

引用格式: 王雯静, 许俊旭, 王红兵, 等. 天竺葵花粉活力测定及柱头可授性研究[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 975–983. WANG Wenjing, XU Junxu, WANG Hongbing, et al. Research on pollen viability determination and stigma receptivity of *Pelargonium* spp.[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(5): 975–983.

天竺葵花粉活力测定及柱头可授性研究

王雯静^{1,2}, 许俊旭², 王红兵¹, 孙 翊²

(1. 上海师范大学 生命科学院, 上海 200241; 2. 上海市农业科学院 林木果树研究所, 上海 201403)

摘要: 【目的】探究天竺葵 *Pelargonium* spp. 的花粉活力及柱头可授性变化情况, 为天竺葵杂交育种提供科学依据。【方法】以无性系天竺葵 ‘大草原 亮粉色’ ‘Savannah Hot Pink’ 为代表性材料, 采用正交设计试验研究蔗糖、硼酸、聚乙二醇 4000 (PEG 4000)、氯化钙 4 个组分对花粉离体萌发的影响, 筛选获得天竺葵花粉萌发的最佳培养基配方, 并建立天竺葵花粉离体萌发活力测定方法。以最佳培养基配方为基础测定 ‘大草原 酒红闪耀’ ‘Savannah TexMex Merlot Sizzle’、‘大力水手 粉色飞溅’ ‘Big EEZE Pink Splash’ 等 9 个品种的花粉活力。并用联苯胺-过氧化氢法观察天竺葵 ‘大草原 亮粉色’ 柱头可授性的变化情况。【结果】各组分对天竺葵 ‘大草原 亮粉色’ 花粉萌发的影响程度从高到低依次为: PEG 4000、硼酸、氯化钙、蔗糖; 最佳处理组合为 50 g·L⁻¹ 蔗糖+250 mg·L⁻¹ 硼酸+200 g·L⁻¹ PEG 4000+5 mg·L⁻¹ 氯化钙, 在该配方条件下, 花粉平均萌发率最高, 达 68.89%。在最佳培养基上, 9 个品种的花粉活力差异明显, 萌发率为 25.56%~76.67%。春季盛花期, 随花朵发育, 呈平展状态的天竺葵柱头可授性最强, 为授粉的最佳发育时期。晴天 10:00 左右, 该状态的柱头可授性最强, 为授粉的最佳时间。【结论】本研究在优化花粉离体萌发最佳培养基配方的基础上建立了天竺葵花粉活力测定方法, 获得不同品种花粉活力范围为 25.56%~76.67%, 明确了柱头授粉的最佳发育时期和时间, 有助于提升天竺葵杂交育种的效率。图 2 表 7 参 34

关键词: 天竺葵; 花粉活力; 离体萌发; 柱头可授性; 正交设计

中图分类号: S68 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)05-0975-09

Research on pollen viability determination and stigma receptivity of *Pelargonium* spp.

WANG Wenjing^{1,2}, XU Junxu², WANG Hongbing¹, SUN Yi²

(1. College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Forestry and Pomology Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the pollen viability and stigma receptivity of *Pelargonium* spp. and provide a basis for hybrid breeding of *Pelargonium*. [Method] Taking the cloning cultivar ‘Savannah Hot Pink’ as the representative material, the effects of 4 components, including sucrose, boric acid, polyethylene glycol 4000 (PEG 4000), and calcium chloride on the in vitro pollen germination viability were evaluated through an orthogonal design experiment. The optimum medium for geranium in vitro pollen germination viability was identified, and a method for determining the in vitro pollen germination viability of geranium based on this medium was established. The pollen viability of 9 different geranium cultivars, including ‘Savannah TexMex Merlot Sizzle’ and ‘Big EEZE Pink Splash’, were determined by the

收稿日期: 2025-08-29; 修回日期: 2025-10-11

基金项目: 上海市崇明区农业科创项目 (2023CNKC-01-08); 上海市花卉产业技术体系项目 (沪农科产字〔2025〕第 8 号)

作者简介: 王雯静 (ORCID: 0009-0007-9051-9605), 从事观赏植物育种与生理研究。E-mail: 353181218@qq.com。

通信作者: 孙翊 (ORCID: 0000-0002-3631-6045), 副研究员, 博士, 从事观赏植物育种与生理研究。
E-mail: gnsuny@163.com

optimum medium. Additionally, benzidine-hydrogen peroxide method was used to observe the changes in stigma receptivity of ‘Savannah Hot Pink’. [Result] The results showed that the order of influence of each component on the pollen germination of ‘Savannah Hot Pink’ from highest to lowest was: PEG 4000, boric acid, calcium chloride, sucrose. The optimum medium was $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ sucrose + $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ boric acid + $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ PEG 4000 + $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ calcium chloride. Under this formulation, the average pollen germination rate was the highest, reaching 68.89%. Based on the optimum medium, the pollen viability was obviously different among 9 different geranium cultivars, with the pollen germination rate ranging from 25.56% to 76.67%. During the full flowering period in spring, as the flowers developed, the geranium stigmas in the flattened state exhibited the strongest receptivity, which was the optimum developmental stage for pollination. The stigma receptivity in this state was the strongest at around 10:00 on sunny days, indicating the best time for pollination. [Conclusion] Based on the optimization of the optimum medium for in vitro pollen germination, this study established a method for assessing the pollen viability, obtaining pollen germination rate ranging from 25.56% to 76.67% for different varieties, and identified the optimum developmental stage and timing for stigma pollination, which helps improve the efficiency of geranium hybrid breeding. [Ch, 2 fig. 7 tab. 34 ref.]

Key words: *Pelargonium*; pollen viability; in vitro germination; stigma receptivity; orthogonal design

天竺葵 *Pelargonium* spp. 为牻牛儿苗科 Geraniaceae 天竺葵属 *Pelargonium* 多年生草本植物或亚灌木, 原产于非洲南部^[1-2]。天竺葵属包含约 280 个种类, 经长期人工栽培和选育形成了许多园艺品种, 因其多季开花、花色艳丽、花叶兼美、适生性强且全株具有芳香等特性, 已成为全球重要的观赏和芳香植物^[3-4]。当前对天竺葵的研究多聚焦于扦插繁殖、抗病育种、组培快繁、精油开发等领域^[5-9], 而其生殖生物学的基础研究则相对匮乏。花粉活力水平直接决定杂交授粉的成功率, 是种质创新与品种选育的关键前提^[10]。花粉离体萌发法测得的花粉活力与实际萌发率最为接近^[11]。矾根属 *Heuchera*、鸢尾属 *Iris* 等植物^[12-13] 的研究表明: 蔗糖、聚乙二醇 4000 (PEG 4000)、硼酸等的合理组合可有效提升花粉离体萌发率。柱头是植物雌性生殖器官的核心部分之一, 对芍药 *Paeonia lactiflora*、兜兰属 *Paphiopedilum* 等研究^[14-15] 显示: 柱头可授性是适配花粉识别、萌发及花粉管伸长的必要条件, 决定了受精过程能否顺利完成。为探究天竺葵花粉活力及柱头可授性情况, 本研究以无性系天竺葵品种为材料, 研究不同培养基组分和质量浓度对花粉离体萌发的影响, 并探明不同发育状态及环境条件下柱头可授性的变化规律, 以期为天竺葵杂交育种的亲本选择与人工授粉时机的把握提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2025 年 3—5 月进行, 供试品种为种植于玻璃连栋温室内, 处于春季盛花期的不同天竺葵品种。选取天竺葵 ‘大草原 亮粉色’ ‘Savannah Hot Pink’ 花粉和柱头, 分别作为花粉离体培养基筛选和柱头可授性试验的材料。选取 9 个天竺葵品种作为花粉活力测定的材料, 分别是 ‘大草原 粉色飞溅’ ‘Savannah Pink Mega Splash’、‘大草原 酒红闪耀’ ‘Savannah TexMex Merlot Sizzle’、‘大力水手 粉色飞溅’ ‘Big EEZE Pink Splash’、‘大力水手 红色’ ‘Big EEZE Red’、‘大力水手 苹果花飞溅’ ‘Big EEZE Apple Blossom Splash’、‘桑塔纳 白色飞溅’ ‘Santana White Splash’、‘桑塔纳 紫色’ ‘Santana Purple’、‘天使之眼 糖果’ ‘Angel Eyes Candy’、‘优雅 宝诺娃’ ‘Elegance Bravo’。在晴天 8:00—10:00, 使用尖头镊子剥取盛开花朵内新鲜裂开的花药, 将花粉收集至 2 mL 离心管中, 置于冰箱 4 ℃ 避光保存。本研究使用新鲜采集或 4 ℃ 储藏不超过 2 h 的花粉。

1.2 花粉离体培养基制备

参考矾根花粉离体萌发研究方法^[12], 本研究采用液体离体培养法, 设置了蔗糖 (A)、硼酸 (B)、PEG 4000 (C) 和氯化钙 (D) 4 个因素, 每因素设置 4 个水平进行 $L_{16}(4^4)$ 正交设计试验 (表 1), 每个处理重复 3 次。

1.3 花粉萌发培养及萌发率统计

吸取适量液体培养基均匀滴加至凹面载玻片中，用尖头镊子取适量收集的花粉，均匀散布于培养基表面，并将凹面载玻片置于铺有湿润滤纸的培养皿内。将制备好的样本转移至人工气候培养箱中，培养箱温度为 25 ℃，光照强度为 8 klx，湿度为 75%，培养 4 h。在光学显微镜下进行观测，花粉管长度大于或等于花粉粒直径即视为萌发的花粉。每个处理 3 次重复，每次 3 个观察视野，每个视野需涵盖不少于 50 粒花粉。花粉萌发率=(萌发的花粉粒数/视野中花粉粒总数)×100%。

1.4 柱头可授性检测

采用联苯胺-过氧化氢法检测柱头可授性。在盛花期的晴天 10:00—12:00，用尖头镊子采不同发育状态的天竺葵柱头。同时，在盛花期的晴天和阴天 8:00—16:00，每 2 h 用尖头镊子取平展状态的柱头，晴天和阴天 5 个采样时间点环境条件的平均值分别为：光照强度 44.90 和 11.38 klx，温度 27.70 和 22.32 ℃，湿度 65.78% 和 87.06%。将采集到的柱头迅速浸入含有联苯胺-过氧化氢反应液 [联苯胺 (10 g·L⁻¹):过氧化氢 (30 g·L⁻¹):水=4:11:22，体积比] 的平面载玻片中，15 min 后用尼康体视显微镜进行观察。若柱头周围的反应液有大量气泡出现，表明柱头具可授性；反之，则无。每个处理 5 次重复，并拍照。参考 FERREIRA 等^[16]和焦雪辉等^[17]的方法设置柱头可授性检验标准 (表 2)。

1.5 数据处理

采用正交设计助手 II V3.1 分析并计算 $L_{16}(4^4)$ 正交设计中各因素试验平均值和极差值。使用 Excel 进行数据分析，采用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 花粉活力

2.1.1 花粉萌发培养基组分的筛选 为探究不同因素对天竺葵花粉离体萌发的影响，观察了盛开期花粉在 16 种培养基配方上的萌发情况。结果显示：天竺葵花粉在不同培养基配方上的萌发率和花粉管伸长均存在明显差异 (表 3 和图 1)，说明培养基配方对花粉萌发效果的影响十分明显。在培养基中各组分质量浓度均为 0 (配方 1, A1B1C1D1) 的条件下，花粉萌发率为 28.89%，花粉管较短；在配方 8 (A2B4C3D2) 条件下，花粉萌发率最高且显著高于其他处理 ($P<0.05$)，达 68.89%，且花粉管伸长的速度较快，说明在合理添加供试 4 个组分的情况下，能够有效促进天竺葵花粉的离体萌发。而配方 4 (A1B4C4D4) 和配方 10 (A3B2C4D3) 的萌发率最低，仅为 12.22%，且花粉管伸长的速度较慢 (图 1)，说明过高质量浓度的组分添加反而会抑制天竺葵花粉的离体萌发。进一步分析各因素对萌发率的影响程度 (表 4)，通过极差分析比较可知极差值 (R) 从大到小依次为： $R(C)$ 、 $R(B)$ 、 $R(D)$ 、 $R(A)$ 。其中，PEG 4000 的极差值最大，该因素下水平 3 均值 (K_3) 是水平 4 均值 (K_4) 的 3.53 倍，说明不同质量浓度的 PEG 4000 对花粉萌发效果的影响差异最大。蔗糖的极差最小，该因素下水平 2 均值 (K_2) 是水平 1 均值 (K_1) 的 1.24 倍，说明蔗糖的影响最不明显。综合分析认为：PEG 4000 是影响天竺葵花粉离体萌发最重要的组分，各组分的影响程度从高到低依次为 PEG 4000、硼酸、氯化钙、蔗糖。筛选获得的天竺葵花粉离体萌发最佳培养基配方为 50 g·L⁻¹ 蔗糖+250 mg·L⁻¹ 硼酸+200 g·L⁻¹ PEG 4000+5 mg·L⁻¹ 氯化钙。

2.1.2 不同品种花粉活力测定 在最佳培养基配方的基础上，对不同品种的花粉活力进行测定。表 5 结果显示：天竺葵 ‘大力水手 粉色飞溅’ 的花粉萌发率最高，为 76.67%，说明其花粉活力最高；其次为 ‘大草原 粉色飞溅’，萌发率为 57.78%。 ‘大力水手 苹果花飞溅’ 的萌发率最低，为 25.56%，说明其

表 1 试验因素及水平

Table 1 Experimental factors and levels				
水平	因素			
	蔗糖(A)/ (g·L ⁻¹)	硼酸(B)/ (mg·L ⁻¹)	PEG 4000(C)/ (g·L ⁻¹)	氯化钙(D)/ (mg·L ⁻¹)
1	0	0	0	0
2	50	50	100	5
3	100	150	200	10
4	150	250	300	15

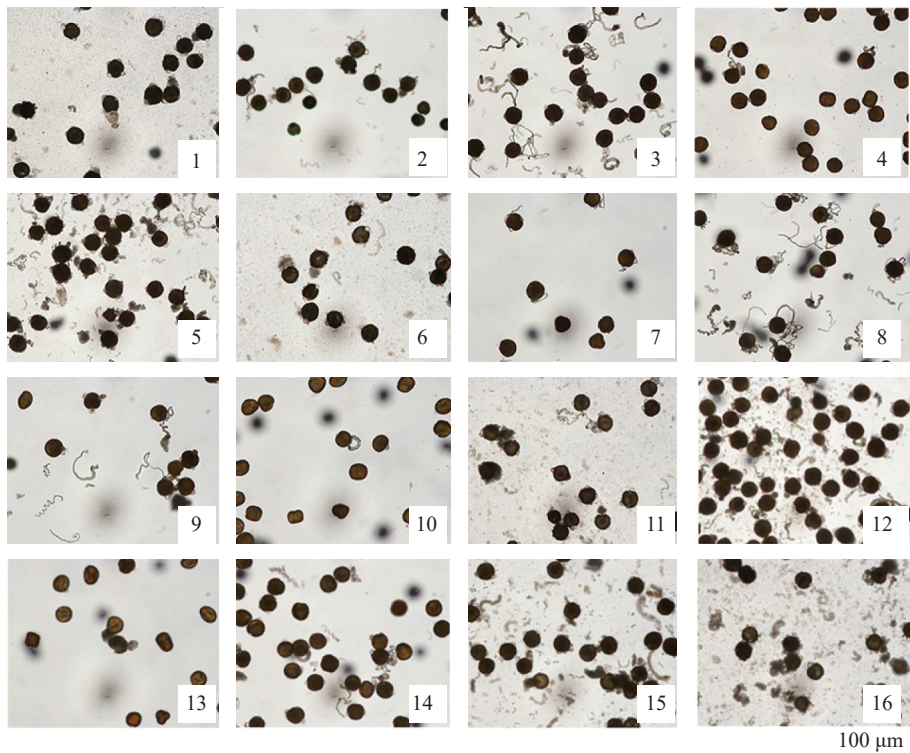
表 2 柱头可授性检验标准

Table 2 Stigma receptivity test standard		
得分	气泡产生量	柱头可授性强度
0	无	无
1	极少	极弱(+)
2	较少	较强(++)
3	较多	强(+++)
4	大量	极强(++++)

表 3 不同配方培养基上天竺葵‘大草原 亮粉色’花粉萌发率统计结果

Table 3 Statistical results of pollen germination rate of ‘Savannah Hot Pink’ on different mediums						
配方编号	配方设置	蔗糖/(g·L ⁻¹)	硼酸/(mg·L ⁻¹)	PEG 4000/(g·L ⁻¹)	氯化钙/(mg·L ⁻¹)	花粉萌发率/%
1	A1B1C1D1	0	0	0	0	28.89±1.92 g
2	A1B2C2D2	0	50	100	5	48.89±5.09 de
3	A1B3C3D3	0	150	200	10	61.11±1.92 b
4	A1B4C4D4	0	250	300	15	12.22±1.92 h
5	A2B1C2D3	50	0	100	10	57.78±1.92 b
6	A2B2C1D4	50	50	0	15	37.78±3.85 f
7	A2B3C4D1	50	150	300	0	23.33±3.33 g
8	A2B4C3D2	50	250	200	5	68.89±3.85 a
9	A3B1C3D4	100	0	200	15	43.33±3.33 ef
10	A3B2C4D3	100	50	300	10	12.22±1.92 h
11	A3B3C1D2	100	150	0	5	56.67±3.33 bc
12	A3B4C2D1	100	250	100	0	61.11±5.09 b
13	A4B1C4D2	150	0	300	5	15.56±1.92 h
14	A4B2C3D1	150	50	200	0	50.00±3.33 cde
15	A4B3C2D4	150	150	100	15	54.44±1.92 bcd
16	A4B4C1D3	150	250	0	10	44.44±5.09 ef

说明：花粉萌发率数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。



右下角数字为配方编号，对应的配方设置见表3。

图 1 天竺葵‘大草原 亮粉色’花粉在不同配方培养基上的萌发情况

Figure 1 Pollen germination of ‘Savannah Hot Pink’ on different mediums

花粉活力最低。由此可见，不同品种间的花粉活力具有明显差异。

2.2 柱头可授性

2.2.1 不同发育状态下天竺葵柱头可授性变化情况 通过对不同发育状态下天竺葵‘大草原 亮粉色’柱头可授性情况及其分值 (图 2 和表 6) 分析可知：并拢状态下的柱头几乎不产生气泡，柱头可授性分值显

表 4 不同因素对天竺葵‘大草原 亮粉色’花粉萌发率的影响

指标	花粉萌发率/%			
	蔗糖(A)	硼酸(B)	PEG 4000(C)	氯化钙(D)
K_1	37.78	36.39	40.28	39.17
K_2	46.94	37.22	55.56	47.50
K_3	43.33	48.89	55.83	43.89
K_4	41.11	46.67	15.83	36.94
R	9.17	12.50	40.00	10.56

说明： K_1 ~ K_4 分别表示各因素在水平1~4下花粉萌发率的平均值。 R 为极差值，即最大均值与最小均值之间的差值。

著低于其他状态 ($P<0.05$)，认为此状态下的柱头无可授性；在柱头张开状态下，气泡产生量极少，表明此时天竺葵柱头可授性极弱；与其他状态相比，平展状态的柱头有大量气泡产生，且柱头可授性分值显著高于其他状态 ($P<0.05$)，说明其可授性极强；而柱头在卷曲和反卷的状态下产生的气泡量均较少，说明柱头可授性相对较强 (图 2D~E)。随花朵发育进程，天竺葵柱头可授性会发生明显变化，呈现先增强再逐渐弱的趋势。据此认为在春季盛花期，呈平展状态的天竺葵柱头可授性最强，为授粉的最佳发育时期。

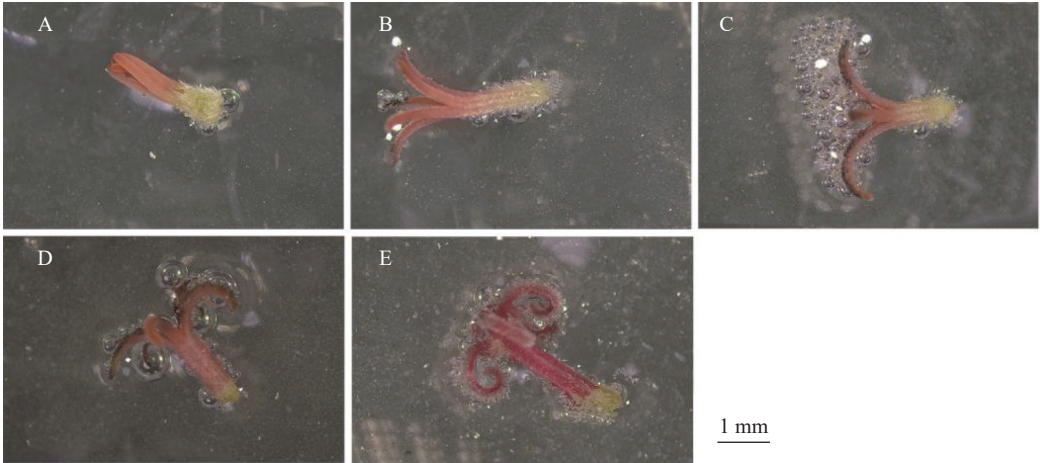
2.2.2 天竺葵柱头可授性的日变化 在明确授粉最佳柱头发育时期的基础上，进一步研究柱头可授性的

日变化规律。由表 7 可知：在盛花期 8:00—16:00，天竺葵平展状态下的柱头均能检测到一定量的气泡，说明柱头均具有一定可授性。无论晴天还是阴天，检测到的气泡产生量都呈先上升后下降的趋势。当日柱头可授性分值的峰值均出现在 10:00，且晴天 10:00 的分值显著高于其他时间 ($P<0.05$)，而最小的柱头可授性分值均出现在 16:00，且阴天 16:00 的分值显著低于其他时间 ($P<0.05$)。总体而言，天竺葵柱头晴天产生的气泡量多于阴天，上午多于下午，柱头可授性最大分值出现在晴天 10:00，最小分值出现在阴天 16:00。据此认为天竺葵盛花期柱头的可授性呈先升后降的日变化规律，最佳授粉时间为晴天的 10:00 左右。

表 5 9 个天竺葵品种花粉离体培养萌发率

Table 5 In vitro pollen germination rate of 9 cultivars	
品种	花粉萌发率/%
‘大草原 粉色飞溅’	57.78±5.09
‘大草原 酒红闪耀’	32.22±1.92
‘大力水手 粉色飞溅’	76.67±3.33
‘大力水手 红色’	55.56±5.09
‘大力水手 苹果花飞溅’	25.56±1.92
‘桑塔纳 白色飞溅’	28.89±1.92
‘桑塔纳 紫色’	38.89±3.85
‘天使之眼 糖果’	37.78±1.92
‘优雅 宝诺娃’	36.67±3.33

说明：数值为平均值±标准差。



A. 柱头并拢；B. 柱头张开；C. 柱头平展；D. 柱头卷曲；E. 柱头反卷。

图 2 不同发育状态下天竺葵‘大草原 亮粉色’柱头可授性变化情况
Figure 2 Changes in stigma receptivity of ‘Savannah Hot Pink’ under different developmental stages

表6 不同发育状态下天竺葵‘大草原亮粉色’柱头可授性

Table 6 Stigma receptivity of ‘Savannah Hot Pink’ under different developmental stages

不同发育状态	柱头可授性分值
柱头并拢	0.60±0.55 d
柱头张开	1.60±0.55 c
柱头平展	3.80±0.45 a
柱头卷曲	2.40±0.55 b
柱头反卷	2.20±0.45 bc

说明：数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

表7 不同时间点天竺葵‘大草原亮粉色’柱头可授性

Table 7 Stigma receptivity of ‘Savannah Hot Pink’ at different time

时间	柱头可授性分值	
	晴天	阴天
8:00	2.60±0.55 b	2.80±0.45 a
10:00	3.80±0.58 a	3.20±0.58 a
12:00	2.80±0.00 b	2.60±0.58 a
14:00	1.60±0.00 c	1.80±0.00 b
16:00	1.40±0.58 c	0.80±0.00 c

说明：数值为平均值±标准差，同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 培养基组分对天竺葵花粉离体萌发培养的影响

PEG 4000 是一种高分子渗透剂，能够起到保湿、维持细胞渗透压等作用，可通过改变花粉内膜的结构，调整膜表面的电荷分布，增强膜的柔韧性和通透性，进而有效促进花粉的萌发以及花粉管的生长^[12, 17]。已有研究发现：PEG 能够促进多种植物的花粉萌发，然而不同植物中的最适 PEG 4000 质量浓度有所不同，如铁甲秋海棠 *Begonia masoniana* 为 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[18]，10 个菊花 *Chrysanthemum* × *morifolium* 品种为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19]，大麻 *Cannabis sativa* 为 $100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20]，4 种木兰属 *Magnolia* 植物为 $150\sim 250 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[21]。在对不同类型蜡梅 *Chimonanthus praecox* 的研究中发现：PEG 4000 是花粉离体培养所必需的培养基成分，最适质量浓度均为 $250 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[22-23]。对砧根花粉离体萌发的研究中认为 PEG 4000 不可或缺且起主导作用，最适质量浓度均为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[12]。本研究结果同样显示：PEG 4000 是影响天竺葵花粉离体萌发最重要的组分，最佳质量浓度为 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此推测，PEG 4000 是天竺葵属植物花粉离体萌发培养基中最重要的组分，可考虑作为花粉离体培养基筛选和优化的首选因素开展相关试验，也可以为其他观赏植物花粉离体萌发培养基的筛选提供重要参考。

蔗糖作为花粉能量代谢与跨膜运输的核心供能物质，同步承担渗透调节功能以维持胞内稳态^[13]。研究表明：花粉离体培养基中的蔗糖质量浓度存在阈值效应，超阈值时引发的渗透胁迫反而抑制萌发^[12-13, 21]。对蜡梅^[22]和梅花 *Prunus mume*^[24]的研究均表明超阈值后花粉萌发率与质量浓度呈负相关。在本研究供试的 4 种因素中，尽管蔗糖对天竺葵花粉萌发的促进作用相对最小，但在设置的质量浓度范围内 ($0\sim 150 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 花粉萌发率同样呈先升后降的趋势。因而，在选择蔗糖作为培养基组分以期达到促进花粉离体萌发效果时，应充分考虑其阈值效应。

锦带 *Weigela florida* 花粉离体萌发试验表明：培养基中硝酸钙对花粉萌发率的影响最为显著^[25]。然而更多研究表明：钙离子并非花粉萌发的主导因子，而是发挥不可或缺的协同调控作用，其动态平衡对启动萌发及后续花粉管伸长均至关重要^[26-27]。本研究结果显示：钙离子对天竺葵花粉萌发的影响效果仅高于蔗糖，适宜质量浓度 ($5\sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 氯化钙的添加能够促进萌发，过高质量浓度 ($15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 也会对萌发产生不利影响。说明钙离子并非影响天竺葵花粉离体萌发的主导因素，它与其他组分协同发挥作用。

天竺葵园艺品种数量丰富，类型多样，品种群是由属内不同种或品种之间经反复杂交而形成的^[5, 8]。本研究供试的 9 个天竺葵品种大部分为市场化程度较高的无性系品种，它们之间的花粉活力存在明显差异。说明在长期人工栽培和选育过程中，随着无性系天竺葵品种占比的增加，品种间花粉活力状况产生了一定分化。因此，在育种亲本选择时应应对花粉活力状况提前进行测定。推测这一现象与品种的遗传背景、花粉结构和发育状况等有关^[28]。

3.2 柱头可授性的强弱

柱头可授性是影响杂交亲本选择和杂交成功率的关键因素之一，柱头形态特征与受精窗口期密切相关，可作为人工授粉的重要参考^[29-31]。宋一岚等^[15]对兜兰 ‘绿肉饼’ *Paphiopedilum* ‘Pacific Shamrock’ 柱头可授性的研究发现：其柱头可授性随开花时间先弱后强再变弱，开花 10~20 d 的柱头可

授性最高。黄薇 *Heimia myrtifolia* 柱头在开花后 48 h 会彻底萎蔫, 失去可授性^[32]。本研究同样发现: 天竺葵花朵开放后, 柱头可授性呈现先增强再减弱的趋势, 呈平展状态的柱头可授性最强。LI 等^[33]发现金银花 *Lonicera japonica* 在柱头开裂期可授性最强, 与本研究中天竺葵在柱头平展状态下可授性最强的结果一致。已有研究表明: 光照和气温等环境因素会对紫斑牡丹 *Paeonia rockii* 柱头可授性造成一定影响^[34]。本研究发现在晴天 10:00 左右, 平展状态的天竺葵柱头可授性最强, 可能由于此时光照强度、温度和湿度最为适宜, 促使柱头分泌大量黏液。柱头可授性从 14:00 开始明显下降, 16:00 为最低。因此, 应该选择在晴天 10:00 左右, 对平展状态的柱头进行授粉, 能够在一定程度上提高授粉成功率。

4 结论

本研究在优化花粉离体萌发最佳培养基配方的基础上建立了天竺葵花粉活力测定方法, 获得不同品种花粉活力范围为 25.56%~76.67%, 建议优先选择花粉活力 50% 以上的品种作为杂交中的父本; 并明确了柱头授粉的最佳发育时期和时间, 有助于提升天竺葵杂交育种的效率。

5 参考文献

- [1] 吴洋, 郭正茂. 天竺葵标准化生产养护[J]. 中国花卉园艺, 2020, 20(16): 28–29.
WU Yang, GUO Zhengmao. Standardized production and maintenance of *Pelargonium* [J]. *China Flowers & Horticulture*, 2020, 20(16): 28–29.
- [2] MARAIS E M. Three new geophytic species of *Pelargonium* (Geraniaceae) from the Western Cape Province, South Africa and their relationships within section *Hoarea* [J]. *South African Journal of Botany*, 2017, 113: 261–269.
- [3] 赵曼祯. 天竺葵繁殖及园林应用[J]. 中国花卉园艺, 2014, 14(20): 40–41.
ZHAO Manzhen. Propagation and landscape application of *Pelargonium* [J]. *China Flowers & Horticulture*, 2014, 14(20): 40–41.
- [4] 蔡寅川, 李懿. 天竺葵组织培养研究进展[J]. 福建农业科技, 2015, 46(3): 47–50.
CAI Yinchuan, LI Yi. Research progress in tissue culture of geranium (*Pelargonium hortorum*) [J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2015, 46(3): 47–50.
- [5] do NASCIMENTO COSTA FERREIRA G, VIANA FERRAZ G, MATOS MONÇÃO R, et al. Assessment of combining capacity and hybrid performance for morphological traits in geranium (*Pelargonium×hortorum*) genotypes using diallel analysis[J/OL]. *Euphytica*, 2024, 220: 108 [2025-08-20]. DOI: 10.1007/s10681-024-03339-w.
- [6] 严忠星, 李健昕, 严加威, 等. 玫瑰天竺葵精油纳米脂质体的制备影响因素考察[J]. 广东化工, 2024, 51(11): 32–34.
YAN Zhongxing, LI Jianxin, YAN Jiawei, et al. Preparation of nanoliposomes of geranium oil and study on their physicochemical properties [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2024, 51(11): 32–34.
- [7] 王庆, 李艳, 尉倩, 等. 天竺葵种子萌发特性研究[J]. 种子, 2017, 36(12): 14–16.
WANG Qing, LI Yan, WEI Qian, et al. Study on seed germination characters of *Pelargonium hortorum* [J]. *Seed*, 2017, 36(12): 14–16.
- [8] FEKRI N, EL AMIR D, OWIS A, et al. Studies on essential oil from rose-scented geranium, *Pelargonium graveolens* L' Herit. (Geraniaceae) [J]. *Natural Product Research*, 2019, 35(15): 1–5.
- [9] ALAVIJEH M K, BAYAT H, KIANPOUR D, et al. Optimization of in vitro propagation and virus eradication using meristem culture and thermotherapy in two geranium species *Pelargonium×hortorum* ('Zonal') and *Pelargonium × domesticum* ('Regal') [J/OL]. *BMC Plant Biology*, 2025, 25(1): 9 [2025-08-20]. DOI: 10.1186/s12870-024-06027-y.
- [10] 余惠文, 涂绍强, 廖艳, 等. 5 种龙船花属植物花粉活力及柱头可授性研究[J/OL]. 分子植物育种, 2025-05-12 [2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250509.1707.006>.
YU Huiwen, TU Shaoqiang, LIAO Yan, et al. Pollen viability and stigma receptivity of five *Ixora* species [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2025-05-12 [2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20250509.1707.006>.
- [11] ZHANG Huihui, WU Huaiyan, ZHOU Qi, et al. Flowering characteristics and reproductive biology of *Nymphaea hybrid*, a precious water lily [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 287: 110268 [2025-08-20]. DOI: 10.1016/j.scienta.2021.110268.
- [12] 张露, 李世峰, 蒋雪彬, 等. 矾根花粉离体萌发培养基组分及培养条件的优化[J]. 中国农学通报, 2019, 35(30): 64–70.

- ZHANG Lu, LI Shifeng, JIANG Xuebin, *et al.* Optimization of medium components and cultivation condition for pollen germination in vitro in *Heuchera* plants [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, **35**(30): 64–70.
- [13] 周琴, 董艳芳, 张冬林, 等. 鸢尾属 8 个品种花粉生活力及柱头可授性比较分析[J]. 分子植物育种, 2024, **22**(7): 2322–2329.
- ZHOU Qin, DONG Yanfang, ZHANG Donglin, *et al.* Analysis of pollen viability and stigma receptivity of eight *Iris germanica* cultivars [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2024, **22**(7): 2322–2329.
- [14] 闫进晓, 申欣可, 范丙友. 油用芍药花粉萌发和柱头可授性研究[J]. 河南林业科技, 2025, **45**(1): 14–16.
- YAN Jinxiao, SHEN Xinke, FAN Bingyou. Study on pollen germination and stigma receptivity of oil herbaceous peony [J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2025, **45**(1): 14–16.
- [15] 宋一岚, 张英杰, 孙纪霞, 等. 兜兰花粉活力及柱头可授性探究[J]. 分子植物育种, 2020, **18**(2): 561–565.
- SONG Yilan, ZHANG Yingjie, SUN Jixia, *et al.* Pollen viability and stigma receptivity of *Paphiopedilum* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, **18**(2): 561–565.
- [16] FERREIRA J A B, LEDO C A S, SOUZA F V D, *et al.* Stigma structure and receptivity in papaya (*Carica papaya* L.) [J/OL]. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, 2021, **93**(1): e20190605[2025-08-20]. DOI: [10.1590/0001-3765202120190605](https://doi.org/10.1590/0001-3765202120190605).
- [17] 焦雪辉, 岳长平, 史喜兵, 等. 11 个紫薇品种花粉活力及柱头可授性日变化规律[J]. 分子植物育种, 2022, **20**(23): 7894–7901.
- JIAO Xuehui, YUE Changping, SHI Xibing, *et al.* Diurnal Variation of pollen viability and stigma receptivity of 11 *Lagerstroemia indica* varieties [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2022, **20**(23): 7894–7901.
- [18] 吕燕玲. 铁甲秋海棠花粉离体萌发研究[J]. 亚热带植物科学, 2023, **52**(5): 408–412.
- LÜ Yanling. In vitro germination of *Begonia masoniana* pollen [J]. *Subtropical Plant Science*, 2023, **52**(5): 408–412.
- [19] 李亚军, 黄河, 牛雅静, 等. 10 个菊花品种花粉生活力测定和贮藏方法研究[J]. 福建农业学报, 2020, **35**(3): 295–302.
- LI Yajun, HUANG He, NIU Yajing, *et al.* Viability of stored *Chrysanthemum morifolium* pollens [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, **35**(3): 295–302.
- [20] 郑其向, 杨永红, 罗欢, 等. 长期干旱胁迫对大麻 (*Cannabis sativa* L.) 花粉生理组织结构及萌发特性的影响[J/OL]. 分子植物育种, 2025-06-03[2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20250603.1322.002>.
- ZHENG Qixiang, YANG Yonghong, LUO Huan, *et al.* The effect of drought stress on pollen physiological structure and germination characteristics of hemp (*Cannabis sativa* L.) [J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2025-06-03[2025-08-20]. <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.s.20250603.1322.002>.
- [21] 俞芹, 王倩颖, 王宁杭, 等. 4 种木兰属植物花粉萌发特性[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(3): 505–510.
- YU Qin, WANG Qianying, WANG Ninghang, *et al.* Pollen germination characteristics of four *Magnolia* species [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, **35**(3): 505–510.
- [22] 沈植国, 孙萌, 丁鑫, 等. 不同培养基组分对 5 个蜡梅品系花粉萌发和花粉管生长的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, **33**(2): 278–287.
- SHEN Zhiguo, SUN Meng, DING Xin, *et al.* Effects of different culture medium composition on pollen germination and pollen tube growth of 5 strains of *Chimonanthus praecox* [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, **33**(2): 278–287.
- [23] 龚双姣, 马陶武, 刘强. 培养基组分及培养条件对蜡梅花粉萌发及花粉管生长的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(6): 1254–1260.
- GONG Shuangjiao, MA Taowu, LIU Qiang. Effects of culture medium composition and culture conditions on pollen germination and pollen tube growth of *Chimonanthus praecox* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(6): 1254–1260.
- [24] 赵宏波, 房伟民, 陈发棣. 梅花花粉离体萌发和花粉管生长研究[J]. 广西植物, 2007, **27**(3): 393–396, 425.
- ZHAO Hongbo, FANG Weimin, CHEN Fadi. Pollen germination in vitro of Mei flower [J]. *Guihaia*, 2007, **27**(3): 393–396, 425.
- [25] 刘雪莲, 秦佳梅, 孙珺博. 培养基组分对锦带花粉离体萌发的影响[J]. 北方园艺, 2012, **36**(24): 129–131.
- LIU Xuelian, QIN Jiamei, SUN Junbo. Effect of medium components on pollen germination in vitro of *Diervilla sessilifolia* [J]. *Northern Horticulture*, 2012, **36**(24): 129–131.

- [26] 蔡昭艳, 苏伟强, 董龙, 等. 钙、镁、钾浓度及光照、温度对西番莲花粉离体萌发的影响[J]. 果树学报, 2022, **39**(1): 86–94.
CAI Zhaoyan, SU Weiqiang, DONG Long, *et al.* Effects of calcium, magnesium, potassium, light and temperature on pollen germination and pollen tube elongation of passion fruit in vitro [J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, **39**(1): 86–94.
- [27] 刘国宇, 王庆, 张文波, 等. 4 种绣球花粉离体萌发研究[J]. 西北农业学报, 2024, **33**(9): 1681–1689.
LIU Guoyu, WANG Qing, ZHANG Wenbo, *et al.* Pollen germination in vitro of four *Hydrangea* species [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2024, **33**(9): 1681–1689.
- [28] ZHAO Wei, HOU Quancan, QI Yuchen, *et al.* Structural and molecular basis of pollen germination [J/OL]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, **203**: 108042[2025-08-20]. DOI: [10.1016/j.plaphy.2023.108042](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108042).
- [29] 林艳, 郝芸莉, 李金霞, 等. 仙客来花粉活力、柱头可授性及花粉管生长研究[J]. 西部林业科学, 2025, **54**(1): 92–100.
LIN Yan, HAO Yunli, LI Jinxia, *et al.* Pollen viability, stigma receptivity and pollen tube growth of *Cyclamen persicum* [J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2025, **54**(1): 92–100.
- [30] WAN Xianqin, SUN Dongchan, GAO Chao. Flower opening dynamics, pollen-ovule ratio, stigma receptivity and stigmatic pollen germination (in-vivo) in *Chaenomeles speciosa* (Sweet) Nakai [J/OL]. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 7127[2025-08-20]. DOI: [10.1038/s41598-024-57655-1](https://doi.org/10.1038/s41598-024-57655-1).
- [31] PAULDASAN A, VIPIN P, DURAI A, *et al.* Floral biology, pollen viability and stigma receptivity in three species of *Casuarina* [J]. *South African Journal of Botany*, 2023, **152**: 182–191.
- [32] 罗卿清, 郑钢, 顾翠花, 等. 黄薇花粉活力及柱头可授性[J]. 浙江农林大学学报, 2020, **37**(1): 182–187.
LUO Qingqing, ZHENG Gang, GU Cuihua, *et al.* Pollen viability and stigma receptivity of *Heimia myrtifolia* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2020, **37**(1): 182–187.
- [33] LI Runzhu, CHANG Hui, LIU Hongyan, *et al.* The fertility research of ‘Huajin 6’, a new variety of honeysuckle [J/OL]. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 13729[2025-08-20]. DOI: [10.1038/s41598-024-64435-4](https://doi.org/10.1038/s41598-024-64435-4).
- [34] 赵凡, 李媛蓉. 拉萨紫斑牡丹柱头可授性研究初探[J]. 农业与技术, 2025, **45**(9): 139–142.
ZHAO Fan, LI Yuanrong. A preliminary study on stigma receptivity of *Paeonia rockii* in Lasa [J]. *Agriculture and Technology*, 2025, **45**(9): 139–142.