

不同处理对采后果实糖代谢过程影响研究进展

李芋萱¹, 曾凯芳¹, 王宝刚², 邓丽莉^{1,*}

(1.西南大学食品科学学院, 重庆 400716; 2.北京市农林科学院林业果树研究所, 北京 100093)

摘要: 糖代谢是果实色泽、风味形成以及其他营养物质代谢的重要基础, 是决定果实品质和商品价值的主要因素。在采后果实品质和成熟衰老调控方面, 糖代谢的合理调控尤为重要。本文综述了近年来国内外在采后果实糖代谢调控, 包括物理调控、化学调控方面的研究进展, 以期对果实品质改善提供一定的理论参考。

关键词: 糖代谢; 采后果实; 可溶性固形物; 蔗糖; 果糖; 葡萄糖

Advances in Regulation of Sugar Metabolism in Postharvest Fruits by Different Treatments

LI Yuxuan¹, ZENG Kaifang¹, WANG Baogang², DENG Lili^{1,*}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400716, China;

2. Institute of Forestry and Pomology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Sugar metabolism is the basis for the formation of fruit color and flavor, and the metabolism of other nutrients, which is a major factor determining the quality and commercial value of the fruits. The regulation of sugar metabolism is particularly important for postharvest fruit ripening and quality. This paper reviews the recent progress in understanding the regulation of sugar metabolism with respect to physical control and control in postharvest fruits, which will provide a theoretical reference for the improvement of fruit quality.

Key words: sugar metabolism; postharvest fruit; soluble solids; sucrose; fructose; glucose

中图分类号: TS252.26

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2015)05-0283-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201505050

糖及其活化形式多处于果实各种代谢的上游位置, 为果实多种代谢过程提供底物、中间反应物、能量、还原力等, 是果实品质和风味形成的重要决定因素^[1]。糖代谢及糖信号途径可作为信号分子调控果实的生长发育与相关基因的表达, 与果实成熟衰老密切相关。果实糖代谢异常会对果实品质, 尤其是果实的风味产生一定影响, 如冷害造成酒精异味^[2]。采后处理不当, 如气调贮藏过程中CO₂含量过高或O₂含量过低, 会导致果实无氧呼吸, 产生不利代谢反应和生理紊乱^[3]。因此, 在采后果实品质和成熟衰老调控方面, 糖代谢的有效调控尤为重要。近年来, 国内外学者在果实糖代谢的调控方面也取得了一定进展, 对果实中糖的生理功能、种类及积累类型以及果实中糖代谢相关酶的作用、果实生长过程中环境因子、栽培措施以及施肥情况对果实糖代谢的影响等方面进行了大量研究^[4]。但目前关于果实采后糖代谢的调控技术的综述尚未见报道。本文从果实采后糖代谢的调控出发, 综述了近年来物理以及化学技术对果实采后糖

代谢过程的调控作用, 以期对采后果实糖代谢的调控提供理论参考。

1 果实主要糖代谢相关酶及作用

果实中含量较多的糖主要是葡萄糖、果糖、蔗糖、淀粉及山梨醇等, 其中除淀粉和纤维素外, 均为可溶性糖。果实积累的可溶性糖是果实的风味物质生物合成的基础原料, 直接影响果实的食用价值^[5]。按照糖代谢的产物可将果实中的糖代谢分为蔗糖代谢(柑橘)、山梨醇代谢(苹果、梨等蔷薇科植物)^[6]、己糖代谢^[7]、淀粉代谢等。蔗糖普遍存在于果实中, 是多种果实中糖的运输贮存形式和信号物质, 其代谢受到各种信号分子的高度调控^[7]。果蔬组织中与蔗糖代谢密切相关的酶主要有蔗糖磷酸合成酶(sucrose-phosphate synthase, SPS)、蔗糖合成酶(sucrose synthase, SS)和转化酶(invertase, Inv)(包括酸性转化酶(acid invertase, AI)及中性转化

收稿日期: 2014-04-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(XDJK2014C068; 2362014xk11); 公益性行业(农业)科研专项(201303075); 重庆市科技攻关(应用技术研发类/重点)项目(cstc2012gg-yyjsB80003)

作者简介: 李芋萱(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为果蔬采后生理。E-mail: 18883303833@163.com

*通信作者: 邓丽莉(1983—), 女, 讲师, 博士, 研究方向为果蔬采后生理与生物技术。E-mail: denglili_361@163.com

酶(neutral, NI))。SS既能合成蔗糖又能水解蔗糖,具有双功能酶的特性^[8];转化酶催化蔗糖不可逆地分解为果糖和葡萄糖;SPS是蔗糖合成中的关键性酶,催化合成蔗糖的不可逆反应^[9]。山梨醇合成与蔗糖合成利用共同的磷酸己糖库^[10],山梨醇与葡萄糖、果糖之间相互转化与6-磷酸山梨醇脱氢酶(sorbitol-6-phosphate dehydrogenase, S6PDH)、山梨醇脱氢酶(sorbitol dehydrogenase, SDH)、山梨醇氧化酶(sorbitol oxidase, SOX)的活性密切相关^[11]。与己糖代谢相关的酶主要是果糖激酶(fructokinase, FRK)和葡萄糖激酶(glucokinase),不同果实中己糖代谢相关酶的活性不同,两种酶对底物都有高度的专一性和亲和力,可以通过调控两种酶的活性实现对果糖、葡萄糖比率的调控^[12]。

2 果实糖代谢的物理调控措施

2.1 热处理对果实糖代谢的调控作用

热处理对果实糖代谢的影响存在品种差异,在一些果实中适当的热处理对果实糖分的积累起到一定促进作用。热处理对果实糖代谢的研究多集中在其对果实可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC)、蔗糖、果糖、葡萄糖含量变化趋势的影响上。经热处理后的芒果^[13]、番茄^[14]、椪柑^[5]果实的SSC有所提高。40℃热空气处理(hot air treatment, HAT)2d刺激椪柑果实中总糖的积累,SSC、果糖、葡萄糖含量均呈现增大的趋势;蔗糖含量有所降低,但不显著^[5]。热处理对果实糖代谢的调控是通过影响果实糖代谢相关酶活性来产生影响的。任雷等^[15]研究表明:随着处理温度的增加,甜瓜果实中果糖、蔗糖、可溶性糖含量增加,Inv、SPS、SS活性升高。自然温度(10~28℃)+6~7℃与自然温度处理间存在明显差异。此外,不同温度处理对番茄果实不同部位糖含量的影响也不相同,随着温度的增加,番茄果实心室隔壁中蔗糖积累逐渐增多,果肉和胶质胎座中蔗糖积累逐渐减少^[16]。但在轻度加工过的葡萄^[17]以及金橘^[18]中SSC并未发生显著变化。

2.2 光照对果实糖代谢的调控作用

光照通过影响与糖代谢相关酶的活性对各种糖的积累转化造成影响。研究表明光照强度的改变可以显著影响草莓果实总糖的含量,但SSC与酸含量则没受到显著影响;不同草莓品种对光照强度改变的反应有所不同^[19]。补光处理后厚皮甜瓜果实中各种糖的含量增高,同时SPS和SS的活性升高,但NI和AI的活性降低,说明补光处理促进甜瓜果实糖分的积累和蔗糖相关酶基因的表达^[15]。实际生产过程中,通过对果实进行套袋处理和田间铺反光膜等措施改变果实的光照条件。套袋处理后乔纳金苹果果实淀粉、葡萄糖、半乳糖含量增加,但SSC、糖醇与其

他糖含量降低,果糖与总非结构性碳水化合物未受显著影响^[20]。而套袋处理后黄金梨果实可溶性糖和淀粉含量都有所降低,SS、SPS活性下降,Inv、淀粉酶活性升高^[21]。此外,杨绍兰等^[22]对“荏梨”的研究表明,套袋处理降低了果实SPS活性,以及果实发育后期SS的分解活性;同时降低了AI₂的相对表达量,推迟了果实中SPS₁的相对表达量最大值出现的时间,影响了SUS₁相对表达量的变化。大棚梨园铺设银色反光膜使翠冠梨果实中的可溶性糖以及总糖尤其是蔗糖含量有所提高,SPS的活性高于对照组而NI的活性则低于对照组^[23]。

2.3 气体成分对果实糖代谢的调控作用

气调与自发气调在果实保鲜中被广泛应用,该技术对果实糖代谢也产生一定的影响。研究表明,11%~12% CO₂和9%~10% O₂气调贮藏条件下贮藏30d可有效延缓阳蜜桃SSC的下降^[24]。内含CO₂吸附剂的活性气调包装能够推迟番木瓜果肉内多糖和还原糖到达峰值的时间^[25]。草莓果实高CO₂、0℃条件下贮藏3d,果实葡萄糖、果糖、蔗糖含量显著降低,将其从高CO₂移除到空气中后,蔗糖含量降低的趋势仍然在继续,表明高CO₂在蔗糖代谢过程中起着重要作用,可以激活蔗糖的部分水解^[26]。但气调过度会对果实的风味造成一定的影响,气调贮藏黄金梨到187d时,对照组大部分果实有乙醇味,经1.0% CO₂+3% O₂处理果心褐变严重的果有苦味,而0.5% CO₂+3% O₂处理果实风味保持较好^[27]。关于气调贮藏调控果实糖代谢的机理尚不十分清楚。

2.4 低温贮藏对果实糖代谢的调控作用

低温贮藏对果实糖代谢产生一定影响。低温贮藏延缓菠萝果实总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量的下降,且(8±1)℃贮藏效果较好^[28]。低温贮藏能延缓草莓^[29]、柑橘^[30]等果实SSC、可滴定酸(titratable acidity, TA)、VC含量的下降,保持果实品质。香蕉在4℃条件下贮藏,SPS、NI和AI酶活性和糖含量上升缓慢,SS活性下降。低温贮藏可明显抑制香蕉体内碳素代谢,降低代谢酶活性以及糖分积累速率^[31]。0℃处理猕猴桃果实中SPS活性的升高与蔗糖的积累呈极显著正相关,Inv活性变化则与蔗糖含量呈极显著负相关。但贮藏温度过低会造成冷害的发生,果实发生冷害会使细胞膜系统遭到破坏,果实的软化能力降低,SSC不再增加^[32]。另外,冷藏时间过长会使葡萄、猕猴桃的苦味强度加强^[33]。

3 果实糖代谢的化学调控措施

3.1 NO对果实糖代谢的调控作用

NO在植物体内广泛存在,作为胞内胞外的信号分子易扩散通过细胞膜,与乙烯、ROS、SA、MeJA、H₂O₂、脱落酸(abscisic acid, ABA)、Ca²⁺等多种信号分子具

有交互作用,在植物抗逆、延缓衰老等过程中发挥重要作用^[34]。Singh等^[35]用10 $\mu\text{mol/L}$ 或20 $\mu\text{mol/L}$ 的NO处理日本李子,果实果糖和葡萄糖含量显著升高,蔗糖和山梨醇则降低;10 $\mu\text{mol/L}$ NO处理后,“肥城”桃果实果糖、葡萄糖、蔗糖的含量随贮藏时间延长而增加,但山梨醇含量则下降;并且NO显著抑制了桃果实贮藏后期可溶性糖含量的增加,随着贮藏时间的延长,桃果实糖酸比上升,NO处理促进了果实中山梨醇的转化^[36]。采后30、50、100 $\mu\text{mol/L}$ SNP(NO供体)处理都能够促进贮藏夏橙、蜜橙、锦橙果实还原糖含量的增加,30、50、100 $\mu\text{mol/L}$ SNP处理组夏橙果实还原糖含量分别比对照增加了12.34%、14.71%和9.32%^[37]。

NO处理通过影响与糖代谢相关酶的活性来影响果实中糖的代谢过程,NO通过促进SS合成方向以及SPS的活性,使苹果果实中的果糖、葡萄糖转化为蔗糖,同时NO处理能够抑制Inv的活性使蔗糖得到积累^[34]。NO处理显著提高了桃果实中SDH的活性,SOX活性也呈现增加趋势,在桃果实贮藏期间NI的活性要明显高于AI的活性。SS的活性呈现出先增加后下降的趋势,在处理后的第8天达到最大值,并且NO使SS分解方向的活性降低,蔗糖分解酶合成方向的活性增加^[38]。

3.2 涂膜技术对果实糖代谢的调控作用

近年来涂膜技术在果蔬保鲜方面广为应用。目前,关于涂膜技术对果实糖代谢调控的报道多集中在涂膜处理对果实SSC的影响。Gol等^[39]用1.0%羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)、1.0%羟丙基甲基纤维素(hydroxypropyl methyl cellulose, HPMC)、1.0% CMC+1.0%壳寡糖(chitosan oligosaccharide, COS)、和1.0% HPMC+1.0% COS处理草莓果实,发现各处理均可以使果实SSC维持在较高水平,且与COS结合处理组的效果更明显。壳聚糖处理蓝莓果实组(2%、4%、8%、12%)SSC比对照组高。在贮藏过程中酸代谢生成淀粉、酸转化成糖,造成TA含量减少,TSS含量增加^[40]。类似的实验结果在高丛蓝莓^[41]上也有报道。壳聚糖衍生物疏基化壳聚糖及壳寡糖在保持樱桃^[42]、“白花”水蜜桃^[43]和柑橘果实^[44]SSC方面的作用也有报道。此外,还有报道指出,可食性膜、涂蜡柑橘果实SSC均比对照组低,并且可食性膜处理组SSC较涂蜡组的更低一些^[45]。

3.3 钙处理对果实糖代谢的调控作用

钙(Ca^{2+})作为园艺作物的主要调控离子,可调节许多生理生化过程和细胞内许多重要酶的活性^[46]。采后钙处理对果实糖代谢的影响与采前不同。贮藏过程中,经1%的 CaCl_2 处理的草莓果实中SSC低于对照组低,但4%的 CaCl_2 处理过的果实SSC较高,原因可能是高 CaCl_2 含量影响了基质的消耗量导致SSC相对较高^[47]。采后钙处理降低贮藏果实SSC的报道较多,Guerra等^[48]对苹果进行钙处

理,发现处理组SSC比对照组低。Hernández-Muño等^[49]分别用1% COS、1% COS+0.5%葡萄糖酸钙(CaGlu)、1.5% COS、1.5% COS+0.75% CaGlu 处理草莓果实,果实中SSC都维持在比对照组低的水平。不同钙处理对无花果果实SSC、总糖、还原糖、非还原糖含量的影响不同, CaCl_2 处理总糖含量低于其他钙处理,乳酸钙处理还原糖含量低于其他钙处理^[50]。

3.4 外源糖处理对果实糖代谢的调控作用

糖不仅可以作为底物维持库组织的生长,而且也能调控源库代谢的信号分子,在调控植物基因表达和发育中发挥重要作用^[51]。外源葡萄糖可显著增加苹果果实SDH活性,但抑制SOX活性,外源果糖的作用则恰好相反^[52]。叶云等^[53]用蔗糖基聚合物对巴西香蕉进行采后涂膜处理,发现处理组可延缓香蕉的Inv、SS活性的下降趋势,推迟并提高SPS的活性高峰,有利于蔗糖的积累。另外,Dai Zhanwu等^[54]研究发现外源糖还可以促进葡萄果实花青素含量的积累。外源糖对果实糖代谢的影响也是通过调控与其相关酶的活性发挥作用的^[52]。

3.5 植物生长调节剂处理对果实糖代谢的调控作用

3.5.1 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)对果实糖代谢的调控作用

1-MCP通过与乙烯受体结合抑制果实乙烯释放和呼吸强度,对果实采后的风味物质、营养成分、硬度保持和减轻采后病害也有一定的影响^[55]。1-MCP处理对果实糖代谢的影响效果与园艺产品的种类、品种、采摘时果实所具有的成熟度以及处理条件等因素有密切关系。1-MCP处理改变杏果实采后糖酸代谢可能是提高果实贮藏品质的主要原因。但果实经过1-MCP处理后SSC、蔗糖、果糖、葡萄糖含量的变化趋势存在品种差异。1.0 $\mu\text{mol/L}$ 的1-MCP处理能使芒果SSC保持在较高水平^[56];但1.0、0.5、0.625 $\mu\text{mol/L}$ 的1-MCP处理对猕猴桃果实SSC均无显著影响^[57]。1-MCP与其他方式结合处理果实与单独使用1-MCP处理果实对采后果实糖代谢的影响不同。Li Fujun等^[58]对库尔勒香梨果实的研究表明:在果实的整个贮藏过程中,0.5 $\mu\text{mol/L}$ 1-MCP处理,不能很好地缓解果实SSC的升高,但与自发气调包装(modified atmosphere packing, MAP)结合处理后在贮藏后期对延缓果实SSC的升高起作用。

3.5.2 水杨酸(salicylic acid, SA)对果实糖代谢的调控作用

SA是植物体内普遍存在的一种小分子酚类物质。SA对果实糖代谢的影响存在品种差异及浓度效应。0.1、0.5、1.0 mmol/L乙酰水杨酸(acetylsalicylic acid, ASA)可使石榴果实保持较高的糖酸含量^[59]。ASA处理后番茄果实中维管束和胶质胎座中AI以及NI活性受到抑制,SS与SPS活性则有所提高,但ASA在心室隔壁和中果肉中作

用则相反。ASA对番茄果实糖代谢的调控主要是通过调控相关酶活性来实现的^[60]。ASA处理可以通过抑制淀粉酶的活性来调节采后猕猴桃果实组织中的糖代谢过程,抑制己糖积累、SPS活性上升和AI活性下降、延缓蔗糖含量增加^[61]。

3.5.3 茉莉酸甲酯 (methyl jasmonate, MeJA) 对果实糖代谢的调控作用

MeJA是植物体内存在的一种天然物质,能够调节植物的生长发育,影响果实糖含量的变化。研究发现:MeJA促进八成熟草莓果实中SSC的增加,并且促进果实红色的发育^[62]。采后桃果实还原糖含量呈上升趋势,贮藏前4周MeJA处理果实对还原糖含量变化无显著影响,但5周后,MeJA处理果实的还原糖含量高于对照果实。1 $\mu\text{mol/L}$ 和10 $\mu\text{mol/L}$ MeJA处理在3周后显著促进贮藏桃总糖含量的回升^[63]。

3.5.4 脱落酸 (ABA) 对果实糖代谢的调控作用

ABA是一种植物内源激素,对果实成熟相关的生理生化过程的调控作用明显,ABA在果实发育的不同阶段在一定程度上会促进糖的积累。ABA浓度为20 $\mu\text{mol/L}$ 时葡萄果实中AI活性最强,为对照组的2.46倍,可能的原因是果实中的一系列生理生化反应受到ABA调控,从而使下游AI的活性升高^[64]。10 mg/L ABA处理显著提高了红肉脐橙果实成熟时的葡萄糖、果糖以及总糖含量,50 mg/L ABA处理显著提高了蔗糖的含量,而100 mg/L ABA处理极显著降低了果实葡萄糖含量,表明着色前较低浓度的ABA处理(10、50 mg/L)可提高果实中一种或几种糖的含量^[65]。ABA主要通过影响与糖代谢相关酶的活性实现对果实糖代谢的调控作用。

3.5.5 赤霉素 (gibberellin, GA₃) 对果实糖代谢的调控作用

赤霉素是常见的植物激素之一,与其他植物激素共同作用,相呼应答调控植物的生长发育。赤霉素对不同种类植物的糖代谢影响不同,外源GA₃处理可以加强蔗糖的代谢效率,对其他糖含量也有影响^[66]。10、50、250 mg/L GA₃处理红肉脐橙果实中蔗糖含量都有极显著的提高,并且10 mg/L GA₃处理极显著地提高了总糖含量,葡萄糖、果糖含量则无明显变化,50、250、500 mg/L GA₃处理显著降低了果实葡萄糖、果糖和总糖含量,低质量浓度的GA₃处理促进了糖的积累,高质量浓度的GA₃处理(250和500 mg/L)使果实中糖的积累受到严重阻碍^[65]。GA₃对葡萄果实可溶性总糖含量的影响存在质量浓度效应。20 mg/L GA₃处理显著提高克瑞森无核葡萄SSC和可溶性总糖含量,30、40 mg/L GA₃处理组则不同程度降低了可溶性总糖含量^[67]。

3.5.6 乙烯对果实糖代谢的调控作用

乙烯是普遍存在于植物体内一种天然植物激素。在

果实的成熟过程中,乙烯利能够促进淀粉降解、糖分增加以及各种酶的活性变化。40 $\mu\text{g/L}$ 的乙烯利处理可使菠萝果实含糖量增加^[68]。乙烯利处理紫花芒果可以显著加速淀粉水解使其含量减少,果肉因此可以保持较高的可溶性糖浓度^[69]。在新红星苹果果实成熟前期,用300 mg/L的乙烯利处理果实,果实淀粉降解量与蔗糖含量都明显增加,果糖和葡萄糖含量无明显影响,NI和SPS显著激活,淀粉酶以及SS的活性也增强^[70],研究发现^[71]经乙烯催熟的脐橙、红宝石葡萄柚、无核小蜜橘的SSC和酸度较之对照组基本无变化。乙烯利采后浸果处理番茄果实,由于切断了番茄果实与植株的联系,还原糖被作为呼吸底物消耗,导致总糖含量有所降低^[72]。研究表明,乙烯可以促进果实中SPS基因转录达到调节糖代谢的效果,促进猕猴桃果实中淀粉酶、SPS活性增加促使蔗糖积累^[61]。另外,可以利用基因工程控制内源乙烯的生成、抑制乙烯的作用达到调控糖代谢的目的,但基因工程很难直接改善果蔬的风味与口感^[73]。

3.5.7 吲哚乙酸 (β -indoleacetic, IAA) 对果实糖代谢的调控作用

外源IAA处理可延缓果实的成熟衰老^[74],对果实糖代谢有调控作用。IAA可加快离体葡萄果实蔗糖分解为还原糖^[75]。苹果果实发育过程中SOX活性与IAA含量间存在显著的负相关关系,外源IAA显著诱导果实SOX活性增加^[76]。

4 结 语

不同果实的各种糖代谢过程有所不同,随着研究的不断深入,人们对果实糖代谢过程的认识也将更加深入。通过各种调控技术的使用,使得果实的糖含量得到有效改善,果实品质有所提高。但目前对各项调控技术的研究多集中在对果实SSC、蔗糖、果糖、葡萄糖等的变化趋势上,对调控机理的关注不多。主要集中在对各种处理手段处理后,果实主要可溶性糖代谢相关酶活性和基因表达水平的变化。在今后的研究中,对糖代谢调控机理的研究应受到较多关注,从分子水平探讨糖代谢相关酶在采后果实中的作用及其调控途径,是研究采后果实糖代谢调节的一个重要思路。从调控机理出发,结合多种糖代谢调控技术,研究出对采后果实糖代谢可以进行有效调控的方法,为采后果实糖代谢的调控提供重要参考,为果实品质改善提供可行方式,并能在实际生产过程中得以运用。

参考文献:

- [1] VELASCO R, ZHARKIKH A, AFFOURTIT J, et al. The genome of the domesticated apple (*Malus $\times$ domestica* Borkh.)[J]. Nature Genetics, 2010, 42(10): 833-839.

- [2] 王友升, 王贵禧. 冷害桃果实品质劣变及其控制措施[J]. 林业科学研究, 2003, 16(4): 465-472.
- [3] 李超, 冯志宏, 陈会燕, 等. 鲜切果蔬保鲜技术的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2010, 10(1): 3-6.
- [4] 于年文, 李俊才, 王家珍, 等. 果实糖代谢及调控因子的研究进展[J]. 江西农业学报, 2011, 23(3): 40-44.
- [5] CHEN Ming, JIANG Qian, YIN Xueren, et al. Effect of hot air treatment on organic acid-and sugar-metabolism in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 147: 118-125.
- [6] MORIGUCHI T, ABE K, SANADA T, et al. Levels and role of sucrose synthase, sucrose-phosphate synthase, and acid invertase in sucrose accumulation in fruit of Asian pear[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1992, 117(2): 274-278.
- [7] 王晨, 房经贵, 王涛, 等. 果树果实中的糖代谢[J]. 浙江农业学报, 2009, 21(5): 529-534.
- [8] 文涛, 熊庆娥. 柑桔果实糖、酸代谢研究概况[J]. 中国南方果树, 2001, 30(2): 13-16.
- [9] 邱文伟, 张光伦, 张嵩. 柑橘等果实糖代谢及其生态调控研究进展[J]. 四川农业大学学报, 2005, 23(1): 114-119.
- [10] 邓丽莉, 生吉萍. 苹果果实糖代谢过程及其调控研究进展[J]. 保鲜与加工, 2012, 12(1): 1-5.
- [11] ZHANG L Y, PENG Y B, PELLESCI-TRAVIER S, et al. Evidence for apoplasmic phloem unloading in developing apple fruit[J]. Plant Physiology, 2004, 135(1): 574-586.
- [12] BERÜTER J. Carbohydrate metabolism in two apple genotypes that differ in malate accumulation[J]. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(9): 1011-1029.
- [13] DJIOUA T, CHARLES F, LOPEZ-LAURI F, et al. Improving the storage of minimally processed mangoes (*Mangifera indica* L.) by hot water treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 52(2): 221-226.
- [14] LU Jianbo, CHARLES M T, VIGNEAULT C, et al. Effect of heat treatment uniformity on tomato ripening and chilling injury[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 56(2): 155-162.
- [15] 任雷, 邹志荣, 李鹏飞. 不同温度对甜瓜糖分积累与蔗糖代谢酶的影响[J]. 北方园艺, 2010(7): 12-16.
- [16] 白鹏威, 邹志荣, 杨振超, 等. 不同温度和光照处理对番茄果实不同部位糖含量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(3): 184-187.
- [17] 寇莉萍, 刘兴华, 张重庆, 等. 热处理对轻度加工巨峰葡萄呼吸强度和贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(5): 143-146.
- [18] SCHWARTZ E, TZULKER R, GLAZER I, et al. Environmental conditions affect the color, taste, and antioxidant capacity of 11 pomegranate accessions' fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(19): 9197-9209.
- [19] 钟需霖, 杨仕品, 乔荣, 等. 光照强度对草莓主要品质的影响[J]. 西南农业学报, 2011, 24(3): 1219-1221.
- [20] FENG Fengjuan, LI Mingjun, MA Fengwang, et al. The effects of bagging and debagging on external fruit quality, metabolites, and the expression of anthocyanin biosynthetic genes in 'Jonagold' apple (*Malus domestica* Borkh.)[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 165: 123-131.
- [21] 李永梅, 王晓婷, 王永章, 等. 套袋对黄金梨果实糖代谢及相关酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2007(7): 43-46.
- [22] 杨绍兰, 王玫, 张晓菲, 等. 套袋对荏梨果实蔗糖代谢及相关酶基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(10): 1887-1896.
- [23] 吴瑞媛, 陈露露, 王涛, 等. 反光膜对大棚翠冠梨果实糖积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(3): 427-432.
- [24] 王宝刚, 侯玉茹, 李文生, 等. 自动自发气调箱贮藏对甜樱桃品质及抗氧化酶的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 137-141.
- [25] 侯美玲, 段华伟, 胡长鹰. 活性气调包装对番木瓜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(2): 280-282.
- [26] BODELÓN O G, BLANCH M, SANCHEZ-BALLESTA M T, et al. The effects of high CO₂ levels on anthocyanin composition, antioxidant activity and soluble sugar content of strawberries stored at low non-freezing temperature[J]. Food Chemistry, 2010, 122(3): 673-678.
- [27] 王志华, 丁丹丹, 王文辉, 等. 黄金梨 CA 和 MAP 贮藏保鲜试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 117-121.
- [28] GONG Deqiang, XIE Jianghui, ZHANG Lubin, et al. Effects of low temperature storage on blackheart incidence and quality maintenance of pineapple fruits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 365-369.
- [29] 钱玉梅, 高丽萍, 张玉琼, 等. 低温处理对草莓贮藏品质的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2006, 33(2): 268-271.
- [30] 陈婷, 王日葵, 陆智明. 柑橘果实采后风味劣变机理的研究进展[J]. 农产品加工: 学刊, 2010(2): 57-59.
- [31] 袁扬静, 胡玉林, 谢江辉. 温度对采后香蕉果实糖代谢及其酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(1): 66-70.
- [32] 王清, 杨娜, 刘凤娟, 等. 不同温度对西葫芦果实冷害及生理变化的影响[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(18): 4027-4030.
- [33] LATOCHA P, KRUPA T, JANKOWSKI P, et al. Changes in postharvest physicochemical and sensory characteristics of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta* and its hybrid) after cold storage under normal versus controlled atmosphere[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 88: 21-33.
- [34] DENG Lili, PAN Xiaoqian, CHEN Lin, et al. Effects of preharvest nitric oxide treatment on ethylene biosynthesis and soluble sugars metabolism in 'Golden Delicious' apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 84: 9-15.
- [35] SINGH S P, SINGH Z, SWINNY E E. Postharvest nitric oxide fumigation delays fruit ripening and alleviates chilling injury during cold storage of Japanese plums (*Prunus salicina* Lindell)[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 53(3): 101-108.
- [36] SUN Zhen, LI Yuan, ZHOU Jie, et al. Effects of exogenous nitric oxide on contents of soluble sugars and related enzyme activities in 'Feicheng' peach fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(10): 1795-1800.
- [37] 李顺民. 一氧化氮处理对柑橘果实采后抗病性及贮藏品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 33-39.
- [38] 徐福乐. 外源一氧化氮熏蒸对番茄果实采后品质的影响[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 72-76.
- [39] GOL N B, PATEL P R, RAO T V. Improvement of quality and shelf-life of strawberries with edible coatings enriched with chitosan[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 185-195.
- [40] DUAN Jingyun, WU Ruyi, STRIK B C, et al. Effect of edible coatings on the quality of fresh blueberries (Duke and Elliott) under commercial storage conditions[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 71-79.
- [41] ZHAO Jiheng, IMPAPRASERT R, YU L, et al. Evaluation of postharvest quality of three Southern Highbush Blueberry (*Vaccinium corymbosum* Hybrid) cultivars subjected to heat pre-treatment[C]// II Asia Pacific Symposium on Postharvest Research Education and Extension: APS2012 1011. 2012: 187-195.
- [42] 李玉峰, 黄大明, 安昀. 改性壳聚糖在樱桃保鲜剂中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8240-8241.
- [43] 陈奕兆, 王亦佳, 刚成诚, 等. 壳寡糖(COS)涂膜对冷藏水蜜桃的保鲜效果[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4): 208-211.
- [44] 邓丽莉, 黄艳, 周玉翔, 等. 壳寡糖处理对柑桔果实贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(7): 287-290.

- [45] ARNON H, ZAITSEV Y, PORAT R, et al. Effects of carboxymethyl cellulose and chitosan bilayer edible coating on postharvest quality of citrus fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 87: 21-26.
- [46] AGHDAM M S, HASSANPOURAGHDAM M B, PALIYATH G, et al. The language of calcium in postharvest life of fruits, vegetables and flowers[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 144: 102-115.
- [47] CHEN Fusheng, LIU Hui, YANG Hongshun, et al. Quality attributes and cell wall properties of strawberries (*Fragaria annanassa* Duch.) under calcium chloride treatment[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 450-459.
- [48] GUERRA M, CASQUERO P A. Summer pruning: an ecological alternative to postharvest calcium treatment to improve storability of high quality apple cv. 'Reinette du Canada'[J]. Food Science and Technology International, 2010, 16(4): 343-350.
- [49] HERNÁNDEZ-MUÑOZ P, ALMENAR E, VALLE V D, et al. Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria* × *ananassa*) quality during refrigerated storage[J]. Food Chemistry, 2008, 110(2): 428-435.
- [50] IRFAN P K, VANJAKSHI V, PRAKASH M N, et al. Calcium chloride extends the keeping quality of fig fruit (*Ficus carica* L.) during storage and shelf-life[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 82: 70-75.
- [51] 陈俊伟, 张上隆, 张良诚. 糖对源库关系的调控与植物糖信号转导途径[J]. 细胞生物学杂志, 2002, 24(5): 266-270.
- [52] 叶成荣, 刘更森, 王永章, 等. 外源糖对苹果果实山梨醇代谢相关酶活性的影响[J]. 天津农业科学, 2011, 17(3): 5-8.
- [53] 叶云, 何英姿, 吕鸣群. 采后涂膜蔗糖基聚合物对香蕉糖积累及相关酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2009, 30(11): 268-270.
- [54] DAI Zhanwu, MEDDAR M, RENAUD C, et al. Long-term *in vitro* culture of grape berries and its application to assess the effects of sugar supply on anthocyanin accumulation[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(16): 4665-4677.
- [55] BAI Xiaohang, TENG Luhua, LÜ Deqing, et al. Co-treatment of EFF and 1-MCP for enhancing the shelf-life and aroma volatile compounds of oriental sweet melons (*Cucumis melo* var. *makuwa* Makino)[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 217-227.
- [56] 高豪杰. 1-MCP对芒果采后品质和生理的影响[D]. 海口: 海南大学, 2012: 4-6.
- [57] 邓雷. 1-MCP对秦美猕猴桃货架期食用品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012: 5-10.
- [58] LI Fujun, ZHANG Xinhua, SONG Baicheng, et al. Combined effects of 1-MCP and MAP on the fruit quality of pear (*Pyrus bretschneideri* Reld cv. Laiyang) during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164: 544-551.
- [59] SAYYARI M, CASTILLO S, VALERO D, et al. Acetyl salicylic acid alleviates chilling injury and maintains nutritive and bioactive compounds and antioxidant activity during postharvest storage of pomegranates[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 60(2): 136-142.
- [60] 姜晶, 李天来, 鲁少尉, 等. 乙酰水杨酸在番茄果实发育期间对蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(4): 649-652.
- [61] 张玉, 陈昆松, 张上隆, 等. 猕猴桃果实采后成熟过程中糖代谢及其调节[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(3): 317-324.
- [62] 唐双双, 郑永华, 汪开拓, 等. 茉莉酸甲酯处理对不同成熟度草莓果实采后腐烂和品质的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(6): 448-452.
- [63] 冯磊, 郑永华, 汪峰, 等. 茉莉酸甲酯处理对冷藏水蜜桃品质的影响[J]. 食品科学, 2003, 24(9): 135-139.
- [64] 邹迅. 脱落酸和蛋白质可逆磷酸化试剂处理对葡萄、苹果果实糖代谢酶活性的效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2004: 20-25.
- [65] 王贵元, 夏仁学, 曾祥国, 等. 外源脱落酸和赤霉素对红肉脐橙果肉糖含量的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 18(11): 2451-2455.
- [66] 王卫平. 花期施用外源生长素类物质对番茄果实糖代谢影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011: 32-37.
- [67] 白世践, 陈光, 赵荣华, 等. 赤霉素对土鲁番地区克瑞森无核葡萄果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2014(1): 29-32.
- [68] 庞观胜, 袁晓丽, 杜丽清. 乙烯利处理对菠萝果实生长发育和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(14): 6196-6212.
- [69] 周玉婵, 唐友林, 谭兴杰. 植物生长调节物质对紫花芒果后熟的作用[J]. 热带作物学报, 1996, 17(1): 32-37.
- [70] 王永章, 张大鹏. 乙烯对成熟期新红星苹果果实碳水化合物代谢的调控[J]. 园艺学报, 2000, 27(6): 391-395.
- [71] MAYUONIL, TIETEL Z, PATIL B S, et al. Does ethylene degreening affect internal quality of citrus fruit?[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(1): 50-58.
- [72] 徐爱东. 乙烯利催熟对番茄果实营养品质影响的研究进展[J]. 北方园艺, 2011(10): 181-184.
- [73] 王刚霞, 席冬华, 吴忠红, 等. 生物保鲜技术在果蔬防腐中的应用及研究进展[J]. 生物技术进展, 2014, 4(1): 12-16.
- [74] LIEBERMAN M, BAKER J E, SLOGER M. Influence of plant hormones on ethylene production in apple, tomato, and avocado slices during maturation and senescence[J]. Plant Physiology, 1977, 60(2): 214-217.
- [75] 夏国海, 张大鹏. IAA、GA和ABA对葡萄果实¹⁴C蔗糖输入与代谢的调控[J]. 园艺学报, 2000, 27(1): 6-10.
- [76] 单守明, 王永章, 董晓颖, 等. IAA、GA和ABA对苹果果实山梨醇代谢相关酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(6): 990-993.