

三角梅花部特征及杂交亲和性研究

杨福伟¹, 关文灵¹, 张 伟¹, 王乐乐¹, 宋 杰², 李叶芳^{1*}

1. 云南农业大学园林园艺学院, 云南昆明 650201; 2. 云南省农业科学院花卉研究所, 云南昆明 650205

摘 要: 本研究旨在揭示三角梅花部特征和开花动态, 探究花粉活力、柱头可授性的变化和不同品种间的杂交亲和性, 为三角梅杂交育种提供理论和技术指导。以 9 个三角梅品种为研究对象, 观测其花部特征和开花动态, 检测花粉活力及柱头可授性; 筛选出适合的亲本进行杂交授粉, 观测花粉管萌发情况和杂交结实率。采用离体萌发法测定的 6 个父本品种中有 3 个品种花粉活力较高, 可以作为父本。采用联苯胺-过氧化氢法检测 3 个母本的柱头可授性, 结果均显示在第 V 时期的柱头可授性最强。通过对结实率最低的 2 个杂交组合授粉后的花粉管生长情况进行荧光显微镜观察, 发现导致结实率低的原因是授粉后柱头和花柱内产生大量胼胝质并持续堆积, 使花粉管发生扭曲变形, 从而导致只有少量花粉管伸入胚珠完成受精, 不同杂交组合之间结实率差异较大。不同杂交组合均存在不同程度不亲和性, 受精前障碍是三角梅杂交不亲和的主要原因。

关键词: 三角梅; 开花生物学; 花粉活力; 柱头可授性; 杂交结实

中图分类号: S685.99 文献标志码: A

Investigation on the Floral Characteristics and Cross-compatibility of *Bougainvillea* spp.

YANG Fuwei¹, GUAN Wenling¹, ZHANG Wei¹, WANG Lele¹, SONG Jie², LI Yefang^{1*}

1. College of Landscape and Horticulture, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. Flower Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China

Abstract: The objective of this study is to elucidate the floral characteristics and flowering dynamics of *Bougainvillea* spp., investigate the variations in pollen viability, stigma acceptability, and cross-compatibility among different varieties, and provide theoretical and technical guidance for the crossbreeding in *Bougainvillea* spp.. Nine varieties of *Bougainvillea* were chosen to examine the floral traits and flowering patterns, also to assess pollen viability and stigma acceptability. Suitable parents were selected for cross-pollination, and the germination of pollen tubes along with the seed-setting rate of hybridization were observed. The pollen viability of the six male varieties, measured by the *ex vivo* germination method was high. Among which, three varieties exhibited high pollen viability and could be used as the male parents. The results from the stigma detection of three varieties by benzidine-hydrogen peroxide method showed that the stigma had the strongest deliverability in the V. period, it was concluded that the low seed-setting rate was due to the substantial amount of callose produced in the stigma and the columella following pollination, which distorted and deformed the pollen tube, resulting in only a limited number of pollen tubes reaching the ovule to complete fertilization. Additionally, significant differences were observed in the seed-setting rates among various hybrid combinations. Incompatibility was noted across various cross combinations, predominantly attributed to pre-fertilization disorders.

Keywords: *Bougainvillea* spp.; flowering biology; pollen viability; stigma receptivity; cross bearing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.08.008

收稿日期 2025-03-10; 接受日期 2025-04-11

基金项目 云南省重大科技专项 (No. 202302AE090018); 云南省现代农业花卉苗木产业体系建设项目 (No. 2017KJTX0010); 建设弥勒乡村振兴科技创新县项目 (No. 202304BT090021)。

作者简介 杨福伟 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 园林植物资源利用与创新。*通信作者 (Corresponding author): 李叶芳 (LI Yefang), E-mail: liyefang537@163.com。

三角梅又称叶子花、三角花、九重葛、勒杜鹃、宝巾等，为紫茉莉科（*Nyctaginaceae*）叶子花属（*Bougainvillea*）灌木状攀援植物，原产于南美洲，栽培种常见于热带及亚热带地区。三角梅苞片色彩鲜艳、花量大、花期长，具有极高的观赏价值，深受人们的喜爱，被广泛应用于绿化景观或盆栽。同时三角梅在净化空气以及食用、医学、生物农药、纺织染料、高分子燃料合成、天然食品保鲜剂等方面具有多种价值^[1-3]。三角梅原种、栽培种、变种、杂交种多达 400~500 个^[4]，大部分均引入中国种植。但目前的品种仍然多样化不足，需要培育更多的品种满足消费者的需求。杂交是培育三角梅新品种的重要途径^[5]，然而三角梅杂交育种存在育性差、杂交困难等难题，因此需要对其花部特征和杂交授粉进行深入研究。了解植物的花部特征是开展杂交育种的前提。国内外关于三角梅繁殖及栽培等方面的研究均有大量报道^[6-11]，但有关开花生物学方面研究仍显不足。本研究将对三角梅的花部特征以及开花动态进行观测，并测定不同品种的三角梅花粉活力和柱头可授性，在此基础上开展杂交授粉研究，观察花粉管的伸长，统计结实率，然后进行杂种苗培育，旨在探究三角梅杂交的技术体系，为三角梅杂交育种提供借鉴和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为三角梅品种粉红豹（*B. spectabilis*, Pink Panther）、新加坡宫粉（*B. glabra*, Singapore Pink）、金边叶浅紫（*B. glabra*, Golden Dragon）、暗斑叶丽娜（*Bougainvillea* sp.）、斑叶光叶紫（*B. glabra*, Sanderiana Variegata）、安格斯（*B. glabra*, Elizabeth Angus）、白雪公主（*B. glabra*, Mrs. Eva White）、浅茄（*B. glabra*, Mariel Fitz Patrick）、苹果花（*B. ougainvillea*, Apple Blossom），该 9 个品种均为嫁接苗，接穗生长 5 a 左右，栽培于云南农业大学园林园艺学院苗圃中（25°8'13"N，102°45'14"E）。

1.2 方法

1.2.1 花部综合特征和开花动态观测 于 2023 年 4 月—2024 年 4 月，昆明年平均气温为 17.9℃，年平均相对湿度为 70%左右，观测粉红豹、浅茄、新加坡宫粉、白雪公主、苹果花和安格斯等 6 个三角梅品种的花朵结构特征和开花动态，从三角

梅花蕾期开始观察苞片的生长、花被管的伸长情况、柱头的形态变化和花被管开裂状态以及花被管的解剖特征，记录其开始生长到完全展开，再到扭曲变形的整个开花动态过程。

1.2.2 花粉活力测定 选择开放 1~2 d 的粉红豹、浅茄、新加坡宫粉、金边叶浅紫、暗斑叶丽娜和斑叶光叶紫 6 个品种，于 9:00—11:00 采集花粉，采集后立即带回实验室，采用离体萌发法测定活力。以 150 g/L 蔗糖、50 mg/L CaCl_2 和 150 mg/L H_3BO_3 为基本培养基，采取单因素试验设计，试验在 90 mm 玻璃培养皿中进行，通过添加 HCl 和 NaOH 调节培养基的 pH 为 6±0.1。参照张伟等^[12]测试三角梅花粉活力的培养基配方：200 g/L 蔗糖+150 mg/L 硼酸+30 mg/L CaCl_2 ，琼脂 20 g/L（pH 6），将花粉用毛刷均匀地撒在培养基上，（25±0.3）℃条件下恒温培养箱培养 4 h，用解剖镜（LEICA DMC 4500）镜检，随机选取 6 个视野，每个视野不少于 40 个花粉粒，统计花粉管伸长的花粉数，计算萌发率。每个品种设 4 个重复。

1.2.3 母本柱头可授性检测 用联苯胺-过氧化氢法测定白雪公主、苹果花和浅茄的柱头可授性。于每天上午 10:00 分别采集微开、半开、全开的母本柱头，每个阶段采集 5 个柱头，在载玻片凹液面滴入联苯胺-过氧化氢溶液（0.5%联苯胺溶液：3%过氧化氢溶液：水=4：11：22，体积比），将采集的柱头侵入凹液面溶液里面，染色 10 min 后在显微镜下观察并拍照记录。若柱头周围反应液呈现蓝色并伴有大量气泡出现，则表示柱头具可授性，气泡越多，可授性越强。柱头周围均匀产生大量气泡并完全包裹住柱头，表示柱头可授性很强；柱头周围产生气泡包住柱头长度的 1/3~2/3，表示柱头可授性较强；柱头周围产生气泡包裹柱头的部分小于柱头长度的 1/3，表示柱头可授性较弱。

1.2.4 杂交授粉 根据花粉活力测定结果，选择花粉活力高的三角梅品种粉红豹、新加坡宫粉作为父本，同时以花粉活力低的三角梅品种安格斯作为对照。选择花朵不易脱落、柱头可授性强的三角梅品种白雪公主、苹果花和浅茄为母本。于早上 9:00—11:00，中午 13:00—15:00 授粉，选择开放当天或开放 1 d 后的花，先用手术刀沿着花被管的任意一个侧棱，从基部由下向上剖开，取父本花粉均匀涂抹在母本柱头上，直至看到柱头有淡黄色花粉。每个花序选择 2 朵授粉，去除

多余的花朵。授粉后在小花枝上挂上吊牌,注明时间、杂交组合和数量。

1.2.5 授粉后花粉管生长状况观察 分别采集白雪公主×安格斯和白雪公主×粉红豹授粉后 4、12、24、48 h 的雌蕊,用 FAA 固定液固定,于 4℃ 冰箱中保存备用。用 4 mol/L NaOH 溶液浸泡,在 60℃ 烘箱内软化 2 h,蒸馏水冲洗至无色,将材料置于 0.1% 水溶性苯胺蓝溶液染色 48 h 后,将材料放置于载玻片中央,并滴加 1 滴甘油,盖上盖玻片,在荧光显微镜下观察花粉管在花柱中的生长情况并拍照。

1.2.6 不同杂交组合结实率统计 授粉 15~25 d 后观察子房发育情况并记录膨大的果实数量,计算结实率。当花被管枯黄开裂时,种子已成熟,此时及时收集杂交种子,放置于阴凉干燥处备用,结实率=采收种子数/杂交花朵数×100%。

1.2.7 播种与出苗率统计 选择发育正常的种子,用 5% 的高锰酸钾浸泡 5 min,再用流水冲洗干净,进行常规播种(基质配比为草炭土:椰糠:珍珠岩=7:2:1)。暗处理 7 d 后放到阴凉的苗床上,播种 15 d 后统计出苗率和生长情况,出苗率=出苗数/播种数×100%。

1.3 数据处理

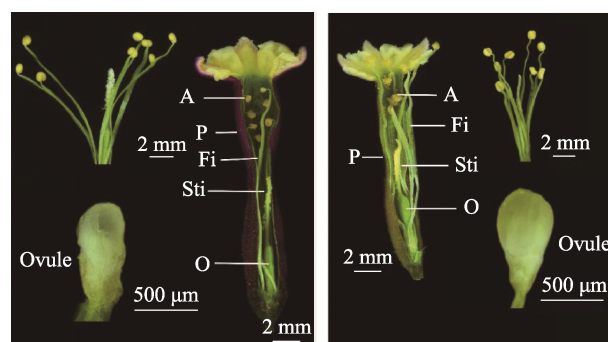
使用 Excel 软件进行数据统计及绘图,所有数据为均值±标准差,使用 Adobe Photoshop CC 2019 软件处理图片。

2 结果与分析

2.1 花朵结构和开花动态观察

三角梅是雌雄同体的两性花,花被管细长,中部溢缩,几乎所有雄蕊皆高于雌蕊,雌蕊和雄蕊藏于狭长的花被管中,给人工授粉造成较大困难。三角梅为聚伞花序,每个花序中 3 个花被管呈不同步开放。如图 1 所示,从下往上三角梅的整体结构为雌蕊包括子房以及里面包裹的胚珠,往上为着生在子房上面的柱头和附生在柱头上接收花药的柱头毛,往上是从子房基部着生由花丝连接的花药是雄蕊,最后由花被把雌雄蕊包裹起来形成整个花被管,不同品种间花被管颜色有差异。通过观测粉红豹、浅茄、新加坡宫粉、白雪公主、苹果花和安格斯等 6 个三角梅品种,其单朵的开花动态大致划分为 7 个时期(图 2):幼蕾期(I),苞片和花被管不断伸长,雌蕊和雄蕊初具形态;花冠准备绽开期(II),苞片和花被管不

再伸长,雌蕊和雄蕊继续发育;花冠开裂期(III),雌雄蕊发育完成,柱头毛发育完成,花药囊继续膨大;花冠绽开初期(IV),此时雌蕊柱头不再发育,花药囊成熟开裂开始出现散粉;花冠完全绽开期(V),雄蕊花药囊完全成熟开裂,持续散粉达到高峰;花冠闭合期(VI),雌蕊雄蕊开始变形收缩,花药散粉急剧下降,花瓣开始向内收拢;花冠扭曲变形期(VII),花被管从中间扭曲变形。三角梅从花蕾期到花被管不再伸长约为 10~15 d,花冠开裂到绽开初期约为 4 d,绽开初期到完全展开约为 2 d,花冠完全展开到开始闭合约 4~12 d,花冠闭合到扭曲变形约为 1 周,所以开花期约为 2 周,遇到阴雨天开花时间会有延长,如环境导致温度有较大变化,开花进程会有所提前或推迟。



A: 花药; Fi: 花丝; P: 花被; Sti: 柱头; O: 子房。

A: Anther; Fi: Filament; P: Perianth; Sti: Stigma; O: Ovary.

图 1 安格斯(左)和粉红豹(右)花部特征

Fig. 1 Flower characteristics of *B. glabra* Elizabeth Angus' (left) and *B. spectabilis* Pink Panther (right)

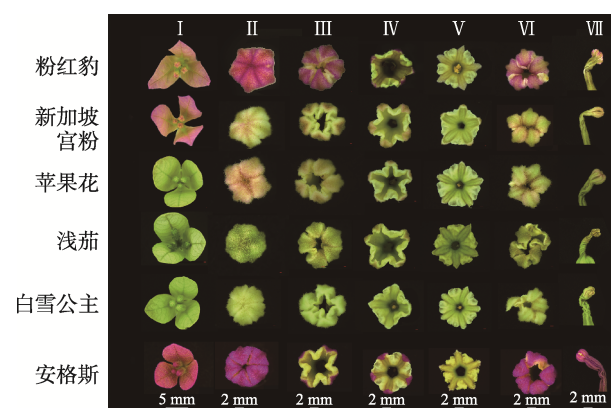


图 2 6 个三角梅品种开花动态过程

Fig. 2 Flowering dynamics of six *Bougainvillea* spp. varieties

2.2 花粉活力测定

通过花粉离体萌发法得出 6 个三角梅品种的

花粉活力，具体数据见表 1。花粉活力最高的是粉红豹（43.03%），其次是新加坡宫粉（29.13%）；安格斯、金边叶浅紫、暗斑叶丽娜和斑叶光叶紫的花粉活力均较低，分别为 9.21%、7.07%、5.75%、3.53%。因此以花粉活力较高的 2 个品种（粉红豹和新加坡宫粉）和花粉活力较低的品种安格斯作为杂交父本。

表 1 6 个三角梅品种花粉活力
Tab. 1 Determination of pollen viability of six varieties of *Bougainvillea* spp.

品种 Varieties	花粉萌发率 Pollen germination rate/%
粉红豹	43.03±3.87 ^a
新加坡宫粉	29.13±7.21 ^b
安格斯	9.21±1.29 ^c
金边叶浅紫	7.07±1.25 ^c
暗斑叶丽娜	5.75±0.60 ^c
斑叶光叶紫	3.53±1.15 ^c

注：不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 母本柱头可授性

由图 3 可知，白雪公主、苹果花和浅茄的柱头可授性在第Ⅲ时期时很微弱，第Ⅳ时期逐渐增强，第Ⅴ时期达最强，所以第Ⅴ时期为授粉最佳时期。通过对比白雪公主、苹果花和浅茄的柱头变化可知，白雪公主、苹果花的柱头明显比浅茄的长，而随着时间的推移以及柱头可授性的增强，浅茄的柱头保持直挺，而白雪公主和苹果花的柱头发生一定程度的弯曲，在第Ⅴ期白雪公主的气泡少于苹果花和浅茄。因此推测白雪公主的柱头

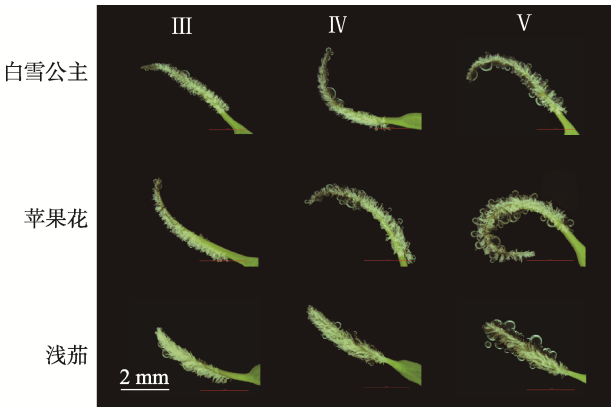


图 3 3 个三角梅品种在Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ
3 个阶段的柱头可授性检测
Fig. 3 Stigma acceptability test of 3 *Bougainvillea* spp. varieties at three stages III, IV and V

可授性弱于苹果花和浅茄。
2.4 授粉后花粉管生长的荧光显微观察

通过观察白雪公主与安格斯杂交授粉后的花粉管生长情况发现，安格斯作为父本授粉 4 h 后，几乎不萌发；授粉 12 h 后，只有少量花粉萌发，在柱头表面开始出现胼胝质现象，影响花粉管伸长，随后花粉管穿过绒毛进入中央花柱中，在花柱中出现了胼胝质塞（图 4A）；24 h 后，花粉管到达柱头底部（图 4B）；由于胚珠附近沉积大量的胼胝质，花粉管未达到胚珠停止生长，未完成受精（图 4C）。同时，本研究发现，安格斯在母本柱头存在更多未萌发现象（图 4D）。

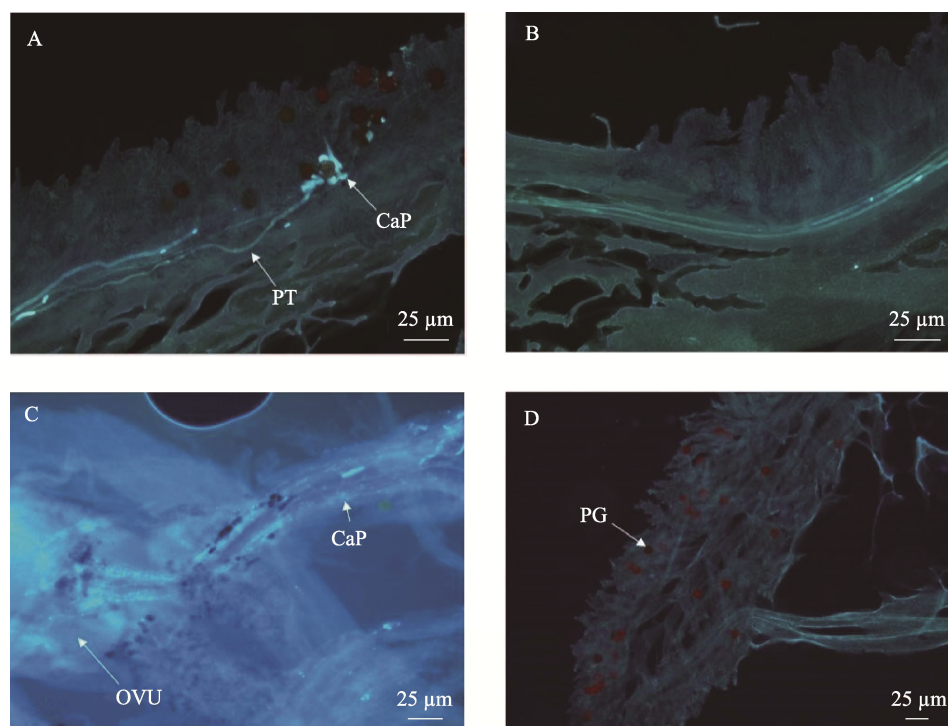
通过观察白雪公主与粉红豹杂交授粉后的花粉管生长情况发现，粉红豹作为父本授粉 4 h，少量花粉萌发；授粉 12 h 后，大量花粉开始萌发，花粉管开始伸入花柱内，但在花粉萌发的绒毛上以及花柱内出现了大量的胼胝质塞，使得部分花粉管发生扭曲，偏离了花柱通道（图 5A）；授粉 24 h 后，随着花粉管继续伸长到达花柱基部，大量胼胝质持续沉积，部分花粉管尖端出现膨胀（图 5B）；48 h 后，胚珠周围沉积了大量胼胝质，少量花粉管伸入胚珠完成受精（图 5C），呈现大量花粉管完全到达不了胚珠的现象（图 5D）。

2.5 杂交结实率统计

由表 2 可知，在所有杂交组合中，苹果花×新加坡宫粉结实率最高，为 16.03%，其次是苹果花×粉红豹（16.00%）、浅茄×新加坡宫粉（14.43%）、浅茄×粉红豹（13.45%）、苹果花×安格斯（9.70%）、白雪公主×新加坡宫粉（6.85%）、白雪公主×粉红豹（4.34%）；白雪公主×安格斯结实率最低，仅为 1.37%。杂交结实种子图片见图 6。

2.6 粉红豹杂交组合成苗率

选取结实多的粉红豹杂交组合进行常规播种，由表 3 可知，不同杂交组合的成苗率具有明显差异。其中浅茄×粉红豹的成苗率最高，为 91.67%；出苗时间也最短。如图 7 所示，播种 17 d 后开始出苗，第 26 天后完全出苗。其次是苹果花×粉红豹，成苗率为 58.33%，第 19 天开始出苗。白雪公主×粉红豹的出苗率最低，为 41.67%，第 22 天开始出苗（注：2024 年 1 月中旬全部杂交组合统计完成，种子常温保存，于 2024 年 4 月 28 日进行播种试验）。

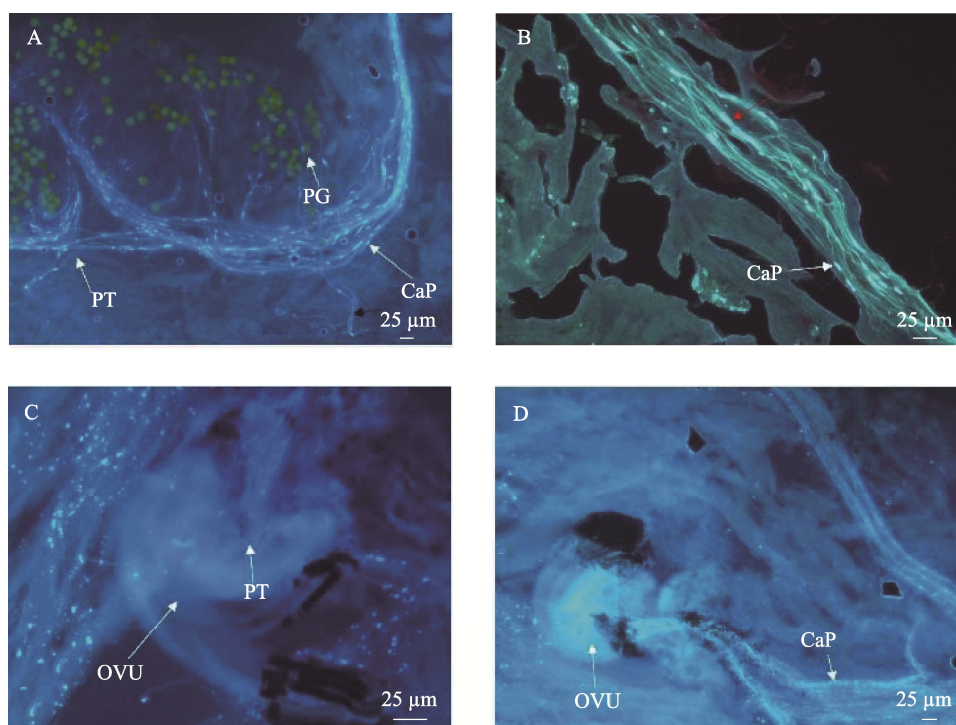


PG: 花粉粒; PT: 花粉管; CaP: 胼胝质塞; OVU: 胚珠。

PG: Pollen grain; PT: Pollen tube; CaP: Callose plug; OVU: Ovule.

图 4 安格斯×白雪公主花粉管生长的荧光显微镜观察

Fig. 4 *B. glabra* Elizabeth Angus × *B. glabra* Mrs. Eva White, fluorescence microscopic observation of pollen tube growth



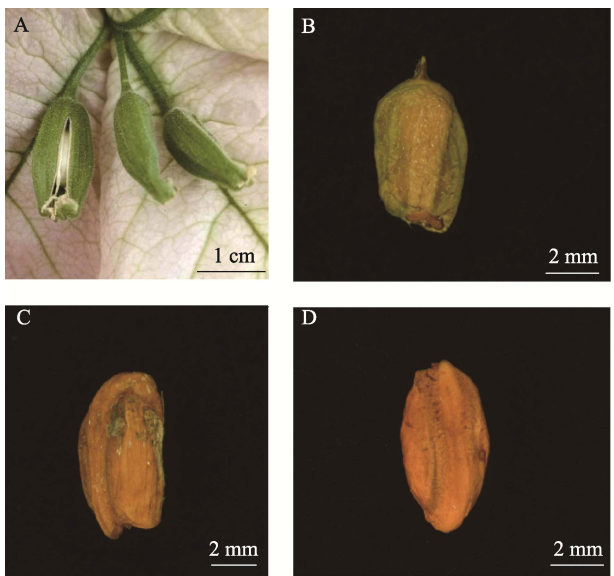
PG: 花粉粒; PT: 花粉管; CaP: 胼胝质塞; OVU: 胚珠。黑色箭头指花粉管扭曲, 红色箭头指花粉管膨胀。
PG: Pollen grain; PT: Pollen tube; CaP: Callose plug; OVU: Ovule. The black arrow indicates that the pollen tube is twisted, the red arrow indicates pollen tube expansion.

图 5 粉红豹×白雪公主花粉管生长的荧光显微镜观察

Fig. 5 *B. spectabilis* Pink Panther × *B. glabra* Mrs. Eva White, fluorescence microscopic observation of pollen tube growth

表 2 6 个三角梅品种杂交结实率
Tab. 2 Hybrid fruiting of six *Bougainvillea* spp. varieties

杂交组合 Cross combination	杂交数量 Number of crosses	结实数 Fruity number	结实率 Setting rate/%
白雪公主×粉红豹	1083	47	4.34
苹果花×粉红豹	750	120	16.00
浅茄×粉红豹	959	129	13.45
白雪公主×新加坡宫粉	248	17	6.85
苹果花×新加坡宫粉	156	25	16.03
浅茄×新加坡宫粉	194	28	14.43
苹果花×安格斯	165	16	9.70
白雪公主×安格斯	73	1	1.37



A: 苹果花×粉红豹的未成熟种子;
B: 浅茄×新加坡宫粉的成熟种子
(瘦果); C: 白雪公主×新加坡宫粉的成熟种子 (瘦果);
D: 白雪公主×安格斯的成熟种子 (瘦果)。

A: Immature seeds of *B. ougainvillea*, Apple Blossom×*B. spectabilis*, Pink Panther B: The seeds of *B. glabra* Mariel Fitz Patrick×*B. glabra* Singapore Pink; C: The seeds of *B. glabra* Mrs. Eva White×*B. glabra* Singapore Pink; D: The seeds of *B. glabra* Mrs. Eva White'×*B. glabra* 'Elizabeth Angus.

图 6 三角梅发育中的果实和成熟种子

Fig. 6 Picture of developing fruit and ripe seeds of *Bougainvillea* spp.

表 3 播种成苗率
Tab. 3 Statistical analysis of seeding rates

杂交组合 Cross combination	播种数量 Seeding quantity	成苗数 Number of seedling formation	成苗率 Percentage of seedling formation/%
白雪公主×粉红豹	12	5	41.67
苹果花×粉红豹	12	7	58.33
浅茄×粉红豹	12	11	91.67

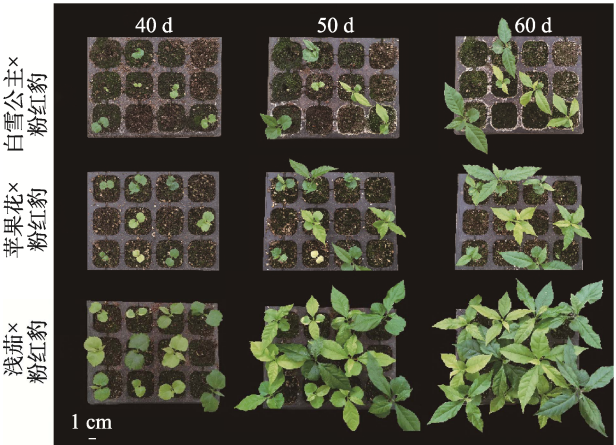


图 7 3 个杂交组合 F₁ 代幼苗长势

Fig. 7 Seedling growth of F₁ generation in 3 hybrid combinations

3 讨论

植物花部特征与有性繁殖密切相关，其中花部的空间特征是植物繁育系统的重要信息^[13]。雌雄同熟和空间分布同位增加了自发授粉的可能性；雌雄异熟和空间分布异位增加了异交的可能性，减少雌雄功能的干扰^[14]。本研究中，粉红豹、新加坡宫粉和安格斯都是雌雄同体的两性花，雌雄器官在同一垂直高度，且几乎所有雄蕊高于雌蕊，花药散粉时，花粉活力达到最高值，柱头具有较强的可授性，花粉易自发掉落在柱头上，这种雌雄同熟和雌雄器官结构特征机制有利于自花授粉。然而，在没有人工干预的条件下，极少看到其自然结实，可能存在自交不亲和机制。

雄蕊的花粉质量和花粉密度是决定植物杂交授粉是否成功的前提之一^[15-22]，而花粉生活力是评估花粉质量的重要参考依据^[23-25]。研究表明，相对于染色法，花粉离体培养法能更加准确地反映出三角梅花粉的真实生活力^[24]。本研究发现，粉红豹、新加坡宫粉都具有较强的花粉活力，适合作为父本。安格斯的花粉活力较低，不是理想的父本，其杂交结实率仅为 1.37%，但是由于其具有较强的耐寒性，仍然值得作为父本进行杂交育种，只要有足够多的杂交样本，仍然可以得到杂交种子。金边叶浅紫、暗斑叶丽娜和斑叶光叶紫的花粉活力很低，不适合做杂交父本。

亲本间的杂交亲和性和花粉活力是决定杂交成功的重要前提，杂交不亲和性主要表现在受精前障碍和受精后障碍，受精前不亲和通常指花粉管无法正常伸长进入花柱或能进入胚珠但无法正

常受精^[21-22]。本研究中, 安格斯和粉红豹的花粉在柱头上萌发时, 在花粉粒周围出现大量的胼胝质以及在花粉管内沉积大量胼胝质, 使得部分花粉管发生扭曲, 伸入花柱异常。在胚珠附近同样有大量胼胝质进一步阻止花粉管完成受精。这说明这些杂交组合存在受精前障碍。安格斯的花粉萌发率很低, 仅为 $(9.21 \pm 1.29)\%$, 其杂交结实率也很低, 仅为 1.37% ; 而粉红豹的花粉萌发率较高, 为 $(43.03 \pm 3.87)\%$, 其杂交结实率为 4.34% , 高于安格斯的杂交结实率。由此可见, 花粉活力与杂交结实率具有正相关性, 花粉质量的高低是影响三角梅杂交结实率的重要因素。新加坡宫粉虽然花粉活力较高, 但由于其花量较少且持续时间短, 给杂交工作造成困难, 因此不是理想的父本。

植物柱头可授性在花器官的发育过程中有阶段性的变化^[25]。在本研究通过对 3 个适合做母本的三角梅品种的 3 个时期开花状态的柱头进行可授性检测, 发现从花冠开展的初期到完全展开, 柱头可授性逐渐增强, 到花冠完全展开的 V 期达到最强, 所以人工授粉的最佳时期为花冠完全展开的 V 期, 其次为 IV 期, III 期因可授性非常弱不适合授粉。在试验过程中还发现杂交结实成功的种子所在的总花梗更粗, 今后杂交育种时应选择母本植株上花梗较粗的花朵进行授粉, 有望进一步提高三角梅杂交结实率。

4 结论

三角梅为雌雄同体两性花, 雌雄蕊被狭长的花被管包裹, 雄蕊高于雌蕊。6 个品种中粉红豹、新加坡宫粉的花粉活力较高, 适合作为父本, 其次是安格斯。在花冠完全展开的第 V 期, 母本的柱头可授性最强, 为最佳的授粉时期。8 个杂交组合均有结实, 其中苹果花×新加坡宫粉的结实率最高 (16.03%), 苹果花×粉红豹 (16.00%) 次之; 白雪公主×安格斯最低 (1.37%), 白雪公主×粉红豹次之 (4.34%)。通过对结实率最低的 2 个组合进行花粉管生长的荧光显微观察发现, 由于授粉后柱头和花柱内产生大量胼胝质并持续堆积, 使花粉管发生扭曲变形, 部分花粉管未到达胚珠就停止伸长, 且只有少量花粉管伸入胚珠完成受精, 这是导致结实率低的直接原因。对父本为粉红豹的 3 个杂交组合进行常规播种发现, 浅茄×粉红豹出苗率最高达 91.67% , 其他 2 个组合均较低。

综上所述, 8 个杂交组合结实率较低, 可能

存在杂交受精前障碍; 粉红豹为最佳父本, 苹果花为最佳母本。

参考文献

- [1] 杜学林, 温志, 傅小霞, 张丽华, 林鸿伟, 刘国锋. 三角梅种质资源表型性状多样性评价[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(15): 133-139, 145.
DU X L, WEN Z, FU X X, ZHANG L H, LING H W, LIU G F. Evaluation of phenotypic character diversity of *Bougainvillea spectabilis* germplasm resources[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(15): 133-139, 145. (in Chinese)
- [2] 杜学林, 张丽华, 肖子航, 伍青, 刘悦明, 王凤兰. 三角梅自交不亲和相关基因转录组学分析[J]. 广西林业科学, 2024, 53(5): 567-576.
DU X L, ZHANG L H, XIAO Z H, WU Q, LIU Y M, WANG F L. Transcriptomics analysis on self-incompatibility related genes in *Bougainvillea* spp[J]. Guangxi Forestry Science, 2024, 53(5): 567-576. (in Chinese)
- [3] 郁书君, 岑若邦, 刘佳美, 景衍之, 李美芬, 冯倚琪, 黄久香. 三角梅品种的表型遗传多样性综合分析与评价[J/OL]. 广西植物, (2024-08-20)[2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20240820.0934.004.html>.
YU S J, CEN R B, LIU J M, JING Y Z, LI M F, FENG Y Q, HUANG J X. Comprehensive analysis and evaluation of phenotypic genetic diversity of *Bougainvillea* varietie[J/OL]. Guihaia, (2024-08-20)[2024-12-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20240820.0934.004.html>. (in Chinese)
- [4] 牛俊海. 三角梅杂交育种回顾与评析[J]. 中国花卉园艺, 2023(4): 54-57.
NIU J H. Review and comment on cross breeding of *Bougainvillea* crossbreeding[J]. Chinese Flower Horticulture, 2023(4): 54-57. (in Chinese)
- [5] DATTA S K. Breeding of *Bougainvillea*: past, present, and future[J]. The Nucleus, 2022, 65(2): 239-254.
- [6] 黄涛, 祝遵凌. 三角梅属植物的育种繁殖及栽培技术研究进展[J]. 分子植物育种, 2023, 21(4): 1381-1392.
HUANG T, ZHU Z L. Research progress on breeding, propagation and cultivation techniques of *Bougainvillea*[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(4): 1381-1392. (in Chinese)
- [7] 李翩翩, 张国禹, 黄桂云, 马晓波, 邱利文, 张海波, 吴笛, 杨兰芳, 望雄英. 三角梅扦插繁殖技术研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(30): 119-121.
LI P P, ZHANG G Y, HUANG G Y, MA X B, QIU L W, ZHANG H B, WU D, YANG L F, WANG X Y. Cutting propagation technology of *Bougainvillea glabra*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(30): 119-121. (in Chinese)
- [8] 伍成厚, 傅小霞, 江奕伟. 三角梅绿色嫩梢的花泥扦插繁

- 殖技术初探[J]. 广东园林, 2022, 44(6): 67-70.
- WU C H, FU X X, JIANG Y W. Preliminary study of cutting propagation on floral foam of young greening shoot in *Bougainvillea* spp.[J]. Guangdong Landscape Architecture, 2022, 44(6): 67-70. (in Chinese)
- [9] HUANG T, ZHANG H H, SHENG Q Q, ZHU Z L. Morphological, anatomical, physiological and biochemical changes during adventitious roots formation of *Bougainvillea buttiana* 'Miss Manila'[J]. Horticulturae, 2022, 8(12): 17.
- [10] LIN H L, XU J R, WU K L, GONG C X, JIE Y Y, YANG B, CHEN J H. An efficient method for the propagation of *Bougainvillea glabra* 'New River' (Nyctaginaceae) from *in vitro* stem segments[J]. Forests, 2024, 15(3): 14.
- [11] SHRESTHA J, BHANDARI N, BARAL S, MARAHATTA S P, PUN U. Effect of rooting hormones and media on vegetative propagation of *Bougainvillea*[J]. Ornam Horticult, 2023, 29(3): 397-406.
- [12] 张伟, 关文灵, 宋杰, 王乐乐, 李叶芳, 李世峰, 王继华, 解玮佳. 4个三角梅品种花粉离体萌发及活力测定优化[J/OL]. 分子植物育种, (2022-08-19)[2024-07-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220818.1115.002.html>. ZHANG W, GUAN W L, SONG J, WANG L L, LI Y F, LI S F, WANG J H, XIE W J. Optimization of *in vitro* pollen germination and viability determination of four *Bougainvillea* cultivars[J]. Molecular Plant Breeding, (2022-08-19) [2024-07-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220818.1115.002.html>. (in Chinese)
- [13] LIU X D, PENG Y N, ZENG Q H, MA Y W, LIU J, HUANG Y Q, YU X Y, LUO L, LI Y L, LI M. Transcriptomic profiling and gene network analysis revealed regulatory mechanisms of bract development in *Bougainvillea glabra*[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 16.
- [14] RASTOGI R R, SINGH N, SINGH S, PAL A K, ROY R K, RANA T S. Assessment of genetic variability in the *Bougainvillea* varieties using morphological and molecular markers[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2019, 57(6): 408-417.
- [15] QIU J, GAO C, WEI H L, WANG B, HU Y, GUO Z Y, LONG L, YANG L, LI H E. Flowering biology of *Rhododendron pulchrum*[J]. Horticulturae, 2021, 7(11): 1-16.
- [16] 李峻峰, 高鸿灿, 殷根深, 梁梓煜, 杨晓虹, 翟书华. 海菜花和波叶海菜花的传粉生物学及其杂交亲和性研究[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1471-1481.
- LI J F, GAO H C, YIN G S, LIANG Z Y, YANG X H, ZHAI S H. Pollination and hybrid affinity of *Ottelia acuminata* and *Ottelia acuminata* var. *crispa*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(9): 1471-1481. (in Chinese)
- [17] 赵丽红, 张晓飞, 李金霞, 储博彦, 尹新彦. 10个萱草品种花粉生活力及柱头可授性比较[J]. 河北林业科技, 2023(4): 22-26.
- ZHAO L H, ZHANG X F, LI J X, CHU B Y, YIN X Y. Comparison of pollen viability and stigmatic pollination of 10 *Hemerocallis* species[J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2023(4): 22-26. (in Chinese)
- [18] 郑棚沛, 董春燕, 陈之光, 徐言, 葛红, 杨树华, 赵鑫, 寇亚平, 朱晋宇, 贾瑞冬, 武荣花. 多花指甲兰开花特性与繁育系统研究[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(1): 124-131.
- ZHENG P R, DONG C Y, CHEN Z G, XU Y, GE H, YANG S H, ZHAO X, KOU Y P, ZHU J Y, JIA R D, WU R H. Flowering characteristics and breeding system of *Aerides rosea*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(1): 124-131. (in Chinese)
- [19] 黄嘉军, 谢美诗, 姜贵芸, 刘娟旭, 余义勋. 桂中报春菖苔花粉生物学特征与繁育系统研究[J]. 西北植物学报, 2024, 44(9): 1464-1473.
- HUANG J J, XIE M S, JIANG G Y, LIU J X, YU Y X. Pollen biological characteristics and breeding system of *Primulina guizhongensis*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(9): 1464-1473. (in Chinese)
- [20] 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.
- LUO F. Study on the breeding system and hybrid breeding of *Manglietia chingii* and *Manglietia maguanica*[D]. Shanghai: Centai South University of Forestry and Technology, 2019. (in Chinese)
- [21] 秦瑶. 牡丹花粉活力测定与杂交亲和性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.
- QING Y. Study on the determination of tree peony pollen and cross compatibility[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [22] CHANG S X, LI C X, JIANG Y Z, LONG Y, LI Y, YIN J M. Characteristics of the pollen morphology and viability of *Bougainvillea* (Nyctaginaceae)[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 277: 109732.
- [23] FRAGALLAH S, LIN S Z, LI N, LIGATE E J, CHEN Y. Effects of sucrose, boric acid, pH, and incubation time on *in vitro* germination of pollen and tube growth of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* L.)[J]. Forests, 2019, 10(2): 1-16.
- [24] STOKES M, GEITMANN A. Screening methods for thermotolerance in pollen[J]. Annals of Botany, 2024, 20: 1-18.
- [25] 余道平, 李策宏, 文香英, 李小杰, 彭启新, 谢孔平. 峨眉拟单性木兰的开花生物学特性与繁育系统[J]. 广西植物, 2019, 39(5): 600-607.
- YU D P, LI C H, WEN X Y, LI X J, PENG Q X, XIE K P. Flowering biological characteristics and breeding system of *Parakmeria omeiensis*[J]. Guihaia, 2019, 39(5): 600-607. (in Chinese)