

花生蛋白凝胶特性的研究进展

蒋雨珊, 章绍兵

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:花生蛋白是一种优质的植物蛋白资源,凝胶特性是其最重要的功能特性之一。综述了花生蛋白凝胶特性的主要影响因素,包括蛋白质浓度及其组成、pH及离子强度、温度和加热时间,总结了不同改性技术(物理改性、化学改性和酶法改性)对花生蛋白凝胶特性的影响,简要介绍了花生蛋白与其他来源蛋白的混合凝胶特性,同时介绍了花生蛋白凝胶性在食品中的应用,展望了对花生蛋白凝胶特性进一步研究的可能方向,为拓展花生蛋白在食品工业中的应用提供理论基础。

关键词:花生蛋白;凝胶特性;改性;进展

中图分类号:TS202.3;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2020)03-0098-05

Progress in gelling property of peanut protein

JIANG Yushan, ZHANG Shaobing

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

Abstract: Peanut protein is high-quality vegetable protein resource, and gelling property is one of the most important functional properties of peanut protein. The main factors affecting the gelling property of peanut protein were reviewed, including protein concentration and composition, pH, ionic strength, temperature and heating time. The effects of physical modification, chemical modification and enzymatic modification on the gelling property of peanut protein were summarized, and the gelling property of mixed gel composed of peanut protein and other protein was summarized. In addition, the applications of peanut protein gel in food industry were introduced, and the possible direction of further research on the gelling property of peanut protein was prospected to lay a good theoretical foundation for expanding the application of peanut protein in the food industry.

Key words: peanut protein; gelling property; modification; progress

我国是世界上最大的花生生产与加工国,拥有 8 000 余份花生品种资源、285 个主栽品种。2017 年我国花生种植面积达 526 万 hm^2 , 年产量为 2 362.5 万 $\text{t}^{[1]}$ 。花生仁中的蛋白质含量一般为 24%~36%, 其中有 90% 的盐溶性蛋白和 10% 的水溶性蛋白, 盐溶性蛋白中花生球蛋白(14S)、伴花生球蛋白 I (7.8S) 和伴花生球蛋白 II (2S) 之间的比例为 73:6:21^[2-3]。花生蛋白是一种营养价值较高的植物蛋白, 其营养价值与动物蛋白相近且不含胆

固醇, 富含大量人体必需氨基酸、维生素和微量元素等, 具有花生特有的清香气味。花生蛋白在人类饮食中重要性的体现, 不仅取决于其营养品质, 还取决于其功能特性, 花生蛋白的功能特性主要包括溶解性、持水性、黏度、胶凝性、乳化性、起泡性等^[4]。

近年来花生蛋白的凝胶特性受到了广泛的关注和研究。蛋白质凝胶化是通过蛋白质变性分子的聚集, 从而形成一个连续、有序的网络结构^[5]。参与凝胶网络形成的主要作用力有氢键、二硫键、疏水相互作用及静电相互作用^[6]。食品蛋白凝胶可大致分为热凝胶和冷凝胶两种: 蛋白质的热凝胶是将蛋白溶液经高温加热后, 再放置于低温下冷却形成的凝胶; 蛋白质的冷凝胶是在低蛋白浓度下加热蛋白溶液使得蛋白质变性聚集, 在室温下冷却后添加凝固剂形成的凝胶^[7-8]。本文对花生蛋白凝胶特性的

收稿日期:2019-05-28;修回日期:2019-10-28

作者简介:蒋雨珊(1996),女,硕士研究生,研究方向为蛋白质资源开发及利用(E-mail)201892062@stu.haut.edu.cn。

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

主要影响因素、改性对花生蛋白凝胶特性的影响及花生蛋白凝胶在食品中的应用进行综述,以期对花生蛋白凝胶特性的研究利用提供一定的参考。

1 花生蛋白凝胶特性的主要影响因素

1.1 蛋白质浓度及其组成

花生蛋白浓度是影响其凝胶形成的主要因素。冯治平等^[9]认为凝胶形成时的花生分离蛋白浓度应控制在8%~24%,并且在pH为8、Ca²⁺浓度为0.5 mol/L时,在85℃下加热30 min,15%花生分离蛋白形成的凝胶黏结性最大,网状结构密实。Yu等^[10]将不同浓度且pH为7.4的花生浓缩蛋白加热后,发现当浓度为7.5%形成溶胶,10%变成软凝胶,12.5%生成牢固的凝胶。Kella等^[11]配制了不同浓度的花生球蛋白,当溶液的pH为3.6时,在90℃下加热15 min形成一种热可逆凝胶,研究得到该体系的最低凝胶点(蛋白质质量浓度)为7.25 g/100 mL,在该质量浓度以上均可形成良好的凝胶网络。Wang^[12]认为花生球蛋白、伴花生球蛋白浓度低于6%时,均不能形成凝胶。当蛋白浓度为8%~18%时,花生球蛋白凝胶的硬度、胶凝性、持水性随着浓度的增加而增大,弹性在蛋白浓度达14%后基本平稳;伴花生球蛋白的凝胶硬度不断增大,而弹性在蛋白浓度达12%后基本变化平稳,胶凝性先上升后下降,蛋白浓度为16%时伴花生球蛋白的胶凝性最佳。王丽^[13-14]等研究发现,花生蛋白凝胶的弹性、硬度、内聚力与凝胶性成正相关,其中又以凝胶硬度最为重要,凝胶性更好的花生品种含有的花生粗蛋白、半胱氨酸、精氨酸及伴花生球蛋白I的含量也越高,且专用凝胶品种生产的花生蛋白粉的凝胶硬度是普通品种的4.1倍。刘岩等^[15]实验得到,伴花生球蛋白的弹性模量值约为花生球蛋白的5倍,表明伴花生球蛋白具有较强的凝胶形成能力,证明花生蛋白中伴球蛋白的含量越高,形成凝胶的能力越好。

1.2 pH及离子强度

李侠等^[16]利用水剂法制得花生蛋白,在pH为3时花生蛋白凝胶具有最大的凝胶硬度、持水性和储能模量;在中性和碱性范围内,pH为8时花生蛋白凝胶的硬度、持水性和储能模量最高。Zhu等^[17]采用葡萄糖酸内酯对花生蛋白溶液进行酸处理,测定其动态流变特性,发现酸诱导的花生分离蛋白凝胶的形成时间至少为40 min。花生主要蛋白组分与花生蛋白的情况有所不同,花生球蛋白在酸性条件(pH<3.8)下,蛋白质质量浓度高于7.5 g/100 mL时

形成一种具有热稳定性的凝胶^[18]。杜寅^[19]研究发现,一定浓度的花生球蛋白溶液,当pH低于6.0时花生球蛋白不能形成凝胶,当pH大于6.0时,花生球蛋白凝胶的弹性、硬度、胶凝性都在不断增加,pH为8.0时弹性略微下降,而pH为7.0时内聚性和持水性最低。伴花生球蛋白在pH3.0~11.0之间形成凝胶,弹性和持水性变化不大,当pH为5.0和8.0时硬度达到最大值,内聚力却恰好相反。得出结论,伴花生球蛋白的凝胶持水性优于花生球蛋白。

Schmidt等^[20]发现Na⁺浓度为0.1、0.3、0.5 mol/L时,花生蛋白凝胶强度均比未添加Na⁺时要差,当Ca²⁺浓度为0.5、10 mmol/L时花生蛋白凝胶强度无变化,Ca²⁺浓度为30 mmol/L时破坏了花生蛋白的胶凝能力,蛋白质产生沉淀。钟世荣等^[21]采用14%花生分离蛋白,在90℃、pH9.0时,分别加入不同浓度的Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺和Cu²⁺溶液,得出Ca²⁺浓度为0.06 mol/L时凝胶形成时间最短、硬度最大,Ca²⁺浓度为0.04 mol/L时凝胶透明度最高,Na⁺浓度为0.06 mol/L时凝胶持水性最好,加入Ca²⁺和Cu²⁺形成的凝胶胶粒较粗,加入Mg²⁺、Na⁺形成的胶粒较细。吴海文^[22]认为在酸性条件下,加入低浓度盐离子有利于蛋白形成强的凝胶,而在中性条件下,加入盐离子不利于蛋白形成凝胶。

总的来说,pH改变蛋白质的带电状态,进而影响蛋白质分子间的静电相互作用;无机盐则通过静电屏蔽和干扰疏水相互作用影响蛋白质分子间相互作用。

1.3 温度和加热时间

冯治平等^[9]设定花生分离蛋白溶液的加热温度为85℃,加热时间控制在45~60 min之间,13%和20%的花生分离蛋白都可形成凝胶。花生蛋白浓度越高加热时间越短,对于浓度较低的样品加热时间越长,凝胶形成性较好,胶粒较细。Kella等^[23]采用15 g/100 mL的花生球蛋白溶液,在90℃下水浴加热15 min,5℃冰水下冷却24 h,可制得花生球蛋白凝胶。杜寅^[19]在70~95℃下分别对花生球蛋白和伴花生球蛋白溶液加热,花生球蛋白和伴花生球蛋白凝胶的硬度、弹性、胶凝性、持水性都随温度的升高而呈现上升趋势。在95℃下对花生球蛋白溶液分别加热10~60 min,在10~30 min内花生球蛋白凝胶凝胶硬度、弹性、胶凝性和持水性随加热时间延长而增强,且弹性和胶凝性在30 min时达到最大值;在90℃下对伴花生球蛋白溶液分别加热10~60 min,随着加热时间的延长,伴花生球蛋白凝胶的硬度、弹性和持水性均增强,且在40 min时,其弹

性、内聚性、胶凝性和持水性均为最高。

2 改性对花生蛋白凝胶特性的影响

蛋白质的改性就是改变蛋白质的分子结构,使其理化性质发生变化,从而达到加强或改善蛋白质功能性质的目的。目前,花生蛋白的改性方法主要有物理改性、化学改性和酶法改性等。

2.1 物理改性

物理改性是利用热处理、高压微射流均质处理、高压处理、超声波处理等手段来改变蛋白质的高级结构及分子间的聚集状态,一般只对次级键产生影响,不会对蛋白质一级结构造成大的影响。

张健磊等^[24]将花生蛋白在 100 °C 下干热处理 3 d,改性后花生蛋白的凝胶硬度比改性前提高了 22%,并且凝胶弹性也较好。干热处理使花生蛋白的空间结构发生变化,导致巯基暴露,蛋白质分子内和分子间的疏水基团交联形成二硫键。张春雪^[25]对 8% 花生蛋白进行超高压微射流均质处理,然后浓缩制成 16% 花生蛋白凝胶,在均质压力为 20 ~ 160 MPa 内,随着均质压力的增加,凝胶强度先增加后减小再增加,在均质压力为 100 MPa 时达到最大值。当均质压力大于 100 MPa 时,由于均质作用较强,蛋白质的凝胶网络结构被破坏、分子聚集成团状结构,导致花生蛋白凝胶形成较为粗糙的网络结构。因此,在适当的温度和压力下,花生蛋白凝胶能形成均匀、致密及孔洞较小的网络结构。

He 等^[26]采用超高压改性花生分离蛋白,在 50 ~ 100 MPa 范围内,压力的增加对凝胶弹性无较大影响,凝胶硬度不断增加,在 100 MPa 时硬度最大且为未高压处理时的 1.5 倍,在 100 ~ 200 MPa 范围内,随着压力的增加,凝胶弹性和硬度都不断减小。通过对花生分离蛋白的结构分析发现,高压处理后由于花生分离蛋白分子的伸展导致了凝胶硬度的增加,使得花生分离蛋白结构疏松,暴露出更多的疏水性基团,提高了胶凝性能。Jiao 等^[27]研究高压均质处理分别对壳聚糖、瓜尔胶、黄原胶与花生分离蛋白形成的混合体系流变特性的影响,结果表明,高压均质处理使花生分离蛋白和多糖的分子链被破坏,分子链变短,延缓了混合体系的凝胶化。吴海文^[22]使用超声处理改善原始花生浓缩蛋白的速凝性质,超声处理后蛋白的游离巯基含量增加、二硫键含量减少,疏水键、氢键和静电作用成为蛋白质分子间主要的作用力,与未改性的花生浓缩蛋白相比,改性后蛋白更易形成凝胶。

2.2 化学改性

化学改性是通过加入化学试剂,使蛋白质部分

肽链断裂或引入功能基团,其结构、疏水基团和静电荷发生改变,从而使其功能性质改变。

Kella 等^[23]在 pH 为 3.6 时,分别加入不同浓度的 *D*-木糖、*D*-葡萄糖、*D*-蔗糖,发现糖降低了热诱导的蛋白质-蛋白质相互作用,花生球蛋白在糖的存在下结构更加紧密、有序,且糖的作用效果为 *D*-蔗糖 > *D*-葡萄糖 > *D*-木糖,花生球蛋白受到分子内部的疏水键和氢键的影响,导致其热凝胶性减弱,降低了凝胶强度。邵俊花等^[28]将 β -巯基乙醇加入花生蛋白溶液中,阻断了花生蛋白凝胶形成时二硫键的生成,增加了花生蛋白溶液的巯基基团的含量,使蛋白质形成凝胶速率和总体黏弹性降低。赵雪淞等^[29]使用亚硫酸盐对花生蛋白进行改性处理发现,花生浓缩蛋白的最低凝胶点从原始 18% 上升到 10%,改性处理后的蛋白溶液中游离的巯基含量更高,凝胶形成的时间更短。

2.3 酶法改性

酶法改性是在适宜的酶解体系下,通过改变蛋白质的结构等生物技术方法,使其功能特性发生改变。酶法改性主要分为酶聚合改性和酶降解改性。

转谷氨酰胺酶(TG 酶)通过酰基转移酶机制促进蛋白质的交联反应。吴海文等^[30]用 TG 酶对花生浓缩蛋白进行交联改性实验,发现蛋白凝胶硬度和弹性分别与底物质量浓度、pH、酶用量成正相关。熊柳等^[31]以凝胶硬度为指标,利用 TG 酶交联改性花生分离蛋白,使用响应面实验优化实验条件,发现花生分离蛋白在改性后凝胶硬度有显著的提高。芦鑫等^[32]以改性蛋白质产率和持水能力作为评价指标,采用响应面分析优化花生蛋白质改性的条件,发现使用 TG 酶改性后花生蛋白凝胶硬度是未改性的 3.94 倍。封小龙^[33]研究发现 TG 酶交联花生蛋白组分时,花生球蛋白的酸性亚基易发生交联反应,而碱性亚基不易受 TG 酶的影响,且伴花生球蛋白比花生球蛋白更易在 TG 酶的催化下发生分子内、分子间共价交联,TG 酶交联反应改善了花生蛋白组分的凝胶性。

碱性蛋白酶处理使花生蛋白分子结构展开、内部的疏水基团暴露,花生蛋白分子间疏水相互作用增强,促进了花生蛋白凝胶网络的形成。张俊婷^[34]利用碱性蛋白酶对花生蛋白溶液酶解 30 min,能够使花生蛋白溶液在 50 ~ 70 °C 的条件下形成凝胶,并且随着温度的升高,凝胶形成时间逐渐缩短,而未经酶处理的花生蛋白溶液在 70 °C 以下无法形成凝胶。Zhao 等^[35]采用碱性蛋白酶对花生分离蛋白进行酶解,结果表明,花生蛋白组分对碱性蛋白酶水解的敏

感程度为花生球蛋白酸性亚基 > 伴花生球蛋白亚基 > 花生球蛋白碱性亚基,碱性蛋白酶解提高了花生球蛋白的热稳定性,酶改性后的花生分离蛋白与未改性相比,二硫键急剧增加,游离巯基大量减少,极大地促进了凝胶的形成。

3 花生蛋白和其他来源蛋白的混合凝胶特性研究

Schmidt 等^[20]将花生粉和乳清蛋白混合,在总蛋白浓度 10%,100℃下加热 15 min 形成热致凝胶。发现当花生蛋白的比例为 12.5% 时,混合体系形成的凝胶较好;当花生蛋白的比例为 25% 或更高时,凝胶强度较低;当花生蛋白的比例在 50% 以上,只形成较弱的凝胶。杨庆利等^[36]制备花生蛋白粉、大豆蛋白粉和海藻酸钠的比例为 40:9:1 的混合凝胶,调节该混合体系的 pH 为 6.0~7.0,将上述溶液在 98℃下保温 50 min,得到合适的花生凝胶弹性和硬度。Gharst^[37]在质量分数 20%、pH 为 8.0 的花生粉溶液中分别加入 1.0%、2.5% 和 5.0% 的酪蛋白,经 TG 酶处理后,观察到花生粉与酪蛋白分散体系中有聚合物形成,并且随着酪蛋白含量的增加,聚合物的形成更加迅速。所有经 TG 酶后处理的花生粉与酪蛋白分散体系的凝胶化温度均升高,且经酶处理样品的黏度变小、持水性增加,酪蛋白被证明是与花生粉有效的共底物。总的来说,这些数据表明花生粉与酪蛋白聚合物在高蛋白花生类食品中具有潜在用途。

4 花生蛋白凝胶性在食品中的应用

花生蛋白凝胶的制作工艺多种多样,不同工艺生产的凝胶产品也具有不同的特点和食品加工中的应用范围。崔旭海等^[38]发现不同添加量的花生分离蛋白均能有效地改善鱼糜凝胶的弹性模量、黏性模量、凝胶强度及持水性,当添加量为 8% 时,鱼糜的凝胶强度达到最大值,且对鱼糜色泽的保持效果最好。Sun 等^[39]研究探讨了花生分离蛋白对热诱导凝胶化过程中鸡肉盐溶性蛋白功能特性的影响,花生分离蛋白的加入提高了混合凝胶的持水能力、凝胶强度和弹性,形成了更紧密的凝胶结构。封小龙^[33]使用 TG 酶交联花生球蛋白、伴花生球蛋白得到的凝胶产品应用于香肠中,使香肠获得更好的口感和质地,具有良好的咀嚼性。

以花生为原料制作豆腐也是近年来研究的热点,通常有盐卤豆腐、内酯豆腐、石膏豆腐 3 种类型。为改善花生豆腐凝胶质构,采用复合凝固剂成为一种新的趋势。张瑞宇等^[40]按不同比例配制乙酸钙、高酰基结冷胶、低酰基结冷胶、卡拉胶和单甘酯,得到复合凝固剂可明显改善花生蛋白的凝胶形成和凝

胶性质,得到的花生豆腐具有优异的感官品质和质构特性。Quoc 等^[41]以花生为原料,研究了影响软花生豆腐制品结构的主要因素,发现加热时间为 4.5 min、CaSO₄含量为 2.75%、挤压力为 40 N 时,得到软花生豆腐的硬度最佳,为 0.35 N。Guo 等^[42]建立了一种将 TG 酶与高温高压蒸煮结合制备花生豆腐的新方法,并研究其凝胶形成,发现添加 0.75 mg/g 的 TG 酶明显改善了豆腐的质地,豆腐的网孔相对均匀、结构更加致密。

5 结束语

凝胶形成的能力是蛋白质的重要功能特性之一,花生蛋白的凝胶特性受蛋白质浓度及其组成、pH、离子强度、温度和加热时间等因素的影响,也与其本身的分子结构性性质密切相关。对花生蛋白进行适当的改性处理可以显著改善其凝胶性能。目前,花生蛋白及其组分凝胶性质的研究虽有较多报道,但与大豆蛋白相比,对花生蛋白分子亚基水平热聚集及胶凝机理等方面的研究还不够深入。因此,为了进一步阐明花生蛋白凝胶性的分子结构基础,有必要在以后的研究中通过合适的方法直接得到花生蛋白的不同亚基,或者通过育种方法获得特定蛋白亚基缺失的花生品种,分析花生蛋白不同亚基分子结构与凝胶性的构性关系,为拓展花生蛋白在食品工业中的应用奠定良好的理论基础。

参考文献:

- [1] 福达花生网. 2018 年中国花生种植面积及生长情况调研[EB/OL]. (2018-08-14)[2019-05-25]. http://www.sohu.com/a/247111267_654616.
- [2] 裴剑慧,王强,周素梅. 我国花生蛋白资源的开发与利用[J]. 粮油加工与食品机械, 2005(12): 53-55.
- [3] 赵谋明,辛佩贤,陈楠楠,等. 花生球蛋白和伴花生球蛋白在酸性条件下亚基结构的变化规律[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 30-35.
- [4] ANDRÉS M, SINEIRO J, HERMINIA D, et al. Functionality of oilseed protein products: a review[J]. Food Res Int, 2006, 39(9): 945-963.
- [5] HERMANSSON A M. Aggregation and denaturation involved in gel formation[M]. Washington D C: American Chemical Society, 1979: 82-103.
- [6] 胡坤,方少瑛,王秀霞,等. 蛋白质凝胶机理的研究进展[J]. 食品工业科技, 2006, 27(6): 202-205.
- [7] 刘德阳. 盐离子对大豆分离蛋白凝胶特性和微结构影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2015.
- [8] 封小龙,刘红芝,刘丽,等. 冷沉法制备花生球蛋白及伴花生球蛋白工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(3): 57-62.

- [9] 冯治平, 吴士业. 花生分离蛋白凝胶形成条件及凝胶特性研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(7): 77-80.
- [10] YU J, AHMEDNA M, GOKTEPE I. Peanut protein concentrate: production and functional properties as affected by processing[J]. Food Chem, 2007, 103(1): 121-129.
- [11] KELLA N K D. Heat-induced reversible gelation of arachin: kinetics, thermodynamics and protein species involved in the process[J]. Int J Biol Macromol, 1989, 11(2): 105-112.
- [12] WANG Q. Peanut processing characteristics and quality evaluation[M]. Singapore: Springer Nature, 2018:436-454.
- [13] 王丽, 王强, 刘红芝, 等. 不同品种花生分离蛋白凝胶性评价方法的研究[J]. 中国油脂, 2012, 37(7): 20-23.
- [14] 王丽, 王强, 刘红芝, 等. 花生品质对其蛋白质凝胶性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 260-267.
- [15] 刘岩, 赵冠里, 苏新国. 花生球蛋白和伴球蛋白的功能特性及构象研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9): 2095-2101.
- [16] 李侠, 章绍兵. 对水剂法提取花生蛋白凝胶特性的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 55-60.
- [17] ZHU Y D, LI D, WANG L J. Dynamic rheological properties of peanut protein isolate and aggregation suspension and acid-induced gel[J]. Powder Technol, 2018, 8: 52[2019-05-25]. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.052>.
- [18] KUMAR K D N, NANDI P K, RAO M S N. Reversible gelation of arachin[J]. Int J Pept Protein Res, 1980, 15(1): 67-72.
- [19] 杜寅. 花生蛋白主要组分的制备及凝胶特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [20] SCHMIDT R H, ILLINGWORTH B L, AHMED E M. Heat-induced gelation of peanut protein/whey protein blends[J]. J Food Sci, 1978, 43(2): 613-621.
- [21] 钟世荣, 冯治平, 吴士业. 金属离子对花生分离蛋白凝胶形成特性的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(7): 173-176.
- [22] 吴海文. 花生浓缩蛋白的制备、凝胶形成机理及其应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- [23] KELLA N K D, POOLA I. Sugars decrease the thermal denaturation and aggregation of arachin[J]. Chem Biol Drug Des, 1985, 26(4): 390-399.
- [24] 张健磊, 崔波. 高温处理提高花生蛋白凝胶性的研究[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(1): 68-70.
- [25] 张雪春. 超高压微射流技术对花生蛋白改性的研究[D]. 江西南昌: 南昌大学, 2007.
- [26] HE X H, LIU H Z, LIU L, et al. Effects of high pressure on the physicochemical and functional properties of peanut protein isolates[J]. Food Hydrocoll, 2014, 36: 123-129.
- [27] JIAO B, SHI A, LIU H, et al. Effect of electrostatically charged and neutral polysaccharides on the rheological characteristics of peanut protein isolate after high-pressure homogenization[J]. Food Hydrocoll, 2017, 77: 329-335.
- [28] 邵俊花, 吴菊清, 周光宏, 等. 巯基和疏水性对蛋白质乳化和凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 155-159.
- [29] 赵雪淞, 蔺雅菲, 刘民. 亚硫酸钠对花生浓缩蛋白功能性质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(15): 124-129.
- [30] 吴海文, 王强, 马铁铮, 等. 转谷氨酰胺酶催化花生浓缩蛋白对凝胶硬度和弹性的影响[J]. 中国油脂, 2009, 34(6): 31-35.
- [31] 熊柳, 孙庆杰, 刘砚, 等. 响应面优化转谷氨酰胺酶改性花生分离蛋白工艺的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 44-49.
- [32] 芦鑫, 高锦鸿, 曹宇锋, 等. 谷氨酰胺转氨酶改性花生蛋白质研究[J]. 河南农业科学, 2018, 47(8): 142-148.
- [33] 封小龙. 花生蛋白组分制备、改性及应用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [34] 张俊婷. 限制性酶解法制备花生蛋白凝胶及其性质研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [35] ZHAO G L, LIU Y, ZHAO M M, et al. Enzymatic hydrolysis and their effects on conformational and functional properties of peanut protein isolate[J]. Food Chem, 2011, 127(4): 1438-1443.
- [36] 杨庆利, 刘洪对, 朱凤, 等. 一种花生蛋白与大豆蛋白复合凝胶的制备方法: CN201010209392.4[P]. 2010-11-10.
- [37] GHARST G A. Biochemical and rheological characterization of peanut proteins crosslinked with microbial transglutaminase[D]. Raleigh: North Carolina State University, 2012.
- [38] 崔旭海, 毕海丹, 崔晓莹, 等. 不同食用蛋白的添加对鲤鱼鱼糜流变和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 195-200, 225.
- [39] SUN J X, WU Z, XU X L, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation[J]. Meat Sci, 2012, 91(1): 88-92.
- [40] 张瑞宇, 雷宇娇. 灭菌型花生豆腐商品化生产工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(22): 303-307.
- [41] QUOC L P T, THANH H H T, HA N D T, et al. Determination of factors effecting on the hardness of soft peanut tofu using screening model[J]. Emir J Food Agric, 2012, 25(2): 97-101.
- [42] GUO Y, HU H, WANG Q, et al. A novel process for peanut tofu gel: its texture, microstructure and protein behavioral changes affected by processing conditions[J]. Food Sci Technol, 2018, 96: 140-146.