

DOI:10.16433/j.1673-2383.2024.02.002

董艺帆,贾赛阳,杨鸣,等. 超声辅助水酶法提取花生油脂工艺研究及油脂品质分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2024,45(2):11-18.

DONG Yifan, JIA Saiyang, YANG Ming, et al. Study on ultrasonic-assisted aqueous enzymatic extraction process of peanut oil and analysis of oil quality[J]. Journal of Henan university of technology (natural science edition), 2024, 45(2): 11-18.

超声辅助水酶法提取花生油脂工艺研究及油脂品质分析

董艺帆,贾赛阳,杨鸣,陈复生,段晓杰*,布冠好*,杨趁仙,朱婷伟

河南工业大学粮油食品学院,河南郑州450001

摘要:为了实现花生油脂的高效提取和利用,采用超声辅助水酶法提取花生油脂,研究超声功率、作用时间、作用温度、料液比及酶用量对花生油脂提取率的影响,采用响应面法优化提取工艺,并分析花生油脂的脂肪酸组成、酸价、过氧化值和抗氧化能力。结果表明:花生油脂的最优提取工艺条件为料液比1:5 g/mL、纤维素酶用量1.0%、超声功率247 W、作用时间41 min、作用温度51℃,此条件下的油脂提取率为92.64%±0.73%;从提取的花生油脂中共检出8种脂肪酸,其中油酸含量最高,为40.44%±0.57%,亚油酸含量为36.97%±0.05%;花生油脂的酸价为(0.38±0.04) mg/g,过氧化值为(0.15±0.00) g/100 g, DPPH和ABTS自由基清除率分别为64.82%±2.51%、82.56%±6.47%。超声辅助水酶法有效缩短了提取时间,降低了酶用量,并且制备的花生油脂中不饱和脂肪酸含量高,具有良好的抗氧化能力。

关键词:花生油脂;水酶法;超声;脂肪酸;抗氧化能力

中图分类号:TS301.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2024)02-0011-08

Study on ultrasonic-assisted aqueous enzymatic extraction process of peanut oil and analysis of oil quality

DONG Yifan, JIA Saiyang, YANG Ming, CHEN Fusheng, DUAN Xiaojie*, BU Guanhao*,
YANG Chenxian, ZHU Tingwei

College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: To improve the extraction efficiency and utilization of peanut oil, the ultrasonic-assisted aqueous enzymatic method was used to extract peanut oil. The effects of ultrasonic power, treatment time, temperature, solid-liquid ratio, and enzyme dosage on the extraction rate of peanut oil were studied. The extraction conditions were then optimized by response surface methodology. The fatty acid composition, acid value, peroxide value and antioxidant capacity of peanut oil were finally analyzed. The optimal conditions for peanut oil extraction were as follows: material to liquid ratio of 1:5 g/mL, cellulase dosage of 1.0%, ultrasonic power of 247 W, 41 min and 51 °C. Under these conditions, the oil extraction rate reached 92.64%±0.73%. A total of 8 fatty acids were detected in peanut oil, among which oleic acid exhibited the

收稿日期:2023-12-25

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A20270);河南省自然科学基金项目(232300420205);河南工业大学创新基金支持计划专项(2021ZKCJ03)

作者简介:董艺帆(1998—),女,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为蛋白质化学与应用。

*通信作者:段晓杰,博士,讲师,E-mail:duanxj@haut.edu.cn;布冠好,教授,博导,E-mail:buguanhao2008@126.com。

highest concentration at $40.44\% \pm 0.57\%$ followed by linoleic acid $36.97\% \pm 0.05\%$. The acid value and peroxide value were determined to be (0.38 ± 0.04) mg/g and (0.15 ± 0.00) g/100 g, respectively. Additionally, the DPPH and ABTS free radical scavenging rates were $64.82\% \pm 2.51\%$ and $82.56\% \pm 6.47\%$, respectively. Ultrasonic-assisted aqueous enzymatic method effectively shortened the processing time and reduced the dosage of enzyme. The obtained peanut oil contained high content of unsaturated fatty acids and showed excellent antioxidant capacity.

Key words: peanut oil; aqueous enzymatic extraction; ultrasound; fatty acid; antioxidant capacity

花生是我国四大油料作物之一,具有种植面积大、产量高、营养丰富等特点。花生中油脂含量达到 45%~55%,花生油含有丰富的油酸和亚油酸,不饱和脂肪酸含量达到 80%^[1],其中单不饱和脂肪酸含量超过 50%。水酶法提取条件温和,工艺简单,能够同时提取油料中的油脂和蛋白,是一种绿色的提油技术^[2]。

用于水酶法提油的酶主要包括纤维素酶、半纤维素酶等细胞壁降解酶和蛋白酶,它们能够破坏花生细胞壁以及脂多糖、脂蛋白结构^[3]。Wang 等^[4]使用蛋白酶提取花生油,酶解时间 8 h,加酶量 1.5%,提取率为 92.2%。刘志强等^[5]在水酶法提取花生油脂的研究中使用纤维素酶和果胶酶的复合酶系,加酶量 0.3%,酶解时间 4 h,提取率为 95.4%。Liu 等^[6]使用复合植物水解酶提取花生油脂,加酶量 1.35%,酶解时间 90 min,油体得率为 48.44%。水酶法可以有效地提取花生油脂,但是也面临着酶制剂价格昂贵、提取时间长等问题^[7]。针对存在的问题,超声^[8]、微波^[9]、脉冲电场^[10]等辅助手段被应用于水酶法提油中。其中超声的空化作用产生剪切力、搅拌、振动、压力、冲击波和形成自由基等物理和化学现象,在液体中传播时能够形成气泡,增强传热和传质速率,有效提高提取效率,并且能够保护油脂中的活性成分,保证油脂的营养价值^[11-14]。李杨等^[15]采用超声波预处理后水酶法提取花生油脂,确定最优工艺条件为超声时间 20 min、超声温度 45℃、酶解温度 56℃、酶解时间 3.8 h、Alcalase 2.4 L 碱性蛋白酶加酶量 1.7%、料液比 1:4、酶解 pH 9.3。Shah 等^[16]使用超声辅助水酶法提取麻风树籽油,超声处理 5 min,提取率为 74%,超声波预处理将酶解时间从 18 h 缩短至 6 h。杨柳等^[17]采用超声辅助水酶法提取大豆油,在加酶量 2.0%、超声时间 15 min、酶解时间 4 h 的条件下,大豆油提取率达到 86.13%,与水酶法相比提高了 12.57%。

超声辅助水酶法作用方式有先超声再酶解、

超声与酶解同时作用。超声波作为预处理手段能够破碎植物细胞,利于油脂的提取。与酶同时作用时超声还能改变酶的结构,增强酶活性^[18]。超声与纤维素酶和果胶酶酶解同时作用能显著缩短葵花籽油的提取时间,提高提取率^[19]。目前超声多作为预处理手段用于水酶法提取花生油脂,超声与酶解同时作用对花生油脂提取的影响有待探究。

因此,本研究以花生为原料,采用超声辅助水酶法提取花生油脂,以油脂提取率为考察指标优化提取工艺,并分析花生油脂的脂肪酸组成、酸价、过氧化值和抗氧化能力,为花生油脂的绿色高效提取提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

花生(远杂 6 号):郑州鹏讯种业有限公司;纤维素酶 Celluclast:诺维信(中国)生物技术有限公司;三氯甲烷、甲醇、三氟化硼、氢氧化钠、石油醚、正己烷、无水乙醇、过硫酸钾:均为市售,分析纯。

1.2 仪器与设备

JYL-C022E 粉碎机:九阳股份有限公司;JY92-IIN 超声细胞粉碎机、DC-2006 低温恒温槽:宁波新芝生物科技股份有限公司;RE-52CS 旋转蒸发仪、SHZ-III 循环水式真空泵:上海亚荣生化仪器厂;TDL-5-A 离心机:上海安亭科技仪器厂;7890B 气相色谱:美国 Agilent 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 超声辅助水酶法提取花生油脂的工艺

将脱去红衣的花生仁按照一定料液比湿法粉碎后,加入纤维素酶,在一定超声功率、作用温度下处理一定时间,随后以 5 000 r/min 离心 15 min,得到乳液、水相和渣相,收集上层乳液,将水相和渣相重新混合,静置 30 min 后以 5 000 r/min 离心 15 min,取出上层乳液,并与第 1 次的

乳液合并,得到乳液。

按 1:3 的质量比向乳液中加入去离子水,加入 1.5% 的碱性蛋白酶后在 50 ℃ 下反应 2 h,然后以 5 000 r/min 离心 20 min,得到清油。

1.3.2 油脂提取率的计算

分别使用索氏抽提和氯仿甲醇的方法测定花生原料和乳液中的脂肪含量。在 1.3.1 得到的乳液中加入 3 倍体积以上的氯仿-甲醇(体积比 2:1)溶液,常温搅拌 3 h,以 5 000 r/min 离心 20 min,收集液相。固相再加入 3 倍体积的氯仿-甲醇,常温搅拌 3 h,以 5 000 r/min 离心 20 min,收集液相,重复 3 次,将 3 次得到的液相合并、旋蒸,得到清油,计算乳液中的脂肪含量。用分布在乳液中的油脂占比表示油脂提取率。

$$Y = \frac{m_1 \times y_1}{m_0 \times y_0} \times 100\%,$$

式中:Y 为油脂提取率; m_1 为乳液质量,g; y_1 为乳液脂肪含量,%; m_0 为花生质量,g; y_0 为花生脂肪含量,%。

1.3.3 单因素试验

1.3.3.1 超声功率对油脂提取率的影响

分别选取超声功率为 0、175、205、240、275、310 W,在作用时间 40 min、作用温度 50 ℃、料液比 1:5 g/mL、加酶量 1.5% (根据花生仁质量计算)的条件下,考察超声功率对油脂提取率的影响。

1.3.3.2 作用时间对油脂提取率的影响

分别选取作用时间为 0、10、20、30、40、50 min,在超声功率 240 W、作用温度 50 ℃、料液比 1:5 g/mL、加酶量 1.5% 的条件下,考察作用时间对油脂提取率的影响。

1.3.3.3 作用温度对油脂提取率的影响

分别选取作用温度为 20、30、40、50、60 ℃,在超声功率 240 W、作用时间 40 min、料液比 1:5 g/mL、加酶量 1.5% 的条件下,考察作用温度对油脂提取率的影响。

1.3.3.4 料液比对油脂提取率的影响

分别选取料液比为 1:3、1:4、1:5、1:6、1:7 g/mL,在超声功率 240 W、作用时间 40 min、作用温度 50 ℃、加酶量 1.5% 的条件下,考察料液比对油脂提取率的影响。

1.3.3.5 加酶量对油脂提取率的影响

分别选取加酶量为 0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5%,在超声功率 240 W、作用时间 40 min、作用温度 50 ℃、料液比 1:5 g/mL 的条件下,考察加酶量对油脂提取率的影响。

1.3.4 Box-Behnken 试验设计

运用 Design Expert 11 软件,采用 Box-Behnken 设计响应面试验。

1.3.5 花生油脂品质的分析

1.3.5.1 脂肪酸组成分析

根据 GB/T 5009.168—2016 的方法分析脂肪酸组成。将适量花生油脂进行甲酯化处理,采用气相色谱分析。色谱条件:HP-88 毛细管色谱柱(100 m×0.25 mm×0.20 μm),FID 检测器,载气为高纯氮气,浓度 99.999%,流速设置为 1 mL/min,分流比 1:20,柱温初始 170 ℃,升温至 240 ℃,进样口温度 250 ℃,检测器温度 280 ℃,进样量 2 μL。

1.3.5.2 酸价和过氧化值测定

参照 GB/T 5009.229—2016 的方法测定花生油脂的酸价。向准确称量的油脂样品加入 50 mL 乙醚-异丙醇(体积比 1:1),再加入 3~4 滴酚酞指示剂,充分振荡溶解,使用氢氧化钾标准溶液进行滴定,当溶液变为微红色,且 15 s 内无明显褪色,即为滴定终点,记录滴定体积,计算其酸价。

参照 GB/T 5009.227—2016 的方法测定花生油脂的过氧化值。向准确称量的油脂样品加入 30 mL 三氯甲烷-冰乙酸溶液,振荡摇匀,加入 1 mL 饱和碘化钾溶液,振荡摇匀,放置暗处 3 min,随后加入 100 mL 水,摇匀后立即用硫代硫酸钠标准溶液滴定,滴定至淡黄色时加入 1 mL 淀粉指示剂,继续滴定至蓝色消失为终点,记录滴定体积,计算其过氧化值。

1.3.5.3 DPPH 自由基清除能力测定

参照 Xu 等^[20]的方法,设置波长为 517 nm。将 2 mL DPPH 溶液(0.2 mmol/L)与 2 mL 无水乙醇溶液振荡混匀,测其吸光度(A_0),将 2 mL 样品溶解于 2 mL DPPH 溶液,振荡混匀,避光放置 30 min,测其吸光度(A_1),将 2 mL 样品与 2 mL 无水乙醇振荡混匀,测其吸光度(A_2)。DPPH 自由基清除率(I_1)计算公式如下。

$$I_1 = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0} \right) \times 100\%。$$

1.3.5.4 ABTS 自由基清除能力测定

参照 Okoh 等^[21]的方法,设置波长为 734 nm。将 7 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混合,避光条件下静置 12~16 h,吸取 1 mL 混合液与 60 mL 甲醇混匀,控制其吸光度为 0.700±0.02,得到测定液。将 4 mL

测定液和 100 μL 样品振荡混匀,静置 10 min,测其吸光度(A_1),对照组的吸光度为 A_0 。ABTS 自由基清除率(I_2)计算公式如下。

$$I_2 = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0} \right) \times 100\%。$$

1.4 数据分析

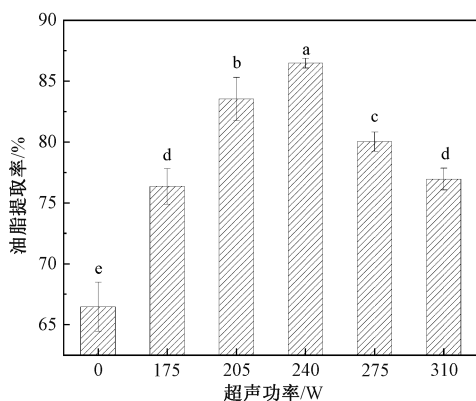
每组试验重复 3 次,各组数据取平均值,计算其标准偏差,利用 IBM SPSS Statistics 23.0 进行差异性分析,利用 Design-Expert 11 进行响应面设计和结果分析,利用 Origin 2024 对数据进行分析及制图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 超声功率对花生油脂提取率的影响

超声功率对油脂提取率的影响如图 1 所示,与未超声处理组相比,超声处理明显提高了油脂提取率,随着超声功率的增加,花生油脂提取率呈现先增长后降低的趋势,在 240 W 时达到最大值,为 $86.08\% \pm 1.24\%$ 。超声的空化作用能够破坏花生细胞壁,并且在一定强度范围内增强酶的活性^[18],超声功率的增加,促使酶与底物作用,反应速率加快,细胞壁破碎程度增强,利于细胞内油脂的释放,但超声功率过大时,产生的瞬时热效应可能会改变酶的结构,降低酶活性,另外产生的自由基可能会引起油脂降解^[22],导致油脂提取率有所降低。因此,最佳超声功率为 240 W。



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),图 2—图 5 同。

图 1 超声功率对花生油脂提取率的影响

Fig. 1 Effect of ultrasonic power on extraction rate of peanut oil

2.1.2 作用时间对花生油脂提取率的影响

作用时间对油脂提取率的影响如图 2 所示,

随着作用时间的增加,油脂提取率呈现先增长后降低的趋势,在 40 min 时达到最大值,为 $87.08\% \pm 0.17\%$ 。在一定反应时间内,超声和酶解可以破坏细胞结构,促进油脂释放,使提取率增加。随着作用时间的进一步增加,可能会发生过度超声作用,导致油脂重新被包裹在细胞残渣中,并且超声的热效应可能会破坏油脂的稳定性,造成油脂分解或挥发^[15],从而降低提取率。因此,最佳作用时间为 40 min。

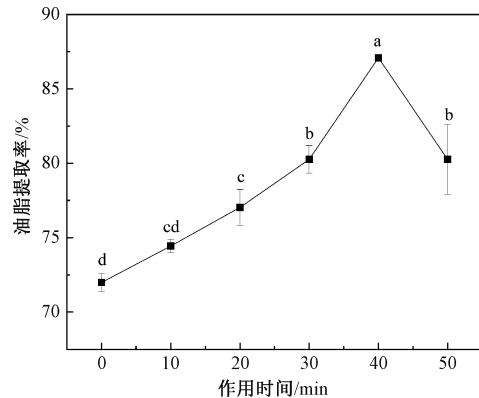


图 2 作用时间对花生油脂提取率的影响

Fig. 2 Effect of treatment time on extraction rate of peanut oil

2.1.3 作用温度对花生油脂提取率的影响

作用温度对油脂提取率的影响如图 3 所示,随着温度的升高,油脂提取率呈现先升高后降低的趋势,在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时达到最大值,为 $88.08\% \pm 0.21\%$ 。在一定温度范围内,随着作用温度的升高,分子扩散加快^[23],酶达到最适温度,活性增强,利于细胞壁降解,促进油滴的溶出。当温度过高时,不仅会影响酶的活性,而且会影响超声的空化作用,不利于传质速度的提高和能量的转化^[24],甚至可能会导致物料轻微糊化乃至变性^[15],致使油脂提取率下降。因此,最佳作用温度为 50 $^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.4 料液比对花生油脂提取率的影响

料液比对油脂提取率的影响如图 4 所示,随着料液比的降低,油脂提取率逐渐增加,在 1:5 g/mL 时达到最大值,为 $85.75\% \pm 0.77\%$,随后呈下降趋势。料液比较高时,反应体系中的底物浓度较高,流动性低,不利于酶与底物相互作用,随着料液比的减小,酶与底物的碰撞概率增大,促进细胞壁降解,有益于油脂体的释放,但料液比过小会降低酶制剂的作用效果,导致油脂提取率有所降低。因此,最佳料液比为 1:5 g/mL。

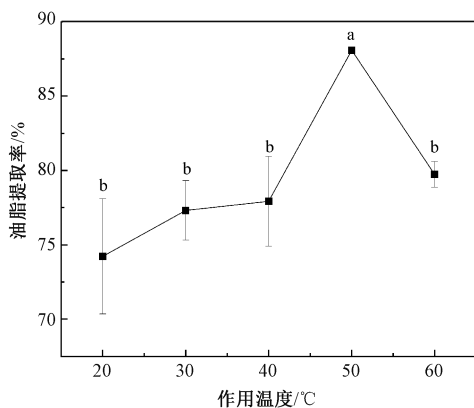


图 3 作用温度对花生油脂提取率的影响

Fig. 3 Effect of temperature on extraction rate of peanut oil

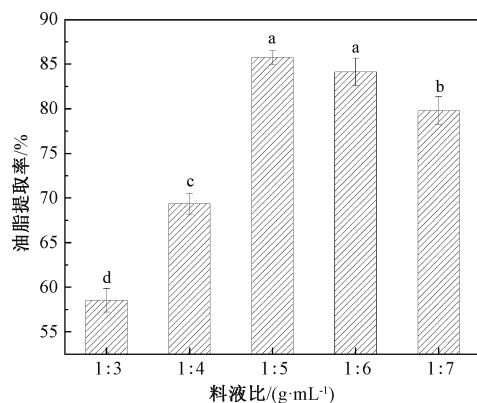


图 4 料液比对花生油脂提取率的影响

Fig. 4 Effect of solid-liquid ratio on extraction rate of peanut oil

2.1.5 加酶量对花生油脂提取率的影响

加酶量对油脂提取率的影响如图 5 所示,随着加酶量的增加,油脂提取率呈先上升后下降趋势,在加酶量为 1.0% 时达到最大值,为 $92.60\% \pm 2.00\%$ 。在一定的范围内,加酶量的增加促进酶与底物的相互作用,反应速率加快,使花生细胞壁破坏程度增加,油脂被充分释放,提取率升高。因此,最佳加酶量为 1.0%。

2.2 响应面优化试验

根据单因素结果,选择超声功率、作用时间、作用温度为自变量,在加酶量 1.0%、料液比 1:5 g/mL 的条件下,设计三因素三水平的响应面试验(表 1)。响应面试验结果及回归模型方差分析分别如表 2、表 3 所示。

对表 2 数据进行回归拟合,得到拟合方程:
 $Y = 93.14 + 2.05A + 0.71B + 0.90C + 0.52AB + 1.17AC - 0.16BC - 5.89A^2 - 6.62B^2 - 7.99C^2$ 。

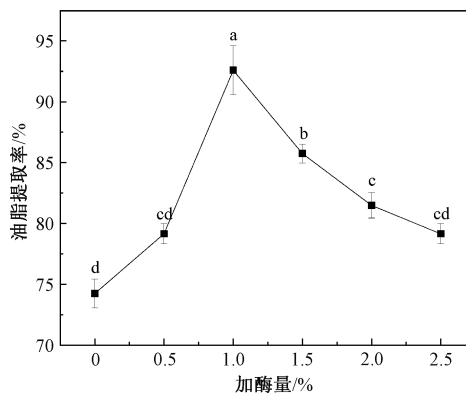


图 5 加酶量对花生油脂提取率的影响

Fig. 5 Effect of enzyme amount on extraction rate of peanut oil

表 1 响应面试验因素和水平

Table 1 Response surface experimental factors and levels

水平	因素		
	A 超声功率/W	B 作用时间/min	C 作用温度/°C
-1	205	30	40
0	240	40	50
1	275	50	60

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface experimental design and results

试验号	A	B	C	Y 提取率/%
1	0	0	0	94.50
2	-1	0	1	76.10
3	1	0	-1	80.09
4	1	1	0	85.73
5	-1	0	-1	78.84
6	0	0	0	92.42
7	0	1	1	79.50
8	0	0	0	91.24
9	0	-1	1	81.54
10	0	-1	-1	77.23
11	0	0	0	93.05
12	0	0	0	94.48
13	-1	1	0	80.08
14	1	-1	0	80.14
15	-1	-1	0	76.57
16	0	1	-1	75.83
17	1	0	1	82.02

由表 3 可知,模型极显著($P < 0.01$),失拟项不显著($P > 0.05$),回归模型的决定系数(R^2)为 0.9503,调整决定系数(R^2_{Adj})为 0.8863,说明模型无失拟因素存在,具有统计学意义,可用该回归方程对超声辅助水酶法提取花生油脂的试

表 3 回归与方差分析
Table 3 Regression and variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	718.88	9	79.88	14.86	0.000 9	**
A	33.58	1	33.58	6.25	0.041 0	*
B	4.00	1	4.00	0.75	0.416 6	
C	6.43	1	6.43	1.20	0.310 4	
AB	1.08	1	1.08	0.20	0.667 3	
AC	5.45	1	5.45	1.01	0.347 4	
BC	0.10	1	0.10	0.02	0.894 1	
A ²	145.84	1	145.84	27.13	0.001 2	**
B ²	184.68	1	184.68	34.36	0.000 6	**
C ²	268.82	1	268.82	50.02	0.000 2	**
残差	37.62	7	5.37			
失拟项	29.84	3	9.95	5.11	0.074 5	
净误差	7.78	4	1.95			
总离差	756.50	16				

注: * 表示显著 ($P < 0.05$); ** 表示极显著 ($P < 0.01$)。

验结果进行分析与预测。响应面模型的一次项 A, 二次项 A²、B²、C² 均显著, 各因素影响顺序依次为超声功率 > 作用温度 > 作用时间。

在加酶量 1.0%、料液比 1:5 g/mL 的条件下, 经过模型预测花生油脂的最佳提取工艺条件为超声功率 246.41 W、作用时间 40.60 min、作用温度 50.69 °C, 此时 Y 为 93.38%。考虑实际因素, 将最佳提取工艺条件调整为超声功率 247 W、作用时间 41 min、作用温度 51 °C。在此条件下进行验证试验, 花生油脂提取率为 92.64% ± 0.73%, 与预测值相差不大, 模型具有一定的实用价值。采用超声与纤维素酶同时作用提取花生油脂, 作用时间显著缩短, 酶用量减少。

2.3 花生油脂品质分析

在作用温度 50 °C、料液比 1:5 g/mL 条件下, 分别选取粉碎处理、酶解处理 (40 min、加酶量 1.0%)、超声处理 (240 W、40 min、加酶量 0%) 以

及超声辅助酶解 (240 W、40 min、加酶量 1.0%) 制备花生油脂, 分析其脂肪酸组成、酸价、过氧化值以及抗氧化能力, 探究超声和酶解处理对花生油脂品质的影响。

2.3.1 脂肪酸组成分析

不同工艺条件下花生油脂的脂肪酸组成如表 4 所示, 从 4 种工艺得到的花生油脂中均检出 8 种脂肪酸。与酶解处理相比, 超声辅助提取得到的花生油脂中油酸含量增加, 亚油酸含量降低。超声辅助酶解得到的花生油脂中, 饱和脂肪酸含量达到 78.10% ± 0.46%, 其中单饱和脂肪酸油酸含量最高, 为 40.44% ± 0.57%, 多饱和脂肪酸亚油酸含量为 36.97% ± 0.05%。脂肪酸的差异主要是因为脂肪酸中的双键数量不同, 双键数量也能反映油脂的氧化速度^[25], 超声辅助酶解得到的花生油脂可能具有更强的氧化稳定性。

表 4 不同工艺条件下花生油脂的脂肪酸组成
Table 4 Fatty acid composition of peanut oil under different treatment conditions

脂肪酸种类	脂肪酸含量/%			
	粉碎处理	酶解处理	超声处理	超声辅助酶解
棕榈酸 (C16:0)	13.59 ± 0.02 ^b	13.35 ± 0.10 ^c	13.51 ± 0.06 ^{bc}	13.86 ± 0.01 ^a
硬脂酸 (C18:0)	3.40 ± 0.29 ^a	3.40 ± 0.11 ^a	3.51 ± 0.31 ^a	3.10 ± 0.09 ^a
油酸 (C18:1)	38.65 ± 0.12 ^b	39.33 ± 0.16 ^b	40.33 ± 0.17 ^a	40.44 ± 0.57 ^a
亚油酸 (C18:2)	38.22 ± 0.07 ^a	38.30 ± 0.24 ^a	37.00 ± 0.16 ^b	36.97 ± 0.05 ^b
花生酸 (C20:0)	1.70 ± 0.42 ^a	1.11 ± 0.09 ^a	1.36 ± 0.17 ^a	1.56 ± 0.16 ^a
花生一烯酸 (C20:1)	0.85 ± 0.12 ^a	0.74 ± 0.01 ^a	0.62 ± 0.13 ^a	0.70 ± 0.06 ^a
山嵛酸 (C22:0)	2.59 ± 0.42 ^a	2.72 ± 0.11 ^a	2.56 ± 0.17 ^a	2.33 ± 0.37 ^a
木焦油酸 (C24:0)	1.04 ± 0.04 ^b	1.08 ± 0.01 ^{ab}	1.14 ± 0.04 ^a	1.07 ± 0.01 ^{ab}
饱和脂肪酸	22.29 ± 0.31 ^a	21.64 ± 0.41 ^a	22.06 ± 0.21 ^a	21.91 ± 0.47 ^a
单饱和脂肪酸	39.49 ± 0.24 ^b	40.07 ± 0.16 ^b	40.95 ± 0.04 ^a	41.13 ± 0.51 ^a
多饱和脂肪酸	38.22 ± 0.07 ^a	38.30 ± 0.24 ^a	37.00 ± 0.16 ^b	36.97 ± 0.05 ^b

注: 同行中不同字母表示有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.3.2 酸价、过氧化值和抗氧化能力分析

4 种不同工艺条件下花生油脂的酸价、过氧化值以及抗氧化能力如表 5 所示。4 种花生油脂酸价没有显著性差异 ($P>0.05$), 超声处理和超声辅助酶解得到的花生油脂其过氧化值高于

酶解处理的, 可能是因为超声的瞬时高温作用, 促使油脂发生氧化, 导致过氧化值增加。4 种工艺条件下的花生油脂酸价和过氧化值均符合 GB/T 2716—2018 规定的植物油标准。

表 5 不同工艺条件下花生油脂的酸价、过氧化值以及 DPPH、ABTS 自由基清除率

Table 5 Acid value, peroxide value and DPPH, ABTS free radical scavenging rate of peanut oil under different treatment conditions

处理条件	酸价/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	过氧化值/($\text{g}\cdot(100\text{g})^{-1}$)	DPPH 自由基清除率/%	ABTS 自由基清除率/%
粉碎处理	0.29±0.08 ^a	0.08±0.01 ^b	30.37±0.95 ^d	50.04±7.67 ^d
酶解处理	0.33±0.04 ^a	0.10±0.01 ^b	45.81±1.42 ^b	70.39±0.11 ^b
超声处理	0.36±0.02 ^a	0.13±0.01 ^a	40.89±2.71 ^c	56.80±3.47 ^c
超声辅助酶解	0.38±0.04 ^a	0.15±0.00 ^a	64.82±2.51 ^a	82.56±6.47 ^a

注: 同列中不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

DPPH 和 ABTS 自由基清除率是评价抗氧化能力最常用的方法^[26], 两者具有相同的单电子转化机制, 但作用动力学路径不同, 是衡量油脂抗氧化能力的重要指标^[27]。由表 5 可知, 超声辅助水酶法得到的花生油脂的 DPPH 和 ABTS 自由基清除率均最高, 抗氧化能力最强, 这是因为超声的空化作用及酶解作用能够有效地破坏细胞结构, 并且能减弱生物活性成分与蛋白质、碳水化合物等成分之间的相互作用, 促使抗氧化活性成分被释放进入油中^[24], 导致抗氧化能力增强, 自由基清除率提高。

3 结论

本研究通过单因素试验和响应面试验对超声辅助水酶法提取花生油脂的工艺进行优化, 并分析了花生油脂的脂肪酸组成、酸价、过氧化值及抗氧化能力。结果表明: 超声辅助水酶法提取花生油脂的最优工艺条件为料液比 1:5 g/mL, 纤维素酶用量 1.0%, 超声功率 247 W, 作用时间 41 min, 温度 51 °C, 在此条件下油脂提取率为 92.64%±0.73%。从超声辅助水酶法提取的花生油脂中共检出 8 种脂肪酸, 其中油酸含量最高, 为 40.44%±0.57%, 亚油酸含量为 36.97%±0.05%, 不饱和脂肪酸含量达到 78.10%±0.46%; 酸价和过氧化值均符合国标规定标准, DPPH 及 ABTS 自由基清除率分别为 64.82%±2.51% 和 82.56%±6.47%。本工艺有效缩短了反应时间, 降低了酶用量, 并且得到的花生油脂不饱和脂肪酸含量高, 抗氧化能力强, 具有良好

的品质。

参考文献:

- [1] JIANG L H, HUA D, WANG Z, et al. Aqueous enzymatic extraction of peanut oil and protein hydrolysates [J]. Food and bioproducts processing, 2010, 88(2/3): 233-238.
- [2] 杨建远, 邓泽元. 水酶法提取植物油脂技术研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(1): 225-230.
- [3] 王瑛瑶, 贾照宝, 张霜玉. 水酶法提油技术的应用进展 [J]. 中国油脂, 2008, 33(7): 24-26.
- [4] WANG Y Y, WANG Z, CHENG S W, et al. Aqueous enzymatic extraction of oil and protein hydrolysates from peanut [J]. Food science and technology research, 2008, 14(6): 533-540.
- [5] 刘志强, 邓光炳. 花生水酶法蛋白质提取及制油研究 [J]. 中国油脂, 1999, 24(2): 3-6.
- [6] LIU C, HAO L H, CHEN F S, et al. Study on extraction of peanut protein and oil bodies by aqueous enzymatic extraction and characterization of protein [J]. Journal of chemistry, 2020, 2020: 5148967.
- [7] 沈玉平, 周旭, 张祖姣, 等. 水酶法提取油脂研究进展 [J]. 中国油脂, 2021, 46(2): 14-19.

- [8] LI H Z, ZHANG Z J, HE D L, et al. Ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction of oil from perilla seeds and determination of its physicochemical properties, fatty acid composition and antioxidant activity [J]. Food science and technology, 2017, 37(suppl 1): 71-77.
- [9] ARROYO B Y N, CHACÓN S L O, TACIAS-PASCACIO V G, et al. Aqueous enzymatic extraction of oil from microwave-pre-treated jicaro seeds[J]. Current biochemical engineering, 2019, 5(1): 42-49.
- [10] 张良, 王丽娟, 钱建亚. 脉冲电场处理油菜籽对菜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2017, 42(11): 33-37.
- [11] TIWARI B K. Ultrasound: a clean, green extraction technology[J]. TrAC trends in analytical chemistry, 2015, 71: 100-109.
- [12] 罗登林, 丘泰球, 卢群. 超声波技术在油脂工业中的研究进展[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(3): 48-50.
- [13] 李杨, 张雅娜, 齐宝坤, 等. 水酶法提油工艺的预处理方法研究进展[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(12): 24-28.
- [14] 熊捷, 宋臻善. 超声波技术在油脂工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2006, 27(8): 194-196.
- [15] 李杨, 江连洲, 齐宝坤, 等. 超声波辅助水酶法提取花生油工艺[J]. 中国油脂, 2012, 37(3): 10-13.
- [16] SHAH S, SHARMA A, GUPTA M N. Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by combination of ultrasonication and aqueous enzymatic oil extraction[J]. Biore-source technology, 2005, 96(1): 121-123.
- [17] 杨柳, 江连洲, 李杨, 等. 超声波辅助水酶法提取大豆油的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(12): 10-14.
- [18] DALAGNOL L M G, SILVEIRA V C C, DA SILVA H B, et al. Improvement of pectinase, xylanase and cellulase activities by ultrasound: effects on enzymes and substrates, kinetics and thermodynamic parameters[J]. Process biochemistry, 2017, 61: 80-87.
- [19] MORADI N, RAHIMI M. Effect of ultrasound- and pulsed electric field-assisted enzymatic treatment on the recovery and quality of sunflower oil [J]. Separation science and technology, 2019, 54(6): 1043-1054.
- [20] XU D X, HAO J, WANG Z H, et al. Physicochemical properties, fatty acid compositions, bioactive compounds, antioxidant activity and thermal behavior of rice bran oil obtained with aqueous enzymatic extraction[J]. LWT - food science and technology, 2021, 149: 111817.
- [21] OKOH S O, ASEKUN O T, FAMILONI O B, et al. Antioxidant and free radical scavenging capacity of seed and shell essential oils extracted from *Abrus precatorius* (L) [J]. Antioxidants, 2014, 3(2): 278-287.
- [22] LOU Z X, WANG H X, ZHANG M, et al. Improved extraction of oil from chickpea under ultrasound in a dynamic system[J]. Journal of food engineering, 2009, 98(1): 13-18.
- [23] 李群, 李颜, 董绪燕, 等. 响应面法优化甜瓜籽油的超声辅助提取工艺及其品质分析[J]. 中国油脂, 2023, 48(5): 5-11.
- [24] HU B, WANG H Y, HE L F, et al. A method for extracting oil from cherry seed by ultrasonic-microwave assisted aqueous enzymatic process and evaluation of its quality [J]. Journal of chromatography A, 2019, 1587: 50-60.
- [25] WEI S L, HUANG J N, ZHANG L X, et al. Physicochemical properties and stabilities of crude and purified oil bodies extracted from high oleic peanuts [J]. European journal of lipid science and technology, 2020, 122(4): 1900183.
- [26] HOU K X, YANG X B, BAO M L, et al. Composition, characteristics and antioxidant activities of fruit oils from *Idesia polycarpa* using homogenate-circulating ultrasound-assisted aqueous enzymatic extraction[J]. Industrial crops and products, 2018, 117: 205-215.
- [27] 朱建宇, 赵城彬, 江连洲, 等. 迷迭香提取物对大豆油抗氧化性的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 208-214.

(责任编辑 金铁成)