

贾聚金,陈香玲,孙权,等.沃柑树冠不同结果部位光照条件对果实品质的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(6):112-118.

DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.06.014

沃柑树冠不同结果部位光照条件对果实品质的影响

贾聚金¹,陈香玲²,孙权¹,包心茹¹,
张红艳¹,徐娟¹,柴利军¹,邓秀新¹,叶俊丽¹

1.园艺植物生物学教育部重点实验室/华中农业大学园艺林学学院,武汉 430070;

2.广西农业科学院园艺研究所,南宁 530007

摘要 以沃柑树冠内膛遮阴果实和树冠外围光照充足果实为试材,对比分析了不同光照条件对果实外观色泽及内在品质的综合影响。结果显示:与光照充足的沃柑果实相比,遮阴的沃柑果实呈现更深的橙红色,其果皮中总类胡萝卜素含量提高了2.87倍,其中主要呈色色素β-柠乌素(红色)和9-顺式紫黄质(橙黄色)的含量分别增加了16.93倍和6.47倍;相关基因表达分析发现类胡萝卜素代谢途径主要结构基因均在遮阴果实中显著上调表达,其中β-柠乌素合成关键基因类胡萝卜素裂解双加氧酶(*CCD4b*)的表达量增加了11.78倍。结果表明,遮阴可以通过诱导沃柑果皮中类胡萝卜素合成相关基因的表达来促进果皮中类胡萝卜素的积累,最终使沃柑果皮呈现深橙红色;与光照充足的沃柑果实相比,遮阴果实的可溶性固形物、可滴定酸、可溶性糖以及有机酸含量、抗坏血酸含量均显著降低,表明光照条件影响了果实的内在品质。

关键词 光照;遮阴;沃柑;果实品质;类胡萝卜素

中图分类号 S 666.901 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)06-0112-07

柑橘是我国南方栽培面积最广、经济地位最重要的果树^[1],其果实外形美观、色泽多样、风味独特,深受消费者的喜爱。柑橘果实品质受到多种环境因素和农业技术措施的影响,其中光照被认为是影响柑橘果实品质的重要环境因素之一^[2]。

色泽作为果实外观品质的一项重要指标,是消费者最直观的感官体验,直接决定了果实经济效益^[3]。柑橘果实的外观色泽由其呈色色素——类胡萝卜素的种类和含量决定。在生产上,光照条件对柑橘色泽的影响因品种而异。大多数柑橘品种在树冠外围光照充足的条件下比树冠内遮阴的果实颜色更鲜艳^[4-6]。对一些柑橘品种进行套袋处理后,成熟期不套袋果实比套袋果实颜色更鲜艳^[7-9]。然而也有研究表明,生长在树冠内遮阴的红葡萄柚(*Citrus paradisi* cv. 'Star Ruby')比树冠外围光照充足的果实在成熟期具有更深的红色^[10]。Gao等^[11]测定了光照和黑暗条件下4个不同品种的柑橘愈伤组织中类胡萝卜素含量和相关基因的表达情况,结果表明,只有红马叙葡萄柚(*C. paradisi*

Macf.)愈伤组织中的类胡萝卜素含量在光照下显著下降,其他3种愈伤组织中类胡萝卜素含量均显著增加。可见,光照对柑橘类胡萝卜素代谢的影响因基因型而异。

光照对果实内在品质也具有十分重要的影响。树体冠层不同部位光照条件的差异被认为是造成果实内在品质差异的重要原因。在柑橘^[12]、梨^[13]、桃^[14-15]和苹果^[16]等果树上的研究结果显示,树冠上层及外围光照条件较好的果实可溶性固形物、总糖含量均显著高于树冠下部及内膛遮阴的果实;可滴定酸含量的差异则表现不一致。除糖酸外,光照对抗坏血酸的积累也有显著影响^[17]。有研究结果表明树冠外围光照充足的柑橘果皮中抗坏血酸含量显著高于遮阴的果实,但是果肉中的抗坏血酸含量未受影响^[18]。在苹果上的研究也表明遮阴的苹果果皮中抗坏血酸含量显著降低,果肉中抗坏血酸含量无显著差异^[19]。

沃柑(*C. reticulata*)果实色泽艳丽,果肉细嫩多汁,口感浓甜,品质佳,是市场热销的晚熟杂柑品

收稿日期:2021-09-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1000203);国家自然科学基金项目(31930095)

贾聚金,E-mail:1580373062@qq.com

通信作者:叶俊丽,E-mail:yejunli@mail.hzau.edu.cn

种。因种植效益高,近年来沃柑产业发展迅速,仅广西的沃柑种植面积已超 10 万 hm^2 ^[20]。成熟沃柑果实的果皮有时呈现诱人的橙红色,有时又呈黄色、亮黄色,一定程度上影响了果品的市场欢迎度。本研究前期对多个沃柑果园进行了田间调查,发现沃柑树体不同结果部位果实的外观色泽存在显著差异,其中光照条件可能为主要影响因素。本研究在此基础上进一步对比分析沃柑树冠外围光照充足的果实和树冠内膛遮阴的果实的内外品质差异,探究树体不同结果部位光照条件差异对沃柑果实品质的影响,以期为深入探究光照调控果实风味及着色的分子机制奠定基础,为沃柑树体整形修剪及优质果品生产提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料和处理

试验于 2021 年在广西省农业科学院柑橘试验基地进行,选取长势一致的 5 年生沃柑为试材,砧木为资阳香橙,共 9 株,每 3 株作为 1 个生物学重复。果园树体栽植方向为东西行向,株行距为 2 m × 4 m,树形为自然生长圆头形,按照常规栽培措施进行管理。于 2021 年 1 月中旬果实成熟期进行采样,每株树选取树冠外围受光照充足的果实与树冠内部遮阴的果实各 12 个,采样后立即装入黑色塑料袋带回实验室,拍照后进行常规品质测定,之后将果皮和果肉分别取样,放入液氮速冻后贮存于 -80 °C 冰箱中,用于测定类胡萝卜素、可溶性糖和可滴定酸等生理指标以及相关基因的表达量。

1.2 测定方法

1) 色差值的测定。所用色差仪型号为 Konica Minolta CM-5,在每个沃柑果实的赤道面选取 6 个点进行色差测定,并记录下 L^* 值(亮度值)、 a^* 值(红绿色度值)、 b^* 值(黄蓝色度值)、 H° (色相角)、CCI(色差指数)。其中 $H^\circ = \arctan(b^*/a^*)$, $CCI = 1000 \times a^*/(L^* \times b^*)$,取平均值进行分析^[14]。

2) 类胡萝卜素的提取与测定。沃柑果皮类胡萝卜素的提取参照 Cao 等^[21]方法,高效液相色谱(HPLC)分析参数参照 Zheng 等^[22]。类胡萝卜素的鉴定根据标样或其已报道的特征吸收峰和出峰时间及顺序来判断^[21]。

3) 果皮总 RNA 提取和荧光定量 PCR。沃柑果皮 RNA 提取所用试剂盒(RN38 EASYspin Plus)购自北京艾德莱生物科技有限公司。操作方法按试剂盒说明书进行。第一链 cDNA 的合成用 HiS-

cript II Q RT Super Mix for qPCR(+gDNA wiper)试剂盒完成。该试剂盒购自南京诺唯赞生物科技有限公司,反转录步骤参照试剂盒说明书进行。类胡萝卜素代谢途径相关基因的引物序列参见 Cao 等^[21]。实时荧光定量 PCR 实验参照姜启航^[8]的方法进行。*actin* 作为内参基因,采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 的方法计算基因的相对表达量。

4) 果实常规品质的测定。用数显游标卡尺测定其横纵径,天平测量其单果质量,对采自每株树的 12 个果实进行测量,计算平均值;可溶性固形物和可滴定酸利用 PAL-BX/ACID 1 糖酸一体机进行测定,抗坏血酸含量用 2,6-二氯酚酚滴定法测定^[8]。

5) 果实可溶性糖和有机酸的提取与测定。果肉中可溶性糖和有机酸的提取、衍生化及气相色谱的分析参数参照许让伟等^[23]。

1.3 数据统计分析

采用 Microsoft Excel(2010)软件进行原始数据统计和分析,使用 IBM SPSS Statistics 25 软件对数据进行显著性差异比较,使用比较平均-独立样本 *t* 检验进行测验,柱形图绘制使用 Graphpad Prism 8 软件。

2 结果与分析

2.1 光照与遮阴对成熟沃柑果皮着色的影响

与直接暴露在光照下的成熟沃柑果实相比,遮阴的成熟沃柑果实果皮颜色表现出更深的橙红色(图 1)。两者的亮度值(L^*)、红绿色度值(a^*)、黄蓝色度值(b^*)存在显著差异(表 1),其中光照下的沃柑果皮的 L^* 值和 b^* 值显著高于遮阴果实, a^* 值显著低于遮阴的果实;且遮阴的果实色相角(H°)显著降低,色差指数(CCI)显著提高。综上,遮阴的沃柑果皮红色程度高,其颜色更深且偏红;光照充足的沃柑果皮黄色程度高,其呈亮黄色。

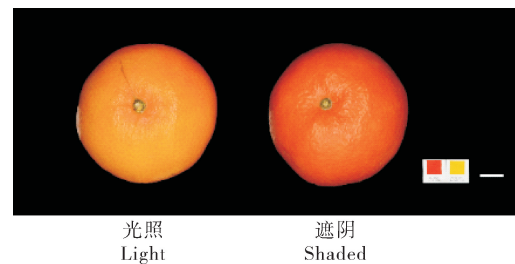


图 1 光照与遮阴的成熟沃柑果实着色差异
Fig.1 Differences in coloration of mature Orangetan mandarin fruits under light and shaded

表1 光照与遮阴的沃柑果皮色差值比较

Table 1 Comparison of color difference values of Orah mandarin peel under light and shaded

处理 Treatment	L^*	a^*	b^*	H°	CCI
光照 Light	68.02±2.40	30.18±3.77	69.66±1.48	66.56±3.04	6.46±1.16
遮阴 Shaded	59.70±0.93**	42.47±1.27**	55.99±1.37**	52.81±1.42**	12.74±0.85**

注: L^* 、 a^* 、 b^* 、 H° 、CCI 分别代表亮度值、红绿色度值、黄蓝色度值、色相角和色差指数。**表示同列2个处理间差异极显著($P<0.01$)。Note: L^* 、 a^* 、 b^* 、 H° 、CCI respectively represent brightness value, red-green degree value, yellow-blue degree value, chroma angle and color index. ** indicates that the difference between the two treatments in each column is extremely significant ($P<0.01$).

2.2 光照与遮阴条件下成熟沃柑果皮的类胡萝卜素组分和含量变化

利用 HPLC 对 2 种光照条件下沃柑果皮中的类胡萝卜素组分和含量进行了测定分析。如图 2 所示,成熟的沃柑果皮中富含叶黄质、 β -隐黄质、 β -柠乌素、紫黄质等多种类胡萝卜素组分,总类胡萝卜素与各类胡萝卜素组分均在 2 种光照条件的沃柑果皮中显著差异积累。遮阴的沃柑果皮中总类胡萝卜素含量达 1 898.57 $\mu\text{g/g}$,其中主要呈色色素 9-顺式紫黄质、紫黄质和 β -柠乌素的含量分别达 1 186.78、306.59 和 215.77 $\mu\text{g/g}$,分别占总类胡萝卜素含量的 63%、16%和 11%。而光照充足的沃柑果皮中总类胡萝卜素含量仅为 490.90 $\mu\text{g/g}$,其中 9-顺式紫黄质、紫黄质和 β -柠乌素的含量分别为 158.81、208.85 和 12.04 $\mu\text{g/g}$,分别占总类胡萝卜素含量的 32%、43%和 2%。与光照充足的沃柑果实相比,遮阴的沃柑果实中总类胡萝卜素、9-顺式紫黄质、紫黄质和 β -柠乌素的含量分别增加了 2.87、6.47、0.46 和 16.93 倍,并且红色色素 β -柠乌素的占比也由 2%

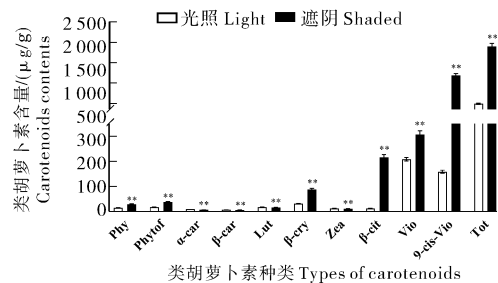
增加到 11%。此外,其他类胡萝卜素组分如八氢番茄红素、六氢番茄红素、 β -隐黄质等的含量也在遮阴的果实中显著升高。这些结果表明遮阴果实中总类胡萝卜素含量、橙色色素 9-顺式紫黄质含量以及红色色素 β -柠乌素含量及其占比均显著增加,导致其果实着色加深,最终呈现出深橙红色。

2.3 光照和遮阴条件下沃柑果皮类胡萝卜素代谢途径相关基因的表达差异

为了进一步探究遮阴诱导类胡萝卜素积累的内在机制,本研究测定并对比分析了类胡萝卜素代谢通路主要结构基因在光照充足与遮阴的沃柑果皮中的表达量变化。由图 3 可知,类胡萝卜素合成相关基因的表达水平在 2 个处理间存在显著差异,除 *LCYE* 和 *LCYB1* 的表达未受影响,其他主要结构基因在遮阴的沃柑果皮中的表达量均有不同程度的提高。其中,控制 β -柠乌素合成的关键基因 *CCD4b* 的表达差异最显著,其在遮阴果实中的表达量较光照充足的果实升高了 11.78 倍,该结果与 β -柠乌素在遮阴果实中积累量显著增加相吻合。由此可见,遮阴可通过诱导沃柑果皮类胡萝卜素代谢通路基因的表达从而促进类胡萝卜素的高积累。

2.4 光照与遮阴对沃柑果实内在品质的影响

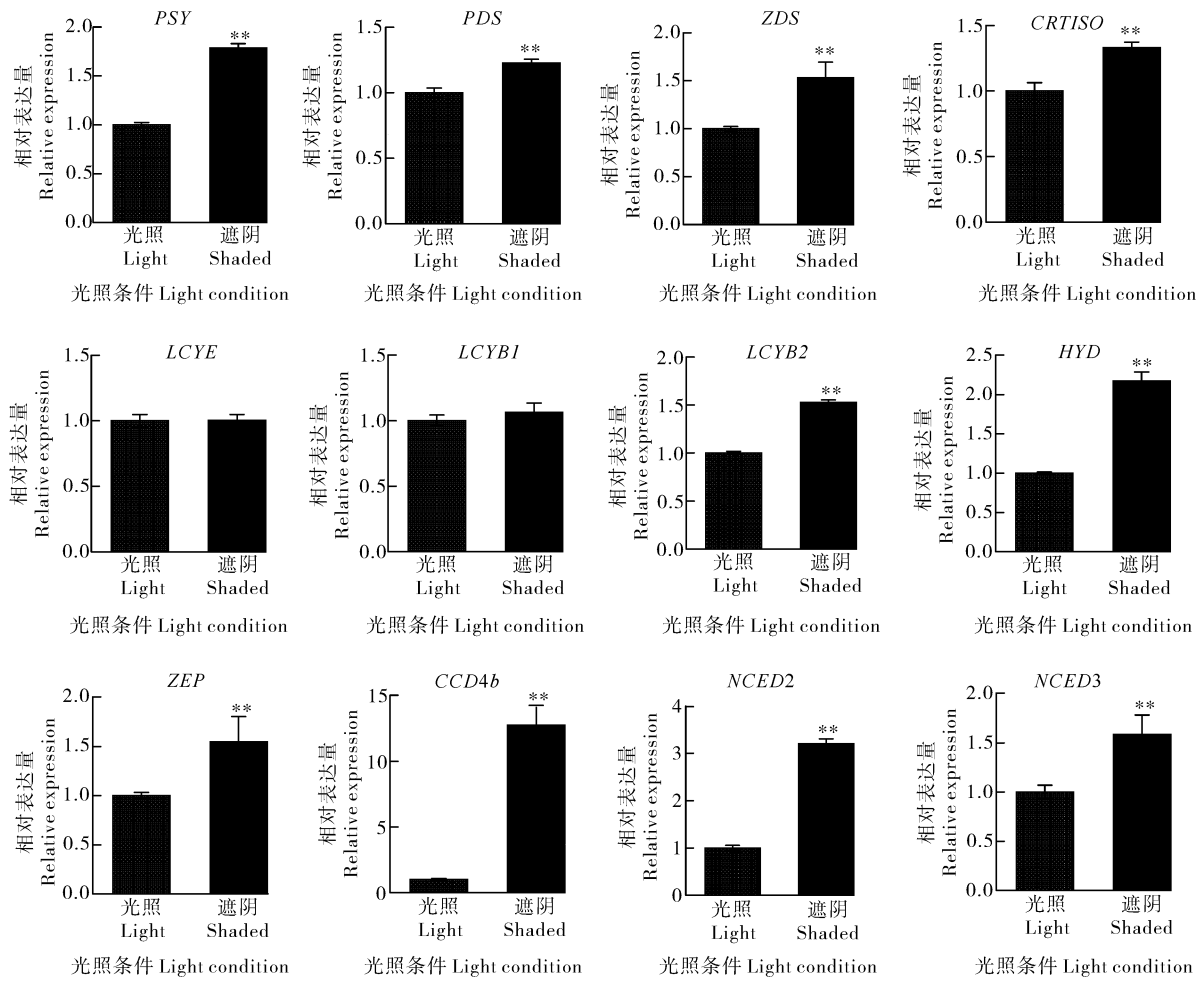
对成熟期树冠外围光照充足和树冠内部遮阴的沃柑果实进行常规品质的测定与分析,所得结果如表 2 所示。两者间单果质量以及果实大小没有显著差异,可溶性固形物、可滴定酸和抗坏血酸含量均差异显著,在光照充足的沃柑果实中的含量均显著高于遮阴的果实。进一步利用气相色谱测定了 2 个处理果实的可溶性糖和有机酸组分和含量变化。如图 4 所示,两者的可溶性糖含量和有机酸含量均存在显著差异。光照充足的沃柑果实中蔗糖、葡萄糖、果糖及总糖的含量均显著高于遮阴的果实;且柠檬酸、苹果酸及总酸的含量也显著高于遮阴果实。结果表明,光照条件一定程度上影响了沃柑果实的内在品质,与遮阴的沃柑果实相比,光照充足的果实糖酸积累量明显增加。



Phy: 八氢番茄红素 Phytoene; Phytof: 六氢番茄红素 Phytofluene; α -car: α -胡萝卜素 α -Carotene; β -car: β -胡萝卜素 β -Carotene; Lut: 叶黄质 Lutein; β -cry: β -隐黄质 β -Cryptoxanthin; Zea: 玉米黄质 Zeaxanthin; β -cit: β -柠乌素 β -Citaurin; Vio: 紫黄质 Violaxanthin; 9-cis-Vio: 9-顺式紫黄质 9-cis-Violaxanthin; Tot: 总量 Total。光照和遮阴的差异用“*”($P<0.05$)和“**”($P<0.01$)表示。以下同。The difference between light and shaded was makerd by “*” ($P<0.05$) and “**” ($P<0.01$). The same as below.

图2 光照和遮阴的沃柑果皮类胡萝卜素含量差异

Fig.2 Differences in carotenoid content of Orah mandarin peel under light and shaded



PSY:八氢番茄红素合成酶基因; PDS:八氢番茄红素脱氢酶基因; ZDS:ζ-胡萝卜素脱氢酶基因; CRTISO:胡萝卜素异构酶基因; LCYE:番茄红素ε-环化酶基因; LCYB1:番茄红素β-环化酶1基因; LCYB2:番茄红素β-环化酶2基因; HYD:β-胡萝卜素羟化酶基因; ZEP:玉米黄质环氧化酶基因; CCD4b:类胡萝卜素裂解双加氧酶基因; NCED2:9-顺式环氧类胡萝卜素双加氧酶2基因; NCED3:9-顺式环氧类胡萝卜素双加氧酶3基因。PSY:Phytoene synthase gene; PDS:Phytoene desaturase gene; ZDS:ζ-carotene desaturase gene; CRTISO:Carotene isomerase gene; LCYE:Lycopene ε-cyclase gene; LCYB1:Lycopene β-cyclase 1 gene; LCYB2:Lycopene β-cyclase 2 gene; HYD:β-Carotene hydroxylase gene; ZEP:Zeaxanthin epoxidase gene; CCD4b:Carotenoid cleavage dioxygenase 4b gene; NCED2:9-cis-Epoxycarotenoid dioxygenase 2 gene; NCED3:9-cis-Epoxycarotenoid dioxygenase 3 gene.

图 3 光照与遮阴的沃柑果皮中类胡萝卜素代谢途径相关基因的表达差异

Fig.3 Differences in expression of genes related to carotenoid metabolism of Orah mandarin peel under light and shaded

表 2 光照与遮阴下沃柑果实常规品质比较

Table 2 Comparison of conventional quality of Orah mandarin fruits under light and shaded

评价指标 Evaluation index	光照 Light	遮阴 Shaded
单果质量/g Fruit weight	131.06 ± 15.10	141.69 ± 13.04
横径/m Transverse diameter	67.30 ± 3.15	69.61 ± 1.78
纵径/mm Longitudinal diameter	51.45 ± 2.93	53.28 ± 2.70
可溶性固形物/% Soluble solids	14.43 ± 1.09	13.00 ± 0.70 **
可滴定酸/% Titratable acid	0.58 ± 0.07	0.37 ± 0.10 **
抗坏血酸/(mg/100 g) Ascorbic acid	17.27 ± 0.92	12.90 ± 1.92 **

注: * 代表同行内 2 个处理间存在显著差异($P < 0.05$), ** 代表同行内 2 个处理间存在极显著差异($P < 0.01$)。Note: * indicates that the difference between the two treatments in the same peer is significant ($P < 0.05$), ** indicates that the difference between the two treatments in the same peer is extremely significant ($P < 0.01$).

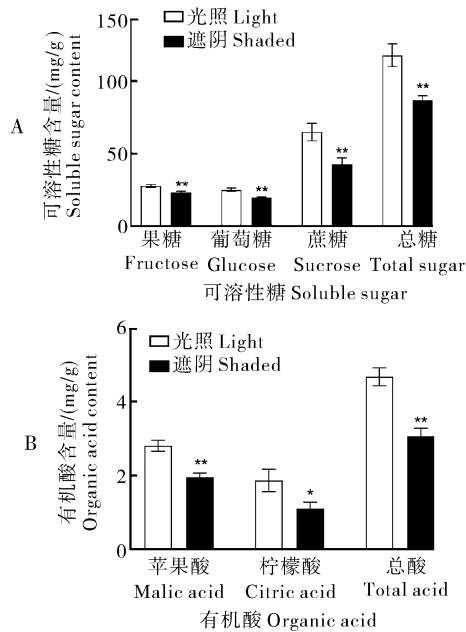


图4 光照与遮阴的沃柑果实可溶性糖(A)和有机酸(B)含量差异

Fig.4 Differences in the content of soluble sugar (A) and organic acid (B) in Orah mandarin fruits under light and shaded

3 讨论

光照是影响果实品质的重要环境因素之一,对果实的外观品质及风味具有重要的影响^[24]。在生产中,树体不同部位的果实由于受到不同程度的光照条件而表现出色泽差异,特别是树冠内膛遮阴的果实与树冠外围光照充足的果实往往表现出明显的不同。前人研究发现树冠外围的克里曼丁红橘(*C. clementina* cv. 'Clemenules')和奈维林娜脐橙(*C. sinensis* cv. 'Navelina')果实比树冠内膛遮阴的果实着色更深,而红葡萄柚果实则在遮阴条件下比光照条件下具有更高的番茄红素含量,色泽更红^[6,10]。本研究发现沃柑果实色泽对光照的响应与红葡萄柚相似,树冠内部被遮阴的果实较光照充足的果实表现出更深的橙红色,其主要呈色色素 β -柠乌素、紫黄质的含量显著增加。由此推测,光照对柑橘果实色泽的调控效应因基因型及其主要呈色类胡萝卜素种类而异。

光照通过调控类胡萝卜素代谢途径基因的表达水平来影响类胡萝卜素的积累。番茄果实中光照诱导了光合组织中类胡萝卜素合成基因的表达,促进了果实中类胡萝卜素的积累^[25-26]。而在胡萝卜根中的研究发现黑暗处理可诱导其类胡萝卜素的积累与基因的表达^[27-28]。在克里曼丁红橘和奈维林娜脐橙

成熟过程中,光照提高了果皮中类胡萝卜素代谢通路相关基因的表达量,类胡萝卜素总量增加,其中八氢番茄红素和紫黄质含量显著提高^[6]。红葡萄柚在弱光条件下积累更多的番茄红素而呈现更深的红色,但研究发现其类胡萝卜素合成相关基因的表达在不同光照条件下无显著差异,进一步推测该现象可能与质体分化有关,认为暗处理通过促进红葡萄柚果皮中的叶绿体分化为有色体从而增强了类胡萝卜素的积累^[10]。本研究对2种光照条件下沃柑果皮中的类胡萝卜素代谢通路相关基因进行定量分析,发现与光照充足的沃柑果实相比,遮阴的沃柑果皮中类胡萝卜素代谢通路相关基因表达量均有不同程度的增加,其中合成 β -柠乌素的关键基因 *CCD4b* 的表达量增加了11.78倍,与 β -柠乌素的高积累结果相一致。值得一提的是,在克里曼丁红橘和奈维林娜脐橙的研究中并未观察到遮阴对果皮中 β -柠乌素积累和 *CCD4b* 表达的影响。可见,光照对柑橘果皮类胡萝卜素代谢的调控机制较为复杂,后续有待针对不同的基因型进行深入解析。

光照通过调控糖酸代谢水平影响果实内在品质。前人研究表明,光照对柑橘的可溶性固形物和总糖含量影响较大,果实的遮阴处理影响了果实中糖代谢相关酶的活性,进而影响了果实中糖的运输、代谢与积累^[29]。本研究也发现光照充足的沃柑果实中可溶性固形物、蔗糖、果糖、葡萄糖含量均显著高于遮阴的沃柑果实。这可能是由于树冠外围光照充足,有利于叶片进行光合作用,促进了碳水化合物的积累和果实中含糖量的增加。光照对柑橘果实有机酸的影响因基因型而异,罗丽娟等^[30]研究发现温州蜜柑果实的柠檬酸含量受到温度、光照、干旱胁迫等多种环境因素的影响,遮光处理显著提高了果实柠檬酸的含量;与之相反,本研究发现树冠外围光照充足的沃柑果实可滴定酸、柠檬酸、苹果酸及总酸的含量均显著高于内膛遮阴的果实。光照对柑橘果实抗坏血酸的影响与组织部位(果皮/果肉)和基因型有关,Lado等^[2]发现光照充足条件下4个柑橘品种果实果皮的抗坏血酸含量均较遮阴的果实显著高积累,但果肉抗坏血酸含量无显著差异;本研究结果表明,与遮阴果实相比,光照条件下沃柑果肉中的抗坏血酸含量显著增加。抗坏血酸的合成前体是光合作用产生的碳水化合物,遮阴导致光合作用降低,影响了果实中葡萄糖的积累,这可能是导致光照和遮阴条件下果实抗坏血酸含量差异的原因。

参考文献 References

- [1] 郭文武,叶俊丽,邓秀新.新中国果树科学研究70年——柑橘[J].果树学报,2019,36(10):1264-1272. GUO W W, YE J L, DENG X X. Fruit scientific research in new China in the past 70 years: citrus[J]. Journal of fruit science, 2019, 36(10): 1264-1272 (in Chinese with English abstract).
- [2] LADO J, GAMBETTA G, ZACARIAS L. Key determinants of citrus fruit quality: metabolites and main changes during maturation[J]. Scientia horticulturae, 2018, 233: 238-248.
- [3] RODRIGO M, ALQUEZAR B, ALOS E, et al. Biochemical bases and molecular regulation of pigmentation in the peel of citrus fruit[J]. Scientia horticulturae, 2013, 163: 46-62.
- [4] HIRATSUKA S, YOKOYAMA Y, NISHIMURA H, et al. Fruit photosynthesis and phosphoenolpyruvate carboxylase activity as affected by lightproof fruit bagging in satsuma mandarin[J/OL]. J Amer Soc Hort Sci, 2012, 137(4): 215 [2021-09-05]. <https://doi.org/10.21273/JASHS.137.4.215>.
- [5] MAGWAZA L S, OPARA U L, CRONJE P J R, et al. Canopy position affects rind biochemical profile of 'Nules Clementine' mandarin fruit during postharvest storage[J]. Postharvest biology and technology, 2013, 86: 300-308.
- [6] JOANNA L, ENRIQUETA A, MATIAS M, et al. Light regulation of carotenoid biosynthesis in the peel of mandarin and sweet orange fruits[J/OL]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 1288 [2021-09-05]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31681382/>. DOI: 10.3389/fpls.2019.01288.
- [7] 王武.套袋对柑橘果实外观色泽和内在品质的影响[D].重庆:西南大学,2006. WANG W. Effect of bagging fruit on the color and quality of citrus fruit[D]. Chongqing: Southwest University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [8] 姜启航.套袋对柚果实类胡萝卜素代谢和品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2019. JIANG Q H. Studies on the effects of bagging on carotenoid biogenesis and quality of pummelo fruits [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [9] 吴世涛.套袋对柚果实色泽变化及品质的影响[D].福州:福建农林大学,2019. WU S T. Effects of bagging on color change and quality of pummelo fruit [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [10] LADO J, CRONJE P, ALQUEZAR B, et al. Fruit shading enhances peel color, carotenoids accumulation and chloroplast differentiation in red grapefruit[J]. Physiologia plantarum, 2015, 154(4): 469-484.
- [11] GAO H, XU J, LIU X, 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): 2485-2492.
- [12] 郎彬彬,陈楚佳,朱博,等.南丰蜜桔优株'ZZL-03'不同部位果实主要品质分析[J].北方园艺,2015(8):29-31. LANG B B, CHEN C J, ZHU B, et al. The analysis of main fruit quality in different positions of superior plant 'ZZL-03' Nanfeng tangerine[J]. Northern horticulture, 2015(8): 29-31 (in Chinese with English abstract).
- [13] 孔佳君.光质对梨果实品质的影响研究[D].南京:南京农业大学,2018. KONG J J. Study on the effect of light quality on the quality of pear fruit [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [14] 丁云龙,张斌斌,严娟,等.桃树体不同部位果实着色差异及其与环境因子的关系研究[J].西北植物学报,2019,39(4):660-668. DING Y L, ZHANG B B, YAN J, et al. Study on difference of peach fruit coloring and relationship with environmental factors in different tree canopy position[J]. Acta botanica boreali-occidentalia sinica, 2019, 39(4): 660-668 (in Chinese with English abstract).
- [15] 贾云云,王越辉,白瑞霞,等.光照对桃果实内在品质的影响研究进展[J].江西农业学报,2020,32(12):30-36. JIA Y Y, WANG Y H, BAI R X, et al. Research progress in effects of sun light on internal quality of peach fruit[J]. Acta agriculturae Jiangxi, 2020, 32(12): 30-36 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王南南,孙昊琪,柳伟杰,等.苹果不同着果部位对果实品质的影响[J].北方园艺,2020(2):51-56. WANG N N, SUN H Q, LIU W J, et al. Effects of different apple fruiting location on fruit quality [J]. Northern horticulture, 2020(2): 51-56 (in Chinese with English abstract).
- [17] MASSOT C, BANCEL D, LOPEZ-LAURI F, et al. High temperature inhibits ascorbate recycling and light stimulation of the ascorbate pool in tomato despite increased expression of biosynthesis genes [J/OL]. PLoS One, 2013, 8(12): e84474 [2021-09-05]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084474>.
- [18] LADO J, ALÓS E, RODRIGO M J, et al. Light avoidance reduces ascorbic acid accumulation in the peel of citrus fruit[J]. Plant science, 2015, 231: 138-147.
- [19] LI M, MA F, SHANG P, et al. Influence of light on ascorbate formation and metabolism in apple fruits[J]. Planta, 2009, 230(1): 39-51.
- [20] 黄其椿,李果果,陈东奎,等.广西沃柑产业发展现状与对策建议[J].中国南方果树,2020,49(5):135-141,149. HUANG Q C, LI G G, CHEN D K, et al. Development status and counter measures of Guangxi Orah industry [J]. South China fruits, 2020, 49(5): 135-141, 149 (in Chinese with English abstract).
- [21] CAO H B, ZHANG J C, XU J D, et al. Comprehending crystalline β -carotene accumulation by comparing engineered cell models and the natural carotenoid-rich system of citrus [J]. Journal of experimental botany, 2012, 63(12): 4403-4417.
- [22] ZHENG X J, ZHU K J, SUN Q, et al. Natural variation in CCD4 promoter underpins species-specific evolution of red coloration in citrus peel[J]. Molecular plant, 2019, 12(9): 1294-1307.
- [23] 许让伟,程运江.柑橘果实糖酸含量测定[DB/OL]. Bio-101, 2018; e1010211 (2021-05-25) [2021-09-05]. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.1010211>. XU R W, CHENG Y J. Determi-

- nation of sugar and organic acid contents in citrus fruits[DB/OL]. Bio-101, 2018; e1010211(2021-05-25)[2021-09-05]. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.1010211>.
- [24] LLORENTE B, D'ANDREA L, RODRIGUEZ-CONCEPCIÓN M. Evolutionary recycling of light signaling components in fleshy fruits; new insights on the role of pigments to monitor ripening[J/OL]. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 263[2021-09-05]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27014289/>. DOI: 10.3389/fpls.2016.00263.
- [25] RAVIV A, YAAKOV T, AYALA M, et al. Light signaling genes and their manipulation towards modulation of phytonutrient content in tomato fruits[J]. *Biotechnology advances*, 2010, 28(1): 108-118.
- [26] SCHOFIELD A, PALIYATH G. Modulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit ripening through phytochrome regulation of phytoene synthase activity[J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2005, 43(12): 1052-1060.
- [27] FUENTES P, PIZARRO L, MORENO J C, et al. Light-dependent changes in plastid differentiation influence carotenoid gene expression and accumulation in carrot roots[J]. *Plant molecular biology*, 2012, 79(1): 47-59.
- [28] RODRIGUEZ-CONCEPCION M, STANGE C. Biosynthesis of carotenoids in carrot; an underground story comes to light[J]. *Archives of biochemistry and biophysics*, 2013, 539(2): 110-116.
- [29] 鲍江峰, 夏仁学, 彭抒昂. 生态因子对柑桔果实品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2004(8): 1477-1480. BAO J F, XIA R X, PENG S A. Effect of ecological factors on citrus fruit quality[J]. *Chinese journal of applied ecology*, 2004(8): 1477-1480 (in Chinese with English abstract).
- [30] 罗丽娟, 郭玲霞, 刘永忠. 温度和 pH 值对柑橘汁胞柠檬酸含量及相关基因表达的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2020, 39(1): 18-23. LUO L J, GUO L X, LIU Y Z. Effects of environmental factors on citric acid accumulation and its related genes in citrus[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2020, 39(1): 18-23 (in Chinese with English abstract).

Effects of light conditions on fruit quality in different fruiting positions of Orah mandarin canopy

JIA Jujin¹, CHEN Xiangling², SUN Quan¹, BAO Xinru¹, ZHANG Hongyan¹,
XU Juan¹, CHAI Lijun¹, DENG Xiuxin¹, YE Junli¹

1. *Key Laboratory of Horticultural Plant Biology, Ministry of Education / College of Horticulture and Forestry Sciences, Huazhong Agriculture University, Wuhan 430070, China;*
2. *Institute of Horticulture, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China*

Abstract The shaded fruits in the inner canopy of Orah mandarin and the fruits with sufficient light at the periphery of the canopy were used to compare and analyze the comprehensive effects of light conditions on the appearance, color and internal quality of Orah mandarin. The results showed that the shaded fruits presented a deeper orange-red color compared with the fruits with sufficient light. The content of total carotenoid in the peel of the shaded fruits increased by 2.87 times, and the main color pigments β -citraurin (red) and 9-*cis* violaxanthin (orange yellow) were increased by 16.93 times and 6.47 times, respectively. The results of gene expression analysis showed that the main structural genes of carotenoid metabolic pathway were significantly up-regulated in shaded fruits. The expression of carotenoid cleavage dioxygenase (*CCD4b*), a key gene for β -citraurin biosynthesis, increased by 11.78 times. It is indicated that shading can promote carotenoid accumulation in the peel of Orah mandarin by inducing the expression of genes related to carotenoid biosynthesis, and ultimately make the peel dark orange-red. The content of soluble solids, titratable acid, soluble sugar, organic acid and ascorbic acid in shaded fruit was much lower than that in the fruit with sufficient light, indicating that light conditions affected the internal quality of the fruit. It will provide a theoretical basis for further elucidating the underlying mechanisms of how light regulate fruit quality, and ultimately improving the fruit quality of citrus by breeding and cultivation.

Keywords light; shaded; Orah mandarin; fruit quality; carotenoids

(责任编辑: 张志钰)