

大红和无刺黄龙火龙果不同发育阶段果实甜菜色素组分及含量差异分析

胡莺菊^{1,2}, 何云², 李洪立², 洪青梅², 濮文辉², 李琼^{2*}, 胡文斌^{2*}

1. 海南大学园艺学院, 海南海口 570228; 2. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101

摘要: 为探究大红和无刺黄龙火龙果果实色泽差异的形成机理, 以大红和无刺黄龙火龙果坐果后 13、16、19、22、25、28 d 共 6 个不同发育阶段果实为材料, 测定不同部位(果肉、果皮、萼片)的色泽参数、甜菜色素总含量、组分和相对含量变化, 并对结果进行相关性和主成分分析。结果表明: 大红果肉 a^* 值坐果后 16 d 逐渐增加呈现红色; 果皮与萼片 a^* 值坐果后 19 d 前为负值, 19~28 d 为正值且呈上升趋势, b^* 值坐果后 22 d 显著增加而后下降, 表现为由绿色先转为红黄色而后转为红色。无刺黄龙果皮与萼片 a^* 值在 25 d 前为负值, 28 d 绝对值趋近于 0, b^* 值坐果后 13~19 d 呈平稳趋势, 而后显著上升, 表现为由绿色转为黄色。大红共检测到 11 种甜菜色素组分, 以甜菜苷含量最高; 总含量逐渐增加, 28 d 增加显著。无刺黄龙共检测到 6 种甜菜色素组分, 以亮氨酸-甜菜黄素含量最高, 果肉仅含甜菜苷配基和酪氨酸; 果肉甜菜色素总含量差异不显著, 果皮与萼片逐渐增加。2 个品种间仅有甜菜苷配基 1 种共有组分。通过相关性分析可得, 大红 3 个部位的 a^* 值与甜菜色素总含量呈显著正相关, 与甜菜苷的含量呈极显著性正相关。无刺黄龙果皮、萼片的 b^* 值与甜菜色素总含量和亮氨酸-甜菜黄素的含量均呈显著正相关, 果肉甜菜色素总含量与 a^* 、 b^* 、 L^* 值的相关性均未达显著水平。对 2 个品种的甜菜色素组分进行主成分分析, 大红提取了 4 个主成分, 累积方差贡献率达 79.23%; 第 1 主成分甜菜红素类贡献率为 34.30%, 主要综合了甜菜苷、丙二酰甜菜苷等组分; 第 2 主成分甜菜红素及代谢物综合类贡献率为 21.35%, 主要综合了 2,17-Decarboxyphyllactin、甜菜醛氨酸等。无刺黄龙提取了 2 个主成分, 累积方差贡献率达 84.21%; 第 1 主成分甜菜黄素类贡献率为 61.71%, 主要综合了亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素等组分, 这为火龙果色泽的评价和育种提供了新的思路。综上所述, 大红火龙果和无刺黄龙果皮与萼片随着甜菜色素的增加逐渐转色; 无刺黄龙果肉仅含甜菜色素代谢物, 未发生转色; 结合相关性和主成分分析, 进一步推测, 大红果实的红色主要由甜菜苷、丙二酰甜菜苷、2,17-Decarboxyphyllactin 贡献, 无刺黄龙果皮与萼片的黄色主要由亮氨酸-甜菜黄素贡献, 这为火龙果色泽的评价提供了新的思路。本研究阐述了火龙果果实色泽差异的形成机理, 为探究火龙果果实的着色机制、色泽的评价及甜菜色素的开发利用奠定了理论基础。

关键词: 火龙果; 色泽; 甜菜色素; 组分; 相关性分析; 主成分分析

中图分类号: S667.9

文献标识码: A

Analysis of Betalain Components and Content Difference Between Dahong and Wucihuanglong Pitaya at Different Developmental Stages

HU Yingju^{1,2}, HE Yun², LI Hongli², HONG Qingmei², PU Wenhui², LI Qiong^{2*}, HU Wenbin^{2*}

1. College of Horticulture, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Tropical Crop Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: In order to explore the formation mechanism of fruit color difference between Dahong and Wucihuanglong

收稿日期 2022-12-09; 修回日期 2023-01-13

基金项目 海南省重大科技计划项目“热带果树种质资源精准评价与创新利用”(No. ZDKJ2021014); 国家科技资源共享服务平台: 国家热带植物种质资源库(National Tropical Plants Germplasm Resource Center)。

作者简介 胡莺菊(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 种质资源学。*通信作者(Corresponding author): 李琼(LI Qiong), E-mail: liqiong4416@126.com; 胡文斌(HU Wenbin), E-mail: huwb@catas.cn。

pitaya, the fruits at different development stages of 13 d, 16 d, 19 d, 22 d, 25 d and 28 d after fruit setting were sampled. The color parameters, total content, components and relative content change of Betalains in different parts (flesh, peel and sepal) were determined, and the results were analyzed by correlation and principal component analysis. Results showed that a^* value of Dahong flesh gradually increased and the flesh showed red color 16 days after fruit setting. The a^* value of the peel and sepal was negative before 19 d after fruit setting, positive during 19 d to 28 d and showed an upward trend; the b^* value significantly increased and then decreased after 22 d after fruit setting, showing that green first turned to red and yellow, then turned to red. The a^* value of the peel and sepal of Wucihuanglong was negative before 25 d, and the absolute value of 28 d was close to 0; the b^* value showed a stable trend during 13 d to 19 d after fruit setting, and then increased significantly, showing that green turned to yellow. A total of 11 kinds of betalains were detected in Dahong, and the content of betanin was the highest. The total content increased gradually, and the increase was significant at 28 d. A total of 6 kinds of betalain components were detected in the Wucihuanglong, and leucine betaxanthin content was the highest, while the flesh only contained betanidin and tyrosine. There was no significant difference in the total content of betalains in flesh, but it increased gradually in peel and sepal. There was only one common component of betanidin between the two varieties. According to the correlation analysis, the a^* value of the three parts of Dahong was significantly positively correlated with the total content of betalains and extremely significantly positively correlated with the content of betanin. The b^* values in the peel and sepal of Wucihuanglong were significantly positively correlated with the total content of betalain and the content of leucine betaxanthin, while the correlation between the total content of betalain in the flesh and the a^* , b^* and L^* values was not significant. The principal component analysis of the betalains of the two varieties showed that Dahong extracted four principal components, and the cumulative variance contribution rate was 79.23%. The contribution rate of the first principal component was 34.30%, which mainly integrated the components of betanin and phyllocactin. The comprehensive contribution rate of the second principal component betaine and metabolites was 21.35%, mainly synthesizing 2,17-Decarboxyphyllocactin and betalamic acid. Two principal components were extracted from Wucihuanglong, and the accumulative rate reached 84.21%. The contribution rate of the first principal component betaxanthin was 61.71%, which mainly integrated leucine-betaxanthin, tyrosine-betaxanthin and other components, which provided a new idea for color evaluation and breeding of pitaya. In conclusion, the peel and sepal of Dahong and Wucihuanglong gradually changed color with the increase of betalains. The flesh of Wucihuanglong contained only metabolites of betalains, and did not change color. Combined with correlation and principal component analysis, it was further speculated that the red color of Dahong was mainly contributed by betanin, phyllocactin and 2,17-Decarboxyphyllocactin, and the yellow color of Wucihuanglong peel and sepal was mainly contributed by leucine-betaxanthin. This would provide a new idea for the evaluation of pitaya color. This study described the formation mechanism of color difference of pitaya, and would lay a theoretical foundation for exploring the color mechanism, color evaluation, as well as the development and utilization of betalains.

Keywords: pitaya; color; betalains; components; correlation analysis; principal component analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.03.008

火龙果 (*Hylocereus undulatus* Britt), 属仙人掌科 (Cactaceae) 多年生攀援植物, 因其色泽艳丽、风味独特、营养丰富而受到广大消费者的青睐^[1-2]。在我国火龙果的种植主要集中于海南、广西、广东、云南、贵州、福建等地, 为当地果农带来了良好的经济收益^[3]。随着人们生活水平的提高, 对果实品质也提出了新的需求。色泽作为评价火龙果果实外观品质的核心指标, 对其果实及加工产品的商品价值有重要影响^[4-5]。因此, 改善果实色泽, 提高其着色程度成为了当下育种者的主要研究方向之一。

果实色泽的形成主要源自于色素的积累, 色素的种类与含量决定着果实的着色^[6], 常见的植物

色素有花青素、甜菜色素、类胡萝卜素、叶绿素等。研究表明, 火龙果果实的色素主要为甜菜色素, 它在火龙果成色过程中扮演着关键角色^[7-8]。甜菜色素作为一类水溶性含氮生物碱色素, 主要包括以氨基酸为辅基的甜菜黄素和糖苷化的甜菜红素^[9-10]。目前火龙果的商品果主要有红皮红肉、红皮白肉、黄皮白肉 3 种类型, 经前人研究发现, 其发育过程可分为幼果期、膨大期、转色期、成熟期, 幼果期甜菜色素无明显变化趋势, 且 3 种类型色泽的差异主要由甜菜色素导致^[11-12]。目前关于火龙果中甜菜色素合成的代谢通路、调控的关键基因与转录因子等研究已有报道^[13-18], 但关于导致火龙果色泽差异现象的主要色素成分与变化规律还

未明确。

因此, 本研究以包含红皮、黄皮、红肉、白肉的具代表性的主栽品种红皮红肉型火龙果大红和黄皮白肉型火龙果无刺黄龙膨大期(坐果后 13、16 d)、转色期(坐果后 19、22 d)、成熟期(坐果后 25、28 d) 3 个时期(6 个不同发育阶段)的果实为材料, 测量不同部位(果肉、果皮、萼片)色泽参数、甜菜色素总含量及甜菜色素组分和相对含量的变化, 以探究火龙果果实色泽差异的形成机理, 为阐述火龙果果实发育过程中的着色机制、甜菜色素的开发利用奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料

以中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所儋州火龙果种质圃大红、无刺黄龙火龙果夏季果果实为实验材料, 2 个品种夏季果果实自坐果至成熟所需时间均为 28 d 左右, 采样时间为 6 月 21 日至 7 月 9 日。各品种采样 6 次: (1) 膨大期(坐果后 13、16 d) 2 次; (2) 转色期(坐果后 19、22 d) 2 次; (3) 成熟期(坐果后 25、28 d) 2 次。单次采集 5 个果实, 液氮速冻后用干冰冷藏运回实验室待测。

1.2 方法

1.2.1 色泽参数测定 采用 BY-320 精密色差仪测量果实不同部位的 a^* 、 b^* 、 L^* 值。 a^* 、 b^* 表示颜色组分, 其中 a^* 正值为红色, 负值为绿色; b^* 正值为黄色, 负值为蓝色; a^* 、 b^* 值的绝对值越大, 颜色越深。 L^* 表示果实亮度, L^* 值越大, 表示果实亮度越高。

1.2.2 甜菜色素测定 (1) 色素提取。各时期、各部位样品分别匀浆后, 准确称取匀浆样品 2.00 g (精确至 0.01 g) 于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 30% 乙醇水溶液, 超声 20 min; 转速 12 000×g 离心 9 min 后, 吸取上清液, 用微孔滤膜(孔径 0.22 μm) 过滤样品, 并保存于进样瓶中待测。

(2) 甜菜色素总含量测定。甜菜色素总含量的测定参照周俊良等^[19]的方法。

(3) 甜菜色素组分与相对定量测定。甜菜色素组分的定性及相对定量测定参照阳辛凤等^[7]的方法。以 a 表示甜菜红素系列、b 表示甜菜色素代谢物系列、c 表示甜菜黄素系列, 各组分分别表示为: a1 (甜菜苷)、a2 (丙二酰甜菜苷)、a3 (Decarboxylated Phyllocactin)、a4 (2-descarboxy-

betanidin)、a5 (2,17-Decarboxyphyllocactin)、a6 (decarboxylated neo betanin)、a7 (Prebetanin)、b1 (甜菜苷配基)、b2 (甜菜醛氨酸)、b3 (环多巴)、b4 (多巴)、b5 (酪氨酸)、b6 (色氨酸)、c1 (梨果仙人掌黄质)、c2 (亮氨酸-甜菜黄素)、c3 (酪氨酸-甜菜黄素)。

1.3 数据处理

1.3.1 组分筛查 以 Analyst 软件对样品信息进行采集, 包括一级质谱信息与二级碎片信息, 然后将数据导入 PeakView 软件中通过实验室自建甜菜素筛查库进行检索, 实现样品中甜菜素的筛查与确证。

1.3.2 数据分析 采用 Microsoft Excel 和 SPSS 23.0 软件进行数据处理和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同发育阶段果实色泽参数变化

2.1.1 不同发育阶段果实红绿色度值 a^* 的变化 由图 1 可见, 大红果肉 a^* 值坐果后 16 d 前绝对值趋近于 0, 坐果后 16~28 d 呈逐渐升高趋势; 果皮与萼片 a^* 值坐果后 13~19 d 均为负值, 19~28 d 为正值且逐渐增加。无刺黄龙果肉 a^* 值在整个发育期内绝对值均趋近于 0, 且差异不显著; 果皮与萼片 a^* 值在 25 d 前均为负值, 28 d 绝对值趋近于 0。

2.1.2 不同发育阶段果实黄蓝色度值 b^* 的变化 由图 2 可见, 大红和无刺黄龙果肉 b^* 值坐果后 13~28 d 绝对值均趋近于 0, 大红果皮与萼片 b^* 值坐果后 22 d 显著增加而后下降; 无刺黄龙果皮与萼片 b^* 值坐果后 13~19 d 呈平稳趋势, 而后呈显著上升趋势。

2.1.3 不同发育阶段果实亮度值 L^* 的变化 由图 3 可见, 大红 3 个部位及无刺黄龙果肉 L^* 值坐果后 13~28 d 均呈下降趋势, 无刺黄龙果皮与萼片 L^* 值坐果后 13~19 d 差异不显著, 坐果后 19~28 d

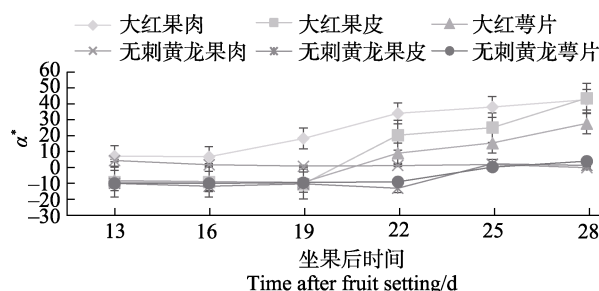


图 1 大红和无刺黄龙果实色泽参数 a^* 变化

Fig. 1 Changes in color a^* of Dahong and Wucihuanglong

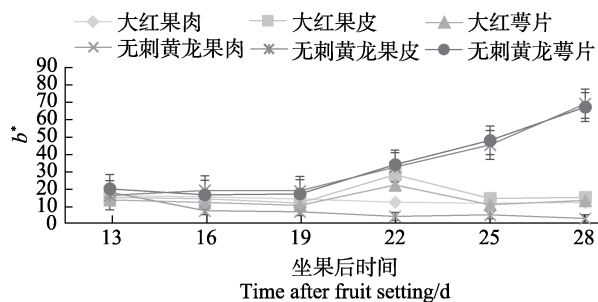


图 2 大红和无刺黄龙果实黄蓝色度值 b^* 变化

Fig. 2 Changes in color b^* of Dahong and Wucihuanglong

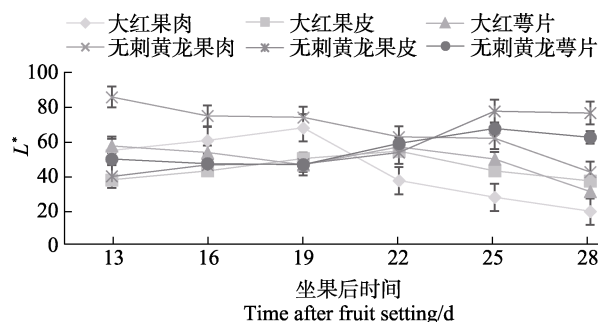


图 3 大红和无刺黄龙果实亮度值 L^* 变化

Fig. 3 Changes in color L^* of Dahong and Wucihuanglong

呈上升趋势。

2.2 不同发育阶段果实甜菜色素组分变化

2.2.1 大红不同发育阶段甜菜色素组分变化 由表 1 可见, 大红果肉坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素组分, 坐果后 19 d 检测到 5 种甜菜色素组分, 分别为甜菜苷、甜菜苷配基、环多巴、多巴、梨果仙人掌黄质; 坐果后 22 d 检测到 7 种甜菜色素组分, 在坐果后 19 d 的基础上增加了 Decarboxylated Phyllocactin 和 2-descarboxy-betanidin; 坐果后 25~28 d 检测到 9 种甜菜色素组分, 在坐果后 22 d 的基础上增加了丙二酰甜菜苷和 decarboxylatedneo betanin。大红果皮坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素组分, 坐果后 19 d 检测到环多巴和多巴; 坐果后 22 d 检测到 6 种甜菜色素组分, 分别为甜菜苷、2-descarboxy-betanidin、甜菜苷配基、环多巴、多巴、梨果仙人掌黄质; 坐果后 25 d 在 22 d 的基础上增加了丙二酰甜菜苷, 坐果后 28 d 共检测到 9 种甜菜色素组分, 在坐果后 25 d 的基础上增加了 Decarboxylated Phyllocactin 和 2,17-Decarboxyphyllocactin。大红萼片坐果后 22 d 检测到了甜菜苷、环多巴、多巴和梨果仙人掌黄质 4 种甜菜色素组分, 坐果后 25 d 和 28 d 分别在此基础上增加了丙二酰甜菜苷、2-descarboxy-betanidin 和 2,17-Decarboxyphylloc-

actin。

2.2.2 无刺黄龙不同发育阶段甜菜色素组分变化 由表 1 可见, 无刺黄龙果肉坐果后 13~19 d 未检测到甜菜色素组分, 坐果后 22 d 检测到甜菜苷配基, 坐果后 25~28 d 检测到酪氨酸和甜菜苷配基。无刺黄龙果皮坐果后 19 d 检测到酪氨酸, 坐果后 22~28 d 均检测到 Prebetanin、酪氨酸、色氨酸、亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素 5 种甜菜色素。无刺黄龙萼片坐果后 22 d 检测到酪氨酸和亮氨酸-甜菜黄素, 坐果后 25~28 d 均检测到 Prebetanin、酪氨酸、色氨酸、亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素。

2.2.3 大红和无刺黄龙不同发育阶段甜菜色素组分差异分析 大红果肉坐果后 19 d 检测到甜菜色素组分, 主要为甜菜色素代谢物, 坐果后 28 d 甜菜色素组分最为丰富, 达到 9 种; 无刺黄龙果肉坐果后 22 d 检测到酪氨酸, 坐果后 28 d 仅含 2 种甜菜色素, 二者仅有甜菜苷配基 1 种共有组分。大红和无刺黄龙果皮均坐果后 19 d 开始检测到甜菜色素组分, 但大红主要为甜菜醛氨酸, 无刺黄龙主要为酪氨酸; 大红果皮坐果后 22~28 d 甜菜色素种类逐渐增加且在 28 d 时主要为甜菜红素, 无刺黄龙果皮 22~28 d 甜菜色素种类均为 5 种且主要为甜菜黄素。大红和无刺黄龙萼片均坐果后 22 d 开始检测到甜菜色素组分, 大红萼片坐果后 25~28 d 甜菜色素种类逐渐增加, 在坐果后 28 d 时达到 7 种, 无刺黄龙坐果后 25~28 d 甜菜色素种类均为 5 种且组分与其果皮一致。

2.3 不同发育阶段果实甜菜色素含量变化

2.3.1 大红不同发育阶段甜菜色素含量变化 由图 4 及表 1 可见, 大红果肉坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素, 坐果后 19~28 d 甜菜色素总含量逐渐增加, 在 28 d 达到峰值 (27.28 mg/100 g)。坐果后 19 d 甜菜色素组分以甜菜苷配基的相对含量最高 (51.36%), 坐果后 22~28 d 以甜菜苷相对含量最高 (33.45%~38.22%)。大红果皮甜菜色素总含量变化趋势与果肉一致, 峰值 (24.35 mg/100 g) 较果肉略有下降。坐果后 19 d 以甜菜醛氨酸相对含量最高 (75.63%), 坐果后 22~28 d 以甜菜苷相对含量最高 (43.62%~46.37%); 此外, 坐果后 22 d 梨果仙人掌黄质的相对含量达 12.32%, 为大红各部位、各时期的最高值。大红萼片坐果后 13~19 d 未检测到甜菜色素, 坐果后 22 d 甜菜色素含量为 0.81 mg/100 g, 随后逐渐增加, 在坐果后 28 d 达

到峰值 (14.98 mg/100 g)。坐果后 22 d 多巴相对含量最高为 55.83%，坐果后 25 d 以甜菜苷 (29.88%)，多巴 (33.52%) 相对含量较高；坐果后 28 d 以甜菜苷相对含量最高 (32.45%)。

2.3.2 无刺黄龙不同发育阶段甜菜色素含量变化

由图 4 及表 1 可见,无刺黄龙果肉坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素,坐果后 19~28 d 甜菜色素含量低且差异不显著。无刺黄龙果皮坐果后 19 d 甜菜色素总含量为 3.57 mg/100 g,仅含酪氨酸;坐果后 22 d 甜菜色素总含量为 4.63 mg/100 g,以亮氨酸-甜菜黄素的相对含量最高 (38.76%);坐果后 25 d 甜菜色素总含量为 4.87 mg/100 g,坐果后 28 d 含量为 10.33 mg/100 g,各组分相对含量与坐果后 22 d 差异不显著。无刺黄龙萼片坐果后 13~22 d 未检测到甜菜色素,坐果后 25 d 甜菜色素含量为 4.49 mg/100 g,以亮氨酸-甜菜黄素的相对含量最高 (40.4%),坐果后 28 d 甜菜色素含量为 5.29 mg/100 g,各组分相对含量与坐果后 25 d 差异不显著。

2.3.3 大红和无刺黄龙不同发育阶段甜菜色素含量差异分析

大红果肉坐果后 19 d 甜菜色素组分以甜菜苷配基含量最高,坐果后 22~28 d 以甜

菜苷含量最高;无刺黄龙果肉坐果后 22 d 仅含酪氨酸,坐果后 25~28 d 以酪氨酸含量最高。大红果皮坐果后 19 d 以甜菜醛氨酸含量最高,坐果后 22~28 d 以甜菜苷含量最高;无刺黄龙果皮坐果后 19 d 仅含酪氨酸,坐果后 22~28 d 以亮氨酸-甜菜黄素含量最高。大红萼片坐果后坐果后 22~25 d 多巴含量最高,坐果后 28 d 甜菜苷含量最高;无刺黄龙萼片坐果后 22 d 以酪氨酸含量最高,坐果后 25~28 d 以亮氨酸-甜菜黄素含量最高。

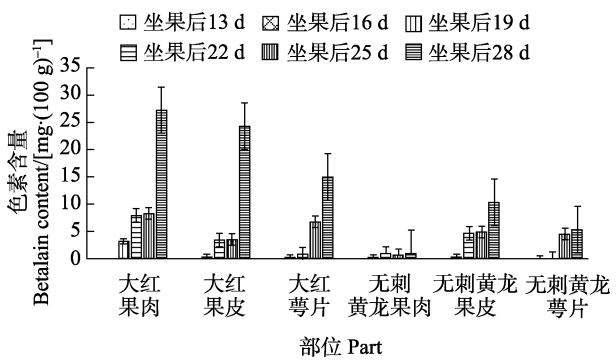


图 4 大红和无刺黄龙甜菜色素总含量变化

Fig. 4 Change of total betalain content in Dahong and Wuchi Huanglong

表 1 不同发育阶段果实不同部位甜菜色素组分及相对含量变化

Tab. 1 Changes of betalain components and relative content in different parts of fruit at different development stages

品种 Varieties	部位 Part	阶段 Stage	相对含量 Relative content/%															
			a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	b1	b2	b3	b4	b5	b6	c1	c2	c3
大红	果肉	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	23.56	—	—	—	—	—	—	51.36	—	16.42	8.66	—	—	—	—	—
		坐果后 22 d	38.22	—	7.84	6.39	—	—	—	28.83	—	9.24	6.79	—	—	2.69	—	—
		坐果后 25 d	36.24	11.26	7.49	4.33	—	8.19	—	20.63	—	6.22	3.66	—	—	1.98	—	—
		坐果后 28 d	33.45	13.77	6.69	5.73	—	6.37	—	22.06	—	5.88	4.04	—	—	2.01	—	—
	果皮	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	—	—	—	—	—	—	—	—	75.63	—	24.37	—	—	—	—	—
		坐果后 22 d	43.62	—	—	11.54	—	—	—	—	15.52	7.63	9.37	—	—	12.32	—	—
		坐果后 25 d	45.16	9.61	—	12.61	—	—	—	—	12.05	9.67	4.37	—	—	6.53	—	—
		坐果后 28 d	46.37	8.85	3.81	11.96	5.57	—	—	—	10.42	6.75	3.44	—	—	2.83	—	—
	萼片	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 22 d	17.85	—	—	—	—	—	—	—	—	18.67	55.83	—	—	7.65	—	—
		坐果后 25 d	29.88	10.22	—	—	—	—	—	—	—	19.56	33.52	—	—	6.82	—	—
		坐果后 28 d	32.45	9.98	—	8.34	7.43	—	—	—	—	22.64	18.16	—	—	1.00	—	—

注：—表示未检出。

Note: — indicates undetected.

续表 1 不同发育阶段果实不同部位甜菜色素组分及相对含量变化

Tab. 1 Changes of betalain components and relative content in different parts of fruit at different development stages (continued)

品种 Varieties	部位 Part	阶段 Stage	相对含量 Relative content/%															
			a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	b1	b2	b3	b4	b5	b6	c1	c2	c3
无刺黄龙	果肉	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 22 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100.00	—	—	—	—
		坐果后 25 d	—	—	—	—	—	—	—	23.66	—	—	—	76.34	—	—	—	—
		坐果后 28 d	—	—	—	—	—	—	—	31.50	—	—	—	68.50	—	—	—	—
	果皮	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100.00	—	—	—	—
		坐果后 22 d	—	—	—	—	—	—	9.20	—	—	—	—	24.58	11.30	—	38.76	16.16
		坐果后 25 d	—	—	—	—	—	—	7.33	—	—	—	—	18.24	7.84	—	52.56	14.03
		坐果后 28 d	—	—	—	—	—	—	4.26	—	—	—	—	23.88	9.69	—	40.02	22.15
	萼片	坐果后 13 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 16 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 19 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		坐果后 22 d	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70.78	—	—	29.22	—
		坐果后 25 d	—	—	—	—	—	—	2.55	—	—	—	—	36.89	8.79	—	40.40	11.37
		坐果后 28 d	—	—	—	—	—	—	1.83	—	—	—	—	30.52	7.74	—	45.62	14.29

注：—表示未检出。
Note: — indicates undetected.

2.4 果实色泽参数与甜菜色素总含量的相关性分析

由表 2 可见, 大红果肉、果皮、萼片甜菜色素总含量均与 a^* 值呈显著正相关 ($P<0.05$), 相关系数为 0.817、0.827、0.904; 大红果皮与萼片 L^* 值呈显著负相关, 相关系数为-0.818、-0.878。无刺黄龙果皮甜菜色素总含量与 b^* 值呈显著正相关, 相关系数为 0.893; 萼片甜菜色素总含量与

表 2 果实色泽参数与甜菜色素总含量的相关性
Tab. 2 Correlation between fruit color parameters and total betalain content

部位 Part	相关系数 Correlation coefficient		
	a^*	b^*	L^*
大红果肉	0.817*	-0.689	-0.818*
大红果皮	0.827*	-0.004	-0.436
大红萼片	0.904*	-0.153	-0.878*
无刺黄龙果肉	0.656	0.739	0.785
无刺黄龙果皮	0.656	0.893*	0.785
无刺黄龙萼片	0.994**	0.928**	0.821*

注：*表示显著相关 ($P<0.05$), **表示极显著相关 ($P<0.01$)。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

a^* 、 b^* 均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 L^* 值呈显著正相关, 相关系数分别为 0.994、0.928、0.821; 果肉甜菜色素总含量与 a^* 、 b^* 、 L^* 的相关性均未达显著水平。

2.5 果实色泽参数与甜菜色素各组分含量的相关性分析

2.5.1 大红火龙果色泽参数与甜菜色素各组分含量的相关性 由表 3 可见, 大红果肉 a^* 值与甜菜苷、Decarboxylated Phylloactin、2-descarboxy-betanidin 的含量均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.938、0.931、0.918; b^* 值与甜菜苷和 Decarboxylated Phylloactin 呈极显著负相关, 相关系数分别为 -0.957、-0.933, 与 2-descarboxy-betanidin、梨果仙人掌黄质呈显著负相关, 相关系数为-0.888、-0.898; L^* 值与丙二酰甜菜苷、Decarboxylated Phylloactin、2-descarboxy-betanidin、descarboxylatedneo betanidin、梨果仙人掌黄质呈显著负相关, 相关系数为-0.853、-0.903、-0.887、-0.813、-0.861。大红果皮 a^* 值与甜菜苷、Decarboxylated Phylloactin 呈极显著正相关, 相关系数为 0.951、0.940, 与环多巴呈显著正相关, 相关系数为 0.877; b^*

表 3 果实色泽参数与甜菜色素组分含量的相关性
Tab. 3 Correlation between fruit color parameters and content of betalain components

部位 Part	色泽参数 Color pa- rameter	组分含量 Components content															
		a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	b1	b2	b3	b4	b5	b6	c1	c2	c3
大红果肉	a [*]	0.938 ^{**}	0.779	0.931 ^{**}	0.918 ^{**}	—	0.752	—	0.415	—	0.361	0.481	—	—	0.902 [*]	—	—
	b [*]	−0.957 ^{**}	−0.712	−0.933 ^{**}	−0.888 [*]	—	−0.734	—	−0.451	—	−0.408	−0.520	—	—	−0.898 [*]	—	—
	L [*]	−0.693	−0.853 [*]	−0.903 [*]	−0.887 [*]	—	−0.813 [*]	—	0.042	—	0.102	−0.035	—	—	−0.861 [*]	—	—
大红果皮	a [*]	0.951 ^{**}	0.810	0.719	0.940 ^{**}	0.719	—	—	—	−0.264	0.877 [*]	−0.211	—	—	0.561	—	—
	b [*]	0.494	−0.223	−0.112	0.484	−0.112	—	—	—	−0.251	0.462	−0.065	—	—	0.871 [*]	—	—
	L [*]	0.070	−0.459	−0.511	0.075	−0.511	—	—	—	0.525	0.116	0.661	—	—	0.573	—	—
大红萼片	a [*]	0.980 ^{**}	0.857 [*]	—	0.738	0.738	—	—	—	—	0.961 ^{**}	0.594	—	—	0.479	—	—
	b [*]	0.148	−0.303	—	−0.050	−0.050	—	—	—	—	0.375	0.735	—	—	0.563	—	—
	L [*]	−0.570	−0.682	—	−0.906 [*]	−0.906 [*]	—	—	—	—	−0.464	0.107	—	—	0.252	—	—
无刺黄龙 果肉	a [*]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	−0.429	—	—	—	—
	b [*]	—	—	—	—	—	—	—	−0.495	—	—	—	−0.642	—	—	—	—
	L [*]	—	—	—	—	—	—	—	−0.827	—	—	—	−0.728	—	—	—	—
无刺黄龙 果皮	a [*]	—	—	—	—	—	—	0.329	—	—	—	—	−0.097	0.450	—	0.734	0.626
	b [*]	—	—	—	—	—	—	0.539	—	—	—	—	−0.111	0.767	—	0.873 [*]	0.916 [*]
	L [*]	—	—	—	—	—	—	0.617	—	—	—	—	−0.071	0.726	—	0.915 [*]	0.838 [*]
无刺黄龙 萼片	a [*]	—	—	—	—	—	—	0.922 ^{**}	—	—	—	—	0.318	0.961 ^{**}	—	0.874 [*]	0.997 ^{**}
	b [*]	—	—	—	—	—	—	0.826 [*]	—	—	—	—	0.530	0.877 [*]	—	0.949 ^{**}	0.935 ^{**}
	L [*]	—	—	—	—	—	—	0.864 [*]	—	—	—	—	0.722	0.856 [*]	—	0.957 ^{**}	0.811

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)，—表示未检出。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$), — indicates undetected.

值与梨果仙人掌黄质呈显著正相关（系数为 0.871）， L^* 值与各组分相关性均不显著。大红萼片 a^* 值与甜菜苷、环多巴的含量呈极显著正相关，相关系数为 0.989、0.961，与丙二酰甜菜苷显著相关（系数为 0.857）； b^* 值与各组分相关性均不显著； L^* 值与 2-descarboxy-betanidin、2,17-Decarboxyphyllactin 含量呈显著负相关，相关系数分别为 -0.906、-0.906。

2.5.2 无刺黄龙火龙果色泽参数与甜菜色素各组合含量的相关性 无刺黄龙果肉与各组分含量的相关性均未达显著水平；果皮的 b^* 、 L^* 值均与亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素的含量呈显著正相关，相关系数分别为 0.873、0.916、0.915、0.838；萼片 b^* 值与亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素的含量呈极显著正相关，相关系数分别为 0.949、0.935。

2.6 果实甜菜色素组分的主成分分析

2.6.1 大红甜菜色素组分主成分分析 主成分特征值碎石图曲线的陡峭程度，可以直接反映各成分的变化趋势，进而明确主成分的提取数量。由图 5 可知，大红甜菜色素前 3 个主成分的特征值呈快速下降趋势，且从第 8 个主成分特征值开始，碎石图曲线趋于平滑且平稳。由表 4 可知，前 4 个主成分的特征值分别为 3.774、2.348、1.430、1.164，具有较高的代表性，其累积贡献率近 80%。因此，可选取前 4 个主成分作为大红甜菜色素组分的分析指标。

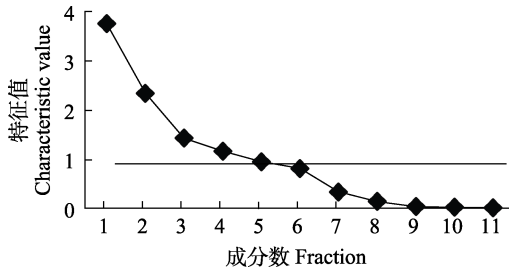


图 5 大红甜菜色素组分主成分分析碎石图
Fig. 5 Scree plot of betalain components in Dahong by principal component analysis

第 1 主成分甜菜红素类（PC1-DH）的方差贡献率为 34.30%（表 4），主要综合了甜菜苷、丙二酰甜菜苷、环多巴等组分（表 5）；第 2 主成分甜菜红素与代谢物综合类（PC2-DH）的方差贡献率为 21.35%，主要综合了 2,17-Decarboxyphyllactin、甜菜醛氨酸、环多巴等组分；第 3 主成分代谢物与甜菜黄素综合类（PC3-DH）的方差贡献率为

表 4 大红甜菜色素组分主成分分析的特征值、贡献率
Tab. 4 Characteristic value and contribution rate of principal component analysis of betalain components in Dahong

主成分 Principal components	特征值 Characteristic value	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
PC1-DH	3.774	34.30	34.30
PC2-DH	2.348	21.35	55.65
PC3-DH	1.430	13.00	68.65
PC4-DH	1.164	10.57	79.23

表 5 大红甜菜色素组分主成分分析的载荷矩阵
Tab. 5 Loading matrix of principal component analysis of betalain components in Dahong

组分 Components	主成分 Principal component			
	PC1-DH	PC2-DH	PC3-DH	PC4-DH
甜菜苷	0.959	0.071	-0.035	0.107
丙二酰甜菜苷	0.795	-0.175	-0.167	-0.050
Decarboxylated Phylloactin	0.577	-0.669	0.089	0.153
2-descarboxy-betanidin	0.770	0.119	-0.489	0.207
2,17-Decarboxyphyllactin	0.438	0.264	-0.570	-0.499
decarboxylatedneo betanin	0.438	0.264	-0.570	-0.499
甜菜苷配基	0.299	-0.511	0.531	-0.192
甜菜醛氨酸	-0.151	0.257	-0.132	0.655
环多巴	0.665	0.474	0.385	-0.393
多巴	0.222	0.671	0.561	0.043
梨果仙人掌黄质	0.539	0.546	0.194	0.413

13.00%，主要综合了甜菜苷配基、环多巴、多巴、梨果仙人掌黄质等组分；第 4 主成分甜菜色素综合类（PC4-DH）的方差贡献率为 10.57%，主要综合了 2-descarboxy-betanidin、甜菜醛氨酸、梨果仙人掌黄质等组分。

2.6.2 无刺黄龙甜菜色素组分主成分分析 通过主成分分析（图 6、表 6、表 7）得出，在无刺黄龙火龙果中，前 2 个主成分的特征值变化趋势陡峭且大于 1，分别为 3.703 和 1.350，具较高的代表性，贡献率达 84.21%。因此，可选取前 2 个主成分作为无刺黄龙甜菜色素组分的分析指标。第

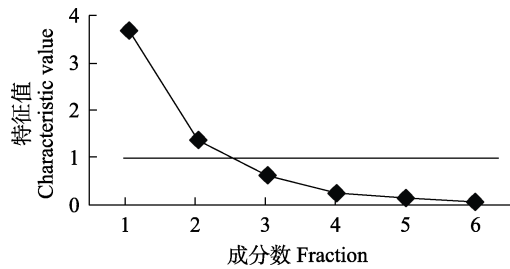


图 6 无刺黄龙甜菜色素组分主成分分析碎石图
Fig. 6 Scree plot of betalain components in Wucihuanglong by principal component analysis

1 主成分甜菜黄素类（PC1-WCHL）的方差贡献率为 61.71%，主要综合了亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素、Prebetanin 等组分；第 2 主成分甜菜色素综合类（PC2-WCHL）的方差贡献率为 22.50%，主要综合了酪氨酸、甜菜苷配基等组分。

表 6 无刺黄龙甜菜色素组分主成分分析的特征值、贡献率
Tab. 6 Characteristic value and contribution rate of principal component analysis of betalain components in Wucihuanglong

主成分 Principal components	特征值 Characteristic value	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
PC1-WCHL	3.703	61.71	61.71
PC2-WCHL	1.350	22.50	84.21

表 7 无刺黄龙甜菜色素组分主成分分析的载荷矩阵
Tab. 7 Loading matrix of principal component analysis of betalain components in Wucihuanglong

组分 Components	主成分 Principal component	
	PC1-HL	PC2-HL
Prebetanin	0.909	0.070
酪氨酸	-0.121	0.852
色氨酸	0.981	0.089
甜菜苷配基	-0.315	0.768
亮氨酸-甜菜黄素	0.933	0.122
酪氨酸-甜菜黄素	0.965	0.082

3 结论

色泽参数是反映果实着色变化最直观的指标之一，其数值可以准确客观地评价果实色泽变化。大红果肉 a^* 值坐果后 16 d 前趋近于 0，而后逐渐增加呈现红色；果皮与萼片 a^* 值坐果后 19 d 前为负值，19~28 d 为正且呈上升趋势， b^* 值坐果后 22 d 显著增加而后下降，表现为由绿色先转为红黄色而后转为红色。无刺黄龙果肉 a^* 、 b^* 值在整个发育期内趋近于 0，未出现红绿、黄蓝色，果皮与萼片 a^* 值在 25 d 前为负值，28 d 绝对值趋近于 0， b^* 值坐果后 13~19 d 呈平稳趋势，而后显著上升，表现为由绿色转为黄色。与已有研究^[11]对比，在红皮红肉火龙果果皮由绿色转为红色的基础上，发现了大红果皮坐果后 22 d 色泽呈现红黄色，而后转为红色。

大红火龙果坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素，19 d 以甜菜色素代谢物相对含量最高，未发生转色；22~28 d 以甜菜红素的种类及相对含量最

高，且总含量逐渐增加，表现为红色逐渐加深；果皮在 22 d 梨果仙人掌黄质的相对含量达 12.32%，为大红各部位、各时期的最高值，表现为红黄色。无刺黄龙火龙果果肉坐果后 13~16 d 未检测到甜菜色素，19~28 d 甜菜色素含量低且主要为甜菜色素代谢物，未发生转色。果皮 13~16 d 未检测到甜菜色素，19 d 仅有酪氨酸（甜菜色素代谢物）未发生转色；22~28 d 以亮氨酸-甜菜黄素的相对含量最高，且总含量逐渐增加，表现为黄色逐渐加深。萼片 13~22 d 未检测到甜菜色素，25~28 d 以亮氨酸-甜菜黄素的相对含量最高，黄色逐渐加深。由此可推测，大红火龙果的红色主要由甜菜红素导致，无刺黄龙的黄色主要由甜菜黄素导致，甜菜色素代谢物在火龙果中未呈色；此外，甜菜红素和甜菜黄素的占比会直接影响火龙果色泽的呈现。

通过相关性分析可得，大红 3 个部位的 a^* 值与甜菜色素总含量呈显著正相关，与甜菜苷的含量呈极著正相关。无刺黄龙果皮、萼片的 b^* 值与甜菜色素总含量和亮氨酸-甜菜黄素的含量均呈显著正相关，果肉甜菜色素总含量与 a^* 、 b^* 、 L^* 值的相关性均未达显著水平。对 2 个品种的甜菜色素组分进行主成分分析，大红提取了 4 个主成分，累积方差贡献率达 79.23%；第 1 主成分甜菜红素类贡献率为 34.30%，主要综合了甜菜苷、丙二酰甜菜苷等组分；第 2 主成分甜菜红素及代谢物综合类贡献率为 21.35%，主要综合了 2,17-Decarboxyphyllocactin、甜菜醛氨酸等。无刺黄龙提取了 2 个主成分，累计率达 84.21%；第 1 主成分甜菜黄素类贡献率为 61.71%，主要综合了亮氨酸-甜菜黄素、酪氨酸-甜菜黄素等组分。大红第一主成分甜菜红素类的贡献率相对较低，未达到预期水平；这可能是由于其甜菜红素种类更为丰富，单一主成分无法达到较高的贡献率。

在本研究中大红和无刺黄龙果皮与萼片随着甜菜色素的增加逐渐转色；无刺黄龙果肉仅含甜菜色素代谢物未发生转色；WYBRANIEC 等^[20]指出甜菜色素是导致火龙果与其杂交种果实颜色差别的原因；SVENSON 等^[21]还指出块根作物美洲落葵马铃薯红色块根鲜重所含甜菜红素与黄色块根鲜重所含甜菜黄素的占比均较高，从而影响了其块根颜色，与本研究结果相似。结合相关性和主成分分析，进一步推测，大红果实的红色主要由甜菜苷、丙二酰甜菜苷、2,17-Decarboxyphyll

locactin 贡献, 无刺黄龙果皮与萼片的黄色主要由亮氨酸-甜菜黄素贡献, 这为火龙果色泽的评价和育种提供了新的思路。

本研究通过探讨了大红和无刺黄龙火龙果不同发育阶段色泽参数与甜菜色素总含量、组分与相对含量的变化, 阐述了火龙果果实色泽差异的形成机理, 为探究火龙果果实的着色机制、色泽的评价及甜菜色素的开发利用提供理论依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 李靛, 朱涵彬, 袁晓晴, 岳晓禹. 火龙果营养成分及保健功能的研究[J]. 现代食品, 2020(10): 26-28.
LI L, ZHU H B, YUAN X Q, YUAN X Y. Study on nutritional composition and healthy function of pitaya fruit[J]. Modern Food, 2020(10): 26-28. (in Chinese)
- [2] 谭梦怡, 李华东, 王鸿浩, 孟鑫, 范声浓, 王烁衡, 林电. 大红火龙果果实养分积累量动态变化及其相关性[J]. 南方农业学报, 2021, 52(7): 1816-1825.
TAN M Y, LI H D, WANG H H, MENG X, FAN S N, WANG L H, LIN D. Dynamic changes and correlation of nutrient accumulation in the fruit of red pitaya[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(7): 1816-1825. (in Chinese)
- [3] 黄艳芳, 秦媛媛, 阮晓静, 兰宗宝. 广西火龙果产业发展现状及可持续发展对策研究[J]. 热带农业科学, 2017, 37(6): 97-99, 105.
HUANG Y F, QIN Y Y, RUAN X J, LAN Z B. Present situation and countermeasures of sustainable development of pitaya industry in Guangxi[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2017, 37(6): 97-99, 105. (in Chinese)
- [4] 吴世涛, 余文琴, 李水祥, 陈晶英, 孙宇晨, 马文, 王杰. 套袋对‘三红蜜柚’果实着色的影响[J]. 果树学报, 2020, 37(5): 687-695.
WU S T, YU W Q, LI S X, CHEN J Y, SUN Y C, MA W, WANG J. Effects of bagging on rind pigmentation of ‘Sanhongmiyou’ fruit[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(5): 687-695. (in Chinese)
- [5] 赵国文, 贾瑞宗, 郭静远, 郭安平. 红心火龙果不同发育时期果肉呈色相关基因表达模式研究[J]. 热带作物学报, 2021, 42(11): 3134-3145.
ZHAO G W, JIA R Z, GUO J Y, GUO A P. Expression patterns of flesh color related genes in red pitaya at different developmental stages[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(11): 3134-3145. (in Chinese)
- [6] 林旗华, 钟秋珍, 张泽煌. 白东魁和东魁不同发育阶段果实花青苷组分及含量差异分析[J]. 中国南方果树, 2022, 51(2): 67-71.
LIN Q H, ZHONG Q Z, ZHANG Z H. Analysis on the difference of anthocyanin composition and content in the fruit of Baidongkui and Dongkui at different development stages[J]. Fruit Trees in Southern China, 2022, 51(2): 67-71. (in Chinese)
- [7] 阳辛凤, 王盼, 郭晓杰, 杨磊, 李琼. 火龙果果实甜菜苷类色素组成与分布[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 20-25, 32.
YANG X F, WANG P, GUO X J, YANG L, LI Q. Study on the components and distribution of betalain pigments in different species of pitaya fruit[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 20-25, 32. (in Chinese)
- [8] 罗兵威. 火龙果种植技术现状及发展建议探究[J]. 南方农业, 2021, 15(30): 83-84.
LUO B W. Research on the current situation and development suggestions of pitaya planting technology[J]. South China Agriculture, 2021, 15(30): 83-84. (in Chinese)
- [9] 唐霓, 徐宁, 韦敏雪, 余丹, 孙天竹. 火龙果色素的稳定性及应用研究[J]. 现代食品, 2017(9): 115-117.
TANG N, XU N, WEI M X, YU D, SUN T Z. Study on stability and application of pitaya pigment[J]. Modern Food, 2017(9): 115-117. (in Chinese)
- [10] 郭攀阳, 曾灿彬, 刘成立, 韦双双, 黄家权, 汤华. 红皮红肉和红皮白肉火龙果果肉呈色相关基因差异表达分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(13): 4311-4326.
GUO P Y, ZENG C B, LIU C L, WEI S S, HUANG J Q, TANG H. Differential expression analysis of genes related to flesh color in *Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*[J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(13): 4311-4326. (in Chinese)
- [11] 曾灿彬. 红肉与白肉火龙果果实发育的色素比较与差异表达基因的研究[D]. 海口: 海南大学, 2017.
ZENG C B. Comparison of pigment and differentially expressed genes in the fruit development of red meat and white meat pitaya[D]. Haikou: Hainan University, 2017. (in Chinese)
- [12] 张瀚, 杨福孙, 胡文斌, 孙会举, 李洪立. 火龙果果实生长及内含物变化规律[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(11): 161-163.
ZHANG H, YANG F S, HU W B, SUN H J, LI H L. Growth and content changes of pitaya fruit[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(11): 161-163. (in Chinese)
- [13] DEY D, HEMACHANDRAN H, D THIRUMAL K, DOSS G P, PRIYADARSHINI R, SIVA R. Accumulation of betacyanin in *Hylocereus undatus* rind: pigment stability analysis and its role in xanthine oxidase inhibition[J]. Phytomedicine Plus, 2022, 2(1): 100197.
- [14] MORALES J, ARAUJO-SANCHEZ J, CASTRO-CONCHA L, KU A, CASTAO E. Defining color change in pitaya: a

- close look at betacyanin synthesis genes in *stenocereus queretaroensis*[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5(1): 132-136.
- [15] 吴景玉. 火龙果甜菜素生物合成途径中关键酶基因克隆与初步功能分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- WU J Y. Cloning and preliminary functional analysis of key enzyme genes in betaine biosynthesis pathway of pitaya fruit[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [16] 于思礼, 刘雪, 张昭宇, 於洪建, 赵广荣. 甜菜素的生物合成及其代谢调控进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2018, 38(8): 84-91.
- YU S L, LIU X, ZHANG Z Y, YU H J, ZHAO G R. Dances in the biosynthesis and metabolic regulation of betaine[J]. *China Biotechnology*, 2018, 38(8): 84-91. (in Chinese)
- [17] CHANG Y C, CHIU Y C, TSAO N W, CHOU Y L, TAN C M, CHIANG Y H, LIAO P C, LEE Y C, HSIEH L C, WANG S Y, YANG J Y. Elucidation of the core betalain biosynthesis pathway in *Amaranthus tricolor*[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 15634-15634.
- [18] ZHANG L L, CHEN C B, XIE F F, HUA Q Z, ZHANG Z K, ZHANG R, CHEN J Y, ZHAO J T, HU G B, QIN Y H. A novel WRKY transcription factor hmoWRKY40 associated with betalain biosynthesis in pitaya (*Hylocereus monacanthus*) through regulating HmoCYP76AD1[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(4): 2171-2171.
- [19] 周俊良, 沈佳奇, 马玉华, 韩秀梅, 张兴无. 火龙果皮甜菜色素提取工艺的优化[J]. *贵州农业科学*, 2017, 45(3): 104-107.
- ZHOU J L, SHEN J Q, MA Y H, HAN X M, ZHANG X W. Optimization of extraction process of sugarbeet pigment from pitaya peel[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2017, 45(3): 104-107. (in Chinese)
- [20] WYBRANIEC S, MIZRAHI Y. Fruit flesh betacyanin pigments in *Hylocereus cacti*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 50(21): 6086-6089.
- [21] SVENSON J, SMALLDIELD B M, JOYCE N I. Betalains in red and yellow varieties of the andean tuber crop ulluco[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56: 7730-7737.