DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250803001
引用格式: 阚鸿, 陈庆敏, 石晶盈, 等. 冷锻炼处理对常见品种菜用椒贮藏品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 116–124.
KAN H, CHEN QM, SHI JY, *et al*. Effects of cold acclimation treatment on the storage quality of common varieties edible pepper [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 116–124. (in Chinese with English abstract).

冷锻炼处理对常见品种菜用椒贮藏品质的影响研究

阚　鸿[1,2], 陈庆敏[3], 石晶盈[1*], 傅茂润[2*]

[1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 泰安　271018; 2. 齐鲁工业大学(山东省科学院)食品科学与工程学院, 济南　250353; 3. 山东农业工程学院食品科学与工程学院, 济南　250100]

摘　要: 目的　探讨冷锻炼处理对 6 种常见菜用椒贮藏效果的影响及对菜椒贮藏品质的影响。**方法**　采用 0 ℃和 4 ℃两个温度冷锻炼处理后转入 10 ℃进行贮藏, 分析贮藏期间菜用椒的腐烂率、腐烂指数、冷害指数、转色指数、生理品质和营养价值。**结果**　冷锻炼处理可以有效抑制大部分菜用椒品种的腐烂和转色现象, 对菜椒尤其明显, 未经冷锻炼处理菜椒的腐烂指数和转色指数为 19.23%与 43.59%, 而 0 ℃冷锻炼 5.25 h 及 4 ℃冷锻炼 0.75 h 的菜椒均未发生转色及腐烂。4 ℃冷锻炼处理 0.75 h 能够延缓菜椒贮藏期内水分流失, 降低呼吸速率, 抑制丙二醛积累, 延缓叶绿素、维生素 C 的降解。**结论**　冷锻炼作为一种低成本、非化学的保鲜方案, 能够抑制大部分菜用椒贮藏期内品质劣变, 且能有效延长菜椒贮藏期, 保持其较好的贮藏品质。冷锻炼处理对于减少采后损失、保障蔬菜供应品质具有明确的产业应用价值。

关键词: 冷锻炼; 耐冷性; 菜用椒品种; 冷害; 贮藏品质

Effects of cold acclimation treatment on the storage quality of common varieties edible pepper

KAN Hong[1,2], CHEN Qing-Min[3], SHI Jing-Ying[1*], FU Mao-Run[2*]

[1. *School of Food Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai'an* 271018, *China*; 2. *School of Food Science and Engineering*, *Qilu University of Technology* (*Shandong Academy of Sciences*), *Ji'nan* 250353, *China*; 3. *School of Food Science and Engineering*, *Shandong Agricultural and Engineering College*, *Ji'nan* 250100, *China*]

ABSTRACT: Objective　To investigate the effects of cold acclimation treatment on the storage performance and storage quality of 6 kinds of common edible pepper varieties. **Methods**　Peppers were cold acclimation treatment at 0 ℃ and 4 ℃ and then stored at 10 ℃. The decay rate, decay index, chilling injury index, color change index, physiological quality and nutritional value of peppers during storage were analyzed. **Results**　Cold acclimation

收稿日期: 2025-08-03
基金项目: 山东省现代农业产业技术体系项目(SDARS-05)
第一作者: 阚鸿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬保鲜。E-mail: kh990313@163.com
***通信作者:** 石晶盈(1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为果蔬采后贮藏保鲜及分子生物学。E-mail: jyshi80@163.com
傅茂润(1981—), 男, 教授, 主要研究方向为农产品物流保鲜与高值化加工。E-mail: skyfmr@163.com

treatment could effectively inhibit decay and color change in most edible pepper varieties, especially bell peppers. Untreated peppers exhibited rot and color change indices of 19.23% and 43.59%, respectively, while peppers subjected to 0 ℃ for 5.25 h and 4 ℃ for 0.75 h showed no color change or rot. Cold acclimation treatment at 4 ℃ for 0.75 h delayed water loss, reduced respiration rate, inhibited malondialdehyde accumulation and delayed the degradation of chlorophyll and vitamin C during storage. **Conclusion**　Cold acclimation represents a cost-effective, chemical-free preservation strategy that effectively inhibits quality deterioration in most edible peppers during storage. It significantly extends the shelf life of bell peppers and maintains their postharvest quality. This approach offers clear industrial value in mitigating postharvest losses and ensuring the supply of high-quality vegetables.

KEY WORDS: cold acclimation; cold resistance; edible peppers varieties; chilling injury; storage quality

0　引　言

辣椒是我国重要的蔬菜品种, 营养丰富, 富含多种维生素, 深受消费者喜爱[1]。辣椒喜热, 不同种类、不同品种辣椒适宜的贮藏温度不同。目前, 低温贮藏是辣椒及其他果蔬最常用的保鲜方法, 大多数辣椒适宜的贮藏温度在 7~10 ℃[2], 低温能提高果实抗氧化能力, 提升食用品质, 抑制有害微生物活动、减缓呼吸和蒸腾作用带来的损耗, 从而延长产品的货架期[3]。辣椒长时间处于低温环境中会发生冷害, 表现为果实表面的点状及水渍状凹陷、种子褐变、花萼及果柄的褐变, 显著降低辣椒货架品质及贮藏期限, 加速贮藏期内品质劣变及腐败进程[4]。冷害现象的发生限制了低温技术在采后辣椒贮藏中的应用[5]。张敏等[6]曾系统综述了果蔬低温贮藏冷害的生理机制与调控技术; 林启昉等[7]研究了贮藏温度对辣椒品质及抗氧化性的影响。赵宇瑛等[8]则综述了热处理对采后果蔬冷害的调控作用。

冷锻炼是一种低温预处理技术, 该技术通过短时间内快速降低果蔬温度(通常至接近冰点), 然后再转移到适宜的长期贮藏温度, 可激发果蔬体内的应激反应, 提升果蔬抗氧化能力和抗寒性, 有效抑制果蔬腐烂、冷害和颜色变化等问题, 从而延长货架期并保持外观品质[8]。祝美云等[9]和魏巍等[10]则分别研究了冷锻炼对桃果实和香蕉果实耐冷性的影响。此外, 刘璐等[11]和李楠[12]探讨了双低温处理及脂类复合脱落酸处理对青椒活性氧代谢和贮藏品质的影响, 赵瑛博[13]以青椒为研究对象, 探究了冷处理对青椒膜脂代谢的影响, 白雪蓉等[14]以库尔勒香梨为研究对象, 用 0 ℃冰水处理 10 min, 发现冷锻炼处理能够抑制果实褐变; 采用 0 ℃处理西葫芦 30 min, 能够维持果实硬度, 抑制过氧化氢酶(catalase, CAT)酶失活, 延长贮藏期限[15]。以杨桃为研究对象, 0 ℃冷库冷锻炼处理 9 h, 能有效保持杨桃体内的抗氧化物质, 延缓抗坏血酸的降解, 减少贮藏后期总酚的损失[16]。GU 等[17]的研究表明冷锻炼处理可以保持采后甜樱桃果实的贮藏品质, 并诱导冷锻炼结构蛋白的相对表达。张毅等[18]研究了不同贮藏温度对甘薯块根品质的影响, 发现低温结合适宜湿度可显著延缓甘薯品质劣变。这些研究表明, 冷锻炼处理可以延缓果蔬的冷害和衰老, 且依赖于处理温度、时间这两个核心参数, 但对于品种这个重要的影响因素, 研究的则比较少。

本研究以 6 个常见品种菜用椒(菜椒、黄彩椒、尖青椒、杭椒、螺丝椒、小米辣)为研究对象, 使用 0 ℃与 4 ℃ 2 个冷锻炼温度和 4 个处理时间, 分析菜用椒对冷锻炼处理的响应情况, 探讨菜用椒适宜的冷锻炼处理参数及其对贮藏品质的影响, 以期为筛选合适的贮藏条件, 提高菜用椒贮藏品质, 提供技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

所用菜用椒品种为菜椒、黄彩椒、尖青椒、杭椒、螺丝椒、小米辣, 产地为山东省寿光市纪台镇蔬菜种植基地。选取果实大小、成熟度一致, 色泽相近, 无机械损伤的菜用椒果实。采摘时初始温度为(24±1) ℃, 采摘后 3 h 内送往实验室。5 层瓦楞纸箱(长×宽×高=20 cm×40 cm× 15 cm, 山东世纪阳光纸业集团有限公司); 内衬塑料保鲜袋[聚乙烯(polyethylene, PE), 厚度为 4 丝, 山东亚新塑料包装有限公司]。

草酸、三氯乙酸(国药集团化学试剂有限公司); 2,6-二氯酚靛酚、磺基水杨酸(山东科源生化有限公司); 无水乙醇(广州市锦源化学有限公司); 氢氧化钠、冰乙酸、磷酸、硫代巴比妥酸(天津市恒兴化学试剂制造有限公司); 抗坏血酸、茚三酮、*L*-脯氨酸(天津市大茂化学试剂厂); 碳酸氢钠(天津市光复科技发展有限公司)。

1.2　仪器与设备

精创 RC-4 温度记录仪(江苏省精创电气股份有限公司); UV-5500PC 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); TGL-16M 台式高速冷冻离心机(湘仪离心机仪器有限公司); A11B S025 液氮研磨仪(艾卡仪器设备有限公司); YDS-20 液氮容器(乐山市东亚机电工贸有限公司); HHS-21-8 电热恒温水浴锅(博讯实业有限公司医疗设厂); ME104E 电子天平(精度 0.1 mg, 梅特勒托利多仪器有限公司); PAL-Tea 爱拓自动数显折射仪(青岛明博环保科技有限

公司); GY-2 型硬度计(浙江拖普仪器有限公司); MDF-682 超低温冰箱(楚柏实验室设备有限公司); DDS-307A 型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司); SB-800 DTD 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); SKS-BM-S2 便携式复合气体检测仪(广东斯柯森气体检测设备有限公司)。

1.3 处理方法

采用 5 层瓦楞纸箱内衬 PE 塑料保鲜袋处理菜用椒, 包装内菜用椒重量为 3.0 kg, 处理完成后分别置于 0 ℃、4 ℃ 2 个常见的商用冷锻炼温度的冷库中, 每隔 3 h 入冷库观察菜用椒冷害发生情况, 待菜用椒表面出现明显冷害表征时停止观察, 记录此时的时间。由于冷害的发生一般早于症状的显现, 因此, 将在冷锻炼温度下出现冷害表征的前 3 h 定义为 M 值, 认定其为冷害可能发生的时间, 即预估最大冷锻炼时间(M)。

确定预估最大冷锻炼时间(M)后, 为观察菜用椒是否在移出冷锻炼环境后发生冷害, 设定 0、1/4M、1/2M、3/4M、M 这 5 个时间的处理组, 包装内中心位置菜用椒插入金属热电偶温度记录仪, 记录处理完成后包装内菜用椒中心温度, 待冷锻炼处理结束后移入 10 ℃冷库中贮藏。记录菜用椒贮藏期内腐烂率、腐烂指数、冷害指数、后熟指数 4 项指标。

以冷锻炼效果最佳的菜椒为试验原料, 设计 3 个处理组, 分别为 0 ℃冷锻炼处理 5.25 h 后移入 10 ℃贮藏组、4 ℃冷锻炼处理 0.75 h 后移入 10 ℃贮藏组; 10 ℃直接贮藏组; 分别在贮藏 0、10、20、30 d 时测定生理和品质。

1.4 指标测定

1.4.1 冷锻炼过程中菜用椒果心温度的变化规律

将温度记录仪探头垂直插入包装内中心菜用椒果实横径最大处, 银色探头完全浸没于果实中, 温度记录仪探头受到外界环境温度的变化输出相应的电信号并存储在设备中, 监测时间间隔为 1 min, 至最大冷锻炼时间时停止监测。将采集的温度数据下载到计算机, 通过“精创数据中心”软件进行数据分析, 生成降温曲线的图表。

1.4.2 冷锻炼对菜用椒外观品质的影响

(1)冷害指数

冷害指数的计算参照陈学红等[19]的方法测定, 将冷害指数分为 4 级, 1 级冷害: 表面轻微斑点状凹陷, 冷害面积小于 5%; 2 级冷害: 表面斑点状凹陷, 轻微水渍状冷害伤, 冷害面积 5%~25%; 3 级冷害: 表面斑点状凹陷, 水渍状冷害伤, 冷害面积>25%~50%; 4 级冷害: 表面斑点状凹陷, 水渍状冷害伤, 冷害面积大于 50%。冷害指数按公式(1)计算。

$$\text{冷害指数}/\%=\sum\frac{\text{冷害级别}\times\text{该级果实数}}{\text{最高冷害级别}\times\text{总果实数}}\times100\% \quad (1)$$

(2)腐烂率及腐烂指数

腐烂率和腐烂指数的计算参照陈学红等[19]的方法。将腐烂指数分为 4 级, 1 级腐烂: 腐烂面积小于 5%; 2 级腐烂: 腐烂面积 5%~25%; 3 级腐烂: 腐烂面积>25%~50%; 4 级腐烂: 腐烂面积大于 50%。腐烂率、腐烂指数分别按照公式(2)~(3)计算。

$$\text{腐烂率}/\%=\frac{\text{腐烂果实数}}{\text{总果实数}}\times100\% \quad (2)$$

$$\text{腐烂指数}/\%=\sum\frac{\text{腐烂级别}\times\text{该级果实数}}{\text{最高腐烂级别}\times\text{总果实数}}\times100\% \quad (3)$$

(3)转色指数

转色指数的计算参照陈学红等[19]的方法测定, 将转色指数分为 4 级, 1 级转色: 转色面积小于 5%; 2 级转色: 转色面积 5%~25%; 3 级转色: 转色面积>25%~50%; 4 级转色: 转色面积大于 50%。转色指数按照公式(4)计算。

$$\text{转色指数}/\%=\sum\frac{\text{转色级别}\times\text{该级果实数}}{\text{最高转色级别}\times\text{总果实数}}\times100\% \quad (4)$$

1.4.3 冷锻炼对菜用椒生理代谢和贮藏品质的影响

(1)呼吸强度

用气体分析仪测定 CO_2 体积分数[20]。测定时称取 1.0 kg 左右的菜椒, 放置于容积 2.5 L 的烧杯中套袋密封, 置于常温环境中 1 h, 插入测定并记录 CO_2 的体积分数。呼吸强度按照公式(5)计算。

$$\text{呼吸强度}/[\text{mg } CO_2/(\text{kg}\cdot\text{h})]=\frac{V_1\times N\times1.977\times1000}{m_1\times t}\times100\% \quad (5)$$

式中: V_1 为呼吸室容积, L; N 为 CO_2 体积分数, %; m_1 为样品质量, kg; t 为放置时间, h; 1.977 g/L 为常温常压下 CO_2 的密度。

(2)丙二醛含量

丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量参照曹建康等[21]的方法测定。2 g 左右菜用椒样品在 5.0 mL 三氯乙酸溶液(100 g/L)中研磨, 4 ℃下离心 20 min (10000 r/min)收集上清液。反应试管中加入 2.0 mL 上清液和 2.0 mL 硫代巴比妥酸溶液(0.67%)并充分混匀, 煮沸 20 min 待冷却至室温后 4 ℃下离心 20 min (10000 r/min)。测定反应混合物 450、532、600 nm 处吸光值, MDA 含量按照公式(6)计算。

$$\text{丙二醛含量}/(\mu\text{mol/kg FW})=\frac{[6.45\times(A-B)-0.56\times D]\times V_2}{V_s\times m_2} \quad (6)$$

式中: A 为 OD_{532}; B 为 OD_{600}; D 为 OD_{450}; V_2 为提取液总体积, mL; V_s 为测定时所加的样液体积, mL; m_2 为样品质量, g。

(3)失重率

采用称量法[22]测定, 失重率按照式(7)计算。

$$\text{失重率}/\%=\frac{\text{贮藏前果实质量}-\text{贮藏后果实质量}}{\text{贮藏前果实质量}}\times100\% \quad (7)$$

(4)可溶性固形物含量

可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量使用爱拓自动数显折射仪进行测定[20], 结果以 ºBrix 表示。

(5)叶绿素含量

参照曹建康等[21]的方法。称取 2.0 g 左右的菜用椒置于研钵, 加入 5.0 mL 95%乙醇, 研磨至匀浆后转移至 25 mL 容量瓶中并定容, 4 ℃冰箱中避光提取 12 h, 提取完成后测定 666 nm 与 645 nm 下吸光度。重复以上操作, 平行测定 3 次。叶绿素含量按照式(8)计算。

$$\text{叶绿素含量/(mg/100 g)}=\frac{(7.18\times \mathrm{OD}_{666}+17.32\times \mathrm{OD}_{645})\times V_4}{m_4} \tag{8}$$

式中: OD_{666}、OD_{645} 为 666 nm、645 nm 波长下的吸光度; V_4 为上清液总体积, mL; m_4 为样品质量, g。

(6)维生素 C 含量

参照 GB 5009.86—2016《食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定》的 2,6-二氯靛酚滴定法测定。准确量取维生素 C (vitamin C, VC)标准溶液(1.000 mg/mL) 1 mL 于 50 mL 锥形瓶, 加入 10 mL 草酸(20 g/L)混匀。用 2,6-二氯靛酚溶液滴定, 得到 2,6-二氯靛酚溶液对 VC 标准溶液的滴定度。将 20 g 菜用椒和 20 mL 草酸混合物打成匀浆。量取 20 mL 匀浆定容至 100 mL 容量瓶, 定容后置于 4 ℃冰箱内冷藏 10 min。用纱布滤过样液, 准确量取 10 mL 滤液至 50 mL 锥形瓶。用 2,6-二氯靛酚溶液滴定至粉红色且 15 s 不褪色, 记录滴定消耗的体积 V_3, VC 含量按照式(9)计算。

$$\text{VC 含量/(mg/100 g)}=\frac{V_3-V_0\times T\times A_1}{m_3\times 100} \tag{9}$$

式中: V_3 为滴定样品所消耗滴定液的体积, mL; V_0 为滴定空白溶液所消耗滴定液的体积, mL; T 为 2,6-二氯靛酚溶液的滴定度; A_1 为稀释倍数; m_3 为样品质量, g。

1.5　数据处理

使用 Excel 2016 进行数据整理及误差分析, 使用 GraphPad 10.1.2 及 Origin 2021 绘制图表。采用 SPSS-11.5 进行显著性分析, $P<0.05$ 表示差异显著。采用方差分析(analysis of variance, ANOVA)程序进行差异性分析。

2　结果与分析

2.1　冷锻炼处理菜用椒果心温度的变化

不同冷锻炼温度(0 ℃和 4 ℃)处理时各品种菜用椒果心温度的变化曲线如图 1 所示。菜椒温度下降迅速, 0 ℃冷锻炼处理 3 h 时, 温度已经降至 10 ℃左右, 而 4 ℃冷锻炼处理时, 下降速率稍低于 0 ℃。尖青椒温度下降较缓慢, 在 7 h 内逐步降低。在不同冷锻炼温度下, 两条曲线显示出微小差异, 但整体趋势相似。黄彩椒温度呈现快速下降趋势, 0 ℃条件下的最初 3 h 内, 迅速从 15 ℃降低到 5 ℃左右, 两条曲线的温度最低点有所不同; 杭椒温度下降较慢, 整个过程持续 3 h, 最低温度约 7 ℃; 螺丝椒温度下降趋势较为均匀, 两个温度影响差异较小。小米辣温度快速下降, 尤其在最初 6 h 内降温速度最快, 9 h 随后趋于平缓。这表明, 菜椒、黄彩椒、小米辣 3 个品种降温迅速, 尖青椒、杭椒和螺丝椒降温较慢。0 ℃冷锻炼比 4 ℃可更快地降低果心温度。

2.2　冷锻炼处理菜用椒果实冷害发生的时间

表 1 列了不同冷锻炼温度(0 ℃和 4 ℃)下各品种菜用椒的冷害发生时间。由表 1 可以看出, 各品种对低温的耐受性有较大差异。尖青椒、杭椒、螺丝椒对低温高度敏感,

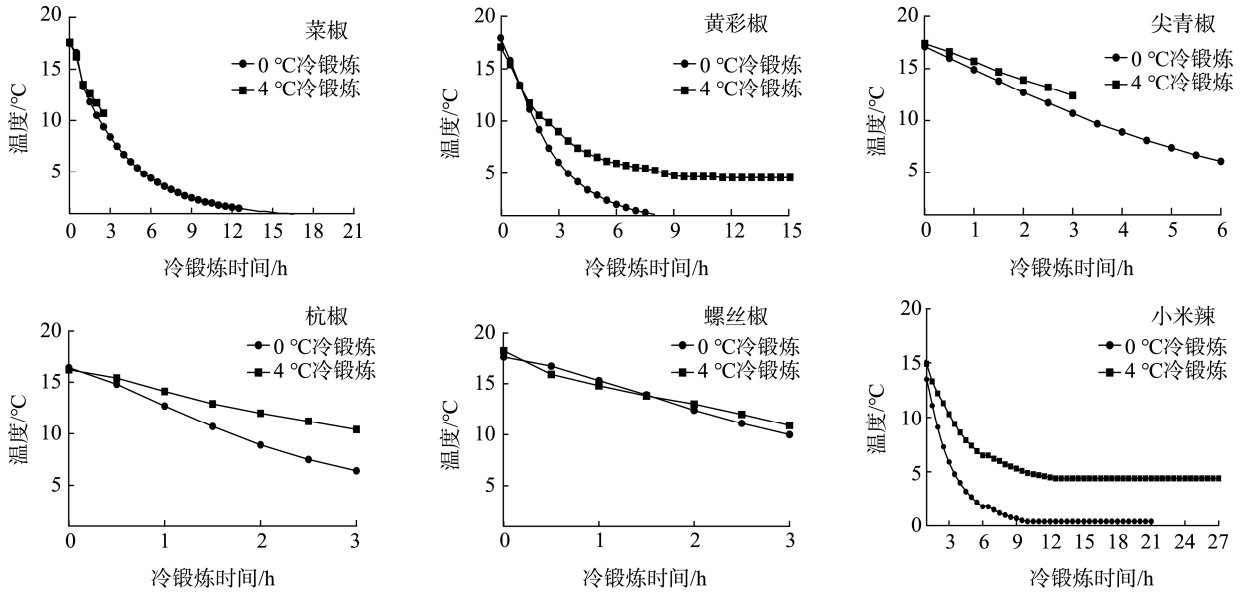


图 1　冷锻炼过程中各品种菜用椒的果心温度变化

Fig.1　Changes in core temperature of various varieties of edible peppers during cold acclimation treatment

无论 0 ℃还是 4 ℃, 冷害发生时间都较短。黄彩椒、杭椒和螺丝椒的冷害发生时间在两种温度下没有变化。菜椒在 0 ℃温度环境贮藏时冷害发生时间为 24 h, 远高于 4 ℃温度环境贮藏时的 6 h, 表明菜椒于 0 ℃温度环境中表现出更强的冷害耐受性。尖青椒的冷害发生时间由 4 ℃的 6 h 延长到 0 ℃的 9 h。小米辣具有最强的耐冷能力, 在 0 ℃和 4 ℃条件下冷害发生时间分别为 24 h 和 30 h, 明显高于其他品种。XU 等[23]的研究表明, 不同品种菜用椒在 4 ℃环境中的耐寒性存在显著差异。同样的, 在 XU 等[24]的另一项研究中发现, 耐寒品种的菜椒贮藏于小于 4 ℃的低温环境时, 其冷害发生时间相较于易冷害的品种可推迟 5 d 以上。

2.3 冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏 30 d 对菜用椒外观品质的影响

2.3.1 冷害指数分析

菜用椒是典型的冷敏性蔬菜, 表征为果皮圆点状凹陷、竖装条纹及水渍状冷害斑等[25]。冷害指数是反映菜用椒果实损害程度的指标, KONG 等[26]将菜椒从 4 ℃贮藏环境中转移到室温条件下观察到更为严重的斑点状冷害, 主要表现为较大的冷害斑点和金属片褐变。6 个品种中, 菜椒、黄彩椒、杭椒发生了冷害, 而其余 3 个品种未发生冷害, 因此图 2 只列出了这 3 个品种的冷害数据。由图 2 可知, 两个温度的冷锻炼处理均会导致菜用椒冷害的发生, 大多发生在贮藏的第 10~15 d, 且冷锻炼处理的时间越长, 冷害越明显, 特别是大于 1/2*M*(最大冷锻炼时间)时。菜椒在 0 ℃和 4 ℃这 2 个冷锻炼温度下均表现出冷锻炼时间延长至一定阈值后冷害指数下降的现象, 这一规律可能归因于冷锻炼诱导的植物抗逆机制动态平衡: 短期冷锻炼会引发细胞膜损伤和代谢紊乱, 导致冷害指数上升; 而当冷锻炼时间超过临界点(0 ℃达 5.25 h 或 4 ℃达 0.75 h)时, 菜椒通过激活抗氧化酶系统、积累渗透调节物质以及修复膜脂结构等生理适应反应, 从而显著提升低温耐受性[27], 表现为冷害指数回落。结合图 1 菜椒冷锻炼过程中果心温度变化, 4 ℃的温度条件能更快地激发菜椒的抗冷代谢系统。

表 1 不同冷锻炼处理的菜用椒最大冷害发生时间和预估最大冷锻炼时间(h)

Table 1 Maximum chilling injury occurrence time and the estimated maximum cold acclimation treatment time for edible peppers under different cold acclimation treatment (h)

菜用椒品种	0 ℃冷锻炼时最大冷害发生时间(*M*+3)	0 ℃冷锻炼时最大冷锻炼时间(*M*)	4 ℃冷锻炼时最大冷害发生时间(*M*+3)	4 ℃冷锻炼时最大冷锻炼时间(*M*)
菜椒	24	21	6	3
尖青椒	9	6	6	3
黄彩椒	18	15	18	15
杭椒	6	3	6	3
螺丝椒	6	3	6	3
小米辣	24	21	30	27

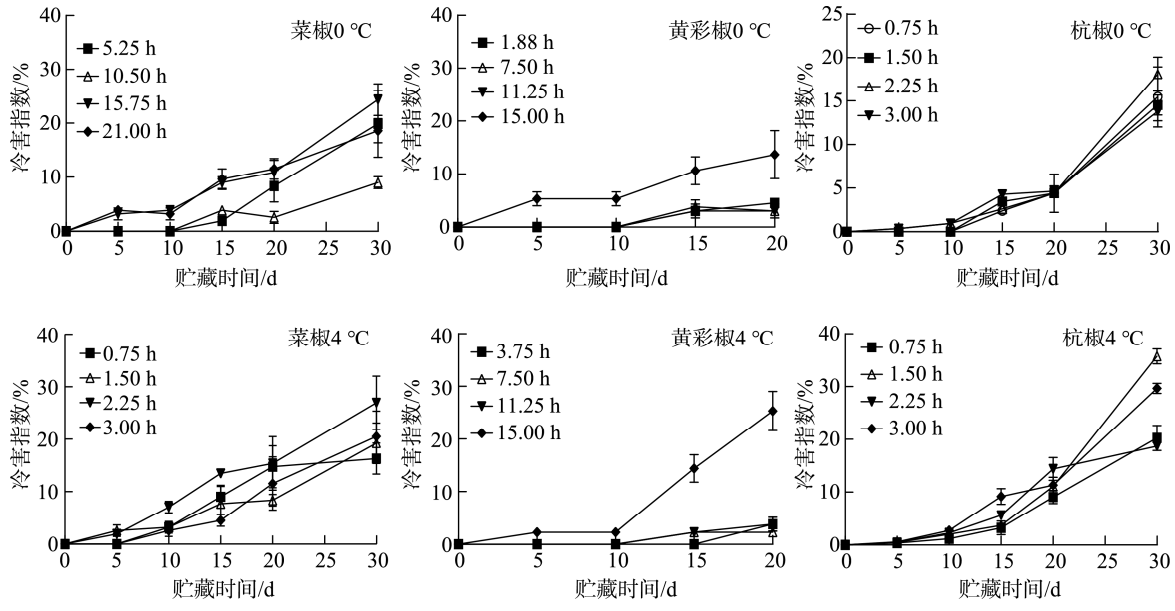


图 2 冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏 30 d 时菜用椒的冷害指数

Fig.2 Chilling injury index of edible peppers after cold acclimation treatment and storage at 10 ℃ for 30 d

2.3.2　腐烂情况分析

由表 2 知, 不同菜用椒品种在冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏期间的腐烂率和腐烂指数表现出显著差异, 总体上冷锻炼能够有效延缓菜用椒的腐烂进程, 其中菜椒和尖青椒未处理组在贮藏 30 d 后腐烂率和腐烂指数分别达到 51.28%和 19.23%与 50.00%和 17.81%, 而菜椒经过 0 ℃短时冷锻炼 5.25 h 及 4 ℃冷锻炼 0.75 h 处理的菜椒腐烂率和腐烂指数在整个贮藏期间均保持为 0, 表明短时低温处理具有显著的保鲜效果, 但处理时间过长如 0 ℃冷锻炼 10.50 h 虽在前期有效, 30 d 后腐烂率升至 56.41%, 这表明过长低温可能一定程度上造成了组织损伤; 尖青椒经过不同冷锻炼时间处理后腐烂率和腐烂指数总体低于未处理组, 但不同温度和时间组合效果差异明显, 短时低温处理仍更优; 杭椒本身耐储藏, 未处理 30 d 腐烂率仅 5.71%, 冷锻炼略微降低了腐烂指数, 但总体变化不大; 冷锻炼未能延缓螺丝椒贮藏期内腐烂变质。不同品种菜用椒的冷锻炼效果存在差异, 其中部分品种在贮藏 30 d 后仍出现较高腐烂率, 表明品种本身耐贮藏性以及冷锻炼条件共同影响储藏期腐烂情况, 总体规律表明短时冷锻炼能够显著降低菜用椒果实的腐烂率和腐烂指数, 而过长时间的低温处理可能导致后期腐烂加剧。

2.3.3　转色指数分析

颜色是评价菜用椒衰老和商品性的重要指标[28]。图 3 为冷锻炼处理对 4 个绿色品种的菜用椒转色指数的影响。由图 3 可知, 冷锻炼处理能够抑制菜椒、尖青椒、螺丝椒的转色, 其中 0 ℃×5.25 h 处理、4 ℃×0.75 h 处理组菜椒至贮藏结束时(30 d), 仍未发生转色, 而对照组转色指数达 43.59%; 0 ℃×1.50 h 处理、4 ℃×1.50 h 处理组尖青椒至贮藏结束时(30 d)分别为 11.25%和 5.00%, 而对照组转色指数达 17.08%; 0 ℃×0.75 h 处理、4 ℃×3.00 h 处理组螺丝椒至贮藏结束时(30 d)分别为 7.91%和 11.25%, 而对照组转色指数达 16.67%。冷锻炼处理促进了杭椒的转色, 各处理组的转色指数均高于对照组, 因此, 从转色指数来讲, 杭椒不适合冷锻炼处理。

2.4　冷锻炼处理对菜椒贮藏品质的影响

由以上的实验结果及图 4 可知, 菜椒对冷锻炼处理有明显的正向响应, 且处理参数组合中以 0 ℃×5.25 h、4 ℃×0.75 h 两个处理组的效果较为显著, 因此, 本研究选择菜椒进行这两个处理, 以直接在 10 ℃下贮藏的菜椒为对比, 分析了冷锻炼处理对菜椒贮藏品质和生理代谢的影响。

由图 5a 可知, 菜椒在 10 ℃贮藏过程中, 无呼吸高峰出现。对照组在整个贮藏期呼吸强度一直高于两个冷锻炼处理组, 其中, 0 ℃×5.25 h 处理组的呼吸强度最低, 表明冷锻炼可抑制辣椒的呼吸。MDA 是膜脂过氧化作用的产物,

表 2　冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏 30 d 的菜用椒果实腐烂率和腐烂指数

Table 2　Decay rate and decay index of edible peppers fruits after cold acclimation treatment and storage at 10 ℃ for 30 d

品种	处理组	腐烂率/%	腐烂指数/%	品种	处理组	腐烂率/%	腐烂指数/%
菜椒	0 h	51.28±3.63^{a}	19.23±1.56^{b}	尖青椒	0 h	50.00±4.08^{a}	17.81±2.70^{a}
	0 ℃×5.25 h	0.00^{f}	0.00^{e}		0 ℃×1.50 h	41.67±2.35^{ab}	14.06±1.56^{ab}
	0 ℃×10.50 h	56.41±3.62^{a}	25.48±1.56^{a}		0 ℃×3.00 h	30.00±4.08^{bc}	7.18±1.02^{c}
	0 ℃×15.75 h	10.25±3.63^{e}	2.89±0.91^{d}		0 ℃×4.50 h	38.33±2.35^{ab}	10.00^{bc}
	0 ℃×21.00 h	38.46^{b}	19.71±0.91^{b}		0 ℃×6.00 h	35.00±4.08^{abc}	8.75±1.02^{c}
	4 ℃×0.75 h	0.00^{f}	0.00^{e}		4 ℃×0.75 h	35.00±7.07^{abc}	11.86±1.81^{abc}
	4 ℃×1.50 h	25.64±3.63^{c}	25.50±1.90^{a}		4 ℃×1.50 h	16.67±4.71^{c}	10.42±0.59^{bc}
	4 ℃×2.25 h	17.94±3.63^{d}	6.73±0.91^{c}		4 ℃×2.25 h	26.67±2.35^{bc}	11.83±0.52^{abc}
	4 ℃×3.00 h	0.00^{f}	0.00^{e}		4 ℃×3.00 h	33.33±2.35^{bc}	11.25±1.02^{abc}
杭椒	0 h	5.71^{c}	3.57±0.29^{b}	螺丝椒	0 ℃×0 h	26.25±4.08^{bc}	15.41±2.57^{c}
	0 ℃×0.75 h	10.95±3.60^{a}	5.24±1.31^{a}		0 ℃×0.75 h	27.50±7.07^{bc}	19.17±2.94^{bc}
	0 ℃×1.50 h	10.95±0.82^{a}	3.81±0.34^{b}		0 ℃×1.50 h	51.25±2.35^{a}	23.33±4.25^{b}
	0 ℃×2.25 h	5.71±1.43^{c}	2.14±0.29^{c}		0 ℃×2.25 h	35.00±4.71^{b}	21.25±3.54^{bc}
	0 ℃×3.00 h	2.86^{d}	2.26±0.33^{c}		0 ℃×3.00 h	23.75±2.36^{c}	17.08±1.56^{c}
	4 ℃×0.75 h	5.23±0.82^{c}	2.97±0.16^{b}		4 ℃×0.75 h	31.25±6.24^{b}	20.83±1.56^{b}
	4 ℃×1.50 h	6.19±1.65^{bc}	2.50±0.50^{bc}		4 ℃×1.50 h	46.26±6.23^{a}	34.16±3.84^{a}
	4 ℃×2.25 h	2.38±0.67^{d}	2.02±0.67^{c}		4 ℃×2.25 h	35.00±4.08^{b}	22.92±0.59^{b}
	4 ℃×3.00 h	7.14^{b}	4.76±0.33^{a}		4 ℃×3.00 h	26.66±2.36^{c}	17.91±0.70^{c}

注: 不同字母表示同一品种不同处理组之间差异显著(P<0.05)。

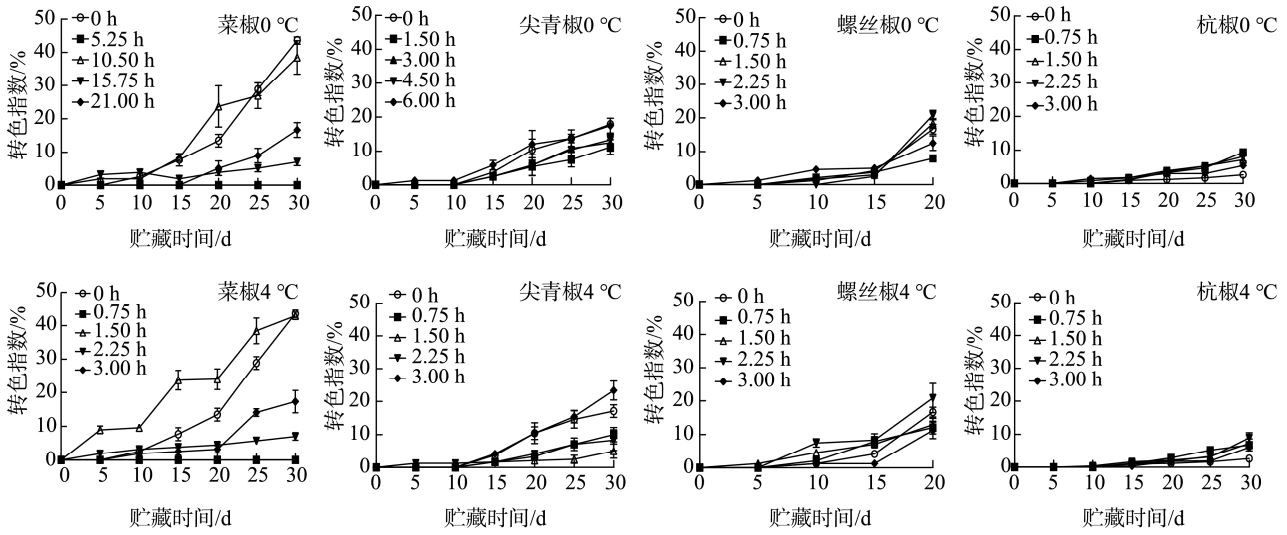


图 3 冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏 30 d 对菜用椒果实转色指数的影响

Fig.3 Effects of cold acclimation treatment followed by storage at 10 ℃ for 30 d on the color change index of edible peppers fruits

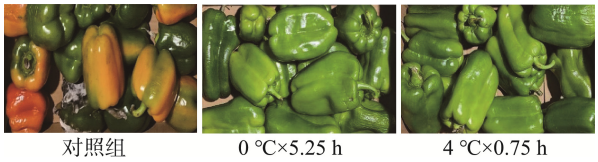


图 4 菜椒冷锻炼处理后转入 10 ℃贮藏 30 d 时的整体感官效果

Fig.4 Overall sensory effects of bell peppers after cold acclimation treatment and storage at 10 ℃ for 30 d

可以反应膜脂过氧化程度和植物衰老状态，数值越小表明越新鲜[2]。由图 5b 可知，各处理组 MDA 含量均呈上升趋势，冷锻炼处理组相对较低，其中 0 ℃×5.25 h 处理组第 30 d 时 MDA 含量为 0.196 μmol/g FW，为对照组的 57.8%，略优于 4 ℃×0.75 h 处理组的 0.219 μmol/g FW。说明冷锻炼处理能够抑制菜椒的膜脂过氧化程度及细胞衰老。由图 5c 可知，随着贮藏时间的延长，各处理组的失重率均呈上升趋势。其中，0 ℃×5.25 h 处理组的增幅最大，表明该处理组贮藏过程中失重最为严重。4 ℃×0.75 h 处理组贮藏失重率变化较小，贮藏结束时失重率仅有 8.71%，为 0 ℃冷锻炼 5.25 h 处理组的 72.04%，表明该处理能够有效减少失重。

由图 5d 可知，随着贮藏时间的延长，菜椒果实的 TSS 含量总体均呈现下降趋势，冷锻炼组均高于对照组(10 ℃贮藏)，30 d 时，0 ℃×5.25 h 处理组与 4 ℃×0.75 h 处理组 TSS 含量分别为 2.37°Brix 和 2.60°Brix，均高于对照组的 2.23 mg/g。由图 5e 可知，贮藏期内菜椒叶绿素含量逐渐下降，但冷锻炼处理组始终高于对照组。其中 4 ℃×0.75 h 处理组下降最慢，30 d 时叶绿素含量为 43.74 mg/g，明显高于对照组的 36.24 mg/g。研究表明，VC 可阻断人体内亚硝酸盐与亚硝胺的合成，具有预防癌症的作用[29–30]。由图 5f 可知，随着贮藏时间的延长，菜椒中 VC 含量逐渐降低。对照组 VC 含量下降速率最快，贮藏至 10 d 时，VC 含量为 0 d 的 80.4%。贮藏结束时 4 ℃冷锻炼 0.75 h 处理组果实 VC 含量保存率约为 67.4%，是对照组的 1.26 倍。

由上可知，冷锻炼处理可较好地保持菜椒营养品质，其中 4 ℃冷锻炼 0.75 h 处理组效果更显著。

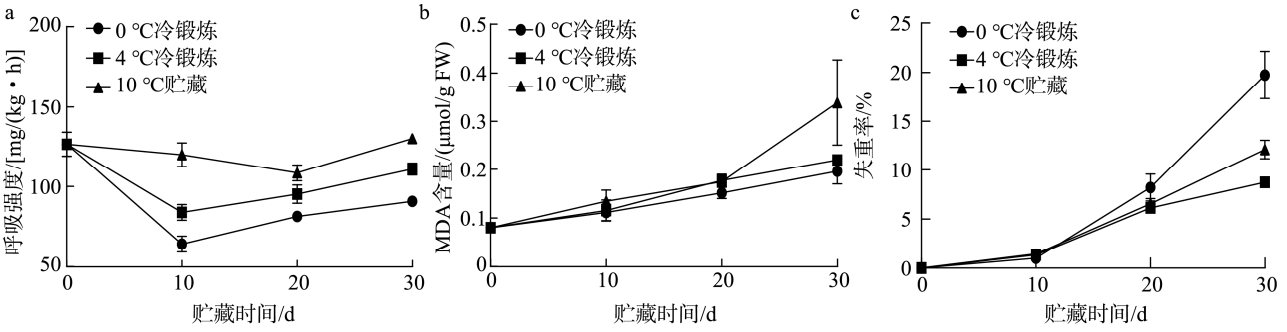


图 5 冷锻炼处理对菜椒生理代谢和贮藏品质的影响

Fig.5 Effects of cold acclimation treatment on physiological metabolism and storage quality of bell peppers

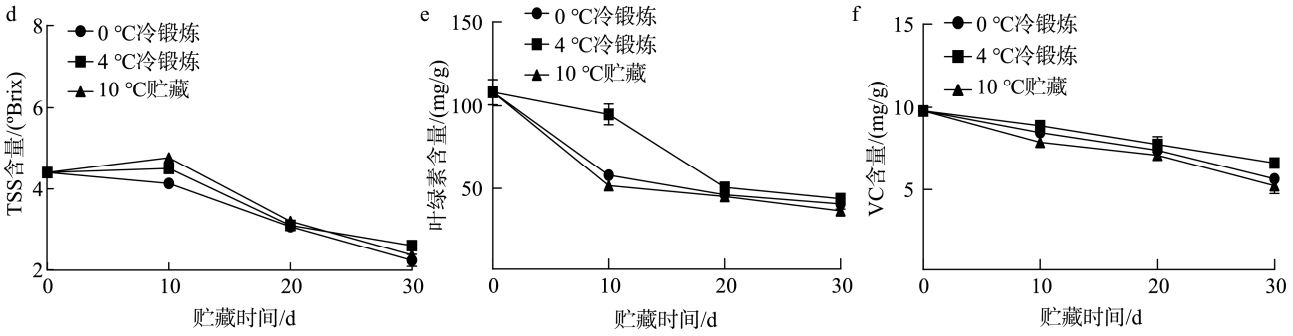


图 5(续)　冷锻炼处理对菜椒生理代谢和贮藏品质的影响

Fig.5　Effects of cold acclimation treatment on physiological metabolism and storage quality of bell peppers

3　结　论

冷锻炼处理对菜用椒的贮藏品质有显著影响, 能够在一定程度上延缓冷害、腐烂和转色, 品种因素对冷锻炼的响应差别较大, 其中菜椒冷锻炼处理的效果最佳, 且 4 ℃冷锻炼 0.75 h 能够降低呼吸速率, 抑制 MDA 积累, 维持 TSS 含量、叶绿素和 VC 含量。

本研究不仅验证了冷锻炼作为一种绿色、低成本的物理保鲜技术对延长辣椒贮藏期、维持采后品质的有效性, 也为后续探索采后低温驯化诱导果蔬抗性的生理与分子机制提供了基础。该技术在实际应用中有望减少采后损失、提升农产品供应链稳定性, 同时为同类易腐蔬果的保鲜工艺开发提供了可借鉴的路径, 兼具明确的产业价值与学术意义。

参考文献

[1] 王青, 陶乐仁, 周小辉. 真空预冷条件下相同终压不同终温对青椒贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(3): 23–28.
WANG Q, TAO LR, ZHOU XH. Effects of the same final pressure and different final temperature on the storage quality of green peppers under vacuum precooling conditions [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2019, 55(3): 23–28.

[2] BABELLAHI F, PALIWAL J, ERKINBAEV C, *et al*. Early detection of chilling injury in green bell peppers by hyperspectral imaging and chemometrics [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162: 111100.

[3] LIU B, JIAO W, WANG B, *et al.* Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 249: 100–109.

[4] 葛琬莹. 转录因子 CaMYB340 在采后青椒冷害发生中的调控作用机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
GE WY. Regulatory mechanism of transcription factor CaMYB340 in chilling injury of post-harvest green pepper [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[5] 解越. 低温逆境下冷敏果实组织冷损伤及半致死温度的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
JIE Y. Study on cold damage and semi-lethal temperature of cold-sensitive fruit tissues under low temperature stress [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.

[6] 张敏, 解越. 采后果蔬低温贮藏冷害研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(1): 1–11.
ZHANG M, JIE Y. Research progress on chilling injury of post-harvest fruits and vegetables during low-temperature storage [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2016, 35(1): 1–11.

[7] 林启昉, 吴木兰, 林淑婷, 等. 不同贮藏温度对辣椒采后贮藏品质的影响[J]. 热带农业科学, 2025, 11(1): 1–7.
LIN QF, WU ML, LIN ST, *et al*. Effects of different storage temperatures on postharvest storage quality of peppers [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2025, 11(1): 1–7.

[8] 赵宇瑛, 吴广宇. 采后热处理对果蔬贮藏的影响研究进展[J]. 长江大学学报(自然科学版)农学卷, 2010, 7(2): 83–85.
ZHAO YY, WU GY. Research progress on the effects of postharvest heat treatment on fruit and vegetable storage [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition) Agronomy, 2010, 7(2): 83–85.

[9] 祝美云, 白欢, 梁丽松, 等. 冷锻炼处理减轻低温贮藏桃果实冷害的能量代谢机理[J]. 农业工程学报, 2012, 23(1): 41.
ZHU MY, BAI H, LIANG LS, *et al*. Energy metabolism mechanism of cold conditioning to alleviate chilling injury in peach fruit during low-temperature storage [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 23(1): 41.

[10] 魏巍, 郝利平, 张誉丹, 等. 电生功能水冷激处理对香蕉耐冷性的影响[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(5): 5.
WEI W, HAO LP, ZHANG YD, *et al*. Effect of electro-functional water cold shock treatment on the cold tolerance of banana [J]. Storage and Process, 2015, 15(5): 5.

[11] 刘璐, 陶乐仁, 周小辉. 低温和双低温处理对青椒保藏品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2017, 53(5): 12–16.
LIU L, TAO LR, ZHOU XH. Effects of low temperature and double low temperature treatment on storage quality of green peppers [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2017, 53(5): 12–16.

[12] 李楠. 脂类和脱落酸提高采后绿辣椒抗冷性的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020.
LI N. Study on improving cold resistance of postharvest green peppers by lipids and abscisic acid [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.

[13] 赵瑛博. 基于脂质组学的青椒冷害发生机制及其调控研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
ZHAO YB. Study on the mechanism of chilling injury and its regulation in green pepper based on lipidomics [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[14] 白雪蓉, 李雅玲, 郑贺云, 等. 冷激处理对库尔勒香梨贮藏品质的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(11): 3–9.
BAI XR, LI YL, ZHENG HY, *et al*. Effects of cold shock treatment on storage quality of Korla fragrant pear [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(11): 3–9.

[15] 李玉申, 张敏, 王红婷, 等. 冷热温激处理对西葫芦贮藏生理特性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2024, 51(5): 783.
LI YS, ZHANG M, WANG HT, *et al*. Effects of cold and hot temperature shock treatments on storage physiological characteristics of zucchini [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2024, 51(5): 783.

[16] 孙金金. 杨桃冷藏保鲜及冷激处理技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
SUN JJ. Research on cold storage and cold shock treatment technology of carambola [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.

[17] GU S, XU D, ZHOU F, *et al*. Cold shock treatment maintains quality and induces relative expression of cold shock domain protein (CSDPs) in postharvest sweet cherry [J]. Scientia Horticulturae, 2020, 262: 109058.

[18] 张毅, 庞林江, 岳瑞雪, 等. 不同贮藏温度对冷凉地区甘薯块根品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 172–180.
ZHANG Y, PANG LJ, YUE RX, *et al*. Effects of different storage temperatures on the quality of sweet potato tubers in cool areas [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 172–180.

[19] 陈学红, 郑永华, 杨震峰, 等. 高氧处理抑制草莓果实采后腐烂与抗病性诱导的关系[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 208–211.
CHEN XH, ZHENG YH, YANG ZF, *et al*. Relationship between high oxygen treatment inhibiting postharvest decay of strawberry fruit and inducing disease resistance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 208–211.

[20] 姜云北, 陶乐仁, 梅娜. 冷激处理对青椒生理及品质的影响[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(6): 27–31.
JIANG YB, TAO LR, MEI N. Effects of cold shock treatment on physiology and quality of green peppers [J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2015, 51(6): 27–31.

[21] 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, 2017.
CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2017.

[22] 孙小静, 王雪雅, 苏丹, 等. 不同温度对气调包装青椒贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 29–36.
SUN XJ, WANG XY, SU D, *et al*. Effect of different temperatures on the storage quality of modified atmosphere packaged green peppers [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 29–36.

[23] XU D, YUAN S, CHEN B, *et al*. A comparative proteomic and metabolomic analysis of the low-temperature response of a chilling-injury sensitive and a chilling-injury tolerant cultivar of green bellpepper [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 318: 112092.

[24] XU D, LAM SM, ZUO J, *et al*. Lipidomics reveals the difference of membrane lipid catabolism between chilling injury sensitive and non-sensitive green bell pepper in response to chilling [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 182: 111714.

[25] 邵婷婷, 张敏, 刘威, 等. 采后热水处理对青椒果实低温贮藏期间活性氧代谢及抗氧化物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 133–139.
SHAO TT, ZHANG M, LIU W, *et al.* Effects of postharvest hot water treatment on reactive oxygen metabolism and antioxidant substances in green pepper fruits during low-temperature storage [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 133–139.

[26] KONG X, GE W, WEI B, *et al*. Melatonin ameliorates chilling injury in green bell peppers during storage by regulating membrane lipid metabolism and antioxidant capacity [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 170: 111315.

[27] SZABADOS L, SAVOURÉ A. Proline: A multifunctional amino acid [J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(2): 89–97.

[28] 张萌, 曹婷婷, 程紫薇, 等. 高湿贮藏对青椒果实冷害和抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 243–250.
ZHANG M, CAO TT, CHENG ZW, *et al*. Effects of high humidity storage on chilling injury and antioxidant activity of green pepper fruits [J]. Food Science, 2021, 42(3): 243–250.

[29] 刘海燕, 蔡祥, 时文兴, 等. 几种常见蔬菜的维生素 C 含量及其加热变化规律[J]. 上海蔬菜, 2023(4): 64–66.
LIU HY, CAI X, SHI WX, *et al*. Vitamin C content of several common vegetables and its heating changes [J]. Shanghai Vegetables, 2023(4): 64–66.

[30] 陈菊, 孙小静, 苏丹, 等. 自发气调包装对不同品种青椒贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 99–106.
CHEN J, SUN XJ, SU D, *et al.* Effect of modified atmosphere packaging on storage quality of different varieties of green peppers [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 99–106.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)