

引用格式: 刘惠玉, 刘一洁, 谭博毫, 等. 兰州百合远缘杂交亲和性及后代真实性检验[J]. 浙江农林大学学报, 2026, 43(2): 351–360. LIU Huiyu, LIU Yijie, TAN Bohao, et al. Assessment of crossability and authenticity of progeny in distant hybridization of *Lilium davidii* var. *unicolor*[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2026, 43(2): 351–360.

兰州百合远缘杂交亲和性及后代真实性检验

刘惠玉¹, 刘一洁¹, 谭博毫¹, 马小鸥¹, 董钦金², 蒙敏², 魏启森¹, 孙明¹

(1. 北京林业大学 林木资源高效生产全国重点实验室/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/园林环境教育部工程研究中心/林木花卉遗传育种教育部重点实验室/园林学院, 北京 100083; 2. 四川省亿尚农业旅游开发有限公司, 四川 绵阳 621602)

摘要: 【目的】研究兰州百合 *Lilium davidii* var. *unicolor* 与不同品系观赏百合 *Lilium* 杂交亲和性, 为培育多用途优良百合新品种提供种质资源和技术支撑。【方法】对所有供试百合花粉活力进行检验, 根据结果配置以兰州百合为父本, ‘虎宝宝’ ‘Tiger Babies’、‘紫梦’ ‘Purple Dream’、‘黑色魅力’ ‘Black Charm’、‘甜糖’ ‘Sweet Sugar’、‘眼线’ ‘Eye Liner’、‘小玩意’ ‘Gizmo’、‘守望’ ‘Watch Up’ 为母本, 以及以兰州百合为母本, ‘紫梦’ ‘黑色魅力’ ‘守望’ 为父本的 10 个杂交组合。采用直接授粉、切割柱头授粉、1 g·L⁻¹ 茶乙酸 (NAA) 水溶液涂抹柱头授粉 3 种方式进行杂交, 结合花粉管生长和结实情况评价组合亲和性, 并利用简单重复序列标记 (SSR) 技术对胚培养获得的杂种实生苗进行真实性检验。【结果】①杂交亲和性评价表明: ‘甜糖’ ‘黑色魅力’ 作为母本与兰州百合杂交亲和性较高, ‘眼线’ ‘虎宝宝’ ‘紫梦’ 作为母本与兰州百合杂交亲和性次之, 而 ‘守望’ 和 ‘小玩意’ 作为母本与兰州百合杂交亲和性低。②直接授粉操作简便且普适性强。③SSR 鉴定结果显示: ‘甜糖’ × 兰州百合、‘黑色魅力’ × 兰州百合、‘虎宝宝’ × 兰州百合、‘眼线’ × 兰州百合、兰州百合 × ‘黑色魅力’、兰州百合 × ‘紫梦’ 的杂交后代共 145 株实生苗均为真杂种。【结论】兰州百合与不同品系百合亲和性存在差异, 本研究筛选出了高亲和亲本 ‘甜糖’ ‘黑色魅力’; 切割柱头授粉可改善 ‘虎宝宝’ × 兰州百合的坐果率; SSR 标记技术可以实现对杂种苗的早期准确鉴定。图 2 表 6 参 34

关键词: 兰州百合; 远缘杂交; 杂交亲和性; 杂种鉴定

中图分类号: S722.3 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2026)02-0351-10

Assessment of crossability and authenticity of progeny in distant hybridization of *Lilium davidii* var. *unicolor*

LIU Huiyu¹, LIU Yijie¹, TAN Bohao¹, MA Xiao'ou¹, DONG Qinjin², MENG Min², WEI Qisen¹, SUN Ming¹

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources/Beijing Key Laboratory of Ornamental Plants Germplasm Innovation & Molecular Breeding/National Engineering Research Center for Floriculture/Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment/Engineering Research Center of Landscape Environment of Ministry of Education/Key Laboratory of Genetics and Breeding in Forest Trees and Ornamental Plants of Ministry of Education/School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Sichuan Yishang Agricultural Tourism Development Co., Ltd., Mianyang 621602, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate hybrid affinity between *Lilium davidii* var. *unicolor* and *Lilium* ornamental cultivars, and to provide germplasm resources and technical support for breeding multi-

收稿日期: 2025-08-07; 修回日期: 2025-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (32471936); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (QNTD202503); 国家资助博士后研究人员计划 (GZC20230248)

作者简介: 刘惠玉 (ORCID: 0009-0002-9495-2960), 从事花卉种植资源与遗传育种研究。E-mail: liuhuiyu@bjfu.edu.cn. 通信作者: 孙明 (ORCID: 0000-0001-7037-0822), 教授, 博士, 从事观赏植物栽培、遗传育种与分子生物学研究。E-mail: sunming@bjfu.edu.cn

purpose lilies. [Method] Pollen viability of all tested lilies was examined. Based on the results, 10 cross combinations were established: using *L. davidii* var. *unicolor* as the male parent with ‘Tiger Babies’ ‘Purple Dream’ ‘Black Charm’ ‘Sweet Sugar’ ‘Eye Liner’ ‘Gizmo’ and ‘Watch Up’ as female parents, and using *L. davidii* var. *unicolor* as the female parent with ‘Purple Dream’ ‘Black Charm’ and ‘Watch Up’ as male parents. 3 pollination methods were employed, including direct pollination, cut-style pollination, and stigma application with $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ NAA solution. Cross-compatibility was evaluated based on pollen tube growth and fruit set. The authenticity of hybrid seedlings obtained through embryo culture was assessed using SSR markers. [Result] (1) Cross-compatibility analysis revealed that ‘Sweet Sugar’ and ‘Black Charm’ exhibited the highest compatibility with *L. davidii* var. *unicolor*, followed by ‘Eye Liner’ ‘Tiger Babies’ and ‘Purple Dream’. In contrast, ‘Watch Up’ and ‘Gizmo’ showed low compatibility. (2) Direct pollination was the simplest and most universally applicable method. (3) SSR analysis revealed that all 145 seedlings from the 6 hybrid combinations (‘Sweet Sugar’ \times *L. davidii* var. *unicolor*, ‘Black Charm’ \times *L. davidii* var. *unicolor*, ‘Tiger Babies’ \times *L. davidii* var. *unicolor*, ‘Eye Liner’ \times *L. davidii* var. *unicolor*, *L. davidii* var. *unicolor* \times ‘Black Charm’, and *L. davidii* var. *unicolor* \times ‘Purple Dream’) were authentic hybrids. [Conclusion] The study revealed distinct cross-compatibility between *L. davidii* var. *unicolor* and different lily cultivars, identifying ‘Sweet Sugar’ and ‘Black Charm’ as highly compatible parents. Cut-style pollination is an effective technique for improving fruit set in the cross of ‘Tiger Baby’ \times *L. davidii* var. *unicolor*. SSR marker technology enables early and accurate identification of hybrid seedlings. [Ch, 2 fig. 6 tab. 34 ref.]

Key words: *Lilium davidii* var. *unicolor*; distant hybridization; hybrid compatibility; hybrid identification

百合是百合科 Liliaceae 百合属 *Lilium* 的多年生鳞茎类草本植物, 目前已发现 100 多种野生百合, 培育品种超过 1 万个^[1-3]。其中, 兰州百合 *Lilium davidii* var. *unicolor* 是川百合 *L. davidii* 的变种, 主要分布于中国西北干旱半干旱地区, 具有较强的耐旱性^[4]。其鳞茎含有丰富的氨基酸、碳水化合物以及多种生物活性物质, 是重要的赏食兼用百合资源^[5], 但兰州百合花型与花色单一^[6], 因此, 将兰州百合与观赏百合进行远缘杂交, 利用双方优势, 为培育多用途优良百合品种提供种质基础, 对百合产业可持续发展具有重要的研究意义。

在百合多种育种方式中, 远缘杂交是有效手段之一^[7-8], 但由于百合品种遗传背景复杂, 育种过程中通常会表现出配子不亲和、受精障碍和胚胎败育等杂交障碍^[9]。因此, 评价亲本间亲和性并探索有效克服杂交障碍的手段, 对提升杂交成功率具有重要意义。同时, 由于百合生长发育周期长, 早期应用分子标记技术如简单重复序列标记 (SSR) 可快速鉴定百合杂交后代的真实性^[10], 能有效节省育种资源与周期, 大大提升育种效率。

本研究旨在利用亲本优势, 选择 7 种不同品系观赏性状优良的百合材料, 以及抗旱性与食用性优良但观赏性不足的兰州百合作为杂交亲本, 通过花粉活性评价筛选合适亲本, 采用直接授粉、切割柱头授粉和 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 萘乙酸 (NAA) 水溶液涂抹柱头授粉 3 种方式进行杂交。结合花粉管观察与杂交结实情况统计综合评价亲和性, 并利用 SSR 分子标记对杂交后代进行早期真实性鉴定, 为后续多用途百合新品种选育提供理论依据和中间种质。

1 材料与方法

1.1 材料

以兰州百合、亚洲百合杂种系 (A) 品种 ‘虎宝宝’ ‘Tiger Babies’、‘紫梦’ ‘Purple Dream’、‘黑色魅力’ ‘Black Charm’, 麝香百合 *L. Longiflorum* \times 亚洲百合杂种系 (LA) 品种 ‘甜糖’ ‘Sweet Sugar’、‘眼线’ ‘Eye Liner’, 麝香百合 \times 东方百合杂种系 (LO) 品种 ‘小玩意’ ‘Gizmo’, 麝香百合杂种系 (L) 品种 ‘守望’ ‘Watch Up’ 为材料 (图 1)。温室内种植, 常规水肥管理。



A. ‘虎宝宝’；B. ‘紫梦’；C. ‘黑色魅力’；D. ‘甜糖’；E. ‘眼线’；F. ‘小玩意’；G. ‘守望’；H. 兰州百合。

图 1 百合样本花器官

Figure 1 Flowers of the sampling lilies

1.2 组合选配与杂交

1.2.1 花粉活力测定 参考凌吴等^[11]的方法，使用光学显微镜观察并统计花粉的萌发情况，随机选取 3 个视野，每个视野不少于 100 个花粉粒。花粉管若长于花粉粒直径，则认为花粉已经萌发，计算花粉萌发率。花粉萌发率=萌发花粉粒数/视野内花粉粒总数×100%。

1.2.2 花粉贮存与授粉 在花朵开放前采集花药，于阴凉干燥处静置 24 h，使其自然散粉并收集保存。以兰州百合为母本，‘紫梦’‘黑色魅力’‘守望’为父本，以及兰州百合为父本，‘虎宝宝’‘紫梦’‘黑色魅力’‘甜糖’‘眼线’‘小玩意’‘守望’为母本，共 10 个杂交组合进行杂交，授粉前 1~2 d 进行去雄操作，并在 7:00—11:00 采用 3 种授粉方法授粉：①直接授粉，把花粉涂抹到柱头上，然后用锡纸裹住柱头；②切割柱头授粉，用小刀切除 2/3 花柱，在横断面中间纵切 0.2 cm 深，将纵裂撑开，授新鲜的父本花粉，然后用锡纸裹住柱头；③NAA 涂抹柱头授粉，在柱头上涂抹 1 g·L⁻¹ 的 NAA 水溶液后授粉，然后用锡纸裹住柱头。总计授粉 1231 朵，授粉后挂上标签，1 周后摘除锡纸。

1.2.3 杂交结果统计 在授粉 30 d 后统计杂交结果情况，并计算蒴果膨大率、坐果率和有胚率。膨大率=膨大蒴果数(授粉 30 d 后的膨大蒴果)/杂交花朵数×100%；坐果率=结实蒴果数(授粉后成活时间大于 40 d 的蒴果)/杂交花朵数×100%；有胚率=有胚种子数/全部种子数×100%。

1.2.4 花粉管行为观察 花粉管荧光观察参考雷家军等^[12]的方法，取杂交组合直接授粉后 4、8、12、24、36、48、72、120 h 的母本花柱和子房各 3~5 个进行固定染色，在荧光显微镜下，观察记录花粉粒在柱头上的萌发情况、花粉管的生长状况以及向胚珠伸长的过程。

1.3 胚培养

取 50~60 d 膨大的蒴果，消毒处理后，将有胚种子接种到培养基中。胚萌发与胚培养的培养基为：MS 培养基 + 6 g·L⁻¹ 琼脂 + 30 g·L⁻¹ 蔗糖 + 0.1 mg·L⁻¹ NAA + 1.0 mg·L⁻¹ 6-苄基腺嘌呤(6-BA)^[13]，总计接种数为 1726 个，计算幼胚萌发率：萌发率=萌发胚数/接种胚数×100%。

1.4 杂种后代 SSR 标记鉴定

选择杂交亲本和生长健壮的杂种后代组培幼苗，采用十六烷基三甲基溴化铵法(CTAB)^[14]从叶片中分离并纯化出完整的脱氧核糖核酸分子，用于后续的遗传分析。根据已有文献[15-16]筛选 5 对 SSR 引物进行合成(表 1)，通过初筛选择在亲本中扩增稳定且具有多态性的 SSR 引物，用于全部百合杂交后代鉴定和遗传分析，杂种扩增结果中具有双亲特征条带的为真杂种，只有母本特征带而无父本特征带的后代为假杂种或自交种^[17]。

1.5 数据统计与分析

运用 Excel 软件对试验数据进行处理，应用 SPSS 软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA)，邓肯法(Duncan)比较各处理之间的显著性差异。

表1 引物和序列信息

Table 1 Primer and sequence information

| 引物名称 | 上游引物(5'→3') | 下游引物(5'→3') |
|------------|--------------------------|--------------------------|
| ivflmre179 | GCGAGCGTGTCAATAATAAC | CATCCCTACATCAAGACCGT |
| ivflmre738 | CATACATCCATCCGATTACA | TGGTTTCATGACGTTTCGT |
| ivflmre486 | GCCCAACCCACTCTTCT | GCTGCTGAATATGCCCTC |
| MJ037 | CACAATCTCTGCTACCAGAACAAA | TATCCCGTTATCCTTGAGATAGGA |
| MJ066 | CTTTATCAACCAACTTCTCAGGT | ATGAGACTGACGGGAAGAGAG |

2 结果与分析

2.1 花粉萌发率

观察发现各材料花粉萌发率存在差异,其中兰州百合花粉萌发率为34.33%,‘虎宝宝’‘甜糖’‘眼线’‘小玩意’的花粉未萌发,‘紫梦’花粉萌发率最高,达到46.70%,‘黑色魅力’花粉萌发率仅为0.91%,‘守望’花粉萌发率为36.73%(表2)。因此,以兰州百合为母本时,选定‘紫梦’‘黑色魅力’‘守望’作为父本;兰州百合为父本时,选定‘虎宝宝’‘紫梦’‘黑色魅力’‘甜糖’‘眼线’‘小玩意’‘守望’作为母本杂交。

表2 不同百合材料花粉萌发率

Table 2 Pollen germination rate of different samples of *Lilium*

| 材料 | 萌发率/% | 材料 | 萌发率/% |
|--------|--------------|-------|--------------|
| 兰州百合 | 34.33±4.12 b | ‘甜糖’ | 0 |
| ‘虎宝宝’ | 0 | ‘眼线’ | 0 |
| ‘紫梦’ | 46.70±0.60 a | ‘小玩意’ | 0 |
| ‘黑色魅力’ | 0.91±0.24 c | ‘守望’ | 36.73±2.92 b |

说明:数据为平均值±标准误。同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

2.2 花粉管荧光观察结果

‘甜糖’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2A):授粉4 h后,花粉在柱头上大量萌发,8 h后花粉管在柱头上伸长,开始向花柱延伸,24 h后花粉管沿着柱头向子房方向延伸,到达花柱1/2处,48 h后花粉管成簇状,到达花柱底部开始伸入子房,72 h后花粉管伸入子房,进入胚珠。‘眼线’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2B):授粉4 h时大量花粉附着于柱头开始萌发,花粉管较短,24 h时已萌发的花粉管仍缠绕在柱头且产生大量胼胝质,花粉管生长变慢,72 h时大量花粉管向花柱延伸至3/5处发生折叠、缠绕停止生长,96 h时少部分花粉管继续往子房延伸,120 h时极少数花粉管进入子房,完成受精。‘虎宝宝’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2C):授粉4 h时大量花粉在柱头上萌发,24 h时花粉管伸长,产生大量胼胝质,部分花粉管基部膨大,缩短增粗,48 h时花粉管伸长到花柱1/3处,部分花粉管折叠停止生长,72 h时一部分花粉管聚集成簇状延伸至花柱底部,开始伸入子房,96 h时花粉管进入子房完成受精。‘紫梦’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2D):授粉4 h时少量花粉在柱头上萌发,8 h时花粉大量萌发且开始伸长但仍附着在柱头上,24 h时产生大量胼胝质,部分花粉管停止生长,48 h时花粉管向下延伸至花柱底部,开始进入子房,72 h时部分花粉管进入子房,完成受精。‘黑色魅力’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2E):授粉4 h时花粉在柱头上萌发,8 h时花粉开始向柱头延伸,逐渐聚集成簇状,24 h时簇状花粉管到达花柱1/2处,48 h时花粉管向下延伸至花柱底部,开始进入子房,72 h时部分花粉管进入子房,完成受精。‘守望’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2F):授粉24 h时柱头上仅少量附着且花粉不萌发;‘小玩意’×兰州百合花粉管生长荧光观察结果显示(图2G):授粉24 h时柱头上无花粉附着。

‘甜糖’‘眼线’‘虎宝宝’‘紫梦’‘黑色魅力’作为母本与兰州百合杂交时,柱头花粉均能萌发,花粉管可以延伸到子房完成受精,表明组合杂交亲和性良好。其中‘眼线’‘虎宝宝’‘紫

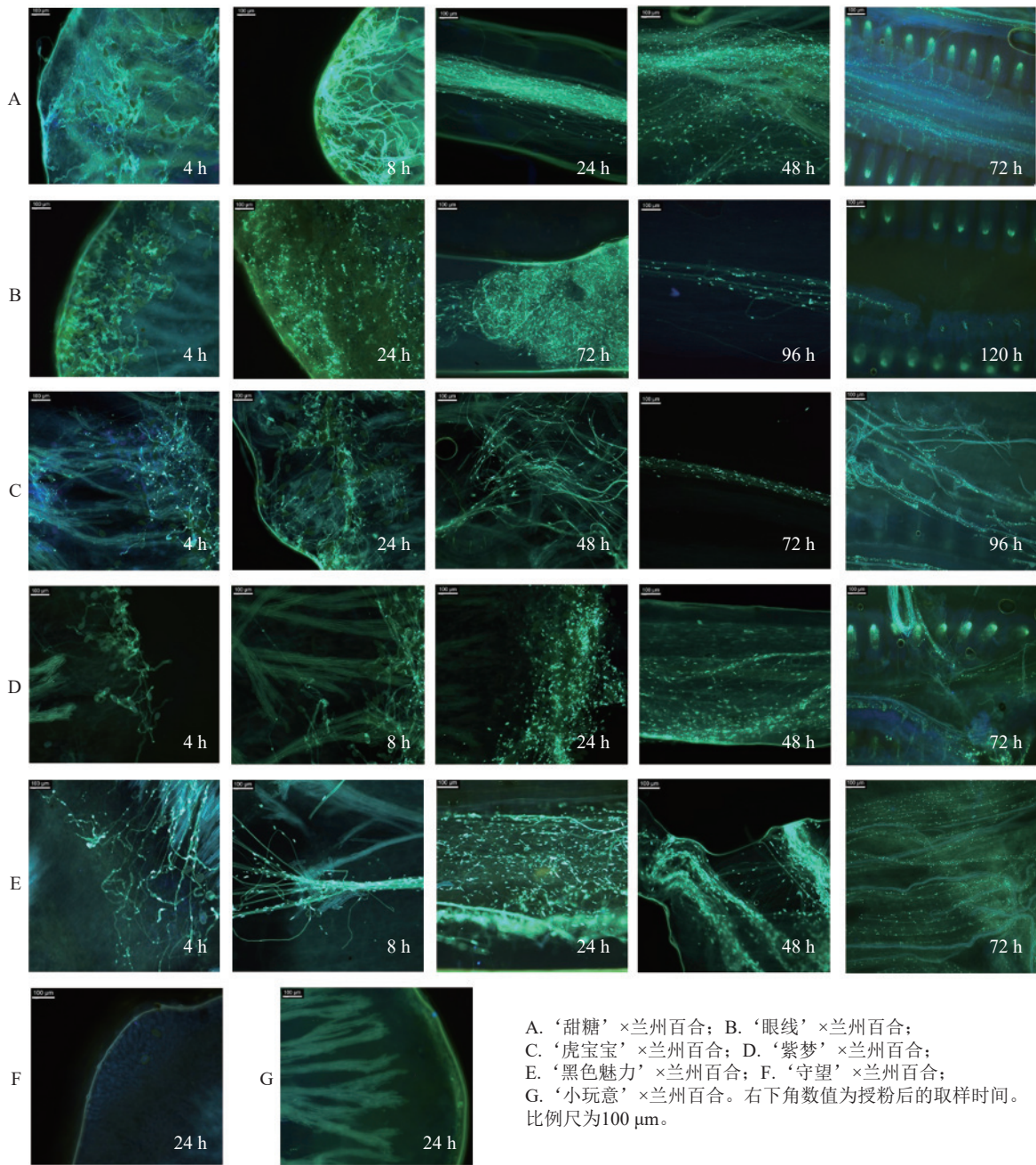


图 2 花粉管荧光观察结果

Figure 2 Fluorescence observation results of pollen tubes

梦’作为母本杂交时，花粉管中途出现异常现象，表明其与兰州百合杂交亲和性次于‘甜糖’和‘黑色魅力’。而‘守望’和‘小玩意’作为母本时，仅有少部分花粉附着或无附着，说明其与兰州百合杂交亲和性差。

2.3 杂交结实情况

以亚洲百合(除‘虎宝宝’)为母本进行杂交时，3种授粉方法的果实膨大率和坐果率均较高。‘虎宝宝’作母本时，NAA涂抹柱头授粉方法抑制了果实的膨大和坐果，而切割授粉方法则将膨大率和坐果率提高至95.00%，说明切割授粉是‘虎宝宝’与兰州百合杂交的最优方法(表3)。“紫梦”和“黑色魅力”为母本进行杂交时，直接授粉和NAA涂抹柱头授粉方法均取得了较好的效果，尤其是后者的果实膨大率达到了100.00%，坐果率也超过了80.00%。LA系列百合(‘甜糖’和‘眼线’)为母本时，直接授粉的效果最好，NAA涂抹柱头授粉次之，切割授粉效果较差，其中直接授粉的果实膨大率超过80.00%，坐果率超过70.00%。LO系列百合‘小玩意’与L系列百合‘守望’作为母本时，所有授粉方

表3 不同授粉方法杂交结实情况

Table 3 Seed setting of hybrids with different pollination methods

| 杂交组合 | 授粉方法 | 杂交花朵数/个 | 果实膨大数/个 | 果实膨大率/% | 结实蒴果数/个 | 坐果率/% | 有胚种子数/个 | 种子总数/个 | 有胚率/% |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|-------|
| ‘虎宝宝’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 79 | 46 | 58.23 | 39 | 49.37 | 36 | 1821 | 1.98 |
| | 切割授粉 | 40 | 38 | 95.00 | 38 | 95.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 40 | 13 | 32.50 | 11 | 27.50 | ND | ND | ND |
| ‘紫梦’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 22 | 22 | 100.00 | 18 | 81.82 | 24 | 1389 | 1.73 |
| | 切割授粉 | 30 | 22 | 73.33 | 15 | 50.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 10 | 10 | 100.00 | 8 | 80.00 | ND | ND | ND |
| ‘黑色魅力’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 140 | 140 | 100.00 | 140 | 100.00 | 190 | 2089 | 9.10 |
| | 切割授粉 | 30 | 18 | 60.00 | 18 | 60.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 40 | 40 | 100.00 | 39 | 97.50 | ND | ND | ND |
| ‘眼线’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 122 | 102 | 83.61 | 93 | 76.23 | 23 | 4322 | 0.53 |
| | 切割授粉 | 50 | 26 | 52.00 | 19 | 38.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 60 | 32 | 53.33 | 31 | 51.67 | ND | ND | ND |
| ‘甜糖’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 150 | 138 | 92.00 | 125 | 83.33 | 306 | 3774 | 8.11 |
| | 切割授粉 | 50 | 22 | 44.00 | 12 | 24.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 79 | 50 | 63.29 | 42 | 53.16 | ND | ND | ND |
| ‘守望’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 100 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | - |
| | 切割授粉 | 30 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 30 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | ND | ND | ND |
| ‘小玩意’ × 兰州百合 | 直接授粉 | 30 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | - |
| | 切割授粉 | 30 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | ND | ND | ND |
| | NAA涂抹柱头 | 30 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | ND | ND | ND |
| 兰州百合 × ‘黑色魅力’ | 直接授粉 | 19 | 16 | 84.21 | 10 | 52.63 | 135 | 3074 | 4.39 |
| 兰州百合 × ‘紫梦’ | 直接授粉 | 10 | 8 | 80.00 | 8 | 80.00 | 26 | 3840 | 0.68 |
| 兰州百合 × ‘守望’ | 直接授粉 | 10 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0 | - |

说明：有胚种子数据仅来源于直接授粉方法，ND表示未测定，-表示因有胚种子数为0，无法计算。

法在15 d后蒴果逐渐萎蔫，果实膨大率和坐果率均为0。此外，兰州百合作为母本时，与A系列百合杂交的2个组合的果实膨大率和坐果率均超过50.00%，而与‘守望’杂交后的果实膨大率和坐果率均为0，这可能是由于兰州百合与其亲缘关系较远，无法完成受精和正常发育。由此得出：相较于LO、L系列百合，兰州百合与A、LA系列百合的亲合性较高，且不同杂交组合适宜的授粉方法也存在差异，其中直接授粉虽非所有组合最优方式，但其普适性更高。

对各组合种子总数和有胚种子数进行统计，计算有胚率(表3)。其中‘黑色魅力’ × 兰州百合的有胚率最高，为9.10%，其坐果率达到100.00%，这表明‘黑色魅力’与兰州百合亲合性高。其次是‘甜糖’ × 兰州百合和兰州百合 × ‘黑色魅力’，有胚率分别为8.11%和4.39%，坐果率为83.33%和52.63%。这些数据进一步证实‘黑色魅力’无论作为母本还是父本，都与兰州百合有较好的结实潜力。因此，相较其他组合，‘甜糖’作为母本和‘黑色魅力’作为母本或父本与兰州百合杂交亲合性更高，是合适的杂交选择。

2.4 杂交幼胚的萌发与成苗表现

不同杂交组合幼胚萌发率和成苗率存在差异，兰州百合 × ‘紫梦’幼胚萌发率最高为77.78%，成苗率为85.71%(表4)；兰州百合 × ‘黑色魅力’的幼胚萌发率为48.78%，成苗率相对较低，仅为76.67%；‘紫梦’ × 兰州百合、‘黑色魅力’ × 兰州百合和‘甜糖’ × 兰州百合的幼胚萌发率分别为23.91%、

表 4 不同组合幼胚萌发与成苗情况

Table 4 Germination and seedling formation of young embryos in different combinations

| 杂交组合 | 接种数/个 | 萌发数/个 | 萌发率/% | 成苗数/株 | 成苗率/% |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ‘虎宝宝’×兰州百合 | 154 | 26 | 16.88 | 18 | 69.23 |
| ‘紫梦’×兰州百合 | 46 | 11 | 23.91 | 10 | 90.91 |
| ‘黑色魅力’×兰州百合 | 433 | 198 | 45.73 | 187 | 94.44 |
| ‘眼线’×兰州百合 | 150 | 20 | 13.33 | 16 | 80.00 |
| ‘甜糖’×兰州百合 | 811 | 338 | 41.68 | 291 | 86.09 |
| 兰州百合×‘黑色魅力’ | 123 | 60 | 48.78 | 46 | 76.67 |
| 兰州百合×‘紫梦’ | 9 | 7 | 77.78 | 6 | 85.71 |

45.73%、41.68%，成苗率都在 85.00% 以上；‘虎宝宝’×兰州百合和‘眼线’×兰州百合的幼胚萌发率较低，分别为 16.88%、13.33%，成苗率为 69.23% 和 80.00%。

2.5 杂种鉴定

对 SSR 引物 ivflmre179、ivflmre738、ivflmre486、MJ037 和 MJ066 在亲本中进行筛选，扩增产物片段大小见表 5，选择在亲本间有明显特异性条带且多态性较好的引物 ivflmre179 用于后续子代的鉴定。

表 5 亲本 SSR 扩增结果

Table 5 SSR amplification results of parents

| 编号 | 等位基因片段大小/bp | | | | |
|------|---------------|------------|------------|---------------|----------|
| | ivflmre179 | ivflmre738 | ivflmre486 | MJ037 | MJ066 |
| T(♀) | 194, 212, 216 | 214 | 132 | 266, 277 | 193 |
| L(♀) | 210 | 224, 226 | 129 | 274 | 211 |
| M(♂) | 212 | 212 | 132 | 269 | 193 |
| H(♀) | 198, 212 | 214, 234 | 132, 138 | 263, 266 | 193 |
| Y(♀) | 194, 208, 212 | 212, 214 | 132 | 269, 272, 278 | 193, 199 |
| Z(♂) | 212, 216 | 212, 214 | 130 | 260, 266, 269 | 193 |

说明：T. ‘甜糖’；L. 兰州百合；M. ‘黑色魅力’；H. ‘虎宝宝’；Y. ‘眼线’；Z. ‘紫梦’。

使用所筛选的特异性条带清晰的 SSR 引物 ivflmre179 扩增子代，‘甜糖’×兰州百合杂交子代 99 株、‘黑色魅力’×兰州百合杂交子代 10 株、‘虎宝宝’×兰州百合杂交子代 9 株、‘眼线’×兰州百合杂交子代 5 株、兰州百合×‘黑色魅力’杂交子代 18 株、兰州百合×‘紫梦’的杂交后代 4 株，共 145 株子代中均可以扩增出父母本的特异性条带(表 6)，鉴定所有后代均为真杂种。

表 6 杂交子代 SSR 扩增结果

Table 6 SSR amplification results of hybrid offspring

| 编号 | 等位基因片段大小/bp | 编号 | 等位基因片段大小/bp | 编号 | 等位基因片段大小/bp | 编号 | 等位基因片段大小/bp |
|--------|---------------|--------|---------------|-------|---------------|-----------|---------------|
| ML1~10 | 210, 212 | LZ1~4 | 210, 212 | HL8~9 | 210, 212 | TL9~TL33 | 210, 216 |
| YL1 | 194, 210, 212 | LM1~18 | 210, 212 | TL1~2 | 210, 216 | TL34~TL68 | 210, 212 |
| YL2 | 210, 212 | HL1 | 198, 210, 212 | TL3~4 | 194, 210, 216 | TL69~TL83 | 194, 210, 216 |
| YL3 | 194, 210, 214 | HL2 | 194, 210, 212 | TL5 | 194, 210, 212 | TL84~94 | 194, 210, 212 |
| YL4 | 194, 208, 210 | HL3 | 210, 212 | TL6 | 196, 210, 216 | TL95~99 | 196, 210, 212 |
| YL5 | 210, 212 | HL4~7 | 198, 210, 212 | TL7~8 | 194, 210 | | |

说明：TL. ‘甜糖’×兰州百合；LM. 兰州百合×‘黑色魅力’；ML. ‘黑色魅力’×兰州百合；HL. ‘虎宝宝’×兰州百合；YL. ‘眼线’×兰州百合；LZ. 兰州百合×‘紫梦’。字母后数字代表株系编号。

3 讨论

远缘杂交是百合育种中培育新品种的重要手段之一^[18]，但由于百合属植物遗传背景的复杂性，常存

在远缘杂交不亲和现象。因此,科学评价亲本间的亲和性对提高杂交效率十分重要,目前亲和性常见评价指标包括坐果率和有胚率等^[19]。本研究中‘黑色魅力’×兰州百合的有胚率和坐果率均最高,显示其杂交亲和性高,而‘眼线’×兰州百合虽然坐果率较高,但有胚率很低,说明二者很大程度不亲和^[20],因此,百合杂交育种中,应综合选择多指标进行亲和性评价,从而更准确地筛选高亲杂交组合。

随着荧光显微镜技术的广泛应用^[21],研究者在多种植物中观察到不亲和组合授粉后花粉管出现异常现象或者有强烈的胼胝质反应^[22-25]。本研究中,以‘甜糖’‘眼线’‘虎宝宝’‘紫梦’‘黑色魅力’为母本与兰州百合杂交时,花粉在柱头上萌发并向下延伸受精,其中‘眼线’‘虎宝宝’‘紫梦’在作为母本杂交时部分花粉管出现胼胝质积累、缩短增粗、折叠缠绕停止增长等异常现象,说明存在杂交障碍。‘守望’和‘小玩意’作为母本时,花粉极少附着或不萌发,说明其和兰州百合不亲和,推测是由于柱头分泌物影响花粉的水合作用,抑制了其萌发^[26]。这些观察结果与杂交结果相符,说明花粉管生长与亲和性有一定联系。

上述花粉管行为异常现象属于典型杂交障碍中的受精前障碍表现,而杂交障碍还包括受精后障碍,主要指胚乳或胚等发育异常或败育,通常通过优化授粉方式、适时的胚拯救等克服^[27-28]。本研究比较了直接授粉、切割柱头授粉和NAA涂抹柱头法授粉后不同杂交组合的结实情况,发现授粉方法效果具有组合特异性^[29-30]。其中,‘小玩意’和‘守望’与兰州百合的杂交组合中均未能成功获得膨大的蒴果,这可能由于其和兰州百合的亲缘关系较远,今后可以尝试采取离体授粉^[19]、桥接杂交^[31]等方式提高远缘杂交成功率。此外,杂交亲本之间存在的倍性差异也会造成由于染色体不平衡而导致的胚胎败育或果实不发育^[32-33]。本研究还观察到‘虎宝宝’×兰州百合和‘眼线’×兰州百合组合的幼胚萌发率较低,幼苗生长速度较慢,除亲和性影响外,还可能与胚拯救时间、培养条件等有关,后续应深入研究培养基配方、激素浓度、胚龄选择和培养方式等,优化培养效果,提高杂种成苗率^[34]。

本研究通过对兰州百合和多个品系观赏百合远缘杂交观察发现:不同杂交组合亲和性存在差异。因此,在百合杂交育种中,亲本组合的选择除考虑性状互补外,还应兼顾亲和性因素。尽管本研究部分杂交组合样本量较小,但结果呈现出明显的趋势,可以为未来研究提供有用参考,结合授粉方法优化、胚培养与胚拯救方式以及倍性调控等技术,扩大实验规模,以制定更合理的杂交策略,提高杂交成功率和后代获得率,推动百合种质的创新。

4 结论

本研究将兰州百合与多品系观赏百合进行远缘杂交,并结合花粉管行为、坐果率和有胚率等指标对亲和性进行评价,得出所用材料中‘甜糖’‘黑色魅力’与兰州百合杂交亲和性较高。不同授粉方式影响杂交坐果率,其中直接授粉普适性强,切割授粉可以有效改善‘虎宝宝’×兰州百合的坐果率。此外,SSR分子标记鉴定可以早期鉴定杂种苗真实性,成功获得多组合真杂种后代,为多用途百合新品种培育提供了材料基础。

5 参考文献

- [1] LIANG Yuwei, GAO Qiang, LI Fan, *et al.* The giant genome of lily provides insights into the hybridization of cultivated lilies[J]. *Nature Communications*, 2025, **16**: 45. DOI: 10.1038/s41467-024-55545-8.
- [2] 赵祥云, 王树栋, 陈新露, 等. 百合[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. ZHAO Xiangyun, WANG Shudong, CHEN Xinlu, *et al.* *Lilium* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [3] ZHOU Jing, AN Renfeng, HUANG Xuefeng. Genus *Lilium*: a review on traditional uses, phytochemistry and pharmacology[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, **270**: 113852. DOI: 10.1016/j.jep.2021.113852.
- [4] LI Wenmei, WANG Yajun, WEI Hailian, *et al.* Structural characterization of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) polysaccharides and determination of their associated antioxidant activity[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, **100**(15): 5603–5616. DOI: 10.1002/jsfa.10613.
- [5] MI Lu, WANG Kewen, GAN Zhilin, *et al.* A comparative metabolomics study on two fresh edible lilies for vegetable: *Lilium brownii* var. *viridulum* and *Lilium davidii* var. *unicolor* [J]. *Food Bioscience*, 2024, **57**: 103583. DOI: 10.1016/j.fbio.

- 2024.103583.
- [6] HAN Yufei, YU Pengcheng, JIANG Yuzhou, *et al.* Genetic variation in ornamental and growth traits in hybrid populations of *Lilium davidii* var. *unicolor*[J]. *Plants*, 2025, **14**(5): 656. DOI: [10.3390/plants14050656](https://doi.org/10.3390/plants14050656).
- [7] 曹钦政, 高雪, 贾桂霞. 三倍体 LA 百合远缘杂交亲本的筛选[J]. *北京林业大学学报*, 2016, **38**(2): 96–104. CAO Qinzhen, GAO Xue, JIA Guixia. Selection of distant hybridization parents for triploid LA hybrid lilies[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2016, **38**(2): 96–104. DOI: [10.13332/j.1000-1522.20150199](https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20150199).
- [8] DHIMAN M R, MOUDGIL S, PARKASH C, *et al.* Biodiversity in *Lilium*: a review[J]. *International Journal of Horticulture*, 2018, **8**(8): 83–97. DOI: [10.5376/ijh.2018.08.0008](https://doi.org/10.5376/ijh.2018.08.0008).
- [9] BAKHSHAIE M, KHOSRAVI S, AZADI P, *et al.* Biotechnological advances in *Lilium*[J]. *Plant Cell Reports*, 2016, **35**(9): 1799–1826. DOI: [10.1007/s00299-016-2017-8](https://doi.org/10.1007/s00299-016-2017-8).
- [10] FU Yongyao, LU Shulin, LIU Chengchen, *et al.* Obtaining and characterization of an interspecific hybrid between *Lilium callosum* and ‘Snow Queen’ and evaluation of the *Botrytis* stress response[J]. *Plants*, 2024, **13**(10): 1376. DOI: [10.3390/plants13101376](https://doi.org/10.3390/plants13101376).
- [11] 凌吴, 李泽, 陈志文, 等. LA 百合与亚洲百合远缘杂交及杂种后代的鉴定[J/OL]. 分子植物育种, 2023-05-30. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230529.1514.028.html>. LING Wu, LI Ze, CHEN Zhiwen, *et al.* Distant hybridization between *Lilium longiflorum* Thunb. × *Lilium Asiatic* hybrida and *Lilium Asiatic* hybrida and identification of their hybrid progeny [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2023-05-30. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/46.1068.S.20230529.1514.028.html>.
- [12] 雷家军, 吴超. 卷丹与亚洲百合种间杂交花粉管生长的荧光观察[J]. *东北农业大学学报*, 2012, **43**(4): 117–120. LEI Jiajun, WU Chao. Fluorescence observation of pollen tube growth from interspecific hybridization between *Lilium lancifolium* Thunb. and Asiatic lilies[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, **43**(4): 117–120. DOI: [10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2012.04.021](https://doi.org/10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2012.04.021).
- [13] 周敏, 张迪, 赵秋燕, 等. 东方百合 ‘Siberia’ 正反交及胚挽救[J]. *北方园艺*, 2023(1): 55–63. ZHOU Min, ZHANG Di, ZHAO Qiuyan, *et al.* Reciprocal cross and embryo rescue of oriental lily ‘Siberia’ [J]. *Northern Horticulture*, 2023(1): 55–63. DOI: [10.11937/bfy.20222169](https://doi.org/10.11937/bfy.20222169).
- [14] ZHANG Lingling, WANG Bo, PAN Lei, *et al.* Recycling isolation of plant DNA, a novel method[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 2013, **40**(1): 45–54. DOI: [10.1016/j.jgg.2012.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jgg.2012.10.001).
- [15] 葛亮. 基于转录组信息的百合 SSR 标记开发及种质分子鉴定研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012. GE Liang. *Development of SSR Markers Based on Transcriptome and Their Application in Germplasm Identification of Lilium*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [16] 周艳萍. 百合遗传多样性和亲缘关系的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. ZHOU Yanping. *Studies on Genetic Diversity and Genetic Relationship of Lilium*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020. DOI: [10.26949/d.cnki.gblyu.2020.001566](https://doi.org/10.26949/d.cnki.gblyu.2020.001566).
- [17] 胡文舜, 黄爱萍, 姜帆, 等. 龙眼正反交后代的 SSR 鉴定及遗传多样性分析[J]. *园艺学报*, 2015, **42**(10): 1899–1908. HU Wenshun, HUANG Aiping, JIANG Fan, *et al.* Identification and genetic diversity of reciprocal hybrids in longan (*Dimocarpus longan*) by SSR[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, **42**(10): 1899–1908. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2015-0131](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2015-0131).
- [18] 杜文文, 王祥宁, 吴丽芳, 等. 亚洲百合和铁炮百合正反杂交亲和程度的差异性分析[J]. *中国农业科学*, 2012, **45**(23): 4854–4861. DU Wenwen, WANG Xiangning, WU Lifang, *et al.* Difference analysis on the degree of positive and negative hybridization affinity for Asian lily and Longiflorum lily[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, **45**(23): 4854–4861.
- [19] 罗建让. 百合交配亲和性及其不亲和性克服方法的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. LUO Jianrang. *Study on the Cross Compatibility and the Methods to Overcome Cross Incompatibility in Lilium*[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006.
- [20] 周桂雪, 李克虎, 张线线, 等. 亚洲百合品种倍性、花粉育性及其杂交研究[J]. *园艺学报*, 2011, **38**(4): 733–739. ZHOU Guixue, LI Kehu, ZHANG Xianxian, *et al.* Studies on ploidy levels, pollen fertility and interploid hybridization of Asiatic lilies[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, **38**(4): 733–739. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2011.04.017](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2011.04.017).
- [21] 李辛雷, 陈发棣, 赵宏波. 菊属植物远缘杂交亲和性研究[J]. *园艺学报*, 2008, **35**(2): 257–262. LI Xinlei, CHEN Fadi,

- ZHAO Hongbo. Compatibility of interspecific cross in *Dendranthema genus*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, **35**(2): 257–262. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2008.02.02](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2008.02.02).
- [22] WILLIAMS E G, KNOX R B, ROUSE J L. Pollination sub-systems distinguished by pollen tube arrest after incompatible interspecific crosses in *Rhododendron (Ericaceae)*[J]. *Journal of Cell Science*, 1982, **53**(1): 255–277. DOI: [10.1242/jcs.53.1.255](https://doi.org/10.1242/jcs.53.1.255).
- [23] 王克通, 陆漱韵. 甘薯种内不亲和性中花粉和雌蕊关系的研究[J]. 北京农业大学学报, 1992, **18**(4): 375–380. WANG Ketong, LU Shuyun. Studies on the interrelation of between pollen and pistil in intraspecific incompatibility of sweet potato[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis*, 1992, **18**(4): 375–380.
- [24] 周旭红, 桂敏, 陈敏, 等. 不同倍性香石竹杂交受精过程及胚胎发育研究[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(1): 1–6. ZHOU Xuhong, GUI Min, CHEN Min, *et al.* Fertilization and development of embryo in different interploidal crosses of *Dianthus caryophyllus*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(1): 1–6.
- [25] 李守丽, 石雷, 张金政. 大百合与百合属间授粉后花粉管生长发育的观察[J]. 园艺学报, 2006, **33**(6): 1259–1262. LI Shouli, SHI Lei, ZHANG Jinzheng. Pollen tube behavior following pollination between *Cardiocrinum giganteum* and *Lilium*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, **33**(6): 1259–1262. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2006.06.019](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2006.06.019).
- [26] 王文和, 王树栋, 赵祥云, 等. 百合远缘杂交花粉萌发及花粉管生长过程观察[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(9): 1790–1794. WANG Wenhe, WANG Shudong, ZHAO Xiangyun, *et al.* Process of pollen sprouting and pollen tube growth on the lily distant hybridization[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(9): 1790–1794.
- [27] 李守丽, 石雷, 张金政, 等. 百合育种研究进展[J]. 园艺学报, 2006, **33**(1): 203–210. LI Shouli, SHI Lei, ZHANG Jinzheng, *et al.* Recent advances in lily breeding[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, **33**(1): 203–210. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2006.01.050](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2006.01.050).
- [28] MORIMOTO T, KITAMURA Y, NUMAGUCHI K, *et al.* Characterization of post-mating interspecific cross-compatibility in *Prunus* (Rosaceae)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, **246**: 693–699. DOI: [10.1016/j.scienta.2018.11.045](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.045).
- [29] 徐丽萍, 唐道城, 何瑞军. 不同授粉方式对青海细叶百合与亚洲百合杂交结实研究[J]. 北方园艺, 2009(1): 175–177. XU Liping, TANG Daocheng, HE Ruijun. Influences on seed formation of different hybrid combinations in *Lilium pumilum* and three Asiatic hybrids by two pollination methods[J]. *Northern Horticulture*, 2009(1): 175–177.
- [30] 李婕, 高亦珂, 张启翔. 切割花柱法对百合杂交亲和性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2013, **41**(5): 98–101. LI Jie, GAO Yike, ZHANG Qixiang. The effect of cut style methods on cross compatibility of lilies breeding[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, **41**(5): 98–101. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2013.05.020](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2013.05.020).
- [31] van HUYLENBROECK J, EECKHAUT T, LEUS L, *et al.* Bridging the gap: tools for interspecific and intergeneric hybridization in ornamentals[C]// FRANKEN P, TRÄNKNER C, DRÜGE U. *Proceedings of the XXVI International Eucarpia Symposium Section Ornamentals: Editing Novelty*. Erfurt: International Society for Horticultural Science, 2020: 161–168.
- [32] WANG Qing, WANG Jingmao, ZHANG Yiying, *et al.* The application of fluorescence in situ hybridization in different ploidy levels cross-breeding of lily[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(5): e0126899. DOI: [10.1371/journal.pone.0126899](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126899).
- [33] ZHANG Xianxian, REN Guiling, LI Kehu, *et al.* Genomic variation of new cultivars selected from distant hybridization in *Lilium*[J]. *Plant Breeding*, 2012, **131**(1): 227–230. DOI: [10.1111/j.1439-0523.2011.01906.x](https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2011.01906.x).
- [34] 邵杨, 温韦华, 崔金腾, 等. 东方百合系内杂交授粉技术与胚抢救技术研究[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(6): 1119–1124. SHAO Yang, WEN Weihua, CUI Jinteng, *et al.* Study on the pollination methods and embryo rescue techniques of the crosses among *Lilium* oriental hybrids[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(6): 1119–1124. DOI: [10.7606/j.issn.1000-4025.2014.06.1119](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2014.06.1119).