

刺梨果渣水不溶性膳食纤维提取工艺优化

夏洁^{1,2}, 薛浩岩³, 贾祥泽^{1,2}, 高晴^{1,2}, 李超^{1,2}, 黄强^{1,2}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 中新国际联合研究院, 广东广州 510000)

(3. 贵州华凯农业科技发展有限公司, 贵州毕节 551700)

摘要: 膳食纤维是健康饮食中重要的组成成分, 具有许多有益的生理功能。本文以刺梨果渣为原料, 采用超声波辅助提取技术提取水不溶性膳食纤维 (IDF), 通过单因素试验研究超声功率、提取时间、提取温度以及料液比 4 个因素对刺梨果渣 IDF 得率的影响, 并使用 Box-Behnken 中心组合法和响应面优化法, 对刺梨果渣 IDF 的提取工艺进行了优化。结果表明, 最佳提取工艺条件: 超声功率为 184 W、提取时间为 14.7 min、提取温度为 49.5 °C、料液比为 1:16.25 g/mL, 此时刺梨果渣 IDF 的最大得率为 76.00%, 与预测值基本一致, 表明优化超声辅助提取刺梨果渣 IDF 具有较好的准确性和可靠性。基本组成成分分析表明刺梨果渣 IDF 主要包括纤维素 (42.06%±0.82%)、半纤维素 (13.26%±0.01%) 以及木质素 (12.36%±0.78%), 此外, 与传统水提法相比, 超声提取制备的 IDF 含量更高。

关键词: 刺梨果渣; 水不溶性膳食纤维; 超声提取; 响应面法

文章编号: 1673-9078(2020)07-227-234

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.7.0683

Extraction Optimization of Water-insoluble Dietary Fiber from *Rosa roxburghii* Tratt Fruit Pomace

XIA Jie^{1,2}, XUE Hao-yan³, JIA Xiang-ze^{1,2}, GAO Qing^{1,2}, LI Chao^{1,2}, HUANG Qiang^{1,2}

(1.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2.Sino-Singapore International Joint Research, Guangzhou 510000, China)

(3.Guizhou Huakai Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Bijie 551700, China)

Abstract: Dietary fiber is an important part of a healthy diet and offers many physiological benefits. In this work, the pomace of *Rosa roxburghii* Tratt fruit was used as raw material. The insoluble dietary fiber (IDF) from the pomace of *R. roxburghii* Tratt fruit was extracted by ultrasonic-assisted extraction technology. The effects of ultrasonic power, extraction time, extraction temperature and ratio of material to liquid on the yields of IDF were investigated by single factor experiments. The optimal extraction conditions were optimized by Box-Behnken design (BBD) and response surface methodology (RSM). The results showed that the optimal extraction conditions were as follow: ultrasonic power of 184 W, extraction time of 14.7 min, extraction temperature of 49.5 °C, and material-to-liquid ratio of 1:16.25 g/mL. Under this optimal extraction, the maximum yield of IDF was 76.00% in accordance with the predicted value, indicating that the optimization of ultrasonic-assisted extraction of IDF from the pomace of *R. roxburghii* Tratt fruit had good accuracy and reliability. Results of basic component analysis indicated that crude IDF was mainly composed of cellulose (42.06%±0.82%), hemicellulose (13.26%±0.01%) and lignin (12.36%±0.78%). In addition, compared with the conventional hot water method, ultrasonic-assisted extraction could increase the content of IDF.

Key words: *Rosa roxburghii* Tratt fruit pomace; water-insoluble dietary fiber; ultrasonic extraction; response surface methodology

引文格式:

夏洁,薛浩岩,贾祥泽,等.刺梨果渣水不溶性膳食纤维提取工艺优化[J].现代食品科技,2020,36(7):227-234

XIA Jie, XUE Hao-yan, JIA Xiang-ze, et al. Extraction optimization of water-insoluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt fruit pomace [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(7): 227-234

收稿日期: 2019-07-18

基金项目: 广州市科技计划项目 (201803050001)

作者简介: 夏洁 (1994-), 女, 硕士, 研究方向: 膳食纤维

通讯作者: 黄强 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能碳水化合物

刺梨 (*Rosa Roxburghii* Tratt) 又名文先果、送春归、刺菠萝, 是蔷薇科蔷薇属多年生的一种落叶丛生灌木, 多种植于我国贵州、云南、四川等地, 其不仅富含蛋白质、维生素、无机盐、糖类及氨基酸等主要营养成分, 还含有丰富的多糖、黄酮、三萜类等生物活性物质^[1-4]。据贵州省林业局 2018 年调查统计, 全省刺梨鲜果产量达 15 万吨, 种植面积和产量均居全国之首^[5]。榨汁是刺梨最主要的用途之一, 而新鲜刺梨榨取果汁后会残留约 50% 的果渣, 其含有大量的单宁和粗纤维, 作为饲料效果不佳, 被丢弃后会造成较大程度上的环境污染和资源浪费。膳食纤维被誉为“第七大营养素”, 可以平衡膳食结构。根据水溶性的不同, 膳食纤维可以分为水溶性膳食纤维 (water-soluble dietary fiber, SDF) 与水不溶性膳食纤维 (water-insoluble dietary fiber, IDF)。已有研究证明, 膳食纤维具有多种功能特性, 如预防肥胖、降血糖、降血脂、降血压、调节肠道菌群等, 对人体健康具有显著的益处。由于刺梨果渣中富含有机酸、维生素、氨基酸等营养物质, 可广泛应用于发酵饲料蛋白、软糖配方、酿造食醋及营养保健型风味果醋, 但刺梨果渣的主要成分 IDF 并未得到充分利用。目前, 在工业上关于 IDF 的提取及改性方法有很多, 主要有化学法、生物法以及物理法。与传统热水法相比, 化学法是利用酸碱的作用溶出杂质, 提取膳食纤维, 若使用强溶剂处理原料, 会导致原料中半纤维素损失 50%~60%, 纤维素损失 10%~30%^[6]。生物法是利用特定的酶或微生物将膳食纤维酶解或发酵成小分子物质, 但提取过程中, 对条件要求比较严格, 且生产成本极高。物理法是通过不同物理技术改善膳食纤维功能性质的方法, 对环境污染少, 在工业生产过程中广泛应用^[7]。超声波提取技术是基于液体介质中传播的声空化效应, 由于空化气泡在植物材料表面破裂而产生冲击波以及剪切力, 从而破坏植物细胞壁, 有利于提取目标分析物。该提取技术减少了有机溶剂的用量, 简化了工艺流程, 缩短了提取时间, 降低了能耗, 是一种安全性高的提取方法^[8]。因此, 本研究以刺梨果渣为原料, 采用超声波辅助提取技术提取刺梨果渣不溶性膳食纤维 (IDF), 采用单因素实验和响应面法对提取工艺进行优化, 并对其基本成分进行分析, 研究结果将为刺梨果渣副产物高值化利用提供一定的理论和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

刺梨果渣, 由贵州华凯农业科技发展有限公司提供; 无水乙醇, 天津市大茂化学试剂厂; 草酸铵, 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; 硼氢化钠, 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; 氢氧化钾, 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; 冰醋酸, 广东光华科技股份有限公司; 浓硫酸, 广州化学试剂厂; 以上有机试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

FW100 高速万能粉碎机, 天津泰斯特仪器有限公司; SCIENTZ-50ND 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; Spring-R30 实验室纯水机, 厦门锐思捷水纯化技术有限公司; KQ-300DE 数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; DL-5-B 离心机, 上海安亭科学仪器厂。

1.3 实验方法与步骤

1.3.1 原料预处理

将刺梨果渣置于 50 °C 的热风干燥箱中干燥 24 h, 去除其中的刺梨籽与沙石等杂质后, 采用粉碎机碾碎后, 过 55 目筛网得到粉末样品, 保存于干燥器中备用。称取刺梨果渣粉末 250 g, 倒入到三颈烧瓶中, 添加 1 L 乙醇溶液 (95%, V/V), 混匀后置于 70 °C 的水浴锅中热回流 4 h (除去脂溶性物质、色素和小分子物质), 真空抽滤得到残渣, 将残渣重复上述步骤 2 次, 得到的残渣置于 -50 °C 真空冷冻干燥机中干燥 48 h, 即得到预处理的刺梨果渣样品^[9]。

1.3.2 刺梨果渣水不溶性膳食纤维的超声辅助提取

称取预处理的刺梨果渣样品 (X_1), 装入烧瓶中, 添加一定体积的蒸馏水, 设置不同的提取工艺参数 (料液比、超声功率、提取时间和提取温度), 置于超声波清洗器中进行静态提取, 于 4500 r/min 转速下离心 20 min, 倒去提取液, 收集沉淀物; 用 70 °C 的去离子水洗涤 2 次, 然后用 78% 乙醇溶液洗涤 1 次, 真空冷冻干燥, 即得到刺梨果渣粗水不溶性膳食纤维样品 (X_2), 命名为 IDF^[10], 得率按如下公式 (1) 计算:

$$\text{刺梨果渣 IDF 得率 (以干基计, \%)} = \frac{X_2(\text{g})}{X_1(\text{g})} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 单因素试验设计

以刺梨果渣 IDF 得率为指标, 按照以下步骤进行单因素试验。

超声功率: 准确称取刺梨果渣粉末 2 g, 固定料液比 1:15 g/mL, 提取温度 50 °C, 提取时间 15 min, 考察不同超声功率 (60、120、180、240 和 300 W) 对 IDF 提取率的影响。

提取时间:准确称取刺梨果渣粉末 2 g,固定料液比 1:15 g/mL,超声功率 180 W,提取温度 50 ℃,考察不同提取时间(5、10、15、20 和 25 min)对 IDF 提取率的影响。

提取温度:准确称取刺梨果渣粉末 2 g,固定料液比 1:15 g/mL,超声功率 180 W,提取时间 15 min,考察不同提取温度(30、40、50、60 和 70 ℃)对 IDF 提取率的影响。

料液比:准确称取刺梨果渣粉末 2 g,固定提取时间 15 min,超声功率 180 W,提取温度 50 ℃,考察不同料液比(1:10、1:15、1:20、1:25 和 1:30 g/mL)对 IDF 提取率的影响。

1.3.4 刺梨果渣 IDF 提取工艺优化

根据单因素实验结果,选取超声功率、提取时间、提取温度以及料液比四个因素,进行四因素三水平的 Box-Behnken 中心组合试验设计,并采用响应面(RSM)进行优化提取条件。试验设计因素水平及编码如表 1。

表 1 Box-Behnken 中心组合试验设计的实验因素水平及编码

Table 1 Box-Behnken design variables and coded of factors

因素	符号	编码及水平		
		-1	0	1
超声功率/W	A	120	180	240
提取时间/min	B	10	15	20
提取温度/℃	C	40	50	60
料液比/(g/mL)	D	1:10	1:15	1:20

1.4 基本成分分析

1.4.1 水分含量的测定

参考 AOAC 925.09。

1.4.2 灰分含量的测定

参考 AOAC 942.05。

1.4.3 蛋白质含量的测定

参考 AOAC 955.04。

1.4.4 脂肪含量的测定

参考 AOAC 920.39。

1.4.5 不溶性膳食纤维、总膳食纤维含量的测定

参考 AOAC 991.43。

1.4.6 果胶、纤维素、半纤维素和木质素含量的测定^[11,12]

将待测样品(Y)与 0.25%草酸铵溶液按 1:10(m/V)的比例混匀后,于 90 ℃水浴中连续搅拌 2 h,离心收集上清液,重复以上操作两次,合并上清液,装入透析袋(截留分子量:7000 u)中透析至与去离子水的电导率相同,收集截留液冷冻干燥,得到果胶类物质

(A₁)。上述滤渣依次用 80%乙醇洗涤 2 次,用蒸馏水洗涤 3 次后,冷冻干燥,在室温下,将冻干后的残渣与含有 0.1%硼氢化钠的氢氧化钾溶液(4 mol/L)按 1:8(m/V)的料液比混合,搅拌提取 18 h 后过滤,滤液采用醋酸溶液(4 mol/L)中和后,用透析袋透析至与去离子水的电导率相同,截留液冷冻干燥,得到半纤维素(A₂);过滤后的残渣洗涤后冻干得样品 A₃;向 A₃中按 1:1 的比例(m/V)加入浓硫酸溶液(72%,m/m),于 4 ℃冰箱中浸提 24 h,依次经过滤、洗涤、干燥得样品 A₄,其中灰分质量为 A₅。其中纤维素和木质素含量计算公式(2~3)。

$$\text{纤维素含量 (以干基计, \%)} = \frac{A_3(\text{g}) - A_4(\text{g}) - A_5(\text{g})}{Y(\text{g})} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{木质素含量 (以干基计, \%)} = \frac{A_4(\text{g}) - A_5(\text{g})}{Y(\text{g})} \times 100\% \quad (3)$$

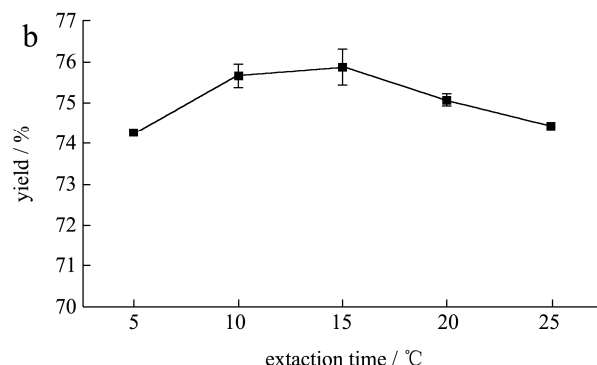
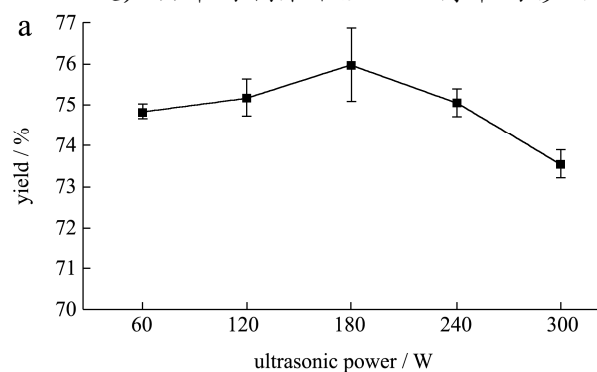
1.5 数据统计分析

所有试验均设置 3 次平行样品,以平均值±标准差(Mean±SD)的形式表示,采用软件 Origin Pro 8.5 分析处理数据,软件 Design-Expert 8.05b 设计了刺梨果渣 IDF 得率的回归统计试验, $p < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单因素实验设计

2.1.1 超声功率对刺梨果渣 IDF 得率的影响



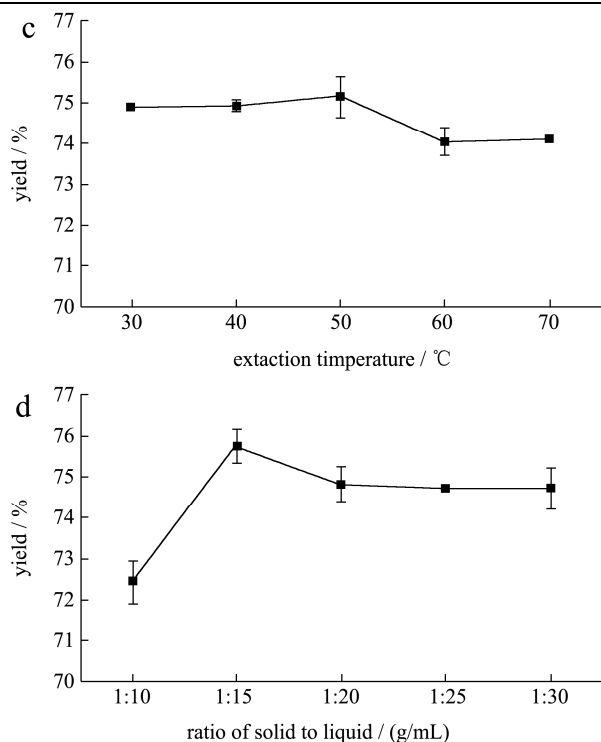


图1 不同因素对刺梨果渣 IDF 得率的影响

Fig.1 Effects of different factors on extraction yields of IDF from *R. Roxburghii* fruit pomace

注: a: 超声功率; b: 提取时间; c: 提取温度; d: 料液比。

由图 1a 可知,随着超声功率的不断增大,刺梨果渣 IDF 得率呈现先增大后降低的趋势,这可能是随着超声功率的增强,细胞内的其他水溶性成分(如多糖)被释放出来,导致 IDF 得率降低。影响超声波作用效果的因素有物料的结构性质与含量,不同来源的提取物其最佳提取超声功率不同,如提取西番莲果皮^[7]、黑豆渣^[13]、玉米皮^[14]中水不溶性膳食纤维的最适超声功率分别是 400 W、150 W、500 W,超声波功率过低可能会使水溶性成分难以分离溶出,而超声波功率过高可能会破坏物料结构使其降解,从而影响其提取得率^[15]。

2.1.2 提取时间对刺梨果渣 IDF 得率的影响

由图 1b 可知,在提取时间为 5~15 min 时,刺梨果渣 IDF 的得率逐渐上升,这可能是超声波通过产生空穴效应,破坏了细胞壁结构,促进细胞内水分子运动,增强了水溶液和物料之间的接触^[16],进而增加了 IDF 的得率。在 15 min 时取得最大值,之后得率开始降低。这可能是长时间的超声波强机械剪切作用,使得纤维类物质发生了降解,从而降低了 IDF 的得率^[17]。

2.1.3 提取温度对刺梨果渣 IDF 得率的影响

由图 1c 可知,提取温度对刺梨果渣 IDF 得率的影响不大,在 30 至 50 °C 间刺梨果渣 IDF 的得率变化

不明显,而当提取温度达到 60 °C 时,其得率下降速度较快,与卢忠英^[18]提取刺梨水不溶性膳食纤维的结论一致。这可能是因为温度升高使得物质的扩散系数增大,水溶液的渗透力也随之增强,促使有效成分的溶出率增大^[19],从而使 IDF 的得率增大。而当温度过高时,热效应叠加超声空化效应可能会使 IDF 的结构发生部分降解,如结构中的主要成分纤维素与半纤维素降解为低聚糖,再降解成单糖,木质素将会降解成酚类物质,使其得率降低^[20]。

2.1.4 料液比对刺梨果渣 IDF 得率的影响

由图 1d 可知,当料液比小于 1:15 g/mL 时,刺梨果渣 IDF 的得率随料液比的增大而增大,这主要是因为增加了物料与水的接触面积,加快了 IDF 分子的溶出速度和溶出量^[21]。当料液比大于 1:15 g/mL 时,由于 IDF 的含量有限,会促使其他水溶性杂质的溶出,从而降低了 IDF 的得率。

本实验制备的刺梨果渣 IDF 外观为浅褐色,且与现有的化学法、生物法提取的样品相比,其对刺梨果渣 IDF 的结构影响较小。提取过程中除乙醇外没有使用其他有机溶剂,绿色环保,安全无毒,且对设备条件要求及生产成本低,有利于工业化生产,并为进一步探讨 IDF 的理化性质及应用奠定基础。

2.2 刺梨果渣 IDF 提取工艺优化

2.2.1 模型方程的建立及其方差分析

使用 Design-Expert.8.05b 软件设计了刺梨果渣 IDF 得率的回归统计试验,如表 2 所示,得到二次多元回归方程:

$$\text{得率}(\%) = 75.89 + 0.18A - 0.14B - 0.13C + 0.97D + 0.13AB + 0.20AC + 0.20AD - 0.12BC + 0.19BD + 0.19CD - 1.11A^2 - 0.60B^2 - 0.57C^2 - 1.90D^2$$

从表 3 可知,本试验回归模型的 $F=14.89$, $p<0.0001$,表示模型高度显著。失拟项 $p=0.0576$,表示失拟项没有显著性差异($p>0.05$)。 R^2 常用来表示拟合度,其值越大表示模型中各因素间的相关性越强。通过回归方程分析,本试验模型的 R^2 为 0.9371,说明回归模型与实验结果有较好的拟合度。模型的调整决定系数 $R^2_{\text{Adj}}=0.8741$,说明该模型能解释 87.41% 响应值的变化。精密度(Adeq Precisor)是指有效信号与噪声的比值,响应面模型中精密度大于 4 视为合理,本研究模型的精密密度为 12.672,说明实验具有较高的准确度。通常情况下,C.V.% 值越低,表示模型的可靠性越高,本研究模型的 C.V.% 值为 0.59,表明本模型是可靠的。

从回归方程方差分析可以看出方程一次项 D,二

次项 A^2 、 B^2 和 D^2 对刺梨果渣 IDF 得率的作用均显著 ($p<0.05$)。由一次项的 F 值大小可知四个因素对刺

梨果渣 IDF 得率的影响程度, 各因素影响的主次顺序为: 料液比>超声功率>提取时间>提取温度。

表 2 超声波辅助提取刺梨果渣 IDF 的响应面方案

Table 2 Design of response surface of IDF from *R. Roxburghii* fruit pomace

试验号	A	B	C	D	得率/%	试验号	A	B	C	D	得率/%
1	1	0	1	0	74.17	16	-1	0	0	1	73.30
2	1	0	0	1	74.28	17	0	-1	-1	0	74.69
3	0	0	1	-1	72.35	18	1	1	0	0	74.06
4	0	0	1	1	74.91	19	0	1	1	0	74.12
5	-1	0	-1	0	74.47	20	0	-1	0	1	73.99
6	-1	0	0	-1	71.99	21	0	1	0	0	73.64
7	0	0	0	0	76.24	22	0	-1	-1	-1	72.35
8	-1	0	1	0	73.13	23	-1	1	-1	0	74.55
9	0	0	0	0	75.87	24	1	0	0	0	74.22
10	-1	-1	0	0	73.07	25	0	0	-1	1	73.44
11	0	1	0	-1	72.23	26	1	-1	0	0	74.19
12	0	0	0	0	75.36	27	0	0	0	0	75.48
13	0	0	0	0	75.89	28	0	0	-1	-1	72.35
14	0	-1	1	0	75.10	29	1	0	0	-1	72.16
15	0	1	0	1	74.64						

表 3 刺梨果渣 IDF 提取回归方程的分析结果

Table 3 Result of regression on the IDF of *R. Roxburghii* fruit pomace

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
模型	40.32	14	2.88	14.89	<0.0001	***
A	0.40	1	0.40	2.07	0.1726	
B	0.22	1	0.22	1.14	0.3028	
C	0.21	1	0.21	1.09	0.3143	
D	11.27	1	11.27	58.27	< 0.0001	***
AB	0.065	1	0.065	0.34	0.5713	
AC	0.16	1	0.16	0.81	0.3843	
AD	0.16	1	0.16	0.85	0.3727	
BC	0.060	1	0.060	0.31	0.5863	
BD	0.15	1	0.15	0.77	0.3961	
CD	0.15	1	0.15	0.77	0.3961	
A^2	8.06	1	8.06	41.65	< 0.0001	***
B^2	2.31	1	2.31	11.95	0.0039	**
C^2	2.08	1	2.08	10.78	0.0054	**
D^2	23.53	1	23.53	121.63	< 0.0001	***
残差	2.71	14	0.19			
失拟项	2.52	10	0.25	5.49	0.0576	不显著
净误差	0.18	4	0.046			
总离差	43.03	28				
$R^2=0.9371$, $R^2_{Adj}=0.8741$, Adeq Precisor=12.672, C.V.%=0.59						

注: *** ($p<0.001$), ** ($p<0.01$), * ($p<0.1$)。

2.2.2 响应面及等高线图分析

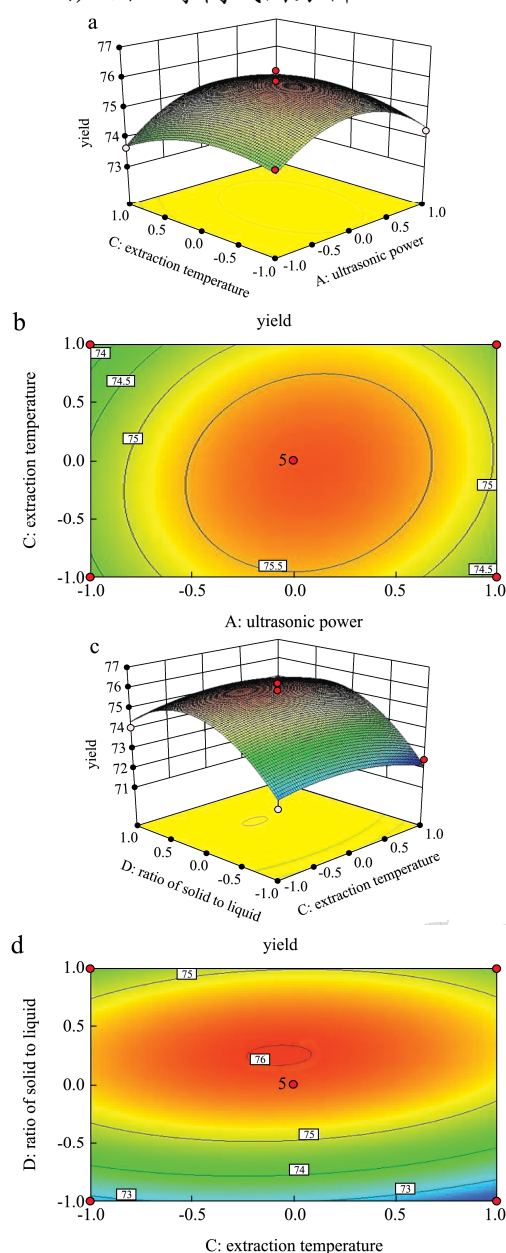


图2 交互作用的响应面图和等高线图

Fig.2 Response surface and contour plots

注: a、b: 超声功率和提取温度; c、d: 提取温度和料液比。

3D 响应曲面图和 2D 等高线图常用来观察各因素间的交互作用以及各因素与响应值之间关系的变化^[22]。从图 2a 与图 2c 响应面图可以看出, 随着超声功率、提取时间、提取温度以及料液比的增大, 刺梨果渣 IDF 的得率均呈现先升高再降低的趋势, 与单因素试验结果一致, 响应面图都较陡峭且有最大值, 说明因素间的影响均呈显著水平。等高线的形状可以表征出因素间交互作用的强弱, 圆形表示两个因素之间的交互作用不显著, 而椭圆形则表示两个因素间的交互作用显著。从图 2b 与图 2d 等高线图可以看出, CD

的等高线图呈现扁平状, 表明因素间影响较大, 即提取温度与料液比对刺梨果渣 IDF 得率影响较大。而 AC 接近圆形则表明两两因素间的交互作用较弱。

2.2.3 模型验证

综上可知, 响应面模型推测出的最优提取工艺条件为: 超声功率 184 W, 提取时间 14.7 min, 提取温度 49.5 °C, 料液比 1:16.25 g/mL, 此时刺梨果渣 IDF 的最大得率为 76.00%。为了实验操作的可行性, 将提取条件设置为超声功率 180 W, 提取时间 15 min, 提取温度 50 °C, 料液比 1:15 g/mL, 平行 3 次实验, 测得刺梨果渣 IDF 的得率为 75.97%, 与理论预测值基本一致。结果表明响应面回归方程能较好地模拟试验过程和预测刺梨果渣 IDF 得率, 并真实地反映超声波提取法对 IDF 得率的影响。

2.3 基本组成成分分析

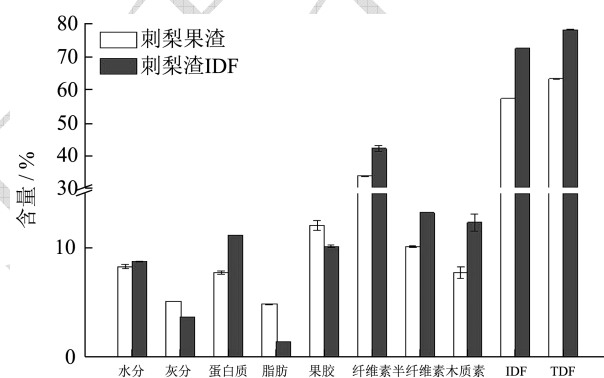


图3 刺梨果渣及刺梨果渣 IDF 的基本成分分析

Fig.3 Chemical components of *R. Roxburghii* fruit pomace and its insoluble dietary fiber

图 3 所示为刺梨果渣、刺梨果渣 IDF 的基本成分。从图 3 可以得知, 刺梨果渣中含量最高的成分是不溶性膳食纤维, 且通过超声波联合水提法提取的不溶性膳食纤维含量有所提高, 从 $57.55\% \pm 0.05\%$ 增加到了 $72.75\% \pm 0.05\%$, 即其纯度提高了约 15.20%。刺梨果渣与 IDF 中主要成分是纤维素、半纤维素、木质素和果胶, 纤维素的含量最高, 且提取的 IDF 中纤维素纯度提高了约 8.46%, 其次是半纤维素和果胶, 最后是木质素, 结果与孜然^[11]、卷心菜^[23]、芒果^[24]、人参^[25]中纤维素、半纤维素和木质素的检测结果基本一致, 但土豆中半纤维素含量较高, 大米中木质素的含量要高于半纤维素^[26], 这表明原料决定了 IDF 成分含量的差异。纤维素是由葡萄糖经 β -1,4 糖苷键连接而成的平行直链线性多糖, 因而易于缔合, 使得纤维素分子链呈规律性排列, 形成结晶状的微晶纤维束结构单元, 结晶区由大量氢键连接而成。通常与半纤维素、木质素和果胶结合在一起, 不溶于水与一般有机溶剂,

但具有吸水膨胀的能力,在消化道内可以大量吸收水分^[6]。总之,这些结果表明刺梨果渣富含水不溶性膳食纤维,具有较好的开发和应用前景,其功能特性和生理功能值得下一步深入的研究。

3 结论

3.1 采用 Box-Behnken 中心组合设计和响应面优化实验对超声辅助提取 IDF 的工艺条件进行优化。结果表明,最佳工艺条件为:超声功率 184 W、提取时间 14.7 min、提取温度 49.5 °C、料液比 1:16.25 g/mL,在该条件下, IDF 最大得率为 76.00%,与预测值基本一致,表明响应面法可用于优化超声提取刺梨渣 IDF,具有较好的准确性和可靠性。

3.2 基本组成分析表明 IDF 主要含有纤维素、半纤维素和木质素,这些结果表明刺梨果渣含有丰富的 IDF,可以开发一种新型食品成分应用于功能性食品或医药领域。

参考文献

- [1] 曾芳芳,罗自生.刺梨营养成分的研究进展[J].浙江农业科学,2015,1(11):1753-1757
ZENG Fang-fang, LUO Zi-sheng. Research progress on nutrient composition of *roxburghii* tratt fruit [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2015, 1(11): 1753-1757
- [2] Lu M, An H, Wang D. Characterization of amino acid composition in fruits of three, *Rosa roxburghii*, genotypes [J]. Horticultural Plant Journal, 2017, 3(6): 232-236
- [3] Wang L, Zhang B, Xiao J, et al. Physicochemical, functional, and biological properties of water-soluble polysaccharides from *Rosa roxburghii* tratt fruit [J]. Food Chemistry, 2018, 249: 127-135
- [4] Zhu J Z, Zhang B, Wang B X, et al. In-vitro inhibitory effects of flavonoids in *Rosa roxburghii* and *R. sterilis* fruits on α -glucosidase: effect of stomach digestion on flavonoids alone and in combination with acarbose [J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 13-21
- [5] 袁鹏.聚焦刺梨产业助推脱贫攻坚[N].黔南日报,2019-1-31 (8744)
- [6] 郑建仙,高孔荣.论膳食纤维[J].食品与发酵工业,1994,4:71-74
ZHENG Jian-xian, GAO Kong-rong. On dietary fiber [J]. Food and Fermentation Industries, 1994, 4: 71-74
- [7] 程明明.西番莲果皮水不溶性膳食纤维提取、改性及功能特性研究[D].广州:华南农业大学,2016
CHENG Ming-ming. Study on extraction, modified and functional features of dietary Fiber from *Passiflora edulis* rind [D]. Guangzhou: South China Agricultural, 2016
- [8] Yang Y S, Wang M, Hu D, et al. Efficient extraction of pectin from sisal waste by combined enzymatic and ultrasonic process [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 189-196
- [9] 李超.药食同源夏枯草多糖的分离纯化、结构鉴定及生物活性研究[D].广州:华南理工大学,2015
LI Chao. Isolation, purification and structural identification of polysaccharides from *Prunella vulgaris* Linn and their biological activities [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015
- [10] Luo X, Wang Q, Fang D, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell: Structural characterization and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 1461-1467
- [11] Ma M, Mu T, Sun H, et al. Optimization of extraction efficiency by shear emulsifying assisted enzymatic hydrolysis and functional properties of dietary fiber from deoiled cumin (*Cuminum cyminum* L.) [J]. Food Chemistry, 2015, 179: 270-277
- [12] Capek P, Hribalova V, Svandova E, et al. Characterization of immunomodulatory polysaccharides from *Salvia officinalis* L [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2003, 33(1): 113-119
- [13] 沈杰.黑豆渣不溶性膳食纤维硫酸酯制备及其功能性质 [D].扬州:扬州大学,2015
SHEN Jie. Preparation and functional properties of black bean dregs insoluble dietary fiber sulphate [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2015
- [14] 杨雪.超声波法提取玉米皮中水溶性膳食纤维的工艺研究 [J].农产品加工(学刊),2008,11:68-70
YANG Xue. Study on the extraction of water soluble dietary fiber from corn peel by ultrasonic method [J]. Agricultural Products Processing (Science), 2008, 11: 68-70
- [15] Vinatoru M. An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(3): 303-313
- [16] Moorthy I G, Maran J P, Ilakya S, et al. Ultrasound assisted extraction of pectin from waste *Artocarpus heterophyllus* fruit peel [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 34: 525-530
- [17] 邓瑾,李志建,李海峰,等.酶化学法提取石墨小麦麸皮不溶性膳食纤维工艺研究[J].河南工业大学学报,2015,36(2):14-16
DENG Wei, LI Zhi-jian, LI Hai-feng, et al. Extraction of

- graphite wheat bran insoluble dietary fiber by enzymatic chemical method [J]. Journal of Henan University of Technology, 2015, 36(2): 14-16
- [18] 卢忠英,鲁道旺,陈仕学,等.响应面优化微波辅助法提取刺梨水不溶性膳食纤维工艺[J].食品工业科技,2016,37(17): 195-199
- LU Zhong-ying, LU Dao-wang, CHEN Shi-xue, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of insoluble dietary fiber (IDF) from *Rosa roxburghii* by response surface method [J]. Food Industry Technology, 2016, 37(17): 195-199
- [19] 潘利华,徐学玲,罗建平.超声辅助提取水不溶性大豆膳食纤维及其物理特性[J].农业工程学报,2011,27(9):387-392
- PAN Li-hua, XU Xue-ling, LUO Jian-ping. Ultrasonic-assisted extraction of water-insoluble soybean dietary fiber and its physical properties [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 387-392
- [20] Zhang X, Yang W, Blasiak W. Modeling study of woody biomass: interactions of cellulose, hemicellulose, and lignin [J]. Energy & Fuels, 2011, 25(10): 4786-4795
- [21] 王倩,马丽苹,焦昆鹏,等.绿豆皮不溶性膳食纤维提取及其性质研究[J].农产品加工,2015,7:12-15
- WANG Qian, MA Li-ping, JIAO Kun-peng, et al. Extraction and properties of insoluble dietary fiber from mung bean skin [J]. Farm Products Processing, 2015, 7: 12-15
- [22] Chen W, Wang W, Zhang H, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of water-soluble polysaccharides from *Boletus edulis* mycelia using response surface methodology [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 614-619
- [23] Zia-Ur-Rehman Z, Islam M, Shah W H. Effect of microwave and conventional cooking on insoluble dietary fibre components of vegetables [J]. Food Chemistry, 2003, 80(2): 237-240
- [24] Xu N, Zhang W, Ren S F, et al. Hemicelluloses negatively affect lignocellulose crystallinity for high biomass digestibility under NaOH and H₂SO₄ pretreatments in miscanthus [J]. Biotechnology for Biofuels, 2012, 5: 58
- [25] Hua M, Lu J X, Qu D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522-529
- [26] Claye S S, Idouraine A, Weber C W. Extraction and fractionation of insoluble fiber from five fiber sources [J]. Food Chemistry, 1996, 57(2): 305-310

(上接第 226 页)

- [21] 王昊宇,黄艳,李坤,等.益生菌发酵山楂浆工艺优化及品质分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(3):409-415
- WANG Hao-yu, HUANG Yan, LI Kun, et al. Process optimization of hawthorn pulp fermented by probiotics and quality analysis [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50(3): 409-415
- [22] 党翠红.低度海红果酒酿造工艺研究[D].西安:陕西科技大学,2015:14-16
- DANG Cui-hong. Study on brewing technologies of low-alcohol malus micromalus makino wine [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2015: 14-16
- [23] Joshi V K, Chauhan A, Devi S, et al. Application of response surface methodology in optimization of lactic acid fermentation of radish: effect of addition of salt, additives and growth stimulators [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(8): 4935-4944
- [24] Altan A, McCarthy K L, Maskan M. Evaluation of snack foods from barley-tomato pomace blends by extrusion processing [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 84(2): 231-242
- [25] Xia Y, Liu X, Wang G, et al. Characterization and selection of *Lactobacillus brevis*, starter for nitrite degradation of Chinese pickle [J]. Food Control, 2017, 78: 126-131
- [26] 张婧.干酪乳杆菌发酵乳饮料的研制及其稳定性研究[D].杭州:浙江工商大学,2011
- ZHANG Jing. Studies on the technology and Stability of milk beverage fermented by *Lactobacillus casei* [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2011
- [27] 王然,陈善斌,庞瑞鹏,等.干酪乳杆菌 L9 对健康人群肠道健康的影响[J].中国食品学报,2016,16(8):38-44
- WANG Ran, CHEN Shan-bin, PANG Rui-peng, et al. Effect of *Lactobacillus casei* L9 on gut health of healthy individuals [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(8): 38-44
- [28] 何嘉敏,于新,刘学云.响应面优化益生菌发酵复合果蔬汁的加工工艺[J].现代食品科技,2019,35(5):206-213
- HE Jia-min, YU Xin, LIU Xue-yun, et al. Optimization of probiotic fermentation process for vegetable-fruit juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 206-213