

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80724

热激复合褪黑素处理对青椒低温冷害的影响

吕芳娥 李喜宏 林子沁 李 娇 杨梦娇

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: [目的] 减少青椒采后低温贮藏过程中冷害的发生。[方法] 以青椒为试验材料, 对热激(HC)和褪黑素(MT)复合处理的青椒样品在(4±1) °C和85%~90% RH贮藏过程中的冷害指数、相对电导率、丙二醛、H₂O₂含量、抗氧化酶活性和品质指标及相关性进行研究。[结果] HC复合MT处理使冷害出现时间推迟了5 d, 失重率降低了52.4%, H₂O₂含量降低了71.75%, 有效抑制了青椒相对电导率的增加和MDA的积累, POD、SOD、APX和CAT抗氧化酶活性分别提高了0.45, 0.71, 14.50, 0.86 U/kg。同时, 复合处理也较好地保持了青椒的硬度、TSS、叶绿素和维生素C含量且各指标之间均存在相关性。[结论] HC复合MT处理能有效降低青椒冷害现象的发生。

关键词: 青椒; 热激; 褪黑素; 冷害; 抗氧化酶活性

Effects of heat shock combined with melatonin treatment on low-temperature chilling injury in green peppers

LU Fange LI Xihong LING Ziqin LI Jiao YANG Mengjiao

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: [Objective] To reduce the occurrence of chilling injury during postharvest low-temperature storage of green peppers. [Methods] Green peppers are used as the experimental material to investigate the effects of heat shock (HC) combined with melatonin (MT) treatment on the chilling injury index, relative conductivity, malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide (H₂O₂) content, antioxidant enzyme activity, and quality parameters during storage at (4±1) °C and 85%~90% relative humidity (RH). [Results] The HC combined with MT treatment delays the onset of chilling injury by 5 days, reduces weight loss by 52.4%, and decreases H₂O₂ content by 71.75%. This treatment effectively inhibits the increase in relative conductivity and the accumulation of MDA. The activities of antioxidant enzymes, including peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), ascorbate peroxidase (APX), and catalase (CAT), increase by 0.45, 0.71, 14.50, and 0.86 U/kg, respectively. Additionally, the composite treatment helps maintain the hardness, total soluble solids (TSS), chlorophyll, and vitamin C content of the green peppers, with significant correlations observed between the various parameters. [Conclusion] HC combined with MT treatment can effectively reduce the occurrence of chilling injury in green peppers.

Keywords: green pepper; heat shock; melatonin; chilling injury; antioxidant enzyme activity

青椒是典型的冷敏性果蔬, 因其色泽鲜艳且营养物质丰富而深受人们的喜爱^[1]。采后青椒贮藏难度大, 在7 °C以下贮藏或贮运极易发生冷害, 导致果实表面出现点蚀萎蔫、水渍浸斑等症状^[2-4], 从而影响青椒的食用品质, 造成严重的经济损失。

褪黑素(MT)是一种广泛分布于动植物体内的高度生物活性信号分子^[5], 影响果蔬生长发育的多个关键阶段, 包括但不限于生长周期的调控、成熟过程的促进以及最终衰老阶段的介导。通过复杂的调控机制影响机体在遭受胁迫时的抗氧化防御体系及多种代谢途径, 从

基金项目: 山东省重点研发项目(编号: 2021CXGC010809); 银川市科技计划项目(编号: 2024CGZHHZC002)

通信作者: 李喜宏(1960—), 男, 天津科技大学教授, 博士。E-mail: lixihong@tust.edu.cn

收稿日期: 2024-07-26 改回日期: 2025-03-17

引用格式: 吕芳娥, 李喜宏, 林子沁, 等. 热激复合褪黑素处理对青椒低温冷害的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(6): 129-135.

Citation: LU Fange, LI Xihong, LING Ziqin, et al. Effects of heat shock combined with melatonin treatment on low-temperature chilling injury in green peppers[J]. Food & Machinery, 2025, 41(6): 129-135.

而有利于果蔬采后贮藏,现已被广泛用于果蔬保鲜等领域^[6]。在对猕猴桃^[7]、番石榴^[8]、蘑菇^[9]、芒果^[10]进行 MT 处理时发现,MT 能有效降低冷害指数,提高果实的抗冷性。热激(HC)是一种安全性高且广泛使用的物理保鲜方法,通过诱导果蔬体内热激蛋白生成来增强果蔬的抗逆性,进而达到延缓衰老进程和延长贮藏寿命的目的。赵云峰等^[11]研究发现,龙眼果实经 50℃处理 10 min 后,能够显著抑制贮藏期间细胞壁降解酶的活性,维持细胞壁结构的功能性和完整性。复合保鲜处理是通过融合多种不同保鲜方法以达到协同增效的效果,从而最大限度地提升果蔬采后品质并有效延长其保鲜期和货架寿命。

目前各种保鲜方法如辐照处理^[12]、气调处理^[13]、低温贮藏^[14]等均被证明可以减轻青椒贮藏期间的冷害,而有关 HC 复合 MT 处理对抗冷害的作用尚未见报道。研究拟对青椒进行 HC 复合 MT 处理并置于低温条件下贮藏,通过测定青椒冷害指标考察 HC 复合 MT 处理对青椒低温冷害的影响,以期控制青椒采后冷害的发生提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

青椒:辛香 2 号,挑选八成熟、大小均匀、无机械损伤和病虫害的果实,市售;

褪黑素、三氯乙酸:分析纯,深圳市北化精细化学品有限公司;

氢氧化钠、乙二胺四乙酸:分析纯,云南利妍科技有限公司;

碳酸钙、磷酸氢二钠、丙酮、硫代巴比妥酸:分析纯,湖北健楚生物医药有限公司;

甲醇、磷酸氢钾、磷酸氢二钾、硫酸:分析纯,宜都奥达实业有限公司;

苯酚、丙酮、氢氧化钾、戊二醛:分析纯,山东蓝之星科技集团有限公司;

乙醇、乙酸异戊酯:分析纯,武汉卡布达化工有限公司;

冰醋酸、高氯酸、无水醋酸钠:分析纯,安徽金粤冠科技有限公司;

过氧化氢试剂盒:上海优选生物科技有限公司。

1.1.2 仪器与设备

电子天平:MK-4 型,广东万慕仪器有限公司;

糖度仪:SM-200 型,长沙米淇仪器设备有限公司;

数显恒温水浴锅:JD-7 型,东莞市盛山电子科技有限公司;

电导率仪:HDS-12 型,上海保圣实业发展有限公司;

全自动酶标仪:YT-1101 型,陕西广腾安全设备有限公司;

冷冻离心机:AG-15J-XL 型,深圳市心怡创科技有限公司;

硬度计:GY-3 型,安徽七通商贸有限公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 将青椒样品随机分为 4 组,分别按表 1 进行浸泡处理。经浸泡的样品自然风干后,用 0.03 mm PVC 袋包装,封口,置于(4±1)℃、相对湿度为 85%~90%冷库中贮藏 20 d,每隔 5 d 测定青椒相关指标。

表 1 样品浸泡工艺
Table 1 Sample soaking process

样品	处理工艺
CK 组	蒸馏水浸泡 15 min
HC 组	45℃热水浸泡 15 min
MT 组	100 μmol/L 褪黑素溶液浸泡 20 min
HC+MT 组	45℃热水浸泡 15 min 后,再用 100 μmol/L 褪黑素溶液浸泡 20 min

1.2.2 冷害指数测定 根据文献^[15]。

1.2.3 失重率测定 随机选取 10 个青椒果实记录初始质量和贮藏后的最终质量,重复 3 次,取平均值。按式(1)计算果实失重率。

$$P = \frac{A - B}{C} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

A——初始质量,g;

B——最终质量,g;

C——初始质量,g;

P——失重率,%。

1.2.4 相对电导率测定 根据文献^[16]。

1.2.5 丙二醛(MDA)含量测定 根据文献^[17]。

1.2.6 过氧化氢(H₂O₂)含量测定 使用试剂盒测定。

1.2.7 抗氧化酶活性测定 根据文献^[18]。

1.2.8 贮藏品质测定 随机选取 10 个青椒,在果实赤道部位用 GY-3 型硬度计测定硬度。SM-200 型糖度仪测定可溶性固形物。根据文献^[17]的方法测定维生素 C 和叶绿素含量。

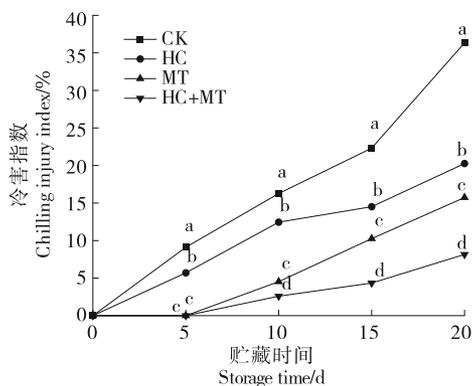
1.3 数据处理

使用 Excel 2018 统计整理数据,采用 Origin 2021 和 SPSS 8.2 统计分析并绘图($P < 0.05$),试验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 HC+MT 复合处理对青椒冷害指数的影响

由图 1 可知,青椒果实在整个贮藏期内的冷害指数呈上升趋势。CK 组和 HC 组的青椒在贮藏第 5 天表现出明显的冷害症状,随贮藏时间的延长其冷害程度进一步加大。CK 组青椒的冷害指数在贮藏 5 d 后显著高于其他处理组青椒的($P < 0.05$)。贮藏 15 d 时,CK 组、HC 组、MT 组、HC+MT 组青椒的冷害指数分别达到 22.31%、14.51%、10.26%、4.35%,复合处理对冷害现象表现出更有效的抑制作用,可能由于复合处理能有效减缓细胞膜由液晶态转变为凝胶态的过程,保持膜的流动性和通透性,进而推迟冷害现象出现。这与王锋等^[18]的研究结果一致。贮藏 20 d 时,HC+MT 组冷害指数分别是 CK 组、HC 组、MT 组的 22%、40%、52%,表明 HC 复合 MT 处理能够有效降低青椒果实冷害现象的发生。



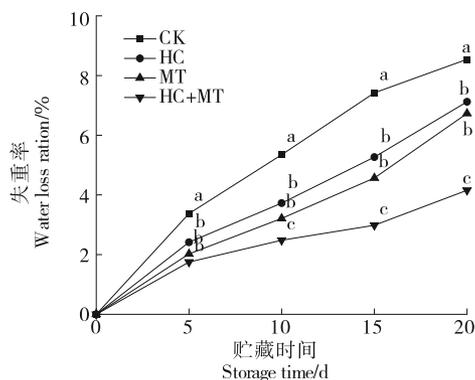
字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 HC+MT 复合处理对青椒冷害指数的影响

Figure 1 Effects of HC+MT combined treatments on chilling index in green peppers

2.2 HC+MT 复合处理对青椒失重率的影响

由图 2 可知,青椒贮藏期间,随着贮藏时间的增加,所有处理组的失重率均呈增长趋势,其中 HC+MT 组的涨幅明显低于其他处理组。贮藏 20 d 时,CK 组、HC 组、MT 组、HC+MT 组的失重率分别为 8.53%、7.11%、6.72%、4.15%。青椒在贮藏过程中,CK 组失重率一直处于较高水平,水分蒸腾及营养消耗较严重,各处理组失重率显著低于 CK 组,复合处理比 CK 组低 4.38 个百分点。由此可见,HC 复合 MT 处理能更有效地抑制青椒水分损失。



字母不同表示差异显著($P < 0.05$)

图 2 HC+MT 复合处理对青椒失重率的影响

Figure 2 Effects of HC+MT combined treatments on weight loss rate in green peppers

2.3 HC+MT 复合处理对青椒相对电导率和 MDA 含量的影响

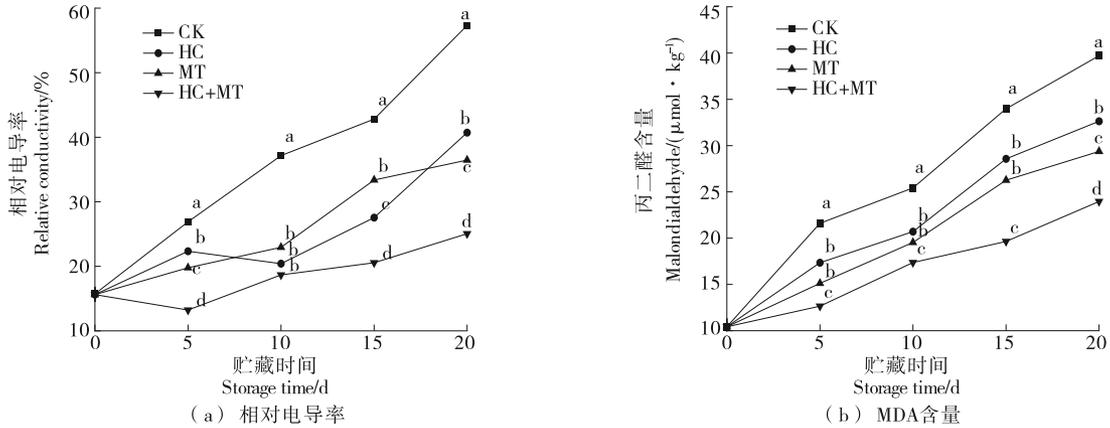
由图 3 可知,贮藏 0 d 时,所有处理组的相对电导率和 MDA 含量分别为 15.73%、10.43 $\mu\text{mol/kg}$,20 d 后 CK 组的相对电导率和 MDA 含量分别为 57.33%、29.37 $\mu\text{mol/kg}$ 。说明在低温胁迫下,CK 组青椒细胞膜的完整性破坏严重,导致细胞内电解质渗漏,细胞膜通透性增加,相对电导率升高;细胞内产生的自由基和活性氧对细胞膜上的不饱和脂肪酸进行攻击,发生脂质过氧化反应,产生 MDA 等产物,使青椒的冷害程度加深。HC 组、MT 组和 HC+MT 组的相对电导率相较 CK 组分别降低了 16.61%、20.87%、32.28%,MDA 含量相较 CK 组分别降低了 7.08、10.34、15.75 $\mu\text{mol/kg}$ 。由此可见,HC+MT 组能更有效地抑制青椒相对电导率和 MDA 的增加($P < 0.05$)。这与朱芹^[19]²⁴⁻²⁵的研究结果类似。

2.4 HC+MT 复合处理对青椒 H₂O₂ 含量的影响

由图 4 可知,随着贮藏时间的延长,青椒组织内部发生持续的化学变化,H₂O₂ 不断地生成累积。过量的 H₂O₂ 会破坏细胞膜、蛋白质和 DNA 等生物分子,导致细胞损伤和细胞死亡^[20]。贮藏 20 d 时,CK 组、HC 组、MT 组和 HC+MT 组的 H₂O₂ 含量分别为 61.35、54.21、46.39、35.72 $\mu\text{mol/kg}$,HC+MT 组 H₂O₂ 含量显著低于 CK 组($P < 0.05$)。因此,HC、MT 单独处理或复合处理对贮藏期间青椒 H₂O₂ 含量的生成均有一定的抑制作用,其中复合处理的效果更显著。

2.5 HC+MT 复合处理对青椒果实抗氧化酶活性的影响

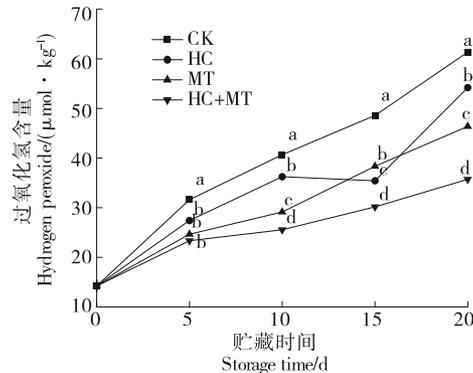
由图 5(a)可知,所有处理组青椒的 POD 活性在贮藏期间均呈先上升后逐渐降低的趋势。贮藏前期,POD 活性不断上升,表明低温胁迫果蔬抗氧化酶系统对冷害产



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 HC+MT 复合处理对青椒相对电导率和 MDA 含量的影响

Figure 3 Effects of HC+MT combined treatments on relative conductivity and MDA content in green peppers



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 HC+MT 复合处理对青椒 H_2O_2 含量的影响

Figure 4 Effects of HC+MT combined treatments on H_2O_2 content in green peppers

生的应激反应,通过提高自身酶活性来抵抗冷害的发生,这可能是果蔬贮藏初期的一种保护响应机制^[21]。贮藏后期,POD 活性不断下降,青椒的冷害症状加剧,冷害指数大幅升高,POD 酶需清除自由基,导致其活性逐渐降低。贮藏 20 d 时,CK 组、HC 组、MT 组和 HC+MT 组的 POD 活性分别为 2.39, 2.56, 2.63, 2.84 U/kg, HC+MT 处理组的 POD 活性显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。说明 HC、MT 单独处理或复合处理均能较好地激活 POD 活性,其中复合处理的效果最好。这与何欢等^[22]使用褪黑素处理增加苹果果实 POD 活性研究结论一致。

由图 5(b) 可知,随着贮藏时间的延长,青椒的 SOD 活性均呈先上升后下降的趋势,贮藏 10 d 时,达到最大值,此时正值冷害症状急剧出现时间,需要 SOD 酶催化活性氧以减少其积累,抑制膜脂过氧化反应,维持较低的细胞膜透性。贮藏 20 d 时,CK 组、HC 组、MT 组和 HC+MT 组

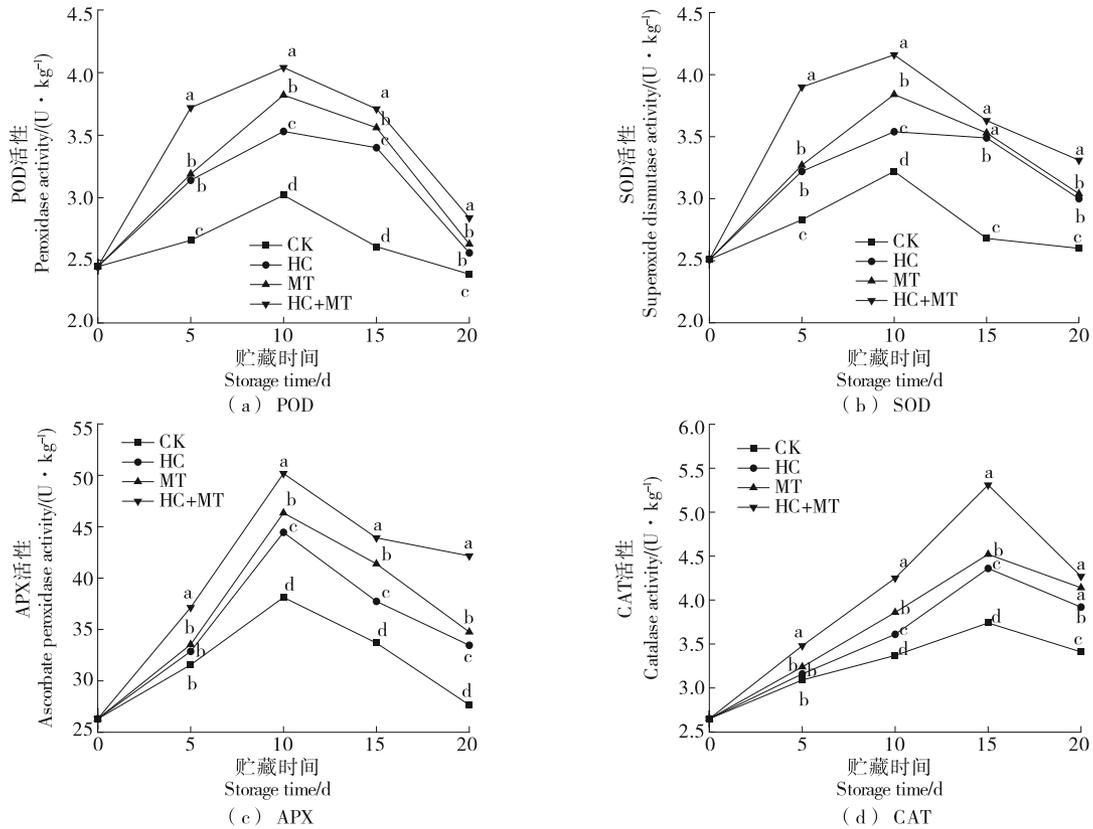
的 SOD 活性分别为 2.60, 3.00, 3.04, 3.31 U/kg, HC+MT 组的 SOD 活性高于其他处理组 ($P < 0.05$)。表明复合处理组能够保持较高的 SOD 活性,减轻因低温带给青椒细胞膜的损伤。

由图 5(c) 可知,贮藏过程中青椒的 APX 活性随贮藏时间的延长呈先升高后下降趋势,在第 10 天达到峰值,这与 SOD、POD 活性的变化趋势类似。贮藏 10~20 d 时,青椒组织中的 APX 酶活性随冷害加重呈下降趋势,可能是冷害使细胞内出现大量的活性氧,APX 酶因发挥防御作用而活性下降。贮藏 20 d 时,HC 组、MT 组和 HC+MT 组的 APX 活性分别为 33.46, 34.75, 42.16 U/kg, HC+MT 组的 APX 活性显著高于其他组 ($P < 0.05$)。因此,HC 复合 MT 处理能显著提高青椒的 APX 活性,减少活性氧对细胞损伤,达到抗冷害效果。这与刘家粮等^[23]的研究结论一致。

由图 5(d) 可知,4 个处理组青椒中 CAT 活性均呈先上升后下降的趋势,在贮藏第 15 天达到峰值。贮藏 20 d 时,HC+MT 组的 CAT 活性分别比 CK 组、HC 组、MT 组的高 25.2%, 8.9%, 3.1%, 而且整个贮藏期内 HC+MT 组的 CAT 活性显著高于 CK 组 ($P < 0.05$)。说明 HC 复合 MT 处理可以更好地激活 CAT 活性,提高青椒的抗氧化能力,保持低温贮藏中青椒的品质,以达到延长冷藏期的目的。

2.6 HC+MT 复合处理对青椒贮藏过程中品质变化的影响

由表 2 可知,经过 20 d 的低温贮藏,CK 组青椒的各项指标均迅速下降,HC 组和 MT 组对各项指标的下降均有一定的抑制作用,但抑制效果均不及 HC+MT 组。这可能是 HC、MT 单独处理或复合处理均能抑制纤维素酶和果胶酶活性,阻止青椒进一步呼吸,防止糖类消耗;抑制



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图5 HC+MT复合处理对青椒POD、SOD、APX、CAT活性的影响

Figure 5 Effects of HC+MT combined treatments on POD, SOD, APX, and CAT activities in green pepper peppers

叶绿素降解酶的活性,防止维生素C发生氧化、酶促降解反应。HC+MT组的叶绿素含量、V_c含量均显著高于HC组和MT组 ($P < 0.05$),而硬度和可溶性固形物含量与HC组和MT组无显著差异。HC、MT处理的抑制效果与[19]²³的研究结果一致。由此可见,HC复合MT处理能保持青椒在贮藏过程中质地与组织结构的完整性、可溶性固形物含量、绿色保持度和抗氧化能力。

表2 HC+MT复合处理对青椒贮藏过程中品质变化的影响[†]

Table 2 Effects of HC+MT combined treatment on quality changes of green peppers during storage

样品	硬度/N	可溶性固形物含量/%	叶绿素含量/(mg·g ⁻¹)	维生素C含量/(mg·g ⁻¹)
贮藏前	16.47 ± 1.51 ^a	3.45 ± 0.12 ^a	0.82 ± 0.13 ^a	1.47 ± 0.18 ^a
CK	10.63 ± 1.14 ^c	2.56 ± 0.11 ^c	0.44 ± 0.12 ^c	0.38 ± 0.16 ^d
HC	11.24 ± 1.58 ^c	2.95 ± 0.17 ^b	0.51 ± 0.12 ^c	0.55 ± 0.14 ^c
MT	12.52 ± 1.64 ^b	3.13 ± 0.15 ^b	0.58 ± 0.11 ^c	0.67 ± 0.16 ^c
HC+MT	13.73 ± 1.32 ^b	3.20 ± 0.13 ^a	0.67 ± 0.16 ^b	1.02 ± 0.16 ^b

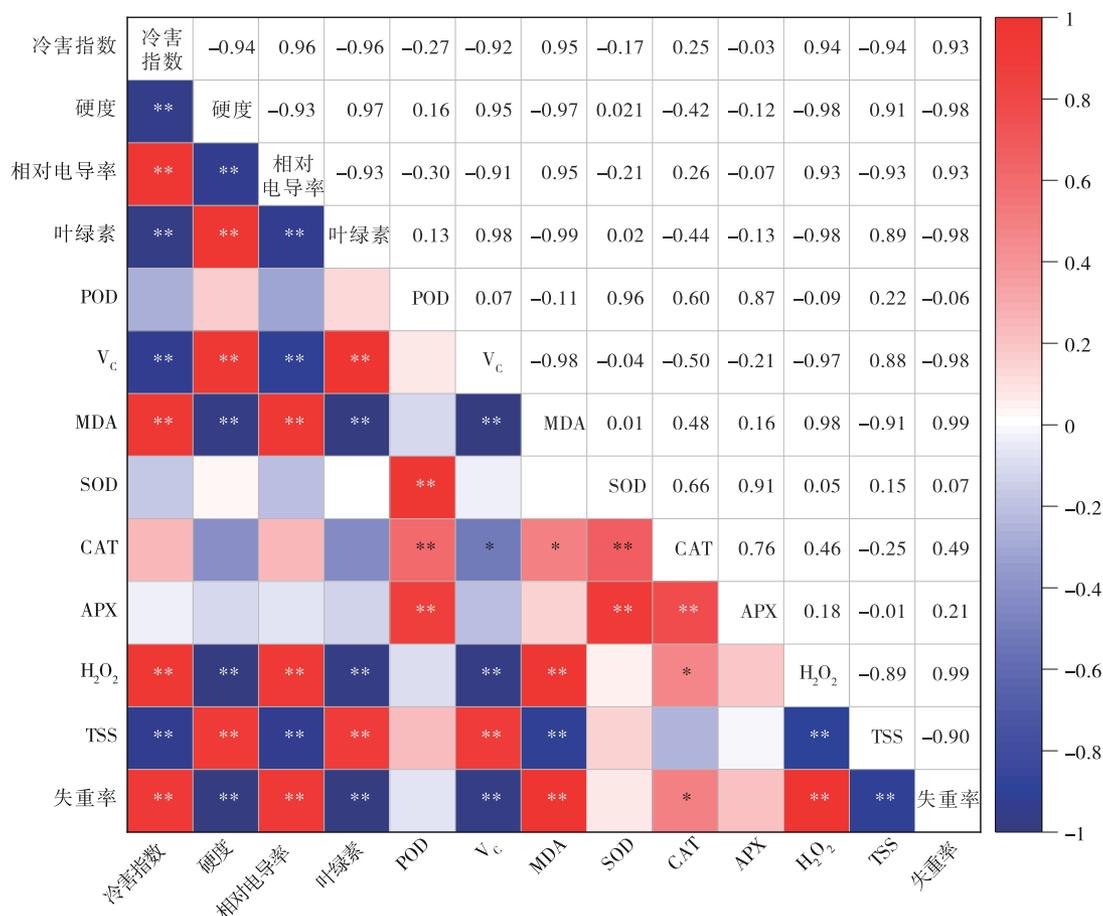
[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.7 相关性分析

为进一步探究影响青椒各品质指标之间的相互关系,对低温冷害最佳处理HC+MT组各项指标进行了Pearson相关性分析。由图6可知,冷害指数与相对电导率、MDA、H₂O₂、失重率呈极显著正相关(0.93~0.96),与TSS、APX、叶绿素呈显著负相关(0.94~0.96);硬度与POD、V_c含量、叶绿素呈极显著负相关,相关系数均超0.95;相对电导率与SOD呈极显著负相关(0.21),与H₂O₂含量和MDA呈正相关(0.97~0.98);H₂O₂含量与维生素C含量、叶绿素呈极显著负相关(0.13~0.21),与MDA、失重率呈显著正相关性(0.98~0.99)。

3 结论

采用热激复合褪黑素处理技术,延缓了青椒果实冷害发生,维持了青椒的品质并延长了货架期。具体表现在能有效降低青椒冷害指数和失重率,抑制H₂O₂含量,增强抗氧化酶活性,减缓冷胁迫中膜质过氧化,延缓丙二醛的增加和相对电导率升高,同时较好地保持了可溶性固形物含量和硬度,以及在叶绿素和维生素C含量等方面



* P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01

图 6 HC+MT 复合处理对青椒贮藏过程中不同指标间相关性分析热图

Figure 6 Heatmap of correlation analysis between different indexes during storage of green peppers under HC+MT combined treatment

均有显著的提升。但关于二者减轻青椒冷害的机制还需进行深入研究。

参考文献

[1] O'DONOGHUE E M, BRUMMELL D A, MCKENZIE M J, et al. Sweet capsicum: postharvest physiology and technologies[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2018, 46(4): 269-297.

[2] RAMANA RAO T V, GOL N B, SHAH K K. Effect of postharvest treatments and storage temperatures on the quality and shelf life of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 132: 18-26.

[3] ENDO H, MIYAZAKI K, OSE K, et al. Hot water treatment to alleviate chilling injury and enhance ascorbate-glutathione cycle in sweet pepper fruit during postharvest cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 257: 108715.

[4] KORKMAZ A, KORKMAZ Y, DEMIRKIRAN A R. Enhancing chilling stress tolerance of pepper seedlings by exogenous application of 5-aminolevulinic acid[J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 67(3): 495-501.

[5] WANG S Y, SHI X C, WANG R, et al. Melatonin in fruit production and postharvest preservation: a review[J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126642.

[6] SHAH H M S, SINGH Z, AFRIFA-YAMOAH E, et al. Insight into the role of melatonin in mitigating chilling injury and maintaining the quality of cold-stored fruits and vegetables[J]. Food Reviews International, 2024, 40(5): 1 238-1 264.

[7] JIAO J Q, JIN M J, LIU H, et al. Application of melatonin in kiwifruit (*Actinidia chinensis*) alleviated chilling injury during cold storage[J]. Scientia Horticulturae, 2022, 296: 110876.

[8] CHEN H B, LIN H T, JIANG X J, et al. Amelioration of chilling injury and enhancement of quality maintenance in cold-stored guava fruit by melatonin treatment[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100297.

[9] SHEKARI A, HASSANI R N, AGHDAM M S, et al. The effects of melatonin treatment on cap browning and biochemical

- attributes of *Agaricus bisporus* during low temperature storage [J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129074.
- [10] 徐萍, 黄婷, 刘士琦, 等. 褪黑素对冷藏后芒果果实冷害和后熟的影响及生理机制[J]. *食品科学*, 2024, 45(8): 218-227.
XU P, HUANG T, LIU S Q, et al. Effect of melatonin on chilling injury and ripening of postharvest mango fruits during shelf life after refrigeration and underlying physiological mechanism[J]. *Food Science*, 2024, 45(8): 218-227.
- [11] 赵云峰, 林河通, 王静, 等. 热处理对龙眼果实采后生理和贮藏品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(5): 124-133.
ZHAO Y F, LIN H T, WANG J, et al. Effects of heat treatment on postharvest physiology and storage quality of longan fruits [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(5): 124-133.
- [12] 陈奕兆, 刚成诚, 王亦佳, 等. UV-C 处理对水蜜桃果实冷害及贮藏品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2013, 42(1): 16-21.
CHEN Y Z, GANG C C, WANG Y J, et al. Effects of UV-C treatment on chilling injury and fruit quality of peach[J]. *South China Fruits*, 2013, 42(1): 16-21.
- [13] 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 X J, WANG X Y, SU D, et al. Effect of different temperature on the qualities of modified atmosphere packaging green pepper[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 48(8): 29-36.
- [14] 郑现容, 鲜双, 谢鸿林, 等. 梯度预冷复合低温贮藏对大五星枇杷采后品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(22): 254-260.
ZHENG X R, XIAN S, XIE H L, et al. Effect of gradient precooling combined with low-temperature storage on postharvest quality of Dawuxing loquats[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(22): 254-260.
- [15] 姚文思, 金鹏, 许婷婷, 等. 外源甘氨酸甜菜碱处理对西葫芦果实冷害和品质的影响[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1 781-1 788.
YAO W S, JIN P, XU T T, et al. Effects of exogenous glycine betainetreatment on chilling injury and quality of *Cucurbita pepo* L. under low temperature storage [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(9): 1 781-1 788.
- [16] 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: 75.
CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. *Experimental guide for postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 75.
- [17] LIN Y F, LIN H T, LIN Y X, et al. The roles of metabolism of membrane lipids and phenolics in hydrogen peroxide-induced pericarp browning of harvested Longan fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 111: 53-61.
- [18] 王锋, 赵旗峰, 张晓萍, 等. 壳聚糖—纳米 ZnO-褪黑素复合涂膜对黄瓜冷害的影响及其机制研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 201-207.
WANG F, ZHAO Q F, ZHANG X P, et al. Effect of chitosan-nano-ZnO-melatonin composite coating on cucumber chilling injury and mechanism[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 201-207.
- [19] 朱芹. 外源褪黑素和热处理对冷藏水蜜桃冷害发生的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
ZHU Q. Effects of exogenous melatonin and heat treatment on chilling injury of peach[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [20] 孙萌, 罗志雄, 彭敏, 等. 低温对水稻幼苗根系活性氧代谢及其相关基因表达的影响[J/OL]. *分子植物育种*. (2022-01-05) [2025-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220105.1152.004.html>.
SUN M, LUO Z X, PENG M, et al. Effects of low temperature stress on reactive oxygen metabolism and related gene expression in rice seedling roots[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*. (2022-01-05) [2025-01-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20220105.1152.004.html>.
- [21] KONG X M, GE W Y, WEI B D, 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.
- [22] 何欢, 刘昭雪, 张亚琳, 等. 外源褪黑素通过调控活性氧代谢减轻采后杏果实冷害[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 168-174.
HE H, LIU Z X, ZHANG Y L, et al. Exogenous melatonin ameliorates postharvest chilling injury of apricot fruit by modulating reactive oxygen species metabolism[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 168-174.
- [23] 刘家粮, 张越, 刘力霞, 等. 褪黑素对采后荔枝果实冷害及生理变化的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 200-213.
LIU J L, ZHANG Y, LIU L X, et al. Effect of melatonin on chilling injury and physiological changes in litchi fruit during cold storage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(12): 200-213.