



包装工程

Packaging Engineering

ISSN 1001-3563, CN 50-1094/TB

《包装工程》网络首发论文

题目：气调包装联合保鲜剂对‘塞外红’苹果中短期贮藏的影响
作者：魏智成，任兆琳，田蜜，李娜，朱文立，孙雨，吴昊，朱俊向
收稿日期：2023-05-30
网络首发日期：2023-08-18
引用格式：魏智成，任兆琳，田蜜，李娜，朱文立，孙雨，吴昊，朱俊向. 气调包装联合保鲜剂对‘塞外红’苹果中短期贮藏的影响[J/OL]. 包装工程.
<https://link.cnki.net/urlid/50.1094.TB.20230818.1310.008>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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

(1.青岛农业大学 食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109;

2. 青岛特种食品研究院, 山东 青岛 266109;

3. 山东省特种食品技术创新中心, 山东 青岛 266109;

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. 奈曼旗乡村振兴局, 内蒙古 通辽 028300;

6. 中共通辽市委党校, 内蒙古 通辽 028006)

摘要: 目的 探究不同储藏温度、气调包装及保鲜剂对‘塞外红’苹果储藏品质的影响。**方法** 采用冷藏、气调包装($O_2/CO_2=5:1$)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天的贮藏,并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、可溶性固形物、抗坏血酸、相对电导率以及丙二醛含量的变化。**结果** 在 $0.5^\circ C$ 下,采用气调包装结合保鲜剂处理能够有效地抑制‘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 $0.5^\circ C$ 冷藏处理相比,经过60天贮藏,处理后的苹果褐变指数、丙二醛含量和相对电导率分别降低了42%、66%和14%。同时,该处理方式还延缓了‘塞外红’苹果果实质构特性的下降,降低果实的呼吸强度,并保持较高的抗坏血酸、可溶性固形物和可滴定酸含量。**结论** $0.5^\circ C$ 冷藏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损失,延缓苹果品质的恶化。

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

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

WEI Zhi-cheng^{1,2}, REN Zhao-lin⁵, TIAN Mi⁶, LI Na¹, ZHU Wen-li¹, SUN Yu¹, WU Hao^{1,2,3,4}, ZHU Jun-xiang^{1,2,3,4*}

(1.College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province, Qingdao 266109, China;

2.Qingdao Special Food Research Institute, Qingdao, Shandong Province, Qingdao 266109, China;

3.Shandong Technology Innovation Center of Special Food, Qingdao, Shandong Province, Qingdao 266109, China;

4.Key Laboratory of Special Food Processing (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture Rural Affairs, Qingdao, Shandong Province, Qingdao 266109, China;

5.Rural Revitalization Administration of Naiman Banner, Tongliao, Inner Mongolia Autonomous Region, Tongliao 028300, China;

6.Party School of the CPC Tongliao Municipal Committee, Tongliao, Inner Mongolia Autonomous Region, Tongliao 028006, China)

Abstract: Objective To explore the effects of different storage temperatures, modified atmosphere packaging, and preservatives on the storage quality of 'Saiwaihong' apples. Method Freshly postharvest 'Saiwaihong' apples were subjected to storage for 60 d using refrigeration, modified atmosphere packaging ($O_2/CO_2=5:1$), and treatment with a complex preservatives (methyl cyclopropene, $CaCl_2$, betaine). During the storage period, changes in the texture properties,

收稿日期: 2023-05-30

基金项目: 国家自然科学基金专项项目(M224200002); 山东省自然科学基金(ZR2020MC213、ZR2020QC242); 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)

作者简介: 魏智成(1999—), 男, 硕士, 主攻农产品包装贮藏。

通信作者: 朱俊向(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品贮藏与加工。

respiration rate, appearance quality, browning index, titratable acidity, soluble solids, ascorbic acid, relative conductivity, and malondialdehyde content of the apples were analyzed. Results 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 subjected 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. Conclusion 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.

Keywords: '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]。然而, 由于‘塞外红’苹果生长发育期短, 果皮薄, 不耐贮运, 采后自然温度条件下存放 6~8 天就发生褪色变软的现象^[2]。研究表明, ‘塞外红’苹果对低温和 CO₂ 敏感。因此, 贮藏时温度和气体成分配置不当, 可能会导致果肉绵软、组织褐变以及口感下降等品质劣变问题。因此, 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方法, 其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过程。这种方法已广泛应用于新鲜果蔬的采后保鲜^[3]。此外, 保鲜剂 1-甲基环丙烯 (1-Methylcyclopropene, 1-MCP) 也是一种常用的保鲜手段, 它通过与乙烯受体不可逆地结合, 减少乙烯的生成, 从而延缓果实成熟和衰老^[4]。这种方法在香蕉、梨和番茄中也得到广泛应用^[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]。因此, 本研究以内蒙古通辽产的塞外红苹果为试材, 探究气调包装联合保鲜剂 (钙离子、甜菜碱以及 1-MCP) 对低温下塞外红苹果中短期贮藏的影响, 旨在为塞外红苹果贮藏品质研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

选用发育期在 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。苹果采摘后, 立即在产地预冷包装, 于 3 天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’苹果单果重 54.6 ± 13.2 g, 果形指数 1.06 ± 0.02, 淀粉染色级数 4.2 ± 0.7。

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; CaCl₂, 江苏科伦多食品配料有限公司; 其他分析纯试剂, 均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

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 4 组处理, 每组 3 kg。4 组处理分别为 0.5℃、4℃、0.5℃/气调、0.5℃/气调/保鲜剂。其具体流程为:

1) 0.5℃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 N₂、O₂ 和 CO₂, 充气后置于 0.5℃冷库贮藏。

2) 4℃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 N₂、O₂ 和 CO₂, 充气后置于 4℃冷库贮藏。

3) 0.5℃/气调组: 将‘塞外红’苹果放入保鲜盒中, 利用气调包装机充入 O₂ (5%) /CO₂ (1%) 气体, 充气后置于 0.5℃冷库贮藏。

4) 0.5℃/气调/保鲜剂组: 以 2% (w/v) CaCl₂ 浸泡‘塞外红’苹果, 30 min 后晾干, 再以 10 mmol/L 甜菜碱浸泡果实, 10 min 后捞出晾干。再将‘塞外红’苹果装入包装盒, 并装入 1-MCP (0.15g), 利用气调包装机充入 O₂ (5%) /CO₂ (1%) 气体, 充气后置于 0.5℃冷库贮藏。

贮藏期间相对湿度均为 80% ± 5%。贮藏 30 d、60 d 时定期取样, 测定品质变化。

1.3.2 全质构分析 (TPA)

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

1.3.3 呼吸强度测定

参考刘泽松等^[9], 将苹果放入呼吸罐测量, 读数稳定之后记录时间 t 与读数差值 ΔP , 根据测定结果计算呼吸强度 Q [mg/(kg·h)]。

呼吸强度计算公式如 (1) 所示:

$$Q = \frac{\Delta P \times 10^{-9} \times V \times 60}{W \times t} \times \frac{44000}{22.4} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: W 为样品质量 (kg); V 为呼吸容体积 (L); t 为呼吸时间 (min); T 为呼吸测定仪显示温度 (℃)。

1.3.4 褐变指数 (Brown change index, BI)

参考宾宇淇^[10], 使用色差仪记录苹果前后左右四点 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 按公式 (2) 和 (3) 计算褐变指数^[11]:

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

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

1.3.5 可溶性固形物含量 (soluble solids content, SSC) 和可滴定酸 (titratable acid, TA) 含量测定

苹果磨碎过滤后取适量汁液, 在数显糖分析光仪下测定 SSC; TA 含量参考曹建康等^[12], 用酸碱滴定法测定, 结果以苹果酸换算。

1.3.6 抗坏血酸含量测定

参考汤天瑾等^[13], 称取 5 g 苹果, 加入 50 g/L 三氯乙酸溶液研磨, 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), 无水乙醇 1.0 mL, 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, 根据公式 (4) 计算 VC 含量 (mg/100g) :

$$\text{VC含量} = \frac{V \times M}{V_s \times m \times 1000} \times 100 \quad (4)$$

式中: M 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 为样品质量 (g)

1.3.7 相对电导率和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量的测定:

参考丁红瑾等^[14], 取 5 g 苹果, 加 20 mL 去离子水, 煮沸 20 min, 根据公式 (5) 计算:

$$\text{相对电导率 (\%)} = \frac{(P_1 - P_0)}{(P_2 - P_0)} \times 100\% \quad (5)$$

式中: P_0 表示加入超纯水后立即测得的电导率, P_1 表示样品静置 10 min 后测得的电导率, P_2 表示样品煮沸 15 min 后测得的电导率。

参考高俊凤^[15]测定样品中 MDA 含量。在苹果样品中加入 10%三氯乙酸溶液 (5.0 mL), 研磨后于 4℃下离心 20 min (10000 $\times g$), 收集上清液。再将 0.67%硫代巴比妥酸溶液 (1.0 mL) 加入到 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 nm、532 nm 和 600 nm 处测定上清液吸光度, 并根据公式 (6) 计算 MDA 含量:

$$\text{MDA}(\mu\text{mol/kg}) = [6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450}] \times 5 \quad (6)$$

1.4 数据处理

所有实验均进行生物学重复 ($n=3$ 次), 指标测定也进行技术重复 ($n=3$ 次)。实验结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示, 单因素方差分析通过 Duncan 多重比较进行 ($P < 0.05$ 表示差异显著)。选取贮藏 0 天、30 天、60 天测定的各指标数据, 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出现软化现象, 严重影响其货架期和商品价值。根据表 1 数据, 4℃下‘塞外红’苹果的硬度下降速度最快。经过 60 d 贮藏, 硬度下降到 171.0 ± 1.6 N。次之是 0.5℃下贮藏, 60 d 贮藏后硬度下降了 7.0%, 可能是由于 0.5℃是‘塞外红’苹果较适宜的贮藏温度, 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下降的速度 ($P < 0.05$), 贮藏 60 d 后, 硬度仅下降了 2.3%, 再配合使用保鲜剂, 果实硬度在 60 d 后仅下降 2%。

从表 1 可以看出, 在 4℃条件下, 粘附性下降最快。使用保鲜剂的下降速度最慢, 优于单独的气调包装保鲜。在使用保鲜剂后, 内聚性下降速度也较慢, 保持了良好的果实完整性。贮藏 60 d 后, 在 4℃处理组中, 弹性下降了 10%。在使用保鲜剂后, 弹性仅下降了 5%, 而其他两组弹性下降的差异不显著 ($P > 0.05$)。保鲜剂施用下贮藏 30 d 后, 咀嚼性显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。通过对‘塞外红’苹果的全质构分析, 可以发现相比于 4℃, 在 0.5℃下, ‘塞外红’苹果的质构特性更佳, 因此 0.5℃是其较适宜的贮藏温度。气调包装可以影响苹果呼吸作用, 抑制代谢, 提高苹果的品质, 但相比于单独的温度和气调包装处理, 使用保鲜剂能更有效减少乙烯生成, 可以明显抑制‘塞外红’苹果质构特性的劣化。

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)	粘附性 (kJ)	内聚性	弹性 (mm)	胶粘性 (N)	咀嚼性 (mJ)
0	0.5℃	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℃	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℃/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℃/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℃	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℃	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℃/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℃/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℃	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℃	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℃/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℃/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 ($P > 0.05$)

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，如图 1 所示，在贮藏期间内，‘塞外红’苹果的呼吸强度呈现上升趋势。贮藏 30 d 时，气调包装可以抑制呼吸强度上升，使用保鲜剂后抑制作用更加显著 ($P < 0.05$)。贮藏结束时，4℃下‘塞外红’苹果出现明显腐败现象，呼吸强度最高 ($P < 0.05$)。相比之下，0.5℃和气调包装下苹果的呼吸强度相对较低。使用保鲜剂后可以显著降低‘塞外红’苹果呼吸强度 ($P < 0.05$)。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。在贮藏后期，0.5℃温度下使用气调包装和未使用气调包装的苹果呼吸强度没有出现显著差异 ($P > 0.05$)，这可能是由于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。

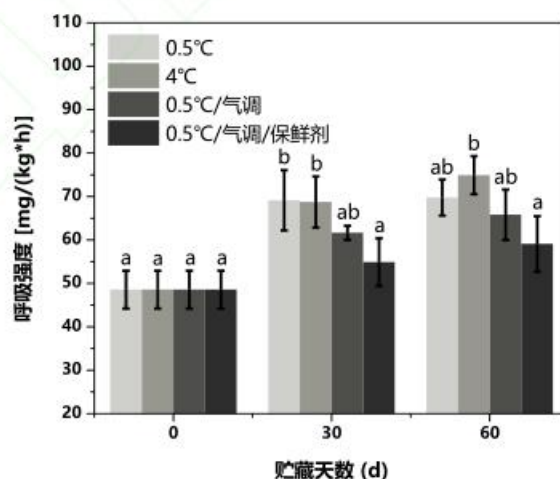


图 1 不同贮藏条件对塞外红苹果呼吸强度的影响

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

Fig.1 Effects of different storage conditions on respiratory intensity of ‘Saiwaihong’ apple

Note: the same letter indicates that non-significant difference between different storage conditions within the same period ($P > 0.05$). The same as below.

2.3 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果果实外观和 BI 的影响

苹果中的酚类物质在酶和氧气作用下形成醌，进一步氧化聚合，发生褐变反应^[16]。苹果的褐变程度反映了苹果的品质，是影响货架期的主要原因之一。‘塞外红’苹果贮藏期内外观变化如图 2 所示，贮藏 30 d 时，苹果表皮开始发黄，其中 4℃条件下苹果变色明显，出现大面积黄化，同时果肉边缘位置出现少量褐变现象。0.5℃和此温度下使用气调包装的苹果外观差异不明显，苹果表面均出现小面积发黄，果肉未出现明显变化。使用保鲜剂后苹果可维持较好外观品质。贮藏 60 d 时，仅温度处理下的苹果发生了明显褐变现象，其中 4℃下的果肉出现了明显腐败。而气调包装下的‘塞外红’苹果品质基本维持不变，果皮及果肉仅出现少量褐变，使用保鲜剂后，苹果维持了相对较好的品质，没有出现褐变现象。

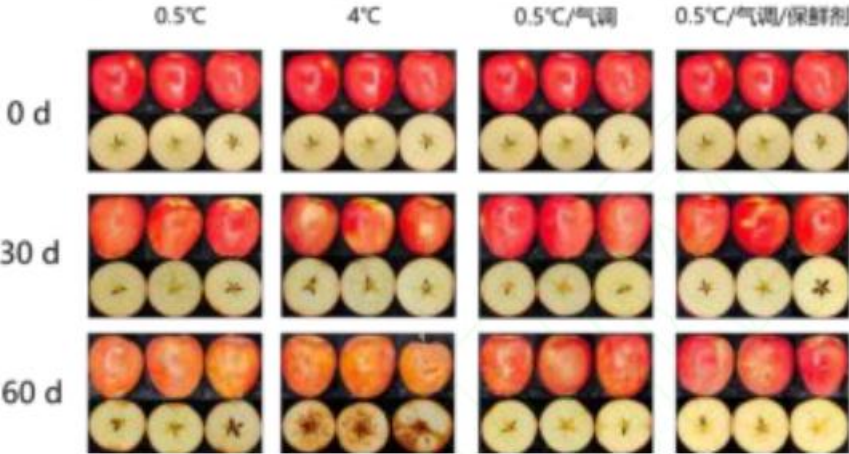


图 2 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果外观的影响

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

‘塞外红’苹果贮藏期内表皮 BI 如图 3 所示，BI 值随着贮藏时间延长而增加，在 4℃条件下，‘塞外红’苹果贮藏 60 d 后，褐变显著，BI 显著增加 ($P < 0.05$)。使用气调包装可以延缓褐变发生，在 0.5℃下贮藏 60 d 后，气调包装可以将苹果 BI 降低 11%。相比气调包装，保鲜剂可以再降低 12%，表明保鲜剂可有效抑制褐变发生。使用保鲜剂后，1-MCP 与乙烯受体作用，延缓果实衰老。此外，钙处理也可以减少苹果在贮藏过程中的褐变。钙能够降低苹果细胞膜的渗透性，减少乙烯的生成，抑制呼吸作用的水平，增加果肉的硬度，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，从而减少组织褐变的风险。

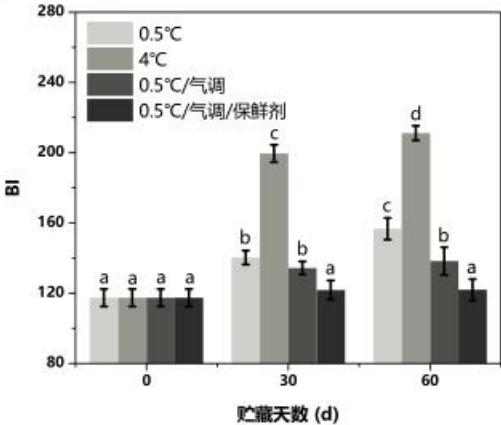


图 3 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 BI 的影响

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

2.4 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果果实 SSC 和 TA 含量的影响

苹果的风味变化受 SSC 和 TA 含量的影响较大，通过评价 SSC 和 TA 含量可以反映出苹果质量的好坏。从图 4 可知，在贮藏过程中，‘塞外红’苹果 SSC 含量呈先上升后下降的趋势，而酸度则呈下降趋势。贮藏期间，不同处理方式对‘塞外红’苹果 SSC 和 TA 含量的影响没有显著差异 ($P > 0.05$)。‘塞外红’苹果 SSC 上升可能是因为采摘时苹果并未完全成熟，体内淀粉发生转化，而后期下降是因为呼吸作用消耗了体内碳水化合物^[6]。使用保鲜剂后，‘塞外红’苹果的 SSC 和 TA 维持了较高水平，说明保鲜剂可以延缓 SSC 和 TA 含量下降，维持较好风味。

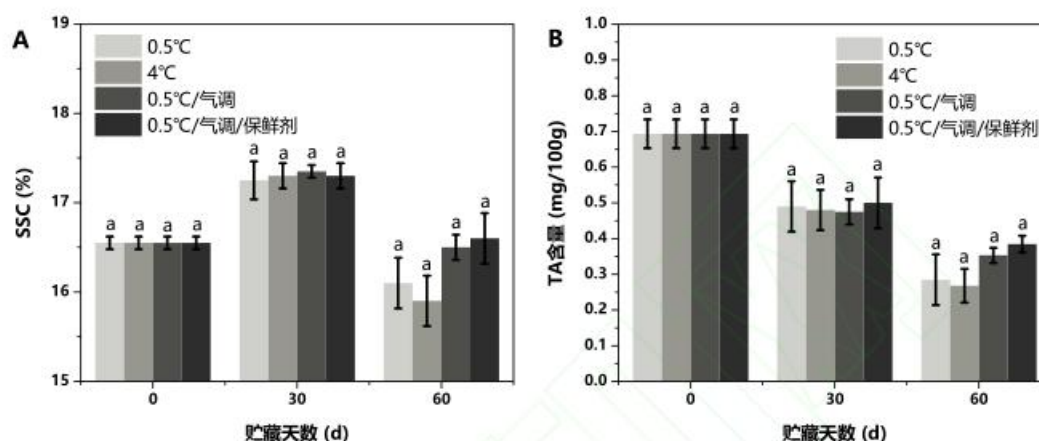


图 4 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 SSC (A) 和 TA 含量 (B) 的影响

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

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，它被用作评价果蔬营养品质的重要指标。从图 5 中可知，在贮藏 60 d 后，4°C 和 0.5°C 的贮藏条件下抗坏血酸含量没有显著差异 ($P > 0.05$)。然而，在气调包装下贮藏 60 d 后，抗坏血酸含量下降 50.7%，比不使用气调包装的情况提高了 10%，这表明气调可以延缓‘塞外红’苹果的氧化变质。此外，相比其他处理组，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，其 VC 含量为 8.5 ± 0.4 mg/100g。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，裴健翔发现对寒富苹果进行钙处理可以显著提升 VC 含量^[20]。

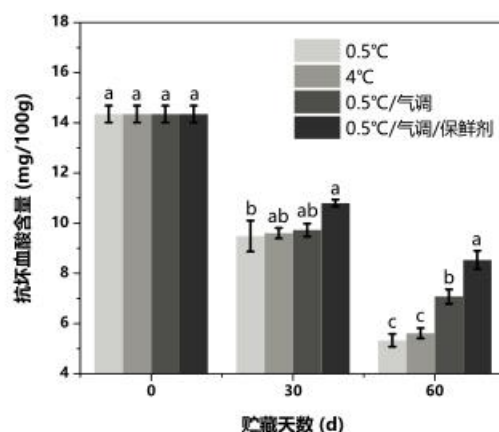


图 5 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果抗坏血酸含量的影响

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

2.6 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果果实 MDA 含量及相对电导率的影响

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]，从而导致内容物外泄和相对电导率的上升。如图 6 所示，当贮藏 30 d 时，采用气调包装和保鲜剂处理的苹果，其 MDA 含量缓慢上升。使用保鲜剂后，增长速度明显降低 ($P < 0.05$)。当贮藏 60 d 时，4℃下‘塞外红’苹果的 MDA 含量和相对电导率显著升高 ($P < 0.05$)，出现了明显腐败现象。然而，使用保鲜剂后，苹果 MDA 含量和相对电导率的上升速度显著降低 ($P < 0.05$)，可能是因为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，提高细胞渗透性^[19]，从而稳定细胞膜，增加硬度，抑制了细胞破裂导致的相对电导率上升。

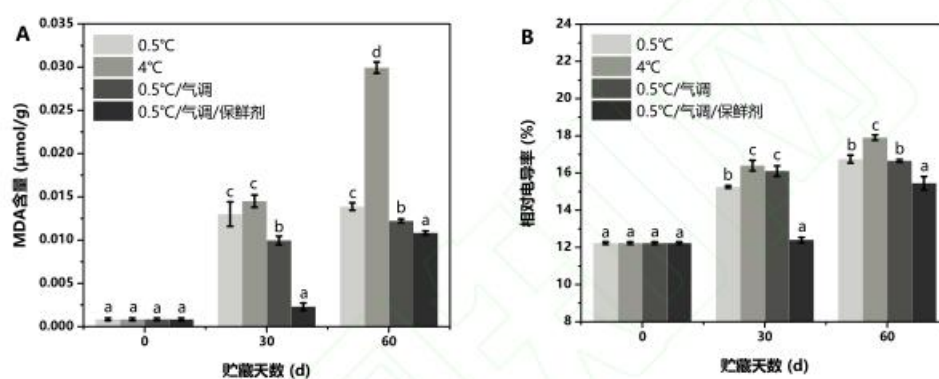


图 6 不同贮藏条件对‘塞外红’苹果 MDA 含量 (A) 及相对电导率 (B) 的影响

Fig.6 Effects of different storage conditions on MDA content (A) and relative electrical conductivity (B) of ‘Saiwaihong’ apple

2.7 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分析。结果如图 7 所示。在本研究条件下，‘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 和 0.797 ，呼吸作用越强，苹果的新陈代谢的速率越快，加速细胞衰老。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，其含量上升越快。细胞衰老破裂，胞内电解质物质释放，相对电导率升高，苹果的质构特性下降^[22]。此外，低温下‘塞外红’苹果的 BI 和 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。

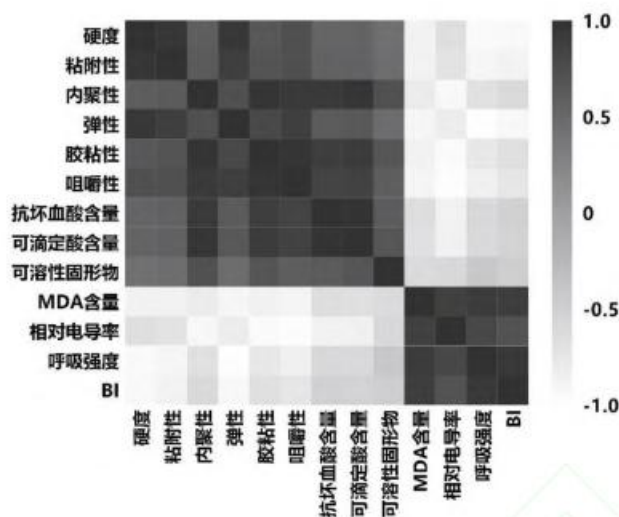


图7 不同贮藏条件下采后‘塞外红’苹果各指标之间的相关性分析

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

3 结语

本文以‘塞外红’苹果为试材，研究了 0.5℃和 4℃两种贮藏条件下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，0.5℃贮藏可以有效抑制‘塞外红’苹果采后品质下降，在抑制 BI、MDA 含量及相对电导率的上升方面尤为显著。此温度下使用气调包装贮藏 60 d 与未使用气调包装相比，苹果硬度和抗坏血酸含量分别提升 3.4%和 32%，MDA 含量和 BI 分别降低 12.1%和 11.5%。结合使用 1-MCP、CaCl₂、甜菜碱复合保鲜剂后对‘塞外红’果实品质下降的抑制作用更加显著，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 60 d。

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 'Saiwaihong' Apple Industry in Tongliao City[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 Y, Wakisaka M. A Review on the Modified Atmosphere Preservation of Fruits and Vegetables with Cutting-Edge Technologies. Agriculture, 2021, 11(10).
- [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, et al. Improving the ripening process after 1-MCP application: Implications and strategies." 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 Shanxi 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, LV 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 C, Hu W Z, He Y B, 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 Yv-mei, et al. Postharvest Physiological and Biochemical Experiment Guidance 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, 孙群, 曹翠玲, 等. 植物生理学实验指导[M]. 高等教育出版社, 2006: 210-211.
GAO Jun-feng, SUN Qun, CAO Cui-ling, et al. Experimental Guidance of Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 210-211.

- [16] Wang H, Zhang S H, Fu Q Q, et al. Transcriptomic and Metabolomic Analysis Reveals a Protein Module Involved in Pre-harvest Apple Peel Browning[J]. *Plant Physiol*, 2023, 00: 1-21.
- [17] Li J, ZHOU Q, ZHOU X, 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.
WANG Li. Mechanism of Glycine Betaine and Hot Water Treatments on Regulation of Chilling Injury in Peach Fruit[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [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 the removal of active oxygen in 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.
PEI Jian-xiang. Effects of Exogenous Calcium on Calcium Metabolism and Fruit Quality of 'Hanfu' Apple[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [21] Lu F, Xu F X, Li Z, 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.