

23 个品种柑橘果皮黄酮类含量及 抗氧化活性比对研究

白 莉, 吴颖娴, 董 浩, 史阳凯, 王 宏, 于立梅*

(仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 农业农村部岭南特色
食品绿色加工与智能制造重点实验室, 现代农业工程创新研究院, 广州 510225)

摘 要: **目的** 确定超声辅助提取柑橘皮黄酮的最佳工艺条件, 基于最佳工艺参数, 比对研究 23 个品种柑橘果皮中黄酮类物质含量及抗氧化活性。**方法** 通过单因素及正交实验优化超声辅助乙醇提取柑橘黄酮的最佳工艺条件, 使用 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)法、铁离子还原法测定体外抗氧化活性, 并进行相关性分析和聚类分析。**结果** 总黄酮提取的最优条件为: 料液比 1:35 (g/mL)、乙醇浓度 50%、超声时间 90 min、超声温度 70°C, 在此条件下柑橘果皮总黄酮提取量达到 8.91 mg RE/g。23 种柑橘果皮的总黄酮含量存在较明显差异, 介于(4.07±0.01)~(10.92±0.17) mg RE/g 之间, 其中广西红心蜜柚果皮总黄酮含量最高; 在抗氧化能力的表达上, 半最大效应浓度(concentration for 50% of maximal effect, EC₅₀)值介于(0.36±0.00)~(2.27±0.08) g/L 之间; EC₁ 值介于(0.01±0.00)~(0.14±0.00) mmol Fe²⁺/g 之间, 广东皇帝柑和马水桔 DPPH 自由基清除能力最强; 云南沃柑的总黄酮含量最低、DPPH 自由基清除能力最弱; 浙江槿柑皮铁离子还原能力最强, 且优劣解距离算法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)分析结果显示其综合抗氧化性在 23 种柑橘皮中表现最优; 聚类分析结果显示, 柑橘种类与黄酮含量、抗氧化活性之间无明显关联, 依据黄酮含量和抗氧化活性差异可将 23 种柑橘果皮分为 3 类; 总黄酮含量与 DPPH 自由基清除能力、铁离子还原能力呈显著正相关。**结论** 正交优化后的超声辅助技术可以提高柑橘皮总黄酮的提取效率, 提高提取量, 23 种柑橘皮黄酮中第一、二类黄酮含量较高, 具有较好的抗氧化活性, 浙江槿柑皮综合抗氧化性最强。

关键词: 工艺优化; 柑橘果皮; 总黄酮; 抗氧化活性

Comparative study on flavonoids content and antioxidant activity of 23 kinds of *Citrus reticulata* Blanco peels

BAI Li, WU Ying-Xian, DONG Hao, SHI Yang-Kai, WANG Hong, YU Li-Mei*

(College of Light Industry and Food Science, Lingnan Special Food Science and Technology Key Laboratory of Guangdong Province, Lingnan Special Food Green Processing and Intelligent Manufacturing Key Laboratory of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Modern Agricultural engineering Innovation Institute, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

基金项目: 仲恺农业工程学院产教融合实践教学基地项目(仲教字 2022-48 号)、广东省重点领域研发计划项目(2022B0202040003)、广州市科技计划项目一般项目(202201010268)

Fund: Supported by the Zhongkai University of Agriculture and Engineering Science-industry-education Integration Practice Teaching Base Project (Zhongjiao Zi 2022-48), the Guangdong Province Key Area Research and Development Program Project (2022B0202040003), and the General Projects of Guangzhou Science and Technology Plan Projects (202201010268)

*通信作者: 于立梅, 博士, 教授, 主要研究方向为功能食品化学。E-mail: biyingwang2003@163.com

*Corresponding author: YU Li-Mei, Ph.D, Professor, Technical Center of Shandong Entry-exit Inspection & Quarantine Bureau Zhongkai University of Agriculture and Engineering, No.501 Zhongkai Road, Haizhu District, Guangzhou 510225, China. E-mail: biyingwang2003@163.com

ABSTRACT: Objective To determine the optimal process conditions for ultrasound-assisted extraction of flavonoids from honey orange peel, and compare the differences in flavonoid content and antioxidant activity among 23 kinds of *Citrus reticulata* Blanco peels. **Method** The optimal process conditions for ultrasonic assisted ethanol extraction of *Citrus reticulata* Blanco flavonoids were optimized by single factor and orthogonal experiments, total flavonoid content, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) method and Fe^{3+} reduction method were used to determine *in vitro* antioxidant activity was used for correlation analysis and cluster analysis were investigated. **Results** The optimum conditions for total flavonoid extraction were the liquid to material ratio of 1:35 (g/mL), ethanol concentration of 50%, ultrasound time of 90 min, ultrasound temperature of 70°C, the total flavonoid extraction amount of tangerine peel was 8.91 mg RE/g. The total flavonoid of 23 kinds of *Citrus reticulata* Blanco peels varied significantly, ranging from (4.07 ± 0.01) to (10.92 ± 0.17) mg RE/g; the concentration for 50% of maximal effect (EC_{50}) values of DPPH radical scavenging ability ranged from (0.36 ± 0.00) to (2.27 ± 0.008) g/L; the EC_1 values of ferric ion reduction ability ranged from (0.01 ± 0.00) to (0.14 ± 0.00) mmol Fe^{2+} /g. The total flavonoid of Guangxi red heart grapefruit was the highest, and the DPPH radical scavenging ability of Guangdong emperor mandarin and Ma Shui orange was the strongest; the total flavonoid and the DPPH radical scavenging ability of Yunnan wok mandarin was the weakest; the iron ion reducing ability of Zhejiang ponkan peel was the strongest, and the weakest was Fujian red heart grapefruit peel. Technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) analysis showed that Zhejiang ponkan peels had the strongest comprehensive antioxidant capacity. Based on the differences in flavonoid content and antioxidant activity, there was no correlation between *Citrus reticulata* Blanco species and flavonoid content and antioxidant activity. And the peels of 23 different *Citrus reticulata* Blanco varieties could be divided into 3 categories; total flavonoid content was proportional to the DPPH radical scavenging ability and iron ion reducing ability. **Conclusion** The orthogonally optimized ultrasound-assisted technique can improve the efficiency and increase the extraction of total flavonoids from *Citrus reticulata* Blanco peels, and 23 kinds of *Citrus reticulata* Blanco flavonoids with higher content of the first and second flavonoids have better antioxidant activities, and the Zhejiang ponkan peels have the strongest comprehensive antioxidant properties.

KEY WORDS: process optimization; *Citrus reticulata* Blanco peel; total flavonoids; antioxidant activity

0 引言

我国柑橘多以鲜食或加工成果汁、罐头等食用方式使用,随之产生大量副产物皮渣,目前皮渣虽有被应用于各种药物和非药物领域^[1],但由于过剩皮渣的有效利用率低,带来资源浪费和环境污染问题被行业高度重视^[2]。柑橘含有丰富的类黄酮等天然抗氧化剂活性物质,因产地、柑橘品种、果实部位和生长阶段的不同,其生物活性物质的组成成分和含量也存在差异^[3-4]。在柑橘的不同组织部位中黄酮类物质含量由多到少依次为果皮、果肉、果汁^[5]。

从柑橘提取的黄酮为柑橘黄酮,其具有抗氧化、抗癌、抗炎^[6]、抗病毒^[7]、抑菌作用^[8]、保护皮肤健康^[9]和预防心血管疾病^[10]等积极作用。目前,提取黄酮类化合物的方法主要有有机试剂(碱、醇)提取法、酶法、微波和超声波辅助提取法等^[11]。其中,超声辅助提取技术具有高效低耗的优点,已广泛应用于植物化学成分中提取,具有增加提取率、加快提取速度和节约有机溶剂的优点^[12],是具有开发潜力和发展前景的辅助提取技术之一。赵彦巧等^[13]利用超声辅助技术提高紫苏叶总黄酮提取量及抗氧化活性,提取量为

22.48 mg/g; WANG 等^[14]研究发现高强度超声处理可显著提高猕猴桃汁的多酚、黄酮含量及抗氧化性强度;王文骏^[15]发现超声辅助提取法有利于柑橘果胶的溶出。但不同原料使用超声辅助提取技术提取效果差异大,且目前超声优化柑橘品种之一——蜜橘黄酮提取工艺鲜有报道。而我国作为柑橘资源含量丰富的国家之一,其中蜜橘产量大,并且蜜橘味道甘甜可口,多以鲜食或加工成罐头,深受消费者喜爱^[16]。因此,利用蜜橘为原料研究超声辅助技术提高柑橘果皮利用率,提高黄酮提取效率具有重要意义。

本研究基于超声辅助技术提高柑橘果皮总黄酮提取量,筛选最优工艺条件,并在该工艺基础上比较 23 种柑橘果皮提取物总黄酮含量及体外抗氧化活性,探索柑橘果皮总黄酮含量与抗氧化活性相关性,进行聚类分析了解柑橘类别与黄酮含量、抗氧化活性的关联性以及进行分类,以期筛选出优质柑橘果皮,为柑橘果皮综合利用开发提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

不同品种柑橘果皮信息如表 1 所示。

芦丁(纯度 98%)、三吡啶三吡嗪(tripyrindine triazine, TPTZ)、1,1-二苯基-2-苦基胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(分析纯)(上海源叶生物科技有限公司); 亚硝酸钠、无水乙醇(分析纯, 天津市永大化学试剂有限公司); 硝酸铝、氢氧化钠、三氯化铁、冰乙酸(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 浓盐酸(分析纯, 广州化学试剂厂)。

铁离子还原(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)溶液: 2.5 mL 用 40 mmol/L HCL 溶解的 10 mmol/L TPTZ 溶液, 2.5 mL 的 20 mmol/L FeCl₃·6H₂O 溶液, 25 ml pH3.6 的 0.3 mol/L 醋酸缓冲液, 按 1:1:10 (V:V:V)比例混合;

0.1 mmol/L DPPH 自由基标准溶液: 准确称取 0.020 g DPPH, 用无水乙醇溶解并定容至 500 mL, 持续搅拌 10 min;

0.1 mol/L FeSO₄ 溶液的配制: 在天平上称一定量的 FeSO₄·7H₂O, 放入烧杯, 加水溶解。

HR/T20M 离心机(湖南赫西仪器装备有限公司); JJ224BC 电子天平(精度 0.1 mg, 常熟市双杰测试仪器厂); UV-1780 紫外可见分光光度计[岛津企业管理(中国)有限公司]; DHG-9240B 电热鼓风干燥箱(上海培因实验仪器有限公司); RE-52A 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂); KQ5200V 超声波清洗(昆山市超声仪器有限公司); PHS-3C pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司); SHZ-D(III)循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限责任公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备及总黄酮提取方法

样品的制备: 参照邓菊庆等^[17]的方法, 略有修改。将不同品种柑橘鲜果洗净剥皮, 把果皮切成细丝条, 放于 55℃烘箱中烘干至恒重, 粉碎过 60 目筛, 备用。

总黄酮提取方法: 准确称取 4 g 柑橘皮粉样于烧杯中, 超声辅助一定体积的乙醇提取后以转速 4000 r/min 离心 20 min, 将离心后一定体积的上清液收集于 250 mL 容量瓶中, 用相应浓度的乙醇进行定容。

1.2.2 总黄酮含量测定

总黄酮测定参照蒋变玲等^[18]的方法略有修改。准确吸

取 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0 mL 芦丁标准溶液于 25 mL 容量瓶中, 加入 1 mL 5%亚硝酸钠溶液, 摇匀后静置 6 min; 再加入 1 mL 10%硝酸铝溶液, 摇匀后静置 6 min; 再加入 10 mL 4%氢氧化钠溶液, 70%乙醇定容至刻度, 摇匀后静置 15 min, 以溶剂作为空白参比液, 在 510 nm 的波长处测定吸光度。标准曲线方程为: $Y=0.0106X+0.0335$, $r^2=0.9999$ 。

样品测定: 取柑橘黄酮提取液 10 mL 于 25 mL 容量瓶中, 按上述方法定容后测定吸光度, 进行 3 次平行实验。根据公式(1)计算总黄酮含量:

$$W=\frac{c\times V\times n}{m_1}$$
 (1)

式中: W 为样品中总黄酮的含量, mg/g; c 为提取物总黄酮质量浓度, mg/mL; V 为测定时定容的体积, mL; n 为稀释倍数; m_1 为样品重量, g。

1.2.3 超声辅助提取单因素实验设计

以蜜橘果皮粉为原料, 其黄酮提取量(mg/g)为评价指标, 乙醇为提取剂, 研究料液比[1:10、1:15、1:20、1:25、1:30、1:35 (g/mL)]、乙醇浓度(40%、50%、60%、70%、80%、90%)、超声提取温度(30、40、50、60、70、80℃)、提取时间(30、60、90、120、150、180 min)对柑橘黄酮类化合物提取量的影响。总黄酮提取方法如 1.2.1。

1.2.4 正交实验设计

根据单因素实验的结果, 对料液比、乙醇浓度、提取时间、提取温度 4 个因素进行 $L_9(3^4)$ 正交实验设计, 以黄酮提取率为评价指标, 具体因素水平值见表 2。

1.2.5 验证实验

准确称取 4 g 柑橘果皮粉样, 以正交实验得出的最佳提取工艺进行 3 次平行实验, 分别按照 1.2.2 步骤进行总黄酮含量的测定。

1.2.6 23 种柑橘果皮总黄酮提取及含量测定

23 种柑橘果皮总黄酮提取使用 1.2.5 最优工艺条件提取。23 种柑橘果皮黄酮含量测定按照 1.2.2 步骤。

1.2.7 1,1-二苯基-2-苦基胍自由基清除能力测定

根据秦艳^[19]的方法进行适当的修改。

表 1 不同品种柑橘果皮信息表
Table 1 Informations table of different varieties of *Citrus reticulata* Blanco fruit peels

序号	种类	品种	产地	序号	种类	品种	产地
1	柑类	椪柑	浙江	13	橘类	砂糖橘	湖北
2	柑类	皇帝柑	广西	14	橘类	砂糖橘	广东
3	柑类	皇帝柑	广东	15	橘类	砂糖橘	广西
4	柑类	皇帝柑	云南	16	橘类	丑橘	贵州
5	柑类	沃柑	广西	17	橘类	丑橘	四川
6	柑类	沃柑	云南	18	柚类	胡柚	常山
7	柑类	沃柑	广东	19	柚类	红心蜜柚	广东
8	柑类	茶枝柑	广东	20	柚类	红心蜜柚	广西
9	橘类	柑橘	四川	21	柚类	红心蜜柚	福建
10	橘类	柑橘	云南	22	柚类	沙田柚	广东
11	橘类	柑橘	广东	23	柚类	沙田柚	广西
12	橘类	马水桔	广东				

表 2 正交实验因素水平表
Table 2 Levels of orthogonal test factors

水平	影响因素			
	A料液比(g/mL)	B乙醇浓度/%	C提取时间/min	D提取温度/°C
1	1:25	50	30	50
2	1:30	60	90	60
3	1:35	70	150	70

样品测定: 准确吸取 0.20 mL 总黄酮提取液于具塞试管中, 加入 4.0 mL 0.1 mmol/L DPPH 标准溶液, 摇匀, 避光静置 30 min, 在 517 nm 处测其吸光值, 以 4.0 mL 无水乙醇和 0.2 mL 蒸馏水的混合液为空白调零。

空白测定: 准确吸取 0.20 mL 70%乙醇溶液于具塞试管中, 按照样品测定方法操作。

结果用半最大效应浓度(concentration for 50% of maximal effect, EC₅₀)值表示, 该值指的是将原始 DPPH 乙醇溶液的浓度降低 50%所需的抗氧化剂(样品)的浓度(g/L)。样品的 EC₅₀ 值根据公式(2)计算:

$$EC_{50} = \frac{V_1 \times 1000 \times 500 \times m_2 \times A_0}{V_2 \times n \times (A_0 - A_1) \times V_3} \quad (2)$$

式中: A₁ 为样品测定的吸光度; A₀ 为空白测定的吸光度; m₂ 为样品质量, g; n 为稀释倍数; V₁ 为测定样液的体积, mL; V₂ 为测定定容的体积, mL; V₃ 为提取定容的体积, mL。

1.2.8 铁离子抗氧化能力测定

根据秦艳^[19]的方法进行适当的修改。

取 0、20、40、60、80、100 μL 0.1 mol/L FeSO₄ 溶液于 10 mL 容量瓶并用超纯水定容, 取上述浓度 FeSO₄ 溶液各 120 μL, 加入 3600 μL 的 FRAP 工作液及 360 μL 的超纯水, 混匀后在 37°C 水浴中保温 30 min, 于 593 nm 处测定其吸光值。以吸光度值(Y)为纵坐标, 以 FeSO₄ 溶液终浓度(X, mmol/L)为横坐标, 绘制标准曲线。测得 FeSO₄ 标准曲线方程为 Y=0.5343X+0.6396, r²=0.9724。

样品测定: 准确吸取稀释 10 倍的样液 120 μL, 按上述方法测定样品吸光度, 以超纯水代替样品为空白, 测定空白吸光度。样品反应液的吸光值应在标准曲线(FeSO₄)范围之内, 结果用 EC₁ 值表示。EC₁ 值指的是与 1 mmol/L FeSO₄·7H₂O 有相同抗氧化能力的抗氧化剂(样品)的量(mmol Fe²⁺/g)。EC₁ 值与样品的铁抗氧化能力成正比, 样品的 EC₁ 值(mmol Fe²⁺/g)根据公式(3)计算:

$$EC_1 = \frac{(y-d) \times n \times V}{k \times 1000 \times m_3} \quad (3)$$

式中: y 为标准曲线中的吸光值; d 为标准曲线中的截距; k 为标准曲线中的斜率; n 为稀释倍数; V 为提取时样液定容体积, mL; m₃ 为样品质量, g。

1.2.9 TOPSIS 法综合评价不同品种柑橘果皮抗氧化能力

优劣解距离算法(technique for order preference by

similarity to ideal solution, TOPSIS)是多目标决策分析中一种常用的有效方法, 根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 是在现有的对象中进行相对优劣的评价^[20-21]。若评价对象最靠近最优解同时又最远离最劣解, 则为最好; 否则不为最优。其中, 最优解的各指标值都达到各评价指标的最优值。最劣解的各指标值都达到各评价指标的最差值。通过 SPSS 22.0 软件对不同品种柑橘果皮抗氧化能力进行 TOPSIS 分析。

1.3 统计分析

每个实验均重复 3 次。数据采用平均值±标准偏差表示。应用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析和皮尔森相关性分析, 采用 Origin 2021 软件作图。P<0.05 表示差异显著, P<0.01 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 单因素对蜜橘果皮总黄酮提取的影响

2.1.1 料液比对总黄酮含量的影响

随着料液比的增大, 总黄酮含量逐渐增加。料液比由 1:10 (g/mL)增加到 1:35 (g/mL)时, 由 4.02 mg RE/g 升高到 7.42 mg RE/g。料液比为 1:10 (g/mL)时, 可能因为溶剂太少, 蜜橘颗粒浸润不充分, 黄酮类化合物溶出有限, 所以黄酮提取量较低^[22]; 而料液比为 1:35 (g/mL)时, 总黄酮含量增加缓慢, 可能过高的料液比会导致溶解在溶剂中的黄酮有效成分浓度降低其他可溶物质也会与之竞争溶剂, 阻碍黄酮的溶出^[23]。综合上述结果及从经济和环保的方面考虑, 选取 1:25、1:30、1:35 (g/mL)这 3 个料液比水平进行正交实验。

2.1.2 乙醇浓度对总黄酮含量的影响

乙醇浓度处于 40%~60%范围内, 总黄酮含量不断提高, 呈显著上升趋势(P<0.05); 当乙醇浓度为 60%时, 蜜橘果皮总黄酮含量达到最大值, 为 8.65 mg RE/g; 当乙醇浓度于 60%~90%之间, 总黄酮含量呈下降趋势, 原因可能是乙醇浓度过高, 一些易溶解于乙醇的杂质、色素、脂溶性强的成分等相继溶出, 与黄酮类物质竞争溶剂, 使得细胞通透性有所下降, 干扰因素增加, 反而降低总黄酮含量^[24]。综合上述结果, 选取 50%、60%、70%这 3 个乙醇浓度水平进行正交实验。

2.1.3 超声提取时间对总黄酮含量的影响

随提取时间变化, 蜜橘果皮总黄酮含量呈先升高后逐渐下降趋势; 在超声提取时间为 30~90 min 之间, 蜜橘果皮总黄酮随时间延长存在积累效应, 说明原料在溶剂中适当延长超声辅助浸泡时间有利于蜜橘果皮颗粒与溶剂充分接触及发挥机械波动和空化效应, 从而加大超声破壁效应, 促进黄酮物质的快速溶出^[25]。超声时间处于 120~150 min 范围内, 总黄酮含量呈现下降趋势, 随后趋于平缓, 可能因为总黄酮已基本溶出, 超声时间延长导致热效应增加, 使对热不稳定的一些黄酮类化合物结构被破坏, 导致含量下降, 与杨子敬等^[26]研究结果相似。因显著性分析结果显示 60、90、120 min 无显著性差异, 30 min 和 60 min, 120 min 和 150 min 之间有显著性差异($P<0.05$)。且当超声提取时间为 90 min 时, 蜜橘果皮总黄酮含量最高达到 8.50 mg RE/g; 综合上述结果, 选取 30、90、150 min 这 3 个提取时间水平进行正交实验。

2.1.4 超声提取温度对总黄酮含量的影响

提取温度处于 30~60℃范围, 总黄酮含量显著上升($P<0.05$), 可能因为温度的升高有利于溶剂黏滞性降低, 促进了分子动能增大, 加大黄酮类分子和溶剂分子碰撞机会, 使得渗透、扩散、溶解系数变大, 使得黄酮类物质更易从细胞中转移到溶剂中^[27]; 60℃时, 黄酮含量最大, 总黄酮提取量达到 7.33 mg RE/g; 在提取温度处于 60~80℃范围, 总黄酮含量呈现下降趋势, 可能因为温度过高导致组织中的纤维素酶活性得到一定的抑制, 或黄酮类物质有效成分在较高温度下被分解或转化^[28]。考虑到 40℃提取温度黄酮含量相对较低, 故选取 50、60、70℃这 3 个提取温度水平进行正交实验。

2.2 正交实验

根据单因素实验结果, 设计 $L_9(3^4)$ 正交表, 以料液比(A)、乙醇浓度(B)、提取时间(C)、超声温度(D)作为 4 个考察因子, 重复实验 3 次, 正交实验结果表见表 3。

由表 3 可知, 4 个因素对总黄酮含量影响的大小顺序依次为: 提取温度>料液比>提取时间>乙醇浓度。最佳实验工艺条件为 $A_3B_1C_2D_3$ [料液比 1:35 (g/mL)、乙醇浓度 50%、超声提取时间 90 min、超声提取温度 70℃], 在此条件下蜜橘果皮总黄酮提取效果最好。但在正交实验表中此组合不存在, 故需进行下一步的验证实验。由表 4 方差分析可知, 4 个因素对超声辅助提取蜜橘果皮总黄酮均有显著性影响。

按照正交实验确定的最佳工艺条件为 $A_3B_1C_2D_3$, 进行 3 次重复实验, 测定总黄酮含量平均值为 8.91 mg RE/g, 表明通过正交实验选择及验证最佳提取工艺科学合理, 可见超声波辅助法在最佳条件下提取柑橘果皮总黄酮的方法操作性强, 结果较稳定可靠。

2.3 不同品种柑橘果皮中总黄酮含量和体外抗氧化活性

由表 5 可知, 不同品种的柑橘果皮的总黄酮含量介于 (4.07±0.01)~(10.92±0.17) mg RE/g 之间, 在 23 种柑橘中, 广西红心蜜柚的黄酮含量最高(10.92 mg RE/g), 总黄酮含量最低的是云南沃柑(4.07 mg RE/g)。在柑类中, 云南皇帝柑总黄酮含量最高为 9.65 mg RE/g; 最低的是云南沃柑(4.07 mg RE/g)。在橘类中, 广东柑橘总黄酮含量最高为 10.26 mg RE/g; 最低的是贵州丑橘(4.42 mg RE/g)。对比柑类及橘类, 柚类整体的总黄酮含量偏高, 最高的是广西红心蜜柚(10.92 mg RE/g),

表 3 正交实验结果
Table 3 Orthogonal test results

实验号	A料液比(g/mL)	B乙醇浓度/%	C提取时间/min	D提取温度/℃	总黄酮含量平均值/(mg/g)
1	1:25	50	30	50	5.24
2	1:25	60	90	60	6.00
3	1:25	70	150	70	6.99
4	1:30	50	90	70	8.73
5	1:30	60	150	50	5.25
6	1:30	70	30	60	6.00
7	1:35	50	150	60	6.24
8	1:35	60	30	70	8.83
9	1:35	70	90	50	6.45
k_1	6.08	6.74	6.69	5.65	
k_2	6.66	6.69	7.06	6.08	
k_3	7.17	6.48	6.16	8.18	
R	1.10	0.26	0.90	2.54	

表 4 方差分析表
Table 4 Analysis of Variance

差异源	偏差平方和	自由度	均方	F	显著性
料液比	5.42	2.00	2.71	237.10	*
乙醇浓度	0.34	2.00	0.17	14.88	*
提取时间	3.68	2.00	1.84	161.18	*
提取温度	33.04	2.00	16.52	1445.17	*
误差	0.21	18.00	0.01		
总计	42.69	26			

注: *表示具有显著性差异($P<0.05$)。

表 5 不同品种柑橘果皮中总黄酮含量与抗氧化活性
Table 5 Total flavonoid content and antioxidant activity of different *Citrus reticulata* Blanco cultivars peel

品种	产地	总黄酮/(mg RE/g)	EC ₅₀ 值/(g/L)	EC ₁ 值/(mmol Fe ²⁺ /g)
椪柑	浙江	8.25±0.01 ^{fg}	0.84±0.03 ^g	0.14±0.00 ^a
皇帝柑	广西	5.71±0.09 ^j	0.85±0.09 ^b	0.09±0.03 ^d
皇帝柑	广东	8.26±0.10 ^{fg}	0.36±0.00 ⁱ	0.07±0.00 ^{gh}
皇帝柑	云南	9.65±0.12 ^c	0.44±0.00 ^{hi}	0.02±0.00 ^j
沃柑	广西	7.65±0.02 ^h	1.70±0.05 ^f	0.09±0.01 ^d
沃柑	云南	4.07±0.01 ^p	2.22±0.03 ^b	0.08±0.01 ^g
沃柑	广东	6.72±0.08 ^k	0.44±0.00 ^{hi}	0.03±0.00 ^{ij}
茶枝柑	广东	8.06±0.05 ^g	0.48±0.00 ^h	0.03±0.00 ^{ij}
柑橘	四川	8.73±0.02 ^c	0.85±0.01 ^g	0.09±0.03 ^{cd}
柑橘	云南	4.70±0.06 ⁿ	2.27±0.08 ^b	0.07±0.01 ^{gh}
柑橘	广东	10.26±0.15 ^b	0.44±0.00 ^{hi}	0.05±0.00 ^{hi}
马水桔	广东	9.42±0.32 ^c	0.36±0.00 ⁱ	0.03±0.00 ^{ij}
砂糖橘	湖北	8.16±0.22 ^g	0.37±0.00 ⁱ	0.05±0.00 ^{hi}
砂糖橘	广东	8.83±0.11 ^{de}	0.41±0.00 ^{hi}	0.05±0.00 ^{hi}
砂糖橘	广西	8.08±0.02 ^g	0.89±0.05 ^g	0.11±0.01 ^b
丑橘	贵州	4.42±0.01 ^o	1.90±0.01 ^d	0.08±0.02 ^g
丑橘	四川	5.03±0.01 ^m	1.81±0.03 ^{de}	0.08±0.02 ^e
胡柚	常山	9.01±0.04 ^d	0.85±0.07 ^g	0.14±0.00 ^a
红心蜜柚	广东	7.58±0.01 ^{hi}	1.32±0.01 ^a	0.06±0.00 ^f
红心蜜柚	广西	10.92±0.17 ^a	0.48±0.04 ^b	0.03±0.00 ^{ij}
红心蜜柚	福建	8.43±0.24 ^f	0.52±0.09 ^b	0.01±0.00 ^j
沙田柚	广东	7.19±0.00 ^j	0.88±0.07 ^{ef}	0.10±0.02 ^g
沙田柚	广西	7.38±0.01 ^{ij}	2.05±0.03 ^c	0.07±0.00 ^{gh}

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

最低的是广东沙田柚(7.19 mg RE/g), 卢锦澜^[29]测定得到 10 产地文旦柚果皮总黄酮含量在 9.84~19.81 mgRE/gDW 之间, 与本研究测得的柚类总黄酮含量结果类似。张东峰等^[30]发现 7 种不同柑橘果皮中总黄酮含量不同; GORINSTEIN 等^[31]发现柠檬、橙子和葡萄柚其黄酮含量存在差异。可能因为品种、产地不一样, 柑橘的总黄酮含量

存在较明显的差异。

由表 5 可知, 不同品种的柑橘果皮的 EC₅₀ 值介于 (0.36±0.00)~(2.27±0.08) g/L 之间, 可能与不同品种柑橘之间的抗氧化物质不同有关。其中广东皇帝柑、广东马水桔的 EC₅₀ 值最低, 均为 0.36 g/L, 抗氧化能力最强; 云南柑橘的 EC₅₀ 值最高, 为 2.27 g/L, 其抗氧化能力最弱。在柑类中, 广

东皇帝柑的抗氧化能力最强, 云南沃柑的抗氧化能力最弱; 在橘类中广东马水桔的抗氧化能力最强, 云南柑橘的抗氧化能力最弱; 在柚类中, 广西红心蜜柚的抗氧化能力最强, 最弱的是广西沙田柚。与陈源等^[32]的研究结果相似, 其研究表明不同类柑橘果皮清除 DPPH 自由基能力不同, 金柑类为最好, 其次为宽皮橘类, 最弱为柚类。

由表 5 可知, 不同品种的柑橘果皮的 EC_{10} 值介于 $(0.01\pm 0.00)\sim(0.14\pm 0.00)$ mmol Fe^{2+}/g 之间, 铁离子还原能力最强的是浙江椪柑, 铁离子还原能力最弱的是福建红心蜜柚。在柑类中, 铁离子还原能力最强的是浙江椪柑, 其 EC_{10} 值为 0.14 mmol Fe^{2+}/g , 铁离子还原能力最弱的是云南皇帝柑, 其 EC_{10} 值是 0.02 mmol Fe^{2+}/g ; 在橘类中, 广西砂糖橘的铁离子还原能力最强, 其 EC_{10} 值为 0.11 mmol Fe^{2+}/g , 铁离子还原能力最弱的是广东马水桔, 其 EC_{10} 值是 0.03 mmol Fe^{2+}/g ; 在柚类中, 铁离子还原能力最强的是常山胡柚, 其 EC_{10} 值是 0.14 mmol Fe^{2+}/g , 铁离子还原能力最弱的是福建红心蜜柚, 其 EC_{10} 值是 0.01 mmol Fe^{2+}/g 。样品对铁离子的还原能力越强则其抗氧化活性越强。徐贵华等^[33]的研究结果表明宽皮桔果皮抗氧化能力最强, 蜜柚果皮抗氧化能力最低, 与本研究结果相似。

2.4 不同品种柑橘果皮抗氧化能力综合排序

以不同品种柑橘果皮 EC_{50} 值和 EC_{10} 值为原始数据, TOPSIS 法综合评定出抗氧化能力排名前 15 种的不同品种柑橘果皮, 其排序为浙江椪柑、广西皇帝柑、广东皇帝柑、

云南皇帝柑、云南沃柑、广东沃柑、广东茶枝柑、云南柑橘、广东柑橘、广西砂糖橘、贵州丑橘、四川丑橘、常山胡柚、广东红心蜜柚、广东沙田柚, 详见表 6。

2.5 不同品种柑橘果皮总黄酮含量及抗氧化活性聚类分析

利用 SPSS 软件进行聚类分析并构建树状图, 不同品种柑橘果皮总黄酮含量及抗氧化活性聚类分析如图 1 所示, 将 23 种柑橘果皮分为 3 类, 第一类为广东柑橘、广西红心蜜柚、广东皇帝柑、云南皇帝柑、广东茶枝柑、福建红心蜜柚, 聚类显示其相互间可能亲缘关系较近; 第二类为常山胡柚、浙江椪柑、广东沃柑、四川柑橘、广东马水桔、湖北砂糖橘、广东砂糖橘、广西砂糖橘; 第三类为广西皇帝柑、广西沃柑、云南沃柑、云南柑橘、贵州丑橘、四川丑橘、广东红心柚、广东梅州沙田柚、广西沙田柚。第一类和第二类的总黄酮含量相对较多, DPPH 自由基清除能力强, 铁离子还原能力比较强; 第三类的总黄酮含量相对偏少, 其 DPPH 自由基清除能力偏弱, 铁离子还原能力较强。通过比较发现柑橘种类与黄酮含量以及抗氧化活性之间不存在明显关联性。

2.6 不同品种柑橘果皮总黄酮含量及抗氧化活性相关性分析

由总黄酮含量与抗氧化活性相关性热图(图 2)可知, 不同品种柑橘果皮抗氧化能力(DPPH 自由基、FRAP 的能力)和总黄酮含量呈现不同的相关性。热图颜色深浅表示相关值的

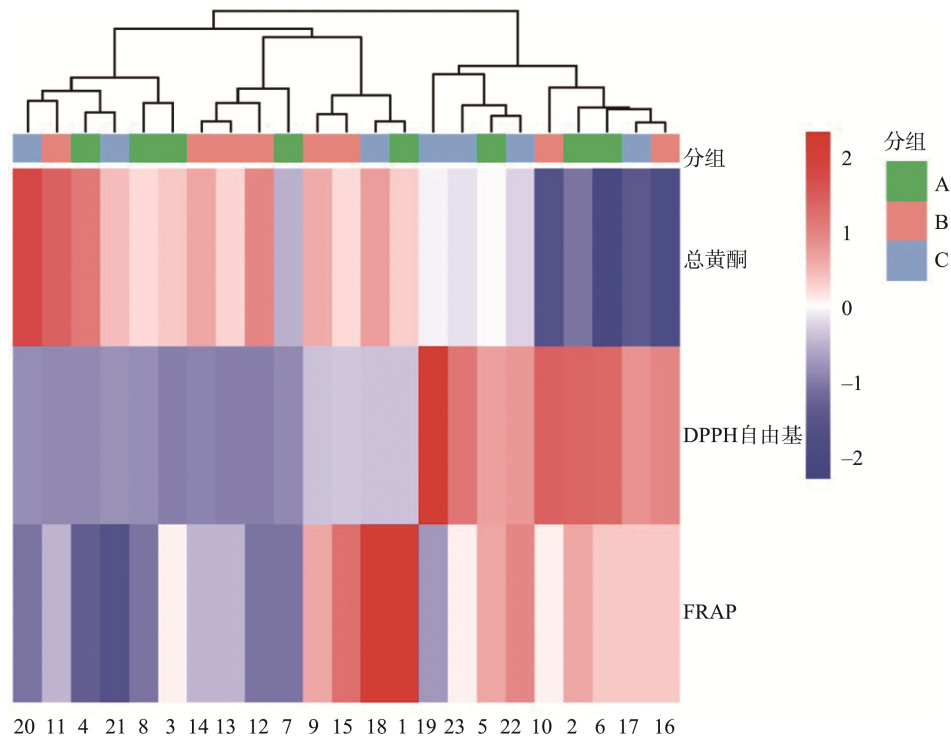
表 6 TOPSIS 法评定不同品种柑橘果皮抗氧化能力综合排序

Table 6 Comprehensive ranking of antioxidant capacity of <i>Citrus reticulata</i> Blanco peel assessed by topsis method				
索引值	正理想距离(D+)	负理想距离(D-)	综合得分指数	排序结果
贵州丑橘	0.62716505	0.51389524	0.45036642	16
四川丑橘	0.58659174	0.47970066	0.44987722	17
广东沃柑	0.43872851	0.66860111	0.60379592	7
广东茶枝柑	0.53338403	0.75477099	0.5859318	8
广东红心蜜柚	0.631411	0.38552064	0.37910182	19
广东沙田柚	0.79622058	0.31634736	0.28433982	22
云南皇帝柑	0.35569625	0.74562741	0.67702842	4
云南沃柑	0.38942953	0.71907953	0.64869071	6
广东柑橘	0.50845694	0.55697551	0.52276943	11
常山胡柚	0.71282092	0.47509203	0.39993842	18
云南柑橘	0.56218544	0.72527842	0.56333886	10
浙江椪柑	0.16682852	0.85993979	0.83752078	1
广东皇帝柑	0.23743454	0.8584573	0.78334126	3
广西皇帝柑	0.20035961	0.85349242	0.8098788	2
广西砂糖橘	0.58761792	0.49622628	0.45783913	15

注: D+和 D-值, 此两值分别代表评价对象与最优或最劣解(即 A+或 A-)的距离(欧式距离), 此两值的实际意义是, 评价对象与最优或最劣解的距离, 值越大说明距离越远, 研究对象 D+值越大, 说明与最优解距离越远; D-值越大, 说明与最劣解距离越远。最优解的研究对象是 D+值越小同时 D-值越大。综合度得分 C 值, $C=(D-)/(D++D-)$, 计算公式上, 分子为 D-值, 分母为 D+和 D-之和; D-值相对越大, 则说明该研究对象距离最劣解越远, 则研究对象越好; C 值越大说明研究对象越好。

大小,从图 2 中可知,总黄酮含量与 EC_{50} 值呈显著负相关($r=-0.642$, $P<0.05$),即与 DPPH 自由基清除能力呈显著正相关($P<0.05$);与 FRAP 能力的 EC_1 值呈显著正相关($r=0.555$, $P<0.05$),即与还原铁离子能力(抗氧化能力)呈显

著正相关($P<0.05$)。说明黄酮对柑橘果皮提取物抗氧化能力影响较大,其含量的变化可能是导致不同品种柑橘抗氧化能力差异的重要因素。CHEN 等^[34]研究结果与本研究相似,发现黄酮化合物与体外抗氧化活性呈正相关。



注:底部序号对应表1。

图1 不同品种柑橘果皮总黄酮含量及抗氧化活性聚类热图

Fig.1 Clustering heatmap of total flavonoid content and antioxidant activity of different *Citrus reticulata* Blanco peels

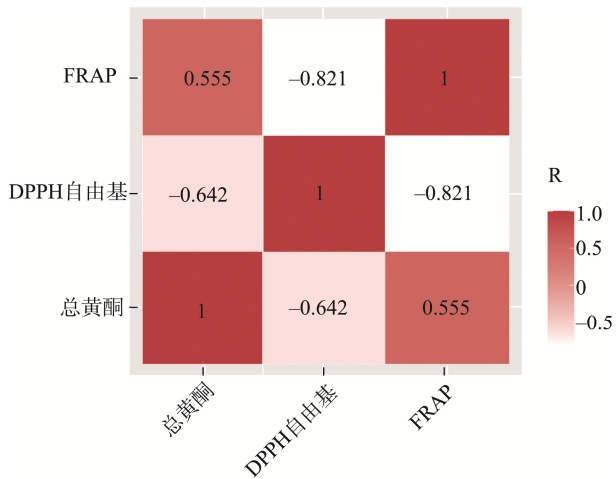


图2 总黄酮含量与抗氧化活性相关系数热力图

Fig.2 Thermal diagram of correlation coefficient between total flavonoid content and antioxidant activity

3 结 论

通过正交实验优化超声辅助乙醇提取柑橘皮中总黄

酮,得到最优工艺为:料液比 1:35 (g/mL)、乙醇浓度 50%、超声提取时间 90 min、超声提取温度 70℃,在此条件下柑橘果皮总黄酮提取量为 8.91 mg RE/g。

基于最优工艺提取 23 种柑橘皮总黄酮,测定总黄酮含量及其抗氧化能力的结果为:总黄酮含量介于 $(4.07\pm0.01)\sim(10.92\pm0.17)$ mg RE/g 之间,其中广西红心蜜柚果皮总黄酮含量最高为 10.92 mg RE/g;DPPH 自由基清除能力的 EC_{50} 值介于 $(0.36\pm0.00)\sim(2.27\pm0.08)$ g/L 之间,其中广东皇帝柑和马水桔果皮的 EC_{50} 值最低,均为 (0.36 ± 0.00) g/L,说明两者 DPPH 自由基清除能力最强;铁离子还原能力的 EC_1 值介于 $(0.01\pm0.00)\sim(0.14\pm0.00)$ mmol Fe^{2+} /g 之间,其中铁离子还原能力最强的是浙江槿柑果皮。TOPSIS 综合评价体系结果表明浙江槿柑果皮综合抗氧化能力最强。聚类分析分为 3 大类,第一类黄酮含量及抗氧化活性最强,抗氧化活性与柑橘种类不存在明显关联性。相关性分析结果表明总黄酮含量与 DPPH 自由基清除能力、铁离子抗氧化能力呈显著正相关($P<0.05$),相关系数都大于 0.5。本研究将为柑橘果皮综合利用开发提供理论参考依据。

参考文献

- [1] LIU N, LI X, ZHAO P, *et al.* A review of chemical constituents and health-promoting effects of citrus peels [J]. Food Chem, 2021, 365: 130585.
- [2] 唐清苗, 王鲁峰. 柑橘皮渣的功能组分及加工应用现状[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 180–185.
- TANG QM, WANG LF. Functional components of citrus peel and its processing and application status [J]. Food Mach, 2022, 38(6): 180–185.
- [3] LU X, ZHAO C, SHI H, *et al.* Nutrients and bioactives in citrus fruits: Different citrus varieties, fruit parts, and growth stages [J]. Crit Food Sci, 2023, 63(14): 2018–2041.
- [4] HANO C. An overview of bioactive flavonoids from citrus fruits [J]. Appl Sci, 2021. DOI: 10.3390/app12010029
- [5] SIR EKA, ELAGIB RAA, HASSAN AB. Content of phenolic compounds and vitamin C and antioxidant activity in wasted parts of *Sudanese citrus* fruits [J]. Food Sci Nutr, 2017, 6: 1214–1219.
- [6] ADENAIKE O, ABAKPA GO. Antioxidant compounds and health benefits of citrus fruits [J]. Europ J Nutr Food Saf, 2021. DOI: 10.9734/ejnf/2021/v13i230376
- [7] AGRAWAL PK, AGRAWAL C, BLUNDEN G. Pharmacological significance of hesperidin and hesperetin, two citrus flavonoids, as promising antiviral compounds for prophylaxis against and combating COVID-19 [J]. Nat Prod Commun, 2021. DOI: 10.1177/1934578X211042540
- [8] ZENG XA. Inhibition of biofilm formation of foodborne staphylococcus aureus by the citrus flavonoid naringenin [J]. Foods, 2021. DOI: 10.3390/foods10112614
- [9] SEBGHATOLLAHI Z, GHANADIAN M, AGARWAL P, *et al.* Citrus flavonoids: Biological activities, implementation in skin health, and topical applications: A review [J]. ACS Food Sci Technol, 2022, 2(9): 1417–1432.
- [10] DENG Y, TU Y, LAO S, *et al.* The role and mechanism of citrus flavonoids in cardiovascular diseases prevention and treatment [J]. Crit Rev Food Sci, 2021, (9): 1–24.
- [11] 刘丹, 郭欢, 吴笛, 等. 柑橘黄酮类化合物的提取新技术及生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(11): 217–224.
- LIU D, GUO H, WU D, *et al.* Research progress on new extraction technologies and bioactivities of flavonoids from orange [J]. Food Mach, 2022, 38(11): 217–224.
- [12] CHIEN W, SAPUTRI DS, LIN H. Valorization of Taiwan's *Citrus depressa hayata* peels as a source of nobletin and tangeretin using simple ultrasonic-assisted extraction [J]. Current Res Food Sci, 2022, 5: 278–287.
- [13] 赵彦巧, 张鑫, 王月, 等. 超声提取紫苏叶多酚及其抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(9): 127–132.
- ZHAO YQ, ZHANG X, WANG Y, *et al.* Study on ultrasonic extraction of perilla leaf polyphenols and its antioxidant activity [J]. Cere Oils, 2022, 35(9): 127–132.
- [14] WANG J, VANGA SK, RAGHAVAN V. High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the ascorbic acid, total phenolics, flavonoids and antioxidant capacity [J]. LWT-Food Sci Technol, 2019, 107: 1–9.
- [15] 王文骏. 柑橘皮果胶超声辅助提取的作用机制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WANG WJ. The research on the mechanism of ultrasound-assisted extraction of pectin from citrus peel [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [16] 叶灵玉. 基于光谱指数的便携式蜜橘成熟度检测研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2018.
- YE LY. Study on portable detection of ripeness of orange based on spectral index [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2018.
- [17] 邓菊庆, 柏春玲, 杨学芳, 等. 紫外可见分光光度法测定不同品种柑橘皮中总黄酮含量[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(9): 210–211.
- DENG JQ, BAI CL, YANG XF, *et al.* Determination of total flavonoids in different varieties of citrus peels by ultraviolet-visible spectrophotometry [J]. J Anhui Agric Sci, 2020, 48(9): 210–211.
- [18] 蒋爱玲, 王志花, 张东京, 等. 四种柑橘果皮主要活性物质测定和抗氧化能力对比研究[J]. 阜阳师范大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 51–56.
- JIANG BL, WANG ZH, ZHANG DJ, *et al.* Determination of main bioactive compounds and comparison of antioxidant capacity of four cultivars of citrus peels [J]. J Fuyang Norm Univ (Nat Sci Ed), 2021, 38(1): 51–56.
- [19] 秦艳. 脐橙皮多酚的抗氧化特性及其应用研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2013.
- QIN Y. Research on antioxidant properties of polyphenols in navel orange peel and its application [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2013.
- [20] BELENSON SM, KAPUR KC. An algorithm for solving multicriterion linear programming problems with examples [J]. J Oper Res Soc, 1973, 24(1): 65–77.
- [21] ZELANY M. A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal [J]. Comput Oper Res, 1974, 1(3): 479–496.
- [22] 石畅, 高畅, 郭晓瑞, 等. 层次分析-熵权法结合响应面法优化五味子藤茎油脂素超声提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 293–302.
- SHI C, GAO C, GUO XR. Optimization of ultrasonic extraction process of lignans from *Schisandra chinensis* vine stem by analytic hierarchy process-entropy weight method combined with response surface methodology [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(12): 293–302.
- [23] 刘娟, 罗仓学, 魏丽娜, 等. 地椒总黄酮超声提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2020, (1): 268–273.
- LIU J, LUO CX, WEI LN, *et al.* Extraction process of ultrasound and antioxidant activity for total flavonoids from *Thymus quinquecostatus* [J]. Food Sci Technol, 2020, (1): 268–273.
- [24] 安卓, 贾昌喜. 响应面优化超高压提取苦苣黄酮工艺的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(2): 105–110.
- AN Z, JIA CX. Research on ultra-high-pressure extraction technology of falconoid from *Sonchus oleraceus* L. with response surface optimization [J].

- J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(2): 105–110.
- [25] POYRAZ A, KUUKYLDZ G, KRBAL ARAS, *et al.* Valorization of *Citrus unshiu* biowastes to value-added products: An optimization of ultrasound-assisted extraction method using response surface methodology and particle swarm optimization [J]. Biomass Conver Bior, 2021. DOI: 10.1007/s13399-021-01329-9
- [26] 杨子敬, 饶桂维, 王磊. 超声波辅助双水相提取枇杷花总黄酮工艺优化及其抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 218–225.
- YANG ZJ, RAO GW, WANG L. Optimization of ultrasonic assisted aqueous two-phase extraction of total flavonoid from loquat flower and its antioxidant activity [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(19): 218–225.
- [27] 张贞发, 韦馥轩, 赵汉民, 等. 超声波辅助提取大新苦丁茶中总黄酮的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 122–126.
- ZHANG ZF, WEI FX, ZHAO HM, *et al.* Study on ultrasonic assisted extraction of total flavonoids from Daxin Kudingcha [J]. Food Res Dev, 2021, 42(2): 122–126.
- [28] 刘海鸥, 虎春艳, 赵声兰, 等. 滇黄芩总黄酮酶解超声提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2016, 35(1): 110–114.
- LIU HOU, HU CY, ZHAO SL, *et al.* Enzymatic-ultrasonic extraction of total flavonoids from *Scutellaria amoena* and its antioxidant activities [J]. Chin Brew, 2016, 35(1): 110–114.
- [29] 卢锦澜. 中国 10 产地文旦柚果皮化学成分及生物活性研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2020.
- LU JL. Research on the chemical composition and biological activity of the pericarp of *Pomelo vulgaris* from 10 origins in China [D]. Beijing: Minzu University of China, 2020.
- [30] 张东峰, 陈家豪, 郭静, 等. 7 种柑橘多酚、黄酮含量及其抗氧化活性比较研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 69–74.
- ZHANG DF, CHEN JH, GUO J, *et al.* Comparative study on the polyphenol, flavonoid and antioxidant activity of seven varieties of citrus [J]. Food Res Dev, 2019, 40(6): 69–74.
- [31] GORINSTEIN S, MART N-BELLOSO O, PARK YS, *et al.* Comparison of some biochemical characteristics of different citrus fruits [J]. Food Chem, 2004, 74(3): 309–315.
- [32] 陈源, 张迪, 潘鹤立, 等. 不同品种柑橘果皮的抗氧化能力研究[J]. 热带作物学报, 2019, 40(8): 1633–1637.
- CHEN Y, ZHANG D, PAN HL, *et al.* Antioxidant capacity of different varieties of citrus peels [J]. Chin J Trop Crops, 2019, 40(8): 1633–1637.
- [33] 徐贵华, 刘东红, 李波, 等. 柑橘果皮中类黄酮组成与抗氧化能力研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 114–117, 123.
- XU GL, LIU DH, LI B, *et al.* Study on composition of flavonoids and antioxidant capacity of citrus peels [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(16): 114–117, 123.
- [34] CHEN Y, PAN H, HA S, *et al.* Evaluation of phenolic composition and antioxidant properties of different varieties of Chinese citrus [J]. Food Chem, 2021, 364: 130413.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



白莉, 硕士研究生, 主要研究方向为功能食品化学。
E-mail: 1969409127@qq.com



于立梅, 博士, 教授, 主要研究方向为功能食品化学。
E-mail: biyingwang2003@163.com