齐鲁工业大学学报 第40卷 第4期 2026年8月出版
JOURNAL OF QILU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Vol.40 No.4 Aug.2026
DOI:10.16442/j.cnki.qlgydxxb.2026.04.003 【食品与生物工程】

冷锻炼处理对青椒氧化还原体系及生理代谢的影响

阚 鸿[1,2],陈庆敏[3],徐志英[2,3],李梦妮[1,4],傅茂润[1,4*],石晶盈[2*]
1.齐鲁工业大学(山东省科学院),食品科学与工程学院,山东 济南 250353;
2.山东农业大学,食品科学与工程学院,山东 泰安 271018;
3.山东农业工程学院,食品科学与工程学院,山东 济南 250100;
4.山东省健康食品资源挖掘与创制重点实验室,山东 济南 250353

摘要:适当的冷锻炼可以提高冷敏性蔬菜的抗冷能力,延长货架期。本文以青椒为研究对象,首先将青椒在0 ℃冷锻炼处理15或45 min,然后转入10 ℃贮藏30 d,解析冷锻炼处理对青椒氧化还原体系、膜脂组成的影响,以期为发现抗冷靶点提供依据。结果发现,0 ℃冷锻炼处理45 min可以延缓青椒贮藏期内可滴定酸、叶绿素、总糖及还原糖的降解;有效维持贮藏期内类黄酮、还原型谷胱甘肽含量;显著抑制丙二醛积累,贮藏结束时,处理组的丙二醛含量仅为对照组的27.13%;并且能够显著延缓CAT、POD失活,贮藏结束时,0 ℃冷锻炼45 min处理组青椒的CAT、POD活性分别较对照组高出47.06%及40.05%。贮藏1 d时,较于对照组,0 ℃冷锻炼45 min后青椒的不饱和脂肪酸(UFAs)总量达到了14.20%,较对照组高出2.40%。结果表明,适宜的冷锻炼处理可改善青椒贮藏期内营养品质,增加抗氧化能力,调节生理代谢,有效延长贮藏期。

关键词:冷锻炼;青椒;生理品质;脂肪酸代谢;氧化还原体系
中图分类号:TS205.7;S641.3 **文献标志码**:A **文章编号**:2097-2792(2026)04-20-11

Effects of cold acclimation treatment on redox system and related physiological metabolism of green pepper

KAN Hong[1,2],CHEN Qingmin[3],XU Zhiying[2,3],LI Mengni[1,4],FU Maorun[1,4*],SHI Jingying[2*]
1.Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences),
School of Food Science and Engineering,Jinan,250353,China;
2.School of Food Science and Engineering,Shandong Agricultural University,Taian,271018,China;
3.Shandong Agricultural Engineering College,School of Food Science and Engineering,
Jinan,250100,China;
4.Shandong Key Laboratory of Healthy Food Resources Exploration and Creation,Jinan,250353,China

Abstract:Appropriate cold acclimation treatment can improve the cold tolerance of cold-sensitive vegetables and extend their shelf life. This study used green peppers as the research subjects. First, the peppers were cold-conditioned at 0 ℃ for 15 or 45 minutes and then stored at 10 ℃ for 30 days. The effects of cold acclimation treatment on the redox system, membrane lipid composition were analyzed to provide a basis for identifying cold-resistance targets. Results showed that cold acclimation treatment at 0 ℃ for 45 minutes delayed the loss of titratable

收稿日期:2025-09-11 **网络出版时间**:2026-08-31
基金项目:山东省农业产业技术体系项目(SDAIT-05)
作者简介:阚鸿,硕士生;研究方向:果蔬保鲜
*通信作者:傅茂润,博士、教授;研究方向:农产品物流保鲜与高值化加工;skyfmr@163.com
石晶盈,博士、教授,研究方向:果蔬采后防腐保鲜技术;jyshi80@163.com

acid, chlorophyll, total sugar, and reducing sugar during storage; effectively maintained flavonoid and reduced glutathione levels; and significantly inhibited malondialdehyde accumulation. At the end of storage, malondialdehyde levels in the treated groups were only 19.4% of those in the control group. Cold acclimation treatment also significantly delayed the inactivation of CAT and POD. At the end of storage, CAT and POD activities in the 0 ℃ for 45 minutes group were 47.06% and 40.05% higher than those in the control group, respectively. After one day of storage, the total unsaturated fatty acids (UFAs) content of green peppers reached 14.20% after 45 minutes of cold acclimation treatment at 0 ℃, a 2.40% increase compared to the control group. These results suggest that appropriate cold acclimation treatment can improve the nutritional quality of green peppers during storage, increase antioxidant capacity, regulate physiological metabolism, and effectively extend their storage life.

Key words: cold acclimation treatment; green pepper; physiological quality; fatty acid metabolism; redox system

青椒(*Capsicum annuum L.*),又称菜椒、甜椒、柿子椒,茄科辣椒属草本植物,营养价值丰富,具有开胃消食、降压减脂和抗氧化等功效[1]。青椒原产于南美,生理代谢旺盛,采后常温下贮藏易失水萎焉。目前,青椒常用的低温贮藏温度为 7~10 ℃[2],低温能显著抑制其呼吸速率和乙烯产生,从而减缓细胞代谢过程,有助于维持青椒中的维生素 C、叶绿素、多酚类等营养和功能成分的稳定,减缓其降解,保持其食用品质和抗氧化能力[3]。

冷锻炼(Cold Acclimation Treatment)是指在采后短时间内将果蔬暴露于接近冰点的低环境中,以激发其抗逆反应、增强其冷耐性,从而提高其低温贮藏适应性的采后处理技术[4]。Mi 等[5]研究表明,0 ℃冰水混合物,冷锻炼处理有效减缓果实贮藏期间的硬度下降,其作用机制之一是通过维持水溶性果胶含量、减少果胶分解酶(β-半乳糖苷酶、果胶裂解酶活性),从而稳定果胶结构,提升果胶质水平,延长货架寿命。Yao 等[6]研究发现,冷锻炼结合谷胱甘肽处理可显著降低膜脂过氧化物含量,为抗氧化防御提供强有力支持,从而显著减缓冷害发生。Charoenphun 等[7]利用 0 ℃冷锻炼结合褪黑素处理后再低温贮藏,结果显示冷锻炼处理可延缓色素降解、抑制丙二醛(Malondialdehyde, MDA)累积、显著提高超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)等抗氧化酶活性,CLS-AsA(Ascorbate-Glutathione Cycle)循环系统(AsA、GSH 含量及其氧化还原比值)也得到增强。另外,脂肪酸组成与果蔬内源性防御酶系统在冷害形成与抑制过程中密切相关,是影响贮藏品质的关键因素之一。在低温贮藏条件下,果蔬细胞膜是首先感知冷胁迫的结构,其稳定性直接受膜脂中脂肪酸组成的影响,尤其是饱和与不饱和脂肪酸的比例变化。不饱和脂肪酸(如亚油酸、亚麻酸)含量的提升有助于维持膜的流动性,延缓膜相变,减缓离子渗漏和膜脂过氧化的发生,从而增强果蔬的低温耐受性[8]。冷锻炼处理通过诱导果蔬体内活性氧信号、激活 SOD、CAT 等抗氧化酶系统及 AsA-GSH 循环来维持氧化还原平衡[9],同时通过提升能量代谢水平、增加膜脂不饱和度和渗透调节物质来稳定细胞结构并延缓衰老[10],但目前研究仍存在机制解析不够深入、信号转导网络不清晰、处理参数缺乏标准化优化等问题,因此深入开展该研究对阐明果蔬抗冷机制、开发绿色高效的物理保鲜技术以替代化学处理、减少采后损耗、提升农产品附加值具有重要的理论价值和经济意义。

本研究以青椒为研究对象,使用 0 ℃分别冷锻炼处理 15、45 min,再转入 10 ℃进行贮藏,分析采后青椒在不同冷锻炼条件下品质、抗氧化能力及膜脂代谢的变化,探讨青椒适宜的冷锻炼处理参数及其对贮藏品质的影响,旨在明确适宜的预处理条件,延缓青椒贮藏期内品质劣变,提高贮藏品质。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

实验所用青椒品种为菜椒,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、无冷害表征的青椒果实。采摘时初始温度为(24±1) ℃,采摘 3 h 内送往实验室。

包装材料:五层瓦楞纸箱(长×宽×高 = 20 cm×40 cm×15 cm);内衬 PE(Polyethylene)保鲜袋(厚度为 4 丝,山东亚新塑料包装有限公司)。

试剂:草酸、三氯乙酸、愈木创酚、没食子酸、维生素 C 标准品、十二烷基硫酸钠、考马斯亮蓝;2,6-二氯

酚靛酚、磺基水杨酸、四甲基乙二胺、甘油(山东科源生化有限公司);无水乙醇、浓硫酸(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、30%过氧化氢、三氯乙酸、甲醇、甘氨酸、溴酚蓝(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、氮蓝四唑、福林酚、二硫苏糖醇(天津市大茂化学试剂厂);碳酸氢钠、核黄素(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、涡旋振荡器(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、微量移液器、数显果实硬度计(梅特勒托利多仪器有限公司);MDF-682 超低温冰箱(楚柏实验室设备有限公司);SB-800 DTD 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司);手持阿贝折光仪(贝尔仪器分析有限公司);pH 计(赛默飞世尔科技有限公司);GC-MS 气相色谱质谱联用仪(岛津-GL(上海)商贸有限公司);振荡器(上海天呈实验仪器制造有限公司);WD-2113A型 mini 混匀仪。

1.3 处理方法

采用 5 层瓦楞纸箱内衬 PE 塑料保鲜袋处理青椒,包装内青椒质量为 3.0 kg,处理完成后置于冷库中进行冷锻炼,冷锻炼条件为 0 ℃×15 min、0 ℃×45 min。包装内中心位置青椒插入温度记录仪,记录处理完成后包装内青椒中心温度,待冷锻炼处理结束后移入 10 ℃冷库中贮藏,分别在贮藏 0、1、10、20、30 d 时测定生理指标。

1.4 指标测定

1.4.1 温度变化及外观观察

(1)果心温度变化

将温度记录仪插入包装内中心辣椒果实内部,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,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,生成降温曲线和升温曲线的图表。

(2)冷害观察

以表面是否发生轻微斑点状凹陷作为判定青椒是否发生冷害的依据[11],在冷锻炼结束后,移入 10 ℃贮藏前,观察青椒是否发生冷害。

1.4.2 品质指标测定

(1)硬度

对辣椒赤道部位的果肉进行取样,采用数显果实硬度计测量,结果以 kg · cm^{-2}表示。

(2)TSS 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[11],结果以 kg · cm^{-2}表示。

(3)可滴定酸含量

参考杨帅[12]的测定方法,可滴定酸(Titratable Acidity,TA)利用氢氧化钠滴定法进行测定。取青椒匀浆 5 g,加水 45 mL,75 ℃水浴加热 30 min,6 000 r · min^{-1}离心 15 min,取上清液 10 mL,用 0.1 mol · L^{-1} NaOH 滴定至 pH=8.1。结果按式(1)计算。

$$w_{可滴定酸}=\frac{C_1(V_1-V_2)\times K}{m_1}\times 100\%, \tag{1}$$

式中:$w_{可滴定酸}$为可滴定酸质量分数,mg · g^{-1};C_1为氢氧化钠标准滴定溶液浓度,mol · L^{-1};V_2 为空白实验时消耗氢氧化钠标准滴定溶液的体积,mL;V_1为滴定试液时消耗氢氧化钠标准滴定;溶液的体积 m_1为样品质量,g;K 为酸换算系数(柠檬酸取 0.064),g · $mmol^{-1}$。

(4)叶绿素含量

参照曹建康等[13]的方法。称取 2.0 g 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 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(2)计算。

$$w_{叶绿素}=\frac{(K_1\times OD_{666}+K_2\times OD_{645})\times V_4}{m_4},\tag{2}$$

式中:$w_{叶绿素}$为叶绿素质量分数,mg·g^{-1};OD_{666}、OD_{645}为 666、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。K_1、K_2 分别为换算系数 7.18、17.32,mg·L^{-1}。

(5)总糖含量

参照曹建康等[13]的测定方法,采用苯酚-硫酸法测定青椒果实的总糖含量。称取 2 g 青椒样品,按料液比 1∶25(g∶mL)加入蒸馏水,1∶10(g∶mL)加入浓盐酸,摇匀后沸水浴中回流提取 1 h,合并滤液备用。取 2 mL 待测液于 25 mL 具塞试管中,依次加入 5% 的苯酚溶液 1 mL,再加入 5 mL 浓硫酸混匀,静置 5 min,在 60 ℃水浴20 min,冷却至室温,于 490 nm 处测其吸光度以同样方法测定不同浓度梯度葡萄糖标准液,标准曲线方程为 $y=0.115x+0.001$,$R^2=0.990\ 9$。根据式(3)计算样品中的总糖含量。

$$w_{总糖含量}=\frac{C_2\times V_3}{m_2\times 1\ 000},\tag{3}$$

式中:$w_{总糖}$为叶绿素质量分数,mg·g^{-1};C_2 表示从标准曲线查得的葡萄糖质量浓度,mg·mL^{-1};V_3 表示样品提取液总体积,mL;m_2 表示样品质量,g。

(6)还原糖含量

参照曹建康等[13]的测定方法,采用 3,5-二硝基水杨酸法测定青椒果实的还原糖含量。称取 0.4 g 液氮研磨后的样品,添加去离子水至 25 mL,80 ℃恒温水浴 30 min,于 10 000×g 离心 20 min,离心两次,将两次上清液全部收集在 100 mL 容量瓶中。取 0.8 mL 提取液和 0.6 mL DNS 混匀,沸水浴 5 min,冷却后再加去离子水至 10 mL,于 540 nm 波长下比色。以葡萄糖为标准溶液,葡萄糖质量为横坐标绘制标准曲线,标准曲线公式为 $y=0.421\ 4x+0.004\ 2$,$R^2=0.999\ 7$。还原糖含量的计算公式如(4)

$$w_{还原糖}=\frac{m_0\times V_4}{m_3\times V_s},\tag{4}$$

式中:$w_{还原糖}$表示为还原糖的质量分数,mg·g^{-1};m_0表示从标准曲线查得的葡萄糖质量,mg;V_4 表示样品提取液总体积,mL;m_3 表示样品质量,g;V_s表示测定时所取样品提取液体积,mL。

1.4.3　防御性氧化还原系统检测

(1)总酚含量

参照杨帅[12]的测定方法,采用福林酚法测定青椒果实的总酚含量。参照赵珊的方法。取 2 g 青椒样品,用蒸馏水定容至 5 mL,制得样品提取液。取 0.5 mL 样品提取液与 0.5 mL 福林酚试剂混匀,加入 4.0 mL 7.5%碳酸钠溶液,避光反应 1 h,于 736 nm 处测定吸光度。以没食子酸为标准品制作标准曲线,结果以干基计,表示为每 100 g 青椒中没食子酸当量质量,mg·g^{-1}。

(2)类黄酮含量

参照杨帅[12]的方法测定青椒果实中类黄酮含量。取 2 g 青椒样品,用蒸馏水定容至 5 mL,制得样品提取液。取 1.0 mL 提取液,依次加入 2.0 mL 0.1 mol·L^{-1}三氯化铝溶液和 3.0 mL 1.0 mol·L^{-1}乙酸钾溶液,室温静置 30 min 后,于 420 nm 处测定最大吸光度。以芦丁为标准品制作标准曲线,结果以干基计,表示为每 100 g 甘薯中芦丁当量质量,mg·g^{-1}。

(3)维生素 C 含量

参照冯慧敏[14]的测定方法。采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定青椒果实的维生素 C 质量分数。准确量取维生素 C(Vitamin C,VC)标准溶液(1.000 mg·mL^{-1}) 1 mL 于 50 mL 锥形瓶,加入 10 mL 草酸(20 g·L^{-1})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 20.0 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(5)计算。

$$w_{VC}=\frac{(V_3-V_0)\times T}{m_3\times 100},\tag{5}$$

式中:V_3 为滴定样品所消耗滴定液的体积,mL;V_0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,mg·mL^{-1};m_3 为样品质量,g。

(4)丙二醛含量

参照曹建康等[13]的方法测定。称取 2 g 左右菜用椒样品在 5.0 mL 三氯乙酸溶液(100 g·L^{-1})中研磨,4 ℃下离心 20 min(10 000 r·min^{-1})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(10 000 r·min^{-1})。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。

$$b_{丙二醛}=\frac{[6.45\times(A-B)-0.56\times D]\times V_2\times V_t}{V_s\times m_2}, \tag{6}$$

式中:$b_{丙二醛}$为丙二醛的质量摩尔浓度,μmol·g^{-1};A 为 OD_{532};B 为 OD_{600};D 为 OD_{450};6.45、0.56 为经验换算系数,μmol·mL^{-1};V_2 为提取液总体积,mL;V_s为测定时所加的样液体积,mL;V_t 为显色反应时反应液的总体积,mL;m_2 为样品质量,g。

(5)游离脯氨酸含量

参照李清峰[15]的方法测定。称取 2 g 青椒样品,加入 5 mL 经 4 ℃预冷后的 30 g·L^{-1}磺基水杨酸溶液进行研磨提取,转入试管中煮沸提取 10 min,期间摇匀 3 次,取出冷却至室温后,于 4 ℃,12 000×g 条件下离心 20 min,收集上清液即为游离脯氨酸提取液。吸取上清液 2 mL、酸性茚三酮溶液 3 mL 和冰乙酸溶液 2 mL 摇匀煮沸 30 min,待冷却后加入甲苯溶液 4 mL,吸取上层溶液测定 520 nm 处吸光度值,重复 3 次。

(6)还原型谷胱甘肽含量

参考 Lin[16]的方法测定。还原型谷胱甘肽(Reduced Glutathione,GSH)含量参照邵婷婷的方法测定。称取 2 g 青椒样品,加入 6 mL 经 4 ℃预冷后的 50 g·L^{-1}TCA 溶液进行研磨提取,于 4 ℃、12 000×g 条件下离心 20 min,收集上清液即为还原型谷胱甘肽提取液。吸取上清液 1 mL,依次加入 0.1 mol·L^{-1}磷酸缓冲液(pH 7.0)1 mL、4 mmol·L^{-1} DTNB 溶液 0.5 mL 和蒸馏水 3.5 mL,摇匀后于 25 ℃水浴中保温反应 15 min,测定412 nm处吸光度值,重复 3 次。

(7)SOD 活性

参照张萌[1]的方法。取 1 g 青椒样品,用 5 mL 0.1 mol·L^{-1}磷酸钠缓冲液(pH 7.8)进行充分研磨,12 000 r·min^{-1}离心 20 min 后得到粗酶液。反应体系包括 2.6 mL 反应液(含 0.1 mol·L^{-1}磷酸钠缓冲液 1.7 mL、13 mmol·L^{-1} Met 0.3 mL、750 μmol·L^{-1} NBT 0.3 mL、100 μmol·L^{-1} EDTA-Na_2 0.3 mL)、0.1 mL 粗酶液和 0.3 mL 20 μmol·L^{-1}核黄素溶液。以每分钟反应体系在 560 nm 波长处对 NBT 光化还原的抑制为 50%时所需的酶量为一个酶活力单位(U)。

(8)CAT 活性

参照张萌[1]的方法。取 1 g 青椒样品,用 5 mL 0.1 mol·L^{-1}磷酸钠缓冲液(pH 7.0)进行充分研磨,12 000 r·min^{-1}离心 20 min 后得到粗酶液。反应体系包括 3.5 mL 0.1 mol·L^{-1}磷酸钠缓冲液、0.2 mL 0.75% H_2O_2 和 0.3 mL 粗酶液。以每分钟反应体系在 240 nm 波长处吸光度减少 0.01 为一个酶活力单位(U)。

(9)POD 活性

参照张萌[1]的方法。取 1 g 青椒样品,用 5 mL 0.1 mol·L^{-1}乙酸-乙酸钠缓冲液(pH 5.5,含 1 mmol·L^{-1} PEG、0.4 g·L^{-1} PVPP 和 1% Triton X-100)进行充分研磨,12 000 r·min^{-1}离心 20 min 后得到粗酶液。反应体系包括 3.0 mL 25 mmol·L^{-1}愈创木酚、0.15 mL 粗酶液和 0.2 mL 0.5 mol·L^{-1} H_2O_2。以每分钟反应体系在470 nm波长处吸光度增加 1 为一个酶活力单位(U)。

1.4.4 脂肪酸组成

参照刘晶晶[17]的方法,运用气相色谱-质谱联用(GC-MS,Gas Chromatography-Mass Spectrometry)测定青椒脂肪酸组分,色谱柱为 30 m×0.25 mm×0.25 μm 膜厚 DB-225MS 毛细管柱(安捷伦)。色谱条件:载气,氦气;流速为 1 mL·min^{-1};进样体积 1 μL;分流比为 20∶1;溶剂延迟 6 min。进样口温度 250 ℃;初始柱温 40 ℃保持 1 min,以 35 ℃·min^{-1}升至 195 ℃保持 2 min,再以 2 ℃·min^{-1}升至 205 ℃保持 2 min,再以 8 ℃·min^{-1}升至230 ℃,并保持 1 min。质谱条件:离子源温度为 230 ℃,电离电压为 70 eV,四极杆为 150 ℃,传输线保持在 250 ℃,扫描范围(m/z)为 50~550。使用归一化法对数据进行分析。

1.5 数据分析

使用 Excel 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-21.0 进行显著性分析(P<0.05 表示差异显著)。

2　结果与分析

2.1　冷锻炼处理过程中辣椒果心的变化

选取菜椒为试验材料,其果实硬度为(11.23±0.11) kg·cm^{-2},可溶性固形物含量(TSS)为(3.87±0.31) kg·cm^{-2}。0 ℃冷锻炼处理时青椒果心温度的变化曲线如图 1 所示。入库温度为 17.5 ℃,15 min 时,青椒果实温度已经降至 16.6 ℃左右;45 min 时青椒果实温度已经降至 14.9 ℃左右。冷锻炼结束后,2 个处理组青椒均未出现冷害症状。

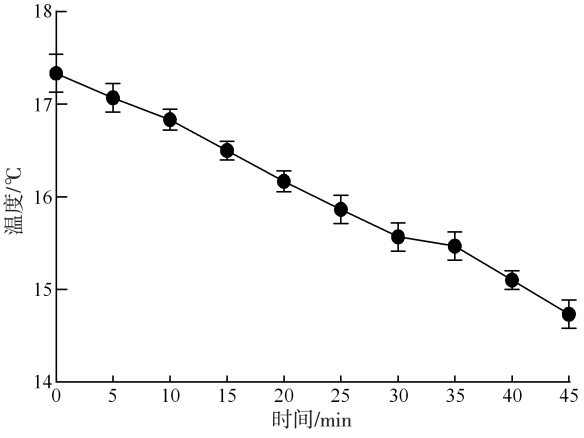
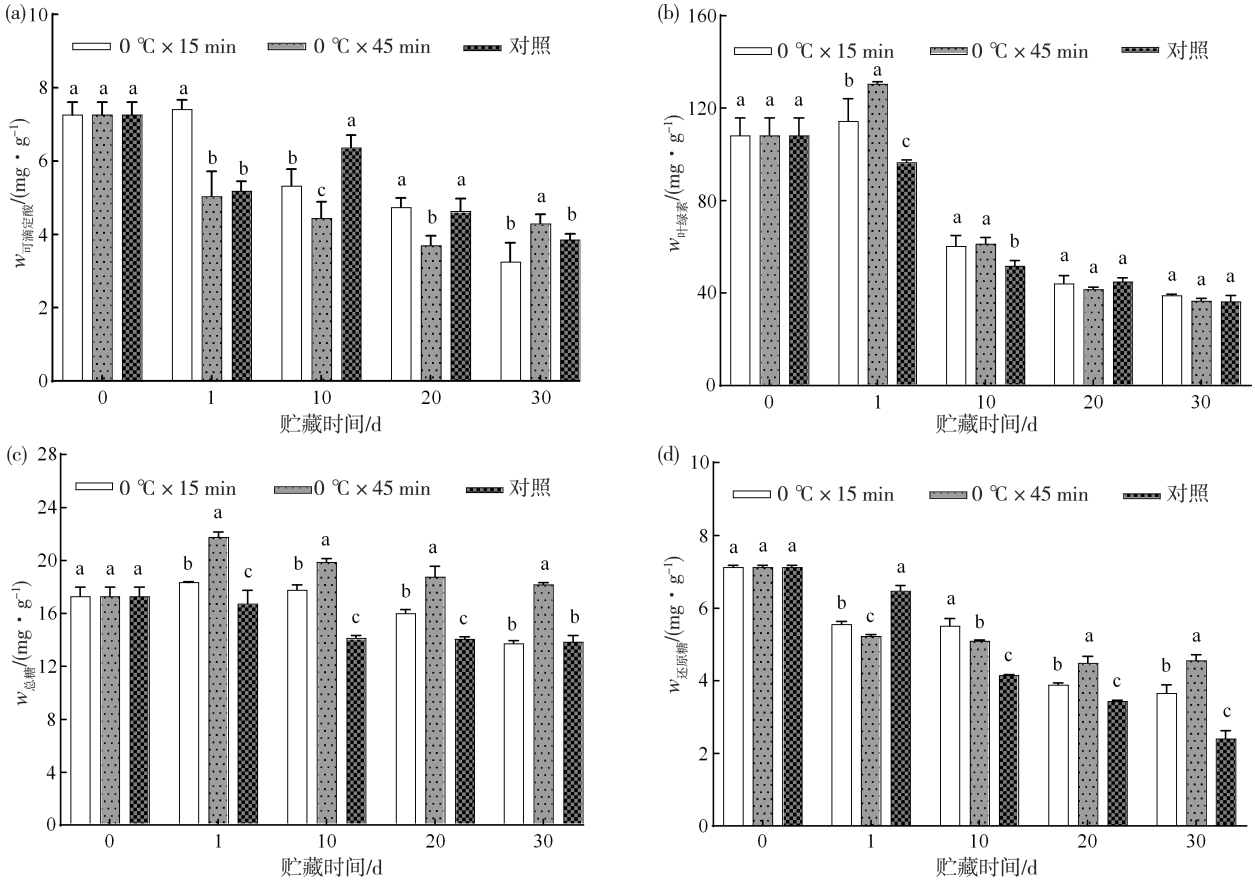


图 1　0 ℃冷锻炼处理过程中青椒的果心温度变化

2.2　冷锻炼处理对青椒主要理化品质的影响

由图 2(a)可知,各处理组青椒贮藏期间可滴定酸含量整体上呈现下降趋势。其中,对照组的降幅最大,表明该组贮藏过程中可滴定酸流失最为严重。0 ℃×45 min 处理组可滴定酸含量变化较小,贮藏结束时可滴定酸质量分数为4.29 mg·g^{-1},较对照组高出 31.60%,表明该处理能够有效减少青椒贮藏期内可滴定酸的流失。由图 2(b)可知,冷锻炼处理后青椒叶绿素含量在 1 d 时升高,随后逐渐下降,其中 0 ℃×15 min 处理组下降最慢,30 d 时果肉组织叶绿素质量分数为 38.82 mg·g^{-1},稍高于对照组的 36.24 mg·g^{-1}。由图 2(c)可知,冷锻炼处理后青椒总糖含量在 1 d 时升高,随后逐渐下降。其中,0 ℃冷锻炼 45 min 能够显著抑制青椒贮藏其内总糖降解,至贮藏 30 d 时,其总糖质量分数为 18.19 mg·g^{-1};高出对照组 23.78%(P<0.05)。由图 2(d)可知,冷锻炼处理后青椒还原糖质量分数整体上呈现逐渐下降的趋势。其中,0 ℃冷锻炼 45 min 能够显著抑制青椒贮藏其内还原糖的降解,至贮藏 30 d 时,其还原糖质量分数为 4.56 mg·g^{-1};是对照组的 1.9 倍(P<0.05)。

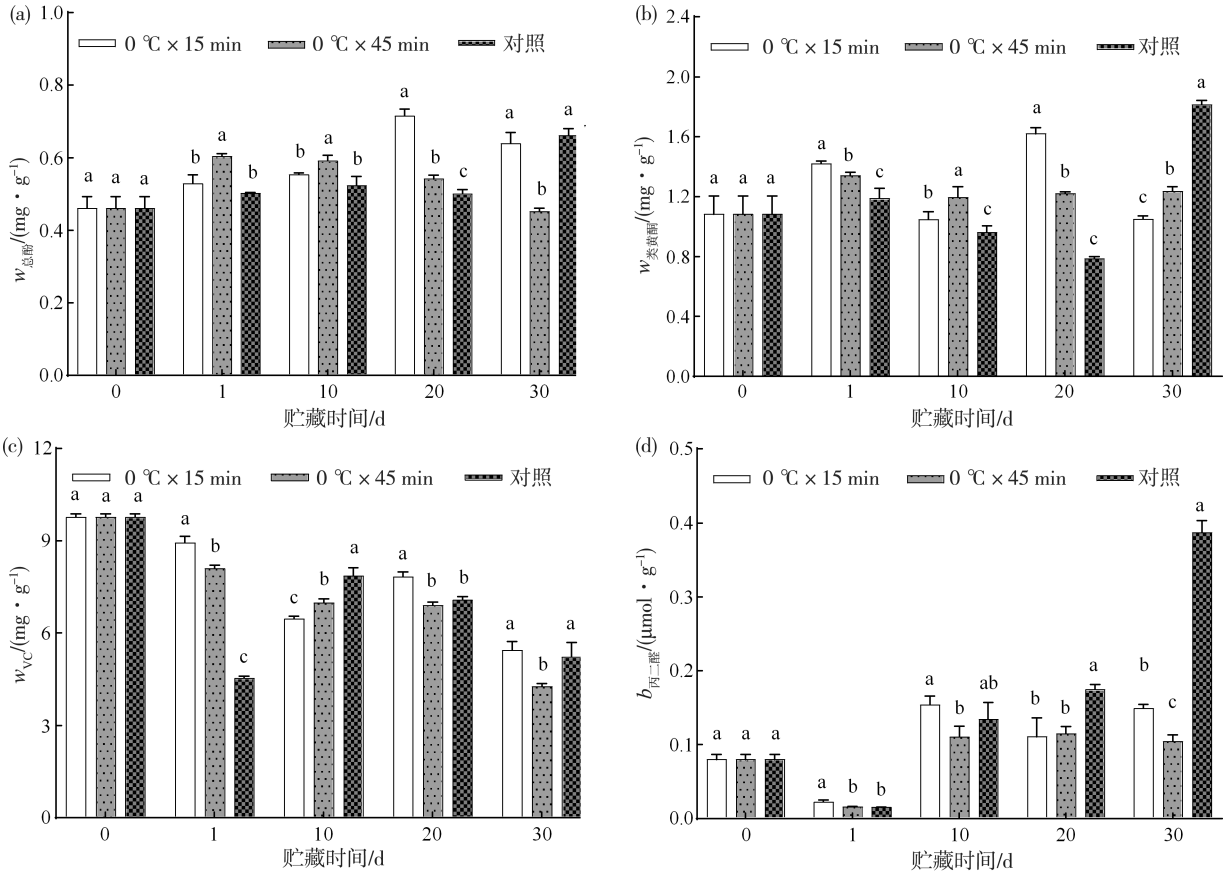


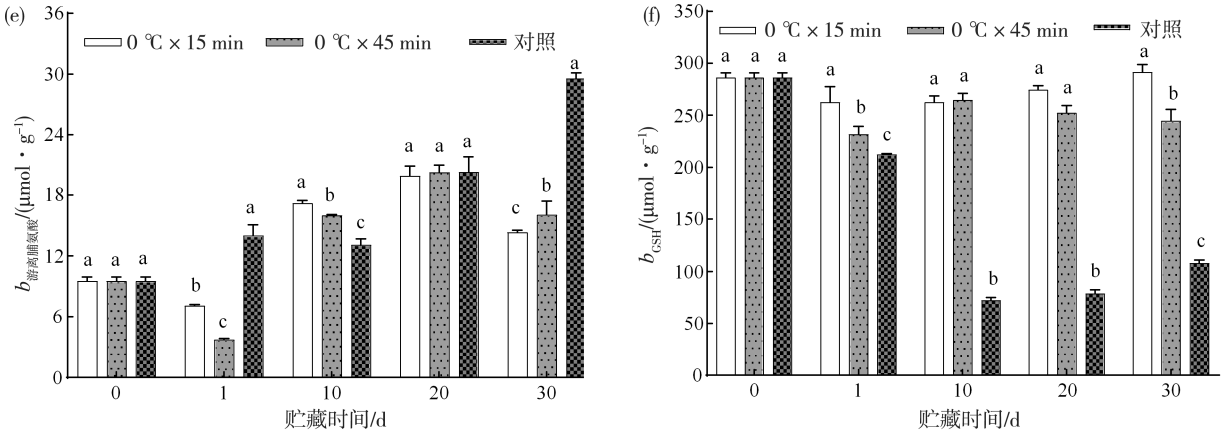
注:(a)可滴定酸;(b)叶绿素;(c)总糖;(d)还原糖。不同小写字母表示不同处理间在 P<0.05 水平差异显著。

图 2　冷锻炼处理对青椒主要理化品质的影响

2.3 冷锻炼处理对青椒氧化还原体系的影响

多酚类物质具有抗氧化活性和抗菌功能,是果蔬营养成分的重要组成部分[18]。由图 3(a)可知,各处理组青椒总酚含量整体上呈现上升趋势。冷锻炼处理组中,0 ℃×15 min 的青椒增幅最大,贮藏 30 d 时其总酚质量分数为 0.64 mg· g^{-1},而 0 ℃×45 min 处理组的总酚质量分数降至 0.45 mg· g^{-1},仅为 0 ℃×15 min 处理组的 70.3%,这表明 0 ℃冷锻炼处理 15 min 能够有效维持青椒贮藏期内总酚含量。类黄酮是一种苯丙烷代谢形成的黄色或浅黄色次级代谢产物,能增强果蔬抗氧化能力[19]。由图 3(b)可知,各处理组青椒贮藏期间类黄酮含量整体上呈现先上升后下降再上升的趋势冷锻炼处理显著推迟了青椒贮藏中期类黄酮含量峰值的出现,其中,0 ℃×15 min 的青椒效果最为明显,贮藏 20 d 时达到峰值,为 1.62 mg· g^{-1},至贮藏结束时,该处理组类黄酮质量分数为 1.04 mg· g^{-1},仅为对照组的 57%($P<0.05$)。研究表明,维生素 C 是果蔬体内最重要的抗氧化物质,它能提高 SOD 活性,抑制膜脂过氧化反应,清除体内积累的活性氧,提高果蔬的抗逆性[2]。由图 3(c)可知,随着贮藏时间的延长,青椒中维生素 C 含量逐渐降低。对照组维生素 C 含量下降速率较快,贮藏至 10 d 时,维生素 C 含量仅为 0 d 的 49.4%。贮藏结束时 0 ℃冷锻炼 15 min 处理组果实维生素 C 含量保存率约为 55.5%,是对照组的 1.03 倍。丙二醛(MDA)是膜脂过氧化作用的产物,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[1]。由图 3(d)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 ℃×45 min 处理组第 30 d 时 MDA 质量摩尔浓度为 0.105 μmol· g^{-1},为对照组的 27.13%,说明冷锻炼处理能够显著抑制青椒的膜脂过氧化程度及细胞衰老($P<0.05$)。由图 3(e)可知,各处理组青椒贮藏期间游离脯氨酸含量整体呈现上升趋势。其中,对照组的增幅最大,表明该组贮藏过程中品质劣变最为严重。0 ℃×15 min 处理组游离脯氨酸含量变化最小,贮藏结束时质量摩尔浓度为 14.33 μmol· g^{-1},仅为对照组的 48.51%,表明该处理能够有效抑制青椒贮藏期内游离脯氨酸的增加。还原型谷胱甘肽(GSH)是植物和人体内重要的抗氧化剂,能清除自由基、减轻氧化应激。青椒中 GSH 质量摩尔浓度越高,其抗氧化能力越强,营养价值更高[20]。由图 3(f)可知,青椒贮藏期间还原型谷胱甘肽含量整体上呈现先下降后缓慢上升的趋势。其中,两个 0 ℃冷锻炼处理组能有效延缓还原型谷胱甘肽含量减少,至贮藏 30 d 时,0 ℃×15 min 及 0 ℃×45 min 处理组的还原型谷胱甘肽质量摩尔浓度分别为 291.18 和 244.51 μmol· g^{-1},而对照组的质量摩尔浓度仅为 107.81 μmol· g^{-1}。

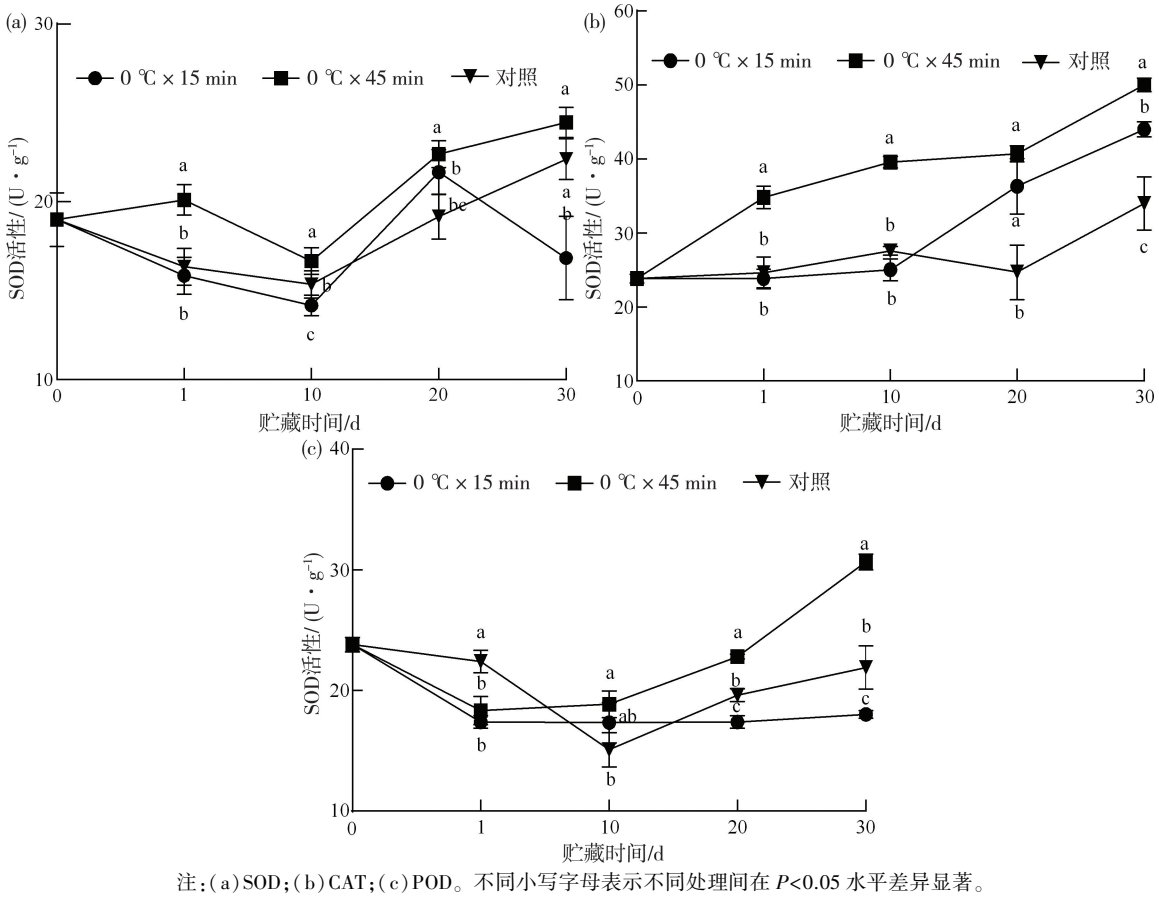




注:(a)总酚;(b)类黄酮;(c)维生素 C;(d)丙二醛;(e)游离脯氨酸;(f)GSH。不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$,水平差异显著。

图 3　冷锻炼处理对青椒生理品质的影响

超氧化物歧化酶(SOD)普遍存在于动植物体内,可以清除果蔬体内的超氧自由基,减少自由基对细胞膜的损伤。有研究表明,较高水平的 SOD 活性可以抑制乙烯合成的直接前提物(ACC,1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid)向乙烯的转化,从面增果实自身免疫性,延缓衰老[19]。由图 4(a)可知,青椒贮藏期内 SOD 活性随贮藏时间延长呈现先下降后上升的趋势,0 ℃×45 min 处理青椒的 SOD 含量在贮藏期内维持在相对较高水平,贮藏 30 d 时为 24.47 U · g^{-1},高出对照组 9.2%。CAT 是抗氧化系统的关键酶,它作为主要的活性氧清除剂,在保护细胞成分免受氧化胁迫方面具有重要作用[21]。由图 4(b)可知,各处理组青椒 CAT 活性呈不断上升趋势,其中 0 ℃×45 min 处理组青椒的 CAT 活性增幅最大,至贮藏结束时,其 CAT 活性为 50.00 U · g^{-1},相较于 0 d 时增幅达 110%,而对照组贮藏结束时的 CAT 活性的增幅仅为 42.86%。POD 在植物中扮演着重要角色,其主要功能是保护植物细胞免受过氧化氢的损害。有研究表明 POD 通过减少过氧化氢的积累,有望降低植物的老化速度。因此 POD 酶活力高低可以反应果蔬组织衰老速度[22]。由图 4(c)可知,各处理组青椒 POD 活性呈现上升趋势,其实 0 ℃×45 min 处理组 POD 活性显著高于其他 2 组($P<0.05$),至贮藏结束时,其 POD 活性为 30.67 U · g^{-1},而对照组青椒的 POD 活性仅为 0 ℃×45 min 处理组的 71.41%。

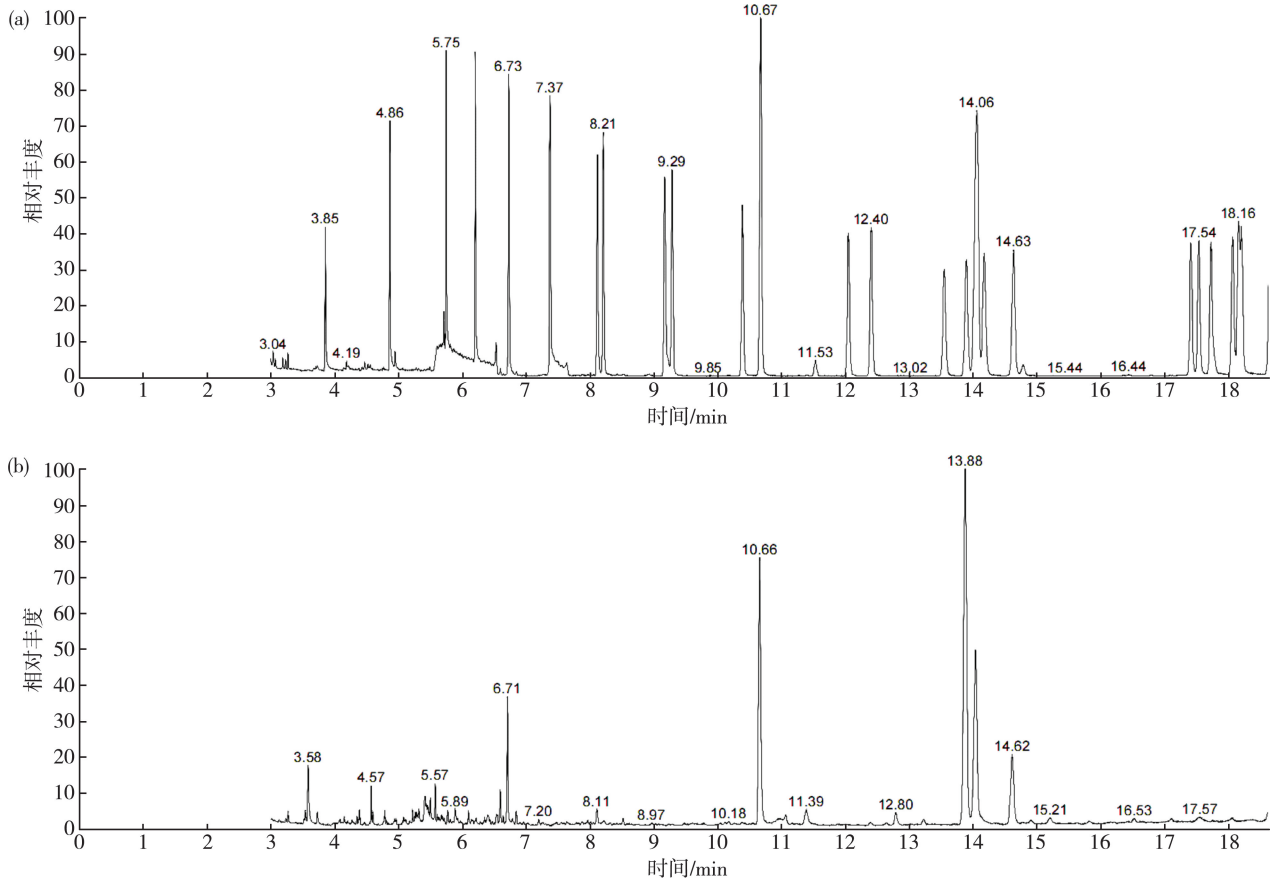


注:(a)SOD;(b)CAT;(c)POD。不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

图 4　冷锻炼处理对青椒酶活性的影响

2.4 冷锻炼处理对青椒脂肪酸含量的影响

脂肪酸是生物膜的重要组成成分,在维持生物膜稳定性中具有重要作用[23]。图 5 为脂肪酸标准品及 0 ℃冷锻炼 45 min 处理青椒样品的 GC-MS 色谱图。其中,图 5(a)中各组分在 3.04~18.16 min 内实现了良好的基线分离,峰形尖锐对称,无明显拖尾或共流现象,表明本研究建立的 GC-MS 分析条件可有效区分青椒中主要脂肪酸组分,为样品脂肪酸的定性与定量分析提供了可靠的参照依据。对比标准品与青椒样品色谱图 5(b)可见,冷锻炼处理组与对照组的脂肪酸出峰顺序基本一致,未出现新的特征峰,说明冷锻炼处理未引入外源脂肪酸组分,仅对青椒内源脂肪酸的组成与含量产生调控作用。表 1 为冷锻炼处理后 1 d 青椒中的脂肪酸组分经 GC-MS 测定分析,共检出 8 种主要脂肪酸,其中包括 3 种饱和脂肪酸((C16:0,棕榈酸)、(C18:0,硬脂酸)、(C20:0,花生酸))、2 种单不饱和脂肪酸((C16:1,棕榈油酸)、(C18:1,油酸))和 3 种多不饱和脂肪酸((C18:2,亚油酸)、(C18:3,亚麻酸)、(C20:4,花生四烯酸))。在脂肪酸总量构成上,饱和脂肪酸(Saturated Fatty Acid,SFA)在空白对照组中的相对含量为 24.65%,在 0 ℃冷锻炼 15 和 45 min 组中分别降低至 24.23%和 20.08%;单不饱和脂肪酸(Monounsaturated Fatty Acid,MUFA)含量随处理时间延长呈上升趋势,由 7.04%升至 8.92%;多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acid,PUFA)在 3 组中相对稳定,含量维持在 4.76%~5.28%之间。脂肪酸是细胞膜的基本组成成分,其饱和程度直接影响膜的稳定性与流动性。研究结果表明,随着冷锻炼处理时间的延长,青椒果实中饱和脂肪酸含量降低,与此相反,单不饱和脂肪酸(主要为 C18:1,油酸)含量随冷锻炼时间延长逐渐增加,说明冷锻炼可能增强了脂肪酸去饱和酶(如 Δ9-desaturase)的活性,加速了不饱和脂肪酸的合成[24]。这一变化增加了膜的流动性,有利于维持膜结构的稳定,避免低温下膜脂相变造成的损伤。此外,多不饱和脂肪酸((C18:2,亚油酸)、(C20:4,花生四烯酸)等)在 3 组处理间变化幅度不大,推测其在维持膜的基本功能和信号转导中起着重要作用[25],因此在低温处理下未发生明显波动。综上,适度冷锻炼处理能够通过调节脂肪酸组成增强青椒对低温胁迫的响应能力,为其后续低温贮藏提供生理基础。



注:(a)脂肪酸标准品;(b)0 ℃×45 min 样品。

图 5 脂肪酸标准品及 0 ℃冷锻炼 45 min 处理青椒样品的 GC-MS 色谱图

表 1　冷锻炼处理后 1 d 青椒中的脂肪酸组分

脂肪酸种类	类型	对照组组分质量分数/%	0 ℃冷锻炼 15 min 后组分质量分数/%	0 ℃冷锻炼 45 min 后组分质量分数/%
棕榈酸(C16:0)	SFA	9.31±0.03^{a}	9.63±0.11^{a}	8.70±0.18^{b}
硬脂酸(C18:0)	SFA	9.40±0.06^{a}	8.72±0.06^{b}	6.72±0.04^{c}
花生酸(C20:0)	SFA	5.94±0.02^{a}	5.88±0.03^{a}	4.66±0.10^{b}
饱和脂肪酸(SFAs)	SFA	24.65±0.11^{a}	24.23±0.20^{a}	20.08±0.32^{b}
棕榈油酸(C16:1)	MUFA	2.17±0.02^{c}	2.34±0.02^{b}	2.63±0.06^{a}
油酸(C18:1)	MUFA	4.87±0.05^{c}	5.28±0.03^{b}	6.29±0.03^{a}
单不饱和脂肪酸(MUFAs)	MUFA	7.04±0.07^{c}	7.62±0.05^{b}	8.92±0.09^{a}
亚油酸(C18:2)	PUFA	2.31±0.03^{b}	2.52±0.03^{a}	2.72±0.04^{a}
亚麻酸(C18:3)	PUFA	1.87±0.05^{b}	1.84±0.03^{b}	2.01±0.04^{a}
花生四烯酸(C20:4)	PUFA	0.58±0.04^{a}	0.63±0.03^{a}	0.55±0.02^{a}
多不饱和脂肪酸(PUFAs)	PUFA	4.76±0.12^{b}	4.99±0.09^{b}	5.28±0.10^{a}
不饱和脂肪酸(UFAs)	UFA	11.80±0.19^{c}	12.61±0.14^{b}	14.20±0.19^{a}

注:不同小写字母表示同一脂肪酸不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。

3　结　语

本研究系统地探讨了采后冷锻炼处理对青椒贮藏期间生理品质、氧化还原体系、膜脂代谢的影响,旨在寻求一种有效延长货架期的物理保鲜技术。研究结果表明,0 ℃冷锻炼 45 min 能够显著提升青椒的贮藏性能,其作用机制是多方面协同作用的结果。首先,0 ℃冷锻炼 45 min 有效减缓了可滴定酸和叶绿素的降解速率,从而更好地保持了青椒的风味和色泽。其次,0 ℃冷锻炼 45 min 显著增强了青椒自身的抗氧化防御能力。一方面,冷锻炼处理通过维持更高的抗氧化酶活性,构建了一个强大的活性氧清除系统,贮藏结束时,处理组的过氧化氢酶(CAT)活性高达 50.00 U·g^{-1},远高于对照组的 34.00 U·g^{-1};其过氧化物酶(POD)活性较对照组高出 40.05%;另一方面,处理组维持了较高的非酶抗氧化物水平,其还原型谷胱甘肽(GSH)质量摩尔浓度在贮藏 30 d 时为 244.51 μmol·g^{-1},显著高于对照组的 107.81 μmol·g^{-1},这一系列防御反应的强化,最终通过显著抑制 MDA 的积累而体现,贮藏结束时处理组的 MDA 含量仅为对照组的 27.13%,证明了该处理有效减轻了氧化胁迫对细胞膜的损伤。另外,0 ℃冷锻炼 45 min 提升了不饱和脂肪酸含量,延缓了细胞膜代谢。经处理的青椒在贮藏 1 d 后,其不饱和脂肪酸(UFAs)总量达到了 14.20%,高于对照组的 11.80%。其中,关键的棕榈酸(C16:0)和亚麻酸(C18:3)含量分别维持在 8.70%和 2.01%,均高于对照组。本研究为延缓采后青椒品质劣变、减少商业损耗提供了一种具有实际应用前景的绿色保鲜策略。

参考文献:

[1]　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.

[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]　乔建福.ε-聚赖氨酸及其复合材料在鲜切青椒保鲜中的应用研究[D].临汾:山西师范大学,2024:3.

[4]　龚诗琪,周俞含,王婧,等.氯化钙结合冷激处理抑制爱媛橙冬季快递冻害机理研究[J].包装工程,2025,46(5):101-112.

[5]　Mi Si,Li Tong,Shi Quanying,et al.Cold shock precooling improves the firmness of chili pepper during postharvest storage and the molecular mechanisms related to pectin[J].Food Chemistry,2023,419:136052.

[6]　Yao Miaomiao,Ge Wanying,Zhou Qian,et al.Exogenous glutathione alleviates chilling injury in postharvest bell pepper by modulating the ascorbate-glutathione (AsA-GSH) cycle[J].Food Chemistry,2021,352:129458.

[7]　Charoenphun N,Pham N H,Rattanawut J,et al.Exogenous application of melatonin on the preservation of physicochemical and enzymatic qualities of pepper fruit from chilling injury[J].Horticulturae,2024,10(6):550.

[8]　Phornvillay S,Pongprasert N,Sugaya S,et al.Low temperature conditioning reduces chilling injury incidence in okra

(*Abelmoschus esculentus* L.) pods[J].Fruits,2021,76(4):191-200.DOI:10.17660/th2021/76.4.4.

[9] Hanaei S, Bodaghi H, Ghasimi Hagh Z. Alleviation of postharvest chilling injury in sweet pepper using Salicylic acid foliar spraying incorporated with caraway oil coating under cold storage[J].Frontiers in Plant Science,2022,13:999518.

[10] Song Chunbo,Wu Mengbo,Zhou Ying,et al.NAC-mediated membrane lipid remodeling negatively regulates fruit cold tolerance [J].Horticulture Research,2022,9:uhac039.

[11] 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.

[12] 杨帅,李毅,柳佳清,等.低温等离子体对枸杞鲜果保鲜效果及其贮藏期品质的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2025,43(3):83-95.

[13] 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,2007:13-22.

[14] 冯慧敏,朱云娜,谢景,等.紫色与绿色芥菜种质间色素差异及其相关品质评价[J].中国蔬菜,2023(9):86-97.

[15] 李清峰.抗氰呼吸对采后李子果实抗冷性的影响及关键基因过表达果肉组织转录组学分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022:16.

[16] Lin Yifen,Lin Hetong,Zhang Shen,et al.The role of active oxygen metabolism in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested Longan fruit[J].Postharvest Biology and Technology,2014,96:42-48.

[17] 刘晶晶.反式-2-己烯醛(E2H)对番茄转色期质体转化的调控作用[D].南昌:江西农业大学,2022:30-32.

[18] 武警,于昌浩,张天天,等.高浓度二氧化碳胁迫预处理对鲜切苹果贮藏品质的影响[J].保鲜与加工,2025,25(5):1-14.

[19] 陈道业,王玲,陈于陇,等.不同切割方式对鲜切芋头品质的影响[J].食品工业科技,2025,46(19):347-356.

[20] 陈华.不同品种青椒中谷胱甘肽含量的比较分析[J].中国蔬菜,2025,30(6):67-71.

[21] 张新宪,焦旋,张立新,等.压差预冷对青椒货架期品质及相关酶活性的影响[J].食品科技,2020,45(11):44-50.

[22] 刘绮帆.气调包装结合迷迭香精油处理对鲜切西兰花保鲜效果的研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2024:25.

[23] 杨舒涵.气态臭氧处理对不同鲜切蔬菜贮藏品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2023:40.

[24] 吕志伟,胡昌勇.植物膜脂调控对逆境胁迫的响应机制[J].植物研究,2017,37(1):114-122.

[25] 黎霞.Kosmotoga olearia TBF19.5.1T 响应冷胁迫的组学分析及差异表达基因的功能研究[D].成都:四川大学,2022:3-5.

(责任编辑:王亚宾;校　对:孙洪清)