

油茶籽碱性蛋白酶水解理化特性的分析

赵雅贞¹, 龙 旬¹, 常云鹤^{1,2}, 宋明发^{1,3}, 侯俊财^{1,2}, 冯红霞^{1,2}

(贵阳学院食品科学与工程学院¹, 贵阳 550005)

(国家林业草原山桐子加工与综合利用工程技术研究中心², 贵阳 550005)

(贵州省果品加工工程技术研究中心³, 贵阳 550005)

摘要:为解决水酶法提取油脂产生的废水污染与资源浪费等问题,以油茶籽为原料,用水酶法酶解油茶籽分离水解液后,喷雾干燥得到酶解物,分析其基本成分、茶皂素含量以及理化特性。结果表明,与空白组相比,加酶组(添加碱性蛋白酶1 mL)的酶解物产品得率为 $(10.28 \pm 0.32)\%$,蛋白质质量分数为 $(17.70 \pm 1.28)\%$ 、粗多糖质量分数为 $(36.47 \pm 0.30)\%$ 、茶皂素质量分数为 $(18.40 \pm 0.51)\%$,均明显增加;微观结构表明,与空白组相比,加酶组颗粒较小且大小均匀。加酶组的蛋白水解度更高,在 $PI = 3$ 附近的乳化活性和乳化稳定性更强,但持油性差别不显著;红外光谱图和DSC表明,加酶组出现特征峰,蛋白质二级结构发生变化,且热稳定性更强。油茶籽碱性蛋白酶水解物的理化指标较优,颗粒均匀,热稳定性强。

关键词:油茶籽;碱性蛋白酶;水解物;理化特性

DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001305

中图分类号:TS229 文献标识码:A 文章编号:1003-0174(2026)01-0128-08

网络首发时间:2026-01-23 10:33:42

网络首发地址:<https://link.cnki.net/urlid/11.2864.TS.20260123.1004.002>

Analysis of the physicochemical properties of *Camellia oleifera* alkaline protease hydrolysates

Zhao Yazhen¹, Long Xun¹, Chang Yunhe^{1,2}, Song Mingfa^{1,3}, Hou Juncai^{1,2}, Feng Hongxia^{1,2}

(School of Food Science and Engineering, Guiyang University¹, Guiyang 550005)

(Engineering Technology Research Center for Processing and Comprehensive Utilization of *Idesia polycarpa* of National Forestry and Grassland Administration², Guiyang 550005)

(Guizhou Engineering Research Center for Fruit Processing³, Guiyang 550005)

Abstract: To address issues such as wastewater pollution and resource waste caused by the aqueous enzymatic extraction of oils and Fats, *Camellia oleifera* seeds were used as the raw material. Hydrolysate was separated from the seeds via aqueous enzymatic hydrolysis, followed by spray drying to obtain the enzymatically treated hydrolysate. The basic composition, content of tea saponin, and physicochemical properties were determined. The results showed that, the product yield of the enzyme-added group (with 1 mL of alkaline protease added) was $(10.28 \pm 0.32)\%$. The protein content was $(17.70 \pm 1.28)\%$, crude polysaccharide content was $(36.47 \pm 0.30)\%$, and tea saponin content was $(18.40 \pm 0.51)\%$, all of which were significantly increased compared with the blank group. Microstructural analysis revealed that the particles of the enzyme-added group was smaller and more uniformly sized compared with those of the blank group. Physicochemical tests demonstrated that the degree of protein hydrolysis of the enzyme-added group was higher, and its emulsifying activity and emulsifying stability were stronger near the isoelectric point ($PI = 3$), however, no significant difference was observed in oil-holding capacity between the two groups. Fourier-transform infra-

基金项目:贵州省科技厅科技计划项目(黔科合基础-ZK[2023]-一般017),贵州省科学技术厅计划项目(黔科合重大专项字[2024]025),贵州林草发展有限公司贵阳学院资金项目(GZ-LFGS-HZ-135-013)

收稿日期:2025-05-29

第一作者:赵雅贞,女,2000年出生,硕士,食品科学,zhaoyazhen0509@163.com

通信作者:冯红霞,女,1986年出生,副教授,粮油、油脂及植物蛋白工程,fenghongxia914@163.com

red (FT-IR) spectroscopy and differential scanning calorimetry (DSC) showed that characteristic peaks appeared in the enzyme-added group, the secondary structure of the protein was altered, and its thermal stability was enhanced. The *Camellia oleifera* alkaline protease hydrolysate exhibited superior physicochemical properties, with uniform particles and strong thermal stability.

Key words: *Camellia oleifera* seed; alkaline protease; hydrolysate; physicochemical properties

油茶(*Camellia oleifera* Abel.)是山茶科山茶属的木本油料植物,油茶籽中含有极高的油脂和营养成分^[1],含油率为40%~60%,其中油酸含量丰富(质量分数74%~87%),优于橄榄油^[2]。油茶籽油中含有人体所需的脂肪酸、维生素E、植物多酚、角鲨烯等功能性成分,能为人体提供能量,有益于调节免疫细胞活性、增强免疫功能、清除人体自由基、促进新陈代谢、抗炎、抗氧化、抗肥胖等^[3]。目前,油茶籽油的提取方法主要有压榨法、有机溶剂提取法和酶法。相较于压榨法和有机溶剂提取法,酶法可以通过生物酶温和水解油茶籽细胞壁,在低温条件下高效释放油脂,避免有机溶剂残留和高温破坏热敏性成分,如多酚、维生素E等,兼具提取安全性和营养完整性等优点^[4]。酶法的酶制剂主要包括蛋白酶、淀粉酶、果胶酶、纤维素酶等,可以针对性降解这些生物大分子,使油料得以释放。虽然纤维素酶、果胶酶等细胞壁降解酶可直接水解细胞壁骨架结构,但植物油料中的油脂通常存储在油脂体内,并由蛋白质基质紧密包裹。而蛋白酶能高效水解细胞中的贮藏蛋白和膜蛋白,促进油脂释放^[5]。Nguyen等^[6]比较了蛋白酶和纤维素酶对印加果种子榨油率的影响,发现木瓜蛋白酶酶解印加果种子的出油率最高,达到(24.67±0.60)%。

针对油茶籽油酶法提取的研究主要集中在联合工艺、工艺参数的优化^[7]、油脂品质与稳定性分析^[8]方面,对水解液中物质的研究鲜见报道。酶法工艺在提取油脂过程中产生的水解物富含蛋白质、碳水化合物等有机物,其直接排放易导致资源浪费和环境污染,且其易腐败的特性不利于后续的研究利用。本研究对酶法提取油茶籽油得到的水解液,经喷雾干燥处理为固体粉末状的水解物样品,进行基本成分分析和结构特性分析,旨在提高油茶籽资源的利用率,并为后续副产物的高值化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

油茶籽、碱性蛋白酶(240 000 U/g),市售;其他

试剂均为分析纯。

CS-2000Y 高速多功能粉碎机、SYG-2-4 电热恒温水浴锅、TDZ5-WS 离心机、GYB60-6S 超高压均质机、YC-500 喷雾干燥机、UV-2550 紫外分光光度计、DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器、SU8600 超高分辨场发射扫描电子显微镜、NS-90Z PLUS 纳米粒度及电位分析仪、KQ-400KDE 高功率数控超声波清洗器、202-1AB 电热恒温干燥机、L1600400 傅里叶变换红外光谱仪、DSC 4000 差示扫描量热仪。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

采用酶法辅助提取油茶籽油。油茶籽仁经粉碎后在碱性条件(pH 9.0)下处理,设置加酶组与空白对照组。2组样品反应结束后均经离心分离,体系自上而下依次分为油层、乳化层、水层(水解液)和残渣层,其中水层作为主要研究对象,经处理后获得最终实验样品。

具体而言,参考冯红霞等^[9]的方法并稍作修改,准确称取过0.42 mm筛的油茶籽仁粉末100 g,与600 mL蒸馏水混合以 m (油茶籽仁粉末): V (蒸馏水)为6:1的比例,于50℃水浴中加热搅拌。待温度至50℃后,使用质量分数10% NaOH溶液调至pH 9。加酶组按底物质量分数的1%加入碱性蛋白酶(1 mL),用适量蒸馏水溶解后加入该体系中,50℃酶解3 h;空白组则不添加酶,在相同温度下搅拌相同时间。随后将2组混合物均于100℃热处理10 min,在4 500 r/min下离心30 min,可分离出油层、乳化层、水层和残渣层。取水层均质后进行喷雾干燥(进风温度120℃,进料速率200 mL/h),所得粉末样品密封避光保存备用。

1.2.2 样品得率测定

准确称量干油茶籽仁粉末质量和喷雾干燥得到的样品质量,根据式(1)计算油茶籽碱性蛋白酶水解物得率(Y_1)。

$$Y_1 = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Y_1 为油茶籽碱性蛋白酶水解物得率/%;

m_1 为干油茶籽仁粉末质量/g; m_2 为喷雾干燥得到的样品质量/g。

1.2.3 基本成分测定

水分含量根据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》直接干燥法测定;脂肪含量依据 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索氏提取法测定;蛋白质含量依据 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法测定;磷脂含量根据 GB/T 5537—2008《粮油检验 磷脂含量的测定》钼蓝比色法测定;灰分含量根据 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》测定;粗多糖含量依据 SN/T 4260—2015《出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法》测定;可溶性固形物依据 NY/T 2637—2014《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》测定;茶皂素的测定参考文献[10]测定。

1.2.4 理化特性测定

1.2.4.1 微观结构

参考文献[11]使用超高分辨场发射扫描电子显微镜在 5 kV 的加速电压下对样品进行扫描电镜分析 (SEM)。

1.2.4.2 粒径与 Zeta 电位

参考文献[12]使用纳米粒度及电位分析仪对经去离子水稀释后的样品和空白组进行粒径和 Zeta 电位测定。

1.2.4.3 蛋白质水解度

采用茚三酮法^[13]测定样品的水解度,记录酪蛋白水解液和空白溶液的吸光值(A),并利用标准曲线计算酪蛋白水解液中—NH₂的含量($\mu\text{mol}/\text{mL}$)。根据国家标准中凯氏定氮法测量得到蛋白质含量,表示为 $N \times 6.38$,根据式(2)计算蛋白质水解度(Y_2)。

$$Y_2 = \frac{\left[\frac{x}{6.38 \times N} - u \right]}{k} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Y_2 为蛋白质水解率/%; x 为—NH₂含量,根据标准曲线确定; u 为原料酪蛋白游离氨基的量,其经验数值为 0.33 mmol/g; k 为每 1 g 蛋白中肽链当量数,酪蛋白取 8.2 mmol/g。

1.2.4.4 等电点的测定

参考宋乐^[14]的方法,取 pH 2~10 的 1 mg/mL 的样品溶液,测定不同 pH 值条件下加酶组和空白组样品在 660 nm 处的吸光度值,绘制 pH 值与透光率的关系图。

1.2.4.5 乳化活性与乳化稳定性

参考文献[15]测定加酶组和空白组的乳化性与乳化稳定性的影响。将 pH 调至 2、4、6、8、10,质量浓度为 1 mg/mL 的加酶组样品溶液和空白组溶液中加入 5 mL 山桐子油,然后用 8 000 r/min 高速剪切机剪切 2 min。在 0 min 和静置 10 min 时迅速从烧杯低部吸取 50 μL 乳浊液与 5 mL 的 1 g/100 mL SDS 溶液混合均匀,在 500 nm 处测定吸光度。按式(3)和式(4)分别计算乳化性(Y_3)和乳化稳定性(Y_4)。

$$Y_3 = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times B}{c \times \Phi(1 - \theta) \times 1000} \quad (3)$$

$$Y_4 = \frac{A_1}{A_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中: Y_3 为乳化性/ m^2/g ; Y_4 为乳化稳定性/%; A_0 为 0 min 时混合液的吸光度值; A_1 为静置 10 min 后混合液的吸光度值; B 为样品稀释倍数; c 为蛋白质质量浓度/mg/mL; Φ 为光程取 0.01; θ 为乳状液的油体积分数取 0.25。

1.2.4.6 持油性

参考文献[16]测定持油性,准确称取 10 mg 样品和 10 mL 山桐子油加入离心管中,漩涡振荡混合 5 min 后静置 30 min,在 4 000 r/min 条件下离心 20 min,去除上层液体后称重,按式(5)计算持油性(Y_5)。

$$Y_5 = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad (5)$$

式中: Y_5 为持油性/g/g; m_0 为样品质量/g; m_1 为样品和离心管质量; m_2 为沉淀物和离心管的总质量/g。

1.2.4.7 FTIR 与 DSC

参考文献[17]首先将油茶籽碱性蛋白酶水解物样品与干燥 KBr 粉末以 m (样品): m (KBr) 比例为 1:100 混合均匀研磨,在 $5 \times 10^7 \sim 10 \times 10^7$ Pa 压片机上加压 1 min 得到透明圆薄片样品,上机检测。傅里叶红外光谱仪扫描范围 4 000~400 cm^{-1} ,扫描 32 次,分辨率 4 cm^{-1} ,以空气为背景。空白组操作相同。

参考文献[18]将 5.5 mg 样品紧紧包裹在铝制密封罐中,使用空罐作为空白。从 25 $^{\circ}\text{C}$ 加热至 300 $^{\circ}\text{C}$,以 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度用干燥氮气(50 mL/min)吹扫样品。使用通用 V4.1D TA 仪器软件分析扫描后的结果。

1.3 数据处理

所有测定均重复 3 次,结果以“均值 \pm 标准偏差”表示。使用 Excel 2010 进行数据统计,采用 Origin 2021 进行绘图处理,用 SPSS Statistics V26.0 中的 Pearson 进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 为显著。

2 结果与分析

2.1 基本成分分析

加酶组和空白组的基本成分指标见表1,加酶组的酶解物产品得率为 $(10.28 \pm 0.32)\%$,空白组为 $(15.86 \pm 0.41)\%$,理论上,酶解过程中部分大分子物质降解为小分子多肽^[19],进入水相后,加酶组产品得率应升高,但实际测定值却明显低于空白组,这可能与水相中固形物的差异有关。空白组的脂肪质量分数 $(1.37 \pm 0.06)\%$ 和可溶性固形物质量分数 $(1.10 \pm 0.10)\%$ 均高于加酶组,说明空白组水相中整体固形物质量浓度更高,在喷雾干燥后可转化为粉末的物质更多。

由表1可见,加酶组和空白组的脂肪、可溶性固形物、磷脂含量、茶皂素、蛋白质和粗多糖质量分数之间具有显著性差异($P < 0.05$),灰分和水分质量分数之间无显著性差异。加酶组中粗多糖质量分数较高,约为36.47%,这可能是因为碱性蛋白酶虽不直接作用于多糖,但可水解细胞壁相关蛋白(如伸展蛋白)或破坏蛋白-多糖交联结构,促使细胞壁多糖(如果胶、半纤维素)溶出。茶皂素质量分数也有所增加,相较于空白组,加酶组的茶皂素质量分数增加约5.8%,这可能由于空白组中茶皂素被未分解的蛋白质或胶体包裹,从而阻碍其提取;而酶解后与茶皂素结合的蛋白质或脂质复合物被破坏,或间接促进纤维素酶活性(若底物含少量纤维素)提升,释放细胞壁中包裹的茶皂素,使其质量分数升高。这一结果与黄瑶等^[20]用碱性蛋白酶作为酶制剂,水酶法回收水层中多糖和茶皂素的研究中结果一致。

表1 加酶组和空白组的基本成分指标

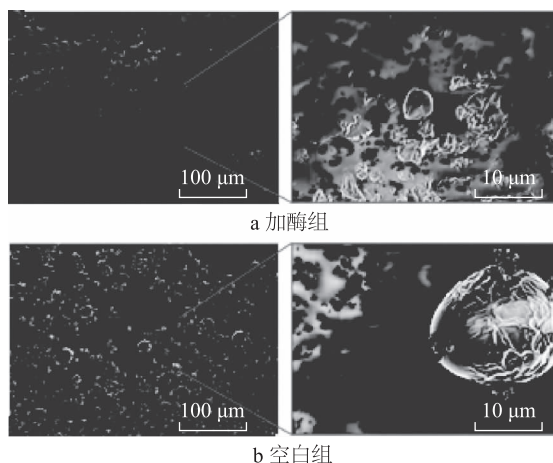
指标	加酶组	空白组
$w(\text{产品得率})/\%$	10.28 ± 0.32^b	15.86 ± 0.41^a
$w(\text{脂肪})/\%$	0.37 ± 0.05^b	1.37 ± 0.06^a
$w(\text{可溶性固形物})/\%$	0.82 ± 0.08^b	1.10 ± 0.10^a
磷脂含量/mg/g	2.47 ± 0.10^a	2.07 ± 0.14^b
$w(\text{灰分})/\%$	3.30 ± 0.12^a	3.22 ± 0.14^a
$w(\text{水分})/\%$	7.25 ± 0.13^a	7.09 ± 0.11^a
$w(\text{茶皂素})/\%$	18.40 ± 0.51^a	11.60 ± 0.47^b
$w(\text{蛋白质})/\%$	17.70 ± 0.42^a	14.19 ± 0.30^b
$w(\text{粗多糖})/\%$	36.47 ± 0.40^a	20.06 ± 0.50^b

注:不同小写字母表示不同组别间的显著性差异($P < 0.05$)。余同。

2.2 理化特性分析

2.2.1 微观结构

加酶组和空白组的扫描电镜图见图1,加酶组与空白组在形态上存在显著差异。在扫描电镜放大



注:图片左侧为放大500倍图像,右侧为放大5000倍图像。

图1 加酶组和空白组的扫描电镜图

500倍下观察发现,加酶组分布整体较为密集,颗粒较小且均匀,放大到5000倍观察发现,呈现更明显的破碎或疏松状态,粉末颗粒有明显裂纹和凹痕、结构不完整。空白组中存在较大颗粒物,表面较为致密,边缘清晰,放大到5000倍观察发现,微观结构完整,表面平滑,无明显破坏或降解迹象。产生这种差异的原因可能是因为碱性蛋白酶催化特定化学键断裂,导致样品表面高分子链或纤维结构的分解,使加酶组样品破碎,纤维度增加。空白组未受酶作用,分子间作用力和结晶结构得以保留,因此表面更致密、完整。Rehman等^[21]对水芹种子蛋白浓缩物和水解物的也观察到了类似的结果。

2.2.2 粒径与Zeta电位

由图2可见,酶解后,水解液中纳米颗粒的平均粒径减小,从空白组 $(246.36 \pm 1.89) \text{ nm}$ 减至 $(242.63 \pm 2.26) \text{ nm}$ 。表明碱性蛋白酶水解可能部分破坏了颗粒的聚集态结构(如断裂连接肽段或表面疏水区域),导致松散的大颗粒变为更小单元^[22];而空白组因无酶促降解,结构稳定性更高。加酶组和空白组的Zeta电位均为负值,但加酶组的电位绝对

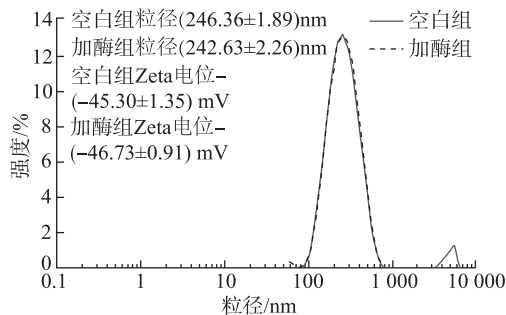


图2 加酶组和空白组的粒径与Zeta电位图

值稍大,这可能是因为酶解过程暴露了更多电子基团,使其表面电荷增加^[23]。与空白组相比,加酶组表现出更小的粒径和更高的电位绝对值,表明其稳定性较强,颗粒间静电排斥力强,不易聚集,有利于长期保存或作为递送载体应用。

2.2.3 蛋白水解度

加酶组与空白组的蛋白水解度见表2,蛋白质水解度越高,蛋白质断裂的肽键越多,产物分子质量越小,溶解度提高。蛋白质水解度根据标准曲线计算得出,标准曲线回归方程为 $y = 0.0438x - 0.002$, $R^2 = 0.9931$,表明具有良好的线性关系。由表2可见,与空白组(7.62%)相比,加酶组的蛋白质水解度更高(10.15%),表明加酶组水解更彻底,且加酶组粒径小于空白组,这可能是因为碱性蛋白酶可以对油茶籽充分进行酶解,将大分子蛋白切割为小分子肽段和游离氨基酸,直接导致颗粒尺寸减小^[24]。这与王娜等^[25]对米糠蛋白水解物二元纳米颗粒的研究结果一致。

表2 加酶组与空白组的蛋白水解度

指标	加酶组	空白组
蛋白水解度/%	10.15 ± 0.62 ^a	7.62 ± 0.43 ^b

2.2.4 等电点

加酶组和空白组的等电点由图3可见,在等电点时,蛋白质的表面静电荷为零,分子间由于缺乏静电斥力,易形成沉淀,使溶液浊度升高,透光率降低^[26]。随pH的增加,透光率总体呈先降低后升高再降低的趋势。加酶组在pH为3时透光率最低,表明其等电点在pH3左右;空白组的等电点在pH4左右。加酶组的透光率大于空白组,可能是因为加酶组碱性蛋白酶将大分子蛋白质水解为小分子多肽,减少颗粒尺寸,降低光散射,浊度降低,透过率升高。而空白组中未水解的蛋白质保持较大分子质量,易聚集形成大颗粒,增加光散射,使浊度升高,透过率降低^[27]。

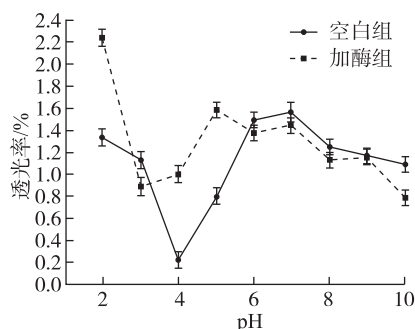


图3 加酶组和空白组的等电点图

2.2.5 乳化活性与乳化稳定性

加酶组和空白组的乳化活性和乳化稳定性图如图4所示,加酶组和空白组的乳化活性及乳化稳定性均随pH值的增加先升后降再升,但总体呈上升趋势。当溶液pH在等电点附近时,样品的乳化活性和乳化稳定性最差;在pH为4时,加酶组和空白组的乳化活性最强,分别为133 m²/g和126 m²/g,表明酸性条件下加酶组和空白组的乳化活性表现最佳;在pH为10时,乳化稳定性达到最高,分别为0.89 min和0.92 min,这与Zhang等^[28]对花生蛋白水解物的研究一致。与空白组相比,加酶组的乳化活性较高,这可能是由于碱性蛋白酶将大分子质量的蛋白质水解为小分子多肽,降低了分子质量,使得小分子质量的多肽能更快扩散至油-水界面,从而形成致密吸附层,降低界面张力,进而提升乳化活性。在Li等^[29]的研究中也发现了类似的现象。

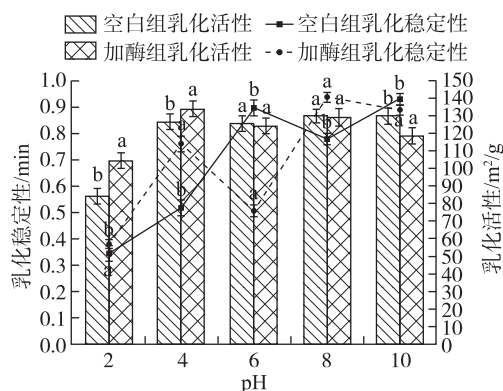


图4 加酶组和空白组的乳化活性和乳化稳定性图

2.2.6 持油性

加酶组和空白组的持油性由表3可见,加酶组的持油性略低于空白组,这可能是因为酶解将大分子质量的蛋白质切割为小肽段后失去大分子网络结构的物理截留能力,无法有效包裹油脂;且水解后肽段暴露出更多亲水基团(如羧基、氨基),使亲水-疏水平衡向亲水侧偏移,从而降低了与油脂的亲合力^[30]。

表3 加酶组和空白组的持油性

指标	加酶组	空白组
持油性/g/g	3.22 ± 0.24 ^a	3.31 ± 0.20 ^a

2.2.7 FTIR与DSC

加酶组和空白组的傅里叶红外光谱图和差示扫描量热图见图5,图5a是加酶组和空白组的傅里叶红外光谱图,样品在1650~1660 cm⁻¹处对应酰胺I带,归属于C=O伸缩振动;在1540~1550 cm⁻¹处对应酰胺II带,归属于N-H弯曲或C-N伸缩;

在 $1\ 230\sim 1\ 300\ \text{cm}^{-1}$ 处对应酰胺Ⅲ带,归属于 C—N 伸缩 N—H 弯曲,可辅助分析二级结构^[31]。加酶组在 $1\ 652\ \text{cm}^{-1}$ 处出现特征峰,表明相较于空白组 α -螺旋增强,结构柔性增加。加酶组的特征峰 ($3\ 375\ \text{cm}^{-1}$) 相较于空白组特征峰 ($3\ 369\ \text{cm}^{-1}$) 发生偏移,表明水解后亲水性基团 (—COOH、—NH₂) 增多,与水分子氢键作用增强。加酶组在 $2\ 925\ \text{cm}^{-1}$ 处出现特征峰,而空白组对应的特征峰在 $2\ 923\ \text{cm}^{-1}$ 处,此偏移表明 C—H 振动峰增强,证明水解物乳化活性增强^[32]。图 5b 差示扫描量热 (DSC) 图谱可反映蛋白质热变性行为的变化,其与变性温度 (T_d) 有关, T_d 是蛋白质开始展开 (变性) 的温度,表示结构稳定性。发现加酶处理后,加酶组和空白组之间的峰值温度存在显著差异,加酶组融融峰向高温方向偏移,从空白组 $135\ ^\circ\text{C}$ 升至加酶组 $175\ ^\circ\text{C}$ 周围,表明加酶组热稳定性增强,这与 Trigui 等^[33] 发现黑孜然籽蛋白在水解后表现出热稳定性显著增加的结果一致。

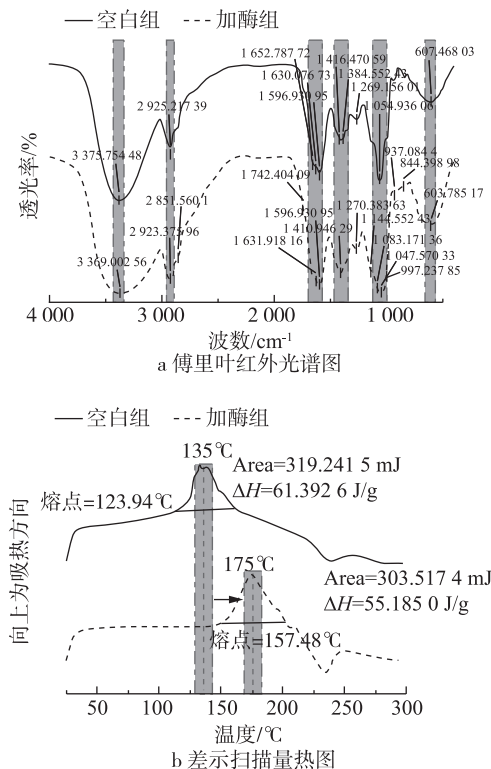


图5 加酶组和空白组的傅里叶红外光谱图和差示扫描量热图

3 结论

本研究对比分析了油茶籽碱性蛋白酶水解物组和空白组的基本成分和理化特性。结果表明,加酶组和空白组的产品得率分别为 $(10.28 \pm 0.32)\%$ 、

$(15.86 \pm 0.41)\%$, 茶皂素质量分数分别为 $(18.40 \pm 0.51)\%$ 、 $(11.60 \pm 0.47)\%$, 蛋白质质量分数分别为 $(17.70 \pm 0.42)\%$ 、 $(14.19 \pm 0.30)\%$, 粗多糖质量分数分别为 $(36.47 \pm 0.40)\%$ 、 $(20.06 \pm 0.50)\%$; 在形态上存在差异,空白组颗粒物较大,加酶组更均匀;加酶组等电点为 pH 3,空白组为 pH 4,pH 4 时乳化活性最高,pH 9 时乳化稳定性最佳;空白组蛋白水解度和持油性分别为 7.62% 和 3.31 g/g,加酶组分别为 10.15%、3.22 g/g;红外光谱图和 DSC 表明,酶解使蛋白质二级结构发生明显变化,且热稳定性增强。因此,油茶籽碱性蛋白酶水解物具有更高质量分数的茶皂素、蛋白质和粗多糖,且理化特性较优,有望作为表面活性剂应用于化工领域。

参考文献

- [1] 杨海余, 龚文芳, 崔坤鹏, 等. 油茶籽油品质性状研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 210-223
Yang H, Gong W, Cui K, et al. Progress of research on quality characteristics of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(8): 210-223
- [2] 侯思涵. 油茶籽油和橄榄油中主要化学成分分析[J]. 食品安全导刊, 2024(14): 163-165
Hou S. Analysis of main chemical components in *Camellia oleifera* seed oil and olive oil[J]. China Food Safety Magazine, 2024(14): 163-165
- [3] Yang R, Zhang L, Li P, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 26-32
- [4] 王晓峰. 水酶法提取油茶籽油的优劣势与工艺研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(4): 80-82
Wang X. Study on the advantages and disadvantages of aqueous enzymatic extraction of *Camellia* seed oil and its processing technology[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2018, 43(4): 80-82
- [5] 高凤. 水酶法提取花生蛋白及蛋白饮料稳定性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023: 4-5
Gao F. Study on the stability of protein and protein drink extracted by water enzyme [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023: 4-5
- [6] Nguyen H C, Vuong D P, Nguyen N T T, et al. Aqueous enzymatic extraction of polyunsaturated fatty acid-rich *Sacha inchi* (*Plukenetia volubilis* L.) seed oil: an eco-friendly approach[J]. LWT - Food Science and Technology, 2020, 133: 109992
- [7] 徐宁宁, 潘会, 胡源. 热处理辅助水酶法提取奇亚籽油的

- 工艺优化及其成分测定[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 171-177
- Xu N, Pan H, Hu Y. Optimization of heat treatment assisted water enzymatic extraction of *Chia* seed oil and determination of its composition[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12):171-177
- [8] 陈小静, 闻乐嫣, 向旭雯, 等. 水酶法提取毛叶山桐子油的工艺优化及其品质分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(12):1-6
Chen X, Wen L, Xiang X, et al. Optimization and quality analysis of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels oil extracted by aqueous enzymatic extraction [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(12):1-6
- [9] 冯红霞, 郑舒文, 常云鹤, 等. 水酶法提取核桃水解液制备核桃粉的品质分析[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(11): 129-133
Feng H, Zheng S, Chang Y, et al. Quality analysis of walnut powder prepared from walnut hydrolysate extracted by aqueous enzymatic method[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(11): 129-133
- [10] 王传浩, 陈俊宇, 张少凯, 等. 水酶法复合正丁醇提取浅色茶皂素工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(1):136-143
Wang C, Chen J, Zhang S, et al. Extraction process of light-color tea saponin by aqueous enzymatic method combined with n-butanol[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(1):136-143
- [11] 张敏. 大米蛋白水解物对小麦淀粉及面团的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020: 11
Zhang M. Effect of rice protein hydrolysate on wheat starch and dough [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020: 11
- [12] 刘静波, 李子豪, 温鹤迪, 等. 酶解对豆粕肽结构和乳化性质的影响及其高稳定性乳液的制备与表征[J]. 食品科学, 2024, 45(24):53-60
Liu J, Li Z, Wen H, et al. Effect of enzymatic hydrolysis time on the structure and emulsifying properties of soybean meal hydrolysate and preparation and characterization of highly stable emulsions stabilized with it[J]. Food Science, 2024, 45(24):53-60
- [13] 马海朝, 张密密, 李晴, 等. 天山雪莲细胞蛋白肽的制备与活性研究[J]. 中国药学杂志, 2025, 60(13): 1343-1352
Ma H, Zhang M, Li Q, et al. Preparation and activity study of cell protein peptides from *Saussurea involucrata*[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2025, 60(13):1343-1352
- [14] 宋乐. 驼掌胶原蛋白的提取及其理化性质研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 35
Song L. The study of camel palm extraction and physico-chemical properties [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2020: 35
- [15] 帕尔哈提·柔孜, 古丽米热·阿巴拜克日, 刘源, 等. 牛骨髓蛋白及其碱性蛋白酶酶解物的功能特性比较[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5):43-52
Rozi P, Ababaikeri G, Liu Y, et al. Comparison of the functional characteristics of bovine bone marrow protein and its hydrolysate obtained with alkaline protease [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5):43-52
- [16] 杨恒. 超声辅助对鸡肺胶原蛋白提取工艺、理化性质及其酶解产物抗氧化活性的影响[D]. 南京: 南京财经大学, 2020: 23
Yang H. Effect of ultrasonic assistance on extraction of chicken Lung collagen and antioxidant activity of enzymatic hydrolysis products [D]. Nanjing: Nanjing University of Finance & Economics, 2020: 23
- [17] 王琳, 周国卫, 于志超, 等. pH值偏移处理对油莎豆蛋白结构及乳化性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22):34-41
Wang L, Zhou G, Yu Z, et al. Effect of pH-shifting treatment on the structure and emulsifying properties of *Cyperus esculentus* L. protein [J]. Food Science, 2020, 41(22): 34-41
- [18] Jamshidi M, Kenari R E, Motamedzadegan A, et al. Encapsulation of unsaponifiable matter of rice bran oil by chitosan and *Lepidium perfoliatum* seed gum: characterization and antioxidant activity [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(10):1131-1140
- [19] 黄瑶. 水酶法提取的油茶籽油品质及水相中皂素粗品回收的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014: 33-35
Huang Y. Study on Camellia seed oil quality by aqueous enzymatic extraction and recovery of Saponin crude extract products from the hydrolyzates [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014: 33-35
- [20] 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]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109407
- [21] Rehman A, Khalifa I, Miao S, et al. Localized enzymolysis and dual-frequency ultrasound modification of underutilized fava bean protein: techno-functional, structural, *in vitro* digestibility, molecular docking, and interrelationship characteristics [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160:110850
- [22] Zhang W, Boateng I D, Wang Y, et al. High-intensity ultrasound-assisted alkaline extraction of soy protein: optimization, modeling, physicochemical and functional properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283:137494

- [23] Xue Z, Zhang M, Wang J, et al. pH - regulated Tannic acid and soybean protein isolate adhesive for enhanced performance in plant - based meat analogues [J]. *Food Research International*, 2024, 185:114289
- [24] Zhang X, Dai Z, Zhang Y, et al. Structural characteristics and stability of salmon skin protein hydrolysates obtained with different proteases [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 153:112460
- [25] 王娜, 卜慧芳, 孙煜卓, 等. 米糠蛋白水解物及其二元纳米颗粒的制备及结构表征 [J]. *食品科学*, 2025, 46(5):85 - 95
- Wang N, Bu H, Sun Y, et al. Preparation and structural characterization of rice bran protein hydrolysates and their binary nanoparticles [J]. *Food Science*, 2025, 46(5):85 - 95
- [26] 贾润红. 油牡丹籽粕蛋白质提取工艺优化及其抗氧化活性研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(12):42 - 50
- Jia R. Optimization of protein extraction process of oil peony seed meal and its antioxidant activity [J]. *China Food Additives*, 2023, 34(12):42 - 50
- [27] 彭嘉淇, 陈林, 姬文晋, 等. 柠檬酸脱酰胺改善小麦面筋蛋白乳化特性的作用机理研究 [J/OL]. *食品与发酵工业*, 2025;1 - 12 (2025 - 05 - 14). <https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042585>.
- Peng J, Chen L, Ji W, et al. The study on the mechanism of citric acid - induced deamidation improving the emulsifying properties of wheat gluten [J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 2025;1 - 12 (2025 - 05 - 14). <https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.042585>
- [28] Zhang L, Song C, Chang J, et al. Optimization of protein hydrolysates production from defatted peanut meal based on physicochemical characteristics and sensory analysis [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2022, 163:113572
- [29] Li Q, Chang B, Huang G, et al. Differential enzymatic hydrolysis: a study on its impact on soy protein structure, function, and soy milk powder properties [J]. *Foods*, 2025, 14(5):906
- [30] Ma K K, Grossmann L, Nolden A A, et al. Functional and physical properties of commercial pulse proteins compared to soy derived protein [J]. *Future Foods*, 2022, 6:100155
- [31] 赵冰. 基于近红外和中红外光谱的糖化白蛋白结构表征及糖尿病判别研究 [D]. 济南: 山东大学, 2024: 14 - 15
- Zhao B. Structural attribution of glycated albumin and disease diagnosis based on NIRS and MIRS [D]. Jinan: Shandong University, 2024: 14 - 15
- [32] 陈星烁. 花生蛋白酶水解物的结构、功能特性和抗氧化活性及脱苦研究 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025: 34 - 35
- Chen X. Study on structure, functional characteristics, antioxidant activity and debittering of peanut protease hydrolysate [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025: 34 - 35
- [33] Trigui I, Yaich H, Sila A, et al. Physical, techno - functional and antioxidant properties of black cumin seeds protein isolate and hydrolysates [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(4):3491 - 3500.