

低温预贮对猕猴桃果实糖代谢的影响

张 维^{1,2,3}, 李高阳^{1,2,3}, 张 群^{1,2,3}, 单 杨^{1,2,3}, 苏东林^{3*}, 朱向荣^{1,2*}

¹ 湖南大学研究生院隆平分院 长沙 410125

² 湖南省农业科学院农产品加工研究所 长沙 410125

³ 果蔬贮藏加工与质量安全湖南省重点实验室 长沙 410125)

摘要 目的:研究低温预贮结合外源乙烯催熟对采后猕猴桃果实糖代谢的影响。方法:将猕猴桃在 0,4,8,12℃ 4 个温度下分别放置 3,5,7 d 后,在室温(25℃)采用乙烯催熟,以其为对照,分别测定 12 个不同处理组以及对照组猕猴桃果实中可溶性糖含量、单糖含量(葡萄糖、果糖、蔗糖)、淀粉含量、关键糖代谢酶活性和淀粉酶活性。结果:低温预贮能够提高后熟猕猴桃中可溶性糖的含量,保持较高的淀粉酶活性;同时,低温预贮能加快淀粉降解速率,有效维持中性转化酶与蔗糖磷酸合成酶活性,而对果实的酸性转化酶与蔗糖合成酶活性无显著影响。通过主成分分析及聚类分析发现低温预贮对后熟猕猴桃糖代谢影响的最佳预贮条件是 4℃ 下预贮 7 d。结论:低温预贮可调控采后猕猴桃糖代谢相关酶活性,从而使其在后熟过程中保持较高的可溶性糖含量和营养价值。

关键词 采后猕猴桃;低温预贮;乙烯催熟;糖代谢;后熟

文章编号 1009-7848(2022)11-0288-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.030

猕猴桃质地柔软、口感酸甜,具有较高的营养价值,深受消费者的喜爱。猕猴桃是典型的呼吸跃变型果实,在成熟的过程中会产生大量乙烯。由于乙烯在呼吸跃变型果实成熟衰老的过程中具有重要的作用,是呼吸跃变型果实成熟衰老的启动因子^[1],因此猕猴桃需在未达到生理成熟的状态下进行采收^[2]。乙烯利作为替代乙稀的植物生长调节剂,常用于采后果蔬上市前的催熟^[3-4]。采用乙烯利对猕猴桃进行催熟,可使其快速成熟并进入可食阶段,该阶段属于营养物质的快转化过程。部分研究表明外源乙烯催熟在一定程度上会对果实的风味产生不良影响,如外源乙烯催熟会减少甜瓜、香蕉的风味化合物以及糖含量,影响其食用品质^[5]。

糖的种类及其储存量在很大程度上决定了果实的风味和品质,而果实不同发育阶段发生的碳水化合物代谢和积累造成最终果实内各种糖含量的差异^[6]。糖是影响果实品质和风味的重要物质,

猕猴桃被外源乙烯催熟的过程主要是淀粉快速降解为糖类的过程,蔗糖代谢是果实糖积累和转化的重要环节之一^[7]。低温会导致低温响应(Cold-regulated, COR)现象的出现,COR 是指为更好地适应低温环境,植物基因的表达发生变化,相应的蛋白质、脂类、糖类等抗冻物质合成并积累,使细胞进入缓慢代谢状态^[8]。前人研究表明低温响应可以通过提高可溶性糖的含量来缓解低温伤害^[9]。低温预贮(Low temperature conditioning, LTC)是指将果蔬等产品放入略高于冷害温度下预贮一段时间,从而减轻后续冷藏期间冷害发生的一种温度调控方法^[10]。LTC 目前被广泛应用于减少果实冷害,延长果实保质期方面^[11],被广泛应用于桃^[12]、芒果^[13]、葡萄柚^[14]、梨^[15]、甜椒^[16]等果蔬^[17],然而,目前尚未见低温预贮用于提高水果品质的研究报道。

本研究在对猕猴桃进行外源乙烯催熟前,进行低温预贮处理,使猕猴桃中的淀粉等物质在降解为糖类之前进行一个缓慢代谢,提高猕猴桃的可溶性糖含量;通过测定处理前、后与糖代谢相关的酶活,并运用相关性分析、主成分分析、聚类分析等方法来研究低温预贮处理对外源乙烯催熟猕猴桃糖代谢的影响,得出最佳 LTC 条件,为采后猕猴桃品质的保持提供参考。

收稿日期: 2021-09-09

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(2021NK2014);“十三五”国家重点研发计划项目(2017YFD0401303);湖南省农业科技创新资金项目(2019JG01-4)

第一作者: 张维,女,硕士

通信作者: 苏东林 E-mail: sdl791228@163.com

朱向荣 E-mail: xiangrongchu@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猕猴桃样品购自长沙一猕猴桃批发商。

无水乙醇、3,5-二硝基水杨酸、酒石酸钾钠、苯酚、亚铁氰化钾、乙酸锌、冰乙酸、硫酸、氢氧化钠、氯化镁、蒽酮、二硫苏糖醇、聚乙二醇辛基苯基醚、蔗糖、果糖、葡萄糖、氢氧化钾、醋酸钠、磷酸钠、盐酸,均为分析纯级,国药集团化学试剂有限公司;葡萄糖标准品,酷尔化学科技(北京)有限公司;果糖-6-磷酸、葡萄糖-6-磷酸,赛文创新生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

JE502 型分析天平(感量 0.001 g),上海浦春计量仪器有限公司;JYLC020E 型料理机,九阳股份有限公司;DHG-9053A 型电热恒温鼓风,上海五久自动化设备有限公司;XMT-DA 数显调节仪水浴锅,余姚市亚星仪器有限公司;SYNERGY H1 多功能酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;J-26XPX 型高速离心机,美国贝克曼库尔特有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验材料处理 将购买的猕猴桃样品分成 13 组,用泡沫箱装箱。将样品分为 4 个批次放置于温度为 0,4,8,12 °C 的冷库中进行预贮藏,每个温度下的猕猴桃分别于预贮藏的第 0,3,5,7 天时取出,采用乙烯利熏蒸剂进行催熟,再放置 6 d,待猕猴桃完全成熟时测定猕猴桃中营养物质的含量。以直接用乙烯利于 25 °C 下在密闭的泡沫箱中熏蒸 24 h 进行催熟的猕猴桃样品作为对照。每种处理和保存条件均进行了 3 次重复。

1.3.2 可溶性糖含量的测定 可溶性糖含量参考标准 NY/T 2742-2015《水果及制品可溶性糖的测定 3,5-二硝基水杨酸比色法》中的方法进行测定。

1.3.3 单糖(蔗糖、果糖、葡萄糖)含量的测定 参考靳亚忠等^[18]的方法,取 1 g 猕猴桃样品,用研钵研磨后置于 10 mL 的离心管中,加入 5 mL 80%乙醇溶液,置于水浴锅中 80 °C 水浴 30 min,冷却后在 3 000×g 条件下离心 10 min,收集上清液于 50 mL 容量瓶中,重复以上步骤 2 次,合并上清液定容至 50 mL 即为单糖待测液。采用蒽酮-硫酸比色

法测定葡萄糖、果糖含量;采用 NaOH-蒽酮-硫酸法测定蔗糖。

1.3.4 总淀粉及淀粉酶活的测定 总淀粉及淀粉酶活的测定参考曹建康等^[19]的方法,并略有改动。

1.3.5 糖代谢酶活性的测定

1.3.5.1 酶的提取 参照 Matsumoto 等^[20]的方法,取 1 g 样品加入 3 mL 经预冷的缓冲液。该缓冲液含有 50 mmol/L-NaOH(pH 7.5)、5 mmol/L MgCl₂、1 mmol/L Na₂EDTA、2.5 mmol/L 二硫苏糖醇(Dithiothreitol, DTT)和 0.05% 聚乙二醇辛基苯基醚(Triton X-100)。在冰浴条件下研磨均匀后,在 4 °C 下将匀浆以 11 000 r/min 离心 15 min,并将离心后的上清液保存在-20 °C 下备用。

1.3.5.2 酶活性的测定 糖代谢酶活性的测定参照王慧聪等^[21]的方法。

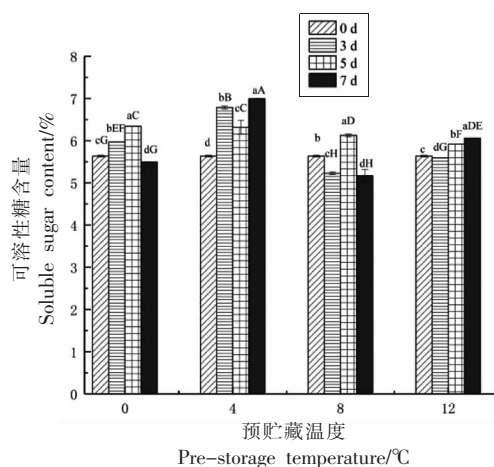
1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 进行数据计算和分析,用 Duncan 新复极差法($P < 0.05$)进差异显著性比较,用 Origin 2017 作图。

2 结果与分析

2.1 低温预贮对可溶性糖含量的影响

猕猴桃果实糖代谢的一个典型特征是淀粉代谢呈现由积累到降解的动态变化过程。果实采后再经后熟,后熟的过程中淀粉几乎全部转化为可溶性糖^[22]。由图 1 可知大部分经过低温预贮处理



注:不同小写字母表示组内显著性($P < 0.05$);不同大写字母表示组间显著性($P < 0.05$),下同。

图 1 不同低温预贮条件下可溶性糖的含量

Fig.1 Soluble sugar content of different LTC conditions

的猕猴桃的可溶性糖含量均高于预贮 0 d 处理组,其中 4 °C 为最适宜处理温度,4 °C 下预贮 7 d 处理组的可溶性糖含量最高,其可溶性糖质量分数为 7%;较对照组(5%)提高了 40%。

2.2 低温预贮对淀粉含量及淀粉酶活的影响

猕猴桃中的淀粉代谢是一个先积累后降解的过程^[23]。采摘后的猕猴桃在外源乙烯的催化下迅速降解,淀粉含量减少。由图 2 可知低温预贮处理组与预贮 0 d 处理组样品的淀粉含量均很低,其中对照组淀粉含量为 1.19 mg/g, LTC 处理(4 °C+7 d)组淀粉含量最低为 1.081 mg/g,这说明猕猴桃果实中淀粉的降解与低温预贮藏前处理相关性不大。

淀粉在淀粉酶的催化下降解,淀粉酶活与淀粉含量呈显著负相关^[24]。由图 3 可知在预贮温度为 0 °C 和 12 °C 时猕猴桃中淀粉酶活呈现先上升后下降的趋势,其中预贮 0 d 处理淀粉酶活为 5.02 mg/(min·g),在 8 °C 时仅在预贮藏时间为 7 d 时高于预贮 0 d 处理组,4 °C 不同预贮藏天数其淀粉酶活均高于对照组。上述结果表明影响后熟猕猴桃淀粉酶活的关键因素是预贮温度。其中 4 °C、7 d 条件下预贮处理的淀粉酶活性最高。

2.3 低温预贮对葡萄糖、果糖、蔗糖含量的影响

猕猴桃在达到最佳食用条件时,大部分的淀粉会变成单糖。决定果实甜味的主要是 3 种糖:葡萄糖、果糖和蔗糖,另外还有少量糖醇^[25]。由图 4、图 5 和图 6 可知,不同的低温预贮条件对后熟猕猴桃中葡萄糖、果糖、蔗糖含量的影响存在明显差异。随着预贮温度的变化,其果糖、蔗糖含量在预贮 5 d 和 7 d 呈先上升后下降的趋势,其中葡萄糖和果糖在 0 °C 处理组含量最低,在其余预贮藏温度下葡萄糖、果糖含量整体增加,蔗糖含量则在预贮藏温度为 8 °C 时整体上达到峰值。

在相同预贮温度下,不同处理时间也会对猕猴桃果实中葡萄糖、果糖、蔗糖含量产生显著的影响。其中,在 0 °C 下,后熟猕猴桃中葡萄糖、果糖和蔗糖含量随着预贮时间的延长呈现先上升后下降趋势。在 4 °C 和 8 °C 下,其单糖含量随着预贮时间的延长整体呈增加的趋势。在 0 °C 下

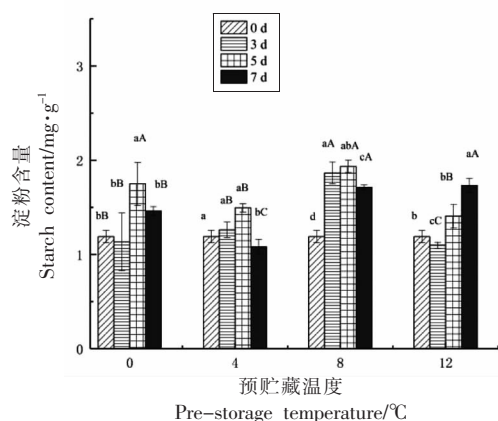


图 2 不同低温预贮条件下猕猴桃的淀粉含量

Fig.2 Starch content of kiwi under different LTC conditions

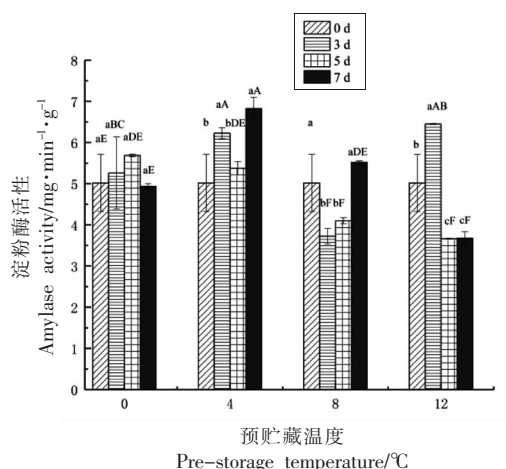


图 3 不同低温预贮条件下猕猴桃淀粉酶的活性

Fig.3 Amylase activity of kiwi under different LTC conditions

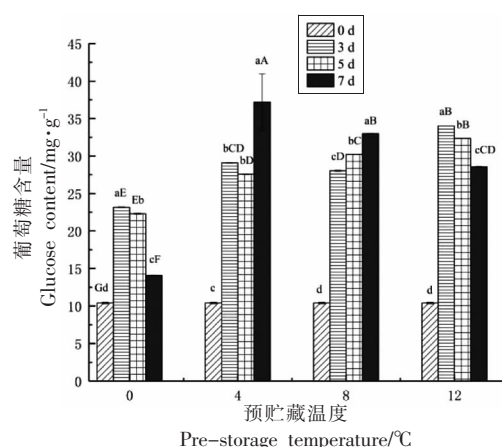


图 4 不同低温预贮条件下猕猴桃葡萄糖的含量

Fig.4 Glucose content of kiwi under different LTC conditions

其单糖含量随着预贮时间的增加反而下降,这可能是因为温度太低会诱导果实产生生理失调和继发性代谢反应(如木质化),从而促进了细胞损

伤^[26]。由此可知猕猴桃果实最佳的低温预贮条件为 4℃下贮藏 7 d,葡萄糖、果糖含量有最大值,分别为 37.20 mg/g 和 21.23 mg/g。

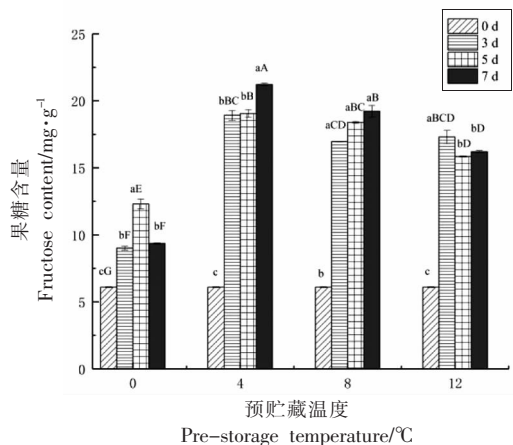


图 5 不同低温预贮条件下猕猴桃果糖含量

Fig.5 Fructose content of kiwi under different LTC conditions

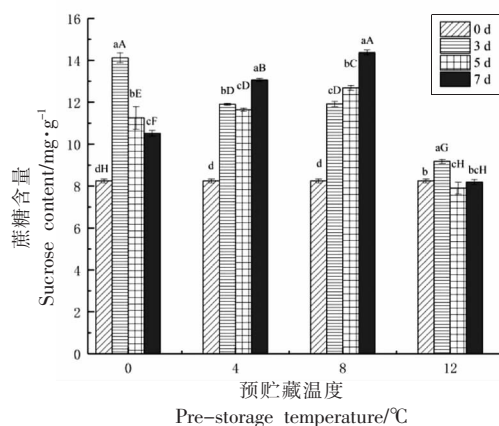


图 6 不同低温预贮条件下猕猴桃蔗糖含量

Fig.6 Sucrose content of kiwifruit under different LTC conditions

2.4 低温预贮对转化酶活性的影响

转化酶是蔗糖的分解酶,根据转化酶的最适 pH 值又可分为酸性转化酶 (Acid invertase, AI) 和中性转化酶(或称碱性转化酶,Neutral invertase, NI),其中 AI 又分可溶性 AI 与不溶性 AI^[27]。由图 7 可知在 4℃和 8℃下,低温预贮的后熟猕猴桃 AI 活性随着贮藏时间的延长呈先上升后下降的趋势,12℃下在预贮贮藏后 AI 酶活性呈先下降后逐渐上升的趋势。整体来说低温预贮藏处理对

AI 酶活性的影响并不大,仅在 0℃下预贮 5 天,4℃下预贮藏 3 天,8℃下预贮 3 d 条件下后熟猕猴桃 AI 酶活性有显著提高,而预贮 0 d 处理组猕猴桃 AI 酶活高于大部分经预贮处理后的猕猴桃,因此并不能判断低温预贮藏是否具有保持 AI 酶活的作用。

由图 8 可知,0,4,8℃下预贮猕猴桃与 12℃下预贮处理猕猴桃相比,其组间差异较小具有较好地维持 NI 酶活的作用。其中,预贮温度为 8℃

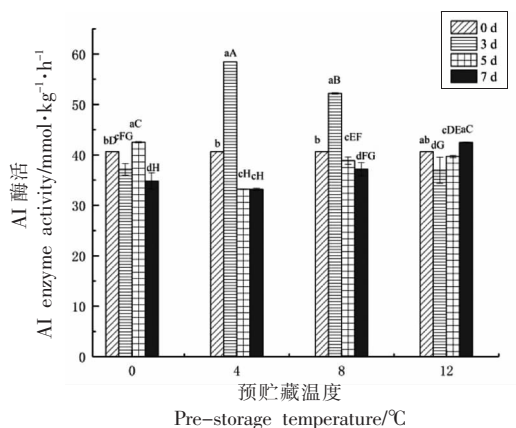


图 7 不同低温预贮条件下猕猴桃 AI 酶活

Fig.7 AI enzyme activity of kiwi under different LTC conditions

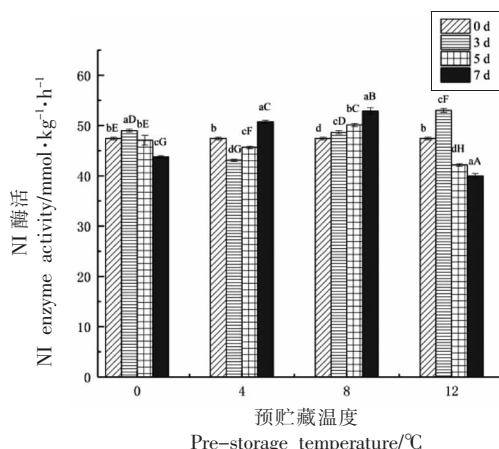


图 8 不同低温预贮条件下猕猴桃 NI 酶活

Fig.8 NI enzyme activity of kiwi under different LTC conditions

时,其NI酶活有最高值。在0℃和12℃预贮时,NI活性随着预贮藏时间的延长呈先升高后降低的趋势;4℃和8℃时,NI活性整体随着预贮藏时间的延长而升高。NI酶活最高的处理组是8℃预贮7d,为52.87 mmol/(kg·h);预贮0d的NI酶活为47.42 mmol/(kg·h)。

2.5 对蔗糖磷酸合成酶、蔗糖合成酶活性的影响

蔗糖磷酸合成酶(Sucrose phosphate, SPS)是调控蔗糖合成的重要酶之一,在果实成熟的过程中SPS活性的升高与蔗糖的积累密切相关^[28]。由图9可知,经过低温预贮处理的猕猴桃其SPS酶活显著高于预贮0d处理组,在不同处理下SPS酶活较预贮0d处理组均上升。在不同预贮温度和时间下SPS活性变化趋势明显。在8℃条件下,其SPS酶活随着预贮时间延长,呈先升高后下降趋势。SPS酶活在4℃时呈上升趋势,且在4℃下

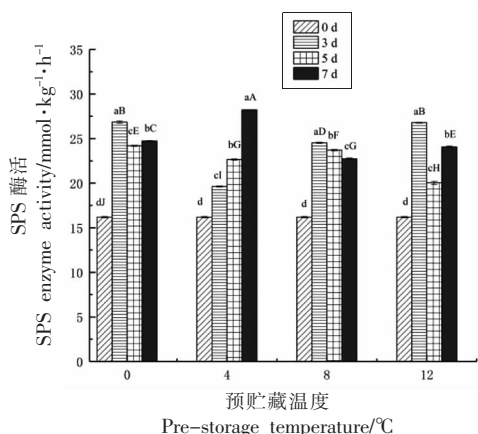


图9 不同低温预贮条件下猕猴桃SPS酶活

Fig.9 SPS enzyme activity of kiwi under different LTC conditions

2.6 相关性分析

本研究对不同LTC处理组的后熟猕猴桃中糖代谢的关键指标进行相关性分析,发现可溶性糖含量不仅与葡萄糖含量、蔗糖含量、果糖含量以及淀粉酶活性呈显著正相关,并且与NI酶活呈显著正相关;与SS酶活和SPS酶活呈正相关关系。

2.7 主成分分析

对不同LTC条件处理的后熟猕猴桃的糖代谢品质指标进行了主成分分析,通过主成分分析共提取出4个主成分,主成分1(PC1)方差贡献率为37.39%,主成分2(PC2)方差贡献率为20.19%,主

预贮7d出现峰值,其最大值为28.22 mmol/(kg·h)。综上,低温预贮处理能够有效提高SPS酶活,促进蔗糖合成。

蔗糖合成酶(Sucrose synthase, SS)主要存在于细胞质中,在蔗糖代谢中其具有分解以及合成作用,然而,其在大多数情况下主要起分解作用,可为细胞壁的合成提供合成底物^[29-30]。由图10可知,与预贮0d处理组相比,部分低温预贮处理对猕猴桃SS酶活性产生显著影响。在低温预贮处理组中,仅0℃下预贮3d、4℃下预贮7d与8℃下预贮3d处理果实的SS酶活较预贮0d处理组高,其SS酶活分别为34.51 mmol/(kg·h)、35.74 mmol/(kg·h)和34.90 mmol/(kg·h),而对照组SS酶活性为33.91 mmol/(kg·h);其余低温处理组SS酶活均比对照组低。

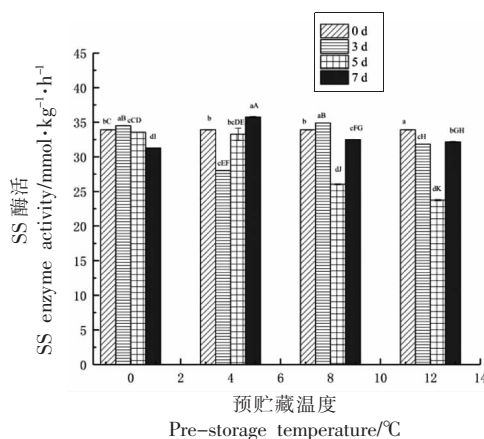


图10 不同低温预贮条件下猕猴桃SS酶活

Fig.10 SS enzyme activity of kiwi under different LTC conditions

成分3(PC3)以及主成分4(PC4)方差贡献率分别为16.94%和11.14%。前4个主成分累计方差贡献率为85.67%,几乎包含了猕猴桃样品的所有信息。

前4个主成分累计方差贡献率为85.67%,能够反映后熟猕猴桃代谢过程的主要信息,且特征值皆大于1,说明提取因素可以反映PCA得分总体特征。本研究主要对前4个主成分的得分图以及载荷图进行分析,从载荷图中可以看出SS酶活、NI酶活、蔗糖含量、葡萄糖含量、果糖含量、可溶性糖含量、淀粉酶活等指标与PC1均呈正相关。

表 1 糖代谢指标相关性分析

Table 1 Correlation analysis of carbohydrate metabolism indicators

指标	可溶性糖含量	淀粉含量	淀粉酶活性	葡萄糖含量	蔗糖含量	果糖含量	AI 酶活性	NI 酶活性	SS 酶活性	SPS 酶活性
可溶性糖含量	1									
淀粉含量	-0.333*	1								
淀粉酶活性	0.580**	-0.576**	1							
葡萄糖含量	0.707**	-0.128	0.173	1						
蔗糖含量	0.435**	0.232	0.345*	0.267	1					
果糖含量	0.605**	0.168	0.038	0.842**	0.323*	1				
AI 酶活性	-0.147	0.410**	-0.158	-0.008	-0.060	0.086	1			
NI 酶活性	0.601**	-0.248	0.738**	0.159	0.682**	0.145	-0.254	1		
SS 酶活性	0.073	0.091	0.449**	-0.149	0.502**	-0.055	0.073	0.517**	1	
SPS 酶活性	0.313	-0.177	0.265	0.429**	0.434**	0.275	-0.375*	0.121	0.332*	1

注：“*”表示显著相关, $P < 0.05$; “**”表示极显著相关, $P < 0.01$ 。

表 2 主成分的特征值和贡献率

Table 2 Eigenvalue and contribution rate of principal components

主成分	特征值	方差贡献率/ %	累计方差 贡献率/%
1	3.739	37.39	37.39
2	2.019	20.19	57.58
3	1.695	16.94	74.52
4	1.114	11.14	85.67

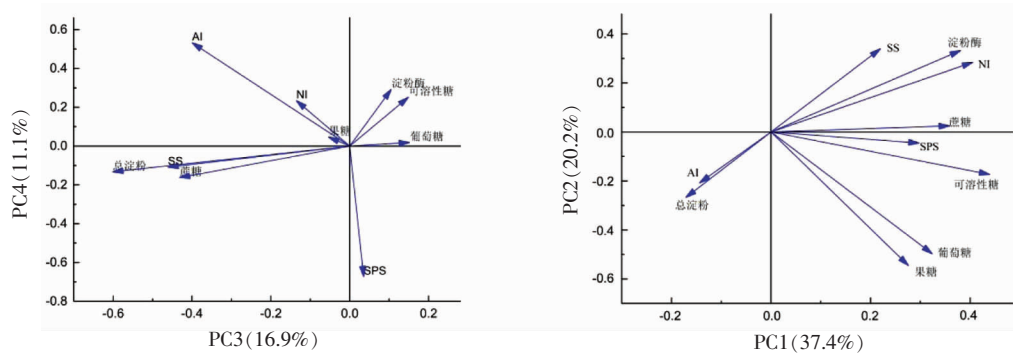
SS 酶活、淀粉酶活等指标与 PC2 呈正相关, PC2 主要是体现合成酶对后熟猕猴桃糖代谢过程的影响。葡萄糖含量、可溶性糖含量等指标与 PC3 呈明显正相关。AI 酶活与 PC4 呈明显正相关, PC4 主要体现转化酶活对后熟猕猴桃糖代谢过程的影响。

根据主成分分析的原理, 样品在得分图上的

距离越近说明它们之间组分和成分含量越相似^[31]。由图 11b 可知, 对照组及在 4 °C 下预贮藏 7 d 的处理组与其它低温预贮藏后熟猕猴桃在 PCA 图上明显分开, 说明 LTC 处理对后熟猕猴桃的糖代谢酶以及糖含量等存在显著影响。4 °C+7 d 处理组在 PC1 以及 PC2, PC3 上的得分均为正, 且在 PC1 上得分最高, PC1 具有最高的贡献值。在 PC4 上得分为负, 并且 PC4 贡献率较其它三个主成分贡献率低, 说明 4 °C 下预贮藏 7 d 为低温后熟猕猴桃的最佳预处理方式。

2.8 聚类分析

对不同 LTC 处理组测定的指标进行了聚类分析, 聚类热图如图 12 所示, 可分为 6 类。第 1 类为 12 °C 下预贮 7 d、12 °C 下预贮 5 d 处理组; 第 2 类为 12 °C 下预贮 3 d、4 °C 下预贮 7 d 处理组; 4 °C 下预贮藏 3 d 处理组单独作为第 3 类; 第 4 类为



(a)

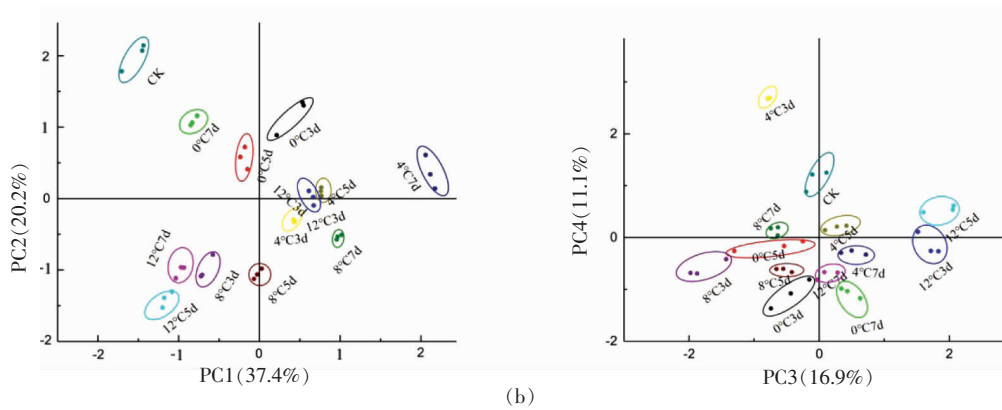


图 11 不同低温预贮处理后熟猕猴桃载荷图(a)以及得分分析图(b)

Fig.11 Load diagram (a) and score analysis diagram (b) of ripe kiwifruit by different LTC

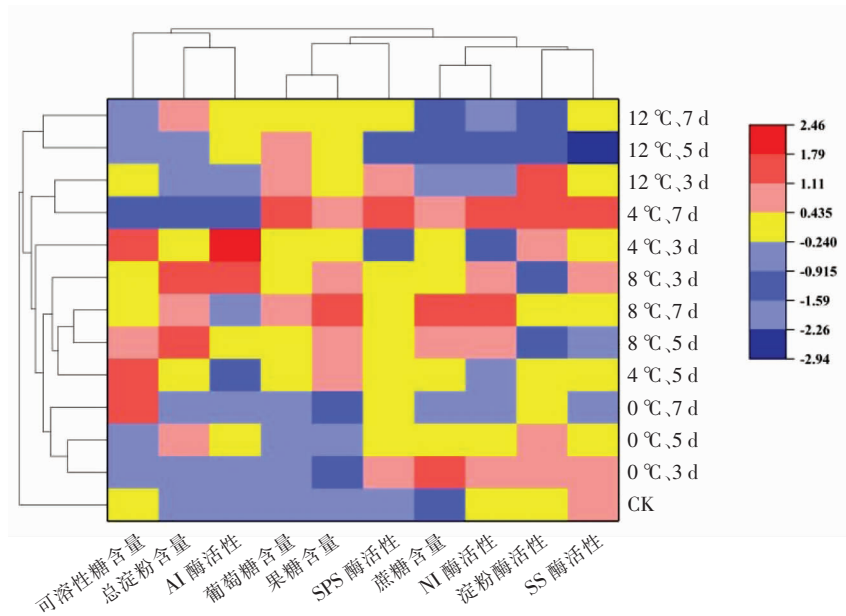


图 12 不同低温预贮处理后熟猕猴桃聚类热图

Fig.12 Cluster heat map of ripe kiwifruit after different pre-storage treatments

8℃预贮3d、8℃下预贮藏7d、8℃下预贮藏5d、4℃下预贮藏5d;第5类为0℃下预贮7d、0℃下预贮藏5d、0℃下预贮藏3d;第6类为对照组。由聚类分析可知预贮温度相同的后熟猕猴桃基本被归为同一类,只有少数同种温度下的处理组存在差异,说明温度是影响低温预贮猕猴桃糖代谢的主要因素,预贮时间对其影响较小。

3 讨论

果实后熟过程中会发生一系列复杂的生理变化,使果实的色泽、糖酸、质地等发生改变^[2]。果实

内糖和淀粉含量的变化会影响果实软化进程^[33]。淀粉酶具有启动果实软化的作用,是影响果实软化的关键酶。在果实软化的过程中淀粉含量会急速下降,淀粉酶活与淀粉含量呈显著负相关关系。本研究表明低温预贮对于后熟猕猴桃中淀粉的降解无显著作用,淀粉含量整体差异不明显,这与苗红霞等^[34]的研究结果一致,即低温虽能够抑制淀粉降解速度,但适宜的温度(25℃)下乙烯的释放量是影响淀粉降解的主要因素。

低温贮藏会导致植物结构及生理生化等方面发生改变,其中可溶性糖含量的变化是最重要的

指标之一。蔗糖、果糖和葡萄糖是果蔬中可溶性糖存在的主要形式^[35]。可溶性糖提高植物组织抗寒性的原因有 3 种：一是通过积累糖类物质调节渗透势,增强细胞保水力。二是糖对生物膜及生物大分子等生命物质有保护作用。三是通过糖代谢,产生其它保护性物质和能源^[36]。在本研究中 LTC 增加了后熟猕猴桃中蔗糖、果糖、葡萄糖的含量,其中果糖、葡萄糖含量最高的处理条件为 4 ℃下预贮藏 7 d,蔗糖含量最高的处理条件为 8 ℃下预贮藏 7 d。LTC 处理猕猴桃中葡萄糖含量最高、果糖次之、蔗糖含量最低,这与 Burdon 等^[37]的研究结果一致。蔗糖含量低于果糖含量的原因可能是由于低温预贮藏阶段猕猴桃中积累了较多的蔗糖,而在果实成熟阶段蔗糖会减少,果糖和葡萄糖含量提高^[38]。在本研究中,4 ℃与 8 ℃下预贮单糖含量高于 0 ℃这与江开拓等^[39]的研究结果基本一致。

果实中的各种代谢酶可通过协调作用控制可溶性糖的含量及组分从而调控果实的风味。有关低温胁迫影响果实蔗糖代谢的研究已有一些报道,并且已证实在以蔗糖为主要光合运转糖的植物果实中,蔗糖代谢的变化是影响果实膨大和品质的重要因子之一^[40]。蔗糖代谢过程中起关键作用的酶主要包括:蔗糖合成酶、蔗糖磷酸合成酶、参与蔗糖分解的转化酶、催化蔗糖合成和分解的双向酶^[41]。较常温直接后熟组相比,LTC 对 NI 酶活以及 SPS 酶活显著高于对照组,这说明在猕猴桃后熟过程中,NI 酶以及 SPS 酶对糖含量的调控与变化起关键作用,且最佳处理条件为 4 ℃下预贮 7 d;然而,与对照相比,LTC 对 SS 酶活与 AI 酶活无显著影响。糖代谢酶中转化酶的活性显著高于合成酶的活性,说明 LTC 后熟猕猴桃其糖转化的主要趋势是蔗糖转化为果糖、葡萄糖速度大于蔗糖和合成速度。张玉等^[42]的研究也表明在果实软化后期 SPS 酶活性降低蔗糖积累被抑制,林学亮等^[43]的研究也表明在低温贮藏下黄花梨的代谢也向蔗糖分解方向进行。

4 结论

研究结果表明经过低温预贮藏处理的后熟猕猴桃,在不同处理下其代谢特性均存在变化,对猕猴桃糖代谢特性进行相关性分析发现糖代谢各指标

之间相互联系。通过主成分分析对后熟猕猴桃糖代谢进行了综合分析,发现 4 ℃下预贮 7 d 处理组的处理效果最佳。从研究结果可以得出,LTC 处理可提高后熟猕猴桃可溶性糖含量,其中葡萄糖含量最高、果糖含量次之、蔗糖含量较低。此外,LTC 处理具有维持蔗糖酶活的作用,其中转化酶活性高于合成酶活性,能够获得品质较高的后熟猕猴桃,这为猕猴桃采后品质保持和调控提供理论支持,也为猕猴桃采后处理提供技术支撑。

参 考 文 献

- [1] TONUTTI P, BONGHI C, RAMINA A. Fruit firmness and ethylene biosynthesis in three cultivars of peach (*Prunus persica* L. Batsch)[J]. Journal of Horticultural Science, 1996, 71(1): 141-147.
- [2] TILAHUN S, CHOI H R, PARK D S, et al. Ripening quality of kiwifruit cultivars is affected by harvest time[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 261: 108936.
- [3] 王玥琳, 徐大平, 杨曾奖, 等. 乙烯利对降香黄檀生长和光合生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(1): 18-24.
WANG Y L, XU D P, YANG Z J, et al. Effects of ethephon on the growth and photosynthetic characteristics of *Dalbergia odorifera*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(1): 18-24.
- [4] 马静, 陈丽兰, 柳颀, 等. 乙烯利对澳洲坚果落果和落叶的影响[J]. 热带农业科技, 2020, 43(1): 19-23.
MA J, CHEN L L, LIU J, et al. Effect of ethephon on the fruit and leaf abscission of macadamia nut [J]. Tropical Agricultural Science & Technology, 2020, 43(1): 19-23.
- [5] LIM S, LEE J G, LEE E J. Comparison of fruit quality and GC-MS-based metabolite profiling of kiwifruit 'Jecy green': Natural and exogenous ethylene-induced ripening [J]. Food Chemistry, 2017, 234: 81-92.
- [6] 李梦雪, 夏富娟, 杨光映, 等. 果实糖代谢中激素调控研究进展[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(4): 819-831.
LI M X, XIA F X, YANG G Y, et al. An re-

- search on the progress of hormone regulation of sugar metabolism in fruits[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2019, 41(4): 819-831.
- [7] 李梦鸽, 邓群仙, 吕秀兰, 等. ‘美人指’葡萄果实糖积累和蔗糖代谢相关酶活性的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(8): 185-190.
- LI M G, DENG Q X, LÜ X L, et al. Sugar accumulation and sucrose-metabolizing enzyme activities of ‘Manicure Finger’ grape[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2016, 44(8): 185-190.
- [8] SHI Y T, TIAN S W, HOU L Y, et al. Ethylene signaling negatively regulates freezing tolerance by repressing expression of CBF and Type-A ARR genes in Arabidopsis[J]. Plant Cell, 2012, 24(6): 2578-2595.
- [9] DALEN L S, JOHNSEN Y, LNNEBORG A, et al. Freezing tolerance in Norway spruce, the potential role of pathogenesis-related proteins[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(1): 1-9.
- [10] 刘婧, 郑秋丽, 左进华, 等. 低温预贮对青尖椒采后冷害的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(2): 205-211.
- LIU J, ZHENG Q L, ZUO J H, et al. Effects of low temperature prestorage on the postharvest chilling injury of green pepper[J]. Modern Food Science & Technology, 2018, 34(2): 205-211.
- [11] ZHANG Z K, ZHU Q G, HU M J, et al. Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in stored mango fruit[J]. Food Chemistry, 2017, 219: 76-84.
- [12] 赵颖颖, 陈京京, 金鹏, 等. 低温预贮对冷藏桃果实冷害及能量水平的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(4): 276-281.
- ZHAO Y Y, CHEN J J, JIN P, et al. Effect of low temperature conditioning on chilling injury and energy status in cold-stored peach fruit[J]. Food Science, 2012, 33(4): 276-281.
- [13] CHAUDHARY P R, JAYAPRAKASHA G K, PORAT R, et al. Low temperature conditioning reduces chilling injury while maintaining quality and certain bioactive compounds of ‘Star Ruby’ grapefruit [J]. Food Chemistry, 2014, 153: 243-249.
- [14] YAO M M, ZHOU X, ZHOU Q, et al. Low temperature conditioning alleviates loss of aroma-related esters of ‘Nanguo’ pears by regulation of ethylene signal transduction[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 263-269.
- [15] WANG Y X, GAO L P, WANG Q, et al. Low temperature conditioning combined with methyl jasmonate can reduce chilling injury in bell pepper[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 243: 434-439.
- [16] CAI C, XU C, SHAN L L, et al. Low temperature conditioning reduces postharvest chilling injury in loquat fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 41(3): 252-259.
- [17] WANG C Y. Chilling injury of tropical horticultural commodities[J]. Hortence A Publication of the American Society for Horticultural Science, 1992, 29(9): 986-988.
- [18] 靳亚忠, 陈业雯, 龙闪闪, 等. 鸡粪的施用对薄皮甜瓜果实糖积累及糖代谢相关酶活性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(5): 1106-1112.
- JIN Y Z, CHEN Y W, LONG S S, et al. Effects of application of chicken manure on sugar accumulation and activity of enzymes related to carbohydrate metabolism in oriental melon fruit[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(5): 1106-1112.
- [19] 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: 78-82.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Guidance for postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 78-82.
- [20] MATSUMOTO J, KANO Y, MADACHI T, et al. Heating bearing shoots near fruits promotes sugar accumulation in melon fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 133: 18-22.
- [21] 王惠聪, 黄辉白, 黄旭明. 荔枝果实的糖积累与相关酶活性[J]. 园艺学报, 2003, 30(1): 1-5.
- WANG H C, HUANG H B, HUANG X M. Sugar accumulation and related enzyme activities in the litchi fruit of ‘Nuomici’ and ‘Feizixiao’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2003, 30(1): 1-5.
- [22] BOWER J P, CUTTING J G. Avocado fruit development and ripening physiology[J]. Horticultural Reviews, 1988, 10: 229-271.
- [23] SIMONA N, BOLDINGH H L, SONIA O, et al. Metabolic analysis of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)

- berries from extreme genotypes reveals hallmarks for fruit starch metabolism[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(16): 5049–5063.
- [24] 戚雯烨, 周晨卉, 宋丽君, 等. 毛花猕猴桃 ‘华特’ 果实采后糖代谢研究[J]. *果树学报*, 2016, 33(6): 744–751.
- QI W Y, ZHOU C H, SONG L J, et al. Study on sugar metabolism of *Actinidia eriantha* Benth ‘White’ during storage[J]. *Journal of Fruit Science*, 2016, 33(6): 744–751.
- [25] 高海燕, 王善广, 廖小军, 等. 不同品种梨汁中糖和有机酸含量测定及相关性分析[J]. *华北农学报*, 2004, 19(2): 104–107.
- GAO H Y, WANG S G, LIAO X J, et al. Study on determination and correlation of soluble sugars and organic acids in pear juice from different cultivars[J]. *North China Journal of Agriculture*, 2004, 19(2): 104–107.
- [26] SEVILLANO L, SANCHEZ-BALLESTA M T, ROMOJARO F, et al. Physiological, hormonal and molecular mechanisms regulating chilling injury in horticultural species. Postharvest technologies applied to reduce its impact[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 89(4): 555–573.
- [27] STURM A. Invertases. Primary structures, functions, and roles in plant development and sucrose partitioning[J]. *Plant Physiology*, 1999, 121(1): 1–8.
- [28] HUBBARD N L, HUBER S C, PHARR D M. Sucrose phosphate synthase and acid invertase as determinants of sucrose concentration in developing muskmelon (*Cucumis melo* L.) fruits[J]. *Plant Physiology*, 1989, 91: 152–156.
- [29] AMOR Y C, HAIGLER H, JOHNSON S, et al. A membrane-associated form of sucrose synthase and its potential role in synthesis of cellulose and callose in plants[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1995, 92(20): 9353–9357.
- [30] 曹兵, 刘毓璟, 张雁南, 等. 枸杞果实糖代谢研究进展[J]. *经济林研究*, 2017, 35(1): 158–164.
- CAO B, LIU Y J, ZHANG Y N, et al. Advance in research on sugar metabolism in goji berry[J]. *Economic Forest Researches*, 2017, 35(1): 158–164.
- [31] YANG W J, YU J, PEI F, et al. Effect of hot air drying on volatile compounds of *Flammulina velutipes* detected by HS-SPME-GC-MS and electronic nose[J]. *Food Chemistry*, 2015, 196(1): 860–866.
- [32] 齐秀东, 魏建梅, 赵美微, 等. ‘京白梨’果实后熟软化与糖、淀粉代谢及其基因表达的关系[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(13): 2591–2599.
- QI X D, WEI J M, ZHAO M W, et al. Relationship between fruit softening and the metabolism of sugar and starch and their related-gene expression in post-harvest ‘Jingbaili’ fruits[J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2015, 48(13): 2591–2599.
- [33] 齐秀东, 魏建梅. 冷藏和乙烯处理对采后苹果果实糖代谢及关键基因表达的调控[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(7): 137–145.
- QI X D, WEI J M. Effect of cold storage and ethylene regulation on sugar metabolism and its key gene expression in post-harvest apple fruit[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2015, 31(7): 137–145.
- [34] 苗红霞, 孙佩光, 张凯星, 等. 不同贮藏温度下‘宝岛蕉’果实淀粉降解与乙烯释放量关系初探[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(7): 85–90.
- MIAO H X, SUN P G, ZHANG K X, et al. Starch degradation and ethylene release content of *Musa acuminata* L. AAA Cavendish ‘Formosana’ fruits stored at different temperatures[J]. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2016, 32(7): 85–90.
- [35] NISHIKAWA F, IWAMA T, KATO M, et al. Effect of sugars on ethylene synthesis and responsiveness in harvested broccoli florets[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2005, 36(2): 157–165.
- [36] 孙永梅, 刘丽杰, 冯明芳, 等. 植物在低温胁迫下的糖代谢研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(7): 95–102.
- SUN Y M, LIU L J, FENG M F, et al. Research progress of sugar metabolism of plants under cold stress[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(7): 95–102.
- [37] BURDON J, PIDAKALA P, MARTIN P, et al. Postharvest performance of the yellow-fleshed ‘Hort16A’ kiwifruit in relation to fruit maturation[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 92: 98–106.
- [38] ZHAO H D, JIAO W X, CUI K B, et al. Near-freezing temperature storage enhances chilling tolerance in nectarine fruit through its regulation of soluble sugars and energy metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2019, 289: 426–435.

- [39] 汪开拓, 廖云霞, 阚建全, 等. 杨梅采后低温贮藏期间蔗糖代谢酶活性与果实花色苷合成关系的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(12): 1-7.
WANG K T, LIAO Y X, KAN J Q, et al. A Study on relationship between changes in activities of sucrose metabolism-related enzymes and anthocyanin synthesis in harvested Chinese bayberries during low temperature storage[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2014, 36(12): 1-7.
- [40] 郝敬虹, 李天来, 孟思达, 等. 夜间低温对薄皮甜瓜果实糖积累及代谢相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3592-3599.
HAO J H, LI T L, MENG S D, et al. Effects of night low temperature on sugar accumulation and sugar-metabolizing enzyme activities in melon fruit[J]. Chinese Agricultural Sciences, 2009, 42(10): 3592-3599.
- [41] 王曼曼, 屈淑平, 李俊星, 等. 葫芦科作物果实糖积累及其调控研究进展[J]. 植物生理学报, 2019, 55(7): 941-948.
WANG M M, QU S P, LI J X, et al. Advances in research on sugar accumulation and regulation of Cucurbitaceae crop fruits[J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 55(7): 941-948.
- [42] 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.
ZHANG Y, CHEN K S, ZHANG S L, et al. Sugar metabolism and its regulation in postharvest ripening kiwifruit[J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2004, 30(3): 317-324.
- [43] 林学亮, 郑艳芳, 王则金, 等. 冰温贮藏下黄花梨贮藏效果及抗冷性研究[J]. 冷藏技术, 2017, 40(1): 14-18.
LIN X L, ZHENG Y F, WANG Z J, et al. Research on the storage effect and cold resistance of Huanghua pear during ice-temperature storage[J]. Refrigeration Technology, 2017, 40(1): 14-18.

Effects of Low Temperature Conditioning the Sugar Metabolism of Kiwifruit

Zhang Wei^{1,2,3}, Li Gaoyang^{1,2,3}, Zhang Qun^{1,2,3}, Shan Yang^{1,2,3}, Su Donglin^{3*}, Zhu Xiangrong^{1,2*}

(¹Longping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125

²Agricultural Product Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125

³Hunan Key Lab of Fruits & Vegetables Storage, Processing, Quality and Safety, Changsha 410125)

Abstract Objective: The effect of low temperature conditioning (LTC) combining with exogenous ethylene on the sugar metabolism of postharvest kiwifruit was studied. Methods: The kiwifruit was placed at four temperatures: 0, 4, 8, 12 °C for 3, 5, 7 day, respectively, and then ripened at room temperature (25 °C) with ethylene. The kiwifruit directly ripened at room temperature was as control group (CK). The soluble sugar content, monosaccharide content (glucose, fructose and sucrose), starch content, amylase activity, and sugar metabolism enzymes activities in 12 treatment groups and CK were determined. Results: LTC treatment could increase the soluble sugar content and starch degradation rate, maintain high amylase activity in kiwifruit. Neutral invertase (NI) and sucrose phosphate (SPS) enzyme activities were maintain effectively. However, the effect of LTC on AI and SS enzymes activities was not significant. Through principal component analysis (PCA) and cluster analysis (CA), it was found that the best time and temperature for LTC in kiwifruit was 7 days and 4 °C, respectively. Conclusion: These results indicated that LTC can maintain a higher soluble sugar content by regulating the activity of sugar metabolism-related enzymes during ripening, and kiwifruit has higher nutritional value.

Keywords postharvest kiwifruit; low temperature conditioning (LTC); ethylene ripening; sugar metabolism; after ripening