

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20231010002

佛手凉果加工过程中功能性成分与 抗氧化活性分析

张受恩¹, 安可婧¹, 白卫东^{1*}, 黄桂颖¹, 王 宏¹, 肖更生^{1,2}, 杨启财³, 杨婉媛⁴

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院/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, 广州 510225;
2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室,
广州 510610; 3. 广东济公保健食品有限公司, 潮安 515638; 4. 广东佳宝集团有限公司, 潮州 515638)

摘 要: **目的** 探究佛手凉果加工中功能性成分和抗氧化活性的变化规律。**方法** 以佛手凉果为研究对象, 探究新鲜佛手柑经过盐渍、晒盐胚、糖渍、干燥等工艺成为佛手凉果(成品)的加工过程中功能性成分含量活性变化, 监测 1,1-二苯基-2-三硝基苯(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)ammonium salt, ABTS]阳离子自由基抑制率和铁离子还原抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)在加工中的变化, 研究各功能成分与体外抗氧化指标的相关性。**结果** 加工提高了佛手柑的总酸、多糖、黄酮、膳食纤维含量与抗氧化活性; DPPH、ABTS、FRAP 分别比新鲜佛手柑增加 1.35 倍、1.57 倍和 2.16 倍。糖渍和干燥可提高抗氧化活性。黄酮的含量影响了佛手凉果的抗氧化性, 黄酮与 FRAP 呈极显著正相关($P<0.01$), 与 DPPH、ABTS 呈显著正相关($P<0.05$)。多糖与 FRAP、黄酮呈显著正相关($P<0.05$)。**结论** 佛手柑加工可以提高多糖、黄酮、膳食纤维等功能成分以及抗氧化活性, 糖渍和干燥是关键加工步骤。

关键词: 佛手; 功能活性成分; 多糖; 黄酮; 膳食纤维; 抗氧化活性; 加工工艺

Analysis of functional components and antioxidant activity in the processing of finger citron preserved fruit

ZHANG Shou-En¹, AN Ke-Jing¹, BAI Wei-Dong^{1*}, HUANG Gui-Ying¹, WANG Hong¹,
XIAO Geng-Sheng^{1,2}, YANG Qi-Cai³, YANG Wan-Yuan⁴

(1. College of Light Industry and Food Science, Zhongkai College of Agricultural Engineering/Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Foods, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510225, China;
2. Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China; 3. Guangdong Jigong Healthy Food Co., Ltd., Chaoan 515638, China;
4. Guangdong Jiabao Group Co., Ltd., Chaozhou 515638, China)

基金项目: 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室项目(2021B1212040013)、岭南特色食品感官分析实验室建设项目(22097155302141)、广州市科技计划项目一般项目(202201010268)、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项目(农计财发[2020]18 号)

Fund: Supported by the Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology (2021B1212040013), the Construction of Sensory Analysis Laboratory for Lingnan Specialty Foods (22097155302141), the Guangzhou Science and Technology Plan Project General Project (202201010268), and the Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture (Nongji Caifa[2020]18)

*通信作者: 白卫东, 博士, 教授, 主要研究方向为食品化学。E-mail: 767313893qq.com

*Corresponding author: BAI Wei-Dong, Ph.D, Professor, Zhongkai College of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China. E-mail: 767313893@qq.com

ABSTRACT: Objective To explore the changes of functional components and antioxidant activity in the processing of finger citron preserved fruit. **Methods** In this study, the functional component content and activity of fresh finger citron into processed finger citron were investigated by salting, drying, saccharifying, stoving processes, and the scavenging capacity of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis(3-ethyl-benzothiazoliline-6-sulfonic acid) diammonium salt, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) ammonium salt (ABTS) free radical inhibition rate and ferric reducing antioxidant power (FRAP) during processing were monitored, and the correlation between each functional component and antioxidant indexes *in vitro* was studied. **Results** The content of total acid, polysaccharides, flavone, dietary fiber and antioxidant activity of finger citron were increased after processed. DPPH, ABTS and FRAP increased by 1.35 times, 1.57 times and 2.16 times respectively compared with fresh finger citron. The saccharification and stoving significantly affected the content of functional ingredients and antioxidant activity. The content of flavone affected the antioxidant activity of finger citron. Flavone showed a highly significant positive correlation with FRAP ($P<0.01$), and a significant positive correlation with DPPH and ABTS ($P<0.05$). Polysaccharides were significantly positively correlated with FRAP and flavone ($P<0.05$). **Conclusion** The processing of processed finger citron can improve the functional components, such as polysaccharides, flavonoids, dietary fiber, and antioxidant activity, while saccharification and stoving are the keys of processing steps.

KEY WORDS: finger citron; functional components; polysaccharide; flavone; dietary fiber; antioxidant activity; processing technology

0 引言

佛手,芸香科柑橘属植物,分布于在广东、福建、浙江、四川等地,为药食同源植物,具有疏肝理气,和胃止痛等的功效,其活性成分如多糖、黄酮等具有抗氧化、抗衰老、抗菌等效果^[1-2]。

新鲜佛手柑口感苦涩,经盐渍、晒盐胚、糖渍、干燥、成品等环节^[3],不仅改善了口感,同时赋予佛手凉果独特的风味和功效,为岭南地区特色保健及休闲食品。研究发现,腌制佛手对比新鲜佛手柑具有更好的风味成分^[4]。

加工对其品质影响,一方面体现在功能成分种类的变化。加工佛手(老香黄)随贮藏年份延长,活性成分、抗氧化活性及挥发性风味成分变化明显,抗氧化能力增强,气味逐渐变香醇^[5],盐渍促进了醛、酯和酸的生成,但导致了醇类的消失,而干燥促进了醇类、酚类、醛类和酸的生成,但引起萜类化合物的减少^[6]。另一方面是功能成分含量的变化。方晟等^[7]研究了金佛手酵素发酵过程中有机酸组成和含量以及抗氧化性能。夏雨等^[8]发现腌制佛手的多糖和多酚体外胆酸盐结合效果优于新鲜佛手柑。WU等^[9]利用体外人肠道发酵模型比较佛手柑和老香黄多糖(佛手柑发酵1年、3年和5年)的体外发酵特性,发现两者不同的单糖组成和表面形态对肠道微生物群和代谢调节存在影响。

课题组前期研究岭南特色凉果加工与品质,在臭氧对橙皮果脯品质及抗氧化活性的作用的研究中,发现渗糖和干燥工艺会增加总糖含量、降低总黄酮含量及1,1-二苯基-2-三硝基苯(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)

自由基、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)ammonium salt, ABTS]阳离子自由基的清除能力,此两道工序会导致果脯制品功能活性下降^[10];邓家棋等^[11]对广式佛手凉果的品质分析中发现,黄酮、多酚与有机酸等功能成分对消费者的感官喜爱度有贡献。加工佛手作为常见的岭南特色凉果,其加工过程中活性成分含量及抗氧化活性的变化,目前尚未有相关研究,因此本研究通过探究佛手凉果加工中功能性成分和抗氧化活性的变化规律,以期对佛手凉果的科学加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜佛手、盐渍佛手、盐渍后晒干佛手、糖渍佛手、干燥佛手、成品,由广东济公保健食品有限公司提供,采样方式为同一批次样品在完成加工流程后随机抽样,成品为市售商品。

苯酚、酚酞、95%乙醇、无水乙醇、浓硫酸、柠檬酸、氢氧化钠(分析纯,天津博迪化工股份有限公司);葡萄糖(纯度 $\geq 98\%$,北京索莱宝科技有限公司)、丙三醇(纯度 $\geq 99\%$,上海贝万塔生物科技有限公司)、抗性麦芽糊精(resistant malto dextrin, RMD)(纯度99%,山东爱采生物科技有限公司);橙皮苷(纯度95%~99%,成都普瑞法科技开发有限公司);DPPH自由基清除能力试剂盒、ABTS阳离子自由基清除能力试剂盒、FRAP试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)。

1.2 仪器与设备

赛默飞 Multiskan GO 型全波长酶标仪(美国赛默飞世尔公司); Agilent 1260 Infinity 高效液相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司); UV769 型紫外可见分光光度计(江苏金坛市金城国胜实验仪器厂); pH5-3C 型 pH 计(上海仪电科学仪器有限公司); SHJ-4A 磁力搅拌水浴锅(常州迅生仪器有限公司); FA2001 型分析天平(精度 0.0001 g, 艾力特国际贸易有限公司)。

1.3 方法

1.3.1 佛手加工流程

工艺流程: 原料选择→盐渍→晒胚→脱盐→热烫→调味、糖渍→干燥→成品。

新鲜(fresh finger citron, FF): 选用新鲜、无硬褐斑, 无损伤的广佛手, 取样。

盐渍(salted finger citron, SAF): 新鲜佛手柑在盐溶液中浸泡 20 d, 完成后取样。

晒盐胚(dried salty finger citron, DSF): 盐渍后在阳光下晒盐胚, 完成后取样。

糖渍(sugar finger citron, SUF): 加入白砂糖和食品添加剂, 浸泡在由罗汉果、胖大海、老广皮、梅果、金银花、桔梗、甘草、蜂蜜、薄荷脑等材料调制成的糖渍液, 糖渍 30 d, 完成后取样。

干燥(stoving finger citron, SOF): 糖渍后干燥至水分含量为 25%±2%, 完成后取样。

成品(pickled finger citron, PF): 加入薄荷脑等食用香料、香粉, 包装, 完成后取样。

样品处理: 分别将 6 份样品粉碎, 取 4.0 g, 加入甲醇: 水: 乙酸(80:20:0.1, V:V:V)的提取液 20 mL, 超声振荡悬液 30 min 后过滤, 用提取液定容至 100 mL, 进行抗氧化指标测定。

1.3.2 功能成分含量的测定

总酸含量的测定参考 GB 12456—2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的“酸碱指示剂滴定法”进行; 多糖的测定参考 NY/T 1676—2023《食用菌中粗多糖的测定 分光光度法》, 使用酶标仪在 490 nm 处测定吸光值; 黄酮含量测定参考 NY/T 2010—2011《柑橘类水果及制品中总黄酮含量的测定》进行; 总酚含量测定采用总酚试剂盒进行测定; 膳食纤维含量测定参考 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》。

1.3.3 抗氧化活性的测定

DPPH 自由基清除率、ABTS 阳离子自由基清除率、FRAP: 参考袁晶等^[12]的方法, 采用 DPPH 自由基清除能力试剂盒、ABTS 阳离子自由基清除能力试剂盒、FRAP 试剂盒检测。

1.4 数据处理

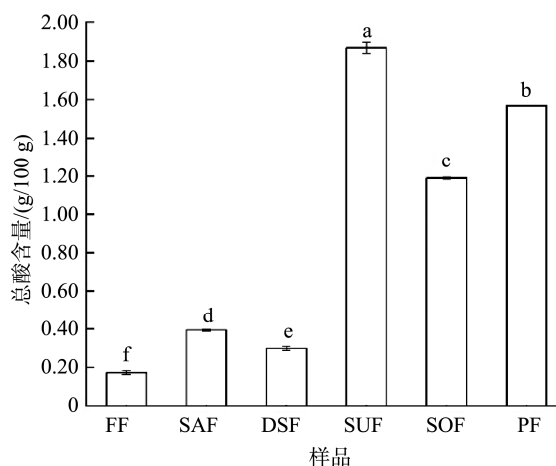
所有实验均重复 3 次, 结果表示为平均值±标准偏差。应用 SPSS Statistics 24.0 软件对所有数据进行变量之间的显著性及相关性分析, $P<0.05$ 表示显著, $P<0.01$ 表示极显著。

2 结果与分析

2.1 佛手凉果加工过程中功能性成分含量的变化

2.1.1 总酸含量分析结果

传统加工方法属于自然发酵, 酵母菌、乳酸菌等微生物生长代谢产生了乳酸、乙酸, 导致总酸增加^[7]。如图 1 所示, 经过加工, PF 总酸含量 $[(1.58\pm0.02) \text{ g}/100 \text{ g}]$ 显著高于 FF $[(0.17\pm0.02) \text{ g}/100 \text{ g}]$ 。盐渍过程中的发酵使 SAF 样品总酸含量上升至 $[(0.39\pm0.01) \text{ g}/100 \text{ g}]$, 但高盐环境抑制了微生物的活性; 总酸在 SUF 含量达到最高 $[(1.91\pm0.01) \text{ g}/100 \text{ g}]$, 可能是糖渍液加入的大量白糖、罗汉果、金银花和甘草等提供了更多的发酵底物, 同时高糖偏酸水溶液环境有利于部分微生物发酵产酸。晒盐胚和干燥降低水分含量使 DSF 和 SOF 的总酸含量较低。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$, 下同。

图 1 加工过程中总酸含量的变化

Fig.1 Changes in total acid content during processing

2.1.2 多糖含量分析结果

多糖是微生物生长代谢的重要碳源, 具有免疫活性^[13]。佛手多糖主要存在于细胞壁中, 广佛手主要有甘露聚糖、L-鼠李糖、D-半乳糖水溶性多糖和单糖, 老香黄(佛手柑发酵 1 年、3 年和 5 年)多糖为聚半乳糖醛酸(包含半乳糖醛酸和半乳糖)^[9,14]。图 2 表明加工会显著影响佛手凉果的多糖含量($P<0.05$)。多糖含量从 FF $[(2.4\pm0.01) \text{ g}/100 \text{ g}]$ 下降至 DSF 最低 $[(1.1\pm0.01) \text{ g}/100 \text{ g}]$, 在 SUF 处开始上升, 至 SOF 最高 $[(20.38\pm0.01) \text{ g}/100 \text{ g}]$ 。

FF 富含果胶和纤维素, 植物细胞壁阻碍了多糖的释放^[13]。SAF 在高渗透压和酶的作用下, 细胞壁部分水解,

多糖被微生物利用造成含量下降;SUF 的含量显著上升,可能是因为纤维素、果胶等进一步水解,以及高温和发酵有利于罗汉果、金银花、甘草的多糖水解,通过糖渍液进入佛手组织。SOF 多糖含量进一步上升与干燥后水分含量降低有关。结果表明,糖渍和干燥加工对多糖含量产生显著影响($P<0.05$)。

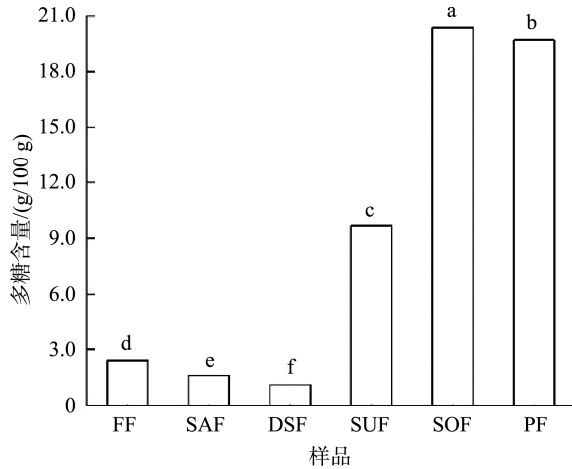


图2 加工过程中多糖含量的变化

Fig.2 Changes in polysaccharide content during processing

2.1.3 黄酮含量分析结果

粗黄酮含量在加工过程中的变化如图3所示,DSF 黄酮含量最低[(0.02±0.01) g/100 g],PF 最高[(0.11±0.01) g/100 g]。佛手细胞壁中黄酮类化合物的释放使 SAF 含量较 FF [(0.05±0.01) g/100 g]增加了 31%。SUF 黄酮含量上升至 (0.05±0.01) g/100 g,推测是糖渍液中罗汉果等药食同源食材的黄酮进入佛手组织;另外高浓度糖液对加工佛手的抗氧化成分可能有保护作用,JULIANA 等^[15]研究加工香蕉时,发现蔗糖溶液可以防止抗氧化物从香蕉组织中析出。

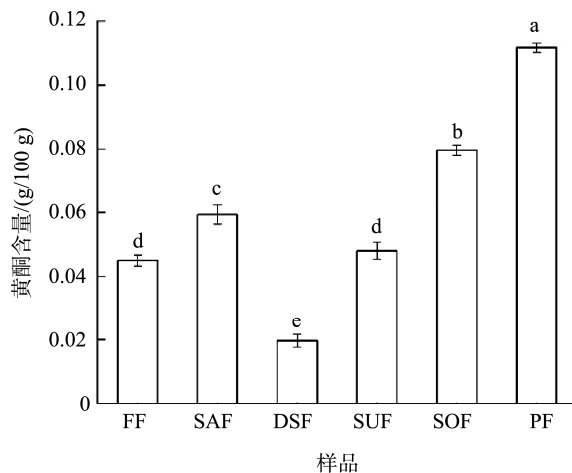


图3 加工过程中黄酮含量的变化

Fig.3 Changes in flavone content during processing

发酵过程中微生物的代谢活动促进了黄酮类化合物的转化和富集,经过加工,PF 黄酮含量为 FF 的 2.49 倍。与 RAMLI 等^[16]、梅玉立等^[17]对番石榴、桑叶发酵前后总黄酮含量变化趋势一致。

2.1.4 多酚含量分析结果

图4显示了多酚含量的变化,与FF 的相比,加工过程中多酚含量整体呈现下降趋势($P<0.05$),与 OUAHIBA 等^[18]发现盐渍橄榄的酚类物质损失率为 6%~46%的趋势一致。PF 多酚含量仅为 FF [(1.10±0.01) g/100 g]的 44.5%,可能是加工过程中微生物和酶变化活跃,多酚类化合物发生了分解和氧化反应。与 FF 相比,SAF 总多酚含量降低了 0.72 g/100 g,KEBE 等^[19]推测总酚含量的降低是酚类化合物向盐溶液浸出;在高温和溶剂浓度过高或过低的情况下性质不稳定。SUF 最低[(0.32±0.02) g/100 g],可能是多酚化合物在糖液中存在结构变化,EMAD 等^[20]研究发现,添加蔗糖(4%)后,绿茶的酚类化合物抗氧化活性降低;KOVACEY 等^[21]发现 5 种市售甜味蔓越莓干的蔓越莓多酚在甜味基质中均不稳定。而 PF 多酚含量升高至(0.49±0.02) g/100 g,与添加薄荷脑等食用香料有关。

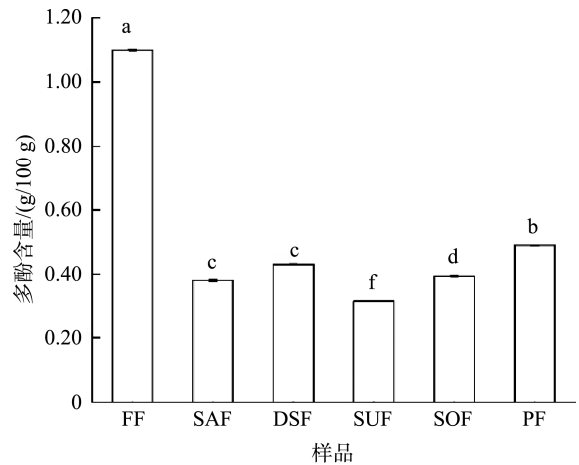


图4 加工过程中多酚含量的变化

Fig.4 Changes in polyphenols content during processing

2.1.5 膳食纤维含量分析结果

膳食纤维(dietary fiber, DF)分为可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)两类,新鲜佛手柑的 SDF 由葡萄糖醛酸、阿拉伯糖、岩藻糖组成;IDF 由葡萄糖醛酸、半乳糖、阿拉伯糖组成^[22]。如图5所示,加工过程中膳食纤维含量差异显著($P<0.05$)。FF 的 DF 含量为(6.92±0.03) g/100 g,自然发酵中产生大量有机酸和酶,破坏了细胞壁结构,造成 SAF 含量下降。晒盐胚后 DF 浓度升高,因此 DSF 的 DF 含量是 FF 的 1.48 倍,SDF 溶于糖渍液导致 DF 含量在 SUF 下降至(5.93±0.04) g/100 g。

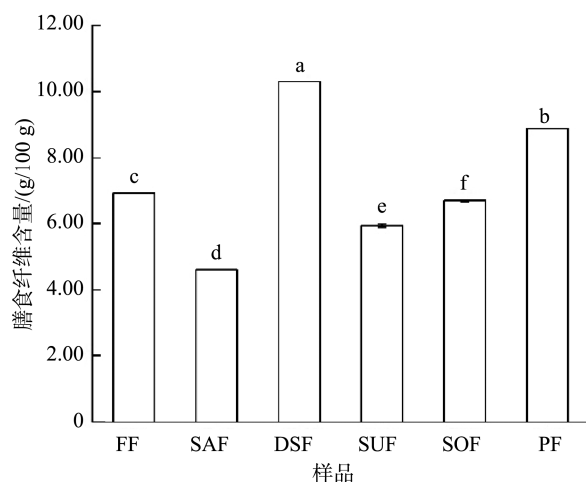


图 5 加工过程中膳食纤维含量的变化

Fig.5 Changes in dietary fiber content during processing

2.2 佛手凉果加工过程中抗氧化性变化分析

新鲜佛手柑是常见的柑橘属药食同源植物^[23], 含有丰富的黄酮、多糖等活性成分, 具有改善糖尿病^[22]、抗氧化^[1]、抗炎^[24]、减肥和降血脂^[25]等多种生物活性。加工产品如金佛手酵素^[7]、老香黄^[5]等都被报道具有抗氧化作用。运用 DPPH、ABTS 和 FRAP 指标评价佛手凉果加工过程抗氧化活性的变化。

2.2.1 体外抗氧化效果分析结果

图 6~8 分别显示了佛手柑在不同加工过程中 DPPH 自由基清除能力、ABTS 阳离子自由基清除能力以及 FRAP 抗氧化效果的变化。经过加工, PF 的 DPPH、ABTS、FRAP 分别比 FF 增加 1.35 倍、1.57 倍和 2.16 倍。从趋势看, 均呈现先下降后上升, 从 FF 下降至 DSF 最低, 分别为 $(17.33 \pm 0.01)\%$ 、 $(19.33 \pm 0.01)\%$ 和 $(6.20 \pm 0.01)\%$, 降幅为 35.0%、15.7% 和 2.2%; 再从 SUF 开始上升至 PF 最高。从加工流程看, 晒盐胚对抗氧化活性损失影响较大, 糖渍和干燥可提高抗氧化效果。

SAF 和 DSF 抗氧化性降低, 可能与高盐环境发酵以及晒胚导致微生物活动减缓、功能性成分氧化分解等有关; SUF、SOF 和 PF 表现为上升趋势, 且 SOF 的效果变化显著, 在 PF 达到峰值, 分别为 $(68.00 \pm 0.02)\%$ 、 $(55.00 \pm 0.01)\%$ 和 $(20.40 \pm 0.01)\%$, 糖渍改善产品感官性状的同时, 添加的药食同源食材, 提高了溶液中次生代谢物的含量, 在浸泡过程中进入样品组织, 经过干燥工艺后, 抗氧化活性显著提高。说明糖渍、干燥是关键工艺。目前没有干燥工艺对佛手凉果功能性成分和抗氧化作用的文献报道。XU 等^[26]研究发现相对湿度 40% 的微波辅助 70℃ 热风干燥的样品较无相对湿度、20% 和 60% 下处理的样品, 具有最好的色泽和香气。推测干燥在降低水分含量、浓缩功能成分的同时, 温度和湿度的变化可能造成功能成分结构改变和化合物转化, 具体机制有待进一步研究。

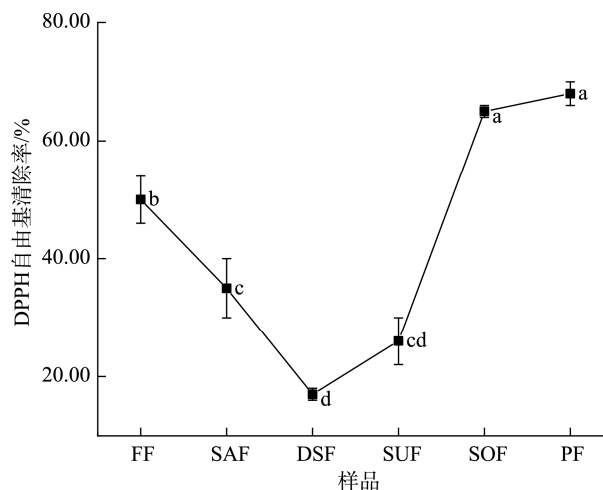
注: 不同字母表示组间具有显著性差异, $P < 0.05$, 下同。

图 6 腌制过程中 DPPH 自由基清除能力的变化

Fig.6 Changes in DPPH radical scavenging ability during processing

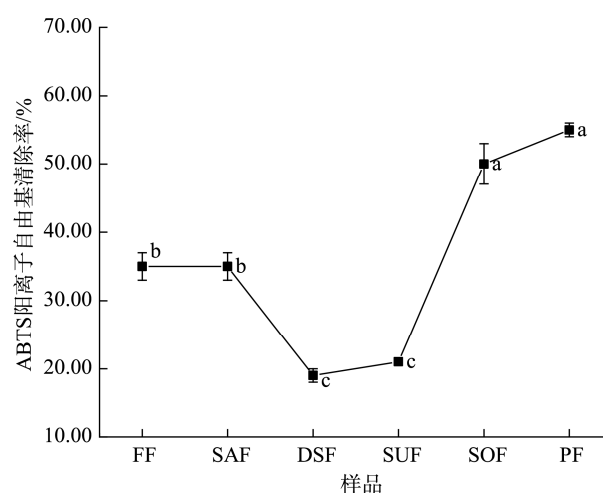


图 7 腌制过程中 ABTS 阳离子自由基清除能力的变化

Fig.7 Changes in ABTS cationic free radicals scavenging ability during processing

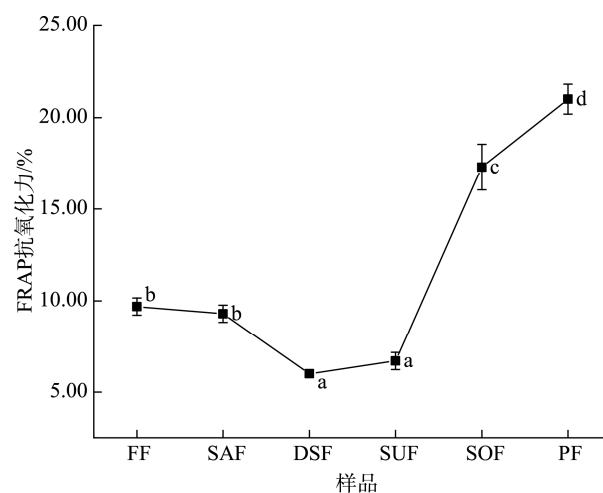


图 8 腌制过程中还原力的变化

Fig.8 Changes in reducing power ability during processing

2.2.2 加工过程中佛手功能性成分抗氧化活性相关性分析结果

表 1 体现了功能性成分与抗氧化活性之间的相关关系。如表 1 所示, 黄酮与 FRAP 之间呈现极显著正相关($P<0.01$), 相关系数达到 0.946; 与 DPPH、ABTS 呈显著正相关($P<0.05$), 相关系数分别为 0.869 和 0.912, 同时加工过程中黄酮含量与三者的变化趋势高度相似, 说明本研究中黄酮含量影响佛手凉果的抗氧化性。多糖与 FRAP 呈显著正相关($P<0.05$), 相关系数为 0.862, 此结果与李腾宇等^[27]、卫春会等^[28]的研究结果一致; 据 GHOSH 等^[29]研究, 锡兰肉桂果胶多糖中的半乳糖醛酸具备抗氧化性, 与文献^[9]报道的半乳糖醛酸为

加工佛手主要多糖成分一致, 这可能是具备相关性的原因。除此之外, 多糖和黄酮之间具有显著正相关($P<0.05$)。DPPH、ABTS 和 FRAP 三者之间具有极显著相关性($P<0.01$), 说明在加工过程中, 不同功能性组分之间存在协同作用。

总酸和多酚抗氧化结果与文献^[7,27-28]趋势不同, 可能是有机酸和多酚活性降低或结构改变, 多酚与 OUAHIBA 等^[18]关于干盐腌橄榄总多酚与抗氧化性关系的研究结果一致; DF 则可能是由于其中的结合多酚分解或转化^[30], 以及具备抗氧化性的 SDF^[31]在脱盐环节中流失造成含量下降, 据 LIU 等^[32]研究, 胡萝卜的脱酚膳食纤维比结合多酚膳食纤维的抗氧化活性低。

表 1 功能性成分与抗氧化活性之间的相关系数
Table 1 Correlation coefficients between functional ingredients and antioxidant activity

	DPPH	ABTS	FRAP	总酸	多糖	多酚	黄酮	膳食纤维
DPPH	1							
ABTS	0.961**	1						
FRAP	0.932**	0.968**	1					
总酸	0.302	0.252	0.424	1				
多糖	0.779	0.763	0.862*	0.749	1			
多酚	0.264	-0.800	-0.310	-0.525	-0.303	1		
黄酮	0.869*	0.912*	0.946**	0.559	0.836*	-0.142	1	
膳食纤维	-0.042	-0.030	0.137	-0.077	0.900	0.066	-0.071	1

注: ABTS: ABTS 阳离子自由基清除能力; DPPH: DPPH 自由基清除能力; FRAP: 铁离子还原抗氧化力; *表示 0.05 水平上呈显著性相关, **表示在 0.01 水平上呈极显著性相关。

3 结 论

加工工艺影响佛手功能性成分含量和抗氧化活性, 使其风味和营养在时间作用下产生变化。经过加工 PF 的总酸、多糖、黄酮、膳食纤维分别是 FF 的 9.29 倍、8.20 倍、2.49 倍和 1.28 倍, 而多酚在加工中损失较大, 仅为 FF 的 0.45 倍。经过加工, PF 的 DPPH、ABTS、FRAP 分别比 FF 增加 1.35 倍、1.57 倍和 2.16 倍; 均呈现先下降后上升的趋势; 晒盐胚对抗氧化活性损失影响较大, 糖渍和干燥可以提高抗氧化效果。

经过相关性分析, 黄酮与 FRAP 之间呈现极显著正相关($P<0.01$); 与 DPPH、ABTS 呈显著正相关($P<0.05$), 说明黄酮的含量影响了佛手凉果的抗氧化性。多糖与 FRAP 存在显著正相关性($P<0.05$)。黄酮与多糖呈显著正相关($P<0.05$); DPPH、ABTS 和 FRAP 三者之间具有极显著相关性($P<0.01$), 说明在加工过程中, 不同功能性组分之间可能存在协同作用, 具体机制有待进一步研究。

本研究揭示了佛手凉果在制备过程中, 糖渍和干燥可以使佛手功能成分转化和浓缩, 从而提升其抗氧化活性; 黄酮含量变化与 DPPH、ABTS 和 FRAP 存在显著相关性。本研究可为优化佛手凉果加工工艺提供理论参考。

参考文献

[1] LUO X, WANG J, CHEN H, et al. Identification of flavonoids from

finger citron and evaluation on their antioxidative and antiaging activities [J]. Front Nutr, 2022, 7: 584900.

[2] GABRIELE M, FRASSINETTI S, CALTAVUTURO L. *Citrus bergamia* powder: Antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory properties [J]. J Funct Foods, 2017, 31: 255–265.

[3] 郑玉忠, 郭守军, 杨永利, 等. 药食凉果老香黄制作工艺的研究[J]. 农产品加工(学刊), 2014, (1): 44–45.

ZHENG YZ, GUO SJ, YANG YL, et al. Production process of preserved fruits Laoxianghuang [J]. Farm Prod Process, 2014, (1): 44–45.

[4] 严赞开, 严奉伟. 佛手挥发性物质在腌制过程中的变化[J]. 食品科学, 2012, 33(2): 181–184.

YAN ZK, YAN FW. Variations in volatile compounds in finger citron during curing [J]. Food Sci, 2012, 33(2): 181–184.

[5] 王雅倩, 安可婧, 黄桂颖, 等. 不同年份老香黄活性成分、抗氧化活性及挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2023. DOI: 221-228I0007-I0010

WANG YQ, AN KJ, HUANG GY, et al. Analysis of active components, antioxidant activity, and volatile components of Laoxianghuang in different years [J]. Food Ferment Ind, 2022. DOI: 221-228I0007-I0010

[6] CHEN X, CHEN H, XIAO J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [Z]. 2020.

[7] 方晟, 陈俊池, 周瑾, 等. 金佛手酵素发酵过程中有机酸及其体外抗氧化性能分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 68–74.

FANG S, CHEN JD, ZHOU J, et al. Analysis of organic acids and antioxidant activity in vitro of citrus medica Jiaosu during fermentation process [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(10): 68–74.

[8] 夏雨, 王雁胜, 张延杰, 等. 佛手果营养与活性成分测定及降血脂功能研究[J]. 食品科技, 2016, 41(2): 70–73.

- XIA Y, WANG YS, ZHANG YJ, *et al.* Determination on the basic nutrient components, active ingredients of finger citron fruit and study on their reducing blood lipid function [J]. Food Sci Technol, 2016, 41(2): 70–73.
- [9] WU K, LU X, FANG F, *et al.* Comparative study on *in vitro* fermentation characteristics of the polysaccharides extracted from finger citron and fermented finger citron [J]. Foods, 2023, 12: 2878.
- [10] 林婷婷, 陈嘉澍, 黄桂颖, 等. 臭氧对橙皮果脯品质及抗氧化活性的作用[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 109–116.
- LIN TT, CHEN JS, HUANG GY, *et al.* Effects of ozone treatment on the quality and antioxidant activity of preserved orange peel [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(9): 109–116.
- [11] 邓家棋, 陈嘉澍, 黄桂颖, 等. 基于感官喜爱度排序的广式佛手柑凉果的品质分析[J]. 农产品加工, 2022, (12): 82–87.
- DENG JQ, CHEN JS, HUANG GY, *et al.* Quality analysis of cantonese finger citron preserved fruit based on ranking of sensory preference [J]. Farm Prod Process, 2022, (12): 82–87.
- [12] 袁晶, 康三江, 曾朝珍, 等. 益生菌发酵对苹果浆理化性质、抗氧化活性及挥发性风味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 288–295.
- YUAN J, KANG SJ, ZENG ZZ, *et al.* Effects of probiotics fermentation on physicochemical properties, antioxidant activity, and volatile flavor of fermented apple pulp [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(18): 288–295.
- [13] 王淑惠, 杨玉洁, 周爱梅, 等. 两种方法提取佛手渣多糖及其对巨噬细胞 RAW264.7 免疫调节活性的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 179–187.
- WANG SH, YANG YJ, ZHOU AIM, *et al.* Study on the polysaccharide extracted from finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) residue by two methods and its immunomodulatory function in RAW264.7 Cells [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(15): 179–187.
- [14] 张振霞, 赖宣, 杨启财, 等. 广佛手与金华佛手理化性质的比较[J]. 轻工科技, 2017, 33(8): 22–23.
- ZHANG ZX, LAI X, YANG QC, *et al.* Comparison of the physicochemical properties of finger citron fruit in Guangdong and Jinhua [J]. Light Ind Sci Technol, 2017, 33(8): 22–23.
- [15] JULIANA ARA, LARA PM, DANIELA BO, *et al.* Effect of temperature and sucrose concentration on the retention of polyphenol compounds and antioxidant activity of osmotically dehydrated bananas [J]. J Food Process Pres, 2015. DOI: 10.1111/jfpp.12321
- [16] RAMLI NS, MOHAMAD SNR. Effects of pickling steps on antioxidant activity of guava [Z]. 2021.
- [17] 梅玉立, 黄先智, 丁晓雯. 响应面法优化发酵对桑叶生物碱、黄酮和多糖含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1764–1772.
- MEI YL, HUANG XZ, DING XW. Effects of optimized fermentation on the content of alkaloids, flavonoids and polysaccharides in mulberry leaves by response surface methodology [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(6): 1764–1772.
- [18] OUAHIBA S, CONCEPCIÓN R, HAYETTE L. Ortho-diphenol profile and antioxidant activity of Algerian black olive cultivars: Effect of dry salting process [J]. Food Chem, 2014, 1: 157.
- [19] KEBE M, RENARD C MCG, AMANI GNG, *et al.* Kinetics of apple polyphenol diffusion in solutions with different osmotic strengths [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(40): 1–5.
- [20] EMAD AS, GHADA IM, SANAA MMS. Suggested mechanism for the effect of sweeteners on radical scavenging activity of phenolic compounds in black and green tea [J]. Front Life Sci, 2016, 9(4): 81–85.
- [21] KOVACEY K, HUGHES B, SMITH JS. Polyphenol stability and physical characteristics of sweetened dried cranberries [J]. Foods, 2020, 9(5): 551.
- [22] LIU H, LIANG J, LIANG C, *et al.* Physicochemical properties of dietary fiber of bergamot and its effect on diabetic mice [J]. Front Nutr, 2022, 1: 9.
- [23] 曹小敏, 潘思秩. 柑橘属药食同源植物次生代谢物及生物活性研究进展[J]. 食品科学, 2022, 1: 1–19.
- CAO XM, PAN SY. A review of secondary metabolites and biological activities of medicated and edible homologues of citrus [J]. Food Sci, 2022, 1: 1–19.
- [24] BARON G, ALTOMARE A, MOL M, *et al.* Analytical profile and antioxidant and anti-inflammatory activities of the enriched polyphenol fractions isolated from finger citron fruit and leave [Z]. 2021.
- [25] LIU J, HUA J, CHEN S, *et al.* The potential mechanisms of finger citron-derived dietary fiber alleviating high-fat diet-induced hyperlipidemia and obesity in rats [Z]. 2022.
- [26] XU W, ISLAM MN, CAO X, *et al.* Effect of relative humidity on drying characteristics of microwave assisted hot air drying and qualities of dried finger citron slices [J]. LWT, 2021, 137(1): 1–6.
- [27] 李腾宇, 郭艳, 葛含静, 等. 红糖醋不同发酵阶段产物有机酸变化及抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(3): 89–93.
- LI TY, GUO Y, GE HJ, *et al.* Changes of organic acid and antioxidant activity of brown sugar vinegar during fermentation process [J]. China Brew, 2019, 38(3): 89–93.
- [28] 卫春会, 黄亮, 姚亚林, 等. 山葡萄酒发酵过程中活性物质、抗氧化能力及有机酸的变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 9–14.
- WEI CH, HUANG L, YAO YL, *et al.* Changes of active substances, antioxidant capacity and organic acids during the fermentation of *Vitis amurensis* wine [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(6): 9–14.
- [29] GHOSH T, BASU A, ADHIKARI D, *et al.* Antioxidant activity and structural features of Cinnamomum zeylanicum [Z]. 2015.
- [30] 薛山. 柑橘皮渣中非水溶性抗氧化膳食纤维提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(8): 151–155.
- XUE S. The optimization of extraction process of insoluble antioxidant dietary fiber from orange [J]. Food Mach, 2016, 32(8): 151–155.
- [31] SEZER DB, AHMED J, SUMNU G, *et al.* Green processing of sour cherry (*Prunus cerasus* L.) pomace: Process optimization for the modification of dietary fibers and property measurements [J]. J Food Meas Charact, 2021, 15(4): 3015–3025.
- [32] LIU S, JIA MY, CHEN JJ, *et al.* Removal of bound polyphenols and its effect on antioxidant and prebiotics properties of carrot dietary fiber [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 93: 284–292.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介

张受恩, 硕士研究生, 主要研究方向为肉制品风味、食品感官科学。
E-mail: 1135562145@qq.com

白卫东, 博士, 教授, 主要研究方向为食品化学。
E-mail: 767313893qq.com