芒果采后冷害发生及控制技术研究进展

杨 杨^{1,2}, 范 蓓³, 申 琳^{1,*}, 生吉萍⁴

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3. 农业部农产品加工综合性重点实验室, 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193; 4. 中国人民大学农业与农村发展学院, 北京 100872)

摘要: 本文总结了芒果采后冷害发生的特征、条件以及生理生化机制方面的研究进展, 介绍了芒果采后抗冷机理及冷害控制技术的发展现状。芒果采后冷害发生率先从果皮开始, 伴随着细胞膜透性上升、活性氧代谢能力下降、乙烯合成受损以及能量代谢失调等一系列生理变化。芒果采后冷害的控制技术主要分为冷激、热激和间歇升温等物理方法和采用多胺、有机酸、小分子信号物质、植物生长调节剂等物质处理的化学方法。

关键词: 芒果; 冷害; 抗冷诱导

Advances in Technologies for the Control of Chilling Injury in Postharvest Mango

YANG Yang^{1,2}, FAN Bei³, SHEN Lin^{1,*}, SHENG Ji-ping⁴

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 4. School of Agricultural Economics and Rural Development, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: In this review, the recent progress in research on the characteristics, conditions and physiological mechanisms of chilling injury in postharvest mango is summarized. Also, recent studies on the mechanisms and control technologies for chilling injury in postharvest mango are reviewed. The incidence of chilling injury in postharvest mango usually starts from the peel, along with serial physiological changes such as increased cell membrane permeability, lowered reactive oxygen species (ROS) metabolism, impaired capacity for ethylene synthesis and dysfunctional energy metabolism. Many technologies for controlling chilling injury in postharvest mango have been reported in the literature, including physical methods such as cold shock, heat shock and intermittent warming and chemical treatments with polyamines, organic acids, small molecule signal substances and plant growth regulating agents.

Key words: mango; chilling injury; cold resistance

中图分类号: TS255

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2014) 07-0292-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201407057

芒果 (*Mangifera indica* Linn.) 是热带和亚热带地区的重要经济作物, 也是我国第四大热带水果, 2012年种植面积达14万 hm^2 , 产量逾100万 t, 并呈逐年增长的趋势。冷害严重制约着芒果采后贮藏运销质量乃至影响产业发展和价值提升。作为典型的呼吸跃变型水果, 芒果一旦进入跃变阶段, 成熟进程便难以调控。商业采收后的芒果在常温下3~4 d启动跃变, 4~7 d达到成熟^[1-2], 完熟后的果实迅速衰老, 品质下降, 逐渐失去商品价值。商业上对跃变型果实采取普遍运销措施是: 跃变前

采摘, 采后低温贮藏以调整市场供需平衡。低温贮藏可以降低果实呼吸造成的自身消耗, 推迟跃变期的到来, 削弱病原微生物的生存繁殖能力, 从而延长贮藏时间并减少果实采后损失。低温贮藏是目前果蔬产品运销过程中最为广泛采用的基本贮藏手段, 尚无一种措施能够在生产和商业上完全替代其作用。然而芒果属于冷敏型水果, 贮藏温度低于8~10 $^{\circ}\text{C}$ 时即可能发生冷害^[3], 无法实施真正有效的长期低温贮藏; 而较高的贮藏温度不能有效调控采后成熟和侵染性病害的发生, 由此造成的采后

收稿日期: 2013-10-09

基金项目: 中国农业科学院基本科研项目 (0032012018)

作者简介: 杨杨 (1981—), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为果蔬贮藏保鲜技术。E-mail: northerapril@126.com

*通信作者: 申琳 (1964—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为果蔬贮藏保鲜技术。E-mail: shen5000@cau.edu.cn

损失十分可观。因此芒果冷害问题倍受国外采后生理学界的关注。我国对芒果冷害发生规律和机制、调控机理和技术的探索已经起步,并积累了一系列理论基础和技术成果,但尚未有该领域研究的国内外成果的综合性总结。本文对芒果采后冷害发生及控制技术进行综述,以期为本领域的研究者提供一定的参考。

1 芒果采后冷害发生规律及机理

1.1 芒果冷害发生症状

芒果果实的冷害(chilling injure, CI)率先发生在果皮,严重时可蔓延至果肉。果皮的冷害症状体现为灰褐色烫伤样冷害斑^[4],果肉的冷害症状则体现为出斑部位皮下果肉组织发生褐变。程度较轻的冷害具有一定的潜伏性,即果实的冷害症状需在从低温条件下取出后方才逐渐呈现^[5];而遭受严重冷害的果实在低温下即可明显地看到针尖状的暗绿色至浅褐色下陷斑。轻度冷害的果实褐斑较小且稀,随着冷害加重,褐斑变大并连成片,以致整个果面都凹凸不平。果皮的冷害斑在后熟过程中并不增多,颜色却会加深,后熟完成后变为黑褐色^[6]。此外冷害对芒果的后熟也会产生影响,冷害严重的果实从低温转入常温后不能正常成熟^[7]。

1.2 影响芒果冷害发生的因素

1.2.1 生物学基础

生物学基础是冷害发生的内在因素,主要可分为两个方面:品种和成熟度。

1.2.1.1 品种因素

尽管所有品种的芒果在不适宜的低温下贮藏均会发生冷害,但不同品种仍体现出低温下的贮藏能力的差异。薛进军等^[8]对2008年广西地区生长的主要芒果品种的花穗抗冷性进行研究,发现抗低温冷害的品种有凯特、桂热82号、桂热120号、紫花、金穗;不太抗低温的品种是台农1号和吉尔;最不抗低温的品种是爱文和金煌。对我国不同芒果品种果实抗冷能力缺乏系统的比较,但芒果果实是由花穗授粉后发育而来,因此花穗上所具有的抗冷相关遗传物质和信号系统可能会被果实继承,花穗的抗冷能力在一定程度上可以反映果实的抗冷能力。总体而言,除少数品种外大部分品种的芒果在7~8℃以下贮藏都会出现冷害,抗冷能力差的品种甚至在低于12℃时便会发生冷害。

1.2.1.2 成熟度的影响

对于同一芒果品种而言,成熟程度不同的果实也体现出不同的低温贮藏能力:成熟度越高,越不容易发生冷害。研究不同采收期的Amelie、Tommy Atkins和Keitt芒果对低温贮藏的适应能力发现,早期采收果实在10℃条件下贮藏后3个品种都发生了冷害;而中期和晚期采收

的果实冷害症状并不明显,但取出催熟后果实香味比采收后直接成熟的果实差^[3];将芒果先催熟后包薄膜袋,在5~8℃低温下可贮藏40d以上,说明完熟的果实对低温胁迫具有更好的适应能力^[9]。

1.2.2 环境因素

冷害是逐步积累的过程而并非置于低温下立刻发生,对于品种、成熟度相同的芒果,其积累的速度取决于贮藏温度。季作梁等^[10]研究了我国主栽芒果品种紫花芒的低温贮藏、冷害及其生理生化反应。结果表明,2℃贮藏15d、5℃贮藏34d表现冷害症状;高于8℃未发现冷害;11℃贮藏20d后,开始启动成熟。而冷害的积累程度则取决于贮藏时间,处于冷害临界温度(大多数品种为8℃)之下的果实,贮藏时间越长冷害症状越严重^[11]。除温度外环境湿度、气体成分也会影响果实对冷害的响应。研究湿度对不同包装材料的Tommy Atkins和Keitt芒果贮藏时发现当包装内相对湿度从99%下降到90%,芒果的冷害程度降低^[12]。说明高湿可能会促进芒果冷害的积累,但目前尚未见到对此的深入研究。气调贮藏常与低温贮藏配合运用于生产中,不同果蔬对CO₂的适应能力不同,适当的气体比例有助于芒果抵御低温胁迫,但过高浓度的CO₂会导致气体伤害,从而加剧冷害的发生。有研究表明,Alphons芒果在8~10℃的冷藏条件下能耐受3%~5% O₂和5%~6%的CO₂,该条件下可存放3~6周^[13-14]。

1.3 芒果冷害进程中的生理代谢变化

1.3.1 细胞膜渗透性增加

低温伤害会导致芒果果实细胞的膜脂发生相变^[15]进而影响细胞膜透性。细胞膜透性的增加意味着膜脂的流动能力降低,进而令附着于膜上的蛋白不能正常执行功能,从而造成细胞ATP短缺、离子渗漏等现象,打破细胞的代谢平衡,最终导致细胞死亡。紫花芒果2℃贮藏时果皮细胞膜透性随贮藏时间的延长而增加,8d后出现轻微冷害现象;而进行低温锻炼然后再置于2℃中贮藏,冷害现象减轻,同时细胞膜透性随着时间延长而上升的速度减缓^[16]。Gedong Gincu芒果在8℃条件下贮藏时离子渗透率大于同时期13℃条件下贮藏的果实,并且于8℃条件下贮藏第4天达到最高,此后又开始下降,而与此同时果实开始出现表皮黑斑、可溶性固形物下降、不能成熟等冷害症状,Purwanto等^[17]据此认为离子渗透率的变化可以指示芒果冷害的发生。

1.3.2 活性氧清除能力下降

高水平的活性氧被认为是膜脂过氧化加速、膜蛋白聚合进而破坏膜结构、丧失膜功能的重要成因。Zhao Zhilei等^[18]实验发现在相同的贮藏条件下(2℃,15d),半黄和黄熟的芒果放置于低温时冷害发生率低于绿熟期芒果,这一结果与绿熟期芒果在冷藏条件下细胞膜透性升高迅速有显著相关性,与此同时冷藏期间高

成熟度芒果的超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT) 以及抗坏血酸过氧化物酶 (ascorbate peroxidase, APX) 的活性较高, 并保有较高水平的还原性谷胱甘肽 (reduced glutathione tablets, GSH) 和抗坏血酸 (ascorbic acid, AsA), 而细胞膜脂过氧化产物丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 的含量则低于绿熟期的芒果。由此可见细胞膜抗氧化能力的确与芒果的冷害有关。Chongchatuporn通过对Nam Dok Mai芒果与Choke Anan芒果在4 °C和12 °C的贮藏实验发现在以上两个品种的芒果果实中, APX和过氧化物酶 (peroxidase, POX) 与冷害发生的联系较SOD和CAT更小一些^[19]。此外还有研究发现果皮冷害过程引发的褐变与果皮中苯丙氨酸解氨酶 (*L*-phenylalanin ammonia-lyase, PAL) 的活性呈正相关^[20]。

1.3.3 乙烯合成系统受损

乙烯合成削弱甚至受阻是芒果在低温环境下表现出的又一特征。在冷藏期间, 芒果皮中1-氨基环丙烷-1-羧酸 (1-aminocyclopropanecarboxylic acid, ACC) 向乙烯转化的能力随着贮藏时间的延长而降低, 用ACC处理Keitt芒果果皮后即便在ACC处理诱导存在的情况下, 乙烯释放量也逐渐下降, 贮藏2周后与不处理的果皮产乙烯能力基本相同, 这说明温度极大地影响了果皮中乙烯的产生。低温贮藏对芒果果皮产生乙烯能力的影响有可能会一直持续到果实复温之后。而在不同低温 (0、2、5 °C) 下贮藏4周后复温的Keitt芒果皮中ACC转化为乙烯的能力并没有得到恢复^[21]。由此可见, 冷害发生严重的果实中乙烯合成酶的功能已经丧失, 因此不能正常转熟, 而温度对果皮乙烯释放能力的影响与果肉的成熟度并无直接关系。

综上所述, 芒果的果皮细胞在低温胁迫下发生膜脂结构的改变, 致使膜上包括活性氧清除体系在内的蛋白质功能的减弱, 活性氧等氧化伤害物质积累, 造成了膜结构的破坏和蛋白质功能的丧失, 积累到一定程度之后细胞损伤不可逆转, 最终表现为组织坏死褐变以及未坏死组织无法正常成熟。此外活性氧水平的升高会导致包括能量代谢在内的诸多代谢平衡的打破。线粒体作为活性氧的主要调用者, 在此状态下容易逐渐失去正常生理功能, 致使内膜上一系列与呼吸代谢和能量平衡相关的酶类的活性也发生改变, 造成ATP等维持能量代谢平衡的枢纽物质的提供能力随之降低, 细胞内的正常能量转换过程难以维系也会造成相应细胞的瓦解^[22]。关于冷害发生的深入机理已在细胞和分子水平取得了众多突破^[23-25], 如能量代谢平衡的变化^[26]及差异蛋白的表达^[27], 这些理论也已逐渐在芒果冷害的研究和实践中被探讨和运用, 成为理解和认识芒果冷害发生机理的新切入点。

2 芒果抗冷能力诱导及冷害控制技术

2.1 植物抗冷能力的诱导

当温度低于植物可以忍受的阈值时会对植物造成冷胁迫, 但植物并非毫无抵抗地暴露于胁迫环境中, 而是会在低温信号的刺激下自发地在体内产生相应的抗冷调节反应, 以抵御冷害、维持其生命, 这一现象被称为植物的抗冷。抗冷能力在植物界是广泛存在的能力, 长期研究发现, 植物的抗冷能力主要包括生物膜系统对低温逆境环境的适应和低温诱导蛋白, 如类脂转移蛋白 (lipid transfer protein, LTP) 的表达等过程, 而这些过程的启动模式并不是单一的, 除了冷胁迫之外, 还存在其他方法能够诱发植物发生有利于适应低温冷胁迫的生理变化, 从而提高对于低温的适应能力, 这一过程便是抗冷诱导。

植物抗冷诱导的方式主要包括化学方法和物理方法。对植物抗冷能力具有诱导作用的化学物质主要有:

1) 在抗冷信号途径上游起调控作用的激素或生长调节物质, 如水杨酸、茉莉酸及其甲酯、脱落酸、乙烯、油菜素内酯等; 2) 起到信号传递作用的信号物质, 主要有H₂O₂和NO; 3) 下游起到抗冷效应的物质, 如起渗透调节作用的多胺、多糖、游离脯氨酸等, 这些物质可以使植物细胞有效的抵抗冷胁迫导致的膜损伤^[15]。很多研究都表明冷激、热激等物理处理办法也可有效诱导植物抗冷能力的提高^[28-29]。但无论使用何种方法, 植物抗冷诱导方式发挥作用的基础, 都是启动并调节植物自身对冷胁迫的响应体系。经过抗冷诱导之后的植物置于低温环境之下时抗冷能力会增强, 冷害发生延缓或降低, 因而成为植物冷害防治的新手段和新思路, 在芒果的低温贮藏保鲜中具有广阔的前景。

2.2 芒果冷害控制技术

2.2.1 中温贮藏

中温贮藏是指在芒果冷害发生的临界温度 (10~12 °C) 或更高温度内对芒果进行贮藏的方式, 该方法是最早运用于生产中, 以延长果实贮藏时间, 同时保证不发生冷害, 目前也在芒果贮运行业中被广泛采用。在冷害临界温度以上实施贮藏虽然可以避免冷害的发生, 但不能有效抑制和调控芒果在贮藏过程中的成熟变化, 故而必须辅助以气调、乙烯吸收剂KMnO₄、乙烯竞争抑制剂1-MCP^[30]、抗氧化剂^[12]等措施才在商业上具有应用价值。芒果在12 °C条件下气调贮藏可使果实的贮藏期延长至6周左右^[13], 施用1-MCP后芒果在20 °C条件下可保存2周左右。中温贮藏保证了芒果中短期贮藏的效果和品质, 但该技术尚不能实现芒果的中长期和长期贮藏。

2.2.2 物理方法

2.2.2.1 低温处理

低温处理会改变基因表达模式, 具体表现为部分冷

相关蛋白表达的上调^[31]。该方法运用于芒果低温贮藏的驯化锻炼,可诱导芒果抗冷能力的提升。将紫花芒果先置于15℃低温中贮藏7d进行低温锻炼后再置于2℃中贮藏,使得芒果的冷害发病时间从8d推迟到21d,果皮细胞中CAT和SOD的活性显著提高,MDA含量的增加和细胞膜透性的增大则明显延缓^[16]。冷激处理是对采后果实进行短时低温处理,该研究始于20世纪70年代末。用0℃冷激处理3、4、5h“瓦橙”芒果后再进入2℃贮藏,冷害指数和冷害率均有显著降低,冷害指数最多可降低60%,冷害率比对照果最多可低32%。冷激促进了芒果贮藏期间可溶性固形物含量的上升和可滴定酸含量的下降,延缓了抗坏血酸含量的下降,并且提高了芒果贮藏中后期ATP酶、细胞色素氧化酶、POX的活性^[32]。

2.2.2.2 高温处理

高温处理诱导抗冷能力运用了生物对于逆境环境具有交叉适应性,即热激过程中产生的热激蛋白等物质同时对于冷胁迫也具有防御作用的特点^[33]。研究表明,热激处理对芒果果实组织会产生诸多影响,如减少乙烯释放量、降低果实外源乙烯的敏感、减少离子渗漏、减慢果实软化和果胶可溶化的速度,还引起包括核仁、线粒体、核糖体以及细胞核和内质网在内的细胞超微结构的变化,引发重要抗逆蛋白质热激蛋白的表达^[6]。热激处理方式可以是热水浴或热空气处理,处理时间因温度强度不同。一般情况下热水处理温度稍高,时间较短;热空气处理温度较低,持续时间略长。这是由于水比空气比热大,传热也更快^[34]。朱世江等^[6]则发现紫花芒果热激处理后在低温贮藏期间内源ABA含量高于对照,说明热激处理不仅可以产生热激蛋白,还可以影响到负责调控植物抗逆功能的信号物质。实验测定了38℃热空气处理持续时间对2℃贮藏12d的芒果抗冷性的影响,结果发现在12~72h范围内,芒果均可以获得最好的抗冷性,说明使芒果抗冷性达到最强的热处理持续时间是一个跨度较大的区间。

2.2.2.3 间歇升温

间歇升温是较早被发现的可以提高果实抗冷能力的技术措施。对紫花芒果进行间歇升温贮藏的研究结果表明:该方式有助于维持果皮中较高水平的活性氧清除能力,如还原型谷胱甘肽、还原型VC含量的下降趋势减缓,一定程度上抑制了氧化型谷胱甘肽(GSSG)、氧化型VC(DHA)、丙二醛的产生,延迟了多胺、乙烯合成前体ACC含量乃至细胞膜透性的上升。但当间歇升温处理采用中温(而非低温)和常温交错处理时反而促使果实乙烯释放高峰及呼吸高峰提前到来,加速了芒果的成熟衰老,这提示人们间歇升温处理可能只适用于冷害临界温度之下贮藏的果实^[35-37]。

2.2.3 化学方法

2.2.3.1 多胺

多胺是较早被发现的与冷害发生过程相伴随的物质,目前多认为多胺是植物在冷刺激下所产生的防御性产物,可通过与膜磷脂结合等多种方式对冷胁迫下的生物细胞产生保护作用,施用外源多胺有助于提高果实的抗冷能力。在对芒果冷害进程的研究中人们发现芒果果皮和果肉中的多胺与果实冷害是相伴出现的^[38],并在整体的冷害进程中具有先上升后下降的趋势,在贮藏末期,多胺随着冷害的加重而急剧下降,而一定浓度的外源腐胺处理可以明显地减轻芒果冷害,在该过程中芒果内源腐胺含量降低而内源亚精胺及尸胺含量提高,这一致冷害多胺代谢机制与柑桔和南瓜相似^[39]。

2.2.3.2 有机酸

草酸广泛分布于动植物及真菌中,近年来草酸对果蔬抗逆能力的影响引起了研究者的关注。Ding等^[40]发现外施一定浓度的外源草酸可降低芒果在5℃低温贮藏期间芒果的冷害发生率,并提高了冷贮期间果肉中活性氧的代谢能力。使用5mmol/L草酸溶液于套袋前处理“圣心”芒果10min,贮藏期间保持了较高的AsA和GSH含量,APX和谷胱甘肽还原酶(GR)活性在贮藏9d后提高,而超氧阴离子生成速率、H₂O₂含量和MDA含量降低,说明草酸处理可通过提高果皮AsA-GSH循环系统中抗氧化酶活性和抗氧化剂水平来增强清除活性氧自由基(ROS)能力^[41]。同样的方式处理“Zill”芒果,可使果实在(10±0.5)℃存放49d后的冷害发生受到抑制,通过改变脯氨酸代谢途径关键酶的活性促进果皮和果肉组织中游离脯氨酸的积累,并提高果肉细胞的能荷以及ATP水平^[42]。抗坏血酸是生物体内维持氧化还原平衡的重要物质,Chongchatuporn等^[19]发现Nam Dok Mai芒果和Choke Anan芒果在4℃时的冷害水平与果皮组织中抗坏血酸含量和总抗氧化能力呈负相关,这意味着存在通过提高抗坏血酸水平来减缓芒果冷害发生的可能。

2.2.3.3 活性氧类小分子信号物质

活性氧作为生物氧化代谢的副产物大量积累的时候会对生物膜造成不可逆的损伤进而导致细胞衰老死亡,但一部分活性氧代谢体系的中间产物却同时也在植物防御网络信号系统中承担着重要的反馈作用,如作为胞内信使存在的H₂O₂和同时作为胞间和胞内信使存在的NO,已有许多实验证明这两种物质在诱导植物抗病抗逆性增强方面的作用,关于这两种信号物质对芒果抗冷性的诱导作用也已被研究证实。采用0.001mmol/L H₂O₂处理“白象牙”芒果后可明显降低冷害发生率、冷害指数以及贮藏期间的H₂O₂和MDA含量,其对抗冷能力的效果效果与0℃水150min冷激处理效果相当^[43]。10~40μL/L NO气体处理均可以有效地减缓芒果在低温贮藏下的冷害

发生^[44], 0.08 mmol/L NO供体SNP溶液浸泡处理有助于台农一号芒果抗冷性的提高, 同时这种效应对于过氧化氢酶的调节在活性氧清除体系中最为明显, NO调控芒果抗冷能力增强的信号传递可能通过调节H₂O₂水平来实现^[45-46], 小分子信号物质对芒果抗冷能力的诱导是一个复杂的信号网络。

2.2.3.4 激素及植物生长调节剂类小分子信号物质

ABA是重要的抗逆境胁迫激素, 现已证实在多种植物体内存在依赖于ABA的抗冷途径, 尽管尚未看到ABA直接用于芒果抗冷的报道, 但在热激处理提升芒果抗冷能力的过程中也观察到了果肉和果皮组织细胞中ABA水平的升高, 意味着ABA很可能与芒果抗冷能力的产生有关^[6]。水杨酸和茉莉酸本身都是植物生长调节剂, 在植物获得性抗性产生过程中的作用近年来逐渐为人所熟知, 0.1 mmol/L SA和1 mol/L Me-JA处理“Nam Dok Mai No. 4”芒果后在5℃贮藏的抗冷能力皆有显著提高, SA和Me-JA在此过程中均降低了芒果MAD的积累速度和细胞的离子渗透率^[47]。10 μmol/L BL处理“Zill”芒果也可以提升其对5℃低温的忍耐能力, 该处理激发了包括转录、细胞生物合成、细胞防卫和胁迫响应在内的四大类14种位于质膜上的蛋白质合成及其相应基因表达变化, 其中Remorin蛋白、ABA压力响应类成熟蛋白(abcisic stress ripening-like protein)、II型SK2脱水蛋白(type II SK2 dehydrin)以及温度诱导质膜运载蛋白(temperature-induced lipocalin)及其相应基因在冷胁迫中受到BL处理的正向调节。此外BL处理还能降低膜的相变温度, 提高其不饱和度, 使之在低温下保持了较高的流动性。这说明BL在提高芒果抗冷能力的过程中扮演着重要角色, 而质膜蛋白和膜脂与此有极为密切的关联^[48]。Wang Baogang等^[49]使用150 mg/L类生长素物质2,4-二氯苯氧乙酸(2,4-D)处理Nam Dok Mai和Choke Anan芒果后也显著的减轻了果实冷害发生和提升了果实的品质, 与此同时果实贮藏品质得以提升, 可溶性固性物、可溶性糖含量、硬度和果皮中叶绿素含量明显高于对照组。此外该处理也改变了果实内部的激素平衡, 内源ABA和GA₃含量升高而内源IAA和ZR含量下降。以上研究提示人们, 植物生长调节剂在植物抗逆信号网络中具有特殊作用, 它们诱导芒果抗冷的机理有待于进行更深入的研究。

3 结 语

综上所述, 有关芒果冷害问题的研究是围绕着长期以来对植物低温胁迫生理研究的成果展开的, 目前已经在细胞层面和生理层面取得了很大进展, 通过抗逆性诱导来增强抗冷能力是目前冷害防治研究的关注焦点, 但不论是在芒果冷害发生机理还是抗冷性的研究中, 分子

层面的机制尚有待于深入探讨。目前发现的植物抗冷途径主要有两条: 依赖于ABA的途径和不依赖于ABA的途径。芒果抗冷能力提高的机制究竟为哪条途径; 一些调控植物抗冷能力的重要基因在芒果中如何被低温信号所调控; 这些调控又最终对芒果的抗冷能力和冷害发生起到怎样的作用等都是芒果冷害研究中亟待研究的问题。此外, 尽管目前发现了多种提高芒果抗冷能力的小分子物质, 但这些物质在芒果应对冷胁迫的信号网络中究竟居于何种地位, 相互之间关系如何, 以及如何协调这些物质与外界环境之间的关系以达到抗冷效果等问题也需进行深入研究。而在实际生产中, 则可以考虑通过两种以上手段结合使用的方式来有效降低芒果在低温贮藏过程中的冷害发生。

参考文献:

- [1] ABBASI N A, IQBAL Z, MAQBOOL M, et al. Postharvest quality of mango (*Mangifera indica* L.) fruit as affected by chitosan coating[J]. *Journal of Environment Biology*, 2009, 41(1): 343-357.
- [2] PANHWAR F. Post-harvest technology of mango fruits, its development, physiology, pathology and marketing in Pakistan[M]. Digitalverlag GmbH, Germany, 2005.
- [3] MEDLICOTT A P, SIGRIST J M, SY O. Ripening of mangos following low-temperature storage[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1990, 115(3): 430-434.
- [4] CHIDTRAGOOL S, KETSA S, BOWEN J, et al. Chilling injury in mango fruit peel: cultivar differences are related to the activity of phenylalanine ammonia-lyase[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2011, 62(1): 59-63.
- [5] 潘永贵, 谢江辉. 现代果蔬采后生理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 121-132.
- [6] 朱世江. 芒果采后热处理诱导抗冷性的生理生化机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2002: 15.
- [7] 叶其蓝, 林月芳, 袁军, 等. 紫花芒果品质在冷藏过程中的变化[J]. *中国果品研究*, 1996(4): 10-12.
- [8] 薛进军, 姜建初, 唐建, 等. 2008年荔枝芒果龙眼不同品种花穗冷害程度及处理效果[J]. *广西农学报*, 2009, 24(2): 37-39.
- [9] 罗保康, 韦祖桂, 邓飞洪, 等. 芒果2~8℃低温贮藏试验初报[J]. *广西热作科技*, 1992, 42(1): 17-20.
- [10] 季作梁, 张昭其, 王燕, 等. 芒果低温贮藏及其冷害的研究[J]. *园艺学报*, 1994, 21(2): 111-116.
- [11] JEFFREY K, BRECHT M C. Time-temperature combinations that induce chilling injury of mangos[R]. Gainesville, University of Florida, 2012.
- [12] PESIS E, AHARONI D, AHARON Z, et al. Modified atmosphere and modified humidity packaging alleviates chilling injury symptoms in mango fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2000, 19(5): 93-101.
- [13] ULLAH H, AHMAD S, THOMPSON A, et al. Storage of ripe mango (*Mangifera indica* L.) cv. alphonso in controlled atmosphere with elevated CO₂[J]. *Journal of Environment Biology*, 2010, 42(3): 2077-2084.
- [14] NIRANJANA P, GOPALAKRISHNA R K P, SUDHAKAR R D, et al. Effect of controlled atmosphere storage (CAS) on antioxidant enzymes and DPPH-radical scavenging activity of mango (*Mangifera indica* L.) cv. alphonso[J]. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 2009, 9(2): 779-792.
- [15] 田世平, 罗云波, 王贵禧. 园艺产品采后生理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2011.

- [16] 李雪萍, 张昭其, 戴宏芬, 等. 低温锻炼对冷藏芒果膜脂过氧化作用的影响[J]. 华南农业大学学报, 2000, 21(4): 15-17.
- [17] PURWANTO Y A, OKVITASARI H, SUTRISNO, et al. Chilling injury in green mature mango fruits cv. gedong gincu based on the changes in ion leakage[C]./2nd Asia Pacific Symposium on Postharvest Research, Education, and Extension, 2012, Sep.
- [18] ZHAO Zhilei, JIANG Weibo, CAO Jiankang, et al. Effect of cold-shock treatment on chilling injury in mango (*Mangifera indica* L. cv. 'Wacheng') fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(14): 2458-2462.
- [19] CHONGCHATUPORN U, KETSA S, DOORND W G. Chilling injury in mango (*Mangifera indica*) fruit peel: relationship with ascorbic acid concentrations and antioxidant enzyme activities[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 86(12): 409-417.
- [20] CHIDTRAGOOL S, KETSA S, BOWEN J. Chilling injury in mango fruit peel: cultivar differences are related to the activity of phenylalanine ammonia lyase[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(1): 59-63.
- [21] LEDERMAN I E, ZAUBERMAN G, WEKSLER A, et al. Ethylene-forming capacity during cold storage and chilling injury development in 'Keitt' mango fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 1997, 10(1): 107-112.
- [22] PURVIS A C. How respiring plant cells limit the production of active oxygen species// HODGES D M. Postharvest oxidative stress in horticultural crops[M]. New York: Food Products Press, 2003: 151-164.
- [23] ZHANG Changfeng, TIAN Shiping. Crucial contribution of membrane lipids' unsaturation to acquisition of chilling-tolerance in peach fruit stored at 0 °C[J]. Food Chemistry, 2009, 115(2): 405-411.
- [24] LI Boqiang, ZHANG Changfeng, CAO Baohua. Brassinolide enhances cold stress tolerance of fruit by regulating plasma membrane proteins and lipids[J]. Amino Acids, 2012, 43: 2469-2480.
- [25] ZHANG Changfeng, TIAN Shiping. Peach fruit acquired tolerance to low temperature stress by accumulation of linolenic acid and *n*-acylphosphatidylethanolamine in plasma membrane[J]. Food Chemistry, 2010, 120(3): 864-872.
- [26] WILSON J M. Leaf respiration and ATP levels at chilling temperatures[J]. New Phytologist, 1978, 80(2): 325-334.
- [27] SANCHEZ-BEL P, EGEE I, SANCHEZ-BALLESTA M T, et al. Proteome changes in tomato fruits prior to visible symptoms of chilling injury are linked to defensive mechanisms, uncoupling of photosynthetic processes and protein degradation machinery[J]. Plant and Cell Physiology, 2012, 53(2): 470-484.
- [28] BASSALA M, EL-HAMAHMY M. Hot water dip and preconditioning treatments to reduce chilling injury and maintain postharvest quality of navel and valencia oranges during cold quarantine[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(3): 186-191.
- [29] COLINET H, LEE S F, HOFFMANN A. Temporal expression of heat shock genes during cold stress and recovery from chill coma in adult *Drosophila melanogaster*[J]. FEBS Journal, 2010, 277(1): 174-185.
- [30] WANG Baogang, WANG Jianhui, FENG Xiaoyuan, et al. Effects of 1-MCP and exogenous ethylene on fruit ripening and antioxidants in stored mango[J]. Plant Growth Regulation, 2009, 57(2): 185-192.
- [31] ZHAO Danying, SHEN Lin, FAN Bei, et al. Physiological and genetic properties of tomato fruits from 2 cultivars differing in chilling tolerance at cold storage[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(5): 348-352.
- [32] 赵志磊, 顾玉红, 赵玉梅, 等. 冷激处理对芒果贮藏冷害及相关酶的影响[J]. 河北农业大学学报, 2007, 30(4): 27-30.
- [33] WANG L J, LOESCHER W, DUAN W, et al. Heat acclimation induced acquired heat tolerance and cross adaptation in different grape cultivars: relationships to photosynthetic energy partitioning[J]. Functional Plant Biology, 2009, 36(6): 516-526.
- [34] JACOBI K K, MACRAE E A, HETHERINGTON S E. Effects of hot air conditioning of 'Kensington' mango fruit on the response to hot water treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 21(1): 39-49.
- [35] 张昭其, 洪汉君, 李雪萍, 等. 间歇升温对芒果冷害及生理生化反应的影响[J]. 园艺学报, 1997, 24(4): 329-332.
- [36] 张昭其, 洪汉君, 李雪萍, 等. 间隙升温处理对芒果内源多胺和ACC含量的影响[J]. 华南农业大学学报, 1997, 18(3): 77-80.
- [37] 戴宏芬, 季作梁, 张昭其. 间歇升温对芒果果实冷害及谷胱甘肽、抗坏血酸代谢的影响[J]. 华南农业大学学报, 1999, 20(2): 51-54.
- [38] NAIR S, SINGH Z. Chilling injury in mango fruit in relation to biosynthesis of free polyamines[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2004, 79(4): 515-522.
- [39] 季作梁, 洪汉君, 张昭其, 等. 多胺与芒果贮藏冷害的研究[J]. 热带作物学报, 1998, 19(3): 28-32.
- [40] DING Zansheng, TIAN Shiping, ZHENG Xiaolin, et al. Responses of reactive oxygen metabolism and quality in mango fruit to exogenous oxalic acid or salicylic acid under chilling temperature stress[J]. Physiologia Plantarum, 2007, 130(1): 112-121.
- [41] 郑小林, 陈燕, 敬国兴, 等. 草酸处理对芒果采后果实AsA-GSH循环系统的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(9): 1633-1640.
- [42] LI Peiyan, ZHENG Xiaolin, LIU Yan, et al. Pre-storage application of oxalic acid alleviates chilling injury in mango fruit by modulating proline metabolism and energy status under chilling stress[J]. Food Chemistry, 2014, 142(1): 72-78.
- [43] 赵习娟, 刘扬, 李进才, 等. H₂O₂处理对采后樱桃番茄和芒果抗冷性的影响[J]. 天津大学学报, 2010, 43(9): 844-848.
- [44] ZAHARAH S S, ZORA S. Postharvest nitric oxide fumigation alleviates chilling injury, delays fruit ripening and maintains quality in cold-stored 'Kensington Pride' mango[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(3): 202-210.
- [45] 杨杨, 申琳, 生吉萍, 等. 外源NO对采后芒果果实低温胁迫后H₂O₂代谢的影响[J]. 中国农业科技导报, 2013, 15(2): 131-136.
- [46] 范蓓, 杨杨, 王锋, 等. 外源NO处理对采后芒果抗冷性的影响[J]. 核农学报, 2012, 27(6): 800-804.
- [47] JUNMATONG C, UTHAIBUTRA J, BOONYAKIAT D, et al. Reduction of chilling injury of 'Nam Dok Mai No. 4' mango fruit by treatments with salicylic acid and methyl jasmonate[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(10): 126-136.
- [48] LI Boqiang, ZHANG Changfeng, CAO Baohua, et al. Brassinolide enhances cold stress tolerance of fruit by regulating plasma membrane proteins and lipids[J]. Amino Acids, 2012, 43(6): 2469-2480.
- [49] WANG Baogang, WANG Jianhui, LIANG Hao, et al. Reduced chilling injury in mango fruit by 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid and the antioxidant response[J]. Postharvest Biology and Technology, 2008, 48(2): 172-181.