

‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中 5种酚类物质含量的研究

孙 权¹, 范 青¹, 赵志磊², 李 程¹, 李 杰¹, 顾玉红^{1*}, 郭素萍³

(1. 河北农业大学生命科学学院, 保定 071001; 2. 河北大学质量技术监督学院, 保定 071002;

3. 河北农业大学林学院, 保定 071001)

摘 要: **目的** 研究‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓不同发育时期果实的5种酚类物质含量变化规律。**方法** 采用高效液相色谱法, 选择C₁₈色谱柱(200 mm×4.6 mm, 5 μm), 以乙腈和0.5%乙酸水溶液为流动相进行梯度洗脱, 对两品种红树莓4个发育时期果实(青果、黄果、红果、深红果)中咖啡酸、阿魏酸、儿茶素、表儿茶素和芦丁的含量进行分析测定; 检测波长为280 nm, 流速为0.8 mL/min, 柱温为25 °C。**结果** 红树莓从青果发育到深红果的过程中, ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的咖啡酸含量均呈先下降后上升的趋势, 深红果的咖啡酸含量最高, 最高值分别为16.383、60.815 mg/100 g FW, ‘托拉蜜’深红果的咖啡酸含量极显著高于‘菲尔杜德’($P<0.01$); 两品种的阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁含量均呈下降趋势, 均为青果的含量最高, 阿魏酸最高含量分别为163.752和143.148 mg/100 g FW, 儿茶素最高含量分别为543.915和139.058 mg/100 g FW, 表儿茶素最高含量分别为2.079和1.603 mg/100 g FW, 芦丁最高含量分别为0.906和0.651 mg/100 g FW。‘菲尔杜德’青果的阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁含量极显著高于‘托拉蜜’青果($P<0.01$)。**结论** 在‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中, 5种酚类物质的含量变化规律在两品种间一致, 采摘‘菲尔杜德’青果时期的果实可得到最高含量的阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁, 采摘‘托拉蜜’深红果时期的果实可得到最高含量的咖啡酸。本研究为更好地利用其酚类物质研发营养保健食品及药物提供了理论依据。

关键词: 红树莓; 果实; 发育; 酚类物质; 咖啡酸; 阿魏酸; 儿茶素

Study on the content of 5 kinds of phenolic compounds during the fruit development of red raspberry ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’

SUN Quan¹, FAN Qing¹, ZHAO Zhi-Lei², LI Cheng¹, LI Jie¹, GU Yu-Hong^{1*}, GUO Su-Ping³

(1. College of Life Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China; 3. Forestry College, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

ABSTRACT: Objective To study the change rules of 5 kinds of phenolic compounds content of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ red raspberry fruits during different development. **Methods** The content of caffeic acid, ferulic acid, catechin, epicatechin and rutin in 4 developmental stages fruits (green fruit, yellow fruit, red fruit and dark red

基金项目: 河北省重点研发计划项目(20326338D)

Fund: Supported by the Key Research and Development Plan Project of Hebei Province (20326338D)

*通信作者: 顾玉红, 博士, 教授, 主要研究方向为植物发育生物学的研究。E-mail: gyhshengwu@163.com

*Corresponding author: GU Yu-Hong, Ph.D, Professor, College of Life Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China. E-mail: gyhshengwu@163.com

fruit) of 2 varieties of red raspberry was analyzed and determined simultaneously by high performance liquid chromatography on a C₁₈ column (200 mm×4.6 mm, 5 μm), using acetonitrile and 0.5% acetic acid aqueous solution as mobile phases for gradient elution. The detection wavelength was 280 nm, the flow rate was 0.8 mL/min, and the column temperature was 25 °C. **Results** During the development of red raspberry from green fruit to dark red fruit, the content of caffeic acid in ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ showed a trend of falling firstly and then rising, the content of caffeic acid in dark red fruit was the highest, with the highest values being 16.383 and 60.815 mg/100 g FW, respectively. The content of caffeic acid in ‘Tulameen’ dark red fruit was significantly higher than that in ‘Fertod Zamatos’ ($P<0.01$); the content of ferulic acid, catechin, epicatechin and rutin of 2 varieties showed a downward trend, and the content of green fruit was the highest, the highest content of ferulic acid was 163.752 and 143.148 mg/100 g FW, respectively, the highest content of catechin was 543.915 and 139.058 mg/100 g FW, respectively, the highest content of epicatechin was 2.079 and 1.603 mg/100 g FW, respectively, and the highest content of rutin was 0.906 and 0.651 mg/100 g FW, respectively. The content of ferulic acid, catechin, epicatechin and rutin in ‘Fertod Zamatos’ green fruit was significantly higher than that in ‘Tulameen’ green fruit ($P<0.01$). **Conclusion** During the fruit development of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ red raspberries, the content variation of five phenolics is consistent between 2 varieties, the highest content of ferulic acid, catechin, epicatechin and rutin can be obtained from the fruits of ‘Fertod Zamatos’ green fruit period, and the highest content of caffeic acid can be obtained from the fruits of ‘Tulameen’ dark red fruit period. This study provides a theoretical basis for making better use of its phenolic compounds to develop nutritional and health food and drugs.

KEY WORDS: red raspberry; fruit; development; phenolic compounds; caffeic acid; ferulic acid; catechin

0 引言

红树莓(*Rubus idaeus* L.)又名覆盆子、山莓果、马林果、悬钩子、托盘等,是蔷薇科(Rosaceae)悬钩子属(*Rubus* L.)木本药食同源植物,被誉为“黄金水果”和“癌症的克星”^[1],树莓除鲜食外,可生产各种高档食品,如果汁、果粉、果酒、果酱及树莓口服液等保健食品。《中国药典》中记载,夏初由绿变绿黄的未成熟覆盆子果实性甘、温,有益肾缩尿、养肝明目的功效,可作为中草药使用。现代研究表明,红树莓全果或果肉中的多酚提取物可减轻肥胖^[2],红树莓成熟果富含花青素和鞣花单宁^[3-4]等抗氧化酚类物质,这些酚类物质主要通过莽草酸途径合成,咖啡酸、阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁这5种酚类物质均为该途径中间产物,药效实验表明,儿茶素可以抗衰老^[5]、抗癌、维持尿酸代谢平衡、减弱苯并[a]芘诱导的肾毒性^[6]、通过抗氧化活性保护眼睛^[7]和治疗眼疾^[8];阿魏酸具有清除自由基、消除甲氨蝶呤引起的肝毒性、抵抗急性肝损伤^[9]、保护肝脏^[10]、治疗干眼综合征、防辐射^[11]等功效;咖啡酸能促进伤口愈合、预防心肌梗死^[12]、抑制食管鳞状细胞癌 KYSE150 细胞增殖、迁移及侵袭^[13];表儿茶素具有抗炎、抗氧化^[14]、抗肥胖、减轻脂多糖诱导的急性肺损伤的炎症反应^[15]等功效;芦丁具有抗肿瘤^[16]、减轻神经毒性^[17]、降低血糖^[18]和胆固醇^[19]等医疗价值。目前,已有研究阐明了桑葚^[20]、刺梨^[21]、油桃^[22]、葡萄^[23]、火龙果^[24]等的酚类物质含量

与果实发育时期有关,为这些果实的开发利用提供了重要依据。‘菲尔杜德’(Fertod Zamatos)红树莓的果实品质及栽培适应性良好,‘托拉蜜’(Tulameen)红树莓的果实产量高、果个大、品质优良、适合加工及鲜食,这两个品种红树莓果实不同发育时期的酚类物质含量尚不明确,制约其营养保健价值及药用价值的开发利用。本研究以‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’2个红树莓品种为材料,利用高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)研究并阐明红树莓果实发育过程中5种酚类物质含量及其变化规律,为适时采收‘菲尔杜德’‘托拉蜜’红树莓果实,进而对其更好地利用开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓的青果、黄果、红果、深红果采自河北省邢台市红树莓基地,经液氮速冻后,−80 °C冻存备用。

阿魏酸(纯度≥99%,美国 Fluka 公司);咖啡酸(纯度≥98%)、儿茶素(纯度≥90%)、表儿茶素(纯度≥90%)、芦丁(纯度≥99%)(美国 Sigma 公司);乙腈(色谱纯)、乙酸(优级纯)(天津市康科德科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Waters 4525 高效液相色谱仪(美国沃特世公司);

OHAUS CP114 电子天平(上海奥豪斯仪器有限公司); SB-5200DTDN 超声波清洗机(宁波新芝生物科技股份有限公司); Thermo scientific ST 8R 离心机(德国赛默飞世尔有限公司); Agilent TC-C₁₈ 柱(200 mm×4.6 mm, 5 μm, 美国 Agilent 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

称 0.500 g 果肉, 充分研磨, 用 5 mL 甲醇溶液(pH 2) 转至 10 mL 刻度试管, 45 °C下, 分别超声提取 40 min, 冷却至室温, 加提取液至刻度, 10000 r/min 离心 20 min, 取上清液, 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 滤液供 HPLC 分析, 重复 3 次。根据标准曲线计算出样品中 5 种多酚物质的含量。

1.3.2 标准溶液的配制

精确称量咖啡酸、阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁标准品各 0.001 g 于 100 mL 容量瓶中, 用甲醇溶液(pH 2.0) 定容, 用母液稀释为 2、4、6、8、10 μg/mL, 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 绘制质量浓度(X, μg/mL)与峰面积 Y 的标准曲线, 求出相关系数(r^2)。

1.3.3 色谱条件

色谱柱: 色谱柱为 Agilent TC-C₁₈ 柱(200 mm×4.6 mm, 5 μm), 柱温 25 °C; 流动相: A 为乙腈, B 为 0.5%乙酸水, 梯度洗脱(表 1), 流速: 0.8 mL/min, 进样量 20 μL, 检测波长 280 nm, 外标法定量。

表 1 流动相梯度设置 Table 1 Setting of mobile phase gradient		
时间/min	0.5%乙酸水/%	乙腈/%
0	95.0	5.0
14	85.9	14.1
40	60.5	39.5
50	95.0	5.0
55	95.0	5.0

1.4 数据处理

所有指标重复测量 3 次, 使用 Excel 软件进行数据统计及作图, 使用 SPSS 19.0 软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 标准曲线的绘制

分别测定咖啡酸、阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁 5 个标准品的 5 个质量浓度梯度的峰面积, 绘制了质量浓度与峰面积的标准曲线, 回归方程、相关系数和线性范围如表 2 所示, 相关系数 r^2 均大于等于 0.9972, 表明酚类物质的标准曲线可靠, 可准确计算酚类物质的含量。

表 2 5 种酚类物质的标准曲线
Table 2 Standard curves for 5 kinds of phenolic compounds

酚类物质	回归方程	线性范围 (μg/mL)	相关系数 (r^2)
咖啡酸	$Y=8900.50X-2409.30$	0~10	0.9976
阿魏酸	$Y=2258.70X-4605.60$	0~10	0.9975
儿茶素	$Y=1002.50X-479.17$	0~10	0.9979
表儿茶素	$Y=3169.40X-13508.00$	0~10	0.9979
芦丁	$Y=1293375.40X-821351.50$	0~10	0.9972

2.2 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中 5 种酚类物质含量的研究

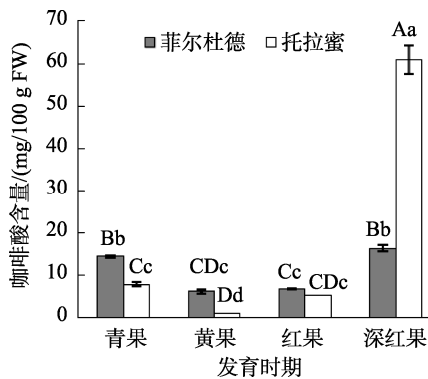
2.2.1 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中咖啡酸含量的变化

由图 1 可知, 红树莓果实发育过程中, ‘菲尔杜德’的咖啡酸含量从青果至黄果时期下降 56.80%, 从黄果至红果时期上升 11.06%, 从红果至深红果时期上升 136.85%, 在深红果时期达到最高值, 为 16.383 mg/100 g FW, 与青果时期差异不显著($P>0.05$), 极显著高于黄果、红果($P<0.01$), 分别是青果、黄果、红果的 1.14、2.63、2.37 倍; ‘托拉蜜’的咖啡酸含量从青果至黄果时期下降 87.08%, 从黄果至红果时期上升 431.67%, 从红果至深红果时期上升 1018.13%, 在深红果时期达到最高值, 为 60.815 mg/100 g FW, 极显著高于青果、黄果和深红果($P<0.01$), 分别是青果、黄果、红果的 7.68、59.45、11.18 倍。‘菲尔杜德’青果、黄果咖啡酸含量极显著高于‘托拉蜜’($P<0.01$), ‘托拉蜜’深红果的咖啡酸含量极显著高于‘菲尔杜德’($P<0.01$)。综上所述, 采摘 ‘托拉蜜’深红果时期的果实可得到高含量的咖啡酸。‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的咖啡酸含量在果实发育过程中变化趋势相同, 均呈先下降再上升趋势。目前对咖啡酸随着果实发育时期含量变化的研究鲜有报道, 赵金伟等^[25]研究表明苹果梨的咖啡酸含量在发育过程中呈下降趋势, 这与本研究趋势不一致, 可能是由于红树莓是浆果类植物, 苹果、梨是仁果类植物。

2.2.2 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中阿魏酸含量的变化

由图 2 可知, 红树莓果实发育过程中, ‘菲尔杜德’从青果至深红果时期的阿魏酸含量呈逐渐下降趋势, 由 163.752 mg/100 g FW 下降至 8.048 mg/100 g FW, 下降 95.09%, 在青果时期的阿魏酸含量最高, 极显著高于其他 3 个时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果的 2.33、2.73、20.35 倍; ‘托拉蜜’从青果至深红果时期的阿魏酸含量呈逐渐下降趋势, 由 143.148 mg/100 g FW 下降至 29.841 mg/100 g FW, 下降 79.15%, 在青果时期的阿魏酸含量最高, 极显著高于其他 3 个时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果的 2.36、3.33、4.80 倍。‘菲尔杜德’的青果和红果的阿

阿魏酸含量极显著高于‘托拉蜜’($P<0.01$), ‘托拉蜜’的深红果的阿魏酸含量极显著高于‘菲尔杜德’($P<0.01$)。综上所述, 采摘‘菲尔杜德’青果时期的果实可以得到高含量的阿魏酸。‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的阿魏酸含量在果实发育过程中变化趋势相同, 均呈现下降趋势, 这与沈静等^[26]研究的灵武长枣中阿魏酸含量随着果实成熟度的增加而逐渐下降的趋势一致。5 种酚类物质中, 阿魏酸在发育过程中的含量仅低于儿茶素, 是本研究中红树莓青果时期含量最高的酚酸类物质。



注: 柱上面标注小写字母不同时, 表示差异达到显著性水平, $P<0.05$; 柱上面标注大写字母不同时, 表示差异达到极显著性水平, $P<0.01$; 柱上面标注相同小写字母时, 表示差异不显著, $P>0.05$; 下同。

图 1 不同发育时期‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实中的咖啡酸含量($n=3$)

Fig.1 Caffeic acid content in red raspberries of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ at different developmental stages ($n=3$)

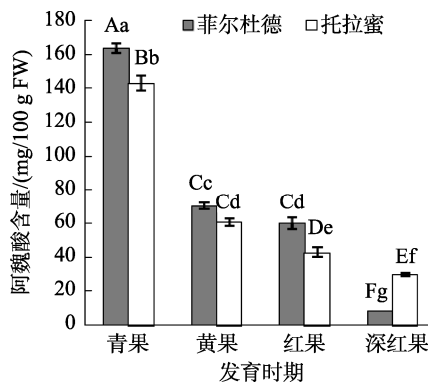


图 2 不同发育时期‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实中的阿魏酸含量($n=3$)

Fig.2 Ferulic acid content in red raspberries of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ at different developmental stages ($n=3$)

2.2.3 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中儿茶素含量的变化

由图 3 可知, 红树莓果实发育过程中, ‘菲尔杜德’从青果至深红果时期的儿茶素含量呈逐渐下降趋势, 由 543.915 mg/100 g FW 下降至 11.429 mg/100 g FW, 下降了

97.90%, 在青果时期的儿茶素含量最高, 极显著高于其他 3 个时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果含量的 10.60、10.74、47.59 倍; ‘托拉蜜’从青果至深红果时期的儿茶素含量呈逐渐下降趋势, 由 139.058 mg/100 g FW 下降至 15.164 mg/100 g FW, 下降 89.10%, 在青果时期的儿茶素含量最高, 极显著高于其他 3 个时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果含量的 3.92、4.33、9.17 倍。‘菲尔杜德’青果的儿茶素含量极显著高于‘托拉蜜’($P<0.01$), 两品种其他 3 个时期的儿茶素含量差异不显著($P>0.05$)。综上所述, 采摘‘菲尔杜德’青果时期的果实可以得到高含量的儿茶素。‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的儿茶素含量在果实发育过程中变化趋势相同, 均呈现下降趋势, 与‘六月白’桃^[27]和枣^[28]果实中测得的儿茶素含量随着果实成熟度的增加而逐渐降低的趋势一致。本研究表明, 在两个红树莓品种的 5 种酚类物质中, ‘菲尔杜德’青果时期的儿茶素含量最高且极显著高于其他 4 种酚类物质在两品种的 4 个果实发育时期的含量($P<0.01$)。

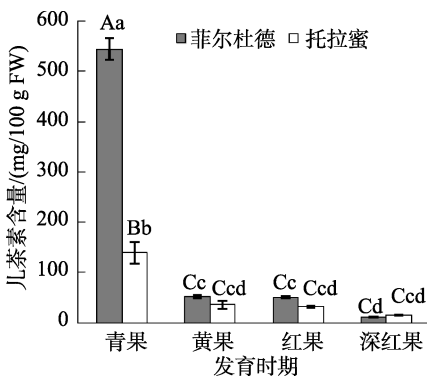


图 3 不同发育时期‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实中的儿茶素含量($n=3$)

Fig.3 Catechin content in red raspberries of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ at different developmental stages ($n=3$)

2.2.4 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中表儿茶素含量的变化

由图 4 可知, 红树莓果实发育过程中, ‘菲尔杜德’从青果至深红果时期的表儿茶素含量呈现逐渐下降的趋势, 由 2.079 mg/100 g FW 下降至 0.748 mg/100 g FW, 下降了 64.02%, 在青果时期的表儿茶素含量最高, 极显著高于黄果、红果和深红果时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果的 1.46、1.97、2.78 倍; ‘托拉蜜’从青果至深红果时期的表儿茶素含量呈逐渐下降趋势, 由 1.603 mg/100 g FW 下降至 0.724 mg/100 g FW, 下降了 54.83%, 在青果时期的表儿茶素含量最高, 与黄果时期差异不显著($P>0.05$), 极显著高于红果和深红果时期($P<0.01$), 分别是黄果、红果、深红果的 1.15、1.71、2.21 倍。‘菲尔杜德’果实的表儿茶素含量整体高于‘托拉蜜’果实, 且在青果时期差异极显著($P<0.01$)。综上所述, 采摘‘菲尔杜德’青果时期的果实可以

得到高含量的表儿茶素。‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的表儿茶素含量在果实发育过程中的变化趋势相同,均呈现下降趋势,这一结果与‘久保桃’^[27]的相关研究一致。研究表明,表儿茶素是引起果实涩感的重要物质^[29],随着果实成熟度的增加,儿茶素含量逐渐降低,果实涩味也随之减弱,利于食用。

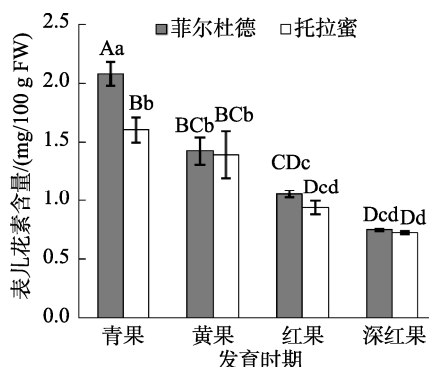


图4 不同发育时期‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实中的表儿茶素含量(n=3)

Fig.4 Epicatechin content in red raspberries of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ at different developmental stages (n=3)

2.2.5 ‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中芦丁含量的变化

由图5可知,红树莓果实发育过程中,‘菲尔杜德’从青果至深红果时期的芦丁含量呈逐渐下降趋势,由0.906 mg/100 g FW下降至0.641 mg/100 g FW,下降29.25%,在青果时期的芦丁含量最高,与黄果差异不显著($P>0.05$),极显著高于红果和深红果($P<0.01$),分别是黄果、红果、深红果的1.03、1.19、1.41倍;‘托拉蜜’的芦丁含量从青果至深红果时期虽然呈逐步下降趋势,但是变化幅度很小,由0.651 mg/100 g FW下降至0.640 mg/100 g FW,下降了1.69%,分别是黄果、红果、深红果含量的1.01、1.01、1.02倍,4个发育时期的差异均不显著($P>0.05$),芦丁含量变化基本趋于稳定。通过对两个品种的比较分析可知,‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’的芦丁含量在果实发育过程中均呈现下降趋势,但是‘菲尔杜德’较‘托拉蜜’的芦丁含量变化幅度大,其芦丁含量极显著高于除‘托拉蜜’深红果之外的其他时期($P<0.01$),所以,采摘‘菲尔杜德’青果时期的果实可以得到高含量的芦丁。谢敏^[30]研究了‘金魁’、‘赣猕6号’、‘红阳’3个品种猕猴桃果实随着发育时期芦丁含量的变化,其中,‘红阳’猕猴桃果实的芦丁含量在发育过程中呈下降趋势,‘金魁’和‘赣猕6号’两个品种猕猴桃则呈现出降-升-降-升-降的波动趋势,但是‘金魁’的波动范围较小,趋于平稳,即同一物种内不同品种间的树莓果实、猕猴桃果实的芦丁含量变化存在一些差异,可能是因为芦丁生物合成通路相关基因的表达情况与品种密切相关,还有待于进一步研究。

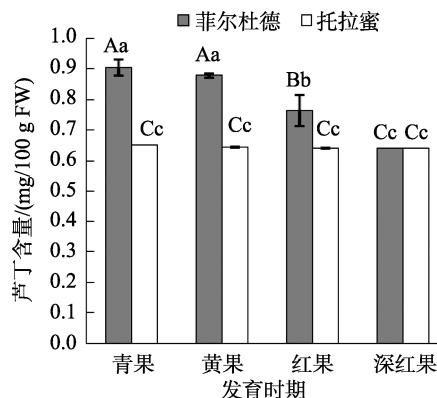


图5 不同发育时期‘菲尔杜德’和‘托拉蜜’红树莓果实中的芦丁含量(n=3)

Fig.5 Rutin content in red raspberries of ‘Fertod Zamatos’ and ‘Tulameen’ at different developmental stages (n=3)

3 结论与讨论

植物体内酚类物质的含量与发育时期密切相关。本研究表明‘菲尔杜德’与‘托拉蜜’红树莓果实的阿魏酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁含量均随果实成熟度的增加而下降,均在青果时期含量最高,这可能是由于酚类物质对植物具有保护作用,所以,在易受侵害的幼果时期酚类物质含量高,即在青果时期采摘‘菲尔杜德’‘托拉蜜’果实可以获得高含量的酚类物质;两品种红树莓果实的咖啡酸含量则呈先下降后上升的趋势,在深红果时期含量最高,这可能与发生了物质转化有关,酚类物质含量的变化主要与其合成途径有关,苯丙烷代谢途径中香豆酸在合成咖啡酸后继而合成阿魏酸,在红树莓发育过程中,阿魏酸含量不断降低,咖啡酸含量虽在黄果时期稍有下降,然后不断升高,这可能是由于随着果实成熟度的增加抑制了咖啡酸向阿魏酸的转化,而造成阿魏酸含量下降,咖啡酸含量积累;此外,红树莓青果的儿茶素和阿魏酸含量高于咖啡酸、表儿茶素、芦丁含量,而现代医学研究表明儿茶素和阿魏酸对肝、肾、眼都有保护作用,因而推测红树莓青果富含的儿茶素和阿魏酸可能是《中国药典》中记载的“未成熟覆盆子果实具有益肾缩尿、养肝明目”的功效成分,关于这一点还需要进一步研究。总的来说,本研究阐明了‘菲尔杜德’与‘托拉蜜’红树莓果实发育过程中阿魏酸、咖啡酸、儿茶素、表儿茶素、芦丁含量的变化规律,为红树莓的适时采收进而制作成酚类物质含量高的功能性食品和药品提供重要的理论依据。目前缺乏红树莓中酚类物质含量随着果实发育时期变化的分子机制方面的研究,还有待于进一步探讨。

参考文献

- [1] 侯帅. 寒地树莓不同品种生物学特性及产量品质性状研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.

- HOU S. Study on the biological characteristics and yield and quality traits of different raspberry varieties in cold region [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [2] XIAN YB, FAN R, SHAO J, *et al.* Polyphenolic fractions isolated from red raspberry whole fruit, pulp, and seed differentially alter the gut microbiota of mice with diet-induced obesity [J]. *J Funct Foods*, 2021, 76: 104288.
- [3] WILLIAM M, JENNIFER M, MICHAEL EJL, *et al.* Ellagitannins, flavonoids, and other phenolics in red raspberries and their contribution to antioxidant capacity and vasorelaxation properties [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50(18): 5191–5196.
- [4] OLIVEIRA BD', RODRIGUES AC, CARDOSO BMI, *et al.* Antioxidant, antimicrobial and anti-quorum sensing activities of *Rubus rosaefolius* phenolic extract [J]. *Ind Crop Prod*, 2016, 84: 59–66.
- [5] 郝婕, 韩沫, 司贺龙, 等. 金丝小枣中多酚类物质的分离纯化研究[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(4): 30–35.
- HAO J, HAN M, SI HL, *et al.* Study on separation and purification of the polyphenols extracts from *Ziziphus jujuba* Mill. 'jinsixiaozao' [J]. *J Hebei Agric Univ*, 2014, 37(4): 30–35.
- [6] SAMAH AK, WAFAA FW, NERMIN R, *et al.* Modulatory effects of catechin hydrate on benzo[a]pyrene-induced nephrotoxicity in adult male albino rats [J]. *Toxicol Res-UK*, 2021, 10(3): 542–550.
- [7] ON CK, PING CK, CHIU WC, *et al.* Green tea catechins and their oxidative protection in the rat eye [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(3): 1523–1534.
- [8] IHSANA H, RAHMIA N. Skrining fitokimia dan aktivitas antibakteri dari daun bamban (*Donax canniformis*) untuk formulasi obat dari bahan alam [J]. *J Riset Industri Hasil Hutan*, 2017, 9(1): 29–40.
- [9] 傅爱, 徐甜甜, 杨贞, 等. 阿魏酸抑制 p38 MAPK 保护棕榈酸诱导的肝细胞脂毒性[J]. 中国临床药理学与治疗学, 2021, 26(2): 137–143.
- FU AI, XU TT, YANG Z, *et al.* Ferulic acid protects palmitic acid-induced lipotoxicity in hepatocytes via inhibiting p38MAPK [J]. *China J Chin Pharmacol Ther*, 2021, 26(2): 137–143.
- [10] MOZHDEH R, HEIBATULLAH K, MOHAMMAD JK, *et al.* Alleviation of liver dysfunction, oxidative stress and inflammation underlies the protective effect of ferulic acid in methotrexate-induced hepatotoxicity [J]. *Drug Des Dev Ther*, 2020, 14: 1933–1941.
- [11] 洪倩, 高月, 马增春. 阿魏酸抗辐射活性及其作用机制研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2012.
- HONG Q, GAO Y, MA ZC. The anti-radiation effect and mechanism of ferulic acid [D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2012.
- [12] KUMURAN KS, PRINCE PSM. Caffeic acid protects rat heart mitochondria against isoproterenol-induced oxidative damage [J]. *Cell Stress Chaperon*, 2004, 24(2): 133–150.
- [13] 孙晓萌, 齐义军, 高社干. 咖啡酸对食管鳞状细胞癌 KYSE150 细胞增殖、迁移、侵袭及裸鼠移植瘤生长的影响[J]. 郑州大学学报(医学版), 2020, 55(4): 450–453.
- SUN XM, QI YJ, GAO SG. Effects of caffeic acid on proliferation, migration and invasion of KYSE150 cells and growth of subcutaneous tumors in nude mice [J]. *J Zhengzhou Univ (Med Sci Ed)*, 2020, 55(4): 450–453.
- [14] 黄仁术, 易凡, 何惠利, 等. 金荞麦(-)-表儿茶素抗氧化活性研究[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 118–121.
- HUANG RS, YI F, HE HL, *et al.* Antioxidant activity of (-)-epicatechin from the root tubers of *Fagopyrum dibotrys* [J]. *Food Sci*, 2014, 35(15): 118–121.
- [15] XING J, YU ZL, ZHANG XY, *et al.* Epicatechin alleviates inflammation in lipopolysaccharide-induced acute lung injury in mice by inhibiting the p38 MAPK signaling pathway [J]. *Int Immunopharmacol*, 2019, 66: 146–153.
- [16] 孔祥虎, 李志欣, 房丽君, 等. 芦丁对肺癌 A549/DDP 细胞耐药性的逆转作用及其机制[J]. 中国免疫学杂志, 2019, 35(19): 2332–2336.
- KONG XH, LI ZX, FANG LJ, *et al.* Reversal effect of rutin on cisplatin-resistance in human lung cancer A549/DDP cells and its mechanisms [J]. *Chin J Immunol*, 2019, 35(19): 2332–2336.
- [17] HAMIT C, FSTIH MK, CUNEYT C, *et al.* Neuroprotective effect of rutin against colistin-induced oxidative stress, inflammation and apoptosis in rat brain associated with the CREB/BDNF expressions [J]. *Mol Biol Rep*, 2020, 47(3): 2023–2034.
- [18] RAGHEB SR, EL WLM, NASR MS, *et al.* Impact of rutin and vitamin C combination on oxidative stress and glycemic control in patients with type 2 diabetes [J]. *Clin Nutr ESPEN*, 2019, 35: 128–135.
- [19] DIVYA G, ABHISHEK AEP, KARTHIKEYAN A, *et al.* Rutin ameliorates metabolic acidosis and fibrosis in alloxan induced diabetic nephropathy and cardiomyopathy in experimental rats [J]. *Mol Cell Biochem*, 2020, 471(1-2): 41–50.
- [20] 张秀梅, 刘玉革, 朱祝英, 等. 不同成熟度桑葚果实和叶片的多酚、黄酮和抗氧化性研究[J]. 果树学报, 2014, 31(4): 660–666.
- ZHANG XM, LIU YG, ZHU ZY, *et al.* Total polyphenols, flavonoids and antioxidant activities in mulberry(*Morus alba*)leaves and fruit at different maturities [J]. *J Fruit Sci*, 2014, 31(4): 660–666.
- [21] 周广志, 鲁敏, 安华明. 刺梨果实发育过程中主要活性物质含量及其抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2018, 39(22): 20–25.
- ZHOU GZ, LU M, AN HM. Analysis of bioactive substance contents and antioxidant activities in *Rosa roxburghii* fruits during development [J]. *Food Sci*, 2018, 39(22): 20–25.
- [22] LEANDRO OL, BÉNÉDICTE OT, CLAIRE D, *et al.* Cuticular waxes of nectarines during fruit development in relation to surface conductance and susceptibility to *Monilinia laxa* [J]. *J Exp Bot*, 2020, 71(18): 5521–5537.
- [23] MDÁM E, VICTORIA AM, DAVID U, *et al.* Histochemical and immunohistochemical analysis of enzymes involved in phenolic metabolism during berry development in *Vitis vinifera* L. [J]. *Protoplasma*, 2019, 256(1): 25–38.
- [24] ZITHA EZM, MAGALHAES DS, DO LRC, *et al.* Changes in the bioactive compounds and antioxidant activity in red-fleshed dragon fruit during its development [J]. *Sci Hortic Amsterdam*, 2022, 291: 110611.
- [25] 赵金伟, 李范洙, 崔泰花, 等. 苹果梨生育期酚类物质的分析[J]. 食品工业科技, 2009, 30(9): 105–107.
- ZHAO JW, LI FZ, CUI TH, *et al.* Analysis of phenolic compounds in Apple-pear fruit during the growth period [J]. *J Food Ind Technol*, 2009, 30(9): 105–107.
- [26] 沈静, 王敏, 荀茜, 等. 不同成熟期灵武长枣酚类组分及抗氧化活性差异分析[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 191–195.
- SHEN J, WANG M, GOU Q, *et al.* Changes in phenolic components and

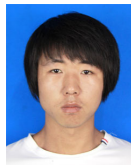
- antioxidant activity of jujube fruits (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Lingwu Changzao) during different growth stages [J]. Food Sci, 2015, 36(8): 191–195.
- [27] 朱明涛, 余俊, 高瑞汝, 等. 桃果实不同成熟期总酚含量的变化及其抗氧化活性[J]. 北方园艺, 2017, (5): 31–34.
- ZHU MT, YU J, GAO RR, *et al.* Total phenolic content and antioxidant activity of peach fruits at different ripening stages [J]. Northern Hortic, 2017, (5): 31–34.
- [28] 刘杰超, 张春岭, 陈大磊, 等. 不同品种枣果实发育过程中多酚类物质、VC 含量的变化及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 94–98.
- LIU JC, ZHANG CL, CHEN DL, *et al.* Changes in phenolics, vitamin C and antioxidant capacity during development of different cultivars of jujube fruits [J]. Food Sci, 2015, 36(17): 94–98.
- [29] 乜兰春, 孙建设. 苹果果实酚类物质含量与果实苦涩关系的研究[J]. 园艺学报, 2005, 32(5): 13–17.
- NIE LC, SUN JS. Relationship between the content of phenolic compounds and the taste of astringency and bitterness in apple fruit [J]. Acta Hort Sinica, 2005, 32(5): 13–17.
- [30] 谢敏. 毛花猕猴桃酚类物质及相关抗氧化活性研究[D]. 南昌: 江西农

业大学, 2017.

XIE M. Research on phenolic and antioxidant activity in *Actinidia eriantha* benth [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



孙 权, 硕士研究生, 主要研究方向
为植物发育过程中代谢物的研究。
E-mail: 2997393657@qq.com



顾玉红, 博士, 教授, 主要研究方向为
植物发育生物学的研究。
E-mail: gyhshengwu@163.com