

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201611062

马雄杜鹃的繁育系统和杂交育种研究初探*

易陈燃¹, 郑硕理^{1,3}, 刘巧¹, 谷珂¹, 刘国强², 张敬丽^{1**}

(1. 云南农业大学 园林园艺学院, 云南 昆明 650201; 2. 苍山植物园, 云南 大理 671003;

3. 湖南省森林植物园, 湖南 长沙 410116)

摘要:【目的】为马雄杜鹃(*Rhododendron maxiongense*)的保护和园林应用提供理论依据。【方法】本研究对马雄杜鹃进行了开花物候和访花昆虫的观察,统计了杂交指数、花粉-胚珠比和人工控制授粉试验。【结果】马雄杜鹃花期为4月中旬到5月底;杂交指数(OCI)≥4, P/O值为422.48,主要的传粉者为东方蜜蜂;自然状态下马雄杜鹃的坐果率最高,为57.14%,同种同株异花授粉和同种异株异花授粉坐果率仅为24.28%和17.14%。以马雄杜鹃(*R. maxiongense*)为母本,马缨杜鹃(*R. delavayi*)、大白杜鹃(*R. decorum*)、露珠杜鹃(*R. irroratum*)和羊躑躅(*R. molle*)为父本的坐果率分别为11.43%、22.86%、2.86%和10%。【结论】马雄杜鹃花粉的最佳活性期与柱头的最佳可授期可能互不相遇;其繁育系统属于兼性异交且自交亲和,在传粉的过程需要传粉者;自然状态下传粉昆虫效率较高,而人工同种授粉和人工杂交授粉可能由于杂交亲和力不同导致坐果率较低。

关键词: 马雄杜鹃; 访花昆虫; 繁育系统; 杂交育种

中图分类号: S 685.210.36

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2018)01-0099-07

Preliminary Study on the Breeding System and Crossbreeding of *Rhododendron maxiongense* (Ericaceae)

YI Chenran¹, ZHENG Shuoli^{1,3}, LIU Qiao¹, GU Ke¹, LIU Guoqiang², ZHANG Jinli¹

(1. College of Horticulture and Landscape, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Cangshan Botanical Garden, Dali 671003, China; 3. Hunan Forest Botanical Garden, Changsha 410116, China)

Abstract: [Purpose] To provide the theoretical basis for the protection and landscape application of *Rhododendron maxiongense*. [Method] In this study, flowering phenology and visiting insects were observed, and the indices of hybridization, pollen ovule ratio and controlled pollination were counted. [Result] The flowering phase of *R. maxiongense* is from middle April to the end of May, and the hybrid index (OCI) ≥ 4, P/O ratio is 422.48; the main pollinators is *Apis cerana*. The highest fruit rate of *R. maxiongense* was 57.14% under the natural conditions, and the fruit rates of the cross pollination in the same or different individuals were only 24.28% and 17.14%. Moreover, the fruit rates of artificial cross between *R. maxiongense* (♀) and *R. delavayi* (♂), *R. decorum* (♂), *R. irroratum* (♂) and *R. molle* (♂) were 11.43%, 22.86%, 2.86% and 10%, respectively. [Conclusion] The results revealed that the best period of pollen activity and the stigma receptivity of *R. maxiongense* may

收稿日期: 2016-12-06

修回日期: 2017-05-16

网络出版时间: 2018-03-02

*基金项目: 国家自然科学基金项目(31260079); 国家科技支撑计划(2015BAD10B00)。

作者简介: 易陈燃(1991—), 女, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事野生植物资源起源与应用研究。

E-mail: 1309465419@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 张敬丽(1975—), 女, 河南开封人, 博士, 副教授, 主要从事野生植物资源起源与应用研究。E-mail: jl200812@yeah.net

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201611062](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201611062)

not meet each other; the breeding system is facultative outcrossing, self-compatibility, and require pollinators; the pollinator efficiency is highest under the natural condition, and the low rates of artificial pollination in the same species and between different species, because it was difficult to grasp the best period of the pollen activity and stigma receptivity.

Keywords: *Rhododendron maxiongense*; visitors; breeding system; crossbreeding

植物繁育系统是指直接影响其子代遗传物质的所有有性特征^[1], 包括花的综合性状、花的寿命与开放式样、自交亲和程度等多个方面^[2]。而植物后代的遗传组成和适合度是由植物繁育过程与传粉者、传粉行为等一起决定的^[3]。杜鹃花品种的选育是对杜鹃花的繁育系统最早的研究。国外有 NG 等^[4]研究了 6 种香港的杜鹃花的开花时间、传粉者、花部特征、繁殖生物学和种子萌发等方面; 国内只有少部分研究学者通过人工杂交育种手段来培育出具有知识产权的杜鹃新品种^[5-6]。国内对杜鹃花的繁育系统研究有云锦杜鹃^[7]以及其他 4 种杜鹃花^[8-9]。前人的研究表明: 大部分杜鹃花属植物自交亲和且以传粉媒介辅助的同株异花为其主要授粉方式^[10-15]。

马雄杜鹃 (*R. maxiongense*) 为杜鹃科 (Ericaceae) 杜鹃属 (*Rhododendron* L.) 植物, 常绿灌木^[16], 总状伞形花序, 高约 0.6~1.5 m, 株形紧凑, 花粉白色至粉红色, 具有较高的观赏价值, 是进行杂交育种的优良亲本。由于马雄杜鹃仅分布在云南省曲靖地区马雄山, 分布领域极其狭窄, 已被 IUCN(2003) 列为易危植物种类^[17]。本研究对云南野生杜鹃属植物马雄杜鹃进行了开花物候及访花昆虫的观察, 统计了杂交指数、花粉-胚珠比, 进行了人工控制授粉试验, 繁育系统和杂交育种进行了研究, 目的是为云南野生花卉资源的保护, 园林应用及新品种选育提供研究基础和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

曲靖珠江源自然保护区位于北纬 25°23'、东经 102°73', 海拔 2 400 m 左右。土壤(土层厚 30~60 cm)是黄砂岩形成的山地黄沙质壤土, 其土壤 pH 在 5.4~5.8 之间, 呈弱酸性。该地区植被以暖温性针叶林和寒温性灌丛为主, 其生活型组成以小乔木和中小灌木为主, 伴生植物种类组成主要为各种杜鹃花科植物, 包括马缨杜鹃 (*R. delavayi*)、大白杜鹃 (*R. decorum*)、露珠杜鹃 (*R.*

irroratum)、迷人杜鹃 (*R. agastum*)、基毛杜鹃 (*R. rigidum*)、美丽马醉木 (*Pieris formosa*), 其他木本植物有云南松 (*Pinus yunnanensis*)、山茶 (*Camellia japonica*) 和壳斗科植物等。

1.2 试验材料

本试验的马雄杜鹃为曲靖珠江源公园的野生杜鹃, 杂交试验中父本的花粉采自昆明地区。

1.3 试验方法

1.3.1 开花动态及形态特征观察

2015—2016 年连续两年对珠江源野外居群的马雄杜鹃进行了群体花期观察; 随机挂牌标记 10 株植株进行单花、单花序及单株的花期观察; 观察记录居群的花期时间。盛花期的时候随机选取 30 朵未开放的花苞进行标记、观察花朵的开放时间、花冠形态及柱头颜色等开花特征。

1.3.2 柱头可授性的检测

本研究采用联苯胺—过氧化氢法^[18]。每天中午采摘不同期的已经开放的花朵, 在其柱头上滴加联苯胺—过氧化氢反应液。[*V*(1% 联苯胺):*V*(3% 过氧化氢):*V*(水)=4:11:22]。若柱头有可授性, 则过氧化物酶有活性, 柱头有气泡产生, 随着柱头可授性的强弱, 产生气泡数目则不同。

1.3.3 花粉-胚珠比估算

随机选取快开放的花 30 朵, 用 FAA 固定后带回实验室[*V*(38% 甲醛):*V*(冰醋酸):*V*(70% 酒精)=1:1:18]。在实验室内统计花的雌蕊数目后, 用解剖针划破 1 朵花中全部花药, 把全部的花粉用水配成 5 mL 悬浮液, 震荡混匀后用移液管吸取 0.5 mL 的悬浮液于载玻片上, 盖上盖玻片在显微镜下统计数目。每朵花重复 3 次。在解剖镜下用解剖针解剖子房记录胚珠数目。

1.3.4 杂交指数的估算

随机摘取当天开放的花 30 朵, 并测量出花朵直径、花药长、花柱长; 依照 Dafni 的繁育系统类型标准计算其杂交指数 OCI 值, 并确定繁育系统类型。

1.3.5 访花昆虫种类及其活动规律观察

对马雄杜鹃居群随机标记已开放的花朵(20朵)对其访花昆虫进行观察。从8:30—17:30进行连续一周的观察,记录其访花昆虫的种类及活动规律。

1.3.6 人工授粉试验

选取马雄杜鹃的开花植株,并且设置了7个处理进行试验:(1)直接挂牌不作任何的处理作为自然对照,检测自然条件下的结实率。(2)开花前套袋,不去雄,检验是否存在自花授粉。(3)异株异花授粉:去雄后用其他植株的盛花期的花粉授上并套袋,统计结实率。(4)同株异花授粉:去雄后用同株其他的盛花期花粉授粉并套袋,检测结实率。(5)去雄套网:检测风媒传粉效果^[19]。(6)去雄套袋,检测是否存在无融合生殖。(7)杂交套袋试验,以马雄杜鹃为母本,马缨杜鹃(*R. delavayi*)、大白杜鹃(*R. decorum*)、露珠杜鹃(*R. irroratum*)、羊躑躅(*R. molle*)为父本进行杂交试验,检测杂交亲和力^[20]。

1.3.7 每果实种子数量、种子千粒重和萌发试验

将采到的果实进行统计,对每果实种子数进行人工计数,将每个类型种子以50粒为1份,用分析天平称重换算出千粒重,每个杂交组合重复8次(羊躑躅种子数不够例外),用SPSS软件($P=0.05$)分析种子数和千粒重^[21]。种子萌发试

验在参数设置为白天12h温度21℃,光照4000 lx;夜间12h温度19℃的光照培养箱中进行,将种子各数30粒放于有湿润滤纸的培养皿中,以子叶展开视其为萌发标准,直到连续5d萌发数不再变化。每个组合重复3次,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 开花生物学特征观察

2.1.1 开花物候和单花花期观察

马雄杜鹃为总状伞形花序,每个花序有花1~15朵花。总花期从4月底到5月底,单花花期6~7d,花冠呈碗状或者钟状,展开成蝶形,花冠直径4~5.5 cm,白色或粉红色,5裂,裂片近圆形;雄蕊10枚,不等长,长1.5~2.5 cm,花丝无毛,花药椭圆形;子房圆锥形,直径约2 mm。根据单花的开花进程,可以把单花发育分成4个阶段:(1)花蕾期:花蕾呈桃红色的椭圆形,柱头无黏液。(2)始花期:(持续2d)花微微展开,但并未展开到最大,花瓣颜色变浅且柱头无黏液,花药渐渐开始散粉。(3)盛花期:(持续2~3d)花朵完全展开,花瓣变成全白色且柱头有黏液,花药散粉量最大。(4)末花期:(持续2d)柱头还有黏液但花药已散完,花丝开始枯萎,花瓣脱落(图1)。



注: A 为花苞期; B、C 为始花期; D 为盛花期; E 为末花期。

Note: A. bud stage; B, C. initial flowering; D. bloom; E. end of flowering.

图1 马雄杜鹃开花周期图

Fig. 1 Flowering period of *R. maxiongense*

2.1.2 柱头可授性的测定和花粉散粉情况观察

开花前一天联苯胺—过氧化氢溶液测试柱头可授性,发现有少量的气泡反应,花药未散粉。开花第1天和第2天,柱头产生的气泡逐渐增加,说明过氧化物酶活性增强,则柱头可授性逐

渐增大,花药开始散粉。开花第3天,花药散粉量达到最大。开花第4天,柱头产生的气泡最多,则过氧化物酶活性最大且柱头可授性也为最大,此时是最佳授粉的时候。开花第5~7天,柱头产生气泡逐渐减少,则过氧化物酶活性减少,

表 1 马雄杜鹃柱头可授性、黏液分泌情况和花粉散粉情况比较
Tab. 1 Stigma receptivity, mucus secretion and pollen disperse of *R. maxiongense*

开花时间 flowering time	柱头可授性 stigma receptivity	分泌黏液 mucus secretion	花粉散粉 pollen disperse
开花前 1 天 the day before flowering	+/-	-	-
开花第 1 天 the 1st day of flowering	+	+/-	+
开花第 2 天 the 2nd day of flowering	+	+	+
开花第 3 天 the 3rd day of flowering	+	+	++
开花第 4 天 the 4th day of flowering	++	++	+
开花第 5 天 the 5th day of flowering	+	+	+
开花第 6 天 the 6th day of flowering	+	+/-	+
开花第 7 天 the 7th day of flowering	-	-	-

注：1) + 具可授性, 产生气泡, 变成浅蓝色; - 不具可授性; +/- 具有微弱可授性, 产生气泡少, 不变色; ++ 具有较强可授性, 产生大量气泡, 变成蓝色; 2) - 无黏液分泌; + 柱头分泌黏液; ++ 有大量黏液分泌; +/- 有很少黏液分泌; 3) - 无花粉分散; + 有少量花粉分散; ++ 有大量花粉分散。
Note: 1) + receptivity, bubbles, a light blue; - no receptivity; +/- with weak receptivity, bubbles, no color; ++ has strong receptivity, produce a lot of air into the blue; 2) - mucus secretion; +mucus secretion; ++ stigma; excessive secretion of mucus; +/- has little mucus secretion; 3) - no pollen; + there is a small amount of pollen dispersion; ++ has a large number of dispersed pollen.

柱头可授性减弱; 至第 7 天花粉散尽, 花瓣脱落。

2.1.3 花粉-胚珠比 (P/O) 的估算

由 CRUDEN (1977) 繁育系统类型评判标准可知^[22]: P/O: 244.7~2 588.0, 繁育系统为兼性异交, 且 P/O 值升高则说明远交程度上升, 而 P/O 值降低说明近交程度升高。根据表 2 可以推断马雄杜鹃应为兼性异交型。

表 2 马雄杜鹃花粉-胚珠比的估算
Tab. 2 Pollen-ovule ratio estimate of *R. maxiongense*

观测项目 observed projects	结果 results
单花花粉数均值 average of pollen number per flower	717 381.17±15 479.34
单花胚珠数均值 average of ovule number per flower	1 698.5±160.73
花粉-胚珠比 pollen ovule ratio (P/O)	422.48
繁育系统类型 breeding system type	兼性异交 facultative outcrossing

2.1.4 杂交指数的估算

马雄杜鹃花朵平均直径为 (48.40±5.66) mm> 6 mm 记为 3; 花为两性花, 花药散粉初期雌蕊尚未成熟, 记为 1; 雌雄蕊空间分离, 且柱头略高于花药, 记为 1; 由 DAFNI 的标准^[18]可以得出马雄杜鹃的杂交指数 (OCI)≥4。可以初步评定马雄杜鹃繁育系统是异交且自交亲和型, 并要有传粉者 (表 3)。

2.2 马雄杜鹃的访花昆虫种类及其活动规律观察

马雄杜鹃的访花昆虫主要有两种, 一类是蝇类, 另一类是蜂类 (东方蜜蜂 *Apis cerana Fabricius* 为主)。蝇类表现为在马雄杜鹃的花冠边缘

处停留, 身体并没进入花中, 故此与柱头不发生接触, 在没有干扰的情况下约是停留 12 s, 一般情况下只停留 5~8 s; 而蜂类则钻入马雄杜鹃花朵并且到达花柱的底部, 停留时间为 8~15 s; 蜂类在这样的采集方式下, 花粉都会在蜂类的脚部和腹部有沾染, 所以推测东方蜜蜂应为马雄杜鹃的有效传粉者 (图 2)。通常在早上 10:00 以后, 随着气温升高, 访花昆虫开始增加, 在中午 12:00 到下午 15:00 的时候最多, 下午 15:00 以后, 访花昆虫逐渐减少。

表 3 马雄杜鹃的花部特征
Tab. 3 Flower morphology of *R. maxiongense*

测量指标 measured indexes	<i>n</i>	Min./mm	Max./mm	mean±SD/mm
花冠直径 corolla diameter	30	40.28	59.63	48.40±5.66
雄蕊长 stamen length	30	10.91	19.94	18.03±3.22
雌蕊长 pistil length	30	16.05	25.52	20.42±2.29
子房长 ovary length	30	4.54	6.90	5.65±0.68
子房宽 daughter room width	30	2.78	3.67	3.08±0.21



图 2 马雄杜鹃的访花昆虫
Fig. 2 Pollinator of *R. maxiongense*

2.3 人工授粉试验

自然状况下, 结实率为 57.14%; 开花前套袋不去雄, 隔离花粉传播者的结实率为 0, 表明马雄杜鹃的生殖需要传粉者。人工同株异花授粉可以结实, 但结实率仅为 24.28%。人工异株异花授粉结实率为 17.14%。由于去雄后套袋且不授粉处理的结果率为 0, 则说明了马雄杜鹃是不存在无融合生殖现象。又因为去雄套网的结实率为 0, 则马雄杜鹃风媒授粉的概率为 0。杂交套袋试验中, 其与露珠杜鹃杂交结实率最高为 22.86%, 而与羊躑躅杜鹃杂交率最低为 2.86% (表 4)。

2.4 每果实种子数量、种子千粒重和萌发试验

自然条件下, 平均每颗果实所有种子数为 (1 282.50±199.24) 粒且最多; 而其种子千粒重 (382.00±5.59) mg 也为最重。平均每颗果实所有种子数最少的为马雄杜鹃×羊躑躅杜鹃的 20.5

粒; 且其种子千粒重 9.10 mg 也为最轻。通过 SPSS 软件处理 ($P=0.05$) 分析得出 (表 4): 自然对照的果实平均种子数分别和去雄套袋同/异株授粉存在显著差异; 自然对照的果实平均种子数分别和 3 组杂交套袋组合都存在显著差异; 而同花同株授粉与异株授粉差异不显著; 杂交套袋 (马雄杜鹃×大白杜鹃) 和杂交套袋 (马雄杜鹃×马缨杜鹃) 差异不显著。自然对照的果实千粒重分别和去雄套袋同/异株授粉存在显著差异; 自然对照的果实千粒重分别和 3 组杂交套袋组合都存在显著差异; 而同花同株授粉和异株授粉差异不显著; 杂交套袋 (马雄杜鹃×大白杜鹃) 和杂交套袋 (马雄杜鹃×马缨杜鹃) 存在显著差异。萌发率则是随着种子千粒重增大而升高的, 萌发率最高的是自然对照 (69%), 最低为马雄杜鹃×羊躑躅杜鹃 (15.4%)。

表 4 人工授粉试验结果和种子萌发率比较
Tab. 4 Comparison of the artificial cross results and the geminate rates

项目 items	试验个数 number of experiments	膨大个数 number of expanded	实际结果实个数 number of fruits	结实率/% fruit rates	每颗果实内平均种子数/粒 average seed numbers of per capsule	千粒重/mg 1 000-grain weight	萌发率/% germinate rate
自然对照 natural control	70	49	40	57.14	1 282.50±199.24 a	382.00±5.59 a	69.00
不去雄套袋 no emasculation bagging	70	28	0	0	0	0	0
去雄套袋不授粉 emasculation bagging no pollination	70	42	0	0	0	0	0
去雄套网 emasculation set net	70	28	0	0	0	0	0
去雄套袋同株异花授粉 emasculation bagging geitonogamy	70	42	17	24.28	1 162.25±123.42 b	371.40±8.79 b	65.00
去雄套袋异株授粉 emasculation bagging pollination	70	35	12	17.14	1 089.50±71.85 b	363.40±8.26 b	63.00
马雄杜鹃×大白杜鹃 <i>R. maxiongense</i> × <i>R. decorum</i>	70	33	8	11.43	419.50± 88.66 d	304.60±6.50 c	38.67
马雄杜鹃×露珠杜鹃 <i>R. maxiongense</i> × <i>R. irroratum</i>	70	40	16	22.86	889.50±56.66 c	296.00±3.74 c	38.10
马雄杜鹃×羊躑躅杜鹃 <i>R. maxiongense</i> × <i>R. molle</i>	70	13	2	2.86	20.50	91.00	15.40
马雄杜鹃×马缨杜鹃 <i>R. maxiongense</i> × <i>R. delavayi</i>	70	26	7	10.00	428.75±45.15 d	271.40±11.72 d	22.20

3 讨论

3.1 影响访花者行为的因素和有效传粉者

植物花部分有两个特征: 花部构成和花的开放式样^[23]。花部构成是指花的颜色、结构、香气等单花的所有特征; 花的开放式样则是指某一时段花的大小、开花的数目等^[24]。本研究结果表明: 东方蜜蜂是马雄杜鹃的主要访花昆虫, 而马

雄杜鹃的筒状漏斗形花冠与东方蜜蜂的体型相似, 这就便于东方蜜蜂在花朵内部开展传粉作业。马雄杜鹃的花序簇生且花朵的密度大, 这也有利于传粉者在各花序间的移动, 所以马雄杜鹃不可避免地会发生自花或同株异花传粉, 这个结果也证实了前人的研究^[25]。

开花植物与传粉动物之间的长期协作使开花

植物与传粉动物之间形成了相互有利的关系。由于访花昆虫所访的花与飞行行为不同,使其访花频率不同,从而使得植物传粉效果也不一样^[26]。蝇类表现为在马雄杜鹃的花冠边缘处停留,身体并未进入花中,无法有效接触柱头,对传粉贡献不大;而蜂类(东方蜜蜂)则钻入马雄杜鹃花朵并且到达花柱的底部,能有效接触柱头,对传粉有贡献,所以推测蜂类应为马雄杜鹃的有效传粉者。

3.2 马雄杜鹃的繁育系统

根据 CRUDEN 的花粉/胚珠比 (P/O) 标准以及 DAFNI 标准,我们认为马雄杜鹃的繁育系统属于兼性异交类型;而马雄杜鹃的人工控制授粉

试验结果则表明了马雄杜鹃自然条件下的结实率较高且所结果实大而饱满(图 3),它的结实率高于人工辅助下的同株异花传粉、异株异花传粉及自花传粉,这可能因为实验所用的花朵柱头都是尚未开花的花朵,此时柱头尚未分泌黏液,可授性较小,而花粉在柱头上停留时间过长,失去活力导致的;根据实验观察,马雄杜鹃的雄、雌蕊虽具有同熟性,但马雄杜鹃开始散粉的时候,柱头还没有黏液,柱头有黏液时,依然在散粉,同一朵花的花粉的最佳活性期与柱头的最佳可授期可能互不相遇,所以推测马雄杜鹃仍然是异花授粉为主。而马雄杜鹃的这些研究结果与前人对杜鹃繁育系统研究结果^[5]一致。



注: A、B 为套袋实验子房膨大状况; C 为自然条件下子房膨大状况。

Note: A, B for bagging experiment ovary swelling condition; C for natural conditions room expansion condition.

图 3 马雄杜鹃的子房膨大比较

Fig. 3 Comparison of ovary enlargement of *R. maxiongense*

3.3 人工杂交授粉实验

张长芹等^[3]研究表明:杜鹃花属之中不同亚属间杂交不育,同亚属间杂交亲和力强。这 4 个杂交组合中,母本马雄杜鹃和父本马缨杜鹃、露珠杜鹃、大白杜鹃,同属于常绿杜鹃亚属 (Subgen. *Hymenanthes*) 常绿杜鹃组 (Sect. *Ponticum*)。其中,马雄杜鹃和露珠杜鹃属于露珠杜鹃亚组 (Subsect. *Irrorata*),马缨杜鹃属于树形杜鹃亚组 (Subsect. *Arborea*),大白杜鹃属于云锦杜鹃亚组 (Subsect. *Fortunea*),而父本羊躑躅亲缘关系最远,属于羊躑躅亚属 (Subgen. *Pentanthera*)。结果显示:马雄杜鹃×露珠杜鹃的结实率最高,二者亲缘关系最近;马雄杜鹃×大白杜鹃、马雄杜鹃×马缨杜鹃的结实率次之,三者同属于常绿杜鹃组不同亚组;马雄杜鹃×羊躑躅的结实率最低,二者亲缘关系最远。这与张长芹等的研究结果一致。

每果实种子数、千粒重、萌发率比较的结果

表明:与自然状态相比较,以马雄杜鹃为母本的 4 个杂交组合结实率均不高,这可能和同种异花授粉的原因相同,母本柱头的最佳可授期与父本花粉的最高活力时间不一致,也可能是由于杜鹃花种间杂交存在着不亲和障碍^[27]。杂交种子的萌发率与千粒重成正相关的关系,这与我们前期的研究结果^[23]一致。

综上,马雄杜鹃的繁育系统为兼性异交类型,在自然状态下,有效的传粉昆虫为东方蜜蜂,二者达到较好的协同进化效果,自然结实率较高,不存在自交衰退的可能性。由于其所在地已经被开发为风景区,可能存在人为破坏情况。本研究结果可为以后的引种与栽培、不同种间的杂交育种工作,提供一定的研究基础和应用价值。

[参考文献]

[1] WYATT R. Pollinator-plant interactions and the evolu-

- tion of breeding systems [M]. Orlan-do: academy press, 1983: 51.
- [2] 高则睿, 张长芹, 韩智强, 等. 片断化生境中滇桐传粉生物学和繁育系统[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2217. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2012.0348](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2012.0348).
- [3] 白天, 关文灵, 宋杰, 等. 锈叶杜鹃的开花特性及繁育系统研究[J]. 西部林业科学, 2014(1): 47. DOI: [10.16473/j.cnki.xblykx1972.2014.01.017](https://doi.org/10.16473/j.cnki.xblykx1972.2014.01.017).
- [4] NG S C, CORLETT R T. Comparative reproductive biology of the six species of *Rhododendron* (Ericaceae) in Hong Kong, South China[J]. Canadian Journal of Botany, 2000, 78(2): 221.
- [5] 张长芹, 冯宝钧, 吕元林. 杜鹃花属的杂交育种研究[J]. 植物分类与资源学报, 1998, 20(1): 94.
- [6] 田晓玲, 马永鹏, 张长芹, 等. 杜鹃花繁殖生物学研究进展[J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2011, 35(3): 124. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2006.2011.03.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2006.2011.03.026).
- [7] 边才苗, 金则新. 云锦杜鹃的开花动态与繁育系统研究[J]. 广西植物, 2005, 25(2): 169. DOI: [10.3969/j.issn.1000-3142.2005.02.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3142.2005.02.020).
- [8] 张敬丽, 张长芹, 吴之坤, 等. 探讨种间传粉在杜鹃花属自然杂交物种形成中的作用[J]. 生物多样性, 2007(06): 658. DOI: [10.3321/j.issn:1005-0094.2007.06.013](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-0094.2007.06.013).
- [9] 田晓玲. 大喇叭杜鹃繁殖生物学研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [10] STOUT J C. Does size matter? Bumblebee behaviour and the pollination of *Cytisus scoparius* L. (Fabaceae)[J]. Apidologie, 2000, 31(1): 129.
- [11] STOUT J C. Pollination of invasive *Rhododendron ponticum* (Ericaceae) in Ireland[J]. Apidologie, 2007, 38(2): 198. DOI: [10.1051/apido:2006071](https://doi.org/10.1051/apido:2006071).
- [12] ESCARAVAGE N, WAGNER J. Pollination effectiveness and pollen dispersal in a *Rhododendron ferrugineum* (Ericaceae) population[J]. Plant Biology, 2004, 6(5): 606. DOI: [10.1055/s-2004-821143](https://doi.org/10.1055/s-2004-821143).
- [13] ONO A, DOHZONO I, SUGAWARA T. Bumblebee pollination and reproductive biology of *Rhododendron semibarbatum* (Ericaceae)[J]. Journal of Plant Research, 2008, 121(3): 319. DOI: [10.1007/s10265-008-0155-y](https://doi.org/10.1007/s10265-008-0155-y).
- [14] JAIN A, PANDIT M K, ELAHI S, et al. Reproductive behaviour and genetic variability in geographically isolated populations of *Rhododendron arboreum* (Ericaceae)[J]. Current Science, 2000, 79(9): 1377.
- [15] WHEELWRIGHT N T, ZINK A G. Pollinator limitation, autogamy and minimal inbreeding depression in insect-pollinated plants on a Boreal Island[J]. American Midland Naturalist, 2006, 155(1): 19.
- [16] ZHANG C Q, PATERSON D. *Rhododendron maxion-gense* (Ericaceae), a new species from Yunnan, China[J]. Novon, 2003, 13(1): 156.
- [17] 何俊蓉, 袁宁, 吴洁, 等. 高山杜鹃组织培养研究现状[J]. 四川林业科技, 2008, 29(4): 52. DOI: [10.3969/j.issn.1003-5508.2008.04.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-5508.2008.04.009).
- [18] DAFNI A. Pollination ecology: a practical approach[J]. Brittonia, 1992, 46(2).
- [19] 陈香, 胡雪华, 肖宜安, 等. 紫茉莉的花部综合特征与繁育系统[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1653. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2008.0312](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2008.0312).
- [20] 王瑞文. 紫薇开花生物学特性及杂交育种的初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [21] 郑硕理, 易陈燃, 刘巧, 等. 云南几种杜鹃杂交育种初探[J]. 云南农业大学学报 (自然科学), 2016, 31(6): 1052. DOI: [10.16211/j.issn.1004-390X\(n\).2016.06.013](https://doi.org/10.16211/j.issn.1004-390X(n).2016.06.013).
- [22] CRUDEN R W. Pollen-ovule ratios: a conservative indicator of breeding systems in flowering plants[J]. Evolution, 1977, 31(1): 32.
- [23] BARRETT S C, HARDER L D. Ecology and evolution of plant mating[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1996, 11(2): 73.
- [24] 黄双全, 郭友好. 传粉生物学的研究进展[J]. 科学通报, 2000, 45(3): 225.
- [25] 赖家业, 潘春柳, 覃文更, 等. 单性木兰花部综合特征及其传粉适应性[J]. 云南植物研究, 2007, 29(3): 303. DOI: [10.3969/j.issn.2095-0845.2007.03.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0845.2007.03.008).
- [26] 杜巍, 王帅, 王满困, 等. 谁是腊梅的主要传粉者: 昆虫行为与传粉作用[J]. 生物多样性, 2012, 20(3): 400.
- [27] WILLIAMS E G. Pollination sub-systems distinguished by pollen tube arrest after incompatible interspecific crosses in *Rhododendron* (Ericaceae)[J]. Journal of Cell Science, 1982, 53(2): 255.