

# 绿豆蛋白的结构、提取及其在食品中的应用

谢冕<sup>1,2</sup>, 张名位<sup>2,3</sup>, 邓媛元<sup>2</sup>, 唐小俊<sup>2</sup>, 刘光<sup>2</sup>, 周鹏飞<sup>2</sup>, 赵志浩<sup>2</sup>, 曾嘉锐<sup>2</sup>, 王佳佳<sup>2</sup>, 钟立煌<sup>2</sup>, 廖娜<sup>2</sup>, 李萍<sup>2\*</sup>  
(1.长江大学生命科学学院, 湖北荆州 434000) (2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510640) (3.中原食品实验室, 河南漯河 462300)

**摘要:** 绿豆作为我国传统的豆类资源之一, 是一年生的可食用农作物。绿豆中蛋白质含量约为 14.6%~32.6%, 其氨基酸组成种类齐全, 必需氨基酸含量较高, 同时因低致敏性和具有调节糖脂代谢异常、抗肥胖、增强矿物质利用度等健康功效, 使其成为优质的植物蛋白来源之一。绿豆蛋白因部分功能特性接近大豆蛋白, 使其在植物性产品的应用方面愈加广泛。为了厘清绿豆蛋白结构与功能特性变化的关联性, 以及不同提取方法对绿豆蛋白结构及功能特性的影响, 该文综述了近年来绿豆蛋白的结构组成、功能特性的研究进展及不同提取方法下绿豆蛋白结构及组成的变化, 同时介绍了绿豆蛋白在植物基产品、肉制品和营养补充剂等食品领域的应用现状, 旨在为绿豆蛋白的提取和未来应用方向的研究提供参考。

**关键词:** 绿豆蛋白; 结构; 功能特性; 提取方法; 食品应用

文章编号: 1673-9078(2025)04-97-108

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.4.1029

## Structure, Extraction Methods, and Application of Mung Bean Protein

XIE Mian<sup>1,2</sup>, ZHANG Mingwei<sup>2,3</sup>, DENG Yuanyuan<sup>2</sup>, TANG Xiaojun<sup>2</sup>, LIU Guang<sup>2</sup>, ZHOU Pengfei<sup>2</sup>,  
ZHAO Zhihao<sup>2</sup>, ZENG Jiarui<sup>2</sup>, WANG Jiajia<sup>2</sup>, ZHONG Lihuang<sup>2</sup>, LIAO Na<sup>2</sup>, LI Ping<sup>2\*</sup>

(1.College of Life Sciences Yangtze University, Jingzhou 434000, China)

(2.Sericultural&Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510640, China)

(3.Zhongyuan Food Laboratory, Luohe 462300, China)

**Abstract:** Mung bean, as one of the traditional legume resources in China, is an annual edible crop. The protein content in mung beans ranges from approximately 14.6% to 32.6%, with a complete array of amino acids and a high content of essential amino acids. Additionally, due to its low allergenicity and health benefits, such as the regulation of abnormal sugar and lipid metabolism, anti-obesity effects, and enhanced mineral utilization, it stands out as one of the superior sources of plant protein. The functional characteristics of mung bean protein, which are similar in some aspects to those of soy protein, have broadened its application in plant-based products. To elucidate the correlations between the structure and functional properties of mung bean protein and the impact of different extraction methods on its structure and functional characteristics, this article reviewed recent research progress on its structural composition and functional properties, the changes in its

引文格式:

谢冕,张名位,邓媛元,等.绿豆蛋白的结构、提取及其在食品中的应用[J].现代食品科技,2025,41(4):97-108.

XIE Mian, ZHANG Mingwei, DENG Yuanyuan, et al. Structure, extraction methods, and application of mung bean protein [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 97-108.

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 广东省特支计划项目(2019BT02N112); 科技创新战略专项资金项目(高水平农科院建设)(R2020PY-JX009; R2021PY-QF007; R2019YJ-YB1001; R2021YJ-YB2001)

作者简介: 谢冕(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xm24772024@163.com

通讯作者: 李萍(1990-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: liping2019@gdaas.cn

structure and composition under various extraction methods, and the current state of its application in the food industry, including plant-based products, meat products, and nutritional supplements. The aim of this study is to provide a reference for the extraction and future research directions of mung bean protein applications.

**Key words:** mung bean protein; structure; functional properties; extraction method; food application

蛋白质是细胞、组织、器官和系统发挥重要功能所必需的主要营养物质之一，所以日常中摄入足量的动植物性蛋白质具有诸多益处<sup>[1]</sup>。在全球人口激增和气候巨变的大背景下，设法扩充蛋白质来源，满足人类营养需求十分关键。植物蛋白因其绿色、环保和可持续性的特点，逐渐受到研究者的青睐，其中，豆类蛋白质因其低成本、高营养价值和高生物利用度，备受关注<sup>[2-4]</sup>。

绿豆作为一年生的可食用豆类作物之一，因其生长周期短、平均产量高、且具有耐旱和固氮等特点，在我国广泛种植，年总产量接近 100 万 t，居世界第一<sup>[5]</sup>，同时在亚洲地区有超 90% 以上的国家种植，产量占全球产量 50% 以上，并且其全球种植面积达总豆科种植面积的 8.5%，总产量超 720 万 t<sup>[6,7]</sup>。绿豆中含有丰富的营养素，主要包括淀粉（40.6%~48.9%）、蛋白质（14.6%~32.6%）、膳食纤维（3.5%~6.5%）、脂肪（1%~1.5%）等<sup>[8,9]</sup>，此外，绿豆含有一定量的功能活性组分如牡荆素和异牡荆素等，具有保护心血管和调节血糖等健康效应<sup>[10]</sup>，同时因其营养组成丰富且具有健康效应，近年来有诸如绿豆奶<sup>[11]</sup>、植物鸡蛋<sup>[12]</sup>等新型绿豆产品出现。研究表明，绿豆蛋白具有调节糖脂代谢异常、改善肥胖症、增强矿物质利用度等健康效应<sup>[13-15]</sup>。其中，相较于大豆和豌豆蛋白，绿豆的总必需氨基酸评分高于豌豆蛋白，但低于大豆分离蛋白<sup>[10,16]</sup>，这不仅引起广大研究者的关注，同时受到更多素食和纯素食饮食者的青睐<sup>[10]</sup>。在功能特性方面，相较于其他豆类蛋白，绿豆蛋白具有与大豆蛋白相近的溶解度和持油性<sup>[17,18]</sup>，发泡特性优于鹰嘴豆和羽扇豆蛋白，但弱于大豆蛋白<sup>[17]</sup>，乳化特性上弱于大豆蛋白<sup>[19]</sup>。因在功能特性上与其他豆类蛋白有所差异，使得绿豆蛋白在食品体系中的应用存在局限性<sup>[14,20,21]</sup>。

因此，了解有关绿豆蛋白的结构与功能特性相关性的研究信息，有利于绿豆蛋白的深入研究与应用。故本文综述了近年来绿豆蛋白的结构组成、提取方法对结构及功能特性的影响，并综合阐述了绿豆蛋白的应用进展，以期为绿豆蛋白的高效开发与应用提供一定的理论指导。

## 1 绿豆蛋白的组成与结构

### 1.1 绿豆蛋白的组成

Osborne 最早依据蛋白质溶解性的差异进行蛋白质分类<sup>[22]</sup>。根据 Osborne 分类法发现绿豆蛋白的组成（如图 1）与大豆蛋白存在显著差异。绿豆蛋白中球蛋白和清蛋白分别占比 60%~70% 和 15%~20%，谷蛋白约占 13.3%，醇溶蛋白含量最低，约占 0.95%<sup>[22]</sup>，而大豆蛋白主要由球蛋白组成，占比 70%~80%，清蛋白约占 8%，剩余则为谷蛋白和醇溶蛋白<sup>[23,24]</sup>。绿豆蛋白的球蛋白主要由 8S 和 11S 球蛋白组成，分子量分别为 200 和 360 kDa<sup>[25]</sup>，其中 8S 球蛋白是由三个亚基蛋白形成的三聚集体蛋白<sup>[26]</sup>，11S 球蛋白是由是由六个亚基形成的六聚体蛋白质，每个亚基是由分子量为 40 和 24 kDa 的酸性和碱性多肽通过二硫键连接形成<sup>[27]</sup>。而大豆蛋白的主要球蛋白组成为 7S 和 11S 球蛋白，分子量介于 180~210 kDa 和 320~375 kDa<sup>[28]</sup>。绿豆蛋白的清蛋白主要由分子量较小的 2S 清蛋白组成<sup>[29]</sup>，因其能在气泡周围形成强大的粘聚界面层，因此赋予绿豆蛋白较好的发泡性能<sup>[30]</sup>。谷蛋白只溶于稀酸或碱性溶液中，可用作还原剂，但目前尚未发现关于绿豆中谷蛋白的进一步研究<sup>[31]</sup>。

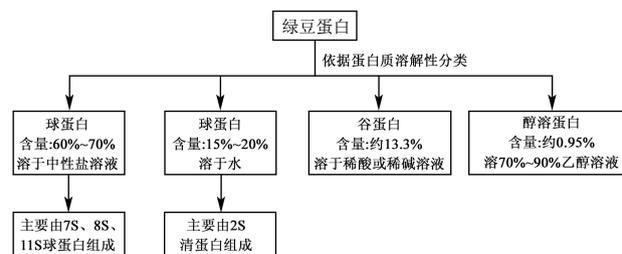


图 1 绿豆蛋白的亚基组成

Fig.1 Subunit composition of mung bean protein

### 1.2 绿豆蛋白的结构

蛋白质的结构，依据组成上的不同，可分为一级、二级、三级和四级等结构层次（如图 2 所示）<sup>[32]</sup>。其中蛋白质的一级结构是指由氨基酸残基组成的线性序列<sup>[33]</sup>，其不仅决定蛋白质的营养价值，同时影

响蛋白质的溶解性、乳化特性等功能特性<sup>[34]</sup>。绿豆蛋白由 20 种氨基酸组成，包括 8 种必需氨基酸和 12 种非必需氨基酸，其中谷氨酸和谷氨酰胺的含量最高，其次是天冬氨酸和天冬酰胺，色氨酸及含硫氨基酸含量较低，是绿豆蛋白中的限制性氨基酸<sup>[32]</sup>。此外，蛋白质中疏水 / 亲水性氨基酸的含量在一定程度上会影响蛋白质的溶解性、表面活性、乳化特性等<sup>[35]</sup>。Kudre 等<sup>[36]</sup>分析绿豆蛋白质氨基酸组成发现，相较于班巴拉花生蛋白和黑豆蛋白，绿豆蛋白的溶解性较低，可能归因于其亲水性氨基酸所占比例低所致。Liu 等<sup>[34]</sup>发现绿豆蛋白的酸性氨基酸含量远高于碱性氨基酸，使其具有不错的乳化和发泡特性。

蛋白质的二级结构是指氨基酸残基序列结合形成多肽链，多肽链通过折叠和盘绕形成的三维局部片段，其中  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -卷曲和无规则卷曲是主要的蛋白质二级结构形式<sup>[33]</sup>，可借助傅里叶变换红外光谱<sup>[37]</sup>(Fourier-Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR) 和圆二色光谱<sup>[4]</sup>(Circular Dichroism Spectrum, CD) 进行分析。傅里叶变换红外光谱可通过分析酰胺 I 和 III 键主要特征结构的变化(如表 1 所示)，辅助表征绿豆蛋白主要二级结构的改变。虽然蛋白中主要二级结构可依据特定波段的震动帮助表征结构的变化，但淀粉等其他物质在特定波段内也会存在重复震动，从而对红外分析结果造成干扰<sup>[38]</sup>。因此常常对红外分析结果进行解卷积计算，通过比较特征结构含量的变化来进一步分析二级结构的变化<sup>[39]</sup>。Brishti 等<sup>[37]</sup>通过红外解卷积对比分析不同水分含量挤压处理的绿豆蛋白后发现，天然绿豆蛋白二级结构中  $\alpha$ -螺旋含量低， $\beta$ -卷曲含量高，而挤压处理后绿豆蛋白的  $\beta$ -卷曲和无规则卷曲含量显著降低， $\beta$ -折叠含量升高，表明蛋白质分子之间的化学键断裂，使其天然结构有所舒展，形成致密的蛋白聚集物。圆二色光谱是依据蛋白质分子吸收不同程度的偏振光时，氢键构象在特定波长内发生变化，根据特定波段内峰值变化来表征二级结构<sup>[40]</sup>。对天然绿豆蛋白进行圆二色光谱分析后发现，其二级结构中  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -卷曲和无规则卷曲的含量分别为 19.7%、26.7%、21.3% 和 32.3%<sup>[37,41]</sup>。Brishti 等<sup>[37]</sup>对挤压处理后绿豆蛋白进行圆二色光谱分析后发现，194 nm 处的峰值出现椭圆度降低，207~224 nm 范围内的双峰发生偏移，可能是在挤压处理过程中，绿豆蛋白的芳香族氨基酸残基发生解离，蛋白质分子之间的相互作用减弱，使得绿豆蛋白二级结构发生变化。

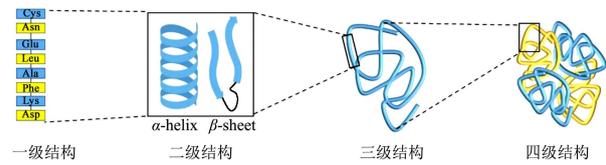


图 2 绿豆蛋白的结构组成

Fig.2 Structural composition of mung bean protein

表 1 绿豆蛋白二级结构主要特征基团傅里叶变换红外光谱波段及分布

Table 1 Fourier transform infrared spectroscopy band and distribution of the main characteristic groups of the secondary structure of mung bean protein

波段/cm <sup>-1</sup>	主要二级结构	参考文献
1 200~1 400	酰胺 III 键，代表蛋白质的二级结构 (N-H 弯曲和 C-N 伸缩震动)	[14,36,42]
1 220~1 245	$\beta$ -卷曲	[42]
1 245~1 270	无规则卷曲	[14,42]
1 270~1 290	$\beta$ -折叠	[42]
1 290~1 340	$\alpha$ -螺旋	[14,42]
1 600~1 700	酰胺 I 键，代表蛋白质的二级结构 (C=O 和 N=H 伸缩震动)	[36,42-44]
1 600~1 640	$\beta$ -卷曲	[42-44]
1 640~1 650	无规则卷曲	[42-44]
1 650~1 660	$\alpha$ -螺旋	[14,42-44]
1 660~1 700	$\beta$ -折叠	[42-44]

蛋白质的三级结构又称三维结构，是由二级结构依靠氨基酸侧链之间的氢键、二硫键等化学键的作用，进一步盘绕、折叠而形成的结构<sup>[33]</sup>。荧光光谱法主要利用色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸残基的内源荧光基团在接受特定波段的激发光后，会在特定波段内出现荧光强度的变化，以此来分析蛋白质的三级结构。Brishti 等<sup>[37]</sup>通过荧光光谱分析天然绿豆蛋白后发现，当在 295 nm 处发射激发光后，其最强荧光强度在 393 nm 出现。加工处理会影响绿豆蛋白的三级结构。Wang 等<sup>[12]</sup>对绿豆蛋白进行钙离子结合 pH 值偏移处理后，发现绿豆蛋白在 393 nm 处的荧光强度明显降低，可能是绿豆蛋白的疏水侧链在极性环境和钙离子存在下，由于静电盐桥效应形成更大的聚集物所致。同样分析蛋白质的巯基基团和二硫键含量的变化，也是评价蛋白结构和功能特性变化的重要指标。蛋白质中的巯基基团可通过氧化为二硫键或与二硫键发生交换反应，改变蛋白质表面的疏水性能，从而改变蛋白质的三级结构及功能特性<sup>[45]</sup>。Tang 等<sup>[46]</sup>曾研究发现，加热处理后的天然绿豆蛋白的总巯基以及游离巯基基团含量均有所降低，巯基基团被氧化形成

新的二硫键,同时蛋白质通过共价交联键形成新的可溶性聚集体,从而改善其溶解性。Liu等<sup>[34]</sup>发现在不同pH值环境下,绿豆蛋白的游离巯基含量有所变化,可能归因于不同pH值下蛋白质的氢键、二硫键等化学键发生断裂,导致蛋白结构有所舒展,巯基团更易暴露,赋予绿豆蛋白更优的溶解性和凝胶特性。

## 2 绿豆蛋白的功能特性

绿豆蛋白结构上的变化会影响其功能特性(如表2所示),从而影响绿豆蛋白的应用。因此,分析绿豆蛋白结构与功能特性变化的相关性,有助于挖掘绿豆蛋白的潜在应用。

### 2.1 溶解性

溶解性是蛋白质在各种体系中发挥功能特性的首要前提,也是影响乳化性、起泡性和凝胶特性等功能特性的关键<sup>[51]</sup>。蛋白质通过在液体体系中的亲/疏水相互作用影响其水合效应和溶解性<sup>[18]</sup>。研究表明,体系中的pH值、离子强度、蛋白质组成结

构等因素均会影响蛋白质的溶解性<sup>[52]</sup>。当pH值高或低于等电点时,蛋白质分子的表面电荷密度增加,亲水和水合排斥力远大于疏水相互作用,溶解性升高<sup>[14,47]</sup>。如在pH值2~10,绿豆蛋白的溶解性呈“U”型分布(溶解度在73.5%~98.3%),因pH值4~5是绿豆蛋白的等电点区间范围<sup>[34]</sup>,此时绿豆蛋白的溶解性最低(5.9%)。Ge等<sup>[18]</sup>研究发现在不同pH值下大豆分离蛋白溶解性的变化规律与绿豆蛋白相似,但在pH值5与pH值9时的溶解性(16.2%、98.6%)均高于绿豆蛋白(14.6%、89.3%),可能归因于大豆分离蛋白比绿豆蛋白具有更高的表面电荷数。Kudre等<sup>[36]</sup>曾通过调整溶液中盐溶液浓度后发现,绿豆蛋白溶解性因体系中盐溶液浓度的增加发生差异性的变化,可能归因于在一定浓度的盐溶液中减弱了绿豆蛋白分子之间的静电排斥,从而提高溶解性(19.0%升至52.7%),而高浓度的盐溶液却可能降低蛋白质的水化程度,增强疏水相互作用,形成不溶性蛋白聚合物,降低溶解性(52.7%降至41.8%)。

表2 绿豆蛋白的功能特性与结构基础

Table 2 Functional properties and structural basis of mung bean protein

性质	功能特性	结构基础	参考文献
溶解性	pH值2~10,溶解性“U”型分布; pH值4~5(等电点),溶解性最低	pH值远离等电点,表面电荷密度增加,溶解性↑; pH值接近等电点,表面电荷密度最低,溶解性↓	[14,34,47]
	不同pH值下,溶解性低于大豆蛋白	绿豆蛋白表面电荷数低于大豆蛋白	[18]
乳化特性	0.45 mol/L盐溶液,溶解性↑; 盐溶液浓度高于0.45 mol/L,溶解性↓	适当浓度盐溶液减弱蛋白分子排斥,溶解性↑; 较高浓度盐溶液增强疏水作用,溶解性↓	[36]
	pH值10,乳化特性最佳; pH值4~5,乳化特性最弱	pH值10,暴露更多负电荷;pH值4~5, 电荷数减少,易聚集	[34]
	不同pH值下乳化能力均接近大豆蛋白, 乳化稳定性均弱于大豆蛋白	不同pH值下溶解度、表面电荷数以及 表面疏水性均低于大豆蛋白	[18]
发泡特性	3% NaCl溶液乳化特性优于纯水溶液	3% NaCl溶液提升溶解性,降低液滴相互作用力	[19]
	pH值10为最佳,当pH值降低, 发泡特性↓	pH值10,相互排斥作用减弱,界面的吸附和舒展程度↑; pH值改变,表面疏水性和聚集性↑	[34]
	纯水溶液中发泡能力优于大豆蛋白, 发泡稳定性弱于大豆蛋白	空气-水界面上的吸附和展开程度低于大豆蛋白	[19]
持水/油性	盐析法提取蛋白的发泡特性优于碱溶酸沉法	盐析法蛋白变性程度和结构舒展程度低于碱溶酸沉法	[48]
	持水性优于大豆蛋白,持油性弱于大豆蛋白	绿豆蛋白的极性基团数高于大豆分离蛋白	[19]
	磷酸化改性处理提升持水/油性	暴露绿豆蛋白的内部疏水基团,持油性↑;增加蛋白极性基团含量,增强蛋白与水相互作用,持水性↑	[49]
凝胶特性	冷冻干燥下持油性优于喷雾和烘箱干燥	蛋白表面形成多孔结构,截留脂肪能力↑	[43]
	最小凝胶质量浓度(12%) 略优于大豆蛋白(14%)	加热时,绿豆蛋白的氢键、二硫键等更易断裂, 同时结构舒展程度高于大豆蛋白	[19]
	pH值3,最小凝胶质量浓度最低(8%)	pH值3,绿豆蛋白的7S、11S球蛋白溶解性较高, 表面疏水性最高,同时酸水解产生纤维聚合物	[50]
	钙离子结合pH值偏移提高绿豆蛋白凝胶硬度	钙离子的静电屏蔽和离子桥接效应增加蛋白质聚集的程度和强度,凝胶硬度↑	[12]

## 2.2 乳化特性

蛋白质的乳化特性一般是指其形成和稳定乳液的能力,显著影响其在面团、冰淇淋、蛋糕和蛋黄酱等食品体系的应用。乳化特性通常包括乳化能力和乳化稳定性,乳化能力表示蛋白质形成乳液的能力,而乳化稳定性是在规定的时间内维持乳液稳定的能力<sup>[14]</sup>。蛋白质所处体系中的pH值、离子浓度等因素,会通过改变蛋白质表面电荷、疏水氨基酸残基和蛋白质组成结构,导致蛋白质发生解聚,从而增强其在油水界面活性和吸附能力,以此来影响蛋白质的乳化特性<sup>[46]</sup>。Liu等<sup>[34]</sup>分析不同pH值下绿豆蛋白的乳化特性时发现,当pH值为10时,绿豆蛋白具有最佳的乳化能力(117.05 m<sup>2</sup>/g)和较优的乳化稳定性(20.86 min),随着pH值的降低,绿豆蛋白的乳化能力(117.05~73.48 m<sup>2</sup>/g)和乳化稳定性(20.86~39.6 min)先降低后上升,可能归因于在碱性环境下绿豆蛋白会暴露出较多的负电荷,负电荷利于绿豆蛋白在油水界面形成更稳定的乳状液,而在等电点附近绿豆蛋白发生聚集,减弱其在油水层的界面吸附,使其乳化能力(50.02 m<sup>2</sup>/g)和乳化稳定性(2.31 min)下降。Ge等<sup>[18]</sup>研究发现在pH值3、7、9时,绿豆蛋白的乳化能力(8.7、9.1、9.59 m<sup>2</sup>/g)接近大豆分离蛋白(8.83、9.23、10.1 m<sup>2</sup>/g),但乳化稳定性(0.86、1.89、2.01 min)均弱于大豆蛋白(2.86、3.01、6.47 min),可能是绿豆蛋白在不同pH值环境中的溶解度、表面电荷数以及表面疏水性均弱于大豆蛋白所致。Brishti等<sup>[19]</sup>对比分析3% NaCl溶液和纯水中绿豆蛋白乳化特性后发现,在3% NaCl溶液中绿豆蛋白的乳化能力(72.03%)和乳化稳定性(66.50%)均优于纯水(63.18%、62.75%),可能归因于NaCl会提升蛋白质的溶解性,进而提升其蛋白质的利用率,同时3% NaCl溶液会降低相邻液滴的哥伦布相互作用力,从而使绿豆蛋白具有更优的乳化特性。

## 2.3 发泡特性

蛋白质的发泡特性包括发泡能力和发泡稳定性,发泡能力是搅打后泡沫体积增加的指标,发泡稳定性是蛋白质维持泡沫稳定的能力,两者的优劣共同决定着蛋白质在冰淇淋、烘焙食品、蛋糕等蛋白制品中的应用特性<sup>[43]</sup>。研究发现,绿豆蛋白所处环境pH值以及提取方法等因素都会通过诱导绿豆蛋白结构发生变性,从而影响蛋白质在空气-水界面的吸附和舒展程度,改善其发泡特

性<sup>[18]</sup>。Liu等<sup>[34]</sup>分析不同pH值下绿豆蛋白的发泡特性后发现,当pH值为10时其发泡能力最佳(125%)、发泡稳定性最弱(58%),而随着pH值降低,发泡能力(125%~45%)先下降后上升,但发泡稳定性(58%~92.7%)先上升后下降,可能是碱性环境下,绿豆蛋白在空气-水界面的吸附和舒展程度增强,同时蛋白质分子之间的相互排斥作用减弱,而pH值降低后,绿豆蛋白的表面疏水性和聚集性升高,不利于在空气-水界面形成泡沫。Brishti等<sup>[19]</sup>研究发现,在纯水溶液中绿豆蛋白的发泡能力(89.66%)优于大豆分离蛋白(68.66%),但发泡稳定性(50.40 min)弱于大豆分离蛋白(53.66 min),可能归因于两种蛋白在空气-水界面上的吸附和展开程度不同所致。Ratnaningsih等<sup>[48]</sup>分别采用盐析法和碱溶酸沉法从绿豆副产物中提取绿豆蛋白后发现,绿豆蛋白的发泡能力(61.67%、42.50%)和发泡稳定性(37.9%、29.61%)分别存在显著性差异,可能归因于提取过程中不同化学试剂诱导下蛋白质的变性程度不同,在结构舒展程度上存在差异,从而改变了绿豆蛋白的发泡特性。

## 2.4 持水性和持油性

蛋白质的持水/油性可以显著的影响蛋白制品的质地、多汁性和保质期。具有高持水性的蛋白质可以更好维持产品的水分,较好的维系产品鲜度和口感,而具有高持油性的蛋白质则有利于改善产品的口感和延长保质期<sup>[18,50]</sup>。因绿豆蛋白在不同环境中的极性基团数、表面疏水性和结构舒展程度等存在差异,影响其对油或水的截留能力,从而导致其持水/油性发生变化<sup>[14,50]</sup>。Brishti等<sup>[19]</sup>研究发现绿豆蛋白的持水性(3.33 g)优于大豆分离蛋白(3.00 g),但持油性(3.00 g)弱于大豆分离蛋白(3.45 g),可能是因为绿豆蛋白的高磷酸盐等极性基团含量高于大豆分离蛋白。Hadidi等<sup>[49]</sup>对绿豆蛋白进行磷酸化改性处理后发现,绿豆蛋白的持水性(2.12~2.88 g)和持油性(4.19~5.11 g)显著提升,可能是磷酸化处理后暴露蛋白质内部的疏水基团,改善持油性,同时磷酸等极性基团的增加,增强蛋白质与水分子的相互作用,提高其持水性。此外,干燥方式的选择也会影响绿豆蛋白的持水/油性。Brishti等<sup>[43]</sup>分析不同干燥处理后绿豆蛋白持油性发现,冷冻干燥的绿豆蛋白持油性(8.38 g)显著高于喷雾干燥(4.00 g)和烘箱干燥(5.58 g),可能是冷冻干燥后,绿豆蛋白表面形成多孔结构,脂肪被包裹在蛋白质网络结构中,通过改善绿豆蛋白对脂肪的截留能力来提高持油性。

表 3 不同提取方法对绿豆蛋白功能特性的影响

Table 3 The impact of different extraction methods on the functional properties of mung bean protein

绿豆蛋白的提取方法	功能特性的影响	影响因素	参考文献
湿法提取	碱溶酸沉法	溶解性、发泡特性↓ 二硫键、氢键等断裂, 酸性和中性氨基酸解离	[53,54]
	盐析法	溶解性、乳化特性↑ 盐离子改变蛋白质表面电荷数以及与水分子相互作用强度	[4,55]
	酸溶酸沉法	溶解性、凝胶特性↓ 二硫键断裂以及氨基酸的交联和水解, 加剧蛋白变性	[53,56]
	水溶提取法	溶解性↓ 提取时间长, 蛋白质易发生团聚	[56,57]
干法分离	气流分级法	持水/油性、凝胶特性↑ 提取方式温和, 蛋白质天然结构变性程度低	[58]
	静电分离法	乳化特性、发泡特性↑ 提取方式温和, 蛋白质天然结构破坏程度低	[59,60]
组合提取	气流分级结合水溶提取	溶解性↑ 提取方式温和, 蛋白质变性程度低	[61]

表 4 绿豆蛋白提取方法

Table 4 Extraction methods of mung bean protein

绿豆蛋白的提取方法	提取条件	得率/%	纯度/%	参考文献
碱溶酸沉法	料液比 1:15, pH 值 9 与 pH 值 4	10	92	[62]
	料液比 1:20, 40 °C, pH 值 9 与 pH 值 4	77.32	86.94	[14]
湿法提取	料液比 1:3, 80 °C, 10 g/L MgSO <sub>4</sub>	21.09	78.61	
	料液比 1:3, 80 °C, 7.5 g/L (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	20.43	50.59	[48]
	料液比 1:3, 80 °C, 10 g/L CaCl <sub>2</sub>	20.13	47.22	
	料液比 1:10, 0.5 mol/L NaCl, pH 值 7	11.56	70.76	[57]
	料液比 1:10, 25 °C, pH 值 2	9.23	74.69	[57]
水溶提取法	料液比 1:10, 4 °C, 16 h	12.3	83.16	[57]
干法分离	研磨机频率 40 Hz, 分级机频率 60 Hz, 进料 2 kg/h	31.9	63.2	[63]
	研磨: 锤磨 8 000 r/min, 分级轮 4 000 r/min, 进料 500 g/h, 气流 52 m <sup>3</sup> /h	/	58	[58]
	分级: 分级轮 12 000 r/min, 进料 250 g/h, 气流 47 m <sup>3</sup> /h			
	静电分离法	N <sub>2</sub> 50 L/min, 电极距离 10 cm, 正极电压 20 kV, 进料 1.25 kg/h	/	67.6
组合提取	气流分级结合水溶提取 研磨: 锤磨 8 000 r/min, 分级轮 4 000 r/min, 进料 500 g/h, 气流 52 m <sup>3</sup> /h 分级: 分级轮 8 000 r/min, 进料 250 g/h, 气流 47 m <sup>3</sup> /h 水溶: 料液比 1:4, pH 值 8	3.59	80.92	[61]

## 2.5 凝胶特性

蛋白质的凝胶特性与植物肉、酸奶和奶酪等食品的品质密切相关, 主要取决于所处环境的 pH 值、外源离子以及亚基蛋白组成等因素<sup>[50]</sup>。Brishti 等<sup>[19]</sup>研究发现, 绿豆蛋白的最小凝胶质量浓度为 12%, 而大豆分离蛋白的最小凝胶质量浓度为 14%, 绿豆蛋白的最小凝胶质量浓度略优于大豆分离蛋白, 可能是在加热过程中, 绿豆蛋白的氢键、二硫键等化学键的稳定性弱于大豆蛋白, 使其蛋白结构舒展程度高于大豆蛋白, 更易于形成凝胶网络结构。Ge 等<sup>[50]</sup>分析不同 pH 值环境下绿豆蛋白的最小凝胶浓度后发现, 在 pH 值为 3 时绿豆蛋白的最小凝

胶质量浓度最低 (8%), 可能是在此 pH 值环境下, 绿豆蛋白的 7S、11S 球蛋白溶解性较高, 具有较高的表面疏水性, 同时发生酸水解, 产生纤维聚合物, 使得在加工过程中更易于形成凝胶。Wang 等<sup>[12]</sup>分析钙离子结合 pH 值偏移下绿豆蛋白凝胶的强度后发现, 绿豆蛋白形成凝胶硬度 (3.33 N) 接近稀释鸡蛋所形成的凝胶 (3.92 N), 可能是钙离子的静电屏蔽和离子桥接效应增加了蛋白质聚集的程度和强度, 从而产生更高硬度的凝胶。

## 3 提取方法对绿豆蛋白结构及功能特性的影响

不同方法提取的绿豆蛋白会显著影响绿豆蛋白的组成结构, 进而改变其溶解性、乳化特性等功能

特性(如表3所示)。目前绿豆蛋白的提取方法主要分为湿法或干法,如表4所示,湿法提取主要包括碱溶酸沉法、盐析法、酸溶酸沉法和水溶提取法,而干法提取法则主要是气流分级法和静电分离法<sup>[32]</sup>。

### 3.1 湿法提取

湿法提取因较高的蛋白质提取效率及纯度高等优势被广泛使用,但由于在提取过程中引入了一定比例的化学试剂,以及提取后需要进行一定的干燥处理,可能会破坏蛋白质原有的组成结构,改变蛋白质的表面疏水性,进而影响蛋白质部分功能特性<sup>[56,57]</sup>。

#### 3.1.1 碱溶酸沉法

碱溶酸沉法是一种利用蛋白质在碱性pH值条件下具有较高溶解度,在等电点附近溶解度最低的特点,提取分离蛋白质的方法。因其操作简便、蛋白质提取纯度高等优势,成为目前工业化提取蛋白质最常用的方法<sup>[4]</sup>。

1977年Thompson研究了碱溶酸沉法提取绿豆蛋白<sup>[62]</sup>,发现在碱性pH值环境中,蛋白质的二硫键发生断裂,同时酸性和中性氨基酸发生电离<sup>[53]</sup>,依据蛋白质在不同pH值环境中溶解度的变化,得到纯度92%(干基)的绿豆蛋白(得率10%),但由于碱性环境对蛋白质分子间的氢键、酰胺键和二硫键以及氨基酸结构均有所破坏,对蛋白质的表面疏水性、空气-水界面的吸附能力等均有所影响,导致其溶解性、发泡特性等功能特性下降<sup>[54]</sup>。Du等<sup>[14]</sup>通过响应面法优化绿豆蛋白的碱溶酸沉提取工艺,得到纯度和得率分别为86.94%、77.32%的绿豆蛋白,且具有与白蛋白相似的溶解性。此外,湿法提取后干燥方式的选择同样会对提取绿豆蛋白的纯度、结构和功能特性有所影响。研究发现,与烘箱干燥(77.27%)和喷雾干燥(75.85%)相比,冷冻干燥处理的蛋白质具有最高的蛋白纯度(86.15%)及更优的溶解性,可能归因于烘箱和喷雾干燥过程中较高的处理温度会引起绿豆蛋白不同程度的变性,从而导致蛋白质发生膨胀和团聚现象,使得蛋白质提取纯度和溶解性下降<sup>[46]</sup>。

#### 3.1.2 盐析法

盐析法是利用蛋白质在不同浓度中性盐溶液中,盐离子会改变蛋白质的表面电荷以及与水分子的相互作用来影响溶解度,从而实现蛋白质的提

取<sup>[4]</sup>。Ratnaningsih等<sup>[48]</sup>分别使用三种盐[MgSO<sub>4</sub>、(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和CaCl<sub>2</sub>]溶液从脱皮绿豆中提取蛋白质,依次获得得率和纯度分别为21.09%、20.43%、20.13%和78.61%、50.59%和47.22%的绿豆蛋白,其中MgSO<sub>4</sub>可能是由于其与水分子较高的亲和性以及破坏蛋白质水解层的破坏,使得蛋白质提取率最高。Penchalaraju等<sup>[57]</sup>通过盐溶以及调整pH值的方法,获得得率11.56%、纯度70.76%的绿豆蛋白。相对于碱溶酸沉法提取,盐析法提取较为温和,具有保持蛋白质天然结构、避免蛋白质快速变性的优点,同时能显著提高蛋白质的溶解性、乳化能力和保水能力<sup>[55]</sup>,但因外源离子的引入,使得相较于碱溶酸沉法提取的蛋白质更易于发生聚集<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.3 酸溶酸沉法

酸溶酸沉法与碱溶酸沉法的原理类似,是根据蛋白质在强酸性pH值(1~3)条件下具有较高溶解度,在等电点附近沉淀蛋白,从而提取蛋白质的方法<sup>[56]</sup>。Penchalaraju等<sup>[57]</sup>通过在酸性环境下实现蛋白的溶解和沉淀,最终得到得率9.23%、纯度74.69%的绿豆蛋白。虽然酸溶酸沉法提取蛋白质的纯度较高,操作步骤简便,但在强酸性环境下进行提取,消耗过多化学试剂,同时会导致蛋白质的二硫键断裂以及氨基酸的交联和水解,从而加剧蛋白质的变性程度,影响蛋白质溶解性和凝胶特性,且提取时间较长、易变质,从而使其在实际应用方面较少<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.4 水溶提取法

水溶提取法是指在较低温度下以水为溶剂萃取蛋白质的一种方法,其绿色、环保且条件温和,对蛋白质天然结构的破坏程度较小,但由于提取时间长,蛋白质容易团聚导致溶解性下降,同时因得率较低、费时等缺点,应用并不广泛。Penchalaraju等<sup>[57]</sup>曾通过较长时间水溶萃取并结合喷雾干燥的方式,获得得率和纯度分别为12.3%、83.16%的绿豆蛋白质。

### 3.2 干法分离

相较于湿法提取过程对蛋白质天然结构和功能特性的破坏<sup>[54]</sup>,干法分离因其耗能低、可持续且不产生污水,同时最大化维持蛋白质天然结构和功能等优点,逐渐被认为是具有良好应用前景的蛋白质提取方法,但是由于其蛋白质提取的纯度和得率相对较低、提取设备造价较高等原因,目前实现工业

化的进程较为缓慢<sup>[64]</sup>。目前干法分级较为广泛的方法主要包括气流分级法和静电分离法两种。

### 3.2.1 气流分级法

气流分级法是指将完整或去壳的物料研磨成细粉,通过细粉中蛋白质与淀粉及其他组分分组的粒度和密度的差异,引起气流分级时各分组的沉降速度差,实现蛋白质组分富集的一种分离方法<sup>[65]</sup>。近年来,气流分级已经广泛应用于谷物、豆类等植物性原料蛋白质的富集,但关于绿豆蛋白的研究较少<sup>[66]</sup>。Zhu等<sup>[63]</sup>曾联合使用气流冲击研磨和气流分级机实现了绿豆蛋白的富集,最终得到纯度63.2%的绿豆蛋白(得率31.9%)。Schlangen等<sup>[58]</sup>使用气流分级系统富集绿豆中的蛋白质(纯度58%)后,对绿豆蛋白的功能特性分析研究,结果发现干法气流分级富集的绿豆蛋白具有优良的持水能力和较好的凝胶强度,可作为一种绿色的蛋白分离提取方式。

### 3.2.2 静电分离法

静电分离法是利用蛋白质与其他组分在电荷负载上的差异,施加电荷后,依据异种电荷相斥的原理,分离蛋白质和其他组分,提高蛋白质得率的一种方法<sup>[66]</sup>。因在气流分级过程中,蛋白质和小颗粒纤维的粒径大小接近,两者无法完全分散开来,静电分离法被认为是气流分级后再次提高蛋白质得率的有效途径之一。静电分离法早已应用于塑料、垃圾回收等领域,同时对于米糠和麦麸等原料也表现出较好的应用前景,但对于实现绿豆蛋白富集的应用较少<sup>[67]</sup>。Xing等<sup>[59]</sup>通过气流分级结合静电分离法,在保持绿豆蛋白质原有结构和功能特性的同时,将蛋白质纯度由56%~58%提升至63.4%~67.6%。虽然静电分离法对蛋白质天然结构破坏程度小,使得蛋白质具有较好的乳化和发泡特性,但由于蛋白质组成结构相对较为完整,截留水或油的能力较弱,使得其持水/油性较差<sup>[59]</sup>。

### 3.3 组合提取

因传统湿法提取蛋白质时间长、耗能高以及环保性差,同时对蛋白质结构造成不同程度的破坏,干法提取则存在蛋白质得率较低等问题,因此不少研究者考虑将多种提取方法相结合,在提高蛋白质得率的同时,保持蛋白质原有的结构和特性,并减少环境污染。Yang等<sup>[61]</sup>曾采用气流分级结合水溶法提取绿豆蛋白,将气流分级后富含蛋白质的组分,借助水相分离来得到得率和纯度分别为3.59%、

80.92%的绿豆蛋白,结果发现提取的绿豆蛋白组分团聚现象降低,具有较优的溶解性,同时其粘度显著低于商业化提取的绿豆蛋白。

## 4 绿豆蛋白的应用研究进展

不同的蛋白提取方法会显著影响蛋白质的结构特性,从而影响其功能特性以及绿豆蛋白在食品中的应用。

### 4.1 植物基产品的应用

由于乳糖不耐受、肥胖等人群的高发,以及环境、伦理等问题的显现,使得越来越多的消费者倾向于选择素食饮食<sup>[68]</sup>。绿豆蛋白因其较优的凝胶和乳化特性,在植物基产品开发中的应用越来越广泛。Wang等<sup>[12]</sup>研究发现在绿豆蛋白乳液中加入钙离子,并通过调节pH值,可助绿豆蛋白乳液形成凝胶,且凝胶硬度与稀释鸡蛋凝胶硬度接近,有望作为鸡蛋的潜在替代品。Yang等<sup>[60]</sup>应用绿豆蛋白和豌豆蛋白制备植物性酸奶后发现,与豌豆蛋白基酸奶相比,绿豆蛋白基酸奶具有更高的咀嚼性、硬度、保水量,可能是由于绿豆蛋白与豌豆蛋白在亚基蛋白组成上的差异,使得绿豆蛋白具有更优的持水/油性和凝胶特性。因干法分级下绿豆蛋白的天然结构相对完整,具有较好的持水/油性和凝胶特性,可有希望作为植物酸奶等植物基产品的蛋白原料。

### 4.2 营养补充剂的应用

以谷物类为原料的面条,是亚洲人的主食之一,但在营养素组成上缺乏赖氨酸。豆类蛋白因含有丰富的赖氨酸,使得众多学者将豆类蛋白作为面条制作中的营养补充剂,显著改善面条口感的同时,提高其营养价值<sup>[69,70]</sup>。Diao等<sup>[71]</sup>发现在面粉中添加6%绿豆蛋白后,小麦蛋白与绿豆蛋白形成致密的网状结构,赋予面条最佳的吸水和烹饪特性。碱溶酸沉法提取的绿豆蛋白因其结构有所舒展,持水性有所提高,可考虑作为面条营养蛋白补充剂的原料来源。

### 4.3 肉制品中的应用

早在1996年,就有学者将绿豆蛋白加入到鱼肉香肠中,发现1%~2%的绿豆蛋白可以明显降低鱼肉蛋白热变性对香肠的影响,并显著改善鱼肉香肠的硬度和口感<sup>[72]</sup>。Kudre等<sup>[73]</sup>发现随着绿豆蛋白添加浓度的增加(0%~1.5%),沙丁鱼鱼糜凝胶中蛋白质水解明显得到抑制,并与肌原纤维形成更强的

凝胶网络, 凝胶强度进一步提高, 具有更好的口感。因干法提取的绿豆蛋白天然结构相对完整, 具有较优的凝胶特性, 是作为肉类添加剂提取方法的首选。

## 5 展望

近年来, 绿豆蛋白因其价廉易得、氨基酸组成平衡、低致敏性等优点, 受到广大学者的青睐。绿豆蛋白的亚基组成及结构、功能特性逐渐被解析, 同时绿豆蛋白的提取方法也逐渐丰富起来, 但绿色环保、耗能低、蛋白质提取率高且变性程度低的工业化绿豆蛋白提取方法, 依然有待进一步研究。与此同时, 不同种绿豆蛋白的提取方法对绿豆蛋白结构及功能特性影响的研究也有待更深层次的探索。虽绿豆蛋白在植物基产品、营养补充剂和肉制品添加剂等方面有所应用, 但对于分析并合理化应对绿豆蛋白不同提取方法的优劣, 加强提取方法与食品产业应用的衔接性, 仍有充足的探索空间。

## 参考文献

- [1] BURGER T G, ZHANG Y. Recent progress in the utilization of pea protein as an emulsifier for food applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 25-33.
- [2] ASCHEMANN-WITZEL J, GANTRIIS R F, FRAGA P, et al. Plant-based food and protein trend from a business perspective: markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(18): 3119-3128.
- [3] HOU D, FENG Q, NIU Z, et al. Promising mung bean proteins and peptides: a comprehensive review of preparation technologies, biological activities, and their potential applications [J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102972.
- [4] WEN C, LIU G, REN J, et al. Current Progress in the extraction, functional properties, interaction with polyphenols, and application of legume protein [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(4): 992-1002.
- [5] ZHAO T, MENG X, CHEN C, et al. Agronomic traits, fresh food processing characteristics and sensory quality of 26 mung Bean (*Vigna radiata* L.) cultivars (*Fabaceae*) in China [J]. Foods, 2022, 11(12): 1687.
- [6] PATACZEK L, ZAHIR Z A, AHMAD M, et al. Beans with benefits-the role of mung bean (*Vigna radiate*) in a changing environment [J]. American Journal of Plant Sciences, 2018, 9(7): 1577-1600.
- [7] NAIR R, SCHREINEMACHERS P. Global Status and Economic Importance of Mung Bean [M] The Mung Bean Genome. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [8] SHI Z, YAO Y, ZHU Y, et al. Nutritional composition and antioxidant activity of twenty mung bean cultivars in China [J]. The Crop Journal, 2016, 4(5): 398-406.
- [9] NAIR R M, YANG R, EASDOWN W J, et al. Biofortification of mung bean (*Vigna radiata*) as a whole food to enhance human health [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(8): 1805-1813.
- [10] SEHRAWAT N, YADAV M, KUMAR S, et al. Review on health promoting biological activities of mung bean: a potent functional food of medicinal importance [J]. Plant Archives, 2020, 20(2): 2969-2975.
- [11] MEKKARA NIKARTHIL SUDHAKARAN S, BUKKAN D S. A review on nutritional composition, antinutritional components and health benefits of green gram (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) [J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(6): 13743.
- [12] WANG Y, ZHAO J, ZHANG S, et al. Structural and rheological properties of mung bean protein emulsion as a liquid egg substitute: the effect of pH shifting and calcium [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107485.
- [13] HAN F, MOUGHAN P, LI J, et al. Digestible indispensable amino acid scores (DIAAS) of six cooked chinese pulses [J]. Nutrients, 2020, 12(12): 3831.
- [14] DU M, XIE J, GONG B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of mung bean protein [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 76: 131-140.
- [15] JAIN V, SHARMA S. Protein quality parameters and storage protein profiling of mung bean interspecific lines (*Vigna radiata* L. Wilczek) [J]. Genetika, 2021, 53(3): 1341-1356.
- [16] KALMAN D. Amino acid composition of an organic brown rice protein concentrate and isolate compared to soy and whey concentrates and isolates [J]. Foods, 2014, 3(3): 394-402.
- [17] LI W, SHU C, YAN S, et al. Characteristics of sixteen mung bean cultivars and their protein isolates [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(6): 1205-1211.
- [18] GE J, SUN C X, MATA A, et al. Physicochemical and pH-dependent functional properties of proteins isolated from eight traditional chinese beans [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106288.
- [19] BRISHTI FH, ZAREI M, MUHAMMAD S, et al. Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein [J]. International Food Research Journal 2017, 24(4): 1595-1605.

- [20] DENT T, MALEKY F. Pulse protein processing: the effect of processing choices and enzymatic hydrolysis on ingredient functionality [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(29): 9914-9925.
- [21] DAKHILI S, ABDOLALIZADEH L, MARZIEH HOSSEINI S, et al. Corrigendum to ‘quinoa protein: composition, structure and functional properties [J]. *Food Chemistry*, 2020, 310: 125318.
- [22] FENG Q, NIU Z, ZHANG S, et al. Mung bean protein as an emerging source of plant protein: a review on production methods, functional properties, modifications and its potential applications [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, 104(5): 2561-2573.
- [23] DERBYSHIRE E, WRIGHT D J, BOULTER D. Legumin and vicilin, storage proteins of legume seeds [J]. *Phytochemistry*, 1976, 15(1): 3-24.
- [24] DIN J U, SARWAR A, LI Y, et al. Separation of storage proteins (7S and 11S) from soybean seed, meals and protein isolate using an optimized method via comparison of yield and purity [J]. *The Protein Journal*, 2021, 40(3): 396-405.
- [25] MENDOZA E M T, ADACHI M, BERNARDO A E N, et al. Mung bean [*Vigna radiata* (L.) *Wilczek*] globulins: purification and characterization [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(3): 1552-1558.
- [26] BERNARDO A E N, GARCIA R N, ADACHI M, et al. 8S globulin of mung bean [*Vigna radiata* (L.) *Wilczek*]: cloning and characterization of its cDNA isoforms, expression in escherichia coli, purification, and crystallization of the major recombinant 8S isoform [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(9): 2552-2560.
- [27] TANG C H, SUN X. Physicochemical and structural properties of 8S and/or 11S globulins from mung bean [*Vigna radiata* (L.) *Wilczek*] with various polypeptide constituents [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(10): 6395-6402.
- [28] UTSUMI S, MATSUMURA Y, MORI T. Structure-Function Relationships of Soy Proteins [M]. *Food Proteins and Their Applications*. CRC Press, 2017: 257-292.
- [29] HAMEED A, QURESHI M, NAWAZ M, et al. Comparative seed storage protein profiling of mung bean genotypes [J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44(6): 1993-1999.
- [30] YANG J, KORNET R, DIEDERICKS C F, et al. Rethinking plant protein extraction: albumin-from side stream to an excellent foaming ingredient [J]. *Food Structure*, 2022, 31: 100254.
- [31] DEWAR D H, AMATO M, ELLIS H J, et al. The toxicity of high molecular weight glutenin subunits of wheat to patients with coeliac disease [J]. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 2006, 18(5): 483-491.
- [32] LI S, FENG X, HAO X, et al. A comprehensive review of mung bean proteins: extraction, characterization, biological potential, techno-functional properties, modifications, and applications [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023, 22(4): 3292-3327.
- [33] WARDAH W, KHAN M G M, SHARMA A, et al. Protein secondary structure prediction using neural networks and deep learning: a review [J]. *Computational Biology and Chemistry*, 2019, 81: 1-8.
- [34] LIU F F, LI Y Q, WANG C Y, et al. Impact of pH on the physicochemical and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata* L.) protein [J]. *Process Biochemistry*, 2021, 111: 274-284.
- [35] ZHU X, ZENG J, SUN B, et al. Extraction, conformation characteristics and functional properties of soybean lipophilic proteins [J]. *Food Bioscience*, 2022, 49: 101907.
- [36] KUDRE T G, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Comparative study on chemical compositions and properties of protein isolates from mung bean, black bean and bambara groundnut [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, 93(10): 2429-2436.
- [37] HOSSAIN BRISHTI F, CHAY S Y, MUHAMMAD K, et al. Structural and rheological changes of texturized mung bean protein induced by feed moisture during extrusion [J]. *Food Chemistry*, 2021, 344: 128643.
- [38] AWAIS M, ASHRAF J, WANG L, et al. Effect of controlled hydrothermal treatments on mung bean starch structure and its relationship with digestibility [J]. *Foods*, 2020, 9(5): 664.
- [39] CARBONARO M, NUCARA A. Secondary structure of food proteins by fourier transform spectroscopy in the mid-infrared region [J]. *Amino Acids*, 2010, 38(3): 679-690.
- [40] PELTON J T, MCLEAN L R. Spectroscopic methods for analysis of protein secondary structure [J]. *Analytical Biochemistry*, 2000, 277(2): 167-176.
- [41] ZHOU L, WU F, ZHANG X, et al. Structural and functional properties of maillard reaction products of protein isolate (mung bean, *Vigna radiata* (L.)) with dextran [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017: 1-13.
- [42] XIE J, DU M, SHEN M, et al. Physico-chemical properties, antioxidant activities and angiotensin-i converting enzyme inhibitory of protein hydrolysates from mung bean (*Vigna radiata*) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 270: 243-250.
- [43] BRISHTI F H, CHAY S Y, MUHAMMAD K, et al. Effects of drying techniques on the physicochemical, functional,

- thermal, structural and rheological properties of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate powder [J]. Food Research International, 2020, 138: 109783.
- [44] LIU F F, LI Y Q, WANG C Y, et al. Physicochemical, functional and antioxidant properties of mung bean protein enzymatic hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133397.
- [45] SHIMADA K, CHEFTEL J C. Sulfhydryl group/disulfide bond interchange reactions during heat-induced gelation of whey protein isolate [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1989, 37(1): 161-168.
- [46] TANG C H, SUN X, YIN S W. Physicochemical, functional and structural properties of vicilin-rich protein isolates from three phaseolus legumes: effect of heat treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1771-1778.
- [47] CHAROENSUK D, BRANNAN R G, CHANASATTRU W, et al. Physicochemical and emulsifying properties of mung bean protein isolate as influenced by succinylation [J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1633-1645.
- [48] RATNANINGSIH R, SIRISHAI S. Protein isolate precipitation using acid and salt on a by-product of mung bean starch extraction [J]. Agriculture and Natural Resources, 2021, 55(5): 882-892.
- [49] HADIDI M, JAFARZADEH S, IBARZ A. Modified mung bean protein: optimization of microwave-assisted phosphorylation and its functional and structural characterizations [J]. LWT, 2021, 151: 112119.
- [50] GE J, SUN C, CHANG Y, et al. Understanding the differences in heat-induced gel properties of twelve legume proteins: a comparative study [J]. Food Research International, 2023, 163: 112134.
- [51] TARAHI M, ABDOLALIZADEH L, HEDAYATI S. Mung bean protein isolate: extraction, structure, physicochemical properties, modifications, and food applications [J]. Food Chemistry, 2024, 444: 138626.
- [52] WAGNER J R, SORGENTINI D A, AÑÓN M C. Relation between solubility and surface hydrophobicity as an indicator of modifications during preparation processes of commercial and laboratory-prepared soy protein isolates [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3159-3165.
- [53] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Advances in the plant protein extraction: mechanism and recommendations [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106595.
- [54] VOGELSANG-O'DWYER M, PETERSEN I L, JOEHNKE M S, et al. Comparison of faba Bean protein ingredients produced using dry fractionation and isoelectric precipitation: techno-functional, nutritional and environmental performance [J]. Foods, 2020, 9(3): 322.
- [55] STONE A K, KARALASH A, TYLER R T, et al. Functional attributes of pea protein isolates prepared using different extraction methods and cultivars [J]. Food Research International, 2015, 76: 31-38.
- [56] BOYE J, ZARE F, PLETCH A. Pulse proteins: processing, characterization, functional properties and applications in food and feed [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 414-431.
- [57] PENCHALARAJU M, JOHN DON BOSCO S. Legume protein concentrates from green gram, cowpea, and horse gram [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(4): 16477.
- [58] SCHLANGEN M, TAGHIAN DINANI S, SCHUTYSER M A I, et al. Dry fractionation to produce functional fractions from mung bean, yellow pea and cowpea flour [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103018.
- [59] XING Q, UTAMI D P, DEMATTEY M B, et al. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102480.
- [60] YANG M, LI N, TONG L, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt [J]. LWT, 2021, 152: 112390.
- [61] YANG Q, EIKELBOOM E, VAN DER LINDEN E, et al. A mild hybrid liquid separation to obtain functional mung bean protein [J]. LWT, 2022, 154: 112784.
- [62] THOMPSON L U. Preparation and evaluation of mung bean protein isolates [J]. Journal of Food Science, 1977, 42(1): 202-206.
- [63] ZHU H G, WANG Y, CHENG Y Q, et al. Optimization of the powder state to enhance the enrichment of functional mung bean protein concentrates obtained by dry separation [J]. Powder Technology, 2020, 373: 681-688.
- [64] BASAK S, SINGHAL R S. Succinylation of food proteins—a concise review [J]. LWT, 2022, 154: 112866.
- [65] ASSATORY A, VITELLI M, RAJABZADEH A R, et al. Dry fractionation methods for plant protein, starch and fiber enrichment: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 340-351.
- [66] PULIVARTHI M K, BUENAVISTA R M, BANGAR S P, et al. Dry fractionation process operations in the production of protein concentrates: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(6):

- 4670-4697.
- [67] HEMERY Y, HOLOPAINEN U, LAMPI A M, et al. Potential of dry fractionation of wheat bran for the development of food ingredients, part II: electrostatic separation of particles [J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(1): 9-18.
- [68] HEDAYATI S, JAFARI S M, BABAJAFARI S, et al. Different food hydrocolloids and biopolymers as egg replacers: a review of their influences on the batter and cake quality [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 128: 107611.
- [69] SOFI S A, SINGH J, CHHIKARA N, et al. Effect of incorporation of germinated flour and protein isolate from chickpea on different quality characteristics of rice - based noodle [J]. *Cereal Chemistry*, 2020, 97(1): 85-94.
- [70] ZHANG Y, GUO X, XIONG H, et al. Effect of modified soy protein isolate on dough rheological properties and noodle qualities [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(3): 16371.
- [71] DIAO J, TAO Y, CHEN H, et al. Hydrothermal-induced changes in the gel properties of mung bean proteins and their effect on the cooking quality of developed compound noodles [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 957487.
- [72] MOHAMED S, BAKAR J, HAMID N A. Differences in functional properties of mung bean protein concentrate and the effect of incorporation into fish sausages [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1996, 19(1): 69-75.
- [73] KUDRE T, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Effects of protein isolates from black bean and mung bean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 511-518.