

张旭凤, 王锋, 曹嵌, 等. 不同授粉方式下砀山酥梨早期受精生理特性与授粉效果分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(1): 119–128.

ZHANG X F, WANG F, CAO Q, et al. Analysis on physiological characteristics of early fertilization and pollination effects of pear (*Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu) under different pollination methods[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2025, 53(1): 119–128.

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2025.01.13

不同授粉方式下砀山酥梨早期受精生理特性与授粉效果分析

张旭凤¹, 王 锋², 曹 嵌², 武 敏¹, 郭宝贝³, 郭 媛¹

(1. 山西农业大学 园艺学院, 山西 太原 030031; 2. 山西农业大学 动物科学学院, 山西 晋中 030801;

3. 山西农业大学 果树研究所, 山西 晋中 030815)

摘 要: 为探究不同授粉方式对砀山酥梨(*Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu)早期受精生理特性、果实动态发育和果实品质的影响, 以人工授粉为对照、蜜蜂授粉为处理组, 使用显微镜观察人工授粉和蜜蜂授粉后梨花花粉萌发差异, 采用石蜡包埋子房切片观察子房发育差异, 结合果实发育动态监测与果实品质检测, 揭示2种授粉方式对梨树果实生长发育的影响。结果表明, 相较于人工授粉, 蜜蜂授粉后梨花花粉萌发较早, 授粉后2 h已在柱头萌发, 授粉后48 h到达花柱基部, 椭圆型胚囊完整性更好。子房发育切片观察表明, 相较于人工授粉, 蜜蜂授粉后胚珠发育更快, 且后期胚珠发育为种子数量更多。人工授粉和蜜蜂授粉的花序和花朵坐果率均可达到生产需要; 蜜蜂授粉后, 果实中苹果酸、柠檬酸和奎尼酸含量均极显著降低, 葡萄糖、蔗糖和山梨醇含量均极显著升高, 总酚含量显著升高。利用蜜蜂为梨树授粉, 花粉萌发和到达子房基部的时间均早于人工授粉, 还可以显著提升梨的果实品质。

关键词: 砀山酥梨; 蜜蜂授粉; 人工授粉; 受精生理; 果实品质

中图分类号: S661.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2025)01-0119-10

Analysis of Physiological Characteristics of Early Fertilization and Pollination Effects of Pear (*Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu) under Different Pollination Methods

ZHANG Xufeng¹, WANG Feng², CAO Qian², WU Min¹, GUO Baobei³, GUO Yuan¹

(1. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, 030031, China;

2. College of Animal Science, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

3. Institute of Pomology, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030815, China)

Abstract: To explore the effects of different pollination methods on the physiological characteristics of early fertilization, fruit dynamic development, and fruit quality of pear (*Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu), in this study, artificial pollination was used as the control group, and honeybee pollination was used as the treatment group, a microscope was used to observe the differences in pollen germination between pear flowers after artificial pollination and honeybee pollination, paraffin embedded ovary slices was used to observe differences in ovary development, combined with the dynamic monitoring of fruit development and quality detection, the effect of the two pollination methods on the growth and development of pear fruit was revealed. The results showed that compared with artificial pollination, pear flower pollen germinated earlier after honeybee

收稿日期: 2024-05-06

基金项目: 山西省农业科学院农业科技创新项目(YCX2020YQ04); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系(CARS-44-KXJ2); 山西省应用基础研究计划(青年)项目(202103021223142); 山西农业大学博士基金(2021BQ53)

作者简介: 张旭凤, 副研究员, 博士, 主要从事大田作物授粉研究, E-mail: zhangxf@sxau.edu.cn

通信作者: 郭 媛, 研究员, 硕士, 主要从事大田作物授粉研究, E-mail: yysgy3@163.com

pollination, germinated at the stigma 2 hours after pollination and reached the base of the stigma 48 hours after pollination. The integrity of oval embryo sac was better. The observation of ovary development slices showed that compared with artificial pollination, the ovules developed faster after honeybee pollination, and the ovules developed into more seeds in the later stage. The inflorescence and flower fruit setting rate of artificial pollination and honeybee pollination could achieve the production needs. After honeybee pollination, the contents of malic acid, citric acid, and quinic acid decreased significantly, the contents of glucose, sucrose, and sorbitol increased significantly, and the content of total phenols increased significantly. By using honeybees to pollinate pear trees, pollen germinated and reached the base of the ovary earlier than artificial pollination, it could also significantly improve the fruit quality of pears.

Keywords: *Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu; honeybee pollination; artificial pollination; fertilization physiology; fruit quality

梨树 (*Pyrus* L.) 是我国主要的栽培果树, 其产量位居水果产量第三位, 仅次于苹果和柑橘。据国家统计局最新公布数据显示, 截至 2021 年全国梨树总面积达 921.61 千 hm^2 , 全国梨总产量 1 887.59 万 t, 且梨在我国水果贸易中也占据重要地位^[1]。梨树是自花授粉不结实的果树, 自花授粉结实率低且品质差。因此, 梨树种植必须合理配置授粉品种并且进行辅助授粉, 才能确保梨丰产、稳产和果实的优质美观。现阶段梨树主要的辅助授粉方式有传统人工授粉和外界昆虫授粉^[2]。目前, 约有 30% 的梨树种植户在生产中采用人工授粉解决梨树授粉问题, 虽然人工授粉是一项提高坐果率的生产技术措施, 但是传统的人工授粉存在费时、费力、授粉不均匀和生产成本大幅增加等很多缺陷^[3]。同时, 梨树花期短, 人工授粉时间紧迫, 不仅与其他农业生产活动形成竞争劳动力, 还会导致在梨树种植主产区授粉时节出现劳动力紧缺的现象, 也会大幅增加梨树种植户的生产成本。现今在山西省运城市, 蜜蜂授粉技术已经在梨树上成功得到了有效地推广和应用^[4]。但是, 山西作为酥梨的主要种植产区, 由于种植户对蜜蜂授粉技术仍然存在认识和观念上的缺乏信任, 其他梨树种植地区还存在大面积使用人工授粉的现象, 因此, 仍需进一步深入推广梨树蜜蜂授粉技术, 解决种植户授粉难的问题。梨树的自交不育的生理特性, 决定了梨树必须依靠外界的辅助手段来实现繁殖和受精结实。蜜蜂是自然界最主要的授粉昆虫, 全球约有超过 1/3 的农作物都需要依靠蜜蜂授粉, 蜜蜂授粉在植物多样性保护及生态系统平衡维护方面发挥着极为重要的作用^[5], 且人工授粉不利于梨的产业化和规模化发展, 而梨树开展蜜蜂授粉具有较好的应用前景^[6]。现今蜜蜂授粉技术已经在梨树授粉上得到应用, 已有研究发现^[7],

梨树经蜜蜂授粉后, 较自然授粉可以显著提高梨果实坐果率, 果实单果质量、果实体积和横纵径, 梨果实可溶性总糖、总酚和石细胞含量显著高于自然授粉, 且蜜蜂授粉后, 果实硬度会显著降低, 果实品质显著提升。对梨树蜜蜂授粉关键技术研究发现, 20℃ 时, 砀山酥梨开花所需时间为 44 h, 柱头可授性强, 每天柱头活性最佳时间是 11:00—15:00, 且可授期持续时间可达 120 h, 当外界环境温度 20℃ 时, 更适合梨花发育和蜜蜂采集^[8-9]。同时已有研究发现^[10], 人工采集的花粉与蜜蜂采集的花粉均可作为梨树实现授粉, 但是蜜蜂所采集花粉的花粉管萌发速率却显著高于人工采集的花粉。授粉使用蜂群在梨树初花期即开花 20% 左右入场, 可以达到梨树最佳的授粉效果^[11]。喀阡黑环系、卡尼鄂拉 2 个蜂种能够适应早春梨树开花低温环境采集花粉, 且对梨花粉采集能力强, 是梨树授粉的优良蜂种^[12]。同时, 由于蜜蜂的人工驯化程度高、授粉高效、经济安全、容易运输等特性, 因此, 蜜蜂为梨树授粉是切实可行的。最近的研究也表明^[13], 相较于果树自身的营养状况, 昆虫授粉与否对苹果和梨树的产量和品质起着决定性的作用。西方蜜蜂 (*Apis mellifera*) 为日本梨 *Pyrus pyrifolia* (Burm. f.) Nakai 授粉, 坐果率显著提升^[14]。

目前, 对不同授粉方式后, 梨早期授精生理特性的相关研究还比较少, 而且之前的研究多是比较蜜蜂授粉与自然授粉后的果实品质的差异。因此, 本研究以砀山酥梨 (*Pyrus bretschneideri* cv. Dangshansu) 为研究材料, 通过对比人工授粉和蜜蜂授粉后梨早期受精生理特性差异, 以期发现不同授粉方式下, 梨树早期受精生理特性差异, 再结合后期果实发育动态监测与果实品质检测, 揭示蜜蜂授粉与人工授粉方式下, 梨树果实的生长发

育差异。因此,研究不同授粉方式下砀山酥梨受精与授粉效果将为今后梨树蜜蜂授粉技术的深入推广和应用提供重要的理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为种植于山西省晋中市太谷县范村镇冀村乡的砀山酥梨(*Pyrus bretschneideri*)。试验蜂群为山西农业大学园艺学院试验蜂场饲养。葡萄糖、蔗糖、苹果酸、柠檬酸和山梨醇的标品购买自Dr. Ehrenstorfer公司;奎宁酸购买自上海安谱实验科技股份有限公司;果糖和没食子酸购买自上海源叶生物科技有限公司;乙腈和甲醇购买自ASC公司。福林酚和碳酸钠购买自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验设计

试验时间为2019年梨树整个花期和后期果实生长直至成熟期,在梨树大蕾期,搭建3个网室,每个网室内罩3棵主栽品种和1棵授粉树(雪花梨),分别为自然授粉(网室通风透气)、蜜蜂授粉和人工授粉处理网棚。盛花期前一天晚上在蜜蜂授粉处理棚内放入一群1足框蜂的西方蜜蜂(*Apis mellifera*)。次日清晨天气晴好无风的情况下,人工授粉网棚使用当年采摘的雪花梨花粉,使用鸡毛掸子将花粉蘸上后,对棚内开放的花朵进行逐一点涂,进行人工授粉。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 荧光显微镜观察梨花花粉萌发和花粉管生长 在人工授粉和蜜蜂授粉后24、48、72、96、120 h后分别取20个授粉花柱置于甲醛-乙酸-乙醇固定液(FAA固定液)中,4℃保存;40℃下,用1 mol/L NaOH对花柱进行软化处理12 h,清水冲洗多次后,再用5%苯胺蓝对花柱染色过夜。将染色过夜的花柱进行压片处理,使用OLYMPUS BX51荧光显微镜观察花粉管生长情况。采用图像软件CellSens Standard进行实时观察和拍照,后续采用Photoshop CS5软件进行图像拼接处理。

1.3.2 石蜡切片观察梨子房内胚发育 剖取新鲜胚组织,投入组织固定液内固定24 h以上,将修切好的组织和对应的标签放于包埋框内。将脱水盒放进脱水机内依次梯度进行脱水,75%酒精4 h,85%酒精2 h,90%酒精2 h,95%酒精1 h,无水乙醇I和II各30 min,醇苯5~10 min,二甲苯I和II

中各5~10 min,65℃融化石蜡I 1 h,65℃融化石蜡II 1 h,65℃融化石蜡III 1 h。浸好蜡的组织于包埋机内进行包埋,修整好的蜡块置于石蜡切片机切片,厚4 μm。切片漂浮于摊片机40℃温水上展平,用载玻片将组织捞起,60℃烘箱内烤片。水烤干、蜡烤化后取出常温保存备用。番红染色,切片放入植物番红染色液中染色2 h,洗去多余染料。切片依次入50%、70%、80%梯度酒精中各3~8 s。固绿染色,切片放入植物固绿染色液中染色6~20 s,无水乙醇脱水。切片放入干净的二甲苯透明5 min,中性树胶封片。显微镜镜检,图像采集分析。

1.3.3 果实发育动态监测 人工授粉和蜜蜂授粉处理每棵主栽树各选择20个果实,在开花后40 d开始采样,每隔30 d采样1次。采样时,在树冠外围3个方向同一高度处采集健康、无病害的梨果实各20个,利用数显电子游标卡尺(0.01 mm)记录果实横纵径数据。

1.3.4 花朵坐果率和花序坐果率测定 在梨花大蕾期罩好网棚后,分别依次统计3个网棚内的花序和花朵数,每棵树选取3个方向的树枝,并做好标记,第1次生理落果后统计坐果数,计算花序和花朵坐果率。

1.3.5 果实品质测定 梨成熟期统一采摘果实,利用安捷伦高效液相色谱仪1260,分别测定果实中果糖、葡萄糖、蔗糖、山梨醇、苹果酸、柠檬酸和奎宁酸的含量。液相色谱参数设定,果糖、葡萄糖和蔗糖含量测定使用的色谱柱为安捷伦氨基柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),检测器为示差检测器,柱温为35℃,进样量为10 μL,流动相为乙腈:水=70:30(体积比),流速为1.0 mL/min。苹果酸、柠檬酸和奎宁酸含量测定使用的色谱柱为安捷伦C18 AQ(250 mm×4.6 mm,5 μm),检测器为紫外检测器,柱温为35℃,进样量为10 μL,流速为0.5 mL/min,波长为210 nm,流动相为10 mmol/L K₂HPO₄(pH=2.55)。山梨醇含量测定使用的色谱柱为安捷伦氨基柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),检测器为示差检测器,柱温为25℃,进样量为10 μL,流动相为乙腈:水=80:20(体积比),流速为1.0 mL/min。石细胞含量测定参考NY/T 1388—2007。可溶性固形物含量(%)测定参考NY/T 2637—2014。总酚含量采用福林酚法测定。

1.4 数据处理与分析

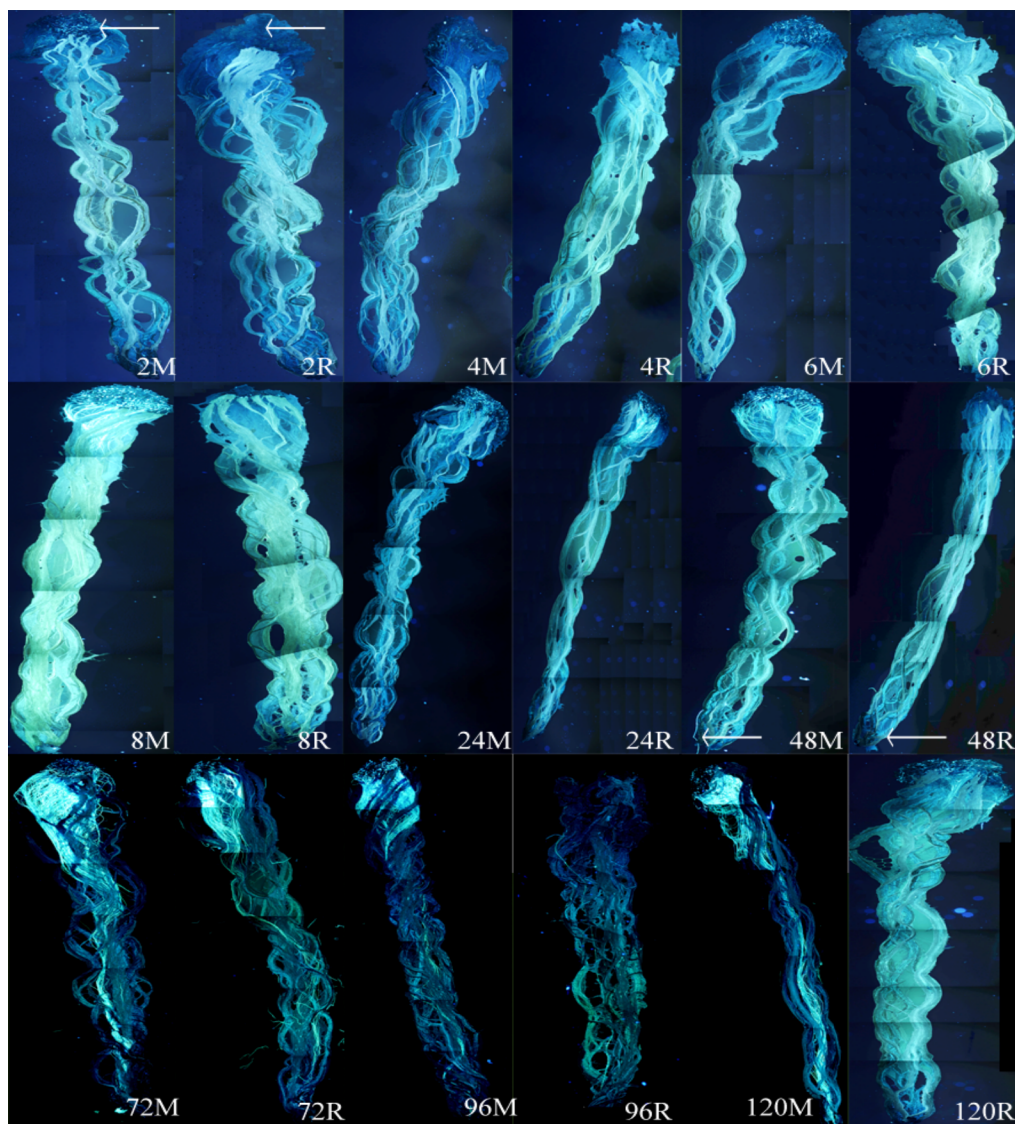
所有数据用 Origin 2021 软件进行数据分析, Photoshop CS5 作图, SPSS 27.0 统计软件进行单因素方差和 T 检验分析, 数据均为 $\text{Mean} \pm \text{SD}$ 。

2 结果与分析

2.1 荧光显微境观察花粉萌发情况

通过观察和比较不同方式授粉后, 花柱花粉

萌发和花粉管生长情况发现, 20 个柱头中, 60% 的花柱表现为蜜蜂授粉较人工授粉的梨花花粉萌发较早, 授粉后 2 h 已经在柱头开始萌发, 8 h 柱头荧光表现强烈, 授粉后 48 h 花粉已到达花柱基部(图 1, 白色箭头所示), 而人工授粉处理后 2 h, 柱头花粉还未萌发, 6 h 有少量开始萌发, 72 h 花粉到达花柱 2/3 处, 120 h 到达花柱基部。



M 为蜜蜂授粉; R 为人工授粉

M was honeybee pollination; R was artificial pollination

图 1 蜜蜂授粉和人工授粉 120 h 内花粉萌发和花粉管生长观察

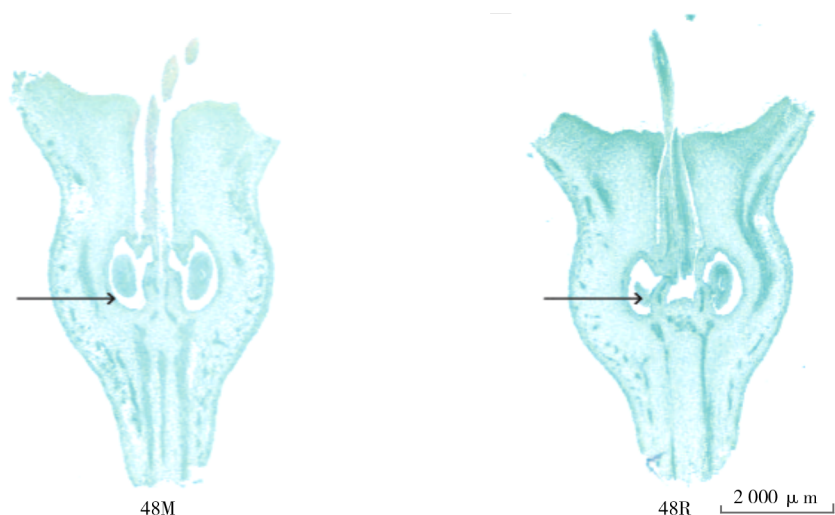
Fig.1 Pollen germination and pollen tube growth observation within 120 hours of honeybee pollination and artificial pollination

2.2 石蜡切片观察梨子房内胚发育状态

通过子房石蜡切片观察胚早期发育状态发

现, 20 个子房切片中, 60% 授粉 48 h 后, 蜜蜂授粉组形成完整的椭圆型胚囊, 而人工授粉组尚未形

成完整的胚囊(图2)。



48M为蜜蜂授粉后48 h,48R为人工授粉后48 h

48M was honeybee pollination after 48 hours, 48R was artificial pollination after 48 hours

图2 蜜蜂授粉和人工授粉后48 h子房切片观察

Fig.2 Observation of ovary slices 48 h after honeybee pollination and artificial pollination

由图3、4可知,20个子房切片中,60%的子房切片授粉12 d后,蜜蜂授粉组发育出完整的胚珠,较人工授粉组发育速度更快;蜜蜂授粉29、43、54 d

后种子数均较人工授粉处理多(红色方框所示),表明后期蜜蜂授粉组较人工授粉组种子发育为饱满种子数量更多。

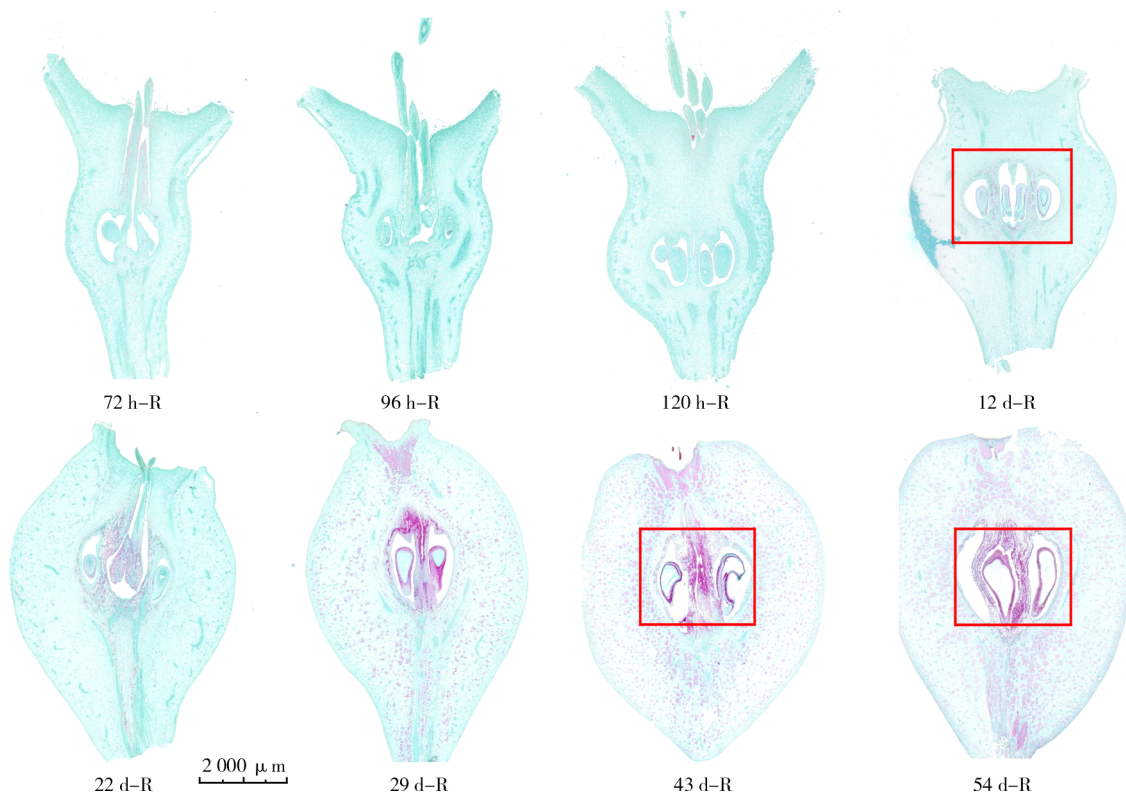


图3 人工授粉后梨果实子房发育动态切片观察

Fig.3 Slice observation of ovary dynamic development of pear fruit after artificial pollination

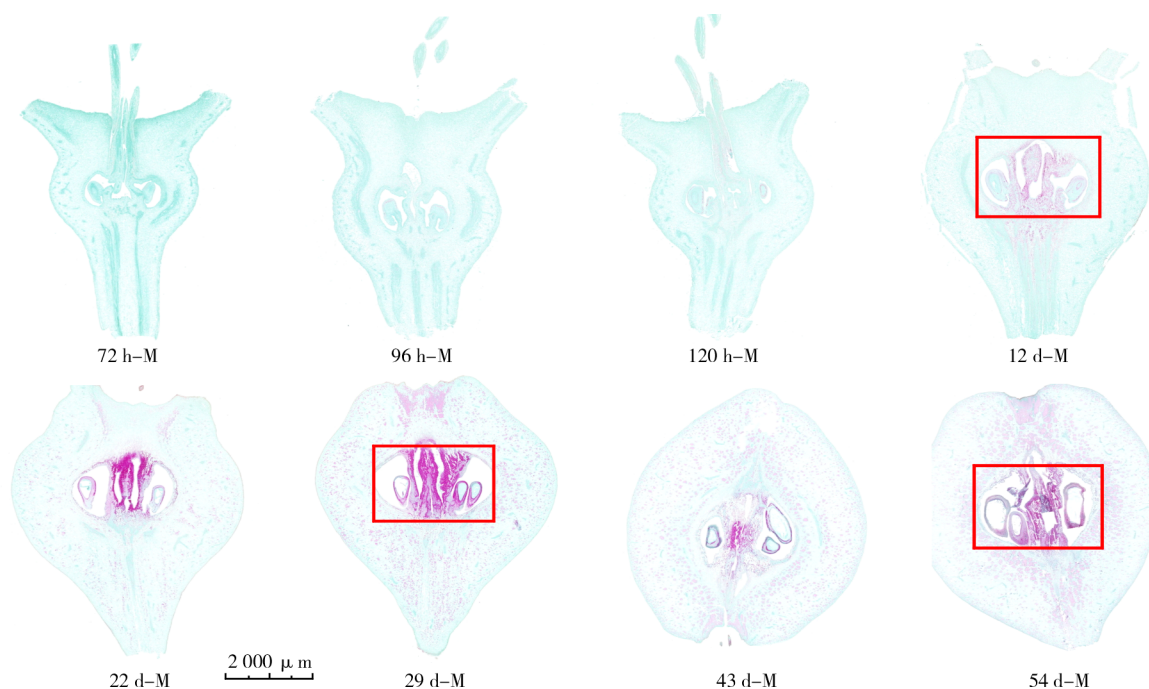


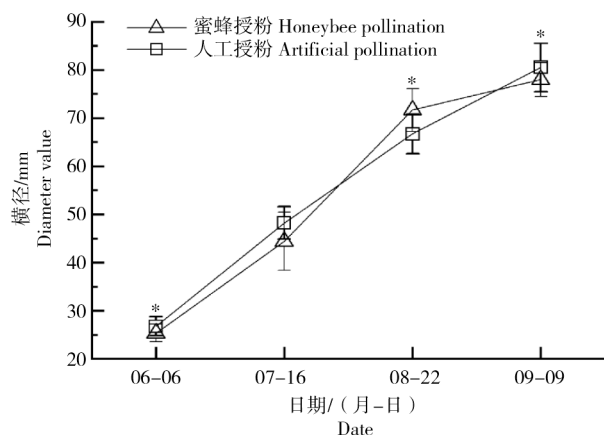
图4 蜜蜂授粉后梨果实子房发育动态切片观察

Fig.4 Slice observation of ovary dynamic development of pear fruit after honeybee pollination

2.3 不同授粉方式梨果实生长发育动态监测

由图5可知,人工授粉和蜜蜂授粉后,梨果实横径在6月6日、8月22日和9月9日测量具有显著差异($P<0.05$),纵径均无显著差异。6月6日蜜蜂授粉果实横径变化为20.18~30.33 mm,纵径变化为24.70~40.64 mm;测得的人工授粉梨横径变化为19.71~31.07 mm,纵径变化为26.79~42.22 mm。7月16日蜜蜂授粉梨横径变化为40.46~56.18 mm,纵径变化为43.56~60.96 mm;人工授粉梨横径

变化为43.29~58.50 mm,纵径变化为44.81~63.61 mm。8月22日测得的蜜蜂授粉梨横径变化为62.24~82.78 mm,纵径变化为62.26~89.58 mm;测得的人工授粉梨横径变化为60.05~76.28 mm,纵径变化为62.53~83.27 mm。9月9日测得的蜜蜂授粉梨横径变化为70.43~84.49 mm,纵径变化为76.19~98.62 mm;测得的人工授粉梨横径变化为71.45~107.21 mm,纵径变化为74.13~97.17 mm。



*表示不同处理间0.05水平上差异显著($P<0.05$)

* represented differences were significant among different treatments at the 0.05 level($P<0.05$).

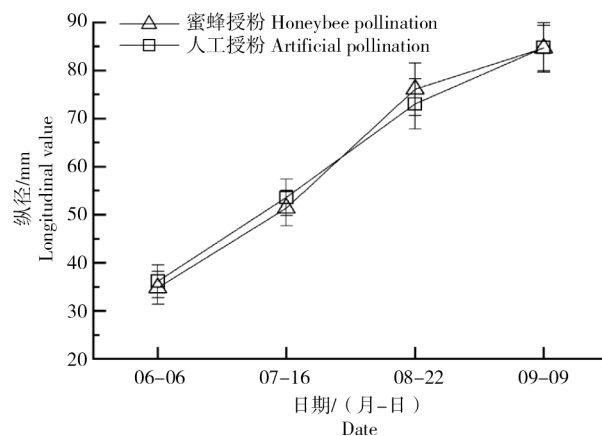


图5 不同授粉方式梨果实生长发育动态监测

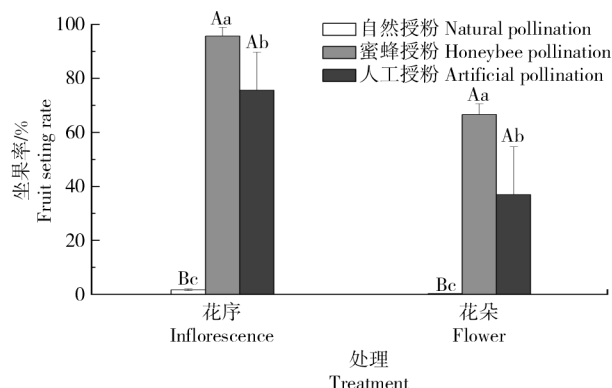
Fig.5 Dynamic monitoring of growth and development of pear fruit with different pollination methods

2.4 不同授粉方式坐果率比较

从图6可知,蜜蜂授粉和人工授粉花序和花朵坐果率均极显著高于自然授粉处理($P<0.01$),而蜜蜂授粉和人工授粉花序和花朵坐果率并无显著差异,表明相较于自然授粉,蜜蜂授粉和人工授粉均可以满足梨树实际生产需要。

2.5 不同授粉方式下果实品质比较

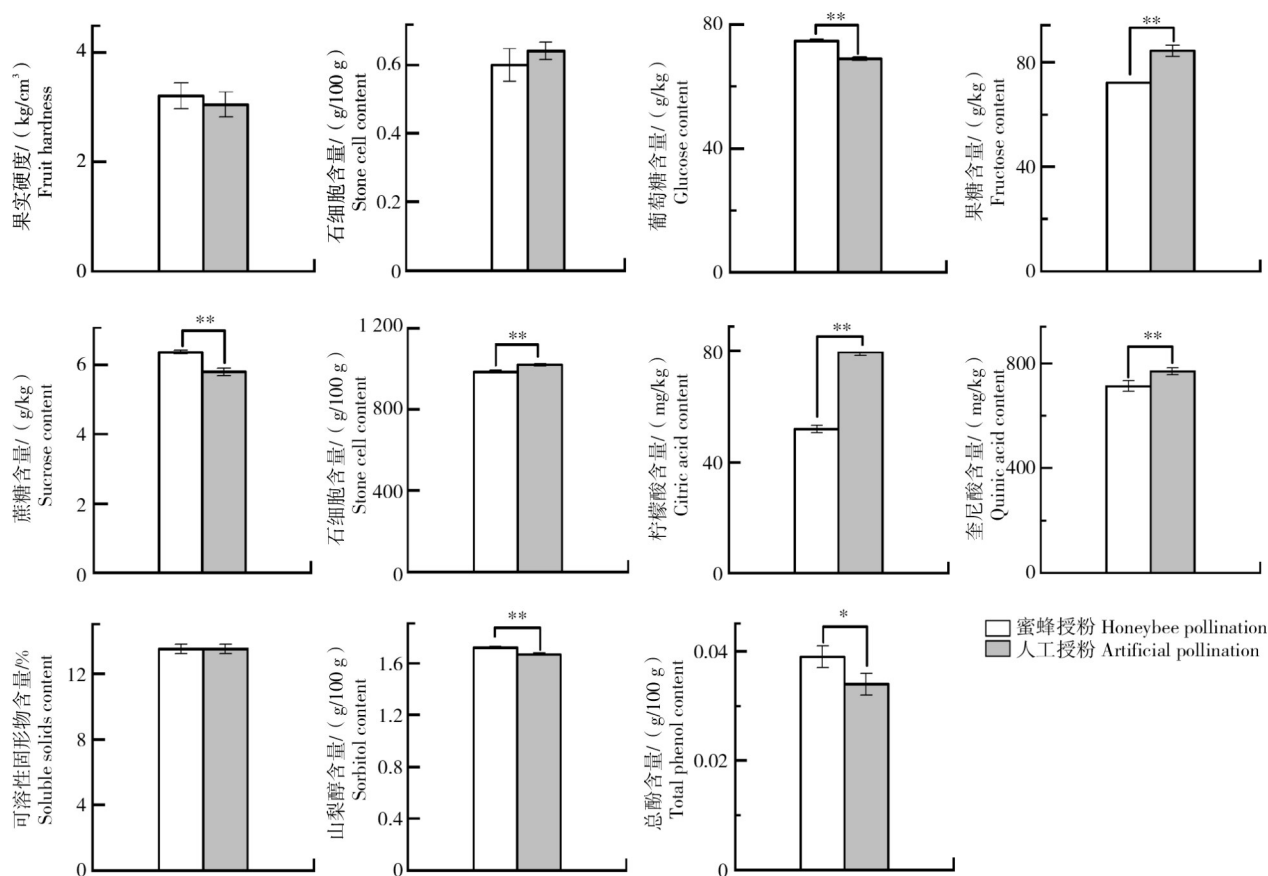
从图7可以看出,人工授粉组与蜜蜂授粉组的梨果实可溶性固形物、石细胞含量和梨果实硬度均无显著差异,而人工授粉组梨果实的果糖含量极显著高于蜜蜂授粉组($P<0.01$);蜜蜂授粉组的梨果实葡萄糖含量、蔗糖含量和山梨醇含量均极显著高于人工授粉组($P<0.01$),而蜜蜂授粉组的梨果实苹果酸含量、柠檬酸含量和奎尼酸含量极显著低于人工授粉组($P<0.01$),蜜蜂授粉组的梨果实总酚(以没食子计)含量显著高于人工授粉组($P<0.05$)。



不同小写字母表示不同处理在0.05水平上差异显著($P<0.05$); 不同大写字母表示不同处理在0.01水平上差异极显著($P<0.01$)
Different lowercase letters indicated significant difference among different treatments at the 0.05 level($P<0.05$); Different capital letters indicated extremely significant difference among different treatments at the 0.01 level($P<0.01$)

图6 不同授粉方式花序和花朵坐果率分析

Fig.6 Analysis of inflorescence and flower fruit setting rate in different pollination methods



*表示在0.05水平上差异显著($P<0.05$), **表示在0.01水平上差异极显著($P<0.01$)

* represented significant difference at the 0.05 level($P<0.05$), ** represented extremely significant difference at the 0.01 level($P<0.01$)

图7 不同授粉方式下梨果实品质分析

Fig.7 Analysis of pear fruit quality under different pollination methods

3 结论与讨论

近年来由于作物种植模式单一、农药使用、栖息地丧失等原因导致野生传粉昆虫数量急剧下降^[15],梨树因其自身典型的自交不亲和生理特性^[16],对传粉昆虫等辅助授粉依赖度更高。通过对不同授粉方式下酥梨早期授粉受精生理特性的研究,进一步明确了蜜蜂为梨树授粉花粉萌发早,有效促进生长和胚珠发育,果实的品质显著提升,本研究结果为推广和应用梨树蜜蜂授粉技术提供了重要的理论依据。

花粉的活性对果树实现成功受精至关重要。已有研究表明^[10],蜜蜂出巢携带的梨花花粉与人工采集的梨花花粉均可实现授粉,但使用蜜蜂采集的花粉授粉,花粉管萌发速率显著高于人工采集花粉,花粉萌发和花粉管生长有群体效应。本研究中蜜蜂授粉组柱头及花粉管生长荧光更强,表明蜜蜂能携带更多的花粉落到柱头上,因此,蜜蜂授粉组花粉萌发及花粉管生长速度均快于人工授粉,完成授粉时间也更早。同时,蜜蜂授粉后,胚珠发育较人工授粉快,具备了更早进行受精的物质基础,而且由于授粉、受精充分,后期果实中种子发育饱满、数量较人工授粉组更多。推测可能是由于蜜蜂采集的梨花花粉来自于新鲜梨花花朵,其花粉活性较人工授粉强所致,后续有待进一步研究不同来源梨花花粉的活性差异。

成功授粉和实现受精是被子植物后期胚珠和果实发育所必须经历的发育历程^[17]。植物特有的授粉受精过程决定了胚珠早期生长的启动和后期的发育。胚珠最终发育为成熟的种子,早期授粉受精缺陷都会引起胚珠的发育异常,直接导致受精不良进而影响后期果实种子的发育^[18]。本研究发现授粉后 48 h,蜜蜂授粉组的梨形成完整的椭圆型胚囊,而人工授粉组尚未形成完整的胚囊,后期蜜蜂授粉梨果实成熟种子数也较人工授粉组更多。梨果实的横纵径大小直接反映果实的生长发育状态。2 a 的数据发现,梨果实的生长发育状态均呈现“S”型曲线变化,7—8 月果实发育速度迅速增加,8—9 月果实发育速度变缓,这与刘畅等^[19]的研究结果一致。果树的坐果率会对后期产量造成影响^[20],本研究结果表明,蜜蜂授粉和人工授粉均可以满足梨树的实际生产需求,相较于人工授粉,蜜蜂授粉技术节约劳动成本的同时,还可满足生

产需求。

农作物的产量会受到多种因素的影响(授粉、施肥、害虫防治等)^[13]。已有研究表明,梨树种植过程中多种因素均会影响梨的果实品质,例如,不同授粉品种^[21-25]、不同树形^[26]和不同授粉方式^[2,27-30]。HÜNICKEN 等^[13]研究表明,相比于果树自身营养状态,苹果和梨的产量和品质受昆虫授粉媒介的影响更大。因此,研究不同授粉方式对梨树产量和品质的影响至关重要^[31]。李红旭等^[28]研究结果发现,相较于人工授粉,蜜蜂授粉后,黄冠梨果实酸度显著下降。梨果实中糖和酸是其生长发育过程中的重要基础物质,其含量和种类也是决定果实品质的重要指标,直接影响果实的风味^[32]。已有研究表明,梨果实可溶性糖主要为葡萄糖、果糖、蔗糖、山梨醇等,而有机酸类主要为苹果酸、柠檬酸、奎尼酸等^[33],其中,苹果酸和柠檬酸对果实酸度具有显著影响^[34]。本研究中蜜蜂授粉后梨果实中苹果酸、柠檬酸和奎尼酸含量极显著下降,使果实酸度降低,与王宇^[2]的研究结果一致,而葡萄糖、蔗糖和山梨醇含量增加,显著提升了梨果实甜度,相较于人工授粉,梨果实品质得到了显著提升。

酚类物质是植物产生的重要次生代谢物质之一^[35],具有清除人体内过剩自由基、抗氧化等活性功能^[36],还可以降低人体患糖尿病等慢性疾病的风险^[37-38]。酚是香气物质合成前体,是影响果实风味的主要物质。PARK 等^[39]研究发现,韩国种植的圆黄、黄金及秋黄梨果实中总酚含量随着果实的成熟而降低。酚类物质的含量高低影响果实的抗氧化能力^[40],且酚类物质中总酚含量对果实的抗氧化能力和果实品质均具有重要作用^[41]。本研究中蜜蜂授粉后,梨果实中总酚含量显著上升,相较于人工授粉,蜜蜂授粉后显著提升了梨果实的抗氧化能力,对果实储存和营养价值的提升均具有重要影响。

综上所述,蜜蜂授粉后,梨早期受精阶段花粉萌发和梨果实成熟后品质表现均优于人工授粉。相较于人工授粉,蜜蜂授粉可以促进梨花花粉的萌发、花粉管生长和胚珠发育,显著降低梨果实中苹果酸、柠檬酸和奎尼酸含量;显著提高果实中葡萄糖、蔗糖、山梨醇和总酚的含量。因此,梨树蜜蜂授粉技术节约劳动成本的同时,还可以有效改善果实口感,显著提升果实品质,研究结果为进一步深入推广和应用梨树蜜蜂授粉技术提供了重要的

理论依据。

参考文献:

- [1] 王田利. 我国梨产业发展浅析[J]. 山西果树, 2013(4):39-41.
WANG T L. Analysis on the development of pear industry in China[J]. Shanxi Fruits, 2013(4):39-41.
- [2] 王宇. 梨树不同授粉技术影响果实发育、品质形成的机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
WANG Y. Study on the mechanism of different pollination techniques affecting fruit development and quality formation in pear trees[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [3] 李晋江, 薛基忠. 果树授粉存在的问题及解决方法[J]. 落叶果树, 2010, 42(3):56-57.
LI J J, XUE J Z. Problems and solutions of fruit tree pollination[J]. Deciduous Fruits, 2010, 42(3):56-57.
- [4] 郭媛. 梨树蜜蜂授粉技术示范推广在运城初见成效[J]. 中国蜂业, 2013, 64(16):47.
GUO Y. The demonstration and popularization of pear bee pollination technology has achieved initial results in Yuncheng[J]. Apiculture of China, 2013, 64(16):47.
- [5] 安建东, 陈文锋. 全球农作物蜜蜂授粉概况[J]. 中国农学通报, 2011, 27(1):374-382.
AN J D, CHEN W F. Review of crop pollination by honey bees world-wide[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1):374-382.
- [6] 武文卿, 郭媛, 申晋山, 等. 梨树蜜蜂授粉现状调查[J]. 中国蜂业, 2011, 62(S4):40-44.
WU W Q, GUO Y, SHEN J S, et al. Investigation on current situation of bee pollination in pear trees[J]. Apiculture of China, 2011, 62(S4):40-44.
- [7] 张绍铃, 陶书田, 周应恒. 梨生产、加工及贸易现状与产业发展基本趋势[M]. 北京:中国农业出版社, 2010(9):1-7.
ZHANG S L, TAO S T, ZHOU Y H. Pear production, processing and trade status and basic trend of industrial development[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010(9):1-7.
- [8] 郭媛, 邵有全, 郭宝贝, 等. 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 Y, SHAO Y Q, GUO B B, et al. Relationship of pear pollen and stigma development with temperature[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12):1446-1452.
- [9] 郭媛, 邵有全, 马卫华, 等. ‘砀山酥梨’花柱可授性及蜜蜂授粉特性的研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16):110-114.
GUO Y, SHAO Y Q, MA W H, et al. Study on physiological activity and pollination characteristic of stigma and pollen of ‘Dangshan sul’[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(16):110-114.
- [10] 宋怀磊, 程慧, 李亮, 等. 蜜蜂采集梨花粉萌发活性及应用分析[J]. 北方园艺, 2016(12):31-33.
SONG H L, CHENG H, LI L, et al. Study on the germinability and application of bee-collected pear pollens[J]. Northern Horticulture, 2016(12):31-33.
- [11] 郭媛, 张旭凤, 邵有全, 等. 蜂群入场时间对蜜蜂采集梨花粉习性的影响[J]. 农学学报, 2015, 5(8):105-110.
GUO Y, ZHANG X F, SHAO Y Q, et al. Effect of intro-
- duced bee colonies in different florescence on pear pollination[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(8):105-110.
- [12] 郭媛, 薛运波, 牛庆生, 等. 梨园不同蜜蜂的传粉行为比较[J]. 中国农学通报, 2016, 32(14):21-25.
GUO Y, XUE Y B, NIU Q S, et al. Comparison of pollination behavior of different honey bees in pear garden[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(14):21-25.
- [13] HÜNICKEN P L, MORALES C L, GARCÍA N, et al. Insect pollination, more than plant nutrition, determines yield quantity and quality in apple and pear[J]. Neotropical Entomology, 2020, 49(4):525-532.
- [14] OKAMOTO K, NOTOYAMA A, MURAMATSU Y, et al. Pollination efficiency of *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae), solitary bees (Hymenoptera), and flies (Diptera) in an insect-pollinated Japanese pear orchard[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2024, 27(2):102242.
- [15] MASHILINGI S K, ZHANG H, CHEN W F, et al. Temporal trends in pollination deficits and its potential impacts on Chinese agriculture[J]. Journal of Economic Entomology, 2021, 114(4):1431-1440.
- [16] 张绍铃, 房经贵, 杨记礅. 果树自交不亲和性的遗传与生理机制及其研究[J]. 果树学报, 2001, 18(1):49-52.
ZHANG S L, FANG J G, YANG J G. Study on the genetics of the fruit self-incompatibility and its physiological mechanism[J]. Journal of Fruit Science, 2001, 18(1):49-52.
- [17] LLOP-TOUS I, BARRY C S, GRIERSON D. Regulation of ethylene biosynthesis in response to pollination in tomato flowers[J]. Plant Physiology, 2000, 123(3):971-978.
- [18] 王会滨. 激素调控无籽梨种子败育及果实发育的机理解析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021.
WANG H B. Mechanism analysis of hormone regulating seed abortion and fruit development of seedless pear[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [19] 刘畅, 任爱华, 齐丹, 等. 2个梨品种生长发育中果实品质变化动态观测[J]. 中国果树, 2023(3):35-40.
LIU C, REN A H, QI D, et al. Dynamic observation on of fruit quality changes of two pear varieties during growth and development[J]. China Fruits, 2023(3):35-40.
- [20] 席东. 梨树授粉及留果方式对果实品质形成的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
XI D. Effects of pollination and fruit retention methods on fruit quality formation in pear trees[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [21] 杨君祎. 砀山酥梨授粉品种亲缘关系的 SCoT 分析及对石细胞含量的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2015.
YANG J Y. SCoT analysis of genetic relationship of pollinated varieties of Dangshan crisp pear and its influence on stone cell content[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2015.
- [22] 刘妮, 李雷廷, 张绍铃, 等. 授粉品种对砀山酥梨果实萼片宿存及品质的影响[J]. 江西农业学报, 2010, 22(6):65-67, 71.
LIU N, LI L T, ZHANG S L, et al. Effect of pollinizers on *Calyx*-abscission and fruit quality of pear “dangshansu”[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(6):65-67, 71.
- [23] 吴小虎. 授粉对砀山酥梨果实品质影响的 SRAP 分析[D]. 合

- 肥:安徽农业大学,2011.
- WU X H. SRAP analysis of the effect of pollination on the fruit quality of Dangshan crisp pear[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011.
- [24] 张四普,杨锐,崔巍,等. 半地下通风库结合冷库贮藏对酥梨品质的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(9): 164-172.
- ZHANG S P, YANG R, CUI W, et al. Effect of semi-underground ventilation storage combined with cold storage on the quality of suli pear[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(9): 164-172.
- [25] 张楠. 异花授粉对砀山酥梨品质、石细胞的影响及 cDNA-SRAP 分析[D]. 合肥:安徽农业大学, 2013.
- ZHANG N. Effect of cross-pollination on quality and stone cells of Dangshan crisp pear and its cDNA-SRAP analysis[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [26] 刘珊珊,令狐田,赵志霞,等. 不同树形对砀山酥梨冠层结构、光合特性及果实品质的影响[J]. 果树资源学报, 2022, 3(5): 41-49.
- LIU S S, LINGHU T, ZHAO Z X, et al. Effects of different tree shapes on canopy structure, photosynthetic characteristics, fruit quality of 'Dangshan' pear[J]. Journal of Fruit Resources, 2022, 3(5): 41-49.
- [27] 王宏伟,李朝阳,冉昆,等. 不同授粉方式对梨坐果率及品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(2): 38-40.
- WANG H W, LI C Y, RAN K, et al. Effects of different pollination modes on fruit setting rate and fruits quality of pear[J]. Northern Horticulture, 2017(2): 38-40.
- [28] 李红旭,赵明新,曹刚,等. 不同授粉方式对黄冠梨着果及果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2023, 52(2): 170-173.
- LI H X, ZHAO M X, CAO G, et al. Effect of pollination methods on fruit set and fruit quality of Huangguan pear[J]. South China Fruits, 2023, 52(2): 170-173.
- [29] 李青松. 梨树蜂类授粉技术及钙钾对库尔勒香梨果实品质的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2013.
- LI Q S. Effects of pear tree bee pollination technology and calcium and potassium on fruit quality of Korla fragrances[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [30] LEE K Y, YIM S H, et al. The influence of insect pollination and artificial pollination on fruit quality and economic profit in the 'niitaka' pear (*Pyrus pyrifolia* nakai) [J]. Korean Journal of Organic Agriculture, 2016, 24(4): 759-771.
- [31] FOUNTAIN M T, MATEOS-FIERRO Z, SHAW B, et al. Insect pollinators of conference pear (*Pyrus communis* L.) and their contribution to fruit quality[J]. Journal of Pollination Ecology, 2019, 25: (10): 103-114.
- [32] 蒋爽,岳晓燕,滕元文,等. 不同砂梨果实中糖酸含量及代谢相关基因表达分析[J]. 果树学报, 2016, 33(S1): 65-70.
- JIANG S, YUE X Y, TENG Y W, et al. Analysis of sugar and acid content and expression of metabolism-related genes in different pear fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(S1): 65-70.
- [33] 姚改芳. 不同栽培种梨果实糖酸含量特征及形成规律研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- YAO G F. Study on the characteristics and formation law of sugar and acid content in different cultivated pear fruits[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [34] ESTI M, MESSIA M C, SINESIO F, et al. Quality evaluation of peaches and nectarines by electrochemical and multivariate analyses: relationships between analytical measurements and sensory attributes[J]. Food Chemistry, 1997, 60(4): 659-666.
- [35] 王玲平,周生茂,戴丹丽,等. 植物酚类物质研究进展[J]. 浙江农业学报, 2010, 22(5): 696-701.
- WANG L P, ZHOU S M, DAI D L, et al. Progress in plant phenolic compounds[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(5): 696-701.
- [36] 曾少敏. 梨果实主要酚类物质含量及抗氧化活性研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
- ZENG S M. Study on main phenolic compounds content and antioxidant activity of pear fruit[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [37] VAUZOUR D, RODRIGUEZ-MATEOS A, CORONA G, et al. Polyphenols and human health: prevention of disease and mechanisms of action[J]. Nutrients, 2010, 2(11): 1106-1131.
- [38] MEDINA-REMÓN A, TRESSERRA-RIMBAU A, PONS A, et al. Effects of total dietary polyphenols on plasma nitric oxide and blood pressure in a high cardiovascular risk cohort. The PREDIMED randomized trial[J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2015, 25(1): 60-67.
- [39] PARK Y O, CHOI J J, CHOI J H, et al. Antioxidant activities of young and mature fruit in three Asian pear cultivars[J]. Korean Journal of Horticultural Science and Technology, 2012, 30(2): 208-213.
- [40] 仵菲. 梨果实发育过程中酚类物质、抗氧化能力及其相关酶活性的研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2022.
- WU F. Study on phenolics, antioxidant capacity and related enzyme activities of pear fruit during fruit development[D]. Alar: Tarim University, 2022.
- [41] 姜喜,唐章虎,吴翠云,等. 3种梨果实发育过程中酚类物质及其抗氧化能力分析[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 99-105.
- JIANG X, TANG Z H, WU C Y, et al. Phenolic composition and antioxidant capacity of developing pear fruit from three cultivars[J]. Food Science, 2021, 42(23): 99-105.