

温度对采后“国峰7号”李果实贮藏品质的影响

郝邢维¹, 周倩¹, 高芳¹, 张婷婷¹, 郝义², 姜永峰², 陆玉卓²

(1.沈阳农业大学 食品学院, 沈阳 110866; 2.辽宁省果树科学研究所, 辽宁 营口 115009)

摘要: 目的 确定适宜李果实的最佳贮藏温度, 明确不同低温贮藏对李果实生理特性和品质的影响。

方法 以“国峰7号”李果实为试材, 通过对不同贮藏温度(-2 ± 0.5)、(-1 ± 0.5)、(0 ± 0.5)、(1 ± 0.5)、(2 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 下果实品质和生理特性进行研究。**结果** 在(0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 下贮藏可显著抑制“国峰7号”李果实的硬度、可滴定酸(Titrable Acid, TA)、总酚及类黄酮含量的下降, 维持果皮色泽, 抑制呼吸强度及减小乙烯释放高峰的峰值, 并能将果实可溶性固形物(Soluble Solid Content, SSC)含量维持在较高的水平。同时能延缓“国峰7号”李果实花青素、相对膜透性、超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)及过氧化氢(H_2O_2)含量升高的时间, 延缓李果实采后的成熟与衰老进程。此外, 该温度能够推迟多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)以及超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性高峰的出现, 以提升其抗氧化能力, 控制采后贮藏期间果品品质的降低。**结论** 在贮藏温度(0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 内能够有效延长李果实贮藏保鲜期并维持果实品质。

关键词: 李果实; 贮藏; 品质; 温度

中图分类号: S662.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)01-0213-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.024

Effects of Temperature on Storage Quality of Postharvest 'Guofeng No.7' Plum Fruit

HAO Xing-wei¹, ZHOU Qian¹, GAO Fang¹, ZHANG Ting-ting¹,
HAO Yi², JIANG Yong-feng², LU Yu-zhuo²

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Liaoning Institute of Pomology, Liaoning Yingkou 115009, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the optimal storage temperature for plum fruit, and to clarify the effects of different low temperature storage on physiological characteristics and quality of plum fruit. The fruit quality and physiological characteristics of 'Guofeng No.7' plum fruit were studied at different storage temperature (-2 ± 0.5), (-1 ± 0.5), (0 ± 0.5), (1 ± 0.5), (2 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$. The results showed that storage at (0 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$ could significantly inhibit the decrease of hardness, titrable acid (TA), total phenols and flavonoids contents of 'Guofeng No.7' plum fruit, keep fruit color, inhibition of respiratory rate and ethylene release peaks, and maintain a high level of soluble solids content (SSC). At the same time, it can delay the increase of anthocyanin, relative membrane permeability, superoxide anion ($\text{O}_2^{\cdot-}$) and hydrogen peroxid (H_2O_2) contents in 'Guofeng No. 7' plum fruit, and delay the ripening and senescence process of plum fruit after harvest. In addition, the temperature can effectively delayed the peak of polyphenol oxidase (PPO), peroxidase (POD) and

收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0401305); 营口市大石桥特色果品商品化提升科技特派团(2021JH1/0100009); 辽宁省农业科学院院长基金项目(2022QN2312)

作者简介: 郝邢维(1999—), 女, 硕士生, 主攻果蔬采后生物学与贮运保鲜。

通信作者: 郝义(1969—), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为果品贮藏保鲜。

superoxide dismutase (SOD) activities, improve the antioxidant capacity and control the quality of fruit during storage after harvest. Therefore, (0 ± 0.5) °C can effectively prolong the storage period and maintain fruit quality.

KEY WORDS: plum fruit; storage; quality; temperature

李属于蔷薇科 (Rosaceae) 桃李属 (*Prunus salicina* Lindl.)^[1]。“国峰 7 号”李是由辽宁省果树科学研究所李杏种质创新团队选育的“龙园秋李”和引进的“澳 14”为亲本杂交育成的优良中晚熟品种。该品种不仅色泽独特,香气浓郁,具有极高的经济价值,深受消费者喜爱,而且因其具有耐贮运的优势,还可延长全年李果实的供应期,实现李果实的周年供应。因其是典型的呼吸跃变型果实且成熟期又恰逢多雨高温季节,在采后贮运过程中,李果实会产生大量的乙烯,出现呼吸高峰,从而影响内部组织发生一系列有关成熟衰老的生理生化反应,使物组织器官从未成熟转向成熟,并步入衰老直至腐烂。具体表现为果肉褐变、果实软化、含糖量增加、组织透性增加、挥发性风味物质丧失等^[2],因此,研究延缓李果实成熟衰老和延长贮藏寿命的方法有重要的意义。

适宜的低温能较好地维持李果实外观品质与内在质地,是目前果蔬采后贮藏有效的技术手段^[3],但果蔬若长期贮藏于不适宜的低温环境里,极易引起冷害,造成严重的经济损失^[4]。研究表明,李果实的冰点为 -2.2 °C,在 -1.0 °C就会发生冷害,在不发生冻害的前提下,贮藏温度越低果实保鲜效果越好^[5],然而“国峰 7 号”李最适宜的贮藏温度及其在不同温度条件下的贮藏期限等问题至今仍不明确,因此,本实验选取 5 种温度处理对“国峰 7 号”李果实品质变化进行研究,深入探讨不同低温贮藏对李果实生理特性和品质的影响,探索适宜“国峰 7 号”李果实的贮藏温度,为延长采后贮藏期和保持果实品质提供理论依据。

1 实验

1.1 材料处理

“国峰 7 号”李果实于 2020 年 9 月 6 日采自辽宁省盖州市小石棚乡杨树房村。采收时剔除病果、伤果、挑选大小均一、八成熟的新鲜果实。当天立即运回辽宁省果树科学研究所,用 0.02 mm 厚的 PE 膜包装后,在温度 (4 ± 0.5) °C、空气相对湿度为 85%~90% 的冷库中预冷 24 h。预冷结束后分别置于 (-2 ± 0.5) 、 (-1 ± 0.5) 、 (0 ± 0.5) 、 (1 ± 0.5) 、 (2 ± 0.5) °C 的冷库中贮藏。挑选 100 个/组,每组处理设 3 次生物学重复。贮藏期间每隔 7 d 随机取样 1 次,共取 6 次样,每次随机取 10 个果实用于各项品质指标的测定。

1.2 仪器与设备

主要仪器: CR-10 精密色差仪,日本柯尼卡美能达

有限公司;GY-4 型果实硬度计,乐清市爱德堡有限公司;PAL-1 数字式糖度计折光仪,日本 Atago 有限公司;DDS-11A 电导率仪,上海越平公司;CP 精密电子天平,美国 Ohaus 公司;RO-DI 型超纯水系统,苏州江东公司;TGL-16B 高速台式离心机,上海中庸公司;UV762 紫外-可见分光光度计,上海鼎科公司;普通冷藏库。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 硬度测定

采用 GY-4 果实硬度计测定果实硬度。将测定 3 次的平均值记录为果实硬度,单位为 N。

1.3.2 可溶性固形物含量 (Soluble Solid Content, SSC) 测定

采用 PAL-1 型数显糖度仪测定果实可溶性固形物含量,每组测定 3 次,结果取平均值,单位为%。

1.3.3 可滴定酸含量 (Titrable Acid, TA) 测定

参照曹建康等的方法^[6],可滴定酸含量以苹果酸计 (折算系数 0.067),单位为%。

1.3.4 果实表面色泽测定

采用 CR-10 精密色差仪对李果实表面颜色 (亮度值 L^* 、红色度 a^* 、黄色度 b^*) 测定,每组测定 3 次,取平均值。

1.3.5 呼吸强度测定

采用曹建康等^[6]的静置法进行呼吸强度的测定,呼吸强度以每小时每千克果蔬累积释放的 CO_2 质量表示,单位为 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。

1.3.6 乙烯释放量测定

乙烯释放量的测定参照唐琦等^[7]方法并修改,单位为 $\text{mL}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 。

1.3.7 果实营养品质测定

总酚含量采用 Mphaphuli^[8]等的测定方法。花青素含量测定采用 pH 示差法^[9]。类黄酮含量测定采用硝酸铝显色法^[10],单位为 g。

1.3.8 果实生理指标测定

相对电导率参照司敏^[11]等的测定方法,单位为%;超氧阴离子 (O_2^-) 产生速率和过氧化氢 (H_2O_2) 含量参照 Chen^[12]等的测定方法,单位为 $\mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g})$ 和 $\mu\text{mol}/\text{g}$;过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性采用愈创木酚比色法^[13],单位为 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$;多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性参照陈文烜^[14]的方法,单位为 $\text{U}/(\text{g}\cdot\text{min})$;超氧化物歧化酶 (Superoxide

Dismutase, SOD) 活性参照王艳颖等^[15]的方法, 单位为 U/g。

1.4 数据分析

采用 SPSS 26.0 软件进行显著性分析, 采用 Origin 2018 绘图软件作图。

2 结果与分析

2.1 贮藏温度对“国峰 7 号”李果实果皮色泽、硬度的影响

果皮的色泽变化是反映果实新鲜度和成熟度的主要指标, 也是消费者选购时最直观的衡量标准。如图 1a、b、c 所示, L^* 值和 b^* 值在贮藏期间一直下降, a^* 值则呈持续上升的趋势。这表示随着贮藏期的增加, 李果实果皮色泽均逐渐变暗, 但与其他 4 组相比, 0°C 可明显延缓了 L^* 值和 b^* 值的下降 ($P<0.05$)。在贮藏第 42 天时, 0°C 处理组的 L^* 值、 a^* 值与 b^* 值均显著高于其他 4 组 ($P<0.05$)。综上所述, “国峰 7 号”

李果实不同贮藏温度下果皮色泽亮度和黄色度均逐渐降低, 红色逐渐加深, 这一现象除了由贮藏温度所致外, 还可能同花青素的合成与积累有关。前期有研究表示, 花青素有很强的抗氧化能力, 同时酚类、类黄酮等次级产物也是果实中重要的抗氧化物质, 均会影响果实的色泽^[16]。

果肉硬度变化反映了果实软化的程度。由图 1d 可知, “国峰 7 号”李果实采后硬度在整个贮藏过程中表现为先升高后降低的趋势, 且在贮藏第 21 天时, 各贮藏温度都出现峰值。这是由于果胶物质在长期贮藏过程中不断被果胶酶水解引起的。果胶酶活性越低, 果胶物质的水解速度就越慢, 果实软化速度也会越慢。在贮藏期第 7 天和第 42 天时, 贮藏温度为 -2°C 下的李果实硬度显著低于其他 4 组 ($P<0.05$)。可能是由于李果实在 -2°C 时发生的冷害现象更严重, 导致组织内部水分散失较多, 硬度较低。其中, 贮藏第 42 天时, -2°C 贮藏下果实硬度为 7.95 N, 而 0°C 贮藏果实硬度为 8.25 N, 两者差异显著。这说明 0°C 贮藏可显著抑制“国峰 7 号”李果实贮藏中后期果实硬度的下降。

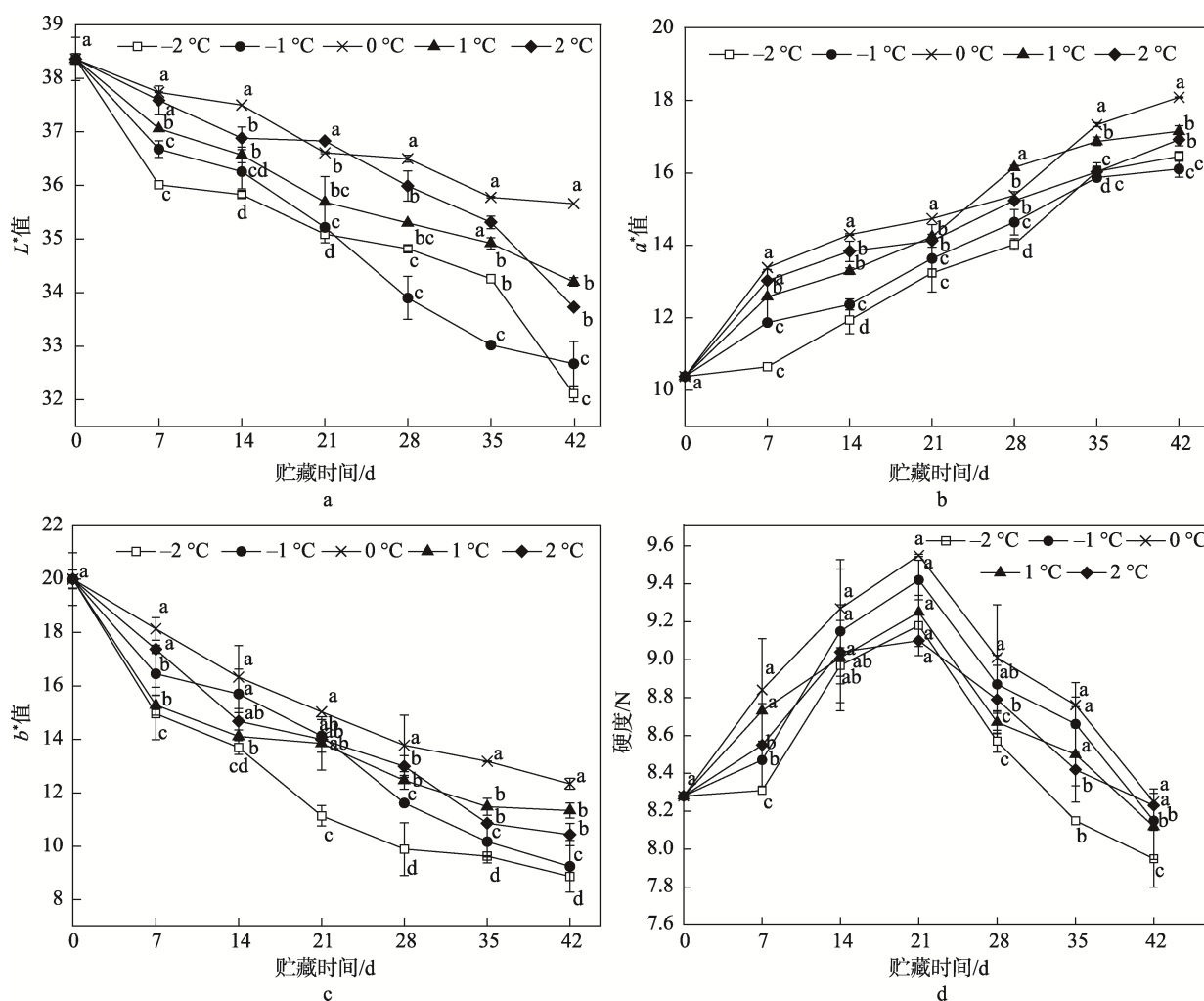


图 1 不同贮藏温度下李果实果皮色泽、硬度的变化

Fig.1 Changes of color and hardness of pericarp of plum fruit under different storage temperature

2.2 贮藏温度对“国峰7号”李果实可溶性固形物 (SSC) 质量分数、可滴定酸 (TA) 质量分数、呼吸强度及乙烯释放量的影响

采后“国峰7号”李果实不同贮藏温度下 SSC 质量分数的变化见图 2a。在不同低温环境下李果实的 SSC 质量分数表现为先上升后下降, 至贮藏中期时 SSC 质量分数先后达到高峰, 其中以 0 °C 下的李果实 SSC 质量分数最高, 可达 23.4%, 显著高于其他 4 组 ($P<0.05$)。这表明贮藏前期随着果实的后熟, 淀粉逐渐转化为糖类, SSC 质量分数不断增加; 而贮藏后期由于果实衰老和呼吸跃变期的到来, 糖类作为主要的呼吸底物被逐渐消耗, SSC 质量分数持续下降。此外, 贮藏 14、21、42 d 时, 贮藏温度为 0 °C 下的李果实 SSC 质量分数均显著高于其他 4 组 ($P<0.05$)。这表明, 0 °C 可以延缓“国峰7号”李果实 SSC 质量分数降低的速度。

由图 2b 可以看出, 贮藏 21 d 内, 各贮藏温度下李果实 TA 质量分数均呈上升趋势。贮藏第 14 天, 0 °C 下李果实 TA 质量分数显著高于其他 4 组 ($P<0.05$)。贮藏第 21 天, TA 质量分数达到峰值。贮藏从 21 d 起, 各组李果实 TA 质量分数呈下降的趋势。其中, 2 °C 贮藏下的李果实 TA 质量分数下降幅度增大, 这可能是由于贮藏温度偏高, 后期果实腐烂有关。差异显著性分析

表明, 在整个贮藏期内, 除第 0 天和第 7 天时, 0 °C 下李果实 TA 的质量分数一直维持较高水平, 与其他 4 组贮藏温度存在显著性差异 ($P<0.05$)。

由图 2c 可见, 除 -2 °C 处理组外, “国峰7号”李在整个贮藏期间的呼吸强度呈先下降后上升再下降的趋势。李子采收后的呼吸强度高达 42 mg/(kg·h), 贮藏 7 d 后呼吸强度明显下降, 可能是由于李果实所处环境温度迅速降低, 低温条件使其新陈代谢作用减缓。这一结果符合低温对呼吸强度抑制的一般规律。在贮藏第 28 天时呼吸强度开始急增, 达到高峰后, 随着果实的衰老呼吸作用不断减弱。这是由于“国峰7号”李属于呼吸跃变型果实。此外, -2 °C 下李果实的呼吸强度与其他 4 组温度相比, 并未出现呼吸高峰。说明 -2 °C 贮藏下的李果实已发生冷害, 造成果肉褐变。

“国峰7号”李果实在低温贮藏过程中, 乙烯的释放同呼吸作用一样会产生高峰, 李果实在贮藏过程中发生呼吸跃变前, 乙烯的释放量会在短时间内明显上升, 从而引起果实发生呼吸跃变。如图 2d 所示, 同呼吸强度相似, 除 -2 °C 处理组外, 其余 4 组的李果实均在第 28 天时达到乙烯高峰; -2 °C 下贮藏的果实冷害发生最严重, 至贮藏末期时已基本检测不出乙烯。这说明适宜的低温贮藏环境可有效降低李果实的乙烯释放量, 有利于延长李果实贮藏时间。

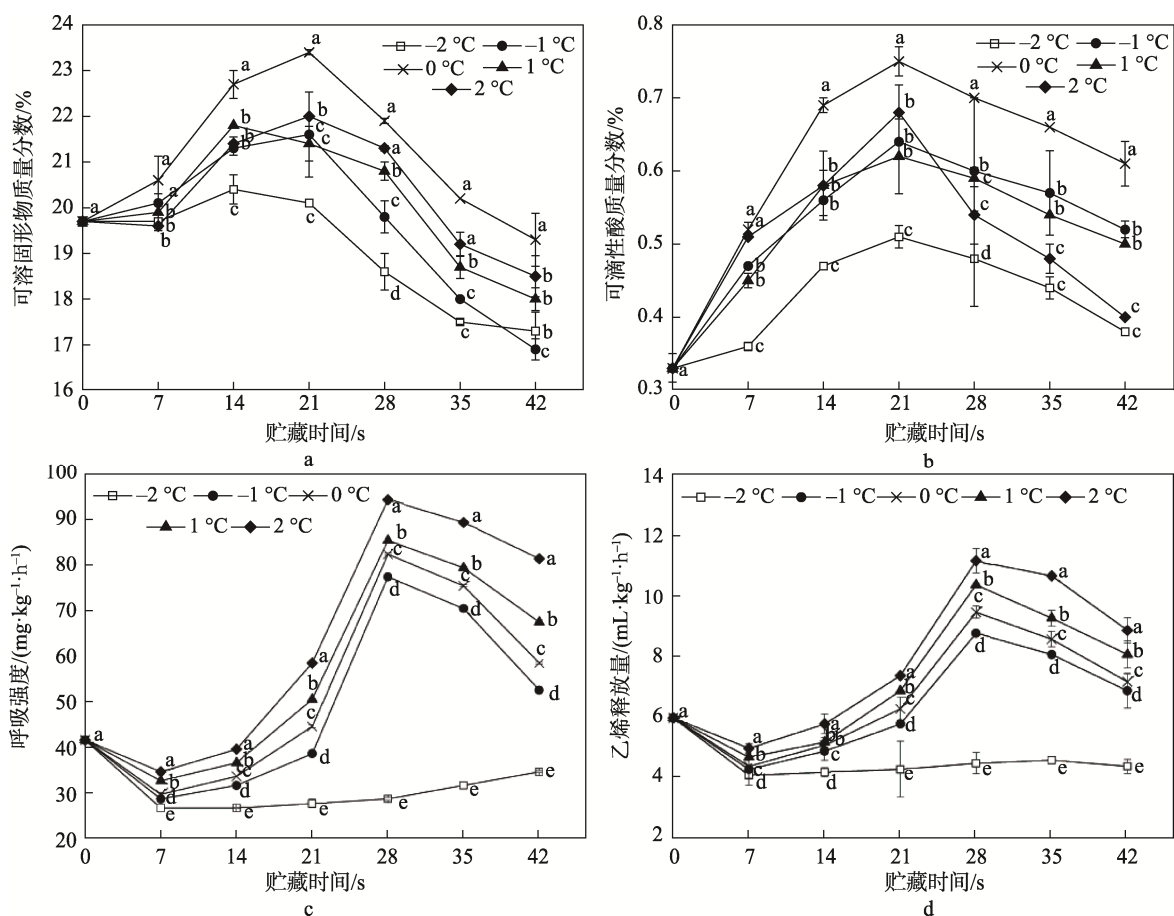


图 2 不同贮藏温度下李果实 TSS、TA、呼吸强度、乙烯释放量的变化

Fig.2 Changes of TSS, TA, respiratory intensity and ethylene release of plum fruit under different storage temperature

2.3 贮藏温度对“国峰7号”李果实总酚、类黄酮及花青素含量的影响

由图 3a 可见, 采后李果实的总酚呈现先上升后逐渐下降的变化规律。在贮藏第 21 天, -2 、 -1 °C 贮藏下的李果实总酚含量持续上升至峰值后又不断下降。这表示果实可能已遭受冷害, 使得细胞膜的完整性遭到一定程度的损伤, 酚类物质不断外渗, 并逐渐与机体中的 PPO 接触氧化为醌, 进而引起果实褐变。贮藏后期由于冷害加剧, 不断消耗酚类物质造成其含量持续减少。同时, 0 °C 处理组的李果实总酚含量在整个贮藏期均显著高于其他处理组 ($P<0.05$)。综上所述, 0 °C 的贮藏环境可以较好地保持李果实的总酚含量。

随着采后李果实的成熟衰老, 其组织中的类黄酮含量不断上升。如图 3b 所示, 在采后贮藏过程中, “国峰7号”李果实整体呈逐渐上升的趋势。贮藏期间第 21、28 和 35 天, 0 °C 处理组的类黄酮含量显著高于其余 4 组 ($P<0.05$)。说明 0 °C 能够提高类黄酮含量, 保持较好的果实营养品质。

如图 3c 可知, “国峰7号”李果实在贮藏过程中花青素含量随着贮藏期的延长而呈现逐渐升高的趋势。在贮藏末期, -2 °C 冷藏处理组的李果实花青素含量显著高于其余 4 组 ($P<0.05$), 且其含量最大值约是 0 °C 处理组的 2.23 倍。综上所述, 0 °C 低温贮藏能够显著抑制李果实花青素含量的累积, 这可能与调控花青素代谢途径中某些位点的作用有关。

2.4 贮藏温度对“国峰7号”李果实相对膜透性、 O_2^- 产生速率及 H_2O_2 含量的影响

长期低温贮藏会导致果实细胞膜活性下降, 膜透性增加, 出现胞内大分子物质外渗等现象, 因此, 膜透性的变化可作为判断果实是否遭受逆境胁迫的重要标志^[15]。由图 4a 可知, 不同贮藏温度下相对膜透性的变化规律相似, 均呈现先持续升高, 后经历大幅度上升后, 再缓慢增长的趋势, 但各处理组出现跃变的时间不同, 从大到小的顺序为 -2 、 -1 、 2 、 1 、 0 °C。其中, -2 °C 的“国峰7号”李果实在贮藏第 7 天时便开始大幅度上升, 而 0 °C 的李果实于贮藏第 28 天时才出现膜透性值迅速增加的现象。这表明 0 °C 处理组出现冷害的时间较晚, 且李果实冷害现象较轻。此外, 除第 0 天、第 21 天和第 35 天外, 贮藏于 0 °C 下果实的膜透性显著低于其他处理组 ($P<0.05$)。由此表明, 0 °C 更适于长期贮藏李果实。

果实采后衰老进程中, 细胞内自由基代谢平衡往往被破坏, 自由基大量累积并引发膜脂过氧化作用, 对植物组织造成损害。活性氧中的 O_2^- 和 H_2O_2 将引起不饱和脂肪酸发生过氧化作用, 导致细胞膜系统的损伤^[17]。过氧化作用又会生成 O_2^- 和 H_2O_2 , 不断循环重

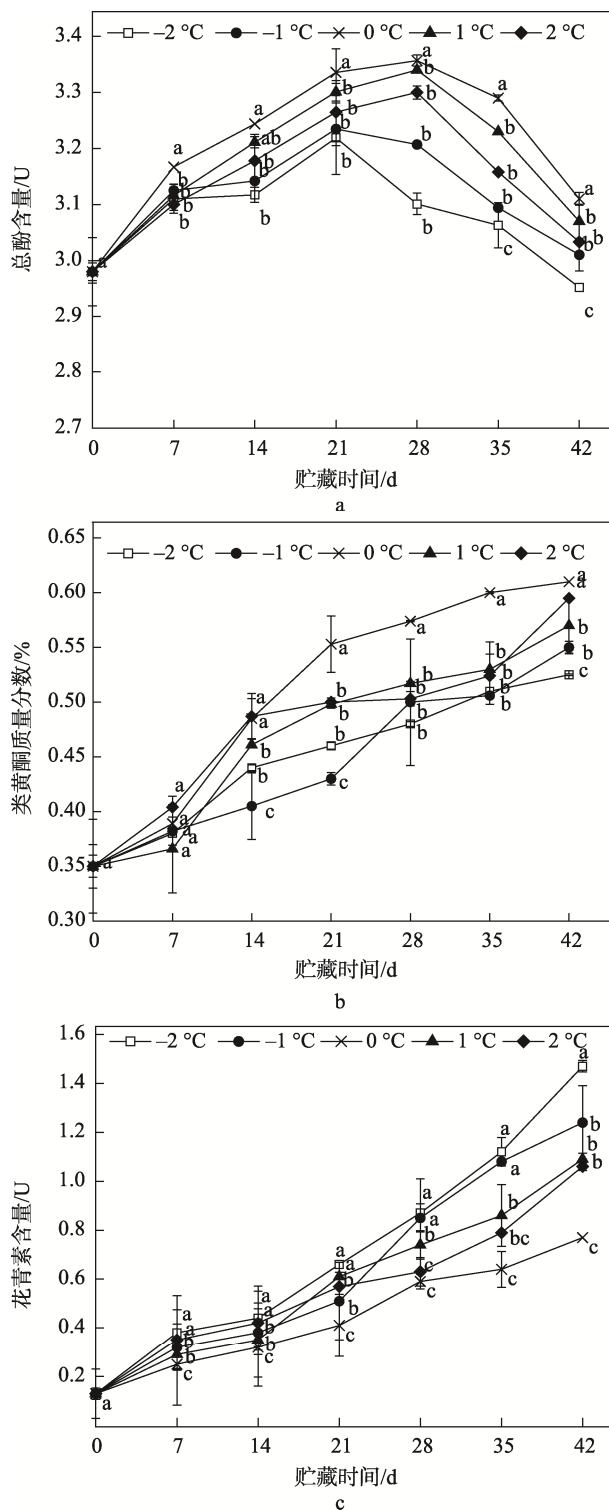


图3 不同贮藏温度下李果实总酚、类黄酮、花青素含量的变化

Fig.3 Changes of total phenol, flavonoid and anthocyanin contents in plum fruit under different storage temperature

复, 引起膜功能紊乱。如图 4b、图 4c 所示, 李果实在低温贮藏期间 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量会随贮藏时间的增加而持续上升。相比于其他处理组, 0 °C 下李果实 O_2^- 和 H_2O_2 产生速率较慢。在贮藏末期 42 d 时, -2 °C

处理组的 O_2^- 产生速率增加至 $1.01 \mu\text{mol}/(\text{min}\cdot\text{g})$, -1 、 0 、 1 和 2°C 处理组分别比 -2°C 处理组的 O_2^- 产生速率低了 26.7% 、 40.2% 、 21.1% 和 13.7% , 且 5 个处理之间差异显著 ($P<0.05$); 贮藏第 42 天, -1 、 0 、 1 和 2°C 处理组的 H_2O_2 含量与 -2°C 处理组的相比, 分别下降了 23.0% 、 32.7% 、 29.5 和 14.5% , 均显著低于 -2°C 处理组 ($P<0.05$)。由此可得, 0°C 显著降低了李果实贮藏期 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量, 抑制果实成熟衰老的速度, 延长贮藏保鲜期。

2.5 贮藏温度对“国峰 7 号”李果实 PPO、POD、SOD 活性的影响

植物机体中的 PPO 在氧气存在的条件下会催化酚类物质为醌类物质, 进一步形成褐色或黑色的聚合物, 导致果实褐变^[18]。如图 5a 所示, 各组果实 PPO 活性大致呈上升趋势。贮藏第 14、21、35 及 42 天时, -2°C 下李果实的活性与其他 4 组有明显差异 ($P<0.05$), 且从 14 d 开始呈明显上升趋势, 说明李果实可能受到冷害, 细胞膜结构发生破坏, 造成果实褐变。

除了 PPO 会影响酶促褐变反应外, POD 也会在 H_2O_2 存在的条件下迅速氧化多酚类物质, 并与 PPO 协同诱导果蔬的酶促褐变反应^[19]。如图 5b 所示, 采后“国峰 7 号”李果实 POD 活性呈上升的变化规律。到第 42 天时, -2 、 -1 、 0 、 1 、 2°C 果实的 POD 活性分别为 0.27 、 0.30 、 0.42 、 0.35 、 0.32 U/g 。在整个贮藏期, 除第 21、28 和 42 天外, 0°C 下李果实的 POD 活性与其他 4 组果实之间差异不显著 ($P>0.05$)。从图 5b 和分析结果可以看出, 冷害导致了 H_2O_2 含量的迅速增加, 从而导致 POD 活性的上升, 提高果实抗胁迫的能力。

SOD 可清除 O_2^- , 减弱自由基对植物组织的毒害^[20]。由图 5c 可知, 在不同温度处理中, 除 -2°C 外, 其余处理组中李果实 SOD 活性的变化有 2 个峰值, 且基本上都是前一个峰值低于后一个峰值。 0°C 条件下贮藏的李果实中 SOD 活性的峰值出现在第 7 天和第 35 天, 此时的活性大小分别为 116 U/g 和 130 U/g 。 1°C 出现第 1 个活性峰值的时间与 0°C 处理一样, 均为贮藏第 7 天, 但后一个峰值则出现在贮藏第 28 天, 分别为 100 U/g 和 157 U/g 。 2°C 处理与 -1°C 处理相似, 峰值出现时间一致。 0°C 处理的李果实中 SOD 活性在整个贮藏期除第 0 天和第 42 天外, 均与其他 4 组存在显著差异 ($P<0.05$)。由此可以得出, 用 0°C 贮藏李果实, 清除自由基能力最强, 降低李果实贮藏期冷害现象的发生, 保持良好的贮藏品质。

综上所述, 当果实遭受低温胁迫时, 体内会产生大量的活性氧 (O_2^- 和 H_2O_2 等), PPO 活性不断增加, 同时 POD、SOD 等保护酶活性降低, 造成果实体内

累积过多的活性氧, 细胞膜透性被破坏, 进而加速果实的衰老腐烂, 最终导致冷害的发生。

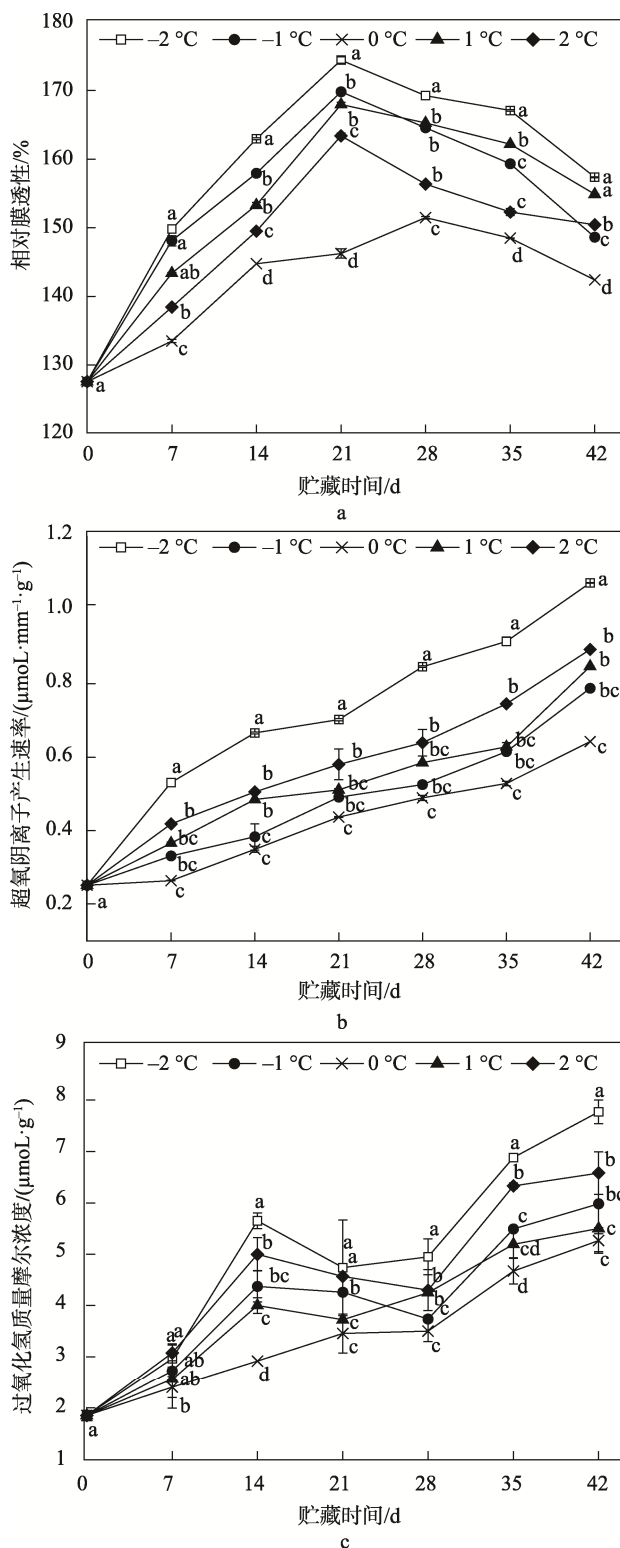


图 4 不同贮藏温度下李果实相对电导率、 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量的变化

Fig.4 Changes of relative electrical conductivity, O_2^- production rate and H_2O_2 content of plum fruit under different storage temperature

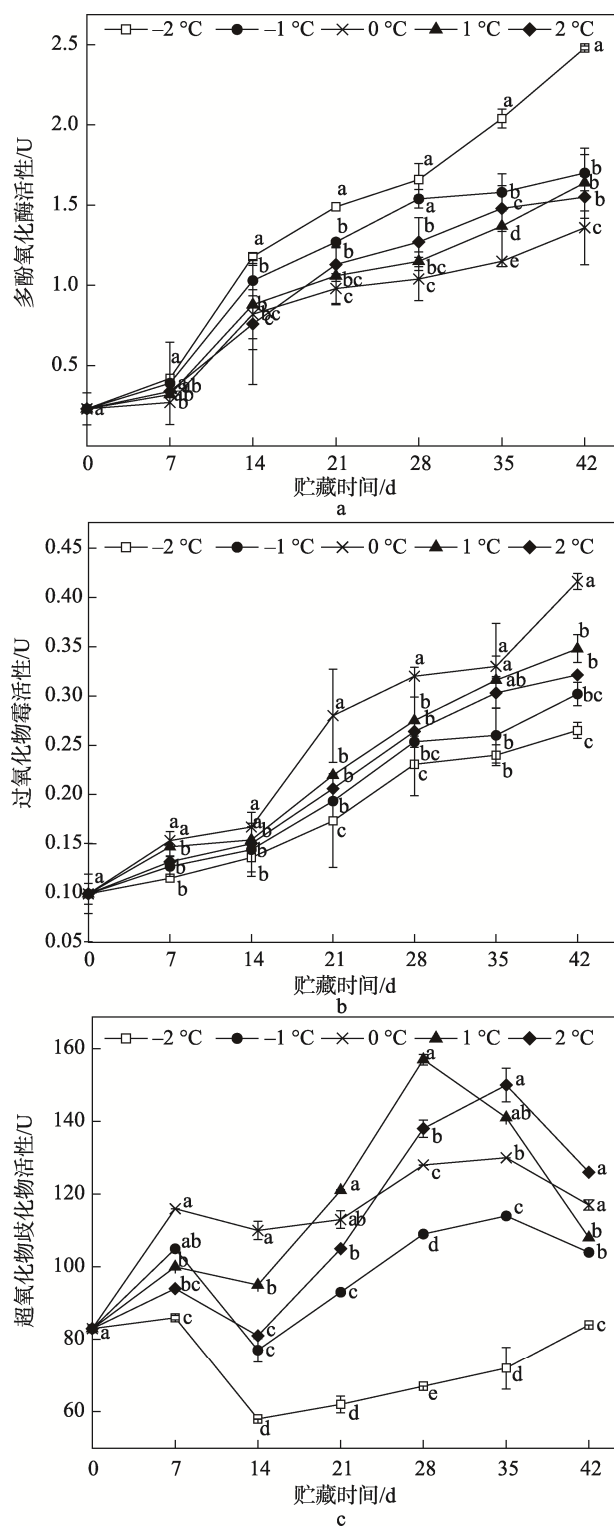


图 5 不同贮藏温度下李果实 PPO、POD、SOD 活性的变化

Fig.5 Changes of PPO, POD and SOD activities in plum fruit under different storage temperature

3 讨论

低温贮藏作为最普遍的保鲜技术,是影响果蔬采后品质的主要因素。适宜的贮藏温度可以降低果蔬的

生理代谢水平,抑制其成熟衰老与微生物的生长,较好地维持果蔬的外在质地与内在品质,进而延长贮藏期,不适宜的低温贮藏会缩短果实贮藏寿命,降低生理品质。本研究发现随着贮藏时间的延长,不同温度下“国峰 7 号”李果实的色泽加深、硬度下降、呼吸高峰推迟、SSC、TA、乙烯释放量和总酚含量均发生不同程度的减少。类黄酮和花青素含量增加,其中以 0 °C 低温贮藏保持效果较好。推测李果实采后品质劣变可能归因于贮藏温度的不同^[21]。同时其体内不断的呼吸代谢活动消耗也会影响果品品质^[22-24]。熊金梁等^[25]研究发现,贮藏温度的波动越小,猕猴桃品质越好,薛友林等^[26]发现,适当低温可保持蓝莓较高的硬度及 SSC 含量,一定程度上延长果实寿命,提高果实贮藏品质。司敏等^[11]的研究显示,若贮藏环境温度过低,果实会遭受低温胁迫,造成果实组织代谢紊乱,发生冷害症状。

当果实出现冷害现象后,由于活性氧大量累积会破坏其内部正常代谢的动态平衡,为维持正常新陈代谢水平,果实体内的抗氧化酶体系(包含 SOD、POD 和 PPO 等)起着不可取代的作用,其活性高低不仅受温度影响很大,而且决定着采后果实品质^[27-28]。不同的酶有不同的特性。SOD 是一种重要的抗氧化酶,催化 O_2^- 转化为 H_2O_2 ,从而减少自由基对有机体的毒害。采后贮运期间,其活性越高,表示果实贮藏性能越好^[29];POD 对防御活性氧或减少自由基对膜系统的伤害起主要作用。果实衰老现象越剧烈,POD 活性则越高^[30-32]。在氧气的作用下,PPO 能催化酚类物质氧化形成醌类化合物,醌类化合物进一步聚合形成褐色、棕色或黑色的聚合物,导致果实褐变。若 PPO 活性增加,则会加剧李果实发生酶促褐变,影响果实品质^[33];其中,SOD 与 POD 能够协同清除植物体内的 O_2^- 和 H_2O_2 ,维持组织活性氧代谢平衡,从而保护膜结构,延缓果实成熟衰老进程。本试验结果显示,采后的李果实不同低温贮藏环境下 POD 和 PPO 活性均呈逐渐升高趋势,与吕麟琳等^[34]研究结果基本一致。其中,0 °C 贮藏更有利于减少 ROS 及自由基对细胞膜造成的损害,但随着低温处理时间的延长,SOD 活性迅速下降,POD 和 PPO 则因低温胁迫活性持续上升,加速次生代谢,导致膜脂过氧化加剧。已有研究认为,只要果实处于受冷害的临界温度下,SOD 活性就会随贮藏时间的延长而降低^[35]。本研究发现,除 0 °C 贮藏外,其余 4 组温度贮藏下的李果实 SOD 活性在贮藏初期有一定程度的升高,达到峰值后迅速降低,不同于上述研究结果,其具体原因有待于进一步研究。

“国峰 7 号”李属呼吸跃变型果实,在其采后衰老腐烂的进程中,主要涉及新陈代谢和酶活性系统显著变化的氧化过程^[36]。如脂质过氧化反应会引起细胞膜系统的损伤,出现 O_2^- 的产生速率和 H_2O_2 含量不断上升的状态,但这种趋势 0 °C 贮藏远远低于其他处理

组,说明该贮藏温度可以有效缓解 ROS 及超氧自由基的生成速率,从而降低细胞膜受损害程度。本试验中相对膜透性的变化趋势为先升高后下降,其中在贮藏第 21 天时出现峰值,可能是果实由于后熟释放大量的乙烯,加速果实衰老,造成细胞膜损伤。这一结果与 Asquiere 等^[37]对桃采后的研究结果一致。

4 结语

本研究发现随贮藏时间的增加,0℃条件有助于果实总酚及类黄酮含量的积累,而其他贮藏温度下,果实所处的贮藏环境不利于细胞呼吸和营养物质的维持。此外,0℃处理能有效延缓果实色泽、硬度、可滴定酸含量的下降,抑制呼吸强度及乙烯释放高峰的峰值,并使果实 SSC 保持在较高的水平。这说明适宜的低温处理能延缓“国峰 7 号”李果实的成熟衰老进程,保持果实具有较好的品质和营养价值。

上述实验结果进一步证明了不适当的低温贮藏会加速“国峰 7 号”李果实的采后成熟衰老进程。为了提高“国峰 7 号”李果实的采后品质,提升其抗氧化能力,在贮运、销售过程中,要尽量精准地控制环境温度在(0±0.5)℃左右,并尽量避免碰撞。

参考文献:

- [1] KUMAR P, SETHI S, SHARMA R R, et al. Effect of Chitosan Coating on Postharvest Life and Quality of Plum during Storage at Low Temperature[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 226: 104-109.
- [2] 王姣, 李丽莉, 袁树枝, 等. 不同品种李果实低温贮藏特性研究[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(19): 343-345. WANG Jiao, LI Li-li, YUAN Shu-zhi, et al. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(19): 343-345.
- [3] TSANIKLIDIS G, DELIS C, NIKOLOUDAKIS N, et al. Low Temperature Storage Affects the Ascorbic Acid Metabolism of Cherry Tomato Fruits[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 84(11): 149-157.
- [4] 王志华, 高剑利, 王文辉, 等. 不同贮藏温度对‘红香酥’梨果实品质和相关生理指标的影响[J]. *中国果树*, 2020(5): 13-19. WANG Zhi-hua, GAO Jian-li, WANG Wen-hui, et al. *Effects of Different Storage Temperatures on Fruit Quality and Related Physiological Indexes of 'Hongxiangsu' Pear*[J]. *China Fruits*, 2020(5): 13-19.
- [5] 汪洋, 胡花丽, 李鹏霞, 等. 不同贮藏温度对‘安哥诺’李果实品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2009, 21(5): 124-127. WANG Yang, HU Hua-li, LI Peng-xia, et al. *Effects of Different Storage Temperatures on Fruit Quality of 'Angelino' Plum*[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2009, 21(5): 124-127.
- [6] 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, 2013: 28-30. CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. *Beijing: China Light Industry Publishing Du*, 2013: 28-30.
- [7] 唐琦, 葛永红, 董雪, 等. 壳聚糖复合多聚赖氨酸处理对苹果果实储藏品质的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(10): 184-187. TANG Qi, GE Yong-hong, DONG Xue, et al. *Effects of Chitosan Complex Polylysine Treatment on Storage Quality of Apple Fruits*[J]. *Food Industry*, 2018, 39(10): 184-187.
- [8] MPHAPHULI T, SLABBERT R M, SIVAKUMAR D. Storage Temperature and Time Changes of Phenolic Compounds and Antioxidant Properties of Natal Plum (*Carissa macrocarpa*)[J]. *Food Bioscience*, 2020, 38: 100772.
- [9] 丁丹. 李子采后生理特性及保鲜技术的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014: 25-30. DING Dan. *Study on Physiological Characteristics and Preservation Technology of Plum after Harvest* [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014: 25-30.
- [10] 王友升, 董银卯, 宋彦, 等. 甘薯叶中清除自由基活性物质的提取保存与定性分析[J]. *安徽农业科学*, 2008(1): 4-7. WANG You-sheng, DONG Yin-mao, SONG Yan, et al. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008(1): 4-7.
- [11] 司敏, 伍利芬, 薛华丽, 等. 采前赤霉素处理对李果实采后冷害的抑制及部分机理研究[J]. *中国果树*, 2018(4): 4-9. SI Min, WU Li-fen, XUE Hua-li, et al. *Inhibition and Partial Mechanism of Preharvest Gibberellin Treatment on Postharvest Cold Injury of Plum Fruit*[J]. *China Fruits*, 2018(4): 4-9.
- [12] CHEN Huan, SHUAI Han, LI Jiang, et al. Postharvest Hot Air and Hot Water Treatments Affect the Antioxidant System in Peach Fruit during Refrigerated Storage[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 126: 1-14.
- [13] WANG Yan, LI Jian-long, WANG Jia-zhen, et al. Exogenous H₂O₂ Improves the Chilling Tolerance of Manilagrass and Mascarenegrass by Activating the Antioxidative System[J]. *Plant Growth Regulation*, 2010, 61(2): 195-204.
- [14] 陈文烜, 郜海燕, 陈杭君, 等. 减压贮藏对软溶质水蜜桃采后生理和品质的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(9): 108-112.

- CHEN Wen-xuan, GAO Hai-yan, CHEN Hang-jun, et al. Effects of Decompression Storage on Postharvest Physiology and Quality of Soft Solute Peach [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 108-112.
- [15] 王艳颖, 胡文忠, 田密霞, 等. 贮前氯化钙处理对李果实冷害及生理生化的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 365-368.
- WANG Yan-ying, HU Wen-zhong, TIAN Mi-xia, et al. Effects of Calcium Chloride Pretreatment on Cold Injury, Physiology and Biochemistry of Plum Fruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 365-368.
- [16] 周丹蓉, 方智振, 叶新福, 等. 李果实中多酚含量及其抗氧化能力研究[J]. 园艺学报, 2017, 44(3): 422-430.
- ZHOU Dan-rong, FANG Zhi-zhen, YE Xin-fu, et al. Study on the Content and Antioxidant capacity of Polyphenols in Plum Fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(3): 422-430.
- [17] CARVAJAL F, PALMA F, JAMILENA M, et al. Pre-conditioning Treatment Induces Chilling Tolerance in Zucchini Fruit Improving Different Physiological Mechanisms Against cold Injury[J]. Annals of Applied Biology, 2015, 166(2): 340-354.
- [18] 公谱. 采收成熟度和 1-MCP 处理对冷藏晚香蕉李果实品质和褐变的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010: 16-27.
- GONG Pu. Effects of Harvesting Maturity and 1-MCP Treatment on Fruit Quality and Browning of Frozen Late Banana Plum[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010: 16-27.
- [19] MA Yan-yan, ZHANG Wei-da, et al. Postharvest Storage at Near-Freezing Temperature Maintained the Quality and Antioxidant properties of *Prunus domestica* L. cv. Ximei fruit[J]. Scientia Horticulture, 2022, 293: 110720.
- [20] 石其宇, 董晓庆, 黄世安, 等. 草酸对采后蜂糖李果实品质和抗氧化代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(15): 299-306.
- SHI Qi-yu, DONG Xiao-qing, HUANG Shi-an, et al. Effects of Oxalic Acid on Fruit Quality and Antioxidant Metabolism of Postharvest Bombyx Plum. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 299-306.
- [21] SHI Jun-yan, GAO Li-pu, ZUO Jin-hua, et al. Exogenous Sodium Nitroprusside Treatment of Broccoli Florets Extends Shelf Life, Enhances Antioxidant Enzyme Activity, and Inhibits Chlorophyll-degradation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 116: 98-104.
- [22] YAHIA E M. Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits[M]. London: Woodhead Publishing, 2011: 125-142.
- [23] VICENT V, NDOYE F T, VERBOVEN P, et al. Quality Changes Kinetics of Apple Tissue during Frozen Storage with Temperature Fluctuations[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 92: 165-175.
- [24] SHADMANI N, AHMAD S H, SAARI N. Chilling Injury Incidence and Antioxidant Enzyme Activities of Carica Papaya L. 'Frangi' as Influenced by Postharvest Hot Water Treatment and Storage Temperature[J]. Postharvest Biology and Technology, 2015, 99: 114-119.
- [25] 熊金梁, 陈爱强, 刘婧, 等. 温度波动对猕猴桃在 4 °C 下货架贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 69-76.
- XIONG Jin-liang, CHEN Ai-qiang, LIU Jing, et al. Effect of Temperature Fluctuation on Kiwifruit Storage Quality at 4 °C[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 69-76.
- [26] 薛友林, 袁兴铃, 张鹏, 等. 精准温度控制对蓝莓的低温保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 185-194.
- XUE You-lin, YUAN Xing-ling, ZHANG Peng, et al. Effect of Precise Temperature Control on Preservation of Blueberry at Low Temperature[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 185-194.
- [27] SHAFA N, KASHIF R, SAMI U, et al. Genotypes and Harvest Maturity Influence the Nutritional Fruit Quality of Mulberry[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 266: 1-7.
- [28] WAN Chun-peng, KAHRAMANOĞLU, CHEN Jin-yin, et al. Effects of Hot Air Treatments on Postharvest Storage of Newhall Navel Orange[J]. Plants(Basel, Switzerland), 2020, 9(2): 170-184.
- [29] SAJID A, AHMAD S K, MUHAMMAD A A, et al. Effect of Postharvest Oxalic Acid Application on Enzymatic Browning and Quality of Lotus(*Nelumbo nucifera Gaertn.*) root slices[J]. Food Chemistry, 2020, 32: 1-8.
- [30] WAKABAYASHI K. Changes in Cell Wall Polysaccharides during Fruit Ripening[J]. Journal of Plant Research, 2000, 113(3): 231-237.
- [31] KAWALJIT K, GILL P P S, JAWANDHA S K. Enzymatic and Physico-Chemical Changes in Pear Fruits in Response to Post-harvest Application of Oxalic Acid[J]. Indian Journal of Horticulture, 2017, 74(2): 303-305.
- [32] HUANG Hua, JING Guo-xing, GUO Li-fang, et al. Effect of Oxalic Acid on Ripening Attributes of Banana Fruit during Storage[J]. Postharvest Biology and Tech-

- nology, 2013, 84: 22-27.
- [33] 韩红艳, 付鸿博, 杜俊杰. 不同贮藏温度对农大 7 号欧李果实采后相关生理指标的影响[J]. 果树资源学报, 2021, 2(6): 6-10.
- HAN Hong-yan, FU Hong-bo, DU Jun-jie. Effects of Different Storage Temperatures on Postharvest Physiological Indexes of Plum Fruit of Nongda 7[J]. Journal of Fruit Resources, 2021, 2(6): 6-10.
- [34] 吕麟琳. 基于膜脂代谢的香蕉李冷害机理及冷害调控技术研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 18-32.
- LYU Lin-lin. Study on Chilling Injury Mechanism and Regulation Technology of Banana Plum based on Membrane lipid Metabolism[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 18-32.
- [35] 高慧, 饶景萍, 张少颖. 不同贮藏温度下油桃果实的冷害生理研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007(10): 61-65.
- GAO Hui, RAO Jing-ping, ZHANG Shao-ying. Physiological study on Cold Injury of Nectarine Fruit at Different Storage Temperatures[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007(10): 61-65.
- [36] WANG Jing, MAO Lin-chun, LI Xue-wen, et al. Oxalic Acid Pretreatment Reduces Chilling injury in Hami Melons (*Cucumis Melo* var. *Reticulatus* Naud.) by Regulating Enzymes Involved in Antioxidative Pathways[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 241: 201-208.
- [37] ASQUIERI E R, BOAS E V, GARCIA L G C, et al. Effect of the Addition of Calcium Chloride and Different Storage Temperatures on the Post-Harvest of Jabuticaba Variety *Pingo de Mel*[J]. Food Science and Technology(Campinas), 2019, 39: 261-269.

责任编辑: 曾钰婵