

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240716003

贮藏温度对百香果果皮性状及其活性 氧代谢的影响

任丽花, 潘 葳, 韦 航, 方 灵, 刘文静, 傅建炜*

(福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所/福建省农产品质量安全重点实验室, 福州 350003)

摘 要: **目的** 探讨贮藏温度对采后百香果果皮性状及其活性氧代谢的影响。**方法** 以金福 7 号百香果为试材, 通过测定贮藏过程中失重率、果皮色度值、果皮中的一些活性氧代谢指标的变化规律, 来探究贮藏温度对百香果果皮理化性质的影响。**结果** 同常温相比, 低温条件下百香果失重率相对较低, 而且失重速率较小。低温贮藏能有效维持百香果的 L^* , 低温下的 a^* 相对较低, 且 a^* 正值出现的时间也较晚, 对 b^* 影响不大。低温在一定时间内不仅可以减缓超氧阴离子自由基(superoxide anion, $O_2^{\cdot-}$)产生速率的变化, 而且还可以保持相对较高的抗氧化性。**结论** 低温下百香果果皮水分含量和色泽表现良好, 一定时间内其果皮的抗氧化活性较高。结合相关性分析结果得出, 在贮藏的过程中尤其冷藏时如果注意采取适当的保水措施, 并使百香果果皮保持较高的超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)和过氧化物酶(peroxidase, POD)活性, 可以延长其贮藏期并使其保持较好外观品质。

关键词: 百香果; 冷藏; 果皮; 活性氧代谢

Effects of storage temperature on the characters and reactive oxygen metabolism of peel of *Passiflora edulis* Sims

REN Li-Hua, PAN Wei, WEI Hang, FANG Ling, LIU Wen-Jing, FU Jian-Wei*

(Research Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences/Fujian Key Laboratory of Agro-Products Quality and Safety, Fuzhou 350003, China)

ABSTRACT: **Objective** To explore the effects of storage temperature on the characters and reactive oxygen metabolism of peel of postharvest *Passiflora edulis* Sims. **Methods** The *Passiflora edulis* Sims cultivar named ‘Jinfu No.7’ was used as the test material, the effects of storage temperature on the physicochemical properties of *Passiflora edulis* Sims peel were investigated by measuring the changes of weight loss rate, peel color value and some active oxygen metabolism indexes in peel during storage. **Results** Compared with room temperature, the weight loss rate of *Passiflora edulis* Sims was relatively lower under cold conditions, and the weight loss rate was

基金项目: 福建省省属公益类科研院所基本科研专项(2021R1022006)、福建省农业科学院科技创新团队建设项目(CXTD2021011-1)、“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021020)

Fund: Supported by the Fundamental Scientific Research Activities Non-profit Research Institution in Fujian (2021R1022006), the Construction Project of Science and Technology Innovation Team of Fujian Academy of Agricultural Sciences (CXTD2021011-1), and the “5511” Collaborative Innovation Project (XTCXGC2021020)

*通信作者: 傅建炜, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。E-mail: fjw9238@163.com

*Corresponding author: FU Jian-Wei, Ph.D, Professor, Research Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China. E-mail: fjw9238@163.com

smaller. Cold storage could effectively maintain the L^* of *Passiflora edulis* Sims, and a^* at low temperature was relatively lower, and the positive value of a^* appeared late, but had little effect on b^* . Low temperature could not only slow down the rate of superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$) production within a certain period of time, but also maintain relatively high antioxidant activity. **Conclusion** The moisture content and color of peel of *Passiflora edulis* Sims perform well at low temperatures, and the antioxidant activity of the peel is relatively high within a certain period of time. Combined with the results of correlation analysis, it is concluded that if appropriate water retention measures are taken during storage, especially during cold storage, and the peel of *Passiflora edulis* Sims maintains high activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), the storage period can be prolonged and the appearance quality can be maintained.

KEY WORDS: *Passiflora edulis* Sims; cold storage; peel; reactive oxygen metabolism

0 引 言

百香果(*Passiflora edulis* Sims), 学名西番莲, 系西番莲科西番莲属的草质藤本植物, 原产大、小安的列斯群岛, 现广植于热带和亚热带地区, 在中国主要栽培于广东、广西、云南、海南、四川、福建等省份^[1-3]。百香果不仅气味芳香, 而且营养丰富, 集食用、药用和观赏性于一体, 经济价值极高。目前, 我国百香果主要以鲜食为主, 采收后的百香果经过相应的处理后进入超市或是经电商发货往全国各地, 销售渠道的多元化, 无疑对采后百香果的新鲜度和风味有更大的要求。百香果成熟季节高温高湿, 而且作为一种典型的呼吸跃变型水果, 采摘后由于呼吸作用和蒸腾作用的加强, 不断消耗自身有机物质, 易出现失水、软化、褐变和腐烂等问题, 从而影响果实本身品质以及贮藏期的长短^[4-6], 所以研究采收后百香果的贮藏保鲜特性具有重要意义。

目前国内外对百香果贮藏的研究主要集中在贮藏温度^[7-10]、保鲜处理^[11-18]等方面, 内容主要涉及贮藏生理^[19-20]、品质^[21]、风味物质^[22]等方面的变化, 而对其果皮尤其果皮生理方面的研究则较少。作为果实内外环境的第一道屏障, 果皮的作用包括保护作用、营养作用、屏障作用、屏蔽作用、生物识别作用、生态作用和抵抗作用等。果皮的存在使得果肉免受外环境的危害, 并能延缓水分散失, 抵御各种病原微生物的入侵^[23], 在生物学中具有重要的作用。此外, 果皮的外观(包括色泽)直接展现了果蔬的外在品质。百香果的果皮约占其鲜果的 55%^[24], 其显微结构由内到外为中果皮、内表皮、表皮、角质层^[25], 内表皮虽比较坚实, 但其表皮和角质层比较薄脆, 中果皮也称海绵层, 易受病虫害侵害和运转途中的挤压碰伤。鉴于果皮在果实贮藏中的重要作用及其生理方面研究的滞后性, 本研究以黄金百香果为研究对象, 探究冷藏及室温条件下其果实的失重率、果皮的色度值、超氧阴离子自由基(superoxide anion, $O_2^{\cdot-}$)产生速率、丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量、超氧化物歧化

酶(superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性及过氧化氢酶(catalase, CAT)活性等相关活性氧代谢指标的变化情况, 并分析各指标之间的相关性, 旨在为改善采后果蔬品质提供理论基础和指导, 对提高百香果贮藏保鲜技术水平具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

百香果采自福建闽侯县大湖乡东墩村的百香果示范基地, 于其商业采收期采摘, 随即运回至实验室预冷处理 2 h 后, 挑选无机械损伤、大小均匀且成熟度一致的果实洗净擦干后, 将置于带有气孔的聚乙烯袋(厚度 40 μm)中, 进行贮藏实验。

磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氮蓝四唑、钼酸铵、盐酸羟胺、过氧化氢、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、愈创木酚、核黄素、乙二胺四乙酸二钠、聚乙烯吡咯烷酮(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

BCD-535WT/B(中国海信家电集团股份有限公司); HZT-A2000 电子天平(精度 0.01 g, 美国康州 HZ 电子有限公司); TS7020 分光色差仪(中国广东三恩时科技有限公司); Allegra X-30R 台式冷冻离心机(美洲贝克曼库尔特国际贸易有限公司); T9 双光束紫外可见分光光度计(中国北京普析通用仪器有限责任公司); HH-6 电热恒温水浴锅(中国江苏常州国华电器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 材料处理

实验共设 2 个处理: 常温(25 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 放置于贮藏室; 低温(4 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 冷藏, 放置于冰箱贮藏。分别在第 0、3、6、9、12、15 及 18 d 取样并对各项指标进行测定。用于生理测定的样品用液氮处理后, 置于低温(-80 $^{\circ}\text{C}$)冰箱中存放待测。

1.3.2 果实失重率(质量损失率)的测定

测定采用称重法,每个处理随机取 15 个百香果,开始实验当天的百香果果实的质量记为首重,每次取样时的质量记为当次重量,失重率计算如式(1)。

失重率/%= (首重-当次重量) / 首重 ×100% (1)

1.3.3 果皮颜色的测定

参照 PONGENER 等^[26]的方法,利用精密色差仪对各处理进行测定,于果实赤道处选 3 个点进行测定,直接读取 L^* 、 a^* 、 b^* 。参考 CIELAB 表色系统, L^* 对应明度值, L^* 越大,亮度越大;色度 a^* 从红色(正值)到绿色(负值)渐变, b^* 从黄色(正值)到蓝色(负值)渐变,每个处理 3 个重复。

1.3.4 其他指标的测定

参考李合生等^[27]的方法,MDA 含量采用硫代巴比妥酸显色法测定;SOD 活性采用氮蓝四唑光化学还原法测定;POD 活性采用愈创木酚法测定; $O_2^{\cdot-}$ 产生速率采用羟胺氧化法测定^[28];CAT 活性采用钼酸铵比色法测定^[29]。

1.4 数据处理

使用 WPS 2023 对实验数据进行整理、作图,相关性热图在 TUTU 云分析免费平台制作,采用 DPSv9.01 软件、Duncan 新复极差法对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同贮藏温度对百香果失重率的影响

失水是果蔬采后普遍存在的一种生理现象,常作为果蔬产品保鲜的一个重要指标。由表 1 可知,不同贮藏温度下百香果失重率的变化趋势一致,都随贮藏时间的延长而不断增大。整个贮藏过程中,相同贮藏时间内,低温处理组的百香果失重率均显著低于常温贮藏($P<0.05$),尤其在贮藏第 18 d 时,常温下百香果的失重率达到 31.03%,明显高于其他处理($P<0.05$),而且常温下失重速率相对较大,说明低温能使采后百香果在贮藏过程中保持较低的失重率。

2.2 不同贮藏温度对百香果果皮色度的影响

色度真实反映了果实的色泽,是果实外观品质的一种体现。百香果果皮色度变化如表 1 所示, L^* 代表亮度, L^* 值越大,亮度越大。不同温度下百香果的 L^* 的变化趋势一致,随着贮藏时间的延长整体上都呈现出先增加后减小的趋势,常温下第 6 d 时 L^* 最大,低温条件下第 9 d 时 L^* 最大。相同贮藏时间内,低温下 L^* 均低于常温条件,贮藏 6~9 d 两者差异不显著,从贮藏第 12 d 开始,常温明显高于低温条件($P<0.05$)。

a^* 代表红绿值,正值代表红色,正值越大,偏向红色的程度越大,负值代表绿色,负的绝对值越大,偏向绿色的程度越大。由表 1 可见,常温条件下, a^* 随贮藏时间的延长而增加,贮藏第 9 d 开始 a^* 为正值,低温条件下 a^* 随贮藏时间的延长整体上都为增加趋势,第 15 d 时 a^* 开始为正值,贮藏第 18 d 时略有下降,但差异不显著($P>0.05$)。相同贮藏时间内,低温条件下与常温下 a^* 相比虽差异不显著($P>0.05$),但其值均相对较低。

b^* 代表黄蓝值,黄色为正值,正值越大,偏向黄色的程度越大,蓝色为负值,负的绝对值越大,偏向蓝色的程度越大。由表 1 可知,黄金百香果的 b^* 均显示为正值,冷藏条件下呈现增加-减小-增加-减小的趋势,但变化不明显。室温下则呈现减小-增加-减小-增加-减小的趋势,但随着贮藏时间延长变化不明显。相同贮藏时间内,贮藏第 3、6、12 d 时低温条件下相对较大,贮藏 9、15、18 d 则相对较小,但两处理间差异不显著($P>0.05$)。

2.3 不同贮藏温度对百香果果皮 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率及 MDA 含量的影响

如图 1 所示,低温条件下百香果果皮 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率呈现先减小后增加的趋势,第 15、18 d $O_2^{\cdot-}$ 产生速率不断明显增加($P<0.05$)。而在常温条件下,贮藏前期(3~12 d),除第 6 d 时明显增加外,其余时间 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率变化不明显,第 15、18 d 时其产生速率明显增加($P<0.05$)。相同贮藏时间内,贮藏第 6、15 d 时低温条件下 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率明显低于常

表 1 不同贮藏温度对百香果失重率及色度等相关指标的影响

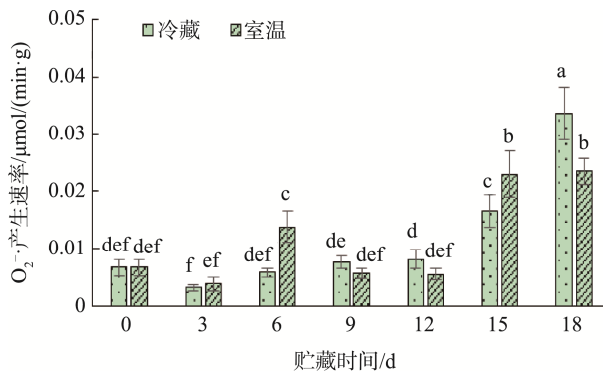
Table 1 Effects of different storage temperature on the indexes of weight loss rate and color degree of *Passiflora edulis* Sims

相关指标	贮藏条件	贮藏时间/d						
		0	3	6	9	12	15	18
失重率/%	冷藏	0	0.11±0.05 ^h	0.25±0.10 ^{gh}	0.35±0.07 ^g	0.40±0.08 ^{fg}	0.57±0.25 ^f	0.59±0.09 ^f
	常温		0.40±0.13 ^{fg}	0.86±0.20 ^c	1.33±0.27 ^d	1.82±0.36 ^c	2.36±0.64 ^b	31.03±0.70 ^a
L^*	冷藏	61.94±2.59 ^c	66.94±1.88 ^b	69.39±3.01 ^{ab}	69.46±5.11 ^{ab}	65.74±2.36 ^{bc}	65.75±1.10 ^{bc}	56.80±2.90 ^d
	常温		71.93±2.33 ^a	73.54±0.91 ^a	72.16±1.02 ^a	72.00±0.98 ^a	71.47±2.33 ^a	66.97±1.43 ^b
a^*	冷藏	-4.78±2.46 ^c	-3.74±1.47 ^{dc}	-3.75±2.64 ^{dc}	-1.16±2.89 ^{bcd}	-2.34±2.77 ^{cde}	0.92±1.58 ^{abc}	0.22±2.53 ^{abcd}
	常温		-1.54±1.61 ^{bcd}	-0.65±1.28 ^{bcd}	0.92±1.13 ^{abc}	1.06±0.47 ^{abc}	2.52±0.81 ^{ab}	4.02±0.87 ^a
b^*	冷藏	41.61±6.61 ^a	45.55±1.90 ^a	43.17±4.21 ^a	41.52±3.11 ^a	44.73±2.85 ^a	42.38±7.19 ^a	40.01±4.82 ^a
	常温		41.56±0.66 ^a	40.16±0.77 ^a	43.61±4.15 ^a	43.23±2.90 ^a	45.72±4.03 ^a	43.83±2.18 ^a

注:同行/同列不同字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

温条件, 贮藏第 18 d 时相反, 其余时间则两处理间差异不显著($P>0.05$)。

MDA 含量可以反映脂质过氧化的水平。如图 2 所示, 低温条件下百香果果皮的 MDA 含量呈现先减小后增加之后减小的趋势, 贮藏第 15 d 时含量最高, 18 d 时又明显减小。常温条件下 MDA 含量呈现先减小后增加的趋势, 贮藏 3~9 d 时 MDA 缓慢累积, 贮藏第 12 d 又明显降低, 之后又随贮藏时间延长含量明显增加($P<0.05$)。整个贮藏时间内, 除去贮藏第 6、9 d 两处理无明显差异外, 其余时间低温条件下 MDA 含量均大于常温条件下贮藏。



注: 图中所有指标进行双因素方差分析多重比较, 相同小写字母表示差异性不显著($P>0.05$), 不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$), 下同。

图1 不同温度贮藏期间百香果果皮 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率

Fig.1 $O_2^{\cdot-}$ production rates of peel of *Passiflora edulis* Sims during storage at different temperatures

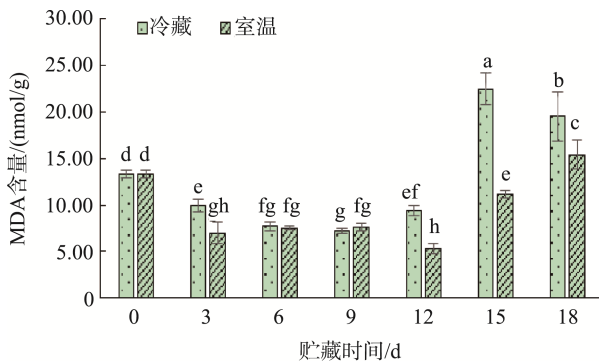


图2 不同温度贮藏期间百香果果皮MDA含量

Fig.2 MDA content of peel of *Passiflora edulis* Sims during storage at different temperatures

2.4 不同贮藏温度对百香果果皮抗氧化酶活性的影响

SOD、POD、CAT 等是活性氧清除过程中比较重要的抗氧化酶, 其酶活性的大小是衡量植物抗氧化能力强弱的重要指标。如图 3 所示, 0 d 时百香果果皮 SOD 活性明显

高于其他贮藏时间, 贮藏 3~18 d 时, 不同贮藏温度下百香果果皮 SOD 活性呈现先降低后升高之后降低的趋势, 均在贮藏第 9 d 时相对较高。相同贮藏时间内, 第 3、6、9、18 d 时低温条件下 SOD 活性相对较高, 第 12、15 d 时则常温条件下 SOD 活性相对较高, 除第 6、18 d 外, 其余时间两处理间差异显著($P<0.05$)。

如图 4 所示, 不同贮藏温度下百香果果皮 POD 活性均呈现先增加后减小的趋势。冷藏处理在贮藏第 6 d 时活性最大, 之后不断下降。常温条件则在第 12 d 时活性最大, 之后活性虽有降低, 但仍明显高于贮藏前期。整个贮藏期间, 贮藏第 3、6 d 冷藏处理的 POD 活性明显高于常温条件下, 其余时间则明显低于常温条件($P<0.05$)。

如图 5 所示, 不同的贮藏温度下, 百香果果皮 CAT 活性均呈现先增加后减小之后增加的趋势。冷藏条件下在第 3 d 时活性明显升高, 之后不断下降, 第 12 d 时活性最低, 之后活性不断增加。常温条件下, 第 6 d 时活性相对较高, 之后不断下降, 第 12 d 时活性最低, 之后活性不断增加, 但增加的幅度小于冷藏条件。相同贮藏时间内, 除去第 15 d 冷藏条件下 CAT 活性明显高于常温条件之外($P<0.05$), 其余贮藏时间两处理间差异不显著。

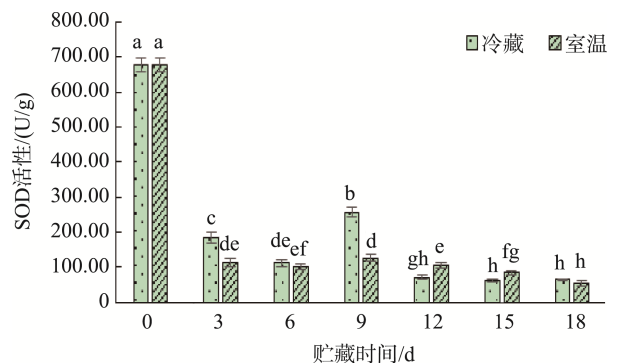


图3 不同温度贮藏期间百香果果皮SOD活性

Fig.3 SOD activities of *Passiflora edulis* Sims peel during storage at different temperatures

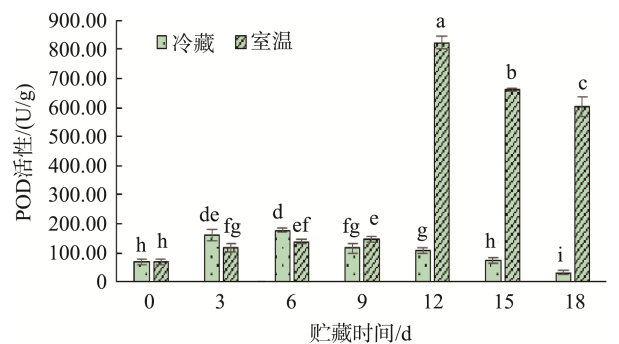


图4 不同温度贮藏期间百香果果皮POD活性

Fig.4 POD activities of *Passiflora edulis* Sims peel during storage at different temperatures

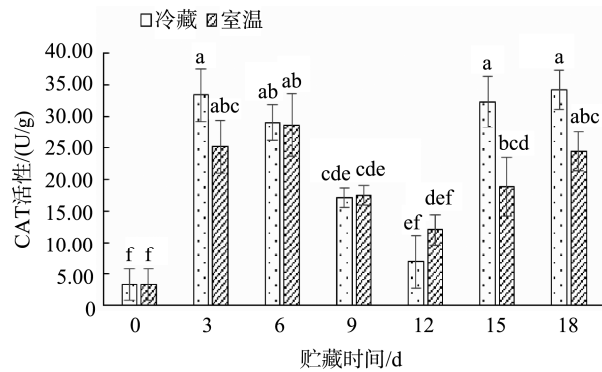


图5 不同温度贮藏期间百香果果皮CAT活性

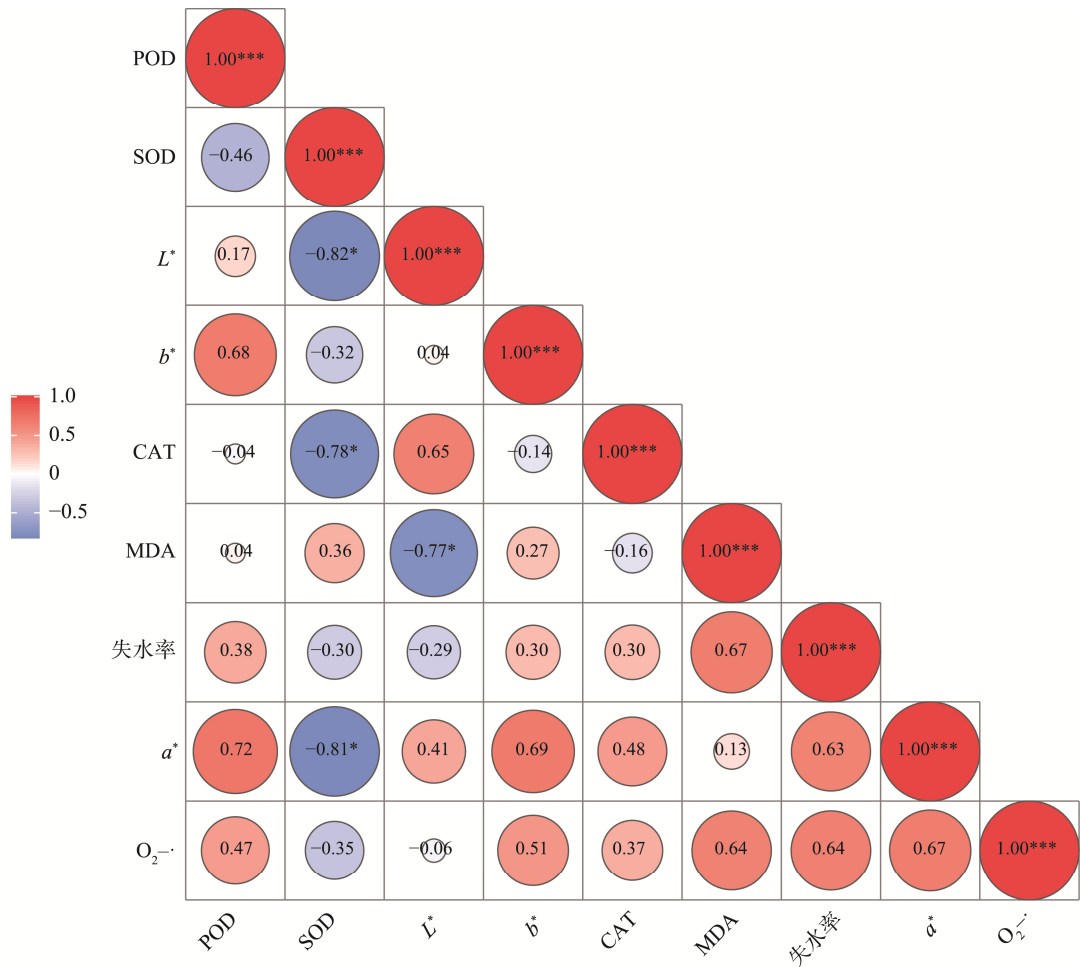
Fig.5 CAT activities of *Passiflora edulis* Sims peel during storage at different temperatures

2.5 相关性聚类热图分析

由图 6 可知, 常温条件下, 失重率与 L^* 、SOD 活性呈负相关。 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率与 MDA 含量呈正相关, 相关系数为

0.64。 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率与 SOD 活性呈负相关, MDA 含量与 L^* 呈显著负相关($P<0.05$), 相关系数为-0.77, 说明在常温贮藏条件下, 百香果果皮的膜脂过氧化程度与其果皮的亮度密切相关。

由图 7 可知, 冷藏条件下, 失重率与 L^* 、SOD 活性、POD 活性呈负相关, 与其余指标呈正相关, 其中与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率呈极显著正相关($P<0.01$), 相关系数为 0.94, 说明失水是造成采后百香果果皮冷藏期间活性氧累积的直接原因。 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率与 MDA 含量呈正相关, 相关系数为 0.74。 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、MDA 含量与 SOD 活性、POD 活性呈负相关, 其中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量均与 POD 活性呈显著负相关($P<0.05$), 相关系数分别为-0.77 和-0.76, 说明在冷藏条件下百香果果皮中 POD 活性与活性氧代谢水平密切相关。酶活性与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量之间的显著负相关关系是生物体对抗氧化应激反应的一个重要指标, 表明生物体通过提高抗氧化酶的活性来对抗氧化损伤, 减少 MDA 的生成, 从而保护细胞免受损伤。



注: 红蓝色分别代表参数间的正相关和负相关关系, *代表显著相关, **代表极显著相关, ***代表非常极显著相关。以下同。

图6 常温下百香果果皮贮藏期间各指标的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of indexes of *Passiflora edulis* Sims peel during the room temperature

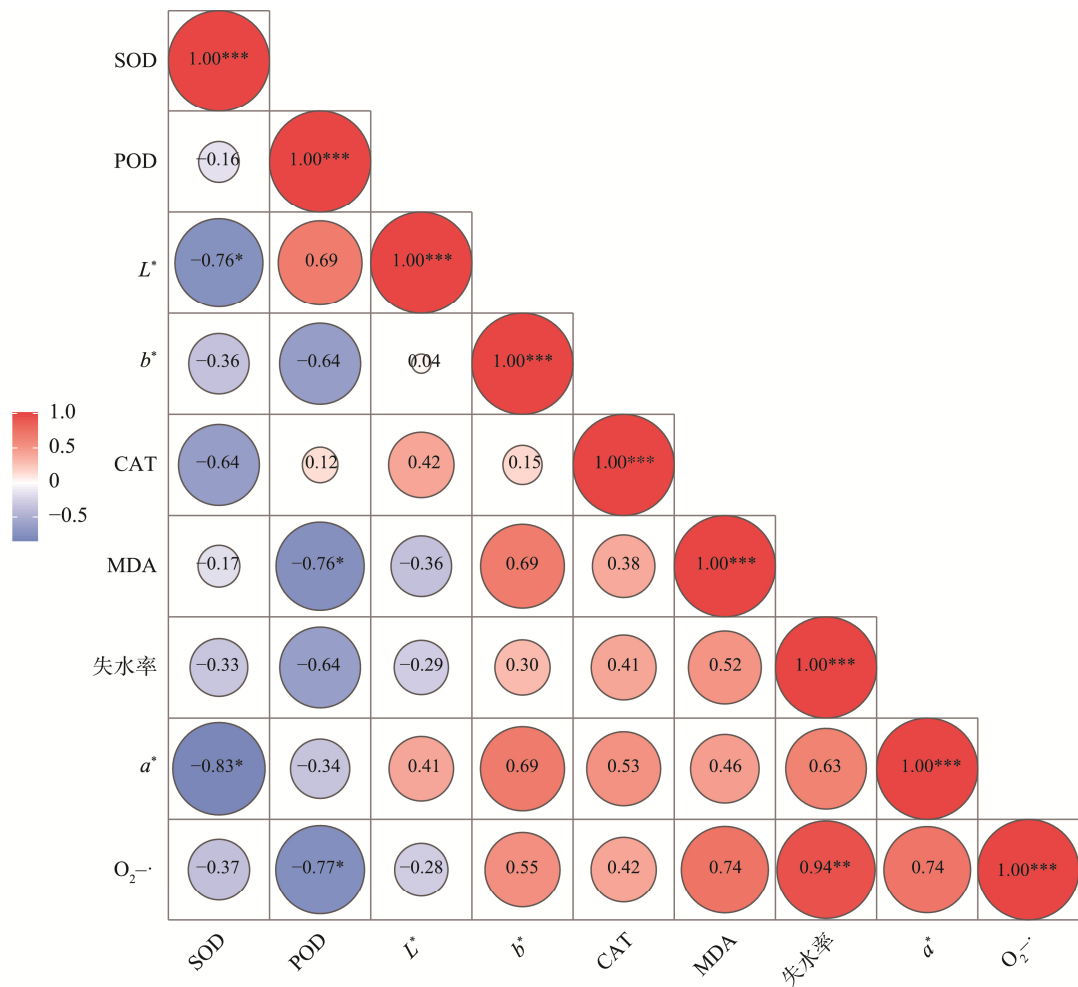


图7 冷藏条件下百香果果皮贮藏期间各指标的相关性分析
Fig.7 Correlation analysis of indexes of *Passiflora edulis* Sims peel during cold storage

3 结论与讨论

水对生命的基本过程至关重要,供水是果蔬产量的关键决定因素。水分流失不仅是影响产量的主要因素,而且会降低果实品质,加速采后衰老^[30]。本研究中,随贮藏时间的延长百香果失重率不断增加,且冷藏条件下百香果失重率相对较小,失水速率也较小,这一的结果与寸待泽等^[10]和王红林等^[9]的结果一致。这是因为采后果实依旧进行着蒸腾作用和呼吸作用。蒸腾作用是果实表面水分蒸发的过程,会导致果实重量的减少,而呼吸消耗则是果实在贮藏过程中自然发生的生理过程,需要消耗果实自身的营养物质,也会引起失重率的增加^[31]。常温下百香果的蒸腾作用和呼吸作用相对较强,随着贮藏时间的延长,导致更多的水分和营养物质被消耗,进而失重率增加。

外观色泽是衡量果实成熟度和外观品质的一个重要指标。黄金百香果果皮中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量和比例决定了其颜色呈现^[32]。黄金百香果在常温

贮藏过程中,果面逐渐转为金黄色,这一变化是黄金百香果自然成熟的过程,也是其品质变化的一个明显特征。本研究中,低温下的 L^* 前期变化较小,表明低温贮藏在一定时间能有效维持百香果的 L^* ,这与王红林等^[9]的研究结果相一致。贮藏后期 L^* 下降,此时低温下的 L^* 明显降低,可能是后期果实的成熟衰老造成的,也可能是因为后期冷害的发生或是乙烯的产生,果皮品质下降。本研究中, a^* 由负值到正值不断升高,说明在后熟的过程中,百香果果皮中的叶绿素逐渐降解,所以绿色减少。贾文君等^[19]认为 a^* 正值的出现与百香果的褐化和腐烂有关,低温下 a^* 相对较低,且 a^* 正值出现的时间较晚,说明了低温条件可抑制叶绿素的降解,延缓百香果的变色及衰老。 b^* 则表现为贮藏初期冷藏条件下相对较大,常温下相对较小,说明贮藏前期低温会减缓百香果果皮中类胡萝卜素的降解。随着贮藏时间的延长,贮藏后期室温条件下 b^* 相对较大,这与王长峰等^[33]的研究结果大体一致,认为低温仅在贮藏前期对 b^* 影响。贮藏过程中两温度下 b^* 无明显差异,这一结果与在南酸枣^[34]

和脐橙^[35]上的研究结果不大一致,出现这种结果可能与百香果的采摘期成熟度、百香果果皮中总类胡萝卜素的种类和含量相关。

活性氧是造成植物细胞氧化损伤的主要物质,一般来说,正常情况下果蔬体内的活性氧代谢处于产生和清除的平衡状态,适度的活性氧积累可作为信号分子激活抗氧化防御系统,而过量的活性氧积累则会产生氧化胁迫,引发一系列的不良反应,如呼吸代谢紊乱、能量供应不足和生物膜功能丧失等,加剧果蔬氧化损伤,促进果蔬的衰老、褐变、软化等的发生。本研究中,刚采摘的百香果由于生长环境骤然发生改变,其果皮正常的活性氧代谢平衡被打破,表现为第 0 d 时 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量相对较大,而其果皮内清除活性氧的防卫系统也作出了应激反应,第一道防御屏障 SOD 活性相应增加,所以第 0 d 时 SOD 活性较大。贮藏第 3 d 时, $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量均降低,此时 POD 和 CAT 的活性增加,这是因为 SOD 能够催化 $O_2^{\cdot-}$ 转化为 H_2O_2 和 O_2 , POD 和 CAT 则可以分解 H_2O_2 ,在这些酶的协同作用下,百香果果皮内活性氧的积累减少,保护植物细胞免受氧化损伤。之后随贮藏时间的延长,冷藏条件下 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率变化比较缓慢,MDA 含量增加的也不明显,这与这段时间冷藏条件下百香果果皮中的 SOD、POD、CAT 的活性相对较大有关系,说明冷藏在一定时间内不仅可以减缓 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率的变化,而且还可以保持相对较高的抗氧化性。贮藏后期 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率增加较快,且冷藏条件下变化较大,说明贮藏后期要警惕冷害的发生,此时冷藏条件下的 SOD、POD 活性相对较小, CAT 活性相对较高,但活性氧清除酶系统没有很好地发挥作用。本研究中贮藏后期 MDA 累积明显,冷藏条件下百香果果皮 MDA 的积累明显高于常温条件下, SOD、POD 活性相对小于常温条件,说明 4 °C 下贮藏时间过长对百香果果皮造成一定的伤害,此时活性氧的代谢平衡遭到破坏, $O_2^{\cdot-}$ 产生速率加快,活性氧清除酶活性和内源抗氧化物质含量下降,此时活性氧代谢失调,活性氧的大量积累,使得植物细胞内的很多生物大分子物质成为活性氧攻击的目标,引发一系列不良生理效应,诱发膜脂过氧化,促进膜脂过氧化产物(MDA 等)的增加和细胞膜结构的破坏,从而加快植物组织衰老或死亡^[36],这也是活性氧造成果蔬衰老褐变的直接途径^[37-39]。

相关性分析表明,冷藏条件下失水率与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率呈极显著正相关关系,失重率与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率之间的极显著正相关关系在多个研究中被观察到,尤其是在植物面对水分胁迫和环境污染等逆境条件下,这种相关性揭示了植物在应对不利环境条件时的生理响应机制,包括氧化应激反应和渗透调节等过程。说明可以通过控制失重率的增加来减少活性氧的产生和积累,从而保护百香果细胞免受氧化应激的伤害。此外,相关性分析发现不同贮藏温度下

SOD 活性与百香果果皮的 L^* 和 a^* 呈显著负相关,这说明百香果的变色与其果皮的活性氧代谢密切相关,这个结果与 SU 等^[40]提出的活性氧自由基伤害学说相契合,具体影响机制有待今后进一步的研究。冷藏条件下,POD 活性与 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 MDA 含量之间呈显著负相关关系,这种负相关关系是生物体对抗氧化应激反应的一个重要指标,表明生物体通过提高抗氧化酶的活性来对抗氧化损伤,减少 MDA 的生成,从而保护细胞免受损伤,说明在冷藏条件下可通过激发百香果果皮 POD 活性来增强其抗氧化性。

采后贮藏保鲜是一个系统的工程,冷藏只是其中一种手段,要延长百香果的贮藏期,在保证合适温度的同时,在其贮藏过程中,可以采取一些保水措施来降低百香果皮的 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率,降低其氧化伤害;可通过控制果皮中的 SOD 酶活性来调控果皮的变色;冷藏期间,可通过提高 POD 酶活性来及时清除活性氧的积累,从而有效地控制果实采后的膜脂过氧化作用,达到维持果实鲜度的目的。

参考文献

- [1] WYCKHUYS K, KORYTKOWSKI C, MARTINEZ J, et al. Species composition and seasonal occurrence of Diptera associated with passion fruit crops in Colombia [J]. Crop Protect, 2012, 32: 90-98.
- [2] 吴斌, 黄东梅, 邢文婷, 等. 不同发育期黄金百香果果皮挥发性物质和游离氨基酸成分[J]. 福建农业学报, 2024, 39(1): 57-65.
WU B, HUANG DM, XING WT, et al. Analysis of volatile components and free amino acid in pericarp of yellow passion fruit *Passiflora edulis* Sims at fruit developmental phase [J]. Fujian J Agric Sci, 2024, 39(1): 57-65.
- [3] 杨秀群, 谢国芳, 宋易, 等. 3 种减菌处理对采后百香果果实常温贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(6): 236-245.
YANG XQ, XIE GF, SONG Y, et al. Effects of 3 kinds of subtracted bacteria treatment on normal temperature storage quality of the harvested *Passiflora edulis* Sims [J]. J Food Saf and Qual, 2024, 15(6): 236-245.
- [4] 高琳琳, 陈旭鹏, 李婷婷, 等. 百香果采后贮藏及深加工工艺研究现状[J]. 现代食品, 2022, 28(8): 30-32, 43.
GAO LL, CHEN XP, LI TT, et al. Research status of post-harvest storage and deep processing of passion fruit [J]. Mod Food, 2022, 28(8): 30-32, 43.
- [5] 乔沛, 殷菲脱, 李静, 等. 百香果采后贮藏保鲜研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 220-225, 229
QIAO P, YIN FL, LI J, et al. Advances on post-harvest storage and preservation of passion fruit [J]. Storage Process, 2020, 20(4): 220-225, 229
- [6] 郭靖, 陈于陇, 王萍, 等. 百香果采后特性与保鲜技术研究综述[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(1): 334-340.
GUO J, CHEN YL, WANG P, et al. Research progress on post-harvest characteristics and preservation technology of passion fruit [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(1): 334-340.
- [7] DOS RL, FACCO E, SALVADOR M, et al. Antioxidant potential and physicochemical characterization of yellow, purple and orange passion fruit [J]. J Food Sci Technol, 2018, 55(7): 2679-2691.

- [8] 帅良, 林德胜, 廖玲燕, 等. 不同贮藏温度对百香果果实糖酸组分变化的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(12): 2408–2416.
SHUAI L, LIN DS, LIAO LY, *et al.* Effect of different storage temperatures on the sugar and acid components of passion fruit [J]. J Nucl Agric, 2023, 37(12): 2408–2416.
- [9] 王红林, 马玉华, 解璞, 等. 低温贮藏对百香果紫香 1 号果实品质的影响[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(2): 97–104.
WANG HL, MA YH, XIE P, *et al.* Effect of low temperature storage on fruit quality of passion fruit Zixiang 1 [J]. Guizhou Agric Sci, 2021, 49(2): 97–104.
- [10] 寸待泽, 杜玉霞, 李丹萍, 等. 贮藏温度对成熟百香果贮藏品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(24): 38–44.
CUN DZ, DU YX, LI DP, *et al.* Storage temperature of mature passion fruit: Effect on storage quality [J]. Chin Agricul Sci Bull, 2022, 38(24): 38–44.
- [11] 潘家丽, 陈舒柔, 李木火, 等. 氯化钙处理对采后百香果细胞壁物质代谢的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(16): 32–39.
PAN JL, CHEN SR, LI MH, *et al.* Effect of calcium chloride treatment on cell wall metabolism of postharvest *Passiflora edulia* [J]. Food Res Dev, 2023, 44(16): 32–39.
- [12] 陈勇杏, 华燕, 郭磊, 等. 黄芩提取物对百香果采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2024, 45(3): 99–106.
CHEN YX, HUA Y, GUO L, *et al.* Effect of *Scutellaria baicalensis georgi* extract on postharvest storage quality of passion fruit [J]. Packag Eng, 2024, 45(3): 99–106.
- [13] 杨秀群, 谢国芳, 袁孟孟, 等. 1-甲基环丙烯结合水杨酸处理维持百香果果实贮藏品质[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(10): 52–58.
YANG XQ, XIE GF, YUAN MM, *et al.* 1-Methylpropylene combined with salicylic acid treatment maintains the storage quality of passion fruit [J]. Food Res Dev, 2024, 45(10): 52–58.
- [14] 帅良, 廖玲燕, 吴振先, 等. 不同保鲜膜包装对百香果贮藏采后贮藏品质的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(12): 180–183.
SHUAI L, LIAO LY, WU ZX, *et al.* Effect of different packaging films on quality of postharvest ambient storage in passion fruit [J]. Food Ind, 2017, 38(12): 180–183.
- [15] 帅良, 杨玉霞, 廖玲燕, 等. 海藻酸钠涂膜对百香果贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(13): 332–334, 339.
SHUAI L, YANG YX, LIAO LY, *et al.* Effects of sodium alginate film on quality of postharvest storage in passion fruit [J]. Food Ind Sci Technol, 2016, 37(13): 332–334, 339.
- [16] 吉宁, 刘仁婵, 张妮, 等. 1-MCP 结合自发气调袋对百香果采后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(17): 18–24.
JI N, LIU RC, ZHANG N, *et al.* Effect of 1-MCP combined with spontaneous modified atmosphere bag on postharvest storage quality of passion fruit [J]. Packag Eng, 2023, 44(17): 18–24.
- [17] 林育钊, 陈蕾伊, 陈洪彬, 等. 4 种包装材料对西番莲果实贮藏效果的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 134–140.
LIN YZ, CHEN LY, CHEN HB, *et al.* Effects of four packaging materials on preservation of passion flower (*Passiflora caerulea* L.) fruit [J]. Food Mach, 2024, 40(3): 134–140.
- [18] 滕峥, 杨翠凤, 马雅甜, 等. 不同包装材料对西番莲采后贮藏品质的影响[J]. 中国南方果树, 2018, 47(3): 94–97, 101.
TENG Z, YANG CF, MA YT, *et al.* Effects of different packaging materials on the postharvest storage quality of passion fruit [J]. South China Fruits, 2018, 47(3): 94–97, 101.
- [19] 贾文君, 刘传和, 王宇, 等. UV-C 处理对‘黄金’百香果贮藏品质和采后生理的影响[J/OL]. 现代食品科技, 1–10. [2024-06-24]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1447>
JIA WJ, LIU CH, WANG Y, *et al.* Effect of postharvest ultraviolet-C treatment on storage quality and physiology of ‘Golden’ passion fruit [J/OL]. Mod Food Sci Technol, 1–10. [2024-06-24]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.1.1447>
- [20] 谢晶, 潘家丽, 覃子倚, 等. 褪黑素处理对百香果采后生理及质构特性的影响[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(7): 1–7.
XIE J, PAN JL, QIN ZY, *et al.* Effects of melatonin treatment on physiology and texture properties of postharvest passion fruit [J]. Storage Process, 2021, 21(7): 1–7.
- [21] 徐雪莹, 陈于陇, 徐玉娟, 等. 不同温度贮藏西番莲品质变化规律研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(3): 557–562.
XU XY, CHEN YL, XU YJ, *et al.* Study on the variation of quality of passion fruit stored at different temperature [J]. Chin J Trop Crop, 2015, 36(3): 557–562.
- [22] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 1-MCP 对黄金百香果贮藏品质及风味变化的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 277–281.
MENG XC, HUANG ZP, FAN C, *et al.* Effect of 1-MCP on storage quality and volatiles variations in gold passion fruit [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(8): 277–281.
- [23] 刘恒蔚, 颜捷, 袁卫明, 等. 冷藏条件下白沙枇杷与红沙枇杷果皮活性氧代谢研究[J]. 基因组学与应用生物学, 2019, 38(2): 766–771.
LIU HW, YAN J, YUAN WM, *et al.* Researches on pericarp reactive oxygen metabolism of white and red flesh loquat under cold storage [J]. Genom Appl Biol, 2019, 38(2): 766–771.
- [24] 黎英, 周荣池, 刘夏蕾, 等. 百香果皮果胶的理化及凝胶特性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 140–146.
LI Y, ZHOU RC, LIU XL, *et al.* Physicochemical and gel properties of pectin from passion fruit peel [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(12): 140–146.
- [25] 田青兰, 张英俊, 刘洁云, 等. 西番莲果皮质构特性和显微结构特征分析[J]. 果树学报, 2022, 39(12): 2365–2375.
TIAN QL, ZHANG YJ, LIU JY, *et al.* Analysis of texture characteristics and microstructure of passion fruit pericarp [J]. J Fruit Sci, 2022, 39(12): 2365–2375.
- [26] PONGENER A, SAGAR V, PAL RK, *et al.* Physiological and quality changes during postharvest ripening of purple passion fruit (*Passiflora edulis* Sims) [J]. Fruits, 2014, 69(1): 19–30.
- [27] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI HS, SUN Q, ZHAO SJ, *et al.* Principles and techniques of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [28] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Experiment guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [29] 彭建, 王丹英, 徐春梅, 等. 钼酸铵法测定水稻过氧化氢酶活性[J]. 中

- 国农学通报, 2009, 25(16): 61–64.
- PENG J, WANG DY, XU CM, *et al.* Ammonium molybdate method for detecting the activities of rice catalase [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, 25(16): 61–64.
- [30] HOU XM, ZHANG WD, DU TS, *et al.* Responses of water accumulation and solute metabolism in tomato fruit to water scarcity and implications for main fruit quality variables [J]. *J Exp Bot*, 2020, 71: 1249–1264.
- [31] ZHANG MF, YANG HB, ZHU F, *et al.* Transcript profiles analysis of *Citrus aquaporins* in response to fruit water loss during storage [J]. *Plant Biol*, 2021, 23(5): 819–830.
- [32] GROSS J. Pigment changes in the pericarp of the Chinese gooseberry (*Actinidia chinensis*) during ripening and storage [J]. *Int Soc Hortic Sci*, 1982, 138: 187–194.
- [33] 王长峰, 陶能国, 黄师荣. 贮藏温度对红肉脐橙(*Citrus sinensis* Osbeck)果实类胡萝卜素含量的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(4): 255–260.
- WANG CF, TAO NG, HUANG SR. Effect of storage temperature on carotenoid content of ‘Cara Cara’ navel orange (*C. sinensis* Osbeck) [J]. *Food Sci*, 2013, 34(4): 255–260.
- [34] 高阳, 巴元富, 李宏宇, 等. 不同贮藏温度条件下南酸枣果实色泽和质地的变化[J]. *经济林研究*, 2021, 39(4): 239–245.
- GAO Y, BA YF, LI HY, *et al.* Changes of color and texture of *Choerospondias axillaris* fruit at different storage temperatures [J]. *Non-wood Forest Res*, 2021, 39(4): 239–245.
- [35] 刘洋. 采收期、贮藏方式和温度对‘纽荷尔’脐橙贮藏果皮色泽影响的研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- LIU Y. Effects of harvest data, storage methods and temperature on peel color of ‘Newhall’ navel orange during storage [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [36] 王静, 孙广宇, 姬俏俏, 等. 活性氧在果蔬采后衰老过程中的作用及其控制[J]. *包装与食品机械*, 2015, 33(5): 51–54, 58.
- WANG J, SUN GY, JI QQ, *et al.* The Role of active oxygen in harvested fruits and vegetables during senescence and its control [J]. *Pack Food Mach*, 2015, 33(5): 51–54, 58.
- [37] 林河通, 席珣芳, 陈绍军. 龙眼果实采后失水果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系[J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2005, 31(3): 287–297.
- LIN HT, XI YF, CHEN SJ. The relationship between the desiccation-induced browning and the metabolism of active oxygen and phenolics in pericarp of postharvest longan fruit [J]. *Physiol Mol Biol Plant*, 2005, 31(3): 287–297.
- [38] 陈莲, 陈梦茵, 林河通, 等. 解偶联剂 DNP 处理对采后龙眼果实果皮褐变和活性氧代谢的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11): 4019–4026.
- CHEN L, CHEN MY, LIN HT, *et al.* Effects of uncouple Agent DNP treatment on browning and active oxygen metabolism in pericarp of harvested Longan Fruit [J]. *Sci Agric Sinica*, 2009, 42(11): 4019–4026.
- [39] 林艺芬. 活性氧引起采后龙眼果实果皮褐变的生理生化机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- LIN YF. Physiological and biochemical mechanism of browning development caused by active oxygen in pericarp of harvested Longan fruits [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [40] SU XQ, JIANG YM, DUAN XW, *et al.* Effects of pure oxygen on the rate of skin browning and energy status in Longan fruit [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2005, 43(4): 359–365.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)

作者简介



任丽花, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。
E-mail: 1272547936@qq.com



傅建伟, 博士, 研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。
E-mail: fjw9238@163.com