山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):656-663 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.007

外源*L*-肌肽对鲜切苹果蔗糖代谢的影响

陈梦强[1],李鸿丽[1],安 城[1],黄丹丹[1],朱树华[2],李成坤[1*]
1. 山东农业大学化学与材料科学学院,山东 泰安 271018
2. 石河子大学农学院,新疆 石河子 832003

摘 要: 为提高鲜切苹果的贮藏品质,探究了不同浓度*L*-肌肽对鲜切苹果中蔗糖代谢的影响。以“红富士”苹果为实验材料,用0.5、2.0、3.5和5.0 mmol·L^{-1} *L*-肌肽溶液浸泡处理鲜切苹果,通过分析呼吸速率和可溶性固形物含量变化得到最适浓度为2 mmol·L^{-1};同时探究最优浓度下*L*-肌肽溶液对果实中蔗糖、果糖和葡萄糖含量的影响;研究*L*-肌肽对蔗糖磷酸合酶(SPS)、蔗糖合酶(SS-s和SS-d)、中性转化酶(NI)、酸性转化酶(AI)活性的影响和*MdSS*、*MdSPS*、*MdNI*基因表达水平的变化。结果表明:2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽可显著延缓果实呼吸速率的上升,维持较高的可溶性固形物含量;*L*-肌肽通过提高SPS和SS-s酶活性,抑制SS-d、NI和AI酶活性,上调*MdSS*、*MdSPS*、*MdNI*基因相对表达水平,促进了蔗糖的累积,减缓了蔗糖的降解,抑制了葡萄糖和果糖含量的上升,维持了较好的果实贮藏品质。

关键词: *L*-肌肽;蔗糖代谢;鲜切苹果;贮藏品质
中图法分类号: TB484.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)04-0656-08

Effect of Exogenous *L*-carnosine on Sucrose Metabolism in Fresh-Cut Apples

CHEN Meng-qiang[1], LI Hong-li[1], AN Cheng[1], HUANG Dan-dan[1], ZHU Shu-hua[2], LI Cheng-kun[1*]
1. *College of Chemistry and Material Science/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China*
2. *College of Agriculture/Shihezi University,Shihezi 832003, China*

Abstract: To improve the storage quality of fresh-cut apples, this research investigates the effects of various concentrations of *L*-carnosine on sucrose metabolism in fresh-cut apples. Using "Red Fuji" apples as experimental materials, fresh-cut apples are immersed in *L*-carnosine solutions (0.5, 2.0, 3.5, and 5.0 mmol L^{-1}). The optimal concentration of 2 mmol L^{-1} is determined through analyzing the changes in respiratory rate and soluble solids content (SSC). Simultaneously, the impact of *L*-carnosine at optimal concentration on the contents of sucrose, fructose, and glucose are examined. The study further evaluates the influence of *L*-carnosine on the activities of sucrose phosphate synthase (SPS), sucrose synthase (synthetic direction: SS-s; degradative direction: SS-d), neutral invertase (NI) and acid invertase (AI), as well as changes in the expression levels of *MdSS*, *MdSPS*, and *MdNI*. The results demonstrate that 2 mmol L^{-1} *L*-carnosine significantly suppresses the increase in respiratory rate and maintains higher SSC levels. *L*-carnosine promotes the accumulation of sucrose and slows its degradation by increasing the activities of SPS and SS-s enzymes, inhibiting the activities of SS-d, NI, and AI enzymes, and upregulating the relative expression levels of the *MdSS*, *MdSPS*, and *MdNI* genes. Consequently, it suppresses the increase in glucose and fructose content and maintains better fruit storage quality.

Keywords: *L*-carnosine; sucrose metabolism; fresh-cut apples; fruit quality

鲜切苹果中含有多种维生素和多酚类等营养成分,具有独特的风味和口感[1],鲜切苹果的天然、营养和即食性等特点使其在消费者中广受欢迎[2]。但切割引起的机械损伤会导致鲜切苹果呼吸作用增强,破坏其细胞稳态,加速果实成熟,在较短时间内发生软化和风味劣变,严重影响了果实的货架期和经济价值[3]。因此,发展用于提高鲜切苹果贮藏品质的保鲜方法具有重要意义[4]。

在鲜切苹果贮藏保鲜中,影响果实贮藏品质的生理生化指标主要包括呼吸强度、可溶性固形物含量、色差、失重及相对电导率。例如,色差变化影响了鲜切苹果的褐变程度,是评判果实新鲜度的表观因素之一,而呼吸强度和可溶性固形物含量主要影响了果实品质和风味。蔗糖、果糖和

收稿日期: 2025-07-28 **修回日期:** 2026-06-18
基金项目: 山东省重点研发计划(2022TZXD0023);山东省自然科学基金(ZR2022QB105,ZR2023QB228)
第1作者简介: 陈梦强(2000-),女,硕士研究生,研究方向:采后果蔬保鲜。E-mail:2023110740@sdau.edu.cn
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:ckli@sdau.edu.cn

葡萄糖作为苹果中主要的可溶性糖，它们的含量所占比重是影响果实风味的关键因素之一[5]。果实中蔗糖代谢通路中相关酶活性影响了可溶性糖的累积，其涉及的关键酶主要包括蔗糖合成酶（SS）、蔗糖磷酸合酶（SPS）、酸性转化酶（AI）和中性转化酶（NI）[6]，其中，蔗糖合成酶（合成方向，SS-s）和SPS活性影响了果实中蔗糖的合成，而蔗糖合成酶（分解方向，SS-d）、AI和NI活性主要参与了蔗糖降解和转化过程[7]。研究发现，通过提升果实中的蔗糖含量，可以有效地延缓果实成熟，维持较好的保鲜效果。例如，利用外源ATP浸泡处理南果梨可抑制呼吸强度，通过提高蔗糖合成酶（合成方向，SS-s）的活性增加南果梨中的蔗糖含量，较好地维持了果实的品质[8]。采后喷施6-苄基氨基嘌呤处理抑制了莲子的呼吸速率，通过提高蔗糖磷酸合酶（SPS），抑制蔗糖合成酶（分解方向，SS-d）、酸性转化酶（AI）和中性转化酶（NI）的活性，增加果实中的蔗糖含量，减缓莲子的采后衰老[9]。

在苹果保鲜方法中，天然生物保鲜方法具有无残留、无毒副作用和食用安全的独特优势[10]。*L*-肌肽是由*β*-丙氨酸和组氨酸组成的水溶性天然二肽，广泛分布于动物的肌肉组织和脑组织中，*L*-肌肽在动物体中具有显著的抗氧化、抗糖化和抗炎等作用，已广泛应用于医学、化妆品和食品添加剂等领域[11]。研究发现，外源*L*-肌肽处理联合超高压可有效保持黑鱼肉冷藏期间的贮藏品质，延长黑鱼肉的货架期[12]。但外源*L*-肌肽处理对采后果蔬保鲜的研究鲜有报道，对采后果蔬中蔗糖代谢的影响尚需探索。因此，本研究以鲜切苹果为试材，采用*L*-肌肽溶液浸泡处理的方式，探究外源*L*-肌肽对鲜切苹果中蔗糖代谢的影响，为延长鲜切苹果的贮藏期限和提高品质提供一种有效的方法。

1　材料与方法

1.1　材料与设备

1.1.1　*材料与试剂*　“红富士”苹果：购买于山东省泰安市，选取60个大小均一、无明显损伤、无病虫害、成熟度一致的苹果作为实验材料，放于4 ℃冰箱预冷备用。蒽酮，国药集团化学试剂有限公司；无水乙醇、次氯酸钠、冰乙酸、浓硫酸、氢氧化钠、乙二胺四乙酸和乙酸钠，天津市凯通化学试剂有限公司；盐酸和氯化镁，天津市永大化学试剂有限公司；牛血清白蛋白混和考马斯亮蓝G-250，北京索莱宝科技有限公司；二硫苏糖醇、尿苷-5'-二磷酸葡萄糖二钠盐、果糖-6-磷酸二钠盐、*L*-肌肽、4-羟乙基哌嗪乙磺酸、乙二醇、间苯二酚、蔗糖、酒石酸钠钾、3，5-二硝基水杨酸和果糖，上海麦克林生化科技公司。

1.1.2　*仪器与设备*　NKR-D3000型照相机，Nikon；SY-1022型果实呼吸测量仪，石家庄世亚科技有限公司；WY015R型手持折光仪，阿贝斯有限公司；AR423CN型电子分析天平，奥豪斯仪器（上海）有限公司；UV-2450型紫外分光光度计，日本岛津公司；A11型组织冷冻研磨粉碎机，德国IKA公司；DLAB-D3024R型台式高速冷冻离心机，北京大龙兴创实验仪器有限公司；DK-8D型恒温水浴锅，上海森信实验设备有限公司；Cary Eclipse型荧光分光光度计，美国Varian公司；CF-F 9677型PCR扩增仪，卡尤迪生物科技（北京）有限公司；LightCycler®96型实时荧光定量仪，济南东岱科学器材有限公司；Q5000型显微分光光度计，美国Quawell公司。

1.2　方法

1.2.1　*样品处理*　在实验准备阶段，所需实验工具均经0.01%NaClO溶液浸泡消毒、晾干备用。苹果经去离子水清洗后，置于0.01%NaClO溶液中浸泡3 min进行表面杀菌，随后取出擦干表面水分，切成大小均匀的小块，随机分为5组，分别浸泡于不同浓度*L*-肌肽溶液（0.5 mmol·L^{-1}、2 mmol·L^{-1}、3.5 mmol·L^{-1}和5 mmol·L^{-1}）以及去离子水中（对照）3 min。处理后晾干表皮水分，置于无菌聚丙烯容器并标记分组。随后置于25±1 ℃，相对湿度70%-80%的条件下贮藏4 d，并每天进行取样检测，测定其呼吸速率和可溶性固形物含量，根据预实验结果筛选出最优处理。采用最优*L*-肌肽处理浓度和去离子水（对照）以相同的方式对苹果进行处理，并将处理后的苹果块在4 ℃条件下贮藏24 d，间隔4 d取样，将样品切成小块用液氮迅速冷冻处理，测定其蔗糖代谢指标，并保存于−80 ℃冰箱中备用。

1.2.2　*测定项目与方法*　每天10点-11点，使用照相机拍照，对鲜切苹果进行外观检测；呼吸速

率通过便携式果实呼吸测量仪测定；可溶性固形物含量使用手持折光仪测定；蔗糖、果糖和葡萄糖的含量参考张友杰[13]等的方法测定；可溶性蛋白含量参考刘彬[14]等的方法测定；蔗糖代谢相关酶活性参考 Gao[15]等的方法测定；总 RNA 的提取和 qRT-PCR 按照康为世纪植物 RNA 快速提取试剂盒提取苹果组织总 RNA，通过 Q5000 显微分光光度计测定 RNA 的纯度和浓度。用 *c*DNAPrimeScript™ II1st Strand *c*DNA Synthesis Kit 反转录总 RNA。参照 He 等[16]以 ACTIN 为管家基因，进行 qRT-PCR，将第 0 d 未处理苹果的基因表达量设为 1。PCR 指数扩增公式为：$R_n=R_0(1+E_r)^n$。式中 E_r 为扩增效率，n 为循环数，R_n 为 n 个循环后的 PCR 产物数，R_0 为原始模板数，基因表达量计算公式为 $2^{(-\Delta\Delta t)}$。苹果内参基因为 *MdActin*，特定引物序列（见表 1）。

表 1 特定引物序列

Table 1 Specific primer sequences

引物名称 Primer name	引物序列 Primer sequences
ACTIN	F：5′- GGACAGCGAGGACATTCAGC-3′
	R：5′- CTGACCCATTCCAACCATAACA-3′
MdSS	F：5′-AAGTTCACTCGCGCCTTAAGC-3′
	R：5′- AGGAGGGCAACGAGTTCGT-3′
MdSPS	F：5′- CTCCTGACCCTCCAATTTGG-3′
	R：5′-CCTGCCAAGGGCAAGTATCA-3′
MdNI	F：5′-GAAAAGGAGGCCTGGAGGTT-3′
	R：5′- CCGGATCAGTAGCAGCAAGAG3′

1.2.3 数据处理 试验均设置 3 次生物学重复，所呈现的数据代表平均值±标准偏差，分析数据采用单因素方差分析，采用最低显著性差异（LSD）检验比较平均值，差异显著性水平为 0.05。不同小写字母表示具有显著性差异。使用 Excel 2021 进行数据处理，使用 Origin 2021 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 *L*-肌肽处理对鲜切苹果呼吸速率和可溶性固形物含量的影响

采后果实的呼吸作用是加速果实品质劣变的重要影响因素之一，通过降低果实的呼吸速率可以减缓果实成熟进程，延长果实的贮藏时间，维持果实的新鲜度[17]。如图 1 a 所示，在贮藏期间，不同处理的苹果果实呼吸速率均呈现先上升后下降的趋势，并于第 4 d 时达呼吸峰值。其中，0.5 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理使果实的呼吸速率整体高于对照处理，3.5 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理仅使果实在贮藏的第 5 d 低于对照，其余时间均高于对照处理；2 mmol·L^{-1} 和 5 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理可抑制果实呼吸速率的上升，其中浓度为 2 mmol·L^{-1} 时效果最好，能显著降低贮藏期间苹果果实呼吸速率（$P<0.05$），其中 4 d 时呼吸速率仅为对照处理的 71.17%。实验结果说明，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理可有效抑制鲜切苹果呼吸速率的上升，有利于延缓果实成熟，更好地保持果实的贮藏品质。

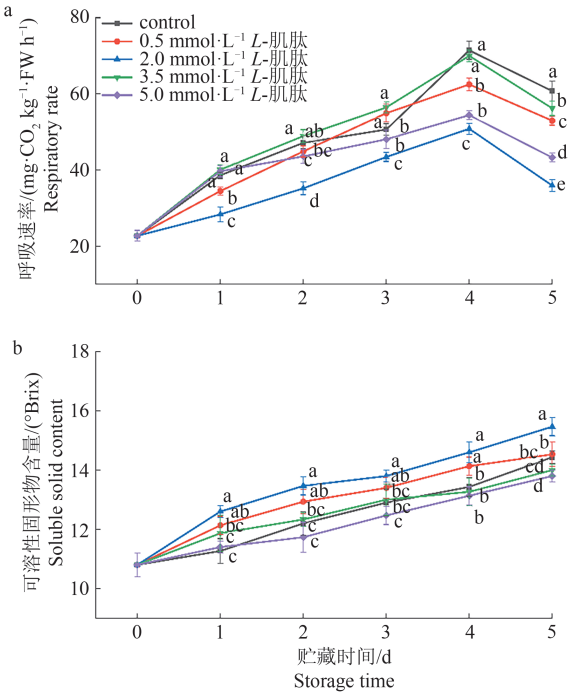


图 1 不同浓度 *L*-肌肽处理对鲜切苹果呼吸速率和可溶性固形物含量的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of *L*-carnosine treatment on respiratory rate and soluble solid content in fresh-cut apples

可溶性固形物含量是衡量果实甜度和品质的重要指标之一[18]。由图 1 b 可看出，不同处理均会使鲜切苹果中 SSC 表现出上升趋势。相较于对照处理，5 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理减缓了 SSC 含量的增加；3.5 mmol·L^{-1} 处理的果实 SSC 含量仅在 1 d 和 2 d 时高于对照，3-4 d 时与对照处理无显著性差异；*L*-肌肽浓度为 0.5 mmol·L^{-1} 和 2 mmol·L^{-1} 时，均有利于提高贮藏期间果实中 SSC 的含量，其中 2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理效果最佳。以上结果说明，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理的鲜

切苹果果实呼吸速率降低，SSC 含量增加，此浓度为处理果实的最适浓度。

2.2　*L*-肌肽处理对鲜切苹果中葡萄糖、果糖和蔗糖含量的影响

贮藏期间果实内的蔗糖、果糖和葡萄糖在维持其生理代谢和品质方面发挥重要作用，同时，蔗糖与葡萄糖和果糖之间可以通过酶促作用互相转化[19]。由图2可见，*L*-肌肽处理的鲜切苹果中蔗糖含量先上升后下降，葡萄糖和果糖含量呈现持续上升的趋势。相较于对照处理，在整个贮藏期间，*L*-肌肽处理显著提高了苹果中的蔗糖含量，并在贮藏的12 d时达到峰值，其蔗糖含量为对照的1.2倍（$P<0.05$，图2 a）；同时，该处理也显著抑制了整个贮藏期间果实中果糖（图2 b）和葡萄糖（图2 c）含量的增加，在贮藏的24 d时，果糖含量是对照处理的84.43%（$P<0.05$），葡萄糖含量为对照的96.63%。以上结果说明，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理可有效提升果实中的蔗糖含量，抑制果糖和葡萄糖含量的上升，从而更好地维持果实的风味和品质，这与Sun[20]等的研究结果类似。

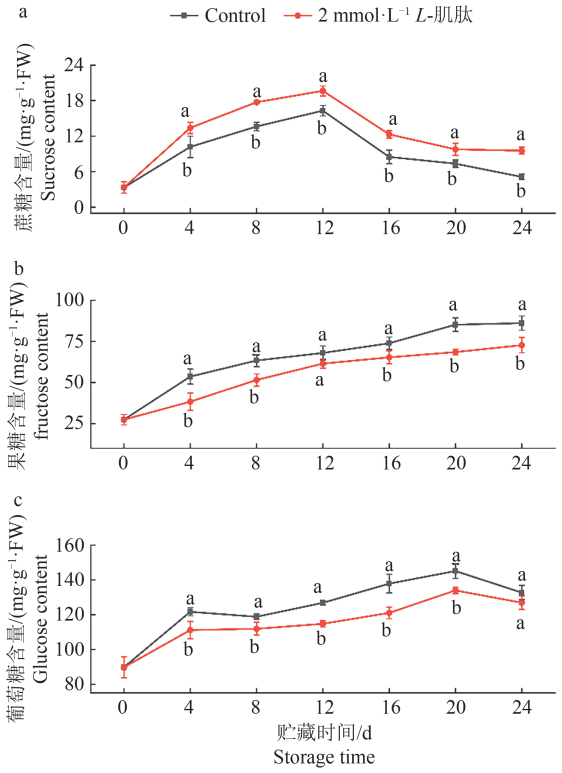


图2 L-肌肽处理对鲜切苹果中葡萄糖、果糖和蔗糖含量的影响

Fig. 2 Effects of L-carnosine treatment on the contents of glucose, fructose and sucrose in fresh-cut apples

2.3　*L*-肌肽处理对鲜切苹果中蔗糖代谢酶活性的影响

蔗糖合成酶（SS）是影响果实中蔗糖合成与分解的可逆酶；蔗糖磷酸合成酶（SPS）通过催化果糖-6-磷酸不可逆地生成蔗糖，是果实中蔗糖累积的主要途径；蔗糖转化酶根据其酶促反应最适pH值可分为酸性转化酶（AI）和中性转化酶（NI），二者的作用是催化水解蔗糖为葡萄糖和果糖[21]。在果实成熟过程中，SS-d、AI和NI会加速蔗糖分解，增加果实中葡萄糖和果糖含量，进而加速果实成熟进程。鲜切苹果经2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理后，贮藏期间果实中的SS-s和AI活性呈现先上升后下降的趋势（图3 c，3 e），SPS、SS-d和NI则表现出先下降后上升的趋势（图3 a、3 b和3 d）。与对照相比，鲜切苹果经2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理能够显著提高整个贮藏期间SS-s的活性，且第4天达峰，SS-s活性是对照处理的1.22倍；该处理也能显著抑制SS-d的活性，第8天时为对照处理的85.73%，由此有利于蔗糖的合成并减缓了蔗糖的水解（$P<0.05$）。*L*-肌肽处理也可显著提高贮藏期间苹果中SPS的活性，第24天时为对照处理的1.18倍，说明该处理可促进果糖-6-磷酸转化为蔗糖（$P<0.05$）；同时，*L*-肌肽处理显著抑制了贮藏期间果实中AI和NI的活性，在第8天和第4天时，AI和NI的活性分别为对照的86.45%和85.44%，表明*L*-肌肽处理会抑制蔗糖转化为葡萄糖和果糖（$P<0.05$）。由以上结果可知，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理通过提高苹果果实中SS-s和SPS的活性促进蔗糖的累积，同时降低SS-d、AI和NI的活性以减少蔗糖的水解。结果表明，*L*-肌肽处理通过上调SS-s和SPS活性，下调SS-d、AI和NI的活性，协同促进了果实中蔗糖的累积，起到延缓果实成熟进程，维持鲜切苹果贮藏品质的作用，这与Ge的研究结果相似[22]。

2.4　蔗糖代谢酶相对基因表达量的测定

MdSS、*MdSPS*和*MdNI*基因表达水平的变化分别调控了SS、SPS和NI的活性，从而影响了果实中蔗糖含量的变化。从图4 a中可知，贮藏期间，在*L*-肌肽处理的鲜切苹果中，*MdSS*基因的表达水平均显著高于对照处理，相较于0天，在第8天和16-24天，*L*-肌肽处理显著提高了*MdSS*基因相对表达量（$P<0.05$），其中果实贮

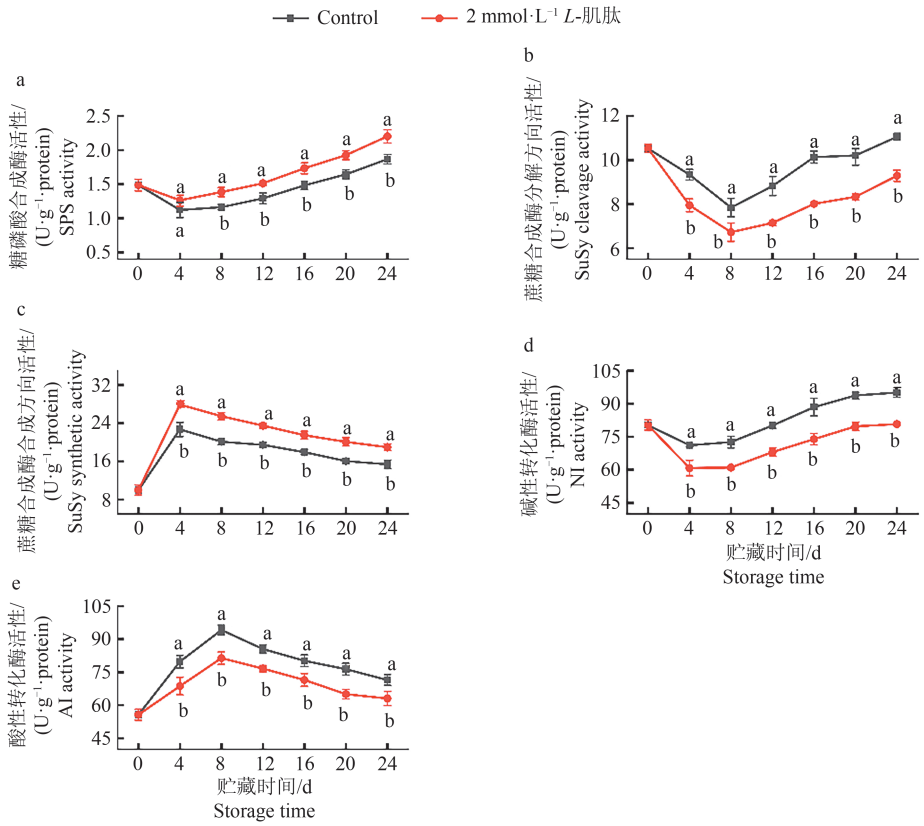


图3 鲜切苹果蔗糖代谢酶活性

Fig. 3 Sucrose metabolism enzyme activities in fresh-cut apples

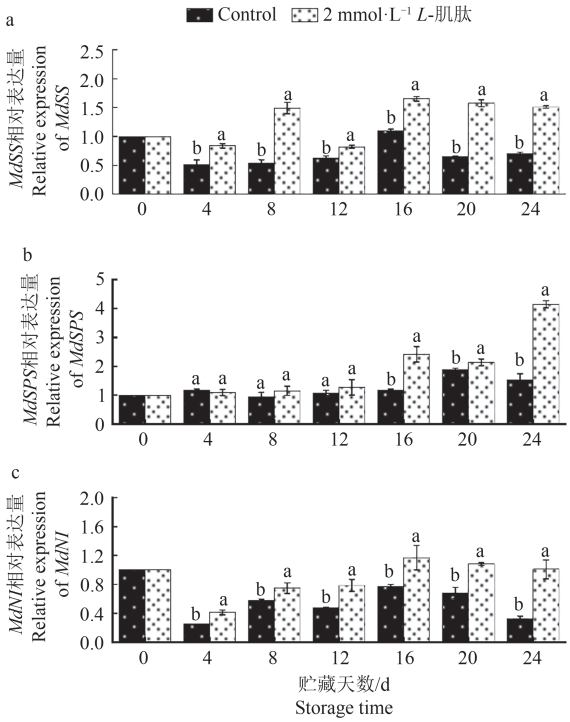


图4 鲜切苹果蔗糖代谢酶相对基因表达量

Fig. 4 Relative gene expression of sucrose metabolism enzymes in fresh-cut apples

藏 16 d 时，*MdSS* 基因的相对表达量为对照的 1.5 倍。同时，在整个贮藏期间，*L*-肌肽处理提高了 *MdSPS* 基因的表达水平，相较于对照处理，在贮藏的 16 d 至 24 d，*MdSPS* 基因的相对表达量显著提高（$P<0.05$），在贮藏的 24 d，果实中 *MdSPS* 基因相对表达量是对照的 1.3 倍（图 4 b）。另外，*L*-肌肽处理使果实中 *MdNI* 基因相对表达量均显著高于对照处理，但仅在贮藏的 16 d 和 20 d，*MdNI* 基因相对表达水平高于 0 d，果实在贮藏的 16 d，*MdNI* 基因相对表达量达到峰值，是对照处理的 2.33 倍（图 4 c）。以上结果说明，经 *L*-肌肽处理的苹果果实使 *MdSS* 基因和 *MdSPS* 基因表达水平上升，进而提高了 SS-s 和 SPS 酶活性，尤其利于贮藏后期果实中蔗糖的累积，有效延缓了鲜切苹果的成熟进程，起到较好的保鲜效果。

3　讨论

鲜切苹果具有营养丰富、即食方便和经济价值较高等特点[23]。苹果呼吸作用的增强会加速

糖代谢过程，二者的相互作用共同影响了果实的成熟衰老进程和风味变化[24]。在贮藏期间，果实中可溶性糖含量在维持细胞膜稳定性[25]、调节细胞渗透压[26]以及调控果实抗氧化能力[27]方面具有重要作用，贮藏期间果实的呼吸作用的增强以及所引起的可溶性糖含量变化会促进果实的成熟和软化；另外，苹果经切割后引起的机械损伤也加速了果实风味和品质的劣变进程，这些因素严重影响了果实的货架期和经济价值。*L*-肌肽作为一种可食用并具备优异抗氧化性的天然二肽，其在保鲜领域的研究主要用于维持肉品品质。本研究将*L*-肌肽应用于果实采后保鲜，结果表明 2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理通过降低鲜切苹果的呼吸速率和提升可溶性固形物含量，维持了果实中糖代谢平衡，延缓了果实的品质劣变，这有利于延缓果实成熟进程，提高鲜切苹果的贮藏品质。

糖代谢平衡是维持果实甜度与风味的重要影响因素[28]，糖代谢的失衡会引发龙眼退糖[29]和番茄软化等[30]生理失调现象。采后果实成熟进程中，蔗糖的合成途径被抑制，降解途径被激活，在蔗糖转化酶（AI 和 NI）作用下，蔗糖加速降解为葡萄糖和果糖，这破坏了果实中原有的糖代谢平衡。2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理通过提高鲜切苹果中 *MdSS* 和 *MdSPS* 基因的相对表达量，提升了 SS-s 和 SPS 活性，有助于果实中蔗糖的累积；另外，SS-d、AI 和 NI 活性的下降说明蔗糖降解过程被抑制，显著减缓了蔗糖含量的下降[31]，从而有效维持了果实的糖代谢平衡。此外，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理使 NI 活性与 *MdNI* 基因表达具有相同的变化趋势，均表现为先下降再上升。在整个贮藏期间，*L*-肌肽处理使 NI 活性显著低于对照处理，而 *MdNI* 基因相对表达量高于对照；Wang[32] 等和 Chen[5] 等报道了桃果实中 NI 基因家族包含 8 个成员，其中 6 个基因（*PpNI1-4*、*PpNI7-8*）在所有测试样品中均稳定表达，而 *PpNI3* 和 *PpNI4* 基因的转录水平与 NI 酶活性的变化趋势相反，据此推测这可能是由于 *L*-肌肽抑制了 NI 活性，负反馈调节使 *MdNI* 表达水平上升。上述因素的综合作用下，*L*-肌肽处理提高了果实中的蔗糖含量，延缓了蔗糖下降趋势，同时抑制了蔗糖的降解，减缓了果实中的果糖和葡萄糖含量的上升，从而有效维持了果实的糖代谢平衡，抑制了果实的成熟进程，较好地保持了鲜切苹果的风味和品质。

L-肌肽作为一种天然保鲜剂，其安全性已得到广泛认可[33]。根据国家相关标准（GB 2760-2014），*L*-肌肽在肉制品、水产品和调味品中的最大添加量分别为 0.5 g·kg^{-1}、0.3 g·kg^{-1} 和 0.2 g·kg^{-1}。在食品工业中，*L*-肌肽的研究应用主要集中在两方面：一是作为功能性成分用于运动营养品和抗衰老保健食品，发挥其抗氧化、抗疲劳等生理功能[34]。二是作为天然的食品抗氧化剂和防腐剂，特别是在肉制品中用于抑制脂质氧化和保持色泽[35]。本研究将 *L*-肌肽应用于采后保鲜领域，结果表明，*L*-肌肽处理通过调控鲜切苹果中蔗糖代谢关键酶活性和基因相对表达水平，进而影响鲜切苹果中的糖分积累与转化，有效延缓了果实的品质劣变，此研究为提升果实贮藏品质提供了理论依据和技术支撑。

4　结论

鲜切苹果经 2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽处理可显著抑制呼吸速率，提高果实中可溶性固形物含量。同时，*L*-肌肽处理使果实中 *MdSS* 基因和 *MdSPS* 基因表达水平提高，与 SS-s 和 SPS 活性上升趋势相符，该处理也降低了 SS-d、AI 和 NI 活性，提高了果实中的蔗糖含量，延缓了蔗糖的降解，从而进一步降低了葡萄糖和果糖的含量，减缓了它们的上升趋势。因此，2 mmol·L^{-1} *L*-肌肽有助于保持鲜切苹果的贮藏品质，延长果实货架期，此研究结果为鲜切苹果的保鲜提供了有效方法。

参考文献

[1] 袁仲玉,周会玲,张晓晓,等.芦荟粗提物对红富士苹果低温贮藏品质的影响[J].西北农业学报,2013,22(12):96-101.

[2] Ma X, Feng J, Zhou Y, et al. Application of antioxidant peptide-based coating on fresh-cut apple [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2024, 59(12): 9051-9059.

[3] Yousuf B, Qadri O S, Srivastava A K. Recent developments in shelf-life extension of fresh-cut fruits and vegetables by application of different edible coatings: A review [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 89: 198-209.

[4] 王 兵,王艳颖,邓鑫磊,等.鲜切果蔬及其物理保鲜技术的研究进展[J]. 现代园艺,2025,48(09):43-55.

[5] Chen Y, Ge Y, Zhao J, et al. Postharvest sodium nitroprusside treatment maintains storage quality of apple fruit by regulating sucrose metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 154: 115-120.

[6] 刘 欢,张 辰,李晨洋,等.不同砧木嫁接对西瓜果实糖分积累及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2026,47(01):1-8.

[7] 苏 静,祝令成,刘 茜,等.果实糖代谢与含量调控的研究进展[J]. 果树学报,2022,39(02):266-279.

[8] Duan B, Ge Y, Li C, et al. Effect of exogenous ATP treatment on sucrose metabolism and quality of Nanguo pear fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 71-76.

[9] Luo S, Hu H, Zhang L, et al. Sugars in postharvest lotus seeds were modified by 6-benzylaminopurine treatment through altering related enzymes involved in starch-sucrose metabolism [J]. Scientia Horticulturae, 2017, 221: 73-82.

[10] 李家琪,张东红,韩爱云.鲜切苹果保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2023,23(03):75-80.

[11] 初 晖,张峰瑞,于庆港,等.*L*-肌肽对蛋鸡产蛋性能、蛋品质、养分表观消化率和血清生化指标的影响[J].动物营养学报,2021,33(10):5938-5946.

[12] 孙良格,徐佳美,吕经秀,等.肌肽联合超高压对黑鱼肉脂质氧化及肌原纤维蛋白的影响[J].食品工业科技,2022,43(04):114-122.

[13] 张友杰.以蒽酮分光光度法测定果蔬中的葡萄糖、果糖、蔗糖和淀粉[J].分析化学,1977(03):167-171.

[14] 刘 彬,张云秀,李 芳,等.新疆野苹果果实VC及可溶性蛋白含量的测定分析[J].天津农学院学报,2016,23(04):14-17.

[15] Gao Z, Zhao K, Zhang Z, et al. Hydrogen sulfide alleviates pericarp browning in lichi fruit by modulating energy and sugar metabolisms [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15:1421203.

[16] He D, Xia B, Zhou Q, et al. Rare earth elements regulate the endocytosis and DNA methylation in root cells of *Arabidopsis thaliana* [J]. Chemosphere, 2019, 227: 522-532.

[17] Bhande S D, Ravindra M R, Goswami T K. Respiration rate of banana fruit under aerobic conditions at different storage temperatures [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87(1): 116-123.

[18] Zhan B S, Li P, Li M, et al. Detection of Soluble Solids Content (SSC) in pears using near-infrared spectroscopy combined with LASSO-GWF-PLS model [J]. Agriculture, 2023, 13(8): 1491.

[19] Wang Y, Liu L, Wang Y, et al. Effects of soil water stress on fruit yield, quality and their relationship with sugar metabolism in 'Gala' apple [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 258:108753.

[20] Sun Y, Shi Z, Jiang Y, et al. Effects of preharvest regulation of ethylene on carbohydrate metabolism of apple (*Malus domestica* Borkh *cv. Starkrimson*) fruit at harvest and during storage [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 276.

[21] 曾小峰,高伦江,曾顺德,等.青脆李采后贮藏过程糖含量及相关酶的变化规律[J]南方农业,2021,15(28):28-32.

[22] Ge Y, Wei M, Li C, et al. Changes in the sucrose metabolism in apple fruit following postharvest acibenzolar-S-methyl treatment [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 99(4): 1519-1524.

[23] Fan X. Chemical inhibition of polyphenol oxidase and cut surface browning of fresh-cut apples [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(27): 8737-8751.

[24] Li J, Min D, Li Z, et al. Regulation of sugar metabolism by methyl jasmonate to improve the postharvest quality of tomato fruit [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 41(4): 1615-1626.

[25] Xue X, Wang J, Shukla D, et al. When SWEETs turn tweens: Updates and perspectives [J]. Annual Review of Plant Biology, 2022, 73(1): 379-403.

[26] Zhang Y, Zhu J, Khan M, et al. Transcription factors *ABF4* and *ABR1* synergistically regulate amylase-mediated starch catabolism in drought tolerance [J]. Plant Physiology, 2023, 191(1): 591-609.

[27] Depaepe T, Hendrix S, Van Rensburg H C J, et al. At the crossroads of survival and death: the reactive oxygen species-ethylene-sugar triad and the unfolded protein response [J]. Trends in Plant Science, 2021, 26(4): 338-351.

[28] Zhu L, Lan J, Zhao T, et al. How vacuolar sugar transporters evolve and control cellular sugar homeostasis, organ development and crop yield [J]. Nature Plants, 2025, 11(6): 1102-1115.

[29] Huang S, Lv X, Han Y, et al. Disrupted sugar transport and continued sugar consumption lead to sugar decline in ripe 'Shixia' longan fruit [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191:115620.

[30] Yang Q, Zhen X, Fang X, et al. Overexpression of *SlIMP3* regulates sugar metabolism, antioxidant

activity, and fruit softening, leading to extended shelf life of tomato fruits [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 223:113429.

[31] Zhai X, Yu X, Mao Z, et al. *CsbHLH122*/*CsMYBS3*-*CsSUT2* contributes to the rapid accumulation of sugar in the ripening stage of sweet orange (*Citrus sinensis*) [J]. The Plant Journal, 2025, 122(1):e70156.

[32] Wang X, Fu X, Chen M, et al. Ultraviolet B irradiation influences the fruit quality and sucrose metabolism of peach (*Prunus persica* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 153: 286-301.

[33] Liu Y, Pan X, Zhang H, et al. Combinatorial protein engineering and transporter engineering for efficient synthesis of *L*-Carnosine in *Escherichia coli* [J]. Bioresource Technology, 2023, 387:129628.

[34] Boldyrev A A, Aldini G, Derave W. Physiology and pathophysiology of carnosine [J]. Physiological Reviews, 2013, 93(4): 1803-1845.

[35] Peña-ramos E A, Xiong Y L. Whey and soy protein hydrolysates inhibit lipid oxidation in cooked pork patties [J]. Meat Science, 2003, 64(3): 259-263.