

# 预冷方式对甜樱桃采后耐贮性及新橙皮苷代谢的影响

冯雅蓉, 杜俊杰\*

(山西农业大学园艺学院, 山西 晋中 030801)

**摘要:**为明确预冷方式对甜樱桃采后耐贮性和新橙皮苷代谢的影响,分别采用压差预冷、冰水预冷、冷库风冷和臭氧冰水预冷4种方式处理‘红玛瑙’甜樱桃,通过关联分析甜樱桃果实在(0.0±0.5)℃贮藏期间感官品质、营养品质、呼吸代谢、抗病相关酶活性、新橙皮苷含量及相关基因表达变化,筛选出预冷方式影响甜樱桃耐贮性的关键评价指标和新橙皮苷代谢关键调控基因。结果表明:相较于商业预冷方式(冷库风冷),压差预冷可显著提高甜樱桃果实中的过氧化物酶(peroxisome, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶活力,使樱桃保持较高的果肉硬度,显著降低病情指数、枯梗率和褐变指数( $P < 0.05$ ),但新橙皮苷含量及变化与冰水预冷处理组无显著差异( $P > 0.05$ );VC含量、苯丙烷代谢途径关键酶(肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶)、SOD、多酚氧化酶(polyphenoloxidase, PPO)和脂氧合酶活力与预冷方式及甜樱桃感官品质呈显著相关,可作为甜樱桃耐贮性关键评价指标;贮藏期间甜樱桃新橙皮苷含量呈现波动下降趋势;压差预冷处理可通过促进基因LOC110760277、LOC110751411、LOC110757814、QXJJ01001021、LOC110745765和LOC110756675表达及抑制基因LOC110758277、LOC110771557表达促进新橙皮苷的合成。综上,压差预冷在提高甜樱桃采后耐贮性和促进新橙皮苷合成方面优于冰水预冷、冷库风冷和臭氧冰水预冷。

**关键词:**预冷;甜樱桃;耐贮性;新橙皮苷;关联分析

Effects of Precooling Treatments on Postharvest Storability and Neohesperidin Metabolism in Sweet Cherries

FENG Yarong, DU Junjie\*

(College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China)

**Abstract:** In order to clarify the effects of precooling treatments on the postharvest storability and neohesperidin metabolism of sweet cherries, forced-air precooling, ice-water precooling, cold storage precooling and ozone ice-water precooling were used to treat ‘Red Agate’ sweet cherries prior to being stored at (0.0 ± 0.5) °C. The sensory quality, nutritional quality, respiratory metabolism, disease resistance-related enzyme activities, neohesperidin content and related gene expression in sweet cherries were analyzed during storage. In addition, the key indicators for the evaluation of storability and the key regulatory genes of neohesperidin metabolism in sweet cherries were selected by correlation analysis. The results showed that compared with commercial precooling (cold storage precooling), forced-air precooling significantly increased the activities of peroxisome (POD), superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), cinnamic acid-4-hydroxylase (C4H), cinnamyl-alcohol dehydrogenase (CAD) and 4-coumarate:coenzyme A ligase (4-CL), maintained higher fruit hardness, and reduced the disease index, dry fruit stem incidence, and browning index of sweet cherry during storage ( $P < 0.05$ ), but its effect in promoting neohesperidin synthesis was not significantly different from that of ice water precooling ( $P > 0.05$ ). VC content, and the activities of C4H, CAD and 4-CL (key enzymes in the phenylpropane metabolic pathway), SOD, PPO and lipoxygenase showed a significant correlation with the sensory quality of sweet cherries, which could be used as key physiological indicators to evaluate the storage stability of sweet cherry. The content of neohesperidin in sweet cherries fluctuated and decreased during storage. Forced-air precooling could promote neohesperidin synthesis by improving the gene expression of LOC110760277, LOC110751411, LOC110757814, QXJJ01001021, LOC110745765 and LOC110756675 and

收稿日期: 2022-08-29

第一作者简介: 冯雅蓉(1982—)(ORCID: 0000-0001-8669-4573),女,副教授,博士研究生,研究方向为农产品加工与贮藏工程。E-mail: 21708347@qq.com

\*通信作者简介: 杜俊杰(1961—)(ORCID: 0000-0002-9200-1099),男,教授,硕士,研究方向为果树学。E-mail: djj738@163.com

inhibiting the gene expression of LOC110758277 and LOC110771557. These results indicated that forced-air precooling was more effective in improving the storage storability of sweet cherries and promoting neohesperidin synthesis than ice-water precooling, cold storage precooling and ozone ice-water precooling.

**Keywords:** precooling; sweet cherry; storability; neohesperidin; correlation analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220829-337

中图分类号: S379.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2023) 15-0239-12

引文格式:

冯雅蓉, 杜俊杰. 预冷方式对甜樱桃采后耐贮性及新橙皮苷代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 239-250.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220829-337. <http://www.spkx.net.cn>

FENG Yarong, DU Junjie. Effects of precooling treatments on postharvest storability and neohesperidin metabolism in sweet cherries[J]. Food Science, 2023, 44(15): 239-250. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220829-337.

<http://www.spkx.net.cn>

甜樱桃作为一种高档精品水果, 素有“春果第一枝”的美誉, 其口感酸甜, 不仅对丰富、调节水果市场供应具有特殊作用, 而且富含铁、VA和有机酸等营养物质, 深受消费者喜爱<sup>[1-3]</sup>。然而甜樱桃采后贮藏和货架时间较短, 易出现果肉褐变、软化、风味变淡、腐烂等品质劣变现象<sup>[4-5]</sup>。预冷作为果蔬采后冷链物流的首要环节, 可有效去除果蔬田间热, 降低其采后生理代谢速率, 延缓其营养成分降解, 抑制腐败变质, 对提高甜樱桃耐贮性和减少采后损失具有重要意义。不同预冷技术对果蔬采后品质的影响存在明显差异<sup>[6-8]</sup>, 赵安琪等<sup>[9]</sup>发现真空预冷联合微酸性电解水处理可有效延缓采后鸡毛菜的黄化衰老进程, 并维持其组织较好的商品特性; 李燕等<sup>[10]</sup>发现压差预冷处理对大枣贮藏稳定性的提升效果明显优于真空预冷和冷库预冷; 时文林等<sup>[11]</sup>发现流态冰预冷处理可明显延缓甜玉米品质劣变, 其效果优于冷库预冷和压差预冷。这些研究已证实适宜的采后预冷方式对缓解果蔬采后贮藏品质的劣变和降低腐烂率具有重要意义。然而针对甜樱桃目前已有的相关研究主要集中在预冷方式对甜樱桃货架品质<sup>[12]</sup>、气调包装保鲜效果<sup>[13]</sup>、贮藏期间糖酸含量变化<sup>[14]</sup>、冷藏期间真菌多样性<sup>[15]</sup>及预冷技术参数优化<sup>[16-17]</sup>等方面, 不同预冷方式对甜樱桃采后耐贮性的影响还不清楚。

新橙皮苷作为一种查耳酮衍生物, 因其甜度是蔗糖 1 100 倍 (以质量计), 被认为是一种天然的、可用于食品添加剂的新型甜味剂; 同时, 其具有良好的抗过敏、抗氧化和调节糖脂代谢等作用<sup>[18-20]</sup>, 近年来在食品和医药领域引起了广泛关注。目前研究者已从柑橘类水果、陈皮、枳壳、橄榄仁红皮、酿酒葡萄等<sup>[18,21]</sup>中检测到了新橙皮苷的存在, 并研究了其提取工艺和检测技术, 且为解决提取工艺繁琐、成本高的问题, 还有研究者探究了其化学合成工艺<sup>[22-23]</sup>, 为新橙皮苷的商品化应用奠定了基础。本课题组前期通过代谢物高通量检测技术证实了甜樱桃可合成新橙皮苷, 而且发现不同预冷技术下的

甜樱桃新橙皮苷含量存在一定差异 (文章未发表)。目前, 甜樱桃酸甜偏酸型口感与近年来消费者口感变甜之间的冲突愈发明显, 而高甜度品种又难以满足糖尿病和高血糖患者的需求, 因此, 明确甜樱桃中新橙皮苷的合成代谢机制, 从而通过提高新橙皮苷含量来改善其口感并满足高血糖患者甜型口感需求具有重要意义。因此, 本研究以‘红玛瑙’甜樱桃为材料, 探究不同预冷方式对其耐贮性和贮藏期间新橙皮苷含量变化的影响, 并从黄酮生物合成途径 (map00941) 中新橙皮苷合成通路探究预冷方式对新橙皮苷合成相关基因表达量的影响, 以期筛选出可有效提升甜樱桃耐贮性的适宜预冷方式, 降低采后损失, 明确其对甜樱桃贮藏期间新橙皮苷代谢的影响, 为基于新橙皮苷甜味作用的甜樱桃品种和口感改良技术的开发提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

甜樱桃供试品种为‘红玛瑙’, 于2020年5月8日在山西省晋中市太谷县种植区选择深红色、大小均匀、色泽相近、约9成熟果实进行采收, 置于可掀盖泡沫盒 (20 cm×10 cm×12 cm) 中, 每盒约2 kg, 2 h内采用低温周转箱运回实验室, 剔除具有机械损伤、病虫害及色泽差异较大的果实后, 进行后续实验。

愈创木酚、Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O、聚乙烯吡咯烷酮、2,6-二氯酚靛酚钠盐、碳酸氢钠、抗坏血酸 (VC)、丙酮 天津市光复精细化工研究所; 草酸 天津市风船化学试剂科技有限公司; 乙二胺四乙酸二钠 天津市申泰化学试剂有限公司; 氢氧化钠 北京化工厂; 甲酸 天津市东丽化工厂; 过氧化物酶 (peroxisome, POD)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶 (catalase, CAT)、多酚氧化酶 (polyphenoloxidase, PPO)、脂氧合酶、肉桂

酸-4-羟化酶、4-香豆酰辅酶A连接酶、肉桂醇脱氢酶试剂盒 北京索莱宝科技有限公司；新橙皮苷（CAS：13241-33-3） 上海阿拉丁生化科技股份有限公司；TRIzol、反转录试剂盒、荧光定量试剂盒 日本Takara公司。

## 1.2 仪器与设备

单元式差压预冷箱由山西省农业科学院农产品贮藏保鲜研究所研制，规格为1 700 mm×1 370 mm×550 mm，由静压箱、卷帘苫布、控制系统等组成，配置有额定功率2.2 kW的轴流风机1台，风量18 000 m<sup>3</sup>/h。

KDC-140HR高速冷冻离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司；752N紫外-可见分光光度计 上海精科上海精密科学仪器有限公司；DK-98-1电热恒温水浴装置 天津市泰斯特仪器有限公司；GC-14C型气相色谱仪 日本岛津公司；F-920便携式氧气和二氧化碳分析仪 美国Felix公司；HD-YT-3G便携式臭氧发生器北京环都亚泰环保科技有限公司；ERUN-SP-O3手持式水质臭氧分析仪 西安赢润环保科技集团有限公司；FT-327型果实硬度计 意大利TR公司；U3000高效液相色谱（high performance liquid chromatography, HPLC）仪美国Thermo Fisher公司；QuantStudio™ 3实时荧光定量聚合酶链反应（quantitative polymerase chain reaction, qPCR）仪美国ABI公司；电泳仪 北京六一仪器厂。

## 1.3 方法

### 1.3.1 预冷处理

将120 kg甜樱桃随机分成4组，每个处理组5 kg、重复6次，随后进行预冷处理，设置预冷终温度为2℃（果心温度）。第1组采用冷库风冷处理：将甜樱桃用0.03 mm聚乙烯（polyethylene, PE）保鲜袋包装，置于39 cm×26 cm×16 cm的塑料框中，0~2℃冷库敞口通风预冷12 h，风速1.5 m/s；第2组采用压差预冷处理：将甜樱桃参照焦旋等<sup>[24]</sup>的方法摆放，预冷参数为温度0~2℃，风速9.3 m/s，预冷时间0.5~1 h；第3、4组分别采用冰水预冷和臭氧冰水预冷处理：将甜樱桃分别放入（1.0±0.5）℃冰水（采用pH 7.28自来水，部分存入冷库，部分冷冻制成冰块，混合制得（1.0±0.5）℃冰水）和含臭氧质量浓度为（2.0±0.1）mg/L的臭氧冰水中（采用便携式臭氧发生器制备臭氧；采用手持式水质臭氧分析仪检测臭氧质量浓度），预冷45 min。预冷完成后，立即将4组甜樱桃使用0.03 mm PE保鲜袋包装，置于39 cm×26 cm×16 cm的塑料框中，于（0.0±0.5）℃冷库贮藏30 d，期间每5 d测定一次样品品质和酶活力指标。

### 1.3.2 甜樱桃耐贮性生理生化指标测定

#### 1.3.2.1 感官品质

病情、褐变指数：参照张立新等<sup>[25]</sup>的方法，统计各处理组果实腐烂等级、果肉褐变等级，并计算病情指数和褐变指数。

枯梗率：以果梗干枯、干缩或枯黄为评判标准，统计各处理组果实果梗干枯数量，并按式（1）计算枯梗率。

$$\text{枯梗率}/\% = \frac{\text{干枯果梗数}}{\text{总果数}} \times 100 \quad (1)$$

果实硬度：随机选择10个果实，利用FT-327型果实硬度计测定甜樱桃果实赤道部位硬度，单位为kg/cm<sup>2</sup>。

#### 1.3.2.2 营养指标

随机选择10个果实，将果肉切成0.5 cm×0.5 cm小块混合均匀后，称取10 g，分别采用苯酚-硫酸法<sup>[26]</sup>、酸碱滴定法<sup>[27]</sup>、2,6-二氯酚靛酚滴定法<sup>[28]</sup>、福林-酚法<sup>[29]</sup>测定可溶性糖含量、可滴定酸质量分数、VC含量和总酚含量；果实花青素含量参照刘仁道等<sup>[30]</sup>的方法测定。以上结果均以鲜质量计。

#### 1.3.2.3 乙烯释放速率

参照张立新等<sup>[25]</sup>的方法进行环境气体收集和乙烯含量检测。

#### 1.3.2.4 呼吸强度

固定选择1 kg经不同预冷方式处理后的甜樱桃果实，置于体积为3 L（V<sub>1</sub>）的玻璃样本瓶中，分别于0℃贮藏0、5、10、15、20、25 d和30 d，使用F-920便携式氧气和二氧化碳分析仪测定瓶内CO<sub>2</sub>体积分数；使用浸水法测定1 kg甜樱桃果实体积，记录为V<sub>2</sub>/L。按照式（2）计算呼吸速率。

$$\text{呼吸速率}/(\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})) = 18 \times \varphi(\text{CO}_2) \times \frac{V_1 - V_2}{t \times m} \quad (2)$$

式中： $\varphi(\text{CO}_2)$ 为CO<sub>2</sub>体积分数%； $m$ 为样品鲜质量/kg； $t$ 为密闭时间/h。

### 1.3.3 甜樱桃抗病相关酶活力测定

#### 1.3.3.1 样品前处理

随机选取甜樱桃果实5个，冰浴下将果肉切成0.5 cm×0.5 cm小块混合均匀后，称取10 g置于玻璃研钵，加入0.1 g聚乙烯吡咯烷酮K30和10 mL 0.1 mol/L磷酸盐缓冲液（pH 7.8），冰浴研磨，4℃、12 000 r/min离心15 min，取上清液用于各种酶活力测定，重复3次。

#### 1.3.3.2 酶活力测定

按照试剂盒说明书测定各处理组SOD、POD、CAT、PPO、脂氧合酶、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酰辅酶A连接酶、肉桂醇脱氢酶活力。以上结果中，SOD、POD、CAT、PPO活力以鲜质量计，其他酶活力以蛋白质质量计。

## 1.3.4 甜樱桃新橙皮苷含量测定

## 1.3.4.1 标准曲线绘制

精密称取10 mg新橙皮苷标准品,先用10 mL甲醇溶解,再用甲醇分别稀释成质量浓度为400、300、200、100、50  $\mu\text{g/mL}$ 和10  $\mu\text{g/mL}$ 的新橙皮苷标准溶液。

## 1.3.4.2 HPLC检测条件

以甲醇和水为流动相,以 $\text{C}_{18}$ 反相柱(Accucore  $\text{C}_{18}$ , 80  $\text{\AA}$ , 150 mm $\times$ 2.1 mm, 2.6  $\mu\text{m}$ )为固定相,于285 nm波长处对各标准品溶液进行线性洗脱检测,并利用新橙皮苷质量浓度和峰面积绘制标准曲线(图1A)。洗脱程序:甲醇20%~50%(磷酸调节至pH 3),线性洗脱20 min;甲醇洗脱20 min。通过HPLC检测可知该条件下新橙皮苷出峰时间为27.94 min(图1B);贮藏30 d样品的新橙皮苷提取液经同样条件检测后在28.69 min处有明显吸收峰,与标准品出峰时间接近,且峰型与标准品相似(图1C),说明甜樱桃中存在新橙皮苷,且检测条件可满足实验要求。

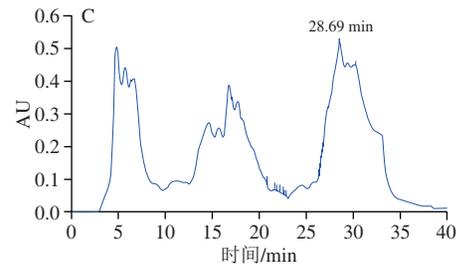
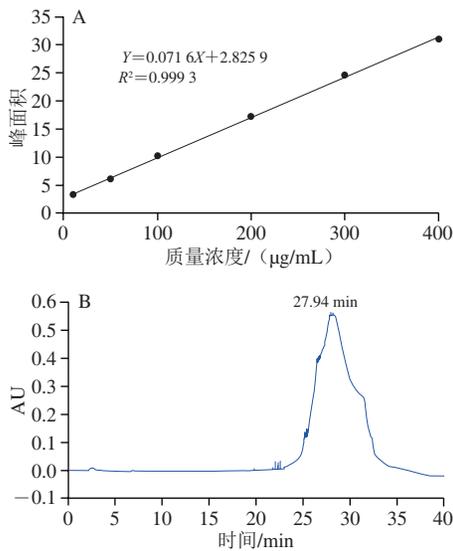


图1 新橙皮苷质量浓度与峰面积线性关系(A)、新橙皮苷标准品(B)和样品(C)吸收曲线

Fig. 1 Linear relationship between neohesperidin content and peak area (A), and HPLC chromatograms of neohesperidin standard (B) and sample (C)

## 1.3.4.3 甜樱桃新橙皮苷的提取

称取甜樱桃果实10 g于250 mL蓝盖试剂瓶中,加入甲醇150 mL,记录其质量;于55  $^{\circ}\text{C}$ 超声提取40 min,并在提取结束后使用甲醇补充至初始质量,滤纸过滤收集上清液;上清液经旋转浓缩至近干,以甲醇定容至25 mL,即为新橙皮苷提取液。

## 1.3.4.4 甜樱桃新橙皮苷含量测定

取新橙皮苷提取液100  $\mu\text{L}$ ,参照标准品检测方法对各处理组样品中的新橙皮苷含量进行检测,并依据绘制的标准曲线按式(3)计算样品中新橙皮苷含量,结果以鲜质量计。

$$\text{新橙皮苷含量}/(\text{mg/g}) = \frac{\rho \times V}{m \times 1000} \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为依据标准曲线计算出的新橙皮苷质量浓度/ $\mu\text{g/mL}$ ;  $V$ 为定容体积/ $\text{mL}$ ;  $m$ 为样品质量/ $\text{g}$ ; 1000为换算系数。

## 1.3.5 预冷方式对甜樱桃新橙皮苷合成通路相关基因表达的影响

## 1.3.5.1 基因筛选与引物设计

依据黄酮类生物合成途径(map00941)中的新橙皮苷合成通路,选择新橙皮苷合成关键酶和前体物质调控基因,并通过Primer Express3.0.1软件设计qPCR引物(表1),用于后续分析。

表1 甜樱桃新橙皮苷合成相关基因qPCR分析引物和基因注释信息

Table 1 Primers used for qPCR analysis of genes related to neohesperidin synthesis in sweet cherries and gene annotation information

基因	上游引物F	下游引物R	退火温度/ $^{\circ}\text{C}$	扩增片段长度/bp	基因注释信息	
LOC110760277	3'-TTGTCTCTTATTCCAATGCCTTTT-5'	3'-GCAGCCGGCAAAGAGAAG-5'	58	100	以黄酮醇7-O- $\beta$ -葡萄糖苷2'-O- $\beta$ -L-鼠李糖基转移酶(EC 2.4.1.236)、 <i>Cl2RT1</i> 基因为目标,经NCBI BLAST筛选出的甜樱桃高度相似基因( $\beta$ -D-葡萄糖基藏红花素 $\beta$ -1,6-葡萄糖基转移酶)	
LOC110760269	3'-CTCTTATTCCAATGCCTTTTTTCTC-5'	3'-GAAGGCAGTTTAAAGAAAAGAGGTA-5'	58	100		
LOC110763545	3'-CAACATCCTCACAACCTAAAGC-5'	3'-CCGACCGATGGAATATTTTG-5'	58	100		
LOC110763545	3'-ACATGGCCAGCCCTAATCTCT-5'	3'-CGATGGCTGGAATGTTTGTAA-5'	58	120		
LOC110751411	3'-TGTCTTTGACGCTGTTGGT-5'	3'-TGCCTAATGCCGAAATCC-5'	58	100		
LOC110753331	3'-CACTGCTCTCTTCTCCATCTC-5'	3'-ACCCAGATCCGCCGTATTC-5'	58	107		
LOC110757812	3'-CCGGTGCCGAGCAAATA-5'	3'-CTGAGATGAAGACCAAGAAAGG-5'	58	114		UDP-鼠李糖合成调控基因
LOC110757814	3'-GGGAGAGGCTAACGAGCTTGAT-5'	3'-GCACAGACAGAGAGAAGAAAATG-5'	58	100	以黄酮醇7-O- $\beta$ -葡萄糖基转移酶(EC 2.4.1.185)已知调控基因NM_001328983为目标,经NCBI BLAST筛选出的甜樱桃高度相似基因(葡萄糖基转移酶相似基因)	
LOC110759087	3'-CTGGAGCCTTCGACTTGAG-5'	3'-CTCCGATGGCCTTCAACAAC-5'	58	140		
QXJ01001021 范围: 28 524~29 946	3'-CCCCTTCCCATGACCAAT-5'	3'-GGACACGTGGAAGATTGGAGTT-5'	58	100		
LOC110745765	3'-TCTGTGGGTTTGTCTTGAATTT-5'	3'-TTACCATGACCCAGCAGAGACA-5'	58	149		樱桃柚皮素合成调控基因
LOC110756675	3'-CGCCACACAAAAGCGTAACA-5'	3'-GGGTTTACTGACCGTGGAA-5'	58	100		樱桃香橙素合成基因
LOC110758277	3'-TTGTGGAGGCTTGTGAGGAT-5'	3'-TCTCTCGACGCGCAAAG-5'	58	120		樱桃Apirifol合成基因
LOC110771557	3'-CGACCTTGCCTCTCACATA-5'	3'-TCTCTCAGAAATTTGCAATGTC-5'	58	111		

1.3.5.2 样品RNA提取及反转录

选择‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间新橙皮苷含量存在明显差异的贮藏时间点采集甜樱桃样品,并用TRIzol按照说明书对不同处理组‘红玛瑙’甜樱桃的RNA进行提取,经0.8%琼脂糖凝胶电泳检测合格后,按照反转录试剂盒说明书进行反转录获得cDNA,于-20℃保存用于后续实验。

1.3.5.3 qPCR反应体系与扩增程序

参照荧光定量试剂盒说明书配制20 μL反应体系;扩增程序为:95℃ 30s;95℃ 5s,59℃ 30s,72℃ 10s,循环40次;95℃ 5s,55℃ 30s,95℃ 1s。内参基因为CYP2<sup>[31]</sup>。

1.3.6 预冷方式影响甜樱桃新橙皮苷合成的关键调控基因筛选

利用迈维代谢云平台(<https://cloud.metware.cn>)对‘红玛瑙’甜樱桃新橙皮苷含量与相关基因表达量进行共表达网络分析,进而筛选出与‘红玛瑙’甜樱桃新橙皮苷代谢密切相关的关键调控基因。

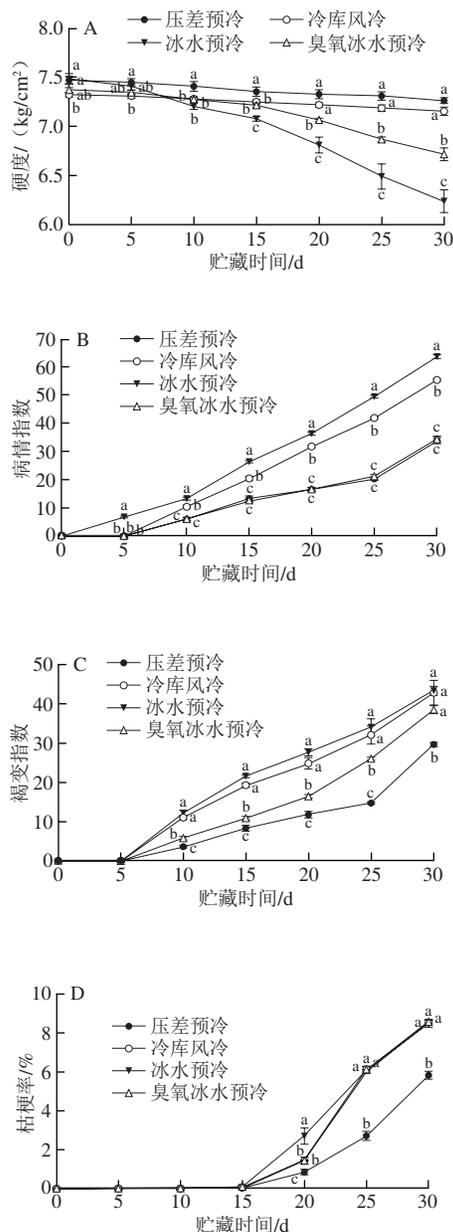
1.4 数据处理与分析

所有数据利用SPSS 17.0软件采用Duncan法进行组间差异显著性分析,采用Sigmaplot 10.0软件绘制折线图,采用Origin 2018软件绘制柱形图,采用TBtools软件绘制热图,所有实验数据重复3次,图中以实验数据的平均值±标准差表示。不同指标互作相关性分析通过迈维代谢云平台(<https://cloud.metware.cn>)完成;预冷方式与不同指标之间的互作关系采用Canoco 5.0软件和SPSS 17.0软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 预冷方式对甜樱桃采后贮藏感官品质的影响

感官品质不仅与甜樱桃商品价值密切相关,而且是判断其贮藏保鲜效果及耐贮性的重要依据。对经不同方式预冷、0℃商业贮藏条件下的‘红玛瑙’甜樱桃感官品质进行分析发现:不同预冷方式对甜樱桃贮藏期间感官品质变化的影响存在一定差异,且其差异随贮藏时间延长而增大。同商业预冷方式(冷库风冷)相比,压差预冷在维持果实硬度和降低病情指数、果肉褐变指数和枯梗率方面效果显著(图2);臭氧冰水预冷虽可有效降低甜樱桃贮藏期间病情指数和果肉褐变指数,但贮藏15d后果实硬度明显降低(图2A~C);冰水预冷处理的甜樱桃贮藏期间病情指数最高,硬度在贮藏10d后明显降低,但褐变指数和枯梗率与冷库风冷处理差异不显著(图2)。



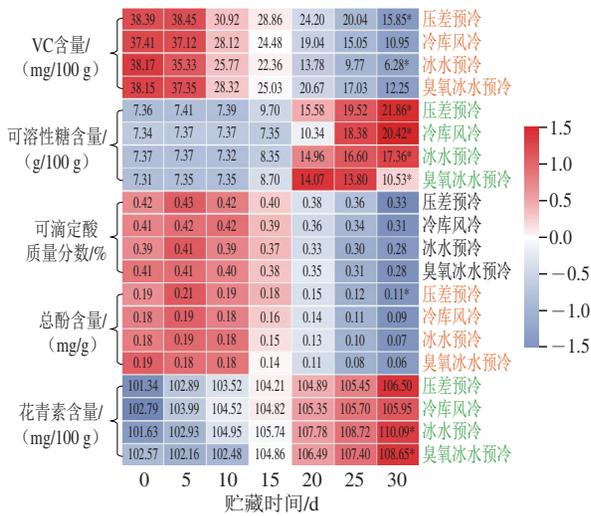
A~D.分别为硬度、病情指数、褐变指数、枯梗率。同一贮藏时间不同组别小写字母不同表示差异显著(P<0.05),下同。

图2 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃采后贮藏感官品质的影响  
Fig. 2 Effects of different precooling methods on sensory quality of ‘Red Agate’ sweet cherries during postharvest storage

2.2 预冷方式对甜樱桃采后贮藏营养品质的影响

由图3可知,‘红玛瑙’甜樱桃经不同预冷方式处理后,贮藏期间VC含量、总酚含量和可滴定酸质量分数均呈现逐渐下降趋势,但可溶性糖和花青素含量却呈现逐渐增加趋势。甜樱桃经不同预冷方式处理后,VC含量均在贮藏5d后开始出现明显下降,且同冷库风冷处理组相比,冰水预冷处理组下降程度更大,而差压预冷和臭氧冰水预冷处理对VC的保护效果优于冷库风冷处理;

总酚含量和可滴定酸质量分数均在贮藏15 d后出现明显下降, 且以冰水预冷和臭氧冰水预冷处理组下降程度更大; 可溶性糖和花青素含量均在贮藏20 d时出现明显增加, 但可溶性糖含量以压差预冷处理组增加较为明显, 而花青素含量以冰水预冷处理组增加较为明显。贮藏30 d后, 商业预冷(冷库风冷)处理组除VC和可溶性糖含量显著低于压差预冷处理组外, 其余品质指标均与压差预冷处理组差异不显著; 冰水预冷和臭氧冰水预冷处理组的花青素含量高于冷库风冷处理组, 但可溶性糖含量显著低于冷库风冷处理组。



\*. 贮藏至30 d时该处理组对应品质指标与其他处理组间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

图3 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间营养品质影响热图  
Fig. 3 Heatmap showing the effects of different precooling methods on the nutritional quality of ‘Red Agate’ sweet cherries during storage

### 2.3 预冷方式对甜樱桃采收后贮藏呼吸强度和乙烯释放速率的影响

如图4所示, 同冷库风冷处理组相比, 压差预冷处理可有效降低甜樱桃贮藏期间的呼吸速率和乙烯释放速率; 冰水预冷处理则显著提高了甜樱桃贮藏期间的呼吸速率, 且未起到降低乙烯释放速率的目的; 臭氧冰水预冷处理组的甜樱桃贮藏期间呼吸速率和乙烯释放速率与冷库风冷组处理组相比差异不显著。

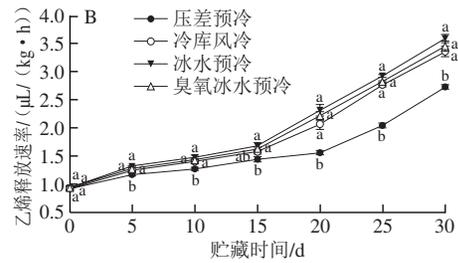
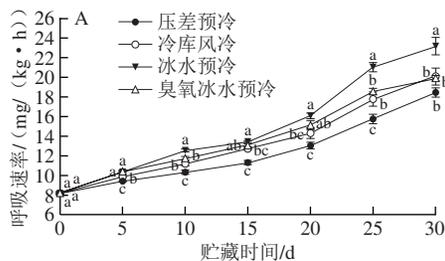
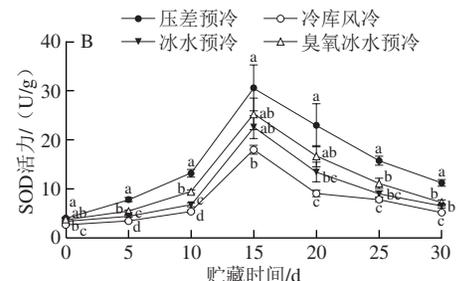
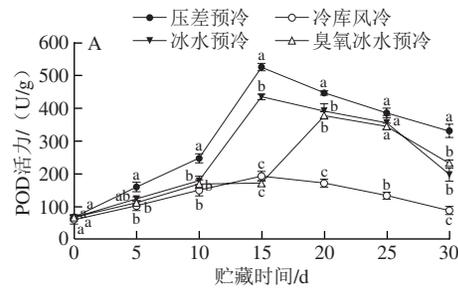


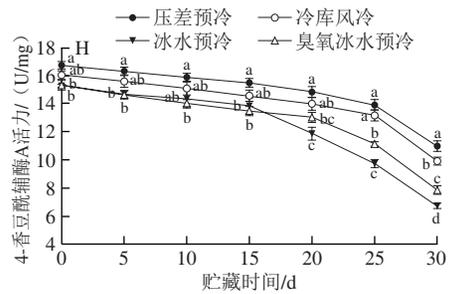
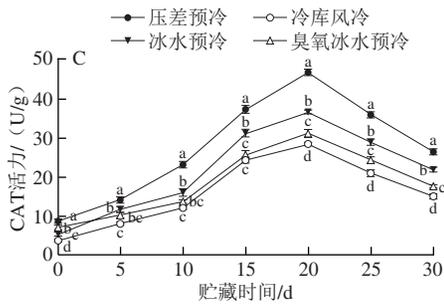
图4 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间呼吸速率(A)和乙烯释放速率(B)的影响

Fig. 4 Effects of different precooling methods on respiration rate (A) and ethylene release rate (B) during storage of ‘Red Agate’ sweet cherries

### 2.4 预冷方式对甜樱桃采收后贮藏抗病相关酶活力的影响

如图5所示, 甜樱桃经不同预冷方式处理后, 0 °C 贮藏期间POD、SOD、CAT、肉桂酸-4-羟化酶和肉桂醇脱氢酶活力均呈现先升高后下降趋势, 但不同处理组不同酶活力最高时的贮藏时间点存在一定差异。贮藏期间各处理组PPO活力均以贮藏5 d和15 d时较高; 4-香豆酰辅酶A连接酶活力均呈现逐渐下降趋势; 脂氧合酶活力在贮藏5~10 d期间下降(除压差预冷处理组), 其他贮藏时间均呈现上升趋势。同冷库风冷处理组相比, 压差预冷处理的甜樱桃贮藏期间POD、SOD、CAT、肉桂醇脱氢酶、肉桂酸-4-羟化酶活力均显著升高, 但脂氧合酶和PPO活力却较低, 且4-香豆酰辅酶A连接酶活力同冷库风冷处理组相比差异不显著; 臭氧冰水预冷和冰水预冷可有效提高甜樱桃贮藏期间SOD、POD、CAT和肉桂醇脱氢酶活力, 但会降低PPO、肉桂酸-4-羟化酶和4-香豆酰辅酶A连接酶活力。

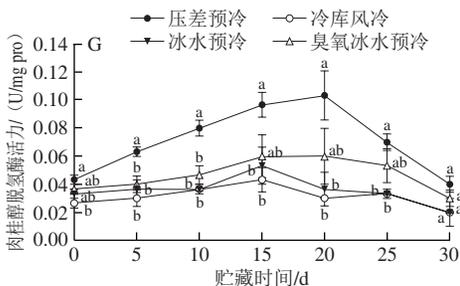
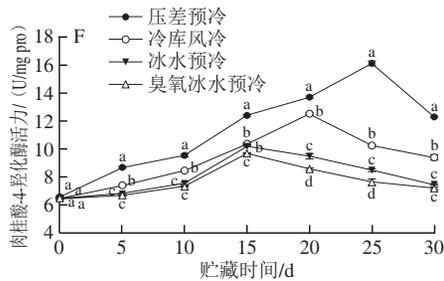
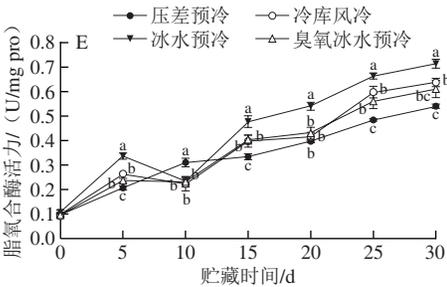
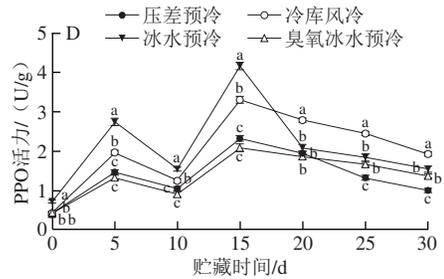




A~H.分别为POD、SOD、CAT、PPO、脂氧合酶、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶活力。

图5 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃采收后贮藏期间抗病相关酶活力的影响

Fig.5 Effects of different precooling methods on the activities of enzymes related to disease resistance during postharvest storage of ‘Red Agate’ sweet cherries

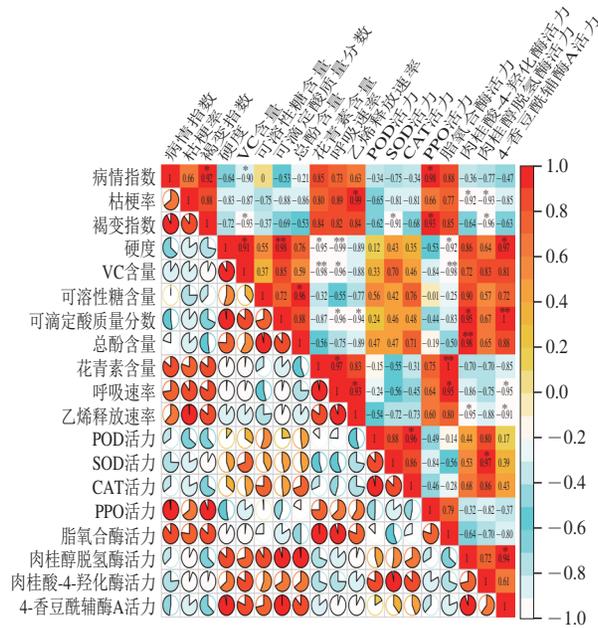


2.5 预冷方式影响甜樱桃耐贮性的关键评价指标筛选分析

通过对不同指标之间互作关系、预冷方式与不同指标之间互作关系的分析可以发现，甜樱桃贮藏期间耐贮性关键直观评价指标（病情指数、枯梗率和褐变指数）与花青素含量、呼吸强度、乙烯释放速率、PPO和脂氧合酶活力存在正相关关系，但与VC含量，POD、SOD、CAT、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶活力存在负相关关系（图6）；甜樱桃果实硬度与花青素含量、呼吸强度、乙烯释放速率、PPO和脂氧合酶活力存在负相关关系。此外，苯丙烷代谢途径抗病相关酶（肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶）活力与花青素合成、PPO和脂氧合酶活力之间存在竞争关系，但与POD、SOD、CAT活力之间存在一定正相关关系，说明提高POD、SOD、CAT、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶、4-香豆酰辅酶A连接酶活力和降低PPO及脂氧合酶活力、呼吸强度、乙烯释放速率及抑制花青素合成可有效提高‘红玛瑙’甜樱桃耐贮性，且苯丙烷代谢途径抗病相关酶活力、VC含量、SOD活力、PPO活力和脂氧合酶活力可作为评价甜樱桃耐贮性的关键评价指标。

如图7和表2所示，压差预冷处理与硬度、可滴定酸质量分数、肉桂醇脱氢酶活力、肉桂酸-4-羟化酶活力、4-香豆酰辅酶A连接酶活力、SOD活力、POD活力、CAT活力和总酚含量之间夹角为锐角，呈现显著正相关关系（ $P < 0.05$ ），且与肉桂醇脱氢酶活力之间夹角最小，但与PPO活力和褐变指数之间呈现显著负相关关系；冷库风冷处理与POD、SOD、CAT和肉桂醇脱氢酶活力之间夹角为钝角，呈现显著负相关关系（ $P < 0.05$ ），与PPO活力、花青素含量、乙烯释放速率和呼吸强度等

之间夹角为锐角，呈现正相关关系，但相关性不显著 ( $P>0.05$ )；冰水预冷处理与病情指数、花青素含量、PPO活力之间夹角为锐角，呈现显著正相关关系 ( $P<0.05$ )，但与硬度、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酰辅酶A连接酶、肉桂醇脱氢酶活力之间夹角为钝角，呈现显著负相关关系 ( $P<0.05$ )；臭氧冰水预冷处理与肉桂酸-4-羟化酶活力之间夹角为钝角，呈现显著负相关关系 ( $P<0.05$ )，但与PPO活力之间夹角为锐角，呈现显著正相关关系 ( $P<0.05$ )。说明压差预冷可有效提高‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间肉桂醇脱氢酶、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酰辅酶A连接酶、SOD、POD和CAT活力，进而提高甜樱桃耐贮性。



\*.在0.05水平上显著相关；\*\*.在0.01水平上极显著相关。饼图面积越大表示相关系数越大。

图6 不同预冷方式下‘红玛瑙’甜樱桃不同指标之间的相关性  
Fig.6 Correlation analysis between indicators of ‘Red Agate’ sweet cherries subjected to different precooling treatments

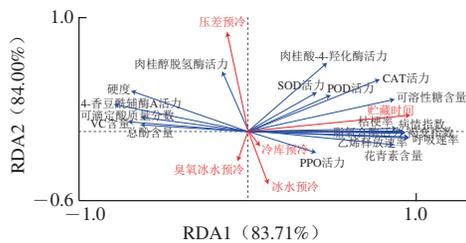


图7 不同预冷方式和‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间不同指标之间的互作关系

Fig.7 Interactions between different precooling methods and indexes during storage of ‘Red Agate’ sweet cherries

表2 不同预冷方式与不同指标之间的Pearson相关性分析  
Table 2 Pearson correlation analysis between precooling methods and fruit indicators

指标	相关系数和P值	冰水预冷	臭氧冰水预冷	冷库风冷	压差预冷	贮藏时间
病情指数	皮尔逊相关系数	0.285**	-0.200	0.118	-0.203	0.878**
	显著性(双侧)	0.009	0.068	0.284	0.064	0.000
枯梗率	皮尔逊相关系数	0.072	0.037	0.037	-0.146	0.836**
	显著性(双侧)	0.517	0.738	0.738	0.186	0.000
褐变指数	皮尔逊相关系数	0.176	-0.064	0.124	-0.236*	0.916**
	显著性(双侧)	0.110	0.561	0.260	0.031	0.000
硬度	皮尔逊相关系数	-0.413**	-0.100	0.139	0.375**	-0.648**
	显著性(双侧)	0.000	0.365	0.209	0.000	0.000
VC含量	皮尔逊相关系数	-0.182	0.031	-0.018	0.169	-0.913**
	显著性(双侧)	0.097	0.780	0.873	0.124	0.000
可溶性糖含量	皮尔逊相关系数	0.006	-0.169	-0.007	0.170	0.835**
	显著性(双侧)	0.955	0.125	0.951	0.123	0.000
总酚含量	皮尔逊相关系数	-0.061	-0.174	0.016	0.219*	-0.883**
	显著性(双侧)	0.581	0.112	0.882	0.045	0.000
可滴定酸质量分数	皮尔逊相关系数	-0.208	-0.119	0.071	0.256*	-0.860**
	显著性(双侧)	0.057	0.282	0.519	0.019	0.000
乙烯释放速率	皮尔逊相关系数	0.115	0.064	0.023	-0.202	0.928**
	显著性(双侧)	0.299	0.562	0.835	0.066	0.000
呼吸速率	皮尔逊相关系数	0.177	0.027	-0.028	-0.176	0.941**
	显著性(双侧)	0.106	0.807	0.799	0.109	0.000
花青素含量	皮尔逊相关系数	0.274*	-0.035	0.034	-0.205	0.828**
	显著性(双侧)	0.012	0.750	0.761	0.062	0.000
POD活力	皮尔逊相关系数	0.109	-0.059	-0.413**	0.363**	0.514**
	显著性(双侧)	0.323	0.596	0.000	0.001	0.000
SOD活力	皮尔逊相关系数	-0.097	0.066	-0.291**	0.322**	0.447**
	显著性(双侧)	0.378	0.549	0.007	0.003	0.000
CAT活力	皮尔逊相关系数	0.036	-0.126	-0.256*	0.346**	0.618**
	显著性(双侧)	0.742	0.252	0.019	0.001	0.000
PPO活力	皮尔逊相关系数	0.257*	0.225*	0.203	-0.235*	0.314**
	显著性(双侧)	0.018	0.039	0.064	0.031	0.004
脂氧合酶活力	皮尔逊相关系数	0.186	-0.040	-0.015	-0.130	0.937**
	显著性(双侧)	0.091	0.715	0.892	0.237	0.000
肉桂酸-4-羟化酶活力	皮尔逊相关系数	-0.239*	-0.339**	-0.043	0.534**	0.503**
	显著性(双侧)	0.029	0.002	0.696	0.000	0.000
4-香豆酰辅酶A活力	皮尔逊相关系数	-0.262*	-0.166	0.119	0.309**	-0.811**
	显著性(双侧)	0.016	0.130	0.279	0.004	0.000
肉桂醇脱氢酶活力	皮尔逊相关系数	-0.253*	0.012	-0.357**	0.598**	-0.015
	显著性(双侧)	0.020	0.917	0.001	0.000	0.893

注：\*.在0.05水平上显著相关；\*\*.在0.01水平上极显著相关。

2.6 预冷方式对甜樱桃采收后贮藏新橙皮苷含量变化的影响

如图8所示，在甜樱桃贮藏期间，压差预冷和冰水预冷处理组的新橙皮苷含量呈现先升高后降低现象，且均在贮藏至第10天时含量最高，但臭氧冰水预冷和冷库风冷处理组的新橙皮苷含量分别呈现先降低后升高再降低和先升高后降低再升高再降低的现象。另外，同冷库风冷处理组相比，压差预冷和冰水预冷处理有效提高了甜樱桃

贮藏期间新橙皮苷含量,且这两种方式的作用效果差异不显著,但臭氧冰水预冷处理则降低了甜樱桃贮藏期间新橙皮苷含量,说明压差预冷和冰水预冷处理能够维持甜樱桃新橙皮苷含量并延缓其分解代谢,但臭氧冰水预冷和冷库风冷处理会显著促进甜樱桃新橙皮苷的分解代谢。

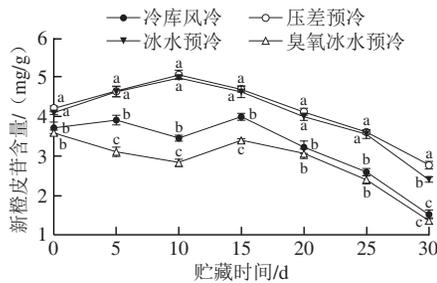
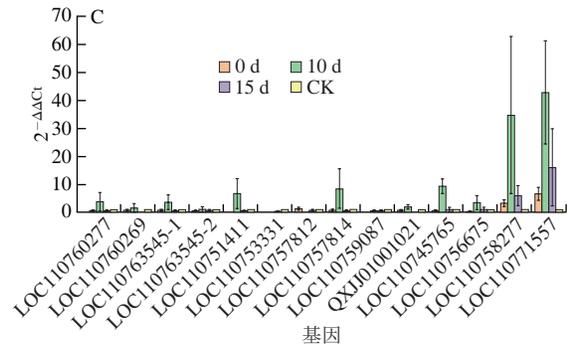
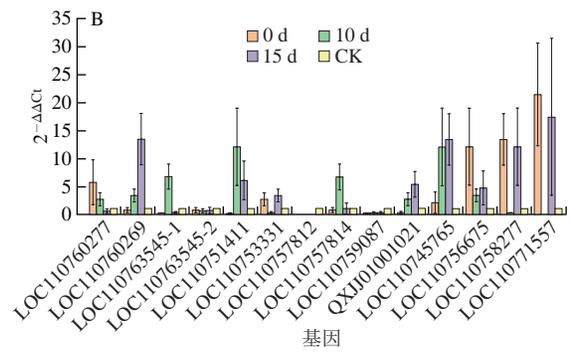
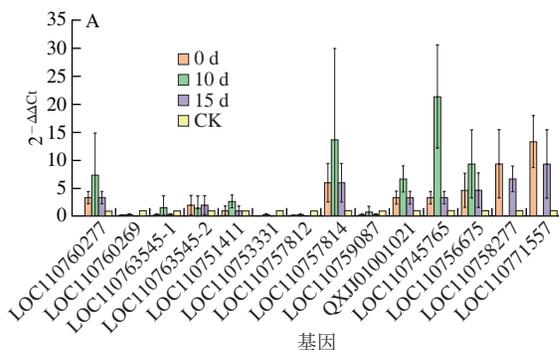


图8 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间新橙皮苷含量变化的影响  
Fig. 8 Effects of different precooling methods on changes of neohesperidin content in ‘Red Agate’ sweet cherries during storage

2.7 预冷方式对甜樱桃新橙皮苷合成通路相关基因表达的影响

依据不同预冷方式处理后‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间新橙皮苷含量变化规律,选择贮藏0、10 d和15 d 3个含量变化的拐点,以商业预冷方式(冷库风冷)为对照,采用qPCR法对不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃新橙皮苷合成相关基因表达特性的影响进行分析,发现压差预冷处理组基因LOC110760277、LOC110763545-1、LOC110751411、LOC110757814、LOC110759087、QXJJ01001021、LOC110745765和LOC110756675表达量在0~15 d内呈现明显先升高后下降趋势,但基因LOC110758277和LOC110771557表达量呈现先下降后升高趋势;冰水处理组基因LOC110763545-1、LOC110751411和LOC110757814表达量呈现先升高后下降趋势,但基因LOC110760277表达量逐渐下调,基因LOC110760269、QXJJ01001021、LOC110745765表达量逐渐上调,基因LOC110758277和LOC110771557表达量变化规律与压差预冷处理组相似;臭氧冰水预冷处理组基因LOC110760277、LOC110760269、LOC110763545-1、LOC110763545-2、LOC110757814、QXJJ01001021、LOC110745765、LOC110756675、LOC110758277和LOC110771557表达量均呈现先升高后下降趋势(图9)。



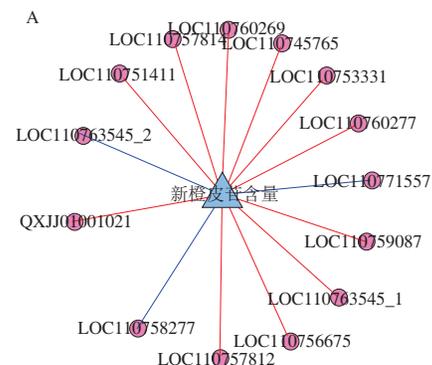
A~C.分别为压差预冷、冰水预冷、臭氧冰水预冷。

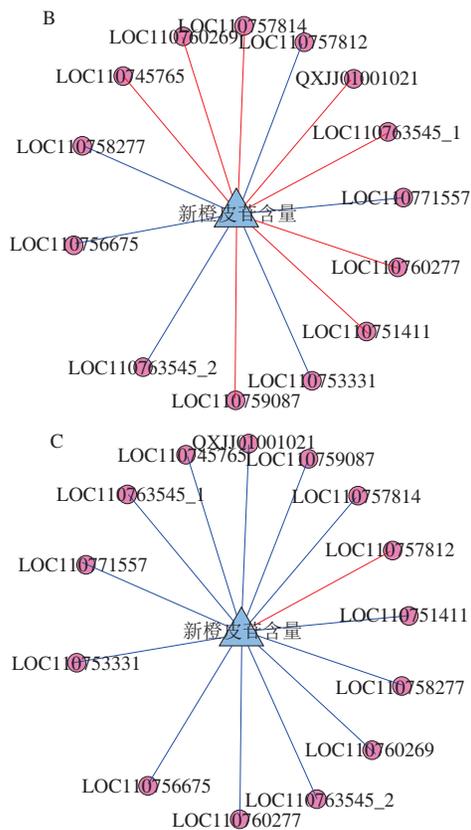
图9 不同预冷方式对‘红玛瑙’甜樱桃新橙皮苷合成相关基因表达的影响

Fig. 9 Effects of different precooling methods on the expression of genes related to neohesperidin synthesis in ‘Red Agate’ sweet cherries

2.8 预冷方式调控甜樱桃新橙皮苷合成的关键相关基因筛选

通过相关性网络分析对贮藏0~15 d期间甜樱桃新橙皮苷含量变化及相关基因表达量进行共表达网络分析,发现在压差预冷和冰水预冷处理组中,新橙皮苷含量均与基因LOC110763545-2、LOC110758277和LOC110771557表达量呈负相关关系;臭氧冰水预冷处理组中新橙皮苷含量仅与基因LOC110757812表达量呈正相关;冰水预冷处理组中新橙皮苷含量还与基因LOC110757812、LOC110756675和LOC110753331表达量存在负相关关系(图10)。说明压差预冷可通过抑制基因LOC110763545-2、LOC110758277和LOC110771557表达,冰水预冷可通过抑制基因LOC110763545-2、LOC110758277、LOC110771557、LOC110757812、LOC110756675和LOC110753331的表达来促进甜樱桃新橙皮苷的合成。





A. 压差预冷与冷库风冷; B. 冰水预冷与冷库风冷; C. 臭氧冰水预冷与冷库风冷。蓝色线条表示负相关; 红色线条表示正相关。

图 10 不同预冷方式下‘红玛瑙’甜樱桃贮藏0~15 d期间新橙皮苷合成与相关基因表达量之间的相关性网络分析

Fig. 10 Correlation network analysis between the synthesis of neohesperidin and the expression of related genes in ‘Red Agate’ sweet cherries subjected to three different precooling methods versus cold storage treatment during the storage period of up to 15 days

### 3 讨论

果蔬采后贮藏前均需经过预冷处理, 且已有研究证实预冷方式对火龙果<sup>[32]</sup>、长枣<sup>[10]</sup>、甜玉米<sup>[11]</sup>和红毛丹<sup>[33]</sup>等的贮藏品质具有一定影响, 但有关预冷方式对甜樱桃采后耐贮性的影响还不清楚。本研究发现不同预冷方式对甜樱桃耐贮性的影响存在一定差异, 且同冷库风冷处理相比, 压差预冷处理效果更好, 这可能与压差预冷时间短, 延缓了甜樱桃预冷期间的衰老进程、提高了抗病相关酶活性、降低了其呼吸代谢强度有关; 冰水预冷处理虽然预冷时间同样较短, 但同冷库风冷处理相比耐贮性较差, 这可能与PPO、肉桂酸-4-羟化酶、4-香豆酰辅酶A连接酶活力较低, 呼吸强度、乙烯释放速率较高, 营养物质消耗过快, 及冰水处理易滋生微生物, 从而加重贮藏后期腐烂关系密切。相关研究结果与邓浩等<sup>[33]</sup> (压差预冷后的红毛丹贮藏品质最好, 冷库预冷效果次之, 冰水预冷效果不明显)、张怡等<sup>[34]</sup> (冰水预冷降温

最快, 但沥干残留水分会加速蓝莓微生物的繁殖, 就贮藏保鲜效果而言, 强制通风预冷较冷库预冷可以更快地降低田间热, 有效降低蓝莓烂果率、失水率、POD活性和丙二醛含量, 减缓可滴定酸含量和硬度的降低)和胡花丽等<sup>[35]</sup> (风预冷可抑制李果实的呼吸速率升高, 冰水预冷果实的腐烂症状明显较风预冷严重, 因此推荐风预冷方式为较好的李果实预冷方式)的结论相似, 但与崔建潮等<sup>[36]</sup> (冰水预冷甜樱桃货架期保鲜效果优于压差预冷)的研究结果相反, 造成这种差异的原因与保鲜温度不同关系密切。另外, 本研究中甜樱桃贮藏15 d后病情指数和褐变指数均显著高于其他研究<sup>[1,16,25,36]</sup>, 这可能与本研究采用的甜樱桃成熟度较高和贮藏期间样品量较多有关。

‘红玛瑙’甜樱桃采后耐贮性相关评价指标测定结果表明, 不同预冷方式中, 压差预冷能更好地提升‘红玛瑙’甜樱桃的耐贮性, 这与压差预冷可有效提高‘红玛瑙’甜樱桃贮藏期间POD、SOD、CAT、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶活力, 降低呼吸强度, 从而使甜樱桃维持较好的营养品质有关。本研究结果与李燕等<sup>[10]</sup> (压差预冷能够使长枣维持更高的贮藏品质, 抑制其细胞膜脂质过氧化, 维持较高的抗氧化酶活性, 抵御氧化胁迫, 抑制褐变)、焦旋等<sup>[24]</sup> (与冷库预冷相比, 压差预冷抑制了油桃贮藏期间呼吸强度和乙烯释放速率的增加, 推迟了呼吸高峰出现的时间, 保持了其较高的硬度和营养品质, 提升了其耐贮性)、邓浩等<sup>[33]</sup> (压差预冷是较优的红毛丹预冷方式, 且可提高红毛丹贮藏期间好果率, 但抑制了果皮苯丙氨酸解氨酶和POD活性)和时文林等<sup>[11]</sup> (流态冰预冷处理对甜玉米的呼吸强度抑制效果和营养品质保护效果明显优于压差预冷)存在一定差异, 造成这些差异的原因与压差预冷技术应用对象的差异密切相关, 说明不同果蔬适宜的预冷方式存在一定差异。目前生产上果蔬普遍采用冷库风冷处理, 且多数果蔬的较优预冷方式尚不明确, 在一定程度上导致果蔬贮藏品质较差和贮藏寿命缩短, 不利于产业健康发展。另外, 这些研究结果还进一步证实压差预冷对果蔬贮藏期间的呼吸强度、营养品质和酶活性具有显著影响, 但不同果蔬对压差预冷响应强度存在差异, 因此筛选不同果蔬适宜的预冷方式、建立预冷标准化技术规程对提升果蔬耐贮性和降低采后损失具有重要意义。

预冷方式影响甜樱桃耐贮性的关键评价指标筛选对其后期贮藏寿命终点判断和贮藏特性靶向监测具有重要意义。苯丙烷代谢途径关键酶 (肉桂醇脱氢酶、肉桂酸-4-羟化酶和4-香豆酰辅酶A连接酶) 可通过促进木质素和酚类物质等抗病物质的合成来提高果蔬抗病性<sup>[37]</sup>, 但目前有关贮藏期间该途径关键酶与甜樱桃耐贮性之间的互作关系还不清楚。本研究通过指标间互作分析发现,

甜樱桃感官品质指标与苯丙烷代谢途径关键酶（肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶）活力存在显著相关性（ $P < 0.05$ ），但营养品质除VC含量外其余指标均未表现出显著相关性（ $P > 0.05$ ）；SOD、PPO和脂氧合酶活力亦分别与褐变指数、病情指数、硬度表现出显著相关性（ $P < 0.05$ ），说明VC含量和苯丙烷代谢途径关键酶、SOD、PPO、脂氧合酶活力可作为评价甜樱桃耐贮性的关键指标。相关研究成果与梁惜雯等<sup>[38]</sup>（较高的抗氧化酶活性可减缓樱桃衰老，延长果实的货架期）、刘静珂<sup>[39]</sup>（甜樱桃贮藏期间较高的硬度、可溶性固形物含量、PPO、POD活性和较低的呼吸强度可提高其耐贮性）、周慧等<sup>[40]</sup>（降低PPO、POD活性，提高CAT、SOD活性，可以较好地保持甜樱桃果实的品质及风味）相似，但不同的是本研究还筛选出了苯丙烷代谢途径关键酶，并通过相关性分析筛选出了耐贮性关键评价指标。另外，虽然本研究筛选出了甜樱桃耐贮性关键评价指标，但这些指标如何服务于生产以预测甜樱桃贮藏寿命还有待进一步研究，如筛选出的耐贮性评价指标与品种之间的适配性；建立耐贮性评价指标数值与贮藏时间之间的动力学数量关系；耐贮性评价指标预测贮藏寿命结果的实践验证等。

黄酮生物合成途径（mp00941）是新橙皮苷合成代谢的核心途径，本研究发现压差预冷和冰水预冷处理均可通过抑制该途径基因LOC110763545-2、LOC110758277和LOC110771557的表达来促进甜樱桃新橙皮苷的合成；压差预冷处理后EC 2.4.1.236相关基因（LOC110760277、LOC110751411）、UDP-鼠李糖合成相关基因（LOC110757814）、EC 2.4.1.185相关基因（QXJJ01001021）和柚皮素合成相关基因（LOC110745765、LOC110756675）表达量与新橙皮苷含量的变化规律一致，说明压差预冷可通过提高上述基因表达量来促进新橙皮苷合成，但甜樱桃新橙皮苷合成相关基因（LOC110760277、LOC110751411、QXJJ01001021）还未在甜樱桃基因组中得到有效注释，后期还需通过转录组学、反向遗传学手段进一步进行基因表达特性的研究及功能验证。

综上所述，适宜的预冷方式可有效提高‘红玛瑙’甜樱桃耐贮性，促进新橙皮苷合成，提升其营养价值。相较于商业预冷方式（冷库风冷），压差预冷处理可有效激活‘红玛瑙’甜樱桃果实中的POD、SOD、CAT、肉桂酸-4-羟化酶、肉桂醇脱氢酶和4-香豆酰辅酶A连接酶，并保持较高的果肉硬度。VC含量和苯丙烷代谢途径关键酶、SOD、PPO、脂氧合酶活力与预冷方式及甜樱桃感官品质呈现显著相关性，可作为甜樱桃耐贮性关键评价指标。此外，贮藏期间甜樱桃新橙皮苷含量呈现波动下降趋势，但同冷库风冷处理组

相比，压差预冷处理可促进甜樱桃新橙皮苷合成通路中EC 2.4.1.236（LOC110760277、LOC110751411）、EC 2.4.1.185高度相似基因（QXJJ01001021）、UDP-鼠李糖（LOC110757814）、柚皮素（LOC110745765、LOC110756675）相关调控基因表达，抑制香橙素（LOC110758277）和Apiforol（LOC110771557）相关调控基因表达，从而使甜樱桃新橙皮苷含量保持在较高的水平。

#### 参考文献：

- [1] 田竹希, 龙明秀, 李咏富, 等. 短波紫外线照射和<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照处理对大樱桃贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 269-276. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181225-297.
- [2] DE PILLI T, LOPRIORE G, MONTEMITRO M, et al. Effects of two sweet cherry cultivars (*Prunus avium* L., cvv. ‘Ferrovia’ and ‘Lapins’) on the shelf life of an innovative bakery product[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(1): 310-320. DOI:10.1007/s13197-018-3491-5.
- [3] ÖNDER D G, ÖNDER S, UYSAL A T, et al. Impact of postharvest hot water, 1-MCP and CaCl<sub>2</sub> treatments on antioxidant enzymes and related genes during cold storage in sweet cherry (*Prunus avium* L.)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(6): 5744-5758. DOI:10.1007/s11694-021-01134-y.
- [4] MORCA A U, TEKSÜR P K, EĞERCI Y. Morphological and molecular identification of *Monilinia* spp. causing blossom blight and fruit rot on sweet cherries in the Aegean region of Turkey[J]. Phytoparasitica, 2022, 2022: 1-16. DOI:10.1007/s12600-022-00987-3.
- [5] SPADONI A, IPPOLITO A, SANZANI S M. First report of *Stemphylium eturmiunum* causing postharvest rot of sweet cherry in Italy[J]. Crop Protection, 2020, 132: 105112. DOI:10.1016/j.cropro.2020.105112.
- [6] 梁芸志, 陈存坤, 吴昊, 等. 不同预冷温度对采后番茄贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 188-193; 200. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.13.033.
- [7] PRABASARI I, PAMUNGKAS U R R, SETIAWAN C K. Effect of pre-cooling and chitosan treatment on pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr.) quality during cold storage[C]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2022, 985(1): e012046. DOI:10.1088/1755-1315/985/1/012046.
- [8] SHOJI K, SCHUDEL S, ONWUDE D, et al. Mapping the postharvest life of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 176: 105914. DOI:10.1016/j.resconrec.2021.105914.
- [9] 赵安琪, 安容慧, 王馨渝, 等. 真空预冷中雾化微酸性电解水处理对鸡毛菜低温流通及其货架期品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 4(3): 218-227. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220325-312.
- [10] 李燕, 刘贵珊, 何建国, 等. 预冷方式对大枣保鲜效果的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(23): 261-268. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211222-250.
- [11] 时文林, 赵雅琦, 闫志成, 等. 不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(15): 218-226. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20210816-197.
- [12] 冯雅蓉. 浅谈预冷方式对樱桃货架期品质的影响[J]. 食品安全导刊, 2021(12): 68; 70. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2021.12.040.
- [13] 杨艳芬. 预冷对气调包装樱桃保鲜效果的研究[J]. 江苏科技信息, 2017(19): 43-45.

- [14] 冯雅蓉. 不同预冷方式对甜樱桃贮藏过程中糖酸含量的影响[J]. 食品安全导刊, 2020(30): 119-120. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2020.30.090.
- [15] 冯雅蓉. 预冷方式对红玛瑙樱桃果实冷藏期间真菌多样性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 214-221. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190524-290.
- [16] 张潇方. 甜樱桃采收后全程冷链保鲜技术研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017: 8-47.
- [17] 贾斌广. 樱桃压差预冷送风参数的优化研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019: 16-48.
- [18] 刘学仁. 柚皮苷、橙皮苷和新橙皮苷的提取与分析研究[D]. 黄石: 湖北师范学院, 2011: 1-18.
- [19] ZHAO T, HU S, MA P, et al. Neohesperidin suppresses IgE-mediated anaphylactic reactions and mast cell activation via Lyn-PLC-Ca<sup>2+</sup> pathway[J]. *Phytotherapy Research: PTR*, 2019, 33(8): 2034-2043. DOI:10.1002/ptr.6385.
- [20] ZHANG J, HUI Y, LIU F, et al. Neohesperidin protects angiotensin II-induced hypertension and vascular remodeling[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2022, 13: 890202. DOI:10.3389/fphar.2022.890202.
- [21] VENTURINI L, FERRARINI A, ZENONI S, et al. *De novo* transcriptome characterization of *Vitis vinifera* cv. Corvina unveils varietal diversity[J]. *BMC Genomics*, 2013, 14(1): 41. DOI:10.1186/1471-2164-14-41.
- [22] 陈春玉, 李毅, 黄超明, 等. 新橙皮苷的制备工艺及应用进展[J]. 天然气化工(C1化学与化工), 2014, 39(3): 81-87.
- [23] 刘坚, 王振, 蒋书歌, 等. 根皮乙酰苯-4'-β-新橙皮糖苷合成新橙皮苷工艺研究[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(8): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1006-9690.2020.08.001.
- [24] 焦旋, 高阳, 高振峰, 等. 压差预冷对油桃贮藏品质及抗氧化性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(22): 173-179. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.024689.
- [25] 张立新, 陈嘉, 冯志宏, 等. 樱桃保鲜纸和高效乙烯去除剂对甜樱桃低温贮藏品质和褐变控制的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 226-230. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201606041.
- [26] 罗春萍, 陆友利, 王星星. 苯酚-硫酸法快速测定多糖方法的优化[J]. 化工管理, 2021(3): 90-91; 94. DOI:10.19900/j.cnki.ISSN1008-4800.2021.03.043.53.
- [27] 姜爱丽. 甜樱桃果实采收后生理、耐藏性及褐变机理的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2002: 9-11.
- [28] 王传芬, 韩玉, 王英博, 等. 果蔬中维生素C含量的测定及比较[J]. 农业与技术, 2020, 40(18): 44-46. DOI:10.19754/j.nyyjs.20200930014.
- [29] 李静, 聂继云, 李海飞, 等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报, 2008(1): 126-131. DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.2008.01.002.
- [30] 刘仁道, 张猛, 李新贤. 草莓和蓝莓果实花青素提取及定量方法的比较[J]. 园艺学报, 2008, 35(5): 655-660. DOI:10.16420/j.issn.0513-353x.2008.05.013.
- [31] 张芳明. 甜樱桃内参基因的筛选[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013: 2-11.
- [32] 陈兴开, 常子安, 连欢, 等. 产地预冷和冷链流通对红心火龙果贮藏品质的影响[J]. 中国果菜, 2022, 42(7): 1-7; 27. DOI:10.19590/j.cnki.1008-1038.2022.07.001.
- [33] 邓浩, 尹青春, 林玉钦, 等. 不同预冷方式对红毛丹贮藏品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(1): 1-4.
- [34] 张怡, 乔勇进, 姚连谋, 等. 不同预冷方式对采收后蓝莓贮藏品质的影响[J]. 农产品加工, 2020(9): 31-35. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.05.009.
- [35] 胡花丽, 李鹏霞, 王炜. 预冷方式对李果实呼吸强度、乙烯生成量及贮藏品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(2): 80-83.
- [36] 崔建潮, 王文辉, 贾晓辉, 等. 不同预冷方式对货架期甜樱桃果实品质的影响[J]. 中国果树, 2017(1): 17-20; 29. DOI:10.16626/j.cnki.issn1000-8047.2017.01.004.
- [37] 郭欣, 林育钊, 林河通, 等. 壳聚糖处理对西番莲果实感病指数、抗病相关酶活性和抗病物质含量的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 206-212. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200723-315.
- [38] 梁惜雯, 徐冬颖, 陈晨, 等. 草酸、水杨酸、茉莉酸甲酯处理对甜樱桃采收后贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(7): 18-25. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.07.003.
- [39] 刘静珂. 不同处理对‘吉美’樱桃表面真菌和贮藏品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022: 22-28. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2022.000345.
- [40] 周慧, 王云香, 王愈, 等. EBR处理对甜樱桃果实褐变及相关酶基因表达的影响[J]. 华北农学报, 2020, 35(增刊1): 24-30. DOI:10.7668/hbxb.20190386.