

陈慧,杨俊枫,罗尚民,等.褪黑素和茉莉酸对冰糖橙果实品质形成的影响[J].华中农业大学学报,2025,44(5):98-106.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.05.010

褪黑素和茉莉酸对冰糖橙果实品质形成的影响

陈慧¹,杨俊枫¹,罗尚民²,张玲²,朱倩¹,
赵玉双¹,陈彤¹,姚茂盛³,陈岳文¹

1.湖南农业大学园艺学院,长沙 410128; 2.怀化市麻阳苗族自治县农业农村局,怀化 419400;

3.怀化市麻阳苗族自治县宋家湾村集体经济合作社,怀化 419400

摘要 为探究褪黑素和茉莉酸在冰糖橙果实品质形成中的作用,以‘黔阳’冰糖橙为试验材料,在果实膨大期和成熟前期进行褪黑素(melatonin, MT)和二氢茉莉酸丙酯(prohydrojasmon, PDJ)喷施,测定果实的内在品质,并对柠檬酸积累关键基因CsAN1进行表达分析。结果显示:在果实膨大期,MT处理后10、30和50 d,果实可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量分别较对照组降低15.07%、30.48%和19.67%,而柠檬酸含量显著提高,增幅分别为18.35%、19.11%和30.30%;PDJ处理则显著降低柠檬酸含量,处理后10、30和50 d分别下降25.10%、36.14%和34.25%。在果实成熟前期,MT处理后10、25和40 d,柠檬酸含量较对照组分别增加106.19%、84.82%和63.10%;PDJ处理显著提高果实TSS含量,处理后10、25和40 d分别增加15.59%、2.52%和9.83%。MT处理冰糖橙愈伤组织后,柠檬酸含量升高31.06%,CsAN1表达量显著提高。以上结果表明,果实膨大期和成熟前期喷施MT可促进果实柠檬酸积累,并显著上调柠檬酸代谢关键基因CsAN1;而成熟前期喷施PDJ则能提高果实TSS含量。

关键词 柑橘; 果实品质; 褪黑素; 茉莉酸; 糖酸

中图分类号 S666 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)05-0098-09

随着柑橘产业蓬勃发展,消费市场对果实品质提出了更高要求,柑橘果实品质已成为决定其市场竞争力的关键因素。其中,果实的内在品质直接决定其风味口感,主要体现在果实糖酸比、可溶性固形物、可滴定酸和维生素C含量等关键指标上。糖分和有机酸的组成、含量及其比例是衡量果实品质的重要指标。蔗糖、葡萄糖和果糖是柑橘果实中主要的可溶性糖^[1],其含量均随果实成熟呈“S”形增加。果实成熟时,蔗糖所占比重最大,其次为葡萄糖,果糖所占比重最小^[2]。同时,柑橘绝大多数品种的酸以柠檬酸为主,极少数品种以苹果酸为主^[3],这些有机酸主要存在于果肉汁胞中,其含量随着果实的成熟而逐渐降低。

当前主要通过栽培管理优化、遗传改良和外源物质调控等技术手段来提升果实品质。其中,传统栽培措施如改善水肥管理、整形修剪等存在成本高、耗劳力等局限,而品种选优等遗传改良方法则面临

周期长、技术复杂等挑战。相比之下,施用外源植物生长调节剂因其操作简便、成本低、效益显著且见效快等特点,在品质调控中展现出重要价值。植物生长调节剂作为一类人工合成的具有调节植物生长发育功能的化合物,可以在一定程度上调控果实品质^[4]。

褪黑素(melatonin, MT)又称为N-乙酰-5-甲氧基色胺(N-acetyl-5-methoxytryptamine),是一种低分子质量的吲哚类化合物,作为一种多功能的生物活性物质,MT不仅参与调节生物节律,还能够有效调控果实生长发育及采后品质^[5-6]。研究显示,MT浸泡处理果实可显著提升‘爱媛38号’杂柑在低温(6~8℃)贮藏期间的果实风味与可溶性固形物含量^[7]。在番茄的果实膨大期,对其叶面喷施不同浓度的MT可有效降低果实中的可滴定酸含量,同时提高了可溶性糖、可溶性固形物含量以及糖酸比^[8]。在葡萄中,MT处理能够增加果实中葡萄糖和果糖的含

收稿日期:2024-12-05

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项(CARS-26);湖南省自然科学基金项目(2024JJ6240);湖南省教育厅科学研究项目(2B0191)

陈慧,E-mail:1814538330@qq.com

通信作者:陈岳文,E-mail:chenyuewen@hunau.edu.cn

量^[9]。另有研究表明,喷施300 μmol/L的褪黑素溶液可显著提高草莓果实的可溶性糖含量,同时降低可滴定酸含量^[10]

茉莉酸类物质(jasmonates, JAs)作为重要的内源信号分子^[11-12],不仅参与调控植物的生长发育、抗逆性及次生代谢产物的合成,还影响根系的生长、种子的萌发、花粉的发育及果实的成熟与发育等过程^[13-14]。具体而言,茉莉酸甲酯(methyl jasmonate, MeJA)和二氢茉莉酸丙酯(prohydrojasmon, PDJ)处理可以增加果实中可溶性固形物含量,改善果实品质^[15-16]。研究显示,在苹果上喷施MeJA,能够有效提升果实中总糖、蔗糖、葡萄糖及果糖的含量,其中蔗糖增加最为显著,而总酸、苹果酸、酒石酸、草酸和柠檬酸的含量则低于对照^[17];在葡萄中,MeJA和PDJ均能促进葡萄着色,提高果粒质量和可溶性固形物含量,改善果实品质^[18-19]。

近年来,褪黑素和茉莉酸类物质在其他果树品质调控方面的研究已取得一定进展,但针对柑橘果实的相关研究相对较少。因此,本研究从MT和PDJ调控冰糖橙果实品质入手,探讨外源激素对不同发育时期冰糖橙果实糖酸累积的影响,以期为提升果实品质提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

植物材料为4年生枳砧‘黔阳’冰糖橙(‘Qianyang’Bingtang Navel Orange),栽植于湖南省怀化市冰糖橙产区果园。选取树势一致的树体开展研究,各处理田间水肥管理一致。

1.2 试验处理

葡萄、桃、梨等木本果树MT和PDJ的喷施处理结果表明,适宜的用量范围为MT 100~150 μmol/L^[18,20-22]、PDJ 50~100 mg/L^[9-10,12-13,23],考虑到果实外果皮厚度的差异,本研究选取了较高浓度处理,设置MT(150 μmol/L)、PDJ(100 mg/L)、CK(清水对照)3个处理,分别在果实膨大期和果实成熟前期2个时期对冰糖橙进行喷施。每个处理选择3棵树,田间采用完全随机排列,避免处理间的相互干扰,2个时期的喷施处理不在相同树上进行。果实膨大期处理于2023年8月4日进行,喷施至叶片滴水,分别于处理后10、30和50 d进行果实取样分析;果实成熟前期处理分别于2023年9月20日和10月10日进行2次喷施,于处理后10、25和40 d取果实进行分

析。每次取样时,采集树冠中部外围中等大小6个果实作为混合样品,3个生物学重复。

1.3 果实品质测定

使用糖酸一体机(爱拓,PAL-BX/ACID1,日本)测定果实的可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(titratable acid, TA)含量,其中酸测定需将原汁稀释50倍。每次试验随机选取6个果实混合测定,进行3次生物学重复。利用LC-20AT型高效液相色谱仪(岛津,日本)测定果肉中可溶性糖、有机酸含量,具体方法参照Lu等^[24]。

1.4 MT处理对柠檬酸积累关键基因CsAN1表达模式的影响

选取健康冰糖橙愈伤组织,置于含有50 μmol/L MT的Murashige & Skoog(MS)培养基上,以正常MS培养基上的愈伤组织(WT)为对照,10 d后收集愈伤组织,液氮速冻后放于-80 °C冰箱保存。采用高效液相色谱法(HPLC)测定愈伤组织中的有机酸含量。利用植物RNA提取试剂盒(Steady Pure,艾科瑞生物)分别对MT处理和WT愈伤组织进行RNA提取,用酶标仪测定RNA的浓度,1%琼脂糖凝胶电泳进行RNA质量检测。使用反转录试剂盒(Evo M-MLV,艾科瑞生物)进行逆转录合成cDNA,使用Talent荧光定量检测试剂盒(Talent,天根)和荧光定量PCR仪(CFX96 Touch, Bio-Rad,美国),以Actin作为内参基因,对CsAN1基因的表达水平进行相对定量分析。

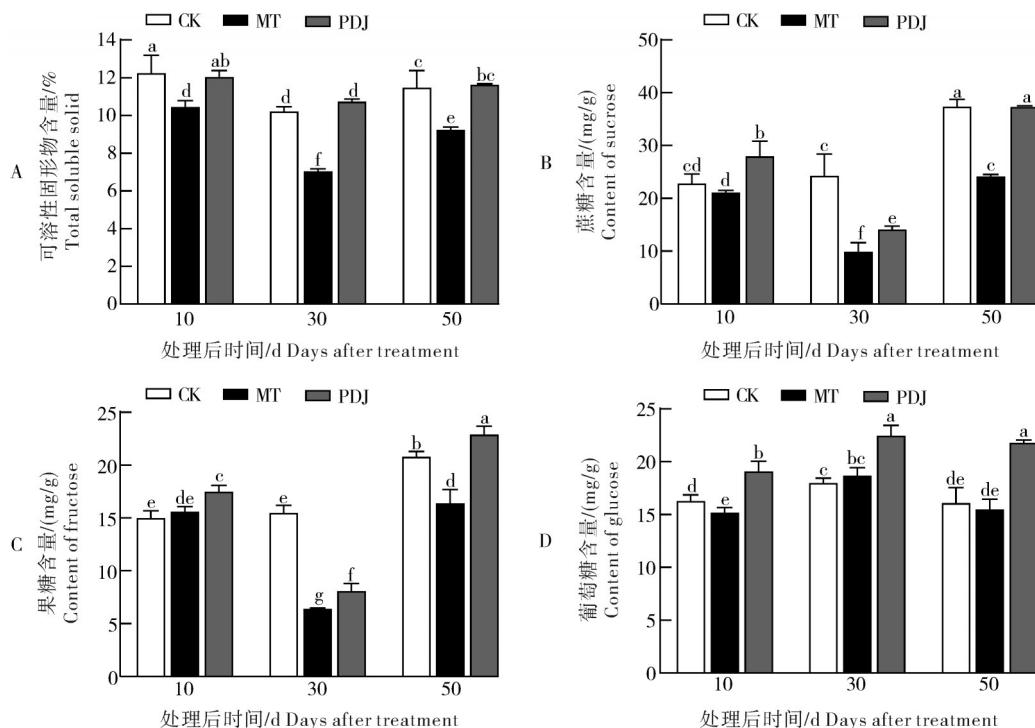
1.5 数据分析

采用Microsoft Excel 2019软件和Graphpad Prism 9.5软件进行数据处理和图表制作,运用IBM SPSS Statistics 22进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 果实膨大期喷施MT和PDJ对冰糖橙果实糖、酸积累的影响

由图1可知,在TSS含量方面,MT处理后10、30、50 d果实TSS含量均显著低于对照组(CK),降幅分别为15.07%、30.48%、19.67%;而PDJ处理后10、30、50 d果实TSS含量均无显著变化(图1A)。蔗糖含量分析结果显示,MT处理后30、50 d果实蔗糖含量较CK显著降低58.84%、34.95%;PDJ处理后10 d果实蔗糖含量较CK显著增加22.24%,而在处理后30 d显著降低41.60%(图1B)。果糖含量分析结果显示,MT处理后30、50 d果实果糖含量较CK



柱上不同小写字母表示同一处理时间下不同处理间存在显著差异($P<0.05$)，下同。Different lowercase letters on the columns indicate significant differences among the treatments at the same treatment time ($P<0.05$), the same as below.

图1 果实膨大期喷施MT和PDJ后果实可溶性固形物(A)、蔗糖(B)、果糖(C)和葡萄糖(D)含量变化

Fig. 1 Changes in soluble solids (A), sucrose (B), fructose (C), and glucose (D) contents in fruits after MT and PDJ treatment during the fruit expansion stage

显著降低58.60%、21.05%；而PDJ处理后10、50 d果实果糖含量较CK显著增加16.19%、10.05%，但在处理后30 d显著降低47.43%(图1C)。葡萄糖含量分析结果显示,MT处理后10 d果实葡萄糖含量较CK显著降低7.00%；而PDJ处理后10、30、50 d果实葡萄糖含量均显著高于CK,增幅分别为16.93%、24.60%、35.48%(图1D)。以上结果表明,果实膨大期MT处理降低了果实TSS含量,并在30、50 d显著降低蔗糖和果糖含量；而PDJ处理对TSS含量无影响,但提高了葡萄糖含量,并阶段性影响蔗糖和果糖含量。

由图2可知,在TA含量方面,MT处理后50 d果实TA含量较CK显著增加27.54%；而PDJ处理后10、30、50 d果实TA含量均显著低于CK,降幅分别为23.48%、21.98%、20.29%(图2A)。柠檬酸含量分析结果显示,MT处理后10、30、50 d果实柠檬酸含量较CK显著增加18.35%、19.11%、30.30%；而PDJ处理后10、30、50 d果实柠檬酸含量较CK显著降低25.10%、36.14%、34.25%(图2B)。苹果酸含量分析结果显示,MT与PDJ处理后10 d果实苹果酸含量均显著高于CK,增幅分别为50%、46.97%,但在处理后30、50 d均显著低于CK,MT处理组降幅为

16.52%、32.44%,PDJ处理组降幅为10.34%、17.40%(图2C)。以上结果表明,果实膨大期MT处理显著提高了果实柠檬酸含量,而PDJ处理显著降低了TA和柠檬酸含量。

2.2 果实成熟前喷施MT和PDJ对冰糖橙果实糖、酸积累的影响

由图3可知,在TSS含量方面,MT处理后10 d果实TSS含量较CK显著增加14.10%,但在40 d显著降低5.67%；PDJ处理后10、25、40 d果实TSS含量均显著高于CK,增幅分别为15.59%、2.52%、9.83%(图3A)。蔗糖含量分析结果显示,MT处理后10、40 d果实蔗糖含量较CK显著增加9.46%、32.80%,PDJ处理仅在40 d表现出显著促进作用,增幅为15.64%,2种处理在25 d均显著降低果实蔗糖含量,MT和PDJ处理组降幅分别为10.87%、22.43%(图3B)。果糖含量分析结果显示,MT处理后25、40 d果实果糖含量较CK显著降低13.08%、9.73%；PDJ处理后10、40 d果糖含量较CK显著增加6.16%、4.85%,但在25 d显著降低7.15%(图3C)。葡萄糖含量分析结果显示,MT处理后25、40 d葡萄糖含量较CK显著降低23.04%、15.13%；而PDJ处理

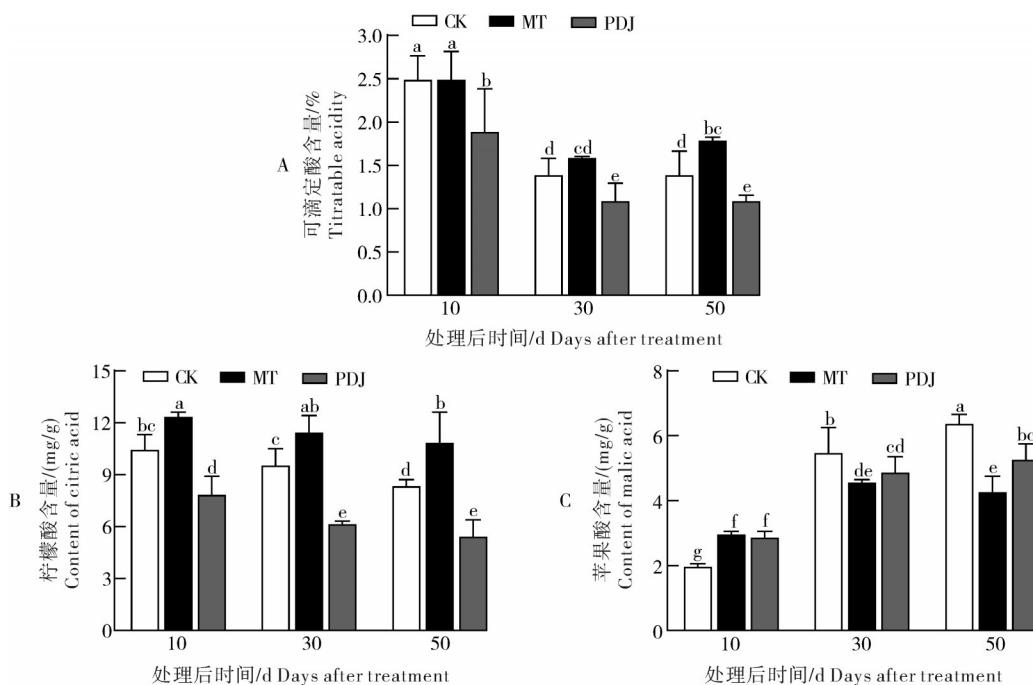


图2 果实膨大期喷施MT和PDJ后果实可滴定酸(A)、柠檬酸(B)和苹果酸(C)含量变化

Fig. 2 Changes in titratable acid (A), citrate (B), and malic acid (C) contents in fruits after MT and PDJ treatment during the fruit expansion stage

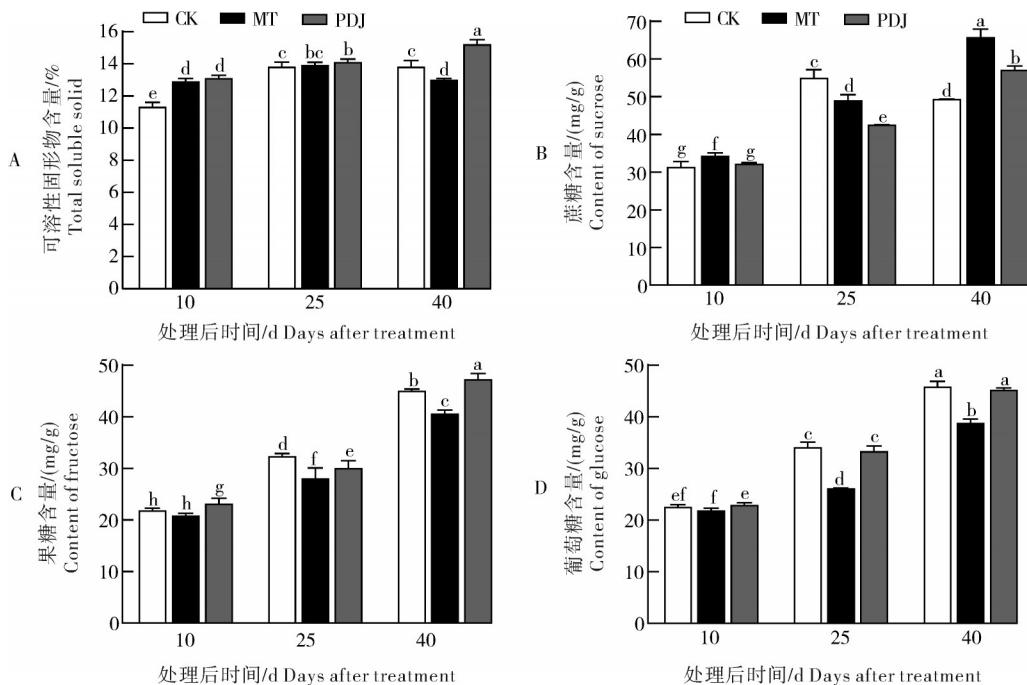


图3 果实成熟前喷施MT和PDJ后果实可溶性固形物(A)、蔗糖(B)、果糖(C)和葡萄糖(D)含量变化

Fig. 3 Changes in soluble solids (A), sucrose (B), fructose (C), and glucose (D) contents in fruits after MT and PDJ treatment before fruit maturity

在3个时间点均未产生显著影响(图3D)。以上结果表明,果实成熟前期PDJ处理显著提高果实TSS含量,在处理后40 d显著增加蔗糖含量,在处理后10、40 d显著增加果糖含量;而MT处理仅在处理后10 d

提升了TSS和蔗糖含量。

由图4可知,在TA和柠檬酸含量方面,MT处理后10、25和40 d,果实TA含量均显著高于CK,增幅分别为40.68%、18.75%、30.00%,同时柠檬酸含量

显著高于CK, 增幅分别为106.19%、84.82%、63.10%; PDJ处理后10 d果实TA含量较CK显著增加25.42%, 处理后25 d较CK显著降低12.50%, PDJ处理后柠檬酸含量无显著性变化(图4A、B)。苹果酸含量分析结果显示, MT处理后10、40 d果实苹果酸含量较CK显著降低72.01%、32.77%; PDJ处理后

10、25和40 d果实苹果酸含量均显著低于CK, 降幅分别为83.57%、29.56%、27.06%(图4C)。以上结果表明, 果实成熟前期MT处理显著提高果实TA和柠檬酸含量, 同时处理后10、40 d苹果酸含量显著降低; PDJ处理后10 d果实TA含量提高, 而苹果酸含量各时期均显著降低。

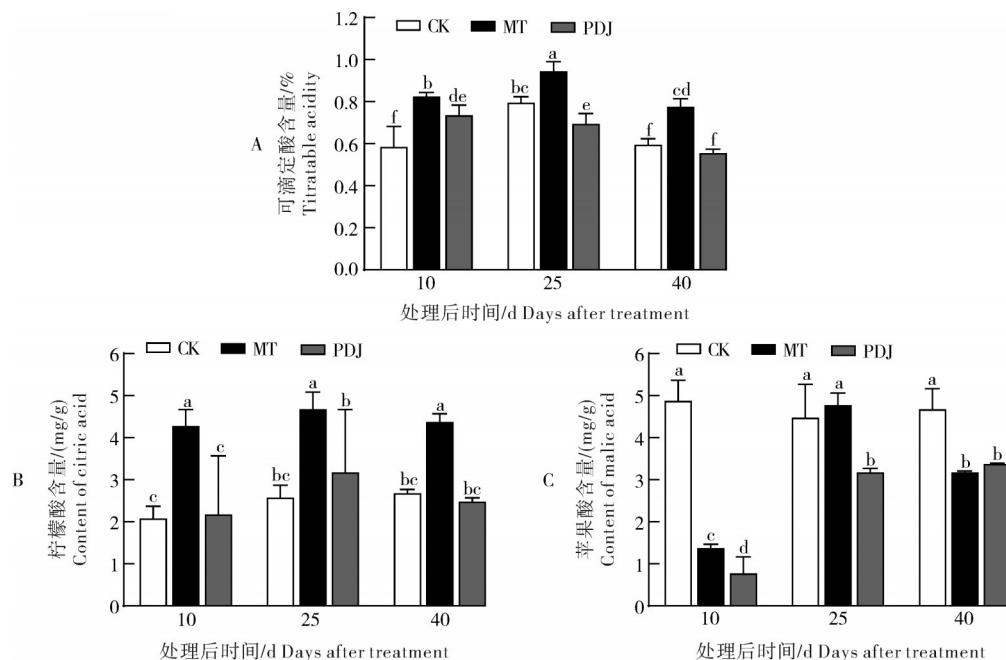


图4 果实成熟前期喷施MT和PDJ后果实可滴定酸(A)、柠檬酸(B)和苹果酸(C)含量变化

Fig. 4 Changes in titratable acid (A), citrate (B), and malic acid (C) contents in fruits after MT and PDJ treatment during the early stage of fruit maturity

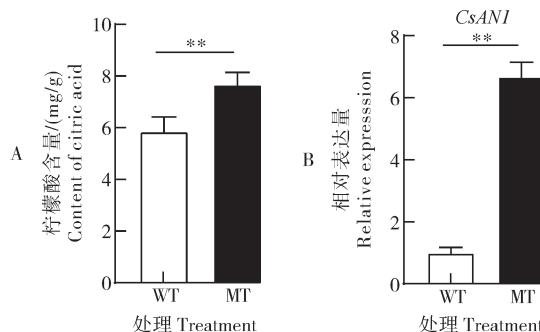
2.3 MT处理对柠檬酸积累关键基因CsAN1表达模式的影响

为进一步验证MT对柠檬酸代谢的影响, 利用50 μmol/L MT处理冰糖橙愈伤组织。由图5可知,

50 μmol/L MT处理冰糖橙愈伤组织10 d后, 其柠檬酸含量显著高于未处理的野生型愈伤组织(WT), 增幅为31.06%, 同时CsAN1的表达量也显著上调6.68倍。

3 讨论

近年来, 关于MT调控果实品质的研究日益增多。MT在果蔬采后保鲜、提升植物抗逆性以及促进植物生长发育等方面发挥着关键作用。适宜浓度的MT处理能够促进果实品质提升。在樱桃番茄中, MT处理组较对照组樱桃番茄果实的糖酸比高, 内在品质显著提升^[25]。使用外源MT处理葡萄幼果, 不仅能使果实膨大, 而且还能减少葡萄果实的欠熟和过熟, 从而提高果实成熟度的一致性, 提升果实品质^[18]。利用50 μmol/L MT对红酥宝梨进行叶面喷施, 可显著提高单果质量、色差、可溶性固形物含量等果实品质性状^[26]。本研究于果实膨大期喷施150 μmol/L MT, 处理后10、30、50 d其果实中TSS含量



表示不同处理间存在显著差异($P<0.01$)。 indicate significant differences among the different treatments ($P<0.01$).

图5 MT处理柑橘愈伤组织10 d后柠檬酸含量(A)和CsAN1表达量(B)变化

Fig. 5 Changes in citrate (A) content and CsAN1 expression (B) in citrus callus after 10 days of MT treatment

显著低于CK(图1A)。该研究结果与前人研究中关于MT促进果实品质提升的结论并不一致,其原因可能是不同浓度MT处理对果实糖含量的影响存在差异性。在桃果实中,果糖含量随着MT浓度的增加呈现先上升后下降的趋势^[21],在葡萄中也观察到类似的现象,当MT的浓度过高时,葡萄糖、果糖含量会减少^[20]。因此,在柑橘果实膨大期进行MT处理时,应严格控制用量,避免因浓度过高而对果实品质产生不利影响。此外,本研究中MT处理后50 d的TSS含量略低于处理后10 d,这一现象可能与多种环境因素和生理过程有关。MT处理后50 d,果实处于膨大后期,此时TSS含量尚未显著增加,导致MT对TSS的调节作用相对有限,这一生理现象在脐橙果实的生长发育过程亦有体现^[27]。

除影响糖分代谢外,MT对有机酸代谢的调控作用同样显著。作为决定果实风味品质的关键指标,有机酸的含量变化直接影响果实的食用品质。研究表明,外源MT处理能够有效地维持果实中TSS和TA的含量,从而保持采后果实品质^[28]。MT对有机酸代谢的调控不仅体现在采后阶段,在果实发育过程中同样发挥着重要作用。在李果实的第二次快速膨大期喷施100 μmol/L MT,相较于对照组,处理后7、14、21、28 d果实的柠檬酸含量分别提高了59.76%、25.79%、25.60%和14.71%^[29]。同样,在猕猴桃果实膨大期喷施2次150 μmol/L MT,果实的有机酸含量显著提高了178%^[30]。本研究中,果实膨大期和成熟前喷施150 μmol/L MT均有效增加果实柠檬酸含量(图2B、图4B),用50 μmol/L MT处理冰糖橙愈伤组织发现,MT同样促进了愈伤组织中柠檬酸含量的显著提升(图5A),此结果与先前的研究结论相吻合。AN1作为bHLH家族转录因子,是MYB-bHLH-WD40(MBW)复合体的核心成员,不仅在花青素代谢中起关键作用,还在细胞酸化和形态调控中发挥重要作用^[31]。在柑橘中,CsAN1调控下游柠檬酸转运质子泵PH8的表达,影响柠檬酸的含量^[32],相关研究表明,温度、pH、矿质元素及干旱胁迫等外界因素主要通过介导CsAN1表达水平进而影响柠檬酸的累积^[33]。本研究发现,调控柠檬酸积累关键基因CsAN1在MT处理的冰糖橙愈伤组织中显著上调表达(图5)。上述结果表明,膨大期和成熟前期喷施150 μmol/L MT可诱导柑橘果实柠檬酸积累,MT可能通过调控柠檬酸累积的关键基因CsAN1的表达参与柠檬酸的代谢过程。

冰糖橙属于蔗糖积累型果实^[3],从果实膨大期至成熟期,蔗糖始终占据主导地位,含量显著高于果糖和葡萄糖^[34]。茉莉酸酯类物质可促进果实可溶性固形物含量积累,改善果实色泽,提高果实品质^[35-36]。PDJ是人工合成的茉莉酸酯类衍生物,较茉莉酸酯类物质更稳定,且在调控果实品质方面具有类似的生理功能^[12]。在本研究中,PDJ处理后10、25和40 d果实TSS含量均显著高于CK(图3A),这与前人研究结果一致。例如,在外源喷施PDJ处理葡萄果实过程中,‘巨玫瑰’‘红地球’‘夏黑’3个葡萄品种的可溶性固形物含量均显著提高,并提前6~7 d达到成熟^[37]。不同浓度的MeJA和PDJ处理3种梨果实,处理组果实可溶性固形物含量均显著高于对照组^[38]。上述结果表明,果实成熟前喷施PDJ可以促进果实糖积累,改善柑橘果实品质。

本研究初步探讨了褪黑素(MT)和二氢茉莉酸丙酯(PDJ)对冰糖橙果实品质的影响,但在研究深度和广度上仍存在若干需要完善之处。在试验设计方面,MT和PDJ的施用浓度仅参考其他果树的研究数据,缺乏针对冰糖橙的浓度梯度试验,未来研究可设计不同浓度梯度,以确定最适施用剂量,提高调控效果。其次,本研究仅聚焦于CsAN1基因的表达分析,而柠檬酸代谢涉及多个关键酶基因(如CsPH8,CsACO等)的协同调控,后续可深入探究MT对柠檬酸合成与降解网络的整体影响。最后,本研究仅测定了果实膨大期和成熟前期的品质变化,未追踪贮藏期或采后品质的变化,未来可延长观测周期,评估外源激素处理的长期效应。

参考文献 References

- [1] 罗安才,杨晓红,邓英毅,等.柑橘果实发育过程中有机酸含量及相关代谢酶活性的变化[J].中国农业科学,2003,36(8):941-944.LUO A C, YANG X H, DENG Y Y, et al. Organic acid concentrations and the relative enzymatic changes during the development of citrus fruits [J]. Scientia agricultura sinica, 2003, 36 (8) : 941-944 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘灵智.冰糖橙和大红甜橙果实成熟过程中糖酸含量变化研究[D].长沙:湖南农业大学,2011.LIU L Z. Changes of sugar and acid content during fruit ripening of Bingtang orange and Dahong sweet orange [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011(in Chinese with English abstract).
- [3] YAMAKI Y T. Organic acids in the juice of citrus fruits [J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science,

- 1989, 58(3):587-594.
- [4] 尹全, 杨晓凤, 刘炜, 等. 植物生长调节剂在柑橘生产中的应用与残留限量标准分析[J]. 中南农业科技, 2023(5): 215-218. YIN Q, YANG X F, LIU W, et al. Application of plant growth regulator in citrus production and analysis of residue limit standard [J]. South-central agricultural science and technology, 2023(5):215-218 (in Chinese with English abstract).
- [5] HERNÁNDEZ-RUIZ J, CANO A, ARNAO M B. Melatonin: a growth-stimulating compound present in lupin tissues [J]. Planta, 2004, 220(1):140-144.
- [6] 杨建帮, 杨丽, 姚文孔, 等. 果树中褪黑素的合成及其调控作用研究进展[J]. 中国果树, 2024 (3) : 13-20. YANG J B, YANG L, YAO W K, et al. Research progress on synthesis and regulation of melatonin in fruit trees [J]. China fruits, 2024 (3):13-20 (in Chinese with English abstract).
- [7] 王晶, 洪敏, 冯雨, 等. 外源褪黑素对‘爱媛38号’柑橘品质和乙醇代谢的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 147-154. WANG J, HONG M, FENG Y, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on fruit quality and ethanol metabolism of ‘Aiyuan 38’ citrus [J]. Food and fermentation industries, 2019, 45 (21) : 147-154 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵海亮, 左璐, 马长恩, 等. 果实膨大期叶面喷施褪黑素对番茄品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(17): 15-21. ZHAO H L, ZUO L, MA C E, et al. Effects of foliar spray of melatonin on tomato fruit quality during the fruit enlargement period [J]. Northern horticulture, 2021 (17) : 15-21 (in Chinese with English abstract).
- [9] 胡容平, 范中菡, 董义霞, 等. 褪黑素对葡萄果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(4):39-44. HU R P, FAN Z H, DONG Y X, et al. Effects of melatonin on fruit quality of grape [J]. Northern horticulture, 2022 (4) : 39-44 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李恭峰, 高亚新, 马万成, 等. 叶喷褪黑素对草莓生长、光合及果实品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2022(12): 80-85. LI G F, GAO Y X, MA W C, et al. Effects of foliar spraying melatonin on strawberry growth, photosynthesis and fruit quality [J]. China vegetables, 2022 (12) : 80-85 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘芳宏, 曾凯芳, 邓丽莉. 莱莉酸类物质诱导果蔬抗性机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7):392-395. LIU F H, ZENG K F, DENG L L. Research progress in mechanisms of jasmonates-induced resistance in fruits and vegetable [J]. Science and technology of food industry, 2015, 36 (7) : 392-395 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王芳, 陈子林. 莱莉酸类植物激素分析研究进展[J]. 生命科学, 2010, 22(1):45-58. WANG F, CHEN Z L. Advance in the analysis of plant hormone jasmonates [J]. Chinese bulletin of life sciences, 2010, 22(1):45-58 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孙雨桐, 刘德帅, 齐迅, 等. 莱莉酸调控植物生长发育和胁迫的研究进展[J]. 生物技术通报, 2023, 39(11):99-109. SUN Y T, LIU D S, QI X, et al. Advances in jasmonic acid regulating plant growth and development as well as stress [J]. Biotechnology bulletin, 2023, 39 (11) : 99-109 (in Chinese with English abstract).
- [14] JANG G, YOON Y, CHOI Y D. Crosstalk with jasmonic acid integrates multiple responses in plant development [J/OL]. International journal of molecular sciences, 2020, 21 (1) : 305 [2024-12-05].<https://doi.org/10.3390/ijms21010305>.
- [15] 李秋利, 高登涛, 魏志峰, 等. 莱莉酸类物质对“映霜红”桃果品质的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(3):107-112. LI Q L, GAO D T, WEI Z F, et al. Effects of jasmonates on fruit quality of ‘Yingshuanghong’ peach [J]. South China fruits, 2018, 47(3):107-112 (in Chinese with English abstract).
- [16] 何平, 李林光, 王海波, 等. 莱莉酸酯类对秋甜桃果实着色及品质的影响[J]. 分子植物育种, 2019, 17(7):2371-2378. HE P, LI L G, WANG H B, et al. Effects of jasmonates on coloration and quality of Qutian peach [J]. Molecular plant breeding, 2019, 17 (7) : 2371-2378 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨光凯, 武媛丽, 高燕, 等. 外源莱莉酸甲酯对苹果果品质的影响[J]. 果树资源学报, 2021, 2(5): 15-22. YANG G K, WU Y L, GAO Y, et al. Effects of exogenous methyl jasmonate on the quality of apple [J]. Journal of fruit resources, 2021, 2(5):15-22 (in Chinese with English abstract).
- [18] 丁平, 白云岗, 户金鸽, 等. 莱莉酸酯类对火焰无核葡萄果实着色及品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2021(6): 78-83. DING P, BAI Y G, HU J G, et al. Effect of jasmonate esters on coloring and quality of flame seedless grape [J]. Heilongjiang agricultural sciences, 2021 (6) : 78-83 (in Chinese with English abstract).
- [19] 孙晓文. 莱莉酸酯类对葡萄果实着色及品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. SUN X W. Effects of jasmonic acid esters on grape fruit coloration and quality [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [20] 钟莉莎. 褪黑素对‘夏黑’葡萄生长和果实品质及蔗糖代谢的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020. ZHONG L S. Effects of melatonin on ‘Xiahei’ grape growth, fruit quality, and sucrose metabolism [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [21] 吴彩芳, 李红艳, 刘琴, 等. 外源褪黑素对桃生长及果品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(1):40-49. WU C F, LI H Y, LIU Q, et al. Effects of exogenous melatonin on growth and fruit quality of peach (*Prunus persica*) [J]. Journal of fruit science, 2021, 38(1):40-49 (in Chinese with English abstract).
- [22] ZHAO L L, YAN S, WANG Y F, et al. Evaluation of the effect of preharvest melatonin spraying on fruit quality of ‘Yuluxiang’ pear based on principal component analysis [J/

- OL]. Foods, 2023, 12(18) : 3507 [2024-12-05]. <https://doi.org/10.3390/foods12183507>.
- [23] WANG X Q, CAO X Y, SHANG Y, et al. Preharvest application of prohydrojasmon affects color development, phenolic metabolism, and pigment-related gene expression in red pear (*Pyrus ussuriensis*) [J]. Journal of the science of food and agriculture, 2020, 100(13):4766-4775.
- [24] LU X P, CAO X J, LI F F, et al. Comparative transcriptome analysis reveals a global insight into molecular processes regulating citrate accumulation in sweet orange (*Citrus sinensis*) [J]. Physiologia plantarum, 2016, 158(4):463-482.
- [25] 黄陈珏, 刘芳, 马琳琳, 等. 外源褪黑素对樱桃番茄果实品质的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(4):527-530. HUANG C J, LIU F, MA L L, et al. Effect of exogenous melatonin on the quality of cherry tomato fruit [J]. Journal of Shanxi agricultural sciences, 2020, 48(4) : 527-530 (in Chinese with English abstract).
- [26] 邓晗, 张向展, 王苏珂, 等. 外源 γ -氨基丁酸和外源褪黑素处理对红酥宝梨果实品质及糖代谢相关酶的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(6): 1094-1110. DENG H, ZHANG X Z, WANG S K, et al. A study on the effects of exogenous γ -aminobutyric acid and exogenous melatonin treatment on fruit quality and sugar metabolism-related enzymes in Hongsubao pear [J]. Journal of fruit science, 2024, 41(6) : 1094-1110 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李莉, 刘仁林. 赣南纽荷尔脐橙果实生长与主要营养物质积累动态[J]. 经济林研究, 2018, 36(2): 43-48. LI L, LIU R L. Dynamics of fruit growth and main nutrients for Gannan Newhall Novel orange [J]. Nonwood forest research, 2018, 36 (2):43-48 (in Chinese with English abstract).
- [28] MARAK K A, MIR H, SIDDIQUI M W, et al. Exogenous melatonin delays oxidative browning in litchi during cold storage by regulating biochemical attributes and gene expression [J]. Frontiers in plant science, 2024, 15: 1402607 [2024-12-05]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1402607>.
- [29] XIAO Y Y, WU Y X, HUANG Z Y, et al. Mechanism of induced soluble sugar accumulation and organic acid reduction in plum fruits by application of melatonin [J/OL]. BMC plant biology, 2024, 24 (1) : 1208 [2024-12-05]. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05949-x>.
- [30] 王彤. 外源褪黑素对猕猴桃果实发育和品质的影响及机理初探[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024. WANG T. Effect of exogenous melatonin on fruit development and quality of kiwifruit and its mechanism [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2024 (in Chinese with English abstract).
- [31] SPELT C, QUATTROCCHIO F, MOL J, et al. ANTHOCYANIN1 of petunia controls pigment synthesis, vacuolar pH, and seed coat development by genetically distinct mechanisms [J]. The plant cell, 2002, 14(9):2121-2135.
- [32] MA X C, SHENG L, LI F F, et al. Seasonal drought promotes citrate accumulation in citrus fruit through the CsABF3-activated CsAN1-CsPH8 pathway [J]. New phytologist, 2024, 242 (3):1131-1145.
- [33] 杨文萱. 柑橘AN1基因(CsAN1)在柠檬酸积累中的作用及不同因素对CsAN1的表达影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. YANG W X. The role of citrus AN1 gene (CsAN1) in citric acid accumulation and the effects of different factors on CsAN1 expression [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [34] 吴孔杰, 胡承孝, 谭启玲, 等. 柑橘果实糖积累特征及蔗糖转运机制研究进展[J]. 园艺学报, 2022, 49(12) : 2543-2558. WU K J, HU C X, TAN Q L, et al. Research advanced on character of sugar accumulation and mechanism of sucrose transport in citrus fruit [J]. Acta horticulturae sinica, 2022, 49 (12):2543-2558 (in Chinese with English abstract).
- [35] 张斌, 王勇, 肯吉古丽·苏力旦, 等. 茉莉酸丙酯对新郁葡萄果着实色及品质的影响[J]. 现代农业科技, 2021(7) : 115-118. ZHANG B, WANG Y, KENJIGULI S, et al. Effect of jasmonic acid propionate on the coloration and quality of Xinyu grapes [J]. Modern agricultural science and technology, 2021 (7) : 115-118 (in Chinese with English abstract).
- [36] 王世明. 茉莉酸酯类可改善秋甜桃果着实色及品质[J]. 中国果业信息, 2019, 36(5) : 64-65. WANG S M. Jasmonates can improve the fruit coloring and quality of autumn sweet peach [J]. China fruit news, 2019, 36(5):64-65 (in Chinese).
- [37] 马文瑶. ABA 和 PDJ 对葡萄果着实色及品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019. MA W Y. Effects of ABA and PDJ on the coloration and quality of grape fruits [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [38] 韩春红. 套袋和喷施外源物(MeJA、PDJ)对红皮梨果实品质的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022. HAN C H. Effects of bagging and exogenous treatments (MeJA, PDJ) on the fruit quality of red-skinned pears [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022 (in Chinese with English abstract).

Effects of melatonin and jasmonic acid on fruit quality of Bingtang sweet orange

CHEN Hui¹, YANG Junfeng¹, LUO Shangmin², ZHANG Ling², ZHU Qian¹,
ZHAO Yushuang¹, CHEN Tong¹, YAO Maosheng³, CHEN Yuewen¹

1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Mayang Miao Autonomous County, Hunan Province,
Huaihua 419400, China;

3. Songjiawan Village Collective Economic Cooperative, Hunan Province, Huaihua 419400, China

Abstract ‘Qianyang’ Bingtang orange was used to study the effects of melatonin (MT) and jasmonic acid (prohydrojasmon, PDJ). MT and PDJ were sprayed during the fruit expansion stage and the pre-ripening stage to assess the intrinsic quality of the fruits and the expression of *CsAN1*, a key gene for citric acid accumulation. The results showed that during fruit expansion, fruit soluble solids (TSS) content decreased by 15.07%, 30.48% and 19.67% at 10, 30 and 50 days after MT treatment compared with the control, respectively, while citric acid content was significantly increased by 18.35%, 19.11% and 30.30%. PDJ treatment, on the other hand, significantly reduced the citric acid content, which decreased by 25.10%, 36.14% and 34.25% at 10, 30 and 50 days after treatment, respectively. During the pre-ripening stage, citric acid content increased by 106.19%, 84.82% and 63.10% at 10, 25 and 40 d after MT treatment compared to the control group, respectively. PDJ treatment significantly increased the fruit TSS content by 15.59%, 2.52% and 9.83% at 10, 25 and 40 days after treatment. MT treatment of citrus callus resulted in a 31.06% increase in citric acid content accompanied by significantly upregulated *CsAN1* expression. These findings demonstrated that foliar application of MT during both fruit expansion and pre-ripening phases promoted citric acid accumulation and significantly upregulated *CsAN1*, while PDJ application prior to ripening enhanced the TSS content in fruits.

Keywords citrus; fruit quality; melatonin; jasmonic acid; sugar and acid

(责任编辑:葛晓霞)