absent or very sparse	褐色毛 brown	褐色毛 brown

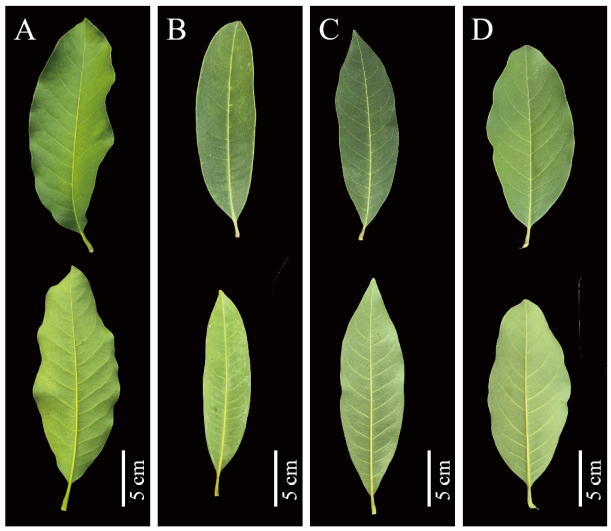


A.诗琳通含笑 A×B; B.石碌含笑 C×D; C.诗琳通含笑♀×石碌含笑♂; D.石碌含笑♀×诗琳通含笑♂。

A. *M. sirindhorniae* A × B; B. *M. shiluensis* C × D; C. *M. sirindhorniae* ♀ × *M. shiluensis* ♂; D. *M. shiluensis* ♀ × *M. sirindhorniae* ♂.

图 3 杂交后代与父母本植株对比

Fig. 3 Comparison of hybrid offspring with their parental plants



A.诗琳通含笑 A×B; B.石碌含笑 C×D; C.诗琳通含笑♀×石碌含笑♂; D.石碌含笑♀×诗琳通含笑♂。

A. *M. sirindhorniae* A × B; B.*M. shiluensis* C × D; C. *M. sirindhorniae* ♀ × *M. shiluensis* ♂; D. *M. shiluensis* ♀ × *M. sirindhorniae* ♂.

图 4 杂交后代及父母本叶型对比

Fig. 4 Comparison of leaf shapes of hybrid offspring and their parents

A.诗琳通含笑 A×B; B.石碌含笑 C×D; C.诗琳通含笑♀×石碌含笑♂; D.石碌含笑♀×诗琳通含笑♂。

A. *M. sirindhorniae* A × B; B. *M. shiluensis* C × D; C. *M. sirindhorniae* ♀ × *M. shiluensis* ♂; D. *M. shiluensis* ♀ × *M. sirindhorniae* ♂.

图 5 杂交后代及父母本顶芽对比

Fig. 5 Comparison of terminal buds between F1 hybrids and their parents

本(表 4),表现出杂种优势。

由表 4 可知,诗琳通含笑的光补偿点 LCP(16.75 μmol·m^{-2}·s^{-1})、暗呼吸速率 Rd(1.24 μmol·m^{-2}·s^{-1})均为最高;而石碌含笑的 LCP(5.97 μmol·m^{-2}·s^{-1})和 Rd(0.48 μmol·m^{-2}·s^{-1})最低;2 个杂交组合(诗琳通含笑♀×石碌含笑♂、石碌含笑♀×诗琳通含笑♂)的 LCP(6.96 和 7.26 μmol·m^{-2}·s^{-1})与 Rd(0.77 和 0.75 μmol·m^{-2}·s^{-1})均介于亲本之间,表现出中间型特征。另一方面,2 个杂交组合的光饱和点 LSP 均>2 000 μmol·m^{-2}·s^{-1},明显高于双亲(石碌含笑 1 106.58 μmol·m^{-2}·s^{-1},诗琳通含笑 1 519.04 μmol·m^{-2}·s^{-1}),说明杂交后代对高光强的耐受能力增强,具有更宽的光适应范围。表观量子效率(AQY)彼此差异不大(0.03 ~ 0.05),光能转化效率较为接近。最大净光合速率(P_{nmax})中,诗琳通含笑最高(9.71 μmol·m^{-2}·s^{-1}),而以诗琳通含笑为母本的杂交组合 P_{nmax} 较低(4.76 μmol·m^{-2}·s^{-1}),石碌含笑为母本的杂交组合 P_{nmax}(7.10 μmol·m^{-2}·s^{-1})接近石碌含笑亲本(6.73 μmol·m^{-2}·s^{-1})。

3 讨 论

木兰科植物在属内种间杂交中通常表现出较高的亲和性,目前已成功培育出许多新品种。含笑属种间进行杂交培育出许多新品种,如紫花含笑(*M. crassipes*)♀×云南含笑(*M. yunnanensis*)♂[12]、云南含笑♀×灰岩含笑(*M. fulva*)♂[13]、球花含笑(*M. sphaerantha*)♀×云南含笑♂[14]、云南含笑♀×南亚含笑(*M. doltsopa*)♂[6]、新含笑(*M. platypetala 'Xin Hanxiao'*)♀×广东含笑(*M. guangdongensis*)♂[15]。

依据结实率评价杂交亲和性的结果分析,部分杂交组合在正反交时表现出显著的亲和性差异。如金叶含笑(*M. foveolata*)♀×紫花含笑♂的坐果率可达 80%,而紫花含笑♀×金叶含笑♂不亲和[6];研究表明,柱道内胼胝质堆积是含笑(*M. figo*)♀×金叶含笑♂中最主要的杂交障碍,而紫花含笑♀×金叶含笑♂亲和性差可能是受精后障碍所引起的[6]。此外,乐昌含笑(*M. chapensis*)与含笑正反交也具有杂交亲和单向性,表现为含笑♀×乐昌含笑♂亲和性显著高于乐昌含笑♀×含笑♂[16]。诗琳通含笑与石碌含笑正反交也表现出类似的亲和性差异,反交组合(石碌含笑♀×诗琳通含笑♂)坐果率达 100%、结籽率 18.69%、萌发率 23.89%,而正交

表 4　诗琳通含笑和石碌含笑杂交苗光响应曲线参数

Tab. 4　Photosynthetic response parameters of hybrid seedlings of *M. sirindhorniae* and *M. shiluensis*

种类 Species	光补偿点 LCP/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光饱和点 LSP/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	表观量子效率 AQY	暗呼吸速率 Rd/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	最大净光合速率 P_{nmax}/ ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	相关系数 *r*	株高 Plant height/ cm	地径 Basal diameter/ mm	相对叶绿素含量 Relative chlorophyll content
诗琳通含笑 *M. sirindhorniae*	16.75	1 519.04	0.05	1.24	9.71	0.99	81.67	18.36	52.77
石碌含笑 *M. shiluensis*	5.97	1 106.58	0.04	0.48	6.73	0.98	85.08	18.06	49.10
诗琳通含笑(♀)×石碌含笑(♂) *M. sirindhorniae* (♀) × *M. shiluensis* (♂)	6.96	＞2000	0.03	0.75	4.76a	0.98	112.63	20.52	56.77
诗琳通含笑(♂)×石碌含笑(♀) *M. sirindhorniae* (♂) × *M. shiluensis* (♀)	7.26	＞2000	0.04	0.77	7.10a	0.97	146.62	25.19	58.07

注: a 表示直接测定值, 其余为拟合计算值。

Note: Values marked with "a" were directly measured; all other values were calculated by fitting.

组合(诗琳通含笑♀×石碌含笑♂)相应指标仅为15%、2.92%、0.51%, 考虑到诗琳通含笑自身异交授粉结籽率 5.48%, 即诗琳通含笑作为母本时存在严重的生殖障碍。在木兰科植物正反杂交差异研究中, 分析授粉结实情况应当充分考虑母本自身的生殖生长过程是否存在败育现象, 同时还需要对杂交种子萌发率进行探究, 才能综合评判正反交的亲和性差异。例如, 亲缘关系较近的桂南木莲(*Manglietia conifera*)与马关木莲(*M. maguanica*)正反交的杂交种子的萌发率明显低于父母本异交获得的种子, 且有少量种子萌发后在正常管理下幼苗逐渐枯萎死亡[17]。以 12 年生鹅掌楸属种间杂交子代为研究对象, 发现杂交组合之间连年长势差异极显著[18]。综合来看, 诗琳通含笑与石碌含笑属于“可杂交但效率受限”的组合, 反交可利用但需克服后代萌发率低的问题, 正交则较难获得有效后代。

本研究中杂交 F_1 代在株高、地径等生长指标上均表现出显著的杂种优势, 尤其是反交后代优势最为突出; 但是, 在关键的光合生理指标——最大净光合速率(P_{nmax})上, 杂交后代均未表现出优势, 显著低于高光合亲本诗琳通含笑, 正交后代甚至低于双亲。结合杂交后代的光饱和点＞2 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 推测杂交后代可能消耗更多的能量去构建光保护能力以耐受极端强光。另一方面, 在评价杂交育种成效时, 也不应将 P_{nmax} 视为唯一的决定性生理指标。一个在 P_{nmax} 上不占优的杂交种, 若其具备更优的冠层结构与叶面积指数、更低的呼吸消耗、更强的根系营养获取能力或更强的抗逆性, 仍可能在整体生长上超越高光合亲本。

本研究正反交子代多数形态性状均偏向诗琳通含笑, 推测由其相关等位基因显性更强、表达优势更高所致; 仅叶背颜色、托叶痕 / 叶柄长度比值与母本完全一致, 存在典型母系细胞质遗传特征, 这类性状在木兰科分类检索中常作为稳定鉴别特征。

4　结　论

本研究首次系统开展诗琳通含笑与石碌含笑正反杂交实验, 明确了以石碌含笑为母本、诗琳通含笑为父本的组合具有较高的杂交亲和性, 是获得杂种后代的可行途径。杂交后代在生长速率、光饱和点等方面表现出明显杂种优势, 尽管光合速率未超越亲本, 但整体生长性能优于双亲, 表明其具备良好的适应性与应用潜力。后续可继续研究正反交植株的耐湿和分枝特性, 挖掘杂交后代的应用价值。

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. https://doi.org/10.11926/jtsb.4771

[2] Rivers M, Beech E, Murphy L, Oldfield S. The Red list of Magnoliaceae revised and extended[M]. Richmond, Surrey, UK: Botanic Gardens Conservation International, 2016: 60.

[3] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家林业和草原局农业农村部公告(2021 年第 15 号)(国家重点保护野生植物名录)[EB/OL]. (2021-09-07)[2026-08-08]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkzfwj/546058.jhtml.

[4] 王亚玲, 李勇, 张寿洲, 等. 木兰科植物的人工杂交[J]. 武汉植物学研究, 2003, 21(6): 508−514. https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0837.2003.06.011

[5] 李辉虎, 施茂寅, 杨爱红, 等. 鹅掌楸属树种近十年研究进展及其应用前景[J]. 江西科学, 2023, 41(6): 1062−1067. https://doi.org/10.13990/j.issn1001-3679.2023.06.006

[6] 张峥, 邵凤侠, 金晓玲, 等. 金叶含笑与 2 种含笑的杂交亲和性[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(5): 961−969. https://doi.org/10.11833/j.issn.2095-0756.20230021

[7] Nooteboom H P, Chalermglin P. A new species of Magnolia (Magnoliaceae) from Thailand[J]. Blumea, 2000, 45(1): 245−247.

[8] Cicuzza D, Newton A, Oldfield S. The red list of Magnoliaceae[M]. Cambridge, UK: Fauna & Flora International, 2007: 52.

[9] 冯雪萍, Wang T L, 文海霞, 等. 海南石碌含笑资源分布与气候变化情景下的生境适宜性变化[J]. 国家公园(中英文), 2025, 3(11): 657−668. https://doi.org/10.20152/j.np.202509110122

[10] 张鹏, 许逸林, 奚如春. 石碌含笑光合及固碳特性[J]. 热带作物学报, 2019, 40(2): 254−260. https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2019.02.007

[11] 徐琰, 高鹏程, 黄宝强, 等. 北美鹅掌楸良种子代苗期表型变异及苗期初选[J]. 山东林业科技, 2025, 55(5): 31−35. https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2724.2025.05.006

[12] 龚洵, 张国莉, 潘跃芝, 等. 含笑新品种: 郁金含笑、丹芯含笑和沁芳含笑[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 123. https://doi.org/10.3321/j.issn:0513-353X.2003.01.041

[13] 龚洵, 张国莉, 潘跃芝, 等. 含笑新品种: 雏菊含笑和春月含笑[J]. 园艺学报, 2003, 30(2): 251. https://doi.org/10.3321/j.issn:0513-353X.2003.02.037

[14] 毛常丽, 潘跃芝, 龚洵. 含笑新品种‘晚春含笑’[J]. 园艺学报, 2009, 36(5): 778. https://doi.org/10.3321/j.issn:0513-353X.2009.05.029

[15] 王晶, 赵强民, 高泽正. 含笑属 *Michelia* 新品种‘香绯’和‘香雪’的选育[J]. 广东园林, 2019, 41(6): 53−55. https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-2641.2019.06.014

[16] 肖玉洁. 乐昌含笑繁育系统及杂交育种研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024. https://doi.org/10.27662/d.cnki.gznlc.2024.000970

[17] 罗峰. 桂南木莲和马关木莲繁育系统及杂交育种研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.

[18] 蔡桁, 徐红梅, 蒋祥娥, 等. 鹅掌楸属种间杂交子代生长动态分析[J]. 湖北林业科技, 2022, 51(2): 13−17. https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-3020.2022.02.004

Phenotypic and photosynthetic characteristics of progenies of a reciprocal cross between endangered *Michelia sirindhorniae* and *M. shiluensis*

Guo Zhaobin[1#], Wang Wanshuang[2,3], Wei Jianxing[1], Rong Xiaojie[2,3], Wang Yaling[2,3*]

（1. Hainan Fengmu Experimental Forest Farm, Tunchang,Hainan 571600, China; 2. Hainan Institute of National Park/Key Laboratory for National Park Protection and Development of Hainan Province, Haikou,Hainan 570203, China; 3. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China）

Abstract: An attempt was made to investigate the cross-compatibility of reciprocal crosses between *Michelia sirindhorniae* and *M. shiluensis*, and to evaluate the phenotypic and photosynthetic physiological characteristics of the F_1 hybrid progeny. Artificial controlled pollination was conducted during the full flowering period to assess fruit set rate and seed set rate of the crosses. Seed germination tests were carried out for the progeny of the crosses. Phenotypic traits of the progeny were observed, and light response curves were measured. The outcrossed control of *M. sirindhorniae* showed a fruit set rate of 26.67%, a seed set rate of 5.48%, and a germination rate of 25.0%. The corresponding values for the *M. shiluensis* outcrossed control were 100%, 22.93%, and 86.67%, respectively. The reciprocal cross combination (*M. shiluensis* ♀ × *M. sirindhorniae* ♂) achieved a fruit set rate of 100%, a seed set rate of 18.69%, and a seed germination rate of 23.89%, all of which were significantly higher than those of the direct cross combination (*M. sirindhorniae* ♀ × *M. shiluensis* ♂) (15%, 2.92%, and 0.51%, respectively). Although the fruit and seed set rates of the reciprocal cross were close to those of its maternal outcrossed control (*M. shiluensis*), the germination rates of both hybrid combinations were significantly lower than those of their respective maternal controls. Morphological observations revealed that the offspring of both reciprocal crosses closely resembled *M. sirindhorniae*. Photosynthetic analysis indicated that at the two-year-old seedling stage, both hybrid progenies exhibited hybrid vigor in terms of high light saturation point (>2 000 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) and growth metrics (height and ground diameter). The maximum net photosynthetic rate (Pnmax) was highest in *M. sirindhorniae* (9.71 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), followed by the reciprocal cross (7.10 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), *M. shiluensis* (6.73 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), and the direct cross (4.76 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$). Reproductive isolation exists in the reciprocal crosses between *M. sirindhorniae* and *M. shiluensis.* The hybrid progeny exhibited hybrid advantages such as rapid growth and tolerance to high light intensity, with the reciprocal cross (*M. shiluensis* ♀ × *M. sirindhorniae* ♂) showing higher cross-compatibility. All these findings provide important technical guidance for germplasm innovation and efficient utilization of endangered Magnoliaceae plants.

Keywords: *Michelia sirindhorniae*; *M. shiluensis*; hybrid progeny; morphological identification; photosynthetic characteristics

(责任编辑:钟云芳)