

## 温度对轮台小白杏授粉生物学影响的研究

谢李星<sup>1,2</sup>, 田宝莲<sup>1,2,3</sup>, 唐章虎<sup>4</sup>, 朱宗财<sup>2</sup>, 阿布来克·尼牙孜<sup>5</sup>, 张大海<sup>4\*</sup>, 罗术东<sup>1,2,6\*</sup>

(<sup>1</sup>中国农业科学院蜜蜂研究所·资源昆虫高效养殖与利用全国重点实验室, 北京 100093; <sup>2</sup>新疆农垦科学院生物技术研究所, 新疆石河子 832000; <sup>3</sup>新疆农业大学农学院, 乌鲁木齐 830052; <sup>4</sup>新疆农业科学院园艺作物研究所, 乌鲁木齐 830091; <sup>5</sup>新疆农业科学院吐鲁番农业科学研究所, 新疆吐鲁番 838000; <sup>6</sup>中国农业科学院西部农业研究中心, 新疆昌吉 831100)

**摘要:** 【目的】探讨温度对轮台小白杏授粉生物学的影响, 为轮台小白杏的人工辅助授粉时机的确定提供理论依据。【方法】在田间情况下, 采用人工定时调查的方法初步明确轮台小白杏开花进程, 并利用联苯胺-过氧化氢法了解花后不同时间段内花朵柱头可授性, 探明人工辅助授粉对轮台小白杏坐果率的影响。结合 2024 年田间实测温度及历年花期温度数据, 在室内模拟轮台小白杏开花时的环境温度, 探究不同温度对轮台小白杏柱头可授性和授粉品种花粉活力的影响。【结果】大田结果表明: 轮台小白杏从开花 5%到开花 50%耗时为 10 h, 而从开花 5%到开花 90%仅耗时 22 h; 一天中, 轮台小白杏的集中开放时段为 10:00—16:00。同时, 研究还表明轮台小白杏在花后 2 h~3 h 具有强可授性。室内模拟试验表明: 高温或低温都会降低柱头的可授性, 18°C~22°C时, 轮台小白杏的柱头强可授期相对较长, 低温使强可授性延迟出现, 而高温会缩短柱头可授期。18°C~22°C有利于花粉的萌发, 其中 22°C为最适花粉萌发和花粉管伸长的温度。人工辅助授粉试验表明: 使用苏勒坦杏授粉后可将轮台小白杏坐果率提高至 62.28%。【结论】轮台小白杏开花速度快且集中, 田间柱头强可授期短, 表明轮台小白杏的最佳授粉窗口期短, 但适宜温度有利于维持柱头强可授性。人工辅助授粉可以显著提高轮台小白杏坐果率, 但需要研发一种高效快速的授粉技术, 以确保在有限的可授期内完成授粉。

**关键词:** 轮台小白杏; 授粉生物学; 柱头可授性; 杂交亲和性; 花粉活力

中图分类号: S662.2 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2025)05-0001-08

## Effects of temperature on the pollination biology of Luntai Xiaobai

### apricot

XIE lixing<sup>1,2</sup>, TIAN Baolian<sup>1,2,3</sup>, TangZhanghu<sup>4</sup>, ZHU Zongcai<sup>2</sup>, ABULAIKE · Niyazi<sup>5</sup>, ZHANG Dahai<sup>4\*</sup>, LUO Shudong<sup>1,2,6\*</sup>

(<sup>1</sup>Institute of Apicultural Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences/State Key Laboratory of Resource Insects, Beijing 100093; <sup>2</sup>Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Biotechnology Research Institute, Shihezi 832000; <sup>3</sup>Xinjiang Agricultural University, College of Agronomy, Urumqi 830052; <sup>4</sup>Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Institute of Horticulture Crops, Urumqi 830091; <sup>5</sup>Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Institute of Agricultural Sciences of Turpan, Turpan 838000; <sup>6</sup>Chinese Academy of Agricultural Sciences, Western Research Institute, Changji 831100)

收稿日期: 2024-12-24

接受日期: 2025-01-23

基金项目: 新疆生产建设兵团农业科技创新工程专项 (NCG202317); 新疆杏产业技术体系 (XJCYTX-01)

作者简介: 谢李星, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为果树授粉新技术的研发。E-mail: xlx5652397@163.com

\*通信作者 Author for correspondence. E-mail: luoshudong@caas.cn; E-mail: ziyuanpuZ@sina.com

**Abstract:** **【Objective】** In order to provide a theoretical foundation for determining the optimal timing of artificially assisted pollination for this cultivar, the influence of temperature on the pollination biology of Luntai Xiaobai apricot was investigated. **【Methods】** The flowering biology of apricot is the base of pollination. We observed and recorded the dynamic flowering of Luntai Xiaobai apricot from March to April 2024. At the same time, we evaluated the stigma receptivity at different times since the flowers blossomed in the field. Subsequently, Suletan apricot was utilized to pollinate Luntai Xiaobai apricots, and the fruit setting rate was investigated at the end of April. To identify the effect of temperature on the receptivity of the stigma, seven different temperature treatments (10, 14, 18, 22, 28, 32, and 36°C) were established based on the temperatures recorded in 2024 and the data from the past ten years during the same periods in Luntai County. During the blooming stage of Luntai Xiaobai apricot, we collected vigorous inflorescence branches by systematically removing the already opened flowers and retaining only those that were about to open. The branches were cultured at the mentioned temperatures above for 120 hours. The stigma receptivity was evaluated hourly using benzidine-hydrogen peroxide during the first 6 hours after flowering. Then, the stigma receptivity was assessed at 24-hour intervals. At the same time, we also investigated the effect of different temperatures (10, 14, 18, 22, 28, 32, and 36°C) on the pollen viability of Suletan apricot. **【Results】** The overall flowering rate of Luntai Xiaobai apricot was fast and concentrated. It only took 10 hours for flowering from 5% to 50%, and 22 hours from 5% to 90%. Additionally, the Luntai Xiaobai apricot predominantly flowered from 10:00 to 16:00. The number of Luntai Xiaobai apricot flowers increased gradually from 10:00 to 16:00 but decreased significantly from 16:00 to 20:00. There was a significant correlation between the number of Luntai Xiaobai apricot flowers and temperature ( $p < 0.01$ ), and the correlation coefficient was 0.58. The study on the stigma receptivity of Luntai Xiaobai apricot in Luntai County indicated that stigma receptivity exhibited a "low-high-low" trend over time. Under field conditions in 2024, Luntai Xiaobai apricot displayed high stigma receptivity only within the first 2 to 3 hours after flowering, after which it gradually decreased. The stigma exhibited the longest duration of strong receptivity within the temperature range of 18°C to 22°C. Lower temperatures delayed the onset of strong stigma receptivity, while excessively high temperatures shortened the period of stigma receptivity. Laboratory results also indicated that different culture temperatures affected stigma receptivity differently. At 10°C, stigma receptivity was weak at 0 and 1 hour post-anthesis, moderate from 2 to 120 hours, and no strong stigma receptivity was observed. For 14°C, strong receptivity emerged 5 hours post-anthesis. As the temperature gradually increased, the onset of strong stigma receptivity in Luntai Xiaobai apricot was further advanced. Within the temperature range of 18°C to 22°C, strong stigma receptivity could occur as early as 3 hours post-anthesis and last until 48 hours post-anthesis. At 28°C, strong receptivity appeared at 2 hours post-anthesis but declined quickly. At 32°C and 36°C, the duration of stigma receptivity was reduced, strong receptivity was absent, and stigma receptivity was lost on the day of flowering. Temperature exerted a significant impact on the pollen germination rate of Suletan apricot *in vitro*. The results indicated that the temperature range of 18 to 22°C was most favorable for pollen germination, with 22°C being the optimal temperature. Specifically, the pollen germination rates at 10, 14, 18, and 22°C were 38.15%, 41.13%, 47.15%, and 60.54%, respectively. When the temperature exceeded 22°C, the pollen germination rate began to decline, decreasing to 42.95%, 42.42%, and 39.61% at 28°C, 32°C, and 36°C, respectively. Similarly, the effects of temperature on pollen tube elongation of Suletan apricot are extremely significant. The

results showed that 22°C was the most favorable temperature for pollen tube elongation. In the first hour of pollen germination, the increase in temperature was conducive to the elongation of the pollen tube. The pollen tubes at 28°C and 32°C were the longest, reaching 140.00 μm and 145.60 μm, respectively. After two hours, the growth of pollen tubes at 22°C and 28°C was the fastest, reaching 315.43 μm and 336.88 μm, respectively, which was significantly longer than those under other temperature conditions. After three and four hours of treatment, the length of the pollen tube at 22°C was significantly greater than in other treatments. The results showed that the fruit setting rate of Luntai Xiaobai apricot pollinated by Suletan apricot pollen was 62.28%, which was significantly higher than 13.91% under natural pollination. 【 Conclusion 】 The overall flowering rate of Luntai Xiaobai apricot is fast and concentrated, with strong stigma receptivity in the field maintained for only 2 to 3 hours. These characteristics result in a very short duration for effective pollination. Suletan apricot pollen can be used to pollinate Luntai Xiaobai apricot. Therefore, a fast and effective pollination technique needs to be developed for Luntai Xiaobai apricot.

**Key words:** Luntai Xiaobai apricot; pollination biology; stigma receptivity; hybrid affinity; pollen viability

杏(*Prunus armeniaca* L.)是蔷薇科杏属的落叶乔木，中国是世界栽培杏的起源和驯化中心之一，拥有丰富的野生和栽培杏品种资源<sup>[1,2]</sup>。新疆是野杏的起源中心，也是我国杏的主要产区。新疆轮台县作为轮台小白杏的原产地，拥有两千五百多年的种植发展史，被国家林业局命名为“中国白杏之乡”。轮台小白杏也因其酸甜可口、营养丰富等特点先后获“全国优质鲜食杏”“国家地理标志产品”等荣誉。轮台县将轮台小白杏产业作为重点发展特色林果业，当地围绕轮台小白杏种植和加工销售的经营主体共 158 家，至 2022 年轮台小白杏种植面积共约 6420 hm<sup>2</sup>，总产量 1.55 万吨，其种植和加工总产值达 1.54 亿元，是当地农户的一个重要的经济收入来源<sup>[3]</sup>。同时，轮台小白杏还具有涵养水源、防风固沙、防止水土流失等关键作用<sup>[4]</sup>。轮台小白杏开花较早还可为众多早春传粉昆虫提供栖息地和食物来源，有助于维持当地生物多样性<sup>[5]</sup>。

授粉是具备活力的花粉经过有效的传播媒介落置到有活性的柱头上的过程。授粉也是制约新疆杏产业发展的瓶颈之一，而温度对植物开花和授粉具有主要影响<sup>[6,7]</sup>。前人的研究表明温度是影响植物开花的重要因素：如文冠果的花期与绝对最高年温呈显著负相关<sup>[8]</sup>；新疆野杏在较低温度环境下其开花推迟，花期延长，而较高温度则有利于花朵的提前开放<sup>[9]</sup>。同时，不同温度对柱头可授性强弱和持续时间以及花粉的萌发和花粉管的伸长同样有着重要影响，不同的植物均有对应最适宜的温度<sup>[10-12]</sup>。如砵山酥梨在 20°C 时柱头强可授性能较快出现，且较强的柱头可授性持续时间可达 5 d<sup>[13]</sup>；蓝莓花粉适宜萌发温度为 25°C~27°C<sup>[14]</sup>，贴梗海棠花粉的萌发温度则为 20°C<sup>[15]</sup>。轮台小白杏一般在 3 月下旬至 4 月上旬开花，据往年的气象资料可查，轮台小白杏花期温度变化较大，时有倒春寒、晚霜和极端高温出现。倒春寒和晚霜不但会影响花器官的分化，造成雌蕊败育率升高，还会限制访花昆虫的传粉活动；极端高温则会影响子房直径、雌蕊长度、柱头可授性和花粉活力，这一系列原因造成轮台小

白杏坐果率低，常发生“满树花不见果”的现象<sup>[16-18]</sup>。目前关于轮台小白杏授粉生物学主要集中在不同品种对其授粉的亲和性和人工辅助授粉的方法，温度对轮台小白杏授粉生物学仍然缺乏系统的研究<sup>[19,20]</sup>。因此，明确轮台小白杏的开花进程以及不同环境温度对轮台小白杏柱头可授性和授粉品种的花粉萌发及花粉管伸长的影响，对于确定人工辅助授粉最佳授粉时期具有重要意义。

本研究调查了 2024 年间轮台小白杏的开花进程及其柱头可授性变化规律，并结合历年花期温度数据，模拟了不同温度对轮台小白杏柱头可授性的变化及授粉品种的花粉萌发与花粉管伸长的影响。最后还采用人工辅助授粉的方法为轮台小白杏授粉，并调查了其坐果率。本研究为轮台小白杏最佳授粉时机的确定提供了科学依据，对于轮台小白杏的高产和稳产具有重要的现实指导意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料及试验地概况

轮台县位于天山南麓东端，塔克拉玛干沙漠北缘，年均气温为 10.6 °C，属于暖温带大陆性干旱气候，土层属灌淤土，主栽品种为轮台小白杏<sup>[21]</sup>。且主要集中在东四乡（阳霞镇、铁热克乡、策大雅乡和野云沟乡），尤以阳霞镇为主要栽培地区。本试验于 2024 年在阳霞镇开展，所选取的试验树体树龄为 20 a，树势中庸、生长健康且结果良好。

### 1.2 轮台小白杏开花进程观察

根据《杏种质资源描述规范和数据标准》，进行轮台小白杏的开花进程观察，初花期以全树开花 5% 为准，盛花期以全树开花 50% 为标准<sup>[22]</sup>。于 2024 年 3 月—4 月，在试验地采用五点取样法选择 5 株杏树，每株树在树冠外围中部东南西北 4 个方向各随机标记 1 个枝条，每个枝条上花朵  $\geq 60$  朵花，对每个枝条进行挂牌标记，待开花后每 2 h 统计 1 次开花数，直至开花率达 90% 以上。

同时，我们将温度记录仪悬挂于杏树树冠中部，用于记录杏树从开花 5% 至开花 90% 时间内的温度变化。

### 1.3 田间柱头可授性调查

利用联苯胺-过氧化氢法对柱头可授性进行调查，具体参见罗克明等的研究方法并略加改进<sup>[23]</sup>。具体而言：选取轮台小白杏树冠外围中部东南西北 4 个方向上的枝条，于气球期进行去雄套袋处理，待开花后采用挂牌标记的方式，在开花后 0、2、4、6、24 和 48 h 摘取

柱头进行柱头可授性强弱的测定，每组重复 20 次。

#### 1.4 人工辅助授粉及坐果率调查

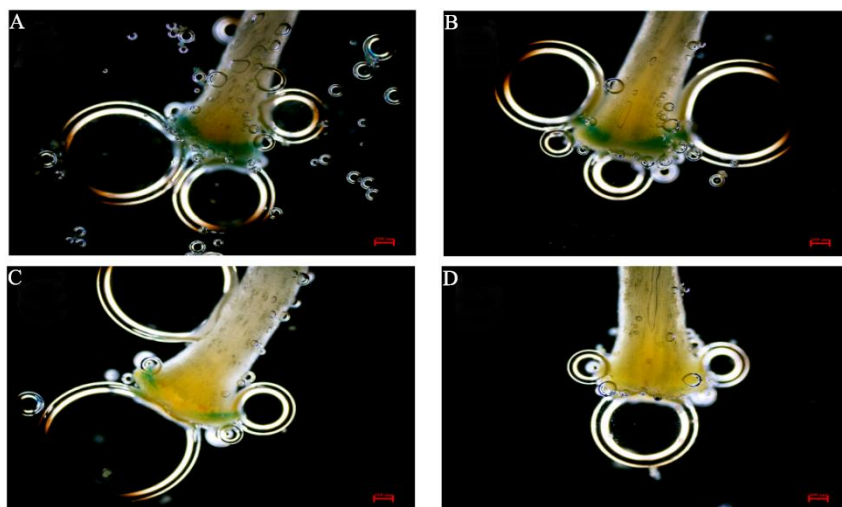
参照安晓芹和张桐源等的方法<sup>[24,25]</sup>以轮台小白杏为母本，苏勒坦杏花粉为授粉花粉。选取杏树冠中部外围的花束状果枝，统计总花数、挂牌并套纱网，在气球期去雄，按照 10% 蔗糖+0.01% 硼酸+0.4% 苏勒坦杏花粉配置授粉液进行授粉，完成授粉后套袋，7 d 后去袋。选取与授粉组同等状态的枝条将自然授粉做为对照组。在第一次生理落果期后进行坐果率调查。

#### 1.5 温度对轮台小白杏柱头可授性和苏勒坦杏花粉的影响

考虑到人工辅助授粉通常在白天进行，根据 1.2 中大田温湿度记录仪的数据，轮台小白杏花期当地田间温度在清晨最低为 10.6℃，中午最高可达 35.8℃，并结合轮台县历年温度数据，我们在室内控制条件下设置 7 个温度梯度（10、14、18、22、28、32 和 36℃），以明确不同温度对轮台小白杏柱头可授性和苏勒坦杏花粉的萌发及伸长的影响。

于盛花期，参照杨琴和李鹏等<sup>[26,27]</sup>的方法采集长势健壮的花束状花枝，仅保留气球期花朵并去雄，将枝条分别于上述温度条件下培养 120 h，在开花后 6 h 每小时用联苯胺-过氧化氢法进行柱头可授性测试，而后每 24 h 检测柱头可授性，每组重复 20 次，柱头可授性判断如图 1 所示。

参照赵长星和孙慧瑛等的方法<sup>[28,29]</sup>，采用固体培养基离体培养法于上述温度条件培养苏勒坦杏花粉，每小时测量 1 次花粉管长度，每次测量观察选择 5 个视野，每个视野不少于 30 粒花粉，持续观察 4 个小时，并于 4 小时后统计不同温度下苏勒坦杏花粉的萌发率，每个处理重复 3 次。



比例尺大小为 100  $\mu\text{m}$ ；A.柱头全部变绿，有大量气泡，柱头可授性强；B.柱头大部分变绿，有较多气泡，柱头可授性中等；C.柱头小部分变绿，有少量气泡，柱头可授性弱；D.柱头未变绿，有少量气泡，无柱头可授性。

The scale magnitude is 100  $\mu\text{m}$ ; A. The stigma completely turns green, with many bubbles, indicating high stigma receptivity. B. The stigma mostly turns green, with more bubbles, indicating medium stigma receptivity. C. The stigma partially turns green, with few bubbles, indicating weak stigma receptivity. D. The stigma does not turn green, with few bubbles, indicating no stigma receptivity.

图 1 杏花柱头可授性强弱等级划分

Fig. 1 Classification of stigma receptivity of apricot

## 1.6 数据分析

使用 Microsoft Excel 2016 整理数据，SPSS 27 进行方差分析和相关性分析，Graphpad Prism 9.1.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 轮台小白杏的开花动态

通过田间调查发现轮台小白杏整体开花速度快，从开花 5%到开花 50%用时仅为 10 h，开花 5%到开花 90%用时则为 22 h（图 1）。

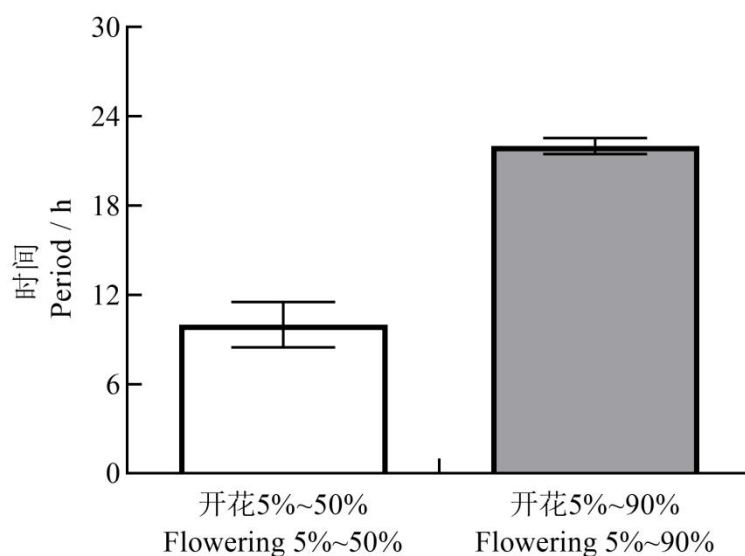
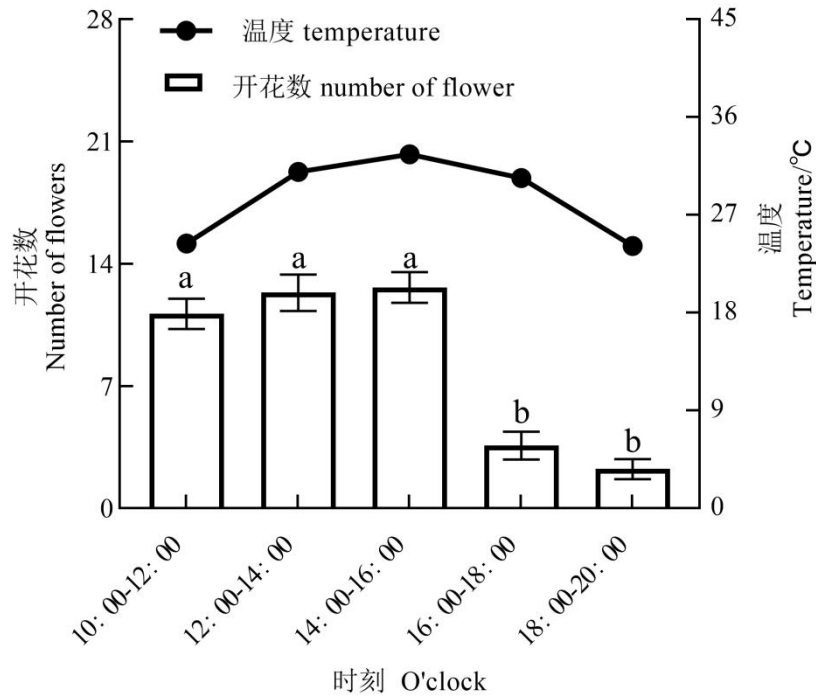


图 2 轮台小白杏的开花历程

Fig.2 Flowering duration of Luntai Xiaobai apricot

在轮台小白杏的开花动态中发现，轮台小白杏主要集中在 10:00—16:00 开放，且单位时间内的开花数量随时间而增加，但在 16:00 之后开花数量显著降低（图 2）。对花期时记录的温度与开花数进行相关性分析发现：轮台小白杏的开花数与温度高低呈正相关 ( $p <$

0.01), 相关系数为 0.58。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Different letters indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

图 3 轮台小白杏的开花动态

Fig.3 The flowering dynamic of Luntai Xiaobai apricot

## 2.2 田间轮台小白杏的柱头可授性

对轮台小白杏进行田间柱头可授性调查,发现轮台小白杏的柱头可授性随着开花时间的推移呈现出“低-高-低”的趋势,在开花后 0 h 到出现强可授性之前皆具有柱头可授性(表 1),并且轮台小白杏只在开花后 2 h~3 h 具有强可授性,随后可授性降低。

表 1 2024 年田间轮台小白杏不同时间的柱头可授性

Table 1 The stigma receptivity of Luntai Xiaobai apricot in orchard in 2024

品种 Variety	开花后时间/h Time after flowering								
	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	24 h	48 h
轮台小白杏 Luntai Xiaobai apricot	++	++	+++	+++	++	+	+	+	-

注: -: 柱头无可授性; +: 柱头可授性弱; ++: 柱头可授性中等; +++: 柱头可授性强。

Note: -: No stigma receptivity; +: Weak stigma receptivity; ++: Medium stigma receptivity; +++: High stigma receptivity.

## 2.3 温度对轮台小白杏柱头可授性和苏勒坦杏花粉萌发和生长的影响

### 2.3.1 温度对轮台小白杏柱头可授性的影响

在 18°C~22°C 的柱头强可授性持续时间最长, 较低的温度会延迟柱头强可授性出现, 温度过高则会缩短柱头可授期。通过不同温度培养发现 10°C 时在开花后 0 h 和 1 h 柱头可授性弱, 开花后 2 h 具有中等可授性, 其柱头可授性一直持续至开花后 120 h, 但柱头无强可授性出现。14°C 强可授性在开花后 5 h 才出现。18°C~22°C 时, 轮台小白杏柱头可授性随着温度的升高, 其强可授性提前至开花后 3 h 出现, 且一直持续至开花后 48 h。随着温度进一步升高, 在 28°C 时强可授性进一步提前至开花后 2 h, 随后柱头可授性降低。在 32°C 和 36°C 时柱头可授期缩短, 无强可授性, 并在开花当日丧失柱头可授性。

表 2 轮台小白杏不同培养温度下的柱头可授性

**Table 2 The stigma receptivity of Luntai Xiaobai apricot during different cultivating temperature**

开花后时间/h Time after flowering	培养温度 Cultivating temperature						
	10°C	14°C	18°C	22°C	28°C	32°C	36°C
0 h	+	+	++	++	++	++	++
1 h	+	++	++	++	++	++	++
2 h	++	++	++	++	+++	++	+
3 h	++	++	+++	+++	++	+	+
4 h	++	++	+++	+++	++	+	-
5 h	++	+++	+++	+++	++	-	-
6 h	++	+++	+++	+++	++	-	-
24 h	++	+++	+++	+++	+	-	-
48 h	++	+++	+++	+++	-	-	-
72 h	++	++	++	++	-	-	-
96 h	++	++	+	+	-	-	-
120 h	+	+	+	-	-	-	-

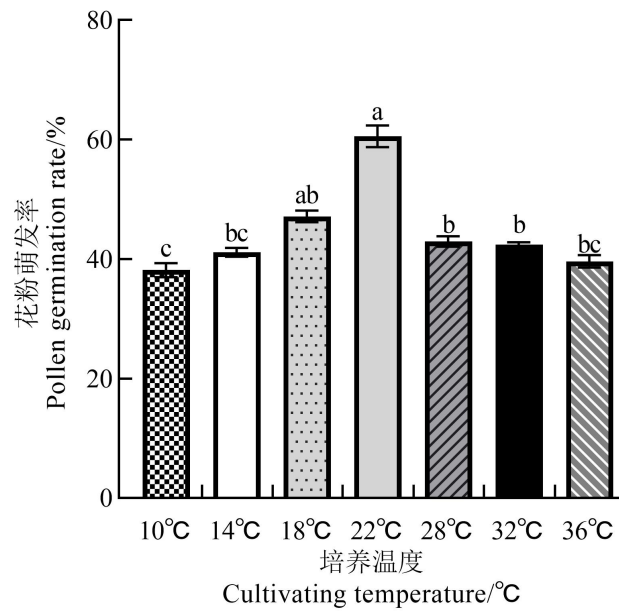
注: -: 柱头无可授性; +: 柱头可授性弱; ++: 柱头可授性中等; +++: 柱头可授性强。

Note: -: No stigma receptivity; +: Weak stigma receptivity; ++: Medium stigma receptivity; +++: High stigma receptivity.

### 2.3.2 温度对苏勒坦杏花粉萌发率的影响



在 18°C~22°C有利于杏花粉的萌发，其中 22°C是最适萌发温度。通过试验发现温度对苏勒坦杏花粉离体培养的萌发率具有极显著的影响。在一定温度范围内随着温度的升高，花粉的萌发率也在逐渐增加，10、14、18 和 22°C花粉萌发率分别为 38.15%、41.13%、47.15% 和 60.54%。当温度持续升高超过 22°C，杏花粉萌发率呈下降趋势，28、32 和 36°C萌发率依次减小为 42.95%、42.42%和 39.61%（图 4）。



不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

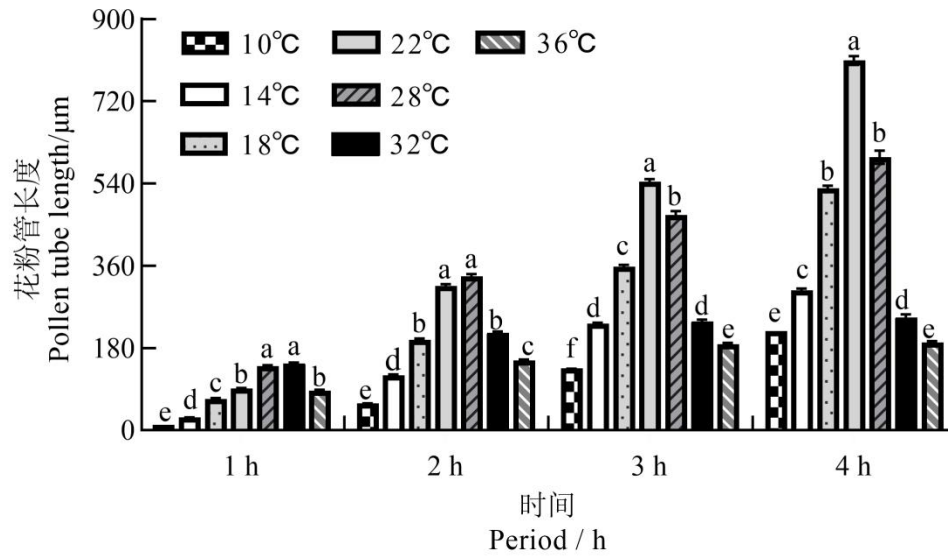
Different letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

图 4 不同培养温度对花粉萌发率的影响

Fig.4 Effects of different cultivating temperatures on pollen germination rate

### 2.3.3 温度对苏勒坦杏花粉管伸长的影响

试验结果表明温度对苏勒坦杏花粉管的伸长具有极显著的影响，即 22°C是最适合苏勒坦杏花粉管伸长的温度。研究发现培养 1 h 时，较高的温度有利于花粉管的伸长，即 28°C和 32°C的花粉管长度最长，分别为 140.00  $\mu\text{m}$  和 145.60  $\mu\text{m}$ 。培养 2 h 后，22°C和 28°C下的花粉管伸长最快，分别为 315.43  $\mu\text{m}$  和 336.88  $\mu\text{m}$ ，显著高于其他温度下花粉管的长度。处理 3 h 和 4 h 后，22°C下花粉管的长度均显著高于其他温度下的花粉管长度。

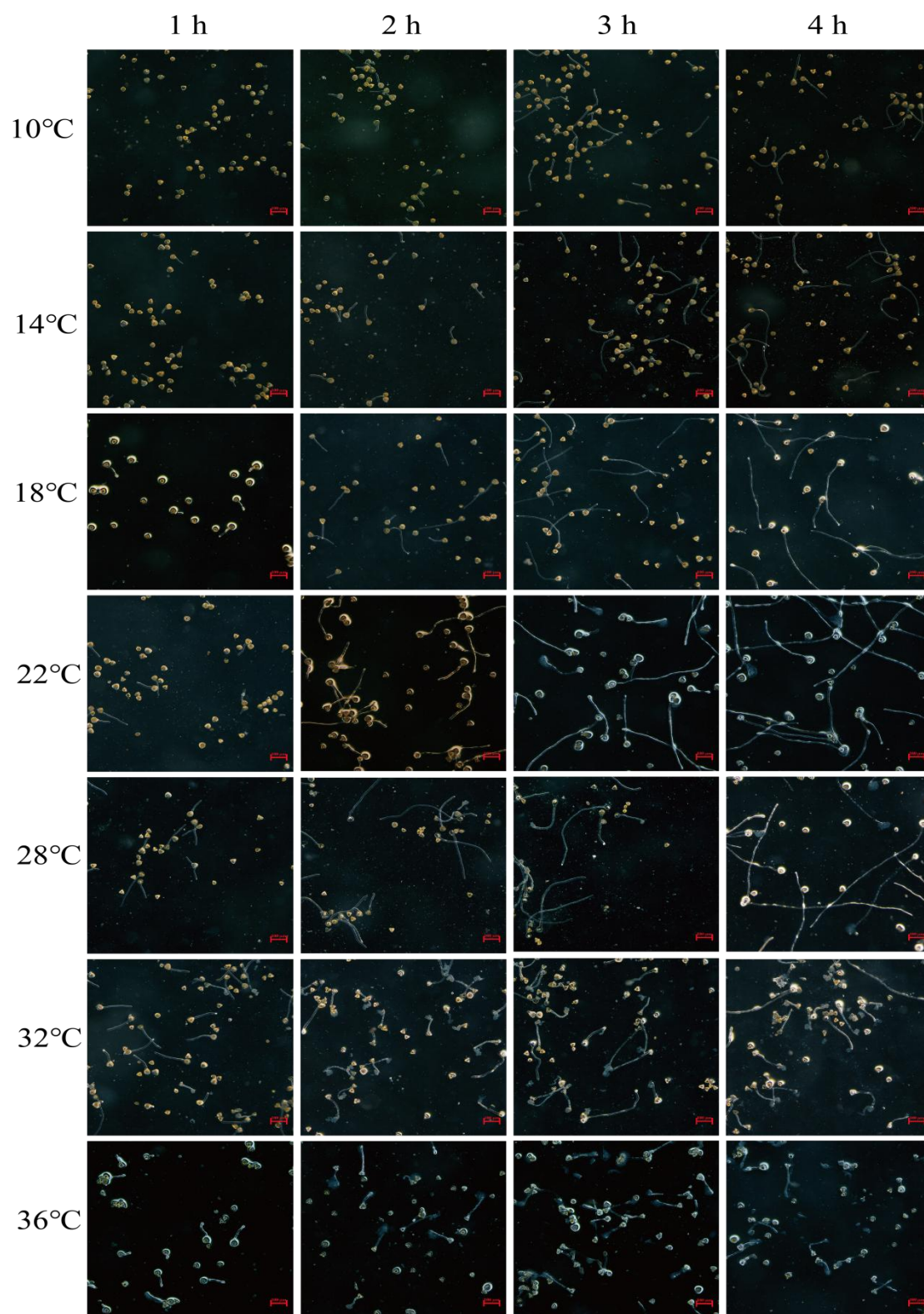


不同字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

Different letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

图 5 不同培养温度和时间对花粉管伸长的影响

Fig.5 Effects of different cultivating temperatures and periods on *in vitro* pollen tube growth



比例尺大小为 100  $\mu\text{m}$ 。

The scale magnitude is 100  $\mu\text{m}$ .

图 6 不同培养时间和温度下花粉管长度的变化情况

**Fig.6 The alterations in the length of *in vitro* pollen tubes amid various cultivating temperatures and periods**

## 2.4 人工辅助授粉坐果率调查

如图 7 所示在第一次生理落果期后的坐果率调查结果表明,经人工辅助授粉后的轮台小白杏坐果率为 62.28%, 显著高于自然授粉状态下的坐果率 13.91%。

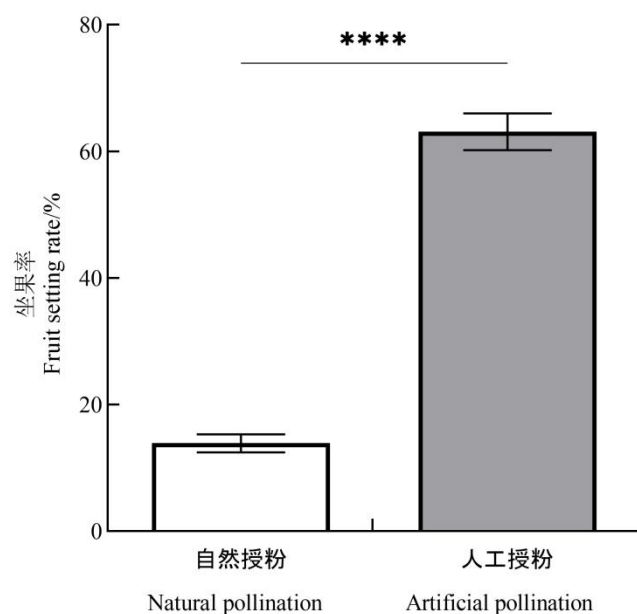


图 7 不同授粉组的轮台小白杏坐果率情况

Fig.7 The fruit setting rate of Luntai Xiaobai apricot in diverse pollination groups

## 3 讨论

人工辅助授粉是大部分果树的有效授粉模式,而开花进程的研究则可为人工辅助授粉时机的把握提供重要参考依据<sup>[30,31]</sup>。通过对轮台小白杏的开花进程调查,发现轮台小白杏具有开花速度快的特点,其从初花期进入盛花期用时在 10 h 内,22 h 内花朵开放至 90%,这一研究结果与前人研究基本一致<sup>[32]</sup>。对轮台小白杏每天的开花进程的研究发现,其开放时间主要集中在上午至中午,这可能是由于这一时间段温度上升会使植物的木葡聚糖糖基转移酶的活性发生变化,影响花朵细胞壁合成与延伸,温度升高,酶活性增强,从而加快植物开花进程<sup>[33,34]</sup>。虽然傍晚时的温度仍处于较高范围,但是开花数普遍降低,这可能是植物受到了光周期对开花调控的影响<sup>[35,36]</sup>。因此轮台小白杏进行人工辅助授粉适宜集中在上午至中午进行。

温度是影响柱头接受花粉能力的主要因素<sup>[16]</sup>。对轮台小白杏在室内进行不同温度培养发现,较低的温度(10°C和 14°C)会使柱头无强可授性或者推迟柱头强可授性的出现,这与前人对欧洲李的研究结果相似<sup>[37]</sup>。当温度升高至 18°C和 22°C,轮台小白杏柱头的可授性相应增强,因为柱头可授性与过氧化氢酶和琥珀酸脱氢酶等酶的活性有着密切关系,温度在

适当范围内升高，酶的活性增强，柱头可授性也随之提高<sup>[38]</sup>。温度进一步上升（28、32 和 36℃），轮台小白杏柱头强可授性的持续时间缩短，甚至无强可授性出现，总体柱头可授期也进一步缩短。高温会使植物体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶的活性产生剧烈变化，加速柱头衰老，降低柱头可授性，同时高温会导致柱头分泌物水分含量减少，缩短柱头可授期<sup>[39]</sup>。植物柱头可授性的强弱及其持续时间是影响授粉效果的重要因素之一，选择在柱头可授性最强的阶段授粉有利于提高坐果率<sup>[40,41]</sup>。研究结果表明轮台小白杏柱头可授性极易受温度的影响，进而将影响其受精作用，对轮台小白杏进行人工辅助授粉时，应实时关注果园的温度变化，若在人工辅助授粉时遭遇低温，应当延迟授粉，而遭遇极端高温，则应采取降温措施并加快授粉进度<sup>[42]</sup>。

针对轮台小白杏在集中开花阶段的花后田间柱头可授性进行调查，发现轮台小白杏与新疆其他杏品种在内的大多数果树的柱头可授性一样呈现出“低-高-低”的变化趋势<sup>[43-45]</sup>。田间轮台小白杏的柱头强可授性持续时间较短，仅在花后 2 h~3 h，且花后 48 h 无柱头可授性，这与孙慧瑛和安晓芹等<sup>[29,46]</sup>研究发现杏的强可授性出现时间多为开花当日的结论基本一致。同时，这一结果也与本研究中和大田温度相近的室内培养温度下测得的柱头可授性存在一定的差异，这可能与大田状态下各种环境因子（如温度、湿度和风沙等）影响柱头的可授性有关。如陈灵鸫等<sup>[47]</sup>研究表明温度、湿度、风速和降雨等外界环境因素会刺激扁穗牛鞭草柱头使其具有可授性，但也会缩短其柱头可授期；纠松涛等<sup>[48]</sup>研究发现低温主要影响甜樱桃开花后的柱头可授性，而过高的温度对整个开花过程的柱头可授性都产生影响，温度过高或过低皆会降低甜樱桃柱头可授性；张礼春等<sup>[49]</sup>发现枣花柱头对风沙极为敏感，并且风沙会减弱其柱头可授性。目前不同环境因子在田间自然环境中的协同作用尚未得到充分验证，考虑到温度、湿度和风沙等环境因素的相互作用可能会共同影响轮台小白杏柱头的可授性及其他生理状态，未来可以通过设置温度、湿度、风速和沙尘等因素，模拟不同组合的环境因子开展试验，进一步探讨这些环境因子的协同作用及其对柱头可授性的具体影响机制。

花粉相较于柱头对温度的反应更加敏感，温度直接影响花粉的萌发，进而影响果树授粉效果和果实产量<sup>[50,51]</sup>。不同培养温度下的花粉萌发率具有极显著差异，温度过低或者过高均会降低到花粉萌发率，在合适的温度区间提升温度有利于花粉的萌发<sup>[52,53]</sup>。不同种类的果树均有不同的最适萌发温度，例如香梨花粉最佳萌发温度为 23℃~26℃，山核桃花粉最佳萌发温度 25℃，李花粉最佳萌发温度为 25℃<sup>[54-56]</sup>。不同品种杏树也存在不同最适萌发温度，总体适宜萌发温度在 20℃~25℃之间，杨晓梅等研究表明‘兰州大接杏’花粉最佳萌发温度为 25℃<sup>[57]</sup>；黄家兴等发现凯特杏最适花粉萌发温度为 20℃<sup>[58]</sup>；孙慧瑛等对库买提杏、树上干杏以及卡巴克胡安娜杏进行研究发现 3 种杏在 25℃下萌发率最高<sup>[59]</sup>，而我们的研究则发现苏勒坦杏的最佳萌发温度为 22℃。

温度不仅影响到花粉的萌发，同样还影响花粉管的伸长。即在一定范围内随着温度的提高，可以促进花粉管伸长，缩短花粉管至胚珠的时间<sup>[26]</sup>。适当升温可以促进酶促反应的发

生,增加花粉自身营养物质的合成和转换能力,但是温度过高可能会影响胼胝质合成酶的活性,导致花粉管内胼胝质累积增加,过量的胼胝质沉积不但能改变花粉管细胞壁力学性能,使花粉管在伸长过程中容易断裂或弯曲,还将降低营养物质合成与供给,阻碍花粉管的伸长<sup>[60,61]</sup>。因此,使用苏勒坦杏花粉对轮台小白杏进行人工辅助授粉需要选择温度在 22℃左右的时间段进行,避免在清晨低温或正午高温环境下授粉,若在授粉期间遭遇高温持续时间较长,可利用微喷灌降低田间小环境的温度,使花粉萌发率和花粉管的生长速度保持在较高的水平,增大柱头接受高活性花粉的概率,提高授粉质量和坐果率<sup>[62]</sup>。

本研究还发现,用苏勒坦杏为轮台小白杏授粉可显著提高坐果率,使其坐果率高达 62.28%,高于安晓芹等<sup>[24]</sup>使用另外 26 种新疆杏品种为轮台小白杏授粉所得的最高坐果率(53.6%),故苏勒坦杏可作为轮台小白杏的候选授粉品种。本研究中的自然坐果率(13.91%)也略高于梁燕和彭晓莉等<sup>[19,20]</sup>对轮台小白杏自然坐果率的调查结果,这可能与这可能与近年来生产管理技术提升有关(<https://www.xast.org.cn/info/1473/70924.htm>)。

在本研究中主要探讨在室内环境下模拟轮台县当地温度对轮台小白杏柱头可授性的影响,及其对苏勒坦杏花粉离体培养的作用。然而,本研究也存在一定的局限性,未将风沙和湿度等其他环境因素纳入研究中。轮台县的风沙天气和低湿度环境可能会对杏花的授粉效率产生影响,例如风沙除了减少植物柱头表面黏液中的水分,飘落的浮尘还会阻碍花粉在柱头上的附着与花粉管的生长,干扰花粉与柱头的相互作用<sup>[63,64]</sup>。低湿度环境同样会加快柱头分泌液的水分流失速度,影响轮台小白杏的柱头可授性,持续暴露在低湿度环境下还可能降低花粉的活力<sup>[65]</sup>。因此,未来的研究可以在考虑这些环境因素的基础上,进一步探索它们对杏花授粉生物学的具体影响,以获得更加全面的结论。

## 4 结 论

轮台小白杏开花速度快且集中,田间柱头强可授性仅出现于花后 2 h~3 h,最佳授粉窗口期短;室内试验表明 18℃~22℃轮台小白杏柱头强可授性维持时间相对较长,苏勒坦杏花粉萌发与花粉管伸长的最佳温度为 22℃,柱头可授性、花粉萌发与花粉管伸长的适宜温度一致。人工辅助授粉可有效提高轮台白杏的坐果率,使用高效快捷的人工辅助授粉方式为轮台小白杏授粉势在必行。

## 参考文献 References:

- [1] QIN F, YAO L, LU C, LI C, ZHOU Y Y, SU C C, CHEN B, SHEN Y H. Phenolic composition, antioxidant and antibacterial properties, and *in vitro* anti-HepG2 cell activities of wild apricot (*Armeniaca Sibirica* L. Lam) kernel skins[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 129: 354-64.
- [2] 王大江, 冯建荣, 刘月霞, 姜新, 曹晓艳, 赵宝龙. 新疆杏品种 SFB 基因的克隆及实时定量表达[J]. 果树学报, 2012, 29(01): 60-65.

- WANG Dajiang, FENG Jianrong, LIU Yuexia, JIANG Xin, CAO Xiaoyan, ZHAO Baolong. Cloning and real-time fluorescence quantitative expression of SFB genes from apricot cultivars in Xinjiang area[J]. Journal of Fruit Science, 2012, 29 (01): 60-65.
- [3] 殷芳琪. 轮台小白杏的产业融合评价研究[D].石河子:石河子大学, 2023.  
YIN Fangqi. Research on industrial integration evaluation of Luntai apricot[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [4] 刘谋荣, 杜月辉, 李利平. 汾河上游仁用杏树生长的气象条件与栽培技术 [J]. 当代生态农业, 2009, 18(Z1): 123-4  
LIU Mourong, DU Yuehui, LI Liping. Meteorological conditions and cultivation technology of apricot tree growth in the upper reaches of the Fenhe river[J]. Contemporary Eco-Agriculture, 2009, 18 (Z1): 123-124.
- [5] LI Q. Strengthening pollination services in Korla fragrant pear in China[D]. Wageningen: Wageningen University, 2024
- [6] 巴哈依丁·吾甫尔, 艾日肯·卡马力, 卡德·艾山, 梁睢, 阿娜尔古力·热为都里, 排孜拉古丽·吐尔地, 阿布来克·尼牙孜. 吐鲁番早熟杏产业现状、存在问题及发展对策[J]. 农业科技通讯, 2024, (01): 23-25.  
BAHAYIDING · Ufuer, AIRIKEN · Kamali, KADE · Aishan, LIANG ju, ANAERGULI · Reweiduli, PAIZILAGULI · Turdi, ABULAIKE · Niyazi. Current situation, existing problems and development countermeasures of early-maturing apricot industry in Turpan[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2024, (01): 23-25.
- [7] 刘立强, 廖康, 张大海, 徐麟, 何峰江, 张乾. 新疆杏品种授粉生物学初探[J]. 北方园艺, 2007, (09): 36-38.  
LIU Liqiang, LIAO Kang, ZHANG Dahai, XU Lin, HE Fengjiang, ZHANG Qian. Exploration of the pollination biology of eight apricot varieties in Xinjiang[J]. Northern Horticulture, 2007, (09): 36-38.
- [8] 张毅, 敖妍, 刘觉非, 赵磊磊, 张永明. 文冠果物候期对环境因子的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43 (05): 30-36.  
ZHANG Yi, AO Yan, LIU Juefei, ZHAO Leilei, ZHANG Yongming. Response of phenophase of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge to environmental factors[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 43 (05): 30-36.
- [9] 郭传超, 周伟权, 石荡, 蒋南林, 唐莹莹, 刁永强, 刘立强. 新疆野杏开花物候与花器官对海拔的响应[J]. 生态学报, 2023, 43 (02): 789-797.  
GUO Chuanchao, ZHOU Wei-quan, SHI Dang, JIANG Nanlin, TANG Yingying, DIAO Yongqiang, LIU Liqiang. The flowering phenological period and floral organ response to altitude in *Prunus armeniaca*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43 (02): 789-797.
- [10] 杨华, 宋绪忠. 马银花花粉萌发和贮藏特性[J]. 浙江林业科技, 2015, 35 (01): 49-53.  
YANG Hua, SONG Xuzhong. Characteristics of pollen germination and storage of *Rhododendron ovatum*[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2015, 35 (01): 49-53.
- [11] 龙兴, 张继, 周双云, 安振宇, 方仁, 邓彪, 尧金燕. 莲雾开花习性及花粉萌发和授粉特性分析[J]. 西南农  
LONG Xing, ZHANG Ji, ZHOU Shuangyun, AN Zhenyu, FANG Ren, DENG Biao, YAO Jinyan. Flowering habits and pollination of wax apple in Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33 (03): 607-612.
- [12] 蔡昭艳, 董龙, 农贵雄, 王葫青, 岑宝林, 苏伟强, 方位宽, 黄章保, 任惠. 温度和药剂对台农 1 号芒果花粉萌发及花粉管生长的影响[J]. 中国果树, 2024, (09): 57-63+70.

- CAI Zhaoyan, DONG Long, NONG Guixiong, WANG Huqing, CEN Baolin, SU Weiqiang, FANG Weikuan, HUANG Zhangbao, REN Hui. Effects of temperature and medicament on pollen germination and pollen tube growth *in vitro* of Tainong 1 mango[J]. China Fruits, 2024, (09): 57-63+70.
- [13] 郭媛, 邵有全, 郭宝贝, 张旭凤. 梨花粉和柱头发育与温度关系研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22 (12): 1446-1452.
- GUO Yuan, SHAO Youquan, GUO Baobao, ZHANG Xufeng. Relationship of pear pollen and stigma development with temperature[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22 (12): 1446-1452.
- [14] 姚平, 周文杰, 黄国辉, 罗璇. 温度对 5 个蓝莓品种花粉发芽率及着果率的影响[J]. 中国南方果树, 2017, 46 (01): 114-117.
- YAO Ping, ZHOU Wenjie, HUAHG Guohui, LUO Xuan. Effects of temperature on pollen germination rate and fruit setting rate of five *Vaccinium corymbosum* L[J]. South China FruitS, 2017, 46 (01): 114-117.
- [15] 马诗钰, 周兰英, 蒲光兰, 赖腾跃, 蔡利娟, 王波. 贴梗海棠花粉生活力与贮藏性研究[J]. 北方园艺, 2014, (16): 81-85.
- MA Shiyu, ZHOU Lanying, PU Guanglan, LAI Tengyue, CAI Lijuan, WANG Bo. Study on pollen viability and storage characters of *Chaenomeles speciosa*[J]. Northern Horticulture, 2014, (16): 81-85.
- [16] 董灿兴, 徐凤杰, 曹永富, 李成忠, 迪丽孜拉, 罗新湖. 伊犁河谷农作物早春冻害调查分析及抗寒关键技术探究[J]. 耕作与栽培, 2022, 42 (03): 154-156.
- DONG Canxing, XU Fengjie, CAO Yongfu, LI Chengzhong, DILizila, LUO Xinhui. Investigation and analysis of early spring freezing injury of crops in Yili river valley and key techniques of cold resistance[J]. Tillage and Cultivation, 2022, 42 (03): 154-156.
- [17] 陈康玉, 陆晓, 赵宁, 甘露, 张海霞, 刘国杰. 花前和花期高温对香白杏花器官发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21 (10): 37-43.
- CHEN Kangyu, LU Xiao, ZHAO Ning, GAN Lu, ZHANG Haixia, LIU Guojie. Effect of high temperature in the pre-blooming and blooming periods on flower development of Xiangbaixing apricot[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21 (10): 37-43.
- [18] 张太西, 樊静, 李元鹏, 余行杰. 1961—2018 年新疆区域高温变化与环流和海温关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38 (05): 1274-1284.
- ZHANG Taixi, FAN Jing, LI Yuanpeng, YU Xingjie. Relationship between high temperature change and circulation and SST in Xinjiang from 1961 to 2018[J]. Arid Zone Research, 2021, 38 (05): 1274-1284.
- [19] 梁燕. 盛花期人工辅助措施对轮台白杏坐果率与果实品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012.
- LIANG Yan. Effects of artificial auxiliary measures at full-bloom stage on fruit-setting rate & fruit quality of *Armeniaca vulgaris* 'Luntaibaixing'[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.
- [20] 彭晓莉, 廖康, 贾杨, 刘欢, 马微, 徐乐. 9 个新疆杏品种间杂交亲和性研究[J]. 果树学报, 2015, 32 (02): 192-199.
- PENG Xiaoli, LIAO Kang, JIA Yang, LIU Huan, MA Wei, XU Le. Study on the cross compatibility among 9 apricot cultivars in Xinjiang[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32 (02): 192-199.
- [21] 王世伟, 潘存德, 张大海, 徐麟. 新疆 11 个杏品种叶绿素荧光特征比较[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(04): 637-643.
- WANG Shiwei, PAN Cunde, ZHANG Dahai, XU Lin. Comparison of chlorophyll fluorescence characters in eleven apricot varieties in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2010, 47 (04): 637-643.



- [22] 刘宁, 刘威生. 杏种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.  
LIU Ning, LIU Weisheng. Descriptors and data standard for apricot (*Armeniaca* Mill.)[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006.
- [23] 罗克明, 马红叶, 杨勇胜, 乔荣. 14 个车厘子品种的花粉活力及柱头的可授性研究[J]. 耕作与栽培, 2019, (02): 29-31.  
LUO Keming, MA Hongye, YANG Yongsheng, QIAO Rong. Pollen viability and stigma receptivity of 14 cheli cultivars[J]. Tillage and Cultivation, 2019, (02): 29-31.
- [24] 安晓芹, 廖康, 孙慧瑛, 刘娟, 李永闲, 廖小龙, 王云. 不同品种授粉对‘轮台白杏’坐果及果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30 (02): 187-193.  
AN Xiaoqin, LIAO Kang, SUN Huiying, LIU Juan, LI Yongxian, LIAO Xiaolong, WANG Yun. Effect of different cultivars pollinating on fruit setting and fruit quality of *Armeniaca vulgaris* 'Luntaibaixing'[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30 (02): 187-193.
- [25] 张桐源. 苹果专用授粉树花粉高效采集与液体授粉研究[D].泰安:山东农业大学, 2022.  
ZHANG Tongyuan. Study on efficient pollen collection from dedicated apple pollinator trees for liquid spreading.[D]. Tai an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [26] 杨琴. 枇杷授粉受精生物学研究与 S 基因克隆[D].成都:四川农业大学, 2013.  
YANG Qin.Studies on biological pollination and fertilization and S-RNases cloning in loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.)[D].Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2013.
- [27] 李鹏, 田嘉, 张琦, 董胜利, 章世奎, 李疆. 扁桃离体枝条培养方式比较和筛选[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38 (05): 23-27+32.  
LI Peng, TIAN Jia, ZHANG Qi, DONG Shengli, ZHANG Shikui, LI Jiang. Comparison and selection of almond branches *in vitro* culture[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38 (05): 23-27+32.
- [28] 赵长星,刘成连. 培养基种类及蔗糖浓度对部分果树花粉发芽率的影响[J]. 河北林果研究, 2001, (03): 240-243.  
ZHAO Changxing, LIU Chenglian. Elementary studies on measurement of life-ability of fruit tree pollen[J]. Hebei Forest and Fruit Research, 2001, (03): 240-243.
- [29] 孙慧瑛. 新疆杏品种授粉受精生物学特性研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.  
SUN Huiying. The research on pollination and fertilization biological characteristics of Xinjiang apricot [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [30] 崔腾飞. ‘藤稔’葡萄萌芽、开花物候期标记基因筛选与应用[D].南京:南京农业大学,2019.  
CUI Tengfei. Screening and application of germination and flowering phenological marker genes 'Fujiminori' grape[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.
- [31] 代江瑞, 王斐然, 史秀丽, 李勇, 亚森·沙利, 罗术东. 果树授粉研究进展[J]. 中国蜂业, 2023, 74(03): 58-61.  
DAI Jiangrui, WANG Feiran, SHI Xiuli, LI Yong, YASEN · Shali, LUO Shudong. Research progress on pollination of fruit tree[J]. Apiculture of China, 2023, 74 (03): 58-61.
- [32] 刘立强, 秦伟, 廖康, 何峰江, 张大海, 徐麟, 樊卫民. 新疆若干杏品种开花生物学特性研究[J]. 新疆农业科学, 2007, (06): 751-755.  
LIU Liqiang, QIN Wei, LIAO Kang, HE Fengjiang, ZHANG Dahai, XU Lin, FAN Weimin. Studies on biological characters of blooming of some apricot varieties in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural

- Sciences, 2007, (06): 751-755.
- [33] 余成华, 陈丹, 杨秋雄, 杨嫦丽, 和丽媛, 梁艳丽. 植物开花过程对温度变化的响应研究进展[J]. 湖南农业科学, 2022, (04): 96-100.
- YU Chenghua, CHEN Dan, YANG Qiuxiong, YANG Changli, HE Liyuan, LIANG Yanli. Research progress on the opening and closing of plant flowers in response to temperatures[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022, (04): 96-100.
- [34] COSGROVE D J. Loosening of plant cell walls by expansins[J]. Nature, 2000, 407(6802): 321-6.
- [35] VALVERDE F, MOURADOV A, SOPPE W, RAVENSCROFT D, SAMACH A, COUPLAN G. Photoreceptor regulation of CONSTANS protein in photoperiodic flowering[J]. Science, 2004, 303(5660): 1003-6.
- [36] 杨秀莲, 贾瑞瑞, 施婷婷, 祝艳艳, 严欣. 观赏植物花期调控分子生物学研究进展[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(03): 344-351.
- YANG Xiulian, JIA Ruirui, SHI Tingting, ZHU Yanyan, YAN Xin. Advances on molecular biology research of flowering regulation in ornamental plants[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48 (03): 344-351.
- [37] HEDHLY A, HORMAZA J I, HERRERO M. The effect of temperature on stigmatic receptivity in sweet cherry (*Prunus avium* L.) [J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(10): 1673-80
- [38] KNOX R B, WILLIAMS E G, DUMAS C. Pollen, pistil, and reproductive function in crop plants [M]. Plant Breeding Reviews. 1986: 9-79.
- [39] 李闯, 姚琪, 谭化, 宁澜, 李玉秋, 王飞, 王忠伟. 温度对马铃薯花朵柱头可授性的影响[J]. 分子植物育种, 1-7.
- LI Chuang, YAO Qi, TAN Hua, NING Lan, LI Yuqiu, WANG Fei, WANG Zhongwei. Study on the receptivity of potato stigma to temperature in greenhouse[J]. Molecular Plant Breeding, 1-7.
- [40] 尚浩乐, 吴娟莉, 黎曼缇, 朱昌威, 易自力, 黄红梅. 金柑杂交授粉生物学特性研究[J]. 果树学报, 2024, 41(05): 875-886.
- SHANG Haole, WU Juanli, LI Manti, ZHU Changwei, YI Zili, HUANG Hongmei. Study on the biological characteristics of cross-pollination in kumquat[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41 (05): 875-886.
- [41] 魏子秋, 彭冶, 李丰霞, 狄昌毅, 张往祥. 观赏海棠品种间的杂交亲和性研究和亲本选择[J]. 西北植物学报, 2023, 43(11): 1910-1919.
- WEI Ziqiu, PENG Ye, LI Fengxia, DI Changyi, ZHANG Wangxiang. Study on the cross compatibility and parent selection among ornamental crabapple cultivars[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023, 43 (11): 1910-1919.
- [42] HESLOP-HARRISON Y. Control gates and micro-ecology: the pollen–stigma interaction in perspective [J]. Annals of Botany, 2000, 85: 5-13.
- [43] 罗术东, 王彪, 褚忠桥, 吴杰, 杨文寿, 张俊丽. 宁南固原枸杞开花生物学特性[J]. 西北农业学报, 2011, 20(10): 150-156.
- LUO Shudong, WANG Biao, CHU Zhongqiao, WU Jie, YANG Wenshou, ZHANG Junli. Flowering biological characteristics of *Lycium barbarum* in Guyuan, Ningxia Hui autonomous region[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2011, 20 (10): 150-156.
- [44] 陆婷, 罗淑萍, 蒙敏, 马燕, 李疆. 灰枣开花生物学特性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(08): 1589-1594.

- LU Ting, LUO Shuping, MENG Min, MA Yan, LI Jiang. Flowering biological characteristics of *Zizyphus jujuba* Mill.[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30 (08): 1589-1594.
- [45] 邓利君, 王铁, 胡娟, 姚远, 孙国超, 熊博, 廖玲, 汪志辉. 蜂糖李开花授粉生物学特性[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(06): 1320-1328.
- DENG Lijun, WANG Tie, Hu Juan, YAO Yuan, SUN Guochao, XIONG Bo, LIAO Ling, WANG Zhihui. Biological characterization of flowering and pollination of *Prunus salicina* Lindl.cv. 'Fengtangli' [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36 (06): 1320-1328.
- [46] 安晓芹, 廖康, 马媛, 孙慧瑛, 马杰, 廖小龙, 曼苏尔·那斯尔, 李文慧. 新疆杏品种开花生物学特性研究[J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(04): 287-293.
- AN Xiaojin, LIAO Kang, MA Yuan, SUN Huiying, MA Jie, LIAO Xiaolong, MANSUER · Nasier, LI Wenhui. Studies on flowering biological characteristics of Xinjiang apricot varieties[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2012, 35 (04): 287-293.
- [47] 陈灵鹭, 杨春华, 张文君, 黄慧君, 唐智松. 扁穗牛鞭草花粉活力及柱头可授性研究[J]. 中国草地学报, 2009, 31 (06): 59-63.
- CHEN Lingzhi, YANG Chunhua, ZHANG Wenjun, HUANG Huijun, TANG Zhisong. Study on pollen viability and stigma receptivity of *Hemarthria compressa*[J]. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31 (06): 59-63.
- [48] 纠松涛, 徐岩, 付朝斌, 刘勋菊, 王世平, 张才喜. 花发育阶段以及温度对不同品种甜樱桃柱头可授性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40 (10): 1698-1705.
- JIE Songtao, XU Yan, FU Chaobin, LIU Xunju, WANG Shiping, ZHANG Caixi. Effects of flower phenology and temperature on stigma receptivity in sweet cherries [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40 (10): 1698-1705.
- [49] 张礼春, 刘彤, 郝晓冉, 郑波, 孙钦明. 南疆枣园风沙特征及对枣树花粉活力、柱头可授性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(02): 121-123.
- ZHANG Lichun, LIU Tong, HAO Xiaoran, ZHENG Bo, SUN Qinming. Characteristics of wind-blown sand in jujube orchard and its effects on pollen vitality and stigma receptivity of jujube in southern Xinjiang[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47 (02): 121-123.
- [50] 冯瑶瑶, 孙继, 俞洋, 武婷, 刘丹丹, 林苏娥, 赵玉雪, 黄鹂. 温度胁迫对植物花粉发育的影响[J]. 中国细胞生物学学报, 2019, 41(01): 141-149.
- FENG Yaoyao, SUN Ji, YU Yang, WU Ting, LIU Dandan, LIN Su'e, ZHAO Yuxue, HUANG Li. The effects of temperature stress on pollen development[J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2019, 41 (01): 141-149.
- [51] KODAD O, I COMPANY R S. Flower age and pollenizer could affect fruit set in late-blooming self-compatible almond cultivars under warm climatic conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 359-365.
- [52] 杜玉虎, 张绍铃, 姜雪婷, 吴俊. 果梅花粉离体萌发及花粉管生长特性研究[J]. 西北植物学报, 2006, (09): 1846-1852.
- DU Yuhu, ZHANG Shaoling, JIANG Xueting, WU Jun. Characteristics of pollen germination and pollen tube growth of *Prunus mume* in vitro[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2006, (09): 1846-1852.
- [53] 张瑞, 李洋, 梁有旺, 彭方仁, 李永荣. 薄壳山核桃花粉离体萌发和花粉管生长特性研究[J]. 西北植物

- 学报, 2013, 33(09): 1916-22.
- ZHANG Rui, LI Yang, LIANG Youwang, PENG Fangren, LI Yongrong. *in vitro* pollen germination and tube growth characteristics in pecan (*Carya illinoensis*)[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33 (09): 1916-1922.
- [54] 安宁. ‘库尔勒香梨’无人机授粉柱头可授性变化及花粉活力的研究[D].石河子:石河子大学,2023.
- AN Ning. Study on changes of stigma receptivity and pollen viability of 'Kuerle Xiangli' pollinated by unmanned aerial vehicle[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.
- [55] 朱雪晨. 薄壳山核桃花粉萌发特性与差异蛋白研究[D].南京:南京林业大学,2014.
- ZHU Xuechen. Research of pollen germination characteristics and differentially expressed proteins of *Carya illinoensis* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2014.
- [56] 薛晓敏, 王金政, 张安宁, 韩雪平. 三个李品种花粉离体萌发特性与条件筛选试验 [J]. 黑龙江农业科学, 2015, (12): 11-4.
- XUE Xiaomin, WANG Jinzheng, ZHANG Anning, HAN Xueping. Pollen Germination characteristics and conditions selecting for three plum varieties[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2015, (12): 11-14.
- [57] 杨晓梅, 刘芬, 胡霞, 王玉安. ‘兰州大接杏’花粉离体萌发与花粉管生长特性研究 [J]. 中国果树, 2021, (02): 55-9+109.
- YANG Xiaomei, LIU Fen, HU Xia, WANG Yu'an. Studies on *in vitro* pollen germination and pollen tube growth of 'Lanzhoudajixing' apricot[J]. China Fruit, 2021, (02): 55-59+109.
- [58] 黄家兴, 吴杰, 安建东, 谭本洲, 邢艳红. 凯特杏花粉的离体培养及影响因子分析 [J]. 西北植物学报, 2008, (01): 52-8.
- HUANG Jiaying, WU Jie, AN Jiandong, TAN Benzhou, XING Yanhong. Factors influencing pollen germination and tube growth of *Prunus armeniaca* L.*in vitro*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2008, (01): 52-58.
- [59] 孙慧瑛, 安晓芹, 廖康, 马媛, 王云, 廖小龙, 马杰. 不同培养条件对杏花粉萌发和生长的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2012, 35(03): 173-7.
- SUN Huiying, AN Xiaoqin, LIAO Kang, MA Yuan, WANG Yun, LIAO Xiaolong, MA Jie. Effects of different culture conditions on germination and growth of apricot pollen[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2012, 35 (03): 173-177.
- [60] 林立金, 张潇, 韩娟, 王均, 廖明安, 刘磊. 温度对枇杷头花花粉管生长及保护酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(12): 2454-60.
- LIN Lijin, ZHANG Xiao, HAN Juan, WANG Jun, LIAO Mingan, LIU Lei. Effects of temperature on pollen tube growth and protective enzyme activities of 'Chuanzao loquat' in the 1st florescence [J]. Journal of Northwest Botany, 2016, 36 (12): 2454-2460.
- [61] KAPOOR K. Role of callose in pollen tube invasive growth[M]. McGill University (Canada), 2022.
- [62] DECEAULT M, POLITO V. High temperatures during bloom can inhibit pollen germination and tube growth, and adversely affect fruit set in the prunus domestica cultivars 'Improved French' and 'Muir Beauty'; proceedings of the IX international symposium on plum and prune genetics, Breeding and Pomology 874, F, 2008 [C].
- [63] 刘海蓉, 谢伦胜, 谷玉东, 吴芳, 陈平. 新疆温宿核桃生长关键期气象指标及气象灾害影响 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(03): 131-6.

LIU Hairong, XIE Lunsheng, GU Yudong, WU Fang, CHEN Ping. Meteorological indexes and effects of meteorological disasters during key growing period of walnut in Wensu county, Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13 (03): 131-136.

[64] ZHANG L, BEEDE R H, BANUELOS G, Wallis C M, FERGUSON L. Dust interferes with pollen-stigma interaction and fruit set in pistachio *pistacia vera* cv. Kerman [J]. HortScience, 2019, 54(11): 1967-71.

[65] NEPI M, CRESTI L, GUARNIERI M, PACINI E. Effect of relative humidity on water content, viability and carbohydrate profile of *Petunia hybrida* and *Cucurbita pepo* pollen [J]. Plant Systematics and Evolution, 2010, 284: 57-64.