

## 四种药剂柱头处理对芍药属远缘杂交授粉结实率的影响

郝津藜 董晓晓 袁涛\*

(北京林业大学 园林学院/花卉种质创新与分子育种北京市重点实验室/国家花卉工程技术研究中心/  
城乡生态环境北京实验室/林木花卉遗传育种教育部重点实验室,北京 100083)

**摘要** 为提高芍药属远缘杂交结实率,对3类5个远缘杂交组合进行柱头处理,即:1)牡丹组革质花盘亚组内杂交:‘凤丹白’×‘芳纪’,紫斑牡丹×‘雪映桃花’;2)革质花盘亚组和肉质花盘亚组杂交:紫牡丹×‘日月锦’,卵叶牡丹×黄牡丹;3)牡丹组和芍药组间杂交:紫斑牡丹×‘红艳争辉’。各组合采用4种处理方式:2.0%,3.5%,5.0% KCl溶液处理柱头;1.5%,3.0%,4.5% NaCl溶液处理柱头;25、50和75 mg/L GA<sub>3</sub>处理柱头;花粉培养液处理柱头,比较不同授粉方式对结实率的影响。结果表明:1)KCl溶液效果优于NaCl溶液,3.5% KCl效果最好;2)所有组合结实率最高值均出现在GA<sub>3</sub>处理中,GA<sub>3</sub> 25 mg/L最为稳妥;3)最佳培养液配方为蔗糖100 g/L+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.08 g/L+CaCl<sub>2</sub> 20 mg/L,但花粉培养液处理仅对革质花盘亚组内杂交组合‘凤丹白’×‘芳纪’组合有促进作用。

**关键词** 芍药属;远缘杂交;柱头处理;结实率

中图分类号 S68

文章编号 1007-4333(2019)01-0040-06

文献标志码 A

## Effects of four stigma treatments on the seed-setting rate of *Paeonia* distant hybridization

HAO Jinli, DONG Xiaoxiao, YUAN Tao\*

(School of Landscape Architecture/ Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation and Molecular Breeding/ National Engineering Research Center for Floriculture/Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment/Beijing Laboratory of urban and rural ecological environment, Beijing Forestry University, Beijing 10083, China)

**Abstract** To enhance the compatibility of distant hybridization for improving breeding efficiency, 5 cross combinations of 3 types were set: 1) Leathery flower disc subgroups hybridization: *Paeonia ostii* ‘Fengdan Bai’ × *P. suffruticosa* ‘Hoki’, *P. rockii* × *P. suffruticosa* ‘XueyingTaohua’; 2) Intersubsectional hybridization: *P. delavayi* × *P. suffruticosa* ‘JitsugetsuNishiki’, *P. qiui* × *P. lutea*; 3) Intersectional hybridization: *P. rockii* × *P. lactiflora* ‘HongyanZhenghui’. Each combination was processed in four treatments: KCl solution treatment (2.0%, 3.5% and 5.0% KC, respectively), NaCl solution treatment (1.5%, 3.0% and 4.5% NaCl respectively), GA<sub>3</sub> treatment (25, 50 and 75 mg/L GA<sub>3</sub>, respectively). The stigmas were treated with these pollen culture solutions to compare their effects on seed-setting rate. The result showed that: 1) The effect of KCl solution treatment was better than that of NaCl solution, and the concentration of 3.5% KCl worked the best; 2) The seed-setting rate in each combination all reached the highest in the GA<sub>3</sub> treatments, and the 25 mg/L GA<sub>3</sub> treatment was the most appropriate; 3) The optimum pollen culture solution was: Sucrose 100 g/L + H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.08 g/L + CaCl<sub>2</sub> 10 mg/L, but it was only effective for *Paeonia ostii* ‘Fengdan Bai’ × *P. suffruticosa* ‘Hoki’ cross combination.

**Keywords** *Paeonia*; distant hybridization; treatment of stigma; seed-setting rate

收稿日期: 2018-03-02

基金项目: 风景园林学科一流学科建设(000-111801001)

第一作者: 郝津藜, 硕士研究生, E-mail: 2472271463@qq.com

通讯作者: 袁涛, 教授, 主要从事园林植物资源与育种、繁殖与栽培技术研究, E-mail: yuantao@bjfu.edu.cn

牡丹(*Paeonia suffruticosa* Andr.)是我国的传统名花,素有“花王”之称。我国现有的千余个牡丹品种,约 90%以上是近缘杂交培育的<sup>[1]</sup>。而早在 19 世纪末—20 世纪初,国外便开始进行芍药属的远缘杂交工作,培育出大量表现优良的新品种<sup>[2]</sup>,对我国的牡丹市场造成巨大冲击。

远缘杂交是指不同种间、属间甚至亲缘关系更远的物种之间的杂交。它不但能够丰富物种,而且可以提高植物的抗病性和抗逆性、改良作物品质,还可以用于研究作物起源和进化等。然而,远缘杂交的亲本由于遗传关系相对较远,在杂交过程中通常会出现各种不亲和的现象,导致不能产生后代或杂种后代无法正常繁殖。芍药属远缘杂交指属内 2 个组(牡丹组和芍药组)之间、牡丹组的 2 个亚组(革质花盘亚组和肉质花盘亚组)之间及亚组内种间、亚组间种和品种间的杂交等。杂交不亲和及杂种不育使牡丹远缘杂交难度较大<sup>[3]</sup>。但远缘杂交对花色、花香、花期和抗病性等性状的改良优势突出。Qing 等<sup>[4]</sup>对牡丹品种‘海黄’与日本牡丹品种杂交试验发现,影响杂交结果的 3 个最主要障碍分别是:花粉管生长不正常、受精失败和杂交种子萌发率低,其中前 2 项均为受精前障碍。韩丽晓<sup>[5]</sup>研究发现:革质花盘亚组种间杂交的亲性和性较差,存在明显杂交障碍,正反交结实率有较大差异。郝津藜等<sup>[6]</sup>用黄牡丹为母本进行远缘杂交时,发现结实率及后代观赏性与父本花型、亲缘关系远近均有相关性。刘欣<sup>[7]</sup>将卵叶牡丹分别与牡丹野生种杨山牡丹、紫斑牡丹、黄牡

丹杂交,发现其与紫斑牡丹的亲性和最高,与杨山牡丹的亲性和次之,与黄牡丹的亲性和最差。

针对远缘杂交中普遍存在的不亲和现象,以往的育种研究中也采用了多种方法。翟红等<sup>[8]</sup>用 50 mg/L 2,4-D 溶液处理甘薯杂交不亲和组合的花器,获得了可育的种间杂交植株。娄琦<sup>[9]</sup>发现 NAA 或 6-BA 能显著提高“马蔺×溪荪”组合的结实率。刘凤栾<sup>[10]</sup>在百合属的远缘杂交中采用了 2.0%、3.5%和 5.0% KCl 溶液和 1.5%、3.0%和 4.5%的 NaCl 溶液处理柱头,发现 3.5% KCl 溶液和 3.0% NaCl 溶液处理柱头显著提高了结实率。在芍药属植物中,何桂梅<sup>[11]</sup>用不同质量浓度的 GA<sub>3</sub> (50 和 100 mg/L) 以及 GA<sub>3</sub> 与质量分数为 10%的蔗糖混合液注射心皮,能够促使心皮膨大,但后期因感染而败育。

为提高芍药属远缘杂交结实率,本研究选择 3 个不同类型 5 组远缘杂交组合,用不同质量浓度的 KCl、NaCl 和 GA<sub>3</sub> 溶液及花粉培养液分别处理母本柱头,统计各处理结实情况,比较结实率的差异,旨在为提高芍药属远缘杂交效率提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验于河南省洛阳市栾川县境内育种圃进行。海拔约 1 300 m,年平均气温 9.2 °C,年日照 2 103 h,年均降水量 800~1 000 mm。试验材料见表 1。母本植于育种圃,父本花粉采自育种圃、洛阳王城公园、洛阳国际牡丹园、隋唐城遗址植物园和北京植物园。

表 1 试验材料表

Table 1 List of experiment materials

种/品种 Species/Varieties	学名 Scientific name	类型 Type	花色 Color	花型 Pattern	父/母本 Mother/Father
紫牡丹	<i>Paeonia. delavayi</i>	牡丹组肉质花盘亚组原种	紫红	单瓣	♀
黄牡丹	<i>P. lutea</i>	牡丹组肉质花盘亚组原种	黄	单瓣	♀♂
卵叶牡丹	<i>P. qiui</i>	牡丹组革质花盘亚组原种	粉	单瓣	♀
紫斑牡丹	<i>P. rockii</i>	牡丹组革质花盘亚组原种	白	单瓣	♀
‘雪映桃花’	<i>P. suffruticosa</i> ‘Xueying Taohua’	牡丹组革质花盘亚组品种	粉系	蔷薇	♂
‘凤丹白’	<i>P. ostii</i> ‘Fengdan Bai’	牡丹组革质花盘亚组品种	白	单瓣	♀♂
‘芳纪’	<i>P. suffruticosa</i> ‘Hoki’	牡丹组革质花盘亚组品种	红	蔷薇	♂
‘日月锦’	<i>P. suffruticosa</i> ‘Jitsugetsu Nishiki’	牡丹组革质花盘亚组品种	红	荷花	♂
‘白玉狮子’	<i>P. suffruticosa</i> ‘Hakuojishi’	牡丹组革质花盘亚组品种	白	菊花	♂
‘杨贵妃’	<i>P. suffruticosa</i> ‘Yohkihi’	牡丹组革质花盘亚组品种	红	蔷薇	♂
‘红艳争辉’	<i>P. lactiflora</i> ‘HongyanZhenghui’	芍药组芍药品种	紫红	皇冠	♂

## 1.2 方法

### 1.2.1 花粉培养液筛选

根据赵娜<sup>[12]</sup>得出的培养液配方(蔗糖 100 g/L+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.08 g/L),设计 CaCl<sub>2</sub> 质量浓度分别为 0、10、20、30、40 和 50 mg/L 6 种。供试材料分别为‘凤丹白’、‘白王狮子’、‘日月锦’、‘杨贵妃’和黄牡丹的新鲜花药,阴干散粉后进行花粉离体萌发试验,悬滴培养法测定花粉萌发率,萌发标准为花粉管长度>花粉粒直径的 2 倍,萌发率为萌发的花粉数/视野中花粉粒总数×100%,每个材料每个处理做 3 个重复,每重复观察 3 个视野,每个视野的花粉粒总数>100 粒,最后得出该材料在该处理下的平均花粉萌发率。

### 1.2.2 不同溶液处理柱头后的结实率

5 个杂交组合分属 3 类,分别为:1)革质花盘亚组内杂交:‘凤丹白’×‘芳纪’,紫斑牡丹×‘雪映桃花’;2)亚组间杂交:紫牡丹×‘日月锦’,卵叶牡丹×黄牡丹;3)组间杂交:紫斑牡丹×芍药‘红艳争辉’。

母本在花蕾露色、蓬松略开绽后去雄套袋,挂标签。父本花粉在花蕾露色期采集,自然晾干,置于一 20℃冰箱中保存,授粉前进行花粉萌发试验确认生活力。母本材料柱头大量分泌粘液时连续 3 d 每天授粉 1 次,1 周后摘除纸袋,每个处理选 3 朵花,每次授粉前处理柱头,用去离子水作对照。授粉 5 d

后柱头干燥时除去套袋,加强抚育。

柱头处理方式:

1)盐溶液:KCl 溶液设置 3 个梯度:2.0%、3.5%和 5.0%;NaCl 溶液设置 3 个梯度:1.5%、3.0%和 4.5%。

2)GA<sub>3</sub>:设置 3 个梯度:25,50,75 mg/L。

3)花粉培养液:授粉前,用 1.2.1 中筛选出的最佳培养基喷施柱头。

4)蒸馏水:空白对照。

因试验材料所限,紫斑牡丹×‘红艳争辉’组合未进行 NaCl 溶液的试验,紫牡丹×‘日月锦’未进行花粉培养液的试验。

授粉后加强养护管理,萼萼果棕黄色时采收,统计结实数量,记录每个果实中成熟种子数、未成熟种子数和败育种子数。

## 2 结果与分析

### 2.1 花粉培养液筛选

表 2 可示,4 个栽培品种的花粉萌发率在 CaCl<sub>2</sub> 浓度为 20 mg/L 时最高,30 mg/L 时略低,而黄牡丹在 CaCl<sub>2</sub> 浓度为 30 mg/L 最高,20 mg/L 略低。本研究在赵娜<sup>[12]</sup>研究基础上得出的最佳培养液配方为蔗糖 100 g/L+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.08 g/L+CaCl<sub>2</sub> 20 mg/L 或 100 g/L+H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 0.08 g/L+CaCl<sub>2</sub> 30 mg/L。

表 2 6 种花粉培养液配方及 5 个供试材料花粉萌发率

Table 2 6 kind of pollen culture solution and germination rate of 5 materials

供试材料 Material	CaCl <sub>2</sub> 质量浓度/(mg/L) Mass concentration of CaCl <sub>2</sub>					
	0	10	20	30	40	50
‘凤丹白’	53.13±1.45 d	56.05±2.65 c	71.80±3.72 a	64.57±3.44 b	58.46±1.72 c	51.08±4.92 d
‘白王狮子’	25.34±2.32 d	28.46±3.44 c	37.47±4.76 a	30.28±3.99 b	27.39±3.13 cd	26.41±2.75 d
‘日月锦’	31.52±2.11 b	30.45±3.45 bc	36.32±2.35 a	35.97±2.66 a	29.80±2.56c	28.67±2.73 c
‘杨贵妃’	18.23±3.44 d	18.90±2.87 d	35.12±2.79 a	32.81±1.32 b	30.60±2.44 c	28.45±3.87 c
黄牡丹	45.25±1.30 e	58.30±3.33 c	73.21±3.76 b	77.75±2.67 a	57.20±3.99c	52.23±2.65 d

注:不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at  $P < 0.05$  level.

## 2.2 不同溶液处理柱头后的结实率

不同杂交组合的结实率见表 3。

### 2.2.1 牡丹组亚组内杂交

对于亚组内杂交的 2 个组合‘凤丹白’×‘芳纪’、紫斑牡丹×‘雪映桃花’,由于其亲本亲缘关系较近,空白对照组的结实率已较高(分别为 45.58% 和 54.14%),与之相比,多数进行柱头处理的结实

率反而有所下降,考虑可能为外加溶液影响了柱头表面的理化性质,从而影响了柱头和花粉的相互识别。值得注意的是,在多数处理的结实率较空白对照组的结实率低的情况下,‘凤丹白’×‘芳纪’、紫斑牡丹×‘雪映桃花’这 2 个组合在 50 mg/L GA<sub>3</sub> 处理,以及‘凤丹白’×‘芳纪’组合在花粉培养液处理下结实率均比 CK 组有所上升。

表 3 不同溶液处理后 5 个杂交组合的结实率

Table 3 Seed-setting rate of five Hybrid combinations under different solution treatment

处理 Treatment	‘凤丹白’×‘芳纪’ <i>P. ostii</i> ‘Fengdan Bai’× <i>P. suffruticosa</i> ‘Hoki’	紫斑牡丹× ‘雪映桃花’ <i>P. rockii</i> × <i>P. suffruticosa</i> ‘Xueying Taohua’	紫牡丹×‘日月锦’ <i>P. delavayi</i> × <i>P. suffruticosa</i> ‘Jitsugetsu Nishiki’	卵叶牡丹× 黄牡丹 <i>P. qiui</i> × <i>P. lutea</i>	紫斑牡丹×芍药 ‘红艳争辉’ <i>P. rockii</i> × <i>P. lactiflora</i> ‘Hongyan Zhenghui’
1.5% NaCl	37.75±3.33 d	41.00±1.43 b	0.00±0.00 g	5.88±1.21 d	
3.0% NaCl	36.20±2.67 d	24.69±2.43 c	0.00±0.00 g	5.76±0.99 de	
4.5% NaCl	18.96±4.97 g	23.42±2.43 cd	0.00±0.00 g	4.29±2.21 e	
2.0% KCl	34.59±1.21 e	40.89±3.30 b	4.23±0.92 e	4.63±1.32 e	22.36±3.67 c
3.5% KCl	36.02±0.53 d	40.26±2.67 b	5.29±1.32 d	8.31±1.32 c	24.17±2.67 b
5.0% KCl	17.89±0.63 g	21.82±4.76 d	3.61±0.92 f	4.29±0.99 e	5.62±1.22 g
25 mg/L GA <sub>3</sub>	53.79±2.34 b	54.38±2.43 a	9.71±0.99 b	21.33±1.22 a	36.64±0.99 a
50 mg/L GA <sub>3</sub>	33.30±2.12 e	54.91±3.32 a	7.19±1.32 c	12.03±2.44 b	16.37±2.21 d
75 mg/L GA <sub>3</sub>	27.36±1.43 f	39.68±1.78 b	11.85±1.45 a	4.43±2.34 e	14.45±3.32 e
CK	45.58±2.78 c	54.14±0.92 a	3.96±0.76 ef	5.57±1.44 de	12.08±2.54 f
花粉培养液	60.73±1.43 a	41.56±1.92 b		0.00±0.00 j	2.99±1.22 h

注：不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at  $P < 0.05$  level.

### 2.2.2 牡丹组亚组间杂交

亚组间 2 个杂交组合卵叶牡丹×黄牡丹和紫牡丹×‘日月锦’，柱头处理促进结实的作用非常明显。由表 3 可见，卵叶牡丹×黄牡丹组合 25 mg/L GA<sub>3</sub> 处理结实率最高，约为 CK 的 5 倍，其次分别为 50 mg/L GA<sub>3</sub> 处理和 3.5% KCl 处理，1.5% NaCl 和 3.0% NaCl 处理组的结实率也较 CK 有所提高。紫牡丹×‘日月锦’的促进效果非常明显，最高结实率出现在 75 mg/L GA<sub>3</sub> 的处理，约为 CK 的 3 倍，其次依次为 25 mg/L GA<sub>3</sub>、50 mg/L GA<sub>3</sub>、3.5% 和 2.0% KCl 的处理；NaCl 各浓度的处理在本杂交组合中结实率全部为 0，原因可能是紫牡丹对 NaCl 较为敏感。

### 2.2.3 牡丹组芍药组组间杂交

由于牡丹和芍药的花期差异，试验材料不足，只进行了部分处理。结实率最高的为 25 mg/L GA<sub>3</sub> 处理，结实率约为 CK 的 3 倍；其次依次为 3.5% KCl、2.0% KCl、50 mg/L GA<sub>3</sub> 和 50 mg/L GA<sub>3</sub> 处理。5.0% KCl 和花粉培养液处理的结实率较 CK 有明显下降。

另外，在观察中还发现，组间杂交紫斑牡丹×‘红艳争辉’组合的许多成熟种子与母本紫斑牡丹自然杂交的种子形态差异较大，直径约为普通紫斑牡丹种子的 1/2；果皮黄绿色时，种皮已变为纯黑色，质地较坚硬紧实。这些颗粒较小的杂种种子次年春季仅有少量萌发出幼根，推测萌发率低的原因可能是多数种子的胚发育不良或胚乳体积较小，无法为种子萌发提供充足的养分。

## 3 讨论

1) 对比所有组合的不同处理可发现，除‘凤丹白’×‘芳纪’外，其他 4 个组合结实率最高值均出现在 GA<sub>3</sub> 的处理中。‘凤丹白’×‘芳纪’、卵叶牡丹×黄牡丹、紫斑牡丹×‘雪映桃花’结实率均随赤霉素浓度的升高而呈明显的下降趋势，只有紫斑牡丹×‘红艳争辉’组合在 GA<sub>3</sub> 质量浓度为 75 mg/L 时结实率仍高于对照组；紫斑牡丹×‘雪映桃花’表现出先略微上升后下降的趋势；紫牡丹×‘日月锦’组合结实率与其他组合的表现略有不同，呈现先降低又显著升高，在 75 mg/L 时到达最高值。由此看来，

不同材料的柱头可能对  $GA_3$  敏感程度有差异,在忽视这种差异时, $GA_3$  25 mg/L 是最为适宜的质量浓度。

2) 盐溶液处理柱头时,NaCl 和 KCl 处理的效果略有不同。紫牡丹×‘日月锦’组合在 3 个浓度 NaCl 处理下均未结实,而其余 3 个组合结实率均表现出随 NaCl 浓度升高而降低的趋势。KCl 处理,紫斑牡丹×‘雪映桃花’的组合在 2.0%、3.5%、5.0% 浓度处理下的结实率分别为 40.89%、40.26% 和 21.82%;其余 4 个组合的结实率均随着 KCl 浓度升高先上升后下降,3.5% KCl 时结实率最高。总体来看,KCl 处理的效果要好于 NaCl,且 3.5% KCl 效果最佳。

3) 花粉培养液处理时,除‘凤丹白’×‘芳纪’组合结实率最高外,其余组合均不理想,较对照组明显降低。原因可能与花粉活力、萌发速度和理化性质等有关,今后可针对不同的组合筛选最佳花粉培养液。

4) 亚组间或组间杂交时,不同的柱头处理效果均较好,其中以赤霉素的效果最为稳定,最适浓度为 25 mg/L;其次为 3.5% KCl 溶液处理;对于亚组内的种间杂交,其本身的结实率已较高,柱头处理的结果反而不如对照组,考虑可能是溶液处理影响了柱头表面的理化性质。

药剂处理母本柱头克服自交不亲和或远缘杂交不亲和在其他植物中也有成功的报道,在百合的杂交育种中,涂抹柱头粘液或花粉培养液可以提高远缘杂交花粉萌发率和坐果率<sup>[13-14]</sup>。推测其作用机理可能在于处理柱头后引起柱头上起“识别”作用的特殊蛋白质溶解、沉淀或变性失活,丧失“识别”能力,降低或解除杂交不亲和<sup>[15-16]</sup>,为花粉提供有利附着、萌发和花粉管快速延伸的微环境<sup>[17]</sup>。

本研究首次尝试用赤霉素( $GA_3$ )处理芍药属远缘杂交母本的柱头,发现在其 4 种药剂中,对亚组间或组间杂交组合提高结实率的效果最稳定,可用于今后芍药属远缘杂交育种,也可以尝试在其他物种的远缘杂交中应用。

此外,远缘杂交中常见的克服不亲和方法还有 NAA 或 6-BA 处理柱头、切割柱头授粉<sup>[18-19]</sup>,花柱嫁接<sup>[20]</sup>、离体受精<sup>[21]</sup>、热水处理<sup>[22]</sup>、激光和高压静电场<sup>[23]</sup>、花粉诱导<sup>[24]</sup>和子房内授粉等,其效果因植物种类的不同也有所差别,这些处理方式也可以在芍药属远缘杂交中尝试,以寻找有效地提高克服远缘杂交障碍的方法。

## 参考文献 References

- [1] 王莲英,袁涛,王福,李清道. 中国芍药科野生种迁地保护与新品种培育[M]. 北京:中国林业出版社,2013  
Wang L Y, Yuan T, Wang F, Li Q D. *Chinese Paeonia Lactiflora Wild Species Migratory Conservation and New Variety Xultivation* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013 (in Chinese)
- [2] 侯祥云,郭先锋. 芍药属植物杂交育种研究进展[J]. 园艺学报, 2013,40(9):1805-1812  
Hou X Y, Guo X F. Progress in paeonia crossbreeding research[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2013, 40(9): 1805-1812 (in Chinese)
- [3] 刘改秀. 牡丹与芍药属远缘杂交育种技术[J]. 现代农业科技, 2017(2):125-126  
Liu G X. Cross breeding technology of tree peony and peony [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(2): 125-126 (in Chinese)
- [4] Qing H, Noriakai A, Jyuoko K, Tetsuya K, Kyeong S C, Yusuke A, Nobuo K. Crossibility of Amercian tree peony ‘High Noon’ as seed parent with Japanese cultivars to breed superior cultivars[J]. *Euphytica*, 2013, 191:35-44
- [5] 韩丽晓. 芍药属杂交育种及杂交后代鉴定的研究[D]. 北京:北京林业大学,2014  
Han L X. Studies on the hybrid breeding of *Paeonia* and identification of hybrids[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014 (in Chinese)
- [6] 郝津黎,赵娜,石颜通,王福,袁涛,王莲英. 黄牡丹远缘杂交亲和性及杂交后代形态分析[J]. 园艺学报, 2014, 41(8):1651-1662  
Hao J L, Zhao N, Shi Y T, Wang F, Yuan T, Wang L Y. Distant hybridization compatibility of *paeonia lutea* and morphological analysis of its progenies[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(8): 1651-1662 (in Chinese)
- [7] 刘欣. 卵叶牡丹杂交育种初步研究[C]//中国观赏园艺研究进展论文集 2016. 北京:中国园艺学会观赏园艺专业委员会,国家花卉工程技术研究中心,2016:4  
Liu X. Preliminary exploration on hybridization of *Paeonia qiui* [C] In: Proceedings of Advances in Ornamental Horticulture of China Annual Conference 2016. Beijing: China Horticultural Society ornamental gardening Specialized Committee, National Flower Engineering Technology Research Center, 2016:4 (in Chinese)
- [8] 翟红,刘庆昌. 用 2,4-D 处理获得可育甘薯组间杂种[J]. 农业生物技术学报, 2002,10(2):113-115  
Zhai H, Liu Q C. Production of fertile interspecific hybrids of ipomoea section batatas by 2, 4-D treatment[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2002, 10(2): 113-115 (in Chinese)
- [9] 娄琦. 鸢尾种间杂交亲和性及胚胎学研究[D]. 沈阳:沈阳农业

- 大学, 2011
- Lou Q. Study on cross-compatibility and embryology of interspecific hybridization in *Iris* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011 (in Chinese)
- [10] 刘凤栾. 克服百合远缘杂交不亲和性的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009
- Liu F L. Research of overcoming cross-incompatibility between distantly related species of *Lilium* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [11] 何桂梅. 牡丹远缘杂交育种及其胚培养与体细胞胚发生的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006
- He G M. Studies on distant cross-breeding and embryo *in vitro* culture and somatic embryogenesis in tree peonies [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006 (in Chinese)
- [12] 赵娜. 牡丹远缘杂交后代及亲本形态与核型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014
- Zhao N. Study on morphology and chromosome karyotype of distant hybridization progenies and their parents of tree peony [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014 (in Chinese)
- [13] 杨晓苓, 杨利平, 尚爱芹, 刘凤栾. 不同授粉处理对百合花粉萌发生长及坐果率的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(2): 46-49
- Yang X L, Yang L P, Shang A Q, Liu F L. Effect of different cross-pollination on pollen tube germination and fruit set of lily [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2009, 32(2): 46-49 (in Chinese)
- [14] 马莉. 百合属杂交育种的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008
- Ma L. Research of Cross-breeding of *Lilium* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [15] Robert W, Pryor L D. Interspecific hybridisation in Polar [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1976, 47: 141-151
- [16] 陈越. NaCl 溶液可克服白菜型油菜自交不亲和性[J]. 陕西农业科学, 1997, (3): 43-44
- Chen Y. NaCl solution can overcome self incompatibility of *Brassica napus* [J]. *Agricultural Science of Shanxi*, 1997, (3): 43-44 (in Chinese)
- [17] 刘凤栾. 克服百合远缘杂交不亲和性的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009
- Liu F L. Research of overcoming cross-incompatibility between distantly related species of *Lilium* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2000 (in Chinese)
- [18] Myodo H. Experimental studies on the sterility of some *Lilium* species [J]. *Plant Science*, 1962, 52(1): 70-122
- [19] 杨晓苓. 授粉方式对百合亲和性的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2009
- Yang X L. The influence of different pollinations on the compatibility in *Lilium* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009 (in Chinese)
- [20] Vantuyt J M, Vandien M P. Application of *in vitro* pollination, ovary culture and embryo rescue for overcoming incongruity barriers in interspecific *Lilium* crosses [J]. *Plant Science*, 1991, 74: 115-126
- [21] 李文钊, 马丰山. 木本植物有性杂交生殖生物学图谱[M]. 北京: 科学出版社, 2011
- Li W D, Ma F S. *Map of Reproductive Biology of Woody Plants in Sexual Hybridization* [M]. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese)
- [22] Shin H, Akira T. Incompatible pollen tube growth and protein composition in styles of Japanese pear following high temperature treatments [J]. *Euphyical*, 1989, 43: 191-196
- [23] 李玉花, 邓明琴, 景士西, 刘福全. 激光和高压静电场对草莓种间杂交不亲和性的影响[J]. 激光生物学, 1995, 4(2): 636-641
- Li Y H, Deng M Q, Jiang S X, Liu F Q. The influence of laser and high-voltage electrostatic field on incompatibility of strawberry interspecific hybridization [J]. *Laster Biology*, 1995, 4(2): 636-641 (in Chinese)
- [24] Gaget M, Villar M, Dumas C. The mentor pollen phenomenon in poplars: A new concept [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1989, 78: 129-135

责任编辑: 王燕华