牛梦迪, 周新, 王喆, 等. 不同 LED 光照模式对圣女果在低温贮藏过程中品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 392−399. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120322
NIU Mengdi, ZHOU Xin, WANG Zhe, et al. Effects of Different LED Lighting Modes on Quality of Cherry Tomatoes during Cold Storage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 392−399. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120322

·贮运保鲜·

不同 LED 光照模式对圣女果在低温贮藏过程中品质的影响

牛梦迪[1], 周　新[2], 王　喆[2], 王　军[1,*]
（1.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
2.合肥华凌股份有限公司, 安徽合肥 230000）

摘　要: 为探究不同光照模式对圣女果采后冷藏期间品质的影响，在 4 ℃ 的冰箱中贮藏时，分别采用 LED 红蓝复合光的 4 种处理模式对圣女果进行光照处理，分别为：光照 10 min+不光照 50 min 处理组、光照 30 min+不光照 150 min 处理组和光照 4 h+不光照 20 h 处理组，以不进行光照处理的圣女果为空白对照组。研究各处理方式对其冷藏期圣女果失重率、色泽、维生素 C 含量、总酚含量、黄酮和番茄红素含量的影响。结果表明，与空白对照组相比，不同 LED 光照模式均能减缓圣女果贮藏过程中营养品质下降的速度。光照 4 h+不光照 20 h 组合在冷藏过程中维持圣女果外观状态并延缓果实营养素的降解或提升其含量的效果最为显著。经光照 4 h+不光照 20 h 组合处理后的圣女果冷藏到第 8 d 时失重率仅为 2.72%；相对于空白对照组，冷藏第 4 d V_C 含量最大提升 20.74%，总酚含量最大提升 47.93%，黄酮含量最大提升 43.59%，第 6 d 番茄红素含量最大提升 19.59%。该条件适合与冷藏技术结合以维持圣女果采后品质。本研究为红蓝光不同光照模式处理提升果蔬采后冷藏品质提供重要参考。

关键词: LED, 红蓝光, 光照模式, 圣女果, 冷藏品质
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0392−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120322
本文网刊:

Effects of Different LED Lighting Modes on Quality of Cherry Tomatoes during Cold Storage

NIU Mengdi[1], ZHOU Xin[2], WANG Zhe[2], WANG Jun[1,*]
（1.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2.Hefei Hualing Co., Ltd., Hefei 230000, China）

Abstract: To explore the effects of different light modes on the storage quality of cherry tomatoes during postharvest refrigeration, the four treatment modes of red and blue LED composite light were used to illuminate cherry tomatoes when they were stored in the refrigerator at 4 ℃, as follows: light for 10 min+no light for 50 min, light for 30 min+no light for 150 min, light for 4 h+no light for 20 h, and no light treatment was used as the control group. The effects of each treatment on the weight loss rate, color, vitamin C content, total phenol content, flavonoid content, and lycopene content of cherry tomatoes during cold storage were studied. The results showed that compared with the control group, the different LED lighting modes could slow down the loss of nutritional quality of cherry tomatoes during storage. The combination of light for 4 h+no light for 20 h had the most significant effect on maintaining the appearance of cherry tomatoes and delaying the degradation or increasing nutrient content during the refrigeration process. On the 8th day of refrigeration, the weight loss was only 2.72%. Compared with the control group, the vitamin C content, total phenol content, and flavonoid content were increased by 20.74%, 47.93%, and 43.59% on the 4th day, respectively, and the lycopene content was increased by 19.59%

收稿日期: 2024−12−26
基金项目: 产学研科技攻关项目-基于光照技术的果蔬营养调控及机理研究（No.202305410610440）。
作者简介: 牛梦迪（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬保藏与品质评价, E-mail: niumd928@163.com。
*** 通信作者:** 王军（1975−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬保藏、加工与品质分析, E-mail: wangjun1@cau.edu.cn。

on the 6th day. This condition is suitable for combining with cold storage technology to maintain the quality of cherry tomatoes after harvest. This study provides an important reference for improving the quality of fruits and vegetables refrigerated after harvest by different treatment modes of red and blue light.

Key words: LED; red and blue light; lighting mode; cherry tomatoes; quality during cold storage

圣女果, 又名樱桃番茄, 属茄科番茄属[1]。果实色泽鲜艳, 矿物质、有机酸、维生素和番茄红素等营养物质含量丰富, 备受消费者的青睐[2]。然而圣女果属于典型的呼吸跃变型果实, 在发育结束到开始衰老这段时间, 圣女果果实的呼吸速率升高, 相关的劣变代谢加剧, 如呼吸代谢、能量代谢和活性氧代谢等, 这会导致贮藏期间果实品质下降严重[3−4]。因此, 寻找一种在贮藏期内能够减缓圣女果品质下降或提升品质的保鲜方式成为当前圣女果保鲜技术研究的热点。

低温保鲜由于操作方便、成本低廉等优点, 是目前保持果蔬采后品质和延长果蔬采后寿命的有效途径, 被广泛应用于大多数果蔬贮藏, 如通过冰箱、冰柜、冷库的使用实现冷藏[5]。光照是植物生长发育最重要的环境因素之一, 近年来光照应用于采后果蔬保鲜的研究不断增加, 如光照波长、光配比、光强度及光均匀性等对果蔬保鲜品质的影响。Loi 等[6] 和 Hasperué等[7] 发现, 绿色、白蓝色发光二极管(light-emitting diode, LED)均增加了西兰花贮藏期间其中叶绿素和抗坏血酸含量。孔得慧等[8] 发现蓝光处理可以提升鲜切番茄中抗坏血酸的含量, 白光处理提升番茄红素含量。Kokalj 等[9] 研究发现黄光处理使红番茄中总酚类化合物含量更高。目前这些研究证实: 适当地使用光线照射采后果蔬, 可使其生理代谢缓慢且正常地进行, 营养物质消耗量相应减少, 从而具有较好的贮藏品质和商品性[10]。然而在冷藏条件下, 对于不同光照模式影响果蔬品质研究较少。日累积光亮(daily light integral, DLI)指植物一天内光照时长与光照度的乘积, 可为研究植物对光的响应机制提供参考[11]。有研究表明, 相同的 DLI 条件下, 改变光照周期与光照度组合可为作物的生长发育带来不同影响[12]。光照间隔影响果实的光化学响应, 从而影响果实的贮藏品质[13]。因此本研究探讨冷藏条件下不同光照模式对圣女果采后冷藏品质的影响, 筛选出适宜的与冷藏技术结合的光照模式, 以期提高圣女果的采后贮藏品质, 同时为光照技术在果蔬冷藏市场的开发应用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

‘海南千禧’圣女果　北京某超市, 规格为 12±2 g/个, 大小均一, 硬度一致, 携带果柄, 无机械损伤; 2,6-二氯靛酚、福林酚、DNS 试剂、芦丁标准品、番茄红素标准品　北京索莱宝科技有限公司; 盐酸　国药集团化学试剂有限公司; 氢氧化钠　美国 Sigma-Aldrich 公司; 碳酸氢钠　天津市科密欧化学试剂有限公司; 氯化铝、无水碳酸钠　上海麦克林生化科技股份有限公司; 葡萄糖标准品、草酸、亚硝酸钠、抗坏血酸、没食子酸标准品　百灵威科技有限公司; 以上试剂标准品纯度≥96%, 其它试剂均为分析纯; 乙酸乙酯、乙腈、甲醇、乙醇　色谱纯, 百灵威科技有限公司。

TU-1810 紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限公司; Agilent1260 高效液相色谱仪　美国安捷伦公司; CR-400 色彩色差计　日本 KONICA MINOLTA 公司; H1750R 台式高速冷冻离心机　长沙湘仪离心机仪器有限公司; DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱　上海精宏实验设备有限公司; ME204 电子天平　梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; HH-2 数显恒温水浴锅　江苏省金坛市荣华仪器制造厂; KQ-600DE 超声波清洗机　昆山市超声仪器有限公司; MiLLi-Q 超纯水仪　美国 MILL-PORE 公司; CRBS615AD-A6 冰箱　上海科慕电器有限公司; MA37-1CN 水分测定仪　德国 Satorious 公司; LED 灯板　美的集团有限公司; 数显定时插座　宁波高新区新诚电子有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　圣女果的贮藏　将圣女果分为 4 个实验组, 在保证各光照处理组日累积光量相同的情况下, 采用冷藏常用的光照时间间隔处理样品, 其中: A 组为空白对照组(不光照)、B 组为光照 10 min+不光照 50 min 处理组、C 组为光照 30 min+不光照 150 min 处理组、D 组为光照 4 h+不光照 20 h 处理组。

将 4 组圣女果样品平铺放置于冰箱冷藏抽屉中, 660 nm 红光与 450 nm 蓝光组合灯板 LED 光源功率为 600 mW, 置于冰箱冷藏抽屉上方, 与样品距离为 10 cm 左右, 使用外联控制器控制光照模式。在(4±1)℃、相对湿度为 90% 的条件下以上述光照模式交替照射贮藏 8 d, 在贮藏第 0、2、4、6、8 d 分别取样。每次取样为 12 颗, 切片后立即浸入液氮中, 研磨成粉末, 用于测定 V_C、总酚、类黄酮、番茄红素含量, 重复测定 3 次。

1.2.2　外观变化　使用相机在小型摄影棚中对定期取出的圣女果样品外观进行拍照记录。

1.2.3　失重率　贮藏过程中各实验组失重率利用标记的圣女果失重率表示, 采用称重法测定。按下述公式计算:

$$失重率(\%) = \frac{m_0 - m_i}{m_0} \times 100$$

式中: m_0 为圣女果初始质量, g; m_i 为贮藏第 i d 时的圣女果质量, g。

1.2.4 色差 测量每组圣女果在赤道附近位置的 L^*、a^*、b^*值，L^*为亮度、a^*为红绿色、b^*为黄蓝色，按下式计算色差值(ΔE)：

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L_0^*)^2 + (a_i^* - a_0^*)^2 + (b_i^* - b_0^*)^2}$$

式中：L_i^*、a_i^*、b_i^*为圣女果贮藏第 i d 时的测定值，L_0^*、a_0^*、b_0^*为圣女果贮藏第 0 d 时的测定值。

利用 a^*和 b^*值计算得到果实的颜色饱和度(Chroma)。Chroma 值的大小反映了色素浓度的高低。

$$\text{Chroma} = \sqrt{a_i^{*2} + b_i^{*2}}$$

式中：a_i^*、b_i^*是贮藏第 i d 时的测定值。

1.2.5 V_C 含量 参考 GB 5009.86-2016，采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定，并稍作修改。称取 5.00 g 样品粉末使用 2% 的草酸溶液定容至 25 mL，摇匀后 4000 r·min^{-1} 离心 5 min，吸取上清液进行滴定。

1.2.6 总酚含量 参考 Vaezi 等[14] 的方法并稍作改进，称取 3.00 g 样品粉末加入 25 mL 的 70% 酸性乙醇溶液(盐酸将 pH 调到 2.7)，40 ℃ 超声提取 40 min，4 ℃ 下 3500 r·min^{-1} 离心 10 min，提取上清液，重复操作两次合并提取液并定容至 50 mL 容量瓶中。取上清液 0.1 mL，依次加入 1 mL 的 2 N 福林酚，3 mL 的 15%(w/w) Na_2CO_3 溶液，超纯水定容至 10 mL，摇匀室温下避光反应 30 min，在 765 nm 测定吸光值。以没食子酸的标准曲线(y=0.0945x+0.076，R^2=0.9997)确定样品的总酚含量，单位为 mg/g。每个样品平行测定三次。

1.2.7 总黄酮含量 参考 Zhao 等[15] 的方法并稍作改进。提取参考 1.2.6 总酚提取方式。取上清液 2 mL，加入 0.3 mL 的 5% $NaNO_2$ 溶液放置 5 min 后，加 0.3 mL 10% $AlCl_3$ 反应 6 min，再加入 2 mL 的 1 mol/L 的 NaOH 溶液后，加水定容至 10 mL，于 510 nm 波长下测定吸光度值，以芦丁的标准曲线(y=0.0085x−0.014，R^2=0.9976)确定样品的总黄酮含量，单位为 mg/g。每个样品平行测定三次。

1.2.8 番茄红素含量 参考乌吉木[16] 使用液相色谱法测量番茄红素含量并稍作改进。称取 5.00 g 圣女果粉末放于 50 mL 离心管中，加入 10 mL 甲醇涡旋提取 10 min，以 4000 r·min^{-1} 离心 10 min 弃去上清液。加入提取液(乙酸乙酯∶乙醇=9∶1，V/V)10 mL，涡旋提取 30 min。以 4000 r·min^{-1} 离心 10 min 过滤收集滤液，在上述离心管中再次加入 10 mL 乙酸乙酯涡旋提取，过滤收集滤液，重复提取 3~4 次至上清液无色。将全部滤液在 35 ℃ 的温度下旋蒸近 5 mL，用乙酸乙酯定容至 10 mL，涡旋混匀，过 0.22 μm 有机滤膜纯化后移入液相小瓶。色谱条件：Agilent ZORBAX SB-C_{18} 柱(250×4.6 mm，5 μm)；检测器：紫外检测器(UV)；检测波长：472 nm；流动相：A-甲醇，B-乙腈+乙酸乙酯(8∶2，V/V)，A∶B=20∶80；柱温：35 ℃；流速：1 mL·min^{-1}；进样量：20 μL。采用番茄红素标准品的色谱峰保留时间对圣女果中番茄红素进行定性，用标准曲线(R^2>0.99)进行定量分析。番茄红素(y=56112x+63572，R^2=0.9999)的标准曲线是通过绘制峰面积与相应标准化合物浓度(0.1~400 μg/g)的关系来构建的。

1.2.9 水分含量 参考 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中直接干燥法进行测定。取约 2 g 圣女果果实粉末平铺于水分测定仪的金属托盘中进行自动测定。

1.3 数据处理

实验采用完全随机设计，每组包括 3 个重复样本。营养物质含量根据测定水分含量折合成每单位干物质所含的量，采用 Excel、IBM SPSS Statistics 27 软件对实验数据进行单因素方差分析及 Duncan 多重比较，统计显著性水平为 P<0.05，采用 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同光照处理模式对圣女果外观的影响

如图 1 所示，各处理组和对照组的圣女果外观品质在采后贮藏 8 d 内没有发生明显的变化。这可能是由于实验所用的圣女果已经处于成熟状态，在贮藏期间外观变化并不明显。但是光照处理组相对于对照组表皮颜色较为鲜红，对照组在贮藏过程中表皮颜色略微变浅，表明光照处理能够一定程度维持圣女果的外观品质。

2.2 不同光照处理模式对圣女果失重率的影响

失重率能够反映果实在贮藏过程中水分流失的情况，是评价果实贮藏品质的重要指标之一[17]。测定结果如图 2 所示，随着贮藏天数的增加，不同 LED 光照模式处理组和对照组失重率均呈现出了逐渐升高的现象。在相同时间内，失重率大小为 C 组(光照 30 min+不光照 150 min)>D 组(光照 4 h+不光照 20 h)>A 组(空白对照)>B 组(光照 10 min+不光照 50 min)，C 组失重较快，与 A 组的差异达显著水平(P<0.05)，其余光照处理组与对照组之间差异不显著(P>0.05)。原因可能是随着贮藏时间的增加，圣女果受到的冷害程度变大，使细胞膜的透性增大，呼吸强度上升导致失重率升高[18]。光照 30 min+不光照 150 min 处理导致圣女果外表皮组织气孔开放程度较高，加速机体内水分和气体扩散，致使重量损失较为明显[19]。

2.3 不同光照处理模式对圣女果色泽的影响

通过分析发现，各实验组在贮藏过程中的 ΔE 均小于 3，总体色泽变化不明显。由表 1 可知，各组中代表亮度的 L^*值在贮藏期间变化不显著。空白对照组的 a^*值先降低后升高。各光照组的 a^*值变化不明显。空白对照组的 b^*值先降低后升高，D 组 b^*值逐渐降低(P<0.05)，其余两组无明显变化。对照组的

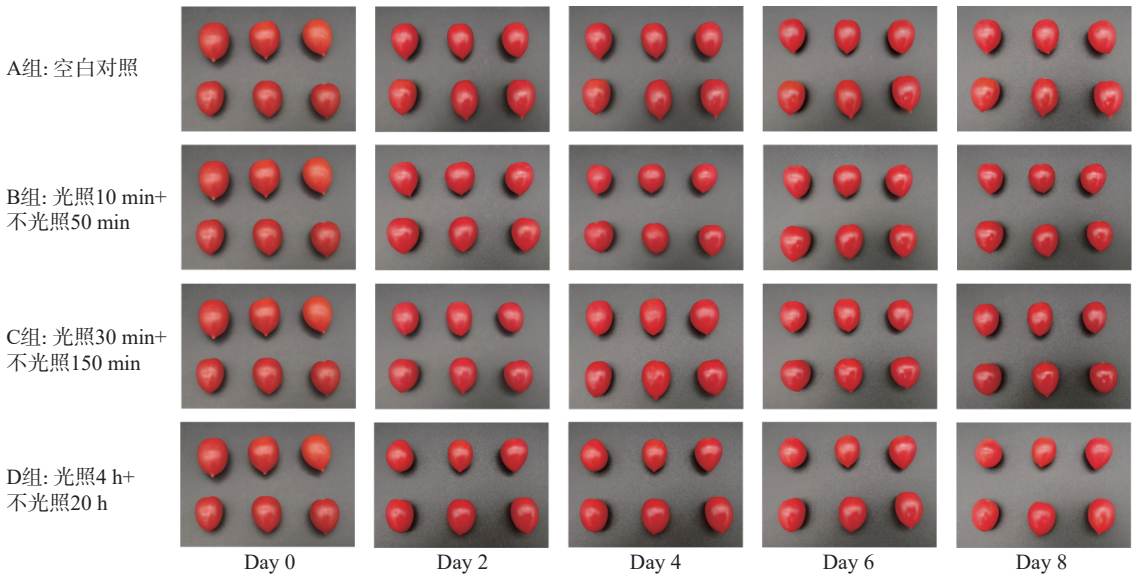


图 1　不同光照处理模式对圣女果外观的影响

Fig.1　Effect of different light treatment patterns on the appearance of cherry tomatoes

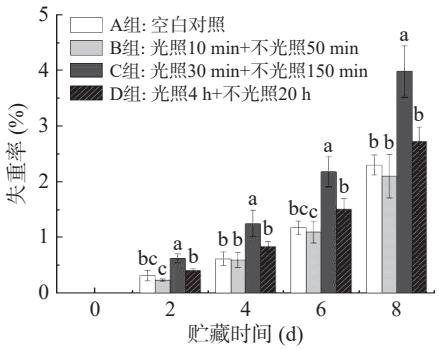


图 2　不同光照处理模式对圣女果失重率的影响

Fig.2　Effect of different light treatment patterns on the weight loss rate of cherry tomatoes

注: 不同小写字母表示同一贮藏时间不同处理间差异显著(P<0.05), 图 3~图 6 同。

表 1　不同光照处理模式对圣女果色泽的影响

Table 1　Effect of different light treatment patterns on the color of cherry tomatoes

组别	颜色系数	0 d	2 d	4 d	6 d	8 d
A组(空白对照)	L^*	35.39±0.65^{a}	35.03±0.74^{a}	34.90±0.22^{a}	35.20±0.37^{a}	35.17±0.33^{a}
	a^*	23.21±0.07^{a}	22.64±0.19^{b}	21.45±0.22^{d}	21.59±0.13^{cd}	21.72±0.09^{c}
	b^*	13.29±0.14^{a}	12.85±0.08^{b}	12.62±0.21^{b}	12.95±0.12^{ab}	13.33±0.38^{a}
	ΔE	–	0.85±0.16^{c}	1.99±0.13^{a}	1.69±0.07^{b}	1.57±0.06^{b}
	Chroma	26.74±0.13^{a}	26.03±0.20^{b}	24.89±0.27^{d}	25.17±0.18^{cd}	25.49±0.27^{c}
B组(光照10 min+不光照50 min)	L^*	35.38±0.12^{a}	35.16±0.08^{a}	35.02±0.72^{a}	34.91±0.30^{a}	34.88±0.87^{a}
	a^*	20.17±0.32^{a}	19.56±0.44^{a}	20.13±0.76^{a}	19.32±0.62^{a}	19.38±0.39^{a}
	b^*	11.98±0.49^{a}	11.50±0.61^{a}	11.11±0.38^{a}	11.60±0.29^{a}	11.53±0.15^{a}
	ΔE	–	0.87±0.16^{a}	1.11±0.29^{a}	1.07±0.34^{a}	1.24±0.20^{a}
	Chroma	23.46±0.51^{a}	22.69±0.66^{a}	23.00±0.85^{a}	22.53±0.66^{a}	22.55±0.41^{a}
C组(光照30 min+不光照150 min)	L^*	35.38±0.12^{a}	35.16±0.08^{a}	35.02±0.72^{a}	34.91±0.30^{a}	34.88±0.87^{a}
	a^*	20.17±0.32^{a}	19.56±0.44^{a}	20.13±0.76^{a}	19.32±0.62^{a}	19.38±0.39^{a}
	b^*	11.98±0.49^{a}	11.50±0.61^{a}	11.11±0.38^{a}	11.60±0.29^{a}	11.53±0.15^{a}
	ΔE	–	2.21±0.30^{ab}	2.00±0.19^{b}	1.81±0.44^{b}	2.61±0.04^{a}
	Chroma	23.46±0.51^{a}	22.69±0.66^{a}	23.00±0.85^{a}	22.53±0.66^{a}	22.55±0.41^{a}
D组(光照4 h+不光照20 h)	L^*	35.47±0.24^{a}	35.20±0.22^{a}	34.70±0.29^{a}	35.45±1.09^{a}	34.36±0.28^{a}
	a^*	21.75±0.55^{a}	21.33±0.41^{a}	21.04±1.26^{a}	21.37±1.82^{a}	21.18±0.31^{a}
	b^*	14.23±0.27^{a}	14.10±0.33^{a}	13.25±0.13^{bc}	13.65±0.23^{b}	13.14±0.15^{c}
	ΔE	–	0.53±0.13^{b}	1.58±0.46^{a}	1.42±0.54^{a}	1.68±0.16^{a}
	Chroma	25.99±0.59^{a}	25.57±0.50^{a}	24.87±1.13^{a}	25.36±1.66^{a}	24.93±0.35^{a}

注: 不同小写字母表示同一光照模式下不同时间之间比较差异显著(P<0.05)。

Chroma 值先降低后略微升高，饱和度下降，光照处理组的 Chroma 值无明显变化。研究表明，B 组与 D 组对圣女果的外观保鲜效果较好，果实外观更鲜红。由于 D 组 b^*值逐渐降低，因此 B 组的光照模式更有利于维持圣女果外观品质。

2.4 不同光照处理模式对圣女果 V_C 含量的影响

V_C 是一种水溶性维生素，广泛存在于水果和蔬菜中，能够清除果蔬组织中活性氧等自由基，有效延缓果蔬衰老，是重要的营养物质[20−21]。因此，V_C 含量是评价果蔬品质的重要指标之一。

由图 3 可知，圣女果随着冷藏时间的延长，V_C 含量出现先降低后升高的趋势。这可能由于圣女果在低温条件下产生应激作用，积累大量的活性氧，抗坏血酸-谷胱甘肽（ASC-GSH）循环在清除活性氧过程中发挥着极其重要的作用。低温下单脱氢抗坏血酸还原酶（Monodehydroascorbate reductase, MDHAR）、脱氢抗坏血酸还原酶（Dehydroascorbate reductase, DHAR）活性下降，抗坏血酸过氧化物酶（Ascorbate peroxidase, APX）活性显著增加，导致 V_C 含量在贮藏初期出现了不同程度地降低[22−23]。而后在光照条件下圣女果通过光合作用增加组织内可溶性糖含量，可溶性糖如葡萄糖是 V_C 合成的前体物质，进而促进 V_C 合成[24]。同时红光能够显著提高 AsA-GSH 循环中关键酶 L-半乳糖苷-1,4-内酯脱氢酶（LGalactono-1,4-lactone, Ga1LDH）、DHAR 和谷胱甘肽还原酶（Glutathione reductase, GR）活性及相应基因的表达水平，并抑制 MDHAR 活性及相应基因 *MDHAR* 的表达量，提升 V_C 含量[25−26]。经过不同光照循环模式的照射后，在第 2 d 时，B 组和 C 组 V_C 含量较空白对照组出现了不同程度的降低，这可能是由于 B 组和 C 组在各自光照模式下生理代谢加剧，V_C 消耗速率高于被光照影响导致的合成速率，最终使得 V_C 含量比对照组降低[27]。第 4 d，空白对照组 V_C 含量达到最低值，光照处理组均呈现上升的趋势，且含量高于空白对照组，其中 C 组和 D 组与对照组之间存在显著性差异（P<0.05）。第 6 d，B 组 V_C 含量提升幅度最为明显，光照处理组 V_C 含量均显著高于空白对照组（P<0.05）。随着贮藏时间的延长和果实的衰老，第 8 d 时，各处理组的 V_C 含量趋于相同，没有明显差异。综上，合适的光照处理模式能够提高采后贮藏期间圣女果中 V_C 的含量。

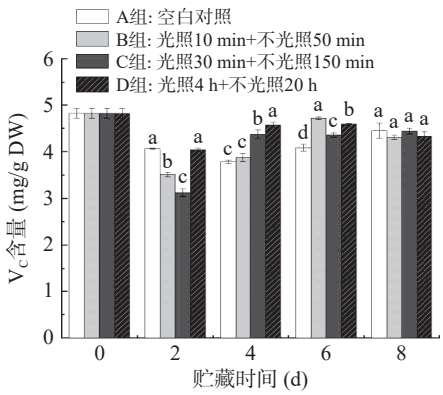


图 3 不同光照处理模式对圣女果 V_C 含量的影响

Fig.3 Effect of different light treatment patterns on V_C content of cherry tomatoes

2.5 不同光照处理模式对圣女果总酚含量的影响

总酚是果蔬中存在的重要生物活性物质和天然抗氧化成分，对人体健康具有重要价值，是影响果蔬功能的重要物质[28]。如图 4 所示，空白对照组总酚含量在贮藏 6 d 内逐渐降低，第 8 d 略有回升。B 组与 C 组中总酚含量均呈现先降后升再降的趋势，在第 2 d 时含量达到最低值，但仍高于空白对照组，之后逐渐升高，第 6 d 达到最高值。D 组在贮藏过程中总酚含量先升高后降低，第 4 d 达到峰值，并且均显著高于空白对照组（P<0.05）。表明不同光照处理均可有效提升圣女果冷藏过程中总酚的含量。圣女果果实中总酚含量的增加可能是光照处理诱导的苯丙氨酸解氨酶（L-phenylalanine ammonia-lyase, PAL）活性较高，从源头上增加多酚类物质的合成量[29]。由于光照会导致蛋白质结构发生变化，因此光照处理显著抑制贮藏期间多酚氧化酶（Polyphenol oxidase, PPO）和过氧化物酶（Peroxidase, POD）活性，如较高强度的光（12.7 W/m^2）可以通过直接光氧化吸收 PPO 氨基酸残基形成自由基的方式来抑制 PPO 活性[30]，进而使总酚降解速度减慢，导致酚类积累，而随着贮藏时间的增加，果实衰老导致总酚含量降低[31]。

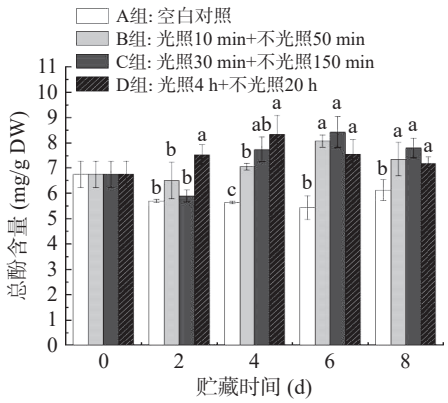


图 4 不同光照处理模式对圣女果总酚含量的影响

Fig.4 Effect of different light treatment patterns on the total phenolic content of cherry tomatoes

2.6 不同光照处理模式对圣女果黄酮含量的影响

黄酮类化合物是植物发育和防御的次生代谢产物，具有抗氧化、清除自由基等重要的功能[32]。如图 5 所示，4 ℃ 贮藏过程中，空白对照组圣女果黄酮含量先降低后升高，B 组与 C 组中第 2 d 含量降低，随后逐渐升高，第 8 d 时又呈现下降的趋势。D 组在贮藏过程中黄酮含量先升高后降低，第 4 d 达到峰值，之后下降。贮藏第 2 d B 组与 D 组含量显著高于空白对照组（P<0.05），贮藏第 4~6 d 光照组含量均显著高于空白对照组（P<0.05），第 8 d 时仅 C 组显著高

于空白对照组（P<0.05）。综上，光照处理能够不同程度地提升圣女果中黄酮含量。这可能是由于红蓝光处理提高了 PAL、查尔酮合成酶（Chalcone synthase，CHS）、查尔酮异构酶（Chalcone isomerase，CHI）的活性，从而提升黄酮含量[33]。

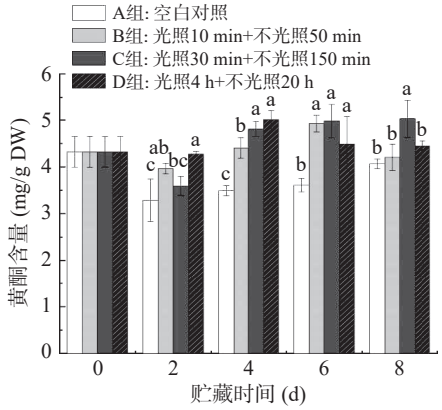


图 5　不同光照处理模式对圣女果黄酮含量的影响

Fig.5　Effect of different light treatment patterns on the flavonoid content of cherry tomatoes

2.7　不同光照处理模式对圣女果番茄红素含量的影响

番茄红素是目前发现的天然类抗氧化剂中最有效的一种单线态氧自由基清除剂，具有抗氧化、抗炎、抗癌等生物活性[34]。如图 6 所示，空白对照组番茄红素含量呈现先下降后上升趋势。在贮藏第 2 d 时，D 组番茄红素含量高于空白对照组，提升了 10.60%，C 组番茄红素含量表现为低于对照组。在贮藏第 4~6 d 时，光照处理组番茄红素含量均显著高于空白对照组（P<0.05）。随着果实衰老，番茄红素合成酶活性降低，组织内呼吸产生的活性氧不断积累，使得番茄红素不断被消耗，导致其含量降低[35]。并且 C 组和 D 组在各自光照模式下加快果实的后熟进程[27]，因此在贮藏第 8 d 时，C 组和 D 组番茄红素低于对照组。表明光照处理能够不同程度地抑制圣女果在贮藏过程中番茄红素的降解。此外果实颜色指数 Chroma 与果实中番茄红素的含量密切相关[36−37]。空白对照组与 C 组的番茄红素含量的变化趋势与表 1 中 Chroma 值的变化趋势一致，也进一步验证了该结论。研究证明红光处理能促进圣女果植株 *PSY1* 基因的转录表达，促进圣女果果实中番茄红素的合成积累[38]。蓝光照射能够激活 CRY 作用于泛素连接酶（COP1）以及其他光信号转导体，通过 COP1 异构化释放光响应因子，启动 *PSY* 基因的转录表达[39]。红蓝组合光处理对抑制冷藏过程中果实中番茄红素降解的效果优于单独红光和单独蓝光处理[27]。

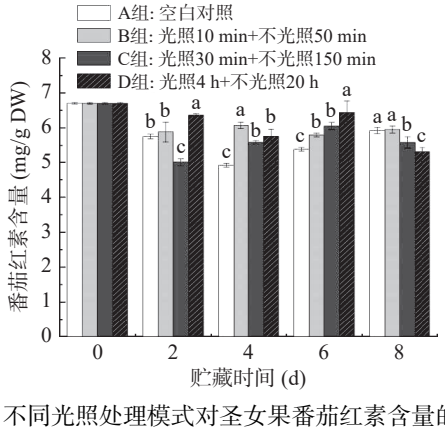


图 6　不同光照处理模式对圣女果番茄红素含量的影响

Fig.6　Effect of different light treatment patterns on the lycopene content of cherry tomatoes

3　结论

本文研究了不同光照模式下圣女果 4 ℃ 贮藏过程中失重率、色泽、V_C、总酚、黄酮以及番茄红素含量的变化。研究表明，光照模式对与圣女果品质密切相关的重要理化指标具有不同的影响效果。光照 30 min+不光照 150 min 组合和光照 4 h+不光照 20 h 组合相对于光照 10 min+不光照 50 min 组合和不使用光照技术的对照组均能更有效提升 V_C、总酚、黄酮以及番茄红素含量，但光照 30 min+不光照 150 min 组合处理会造成圣女果果实失重率升高，因此不适合应用于圣女果冷藏过程。而光照 4 h+不光照 20 h 组合能够使冷藏过程中圣女果的 L^*和 a^*值保持稳定。综上，光照 4 h+不光照 20 h 组合能够在冷藏过程中维持圣女果良好外观状态的同时延缓果实营养素的降解或提升其含量，适宜与冷藏技术结合以维持圣女果采后品质。本研究可为红蓝光处理提升果蔬采后冷藏期间的品质提供重要参考，同时为将光照与冷藏技术相结合的贮藏方式应用于果蔬保鲜冷库、冰箱的开发提供指导。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 赵燕，邱鹏程，吴凌波，等. 不同番茄品种感官品质评价[J]. 北方农业学报，2022，50(5)：87−95. [ZHAO Yan，QIU Pengcheng，WU Lingbo，et al. Evaluation of sensory qualities of different tomato varieties[J]. Journal of Northern Agriculture，2022，50(5)：87−95.]

[2] 蓝彩娟，陈洁怡，何雨薇，等. 壳聚糖-姜黄素光动力协同作用对圣女果食源性致病菌的灭活效果[J]. 食品科学，2023，44(21)：258−266. [LAN Caijuan，CHEN Jieyi，HE Yuwei，et al. Synergistic photodynamic effect of chitosan and curcumin on the inactivation of foodborne pathogens on cherry tomatoes[J]. Food Science，2023，44(21)：258−266.]

[3] 马祥臣，张萍，马雨佳，等. 枸杞枝条提取物对圣女果的贮藏保鲜效果研究[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(8)：11−21. [MA Xiangchen，ZHANG Ping，MA Yujia，et al. Research on the preservation effect of extracts from branches of *Lycium barbarum* on storage of *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme*[J]. Journal of Food Safety & Quality，2024，15(8)：11−21.]

[4] 牛培荣，马存福，魏晓博，等. 低压静电场处理对樱桃番茄采后品质及活性氧和线粒体氧化还原代谢的影响[J/OL]. 食品科学

技术学报, 2024: 1−13. (2024-10-11). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BQGB20241009001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ. [NIU Peirong, MA Cunfu, WEI Xiaobo, et al. Effect of low voltage electrostatic field treatment on postharvest quality and reactive oxygen species and mitochondrial redox metabolism in cherry tomatoes[J/OL]. Journal of Food Science and Technology, 2024: 1−13. [2024-10-11]. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=BQGB20241009001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.]

[5] DAVID S, LEVIN E, FALLIK E, et al. Physiological genetic variation in tomato fruit chilling tolerance during postharvest storage[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 991983.

[6] LOI M, LIUZZI V C, FANELLI F, et al. Effect of different light-emitting diode (LED) irradiation on the shelf life and phytonutrient content of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*)[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 206−214.

[7] HASPERUÉ J H, GUARDIANELLI L, RODONI L M, et al. Continuous white-blue LED light exposition delays postharvest senescence of broccoli[J]. LWT, 2016, 65: 495−502.

[8] 孔得慧, 赵文婷, 马越, 等. LED 光照处理对鲜切番茄冷藏期间品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(5): 45−52. [KONG Dehui, ZHAO Wenting, MA Yue, et al. Effects of light-emitting diode (LED) illumination on the quality and antioxidant capacity of fresh-cut tomatoes during refrigerated storage[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(5): 45−52.]

[9] KOKALJ D, HRIBAR J, CIGIĆ B, et al. Influence of yellow light-emitting diodes at 590 nm on storage of apple, tomato and bell pepper fruit[J]. Food Technology and Biotechnology, 2016, 54(2): 228−235.

[10] 阿热孜姑·吐逊, 古丽孜叶·哈力克, 艾力江·麦麦提. 不同比例红蓝光对茄果类蔬菜幼苗生长及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2024(15): 15−23. [Arezigu·TUXUN, Guliziye·HALIKE, Ailijang·MAIMAITI. Effects of varying proportions of red and blue light spectra on the growth and photosynthetic characteristics of solanaceous vegetables seedlings[J]. Northern Horticulture, 2024(15): 15−23.]

[11] FAUST J E, HEINS R D. Modeling leaf development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.)[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1993, 118(6): 747−751.

[12] KELLY N, CHOE D, MENG Q W, et al. Promotion of lettuce growth under an increasing daily light integral depends on the combination of the photosynthetic photon flux density and photoperiod[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 272: 109565.

[13] 刘文科. LED 短时强光照射提升植物工厂叶菜品质的应用策略[J]. 中国照明电器, 2021(8): 11−14. [LIU Wenke. Application strategy for LED short high-light in plant factory for high leafy vegetable quality[J]. China Light & Lighting, 2021(8): 11−14.]

[14] VAEZI S, ASGHARI M, FAROKHZAD A, et al. Exogenous methyl jasmonate enhances phytochemicals and delays senescence in harvested strawberries by modulating GABA shunt pathway[J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133418.

[15] ZHAO Handong, LIU Bangdi, ZHANG Wanli, et al. Enhancement of quality and antioxidant metabolism of sweet cherry fruit by near-freezing temperature storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 147: 113−122.

[16] 乌吉木. 液相色谱法测定番茄汁中番茄红素的含量[J]. 现代食品, 2020, 26(23): 198−202. [WU Jimu. Determination of lycopene in tomato sauce and tomato juice by liquid chromatography[J]. Modern Food, 2020, 26(23): 198−202.]

[17] SHEN Yan, SUN Yujing, QIAO Liping, et al. Effect of UV-C treatments on phenolic compounds and antioxidant capacity of minimally processed Satsuma mandarin during refrigerated storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2013, 76: 50−57.

[18] 赵丽丽, 李怡晴, 徐梦瑶, 等. 1-MCP 结合主动气调保鲜对鲜切小米辣贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 373−385. [ZHAO Lili, LI Yiqing, XU Mengyao, et al. Effect of 1-MCP combined with controlled atmosphere preservation on the storage quality of freshly cut *Capsicum frutescens*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 373−385.]

[19] 姚军, 郑贺云, 张翠环, 等. LED 持续光照处理对甜瓜贮藏特性及糖代谢的影响[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(7): 1689−1697. [YAO Jun, ZHENG Heyun, ZHANG Cuihuan, et al. Effects of continuous illumination with LED on storage characteristics and sugar metabolism of muskmelon[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2023, 60(7): 1689−1697.]

[20] 李彩云, 李洁, 严守雷, 等. 抗坏血酸在食品中应用的研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(4): 228−232. [LI Caiyun, LI Jie, YAN Shoulei, et al. Research progress on application of ascorbic acid in food[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(4): 228−232.]

[21] 朱娜. 高效液相色谱法测定维生素 C 含量[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(10): 315−317,328. [ZHU Na. Determination of vitamin C using high performance liquid chromatography[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2013, 32(10): 315−317, 328.]

[22] 马丽丽, 白春美, 周新原, 等. 低温贮藏对高品质番茄果实采后生理的影响[J]. 北方园艺, 2023(14): 97−104. [MA Lili, BAI Chunmei, ZHOU Xinyuan, et al. Effects of low temperature storage on postharvest physiological of high-quality tomato fruit[J]. Northern Horticulture, 2023(14): 97−104.]

[23] 林郑和, 钟秋生, 游小妹, 等. 低温胁迫对茶树抗氧化酶活性的影响[J]. 茶叶科学, 2018, 38(4): 363−371. [LIN Zhenghe, ZHONG Qiusheng, YOU Xiaomei, et al. Effects of low temperature stress on antioxidant enzyme activities in tea plants[J]. Journal of Tea Science, 2018, 38(4): 363−371.]

[24] TOLEDO M E A, UEDA Y, IMAHORI Y, et al. L-Ascorbic acid metabolism in spinach (*Spinacia oleracea* L.) during postharvest storage in light and dark[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 47−57.

[25] 陈磊, 向华丰, 曾志红, 等. 茄果类蔬菜低温耐受性鉴定及研究进展[J]. 江西农业学报, 2023, 35(10): 46−50,86. [CHEN Lei, XIANG Huafeng, ZENG Zhihong, et al. Identification and research progress in low temperature tolerance of solanaceous vegetables[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(10): 46−50,86.]

[26] AKRAM N A, SHAFIQ F, ASHRAF M. Ascorbic acid-a potential oxidant scavenger and its role in plant development and abiotic stress tolerance[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 613.

[27] ALBA R, CORDONNIER-PRATT M M, PRATT L H. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato[J]. Plant Physiology, 2000, 123(1): 363−370.

[28] GAO Tengqi, CHEN Jinling, XU Jie, et al. Screening of a novel *Lactiplantibacillus plantarum* MMB-05 and *Lacticaseibacillus casei* fermented sandwich seaweed scraps: Chemical composition, *in vitro* antioxidant, and volatile compounds analysis by GC-IMS[J]. Foods, 2022, 11(18): 2875.

[29] LÓPEZ-GÁLVEZ G, SALTVEIT M, CANTWELL M. Wound-induced phenylalanine ammonia lyase activity: Factors affecting its induction and correlation with the quality of minimally

processed lettuces[J]. Postharvest Biology and Technology, 1996, 9(2): 223−233.
[30] MANZOCCO L, QUARTA B, DRI A. Polyphenoloxidase inactivation by light exposure in model systems and apple derivatives[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 506−511.
[31] LADO J, ALÓS E, MANZI M, et al. Light regulation of carotenoid biosynthesis in the peel of mandarin and sweet orange fruits[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1288.
[32] 赵莹, 杨欣宇, 赵晓丹, 等. 植物类黄酮化合物生物合成调控研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 454−463. [ZHAO Ying, YANG Xinyu, ZHAO Xiaodan, et al. Research progress on regulation of plant flavonoids biosynthesis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 454−463.]
[33] 马慧新, 马慧丽, 齐学慧, 等. 不同光质对香椿种子萌发、幼苗总黄酮合成及相关酶活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 100−106. [MA Huixin, MA Huili, QI Xuehui, et al. Effects of different lights on seed germination, total flavonoids synthesis, and related enzyme activities of *Toona sinensis* seedlings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 100−106.]
[34] WAWRZYNIAK D, ROLLE K, BARCISZEWSKI J. Lycopene–the impact of supplementation on the skin aging process[J]. Postepy Biochemii, 2023, 69(1): 47−53.
[35] DISTEFANO M, ARENA E, MAURO R P, et al. Effects of genotype, storage temperature and time on quality and compositional traits of cherry tomato[J]. Foods, 2020, 9(12): 1729.
[36] 路绪强, 袁明, 何楠, 等. 利用色差仪快速检测西瓜番茄红素含量[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(4): 41−45. [LU Xuqiang, YUAN Ming, HE Nan, et al. Rapid determination of watermelon lycopene content by using chromatic meter[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(4): 41−45.]
[37] 周蓉, 蒋芳玲, 梁梅, 等. 用色差仪法定量分析番茄果实番茄红素的含量[J]. 江西农业学报, 2012, 24(9): 45−48,50. [ZHOU Rong, JIANG Fangling, LIANG Mei, et al. Quantitative analysis of lycopene content in tomato fruit by using colorimeter method[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2012, 24(9): 45−48,50.]
[38] 李岩, 王丽伟, 文莲莲, 等. 红蓝光质对转色期间番茄果实主要品质的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(12): 2372−2382. [LI Yan, WANG Liwei, WEN Lianlian, et al. Effects of red and blue light qualities on main fruit quality of tomato during color-turning period[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(12): 2372−2382.]
[39] 陈同强, 张天柱, 王晓卓. 光照对番茄果实中番茄红素生物合成的调控研究进展[J]. 园艺学报, 2022, 49(4): 907−923. [CHEN Tongqiang, ZHANG Tianzhu, WANG Xiaozhuo. Research progress of the regulation of light on lycopene biosynthesis in tomato fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(4): 907−923.]