

不同人工授粉方式引起金香玉甜瓜植株早衰因子研究

张汉英^{1,2}, 符诗琦¹, 张惠明^{1,2}, 李茹萍¹, 王绍春³, 杨福孙¹

(1. 海南大学热带农林学院 海口 570228; 2. 海南昌江蜜瓜科技小院 海南昌江 572700;
3. 海南王品农业科技开发有限公司 海口 570100)

摘要:海南是我国冬春季甜瓜供应的核心产区。甜瓜有人工和蜜蜂授粉两种授粉方式,蜜蜂授粉能显著提高果实品质,但易造成植株早衰,影响经济效益。为探究蜜蜂授粉导致植株早衰的影响因子,本试验以金香玉甜瓜为研究对象,设置不授粉(CK)、人工花粉授粉(强×高)(T2)、人工花粉授粉(弱×低)(T3)、人工激素授粉(T4)4种处理,测定各授粉方式对植株生长指标、养分积累、果实产量、品质及种子性状的影响。结果表明,CK与T4处理的甜瓜植株不产生早衰,而人工花粉授粉(模拟蜜蜂授粉)均出现了不同程度的早衰现象,T2处理早衰率为4%,T3处理早衰率达45%,二者均显著高于CK和T4处理。与CK相比,T3处理的植株叶面积、叶绿素含量、茎粗和根系活力显著降低。在收获期,T4处理的产量较T2和T3处理分别显著提高17.25%、16.75%;T2处理的果实可溶性糖、可溶性固形物含量显著高于T3和T4处理,并降低总酸度。VIP分析显示,引起甜瓜植株早衰的影响因子由强到弱依次为根系活力>总生物量>果实可溶性固形物含量>果实总酸度>种子数>钾积累量>果实可溶性糖含量。综上,甜瓜种子的生长发育异常,会打破植株养分资源分配平衡,导致根系活力下降,从而造成养分吸收障碍,最终引发植株早衰。

关键词:甜瓜;授粉方式;早衰;种子形成;养分分配

中图分类号:S652

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)03-034-10

Study on factors causing premature aging of Jinxiangyu melon plants by different artificial pollination methods

ZHANG Hanying^{1,2}, FU Shiqi¹, ZHANG Huiming^{1,2}, LI Ruping¹, WANG Shaochun³, YANG Fusun¹

(1. School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; 2. Hainan Changjiang Melon Technology Small Court, Changjiang 572700, Hainan, China; 3. Hainan Wangpin Agricultural Technology Development Co., Ltd., Haikou 570100, Hainan, China)

Abstract: Hainan is the core production area for winter and spring melon supply in China. Melon can be pollinated using either artificial or bee pollination methods. Bee pollination significantly improves fruit quality but can lead to premature senescence, affecting economic benefits. To investigate the factors influencing plant premature aging caused by bee pollination, this study used Jinxiangyu melon as the experimental subject. Four treatments were established: no pollination (CK), artificial pollen pollination (strong×tall) (T2), artificial pollen pollination (weak×short) (T3), and artificial hormone pollination (T4). The effects of each pollination method on plant growth indicators, nutrient accumulation, fruit yield, quality, and seed traits were measured. The results indicated that neither the control nor hormone-pollinated melon exhibited premature aging, whereas all artificial pollen-pollinated treatments (simulating bee pollination) showed varying degrees of premature aging. The T2 treatment had a 4% premature aging rate, while the T3 treatment reached a significantly highest rate of 45%. The plants of T3 exhibited significantly lower leaf area, chlorophyll content, stem diameter and root vitality, compared to CK. During the harvest period, the yield of T4 treatment was significantly increased by 17.25% and 16.75%, respectively, compared with that of T2 and T3 treatments. The content of soluble sugar and soluble solids in the fruits treated with T2 were significantly higher than those treated with T3 and T4, and the total acidity was reduced. VIP analysis revealed, the influencing factors that cause premature aging of melon plants, from strong to weak, were as

收稿日期:2025-08-22;修回日期:2025-10-13

基金项目:共建海南昌江蜜瓜科技小院与创新型人才培养合作协议(HD-KYH-2023016)

作者简介:张汉英,女,在读硕士研究生,研究方向为作物栽培生理。E-mail:23220951310166@hainanu.edu.cn

通信作者:杨福孙,男,教授,主要从事作物栽培生理生态研究。E-mail:fsyang1590@163.com

follows: Root system vitality>total biomass>fruit soluble solids content>fruit total acidity>seed number>potassium accumulation>fruit soluble sugar content. In summary, abnormal melon seed development disrupts the plant's nutrient resource allocation balance, leading to reduced root system vitality, nutrient absorption barriers, and ultimately premature plant senescence.

Key words: Melon; Pollination method; Premature aging; Seed formation; Nutrient allocation

甜瓜(*Cucumis melo* L.)在世界温带至热带地区广泛栽培,是具有较高经济价值和营养价值的作物^[1]。2022年,海南省甜瓜种植面积为26 035 hm²,约占海南省瓜类总种植面积的55.59%;产量为107.67万t,约占海南瓜类总产量的59.60%^[2]。海南依靠反季节优势,成为我国冬春季甜瓜供应的核心产区。金香玉是我国华南地区广泛种植的优质杂交甜瓜品种^[3]。但由于甜瓜果实发育期较长,在果实膨大期植株易出现早衰,导致果实产量及品质下降^[4]。

当前,甜瓜授粉有激素授粉、蜜蜂授粉等方式。其中,人工激素授粉能促进植株生长发育^[5],在设施甜瓜中使用最多。蜜蜂授粉相较于激素授粉果实中芳香物质含量更高,风味好,能显著提高果实品质,增加瓜农经济收入^[6-7],满足消费者对高品质甜瓜的追求^[8]。但蜜蜂授粉产生的早衰问题也日益凸显^[9]。甜瓜在高等植物衰老类型^[10]中属于整株早衰型^[4],即甜瓜整株出现塌秧、萎蔫,甚至死亡^[11]。具体表现为:植株在中午高温强光时段可见叶片及茎秆明显失水下垂,到晚上又恢复正常状态,如此持续数日后,植株逐渐进入不可逆萎蔫阶段,叶片失绿、干枯,茎秆细弱,直至瓜秧枯萎死亡。这时果实尚未完全成熟,植株早衰将导致果实产量及品质显著下降,大大降低瓜农收入^[12]。因此,探究授粉导致植株早衰的影响因子,对发展高品质设施甜瓜生产具有重要意义。

植物早衰的营养胁迫假说认为,当植株生长进入生殖阶段时,生殖器官对同化产物的需求量会大幅上升,通过主动争夺的方式大量获取养分,这种对同化源(叶片)营养的过度征调,最终导致叶片功能逐渐衰退^[13]。在对玉米灌浆期叶片衰老的研究中发现,籽粒发育不良迫使植物重新分配资源,叶片氮、磷等养分加速向籽粒运输以维持最低库需求,导致叶片自身代谢功能衰退,最终表现为叶绿素降解、光合速率骤降^[14]。有研究指出,通过喷施叶面肥^[15]、保留适宜侧枝^[16]、适宜留瓜位置^[17]可延缓甜瓜早衰。但授粉与甜瓜植株早衰间的关系尚未明确。鉴于此,笔者以人工花粉授粉模拟蜜蜂授粉,通过对不同授粉方式种子形成和植株养分需求规律与早衰特征值的多元统计分析,旨在找到引发早

衰的影响因子,以期优化蜜蜂授粉相关的栽培技术措施提供技术支持与理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本试验在海南省昌江黎族自治县海尾镇五大村王品果业试验示范基地(昌江蜜瓜科技小院)设施大棚内开展。该地为热带季风气候区,年均气温24.6℃,年降水量在1200~1800 mm之间。土壤类型为砂质土,前茬作物为甜瓜。金香玉甜瓜在设施大棚中起垄覆膜种植,垄高20~25 cm、宽75~80 cm。行距80 cm,株距35 cm,种植密度为23 400株·hm⁻²。

1.2 材 料

本试验以农友种苗有限公司选育的金香玉甜瓜为研究对象。人工激素授粉的试验药剂选用氯吡脞(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)。首先将50 mL氯吡脞对15 kg水、40 g咯菌腈对15 kg水分别稀释配液,然后将两种药液充分混合均匀,备用。

1.3 试验设计

采用随机区组设计,每个处理3个重复,每个小区面积为40 m²(20 m×2 m)。于2024年9月14日播种,10月26日授粉,11月30日收获,从播种至收获约77 d。共设置4个处理,每个处理60株,即不授粉(T1,CK)、人工花粉授粉强×高组合(T2)、人工花粉授粉弱×低组合(T3)、人工激素授粉(T4)^[18],具体授粉方案见表1。

1.4 测定指标与方法

植株、果实样品自授粉起至果实采收为止(35 d),每隔7 d取样1次,共6次。甜瓜的坐瓜节位选在主蔓自基部向上的第16节。在授粉后、枝条生长至架顶时打顶整枝,即保留顶芽以下的2片健壮叶,去除其余所有顶芽。同时,除授粉坐瓜节位的侧芽外,去除其余所有节位上的侧芽。

(1)早衰率统计。在授粉后28 d前后,植株会出现萎蔫现象,统计其不可逆萎蔫植株数,计算早衰率。

(2)植株样品的测定。采用游标卡尺测定子叶下部茎部直径最大的距离为茎粗;采用叶形纸称质量法测定叶面积;取各处理坐果节位的叶片,采用

表1 不同授粉方案
Table 1 Different pollination schemes

处理 Treatment	授粉时间 Pollination period	花粉活力 Pollen vitality	柱头可授性 Pistil receptivity	组合 Combination
T1(CK)	不授粉 No pollination			
T2	开花后 1 h One hour after flowering	强 Strong	高 High	强×高 Strong×High
T3	开花后 5 h Five hours after flowering	弱 Weak	低 Low	弱×低 Weak×Low
T4	氯吡啶和咯菌腈混合溶液 Mixed solution of chlorpyrifos and cypermethrin			

95%无水乙醇浸提法测定叶绿素含量;采用北京索莱宝科技有限公司植株根系活力检测试剂盒(货号:BC5270)测定根系活力。在测完上述指标后,将植株样品全部烘干测定其生物量以及全氮、全磷、全钾含量。采用硫酸-过氧化氢消煮获得待测液后,分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定全氮、全磷、全钾含量^[19]。养分积累量/(g·株⁻¹)=干物质质量×养分含量。

(3)果实样品的测定。分别测定不同时期不同处理的果实品质。采用FW-80T手持式折光仪测定可溶性固形物含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用酸碱滴定法测定总酸度^[20]。同时取出果实内种子,用于测定单果种子数(简称种子数量)、种子百粒质量。种子内含物在授粉后21~35 d测定,采用紫外分光光度法测定种子蛋白质含量;采用可见分光光度法测定淀粉含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[21]。在收获期,采收全部甜瓜果实,称质量测产。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 统计试验数据;采用 GraphPad Prism 8 进行方差分析(Two-way ANOVA);采用 Origin 2021 和 Spassua 作图。

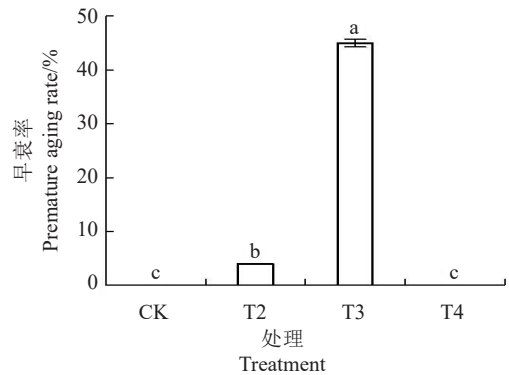
2 结果与分析

2.1 不同人工授粉方式对甜瓜早衰率的影响

由图1可知,不同授粉方式处理后,CK、T4处理的甜瓜植株均不产生早衰现象,而人工花粉授粉甜瓜植株均出现了不同程度的早衰。其中,T2处理的早衰率较低,仅为4%,显著低于T3处理;T3处理早衰率高达45%,显著高于其他处理。

2.2 不同人工授粉方式对甜瓜光合作用的影响

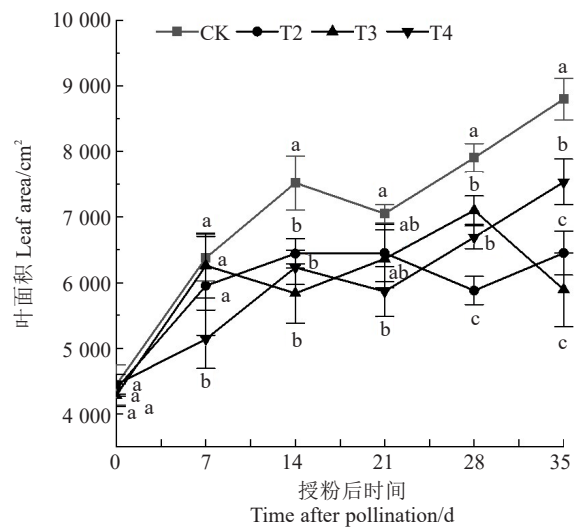
2.2.1 不同人工授粉方式对甜瓜叶面积的影响
由图2可知,T4处理的叶面积小于CK,但两者的变化趋势一致。T2、T3处理在授粉后14、28 d的变化趋势正好相反。自授粉后14 d起,CK的叶面积显著大于其他处理;在授粉后7 d,人工花粉授粉



注:不同小写字母代表处理间存在显著差异(P<0.05)。图9-A。

Note: Different small letters indicate significant difference between treatments(P<0.05). The same for fig. 9-A.

图1 不同人工授粉方式对甜瓜早衰率的影响
Fig. 1 Effects of different artificial pollination methods on the premature aging rate in melon



注:不同小写字母代表同一授粉时间的不同处理间存在显著差异(P<0.05)。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference between treatments of the same pollination time(P<0.05). The same below.

图2 不同人工授粉方式对甜瓜叶面积的影响
Fig. 2 Effects of different artificial pollination methods on melon leaf area

(T2和T3)的叶面积显著大于人工激素授粉(T4);

授粉后 28 d,CK、T3 和 T4 处理的叶面积显著大于 T2 处理;授粉后 35 d,人工激素授粉的叶面积显著大于人工花粉授粉。

2.2.2 不同人工授粉方式对甜瓜叶绿素含量的影响 由图 3 可知,授粉后 0~14 d,各处理的叶绿素含量均无显著差异。授粉后 21~35 d,T3 处理与其他处理叶绿素含量的变化趋势差异较大,表现为:授粉后 21 d,T3 处理的叶绿素含量显著高于 T4 处理;授粉后 28~35 d,T3 处理显著低于其他处理。

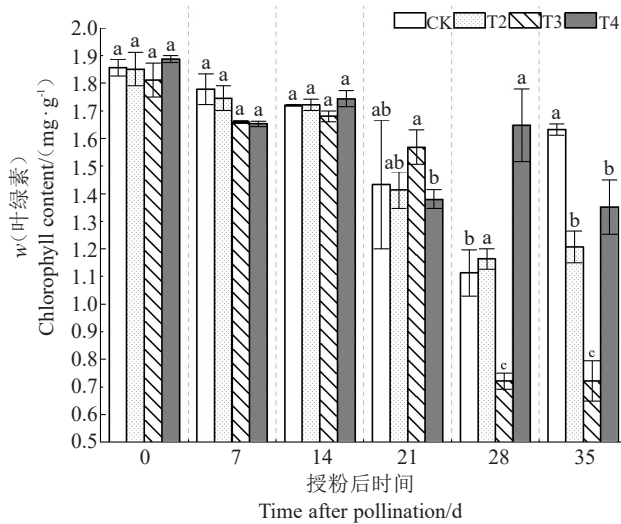


图 3 不同人工授粉方式对甜瓜叶绿素含量的影响
Fig. 3 Effects of different artificial pollination methods on chlorophyll content in melon

2.3 不同人工授粉方式对甜瓜茎粗的影响

由图 4 可知,CK 的茎粗在授粉后维持稳定增

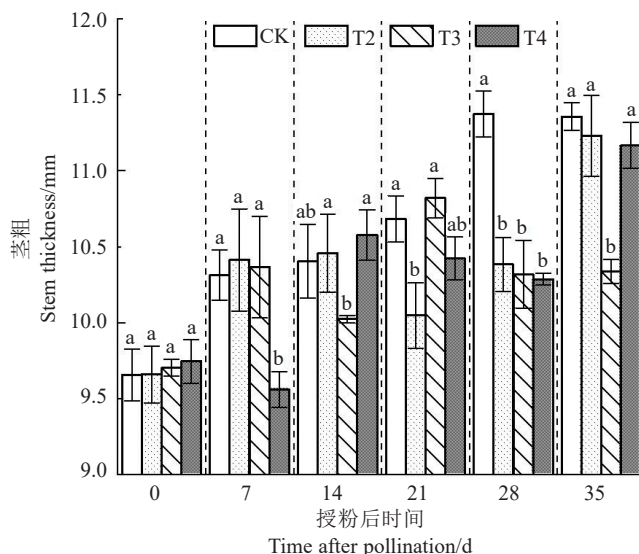


图 4 不同人工授粉方式对甜瓜茎粗的影响
Fig. 4 Effects of different artificial pollination methods on melon stem thickness

长,28 d 后增速趋缓。授粉后 7 d,T4 处理的甜瓜茎粗显著小于 CK 和其他处理;授粉后 14 d,T3 处理显著小于 T2 和 T4 处理;授粉后 21 d,T2 处理显著小于 CK 和 T3 处理;而授粉后 28 d,T2、T3 和 T4 处理的甜瓜茎粗差异不显著,却显著小于 CK;T3 处理在授粉后 35 d 时显著低于 CK 和其他处理。

2.4 不同人工授粉方式对甜瓜生物量的影响

由图 5 可知,授粉后甜瓜总生物量在逐渐积累,授粉初期(0~7 d)总生物量处于较低水平,各处理间差异不显著。由于 CK 无果实发育,至 28 d 后其总生物量显著低于其他处理,而 T4 处理的总生物量显著高于其他处理。在授粉后 35 d,T3 处理的总生物量与 T2 处理无显著差异,但二者均显著高于 CK,且 T2 处理高于 T3 处理。

2.5 不同人工授粉方式对甜瓜根系活力的影响

由图 6 可知,在授粉后,CK 的根系活力显著高于其他授粉处理。T4、T2 处理授粉后均呈先上升后下降的变化趋势,其峰值分别在授粉后 28、21 d。T3 处理授粉后的根系活力一直处于较低水平,且在授粉 21 d 达到最低,显著低于其他处理。

2.6 不同人工授粉方式对甜瓜养分吸收的影响

2.6.1 不同人工授粉方式对甜瓜养分积累量的影响

由图 7 可知,在氮、磷积累量动态变化中,不同处理间各有差异,但 CK 与 T4 处理的变化趋势较为一致,而 T2 和 T3 处理的变化趋势较为一致。在钾积累量动态变化中,T2、T3、T4 处理的变化趋势较为一致。氮积累量随着时间的推移呈现“W”形变化趋势,至授粉 28 d 后,CK 和 T4 处理的氮积累量显著高于 T2 和 T3 处理(图 7-A)。与 CK 和 T4 处理相比,T2、T3 处理的磷积累量较低,但 4 个处理在授粉后各时期均无显著差异;在收获期,T4 处理的磷积累量最高,T3 处理最低(图 7-B)。3 个授粉处理在授粉 14 d 后钾积累量显著高于 CK;在授粉 21 d,CK 的钾积累量显著低于其他处理;在授粉 28 d,T2 处理显著低于 T3、T4 处理;在授粉 35 d,T4 处理显著高于其他处理(图 7-C)。

2.6.2 不同人工授粉方式对收获期甜瓜养分分配率的影响

由图 8 可知,对于 CK 来说,甜瓜氮、磷、钾分配率最高的器官均为叶片,其次为茎、根,茎、根的分配率氮<磷<钾。而对于授粉处理,氮、磷分配率最高的器官是叶片,钾分配率最高的器官是果实。3 个授粉处理的氮、磷、钾分配率在各器官间无明显差异,但 T2、T4 处理的器官分配率较为相近。

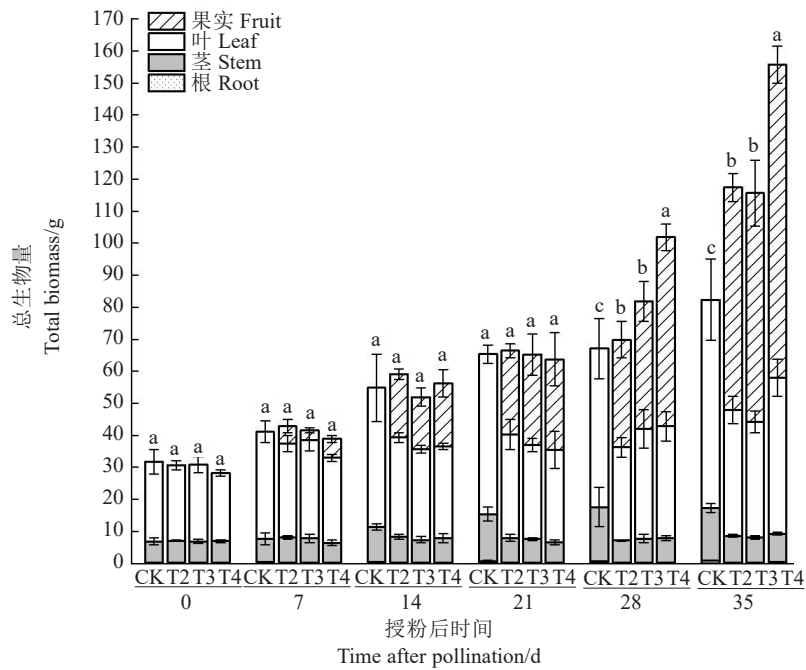


图5 不同人工授粉方式对甜瓜生物量的影响

Fig. 5 Effects of different artificial pollination methods on melon biomass

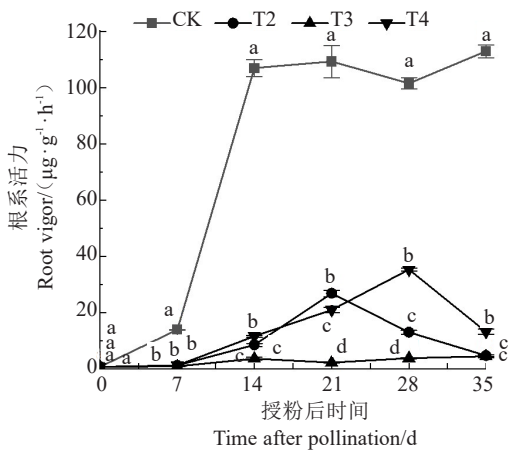


图6 不同人工授粉方式对甜瓜根系活力的影响

Fig. 6 Effects of different artificial pollination methods on melon root vigor

2.7 不同人工授粉方式对甜瓜产量和品质的影响

在收获期, T4 处理的果实产量显著高于人工花粉授粉处理, 较 T2、T3 处理分别显著提高 17.25%、16.75%(图 9-A); 3 个处理的甜瓜果实总酸度变化趋势基本一致, 收获期 T3>T4>T2, 但各处理间均无显著差异(图 9-B); 3 个处理的甜瓜果实可溶性糖含量变化趋势基本一致, 收获期 T2 处理最高, 达 15.74%, 显著高于 T3、T4 处理(图 9-C); 3 个处理的甜瓜果实可溶性固形物含量变化趋势基本一致, 收获期 T2 处理最高, 达 16.27%, 显著高于 T3、T4 处理(图 9-D)。

2.8 不同人工授粉方式对甜瓜种子的影响

2.8.1 不同人工授粉方式对甜瓜百粒质量和种子数量的影响 随着时间的推移, 种子百粒质量呈不断上升的趋势。人工激素授粉仅具种皮而无胚, 因此人工花粉授粉种子质量增长快于人工激素授粉, 至授粉 28 d 后, 人工花粉授粉种子百粒质量显著高于人工激素授粉(图 10-A)。除授粉后 21 d 人工激素授粉的种子数量下降外, 其他处理的种子数量随着时间的延长而增加。在授粉后 7~21 d, 人工花粉授粉的种子数量显著高于人工激素授粉, 授粉后 28 和 35 d, 人工花粉授粉和人工激素授粉种子数量无显著差异(图 10-B)。

2.8.2 不同人工授粉方式对甜瓜种子品质的影响 种子中蛋白质含量随着时间延长呈先升高后下降的趋势, 且 T2 处理高于 T3 处理, 但差异不显著(图 11-A)。种子中淀粉含量在授粉 21 d 最高, 然后开始下降, T3 处理在前期高于 T2 处理, 但在收获期 T2 处理高于 T3 处理, 但差异都不显著(图 11-B)。种子中可溶性糖含量随着时间的推移呈不断上升的趋势, T2 和 T3 处理差异不显著(图 11-C)。

2.9 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育指标影响的 PLS-DA 分析

PLS-DA (偏最小二乘判别分析) 主要用于揭示不同处理组在生长发育指标上的整体差异, 其

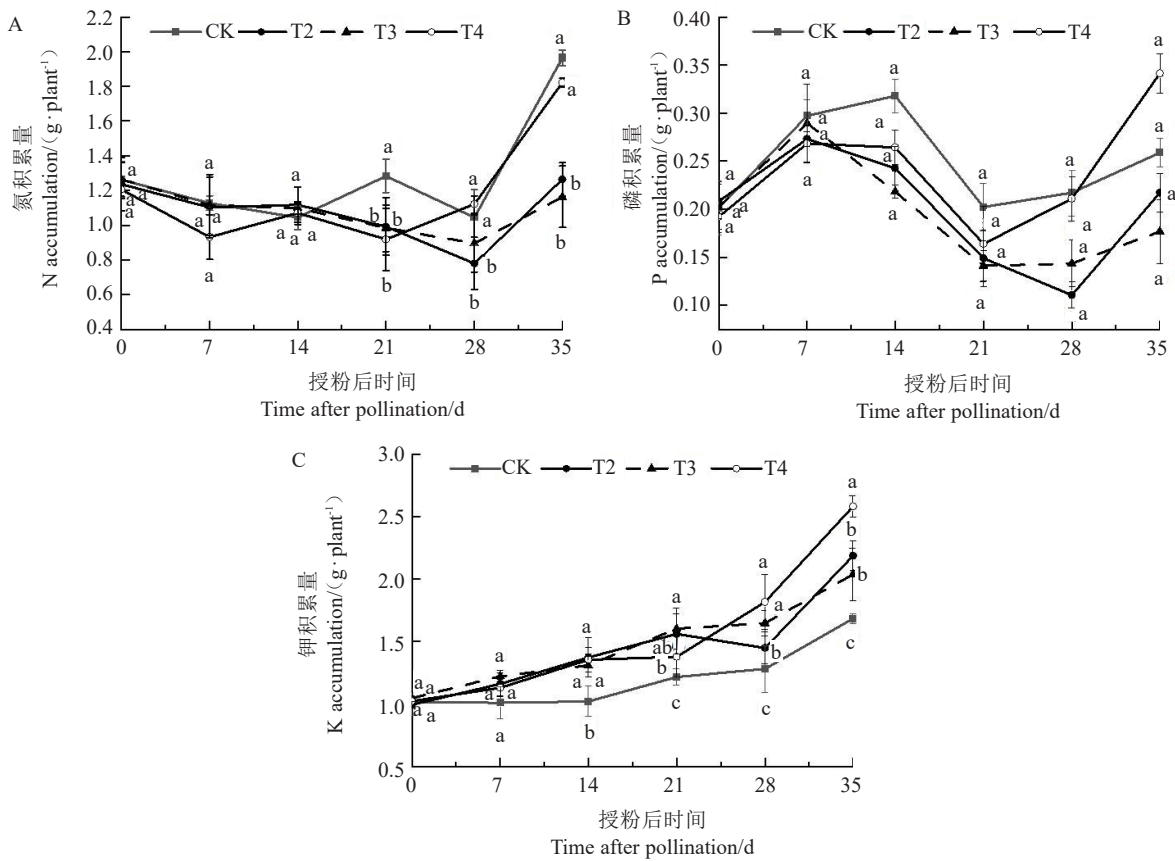


图7 不同人工授粉方式对甜瓜养分积累量的影响

Fig. 7 Effects of different artificial pollination methods on nutrient accumulation in melon

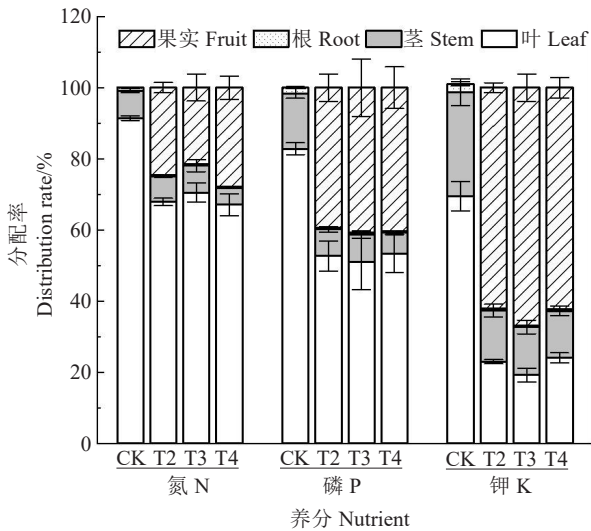


图8 不同人工授粉方式对收获期甜瓜养分分配率的影响

Fig. 8 Effects of different artificial pollination methods on the nutrient distribution ratio of melon at harvest time

核心是通过组分(component)分离反映组间差异程度。

2.9.1 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育指标影响的 Biplot 图 Biplot 同时展示处理组分布与指标

载荷方向,可直观反映指标对组间差异的贡献。由图 12 可知,CK 与 T2、T3、T4 处理在成分 1(贡献率 55.2%,主要差异来源)上明显分离,而 T2、T3、T4 处理则相对聚集。这表明“不授粉”处理的甜瓜在生长发育整体指标上与“授粉处理”差异明显。叶绿素含量(Chl)、根系活力(RA)的载荷偏向成分 1 的负方向,其余指标均偏向正方向。这说明 CK 在负方向指标 Chl、RA 上维持较高水平,与授粉处理差异显著,而授粉处理因生殖生长消耗资源,导致 Chl、RA 偏低。

2.9.2 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育指标影响的 VIP scores 图 VIP(variable importance in projection)值反映指标对组间差异的重要性,揭示关键早衰驱动因子(VIP>1 为关键因子)。由图 13 可知,早衰核心影响因子为 RA(根系活力)、TB(总生物量)、TSS(果实可溶性固形物含量)、TA(果实总酸度)、SN(种子数量)、K(钾积累量)、FSS(果实可溶性糖含量)。

2.9.3 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育影响的相关性分析 由图 14 可知,甜瓜氮积累量、磷积累

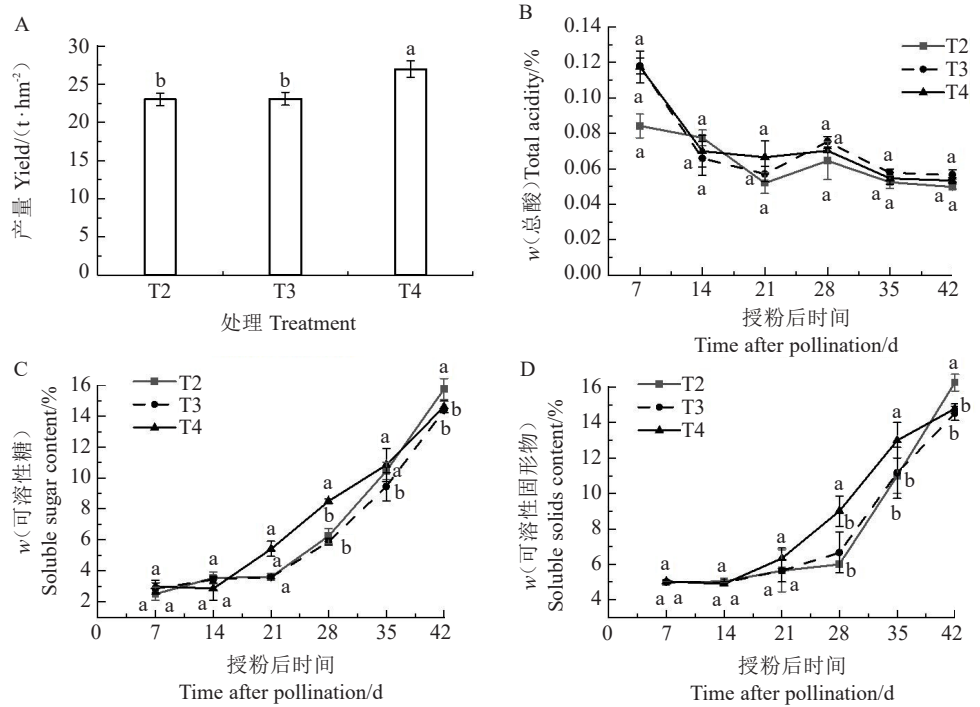


图9 不同人工授粉方式对甜瓜产量和品质的影响

Fig. 9 Effects of different artificial pollination methods on melon yield and quality

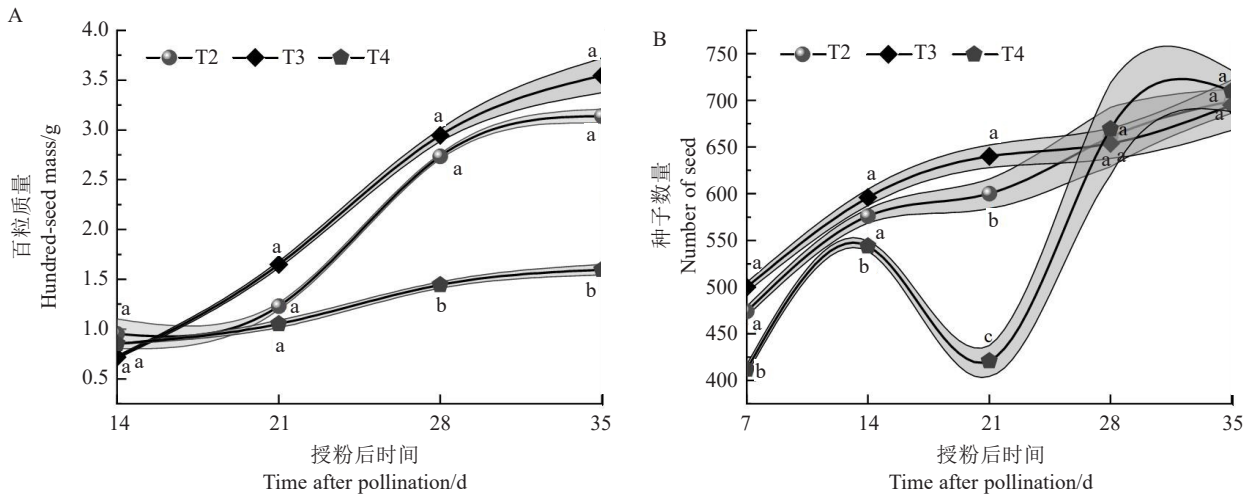


图10 不同人工授粉方式对甜瓜百粒质量、种子数量的影响

Fig. 10 Effects of different artificial pollination methods on hundred-seed mass and seed number of melon

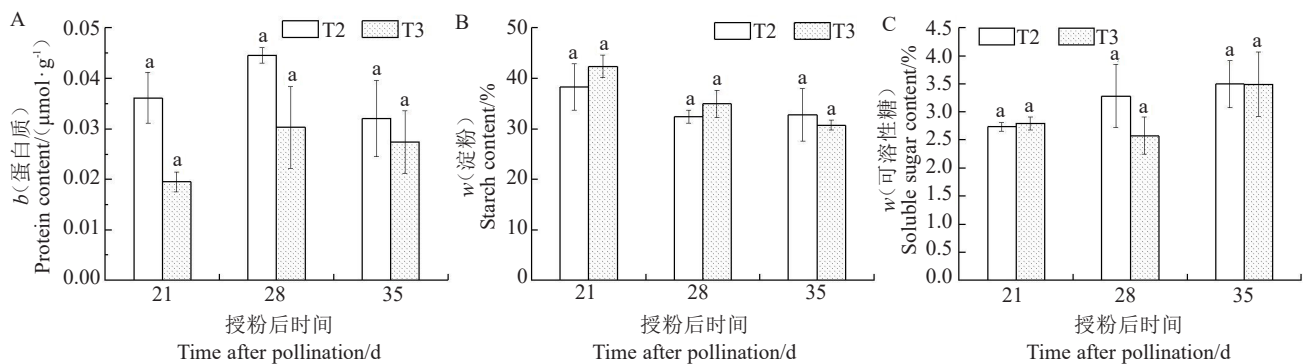
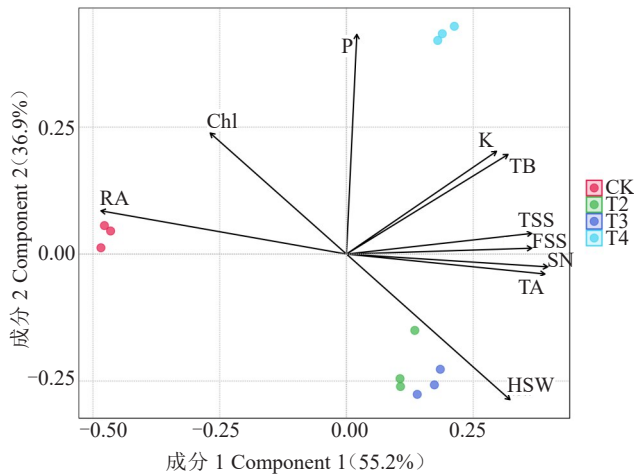


图11 不同人工授粉方式对甜瓜种子品质的影响

Fig. 11 Effects of different artificial pollination methods on melon seed quality

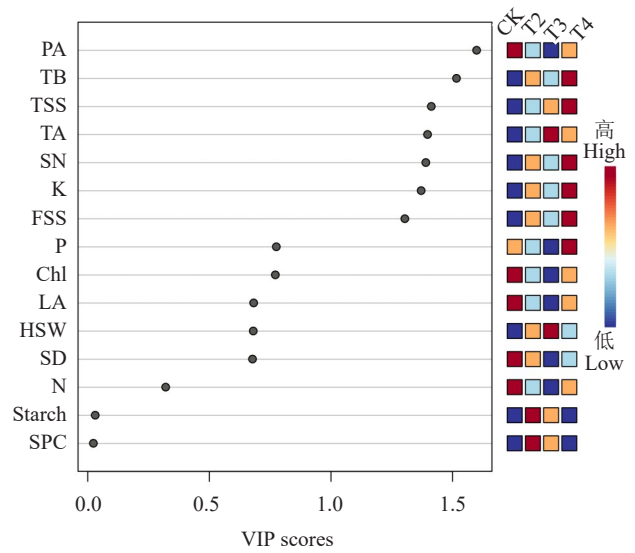


注:RA. 根系活力;Chl. 叶绿素含量;P. 磷积累量;K. 钾积累量;TB. 总生物量;TSS. 果实可溶性固形物含量;FSS. 果实可溶性糖含量;SN. 种子数量;TA. 总酸度;HSW. 种子百粒质量。下同。

Note: RA. Root vigor; Chl. Chlorophyll content; P. P accumulation; K. K accumulation; TB. Total biomass; TSS. Fruit soluble solids content; FSS. Fruit soluble sugar content; SN. Seed number; TA. Total acidity; HSW. 100 seeds mass. The same below.

图 12 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育指标影响的 Biplot 图

Fig. 12 Biplot diagram of the effects of different artificial pollination methods on melon growth and development indicators

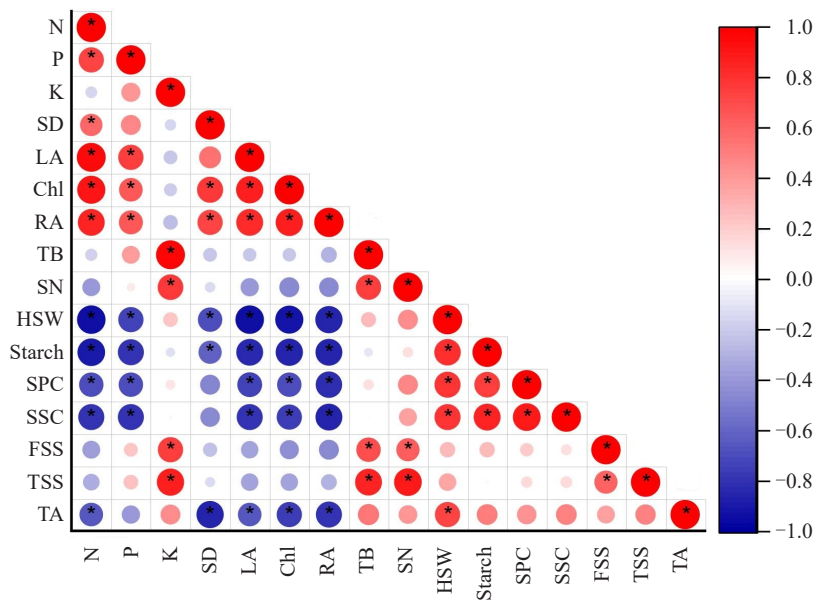


注:LA. 叶面积;SD. 茎粗;N. 氮积累量;Starch. 淀粉含量;SPC. 种子蛋白质含量。下同。

Note: LA. Leaf area; SD. Stem diameter; N. N accumulation; Starch. Starch content; SPC. Seed protein content. The same below.

图 13 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育指标影响的 VIP scores 图

Fig. 13 Vip scores of the effects of different artificial pollination methods on melon growth and development indicators



注:*表示在 0.05 水平显著相关。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level.

图 14 不同人工授粉方式对甜瓜生长发育的相关性分析

Fig. 14 Correlation analysis of different artificial pollination methods on melon growth and development

量、叶面积、叶绿素含量、根系活力分别与种子百粒质量、种子淀粉含量、种子蛋白质含量、种子可溶性糖含量呈显著负相关;钾积累量与总生物量、种子数量、果实可溶性固形物含量、果实可溶性糖含

量呈显著正相关。

3 讨论与结论

本研究发现,早衰现象只在人工花粉授粉的条件

下发生,其中 T3 处理的早衰率显著高于其他处理,较 CK 和 T4 处理提高 45 百分点,较 T2 处理提高 41 百分点。这说明甜瓜植株早衰与授粉时花粉活力及柱头可授性有关,授粉时间不适宜会对授粉受精不利^[22]。

农作物的产量本质上是光合作用积累的有机物总量,而光合作用的“功能核心”是叶绿素^[23]。叶面积是植物进行光合作用的“空间基础”,其大小和分布直接影响光能的接收总量。植株的衰老程度一般通过叶绿素含量判断^[4,24-25],本研究中,T3 处理的叶面积、叶绿素含量显著低于不授粉(CK)和人工激素授粉(T4),进一步验证了 T3 处理甜瓜植株的早衰特征。

花粉活力的强弱及授粉时机的精准调控,对植物生长发育、果实品质形成及产量构成均具有关键影响^[18],且授粉受精会引发多项生理生化指标的变化^[26]。在授粉后 35 d,T3 处理的甜瓜茎粗显著低于其他处理,可能与植株早衰相关,与魏兆平^[27]的研究结果一致。PLS-DA 分析显示,CK 的分离状态进一步佐证——授粉行为是触发植株从营养生长转向生殖发育的关键开关,因此 CK 最终总生物量显著低于其他处理。T3 处理的总生物量在授粉处理中最低,且其营养生长受到明显抑制。此外,T3 处理总生物量的 VIP 值达 1.516 1,仅次于根系活力,这说明早衰严重影响了植株的总生物量,限制了植株的生长发育。本研究中,T4 处理的产量在收获期较 T2、T3 处理分别显著提高 17.25%、16.75%;但在果实品质方面,T2 处理较 T3、T4 处理降低了果实总酸度,显著提高了果实可溶性糖和可溶性固形物含量。同时,果实品质的 VIP 值均大于 1,证实甜瓜植株早衰会导致果实产量和品质下降,与李建波^[4]的研究结果一致。

植物主要通过根系吸收水分、矿质元素,而根系活力高低是根能力强弱的体现,影响植物地上部的生长发育^[28-29]。本研究中,在授粉后,CK 的根系活力显著高于授粉处理,这说明生殖生长可能会限制根系生长。T3 处理的根系活力一直处于较低水平,且在授粉 21 d 达到最低,显著低于其他处理。根系活力的 VIP 值达 1.598 8,为所有指标中最高。这说明根系活力高低是导致甜瓜早衰的重要因子,与前人的研究结果一致^[30-31]。

本研究中,CK 和 T4 处理的氮积累量显著高于 T2、T3 处理。氮素作为植物体内蛋白质合成的核心元素,其供应状况对植物生长发育影响显著^[32]。研究表明,适量施氮可有效增大根系的总长度与表面积,从而增强根系对土壤中水分和养分的吸收能力^[33]。合理施氮还能提高甜瓜生长后期的干物质积累量与

氮素积累量^[34],促进生殖器官生物量分配^[35]。因此推测 T3 处理的氮积累量低间接促进甜瓜植株早衰。

与 CK 和 T4 处理相比,T2 和 T3 处理的磷积累量较低,且磷积累量的 VIP 值为 0.775 3。磷素对光合作用具有显著调控作用,适量施用磷肥可有效提升叶片的光合能力,促进光合产物向生殖器官的定向转运与分配,进而提高产量^[36-37]。因此,T3 处理的磷积累量少可能直接抑制能量代谢和根系活力,导致植株无法高效吸收养分和合成物质,是早衰的重要辅助因子。

收获期 T2、T3 处理的钾积累量显著低于 T4 处理,且钾积累量的 VIP 值达 1.3707,是早衰的关键影响因子。钾积累量与总生物量、果实可溶性固形物含量、果实可溶性糖含量呈显著正相关。钾素直接影响光合同化产物吸收、果实糖分合成及芳香物质(尤其是酯类)的转化与积累,适量增施钾肥可促进干物质和糖分积累,提升产量与品质,而供钾不足或过量则会通过抑制前体物转化等降低果实品质^[38-40]。结合 T3 处理的高早衰率,钾吸收不足可能通过抑制光合产物运输、削弱抗逆性直接加剧植株衰退,是早衰的重要驱动因子之一。

养分分配特征显示,CK 的氮、磷、钾在叶片中分配率最高;而授粉处理中,氮、磷主要分配于叶片,钾则主要分配于果实。3 种授粉处理氮、磷、钾在各器官间分配率无明显差异,但 T2、T4 处理的分配特征更接近。CK 与 T4 处理不出现早衰,说明其氮、磷、钾含量在植株内分配较为合理。在本研究中,氮、磷、钾积累量尤其是钾积累量不足,是 T3 处理早衰率较高的重要原因。

人工激素授粉属于刺激性单性结实,通过授粉触发植物生理反应但不发生受精作用,导致甜瓜形成的种子仅具种皮而无胚,表现为无籽性状^[41-43]。授粉后 21~28 d,人工花粉授粉种子百粒质量和种子数量增加较快、种子内含物积累迅速,而此阶段也是植株出现早衰的时期。结合 PLS-DA 分析,种子数量的 VIP 值为 1.390 0,这可能是 T3 处理种子发育异常导致植物激素信号紊乱,引起植株早衰。寇艳茹等^[44]通过对板栗胚胎发育的观察,发现受精过程可快速增强子房对养分的调运能力。本研究中,氮积累量、磷积累量、叶面积、叶绿素含量、根系活力分别与种子质量、种子内含物含量呈显著负相关,进一步验证 T3 处理种子发育异常导致植物激素信号紊乱,引起植株早衰。而 T2 处理因授粉时间适宜,资源分配信号稳定,生理干扰小,早衰率显著降低。T4 处理则是绕过花粉活力限制直接启动

果实发育,因此未出现早衰。此外,T2、T3处理的种子中蛋白质、淀粉、可溶性糖含量差异不显著,说明早衰对种子品质的影响较小。

综上所述,甜瓜种子的生长发育异常,会打破植株养分资源分配平衡,导致根系活力下降,从而造成养分吸收障碍,最终引发植株早衰。因此,从种子生长发育入手,维持根系活力与资源分配平衡是预防甜瓜早衰的关键。本研究结果可为解析授粉方式引发甜瓜早衰的原因提供理论依据,同时为解决蜜蜂授粉会引发甜瓜早衰这一问题提供思路。

参考文献

- [1] SUN Q Q, CHEN X Y, ZHANG Z Q, et al. The identification, characterization, and management of *Rotylenchulus reniformis* on *Cucumis melo* in China[J]. *Phytopathology Research*, 2023, 5(1): 38.
- [2] 海南省统计局,国家统计局海南调查总队.海南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
- [3] 海南省农业农村厅.五指山金香玉蜜瓜成“金果果”[EB/OL]. [2026-01-07]. https://agri.hainan.gov.cn/hnsny/ywtdt/zwtdt/202601/t20260107_4006879.html.
- [4] 李建波.厚皮甜瓜植株早衰机理与防控技术研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [5] ADANIYA S, MINEMOTO K, MOROMIZATO Z, et al. The use of CPPU for efficient propagation of pineapple[J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 100(1): 7-14.
- [6] 陈莹,张爽爽,张金鹏,等.甜瓜不同授粉方式应用效果分析[J]. *吉林蔬菜*, 2019(1): 43-44.
- [7] 付秋实,张新英,朱慧芹,等.不同授粉方式对设施厚皮甜瓜果实品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2014(11): 31-36.
- [8] 赵珊,吴娇,何燕,等.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.
- [9] 余慧勤.蜜蜂授粉水果市场前景及案例分析[J]. *中国蜂业*, 2019, 70(12): 21-22.
- [10] LEOPOLD A C. Aging, senescence, and turnover in plants[J]. *Bioscience*, 1975, 25(1): 659-662.
- [11] 刘志刚,王岩萍,买买提·艾合买提,等.吐鲁番秋季露地甜瓜防早衰丰产栽培技术[J]. *中国瓜菜*, 2019, 32(8): 147-148.
- [12] 朱立保,刘海河,张彦萍,等.镁对厚皮甜瓜坐果节位叶片叶绿素荧光特性和活性氧清除系统的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1279-1285.
- [13] 沈成国,余松烈,于振义.次结实植物的衰老与氮再分配[J]. *植物生理学通讯*, 1998(34): 288-296.
- [14] GUILLERMO A A D, PABLO C, ROBERTO R. A time-window within the grain filling period accounted for early leaf senescence in maize under sink limitation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 152: 127027.
- [15] 黄锡志,朱徐燕,李红斌,等.不同叶面肥对延缓厚皮甜瓜植株早衰的影响[J]. *浙江农业科学*, 2014(10): 1540-1542.
- [16] 苗立祥,陆鸿英,张豫超,等.不同整枝方式对秋季厚皮甜瓜品质产量和延缓植株早衰的影响[J]. *北方园艺*, 2011(5): 9-11.
- [17] 李斌,吴国利,张跃建,等.留瓜节位对厚皮甜瓜植株生理特性果重及可溶性固形物含量的影响[J]. *中国园艺文摘*, 2012, 28(2): 4-6.
- [18] 张惠明,张汉英,李洪立,等.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[J]. *热带作物学报*, 2025, 46(5): 1176-1184.
- [19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [20] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [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.
- [22] 郭学雨,安成立,王逸珺,等.美味猕猴桃同日不同时间授粉效果研究[J]. *北方园艺*, 2016(11): 34-37.
- [23] 李甜,张志鹏,侯雷平,等.CO₂加富对甜瓜叶片全生命周期光合作用的影响[J]. *福建农业学报*, 2020, 35(11): 1198-1206.
- [24] 李田,刘海河,张彦萍,等.外源赤霉素对厚皮甜瓜坐果节位叶片早衰与内源激素含量的影响[J]. *农药学报*, 2018, 20(5): 618-624.
- [25] 马玲.光环境调控下不同时期甜瓜生理指标的快速检测研究[D].银川:宁夏大学,2023.
- [26] 杨蒙迪.油棕雌蕊授粉后生理及转录组分析[D].海口:海南大学,2021.
- [27] 魏兆平.收成乡日光温室厚皮甜瓜早衰发生的原因及防治对策[J]. *农业与技术*, 2015, 35(8): 114-116.
- [28] 周照留,赵平,汤利,等.小麦蚕豆间作对作物根系活力蚕豆根瘤生长的影响[J]. *云南农业大学学报*, 2007, 22(5): 665-671.
- [29] 齐曼·尤努斯,木合塔尔·扎热,塔衣尔·艾合买提.干旱胁迫下尖果沙枣幼苗的根系活力和光合特性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1789-1795.
- [30] 高燕群,杜阳,孙文,等.整枝方式对不同哈密瓜品种果实生长发育及植株早衰的影响[J]. *上海蔬菜*, 2023(5): 56-57.
- [31] 李修燕.甜瓜栽培防早衰技术[J]. *农业知识*, 2021(22): 16-17.
- [32] 张赛峰.水肥减量及有机无机配施对甜瓜养分吸收分配及生长的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [33] 岳文俊,张富仓,李志军,等.日光温室甜瓜根系生长及单果重的水氮耦合效应[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(10): 1996-2006.
- [34] 杜少平,马忠明,薛亮.适宜施氮量提高温室砂田滴灌甜瓜产量品质及水氮利用率[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 112-119.
- [35] 胡国智,冯炯鑫,张炎,等.施氮对甜瓜干物质积累分配及产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 29-32.
- [36] 王艳丽,王京,刘国顺,等.磷施用量对烤烟根系生理及叶片光合特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 410-417.
- [37] 杨修一,耿计彪,戚兴超,等.磷肥用量对盆栽甜瓜产量及光合特性的影响[J]. *北方园艺*, 2016(14): 171-174.
- [38] 黄伟,张晓光.钾素对薄皮甜瓜光合作用和产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(2): 23-26.
- [39] 王锐竹,王怀松,贺超兴,等.钾对厚皮甜瓜成熟果实中芳香物构成及含量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2009(24): 24-29.
- [40] 陆雪锦,张炎,胡国智,等.钾肥用量对甜瓜生长发育、产量及品质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(12): 2286-2291.
- [41] 许家辉,黄镜浩,余东,等.焦核与大核龙眼雌配子体发育、授粉受精及早期胚胎发育的比较研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2012, 20(2): 114-120.
- [42] 祝海燕,郎德山,默书霞,等.植物无籽果实发生机理研究综述[J]. *河北林果研究*, 2007(3): 259-261.
- [43] KEITA S, HANAKO S, DAISUKE K, et al. Phylogenetic analyses and agronomical characteristics on parthenocarpy in different Cucurbitaceae genera using cross-pollination[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 289: 110210.
- [44] 寇艳茹,苏淑钗.授粉方式对板栗胚胎发育的影响[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(3): 94-99.