

模拟货架温度下贮藏相对湿度对苹果品质的影响

李丹丹¹, 张瑞¹, 杜瑾², 李宇航¹, 胡诗婷¹, 冷传祝^{3*}, 姜瑜倩¹, 李喜宏¹

(1. 天津科技大学 食品科学与工程学院 省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457;
2. 巴彦淖尔市疾病预防控制中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015000; 3. 国投中鲁果汁股份有限公司,
北京 100037)

摘要: 为探究(14±1)°C货架温度下相对湿度(relative humidity, RH)对苹果品质的影响, 将样品分别置于50%、60%、70%、80%、90%、100% RH条件下保存24 d, 测定营养品质、物化特性、抗褐变和总抗氧化能力。结果表明, 100% RH降低苹果的失重率和硬度损失, 保持其新鲜度和质构特性; 延缓可溶性固形物最大值的出现, 加速有机酸向糖类物质的转化。100% RH在贮藏前期调控苯丙氨酸代谢途径, 抑制合成褐变底物; 而在贮藏后期抑制多酚氧化酶活性进一步抑制果肉褐变。100% RH能更好地保持细胞壁结构的完整性, 抑制丙二醛含量的增加, 促进过氧化物酶活性, 进而防止膜质过氧化物的发生。综上, 100% RH条件对苹果采后品质调控和保鲜存在积极作用。

关键词: 苹果; 相对湿度; 贮藏品质; 抗褐变能力; 抗氧化能力

Effects of Relative Humidity on Apple Quality at the Shelf Temperature

LI Dandan¹, ZHANG Rui¹, DU Jin², LI Yuhang¹, HU Shiting¹, LENG Chuazhu^{3*},
JIANG Yuqian¹, LI Xihong¹

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. Bayannur Center for Disease Control and Prevention, Bayannur 015000, Inner Mongolia, China; 3. SDIC Zhonglu Fruit Juice Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: To investigate the effects of relative humidity (RH) on apple quality at a shelf temperature of (14 ± 1) °C, samples were stored under conditions of 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, and 100% RH for 24 d, and their nutritional qualities, physicochemical characteristics, anti-browning properties, and total antioxidant capacity were measured. The results showed that 100% RH reduced weight loss and firmness deterioration in apples, thereby preserving their freshness and textural characteristics. It delayed the occurrence of the maximum soluble solids content and accelerated the conversion of organic acids into sugars. During the early stages of storage, 100% RH regulated the L-phenylalanine metabolism pathway, inhibiting the synthesis of browning substrates, while in the later stages, it further inhibited the activity of polyphenol oxidase, reducing flesh browning. Additionally, 100% RH better maintained the integrity of the cell wall structure, suppressed the increase in malondialdehyde content, and enhanced peroxidase activity, thus preventing membrane lipid peroxidation. In conclusion, the 100% RH condition positively influenced postharvest quality control and freshness preservation in apples.

Key words: apple; relative humidity; storage quality; anti-browning; antioxidant capability

引文格式:

李丹丹, 张瑞, 杜瑾, 等. 模拟货架温度下贮藏相对湿度对苹果品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 24-30.

LI Dandan, ZHANG Rui, DU Jin, et al. Effects of Relative Humidity on Apple Quality at the Shelf Temperature[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 24-30.

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2021CXGC010809); 银川市科技计划项目(2023NY07)

作者简介: 李丹丹(1997—), 女(汉), 硕士, 研究方向: 农产品物流保鲜与加工。

*通信作者: 冷传祝(1966—), 男(汉), 高级工程师, 本科, 研究方向: 农产品加工及贮藏。

2020年我国的苹果产量超过4 000万t,位居世界第一^[1]。苹果风味独特,且富含糖类、蛋白质、有机酸、多酚等生物活性物质,具有抗氧化、抗癌、降血糖等功效^[2]。苹果具有呼吸跃变特性,故其采后产生新陈代谢和呼吸速率高峰,极易品质骤变。另外,苹果采后贮藏期间水相和营养流失,抗褐变和氧化能力衰退,进而影响货架寿命。目前苹果采后品质调控技术主要有预冷、钙离子液、臭氧熏蒸、1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)等预处理技术,以及机械冷藏、气调保鲜等贮藏手段^[3]。

相对湿度(relative humidity, RH)是果蔬采后保质技术中仅次于温度的另一重要影响因素,其调控果蔬呼吸和蒸腾作用,进而影响代谢和品质^[4]。高RH贮藏环境引发果蔬真菌病害和生理失调,而低RH环境会加速果蔬水分散失。据报道,每100g新鲜果蔬中水分含量为81.06~85.60g,而苹果的水分含量高达85%^[5],当果实失水率超过5%时,其品质及食用价值下降。RH变化引起的水分损失会导致果蔬失重率升高、果实软化衰老、生理生化失调等^[4]。荔枝储存在90%RH下,果实细胞完整,褐变降低,且花青素降解延缓^[6]。RH高于90%时,抑制香蕉果皮过早褐变,而低RH条件加速了香蕉的完熟^[7]。大量研究表明,果实褐变的发生与水分流失有一定关联^[8],故推测湿度调控对果蔬糖酸比、膜脂过氧化程度、酶活性等有积极影响。

本研究探究在零售商货架温度下不同RH条件对苹果的营养品质、抗褐变及抗氧化特性的影响,以期对苹果采后保鲜相对湿度贮藏条件的选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

富士苹果:市售,挑选大小形状相近(单果200~220g)、无病虫害、无机械损伤的试验用果。使用冷链物流将试验果运输至天津科技大学。

乙酸-乙酸钠、愈创木酚、过氧化氢:天津市光复科技发展有限公司;邻苯二酚、硼酸-硼砂缓冲液、盐酸、甲醇、冰乙酸、聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)、交联聚维酮(plyvinylpyrrolidone cross-linked, PVPP)、曲拉通X-100、聚乙烯吡咯烷酮(plyvinyl pyrrolidone, PVP)、乙二胺四乙酸(ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA)、 β -巯基乙醇、2,2-二苯基-1-苦基肼(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH):上海麦克林生化科技股份有限公司。以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

JRA-160X智能恒温恒湿箱:无锡杰瑞安仪器设备有限公司;UV-Vis多功能酶标仪:上海木森生物科技

有限公司;HP-200色差计:中国上海中视光电技术有限公司;GR15手持折光仪:上海舍岩仪器有限公司;TH20R连续式温湿度记录仪:平阳县妙观科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 苹果果实的处理

将试验用果置于(14±1)°C预冷24h后,置于50%、60%、70%、80%、90%、100%RH(±3%)条件下的恒温(14±1)°C恒湿箱中贮存,每个湿度环境为1个处理,每组处理3个重复,每组重复30个果实。采用连续式温湿度记录仪记录贮存期间湿度变化。每间隔6d随机取样,共取样4次,将样品冻干并保存于-80°C冰箱。

1.3.2 失重率测定

参考Osuga等^[9]的方法,通过下列公式计算苹果贮藏期间失重率(S,%)。

$$S = \frac{m_n - m_0}{m_n} \times 100$$

式中: m_n 为贮藏第 n 天后样品的质量,g; m_0 为贮藏第0天样品的质量,g; n 为贮藏时间,d。

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

取5g赤道部位果肉经研磨过滤后,使用手持折光仪测定其SSC含量;10g果肉研磨后用蒸馏水定容至100mL容量瓶中,过滤,以0.1mol/L氢氧化钠滴定20mL滤液,以测定TA的含量,结果以苹果酸的质量百分比表示^[10]。

1.3.4 物性测定

取果肉赤道部位直径为1cm,厚度为0.5cm的圆柱体进行食品物性分析。设定质构分析仪(P/100)测试参数^[11]:预压速度1.00mm/s,下压速度0.5mm/s,抬起速度1.00mm/s,触发力0.1N,果肉形变60%。

1.3.5 褐变指数(browning index, BI)的测定

将苹果果实沿赤道部位横切后静置于空气中,使用精密色差仪分别测定其在0、0.5、1.0、1.5、4.0、24.0h时的 L^* (亮度)值、 a^* (红绿)值、 b^* (黄蓝)值,每组重复3次^[12]。褐变指数(B)计算公式如下。

$$B = 100 \times \left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \right) \div 0.172$$

1.3.6 总酚含量(total phenol content, TPC)测定

TPC的测定采用Folin-ciocalteu法^[13],并对该方法进行修改。称取1.0g果肉研磨,并与10mL70%甲醇混合后10 000×g离心30min。取25 μ L上清液和125 μ L0.2mol/LFolin-ciocalteu试剂于37°C反应10min。然后加入125 μ L10%碳酸钠溶液,测定765nm处的吸光度。

1.3.7 苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)活性、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)活性、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性的测定

参考 Du 等^[14]的方法测定 PAL 活性、PPO 活性、POD 活性。取 5 g 样品于冰水浴中研磨后加入 5 mL 提取缓冲液(40 g/L PVP, 2 mmol/L EDTA, 5 mmol/L β -巯基乙醇), 4 °C、10 000 \times g 下离心 30 min, 取上清液作为测定 PAL 的酶提液。将加有 3 mL 50 mmol/L、pH8.8 硼酸和 20 mmol/L L-苯丙氨酸溶液的试管在 37 °C 下保温 10 min 后加入 0.5 mL 酶提液, 测定混合物在 290 nm 处的吸光度。随后将混合物置于 37 °C 下保温 60 min 并测定其在 290 nm 处的吸光度, 根据两次吸光度差值以计算 PAL 活性。

取 3 g 样品于冰水浴中研磨, 随后与 3 mL 磷酸盐缓冲溶液(100 mmol/L, pH5.5, 4% PVP, 1% 曲拉通 X-100)混合。将混合物在 4 °C、10 000 \times g 下离心 30 min, 收集上清液作为测定 PPO 和 POD 的酶提液。将 10 μ L 酶提取物与 200 μ L 50 mmol/L、pH5.5 磷酸盐缓冲液和 50 μ L 50 mmol/L 儿茶酚混合。测定 420 nm 处混合物的吸光度, 并以混合物吸光度每分钟变化增加 1 的可溶性蛋白质的量计算 PPO 活性。另取 30 μ L 酶提取物与 180 μ L 25 mmol/L 愈创木酚和 30 μ L 500 mmol/L 过氧化氢混合。测定 470 nm 处混合物的吸光度, 并以混合物吸光度每分钟变化增加 1 的可溶性蛋白质的量计算 POD 活性。酶活性均以 U/kg 表示。

1.3.8 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量测定

参考 Jiang 等^[15]的方法测定 MDA 含量。5 g 样品加入 5 mL 100 g/L 三氯乙酸, 研磨后离心(10 000 \times g, 10 min)。取 2 mL 上清液与 2 mL 6.7 g/L 硫代巴比妥酸混合后置于沸水浴中保留 20 min, 随后冷却至室温并测定 450、532、600 nm 处吸光度。MDA 含量以 μ mol/kg 表示。

1.3.9 抗氧化能力的测定

抗氧化能力通过 DPPH 自由基清除能力和铁离子还原能力(flourescence recovery after photobleaching, FRAP)来测定^[16]。25 μ L 酚提液和 175 μ L 350 μ mol/L DPPH 自由基组成的反应体系在室温下避光反应 4 h, 测量 517 nm 处的吸光度。使用每千克 Trolox 当量的标准曲线计算 DPPH 自由基清除能力, 并表示为 mmol/kg。此外, 在 96 孔板中加入 10 μ L 酚提液和 300 μ L 300 μ mol/L FRAP 溶液, 该反应体系在室温下避光孵育 2 h, 测定 593 nm 处的吸光度。FRAP 通过每千克抗坏血酸当量的标准曲线计算, 单位为 g/kg。

1.4 数据处理

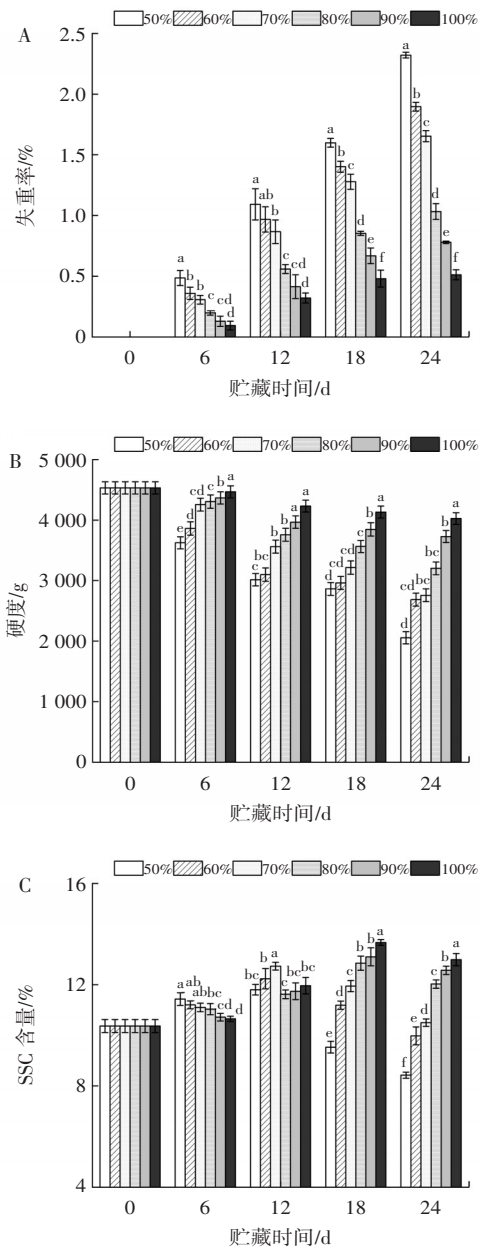
使用 SPSS 19 进行数据分析和方差分析, 使用 Origin 2021 进行绘图。

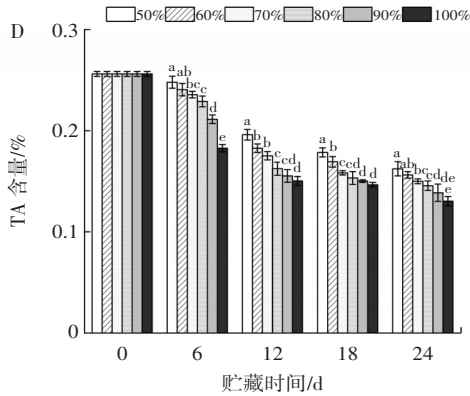
2 结果与分析

2.1 不同 RH 条件对苹果贮藏期间生理指标的影响

不同 RH 条件对苹果贮藏期间基础生理指标(失重率、硬度、SSC 含量、TA 含量)的影响见图 1。

在果蔬贮藏过程中, 造成失水的主要原因是蒸腾作用^[17], 水分子由细胞间隙扩散至苹果表皮, 最后由果实表皮表面气孔、皮孔等结构蒸发至周围环境。贮存环境 RH 的变化造成的水分胁迫会影响苹果内部的水势变化, 进而影响果实贮藏品质。由图 1A 可知, 在 24 d 贮藏期内, 各组苹果的失重率均呈持续上升趋势。在贮藏的第 24 天, 50%~100% RH 的苹果的失重率为 2.32%、1.89%、1.65%、1.03%、0.78%、0.51%, 比第 6 天分别高 1.83%、1.53%、1.34%、0.83%、0.58%、0.41%。贮藏环境的 RH 越小, 苹果内部与周围环境的湿度梯





A. 失重率; B. 硬度; C. SSC 含量; D. TA 含量。不同小写字母表示不同 RH 条件存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

图 1 不同 RH 条件对苹果贮藏期间失重率、硬度、SSC 含量、TA 含量的影响

Fig.1 Effect of different RH conditions on weight loss, hardness, SSC content, and TA content during storage of apples

度越大,对果实内部的水势影响越大,失重率越高,这与 RH 贮藏中柑橘果实的采后失重率和品质的变化趋势一致^[18]。

细胞壁解体和胞间层的溶解是导致果实硬度降低、果蔬物化特性劣变的主要原因^[19]。细胞壁组分在细胞壁降解酶的作用下交联断裂,原果胶、纤维素含量降低,细胞结构完整性丧失,进而导致软化。由图 1B 可知,在 24 d 贮藏中,样品的硬度呈持续降低趋势。第 24 天 50%~100% RH 贮藏的样品的硬度比第 0 天分别降低了 54.55%、40.63%、39.03%、29.21%、17.59%、11.02%。由于水分流失、衰老等原因改变了细胞壁组分的结构,进而导致果实软化和品质劣变^[20]。由此得出 RH 越低,其硬度降低得越快。

通过测定 SSC、TA 含量可评价不同 RH 贮藏条件下的果实品质。果糖、葡萄糖、蔗糖等可溶性糖的组分及含量决定果实的质地和风味^[21]。由图 1C 可知,样品的 SSC 含量先增加后减少。在 50%~70% RH 贮藏的样品,第 12 天的 SSC 含量达到了最大值分别为 $(11.80 \pm 0.21)\%$ 、 $(12.20 \pm 0.40)\%$ 、 $(12.70 \pm 0.15)\%$,而 80%~100% RH 的样品在第 18 天的 SSC 含量达到了最大值分别为 $(12.80 \pm 0.28)\%$ 、 $(13.10 \pm 0.35)\%$ 、 $(13.70 \pm 0.11)\%$ 。综上,低 RH 条件延缓了 SSC 最大值出现的时间。这可能是因为低 RH 加速了苹果呼吸高峰的到来,与呼吸相关的可溶性糖的消耗增加,进而加速了苹果衰老,而高 RH 贮藏能够更好地维持与糖类相关的品质,这与 Saengpook 等^[7]对 RH 贮存条件影响香蕉衰老的研究结果一致。

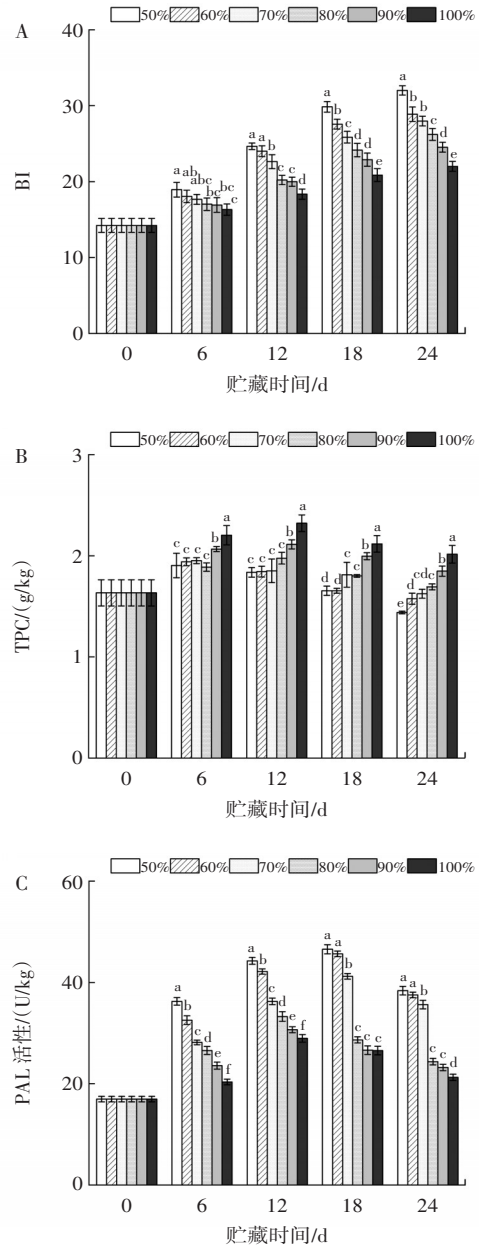
苹果酸是苹果中含量最高的有机酸,存在于细胞的液泡中,占有有机酸总含量的 85%~90%,可通过糖异生途径转化为葡萄糖等^[22]。由图 1D 可知,样品的 TA

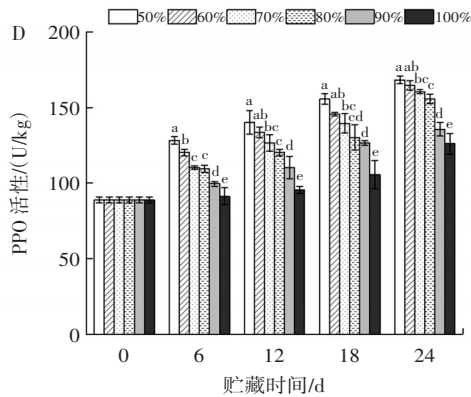
含量在贮藏的 24 d 内不断减少,且随着 RH 的减小,其 TA 含量的减小速率加快。在贮藏 24 d 时,50%~100% RH 的 TA 含量分别比第 0 天减少了 37%、39%、41%、43%、46%、49%。这可能是因为高 RH 贮藏的苹果果实中的有机酸通过糖异生、呼吸作用等途径被消耗^[21],而低 RH 贮藏条件下,水分流失造成的细胞壁结构破坏使细胞完整性丧失,导致液泡中的有机酸无法通过糖异生途径消耗。因此,高 RH 条件能够通过调控 SSC 和 TA 含量,改善苹果贮藏品质。

2.2 不同 RH 条件对苹果抗褐变机制的影响

不同 RH 条件对苹果抗褐变机制的影响见图 2。

酚类底物在氧气和酶的作用下产生醌,而具有强氧化性的醌与氨基酸、蛋白质等发生氧化聚合反应产生酰基化合物,导致果蔬褐变的发生^[23]。BI 是与果蔬





A. BI; B. TPC; C. PAL 活性; D. PPO 活性。不同小写字母表示不同 RH 条件存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

图2 不同 RH 条件对苹果 BI、TPC、PAL 活性、PPO 活性的影响
Fig.2 Effect of different RH conditions on BI, TPC, PAL activity, and PPO activity in apples

褐变相关的重要指标,同时也被用来评估果蔬的新鲜度和商品价值。由图 2A 可知,在贮藏 24 d 的过程中,样品的 BI 均呈现增大的趋势,且 BI 增大速率随 RH 的减小而增大。24 d 的 50%~100% RH 条件下 BI 比第 0 天增加了 17.80%、14.65%、13.75%、11.98%、10.30%、7.78%。因此,高 RH 贮藏环境可以抑制果蔬褐变,进而更好地维持苹果的品质。

苹果中含有没食子酸、原儿茶酸等羟基苯甲酸,绿原酸、咖啡酸等羟基肉桂酸等酚类物质,可作为酶促褐变的底物,同时具有抵御生物和非生物胁迫、抗氧化等作用^[24]。由图 2B 可知,50%~70% RH 处理的 TPC 在第 6 天分别达到峰值(1.90、1.94、1.95 g/kg),而 80%~100% RH 在第 12 天分别达到峰值(1.97、2.11、2.32 g/kg),然后呈逐渐降低的趋势。这与 SSC 含量变化趋势相一致,可能是因为低湿度条件加速了呼吸高峰的到来,而在此之前酚类物质经过苯丙氨酸代谢途径不断被合成,在贮藏后期,随着水分流失加剧和细胞壁结构的解体,酚类底物从细胞中外溢而与氧气接触,在酶的催化下进一步加剧了果实褐变^[25]。

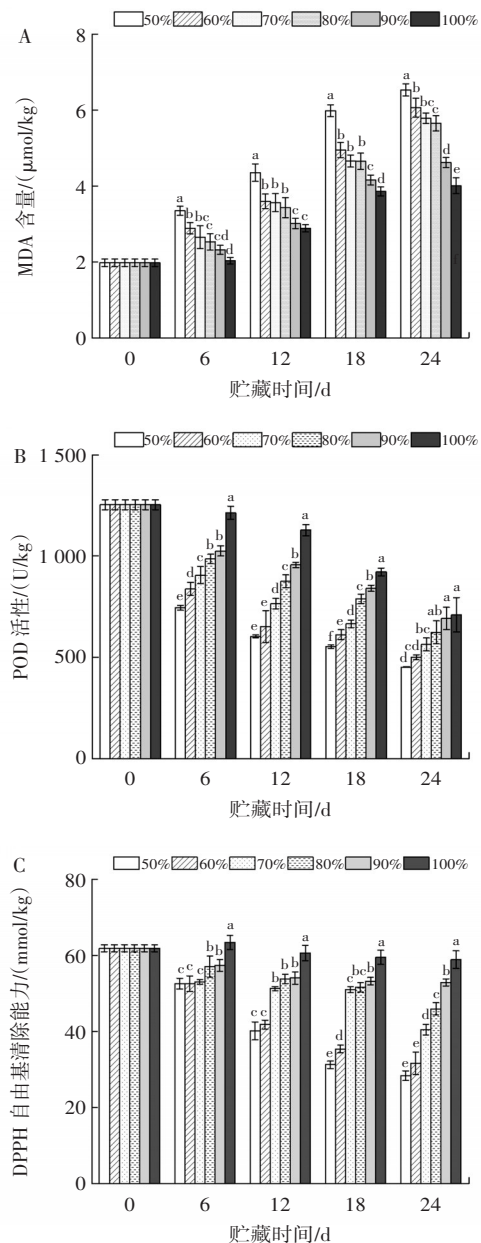
PAL 通过催化苯丙氨酸转化为反式肉桂酸来控制酚类物质的合成,进而影响褐变。由图 2C 可知,贮藏 24 d 内,PAL 活性呈现先升高后降低的趋势,并且 RH 越小,PAL 活性越大。50%~100% RH 贮藏 24 d 的 PAL 活性比第 0 天增加了 21.41%、20.56%、18.67%、7.40%、6.26%、4.30 U/kg。综上,80%~100% RH 的 PAL 活性变化较小,可能是因为 50%~70% RH 条件下的失重率较大,水分流失多,使细胞结构无法保持完整性,进而激活了 PAL 活性,这与失水导致荔枝 PAL 活性升高结果一致^[26]。

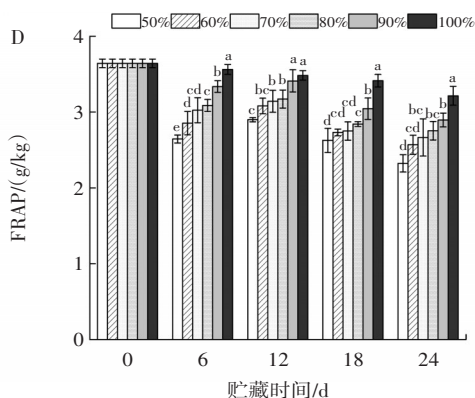
PPO 将儿茶酚氧化成新醌,而不稳定的新醌通过氧化和聚合作用产生黑色素是造成苹果褐变和品质下

降原因之一^[27]。由图 2D 可知,在 24 d 贮藏期内,PPO 活性总体呈上升趋势。在贮藏的第 24 天,50%~100% RH 的 PPO 活性分别比第 0 天增加了 7.9%、7.6%、7.2%、6.7%、4.7%、3.7%。因此,100% RH 可以延缓 PPO 活性的升高,减少酚类物质被转化为醌,进而在防止褐变发生的同时延缓果蔬衰老。此外,贮藏 6~12 d 后,TPC 不断被消耗可能与 PPO 活性增加有关。

2.3 不同 RH 条件对苹果贮藏期间抗氧化特性的影响
不同 RH 条件对苹果贮藏期间抗氧化特性的影响见图 3。

MDA 常被用来评价膜脂过氧化损伤程度,由图 3A 可知,在贮藏期 24 d 内,MDA 含量不断增加,表明细胞膜损伤程度随贮藏时间的延长而加剧^[23]。50% RH 的 MDA 含量显著高于其他处理组($P < 0.05$),





A. MDA 含量; B. POD 活性; C. DPPH 自由基清除能力; D. FRAP。
不同小写字母表示不同 RH 条件存在显著性差异, $P < 0.05$ 。

图3 不同 RH 条件对苹果 MDA 含量、POD 活性、DPPH 自由基清除能力、FRAP 的影响

Fig.3 Effect of different RH conditions on MDA content, POD activity, DPPH scavenging capacity, and FRAP in apples

表明 50% RH 贮藏条件下细胞膜破坏最为严重,膜质过氧化程度最高。在贮藏的第 24 天,50%~100% RH 的 MDA 含量分别为 6.53、6.06、5.79、5.65、4.62、4.01 $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 。随着 RH 的增加,果实中的 MDA 含量不断积累,这可能与细胞失水导致的活性氧(reactive oxygen species, ROS)积累有关,从而加剧了植物细胞的氧化损伤^[28]。

POD 是评估抗氧化能力的关键酶,参与木质素生物合成的同时清除 H_2O_2 ,因此与活性氧代谢密切相关^[29]。由图 3B 可知,POD 活性在贮藏期 24 d 内不断降低,苹果的抗氧化能力也不断降低,果蔬衰老。在 24 d 内,50% RH 的 POD 活性低于其他组。且在贮藏的第 24 天,60%~100% RH 的 POD 活性分别比 50% RH 高出 10.87%、24.62%、37.83%、53.14%、57.09%,因此,低湿度条件下并不能延缓 POD 活性的降低,进而无法更好地维持苹果的抗氧化特性。

DPPH 自由基清除活性和 FRAP 还原能力测定通常用于果蔬的抗氧化评估^[30]。由图 3C 和图 3D 可知,苹果 DPPH 自由基清除能力在贮藏期 24 d 内不断减弱,而 100% RH 处理的 DPPH 自由基清除能力显著高于其他组($P < 0.05$)。50%~100% RH 的 DPPH 自由基清除能力在贮藏 24 d 时分别为 28.3、31.6、40.4、45.9、52.9、58.8 mmol/kg 。因此,100% RH 条件下能够更好地维持苹果的抗氧化能力。此外,随贮藏时间延长,各组的 FRAP 值均呈现出下降的趋势,且贮藏环境的 RH 越低,其 FRAP 值降低程度越高。贮藏第 24 天时,50%~100% RH 的 FRAP 值分别比第 0 天时减少了 1.30、1.10、0.97、0.89、0.75、0.43 g/kg 。因此,贮藏环境的 RH 越高,其 FRAP 值减小速率越低,抗氧化能力越强。这与 Zuo 等^[30]在高 RH 下贮藏西葫芦的研究结果类似。

3 结论

为探寻苹果贮藏环境适宜 RH,延长苹果保鲜货架期,本文探究不同 RH 条件对苹果品质的影响,结果表明,提高贮藏环境的 RH 能够延缓苹果在模拟货架期温度下的水分及营养成分流失,改善物化特性,提高抗褐变和抗氧化能力,延缓果实衰老和品质劣变。研究表明,100% RH 贮藏条件下苹果的失重率减小,延缓 SSC 含量最大值出现的时间,促进有机酸向糖类物质的转化,延缓果蔬衰老。100% RH 贮藏条件下细胞壁结构基本保持完整,可以维持苹果的质构特性。此外,100% RH 条件能够有效防止 PAL 调控酚类底物物质合成,延缓酚类物质在 PPO 的作用下导致果肉褐变,从而更好地维持了果蔬的新鲜度和商品价值。同时,100% RH 延缓了 MDA 含量的增加,膜质过氧化程度降低。通过测定 POD 活性、DPPH 自由基清除能力和 FRAP 验证了高湿度对苹果抗氧化系统的促进作用。综上所述,在模拟(14±1) °C 货架期温度下短期贮藏苹果可以有效提高其贮藏品质。本研究为苹果贮运保鲜提供理论参考。

参考文献:

- GAO Q C, WANG Y X, LI Y H, et al. Residue behaviors of six pesticides during apple juice production and storage[J]. Food Research International, 2024, 177: 113894.
- RIAÑO C, RIBBA T, MARCHANT J I, et al. Ultra-low oxygen and preconditioning storage regulate ethylene synthesis to prevent corky disorders in 'Fuji' apple[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 910139.
- 高海生, 赵希艳, 李润丰. 果蔬采后处理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 273-278.
GAO Haisheng, ZHAO Xiyan, LI Runfeng. Review of postharvest treatment and preservation technologies of fruit and vegetable[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(2): 273-278.
- ZUO X X, CAO S F, ZHANG M, et al. High relative humidity (HRH) storage alleviates chilling injury of zucchini fruit by promoting the accumulation of proline and ABA[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 171: 111344.
- ARNOLD M, GRAMZA-MICHALOWSKA A. Recent development on the chemical composition and phenolic extraction methods of apple (*Malus domestica*)-A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(9): 2519-1560.
- REICHEL M, WELLHÖFER J, TRIANI R, et al. Postharvest control of *Litchi* (*Litchi chinensis* Sonn.) pericarp browning by cold storage at high relative humidity after enzyme-inhibiting treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2017, 125: 77-90.
- SAENGPOOK C, KETSA S, VAN DOORN W G. Effects of relative humidity on banana fruit drop[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 45(1): 151-154.
- LIU B, XUE W W, GUO Z L, et al. Water loss and pericarp browning of *Litchi* (*Litchi chinensis*) and longan (*Dimocarpus longan*) fruit maintain seed vigor[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 290: 110519.
- OSUGA R, KOIDE S, SAKURAI M, et al. Quality and microbial evaluation of fresh-cut apples during 10 days of supercooled stor-

- age[J]. Food Control, 2021, 126: 108014.
- [10] JIA X Y, DU M J, PAN Y F, et al. Effect of 100 kPa O₂ pretreatments time on physiology and quality of vacuum packed and coated fresh-cut apples[J]. Journal of Food Safety, 2020, 40(1): 1-8.
- [11] 张文会, 郭小静, 王荣, 等. 质构仪 P/2 探头与 P/100 探头反映苹果质地程度分析[J]. 山东农业科学, 2013, 45(11): 37-38, 41. ZHANG Wenhui, GUO Xiaojing, WANG Rong, et al. Degree analysis on apple texture reflected by P/2 and P/100 probes[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(11): 37-38, 41.
- [12] XU Y J, WANG D, ZHAO W T, et al. Low frequency ultrasound treatment enhances antibrowning effect of ascorbic acid in fresh-cut potato slices[J]. Food Chemistry, 2022, 380: 132190.
- [13] SUBRAMANIAN K N, PADMANABAN G, SARMA P S. Folin-ciocalteu reagent for the estimation of siderochromes[J]. Analytical Biochemistry, 1965, 12(1): 106-112.
- [14] DU M J, LIU Z T, ZHANG X T, et al. Effect of pulsed controlled atmosphere with CO₂ on the quality of watercored apple during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278: 109854.
- [15] JIANG Y Q, WANG X D, LI X J, et al. Combination of 1-methylcyclopropene and phytic acid inhibits surface browning and maintains texture and aroma of fresh-cut peaches[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 200: 112328.
- [16] TANG Y, LI X H, ZHANG B, et al. Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 380-388.
- [17] WATANABE T, NAKAMURA N, OTA N, et al. Estimation of changes in mechanical and color properties from the weight loss data of 'Shine Muscat' fruit during storage[J]. Journal of Food Quality, 2018, 2018: 7258029.
- [18] ZHANG M, YANG H, ZHU F, et al. Transcript profiles analysis of citrus aquaporins in response to fruit water loss during storage[J]. Plant Biology, 2021, 23(5): 819-830.
- [19] LÓPEZ-CASADO G, SÁNCHEZ-RAYA C, RIC-VARAS P D, et al. CRISPR/Cas9 editing of the polygalacturonase FaPG1 gene improves strawberry fruit firmness[J]. Horticulture Research, 2023, 10(3): uhad011.
- [20] MOGGIA C, LOBOS G A. Why measuring blueberry firmness at harvest is not enough to estimate postharvest softening after long term storage? A review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 198: 112230.
- [21] 王元基. 干旱对苹果品质的影响及其与糖代谢的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. WANG Yuanji. Effect of drought on apple quality and its relationship with sugar metabolism[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [22] 张雯. 钾对苹果果实品质的影响及其与 6-磷酸海藻糖代谢途径的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. ZHANG Wen. Effect of potassium on apple fruit quality and its relationship with trehalose 6-phosphate metabolic pathway[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [23] LI X J, JIANG Y Q, LIU Y, et al. Effects of short-term high oxygen pre-stimulation on browning resistance and low-temperature tolerance of fresh-cut potatoes in supercooled storage[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(3): 709-721.
- [24] ACQUAVIA M, PASCALE R, FOTI L C, et al. Analytical methods for extraction and identification of primary and secondary metabolites of apple (*Malus domestica*) fruits: A review[J]. Separations, 2021, 8(7): 91.
- [25] PETROPOULOS S A, NTATSI G, FERREIRA I C F R. Long-term storage of onion and the factors that affect its quality: A critical review[J]. Food Reviews International, 2017, 33(1): 62-83.
- [26] JIANG Y M, FU J R. Biochemical and physiological changes involved in browning of litchi fruit caused by water loss[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 1999, 74(1): 43-46.
- [27] WANG X Y, CHANG F Y, DONG Q L, et al. Selenium application during fruit development can effectively inhibit browning of fresh-cut apples by enhancing antioxidant capacity and suppressing polyphenol oxidase activity[J]. Journal of Plant Physiology, 2023, 287: 154050.
- [28] HUANG Y J, ZHAO H X, GAO F, et al. A R2R3-MYB transcription factor gene, FtMYB13, from tartary buckwheat improves salt/drought tolerance in *Arabidopsis*[J]. Plant Physiology and Biochemistry: PPB, 2018, 132: 238-248.
- [29] IGHODARO O, AKINLOYE O A. First line defence antioxidants-superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and glutathione peroxidase (GPX): Their fundamental role in the entire antioxidant defence grid[J]. Alexandria Journal of Medicine, 2018, 54(4): 287-293.
- [30] ZUO X X, CAO S F, JIA W R, et al. Near-saturated relative humidity alleviates chilling injury in zucchini fruit through its regulation of antioxidant response and energy metabolism[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129336.

加工编辑: 孟琬星
收稿日期: 2024-01-16