

火龙果果实甜菜苷类色素组成与分布

Study on the components and distribution of betalain pigments in different species of pitaya fruit

阳辛凤^{1,2} 王盼^{3,4} 郭晓杰^{1,3} 杨磊^{3,4} 李琼⁴

YANG Xin-feng^{1,2} WANG Pan^{3,4} GUO Xiao-jie^{1,3} YANG Lei^{3,4} LI Qiong⁴

(1. 中国热带农业科学院分析测试中心, 海南 海口 571101; 2. 海南省热带果蔬产品质量安全
重点实验室, 海南 海口 571101; 3. 海南大学热带作物学院, 海南 海口 570000;
4. 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)

(1. Analysis and Testing Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou,
Hainan 571101, China; 2. Hainan Provincial Key Laboratory of Quality and Safety for Tropical
Fruits and Vegetables, Haikou, Hainan 571101, China; 3. College of Tropical Crops, Hainan
University, Haikou, Hainan 570000, China; 4. Tropical Crops Genetic Resources Institute,
Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

摘要:目的:明确火龙果果实中甜菜苷类色素(BLs)组成及其部位归属。方法:采用超高效液相色谱飞行时间质谱法对3类火龙果果实[红皮红肉型(RR)、红皮白肉型(RW)和黄皮白肉型(YW)]的果肉部位和果皮部位甜菜苷类色素(BLs)进行筛查和结构确证。结果:3类火龙果果实中共鉴定出甜菜苷、丙二酰甜菜苷和梨果仙人掌黄质等19种组分,RR火龙果的果皮部位鉴定的BLs组分最多(14种),其次是RR果肉部位(12种)及RW果皮部位(9种)。结论:RR火龙果果实BLs组分最为丰富,RW次之,YW最少;BLs主要分布在红色果肉和红色果皮部位,在白色果肉和黄色果皮部位则较少。果肉、果皮部位检测出BLs组分分别为12、16种。

关键词:火龙果;甜菜苷类色素;超高效液相色谱飞行时间质谱;筛查;结构确证

Abstract: Objective: To reveal the compositions of betalains (BLs) from pitaya fruit and their distribution in different parts. **Methods:** Three types of pitaya fruits, red peel-red flesh (RR), red peel-white flesh (RW), and yellow peel-white flesh (YW), were selected. The screening and confirmation of BLs were performed by ultra-performance liquid chromatography-quadrupole-time-of-flight-mass spectrometry (UPLC QTOF-MS/MS). **Re-**

sults: A total of 19 components were identified, including betanin, phyllocactin, indicaxanthin, etc. Most components (14) were identified from the peel part of RR fruit, and secondly, 12 components from the flesh part of RR fruit and nine components from the peel part of RW fruit. **Conclusion:** Among the various pitaya fruits, RR fruit presented the most prosperous components, and the following were RW and YW fruit. BLs components are predominantly distributed in the red flesh and red peel parts. The white flesh and yellow peel parts were scarce of BLs components.

Keywords: pitaya fruit; betalains; UPLC/Q-TOF-MS/MS; screening; structure confirmation

火龙果是多年生攀缘植物,主要来源于仙人掌科(Cactaceae)量天尺属(*Hylocereus*)和蛇鞭柱属(*Selenicereus*)^[1-4]。火龙果果实的果肉和果皮依品种不同呈多种颜色,如红色、白色、紫色、紫红、粉色、红白双色、橙色、黄色等。依据果皮与果肉颜色,火龙果果实主要分为红皮红肉型(RR)、红皮白肉型(RW)和黄皮白肉型(YW)3类。研究^[5-8]表明火龙果果实的天然色素属于甜菜苷类色素(Betalains, BLs)。BLs为含氮水溶性色素,主要分布于甜菜、苋菜、千日红、仙人掌和火龙果等植物中^[1,5,9]。依据结构不同,BLs分为甜菜红色素(BCs)和甜菜黄色素(BXs)两大类^[4,9]。已报道的BLs有80余种,其中BCs和BXs分别为46、36种^[10-12]。BLs具有广泛的生物活性,如抗氧化^[1,12]、抗炎^[13-14]、抗焦虑^[15-16]、心血管疾病预防等^[17-19]。Dong等^[8]从量天尺属*H. polyrhizus*的RR及RW果实中共鉴

基金项目:中国热带农业科学院基本科研业务费专项资金(编号:1630082020005);海南省重点研发计划项目(编号:ZDYF2020160)

作者简介:阳辛凤(1971—),女,中国热带农业科学院分析测试中心副研究员,博士。E-mail: yangxinf2002@126.com

收稿日期:2021-01-25

定了 23 种 BLs, Leticia 等^[16]从绿柱属火龙果 *Stenocereus pruinosus* 果实的红色果肉和橙色果肉及 *S. stellatus* 果实的红色果肉和白色果肉中共鉴定了 11 种 BLs。目前有关火龙果果实 BLs 组分构成及其在果肉、果皮部位的分布特征的研究尚未见报道。研究拟采用超高效液相色谱飞行时间质谱法对不同类型火龙果果实和不同部位(果肉、果皮)中的 BLs 进行筛查和结构确证,分析 BLs 的组分构成与空间分布,为火龙果 BLs 天然色素资源和生物活性产物的加工利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

成熟火龙果:金都一号(RR 型)、越南白肉(RW 型)、无刺黄龙(YW 型),市售;

甲醇、乙腈:质谱纯,德国默克公司;

甲酸:色谱纯,美国 Fisher 公司;

盐酸:分析纯,广州化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

超高效液相色谱飞行时间质谱仪:Triple TOF 5600⁺型,安装有 Analyst[®] TF 1.6 工作站、PeakView[®] 2.0 软件,美国 AB SCIEX 公司;

电子天平:ME204 型,感量 0.1 mg,瑞士梅特勒—托利多公司;

电子天平:JJ500 型,感量 0.01 g,江苏常熟市双杰测试仪器厂;

冷冻干燥机:LGJ-10D 型,北京四环起航科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备 将火龙果果实果皮和果肉分离,切块,匀浆,于 -50 °C 冷冻干燥 15 h,得冻干样品。称取果皮、果肉冻干样品 5.00 g,用 50 mL 体积分数为 80% 的甲醇水超声提取 2 次,每次 20 min,合并提取液。12 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,减压旋转蒸发至 10 mL 左右,转移到 10 mL 容量瓶并定容。过 0.22 μm 微孔滤膜,待上机。

1.3.2 测试条件 Agilent Poroshell SBAq 色谱柱 (2.1 mm × 50 mm, 2.7 μm); 流动相为 0.1% 甲酸水溶液(A)—乙腈(B),梯度洗脱:0~1 min, 2% B; 1~10 min, 2%~30% B; 10~17 min, 30%~90% B; 17~18 min, 90%~2% B; 18~20 min, 2% B; 流速 0.3 mL/min, 柱温 30 °C, 进样量 5 μL。ESI 离子源,电喷雾正离子模式,离子源电压 5 500 V,离子源温度 550 °C,雾化气 379 kPa,辅助气 379 kPa,气帘气 241 kPa,去簇电压 80 V,碰撞能量 35 eV,能量扩展 ±15 eV,TOF-MS 扫描范围 80~1 200, Product Ion 扫描范围 50~1 000。扫描方式为 IDA 模式,开启动态背景扣除(DBS)。采用 AB Sciex 公司的 CDS 质量校正系统在线校正。

1.3.3 数据处理 采取靶向检索与非靶向检索策略相结

合进行火龙果果实样品中 BLs 的筛查与确证。

(1) 靶向检索:通过查询资料和 PubChem、ChemSpider、Nist 等数据库信息,建立包含 102 个 BLs 组分及其生物合成前体物的列表,包括英文名称、CAS 号、分子结构式、分子量、二级碎片离子质荷比(m/z)等信息,将该列表导入 PeakView 软件。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。采集的数据导入 PeakView 进行检索,依据测定相对分子质量与理论精确相对分子质量的偏差小于 5×10^{-6} 的原则以及同位素匹配结果,确定各色谱峰的成分归属,并进一步对二级碎片进行分析,根据碎片离子信息推断各色谱峰所对应未知物的结构,实现样品中 BLs 的筛查与确证。

(2) 非靶向检索:采集的数据导入 PeakView 进行非靶向检索,对检索结果进行分析,如果色谱峰的精确质量数与同位素偏差均小于 5×10^{-6} ,且母离子被打碎生成的二级碎片离子有 BLs 的共有特征离子,如 m/z 551, 389, 345, 507 等,则初步判定该未知物属于 BLs 类化合物,然后根据 PeakView 给出的分子式到 PubChem、ChemSpider、Nist 等数据库中进行检索与分析。

2 结果与分析

2.1 火龙果甜菜苷类色素组分构成

由表 1 可知,3 种类型火龙果果实的果肉、果皮中共鉴定了 19 种 BLs 组分,其中 BCs 和 BXs 分别为 15, 4 种。15 种 BCs 组分分别为:甜菜苷(betainin)、甜菜苷配基(betanidin)、苋菜红苷(amaranthin)、丙二酰甜菜苷(phyllactin)、脱羧丙二酰甜菜苷(decarboxylated phylloactin)、apiosyl-betainin、2'-O-apiosylphyllactin、新丙二酰甜菜苷(neophylloactin)、脱羧新甜菜苷(decarboxylated neobetainin)、千日红苷-III(gomphrenin-III)、6'-O-malonyl-2-decarboxylated-betainin、hylocerenin、2-decarboxylated hylocerenin、2-(5'-O-E-feruloylapiosyl) betainin 和 bougainvillein-R-I。4 种 BXs 组分分别为:梨果仙人掌黄质(indicaxanthin)、3-methoxytyramine-betaxanthin、苯丙氨酸—甜菜黄素[(S)-phenylalanine-betaxanthin]和亮氨酸—甜菜黄素[(S)-leucine-betaxanthin]。

2.2 甜菜红色素的鉴定

BCs 在 ESI⁺ 模式下容易发生中性丢失,有脱羧($[-44]^+$)、脱己糖基($[-162]^+$)、脱丙二酰基($[-86]^+$)、脱羧兼脱 2 个氢($[-46]^+$)等,产生的二级碎片离子中,重要的共有特征离子为 m/z 551($[\text{betainin} + \text{H}]^+$)、507($[\text{betainin} + \text{H} - \text{CO}_2]^+$)、389($[\text{betanidin} + \text{H}]^+$)或($[\text{betanin} + \text{H} - \text{Glu}]^+$)、345($[\text{betanidin} + \text{H} - \text{CO}_2]^+$)、 m/z 551, 389, 345, 507 可以作为推断 BCs 组分的依据^[8,10,20-22]。

未知物结构确证以表 1 中序号 4、保留时间为 2.652 min 的对应色谱峰为例,其二级质谱图如图 1 所示。该未知物母离子($[\text{M} + \text{H}]^+$)为 m/z 637.147 6 ($\text{C}_{27}\text{H}_{28}\text{N}_2\text{O}_{16}^+$),二级碎片离子有 593.157 0, 551.147 4,

表 1 火龙果果实甜菜苷类色素的 UPLC QTOF-MS/MS 鉴定结果[†]
Table 1 Identification results of betalains from pitaya fruits by UPLC QTOF-MS/MS

序号	分子式	分子量/Da	[M+H] ⁺		偏差/ ($\times 10^{-6}$)	二级碎片/Da	保留时间/min	化合物	部位归属					
			理论值	测定值					RR-F	RR-P	RW-F	RW-P	YW-F	YW-P
1	C ₂₄ H ₂₆ N ₂ O ₁₃	550.143 49	551.150 77	551.151 31	1.0	389.096 5, 343.090 9, 150.053 4, 297.086 3, 194.044 1	2.506	甜菜苷	+	+	—	+	—	—
2	C ₁₈ H ₁₆ N ₂ O ₈	388.090 67	389.097 94	389.098 16	0.6	345.101 3, 343.097 8, 297.085 7, 150.053 7	2.508	甜菜苷配基	+	+	—	+	—	—
3	C ₃₀ H ₃₄ N ₂ O ₁₉	726.175 58	727.182 85	727.182 20	−0.9	565.127 7, 310.107 1	3.317	苋菜红苷	+	—	—	—	—	—
4	C ₂₇ H ₂₈ N ₂ O ₁₆	636.143 88	637.151 16	637.153 07	3.0	593.157 0, 551.147 4, 389.094 4, 343.090 1	2.652	丙二酰甜菜苷	+	+	—	+	—	—
5	C ₂₆ H ₂₈ N ₂ O ₁₄	592.154 05	593.161 33	593.161 89	0.9	549.170 7, 389.095 9, 345.107 1, 301.117 5	3.020	decarboxylated phyllactin	+	+	—	+	—	—
6	C ₂₉ H ₃₄ N ₂ O ₁₇	682.185 75	683.193 02	683.193 46	0.6	389.096 5, 551.148 2, 343.091 5, 345.107 0	2.877	apiosyl-betainin	+	—	—	+	—	—
7	C ₃₂ H ₃₆ N ₂ O ₂₀	768.186 14	769.193 42	769.194 10	0.9	389.096 9, 725.201 6	3.213	2'-apiosylphyl- lactin	+	+	—	+	—	—
8	C ₂₇ H ₂₆ N ₂ O ₁₆	634.128 23	635.135 51	635.136 03	0.8	591.145 4, 387.081 8, 341.076 0	3.491	新丙二酰甜菜苷	+	+	—	—	—	—
9	C ₂₃ H ₂₄ N ₂ O ₁₁	504.138 01	505.145 29	505.146 48	2.4	343.092 9, 297.086 5, 255.111 0, 257.127 8	3.130	decarboxylated neobetainin	+	+	—	—	—	—
10	C ₃₄ H ₃₄ N ₂ O ₁₆	726.190 83	727.198 11	727.200 60	3.4	727.199 7, 389.098 4	3.896	千日红苷- III	—	+	—	+	—	—
11	C ₂₆ H ₂₉ N ₂ O ₁₄	593.16188	594.169 16	594.166 46	−4.5	550.171 5, 346.108 9, 345.105 7, 508.159 7	2.653	6'-O-malonyl-2- decarboxylated- betainin	—	+	—	—	—	—
12	C ₃₀ H ₃₄ N ₂ O ₁₇	694.185 75	695.193 02	695.193 64	0.9	389.096 4	3.179	hylocerenin	—	+	—	—	—	—
13	C ₂₉ H ₃₄ N ₂ O ₁₅	650.195 92	651.203 20	651.204 58	2.1	651.203 1, 389.098 1	3.091	2-decarboxylated hylocerenin	—	+	—	+	—	—
14	C ₃₉ H ₄₂ N ₂ O ₂₀	858.233 09	859.240 37	859.242 22	2.2	389.095 7	3.390	2-(5'-O-E-feru- loylapiosyl) bet- ainin	—	+	—	—	—	—
15	C ₃₀ H ₃₆ N ₂ O ₁₈	712.177 24	713.184 52	713.184 91	0.5	389.096 1, 551.146 5	3.660	bougainvillein-R- I	—	+	—	—	—	—

续表 1

序号	分子式	分子 量/Da	[M+H] ⁺		偏差/ (×10 ⁻⁶)	二级碎 片/Da	保留时 间/min	化合物	部位归属					
			理论值	测定值					RR-F	RR-P	RW-F	RW-P	YW-F	YW-P
16	C ₁₄ H ₁₆ N ₂ O ₆	308,100.84	309,108.11	309,108.50	1.3	265.119.2,	1.359	梨果仙人掌黄质	+	—	—	—	—	—
						263.103.8,								
						219.113.1,								
						217.097.7,								
						189.102.9,								
17	C ₁₈ H ₂₀ N ₂ O ₆	360,132.14	361,139.41	361,139.44	0.1	173.108.1,	3.319	3-Methoxytyra- mine-betaxanthin	+	+	—	+	—	—
						145.076.5,								
						106.065.4								
						151.074.4,								
						119.048.1,								
18	C ₁₈ H ₁₈ N ₂ O ₆	358,116.49	359,123.76	359,124.05	0.8	269.126.1,	3.388	苯丙氨酸-甜菜 黄素	+	—	—	—	—	—
						223.122.0,								
						194.095.4,								
						267.112.1,								
						150.053.6,								
19	C ₁₅ H ₂₀ N ₂ O ₆	324,132.14	325,139.41	325,139.59	0.5	104.048.2,	3.105	亮氨酸-甜菜黄 素	—	—	—	—	+	+
						131.058.6								
						191.090.6,								
						307.127.8,								
						173.070.1								

† RR-F 为 RR 果实的果肉; RR-P 为 RR 果实的果皮; RW-F 为 RW 果实的果肉; RW-P 为 RW 果实的果皮; YW-F 为 YW 果实的果肉; YW-P 为 YW 果实的果皮。序号 1~15 为甜菜红色素, 序号 16~19 为甜菜黄色素。

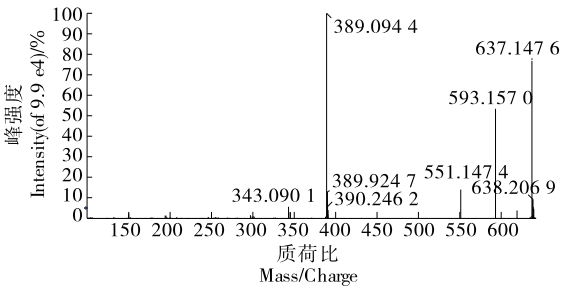


图 1 丙二酰甜菜苷 MS² 谱图
Figure 1 MS² spectrum of phyllocactin

389.094.4, 343.091.6 等, 其中 593.157.0 为母离子丢失 1 分子 CO₂ 所产生([M+H-44]⁺), 551.147.4 为母离子丢失 1 分子丙二酰基所产生([M+H-86]⁺), 389.094.4 为母离子丢失 1 分子己糖基及 1 分子丙二酰基所产生([M+H-162-86]⁺), 343.091.6 为二级碎片 389.094.4 进一步丢失 1 分子 CO₂ 及 2H 所产生([M+H-46]⁺), 因此推断序号 4 未知物为丙二酰甜菜苷(phylllocactin), 其裂解途径见图 2。同理, 对其他未知物的二级碎片离子进行分析, 共鉴定了甜菜苷、苋菜红苷(amaranthin)、脱羧丙二酰甜菜苷(decarboxylated phyllocactin)等 15 种甜菜红类色素。

2.3 甜菜黄色素的鉴定

BXs 与 BCs 结构的基本单元是甜菜醛氨酸(betalamic acid), 二者的离子化模式较为相似, BXs 在

ESI⁺ 模式下同样容易发生中性丢失, 常见的有脱羧([−44]⁺)、脱羧兼脱 1 个氢([−45]⁺)、脱羧兼脱 2 个氢([−46]⁺)、脱 2 个羧基([−88]⁺)、脱 2 个羧基兼 2 个氢([−90]⁺)、脱羟基([−17]⁺)、脱亚甲基([−14]⁺)、脱甲基([−15]⁺)等^[8,10,20-22]。

未知物结构确证以表 1 中序号 16、保留时间为 1.359 min 的色谱峰为例, 其二级质谱图如图 3 所示。该未知物母离子([M+H]⁺)为 m/z 309,108.1(C₁₄H₁₇N₂O₆⁺), 二级碎片离子有 265,119.2, 263,103.8, 219,113.1, 217,097.7 等, 其中 265,119.2 为母离子丢失 1 分子 CO₂ 所产生([M+H-44]⁺), 263,103.8 为母离子丢失 1 分子 CO₂ 和 2H 所产生([M+H-46]⁺), 219,113.1 为二级碎片 263,103.8 进一步丢失 1 分子 CO₂ 所产生([M+H-44]⁺), 217,097.7 为二级碎片 219,113.1 进一步丢失 2H 所产生([M+H-2]⁺), 189,102.9 为二级碎片 219,113.1 进一步丢失 1 分子 CH₂O 所产生([M+H-30]⁺), 173,108.0 为二级碎片 217,097.7 进一步丢失 1 分子 CO₂ 所产生([M+H-44]⁺), 145,076.5 为母离子丢失 1 分子甜菜醛氨酸残基所产生([M+H-164]⁺), 106,065.4 为母离子丢失 1 分子脯氨酸残基及 2 分子 CO₂ 所产生([M+H-115-88]⁺), 因此推断序号 16 未知物为梨果仙人掌黄质(indicaxanthin), 其裂解途径见图 4。同理, 对其他未知物的二级碎片离子进行分析, 共鉴定了梨果仙人掌黄质、3-Methoxytyramine-betaxanthin、苯丙氨酸—

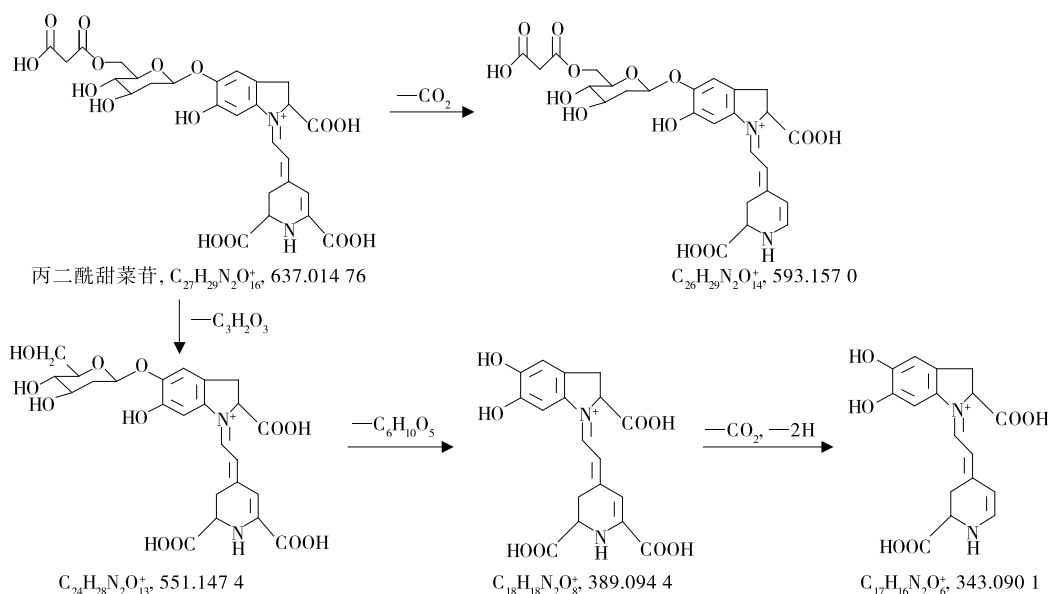
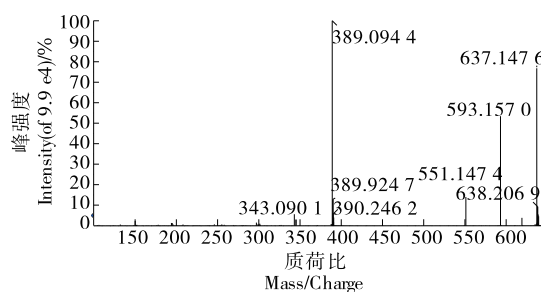


图 2 丙二酰甜菜苷裂解途径

Figure 2 The cleavage pathway of phylloactin

图 3 梨果仙人掌黄质 MS² 谱图Figure 3 MS² spectrum of indicaxanthin

甜菜黄素和亮氨酸—甜菜黄素等 4 种甜菜黄类色素。

2.4 甜菜黄类色素在不同类型果实与部位的分布特征

由图 5 可知,3 种类型火龙果果实中,RR 果实中 BLs 种类最丰富,共鉴定了 18 种组分(15 种 BCs 和 3 种 BXs),包括甜菜苷、甜菜苷配基、苋菜红苷、丙二酰甜菜苷、脱羧丙二酰甜菜苷、apiosyl-betainin、2'-O-apiosylphylloactin、新丙二酰甜菜苷、脱羧新甜菜苷、千日红苷-III、6'-O-malonyl-2-decarboxylated-betainin、hylocerinin、2-decarboxylated hylocerinin、2-(5'-O-E-feruloylapiosyl) betainin、bougainvillein-R-I、梨果仙人掌黄质、3-methoxytyramine-betaxanthin 和苯丙氨酸—甜菜黄素;其次是 RW 果实,鉴定了 9 种组分(8 种 BCs 和 1 种 BXs),包括甜菜苷、甜菜苷配基、丙二酰甜菜苷、脱羧丙二酰甜菜苷、apiosyl-betainin、2'-O-apiosylphylloactin、千日红苷-III、2-decarboxylated hylocerinin 和 3-methoxytyramine-betaxanthin;YW 果实中未发现 BCs,仅鉴定了 1 种 BXs 组分,为亮氨酸—甜菜黄素。

RR 果实的果皮(RR-P)部位鉴定了 BLs 组分 14 种

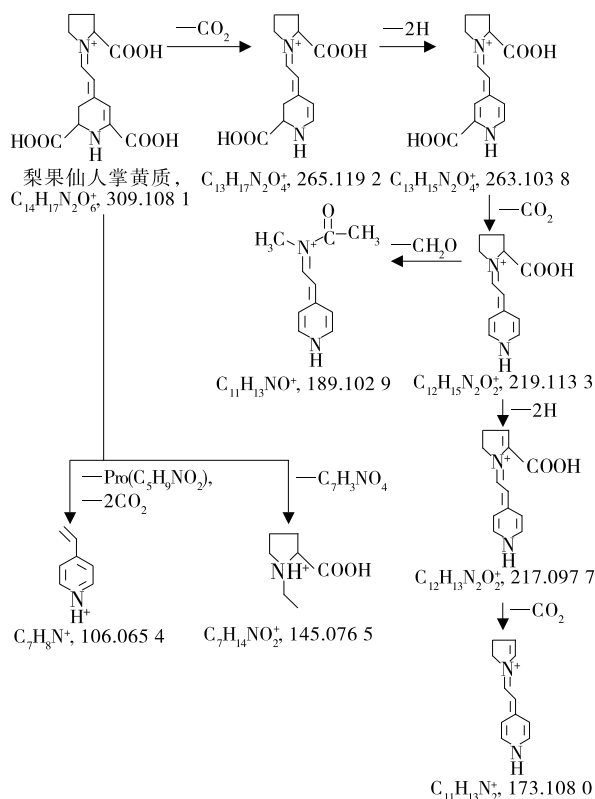


图 4 梨果仙人掌黄质裂解途径

Figure 4 The cleavage pathway of indicaxanthin

(13 种 BCs 和 1 种 BXs),包括甜菜苷、甜菜苷配基、丙二酰甜菜苷、脱羧丙二酰甜菜苷、2'-O-apiosylphylloactin、新丙二酰甜菜苷、脱羧新甜菜苷、千日红苷-III、6'-O-malonyl-2-decarboxylated-betainin、hylocerinin、2-decarboxy-

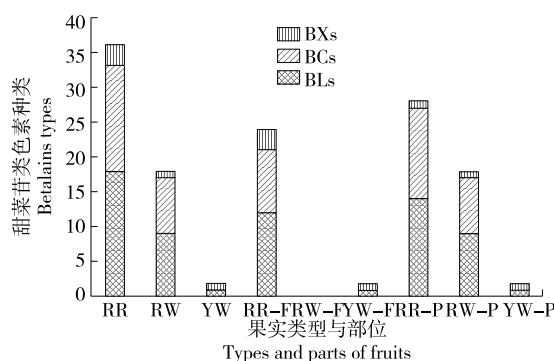


图5 甜菜苷类色素在不同类型果实与部位的分布

Figure 5 Distribution of betalains in types and parts of fruits

lated hydroxyphenyl, 2-(5'-*O*-*E*-feruloylapiosyl) betanin, bougainvillein-*R*-*I* 和 3-methoxytyramine-betaxanthin; 果肉(RR-F)部位 11 种(9 种 BCs 和 3 种 BXs), 包括甜菜苷、甜菜苷配基、苋菜红苷、丙二酰甜菜苷、脱羧丙二酰甜菜苷、apiosyl-betanin、2'-*O*-apiosylphyllactin、新丙二酰甜菜苷、脱羧新甜菜苷、梨果仙人掌黄质、3-methoxytyramine-betaxanthin 和 苯丙氨酸-甜菜黄素。RW 果实的果皮(RW-P)部位鉴定了 BLs 组分 9 种(8 种 BCs 和 1 种 BXs), 包括甜菜苷、甜菜苷配基、丙二酰甜菜苷、脱羧丙二酰甜菜苷、apiosyl-betanin、2'-*O*-apiosylphyllactin、千日红苷-III、2-decarboxylated hydroxyphenyl 和 3-methoxytyramine-betaxanthin; 果肉(RW-F)部位未检测到 BLs 组分。YW 果实的果皮(YW-P)、果肉(YW-F)部位均未检测到 BCs, 仅各检测到 BXs 组分 1 种, 均为亮氨酸-甜菜黄素。

综上, 红皮红肉型和红皮白肉型火龙果中 BLs 种类丰富, 黄皮白肉型则较少; 其次, BLs 主要分布在红色果肉和红色果皮部位, 在白色果肉和黄色果皮部位分布较少。RR 与 RW 为红皮型火龙果, 二者含有共有 BLs 组分, 例如甜菜苷、甜菜苷配基、丙二酰甜菜苷和脱羧丙二酰甜菜苷等, 但是 3 种类型火龙果之间未发现共有 BLs 组分。

3 结论

试验结果表明, 红皮红肉型、红皮白肉型和黄皮白肉型 3 种类型火龙果果实中共鉴定了甜菜苷类色素组分 19 种, 其中甜菜红色素组分 15 种, 甜菜黄色素组分 4 种。红皮红肉型和红皮白肉型火龙果中含有共有组分, 包括甜菜苷、甜菜苷配基、丙二酰甜菜苷和脱羧丙二酰甜菜苷等。甜菜苷类色素在不同类型果实及部位的分布存在差异, 不同类型果实甜菜苷类色素种类丰富程度由高至低依次为红皮红肉型>红皮白肉型>黄皮白肉型, 不同部位则为: 红皮红肉型果皮>红皮红肉型果肉>红皮白肉型果皮>红皮白肉型果肉、黄皮白肉型果皮>黄皮白肉型果肉。研究表明, 甜菜苷类色素具有广泛的生物活性,

而且色泽鲜艳, 既是理想的功能性食品成分, 又是良好的天然植物源着色剂, 在食品、药品、化妆品和宠物食品等行业应用前景广泛, 尤其适于添加到素食人群食品中, 将来可对甜菜苷类色素的制备与应用进行深入研究, 实现火龙果尤其是果皮部位的高值化利用。

参考文献

- [1] ANA S, FRANCI S, ROBERT V, et al. HPLC-MSⁿ identification of betalain profile of different beetroot (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris*) parts and cultivars[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80: C1 952-C1 958.
- [2] KHAN M I, GIRIDHAR P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry[J]. *Phytochemistry*, 2015, 117: 267-295.
- [3] 李洪立, 胡文斌, 洪青梅, 等. 30 份火龙果种质资源收集保存与初步鉴定评价[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(11): 2 034-2 039. LI Hong-li, HU Wen-bin, HONG Qin-mei, et al. Collection and evaluation of 30 accessions of pitaya germplasm resources [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(11): 2 034-2 039.
- [4] POLTURAK G, AHARONI A. "La Vie en Rose": Biosynthesis, sources, and applications of betalain pigments[J]. *Molecular Plant*, 2018, 11(1): 7-22.
- [5] FERNANDO G H, FRANCISCO G C. Biosynthesis of betalains: Yellow and violet plant pigments[J]. *Trends in Plant Sciences*, 2013, 18: 334-343.
- [6] PATRICIA E, FLORIAN C S, REINHOLD C. Pigment pattern and expression of colour in fruits from different *Hylocereus* sp. genotypes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, 8(3): 451-457.
- [7] HUA Qing-zhu, CHEN Can-bin, ZUR T N, et al. Metabolomic characterization of pitaya fruit from three red-skinned cultivars with different pulp colors[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 126: 117-125.
- [8] DONG H S, SUNMIN L, DO Y H, et al. Metabolite profiling of red and white pitayas (*Hylocereus polyrhizus* and *Hylocereus undatus*) for comparing betalain biosynthesis and antioxidant activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(34): 8 764-8 771.
- [9] GREGORY J H, ALAN L. The betalain secondary metabolic network[M]. New York: Springer-Verlag, 2015: 127-140.
- [10] SLIMEN I B, NAJAR T, ABDERRABBA M. Chemical and antioxidant properties of betalains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65: 675-689.
- [11] MARIA G P L, FELIPE G O, BLANCA E B H, et al. Comparative analysis of betalain content in *Stenocereus Stellatus* fruits and other cactus fruits using principal component analysis[J]. *International Journal of Food Properties*, 2016, 19: 326-338.
- [12] TOMASZ S, NATALIA B, WIESLAW W. Betalain profile, content and antioxidant capacity of red beetroot dependent on the genotype and root part[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 27: 249-261.

(下转第 32 页)

- KUROKI Y, et al. Flaxseed oil intake reduces serum small dense low-density lipoprotein concentrations in Japanese men: A randomized, double blind, crossover study[J]. *Nutr J*, 2015, 14(1): 39-48.
- [11] JANGALE N M, DEVARSHI P P, BANSODE S B, et al. Dietary flaxseed oil and fish oil ameliorates renal oxidative stress, protein glycation, and inflammation in streptozotocin-nicotinamide-induced diabetic rats[J]. *J Physiol Biochem*, 2016, 72(2): 327-336.
- [12] ALBRECHT T A, ANDERSON J G, JONES R, et al. A complementary care study combining flaxseed oil, caffeine, fasting, and exercise in women diagnosed with advanced ovarian cancer: Findings from a case study[J]. *Holist Nurs Pract*, 2012, 26(6): 308-316.
- [13] BOMMAREDDY A, ARASADA B L, MATHEES D P, et al. Chemopreventive effects of dietary flaxseed on colon tumor development[J]. *Nutr Cancer*, 2006, 54(2): 216-222.
- [14] CHEN Jiun-rong, CHEN Ya-ling, PENG Hsiang-chi, et al. Fish oil reduces hepatic injury by maintaining normal intestinal permeability and microbiota in chronic ethanol-fed rats[J]. *Gastroenterol Res Pract*, 2016, 2016: 1-10.
- [15] 李俊芳, 马永昆, 张荣, 等. 不同果桑品种成熟桑椹的游离氨基酸主成分分析和综合评价[J]. *食品科学*, 2016, 37(14): 132-137.
- LI Jun-fang, MA Yong-kun, ZHANG Rong, et al. Principal components analysis and comprehensive evaluation of free amino acids in ripe fruits of different mulberry varieties[J]. *Food Science*, 2016, 37(14): 132-137.
- [16] GAO Bo-yan, LU Ying-jian, SHENG Yi, et al. Differentiating organic and conventional sage by chromatographic and mass spectrometry flow injection fingerprints combined with principal component analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(12): 2957-2963.
- [17] 王馨雨, 王蓉蓉, 杨绿竹, 等. 不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(12): 211-220.
- WANG Xin-yu, WANG Rong-rong, YANG Lü-zhu, et al. Principal component analysis and cluster analysis of free amino acids composition of different species and inner and outer lily bulbs[J]. *Food Science*, 2020, 41(12): 211-220.
- [18] 荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳, 等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. *食品科学*, 2020, 41(24): 179-184.
- JING Rui-yong, WEI Jia-qi, WANG Li-yan, et al. Comprehensive quality evaluation of different rice varieties based on principal component analysis[J]. *Food Science*, 2020, 41(24): 179-184.
- [19] 王丽艳, 荆瑞勇, 郭永霞, 等. 基于氨基酸含量的市售 14 种食用蘑菇的综合评价[J]. *食品科学*. (2020-04-27) [2021-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200427.1626.026.html>.
- WANG Li-yan, JING Rui-yong, GUO Yong-xia, et al. Comprehensive evaluation of 14 mushroom species from market based on amino acid content[J]. *Food Science*. (2020-04-27) [2021-02-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200427.1626.026.html>.
- [20] 郭嘉贵, 石树磊, 谢滔, 等. 基于主成分分析的黑龙江省不同来源地黑木耳营养品质评价[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(6): 94-100.
- GUO Jia-gui, SHI Shu-lei, XIE Tao, et al. Evaluation of *Auricularia auricula-judae* nutrient quality of different origins in Heilongjiang province based on principal component analysis[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(6): 94-100.
- (上接第 25 页)
- [13] KHAN M I. Plant betalains: Safety, antioxidant activity, clinical efficacy, and bioavailability[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15: 316-330.
- [14] YONG Y Y, DYKES G, LEE S M, et al. Comparative study of betacyanin profile and antimicrobial activity of red pitahaya (*Hylocereus polyrhizus*) and red spinach (*Amaranthus dubius*) [J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2017, 72: 41.
- [15] LIRA S M, DIONÍSIO A P, HOLANDA M O, et al. Metabolic profile of pitaya (*Hylocereus polyrhizus* (F.A.C. Weber) Britton & Rose) by UPLC-QTOF-MS^E and assessment of its toxicity and anxiolytic-like effect in adult zebrafish[J]. *Food Research International*, 2020, 127: 108701.1-108701.10.
- [16] LETICIA G C, MONTSERRAT D, CELESTINO S B, et al. Beta-lains and phenolic compounds profiling and antioxidant capacity of pitaya (*Stenocereus* spp.) fruit from two species (*S. Pruinus* and *S. stellatus*) [J]. *Food Chemistry*, 2017, 234(1): 111-118.
- [17] LILIA V C, SALVADOR V G, FERNANDO M B, et al. Encapsulation and pigmentation potential of betalains of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruit[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55: 2436-2445.
- [18] ANA C V L, ANA P D, FERNANDO A P A, et al. Microfiltered red-purple pitaya colorant: UPLC-ESI-QTOF-MSE-based metabolic profile and its potential application as a natural food ingredient[J]. *Food Chemistry*, 2020, 330: 127222.
- [19] 田艳, 段晓嫣, 邓放明. 纤维素酶协同超声辅助乙醇提取红肉火龙果色素工艺的优化[J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 173-180.
- TIAN Yan, DUAN Xiao-yan, DENG Fang-ming. Optimization on extracting process for red meat pitaya pigment assisted with enzymatic-ultrasonic by response surface methodology[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(9): 173-180.
- [20] DIETER S, THOMAS V, WILLIBALD S. Recent advances in betalain research[J]. *Phytochemistry*, 2003, 62: 247-269.
- [21] TOMAS G C, ANDREA G M, DANIEL G, et al. Characterization and quantification of individual betalain and phenolic compounds in Mexican and Spanish prickly pear (*Opuntia ficus-indica* L. Mill) tissues: A comparative study[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2019, 76: 1-13.
- [22] WU Ya-wei, XU Juan, HE Yi-zhong, et al. Metabolic profiling of pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) during fruit development and maturation[J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1114. 1-16.