

蓝光LED延缓黄瓜采后冷害的效果研究

张苗苗, 陈书瑶, 张芳*

(中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266000)

摘要: 为探究蓝色发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 对典型冷敏性蔬菜采后冷害的影响。实验以黑暗处理为对照组, 以光照强度 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 每天照射 12 h 的蓝光 LED (460 nm) 为处理组。黄瓜在 4°C 下冷藏 10 d, 每间隔 2 d 测定黄瓜冷害和品质指标, 并对其活性氧代谢进行探究。结果表明: 相较于对照组, 蓝光 LED 处理使黄瓜的冷害指数降低了 30%, 失重率减少了 11.69%, 同时保持较高的硬度、 L^* 、叶绿素和可溶性固形物含量。此外, 蓝光 LED 处理促进总酚和类黄酮含量增加, 提升抗氧化酶活性, 从而提高了自由基清除率, 降低 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 含量。因此, 蓝光 LED 处理通过激活抗氧化系统维持氧化稳态, 进而延缓黄瓜冷害并保持其品质。研究结果为延长黄瓜低温贮藏期并减少其采后损耗提供了 LED 光保鲜条件。

关键词: 蓝光; LED; 黄瓜; 冷害; 氧化稳态

文章编号: 1673-9078(2026)07-114-121

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0555

Effects of Blue LED on Delaying Postharvest Chilling Injury in Cucumber

ZHANG Miaomiao, CHEN Shuyao, ZHANG Fang*

(College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China)

Abstract: The effects of blue light-emitting diodes (LEDs) on postharvest chilling injury were examined in a representative chilling-sensitive vegetable. Cucumbers were divided into two groups: the first group was placed in constant darkness; the second group was irradiated with 460 nm blue LED light at $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ for 12 h every day. All cucumbers were stored at 4°C for ten days. Chilling injury indicators, quality parameters, and reactive oxygen species (ROS) metabolism were analyzed every two days. The results demonstrated that compared to the control group, blue LED treatment significantly reduced the chilling injury index by 30% and decreased the weight loss rate by 11.69%, while also effectively maintaining higher firmness, L^* , chlorophyll, and soluble solids in cucumber. Furthermore, blue LED treatment increased total phenolic and flavonoid content, as well as antioxidant enzyme activities, thus, collectively enhancing free radical scavenging capacity and reducing superoxide anion ($\text{O}_2^{\cdot-}$) content. Therefore, blue LED irradiation mitigates chilling injury and preserves postharvest quality in cucumber by activating antioxidant systems, thereby maintaining oxidative homeostasis. The results of this study provide the LED preservation conditions required to extend the low-temperature storage of cucumbers and reduce postharvest losses.

Key words: blue light; LED; cucumber; chilling injury; oxidative homeostasis

引文格式:

张苗苗,陈书瑶,张芳.蓝光LED延缓黄瓜采后冷害的效果研究[J].现代食品科技,2026,42(7):114-121.

ZHANG Miaomiao, CHEN Shuyao, ZHANG Fang. Effects of blue LED on delaying postharvest chilling injury in cucumber [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 114-121.

收稿日期: 2025-04-18; 修回日期: 2025-05-28; 接受日期: 2025-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32172275)

作者简介: 张苗苗 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品冷藏与加工, E-mail: 18365852681@163.com

通讯作者: 张芳 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品冷藏与保鲜, E-mail: zhangfang@ouc.edu.cn

黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 质地脆嫩、风味清新、营养丰富, 广受消费者喜爱^[1]。然而, 作为典型的冷敏性蔬菜, 黄瓜在冷链贮运环节中极易发生冷害, 导致其品质劣变和商品价值下降, 严重制约其产业的提质增效。近年来, 相比于化学方法, 物理技术因绿色环保、无化学残留、安全性高等优势而备受关注, 但热处理可能引发果皮黄化和质地软化等品质劣变现象^[2], 气调贮藏因成本高难以推广^[3]。因此, 开发高效且成本低的低温保鲜策略仍是亟待解决的难题。

研究表明^[4], 冷害的发生与细胞内活性氧的爆发及过度累积密切相关。为维持细胞内活性氧的稳态, 植物进化出一套由超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 等抗氧化酶系统及多酚、类黄酮等非抗氧化酶系统协同作用的复杂防御机制。激活抗氧化防御系统、减少活性氧累积并维持氧化还原平衡, 可诱导黄瓜对冷害的抗性^[5]。因此, 维持氧化稳态对于延缓黄瓜冷害具有重要意义。

与传统光源相比, 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 凭借节能、耐用、单色可调光谱等优势, 已广泛应用于果蔬采后保鲜领域^[6]。例如, 蓝光 LED 可以提高鲜切苋菜的抗氧化能力^[7], 并通过激活活性氧清除系统调节氧化稳态, 诱导樱桃番茄^[8]、柑橘类水果^[9]的抗病性。同时, 红光 LED 能够提高西兰花中的抗氧化酶活性和自由基清除能力^[10], 并通过抑制衰老调控基因的表达延长小白菜的贮藏期^[11]。然而, LED 光在黄瓜中的研究多聚焦植株光合作用及生理代谢的影响^[12], 而针对黄瓜采后果实品质的研究较少。尽管 Towery 等^[13]发现蓝光可改善黄瓜感官品质, 但与其与冷害的关联机制尚未解析, 因此 LED 光保鲜技术在采后黄瓜领域的应用潜力需进一步挖掘。蓝光虽被证实可通过激活低温响应通路增强植物耐寒性^[14], 但而其对采后果蔬抗冷性的调控机制仍不明确, 尤其是蓝光 LED 能否通过调节活性氧代谢缓解冷害尚未得到系统解析。基于此, 本文以黄瓜为对象, 研究蓝光 LED 对其冷害、品质参数及活性氧代谢的影响, 以期揭示蓝光 LED 缓解采后黄瓜冷害的潜在作用, 为拓展蓝光 LED 在果蔬冷链中的精准应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

黄瓜, 采摘于山东省青岛市健力源生态农场, 需在 3 h 内运回实验室。超氧阴离子含量试剂盒, 北京索莱宝科技公司; SOD 试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 肉桂酸 4-羟基化酶 (C4H) 试剂盒、4-香豆酸:

辅酶 A 连接酶 (4CL) 试剂盒、查尔酮异构酶 (CHI) 试剂盒, 苏州格锐思生物科技公司; RNAprep Pure Plant Plus 试剂盒, 北京天根生化科技公司; HiScript II 1st Strand cDNA Synthesis 试剂盒、ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix 试剂盒, 南京诺唯赞生物科技股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

6F42506 型生物显微镜, 奥林巴斯工业公司; CR-400 型色差仪, 科尼卡美能达公司; P216950 型手持糖度计, 艾拓科技公司; Legend Micro 21R 型微量离心机, 赛默飞世尔科技公司; Powerwave XS 型酶标仪, Biotek 公司; TMS-TOUCH 型食品物性分析仪, Food Technology Corporation 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 采后处理及冷藏

将经蒸馏水清洗、自然晾干后的黄瓜随机分为两组。在冷藏柜顶端中部安装有含散热装置的 LED 小灯珠, 通过照度计测定黄瓜表面的光照强度, 调整光源位置, 确保所有受光部位的光照强度均匀一致。此时, 光源距离为 30 cm。在采后冷藏阶段, 设置蓝光 LED 处理组与对照组 (CK 组)。蓝光 LED 处理组: 采用波长为 460 nm、光照强度为 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的蓝光 (460 nm), 每天间歇性照射黄瓜果实 12 h 直至冷藏结束。对照组 (CK 组): 始终置于相同温度下的黑暗环境中冷藏, 并采取遮光措施以确保无光照干扰。所有处理后的黄瓜均装入厚度为 0.01 mm 的聚乙烯塑料袋中, 置于 4 °C 冷藏柜中冷藏 10 d。冷藏期间, 每隔 2 d 取样一次, 取样后的样品经液氮快速碾磨后, 置于 -80 °C 冰箱中保存, 以备后续分析检测使用。

1.3.2 冷害评价指标测定

参考 Huang 等^[4]方法, 根据黄瓜水渍状斑点和凹陷斑的面积, 将冷害程度分为 5 级: 0 级 (无冷害)、1 级 (<25%)、2 级 (25%~50%)、3 级 (51%~75%) 和 4 级 (>75%)。冷害指数如式 (1) 计算:

$$CI = \frac{\sum n \times N_n}{4 \times N} \quad (1)$$

式中:

n ——果实冷害等级;

N_n ——果实冷害级数;

N ——每组果实总数。

参考 Wang 等^[15]方法, 评估黄瓜的失重率, 结果以 % 表示。参考王浩等^[16]的方法, 使用食品物性分析仪测定黄瓜的硬度, 结果以 N 表示。

参考 Kong 等^[17]方法, 取黄瓜果皮切片置于载玻片上, 滴加去离子水并盖上盖玻片, 将载玻片放置于显微镜载物台上, 滴加香柏油后观察细胞形态。

1.3.3 品质指标测定

使用色差仪测定黄瓜果皮的明度值 (L^*)。参考王浩等^[16]方法测定黄瓜果皮中叶绿素的含量, 结果以 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 表示。参考 Ali 等^[18]的方法使用糖度计测定黄瓜果实中可溶性固形物含量, 结果以 % 表示。

1.3.4 活性氧含量测定

使用超氧阴离子含量检测试剂盒测定黄瓜果皮中超氧阴离子 (O_2^-) 的含量, 结果以 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示。

1.3.5 自由基清除率测定

参考 Zuo^[19]等方法, 测定黄瓜果皮中 1,1-二苯基-2-苦基肼 (DPPH) 自由基和羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$) 的清除率。 $\cdot\text{OH}$ 清除率测定采用 Fenton 反应法, 两者的结果均以 % 表示。

1.3.6 抗氧化酶活性测定

使用 SOD 试剂盒测定 SOD 酶活性。参考 Zuo^[19]方法测定 POD 酶活性, 定义每克样品每分钟吸光度变化 1 时为一个 POD 酶活力单位 (U)。参考 Ali 等^[18]方法测定 CAT 酶活性, 定义每克样品每分钟吸光度变化 0.01 为一个 CAT 酶活力单位 (U)。上述酶活性结果均以 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示。

1.3.7 酚类化合物含量和苯丙烷代谢相关酶活性测定

参考 Sun 等^[8]方法测定黄瓜中的总酚和类黄酮含量。总酚的反应体系由 3 mL 稀释 10 倍的福林酚、2.4 mL $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 饱和碳酸钠和 0.6 mL 上清液组成, 反应体系混合均匀后在波长 760 nm 测定吸光值。类黄酮的反应体系由: 1 mL 上清液、0.3 mL 4 wt.% 氯化铝、0.3 mL 10 wt.% 亚硝酸钠和 4 mL 4 wt.% 氢氧化钠组成, 反应体系混合均匀后在 510 nm 处测定吸光值。结果均以 $\text{mg}/100\text{ g}$ 表示。

参考 Sun 等^[8]方法测定苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的活性, 反应体系由 0.5 mL 上清液、2 mL $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ pH 值 8.8 的硼酸缓冲液以及 0.5 mL $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ L-苯丙氨酸溶液组成。使用 C4H、4CL 和 CHI 试剂盒分别测定 C4H、4CL 和 CHI 的相应酶活力, 以 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ 表示。

1.3.8 抗氧化酶基因表达水平测定

提取黄瓜表皮细胞总 RNA 后进行反转录 cDNA。使用 ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix 试剂盒进行 RT-qPCR 定量分析, 按照 $2^{-\Delta\Delta\text{CT}}$ 法计算基因表达

量。用于基因表达检测的 RT-qPCR 引物见表 1。

表 1 基因表达检测的RT-qPCR引物

Table 1 RT-qPCR primers for gene expression detection	
基因	引物序列 (5'-3')
<i>Actin</i>	F: ACGCTGTTGGTGGTGGTAC
	R: GAGAGGGGTAAACAGTGAATC
<i>CsSOD</i>	F: GCTGATGGAGTAGCAGAGGC
	R: CCAATCTTCCACCCGCATTG
<i>CsPOD</i>	F: GAGTGCTTGTCCAGGAGTTGT
	R: CTGAGGGACCAGGTAAGTTTG
<i>CsCAT</i>	F: GCTTCAGACCAGGATCTTCTC
	R: AAGTAATTCACCTCCTCATCTCGG

1.4 数据处理分析

所有数据均来自 3 次重复的实验, 使用 SPSS 27.0 (Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行数据分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准差 ($n\geq 3$) 表示, 并采用独立样本 t 检验进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 蓝光LED处理对黄瓜冷害评价指标的影响

蓝光 LED 对黄瓜冷害的评价指标如图 1 所示。冷害指数直接反映黄瓜冷害发生的程度, 由图 1a 可知, CK 组冷害指数随着冷藏时间迅速上升, 而蓝光 LED 处理显著抑制了冷害指数的增加, 直至冷藏结束时, 较 CK 组低 30% ($P<0.05$), 表明蓝光 LED 延缓了黄瓜冷害的发展。当果蔬遭受冷害后, 其呼吸强度会大幅增加, 导致营养物质消耗增多, 进而使果蔬失重率增高。由图 1b 可知, 黄瓜失重率随冷藏时间的延长而逐渐上升, 冷藏结束时, 蓝光 LED 处理组失重率比 CK 组低 11.69%。这可能是因为蓝光处理会在黄瓜果皮形成薄干燥层, 该薄膜有助于减少水分蒸发^[20]。低温会增强细胞壁降解酶活性, 加速果胶的溶解, 从而导致果实软化。蓝光 LED 处理组黄瓜显著延缓果实硬度下降 (图 1b), 这可能是蓝光通过抑制细胞壁多糖降解相关酶活性, 维持细胞壁多糖稳定性, 进而延缓软化过程^[15]。类似的现象也出现在经过蓝光 LED 处理的铜陵白姜^[15]和番茄^[8]中。蓝光 LED 处理对黄瓜果皮细胞形态结构的影响, 由图 1c 可知, 新鲜的黄瓜表皮表现出正常的薄壁组织和不可见的细胞间隙, 细胞间结合紧密。贮藏 10 d 后, 黑暗组的薄壁细胞有明显破坏, 细胞间隙有所增大, 但是经蓝光处理的细胞表现出较好的薄壁组织、细胞间结合紧密。上述结果表明, 蓝光 LED 有效缓解了黄瓜冷藏期间的水分损失及软化现象, 延缓了黄瓜的冷害。

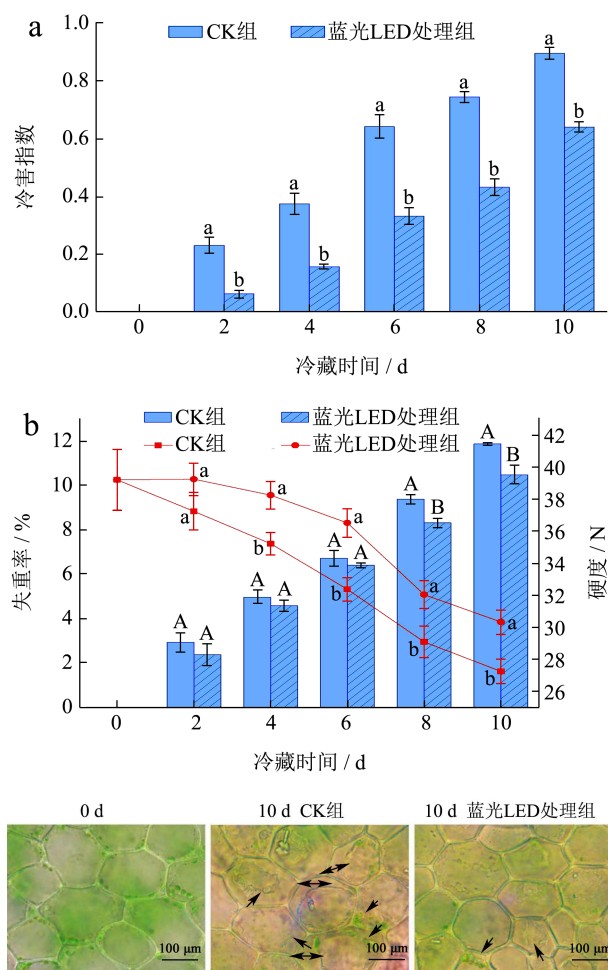


图1 蓝光LED处理对黄瓜冷害评价指标的影响

Fig.1 Effects of blue LED treatment on the evaluation indexes of chilling injury in cucumbers

注: 图中数值是平均值 ± 标准偏差 ($n=3$), 误差线代表标准偏差。不同字母表示蓝光LED处理组与对照组之间存在显著统计学差异 ($P < 0.05$), 下同。

2.2 蓝光LED处理对黄瓜品质的影响

由图2a可知, 体现果皮逐渐变暗的色泽检测指标 L^* 随冷藏时间延长而逐渐降低。然而, 经过蓝光LED处理的黄瓜其 L^* 降幅更小, 果皮鲜绿状态保持更优。叶绿素检测结果显示, 冷藏结束时, 蓝光LED处理延缓了叶绿素含量的下降(图2a), 类似结果也出现在蓝光LED处理的鲜切茼蒿菜中^[7], 这可能是因为蓝光LED促进叶绿素合成酶活性, 同时抑制其降解关键酶活性, 从而维持叶绿素的含量。可溶性固形物(TSS)是指果实中能溶于水的糖类、有机酸、维生素及矿物质等成分。由图2b可知, TSS的含量随冷藏时间延长呈下降趋势, 但在冷藏期间蓝光LED处理组TSS含量始终显著高于CK组($P < 0.05$)。这可能与蓝光LED调控采后黄瓜的碳代谢有关, 其通过抑制

呼吸作用减少有机物的消耗, 同时促进部分代谢中间产物积累^[21]。此外, 较高TSS含量可为黄瓜抵御低温胁迫提供能量, 进而延缓黄瓜冷害。综上, 蓝光LED处理通过维持果皮色泽、延缓叶绿素降解和可溶性固形物含量下降, 协同提升了黄瓜冷藏期间的品质。

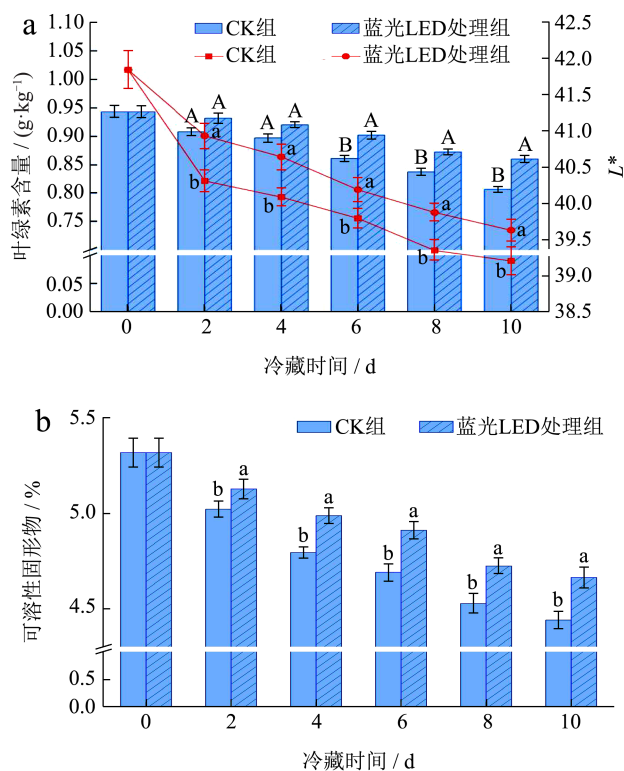


图2 蓝光LED处理对黄瓜品质的影响

Fig.2 Effects of blue LED treatment on the quality of cucumbers

2.3 蓝光LED处理对自由基清除率和 O_2^- 含量的影响

低温胁迫引发活性氧代谢失衡是果蔬冷害发生的重要诱因, 因此维持氧化还原稳态对于增强细胞低温耐受性和延缓冷害进程至关重要^[22]。本研究首先探究了蓝光LED对自由基清除率和 O_2^- 含量的影响(图3), 发现冷藏初期DPPH自由基清除率均呈上升趋势, 第4天达到峰值, 此时蓝光LED处理组清除率较CK组提高15.87% ($P < 0.05$), 随后CK组清除率快速下降, 而蓝光LED处理组下降速率显著减缓(图3a), 这一差异可能与蓝光延缓抗氧化物质的耗竭有关。与DPPH自由基清除率变化不同, $\cdot OH$ 清除率在冷藏期间持续降低, 但蓝光LED处理组始终高于CK组, 冷藏结束时蓝光LED处理组比CK组高26.62% (图3a)。由图3b可知, O_2^- 含量随冷藏时间延长持续增加, 但蓝光LED抑制了其含量增加, 冷藏结束时处理组较CK组降低了10.28% ($P < 0.05$)。

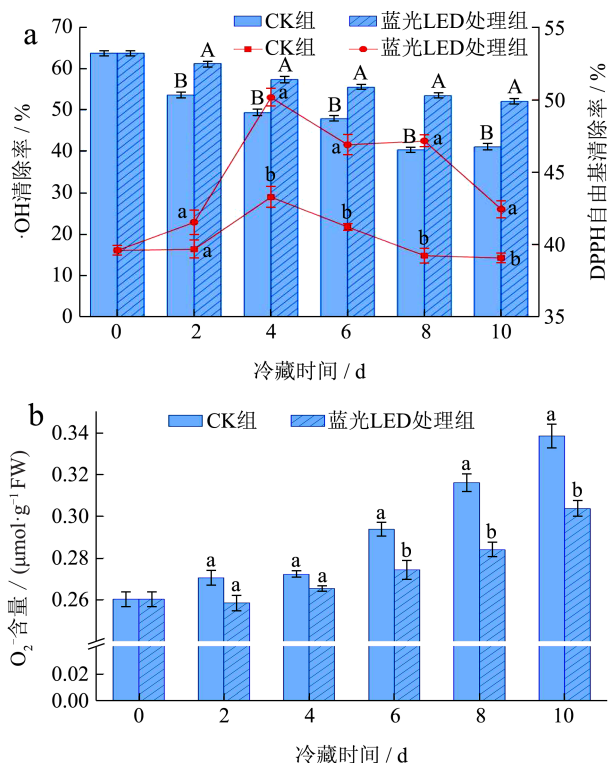
图3 蓝光LED处理对羟基自由基清除率和 O_2^- 含量的影响

Fig.3 Effects of blue LED treatment on scavenging rates of free radicals and O_2^- content in cucumbers

注: (a) 羟基自由基清除率; (b) O_2^- 含量。

2.4 蓝光LED对抗氧化酶活性的影响

为进一步探究蓝光LED对黄瓜氧化稳态的影响以解析其抗冷性提高的原因,本研究首先聚焦于酶促抗氧化系统,以抗氧化酶活性为切入点,分析其对氧化稳态的调控作用。其中SOD、CAT和POD是关键的抗氧化酶。SOD将 O_2^- 催化生成 H_2O_2 ,随后POD和CAT进一步将 H_2O_2 催化形成 H_2O 和 O_2 ,三者协同作用降低活性氧水平^[19]。蓝光LED对抗氧化酶活性的影响如图4所示。SOD和POD酶活性在冷藏过程中均呈现先升高后降低的趋势,表明冷胁迫刺激使抗氧化酶活性应激性升高,这可能是黄瓜的一种保护性反应。此外,蓝光LED处理组的SOD和POD酶活性始终高于CK组,其中POD酶活性在冷藏结束时较CK组提高了28.36% ($P < 0.05$)。CAT活性方面,蓝光LED处理组总体呈上升趋势,冷藏结束时其活性达到 $286.25 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$,较CK组($229.29 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$)提高24.84% ($P < 0.05$)。经过蓝光LED处理的鲜切茼蒿^[7]、樱桃番茄^[8]、柑橘类水果^[9]以及铜陵白姜^[15]中也出现类似现象,表明蓝光LED激活果蔬体内抗氧化防御系统可能是一个普遍现象。此外,激活抗氧化酶活性维持活性氧稳态,能够提高黄瓜抗冷性^[5]。因此,蓝光LED处理可能通过提高SOD、CAT和POD酶活性,降低 O_2^- 水平。

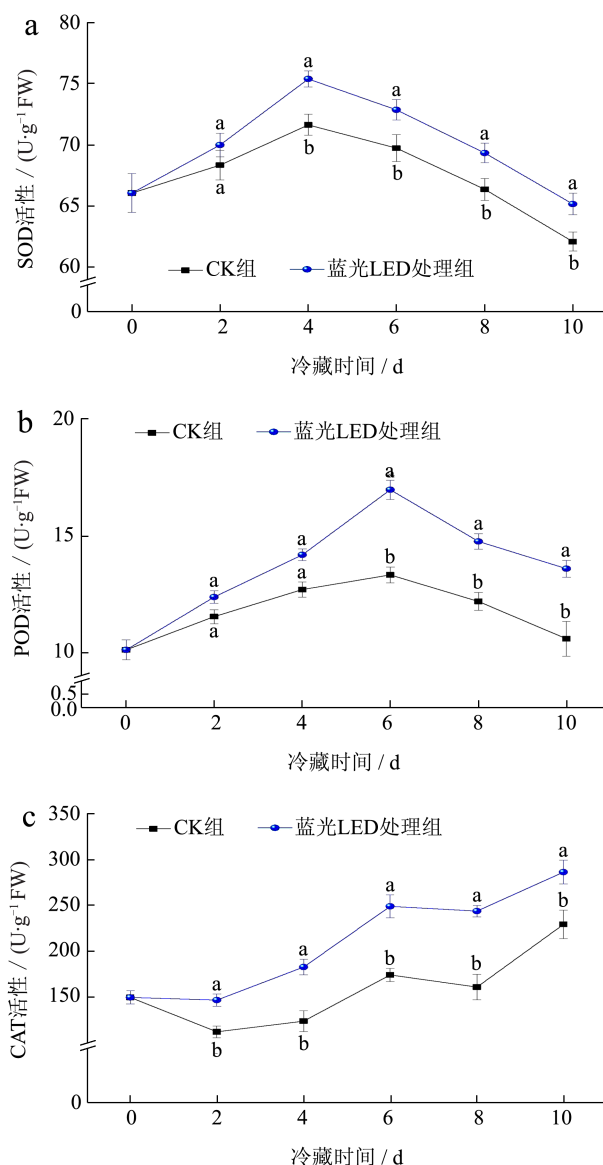


图4 蓝光LED处理对抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of blue LED treatment on antioxidant enzyme activities

2.5 蓝光LED处理对抗氧化酶基因表达水平的影响

进一步从分子水平入手探究蓝光LED对抗氧化酶基因表达的影响。由图5a可知,编码SOD酶的关键基因 CsSOD 相对表达量在第4天达到CK组的3.05倍 ($P < 0.05$)。由图5b可知, CsPOD 相对表达量持续上升,在第4天和6天时蓝光LED处理组的基因相对表达量分别是CK组的2.09倍和1.33倍 ($P < 0.05$)。图5c显示 CsCAT 相对表达量先升高后降低,在第2天和6天时相对表达量分别比CK组高25.14%和22.97% ($P < 0.05$)。因此,SOD、POD和CAT酶活性的增强可能与蓝光LED处理上调 CsSOD 、 CsPOD 和 CsCAT 基因表达有关。

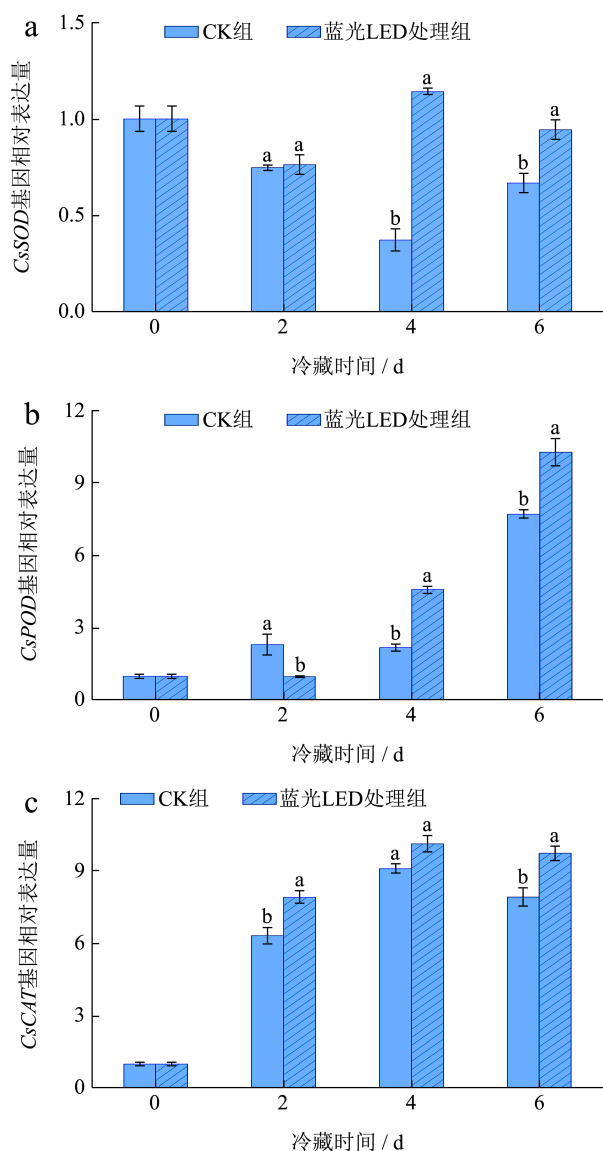


图5 蓝光LED处理对抗氧化酶基因表达水平的影响

Fig.5 Effects of blue LED treatment on gene expression levels of antioxidant enzymes

2.6 蓝光LED处理对酚类化合物含量的影响

为探究蓝光LED对非酶促抗氧化系统的影响,以酚类化合物含量为切入点,结果显示,在冷藏期间,总酚和类黄酮含量均呈现先上升后降低的趋势(图6)。这可能是由于低温胁迫促进酚类和类黄酮积累,但随着冷藏时间延长,酚类化合物作为自由基的抗氧化淬灭剂发挥作用,导致其含量降低^[23]。但是,蓝光LED处理组的峰值更高且下降速率更缓。冷藏结束时,蓝光LED处理组类黄酮含量较CK组提高了13.11%。Sun等^[8]也发现蓝光LED处理樱桃番茄也观察到较高的总酚和类黄酮含量。研究表明,蓝光LED能够激活苯丙烷代谢相关酶,促进酚类合成和积累^[24]、清除活性氧以减轻氧化损伤,进而延缓果实冷害。因此,

结合图3的实验结果,推测蓝光LED可能通过促进酚类化合物的积累,提高自由基清除力,参与黄瓜抗冷性提升。

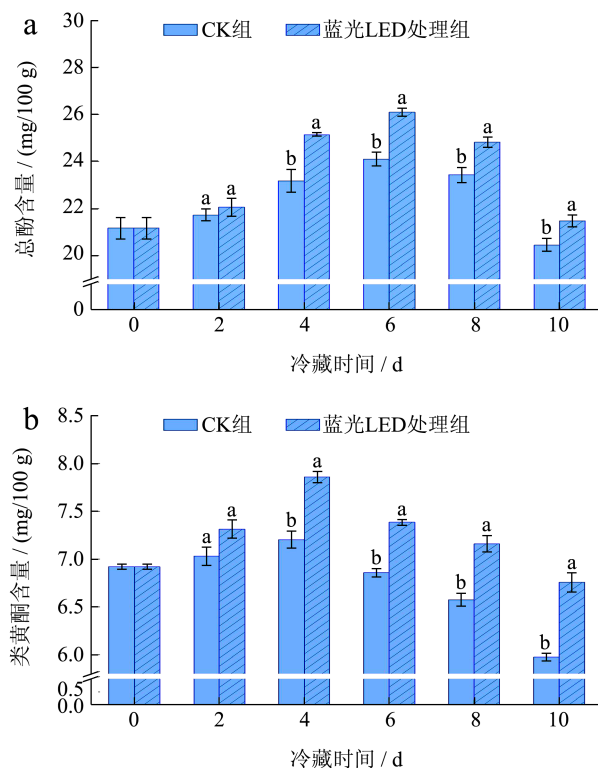


图6 蓝光LED处理对酚类化合物含量的影响

Fig.6 Effects of blue LED treatment on the content of phenolic compounds

2.7 蓝光LED处理对苯丙烷代谢相关酶活性的影响

为探究蓝光LED诱导酚类物质含量增加的原因,研究聚焦于酚类和类黄酮化合物生物合成和积累密切相关的苯丙烷代谢通路关键酶(PAL、4CL、C4H和CHI)活性变化(图7)。首先,PAL催化L-苯丙氨酸脱氨形成反式肉桂酸的限速酶,C4H是将反式肉桂酸转化为香豆酸,随后4CL催化香豆酸发生硫酸酯化反应生成4-香豆酰辅酶A。CHI是种催化查尔酮转化为黄烷酮的限速酶^[23]。由图7a可知,PAL酶活性先升高后降低,但蓝光LED处理组峰值更高且下降速率更缓,冷藏结束时,蓝光LED处理组PAL酶活性较CK提高37.95% ($P < 0.05$)。由图7b可知,C4H酶活性在冷藏期内逐渐增加,冷藏结束时较CK组增加了30.74%。由图7c可知,4CL酶活性先上升后下降,处理显著提高了4CL活性,最终达到CK组的1.82倍 ($P < 0.05$)。蓝光LED处理组的CHI酶活性在第4天和第8天分别比CK组高41.44%和23.39%(图7d)。此外,果蔬采后抗冷性增强与苯丙烷代谢酶活性提高

有关^[25],同时蓝光能够调节和刺激苯丙烷代谢相关酶活性^[24]。因此,蓝光LED处理提高了PAL、C4H、4CL和CHI酶活性,总酚和总黄酮含量相应增加。结合酚类物质已知的抗氧化特性,推测其可能协同抗氧化酶系统共同维持氧化稳态。

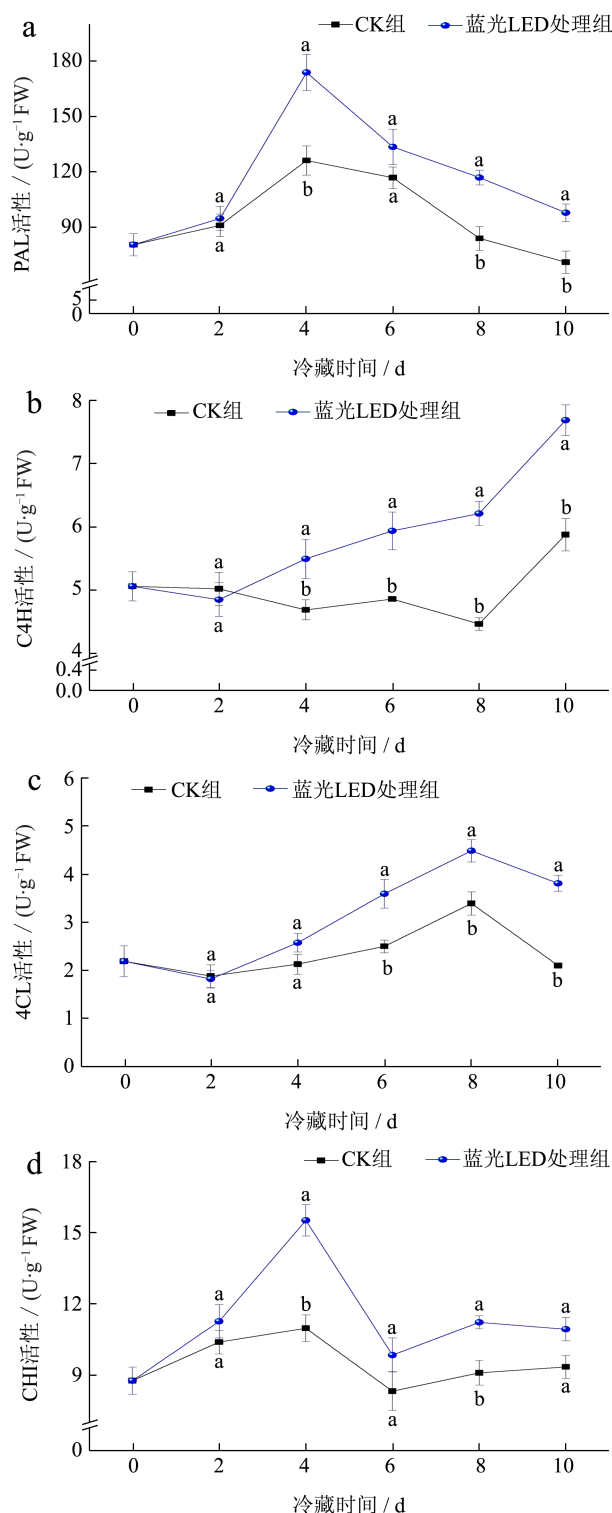


图7 蓝光LED处理对苯丙烷代谢相关酶活性的影响

Fig.7 Effects of blue LED treatment on activities of enzymes related to phenylpropanoid metabolism

3 结论

本研究证实了蓝光LED处理可有效延缓黄瓜冷害症状、维持其冷藏品质,在此基础上,揭示了蓝光LED处理是通过激活酶促抗氧化系统和增加非酶促抗氧化物质的积累,从双途径协同维持细胞氧化稳态,减少活性氧积累最终延缓黄瓜冷害的生物学机制。研究结果为该技术在家庭冰箱和冷链运输的黄瓜保鲜应用提供了理论指导。

参考文献

- [1] SATORU T, YASUMASA A, TAKASHI W, et al. Physical, chemical, and physiological characterization of the reactions preceding chilling injury-induced cell membrane damage in cucumber [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 201: 112349.
- [2] AGHDAM, M S, BODBODAK S. Postharvest heat treatment for mitigation of chilling injury in fruits and vegetables [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 37-53.
- [3] ASANDA M, OLANIYI A F, UMEZURUIKE L O. Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples-A review [J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2018, 16: 59-68.
- [4] HUANG T, LIU G, ZHU L, et al. Mitigation of chilling injury in mango fruit by methyl jasmonate is associated with regulation of antioxidant capacity and energy homeostasis [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 211: 112801.
- [5] ZHANG W, JIANG H, CAO J, et al. Advances in biochemical mechanisms and control technologies to treat chilling injury in postharvest fruits and vegetables [J]. *Trends in Food Science Technology*, 2021, 13: 355-365.
- [6] 杨何, 亢瑞琪, 郭峰, 等. LED蓝白复合光对杏鲍菇采后褐变的影响 [J]. *现代食品科技*, 2025, 41(10): 220-230.
- [7] JIN S, DING Z, XIE J, et al. Study of postharvest quality and antioxidant capacity of freshly cut amaranth after blue LED light treatment [J]. *Plants*, 2021, 10, 1614.
- [8] SUN J, TAN X, LIU B, et al. Blue light inhibits gray mold infection by inducing disease resistance in cherry tomato [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, 215: 113006.
- [9] LAFUENTE M T, ROMERO P, BALLESTER A R. Coordinated activation of the metabolic pathways induced by LED blue light in citrus fruit [J]. *Food Chemistry*, 2021, 341: 128050.
- [10] JIANG A L, ZUO J H, ZHENG Q L, et al. Red LED irradiation maintains the postharvest quality of broccoli by elevating antioxidant enzyme activity and reducing the expression of senescence related genes [J]. *Scientia Horticulture*, 2019, 251: 73-79.
- [11] SONG Y, QIU K, GAO J, et al. Molecular and physiological analyses of the effects of red and blue LED light irradiation on postharvest senescence of pak choi [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2020, 164: 111155.

- [12] LIANG Y, KANG C, KAISER E, et al. Red/blue light ratios induce morphology and physiology alterations differently in cucumber and tomato [J]. *Science Horticulture*, 2021, 281: 109995.
- [13] TOWERY P, GUFFEY J S, MOTTS S, et al. Sensory evaluation of cucumbers treated with blue light [J]. *Journal of Allied Health*, 2018, 47(1): e17-e21.
- [14] LI Y, SHI Y, LI M, et al. The CRY2-COP1-HY5-BBX7/8 module regulates blue light-dependent cold acclimation in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell*, 2021, 33(11): 3555-3573.
- [15] WANG J, WANG X, YANG X, et al. Enhance the quality of “Tongling white ginger” by blue LED treatment: Based on delaying oxidative metabolism and cell wall metabolism pathways [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2025, 227: 113568.
- [16] 王浩,祖正梅,程晨霞,等.不同处理与干燥方式对黄瓜脆片理化特性和抗氧化性的比较[J].*现代食品科技*,2024,40(4):113-120.
- [17] 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.
- [18] ALI S, ANJUM M A, NAWAZ A, et al. Postharvest γ -aminobutyric acid application mitigates chilling injury of aonla (*Emblica officinalis* Gaertn.) fruit during low temperature storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 185: 111803.
- [19] ZUO X, CAO S, JIA W, et al. Near-saturated relative humidity alleviates chilling injury in zucchini fruit through its regulation of antioxidant response and energy metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2021, 351: 129336.
- [20] ABDIPOUR M, NASERI N. Combination method of UV-B and UV-C prevents post-harvest decay and improves organoleptic quality of peach fruit [J]. *Science Horticulture*, 2019, 256: 108564.
- [21] 王雨萌,曹文浩,刘玉鑫,等.短波紫外线结合发光二极管红光辐照对香椿保鲜效果的影响[J].*食品安全质量检测学报*,2023, 14(4):65-73.
- [22] WANG X X, WEI Y Y, JIANG S, et al. Transcriptome analysis reveals that trehalose alleviates chilling injury of peach fruit by regulating ROS signaling pathway and enhancing antioxidant capacity [J]. *Food Research International*, 2024, 186: 114331.
- [23] WANG L, SHAN T M, XIE B, et al. Glycine betaine reduces chilling injury in peach fruit by enhancing phenolic and sugar metabolisms [J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 530-538.
- [24] WANG L, LIN Z, PENG C, et al. Roles of ROS in physiological, microbial and metabolomic alterations of fresh-cut sugarcane under red and blue light irradiation [J]. *Food Chemistry: X*, 2025, 26: 102344.
- [25] CUI K, SHU C, ZHAO H, et al. Preharvest chitosan oligochitosan and salicylic acid treatments enhance phenol metabolism and maintain the postharvest quality of apricots (*Prunus armeniaca* L.) [J]. *Science Horticulture*, 2020, 267: 109334.