

LED 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实着色的影响

Effect of LED Light Treatment on Coloration of Ethephon-degreened Mandarin Fruit

邓丽莉 袁梓洙 尹保凤 任书颖

DENG Li-li YUAN Zi-yi YIN Bao-feng REN Shu-ying

李四平 姚世响 曾凯芳

LI Si-ping YAO Shi-xiang ZENG Kai-fang

(西南大学食品科学学院, 重庆 400715)

(College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

摘要:用乙烯利对重庆本地早熟蜜橘果实进行褪绿处理,对褪绿处理后的果实进行发光二极管(light emitting diode, LED)光照处理,探讨不同 LED 光源、光照时间和光照强度对乙烯褪绿蜜橘果皮和果肉着色的影响。结果表明,不同 LED 光源、光照时间和光照强度处理均有效地提高了果实色泽指数、色差参数(a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 和 C^*)和类胡萝卜素含量,降低了果皮 H^* 值、叶绿素a与b的含量。其中,蓝光 LED 光源处理组的果实褪绿速率快,色泽指数高,果实着色更佳。300 lx 蓝光 LED 光照处理 10 h 在改善乙烯褪绿蜜橘果实着色方面具有潜在的可行性。

关键词:蜜橘; 乙烯; 褪绿; 发光二极管(LED)光照; 蓝光; 着色

Abstract: The effect of light emitting diode (LED) light irradiation on the rind and pulp color of ethephon-degreened mandarin fruits was investigated in this study. The effects of LED light wavelength, treatment time and the intensity of the light on the coloration of mandarin fruit were all taken into consideration. LED light treatments can effectively improve the color index, the chromatographic parameters (a^* , b^* , a^*/b^* and C^*) and the carotenoid content of ethephon-degreened mandarin fruit, and reduced the H^* value, the chlorophyll a and chlorophyll b content. Blue LED light irradiated fruit had a better degreening rate and color index. Ethephon-degreened mandarin fruit could develop a better color after a blue LED light treatment at

intensity of 300 lx for 10 h.

Keywords: mandarin; ethylene; degreening; light emitting diode (LED) light irradiation; blue light; coloration

果皮色泽是柑橘果实的主要外观品质指标之一,也是消费者衡量柑橘果实可接受性的主要参数^[1]。早熟柑橘品种具有果皮和果肉不同步达到成熟标准的特性,即果皮达到上市颜色标准的时间要明显晚于果肉成熟时间^[2-3]。另外,人们为了避免低温对柑橘造成不必要的损害,一般会提前采摘柑橘果实,但此类早产柑橘(如槿柑)的果皮颜色较浅,商品价值较差^[4]。针对上述问题,商业上采用褪绿处理的方式改善早熟或早产柑橘果皮的色泽,以提高此类柑橘的市场竞争力^[5]。乙烯褪绿处理是目前商业应用最广泛且有效的褪绿方式^[4, 6-7]。大量研究表明外源乙烯处理在不影响柑橘果肉品质的情况下^[8-9],通过促进柑橘果皮叶绿素的降解及类胡萝卜素的合成和积累,加速柑橘外观色泽从绿色到黄色或橙色的转变过程^[10-11]。虽然外源乙烯褪绿处理在一定程度上能够诱导柑橘果皮褪绿转黄,使果实色泽更接近于自然成熟果实,但乙烯褪绿不是果实自然成熟转色过程的简单模拟。二者的着色过程存在一定差异^[2]。如何安全、高效地改善乙烯对柑橘果皮褪绿着色的效果,使其着色更接近于自然着色,对于改善早熟、早产柑橘果实的外观色泽、增加柑橘产业的经济价值具有重要意义。

目前,关于光照在调控果蔬着色方面的研究报道较多。一般地,光照能提高不同果蔬的转色速率^[12]。大量的研究^[13-16]也表明不同波长的光质对果蔬色泽的调控效果不同。光照强度和光照时间也是调控果蔬色泽的关键因子^[17]。另外,外源光照处理也能有效地影响类胡萝卜素和叶绿素的含量和组成的变化^[18-19]。但不同品种、不同产地

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:31401540); 重庆市博士后科研项目特别资助项目(编号: Xm2014106);“十二五”国家科技支撑计划项目(编号: 2015BAD16B07)

作者简介:邓丽莉,女,西南大学讲师,博士。

通信作者:曾凯芳(1972—),女,西南大学教授,博士。

E-mail: zengkafang@163.com

收稿日期:2017-02-11

的柑橘果实对光照处理的响应不同。重庆是我国重要的蜜橘差地之一,有效乙烯褪绿模式的研究对提高重庆地区蜜橘果实的商品价值具有重要意义。但目前重庆地区乙烯褪绿适宜的参数尚不明确。本试验拟以重庆本地产蜜橘果实为原料,用乙烯利对果实进行褪绿处理,褪绿处理后采用不同光照条件 LED 光源、不同光照时间和不同光照强度 LED 光源对果实进行处理,通过测定果实色泽相关指标的变化,初步明确在生产上以 LED 光照处理改善乙烯褪绿柑橘果实着色的可行性和有效作用模式,为提高采后乙烯褪绿柑橘果实外观品质和商品价值提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蜜橘:早熟无核蜜橘,采自重庆市北碚区歇马镇果园。果实为果肉成熟、果皮色泽呈绿色。果实采收当日运回实验室,置于 5~8 ℃条件下预冷处理 24 h。选用色泽一致、大小均一、无病虫害、无机械伤的健康果实作为试验材料;

乙烯利(ethephon,ETH):有效成分含量 40.0%,四川国光农化股份有限公司,用自来水配置浓度为 1 000 mg/kg 的乙烯利溶液。

1.2 主要仪器设备

LED 光源:红光 LED 光源波长为 660 nm,蓝光 LED 光源波长为 450 nm,复旦大学信息科学与工程学院提供;

紫外分光光度计:UV1000 型,上海天美科学仪器有限公司;

高速冷冻离心机:3H16R1 型,湖南赫西仪器装备有限公司;

测色仪:UltraScan PRO 型,美国 HunterLab 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 处理方法 果实用 2% NaClO 溶液浸泡 1~2 min 进行表面杀菌,然后用自来水清洗干净,并于室温下(20 ℃)自然晾干,将受试果实分为 8 组,结合前期预试验结果,8 组果实分别按表 1 进行处理。

果实处理后,进行单果包装,然后置于 20 ℃,85%~90% RH 环境中贮藏。处理果实分为观察组和取样组,分别于贮藏的第 0、3、6、9 天取果实赤道部位果皮(1~2 cm 宽)及果肉,迅速切成小块,放入液氮中速冻,再置于-40 ℃冰箱中保存备用。每个处理重复 3 次,共计 90 个果实,8 个处理共用 720 个果实。另取 30 个未处理果实,分成 3 组,测定果皮、果肉各项指标,作为所有处理的 0 d 值。

1.3.2 测定方法

(1)果实色泽指数测定:果实色泽指数的测定方法及分级标准参见表 2,按式(1)计算果实色泽指数^[20]。每个分级处理 30 个果实,重复 3 次。

$$\text{果实色泽指数} = \frac{\sum (\text{色泽级别} \times \text{该级别果实个数})}{\text{总果数个数}} \times 100。$$

(1)

(2)果皮和果肉色差值测定:采用 UltraScan®PRO 色差仪测量。根据国际照明委员会 L^* 、 a^* 、 b^* 颜色空间,分别测

表 1 试验处理分组

Table 1 Test group

组别	处理方法
CK	不做光照和乙烯利浸泡处理
Red (300 lx 10 h)	果实置于 300 lx 的红光 LED 光源下处理 10 h
Blue (300 lx 10 h)	果实置于 300 lx 的蓝光 LED 光源下处理 10 h
ETH	果实于乙烯利溶液中浸泡处理 1 min
ETH+Red (300 lx 10 h)	果实于乙烯利溶液中浸泡处理 1 min,晾干后将果实置于 300 lx 的红光 LED 光源下处理 10 h
ETH+Blue (150 lx 10 h)	果实于乙烯利溶液浸泡处理 1 min,晾干后将果实置于 150 lx 的蓝光 LED 光源下处理 10 h
ETH+Blue (300 lx 5 h)	果实于乙烯利溶液中浸泡处理 1 min,晾干后将果实置于 300 lx 的蓝光 LED 光源下处理 5 h
ETH+Blue (300 lx 10 h)	果实于乙烯利溶液中浸泡处理 1 min,晾干后将果实置于为 300 lx 的蓝光 LED 光源下处理 10 h

表 2 果实色泽变化分级标准

Table 2 Grading scales of fruit color

级数	表现特征
1	目测不到果实转黄,全果呈现绿色
2	果面转黄,转黄面积占全果的 10%~20%
3	果面转黄,转黄面积占全果的 20%~40%
4	果面转黄,转黄面积占全果的 40%~60%
5	果面转黄,转黄面积占全果的 60%~80%
6	果面转黄,转黄面积占全果的 80%~100%

定赤道部位果皮和果肉 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 、 H^* 和 C^* 值。每个处理测 30 个果子,每个果实取果皮赤道处对应 3 点,取平均值,记为果皮色差值;每 3 个果实果汁混合后为一个平行,测 3 个平行,取平均值,记为果肉色差值^[21-22]。

(3)果皮叶绿素 a、b 及类胡萝卜素含量测定:参照陶俊等方法进行测定^[23]。

1.3.3 数据统计及图形分析 以上所有试验均重复 3 次,所有数据用 Excel 2010 统计分析并绘图;应用 SPSS 16.0 软件对数据进行方差分析(ANOVA),采用 Duncan's 多重比较对差异显著性进行分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

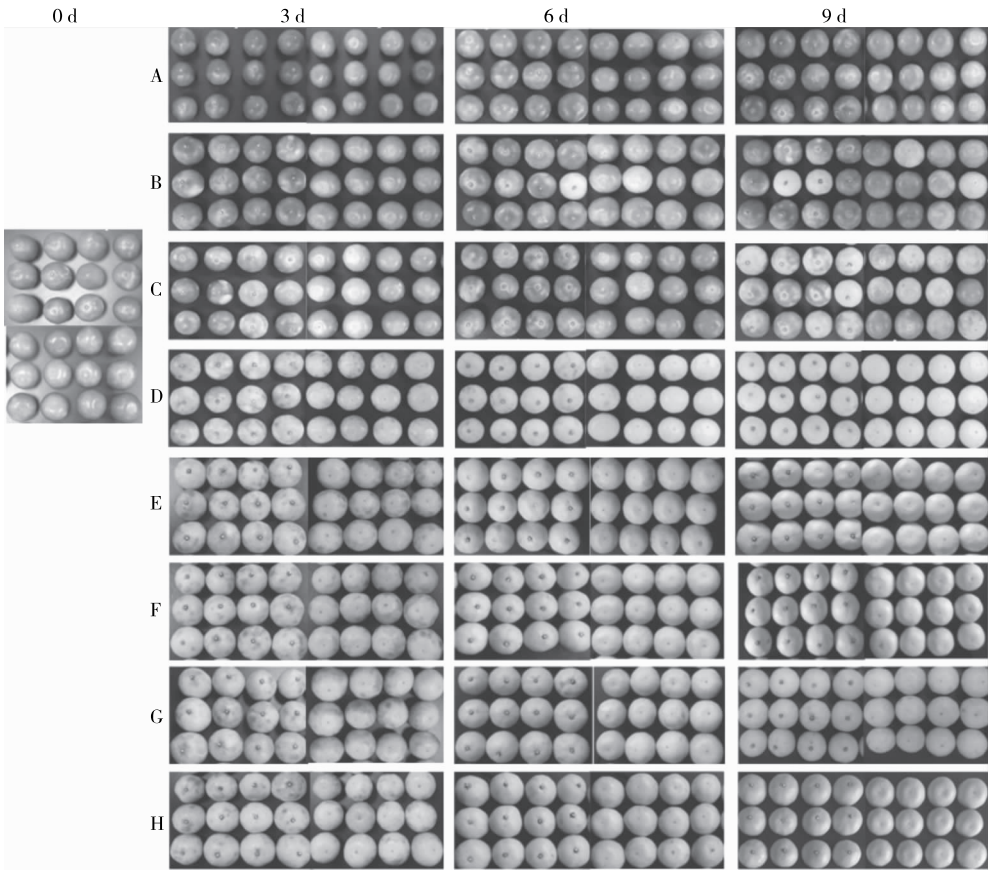
2 结果与讨论

2.1 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实外观的影响

色泽是果实最基本的外观品质,它的深浅度、强弱点、光泽度和均匀度影响着柑橘的商品价值^[24]。室温贮藏条件下处理果实果皮的颜色变化见图 1。外源乙烯褪绿处理后,果皮颜色有明显的褪绿转黄过程。与单独红光和蓝光处理组相比,乙烯处理能更快地促进果实黄化。第 3 天时乙烯褪绿处理的所有果实有明显的褪绿现象,外观呈现黄绿花斑状;第 9 天时其果实呈现黄色,实现了由绿转黄的转色过程。不

过,红光 LED 光源和蓝光 LED 光源结合乙烯褪绿处理组果实色泽呈现橙色,其色泽比单独乙烯处理组更深。且相对于红光 LED 光源处理组(图 1B 和 E),蓝光 LED 光源处理果实褪绿速率更快(图 1C 和 H),呈色更均一,着色效果更好。表明蓝光 LED 光源能更好地改善乙烯褪绿蜜橘果皮的色泽。

图 1(A、D、F、H)为不同光照时间处理果实外观图,图 1



A. CK B. Red(300 lx 10 h) C. Blue(300 lx 10 h) D. ETH E. ETH+Red (300 lx 10 h) F. ETH+Blue (300 lx 5 h) G. ETH+Blue (150 lx 10 h) H. ETH+Blue (300 lx 10 h)

图 1 LED 光照处理后乙烯褪绿蜜橘室温贮藏条件下(20 °C)果皮颜色变化情况

Figure 1 Color change of ethephon-degreened mandarin treated with LED light irradiation (20 °C)

2.2 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实色泽指数的影响

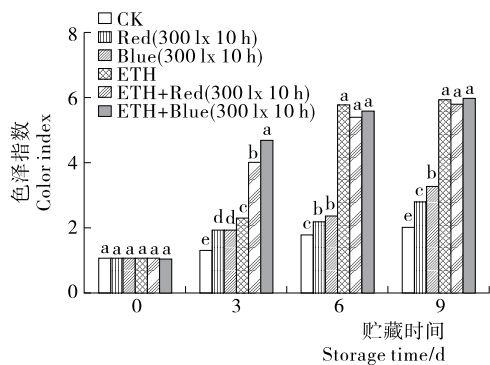
果实的色泽指数可以反映乙烯褪绿蜜橘果皮色泽的转变情况。由图 2 可知,随着贮藏时间的延长,受试蜜橘果实的色泽指数总体呈现上升趋势,0~3 d 果实转色速率较快,贮藏后期相对变缓。其中,图 2(a)表明乙烯、乙烯结合蓝光 LED 光源和乙烯结合红光 LED 光源处理组的蜜橘果实的色泽指数均显著高于单独红光 LED 光源、蓝光 LED 光源和对照组。且整个贮藏期内,蓝光 LED 光源结合处理的乙烯褪绿蜜橘果实色泽指数高于其他处理组,在第 3 天时该结合处理组与红光 LED 光源结合处理组和单独的乙烯处理组之间均存在显著性差异($P<0.05$)。此外,单独蓝光和单独红光处理的色泽指数都显著地高于对照组,且单独蓝光处理在贮藏后期(9 d)与单独红光处理组存在显著性差($P<0.05$)。表明光照处理对贮藏蜜橘果实和乙烯褪绿蜜橘果实的色泽指

(A、D、G、H)为不同光照强度处理果实外观图。两组结果均表明,蓝光 LED 光源结合处理组的褪绿效果好于乙烯单独处理组,且褪绿速率更快。同时,蓝光 LED 光照 10 h 的果实颜色变化明显优于蓝光 LED 光照 5 h 处理;蓝光 LED 光照强度 300 lx 优于蓝光 LED 光照强度 150 lx。故 300 lx 10 h 的蓝光 LED 光源光照处理能更有效地改善乙烯褪绿蜜橘果实的色泽。

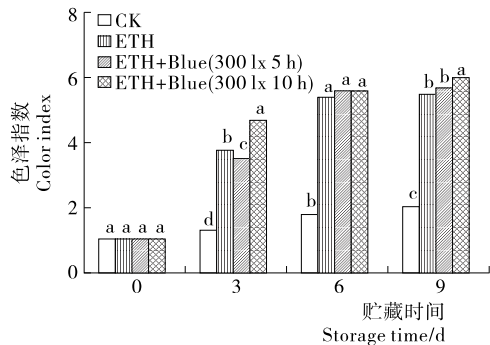
数都有显著影响。

光照时间长短影响蓝光对果实色泽的改善作用。适宜的蓝光 LED 光照时间(10 h)能加快受试蜜橘果实采后的转黄过程。贮藏第 3 天和第 9 天,蓝光光照 10 h 的乙烯褪绿蜜橘果实色泽指数分别比蓝光光照 5 h 处理组果实高 34.29% 和 5.26%,且两处理组之间差异显著($P<0.05$),见图 2(b)。

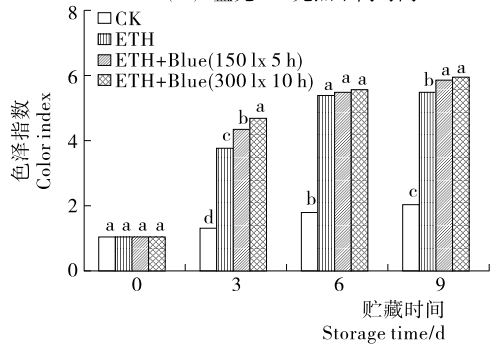
光照强度也是影响蓝光对果实色泽改善作用的因素。贮藏第 3 天和第 9 天,300 lx 的蓝光处理后的乙烯褪绿蜜橘果实色泽指数分别比单独乙烯褪绿蜜橘果实高出 23.68% 和 9.09%,且两处理组之间差异显著($P<0.05$)。第 3 天时,150 lx 蓝光结合处理显著促进乙烯褪绿蜜橘果实的转色。但是 300 lx 蓝光结合处理在数值上要大于 150 lx 蓝光结合光照处理,并且两处理组之间存在显著性差异($P<0.05$),见图 2(c)。



(a) 不同LED光源处理



(b) 蓝光LED光照不同时间



(c) 不同光强蓝光LED光照处理

同一天数值标注不同字母的为检测有显著差异的数据($P<0.05$)

图2 LED光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实色泽指数的影响

Figure 2 Effect of LED light treatment on the color index of ethphon-degreented mandarin fruit

2.3 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实色差值的影响

2.3.1 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果皮色差值(a^* 、 b^* 、 a^*/b^*)、彩度值(C^*)和色度值(H^*)的影响 由表3可知,乙烯褪绿处理后,各处理组果实的色差参数 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 和 C^* 值整体均呈现增加的趋势, H^* 值呈现下降的趋势,这与上述乙烯褪绿蜜橘果皮颜色的变化情况基本保持一致。大量研究也证明了类似的结果^[6, 16, 25]。光照处理(红光/蓝光LED光源)后乙烯褪绿蜜橘果实着色深于单独乙烯处理组。相应地,贮藏过程中,红光/蓝光LED光源结合处理的乙烯褪绿蜜橘果皮色差参数 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 、 C^* 和 H^* 值与单独乙烯处理组均有显著差异($P<0.05$)。同时,蓝光LED光源对乙烯褪绿蜜橘果皮色差参数的影响大于红光LED光源处理。贮藏第9天时,蓝光LED光源结合处理的乙烯褪绿蜜橘果实 a^* 、 b^* 和 C^* 值分别比红光LED光源结合处理组高7.44%、2.72%、3.01%。而且,与单独蓝光LED处理组比

较,蓝光LED光源结合乙烯处理对色差参数 a^* 、 b^* 、 C^* 的影响更显著。

不同的蓝光LED光源光照时间(5, 10 h)对不同色差参数的影响存在一定的差异。贮藏第6天时,蓝光LED光源光照10 h乙烯褪绿蜜橘果实的 a^* 、 b^* 和 C^* 值比蓝光LED光源光照5 h高6.51%、9.78%、9.98%,且存在显著差异($P<0.05$)。然而,不同蓝光LED光照时间对 a^*/b^* 和 H^* 值的影响差别不大。不过,由表3可知,与单独乙烯处理组相比,外源蓝光处理能显著地增加乙烯褪绿蜜橘果实 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 、 C^* 值,降低 H^* 值。

由表3可知,不同光照强度处理对乙烯褪绿蜜橘果实的各个色差参数作用效果也呈现出一致的结果。光照强度为150 lx和300 lx蓝光LED光照处理10 h的乙烯褪绿蜜橘果实 a^* 、 b^* 、 a^*/b^* 、 C^* 和 H^* 值与单独乙烯处理组均有显著差异($P<0.05$)。果实贮藏至后期(第9天)时,300 lx蓝光LED光照结合处理组果实的 b^* 和 C^* 分别比150 lx蓝光LED光照结合处理组高2.74%和2.59%。

2.3.2 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果肉色差值(a^* 、 b^* 、 a^*/b^*)、彩度值(C^*)和色度值(H^*)的影响 由表4可知,蓝光LED光照处理能有效地促进乙烯褪绿蜜橘果肉 a^* 值的增加。贮藏第3、6和9天时,蓝光LED结合乙烯处理组 a^* 值分别比单独乙烯组高35.03%、115.34%、33.42%。相似地,整个贮藏过程中,蓝光LED结合乙烯处理的蜜橘果肉 b^* 和 C^* 值均明显高于对照组、乙烯单独处理组和单独蓝光LED光照组($P<0.05$)。蜜橘果肉的 a^*/b^* 和 H^* 值对蓝光LED光照有一定的积极响应。贮藏3 d后,单独蓝光LED光照组的 a^*/b^* 和 H^* 值分别与其他3组处理存在显著性差异。贮藏后期,蓝光LED-结合乙烯褪绿处理对 a^*/b^* 和 H^* 的影响占主导地位。贮藏第6天时,蓝光LED-结合乙烯处理的蜜橘果肉 a^*/b^* 值分别比对照组、单独蓝光LED光照组和单独乙烯褪绿组高38.89%、6.90%、16.80%;蓝光LED-结合乙烯处理的蜜橘果肉 H^* 值分别比对照组、单独蓝光LED光照组和单独乙烯褪绿组低7.28%、1.63%、3.68%。

2.4 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果实色素物质含量的影响

乙烯能够加速柑橘果皮中叶绿素的分解和促进类胡萝卜素的积累,实现对果皮色泽和果实外观品质的改善^[11-12, 26]。由图3可知,第0天时,果实果皮叶绿素含量明显高于类胡萝卜素含量,从而掩盖了类胡萝卜素的颜色,此时果皮呈绿色;采后褪绿处理后,随着贮藏时间的延长,果皮叶绿素(叶绿素a和叶绿素b)含量均表现显著的下降趋势,而类胡萝卜素不断增加,最终使果实呈现黄色。

柑橘果实存在两种类型的叶绿素,即叶绿素a和叶绿素b^[27-28]。整个贮藏过程中,4组处理组的叶绿素a和b降解速率不同,其速率快慢表现为:蓝光LED结合乙烯处理组>单独乙烯处理组>单独蓝光LED光照组>对照组,见图3(a)、(b)。表明蓝光LED光照处理能加速乙烯褪绿蜜橘果实中叶绿素a和b的降解。贮藏至第6天时,蓝光LED光照结合乙烯处理组的叶绿素a含量分别为单独乙烯处理组、单独蓝光处理组和对照组的51.34%、15.63%、12.51%;叶绿

表 3 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果皮色差值、彩度值和色度值的影响[†]
Table 3 Effects of LED light treatment on a^* , b^* , a^*/b^* , C^* and Hue of ethephon-degreened mandarin peel during storage

差指数	处理	0 d	3 d	6 d	9 d
a^*	CK	-9.75 ± 0.35	$-10.08 \pm 0.11^{\text{cd}}$	$-8.90 \pm 0.42^{\text{d}}$	$-8.90 \pm 0.18^{\text{e}}$
	Blue (300 lx 10 h)		$-10.94 \pm 0.40^{\text{d}}$	$-8.52 \pm 0.83^{\text{d}}$	$-5.46 \pm 0.35^{\text{d}}$
	ETH		$-6.32 \pm 0.64^{\text{b}}$	$9.69 \pm 0.72^{\text{c}}$	$14.44 \pm 0.85^{\text{c}}$
	ETH+Blue (300 lx 5 h)		$10.71 \pm 0.90^{\text{a}}$	$14.56 \pm 0.73^{\text{b}}$	$18.92 \pm 0.23^{\text{b}}$
	ETH+Blue (150 lx 10 h)		$11.59 \pm 1.36^{\text{a}}$	$16.85 \pm 0.57^{\text{a}}$	$20.12 \pm 0.37^{\text{a}}$
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		$11.91 \pm 0.80^{\text{a}}$	$16.67 \pm 0.79^{\text{a}}$	$20.15 \pm 0.98^{\text{a}}$
b^*	CK	30.34 ± 0.59	$31.88 \pm 1.13^{\text{e}}$	$34.55 \pm 1.59^{\text{e}}$	$34.55 \pm 1.08^{\text{f}}$
	Blue (300 lx 10 h)		$42.38 \pm 1.56^{\text{e}}$	$41.10 \pm 1.67^{\text{e}}$	$48.39 \pm 1.04^{\text{d}}$
	ETH		$47.88 \pm 0.73^{\text{b}}$	$69.26 \pm 0.59^{\text{b}}$	$71.50 \pm 0.40^{\text{c}}$
	ETH+Blue (300 lx 5 h)		$70.10 \pm 1.11^{\text{a}}$	$70.58 \pm 0.58^{\text{b}}$	$75.85 \pm 0.60^{\text{a}}$
	ETH+Blue (150 lx 10 h)		$69.21 \pm 0.77^{\text{a}}$	$76.15 \pm 0.59^{\text{a}}$	$73.92 \pm 0.38^{\text{b}}$
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		$71.02 \pm 1.60^{\text{a}}$	$77.48 \pm 0.45^{\text{a}}$	$75.94 \pm 0.79^{\text{a}}$
a^*/b^*	CK	-0.32 ± 0.01	$-0.32 \pm 0.01^{\text{d}}$	$-0.26 \pm 0.02^{\text{d}}$	$-0.26 \pm 0.00^{\text{e}}$
	Blue (300 lx 10 h)		$-0.26 \pm 0.02^{\text{c}}$	$-0.21 \pm 0.03^{\text{c}}$	$-0.11 \pm 0.01^{\text{c}}$
	ETH		$-0.13 \pm 0.01^{\text{b}}$	$0.14 \pm 0.01^{\text{b}}$	$0.20 \pm 0.01^{\text{b}}$
	ETH+Blue (300 lx 5 h)		$0.15 \pm 0.02^{\text{a}}$	$0.21 \pm 0.01^{\text{a}}$	$0.25 \pm 0.03^{\text{a}}$
	ETH+Blue (150 lx 10 h)		$0.17 \pm 0.02^{\text{a}}$	$0.22 \pm 0.01^{\text{a}}$	$0.27 \pm 0.01^{\text{a}}$
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		$0.17 \pm 0.01^{\text{a}}$	$0.22 \pm 0.01^{\text{a}}$	$0.27 \pm 0.02^{\text{a}}$
C^*	CK	31.87 ± 0.67	$33.44 \pm 1.05^{\text{e}}$	$35.69 \pm 1.43^{\text{f}}$	$35.68 \pm 1.09^{\text{f}}$
	Blue (300 lx 10 h)		$43.78 \pm 1.42^{\text{c}}$	$41.98 \pm 1.47^{\text{d}}$	$48.69 \pm 1.02^{\text{d}}$
	ETH		$48.30 \pm 0.69^{\text{b}}$	$69.94 \pm 0.60^{\text{c}}$	$72.94 \pm 0.54^{\text{c}}$
	ETH+Blue (300 lx 5 h)		$70.91 \pm 0.96^{\text{a}}$	$72.07 \pm 0.51^{\text{b}}$	$78.18 \pm 0.14^{\text{a}}$
	ETH+Blue (150 lx 10 h)		$70.17 \pm 0.95^{\text{a}}$	$78.00 \pm 0.56^{\text{a}}$	$76.60 \pm 0.34^{\text{b}}$
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		$72.02 \pm 1.68^{\text{a}}$	$79.26 \pm 0.39^{\text{a}}$	$78.57 \pm 0.56^{\text{a}}$
H^*	CK	107.81 ± 0.30	$107.57 \pm 0.71^{\text{a}}$	$104.49 \pm 1.33^{\text{a}}$	$104.44 \pm 0.16^{\text{a}}$
	Blue (300 lx 10 h)		$104.50 \pm 1.01^{\text{b}}$	$101.75 \pm 1.54^{\text{b}}$	$96.44 \pm 0.48^{\text{c}}$
	ETH		$97.53 \pm 0.80^{\text{c}}$	$82.04 \pm 0.59^{\text{c}}$	$78.59 \pm 0.60^{\text{d}}$
	ETH+Blue (300 lx 5 h)		$81.31 \pm 0.86^{\text{d}}$	$78.35 \pm 0.62^{\text{d}}$	$76.00 \pm 1.40^{\text{e}}$
	ETH+Blue (150 lx 10 h)		$80.49 \pm 1.01^{\text{d}}$	$77.52 \pm 0.44^{\text{d}}$	$74.78 \pm 0.31^{\text{e}}$
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		$80.48 \pm 0.48^{\text{d}}$	$77.86 \pm 0.59^{\text{d}}$	$75.14 \pm 0.82^{\text{e}}$

[†] 同一指标、同一天数值标注不同字母的为检测有显著差异的数据(P<0.05)。

素 b 含量分别为单独乙烯处理组、单独蓝光处理组和对照组的 52.71%,46.45%,42.90%。但在贮藏后期(第 9 天)时,蓝光 LED 结合乙烯处理组和单独乙烯处理组之间叶绿素 a 和 b 含量无显著差异(P>0.05)。由此可知,适宜条件的光照处理能够诱导叶绿素的降解,促进果实果皮的转色^[23]。

柑橘果实外源褪绿处理后,果皮类胡萝卜素含量的高低,直接影响最终果皮的“橙色”水平和外观色泽^[25]。由图 3(d)可知,褪绿处理后,褪绿蜜橘的果皮类胡萝卜素含量呈现上升趋势。贮藏第 3、6 和 9 天时,蓝光 LED 结合乙烯处理组的果实类胡萝卜素含量较对照组高出 32.44%,18.29%,13.49%,且差异显著(P<0.05)。表明蓝光 LED 光照处理可以促进蜜橘果皮类胡萝卜素的积累,对乙烯褪绿蜜橘果皮色

泽有一定的改善作用。在整个试验贮藏过程中,单独蓝光处理组和对照组果实类胡萝卜素的积累较缓慢、变化不大,且差异不显著(P>0.05)。可能是单独蓝光处理对蜜橘果实叶绿素降解过程的调控更为有效,或者蓝光 LED 光照处理需要更长的时间来诱导类胡萝卜素的积累。

3 结论

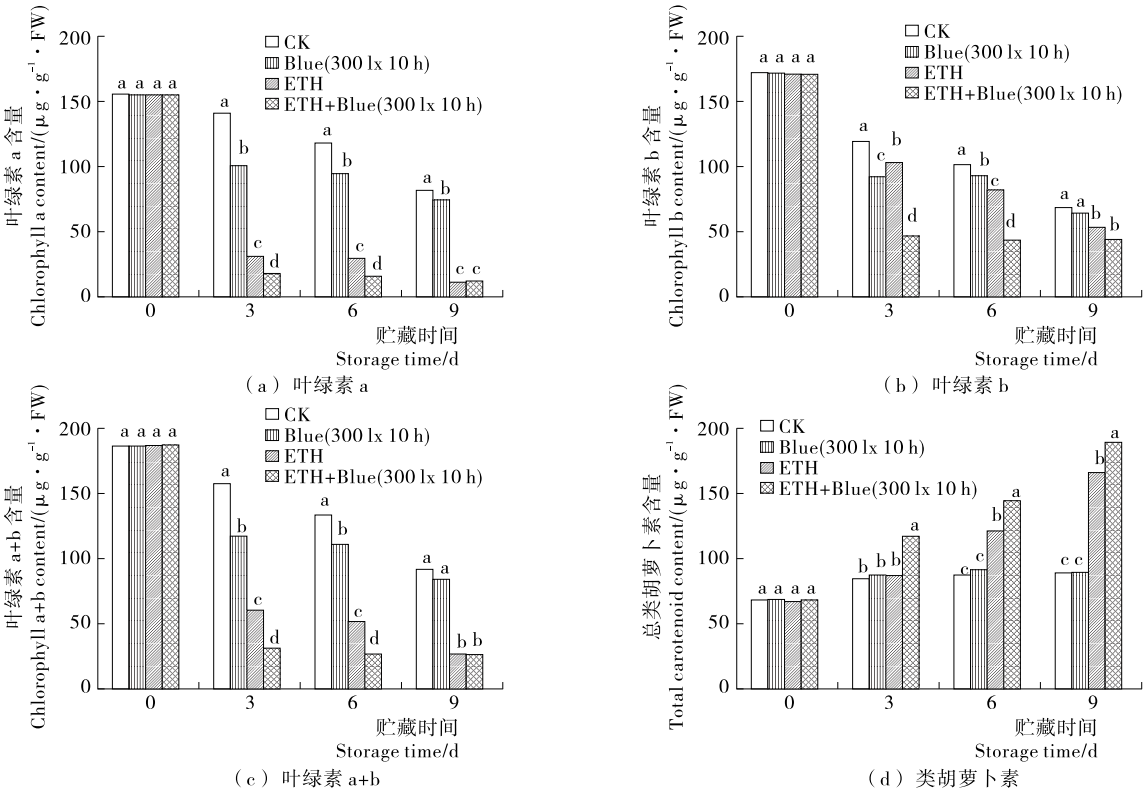
本研究结果表明,不同光照结合乙烯处理组能显著地促进乙烯褪绿蜜橘果实的着色,其中以 300 lx 蓝光 LED 处理 10 h 效果最好。该光照处理在改善柑橘褪绿蜜橘果实着色方面具有潜在的可能性,为改善乙烯褪绿蜜橘着色效果提供了思路。但该光照处理在实际生产应用中的具体方式有待进一步研究。

表 4 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果肉色差值、彩度值和色度值的影响[†]

Table 4 Effects of LED light treatment on a^* , b^* , a^*/b^* , C^* and Hue of ethephon-degreened mandarin pulp during storage

色差指数	处理	0 d	3 d	6 d	9 d
a^*	CK	5.35±0.10	10.08±0.11 ^c	8.90±0.42 ^c	9.00±0.48 ^c
	Blue (300 lx 10 h)		14.81±0.15 ^a	9.88±0.10 ^b	9.30±0.36 ^c
	ETH		11.31±0.30 ^b	7.75±0.24 ^d	13.40±0.31 ^b
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		15.28±0.25 ^a	16.69±1.00 ^a	17.40±0.19 ^a
b^*	CK	22.33±0.08	31.88±1.13 ^d	35.25±0.25 ^b	28.41±0.72 ^c
	Blue (300 lx 10 h)		40.65±0.38 ^b	30.10±0.37 ^c	29.10±0.38 ^c
	ETH		36.77±0.64 ^c	25.80±0.65 ^d	41.90±1.36 ^b
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		50.77±0.75 ^a	47.80±3.13 ^a	48.41±3.05 ^a
a^*/b^*	CK	0.24±0.00	0.32±0.01 ^b	0.25±0.01 ^c	0.32±0.01 ^b
	Blue (300 lx 10 h)		0.36±0.01 ^a	0.33±0.00 ^{ab}	0.32±0.01 ^b
	ETH		0.31±0.00 ^b	0.30±0.00 ^b	0.31±0.00 ^b
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		0.30±0.01 ^b	0.35±0.03 ^a	0.36±0.03 ^a
C^*	CK	22.96±0.07	33.44±1.05 ^d	36.35±0.15 ^b	29.81±0.80 ^c
	Blue (300 lx 10 h)		43.26±0.35 ^b	31.68±0.38 ^c	30.56±0.43 ^c
	ETH		38.47±0.69 ^c	49.75±0.69 ^d	50.12±1.39 ^b
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		53.02±0.61 ^a	50.65±0.42 ^a	51.46±2.69 ^a
H^*	CK	76.52±0.26	72.43±0.71 ^a	75.82±0.73 ^a	72.42±0.66 ^a
	Blue (300 lx 10 h)		69.98±0.27 ^b	71.83±0.15 ^c	72.28±0.56 ^a
	ETH		72.89±0.15 ^a	73.28±0.11 ^b	72.70±0.16 ^a
	ETH+Blue (300 lx 10 h)		73.21±0.62 ^a	70.68±0.44 ^d	70.14±1.73 ^b

[†] 同一指标、同一天数值标注不同字母的为检测有显著差异的数据(P<0.05)。



同一天数值标注不同字母的为检测有显著差异的数据(P<0.05)

图 3 LED 光照处理对乙烯褪绿蜜橘果皮叶绿素及类胡萝卜素含量的影响

Figure 3 Effect of LED light treatment on chlorophyll and carotenoid content of ethephon-degreened mandarin peel

参考文献

- [1] RODRIGO M J, MARCOS J F, ZACARÍAS L. Biochemical and molecular analysis of carotenoid biosynthesis in flavedo of orange (*Citrus sinensis* L.) during fruit development and maturation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(22): 6 724-6 731.
- [2] YAMAUCHI N, AKIYAMA Y, KAKO S, et al. Chlorophyll degradation in Wase satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruit with on-tree maturation and ethylene treatment [J]. Scientia Horticulturae, 1997, 71(1): 35-42.
- [3] CHAUDHARY P R, JAYAPRAKASHA G K, PATIL B S. Ethylene degreening modulates health promoting phytochemicals in Rio Red grapefruit [J]. Food Chemistry, 2015, 188: 77-83.
- [4] ZHOU Jing-yi, SUN Chong-de, ZHANG Lan-lan, et al. Preferential accumulation of orange-colored carotenoids in Ponkan (*Citrus reticulata*) fruit peel following postharvest application of ethylene or ethephon [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 126(2): 229-235.
- [5] PORAT R. Degreening of citrus fruit [J]. Tree and Forestry Science and Biotechnology, 2008, 2(1): 71-76.
- [6] JOHN-KARUPPIAH K-J, BURNS J K. Degreening behavior in ‘Fallglo’ and ‘Lee×Orlando’ is correlated with differential expression of ethylene signaling and biosynthesis genes [J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 58(3): 185-193.
- [7] SDIRI S, NAVARRO P, MONTERDE A, et al. New degreening treatments to improve the quality of citrus fruit combining different periods with and without ethylene exposure [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 63(1): 25-32.
- [8] MAYUONI L, TIETEL Z, PATIL B S, et al. Does ethylene degreening affect internal quality of citrus fruit? [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 62(1): 50-58.
- [9] SDIRI S, NAVARRO P, MONTERDE A, et al. Effect of postharvest degreening followed by a cold-quarantine treatment on vitamin C, phenolic compounds and antioxidant activity of early-season citrus fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 65: 13-21.
- [10] MATSUMOTO H, IKOMA Y, KATO M, et al. Effect of postharvest temperature and ethylene on carotenoid accumulation in the flavedo and juice sacs of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) fruit [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(11): 4 724-4 732.
- [11] SHIMOKAWA K, SHIMADA S, YAEO K. Ethylene-enhanced chlorophyllase activity during degreening of *Citrus unshiu* Marc [J]. Scientia Horticulturae, 1978, 8(2): 129-135.
- [12] WANG S Y, CHEN C T, WANG C Y. The influence of light and maturity on fruit quality and flavonoid content of red raspberries [J]. Food Chemistry, 2009, 112(3): 676-684.
- [13] XU Hui-lian, XU Qi-cong, LI Feng-lan, et al. Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 148: 190-196.
- [14] ZHANG Dong, QIAN Min-jie, YU Bo, et al. Effect of fruit maturity on UV-B-induced post-harvest anthocyanin accumulation in red Chinese sand pear [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(9): 2 857-2 866.
- [15] RODOV V, VINOKUR Y, HOREV B. Brief postharvest exposure to pulsed light stimulates coloration and anthocyanin accumulation in fig fruit (*Ficus carica* L.) [J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 68: 43-46.
- [16] GANGADHAR B H, MISHRA R K, PANDIAN G, et al. Comparative study of color, pungency, and biochemical composition in chili pepper (*Capsicum annuum*) under different light-emitting diode treatments [J]. HortScience, 2012, 47(12): 1 729-1 735.
- [17] ZHANG Lan-cui, MA Gang, YAMAWAKI K, et al. Effect of blue LED light intensity on carotenoid accumulation in citrus juice sacs [J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 188: 58-63.
- [18] 陶俊, 张上隆, 安新民, 等. 光照对柑橘果皮类胡萝卜素和色泽形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1 833-1 836.
- [19] GAO Hui-jun, XU Juan, LIU Xi, et al. Light effect on carotenoids production and expression of carotenogenesis genes in citrus callus of four genotypes [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2011, 33(6): 2 485-2 492.
- [20] BERÜTER J, FEUSI M E S, RÜEDI P. Sorbitol and sucrose partitioning in the growing apple fruit [J]. Journal of Plant Physiology, 1997, 151(3): 269-276.
- [21] MCGUIRE R G. Reporting of objective color measurements [J]. HortScience, 1992, 27(12): 1 254-1 255.
- [22] HASPERUE J H, GUARDIANELLI L, RODONIL M, et al. Continuous white-blue LED light exposition delays postharvest senescence of broccoli [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2016, 65: 495-502.
- [23] 陶俊, 张上隆, 张良诚, 等. MPTA 对柑橘果皮类胡萝卜素形成的影响[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(1): 46-50.
- [24] RODRIGO M J, ALQUÉZAR B, ALÓS E, et al. Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of Citrus fruit [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 163: 46-62.
- [25] STEWART I, WHEATONT A. Carotenoids in citrus: their accumulation induced by ethylene [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1972, 20(2): 448-449.
- [26] EILATI S, BUDOWSKJ P, MONSELISE S. Carotenoid changes in the ‘Shamouti’ orange peel during chloroplast-chromoplast transformation on and off the tree [J]. Journal of Experimental Botany, 1975, 26(4): 624-632.
- [27] ALÓS E, ROCA M, IGLESIAS D J, et al. An evaluation of the basis and consequences of a stay-green mutation in the navel negra citrus mutant using transcriptomic and proteomic profiling and metabolite analysis [J]. Plant Physiology, 2008, 147(3): 1 300-1 315.
- [28] SRILAONG V, AIAMLA-OR S, SOONTORNWAT A, et al. UV-B irradiation retards chlorophyll degradation in lime (*Citrus latifolia* Tan.) fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(1): 110-112.