

紫斑牡丹的开花特性与繁育系统

陶宣霖¹, 韩雷¹, 薛娜娜¹, 牟波², 赵恒瑞¹, 唐红¹

(1 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2 临夏亿农农牧投资有限公司, 甘肃 临夏 731100)

[摘要] **【目的】**阐明紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)的开花特性及其繁育系统类型,揭示其生殖规律,为紫斑牡丹种质资源保护以及杂交育种的亲本选配提供科学依据。**【方法】**以 6 个紫斑牡丹品种为材料,系统观测其花部综合特征、开花动态及访花昆虫行为,测定花粉活力和柱头可授性;通过计算花粉胚珠比(P/O)和杂交指数(outcrossing index, OCI)初步判定其繁育系统类型,并结合人工控制授粉试验对其繁育系统类型进行验证。**【结果】**供试 6 个紫斑牡丹于 5 月上旬至中旬开花,花期为(7.97±0.22) d。柱头自开花第 2 天起具可授性,持续约 7 d;开花后 1~7 d,花粉活力呈先升高后下降趋势,并在开花后第 3 天达峰值(84.35%)。在紫斑牡丹盛花期,访花昆虫以膜翅目蜜蜂科和双翅目食蚜蝇科为主,其中蜜蜂科访花频次最高。紫斑牡丹 P/O 值为 $139.98 \times 10^3 \sim 320.85 \times 10^3$, OCI=4, 可知紫斑牡丹是以异交为主、部分自交亲和的繁育系统。人工控制授粉试验结果显示,去雄套袋处理不结实,同株异花授粉处理平均结实率明显低于异株异花授粉处理。**【结论】**紫斑牡丹为需传粉者介导、自交可育但异交占优势的混合交配系统,不存在无融合生殖现象。

[关键词] 紫斑牡丹;开花特性;繁育系统;种内杂交

[中图分类号] S685.11

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2027)03-0071-11

Flowering characteristics and breeding system of *Paeonia rockii*

Tao Xuanlin¹, Han Lei¹, Xue Nana¹, Mu Bo², Zhao Hengrui¹, Tang Hong¹

(1 College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2 Linxia Yinong Agriculture and Animal Husbandry Investment Co., Ltd., Linxia, Gansu 731100, China)

Abstract: **【Objective】** This study aims to elucidate the flowering characteristics and breeding system of *Paeonia rockii* and reveal its reproductive patterns, thereby providing a scientific basis for germplasm conservation and parental selection in hybrid breeding. **【Method】** Using six cultivars of *P. rockii* as materials, floral morphological traits, flowering dynamics, and pollinator behavior were systematically observed, and pollen viability and stigma receptivity were determined. The breeding system was preliminarily identified based on the pollen-ovule ratio (P/O) and outcrossing index (OCI), and further verified through artificial pollination. **【Result】** The six cultivars flowered from early to mid-May, with a flowering period of (7.97±0.22) d. Stigmas became receptive on day 2 post-anthesis and remained so for approximately 7 d. Pollen viability increased initially and then decreased from day 1 to day 7 post-anthesis, peaking at 84.35% on the third day. The dominant floral visitors were Apidae (Hymenoptera) and Syrphidae (Diptera), with Apidae exhibiting the highest visitation frequency. The P/O values ranged from 139.98×10^3 to 320.85×10^3 with OCI=4, indicating that *P. rockii* possesses a predominantly outcrossing system with partial self-compatibility. Artificial pollination revealed that emasculation

[收稿日期] 2026-01-07 **[修回日期]** 2026-03-25

[基金项目] 甘肃省科技支撑计划项目(1604NKCA053)

[作者简介] 陶宣霖(2000—),女,甘肃白银人,在读硕士,主要从事园林植物与观赏园艺研究。E-mail:TXLeslie2333@163.com

[通信作者] 唐红(1969—),女,山东阳谷人,教授,博士,硕士生导师,主要从事园林植物遗传育种研究。E-mail:tangh@gsau.edu.cn

and bagging resulted in no fruit set, and geitonogamy yielded significantly lower average fruit set than xenogamy.

【Conclusion】*Paeonia rockii* exhibits a pollinator-dependent mixed mating system that is self-compatible but predominantly outcrossing, with no apomixis occurring.

Key words: *Paeonia rockii*; flowering characteristics; breeding system; intraspecific hybridization

开花是植物生活史的关键环节,直接影响授粉、受精及繁殖成功率,也是植物适应环境的重要表征。在长期的进化过程中,植物通过调控花期物候来适应环境波动,物候不仅制约果实形成过程,还调控传粉昆虫的访花活动,在植物与传粉者互作关系中具有核心生态学意义^[1]。植物繁育系统涵盖花器官特征、花各性器官的寿命、自交亲和性及交配系统类型等多个层面,是决定后代遗传组成和种群遗传结构的关键因素^[2]。繁育系统类型包括异交、自交或混合交配,直接影响遗传多样性维持、近交衰退程度及物种适应进化潜力^[3]。开花特征与繁育系统密切关联,花部形态特征决定了传粉者类型和访花效率,花粉活力与柱头可授性的时空动态影响授粉时机和受精成功率,而花期物候则调控种群内有效授粉机会和基因流动模式^[4-5]。因此,系统研究植物的开花生物学特征与繁育系统类型,不仅对理解其繁殖策略和传粉适应机制具有重要的理论意义,也能为遗传改良、种质资源保护及栽培实践提供科学依据。

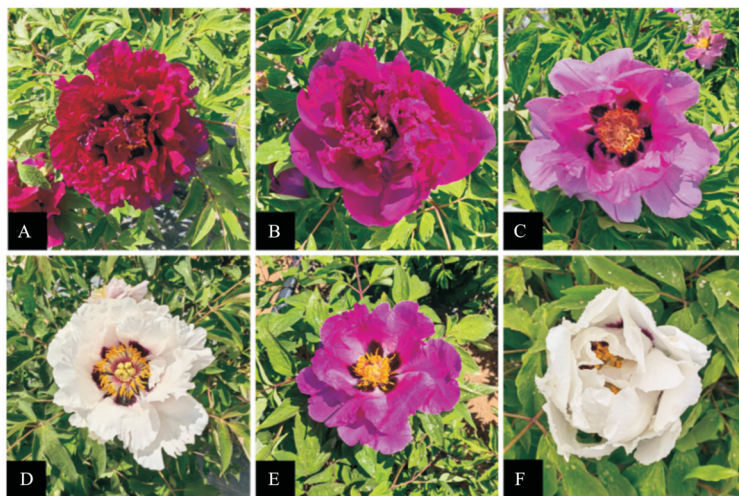
紫斑牡丹(*Paeonia rockii*)为芍药科芍药属落叶小灌木,主要分布于甘肃南部、定西及兰州等地,具有耐寒、耐旱、抗病性强等生态适应特征,兼具较高的观赏价值与油料利用潜力,是牡丹遗传改良和资

源保护中的重要种质资源^[6]。然而,紫斑牡丹在天然条件下结实率普遍较低,人工栽培中不同品种的种子产量差异显著,其繁育系统类型、自交亲和性程度及传粉生物学机制尚不明确,制约了种质资源的高效利用和良种选育。目前对紫斑牡丹的研究主要集中在化学成分分析^[7]、抗逆生理^[8]及分子系统学^[9]等方面,对其繁殖生物学,特别是花期物候、花粉活力动态、柱头可授性及不同授粉方式的繁殖效果研究鲜有报道。鉴于此,本研究通过系统观测 6 个紫斑牡丹品种的花部特征、开花物候、花粉活力与柱头可授性动态、传粉昆虫种类及访花行为,并比较不同授粉处理的结实效果,分析紫斑牡丹的开花特性及其繁育系统类型,为紫斑牡丹种质资源保护以及杂交育种的亲本选配提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于甘肃省临夏市枹罕镇临夏亿农农牧投资有限公司种植基地进行。该地区属温带半干旱气候,年平均气温 6.3℃,无霜期约 170 d,年平均降雨量 537 mm。试验材料选取 6 个 8 年生紫斑牡丹品种:‘赛墨莲’、‘玫瑰洒金’、‘枣园春红’、‘五子拜佛’、‘京优满’和‘点睛白燕尾’(图 1)。



A. 赛墨莲; B. 玫瑰洒金; C. 枣园春红; D. 五子拜佛; E. 京优满; F. 点睛白燕尾。

A. Saimolian; B. Meiguisajin; C. Zaoyuanchunhong; D. Wuzibaifo; E. Jingyouman; F. Dianjingbaiyanwei.

图 1 6 个紫斑牡丹品种的花部形态

Fig. 1 Floral morphology of six *P. rockii* cultivars

供试植株生长状况良好、无明显病虫害,其中‘赛墨莲’和‘玫瑰洒金’花型为重瓣型,其余 4 个品种为单瓣型。

1.2 试验方法

1.2.1 花部特征与开花物候 于盛花期从紫斑牡丹各品种不同植株上随机选取 5 朵花进行花部性状测量,共计 30 朵($n=30$)。测量指标包括花朵直径、最大和最小花瓣长与宽、花瓣数、萼片数、苞片数、雄蕊数、心皮数以及心皮的长、宽、厚。所有测量均遵循标准形态学规程,参照国际植物遗传资源委员会(International Board for Plant Genetic Resources, IBPGR)^[10]描述体系进行测定。同时参照杨翔^[11]的方法,根据花朵开放过程中的形态变化,将单花花期划分为露瓣期、展瓣期和落瓣期,并记录各阶段的起止日期及持续时间,并统计花期。

1.2.2 花粉活力与柱头可授性 采用离体萌发法测定花粉活力。自紫斑牡丹各品种开花第 1~8 天,于每日 09:00 从 6 个品种植株上采集当日开放 3 朵花的花粉(共 18 朵, $n=18$),接种于含蔗糖(100 g/L)、硼酸(0.15 g/L)和琼脂(10 g/L)的培养基中,在 25℃条件下全光照培养 6 h。显微镜下随机观察 3 个视野,以花粉管长度 $\geq$ 花粉直径为萌发标准,统计花粉总数及萌发花粉数,并计算萌发率,以萌发率表示花粉活力。花粉活力(萌发率)=(萌发花粉数/观察花粉总数) $\times 100\%$ 。

开花前 1 d 以及开花后 1~8 d,在紫斑牡丹 6 个品种不同植株上标记套袋 3 朵新开花朵,持续观察至最早标记花朵柱头褐变后采样。采用联苯胺-过氧化氢溶液处理柱头,于体视显微镜下观察显色及气泡产生情况以判断柱头可授性。柱头气泡数量

越多,反应液蓝色越明显表明柱头可授性越强,同时观测柱头表面黏液分泌的动态变化。

1.2.3 花粉胚珠比(pollen-ovule ratio, P/O) 于紫斑牡丹花药即将开裂时,从 6 个品种不同植株上各采集发育正常的花蕾 10 个。每个花蕾随机选取 3 枚花药置于 10 mL 离心管中自然散粉,加入 5 mL 蒸馏水,充分振荡使花粉完全释放,制成花粉悬液。充分混匀后吸取 1 μ L 悬液滴于载玻片上,显微镜下统计 1 μ L 悬液中的花粉数,重复 10 次。同时统计每个品种的花药数和胚珠数,然后计算花粉数:花粉数=(1 μ L 悬液花粉数 $\times$ 稀释倍数 5 000/3) $\times$ 花药数,用平均花粉数除以平均胚珠数计算花粉胚珠比。

1.2.4 杂交指数(outcrossing index, OCI) 参照 Dafni^[12]标准计算杂交指数并判断繁育系统类型。选取各品种盛花期 10 朵花,测定以下指标并赋分:1)花朵直径 <1 mm,记为 0;花朵直径 1~ <2 mm,记为 1;花朵直径 2~ <6 mm,记为 2;花朵直径 ≥ 6 mm,记为 3。2)花药开裂时间与柱头具可授性的时间先后:二者同时成熟(雌雄同熟)或柱头具可授性的时间早于花药开裂时间(雌蕊先熟),记为 0;花药开裂时间早于柱头具可授性时间(雄蕊先熟),记为 1。3)柱头与花药的空间位置在同一高度,记为 0,否则记为 1。以上 3 项总和为杂交指数,评判标准为:OCI=0 为闭花受精;OCI=1 为专性自交;OCI=2 为兼性自交;OCI=3 为自交亲和,有时需传粉者;OCI ≥ 4 为异交,部分自交亲和,需要传粉者。

1.2.5 人工控制授粉试验 2025 年 5 月,选取生长健壮、无病虫害的开花枝开展人工控制授粉试验。共设 6 组处理,具体操作见表 1。

表 1 人工控制授粉试验处理的方法与目的
Table 1 Treatments and purposes of artificial pollination

编号 Number	处理 Treatment	处理方法 Method	处理目的 Purpose
I	自然授粉(对照) Natural pollination (control)	不做任何处理,自然授粉 Untreated, naturally pollinated	检测自然状态下授粉状况 Detect pollination status under natural conditions
II	直接套袋 Bagging	不去除雄蕊,套硫酸纸袋 Bagged with glassine paper without emasculation	检测自交亲和性 Detect self-compatibility
III	去雄套袋 Emasculation and bagging	去除雄蕊,套硫酸纸袋 Emasculated and bagged with glassine paper	检测是否存在无融合生殖现象 Detect the occurrence of apomixis
IV	网袋 Netting	不去除雄蕊,套孔径为 0.1 mm 的防虫网袋 Bagged with 0.1 mm mesh insect-proof net without emasculation	检测风媒传粉能力 Detect wind pollination potential
V	同株异花授粉 Geitonogamy	去雄套硫酸纸袋,授以所在植株上其他花朵的花粉 Emasculated, bagged, and pollinated with pollen from different flow- ers on the same plant	检测自交亲和性 Detect self-compatibility
VI	异株异花授粉 Xenogamy	去雄套硫酸纸袋,授以不同植株的花粉 Emasculated, bagged, and pollinated with pollen from different plants	检测异交亲和性 Detect cross-compatibility

除异株异花授粉处理外,其余处理均设 10 次独立重复。异株异花授粉处理涵盖 6 个品种的正反交组合,每种组合设 10 次重复,共计授粉 300 朵。供试花蕾均选自透色期并进行挂牌标记。8—9 月果实呈蟹黄色微裂时采收,统计并计算以下指标:结实率=结实花朵数/处理花朵数 $\times 100\%$;结实心皮率=结实心皮数/授粉柱头数 $\times 100\%$;结实率=结实数/胚珠数 $\times 100\%$ 。

1.2.6 访花昆虫 于紫斑牡丹盛花期,在前期全园巡视的基础上,选取形态特征典型、生殖器官发育完全的单瓣品种‘枣园春红’作为主要观测对象。随机选取 5 个处于开放状态的花朵进行标记。自开花首日至花瓣完全脱落期间,于每日 08:00—17:00,连续系统观测访花昆虫种类、访花行为、单

次访花时长及访花频率等信息。

2 结果与分析

2.1 紫斑牡丹的开花特征

表 2 显示,6 个供试紫斑牡丹品种的花部性状展现出丰富的变异性。在数量性状方面,6 个品种紫斑牡丹花瓣数为 10~57,形成了从单瓣到重瓣过渡的花型梯度,其变异系数高达 79.72%;雄蕊数变幅较大(76~291),反映出不同品种生殖器官数量差异较大。花朵直径为 104~185 mm,变异系数较小。最小花瓣宽和长的变异系数分别为 40.97% 和 19.27%,明显高于最大花瓣宽。在雌蕊性状中,心皮数及心皮宽、厚均表现出较高的变异水平(CV>20%),而心皮长发育相对稳定(CV=12.47%)。

表 2 紫斑牡丹花部形态指标

Table 2 Floral morphological indices of *P. rockii*

观测项目 Observation item	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数/% CV	最大值 Max	最小值 Min
花朵直径/mm Floral diameter	159.48±23.18	14.53	185	104
花瓣数 Number of petals	20.23±16.13	79.72	57	10
最大花瓣长/mm Length of the largest petal	89.40±8.81	9.85	105	63
最小花瓣长/mm Length of the smallest petal	67.43±12.99	19.27	95	44
最大花瓣宽/mm Width of the largest petal	78.97±7.24	9.17	95	62
最小花瓣宽/mm Width of the smallest petal	43.25±17.72	40.97	75	13
苞片数 Number of bracts	5.03±0.64	12.65	7	4
萼片数 Number of sepals	3.67±0.84	22.83	6	2
心皮数 Number of carpels	5.80±1.95	33.56	14	5
心皮长/mm Length of carpels	22.9±2.86	12.47	29	14
心皮宽/mm Width of carpels	5.69±1.20	21.11	8	2
心皮厚/mm Thickness of carpels	5.32±1.17	22.04	7	2
雄蕊数 Number of stamens	182.52±61.05	33.45	291	76

2.2 紫斑牡丹的开花物候

表 3 显示,6 个紫斑牡丹品种的单花花期为 5~10 d。从开花进程来看,单花花期呈现出明显的阶段性差异,其中展瓣期持续时间最长(4.90±0.16) d,明显长于露瓣期(1.57±0.10) d 和落瓣期(1.50±0.09) d,占总花期的 61.5%。根据花期,可将 6 个紫斑牡丹品种分为 3 类:长花期品种(8~10 d,包括‘玫瑰洒金’和‘五子拜佛’)、中等花期品种(6~9 d,包括‘赛墨莲’、‘枣园春红’和‘京优满’)以及短花期品种(5~7 d,‘点睛白燕尾’)。各品种展瓣期持续时间差异最明显,其中‘玫瑰洒金’较长(5~7 d),‘点睛白燕尾’较短(3~4 d),这是导致不同品种观赏期差异较大的主要原因。各品种露瓣期(1~3 d)和落瓣期持续时间(1~2 d)均较为稳定。

上述结果表明,紫斑牡丹花期的变异主要源于展瓣期。

2.3 紫斑牡丹的花粉活力

表 4 显示,紫斑牡丹花粉活力随开花时间的延长呈先升高后降低的“单峰型”曲线变化。在开花第 1 天,花粉活力处于较低水平,仅为(14.19±3.81)%;随后花粉活力迅速攀升,至第 3 天达到峰值,为(84.35±2.89)%;此后花粉活力开始逐日递减,但直至第 6 天仍能维持在较高水平((64.28±5.42)%);进入第 7 天,花粉活力急剧衰退至(10.80±5.97)%;第 8 天花瓣脱落,花药由鲜黄色转为深褐色并逐渐干瘪,花粉粒最终彻底丧失活力。

表 3 6 个紫斑牡丹的开花物候特征

Table 3 Flowering phenological characteristics of six *P. rockii* cultivars

编号 Number	露瓣期 Petal appearance period		展瓣期 Petal expansion period		落瓣期 Petal falling period		单花花期/d Flowering period
	起止日期 Date	持续时间/d Time	起止日期 Date	持续时间/d Time	起止日期 Date	持续时间/d Time	
A1	05-07—05-08	2	05-09—05-13	5	05-14—05-15	2	9
A2	05-11—05-12	2	05-13—05-17	5	05-18—05-19	2	9
A3	05-13	1	05-14—05-18	4	05-19	1	6
A4	05-13—05-14	2	05-15—05-20	6	05-21	1	9
A5	05-14	1	05-15—05-19	5	05-20	1	7
B1	05-12—05-13	2	05-14—05-18	5	05-19—05-20	2	9
B2	05-13	1	05-14—05-19	6	05-20—05-21	2	9
B3	05-13—05-14	2	05-15—05-19	5	05-20	1	8
B4	05-15—05-16	2	05-17—05-22	6	05-23—05-24	2	10
B5	05-16	1	05-17—05-23	7	05-24	1	9
C1	05-12—05-13	2	05-14—05-18	5	05-19—05-20	2	9
C2	05-13—05-14	2	05-15—05-18	4	05-19—05-20	2	8
C3	05-14	1	05-15—05-19	5	05-20	1	7
C4	05-16	1	05-17—05-22	6	05-23	1	8
C5	05-16—05-17	2	05-18—05-22	5	05-23	1	8
D1	05-12—05-13	2	05-14—05-19	6	05-20—05-21	2	10
D2	05-13	1	05-14—05-18	5	05-19—05-20	2	8
D3	05-15	1	05-16—05-19	4	05-20—05-21	2	7
D4	05-16—05-17	2	05-18—05-22	5	05-23	1	8
D5	05-18	1	05-19—05-24	6	05-25	1	8
E1	05-09—05-11	3	05-12—05-15	4	05-16—05-17	2	9
E2	05-10—05-11	2	05-12—05-16	5	05-17—05-18	2	9
E3	05-11—05-12	2	05-13—05-17	5	05-18	1	8
E4	05-13	1	05-14—05-18	5	05-19—05-20	2	8
E5	05-15	1	05-16—05-19	4	05-20—05-21	2	7
F1	05-11	1	05-12—05-15	4	05-16	1	6
F2	05-12	1	05-13—05-15	3	05-16	1	5
F3	05-14—05-15	2	05-16—05-19	4	05-20	1	7
F4	05-15—05-16	2	05-17—05-20	4	05-21	1	7
F5	05-16	1	05-17—05-20	4	05-21—05-22	2	7
平均 Mean		1. 57±0. 10		4. 90±0. 16		1. 50±0. 09	7. 97±0. 22

注:A. 赛墨莲;B. 玫瑰洒金;C. 枣园春红;D. 五子拜佛;E. 京优满;F. 点睛白燕尾,其后数字1~5表示5个重复。下同。
Note:A. Saimolian;B. Meiguisajin;C. Zaoyuanchunhong;D. Wuzibaifo;E. Jingyouman;F. Dianjingbaiyanwei. The numbers 1—5 following each cultivar represent five replicates. The same below.

表 4 紫斑牡丹花粉活力的变化

Table 4 Changes in pollen viability of *P. rockii* during flowering

%

开花后时间/d Days after flowering	花粉活力 Pollen viability	开花后时间/d Days after flowering	花粉活力 Pollen viability
1	14. 19±3. 81 f	5	71. 24±4. 09 c
2	58. 43±2. 19 e	6	64. 28±5. 42 d
3	84. 35±2. 89 a	7	10. 80±5. 97 g
4	77. 65±3. 75 b	8	0 h

注:同列数据后标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

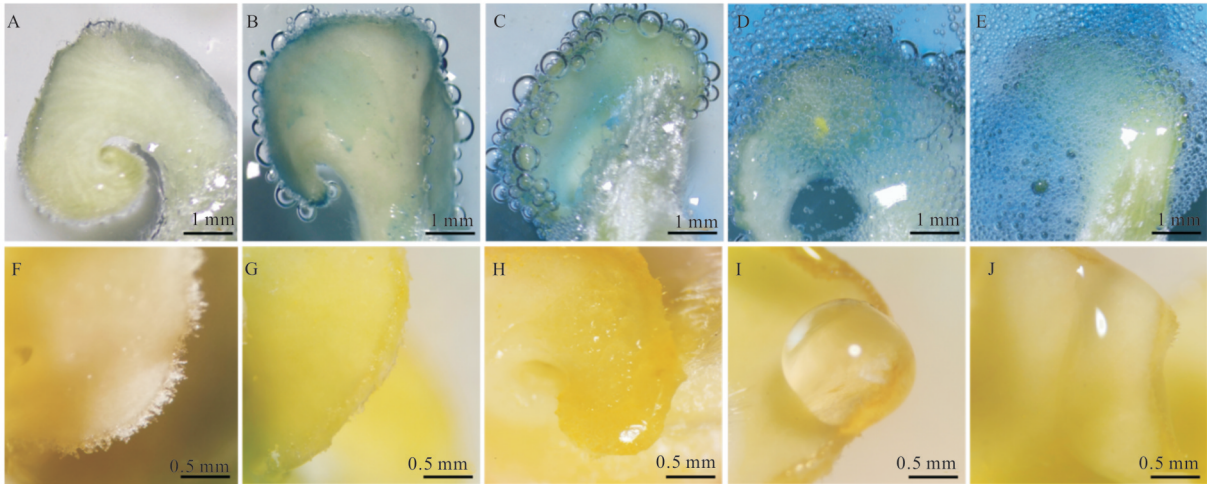
2.4 紫斑牡丹的柱头可授性及柱头黏液观察

图 2 和表 5 显示,紫斑牡丹柱头可授性在开花过程中呈现出明显的阶段性与单峰变化特征。开花前 1 d 及开花初期(1 d),柱头生理活性较低,染色反应弱、气泡产生稀少,且柱头表面干燥、无明显黏

液分泌,处于不可或弱可授状态。随开花进程的推进,柱头活性迅速增强,开花后第 2 天起柱头逐渐出现少量黏液;开花第 3~4 天柱头过氧化物酶反应显著增强并伴随大量气泡产生,黏液明显聚集呈欲滴状态,显示柱头可授性进入高活性阶段,该状态可

持续至开花后第 6 天;随后柱头活性开始下降,开花后第 7 天气泡量骤减,柱头黏液分泌明显减少;开花后第 8 天柱头完全干燥,基本丧失可授能力。综合柱头形态与分泌物动态变化可知,紫斑牡丹柱头可

授期约持续 7 d,其有效可授期主要集中于开花后第 3~6 天,该阶段柱头湿润、分泌物丰富,为昆虫的有效授粉提供了极佳的生理条件。



A~E. 联苯胺-过氧化氢测试:柱头气泡和蓝色显色程度逐渐增强(可授性从一至++++);

F~J. 黏液分泌逐渐增加(可授性从一至++++)。

A—E. Benzidine-H₂O₂ test:progressive increase in bubble formation and blue coloration (stigma receptivity from—to +++++);

F—J. Progressive increase in mucilage secretion (stigma receptivity from—to +++++).

图 2 紫斑牡丹雌蕊柱头可授性的观测结果

Fig. 2 Stigma receptivity of pistils in *P. rockii*

表 5 紫斑牡丹雌蕊柱头可授性的变化

Table 5 Changes in stigma receptivity of *P. rockii* during flowering

花后时间/d Days after flowering	联苯胺-过氧化氢溶液检测情况 Benzidine-H ₂ O ₂ test	黏液分泌情况 Mucilage Secretion	柱头可授性 Stigma receptivity
开花前 1 d 1 day before flowering	无蓝色产生、无气泡 No blue coloration, no bubbles	无黏液分泌 No Mucilage Secretion	—
1	微显蓝色、少量气泡 Faint blue, few bubbles	微量黏液分泌 Slight mucilage secretion	+
2	蓝色较浅、中量气泡 Light blue, moderate bubbles	黏液渗出明显 Obvious mucilage secretion	++
3~4	蓝色明显、大量气泡 Distinct blue, abundant bubbles	大量黏液汇聚成滴 Mucilage droplet formation	++++
5~6	蓝色明显、大量气泡 Distinct blue, abundant bubbles	大量黏液汇聚成滴 Mucilage droplet formation	+++
7	微显蓝色、少量气泡 Faint blue, few bubbles	黏液分泌减少且变干燥 Mucilage decreased and became dry	+
8	无蓝色产生、无气泡 No blue coloration, no bubbles	无黏液分泌, 黏液完全干燥 No mucilage secretion, fully dry	—

2.5 紫斑牡丹的繁育系统分析

2.5.1 花粉胚珠比 参照 Cruden^[13]提出的花粉-胚珠比(P/O)判定标准,对供试紫斑牡丹品种的繁育系统类型进行分析。表 6 显示,6 个紫斑牡丹品种的 P/O 平均值为 $139.98 \times 10^3 \sim 320.85 \times 10^3$,均显著高于专性异交类型的下限阈值(2 108.0),且部分品种超过该类型的上限范围(195 525.0),该结果表明紫斑牡丹在繁殖数量特征上整体呈现出明显的异交倾向,其有性繁殖过程对传粉者介导具有较强

依赖性,符合典型虫媒传粉植物的特征。

2.5.2 杂交指数 紫斑牡丹供试品种花朵直径平均为 159.48 mm,远大于 6 mm,赋值为 3;柱头在花朵开放第 1~2 天开始具有可授性,而花药在花朵开放第 3 天逐渐开裂散粉,表现为雌蕊先熟,赋值为 0;花药高于柱头,两者呈空间分离状态,赋值为 1;综合上述 3 项指标,紫斑牡丹 OCI 值为 4。依据 Dafni^[11]标准判断紫斑牡丹繁育系统属于异交,具有部分自交亲和能力,且繁殖过程依赖传粉者介导。

表 6 紫斑牡丹的花粉胚珠比
Table 6 Pollen-ovule ratio of *P. rockii*

品种 Cultivar	花药数 No. of anthers	花粉数/($\times 10^4$) No. of pollen grains	胚珠数 No. of ovules	花粉胚珠比/($\times 10^3$) Pollen-ovule ratio	
				测定值 Individual value	平均值 Average
A	271 $\pm$ 4	2 765.06 $\pm$ 153.22	99 $\pm$ 2	188.96~369.04	282.19 $\pm$ 17.41 c
B	194 $\pm$ 5	2 193.23 $\pm$ 97.96	72 $\pm$ 1	220.00~383.34	306.52 $\pm$ 16.80 ab
C	229 $\pm$ 4	2 327.53 $\pm$ 90.65	73 $\pm$ 1	256.62~374.00	320.85 $\pm$ 11.72 a
D	160 $\pm$ 3	2 038.03 $\pm$ 120.14	74 $\pm$ 1	155.56~338.99	276.31 $\pm$ 16.15 c
E	158 $\pm$ 5	2 264.63 $\pm$ 178.37	78 $\pm$ 3	194.03~495.60	293.70 $\pm$ 27.23 bc
F	85 $\pm$ 2	981.69 $\pm$ 81.46	70 $\pm$ 1	90.27~211.01	139.98 $\pm$ 11.78 d

2.5.3 人工控制授粉试验结果 人工控制授粉试验结果(表 7)显示,不同授粉处理对 6 个紫斑牡丹品种的结果率和结实率产生了明显影响。自然授粉条件(Ⅰ)下,所有品种均能结实,结实率为 4.62%~16.59%。套网袋处理(Ⅳ)后,多数品种结实率明显降低。去雄套袋处理(Ⅲ)后,6 个品种均未形成种子,结果率和结实率均为 0.00%。直接套袋处理中,‘赛墨莲’、‘玫瑰洒金’和‘点睛白燕尾’3 个品种完全不结实,其余品种虽能形成少量种子,但结实率均低于 5%。同株异花授粉处理(Ⅴ)下,各品种的结实率整体处于较低水平,且总体显著低于异株异花授粉处理(Ⅵ)。异株异花授粉处理后,各品种中的结果率和结实率均较高。上述结果表明,紫斑牡丹不存在无融合生殖现象,整体自交亲和性较弱,表现为异交为主的繁育系统,昆虫是其主要传粉媒介。

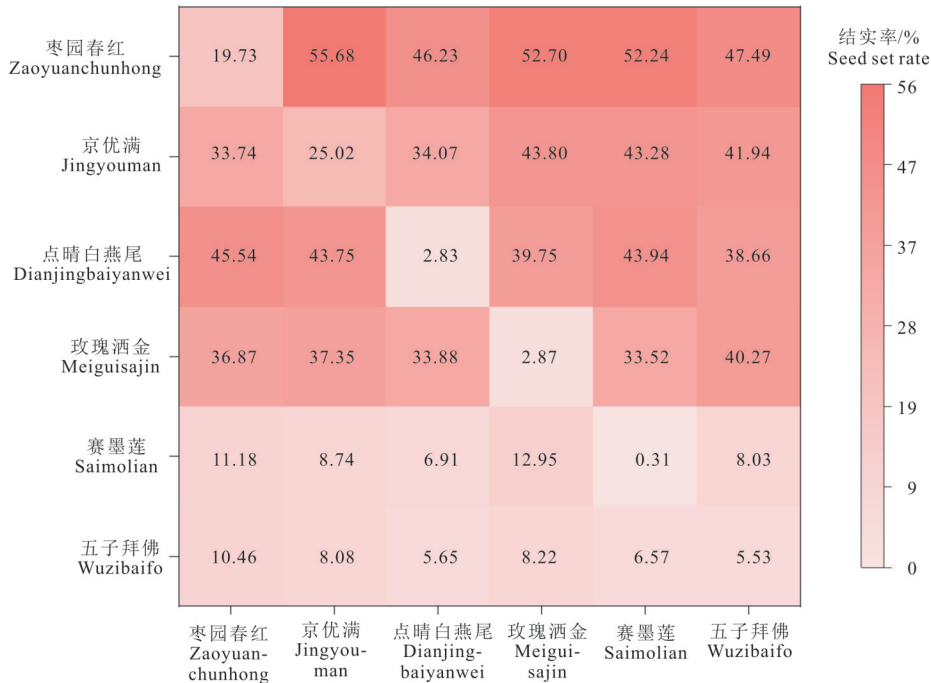
表 7 紫斑牡丹人工控制授粉试验结果
Table 7 Artificial pollination of *P. rockii* %

品种 Cultivar	处理 Treatment	结果率 Fruit set rate	结实心皮率 Carpel set rate	结实率 Seed set rate	品种 Cultivar	处理 Treatment	结果率 Fruit set rate	结实心皮率 Carpel set rate	结实率 Seed set rate
A	Ⅰ	0.00	20.79	5.46 $\pm$ 1.91 a	D	Ⅰ	100.00	44.00	4.62 $\pm$ 1.20 b
	Ⅱ	0.00	0.00	0.00 c		Ⅱ	100.00	38.00	3.18 $\pm$ 0.74 b
	Ⅲ	0.00	0.00	0.00 c		Ⅲ	0.00	0.00	0.00 c
	Ⅳ	50.00	6.19	0.90 $\pm$ 0.40 c		Ⅳ	0.00	0.00	0.00 c
	Ⅴ	30.00	2.94	0.31 $\pm$ 0.16 c		Ⅴ	100.00	58.00	5.53 $\pm$ 0.89 ab
	Ⅵ	84.00	52.97	9.70 $\pm$ 1.05 b		Ⅵ	100.00	70.00	7.80 $\pm$ 0.56 a
B	Ⅰ	100.00	50.50	10.62 $\pm$ 2.49 b	E	Ⅰ	100.00	60.00	15.52 $\pm$ 4.35 c
	Ⅱ	0.00	0.00	0.00 c		Ⅱ	70.00	30.00	2.94 $\pm$ 1.11 d
	Ⅲ	0.00	0.00	0.00 c		Ⅲ	0.00	0.00	0.00 d
	Ⅳ	30.00	12.00	0.98 $\pm$ 0.52 c		Ⅳ	100.00	42.00	5.73 $\pm$ 1.27 d
	Ⅴ	80.00	22.00	3.05 $\pm$ 1.19 c		Ⅴ	100.00	84.00	25.02 $\pm$ 4.28 b
	Ⅵ	100.00	97.60	36.38 $\pm$ 1.11 a		Ⅵ	98.00	95.60	39.37 $\pm$ 1.62 a
C	Ⅰ	100.00	70.00	16.59 $\pm$ 4.39 c	F	Ⅰ	100.00	68.00	14.91 $\pm$ 3.74 b
	Ⅱ	100.00	92.00	27.49 $\pm$ 1.69 b		Ⅱ	0.00	0.00	0.00 c
	Ⅲ	0.00	0.00	0.00 e		Ⅲ	0.00	0.00	0.00 c
	Ⅳ	100.00	54.00	10.46 $\pm$ 1.70 d		Ⅳ	0.00	0.00	0.00 c
	Ⅴ	100.00	100.00	19.73 $\pm$ 1.41 c		Ⅴ	100.00	36.00	2.83 $\pm$ 0.43 c
	Ⅵ	100.00	100.00	50.87 $\pm$ 1.05 a		Ⅵ	100.00	98.80	42.33 $\pm$ 1.05 a

图 3 显示,异株异花授粉处理下,多数品种间杂交组合的结实率集中分布于 30%~55%,整体高于同株异花授粉处理。不同品种作为母本或父本时的结实表现存在明显差异,其中‘枣园春红’、‘京优满’与‘点睛白燕尾’、‘玫瑰洒金’在多数互交组合中均表现出较高的结实率;而‘赛墨莲’与‘五子拜佛’无论作为父本还是母本,其平均结实率均相对较低。部分杂交组合表现出明显的正反交差异,如‘枣园春红’ $\times$ ‘京优满’的结实率明显高于反交组合‘京优满’ $\times$ ‘枣园春红’。自交与杂交对比分析表明,多数品种表现出较低的自交亲和性(对角线区域),特别是‘赛墨莲’(0.31%)和‘玫瑰洒金’(2.78%),这表明供试品种可能存在不同程度的自交不亲和机制。

2.5.4 访花昆虫及访花行为 观察发现,在紫斑牡丹盛花期,访花昆虫的活动呈现出明显的时间集中

性,主要发生在10:00—16:00,其中11:00—14:00为访花高峰期,昆虫数量、种类及访花频次均达到峰值。随着下午气温下降,昆虫访花活动明显减弱;在阴雨或大风等不利天气条件下,访花者的数量 and 活动强度均明显下降。



矩阵的行与列分别代表母本与父本。对角线数据为同株异花授粉结果,反映品种自交亲和性;非对角线数据为异株异花授粉结果,反映品种间杂交亲和性。
Rows and columns of the matrix denote female and male parents, respectively. Diagonal cells represent geitonogamous pollination, reflecting self-compatibility of each cultivar, while off-diagonal cells represent xenogamous pollination, reflecting cross-compatibility between cultivars.

图3 6个紫斑牡丹品种自交与杂交亲和性热图

Fig. 3 Heatmap of self- and cross-compatibility among six *P. rockii* cultivars

本研究在田间观察共记录了6个紫斑牡丹三大类主要访花昆虫,结果(表8)发现,膜翅目蜜蜂科的昆虫是绝对优势的传粉类群,其中中华蜜蜂访花最为频繁(116次),意大利蜜蜂的单次访花时间则最长((150.26±138.33)s);双翅目食蚜蝇科是另一类重要的访花者,以梯斑墨蚜蝇、羽芒宽盾蚜蝇和野食蚜蝇为典型代表,其访花频次与停留时间均显著低于蜜蜂。此外花部及植株周围偶见蜘蛛目个体,如三突伊氏蛛、满蟹蛛和革带豹蛛等,但它们仅作停留,未观察到其体表携带花粉或进行有效的花间移动,因此不认定其为有效传粉者。

表8 紫斑牡丹访花昆虫种类及访花行为

Table 8 Flower-visiting insect species and behavior on *P. rockii*

目 Order	科 Family	种 Species	访花次数 Flower-visiting frequency	单次访花时间/s Single visit duration	访花行为 Visiting behavior
膜翅目 Hymenoptera	蜜蜂科 Apidae	中华蜜蜂 <i>Apis cerana</i>	116	96.41±85.57 a	A
		意大利蜜蜂 <i>Apis mellifera ligustica</i>	84	150.26±138.33 a	A
		梯斑墨蚜蝇 <i>Melanostoma scalare</i>	35	67.06±52.38 b	B
双翅目 Diptera	食蚜蝇科 Syrphidae	羽芒宽盾蚜蝇 <i>Phytomia zonata</i>	23	53.00±39.93 b	B
		野食蚜蝇 <i>Syrphus torvus</i>	18	40.33±17.80 b	B
		三突伊氏蛛 <i>Ebrechtella tricuspidata</i>	1	220.00	C
蜘蛛目 Araneae	蟹蛛科 Thomisidae	满蟹蛛 <i>Thomisus onustus</i>	1	130.00	C
	狼蛛科 Lycosidae	革带豹蛛 <i>Pardosa laura</i>	1	50.00	C

注:A. 采集花粉;B. 吸食花蜜;C. 停留。
Note: A. Pollen collection; B. Nectar feeding; C. Resting.

田间观察还发现,不同花型品种吸引的访花昆虫频率及昆虫行为存在差异。单瓣花型品种的雌蕊、雄蕊完全外露,观察到访花昆虫可直接进入花部中心并频繁接触生殖器官。重瓣品种由于花瓣数量多且结构紧密,雄蕊数目较少,昆虫多在花瓣外围活动,进入花心接触柱头的频次明显低于单瓣品种,单次停留时间亦有所缩短。在昆虫类群的行为特征方面,膜翅目蜂类访花频率最高,其在采集花粉过程中通过腹部或足部的携粉结构装载大量花粉,且在单次访花中多次往返于雄、雌蕊之间;双翅目昆虫多以爬行方式在花内取食花蜜,花粉被动粘附于其背部或腹部。

3 讨论

3.1 紫斑牡丹开花特征与授粉适应策略

在本研究中,紫斑牡丹品种间花部性状差异主要体现在花瓣数、最小花瓣数、心皮数和雄蕊数等数量性状上,而花径等尺度性状相对稳定。这种变异模式与Sánchez-Lafuente等^[14]在芍药属野生种研究中提出的“数量性状高变异、尺度性状相对保守”的观点相吻合,表明紫斑牡丹在维持基本花部框架的前提下,主要通过调节生殖器官数量实现花型分化。已有研究表明,牡丹花型分化与调控生殖器官数量的关键基因高度相关,数量性状在人工选择中比尺度性状更易发生显著改变^[15]。与部分虫媒植物通过改变花径或花部比例分化不同,紫斑牡丹的花型差异主要表现为生殖器官数目增减,而非整体尺度的重塑,这可能与其长期栽培背景下的选择方向以及传粉体系相对稳定有关,但仍需结合系统发育与遗传研究进一步验证。

开花物候的同步性是紫斑牡丹适应传粉环境的重要表现。在本研究中,紫斑牡丹群体花期较长且盛花期高度同步,能在短时间内形成集中的视觉与化学信号,增强对传粉者的吸引。在单花物候中,展瓣期占整个花期的61.5%,确保花朵在受精能力最强时有足够的访花窗口。虽然不同紫斑牡丹品种间展瓣期长度存在差异,但品种内稳定性高,这种通过延长花部展示时间来补偿传粉机会的办法,优化了传粉资源配置,保障异交过程的完成。此外,不同紫斑牡丹柱头可授期(7 d)与花粉活力维持时间(7 d)高度匹配,且均覆盖展瓣期的主要阶段,为雌雄配子体的有效结合提供了时间保障。这种雌雄功能时序的协同性是紫斑牡丹异交为主繁

育系统的重要适应特征。

3.2 紫斑牡丹繁育系统类型及其生物学意义

在本研究中,不同紫斑牡丹花粉胚珠比(P/O)值整体偏高,表明其以异交为主的繁殖策略;人工授粉试验中,异株异花授粉处理结实率显著高于同株异花授粉处理,表明紫斑牡丹对外源花粉具有较强依赖,异交优势明显;而去雄套袋处理完全不结实,排除了无融合生殖的可能性。综上可知,紫斑牡丹繁育系统为以异交为主、保留有限自交能力的混合交配系统。

本研究调查发现,紫斑牡丹品种间的自交亲和性存在差异,而非单一的自交不亲和模式,其中‘五子拜佛’只有平均值为5.53%的自交能力,而‘赛墨莲’则保持较强的不亲和。这种分化可能与人工驯化史中不同的选择压力相关。从演化角度看,紫斑牡丹保留的这种低频自交能力,为其在传粉媒介匮乏或高寒等极端生境下提供了关键的生殖保障,确保了种群的最低限度延续。该结果与Baker^[16]关于广布种保留自交能力以应对环境不确定性的理论相符,也揭示了紫斑牡丹在复杂环境下维持遗传多样性与繁殖稳定性之间的平衡策略。

在芍药属内,紫斑牡丹的繁育系统表现出与凤丹(*P. ostii* ‘Fengdan’)、大花黄牡丹(*P. ludlowii*)和四川牡丹(*P. decomposita*)相似的混合交配特征,即在高P/O值和异交优势的基础上保留了一定的自交潜力^[17-19],主要表现为:在传粉环境优越时,通过高频率异交提升后代的遗传多样性与适合度;而在传粉受限的不利条件下,则依赖有限的自交能力规避繁殖失败的风险。这种混合交配系统在被子植物中普遍存在,被认为是平衡遗传多样性维持与繁殖保障的一种演化适应策略^[20]。与趋向严格异交的矮牡丹(*P. suffruticosa* subsp. *spontanea*)和滇牡丹(*P. delavayi*)相比^[21-22],紫斑牡丹这种策略的形成可能受其生境中传粉者组成及种群密度的影响。

3.3 紫斑牡丹的繁殖保障策略

对于以异交为主的虫媒植物而言,传粉者数量和行为的不确定性是制约其生殖成功的主要因素,因此多层次的繁殖保障策略被认为是其长期演化的重要结果^[23]。本研究结果表明,紫斑牡丹通过花部吸引、授粉时间延展及自交补偿三重机制协同作用,构建了相对完善的繁殖保障体系。

在花部吸引机制方面,紫斑牡丹花朵整体开展、花色对比明显,雄蕊数量多(平均182.52枚)且

花粉供给充足(P/O 值达 $139.98 \times 10^3 \sim 320.85 \times 10^3$), 可为膜翅目和双翅目昆虫提供稳定而高价值的花粉资源。访花观察表明, 蜜蜂科类访花频次最高, 食蚜蝇科次之, 两类传粉者的访花行为与紫斑牡丹花部结构高度匹配, 有利于提高花粉输出效率并促进异交发生。在虫媒植物中, 这种基于个体资源优势的吸引机制, 在种群水平上往往表现出显著的密度依赖效应, 即高密度开花个体通过形成“资源斑块”增强对传粉者的整体吸引力^[24]。紫斑牡丹鲜明的视觉信号与充足的花粉供给可能通过集群效应放大对传粉者的吸引力, 在提高授粉精确度的同时, 有效降低了因传粉者匮乏导致的繁殖风险。

在授粉时间延展机制方面, 紫斑牡丹在群体和单花两个层次均表现出明显的时间延展策略。群体水平上, 花期集中且盛花期高度重叠, 能在短时间内形成集中的视觉和化学信号, 增强对传粉者的吸引; 同时不同品种展瓣期长度差异明显, 在群体尺度上拓展了有效授粉时间, 降低了短期气候波动或昆虫活动不规律对紫斑牡丹繁殖的影响。在单花水平上, 柱头可授期与花粉活力期的高度一致, 为实现异花授粉及花粉竞争提供了充裕的时空条件。这种时空尺度上的延展策略不仅优化了传粉者的资源利用效率, 也能显著提高虫媒植物的异交成功率。

在自交补偿机制方面, 人工授粉及套袋试验表明, 紫斑牡丹结实高度依赖昆虫传粉, 但在传粉隔离下部分品种仍能形成少量自交种子, 这种有限的自交能力在传粉者数量不足、天气恶劣或花期错位的极端条件下可维持基本的繁殖, 降低繁殖失败的风险。

上述三重机制的协同作用, 不仅优化了紫斑牡丹在正常条件下的异交效率, 也为在不利条件下提供了生殖保障, 为其在自然种群及人工栽培中的繁殖成功奠定了基础。本研究主要基于单一栽培环境开展, 未来研究应进一步探讨不同海拔梯度下以上保障机制的稳定性, 以优化紫斑牡丹人工栽培中的授粉管理策略。

4 结 论

紫斑牡丹花型多样性主要源于花瓣和雄蕊等数量性状的变异, 而花径等整体尺度性状保持相对稳定。其开花过程呈集中模式, 单花花期以展瓣期为主。花粉活力、柱头可授性与盛花期访花昆虫活

动在时间上具有良好同步性, 自然条件下主要依赖蜜蜂科和食蚜蝇科等昆虫完成授粉。紫斑牡丹属于以异交为主、兼具自交能力的混合交配系统, 不存在无融合生殖现象, 繁殖过程依赖传粉者介导。

【参考文献】

- [1] Barrett S C H, Harder L D. Ecology and evolution of plant mating[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1996, 11(2): 73-79.
- [2] 王洁, 杨志玲, 杨旭. 濒危植物繁育系统研究进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 207-213.
Wang J, Yang Z L, Yang X. Advances in the studies of endangered plants' breeding system[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2011, 39(9): 207-213.
- [3] 何亚平, 刘建全. 植物繁育系统研究的最新进展和评述[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 151-163.
He Y P, Liu J Q. A review on recent advances in the studies of plant breeding system[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2003, 27(2): 151-163.
- [4] Barrett S C H. The evolution of plant sexual diversity[J]. Nature Reviews Genetics, 2002, 3(4): 274-284.
- [5] 李可钺, 王富贵, 王再旺, 等. 三七开花生物学与繁育系统研究[J]. 广西植物, 2025, 45(2): 360-376.
Li K C, Wang F G, Wang Z W, et al. Flowering biology and breeding system of *Panax notoginseng* [J]. Guihaia, 2025, 45(2): 360-376.
- [6] 成仿云. 中国紫斑牡丹[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
Cheng F Y. Chinese flare Mudan [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005.
- [7] 彭腾腾, 范彬, 石晓峰, 等. 紫斑牡丹的化学成分、活性与开发利用研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(4): 717-735.
Peng T T, Fan B, Shi X F, et al. Research progress on chemical composition, activity, development and utilization of *Paeonia rockii* [J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(4): 717-735.
- [8] 唐红, 薛娜娜, 陶宣霖, 等. 赤霉素和褪黑素对盐碱胁迫下紫斑牡丹幼苗生长及生理特性的影响[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2026, 54(5): 1-10 (2025-11-28) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.05.009>.
Tang H, Xue N N, Tao X L, et al. Effects of gibberellin and melatonin on growth and physiological characteristics of *Paeonia rockii* seedlings under saline-alkali stress[J/OL]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2026, 54(5): 1-10 (2025-11-28) [2026-01-05]. <https://doi.org/10.13207/j.jnwafu.2026.05.009>.
- [9] Zhu J, Wang Y Z, Wang Q Y, et al. The combination of DNA methylation and positive regulation of anthocyanin biosynthesis by MYB and bHLH transcription factors contributes to the petal blotch formation in *Paeonia rockii* [J]. Horticulture Research, 2023, 10: uhad100.
- [10] IBPGR. Descriptors for plant genetic resources[M]. Rome: In-

- ternational Board for Plant Genetic Resources, 1980.
- [11] 杨翔. 大花黄牡丹种群生态学研究[D]. 拉萨:西藏大学, 2010.
- Yang X. Studies on population ecology of *Paeonia ludlowii* in Xizang[D]. Lhasa: Xizang University, 2010.
- [12] Dafni A. Pollination ecology: a practical approach [M]. New York: Oxford University Press, 1992: 18-21.
- [13] Cruden R W. Pollen-ovule ratios: a conservative indicator of breeding systems in flowering plants [J]. Evolution, 1977, 31 (1): 32-46.
- [14] Sánchez-Lafuente A M, Guitián J, Medrano M, et al. Floral variation in the generalist perennial herb *Paeonia broteroi* (Paeoniaceae): differences between regions with different pollinators and herbivores [J]. American Journal of Botany, 2002, 89(8): 1260-1269.
- [15] 任磊. 牡丹花器官发育相关基因的克隆与表达[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- Ren L. Cloning and expression of floral organ related genes in tree peony [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [16] Baker H G. Self-compatibility and establishment after 'long-distance' dispersal [J]. Evolution, 1955, 9(3): 347-349.
- [17] 骆劲涛. 四川牡丹的传粉生物学研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2013.
- Luo J T. Study on pollination biology of *Paeonia suffruticosa* in Sichuan [D]. Ya'an, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [18] 唐英, 袁涛, 陈庭巧. 大花黄牡丹的开花特性与繁育系统[J]. 西北植物学报, 2021, 41(5): 782-794.
- Tang Y, Yuan T, Chen T Q. Flowering characteristics and breeding system of *Paeonia ludlowii* [J]. Acta Botanica Borali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(5): 782-794.
- [19] 罗长维, 陈友, 张涛. 凤丹繁育系统与传粉生物学研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 37-44.
- Luo C W, Chen Y, Zhang T. Breeding system and pollination biology of *Paeonia ostii* T. Hong & J. X. Zhang [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(3): 37-44.
- [20] 胡正艳, 郑全晶, 母其勇, 等. 不同纬度高蔊菜的交配系统和繁殖保障[J]. 生物多样性, 2021, 29(6): 712-721.
- Hu Z Y, Zheng Q J, Mu Q Y, et al. The mating system and reproductive assurance of *Rorippa elata* (Brassicaceae) across latitude [J]. Biodiversity Science, 2021, 29(6): 712-721.
- [21] 李奎. 滇牡丹保护生物学与遗传多样性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- Li K. Research on conservation biology and genetic diversity of *Paeonia delavayi* complex (Paeoniaceae) [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [22] 罗毅波, 裴颜龙, 潘开玉, 等. 矮牡丹传粉生物学的初步研究[J]. 植物分类学报, 1998(2): 134-144.
- Luo Y B, Pei Y L, Pan K Y, et al. A study on pollination biology of *Paeonia suffruticosa* subsp. *Spontanea* (Paeoniaceae) [J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 1998(2): 134-144.
- [23] Stephenson A G. Flower and fruit abortion: proximate causes and ultimate functions [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1981, 12(1981): 253-279.
- [24] 王江铭, 代英超, 周鑫洋, 等. 珍稀濒危植物象鼻兰繁育系统与传粉生物学研究[J]. 园艺学报, 2025, 52(11): 2899-2912.
- Wang J M, Dai Y C, Zhou X Y, et al. Breeding system and pollination biology of rare and endangered *Phalaenopsis zhejiangensis* [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(11): 2899-2912.

(责任编辑: 李小平)