

低温贮藏对‘金红’苹果能量代谢和品质的影响

王志华*, 贾朝爽*, 王文辉, 佟伟, 姜云斌

(中国农业科学院果树研究所, 辽宁省果品贮藏与加工重点实验室, 辽宁兴城 125100)

摘要: 为探究不同贮藏温度对‘金红’苹果果实能量代谢和生理品质的影响, 将‘金红’苹果分别放置在 -2、0、2、4 °C 条件下贮藏, 定期测定果实能量相关物质三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、磷酸腺苷(AMP)含量和能荷(EC)变化以及 H⁺-ATPase、Ca²⁺-ATPase、琥珀酸脱氢酶(SDH)、细胞色素氧化酶(CCO)、超氧化物歧化酶(SOD)等相关酶活性, 同时测定果实呼吸速率、乙烯释放速率、果实硬度、维生素C、可滴定酸、可溶性固形物含量等生理品质指标, 并调查果实组织褐变情况。结果表明: 整个贮藏及货架期, -2 °C 下的果实 ATP、ADP 和 AXP (AXP = ATP + ADP + AMP) 含量、EC 以及能量相关代谢酶活性 (H⁺-ATPase、SDH、CCO)、SOD、乙烯释放速率始终保持最低, 维生素 C 含量后期下降迅速; 4 °C 下的果实硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量降幅较大; -2 °C 下的果实褐变指数最高 (果皮和果肉均出现了严重褐变), 0 °C 下的果实果皮和果肉也有轻微褐变, 2 °C 和 4 °C 果实无褐变。贮藏 30、45、90 d 以及贮藏 90 d + 货架 3 d 和 90 d + 货架 5 d 期间, 2 °C 贮藏的果实保持较高的能量水平, 果实品质和风味保持较好, 0 °C 果实次之。研究结果表明, ‘金红’苹果组织褐变与能量亏缺有密切关系, 能量亏缺越多, 褐变越严重, 适宜的低温能维持果实较高的能量水平, 同时抑制果实褐变, 维持果实较好的贮藏品质, 延缓果实衰老。

关键词: 苹果; 低温贮藏; 酶; 能量水平; 果皮褐变; 品质

中图分类号: S 661.1

文献标志码: A

文章编号: 0513-353X (2020) 12-2277-13

Effects of Low Temperature Storage on Energy Metabolism, Related Physiology and Quality in ‘Jinhong’ Apple Fruit

WANG Zhihua*, JIA Chaoshuang*, WANG Wenhui, TONG Wei, and JIANG Yunbin

(Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Fruit Storage and Processing Key Laboratory of Liaoning Province, Xingcheng, Liaoning 125100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of low temperature storage on energy metabolism and physiological quality of ‘Jinhong’ apple fruit, ‘Jinhong’ apple fruit were stored at low temperature conditions of -2, 0, 2 and 4 °C, and the energy-related substance was regularly measured such as adenosine triphosphate (ATP), adenosine diphosphate (ADP), adenosine monophosphate (AMP) content, energy charge (EC) and H⁺-ATPase, Ca²⁺-ATPase, succinate dehydrogenase (SDH) and cytochrome oxidase (CCO), superoxide dismutase (SOD) and other related enzyme activities. At the same time we measured the fruit respiration intensity, ethylene release, fruit hardness, vitamin C, titratable acid, soluble

收稿日期: 2020-07-21; **修回日期:** 2020-11-25

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目 (CAAS-ASTIP-RIP); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目 (161082020020)

* 同等贡献作者 (E-mail: jiachaoshuang@caas.cn, wangzhihua@caas.cn)

solids content and other physiological quality indicators, and investigated the fruit tissue browning index. The results showed that the ATP, ADP and AXP contents, EC and energy-related metabolic enzyme except Ca^{2+} -ATPase activities, SOD activity and ethylene release of fruits stored at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ were kept to the lowest throughout storage and shelf life, and the vitamin C content decreased rapidly in the later period. The fruit hardness, soluble solids content and titratable acid content remained the lowest at $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. The browning index of fruit at $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ was the highest (both skin and flesh were severely browned), the skin and flesh of the fruit stored at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ had slight browning, and the fruit stored at 2 and $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ had no browning. During storage of 30, 45, 90 d, 90 d + 3 d shelf life and 90 d + 5 d shelf life, fruit stored at $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ maintained higher energy levels, and fruit quality and flavor remained well, followed by fruit at $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. The results showed that there was a close relationship between tissue browning and energy deficit. The more energy deficit, the more serious browning. Appropriate low temperature can maintain a higher energy charge level of the fruit, while inhibiting pericarp browning, maintaining fruit storage quality, and delaying fruit senescence.

Keywords: apple; low storage; enzyme; energy level; pericarp browning; quality

‘金红’苹果别名‘吉红’、‘公主岭 123’，是吉林省农业科学院果树研究所用‘金冠’与‘红太平’杂交培育出的品种，主要在吉林省、内蒙古自治区等地栽培，种植过程几乎不用施农药，且具有结果早、抗寒性强等优点（刘继勋，1981）。‘金红’果实平均单果质量 75 g，为阔卵圆形，果皮红青鲜艳，果肉松脆，酸甜味浓，营养丰富（张文英和姜晓坤，2009），深受消费者喜爱。但据笔者前期调研和预试验发现，该品种果实贮藏和货架期相对较短，采后常温下放置 8 d 左右果肉就发绵变软、品质下降、开始衰老腐烂；低温（ 0 ± 0.5 ） $^{\circ}\text{C}$ 下贮藏 30~60 d 果实就表现出果皮开裂、硬度下降、组织褐变，失去原有的风味。‘金红’苹果这种贮藏和货架期短以及不耐贮运的特点限制了销售时限和销售区域，成为其产业发展的瓶颈（张文英，2007）。

大量研究发现，能量状态与果实采后的成熟、衰老和各种生理失调等密切相关（Saquet et al., 2000; Yang et al., 2009）， H^{+} -ATPase、 Ca^{2+} -ATPase、琥珀酸脱氢酶（SDH）和细胞色素氧化酶（CCO）是参与能量代谢、调节 ATP 合成的关键酶（Jin et al., 2013），这些酶活性的下降将会影响能量代谢相关物质的合成，从而使细胞能量供应不足。果实采后因为细胞内能量代谢相关物质生成速率降低或可用的能量供应不足加速衰老和褐变（Jiang et al., 2008; Chen et al., 2015）。Zhou 等（2014）发现冷藏时间越长，越橘果实中的三磷酸腺苷（ATP）和二磷酸腺苷（ADP）的含量越低，在低温胁迫下 ATP 含量和能量电荷越低，果实褐变发生率越高；Su 等（2005）也发现龙眼果皮褐变可能与能量亏损有关。高兆银等（2018）也发现荔枝采后能荷水平下降是导致果实快速衰老的重要因素之一。

低温贮藏是果实保鲜最有效的方法之一，在一定温度范围内，低温可抑制果实呼吸作用和乙烯的释放，有利于保持果实生理代谢和营养物质的相对稳定，延缓衰老和腐烂，抑制组织褐变，延长贮藏和货架期。所以低温贮藏是生产上应用最多的一种保鲜方法，已在杨梅、荔枝、李、杏、苹果、梨、猕猴桃等上有大量报道（胡位荣等，2005；汪洋等，2008；高雪等，2011；王姣等，2014；陈义挺等，2018；赵祎等，2018）。虽然低温贮藏保鲜效果较好，但由于品种差异性，长期不适宜的低温会对果实生理品质和代谢产生一定的负面影响。本研究中比较了 4 种不同低温下贮藏‘金红’苹果果实能量代谢、组织褐变和贮藏生理品质的变化规律及相关性，以期延长‘金红’苹果果实

贮藏和货架期、延缓果实衰老、抑制组织褐变提供理论依据与参考, 为‘金红’苹果产业发展提供技术支撑。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料与处理

供试材料‘金红’苹果 (*Malus × domestica* Brokh. ‘Jinhong’) 分别于2016年9月8日和2017年9月8日采自内蒙古赤峰市林西县一管理良好的果园, 果实采收后当天运回中国农业科学院果树研究所(辽宁兴城), 立即选大小均匀、无病虫害和机械伤的果实进行不同低温贮藏试验。试验在4个6 m²的冷库中进行, 相对湿度均为85% ~ 90%。

试验共进行两年, 2016年为预试验, 测定果实冰点为-2.5 ~ -2.7 °C, 在此基础上, 2017年设4种低温处理: 分别为-2、0、2和4 °C。4种低温处理果实均放入0.02 mm厚聚乙烯(PE)保鲜袋内(主要是防止贮藏期果实失水), 每个低温处理均装15袋果, 每袋装果10.0 kg, 分别于采收当天(贮藏0 d), 贮藏30、45、90 d, 贮藏90 d + 20 °C货架3 d、贮藏90 d + 20 °C货架5 d(文中分别用90 d + 3 d和90 d + 5 d表示)测定果实品质生理和能量代谢相关指标, 同时调查果实褐变情况。当果皮褐变指数大于70时, 停止所有果实的品质和生理指标测定, 但能量代谢等相关指标继续测定, 果实褐变情况继续调查。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 调查果实褐变情况

参考Li等(2014)的方法并稍作修改, 按褐变发生程度分为5个等级: 0级无褐变; 1级褐变面积小于5%; 2级褐变面积为5% ~ 25%; 3级褐变面积为25% ~ 50%; 4级褐变面积大于50%。褐变指数 = $\sum(\text{褐变级别} \times \text{该级别果实个数}) / (4 \times \text{调查果实总数})$ 。每个低温处理每次重复调查50个果实, 共重复3次, 取平均值。

1.2.2 三磷酸腺苷(ATP)、二磷酸腺苷(ADP)、磷酸腺苷(AMP)和能荷(EC)测定

随机取20个果实, 将每个果实从赤道部位横切后切0.3 cm厚片, 取果皮 + 靠近果皮部位0.5 cm处的果肉混匀后进行低温液氮研磨, 参照Yi等(2008)和Liu等(2006)的方法, 使用高效液相色谱法进行测定, 所用仪器为Agilent HPLC Series1260(安捷伦科技有限公司)。ATP、ADP和AMP的含量单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。能量电荷(EC)的计算公式为: $\text{EC} = ([\text{ATP}] + 1/2[\text{ADP}]) / ([\text{ATP}] + [\text{ADP}] + [\text{AMP}])$ 。

1.2.3 果实相关酶活性测定

参考Jin等(2013)的方法稍作修改, 随机称取之前液氮研磨的果皮 + 果肉组织材料50 g, 加入100 mL提取液进行匀浆, 随后过滤, 滤液在4 000 × g、4 °C条件下离心10 min; 将上清液在14 000 × g下再次离心20 min, 沉淀用10 mL洗涤液进行洗涤, 重复上次操作, 得到沉淀物为线粒体, 用1.5 mL悬浮液对其悬浮, 从而获得用于酶分析的线粒体粗提物。

通过测定磷的释放量来测定H⁺-ATPase、Ca²⁺-ATPase酶活性(Jin et al., 2013)。1个单位的H⁺-ATPase、Ca²⁺-ATPase酶活性被定义为在分析条件下每min释放1 μmol无机磷所需要的酶量作为1个酶活动单位μ, 结果以 $\mu \cdot \text{g}^{-1}$ 表示。

用Bradford法测定酶的蛋白质含量(Bradford, 1976), 酶的比活性用 $\mu \cdot \text{g}^{-1}$ 蛋白质表示。

细胞色素氧化酶 (CCO) 活性的测定: 按照 Errede 等 (1978) 的方法并进行了少量修改, 对 CCO 活性进行检测。将混合溶液 (细胞色素 C 水溶液 + 二甲基对苯二胺溶液), 在 30 °C 下孵育 2 min, 随后加入线粒体提粗物 0.2 mL。用秒表记下反应开始的时间, 保温 3 min, 至出现红色, 于 550 nm 比色, 以每分钟吸光值变化 0.1 为 1 个活性单位, 结果以 $U \cdot mg^{-1}$ 表示。

琥珀酸脱氢酶 (SDH) 活性的测定: 使用 SDH 试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 测定 SDH 活性, 在 600 nm 处测定, 以每 min 吸光值变化 0.01 为 1 个活性单位, 结果以 $U \cdot mg^{-1}$ 表示。

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的测定: 参照 Duan 等 (2011) 方法, 稍作修改。取液氮研磨后贮藏于 -80 °C 的粉末状样品 5 g, 加入浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 的 20 mL 磷酸钠缓冲液 (pH 7.0, 内含质量分数为 0.1% 聚乙烯吡咯烷酮) 和适量石英砂, 冰浴研磨后冷冻离心 20 min ($15\ 000 \times g$, 4 °C), 吸取上清液作为待测液。反应液为 2.5 mL, 包含 $50 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 磷酸钠缓冲液 1.5 mL, $10 \mu\text{mol} \cdot L^{-1}$ 乙二胺四乙酸 0.3 mL, $13 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 核黄素 0.3 mL, $75 \mu\text{mol} \cdot L^{-1}$ 氮蓝四唑 0.3 mL, 酶液 0.1 mL, 空白则使用缓冲液代替酶液。将反应液在 4 000 lx 下光照反应 10 min, 随后进行暗处理, 立即在 560 nm 处测定, 1 个酶活单位为相当于引起 2.5 mL 反应液达到抑制 50% 所需的酶量。酶活以 $U \cdot mg^{-1}$ 表示。

以上指标每个温度处理每次重复随机选取 20 个果实, 3 次重复共 60 个果实, 取平均值。

1.2.4 果实相关品质指标测定

果实硬度 (去皮) 采用南非 GS-15 型水果质地分析仪测定, 探头直径为 11.3 mm, 单位为 $kg \cdot cm^{-2}$; 可溶性固形物 (SSC) 采用日本 PR-101 α 型折糖仪测定, 单位为 %, 以上检测指标每个处理每次随机取 20 个果实, 每个测试样品均在赤道线相反方向取两个点测定, 重复 3 次共 60 个果实, 结果取其平均值。维生素 C 和可滴定酸含量的测定采用瑞士 808 Titrande 自动电位滴定仪测定, 单位分别为 $mg \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ 和 %。每个处理每次随机选取 20 个果实, 3 次重复共 60 个果实, 取平均值。

1.2.5 果实呼吸速率和乙烯释放速率的测定

参考王志华等 (2011) 的方法, 采用山东鲁南瑞虹仪器有限公司的 SP-7890 气相色谱仪测定, 单位分别为 $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 和 $\mu\text{L} \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 。测定条件为: 用高纯 N_2 作为载气, 流速为 $55 \sim 58 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 燃气采用 H_2 和空气, 其中 H_2 压力为 0.2 MPa, 空气为 0.1 MPa; 转化炉温度 360 °C; 填充柱采用不锈钢材质, 柱温为 120 °C; 用温度为 140 °C 的 FID 检测器检测; 将不同低温处理的果实分别置于同样体积密封塑料盒内, 室温 (20 °C) 密封 1 h 后, 使用注射器抽取 1 mL 气体进行测定, 每个低温处理每次重复用果 15 个, 3 次重复共计 45 个果, 取平均值。

1.3 统计与分析

文中数据为 2017 年试验数据, 采用 Origin 2018 软件对数据进行作图, 试验数据统计分析采用 SPSS 统计软件, 结果以平均值 \pm 标准差表示, 差异显著性检验采用邓肯氏多重比较法, 差异显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度下 '金红' 苹果组织褐变 (果皮和果肉) 的变化

由表 1 可知, '金红' 苹果在不同贮藏温度下果皮褐变程度不同。在整个贮藏和货架期间, 2 °C 和 4 °C 贮藏的 '金红' 苹果果皮无褐变发生, -2 °C 和 0 °C 贮藏果实分别在 30 和 45 d 时出现褐变,

随着贮藏时间的延长, 果皮褐变指数逐渐升高, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 果实的果皮褐变指数显著高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在贮藏 90 d + 货架 5 d 试验结束时, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 果实的果皮褐变指数已高达 85.0, 是 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 2.66 倍。

调查结果 (表 1) 还表明, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温果实贮藏 45 d 时, 接近果皮 0.5 cm 部位的果肉出现轻微褐变, 褐变指数为 15.5, 贮藏 90 d 时, 褐变指数为 40.5, 贮藏 90 d + 货架 5 d 时, 果肉褐变指数进一步升高, 高达 62.5, 而 2 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实直到贮藏结束均未出现果肉褐变, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实出现了轻微的果肉褐变, 褐变指数为 8.5。

表 1 不同贮藏温度下‘金红’苹果果皮和果肉褐变指数的变化

Table 1 Changes of pericarp and flesh browning index of ‘Jinhong’ apples at different storage temperatures

贮藏温度/ $^{\circ}\text{C}$ Storage temperature	果皮褐变指数 Pericarp browning index						果肉褐变指数 Flesh browning index					
	0 d	30 d	45 d	90 d	90+3 d	90+5 d	0 d	30 d	45 d	90 d	90+3 d	90+5 d
-2	0	2.50 ± 0.00	15.10 ± 0.01 a	55.30 ± 0.02 a	70.40 ± 0.02 a	85.00 ± 0.02 a	0	0	15.50 ± 0.00	40.50 ± 0.02 a	54.30 ± 0.01 a	62.50 ± 0.02 a
0	0	0	0.50 ± 0.00 b	12.50 ± 0.00 b	21.20 ± 0.03 b	32.00 ± 0.02 b	0	0	0	2.53 ± 0.01 b	6.47 ± 0.00 b	8.50 ± 0.02 b
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注: 同列不同小写字母表示有显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences ($P < 0.05$).

2.2 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实能量指标的变化

‘金红’苹果在 -2 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏过程中 ATP 和 ADP 含量随着贮藏时间延长而持续下降, 而在 2 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 1, A、B) 贮藏前 30 d 呈上升趋势, 随后逐渐下降; $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降幅度显著高于其他温度 ($P < 0.05$), $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下始终最高。与之相反, 在不同贮藏温度下, AMP 含量随贮藏天数的增加而增加, 以 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏增加最多, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的增加最少 (图 1, C)。不同冷藏温度下果实能荷值变化如图 1, E 所示, 随着贮藏时间的延长, 除 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以外其他 3 个贮藏温度下的能荷值均呈现出逐渐下降的趋势。 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下果实前 30 d 稍有升高, 之后开始下降, 45 d 后比相同贮藏和货架期其他 3 个温度下的值要高; $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 显著低于其他贮藏温度下的果实 ($P < 0.05$), 从采收时至贮藏 90 d + 5 d 由 0.344 降到 0.122, 在贮藏 90 d + 5 d 时能荷值比 2、0 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别低 53.3%、45.0%、35.8%, 说明 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实能量水平最低, 能量亏损最严重。

如图 1, D 所示, 2 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实中腺嘌呤核苷酸总量 (AXP = ATP + ADP + AMP) 在贮藏前 30 d 呈上升趋势, 二者无显著差异 ($P < 0.05$), 30 d 后逐渐下降; -2 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实在整个贮藏过程中呈下降趋势, 贮藏 90 d + 5 d 时, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实为初始值的 76.7%, 与此不同, 此时 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实 AXP 含量最高。

2.3 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实 H^+ -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 酶活性的变化

H^+ -ATPase 对维持细胞内酸碱平衡有重要作用, 可以建立跨膜质子推动力, 利用推动力, 在电动势的催化下合成 ATP, 且 H^+ -ATPase 对 ATP 敏感, 是 ATP 适应酶; Ca^{2+} -ATPase 作为细胞膜上的 Ca^{2+} 泵, 可水解 ATP, 将 Ca^{2+} 推到细胞外, 从而使细胞内保持较低的 Ca^{2+} 浓度, 维持细胞稳态 (阚娟等, 2009)。

由图 2, A 可知, 在贮藏 0 ~ 45 d, 2 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实 H^+ -ATPase 酶活性呈现上升趋势, 贮藏 90 d 及不同货架期 H^+ -ATPase 酶活性变化不大; $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实先升高后下降, 在贮藏 45 d 后急速下

降；而 -2 °C 贮藏果实一直显著低于其他组果实中 ($P < 0.05$)。

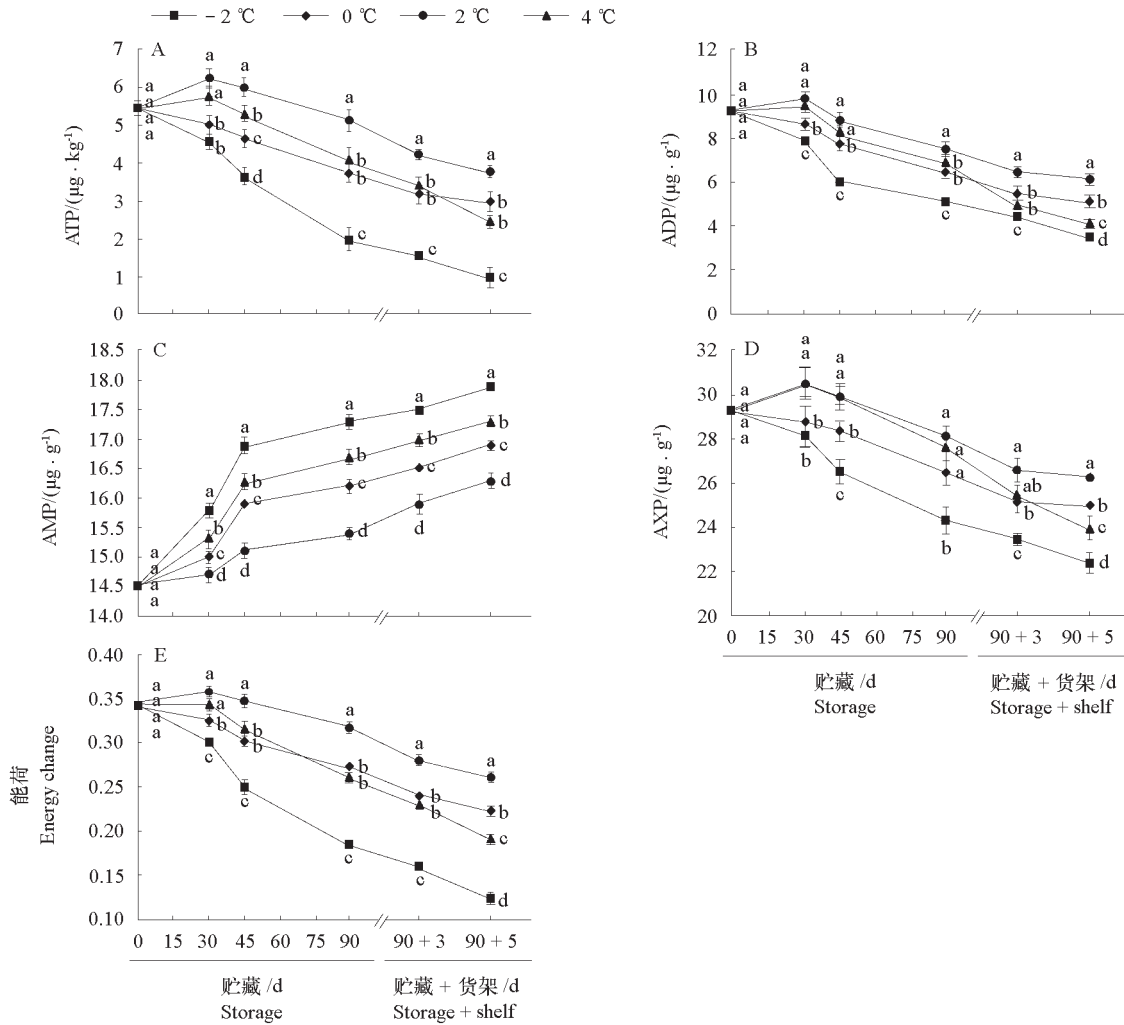


图 1 ‘金红’苹果在不同贮藏温度下 ATP、ADP、AMP、AXP 含量和能荷的变化

同一贮藏时期，不同小写字母表示不同贮藏温度下差异显著。下同。

Fig. 1 Changes of ATP, ADP, AMP, AXP contents and energy charge of 'Jinhong' apples at different storage temperatures. During the same storage period, different lowercase letters indicate significant differences at different storage temperatures. The same below.

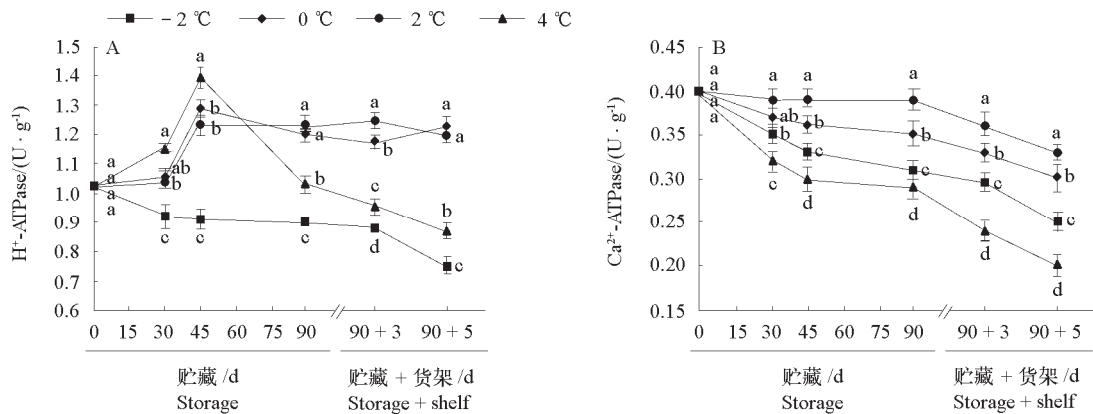


图 2 在不同贮藏温度下果实 H^+ -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 酶活性变化

Fig. 2 Changes of activities of H^+ -ATPase and Ca^{2+} -ATPase in ‘Jinhong’ apples at different storage temperatures

Ca^{2+} -ATPase 酶活性在 4 个贮藏温度下都呈持续下降趋势, 以 4 °C 贮藏的果实下降最显著, -2 °C 下降比 0 和 2 °C 明显 (图 2, B), 表明 4 和 -2 °C 下果实线粒体合成 ATP 能力下降, 线粒体内环境平衡遭到破坏, 而 2 °C 下 Ca^{2+} -ATPase 酶活性在贮藏期间均比其他贮藏温度要高。

2.4 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实 SDH 和 CCO 活性的变化

SDH 作为三羧酸循环中一种重要的酶, 可以催化琥珀酸脱氢酶转化成延胡索酸, 并使黄素腺嘌呤二核苷酸接受脱下的 H^+ , 进而氧化黄素腺嘌呤二核苷酸递氢体产生能量 (Acevedo et al., 2013)。而 CCO 是线粒体呼吸电子传递链的末端酶, 在氧化磷酸化过程中参与有氧代谢和产生能量 (Juan et al., 2011)。不同贮藏温度下‘金红’果实 SDH 活性变化如图 3, A 所示, -2 和 0 °C 贮藏温度下的果实 SDH 活性均在 45 d 前呈上升趋势, 随后逐渐下降, 整个贮藏过程和货架期间 -2 °C 贮藏果实始终低于 0 °C, 2 °C 贮藏果实在 0 ~ 90 d 呈上升趋势。如图 3, B 所示, 不同温度下‘金红’果实 CCO 活性随着贮藏时间延长逐渐下降, 2 和 0 °C 贮藏果实下降较缓慢, -2 和 4 °C 下降显著, 其中 -2 °C 下降最快, 在贮藏 90 d + 货架 5 d 时已经下降了 48.7%。整个贮藏过程和货架期间 -2 °C 贮藏果实 SDH 和 CCO 活性都显著小于其他贮藏温度的 ($P < 0.05$)。SDH 和 CCO 活性下降将会阻碍三羧酸循环和呼吸链的进行, 从而影响线粒体功能, 降低了能量生成效率 (Ekmekcioglu et al., 1999)。

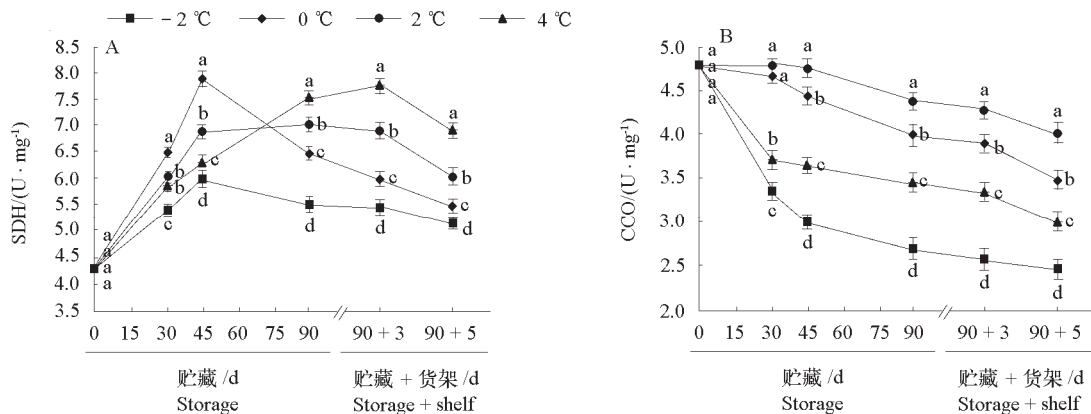


图 3 在不同贮藏温度下果实琥珀酸脱氢酶和细胞色素氧化酶活性变化
Fig. 3 Activities of SDH and CCO in ‘Jinhong’ apples at different storage temperatures

2.5 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实 SOD 活性的变化

由图 4 所示, SOD 活性在所有试验温度的果实中均呈现先增加后下降的趋势, -2 和 4 °C 贮藏果实在 30 d 后下降迅速, -2 °C 贮藏果实在整个贮藏过程和货架期均显著低于其他贮藏温度的果实 ($P < 0.05$)。整个贮藏过程和货架期间, 2 °C 贮藏果实的 SOD 活性最高。

2.6 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实硬度和内在品质的变化

‘金红’苹果硬度 (图 5, A) 随贮藏期延长而逐渐下降, 尤其在贮藏 45 d 后, 4 和 -2 °C 贮藏果实, 随着贮藏时间增加, 果实迅速软化, 硬度显著下降; 而 0 和 2 °C 在贮藏 45 d 后, 随着贮藏时间的延长, 二者的果实硬度无显著性差异 ($P > 0.05$)。随着贮藏时间增加, 4 °C 和 -2 °C 贮藏果

实可溶性固形物 (图 5, B) 呈先上升后下降的趋势, 而 0 °C 和 2 °C 果实从开始贮藏到 45 d 呈上升趋势, 45 d 后开始下降, 贮藏 90 d + 货架 3 d 后又呈增加趋势。4 个温度下的维生素 C 含量 (图 5, C) 都是下降的, 在贮藏 45 d 后, -2 °C 贮藏果实急剧下降, 贮藏 90 d 时已降低至 $59.9 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 比 0 °C 贮藏果实低 50.2%, 说明 -2 °C 果实维生素 C 含量损失率较大。随着贮藏时间增加, 4 和 -2 °C 贮藏果实可滴定酸含量 (图 5, D) 逐渐下降, 贮藏于 0 和 2 °C 下的果实先下降, 进入货架期先升高后降低。在贮藏后期和货架期间, 4 °C 贮藏果实的硬度、可溶性固形物、维生素 C 和可滴定酸含量保持在较低水平。

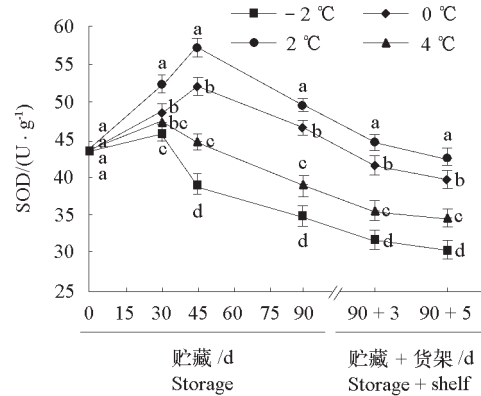


图 4 在不同贮藏温度下果实超氧化物歧化酶活性的变化
Fig. 4 Activity of SOD in 'Jinhong' apples at different storage temperatures

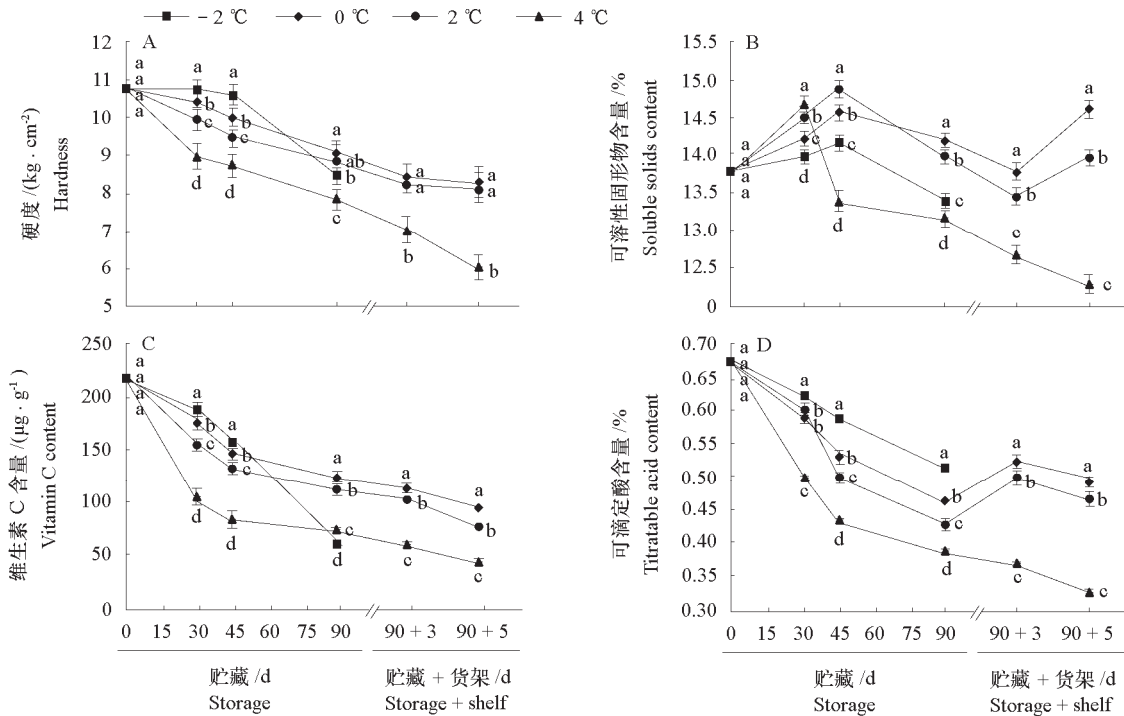


图 5 在不同贮藏温度下果实硬度和内在品质的变化
Fig. 5 Changes of hardness and internal quality of 'Jinhong' apples at different storage temperatures

2.7 不同贮藏温度下‘金红’苹果果实呼吸速率和乙烯释放速率的变化

呼吸速率和乙烯释放速率具有相同的变化趋势, 均先升高后下降。每个贮藏温度下果实出现呼吸高峰的时间具有差异 (图 6, A), 其中 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实呼吸高峰出现最早且呼吸速率最高, 这与果实出现果皮褐变的时间相一致, 但在贮藏 30 d 后其呼吸速率急剧下降。与其他 3 个温度相比, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实的乙烯释放速率一直保持最低水平, 贮藏 90 d 时, 比 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实低 75.3% (图 6, B)。 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实在 45 d 时同时出现呼吸高峰和乙烯释放高峰, 之后急剧下降, 贮藏 90 d + 货架 3 d 和贮藏 90 d + 货架 5 d 期间, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 果实的呼吸速率和乙烯释放速率显著低于 0 和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

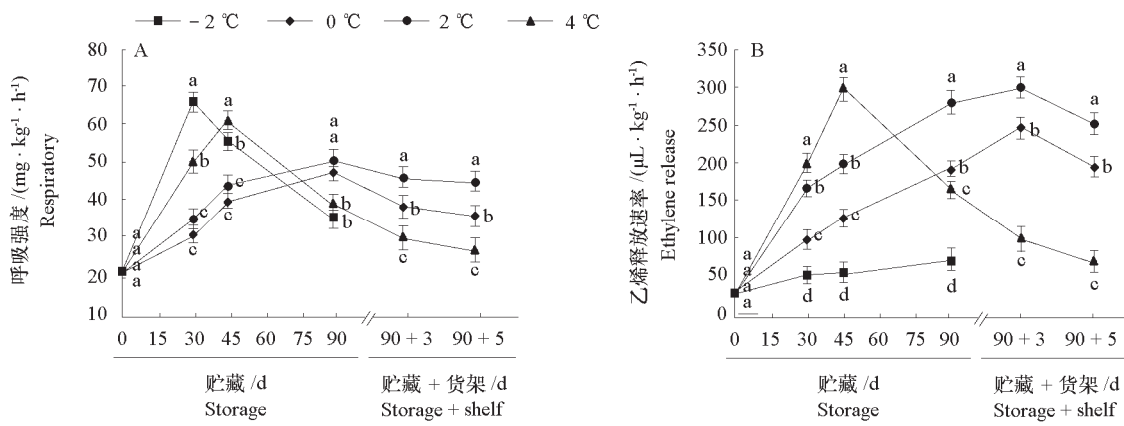


图 6 在不同贮藏温度下果实呼吸速率和乙烯释放速率的变化

Fig. 6 Changes of respiratory intensity and ethylene release of ‘Jinhong’ apples at different storage temperatures

2.8 能量水平与相关酶活性及主要生理品质指标之间的相关性分析

由表 2 可以看出, H^+ -ATPase、 Ca^{2+} -ATPase 和 CCO 酶活性与 ATP 含量均呈极显著正相关 ($r = 0.524^{**}$, $r = 0.733^{**}$, $r = 0.852^{**}$), 同样与能荷值也呈显著相关性 ($r = 0.501^*$, $r = 0.780^{**}$, $r = 0.876^{**}$), 能量变化与能量代谢相关酶密切相关。ATP 含量与 SOD 呈极显著正相关 ($r = 0.844^{**}$), ATP 的生产与活性氧清除酶的诱导有关, SOD 酶是自由基去除酶, 需要消耗能量, 可以提供较高的能量物质, 具有较强的去氧能力。

表 2 能量水平与相关酶活性的相关性分析

Table 2 Pearson correlation analysis among energy levels and enzyme activity

指标 Indicator	ATP	ADP	AMP	能荷 EC	H^+ -ATPase	Ca^{2+} -ATPase	SDH	CCO	SOD
ATP	1.000								
ADP	0.957**	1.000							
AMP	-0.905**	-0.943**	1.000						
能荷 EC	0.992**	0.973**	-0.937**	1.000					
H^+ -ATPase	0.524**	0.386	-0.329	0.501*	1.000				
Ca^{2+} -ATPase	0.733**	0.791**	-0.865**	0.780**	0.357	1.000			
SDH	-0.048	-0.248	0.336	-0.110	0.356	0.367	1.000		
CCO	0.852**	0.828**	-0.927**	0.876**	0.513*	0.828**	-0.127	1.000	
SOD	0.844**	0.768**	-0.728**	0.826**	0.679**	0.706**	0.218	0.776**	1.000

注: **表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关, *表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。 $n = 9$ 。下同。

Note: ** Significant difference at $P < 0.01$ level, * Significant difference at $P < 0.05$ level. $n = 9$. The same below.

由表 3 可知, '金红' 果实褐变指数与 ATP 含量 ($r = -0.808^{**}$) 和 EC ($r = -0.804^{**}$) 呈极显著负相关, 果实低温贮藏过程中的能量损失与褐变指数密切相关。ATP 含量与硬度呈极显著正相关 ($r = 0.706^{**}$), 能量水平高, 有利于保持细胞壁与细胞膜的完整性, 延缓果实软化。ATP 含量与维生素 C ($r = 0.723^{**}$)、可滴定酸 ($r = 0.525^{**}$)、可溶性固形物含量 ($r = 0.601^{**}$) 均呈极显著正相关, 能量水平的变化也一定程度上影响果实品质指标。

表 3 能量水平与主要生理品质指标间的相关性分析
Table 3 Pearson correlation analysis among energy levels and main physiological indicators of quality

指标 Indicator	ATP	ADP	AMP	能荷 EC	褐变指数 Browning index	硬度 Hardness	维生素 C Vitamin C	可滴定酸 Titratable acid	可溶性 固形物 Soluble solid	呼吸强度 Respiratory	乙烯 释放速率 Ethylene release
ATP	1.000										
ADP	0.957 ^{**}	1.000									
AMP	-0.905 ^{**}	-0.943 ^{**}	1.000								
能荷 EC	0.992 ^{**}	0.973 ^{**}	-0.937 ^{**}	1.000							
褐变指数 Browning index	-0.808 ^{**}	-0.677 ^{**}	0.664 ^{**}	-0.804 ^{**}	1.000						
硬度 Hardness	0.706 ^{**}	0.803 ^{**}	-0.789 ^{**}	0.761 ^{**}	-0.440 [*]	1.000					
维生素 C Vitamin C	0.723 ^{**}	0.803 ^{**}	-0.866 ^{**}	0.783 ^{**}	-0.540 ^{**}	0.941 ^{**}	1.000				
可滴定酸 Titratable acid	0.525 ^{**}	0.675 ^{**}	-0.733 ^{**}	0.598 ^{**}	-0.233	0.918 ^{**}	0.911 ^{**}	1.000			
可溶性固形物 Soluble solid	0.601 ^{**}	0.593 ^{**}	-0.547 ^{**}	0.601 ^{**}	-0.307	0.635 ^{**}	0.498 [*]	0.497 [*]	1.000		
呼吸速率 Respiratory	0.199	0.078	0.110	0.161	-0.267	0.098	-0.111	-0.169	0.339	1.000	
乙烯释放速率 Ethylene release	0.206	0.017	0.038	0.154	-0.286	-0.266	-0.329	-0.422 [*]	0.258	0.591 ^{**}	1.000

$n = 11$.

3 讨论

3.1 低温贮藏对 '金红' 苹果果实能量水平及酶活性的影响

近年来一些研究表明, 包括果皮褐变在内的一些生理障碍可能与细胞能量水平的降低有关 (Liu et al., 2011; Zhou et al., 2014)。贮藏可导致果实采后 ATP 和 EC 含量降低, 导致能量代谢紊乱 (Wang et al., 2015)。本试验结果表明, 随着贮藏温度的降低和贮藏时间的延长, 低温贮藏的 '金红' 果实 EC 含量降低, AXP 明显减少。AXP 的减少必然会导致 ATP 总量的减少, 这可能会使 '金红' 果皮褐变指数增加。本研究中, '金红' 果实不同低温下果皮褐变发生程度不同, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏 30 d、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏 45 d 开始发生褐变; $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实未出现果皮褐变症状, 且果实 ATP、ADP 和 EC 含量较高; 随着贮藏时间和货架期的延长, 果实中 AXP 含量也呈逐渐下降趋势, 但 AXP 含量高于 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏的果实, 进一步说明果皮褐变指数不仅与 EC 有关, 而且与 AXP 关系更为密切。

能量变化与能量代谢相关酶密切相关, 其中 ATPase、SDH 和 CCO 是调节 ATP 合成的关键酶 (Jin et al., 2013)。本研究中能量指标 (ATP、ADP 和 EC) 与 H^+ -ATPase、 Ca^{2+} -ATPase、SDH 和 CCO 酶活性的变化趋势非常相似, 其中 ATP 含量与 H^+ -ATPase、 Ca^{2+} -ATPase 和 CCO 酶活性均呈极显著正相关 ($r = 0.524^{**}$, $r = 0.733^{**}$, $r = 0.852^{**}$)。能量代谢相关酶活性下降, ATP、ADP 和 EC 水平降低, 使果实褐变发生加重, 特别是 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏果实的 H^+ -ATPase、SDH 和 CCO 活性都显著低于其

他 3 个温度, 褐变最严重, 其 Ca^{2+} -ATPase 活性也显著低于 2 和 0 °C 贮藏温度的果实, 表明能量相关酶活性下降使线粒体结构和功能被破坏, 降低线粒体产能效率, 使细胞能量亏损, 引起果实褐变。4 °C 果实虽未发生褐变, 但 Ca^{2+} -ATPase 较其他温度低, 这可能是果实在 4 °C 下不耐贮藏, 提前衰老的原因之一, 但其深层次的原因和机理还有待进一步研究。

能量物质 ATP 与 SOD 活性呈极显著正相关 ($r = 0.844^{**}$), ‘金红’果实贮藏过程中, 维持较高的 ATP 含量, 可以保持细胞内较高的活性氧清除能力, 减少活性氧的积累, 减轻膜脂过氧化作用。本研究中发现, -2 °C 贮藏果实 SOD 活性在整个贮藏过程和货架期均显著低于其他贮藏温度的果实 ($P < 0.05$), 且 ATP 能量最低; 而 2 °C 贮藏果实的 SOD 活性最高, ATP 能量水平最高, 也说明了不同贮藏温度果实的 SOD 活性与能量水平密切相关。

3.2 低温贮藏对‘金红’苹果果实相关生理及品质的影响

通常认为, 低温贮藏可较好保持果品品质, 降低果品的呼吸作用。但温度过低, 则会使果实出现生理代谢失调, 果肉出现异味甚至苦味, 最终导致组织褐变(王志华 等, 2014)。本试验中, ‘金红’苹果果实在 4 种不同低温下贮藏品质和组织褐变发生了一定程度的变化, 贮藏 30 和 45 d 时, -2 °C 下果实先后出现果皮和果肉褐变, 同时维生素 C 含量较其他 3 个温度急剧下降, 随着贮藏时间延长, -2 °C 果皮和果肉褐变程度逐渐加重, 0 °C 果实出现轻微褐变, 在整个贮藏和货架期间, 2 °C 和 4 °C 果实未出现褐变症状。结果还表明, -2 °C 贮藏的果实维生素 C 含量下降最明显, 乙烯释放速率保持最低水平; 4 °C 贮藏果实的硬度、可溶性固形物含量和可滴定酸含量下降幅度较大; 2 °C 贮藏果实品质和风味一直保持最好; 0 °C 果实次之。

通过相关性分析, 可以得出‘金红’果实的硬度与 ATP 含量 ($r = 0.706^{**}$) 和 EC ($r = 0.761^{**}$) 呈极显著正相关, 虽然 4 °C 贮藏果实中 ATP 和 EC 含量较高, 但其硬度下降的幅度却大于 -2 °C 贮藏的果实。因此, 有必要进一步研究冷藏后硬度变化与能量状态的关系。ATP 含量与维生素 C ($r = 0.723^{**}$)、可滴定酸 ($r = 0.525^{**}$)、可溶性固形物含量 ($r = 0.601^{**}$) 均呈极显著正相关, 说明能量水平的变化也一定程度上影响果实品质指标。

4 结论

2 °C 贮藏的‘金红’苹果果实能量代谢相关酶 (H^+ -ATPase、 Ca^{2+} -ATPase、SDH 和 CCO) 均表现出较高活性, 同时 SOD 酶活性也保持最高, 品质和风味最好。-2 和 0 °C 的‘金红’苹果果实出现果皮和果肉褐变, 在低温贮藏条件下, 褐变出现时间越早, 症状越严重, 并伴随着能量水平及能量代谢酶活性的降低, 其中 -2 °C 的能量水平和能量代谢相关酶 (H^+ -ATPase、SDH 和 CCO) 活性均最低, 褐变症状最严重。结果表明‘金红’苹果果实褐变发生与能量亏缺有密切关系, 能量亏缺越多, 褐变发生越严重。此外, 4 °C 贮藏的果实虽然 Ca^{2+} -ATPase 酶活性偏低, 但能量水平高于 -2 和 0 °C, 未出现组织褐变, 但果实硬度、可溶性固形物和可滴定酸含量下降幅度较大。

References

- Acevedo, Raúl M, Maiale S J, Pessino S C. 2013. A succinate dehydrogenase flavoprotein subunit-like transcript is upregulated in *Ilex paraguariensis* leaves in response to water deficit and abscisic acid. *Plant Physiology and Biochemistry*, 65: 48 - 54.
- Bradford M M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72: 248 - 254.

- Chen M Y, Lin H T, Zhang S, Lin Y F, Chen Y H, Lin Y X. 2015. Effects of adenosine triphosphate (ATP) treatment on postharvest physiology, quality and storage behavior of longan fruit. *Food and Bioprocess Technology*, 8 (5): 971 - 982.
- Chen Yiting, Feng Xin, Lai Ruilian, Gao Minxia, Chen Wenguang, Wu Rujian. 2018. Cloning and expression regulation of the *AdCCSI* from *Actinidia chinensis* var. *deliciosa*. *Acta Horticulturae Sinica*, 45 (12): 2371 - 2382. (in Chinese)
- 陈义挺, 冯新, 赖瑞联, 高敏霞, 陈文光, 吴如健. 2018. 猕猴桃 *AdCCSI* 基因的克隆及其表达调控. *园艺学报*, 45 (12): 2371 - 2382.
- Duan X W, Liu T, Zhang D D. 2011. Effect of pure oxygen atmosphere on antioxidant enzyme and antioxidant activity of harvested litchi fruit during storage. *Food Research International*, 44: 1905 - 1911.
- Errede B, Kamen M, Hatefi Y. 1978. Preparation and properties of complex IV (ferrocytochrome c: oxygen oxidoreductase EC 1.9.3.1). *Methods in Enzymology*, 53 (1): 40 - 47.
- Ekmekcioglu C, Strauss-Blasche G, Leibetseder V J, Marktl W. 1999. Toxicological and biochemical effects of different beverages on human intestinal cells. *Food Research International*, 32 (6): 421 - 427.
- Gao Xue, Liu Xue-fen, Zou Yuan, Zhuang Lü-ou, Huang Chao-hui. 2011. Effect of low temperature on postharvest physiology and storage of Chinese bayberry fruit. *Journal of Hanshan Normal University*, 32 (3): 73 - 76. (in Chinese)
- 高雪, 刘雪芬, 邹苑, 庄绿欧, 黄超辉. 2011. 低温对杨梅采后生理及保鲜效果的影响. *韩山师范学院学报*, 32 (3): 73 - 76.
- Gao Zhao-yin, Hu Mei-jiao, Zhao Chao, Zhang Zheng-ke, Li Min, Li Huan-ling, Wang Guo, Sun Jin-hua, Wen Jie, Wang Jiabao. 2018. Effects of energy charge levels and expression of energy charge genes on browning of post-harvest litchi fruit. *Acta Horticulturae Sinica*, 45 (1): 51 - 60. (in Chinese)
- 高兆银, 胡美姣, 赵超, 张正科, 李敏, 李焕苓, 王果, 孙进华, 文婕, 王家保. 2018. 荔枝能荷水平及能量相关基因表达与采后褐变关系的研究. *园艺学报*, 45 (1): 51 - 60.
- Hu Wei-rong, Zhang Zhao-qi, Jiang Yue-ming, Ji Zuo-liang. 2005. Study on the parameter of ice-temperature storage in litchi (*Litchi chinensis* Sonn.). *Scientia Agricultura Sinica*, 38 (4): 797 - 802. (in Chinese)
- 胡位荣, 张昭其, 蒋跃明, 季作梁. 2005. 采后荔枝冰温贮藏的适宜参数研究. *中国农业科学*, 38 (4): 797 - 802.
- Jiang Y M, Jiang Y L, Qu H X. 2008. Energy aspects in ripening and senescence of harvested horticultural crops. *Stewart Postharvest Review*, 4: 1 - 5.
- Jin P, Zhu H, Wang J, Chen J, Wang X, Zheng Y. 2013. Effect of methyl jasmonate on energy metabolism in peach fruit during chilling stress. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93 (8): 1827 - 1832.
- Juan K, Wang H M, Jin C H. 2011. Changes of reactive oxygen species and related enzymes in mitochondrial respiration during storage of harvested peach fruits. *Agriculture Science in China*, 10 (1): 149 - 158.
- Kan Juan, Wang Hong-mei, Jin Chang-hai, Huang Li-hua. 2009. Changes of active oxygen and mitochondria respiratory metabolism-related enzymes during maturation of peach fruit. *Food Science*, 30 (8): 275 - 279. (in Chinese)
- 阚娟, 王红梅, 金昌海, 黄力华. 2009. 桃果实成熟过程中活性氧和线粒体呼吸代谢相关酶的变化. *食品科学*, 30 (8): 275 - 279.
- Li P, Zheng X, Liu Y, Zhu Y. 2014. Pre-storage application of oxalic acid alleviates chilling injury in mango fruit by modulating proline metabolism and energy status under chilling stress. *Food Chemistry*, 142 (1): 72 - 78.
- Liu H, Jiang Y, Luo Y, Jiang W. 2006. A simple and rapid determination of ATP: ADP and AMP concentrations in pericarp tissue of litchi fruit by high performance liquid chromatography. *Food Technology and Biotechnology*, 4 (44): 531 - 534.
- Liu H, Song L, You Y, Li Y, Duan X, Jiang Y, Joyce D C, Ashraf M, Lu W. 2011. Cold storage duration affects litchi fruit quality, membrane permeability, enzyme activities and energy charge during shelf time at ambient temperature. *Postharvest Biology and Technology*, 60 (1): 24 - 30.
- Liu Ji-xun. 1981. Cold resistant apple "Jinhong". Selected and compiled by Jilin Province's experience in agricultural scientific and technological achievements. Jilin: Jilin People's Publishing House: 597. (in Chinese)
- 刘继勋. 1981. 抗寒苹果“金红”//吉林省农业科技成果技术经验选编. 吉林: 吉林人民出版社: 597.
- Saquet A A, Streif J, Bangert F. 2000. Changes in ATP, ADP and pyridine nucleotide levels related to the incidence of physiological disorders in 'Conference' pears and 'Jonagold' apples during controlled atmosphere storage. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75 (2): 243 - 249.

- Su Xingguo, Jiang Yueming, Duan Xuewu. 2005. Effects of pure oxygen on the rate of skin browning and energy status in longan fruit. *Food Technology and Biotechnology*, 4 (43): 359 - 365.
- Wang Jiao, Li Li-li, Yuan Shu-zhi, Ding Xin-yuan, Zhang Xiong-feng, Xu Li-min, Cao Jian-kang. 2014. Study on storability of plums of different cultivars at low temperature storage. *Science and Technology of Food Industry*, 35 (19): 343 - 350. (in Chinese)
王 皎, 李丽莉, 袁树枝, 丁鑫源, 张雄峰, 许丽敏, 曹建康. 2014. 不同品种李果实低温贮藏特性研究. *食品工业科技*, 35 (19): 343 - 350.
- Wang Yang, Hu Hua-li, Liang Li-song, Zhang Rui, Li Peng-xia, Fu Zhan-fang, Wang Gui-xi. 2008. Effect of different storage temperature on fruit quality of apricot. *Jiangsu Agricultural Sciences*, (6): 236 - 238. (in Chinese)
汪 洋, 胡花丽, 梁丽松, 张 瑞, 李鹏霞, 付占芳, 王贵禧. 2008. 不同贮藏温度对杏果实品质的影响. *江苏农业科学*, (6): 236 - 238.
- Wang Y, Luo Z, Khan Z U, Mao L, Ying T. 2015. Effect of nitric oxide on energy metabolism in postharvest banana fruit in response to chilling stress. *Postharvest Biology and Technology*, 108: 21 - 27.
- Wang Zhi-hua, Jiang Yun-bin, Wang Wen-hui, Hang Bo, Du Yan-min, Tong Wei, Jia Xiao-hui. 2014. Effects of different low storage temperatures on tissue browning and quality of ‘Dangshan Suli’ pears during shelf-life. *Acta Horticulturae Sinica*, 41 (12): 2393 - 2401. (in Chinese)
王志华, 姜云斌, 王文辉, 杭 博, 杜艳民, 佟 伟, 贾晓辉. 2014. 不同低温贮藏对砀山酥梨货架期组织褐变和品质的影响. *园艺学报*, 41 (12): 2393 - 2401.
- Wang Zhi-hua, Wang Wen-hui, Tong Wei. 2011. Effects of 1-MCP combined with cooling method on physiology and core browning of pear after harvest. *Journal of Fruit Science*, 28 (3): 513 - 517. (in Chinese)
王志华, 王文辉, 佟 伟. 2011. 1-MCP 结合降温方法对鸭梨采后生理和果心褐变的影响. *果树学报*, 28 (3): 513 - 517.
- Yang E, Lu W, Qu H, Lin H, Wu F, Yang S, Chen Y, Jiang Y. 2009. Altered energy status in pericarp browning of litchi fruit during storage. *Nordic Journal of Botany*, 5 (41): 2271 - 2279.
- Yi C, Qu H, Jiang Y, Shi J, Duan X, Joyce D, Li Y. 2008. ATP-induced changes in energy status and membrane integrity of harvested litchi fruit and its relation to pathogen resistance. *Journal of Phytopathology*, 156 (6): 365 - 371.
- Zhang Wen-ying. 2007. Effects of different harvesting periods and storage methods on storage quality of golden red apple [Ph. D. Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. (in Chinese)
张文英. 2007. 不同采收期和贮藏方式对金红苹果贮藏品质的影响 [博士学位论文]. 北京: 中国农业科学院.
- Zhang Wen-ying, Jiang Xiao-kun. 2009. Effect of harvest period on storage quality of golden red apple. *Food Research and Development*, 30 (12): 144 - 147. (in Chinese)
张文英, 姜晓坤. 2009. 采收期对金红苹果贮藏品质的影响. *食品研究与开发*, 30 (12): 144 - 147.
- Zhao Yi, Ma Li-qun, Luo Yun-bo, Zhu Hong-liang. 2018. Effect of low temperature on postharvest physiology and storage of Chinese bayberry fruit. *Storage and Process*, 18 (3): 8 - 14. (in Chinese)
赵 玮, 马力群, 罗云波, 朱鸿亮. 2018. 贮藏温度对嘎啦苹果贮藏期及货架期品质的影响. *保鲜与加工*, 18 (3): 8 - 14.
- Zhou Q, Zhang C, Cheng S, Wei B, Liu X, Ji S. 2014. Changes in energy metabolism accompanying pitting in blueberries stored at low temperature. *Food Chemistry*, 164: 493 - 501.