

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201609011

引文格式: 耿兴敏, 赵红娟, 吴影倩, 等. 野生杜鹃杂交亲和性及适宜的评价指标 [J]. 广西植物, 2017, 37(8):979-988

GENG XM, ZHAO HJ, WU YQ, et al. Cross-compatibility of wild *Rhododendron* and the effective evaluation indicators [J]. Guihaia, 2017, 37(8):979-988

野生杜鹃杂交亲和性及适宜的评价指标

耿兴敏*, 赵红娟, 吴影倩, 张月苗

(南京林业大学 风景园林学院, 南京 210037)

摘要: 以映山红和马银花为母本, 映山红亚属、羊躑躅亚属、杜鹃亚属、常绿杜鹃亚属以及马银花亚属的 5 个亚属 16 个中国野生杜鹃种为父本进行杂交授粉, 统计子房膨大率、坐果率和种子萌发率, 分析杜鹃属植物远缘杂交的亲合性, 探讨其杂交亲和性适宜的评价指标。结果表明: 映山红作为母本, 与同亚属的杜鹃杂交亲和性较好, 与其它亚属的杜鹃种的杂交亲和性存在显著的亚属间和种间差异; 而马银花作为母本, 与同亚属的西施花进行杂交, 未获得杂交果实和种子, 但与杜鹃其它亚属种的杂交, 部分杂交组合显示出较好的杂交亲和性。这一结果表明, 映山红作为母本, 与马银花相比, 有着较好的杂交亲和性, 并且杜鹃属植物的杂交亲和性与目前杜鹃分类体系中的亲缘关系并没有直接关系。进一步的数据分析表明, 子房膨大率与坐果率、坐果率与蒴果平均种子数之间呈显著正相关, 但子房膨大率与果实内种子数无直接相关性; 花粉活力(大于 15%)、父母本花柱长度比(在 0.50~2.12 范围内)与子房膨大率等亲和性指标无显著相关性。

关键词: 杜鹃, 杂交亲和性, 结实性, 评价指标

中图分类号: Q949.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2017)08-0979-10

Cross-compatibility of wild *Rhododendron* and the effective evaluation indicators

GENG Xing-Min*, ZHAO Hong-Juan, WU Ying-Qian, ZHANG Yue-Miao

(College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Wild *Rhododendron* species are mostly distributed in high mountains, they favor cold environmental conditions, and high temperature has been the primary obstacle to cultivate them in most cities of China. In this study, *R. simsii* and *R. ovatum* with higher tolerance to heat stress were used as female parents, and crossed with sixteen wild *Rhododendron* species from subgen. *Tsutsusi*, subgen. *Pentanthra*, subgen. *Rhododendron*, subgen. *Hymenanthus* and subgen. *Azaleastrum* in order to breed new varieties with stronger heat resistance and higher ornamental value. The ovary-swelling rate, fruit-bearing rate and germination rate of hybrid seeds were investigated, the cross-compatibility among wild *Rhododendron* species and the effective evaluation indicators of cross-compatibility were discussed according to ovary-swelling rate, fruit-bearing rate and germination rate of hybrid seeds. The results showed that *R. simsii* as female par-

收稿日期: 2016-11-08 修回日期: 2017-01-09

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程项目 (PAPD) [Supported by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)].

作者简介: 耿兴敏 (1976-), 女, 江苏徐州人, 博士, 副教授, 研究方向为园林植物种质创新与抗性生理, (E-mail) xmgeng76@163.com。

* 通信作者

ent had higher cross-compatibility than *R. ovatum*. When *R. simsii* was crossed with other species from the same subgenus, the cross-compatibility was higher. However, when *R. simsii* was crossed with the male parents from different subgenus, the cross-compatibility of these different cross combinations was obviously different. On the other hand, when *R. ovatum* was used as female parent, the hybridization affinity was not affected heavily by phylogenetic relationship. *R. ovatum* was crossed with *R. ellipticum* from the same subgenus, ovary-swelling rate was 43.4%, but fruit-bearing was not found, but when it was crossed with other species from different subgenera, some cross combinations had better cross-compatibility. Further data analysis indicated that there were positive correlations between ovary-swelling rate and fruit-bearing rate, between fruit-bearing rate and the number of seeds per capsule, but there was not significant correlation between ovary-swelling rate and the number of seeds per capsule. No direct connections were found between pollen viability (above 15%), SLR (male/female style length ratio) (0.50–2.12) and cross affinity.

Key words: *Rhododendron*, cross-compatibility, fruitfulness, evaluating indicator

中国野生杜鹃花资源丰富,占世界杜鹃花资源的半数以上(方瑞征,1996)。但是,我国对其资源利用及种质创新方面的研究还很落后,园艺栽培品种总数不到400个(刘晓青等,2011)。主要栽培品种大多引自国外,自己培育的新品种很少,到2004年止,仅有34个品种进行了登记(张艳红,2007;张长芹等,2002;张长芹等,2004),而国外登记的杜鹃花新品种已达到28 000个(Leslie, 2004)。全球杜鹃花产业的种质资源利用率为12.0%~15.0%,我国仅为8.7%~12.2%,这种差距与我国丰富的杜鹃资源极不相称(吴荭等,2013)。因此,保护和开发利用我国现有的资源,推进我国杜鹃品种开发和产业发展迫在眉睫,而杂交育种是培育新品种最常用、最有效的方法之一。

张长芹等(1998)的研究表明,二倍体与二倍体的杜鹃花杂交亲和力强,而与多倍体的杜鹃花杂交无亲和性。杜鹃的杂交亲和性与杜鹃的系统分类有一定相关性,同亚属不同亚组之间二倍体种间的杜鹃花杂交亲和力强,不同亚属之间的杜鹃花种间杂交不育。但也有研究表明,杜鹃杂交亲和性与杜鹃的分类地位没有明显相关性(Williams et al, 1982)。刘晓青等(2010)的研究发现,杜鹃花品种(种)间杂交的结实率高低与花色、株型和瓣型没有明显的关系,但与品种(种)间的亲缘关系密切相关。Williams & Rouse (1990)的研究则认为,杂交受精成功与否与父母本的花柱长度比(male/female style length ratio, SLR)有关,Yamaguchi et al (1985)的研究认为,选择大花品种作父本要好于小花品种。一般有鳞杜鹃和无鳞杜鹃、常绿种和落叶种的种间杂交困难(余树勋,1992),但有鳞杜鹃与无鳞杜鹃杂交、常绿杜鹃与落叶杜鹃杂交都有成功的报道。杜鹃的正反杂交(刘晓青等,

2010)、父本花粉采集地点的差异(Okamoto et al, 2006)也会影响杂交亲和性,母株的栽培条件直接影响着杂交果实的纵横径大小(解玮佳等,2016)。但是这些育种研究的杂交亲本主要是分布海拔较高的高山杜鹃,选育的新品种在国内大多数地区只能温室栽培,用于室内陈设。

本研究以培育花色丰富、观赏价值高、适应性强的杜鹃新品种为育种目标,以分布在低海拔地区、广泛栽培的映山红(*Rhododendron simsii*)、马银花(*R. ovatum*)为母本,以满山红(*R. mariesii*)、羊躑躅(*R. molle*)、睫毛杜鹃(*R. ciliatum*)、马缨杜鹃(*R. delavayi*)、西施花(*R. ellipticum*)等16个花大色艳的野生杜鹃为父本,配置杂交组合。在我们前期实验中,以映山红和锦绣杜鹃为母本,与杜鹃亚属、常绿杜鹃亚属、马银花亚属以及映山红亚属的12个中国野生杜鹃杂交,发现映山红作母本,杂交亲和性较锦绣杜鹃好;且映山红与不同亚属、同亚属不同种杂交时存在显著差异(耿兴敏等,2013)。本研究在前期实验的基础上,继续扩大杂交范围,分析杜鹃属植物的亲和性,探讨花柱长度比、花粉活力等与亲和性的关系,并对杂交亲和性指标评价展开讨论。为今后的杜鹃育种研究杂交亲本的选择提供参考依据,加快我国杜鹃花的育种进程,促进野生杜鹃的开发利用。

1 材料与方法

1.1 材料

以南京地区栽植的映山红(*Rhododendron simsii*) (映山红亚属映山红组)和马银花(*R. ovatum*) (马银花亚属马银花组)为母本,不同地区

采集的 5 个亚属 16 个种的杜鹃花粉为父本(表 1)(杜鹃植物的分类参照《中国植物志》中的分类系统),进行杂交授粉。

1.2 方法

1.2.1 花粉的保存及活力测定 分别于 2012 年和 2013 年杜鹃开花期在庐山(江西省)、昆明(云南省)和贵阳(贵州省)等地进行花粉采集。根据张超仪和耿兴敏(2012)的报道,杜鹃花粉 -20°C 保存效果优于 4°C 和 -80°C 。因此本研究参照其方法,将采集的花粉放在室内通风、阴凉条件下 24 h 后,置于冰箱中 -20°C 保存。在 2013 年杂交授粉实验前, 37°C 温水解冻,采用 MTT 染色法进行花粉活力测定。在双孔凹型载玻片孔内滴入 0.1 mL 培养液,将充分混合的花粉均匀点入培养液,在 10 倍显微镜下观察并统计花粉活力,每处理统计 10 个视野,每个视野花粉不少于 50 粒,至少重复 3 次。

1.2.2 杂交授粉、果实采集及播种 2013 年杜鹃母本植株开花前 2~3 d 对母本去雄,并对柱头套袋以免被其它花粉污染,于次日 09:00—12:00 进行常规人工授粉,各组合授粉不少于 10 朵(基本为 20~30 朵),连续授粉 2 d,授粉后继续套袋,第 7 天去除袋子。授粉 2 个月后,统计子房膨大率(子房膨大数/授粉花朵数 $\times 100\%$)。授粉 6 个月后,收集自然成熟蒴果,用游标卡尺测量每个果实的大小,记录坐果率(坐果数/授粉花朵数 $\times 100\%$)和种子数/蒴果。然后直接播种于穴盘中(杜鹃种子无休眠特性,可直接播种),基质为泥炭土,并在上面铺一层苔藓。穴盘置于玻璃温室内,温度保持在 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$,自然采光。90 d 后,统计各杂交组合种子萌发率(萌发种子数/播种数 $\times 100\%$)。

2 结果与分析

2.1 花粉活力测定

杂交所用花粉,在授粉前均进行了花粉活力测定,结果如表 1 所示,花粉活力在 $15.6\%\sim 90.8\%$ 之间,当年采集的花粉活力均在 70%以上。部分花粉在 -20°C 保存 1 a 后,花粉活力显著下降。不同杜鹃种花粉的耐贮藏能力不同,如大字杜鹃、满山红及红滩杜鹃花粉在经过了 1 a 贮藏之后,活力仍在 60%以上,而粗柄杜鹃和睫毛杜鹃花粉在经过了 1 a

贮藏后,活力在 15%左右。

在授粉与花粉采集时对父、母本花柱长度进行测定,其花柱长度在 $1.78\sim 5.59\text{ cm}$,另外,在表 1 中未列出的母本映山红 1、2 的花柱长度分别为 3.53 cm 和 3.84 cm ;马银花花柱长度为 2.64 cm 。

2.2 杂交亲和性分析

2.2.1 映山红(母本)与其它杜鹃种杂交亲和性 映山红与同亚属的大字杜鹃、满山红杂交,坐果率分别为 77.3%和 50.0%,蒴果平均种子数分别为 202 和 142,种子萌发率分别为 36%和 37.6%,亲和性较高。与不同亚属的羊躑躅杂交,坐果率为 55.6%,蒴果较小,蒴果内平均种子数为 74,播种后未见萌发。映山红与杜鹃亚属杜鹃组的 4 种杜鹃杂交,其中与基毛杜鹃、江西杜鹃杂交后,坐果率仅分别为 10.5%和 4.5%,种子播种后也未见萌发;与粗柄杜鹃、睫毛杜鹃杂交,授粉 2 个月后子房膨大,尤其是与粗柄杜鹃的杂交,子房膨大率在 80%以上,但在后期发育不良,未能坐果。与常绿杜鹃亚属杜鹃杂交亲和性也因父本的不同而显著不同,其中与马缨杜鹃、云锦杜鹃杂交亲和性较好,坐果率分别为 17.6%和 6.7%,蒴果平均种子数分别为 41 和 20,种子萌发率分别为 21.1%和 5%;其次为红滩杜鹃,获得了一定量的果实和种子,但种子没有萌发;与猴头杜鹃、露珠杜鹃、迷人杜鹃杂交亲和性较差,子房在初期也有所膨大,但在后面的生长过程中全部脱落。映山红与马银花亚属马银花组的马银花杂交,授粉 2 个月子房未见膨大。

不同母株与同一父本的大字杜鹃、满山红、羊躑躅等杂交时,或同一母本,与产地不同的马缨花、云锦杜鹃等杂交时,其子房膨大率、坐果率、蒴果平均种子数和种子萌发率都有差异。

2.2.2 马银花(母本)与其它杜鹃种杂交亲和性

马银花与各杜鹃杂交亲和性因父本来自于不同亚属、同亚属的不同组、同亚属同组的不同种而有差异。马银花与同亚属不同组的西施花杂交 2 个月后的子房膨大率为 43.4%,但在后面的生长过程中全部脱落,未获得果实和种子。与映山红亚属的满山红杂交,子房膨大率、坐果率和蒴果平均种子数分别为 81.5%、59.3%和 601,但种子未见萌发。马银花与杜鹃亚属杜鹃组的 4 种杜鹃分别杂交,与粗柄杜鹃、江西杜鹃、睫毛杜鹃杂交均获得一定量的种子,

表 1 父本实验材料、分类及花粉萌发率

Table 1 Male experimental materials, classification and pollen vitality of *Rhododendron*

分类 Classification	种名 Species	采集地点/时间 Collecting site/Time	花柱长度 Pistil length (cm)	花粉活力 Pollen vitality (%)	
映山红亚属 subgen. <i>Tsutsusi</i>	大字杜鹃 <i>R. schlippenbachii</i>	庐山/2012 年 5 月 Lu Moutain/May 2012	4.67	65.0	
	满山红 <i>R. mariesii</i>	苏州/2015 年 5 月 Suzhou/May 2015	3.28	61.1	
羊躑躅亚属 subgen. <i>Pentanthera</i>	羊躑躅 <i>R. molle</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	5.47	19.5	
杜鹃亚属 subgen. <i>Rhododendron</i>	粗柄杜鹃 <i>R. pachypodum</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	4.57	16.7	
	江西杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	庐山/2012 年 5 月 Lu Moutain/May 2012	5.59	54.0	
	基毛杜鹃 <i>R. rigidum</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	3.85	51.8	
	睫毛杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	4.94	15.6	
	猴头杜鹃 <i>R. simiarum</i>	庐山/2012 年 5 月 Lu Moutain/May 2012	3.82	46.7	
	常绿杜鹃亚属 subgen. <i>Hymenanthes</i>	红滩杜鹃 <i>R. chihsinianum</i>	庐山/2012 年 5 月 Lu Moutain/May 2012	4.63	61.6
		蝶花杜鹃 <i>R. aberconwayi</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	1.78	26.3
		大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	3.54	23.3
		露珠杜鹃 <i>R. irroratum</i>	贵阳/2013 年 3 月 Guiyang/March 2013	—	78.2
		马缨杜鹃 1 <i>R. delavayi</i> 1	昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	3.19	23.4
		马缨杜鹃 2 <i>R. delavayi</i> 2	贵阳/2013 年 3 月 Guiyang/March 2013	3.19	75.2
		迷人杜鹃 <i>R. calophytum</i>	贵阳/2013 年 3 月 Guiyang/March 2013	—	82.7
云锦杜鹃 1 <i>R . fortune</i> 1		昆明/2012 年 4 月 Kunming/April 2012	—	22.7	
云锦杜鹃 2 <i>R . fortune</i> 2	庐山/2012 年 5 月 Lu Moutain/May 2012	—	65.7		
马银花亚属 subgen. <i>Azaleastrum</i>	西施花 <i>R. ellipticum</i>	贵阳/2013 年 3 月 Guiyang/March 2013	—	90.8	

注：—表示未获得数据。下同。
Note: — means data was not obtained. The same below.

但仅与江西杜鹃杂交所获得的种子有萌发,萌发率较低;而与基毛杜鹃杂交,子房在初期有所膨大,但在后面全部脱落。马银花与常绿杜鹃亚属常绿杜鹃组的 7 种杜鹃杂交,子房在初期均有膨大,膨大率在 29%~86.7%之间,除猴头杜鹃外,均获得一定量的果实和种子,坐果率在 6.5%~52.7%之间,蒴果平均种子数在 149~1 094之间,但种子都未萌发。

2.3 杂交亲和性评价指标相关性分析

2.3.1 以映山红为杂交母本时亲和性评价指标之间的相关性 以映山红 1 为杂交母本时,子房膨大率、坐果率、蒴果平均种子数与种子萌发率之间的相关性分析见表 4。表 4 结果显示,子房膨大率与坐果率之间存在极显著的正相关关系,相关系数为 0.629,即坐果率随着子房膨大率的增加而增加,但

表 2 映山红与其它杜鹃种的杂交亲和性

Table 2 Cross-compatibility of *Rhododendron simsii* crossed with other *Rhododendron* species

杂交亲本 Cross parents		父母本 花柱 长度比 SLR	子房膨大率 Ovary-swelling rate (%)	坐果率 Fruit-bearing rate (%)	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/ 蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate (%)
母本 Mother parent	父本 Father parent						
映山红 1 <i>Rhododendron simsii</i> 1	大字杜鹃 <i>R. schlippenbachii</i>	1.22	95.5	77.3	1.88	202	36
	满山红 <i>R. mariesii</i>	0.85	100	50	1.93	142	37.6
	羊躑躅 <i>R. molle</i>	1.42	100	55.6	2.07	74	0
	粗柄杜鹃 <i>R. pachypodum</i>	1.19	81.8	0	—	—	—
	江西杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	1.46	90.9	4.5	2.32	64	4.7
	基毛杜鹃 <i>R. rigidum</i>	1.00	47.4	10.5	2.00	94	1.1
	睫毛杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	1.29	9.5	0	—	—	—
	猴头杜鹃 <i>R. simiarum</i>	0.99	19.7	0	—	—	—
	红滩杜鹃 <i>R. simiarum</i>	1.21	65	25	2.20	33	0
	露珠杜鹃 <i>R. irroratum</i>	—	36.4	0	—	—	—
	马缨杜鹃1 <i>R. delavayi</i> 1	0.83	35.3	17.6	2.20	41	21.1
	马缨杜鹃2 <i>R. delavayi</i> 2	—	34	24	2.17	78	31.4
	迷人杜鹃 <i>R. calophytum</i>	—	48.5	0	—	—	—
	云锦杜鹃1 <i>R. fortunei</i> 1	1.37	66.7	6.7	2.22	20	5
	云锦杜鹃2 <i>R. fortunei</i> 2	1.07	76.2	14.3	2.05	84	0
	西施花 <i>R. ellipticum</i>	—	0	0	—	—	—
映山红 2 <i>R. simsii</i> 2	大字杜鹃 <i>R. schlippenbachii</i>	1.32	100	63.6	1.88	296	20.6
	满山红 <i>R. mariesii</i>	0.93	100	86.7	1.89	181	2.6
	羊躑躅 <i>R. molle</i>	1.55	100	84.6	2.14	91	0.4
	江西杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	1.58	100	25	2.16	26	0
	基毛杜鹃 <i>R. rigidum</i>	1.09	81.8	45.5	2.17	43	0
	睫毛杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	1.40	81.8	0	—	—	—
	猴头杜鹃 <i>R. simiarum</i>	1.08	100	0	—	—	—
	红滩杜鹃 <i>R. simiarum</i>	1.31	94.1	0	—	—	—
	蝶花杜鹃 <i>R. aberconwayi</i>	0.50	100	50	2.29	31	0
	马缨杜鹃1 <i>R. delavayi</i> 1	0.90	78.6	0	—	—	—
	云锦杜鹃1 <i>R. fortunei</i> 1	1.17	85.7	28.6	2.13	75	0
	云锦杜鹃2 <i>R. fortunei</i> 2	1.49	75	0	—	—	—

子房膨大率与蒴果长宽比、蒴果平均种子数以及种子萌发率之间无显著相关性;坐果率与蒴果长宽比呈现明显的负相关关系,而与蒴果平均种子数呈现极显著的正相关关系,相关系数分别为-0.720 和 0.768,即蒴果长宽比随着坐果率的增加而减小,蒴果平均种子数随着坐果率的增加而增加,同时也表明了蒴果长宽比与蒴果平均种子数呈现负相关关系;蒴果平均种子数与种子萌发率之间存在显著的

表 3 马银花与其它杜鹃种的杂交亲和性

Table 3 Cross-compatibility of *Rhododendron ovatum* crossed with other *Rhododendron* species

杂交亲本 Cross parents		父本/母本 花柱 长度比 SLR	子房膨大率 Ovary-swelling rate (%)	坐果率 Fruit-bearing rate (%)	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate (%)
母本 Mother parent	父本 Father parent						
马银花 <i>Rhododendron ovatum</i>	满山红 <i>R. mariesii</i>	1.24	81.5	59.3	1.17	601	0
	粗柄杜鹃 <i>R. pachypodum</i>	1.73	61.8	23.5	1.19	446	0
	江西杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	2.12	76.0	16	1.19	289	4.1
	基毛杜鹃 <i>R. rigidum</i>	1.46	17.2	0	—	—	—
	睫毛杜鹃 <i>R. ciliatum</i>	1.87	52.9	52.9	1.15	1181	0
	猴头杜鹃 <i>R. simiarum</i>	1.44	30.4	0	—	—	—
	红滩杜鹃 <i>R. simiarum</i>	1.75	29	6.5	1.23	149	0
	大白杜鹃 <i>R. decorum</i>	1.34	54.8	41.9	1.15	665	0
	露珠杜鹃 <i>R. irroratum</i>	—	86.7	46.7	1.17	868	0
	马缨杜鹃 2 <i>R. delavayi</i> 2	—	53.1	26.5	1.15	1079	0
	迷人杜鹃 <i>R. calophytum</i>	—	86.0	52.7	1.15	1094	0
	云锦杜鹃 2 <i>R. fortunei</i> 2	1.99	77.4	19.4	—	729	0
	西施花 <i>R. ellipticum</i>	—	43.4	0	—	—	—

正相关关系,即种子萌发率也随着蒴果平均种子数的增加而增加。以映山红 2 为杂交母本时得到的结论与以映山红 1 为杂交母本时基本一致。

2.3.2 以马银花为杂交母本时亲和性评价指标之间的相关性 以马银花为杂交母本时,子房膨大率、坐果率、蒴果平均种子数与种子萌发率之间的相关性分析见表 5。表 5 结果显示,子房膨大率与坐果率之间存在极显著的正相关关系,相关系数为 0.713,即坐果率随着子房膨大率的增加而增加,但子房膨大率与蒴果长宽比、蒴果平均种子数以及种子萌发率之间无显著相关性;坐果率与蒴果长宽比呈现显著的负相关关系,而与蒴果平均种子数呈现显著的正相关关系,相关系数分别为 -0.700 和 0.652,即蒴果长宽比随着坐果率的增加而减小,蒴果平均种子数随着坐果率的增加而增加,同时也表明了蒴果平均种子数随着蒴果长宽比的增加而减小,二者呈现负相关关系;以马银花为杂交母本时,蒴果平均种子数与种子萌发率之间无显著性关系。

2.4 花粉活力、父母本花柱长度比与杂交亲和性之间的相关性

采用 SPSS 软件对花粉活力、父母本花柱长度比与子房膨大率、坐果率、种子萌发率等变量进行相关性分析(表 6,表 7)。表 6 和表 7 结果显示,花粉活力(至少在 15%以上时)、父本与映山红、马银花花柱长度比与子房膨大率、坐果率、蒴果平均种子数及种子萌发率之间均无显著性关系,说明花粉活力和父母本花柱长度比对杂交的亲和性影响不大。

3 讨论与结论

在本研究配置的大量杂交组合中,出现①部分杂交组合子房不膨大;②子房膨大,但宿存时间短,子房很快败育;③获得杂交种子(但蒴果内平均种子数存在显著差异),但种子未见萌发;④观察到种子的萌发,但种子萌发率差异显著,这说明杜鹃杂交后分别出现了不同程度的受精前、受精后障碍。第 1 种情况:杂交后子房未见膨大,说明这些杂交组

表 4 以映山红 1 为杂交母本时亲和性评价指标之间的相关性

Table 4 Correlation of evaluation index when *Rhododendron simsii* was used as the female parent

	子房膨大率 Ovary-swelling rate	坐果率 Fruit-bearing rate	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate
子房膨大率 Ovary-swelling rate	1	0.009	0.3	0.164	0.947
坐果率 Fruit-bearing rate	0.629 * *	1	0.019	0.009	0.096
蒴果长/宽 Fruit length/Width	-0.364	-0.720 *	1	0.002	0.206
种子数/蒴果 No. of seeds/Capsule	0.477	0.768 * *	-0.843 * *	1	0.045
种子萌发率 Seed germination rate	0.024	0.555	-0.438	0.644 *	1

注：对角线下方为相关性系数，对角线上方为 P 值；“*”表示在 0.05 水平上显著相关，“* *”表示在 0.01 水平上显著相关。下同。

Note: The data below the diagonal was the correlation coefficient, and that above the diagonal was the value of P ; “*” indicate significant differences ($P\leqslant0.05$); “* *” indicate significant differences ($P\leqslant0.01$). The same below.

表 5 以马银花为杂交母本时亲和性评价指标之间的相关性

Table 5 Correlation of evaluation index when *Rhododendron ovatum* was used as the female parent

	子房膨大率 Ovary-swelling rate	坐果率 Fruit-bearing rate	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate
子房膨大率 Ovary-swelling rate	1	0.006	0.314	0.428	0.6
坐果率 Fruit-bearing rate	0.713 * *	1	0.036	0.041	0.314
蒴果长/宽 Fruit length/Width	-0.379	-0.700 *	1	0.004	0.597
种子数/蒴果 No. of seeds/Capsule	0.283	0.652 *	-0.850 * *	1	0.224
种子萌发率 Seed germination rate	0.189	-0.355	0.205	-0.422	1

表 6 以映山红为杂交母本时花粉活力、父母本花柱长度比与杂交亲和性之间的相关性

Table 6 Correlation between pollen vitality, SLR and cross-compatibility when *Rhododendron simsii* was used as the female parent

		子房膨大率 Ovary-swelling rate	坐果率 Fruit-bearing rate	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate
花粉活力 Pollen vitality	相关性 Correlation	-0.183	-0.003	-0.275	0.481	0.363
	显著性 Significance	0.498	0.992	0.442	0.159	0.303
	N	16	16	10	10	10
父母本花柱 长度比 SLR	相关性 Correlation	0.286	-0.012	0.422	-0.211	-0.474
	显著性 Significance	0.368	0.969	0.258	0.586	0.197
	N	12	12	9	9	9

表 7 以马银花为杂交母本时花粉活力、父母本花柱长度比与杂交亲和性之间的相关性
Table 7 Correlation between pollen vitality, SLR and cross-compatibility when
Rhododendron ovatum was used as the female parent

		子房膨大率 Ovary-swelling rate	坐果率 Fruit-bearing rate	蒴果长/宽 Fruit length/ Width	种子数/蒴果 No. of seeds/ Capsule	种子萌发率 Seed germination rate
花粉活力 Pollen vitality	相关性 Correlation	0.216	-0.133	0.100	0.136	0.008
	显著性 Significance	0.477	0.666	0.798	0.708	0.982
	N	13	13	9	10	10
父母本花柱 长度比 SLR	相关性 Correlation	0.291	-0.207	0.280	-0.065	0.544
	显著性 Significance	0.447	0.593	0.591	0.890	0.207
	N	9	9	6	7	7

合存在受精前障碍,父本花粉管在花柱中的生长受阻,或无法进入子房,或进入子房,而无法完成受精等(Williams et al, 1982;耿兴敏等,2014b)。第 2 种情况:膨大的子房未正常发育,未能获得杂交种子,属于受精后的障碍。在子房败育前进行胚拯救,目前是获得杂交幼苗的有效途径,但杜鹃属远缘杂交,不同自交组合子房败育的时期存在显著差异,大多杂交组合在授粉 5 个月以后发生败育但有些组合在 2 或 3 个月时已败育(Eeckhaut et al, 2007)。第 3 种情况:获得了杂交种子,但不同杂交组合的蒴果内种子数的差异与受精率密切相关。Ureshino et al(2000)发现,授粉 96 h 后,花粉管到达花柱基部的比率很低的组合,其果实内的种子数也很低。Williams & Rouse(1990)研究表明,杂交受精成功与否与父母本的花柱长度比(SLR)有关,当 $SLR < 0.2$ 或 $SLR > 6$ 时,杂交是不会成功的;选择亲本时,使其 SLR 值接近于 1,可提高亲和性。解玮佳等(2016)以此为依据,选择花柱长度比为 0.98 的大白杜鹃与露珠杜鹃进行杂交,证实两者杂交亲和。本研究中杂交父母本的花柱长度比在 0.50~2.12 之间,在这个范围内,未发现杂交亲本的 SLR 值与子房膨大率、坐果率、种子萌发率等亲和性指标有显著相关性。杂交种子未能萌发或萌发率过低,可能与种子的饱满度差、种子形成早期的败育以及未完全成熟等多种因素有关。一般种子越重,越有利萌发,但萌发过程还同时受到环境因素与胚自身活力的影

响(郑硕理等,2016)。40 ℃浸种和适当浓度的 GA_3 浸种处理或许可以提高杜鹃杂交种子的萌发率和发芽势(蔡静如等,2016)。

判断杂交亲和性的直接指标是受精过程完成与否,即胚的形成与否,但胚的检测具有一定难度,特别是胚的发育初期阶段,胚细胞数少,难以检测,因此,有必要选取间接指标(郝瑞娟等,2005)。本研究选取子房膨大率、坐果率和种子萌发率作为间接指标,分别体现了不同时期胚的发育情况以及子房在花托上的宿存时间长短,而蒴果内种子数与受精率有关(Sakai et al, 2008)。本研究通过配置大量的杂交组合以及相关性数据分析,发现子房膨大率与坐果率呈极显著的正相关,但与蒴果内平均种子数和种子萌发率没有相关性。坐果率与蒴果内平均种子数之间呈正相关,但蒴果内平均种子数与发芽率之间的相关性因母本不同有差异。

映山红亚属内杂交,结实率和种子萌发率明显高于映山红与不同亚属杜鹃的杂交,体现出较好的亲和性,这与本课题组以往的研究结果相同(耿兴敏等,2013)。张长芹(1998)通过对杜鹃花属十余年来所做的 59 对杂交组合的实验也发现,同亚属不同亚组之间二倍体种的杜鹃花杂交亲和力强。杜鹃属植物的杂交亲和性与杂交亲本的形态、生长习性(余树勋,1992)及亲缘关系(刘晓青等,2010)密切相关。一般,生态习性和亲缘关系越近,杂交越易成功;形态、生长习性相差太远,如有鳞杜鹃和无

鳞杜鹃、常绿种和落叶种、分布海拔相差很大的种杂交不易成功(余树勋, 1992)。但马银花作为母本, 与同亚属的西施花杂交, 结实率和种子萌发率反而低于其与不同亚属杜鹃的杂交, 以及映山红、马银花与其它亚属杜鹃的杂交存在显著的种间差异, 这说明目前杜鹃分类体系中的亲缘关系并不能完全体现出种间杂交的亲合性, Williams et al (1990)也得出类似的结论。同时, 根据本研究结果可以发现, 作为母本, 映山红的杂交亲和性好于马银花。郑硕理等(2016)也发现, 杂交组合坐果率与母本选择密切相关, 母本亲和性越好坐果率越高。

映山红是落叶、无鳞杜鹃种, 与常绿、有鳞的杜鹃亚属杂交, 部分杂交组合有着很高的子房膨大率, 与常绿杜鹃亚属的种间杂交, 部分组合的杂交亲和性也很好。马银花属于无鳞杜鹃种, 与有鳞的杜鹃亚属种的杂交也获得了膨大的子房。这说明杜鹃属植物常绿与落叶杜鹃、无鳞与有鳞杜鹃的种间杂交也是可行的。Sakai et al (2008)在对常绿杜鹃与落叶杜鹃进行杂交时发现, 常绿杜鹃作为母本的 4 个杂交组合都能获得 100% 的坐果率, 但与本研究不同的是, 3 个落叶杜鹃作为母本的杂交组合都没有获得膨大的子房。杜鹃花属种间正反杂交亲和力和有显著差异(巴春影等, 2014)。母本的选择对杂交结果也有很大影响, 映山红母本植株 1 和植株 2 所配置的大量组合中, 子房膨大率、结实率等都有很大差异。这或许与母本植株的营养状况, 苗龄及生境条件等有关(耿兴敏等, 2014a)。根据表 6 和 7 的数据分析结果, 花粉活力在 15.6% 以上, 均可以用于杂交授粉, 花粉活力的差异对杂交结实率没有显著影响。或许与杜鹃花粉数量多, 受花粉生活力影响小有关。

参考文献:

BA CY, CAO HN, ZONG CW, et al, 2014. Inter-specific cross compatibility of *Rhododendron* in Changbai Mountain [J]. Hubei Agric Sci, 53(14): 3310–3312. [巴春影, 曹后男, 宗成文, 等, 2014. 长白山杜鹃花属种间杂交亲和性的研究 [J]. 湖北农业科学, 53(14): 3310–3312.]

CAI JR, ZHOU LP, WANG H, et al, 2016. Effects of different soaks on germination of four *Rhododendron* hybrid seeds [J]. Chin J Trop Crops, 37(5): 876–880. [蔡静如, 周兰平, 王辉, 等, 2016. 不同浸种处理对 4 种杜鹃花杂交种

子萌发的影响 [J]. 热带作物学报, 37(5): 876–880.]

ECKHAUT T, DE KEYSER E, VAN HUYLENBROECK J, et al, 2007. Application of embryo rescue after interspecific crosses in the genus *Rhododendron* [J]. Plant Cell Tissue Organ Cult, 89: 29–35.

FANG RZ, 1996. Flora of China [M]. Genus *Rhododendron*. Beijing: Science Press: 57(1–2) [方瑞征, 1996. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社: 57(1–2).]

GENG XM, ZHANG CY, LUO FY, et al, 2013. Study on cross fruitfulness of wild *Rhododendron* in China [J]. Jiangsu Agric Sci, 41(2): 159–161. [耿兴敏, 张超仪, 罗凤霞, 等, 2013. 中国野生杜鹃杂交结实性研究 [J]. 江苏农业科学, 41(2): 159–161.]

GENG XM, WU YQ, ZHAO HJ, 2014a. Preliminary study on hybrid embryo rescue of *Rhododendron* [J]. J Yunnan Agric Univ, 29(4): 533–539. [耿兴敏, 吴影倩, 赵红娟, 2014a. 杜鹃杂交幼胚拯救技术的初步研究 [J]. 云南农业大学学报, 29(4): 533–539.]

GENG XM, ZHANG CY, YIN ZF, 2014b. Analysis of pollen tube growth after pollination in some wild *Rhododendron* [J]. J Anhui Univ (Nat Sci Ed), 38(4): 94–101. [耿兴敏, 张超仪, 尹增芳, 2014b. 部分野生杜鹃杂交授粉后花粉管生长状况分析 [J]. 安徽大学学报(自然科学版), 38(4): 94–101.]

HAO RJ, MU D, ZHANG T, 2005. A preliminary research on cross breeding between lily cultivar [J], J NW For Univ, 20(3): 87–89. [郝瑞娟, 穆鼎, 张檀, 等, 2005. 百合品种间杂交的初步研究 [J]. 西北林学院学报, 20(3): 87–89.]

LESLIE AC, 2004. The international *Rhododendron* register & checklist [M]. Great Britain: Royal Horticultural Society.

LIU XQ, SU JL, LI C, et al, 2010. Study on the fruitfulness of hybridization, selfing and open pollination of rhododendron [J]. Acta Agric Shanghai, 26(4): 145–148. [刘晓青, 苏家乐, 李畅, 等, 2010. 杜鹃花杂交、自交及开放授粉结实性研究 [J]. 上海农业学报, 26(4): 145–148.]

LIU XQ, SU JL, LI C, et al, 2011. Bottleneck and countermeasures of *Rhododendron* in dustry development in China [J]. Jiangsu Agric Sci, (3): 14–16. [刘晓青, 苏家乐, 李畅, 等, 2011. 我国杜鹃花产业发展的瓶颈及对策 [J]. 江苏农业科学, (3): 14–16.]

OKAMOTO A, IKEDAK H, SUTO K, 2006. Variation in cross ability among *Rhododendron japonicum* f. *flavum* plants as pollen parents when crossed with evergreen species, *R. Eriocarpum* [J]. J Jpn Soc Hortic Sci, 75(3): 270–272.

SAKAI K, OZAKI Y, URESHINO K, et al, 2008. Interploid crossing overcomes plastome-nuclear genome incompatibility in intersubgeneric hybridization between evergreen and deciduous azaleas [J]. Sci Hort-Amsterdam, 115(3): 268–274.

URESHINO K, KAWAI M, MIYAZIMA I, 2000. Factors of intersectional unilateral cross incompatibility between several evergreen azalea species and *Rhododendron japonicum* f. *flavum* [J]. J Jpn Soc Hortic Sci, 36: 261–265.

- WILLIAMS EG, KNOX RB, ROUSE JL, 1982. Pollination sub-systems distinguished by pollen tube arrest after incompatible interspecies crosses in *Rhododendron* (Ericaceae) [J]. J Cell Sci, 53:255-277.
- WILLIAMS EG, ROUSE JL, 1990. Relationships of pollen size, pistil length and pollen tube growth rates in *Rhododendron* and their influence on hybridization [J]. Sex Plant Reprod, 3:7-17.
- WILLIAMS EG, ROUSE JL, PALSER BF, et al, 1990b. Reproductive biology of *Rhododendron* [J]. Hortic Rev, 12(1):1-67.
- WU H, YANG XM, SHAO HM, et al, 2013. Germplasm resource base for rhododendron horticulture: status, problems and countermeasures [J]. Biodivers Sci, 21(5): 628 - 634. [吴荭,杨雪梅,邵慧敏,等, 2013. 杜鹃花产业的种质资源基础: 现状、问题与对策 [J]. 生物多样性, 21(5): 628-634.]
- XIE WJ, WANG JH, PENG LC, et al, 2016. The compatibility and fruit growth dynamics of the cross between *Rhododendron decorum* and *R. irroratum* [J]. Acta Agric Univ Jiangxi, 38(1): 90-96. [解玮佳,王继华,彭绿春,等, 2016. 大白杜鹃与露珠杜鹃杂交亲和性及其杂交果实发育动态研究 [J]. 江西农业大学学报,38(1): 90-96.]
- YAMAGUCHI S, KUNISHIGE M, TAMURA T, 1985. Inter-specific compatibility in Japanese *Rhododendron* [J]. Bull Veg & Ornam Crop Res Stn Jpn, Ser B, 8:87-97.
- YU SS, 1992. *Rhododendron* [M]. Beijing: The Jindun Publishing House: 102-104. [余树勋,1992. 杜鹃花 [M]. 北京:金盾出版社: 102-104.]
- ZHANG CQ, FENG BJ, LU YL, 1998. Hybridization study of the Genus *Rhododendron* [J]. Acta Bot Yunnan, 20(1): 94-96. [张长芹,冯宝均,吕元林, 1998. 杜鹃花属的杂交育种研究 [J]. 云南植物研究,20(1): 94-96.]
- ZHANG CQ, LUO JF, FENG BJ, 2002. New *Rhododendron* Hybrid—‘Zhaohui’ and ‘Hongyun’ [J]. Acta Hort Sin, 29(3):296. [张长芹,罗吉凤,冯宝均, 2002. 杜鹃花新品种—‘朝晖’和‘红晕’ [J]. 园艺学报,29(3): 296.]
- ZHANG CQ, GAO LM, XUE RG, et al, 2004. A General Review of the Research and conservation statue of Chinese *Rhododendron* [J]. Guangxi Sci, 11(4): 354 - 359, 362. [张长芹,高连明,薛润光,等, 2004. 中国杜鹃花的保育现状和展望 [J]. 广西科学, 11(4): 354 - 359, 362.]
- ZHANG CY, GENG XM, 2012. Comparative study on methods for testing pollen viability of the six species from genus *Rhododendron* [J]. J Plant Sci, 30(1):92-99. [张超仪,耿兴敏, 2012. 六种杜鹃花属植物花粉活力测定方法的比较研究 [J]. 植物科学学报,30(1): 92-99.]
- ZHANG YH, 2007. Research advance of *Rhododendron* propagation [J]. J Anhui Agric Sci, 35(23): 7170 - 7171, 7209. [张艳红, 2007. 我国杜鹃花的繁育研究进展 [J]. 安徽农业科学,35(23):7170-7171,7209.]
- ZHENG SL, YI CR, LIU Q, et al, 2016. Primary study on hybridizationbreeding among several *Rhododendron* species in Yunnan Province [J]. J Yunnan Agric Univ (Nat Sci Ed), 31(6):1052-1057. [郑硕理,易陈燃,刘巧,等, 2016. 云南几种杜鹃杂交育种初探 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版),31(6):1052-1057.]