果 树 学 报 2026,43(8):2125-2136
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20260259

授粉方式对设施内甜樱桃自花结实品种坐果、品质及授粉成本的影响

吴传宝[1],周君蔓[1,2#],张晓明[1],王 晶[1],冯 琛[1],王 未[1],
张开春[1],王乃玉[1,3],袁 晖[2*],段续伟[1*]

([1]北京市农林科学院林业果树研究所·农业农村部华北地区园艺作物生物学与种质创制重点实验室,北京 100093;
[2]沈阳农业大学园艺学院,沈阳 110866;[3]中国农业大学园艺学院,北京 100193)

摘 要:【目的】探究不同授粉方式对设施内自花结实性品种7-2-9坐果率、果实品质、激素含量及授粉成本的影响,为设施甜樱桃自花结实性品种的高效栽培与推广应用提供理论依据和技术支撑。**【方法】**以7-2-9为材料,设置对照、人工授粉、植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉4种授粉方式,在花期分别对其进行授粉,并分析各授粉方式对其坐果率、果实品质、激素含量及授粉成本的影响。**【结果】**不同授粉方式对7-2-9生长发育及授粉成本的影响具有显著差异。人工授粉与植物生长调节剂处理均显著提高坐果率,但植物生长调节剂处理会导致果柄变长、果实无种子,且授粉用时较长、成本较高;蜜蜂授粉显著降低果实的内在品质,且授粉成本相对较高;人工授粉在显著提高坐果率的同时,对果实品质的负面影响较小,且授粉成本较低。**【结论】**人工授粉综合表现最优,能有效提高坐果率、保障果实品质且授粉成本较低,适宜作为设施甜樱桃自花结实品种7-2-9的主要授粉方式。本研究明确了不同授粉方式的综合表现,为设施甜樱桃高效授粉技术的选择提供了理论依据,但不同授粉方式对激素含量的调控机制仍有待深入研究。

关键词:甜樱桃;授粉方式;自花结实;坐果率;果实品质;授粉成本

中图分类号:S662.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2125-12

Effect of pollination methods on fruit set, quality and pollination costs of a self-fertile sweet cherry variety under protected cultivation

Wu Chuanbao[1], Zhou Junman[1,2#], Zhang Xiaoming[1], Wang Jing[1], Feng Chen[1], Wang Wei[1], Zhang Kaichun[1], Wang Naiyu[1,3], Yuan Hui[2*], Duan Xuwei[1*]

([1]Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences/Key Laboratory of Biology and Genetic Improvement of Horticultural Crops (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100093, China; [2]College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China; [3]College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: **【**Objective**】** The effects of different pollination methods on the fruit set rate, fruit quality, endogenous hormone levels, and economic costs of the self-fertile sweet cherry cultivar 7-2-9 under greenhouse cultivation were investigated. Based on this premise, multiple pollination treatments, including manual pollination using a feather duster, plant growth regulator application, bee pollination, and a non-assisted control, were established to comparatively analyze the physiological and developmental responses during fruit set and growth. The study focused on evaluating differences in fruit set stability, fruit size, soluble solid content, coloration traits, and the dynamic changes of endogenous hormones such as auxins, cytokinins, and gibberellins under different pollination conditions. In addition, a comprehensive assessment of labor input, operational costs, and overall economic efficiency associated with

收稿日期:2026-05-06 **接受日期:**2026-06-19

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20240405,KJCX20260920)

作者简介:吴传宝,男,助理研究员,研究方向为甜樱桃花果调控。E-mail:cb19902010@163.com。#为共同第一作者。

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:dxwlly@163.com;E-mail:huiyuan@syau.edu.cn

each pollination strategy was conducted to reflect their practical applicability in greenhouse production systems. The results further revealed both commonalities and differences among treatments in terms of improving fertilization efficiency, regulating fruit developmental synchronization, and enhancing fruit commercial quality. This work provides a scientific and technical basis for optimizing pollination management strategies under protected sweet cherry cultivation and supports the large-scale promotion of self-fertile cultivars in controlled environments.【Methods】The 8-year-old self-fertile sweet cherry cultivar 7-2-9 (*Prunus avium* L.), grafted on Jingchun 2, was selected as the experimental material at the Tongzhou Cherry Base of the Forestry and Fruit Research Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences. The experiment was conducted in a solar greenhouse under controlled environmental conditions (15−22 ℃, 50%−70% RH), where four pollination treatments were established: natural self-pollination (CK), hand pollination (HP) with feather dusters, plant growth regulator treatment (PGRT) involving a multi-component solution including GA_3, 6-BA, and NAA, and bee pollination (BP) using *Apis mellifera ligustica*. To ensure experimental precision, isolating nets were employed for CK, HP, and PGRT until fruit set was stable. The self-fertility of 7-2-9 was first validated through pollen germination assays and scanning electron microscopy (SEM, Hitachi SU-8010) to assess pollen morphology and uniformity. During the reproductive stages, the fruit set rate was calculated by monitoring flower and fruit counts on representative primary branches. Upon fruit maturity, physical quality traits (weight, shape index, and firmness) were measured using analytical balances, calipers, and the Firmtech FT-7 tester, while nutritional components (anthocyanins, VC, total phenols, and flavonoids) were quantified via colorimetric and enzymatic assays. Furthermore, endogenous hormone levels (IAA, CTKs, GA, SA, and JA) were determined using an LC-MS/MS system (ExionLC™ AD UPLC coupled with QTRAP® 6500+), with samples stored at −80 ℃. Additionally, a standardized cost-benefit model was constructed to calculate pollination time, labor expenses (20 RMB/h), and material inputs per 666.7 m^2. Finally, all data were processed using SPSS 22.0 for one-way ANOVA and LSD tests, with graphical visualizations generated using GraphPad Prism 8.0.2.【Results】Significant differences were observed in the growth, development, fruit quality, and economic costs of greenhouse-cultivated 7-2-9 sweet cherries under different pollination treatments. Pollen assays and two-year field identification confirmed that 7-2-9 was a self-fertile cultivar with high pollen viability and a stable self-pollination fruit set rate (46.00%−58.00%). Compared with the control, both hand pollination (HP) and plant growth regulator treatment (PGRT) significantly increased the fruit set rate, whereas bee pollination (BP) showed a limited promoting effect. Morphologically, PGRT induced pedicel elongation and inhibited endocarp development, resulting in seedless fruits with smaller endocarps, whereas HP and BP maintained fruit traits similar to those of the control. Regarding internal quality, PGRT optimized the sugar-acid ratio by reducing acidity, whereas HP significantly enhanced nutritional quality, producing the highest concentrations of anthocyanins (0.68 $mg \cdot g^{-1}$) and ascorbic acid (0.34 $mg \cdot g^{-1}$). Physiological analysis revealed that PGRT and BP decreased IAA and tZ levels, whereas PGRT significantly increased the concentrations of cytokinins (BAP), gibberellins GA_1 and GA_3, and JA. Finally, economic evaluation showed that PGRT incurred the highest total cost because of intensive labor and chemical inputs, followed by BP due to hive expenses. Overall, hand pollination (HP) was the most efficient strategy, significantly improving fruit set and nutritional quality with relatively low economic costs, thereby providing a balanced approach for high-quality production under protected cultivation.【Conclusion】Different pollination methods had significant effects on the fruit set rate, fruit quality, and economic costs of the self-fertile sweet cherry 7-2-9 under protected cultivation. Both hand pollination (HP) and plant growth regulator treatment (PGRT)

significantly improved the fruit set rate compared with the control. However, although PGRT promoted fruit set, it altered fruit morphology and endogenous hormone balance, and was associated with high labor intensity and production costs. Bee pollination (BP) maintained fruit quality but involved relatively high hive expenses with limited improvement in fruit set. In contrast, hand pollination (HP) not only effectively increased the fruit set rate but also minimized adverse effects on fruit quality, showing the highest economic feasibility. Therefore, hand pollination is recommended as the primary pollination strategy for self-fertile sweet cherries under greenhouse conditions. This study clarifies the trade-offs among different pollination methods and provides a technical basis for efficient production. Further research is needed to explore the molecular mechanisms by which different pollination stimuli regulate endogenous hormone metabolism during fruit development.

Key words: Sweet cherry; Pollination method; Self-compatibility; Fruit set rate; Fruit quality; Pollination costs

甜樱桃（*Prunus avium* L.）色泽鲜艳、风味独特且营养丰富，在果品消费市场中占据重要地位[1-2]。随着设施农业技术的进步，甜樱桃设施栽培在我国北方迅速推广，成为产业提质增效的重要模式。目前，设施栽培面积已超过1.33万hm^2。设施栽培通过调控温度和物候进程，可有效减轻低温、倒春寒等不利气候的影响，实现甜樱桃的促早上市和错季生产，从而提高经济效益[3-4]。然而，设施环境相对封闭，自然授粉条件受限，生产上往往需要借助人工干预或利用访花昆虫进行授粉，进而导致授粉成本显著增加。同时，甜樱桃坐果率不稳定，其授粉效率易受环境条件和授粉方式的影响[5-6]。目前，设施栽培中多为自交不亲和性品种[7]，需通过异花授粉完成受精过程；而自花结实性品种则可简化栽培模式，实现单一品种建园，并能降低极端天气的不利影响[8-9]。此外，设施条件会限制访花昆虫的活动，进而影响花粉传播、授粉受精效率及授粉成本[10]。因此，优化设施环境下的授粉方式，提高坐果率并兼顾果实品质的提升，是当前设施甜樱桃生产与科研亟待解决的重要问题。

目前，果实品质已成为影响市场竞争力和消费者选择的重要因素，而授粉方式作为果实发育与成熟的关键栽培措施，对果实产量与品质表现具有显著影响。在设施栽培条件下，受环境封闭性和访花昆虫行动受限等因素制约，自然授粉效率往往较低，生产上常通过喷施植物生长调节剂或人工辅助授粉等方式加以弥补。植物生长调节剂处理虽能在一定程度上促进果实坐果，但可能会对果实内在品质产生不利影响，目前生产上尚未出台关于其使用范围和残留水平的标准规范。以蜜蜂为代表的生物授粉方式较符合绿色生产理念，有利于改善果实风味[11-12]。但在设施栽培条件下，其授粉效果易受温湿度、光照等因素影响，稳定性仍有待提升[13]。人工授粉则通过精确控制授粉时间与花粉量，可以明显提高授粉成功率及果实坐果率，在设施栽培中表现出较高的可靠性[14]，但对果实品质的影响仍缺乏系统研究。因此，系统比较不同授粉方式对甜樱桃坐果及果实品质的影响，对优化授粉策略、实现高品质安全生产具有重要意义。

目前，关于不同授粉方式对甜樱桃果实发育影响的研究，多侧重于坐果率或果实品质等单一指标，对二者共同影响的研究较少；同时，关于不同授粉方式在授粉用时、人工成本及授粉工具投入等方面的系统比较研究较少。本研究以设施栽培条件下甜樱桃自花结实性品种为试材，综合分析不同授粉方式对其坐果率、果实品质、激素含量及授粉成本的影响，旨在为设施条件下甜樱桃自花结实性品种的高效栽培与推广应用提供理论依据和技术支撑。

1　材料和方法

1.1　植物材料、授粉处理和采样

试验材料选用8年生的甜樱桃自花结实性品种7-2-9（S_4S_9），砧木为京春2号，父母本分别为艳阳（$S_3S_{4'}$）和彩虹（S_3S_9），定植于北京市农林科学院林业果树研究所通州樱桃基地日光温室内（株行距2 m×4 m）。温室内气温15~22 ℃，相对湿度50%~70%，晴天光照度300~600 μmol·m^{-2}·s^{-1}。樱桃树统一栽培管理，生长势良好。试验共设置4种授粉方式：对照

（CK）在自然条件下自花授粉；人工授粉（hand pollination，HP）于盛花期使用蘸有7-2-9花粉的鸡毛掸子人工授粉；植物生长调节剂处理（plant growth regulator treatment，PGRT）于盛花期第3、10、20天分别喷施各药剂按预设浓度复配制成的混合溶液，于晴朗无风天气采用手持喷雾器均匀喷施花簇，以花簇湿润但不滴液为宜，药剂包含：3%赤霉酸乳油、2%苄氨基嘌呤溶液、8%对氯苯氧乙酸钠可溶粉剂、5%萘乙酸水剂、0.1%三十烷醇微乳剂以及水溶性氨基酸[氨基酸有效成分含量（ρ，后同）＞100 g·L^{-1}]。蜜蜂授粉（bee pollination，BP）选用意蜂（*Apis mellifera ligustica*）授粉（1箱•666.7 m^{-2}），蜂箱规格为标准朗氏蜂箱，授粉时间为晴天07:00—09:00。为防止不同授粉方式间的相互干扰，除蜜蜂授粉外，其余3种授粉方式均在授粉后套网隔离，待坐果后解除隔离。每种授粉方式设置3个重复，每个重复随机选取生长势一致的一条主枝进行试验。在果实成熟期（花后70 d）采集果形端正且无病虫害的果实，测定外观品质指标后立即置于−80 ℃冰箱保存，用于后续指标测定。

1.2 自花结实性鉴定

分别对7-2-9和萨米特花粉进行花粉萌发试验及扫描电子显微镜（scanning electron microscopy，SEM）观察，测定两个品种的花粉萌发率和花粉整齐度，判断是否可以作为后续鉴定自花结实性的试验材料；同时，2024年和2025年分别设置7-2-9自花授粉和7-2-9×萨米特异花授粉处理，调查坐果率，以鉴定7-2-9的自花结实性。

1.3 坐果率调查

在开花期，统计设施甜樱桃自花结实品种7-2-9在不同授粉方式下主枝上的开花数量，并在生理落果期调查对应主枝上的坐果数量并记录数据，根据调查结果计算各处理的坐果率。每个处理随机选取3枝生长势一致的主枝作为生物学重复。坐果率计算公式如下：

坐果率/%=坐果数/开花数×100。

1.4 果实品质指标的测定

使用分析天平测定果实单果质量和内果皮质量[15]；利用游标卡尺测量果实纵径、横径、果柄长度以及内果皮纵径和横径，并计算果形指数（果实纵径/果实横径）；使用Firmtech FT-7软水果硬度无损检测仪（Firmtech Inc.，Wapato，WA，USA）测定果实硬度。采用pH示差法测定花色苷含量[16]；采用酶法测定还原型抗坏血酸含量[17-18]；采用福林酚法测定总酚含量[19]；采用铝盐比色法测定总黄酮含量[20]。每种授粉方式设置3次生物学重复，每个重复随机选取30个果实用于统计分析。

1.5 果实激素含量的测定

将样品在液氮中冷冻并研磨成粉末后置于−80 ℃保存。取50 mg样品加入1 mL甲醇/水/甲酸（15∶4∶1，*V*/*V*/*V*）提取液，并加入10 μL内标溶液（100 ng·mL^{-1}）。样品充分振荡10 min后，12 000 r·min^{-1}、4 ℃离心5 min。取上清液吹干后，以100 μL 80%甲醇复溶并经0.22 μm滤膜过滤，用于LC-MS/MS分析[21-22]。检测的植物激素包括：生长素（auxin，IAA）、细胞分裂素（cytokinins，CTKs）、赤霉素（gibberellin，GA）、水杨酸（salicylic acid，SA）及茉莉酸（jasmonic acid，JA）。所有指标均进行3次生物学重复用于统计分析，使用ExionLC™ AD UPLC联用QTRAP® 6500+质谱仪进行定量分析。使用Waters ACQUITY UPLC HSS T3 C18色谱柱（100 mm × 2.1 mm，1.8 μm）进行分离，流动相为含0.04%醋酸的水（A）和乙腈（B），按照标准梯度程序进行洗脱。流速设置为0.35 mL·min^{-1}，柱温40 ℃，上样量2 μL[23-25]。质谱在ESI正、负离子模式下运行，并采用定时多反应监测（scheduled MRM）实现多激素的同时定量。数据采集与定量分析分别使用Analyst 1.6.3与MultiQuant 3.0.3软件完成[26-28]。

1.6 授粉成本调查分析

以每666.7 m^{2}为计算单位，分别调查不同授粉方式的授粉用时、人工授粉成本、授粉工具成本及总成本，每种授粉方式均设置3次重复。授粉用时指完成666.7 m^{2}授粉作业所需的总用时（单位为h·666.7 m^{-2}）；人工授粉成本参照北京地区田间用工标准20元•h^{-1}，计算公式为：人工授粉成本=授粉用时×20元•h^{-1}；授粉工具成本为各授粉方式的专项投入，其中人工授粉为鸡毛掸子费用，植物生长调节剂处理成本为药剂及配制费用，蜜蜂授粉成本为蜂箱租赁与养护费用，计算公式为：总成本=人工授粉成本+授粉工具成本。

1.7 统计分析

所有测量均设置3次重复，并计算平均值及标准误差。使用Microsoft Excel 2021软件进行基础数据处理及部分表格绘制；利用Adobe Photoshop

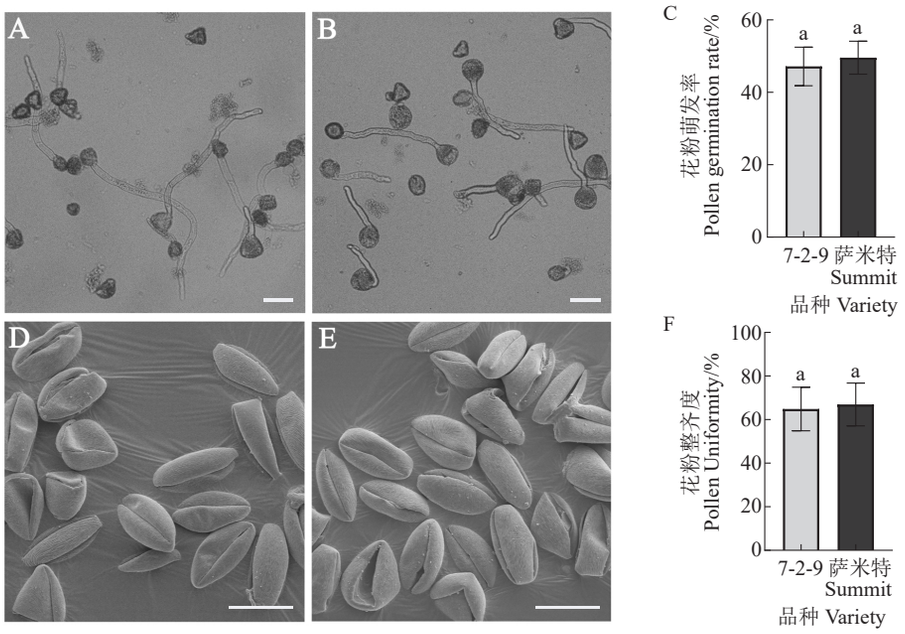
CC 2019软件进行图片处理；利用SPSS 22.0软件进行数据分析；采用单因素方差分析，并通过0.05显著性水平下的最小显著差异（LSD）检验比较处理间均值差异；利用GraphPad Prism 8.0.2软件绘制柱状图。

2　结果与分析

2.1　7-2-9自花结实性鉴定

经花粉离体萌发试验及扫描电子显微镜观察发现，7-2-9与萨米特花粉均能正常萌发，花粉管生长均匀，且花粉粒形态完整、椭圆饱满，表面结构清晰，未见明显畸形或塌陷；两者花粉萌发率均在45%以上，花粉整齐度均在60%以上，且二者无显著差异，表现出较高的花粉活力，可作为后续自花结实性鉴定材料（图1）。

随后，对7-2-9进行连续2年的自花结实性鉴定。结果（表1）表明，在自花授粉（7-2-9×7-2-9）条件下，2024年和2025年坐果率分别为58.00%和46.00%；在异花授粉（7-2-9×萨米特）条件下，2年的坐果率分别为32.00%和24.00%。综上所述，7-2-9在自花授粉条件下坐果率较高，且2年坐果率均高于20%，表明其属于自花结实性品种。



A. 7-2-9 花粉萌发形态；B. 萨米特花粉萌发形态；C. 花粉萌发率；D. 7-2-9 花粉扫描电镜；E. 萨米特花粉扫描电镜；F. 花粉整齐度。标尺=50 μm。不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

A. Pollen germination morphology of 7-2-9; B. Pollen germination morphology of Summit; C. Pollen germination rate; D. Pollen scanning electron microscopy of 7-2-9; E. Pollen scanning electron microscopy of Summit; F. Pollen uniformity. Bar = 50 μm. Different small letters indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same below.

图1　7-2-9与萨米特花粉活力、萌发形态及整齐度

Fig. 1　Pollen viability, germination morphology and uniformity of 7-2-9 and Summit

表1　7-2-9自花结实性鉴定

Table 1　Identification of self-compatibility in 7-2-9

授粉组合 Pollination combination	年份 Year	授粉花数 Number of flowers pollinated	坐果数 Number of fruit setting	坐果率 Fruit setting rate/%
7-2-9×7-2-9	2024	50	29	58.00
	2025	50	23	46.00
7-2-9×萨米特 7-2-9×Summit	2024	50	16	32.00
	2025	50	12	24.00

2.2　不同授粉方式对设施甜樱桃7-2-9坐果率的影响

不同授粉方式对设施甜樱桃7-2-9坐果率的影响存在显著差异（图2）。相较于对照，人工授粉（HP）和植物生长调节剂处理（PGRT）均能显著提高坐果率，而蜜蜂授粉（BP）的促进作用较弱。2024年，人工授粉、植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉坐果率分别为37.92%、36.01%和16.05%，较对照分别提

A~D. 不同授粉方式处理；E~H. 不同授粉方式的坐果情况；A，E. 对照（CK）；B，F. 人工授粉（HP）；C，G. 植物生长调节剂处理（PGRT）；D，H. 蜜蜂授粉（BP）；I. 2024 年坐果率；J. 2025 年坐果率。标尺= 5 cm。

A-D. Different pollination methods; E-H. Fruit setting status of different pollination methods; A, E. CK; B, F. Hand pollination（HP）; C, G. Plant growth regulator treatment（PGRT）; D, H. Bee pollination（BP）; I. Fruit setting rate of 2024; J. Fruit setting rate of 2025. Bar = 5 cm.

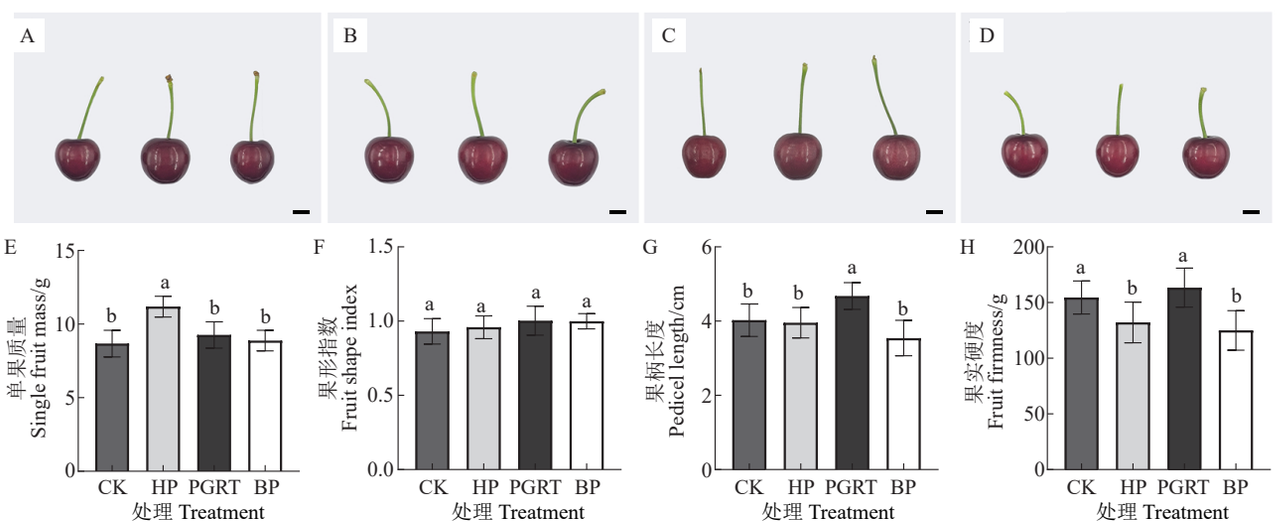
图 2 不同授粉方式对 7-2-9 坐果率的影响

Fig. 2 Effects of different pollination methods on fruit setting rate of 7-2-9

高 23.67%、21.76%和 1.80%；2025 年三者坐果率分别为 42.77%、33.72%和 23.47%，较对照分别显著提高 26.10%、17.05%和 6.80%。综合分析，人工授粉与植物生长调节剂处理在提高 7-2-9 坐果率方面效果显著，且在不同年份间表现较为稳定，而蜜蜂授粉的促进作用在不同年份间表现不一致。

2.3 不同授粉方式对设施甜樱桃 7-2-9 果实品质的影响

通过测定不同授粉方式下设施甜樱桃 7-2-9 果实的外观品质，分析其对果实性状的影响。结果（图 3）表明，各处理间的果形指数无显著差异；人工授粉显著提高了单果质量，而植物生长调节剂处理和蜜



A-D. 不同授粉方式的果实表型（A. 对照；B. 人工授粉；C. 植物生长调节剂处理；D. 蜜蜂授粉）；E. 单果质量；F. 果形指数；G. 果柄长度；H. 果实硬度。标尺= 1 cm。

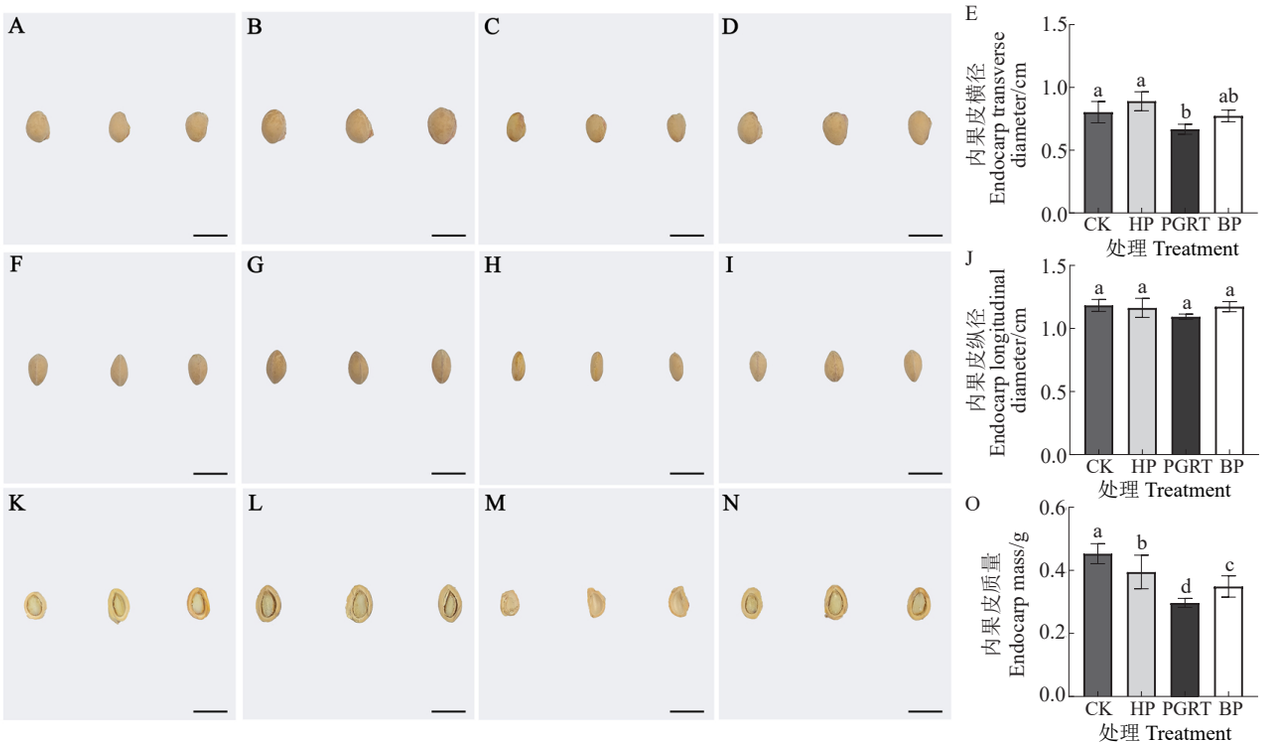
A-D. Phenotypes of fruit with different pollination methods (A. CK; B. Hand pollination; C. Plant growth regulator treatment; D. Bee pollination); E. Single fruit mass; F. Fruit shape index; G. Pedicel length; H. Fruit firmness. Bar = 1 cm.

图 3 不同授粉方式对 7-2-9 外观品质的影响

Fig. 3 Effects of different pollination methods on the appearance quality of 7-2-9

蜂授粉与对照无显著差异；人工授粉和蜜蜂授粉显著降低了果实硬度，而植物生长调节剂处理与对照无显著差异。与对照相比，植物生长调节剂处理可显著增加果柄长度，较对照增加0.65 cm；而人工授粉（HP）和蜜蜂授粉（BP）处理下果柄长度与对照无显著差异，表明植物生长调节剂处理在一定程度上改变了7-2-9果实的外观形态。

对4种授粉方式处理下的设施甜樱桃7-2-9内果皮形态进行观察，结果（图4）表明，不同授粉方式对内果皮发育存在明显差异。其中，植物生长调节剂处理下的内果皮明显小于其他授粉方式，形态较小且发育程度较低，横径、纵径和质量分别为0.67 cm、1.09 cm和0.30 g，较对照（0.80 cm、1.18 cm和0.45 g）分别减少0.13 cm、0.09 cm和0.15 g，且内果皮中未发现种子。而人工授粉和蜜蜂授粉处理下，内果皮形态与对照基本一致，差异较小，表明植物生长调节剂处理在一定程度上抑制了7-2-9内果皮的正常发育，改变了其形态特征。



A~D. 不同授粉方式的内果皮正面图；E. 内果皮横径；F~I. 不同授粉方式的内果皮侧面图；J. 内果皮纵径；K~N. 不同授粉方式的内果皮剖面图。O. 内果皮质量。标尺= 1.5 cm。

A-D. Front view of endocarps with different pollination methods; E. Endocarp transverse diameter; F-I. Side view of endocarps with different pollination methods; J. Endocarp longitudinal diameter; K-N. Sectional view of endocarps with different pollination methods; O. Endocarp mass. Bar = 1.5 cm.

图4　不同授粉方式对7-2-9内果皮的影响

Fig. 4　Effects of different pollination methods on the endocarps of 7-2-9

此外，对不同授粉方式下的设施甜樱桃7-2-9果实内在品质进行了分析。结果（表2）表明，不同授粉方式对果实内在品质的影响存在显著差异。与对照相比，人工授粉和蜜蜂授粉处理下可溶性固形物及可溶性糖含量显著降低，而植物生长调节剂处理与对照无显著差异。在总酸含量方面，蜜蜂授粉处理最高（6.33 mg·g^{-1}），植物生长调节剂处理最低（4.66 mg·g^{-1}）。受糖、酸含量共同影响，植物生长调节剂处理下果实固酸比和糖酸比整体较高，人工授粉与蜜蜂授粉处理则相对较低。综上所述，植物生长调节剂处理在降低酸含量、提高糖酸比方面表现较优。

对设施甜樱桃7-2-9成熟期果实营养品质分析的结果表明，不同授粉方式对其营养品质具有显著影响（表3）。其中，人工授粉下果实花色苷含量（w，后同）（0.68 mg·g^{-1}）和抗坏血酸含量（0.34 mg·g^{-1}）最

表 2 不同授粉方式对 7-2-9 果实内在品质的影响

Table 2 Effects of different pollination methods on the fruit internal quality of 7-2-9

授粉方式 Pollination method	*w*（可溶性固形物）Soluble solids content/%	*w*（可溶性糖）Soluble sugar content/（mg·g^{-1}）	*w*（总酸）Total acid content/（mg·g^{-1}）	固酸比 Solid-to-acid ratio	糖酸比 Sugar-to-acid ratio
CK	20.33±0.79 a	128.59±8.57 a	5.55±0.36 b	3.68±0.28 ab	23.20±0.88 b
人工授粉 Hand pollination	17.90±0.57 bc	91.62±5.67 b	5.30±0.28 bc	3.39±0.26 b	17.29±1.03 c
植物生长调节剂处理 Plant growth regulator treatment	19.51±0.07 ab	126.72±10.57 a	4.66±0.13 c	4.19±0.14 a	27.21±2.00 a
蜜蜂授粉 Bee pollination	17.24±0.21 c	91.28±9.43 b	6.33±0.40 a	2.73±0.19 c	14.38±0.57 d

表 3 不同授粉方式对 7-2-9 果实营养品质的影响

Table 3 Effects of different pollination methods on the fruit nutritional quality of 7-2-9 （mg·g^{-1}）

授粉方式 Pollination method	*w*（花色苷）Anthocyanins content	*w*（抗坏血酸）Ascorbic acid content	*w*（总酚）Total phenolics content	*w*（总黄酮）Total flavonoids content
CK	0.54±0.03 b	0.31±0.01 b	1.78±0.04 a	0.76±0.02 a
人工授粉 Hand pollination	0.68±0.03 a	0.34±0.01 a	1.73±0.11 a	0.78±0.03 a
植物生长调节剂处理 Plant growth regulator treatment	0.60±0.04 ab	0.33±0.01 ab	1.91±0.12 a	0.76±0.04 a
蜜蜂授粉 Bee pollination	0.63±0.05 ab	0.33±0.01 ab	1.85±0.11 a	0.76±0.03 a

高，较对照分别显著提高25.93%和9.68%；植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉虽高于对照，但差异均未达显著水平。同时，与对照相比，3种授粉方式的果实总酚和总黄酮含量均无显著差异。

2.4 不同授粉方式对设施甜樱桃7-2-9果实激素含量的影响

不同授粉方式对设施甜樱桃 7-2-9 果实激素含量均存在显著差异（图5）。在生长素（IAA）含量方面，与对照相比，植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉处理下IAA含量显著降低，而人工授粉（29.78 ng·g^{-1}）与对照（30.31 ng·g^{-1}）无显著差异。在细胞分裂素含量方面，植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉下反式玉米素（tZ）含量显著降低，而苄氨基嘌呤类（BAP、BAPR、BAP9G）及拓扑林类（pTR）含量均以植物生

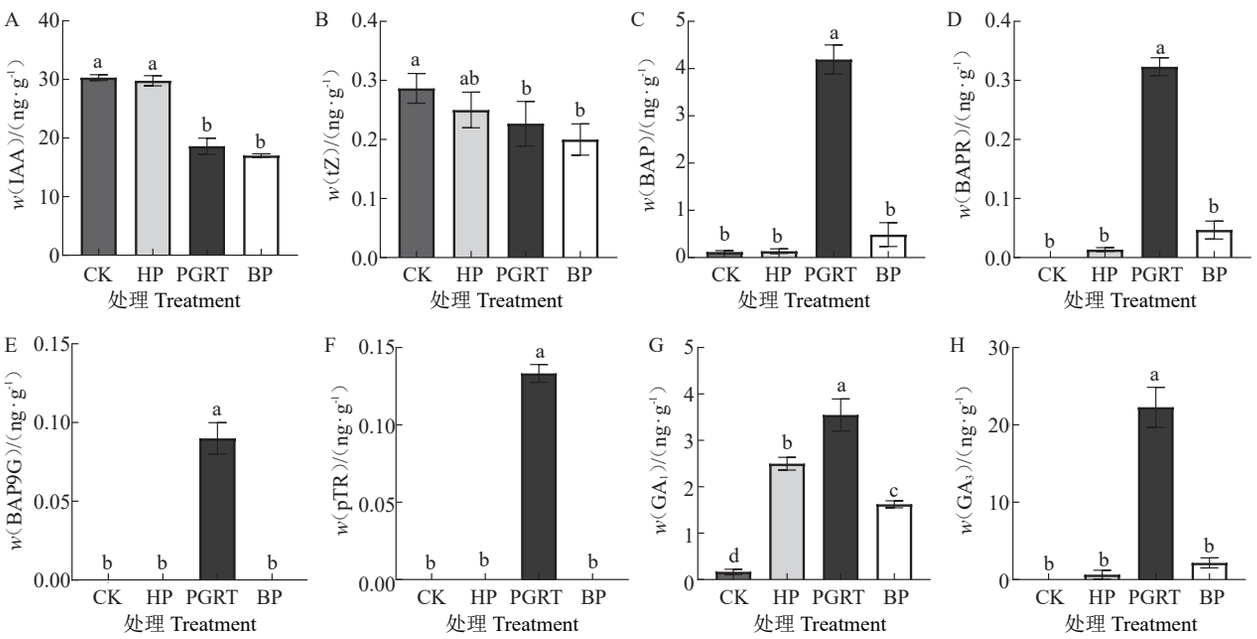


图 5 不同授粉方式对 7-2-9 果实激素含量的影响

Fig. 5 Effects of different pollination methods on the fruit hormone content of 7-2-9

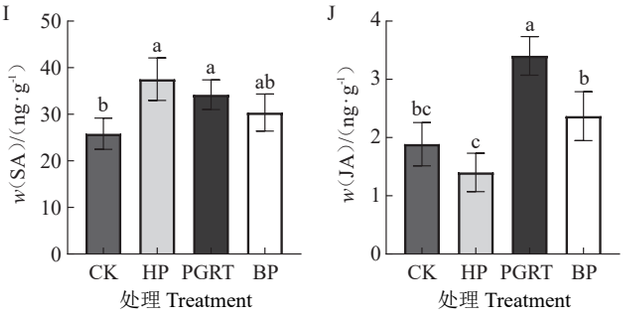


图5 （续） Fig. 5 (Continued)

长调节剂处理最高，且显著高于其他3种处理。在赤霉素含量方面，与对照相比，各授粉方式下GA_1含量均显著提高，其中植物生长调节剂处理最高，为3.55 ng·g^{-1}；GA_3含量以植物生长调节剂处理最高，为22.28 ng·g^{-1}。水杨酸（SA）含量在人工授粉和植物生长调节剂处理下显著高于对照，而蜜蜂授粉处理与对照无显著差异。此外，植物生长调节剂处理下茉莉酸（JA）含量（3.40 ng·g^{-1}）显著高于其他处理。

2.5　不同授粉方式授粉用时及授粉成本分析

对设施甜樱桃不同授粉方式的授粉成本进行了统计分析，表明不同授粉方式在授粉用时、人工成本、授粉工具成本及总成本方面均存在显著差异（表4）。其中，植物生长调节剂处理人工成本最高，每666.7 m^{2}为508.07元；人工授粉次之，对照和蜜蜂授粉无需人工授粉，人工成本均为0。授粉工具成本以蜜蜂授粉最高，每666.7 m^{2}为358.33元。总成本以植物生长调节剂处理最高，其次为蜜蜂授粉和人工授粉。总体可知，不同授粉方式在劳动投入和经济成本方面差异明显，其中人工授粉具有较高的经济效益。

表4　不同授粉方式授粉成本分析

Table 4　Analysis of pollination costs under different pollination methods

授粉方式 Pollination method	授粉用时 Pollination time/（h·666.7 m^{-2}）	人工成本 Labor cost/（Yuan·666.7 m^{-2}）	授粉工具成本 Pollination tool cost/（Yuan·666.7 m^{-2}）	总成本 Total cost/（Yuan·666.7 m^{-2}）
CK	0 c	0 c	0 d	0 d
人工授粉 Hand pollination	11.53±0.94 b	230.60±18.78 b	36.81±1.71 c	267.41±17.98 c
植物生长调节剂处理 Plant growth regulator treatment	25.40±1.69 a	508.07±33.88 a	141.33±2.87 b	649.40±35.20 a
蜜蜂授粉 Bee pollination	0 c	0 c	358.33±6.24 a	358.33±6.24 b

3　讨　论

3.1　不同授粉方式对设施甜樱桃坐果率的影响

在设施栽培条件下，自然授粉受限是影响甜樱桃坐果的关键因素[29]。本研究中，人工授粉与植物生长调节剂处理均显著提高坐果率，与前人在露地及设施栽培条件下的研究结果一致，即充足的花粉供应能够提高有效受精率并促进幼果发育[30-31]。植物生长调节剂处理同样提高了坐果率，可能与外源激素诱导单性结实有关[32]。与露地栽培条件下蜜蜂授粉能够显著提高坐果率的报道不同[33]，本研究中2024年蜜蜂授粉效果未达到显著水平，可能与设施环境中温度、湿度及光照条件改变了蜜蜂访花活动有关[34]。

3.2　不同授粉方式对设施甜樱桃果实品质的影响

果实品质形成与授粉受精过程密切相关。已有研究表明，充分授粉不仅能提高坐果率，还可促进果实膨大和营养物质积累，从而改善果实品质[12]。本研究中，人工授粉处理获得较高单果质量和抗坏血酸含量，与上述研究结果基本一致，表明正常受精及种子形成可能通过增强同化物运输能力和代谢活性促进果实品质提升[35]。植物生长调节剂处理诱导形成单性结实果实，其内果皮缩小甚至无种子的现象与赤霉素处理樱桃的研究结果一致[36-37]。由于缺乏种子发育过程中产生的激素信号，单性结实果实在形态建成及代谢调控方面通常与正常果实存在明显

差异[38]。本研究中，植物生长调节剂处理显著提高了糖酸比，表明喷施激素可能通过调控糖分积累和有机酸代谢改善果实风味。蜜蜂授粉处理提高花色苷含量的现象则提示授粉过程除影响受精外，还可能通过调节相关信号转导途径影响次生代谢产物积累[39]。

3.3 不同授粉方式对设施甜樱桃果实激素含量的影响

果实发育受多种内源激素协同调控，其中生长素、细胞分裂素和赤霉素被认为是果实坐果与膨大发育的重要调节因子[40]。本研究中，人工授粉处理下果实内IAA和tZ含量相对稳定，表明正常受精过程能够维持果实发育所需的激素平衡。而植物生长调节剂处理和蜜蜂授粉处理下IAA和tZ含量显著降低，可能与受精程度及激素来源差异对激素代谢产生影响有关。植物生长调节剂处理显著提高GA_3及苄氨基嘌呤类物质含量，这与外源激素直接参与果实发育调控的作用机制相吻合。同时，pTR和JA含量增加表明外源激素处理可能诱导果实产生一定的胁迫响应或防御调节作用[41]。此外，各授粉处理均显著提高了GA_1含量，进一步表明赤霉素信号在甜樱桃果实发育启动过程中具有重要作用。

3.4 不同授粉方式对设施甜樱桃果实授粉成本的影响

授粉措施的应用价值不仅取决于生物学效果，还受到劳动投入和经济成本的影响。植物生长调节剂处理虽能提高坐果率，但需多次均匀喷施，增加了人工投入和管理成本。蜜蜂授粉具有省工优势，但蜂群购置、运输及管理费用较高，同时授粉效果易受设施环境影响[42]。相比之下，人工授粉通过定向补充花粉能够兼顾授粉效果与成本控制，其投入产出效率较高[43]。从设施甜樱桃生产实践角度可知，人工授粉在提高坐果稳定性和控制生产成本之间表现出较好的综合优势，具有较大的推广应用潜力。

4 结 论

不同授粉方式对设施甜樱桃自花结实性品种7-2-9的坐果率、果实品质、激素含量和授粉成本影响显著。人工授粉和植物生长调节剂处理显著提高坐果率，但植物生长调节剂处理在一定程度上改变果形及果实内激素含量，且授粉成本较高。人工授粉在显著提高坐果率的同时，对果实品质影响较小，且成本较低；蜜蜂授粉对果实品质提升效果不显著，且授粉成本较高。综合分析比较，人工授粉更适宜作为设施甜樱桃自花结实品种的主要授粉方式。

参考文献 References：

[1] 周君蔓，段续伟，张开春，张晓明，闫国华，周宇，王晶，冯琛，王未，王乃玉，袁晖，吴传宝 . 17 份樱桃种质资源花粉扫描电镜观察[J]. 果树学报，2025，42(6)：1181-1189.
Zhou Junman，Duan Xuwei，Zhang Kaichun，Zhang Xiaoming，Yan Guohua，Zhou Yu，Wang Jing，Feng Chen，Wang Wei，Wang Naiyu，Yuan Hui，Wu Chuanbao. SEM observation of pollen in 17 cherry germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science，2025，42(6)：1181-1189.

[2] Feng C，Guo Q Q，Wu C B，Zhang X M，Wang J，Song G Q，Yan G H，Zhou Y，Wang W，Zhang K C，Duan X W. Effect of bagging treatment on fruit anthocyanin biosynthesis in sweet cherry[J]. Agriculture Communications，2025，3(4)：100103.

[3] Blanco V，Zoffoli J P，Ayala M. High tunnel cultivation of sweet cherry (*Prunus avium* L.)：Physiological and production variables[J]. Scientia Horticulturae，2019，251：108-117.

[4] Salvadores Y，Bastías R M. Environmental factors and physiological responses of sweet cherry production under protective cover systems：A review[J]. Chilean Journal of Agricultural Research，2023，83(4)：484-498.

[5] Eeraerts M，Vanderhaegen R，Smagghe G，Meeus I. Pollination efficiency and foraging behaviour of honey bees and non-*Apis* bees to sweet cherry[J]. Agricultural and Forest Entomology，2020，22(1)：75-82.

[6] Zhang H，Han C，Breeze T D，Li M D，Mashilingi S K，Hua J，Zhang W B，Zhang X B，Zhang S W，An J D. Bumblebee pollination enhances yield and flavor of tomato in Gobi Desert greenhouses[J]. Agriculture，2022，12(6)：795.

[7] Feng C，Wu C B，Wang J，Wang W，Yan G H，Zhou Y，Zhang K C，Zhang X M，Duan X W. Identification of self-incompatibility related genes in sweet cherry based on transcriptomic analysis[J]. Biology，2025，14(9)：1125.

[8] Quero-García J，Lezzoni A，Puławska J，Lang G. Cherries：Botany，production and uses[M]. Wallingford：CABI，2017.

[9] Athira K S，Pradeepkumar T. Pollination strategies for advancing protected cultivation of vegetable crops[J]. Journal of Advances in Biology & Biotechnology，2025，28(2)：235-252.

[10] Hedhly A，Hormaza J I，Herrero M. Effect of temperature on pollen tube kinetics and dynamics in sweet cherry，*Prunus avium* (Rosaceae)[J]. American Journal of Botany，2004，91(4)：558-564.

[11] Osterman J，Benton F，Hellström S，Luderer-Pflimpfl M，Pöpel-Eisenbrandt A K，Wild B S，Theodorou P，Ulbricht C，Paxton R J. Mason bees and honey bees synergistically enhance fruit set in sweet cherry orchards[J]. Ecology and Evolution，2023，13(7)：e10289.

[12] Queirós F，Carvalho R，de Sousa R，Sánchez C. Insect pollination improves fruit set，yield and fruit quality of commercial sweet cherry[J]. Acta Horticulturae，2024，1408：267-274.

[13] García C B，Díaz-Siefer P，Smith-Ramírez C，Montero-Silva F，Martínez-Harms J，Murúa M，Celis-Diez J L. Synergistic effect of honeybees and wild floral visitors in promoting sweet cherry fruit set in central Chile[J]. Biological Research，2025，58(1)：39.

[14] Sánchez-Contreras J，Palma M，Yuri J A. Assisted pollination by means of an electrostatic system in the production and quality of sweet cherries cv. ‘Regina’[J]. Folia Horticulturae，2025，37(2)：175-180.

[15] Luan A P，Zhang W，Yang M Z，Zhong Z Q，Wu J，He Y H，He J H. Unveiling the molecular mechanism involving anthocyanins in pineapple peel discoloration during fruit maturation[J]. Food Chemistry，2023，412：135482.

[16] Ihara H，Shino Y，Aoki Y，Hashizume N，Minegishi N. A simple and rapid method for the routine assay of total ascorbic acid in serum and plasma using ascorbate oxidase and o-phenylenediamine[J]. Journal of Nutritional Science and Vitaminology，2000，46(6)：321-324.

[17] Vermeir S，Hertog M L A T M，Schenk A，Beullens K，Nicolaï B M，Lammertyn J. Evaluation and optimization of high-throughput enzymatic assays for fast *L*-ascorbic acid quantification in fruit and vegetables[J]. Analytica Chimica Acta，2008，618(1)：94-101.

[18] Sun X S，Wang Z，Li X，Du S H，Lin D M，Shao Y X. Effects of *Yucca schidigera* extract on serum biochemical parameters，humoral immune response，and intestinal health in young pigeons[J]. Frontiers in Veterinary Science，2022，9：1077555.

[19] Hu F G，Bi X F，Fu X F，Li Y N，Li G P，Li Y Q，Liu D X，Yang Y，Shi R，Dong W J. Comparative metabolome profiles and antioxidant potential of four *Coffea arabica* L. varieties differing in fruit color[J]. Diversity，2023，15(6)：724.

[20] Floková K，Tarkowská D，Miersch O，Strnad M，Wasternack C，Novák O. UHPLC-MS/MS based target profiling of stress-induced phytohormones[J]. Phytochemistry，2014，105：147-157.

[21] Li Y，Zhou C X，Yan X J，Zhang J R，Xu J L. Simultaneous analysis of ten phytohormones in *Sargassum horneri* by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry[J]. Journal of Separation Science，2016，39(10)：1804-1813.

[22] Cai B D，Zhu J X，Gao Q，Luo D，Yuan B F，Feng Y Q. Rapid and high-throughput determination of endogenous cytokinins in *Oryza* sativa by bare Fe_3O_4 nanoparticles-based magnetic solid-phase extraction[J]. Journal of Chromatography A，2014，1340：146-150.

[23] Niu Q F，Zong Y，Qian M J，Yang F X，Teng Y W. Simultaneous quantitative determination of major plant hormones in pear flowers and fruit by UPLC/ESI-MS/MS[J]. Anal Methods，2014，6(6)：1766-1773.

[24] Xiao H M，Cai W J，Ye T T，Ding J，Feng Y Q. Spatio-temporal profiling of abscisic acid，indoleacetic acid and jasmonic acid in single rice seed during seed germination[J]. Analytica Chimica Acta，2018，1031：119-127.

[25] Pan X Q，Welti R，Wang X M. Quantitative analysis of major plant hormones in crude plant extracts by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry[J]. Nature Protocols，2010，5(6)：986-992.

[26] Šimura J，Antoniadi I，Široká J，Tarkowská D，Strnad M，Ljung K，Novák O. Plant hormonomics：Multiple phytohormone profiling by targeted metabolomics[J]. Plant Physiology，2018，177(2)：476-489.

[27] Cui K Y，Lin Y Y，Zhou X，Li S C，Liu H，Zeng F，Zhu F，Ouyang G F，Zeng Z X. Comparison of sample pretreatment methods for the determination of multiple phytohormones in plant samples by liquid chromatography-electrospray ionization-tandem mass spectrometry[J]. Microchemical Journal，2015，121：25-31.

[28] Ali Sabir I，Liu X J，Jiu S T，Whiting M，Zhang C X. Plant growth regulators modify fruit set，fruit quality，and return bloom in sweet cherry[J]. HortScience，2021，56(8)：922-931.

[29] 高扬 . 甜樱桃设施栽培的温湿度管理标准及调控技术[J]. 农业工程技术，2022，42(29)：40-41.
Gao Yang. Standard and regulation techniques of temperature and humidity management in protected cultivation of sweet cherry[J]. Agricultural Engineering Technology，2022，42(29)：40-41.

[30] 李晓，张绍铃，吴俊，吴华清 . 樱桃品种 *S* 基因型及自交不亲和性分子机制研究进展[J]. 生物技术通报，2006，22(6)：28-33.
Li Xiao，Zhang Shaoling，Wu Jun，Wu Huaqing. Studies on *S* genotypes and molecular mechanism of self-incompatibility in cherry[J]. Biotechnology Bulletin，2006，22(6)：28-33.

[31] Hedhly A，Hormaza J I，Herrero M. Global warming and sexual plant reproduction[J]. Trends in Plant Science，2009，14(1)：30-36.

[32] Vignati E，Lipska M，Dunwell J M，Caccamo M，Simkin A J. Fruit development in sweet cherry[J]. Plants，2022，11(12)：1531.

[33] 李丰国，林洪荣，江桂玉，崔学双 . 设施甜樱桃棚内环境调控技术要点[J]. 西北园艺(果树专刊)，2007(10)：13-14.
Li Fengguo，Lin Hongrong，Jiang Guiyu，Cui Xueshuang. Key techniques for environmental regulation in greenhouse sweet cherry production[J]. Northwest Horticulture，2007(10)：13-14.

[34] Laterza I，Ragone G，Grossi G，Cappellari A，Agostinacchio M F，Seclì G A，Bari G，Porro R，Addante R，Cornara D，De Lillo E，Tamburini G. Agricultural intensification at local and landscape scales impacts sweet cherry production through altered pollination services[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2025，386：109586.

[35] 李佳益，龚无缺，杨静慧，刘艳军，梁发辉，黄俊轩 . 温室中 7 个樱桃品种果实内在品质比较[J]. 西南大学学报(自然科学版)，2018，40(7)：25-30.
Li Jiayi，Gong Wuque，Yang Jinghui，Liu Yanjun，Liang Fahui，Huang Junxuan. Comparative analysis of fruit internal quality of seven cherry varieties in a solar greenhouse[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition)，2018，40(7)：25-30.

[36] 李慧，沙马石体，胡军超，袁明 . 植物生长调节剂诱导无籽果实研究进展[J]. 农业生物技术学报，2019，27(7)：1291-1300.
Li Hui，Sha Mashiti，Hu Junchao，Yuan Ming. Research advance in seedless fruits inducted by plant growth regulators[J]. Journal of Agricultural Biotechnology，2019，27(7)：1291-1300.

[37] Vignati E，Caccamo M，Dunwell J M，Simkin A J. Morphological changes to fruit development induced by GA_3 application in sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Plants，2024，13(15)：2052.

[38] 郑奇志，秦泽冠，王磊，张才喜，王世平，许文平 . 植物生长调节剂对甜樱桃坐果率及果实品质的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版)，2019，37(6)：213-220.
Zheng Qizhi，Qin Zeguan，Wang Lei，Zhang Caixi，Wang Shiping，Xu Wenping. Effects of plant growth regulators on fruit set and fruit quality of sweet cherries[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University (Agricultural Science)，2019，37(6)：213-220.

[39] Wietzke A，Westphal C，Gras P，Kraft M，Pfohl K，Karlovsky P，Pawelzik E，Tscharntke T，Smit I. Insect pollination as a key factor for strawberry physiology and marketable fruit quality[J]. Agriculture，Ecosystems & Environment，2018，258：197-204.

[40] Wu W Q，Ma W H，Li L X，Lei J，Song H L，Zhi H Y，Shen J S. Effect of pollination methods on fruit development in greenhouse watermelon：Physiological and molecular perspectives[J]. Agriculture，2025，15(21)：2291.

[41] Wang W，Dai Z R，Wang P，Zhang X M，Wang J，Wu C B，Feng C，Yan G H，Zhang K C，Zhou Y，Zhou L H，Duan X W. Jasmonate ZIM- domain proteins regulate fruit ripening and quality traits：Mechanisms and advances[J]. Food Quality and Safety，2025，9：fyaf022.

[42] Eeraerts M，Borremans L，Smagghe G，Meeus I. A growers' perspective on crop pollination and measures to manage the pollination service of wild pollinators in sweet cherry cultivation[J]. Insects，2020，11(6)：372.

[43] 陈永朋，罗慧，赵芝俊 . 不同授粉方式下樱桃成本收益分析：以山西省临猗县为例[J]. 中国蜂业，2021，72(4)：49-52.
Chen Yongpeng，Luo Hui，Zhao Zhijun. Cost-benefit analysis of cherry under different pollination methods：A case study of Linyi county，Shanxi province[J]. Apiculture of China，2021，72(4)：49-52.