

琯溪蜜柚果肉中类胡萝卜素组分的特征解析*

赖长鸿, 王寒雪, 李培杰, 廖红

福建农林大学根系生物学研究中心, 福建 福州 350002

摘要: 琯溪蜜柚(*Citrus grandis* cv 'Guanximiyou')因其汁多味甜、色泽丰富等特点, 广受消费者欢迎。琯溪蜜柚果肉色素主要为类胡萝卜素, 其组分和含量直接影响果实品质。研究蜜柚果肉类胡萝卜素组分特征及其在不同养分管理下的差异, 可为通过养分管理提高果实品质提供科学依据。本研究首先利用液相色谱串联质谱(LC-MS/MS), 分析果实汁胞中类胡萝卜素的组分; 通过施化肥(CF)和有机肥(OF)处理, 比较分析不同养分管理对类胡萝卜素的影响。结果表明, 蜜柚汁胞共含23种类胡萝卜素, 其中5种属于胡萝卜素、18种属于胡萝卜醇。汁胞中类胡萝卜素以胡萝卜素为主, 质量分数为(346.27±69.39) μg/g, 占比为98.98%。胡萝卜素中, 以番茄红素为主, 质量分数为(332.27±75.05) μg/g, 占类胡萝卜素比例为95.97%。此外, 养分管理显著影响汁胞类胡萝卜素的质量分数。与CF相比, OF处理番茄红素和E/Z-八氢番茄红素的质量分数分别增加了8.40%和16.48%, 说明通过养分管理能够调控蜜柚果肉色素, 为进一步调控果实品质提供参考依据。

关键词: 蜜柚(*Citrus grandis*); 品质; 类胡萝卜素; 番茄红素

中图分类号: S66 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)04-0071-07

Characteristics of carotenoid components in juice sacs of pomelo (*Citrus grandis* cv 'Guanximiyou')

LAI Changhong, WANG Hanxue, LI Peijie, LIAO Hong

Root Biology Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract: Guanxi pomelo (*Citrus Grandis* cv 'Guanximiyou') is popular for its sweet and colorful juice sacs. The pigments in juice sacs are mainly carotenoids, whose composition and concentration directly affect the quality of fruits. Characterization of the carotenoid components in juice sacs and their differences under different nutrient management might provide scientific basis for improving fruit quality through nutrient management. In the study, liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) was used to analyze the carotenoid components in juice sacs; and the effects of different nutrient management on carotenoids were compared between the usage of chemical (CF) and organic (OF) fertilizations. The results showed that the juice sacs contained 23 carotenoids, among them, 5 and 18 belonged to carotene and lutein, respectively. The carotenoid in juice sacs was mainly carotene with the concentration as (346.27±69.39) μg/g. Lycopene is the major component of carotenes, which concentration was (332.27±75.05) μg/g and proportion was 95.67%. In addition, fertilization management significantly affected the concentration of carotenoids. Compared with CF, the concentration of

* 收稿日期: 2024-03-27

录用日期: 2024-05-15

网络首发日期: 2024-06-18

基金项目: 福建省自然科学基金(2021N0008)

作者简介: 赖长鸿(1990年生), 男; 研究方向: 植物营养;

E-mail: lch@fafu.edu.cn; 1023906391@qq.com

通信作者: 廖红(1969年生), 女; 研究方向: 植物营养;

E-mail: hliao@fafu.edu.cn

增强出版



ZR20240088

全文阅读



ZR20240088

lycopene and (*E/Z*)-phytoene in OF increased 8.40% and 16.48%, respectively, indicating that nutrient management could affect the pigment in juice sacs of Guanxi pomelo, and thereby might provide references for further regulating fruit quality through nutrient management.

Key words: pomelo(*Citrus grandis*); quality; carotenoids; lycopene

柑橘类水果普遍色泽鲜艳、富含色素,其色泽与色素种类及含量有关,尤其是与类胡萝卜素有关(Xu et al., 2006; Zhang et al., 2017; Huang et al., 2019)。类胡萝卜素是由异戊二烯构成的C40或C30萜类化合物(Honda et al., 2019),通常在异养真菌、细菌质体或植物和藻类等光合生物体中合成(Cazzonelli et al., 2010; Sun et al., 2022; Stra et al., 2023)。类胡萝卜素在植物中发挥多重功能,包括在光捕获和保护光合器官免受活性氧(ROS)的影响中发挥重要作用(Strat et al., 2023)。类胡萝卜素在400~500 nm的可见光范围内,主要呈现红、橙和黄色,并对光具有较强的吸收特性(Jeyakodi et al., 2018)。因此,类胡萝卜素也是自然界生物斑斓色彩的主要来源。此外,水果中的类胡萝卜素还是合成维生素A和植物激素ABA等的前体(Nisar et al., 2015; Sun et al., 2024),对果实品质提升具有重要作用。

柑橘类水果中类胡萝卜素的组分和含量不同导致色泽和风味各异。有研究利用HPLC技术,测定了我国宽皮橘类、橙类、柚类及杂柑类等53个品种中6种类胡萝卜素组分含量,发现柑橘属水果果肉均富含 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、玉米黄素、叶黄素和 β -隐黄质(陶俊, 2002)。也有研究通过检测12个柚类种质的果实,发现柚类汁胞共有27种类胡萝卜素组分,并定性了其中22种(石梅艳, 2020)。并且果实中类胡萝卜素含量差异与其成熟度有关,一般中幼果表皮呈深绿色,柑橘果皮 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素占主要成分;果实成熟期,柑橘果皮中 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素呈下降趋势,以叶黄素为主(陶俊, 2002);而红肉脐橙果肉以番茄红素为主(徐娟等, 2002)。此外养分管理对类胡萝卜素含量也有影响。例如,相较于农户习惯(N 150 kg/hm²、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²),施用高产高效施肥处理[N 120 kg/hm²(以12 kg/hm²菜籽饼肥代替作基肥)、P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²],可提高益阳、湘阴试验点的早稻叶片灌浆期类胡萝卜素含量13.16%、30.12%(周旋等, 2013)。然而施用钾肥却降低了番茄果实中番茄红素的累积(朱兰英等, 2016);也有报道表明,施用

钾肥后,番茄中番茄红素含量呈先下降后上升的变化(牛晓丽等, 2011)。

蜜柚(*Citrus grandis*)是一种广受欢迎的柑橘类水果。其中,琯溪蜜柚是主产于福建省平和县的地方特色品种,其果实汁多味甜、清香可口,深受消费者喜爱。传统琯溪蜜柚果肉呈白色,后经芽变选种后衍生出多个芽变品种,包括:红肉(红柚、三红柚)、黄肉和红棉蜜柚等(Xu et al., 2006; 徐娟, 2002; 彭刚, 2013)。其中,三红柚是琯溪蜜柚中的上品,具有色泽丰富、皮薄汁多等特点。据报道,三红柚果实色泽主要来自果肉中大量积累的类胡萝卜素(徐娟等, 2002),但其类胡萝卜素组分及其含量却未见报道。本研究以三红柚为研究对象,利用液相色谱串联质谱(LC-MS/MS)方法对68种类胡萝卜素进行定量分析,研究三红柚果实类胡萝卜素的组分及含量;在此基础上,通过施化肥(CF)和有机肥(OF)处理,比较分析不同养分管理对类胡萝卜素的影响,为进一步通过养分管理调控果实品质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为树龄13 a左右的三红柚(*Citrus grandis*)果实,采自福建省平和县坂仔镇五星村柚园(117.244 737 E, 24.301 727 N)。本试验设置2种处理:① CF(化肥处理。即高氮复合肥N-P₂O₅-K₂O=20-5-20,一年按3次施肥,分别为0.4 kg萌芽肥+0.4 kg稳果肥+0.4 kg越冬肥);② OF(有机肥处理。5 kg/(棵·a)的改土有机肥[有机质>30%, N+P₂O₅+K₂O>10%, CaO+MgO>8%, pH=7.0~8.5;分2次,施入3 kg促梢肥(N-P₂O₅-K₂O=5-2-3)+2 kg壮果肥(N-P₂O₅-K₂O=2-4-4)]。2022年9月22日进行采摘,之后按企业标准储存;1个月后(2022年10月22日)取样于蜜柚竖直汁胞(增强出版:附图1),并测定类胡萝卜素组分。

1.2 类胡萝卜素测定

类胡萝卜素的测定参考Bartley et al.(1995)和Inbaraj et al.(2008)的方法,取50 mg用球磨仪研磨(30 Hz, 1 min)的粉末状样本,用0.5 mL 1.0 g/mL

BHT的正己烷/丙酮/乙醇混合溶液(1:1:1, 体积比)进行提取; 室温下涡旋20 min后, 4 °C条件下, 12 000 r/min离心5 min, 取上清液, 重复提取1次后离心合并上清液; 将得到的提取液浓缩后, 用100 μ L二氯甲烷复溶, 过0.22 μ m滤膜后, 保存于棕色进样瓶中, 待用; 并于LC-MS/MS分析, 其中数据采集仪器系统主要包括超高效液相色谱(UPLC, ultra performance liquid chromatography)(ExionLC™ AD, <https://sciex.com.cn/>)和串联质谱(MS/MS, tandem mass spectrometry)(QTRAP® 6500+, <https://sciex.com.cn/>); 色谱柱: YMC C30(2.0 mm \times 100 mm, 3 μ m)。配制0.001、0.005、0.01、0.05、0.1、0.5、1、5、10、50、100、250和400 μ g/g的类胡萝卜素组分标准品溶液, 获取各个标准品的对应定量信号的色谱峰强度数据; 以标准品质量分数为横坐标, 标准品峰面积为纵坐标, 绘制组份物质的标准曲线。

1.3 数据处理

所有数据采用IBM SPSS STATISTICS 20.0进行*t*检验(Student's *t* test)、单因素方差分析(ANOVA One-way)。采用GraphPad Prism 8、HILOT PRO作图。

2 结果与分析

2.1 果实汁胞中类胡萝卜素组分鉴定

在定量分析的68种类胡萝卜素组分中, 本研

究从蜜柚果实汁胞中共鉴定出23种类胡萝卜素组分。其中, 5种属于胡萝卜素, 分别为番茄红素、 β -胡萝卜素、八氢番茄红素、 γ -胡萝卜素和 α -胡萝卜素; 18种属于胡萝卜素醇, 分别为玉米黄质、 β -隐黄质、叶黄素、 α -隐黄质、叶黄素二月桂酸酯、紫黄质-肉豆蔻酸酯-发酸酯、紫黄质-肉豆蔻酸酯-月桂酸酯、叶黄素二肉豆蔻酸酯、紫黄质、花药黄质二棕榈酸酯、8'- β -阿朴胡萝卜素醛、玉米黄质二肉豆蔻酸酯、玉米黄质二棕榈酸酯、海胆烯酮、玉米黄质二月桂酸酯、紫黄质二丁酸酯、新黄质和 β -隐黄质月桂酸(图1a)。

按照各组分质量分数高低, 将类胡萝卜素分为3组, 包括H组(>5.0 μ g/g)、L组(\leq 0.1 μ g/g)和M组(质量分数介于H和L组之间)。如图1b所示, H组(红色)为番茄红素和 β -胡萝卜素2种胡萝卜素; M组(蓝色)按质量分数排序依次为八氢番茄红素、玉米黄质、 β -隐黄质、 γ -胡萝卜素、叶黄素、 α -隐黄质、 α -胡萝卜素和叶黄素二月桂酸酯; 质量分数最低的L组(绿色)依次为紫黄质-肉豆蔻酸酯-发酸酯、紫黄质-肉豆蔻酸酯-月桂酸酯、叶黄素二肉豆蔻酸酯、紫黄质、花药黄质二棕榈酸酯、8'- β -阿朴胡萝卜素醛、玉米黄质二肉豆蔻酸酯、玉米黄质二棕榈酸酯、海胆烯酮、玉米黄质二月桂酸酯、紫黄质二丁酸酯、新黄质和 β -隐黄质月桂酸。

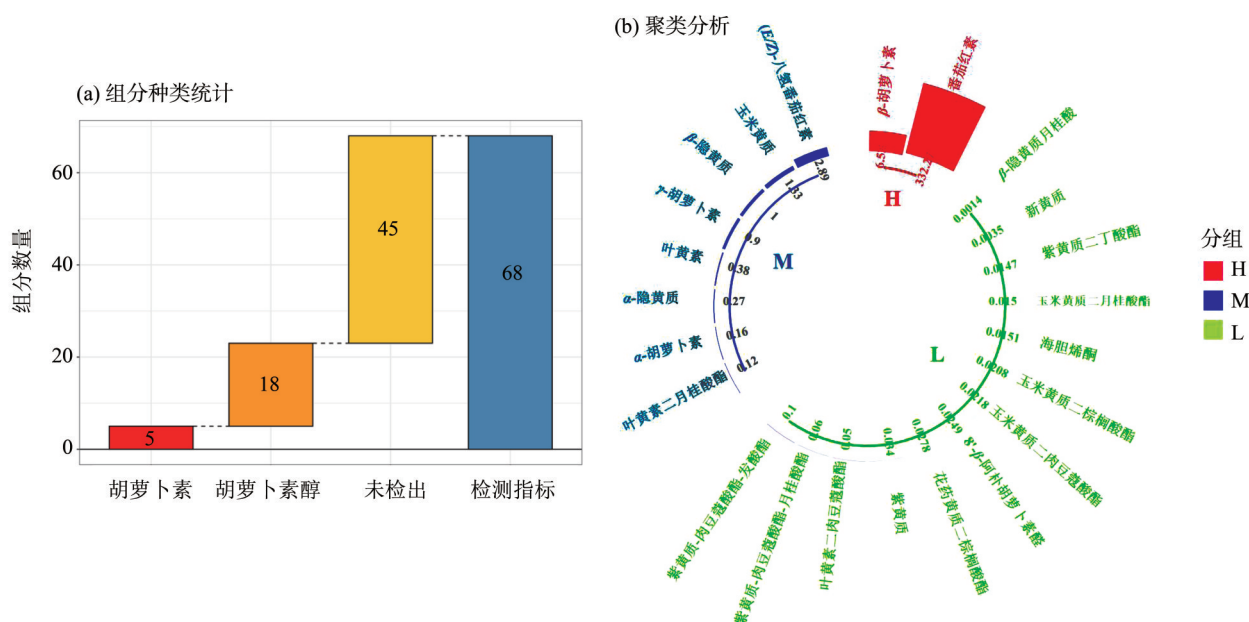


图1 类胡萝卜素组分鉴定及分析

Fig. 1 Identification and analysis of carotenoid components

2.2 汁胞中类胡萝卜素各组分的质量分数和占比分析

汁胞类胡萝卜素由不同组分构成,但其质量分数和占比各异。定量结果表明,汁胞类胡萝卜素质量分数为 (346.27 ± 69.39) $\mu\text{g/g}$ 。其中,胡萝卜素质量分数为 (342.74 ± 147.45) $\mu\text{g/g}$,占比为98.98%;胡萝卜素醇质量分数为 (3.53 ± 1.02) $\mu\text{g/g}$,占比为1.02%(图2a~b)。胡萝卜素色素组分间质量分数存在显著性差异,其中番茄红素、 β -胡萝卜素、八氢番茄红素、 γ -胡萝卜素和 α -胡萝卜素的质量分数分别为 (332.27 ± 75.05) 、 (6.52 ± 1.83) 、 (2.89 ± 0.75) 、 (0.90 ± 0.21) 和 (0.16 ± 0.03) $\mu\text{g/g}$,其占类胡萝卜素比例分别为95.97%、1.88%、0.83%、0.26%和0.05%(图2a~b)。

胡萝卜素色素组分间质量分数也存在显著性差异,按质量分数排序前5的组分分别为玉米黄质、 β -隐黄质、叶黄素、 α -隐黄质和叶黄素二月桂酸酯,其质量分数分别为 (1.33 ± 0.19) 、 (1.00 ± 0.19) 、 (0.38 ± 0.10) 、 (0.27 ± 0.04) 和 (0.12 ± 0.03) $\mu\text{g/g}$,占类胡萝卜素的比例分别为38.44%、28.92%、10.94%、7.87%和3.33%(图2c);而后紫黄质-肉豆蔻酸酯-发酸酯、紫黄质-肉豆蔻酸酯-月桂酸酯、叶黄素二肉豆蔻酸酯、紫黄质、花药黄质二棕榈酸酯、8'- β -阿朴胡萝卜素醛、玉米黄质二肉豆蔻酸酯、玉米黄质二棕榈酸酯、海胆烯酮、玉米黄质二月桂酸酯、紫黄质二丁酸酯、新黄质和 β -隐黄质月桂酸的质量分数分别为 (0.10 ± 0.02) 、 (0.06 ± 0.02) 、 (0.05 ± 0.02) 、 (0.034 ± 0.010) 、 (0.028 ± 0.011) 、 (0.025 ± 0.004) 、 (0.022 ± 0.005) 、 (0.021 ± 0.049) 、 (0.015 ± 0.004) 、 (0.015 ± 0.005) 、 (0.015 ± 0.004) 、 (0.004 ± 0.004) 和 (0.001 ± 0.003) $\mu\text{g/g}$,占类胡萝卜素质量分数比例分别为2.82%、1.66%、1.40%、0.98%、0.80%、0.72%、0.63%、0.60%、0.44%、0.43%、0.42%、0.10%和0.04%(图2c)。

2.3 养分管理对汁胞中类胡萝卜素组分质量分数的影响

不同养分管理下,汁胞中类胡萝卜素组分表现出一定的差异。其中,玉米黄质二棕榈酸酯和新黄质是CF管理下特有的类胡萝卜素,质量分数分别为 (0.042 ± 0.068) 和 (0.007 ± 0.001) $\mu\text{g/g}$; β -隐黄质月桂酸是OF管理下特有的类胡萝卜素,质量分数为 (0.003 ± 0.005) $\mu\text{g/g}$ (图3a)。采用非度量多维排列(NMDS)分析养分管理与类胡萝卜素组分质量分数的拟合度,Stress值为0.038(< 0.05),拟合度较好,具有代表性;说明养分管理显著影响汁胞中类胡萝卜素组分的质量分数和颜色表征(图3b,

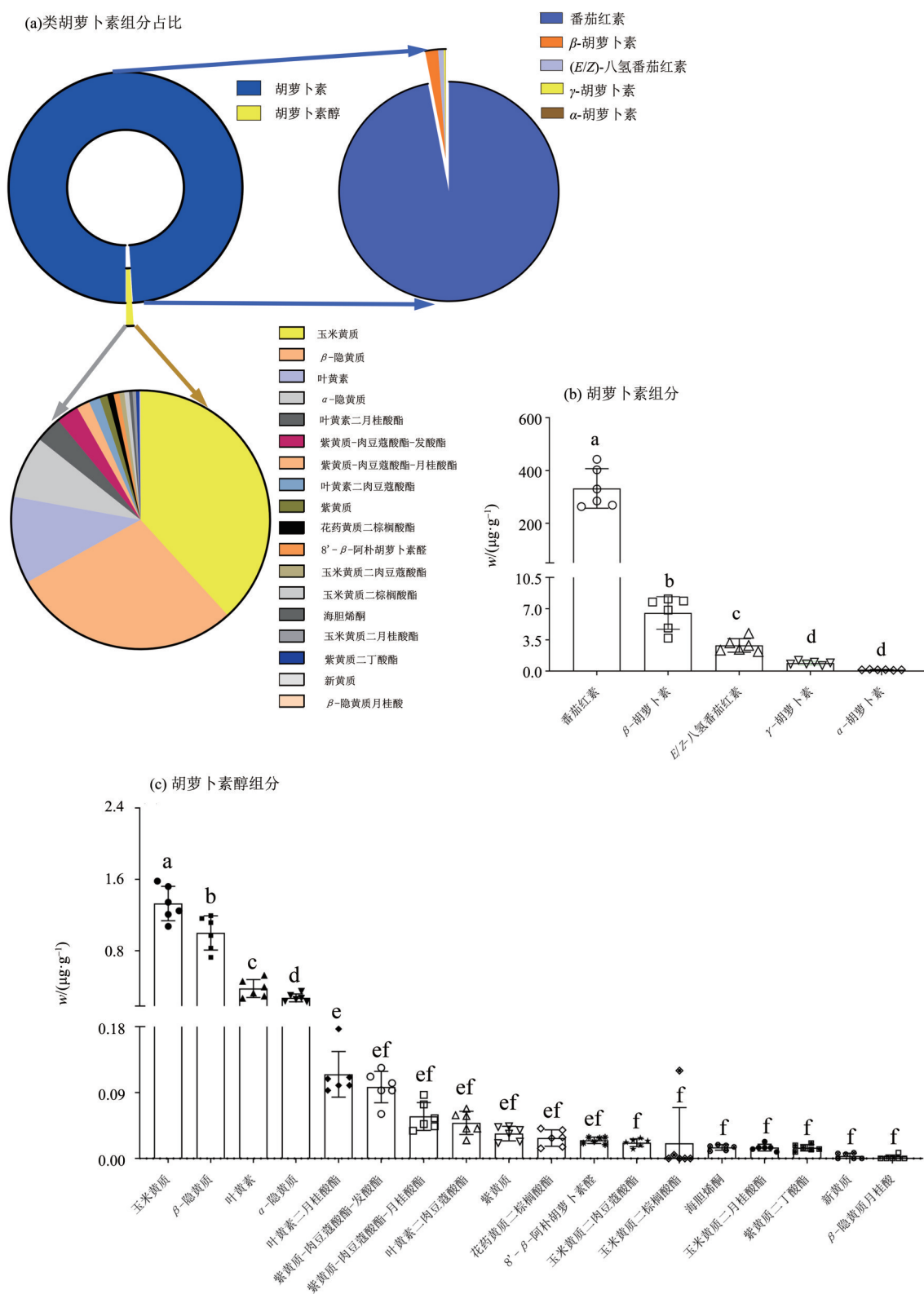
增强出版:附图1)。

相较于CF,OF管理下汁胞中 α -隐黄质、紫黄质二丁酸酯、番茄红素、玉米黄质、八氢番茄红素、玉米黄质二月桂酸酯和紫黄质-肉豆蔻酸酯-月桂酸酯的质量分数分别增加了3.25%、4.32%、8.40%、9.89%、16.48%、27.28%和68.44%。反之,相较于OF,CF管理下汁胞中 γ -胡萝卜素、 α -胡萝卜素、花药黄质二棕榈酸酯、紫黄质-肉豆蔻酸酯-发酸酯、叶黄素二月桂酸酯、8'- β -阿朴胡萝卜素醛、 β -隐黄质、叶黄素、玉米黄质二肉豆蔻酸酯、海胆烯酮、紫黄质、 β -胡萝卜素和叶黄素二肉豆蔻酸酯的质量分数分别增加了3.53%、5.65%、5.67%、9.26%、13.45%、14.53%、17.23%、18.28%、18.37%、22.11%、25.31%、27.70%和42.08%(图3c,增强出版:附表1),进一步说明了养分管理可调控类胡萝卜素的组分及其质量分数。

3 讨论

3.1 蜜柚果实色素种类、组分与品质密切相关

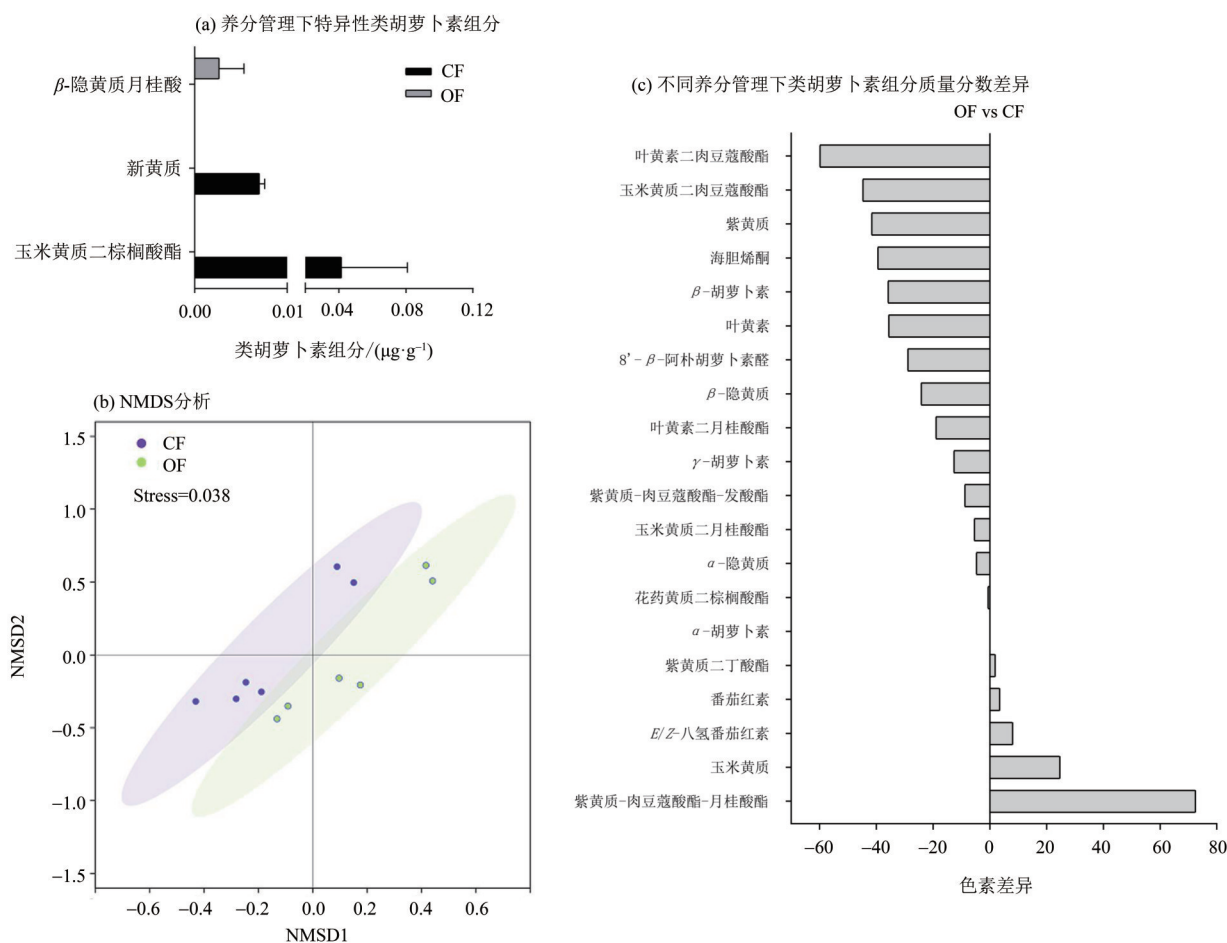
琯溪蜜柚,平和县国家地理标志农产品,广受消费者欢迎。琯溪蜜柚除了皮薄、汁多、清甜等特点外,其色泽鲜丽也是市场青睐的重要品质因素(Sun et al., 2024)。果实色泽主要由色素组分及含量决定,其中类胡萝卜素是柑橘类水果的主要色素。据陶俊(2002)研究分析我国宽皮橘类、橙类、柚类及杂柑类等53个品种均含有 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、玉米黄素、叶黄素和 β -隐黄质,说明色素种类决定了水果的颜色。石梅艳(2020)以12个柚类种质进行研究,在汁胞中标定了27种类胡萝卜素,定性了其中22种类胡萝卜素;结果发现,色素组分和含量可能是决定颜色鲜丽程度的重要因素。本研究为进一步探索蜜柚果实色素种类、组分与品质的关系,采用LC-MS/MS定量分析了68种类胡萝卜素。明确了三红柚汁胞中含有23种类胡萝卜素,包括5种胡萝卜素、18种胡萝卜素醇。胡萝卜素为三红柚果实的主要色素,胡萝卜素中超过95%的色素为番茄红素(图2)。这与报道中,柚类果肉呈红色的主要组分为番茄红素的结果一致(Liu et al., 2009; Alquezar et al., 2013; Zhao et al., 2021)。在类胡萝卜素代谢途径, β -隐黄质月桂酸是一种结合了 β -隐黄质和月桂酸特性的化合物,同时 β -隐黄质是属于维生素A的前体物质(Wei et al., 2014),但不同养分管理下汁胞中出现特异性类胡萝卜素组分,CF管理下特有新黄



b, c: 不同字母表示类胡萝卜素组分间质量分数具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 2 类胡萝卜素组分质量分数和占比分析

Fig. 2 Analysis of the concentration and proportion of carotenoid components



色素差异计算, $y = [(w_{OF} - w_{CF}) / w_{CF}] \times 100\%$ 。

图3 汁胞中类胡萝卜素的NMDS分析及其组分分析

Fig. 3 NMDS analysis and component concentration analysis of carotenoids in juice sac

质和玉米黄质二棕榈酸酯, OF管理下特有β-隐黄质月桂酸(图3a), 有助于提高汁胞维生素A的质量分数, 进而提升果实健康品质, 这对后期色素应用提供了参考依据。

3.2 养分对类胡萝卜素的调控

类胡萝卜素广泛存于果实中, 但其合成、组分和含量受到品种(基因)、气候和养分管理等因素的影响。据报道, 不同柚类汁胞中ZISO和LUT5基因的表达可调控类胡萝卜素的合成及组分(邱光明等, 2023)。也有研究发现, 在金柚中PDS和ZDS可限速调控类胡萝卜素的累积(Zhao et al., 2021)。除了遗传因素外, 养分管理是实际生产中, 影响类胡萝卜素组分和含量的重要因素。姜帅(2022)发现, N、P、K等养分过低, 直接导致番茄果实中番茄红素含量下降。微量元素也会影响类胡萝卜素含量。外源施Ca可提高辣椒中番茄红素和β-胡萝卜素的含量(Flores et al., 2004);

Mg肥可提高柑橘中α-胡萝卜素和β-胡萝卜素的含量, 加深果肉转色至橙红(刘闰, 2022)。本研究发现, 类胡萝卜素中以番茄红素为主; 不同养分管理影响类胡萝卜素组分变化, 施有机肥显著提高琯溪蜜柚汁胞番茄红素和八氢番茄红素含量, 果实更红更鲜艳。番茄红素可能是决定部分香气的关键代谢物质(石梅艳, 2020), 可见除果实色泽外, 养分管理还可影响果实香气品质。以上研究结果, 为果实品质优化管理提供了科学依据。

4 结论

经定量分析68种类胡萝卜素组分, 共鉴定蜜柚汁胞富含23种类胡萝卜素色素组分, 其中5种属于胡萝卜素、18种属于胡萝卜醇; 汁胞中类胡萝卜素以番茄红素为主, 占比为95.97%。此外, 养分管理可调控类胡萝卜素的组分及其含量。

参考文献:

- 姜帅, 2022. 氮磷钾对番茄红素合成及其关键酶基因表达的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学.
- 刘闰, 2022. 镁对柑橘产量和果肉色泽的影响[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 牛晓丽, 周振江, 李瑞, 等, 2011. 水肥供应对番茄中番茄红素含量的影响[J]. 园艺学报, 38(11): 2111-2120.
- 彭刚, 2013. 柑橘果实转色的叶绿素和类胡萝卜素代谢基础[D]. 杭州: 浙江大学.
- 邱光明, 周远祥, 朱丛戎, 等, 2023. 五布红柚类胡萝卜素物质的提取鉴定及焦甜香效果研究[J]. 食品工业, 44(7): 185-188.
- 石梅艳, 2020. *CgMYB58*对华农红柚汁胞木质素和类胡萝卜素生物合成的调控机理[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 陶俊, 2002. 柑橘果实类胡萝卜素形成及调控的生理机制研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 郭庆江, 2021. 柚果肉色泽和果形调控基因的克隆与鉴定[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 徐娟, 邓秀新, 2002. 红肉脐橙果肉中主要色素的定性及色素含量的变化[J]. 园艺学报, 29(3): 203-208.
- 徐娟, 2002. 几个柑桔产区果实色泽评价及红肉脐橙(*Citrus sinensis* L.cv.Cara cara)果肉呈色机理初探[D]. 武汉: 华中农业大学.
- 周旋, 彭建伟, 蔡桂青, 等, 2013. 养分运筹对早稻叶片叶绿素及类胡萝卜素含量的影响[J]. 江苏农业科学, 41(3): 44-48.
- 朱兰英, 邹志荣, 杜天浩, 等, 2016. 钾肥对番茄果实养分吸收及类胡萝卜素含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 44(5): 147-156.
- ALQUEZAR B, RODRIGO M J, LADO J, et al, 2013. A comparative physiological and transcriptional study of carotenoid biosynthesis in white and red grapefruit (*Citrus paradisi* Macf.)[J]. Tree Genet Genomes, 9(5): 1257-1269.
- BARTLEY G E, SCOLNIK P A, 1995. Plant carotenoids: Pigments for photoprotection, visual attraction, and human health[J]. Plant Cell, 7(7): 1027-1038.
- CAZZONELLI C I, POGSON B J, 2010. Source to sink: Regulation of carotenoid biosynthesis in plants [J]. Trends Plant Sci, 15(5): 266-274.
- FLORES P, NAVARRO J M, GARRIDO C, et al, 2004. Influence of Ca^{2+} , K^+ and NO_3^- fertilisation on nutritional quality of pepper[J]. J Sci Food Agric, 84(6): 569-574.
- HUANG H, LIU R, NIU Q, et al, 2019. Global increase in DNA methylation during orange fruit development and ripening[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 116(4): 1430-1436.
- HONDA M, KAGEYAMA H, HIBINO T, et al, 2019. Improved carotenoid processing with sustainable solvents utilizing Z-isomerization-induced alteration in physico-chemical properties: A review and future directions [J]. Molecules, 24(11): 2149.
- INBARAJ B S, LU H, HUNG C F, et al, 2008. Determination of carotenoids and their esters in fruits of *Lycium barbarum* Linnaeus by HPLC-DAD-APCI-MS[J]. J Pharm Biomed Anal, 47(4/5): 812-818.
- JEYAKODI S, KRISHNAKUMAR A, CHELLAPPAN D K, 2018. Beta carotene-therapeutic potential and strategies to enhance its bioavailability [J]. Nutri Food Sci Int J, 7(4): 555716.
- LIU Q, ZHU A, CHAI L, et al, 2009. Transcriptome analysis of a spontaneous mutant in sweet orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] during fruit development[J]. J Exp Bot, 60(3): 801-813.
- NISAR N, LI L, LU S, et al, 2015. Carotenoid metabolism in plants[J]. Mol Plant, 8(1): 68-82.
- SUN T, RAO S, ZHOU X, et al, 2022. Plant carotenoids: Recent advances and future perspectives[J]. Mol Hortic, 2(1): 3.
- STRA A, ALMARWAEY L O, ALAGOZ Y, et al, 2023. Carotenoid metabolism: New insights and synthetic approaches[J]. Front Plant Sci, 13: 1072061.
- SUN Q, HE Z C, WEI R R, et al, 2024. The transcriptional regulatory module CsHB5-CsbZIP44 positively regulates abscisic acid-mediated carotenoid biosynthesis in *Citrus* (*Citrus* spp.)[J]. Plant Biotechnol J, 22(3): 722-737.
- WEI X, CHEN C, YU Q, et al, 2014. Comparison of carotenoid accumulation and biosynthetic gene expression between *Valencia* and Rohde Red *Valencia* sweet oranges [J]. Plant Sci, 227: 28-36.
- XU C J, FRASER P D, WANG W J, et al, 2006. Differences in the carotenoid content of ordinary citrus and lycopene-accumulating mutants[J]. J Agric Food Chem, 54(15): 5474-5481.
- ZHANG H, XIE Y, LIU C, et al, 2017. Comprehensive comparative analysis of volatile compounds in citrus fruits of different species[J]. Food Chem, 230: 316-326.
- ZHAO Y, YANG X, HU Y, et al, 2021. Evaluation of carotenoids accumulation and biosynthesis in two genotypes of pomelo (*Citrus maxima*) during early fruit development[J]. Molecules, 26(16): 5054.