

授粉方式对吉优蜜 29 号甜瓜果实品质和相关酶活性的影响

张惠明^{1,2}, 张汉英^{1,2}, 李洪立³, 王绍春⁴, 杨福孙^{1*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 海南昌江蜜瓜科技小院, 海南昌江 572732; 3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101; 4. 海南王品农业科技开发有限公司, 海南海口 570000

摘 要: 甜瓜为海南省重要经济作物, 授粉以激素授粉为主, 易造成果实畸形并伴有不同程度风味和品质的下降, 影响商品率和种植效益。为此, 本研究以吉优蜜 29 号甜瓜为试验材料, 采用不同人工花粉组合授粉方式, 以激素授粉为对照, 测定植株与果实的生长状况、果实内在品质及蔗糖积累关键酶活性, 分析授粉对植株与果实生长的影响。结果表明: (1) 不同授粉方式处理对甜瓜植株的株高、茎粗、生物量、果实质量、硬度产生很大影响, T_1 处理的甜瓜植株茎粗、生物量、果实质量显著高于其他处理。CK 处理的甜瓜植株株高、果实硬度显著高于其他处理。(2) 不同授粉方式处理对甜瓜果实内在品质各指标间均存在显著差异, 以 T_1 处理效果最佳, 其可溶性固形物、可溶性糖、蔗糖、果糖、葡萄糖含量均显著高于 CK 处理。(3) T_4 处理的蔗糖合成酶 (SS) 活性在果实生长发育过程中相对较高; T_1 处理的蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 活性在果实生长发育过程中保持较高水平, T_1 、 T_2 处理的果实酸性转化酶活性在授粉后 40 d 达到最高, 分别为 93.69、88.54 U/g。因此, 人工花粉授粉后甜瓜植株的生长状况与果实品质以 T_1 (花粉活力强 × 柱头可授性高) 处理组效果最佳。

关键词: 授粉; 甜瓜; 品质; 蔗糖合成酶 (SS); 蔗糖磷酸合成酶 (SPS); 酸性转化酶 (AI)

中图分类号: S652 文献标志码: A

Effects of Pollination Methods on Fruit Quality and Related Enzyme Activities of Melon Jiyoumi 29

ZHANG Huiming^{1,2}, ZHANG Hanying^{1,2}, LI Hongli³, WANG Shaochun⁴, YANG Fusun^{1*}

1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Hainan Changjiang Melon Technology Small Court, Changjiang, Hainan 572732, China; 3. Tropical Crop Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Hainan Wangpin Agricultural Technology Development Co., Ltd., Haikou, Hainan 570000, China

Abstract: Melon is an important cash crop in Hainan, and its pollination is mainly hormone pollination, which is easy to cause fruit deformity and accompanied by different degrees of flavor and quality decline, affecting commodity rate and planting efficiency. Melon Jiyoumi 29 was used as the experimental material. Different artificial pollen combinations were used to pollinate to compare with hormone pollination. The growth status of plants and fruits, the internal quality of fruits and the activities of key enzymes for sucrose accumulation, and analyzed the effects of pollination on the growth of plants and fruits were studied. Different pollination methods had great effects on plant height, stem diameter and biomass, fruit weight and hardness, and the stem diameter and biomass and fruit weight treated with T_1 were significantly higher than those of the other treatments. The plant height and fruit hardness treated with CK were significantly higher than those of the other treatments. There were significant differences among different pollination methods on each index of melon fruit internal quality, and T_1 treatment had the best effect, and its soluble solids, soluble sugar, sucrose content, fructose content and glucose content were significantly higher than CK treatment. The activity of sucrose synthase (SS) treated with T_4 was relatively high during fruit growth and development. The sucrose phosphate

收稿日期 2024-12-13; 接受日期 2025-01-17

基金项目 2022 年海南大学自然科学类横向项目 (No. HD-KYH-2023016)。

作者简介 张惠明 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培与耕作。*通信作者 (Corresponding author): 杨福孙 (YANG Fusun), E-mail: fsyang1590@163.com。

synthase (SPS) in T_1 treatment maintained a high level during the fruit growth and development, and the acid invertase activity in T_1 and T_2 treatment reached the highest at the 40th day after pollination, which were 93.69 U/g and 88.54 U/g respectively. The treatment of T_1 (strong pollen vitality $\times$ high stigma receptivity) has the best effect on the growth and fruit quality of melon plants after artificial pollen pollination.

Keywords: pollination; *Cucumis melo*; quality; sucrose synthase (SS); sucrose phosphate synthase (SPS); acid invertase (AI)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.05.016

甜瓜 (*Cucumis melo* L.) 起源于非洲^[1], 属葫芦科 (Cucurbitaceae) 甜瓜属 (*Cucumis*) 一年生蔓生草本植物^[2], 其种植区域广泛, 遍布五大洲^[3], 是一种高经济的水果作物^[4]。目前, 甜瓜已成为海南省的主要经济作物, 海南部分地方乡村振兴的重要作物, 一年可种植和收获 2~3 次^[5]。

在植物生长和果实发育的过程中, 授粉不仅是种子形成的必要条件, 同时也对果实的品质有着重要影响。授粉过程是农作物进行有性繁殖的开始, 也是农业生产上最关键的一环^[6]。当前生产上甜瓜主要依靠激素授粉和自然蜜蜂授粉。激素授粉主要采用氯吡脲 (CPPU) 进行处理, 常因激素剂量和使用时期不当而造成果实畸形, 同时影响果实口感与风味^[7], 并伴随着不同程度的农药残留^[8]; 蜜蜂授粉是早期甜瓜种植的主要传粉方式, 其省时省工、且利于产品安全生产^[9], 海南等热区甜瓜种植于大棚, 温度高, 蜜蜂授粉易造成蜂群的大量死亡和甜瓜植株早衰, 影响产量。有研究表明, 人工花粉授粉虽然提高了人工成本, 但利于提高果实品质和经济价值^[10-12]。

授粉作为植物生殖生长的关键环节, 对果实的发育及糖分积累具有重要影响。研究表明, 果实风味的形成与果实糖含量及各糖分所占比重大关系密切, 甜瓜果实中糖积累的主要形式为葡萄糖、果糖和蔗糖^[13], 而蔗糖的积累是甜瓜果实糖分提高的重要原因^[14]。在大多数植物中, 蔗糖是源器官 (叶) 进行光合作用的主要产物, 蔗糖合成后会通过韧皮部长距离运输转运至果实、根、茎尖等不同的库器官中维持其生长发育^[15-16]。果实中蔗糖代谢的相关酶包括蔗糖合成酶 (SS)、蔗糖磷酸化酶 (SPS)、酸性转化酶 (AI)^[17], 蔗糖合成酶可以通过催化葡萄糖和果糖的合成来促进蔗糖的合成, 又可以催化蔗糖分解^[18-19]。酸性转化酶促进蔗糖不可逆的分解, 蔗糖磷酸化酶可以将果糖和葡萄糖转化为蔗糖而在植物体内积累^[20]。

蔗糖是植物体内重要的能源和碳源物质, 对

于植物的生长和代谢具有重要作用。转化酶参与叶片光合作用, 细胞对环境的响应及植物生长发育的调节^[21-22], 在光合组织中, 蔗糖的合成与分配对于维持光合作用的平衡和调节植物体内碳同化的平衡也具有重要意义, 这些酶在调控果实内糖分的合成、转运与代谢中发挥着至关重要的作用^[23]。授粉作为果实发育的触发器, 通过影响激素平衡、营养物质分配及基因表达模式, 间接或直接调节这些关键酶的活性, 进而影响甜瓜的糖分积累。而激素与蜜蜂授粉是如何影响甜瓜品质及糖分积累的差异? 为此, 本研究通过采用人工花粉授粉来模拟蜜蜂授粉方式, 对比激素授粉的吉优蜜 29 号甜瓜, 分析不同授粉处理下果实发育过程中糖代谢相关酶活性的动态变化, 并结合表型指标及内在品质, 探讨授粉方式如何调控这些酶的活性, 进而影响甜瓜蔗糖代谢。通过调控授粉方式优化甜瓜栽培管理、为提升果实品质提供科学依据, 对甜瓜产业的可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地点位于海南省昌江黎族自治县海尾镇五大村王品果业有限公司蜜瓜试验示范基地 (19.44°N, 108.87°E), 供试甜瓜品种为吉优蜜 29 号, 试验时间为 2023 年 12 月至 2024 年 5 月, 每年种植 2 批, 第一批种植时间为同年的 8—12 月、第二批为 12 月至次年 4 月。种植株距 36 cm, 行距 80 cm, 种植密度 1560 株/667 m²。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验采用花粉不同活力与柱头不同可授性进行人工花粉组合授粉处理 (表 1)。先测定出吉优蜜 29 号甜瓜开花规律, 确定开花周期。并在开花前 1 d 进行套袋处理, 做好标记。按照表 1 设置粉源组合, 在第 15~16 个节位的雌花开花时进行人工花粉组合授粉; 激素授粉

表 1 不同粉源组合的授粉方式
Tab. 1 Pollination methods of different combinations of powder sources

处理 Treatment	雄花开花时间 Flowering time of male flowers	花粉活力 Pollen viability	雌花开花时间 Flowering time of female flowers	柱头可授性 Stigma receptivity	组合 Combination
人工花粉授粉	开花后 1 h	强	开花后 1 h	高	强×高 (T ₁)
	开花后 1 h	强	开花后 5 h	低	强×低 (T ₂)
	开花后 5 h	弱	开花后 1 h	高	弱×高 (T ₃)
	开花后 5 h	弱	开花后 5 h	低	弱×低 (T ₄)
激素授粉	氯吡脞和咯菌腈混合溶液				CK

(CK) 处理组在开花前 1 d 进行套袋处理, 做好标记。配置好氯吡脞 (四川施特优化工有限公司) 和咯菌腈 (先正达南通作物保护有限公司) 混合均匀溶液, 在雌花开花时进行激素授粉, 将配置好的激素混合溶液用喷壶均匀喷施在雌花瓜胎表面, 并进行套袋处理, 每个处理 3 株, 3 次重复。

1.2.2 指标测定 (1) 甜瓜表型、生物量及可溶性固形物测定。在授粉后 10、20、30、40 d 取样, 采用卷尺、DL91200 数显游标卡尺测定植株株高、茎粗, 采用电子天平测定果实质量, 使用带有针形探针 (直径 5 mm) 的 TA TOUCH 10020 质构仪 (上海保圣实业发展有限公司) 测定硬度, 从每个去皮甜瓜阴阳两面的赤道轴上的等距点获得 2 个读数。植株全生物量测定: 收获时将水冲刷植株根部土壤, 取完整植株, 105 ℃ 杀青 30 min 后 60 ℃ 烘干至恒重, 用百分之一天平准确称取植株干质量; 使用 FW-80T 糖度计测得甜瓜果实可溶性固形物含量。

(2) 叶绿素含量测定。不同授粉天数取样, 测定功能叶的叶绿素, 叶绿素含量测定参照 95% 无水乙醇浸提法^[17]进行, 暗处放置 12~24 h, 叶片全部变白后测定叶绿素含量。

(3) 果实内在品质测定。不同授粉天数取样, 切块液氮速冻。将甜瓜果实打磨成粉, 保存于 50 mL 离心管中, 置于-80 ℃ 超低温冰箱待用,

按照酶试剂盒说明书测定甜瓜果实的可溶性糖、果糖、葡萄糖和蔗糖含量, 3 次重复, 平行 3 次, 测定均使用北京索莱宝科技有限公司试剂盒。

(4) 糖分转化相关酶活性测定。不同授粉天数取样, 切块液氮速冻。将甜瓜果实打磨成粉, 保存于 50 mL 离心管中, 置于-80 ℃ 超低温冰箱待用。按照酶试剂盒说明书测定甜瓜果实的蔗糖合成酶 (SS)、蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 和酸性转化酶 (AI) 活性, 3 次重复, 平行 3 次, 测定均使用北京索莱宝科技有限公司试剂盒。

1.3 数据处理

采用 Excel 2010 软件整理数据, 采用 SPSS Statistics 26 软件统计分析各成分的差异性, 并进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 采用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 授粉方式对甜瓜生长和生物量的影响

不同授粉方式授粉 40 d 后, 植株株高、茎粗、果实质量、果实硬度、生物量间均差异显著 (表 2)。人工花粉 4 个处理组间, T₁ 处理的甜瓜植株茎粗、果实质量、生物量显著高于 T₂、T₃、T₄ 处理, T₂、T₃、T₄ 处理间差异不显著; CK 处理的植株株高高于 T₁ 和 T₄ 处理, 且差异显著, 果实硬度显著高于其他处理。

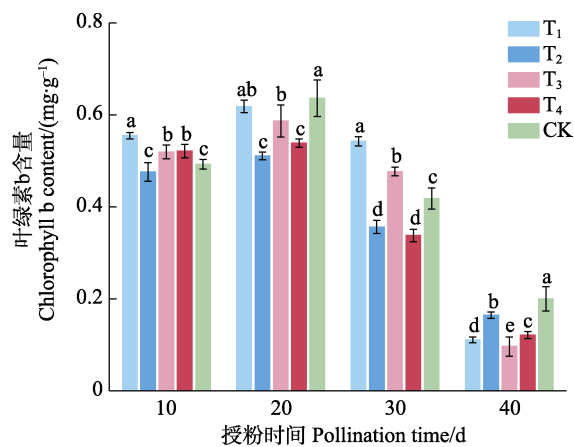
表 2 不同授粉方式处理 40 d 对吉优蜜 29 号甜瓜植株和果实生长的影响
Tab. 2 Effects of different pollination methods on plant and fruit growth of Jiyoumi 29 at 40th day

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	果实质量 Fruit weight/kg	果实硬度 Fruit hardness/N	生物量 Biomass/g
T ₁	208.27±0.59 ^c	14.79±1.69 ^a	1.90±0.20 ^a	26.04±0.18 ^b	298.90±24.32 ^a
T ₂	210.70±0.80 ^{ab}	13.47±0.24 ^{ab}	1.73±0.17 ^{ab}	23.86±1.12 ^c	265.60±16.60 ^{ab}
T ₃	210.53±0.34 ^{ab}	12.64±0.36 ^b	1.72±0.21 ^{ab}	26.70±0.67 ^b	259.59±37.83 ^{ab}
T ₄	209.87±0.95 ^b	13.18±0.52 ^b	1.71±0.12 ^{ab}	24.59±0.55 ^c	261.63±14.10 ^{ab}
CK	211.33±0.38 ^a	12.25±0.03 ^b	1.51±0.18 ^b	29.40±0.88 ^a	238.99±26.22 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05).

2.2 授粉方式对甜瓜功能叶光合色素含量的影响

不同授粉方式处理后，随着授粉天数的增加，甜瓜功能叶绿素 b 含量呈先上升后下降的趋势（图 1）。CK 处理下叶绿素 b 含量在 20 d 时达到最大，且与其他处理差异显著，较 T₁ 处理增加 2.93%，较 T₂ 处理增加 24.55%，较 T₃ 处理增加 8.44%，较 T₄ 处理增加 18.12%；T₂ 处理下叶绿素 b 含量在 20~40 d 降幅最小，较 T₁ 处理减少 31.69%，较 T₃ 处理减少 29.33%，较 T₄ 处理减少 17.04%，较 CK 处理减少 18.46%。



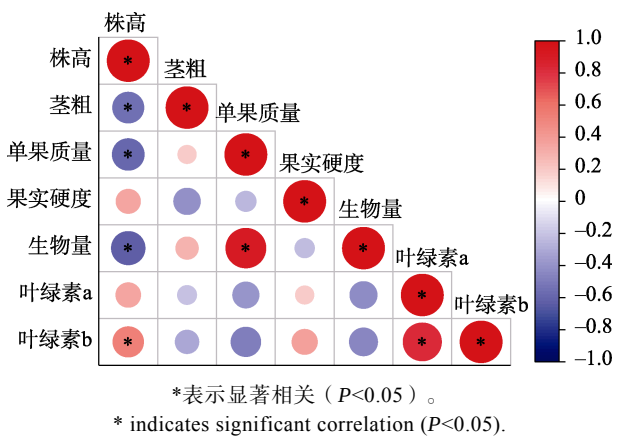
不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 1 不同授粉方式处理甜瓜功能叶叶绿素 b 含量
Fig. 1 Chlorophyll B content in functional leaves after pollination by different pollination methods

2.3 授粉方式对甜瓜生理影响的相关性分析

由图 2 可知，不同授粉方式处理对甜瓜植株

和果实表型性状、光合色素含量间相关性较高，植株株高与茎粗、单果质量、生物量呈显著负相关，相关系数分别为-0.55、-0.58、-0.63，与叶绿素 b 含量呈显著正相关，相关系数为 0.53；单果质量与生物量呈显著正相关，相关系数为 0.91；叶绿素 a 含量与叶绿素 b 含量呈显著正相关，相关系数为 0.83。



*表示显著相关（ $P<0.05$ ）。
* indicates significant correlation ($P<0.05$).

图 2 不同授粉方式处理 40 d 对吉优蜜 29 号甜瓜表型及光合色素影响的相关性
Fig. 2 Correlation between effects of different pollination methods on phenotypes and photosynthetic pigments of Jiyoumi 29 at 40th day

2.4 授粉方式对甜瓜果实内在品质的影响

不同授粉方式授粉 40 d 后，果实内在品质各指标间均差异显著（表 3）。人工花粉 4 个处理组间，以 T₁ 处理效果最佳，可溶性固形物、蔗糖含量和果糖含量显著高于其他处理；不同授粉方式处理的果实葡萄糖含量差异不显著。

表 3 不同授粉方式处理 40 d 对吉优蜜 29 号甜瓜果实内在品质的影响
Tab. 3 Effects of different pollination methods on internal quality of Jiyoumi 29 after 40 days of pollination

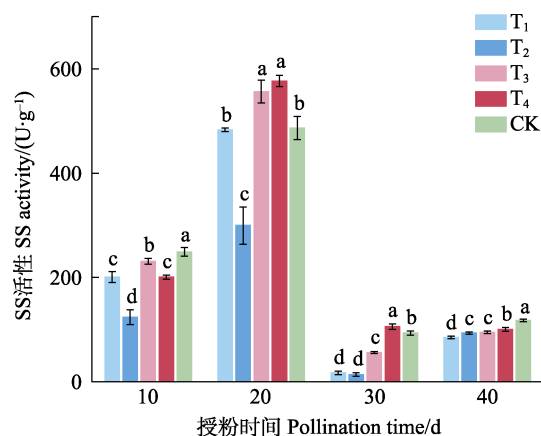
处理 Treatment	含量 Content				
	可溶性固形物 Soluble solids/%	可溶性糖 Soluble sugar/(mg·g ⁻¹)	蔗糖 Sucrose/(mg·g ⁻¹)	果糖 Fructose/(mg·g ⁻¹)	葡萄糖 Glucose/(μmol·g ⁻¹)
T ₁	18.07±0.21 ^a	92.32±1.90 ^{ab}	13.74±0.32 ^a	58.13±5.32 ^a	15.73±0.66 ^a
T ₂	16.87±0.71 ^b	93.52±2.82 ^{ab}	12.80±0.89 ^a	48.12±4.30 ^{bc}	15.88±0.33 ^a
T ₃	17.17±0.42 ^b	94.90±3.03 ^a	10.11±0.45 ^b	35.50±3.83 ^d	16.11±0.55 ^a
T ₄	16.50±0.30 ^b	79.00±3.63 ^c	10.75±0.52 ^b	43.66±2.16 ^c	15.36±0.34 ^a
CK	15.17±0.15 ^c	89.45±1.66 ^b	10.71±0.13 ^b	52.32±4.45 ^{ab}	15.48±0.56 ^a

注：不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.5 授粉方式对甜瓜糖分积累相关酶活性影响

2.5.1 蔗糖合成酶（SS）活性 不同授粉方式处理下果实中 SS 活性总体呈现出“升-降-升”的变化趋势（图 3）。授粉 10、40 d 时，CK 处理的 SS

活性显著高于其他处理；授粉 20 d，T₄ 处理下 SS 活性高达 576.57 U/g，显著高于其他处理；授粉 30 d，T₁ 和 T₂ 处理下 SS 活性达到最低，显著低于其他处理。



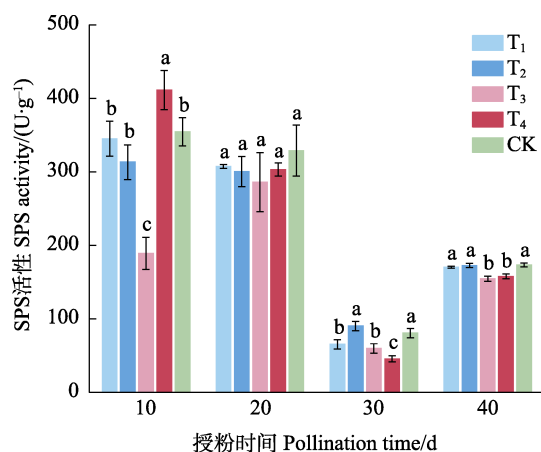
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同授粉方式下吉优蜜 29 号甜瓜果实 SS 活性

Fig. 3 SS activity of Jiyoumi 29 under different pollination methods

2.5.2 蔗糖磷酸合成酶 (SPS) 活性 由图 4 可知, 不同授粉方式处理下果实中 SPS 活性总体呈现出“降-降-升”的变化趋势, 而 T_3 处理下甜瓜果实 SPS 活性呈“升-降-升”的趋势, 并在授粉 20 d 时达到最高, 较其他处理增幅为 29.51%~32.23%, 在授粉 30 d 时达到最低, 显著低于其他处理。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

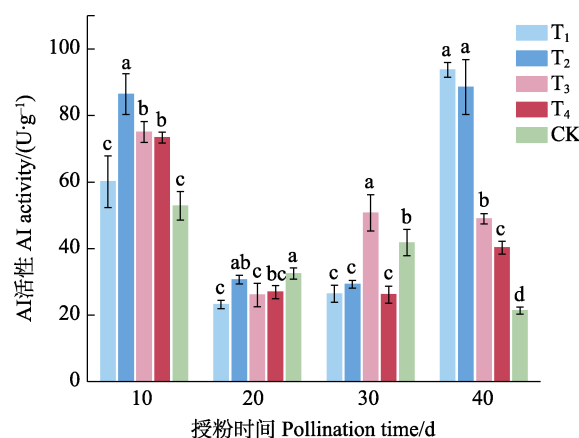
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同授粉方式下吉优蜜 29 号甜瓜果实 SPS 活性

Fig. 4 SPS activity of Jiyoumi 29 under different pollination methods

2.5.3 酸性转化酶 (AI) 活性 不同授粉方式处理下甜瓜果实中 SPS 活性总体呈现先下降后上升的变化趋势, 各处理在不同授粉天数间均差异显著 (图 5)。 T_1 、 T_2 处理组在授粉 40 d 时 AI 活性达到最高, 分别为 93.69、88.54 U/g, 且与其他处

理存在显著性差异; CK 处理在授粉 10、40 d 时 AI 活性均低于其他处理, 分别为 52.83、21.34 U/g, 且差异显著。



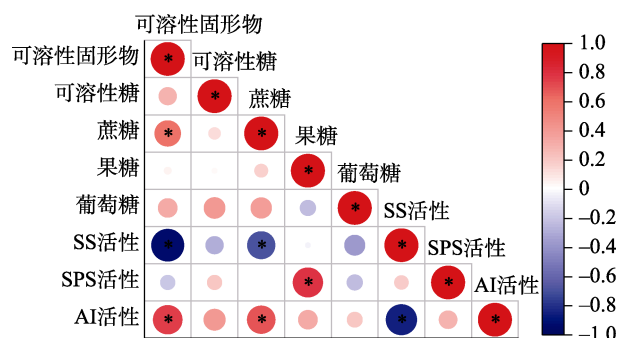
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 5 不同授粉方式下吉优蜜 29 号甜瓜果实 AI 活性

Fig. 5 AI activity of Jiyoumi 29 under different pollination methods

2.5.4 甜瓜果实内在品质与蔗糖代谢关键酶活性相关性 由图 6 可知, 不同授粉方式处理对甜瓜果实内在品质与蔗糖代谢关键酶含量间相关性较高, 可溶性固形物与蔗糖含量、酸性转化酶呈显著正相关, 相关系数分别为 0.60、0.74, 与蔗糖合成酶呈显著负相关; 蔗糖含量与蔗糖合成酶呈显著负相关, 相关系数为 -0.69; 果糖含量与蔗糖磷酸合成酶呈显著正相关, 相关系数为 0.79; 蔗糖合成酶与酸性转化酶呈显著负相关, 相关系数为 -0.84。



*表示显著相关 ($P < 0.05$)。

* indicates significant correlation ($P < 0.05$).

图 6 授粉方式对吉优蜜 29 号甜瓜果实内在品质与蔗糖代谢关键酶的相关性

Fig. 6 Correlation between internal quality of Jiyoumi 29 fruit and key enzymes of sucrose metabolism by pollination methods

3 讨论

花粉活力和授粉时机的把握对于植物生长发育具有重要意义。花粉活力和柱头可授性的强弱是决定授粉成功率的关键因素^[24]，它不仅影响授粉后花粉管的伸长和受精过程，还与果实的品质和产量密切相关。不同授粉方式授粉40 d，T₁（花粉活力强×柱头可授性高）处理的甜瓜植株与果实长势良好，优于其他处理，而CK（激素授粉）的植株株高和果实硬度显著高于人工花粉授粉处理组，激素的合理使用可以有效地促进植物的生长发育。同时，生物量是反映植物体有机物积累状况的主要指标^[25]，是作物产量和品质形成的基础^[26]。本研究中，T₁处理的植株生物量显著高于其他处理，说明T₁处理的果实具有较高的生长速度、积累的有机物较多，使得积累生物量显著高于其他处理。

叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素，其含量通常与光合作用呈正相关^[27]，光合作用是植物进行生产的基础^[28]。不同授粉方式处理下，甜瓜功能叶叶绿素含量20 d时达到最高值，之后开始降低，可能是由于甜瓜果实在生长发育过程中，随着果实的膨大，功能叶叶片也在逐渐增大，使得叶绿素含量在0~20 d时达到最高，随着果实的发育成熟，功能叶叶片停止生长转而逐渐衰老，直至枯萎，叶绿素含量在40 d时降到最低。

在人工花粉授粉过程中，花粉的活力和柱头的可授性是影响果实品质的关键因素。高活力花粉和良好可授性的柱头有助于果实营养成分的显著提升。其中，可溶性固形物和可溶性糖是衡量果实口感和营养价值的重要指标，可溶性固形物的增加将带来更佳的口感和更丰富的营养，可溶性糖是调控植物生长发育的重要信号分子^[20]。本研究表明，人工花粉授粉的甜瓜其可溶性固形物和可溶性糖含量显著高于激素授粉。

蔗糖合成酶（SS）和蔗糖磷酸合成酶（SPS）在蔗糖的合成过程中起着关键作用^[27]。SS主要催化蔗糖的合成，将单糖转化为蔗糖，而SPS则通过磷酸化作用促进蔗糖的合成^[29]。这2种酶在植物体内相互协作，共同调节蔗糖的合成速率和方向，酸性转化酶则主要参与蔗糖的分解过程。在植物体内，酸性转化酶可以将蔗糖分解为单糖，从而影响蔗糖的运输和利用^[30]。此外，它还可以将光合作用合成的蔗糖进行分配，用于储存、呼

吸或其他生物合成过程^[31]。本研究中，不同授粉方式处理对甜瓜糖分积累相关酶活性有不同程度的影响，T₄处理的蔗糖合成酶活性在果实生长发育过程中相对较高，T₁处理的蔗糖磷酸合成酶在果实生长发育过程中保持较高水平，T₁、T₂处理的果实酸性转化酶活性在授粉后40 d时达到最高，可能是由于T₁、T₂处理的甜瓜成熟期早，采摘后快速进入后熟阶段，使得酸性转化酶快速增加，而酸性转化酶的增加有助于果实的成熟和软化^[32]，通过分解蔗糖，释放出的葡萄糖和果糖可以为果实的细胞提供能量，促进细胞壁的降解和果肉的软化，从而使果实更易于食用和消化^[33-34]。

4 结论

不同授粉方式对甜瓜植株的生长形态、生理过程存在明显的相关性，即T₁处理组在授粉后，甜瓜植株的生长性状和光合色素含量在10~30 d时保持较高水平，显著高于其他处理，长势最佳，随着果实的成熟，在40 d时达到最低，果实成熟期早；同时不同授粉方式对甜瓜果实品质及糖分积累关键酶含量间相关性较高，T₁处理的甜瓜果实在品质显著高于其他处理。人工花粉授粉4个处理组的蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶、酸性转化酶，在整个果实生长发育过程中均保持在较高水平；不同授粉方式授粉后，甜瓜果实的蔗糖含量与蔗糖磷酸合成酶、酸性转化酶呈显著正相关、与蔗糖合成酶呈显著负相关；蔗糖合成酶与酸性转化酶呈显著负相关，综合考虑甜瓜的生长特性、内在品质及糖分积累相关酶的活性，得出甜瓜在T₁（花粉活力强×柱头可授性高）授粉后生长状况与果实品质最佳。

参考文献

- [1] 任俭, 袁悦, 李煜华, 曾红霞, 张娜, 熊建顺, 朱志坤, 汤谧. 不同砧木嫁接对薄皮甜瓜生长和果实品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(5): 78-83.
REN J, YUAN Y, LI Y H, ZENG H X, ZHANG N, XIONG J S, ZHU Z K, TANG M. Effects of different rootstock grafting on the growth characteristics of thin-skin melon[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(5): 78-83. (in Chinese)
- [2] 于素华, 赵敬美, 王玉春, 李建平, 朱孔利. 设施栽培甜瓜品种对比试验[J]. 农业科技通讯, 2023(3): 75-79.

- YU S H, ZHAO J M, WANG Y C, LI J P, ZHU K L. Comparative trial of melon varieties under facility cultivation[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2023(3): 75-79. (in Chinese)
- [3] 王琛, 吴敬学, 杨艳涛. 世界甜瓜生产贸易分析及对中国的启示[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(2): 18-22.
- WANG C, WU J X, YANG Y T. Analysis of global melon production and trade and its implications for China[J]. China Food and Nutrition, 2016, 22(2): 18-22. (in Chinese)
- [4] 王志丹, 吴敬学, 毛世平, 赵姜. 中国甜瓜产业国际竞争力比较分析与提升对策[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(1): 81-84.
- WANG Z D, WU J X, MAO S P, ZHAO J. Comparative analysis of international competitiveness and enhancement strategies for China's melon industry[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(1): 81-84. (in Chinese)
- [5] 韦盈, 刘冬妮, 康蕊, 符郁馥, 王丽强, 常虹. 甜瓜果实不同部位矿物元素含量分析[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(7): 74-83.
- WEI Y, LIU D N, KANG R, FU Y F, WANG L Q, CHANG H. Analysis of mineral element content in different parts of melon fruits[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2024, 37(7): 74-83. (in Chinese)
- [6] 冀薇, 樊莹, 黄家兴, 杨慧鹏, 徐进, 李小英, 郭岳琴, 吴跃国, 李继莲, 姚军. 不同授粉强度对蓝莓柱头响应机制的转录组分析[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(10): 71-82.
- JI W, FAN Y, HUANG J X, YANG H P, XU J, LI X Y, GUO Y Q, WU Y G, LI J L, YAO J. Transcriptome analysis of the response mechanism of blueberry stigma under different pollination intensities[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, China, 2024, 26(10): 71-82. (in Chinese)
- [7] 张华峰, 蒋云飞, 张蕾琛, 马二磊, 应泉胜, 王毓洪, 黄芸萍. 不同授粉方式对南方设施西甜瓜授粉效果的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(11): 62-67.
- ZHANG H F, JIANG Y F, ZHANG L C, MA E L, YING Q S, WANG Y H, HUANG Y P. Effects of different pollination methods on the pollination effect of watermelons and melons in southern greenhouses[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(11): 62-67. (in Chinese)
- [8] 赵珊, 吴娇, 何燕, 高兆银, 钟义海, 韩文素, 赵冬香, 高景林, 王释婕. 不同授粉方式对设施网纹甜瓜品质的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(12): 41-46.
- ZHAO S, WU J, HE Y, GAO Z Y, ZHONG Y H, HAN W S, ZHAO D X, GAO J L, WANG S J. Effects of different pollination methods on the quality of muskmelons with reticulated rinds in greenhouses[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(12): 41-46. (in Chinese)
- [9] 祁海萍, 郭媛, 宋怀磊, 祁蕾. 论蜜蜂授粉在农业生产中的重要性及可行性[J]. 山西科技, 2018, 33(6): 34-36, 48.
- QI H P, GUO Y, SONG H L, QI L. On the importance and feasibility of bee pollination in agricultural production[J]. Shanxi Science and Technology, 2018, 33(6): 34-36, 48. (in Chinese)
- [10] 魏国香, 丁泽川, 陈洁明, 曾两顺, 蔡跃文. 不同授粉树对“脆蜜”滇刺枣着果和果实品质的影响初探[J]. 中国南方果树, 2024, 53(4): 107-110, 114.
- WEI G X, DING Z C, CHEN J M, ZENG L S, CAI Y W. Preliminary study on the effects of different pollinizer trees on the fruit setting and fruit quality of “cuimi” ziziphus mauritiana[J]. South China Fruits, 2024, 53(4): 107-110, 114. (in Chinese)
- [11] 刘磊. 果树人工辅助授粉技术探析[J]. 现代农业科技, 2021(15): 94-95
- LIU L. Analysis of artificial auxiliary pollination technology for fruit trees[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2021(15): 94-95. (in Chinese)
- [12] 杨华, 祖贵东, 张诗莹, 赵绍英. ‘红富士’苹果辅助授粉技术研究[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(3): 29-30.
- YANG H, ZU G D, ZHANG S Y, ZHAO S Y. Study on the auxiliary pollination technology of ‘Red Fuji’ apple[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2011, 27(3): 29-30. (in Chinese)
- [13] 骆蒙, 李天然, 张治中, 方天祺. 河套蜜瓜 *Cucumis melo* CV Hetau 成熟期中某些生理生化过程的变化[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1996(2): 234-236.
- LUO M, LI T R, ZHANG Z Z, FANG T Q. Changes of some physiological and biochemical processes during the maturity period of *Cucumis melo* CV Hetau in the hetao region[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Neimongol (Natural Science Edition), 1996(2): 234-236. (in Chinese)
- [14] 张明方, 蒋有条, 余抗. 甜瓜不同变种果实发育过程中的糖分转化与酶活性变化[J]. 浙江农业学报, 1998(6): 310-312.
- ZHANG M F, JIANG Y T, YU K. Changes of sugar transformation and enzyme activity during fruit development of different varieties of muskmelon[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1998(6): 310-312. (in Chinese)
- [15] MEHDI F, GALANI S, WICKRAMASINGHE K P, ZHAO P F, LU X, LIN X Q, XU C H, LIU H B, LI X J, LIU X L. Current perspectives on the regulatory mechanisms of sucrose accumulation in sugarcane[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e27277.
- [16] YOON J, CHO L H, TUN W, JEON J S, AN G. Sucrose signaling in higher plants[J]. Plant Science, 2021, 302: 110703.

- [17] 汤谧. ‘风味甜瓜’系列果实高糖高酸品质形成的机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
TANG M. Study on the formation mechanism of high sugar and high acid fruit quality of the 'flavor muskmelon' series[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [18] RUAN Y L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 33-67.
- [19] SCHMLZER K, GUTMANN A, DIRICKS M, DESMET T, NIDETZKY B. Sucrose synthase: a unique glycosyltransferase for biocatalytic glycosylation process development[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34: 88-111.
- [20] SADDHE A A, MANUKA R, PENNA S. Plant sugars: homeostasis and transport under abiotic stress in plants[J]. *Physiologia Plantarum*, 2021, 171(4): 739-755.
- [21] LESKOW C C, CONTE M, DEL P T. The cytosolic invertase NI6 affects vegetative growth, flowering, fruit set and yield in tomato[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, DOI:10.1093/jxb/eraa594.
- [22] RU L, HE Y, ZHU Z J. Integrating sugar metabolism with transport: elevation of endogenous cell wall invertase activity up-regulates SIHT2 and SISWEET12c expression for early fruit development in tomato[J]. *Frontiers in Genetics*, 2020, 11: 592596.
- [23] MA M, WANG L B, ZHANG S L. ACid vacuolar invertase 1 (PbrAc-Inv1) and invertase inhibitor 5 (PbrII5) were involved in sucrose hydrolysis during postharvest pear storage[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126635.
- [24] 胡秉芬, 黄华梨, 季元祖, 赵晓芳, 戚建莉, 张露荷, 张广忠. 分光光度法测定叶绿素含量的提取液的适宜浓度[J]. *草业科学*, 2018, 35(8): 1965-1974.
HU B F, HUANG H L, JI Y Z, ZHAO X F, QI J L, ZHANG L H, ZHANG G Z. Optimum concentration of extractant for determination of chlorophyll content by spectrophotometry[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(8): 1965-1974. (in Chinese)
- [25] 吴斌, 王加志, 邢文婷, 宋顺, 黄海杰, 李洪立, 胡文斌, 马伏宇, 黄东梅. 西番莲属25个种(品种)花粉活力检验方法筛选及其花粉活力和柱头可授性比较分析[J]. *果树学报*, 2024, 41(10): 1947-1960.
WU B, WANG J Z, XING W T, SONG S, HUANG H J, LI H L, HU W B, MA F N, HUANG D M. Screening of pollen viability testing methods and comparative analysis of pollen viability and stigma receptivity of 25 passiflora species (varieties)[J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(10): 1947-1960. (in Chinese)
- [26] 童贯和, 肖家军, 孙坤. 不同供镁水平对不同时期小麦幼苗生长速率的影响[J]. *中国农学通报*, 2008(11): 132-138.
TONG G H, XIAO J J, SUN K. Effects of different magnesium supply levels on the growth rate of wheat seedlings at different stages[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008(11): 132-138. (in Chinese)
- [27] 李乐, 张丽娟, 李建设, 高艳明. 不同密度与功能叶对大棚厚皮甜瓜光合特性及产量品质的影响[J]. *西南农业学报*, 2022, 35(7): 1539-1547.
LI L, ZHANG L J, LI J S, GAO Y M. Effects of different densities and functional leaves on photosynthetic characteristics, yield and quality of thick-skinned muskmelon in greenhouses[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(7): 1539-1547. (in Chinese)
- [28] 邵玺文, 韩梅, 韩忠明, 孔伟伟, 杨利民. 不同生境条件下黄芩光合日变化与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1470-1477.
SHAO X W, HAN M, HAN Z M, KONG W W, YANG L M. Relationship between diurnal variation of photosynthesis of *scutellaria baicalensis georgi* and environmental factors under different habitat conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1470-1477. (in Chinese)
- [29] 李春阳, 胡瑞芳, 张馨月, 杨阳, 逢洪波, 李玥莹. 不同甜高粱品种蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶活性与糖分积累的关系[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(11): 139-141.
LI C Y, HU R F, ZHANG X Y, YANG Y, FENG H B, LI Y Y. Relationship between activities of sucrose synthase and sucrose phosphate synthase and sugar accumulation in different sweet sorghum varieties[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(11): 139-141. (in Chinese)
- [30] SCHMLZER K, GUTMANN A, DIRICKS M. Sucrose synthase: a unique glycosyltransferase for biocatalytic glycosylation process development[J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(2): 88-111.
- [31] 赵婷婷, 杨本鹏, 王俊刚, 甘仪梅, 张树珍. 甘蔗叶片中蔗糖代谢酶活性及糖含量动态变化特征分析[J]. *中国糖料*, 2023, 45(2): 47-53.
ZHAO T T, YANG B P, WANG J G, GAN Y M, ZHANG S Z. Analysis of the dynamic variation characteristics of sucrose-metabolizing enzyme activities and sugar contents in sugarcane leaves[J]. *Sugar Crops of China*, 2023, 45(2): 47-53. (in Chinese)
- [32] RUAN Y L, JIN Y, YANG Y J. Sugar input, metabolism, and signaling mediated by invertase: roles in development, yield potential, and response to drought and heat[J]. *Molecular Plant*, 2010, 3(6): 942-955.
- [33] 张强, 代文婷, 李冀新, 金新文. 糖代谢对甜瓜果实后熟

- 软化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 112-117.
- ZHANG Q, DAI W T, LI J X, JIN X W. The effect of sugar metabolism on the post - ripening and softening of muskmelon fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(1): 112-117. (in Chinese)
- [34] 钱丽丽, 杨斯琪, 李跃, 刘盈, 李雪静, 孙华军. 果实采后软化机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 371-378.
- QIAN L L, YANG S Q, LI Y, LIU Y, LI X J, SUN H J. Research progress on the post-harvest softening mechanism of fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 371-378. (in Chinese)