DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.13.008

鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白理化与功能特性分析

乔方瑞,刘全兰*
(青岛科技大学 生物工程学院,山东 青岛 266045)

摘　要:鹰嘴豆是重要的豆类资源,其蛋白质利用率高且氨基酸组成均衡。为进一步拓宽其应用前景,通过碱溶酸沉法和Osborne分级分离法获得鹰嘴豆分离蛋白及主要组分蛋白(白蛋白、球蛋白、谷蛋白),并对其理化、功能特性进行研究。结果表明,不同蛋白组分在分子量分布、二级结构、表面疏水性等方面存在明显差异,这些结构差异导致其在溶解度、乳化性、起泡性及吸水、吸油性等功能特性上表现出不同特点。其中,白蛋白表面疏水性最高,为5 751.67,同时具有较高的起泡能力和起泡稳定性;分离蛋白和白蛋白的乳化活性指数较高,分别为65.28 m^2/g和46.37 m^2/g,且分离蛋白的乳化稳定性最强,为165.23 min;谷蛋白和球蛋白在吸油性方面表现较好,分别为5.80 g/g和5.24 g/g。

关键词:鹰嘴豆;鹰嘴豆分离蛋白;鹰嘴豆组分蛋白;理化特性;功能特性

Physicochemical and Functional Properties of Chickpea Protein Isolate and Its Components

QIAO Fangrui, LIU Quanlan*
(College of Biological Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266045, Shandong, China)

Abstract: Chickpeas are important bean resources, with a high protein utilization rate and balanced amino acid composition. Chickpea protein isolate and its components (albumin, globulin, and gluten) were obtained via the alkali extraction-acid precipitation method and Osborne fractional precipitation method, which was expected to enhance the application prospects of chickpeas. The physicochemical and functional properties of chickpea protein isolate and its components were then studied. The results revealed significant differences among the protein components in molecular weight distribution, secondary structure, and surface hydrophobicity, which led to differences in functional properties such as solubility, emulsifying properties, foaming properties, and water/oil absorption. Albumin had the highest surface hydrophobicity at 5 751.67, demonstrating good foaming capacity and stability. The protein isolate and albumin had high emulsifying activity indices of 65.28 m^2/g and 46.37 m^2/g, respectively, and the protein isolate showed the strongest emulsifying stability (165.23 min). Gluten and globulin performed better in oil absorption, which reached 5.80 g/g and 5.24 g/g, respectively.

Key words: chickpea; chickpea protein isolate; chickpea component protein; physicochemical property; functional property

引文格式:
乔方瑞,刘全兰.鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白理化与功能特性分析[J].食品研究与开发,2026,47(13):59-66.
QIAO Fangrui, LIU Quanlan. Physicochemical and Functional Properties of Chickpea Protein Isolate and Its Components[J]. Food Research and Development,2026,47(13):59-66.

鹰嘴豆(*Cicer arietinum* L.)是一年生的豆科植物,属于草本类,具有结荚的生长特性,广泛分布于半干旱至温带的生态环境中。作为全球重要的豆类资源之一,我国也在大力发展鹰嘴豆产业。鹰嘴豆拥有极高

基金项目:青岛西海岸新区2021年度科技项目(2021-22)
作者简介:乔方瑞(1999—),男(汉),硕士,研究方向:食品科学。
*通信作者:刘全兰(1974—),女(汉),副教授,博士,研究方向:益生菌与宿主互作机制、蛋白与多糖的性质与功能。

的营养价值，富含多种营养素，并且其碳水化合物含量在豆类中位居前列，显示出其在营养结构上的独特优势。随着健康饮食的理念深入人心，鹰嘴豆及其加工食品的需求与日俱增。

近年来，随着植物基食品需求的快速增长，鹰嘴豆蛋白因其低致敏性、高消化率和可持续性等特点，在替代蛋白和功能性食品添加剂等领域展现出巨大的应用潜力[1]。鹰嘴豆富含优质蛋白，约占其干重的 20%~30%，且具有人体所需的全部必需氨基酸。因此，鹰嘴豆被认为是超级食物和高品质的植物蛋白来源之一[2]。

尽管鹰嘴豆蛋白的功能特性研究已较为深入，但其理化功能的差异本质上与不同组分蛋白的结构特征密切相关。目前，研究多集中于鹰嘴豆分离蛋白的提取及其单一功能的评价，而对各组分蛋白的深入研究仍相对不足[3]，需要进一步探索鹰嘴豆蛋白的组分特性及其在食品中的应用潜力，以推动其在功能性食品和替代蛋白领域的开发和利用。

本研究采用碱溶酸沉法及 Osborne 分级分离法提取鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白，并采用聚丙烯酰胺凝胶电泳、傅里叶变换红外光谱、表面疏水性分析等技术手段，对比 4 种蛋白，以期提高鹰嘴豆产品的食用价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鹰嘴豆：市售；浓硫酸：烟台三和化学试剂有限公司；蛋白标记物（Marker）：北京索莱宝科技有限公司；氢氧化钠、十二烷基硫酸钠（sodium lauryl sulfate，SDS）、三羟甲基氨基甲烷[tris（hydroxymethyl）aminomethane，Tris]、冰醋酸：国药集团化学试剂有限公司；考马斯亮蓝 R250：山东科源生化有限公司；牛血清蛋白：生工生物工程股份有限公司；5，5′-二硫代双（2-硝基苯甲酸）、β-巯基乙醇、8-苯胺-1-萘磺酸（8-anilino-1-naphthalenesulfonic acid，ANS）：上海麦克林生化科技有限公司；Laemmli 样品缓冲液、甘氨酸（glycine，Gly）：上海源叶生物科技有限公司。所用试剂均为分析纯。

0.1 mol/L Tris-Gly 缓冲液配制：准确称量 12.11 g 三羟甲基氨基甲烷与 7.5 g 甘氨酸，用去离子水溶解并定容至 1 000 mL 容量瓶。Ellman 试剂配制：准确称量 39.6 mg 5，5′-二硫代双（2-硝基苯甲酸），用 pH8.0 的 0.1 mol/L Tris-Gly 缓冲液溶解并定容至 10 mL 棕色容量瓶。

1.2 仪器与设备

FD-1A-50 真空冷冻干燥机：上海比朗仪器有限公司；PHS-25 型数显 pH 计：上海精密科学仪器有限公司；LG10-2.4A 高速离心机：北京京立离心有限公司；UV-2550 紫外分光光度计：日本岛津公司；FL970 荧光分光光度计：上海泰科仪器有限公司；DYCZ-24A 型双垂直电泳仪：北京六一生物科技有限公司；Nicolet IS10 傅里叶变换红外光谱仪：美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的制备

鹰嘴豆分离蛋白（chickpea protein isolate，CPI）参考 Ahmad Sofi 等[4]的碱溶酸沉法进行提取。将鹰嘴豆研磨成粉末后过 120 目筛，以料液比 1∶10（g/mL）与甲醇混匀，常温下脱脂 12 h 后使甲醇挥发晾干；将处理后的脱脂鹰嘴豆粉以料液比 1∶7（g/mL）溶于水中，用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至 9.0，在常温下涡旋 4 h 后，5 000 r/min 离心 15 min 并收取上清液，用 1 mol/L HCl 溶液调节 pH 值至 4.0 使上清液中蛋白沉淀，5 000 r/min 条件下离心 5 min 后取蛋白沉淀，用 1 mol/L NaOH 溶液调 pH 值至中性后冷冻干燥。将干燥后的蛋白粉末密封，于 4 ℃储存备用。

鹰嘴豆组分蛋白采用 Osborne 分级分离法进行提取[5]。将脱脂鹰嘴豆粉与去离子水按 1∶7（g/mL）混匀，常温下涡旋 2 h 后，5 000 r/min 条件下离心 10 min，上清液即为鹰嘴豆白蛋白（chickpea albumin protein，CAP）。将离心后的沉淀与 5% 的 NaCl 溶液混合进行相同操作，离心后上清液即为鹰嘴豆球蛋白（chickpea globulin protein，CGP）；将离心后的沉淀与 0.02 mol/L NaOH 溶液混合进行相同操作，离心后上清液即为鹰嘴豆谷蛋白（chickpea glutelin protein，CGTP）。调节上清液 pH 值至 4.5 左右，分别使 3 种组分蛋白析出，在 5 000 r/min 条件下离心 5 min 取沉淀，加入去离子水，用 1 mol/L NaOH 溶液调节 pH 值至中性后冷冻干燥，得到鹰嘴豆组分蛋白粉末，密封储存。在提取鹰嘴豆中醇溶蛋白时因其含量过低，所以不考虑提取进行后续试验。

1.3.2 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳（polyacrylamide gel electrophoresis，PAGE）

聚丙烯酰胺凝胶电泳参考 Hughes 等[6]的方法并适当调整。下层胶溶液和上层胶溶液加凝固剂后依次添加于电泳仪中等待形成凝胶体系。将 2 mg 的 4 种蛋白样品分别稀释于还原和非还原条件下的 1 mL Laemmli 样品缓冲液（pH6.8）中，煮沸 5 min 后，12 000 r/min 离心 5 min。移取离心后的上清液依次点样于凝胶孔中，80 V 电压下运行 15 min 进行样品压缩，再将电压调整为 120 V 运行 40 min 使样品和蛋白标记物（Maker）展开。取出已电泳完的凝胶，用考马斯亮蓝 R250 溶液和乙醇与醋酸的混合液进行染色和脱色。将凝胶放在灯照的条件下获取图像并处理数据。

1.3.3 傅里叶变换红外光谱

参考江睿钊等[7]的方法并略作修改。将待测蛋白和溴化钾分别烘干后研磨混合，压成薄片，使用傅里叶

变换红外光谱仪测定蛋白样品在波长4 000~400 cm^{-1}的红外吸收光谱，分辨率为4 cm^{-1}，扫描时间为32 s。

1.3.4 表面疏水性

蛋白样品表面疏水性的测定采用Kato等[8]方法并进行适当调整。利用0.01 mol/L磷酸盐缓冲液（phosphate buffered saline，PBS）配制100 mL、0.1 mg/mL蛋白溶液，从中依次取2、4、6、8、10 mL分别置于5个10 mL容量瓶，加入去离子水定容。分别取4 mL不同浓度的蛋白溶液，加入50 μL的ANS，黑暗环境下静置反应5 min后，使用荧光分光分度计进行检测，设置发射波长为470 nm、激发波长为390 nm，且将光电倍增管（photomultiplier tube，PMT）值调整至350，测定各组不同浓度蛋白溶液所对应的荧光强度。以测得的蛋白浓度为横坐标，荧光强度为纵坐标，绘制标准曲线，曲线的斜率即为蛋白样品的表面疏水性。

1.3.5 巯基与二硫键

蛋白质中巯基（—SH）含量测定参考Beveridge等[9]的方法并进行适当调整。

游离巯基含量的测定：称量25 mg蛋白样品溶于10 mL 0.1 mol/L Tris-Gly缓冲液，25 ℃避光孵育1 h。孵育完成后，5 000 r/min条件下离心10 min取上清液，测定412 nm波长处上清液的吸光度。

总巯基含量的测定：称量25 mg蛋白样品溶于15 mL Tris-Gly缓冲液，25 ℃孵育1 h。孵育结束后，加入15 mL 12%三氯乙酸溶液，5 000 r/min条件下离心10 min使沉淀析出。相同条件洗涤3次，最终得到沉淀物重悬于10 mL Tris-Gly缓冲液中，加入100 μL Ellman试剂充分混匀，测定此溶液在412 nm波长处吸光度。游离巯基（—SH）含量、总巯基含量及二硫键（S—S）含量的计算公式如下。

$$Y = \frac{73.53 \times A_{412} \times D}{C} \tag{1}$$

$$S = Y_1 - Y_2 \tag{2}$$

式中：Y为游离巯基或总巯基含量，μmol/g；73.53为系数；A_{412}为412 nm波长处吸光度；C为蛋白质浓度，mg/mL；D为稀释系数；S为二硫键（S—S）含量，μmol/g；Y_1、Y_2分别为总巯基、游离巯基含量，μmol/g。

1.3.6 溶解度

蛋白质溶解度测定参考Cepeda等[10]的方法并稍作修改。配制10 mL 1%蛋白溶液，用酸碱溶液调节pH值（2~11）。5 000 r/min离心10 min后分离溶液，测定上清液中溶解性蛋白质的含量。以牛血清蛋白浓度、595 nm处吸光度绘制标准曲线，标准曲线方程为y=7.57x+0.021 4（R^2=0.991 08）。蛋白质溶解度（P，%）按以下公式计算。

$$P = \frac{M_1}{M_0} \times 100 \tag{3}$$

式中：M_0为总蛋白质量，g；M_1为上清液中蛋白质的质量，g。

1.3.7 乳化活性指数及乳化稳定性

蛋白质的乳化性能测定参考贾尚羲等[11]的方法并进行适当调整。15 mL 0.1%蛋白质溶液与5 mL大豆油置于离心管中，20 000 r/min均质120 s。分别取25 μL未均质和均质后30 min的乳液，与5 mL 0.1% SDS溶液一同加入试管，测定500 nm处吸光度。乳化活性指数（N，m^2/g）和乳化稳定性（W，min）按以下公式计算。

$$N = \frac{2 \times 2.303 \times A \times D}{C \times \varphi \times \theta \times 10\,000} \tag{4}$$

$$W = \frac{A}{A - A_0} \times \Delta t \tag{5}$$

式中：N为乳化活性指数，m^2/g；W为乳化稳定性，min；A、A_0为0 min和30 min的吸光度；C为蛋白质初始浓度，g/mL；D为稀释系数，200；φ为光径，1 cm；θ为油体积分数，0.25；Δt为反应时间，30 min。

1.3.8 起泡能力及起泡稳定性

蛋白质的起泡性能测定参考李弓中等[12]的方法并进行适当调整。制备50 mL浓度为1%的样品溶液加入离心管，20 000 r/min均质5 min。测量未均质和均质后30 min管中泡沫高度。起泡能力（Q，%）和起泡稳定性（D，%）通过以下公式计算。

$$Q = \frac{V_0}{V} \times 100 \tag{6}$$

$$D = \frac{V_1}{V} \times 100 \tag{7}$$

式中：Q为起泡能力，%；D为起泡稳定性，%；V、V_0、V_1分别为初始体积、0 min和30 min时的泡沫体积，mL。

1.3.9 吸水性及吸油性

蛋白质吸水性（water absorption capacity，WAC）及吸油性（oil absorption capacity，OAC）的测定参考石杰等[13]的方法并进行适当调整。

蛋白质吸水性的测定：将0.5 g蛋白样品加入含有10 mL去离子水的试管中摇匀，于25 ℃静置60 min。5 000 r/min条件下离心10 min后取出上清液，称取上清液和余下物质质量。

蛋白质吸油性的测定：将0.5 g蛋白样品置于含有5 g大豆油的试管中摇匀。将混合物静置30 min，在静置期间，每隔3 min摇匀一次。5 000 r/min条件下离心10 min后沥出上层油，称量上层油和余下物质质量。蛋白质的吸水性和吸油性计算公式如下。

$$W = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \times 100 \tag{8}$$

$$O = \frac{W_1 - W_2}{W_0} \times 100 \tag{9}$$

式中：W为吸水性，g/g；O为吸油性，g/g；M_0、W_0为蛋白样品的质量，g；M_1为加入到待测蛋白样品中，参

与孵育的蒸馏水总质量，g；M_2 为孵育离心后，未被蛋白样品吸收的游离上清液质量，g；W_1 为加入到待测蛋白样品中，参与孵育的大豆油总质量，g；W_2 为孵育离心后，未被蛋白样品吸收的游离上层油相质量，g。

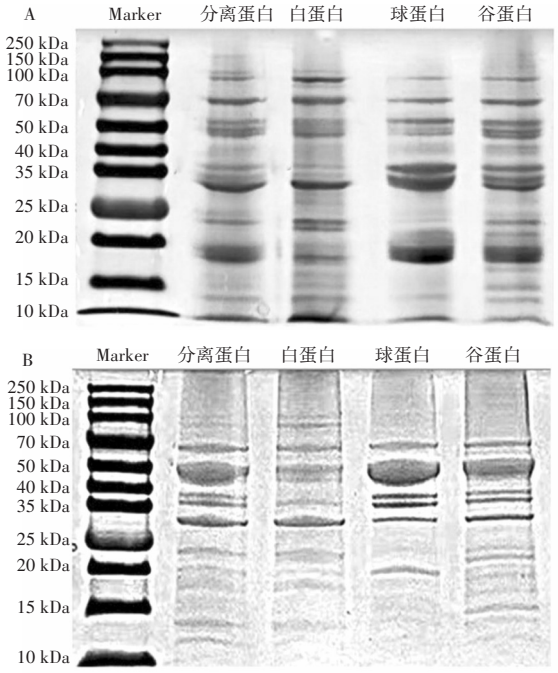
1.4 数据分析

每组试验均进行 3 次重复后取平均值，数据经 Excel 处理，采用 Origin 2024、OMNIC 软件绘图，采用统计软件 SPSS Statistics 27 进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 SDS-PAGE 结果

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白在还原与非还原条件下的 SDS-PAGE 电泳图见图 1。



A. 还原条件；B. 非还原条件。Marker 为标准蛋白。

图 1 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白在还原条件与非还原条件下的电泳结果

Fig.1 Electrophoresis of chickpea protein isolate and its components in reduced and non-reduced states

由图 1 可知，在还原条件下，CPI 与其他组分蛋白（CAP、CGP、CGTP）分布基本趋同，主要分布于 95~100、70、45~55、30~40、22、17、10 kDa 这 7 个范围。其中，95~100 kDa 条带推测是样品中存在未完全解离的蛋白多聚体或经特殊修饰的蛋白亚基所致；70 kDa 可能源于蛋白降解或聚合的存在；45~55 kDa 可能是 7S 亚基的存在；30~40 kDa 可能是 11S 酸性亚基或 7S 部分亚基存在；22 kDa 可能是 11S 碱性亚基片段或杂质；17、10 kDa 大概率是杂质或降解产物[14]。在非还原条件下，CPI 及其组分蛋白条带集中在 30~70 kDa 之间，与豌豆球蛋白相似[15]。30~50 kDa 为 7S 球蛋白主要条带对应亚基分子量；30~40 kDa 为 11S 球蛋白酸性亚基条带；20~30 kDa 为碱性亚基；30 kDa 可能是 11S 球蛋白碱性亚基在非还原条件下以完整形式存在，或与其他亚基发生部分结合所致；35~40 kDa 可能是酸性亚基或单体存在或与碱性亚基结合。

2.2 傅里叶变换红外光谱

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的傅里叶变换红外光谱图见图 2。

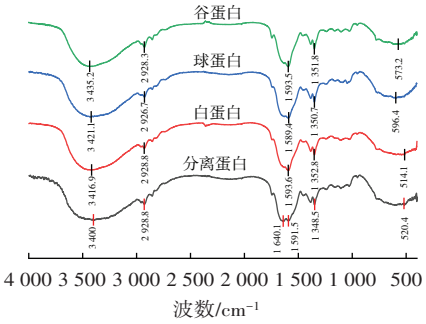


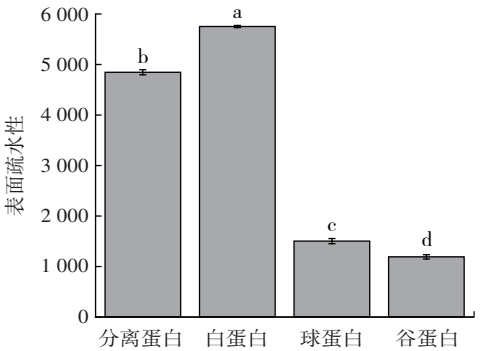
图 2 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的傅里叶变换红外光谱图

Fig.2 Fourier transform infrared spectra of chickpea protein isolate and its components

由图 2 可知，鹰嘴豆分离蛋白有 6 个特征峰，组分蛋白有 5 个特征峰。其中，在 3 500~3 200 cm^{-1} 区域 4 种蛋白位置相似，基本均在 3 400 cm^{-1} 附近，该吸收峰对应蛋白质中 O—H 伸缩振动。在 2 900 cm^{-1} 处也均有近似的特征峰，主要是由这些氨基酸侧链中的饱和 C—H 键伸缩振动引起[16]。在 1 700~1 600 cm^{-1} 附近为酰胺 Ⅰ 带，只有 CPI 有特征峰，主要源于 C═O 伸缩振动。4 种蛋白均在 1 600~1 500 cm^{-1} 和 1 300~1 200 cm^{-1} 有特征峰，分别对应于酰胺 Ⅱ 带和酰胺 Ⅲ 带，主要与 N—H 弯曲振动和 C—N 伸缩振动耦合有关[17]。

2.3 表面疏水性

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的表面疏水性见图 3。



不同小写字母表示蛋白样品间差异显著（$P<0.05$）。

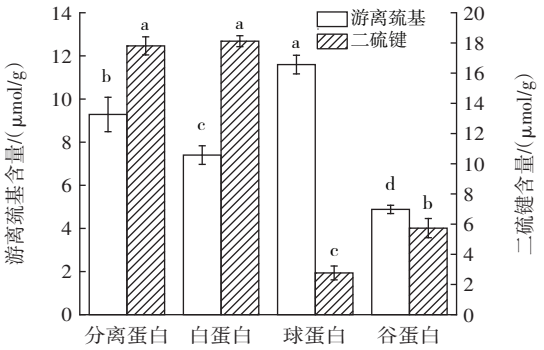
图 3 鹰嘴豆组分蛋白及其分离蛋白的表面疏水性

Fig.3 Surface hydrophobicity of chickpea protein isolate and its components

由图 3 可知，CAP 的表面疏水性最高，为 5 751.67，这可能与其氨基酸组成中含有较多的非极性氨基酸残基有关，这些残基倾向于聚集在一起，能够减少与水分子的接触，从而赋予 CAP 较强的疏水性；CPI 表面疏水性次之，为 4 846.67，这是由于它是多种蛋白的混合体，其相对较高的表面疏水性可能是其中部分蛋白组分贡献的结果；CGP 和 CGTP 分别为 1 503.33 和 1 191.67，表面更倾向于亲水性，说明它们的分子结构中可能富含极性氨基酸或带有亲水性基团，这些基团能与水分子形成良好的相互作用[18]。

2.4 游离巯基与二硫键含量

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的游离巯基与二硫键含量见图 4。



不同小写字母表示蛋白样品间差异显著（$P<0.05$）。

图 4 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的游离巯基与二硫键含量

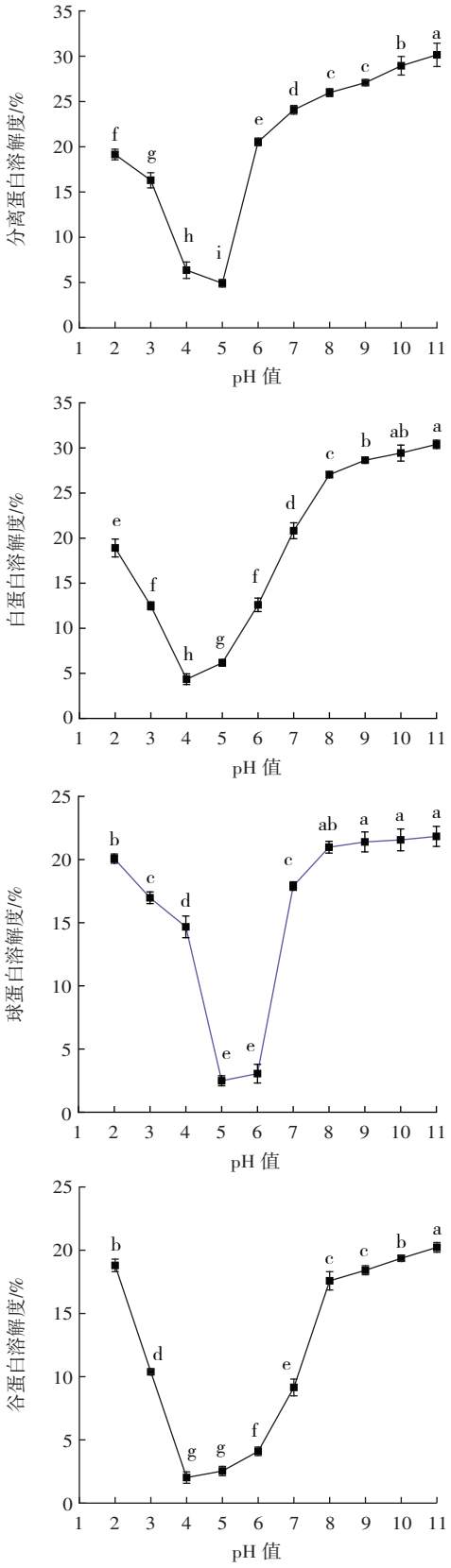
Fig.4 Content of free sulfhydryl group and disulfide bond in chickpea protein isolate and its components

由图 4 可知，CGP 的游离巯基含量最高，为 11.6 μmol/g。CGTP 的游离巯基含量最低，为 4.88 μmol/g。从游离巯基含量来看，CGP 的游离巯基含量最高，这可能与其蛋白结构中暴露的巯基基团较多有关，较多的游离巯基使 CGP 具有较高的反应活性，在与其他物质发生相互作用时可能更具优势。CGTP 的游离巯基含量最低，表明其蛋白结构中的巯基基团被保护得较好，或者巯基参与了分子内或分子间的相互作用，如二硫键的形成，从而降低了巯基的可及性和反应活性。这些巯基含量的差异对鹰嘴豆蛋白的功能特性会产生重要影响。

CPI 和 CAP 二硫键含量相近，分别为 17.8 μmol/g 和 18.12 μmol/g，意味着它们在蛋白组成和结构上具有一定相似性，二者均含有较多能形成二硫键的氨基酸残基或结构单元。CGP 二硫键含量最低，为 2.76 μmol/g，这可能是由于其 7S 蛋白相对含量较高。CGTP 的二硫键含量处于中间水平，为 5.74 μmol/g，这反映出其蛋白组成中 7S 和 11S 的比例相对适中[19]。

2.5 溶解度

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的溶解度见图 5。



不同小写字母表示蛋白样品间差异显著（$P<0.05$）。

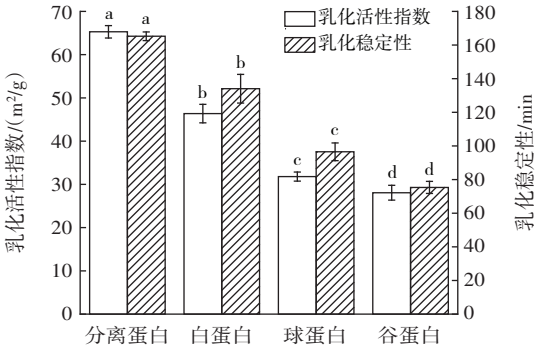
图 5 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的溶解度

Fig.5 Solubility of chickpea protein isolate and its components

由图 5 可知，4 种蛋白溶解度变化趋势相似，均呈 U 型，差别相对较小。CPI、CAP 和 CGTP 的溶解度最低点均介于 pH3~5，对应其等电点，也佐证了提取蛋白时调节的 pH 值较为合理。在 pH4~5 时，由于 CPI 和 CAP 的溶解度较小，它们在低 pH 值下具有较高的稳定性，因此在一些特定的低 pH 值应用中（如酸奶、酸性饮料等），这两种蛋白质可以作为增稠剂或稳定剂使用，从而保持产品质地和口感的稳定。CPI 和 CAP 在中性条件下的溶解度均有 20%以上，表明它们在中性 pH 值下具有较好的溶解性，可以用于制作各种中性 pH 值食品（如牛奶、豆浆等）。此外，它们还可以作为乳化剂或起泡剂使用，提高食品的品质和稳定性。在 pH 值为 8 以上时，CPI 的溶解度稳步上升，说明其在高 pH 值下具有较好的溶解性，可以用于一些需要高 pH 值的食品加工中，如某些发酵食品、豆制品等。而 CAP 在 pH 值为 8 以上时溶解度上升速度变缓，这可能限制了它在高 pH 值应用中的使用，但在一些特定的高 pH 值食品中，如某些碱性面食等，CAP 仍然可以作为功能成分使用，可以看出它们在食品工业中具有较为广阔的应用前景[20]。

2.6 乳化活性指数及乳化稳定性

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的乳化性能指标见图 6。



不同小写字母表示蛋白样品间差异显著（$P<0.05$）。

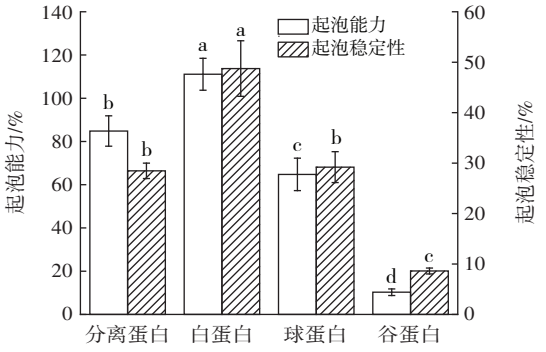
图 6 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的乳化活性指数和乳化稳定性

Fig.6 Emulsion activity indices and emulsion stability of chickpea protein isolate and its components

由图 6 可知，CPI、CAP、CGP 和 CGTP 的乳化活性指数分别为 65.28、46.37、31.81、28.07 m^2/g。从数据上看，CPI 和 CAP 的乳化活性指数高于大豆蛋白（44.20 m^2/g）和豌豆蛋白（42.87 m^2/g）[21]。根据赵燕等[22]的研究可知，乳化性能与表面疏水性和蛋白溶解度均呈正相关。因此，CPI 和 CAP 的乳化活性指数较高可能与它们较高的溶解度有关。CPI、CAP、CGP 和 CGTP 的乳化稳定性分别为 165.23、134.02、96.52、75.33 min。CGP 与 CGTP 的乳化稳定性与大豆分离蛋白（85.97 min）和小豆分离蛋白（86.79 min）[21]的乳化稳定性相似。CPI 的乳化稳定性最高可能是由于其表面疏水性和蛋白溶解性的平衡所致，与 Yu 等[23]的研究结果相似。

2.7 起泡能力及起泡稳定性

鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的起泡能力和起泡稳定性见图 7。



不同小写字母表示蛋白样品间差异显著（$P<0.05$）。

图 7 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的起泡能力和起泡稳定性

Fig.7 Foaming capacity (FC) and foaming stability (FS) of chickpea protein isolate and its components

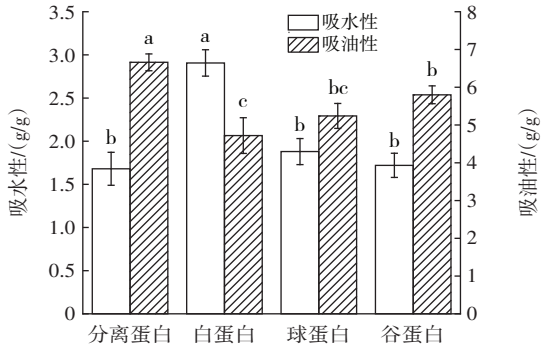
由图 7 可知，CPI、CAP、CGP 和 CGTP 的起泡能力分别为 85%、111%、65% 和 10%。CPI、CAP 比 CGP、CGTP 具有更高的起泡性能，这一结果可能是由于其具有较高的溶解度，与 Ahmad Nadzri 等[24]的研究结果类似。CPI、CAP、CGP 和 CGTP 的起泡稳定性分别为 28%、49%、29% 和 9%。CAP 的起泡能力和起泡稳定性最高，其次是 CPI 和 CGP，CGTP 最低。因此，CAP、CPI、CGP 的起泡能力和起泡稳定性更适合食品加工处理。

2.8 吸水性及吸油性

蛋白质的吸水性与其分子结构、氨基酸组成、表面电荷等因素密切相关。含有较多亲水性氨基酸残基（如丝氨酸、苏氨酸、天冬氨酸和谷氨酸等）的蛋白通常具有较高的吸水性。蛋白质的吸油性与其分子结构和组成密切相关。疏水性氨基酸残基的含量和分布对吸油性有重要影响[25]。鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的吸水性和吸油性见图 8。

由图 8 可知，CPI、CAP、CGP 和 CGTP 的吸水性分别为 1.66、2.84、1.84 g/g 和 1.68 g/g，CAP 的吸水性显著高于其他 3 种蛋白，同时 CAP 的表面疏水性较强，可能是其内部的疏水基团被暴露，导致表面疏水性增加，但同时蛋白质可能通过与水分子形成新的氢键或其他相互作用来调节吸水性。而 CPI、CGP 和 CGTP 吸水性相对较低，可能是由于它们的亲水性基团较少，或者分子结构较为紧密，限制了水分子的进入。

在 4 种鹰嘴豆蛋白中，CPI 的吸油性最高，为 6.66 g/g，显著高于 CAP（4.72 g/g）、CGP（5.24 g/g）以及 CGTP（5.80 g/g）。CPI 具有较强的结合油脂的能力，可



不同小写字母表示蛋白质样品间差异显著(P<0.05)。

图 8 鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的吸水性和吸油性

Fig.8 Water absorption capacity (WAC) and oil absorption capacity (OAC) of chickpea protein isolate and its components

能是由于其分子结构中含有较多的疏水性氨基酸区域,这些区域能够与油脂分子相互作用,从而增加对油脂的吸附量。而 CAP 吸油性较低,可能是由于其分子中疏水性基团相对较少,不利于油脂分子的嵌入和结合。CGP 和 CGTP 吸油性处于中间水平,说明它们的分子结构和组成在亲水性和疏水性的平衡上与 CPI 和 CAP 不同。

3 结论

本试验通过碱溶酸沉法和 Osborne 分级分离法提取鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白,并对其理化及功能特性进行研究。结果表明:通过 SDS-PAGE 分析发现,鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白在还原与非还原条件下展现出不同的分子量分布与亚基组成。还原条件下,蛋白分子量分布较为分散;非还原条件下,鹰嘴豆分离蛋白条带集中在 30~70 kDa 区间。红外光谱分析显示,鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白在特征峰上有一定差异,在酰胺Ⅰ带、Ⅱ带、Ⅲ带等的吸收峰均有变化。表面疏水性分析发现,鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的表面疏水性存在显著区别,其中白蛋白表面疏水性最高。在溶解度方面,鹰嘴豆分离蛋白及其组分蛋白的溶解度均随 pH 值变化呈先下降后上升趋势。CPI 和 CAP 的乳化活性指数较高,且 CPI 的乳化稳定性最强。CAP 展现出最高的起泡能力和起泡稳定性。CAP 具有最强的吸水性,而 CPI 的吸油性最高。综上,通过对鹰嘴豆分离蛋白、白蛋白、球蛋白和谷蛋白的理化及功能特性的研究,可以看出不同蛋白在功能特性上各有优势,可根据不同的实际需求,针对性地应用蛋白,从而提高商品应用价值。

参考文献:

[1] PATIL N D, BAINS A, SRIDHAR K, et al. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (*Cicer arietinum*) protein: An up-to-date review[J]. Foods, 2024, 13(9): 1398.

[2] MENG Y, WEI Z H, XUE C H. Deciphering the interaction mechanism and binding mode between chickpea protein isolate and flavonoids based on experimental studies and molecular simulation[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136848.

[3] ALROSAN M, TAN T C, EASA A M, et al. Molecular forces governing protein-protein interaction: Structure-function relationship of complexes protein in the food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(15): 4036-4052.

[4] AHMAD SOFI S, SINGH J, MUZAFFAR K, et al. Physicochemical characteristics of protein isolates from native and germinated chickpea cultivars and their noodle quality[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2020, 22: 100258.

[5] JU Z Y, HETTIARACHCHY N S, RATH N. Extraction, denaturation and hydrophobic properties of rice flour proteins[J]. Journal of Food Science, 2001, 66(2): 229-232.

[6] HUGHES M J, LIANG H, JOST J P. Molecular weight determination of DNA-binding proteins by UV cross-linking combined with SDS polyacrylamide gel electrophoresis[M]//A laboratory guide to *in vitro* studies of protein-DNA interactions. Basel: Birkhäuser Basel, 1991: 79-91.

[7] 江睿钊, 赵源, 石林凡, 等. 发酵谷朊粉对大豆分离蛋白膜理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 93-99.
JIANG Ruizhao, ZHAO Yuan, SHI Linfan, et al. Effect of fermented wheat gluten on the physicochemical properties of soy protein isolate films[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 93-99.

[8] KATO A, NAKAI S. Hydrophobicity determined by a fluorescence probe method and its correlation with surface properties of proteins[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure, 1980, 624(1): 13-20.

[9] BEVERIDGE T, TOMA S J, NAKAI S. Determination of SH- and SS-groups in some food proteins using Ellman's reagent[J]. Journal of Food Science, 1974, 39(1): 49-51.

[10] CEPEDA E, VILLARÁN M C, ARANGUIZ N. Functional properties of faba bean (*Vicia faba*) protein flour dried by spray drying and freeze drying[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 36(3): 303-310.

[11] 贾尚羲, 张怡雪, 石盼盼, 等. 不同时长超声波处理对鹰嘴豆分离蛋白乳化液稳定性的影响[J]. 轻工学报, 2024, 39(5): 40-49.
JIA Shangxi, ZHANG Yixue, SHI Panpan, et al. Effect of ultrasound treatment of different durations on the stability of chickpea protein isolate emulsions[J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(5): 40-49.

[12] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 68-75.
LI Gongzhong, ZHAO Ying, WANG Juntong, et al. Effect of ultrasonic treatment on protein structure and physicochemical and foaming properties of liquid egg white[J]. Food Science, 2019, 40(9): 68-75.

[13] 石杰, 宋淑敏, 魏连会, 等. 汉麻籽蛋白的分级提取及产物功能特性的研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 132-136.
SHI Jie, SONG Shumin, WEI Lianhui, et al. Study on fractionation of hemp seed protein and functional properties of the product[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(11): 132-136.

[14] NISHINARI K, FANG Y, GUO S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 301-318.

[15] 王雪艳, 李开鑫, 李家豪, 等. 不同高静压的压力处理对豌豆 7S、11S 球蛋白形成凝胶的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 153-160.
WANG Xueyan, LI Kaixin, LI Jiahao, et al. Effects of different high

hydrostatic pressure treatments on gel formation of pea 7S and 11S globulins[J]. Food Science, 2024, 45(8): 153-160.

[16] 张涛, 江波, 王璋 . 鹰嘴豆分离蛋白质的特性[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(3): 66-71.
ZHANG Tao, JIANG Bo, WANG Zhang. Characteristics of chickpea protein isolates[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2005, 24(3): 66-71.

[17] MIKHONIN A V, AHMED Z, IANOUL A, et al. Assignments and conformational dependencies of the amide Ⅲ peptide backbone UV resonance Raman bands[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2004, 108(49): 19020-19028.

[18] YE J M, SHI N H, ROZI P, et al. A comparative study of the structural and functional properties of chickpea albumin and globulin protein fractions[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(10): 3253-3266.

[19] 付洪玲, 范宏亮, 吕博, 等 . 亚基水平上大豆蛋白凝胶性的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 382-389.
FU Hongling, FAN Hongliang, LYU Bo, et al. Research progress of soybean protein gels at subunit level[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 382-389.

[20] 卢家维, 李甜甜, 吴淼, 等 . 琥珀酰化改性对鹰嘴豆分离蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(17): 169-177.
LU Jiawei, LI Tiantian, WU Miao, et al. Effect of succinylation modification on structure and functional properties of chickpea protein isolate[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(17): 169-177.

[21] HU X Z, CHENG Y Q, FAN J F, et al. Effects of drying method on physicochemical and functional properties of soy protein isolates[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2010, 34(3): 520-540.

[22] 赵燕, 余慧琳, 邱阳, 等 . 3 种微藻中提取蛋白质的乳化特性[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 40-52.
ZHAO Yan, YU Huilin, QIU Yang, et al. Emulsifying properties of proteins extracted from three microalgal species[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 40-52.

[23] YU M, ZENG M M, QIN F, et al. Physicochemical and functional properties of protein extracts from *Torreya grandis* seeds[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 453-460.

[24] AHMAD NADZRI F N, TAWALBEH D, SARBON N M. Physicochemical properties and antioxidant activity of enzymatic hydrolysed chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein as influence by alcalase and papain enzyme[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2021, 36: 102131.

[25] DESANTIS F, MIOTTO M, DI RIENZO L, et al. Spatial organization of hydrophobic and charged residues affects protein thermal stability and binding affinity[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 12087.

责任编辑：冯娜
收稿日期：2025-04-24