

不同贮藏温度下李果实的品质比较

万璇, 林欣, 彭俊森, 张琴, 罗登灿, 董晓庆*

(贵州大学农学院, 贵州贵阳 550000)

摘要: 为探究‘蜂糖李’和‘空心李’适宜采后贮藏温度, 将两种李果实贮藏于0、2、4℃下进行外观及内在相关品质指标测定。研究表明低温有助于维持李果实较高硬度、减弱呼吸作用从而维持品质; 其中‘蜂糖李’在4℃下可溶性固形物迅速积累且呼吸速率飙升, 颜色由绿转黄后失去商品价值, 而0、2℃较好的抑制‘蜂糖李’呼吸速率延缓营养物质的消耗, 但2℃下果实失重明显且贮藏前期超氧化物歧化酶活性显著低于0℃, 0℃有利于李果实保持较好色泽并延迟硬度下降、抑制失重率、可溶性固形物含量上升等; ‘空心李’在贮藏过程中, 三个温度均延缓果实硬度下降且可溶性固形物含量较为稳定, 但0℃比2、4℃更好的维持果实硬度、减缓失重率、呼吸速率的上升、以及丙二醛和过氧化氢的积累, 且0℃下果实色泽保持良好, 而2、4℃贮藏后期果实丧失特有色泽。综上所述, 0℃贮藏有利于维持‘蜂糖李’和‘空心李’外观及内在品质, 从而延长货架期。

关键词: 李; 温度; 保鲜; 抗氧化; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)04-142-155

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0213

Physiological Comparison of Plum Fruit Quality at Different Storage Temperatures

WAN Xuan, LIN Xin, PENG Junsen, ZHANG Qin, LUO Dengcan, DONG Xiaoqin*

(College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550000, China)

Abstract: To explore the suitable postharvest storage temperatures of two plum fruits, “FTL” and “KXL”, their appearance and intrinsic quality indices were measured at 0, 2, and 4 °C. The results showed that low temperatures could contribute to the maintenance of plum fruit hardness to a greater extent while concurrently mitigating respiration, thus maintaining overall fruit quality. Among them, the soluble solids of “FTL” accumulated rapidly at 4 °C and the respiration rate increased. The color turned from green to yellow, resulting in a loss of market value. However, temperatures of 0 and 2 °C effectively inhibited the respiration rate of “FTL” and delayed the consumption of nutrients, but the weight loss of the fruit was pronounced at 2 °C, superoxide dismutase activity at the early storage stage was significantly lower than that at 0 °C, which was conducive to maintaining favorable color and delaying the decrease in hardness, inhibiting the weight loss rate, and increasing the content of soluble solids. During the storage process of “KXL”, the decrease in fruit hardness and the soluble solid content was relatively stable at all three temperatures, but 0 °C was more favorable than 2 and 4 °C for maintaining fruit hardness, slowing down the weight loss rate, increasing the respiration rate, and accumulating malondialdehyde and hydrogen

引文格式:

万璇,林欣,彭俊森,等.不同贮藏温度下李果实的品质比较[J].现代食品科技,2024,40(4):142-155.

WAN Xuan, LIN Xin, PENG Junsen, et al. Physiological comparison of plum fruit quality at different storage temperatures [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 142-155.

收稿日期: 2023-02-24

基金项目: 贵州省科技厅项目(黔科合支撑[2022]重点018号); 国家自然科学基金项目(31960620)

作者简介: 万璇(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬采后生理与贮藏保鲜, E-mail: 2079516604@qq.com

通讯作者: 董晓庆(1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬采后生理与分子生物学, E-mail: 117980544@qq.com

peroxide. The color of the fruit remained favorable at 0 °C ; however, the fruit lost its unique color in the later stage of storage at 2 and 4 °C . In summary, 0 °C storage was conducive to maintaining the appearance and intrinsic quality of “FTL” and “KXL” , thereby extending the shelf life.

Key words: plum; temperature; preservation; antioxidant; quality

李 (*Prunus salicina* Lindl.) 属于蔷薇科 (Rosaceae) 李属 (*Prunus*) 植物, 多年生落叶果树, 在中国栽培历史长达 3 000 余年, 李果实外形靓丽、清脆可口, 富含矿物质、维生素、膳食纤维及抗氧化物质^[1,2]。李为呼吸跃变型果实, 因多于夏秋季成熟, 高温气候下采后果实生理代谢旺盛, 易失水导致感病从而致使常温下李果实的保鲜期仅为 5~10 d, 此后大量腐败造成经济亏损, 严重挫伤果农种植积极性^[2-5]。

贮藏温度是影响果实保鲜效果及期限的重要因素之一, 低温贮藏通过降低果实的呼吸强度, 减缓营养物质的消耗速度, 抑制各种微生物的活动, 从而降低腐败, 使其在果蔬贮藏中具有较大的实用价值^[6]。低温常作为一个基础的贮藏手段应用于各类果实, 研究表明, 低温处理可延缓柑橘果实品质下降且减轻食用柑橘果实给人体带来的炎症^[6], 黄晶果等^[7]在 10 °C 低贮藏下可减轻果实失重率、降低果实呼吸强度, 保持果实风味并延缓了果实衰老、冷害褐变, Mphaphuli 等^[8]发现 ‘Natal’ 李在采收后果皮转色受温度影响较大, 通过研究发现在 2、4、10 和 25 °C 贮藏条件下, 2 °C 更有利于 ‘Natal’ 李果实减缓软化程度且利于花青素衍生物 (花青素 -3-O-吡喃苷、花青素 -3-O-葡萄糖苷、槲皮素 -3-O-鼠李糖苷) 的积累, 张瑜瑜等^[9]通过研究低温结合外源水杨酸处理蓝莓果实发现其有效维持果实中超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性和抗坏血酸 (Ascorbic Acid, AsA) 含量并减缓了可溶性蛋白的下降。可见, 低温贮藏是维持果实采后贮藏品质的重要贮藏手段。

李是一种低温敏感型果实, 在低温下常表现出果实风味变淡、不能正常后熟、膜透性增加、果实发生酶促褐变等冷害症状^[10,11]。因此筛选李果实适宜的贮藏温度对于李产业发展有一定的应用价值, 研究发现, 不同贮藏温度对果实外观品质 (果实大小、形状、颜色等) 和内在品质 (风味、可溶性固形物、可滴定酸、营养成分等) 有较大的影响^[12]。在贵州省政府及各大科研单位的大力推广下, 2022 年 ‘蜂糖李’ 在贵州省栽培面积已达 1.32 万 hm^2 ,

总产量约 5.73 万 t, 空心李 2022 年投产种植面积达 30 km^2 , 投产产量达到了 5.5 万 t^[13,14]。‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 作为贵州省乡村振兴下产业兴旺的支柱产业, 了解其果实在低温贮藏品质的变化对于未来商业化推广至关重要。但是, 目前关于 ‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 采后低温贮藏的相关研究少见报道, 本研究以贵州 ‘空心李’、‘蜂糖李’ 为试验材料, 通过评价 0、2、4 °C 贮藏条件下李果实表现出的感官品质及测定分析果实生理生化指标变化, 以期筛选 ‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 果实适宜的贮藏温度, 为保持李果实采后冷藏品质与延长冷藏期提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

‘蜂糖李’ (*Prunus salicina* Lindl cv. ‘Fengtang’, FTL) 于贵州省黔南布依族苗族自治州惠水县采摘 (2021 年 6 月 27 日); ‘空心李’ (*Prunus salicina* Lindl cv. ‘Kongxin’, KXL) 于贵州省铜仁市沿河土家族自治县采摘 (2021 年 7 月 23 日)。晴朗天气早晨选择无病虫害、可溶性固形物质量分数为 11.5%~12.5% 果实集中采收。采后立即运回贵州大学采后贮藏保鲜实验室, 筛除在采摘、分装和运输等过程发生机械损伤的果实, 避免试验中增加微生物侵染的危险性^[15], 并挑选大小一致、无病虫害的果实用于试验。将果实置于实验室自然散热 5 h。散去田间热后, 将 ‘空心李’ 和 ‘蜂糖李’ 移至 4 °C 冷库内预冷 24 h, 预冷结束后移至预先设定的三个低温库 (0±0.5、2±0.5、4±0.5) °C 进行贮藏。

由于 ‘空心李’、‘蜂糖李’ 品种间果实单果重差异较大, ‘空心李’ 平均单果重仅为 40 g 左右, 而 ‘蜂糖李’ 平均单果重约为 70 g。因此将 ‘空心李’、‘蜂糖李’ 各分为 3 组, ‘空心李’ 每组 110 个果, ‘蜂糖李’ 每组 70 个果, 每个温度处理下分别选择 10 个 ‘空心李’、6 个 ‘蜂糖李’ 测量呼吸强度、失重率, 贮藏期间每间隔 10 d 测量可溶性固形物、可滴定酸等相关品质指标并记录, 同时削去果皮、去除果核, 剁碎装袋, 每 3 个 ‘空心李’、1 个 ‘蜂糖李’

为一重复,每个温度重复3次,置于-20℃冰箱留样,后期测定其他生理指标。

1.2 实验方法

1.2.1 果实的感官品质评定

表1 ‘蜂糖李’和‘空心李’感官品质评分表

Table 1 Sensory quality evaluation table of ‘FTL’ and ‘KXL’

指标	品种	评价项目	评价结果	分值/分
色泽 (30)	蜂糖李	果皮 (15)	暗黄	0~3
			黄	3~6
			淡黄	6~9
			黄绿	9~12
			绿	12~15
			果肉 (15)	黄
	空心李	果皮 (15)	暗黄	5~10
			淡黄	10~15
			黄红	0~3
			黄	3~6
			淡黄	6~9
			黄绿	9~12
质地 (20)	蜂糖李/ 空心李	硬度 (20)	绿	12~15
			淡黄	0~5
			黄绿	5~10
			黄	10~15
			较软	0~5
			软	5~10
风味 和褐变 (50)	蜂糖李/ 空心李	褐变 (30)	硬	10~15
			较硬	15~20
			50%<褐变发生 面积	0~6
			35%<褐变发生 面积≤50%	6~12
			20%<褐变发生 面积≤35%	12~18
			0<褐变发生面积 ≤20%	18~24
风味 (20)		风味 (20)	无褐变	24~30
			失去原有风味	0~10
			保留原有风味	10~20

由10人组成评议小组对感官品质进行打分。参照黄世安等^[16]、陈艺晖等^[17]的方法,依据表1,在贮藏90 d时,取样比较评价不同贮藏温度下李果

实的感官品质。每个处理随机取样3袋,对李果实品质进行评价,指标包括果皮色泽(果实表皮颜色、光泽等)、果实质地(果实硬度)、风味、褐变等。

1.2.2 硬度

每组随机选三个李果实,在果实赤道部位均匀选取三个点,削去约1 mm厚的表皮,使用浙江托普云农科技股份有限公司的GY-4型数显果实硬度计,将半径为3.5 mm的探头刺入果肉,没入果实的深度达到探头刻度线(10 mm)后放手,读数记录,硬度单位为N。

1.2.3 失重率

$$B = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

B—失重率, %;

M₂—试验当天所称质量, g;

M₁—采收后当天果实的初始质量, g。

1.2.4 可溶性固形物(SSC)

采用ATAGO(爱拓)公司PAL-BX/ACID 12型数显糖酸度计进行测定,单位%。

1.2.5 可滴定酸(TA)

参考曹建康等^[18]方法测定果实中TA的含量(%)。

1.2.6 固酸比(SSC/TA)

$$C = \frac{D}{E} \quad (2)$$

式中:

C—固酸比(Solid-Acid Ratio);

D—可溶性固形物含量(SSC), %;

E—可滴定酸含量(TA), %。

1.2.7 呼吸强度

参考董晓庆等^[19]的方法。

$$H = \frac{1.96 \times \Delta J \times V}{W \times T} \quad (3)$$

式中:

H—呼吸强度(Respiration Rate), CO₂ mg/(kg·h);

1.96—标准状况下CO₂的摩尔质量与摩尔体积之比;

ΔJ—TEL7001呼吸仪的读数差, ppm;

V—密闭容器体积, L;

W—果实质量, g;

T—密封时间, h。

1.2.8 总酚、类黄酮、花青素、可溶性蛋白质含量

参考曹建康等^[18]的方法。

1.2.9 苯丙氨酸解氨酶 (PAL)

分光光度法, 南京建成生物工程研究所苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Ammonia-lyase, PAL) 测定试剂盒。

1.2.10 脯氨酸、超氧化物歧化酶、丙二醛

参考曹建康等^[18]的方法。

1.2.11 过氧化氢 (H₂O₂)

植物 H₂O₂ 含量通过 KI 法测定, 方法参考 Sergiev 等^[20]报道。

1.3 实验数据处理

使用软件 Microsoft Excel 2019 对所获得的实验数据进行整理计算, 使用 Excel 绘图。SPSS “分析” 模块中采用比较平均值 “单因素 ANOVA” 对实验结果进行差异显著性分析; SPSS “分析” 模块中采用相关 “双变量相关性” 对不同指标进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对李果实感官品质的影响

由图 1 可知, 0 °C 下 ‘蜂糖李’ 表皮颜色变化不明显, 4 °C ‘蜂糖李’ 在 30 d 绿色渐渐褪去, 90 d 果皮呈现暗黄色, 有红色细点出现, 外观品质下降。‘空心李’ 果实外表皮颜色变化较小, 果实转色从赤道部位开始颜色由绿变黄, 90 d 时, 4 °C 果皮黄中带红, 失去品种特有商品价值, 此时 2 °C 果皮轻微转为黄色, 0 °C 果皮仍呈现绿色。‘蜂糖李’ 果实贮藏 90 d 时, 据评定小组评定结果 (表 2), 0 °C 贮藏条件下 ‘蜂糖李’ 果实外观色泽、果肉质地、褐变指数均显著优于 4 °C 贮藏条件, 0 °C ‘蜂糖李’

果实总分为 61.7, 分别是 2、4 °C 总评分的 1.49、2.4 倍。‘空心李’ 果实在 90 d 时不同贮藏温度间感官品质存在显著差异, 其中, 0 °C 处理组评分最高, 为 2、4 °C 评分 1.47、1.85 倍。结合图 1 所示, 2、4 °C ‘空心李’ 果实在贮藏末期失去了其品种商品特有色泽, 而 0 °C 可以有效延缓果实的变色进程, 从而维持两种李果实外观商品特性。这种颜色差异可能与类黄酮和花青素积累相关, 0 °C 抑制了果实中色素成分合成或积累, 这与段邓乐等^[21]在蓝莓中研究相似, 温度越高花青素的稳定性越差。

2.2 不同贮藏温度对李果实硬度的影响

果实硬度是一项重要评判李果实成熟程度、口感脆爽指标, 硬度的降低直接影响到其商品价值^[22], 在贮藏过程中, 硬度往往随贮藏时长的增加而降低, 前人研究^[14]表明, 25 °C 下 ‘蜂糖李’ 贮藏达到 21 d 后, 各项品质急剧下降, 未处理组果实硬度下降了 50%, 在 20 °C 下 1-MCP (1-甲基环丙烯) 和 1-MCP+MAP (1-甲基环丙烯+自发气调包装) 处理的 ‘空心李’ 在 12 d 时硬度下降为 3.91 和 4.07 kg/cm²^[23]。‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 的硬度随着贮藏时长的增加而降低。其中, 0 °C 下 ‘蜂糖李’ 硬度变化幅度较小, 90 d 时果实硬度下降为起始值的 80.02%, 2、4 °C 果实硬度分别降到起始值 52.37%、17.99%, 0 °C 与 4 °C 存在显著差异, 与 2 °C 无显著差异 ($P>0.05$)。‘空心李’ 果实硬度起始值为 10.50 N, 贮藏期 90 d 时 4、2、0 °C 果实硬度分别下降为初始值的 62.10%、71.33%、77.52%, 整个贮藏期 0 °C 与 4 °C 间具有显著差异 ($P<0.05$)。本研究表明, 在三种贮藏温度条件下, 0 °C 能维持 ‘蜂糖李’、‘空心李’ 果实较高硬度。‘Natal’ 李在 2、4、10 和 25 °C 四个温度贮藏过程中, 相较于 25 °C, 2 和 4 °C 明显减缓了李果实硬度下降的趋势, 同样, ‘Alpha verity’ 李在 5 °C 贮藏条件果实软化程度低于 23 °C^[8,24]。

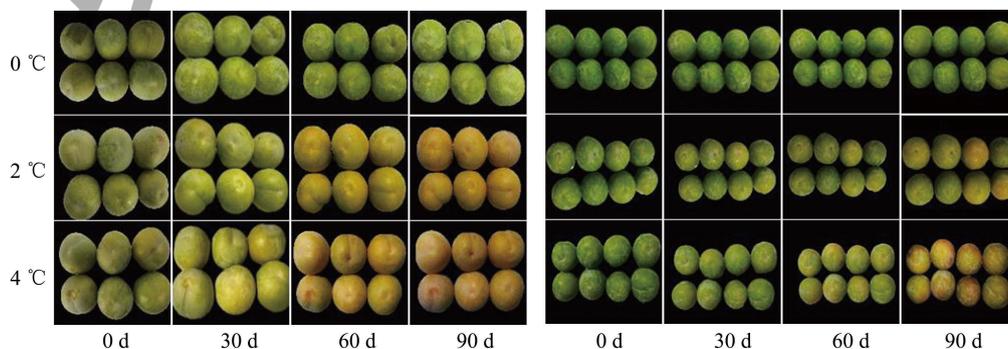


图 1 温度处理对 ‘蜂糖李’ (左) 和 ‘空心李’ (右) 外观影响

Fig.1 Effect of temperature treatment on the appearance of ‘FTL’ (left) and ‘KXL’ (right)

表 2 不同贮藏温度对李果实感官品质的影响 (90 d)

Table 2 Effects of different storage temperatures on sensory quality of plum fruit (90 d)

品种	处理/°C	果皮色泽	果肉色泽	质地	褐变	风味	总分
蜂糖李	0	14.67 ± 1.30 ^a	12.00 ± 1.52 ^a	12.00 ± 1.56 ^a	10.33 ± 0.45 ^a	12.33 ± 1.45 ^a	61.67 ± 1.76 ^a
	2	6.33 ± 1.85 ^b	8.33 ± 0.88 ^{ab}	7.00 ± 1.52 ^{ab}	8.67 ± 1.11 ^{ab}	11.00 ± 1.11 ^a	41.33 ± 1.64 ^b
	4	4.33 ± 0.33 ^b	4.00 ± 0.57 ^b	5.67 ± 0.88 ^b	4.33 ± 0.67 ^b	7.33 ± 1.33 ^a	25.67 ± 1.75 ^b
空心李	0	14.00 ± 0.00 ^a	13.00 ± 1.00 ^a	10.67 ± 0.67 ^a	21.67 ± 1.67 ^a	12.67 ± 1.85 ^a	72.00 ± 1.21 ^a
	2	8.67 ± 1.33 ^b	6.67 ± 0.33 ^b	8.67 ± 0.33 ^{ab}	17.33 ± 1.76 ^a	7.67 ± 0.45 ^a	49.00 ± 2.51 ^b
	4	3.33 ± 0.33 ^c	5.33 ± 1.76 ^b	6.33 ± 0.88 ^b	16.33 ± 0.88 ^a	7.67 ± 1.21 ^a	39.00 ± 2.15 ^b

注: 不同小写字母表示在 0.05 水平下差异显著。下同。

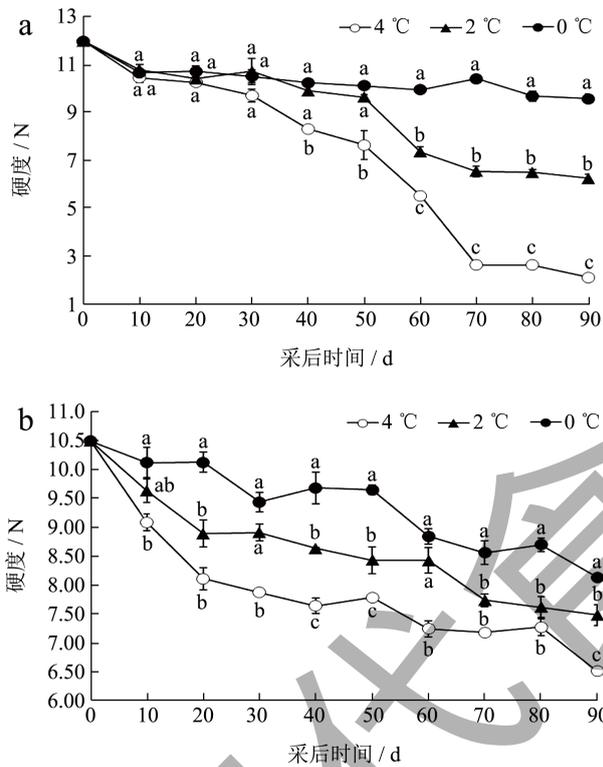


图 2 不同贮藏温度对‘蜂糖李’ (a)、‘空心李’ (b) 果实硬度的影响

Fig.2 Effects of different storage temperatures on fruit firmness of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

2.3 不同贮藏温度对李果实失重率的影响

失重率作为判断果实失水情况的主要数据, 可以判断果实汁液损耗程度。随着贮藏时长的增加, 果实养分、水分不断流失, 失重率上升。‘蜂糖李’果实在三个不同温度贮藏条件下失重率无显著差异 ($P>0.05$), 4 °C 失重率变化与 2 °C 基本吻合, 整体上 0 °C 下 ‘蜂糖李’ 果实失重率略低于 4 °C 及 2 °C, 90 d 时 0 °C 失重率为 11.78%, 2 °C 失重率为 13.76%, 0 °C 失重率为 13.85%。图 3b 中, 2 °C ‘空心李’ 失重率高于 4 °C 及 0 °C, 90 d 时

0 °C 失重率仅为 4 °C、2 °C 的 0.63、0.57 倍, 4 °C 与 0 °C 存在显著性差异 ($P<0.05$)。0 °C 下 ‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 果实的失重率也远比其他两个温度低, 有效的减少了果实营养成分的流失。说明 0 °C 有效保持了果实水分, 延缓果实重量下降^[25]。

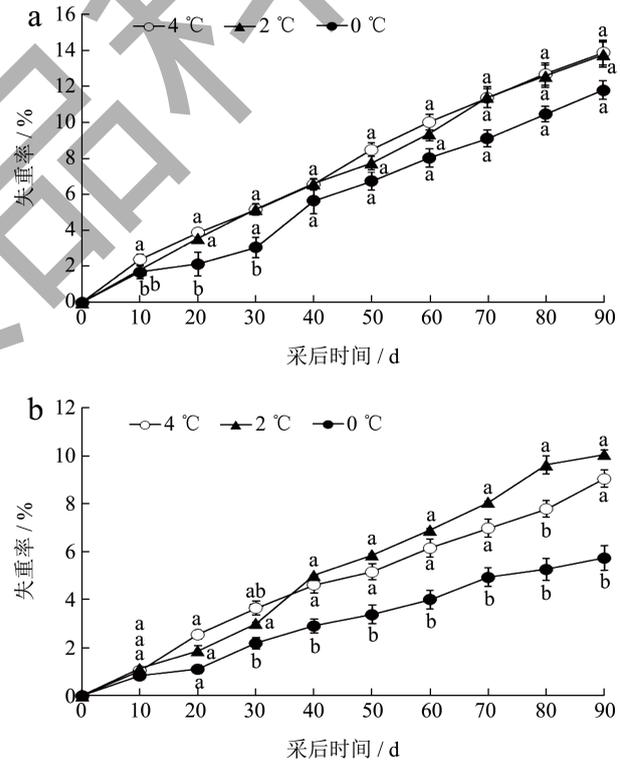


图 3 不同贮藏温度对‘蜂糖李’ (a)、‘空心李’ (b) 果实失重率的影响

Fig.3 Effects of different storage temperatures on weight loss rate of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

2.4 不同贮藏温度对李果实 SSC、TA、SSC/TA 含量的影响

可溶性固形物、可滴定酸、固酸比是通过测定果实甜酸度的含量来对果实的风味特性进行评估的重要指标^[26,27]。在贮藏期间, ‘蜂糖李’ SSC 含量呈

现上升趋势, 从贮藏期 20 d 开始 4 °C 下 ‘蜂糖李’ 果实 SSC 含量持续上升, 且贮藏期 50~70 d 时 SSC 含量显著高于 2 °C 及 0 °C ($P<0.05$), 80~90 d 时, 2 °C 下 ‘蜂糖李’ SSC 含量急剧上升至 17.07%, 90 d 时 2、4 °C SSC 含量为 0 °C 贮藏条件的 1.28、1.25 倍。‘空心李’ 果实 SSC 含量在贮藏过程中总体呈现先上升再下降趋势, 60 d 时, 各温度下果实 SSC 含量达到最高, 4、2、0 °C 果实 SSC 含量分别为初始值 1.09、1.05、1.06 倍, 贮藏 90 d 时 2 °C 果实 SSC 含量显著高于 4 °C 与 0 °C ($P<0.05$)。‘蜂糖李’ 果实 TA 含量在贮藏期 10 d 后呈缓慢下降趋势, 40 d 后三个温度下 TA 变化趋势基本一致。‘空心李’ 果实 TA 含量在贮藏期间主要呈现先上

升再下降的趋势, 总体上, 三个温度间 TA 含量无显著差异 ($P>0.05$)。不同温度贮藏条件下 ‘蜂糖李’ 和 ‘空心李’ 固酸比的值随着贮藏时长的增加呈现上升趋势。‘蜂糖李’ 在贮藏过程 10~30 d 及 70~80 d 不同温度间存在显著性 ($P<0.05$)。‘空心李’ 在贮藏前期固酸比出现小幅下降趋势, 后期逐步升高。

本研究表明, 0 °C 能够延缓 ‘蜂糖李’ 果实 SSC 含量上升, 但不同温度对果实 TA 含量、固酸比影响不大, ‘空心李’ 果实 SSC、TA 含量在三个温度下差异较小, 但在贮藏后期, 0 °C 及 2 °C 更适于果实的贮藏。这与瓏口华莱士蜜瓜以及 ‘宝岛蕉’ 上有相似的结论^[28,29]。

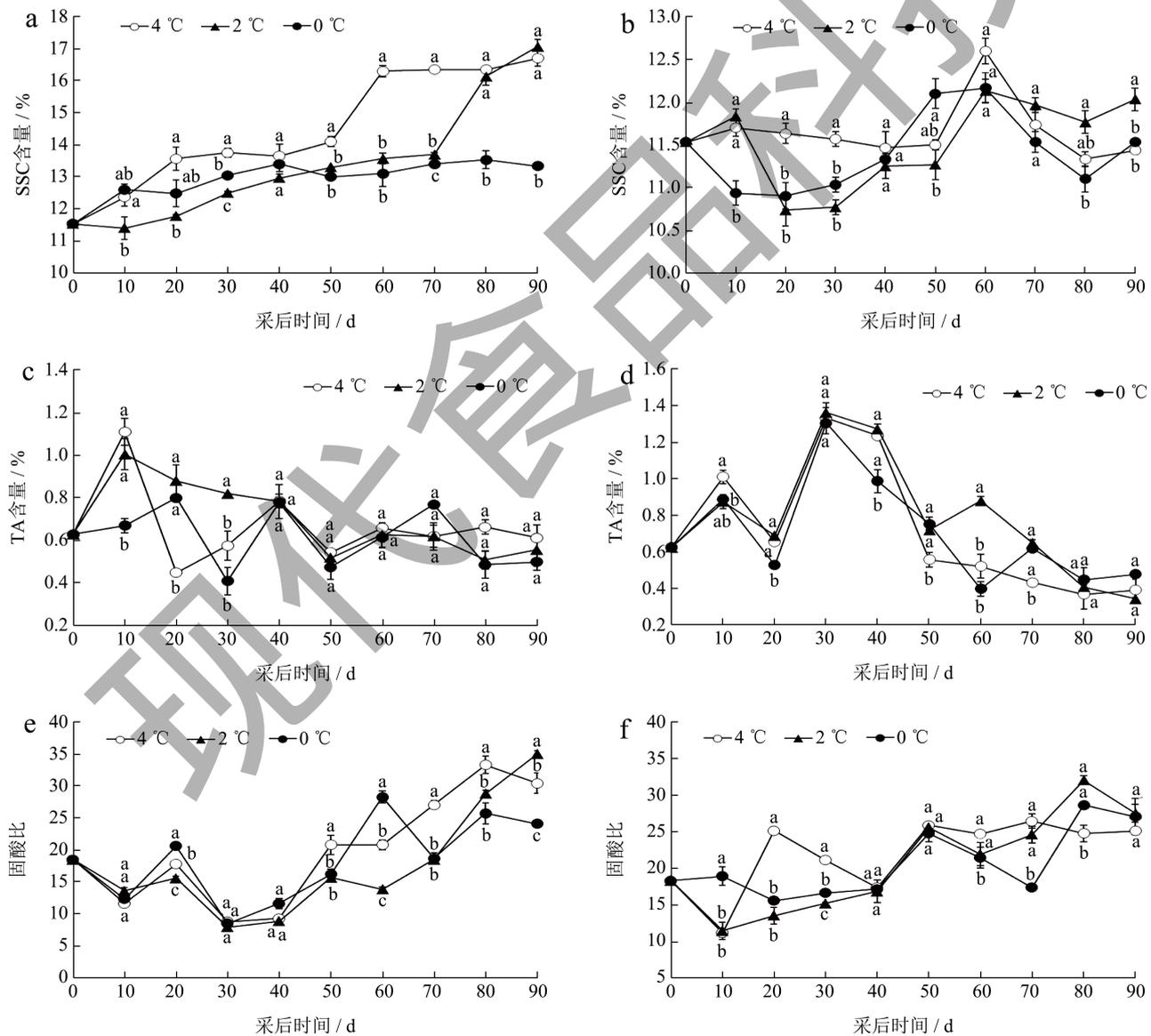


图 4 不同贮藏温度对 ‘蜂糖李’ (a、c、e)、‘空心李’ (b、d、f) 果实 SSC、TA、SSC/TA 含量的影响

Fig.4 Effects of different storage temperatures on SSC, TA, SSC/TA content of ‘FTL’ (a、c、e) and ‘KXL’ (b、d、f) fruits

2.5 不同贮藏温度对李果实呼吸强度的影响

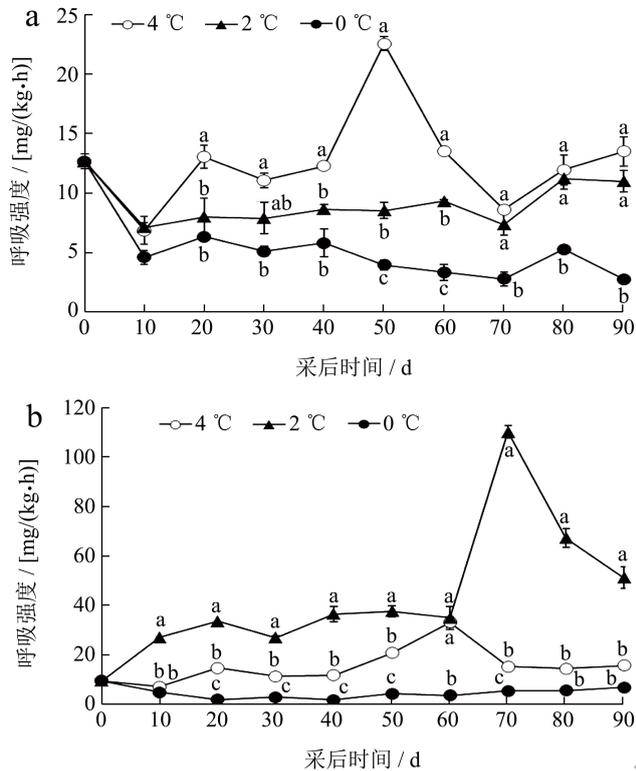


图5 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、“空心李”(b)果实呼吸强度的影响

Fig.5 Effects of different storage temperatures on respiration rate of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

呼吸强度是通过判断果实 CO_2 排出量、 O_2 摄入量或干重损耗量来对果实代谢强弱进行比对的重要指标, 较低的呼吸强度往往有利于果实营养物质的保存, 而呼吸跃变型果实在达到呼吸跃变期后果实耐藏性将急剧下降, 从而使得果实贮藏期缩短^[30]。4 °C下‘蜂糖李’果实呼吸强度显著高于2 °C及0 °C ($P < 0.05$), 4 °C果实在贮藏期50 d时出现呼吸跃变高峰22.59 mg/kg·h, 而2 °C和0 °C无明显的呼吸跃变高峰出现。2 °C下‘空心李’果实呼吸强度显著高于0 °C和4 °C ($P < 0.05$), 2 °C‘空心李’在贮藏期70 d时出现呼吸跃变高峰, 此时呼吸强度为110.33 mg/kg·h, 而4 °C下‘空心李’果实的呼吸跃变高峰比2 °C早10 d, 贮藏期60 d时2 °C下‘空心李’呼吸高峰为37.81 mg/kg·h, 0 °C则无呼吸跃变高峰出现。

整个贮藏期内不同温度下‘蜂糖李’、‘空心李’果实的呼吸强度变化不同, 对于‘蜂糖李’, 4 °C贮藏条件下果实生理代谢活动活跃, 在50 d时出现呼吸跃变高峰, 而2 °C及0 °C呼吸高峰则被推迟, 0 °C

处理降低了果实的呼吸强度, 而对于‘空心李’果实, 4 °C、2 °C均有明显的呼吸跃变高峰出现, 0 °C下不仅推迟了呼吸高峰的出现, 且呼吸强度长期低而平缓, 因此, 0 °C较有利于‘蜂糖李’和‘空心李’果实的长期贮藏, 这与0 °C条件下‘西州密25号’哈密瓜果实呼吸强度得到显著抑制结论相似^[31]。

2.6 不同贮藏温度对李果实总酚含量的影响

植物多酚是植物中磷酸戊糖、莽草酸盐和苯丙酸途径的次生代谢产物, 其有益作用是其抗氧化活性^[32]。贮藏过程中‘蜂糖李’总酚含量波动起伏大, 如图6a, 40 d时0 °C果色总酚含量达到峰值271.80 $\mu\text{mol/g}$, 分别为2、0 °C果实1.49、1.28倍, 0 °C‘蜂糖李’果实总酚含量从40 d起与2 °C处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。‘空心李’在贮藏过程中总酚含量变化呈现先上升再缓慢下降趋势。由图6b可知, 0、2 °C处理组‘空心李’果实总酚含量于30 d达到峰值, 分别为494.63、449.72 $\mu\text{mol/g}$, 而4 °C处理组则于40 d达到峰值508.13 $\mu\text{mol/g}$ 。在本研究中, ‘蜂糖李’果实在贮藏后期0 °C总酚含量较高, 而‘空心李’各温度下总酚含量差异不显著, 但‘空心李’总酚含量整体高于‘蜂糖李’, 这同样表现在不同的樱桃品种, 研究表明樱桃总酚含量是红肉大于黄肉^[33]。0、2 °C下‘空心李’果实总酚比4 °C提前10 d出现。说明不同品种间总酚含量存在差异, 同时不同温度贮藏下变化差异可能与外观颜色密切相关。

2.7 不同贮藏温度对李果实类黄酮含量的影响

类黄酮作为植物次生代谢产物, 在植物的许多生物过程和对环境因子的响应中发挥着重要作用, 且类黄酮在人类饮食中很常见, 具有抗氧化作用以及其他生物活性(如抗菌和消炎特性), 能够降低疾病风险^[34]。Fang等^[35]研究表明, 采后果实的着色程度与贮藏温度密切相关, 而贮藏温度也影响类黄酮含量^[36]。如图7a所示, ‘蜂糖李’果实在贮藏70 d后, 4 °C处理组果实类黄酮含量开始迅速上升, 与2、0 °C均存在显著差异 ($P < 0.05$), 在贮藏90 d时4 °C果实类黄酮含量分别为2、0 °C的1.6和2.5倍。‘空心李’在不同贮藏温度下其类黄酮含量呈现先上升再下降的趋势, 且0、2 °C于30 d时出现高峰, 分别为0.07、0.06 $\mu\text{mol/g}$, 4 °C处理组则于40 d出现高峰值0.08 $\mu\text{mol/g}$, 贮藏40 d后, 4 °C处理组类黄酮含量均高于0、2 °C。

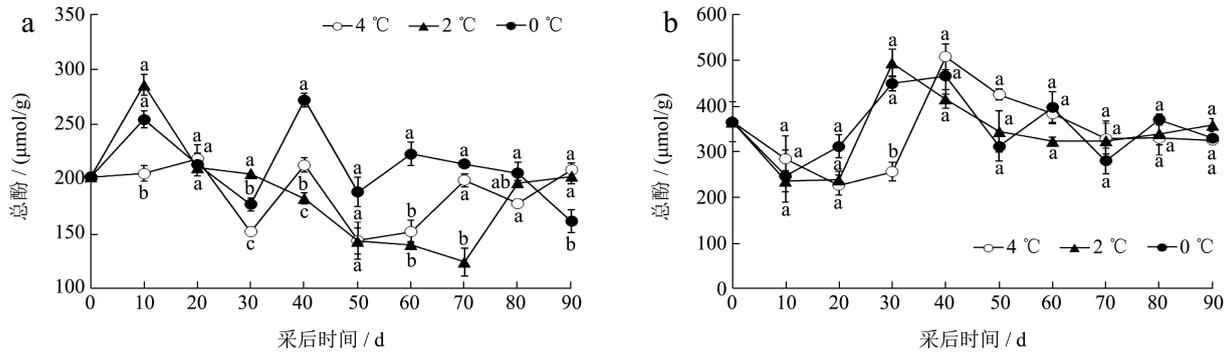


图6 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实总酚含量的影响

Fig.6 Effects of different storage temperatures on total phenolic content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

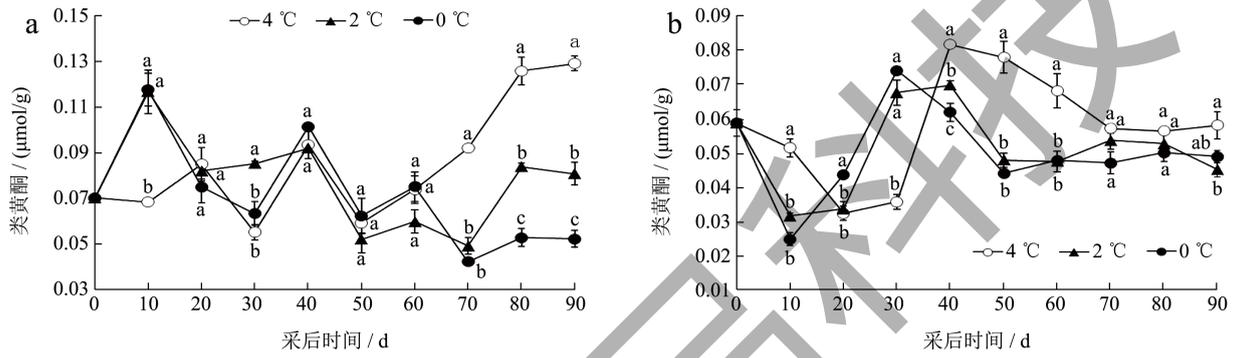


图7 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实类黄酮含量的影响

Fig.7 Effects of different storage temperatures on flavonoid content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

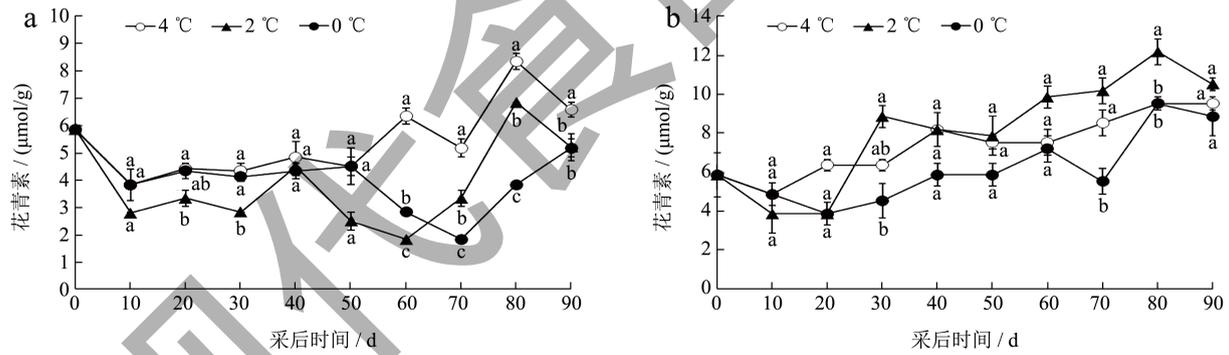


图8 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实花青素含量的影响

Fig.8 Effects of different storage temperatures on anthocyanin content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

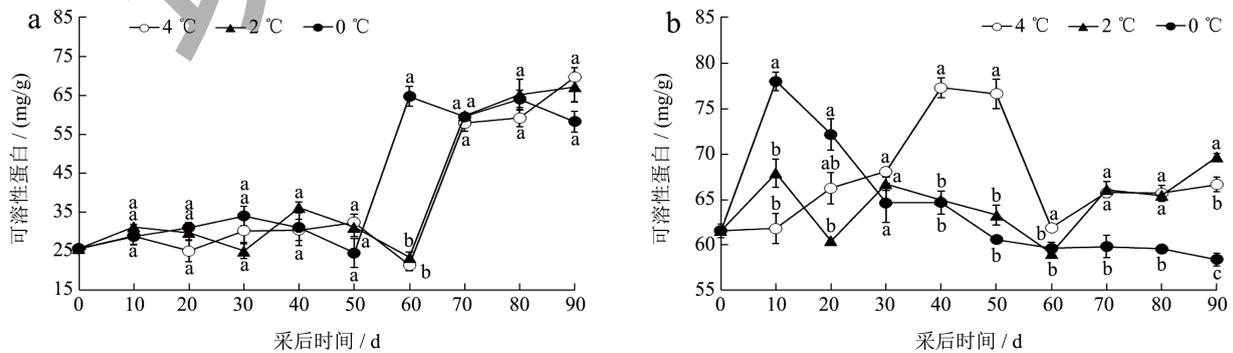


图9 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实可溶性蛋白质含量的影响

Fig.9 Effects of different storage temperatures on soluble protein content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

结合图 1 可知, 贮藏后期两种李果实中 4 °C 类黄酮含量高于 0 °C, 转色明显且出现明显红色斑点, 而 0 °C 则减缓了果实色泽的改变。0、2 °C 下 ‘空心李’ 果实类黄酮值比 4 °C 提前 10 d 出现。

2.8 不同贮藏温度对李果实花青素含量的影响

花青素影响果蔬的颜色和感官特征, 有利的低温条件是诱导花青素生物合成的重要因素之一^[37]。‘蜂糖李’ 果实贮藏期间 4 °C 处理组花青素含量均显著高于 0 °C 及 2 °C ($P<0.05$), 80 d 时 4、2 °C 花青素含量达到峰值且 4 °C 为 2 °C 的 1.22 倍。‘空心李’ 果实花青素含量随贮藏时长的增加含量也呈现上升的趋势, 0、2、4 °C 下果实花青素含量在贮藏 80 d 达到峰值 9.51、12.18、9.51 $\mu\text{mol/g}$, 此时 2 °C 下花青素含量为 0 °C 及 4 °C 的 1.3 倍, 由图 8b 可知从 50 d 起 2 °C 下果实花青素含量显著高于 0 °C ($P<0.05$)。贮藏后期 ‘蜂糖李’ 在 4 °C 的花青素含量高于 0 °C。李秀芳等^[38]研究表明 0 °C 低温贮藏延缓果皮色泽、色素含量的变化, 可较好地保持 ‘红富士’ 苹果外观品质和营养价值。

2.9 不同贮藏温度对李果实可溶性蛋白质含量的影响

可溶性蛋白为重要的营养物质和渗透调节物质保持果实在低温环境下细胞膜内外的渗透平衡^[39,40]。前 50 d 中各温度处理下的 ‘蜂糖李’ 可溶性蛋白质含量较为稳定, 之后在第 60 天时 0 °C 下含量骤升到达峰值 64.69 mg/g, 分别是 4 °C 和 2 °C 的 3.0 倍、2.8 倍 (图 9a)。而 ‘空心李’ 可溶性蛋白质含量在 0 °C 和 2 °C 下分别于第 10 天时达到峰值 78.00 和 67.89 mg/g, 之后含量急剧下降, 而 4 °C 则稳定上升于第 40 天达到峰值 77.27 mg/g, 在第 60 天急剧下降。且 70~90 d 内, 2 °C 和 4 °C 显著高于 0 °C ($P<0.05$)。结合数据可知两种李果实中渗透物质发挥的调节作用不同, ‘蜂糖李’ 贮藏后期可溶性蛋白整体上升, 说明低温贮藏下 ‘蜂糖李’ 内可溶性蛋白起主要调节作用, 0 °C 下 ‘蜂糖李’ 果实更早的参与了调控。其与山楂果实不同贮藏温度下可溶性蛋白下降的结果相反^[41]。

2.10 不同贮藏温度对李果实苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性的影响

PAL 作为苯丙烷代谢途径中的关键酶, 为总酚、类黄酮、花青素等上述次生代谢产物的合成提

供条件^[42]。0、2 °C 下 ‘蜂糖李’ 果实 PAL 含量峰值出现比 4 °C 慢, 4 °C 处理组在 60 d 时活性达到峰值 11.93 U/g, 2 °C 处理组峰值 14.05 U/g 出现在 70 d, 而 0 °C 处理组峰值 12.93 U/g 则出现在贮藏末期 90 d。‘空心李’ 在贮藏前期不同贮藏温度下 PAL 含量变化趋势一致, 2 °C 果实在 90 d 达到峰值 25.91 U/g, 4 °C、0 °C 在 70 d 达到峰值, 且此时 4 °C 果实含量为 0 °C、2 °C 含量的 1.17、1.33 倍。PAL 作为果实防御酶, 低温下酶活性上升可以抵御低温带来的伤害^[43]。

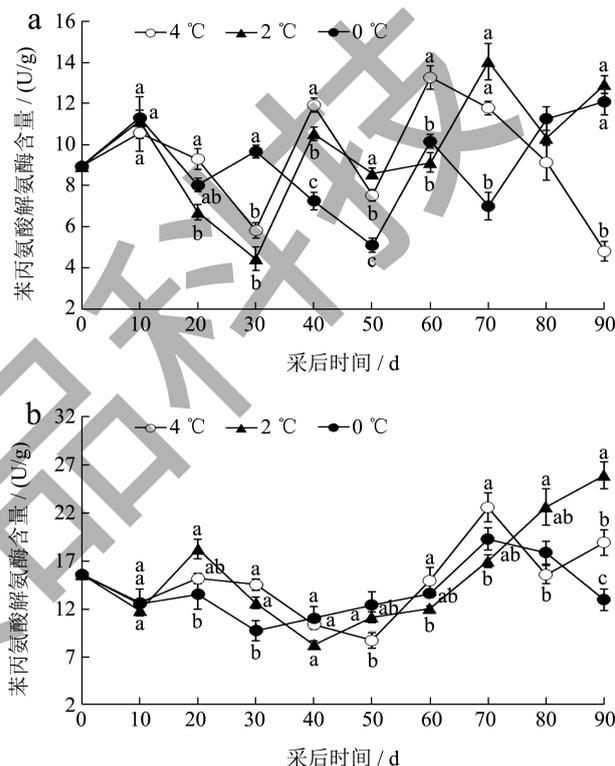


图 10 不同贮藏温度对 ‘蜂糖李’ (a)、‘空心李’ (b) 果实苯丙氨酸解氨酶活性的影响

Fig.10 Effects of different storage temperatures on PAL activity of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

2.11 不同贮藏温度对李果实游离脯氨酸含量的影响

游离脯氨酸作为渗透调节物质保持膜的完整性, 防治水分散失, 且在低温贮藏条件下的果实体内会产生脯氨酸来抵抗低温胁迫对果实造成的损伤^[44]。如图 11 可知, 不同温度处理下的 ‘蜂糖李’ 脯氨酸含量总体呈现先降后升趋势, 而 ‘空心李’ 则呈现先上升后下降的趋势。贮藏前期 4 °C ‘蜂糖李’ 游离脯氨酸含量高于 2、0 °C 果实, 在贮藏后期三个温度间脯氨酸含量差异小。40 d 时, 2 °C ‘空

‘空心李’果实脯氨酸含量率先上升，从60 d起0℃下果实脯氨酸含量就显著高于2、4℃ ($P < 0.05$)。本研究中‘蜂糖李’贮藏过程脯氨酸含量变化为先下降后上升，造成这种变化的原因可能与脯氨酸在‘蜂糖李’中的积累需要一定的启动时间相关^[40]。而‘空心李’果实在三个温度下，脯氨酸含量于50 d时骤升后逐渐下降，这与燕红水蜜桃在20℃贮藏中脯氨酸含量变化相似，原因可能是‘蜂糖李’果实中脯氨酸对于低温比较敏感，初期由于低温刺激脯氨酸含量急剧上升，而后期不可逆的低温伤害导致细胞损伤无法正常调节^[45]。

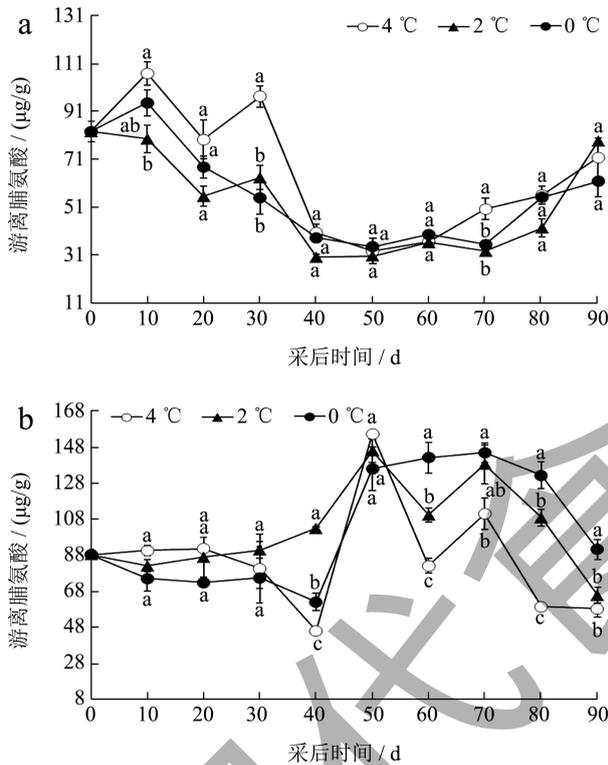


图 11 不同贮藏温度对‘蜂糖李’ (a)、‘空心李’ (b) 果实游离脯氨酸含量的影响

Fig.11 Effects of different storage temperatures on free proline content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

2.12 不同贮藏温度对李果实 SOD 活性的影响

低温下细胞膜透性增加，会致使细胞代谢紊乱，从而导致膜脂过氧化，加速贮藏期间果实的衰老进程^[46]。SOD 是果实细胞内部起到保护细胞膜系统作用的含金属辅基酶，其通过歧化反应将 $O_2\cdot$ 催化为 H_2O_2 与 O_2 ^[47]。如图 12 可知，不同温度处理下的‘蜂糖李’ SOD 活性起伏较大，4℃‘蜂糖李’

果实 SOD 活性率先于 30 d 达到峰值，0℃果实峰值比 4℃推迟 20 d 出现，2℃果实峰值最低且最晚出现，是 0℃和 4℃峰值的 0.87 倍和 0.96 倍。‘空心李’0℃下果实 SOD 峰值出现在 60 d，此时 0℃含量显著高于 2、4℃下果实 SOD 含量 ($P < 0.05$)，分别是它们的 1.32、1.26 倍。SOD 贮藏末期下降的原因可能是自由基累积和膜质伤害加剧，导致果实无法通过自身调节抵御代谢紊乱^[43]。

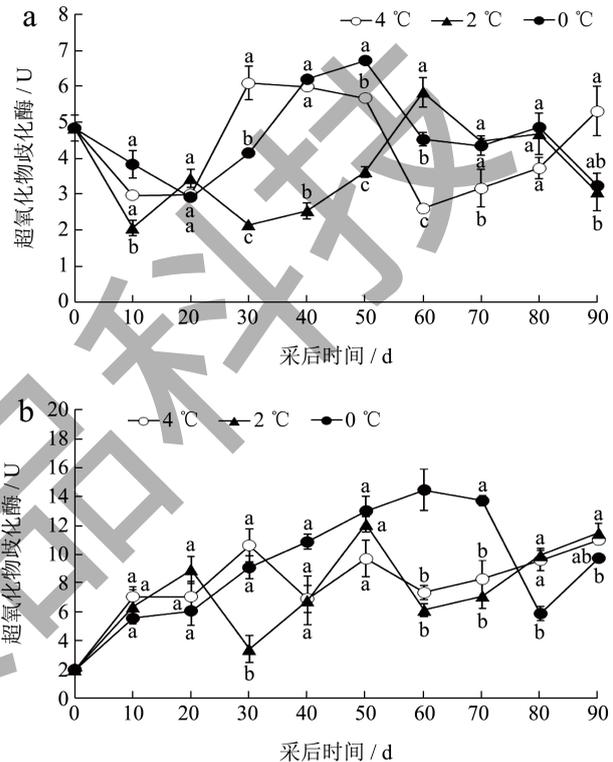


图 12 不同贮藏温度对‘蜂糖李’ (a)、‘空心李’ (b) 果实超氧化物歧化酶活性的影响

Fig.12 Effects of different storage temperatures on SOD activity of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

2.13 不同贮藏温度对李果实丙二醛(MDA)含量的影响

MDA 是膜脂过氧化作用的产物之一，低温下细胞代谢，从而对细胞膜结构产生破坏^[43]。如图 13a 所示，三个温度下‘蜂糖李’ MDA 含量变化趋势基本一致，它们峰值都出现在贮藏期 10 d 时，此时 0℃果实 MDA 含量为 4、2℃的 1.23、1.32 倍。‘空心李’ MDA 含量呈现先上升再下降的趋势，4℃果实 MDA 平均含量略高于 2、0℃，2℃处理组 MDA 含量从 10~40 d 急剧上升达到峰值，比 4℃和 0℃高了 11% 和 64%。‘巨峰’葡萄在 2℃

低温下 MDA 含量逐渐上升^[48], 这与‘空心李’在低温下 MDA 变化趋势相一致, 但相较于 4、2 °C ‘空心李’在 0 °C 贮藏后期 MDA 含量较低。

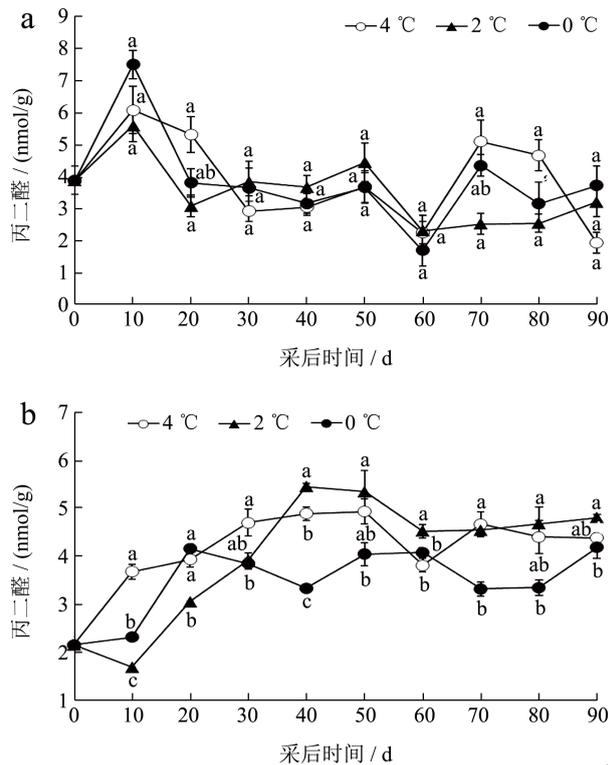


图 13 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实丙二醛含量的影响

Fig.13 Effects of different storage temperatures on MDA content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b) fruits

2.14 不同贮藏温度对李果实 H₂O₂ 含量的影响

H₂O₂ 与果实细胞膜脂过氧化作用有关, 在低温胁迫下, 其对于抗逆性的启动有较好的帮助作用^[40]。随着贮藏期的增长‘蜂糖李’、‘空心李’果实中 H₂O₂ 含量呈现出上升趋势。如图 14a 所示, 从贮藏 50 d 起, ‘蜂糖李’ 2 °C 处理组 H₂O₂ 含量显著高于 4 °C 和 0 °C ($P < 0.05$), 2、0 °C 在 70 d 时果实 H₂O₂ 含量达到峰值 18.01、16.39 nmol/g。‘空心李’果实贮藏期 50 d 后, 4 °C 下‘空心李’果实 H₂O₂ 含量显著高于 0 °C, 三个温度均在贮藏 90 d 时达到峰值且 4 °C 含量分别是 2、0 °C 含量的 1.13、1.20 倍。本研究发现, 两种李果实不同贮藏温度下 H₂O₂ 含量逐渐积累, 但在贮藏 50~60 d 0 °C 显著抑制 H₂O₂ 含量上升。这在‘国峰 7 号’李、火龙果有着一致结论, 0 °C 下 H₂O₂ 产生受到抑制, 从而延长了果实的贮藏期^[49,50]。

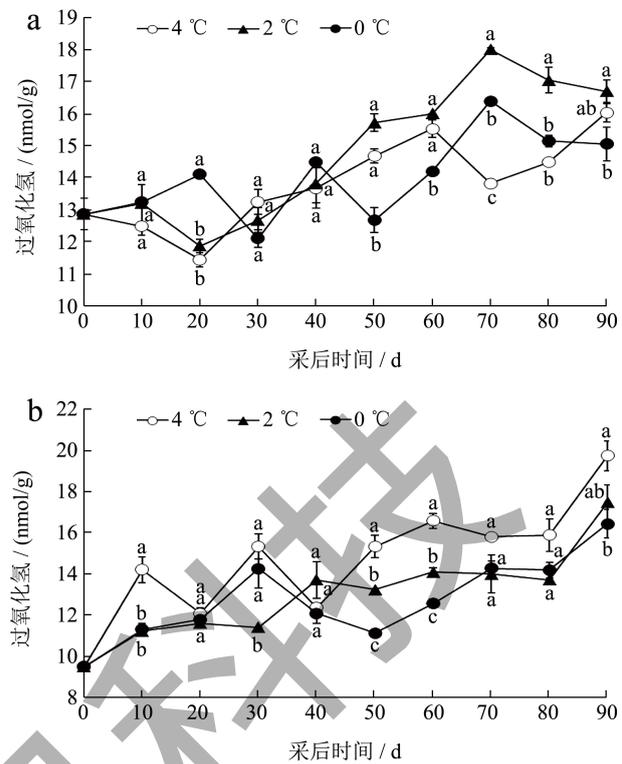


图 14 不同贮藏温度对‘蜂糖李’(a)、‘空心李’(b)果实过氧化物含量的影响

Fig.14 Effects of different storage temperatures on the H₂O₂ content of ‘FTL’ (a) and ‘KXL’ (b)

2.15 贮藏期间不同指标间相关性分析

由图 15 可知, 2 °C 下‘空心李’果实 MDA 与硬度极显著负相关 ($P < 0.01$), 与失重率极显著正相关 ($P < 0.01$), 与花青素显著正相关 ($P < 0.05$), 4 °C 下‘空心李’MDA 含量与硬度、SOD 极显著正相关 ($P < 0.01$), 而 0 °C 下 MDA 与其他指标无显著相关, 说明 MDA 导致的细胞膜结构损坏是造成果实软化的重要原因。且 4 °C 下‘空心李’硬度与失重率、花青素、SOD、MDA、H₂O₂ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 2 °C 下硬度与失重率、花青素、MDA、H₂O₂ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与呼吸强度和 SOD 显著负相关 ($P < 0.01$), 而 0 °C ‘空心李’硬度仅与失重率和 H₂O₂ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 说明果实在贮藏条件中细胞膜脂过氧化与硬度变化相关联。‘蜂糖李’在贮藏中, H₂O₂ 与脯氨酸和 MDA 呈负相关, 在 2、4 °C 下与 SOD 呈正相关, 而 0 °C 下与 SOD 负相关, 说明 0 °C 时 SOD 活性受到了极大抑制, 且硬度与失重率、SSC 极显著负相关 ($P < 0.01$), 意味着果实在软化过程中伴随着水分流失和糖分积累。

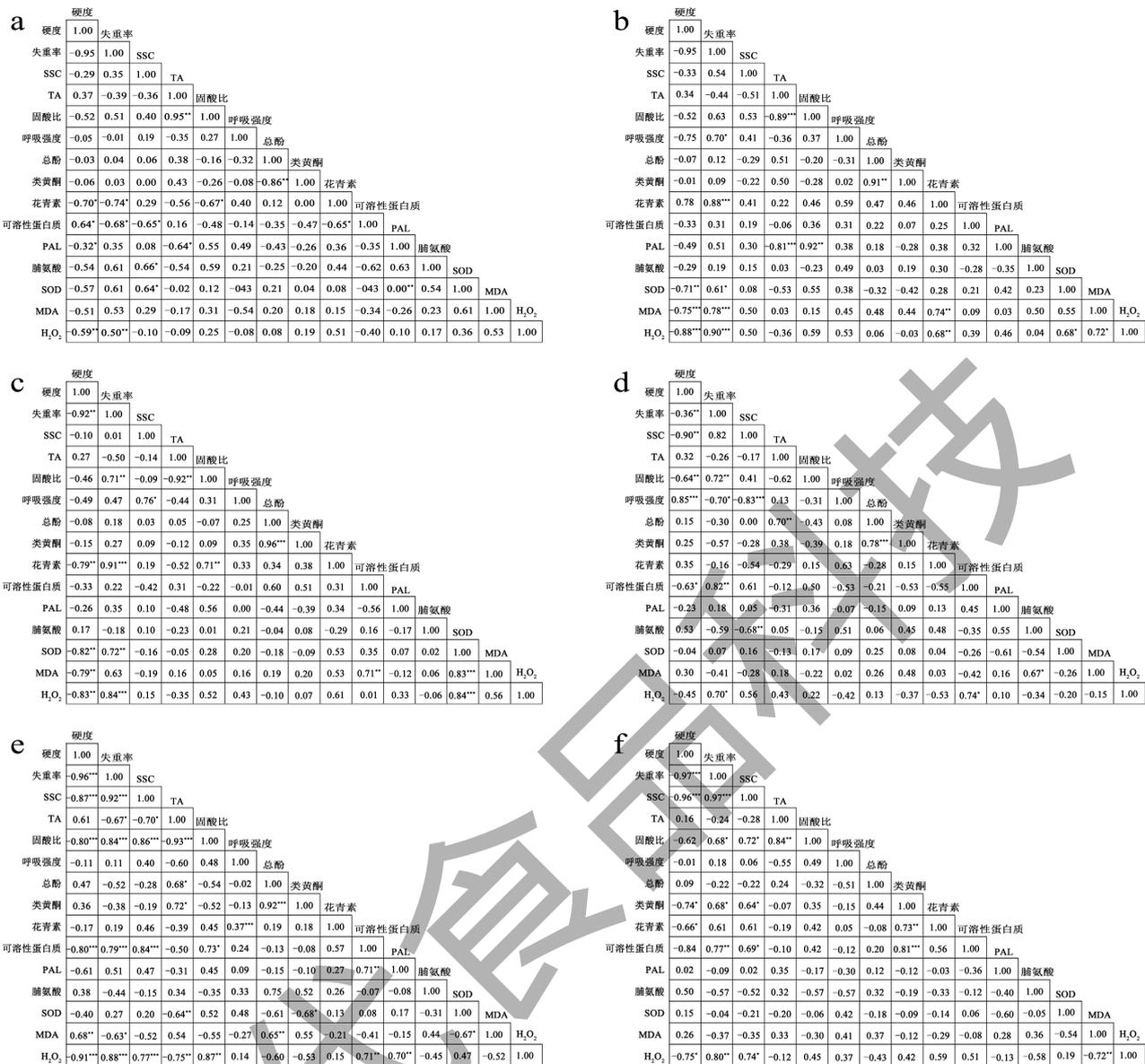


图 15 ‘空心李’和‘蜂糖李’指标相关性分析

Fig.15 Correlation analysis of ‘KXL’ and ‘FTL’ index

注: a-c 为 ‘空心李’, d-f 为 ‘蜂糖李’。* 和 ** 分别表示显著相关 (P < 0.05) 和极显著相关 (P < 0.01)。

3 结论

本试验分别对比了‘蜂糖李’和‘空心李’在 0、2、4 °C 三种贮藏温度下李果实的保鲜效果。通过比较外观、内在品质以及部分酶活性筛选出适宜两种李果实的贮藏温度。本试验结果表明 0 °C 贮藏条件能够保持果实较高的硬度, 延缓失重率、SSC 上升的同时减弱呼吸强度, 抑制总酚、类黄酮和花青素的积累从而有效的维持了两种李果实的外观商品特性, 且提高 SOD 酶活性以减少 H₂O₂ 的上升, 以延长较好品质的贮藏期限。相关性分析发现指标间相

关性在不同温度下表现不同, 说明温度是影响指标互作的因素, 可以通过调节贮藏温度以达到延缓果实品质下降的目的。

参考文献

[1] YU J W, LI W, YOU B Y, et al. Phenolic profiles, bioaccessibility and antioxidant activity of plum (*Prunus Salicina* Lindl) [J]. Food Research International, 2021, 143: 110300.
 [2] LIN X, HUANG S A, ZHANG Q, et al. Changes in the primary metabolites of ‘Fengtang’ plums during storage detected by widely targeted metabolomics [J]. Foods, 2022, 11(18): 2830.

- [3] 张琴,林欣,彭俊森,等.外源草酸对采后‘蜂糖李’果实软化和细胞壁降解的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(6):64-70.
- [4] 黄展文,李明娟,游向荣,等.李果采后生理及贮藏保鲜技术研究进展[J].食品科技,2021,46(1):27-32.
- [5] XIE G F, WANG X H, WEI K H, et al. Effects of 1-methylcyclopropene on texture properties of Rabbiteye blueberry during long-term storage and simulated transportation [J]. Food Science and Technology, 2018, 38: 188-192.
- [6] DENG W J, WU J L, DA Y R, et al. Effect of temperature treatment on fruit quality and immunoregulation of Satsuma (*Citrus unshiu* Marc.) during storage.[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(10): 5443-5451.
- [7] 何炬才,康仕成,张冬敏,等.不同贮藏温度对黄晶果采后生理和贮藏品质的影响[J].食品科学,2023,44(21):213-219.
- [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] 张瑜瑜,陈泽斌,用成健,等.外源水杨酸处理对蓝莓采后生理及贮藏品质的影响[J].西南农业学报,2022,35(1):168-175.
- [10] 张银志,孙秀兰,刘兴华,等.低温胁迫和变温处理对李子生理特性的影响[J].食品科学,2003,2:134-138.
- [11] 孙秀兰,刘兴华,张华云,等.变温贮藏对黑琥珀李品质及生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,2:109-113.
- [12] 曾秋敏,陈力耕,严伟东,等.不同贮藏温度对黑琥珀李保鲜效果的影响[J].浙江林业科技,2005,4:32-34,44.
- [13] 尚磊,高倩,李悦,等.蜂糖李果实内源激素含量与其生理落果的关系[J].南方农业学报,2022,53(11):3184-3191.
- [14] 王贵,李蕊蕊,吴茂宏,等.基于IRAP标记的沙子空心李遗传多样性评价及指纹图谱构建[J].华中农业大学学报,2023,42(1):1-11.
- [15] 高迎旺,耿金凤,饶秀勤.果蔬采后内部损伤无损检测研究进展[J].食品科学,2017,38(15):277-287.
- [16] 黄世安,董晓庆,蔡明佳,等.褪黑素对采后“蜂糖李”果实品质和生理特性的影响[J].北方园艺,2021,18:103-110.
- [17] 陈艺晖,张华,林河通,等.不同浓度1-MCP处理对采后杨桃果实的保鲜效应[J].热带作物学报,2013,34(11):2283-2288.
- [18] 曹建康,赵玉梅,姜微波.果蔬采后生理生化实验技术[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [19] 董晓庆,饶景萍,田改妮,等.草酸复合清洗剂对红富士苹果贮藏品质的影响[J].园艺学报,2009,36(4):577-582.
- [20] SERGIEV I, ALEXIEVA V, KARANOV E. Effect of spermine, atrazine and combination between them on some endogenous protective systems and stress markers in plants [J]. Compt Rend Acad Bulg Sci, 1997, 51: 121-124.
- [21] 段邓乐,徐海燕,冯志强,等.蓝莓花青素的提取及其抗氧化活性和稳定性[J].食品研究与开发,2023,44(12):137-143.
- [22] LUO Z S, XIE J, XU T Q, et al. Delay ripening of ‘Qingnai’ plum (*Prunus salicina* Lindl.) with 1-methylcyclopropene [J]. Plant Science, 2009, 177(6): 705-709.
- [23] 董晓庆,刘洪滩,朱守亮,等.1-MCP结合自发气调包装对‘空心李’果实软化和细胞壁代谢的影响[J].中国农学通报,2020,36(22): 129-135.
- [24] MORE P R, PEGU K, ARYA S S. Post-harvest application of micellar pomegranate peel extract (MPPE) enriched starch-casein composite coating to preserve the plum (*Prunus salicina* L.) fruit during cold and ambient storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12): 17226.
- [25] 李高潮,霍强强,范崇辉,等.不同贮藏温度与采收期对‘秦超’桃果实品质的影响[J].北方园艺,2017,14:136-143.
- [26] 黄展文,王颖,李明娟,等.采收成熟度对龙滩珍珠李果实品质的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(7):203-210.
- [27] 杜艳民,王文辉,贾晓辉,等.不同可溶性固形物含量‘鸭梨’耐贮性差异比较[J].果树学报,2018,35(10):1262-1270.
- [28] 刘聪,李亚珍,尹嘉敏,等.不同贮藏温度对磴口华莱士蜜瓜质构特性、理化指标、感官品质变化及相关性分析[J].中国瓜菜,2022,35(1):47-53.
- [29] 魏军亚,程石,魏守兴,等.不同贮藏温度下‘宝岛蕉’果实品质变化规律研究[J].中国果树,2021,12:69-74.
- [30] 潘越,李婷婷,吴彩娥,等.低温等离子体处理对新疆‘小白杏’保鲜效果及品质的影响[J].食品科学,2022,43(9):55-61.
- [31] 徐斌,阿塔吾拉·铁木尔,张婷,等.不同贮藏温度对西州密25号哈密瓜果实软化的影响[J].新疆农业科学,2022,59(5):1135-1143.
- [32] 李典典,郝晓庆,张培培,等.植物多酚抑菌性及其复合保鲜技术在水产品中的应用进展[J].中国食品添加剂,2022,33(2):210-217.
- [33] 崔建潮,贾晓辉,孙平平,等.不同品种甜樱桃果实贮藏期间品质及生理特性变化[J].保鲜与加工,2019,19(5):24-32.
- [34] 赵莹,杨欣宇,赵晓丹,等.植物类黄酮化合物生物合成调控研究进展[J].食品工业科技,2021,42(21):454-463.
- [35] FANG Z Z, LIN-WANG K, JIANG C C, et al. Postharvest temperature and light treatments induce anthocyanin accumulation in peel of ‘Akihime’ plum (*Prunus salicina* Lindl.) via transcription factor PsMYB10. 1 [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 179: 111592.
- [36] CHAUDHARY P R, YU X, JAYAPRAKASHA G K, et al. Influence of storage temperature and low-temperature conditioning on the levels of health-promoting compounds in Rio Red grapefruit [J]. Food Science & Nutrition, 2017,

- 5(3): 545-553.
- [37] LI X L, CHENG Y D, WANG M, et al. Weighted gene coexpression correlation network analysis reveals a potential molecular regulatory mechanism of anthocyanin accumulation under different storage temperatures in 'Friar' plum [J]. *BMC Plant Biology*, 2021, 21(1): 1-14.
- [38] 李秀芳, 杨拉弟, 韩叶, 等. 温度对采后'红富士'苹果果皮色泽、色素及其相关酶活性变化的影响[J]. *西北农业学报*, 2014, 23(5): 97-103.
- [39] 项洪涛, 郑殿峰, 何宁, 等. 植物对低温胁迫的生理响应及外源脱落酸缓解胁迫效应的研究进展[J]. *草业学报*, 2021, 30(1): 208-219.
- [40] 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, 16.
- [41] 刘榕晨, 史小柯, 任瑞, 等. 不同贮藏温度对山楂果实品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(10): 1842-1846.
- [42] 胡顺卿, 刘雨辰, 井广琴, 等. 不同贮藏温度对李果实花青素代谢的影响[J]. *包装工程*, 2015, 36(9): 16-22.
- [43] 陈丽, 朱丽婵, 张鲁斌, 等. 低温贮藏期对芒果果实抗氧化能力和品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(34): 134-138.
- [44] 辛丹丹, 司金金, 张若曦, 等. 外源褪黑素处理对黄瓜采后冷藏期抗冷性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 108-114, 120.
- [45] 陈伟, 苏新国, 郜海燕, 等. 低温对桃果实采后冷害及其内源激素的影响[J]. *核农学报*, 2013, 27(8): 1173-1178.
- [46] 袁洁, 朱璇, 逢焕明, 等. 外源水杨酸处理对采后杏果实抗冷性的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(24): 339-343.
- [47] 刘彩红, 王雅琪, 李乾, 等. 正丁醇对采后哈密瓜冷害及活性氧代谢的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(11): 1984-1994.
- [48] 刘树泽, 代惠芹, 刘晨霞, 等. 不同熏蒸保鲜剂对'巨峰'葡萄抗氧化能力的影响[J]. *北方园艺*, 2022, 1: 94-100.
- [49] 郝邢维, 周倩, 高芳, 等. 温度对采后"国峰7号"李果实贮藏品质的影响[J]. *包装工程*, 2023, 44(1): 213-222.
- [50] 王红林, 袁启凤, 严佳文, 等. 贮藏温度对"紫红龙"火龙果SA、JA及酶活性变化的影响[J]. *中国南方果树*, 2020, 49(1): 70-74, 80.