

软枣猕猴桃果实发育期品质指标及抗氧化能力的变化

Changes of quality characteristics and antioxidant capacities during fruit development of hardy kiwifruit

张良英 刘 林 于立杰 刘 启 齐边斌

ZHANG Liang-ying LIU Lin YU Li-jie LIU Qi QI Bian-bin

(辽宁农业职业技术学院, 辽宁 营口 115009)

(Liaoning Agricultural Technical College, Yingkou, Liaoning 115009, China)

摘要:目的:为软枣猕猴桃品质提升及合理开发利用提供理论依据。方法:以龙成 2 号及海佳 2 个品种(系)为试材,分析了软枣猕猴桃果实发育期间基本品质指标、总酚及类黄酮含量的变化,采用 FRAP 法、ABTS 法和 DPPH 法动态测定其抗氧化能力,进一步比较了总酚含量与抗氧化能力在果实不同部位的分布差异。结果:① 2 个品种(系)果实的可溶性固形物、可滴定酸及维生素 C 含量在果实发育过程中整体表现出持续上升的趋势。② 在色素方面,2 个品种(系)的叶绿素含量均表现为高一低一高的变化趋势;自盛花后 64 d 起,2 个品种(系)的类胡萝卜素含量持续增加,同时海佳的花青苷含量也逐步上升。③ 总酚、类黄酮含量及 3 种抗氧化能力均随果实的成熟而呈下降趋势;相关性分析表明,在所有品质指标中,总酚、类黄酮与 3 种抗氧化能力均呈极显著正相关。④ 在成熟果实中,果皮的总酚、类黄酮含量均远高于果肉,表现出较强的抗氧化能力。结论:2 个品种(系)软枣猕猴桃的抗氧化能力均随果实发育而下降,而总酚特别是类黄酮是果实发育过程中影响抗氧化能力的重要物质。果皮是软枣猕猴桃果实抗氧化能力较高的部位,同时也是涩味的主要来源。

关键词:软枣猕猴桃;果实发育;品质性状;总酚;类黄酮;抗氧化能力

Abstract: Objective: This study aimed to provide theoretical basis

for hardy kiwifruit quality improvement and rational utilization. **Methods:** Taking the main variety 'Longcheng No. 2' and line 'Haijia' as experimental materials, the changes of basic quality indexes, contents of total phenolics and flavonoids were analyzed during fruit development. On this basis, the antioxidant capacities were comprehensively evaluated by three assays (FRAP iron reducing ability, ABTS radical scavenging ability and DPPH radical scavenging ability). Furthermore, the differences of total phenolics and antioxidant capacities in different parts of fruit were compared. **Results:** ① The contents of soluble solids, titratable acids and Vc in the fruits of the two varieties (lines) showed a trend of continuous increasing during fruit development. ② The chlorophyll contents of two varieties (lines) both declined constantly at the early stage of fruit development, and then increased continuously from 64 days after blooming. The carotenoids of two varieties (lines) also increased continuously from 64 days after blooming, meanwhile, the anthocyanins of 'Haijia' increased gradually. ③ The contents of total phenolics, flavonoids and three antioxidant capacities all decreased significantly during fruits ripening. The correlation analysis showed that among all quality indexes, total phenolics and flavonoids had extremely significant positive correlations with the three antioxidant capacities. ④ In mature fruits, the contents of total phenolics and flavonoids in the peel were significantly higher than those in the flesh, which indicated strong antioxidant capacities. **Conclusion:** The antioxidant capacities of two varieties (lines) of hardy kiwifruit decreased significantly during fruit development. Moreover, the content of total phenolics, especially flavonoids are the main components to affect antioxidant capacities during fruit development. In the different fruit parts, the peel has higher antioxidant capacities, but it is also the main source of astringency.

基金项目: 辽宁省自然科学基金联合基金项目(编号: 2021-YKLH-06); 辽宁省教育厅科学研究经费项目(编号: L202003); 辽宁农业职业技术学院院级科研项目(编号: 2020-03)

作者简介: 张良英,女,辽宁农业职业技术学院副教授,硕士。

通信作者: 刘林(1980—),男,辽宁农业职业技术学院副教授,博士。E-mail: 103161474@qq.com

收稿日期: 2022-12-31 **改回日期:** 2023-05-05

Keywords: *Actinidia arguta*; fruit development; quality characteristic; total phenolic; flavonoid; antioxidant capacity

软枣猕猴桃(*Actinidia arguta*)又名软枣子,与生产上广泛栽培的中华猕猴桃(*A. chinensis* var. *chinensis*)及其变种美味猕猴桃(*A. chinensis* var. *deliciosa*)同属猕猴桃属植物^[1],其果面光滑无毛,富含维生素 C 及酚类等多种活性物质,具有抗氧化、延缓衰老、促消化及预防癌症等多种功效^[2-3]。由于软枣猕猴桃果实的营养及经济价值较高,近年来已逐步投入到商业化生产^[2],在中国辽宁、吉林、黑龙江、山东等地已开始人工栽培,其中辽宁的栽培面积居首位^[3]。但软枣猕猴桃的栽培规模仍相对较小,尚属于新兴果树。

酚类物质作为园艺产品器官中重要的营养保健成分^[4-5],具备多种生理功效,不仅可以清除体内自由基,起到抗氧化、抗衰老的作用,也直接对果实的涩味、色泽及香气等存在重要影响^[5-7],已成为果品品质的重要组成部分。目前,对猕猴桃的酚类物质及其生物活性的研究已成为热点。已有研究表明,不同猕猴桃品种的总酚含量及抗氧化能力均存在较大差异^[5,8],而且猕猴桃果皮的总酚含量和抗氧化能力均明显高于果肉^{[4]25-39[9]}。

一般认为,酚类化合物可分为酚酸、类黄酮及单宁三大类,其中单宁为导致大部分果蔬涩味的主要物质^{[4]2-3[10]}。软枣猕猴桃果实小巧、无毛,因此可直接带皮食用,但食用过多易导致涩味的产生,这对软枣猕猴桃的口感影响较大。而 Kim 等^[7]的研究也证实了这一点,软枣猕猴桃的果皮富含酚类物质,但其涩味也远高于果肉,由此可见总酚与抗氧化能力及涩味均密切相关。目前,对软枣猕猴桃的酚类物质及抗氧化能力的分析已有陆续报道,但鲜有果实发育过程中酚类物质与抗氧化能力变化规律的研究。研究拟以龙成 2 号和海佳 2 个品种(系)为试材,分析不同发育时期果实的基本品质指标和抗氧化能力的动态变化,并进一步探讨总酚、类黄酮含量与抗氧化能力在果实中的分布差异,以期对软枣猕猴桃的合理开发利用及果品品质的提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料

软枣猕猴桃:海佳品系、龙成 2 号品种,辽宁省海城市诚阳软枣采摘园。选取田间管理正常、树势一致的植株为试材,于盛花期 22 d 后,每隔 14 d 左右在每株树的树冠东部随机采集大小均匀一致、无病虫害的果实 15 个,直至果实采收,重复 3 次。随后用冰盒带回实验室,将带皮的果实用于基本品质指标及抗氧化能力的测定。在果实采收时扩大取样量,随机选留部分样品,在室温下经

4 d 后熟,分为 2 份:一份继续用于相关指标的测定;另一份用镊子将果皮与果肉分离后,用于果实不同部位抗氧化能力的测定、比较。

1.1.2 试剂

2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ)、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS):纯度 $\geq 98\%$,美国 Sigma 公司;

没食子酸、水溶性维生素 E(Trolox)、1,1-二苯基-2-苦肟基(DPPH):分析纯,合肥博美生物科技有限责任公司;

芦丁:分析纯,福州飞净生物科技有限公司。

1.1.3 主要仪器设备

电子天平:FA2104B 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

旋转蒸发仪:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

高速冷冻离心机:H2050R 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

色差仪:NF333 型,日本电色工业株式会社。

1.2 方法

1.2.1 相关品质指标测定

(1) 维生素 C(V_C)含量:采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[11]。

(2) 可滴定酸含量:采用酸碱滴定法^[11]。

(3) 花青苷含量:参照文献^[12]。

(4) 叶绿素及类胡萝卜素含量:参照文献^[13]。

(5) 色差值(a^* 、 b^* 、 h°):用色差仪测定,重复 5 次,取平均值。

1.2.2 果实总酚和类黄酮含量的提取与测定

(1) 总酚与类黄酮提取:根据文献^[14]¹³⁻¹⁴,修改如下:取研磨好的供试样品约 3 g,置于 50 mL 离心管中,提取溶剂为 70%酸化甲醇(0.1% HCl),在提取温度 45 ℃、液料比为 10:1 (mL/g)的条件下提取 45 min,6 000 r/min 离心 10 min,将上清液用旋转蒸发仪浓缩至约 5 mL,加 70%甲醇至 12 mL,-20 ℃下保存。提取液用于总酚、类黄酮及抗氧化能力的测定。

(2) 总酚、类黄酮含量测定:参照文献^[14]¹⁵⁻¹⁶。

1.2.3 抗氧化能力测定

(1) 铁离子还原能力(FRAP):参照文献^[15]。

(2) ABTS 自由基清除能力:参照文献^[14]¹⁶⁻¹⁸和^[15],略有改动。将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液 10 mL 与 140 mmol/L 的过硫酸钾溶液 178 μ L 混合,定容至 25 mL 后,室温下避光反应 12~16 h。然后,将反应后的混合液稀释至 734 nm 处的吸光度值为 0.75 $\pm$ 0.02。取适当稀释后的提取液 20 μ L 与 ABTS 稀释液 1 mL 混匀,黑暗条件下 30 ℃水浴,反应 30 min,测定 734 nm 处的吸光

度值。

(3) DPPH 自由基清除能力:根据文献[15—16],修改如下:将适当过量的 DPPH 用甲醇溶解、稀释至 517 nm 处的吸光度值为 0.75 ± 0.02 。将适当稀释后的提取液 40 μL 与 DPPH 稀释溶液 2 mL 混匀,室温下避光反应 30 min 后测定 517 nm 处的吸光度值。

3 种测定方法均以 Trolox 为标准品绘制标准曲线,计算方法参照文献[14]^[16-18]。

1.3 数据分析

采用 Excel 进行数据整理,以 SPSS 22 进行相关性分析及 Duncan 法多重比较,利用 Excel 2016 制图。

2 结果与分析

2.1 在果实发育过程中不同品种(系)软枣猕猴桃品质指标的变化

2.1.1 基本品质指标的动态变化 在果实发育过程中,可溶性固形物含量的变化见图 1(a)。与盛花后 22 d 相比,在花后 36 d 时 2 个品种(系)的可溶性固形物含量略有下降,但差异不显著,可能是受果实发育特性或环境因素等的影响,如 6~8 月降雨充沛易导致果实含水量较高。此后可溶性固形物含量逐步增加,盛花后 90 d 时,海佳的可溶性固形物含量达 7.82%,进行采收。龙成 2 号于盛花后 102 d 采收,可溶性固形物含量为 7.84%。经过 4 d 的后熟作用(盛花后 94,106 d),海佳与龙成 2 号的可溶性固形物含量急剧上升,分别为 12.71%,13.71%。

由图 1(b)、图 1(c)可见,在果实发育过程中 2 个品种(系)的可滴定酸与 V_C 含量均呈先后高低的趋势。其中,可滴定酸含量随时间延长而持续上升,至果实采收时,海佳为 0.96%(盛花后 90 d),龙成 2 号为 1.22%(盛花后 102 d),二者区别不明显。而果实的 V_C 含量则在果实发育期表现为曲折上升,在花后 90 d 时海佳的 V_C 含量相对较高(84.85 mg/100 g FW)。完熟后,2 个品种(系)的 V_C 含量均略有下降,但差异不显著。整体而言,海佳的 V_C 含量高于龙成 2 号。综合来看,可滴定酸含量的变化规律与软枣猕猴桃上的其他研究结果^[17-18]基本一致,而

V_C 的含量变化则与刘春宏等^[19]在软枣猕猴桃魁绿品种上的相反,但与王博等^[18]的结论相似,可能与品种差异、取样时间等有关。

2.1.2 主要色素含量的动态变化 由表 1 可知,2 个品种(系)果皮与果肉的 a^* 、 b^* 、 h° 值变化趋势基本一致,但果皮相关色差值的变化幅度均大于果肉。果皮与果肉的 a^* 值均整体呈上升的趋势,其中海佳的果皮变化最明显。而 2 个品种(系)的果皮和果肉的 b^* 、 h° 值则在果实发育期间表现为下降的趋势,仍以海佳果皮的变幅最大,表明海佳的着色情况相对优于龙成 2 号。

果实的色泽主要受花青苷、叶绿素及类胡萝卜素等呈色物质的种类及其相对含量的动态影响^[20],对果实发育期间软枣猕猴桃的主要色素含量进行测定,结果如图 2 所示。海佳的果实花青苷含量自盛花后 64 d 后逐步增加,盛花后 90 d 即果实采收时含量最高,且与龙成 2 号差异显著,这与海佳果皮的 a^* 、 h° 值的变化基本同步发生。但在完全成熟后海佳的果实花青苷含量下降明显。

2 个品种(系)的叶绿素含量变化趋势基本一致,均表现为高一低一高的趋势。自盛花后 36 d 起,果实的叶绿素总含量急剧下降,至盛花后 64 d 达到最低值,此后叶绿素含量持续回升,与猕猴桃绿色果肉品种魁蜜的叶绿素变化规律^[20]类似。经 4 d 后熟后,2 个品种(系)的叶绿素含量均不同程度地增加,其中龙成 2 号的增幅较大,显著高于盛花后 22 d 的叶绿素含量。而不同软枣猕猴桃果实的类胡萝卜素含量在盛花后 22~64 d 基本平稳,此后持续增加。

2.1.3 总酚及类黄酮含量的变化 如图 3 所示,在不同果实发育阶段,同一种软枣猕猴桃果实的总酚与类黄酮含量差异显著。其中,2 个品种(系)的总酚含量均呈不断下降的趋势。在盛花后 22~78 d,总酚含量急剧下降,此后趋势渐缓。海佳在果实后熟 4 d 后总酚含量虽然略有回升,但差异不明显。盛花后 22 d 时,海佳与龙成 2 号的总酚含量最高,分别为 1 141.85,1 234.61 mg GAE/100 g FW;与盛花后 22 d 相比,海佳与龙成 2 号果实在充分成熟后,总

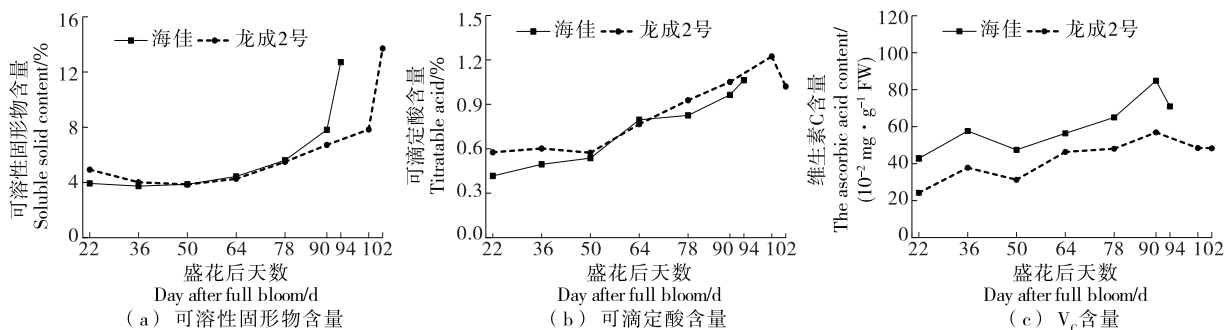


图 1 果实发育过程中基本品质指标的变化

Figure 1 Changes of basic quality characteristics during fruit development of hardy kiwifruit

表 1 2 个品种(系)软枣猕猴桃果实发育过程中色差值的变化[†]

Table 1 Changes of color difference values in 2 varieties or lines of hardy kiwifruit

品种(系)	花后天数/d	果皮			果肉		
		<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	<i>h</i> [°]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	<i>h</i> [°]
海佳	22	-8.67±0.24 ^d	29.37±1.47 ^a	106.46±0.69 ^a	-6.39±0.37 ^e	26.45±0.79 ^a	103.61±1.04 ^a
	36	-8.59±0.37 ^d	30.81±1.21 ^a	105.44±0.83 ^a	-5.38±0.60 ^d	26.71±1.61 ^a	101.37±0.81 ^b
	50	-8.13±1.11 ^d	31.12±0.61 ^a	104.62±1.92 ^a	-4.11±0.46 ^c	27.23±1.18 ^a	98.56±0.66 ^c
	64	-9.45±0.39 ^d	31.30±1.92 ^a	106.84±1.13 ^a	-2.73±0.96 ^{ab}	26.10±0.92 ^a	95.96±2.04 ^d
	78	-1.86±2.00 ^c	20.53±3.00 ^b	83.02±5.21 ^b	-3.05±0.41 ^b	23.51±1.50 ^b	97.38±0.76 ^{cd}
	90	9.06±1.12 ^a	10.85±1.56 ^c	49.95±7.03 ^c	-2.40±0.52 ^{ab}	21.74±1.26 ^c	96.36±1.54 ^d
	94(采后 4 d)	6.78±0.88 ^b	10.02±1.18 ^c	55.74±6.07 ^c	-1.98±0.38 ^a	15.12±1.16 ^d	97.43±1.24 ^{cd}
龙成 2 号	22	-8.77±0.63 ^b	31.36±0.89 ^a	105.61±0.81 ^{ab}	-6.03±0.35 ^d	26.72±1.46 ^{cd}	102.72±0.25 ^{ab}
	36	-8.41±0.88 ^b	31.49±1.40 ^a	104.93±0.98 ^{ab}	-5.52±0.53 ^{cd}	28.42±1.17 ^{abcd}	100.98±0.70 ^{bc}
	50	-7.70±1.05 ^b	30.05±1.65 ^a	104.33±1.23 ^{ab}	-5.68±1.40 ^{cd}	28.83±1.64 ^{abc}	101.06±2.10 ^{bc}
	64	-8.27±0.52 ^b	31.65±0.55 ^a	104.62±0.92 ^{ab}	-4.82±0.60 ^{abc}	30.65±1.24 ^a	99.08±0.84 ^b
	78	-8.39±0.43 ^b	31.13±1.03 ^a	105.13±1.23 ^{ab}	-5.05±0.31 ^{abcd}	29.95±1.46 ^{ab}	99.58±0.35 ^b
	90	-8.29±0.45 ^b	26.69±1.39 ^b	107.27±0.60 ^a	-4.30±1.13 ^a	25.82±2.99 ^d	99.32±1.62 ^b
	102	-3.90±2.31 ^a	22.97±2.81 ^c	99.13±4.76 ^c	-4.81±0.88 ^{abc}	27.84±2.74 ^{bcd}	99.75±1.07 ^b
	106(采后 4 d)	-4.40±0.56 ^a	18.50±1.18 ^d	103.43±2.02 ^b	-4.42±0.69 ^{ab}	18.79±1.30 ^e	103.32±2.57 ^a

[†] 同列字母不同表示在 0.05 的水平差异显著。

酚含量分别下降了 86.76%,88.24%。

在果实发育过程中,类黄酮含量也表现出随果实的成熟而逐步降低的变化趋势。在果实发育初期尤其是盛

花后 22 d,龙成 2 号的类黄酮含量明显高于海佳,此后随着类黄酮含量的急剧下降,2 个品种(系)间的差距逐步缩小;至盛花后 50 d 下降趋势略缓,采收时降至最低,此时

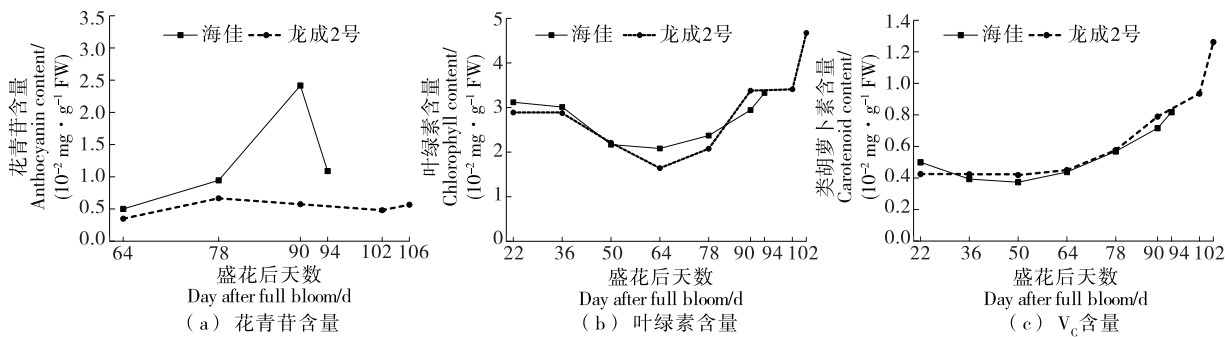


图 2 不同软枣猕猴桃果实发育过程中色素含量的变化

Figure 2 Changes of pigment contents in 2 varieties or lines of hardy kiwifruit

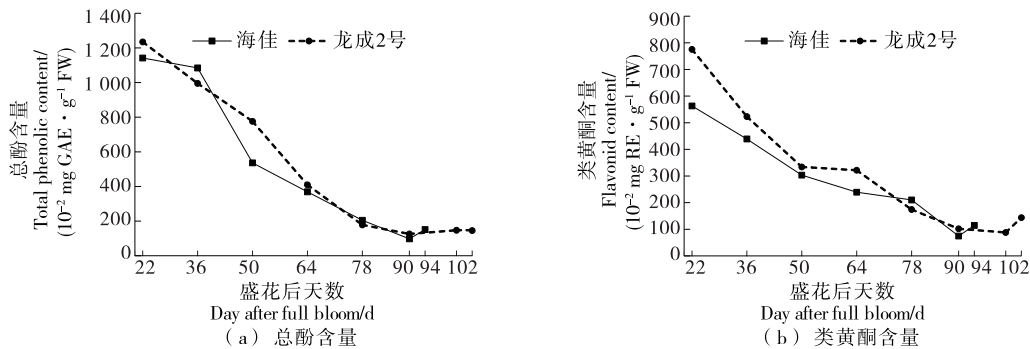


图 3 果实发育过程中总酚与类黄酮含量的变化

Figure 3 Changes in contents of total phenolics and flavonoids during fruit development

海佳与龙成 2 号的类黄酮含量分别为 74.57, 87.89 mg RE/100 g FW。后熟 4 d 后,不同软枣猕猴桃果实的类黄酮含量均略有回升。

相关研究^{[4]40-43[5][14]20-21}也表明,在果实发育过程中,总酚、类黄酮含量总体呈下降趋势。总酚和类黄酮在幼果中含量丰富,而后随果实发育逐渐降低,可能与酚类物质的合成、代谢及果实的膨大有关^{[4]40-43}。

2.2 软枣猕猴桃果实发育过程中抗氧化能力的动态变化

因抗氧化物质成分及其作用机理的复杂多样,为保证测定结果的全面性、准确性,选择 FRAP 法、ABTS 自由基清除法及 DPPH 自由基清除法 3 种方法对抗氧化能力进行综合评价,结果如图 4 所示。

虽然 3 种方法测定的抗氧化能力均随果实发育进程的推进而下降,但仍存在一定的区别。3 种抗氧化能力的最高值均出现在盛花后 22 d,且龙成 2 号的抗氧化能力

略高于海佳,其中 DPPH 自由基清除能力分别高达 1 234.90,1 027.78 mg TE/100 g FW,ABTS 自由基清除能力则分别为 842.64,754.36 mg TE/100 g FW,而 FRAP 值仅为 539.08,477.21 mg TE/100 g FW。总体而言,在果实发育的整个过程中,3 种抗氧化能力始终以 DPPH 自由基清除能力最高,其次为 ABTS 自由基清除能力,FRAP 值则相对较低。

在盛花后 22~50 d,2 个品种(系)果实的 3 种抗氧化能力均迅速下降。在盛花后 64 d,FRAP 值与 ABTS 自由基清除能力的下降趋势出现不同程度的缓和甚至略有回升,之后继续下降。至后熟 4 d 时又均略有提高,海佳与龙成 2 号的 FRAP 值分别为 202.75,191.16 mg RE/100 g FW,ABTS 自由基清除能力分别为 323.23,341.93 mg RE/100 g FW。而 DPPH 自由基清除能力则在盛花后 50 d 起相对比较平稳,为 484.98~599.69 mg TE/100 g FW。

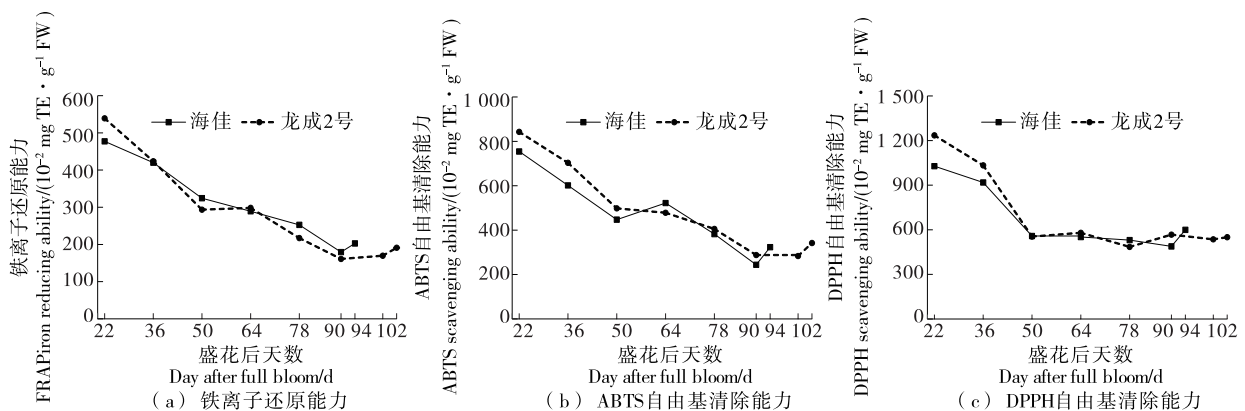


图 4 果实发育过程中铁离子还原能力、ABTS 及 DPPH 自由基清除能力的变化

Figure 4 Changes of antioxidant capacities during fruit development tested by FRAP, ABTS and DPPH

2.3 软枣猕猴桃果实发育过程抗氧化能力与主要品质指标的相关性分析

植物体内的抗氧化物质种类繁多,主要包括酚类物质、维生素和类胡萝卜素等^{[4]2-3[5,21]}。因此,为明确软枣猕猴桃果实抗氧化能力的主要影响因素,对其与主要品质指标的相关性进行了分析。如表 2 所示,2 个供试品种(系)的果实总酚、类黄酮含量与 FRAP 值、ABTS 自由基及 DPPH 自由基清除能力之间均存在极显著正相关。其中,海佳的总酚、类黄酮含量与 3 种抗氧化能力的相关系数均达 0.9 以上,而类黄酮含量与 FRAP 值、ABTS 自由基清除能力的相关系数略高于总酚;龙成 2 号的类黄酮含量与 3 种抗氧化能力的相关系数也都高于总酚。另一方面,在 3 种抗氧化能力的测定方法中,综合来看 FRAP 值与总酚、类黄酮的相关性最高,ABTS 自由基、DPPH 自由基清除能力次之。

果实的其他品质指标则与 3 种抗氧化能力间多数不存在明显的相关性,甚至存在显著、极显著负相关。其

中,花青苷、V_C及可滴定酸含量与 3 种抗氧化能力的相关性大多为显著或极显著负相关,而叶绿素、类胡萝卜素及可溶性固形物含量则与抗氧化能力无明显相关性。

综上所述,可初步推测在软枣猕猴桃果实发育过程中影响抗氧化能力的主要物质为总酚尤其是类黄酮,这与赣猕 6 号等 3 个猕猴桃品种的研究结论^[5]相一致。究其原因,可能与果实发育初期总酚、类黄酮含量处于较高水平,且后期降幅较大有关,而花青苷等则含量相对较低且变幅较小。而杜国荣^{[4]40-43}对不同基因型猕猴桃的研究则发现其抗氧化能力与总酚和 V_C含量均密切相关,Krupa 等^[21]也认为软枣猕猴桃采后贮藏期间抗氧化能力的变化与总酚、V_C含量有关,但此类研究关注的重点在于猕猴桃不同品种的差异性 or 采后生理,而非果实发育中的动态变化,其抗氧化物质主要组分、相对含量及其变幅等可能存在区别,因此与研究的观点并不存在矛盾。

作为总酚、类黄酮类化合物的重要组成部分之一^[22],花青苷不仅影响果实的外观品质, also 具有很强的抗氧化活

表 2 软枣猕猴桃果实发育过程抗氧化能力与各品质指标的相关性[†]

Table 2 The correlation between antioxidant capacities and quality characteristics in 2 varieties or lines

品种(系)	指标	总酚	类黄酮	花青苷	总叶绿素	类胡萝卜素	V _C	可滴定酸	可溶性固形物
海佳	FRAP	0.981**	0.997**	-0.825*	0.090	-0.698	-0.840*	-0.942**	-0.704
	ABTS	0.922**	0.965**	-0.816*	0.042	-0.656	-0.853*	-0.858*	-0.664
	DPPH	0.940**	0.904**	-0.615	0.496	-0.350	-0.593	-0.742	-0.386
龙成 2 号	FRAP	0.962**	0.998**	-0.833*	-0.287	-0.671	-0.868**	-0.840**	-0.514
	ABTS	0.962**	0.991**	-0.827*	-0.295	-0.683	-0.866**	-0.860**	-0.520
	DPPH	0.880**	0.925**	-0.722*	0.001	-0.459	-0.722*	-0.635	-0.333

† “**”表示在 0.01 的水平显著;“*”表示 0.05 的水平显著(Pearson 法双尾检验)。

性^[23-24]。在试验材料方面,海佳与龙成 2 号虽然在色泽上存在一定差异,但均非高花青苷品种,花青苷对软枣猕猴桃抗氧化能力的贡献有待于进一步扩大试验材料、深入评估。

2.4 软枣猕猴桃果实不同部位的抗氧化物质及抗氧化能力比较

软枣猕猴桃果实熟 4 d 后,不同部位的总酚、类黄酮含量及抗氧化能力的测定结果见表 3。果皮、果肉的总酚与类黄酮含量在品种间均无显著差异,但同一品种在不同部位的总酚、类黄酮含量相差甚远。其中,海佳的果皮总酚与类黄酮含量约为果肉的 46.37,338.13 倍,龙成 2 号果皮的上述 2 个指标则依次为果肉的 63.10,396.61 倍。同样,果皮的抗氧化能力也始终高于果肉。海佳果皮的 FRAP 值、ABTS 自由基及 DPPH 自由基清除能力分别为果肉的 19.50,29.15,20.03 倍;龙成 2 号果皮的上述指标则依次为果肉的 19.24,28.88,20.74 倍。

试验发现,总酚含量在果实不同部位的分布差异与其他学者的研究结果既有相似之处,也存在一定区别。如:Kim 等^[7]对 12 个软枣猕猴桃品种的总酚含量及涩味进行了评估,其中果皮的总酚平均含量约为果肉的 15 倍;Latocha 等^[25]分析了 6 个软枣猕猴桃品种的总酚及抗氧化能力,其中不同品种的果皮总酚含量为果肉的 9.0~12.6 倍,抗氧化能力约为果肉的 2~6 倍。虽然这些研究均表明软枣猕猴桃果皮总酚含量远高于果肉,但二者间

的差距仍低于试验结果。参试品种、试验方法等可能是造成上述差异的原因之一。在取样方法上,试验未参考文献^[7]和^[25]采用手术刀分离果皮的方法,而是用镊子将成熟软化果实的果皮剥离果肉,因此果皮上的果肉附着量等因素也可能会影响测定结果。

与总酚含量相比,果皮、果肉间的类黄酮含量相差悬殊,主要原因是果肉的类黄酮含量远低于总酚含量,而果皮的类黄酮含量又高于总酚。需要说明的是,类黄酮是酚类物质的重要组成,整个果实或果肉的总酚含量始终高于类黄酮含量也印证了这一点(见图 3、表 3)。但果皮的总酚含量却明显低于类黄酮,这种情况在其他研究^{[4]60-62[26]}中也有出现,可能与测定方法及选用的标准品等因素有关,甚至总酚、类黄酮的组分差异也会对测定结果造成一定干扰。

总体来看,软枣猕猴桃果皮的总酚及类黄酮含量明显高于果肉,抗氧化活性很强,具备较高的药用价值。但果皮中丰富的酚类物质,也往往伴随着涩味的加重,影响果实的适口性,究其原因可能与果皮中单宁特别是高分子量单宁含量的增加有关^[7]。

3 结论

在果实发育过程中,海佳与龙成 2 号 2 个软枣猕猴桃品种(系)的品质指标及抗氧化能力的变化趋势基本一致,除花青苷含量外的大部分指标在品种间差异不明显。

表 3 软枣猕猴桃果实不同部位总酚、类黄酮与抗氧化能力的比较[†]

Table 3 Comparison of total phenolics, flavonoids and antioxidant capacities in different parts of hardy kiwifruit

品种 (品系)	果实 部位	总酚/ (10 ⁻² mg GAE · g ⁻¹ FW)	类黄酮/ (10 ⁻² mg RE · g ⁻¹ FW)	抗氧化能力		
				FRAP/(10 ⁻² mg TE · g ⁻¹ FW)	ABTS/(10 ⁻² mg TE · g ⁻¹ FW)	DPPH/(10 ⁻² mg TE · g ⁻¹ FW)
海佳	果皮	3 676.77±1 842.90 ^a	6 346.47±2 631.99 ^a	3 570.43±1 694.94 ^a	4 513.59±1 980.15 ^a	9 887.03±3 666.70 ^a
	果肉	79.29±9.74 ^b	18.77±8.02 ^b	183.14±38.35 ^b	154.86±37.03 ^b	493.60±15.60 ^b
龙成 2 号	果皮	4 438.84±865.34 ^a	7 529.00±418.68 ^a	3 207.68±473.23 ^a	4 874.17±378.28 ^a	9 625.89±1 382.85 ^a
	果肉	70.35±0.68 ^b	18.98±4.05 ^b	166.69±9.79 ^b	168.75±13.46 ^b	464.10±17.14 ^b

† 同列字母不同表示在 0.05 的水平差异显著。

2个品种(系)的可溶性固形物、可滴定酸和维生素C含量上升,2个品种(系)的类胡萝卜素及海佳的花青苷含量在盛花后约64 d开始增加,叶绿素含量均先降后升,而总酚、类黄酮含量与铁离子还原能力、ABTS自由基清除能力及DPPH自由基清除能力均下降。在成熟果实的不同部位中,酚类物质主要富集于果皮,具备较强的抗氧化能力。相关性分析表明,总酚、类黄酮含量与铁离子还原能力、ABTS自由基清除能力及DPPH自由基清除能力表现为极显著正相关关系。需要说明的是,由于果实发育过程中果皮、果肉不易分离等原因,未对果实不同部位的抗氧化能力进行动态测定,有待于进一步补充、完善。基于软枣猕猴桃果实总酚与类黄酮含量在不同时期、不同部位的差异,可深入研究其酚类物质的代谢机制,为优良品种的培育及品质提升提供参考。

参考文献

- [1] 齐秀娟, 徐善坤, 钟云鹏, 等. 不同来源猕猴桃雄株花粉特性遗传差异及聚类分析[J]. 果树学报, 2016, 33(10): 1 194-1 205.
QI X J, XU S K, ZHONG Y P, et al. Genetic differences and cluster analysis of pollens from different male kiwifruit germplasm resources[J]. Journal of Fruit Science, 2016, 33(10): 1 194-1 205.
- [2] 高雪, 章印, 辛广, 等. 不同成熟度软枣猕猴桃果实的划分标准及贮藏特性[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1 784-1 796.
GAO X, ZHANG Y, XIN G, et al. Classification criteria and storage characteristics of *Actinidia Arguta* fruits with different maturities[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(10): 1 784-1 796.
- [3] 李红莉, 王澎, 李雪, 等. 黑龙江野生软枣猕猴桃种质资源表型性状的遗传多样性[J]. 经济林研究, 2022, 40(1): 150-158.
LI H L, WANG P, LI X, et al. Genetic diversity of phenotypic traits of wild *Actinidia arguta* germplasm resources in Heilongjiang[J]. Non-wood Forest Research, 2022, 40(1): 150-158.
- [4] 杜国荣. 猕猴桃, 柿和苹果果实的抗氧化能力及其抗氧化活性成分的分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2009.
DU G R. Study on the total antioxidant capacity and bioactive compounds of kiwi (*Actinidia*), persimmon (*Diospyros kaki* L.) and apple (*Malus domestica* Borkh.) fruits [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2009.
- [5] 黄春辉, 廖光联, 谢敏, 等. 不同猕猴桃品种果实发育过程中总酚和类黄酮含量及抗氧化活性的动态变化[J]. 果树学报, 2019 (2): 174-184.
HUANG C H, LIAO G L, XIE M, et al. Dynamic changes in total phenols, flavonoids and antioxidant capacity during fruit development of different kiwifruit cultivars[J]. Journal of Fruit Science, 2019(2): 174-184.
- [6] 秦晨亮, 丁玲, 代红军. 赤霞珠葡萄果实发育过程中酚类物质含量与相关酶活性的关系[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(11): 1 922-1 926.
QIN C L, DING L, DAI H J. Relationship between phenolic substance content and related enzymes activities during the development of Cabernet Sauvignon grape berries [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2015, 27(11): 1 922-1 926.
- [7] KIM J G, BEPPU K, KATAOKA I. Varietal differences in phenolic content and astringency in skin and flesh of hardy kiwifruit resources in Japan[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 120(4): 551-554.
- [8] LI H Y, YUAN Q, YANG Y L, et al. Phenolic profiles, antioxidant capacities, and inhibitory effects on digestive enzymes of different kiwifruits[J]. Molecules, 2018, 23(11): 2 957.
- [9] WANG Y T, LI L X, LIU H, et al. Bioactive compounds and in vitro antioxidant activities of peel, flesh and seed powder of kiwi fruit[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(9): 2 239-2 245.
- [10] 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: 3-6.
XIE M. Research on phenolic and antioxidant activity in *Actinidia eriantha* Benth [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017: 3-6.
- [11] 李海波, 薛浩, 薛静茹, 等. 中国沙棘树冠上中下部枝条的水碳代谢与生长结实性状研究[J]. 林业科学研究, 2022, 35(5): 188-195.
LI H B, XUE H, XUE J R, et al. Correlation between water-carbon metabolism and growth and middle and lower branches in the crown of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* Rousi[J]. Forest Research, 2022, 35(5): 188-195.
- [12] 沈馨, 王开勇, 周晓杰, 等. 不同土壤 pH 对银红槭叶色变化的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 29-36.
SHEN X, WANG K Y, ZHOU X J, et al. Effects of different soil pH on leaf color change of *Acer × freemanii* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 29-36.
- [13] 刘声传, 魏杰, 林开勤, 等. 黄化茶树新梢色素和主要生化成分含量变化特征及其相关性分析[J]. 西北植物学报, 2021, 41 (5): 808-816.
LIU S C, WEI J, LIN K Q, et al. Characteristics of pigments and main biochemical component contents and their relationships in young shoot of chlorophyll-deficient tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2021, 41(5): 808-816.
- [14] 李洪怡. 不同来源猕猴桃理化特性和酚类化合物及其体外生物活性的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
LI H Y. Physicochemical characteristics and phenolic profiles of kiwifruit from different sources and its in vitro biological activities[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2019.
- [15] 黄龙, 邓媛元, 张名位, 等. 不同苦瓜品种果肉中酚类物质含量及抗氧化能力比较[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4 660-4 668.
HUANG L, DENG Y Y, ZHANG M W, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of *Momordica charantia* L. of different varieties[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(22): 4 660-4 668.

- [16] 韦献雅, 殷丽琴, 钟成, 等. DPPH 法评价抗氧化活性研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(9): 317-322.
WEI X Y, YIN L Q, ZHONG C, et al. Advances in the DPPH radical scavenging assay for antioxidant activity evaluation[J]. Food Science, 2014, 35(9): 317-322.
- [17] 周子更, 王梓博, 金花林, 等. 软枣猕猴桃果实发育过程中糖酸合成相关酶活性变化[J]. 北方园艺, 2021(19): 22-28.
ZHOU Z G, WANG Z B, JIN H L, et al. Changes of enzyme activities related to glycolic acid synthesis during fruit development of *Actinidia arguta* [J]. Northern Horticulture, 2021 (19): 22-28.
- [18] 王博, 朴一龙, 王琳, 等. 野生软枣猕猴桃果实生长发育过程中生理生化变化[J]. 延边大学农学报, 2011, 33(1): 6-9.
WANG B, PIAO Y L, WANG L, et al. Changes of physio-biochemistry during the growth and development in undomesticated *Actinidia arguta* fruits[J]. Journal of Agricultural Science Yanbian University, 2011, 33(1): 6-9.
- [19] 刘春宏, 邱国良, 刘志斌, 等. 采收前软枣猕猴桃“魁绿”果实理化性质变化研究[J]. 资源开发与市场, 2019, 35(6): 849-854.
LIU C H, QIU G L, LIU Z B, et al. Changes of physicochemical properties of *A. arguta* Kuilv before harvesting [J]. Resource Development & Market, 2019, 35(6): 849-854.
- [20] 黄春辉, 葛翠莲, 高洁, 等. 不同类型猕猴桃果实发育过程中内果皮色泽的动态变化[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(3): 501-506.
HUANG C H, GE C L, GAO J, et al. Dynamic changes in flesh color in different kiwifruit types during fruit development[J]. Acta Agriculhurae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(3): 501-506.
- [21] KRUPA T, LATOCHA P, LIWINSKA A. Changes of physicochemical quality, phenolics and vitamin C content in hardy kiwifruit (*Actinidia arguta* and its hybrid) during storage [J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(2): 410-417.
- [22] 王沙, 张心慧, 赵玉洁, 等. 石榴花青苷合成相关基因 *PgMYB111* 的克隆与功能分析[J]. 园艺学报, 2022, 49(9): 1 883-1 894.
WANG S, ZHANG X H, ZHAO Y J, et al. Cloning and functional analysis of *PgMYB111* related to anthocyanin synthesis in pomegranate[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(9): 1 883-1 894.
- [23] LIU Y F, QI Y W, CHEN X, et al. Phenolic compounds and antioxidant activity in red- and in green-fleshed kiwifruits[J]. Food Research International, 2019, 116: 291-301.
- [24] 翁文昕, 宣继萍, 王刚, 等. 果肉着色过程中“华秀”李果实部分指标的比较及相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(2): 39-45.
WENG W X, XUAN J P, WANG G, et al. Comparison and correlation analysis on some indexes of *Prunus salicina* 'Huaxiu' fruit during flesh coloring progress[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2018, 27(2): 39-45.
- [25] LATOCHA P, ŁATA B, STASIAK A. Phenolics, ascorbate and the antioxidant potential of kiwiberry vs. common kiwifruit: The effect of cultivar and tissue type[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19: 155-163.
- [26] 陈月, 朱勇, 秦礼康. 苦荞不同部位酚类化合物组成与抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 15-19.
CHEN Y, ZHU Y, QIN L L. Phenolic compounds profile and antioxidant activities of different fractions of tartary buckwheat[J]. Food & Machinery, 2022, 38(11): 15-19.

(上接第 142 页)

- [16] 朱伟成, 邵海燕, 韩延超, 等. 不同预冷方式对茭白采后降温速度和贮藏品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(10): 1 873-1 879.
ZHU W C, HU H Y, HAN Y C, et al. Effects of different pre-cooling methods on cooling speed and storage quality of postharvest water bamboo shoot [J]. Journal of Zhejiang Agriculture, 2020, 32(10): 1 873-1 879.
- [17] 王晓芬. MAP 结合 UV-C 处理对微加工茭白保鲜效应及机理的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2017: 30-31.
WANG X F. Effect of MAP in combination with UV-C treatment on the preservation and mechanism of minimally processed water bamboo shoots[D]. Xi'an: Northwest A & F University, 2017: 30-31.
- [18] 向世杰. 气调贮藏及 1-MCP 保鲜处理在“大五星”枇杷果实上的应用研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
XIANG S J. Study on controlled atmosphere storage and 1-MCP preservation processing of "Dawuxing" loquat fruits[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [19] 王利斌, 姜丽, 石韵, 等. 气调贮藏对四季豆生理生化特性的影响[J]. 食品科学, 2013(8): 289-293.
WANG L B, JIANG L, SHI Y, et al. Physiobiochemical characteristics of *phaseolus vulgaris* L. during controlled atmosphere storage[J]. Food Science, 2013(8): 289-293.
- [20] 陈丽. 甘薯块根质构特性的评价研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013: 23-25.
CHEN L. Study on texture properties evaluation of sweet potato [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2013: 23-25.
- [21] SHEN Q, KONG F C, WANG Q. Effect of modified atmosphere packaging on the browning and lignification of bamboo shoots[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(2): 348-354.
- [22] ZHENG H, CUI C, ZHANG Y, et al. Active changes of lignification-related enzymes in pepper response to *Glomus intraradices* and/or *Phytophthora capsici* [J]. Journal of Zhejiang University, 2005(8): 778-786.
- [23] LIU M Y, QIAN B J, ZHANG H, et al. Sanitizer treatments alleviate lignification of sliced few-flower wild rice (*Zizania latifolia* Turcz.) [J]. Food Research International, 2010, 43: 2 363-2 368.