

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.006

论文标题： 杏、杏李、桃远缘杂交胚败育规律及幼胚挽救技术研究

作　　者： 李金凇，李洪艳，廉诗启，等

收稿日期： 2025-12-09

引文格式： 李金凇,李洪艳,廉诗启,等.杏、杏李、桃远缘杂交胚败育规律及幼胚挽救技术研究[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):56-67.

Li J S, Li H Y, Lian S Q, et al. Study on embryo abortion regularity and immature embryo rescue technique in distant hybridization of apricot, plumcot and peach[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):56-67.

相关论文推荐

Recommended articles

山杏种质创新培育及高效利用研究进展

Research progress on germplasm innovation cultivation and efficient utilization of *Prunus sibirica*

69个东北杏无性系果实表型多样性及优良无性系筛选

Phenotypic traits diversity analysis and selection of superior clones of 69 apricot (*Prunus mandshurica*) clones

西伯利亚杏种仁油脂积累及脂肪酸组分变化规律

The regularity of atty acid compositions and lipid accumulation changes in kernel of *Armeniaca sibirica*

内蒙古西伯利亚杏种子脂肪酸组分的遗传变异

Genetic variation of fatty acid components in seeds of *Armeniaca sibirica* in Inner Mongolia

西伯利亚杏花芽酵母cDNA文库构建及质量评价

Construction and quality evaluation of cDNA library of flower bud yeast from *Prunus sibirica*

内蒙古野生山杏优良单株核仁成分的遗传变异分析

Genetic variation of fine Apricot individual’s kernel composition characters in Inner Mongolia

杏RPW8基因家族鉴定与表达量分析

Identification and expression analysis of *RPW8* gene family in Apricot

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.006 http: //qks.csuft.edu.cn

杏、杏李、桃远缘杂交胚败育规律及幼胚挽救技术研究

李金凇[1]，李洪艳[1]，廉诗启[2]，尹明宇[3]，张钰婧[1]，吴锦秋[1]，姜 楠[1]，黄浩东[1, 4]，凌 鹏[1]，乌云塔娜[1]

（1. 中国林业科学研究院经济林研究所，河南 郑州 450003；2. 丰宁满族自治县林业和草原局，河北 丰宁 068350；3. 中国林业科学研究院热带林业研究所，广东 广州 510520；4. 中南林业科技大学 林学院，湖南 长沙 410004）

摘 要：【目的】探究杏、杏李、桃远缘杂交胚败育发生关键时期和发生规律，为蔷薇科核果类果树远缘杂交胚挽救方法提供理论依据和实践指导。【方法】以杏、杏李、桃为母本，设计 12 个不同的远缘杂交组合，人工控制授粉后观测幼果发育进程，测定不同发育阶段果实大小、坐果率，用荧光染色法观测幼胚存活时间，并将具有活性的幼胚进行芽诱导、增殖和生根培养，探究植物生长调节剂比例，建立蔷薇科核果类果树幼胚挽救技术体系。【结果】蔷薇科核果类果树远缘杂交果实发育和幼胚存活时间受不同种母本的影响较大，当普通杏 / 仁用杏、杏李、桃 / 普通扁桃 / 扁桃作为母本时，杂交幼果分别在授粉后 12、6 和 31 d 停止生长，在授粉后 21、18 和 38 d 开始脱落。蔷薇科核果类果树远缘杂交幼果普遍存在横径生长受阻现象，为对照亲和授粉组合的 48.3% ～ 69.0%；‘风味玫瑰’×‘小白杏’等 4 个组合幼果的纵径生长受阻，为对照亲和授粉组合的 52.8% ～ 55.9%；‘中仁 3 号’×‘晋扁 1 号’等 10 个组合幼果的侧径生长受阻，为对照亲和授粉组合的 47.2% ～ 74.3%。以‘龙王帽’‘风味玫瑰’‘中油桃 4 号’‘山桃 1 号’为母本的 7 个组合受精时间与对照亲和授粉组合相同，其他组合的受精时间晚于对照亲和授粉组合。胚挽救培养基为：MS 基本培养基 +2,4-D/IAA（2.0 mg/L）+6-BA（0.5 mg/L）+ 蔗糖（30 g/L）+ 琼脂（7 g/L），幼胚挽救率为 40.0%。增殖培养基为：MS 基本培养基 +6-BA（1.0 mg/L）+ 蔗糖（30 g/L）+ 琼脂（7 g/L），平均生长的新芽数为 30.5 个。根诱导培养基为：WPM 基本培养基 +NAA（0.5 mg/L）+ 蔗糖（20 g/L）+ 琼脂（7 g/L），平均生根数为 25.5 个。【结论】母本基因型显著影响蔷薇科核果类果树远缘杂交幼果停止生长和落果时间以及幼胚存活时间，杏、杏李和桃作为母本的杂交幼胚挽救的关键时期分别为授粉后 12 ～ 18、6 ～ 15 和 12 ～ 30 d，其中‘龙王帽’‘风味玫瑰’和‘中油桃 4 号’作为母本时幼胚挽救成功率较高，2,4-D、IAA、6-BA 和 NAA 可作为胚挽救过程中重要的植物生长调节剂。

关键词：杏；杏李；桃；远缘杂交；胚败育；胚挽救

中图分类号：S722.3^{+}4 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0056-12

Study on embryo abortion regularity and immature embryo rescue technique in distant hybridization of apricot, plumcot and peach

Li Jinsong[1], Li Hongyan[1], Lian Shiqi[2], Yin Mingyu[3], Zhang Yujing[1], Wu Jinqiu[1], Jiang Nan[1], Huang Haodong[1,4], Ling Peng[1], Wuyun Tana[1]

(1. Research Institute of Non-timber Forestry, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou 450003, Henan, China;
2. Fengning Manchu Autonomous County Forestry and Grassland Bureau, Fengning 068350, Hebei, China;
3. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;
4. School of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】To explore the critical periods and occurrence patterns of embryo abortion during distant hybridization

收稿日期（Received）：2025-12-09 **修订日期**（Revised）：2026-03-03

基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项（CAFYBB2024QG002）；中央引导地方科技发展资金项目（2024ZY0167）。

第一作者：李金凇（lijinsong13579@outlook.com），硕士研究生。

通信作者：乌云塔娜（tanatanan@163.com），教授，博士，博士研究生导师。

引文格式：李金凇 , 李洪艳 , 廉诗启 , 等 . 杏、杏李、桃远缘杂交胚败育规律及幼胚挽救技术研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(8):56-67.

Li J S, Li H Y, Lian S Q, et al. Study on embryo abortion regularity and immature embryo rescue technique in distant hybridization of apricot, plumcot and peach[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):56-67.

among apricot, plumcot, and peach, and to provide a theoretical basis and practical guidance for embryo rescue methods in Rosaceae stone fruit trees.【Method】Twelve distant hybrid combinations were designed using apricot, plumcot, and peach as female parents. Following controlled artificial pollination, the developmental progression of young fruits was monitored, fruit size and fruit set rates at different developmental stages were recorded. The survival time of immature embryos was assessed using fluorescent staining. Viable immature embryos were subjected to bud induction, proliferation, and rooting cultures. Different plant growth regulator combinations were evaluated to establish an effective immature embryo rescue system for Rosaceae stone fruit trees.【Result】Fruit development and immature embryo survival time in distant hybridization of Rosaceae stone fruit trees were significantly influenced by the female parent species. In hybrid combinations with common apricot or kernel apricot, plumcot, and peach, common almond, or almond as female parents, fruit growth ceased at 12, 6, and 31 days after pollination, respectively, and fruit drop began at 21, 18, and 38 days after pollination. Distant hybrid young fruits of Rosaceae stone fruit trees commonly exhibited prevented transverse diameter growth, occurring in 48.3%-69.0% of cases compared with compatible pollination controls. In addition, prevented vertical diameter growth was observed in young fruits of four combinations such as ‘Fengweimeigui’ × ‘Xiaobaixing’, with an incidence of 52.8%-55.9%, while prevented side diameter growth was noted in young fruits of ten combinations such as ‘Zhongren 3’ × ‘Jinbian 1’, occurring in 47.2%-74.3% of cases relative to controls. Seven hybrid combinations, with ‘Longwangmao’, ‘Fengweimeigui’, ‘Zhongyoutao 4’, and ‘Shantao 1’ as female parents, showed fertilization timing similar to that of compatible controls, whereas the remaining combinations exhibited delayed fertilization. The optimal embryo rescue medium consisted of MS basal medium supplemented with 2,4-D or IAA (2.0 mg/L), 6-BA (0.5 mg/L), sucrose (30 g/L), and agar (7 g/L), with 40.0% of the rescue rate of immature embryos. The proliferation medium comprised MS basal medium supplemented with 6-BA (1.0 mg/L), sucrose (30 g/L), and agar (7 g/L), with 30.5 of the average of new buds. The rooting medium consisted of WPM basal medium supplemented with NAA (0.5 mg/L), sucrose (20 g/L), and agar (7 g/L), with 25.5 of the average of roots.【Conclusion】The female parent genotypes significantly affect the time when young fruits stop growing and drop, as well as the survival time of immature embryos in distant hybridization of Rosaceae stone fruit trees. The optimal periods for immature embryo rescue, when apricot, plumcot, and peach are used as female parents, are 12-18, 6-15, and 12-30 days after pollination, respectively. Among these, combinations using ‘Longwangmao’, ‘Fengweimeigui’, and ‘Zhongyoutao 4’ as female parents show relatively higher success rates in embryo rescue. Plant growth regulators such as 2,4-D, IAA, 6-BA, and NAA serve as critical additives during embryo rescue.

Keywords: apricot; plumcot; peach; distant hybridization; embryo abortion; embryo rescue

远缘杂交育种是创制优质新品种的重要手段，不仅能为新品种选育提供优良材料，还能为相关功能基因分析及重要性状研究奠定重要的遗传学基础[1]。杏属 *Armeniaca* 植物是广泛分布于我国干旱、半干旱“三北”地区的重要经济林树种，具有干 / 鲜果、木本油料、木本蛋白及木本药材等多种用途，是兼具经济效益、生态效益与社会效益的重要乡土树种[2]。2022 年，我国鲜食杏年产量约 190 万 t，杏仁年产量约 58 万 t，其中新疆、山西、山东、河北、甘肃和河南为主产区[3]。杏 *A. vulgaris* 用途广泛，杏果肉可加工成果脯、果酱和饮料等，杏仁可加工成干果、杏仁油和杏仁露等，其中杏仁油是美容用品以及润滑油、表面活性剂等工业用品的优质原料[4]。然而，杏主栽品种易受“倒春寒”危害，经常出现减产甚至绝收的问题，严重阻碍了杏产业的发展[5]。杏天然缺乏能避开“倒春寒”的晚花基因型，蔷薇科 Rosaceae 核果类果树中桃 *Prunus persica*、杏李 *P. domestica*×*armeniaca* 等树种花期比杏晚 15 ～ 20 d，能够有效避开“倒春寒”，利用核果类的晚花基因改良杏的早花性状，是杏避“倒春寒”育种的重要手段。

前期研究发现，蔷薇科核果类果树远缘杂交存在受精后生殖隔离现象，在杏与李 *P. salicina* 的 9 个远缘杂交组合中，有 6 个组合的杂交果平均结实率为 3.3%，其他 3 个组合未收获到杂交果[6]。在榆叶梅 *P. triloba* 与广义李属 *Prunus* 植物的正反交试验中，当以李和毛樱桃 *P. tomentosa* 为母本、榆叶梅为父本时，能够顺利完成受精，但在最终收获杂交种子的组合中，平均结实率仅为 2.2%[7]。在杏 × 桃的 2 个远缘杂交组合中，杂交花粉管能够顺利进入子房，但杂交幼果成熟期的平均坐果率为 2.5%，果实与种胚表现为畸形[8]。在樱桃李 *P. cerasifera*× 杏的 3 个远缘杂交组合中，所有杂交幼果授粉后第 4 周的坐果率与第 1 周相比，平均下降了 53.4%，且最终收获的杂交种子多是发育不全的死胚[9]。在梅 *P. mume*× 山桃 *P. davidiana* 的 4 个远缘杂交组合中，杂交果结实率最高为 7.4%，且结实率较高的 2 个组合在授粉后约 35 d 的落果率高达 90%[10]。

针对蔷薇科核果类果树杂交果实收获困难的问题，胚挽救技术可支持自然条件下的胚胎继续发育，最终形成完整植株。目前，蔷薇科核果类果树远缘杂交中胚败育的发生时期与规律、胚挽救的关键时期及培养方法尚不明确。本研究以杏、杏李和桃作为母本，设置杏 × 扁桃 *P. dulcis*、杏李 × 杏和桃 × 杏 3 种授粉类型，系统统计各杂交组合幼果不同时期的坐果率，授粉后观察杂交幼果停止发育和落果的时期、“大小果”的发生

规律以及幼胚荧光反应的发生规律，探索胚挽救各阶段的最佳培养条件，为蔷薇科核果类果树远缘杂交母本品种选择、胚挽救最佳时期和胚挽救方法提供理论依据，从而有效解决因胚败育导致的杂交育种效率低的问题。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于河南省焦作市中国林业科学研究院经济林研究所孟州长期试验基地进行。孟州市属暖温带大陆性季风气候，四季分明，年平均气温 14.2 ℃，年平均降水量 586.9 mm。土壤主要为褐土、潮土，土层深厚，质地适中 [11]。

1.2 试验材料

选择生长发育良好的杏品种‘优一’‘龙王帽’‘中仁 3 号’，杏李品种‘风味玫瑰’，桃品种‘中油桃 4 号’和‘山桃 1 号’作为母本树种。选择杏品种‘中仁 7 号’‘珍珠油杏’‘小白杏’‘树上干’和‘阿克牙格勒克’，扁桃品种‘晋扁 1 号’作为授粉品种。

1.3 试验方法

1.3.1 亲本配置

杂交组合配置见表 1，共 12 个杂交组合，其中以‘优一’‘龙王帽’和‘中仁 3 号’为母本分别设置 1 个组合，以‘风味玫瑰’为母本设置 2 个组合，以‘中油桃 4 号’为母本设置 3 个组合，以‘山桃 1 号’为母本设置 4 个组合。

1.3.2 花粉采集与田间授粉

参考尹明宇等 [12] 和 Beltrán 等 [13] 的方法，于大铃铛期采集花蕾并收集花药，在室温环境中置于称量纸上，待花药自然爆裂散粉，干燥后将花粉置于离心管中加入硅胶干燥剂，于 −20 ℃冰箱中保存，并以点授的方式进行授粉。

1.3.3 田间数据统计

统计各授粉组合幼果停止生长、首次脱落、授粉后 30 d 和果实成熟 4 个时期的坐果率，并测定幼果纵径、横径、侧径和单果质量 4 个性状指标，各授粉组合重复 3 次。

1.3.4 样品采集与拍照

采集各品种授粉前的子房，以杏和杏李为母本的杂交组合每隔 3 d 采集 1 次样品，以桃为母本的杂交组合每隔 6 d 采集 1 次样品，观察幼果的发育进程，采集周期持续 1 个月。采集同时期各母本品种亲和授粉的幼果作为对照，拍照记录后将幼果的幼胚取出，用卡诺氏固定液固定 24 h 后用 95% 乙醇冲洗净，置于 70% 乙醇中，于 4 ℃冰箱中保存。

1.3.5 幼胚荧光显微观察

参考陈娟等 [14] 的方法并加以调整，采用苯胺蓝染色法，将幼胚分别置于盛有 10 mL 50% 乙醇、30% 乙醇和蒸馏水的 25 mL 烧杯中浸泡，待其沉底后取出。将样品置于 60 ℃水浴中，用 2 mol/L NaOH 溶液加热软化 2 h，随后转移至苯胺蓝染液中避光染色 2 d。染色完毕后将材料置于滴有 1 滴清水的载玻片上，在 Olympus 荧光显微镜下进行观察。各授粉组合重复 5 次。

1.3.6 远缘杂交胚挽救

以杏幼果作为试验材料，参考丁文文 [15] 的消毒方案和陈曦 [16] 的种皮处理方法并加以调整，将幼果用清水冲洗 15 min 后，放入超净工作台并用紫外灯消毒 20 min，再用 5% NaClO 溶液浸泡

表 1 杂交组合配置

Table 1 Configuration of hybrid combinations

序号 Code	类型 Type	杂交组合 Hybrid combination	母本 Female	父本 Male
1	杏 × 扁桃远缘杂交	大扁杏 × 扁桃	‘优一’	‘晋扁 1 号’
2			‘龙王帽’	‘晋扁 1 号’
3		（大扁杏 × 普通杏）× 扁桃	‘中仁 3 号’	‘晋扁 1 号’
4	杏李 × 杏远缘杂交	杏李 × 普通杏	‘风味玫瑰’	‘小白杏’
5				‘珍珠油杏’
6	桃 × 杏远缘杂交	油桃 × 普通杏	‘中油桃 4 号’	‘中仁 7 号’
7				‘珍珠油杏’
8				‘阿克牙格勒克’
9		山桃 × 普通杏	‘山桃 1 号’	‘中仁 7 号’
10				‘珍珠油杏’
11				‘小白杏’
12				‘树上干’

7 min，最后用无菌水冲洗 3 ～ 5 次。完成消毒后取出带内种皮的杂交种子，并在内种皮上划 2 ～ 5 个伤口但不完全切开种子，每个伤口的长度为 5 ～ 10 mm，深度为 1 ～ 3 mm，处理后的种子作为外植体。以 MS、DKW、WPM、QL、3/4 MS、1/2 MS 和 1/3 MS 作为基本培养基，测定每组生长势、茎长、根长、叶片数和生根数的平均值 [17]。以‘中油桃 4 号’×‘中仁 7 号’授粉后 18 和 24 d 幼果作为试验材料，远缘杂交胚挽救植物生长调节剂种类及用量见表 2，共设计 12 个试验组别，将杂交种子内种皮上的伤口与培养基直接接触，每组接种 50 粒幼胚，暗培养 2 个月后统计幼胚挽救率，筛选最佳胚挽救培养基配方。

表 2　远缘杂交胚挽救植物生长调节剂用量

Table 2　Dosage of plant growth regulators for embryo rescue in distant hybridization　mg/L

序号 Code	生长素浓度 Auxin concentration			细胞分裂素浓度 Cytokinin concentration
	NAA	2,4-D	IAA	6-BA
1	1.0	0	0	0.1
2	2.0	0	0	0.5
3	3.0	0	0	1.0
4	4.0	0	0	2.0
5	0	1.0	0	0.1
6	0	2.0	0	0.5
7	0	3.0	0	1.0
8	0	4.0	0	2.0
9	0	0	1.0	0.1
10	0	0	2.0	0.5
11	0	0	3.0	1.0
12	0	0	4.0	2.0

1.3.7　远缘杂交增殖培养和生根培养

以杏幼胚作为试验材料，经暗培养出芽后，将幼芽接种到基本培养基上，再配以不同浓度植物生长调节剂 2,4-D、6-BA、IBA、NAA 与 TDZ（0.05、0.1、0.5、1.0、2.0 mg/L）进行光培养。参考马金萍等 [18] 的方法并加以调整，培养温度为（24±1）℃，光照培养强度为 2 500 ～ 3 000 lx，光照培养时间为 14 h/d，每瓶接种 4 个材料，每个处理 5 瓶，重复 3 次，30 d 后统计组培苗新芽数及生根数，筛选最佳增殖培养基与生根培养基配方。以‘中油桃 4 号’×‘中仁 7 号’授粉后 15 d 幼芽作为试验材料，采取相同的培养基配方进行增殖培养和生根培养，观察幼芽生长情况。

1.3.8　数据处理与分析

采用 Excel 2021 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析，运用 Origin 软件绘制图表，采用 Adobe Illustrator 和 Adobe Photoshop 软件进行图片拼接处理。

2　结果与分析

2.1　远缘杂交幼果落果规律

如图 1A ～ C 所示，以杏为母本的 3 个杂交组合的幼果均于授粉后 12 d 停止生长并于授粉后 21 d 首次脱落。授粉后 12 d，仅‘优一’×‘晋扁 1 号’的坐果率显著低于对照亲和授粉组合，为 59.3%；授粉后 21 d，‘优一’×‘晋扁 1 号’和‘中仁 3 号’×‘晋扁 1 号’的坐果率显著低于对照亲和授粉组合，分别为 32.2% 和 48.4%；授粉后 30 d，所有杂交组合幼果的坐果率均显著低于对照亲和授粉组合，‘优一’×‘晋扁 1 号’幼果全部脱落，‘龙王帽’×‘晋扁 1 号’和‘中仁 3 号’×‘晋扁 1 号’的坐果率分别为 0.1% 和 0.4%，所有杂交组合均无成熟杂交果收获。

如图 1D 所示，以‘风味玫瑰’为母本的 2 个杂交组合的幼果均于授粉后 6 d 停止生长并于授粉后 18 d 首次脱落。授粉后 6 d，2 个杂交组合的坐果率分别为 88.1% 和 92.0%；授粉后 18 d，‘风味玫瑰’×‘小白杏’和‘风味玫瑰’×‘珍珠油杏’的坐果率均显著低于对照亲和授粉组合，分别为 22.4% 和 28.5%；授粉后 30 d，所有杂交幼果全部脱落，最终无成熟杂交果收获。

如图 1E、F 所示，以桃为母本的 7 个杂交组合的幼果均于授粉后 31 d 停止生长并于授粉后 38 d 首次脱落。授粉后 31 d，除‘中油桃 4 号’×‘珍珠油杏’、‘山桃 1 号’×‘中仁 7 号’和‘山桃 1 号’×‘珍珠油杏’外，其他杂交组合幼果的坐果率与对照亲和授粉组合之间无显著差异，杂交组合中‘山桃 1 号’×‘小白杏’的坐果率最高（18.4%）；授粉后 38 d，所有杂交组合幼果的坐果率均显著低于对照亲和授粉组合，其中‘山桃 1 号’×‘珍珠油杏’的坐果率最低（3.3%），仅以‘中油桃 4 号’为母本的所有杂交组合收获了少量成熟杂交果，平均坐果率为 0.8%。

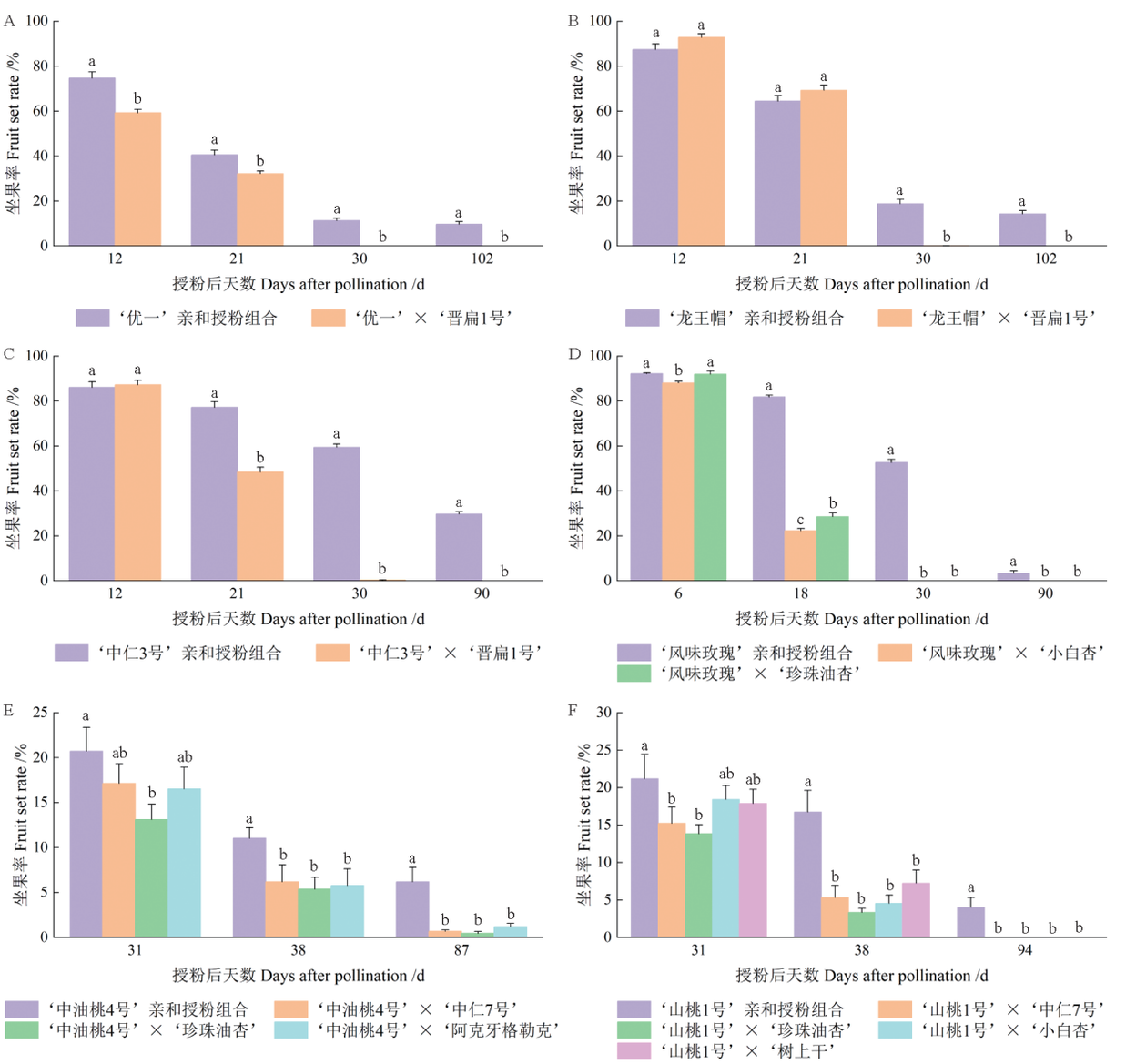
综上所述，杏 × 扁桃、杏李 × 杏和桃 × 杏的远缘杂交存在严重的受精后生殖隔离现象，以杏李、杏和桃为母本的杂交幼果分别于授粉后 6、12 和 31 d 停止生长并于 7 ～ 12 d 后大量脱落。虽然 50% 以上的杂交组合在幼果停止生长时仍能保持较高坐果率，但此时部分幼果的胚发育可能已开始出现异常。在幼果首次脱落时，90% 以上杂

交组合幼果的坐果率显著低于对照亲和授粉组合，导致最终难以收获成熟杂交果。

2.2 远缘杂交幼果“大小果”发生规律

如图 2 所示，以杏品种作为母本组合，授粉后 21 d，杏‘优一’‘龙王帽’和‘中仁 3 号’均出现了明显的“大小果”现象。‘优一’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 55.8%、48.3%、48.6% 和 9.5%；‘龙王帽’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 52.8%、57.5%、49.3% 和 12.6%；‘中仁 3 号’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 55.6%、52.9%、53.8% 和 16.4%。从总体上看，在杂交幼果首次脱落前，‘优一’×‘晋扁 1 号’和‘龙王帽’×‘晋扁 1 号’幼果的纵径、横径和侧径显著低于各自的对照亲和授粉组合，‘中仁 3 号’×‘晋扁 1 号’幼果的横径和侧径显著低于对照亲和授粉组合，‘优一’×‘晋扁 1 号’幼果的单果质量显著低于对照亲和授粉组合。纵径、横径和侧径均会影响‘优一’和‘龙王帽’杂交幼果的单果质量，而‘中仁 3 号’杂交幼果的单果质量主要受横径和侧径的影响。

如图 3 所示，以杏李品种作为母本组合，授粉后 18 d，‘风味玫瑰’出现了明显的“大小果”现象。‘风味玫瑰’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 55.9%、51.3%、58.4% 和 21.7%。在杂交幼果首次脱落前，



不同小写字母表示同一时间不同授粉组合间幼果的坐果率差异显著（$P < 0.05$），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in fruit set rates among different pollination combinations at the same time, the same below.

图 1 对照亲和授粉组合与杂交授粉幼果坐果率

Fig. 1 Fruit set rates of young fruits during compatible pollination controls and hybrid pollination

‘风味玫瑰’×‘小白杏’和‘风味玫瑰’×‘珍珠油杏’幼果的纵径均显著低于对照亲和授粉组合；除授粉后 6 d，2 个杂交组合幼果的横径均显著低于对照亲和授粉组合；授粉后 12 d，2 个杂交组合幼果的侧径和单果质量显著低于对照亲和授粉组合。纵径和横径是影响‘风味玫瑰’杂交幼果单果质量的主要因素。

如图 4 所示，以桃品种作为母本组合，授粉后 31 d，‘中油桃 4 号’和‘山桃 1 号’均出现了明显的“大小果”现象。‘中油桃 4 号’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 86.8%、69.0%、74.3% 和 45.0%，‘山桃 1 号’杂交幼果的纵径、横径、侧径和单果质量分别为对照亲和授粉组合的 59.2%、52.1%、47.2% 和 13.0%。从总体上看，在杂交幼果停止生长前，以‘中油桃 4 号’为母本的所有

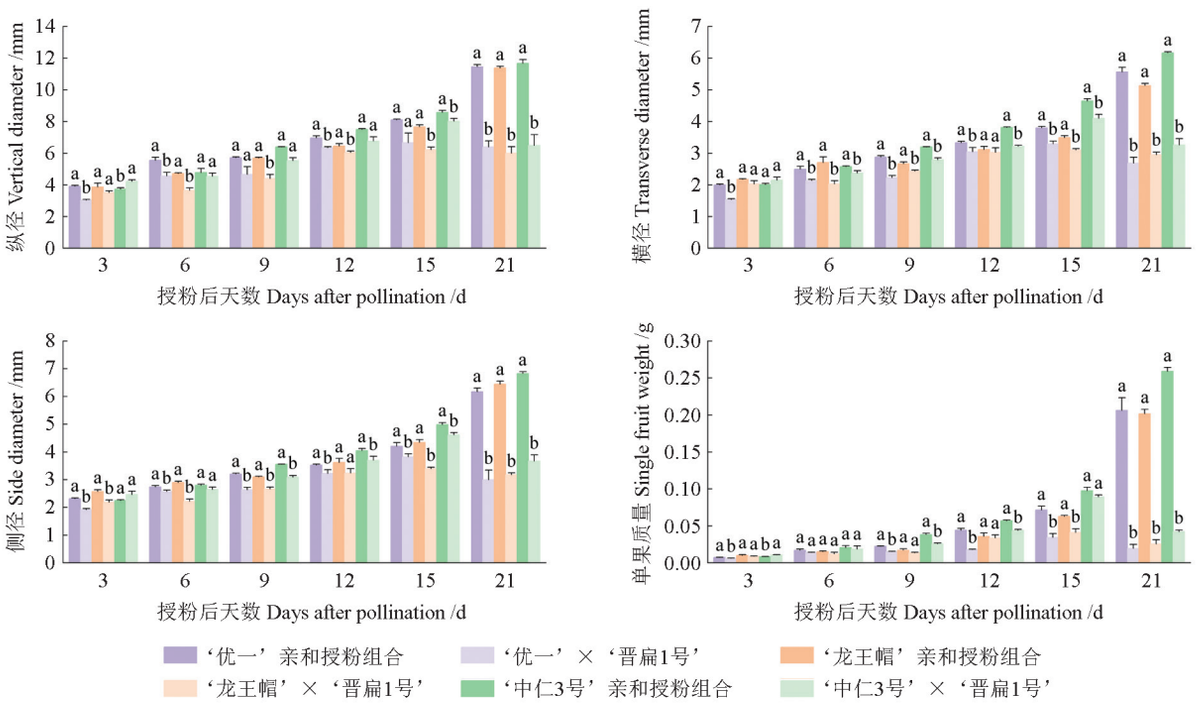


图 2　杏对照亲和授粉组合与杂交授粉幼果性状特征

Fig. 2　Characteristics of young fruits during compatible pollination controls and hybrid pollination in apricot

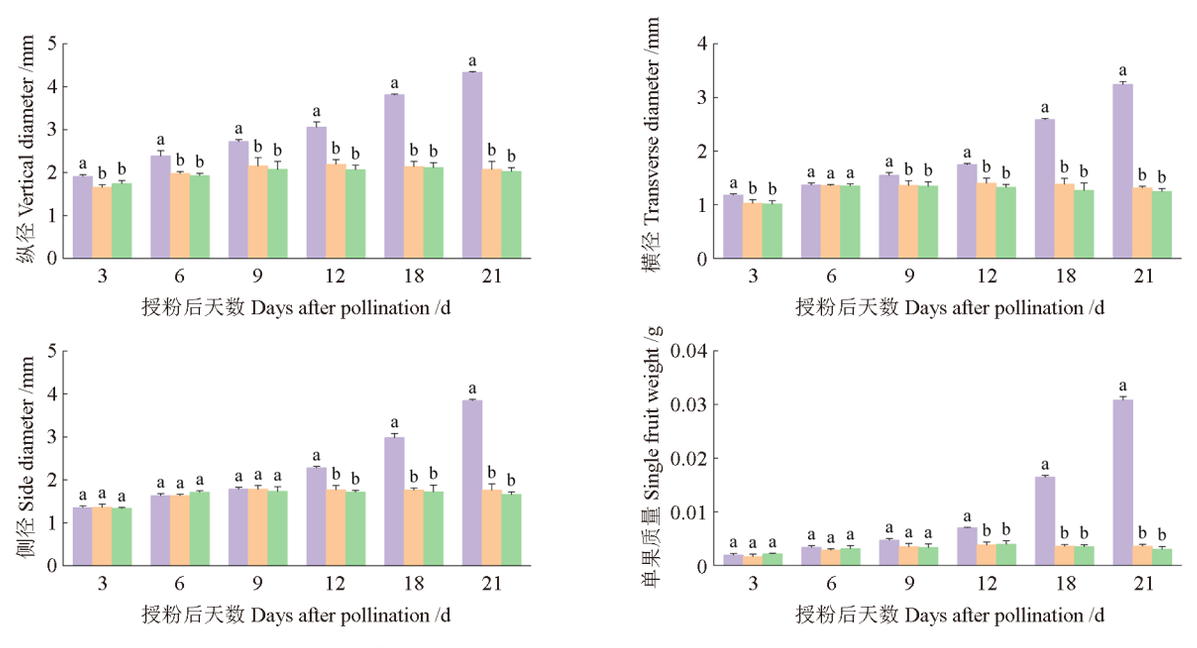


图 3　‘风味玫瑰’亲和授粉组合与杂交授粉幼果性状特征

Fig. 3　Characteristics of young fruits during compatible pollination combination and hybrid pollination in ‘Fengweimeigui’

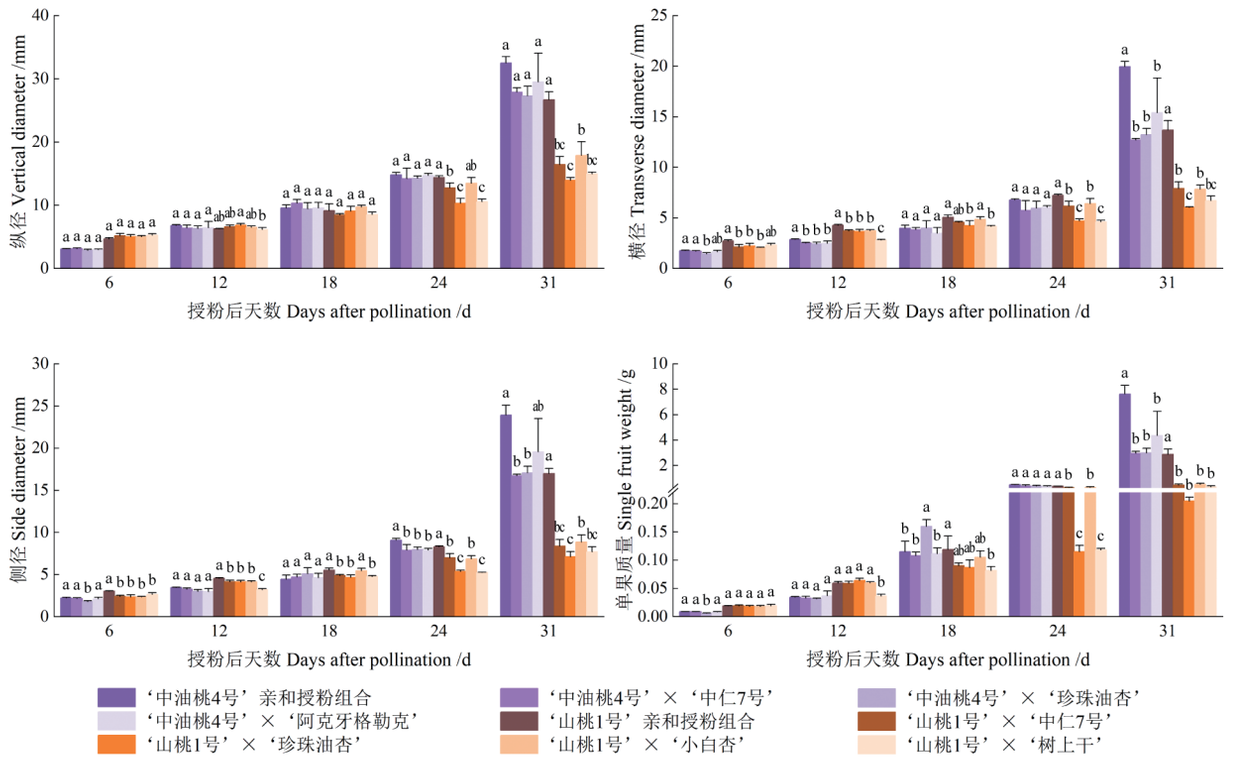


图 4 桃对照亲和授粉组合与杂交授粉幼果性状特征

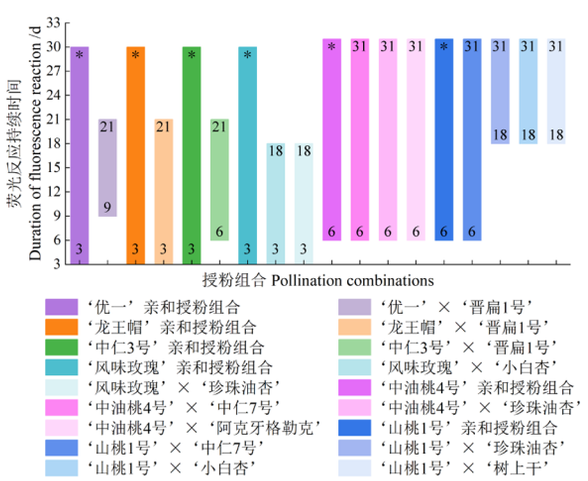
Fig. 4 Characteristics of young fruits during compatible pollination controls and hybrid pollination in peach

杂交幼果以及‘山桃 1 号’×‘中仁 7 号’、‘山桃 1 号’×‘小白杏’杂交幼果的纵径和单果质量与其对照亲和授粉组合之间无显著差异；以‘山桃 1 号’为母本的所有杂交幼果的横径和侧径显著低于对照亲和授粉组合；以‘中油桃 4 号’为母本的所有杂交幼果的横径（授粉后 12 d）和侧径（授粉后 24 d）显著低于对照亲和授粉组合。横径和侧径是影响‘中油桃 4 号’和‘山桃 1 号’杂交幼果单果质量的主要因素。

综上所述，杏、杏李、桃远缘杂交幼果期均出现‘大小果’现象，所有杂交幼果均受横径（对应种仁的厚度）生长影响导致发育缓慢，以‘风味玫瑰’为母本的杂交幼果发育受纵径（对应种仁的长度）生长影响，以‘中仁 3 号’‘中油桃 4 号’和‘山桃 1 号’为母本的杂交幼果发育受侧径（对应种仁的宽度）生长影响，以‘优一’和‘龙王帽’为母本的杂交幼果发育同时受纵径和侧径生长影响。由此可见，在蔷薇科核果类果树远缘杂交中，杂交幼果横径生长普遍受阻。

2.3 远缘杂交幼胚存活规律

如图 5 所示，‘优一’×‘晋扁 1 号’、‘中仁 3 号’×‘晋扁 1 号’、‘山桃 1 号’×‘珍珠油杏’、‘山桃 1 号’×‘小白杏’和‘山桃 1 号’×‘树上干’幼胚尖端首次出现荧光反应的



柱上下两端的数字分别代表幼胚尖端荧光反应首次出现时间和消失时间，“*”代表观察结束时幼胚尖端荧光反应仍然存在。

The numbers at both ends of the column indicate that the time of first appearance and disappearance of the fluorescence reaction at the tip of immature embryos, respectively. “*” indicates that the continued presence of the fluorescence reaction at the tip of immature embryos at the end of the observation.

图 5 幼胚荧光反应持续时间

Fig. 5 Duration of fluorescence reaction in immature embryos

时间晚于对照亲和授粉组合，‘龙王帽’×‘晋扁 1 号’、‘山桃 1 号’×‘中仁 7 号’以及‘风味玫瑰’和‘中油桃 4 号’所有杂交组合幼胚尖端首次出现荧光反应的时间与对照亲和授粉组合一致。由此可见，12 个杂交组合幼果均能够完成受精，但幼胚尖端荧光反应持续时间均短于其对照亲和授粉组合，其中‘龙王帽’‘风味玫瑰’和‘中油桃 4 号’作为母本时幼胚存活时间较长，

可作为胚挽救中适宜母本品种。

2.4　远缘杂交幼胚挽救技术

不同基本培养基对杏不同生理因子的影响如图 6 所示，MS 和 DKW 基本培养基均有利于维持生长，其中 MS 在促进茎、根、叶片生长方面的效果更佳，最终选择 MS 作为基本培养基。

授粉后 18 和 24 d，‘中油桃 4 号’×‘中仁 7 号’幼胚挽救率见表 3。试验组 6 和 10 的幼胚诱导出芽效果最佳，其中试验组 6 条件下，授粉后 24 d 的幼胚挽救率最高（40%）。因此，选择胚挽救培养基配方为：MS 基本培养基 +2,4-D/IAA（2.0 mg/L）+ 6-BA（0.5 mg/L）+ 蔗糖（30 g/L）+ 琼脂（7 g/L），pH 值调至 5.7 ～ 5.8。

如图 7 所示，在基本培养基中添加 1.0 mg/L 的 6-BA 后生长的新芽最多，每个外植体生长的平均新芽数为 30.5 个。因此，增殖培养基配方为 MS 基本培养基 +6-BA（1.0 mg/L）+ 蔗糖（30 g/L）+

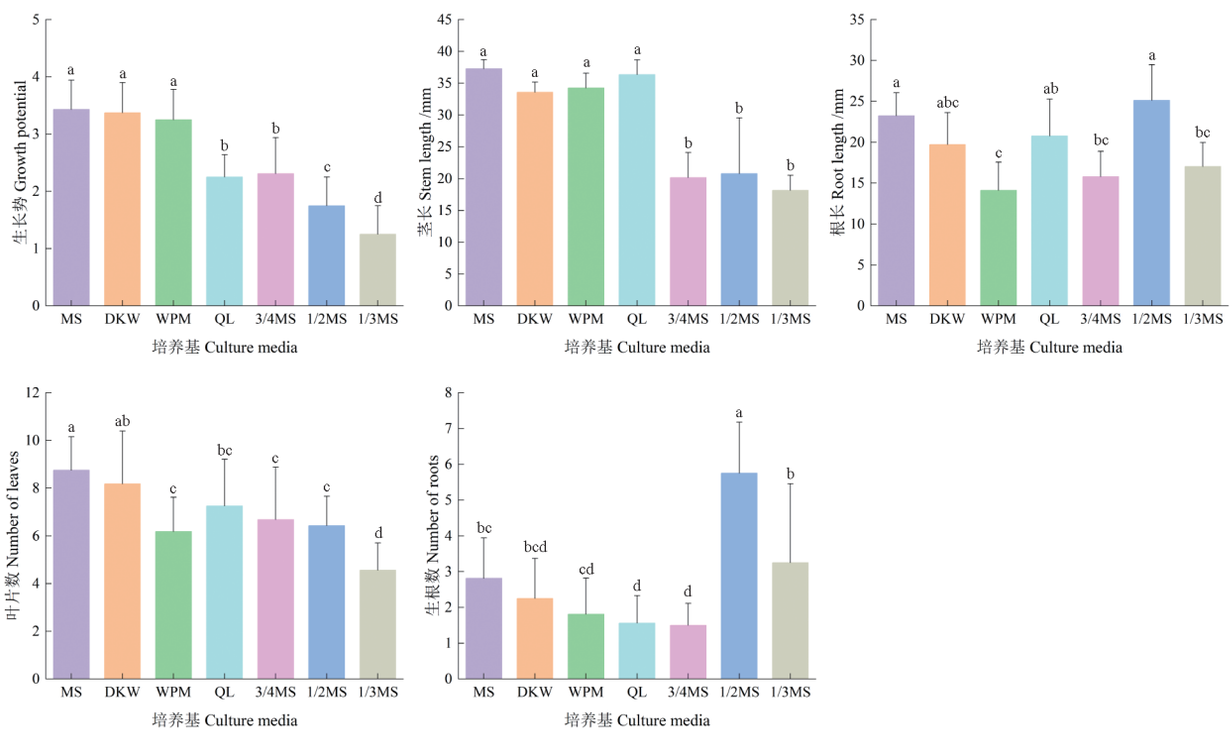


图 6　不同基本培养基对杏不同生理因子的影响

Fig. 6　Effects of different basal media on different physiological factors of apricot

表 3　‘中油桃 4 号’×‘中仁 7 号’幼胚挽救率

Table 3　Rescue rates of ‘Zhongyoutao 4’ × ‘Zhongren 7’ immature embryos

组别 Group	授粉后 18 d 18 days after pollination			授粉后 24 d 24 days after pollination		
	接种数 Number of explants	成活数 Number of survivals	幼胚挽救率 Rescue rate of immature embryos /%	接种数 Number of explants	成活数 Number of survivals	幼胚挽救率 Rescue rate of immature embryos /%
1	50	0	0	50	0	0
2	50	0	0	50	0	0
3	50	0	0	50	0	0
4	50	0	0	50	0	0
5	50	0	0	50	0	0
6	50	16	32	50	20	40
7	50	5	10	50	0	0
8	50	0	0	50	0	0
9	50	5	10	50	2	4
10	50	11	22	50	18	36
11	50	0	0	50	0	0
12	50	0	0	50	0	0

琼脂（7 g/L），pH 值调至 5.7 ～ 5.8。添加 0.5 mg/L 的 NAA 后生长的根最多，每个外植体的平均生根数为 25.5 个。本研究以 WPM 和 1/2 MS 作为基本培养基，分别对杏外植体进行生根诱导，结果表明 WPM 生根效果更佳（图 8）。因此，生根培养基配方为：WPM 基本培养基 +NAA（0.5 mg/L）+ 蔗糖（20 g/L）+ 琼脂（7 g/L），pH 值调至 5.7 ～ 5.8。如图 9 所示，授粉后 15 d，‘中油桃 4 号’ × ‘中仁 7 号’幼芽在光培养下可继续生长至长出幼枝、生根。由此说明，授粉后 15 d 是‘中油桃 4 号’杂交幼胚挽救的关键时期。

3 讨 论

3.1 蔷薇科核果类果树远缘杂交胚败育规律

在杏、杏李、桃的远缘杂交中，存在严重的受精后生殖隔离现象，三者作为母本的杂交幼果分别于授粉后 12、6 和 31 d 停止生长，并分别于授粉后 21、18 和 38 d 开始大量脱落，导致最终难以收获成熟杂交果。在蓝莓 *Vaccinium* spp. × 蓝靛果 *Lonicera edulis* 的 13 个远缘杂交组合中，12 个组合的杂交幼果在授粉后 2 周的平均坐果率可达 89.6%，但授粉后第 4 周的平均坐果率大幅下降至 13.6%[19]。在樱桃李 × 杏的 3 个远缘杂交组合中，杂交幼果坐果率在授粉后 1 ～ 2 周急剧下降，第 3 周后坐果率保持平稳，初步确定杂交幼胚从第 3 周开始败育[20]。以上研究结论与本研究结果一致，远缘杂交幼果受胚败育影响，在发育早期大量脱落，导致坐果率显著下降，杂交幼果停止生长和大量脱落的时期与母本基因型有关。

本研究发现，所有杂交组合幼果发育均受横径（对应种仁的厚度）生长的影响。在种子发育过程中，毛竹 *Phyllostachys edulis* 种子的长度、宽度和厚度在花后 10 ～ 30 d 快速增长，且种子内 GA_3、ZR 和 IAA 的含量均处于较高水平，促进了种子胚及胚乳细胞的分裂分化[21]；羌活

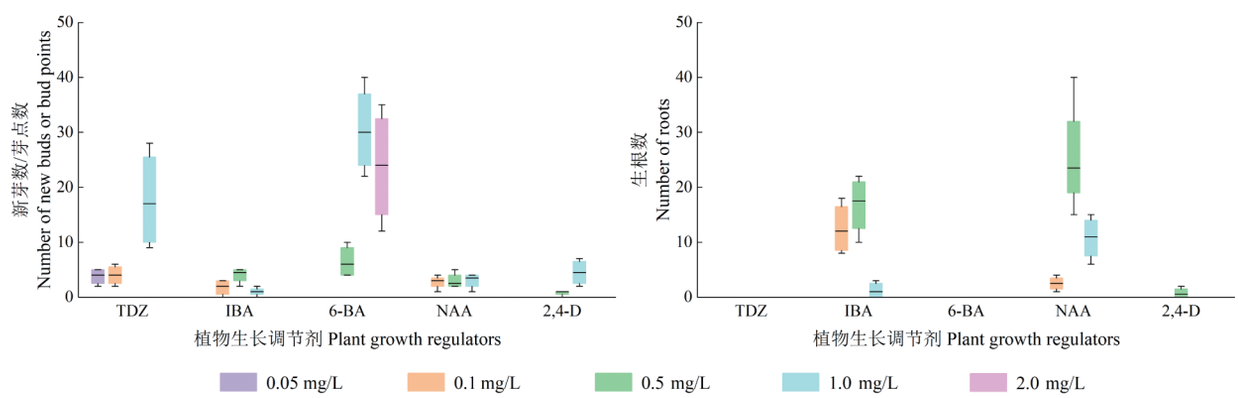
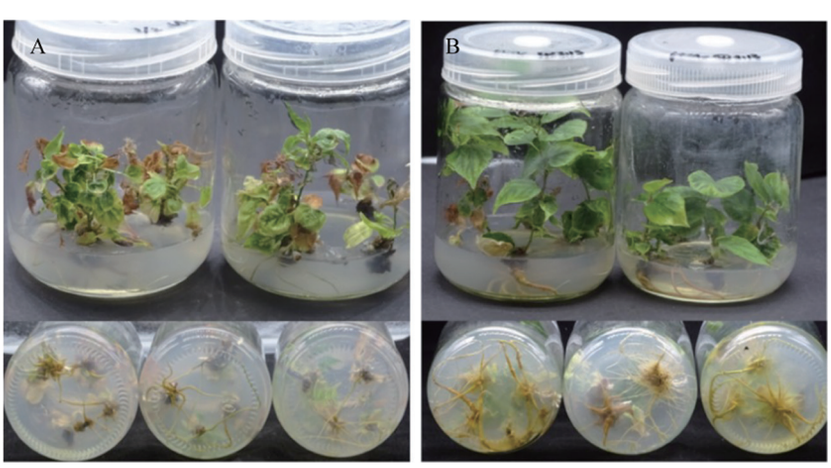


图 7 不同浓度的植物生长调节剂对杏枝条和根生长的影响

Fig. 7 Effects of different concentrations of plant growth regulators on the growth of apricot branches and roots

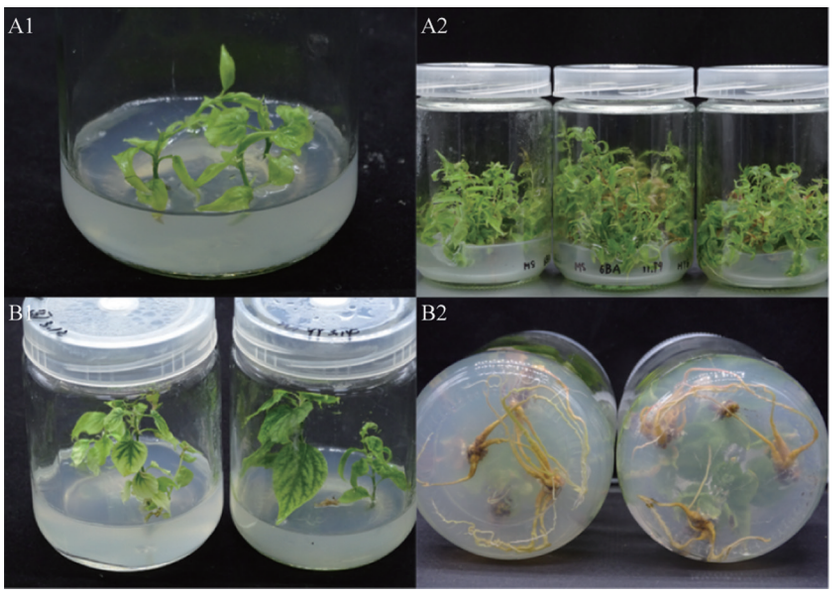


A 为根在 1/2 MS 基本培养基 +0.5 mg/L NAA 培养条件下的生长情况；B 为根在 WPM 基本培养基 +0.5 mg/L NAA 培养条件下的生长情况。

A indicates that the growth condition of roots cultured on 1/2 MS basal medium supplemented with NAA (0.5 mg/L). B indicates that the growth condition of roots cultured on WPM basal medium supplemented with NAA (0.5 mg/L).

图 8 不同基本培养基对杏根生长的影响

Fig. 8 Effects of different basal media on the growth of apricot roots



A1、A2 为光培养增殖培养过程；B1、B2 为光培养生根培养过程。
A1, and A2 indicate that the proliferation process with light culture. B1, and B2 indicate that the rooting process with light culture.

图 9　‘中油桃 4 号’×‘中仁 7 号’授粉后 15 d 幼胚增殖和生根培养过程

Fig. 9　Process of proliferation and rooting culture of ‘Zhongyoutao 4’ × ‘Zhongren 7’ immature embryos 15 days after pollination

Notopterygium incisum 种子的纵径、横径和厚度在花后 17 ～ 38 d 逐渐增长，且种子内 ZR 的含量在 31 d 时达到最高水平 [22]；黄瑞香 *Daphne giraldii* 种子的长度、宽度和厚度在坐果期第 7 ～ 21 d 显著增加，且种子内 IAA 含量在 14 d 时达到最高水平 [23]。可见，种仁早期的快速发育需要内源激素的调节，内源激素不足将导致种仁厚度乃至整体生长受阻，进而导致败育。

胼胝质存在于高等植物的韧皮部、花粉管、胚囊、胚乳等部位，影响着细胞生长、分化及细胞间物质运输，与苯胺蓝染料结合后，在紫外光的激发下可发出明显的荧光 [24-25]。对板栗 *Castanea mollissima* 的胚珠进行切片和荧光染色处理后，所有胚珠在盛花期后 20 d 时均出现明显的荧光反应，表明该时期胼胝质含量较高，在 25 d 时所有胚珠荧光强度显著降低，并在 30 和 35 d 时持续降低。其中败育胚珠的荧光强度始终高于可育胚珠，推测败育胚珠中胼胝质堵塞珠柄端，从而导致营养物质运输受阻 [26]。本研究中并未出现胚珠整体荧光强度减弱的现象，仅幼胚尖端的荧光强度存在差异，可能是样品处理方式、荧光染色时间不同所致。有关胚珠荧光显微观测的研究尚不完善，该结果有待进一步探讨。

3.2　蔷薇科核果类果树远缘杂交胚挽救

在杂交幼胚败育前进行离体培养的胚挽救是克服远缘杂交不亲和的有效方法，也为培育早熟及特早熟品种、挽救优良性状品种等研究提供了新的技术与途径 [27]。关于胚挽救的最佳时期，若取样过早，幼胚的离体培养难度较大，不易存活；若取样过迟，胚珠会开始退化，导致难以出胚 [28]。根据研究结果，可将幼胚明显膨大至大量败育前的时期确定为胚挽救的最佳时期。以杏为母本的杂交幼胚于授粉后 12 ～ 18 d 取样，以杏李为母本的杂交幼胚于授粉后 6 ～ 15 d 取样，以桃为母本的杂交幼胚于授粉后 12 ～ 30 d 取样，有助于提高胚挽救成功率。

在胚挽救培养基配方的研究中，以桃成熟前 2 周的杂交胚作为材料，最佳芽诱导培养基配方为 MS+6-BA（0.5 mg/L）+NAA（0.2 mg/L），最佳增殖培养基配方为 MS+6-BA（0.3 mg/L）+NAA（0.1 mg/L），最佳生根培养基配方为 1/2 MS+IBA（0.5 mg/L）+NAA（0.1 mg/L）[29]。戴美琪 [30] 以野生多毛番茄 *Solanum habrochaites* 和栽培番茄 *S. lycopersicum* 的杂交胚作为材料开展研究，结果表明：授粉后 35 d 为胚挽救最佳时期；MS 基本培养基 + 高浓度 NAA+ 高浓度 ZT+ 低浓度 GA_3 为发芽成苗的最佳培养基配方；中等浓度的 IBA 最有利于生根。刘玉泽等 [31] 以北美豆梨 *Pyrus calleryana* 授粉后 80 d 的杂交胚作为材料进行研究，结果表明：最佳芽诱导培养基配方为 1/2 MS+6-BA（4.0 mg/L）+NAA（0.5 mg/L）；　最佳增殖培养基配方为 1/2MS+6-BA（1.5 mg/L）+IBA（0.1 mg/L）；最佳生根培养基配方为 1/2 MS+IBA（1.5 mg/L）+NAA（0.05 mg/L）+ 蔗糖（20 g/L）+ 活性炭（1.0 g/L）。结合本研究结果可知，NAA、

6-BA 和 IBA 是胚挽救体系中常用且重要的植物生长调节剂，有助于挽救不同种类、不同胚龄的杂交胚。

4 结 论

本研究明确了蔷薇科核果类果树远缘杂交中母本基因型显著影响幼果停止生长和落果时期以及幼胚存活时间。杏、杏李和桃幼胚挽救最佳取样时期分别为授粉后 12～18、6～15 和 12～30 d，‘龙王帽’‘风味玫瑰’和‘中油桃 4 号’作为母本有助于提高杂交幼胚挽救成功率，2,4-D、IAA、6-BA 和 NAA 是胚挽救过程中重要的植物生长调节剂。研究结果为蔷薇科核果类果树远缘杂交母本品种的选择、胚挽救关键时期的确定及胚挽救方法的优化提供了理论依据，有助于推动蔷薇科核果类果树远缘杂交良种的创制，克服远缘杂交不亲和障碍。

参考文献：

[1] Yuan J L, Yue J J, Zhong Y B, et al. Genetic variation in distant and inbred hybridization progenies from three sympodial bamboo parent species[J]. Journal of Forestry Research,2019,30(4): 1323-1329.

[2] 庞传明 , 陶玲 , 杨晓华 , 等 . 我国杏产业发展现状及对策 [J]. 果树资源学报 ,2024,5(6):107-109.
Pang C M, Tao L, Yang X H, et al. Status and countermeasures of apricot industry development in China[J]. Journal of Fruit Resources,2024,5(6):107-109.

[3] 国家林业和草原局 . 中国林业和草原统计年鉴 2022[M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2023:22-25.
National Forestry and Grassland Administration. China forestry and grassland statistical yearbook[M]. Beijing: China Forestry Publishing House,2023:22-25.

[4] Pawar K R, Nema P K. Apricot kernel characterization, oil extraction, and its utilization: a review[J]. Food Science and Biotechnology,2023,32:249-263.

[5] 陈玉玲 , 陈占营 , 夏乐晗 , 等 . 杏、李等核果类果树果园灾后管理措施探讨 [J]. 现代园艺 ,2022,45(16):192-194.
Chen Y L, Chen Z Y, Xia L H, et al. Discussion on post-disaster management measures of apricot, plum and other stone fruit orchards[J]. Contemporary Horticulture,2022,45(16):192-194.

[6] Yaman M, Uzun A. Evaluation of superior hybrid individuals with intra and interspecific hybridization breeding in apricot[J]. International Journal of Fruit Science,2020,20(S3): S2045-S2055.

[7] 李娜 , 邓童 , 罗乐 , 等 . 榆叶梅的远缘杂交亲和性和花粉管行为 [J]. 分子植物育种 ,2022,20(17):5754-5762.
Li N, Deng T, Luo L, et al. Distant hybridization compatibility and pollen tube behavior of *Prunus triloba*[J]. Molecular Plant Breeding,2022,20(17):5754-5762.

[8] 刘雪怡 . 桃、杏远缘杂交亲和性分析及杂种胚再生与鉴定研究 [D]. 保定 : 河北农业大学 ,2022:25-27.
Liu X Y. Studies on the distant crossing compatibility between peach and apricot and the regeneration and identification of hybrid embryos[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2022:25-27.

[9] Szymajda M, Studnicki M, Kuras A, et al. Cross-compatibility in interspecific hybridization between three *Prunus* species[J]. South African Journal of Botany,2022,146:624-633.

[10] 王翠梅 , 董然然 , 王一兰 , 等 . 梅与山桃远缘杂交亲和性初步研究 [J]. 西北植物学报 ,2015,35(5):957-962.
Wang C M, Dong R R, Wang Y L, et al. Study on cross-compatibility between *Prunus mume* and *P. davidiana*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2015,35(5):957-962.

[11] 孟州市人民政府 . 人文地理 [EB/OL].〔2020-04-18〕[2026-03-30]. https://www.mengzhou.gov.cn/2025/07-17/448886.html.
The People’s Government of Mengzhou City. Human geography[EB/OL]. (2020-04-18)[2026-03-30].https://www.mengzhou.gov.cn/2025/07-17/ 448886.html.

[12] 尹明宇 , 朱绪春 , 刘慧敏 , 等 . 西伯利亚杏种质资源花表型变异 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2018,46(2): 92-103.
Yin M Y, Zhu X C, Liu H M, et al. Flower phenotypic variations of germplasm resources of Siberian apricot (*Armeniaca sibirica*) [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2018,46(2):92-103.

[13] Beltrán R, Valls A, Cebrián N, et al. Effect of temperature on pollen germination for several Rosaceae species: influence of freezing conservation time on germination patterns[J]. PeerJ,2019,7:e8195.

[14] 陈娟 , 王森 , 邵凤侠 . 制片方法对枣花授粉荧光显微观察效果的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(9):35-44.
Chen J, Wang S, Shao F X. Slicing methods for fluorescence microscopic observation of style of Chinese jujube after pollination[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(9):35-44.

[15] 丁文文 . 新疆薄壳核桃组织培养技术研究 [D]. 阿拉尔 : 塔里木大学 ,2023:17-22.
Ding W W. Tissue culture technology research on Xinjiang thin-shelled walnut[D]. Alaer: Tarim University,2023:17-22.

[16] 陈曦 . 野生欧洲李组织培养体系试验研究 [D]. 乌鲁木齐 : 新疆农业大学 ,2021:42-45.
Chen X. Experimental study on tissue culture system of wild

European plum[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021:42-45.

[17] Silva T D, Chagas K, Batista D S, et al. Morphophysiological *in vitro* performance of Brazilian ginseng (*Pfaffia glomerata* (Spreng.) Pedersen) based on culture medium formulations[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant,2019,55(4): 454-467.

[18] 马金萍 , 王帆 . 兰州百合组培快繁技术研究 [J]. 现代农业科技 ,2023(8):69-72.
Ma J P, Wang F. Research on tissue culture and rapid propagation technology of Lanzhou lily[J]. Modern Agricultural Science and Technology,2023(8):69-72.

[19] 王馨瑶 . 蓝莓与蓝靛果远缘杂交亲和性的研究 [D]. 延吉 : 延边大学 ,2022:16-17.
Wang X Y. A study on the compatibility of distant hybridization between blueberry and *Lonicera edulis*[D]. Yanji: Yanbian University,2022:16-17.

[20] 吕雪 , 王丽娟 , 李春苗 , 等 . 李杏远缘杂交胚抢救体系的建立 [J]. 中国果树 ,2014(1):21-24.
Lyu X, Wang L J, Li C M, et al. Establishment of rescue system for distant hybrid embryos between plum and apricot[J]. China Fruits,2014(1):21-24.

[21] 贾冬冬 , 李在留 , 郑云丽 , 等 . 毛竹种子发育过程中形态和生理特性变化 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(1):79-88.
Jia D D, Li Z L, Zheng Y L, et al. Changes in morphological and physiological characteristics of *Phyllostachys edulis* seeds during development[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(1):79-88.

[22] 耿蓓蕊 , 高洁 , 辜晓英 , 等 . 羌活种子发育过程中形态及生理生化指标动态变化特征 [J]. 西北植物学报 ,2024,44(10): 1539-1548.
Geng B R, Gao J, Gu X Y, et al. Changes of morphological, physiological, and biochemical indices during seed development of *Notopterygium incisum* Ting ex H.T. Chang[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2024,44(10):1539-1548.

[23] 侯玲玲 , 胡彩云 , 徐庆一 , 等 . 黄瑞香种子发育过程中形态及生理生化特征研究 [J]. 中国现代中药 ,2025,27(8):1507-1514.
Hou L L, Hu C Y, Xu Q Y, et al. Study on morphological, physiological, and biochemical properties during seed development of *Daphne giraldii*[J]. Modern Chinese Medicine,2025,27(8): 1507-1514.

[24] 张庆雯 , 王兆昊 , 祁静静 , 等 . 植物胼胝质合成酶研究进展 [J]. 园艺学报 ,2021,48(4):661-675.
Zhang Q W, Wang Z H, Qi J J, et al. The advances of callose synthase in plant[J]. Acta Horticulturae Sinica,2021,48(4): 661-675.

[25] 肖军 . 植物体内的胼胝质及其生物学意义 [J]. 生物学通报 , 2021,56(11):4-6.
Xiao J. Biological significance of callose in plants[J]. Bulletin of Biology,2021,56(11):4-6.

[26] 杜兵帅 . 板栗胚珠败育的细胞学及分子机理初探 [D]. 北京 : 北京农学院 ,2020:16-17.
Du B S. The preliminary study on cytological and molecular mechanism of ovule abortion in Chinese chestnut[D]. Beijing: Beijing University of Agriculture,2020:16-17.

[27] 程喜莉 , 王发东 , 甘润 , 等 . 植物胚挽救在远缘杂交及新品种培育中的应用综述 [J]. 热带农业工程 ,2024,48(4):153-158.
Cheng X L, Wang F D, Gan R, et al. Current application and development of the plant embryo rescue in distant hybridization and new variety breeding[J]. Tropical Agricultural Engineering, 2024,48(4):153-158.

[28] 杨红丽 , 徐学忠 , 胡靖锋 , 等 . 甘蓝与甘蓝型油菜杂交胚挽救技术研究 [J]. 湖北农业科学 ,2022,61(13):65-68.
Yang H L, Xu X Z, Hu J F, et al. Study on hybrid embryo rescue technology of cabbage and *Brassica napus*[J]. Hubei Agricultural Sciences,2022,61(13):65-68.

[29] 陈雪 . 桃杂交种胚培养技术探析 [J]. 河北果树 ,2024(2): 10-11,14.
Chen X. Analysis on hybrid embryo culture technology of peach[J]. Hebei Fruits,2024(2):10-11,14.

[30] 戴美琪 . 野生多毛番茄与栽培番茄远缘杂交胚挽救技术优化及抗冷砧木筛选 [D]. 沈阳 : 沈阳农业大学 ,2025:23-29.
Dai M Q. Optimization of embryo rescue technique and screening of cold resistant rootstock of wild hairy tomato and cultivated tomato[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025:23-29.

[31] 刘玉泽 , 王一菲 , 任威蓁 , 等 . 北美豆梨杂种幼胚挽救及再生体系的建立 [J]. 植物学报 ,2024,59(5):800-809.
Liu Y Z, Wang Y F, Ren W Z, et al. Establishment of immature embryo rescue and regeneration system for *Pyrus calleryana* cv. ‘Cleveland’[J]. Chinese Bulletin of Botany,2024,59(5):800-809.

[本文编校：戴欧琳]