

农产品保鲜与食品包装

气调包装联合保鲜剂对‘塞外红’苹果中短期贮藏的影响

魏智成¹, 任兆琳², 田蜜³, 李娜¹, 朱文立¹, 孙雨¹, 吴昊^{1,4,5,6}, 朱俊向^{1,4,5,6*}

(1.青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109; 2.奈曼旗乡村振兴局, 内蒙古 通辽 028300; 3.中共通辽市委员会党校, 内蒙古 通辽 028006; 4.农业农村部特种食品加工重点实验室 (部省共建), 山东 青岛 266109; 5.山东省特种食品协同创新中心, 山东 青岛 266109; 6.青岛特种食品研究院, 山东 青岛 266109)

摘要: **目的** 探究不同贮藏温度、气调包装及保鲜剂对‘塞外红’苹果贮藏品质的影响。**方法** 采用冷藏、气调包装(O_2 与 CO_2 的体积比为5:1)以及复合保鲜剂(1-甲基环丙烯、 $CaCl_2$ 、甜菜碱)等处理方式,对新鲜采摘的‘塞外红’苹果进行60 d的贮藏实验,分析贮藏期间苹果的质构特性、呼吸强度、外观品质、褐变指数、可滴定酸含量、可溶性固形物含量、抗坏血酸含量、相对电导率、丙二醛含量的变化。**结果** 在贮藏温度 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,采用气调包装结合保鲜剂处理能够有效抑制‘塞外红’苹果的褐变指数、丙二醛含量和相对电导率的增加。与单独进行 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷藏处理相比,经过60 d贮藏,处理后苹果的褐变指数、丙二醛含量和相对电导率分别降低了42%、66%、14%。同时,该处理方式延缓了‘塞外红’苹果质构特性的下降,降低了果实的呼吸强度,并保持了较高的抗坏血酸、可溶性固形物和可滴定酸等含量。**结论** 在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷藏并配合气调包装和外源保鲜剂处理可以有效地抑制‘塞外红’苹果的细胞损伤和营养物质的损失,延缓苹果品质的恶化进程。

关键词: ‘塞外红’苹果; 气调包装; 保鲜剂; 贮藏品质

中图分类号: TS255.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)21-0144-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.21.018

Effect of Modified Atmosphere Packaging Combined with Preservatives on Medium and Short-term Storage of 'Saiwaihong' Apple

WEI Zhi-cheng¹, REN Zhao-lin², TIAN Mi³, LI Na¹, ZHU Wen-li¹, SUN Yu¹,
WU Hao^{1,4,5,6}, ZHU Jun-xiang^{1,4,5,6*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Shandong Qingdao 266109, China; 2. Rural Revitalization Administration of Naiman Banner, Inner Mongolia Tongliao 028300, China; 3. Party School of the CPC Tongliao City Committee, Inner Mongolia Tongliao 028006, China; 4. Key Laboratory of Special Food Processing (Co-construction by Ministry and Province), Shandong Qingdao 266109, China; 5. Shandong Collaborative Innovation Center of Special Food, Shandong Qingdao 266109, China; 6. Qingdao Special Food Research Institute, Shandong Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effects of different storage temperature, modified atmosphere packaging, and preservatives on the storage quality of 'Saiwaihong' apples. Freshly picked 'Saiwaihong' apples were subject to storage for 60 d through refrigeration, modified atmosphere packaging (O_2/CO_2 , 5:1), and treatment with a complex preservatives (methyl

收稿日期: 2023-06-04

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020MC213, ZR2020QC242); 国家自然科学基金专项(M224200002); 青岛特种食品研究院项目(6602422079); 青岛农业大学高层次人才科研基金(6651120039)

*通信作者

cyclopropene, CaCl_2 , betaine). During the storage period, changes in the texture properties, respiration rate, appearance quality, browning index, titratable acidity, soluble solids, ascorbic acid, relative conductivity, and malondialdehyde content of the apples were analyzed. At 0.5 °C, combined treatment of modified atmosphere packaging and exogenous preservatives effectively suppressed the increase in browning index, malondialdehyde content, and relative conductivity of 'Saiwaihong' apples. Compared to the apples subject to 0.5 °C refrigeration alone after 60 d of storage, the above-mentioned treatment showed a reduction of 42% in browning index, 66% in malondialdehyde content, and 14% in relative conductivity. Furthermore, this treatment method also slowed down the decline in fruit texture properties, reduced the respiration rate, and maintained higher levels of ascorbic acid, soluble solids, and titratable acidity in the fruit. Refrigeration at 0.5 °C combined with modified atmosphere packaging and preservatives can effectively inhibit cell damage and nutrient loss in 'Saiwaihong' apples, thus delaying the deterioration of apple quality.

KEY WORDS: 'Saiwaihong' apple; modified atmosphere packaging; preservatives; storage quality

‘塞外红’苹果 (*Malus pumila* 'saiwaihong'), 又名锦绣海棠、鸡心果, 主要产自内蒙古通辽地区^[1]。目前, ‘塞外红’苹果已被纳入国家优质特色小苹果种质资源库, 并获得国际森林认证认可计划 PEFC 标识, 市场前景十分广阔^[1]。由于‘塞外红’苹果的生长发育期较短、果皮薄、不耐贮运, 因此采后在自然温度条件下存放 6~8 d 就会出现褪色、变软现象^[2]。研究表明, ‘塞外红’苹果对低温和 CO_2 敏感。在贮藏时如果温度和气体成分的配置不当, 则可能导致其出现果肉绵软、组织褐变、口感下降等品质劣变问题。由此可见, 开展‘塞外红’苹果贮藏保鲜技术研究对于延长其货架期具有重要意义^[2]。

常用的果蔬保鲜方法包括低温冷藏、气调包装、保鲜剂处理等。气调包装是一种常用的果蔬保鲜方法, 可以通过降低氧气含量来减缓果蔬的呼吸作用, 从而延缓其成熟和衰老进程, 这种方法已广泛应用于新鲜果蔬的采后保鲜^[3]。此外, 采用保鲜剂 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP) 也是一种常用的保鲜手段, 通过与乙烯受体不可逆结合, 减少乙烯的生成, 从而延缓果实的成熟和衰老^[4]。这种方法在香蕉、梨和番茄保鲜中得到了广泛应用^[5]。甜菜碱是一种广泛存在于多种植物体内的季胺类化合物, 可以调节细胞内渗透压, 保护生物膜, 增强自身抗性^[6]。钙在调节果蔬生长发育过程中发挥着重要作用, 钙离子可以调节多种与果实软化相关的酶的表达^[7]。这里以内蒙古通辽产的塞外红苹果为实验材料, 探究气调包装联合保鲜剂 (钙离子、甜菜碱、1-MCP) 对低温下中短期贮藏塞外红苹果的影响, 旨在为塞外红苹果贮藏品质研究提供理论依据。

1 实验

1.1 材料与试剂

选用发育期为(120±3)d 的‘塞外红’苹果, 于 2022 年 9 月 1 日采自内蒙古自治区通辽市奈曼旗西二十家子村果园。将苹果采摘后, 立即在产地预冷包装, 于 3 d 内运到青岛农业大学食品科学与工程学院冷库, 此批‘塞外红’苹果的单果质量为(54.6±13.2)g,

果形指数为(1.06±0.02), 淀粉染色级数为(4.2±0.7)。

主要试剂: 甜菜碱, 济南亚细亚药业有限公司; 1-MCP, 咸阳西秦生物科技有限公司; CaCl_2 , 江苏科伦多食品配料有限公司; 其他分析纯试剂, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器: DJL-320V 型气调包装机, 温州市大江真空包装机械有限公司; TMS-Pilot 质构仪, 美国 FTC 公司; MD SpectraMax i3x 多功能荧光测定仪, 美国 Molecular Devices 公司; CNT0-95 折光仪, 陆恒生物科技有限公司; DDS-307A 电导率仪, 上海佑科仪器仪表有限公司; CR-10Plus 色差仪, 日本柯尼卡美能达株式会社。

1.3 方法

1.3.1 ‘塞外红’苹果贮藏处理

在冷库去除虫果、机械伤果, 将挑选好的苹果分为 4 个处理组, 每组质量为 3 kg。4 组处理条件分别为 0.5 °C、4 °C、0.5 °C/气调、0.5 °C/气调/保鲜剂。具体流程如下。

1) 0.5 °C 组。将‘塞外红’苹果放入保鲜盒中, 利用气调包装机充入与空气组成相同的 N_2 、 O_2 、 CO_2 , 在充气后置于 0.5 °C 冷库中贮藏。

2) 4 °C 组。将‘塞外红’苹果放入保鲜盒中, 利用气调包装机充入与空气组成相同的 N_2 、 O_2 、 CO_2 , 在充气后置于 4 °C 冷库中贮藏。

3) 0.5 °C/气调组。将‘塞外红’苹果放入保鲜盒中, 利用气调包装机充入 O_2 (5%) / CO_2 (1%) 气体, 在充气后置于 0.5 °C 冷库中贮藏。

4) 0.5 °C/气调/保鲜剂组。用 CaCl_2 (20 g/L) 浸泡‘塞外红’苹果, 在 30 min 后晾干, 再以 10 mmol/L 甜菜碱浸泡果实, 在 10 min 后捞出晾干。再将‘塞外红’苹果装入包装盒, 并放入 1-MCP (0.15 g), 利用气调包装机充入 O_2 (5%) / CO_2 (1%) 气体, 在充气后置于 0.5 °C 冷库中贮藏。

在贮藏期间, 相对湿度均为(80±5)%。在贮藏 30、60 d 时定期取样, 以测定果实的品质变化。

1.3.2 全质构分析

参考杜昕美等^[8]的方法,采用质构仪对塞外红苹果进行全质构分析(TPA),使用圆柱形探头,探头直径为37 mm,将起始力设为2 N,检测速度设为180 mm/min,形变量设为10%,测定果肉的质构特性。

1.3.3 呼吸强度测定

参考刘泽松等^[9]的方法,将苹果放入呼吸罐中测量其呼吸强度,在读数稳定后记录时间 t 和读数差值 ΔP ,根据测定结果计算呼吸强度,见式(1)。

$$Q = \frac{\Delta P \times 10^{-9} \times V \times 60}{m \times t} \times \frac{44\,000}{22.4} \times \frac{273}{273 + \theta} \quad (1)$$

式中: Q 为呼吸强度,mg/(kg·h); m 为样品质量,kg; V 为呼吸容体积,L; t 为呼吸时间,min; θ 为呼吸测定仪显示温度,℃。

1.3.4 褐变指数

参考宾宇淇^[10]的方法,使用色差仪记录苹果前后左右4点的 L^* 、 a^* 、 b^* ,按式(2)~(3)计算褐变指数(Brown index) B_I ^[11]。

$$X = (a^* + 1.75L^*) \div (5.645L^* + a^* - 3.012b^*) \quad (2)$$

$$B_I = [100(X - 0.31)] \div 0.172 \quad (3)$$

1.3.5 可溶性固形物含量和可滴定酸含量测定

将苹果磨碎过滤后,取适量汁液,采用数显糖折光仪测定其可溶性固形物含量(Soluble solids content, SSC) ω_{SSC} 。可滴定酸(Titratable acid, TA)含量 ω_{TA} 的测定参考曹建康等^[12]的酸碱滴定法,结果以苹果酸计。

1.3.6 抗坏血酸含量测定

参考汤天瑾等^[13]的方法,称取5 g苹果,加入50 g/L三氯乙酸溶液中研磨,定容摇匀,静置10 min。向1.0 mL提取液中加入1 mL三氯乙酸溶液(50 g/L)、1.0 mL无水乙醇,经混合摇匀后,依次加入磷酸-乙醇溶液、BP-乙醇溶液、三氯化铁-乙醇溶液。之后放入30℃水浴下反应60 min,于534 nm处测定吸光值,根据式(4)计算维生素C的含量 ω_{Vc} (mg/g)。

$$\omega_{Vc} = \frac{V \times m_1}{V_s \times m_2 \times 1000} \quad (4)$$

式中: m_1 为利用标准曲线求得的抗坏血酸质量,μg; V 为样品提取液总体积,mL; V_s 为测定时所用样品提取液体积,mL; m_2 为样品质量,g。

1.3.7 相对电导率和丙二醛含量的测定

参考丁红瑾等^[14]的方法,取5 g苹果,加入20 mL去离子水,煮沸20 min,根据式(5)计算相对电导率(Relative conductivity) σ (%)。

$$\sigma = \frac{(P_1 - P_0)}{(P_2 - P_0)} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_0 为加入超纯水后立即测得的电导率;

P_1 为样品静置10 min后测得的电导率; P_2 为样品煮沸15 min后测得的电导率。

参考高俊凤^[15]的方法测定样品中的MDA含量。在苹果样品中加入100 g/L的三氯乙酸溶液(5.0 mL),研磨后于4℃下离心20 min(10 000g),收集上清液。再将6.7 g/L的硫代巴比妥酸溶液(1.0 mL)加入1.0 mL上清液中,放入沸水中反应20 min,结束后冷却并离心。在450、532、600 nm处测定上清液的吸光度,并根据式(6)计算丙二醛(Malondialdehyde, MDA)的含量 ω_{MDA} (μmol/kg)。

$$\omega_{MDA} = [6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}] \times 5 \quad (6)$$

式中: A_{450} 、 A_{532} 、 A_{600} 分别表示样品在450、532、600 nm处测定的上清液吸光度。

1.4 数据处理

所有实验均进行生物学重复($n=3$),指标测定进行技术重复($n=3$)。实验结果以平均值±标准差的形式表示,单因素方差分析采用Duncan多重比较($P<0.05$ 表示差异显著)。选取贮藏0、30、60 d时测定的各指标,采用Shapiro-Wilk检验进行正态分布分析,根据分析结果,利用Spearman相关分析进行各指标之间的相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果质构特性的影响

苹果在采后易受到细胞壁降解酶的作用,导致其出现软化现象,这会严重影响货架期和商品的价值。由表1可知,在4℃下贮藏时,‘塞外红’苹果硬度的下降速度最快。在贮藏60 d后,苹果的硬度降至(171.0±1.6)N。其次,在0.5℃下贮藏60 d后果实的硬度下降了7.0%,这可能是因0.5℃是‘塞外红’苹果较适宜的贮藏温度,在此条件下苹果的代谢速率较慢。气调包装可以显著延缓果实硬度的下降速度($P<0.05$),在贮藏60 d后,果实的硬度仅下降了2.3%,再配合使用保鲜剂,果实的硬度在贮藏60 d后仅下降了2%。

从表1可以看出,在4℃下贮藏,果实的黏附性下降得最快。使用保鲜剂后果实黏附性的下降速度最慢,优于单独的气调包装保鲜。在使用保鲜剂后,果实内聚性的下降速度也较慢,保持了良好的果实完整性。在贮藏60 d后,4℃处理组果实的弹性下降了10%。在使用保鲜剂后,果实的弹性仅下降了5%,而其他2组果实的弹性差异不显著($P>0.05$)。施用保鲜剂后贮藏30 d,果实的咀嚼性显著高于其他处理组果实($P<0.05$)。通过对‘塞外红’苹果进行全质构分析发现,相较于4℃,在0.5℃下贮藏,‘塞外红’苹果的质构特性更佳,可见0.5℃是较适宜的贮

表 1 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果质构特性的影响
Tab.1 Effect of different storage conditions on the texture properties of 'Saiwaihong' apples

贮藏时间/d	贮藏条件	硬度/N	黏附性/kJ	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
0	0.5 °C	189.0±3.2 ^a	38.0±1.8 ^a	0.72±0.04 ^a	3.67±0.13 ^a	135.4±8.0 ^a	496.5±46.9 ^a
	4 °C	189.0±3.2 ^a	38.0±1.8 ^a	0.72±0.04 ^a	3.67±0.13 ^a	135.4±8.0 ^a	496.5±46.9 ^a
	0.5 °C/气调	189.0±3.2 ^a	38.0±1.8 ^a	0.72±0.04 ^a	3.67±0.13 ^a	135.4±8.0 ^a	496.5±46.9 ^a
	0.5 °C/气调/保鲜剂	189.0±3.2 ^a	38.0±1.8 ^a	0.72±0.04 ^a	3.67±0.13 ^a	135.4±8.0 ^a	496.5±46.9 ^a
30	0.5 °C	176.4±4.0 ^b	32.0±3.6 ^a	0.63±0.06 ^a	3.49±0.04 ^{ab}	110.6±10.2 ^a	385.8±35.4 ^{ab}
	4 °C	177.5±5.6 ^b	34.0±2.8 ^a	0.63±0.03 ^a	3.34±0.11 ^b	111.8±6.4 ^a	373.4±31.1 ^b
	0.5 °C/气调	184.5±0.7 ^a	34.0±2.2 ^a	0.64±0.04 ^a	3.49±0.04 ^{ab}	118.1±6.1 ^a	411.8±16.9 ^{ab}
	0.5 °C/气调/保鲜剂	185.6±0.3 ^a	37.0±0.8 ^a	0.67±0.04 ^a	3.56±0.14 ^a	125.0±6.9 ^a	444.9±35.6 ^a
60	0.5 °C	175.7±1.1 ^b	31.0±1.6 ^b	0.57±0.02 ^{ab}	3.40±0.07 ^{ab}	100.7±4.4 ^{ab}	342.8±17.9 ^a
	4 °C	171.0±1.6 ^c	31.0±2.3 ^b	0.54±0.01 ^b	3.29±0.01 ^b	92.3±2.2 ^b	303.7±7.1 ^{ab}
	0.5 °C/气调	181.0±3.1 ^a	34.0±4.5 ^{ab}	0.59±0.04 ^{ab}	3.42±0.04 ^a	106.8±9.5 ^a	365.3±36.5 ^a
	0.5 °C/气调/保鲜剂	185.0±2.1 ^a	37.0±1.1 ^a	0.61±0.03 ^a	3.47±0.09 ^a	113.5±5.6 ^a	394.1±14.9 ^a

注：相同字母表示同贮藏期内不同贮藏条件之间差异不显著（ $P>0.05$ ）

藏温度。气调包装可以影响苹果的呼吸作用，抑制代谢，提高苹果的品质，相较于单独的温度和气调包装处理，使用保鲜剂后能更有效地减少乙烯的生成，明显抑制‘塞外红’苹果质构特性的劣化进程。

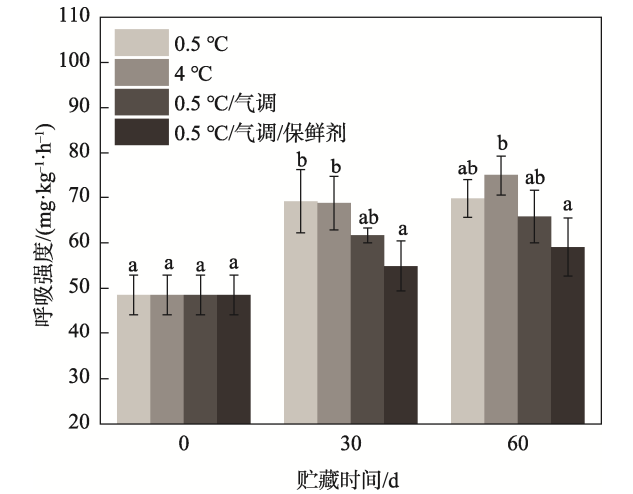
2.2 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果果实呼吸强度的影响

苹果属于呼吸跃变型水果，在贮藏期间内‘塞外红’苹果的呼吸强度呈现上升趋势，如图 1 所示。在贮藏 30 d 时，气调包装可以抑制果实呼吸强度的上升，使用保鲜剂后的抑制作用更加显著（ $P<0.05$ ）。贮藏结束时，在 4 °C 下贮藏的‘塞外红’苹果出现明显的腐败现象，其呼吸强度最高（ $P<0.05$ ）。相比之下，在 0.5 °C 和气调包装下贮藏时苹果的呼吸强度较低。使用保鲜剂后可以显著降低‘塞外红’苹果的呼吸强度（ $P<0.05$ ）。在贮藏前期，气调包装通过调整苹果贮藏环境中的气体比例，可以抑制苹果的呼吸作用。贮藏后期，在 0.5 °C 下使用气调包装和未使用气调包装的苹果的呼吸强度无显著差异（ $P>0.05$ ）。这可能是因贮藏后期苹果加速衰老，呼吸强度提高，气调包装环境中的气体比例失调。

2.3 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果外观和 BI 值的影响

苹果中的酚类物质在酶和氧气作用下会形成醌，并进一步氧化聚合，从而发生褐变反应^[16]。褐变程度反映了苹果的品质，是影响其货架期的主要原因之一。‘塞外红’苹果在贮藏期内的外观变化情况如图 2 所示。在贮藏 30 d 时，苹果表皮开始发黄，其中在

4 °C 贮藏条件下苹果变色较明显，出现了大面积黄化现象，同时果肉边缘位置出现了少量褐变现象。0.5 °C 组苹果与 0.5 °C/气调包装组苹果的外观差异不明显，苹果表面均出现了小面积发黄现象，果肉未发生明显变化。在使用保鲜剂后，维持了苹果较好的外观品质。在贮藏 60 d 时，0.5 °C 和 4 °C 处理条件下的苹果发生了明显褐变现象，其中 4 °C 下贮藏时果肉出现了明显腐败现象。在气调包装下，‘塞外红’苹果的品质基本不变，果皮和果肉仅出现少量褐变现象，在使用保鲜剂后，苹果维持了相对较好的品质，未出现褐变现象。



注：相同字母表示同贮藏期内不同处理之间差异不显著（ $P>0.05$ ），下同

图 1 不同贮藏条件对塞外红苹果呼吸强度的影响
Fig.1 Effects of different storage conditions on respiratory intensity of 'Saiwaihong' apple



图2 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果外观的影响

Fig.2 Effects of different storage conditions on the appearance of 'Saiwaihong' apple

‘塞外红’苹果在贮藏期间的表皮 BI 值如图 3 所示, BI 值随着贮藏时间的延长而增大。在 4 °C 下贮藏 60 d 后, ‘塞外红’苹果的褐变现象显著, BI 值显著增大 ($P<0.05$)。使用气调包装可以延缓褐变的发生, 在 0.5 °C 下贮藏 60 d 后, 采用气调包装可以将苹果的 BI 值降低 11%。相较于气调包装, 采用保鲜剂可以将苹果的 BI 值再降低 12%, 表明保鲜剂可有效抑制褐变的发生。使用保鲜剂后, 1-MCP 与乙烯受体作用, 延缓了果实的衰老。此外, 钙处理也可减轻苹果在贮藏过程中的褐变现象。钙能够降低苹果细胞膜的渗透性, 减少乙烯的生成, 抑制呼吸作用, 增大果肉的硬度, 并延缓果实的衰老和褐变^[17]。甜菜碱可以调节细胞的渗透压^[18], 抑制低温冷害的发生, 从而减小组织褐变的风险。

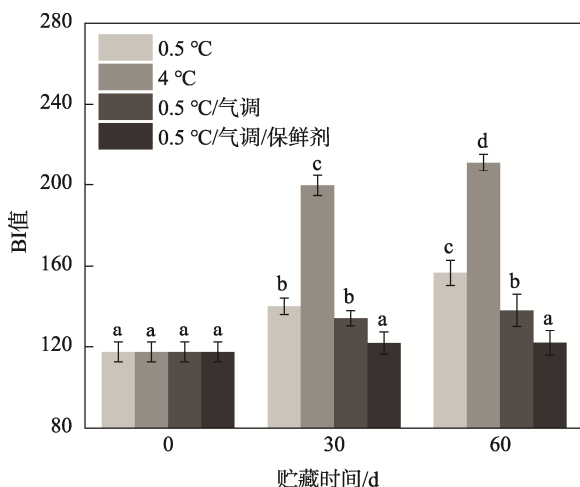


图3 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 BI 值的影响

Fig.3 Effect of different storage conditions on BI of 'Saiwaihong' apple

2.4 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果的 SSC 含量和 TA 含量的影响

苹果的风味变化受到 SSC 含量和 TA 含量的影响较大, 通过评价 SSC 和 TA 含量可以反映苹果质量的好坏。从图 4 可知, 在贮藏过程中, ‘塞外红’苹果的 SSC 含量呈先上升后下降的趋势, 酸度呈下降趋势。在贮藏期间, 不同处理方式对 ‘塞外红’苹果 SSC 和 TA 含量的影响无显著差异 ($P>0.05$)。‘塞外红’苹果 SSC 的上升可能是因采摘时苹果未完全成熟, 体内淀粉发生了转化, 后期下降是因为呼吸作用消耗了体内的碳水化合物^[6]。使用保鲜剂后, ‘塞外红’苹果的 SSC 和 TA 含量维持在较高水平, 说明保鲜剂可以延缓 SSC 和 TA 含量的下降, 维持果实较好的风味。

2.5 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果果实抗坏血酸含量的影响

抗坏血酸是一种抗氧化剂, 可以清除自由基, 延缓果实衰老, 因此它是评价果蔬营养品质的重要指标。从图 5 可知, 在贮藏 60 d 后, 在 4 °C 和 0.5 °C 的贮藏条件下果实的抗坏血酸含量无显著差异 ($P>0.05$)。在气调包装下贮藏 60 d 后, 果实的抗坏血酸含量下降了 50.7%, 比不使用气调包装时提高了 10%, 表明气调可以延缓 ‘塞外红’苹果的氧化变质进程。此外, 相较于其他处理组, 使用保鲜剂可以显著增加 ‘塞外红’苹果的 Vc 含量 ($P<0.05$)。在贮藏结束时, 果实的 Vc 含量为 $(0.085 \pm 0.4)\text{mg/g}$ 。在气调包装条件下, 低氧环境可以使 ‘塞外红’苹果维持较低的呼吸强度, 从而降低其抗坏血酸的降解速率^[19]。钙离子处理也可以抑制抗坏血酸的下降。例如, 裴健翔^[20]研究发现, 对寒富苹果进行钙处理后可以显著提升其 Vc 含量。

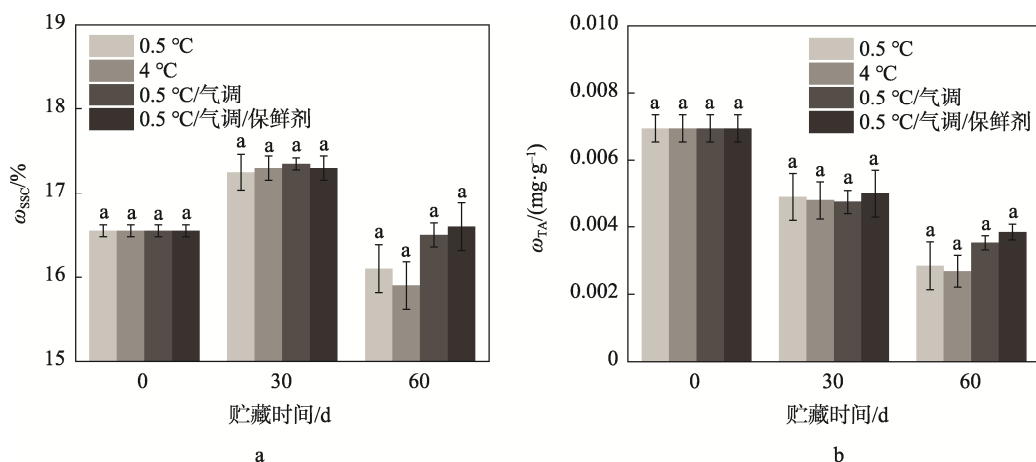


图 4 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 SSC (a) 和 TA 含量 (b) 的影响

Fig.4 Effects of different storage conditions on SSC (a) and TA content (b) of 'Saiwaihong' apple

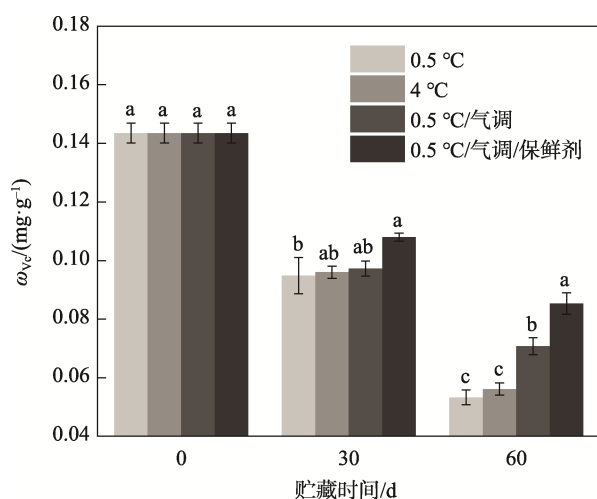


图 5 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果抗坏血酸含量的影响

Fig.5 Effects of different storage conditions on ascorbic acid content of 'Saiwaihong' apple

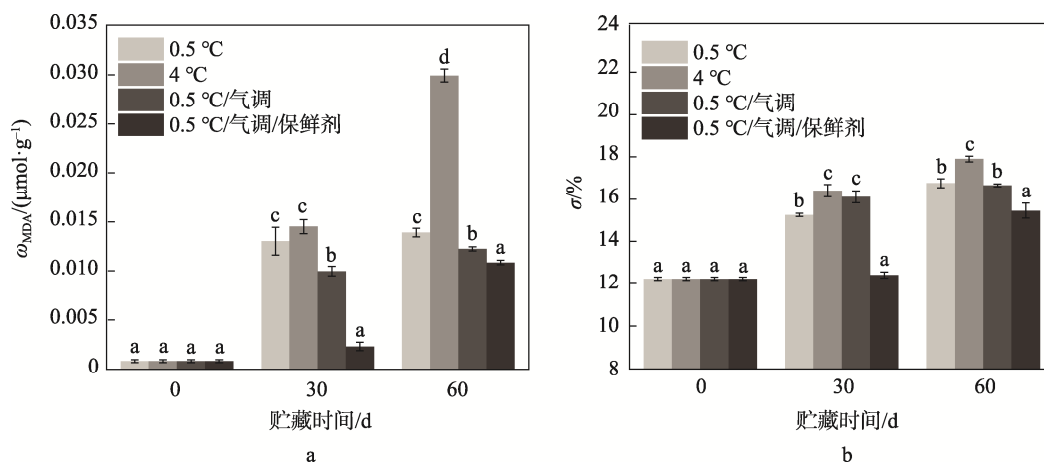


图 6 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 MDA 含量 (a) 及相对电导率 (b) 的影响

Fig.6 Effects of different storage conditions on MDA content (a) and relative electrical conductivity (b) of 'Saiwaihong' apple

2.6 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 MDA 含量和相对电导率的影响

MDA 含量是反映植物细胞膜质过氧化程度的指标。如果 MDA 含量高, 则说明植物细胞膜受到的损伤较严重^[21], 其相对电导率会上升。如图 6 所示, 当贮藏 30 d 时, 采用气调包装和保鲜剂处理后, 苹果的 MDA 含量缓慢上升。使用保鲜剂后, 苹果的 MDA 含量的增长速度明显减缓 ($P<0.05$)。在贮藏 60 d 时, 4 °C 下贮藏的‘塞外红’苹果的 MDA 含量和相对电导率显著升高 ($P<0.05$), 出现了明显的腐败现象。在使用保鲜剂后, 苹果的 MDA 含量和相对电导率的上升速度显著降低 ($P<0.05$)。这可能是因钙离子可以与细胞壁中的果胶类物质结合, 形成果胶钙, 从而使细胞壁更加坚固。细胞内的钙离子可以促进磷脂双分子层与蛋白质的结合, 提高细胞的渗透性^[19], 从而稳定细胞膜, 增加硬度, 抑制细胞破裂所致的相对电导率的上升。

2.7 相关性分析

为了了解不同贮藏条件对‘塞外红’苹果贮藏效果的影响,对贮藏期内苹果的贮藏理化指标相关性进行了分析,结果如图7所示。在此次研究条件下,‘塞外红’苹果的硬度与MDA含量、相对电导率、呼吸强度呈显著负相关($P<0.05$),相关系数分别为-0.868、-0.670、-0.956,呼吸强度与MDA含量和相对电导率呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.901、0.797。呼吸作用越强,苹果的新陈代谢速率越快,细胞会加速衰老。MDA是衰老过程中细胞过氧化作用的最终产物,细胞受到的伤害越大,其含量上升得越快。在细胞衰老破裂时,胞内的电解质释放,相对电导率升高,导致苹果的质构特性下降^[22]。此外,在低温下贮藏时,‘塞外红’苹果的BI值与MDA含量、相对电导率、呼吸强度呈显著正相关($P<0.05$),相关系数分别为0.890、0.692、0.934,说明采后‘塞外红’苹果的褐变程度越大,MDA含量、相对电导率越高,呼吸作用越强。

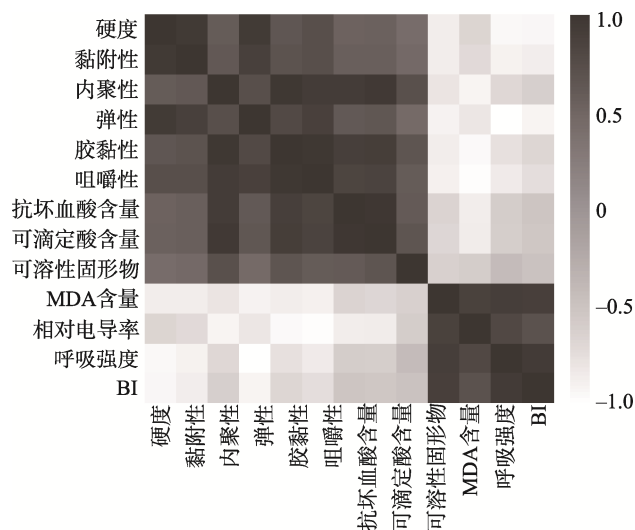


图7 不同贮藏条件下采后‘塞外红’苹果各指标之间的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of various indexes of postharvest 'Saiwaihong' apples under different storage conditions

3 结语

以‘塞外红’苹果为实验材料,研究了0.5、4℃2种贮藏条件,以及气调包装和外源复合保鲜剂处理对果实贮藏品质的影响。与4℃相比,在0.5℃下贮藏可以有效抑制‘塞外红’苹果采后品质的下降,在抑制BI值、MDA含量及相对电导率的上升方面尤为显著。在0.5℃下使用气调包装贮藏60d后与未使用气调包装相比,苹果的硬度和抗坏血酸含量分别提升了3.4%、32%,MDA含量和BI值分别降低了12.1%、

11.5%。使用1-MCP、CaCl₂、甜菜碱复合保鲜剂对‘塞外红’果实品质下降的抑制作用更加显著,在贮藏过程中未出现褐变现象,可有效保持‘塞外红’苹果品质至60d。

参考文献:

- [1] 刘颖超,李彤.通辽市塞外红苹果产业发展现状及对策[J].内蒙古林业,2022(8):31-32.
LIU Ying-chao, LI Tong. Development Status and Countermeasures of Red Apple Industry in Tongliao City beyond the Great Wall[J]. Inner Mongolia Forestry, 2022(8): 31-32.
- [2] 王志华,王文辉,姜云斌,等.不同采收期对苹果常温贮藏品质和衰老的影响[J].农业工程学报,2020,36(7):300-306.
WANG Zhi-hua, WANG Wen-hui, JIANG Yun-bin, et al. Effects of Different Harvesting Periods on the Storage Quality and Senescence of Apple at Room Temperature[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(7): 300-306.
- [3] FANG Yu-jie, WAKISAKA M. A Review on the Modified Atmosphere Preservation of Fruits and Vegetables with Cutting-Edge Technologies[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 992.
- [4] 贾朝爽,包熬民,王志华,等.1-MCP对‘塞外红’苹果贮藏品质的影响[J].包装工程,2019,40(19):57-65.
JIA Chao-shuang, BAO Ao-min, WANG Zhi-hua, et al. Effect of 1-MCP Treatment on Storage Quality of 'Saiwaihong' Apples[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(19): 57-65.
- [5] DIAS C, RIBEIRO T, RODRIGUES A C, et al. Improving the Ripening Process after 1-MCP Application: Implications and Strategies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 113: 382-396.
- [6] 李灿婴,侯佳宝,张浪,等.外源甜菜碱处理对南果梨果实贮藏品质的影响[J].包装与食品机械,2021,39(4):31-37.
LI Can-ying, HOU Jia-bao, ZHANG Lang, et al. Effect of Exogenous Glycine Betaine Treatment on Storage Quality of Nanguo Pears[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(4): 31-37.
- [7] 潘琪,武建强,贾慧,等.外源钙对低温胁迫下梨生理特性的影响[J].山西农业科学,2022,50(2):148-154.
PAN Qi, WU Jian-qiang, JIA Hui, et al. Effect of Exogenous Calcium on Physiological Characteristics of Pear under Low Temperature Stress[J]. Journal of Shan-

- xi Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 148-154.
- [8] 杜昕美, 赵前程, 吕可, 等. 五种苹果质构测定方法的比较及与感官评价的相关性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 240-246.
- DU Xin-mei, ZHAO Qian-cheng, LYU Ke, et al. Comparison of Texture Determination Method and Correlation Analysis with Sensory Evaluation of 5 Kinds of Apple[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 240-246.
- [9] 刘泽松, 史君彦, 左进华, 等. UV-C 和 LED 红光复合处理对西兰花贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 238-245.
- LIU Ze-song, SHI Jun-yan, ZUO Jin-hua, et al. Effect of Combined UV-C and Red Light Emitting Diode Irradiation on Storage Quality of Broccoli[J]. Food Science, 2020, 41(17): 238-245.
- [10] 宾宇淇, 石立佳, 谢佳妮, 等. 鲜切前后热空气处理对‘红富士’苹果的保鲜效果[J/OL]. 食品科学, 2023: 1-10.
- BIN Yv-qi, SHI Li-jia, XIE Jia-ni, et al. Effects of hot air treatment before and after fresh-cutting on the preservation of 'Red Fuji' apples[J/OL]. Food Science, 2023: 1-10.
- [11] CHEN Chen, HU Wen-zhong, HE Yu-bo, et al. Effect of Citric Acid Combined with UV-C on the Quality of Fresh-Cut Apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 111: 126-131.
- [12] 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: 32-34.
- CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 32-34.
- [13] 汤天瑾, 王晓彤, 齐杰, 等. 包装膜透气性对双孢蘑菇保鲜效果及呼吸代谢的影响[J/OL]. 食品科学, 2023: 1-15.
- TANG Tian-jin, WANG Xiao-tong, QI Jie, et al. Effect of Permeability of Packaging Film on Preserving Effect and Respiratory Metabolism of Agaricus bisporus[J/OL]. Food Science, 2023: 1-15.
- [14] 丁红瑾, 陈彦云, 曹君迈, 等. 外源钙对贮藏期马铃薯细胞膜及过氧化物酶的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 103-106.
- DING Hong-jin, CHEN Yan-yun, CAO Jun-mai, et al. The Effect of Exogenous Calcium on Cell Membrane and POD of Potato in the Storage Period[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(14): 103-106.
- [15] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 210-211.
- GAO Jun-feng. Experimental Guidance for Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 210-211.
- [16] WANG Hui, ZHANG Shu-hui, FU Qing-qing, et al. Transcriptomic and Metabolomic Analysis Reveals a Protein Module Involved in Preharvest Apple Peel Browning[J]. Plant Physiology, 2023, 192(3): 2102-2122.
- [17] LI Jia-xin, ZHOU Qian, ZHOU Xin, et al. Calcium Treatment Alleviates Pericarp Browning of 'Nanguo' Pears by Regulating the GABA Shunt after Cold Storage[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 580986.
- [18] 王莉. 甜菜碱和热水处理调控桃果实冷害机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020: 10-13.
- WANG Li. Mechanism of Glycine Betaine and Hot Water Treatments on Regulation of Chilling Injury in Peach Fruit[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020: 10-13.
- [19] 张佳楠, 董成虎, 王志伟, 等. 被动气调包装对采后甜樱桃活性氧清除的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 181-186.
- ZHANG Jia-nan, DONG Cheng-hu, WANG Zhi-wei, et al. Effect of Passive Modified Atmosphere Packaging on Scavenging Active Oxygen in Postharvest Sweet Cherry[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 181-186.
- [20] 裴健翔. 外源钙对‘寒富’苹果果实钙代谢及果实品质影响的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019: 9-14.
- PEI Jian-xiang. Effects of Exogenous Calcium on Calcium Metabolism and Fruit Quality of 'Hanfu' Apple[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019: 9-14.
- [21] LU Fei, XU Fang-xu, LI Zhe, et al. Effect of Vibration on Storage Quality and Ethylene Biosynthesis-Related Enzyme Genes Expression in Harvested Apple Fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 1-6.
- [22] 姚玉涛, 张国新, 丁守鹏, 等. 盐胁迫对草莓苗期生长及氧化还原系统的影响[J]. 北方园艺, 2021(17): 22-29.
- YAO Yu-tao, ZHANG Guo-xin, DING Shou-peng, et al. Effects of Salt Stress on Strawberry Seedling Growth and Antioxidant System[J]. Northern Horticulture, 2021(17): 22-29.