刘瑜, 葛红娟, 张鑫鑫, 等. 30 种海棠果的综合品质分析及其黄嘌呤氧化酶抑制活性的探究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 294−305. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030055
LIU Yu, GE Hongjuan, ZHANG Xinxin, et al. Comprehensive Quality Analysis and Exploration of Xanthine Oxidase Inhibitory Activity of 30 Crabapple Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 294−305. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030055

· 分析检测 ·

30 种海棠果的综合品质分析及其黄嘌呤氧化酶抑制活性的探究

刘　瑜[1], 葛红娟[2,+], 张鑫鑫[1], 孙吉禄[2], 马荣群[2], 孟祥红[1,*]
（1.中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266404;
2.青岛市农业科学研究院, 山东青岛 266100）

摘　要: 为更好地了解不同品种海棠果的品质特性，有效利用海棠果资源，本研究测定了 30 个品种海棠果的单果重、水分含量、可溶性固形物等理化指标及黄嘌呤氧化酶半抑制浓度等生物活性指标，通过测定 DPPH 自由基清除能力、ABTS^{+}自由基清除能力和铁离子还原能力比较了体外抗氧化活性，并对其进行了相关性分析、主成分分析和聚类分析。结果表明，所测品种海棠果中总酚含量（2.749~80.877 mg GAE/g DW）和总黄酮含量（3.522~167.312 mg RE/g DW）较高，其与果实横径、纵径、单果重呈显著负相关（P<0.05），具有较好的抗氧化活性和黄嘌呤氧化酶抑制活性。经主成分分析，5 种主成分累计贡献率为 82.570%，海棠果实综合评价模型筛选出‘2010-6’为品质最佳的品种，其总酚、总黄酮含量在所测品种中最高，且具有较好的抗氧化活性（0.827、0.654 和 0.518 mmol TE/g DW）和较强的黄嘌呤氧化酶抑制活性（IC_{50}=2.724 mg/mL），具有较好的开发利用的前景。海棠果的糖酸比（0.47~5.48）较小，更适宜用来加工制成果汁、果酒等产品，或作为提取活性物质的来源。本研究从营养品质、功能特性等方面对海棠果进行了全面的分析，为不同品种海棠果的开发利用提供理论依据。

关键词: 海棠果, 品质特性, 综合分析, 黄嘌呤氧化酶
中图分类号: TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0294−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030055　　本文网刊:

Comprehensive Quality Analysis and Exploration of Xanthine Oxidase Inhibitory Activity of 30 Crabapple Varieties

LIU Yu[1], GE Hongjuan[2,+], ZHANG Xinxin[1], SUN Jilu[2], MA Rongqun[2], MENG Xianghong[1,*]
（1.College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266404, China;
2.Qingdao Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266100, China）

Abstract: To elucidate the quality characteristics of crabapple cultivars and facilitate resource utilization, we systematically evaluated 30 crabapple varieties using multidimensional analyses. Physicochemical parameters (fruit weight, moisture content, and soluble solids content) and bioactive profiles (xanthine oxidase inhibitory activity, expressed as IC_{50}) were quantified. Antioxidant potential was assessed using three established methods: DPPH and ABTS^{+} radical scavenging capacity, and ferric ion-reducing antioxidant power. Multivariate statistical approaches, including correlation analysis, principal component analysis (PCA), and hierarchical cluster analysis, were used for data interpretation. Notably, the cultivars contained substantial levels of total phenolics (2.749~80.877 mg GAE/g DW) and flavonoids (3.522~167.312 mg RE/g DW), demonstrating strong negative correlations (P<0.05) with fruit morphometric parameters (diameter, length, and weight). These phytochemical profiles accounted for the remarkable antioxidant capacity and inhibition of xanthine oxidase. The PCA revealed that the first five principal components explained 82.570% of the total variance. Through the established

收稿日期: 2025−03−07　　+并列第一作者
作者简介: 刘瑜（1999−）, 女, 博士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 17861510172@163.com。
葛红娟（1985−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 苹果种质资源收集评价及矮化砧木选育, E-mail: ghj042@163.com。
*** 通信作者:** 孟祥红（1973−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品营养加工与保鲜, E-mail: mengxh@ouc.edu.cn。

quality evaluation model, cultivar '2010-6' emerged as the most promising candidate, characterized by the highest phenolic and flavonoid contents, superior antioxidant activities (0.827, 0.654, and 0.518 mmol TE/g DW), and potent xanthine oxidase inhibition (IC_{50}=2.724 mg/mL). Despite the suboptimal sugar–acid ratio (0.47~5.48), these findings position crabapples as valuable raw materials for functional food processing (such as juice and wine production) and natural bioactive compound extraction. This study establishes a scientific framework for the comprehensive quality assessment of crabapple resources, providing critical insights for varietal selection in nutraceutical development and value-added processing.

Key words: crabapple; quality characteristics; comprehensive analysis; xanthine oxidase

海棠(*Malus spectabilis*)为蔷薇科苹果属, 在我国资源丰富, 种植广泛。海棠的果实是药食两用食材[1], 与商品苹果相比, 海棠果实中维生素 C、纤维素、矿质元素、特定酚类化合物、有机酸和氨基酸含量较高[2], 不仅能够生津止渴、健脾止泻, 还具有治疗消化不良、食积腹胀、痔疮等的作用, 在中国, 海棠用于治疗腹泻、消化不良等消化道疾病的传统医学已有数百年的历史[3]。近年来, 研究者还发现海棠果具有多种功效, 如降血糖[4]、抗氧化[5]、降低血清胆固醇[6], 抗肿瘤[7] 等。

高尿酸血症是血液中尿酸浓度异常升高的代谢性疾病, 指成人在正常嘌呤饮食情况下, 无论男性还是女性, 非同日 2 次空腹血尿酸水平超过 420 μmol/L[8], 易引发痛风、肾结石及慢性肾病等并发症。目前, 临床上使用的药物别嘌醇和非布司他, 是通过抑制黄嘌呤氧化酶(XO)的活性, 从而达到降低血清尿酸水平的目的[9], 但这些药物具有一定的副作用, 因此研究者开始寻求天然的活性物质, 来抑制 XO 的活性。研究表明, 海棠果中含有丰富的生物活性成分, 如芦丁、(-)-表儿茶素、根皮素、没食子酸、原花青素 B1、绿原酸、槲皮素、咖啡酸等[10], 其中芦丁、(-)-表儿茶素、槲皮素和绿原酸等具有较好的 XO 抑制活性[11−13]。因此海棠果具有抑制 XO 活性及缓解高尿酸血症的潜力, 目前尚未有研究报道。

海棠果虽可食用, 具有较好的功能活性, 但因其酚类物质和有机酸含量较多, 味道酸涩[14], 且海棠果果实较苹果小, 很少被食用[15], 鲜食利用率较低, 因此大量的海棠果被丢弃, 造成资源浪费。目前以海棠果为原料的加工食品种类相对较少[16], 已进行综合品质分析、生物活性验证的海棠果品种也较少, 人们对海棠果的品质特性、化学成分以及不同品种之间的联系缺乏系统的了解, 因此分析不同品种海棠果的理化性质、营养品质尤为重要, 能够为海棠果精深加工、资源利用提供理论依据, 提高其经济价值。

青岛市农业科学研究院在育种基地里保存有近 300 份矮化苹果种质资源, 其中包括野生海棠等中国特有的种质资源, 在海棠果的研究和培育方面有显著成果。因此本研究选择了青岛市农业科学研究院部分具有代表性的海棠果品种, 测定了其单果重、果形指数、水分含量等基本理化指标、体外抗氧化活性及黄嘌呤氧化酶抑制活性, 为海棠果资源的综合利用提供了新思路。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

海棠果样品　30 个, 采收于山东省青岛市和新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州。于 2024 年 8~10 月, 果实完全成熟时手工采摘, 采样后转移至实验室−80 ℃ 保存备用; 福林酚、黄嘌呤氧化酶(0.02 U)、3,5-二硝基水杨酸试剂　北京索莱宝科技有限公司; 芦丁(分析纯)、没食子酸(色谱纯)　上海源叶生物科技有限公司; 亚硝酸钠(分析纯)、九水合硝酸铝(分析纯)、醋酸钠(分析纯)、二甲基亚砜(分析纯)、邻苯二甲酸氢钾(分析纯)　国药集团化学试剂有限公司; 甲酸(色谱纯)　上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

AQUASEARCHER™pH 计　奥豪斯仪器(上海)有限公司; HFD-4 冷冻干燥机　上海贝晶生物技术有限公司; Powerwave XS 酶标仪　美国 Bio Tek 公司; PAL-1 阿贝折光仪　日本 ATAGO 公司; CR-400 色差仪　柯尼卡美能达(中国)有限公司; X-7 紫外可见光分光光度计　上海元析仪器有限公司; Hei-VAP Value 旋转蒸发仪　德国 Heidolph 公司; Agilent 1260 高效液相色谱仪　美国安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　海棠果匀浆上清液及提取物的制备

1.2.1.1　匀浆上清液　海棠果去梗去核后, 使用无菌均质仪将果肉匀浆, 离心(8000 r/min, 30 min)取上清液, 备用。

1.2.1.2　海棠果提取物制备　海棠果去梗去核后使用冷冻干燥机进行冷冻干燥, 在液氮保护下研磨成海棠果干粉。称取 1 g 海棠果冻干粉, 加入 40 mL 50% 甲酸甲醇提取液(甲醇∶水∶甲酸=50∶49∶1), 室温避光静置 24 h 后离心(8000 r/min, 30 min), 取上清液, 用提取液冲洗两次以上并定容至 50 mL, 用于测定海棠果总酚、总黄酮、总花青素、根皮苷含量及体外抗氧化活性。同样的提取方法, 提取液转移至旋蒸瓶, 在 35 ℃, 200 r/min, 最大真空度条件下将提取剂蒸干, 使用 0.1% 二甲基亚砜溶液复溶至 100 mg/mL, 用于测定海棠果黄嘌呤氧化酶抑制活性。提取液储存于−80 ℃ 冰箱备用。

1.2.2 海棠果理化性质的测定

1.2.2.1 果实横径、纵径及果形指数 随机抽取 20 粒海棠果实,使用电子数显游标卡尺测量统计海棠果的横径和纵径,从而计算果形指数(纵径比横径)。

1.2.2.2 单果重及可食用部分比例 随机抽取 5 粒海棠果实,称重,重复 3 次,取平均值。去梗去核,称量果肉重量,按公式(1)计算可食用部分比例。重复 3 次,取平均值。

$$m_2(\%)=\frac{m_0}{m_1} \quad \text{式(1)}$$

式中,m_0 为去梗去核后果肉重量,g;m_1 为去梗去核前果实重量,g。

1.2.2.3 含水量 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定。

1.2.2.4 出汁率 随机抽取 5 粒海棠果实,记重量为 m_1,果实去梗去核后,使用无菌均质机将果实匀浆,8000 r/min 的条件下离心取上清液,上清液质量为 m_0,重复 3 次,取平均值。

$$m_2(\%)=\frac{m_0}{m_1} \quad \text{式(2)}$$

式中,m_0 为匀浆上清液重量,g;m_1 为去梗去核前果实重量,g。

1.2.2.5 还原糖 将匀浆上清液稀释 100 倍,取 1 mL,用蒸馏水补至 2.0 mL,然后加入 1.5 mL 3,5-二硝基水杨酸试剂,混合均匀,沸水浴 5 min,用流动冷水冷却后定容到 25 mL,540 nm 波长处测定吸光值。以葡萄糖标准溶液制作标准曲线:y=0.267x+0.0461(R^2=0.9989),其中 x 为葡萄糖浓度,mg/mL,y 为吸光度,代入标准曲线计算还原糖含量。

1.2.2.6 可滴定酸 取 1 mL 上清液于 50 mL 蒸馏水中,使用标定好的 NaOH 溶液滴定至 pH8.3,记录消耗的 NaOH 体积 V_1,使用蒸馏水做空白滴定,记录消耗 NaOH 体积 V_2,按公式(3)计算滴定酸含量 X(g/kg,以苹果酸计,苹果酸转换系数为 0.067)。每个样品重复 3 次取平均值。

$$X=C\times(V_1-V_2)\times K\times F\times 1000 \quad \text{式(3)}$$

式中:C 为 NaOH 的浓度,mol/L;V_1 为消耗 NaOH 体积,mL;V_2 为空白试验消耗 NaOH 体积,mL;K 为酸的换算系数:以苹果酸计,0.067;F 为样品稀释倍数。

1.2.2.7 可溶性固形物 使用阿贝折光仪测定匀浆上清液的可溶性固形物含量,重复 3 次,取平均值。

1.2.2.8 糖酸比 糖酸比为可溶性固形物与可滴定酸的比值。

1.2.3 总酚、总黄酮和总花青素测定

1.2.3.1 总酚 将提取液稀释 20 倍作为样液。取样液 1.0 mL,加入 0.5 mL 福林酚试剂,反应 8 min 后加入 1.5 mL 20% 碳酸钠溶液和 7.0 mL 蒸馏水,摇匀暗处反应 2 h 后测 765 nm 处吸光值,结果以没食子酸计,标准曲线为 y=0.0508x+0.0627(R^2=0.9961),x 为没食子酸浓度(mg/L),y 为吸光度。

1.2.3.2 总黄酮 将提取液稀释 10 倍作为样液。取样液 1.0 mL,加入 4.4 mL 30% 乙醇、5% $NaNO_2$ 溶液 0.3 mL 并混匀,静置 5 min 后,加入 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 0.3 mL,摇匀后静置 5 min。加入 1.0 mol/L NaOH 溶液 4.0 mL,摇匀后静置 10 min,510 nm 波长下测定其吸光值,使用 1.0 mL 蒸馏水代替样液,作为对照,检测 510 nm 下吸光值,结果以芦丁计,标准曲线为:y=0.0056x+0.0495(R^2=0.9994),x 为芦丁浓度(mg/L),y 为吸光度。

1.2.3.3 总花青素 分别使用 pH1.0 缓冲液和 pH4.5 缓冲液 2 倍稀释海棠果提取物,在 520 nm 和 700 nm 下分别测定提取物稀释液的吸光度,使用蒸馏水做空白对照,在稀释后 20~50 min 内检测。根据下列公式计算花青素浓度,以花青素-3-葡萄糖苷当量表示,mg/L。

$$\text{花青素(矢车菊素-3-葡萄糖苷当量,mg/L)}=\frac{A\times MW\times DF}{\varepsilon\times 1}\times 1000 \quad \text{式(4)}$$

式中:$A=(A_{520}-A_{700})pH1.0-(A_{520}-A_{700})pH4.5$;MW(花青素-3-葡萄糖苷(cyd-3-glu)的摩尔质量)为 449.2 g/mol;DF 为稀释因子;l 为以 cm 为单位的光程;ε(cyd-3-glu 的摩尔消光系数)为 26900,$L\cdot mol^{-1}\cdot cm^{-1}$;1000 为从 g 转换为 mg 的因子。

1.2.4 根皮苷含量的测定 使用高效液相色谱法进行测定,色谱条件:ZORBAX Eclipse SB-C_{18},100 mm×4.6 mm,5 μm 色谱柱,以 0.5% 的甲酸水溶液:乙腈(60∶40,V/V)为流动相,流速 1.0 mL/min,30 ℃ 柱温,进样 20 μL,检测 285 nm 吸收峰。取海棠果提取物(同 1.2.1.2),用流动相稀释 2 倍,过 0.22 μm 孔径滤膜,待检测。以根皮苷标准溶液制作标准曲线:y=21.067x−8.6055(R^2=0.9999),x 为根皮苷浓度(μg/mL),y 为峰面积(mAU),根据标准曲线计算各品种的根皮苷含量。

1.2.5 体外抗氧化活性测定

1.2.5.1 $ABTS^+$自由基清除能力 使用蒸馏水将 1.2.1.2 制备的各品种海棠果提取物稀释 50 倍作为样液,检测 $ABTS^+$自由基清除能力。将 7.4 mmol/L ABTS 溶液与 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液按体积比 1∶1 混合,避光静置 16 h,实验时加入蒸馏水稀释,使其吸光值处于 0.7±0.02,作为工作液。将 0.2 mL 样液与 4.0 mL 工作液混合均匀,室温下避光反应 6 min,于 734 nm 处测定样品吸光值。以去离子水代替样液作为空白对照。以同样的方法用 Trolox

equivalents（TE）制作标准曲线：y=−0.0006x+0.6928（R^2=0.9995），x 为 TE 浓度（μmol/L），y 为吸光度，计算各品种海棠果 $ABTS^+$自由基清除能力，结果以 TE 表示。

1.2.5.2　铁离子还原能力测定　使用蒸馏水将 1.2.1.2 制备的各品种海棠果提取物稀释 50 倍作为样液，测定铁离子还原能力。取 0.3 mol/L pH 为 3.6 的醋酸盐缓冲液 25 mL，10 mmol/L TPTZ 溶液（以 40 mmol/L HCl 配制）2.5 mL，20 mmol/L $FeCl_3$ 溶液 2.5 mL，混合摇匀即得工作液。将 30 μL 样液与 900 μL 工作液混合均匀，避光静置 30 min，于 593 nm 处测定样品吸光值。以同样的方法用 Trolox equivalents（TE）制作标准曲线：y=0.0007x+0.1131（R^2=0.999），x 为 TE 浓度（μmol/L），y 为吸光度，计算各品种海棠果铁离子还原能力，结果以 TE 表示。

1.2.5.3　DPPH 自由基清除能力　使用蒸馏水将 1.2.1.2 制备的各品种海棠果提取物稀释 50 倍作为样液，检测 DPPH 自由基清除能力。使用甲醇配制 DPPH 自由基母液（125 mg/L），现配现用，避光低温贮存。使用时将母液用甲醇稀释 5 倍，即为工作液。将 0.1 mL 样液与 3.9 mL 工作液混合均匀，避光静置 20 min，于 517 nm 处测定样品吸光值。以甲醇代替样液作为空白对照。以同样的方法用 Trolox equivalents（TE）制作标准曲线：y=−0.0003x+0.4331（R^2=0.9985），x 为 TE 浓度（μmol/L），y 为吸光度，计算各品种海棠果 DPPH 自由基清除能力，结果以 TE 表示。

1.2.6　黄嘌呤氧化酶（XO）的半抑制浓度测定　将海棠果提取物（100 mg/mL）稀释至不同浓度（5、10、20、30、40、50、60、70、80 mg/mL），以 180 μL 浓度为 1 mmol/L 的黄嘌呤为底物，加入 150 μL 样品（或抑制剂），90 μL 0.02 U 黄嘌呤氧化酶，涡旋混合均匀，在 37 ℃ 下反应 30 min，加入 180 μL 0.5 mol/L 的盐酸终止反应，涡旋混合均匀，测 295 nm 处吸光值，计算 IC_{50}。

$$抑制率(\%)=\frac{(B-A)-(D-C)}{(B-A)}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中：A 为只含有黄嘌呤底物、终止剂及缓冲液的待测体系的吸光值；B 为含有黄嘌呤氧化酶、黄嘌呤底物、终止剂及缓冲液的待测体系吸光值；C 为只含有受试物、黄嘌呤底物、终止剂及缓冲液的待测体系的吸光值；D 为含有受试物、黄嘌呤氧化酶、黄嘌呤底物、终止剂及缓冲液的待测体系的吸光值。

1.3　数据处理

在所有实验中，测定三个平行样品，其数据表示为平均值±标准偏差。使用 IBM SPSS Statistics 25 软件进行 Duncan's ANOVA 的统计分析、相关性分析、主成分分析和聚类分析，不同字母表示各组间差异显著（P<0.05）。采用 Origin 2024 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　基本理化指标

2.1.1　果实外观及纵切面　海棠果的大小、形状和颜色是评价其品质的重要指标之一，影响鲜食和加工的适宜性。本研究所测海棠果的外观及纵切面见图 1。30 个海棠果品种中，有 12 个品种果肉颜色为红色或微粉色，分别为‘A378’、‘大棠琴红’、‘大棠婷美’、‘大棠博来’、‘勋紫四号’、‘红勋一号’、‘64-13-3’、‘达尔文’、‘舞美’、‘64-13-9’、‘凯尔斯’、‘红勋一号（伊犁）’。



图 1　不同海棠果的果实外观及纵切面

Fig.1　Appearance and longitudinal section of the crabapple samples

注：01：‘A378’；02：‘大棠琴红’；03：‘大棠婷美’；04：‘大棠博来’；05：‘勋紫四号’；06：‘红勋一号’；07：‘黄太平’；08：‘64-13-3’；09：‘达尔文’；10：‘舞美’；11：‘64-13-9’；12：‘凯尔斯’；13：‘绚丽’；14：‘R4’；15：‘八棱海棠’；16：‘包头山丁子’；17：‘朱眉海棠’；18：‘海红’；19：‘槟子’；20：‘扁果海棠’；21：‘森林苹果’；22：‘红勋一号（伊犁）’；23：‘2010-6’；24：‘俄 2’；25：‘火焰’；26：‘满州里’；27：‘JM7’；28：‘草原海棠’；29：‘B7E4’；30：‘绚丽（9.20）’。

2.1.2　横径、纵径及果形指数　30 种海棠果的果实横径、纵径及果形指数见表 1。参考蔡雪雁[17]的分类标准，将海棠果依据果实横径进行分类，可分为大果（25 mm 以上）、中果（13~25 mm）、小果（6~13 mm）和特小果（6 mm 以下），考虑到食品加工利用的适用性，本次采样的海棠果品种果实均较大，其中大果有 17 种，中果 13 种；根据果形指数，海棠果可分为长圆形（1）、椭圆形（0.9~1）、近圆形（0.8~0.9）和扁圆形（0.6~0.8），在所测的 30 个品种中，不同果形指数的品种数量分别为 1、11、16 和 2 个，近圆形的海棠品种最多。

2.1.3　单果重　果实重量和大小如表 1 所示。单果重量在 1.69 g 到 79.22 g 之间，大部分在 20 g 以下；可食用部分比例在 45.27% 到 85.00% 之间（表 1）。单果重较大的品种有‘勋紫四号’、‘黄太平’、‘舞美’、‘64-13-9’、‘森林苹果’，30 g 以上，其中‘森林苹果’单果重最大，达 79.22 g；单果重较小的品种有‘绚丽’、‘包头山丁子’、‘2010-6’、‘绚丽（9.20）’，2 g 以下，其中‘2010-6’单果重最小，仅 1.69 g。17 个品种的可食用部分比例高于平均值 70.11%。高可食用部分比例有

表 1　不同品种海棠果的理化性质

Table 1　Physical and chemical properties of different crabapple samples

编号	样品名称	横径(mm)	纵径(mm)	果形指数	单果重(g)	可食用部分比例(%)	含水量(%)	出汁率(%)	还原糖 (mg/mL)	可滴定酸 (TA, g/L, 以苹果酸计)	可溶性固形物 (TSS, °Brix)	糖酸比 (TSS/TA)
01	A378	26.03±1.42^{j}	23.48±1.50^{j}	0.90±0.06^{de}	8.88±0.36^{ij}	77.07±0.23^{cde}	84.15±0.15^{gh}	29.04±2.22^{defg}	97.80±1.69^{f}	6.899±0.066^{r}	14.3±0.1^{ef}	2.07
02	大棠琴红	38.54±3.35^{e}	34.06±3.62^{e}	0.88±0.05^{ef}	24.10±1.13^{f}	62.22±1.89^{i}	86.96±0.54^{bc}	43.08±4.43^{a}	72.37±0.45^{n}	8.435±0.050^{n}	10.9±0.1^{m}	1.29
03	大棠婷美	18.21±1.15^{mn}	14.57±1.10^{no}	0.80±0.03^{jk}	3.19±0.09^{mn}	59.78±1.70^{ij}	80.04±0.45^{kl}	3.03±1.40^{o}	48.86±0.64^{t}	21.460±0.227^{a}	10.0±0.1^{o}	0.47
04	大棠博来	22.08±1.19^{l}	19.49±1.52^{k}	0.88±0.06^{ef}	6.93±0.31^{jkl}	70.68±1.14^{fgh}	81.70±0.16^{j}	26.74±0.06^{fghi}	68.67±1.02^{op}	12.380±0.083^{g}	11.9±0.1^{j}	0.96
05	勋紫四号	49.94±4.81^{b}	41.71±5.28^{b}	0.83±0.04^{ghij}	62.58±1.57^{b}	79.42±1.24^{bcd}	88.29±0.01^{a}	31.36±2.84^{def}	59.80±0.75^{r}	12.510±0.066^{g}	9.5±0.1^{q}	0.76
06	红勋一号	31.31±2.42^{h}	25.84±2.80^{i}	0.82±0.04^{hijk}	16.09±0.80^{h}	85.00±1.00^{a}	87.11±0.32^{bc}	34.57±3.70^{bcd}	58.22±1.06^{r}	13.764±0.302^{f}	9.2±0.1^{r}	0.67
07	黄太平	42.63±3.45^{c}	33.68±2.95^{e}	0.79±0.05^{kl}	38.06±1.89^{c}	72.57±1.58^{fgh}	82.70±0.14^{i}	34.09±0.81^{cde}	87.98±1.80^{h}	7.086±0.331^{qr}	15.0±0.1^{d}	2.12
08	64-13-3	38.75±2.67^{e}	33.20±2.80^{e}	0.86±0.06^{fgh}	27.46±0.27^{e}	63.64±2.61^{i}	87.43±0.07^{b}	28.32±3.12^{efgh}	52.27±0.66^{s}	14.314±0.188^{e}	9.0±0.0^{s}	0.63
09	达尔文	22.27±2.19^{l}	20.41±1.98^{k}	0.92±0.05^{de}	5.62±0.25^{klm}	78.05±2.03^{cd}	85.33±0.11^{de}	25.42±9.93^{fghi}	63.59±0.69^{q}	10.123±0.193^{jk}	10.1±0.0^{n}	1.00
10	舞美	42.76±2.37^{c}	38.69±2.89^{c}	0.91±0.06^{de}	35.43±1.75^{c}	70.75±1.40^{fgh}	84.95±0.81^{ef}	26.49±2.81^{fghi}	64.76±0.50^{q}	10.310±0.137^{ij}	9.8±0.1^{p}	0.95
11	64-13-9	42.77±3.71^{c}	35.66±2.64^{d}	0.84±0.04^{ghij}	31.34±3.59^{d}	68.86±2.71^{gh}	86.96±0.16^{bc}	22.58±4.08^{hijk}	60.10±0.75^{r}	10.706±0.076^{h}	9.0±0.0^{s}	0.84
12	凯尔斯	24.07±1.98^{k}	20.69±1.54^{k}	0.86±0.06^{fg}	5.88±0.71^{klm}	74.91±1.33^{def}	81.76±0.16^{j}	18.30±2.01^{jkl}	113.36±1.15^{d}	7.108±0.069^{pqr}	15.8±0.0^{b}	2.22
13	绚丽	16.72±1.39^{no}	16.43±1.19^{lm}	0.99±0.06^{ab}	2.25±0.34^{n}	50.34±6.19^{k}	74.26±0.16^{p}	6.32±0.13^{no}	74.45±0.97^{lm}	9.952±0.023^{k}	12.2±0.0^{i}	1.23
14	R4	26.82±2.65^{j}	23.82±1.70^{j}	0.89±0.05^{ef}	9.34±0.37^{ij}	71.50±1.27^{fgh}	78.81±0.13^{m}	28.21±1.91^{efgh}	126.64±2.57^{b}	2.609±0.057^{u}	14.3±0.0^{f}	5.48
15	八棱海棠	23.87±1.58^{k}	19.19±1.28^{k}	0.81±0.04^{ijk}	6.46±0.26^{jkl}	73.00±2.66^{efg}	82.00±0.12^{j}	17.13±0.36^{kl}	76.16±0.14^{kl}	9.947±0.125^{k}	13.7±0.1^{g}	1.37
16	包头山丁子	16.54±1.04^{o}	15.09±0.82^{mn}	0.91±0.06^{de}	2.27±0.18^{n}	56.17±1.55^{j}	77.85±0.35^{n}	9.30±1.64^{mn}	105.16±1.45^{e}	9.474±0.066^{l}	14.4±0.0^{e}	1.52
17	朱眉海棠	21.94±2.02^{l}	16.65±1.69^{lm}	0.76±0.04^{l}	4.53±0.42^{lmn}	72.22±2.26^{fgh}	82.67±0.47^{i}	21.55±3.63^{ijk}	84.86±2.26^{i}	5.634±0.019^{s}	10.1±0.0^{n}	1.79
18	海红	26.98±1.66^{j}	22.60±1.50^{j}	0.84±0.05^{ghi}	10.84±0.46^{i}	80.70±3.30^{abc}	81.98±0.46^{j}	38.54±0.49^{abc}	69.92±0.63^{o}	9.133±0.331^{m}	11.3±0.0^{l}	1.24
19	槟子	23.03±1.12^{kl}	22.70±1.96^{j}	0.99±0.07^{ab}	7.90±1.03^{jk}	77.23±4.37^{cde}	84.39±0.48^{fg}	34.91±1.53^{bcd}	76.70±0.44^{k}	7.791±0.057^{o}	9.5±0.0^{q}	1.22
20	扁果海棠	40.40±1.84^{d}	33.16±1.46^{e}	0.82±0.04^{hijk}	27.91±1.56^{e}	68.48±1.63^{gh}	84.63±0.34^{fg}	37.69±2.82^{abc}	76.28±1.51^{kl}	8.220±0.099^{n}	10.8±0.1^{m}	1.32
21	森林苹果	56.84±3.47^{a}	48.96±4.00^{a}	0.86±0.06^{fg}	79.22±8.04^{a}	83.76±1.10^{ab}	86.91±0.27^{bc}	40.68±3.58^{ab}	67.42±0.81^{p}	3.104±0.144^{t}	9.2±0.1^{r}	2.95
22	红勋一号(伊犁)	13.76±1.30^{f}	13.19±1.54^{g}	0.82±0.05^{hijk}	16.67±1.00^{h}	84.84±1.24^{a}	86.62±0.55^{c}	24.29±4.81^{ghij}	73.41±0.83^{mn}	15.623±0.281^{d}	9.7±0.0^{p}	0.62
23	2010-6	29.99±4.10^{p}	27.87±4.34^{o}	0.96±0.06^{bc}	1.69±0.30^{n}	45.27±4.14^{l}	74.63±0.30^{p}	9.41±2.76^{mn}	120.06±1.80^{c}	20.155±0.163^{b}	20.2±0.1^{a}	1.00
24	俄2	18.61±1.64^{hi}	16.99±1.52^{gh}	0.93±0.05^{cd}	14.95±1.37^{h}	83.26±1.50^{ab}	88.50±0.54^{a}	40.56±1.57^{ab}	87.39±1.25^{h}	7.229±0.099^{pq}	8.1±0.0^{t}	1.12
25	火焰	18.12±1.63^{m}	16.66±1.74^{l}	0.91±0.06^{de}	3.32±0.32^{mn}	61.39±2.27^{i}	82.88±0.23^{i}	13.29±4.39^{lm}	137.67±0.66^{a}	6.998±0.033^{qr}	12.4±0.0^{h}	1.77
26	满州里	37.20±1.96^{mno}	31.23±2.06^{lm}	0.92±0.06^{de}	4.20±0.29^{lmn}	68.17±1.81^{h}	85.69±0.33^{d}	21.74±2.03^{ijk}	81.28±0.38^{j}	7.934±0.038^{o}	9.7±0.0^{p}	1.22
27	JM7	29.52±1.81^{e}	29.13±1.39^{f}	0.84±0.03^{ghi}	25.26±0.93^{ef}	63.46±2.00^{i}	80.29±0.79^{k}	39.46±5.33^{abc}	74.37±0.99^{lm}	7.747±0.069^{o}	11.9±0.1^{j}	1.54
28	草原海棠	32.85±2.55^{i}	26.40±2.37^{g}	0.99±0.05^{ab}	14.98±2.32^{h}	77.73±3.29^{cd}	83.60±0.29^{h}	16.72±2.75^{kl}	44.16±0.43^{u}	17.064±0.238^{c}	10.1±0.1^{n}	0.59
29	B7E4	17.20±1.47^{g}	17.16±1.57^{hi}	0.80±0.05^{ijk}	20.50±1.18^{g}	62.29±0.58^{i}	79.58±0.19^{l}	23.95±1.32^{ghij}	94.47±0.22^{g}	7.384±0.166^{p}	11.6±0.0^{k}	1.57
30	绚丽(9.20)	35.52±1.85^{mno}	29.26±2.31^{l}	1.00±0.05^{a}	2.95±0.23^{mn}	60.56±1.33^{i}	76.50±0.13^{o}	19.14±2.43^{jkl}	99.26±0.97^{f}	10.409±0.069^{i}	15.4±0.0^{c}	1.48
	差异系数	36.52	34.38	7.36	102.92	14.16	4.69	41.78	28.00	42.74	22.88	64.84
	变化范围	13.76~56.84	13.19~48.96	0.76~1.00	1.69~79.22	45.27~85.00	74.26~88.50	3.03~43.08	44.16~137.67	2.609~21.460	8.1~20.2	0.47~5.48

注: 同一列不同小写字母表示样品之间存在显著性差异(P<0.05), 表2同。

利于鲜食和产品加工[18]。

2.1.4　水分含量　水分含量是海棠果内部品质的重要组成部分，可用来评估果实的口感、新鲜度、营养价值和储存条件。如表 1，在所测的 30 个品种中，海棠果的水分含量在 74.26%~88.50%，差异系数为 4.69%，与 Yu 等[19] 所测定的 12 个品种海棠果的水分含量区间基本一致。其中水分含量最高的是‘俄 2’，最低的是‘绚丽’。

2.1.5　出汁率　海棠果的出汁率不高，只有 3.03%~43.08%，差异系数为 41.78%，其中出汁率最高的品种为‘大棠琴红’，最低的为‘大棠婷美’。出汁率低的原因可能是海棠果中含有大量的果胶，可添加果胶酶对果浆进行酶解后取汁，从而提高出汁率[20]。

2.2　可溶性固形物（TSS）、可滴定酸（TAC）、糖酸比（TSS/TA）

2.2.1　可溶性固形物及可滴定酸　TSS、TAC 是评价海棠果品质的重要指标，能够反映果实的口感、风味和成熟度，衡量果实糖分和酸度的平衡。如表 1，本研究中的海棠果 TSS 从 8.1°Brix 到 20.2°Brix 不等（差异系数为 22.88%），不同品种间差异显著，其中，‘2010-6’的 TSS 含量显著高于其他品种（P<0.05），可能是其含有较多的酸，而‘俄 2’的 TSS 含量最低。TAC 在 2.609~21.460 g/L 之间（表 1），差异系数为 42.74%，‘大棠婷美’、‘2010-6’的 TAC 含量显著高于其他品种（P<0.05），‘R4’的 TAC 含量最低。

2.2.2　糖酸比　TSS/TA 是决定果实是否适合直接食用或加工的重要因素。30 个品种的海棠果 TSS/TA 在 0.47~5.48（表 1），差异系数为 64.84%，差异较大，可能与成熟度及生长条件等因素有关。其中 TSS/TA 最高的品种为‘R4’，最低的品种为‘大棠婷美’。通常来说，糖酸比小于 5 时，可感觉出明显的酸味，本研究所测海棠果中，除‘R4’以外的其他品种 TSS/TA 均小于 5，酸味较突出，且海棠果的糖酸比通常远低于苹果，如 Zhang 等[21] 测定的 15 种苹果的糖酸比在 38.21 到 70.71 之间，说明作为同科属植物的果实，苹果更适宜鲜食，而海棠果很少被直接食用，更适合通过加工，制成果汁、果酱和蜜饯等食品。

2.3　总酚、总黄酮与总花青素含量

酚类物质是植物体内一类重要的有机化合物，有研究显示海棠果实中含有丰富的酚类物质[22]。本研究测定了 30 种海棠果的总酚、总黄酮和总花青素含量，如表 2。总酚含量在 2.749 mg GAE/g DW 到 80.877 mg GAE/g DW 之间，总黄酮含量在 3.522 mg RE/g DW 到 167. 312 mg RE/g DW 之间，总花青素含量在 0~0.851 mg cyd-3-glu/g DW 之间，差异系数分别为 65.80%、75.01%、115.16%，总酚及总黄酮含量最高的品种为‘2010-6’，最低的品种为‘64-13-9’，红果肉海棠果比白果肉海棠果的花青素含量高，最高的

表 2　不同品种海棠果总酚、总黄酮、总花青素和根皮苷含量及抗氧化活性

Table 2　Contents of total phenolics, total flavonoids, total anthocyanins, phloridzin and antioxidant capacity of different varieties of crabapple samples

编号	样品名称	总酚（mg GAE/g DW）	总黄酮（mg RE/g DW）	总花青素（mg cyd-3-glu/g DW）	根皮苷（mg/g DW）	铁离子还原能力（mmol TE/g DW）	DPPH自由基清除能力（mmol TE/g DW）	$ABTS^+$自由基清除能力（mmol TE/g DW）
01	A378	37.701±0.881^{fg}	68.304±0.787^{e}	0.467±0.032^{d}	9.139±0.116^{f}	0.281±0.004^{e}	0.413±0.064^{h}	0.180±0.008^{lm}
02	大棠琴红	11.170±0.265^{p}	17.808±0.344^{p}	0.851±0.020^{b}	3.925±0.023^{p}	0.104±0.002^{n}	0.303±0.021^{i}	–
03	大棠婷美	50.322±0.131^{d}	98.462±2.701^{c}	0.197±0.001^{h}	4.917±0.059^{mn}	0.358±0.008^{b}	0.472±0.011^{g}	0.245±0.011^{j}
04	大棠博来	51.787±1.693^{c}	103.423±3.717^{b}	0.090±0.008^{k}	10.533±0.140^{d}	0.295±0.014^{d}	0.466±0.003^{g}	0.337±0.016^{ef}
05	勋紫四号	5.462±0.076^{s}	7.093±0.172^{r}	0.446±0.004^{e}	3.474±0.090^{q}	0.060±0.003^{q}	0.243±0.010^{j}	–
06	红勋一号	8.874±0.137^{r}	15.427±0.172^{q}	0.194±0.007^{h}	3.661±0.023^{pq}	0.079±0.001^{p}	0.243±0.015^{j}	–
07	黄太平	22.981±0.566^{l}	43.899±1.810^{k}	0.020±0.002^{n}	8.681±0.228^{g}	0.158±0.002^{l}	0.281±0.010^{ij}	0.107±0.007^{no}
08	64-13-3	17.404±0.566^{n}	26.339±0.298^{o}	1.197±0.025^{a}	5.089±0.121^{m}	0.106±0.002^{n}	0.038±0.029^{m}	0.085±0.021^{o}
09	达尔文	50.781±0.237^{cd}	95.982±1.031^{d}	0.569±0.004^{c}	12.068±0.412^{b}	0.274±0.005^{ef}	0.136±0.057^{k}	0.358±0.014^{de}
10	舞美	10.033±0.430^{q}	14.435±0.298^{q}	0.303±0.006^{f}	5.398±0.061^{l}	0.091±0.005^{o}	0.475±0.016^{g}	0.119±0.006^{n}
11	64-13-9	2.749±0.066^{t}	3.522±0.957^{s}	0.065±0.003^{lm}	2.576±0.077^{r}	0.033±0.003^{r}	–	–
12	凯尔斯	58.086±0.200^{b}	105.010±0.344^{b}	0.020±0.004^{n}	4.714±0.070^{no}	0.331±0.021^{c}	0.703±0.032^{b}	0.509±0.006^{b}
13	绚丽	40.238±0.038^{e}	66.220±0.595^{f}	0.053±0.003^{m}	9.923±0.191^{e}	0.254±0.005^{g}	0.694±0.008^{bc}	0.385±0.018^{c}
14	R4	23.681±0.930^{l}	41.022±0.687^{l}	–	6.444±0.086^{k}	0.135±0.003^{m}	0.025±0.004^{m}	0.158±0.009^{m}
15	八棱海棠	36.192±1.051^{h}	63.343±1.639^{g}	–	10.531±0.308^{d}	0.176±0.002^{jk}	0.088±0.007^{l}	0.243±0.003^{j}
16	包头山丁子	34.092±0.702^{i}	57.589±0.298^{h}	–	3.510±0.084^{q}	0.165±0.004^{kl}	0.092±0.016^{l}	0.188±0.002^{kl}
17	朱眉海棠	18.388±0.337^{mn}	30.903±0.172^{m}	–	7.257±0.172^{j}	0.101±0.003^{no}	–	0.101±0.016^{no}
18	海红	36.717±0.922^{gh}	63.046±0.620^{g}	–	9.100±0.389^{f}	0.233±0.006^{h}	0.632±0.013^{e}	0.352±0.015^{de}
19	槟子	31.249±0.211^{j}	52.530±0.515^{j}	–	7.461±0.183^{j}	0.202±0.009^{i}	0.630±0.045^{e}	0.298±0.015^{gh}
20	扁果海棠	18.147±0.100^{mn}	28.224±0.455^{no}	–	4.536±0.100^{o}	0.133±0.007^{m}	0.530±0.011^{f}	0.210±0.010^{k}
21	森林苹果	3.252±0.273^{t}	4.117±0.344^{s}	–	3.547±0.115^{q}	0.042±0.005^{r}	0.480±0.024^{g}	0.084±0.004^{o}
22	红勋一号（伊犁）	5.768±0.262^{s}	7.986±0.455^{r}	0.270±0.003^{g}	2.410±0.064^{r}	0.039±0.006^{r}	–	0.029±0.019^{p}

续表 2

编号	样品名称	总酚（mg GAE/g DW）	总黄酮（mg RE/g DW）	总花青素（mg cyd-3-glu/g DW）	根皮苷（mg/g DW）	铁离子还原能力（mmol TE/g DW）	DPPH自由基清除能力（mmol TE/g DW）	ABTS$^+$自由基清除能力（mmol TE/g DW）
23	2010-6	80.877±1.511^{a}	167.312±1.744^{a}	0.173±0.004^{i}	11.695±0.131^{c}	0.518±0.005^{a}	0.827±0.024^{a}	0.654±0.020^{a}
24	俄2	34.136±1.218^{i}	55.208±1.657^{j}	0.138±0.006^{j}	8.073±0.110^{i}	0.213±0.004^{i}	0.687±0.010^{bcd}	0.289±0.013^{hi}
25	火焰	19.154±0.328^{m}	29.315±0.595^{mn}	0.049±0.008^{m}	6.678±0.145^{k}	0.135±0.003^{m}	0.653±0.024^{cde}	0.166±0.019^{lm}
26	满州里	13.226±0.447^{o}	17.708±0.298^{p}	0.024±0.005^{n}	3.923±0.032^{p}	0.102±0.007^{no}	0.625±0.008^{e}	0.162±0.019^{m}
27	JM7	19.285±0.286^{m}	30.407±0.620^{m}	–	5.568±0.103^{l}	0.134±0.003^{m}	0.630±0.025^{e}	0.189±0.015^{kl}
28	草原海棠	36.170±0.230^{h}	66.319±1.045^{f}	–	18.830±0.329^{a}	0.264±0.003^{fg}	0.682±0.002^{bcd}	0.319±0.013^{fg}
29	B7E4	25.212±0.422^{k}	44.990±1.045^{k}	–	8.369±0.036^{h}	0.181±0.002^{j}	0.646±0.015^{de}	0.270±0.006i
30	绚丽(9.20采)	38.510±0.512^{f}	69.792±1.297^{e}	0.075±0.001^{kl}	10.398±0.114^{d}	0.258±0.013^{g}	0.700±0.015^{b}	0.367±0.025^{cd}
	差异系数	65.80	75.01	115.16	51.07	60.38	52.29	57.49
	变化范围	2.749~80.877	3.522~167.312	0~0.851	2.41~18.830	0.033~0.518	0~0.827	0~0.654

注: “–”表示未检出。

品种为‘64-13-3’。由于仅对海棠果冻干粉进行了一次提取, 因此以上活性成分的含量与实际结果相比可能偏低。李楠等[23] 测定了 14 种海棠果的总酚和总黄酮含量, 分别为 62.96~287.86 mg GAE/100 g FW 和 83.77~604.11 mg RE/100 g FW, 且提出其与苹果果实中多酚及黄酮含量最高的部位—苹果皮的含量相当, 说明海棠果中多酚及黄酮含量较高。有研究表明野生海棠中的总酚含量高于国产苹果[10], 可能与其生长环境和遗传等因素有关, 较高的总酚含量可能是其抗逆性较强的原因之一[24], 因此, 海棠作为苹果砧木的独特优势和其果实的生物活性成分, 使其在果树育种与功能性食品开发中展现出双重价值。

经相关性分析(图 2), 发现总酚含量和果实的横径、纵径呈显著负相关(P<0.01), 与单果重呈显著负相关(P<0.001), 总黄酮含量与果实横径、纵径和单果重也有类似的关系。另外, 总酚、总黄酮的含量与水分含量呈显著负相关(P<0.001)。因此, 海棠果果实越小、水分含量越低, 其总酚、总黄酮含量可能越

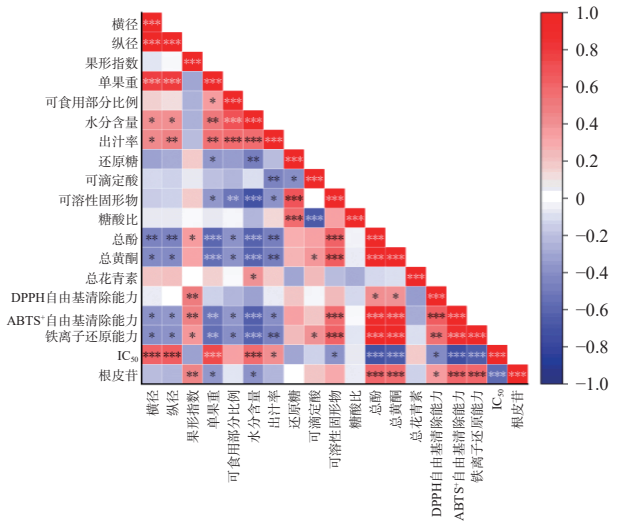


图 2　果实特性指标及生物活性指标间的相关性分析

Fig.2　Correlation coefficients between fruit traits and biological properties

注: *、**和***分别表示相关系数显著性 P<0.05、P<0.01 和 P<0.001。

丰富。李文静等[25] 的研究也发现, 海棠果果实越小, 总酚、总黄酮含量越高。

2.4　根皮苷含量

根皮苷是苹果属植物中典型的酚类物质, 最初是从苹果树皮中提取分离得到的酚类物质, 属于黄酮类中的二氢查耳酮类物质[26], 具有降低血糖、抗氧化、抗炎、抗癌和抑菌等多种重要的生物活性[27]。海棠作为苹果属植物, 其中也含有较丰富的根皮苷。如表 2 所示, 在本研究中的 30 个海棠果品种中, 根皮苷含量在 2.41~18.830 mg/g DW 之间, 差异系数为 51.07%, ‘草原海棠’的根皮苷含量最高, 达 18.830 mg/g DW, 其次是‘达尔文’、‘2010-6’、‘大棠博来’、‘八棱海棠’、‘绚丽(9.20)’, 根皮苷含量分别为 12.068、11.695、10.533、10.531、10.398 mg/g DW, 含量最低的为‘红勋一号(伊犁)’, 仅 2.41 mg/g DW。Han 等[10] 在三种海棠中发现了根皮苷, 浓度分别为 24.57、94.42、131.02 mg/kg DW, 比苹果(2.87 mg/kg DW)高。因此海棠果可作为获取根皮苷的良好来源。

相关性分析(图 2)发现, 根皮苷含量与 DPPH 自由基清除能力呈显著正相关(P<0.05), 与 ABTS$^+$自由基清除能力、铁离子还原能力呈显著正相关(P<0.001), 这与根皮苷具有良好的抗氧化性有关。另外, 根皮苷含量与黄嘌呤氧化酶的 IC_{50} 具有显著的负相关性(P<0.001), 提示根皮苷可能是一种良好的黄嘌呤氧化酶抑制剂。

2.5　体外抗氧化活性分析

本研究通过测定 DPPH 自由基清除能力、ABTS$^+$自由基清除能力、铁离子还原能力, 比较了不同品种海棠果的体外抗氧化活性。结果如表 2, 30 个品种中, ‘2010-6’的体外抗氧化活性最强, 测得的 DPPH 自由基清除能力、ABTS$^+$自由基清除能力、铁离子还原能力分别为 0.827 mmol TE/g DW、0.654 mmol TE/g DW 和 0.518 mmol TE/g DW。李媛[28] 对 3 种海棠果实提取物的体外抗氧化活性进行了分析, 其 DPPH 自由基清除活性的变化范围为 3715.88~8948.83 μmol TE/100 g DW, ABTS$^+$自由基

清除活性的变化范围为 4984.66~13325.81 μmol TE/100 g DW。与之相比，本研究所测海棠果，除‘64-13-3’、‘64-13-9’、‘R4’、‘朱眉海棠’、‘红勋一号（伊犁）’5 个品种外，DPPH 自由基清除能力均大于 8948.83 μmol TE/100 g DW，含‘2010-6’在内的 20 个品种，$ABTS^+$自由基清除能力大于 13325.81 μmol TE/100 g DW，这可能与海棠果品种、提取方式等有关。张虹等[29] 对 11 个苹果品种的抗氧化活性进行了测定，结果显示苹果的 $ABTS^+$自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力分别为 16.2338~20.0307 μmol TE/100 g DW、14.088~27.2631 μmol TE/100 g DW，因此，与同科属的苹果相比，本研究所测海棠果具有更强的抗氧化活性。

蓝莓因富含花青素和多酚类物质被广泛认为是高抗氧化水果，唐柯等[30] 测定了 3 种蓝莓的清除 DPPH 自由基和 $ABTS^+$自由基的能力和铁离子还原能力分别为 96.0~114.5 μmol TE/g FW、26.9~47.9 μmol TE/g FW 和 16.8~77.9 μmol TE/g FW，而李楠等[23] 研究结果显示每 100 g 贴梗海棠鲜果清除 DPPH 自由基和 $ABTS^+$自由基的能力分别为 716.19 μmol TE/100 g FW、2433.72 μmol TE/100 g FW，铁离子还原能力为 1780.73 μmol TE/100 g FW，抗氧化能力在部分指标上接近蓝莓等传统高抗氧化水果，说明海棠果具有较好的抗氧化活性。

本研究发现，DPPH 自由基清除能力与海棠果总酚、总黄酮含量呈显著正相关（$P<0.05$），$ABTS^+$自由基清除能力与海棠果总酚、总黄酮含量呈显著正相关（$P<0.001$），同样，铁离子还原能力也与海棠果总酚、总黄酮含量呈显著正相关（$P<0.001$），这与 Chen 的研究结果一致[31]。Li 等[32] 也发现，海棠果实乙醇提取物和乙酸乙酯提取物的总酚、总黄酮含量与抗氧化活性呈显著正相关，且乙醇提取物的抗氧化活性与总酚含量的相关性更高（分别为 0.927、0.944 和 0.975）。

植物多酚提取物是天然的抗氧化剂[33]，多项研究都表明，植物的总抗氧化能力与总酚含量之间存在显著的正相关性。Huber 等[34] 发现，在苹果皮甲醇提取物中的酚类化合物，(-)-表儿茶素、(-)-儿茶素、矢车菊素-3-O-半乳糖苷、根皮苷和绿原酸与抗氧化能力具有相关性。海棠果实是制备高抗氧化活性的酚类提取物的良好来源，具有替代苹果渣生产酚类提取物的巨大潜力。

2.6　黄嘌呤氧化酶（XO）抑制活性分析

黄嘌呤氧化酶参与体内的嘌呤代谢，是尿酸生成的关键酶[35]，抑制黄嘌呤氧化酶的活性可以减少尿酸的生成，从而降低血清尿酸水平。本研究检测了 30 个品种海棠果提取物对黄嘌呤氧化酶的半抑制浓度（IC_{50}），结果如图 3 所示。各个品种的海棠果均具有一定的黄嘌呤氧化酶抑制活性。其中，‘2010-6’的 XO 抑制活性最强，IC_{50} 值为 2.724 mg/mL，其次是‘绚丽’，IC_{50} 值为 3.075 mg/mL，另外，‘大棠博来’、‘达尔文’、‘凯尔斯’、‘八棱海棠’、‘火焰’的 XO 抑制活性也较好，IC_{50} 值分别为 6.928、5.817、5.631、6.513、6.682 mg/mL。Wang 等[18] 测定了 21 种酸樱桃的 XO 抑制活性，结果为 2.619~17.950 mg/mL，有多项研究发现，酸樱桃可以降低血尿酸的含量，延缓痛风的发生[36−37]，本研究所测海棠果 XO 抑制活性与之相当，说明海棠果具有降低血清尿酸水平，改善高尿酸血症的潜在活性。

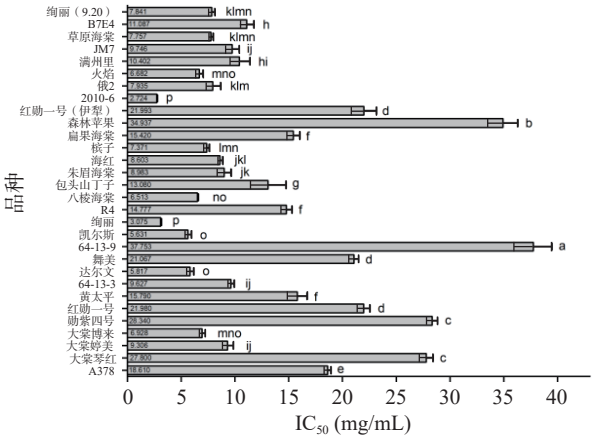


图 3　不同品种海棠果提取物对黄嘌呤氧化酶的半抑制浓度（IC_{50}）

Fig.3　IC_{50} of Xanthine oxidase inhibitory activity of different varieties of crabapple fruit extracts

注：不同小写字母表示样品之间存在显著性差异（$P<0.05$）。

Pearson 相关性分析表明，XO 的 IC_{50} 值与总酚含量（$P<0.001$）、总黄酮含量（$P<0.001$）呈显著负相关性，但与总花青素含量无显著相关性（$P>0.05$）。因此，海棠果提取物的 XO 抑制活性可能与其中含有丰富的酚类、黄酮类物质有关，而本研究所测海棠果中的总花青素含量偏低，可能是其与 XO 抑制活性无显著相关性的原因。有多项研究表明，植物中提取的多酚、黄酮类物质具有 XO 抑制活性[38]，如苦参提取物中的槲皮素、山奈酚、异鼠李素、芦丁、金丝桃苷、原儿茶酸和槲皮素等多酚类化合物被鉴定为 XO 抑制剂，IC_{50} 值分别为 0.03、0.11、0.07、5.62、11.48、22.13 和 367.82 mg/mL[39]。雪菊提取物中分离的 8 个多酚类化合物具有较强或中等抑制活性，IC_{50} 在 0.65~29.11 μmol/L 之间[40]。本研究所测的海棠果也具有较好的体外 XO 抑制活性，是具有潜在的改善高尿酸血症功效的功能性食品。

2.7　主成分分析

使用 SPSS 对海棠果测得的数据进行主成分分析，计算相关矩阵的特征值及其方差贡献率，用于确定保留的主成分或因子数量，以初始特征值>1 为提取标准。表 3 结果显示，前 5 个主成分（PC1、PC2、PC3、PC4、PC5）的累计方差贡献率为 82.570%（>80%），说明前五个成分能够解释大部分的数据变异，剩余 17.430% 的变异可能来自噪声或次要因素，可舍弃。同时，不同品种海棠果主成分分析碎石图

(图 4)也表明各主成分所代表信息的走势情况,第 5 主成分后曲线明显平缓。因此,本研究选择前五个主成分进行后续分析。

表 3 PCA 初始特征值及贡献率

Table 3 Initial eigenvalues and contribution rates of principal components

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	8.333	43.856	43.856
2	2.632	13.855	57.711
3	2.143	11.280	68.990
4	1.546	8.138	77.128
5	1.034	5.442	82.570

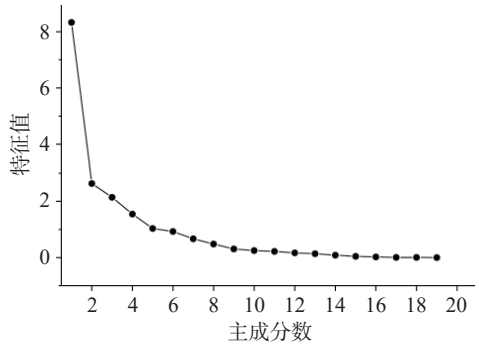


图 4 不同品种海棠果主成分分析碎石图

Fig.4 PCA scree plot for different varieties of crabapples

通过成分矩阵对确定保留的主成分赋予实际意义。成分矩阵结果(表 4)显示,PC1 的方差贡献率为 43.856%,对其贡献较大的是横径、纵径、果形指数、单果重等,主要反映了果实的物理特征,通常与果实的生长条件和品种有关,可用于评估果实的生长状况和品种差异。PC2 的方差贡献率为 13.855%,对其贡献较大的是总酚、总黄酮、总花青素,主要反映了果实中的生物活性成分,可以用于评估果实的营养价值和功能活性。PC3 的方差贡献率为 11.280%,对其贡献较大的是 ABTS$^+$自由基清除能力、铁离子还原能力和 IC_{50},可以用于评估果实的抗氧化活性和潜在的药用价值。PC4 的方差贡献率为 8.138%,对其贡献较大的是根皮苷,根皮苷是一种具有多种生物活性的化合物,如抗氧化、抗菌和抗炎作用,因此 PC4 可以用于评估果实中特定成分的含量和生物活性。PC5 的方差贡献率为 5.442%,对其贡献较大的指标是 IC_{50},IC_{50} 值越低,提取物的抑制活性越强,可用于评估果实提取物的生物活性和潜在药用价值。

表 4 成分矩阵

Table 4 Component matrix

编号	指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
1	横径	0.921	−0.126	0.153	0.041	0.279
2	纵径	0.900	−0.175	0.249	0.023	0.219
3	果形指数	0.900	−0.146	0.180	−0.005	0.309
4	单果重	0.896	−0.016	0.292	0.183	0.043
5	可食用部分比例	−0.834	0.064	0.142	−0.252	0.024
6	水分含量	−0.803	−0.300	−0.001	0.294	0.149
7	出汁率	−0.767	0.044	0.470	−0.080	0.043
8	还原糖	0.679	0.425	0.228	−0.367	0.247
9	可滴定酸	−0.638	0.150	0.266	0.451	0.258
10	可溶性固形物	0.615	−0.192	0.264	0.377	0.100
11	糖酸比	0.453	−0.060	0.404	0.180	−0.345
12	总酚	−0.014	0.884	0.040	0.030	0.244
13	总黄酮	0.298	−0.801	0.011	−0.337	−0.002
14	总花青素	0.451	0.757	−0.076	−0.128	0.035
15	DPPH自由基清除能力	−0.278	−0.475	0.054	−0.287	0.436
16	ABTS$^+$自由基清除能力	−0.616	0.042	0.743	−0.205	0.001
17	铁离子还原能力	−0.626	0.022	0.706	−0.207	0.028
18	IC_{50}	0.497	0.013	0.526	0.309	−0.432
19	根皮苷	−0.540	−0.054	−0.082	0.670	0.303

为综合评价各海棠果的整体品质,对各主成分的载荷值及得分进行计算,不同品种海棠果的载荷图、得分图如图 5 和图 6 所示,依据各主成分的方差贡献率,构建综合评价模型 F=0.439×PC1+0.139×PC2+0.113×PC3+0.081×PC4+0.054×PC5,其中 F 为不同品种海棠果的综合得分,反映海棠果品质的优劣,得分较高的海棠果,表明其整体品质较好,可能在物理特征、抗氧化成分、抗氧化能力等方面表现优异。根据其综合得分的高低对不同的海棠果的品质进行排序,结果(表 5)表明,‘2010-6’、‘凯尔斯’、‘绚丽’、‘绚丽(9.20)’和‘大棠博来’的综合质量得分较高,说明其综合品质较好,可对其进行深入研究和加工利用,如优先用于品种选育中以保证果实品质;在市场推广中,对综合得分较高的品种进行宣传,以吸

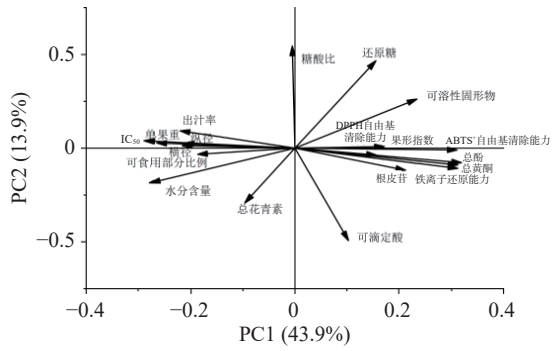


图 5 PC1 和 PC2 载荷图

Fig.5 PC1 and PC2 loadings plot

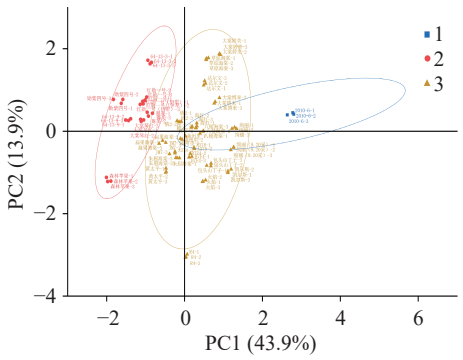


图 6 不同品种海棠果的 PC1 和 PC2 得分图

Fig.6 Scores plot of PC1 versus PC2 for different varieties of crabapples

注:将 30 个品种划分为 3 个主要类群。

表 5　不同品种海棠果果实主成分得分及综合得分

Table 5　Principal component and comprehensive scores of different varieties of crabapples

品种	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	综合得分	排名
A378	0.69	0.73	0.22	0.38	1.64	0.55	11
大棠琴红	−3.25	−0.40	0.64	−1.18	0.68	−1.47	24
大棠婷美	2.68	−3.04	−1.53	−1.60	−0.07	0.45	14
大棠博来	2.41	−1.13	0.03	0.86	0.70	1.01	5
勋紫四号	−4.88	−1.13	1.42	−0.98	0.26	−2.2	30
红勋一号	−3.09	−1.28	−1.17	0.40	0.06	−1.63	27
黄太平	−1.31	1.58	1.04	−0.44	1.10	−0.22	19
64-13-3	−2.54	−2.71	−0.01	−1.63	1.23	−1.56	25
达尔文	1.55	−1.87	−0.28	1.33	1.83	0.59	9
舞美	−2.78	−0.75	1.32	−0.33	−0.86	−1.25	23
64-13-9	−4.26	−0.48	−0.25	−1.60	−0.80	−2.14	29
凯尔斯	3.35	1.59	0.37	0.44	1.07	1.83	2
绚丽	3.95	−0.17	−0.21	−0.57	−2.07	1.53	3
R4	0.15	4.83	−0.87	−0.25	1.28	0.69	7
八棱海棠	1.17	0.01	−1.34	0.04	0.84	0.41	16
包头山丁子	1.88	1.19	−2.00	−1.90	−0.68	0.57	10
朱眉海棠	−0.70	0.94	−2.73	0.20	0.35	−0.45	20
海红	0.77	−0.16	0.26	1.88	0.47	0.53	12
槟子	0.65	−0.15	0.23	2.19	−0.86	0.42	15
扁果海棠	−1.73	0.51	0.83	0.13	−0.39	−0.6	22
森林苹果	−5.59	2.01	3.09	0.40	−0.11	−1.8	28
红勋一号(伊犁)	−2.44	−1.26	−3.26	−0.09	0.08	−1.62	26
2010-6	7.59	−0.53	2.94	−2.36	0.78	3.44	1
俄2	0.14	−0.39	−0.30	3.07	0.00	0.22	17
火焰	1.36	1.88	−1.40	−0.19	−1.53	0.6	8
满州里	−1.02	0.25	0.12	0.21	−1.80	−0.48	21
JM7	−0.60	0.88	0.41	0.17	−0.76	−0.12	18
草原海棠	1.84	−2.73	1.62	1.83	−0.86	0.71	6
B7E4	1.05	1.00	−0.95	0.16	−0.63	0.47	13
绚丽(9.20)	2.98	0.74	1.76	−0.54	−0.95	1.52	4

引消费者。

2.8　聚类分析

聚类分析是一种无监督学习方法，用于将数据集中的对象根据相似性分组成多个簇。如图 7 所示，可将 30 种海棠果分为 3 类，第一类为‘2010-6’，该品种总酚、总黄酮含量最高，抗氧化活性最好，还原糖和可溶性固形物含量较高，但果型偏小，更适合作为活性物质提取的来源，更重要的是，其黄嘌呤氧化酶 IC_{50} 较低，具有降低体内血清尿酸水平的潜力，可能作为一种有益于高尿酸血症的活性物质的来源。第二类包括‘森林苹果’、‘红勋一号(伊犁)’、‘红勋一号’、‘64-13-9’、‘舞美’、‘勋紫四号’、‘64-13-3’、‘大棠琴红’，除‘森林苹果’外，此类海棠果果肉颜色为红色，花青素含量较为丰富，如将其加工为产品，如果汁、果酒，色泽更加吸引消费者，且有研究表明，红色海棠与绿色海棠相比，能更加有效地减少自由基和诱导癌细胞凋亡[41]。其余海棠果为第三类，个别品种如‘R4’，糖酸比较高，口感较其他海棠果更好，因此可鲜食或加工制成果脯、果酱等产品；‘草原海棠’、‘达尔文’等海棠果根皮苷含量较高，可对其进行提取利用。

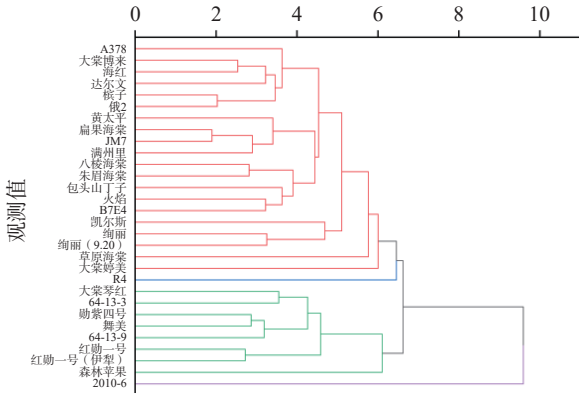


图 7　不同品种海棠果样品聚类分析

Fig.7　Cluster analysis of different varieties of crabapples

3　结论

本研究选取了 30 个品种的海棠果，进行了品质指标的测定及相关分析。结果表明，海棠果具有较高的总酚、总黄酮含量(分别为 2.749~80.877 mg GAE/g DW、3.522~167.312 mg RE/g DW)，大部分海棠果都具有较好的抗氧化活性，且显示出体外黄嘌呤氧化酶抑制活性，如‘2010-6’的 XO 抑制活性 IC_{50} 为 2.724 mg/mL。相关性分析结果表明，总酚、总黄酮含量与海棠果实大小、抗氧化活性、黄嘌呤氧化酶抑制活性呈现较强的相关性。通过 PCA 分析建立了海棠果实综合评价模型，其中，海棠果‘2010-6’的综合得分最高，是一个品质较好的品种，未来可对其进行活性成分的提取、利用。本研究提供了 30 种海棠果的基本信息，包括基本营养成分指标和生物活性指标，并通过相关性分析、主成分分析和聚类分析，比较了不同品种海棠果的品质，为海棠果精深加工及品种选育方面提供了理论指导，以期解决海棠果的资源浪费现象。另外，本研究表明了海棠果具有体外黄嘌呤氧化酶抑制活性，但尚未进行体内降尿酸活性的验证，因此后续可对其降尿酸活性进行进一步的验证，探索其缓解高尿酸血症及痛风的功效及机制。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 刘存宇. 西府海棠果实功效关联性及其活性成分对 CYP450 酶活性影响研究[D]. 开封：河南大学, 2021. [LIU Cunyu. Efficacy correlation of *Malus micromalus* makino fruit and the effect of active ingredients on CYP450 enzyme activity[D]. Kaifeng: Henan University, 2021.]

[2] ZENG X Q, LI H, JIANG W B, et al. Phytochemical compositions, health-promoting properties and food applications of crabapples: A review[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132789.

[3] LI M X, XUE S J, TAN S, et al. Crabapple fruit extracts lower hypercholesterolaemia in high-fat diet-induced obese mice[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 27: 416−428.

[4] USTA C, BEDEL A, KURTOĞLU A U, et al. Effects of crabapple (*Malus* sylvestris) on blood glucose and lipid levels in diabetic rats[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2016, 4(3): 148−151.
[5] SHARMA R, NATH A K. Antioxidant levels and activities of reactive oxygen-scavenging enzymes in crabapple fruits (*Malus* baccata)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2016, 86(4): 877−885.
[6] WEN C, WANG D S, LI X, et al. Targeted isolation and identification of bioactive compounds lowering cholesterol in the crude extracts of crabapples using UPLC-DAD-MS-SPE/NMR based on pharmacology-guided PLS-DA[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2018, 150: 144−151.
[7] QIN X X, XING Y F, ZHOU Z Q, et al. Dihydrochalcone compounds isolated from crabapple leaves showed anticancer effects on human cancer cell lines[J]. Molecules, 2015, 20: 21193−21203.
[8] 方宁远, 吕力为, 吕晓希, 等. 中国高尿酸血症相关疾病诊疗多学科专家共识(2023 年版)[J]. 中国实用内科杂志, 2023, 6(43): 461−480. [FANG Ningyuan, LÜ Liwei, LÜ Xiaoxi, et al. China multi-disciplinary expert consensus on diagnosis and treatment of hyperuricemia and related diseases (2023 edition)[J]. Chinese Journal of Practical Internal Medicine, 2023, 6(43): 461−480.]
[9] WEN S J, ARAKAWA H, TAMAI I. Uric acid in health and disease: From physiological functions to pathogenic mechanisms[J]. Pharmacology & Therapeutics, 2024, 256: 108615.
[10] HAN M L, LI G, LIU X W, et al. Phenolic profile, antioxidant activity and anti-proliferative activity of crabapple fruits[J]. Horticultural Plant Journal, 2019, 5(4): 155−163.
[11] LI J, GONG Y H, LI J W, et al. *In vitro* inhibitory effects of polyphenols from Tartary buckwheat on xanthine oxidase: Identification, inhibitory activity, and action mechanism[J]. Food Chemistry, 2022, 379: 132100.
[12] LIU X Z, ZHANG W, CHEN J W, et al. Investigating the inhibition of xanthine oxidase by five catechins: Kinetic studies, spectroscopy, molecular docking, and dynamics simulations[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281: 136231.
[13] WANG R, YUE X N, SHAN G Z, et al. A novel multi-hyphenated approach to screen and character the xanthine oxidase inhibitors from saffron floral bio-residues[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125990.
[14] 王远利, 王菲, 张权, 等. 海棠果果酱的研制及其品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 175−186. [WANG Yuanli, WANG Fei, ZHANG Quan, et al. Development and quality analysis of *Malus prunifolia* jam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 175−186.]
[15] SEERAM N P, CICHEWICZ R H, CHANDRA A, et al. Cyclooxygenase inhibitory and antioxidant compounds from crabapple fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51: 1948−1951.
[16] 曹世英, 张乐道, 王国泽, 等. 超声波预处理对海棠果片热风干燥微观结构及品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1−14 [2026-01-04]. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036063. [CAO Shiying, ZHANG Ledao, WANG Guoze, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on microstructure and quality of hot-air dried begonia fruit (*Calophyllum inophyllum* L.)[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 1−14[2026-01-04]. doi:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036063.]
[17] 蔡雪雁. 红果肉海棠色素成分及抗氧化能力分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015. [CAI Xueyan. Studies on pigment composition of red flash crabapple and its antioxident analysis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.]
[18] WANG R, ZHANG F, ZAN S Y, et al. Quality characteristics and inhibitory xanthine oxidase potential of 21 sour cherry (*Prunus cerasus* L.) varieties cultivated in China[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 796294.
[19] YU C H, WANG M, LIU F, et al. Nutrient compositions and functional constituents of 12 crabapple cultivars (*Malus* Mill. species): Aptitudes for fresh consumption and processing[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45: e15341.
[20] 王伟. 混合发酵海棠果益生菌产品的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2016. [WANG Wei. Study on the manufacture of crabapple fruit probiotic beverage by mixed culture fermentation [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2016.]
[21] ZHANG M Q, YIN Y H, LI Y T, et al. Chemometric classification of apple cultivars based on physicochemical properties: Raw material selection for processing applications[J]. Foods, 2023, 12: 3095.
[22] LIU F, WANG M, WANG M. Phenolic compounds and antioxidant activities of flowers, leaves and fruits of five crabapple cultivars (*Malus* mill. species)[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 235: 460−467.
[23] 李楠, 师俊玲, 王昆. 14 种海棠果实多酚种类及体外抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 53−58. [LI Nan, SHI Junling, WANG Kun. Composition and *in vitro* antioxidant activity of polyphenols extracted from crabapple[J]. Food Science, 2014, 35(5): 53−58.]
[24] VALAVANIDIS, A, VLACHOGIANNI, T, PSOMAS A, et al. Polyphenolic profile and antioxidant activity of five apple cultivars grown under organic and conventional agricultural practices[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2009, 44: 1167−1175.
[25] 李文静, 刘一心, 陈明堃, 等. 14 种海棠果实品质分析及综合评价[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 121−130. [LI Wenjing, LIU Yixin, CHEN Mingkun, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of 14 varieties of crabapples[J]. Food Science, 2024, 45(16): 121−130.]
[26] 段永芳. 海棠果发酵乳酸菌筛选及其制品工艺研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023. [DUAN Yongfang. Screening of lactic acid bacteria for fermentation of begonia fruit and study on its product technology[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.]
[27] TIAN L, CAO J X, ZHAO T R, et al. The bioavailability, extraction, biosynthesis and distribution of natural dihydrochalcone: Phloridzin[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22: 962.
[28] 李媛. 海棠果实提取物抗氧化活性及对胃癌细胞 BGC-803 的体外抑制活性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. [LI Yuan. Research on antioxidant activity and *in vitro* inhibition effect on BGC-803 cell lines of crabapple fruits extracts[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.]
[29] 张虹, 雒淑珍, 胡晨阳, 等. 11 份苹果种质果实多酚组成和抗氧化活性分析[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(11): 100−110. [ZHANG Hong, LUO Shuzhen, HU Chenyang, et al. Analysis of polyphenol composition and antioxidant activity of 11 apple germplasm fruits[J]. Storage and Process, 2025, 25(11): 100−110.]
[30] 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 Ke, WANG Zixuan, ZHANG Weihong, 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.］

［31］ CHEN F T, LI F, LU L, et al. Phenolic profile and changes in the antioxidant activity of crabapple (*Malus domestica* cv Royalty) fruit during maturation on the tree［J］. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49: 1680−1688.

［32］ LI N, SHI J L, WANG K. Profile and antioxidant activity of phenolic extracts from 10 crabapples (*Malus* wild species)［J］. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62: 574−581.

［33］ ALADEDUNYE F, MATTHÄUS B. Phenolic extracts from *Sorbus aucuparia* (L.) and *Malus baccata* (L.) berries: Antioxidant activity and performance in rapeseed oil during frying and storage［J］. Food Chemistry, 2014, 159: 273−281.

［34］ HUBER G M, RUPASINGHE H P V. Phenolic profiles and antioxidant properties of apple skin extracts［J］. Journal of Food Science, 2009, 74(9): 693−700.

［35］ BORTOLOTTI M, POLITO L, BATTELLI M G, et al. Xanthine oxidoreductase: One enzyme for multiple physiological tasks［J］. Redox Biology, 2021, 41: 101882.

［36］ MARTIN K R, COLES K M. Consumption of 100% tart cherry juice reduces serum urate in overweight and obese adults［J］. Current Developments in Nutrition, 2019, 3(5): 5.

［37］ NAKAGAWA T, LANASPA M A, JOHNSON R J. The effects of fruit consumption in patients with hyperuricaemia or gout［J］. Rheumatology, 2019, 58(7): 1133−1141.

［38］ ULLAH Z, YUE P P, MAO G H, et al. A comprehensive review on recent xanthine oxidase inhibitors of dietary based bioactive substances for the treatment of hyperuricemia and gout: Molecular mechanisms and perspective［J］. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278: 134832.

［39］ LI J, GONG Y H, LI J W, et al. *In vitro* xanthine oxidase inhibitory properties of *Flos sophorae* Immaturus and potential mechanisms［J］. Food Bioscience, 2022, 47: 101711.

［40］ XIAO H, WANG H, SUN S W, et al. Identification of aurones and chalcones as the main contributors to xanthine oxidase inhibitory activity of snow chrysanthemum［J］. Food Bioscience, 2024, 61: 104650.

［41］ HAN M L, LI A, SHEN T, et al. Phenolic compounds present in fruit extracts of *Malus* spp. show antioxidative and pro-apoptotic effects on human gastric cancer cell lines［J］. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43: e13028.