

成熟期对蓝莓果实外观特征、生物活性成分及抗氧化能力的影响

熊 颖 舒 曼 欧光梅 吴思政 禹 霖

(湖南省植物园, 湖南 长沙 410116)

摘要: [目的] 确定蓝莓果实的最佳采收期。[方法] 以蓝金、乡铃、绿宝石、灿烂、珠宝、莱克西和奥尼尔 7 个蓝莓品种为研究对象, 检测蓝莓果实不同成熟度时的外观和生物活性成分。[结果] 蓝莓果实在成熟过程中由 0.58~1.05 g 膨大至 1.40~3.00 g, 总酚和总黄酮含量波动较大, 总花色苷含量持续上升至 71.44~275.33 mg/100 g FW。蓝莓果实完全成熟时具有最强的 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力以及铁离子还原能力。蓝莓果实花青素组成和含量受成熟期影响较大, 飞燕草色素和锦葵色素是成熟蓝莓果实中的主要色素, 两者占比为 50.62%~77.33%。[结论] 蓝莓果实的采摘时期以完全成熟为佳, 此时的蓝莓果实生物活性成分含量最高, 具有最佳的保健功效; 其次为紫红色向紫黑色转变时, 此时蓝莓的保健功效略低于完全成熟的果实。

关键词: 蓝莓; 成熟期; 外观特征; 生物活性成分; 花青素

Effects of maturity on appearance characteristics, bioactive components, and antioxidant capacity of blueberry fruits

XIONG Ying SHU Man OU Guangmei WU Sizheng YU Lin

(Hunan Botanical Garden, Changsha, Hunan 410116, China)

Abstract: [Objective] To determine the optimal harvesting period for blueberry fruits. [Methods] Seven blueberry cultivars, Bluegold, Homebell, Emerald, Brightwell, Jewelry, Legacy, and O'Neal, were used as research subjects to evaluate the appearance and bioactive components of blueberry fruits at different stages of maturation. [Results] During maturation, the weight of blueberry fruits expanded from 0.58~1.05 g to 1.40~3.00 g. The content of total phenols and total flavonoids fluctuated considerably, while the total anthocyanins content steadily increased to 71.44~275.33 mg/100 g FW. Fully ripe blueberry fruits demonstrated the highest DPPH and ABTS free radical scavenging capacity and iron ion reduction ability. The composition and content of anthocyanins in the fruits were greatly influenced by the maturation stage. Delphinidin and malvidin were the predominant pigments in fully ripe blueberries, accounting for 50.62%~77.33% of the total pigment content. [Conclusion] The optimal harvesting period for blueberry fruits is when they are fully ripe, as this is when the bioactive component content is highest, offering the best health benefits. The next best period is during the transition from purple-red to purple-black, when the health benefits are slightly lower than those of fully ripe fruits.

Keywords: blueberry; ripening stage; appearance characteristics; bioactive components; anthocyanidin

蓝莓 (*Vaccinium* spp.) 果实因富含花色苷、多酚等生物活性成分而备受消费者青睐。蓝莓果实具有抗氧化^[1]、抗衰老^[2]等功效, 对抑制癌细胞增长^[3]、保护肠胃^[4]、增强视力^[5]等具有较好的效果。目前, 有关蓝莓果实的研究大

基金项目: 湖南省林业科技攻关与创新项目 (编号: XLK202416)

通信作者: 禹霖 (1973—), 男, 湖南省植物园高级工程师。E-mail: 1548457026@qq.com

收稿日期: 2024-07-11 改回日期: 2025-02-08

引用格式: 熊颖, 舒曼, 欧光梅, 等. 成熟期对蓝莓果实外观特征、生物活性成分及抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 126-133.

Citation: XIONG Ying, SHU Man, OU Guangmei, et al. Effects of maturity on appearance characteristics, bioactive components, and antioxidant capacity of blueberry fruits[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 126-133.

多数集中在加工特性^[6]、加工工艺^[7]、采后贮藏^[8]和生物活性成分^[9]等方面,尤其是蓝莓花色苷对某些不良症状的缓解或对某些疾病的预防作用^[10];此外,还有部分关于蓝莓果实中糖、酸^[11]、酚酸^[12-13]、花色苷^[14]等物质组成的分析。

研究拟以蓝金、乡铃、绿宝石、灿烂、珠宝、莱克西和奥尼尔7个蓝莓品种为研究对象,将盛花期之后果实发育时间划分为大果期、粉果期、紫果期和熟果期4个不同发育阶段,比较不同发育阶段果实的外观特征、生物活性成分含量、抗氧化能力及花青素种类的变化,并结合蓝莓果实外观变化来监测蓝莓果实生长发育过程中生物活性成分和抗氧化能力的变化趋势,以期蓝莓最佳采收时间的确定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蓝莓品种:兔眼系列的灿烂、乡铃,高丛系列的蓝金、绿宝石、莱克西、珠宝和奥尼尔,每个品种选取5株结构类似且管理水平相同的12年生植株用于蓝莓果实样品采摘,4个发育时期的果实均于2024年5—6月采摘于湖南省植物园蓝莓基地,4个发育期详细情况见表1;

表1 蓝莓采样时期划分

Table 1 Period division of blueberry sampling

编号	发育期	果实外观
I 期	大果期	尚未变色果实,全果颜色呈绿色
II 期	粉果期	五成熟果实,果实颜色主要呈粉紫色,果柄根部果皮呈浅粉色
III 期	紫果期	八成熟果实,果实颜色主要呈紫红色,果柄根部果皮粉紫色
IV 期	熟果期	完全成熟果实,全果颜色呈紫黑色

醋酸钠、冰乙酸、KCl、HCl:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

乙腈、甲酸:色谱纯,美国Sigma公司;

超纯水:自制。

1.2 仪器与设备

电子分析天平:SE202F型,奥豪斯仪器(上海)有限公司;

相机:尼康D850型,日本尼康株式会社;

色差仪:NR110型,深圳市三恩时科技有限公司;

超声清洗机:SB-5200DTD型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

恒温水浴锅:SHHW 21-420型,北京市永光明医疗仪器有限公司;

离心机:H1650型,湖南湘仪离心机有限公司;

紫外可见分光光度计:UV1200型,上海美谱达仪器公司;

高效液相色谱仪:1260型,配紫外检测器和ZORBAX SB-C₁₈分析型色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm),美国Agilent公司;

超纯水净化系统:Milli-Q® IQ 7000型,德国默克公司;

超低温冰箱:DW 86L486型,海尔集团公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 随机选取成熟情况类似、大小均匀、无病虫害的蓝莓果实,各品种、各成熟期果实采样量约为100 g。样品采集后分为两份,一份立即用于外观指标测定,另一份快速用液氮冷冻于-80℃冰箱贮藏待用。

1.3.2 指标测定

(1) 果实增重率:每个品种和成熟度随机选取30个蓝莓果实,用电子天平测重,按式(1)计算果实增重率。

$$W_g = \frac{W_n - W_I}{W_I} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W_g ——果实增重率,%;

W_n ——各时期单果质量,g;

W_I ——I期单果质量,g。

(2) 大小与果形:用游标卡尺直接测量果实的纵径与横径,每个品种和成熟度随机测30个果实,果实纵径与横径之比为果形指数。

(3) 色泽:每个品种和成熟度随机选取30个蓝莓果实,测量果实赤道线上分布均匀的3个部位的 L 、 a^* 和 b^* 值。

(4) 总酚含量:采用福林—酚比色法^[15]。

(5) 总黄酮含量:采用 $\text{NaNO}_2\text{-AlCl}_3$ 比色法^[16]。

(6) 总花色苷含量:采用pH示差法^[17]。

(7) DPPH自由基清除能力:根据文献^[18]。

(8) ABTS自由基清除能力:根据文献^[19]。

(9) FRAP铁离子还原能力:根据文献^[20]。

(10) 花青素:根据NY/T 2640—2014。

1.4 数据分析

采用Excel 2019、SPSS 22.0软件进行方差分析(ANOVA),使用Duncan多范围检验以95%的置信区间表示结果的显著差异,采用Origin 2018软件绘图,数据结果用Mean±SD表示。

2 结果与分析

2.1 不同品种及成熟度蓝莓外观特征变化

由图1可知,蓝莓果实在成熟过程中逐渐变色膨大,果皮颜色由绿变粉,随后变为紫红,最终变为紫黑色。各

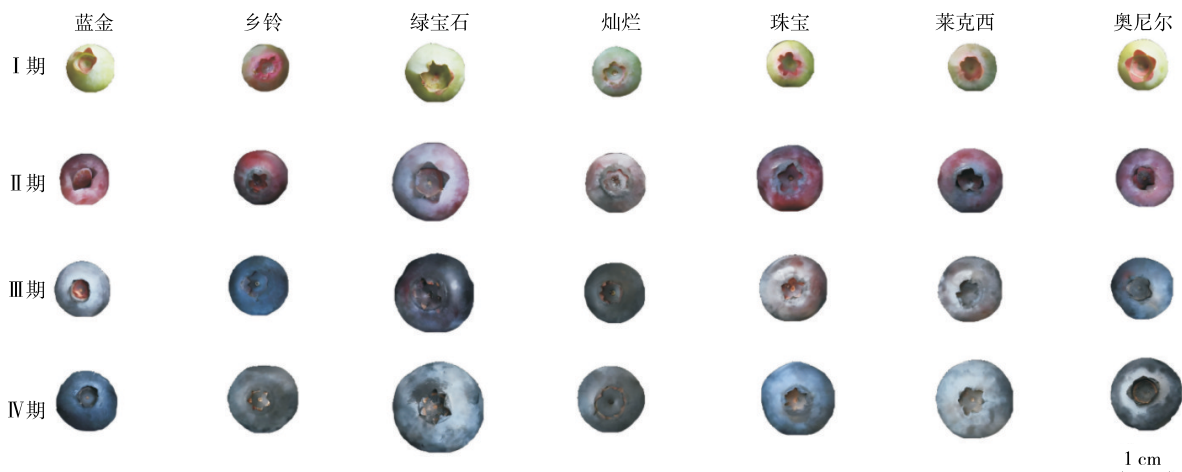


图 1 不同品种及成熟度蓝莓果实的外观变化

Figure 1 Changes in the appearance of blueberry fruits of different cultivars and maturity

品种蓝莓果实大小和颜色均有较大差异,果实表面果粉的覆盖量随着果实成熟度的加深而增加。其中绿宝石和莱克西成熟果实表面覆盖较多果粉,其次为珠宝和奥尼尔,蓝金的最少。

由图 2 可知,从色泽来看,蓝莓果实的亮度随果实成熟度的加深逐渐降低,不同品种 IV 期果实亮度差异明显,其中,乡铃、园蓝和奥尼尔的亮度较低,其余 4 个品种亮度稍高。I 期蓝莓果实 a^* 值为负,呈绿色,II~IV 期蓝莓果实 a^* 值为正,呈红色,当果实完全成熟时(IV 期),各品种蓝

莓果实 a^* 值差异不明显。从 b^* 值来看, I 期果实 b^* 值为正,呈黄色, II~IV 期蓝莓果实 b^* 值为负,呈蓝色,且不同品种 IV 期果实 b^* 值差异明显,其中乡铃和灿烂的 b^* 值明显低于其余品种,表明兔眼系列蓝莓品种果实颜色更加偏蓝。综上,蓝莓果实在成熟过程中颜色变化较大,且不同品种蓝莓果实在同一生长期也存在一定的差异,可能是因为不同品种果实中所含的花青素种类和组成不同。这与陈招芳等^[21]的结果类似,但完全成熟的蓝莓果实颜色与林杨^[22]的研究结果有一定的差异。

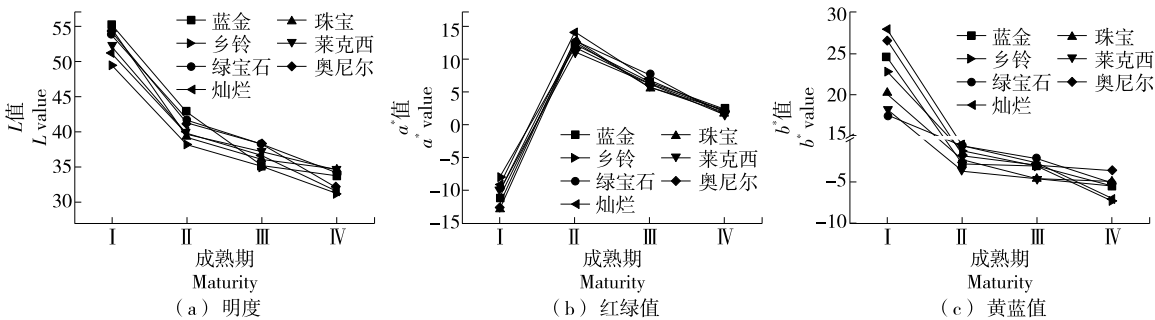


图 2 不同品种及成熟度蓝莓果实的色值变化

Figure 2 Hunter lab value of blueberry fruits of different cultivars and maturity

由表 2 可知,从果实外观特征看,不同品种蓝莓果实随着成熟度的加深,果实增重率明显增加。其中,莱克西果实增重最明显,其次为绿宝石,蓝金和珠宝的较接近,乡铃、灿烂和奥尼尔的变化最小。从果实大小和果形指数看,不同品种蓝莓成熟果实的横径和纵径均 $>10\text{ mm}$,且横径均大于纵径,最扁的蓝莓品种为绿宝石,最圆的蓝莓品种为蓝金,各品种蓝莓果实由圆到扁依次为蓝金 $>$ 奥尼尔 $>$ 乡铃 $=$ 灿烂 $>$ 珠宝 $=$ 莱克西 $>$ 绿宝石。蓝莓果实的果形指数均 <1 ,表明蓝莓果实普遍为扁圆形;蓝莓

果实在不同发育阶段果形指数无显著差异,表明蓝莓果实形状几乎不会随成熟期的加深发生改变。

2.2 不同品种蓝莓果实总酚、总黄酮和总花色苷含量变化

由图 3(a)可知,不同品种蓝莓果实总酚含量随果实成熟度的加深呈先降低后升高趋势。I 期果实总酚含量最高的为蓝金,最低的为莱克西。II 期蓝莓果实总酚含量最低的为蓝金、绿宝石、珠宝、莱克西和奥尼尔,III 期的为乡铃和灿烂。不同品种 IV 期果实的总酚含量差异显

表2 不同品种及成熟度蓝莓果实大小变化[†]

Table 2 Changes in fruit size of different cultivars and maturity of blueberry fruits

品种	成熟期	增重率/%	纵径/mm	横径/mm	果形指数
蓝金	I	0.00	9.41±0.46 ^{ABc}	10.48±0.26 ^{Fc}	0.90±0.04 ^{Aa}
	II	39.66	10.94±0.42 ^{Cb}	12.36±0.41 ^{Db}	0.89±0.03 ^{Aa}
	III	65.52	11.13±0.59 ^{Bb}	12.65±0.49 ^{Cb}	0.88±0.03 ^{Aa}
	IV	141.38	12.89±0.68 ^{Ba}	14.18±0.60 ^{Da}	0.91±0.04 ^{Aa}
乡铃	I	0.00	8.91±0.62 ^{Cd}	11.12±0.58 ^{Ec}	0.80±0.05 ^{Ba}
	II	19.12	9.43±0.44 ^{Dc}	11.61±0.54 ^{Ec}	0.81±0.01 ^{Ba}
	III	30.88	10.09±0.42 ^{Cb}	12.69±0.64 ^{Cb}	0.80±0.02 ^{Bab}
	IV	110.29	11.84±0.36 ^{Ca}	15.50±0.88 ^{Ca}	0.77±0.04 ^{Cb}
绿宝石	I	0.00	9.76±0.61 ^{Ac}	14.19±0.45 ^{Ad}	0.69±0.04 ^{Ea}
	II	130.48	13.09±0.59 ^{Ab}	18.61±0.68 ^{Ab}	0.70±0.03 ^{Ea}
	III	138.10	11.88±0.68 ^{Aa}	16.93±1.11 ^{Ac}	0.70±0.03 ^{Da}
	IV	185.71	13.55±0.72 ^{Aa}	19.69±1.06 ^{Aa}	0.69±0.01 ^{Ea}
灿烂	I	0.00	9.18±0.28 ^{BCd}	11.64±0.47 ^{CDd}	0.79±0.03 ^{BCa}
	II	72.22	10.58±0.66 ^{Cc}	13.50±0.83 ^{Cc}	0.78±0.03 ^{BCa}
	III	88.89	11.10±0.46 ^{Bb}	14.65±0.75 ^{Bb}	0.76±0.03 ^{Ca}
	IV	112.50	12.32±0.56 ^{BCa}	15.85±0.74 ^{Ca}	0.78±0.04 ^{Ca}
珠宝	I	0.00	7.90±0.20 ^{Db}	11.40±0.63 ^{DEb}	0.69±0.03 ^{Eb}
	II	81.97	11.13±0.44 ^{Ca}	15.01±0.63 ^{Ba}	0.74±0.02 ^{Da}
	III	121.31	10.83±0.77 ^{Ba}	14.55±1.09 ^{Ba}	0.74±0.02 ^{Ca}
	IV	142.62	10.93±0.69 ^{Da}	15.09±0.95 ^{Ca}	0.72±0.02 ^{Da}
莱克西	I	0.00	8.93±0.43 ^{Cc}	11.99±0.23 ^{BCd}	0.75±0.03 ^{Da}
	II	98.61	11.96±0.47 ^{Ba}	15.62±0.55 ^{Bb}	0.77±0.02 ^{CDa}
	III	104.17	10.95±0.30 ^{Bb}	14.69±0.58 ^{Bc}	0.75±0.02 ^{Ca}
	IV	208.33	12.42±0.93 ^{BCa}	17.27±1.04 ^{Ba}	0.72±0.02 ^{Db}
奥尼尔	I	0.00	9.32±0.39 ^{BCc}	12.26±0.58 ^{Bc}	0.76±0.03 ^{CDb}
	II	51.39	11.17±1.00 ^{Cb}	13.88±1.19 ^{Cb}	0.81±0.05 ^{Ba}
	III	76.39	11.31±0.63 ^{Bb}	13.91±1.04 ^{Bb}	0.81±0.04 ^{Ba}
	IV	106.94	12.89±0.58 ^{Ba}	15.62±1.17 ^{Ca}	0.83±0.04 ^{Ba}

† 大写字母不同表示不同品种处于同一成熟度时差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示同一品种处于不同成熟度时差异显著($P<0.05$)。

著,总酚含量最高的为灿烂,其次为乡铃,最低的为绿宝石,其含量仅为灿烂的1/3。

由图3(b)可知,7个品种蓝莓果实总黄酮含量最高的时期均为I期,其中,乡铃的最高。当果实成熟度达到II期时,各品种果实中总黄酮含量均明显降低,降幅为10.70%~67.25%。当果实成熟至IV期时,绿宝石和莱克西的总黄酮含量仍在下降,珠宝果实中的总黄酮含量几乎不变,其余品种果实的总黄酮含量均回升至最低点的1.19~2.68倍。蓝莓果实在成熟过程中总酚和总黄酮含量变化情况与树葡萄果实和杏在成熟过程中的变化趋势类

似^[23-24],可能是因为蓝莓果实从I期到II期变色时会迅速膨大,果实内的酚类物质和黄酮类物质总量增加速度低于果实膨大速度,且部分黄酮类物质与花色苷合成所需的前体一致,均为二氢黄酮醇,因此在果实开始变色时二氢黄酮醇被大量用于合成花色苷,从而导致黄酮类物质合成相应降低^[25]。果实由III期到IV期时总酚和总黄酮含量有所回升,是因为此阶段蓝莓果实大小变化有所减缓,而蓝莓果实仍在积累总酚和总黄酮等次生代谢产物导致的。

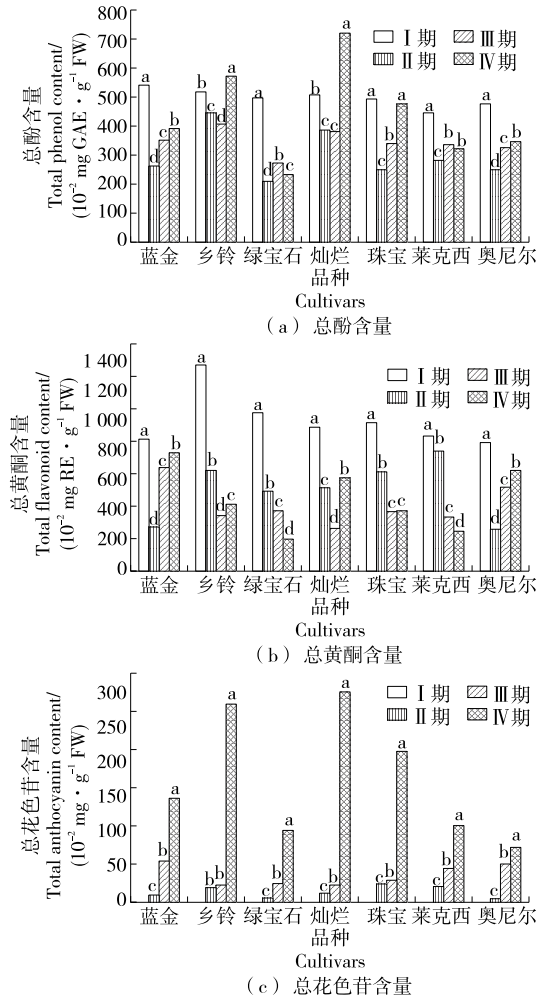
由图3(c)可知,蓝莓果实处于I期时,各品种果实中

均未检出花色苷,随着成熟度的增加,总花色苷不断累积。各品种蓝莓果实从Ⅱ期到Ⅲ期时,花色苷增量为3.10~45.49 mg/100 g,明显低于从Ⅲ期到Ⅳ期的增量,说明蓝莓果实中花色苷的积累主要集中在由紫红到紫黑色这一变色阶段。此外,不同品种成熟果实的总花色苷含量差别较大,奥尼尔的总花色苷含量明显低于其他6个品种,与郑嘉伟等^[26]的结果类似。乡铃和灿烂均属于晚熟的兔眼蓝莓,其总花色苷含量最高,与文献^[27]的结果基本一致。这是因为兔眼蓝莓转色时处于6月份,果实发育时光照强度较大,温度更高,果皮中花色苷积累量更多^[28]。综上,酚类物质和黄酮类物质的变化贯穿了蓝莓果实发育过程的始终,而花色苷在蓝莓果实开始变色时才会产生,因此蓝莓果实中的花色苷含量很大程度上反

映了蓝莓果实的成熟情况。

2.3 不同品种及成熟度下蓝莓花青素组分变化

由图4可知,蓝莓果实中主要含飞燕草色素、矢车菊色素、矮牵牛色素、芍药色素和锦葵色素5种花青素,天竺葵色素在7个品种不同成熟期的果实中均未检出。总体而言,不同品种蓝莓果实中的各花青素含量差异较大,不同种类花青素含量随蓝莓果实成熟度的加深呈现不同的变化趋势。其中,锦葵色素是7个品种成熟果实中含量最高的花青素,除珠宝外,其余6个品种蓝莓果实中的锦葵色素含量均随成熟度的加深而升高。除灿烂和珠宝外,飞燕草色素为其余5个品种成熟果实中含量第二的花青素,在所有品种中,飞燕草色素含量在蓝莓果实从Ⅰ期成熟至Ⅲ期时迅速增加,而当果实成熟至Ⅳ期时,珠宝和奥尼尔的飞燕草色素含量分别由211.92,214.20 mg/kg降至0,58.62 mg/kg,其余5个品种果实中飞燕草色素含量则继续增加。矢车菊色素在蓝莓果实中的含量低于前两种色素,在蓝金、绿宝石和奥尼尔3个品种果实中,矢车菊色素含量初始水平(Ⅰ期)和最终水平(Ⅳ期)差异较小,其余4个品种果实的矢车菊色素最终含量与初始含量相比均



字母不同表示同一品种不同成熟度时生物活性成分含量存在显著性差异($P<0.05$)

图3 不同品种及成熟度下蓝莓生物活性成分含量变化
Figure 3 Content of bioactive components in different cultivars and maturity of blueberry fruits

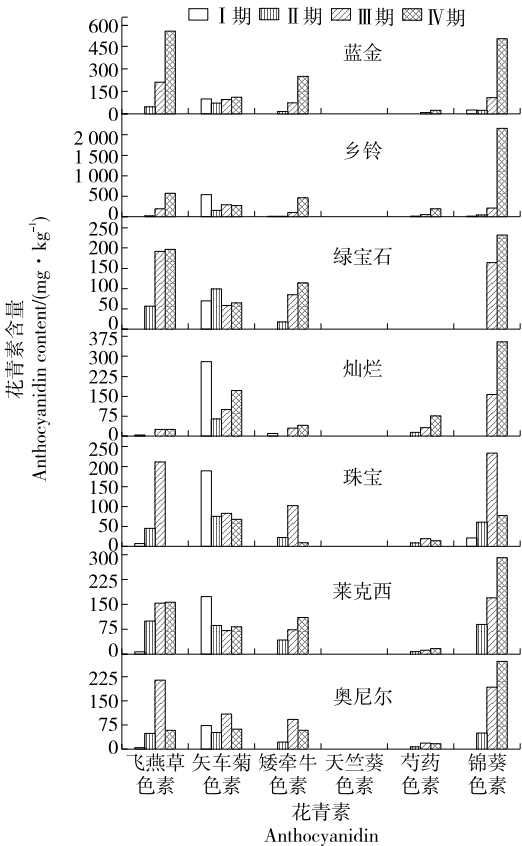


图4 不同品种及成熟度蓝莓果实花青素组分
Figure 4 Anthocyanidin composition of blueberry fruits of different cultivars and maturity

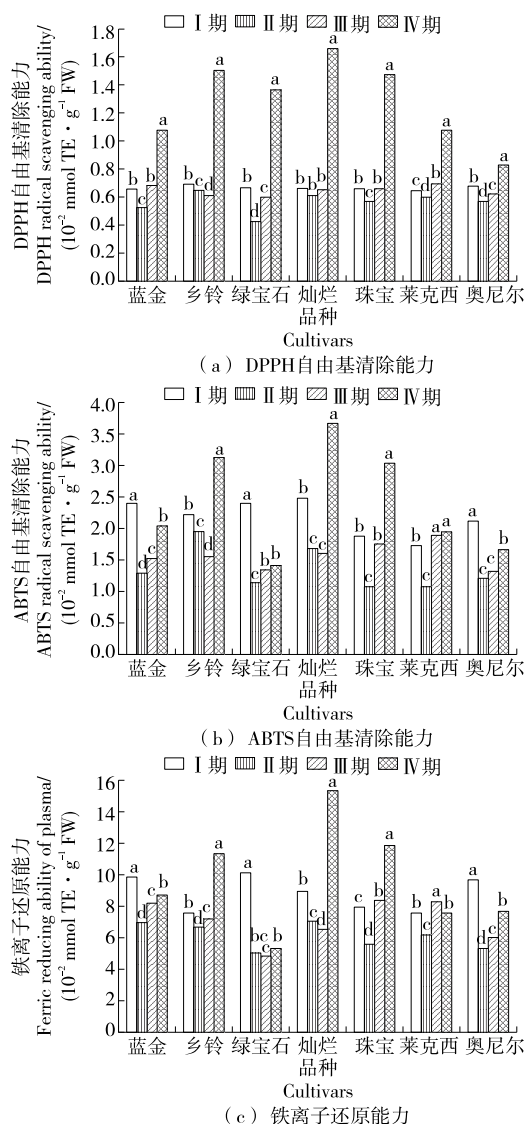
有不同程度的降低(降幅为38.83%~64.24%)。矮牵牛色素在蓝金、乡铃、绿宝石、灿烂和莱克西5个品种中均随果实成熟度的加深而增加,而珠宝和奥尼尔的成熟果实(Ⅳ期)与Ⅲ期果实相比,矮牵牛色素含量分别降低了90.69%,36.76%。芍药色素是成熟蓝莓果实中含量最低的花青素,其中绿宝石各成熟阶段果实均未检出芍药色素,其余6个品种Ⅰ期果实中均不含芍药色素,而随着果实成熟度加深,6个品种果实中的芍药色素含量有所增加,蓝金、乡铃、灿烂、珠宝、莱克西和奥尼尔Ⅳ期果实中芍药色素含量分别增至25.65,194.19,76.56,14.34,16.29,16.08 mg/kg。

2.4 不同品种蓝莓果实的自由基清除能力和铁离子还原能力

由图5(a)可知,不同品种蓝莓Ⅰ期果实的DPPH自由基清除能力差异不明显,果实发育至Ⅱ期或Ⅲ期时DPPH自由基清除能力有所降低,成熟果实(Ⅳ期)的DPPH自由基清除能力最强。蓝金、乡铃、绿宝石、灿烂、珠宝、莱克西和奥尼尔成熟果实的DPPH自由基清除能力分别为Ⅰ期果实的1.66,2.17,2.03,2.52,2.23,1.65,1.22倍。与单宁酸相比,花青素具有更强的DPPH自由基清除能力^[29]。不同品种蓝莓成熟果实的DPPH自由基清除能力最高可能是蓝莓果实从Ⅲ期发育到Ⅳ期时花色苷含量剧增引起的。

由图5(b)可知,7个品种蓝莓果实在成熟过程中的ABTS自由基清除能力随果实成熟度的加深呈先降低后升高趋势。其中,乡铃和灿烂的ABTS自由基清除能力最低的时期为Ⅲ期,其余品种的则为Ⅱ期。Ⅳ期果实的ABTS自由基清除能力在不同品种间差异较大,其中,乡铃、灿烂和珠宝的ABTS自由基清除能力相对较高分别为 (3.13 ± 0.03) , (3.66 ± 0.02) , (3.03 ± 0.01) mmol/100 g,而蓝金、绿宝石、莱克西和奥尼尔则明显低于以上3个品种。

图5(c)与图5(b)有着类似的变化趋势,说明蓝莓果实在发育过程中的铁离子还原能力与ABTS自由基清除能力变化基本一致。蓝金、绿宝石和奥尼尔3个品种Ⅰ期果实的铁离子还原能力强于Ⅳ期,且明显优于同时期的其他品种。Ⅳ期的乡铃、灿烂和珠宝果实的铁离子还原能力明显强于Ⅰ期,也明显强于蓝金、绿宝石和奥尼尔3个品种Ⅰ期果实,莱克西Ⅰ期和Ⅳ期果实的铁离子还原能力变化较小。结合图3可知,蓝莓果实在成熟过程中ABTS自由基清除能力和铁离子还原能力与总酚、总黄酮含量变化趋势基本一致,因此蓝莓果实的ABTS自由基清除能力和铁离子还原能力受果实总酚、总黄酮含量影响较大。总而言之,蓝莓果实的花色苷含量在一定程度上决定了果实对DPPH自由基的清除效果,而总酚、总黄酮



字母不同表示同一品种在不同成熟度时生物活性成分含量存在显著性差异($P < 0.05$)

图5 不同品种及成熟度下蓝莓果实的抗氧化能力

Figure 5 Comparison of antioxidant capacity of blueberry fruits of different cultivars and maturity

含量则很大程度上影响了果实的ABTS自由基清除能力和铁离子还原能力。

3 结论

对比了7个不同蓝莓品种果实在成熟过程中的外观、总酚、总黄酮、花青素、DPPH自由基和ABTS自由基清除能力以及铁离子还原能力的变化。结果表明,不同品种蓝莓果实在不同发育阶段的果实大小、色值、总酚、总黄酮、花青素和抗氧化能力均有较大差异。其中,成熟度越高,蓝莓果实的花色苷含量越高,DPPH自由基清除能力和铁离子还原能力更强。此外,不同品种蓝莓果实的花

色苷含量差异较大,兔眼品系下的蓝莓品种乡铃和灿烂具有更高的花色苷含量。该研究仅对蓝莓果实不同发育阶段的总酚、总黄酮和总花色苷的变化进行了初步探究,并没有对酚酸、黄酮和花色苷的合成途径进行深入探讨,下一步将对蓝莓果实在发育过程中生物活性成分代谢组学和转录组学进行多组学联合分析,从而进一步了解蓝莓果实发育过程中的活性成分合成过程以及基因表达情况对蓝莓品质的影响,为蓝莓栽培过程中调控基因表达水平,提高蓝莓果实品质提供依据。

参考文献

- [1] LI D N, LI B, MA Y, et al. Polyphenols, anthocyanins, and flavonoids contents and the antioxidant capacity of various cultivars of highbush and half-high blueberries[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 62: 84-93.
- [2] 刘翼翔, 吴永沛, 刘光明, 等. 野生蓝莓酚酸成分鉴定及其清除细胞内自由基活性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(12): 173-179.
LIU Y X, WU Y P, LIU G M, et al. Identification of phenolic acids in wild blueberries and their scavenging intracellular ROS activity[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(12): 173-179.
- [3] 薛宏坤, 谭佳琪, 刘成海, 等. 超声—闪式联合法制备蓝莓花色苷提取物及其体内外抗肿瘤活性评价[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 259-269.
XUE H K, TAN J Q, LIU C M, et al. Preparation of blueberry anthocyanin extract by ultrasound-assisted flash extraction and evaluation of its anti-tumor activity *in vivo* and *in vitro*[J]. Food Science, 2020, 41(6): 259-269.
- [4] ZHOU L, XIE M H, YANG F, et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 117: 108621.
- [5] 孟宪军, 毕苑琴, 张琦, 等. 蓝莓花色苷对大鼠视网膜光损伤的保护作用及其机制[J]. 食品科学, 2013, 34(11): 242-245.
MENG X J, BI W Q, ZHANG Q, et al. Protective effect and mechanism of blueberry anthocyanins against retinal photodamage in rats[J]. Food Science, 2013, 34(11): 242-245.
- [6] 熊颖, 禹霖, 柏文富, 等. 不同品种蓝莓果实品质特征和抗氧化能力及多酚组成的比较[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(2): 119-128.
XIONG Y, YU L, BAI W F, et al. Evaluation of quality characteristics, antioxidant ability and polyphenol composition of different blueberry cultivars[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(2): 119-128.
- [7] 赵伟, 黄佳琪. 干燥方式对蓝莓花青素降解特性及抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 147-152.
- ZHAO W, HUANG J Q. Effects of different drying methods on degradation characteristics of anthocyanins and antioxidant capacity in blueberries[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 147-152.
- [8] 周宇益, 杨哪, 孟嫚, 等. 恒稳磁场辅助冷藏保鲜对蓝莓品质的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 161-165, 172.
ZHOU Y Y, YANG N, MENG M, et al. Effects of static magnetic field-assisted preservation on the quality of blueberry [J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 161-165, 172.
- [9] 黄涛, 李威, 喻英, 等. 蓝莓花青素与男性生殖功能损伤机制的研究进展[J]. 实用医学杂志, 2022, 38(17): 2 238-2 242.
HUANG T, LI W, YU Y, et al. Blueberry anthocyanins and male reproductive dysfunction: a review[J]. The Journal of Practical Medicine, 2022, 38(17): 2 238-2 242.
- [10] LI R, YE Z, YANG W, et al. Blueberry anthocyanins from commercial products: structure identification and potential for diabetic retinopathy amelioration[J]. Molecules, 2022, 27(21): 7 475.
- [11] ZHANG J, NIE J Y, LI J, et al. Evaluation of sugar and organic acid composition and their levels in highbush blueberries from two regions of China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9): 2 352-2 361.
- [12] KANG J, THAKALI K M, WU X L. Comparison of phenolic acid profiles and anti-inflammatory effects of two major species of blueberries in the US[J]. The FASEB Journal, 2012, 26: 373.
- [13] 唐柯, 王梓萱, 张伟宏, 等. 不同品种蓝莓酚类物质组成特征及抗氧化能力比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(8): 103-107.
TANG K, WANG Z X, ZHANG W H, et al. Comparative analysis of phenolic content and profile, and antioxidant capacity in different blueberry varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(8): 103-107.
- [14] 徐青, 周元敬, 黄筑, 等. 蓝莓花青素的提取及分离研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2016, 35(9): 897-906.
XU Q, ZHOU Y J, HUANG Z, et al. Extraction and separation of blueberry anthocyanins[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2016, 35(9): 897-906.
- [15] KIM D O, JEONG S W, LEE C Y. Antioxidant capacity of phenolic phytochemicals from various cultivars of plums[J]. Food Chemistry, 2003, 81(3): 321-326.
- [16] 邹平, 张迎阳, 邹林玲. 牡丹籽壳中黄酮类化合物提取及组分分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 44-50.
ZOU P, ZHANG Y Y, ZOU L L. Extraction and composition analysis of flavonoids in peony seed shells[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 44-50.
- [17] ROIDOUNG S, DOLAN K D, SIDDIQ M. Estimation of

- kinetic parameters of anthocyanins and color degradation in vitamin C fortified cranberry juice during storage[J]. Food Research International, 2017, 94: 29-35.
- [18] SHEN Y B, ZHANG H, CHENG L L, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1 003-1 012.
- [19] 党玉婷, 张彦, 井波鑫, 等. 几种黑豆成分、体外抗氧化及酶抑制作用对比[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 181-187, 195.
- DANG Y T, ZHANG Y, JING B X, et al. Comparative study on several black bean components, antioxidant and enzyme inhibition in vitro[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 181-187, 195.
- [20] XU H H, WU M, ZHANG X X, et al. Application of blanching pretreatment in herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) flower processing: improved drying efficiency, enriched volatile profile and increased phytochemical content[J]. Industrial Crops and Products, 2022, 188: 115663.
- [21] 陈招芳, 李恒刚, 许轲, 等. 四川主栽蓝莓品种果实生长发育过程中的品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 244-250.
- CHEN Z F, LI H G, XU K, et al. Quality change patterns during fruit development in blueberries mainly planted in Sichuan[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 244-250.
- [22] 林杨. 蓝莓花色苷积累规律及其提取物对炎症相关结直肠癌的影响机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 55-56.
- LIN Y. The accumulation of blueberry anthocyanin and the effects of its extracts on colitis associated-colorectal cancer and related mechanism[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020: 55-56.
- [23] 林宝妹, 郑开斌, 张帅, 等. 不同成熟度树葡萄果实醇提取物抗氧化和抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(3): 233-240.
- LIN B M, ZHENG K B, ZHANG S, et al. Studies on antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities of ethanol extracts from peels and seeds of jaboticaba at different maturities[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2018, 26(3): 233-240.
- [24] HU Q P, XU J G. Profiles of carotenoids, anthocyanins, phenolics, and antioxidant activity of selected color waxy corn grains during maturation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(5): 2 026-2 033.
- [25] 张琼, 王红清, 冷平, 等. 草莓果实发育过程中花色苷和黄酮醇类物质的形成机制[J]. 园艺学报, 2008, 35(12): 1 735-1 741.
- ZHANG Q, WANG H Q, LENG P, et al. Mechanism of anthocyanins and flavonols in fruit development of strawberries[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2008, 35(12): 1 735-1 741.
- [26] 郑嘉伟, 王兰娇, 李大婧, 等. 蓝莓花青素生物合成相关基因表达与分子进化分析[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 184-191.
- ZHENG J W, WANG L J, LI D J, et al. Expression and molecular evolution of genes related to anthocyanin biosynthesis in blueberries[J]. Food Science, 2022, 43(2): 184-191.
- [27] 裴嘉博, 李晓艳, 王佳卉, 等. 越橘果实发育过程中糖、酸、维生素C和色素的动态变化[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(10): 76-80.
- PEI J B, LI X Y, WANG J H, et al. Study on variation of sugar, acid, vitamin C and pigments contents during fruit development of blueberries[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(10): 76-80.
- [28] LI Y Y, MAO K, ZHAO C, et al. MdCOP1 ubiquitin E3 ligases interact with MdMYB1 to regulate light-induced anthocyanin biosynthesis and red fruit coloration in apple[J]. Plant Physiology, 2012, 160(2): 1 011-1 022.
- [29] 张玲艳, 王宏权. 黑枸杞花青素的提取及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2014, 35(12): 88-91.
- ZHANG L Y, WANG H Q. Extraction of anthocyanin from *Lycium ruthenicum* Murr and its antioxidation[J]. The Food Industry, 2014, 35(12): 88-91.