

不同单色 LED 对低温贮藏西兰花的保鲜作用

李汴生, 文雅欣, 阮征, 周伟, 陈林昀

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 为改善西兰花的采后贮藏品质, 以期和蔬菜保鲜的实际应用提供新思路。本文研究了低温下不同波长的单色发光二极管 (lighting-emitting diode, LED) 对西兰花品质的保鲜作用。本研究采用了红光 (642 nm)、黄光 (591 nm)、绿光 (519 nm)、蓝光 (464 nm)、紫光 (435 nm) 不同波长的单色 LED 照射西兰花, 光照时间 24 h/d, 并从感官、理化、营养和微生物指标综合评价分析不同单色 LED 对西兰花不同贮藏时期品质的影响。结果表明: 不同单色 LED 光照能延缓西兰花在贮藏过程中营养品质的下降。贮藏 12 d 后, 绿光 LED (519 nm) 能够最大程度地保持西兰花的感官品质, 抑制亮度 L^* 的增加, 延缓叶绿素、还原糖及可溶性固形物的降解, 同时能够有效地抑制微生物的增长速度, 延缓色相角度 H 值的降低、保持维生素 C 的含量。因此, 绿光 LED 照射对于西兰花的低温贮藏品质的保持效果最佳, 从而延长西兰花的贮藏期。

关键词: 西兰花; 单色发光二极管 (LED); 波长; 贮藏; 保鲜

文章编号: 1673-9078(2019)01-137-143

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.1.020

Preservative Effect of Different Monochromatic Light-emitting Diode (LED) Treatments on Broccoli (*Brassica oleracea*) in Low-temperature Storage

LI Bian-sheng, WEN Ya-xin, RUAN Zheng, ZHOU Wei, CHEN Lin-yun

(College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to improve the post-harvest storage quality of broccoli (*Brassica oleracea*), and provide new approaches for preservation of fresh vegetables in practice, this research examined the preservative effects of different wavelengths of monochromatic light-emitting diode (LED) on the quality of broccoli stored at a low temperature: Red (642 nm), yellow (591 nm), green (519 nm), blue (464 nm), and purple (435 nm); treatment time 24 h/day $\times$ 12 day dark conditions used as a control. A comprehensive evaluation was conducted based on sensory, physico-chemical, nutritional and microbial analyses (including color attributes, chlorophyll content, reducing sugar content, total soluble solid content, and total number of colonies), to assess the post-harvest storage quality of broccoli over the storage. Results showed that different monochromatic LED treatments could delay the decline of nutritional quality of broccoli during storage. After 12 days of storage, the green LED (519 nm) could maximally maintain the sensory quality of broccoli, inhibit the increase of brightness L^* , delay the degradation of chlorophyll, reducing sugar and soluble solids, and in the meantime, suppress effectively the microbial growth, delay the decrease of hue angle (H -value) and maintain the content of vitamin C. Therefore, the green LED treatment was the most effective to maintain the storage quality of broccoli over the low-temperature storage and extend its shelf life.

Key words: *Brassica oleracea*; monochromatic lighting-emitting diode (LED); wavelength; storage; preservation

西兰花 (*Brassica oleracea*) 是一种带有深绿色花蕾的花球状双子叶植物, 目前我国南北方均有栽培, 深受人们喜爱。然而, 西兰花花球及花蕾组织脆弱, 因此在日常贮运时极易因衰老而受到不可逆的损害, 如水分减少、花球松散、花蕾黄化褐变严重、营养成分损失^[1], 甚至由于微生物代谢而产生亚硝酸盐等有害

害物质^[2,3]。

目前, 蔬菜采后保鲜技术普遍采用黑暗冷藏方式, 以一定程度地减缓微生物繁殖与品质劣变。然而, 传统冷藏方式依旧存在弊端, 无法长时间维持蔬菜的综合品质^[4], 这主要是因为黑暗环境中, 蔬菜的组织容易崩溃, 器官容易死亡, 从而出现水分流失、叶绿素降解^[5]等一系列变质现象。因此, 国内外已有众多新型技术渐渐应用于蔬菜的保鲜, 包括气调包装^[6,7]、光照^[8]、电离辐射^[9,10]等。

收稿日期: 2018-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400404)

作者简介: 李汴生 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏

LED (lighting emitting diode) 作为一种新型物理保鲜技术, 可通过发射不同颜色的光, 与各种植物光合作用实现光谱的基本吻合, 提高光能利用效率^[11,12], 进一步能使蔬菜呼吸作用降低^[13], 感官品质提高, 延缓生理老化。Ma 等^[14]针对西兰花发现 LED 红光 (660 nm) 较于 LED 蓝光 (464 nm) 更有利于保持其综合品质, Peng 等^[15]研究表明 LED 绿光也能够延长其货架期。因此, LED 光质对蔬菜的贮藏品质有一定的效果, 众多研究表明红橙光、蓝紫光是蔬菜光合作用的吸收峰值区域^[16-18]。另外, 光照强度也会影响蔬菜的贮藏品质。在最适光照强度的照射下, 蔬菜的蒸腾作用和光合作用得到良好协调, 能够保证不引起较强的蒸腾作用和光合膜的破坏同时, 又能够保证较高的光合速率和光合产物的积累^[19]。蔬菜对于光照的响应与蔬菜的种类、组织器官、生理状态及光质、光强等均有联系, 且不同采收时段的蔬菜对于光照的响应也有差异^[20]。目前, 国内绝大多数的研究报道都仅仅给出采用一种单色 LED 灯对一种蔬菜的照射效果。

本文针对西兰花采后浪费严重^[21]的问题, 采取西兰花为主要研究原料, 以黑暗条件为对照, 从感官品质、理化指标、营养指标和微生物指标四个角度, 研究了不同波长的单色 LED 对西兰花采后贮藏品质的影响, 为 LED 技术应用于其他蔬菜采后贮藏技术提供帮助。此外, LED 属于冷光源, 发热量低, 因此可以应用于其他各类蔬菜的低温贮藏过程之中^[22]。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜西兰花购自广州本地市场, 西兰花品种为广州鹤洞池花。要求西兰花生长时间 100~110 d, 采收时间为五月至八月份, 颜色一致 (鲜绿)、大小相似 (花球直径 15~5 cm)、质量相近 (400±100 g)、带有光泽、没有泥沙, 没有明显霉烂、黄化、缺损等现象。购买后, 将西兰花置于冰上并在 1 h 内运回实验室。其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

LG4-273LW 立式单温冷藏柜, 带门非敞口式 (长 50 cm, 宽 50 cm), 广州市穗凌电器有限公司; HT-1301 照度计, 测定范围 0~9990 lux, 深圳市宏诚科技有限公司; 各波长 LED 灯, 红光 (642 nm)、黄光 (591 nm)、绿光 (519 nm)、蓝光 (464 nm)、紫光 (435 nm), 其特征光谱如图 1, 额定电压 24 V, 额定电流 0.15 A, 额定功率 3.6 W, 深圳市深博创照明电股份有限公司。

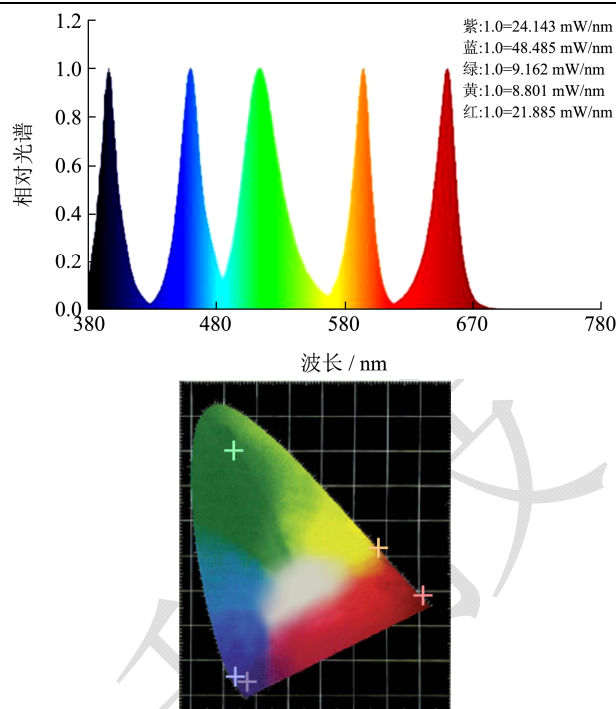


图1 五种单色 LED 灯的特征光谱

Fig.1 Characteristic spectrogram of five monochromatic LED lights

1.3 试验设计

切除西兰花的主花柄及多余叶片, 保证每个西兰花高度为 15±1 cm。将西兰花放置在 4±0.5 °C 的冷藏柜中进行贮藏, 在贮藏过程中, 9 个西兰花样品平铺一层 (3×3, 保证花球向光), 样品之间相互隔开、互不影响。处理组每次分别用红、黄、绿、蓝、紫五种不同波长的单色 LED 灯照射, 对照组始终置于相同温度下的黑暗环境中贮藏 (遮光)。LED 灯固定于冷藏柜顶端中部, 使用照度计测量西兰花花球表面接收到的光照强度, 保证光照强度一致, 此时光源距离西兰花花球顶端 37±1 cm, 光照强度为 517±10 lux。将 LED 光照与低温贮藏相结合, 光照时间 24 h/d。在贮藏第 0、4、8、12 d 时, 测定西兰花的感官品质、理化指标 (色差)、营养指标 (叶绿素、维生素 C、还原糖、可溶性固形物) 和微生物指标 (菌落总数), 对比不同波长的单色 LED 对西兰花贮藏品质的影响, 得出西兰花贮藏的最佳 LED 照射波长段。每组样品均做 3 次平行。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 感官评分

在西兰花贮藏过程中, 选取 4 男 4 女共 8 名具有蔬菜感官评价经验的人员, 对西兰花的色泽、形态、气味进行评分, 总分设定为 9 分。西兰花的感官评价标准见表 1。

表1 西兰花的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standard for *Brassica oleracea*

分值	色泽	形态	气味
9	花球鲜绿, 无黄化现象	花柄饱满, 能够支撑完整的花球	新鲜西兰花带有的清香
7	花球出现零星的黄化	花柄较饱满, 有小部分的萎缩现象	西兰花清香减弱, 无异味
5	花球小部分发生黄化	较细的花柄无法支撑花球	西兰花出现微弱异味
3	花球超过一半面积出现黄化	花柄萎缩严重, 无法支撑花球	西兰花异味较严重
1	花球基本出现黄化现象	花柄萎缩严重, 花球脱落花柄	西兰花发臭严重, 气味不可接受

1.4.2 色差的测定

色差的测定部位是西兰花球顶端凸面的中心部位。自动测定亮度 L^* 值从 100~0 变化时, 亮度从纯白变化到纯黑。 H 值 (hue angle), 即色相角度, 主要反映样品褐变的情况。 H 值的计算公式见式(1)和式(2):

$$\text{当 } a^* > 0, b^* > 0 \text{ 时, } H = \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (1)$$

$$\text{当 } a^* < 0, b^* > 0 \text{ 时, } H = 180^\circ + \arctan \frac{b^*}{a^*} \quad (2)$$

式中: a^* 、 b^* 为 CIELAB 色度空间的 2 个指标, a^* 表示从红色至绿色的范围, b^* 表示从黄色至蓝色的范围。

1.4.3 叶绿素的测定

取西兰花的花球部分进行均匀破碎, 参照 Yuan^[23] 等人的方法对叶绿素含量的测定, 在波长 652 nm 下测定吸光度。叶绿素含量用每 100 g 西兰花花球部分质量的毫克数表示。叶绿素含量计算见式 (3):

$$\text{叶绿素含量 (mg/100 g)} = \frac{A_{652} \times 25 \times 100}{34.5 \times m} \quad (3)$$

式中: A_{652} 为波长 652 nm 时叶绿素的吸光度; m 为称取的西兰花花球部分的质量, g。

1.4.4 维生素 C 含量的测定

取西兰花的花球部分进行均匀破碎, 参照 GB 6195-86 2,6-二氯酚酚滴定法测定维生素 C 含量。

1.4.5 还原糖含量的测定

取西兰花的花球部分进行均匀破碎, 参考赵凯^[24] 的方法进行还原糖含量的测定, 在 540 nm 下测量吸光度。还原糖含量以葡萄糖计, 计算见式 (4):

$$\text{还原糖含量 (g/100 g)} = \frac{C \times V}{m \times 1000} \times 100\% \quad (4)$$

式中: C 为还原糖提取液的浓度, mg/mL; V 为还原糖提取液的总体积, mL; m 为西兰花质量, g; 1000 为换算成 g 的系数, mg。

1.4.6 可溶性固形物的测定

取西兰花的花球部分进行均匀破碎, 用四层纱布挤出匀浆汁液。采用折射仪法, 参照 NY/T 2637-2014 的方法进行测定, 测定结果以蔗糖质量百分浓度表示。

1.4.7 菌落总数的测定

取西兰花的花球部分进行均匀破碎, 参照 GB 4789.2-2016 的平板计数法进行测定。在无菌室中, 将已均匀破碎的西兰花花球用无菌生理盐水制成 1:10 西兰花球匀液, 在 $36 \pm 1^\circ \text{C}$ 培养 $48 \pm 2 \text{ h}$, 测定结果用 lg CFU/g 表示。

1.4.8 数据处理

本试验中每组共 9 朵西兰花球, 均平行测定 3 次, 实验数据的处理采用 Excel 2016, 作图采用 Origin 8.0, 结果的显著性分析采用 SPSS 22.0 (Duncan 法, 置信区间 95%)。

2 结果与分析

2.1 不同波长的单色 LED 照射对西兰花感官品质的影响

在传统冷藏过程中, 西兰花容易出现黄化、萎蔫、腐烂等感官劣化现象, 不同波长 LED 照射对西兰花感官品质的影响如图 2 所示。

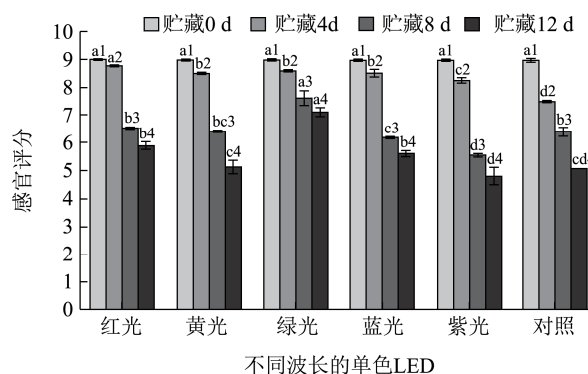


图2 不同波长LED照射对西兰花感官品质的影响

Fig.2 Effect of various wavelengths of LED on sensory quality of *Brassica oleracea*

注: 柱状图上方标记的相同数字表示相同贮藏天数的显著性分析, 即 1、2、3、4 分别代表贮藏 0、4、8、12 d 的显著性差异。下同。

由图 2 可知, 在贮藏过程中, 对照组的西兰花感官品质劣变最快, 贮藏 4 d 时开始失水黄化, 贮藏 8 d 时西兰花黄化程度加深; 而在不同波长的 LED 照射

下,西兰花在贮藏过程中的感官品质下降速率不同,说明光质是影响贮藏感官品质的因素之一。贮藏 4 d 时,不同波长 LED 照射的西兰花感官评分均显著高于对照组 ($p<0.05$),因为贮藏前期,具有光照的西兰花生命活动较强,仍处于新鲜状态,不易黄化腐烂;贮藏 8 d 时,绿色 LED 照射的西兰花开始略有黄化现象,感官劣变最慢,其他波长单色 LED 照射的西兰花感官评分均有不同程度下降,以紫色 LED 最快 ($p<0.05$);贮藏 12 d 后,紫光 LED 照射的西兰花外观品质较差,出现脱水干及黄化现象,感官评分较初始的减少了 47.22%,而绿色 LED 照射的西兰花品质仍保持在较高水平 ($p<0.05$)。且贮藏 8 d 和 12 d 时,波长为 519 nm 的绿光 LED 下,感官评分均为最高。这与绿光照射条件下,西兰花光合作用能力强有关。刘然等^[25]的研究表明,50~112 lux 光照强度的绿光 LED 对芦笋、莴笋的褐变腐烂控制也十分显著。绿光 LED (519 nm) 照射较好地保持了西兰花的理化品质和营养品质,能够延长西兰花的贮藏期,这是因为绿光 LED 与西兰花的光合作用能够实现光谱的基本吻合,从而提高西兰花的光能利用效率,降低其呼吸作用^[13]。

2.2 不同波长的单色 LED 照射对西兰花色泽的影响

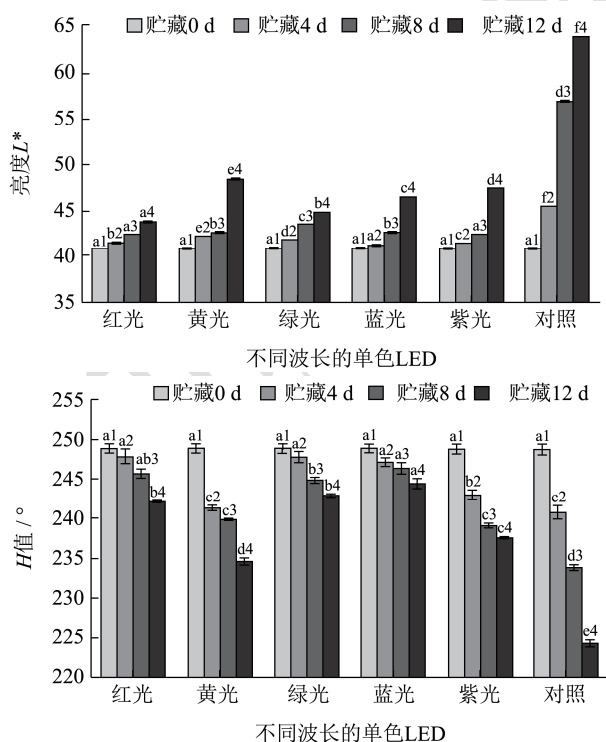


图3 不同波长 LED 照射对西兰花色泽的影响

Fig.3 Effect of various wavelengths of LED on color parameter in *Brassica oleracea*

色差值体现了西兰花球颜色的变化情况,不同波长 LED 照射对西兰花色差的影响如图 3 所示。

由图 3 可知,在贮藏过程中,西兰花亮度 L^* 值不断上升,色相角度 H 值不断下降,说明随着贮藏时间延长,西兰花绿色程度减少,黄色程度增加,褐变越来越严重。贮藏过程中,对照组亮度 L^* 值上升及 H 值下降最为迅速,而 LED 灯照射均能有效抑制西兰花亮度 L^* 值的升高和 H 值的下降 ($p<0.05$),降低了西兰花贮藏过程中的黄化速率。贮藏 12 d 后,红光 LED 照射对 L^* 值上升的抑制效果最佳, L^* 值的增长率仅为 7.15%,是对照组的 1/8,显著优于其他光照条件 ($p<0.05$),绿光次之;蓝光 LED 照射对 H 值下降的抑制效果最佳, H 值的下降率仅为 1.72%,显著优于其他光照条件 ($p<0.05$),红光和绿光次之。这与 Peng 等^[15]的研究结果相似。Olarie 等^[26]的研究表明,光照能提高蔬菜贮藏中叶绿素的含量,即证明了此点。

2.3 不同波长的单色 LED 照射对西兰花叶绿素的影响

叶绿素降解导致的黄化脱绿是植物成熟衰老过程中的一大标志。不同波长 LED 照射对西兰花叶绿素的影响如图 4 所示。

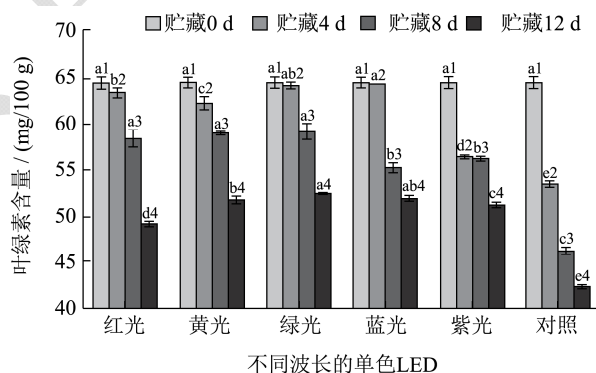


图4 不同波长 LED 照射对西兰花叶绿素的影响

Fig.4 Effect of various wavelengths of LED on chlorophyll content in *Brassica oleracea*

由图 4 可以看出,在 4 °C 的货架温度贮藏 12 d,西兰花的叶绿素含量不断下降。贮藏 4 d 后,不同光照条件下西兰花的叶绿素含量下降速率不同,且蓝光和绿光条件下叶绿素含量维持效果最佳,对照组的叶绿素含量维持效果最差 ($p<0.05$)。贮藏 8 d 后,西兰花在红光、黄光、绿光照射下的叶绿素含量最高,且无显著性差异 ($p>0.05$),蓝光和紫光次之,对照组最差,且与其他光照处理组具有显著性差异 ($p<0.05$)。贮藏 12 d 后,对照组西兰花的叶绿素含量较绿光 LED 照射组西兰花的下降幅度大 ($p<0.05$),对照条件下的

西兰花叶绿素含量较初始减少了 34.29%，绿光 LED 组的叶绿素含量较第 0 d 仅减少了 18.50%。Olarte 等^[26]与 Büchert 等^[27]的研究也发现了相似的现象。这是光照能够抑制叶绿素分解有关的酶活性，并促进原脱植基叶绿素合成叶绿素。这是因为 LED 光源发热少、功率低，与冷藏结合，同时绿光 LED 与西兰花的光合作用峰值匹配^[16-18]，提高了西兰花的光合作用效率^[11,12]，能够更大程度上保持西兰花的贮藏品质。

2.4 不同波长的单色 LED 照射对西兰花维生素 C 的影响

西兰花中所富含的维生素 C，在贮藏过程中易被空气氧化。不同波长 LED 照射对西兰花维生素 C 的影响如图 5 所示。

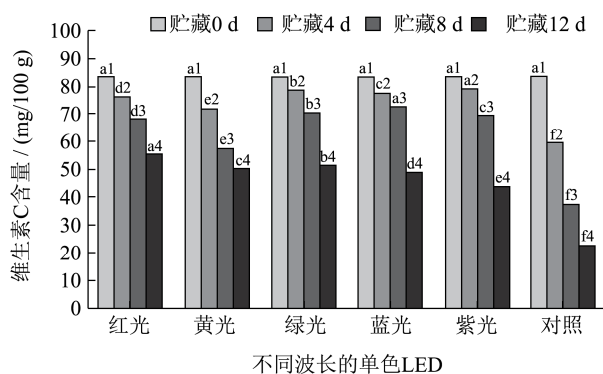


图 5 不同波长 LED 照射对西兰花维生素 C 的影响

Fig.5 Effect of various wavelengths of LED on vitamin C content in *Brassica oleracea*

由图 5 分析，随着贮藏时间的推移，西兰花的维生素 C 含量逐渐减少。在第 0 d 到第 4 d 贮藏阶段，红光照射和对照组的西兰花的维生素 C 含量的相对下降率仅为 8.47%和 28.65% ($p < 0.05$)；但在第 4 d 到第 8 d 的贮藏过程中，西兰花维生素 C 含量的相对下降率分别达到了 10.92%和 37.54% ($p < 0.05$)，故对照条件下，维生素 C 损失加速度变大，说明西兰花维生素 C 的损失速度不稳定，与光质和储藏天数都有密切的关系。贮藏 12 d 后，对照组的维生素 C 含量下降尤其迅速，较第 0 d 维生素 C 含量的减少率达到了 49.59%，而红光和绿光 LED 照射的西兰花，维生素 C 含量虽有下降，但下降速率有所缓解，分别为 33.40%和 38.50%。说明贮藏 12 d 后，红光 LED 照射的效果显著优于其他光照 ($p < 0.05$)，绿光 LED 效果其次。贮藏第 4 d、第 8 d 和第 12 d 时，红光 LED 的维生素 C 含量均高于对照组 ($p < 0.05$)，且贮藏后期西兰花中维生素 C 含量的保持效果也较好，说明红光 LED 有益于延缓西兰花维生素 C 的下降速度，进而延缓维生素

C 的消耗。原因是波长为 642 nm 红光 LED 照射促进了西兰花的光合作用，使蔬菜光合作用的同化产物部分抵消了呼吸作用营养成分的消耗，导致维生素 C 含量下降比较缓慢。

2.5 不同波长的单色 LED 照射对西兰花还原糖的影响

在西兰花的采后贮藏过程中，碳水化合物是蔬菜进行呼吸作用的最主要的底物，一系列反应后其变成小分子物质，同时放出能量。还原糖的积累与还原糖的合成与分解之间的相互作用有关，光照处理维持了较高的 SPS、SS-S、SAI 活性和较低的 SS-C、GK、UDPase 活性，这就是光照能够维持较高还原糖的原因之一^[28]。不同波长 LED 照射对西兰花还原糖的影响如图 6 所示。

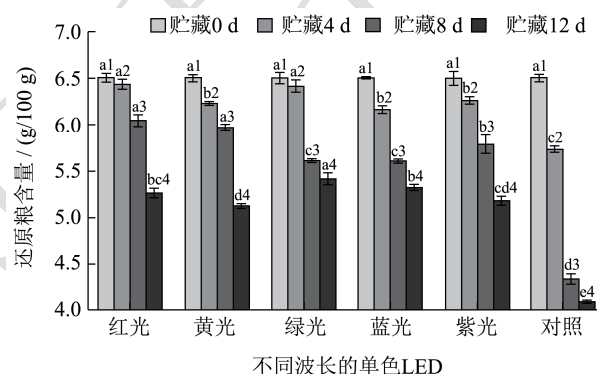


图 6 不同波长 LED 照射对西兰花还原糖的影响

Fig.6 Effect of various wavelengths of LED on reducing sugar content in *Brassica oleracea*

由图 6 可知，在贮藏期内，西兰花还原糖含量均逐渐下降，第 0 d 至第 4 d 还原糖含量的减少较少，但第 4 d 至第 8 d 还原糖含量减少最快，说明贮藏后期西兰花还原糖损失较严重，其中对照组还原糖减少最快 ($p < 0.05$)。贮藏 12 d 后，对照组西兰花的还原糖含量减少至原先的 36.92%，而经过 LED 照射的西兰花还原糖降低均受到了抑制 ($p < 0.05$)，其中经过绿光 LED 的处理，还原糖减少率最低 ($p < 0.05$)，说明贮藏过程中，绿光 LED 照射有利于西兰花还原糖的积累。

2.6 不同波长的单色 LED 照射对西兰花可溶性固形物的影响

可溶性固形物含量是蔬菜中糖酸含量变化的反映，与蔬菜的营养品质和商品价值密切相关。不同波长 LED 照射对西兰花可溶性固形物的影响如图 7 所

示。

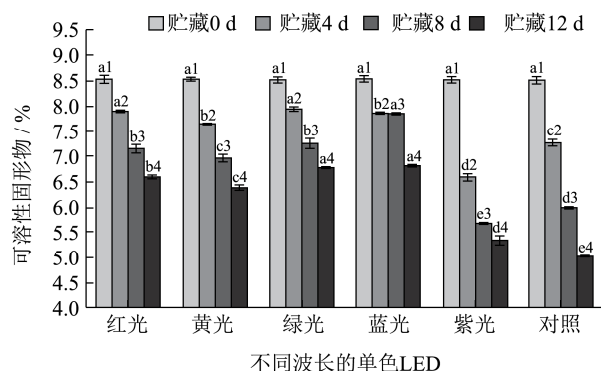


图7 不同波长LED照射对西兰花可溶性固形物的影响

Fig.7 Effect of various wavelengths of LED on total soluble solid content in *Brassica oleracea*

由图7可知,在贮藏过程中,西兰花的可溶性固形物显著减少 ($p < 0.05$)。第0 d到第4 d西兰花的可溶性固形物的减少较慢,第4 d到第8 d可溶性固形物的减少较快。与对照组对比,经过LED照射处理的西兰花可溶性固形物含量降低普遍较慢 ($p < 0.05$)。贮藏4 d时,红光和绿光LED下可溶性固形物含量最高 ($p < 0.05$),蓝光和黄光次之;贮藏8 d时,蓝光下可溶性固形物含量最高、绿光和红光次之;贮藏12 d时,蓝光和绿光LED抑制可溶性固形物含量下降的效果最为显著 ($p < 0.05$),减少率分别为19.84%和20.88%,红光次之,对照组西兰花的可溶性固形物含量的减少率则达到了40.99%。说明贮藏过程中,蓝光、红光和绿光LED对西兰花的光合作用积累可溶性固形物等光合产物有益。

2.7 不同波长的单色LED照射对西兰花菌落总数的影响

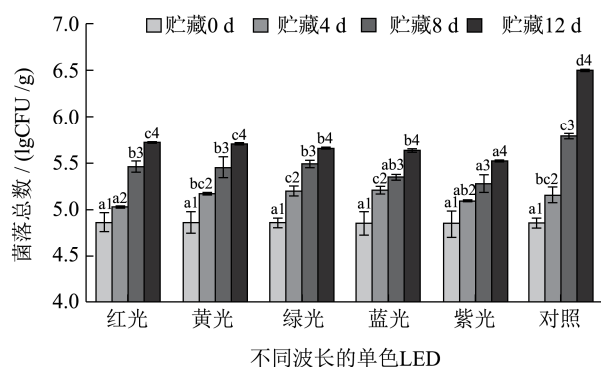


图8 不同波长LED照射对西兰花菌落总数的影响

Fig.8 Effect of various wavelengths of LED on total number of colonies in *Brassica oleracea*

微生物污染是蔬菜加工和贮藏过程中重要的问题之一,因此检测贮藏过程中西兰花微生物的数量十分

必要,菌落总数是安全性评价的一个重要指标。不同波长LED照射对西兰花菌落总数的影响如图8所示。

由图8分析可知,随着贮藏时间的延长,菌落总数逐渐升高。第0 d到第4 d菌落总数的增长较慢,但第4 d到第8 d菌落总数增长最快。贮藏8 d后,与对对照相比,不同波长的LED光照处理的西兰花菌落总数上升速度显著降低 ($p < 0.05$)。同时,照射时间越长,LED照射对微生物的抑制的效果越显著 ($p < 0.05$)。贮藏12 d后,对照组菌落总数增长率最高,为17.81%;而紫光LED (437 nm)下,西兰花的菌落总数的增加率最低为14.08%,且差异显著 ($p < 0.05$)。

3 结论

研究显示,不同单色LED光照能保持西兰花在低温贮藏过程中的营养品质,延缓营养成分含量的下降。且不同指标对应的最适光照条件和影响程度也存在着差异,说明西兰花的不同营养物质对光质的需求和累积程度不完全相同。绿光LED (519 nm)能够最大程度地保持西兰花的感官品质,抑制亮度 L^* 增加,延缓叶绿素、还原糖及可溶性固形物的降解;对微生物增长速度的抑制、色相角度 H 值降低、维生素C保持的影响,绿光LED的效果也相对较好。综上所述,在实验室条件下,在不同波长的单色LED中,波长为519 nm的绿光LED对于西兰花的低温贮藏品质的保持效果最佳。尤其贮藏前期,西兰花能够合成更多的营养物质,抵消损耗,贮藏品质更好。该研究反映了西兰花贮藏品质的变化,说明了LED对西兰花保鲜影响效果的问题,为LED照射这种新型食品安全控制技术提供具体的理论支持。

参考文献

- [1] G R Velderrain-Rodríguez, A E Quirós-Sauceda, G A González Aguilar, et al. Technologies in fresh-cut fruit and vegetables [M]. Minimally Processed Foods. Springer International Publishing, 2015: 6-11
- [2] Wen Q C. Nitrate and nitrite contents and postharvest quality of choy sum (*Brassica Rapa chinensis* group) during storage [J]. Acta Horticulturae, 2013, 1012(1012): 315-320
- [3] Chan T Y K. Vegetable-borne nitrate and nitrite and the risk of methaemoglobinaemia [J]. Toxicology Letters, 2011, 200(1-2): 107-108
- [4] Olarte C, Sanz S, Federico Echávarri J, et al. Effect of plastic permeability and exposure to light during storage on the quality of minimally processed broccoli and cauliflower [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(1): 402-411

- [5] Limantara L, Dettling M, Indrawati R, et al. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables [J]. *Procedia Chemistry*, 2015, 14(14): 225-231
- [6] Ren J, Guo S S, Xin X L, et al. Changes in volatile constituents and phenols from *Gynura bicolor* DC grown in elevated CO₂ and LED lighting [J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 175(1): 243-250
- [7] Carrera A, Gil R, Mark D. Postharvest behavior of five cultivars of mango treated with CO₂ and stored under natural conditions, in the experimental station of INIA Caripe, Monagas state [J]. *Revista Científica UDO Agrícola*, 2011, 9(1): 51-59
- [8] Aguiló-Aguayo I, Oms-Oliu G, Martín-Belloso O, et al. Impact of pulsed light treatments on quality characteristics and oxidative stability of fresh-cut avocado [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 320-326
- [9] Kallai S, Ravi R, Kudachikar V B. Assessment of bulb pungency level in Indian onion cultivars under influence of low doses of ionizing radiation and short term storage [J]. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2015, 6(10): 38-49
- [10] Sorică C, Voicea I, Sorică E, et al. Conditioning of horticultural products for consumption in fresh state using ultraviolet no-ionizing radiation, UV-C [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 2014, 44(28): 194-202
- [11] 黄丹丹,张士秀,贾淑霞,等.LED补光对番茄光合特性的影响[J].*中国农学通报*,2014,30(22):102-108
HUANG Dan-dan, ZHANG Shi-xiu, JIA Shu-xia, et al. Influence of illumination supplement used LED light on photosynthesis of tomato [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(22): 102-108
- [12] 黄丹丹,杨华,李晓燕,等.LED补光对温室大豆光合特性及产量的影响[J].*云南大学学报:自然科学版*,2016,38(6): 965-973
HUANG Dan-dan, YANG Hua, LI Xiao-yan, et al. Influence of different supplemental light from LED on photosynthesis and yield of soybean in greenhouse [J]. *Journal of Yunnan University*, 2016, 38(6): 965-973
- [13] Kim N Y, Lee D S, Lee H J, et al. Effect of UV-LED irradiation on respiration and ethylene production of cherry tomatoes [J]. *The Korean Society of Food Preservation*, 2012, 19(1): 47-53
- [14] Ma G, Zhang L, Setiawan C K, et al. Effect of red and blue LED light irradiation on ascorbate content and expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 94(7): 97-103
- [15] Jin P, Yao D, Xu F, et al. Effect of light on quality and bioactive compounds in postharvest *broccoli florets* [J]. *Food Chemistry*, 2015, 172(1): 705-709
- [16] HunJoong, Kweon, Park M Y, et al. Influence of red LED treatment on photosynthesis, vegetative growth and fruit quality in Fuji/M.26 apple trees during night [J]. *Protected Horticulture & Plant Factory*, 2016, 25(1): 57-62
- [17] 查凌雁,刘文科.LED红蓝光连续光照对五种生菜生长、光合和叶绿素荧光特性的影响[J].*植物生理学报*,2017,62(9): 1735-1741
ZHA Ling-yan, LIU Wen-ke. Effect of continuous light with red and blue LED lamps on growth and characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of five lettuce cultivars [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 62(9): 1735-1741
- [18] Schwalb M, Naznin M T, Lefsrud M. Determination of the effect of red and blue ratios of LED light on plant photosynthesis [C]. *Ashs Conference*, 2014
- [19] Na Y L, Hyun J N. LED effect on free radical-scavenging activity of barley leaf [J]. *Journal of Crop Science & Biotechnology*, 2011, 14(4): 317-320
- [20] Wada K C, Kondo H, Takeno K. Obligatory short-day plant, *Perilla frutescens* var. *crispa* can flower in response to low-intensity light stress under long-day conditions [J]. *Physiologia Plantarum*, 2010, 138(3): 339-345
- [21] Mepba H D, Eboh L, Banigo D E B. Effects of processing treatments on the nutritive composition and consumer acceptance of some Nigerian edible leafy vegetables [J]. *African Journal of Food Agriculture Nutrition & Development*, 2016, 7(1): 1-18
- [22] Gupta S D, Jatothu B. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and morphogenesis [J]. *Plant Biotechnology Reports*, 2013, 7(3): 211-220
- [23] Yuan G, Sun B, Yuan J, et al. Effect of 1-methylcyclopropene on shelf life, visual quality, antioxidant enzymes and health-promoting compounds in broccoli florets [J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(3): 774-781

(下转第220页)