



贺强,杨芬,高德航,董振飞,许腾飞,毛立榕,王红清. 调环酸钙处理对北京地区草莓花芽分化及生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025,30(05):96-106.
HE Qiang, YANG Fen, GAO Dehang, DONG Zhenfei, XU Tengfei, MAO Lirong, WANG Hongqing. Effects of prohexadione-calcium treatment on flower bud differentiation and plant growth of strawberry in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(05):96-106.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.05.08

调环酸钙处理对北京地区草莓花芽分化及生长发育的影响

贺强^{1,2} 杨芬² 高德航² 董振飞² 许腾飞² 毛立榕² 王红清^{1,2*}

(1. 四川成都中农大现代农业产业研究院,成都 610041;

2. 中国农业大学 园艺学院,北京 100193)

摘要 为探究调环酸钙(Pro-Ca)对草莓花芽分化及开花结果的影响,以‘香野’草莓为试验材料,于定植前进行叶面喷施Pro-Ca处理,通过测定喷施后草莓生长指标、进行花芽分化形态学观察和相关基因表达量检测、记录定植后花期、测定各阶段的草莓产量和果实品质情况,探讨Pro-Ca处理对‘香野’草莓生长、花芽分化以及产量和品质的影响。结果表明:1)Pro-Ca处理可以显著抑制草莓旺长($P<0.05$),使叶片叶绿素相对含量较处理前增加6.28~9.07;2)Pro-Ca处理可调控草莓花分生组织决定基因 *FaAP1* 和花分生组织特异基因 *FaLFY* 的表达,促进花芽提早分化,使花芽分化提前2周左右;3)适宜浓度Pro-Ca处理可使草莓始花期和坐果期提前3 d,果实始熟期提前6 d,可显著提高草莓果实品质($P<0.05$),增加草莓结果初期单果重和单株产量,使产量增加5.85%~10.37%。综上,北京地区‘香野’草莓定植前40 d进行叶面喷施Pro-Ca处理,可有效抑制草莓旺长,增加叶绿素相对含量,使草莓提早花芽分化,提前开花结果,提高结果初期产量和果实品质,有助于草莓提早上市。

关键词 草莓;花芽分化;Pro-Ca;产量;果实品质

中图分类号 S668.4

文章编号 1007-4333(2025)05-0096-11

文献标志码 A

Effects of prohexadione-calcium treatment on flower bud differentiation and plant growth of strawberry in Beijing

HE Qiang^{1,2}, YANG Fen², GAO Dehang², DONG Zhenfei², XU Tengfei², MAO Lirong²,
WANG Hongqing^{1,2*}

(1. CAU-SCCD Advanced Agricultural & Industrial Institute, Chengdu 610041, China;

2. College of Horticulture, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To investigate the effects of prohexadione-calcium (Pro-Ca) on the flower bud differentiation, flowering and fruit of strawberry, strawberry variety ‘Kaolino’ was taken as the experimental material, and Pro-Ca was applied to the leaf surface before planting. The growth index of strawberry after spraying were determined, the morphology of flower bud differentiation was observed, and the expression of related genes was detected. The flowering stage after planting and measuring the yield and fruit quality of strawberry at each stage were recorded, and the effects of Pro-Ca treatment on the growth, flower bud differentiation, yield and quality of ‘Kaolino’ strawberry were explored. The results showed that: 1) Pro-Ca treatment could significantly inhibit the growth of strawberry ($P<0.05$), and the relative content of chlorophyll in leaves increased by 6.28 to 9.07 compared with that before treatment. 2) Pro-Ca treatment could regulate the expression of floral meristem determining gene *FaAP1* and floral meristem specific gene *FaLFY*, and

收稿日期: 2024-06-10

基金项目: 四川成都中农大现代农业产业研究院建设省市农业补助专项资金资助项目

第一作者: 贺强 (ORCID:0009-0005-4057-1363), 硕士研究生, E-mail: heqiang3037@163.com

通讯作者: 王红清 (ORCID:0000-0003-3275-6753), 教授, 主要从事草莓生长发育系统调控与高效栽培研究, E-mail: wanghq@cau.edu.cn

promote the early differentiation of flower buds by about 2 weeks. 3) The appropriate concentration of Pro-Ca treatment could advance the beginning flowering and fruit setting period of strawberry by 3 days, and the fruit ripening period by 6 days, which significantly improved the fruit quality of strawberry ($P < 0.05$), increased the initial fruit weight and yield per plant, and increased the yield by 5.85% to 10.37%. In summary, leaf spraying Pro-Ca treatment 40 days before the planting of 'Kaolino' strawberry in Beijing area can effectively inhibit the growth of strawberry, increase the relative content of chlorophyll, advance flower bud differentiation, advance flowering and fruit, improve the initial fruit yield and fruit quality, and contribute to early listing of strawberry.

Keywords strawberry; flower bud differentiation; prohexadione-calcium; yield; fruit quality

草莓(*Fragaria* × *ananassa* Duch.)属于浆果类水果,具有丰富的营养物质和经济价值,草莓果实鲜红艳明,果肉多汁,素有“水果皇后”的美誉,其含有多种矿物质,维生素C含量丰富,比柑橘高2.3倍,比苹果和葡萄高10倍^[1-2]。20世纪初,中国开始种植草莓,随着现代农业和设施农业的发展与进步,我国草莓产业发展迅猛,种植规模逐年增加,全国各地皆有大面积种植。据FAO统计,截止到2023年,我国草莓收获面积已达15.63万hm²,产量高达421.67万t,产量和收获面积均居世界首位^①。草莓栽培周期短、结果期长、收益快,已成为水果市场中极受大众欢迎的水果之一。我国草莓种植品种和种植模式差别较大,这也致使我国草莓上市时间与种植效益出现较大差异,究其缘由,关键在于草莓栽培期间花芽分化的时间不一致。因此,草莓促早栽培逐渐受到莓农青睐,促早栽培不仅可以促进草莓花芽提前形成,提早开花结果,还能提高产量和品质,效益远优于传统栽培。草莓能否提前进行花芽分化,是草莓提前开花结果、实现早熟及高产的基础,也是提高草莓种植效益的重要手段^[3]。

草莓花芽分化是叶芽分化为花芽,茎尖生长点从营养生长转变为生殖生长的过程,这个过程需要经历4个阶段,即诱导、启动、分化和形态建成^[4-6]。花芽分化是影响开花结果时间及果实产量和品质的重要阶段,分化过程受到内部与外部因素共同作用和相互协调,是一个复杂生理生化变化的过程,调控花芽分化的措施主要集中在人工调控和物质含量的变化2个方面^[7-9]。花芽分化过程中需要充足的营养物质,分化期间植物的形态及生理均会发生较大的改变^[10-11]。花芽分化是植物生长发育和农业生产过程中最重要的环节之一,草莓的花芽分化是多种因素相互作用的结果,外界环境、营养元素、

植物生长调节剂以及遗传物质等均是影响植物花芽分化的重要因素^[11-14]。在调控草莓花芽分化的过程中,相较于其他调控措施,植物生长调节剂处理具有操作简单、高效、快捷且成本较低的优势。

调环酸钙(Prohexadione-calcium, Pro-Ca)是一种工业合成的低毒、无污染的植物生长调节剂^[15]。具有高效、对环境无污染和农作物易吸收等特点^[16]。在植物体内Pro-Ca主要阻止GA20羟基化为GA1,降低GA的含量,影响不同作物的营养生长^[17-19]。Pro-Ca可以提高植物的抗逆性,增强植株的抗病害和抗寒冷能力^[20]。适宜浓度的Pro-Ca可以明显抑制苹果幼树新梢的生长,促进新梢粗度增长与次年成花,有利于N、Ca、Mg、Fe和B等元素在叶片中积聚^[21]。Pro-Ca也常用来调节果蔬的产量和品质^[22]。叶面或土壤施用Pro-Ca后,能控制植株旺长,使花期提前,提高果实品质、坐果率和产量,改变光合产物的分配方向,从而实现提质增产的目的^[23-24]。Maehyang(梅香)草莓母株使用Pro-Ca处理后可显著降低植株叶柄长度、匍匐茎数量及长度,显著增加匍匐茎的干鲜重,提高草莓叶片的叶绿素相对含量^[25]。

‘香野’草莓品质优良,且早熟高产,抗病性好,深受消费者喜爱。近年来,北京地区‘香野’草莓种植面积逐年增加,然而夏季高温严重影响了‘香野’草莓的花芽分化,阻碍了上市时间。因此,本研究结合实际生产情况,以‘香野’草莓为试验材料,于定植前对‘香野’草莓子苗叶面喷施不同浓度的Pro-Ca,从草莓生长情况、花芽分化(包括花芽分化进程,花芽分化机理探究等)、开花结果及果实品质4个方面综合探究苗期喷施Pro-Ca处理对草莓花芽分化以及对定植后产量和品质的影响,以达到提早开花结果、尽早上市、增加莓农经济效益、实现增产增收的

①数据来源:Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO),<https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>

目标,旨在为草莓的生产栽培提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以北京市万德草莓庄园繁育的‘香野’草莓子苗为试验材料,草莓子苗由当年栽植的母苗抽生并直接压苗于120 cm×10 cm×8 cm(长×宽×高)的栽培槽内,所用基质为V(草炭):V(珍珠岩):V(蛭石)=2:1:1。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验于2023年7—8月在北京市万德草莓庄园的草莓育苗大棚内进行,选用生长状况良好,有4~6片展开叶,无病虫害的草莓植株进行处理。处理采用叶面喷施的方式进行,Pro-Ca共设置3个浓度梯度,即0.3(T1)、0.45(T2)和0.6(T3) g/L,以喷施蒸馏水作为对照(CK),喷施处理共计2次,间隔21 d。第1次处理时间为7月12日,第2次处理时间为8月2日,每个浓度处理草莓子苗120株,共计处理草莓400余株(含损耗)。苗期Pro-Ca处理结束后,定植于中国农业大学科学院日光温室,采用高架定植,定植时间为8月27日,开花坐果统计时间为2023-10—2024-03。

1.2.2 生长指标测定

第2次处理结束后21 d(即8月23日),测量草莓植株的株高、根茎粗和叶绿素相对含量等生长指标,测量方法参照赵密珍^[26]编著的《草莓种质资源描述规范和数据标准》。

随机选取经Pro-Ca处理后的10株‘香野’草莓苗,用直尺测量每株草莓从地面到最高叶片的自然高度即为株高;用数显游标卡尺测量露出土壤上部1~2 cm左右处的草莓根茎粗;使用SPAD-502 Plus叶绿素仪(哈维斯廷科技有限公司生产)测量每株草莓中心展开叶往外数第3叶的中心小叶的叶绿素相对含量(SPAD值)。处理前和处理结束后各测定1次,叶绿素相对含量增加量=处理结束后的SPAD值—处理前的SPAD值。

1.2.3 草莓花芽分化形态学观察

从定植前2周至定植后6周,每周观察1~2次花芽分化进程。每次选取生长一致的草莓5株,取样后带回实验室,剥离老叶、新叶以及去除根系,在体视解剖镜下剥离草莓的顶芽,拍照观察并记录花芽分化的形态。草莓花芽可分为未分化期、肥厚初期、肥

厚中期、肥厚后期、二分割期、萼片形成期、雄蕊形成期、雌蕊形成期和花成形期9个时期,以上各分化时期以达到该时期的植株超过60%为标准^[8,27]。

1.2.4 草莓花芽分化相关基因表达量检测

选取各处理下生长状况较为一致,无病虫害的草莓子苗5~10株,去除多余的叶片,置于盛有冰块的泡沫箱中,带回实验室临时保存于4℃冰箱。检测基因表达量时,将取回的样品按不同浓度处理进行分类,逐步剥离多余的叶片、叶柄和根系,剥取草莓茎尖生长点,置于2 mL离心管内,每份样品1~5 g。取样后用液氮进行速冻,保存于-80℃超低温冰箱备用。

草莓总RNA的提取参照E. Z. N. A.® Plant RNA Kit植物RNA提取试剂盒(Omega Bio-tek, Inc)说明书进行。使用1%琼脂糖凝胶和1×TAE电泳检测RNA质量;使用Nano drop和相应软件测定所提取RNA的浓度。

cDNA的合成参照HiScript II Reverse Transcriptase反转试剂盒(诺唯赞,R223-01)说明书进行。

以反转录得到的cDNA为模板,以草莓*Actin*基因作为内参基因,采用SYBR Green法对花分生组织决定基因*FaAP1*和花分生组织特异基因*FaLFY*在草莓花芽分化进程中的表达进行相对定量分析,每个样品重复3次,使用ABI Q6 Real-Time PCR System仪器进行实时荧光定量RT-PCR反应。采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法计算各个基因的相对表达量。所用引物如表1。

实时荧光定量RT-PCR反应体系为20 μL: 2×ChamQ SYBR Color qPCR Master Mix (Low ROX Premixed) 10 μL, 上、下游引物(10 μmol/L)各0.4 μL, cDNA模板1 μL, ddH₂O 8.2 μL; PCR反应程序为预变性:95℃ 30 s; 循环反应:95℃ 10 s, 60℃ 30 s, 40个循环; 溶解曲线:95℃ 15 s, 60℃ 60 s, 95℃ 15 s。

1.2.5 开花坐果期观察

草莓开花结果期观察参照赵密珍^[26]编著的《草莓种质资源描述规范和数据标准》,结合实际稍作调整。自定植后30 d开始(即9月27日),以整个小区的所有草莓植株为调查对象,每隔3 d观察1次草莓开花结果期变化情况,包括草莓植株始花期、盛花期、坐果期和始熟期。各时期记录的标准:始花期为5%植株有花开放的日期;盛花期为25%植株

表 1 草莓花芽分化相关基因 qRT-PCR 反应引物序列

Table 1 Primer sequence of strawberry flower bud differentiation related genes qRT-PCR		
引物名称 Primer name	引物序列(5'-3') Primer sequence(5'-3')	来源 Source
<i>FaAP1</i> -F	GGAGAAGGCAATCAAGGAGCA	韩佩汝等 ^[8]
<i>FaAP1</i> -R	GAGCTGGTTCCTCCTCACCT	
<i>FaLFY</i> -F	TCCAAACGCGTTCCTGCGA	
<i>FaLFY</i> -R	AGCCCGGAACATCTCCTCCA	
<i>FaACTIN</i> -F	TGGGTTTGCTGGAGATGAT	梁佳惠 ^[28]
<i>FaACTIN</i> -R	CAGTTAGGAGAACTGGGTGC	

有花开放的日期;坐果期为 75% 植株有花瓣脱落的日期;始熟期为 5% 植株一级序果成熟的日期。

1.2.6 产量统计

以整个试验小区全部植株为调查对象,待草莓果实达到七分熟后进行采摘,按处理分类包装并带回实验室,用电子天平和电子计价秤进行称重,记录各个处理所采收的草莓果实数量和总产量等,计算各个处理间草莓平均单果重、平均单株产量以及产量。测量标准如下:

统计 2023-11—2024-03 期间所采收的草莓果实总重量和总个数,其中总产量为每次采收草莓重量的总和;平均单果重=草莓总重量/果实总个数;平均单株产量=草莓总重量/草莓总株数;产量=平均单株产量×每公顷种植株数/1 000,本试验按每公顷种植 90 000 株进行计算。

1.2.7 果实品质测定

测量各个处理结果早期(2023-11—2024-01)所采收的草莓果实单果重、果实横纵径和畸形果率等外在品质以及果实硬度、可溶性糖和可滴定酸等内在品质。

用数显游标卡尺测量各个处理所采收的特级果(单果重≥20 g)草莓果实横径和纵径,果形指数=最大纵径/最大横径;从试验小区收获的果实中随机取成熟适宜、有代表性、无污染的 30 个果,清洗干净,使用 GY-4 型水果硬度计(8 mm 测头)测定草莓中间部位的压力即为果实硬度,果实阴阳面各测 1 次,取平均数;采用手持 PAL-1 数显测糖仪测定草莓果实汁液的可溶性固形物含量。

选取成熟适宜、有代表性、无污染的草莓若干,去除多余果柄和萼片,称其鲜重记为 W1,将其装入提前准备好的铝盒中,将铝盒放入烘箱 100~105 ℃

杀青 10 min,将烘箱的温度降至 70~80 ℃烘至恒重,取出装有草莓的铝盒,将铝盒中烘干的草莓倒出进行称重,记为 W2。烘干前的草莓重量减去烘干后的草莓重量即为水份含量,每个处理重复 6 次。
含水率=(W1-W2)/W1×100%

维生素 C(Vc)含量参照 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[29]测定;可溶性糖含量参照蒽酮-乙酸乙酯比色法^[29]测定;可滴定酸含量参照 NaOH 滴定法^[29]测定;有机酸含量使用 ATAGO(日本爱拓)的手持 PAL-BXI/Acid 3 糖酸一体机测定。

1.3 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 和 GraphPad Prism 软件进行数据统计分析及绘图。使用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行差异显著性分析,显著性水平为 P=0.05。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓生长的影响

处理结束后,测定草莓植株生长情况,如表 2 所示。可见 Pro-ca 处理可有效抑制草莓旺长。其中:T1 和 T2 处理可显著降低‘香野’草莓株高(P<0.05);T3 处理也具有降低株高的趋势,但与对照相比则无显著性差异;此外,T2 和 T3 处理可使草莓根茎粗增加,但与对照相比,无显著性差异。

Pro-Ca 处理后‘香野’草莓叶绿素相对含量如图 1 所示,其中心小叶的叶绿素相对含量(SPAD 值)均显著增加,T1~T3 处理的 SPAD 值增加量分别为 6.28、6.52 和 9.07,均显著高于对照处理的 2.66(P<0.05)。其中,T3 处理的 SPAD 值增加量最高,较对照处理高 6.41 个单位。

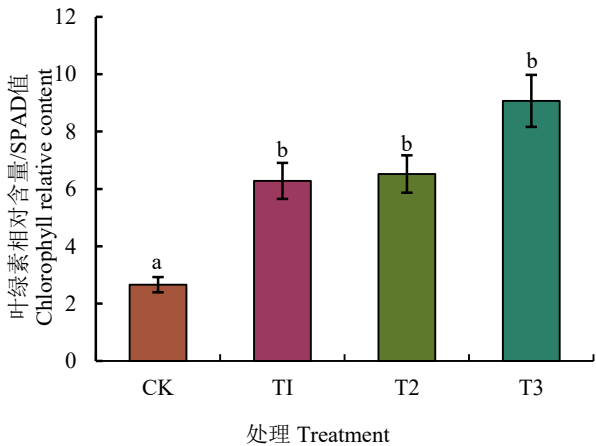
表2 Pro-Ca处理对‘香野’草莓株高和根茎粗的影响

Table 2 Effects of Pro-Ca treatment on plant height and root diameter of ‘Kaolino’ strawberry

处理 Treatment	株高/cm Plant height		根茎粗/mm Root thickness	
	处理前	处理后	处理前	处理后
	Before treatment	After treatment	Before treatment	After treatment
CK	20.08±1.96aB	30.20±2.25aA	4.90±0.40abB	8.10±2.06abA
T1	22.40±1.18aB	24.37±2.81bA	4.92±0.44aB	7.60±1.39aA
T2	19.46±2.36aB	25.01±3.45bA	4.67±0.43aB	8.36±1.96aA
T3	21.54±3.47aB	26.81±3.89abA	4.76±0.85aC	8.46±2.10aA

注:CK为对照组;T1、T2和T3分别为0.3、0.45和0.6 g/L的Pro-Ca处理。不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异($P<0.05$),相同小写字母表示不同处理间无显著性差异($P>0.05$);不同大写字母表示处理前和处理后具有显著性差异($P<0.05$),相同大写字母表示处理前和处理后无显著性差异($P>0.05$)。下同。

Note: CK, control group; T1, T2 and T3 are Pro-Ca treatments of 0.3, 0.45 and 0.6 g/L, respectively. Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments ($P<0.05$), while the same lowercase letters indicated no significant difference between different treatments ($P>0.05$). Different uppercase letters indicated significant difference between before and after treatment ($P<0.05$), while the same uppercase letters indicated no significant difference between before and after treatment ($P>0.05$). The same bellow.



不同小写字母表示不同处理间具有显著性差异($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicated significant difference between different treatments($P<0.05$).

图1 Pro-Ca处理对‘香野’草莓叶绿素相对含量的影响

Fig. 1 Effects of Pro-Ca treatment on relative chlorophyll content of ‘Kaolino’ strawberry

2.2 不同浓度 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓花芽分化的影响

为判断草莓花芽分化情况以及各个分化时期的特征,利用SZN45型体式显微镜对草莓的茎尖进行解剖观察,每周观察1~2次花芽分化情况。结果如图2所示。本试验将草莓花芽分化进程分为9个时期,其中,未分化期的茎顶端分生组织形态狭窄,紧贴于叶原基,且叶原基较小,呈明显山字状;肥厚初期的茎顶端分生组织形态稍微膨大,较

未分化期宽大,生长点有点突起,变得肥厚,并向两侧扩张;肥厚中期的生长点继续突起,呈半圆形;肥厚后期的生长点呈球形,变得更加饱满;二分割期时,已经肥厚的球形生长点被分割成前后两个部分,其中高的突起为顶花芽;萼片形成期时,花芽四周萼片原基周围继续形成突起;雄蕊形成期时,顶花芽的四周出现锯齿状的突起;雌蕊形成期时,花器里侧出现下限,且中心位置出现向上的突起;花成形期时,中心花被萼片全部包裹,且有许多小绒毛出现。

‘香野’草莓各处理花芽分化进程如图3所示,与对照相比,Pro-Ca处理能促进草莓花芽提早分化。其中,对照处理植株于9月初开始进入花芽肥厚期,而Pro-Ca处理可使草莓花芽肥厚期提早10 d左右,即8月底进行;二分割期通常被认为是花芽分化开始的标志,Pro-Ca处理可使草莓提前17 d左右进入二分割期,提前14 d左右进入萼片形成期。综上,Pro-Ca处理可使‘香野’草莓花芽分化提早2周左右,其中,高浓度的Pro-Ca处理促进效果优于低浓度处理。

通过检测草莓花芽分化相关基因表达量发现,T3处理可显著上调花分生组织决定基因*FaAP1*和花芽分生组织特异基因*FaLFY*的表达,从而促进花芽提早分化,T1和T2处理则无显著差异,推测可能由于Pro-Ca浓度过低或环境间的差异影响了*FaAP1*和*FaLFY*基因表达(图4)。

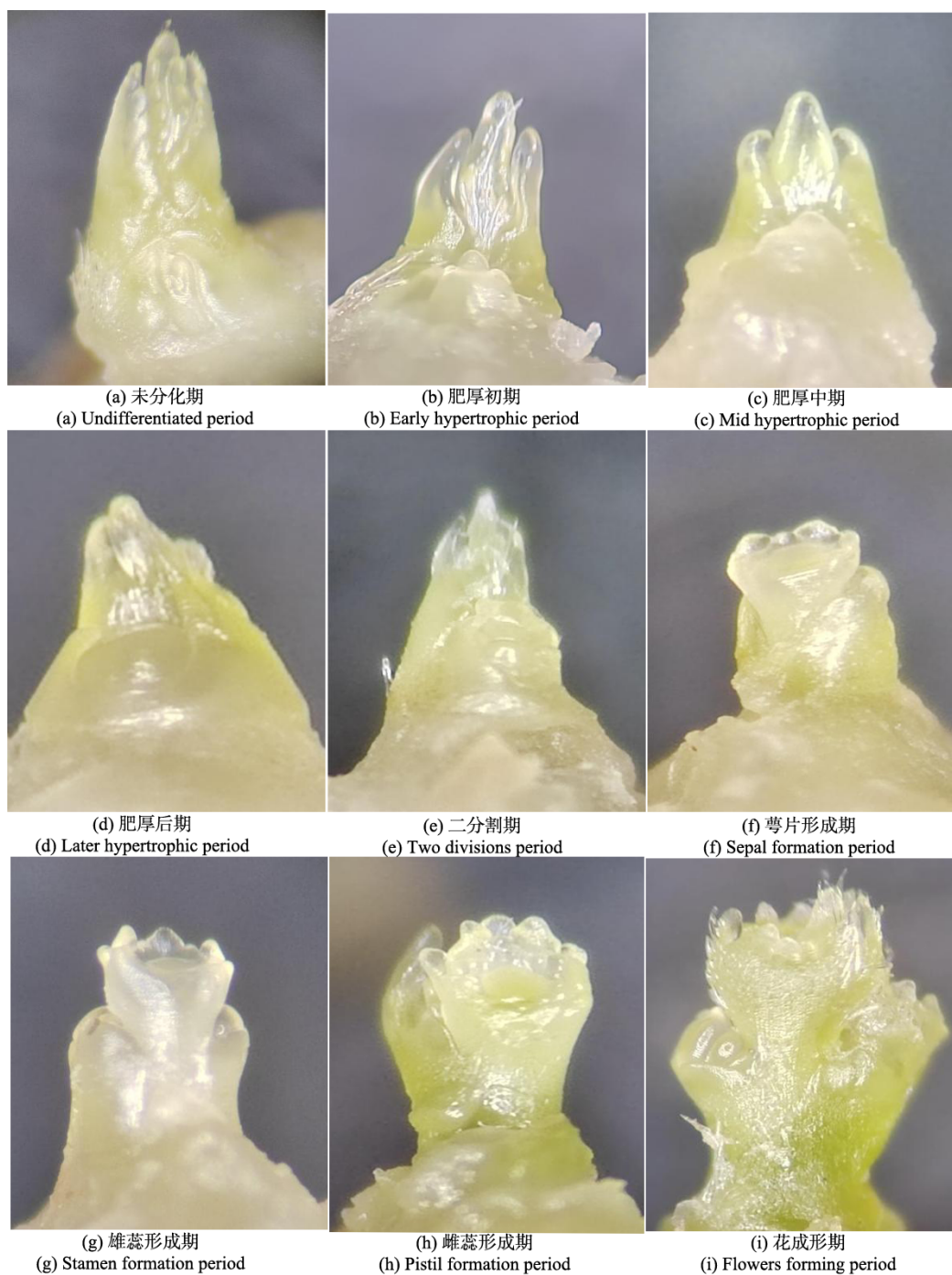


图 2 草莓花芽分化形态学观察

Fig. 2 Morphological observation of strawberry flower bud differentiation

2.3 不同浓度 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓开花结果的影响

Pro-Ca 处理后,草莓始花期、盛花期、坐果期和果实始熟期均有所提前,如表 3 所示,T1 处理可使‘香野’草莓始花期和坐果期提前 3 d,果实始熟期提前 6 d;T2 处理可使‘香野’草莓始花期提前 3 d。

2.4 不同浓度 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓产量的影响

草莓成熟后,及时采摘并记录每月所采收的草莓数量和总重量,计算平均单果重、平均单株产量和产量。如表 4 所示,与对照相比,T1 处理可增加‘香野’草莓 11 月份单果重和 11 月一次年 3 月的单株产量,

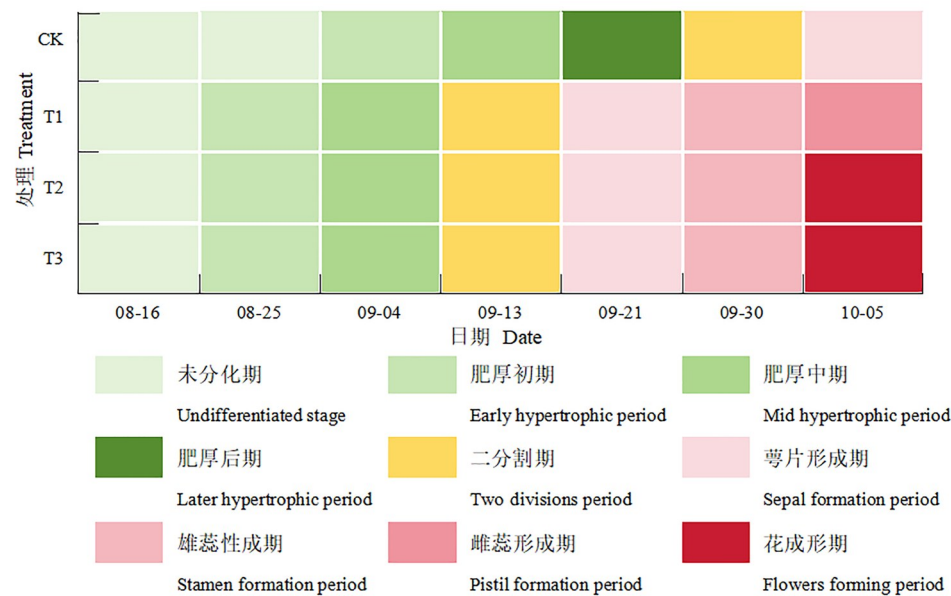
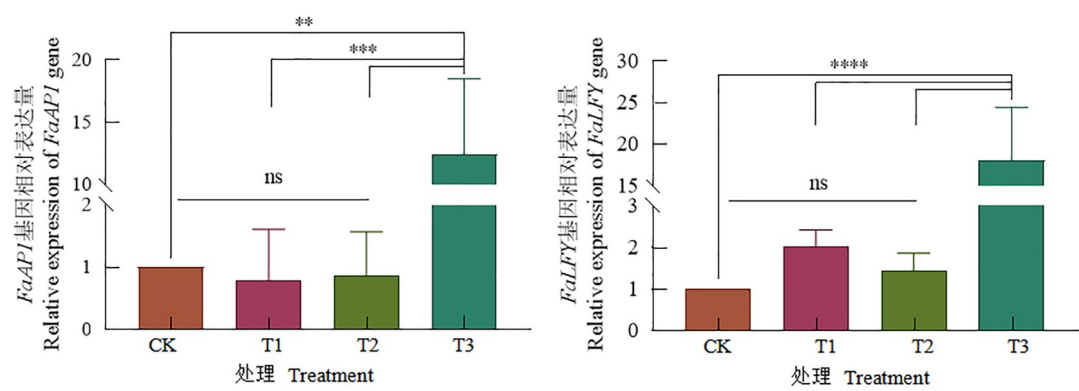


图3 Pro-Ca处理对‘香野’草莓花芽分化进程的影响

Fig. 3 Effect of Pro-Ca treatment on flower bud differentiation of ‘Kaolino’ strawberry



,*和****均表示处理间具有显著性差异($P<0.05$),ns表示处理间无显著性差异($P>0.05$)。

,*and**** all indicates significant difference between treatments($P<0.05$), ns indicates no significant difference between treatments ($P>0.05$).

图4 Pro-Ca处理对‘香野’草莓花芽分化相关基因表达量的影响

Fig. 4 Effect of Pro-Ca treatment on the expression of genes related to flower bud differentiation of ‘Kaolino’ strawberry

表3 Pro-Ca处理对‘香野’草莓开花结果的影响

Table 3 Effect of Pro-Ca treatment on flowering and fruit of ‘Kaolino’ strawberry

处理 Treatment	始花期 First flowering period	盛花期 Full flowering period	坐果期 Time of fruiting	始熟期 Initial ripening period
CK	10-13	11-24	12-09	11-03
T1	10-10	11-24	12-06	10-28
T2	10-10	11-24	12-15	11-03
T3	10-22	11-27	12-09	11-03

可使产量增加 10.37%；T2 处理可增加‘香野’草莓 11 月份单果重和单株产量，可使产量增加 5.85%；T3 处理可增加‘香野’草莓 11 月一次年 2 月的平均单果重和 11 月和 12 月的单株产量，可使产量增加 7.68%。

表 4 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓产量的影响
Table 4 Effect of Pro-Ca treatment on yield of ‘Kaolino’ strawberry

处理 Treatment	平均单果重/g Average single fruit weight					平均单株单产/g Average yield per plant					产量/ (kg/hm ²) Yield
	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	
CK	7.82	13.49	12.21	12.49	10.08	5.35	10.65	52.49	58.97	24.39	13 666.50
T1	8.24	8.51	12.05	16.08	9.63	8.45	11.87	54.56	59.26	33.46	15 083.70
T2	8.33	8.56	12.29	14.64	8.86	12.17	4.17	45.36	69.06	29.97	14 465.85
T3	10.64	14.01	12.41	14.72	9.85	6.08	11.61	45.03	72.36	28.43	14 715.90

2.5 不同浓度 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓品质的影响

草莓采摘后，测定结果早期(11 月一次年 1 月)草莓商品果率(单果重≥10 g)，畸形果率，特级果率(单果重≥20 g)以及特级果单果重、果实横纵径和果形指数，如表 5 所示，Pro-Ca 处理会降低‘香野’草莓结果早期特级果率；T1 和 T2 处理显著降低特级果单果重和果实横径($P<0.05$)，对果实纵径和果形指数则无显著影响；相较于对照处理，T3 处理可使‘香野’草莓商

品果率增加 7.0%，对特级果单果重和果形指数无显著影响，但畸形果率会有所上升。

如表 6 所示，通过测定‘香野’草莓果实的硬度、可溶性糖和可滴定酸等内在品质发现，Pro-Ca 处理可显著增加草莓中可溶性糖和 Vc 含量($P<0.05$)，但对草莓果实硬度和含水率则无显著影响；T2 处理可显著增加可滴定酸含量($P<0.05$)；T3 处理可使可溶性固形物、可滴定酸和有机酸含量显著增加($P<0.05$)。

表 5 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓外在品质的影响
Table 5 Influence of Pro-Ca treatment on external quality of ‘Kaolino’ strawberry

处理 Treatment	单果重/g Weight of single fruit	横径/mm Transverse diameter	纵径/mm Longitudinal diameter	果形指数 Fruit shape index	特级果率/% Special grade fruit rate	商品果率/% Commercial fruit rate	畸形果率/% Malformed fruit rate
CK	30.31±4.11a	37.80±3.29a	50.16±5.47a	1.34±0.24a	11.6	56.6	13.7
T1	22.72±1.79cd	32.87±0.98cd	47.61±5.60a	1.45±0.19a	4.5	53.8	9.8
T2	23.02±3.10cd	33.40±3.65cd	47.53±4.84a	1.45±0.25a	5.0	56.4	14.1
T3	27.03±4.25ab	35.60±2.31abc	48.90±6.04a	1.38±0.22a	9.7	63.6	17.0

表 6 Pro-Ca 处理对‘香野’草莓内在品质的影响
Table 6 Effects of Pro-Ca treatment on the intrinsic quality of ‘Kaolino’ strawberry

处理 Treatment	硬度/ (N/cm ²) Hardness	可溶性固形物/% Soluble solids	可溶性糖/ (mg/g) Soluble sugar	可滴定酸/ (mg/g) Titrable acid	有机酸/% Organic acid	Vc 含量/ (mg/kg) Vc content	含水率/% Content of water
CK	9.72±1.13a	9.29±0.99b	66.61±1.72d	6.37±0.05b	0.50±0.01bc	291.80±0.57b	92.50±0.01a
T1	9.34±1.37a	9.86±1.41ab	73.32±0.64b	6.03±0.18b	0.48±0.04c	397.62±0.85a	92.17±0.01a
T2	10.06±1.69a	9.48±1.05ab	76.64±0.59a	7.44±0.22a	0.51±0.01b	378.04±1.36c	92.33±0.01a
T3	10.02±1.30a	10.10±1.04a	69.66±0.46c	7.50±0.08a	0.55±0.01a	365.87±1.29d	92.50±0.01a

3 讨 论

草莓花芽分化需要适宜的温度环境,温度过高或过低,均会影响草莓花芽分化进程。草莓花芽分化的临界温度为5~27℃,适宜温度为10~20℃,高温会延缓花芽分化,低温则促进花芽分化^[5,30]。北京地区夏季高温炎热,且高温持续时间较长,不利于草莓进行花芽分化,进而影响了开花结果时间,阻碍提早上市。本研究使用RC-4HC重复性温(湿)度记录仪记录处理期间棚内温度发现,北京市昌平区2023年7—8月平均温度为26.3℃,日最高温为38.5℃,严重影响了草莓花芽分化。在草莓日常栽培过程中,促进草莓提早花芽分化的方式有很多,如利用高山育苗、遮阴、断根、定植前进行低温冷藏处理等均能促进草莓提早花芽分化^[8,31]。然而,我国地域辽阔,高山育苗路途遥远,难以统一管理;遮阴和断根处理会使人力和物力成本增加;低温冷藏处理需要安装低温冷藏设备且不利于大批量处理,也会增加管理和生产成本。因此,为了解决这一生产问题,本研究结合实际生产情况,以‘香野’草莓为试材,选择操作简单、高效、快捷且成本低的植物生长调节剂进行处理,探索定植前喷施不同浓度Pro-Ca处理对草莓花芽分化及产量和品质的影响。

植物生长调节物质能够调节草莓的生长、发育和分化过程^[9]。前人研究显示,Pro-Ca处理可促进植物花芽分化和调控花期^[24,32-33]。本研究通过对草莓花芽分化进程进行形态学观察和检测草莓花芽分化相关基因的表达量,发现Pro-Ca处理可调控草莓花分生组织决定基因*FaAPI*和花分生组织特异基因*FaLFY*基因的表达,从而促进花芽提早分化,使花芽分化提前2周左右。其中,浓度为0.45和0.6 g/L的Pro-Ca处理对花芽分化的促进效果优于浓度为0.3 g/L的Pro-Ca处理。使用0.6 g/L Pro-Ca处理时,可显著上调花分生组织决定基因*FaAPI*和花分生组织特异基因*FaLFY*基因的表达,但0.3和0.45 g/L的Pro-Ca处理时则没有显著性差异,推测可能受Pro-Ca施用浓度、环境差异或其他调控网络等因素的影响。根据前人研究,草莓花芽分化会受到营养物质、激素水平、温度和光照等因素的影响^[4,7-8]。此外,在基因水平上,*API*基因的表达会受到花分生组织特异基因*LFY*、开花决定

基因*FT*和开花抑制子*TFL1*的影响^[8,34-36]。*LFY*基因是花芽分化过程中最早开始表达的基因,与*API*基因可以互相正调控^[37-38],*LFY*基因能激活*API*基因,使其在整个花分生组织中表达^[39]。综上,高浓度Pro-Ca处理可显著影响草莓花芽分化相关基因的表达,低浓度处理则基因表达不明显,Pro-Ca对草莓花芽分化的影响机理仍需进一步研究。

前人研究表明,Pro-Ca处理不仅可以促进草莓生殖生长,提早草莓始花期和盛花期,还能显著增加果实最大单果重,提高植株坐果率和果实品质,增加果实产量和商品果率^[24,32,40]。本研究发现,草莓苗定植前经适宜浓度Pro-Ca处理,可显著抑制草莓旺长,使叶绿素相对含量增加6.28~9.07,高浓度Pro-Ca处理可增加草莓根茎粗,这对增强草莓光合能力,促进草莓提早花芽分化,调控花期具有一定的益处,还能促进草莓更好地吸收养分,提高产量和品质。经统计分析发现,适宜浓度的Pro-Ca处理可使始花期和坐果期提前3 d,果实始熟期提前6 d,草莓果实品质也得到显著提高,可增加草莓结果初期单果重和单株产量,对草莓果形指数无显著影响,可使产量增加5.85%~10.37%。另外,0.3和0.45 g/L的Pro-Ca处理会使结果初期特级果单果重显著降低,0.6 g/L的Pro-Ca处理则没有显著影响,能增加商品果率,与前人^[24,40]的研究结果一致。

4 结 论

北京地区‘香野’草莓定植前40 d进行叶面喷施Pro-Ca处理,可有效抑制草莓植株旺长,增加叶绿素相对含量,使草莓提早花芽分化,提高早期产量和果实品质,有助于草莓提早上市,达到提高经济效益的目标。

参考文献 References

- [1] 刘相如,尹克林,钱春,刘素君,张元元,芮春梅.盆栽草莓基质筛选试验初报[J].中国农学通报,2007,23(4):281-284
Liu X R, Yin K L, Qian C, Liu S J, Zhang Y Y, Rui C M. Primary report of experiment of substrate optimization of pot-strawberry [J]. *China Agriculture Science*, 2007, 23(4): 281-284 (in Chinese)
- [2] 罗学兵,贺良明.草莓的营养价值与保健功能[J].中国食物与营养,2011,17(4):74-76
Luo X B, He L M. Nutritional value and health function of strawberry [J]. *Food and Nutrition in China*, 2011, 17(4): 74-76 (in Chinese)
- [3] 孙彬,赵小琳.草莓花芽分化的形态发生[J].兰州大学学报,1990,26(4):

- 127-131
Sun B, Zhao X L. The morphogenesis of flower bud differentiation in strawberry [J]. *Journal of Lanzhou University*, 1990, 26 (4): 127-131 (in Chinese)
- [4] 余红,马华升,方献平,来文国,俞少华. 草莓花芽分化机理及调控技术研究进展[J]. 江西农业学报, 2011, 23(1): 58-61, 67
Yu H, Ma H S, Fang X P, Lai W G, Yu S H. Review on mechanism of strawberry flower bud differentiation and application of regulation techniques [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23 (1): 58-61, 67 (in Chinese)
- [5] 宫殿为. 草莓花芽分化及其影响因素研究[J]. 农业科技与装备, 2021(5): 3-4
Gong D W. Study on strawberry flower bud differentiation and its influencing factors [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2021(5): 3-4 (in Chinese)
- [6] 曹明浩,庞夫花,肖坤,李歆渝,连红莉,许鹏博. 断氮处理对红颜和章姬草莓花芽分化及开花结果的影响[J]. 中国果树, 2022(11): 17-22, 29
Cao M H, Pang F H, Xiao K, Li X Y, Lian H L, Xu P B. Effects of nitrogen-deficient on flower bud differentiation, flowering and fruiting of 'Benihoppe' and 'Akihime' strawberry [J]. *China Fruits*, 2022 (11): 17-22, 29 (in Chinese)
- [7] 张学明,陈玉波,侯佳贤,姚环宇,郑亚杰. 草莓的花芽分化及其影响因素研究进展[J]. 吉林农业, 2017(21): 85
Zhang X M, Chen Y B, Hou J X, Yao H Y, Zheng Y J. Research progress on flower bud differentiation of strawberry and its influencing factors [J]. *Agriculture of Jilin*, 2017(21): 85 (in Chinese)
- [8] 韩佩汝,张正伟,郑静,宋丹,梁佳惠,祝保英,王红清. 低温对草莓花芽分化的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 30-39
Han P R, Zhang Z W, Zheng J, Song D, Liang J H, Zhu B Y, Wang H Q. Effects of low temperature on flower bud differentiation in strawberry [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1): 30-39 (in Chinese)
- [9] 胡彩珠,孙东宇,宋世威. 植物激素调控草莓花芽分化及果实发育的作用[J]. 果农之友, 2024(1): 1-7
Hu C Z, Sun D Y, Song S W. Effects of plant hormones on flower bud differentiation and fruit development of strawberry [J]. *Fruit Growers' Friend*, 2024(1): 1-7 (in Chinese)
- [10] 张珊珊. 果树花芽分化机理研究进展[J]. 农家顾问, 2015(4): 109
Zhang S S. Research progress on flower bud differentiation mechanism of fruit trees [J]. *Farmer's Consultant*, 2015(4): 109 (in Chinese)
- [11] 金洲,卢山,江俊浩,李寿仁,张楠,江晓钰,吴凡. 园艺植物花芽分化影响因素及机理研究进展[J]. 园艺学报, 2023, 50(5): 1151-1164
Jin Z, Lu S, Jiang J H, Li S R, Zhang N, Jiang X Y, Wu F. Research progress on influencing factors and mechanisms of flower bud differentiation in horticultural plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2023, 50(5): 1151-1164 (in Chinese)
- [12] Melzer S, Lens F, Gennen J, Vanneste S, Rohde A, Beeckman T. Flowering-time genes modulate meristem determinacy and growth form in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Nature Genetics*, 2008, 40(12): 1489-1492
- [13] Barazesh S, McSteen P. Hormonal control of grass inflorescence development [J]. *Trends in Plant Science*, 2008, 13(12): 656-662
- [14] Amasino R. Seasonal and developmental timing of flowering [J]. *The Plant Journal*, 2010, 61(6): 1001-1013
- [15] Owens C L, Stover E. Vegetative growth and flowering of young apple trees in response to prohexadione-calcium [J]. *HortScience*, 1999, 34 (7): 1194-1196
- [16] Carra B, Fachinello J C, de Abreu E S, da Silveira Pasa M, Spagnol D, Giovanaz M A, da Silva C P. Control of the vegetative growth of 'Shinseiki' pear trees by prohexadione calcium and root pruning [J]. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2017, 52(3): 177-185
- [17] Medjdoub R, Val J, Blanco A. Inhibition of vegetative growth in red apple cultivars using prohexadione-calcium [J]. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 2005, 80(2): 263-271
- [18] Vavilala D T, Reddy S, Sachchidanand, Prakash S, Chaithanya Ponnaluri V K, Kumar A, Mukherji M. Prohexadione, a plant growth regulator, inhibits histone lysine demethylases and modulates epigenetics [J]. *Toxicology Reports*, 2014, 1: 1152-1161
- [19] Araújo W L, Martins A O, Fernie A R, Tohge T. 2-Oxoglutarate: Linking TCA cycle function with amino acid, glucosinolate, flavonoid, alkaloid, and gibberellin biosynthesis [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 552
- [20] Lokuruge P, Tar'an B, Harms T, Howard R, Bandara M. Effect of prohexadione calcium on vegetative growth, seed maturity and seed yield of the Kabuli chickpea cultivar CDC Frontier [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2015, 95(3): 571-578
- [21] 王钰菲,赵德英,闫帅,徐功勋,赵亮亮. 外源调环酸钙对苹果幼树生长发育和叶片矿质营养的影响[J]. 中国果树, 2024(3): 26-33
Wang Y F, Zhao D Y, Yan S, Xu G X, Zhao L L. Effects of exogenous prohexadione-calcium on growth and leaf mineral nutrition of young apple trees [J]. *China Fruits*, 2024 (3): 26-33 (in Chinese)
- [22] Rehman M, Singh Z, Khurshid T. Pre-harvest spray application of prohexadione-calcium and paclobutrazol improves rind colour and regulates fruit quality in M7 Navel oranges [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 234: 87-94
- [23] 柳嘉程,刘永忠,凌永河,张祖铭,姜伟,牛王翠,陈兆星,张油兵,严翔. 调环酸钙对赣南纽荷尔脐橙夏梢生长和果实品质的影响[J]. 中国南方果树, 2022, 51(3): 12-15
Liu J C, Liu Y Z, Ling Y H, Zhang Z M, Lou W, Niu W C, Chen Z X, Zhang Y B, Yan X. Effects of prohexadione calcium on growth of summer shoots, fruit yield and quality of newhall navel orange in Gannan [J]. *South China Fruits*, 2022, 51(3): 12-15 (in Chinese)
- [24] 成雨. 调环酸钙调控草莓生长发育和产量品质的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022
Cheng Y. Preliminary study on the regulation of growth and development, yield and quality of strawberry by calcium cyclamate [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022 (in Chinese)
- [25] Kim H M, Lee H R, Kang J H, Hwang S J. Prohexadione-calcium application during vegetative growth affects growth of mother plants, runners, and runner plants of maehyang strawberry [J]. *Agronomy*, 2019, 9(3): 155
- [26] 赵密珍. 草莓种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006
Zhao M Z. *Descriptors and Data Standard for Strawberry (Fragaria spp)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [27] 柳爱春,童建新,肖文斐,来文国,汪建荣,石秀萍,余红. 不同地区红玉草莓苗花芽分化观察和营养分析[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(7): 1324-1326, 1330
Liu A C, Tong J X, Xiao W F, Lai W G, Wang J R, Shi X P, Yu H. Observation on flower bud differentiation and nutritional analysis of 'Hongyu' strawberry seedling in different regions [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2021, 62 (7): 1324-1326, 1330 (in Chinese)
- [28] 梁佳惠. *FaHAN*在草莓匍匐茎和花发育中的功能探究[D]. 北京: 中国农

- 业大学,2022
- Liang J H. Studies on the function of *FaHAN* in runner and flower development in strawberry [D]. Beijing: China Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [29] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社,2007
- Cao J K, Jiang W B, Zhao Y M. *Experiment Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007 (in Chinese)
- [30] 颜敬伟. 不同遮荫处理对草莓花芽分化和果实品质的影响[D]. 昆明:云南大学,2017
- Yan D W. Effects of Different Shading Treatments on Flower Bud Differentiation and Fruit Quality of Strawberry [D]. Kunming: Yunnan University, 2017 (in Chinese)
- [31] 齐长红,王立府,钟连全,孙远冲. 促进草莓花芽分化的措施[C]//草莓研究进展(三). 北京:中国园艺学会,2009:203-205
- Qi C H, Wang L F, Zhong L Q, Sun Y C. Measures to promote strawberry flower bud differentiation [C]//*Progress in Strawberry Research (III)*. Beijing: Chinese Horticultural Society, 2009:203-205 (in Chinese)
- [32] 万翠,姚锋娜,郭恒,刘彦涛,赵凡,郑先福. 植物生长调节剂调环酸钙的应用与发展现状[J]. 现代农药, 2016, 15(5): 1-4
- Wan C, Yao F N, Guo H, Liu Y T, Zhao F, Zheng X F. Research and application situation of plant growth regulator prohexadione calcium [J]. *Modern Agrochemicals*, 2016, 15(5): 1-4 (in Chinese)
- [33] 潘明君,尹永强,沈方科,罗宝雄,唐新莲,何虹华,陈登科. 调环酸钙对低温胁迫下烟草幼苗生理指标的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 288-293
- Pan M J, Yin Y Q, Shen F K, Luo B X, Tang X L, He H H, Chen D K. Effects of prohexadione calcium on physiological index of tobacco seedlings during cold stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(2): 288-293 (in Chinese)
- [34] Parcy F. Flowering: A time for integration [J]. *The International Journal of Developmental Biology*, 2005, 49(5-6): 585-593
- [35] Kaufmann K, Wellmer F, Muiño J M, Ferrier T, Wuest S E, Kumar V, Serrano-Mislata A, Madueño F, Krajewski P, Meyerowitz E M, Angenent G C, Riechmann J L. Orchestration of floral initiation by *APETALA1* [J]. *Science*, 2010, 328(5974): 85-89
- [36] Rantanen M, Kurokura T, Jiang P P, Mouhu K, Hytönen T. Strawberry homologue of terminal flower1 integrates photoperiod and temperature signals to inhibit flowering[J]. *The Plant Journal*, 2015, 82(1): 163-173
- [37] Piñeiro M, Coupland G. The control of flowering time and floral identity in Arabidopsis[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(1): 1-8
- [38] Komeda Y. Genetic regulation of time to flower in Arabidopsis thaliana [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55: 521-535
- [39] Nilsson O, Lee I, Blázquez M A, Weigel D. Flowering-time genes modulate the response to *LEAFY* activity[J]. *Genetics*, 1998, 150(1): 403-410
- [40] 曹亚萍,张林. 植物生长调节剂和遮光对草莓开花结果的影响[J]. 中国南方果树, 2015, 44(2): 84-86
- Cao Y P, Zhang L. Effect of plant growth regulators and shading on flowering and fruit of strawberry[J]. *South China Fruits*, 2015, 44(2): 84-86 (in Chinese)

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 贺强,硕士研究生,中国农业大学园艺学院果树系农艺与种业专业。硕士期间曾担任果树系第三团支部书记、园艺学院研究生会学术部负责人以及实验室安全员等职务,荣获中国农业大学2022-2023学年“硕士一等学业奖学金”及“三好学生”荣誉称号;本科就读于山东农业大学,曾主持或参与省级大学生创新创业训练计划项目、校级大学生创业训练项目、发展性资助项目以及多项“互联网+”创新创业比赛类项目。先后荣获2次省级奖项,10余次校级奖项,6次校级奖学金以及校级“优秀本科毕业生”“优秀学生团干部”“优秀学生”等荣誉称号。



通讯作者简介: 王红清,博士,教授,博士生导师。担任中国园艺学会草莓分会常务理事,中国设施园艺分会委员会委员,全面负责中国农业大学新农村发展研究院“草莓教授工作站”工作。主持了国家自然科学基金项目、国家重点研发项目(子课题)、科技部863项目(子课题)、国家科技攻关项目、农业科技成果转化基金项目和北京市科委项目等多项课题。被聘为北京市科委农村发展中心咨询专家。曾担任“第七届世界草莓大会”以及“北京农业嘉年华”技术指导专家。参编了《草莓园艺工》《园艺植物栽培学总论》《园艺植物生物学》《桃树学》《中国草莓》《草莓栽培手册》等书籍。