

# 绿豆蛋白的凝胶特性及应用研究进展

孙冰玉, 付雨欣, 黄雨洋, 刘琳琳, 吕铭守, 朱 颖, 郭汝杞, 朱秀清\*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江省普通高校食品科学与工程重点实验室,

黑龙江省谷物食品与谷物资源综合加工重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150028)

**摘 要:** 绿豆蛋白因其较高的营养价值和健康功效而成为可以替代动物蛋白和大豆蛋白的新型蛋白质来源, 具有理想的功能特性。绿豆蛋白的凝胶特性作为其重要的功能特性之一, 在食品加工过程中应用广泛。研究发现可以通过添加不同的外源物质或通过不同的改性方法增强绿豆蛋白的凝胶特性, 使其满足食品加工需求。本文对绿豆蛋白凝胶的形成机理、不同外源添加物及加工技术对绿豆蛋白结构以及凝胶特性产生的影响进行详细分析, 综述了绿豆蛋白凝胶特性的研究现状, 最后总结了绿豆蛋白的凝胶特性在食品中的应用, 旨在为绿豆蛋白在食品工业的进一步应用提供参考。

**关键词:** 绿豆蛋白; 凝胶特性; 外源添加物; 加工方式; 应用

## Research Progress on Gel Characteristics and Application of Mung Bean Proteins

SUN Bingyu, FU Yuxin, HUANG Yuyang, LIU Linlin, LÜ Mingshou, ZHU Ying, GUO Ruqi, ZHU Xiuqing\*

(Key Laboratory of Food Science and Engineering of Heilongjiang Province, Key Laboratory of Grain Food and Comprehensive Processing of Grain Resource of Heilongjiang Province, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**Abstract:** Mung bean proteins have become a new source that can replace animal and soybean proteins due to their high nutritional value and health benefits, and have ideal functional characteristics. As one of their important functional properties, the gel properties of mung bean proteins are widely used in food processing. It is found that the gel properties of mung bean proteins can be enhanced by adding different exogenous substances or by different modification methods to meet the needs of food processing. In this paper, the formation mechanism of mung bean protein gels, the effects of different exogenous additives and processing technologies on the structure and gel characteristics of mung bean proteins are dissected, and the current status of research on the gel characteristics of mung bean proteins is summarized. Finally, the application of the gel characteristics of mung bean proteins in foods is summarized, aiming at providing a reference for furthering the application of mung bean proteins in the food industry.

**Keywords:** mung bean proteins; gel characteristics; exogenous additives; processing mode; application

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240801-008

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 03-0318-10

引文格式:

孙冰玉, 付雨欣, 黄雨洋, 等. 绿豆蛋白的凝胶特性及应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 318-327. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240801-008. <http://www.spkx.net.cn>

SUN Bingyu, FU Yuxin, HUANG Yuyang, et al. Research progress on gel characteristics and application of mung bean proteins[J]. Food Science, 2025, 46(3): 318-327. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240801-008. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2021ZX12B04);

黑龙江省“双一流”学科协同创新成果建设项目(LJGXCG2022-084); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023C064)

第一作者简介: 孙冰玉(1978—)(ORCID: 0000-0002-7234-9266), 女, 教授, 博士, 研究方向为大豆化学及加工技术。

E-mail: sby0451@163.com

\*通信作者简介: 朱秀清(1968—)(ORCID: 0000-0001-7825-1449), 女, 教授, 硕士, 研究方向为蛋白质分子化学及大豆深加工。E-mail: xqzhuwang@163.com

绿豆原产于印度,含有非常均衡的营养成分,包括蛋白质、膳食纤维、矿物质、维生素和大量的生物活性化合物,具有良好的消化性,是丰富和价格低廉的蛋白质来源之一<sup>[1]</sup>。绿豆蛋白(mung bean protein, MBP)富含亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸等必需氨基酸,特别是赖氨酸含量(64.5 mg/g)高于联合国粮食及农业组织的要求(55 mg/g),可以与低赖氨酸谷物如小米和小麦等一起食用以获得氨基酸平衡<sup>[2-4]</sup>。此外,MBP及其肽还具有许多生理活性,如抗氧化、抗菌、抑制血管紧张素转换酶活性,还有改善糖脂代谢、预防非酒精性脂肪性肝病的发生和发展等功效<sup>[5]</sup>。与牛和家禽等其他蛋白质来源相比,MBP的碳足迹较低,是可持续的蛋白质来源<sup>[6-7]</sup>。MBP具有理想的功能特性,包括发泡、乳化、持水、持油和胶凝能力,其中凝胶性是其重要的功能特性之一,MBP与大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)相比,具有更多的疏水和/或不带电的氨基酸以及更少的二硫键,赋予其独特的凝胶特性<sup>[8]</sup>。基于这些优点,MBP可以应用于制备鸡蛋替代品、传统食品以及植物性肉类等<sup>[9-12]</sup>。但由于天然MBP凝胶性不佳,限制了其在食品工业中的应用,因此可以通过不同改性手段而得到改善<sup>[2,13]</sup>。

作为一种新兴的植物蛋白,近年来关于MBP的研究逐渐增多,但关于凝胶特性的总结较少。基于国内外研究,本文综述MBP的组成结构、提取、功能特性及凝胶形成机理,并着重对添加不同外源物(如盐离子、多糖、其他不同种类蛋白等)及不同加工方式(如热处理、pH值偏移处理、超声处理、酶处理等)对MBP结构及其凝胶特性的影响进行阐述,最后总结关于MBP的凝胶特性在食品中的应用,以期为MBP在食品工业的进一步应用提供参考。

## 1 MBP的组成结构、提取及功能特性

### 1.1 MBP的组成结构

绿豆中蛋白质含量约占14.6%~32.6%,主要分为白蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白,其中球蛋白相对含量最高(60%~70%)<sup>[14]</sup>。球蛋白中按离心沉降系数可分为7S(135 kDa)、8S(200 kDa)和11S(360 kDa)球蛋白<sup>[5,15]</sup>。8S是绿豆的主要贮藏蛋白,约占球蛋白的89%;11S和7S含量较少,分别约占球蛋白的7.6%和3.4%。8S和11S的结构如图1所示,8S球蛋白是由 $\alpha$ 、 $\alpha'$ 和 $\beta$  3个亚基组成的三聚体蛋白,与其他豆科植物的7S球蛋白具有高度的结构相似性和同源性,氨基酸序列相似性为68%<sup>[16-17]</sup>。11S球蛋白由酸性亚基和碱性亚基组成,分子质量分别为40、24 kDa,它们通过二硫键连接<sup>[18]</sup>。不同品种绿豆之间蛋白质成分含量有所差异,同时不同8S球蛋白在功能特性和多肽成分上也存在显著差异,基因型

间的组成和结构差异对绿豆8S球蛋白组分的功能特性有显著影响,但具体影响还需要进一步探索<sup>[19]</sup>。

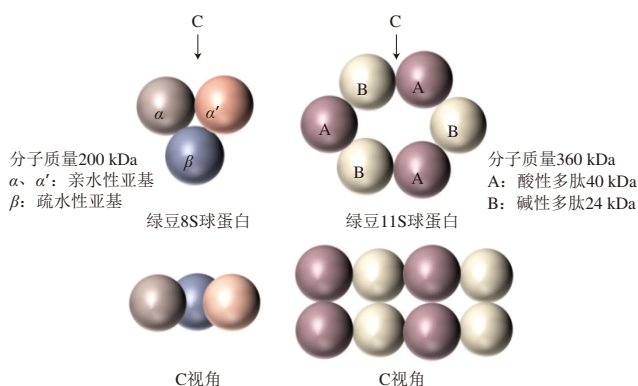


图1 绿豆8S、11S球蛋白的结构<sup>[17,20]</sup>

Fig. 1 Structures of 8S and 11S globulins of mung bean<sup>[17,20]</sup>

氨基酸是蛋白质的基本结构单位,其组成比例会影响MBP的功能特性。MBP中疏水性氨基酸的含量(41.98 g/100 g)远高于亲水性氨基酸(7.07 g/100 g),导致MBP具有高表面活性影响了其乳化性能<sup>[21-22]</sup>。此外,疏水性氨基酸含量越高的MBP耐热性越好,这可能归因于疏水性氨基酸有利于形成具有表面活性的球形结构,而破坏其结构中的氢键和疏水相互作用所需的高焓值往往源于高变性温度<sup>[21,23-24]</sup>。

### 1.2 MBP的提取

MBP的传统提取方法为化学方法,如碱溶酸沉法、盐提取法及热水浸提法等。其中最常用的方法是碱溶酸沉法,操作简单,所需材料易获得且产率较高,但会破坏氨基酸结构,影响蛋白质的消化率<sup>[25]</sup>。较为温和的方法包括盐提取法、热水浸提法等,但产率较低。新型的物理辅助提取方法如超声波辅助法、高压辅助法以及酶法等都可以提高蛋白提取效率。MBP不同提取方法的原理、优缺点及操作条件如表1所示。

### 1.3 MBP的功能特性

MBP的功能特性有利于其在食品工业中的应用。MBP的溶解度在等电点附近(pH 4.0~5.0)时最小,这可能是由于MBP在等电点时携带的净电荷减少,降低了蛋白质分子之间的静电排斥,同时增加了表面疏水性,使溶解度急剧下降,导致蛋白质聚集和沉淀<sup>[20,37]</sup>。MBP是由亲水性氨基酸和疏水性氨基酸组成的大分子,可以用作乳化剂<sup>[38-39]</sup>。不同分离方法得到的MBP泡沫容量和稳定性分别在27.5%~62.5%和21.55%~49.93%之间,MBP可以形成一种黏稠的凝胶状黏结层,具有很强的柔韧性,从而产生极好的泡沫稳定性<sup>[40]</sup>。MBP与SPI的持水能力(3.33 g/g和3.00 g/g)和持油能力(3.00 g/g和3.45 g/g)相当,一定程度上可以替代SPI<sup>[41]</sup>。并且与其他豆类(如豌豆蛋白和蚕豆蛋白,每克分离蛋白分别具有1.2 g和1.6 g脂肪吸收能力)相比更佳<sup>[42]</sup>。

表 1 MBP的提取方法  
Table 1 Extraction methods for MBP

制备方法	原理	优缺点	制备条件	参考文献
碱溶酸沉法	在碱性条件下，蛋白质溶解度高，然后在低pH值（等电点）条件下沉淀析出	优点是蛋白质溶出率较高、操作简单、成本低，缺点是碱液浓度过大时易发生美拉德反应，使蛋白质溶液颜色加深，从而影响了其营养特性	料液比1:10（g/mL），提取温度31.74℃，提取时间33.24 min，pH 8.97，提取率77.6%； 料液比1:15（g/mL），提取温度40℃，提取时间20 min，pH 9.0，提取率88.80%	[26-27]
盐提取法	通过改变离子强度触发蛋白质的盐和盐出	产率低，但是蛋白纯度高	20 g绿豆粉中加入200 mL 0.5 mol/L NaCl溶液室温条件下搅拌1 h，离心过滤后超滤浓缩至40~50 mL，加入5倍体积的水，在冷却室中静置过夜，形成胶束，提取率为9.5%，纯度为87.9%； 将绿豆粉以1:10（g/mL）稀释在pH 6.1、0.75 mol/L NaCl溶液中，提取率为8.3%，但纯度较高	[28-29]
热水浸提法	用挥发性溶剂将原料中的蛋白质转移到溶剂中，然后通过蒸发水分，得到所需的较为纯净的萃取组分	对MBP的生物活性破坏小、条件温和，但蛋白质提取率低	提取温度42℃，提取时间2.3 h，用水量15.3 mL/g， 浸提液中蛋白质提取量为813.24 μg/mL	[30]
超声波辅助提取法	超声波可以破坏细胞基质，提高蛋白质的可提取性	具有成本低、设备简单、操作容易、提取效率高和提取时间短等优点	料液比为1:12（g/mL），pH 8.5，超声处理时间25 min，温度45℃，提取率为95.1%； 超声频率24 kHz，微波功率338 W，处理温度37℃，处理时间15.6 min， 料液比1:17.5（g/mL），提取率为（19.52±0.13）%； 均质7次，超声时间为8.4 min，超声功率为300.69 W，提取率为81.8%	[31-33]
超高压辅助提取法	给样品加压后，细胞在高压条件下破裂，从而使细胞内物质被释放并溶解，提高物质提取效率	具有时间短、提取率高的优点	超高压压力300 MPa，保压时间6 min，提取温度40℃， 料液比1:15（g/mL），提取率为79.2%	[34]
干法	空气分级是一种将细粉中的轻组分（蛋白质）与重组分（淀粉）分离的碾磨技术	干法分馏趋向于节能和环保，并尽量减少组分的改变和破坏，但是植物蛋白馏分的含量通常远低于湿法分馏	分级轮频率57 Hz，进料速率2.1 kg/h，引风机频率60 Hz。此时分离效率最高， 可达（84.0±4.4）%，纯度（63.2±0.6）%，得率（31.9±1.8）%	[35]
酶法	酶能够与蛋白质特异性结合，形成酶-底物复合物。在适宜的条件下，酶会催化底物的转化反应，从而实现目标物质的分离和纯化	酶法可以提高效率，但酶价格昂贵、易失活、提取过程较难控制、生产成本也较高	碱性蛋白酶加酶量7%、料液比1:25（g/mL）、 提取1 h时提取率最高，为96.63 mg/g左右	[36]

凝胶特性在食品加工过程中也起到非常重要的作用。最小胶凝浓度（least gelation concentration, LGC）是衡量胶凝能力的常用指标之一，LGC越低代表蛋白质胶凝能力越强。MBP（12%）与其他豆科蛋白（菜豆白蛋白18%、豌豆蛋白16%和扁豆蛋白16%）相比LGC更低，具有与SPI（9%~14%）相似的凝胶特性，这意味着MBP有潜力替代SPI成为肉类类似物的植物性蛋白质来源<sup>[21,41,43-44]</sup>。如图2所示，MBP的凝胶形成过程包括分子展开、解离-结合和聚集，所涉及的主要作用力是疏水相互作用和氢键，以及有助于支撑凝胶结构的二硫键<sup>[41,45-47]</sup>，即当加热到最低展开温度以上时，MBP原有空间结构发生变化，形成球状网络结构，在一定疏水相互作用下发生聚集，并利用二硫键维持凝胶强度<sup>[48-49]</sup>。

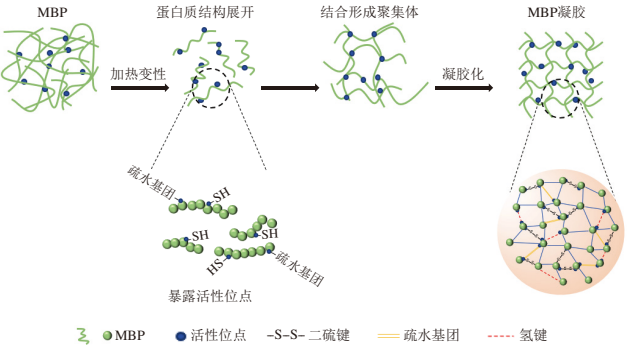


图 2 MBP凝胶形成机理  
Fig. 2 Formation mechanism of MBP gels

2 外源添加物对MBP结构及凝胶特性的影响

2.1 盐离子对MBP结构及凝胶特性的影响

盐离子会改变MBP之间的聚集行为，常用的盐离子有Na<sup>+</sup>与Ca<sup>2+</sup>等<sup>[50]</sup>。随着加入适当浓度Ca<sup>2+</sup>，α-螺旋结构含量呈先降低后增加的趋势，β-折叠结构含量呈相反趋势。Ca<sup>2+</sup>预处理使蛋白质去折叠，暴露了蛋白质内部的疏水基团和巯基基团，提高了蛋白结构中二硫键的含量，促进蛋白质间的相互作用和交联。与Na<sup>+</sup>相比，Ca<sup>2+</sup>的加入还会通过静电盐桥形成相对较大的聚集体，但过量的盐离子加入，蛋白质可能发生“盐沉淀”<sup>[51]</sup>。MBP与Ca<sup>2+</sup>的相互作用机制如图3所示。

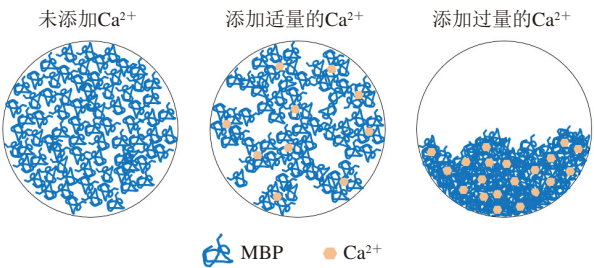


图 3 MBP与Ca<sup>2+</sup>的相互作用机制<sup>[52]</sup>  
Fig. 3 Interaction mechanism between MBP and Ca<sup>2+</sup><sup>[52]</sup>

适当浓度的盐离子通过改变MBP之间的相互作用，从而增强凝胶网络结构，提高蛋白质体系的离子浓度，对MBP的凝胶性质有积极的影响，而过高浓度的盐离子则会破坏凝胶网络结构<sup>[51,53]</sup>。在中性（pH 7）复合体系（7.2% MBP和10%菜籽油）中，当Ca<sup>2+</sup>添加量为



0~5 mmol/L时, MBP乳液凝胶结构松散, 当 $\text{Ca}^{2+}$ 添加量为10~20 mmol/L时, MBP乳液凝胶具有更均匀致密的网络结构, 可能是适当浓度盐离子的加入引起交联, 包裹更多的乳滴, 使凝胶网络更加均匀致密<sup>[54]</sup>。不同浓度的 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}$  (分别为44 mmol/L和50 mmol/L) 也显著改善了MBP/小麦面筋蛋白复合蛋白凝胶的凝胶特性。相同盐离子浓度条件下, 与 $\text{Na}^+$ 相比,  $\text{Ca}^{2+}$ 的聚集能力更强, 对复合凝胶的影响更为显著, 而高浓度盐离子会破坏凝胶网络<sup>[50]</sup>。适当浓度 $\text{Ca}^{2+}$  (5~20 mmol/L) 预处理还可以改善转谷氨酰胺酶 (transglutaminase, TG) 诱导的MBP凝胶特性, 但过高的 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度 (>20 mmol/L) 会破坏MBP与TG之间的相互作用, 形成较大的蛋白质聚集体, 使凝胶性能下降<sup>[55]</sup>。

## 2.2 多糖对MBP结构及凝胶特性的影响

蛋白质与多糖是食品中两大重要的营养物质, MBP中加入多糖会改变分子间和/或分子内的相互作用, 通过共价与非共价相互作用形成复合物<sup>[56-57]</sup>。目前许多研究集中于不同多糖的加入对MBP结构的影响分析, 例如低水平 (0.5%~2.5%) 的新型天然凝胶改性剂三赞胶 (sanzan gum, SAN) 加入MBP中会改变MBP结构, 将 $\alpha$ -螺旋转化为 $\beta$ -折叠, 蛋白分子展开, 暴露色氨酸残基, 导致疏水相互作用、氢键和静电相互作用显著增强。由于SAN链中存在丰富的羟基和羧基, 所以SAN的加入增强了氢键作用。而高水平的SAN (3%) 由于其屏蔽作用, 隐藏了疏水基团和-SH基团, 降低了蛋白质分子之间的相互作用力<sup>[49]</sup>。

蛋白质与不同多糖的混合比例、蛋白质和多糖的特性等因素对凝胶结构和特性都会产生不同影响<sup>[58]</sup>。SAN加入MBP中, 通过增强MBP凝胶中的疏水相互作用和氢键改善其凝胶性能<sup>[49]</sup>。MBP与天然玉米淀粉 (natural corn starch, NCS) 相互作用形成凝胶后<sup>[59]</sup>, 由于MBP的高持水能力以及NCS糊化过程中其直链淀粉与MBP羧基的相互作用, 延缓直链淀粉的重排, 使硬度和结构凝聚力降低, 削弱凝胶网络, 减少凝胶的协同作用, 延长产品的保质期。高酰基结冷胶 (high acyl gellan, HAG) 和低酰基结冷胶 (low acyl gellan, LAG) 对MBP-结冷胶复合凝胶的影响不同<sup>[52]</sup>。加入HAG后, 当MBP浓度较低时, 形成了柔软且弹性较好的凝胶, 随着MBP浓度的提高, 浓度较高时蛋白质网络破坏, 凝胶强度变弱。加入LAG后, MBP凝胶性较差, 并且LAG与MBP之间具有协同相互作用, 随着蛋白质含量的增加而变得更黏稠。MBP与荞麦淀粉制备的复合凝胶是典型的假塑性流体。随着MBP添加比例的增大复合凝胶的假塑性逐渐增强, 剪切变稀现象更加显著, 形成松散的凝胶网络结构, 黏度下降<sup>[60]</sup>。

## 2.3 动、植物蛋白对MBP结构及凝胶特性的影响

当体系中含有多种蛋白时, 蛋白质之间可能通过相互作用克服聚集体之间的排斥力结合在一起<sup>[61]</sup>。复合凝胶制备过程中, 不同类型蛋白质在开始加热前均匀地混合在一起, 加热后蛋白质间相互作用发生变化, 形成不同类型的凝胶网络结构, 可能是蛋白质之间的共聚集促进了复合蛋白凝胶的形成。此外, 蛋白质掺入引起的填充效应可以通过增稠和相分离从而改善复合蛋白凝胶的性能<sup>[62]</sup>。

低水平的MBP (<6%) 能够与小麦蛋白 (wheat protein, WP) 制备形成复合凝胶, 其作用机制是通过二硫键发生共价交联使分子间聚集形成凝胶网络结构。但当MBP水平较高时 (>6%), 会降低复合凝胶与水的相互作用从而破坏交联结构, 阻碍凝胶形成, 并破坏凝胶结构, 使二硫键含量降低, 凝胶品质下降<sup>[63]</sup>。另外, MBP具有水结合能力, 可以作为水结合剂以及TG底物, 影响MBP与肌原纤维蛋白复合凝胶的凝胶化结构, 增强成胶能力<sup>[64-65]</sup>。MBP较高的持水能力还可以增加与沙丁鱼鱼糜制备的复合凝胶的破断力和断裂形变, 延缓与内源性蛋白酶相关的沙丁鱼鱼糜的蛋白水解, 提高凝胶强度<sup>[66]</sup>。

## 2.4 其他物质对MBP结构及凝胶特性的影响

蛋白质与生物活性物质 (如多酚) 之间的相互作用可以增强蛋白质的功能特性, 并保留了生物活性化合物, 近年来已成为食品行业的热门研究课题。研究表明, 向MBP中加入不同浓度牡荆素 (vitexin, VT), VT与MBP能够通过非共价结合形成新的VT-MBP复合物。随着VT浓度的增加, 复合物粒径逐渐增大, 三级结构展开, 荧光强度降低。VT-MBP复合物的形成改变了结构, 显著增强了其功能特性<sup>[67]</sup>。但目前未见多酚对MBP凝胶特性影响的相关研究, 未来还需进一步探索。

# 3 不同加工方式对MBP结构及凝胶特性的影响

## 3.1 热处理对MBP结构及凝胶特性的影响

热处理会影响蛋白质的变性程度和聚集行为, 使MBP结构展开, 暴露了原本埋在蛋白质中心的巯基, 这些巯基容易在蛋白质分子之间形成二硫键, 增强分子间的作用力<sup>[47]</sup>。通过控制蛋白质热处理后的变性和聚集程度可以调节MBP的凝胶化过程, 影响凝胶性能<sup>[68-69]</sup>。将MBP中的vicilin组分 (MV) 在90 °C加热20 min后, 在冰水中冷却15 min, 重复此过程以提供双加热循环。第1次加热不能引起MV的凝胶化, 第2次加热时才可以形成MV的黏弹性热凝胶<sup>[70]</sup>。

热处理后温度升高, 凝胶的持水性、硬度升高, 其网络结构也更为致密。但过高的热处理温度及过长的热处理时间会导致凝胶劣变, 凝胶持水性、硬度下降, 网

络结构变松散。在不同加热温度和加热时间条件下制备MBP-HAG乳液凝胶,结果表明,随着加热温度的增加与时间的延长,凝胶性能逐渐提高,在85℃、30 min条件下最佳,但过高温度和过长热处理时间会导致凝胶劣变<sup>[71]</sup>。不同MBP浓度在pH 2和不同加热时间(1、3、6 h和16 h)条件下形成的凝胶,随着加热时间的延长,MBP凝胶的硬度、弹性和屈服应力均增加,表现出更均匀致密的网络结构<sup>[72]</sup>。在MBP粉末上,均匀喷水制成不同水分质量分数(0%、15%、20%、25%、30%、35%)样品,然后分别在不同温度(25、65、75、85、95℃和105℃)条件下加热不同时间(0、15、30、45、60 min和75 min)。处理后的样品粉末在去离子水中稀释至质量分数为20%,80℃水浴加热30 min,得到凝胶样品,分析MBP的凝胶性能和主要结构变化。其中含水率为25%的MBP在85℃加热60 min时,凝胶性能明显改善。水热处理破坏了分子内氢键,增加了分子间的作用力与 $\beta$ -折叠的含量,促进了凝胶网络结构的形成<sup>[47]</sup>。

### 3.2 pH值偏移对MBP结构及凝胶特性的影响

pH值偏移是一种既环保又简单的改变MBP结构的方法,通过酸碱处理调节蛋白的pH值反应一段时间后,将pH值调回中性,残留的微量盐离子忽略不计或通过透析除去。在极端的pH值条件下,蛋白质相互作用(包括范德华力和蛋白质分子之间的疏水相互作用)被强烈的静电斥力破坏。随后,由于化学键的断裂,MBP球状蛋白质变成“熔融球状”结构,蛋白质重新折叠,并且在中性pH值条件下可以保持新的结构<sup>[73]</sup>。

碱性条件下MBP(pH 10~12)的柔性结构增加了蛋白质的溶解度并暴露了在蛋白质表面的氨基酸残基,从而提高了它们的持水能力和凝胶性能。酸性条件下MBP(pH 2~4)的溶解度在等电点处最低,同时持水能力和凝胶性能下降,因为酸会引起聚集<sup>[73]</sup>。其中,pH值为12时的热诱导凝胶具有更高的弹性和更致密的凝胶结构(与天然MBP形成的凝胶相比)<sup>[13,73]</sup>。此外,通过pH 12偏移处理与其他手段协同处理MBP,也可以改善MBP的凝胶性能。TG交联使天然MBP和pH 12偏移处理的MBP乳液凝胶硬度分别提高了1.3倍和1.8倍。可能是与天然MBP相比,pH 12处理后的蛋白质暴露了更多的TG交联位点,因此凝胶性能更佳<sup>[74]</sup>。如图4所示,与天然MBP相比,pH 12偏移处理的MBP与适当盐离子结合后制备的乳液凝胶具有均匀致密的网络结构,其凝胶硬度、持水性和水分分布均优于天然MBP样品<sup>[54]</sup>。总的来说,在碱性条件下制成的MBP凝胶具有更好的凝胶特性。

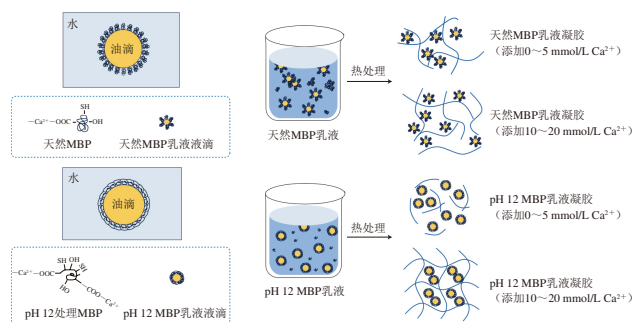


图4 pH 12结合不同含量 $\text{Ca}^{2+}$ 处理对MBP乳液凝胶的影响机制<sup>[54]</sup>

Fig. 4 Effect mechanism of pH 12 combined with different  $\text{Ca}^{2+}$  contents on MBP emulsion gels<sup>[54]</sup>

### 3.3 超声处理对MBP结构及凝胶特性的影响

超声是一种高效、经济、操作简单的新型物理方法<sup>[75]</sup>。通过超声对MBP进行处理,可以降低蛋白质的大小,改变分子结构,使MBP中 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -转角含量降低, $\beta$ -折叠含量提高,并增加MBP中疏水相互作用和二硫键含量,提高溶解度,但过大的超声功率会降低游离巯基的含量,削弱二硫键<sup>[76]</sup>。

超声处理可用于食品工业中蛋白质凝胶性质的改性,可以使MBP结构发生转变,分子间作用力增加,形成致密均匀的MBP凝胶网络结构,提高了凝胶性能。其中300 W超声处理后的MBP凝胶二硫键含量最大达到61.61%,具有最好的凝胶性能。但过大的超声功率会削弱MBP凝胶的二硫键<sup>[76]</sup>。对不同浓度的MBP分别施加输出功率2.2 kW、工作频率20 kHz的高功率超声处理,降低了MBP的凝胶形成温度,改善了其弹性、内聚性、咀嚼性和回弹性等质构特性,并形成了透明的凝胶<sup>[77]</sup>。在0~3 400 J的能量范围内通过超声处理MBP,其凝胶硬度随着超声处理能量的增大而增大,凝胶硬度的增加与超声处理的能量密切相关<sup>[78]</sup>。

### 3.4 TG诱导对MBP结构及凝胶特性的影响

TG是一种有效的绿色交联剂。MBP结构的变化是由于TG诱导的 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰胺)-赖氨酸共价交联的形成,导致Gln-Lys异肽键比非共价键强约20倍<sup>[79]</sup>。当TG浓度过高时,会导致共价交联过多,阻碍分子间聚集。

TG是改善蛋白质凝胶化最常用的酶之一<sup>[80]</sup>。TG处理后MBP的溶解度没有显著变化,共价交联和二硫键是TG诱导MBP凝胶的主要作用力,限制了非共价相互作用,使用TG处理后的MBP凝胶网络结构更紧凑、孔隙更小、更均匀,特别是在30 U/g时最佳<sup>[48]</sup>。微生物转谷氨酰胺酶(microbial transglutaminase, MTG)可以通过增加交联程度进而增强MBP的凝胶强度和水结合能力,并且对MTG具有浓度依赖性<sup>[81]</sup>。MBP与MTG(5 U/g蛋白底物)在45℃条件下持续搅拌4 h(MTM 4)或



8 h (MTM 8) 后与未进行处理的MBP相比, MTM 4和MTM 8凝胶的硬度、凝胶性、咀嚼性和黏附性均显著增加, 并且MTM 8凝胶的硬度 ( $(1\ 907.5 \pm 20.2)$  g) 高于MTM 4凝胶 ( $(1\ 754.6 \pm 71.8)$  g), 说明处理时间的延长促进蛋白质交联形成更致密、更均匀的凝胶网络结构, 从而形成更硬的凝胶<sup>[82]</sup>。

### 3.5 其他技术对MBP结构及凝胶特性的影响

不同干燥手段处理MBP后会对其凝胶性产生不同影响。通过冷冻 (freeze drying, FD)、喷雾 (spray drying, SD) 和烘箱干燥 (oven drying, OD) 等手段处理MBP后, FD会形成多孔蛋白, 而SD和OD分别形成皱状和致密晶体。FD相比SD和OD溶解度更高, 可能是由于水溶性聚集体的存在。FD和SD形成弹性凝胶, OD形成聚集的凝胶, FD和SD的LGC为12%, 而OD需要18%的蛋白质才能形成凝胶。不同样品凝胶结构形成的差异可能是由于蛋白质二级结构的差异, 由于OD在50 ℃长时间加热后使 $\beta$ -折叠向 $\beta$ -转角转变, 与FD和SD相比具有相对较多的 $\beta$ -转角结构, 而这一结构在蛋白质聚集体的形成中起着重要作用, 从而形成了相对聚集的结构<sup>[24]</sup>。采用大气冷等离子体技术, 80 kV高压处理MBP 5 min, 显著增加了 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠含量, 减少了无规卷曲含量, 溶解度降低, LGC从16%降低到14%, 提高了凝胶的硬度, 增强了MBP的凝胶特性<sup>[77]</sup>。琥珀酰化、酰化和氧化还原后的MBP与未经处理的MBP相比, 凝胶性有所下降, 这是由于蛋白质的部分变性导致蛋白质链展开, 同时酰化处理的MBP会增加蛋白质的负电荷, 而琥珀酰化和氧化还原后的MBP在修饰过程中会增加蛋白质的正电荷, 从而导致蛋白质净电荷之间的静电排斥, 凝胶性差<sup>[83]</sup>。

综上, 为了弥补MBP凝胶特性的部分局限性, 研究人员采用了一些技术对其进行改性, 其中包括物理改性方法如热处理、超声处理、等离子体技术以及干燥处理等, 化学改性方法如TG处理、pH值处理等。物理改性具有操作简单、耗时短、毒副作用小等优点, 但改性效果不是很明显。相较物理改性, 化学改性效果明显, 且反应速率快, 但在实际应用中要注意化学试剂的食品安全问题。目前还有一些技术手段如超高压处理、糖基化处理等对MBP凝胶特性的影响尚未研究或研究手段单一, 未来可以将物理与化学改性方法联合使用发挥各自优势, 从而更好地提高MBP凝胶特性。

## 4 MBP凝胶特性在食品中的应用

### 4.1 MBP凝胶特性在鸡蛋替代品中的应用

鸡蛋可能造成高胆固醇和过敏原等健康问题, 寻找鸡蛋替代品成为研究热点。当pH值为12时, 加入 $\text{Ca}^{2+}$ 后形成的MBP乳液凝胶具有优异的力学性能和保水性能,

获得与鸡蛋相似的质地, 具有开发基于MBP的鸡蛋替代品的潜力<sup>[54]</sup>。以pH 12偏移处理后的MBP为基础的乳化液代替80%、100%的蛋液制备蛋挞样品, 其感官指标在外观和质地上与鸡蛋基样品接近, 形状好、有嚼劲、无腥味。具有更好的持水能力, 口感更鲜嫩多汁, 这可能与其均匀的凝胶网络有关, 因此, 基于MBP的代鸡蛋可以完全替代真正的鸡蛋<sup>[74]</sup>。

### 4.2 MBP凝胶特性在传统食品中的应用

由于MBP缺乏麸质, 限制了它们在面条等主食中的使用。当25%含水率的MBP在85 ℃条件下加热60 min时, 略微提高了其二硫键含量, 显著改善了MBP的凝胶性能和吸水能力。将改性后的MBP以不同替代水平添加到小麦面条中, 当替代水平为9%时, MBP与小麦面团之间发生了分子间交联, 增强面筋网络结构, 有利于提高面条的蒸制特性, 从而改善了面条质量<sup>[47]</sup>。

将MBP部分替代牛奶还可以开发混合奶酪, 当MBP代替30%的牛奶制成奶酪时, 其蛋白质含量和水分含量都高于牛奶奶酪<sup>[84]</sup>。MBP可以用于制备质量良好的植物性酸奶, MBP酸奶具有良好的硬度、耐嚼性、保水能力和储能模量, 表明以MBP为基础的酸奶具有更好的凝胶质量。疏水相互作用和二硫键是维持诱导的植物蛋白基凝胶的主要作用力<sup>[85]</sup>。

将1%~2%的MBP添加到鱼肠中, 可以减轻鱼肠因蛋白质热变性而导致的质量损失, 并降低鱼肠的收缩率, 提高硬度。含MBP的鱼肠感官评价评分较高, 提高了鱼肠的整体接受度<sup>[86]</sup>。

### 4.3 MBP凝胶特性在肉类类似物中的应用

MBP具有较好的胶凝潜力, 已用于肉类类似物加工中<sup>[87]</sup>。当挤出参数为进料水分质量分数49.33%、螺杆转速80.66 r/min、料筒温度144.57 ℃时, 可以得到理想物理性能的糊化MBP, 具有良好的物理性能和纤维结构, 有作为肉类食用的巨大潜力, 与动物蛋白相比, 是一种更健康、更环保的蛋白选择<sup>[11]</sup>。

3D打印作为一项新兴的、有发展前景的技术, 可以为加工食品提供量身定制的风味、颜色、质地、口感甚至营养特征, 满足不同年龄段和生活方式的消费者营养密集食品的需求, 为新的商业模式打开市场<sup>[88-89]</sup>。将甜菜红和木糖加入MBP中制备可3D打印的含色素肉类类似物。MBP与木糖的糖基化显著改善了含着色剂的肉类类似物的机械性能和微观结构, 导致了质地的变化。同时, 木糖的增加可以提高含色素的肉类类似物在烹饪前的稳定性, 可能是因为木糖通过改变相互作用增加了剪切模量并改变了结构<sup>[90]</sup>。

综上所述, MBP凝胶在食品工业中的应用如图5所示, 其具有较高的应用潜力, 未来还可以进一步开发在其他食品领域中的应用潜力<sup>[90-91]</sup>。

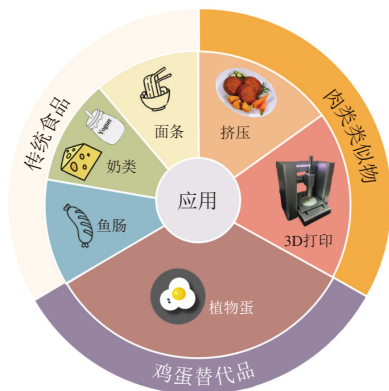


图5 MBP的凝胶特性在食品中的应用

Fig. 5 Application of MBP gel properties in foods

## 5 结 语

绿豆是一种新兴的能提供优质植物蛋白的豆科作物。经碱溶酸沉法提取的MBP含量更高，通过添加不同外源物或使用不同加工技术可以改善其凝胶性，使其更好地应用于凝胶型食品的多个领域。MBP的凝胶机制包括分子展开、解离-结合和聚集。不同外源物或不同加工技术处理对MBP结构产生不同影响，从而影响其凝胶特性，如添加适当的盐离子会增强蛋白质聚集，碱性条件下处理MBP会增强蛋白质之间的相互作用，提高其凝胶特性。过量的盐离子或过高的蛋白浓度会导致蛋白质过度结合，破坏凝胶结构。目前对于MBP凝胶特性的研究技术手段单一，未来还可以探究不同组合加工技术改善MBP的凝胶特性，开发新的植物性食品。此外，MBP凝胶性相关应用目前还处于实验探索阶段，要成为商业产品，还需要对加工条件、质地、配方、气味、味道等方面进行优化，并全面探索产品的功能性、营养性和健康效益。总地来说，MBP作为一种新兴的植物蛋白，具有较高的研究价值，需要更多的研究挖掘其在食品工业中的巨大潜力。

## 参考文献：

- [1] TANG D Y, DONG Y M, REN H K, et al. A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common food mung bean and its sprouts (*Vigna radiata*)[J]. Chemistry Central Journal, 2014, 8(1): 4. DOI:10.1186/1752-153X-8-4.
- [2] DU M X, XIE J H, GONG B, et al. Extraction, physicochemical characteristics and functional properties of mung bean protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 76: 131-140. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.01.003.
- [3] GUNDOGAN R, KARACA A C. Physicochemical and functional properties of proteins isolated from local beans of Turkey[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109609. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109609.
- [4] 曾志红, 王强, 林伟静, 等. 绿豆蛋白营养及功能特性分析[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(6): 51-55. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2012.06.011.
- [5] GUPTA N, SRIVASTAVA N, BHAGYAWANT S S. Vicilin: a major storage protein of mungbean exhibits antioxidative potential, antiproliferative effects and ACE inhibitory activity[J]. PLoS ONE, 2018, 13(2): e0191265. DOI:10.1371/journal.pone.0191265.
- [6] SCHREINEMACHERS P, SEQUEROS T, RANI S, et al. Counting the beans: quantifying the adoption of improved mungbean varieties in South Asia and Myanmar[J]. Food Security, 2019, 11(3): 623-634. DOI:10.1007/s12571-019-00926-x.
- [7] RANDHIR R, LIN Y T, SHETTY K. Stimulation of phenolics, antioxidant and antimicrobial activities in dark germinated mung bean sprouts in response to peptide and phytochemical elicitors[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(5): 637-646. DOI:10.1016/S0032-9592(03)00197-3.
- [8] 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. DOI:10.1002/jsfa.6052.
- [9] BRISHTI F H, 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128643.
- [10] SEETAPAN N, RAKSA P, LIMPARYOON N, et al. High moisture extrusion of meat analogues using mung bean (*Vigna radiata* L.) protein and flour blends: investigations on morphology, texture and rheology[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(4): 1922-1930. DOI:10.1111/ijfs.16334.
- [11] BRISHTI F H, CHAY S Y, MUHAMMAD K, et al. Texturized mung bean protein as a sustainable food source: effects of extrusion on its physical, textural and protein quality[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102591. DOI:10.1016/j.ifset.2020.102591.
- [12] GONG K M, ZHANG G Z, JI H J. Electrochemical properties and slow release properties of mung bean protein gel[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(6): 6091-6098. DOI:10.1007/s11694-023-02110-4.
- [13] NIE Y Q, LIU Y F, JIANG J, et al. Rheological, structural, and water-immobilizing properties of mung bean protein-based fermentation-induced gels: effect of pH-shifting and oil imbedment[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107607. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107607.
- [14] JAIN V, SHARMA S. Protein quality parameters and storage protein profiling of mungbean interspecific lines (*Vigna radiata* L. Wilczek)[J]. ABI Genetika, 2021, 53(3): 1341-1356. DOI:10.2298/gensr2103341j.
- [15] MENDOZA E M, ADACHI M, BERNARDO A E, et al. Mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] globulins: purification and characterization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(3): 1552-1558. DOI:10.1021/jf001041h.
- [16] BERNARDO A E N, GARCIA R N, ADACHI M, et al. 8S globulin of mungbean [*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. DOI:10.1021/jf0305938.
- [17] ITOH T, GARCIA R N, ADACHI M, et al. Structure of 8Sa globulin, the major seed storage protein of mung bean[J]. Acta Crystallographica Section D, 2006, 62: 824-832. DOI:10.1107/S090744490601804X.

- [18] TANG C H, SUN X. Physicochemical and structural properties of 8S and/or 11S globulins from mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] with various polypeptide constituents[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(10): 6395-6402. DOI:10.1021/jf904254f.
- [19] LIU H, LIU H K, YAN L, et al. Functional properties of 8S globulin fractions from 15 mung bean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) cultivars[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(5): 1206-1214. DOI:10.1111/ijfs.12761.
- [20] BADLEY R A, ATKINSON D, HAUSER H, et al. The structure, physical and chemical properties of the soy bean protein glycinin[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure, 1975, 412(2): 214-228. DOI:10.1016/0005-2795(75)90036-7.
- [21] 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. DOI:10.1016/j.procbio.2021.10.008.
- [22] LÓPEZ-MONTECUBIO D I, LOBATO-CALLEROS C, ALVAREZ-RAMIREZ J, et al. Huauzontle (*Chenopodium nuttalliae* saff.) protein: composition, structure, physicochemical and functional properties[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106043. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106043.
- [23] ZHOU L Y, WU F, ZHANG X N, 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. DOI:10.1080/10942912.2017.1338727.
- [24] 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. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109783.
- [25] KUMAR M, TOMAR M, POTKULE J, et al. Advances in the plant protein extraction: mechanism and recommendations[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 115: 106595. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.106595.
- [26] WANG M, JIANG L Z, LI Y, et al. Optimization of extraction process of protein isolate from mung bean[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 5250-5258. DOI:10.1016/j.proeng.2011.08.973.
- [27] 柳芬芳, 李迎秋. 绿豆蛋白提取工艺的响应面法优化[J]. 轻工学报, 2020, 35(2): 7-16. DOI:10.12187/2020.02.002.
- [28] RAHMA E H, DUDEK S, MOTHES R, et al. Physicochemical characterisation of mung bean (*Phaseolus aureus*) protein isolates[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(4): 477-483. DOI:10.1002/(sici)1097-0010(200003)80:4<477:aid-jsfa553>3.0.co;2-0.
- [29] WINTERSOLE C, KRACKE I, IGNATZY L M, et al. Physicochemical and chemical properties of mung bean protein isolate affected by the isolation procedure[J]. Current Research in Food Science, 2023, 7: 100582. DOI:10.1016/j.crfs.2023.100582.
- [30] 王维坚, 潘艳. 绿豆蛋白热水浸提工艺优化[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 154-157.
- [31] 张玉霞, 雍国新, 黎渊珠, 等. 超声波协助提取绿豆分离蛋白的研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(20): 13-17. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2014.20.004.
- [32] 李朝阳, 刁静静, 李良玉. 绿豆蛋白超声波协同提取工艺技术研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(5): 49-55. DOI:10.3969/j.issn.1002-2090.2020.05.008.
- [33] 王维坚, 潘艳. 化学计量法优化均质-超声联合提取绿豆蛋白的工艺参数[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(18): 7950-7953. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2013.18.015.
- [34] 田海娟, 王维坚, 张亚楠. 超高压辅助物理法提取绿豆活性蛋白的研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(23): 13-16. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2014.23.004.
- [35] 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. DOI:10.1016/j.powtec.2020.07.023.
- [36] 潘妍, 吕春健, 谢传磊, 等. 酶法提取绿豆蛋白及其功效的初步研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(9): 238-241. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2010.09.018.
- [37] 杨勇, 毕爽, 王中江, 等. 超声波处理对绿豆蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(9): 69-73. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.09.005.
- [38] GULZAR S, NILSUWAN K, RAJU N, et al. Whole wheat crackers fortified with mixed shrimp oil and tea seed oil microcapsules prepared from mung bean protein isolate and sodium alginate[J]. Foods, 2022, 11(2): 202. DOI:10.3390/foods11020202.
- [39] HE S D, ZHAO J L, CAO X D, et al. Low pH-shifting treatment would improve functional properties of black turtle bean (*Phaseolus vulgaris* L.) protein isolate with immunoreactivity reduction[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127217. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127217.
- [40] RATNANINGSIH R, SONGSERMPONG 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. DOI:10.34044/j.anres.2021.55.5.19.
- [41] BRISHTI F H, ZAREI M, MUHAMMAD S K 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.
- [42] FERNÁNDEZ-QUINTELA A, MACARULLA M T, DEL BARRIO A S, et al. Composition and functional properties of protein isolates obtained from commercial legumes grown in northern Spain[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 1997, 51(4): 331-342. DOI:10.1023/a:1007936930354.
- [43] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K, VAN DER GOOT A J. Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues[J]. Foods, 2021, 10(3): 600. DOI:10.3390/foods10030600.
- [44] SHRESTHA S, VAN'T HAG L, HARITOS V S, et al. Lentil and mungbean protein isolates: processing, functional properties, and potential food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108142. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108142.
- [45] MCCANN T H, GUYON L, FISCHER P, et al. Rheological properties and microstructure of soy-whey protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82: 434-441. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.04.023.
- [46] SHRESTHA S, VAN'T HAG L, HARITOS V, et al. Rheological and textural properties of heat-induced gels from pulse protein isolates: lentil, mungbean and yellow pea[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108904. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108904.
- [47] DIAO J J, TAO Y, CHEN H S, 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. DOI:10.3389/fnut.2022.957487.
- [48] WANG R X, LI Y Q, SUN G J, et al. Effect of transglutaminase on structure and gelation properties of mung bean protein gel[J]. Food Biophysics, 2023, 18(3): 421-432. DOI:10.1007/s11483-023-09784-9.
- [49] WANG K N, WANG J H, CHEN L, et al. Effect of sanxan as novel natural gel modifier on the physicochemical and structural properties of microbial transglutaminase-induced mung bean protein isolate gels[J]. Food Chemistry, 2024, 449: 139147. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.139147.



- [50] GUO R Q, LIU L L, HUANG Y Y, et al. Effect of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  on the texture, structure and microstructure of composite protein gel of mung bean protein and wheat gluten[J]. Food Research International, 2023, 172: 113124. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113124.
- [51] YANG Q, WANG Y R, LI-SHA Y J, et al. Physicochemical, structural and gelation properties of arachin-basil seed gum composite gels: effects of salt types and concentrations[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106545. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106545.
- [52] ISRAKARN K, BUATHONGJAN C, GAMONPILAS C, et al. Effects of gellan gum and calcium fortification on the rheological properties of mung bean protein and gellan gum mixtures[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(11): 5001-5016. DOI:10.1111/1750-3841.16337.
- [53] LU X, LU Z H, YIN L J, et al. Effect of preheating temperature and calcium ions on the properties of cold-set soybean protein gel[J]. Food Research International, 2010, 43(6): 1673-1683. DOI:10.1016/j.foodres.2010.05.011.
- [54] WANG Y, ZHAO J, ZHANG S C, 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. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107485.
- [55] 王瑞雪, 李迎秋.  $\text{CaCl}_2$  预处理对TG酶诱导的绿豆蛋白凝胶结构特征的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(4): 46-52; 60. DOI:10.12187/2023.04.006.
- [56] LAKEMOND C M M, DE JONGH H H J, PAQUES M, et al. Gelation of soy glycinin; influence of pH and ionic strength on network structure in relation to protein conformation[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(3): 365-377. DOI:10.1016/S0268-005X(02)00100-5.
- [57] QIAN Z, DONG S Z, ZHONG L, et al. Effects of carboxymethyl chitosan on the gelling properties, microstructure, and molecular forces of *Pleurotus eryngii* protein gels[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109158. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.109158.
- [58] YANG X, LI A Q, LI D, et al. Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 197-210. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.002.
- [59] TARAHI M, HEDAYATI S, SHAHIDI F. Effects of mung bean (*Vigna radiata*) protein isolate on rheological, textural, and structural properties of native corn starch[J]. Polymers, 2022, 14(15): 3012. DOI:10.3390/polym14153012.
- [60] 修琳, 张淼, 许秀颖, 等. 绿豆蛋白对荞麦淀粉糊化和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 57-61. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190630-417.
- [61] POLYAKOV V I, GRINBERG V Y, TOLSTOGUZOV V B. Thermodynamic incompatibility of proteins[J]. Food Hydrocolloids, 1997, 11(2): 171-180. DOI:10.1016/S0268-005X(97)80024-0.
- [62] NICOLAI T. Gelation of food protein-protein mixtures[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 270: 147-164. DOI:10.1016/j.cis.2019.06.006.
- [63] 陶阳, 陈洪生, 王长远, 等. 改性绿豆蛋白与小麦蛋白相互作用对其凝胶特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 60-69. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000091.
- [64] LEE H C, CHIN K B. Evaluation of mungbean protein isolates at various levels as a substrate for microbial transglutaminase and water binding agent in pork myofibrillar protein gels[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2013, 48(5): 1086-1092. DOI:10.1111/ijfs.12066.
- [65] LEE H C, KANG I, CHIN K B. Effect of mungbean [*Vigna radiata* (L.) Wilczek] protein isolates on the microbial transglutaminase-mediated porcine myofibrillar protein gels at various salt concentrations[J]. Meat Science, 2015, 101: 112. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.09.035.
- [66] KUDRE T, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 50(2): 511-518. DOI:10.1016/j.lwt.2012.08.018.
- [67] HU J R, ZHU Y S, LIU X, et al. Interactions between different concentrations of vitexin and mung bean protein and their effects on the physicochemical and antioxidant properties of the complexes[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 186: 115282. DOI:10.1016/j.lwt.2023.115282.
- [68] LIANG P J, CHEN S M, FANG X, et al. Recent advance in modification strategies and applications of soy protein gel properties[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(1): e13276. DOI:10.1111/1541-4337.13276.
- [69] BANERJEE S, BHATTACHARYA S. Food gels: gelling process and new applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(4): 334-346. DOI:10.1080/10408398.2010.500234.
- [70] LEE E J, HONG G P. Effect of the double heating cycle on the thermal gelling properties of vicilin fractions from soy, mung bean, red bean and their mixture with soy glycinin[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108370. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108370.
- [71] 娜音图, 刘少伟, 杨清馨, 等. 蛋白质热处理对绿豆蛋白-高酰基结冷胶乳液凝胶性质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(6): 83-90. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021080037.
- [72] LEE M Y, JO Y J. Microstructural and rheological properties of heat-induced gels from mung bean protein aggregates[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(4): 3464-3472. DOI:10.1007/s11694-023-01898-5.
- [73] JEONG M S, CHO S J. Effect of pH-shifting on the water holding capacity and gelation properties of mung bean protein isolate[J]. Food Research International, 2024, 177: 113912. DOI:10.1016/j.foodres.2023.113912.
- [74] WANG Y, WANG L, ZHANG S C, et al. Influence of pH-shifting and transglutaminase on the freeze-thaw stability and thermal gel properties of mung bean protein-based liquid egg substitute prepared with two different oil phases[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109182. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.109182.
- [75] CHENG Y, DONKOR P O, YEBOAH G B, et al. Modulating the *in vitro* digestion of heat-set whey protein emulsion gels via gelling properties modification with sequential ultrasound pretreatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111856. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111856.
- [76] WANG R X, LI Y Q, SUN G J, et al. The improvement and mechanism of gelation properties of mung bean protein treated by ultrasound[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 182: 114811. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114811.
- [77] RAHMAN M M, LAMSAL B P. Effects of atmospheric cold plasma and high-power sonication on rheological and gelling properties of mung bean protein dispersions[J]. Food Research International, 2023, 163: 112265. DOI:10.1016/j.foodres.2022.112265.
- [78] CHAROENSUK D, CHAIYASIT W, CHANASATRU W. Effect of high intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of whey protein isolate and mung bean protein isolate[C]//26th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International, Chiang Rai, Thailand, 2014: 394-401.
- [79] PEI S P, WANG Y, ZHANG Y, et al. Structural and textural properties of walnut protein gels induced by ultrasound and transglutaminase: encapsulation and release of tea polyphenols[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(8): 2286-2295. DOI:10.1007/s13197-023-05756-6.

- [80] KUDRE T G, BENJAKUL S. Combining effect of microbial transglutaminase and *Bambara groundnut* protein isolate on gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*)[J]. Food Biophysics, 2013, 8(4): 240-249. DOI:10.1007/s11483-013-9292-5.
- [81] VIJAYAN P, SONG Z X, TOY J Y H, et al. Effect of transglutaminase on gelation and functional proteins of mung bean protein isolate[J]. Food Chemistry, 2024, 454: 139590. DOI:10.1016/j.foodchem.2024.139590.
- [82] MOON S H, CHO S J. Effect of microbial transglutaminase treatment on the techno-functional properties of mung bean protein isolate[J]. Foods, 2023, 12(10): 1998. DOI:10.3390/foods12101998.
- [83] WONGPRATHEEP N, PUKRUSPAN T, CHAISERI S, et al. Effect of chemical reagents on functional properties of mungbean protein products[J]. Agriculture and Natural Resources, 2005, 39(1): 109-118.
- [84] TOJAN S, KAUR L, SINGH J. Hybrid paneer: influence of mung bean protein isolate (*Vigna radiata* L.) on the texture, microstructure, and *in vitro* gastro-small intestinal digestion[J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137434. DOI:10.1016/j.foodchem.2023.137434.
- [85] YANG M, LI N N, TONG L T, et al. Comparison of physicochemical properties and volatile flavor compounds of pea protein and mung bean protein-based yogurt[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 152: 112390. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112390.
- [86] MOHAMED S, BAKAR J, HAMID N A. Differences in functional properties of mungbean protein concentrate and the effect of incorporation into fish sausages[J]. 1996, 19(1): 69-75.
- [87] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: science, technology, and challenges[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 51-61. DOI:10.1016/j.tifs.2020.05.022.
- [88] FENG C Y, ZHANG M, BHANDARI B. Materials properties of printable edible inks and printing parameters optimization during 3D printing: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(19): 3074-3081. DOI:10.1080/10408398.2018.1481823.
- [89] NACHAL N, MOSES J A, KARTHIK P, et al. Applications of 3D printing in food processing[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(3): 123-141. DOI:10.1007/s12393-019-09199-8.
- [90] WEN Y X, KIM H W, PARK H J. Effect of xylose on rheological, printing, color, texture, and microstructure characteristics of 3D-printable colorant-containing meat analogs based on mung bean protein[J]. Food Research International, 2022, 160: 111704. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111704.
- [91] FENG Q Q, NIU Z T, ZHANG S Q, 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. DOI:10.1002/jsfa.13107.