

# 不同波长LED光源照射对采后冷藏蓝莓理化品质的影响

李洋\*, 袁迪, 陈丰

(东北林业大学工程技术学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 为研究光照处理对采后蓝莓冷藏期间理化品质的影响, 该实验以黑暗处理为对照组, 在 4 °C、12 d 全光照条件下对蓝莓进行不同波长 LED 红光 (620 nm)、蓝光 (460 nm) 和白光 (450 nm) 三种光源处理, 每 2 d 分别取样, 分析不同 LED 光源照射处理对蓝莓贮藏期间外观品质和营养成分指标的影响。结果表明: 与黑暗对照组相比, 各光照处理均有利于保持果实原有色泽, 贮藏 12 d 后, 蓝光处理组蓝莓的硬度最高, 可溶性固形物质量分数、可滴定酸含量分别为 13.15% 和 1.27%, 花青素含量达到了 45.79 mg/g, 是对照组的 3.48 倍; 各光照处理组中, LED 蓝光能显著抑制丙二醛物质的增加, 其含量仅为 0.88  $\mu\text{mol/g}$ ; 且蓝、红光照射可显著抑制 PPO、POD 活性的增加, 减少蓝莓果实的褐变程度, 其中蓝光效果更加显著 ( $P < 0.05$ )。因此, 蓝光处理更有利于保持蓝莓采后贮藏品质和营养价值, 延长货架期, 同时为蓝莓采后保鲜技术提供理论依据, 具备一定的应用潜力。

**关键词:** 光照处理; 蓝莓; 色泽; 蓝光; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2024)05-119-126

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.5.0552

## Effect of Different Wavelengths of LED Light Irradiation on the Physicochemical Quality of Blueberries during Postharvest Cold Storage

LI Yang\*, YUAN Di, CHEN Feng

(College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** In order to study the effect of light treatment on the physicochemical quality of postharvest blueberries during cold storage, in this experiment, dark treatment was used as the control group, and blueberries were treated with LED red light (620 nm), blue light (460 nm), and white light (450 nm) under full light conditions at 4 °C for 12 d. Samples were taken every 2 d to analyze the effects of different LED light irradiation treatments on the appearance quality and nutrient indexes of blueberries during storage. The results showed that compared with the dark control group, all light treatments were beneficial for maintaining the original color of the fruit, and after 12 days of storage, the blueberries in the blue light treatment group had the highest hardness, with the soluble solids mass fraction and titratable acid content being 13.15% and 1.27%, respectively. The anthocyanin content reached 45.79 mg/g, which was 3.48 times that of the control group; Among the light treatment groups, LED blue light could significantly inhibit the increase of malondialdehyde (content was only 0.88  $\mu\text{mol/g}$ ). Moreover, the blue and red light radiation could significantly inhibit the increases of PPO and POD activities and reduce the degree of browning

引文格式:

李洋,袁迪,陈丰.不同波长LED光源照射对采后冷藏蓝莓理化品质的影响[J].现代食品科技,2024,40(5):119-126.

LI Yang, YUAN Di, CHEN Feng. Effect of different wavelengths of LED light irradiation on the physicochemical quality of blueberries during postharvest cold storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 119-126.

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2021C016)

作者简介: 李洋 (1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 冷链物流和果蔬贮藏保鲜, E-mail: 378918917@qq.com

of blueberry fruits, with the effect of blue light being more significant ( $P<0.05$ ). Therefore, the blue light treatment was more conducive to maintaining the postharvest storage quality and nutritional value of blueberries and prolonging the shelf life, while providing a theoretical basis for postharvest blueberry preservation technology, which has certain application potential.

**Key words:** light treatment; blueberry; color; blue light; storage quality

蓝莓, 又名越橘、蔷薇果, 富含花青素、维 C、纤维素等营养物质, 具有抗氧化、改善视力、降低癌变风险等效用, 有“浆果之王”的美誉<sup>[1]</sup>。蓝莓在采后贮藏过程中因其旺盛的呼吸代谢会出现褐变、腐烂、营养成分流失等现象, 这严重制约了蓝莓市场的消费和可用性<sup>[2]</sup>。因此, 采取合适的采后处理保持蓝莓的营养品质, 延长货架期具有现实意义。目前常见的蓝莓贮藏保鲜手段主要有低温冷藏、涂膜、紫外线处理 (Ultraviolet-C, UV-C)、1-甲基环丙烯 (1-MCP) 保鲜剂和气调保鲜<sup>[3-5]</sup>等。虽然这些方法都具有一定的保鲜效果, 但都有一定的局限性, 比如存在安全隐患、投资成本大、能源消耗高等问题。光辐射技术具有绿色安全、可控性强、操作便捷等优点, 在延缓采后果蔬劣变衰老、保质保鲜方面效果出众<sup>[6]</sup>。

发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 辐照保鲜可通过选择特定波长、光照强度等方式对果蔬的呼吸作用进行调节, 延缓其生理代谢过程, 达到延长贮藏期的目的<sup>[7]</sup>。孔德慧等<sup>[8]</sup>研究发现, 鲜切番茄经蓝光照射可显著提高抗坏血酸含量和抗氧化能力。Jiang 等<sup>[9]</sup>发现 LED 红光可有效保持采后西兰花的感官品质, 增强抗氧化酶的活性, 同时抑制叶绿素降解酶基因的表达。Xu 等<sup>[10]</sup>研究发现, 草莓经蓝光处理后, 苯丙氨酸解氨酶、UDP-糖类黄酮-3-O-糖基转氨酶等酶活性显著增强, 这促进了花青素的合成。此外, LED 光照处理还应用于降低果蔬的褐变、失重率和微生物数量等<sup>[11-13]</sup>方面。然而, 目前关于 LED 光照应用于采后蓝莓的研究鲜有报道。本文旨在探究不同光照处理 (红光、蓝光和白光) 对蓝莓贮藏品质的影响, 为开发采后蓝莓保鲜新技术和 LED 光照在蓝莓的实际应用中提供理论依据和技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

“蓝丰”蓝莓, 购于哈尔滨市红旗乡蓝莓小镇, 选取果粒饱满、表面无病虫害及裂纹的蓝莓果实, 置于透气性良好的 PP 塑料包装盒中暂存, 并用垫

有泡沫棉及冰袋的规格为 60 cm×40 cm×40 cm 的瓦楞纸箱中集中运输。

氢氧化钠、碘酸钾、聚乙二醇、聚乙烯吡咯烷酮、30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液、愈创木酚溶液、邻苯二酚, 天津光富精细化工研究所; 甲醇、乙酸-乙酸钠缓冲溶液 (pH 值为 5.5), 西陇科学股份有限公司; 三氯乙酸、硫代巴比妥酸, 天津市东丽区天大化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

LED 红蓝白光光源果蔬保鲜冷藏箱 (实验室自制); TGL-20B 离心机, 上海安亭科学仪器厂; L5S 紫外可见分光光度计, 上海精密科学仪器有限公司; DPP800W 探针式温度传感器, 深圳益欧科技有限公司; Master RI 手持式折光仪, 上海仪电分析仪器有限公司; CT3-10K 质构仪, Bookfield 公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品处理

挑选无机械损伤、表皮光滑且规格差距相近的蓝莓果实, 使用聚乙烯袋 (0.2 mm, 50 cm×35 cm) 进行包装, 放置于 60 cm×80 cm 的托盘中。将蓝莓分为 4 组, 每组 30 颗, 置于温度为 4 °C, 相对湿度 (85±3)% 的冷藏箱内, 采用 LED 红、蓝、白光作为辐照源, LED 灯管与实验果品距离 30 cm。对照组: 直接放置于黑暗处; 红光处理组: LED 红光 (波长 620 nm, 光通量 2.543 lm) 照射 12 d; 蓝光处理组: LED 蓝光 (波长 460 nm, 光通量 1.209 lm) 照射 12 d; 白光处理组: LED 白光 (波长 450 nm, 光通量 98.42 lm) 照射 12 d。贮藏过程中每隔 2 d 取一次样, 测定样品的相关品质指标。

#### 1.3.2 光照分布及均匀性测定

将光照接收平面 30 cm 处的 LED 光设定为蓝光 [光强为 2.241 μmol/(m<sup>2</sup>·s)] 冷藏平面设置 5 个光强测点, 测定冷藏室接收面的光照均匀性。

#### 1.3.3 色差的测定

采用 CR-410 色差仪测定蓝莓表面的  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值, 每颗果实选取 3 个取样点, 结果取平均值。

### 1.3.4 质构的测定

参考谢晶等<sup>[14]</sup>的方法,采用质构仪进行测定。设定探头直径 2 mm,触发力为 5 g,进给量 4 mm,进给速度 0.5 mm/s,上升速度 1 mm/s。根据力-位移曲线图得到样品的硬度、内聚性、弹性和咀嚼性 4 项质构参数。

### 1.3.5 可滴定酸含量的测定

采用 NaOH 滴定法<sup>[2]</sup>测定。

### 1.3.6 可溶性固形物

各试验组取蓝莓果肉 5 g,放在研钵中研碎均匀,然后进行离心处理,取滤液用折光仪测定。每组测量 5 次,取平均值。

### 1.3.7 抗坏血酸含量的测定

参考徐瞳晖<sup>[15]</sup>的方法进行测定。

### 1.3.8 花青素含量的测定

取 2.0 g 果肉组织和少许体积分数为 1% 的盐酸-甲醇溶液混合研磨,采用紫外分光光度计法<sup>[16]</sup>测定,在波长 600 nm 和 530 nm 处测量提取液的吸光度值,以两种波长的吸光度差值表示花青素含量,每组测量 5 次,取平均值。

### 1.3.9 丙二醛 (MDA) 含量的测定

采用硫代巴比妥酸法<sup>[16]</sup>测定丙二醛含量,称取 1.0 g 果肉组织和少量 5.0 mL 100 g/L 三氯乙酸溶液,研磨、离心,取上清液加入 2.0 mL 0.67% TBA 溶液,煮沸 20 min 后再次离心,分别测定上清液在 450 nm、532 nm 和 600 nm 处的吸光值,丙二醛的计算公式如下:

$$D = \frac{c \times V}{V_s \times m \times 1000} \quad (1)$$

$$c = 6.45 \times (A_{532} - A_{600}) - 0.56 \times A_{450} \quad (2)$$

式中:

$D$ —丙二醛含量,  $\mu\text{mol/g}$ ;

$c$ —提取液中丙二醛浓度,  $\mu\text{mol/L}$ ;

$V$ —提取液总体积, mL;

$V_s$ —样品提取液体积, mL;

$m$ —样品质量, g;

$A_{450}$ —上清液在 450 nm 处的吸光度值;

$A_{532}$ —上清液在 532 nm 处的吸光度值;

$A_{600}$ —上清液在 600 nm 处的吸光度值。

### 1.3.10 氧化酶活性的测定

PPO、POD 活性的测定参考曹建康等<sup>[17]</sup>的方法,并略有修改。PPO 反应体系为 0.1 mL 酶提取液和

1 mL 邻苯二酚溶液,每隔 1 min 记录反应液在 420 nm 处的吸光度值;POD 反应体系为 3 mL 25 mmol/L 愈创木酚、0.1 mL 酶提取液和 0.2 mL 0.5 mol/L  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,每隔 1 min 记录反应液在 470 nm 处的吸光度值。

## 1.4 数据处理与分析

所有数据进行 3 次平行测定,采用 Excel 2019 和 SPSS 19 软件进行数据处理和显著性分析,采用 Origin 2021 软件进行相关图像绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 光照分布及均匀性

为了研究平面距离对光源光照特性的影响,在蓝莓冷藏平面设置 5 个光强测点,不同距离下光接收平面光强测点分布如图 1 所示。图中的 5 个光强测点均匀分布在长为 28 cm、宽为 21 cm 的平面内。不同测点光照强度如表 1 所示,结果表明各光照点之间光强较均匀,其中监测点 3 区域内光强略高于同一平面内其余监测点的光强值,这是由于 LED 光照在此区域内受光源散射角的影响较小,而 1、2、4、5 区域受其影响相对较大。总体而言,距离 LED 光源越远,光照强度越弱,反之,光照强度则越强,光照强度在各个直线距离相等的点上光强一致。本试验结果为后续 LED 光照冷藏蓝莓研究提供了试验基础。

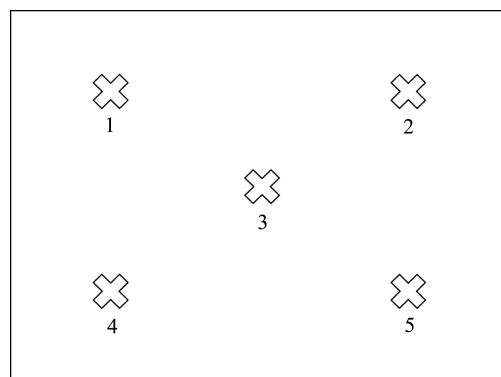


图 1 光强测点分布图

Fig.1 Distribution of light intensity measurement points

表 1 不同测点光照强度

Table 1 Intensity of light at different measuring points

测点编号	光照强度/ $[\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$
1	2
2	2
3	2.1
4	2
5	2

## 2.2 不同LED光照对蓝莓色差的影响

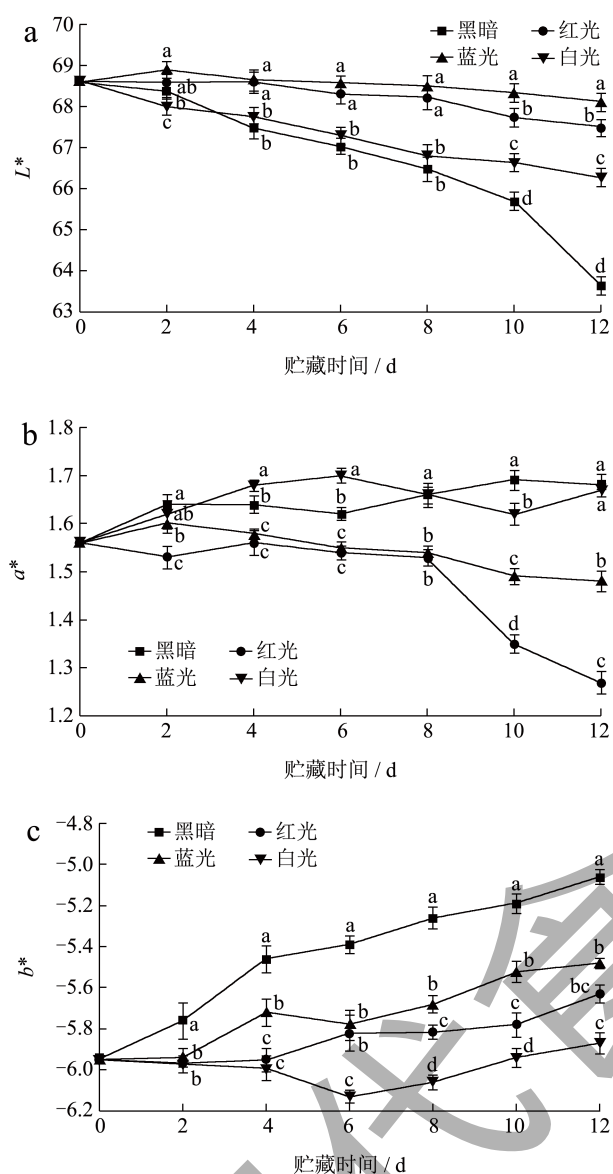


图2 不同波长LED光照方式对蓝莓 $L^*$ (a)、 $a^*$ (b)、 $b^*$ (c)值的影响

Fig.2 Effect of different wavelengths of LED light methods on  $L^*$ (a),  $a^*$ (b), and  $b^*$ (c) values of blueberry

注: 不同小写字母表示样品间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 下同。

色差是反映果实贮藏过程中外观色泽变化的直接指标<sup>[18]</sup>。 $L^*$ 值代表果皮的明亮度, 其值越大亮度越亮,  $a^*$ 值代表红绿度, 其值越小样品越绿,  $b^*$ 值代表黄蓝度, 其绝对值越小样品越蓝<sup>[19]</sup>。由图2a可知, 随着贮藏时间的延长,  $L^*$ 值呈下降趋势, 黑暗组在12 d有最小值63.64, 与光照组均有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 贮藏结束时, 蓝光组的 $L^*$ 值显著高于其他组 ( $P < 0.05$ )。如图2b所示, 白光和黑暗处

理组果皮 $a^*$ 值整体呈上升趋势, 而蓝光与红光组的 $a^*$ 值呈下降趋势, 第8天时, 红光组 $a^*$ 值大幅降低, 至终点时仅为1.27, 这表明红光对 $a^*$ 值影响更显著 ( $P < 0.05$ )。此外, 各处理组的 $b^*$ 值均有所上升 (图2c), 黑暗和蓝光处理组上升幅度最大, 贮藏终点时蓝光组的 $b^*$ 值从最初的-5.95上升至-5.48, 高于白光和红光处理的-5.87和-5.63。以上结果说明, 蓝光和红光处理有利于蓝莓原有色泽的保持, 其中蓝光效果更为显著。这与池铭等<sup>[18]</sup>研究红、白、蓝光对桃果皮色差的影响结果相似。

## 2.3 不同LED光照对蓝莓质构特性的影响

不同光源对冷藏蓝莓质构特性的影响如图3所示。硬度是判断果肉品质、衡量果实衰老及耐性品质的重要指标, 整个贮藏过程果实硬度持续下降, 贮藏12 d时, 蓝光、红光和白光组蓝莓硬度分别为2.72、2.64和2.42  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , 均高于黑暗处理的2.38  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 。Chen等<sup>[20]</sup>研究发现, 蓝莓在贮藏过程中由于水溶性果胶(WSP)含量、碳酸钠可溶性果胶(SSP)含量和纤维素含量的降低导致了蓝莓的软化。经蓝光处理的蓝莓硬度最大, 说明蓝光辐照有利于蓝莓细胞壁结构成分和水溶性果胶的保留, 保持果实硬度。贮藏6 d时, 果肉的弹性明显下降, 弹性也急速下降, 其中蓝光和红光组的弹性终点相似, 蓝莓果实弹性损失率为32.89%和34.87%, 明显高于黑暗组的42.88%。由此可得, 蓝、红光处理可有效延缓果实内部结合力的下降和组织软绵, 较好地保持果实完整性<sup>[21]</sup>。蓝莓的咀嚼性在冷藏期间呈下降趋势, 白光、红光和蓝光处理组在试验终点的咀嚼性分别为1.21、1.42和1.71 mJ, 比黑暗对照组提高了11.01%、30.27%和56.89%, 这表明蓝光处理能更好维持果实的食用风味口感。

## 2.4 不同LED光照对蓝莓可滴定酸含量的影响

可滴定酸是影响果实风味品质的重要因素。如图4所示, 蓝莓的可滴定酸含量随贮藏时间的延长呈先降低后升高的趋势, 贮藏至10 d时, 红光、蓝光和白光的可滴定酸含量有最低值, 分别为0.94%、1.16%和0.67%, 这是由于贮藏初期有机酸逐渐降解成糖类, 酸含量逐渐下降, 果实也由原先的酸涩逐渐变甜而可口; 贮藏后期所有处理组可滴定酸含量呈上升趋势, 按照Huang等<sup>[22]</sup>的说法, LED光照抑制了果实酸转化酶和降解酶的活性, 可滴定酸含

量有所增加。12 d时, 蓝光组蓝莓果实可滴定酸含量达到了 1.27%, 比黑暗、红光和白光组分别提高了 22.12%、18.02% 和 23.19%, 这说明蓝光组更有利于原有酸度的保持, 风味最佳。

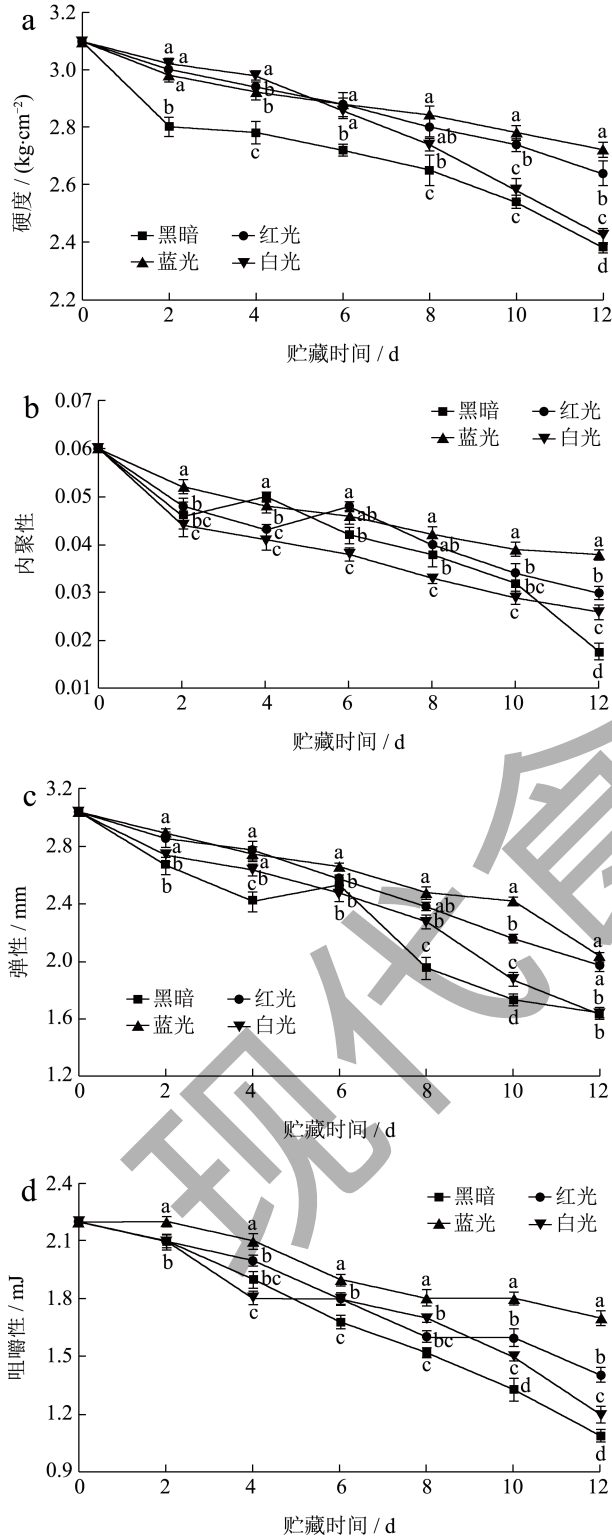


图3 不同波长 LED 光照方式对蓝莓质构特性的影响  
Fig.3 Effect of different wavelengths of LED light methods on the textural properties of blueberry

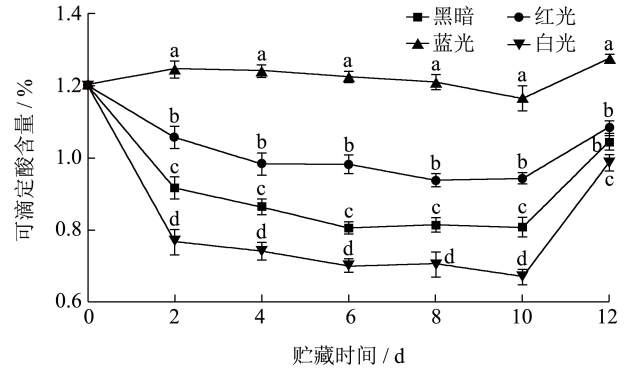


图4 不同波长 LED 光照方式对蓝莓可滴定酸含量的影响  
Fig.4 Effect of different wavelengths of LED light methods on the titratable acid content of blueberry

### 2.5 不同LED光照对蓝莓可溶性固形物含量的影响

可溶性固形物主要指组织中的可溶性糖、酸及其他小分子物质, 其含量反映了果实的成熟度<sup>[11]</sup>。如图 5 所示, 在贮藏期间, 蓝莓果实的可溶性固形物含量整体呈下降趋势, 贮藏终点时, 蓝光、红光、白光和黑暗组的可溶性固形物质量分数分别为 13.16%、12.78%、12.29% 和 12.07%, 这是因为采后蓝莓的呼吸速率较高, 可溶性固形物作为底物在呼吸过程中被消耗, 含量下降。此外, 蓝光组的可溶性固形物含量始终显著高于其他处理组 ( $P < 0.05$ ), 由此推断蓝光可有效抑制可溶性固形物的降解, 这表明持续蓝光照射可显著提高蓝莓幼果中可溶性固形物的含量<sup>[23]</sup>。

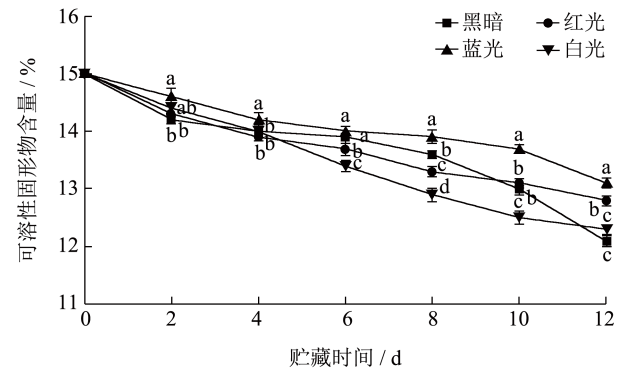


图5 不同波长 LED 光照方式对蓝莓可溶性固形物含量的影响  
Fig.5 Effect of different wavelengths of LED light methods on soluble solids content of blueberry

### 2.6 不同LED光照对蓝莓抗坏血酸含量的影响

在植物中, 抗坏血酸 (维生素 C) 参与生长和发育过程, 特别是植物激素的合成、细胞分裂、光合作用, 以及对生物和非生物胁迫的防御反应<sup>[24,25]</sup>。

由图6可知,整个贮藏期间,抗坏血酸含量呈下降趋势,这是因为蓝莓体内的抗坏血酸易被氧化分解。贮藏前期抗坏血酸含量下降迅速,6 d后呈缓慢降低趋势。黑暗处理组的抗坏血酸含量显著低于红、白光处理组 ( $P<0.05$ ),相关研究也表明,黑暗条件下会促进维生素C的分解代谢<sup>[26]</sup>。贮藏至12 d时,红光组的抗坏血酸含量最高,从最初的4.95 mg/100 g降低至3.54 mg/100 g,损失率仅为17.79%,保留效果最好,白光组次之,蓝光组的抗坏血酸含量为3.72 mg/100 g,与黑暗组无显著差异 ( $P>0.05$ )。

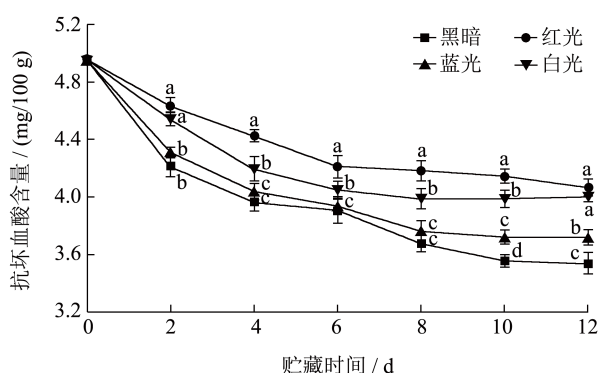


图6 不同波长LED光照方式对蓝莓抗坏血酸含量的影响  
Fig.6 Effect of different wavelengths of LED light methods on the ascorbic acid content of blueberry

## 2.7 不同LED光照对蓝莓花青素含量的影响

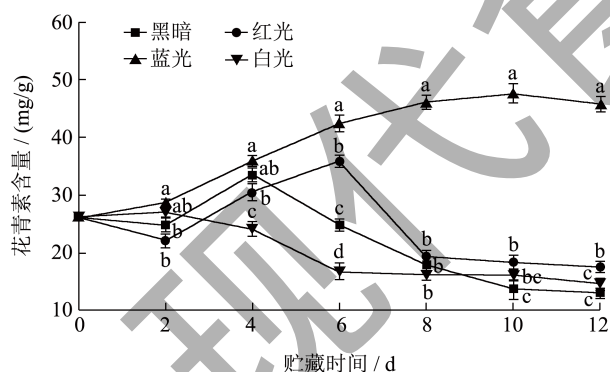


图7 不同波长LED光照方式对蓝莓花青素含量的影响  
Fig.7 Effect of different wavelengths of LED light methods on anthocyanin content of blueberry

花青素是蓝莓生物活性成分的重要组成部分,其含量也影响颜色的变化<sup>[27]</sup>。由图7可知,总体上各处理组蓝莓的花青素呈现先上升后下降的趋势,这可能因为在贮藏初期,蓝莓处于未成熟状态,随后体内花青素会进行一段时间的合成。经蓝光处理的蓝莓果实中花青素含量持续增加,在第10天达到最大值47.58 mg/g,此时含量分别为红光和白光

处理组的2.57倍和2.93倍,这说明蓝光可有效推迟花青素合成的峰值时间,增加其含量。这与Wang等<sup>[28]</sup>的研究结果不同,其研究表明昼夜蓝光照射并未明显对蓝莓花青素及颜色产生显著影响。研究结果不同的原因可能是品种、成熟度、处理方式和时间的不同造成的。贮藏12 d时,红光、白光和黑暗组花青素含量仅分别为17.64、14.68和13.11 mg/g。此外,红光处理初期也会增加蓝莓花青素含量,但在第8天急速下降,最终与白光和黑暗组趋近。

## 2.8 不同LED光照对蓝莓丙二醛含量的影响

丙二醛(MDA)是蓝莓采后细胞膜脂过氧化反应而形成的有毒代谢产物,其含量是判断植物细胞衰老的重要标志<sup>[19]</sup>。由图8可知,与黑暗组相比,各光照处理组的丙二醛含量均有较大幅度增加,且红光组的丙二醛含量水平始终最高。贮藏结束时,红光、白光和蓝光组丙二醛含量分别为1.15、0.94和0.88  $\mu\text{mol/g}$ ,由此推断红光处理最易导致采后蓝莓组织细胞膜的损伤,加速细胞衰老。相比而言,蓝光组MDA含量增加值显著低于其他光照组 ( $P<0.05$ ),这说明蓝光处理更能抑制蓝莓膜脂过氧化作用,减少丙二醛的产生,延缓其衰老过程<sup>[29]</sup>。

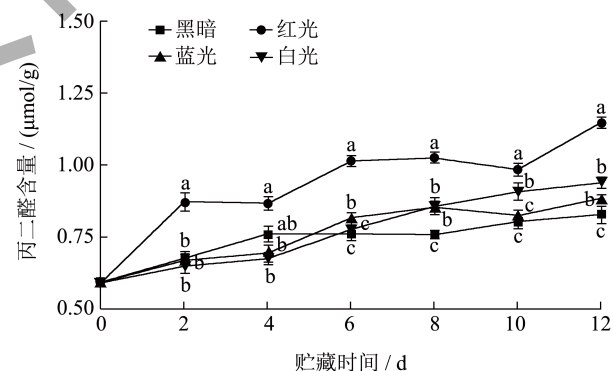


图8 不同波长LED光照方式对蓝莓丙二醛含量的影响  
Fig.8 Effect of different wavelengths of LED light methods on malondialdehyde content of blueberry

## 2.9 不同LED光照对蓝莓PPO、POD活性的影响

多酚氧化酶(PPO)是导致蓝莓鲜果褐变、色泽变暗的关键酶<sup>[30]</sup>。如图9a所示,贮藏期间蓝莓的PPO活性呈上升趋势。与黑暗组相比,不同光照处理均能延缓PPO活性的升高,其中蓝光组PPO活性显著低于红光和白光组 ( $P<0.05$ )。蓝光和红光组的PPO活性变化趋势一致,贮藏第6天有

最小值 18.63 和 22.18 U/(min·g), 均显著低于黑暗组 ( $P < 0.05$ )。至贮藏终点时, 蓝光、红光和白光组 PPO 活性分别为黑暗组的 65.54%、78.05% 和 88.15%。由此说明, 白光处理对蓝莓果实 PPO 活性的刺激更显著, 而蓝光组更能有效抑制 PPO 活性的升高, 从而有效降低酚类化合物的氧化速率<sup>[31]</sup>, 减小蓝莓鲜果颜色的变化。

过氧化物酶 (POD) 是植物活性氧清除系统中的一种重要酶, 其活性标志着果实成熟衰老的程度<sup>[32]</sup>。如图 9b 所示, 整个贮藏过程中, 黑暗、红光和蓝光组 POD 活性上升较为平稳缓慢, 无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 而白光处理组的蓝莓 POD 活性大幅增强, 在贮藏后期尤为明显; 贮藏第 12 天时, 白光组的 POD 活性从最初的 7.24 U/(min·g) 增加到 17.02 U/(min·g), 显著高于蓝光组的 8.41 U/(min·g) 和红光组的 8.24 U/(min·g)。Zhan 等<sup>[33]</sup>的研究表明, 酶活性取决于蛋白质的天然结构, 可能的原因是红光处理导致了 POD 的结构变化, 诱导其酶活性的增加。这也说明, 与白光相比, 蓝光、红光和黑暗贮藏更能延缓 POD 活性高峰的到来, 且其活性始终保持在相对较低的水平。

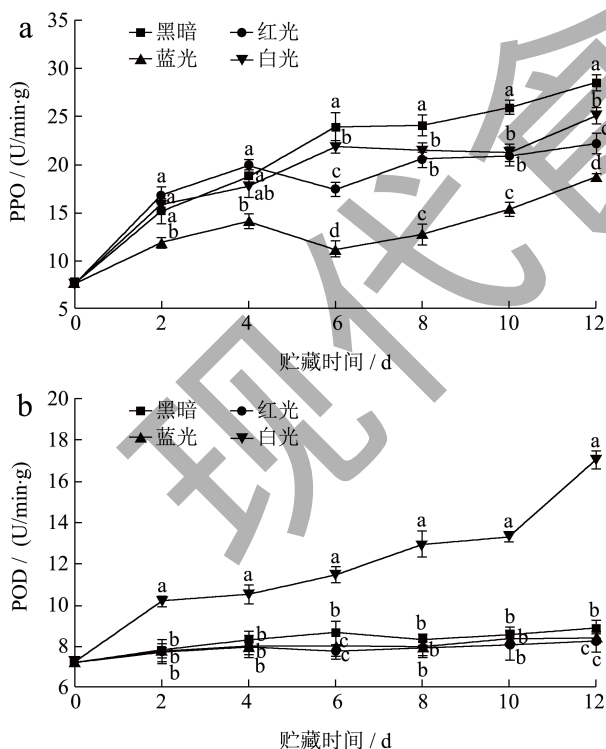


图 9 不同波长 LED 光照方式对蓝莓 PPO (a)、POD (b) 活性的影响

Fig.9 Effect of different wavelengths of LED light methods on PPO (a) and POD (b) activities of blueberry

### 3 结论

本研究探讨了不同波长 LED 蓝光、红光、白光和黑暗条件对采后冷藏蓝莓的营养成分和感官品质的影响。结果表明, 蓝光和红光处理能有利于蓝莓原有色泽的保持, 蓝光处理有利于蓝莓果实硬度的保持, 延缓可滴定酸、可溶性固形物、抗坏血酸和花青素含量的降解, 抑制丙二醛物质的产生, 延缓其衰老过程。同时, 蓝、红光照辐射可显著抑制 PPO、POD 活性的增加, 减少蓝莓果实的褐变程度, 蓝光效果更加显著。因此, 蓝光处理可有效保持采后蓝莓贮藏期间的营养品质, 延长货架期。这一研究也为蓝莓采后保鲜技术提供了一定的参考和理论支撑。

### 参考文献

- [1] 郇海燕,徐龙,陈杭君,等.蓝莓采后品质调控和抗氧化研究进展[J].中国食品学报,2013,13(6):1-8.
- [2] 纪淑娟,马超,周倩,等.蓝莓果实贮藏期间软化及相关指标的变化[J].食品科学,2013,34(12):341-345.
- [3] 吉宁,龙晓波,李江阔,等.1-MCP结合臭氧处理对蓝莓低温保鲜效果的影响[J].食品工业科技,2019,40(11):302-307.
- [4] 薛友林,于弘毅,张鹏,等.微环境气调对冰温贮藏下蓝莓果实品质及挥发性成分的影响[J].食品工业科技,2021,42(18):334-341.
- [5] 张红,李晴晴,许庆龙,等.紫外线与保鲜膜对蓝莓冷藏保鲜效果的影响[J].食品工业科技,2017,38(9):314-318.
- [6] D'SOUZA C, YUK H G, KHOO G H, et al. Application of light-emitting diodes in food production, postharvest preservation, and microbiological food safety [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(6): 719-740.
- [7] 李沛生,文雅欣,阮征,等.不同单色LED对低温贮藏西兰花的保鲜作用[J].现代食品科技,2019,35(1):137-143, 220.
- [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.
- [9] JIANG A, ZUO J, ZHENG Q, 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 Horticulturae, 2019, 251: 73-79.
- [10] XU F, CAO S, SHI L, et al. Blue light irradiation affects anthocyanin content and enzyme activities involved in postharvest strawberry fruit [J]. Journal of Agricultural

- and Food Chemistry, 2014, 62(20): 4778-4783.
- [11] 王宇滨,冯雨晴,马越,等.光照处理对鲜切薄皮甜瓜货架期品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(12):122-129.
- [12] XIE C, TANG J, XIAO J, et al. Purple light-emitting diode (LED) lights controls chlorophyll degradation and enhances nutraceutical quality of postharvest broccoli florets [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 294: 110768.
- [13] KIM M J, BANG W S, YUK H G. 405±5 nm light emitting diode illumination causes photodynamic inactivation of *Salmonella* spp. on fresh-cut papaya without deterioration [J]. *Food Microbiology*, 2017, 62: 124-132.
- [14] 谢晶,张利平,王金锋,等.贮藏温度对草莓理化性质的影响[J].食品科学,2013,34(22):307-310.
- [15] 徐瞳晖,李洋,霍若冰,等.基于感官评价的蓝莓消费者满意度预测模型[J].森林工程,2021,37(2):110-116.
- [16] 李洋,张茜,陈业莉,等.贮运过程中振动损伤对蓝莓品质的影响[J].林业科学,2020,56(9):40-50.
- [17] 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.
- [18] 池铭,孙丽娟,马立杰,等.不同光质处理对采后桃果皮色泽及花色苷代谢的影响[J].食品科学,2023,44(3):209-217.
- [19] 刘泽松,史君彦,左进华,等.UV-C和LED红光复合处理对西兰花贮藏品质的影响[J].食品科学,2020,41(17):238-245.
- [20] CHEN H, CAO S, FANG X, et al. Changes in fruit firmness, cell wall composition and cell wall degrading enzymes in postharvest blueberries during storage [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 188: 44-48.
- [21] 刘聪,李亚珍,尹嘉敏,等.不同贮藏温度对瓯口华菜土蜜瓜质构特性、理化指标、感官品质变化及相关性分析[J].中国瓜菜,2022,35(1):47-53.
- [22] HUANG J Y, XU F, ZHOU W. Effect of LED irradiation on the ripening and nutritional quality of postharvest banana fruit [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5486-5493.
- [23] ZHANG D, LIU Y, NI C, et al. Effect of LED light on the growth and physiological indices of blueberry [J]. *Agronomy Journal*, 2022, 114(4): 2105-2112.
- [24] 张书轩,李良良,鲁敏,等.三种植物生长调节剂对刺梨果实维生素C积累及其代谢基因表达的影响[J].农业生物技术学报,2018,26(4):606-615.
- [25] PACIOLLA C, FORTUNATO S, DIPIERRO N, et al. Vitamin C in plants: from functions to biofortification [J]. *Antioxidants*, 2019, 8(11): 519.
- [26] TRUFFAULT V, Fry S C, Stevens R G, et al. Ascorbate degradation in tomato leads to accumulation of oxalate, threonate and oxalyl threonate [J]. *The Plant Journal*, 2017, 89(5): 996-1008.
- [27] 李恩惠,矫馨瑶,王晨歌,等.蓝莓花色苷降解动力学及稳定性[J].食品科学,2018,39(5):1-7.
- [28] WANG Y W, LUDWIG H D, SCHERM H, et al. Blue light does not affect fruit quality or disease development on ripe blueberry fruit during postharvest cold storage [J]. *Horticulturae*, 2020, 6(4): 59.
- [29] 蒋汉蓉,陈于隼,陈飞平,等.LED蓝色光照结合气调包装对不同品种荔枝采后品质的比较[J].现代食品科技,2023,39(8):103-111.
- [30] ZHAN L, HU J, Lim L T, et al. Light exposure inhibiting tissue browning and improving antioxidant capacity of fresh-cut celery (*Apium graveolens* var. dulce) [J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3): 2473-2478.
- [31] 朱凯,吴伟杰,房祥军,等.发光二极管蓝光结合紫外线处理对鲜切杏鲍菇贮藏品质的影响[J].食品科学,2022,43(9):223-231.
- [32] 玛尔哈巴·帕尔哈提,白羽嘉,李梦,等.贮前光照处理对伽师瓜贮藏品质及部分防御酶活性影响[J].食品工业科技,2019,40(2):271-275,281.
- [33] ZHAN L, LI Y, HU J, et al. Browning inhibition and quality preservation of fresh-cut romaine lettuce exposed to high intensity light [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 14: 70-76.