

花生水剂法制油中固相体系油脂和蛋白的释放研究

李亚博, 章绍兵, 罗舒慧

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要: 为了降低花生水剂法制油中花生固相的残油率与残蛋白率, 以豫花 37 脱皮花生仁为原料, 通过水剂法制油获得水洗花生固相, 以水洗固相中残油率与残蛋白率为指标, 考察了酶解处理(细胞壁多糖酶、淀粉酶)、超声处理以及超声协同酶解处理对水洗固相的影响。结果表明: 水洗花生固相中残油率和残蛋白率分别为 2.18% 和 3.23%; 采用添加量 1.2 mL/100 g 的细胞壁多糖酶(纤维素酶、半纤维素酶与果胶酶质量比为 1:1.5:0.3) 酶解 5 h 后, 固相残油率和残蛋白率显著降低(分别为 1.75% 和 0.92%); 淀粉酶酶解时间 3 h 不能降低固相残油率, 但可降低残蛋白率至 0.91% (酶添加量 0.3 mL/100 g); 当淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解时固相残蛋白率可进一步降低至 0.80%, 但残油率无显著变化; 单独超声(400 W/20 min) 处理时, 固相残油率和残蛋白率分别降至 0.89% 和 0.62%; 而超声(400 W/30 min) 协同 0.3 mL/100 g 淀粉酶酶解时, 固相残油率降至 0.71%; 与超声处理相比, 超声协同复合酶(淀粉酶与细胞壁多糖酶) 处理并不能降低水洗花生固相残油率和残蛋白率。综上, 超声或超声协同淀粉酶处理花生水剂法制油中固相可以有效促进油脂与蛋白的充分释放。

关键词: 水剂法; 花生固相; 淀粉酶; 超声; 残油率; 残蛋白率

中图分类号: TS224.8; TS221 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)09-0001-08

Release of oil and protein in the solid phase from aqueous extraction of peanut oil

LI Yabo, ZHANG Shaobing, LUO Shuhui

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

Abstract: To reduce the residual oil and protein rates in the peanut solid phase during aqueous extraction of peanut oil, Yuhua 37 decorticated peanut kernels were employed as the raw materials, and the water-washed peanut solid phase was obtained through aqueous extraction of peanut oil. Using the residual oil and protein rates as evaluation indicators, the impacts of enzymatic hydrolysis treatment (cell wall polysaccharide enzyme and amylase), ultrasound treatment and ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis treatment on the water-washed solid phase were investigated. The results indicated that the residual oil and protein rates in the solid phase were 2.18% and 3.23%, respectively. Enzymatic hydrolysis with 1.2 mL/100 g cell wall polysaccharide enzyme (a composite of cellulase, hemicellulase, and pectinase at a mass ratio of 1:1.5:0.3) for 5 h, both the residual oil and protein rates in the solid phase decreased significantly to 1.75% and 0.92%, respectively. Amylase treatment (hydrolysis time 3 h) could not reduce the residual oil rate but lowered the residual protein rate to 0.91% (enzyme dosage 0.3 mL/100 g). When amylase was combined with cell wall polysaccharide enzyme for simultaneous enzymatic hydrolysis, the residual protein rate further decreased to 0.80%, while the residual oil rate showed no significant

change. For ultrasound treatment alone (400 W/20 min), the residual oil and protein rates in the solid phase decreased to 0.89% and 0.62%, respectively. When ultrasound treatment (400 W/30 min) was combined with 0.3 g/100 mL amylase enzymatic hydrolysis, the residual oil rate in the

收稿日期: 2024-08-03; 修回日期: 2025-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(U21A20270)

作者简介: 李亚博(1999), 女, 在读硕士, 研究方向为油料加工技术与理论(E-mail) yaboli1102@163.com。

通信作者: 章绍兵, 教授, 博士(E-mail) shaobingzhang@126.com。

solid phase decreased to 0.71%. In contrast, ultrasound – assisted composite enzyme (amylase combined with cell wall polysaccharide enzyme) treatment did not further reduce the residual oil and protein rates in the peanut solid phase compared with ultrasound treatment alone. In conclusion, ultrasound treatment or ultrasound – assisted amylase treatment of the peanut solid phase can effectively promote the thorough release of oil and protein.

Key words: aqueous extraction method; peanut solid phase; amylase; ultrasound; residual oil rate; residual protein rate

花生是豆科蝶形花亚科一年生草本植物,是我国四大油料作物之一,其果实已成为我国国民食用油脂和蛋白质的重要来源^[1]。研究表明,花生仁中油脂含量达 44% ~ 56%,蛋白质含量达 22% ~ 30%^[2]。传统花生制油工艺主要是压榨法和溶剂浸出法。压榨法^[3]是指在机械压力的作用下将油脂从油料中挤压出来的制油方法,其优点是在加工过程中无任何化学添加剂,产品安全性高,但是能耗较大,油脂提取率低。溶剂浸出法^[4]是一种常见的植物油制取方法,其所采用的溶剂一般为正己烷等有机溶剂,此方法的优点是油脂提取率高,但可能存在溶剂残留或大气环境污染风险。此外,压榨法和溶剂浸出法均以提取油脂为目标,对饼粕的深加工利用有待提高。

水剂法是一种利用水作为介质同时提取油料中蛋白和油脂的绿色方法,水剂法制油过程中油水混合体系由于密度差异,离心后由上至下分为四相,即油相、乳相、水相和固相^[5]。目前,关于水剂法的研究主要集中在植物细胞破碎条件的优化^[6]、破乳^[7]、蛋白的回收利用^[8]等。在水剂法制油工艺研究中多种处理方法被采用以提高油脂提取率,如在水剂法基础上向体系中加入细胞壁多糖酶以破坏植物细胞结构^[9-10],利用超声^[11-12]等物理方式辅助酶解,进一步促进油脂和蛋白的释放。对于花生水剂法制油而言,尽管研究者采用多种手段提高了油脂和蛋白的提取率,但是仍有部分油脂和蛋白存在于花生固相中。目前针对水剂法花生固相的研究多为非淀粉多糖的提取与性质研究^[13],而对花生固相中残余油脂与蛋白的释放规律仍不明确。前期研究发现,在最佳水剂法制油工艺条件下仍有 3% ~ 4% (占花生原料中粗脂肪的比例)的花生油残留在离心后的固相中^[5],而工业上采用传统溶剂浸出法制备花生油时粕中残油率能降至 1% 甚至更低。因此,采取有效措施缩小水剂法与传统溶剂浸出法制油的油脂提取率差距,已成为推动前者技术升级和产业发展的关键所在。

本文以高油酸花生品种豫花 37 为研究对象,对其进行水剂法制油后,首先分析了花生固相的化学组成,然后分别通过酶解与超声及二者协同的方式处理花生固相体系,旨在降低花生固相的残油率和残蛋白率,探究花生固相体系油脂和蛋白的释放规律,为花生水剂法加工制油工艺的完善提供理论和方法依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

豫花 37 脱皮花生(水分含量 2.31%,油脂含量 52.09%,蛋白质含量 21.45%),河南邦农种业有限公司;纤维素酶(700 EGU/g)、半纤维素酶(100 FBG/g)、果胶酶(10 000 PECTU/g)、中温淀粉酶(240 KNU/g),诺维信生物技术有限公司;糖化酶(100 000 U/g),北京奥博星生物技术有限公司;K-TDFR 膳食纤维总量检测试剂盒、K-TSTA 淀粉总量检测试剂盒,爱尔兰 Megazyme 公司;纤维二糖、葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖,上海麦克林生化科技股份有限公司;甘露糖、木糖,上海源叶生物科技有限公司;石油醚、氢氧化钠、碳酸钙,均为市售分析纯。

SHZ-88 水浴恒温振荡器,江苏金怡仪器科技有限公司;SZC-101 脂肪测定仪,上海纤检仪器有限公司;TN3000 杜马斯定氮仪,长沙开元弘盛科技有限公司;DT5-4B 低速台式离心机,北京时代北利离心机有限公司;Agilent 1260 高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;SCIENTZ-II D 超声细胞粉碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;FV3000 激光扫描共聚焦显微镜,日本 Olympus 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 水剂法花生固相的制备

参考李万山等^[14]的方法并略有改动制备水剂法花生固相。称取 280 g 脱皮花生于粉碎机中,粉碎成花生浆,放置 24 h 后,称取 25 g 花生浆于 250 mL 离心瓶中,加入 4 倍体积的蒸馏水并搅匀,置于 50℃、150 r/min 的水浴振荡器中振荡 30 min 后,调节 pH 至 11.0,继续在水浴振荡器中振荡

40 min, 然后于 $3\ 300 \times g$ 下离心 15 min, 取底层固相沉淀(水洗前固相), 加入 7 倍体积的蒸馏水, 搅匀后继续在水浴振荡器中振荡 60 min, 离心($3\ 300 \times g$, 15 min), 弃上清液, 沉淀经 $60\ ^\circ\text{C}$ 电热恒温鼓风干燥后得到水洗后的花生固相。

1.2.2 花生固相化学组成测定

1.2.2.1 粗脂肪含量

参照 GB 5009.6—2016 采用索氏抽提法测定粗脂肪含量。

1.2.2.2 粗蛋白质含量

参照 GB/T 31578—2015 测定粗蛋白质含量。

1.2.2.3 膳食纤维含量

参照 GB 5009.88—2014 测定膳食纤维含量。

1.2.2.4 总淀粉含量

参考 AOAC Official Method 996.11 测定总淀粉含量。

1.2.2.5 纤维素组成测定——纤维素和半纤维素含量

参考汪翔^[15]的方法并略有改动, 采用高效液相色谱(HPLC)法测定纤维素和半纤维素含量。

(1) 标准曲线的绘制: 配制一定质量浓度梯度的纤维二糖和葡萄糖(0.05、0.1、0.25、0.5、1.0 mg/mL)、阿拉伯糖(0.01、0.05、0.1、0.25、0.5 mg/mL)、半乳糖(0.05、0.1、0.15、0.5、1.0 mg/mL)、甘露糖(0.05、0.1、0.2、0.5、1.0 mg/mL)、木糖(0.01、0.05、0.1、0.25、0.5 mg/mL)的标准溶液, 用 $0.22\ \mu\text{m}$ 水系微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析, 因样品需进行酸解处理, 故对酸解过程中混合糖损失量进行矫正。配制与固相中浓度相近的葡萄糖、阿拉伯糖、半乳糖、甘露糖、木糖标准溶液, 取 20 mL 标准溶液于耐压试管中, 加入 $696\ \mu\text{L}$ 体积分数为 72% 的硫酸溶液, 二级酸解后进行 HPLC 分析。

(2) 样品制备: 取 $60\ ^\circ\text{C}$ 烘干的花生固相, 粉碎过 $0.25\ \text{mm}$ (60 目) 筛, 取 5.0 g 固相粉末用石油醚进行脱脂处理($55\ ^\circ\text{C}$ 浸泡 90 min, $60\ ^\circ\text{C}$ 抽提 120 min), 记录脱脂前后的质量。将脱脂后的样品置于 250 mL 离心瓶中, 加入 30 mL 蒸馏水混匀, 调节 pH 至 7.0, 加入淀粉酶(0.6%) 和糖化酶(0.3%) 进行脱淀粉($50\ ^\circ\text{C}$ 、150 r/min 水浴振荡) 处理, 离心($3\ 300 \times g$ 、15 min), 弃上清, 加入 150 mL 蒸馏水混匀, 在水浴振荡器($50\ ^\circ\text{C}$ 、150 r/min) 中振荡 1 h, 离心($3\ 300 \times g$ 、15 min), 弃上清, 重复 3 次, 再以相同的条件加入 150 mL 95% 乙醇溶液洗涤 3 次, 离心后将固相沉淀放入培养皿中, 于 $50\ ^\circ\text{C}$ 鼓风干燥箱中烘 2 h。称取上述处理后的样品(0.150 ± 0.005) g 于

耐压试管中, 酸解后进行 HPLC 测定。

(3) 样品测定: 制备的样品经 HPLC 分析后, 根据峰面积和标准曲线方程计算单糖质量浓度, 再按照公式(1)分别计算相应的聚糖含量。

$$Z_i = \frac{C_i \times V \times F \times \omega_1}{R_i \times \omega_{\text{ef}} \times \omega_0 \times 1\ 000} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_i = \frac{C_{i1}}{C_{i0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Z_i 为单糖 i 对应的聚糖含量; ω_0 为粉碎过筛后试样的质量, g; ω_1 为脱脂、脱淀粉后干燥试样的质量, g; ω_{ef} 为待酸解试样的质量, g; C_i 为酸解后滤液中测定的第 i 种单糖的质量浓度, mg/mL; V 为酸解后滤液体积, mL; F 为脱水因子, 木聚糖和阿拉伯聚糖用 0.88 校正, 葡聚糖、半乳聚糖和甘露聚糖用 0.9 校正; R_i 为第 i 种单糖的回收率; C_{i1} 为酸解后第 i 种单糖的质量浓度, mg/mL; C_{i0} 为酸解前第 i 种单糖的质量浓度, mg/mL。

纤维素含量由葡聚糖含量表征; 半纤维素含量由阿拉伯聚糖、半乳聚糖、甘露聚糖和木聚糖含量之和表征。

1.2.3 花生固相残油率和残蛋白率的测定

花生固相残油率(W_o) 和残蛋白率(W_p) 的计算分别见式(3)和式(4)。

$$W_o = \frac{m_o \times f_o}{f_s} \times 100\% \quad (3)$$

$$W_p = \frac{m_o \times \omega_p}{\omega_s} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_o 为固相质量, g; f_o 为花生固相粗脂肪含量; f_s 为原料花生粗脂肪质量, g; ω_p 为花生固相粗蛋白质含量; ω_s 为原料花生粗蛋白质质量, g。

1.2.4 水洗花生固相的酶解处理

1.2.4.1 细胞壁多糖酶酶解(酶解膳食纤维)

将 1.2.1 中水洗后未干燥的花生固相均匀分散于 50 mL 蒸馏水中, 调节体系 pH 至 5.0, 按纤维素酶、半纤维素酶与果胶酶质量比 1:1.5:0.3 配制细胞壁多糖酶, 加入一定量(以干燥的花生固相质量计)的细胞壁多糖酶, 于水浴振荡器中($50\ ^\circ\text{C}$ 、150 r/min) 酶解一定时间, 酶解完成后回调体系 pH 至 11.0, 离心($3\ 300 \times g$ 、15 min), 收集沉淀于培养皿中, 于 $60\ ^\circ\text{C}$ 鼓风干燥箱中烘干过夜, 得到酶解处理固相, 保存备用。

1.2.4.2 淀粉酶酶解

按 1.2.4.1 的操作, 采用中温淀粉酶在 pH 7.0 下酶解 3 h。为了将体系中的淀粉多糖尽可能除去, 在确定淀粉酶最佳添加量的基础上, 研究了淀粉酶

与糖化酶(辅助用酶)复配的酶解效果,酶解条件同中温淀粉酶。

1.2.4.3 淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解

按 1.2.4.2 的操作,调节体系 pH 至 7.0 后,加入淀粉酶酶解 3 h 后,再按 1.2.4.1 操作,调节体系 pH 至 5.0,加入细胞壁多糖酶酶解。

1.2.5 水洗花生固相的超声处理

将 1.2.1 中水洗后未干燥的花生固相均匀分散于 50 mL 蒸馏水中,调节体系 pH 至 7.0,使用直径为 6 mm 的超声探头,冰水浴控温至 30 °C 以下,在超声功率 400 W 下超声一定时间,超声结束后于水浴振荡器中振荡 3 h,然后按 1.2.4.1 的操作回调体系 pH、离心、收集沉淀并干燥备用。

1.2.6 水洗花生固相的超声协同酶解处理

1.2.6.1 超声协同淀粉酶

按 1.2.5 的操作,对水洗后未干燥的花生固相分散液在超声功率 400 W 下超声一定时间后,加入中温淀粉酶于水浴振荡器中酶解 3 h。

1.2.6.2 超声协同复合酶(淀粉酶与细胞壁多糖酶)

按 1.2.6.1 的操作,在超声协同淀粉酶酶解后,再按 1.2.4.1 的操作调节分散液 pH 至 5.0,加入细胞壁多糖酶酶解。

1.2.7 微观结构观察

选用尼罗红(0.1 g/100 mL)对花生固相分散液进行染色,设置仪器的激发波长为 543 nm,发射波长为 598 nm,通过激光扫描共聚焦显微镜(CLSM)观察油脂的微观结构。

1.2.8 数据处理

所有试验重复 3 次,结果以“平均值 ± 标准差”表示,采用 IBM SPSS Statistics 20 软件(美国纽约,IBM 公司)对数据进行 Duncan 分析($p < 0.05$ 表示差异显著),采用 Origin 2018 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 花生固相水洗前后的化学组成比较

试验发现,经过水洗处理后花生固相残油率从 3.24% 降至 2.18%,残蛋白率从 10.64% 降至 3.23%。对水洗前后花生固相的化学组成进行分析,结果分别如图 1 和图 2 所示。

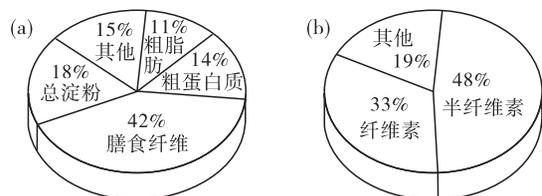


图 1 水洗前花生固相组成(a)以及膳食纤维组成(b)

Fig.1 Chemical composition (a) of peanut solid phase before water - washing and its dietary fiber composition (b)

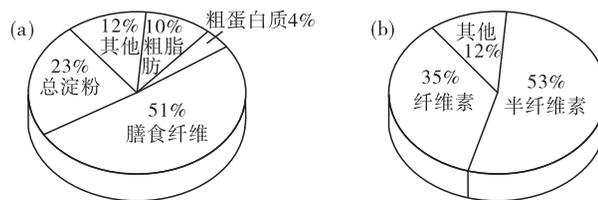


图 2 水洗后花生固相组成(a)以及膳食纤维组成(b)

Fig.2 Chemical composition (a) of peanut solid phase after water - washing and its dietary fiber composition (b)

由图 1 可知,水洗前花生固相中主要含有膳食纤维,其次为淀粉,同时含有一定量的蛋白质和脂肪,而花生膳食纤维主要由半纤维素和纤维素组成,剩余部分可能主要是果胶类物质。由图 2 可知:水洗后花生固相中蛋白质含量显著降低,说明水洗前固相中的蛋白质大多是可溶性蛋白;水洗后固相中脂肪含量轻微减少,膳食纤维和总淀粉含量则显著增加。水洗后花生固相中膳食纤维的组成也发生了改变,表现在半纤维素和纤维素的占比显著增加,这可能是固相中可溶性果胶的释放所致。叶建芬^[13]研究发现,水酶法花生固相中膳食纤维、淀粉、蛋白质、灰分和粗脂肪含量分别为 47.2%、30.2%、12.5%、5.6% 和 3.4%,与本研究不同,这可能是由于花生品种及工艺参数存在差异所致,但最主要的两大成分均是膳食纤维和淀粉,它们可能是阻碍花生固相中蛋白和油脂充分释放的主要因素。

2.2 酶解对水洗后花生固相残油率与残蛋白率的影响

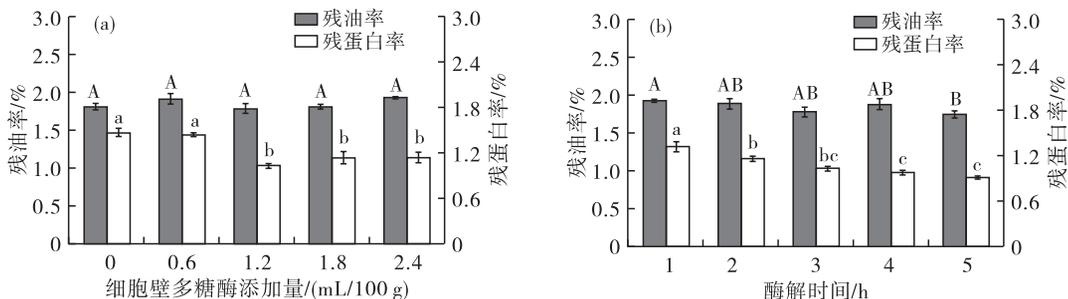
2.2.1 细胞壁多糖酶酶解对固相残油率与残蛋白率的影响

按 1.2.4.1 的方法分别考察细胞壁多糖酶添加量(酶解时间 3 h)和酶解时间(细胞壁多糖酶添加量 1.2 mL/100 g)对固相残油率和残蛋白率的影响,结果见图 3。

由图 3a 可知,与不加酶相比,随着细胞壁多糖酶添加量的增加,固相残油率无明显变化,而残蛋白率则显著下降,在酶添加量为 1.2 mL/100 g 时,残蛋白率显著降低至 1.03%,之后残蛋白率变化不显著。由图 3b 可知,随着酶解时间的延长,固相残油率和残蛋白率均呈下降趋势,在酶解 5 h 时残油率和残蛋白率分别为 1.75% 和 0.92%。上述结果说明,通过进一步酶解花生细胞壁可以有效降低固相残油率和残蛋白率,这可能是由于固相体系中未被充分粉碎的细胞在酶解作用下被进一步破坏,内部的可溶性蛋白“携带”油脂通过细胞孔隙游离出来。郝莉花^[6]研究发现,复合植物水解酶主要通过作用于纤维素的 C—O 伸缩、C—C 伸缩、CH₂ 的对称弯曲

和果胶的 C—O 伸缩、C—C 伸缩,以及半纤维素的 O—C—O 的不对称伸缩来实现对花生细胞壁结构

的有效降解。综合考虑,选择细胞壁多糖酶酶解的最佳条件为酶添加量 1.2 mL/100 g、酶解时间 3 h。



注:同一指标不同字母表示具有显著性差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters for the same index indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图3 细胞壁多糖酶添加量(a)与酶解时间(b)对固相残油率和残蛋白率的影响

Fig. 3 Effects of cell wall polysaccharide enzyme dosage (a) and hydrolysis time (b) on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

2.2.2 淀粉酶和糖化酶酶解对固相残油率和残蛋白率的影响

按 1.2.4.2 的方法,考察了中温淀粉酶对固相残油率和残蛋白率的影响,结果见图 4。

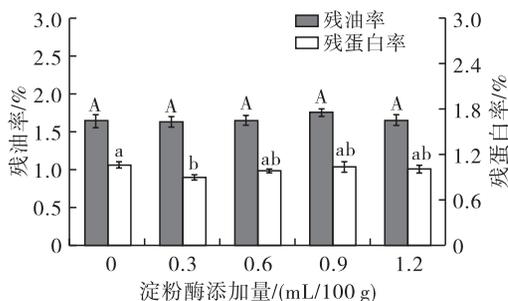


图4 淀粉酶添加量对固相残油率和残蛋白率的影响

Fig. 4 Effects of amylase dosage on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

由图 4 可知,与不加酶相比,随着淀粉酶添加量的增加,固相残油率无明显变化,而残蛋白率显著降低,在淀粉酶添加量为 0.3 mL/100 g 时残蛋白率(0.91%)最低,之后残蛋白率变化不显著,这与细胞壁多糖酶酶解释放固相中蛋白的作用效果非常接近,但淀粉酶酶解时固相残油率可显著降低至 1.56%。一些研究指出,蛋白质-淀粉或蛋白质-多酚/脂肪酸-淀粉在一定条件下可形成二元或三元复合物^[16-18]。在花生水剂法制油过程中淀粉和蛋白质可能会形成复合物,而复合物一旦被淀粉酶所破坏,将导致蛋白质溶出,由此降低了固相残蛋白率。综上,淀粉酶最佳添加量为 0.3 mL/100 g。

按 1.2.4.2 的方法,考察了中温淀粉酶(添加量 0.3 mL/100 g)与糖化酶复配对固相残油率和残蛋白率的影响,结果见图 5。

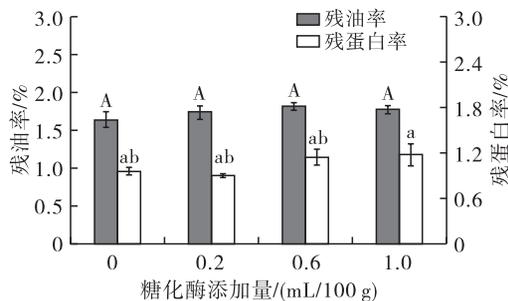


图5 淀粉酶与糖化酶复配对固相残油率和残蛋白率的影响

Fig. 5 Effects of amylase-glucoamylase combination on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

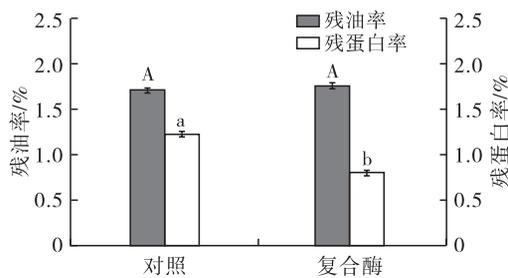
由图 5 可知,使用淀粉酶与糖化酶联合处理时,固相残油率变化不显著,而残蛋白率不降反升。这说明即使淀粉被彻底水解成单糖,也并不能进一步促进固相中油脂和蛋白的释放。酶本身也是蛋白质,酶添加量增大时残留在固相中的酶含量随之增高,从而可能导致固相残蛋白率有所上升。综上,选择淀粉酶酶解的最佳条件为淀粉酶添加量 0.3 mL/100 g,不加糖化酶辅助酶解。

2.2.3 淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解对固相残油率与残蛋白率的影响

按 1.2.4.3 的方法考察淀粉酶(添加量 0.3 mL/100 g)与细胞壁多糖酶(添加量 1.2 mL/100 g,酶解时间 3 h)联合酶解对固相残油率与残蛋白率的影响,结果见图 6。

由图 6 可知,与不加酶样品相比,将淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解时,固相残油率无显著变化,而残蛋白率显著降低至 0.80%。与单独细胞壁多糖酶(1.03%)或淀粉酶(0.91%)酶解相比,复合酶酶解后固相残蛋白率进一步降低,说明这两种酶对于

固相中蛋白的释放具有协同效应。淀粉酶能够破坏蛋白质-淀粉复合物,而细胞壁多糖酶能够进一步破坏预处理阶段未被粉碎的花生细胞,这些因素均有利于蛋白的充分释放。然而,两种酶酶解后固相残油率未能够进一步降低,甚至显著高于单独淀粉酶酶解时的残油率,这可能是由于总的酶解时间较长(淀粉酶酶解 3 h 后细胞壁多糖酶继续酶解 3 h),在长时间振荡过程中固相体系中的油滴发生了聚集,形成的大油滴不易从固相中释放出来。



注:对照为不加酶

Note: Control. No enzyme added

图 6 淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解对花生固相残油率与残蛋白率的影响

Fig. 6 Effect of combined enzymatic hydrolysis of amylase and cell wall polysaccharide enzyme on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

2.3 超声处理对固相残油率与残蛋白率的影响

超声波是由在传播介质中振荡的分子运动产生的机械声波组成的,其频率在 20 kHz ~ 1 MHz,超声效应主要包括机械效应和空化作用^[19]。超声波因具有处理效率高、成本低等优点^[20],已被广泛应用于食品加工中。超声处理对固相残油率与残蛋白率的影响如图 7 所示。

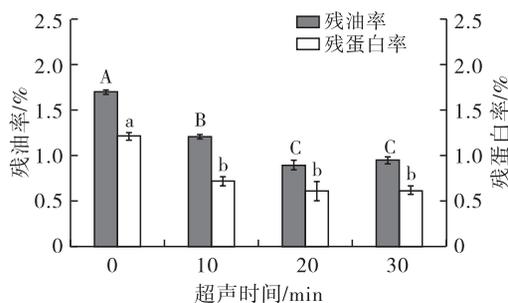


图 7 超声处理对固相残油率与残蛋白率的影响

Fig. 7 Effect of ultrasonic treatment on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

由图 7 可知,与未超声处理的样品相比,超声处理对固相残油率与残蛋白率的降低均有显著作用,在超声时间 20 min 时残油率与残蛋白率分别降至 0.89% 和 0.62%。超声处理效果明显优于酶解处理,其原因可能有 3 个:①超声的机械效应与空化作

用使部分花生细胞被充分破碎,其作用相当于细胞壁多糖酶对细胞的破坏,导致油脂和蛋白的释放;②超声处理对体系中的蛋白聚集体或多元复合物造成了一定程度的破坏,促进了蛋白的溶出;③体系中较大的油滴在超声作用下被破碎成细小油滴,而后者更容易从固相体系中释放出来。

进一步利用 CLSM 观察花生固相分散液超声处理(超声 20 min,继续水浴振荡 3 h)和未超声处理的微观结构,结果如图 8 所示。

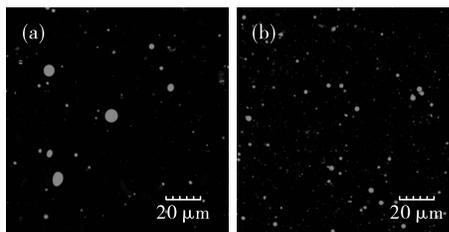
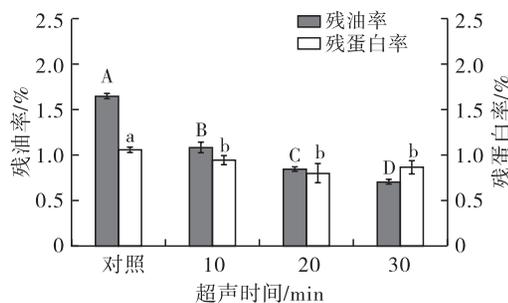


图 8 未超声处理(a)和超声处理(b)花生固相中油脂的微观结构
Fig. 8 Microstructure of residual oil in solid phase without ultrasonic treatment (a) and with ultrasonic treatment (b)

由图 8 可知:未超声处理的花生固相分散液中部分油滴呈现聚集状态,粒径较大;而超声处理后固相分散液中油滴显著减少,小油滴显著增加。Sun 等^[21]研究也发现,利用超声辅助提取花生分离蛋白时,超声处理可以降低花生分离蛋白粒径。

2.4 超声协同酶解处理对固相残油率与残蛋白率的影响

在淀粉酶添加量 0.3 mL/100 g 条件下,考察了超声协同淀粉酶酶解处理对固相残油率与残蛋白率的影响,结果见图 9。



注:对照为不超声、不加酶酶解。下同

Note: Control. No ultrasound and no enzyme added. The same below

图 9 超声协同淀粉酶酶解处理对固相残油率与残蛋白率的影响

Fig. 9 Effect of ultrasound and amylase enzymatic hydrolysis treatment on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

由图 9 可知,与对照相比,超声协同淀粉酶酶解时,固相残油率与残蛋白率均显著降低,且随着超声时间从 10 min 延长至 30 min,残油率显著降低,而

残蛋白率则无明显变化,在超声处理 30 min 时残油率最低,为 0.71%。与单独淀粉酶酶解或单独超声处理相比,超声协同淀粉酶酶解处理的固相残油率更低。这是因为:一方面,超声破碎了固相中较大的油滴;另一方面,淀粉酶能够破坏固相中的多元复合物,进一步瓦解固相体系,从而有效释放出花生固相中的油脂。然而,与单独淀粉酶酶解或单独超声处理相比,超声协同淀粉酶酶解不能进一步降低固相残蛋白率。

在淀粉酶添加量 0.3 mL/100 g,细胞壁多糖酶添加量和酶解时间分别为 1.2 mL/100 g 和 3 h 条件下,考察了超声协同复合酶酶解对固相残油率与残蛋白率的影响,结果见图 10。

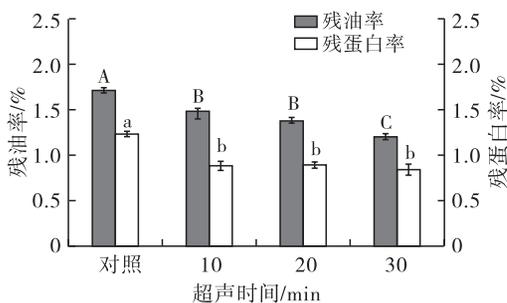


图 10 超声协同复合酶酶解对固相残油率与残蛋白率的影响

Fig. 10 Effect of ultrasound and composite enzymatic hydrolysis treatment on residual oil rate and residual protein rate in solid phase

由图 10 可知,与对照相比,超声协同复合酶酶解时,固相残油率与残蛋白率均显著降低。与单独复合酶酶解(图 6)相比,超声协同复合酶酶解后固相残油率显著降低,而残蛋白率无显著变化。而与单独超声处理(图 7)相比,超声协同复合酶酶解时固相残油率和残蛋白率均有所升高,这可能是因为复合酶酶解时间较长,导致超声破碎后的小油滴重新发生了聚集,油脂释放受阻。另外,复合酶酶解时体系的 pH 先调至 7.0 后调至 5.0,酶解结束后回调 pH 至 11.0,酶解过程酸碱度的变化以及过程中生成的 NaCl 可能会促进淀粉-蛋白多元复合物的形成,从而导致残蛋白率升高。牛斌^[22]研究不同因素对多元复合物形成的影响时发现,NaCl 含量的增加可促进淀粉-月桂酸- β -乳球蛋白三元复合物的形成。

3 结 论

本研究对豫花 37 花生水剂法制油过程中产生的固相进行水洗处理,对水洗前后花生固相化学组成进行了分析,并对水洗花生固相进行了酶解、超声

以及超声协同酶解处理。结果发现:膳食纤维与淀粉是花生固相的主要组成成分;细胞壁多糖酶酶解能同时降低花生固相的残油率与残蛋白率;淀粉酶酶解(酶解时间 3 h)时花生固相残油率无显著变化,但残蛋白率显著降低;淀粉酶与细胞壁多糖酶联合酶解时花生固相残油率无显著变化,残蛋白率可进一步降低;与酶处理相比,单独超声(400 W/20 min)处理时,残蛋白率和残油率可进一步降低(残蛋白率与残油率分别为 0.62% 和 0.89%),超声(400 W/30 min)协同 0.3 mL/100 g 淀粉酶酶解时可将固相残油率降至 0.71%。综上,超声或超声协同淀粉酶处理是促进花生固相油脂与蛋白充分释放的有效方法。

参考文献:

- [1] 李明妹,姚开,贾冬英,等. 花生功能成分及其综合利用[J]. 中国油脂, 2004, 29(9): 13-15.
- [2] TOOMER O T. Nutritional chemistry of the peanut (*Arachis hypogaea*) [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2018, 58(17): 3042-3053.
- [3] 纪俊敏,刘玉兰,黄莲燕,等. 不同制油工艺制备花生毛油及饼粕的品质分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(5): 82-87.
- [4] 刘方波,刘元法,王兴国,等. 新型制油溶剂正戊烷浸出大豆油的研究[J]. 中国油脂, 2008, 33(8): 11-13.
- [5] 贾琪琪,章绍兵,李端. 花生水剂法制油工艺中蛋白质的结构特征研究[J]. 中国油脂, 2025, 50(2): 63-70.
- [6] 郝莉花. 酶法同步提取花生蛋白和油脂体机理的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2017.
- [7] 赵自通,陈复生,周龙正. 酶法预处理对花生油脂体稳定性的影响及酶法破乳工艺优化[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 195-201.
- [8] 刘军军. 花生水代法提油过程中蛋白质结构变化规律及回收应用技术研究[D]. 江苏无锡:江南大学, 2020.
- [9] GUO X, WU B C, JIANG Y, et al. Improving enzyme accessibility in the aqueous enzymatic extraction process by microwave-induced porous cell walls to increase oil body and protein yields [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2024, 147: 109407 [2024-08-03]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109407>.
- [10] 高玉航. 水酶法提取花生油过程中乳化体系稳定性及破乳机制研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2022.
- [11] 包放,孙晓洋,陈复生,等. 物理场耦合水酶法同步释放植物油和蛋白的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(10): 335-341.
- [12] 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.

(下转第 39 页)

- simultaneous extraction of phthalates, polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons from edible oil for GC - MS determination [J/OL]. *J Food Compos Anal*, 2022, 114: 104827 [2023 - 10 - 12]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104827>.
- [23] HE F, TIAN Y, XU Z, et al. Development of an immunochromatographic assay as a screen for detection of total phthalate acid esters in cooking oil [J]. *J Toxicol Environ Health A*, 2018, 81(4): 80 - 88.
- [24] CUI X, WU P, LAI D, et al. Development of a highly specific fluorescence immunoassay for detection of diisobutyl phthalate in edible oil samples [J]. *J Agric Food Chem*, 2015, 63(42): 9372 - 9378.
- [25] WANG X, CHEN C, XU L, et al. Development of molecularly imprinted biomimetic immunoassay method based on quantum dot marker for detection of phthalates [J]. *Food Agric Immunol*, 2019, 30(1): 1007 - 1019.
- [26] WANG X, CHEN C, CHEN Y, et al. Detection of dibutyl phthalate in food samples by fluorescence ratio immunosensor based on dual - emission carbon quantum dot labelled aptamers [J]. *Food Agric Immunol*, 2020, 31(1): 813 - 826.
- [27] 黄世慧, 潘相玉, 张榴萍, 等. 分子印迹电化学传感器对食用油中塑化剂邻苯二甲酸二异壬酯的快速检测 [J]. *化工进展*, 2023, 42(12): 6469 - 6477.
- [28] 李冰, 李玉双. 邻苯二甲酸酯检测方法的研究进展 [J]. *北方园艺*, 2017(18): 175 - 179.
- [29] XIE Q, SUN D, HAN Y, et al. Determination of total phthalates in edible oils by high - performance liquid chromatography coupled with photodiode array detection [J]. *J Sep Sci*, 2016, 39(5): 857 - 863.
- [30] 李惠华, 聂贞梅, 孙胜枚. 液相色谱串联质谱 (LC - MS/MS) 法同时检测食品中 18 种增塑剂 [C] // 现代食品工程与营养健康学术研讨会暨 2020 年广东省食品学会年会论文集. 广州: 广东省食品学会, 2020: 139 - 144.
- [31] 李康雄, 钟海雁, 罗凡, 等. 油茶籽油中邻苯二甲酸酯的气相色谱分析方法建立及应用 [J]. *中国油脂*, 2016, 41(1): 56 - 59.
- [32] LIU S, LIU L, HAN Y, et al. Rapid screening of edible oils for phthalates using phase - transfer catalyst - assisted hydrolysis and liquid phase microextraction coupled to high performance liquid chromatography - tandem mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2015, 1420: 26 - 34.
- [33] 袁方池, 林云卓雅, 邓欣, 等. 农产品中邻苯二甲酸酯类 (PAEs) 的提取、检测和污染状况的研究进展 [J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(11): 2619 - 2626, 2683.
- [34] 向成艳, 唐晓倩, 张奇, 等. 食品中邻苯二甲酸酯类塑化剂检测技术研究进展 [J/OL]. *中国油料作物学报*: 1 - 9 [2023 - 10 - 12]. <https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2022170>.
- [35] 彭星星, 耿丽娜, 高海军, 等. 冷冻法结合 GC - MS/MS 测定植物油中 19 种邻苯二甲酸酯类化合物 [J]. *粮油食品科技*, 2023, 31(3): 137 - 146.

(上接第 7 页)

- [13] 叶建芬. 花生多糖精细结构、溶液构象及其在稳定水包油乳液中应用研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2022.
- [14] 李万山, 章绍兵, 颜东琼. 复合表面活性剂辅助水剂法同步制备花生油和蛋白 [J]. *中国油脂*, 2021, 46(12): 16 - 20.
- [15] 汪翔. 白腐真菌预处理玉米秸秆及混合酵母乙醇发酵工艺优化 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- [16] 田子昂, 郑丽丽, 艾斌凌, 等. 蛋白质 - 多酚 - 淀粉三元体系的相互作用及其对各组分功能影响的研究进展 [J]. *食品科学*, 2023, 44(11): 348 - 355.
- [17] 郑梦歌. 淀粉 - 脂肪酸 - 蛋白质三元复合物的形成机制及对淀粉功能性质的影响 [D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- [18] YE J, HUA X, ZHAO Q, et al. Characteristics of alkali - extracted peanut polysaccharide - protein complexes and their ability as Pickering emulsifiers [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 162: 1178 - 1186.
- [19] GALLO M, FERRARA L, NAVIGLIO D. Application of ultrasound in food science and technology: A perspective [J/OL]. *Foods*, 2018, 7(10): 164 [2024 - 08 - 03]. <https://doi.org/10.3390/foods7100164>.
- [20] 方桂红, 李晓珍, 周静. 超声技术在食品行业中的应用 [J]. *轻工科技*, 2021, 37(11): 1 - 3.
- [21] SUN X, ZHANG W, ZHANG L, et al. Effect of ultrasound - assisted extraction on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate [J]. *J Sci Food Agric*, 2021, 101(3): 1150 - 1160.
- [22] 牛斌. 不同因素对淀粉 - 脂肪酸 - 蛋白质相互作用的影响及其机制 [D]. 天津: 天津科技大学, 2020.