

## 热处理对大豆蛋白结构的影响及其乳液的研究进展

朱秀清, 高颖, 宣希寰, 韩田露, 朱颖, 黄雨洋, 付雨欣

### Research Progress on the Effect of Heat Treatment on Soy Protein Structure and Emulsions

ZHU Xiuqing, GAO Ying, XUAN Xihuan, HAN Tianlu, ZHU Ying, HUANG Yuyang, and FU Yuxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.202407198>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 热处理对金枪鱼蛋白乳液稳定性的影响

Effect of Heat Treatment on the Stability of the Tuna Protein Emulsion

食品工业科技. 2024, 45(11): 86–92 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070287>

#### 热处理和蛋白浓度对肌原纤维蛋白乳液的稳定性和流变特性的影响

Effect of Heat Treatment and Protein Concentration on the Stability and Rheological Properties of Myofibrillar Protein Emulsion

食品工业科技. 2022, 43(23): 56–63 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020066>

#### 高压均质对大豆蛋白乳液性质影响的研究进展

Research Progress on the Effects of High Pressure Homogenization on the Properties of Soybean Protein Emulsions

食品工业科技. 2023, 44(1): 465–474 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030135>

#### 高压均质技术对大豆蛋白结构和发酵特性影响研究进展

Research Progress on Effects of High Pressure Homogenization on Structure and Fermentation Characteristics of Soy Protein

食品工业科技. 2022, 43(13): 425–433 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070123>

#### 枯草芽孢杆菌对大豆蛋白-磷脂复合乳液在体外消化中稳定性的影响

Effects of *Bacillus subtilis* on the Stability of Soybean Protein-Phospholipid Composite Emulsion *in Vitro* Digestion

食品工业科技. 2021, 42(1): 132–138 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020010100>

#### 大豆分离蛋白-蔗糖酯对不同油脂制备的乳液稳定性的影响

Effect of Soy Protein Isolate-Sucrose Ester on the Stability of Emulsion Prepared by Different Oil

食品工业科技. 2024, 45(8): 110–118 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050200>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

朱秀清,高颖,宣希寰,等.热处理对大豆蛋白结构的影响及其乳液的研究进展 [J].食品工业科技,2025,46(12):404–411. doi:10.13386/j.issn1002-0306.202407198

ZHU Xiuqing, GAO Ying, XUAN Xihuan, et al. Research Progress on the Effect of Heat Treatment on Soy Protein Structure and Emulsions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 404–411. (in Chinese with English abstract). doi:10.13386/j.issn1002-0306.202407198

·专题综述·

# 热处理对大豆蛋白结构的影响及其乳液的研究进展

朱秀清,高 颖,宣希寰,韩田露,朱 颖\*,黄雨洋,付雨欣

(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,绿色食品加工与贮藏省级工程实验室,黑龙江哈尔滨 150076)

**摘要:**近年来,大豆蛋白因其独特的营养价值和优异的乳化性能,在食品、医药、化妆品等行业得到了广泛应用。然而,大豆蛋白作为乳化剂的应用受到一定限制,因此,改性处理成为提升其乳化能力的关键措施。热处理作为一种常见的加工方法,能够引起大豆蛋白的变性和聚集,从而显著影响其结构和功能,进而增强大豆蛋白乳液的乳化性和稳定性。本文综述了大豆蛋白乳液制备、热处理对大豆蛋白二级结构、亚基、粒径电位及其乳液性质的影响,重点分析了其在乳化性、乳液稳定性、流变性及界面特性方面的作用。此外还探讨了大豆蛋白乳液在3D打印、活性物质递送及生物塑料领域的潜在应用。最后,针对未来大豆蛋白乳液的发展,提出了优化热处理技术及其应用的建议,以期为大豆蛋白乳液的进一步发展提供参考。

**关键词:**大豆蛋白,热处理,乳液,蛋白结构,稳定性

中图分类号:TS214.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2025)12-0404-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.202407198

本文网刊:



## Research Progress on the Effect of Heat Treatment on Soy Protein Structure and Emulsions

ZHU Xiuqing, GAO Ying, XUAN Xihuan, HAN Tianlu, ZHU Ying\*, HUANG Yuyang, FU Yuxin

(College of Food Engineering of Harbin University of Commerce, Key Laboratory of Food Science and Engineering of Heilongjiang Province, Key Laboratory of Grain Food and Comprehensive Processing of Grain Resource of Heilongjiang Province, Green Food Processing and Storage Provincial Engineering Laboratory, Harbin 150076, China)

**Abstract:** In recent years, soybean protein is widely used in industries such as food, medicine, and cosmetics due to its unique nutritional value and excellent emulsifying properties. However, the application of soybean protein as an emulsifier is somewhat limited. Therefore, modification treatments have become essential measures to enhance its emulsifying capacity. Heat treatment, as a common processing method, can cause the denaturation and aggregation of soybean protein, significantly affecting its structure and functionality, thereby potentially improving the emulsifying properties and stability of soybean protein emulsions. This article reviews the preparation of soybean protein emulsions and the effects of heat treatment on the secondary structure, subunits, particle size and zeta potential, and properties of soybean protein emulsions. It focuses on analyzing their roles in emulsification, emulsion stability, rheological properties, and interfacial characteristics. Additionally, the potential applications of soy protein emulsions in 3D printing, active substance delivery, and bioplastics are explored. Finally, suggestions for optimizing heat treatment techniques and their applications are proposed to support the further development of soybean protein emulsions.

收稿日期: 2024-07-16

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 (LJGXC2022-084)。

作者简介: 朱秀清 (1968-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: xqzhuwang@163.com。

\* 通信作者: 朱颖 (1992-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 植物蛋白加工与利用, E-mail: 13258512068@163.com。

**Key words:** soy protein; heat treatment; emulsion; protein structure; stability

乳液是由两种互不相溶的液体, 经过搅拌或添加乳化剂混合, 一种液体(分散相)以液滴的形式分散在另外一种液体(连续相)中<sup>[1]</sup>。失稳现象一直是食品乳液存在的卡点问题, 因此选择适宜的乳化剂提高乳液稳定性显得尤为重要。近年来的研究表明, 与传统乳化剂相比, 蛋白质粒子在乳液体系中能够从连续相扩散至油水界面, 并在油滴表面吸附形成一层界面膜。这层膜阻止了液滴间的接近和聚集, 有效降低了界面张力及体系的整体自由能, 进而显著提升了乳化体系的稳定性<sup>[2]</sup>。

大豆含有约 40% 的蛋白质和 20% 的油脂<sup>[3]</sup>, 是重要的植物蛋白质来源。大豆分离蛋白(Soy protein isolate, SPI)是从大豆粕中提取出来的一种优质蛋白<sup>[4]</sup>, 可分为 2S、7S、11S 和 15S 球蛋白四个组分。其中, 7S 和 11S 球蛋白含量较高, 占大豆储藏蛋白 70% 以上<sup>[5]</sup>。SPI 具有良好的功能特性, 主要包括乳化性、凝胶性、成膜性及保健功能。SPI 由于其亲疏水性, 能够吸附在油滴表面并稳定油滴, 防止油滴聚集。然而, 由于许多商业大豆蛋白产品的溶解度差, 其作为乳化剂的应用仍然非常有限<sup>[6]</sup>。目前研究通过蛋白修饰改变蛋白质的结构和功能, 以满足生产、制造和商业需要<sup>[7]</sup>。蛋白质修饰可以通过化学、物理或酶方法来实现。作为最常见的物理改性方法, 热处理通过加热改变蛋白质的物理性质, 如溶解度、稳定性和活性<sup>[8]</sup>, 不会产生安全问题, 并且可以显著降低生产成本。因此, 热处理改变大豆蛋白特性的方法受到研究人员和食品制造商的青睐。

热处理作为一种广泛使用的蛋白质改性和预处理技术, 能够显著影响蛋白质亚基之间的相互作用, 改变蛋白质的结构, 进而调节其功能。对于球状蛋白质而言, 热诱导变性和聚集会导致原本隐藏在天然构象中的疏水基团暴露, 这不仅增加了蛋白质的表面疏水性, 还减少了其净电荷。这种变性和结构展开对于提高球状蛋白质的乳化特性至关重要<sup>[9]</sup>。对 SPI 溶液进行热处理, 可以在界面处形成蛋白质聚集体。这些聚集体的大小受到蛋白质浓度和加热温度的影响, 表明可以通过调节这些参数来控制聚集体的形成<sup>[10]</sup>。研究表明, 经过预热处理(95 °C, 15 min)的 SPI 在稳定乳状液方面的理化特性、微观结构和稳定性都得到了显著提升<sup>[11]</sup>, 特别是其乳化能力和乳状液的氧化稳定性。此外, 其他研究者也发现, 在较高浓度下加热大豆蛋白可以改善乳化性能, 这一点从乳滴大小、吸附百分比和表面负载等方面得到了证实<sup>[12]</sup>。热处理通过改变蛋白质的结构和聚集状态, 对大豆蛋白的乳化性能和乳液稳定性产生了积极的影响。通过优化热处理条件, 可以显著提升大豆蛋白在食品工业中的应用潜力, 尤其是乳化剂和乳液稳定剂的开发方面。

基于此, 本文首先介绍了热处理对大豆蛋白结构的影响, 包括热处理过程中蛋白质的聚集以及构象变化等。其次, 综述了热处理对大豆蛋白乳液性质的影响, 重点介绍了热处理对蛋白质的乳化能力及乳液稳定性的影响及作用机制。此外, 还讨论了大豆蛋白乳液的研究应用, 包括 3D 打印, 活性物质递送及生物塑料等方面。最后, 本文提出了热处理大豆蛋白一些挑战和前景, 为未来的研究和应用提供了新的思路和方向。

## 1 大豆蛋白乳液及其制备

### 1.1 大豆蛋白乳液

大豆蛋白乳液是一种乳浊液, 利用大豆蛋白作为分散剂, 将油均匀分散于水。大豆蛋白(SPI)作为氨基酸型表面活性剂, 其亲水基团与水结合, 疏水基团与油相互作用, 形成稳定的蛋白质膜, 降低界面张力, 减少乳化所需能量<sup>[13]</sup>。这种膜促进水和油的混合, 实现乳化, 形成相对稳定的乳状液。SPI 覆盖的油滴形成蛋白质保护膜, 防止聚集并维持乳化稳定性。同时, 油滴表面的电荷通过吸附、摩擦和离子强度等因素影响, 增强了静电排斥, 进一步提高乳液的稳定性。

大豆蛋白作为乳化剂的广泛应用受限, 热处理是蛋白质最常用的改性和预处理方法之一, 已被证明对提高乳化能力有效。热处理制备大豆蛋白乳液的具体过程如图 1 所示。热处理是提升蛋白质乳化能力的常用方法。预变性蛋白质能提高耐热性, 从而增强乳液的热稳定性<sup>[14]</sup>。与天然蛋白相比, 使用可溶性蛋白聚集体制备的乳液具有更佳的耐热性<sup>[15]</sup>, 因此增强蛋白质热稳定性对高蛋白乳液的生产至关重要。通过预热可控制蛋白聚集, 提高乳状液的热稳定性<sup>[16]</sup>。研究发现, 在乳化前提高蛋白质的热稳定性显著提升了乳状液的稳定性。改性大豆蛋白颗粒在加热过程中表现出良好的流动性和热稳定性<sup>[17]</sup>, 即使在高浓度时也如此。此外, 常规热处理和亚临界水处理对大豆蛋白的表面活性有促进作用<sup>[18]</sup>, 显著提高泡沫容量和稳定性。因此, 热处理因操作简单而广泛应用于水溶性蛋白的改性。

### 1.2 大豆蛋白乳液的制备

大豆蛋白乳液的制备方法有超声法、高压均质法和微射流法等。具体制备方法如表 1 所示。

综上所述, 大豆蛋白乳液的稳定性受多种因素影响, 包括蛋白质的物理化学特性、制备方法和预处理过程。热处理是一种有效的改性方法, 可以增强蛋白质的热稳定性和乳液的性能, 是提升大豆蛋白乳液质量的重要手段。

## 2 热处理对大豆蛋白乳液中蛋白结构的影响

热处理通过改变大豆蛋白结构, 促使其分解并

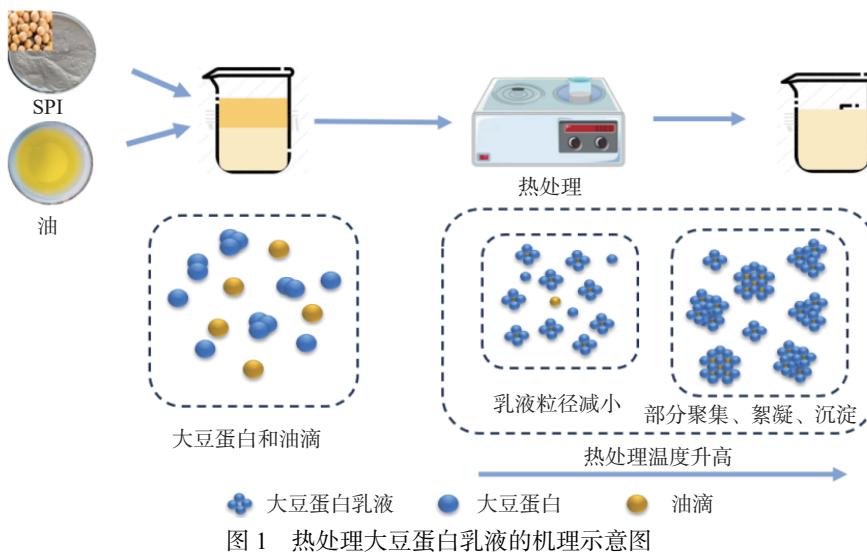


图1 热处理大豆蛋白乳液的机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the mechanism of heat-treated soy protein emulsion

表1 大豆蛋白乳液的制备方法及特点

Table 1 Preparation methods and characteristics of soy protein emulsions

制备方法	原理	结果	优点	缺点	文献
高压均质	通过高速剪切、高频振荡、空化效应、对流冲击等作用将乳化液液滴会被分解成小的乳化液液滴	改变蛋白二级结构，提高稳定性	高效制备理想粒径乳液，并显著减少乳化剂用量	能耗较高，可能升高乳液温度，不适合高粘度体系	[19]
超声处理	利用声空化和湍流产生机械剪切力，能引起蛋白质的物理和化学变化	显著增强静电相互作用，降低液滴粒径并改善乳化性能	能制备出更细小的乳液粒径，减少乳化剂用量和能源消耗	缺乏高效工业设备，超声不适合大规模生产	[20]
微射流	通过高速冲击和剪切力改善蛋白质的物理性质，利用流动聚焦微流控装置制备出均匀、稳定的大豆蛋白乳液	乳液乳化均匀一致性更好	能制备更细小的液滴，适合对精度要求高的生物医学应用	设备精密且成本高、操作复杂	[21]
热处理	通过加热使蛋白质或表面活性剂发生变性，从而增强其乳化性能，形成稳定的乳液	提升蛋白质乳化能力	提高蛋白质乳化能力，增强乳液热稳定性	热敏感成分的降解，从而影响乳液的营养价值和风味	[14]

展开<sup>[22]</sup>。这一过程使得原本隐藏在蛋白质内部的疏水基团暴露出来，进而引发蛋白质分子间的聚集作用。随着蛋白质构象的改变和分子间相互作用方式的调整，大豆蛋白乳液的性质也随之发生变化。

## 2.1 热处理对大豆蛋白二级结构的影响

随着热处理温度的升高，蛋白质内部分子碰撞的频率增加，导致蛋白质凝聚速度加快，进而促使蛋白质二级结构发生变化，从而改变蛋白质分子结构<sup>[23]</sup>。热处理具有双重作用，既能破坏也能增强蛋白质的 $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠结构，进而导致蛋白质分子的二级结构发生显著变化。热处理对 $\beta$ -伴大豆球蛋白的结构特性产生明显影响<sup>[24]</sup>，导致蛋白质聚集体的形成和二硫键数量减少。加热后， $\beta$ -伴大豆球蛋白的无规卷曲和 $\beta$ -折叠含量降低， $\beta$ -转角和 $\alpha$ -螺旋的含量增加，同时结构展开，暴露更多疏水区域，可能影响抗原性和致敏性。研究发现，在20~60℃加热时11S蛋白结构稳定<sup>[23]</sup>，但80℃以上时 $\beta$ -折叠明显减少。傅里叶变换红外光谱技术研究表明<sup>[25]</sup>，热处理增强了大豆11S球蛋白的 $\beta$ -折叠氢键。核磁共振结果显示<sup>[25]</sup>，当加热至95℃时，含Gln和Glu的 $\alpha$ -螺旋结构逐渐解体。

综上所述，热处理通过改变蛋白质分子的碰撞频率和相互作用，对大豆蛋白的二级结构和整体构象

产生重要影响。导致聚集体形成、结构改变及抗原性变化。温度降低 $\beta$ -折叠含量，促进 $\alpha$ -螺旋解体，并增强氢键。这些结构变化不仅关系到蛋白质的物理化学性质，还可能影响其生物学功能和应用特性。

## 2.2 热处理对大豆蛋白亚基的影响

热处理能够对大豆11S和7S球蛋白的结构、溶解性和聚集状态产生重要影响并显著影响SPI的亚基间相互作用<sup>[26~28]</sup>，引发蛋白质亚基的解离以及蛋白质间相互作用的增强<sup>[29]</sup>。研究揭示，在100℃对大豆11S球蛋白进行热处理时，大部分球蛋白分子迅速形成了可溶性聚集体<sup>[30]</sup>。随着加热时间的持续，这些聚集体逐渐增大，最终转变为沉淀。随着大豆蛋白浓度的增加，热处理后的可溶蛋白中 $\beta$ -11S多肽链、 $\alpha$ 、 $\alpha'$ 、 $\beta$ -7S亚基的含量减少，而A-11S多肽和乳清蛋白的含量增多<sup>[31]</sup>。随着加热温度的升高，SPI亚基尤其是AB亚基含量逐渐降低，甚至可能完全消失<sup>[32]</sup>。在超过变性温度的情况下，11S亚基的含量显著低于7S亚基。此外，7S中的 $\beta$ -多肽含量的减少幅度超过了 $\alpha'$ 和 $\alpha$ 多肽的含量减少幅度。热变性的大豆蛋白倾向于通过二硫键形成可溶性聚合物，这是由于11S中的碱性多肽优先与7S的 $\beta$ -多肽相互作用，导致聚集体的形成。

总体而言，热处理对蛋白质空间结构的影响导

致蛋白质分子结构的变化。热处理的效果取决于处理条件和蛋白质的特性。适当的热处理可以提升蛋白质的功能性能和稳定性, 但过度的热处理可能会导致蛋白质发生变性和失活。

### 2.3 热处理对大豆蛋白粒径和电位的影响

乳液的颗粒大小和 $\zeta$ 电位是其理化性质的关键指标, 与蛋白质在油滴表面的吸附密切相关<sup>[33]</sup>。乳液稳定性受界面层的吸引力和排斥力影响, 提高静电斥力可以增强抗聚集能力。较高的 $\zeta$ 电位绝对值和较小的颗粒尺寸通常意味着更高的稳定性<sup>[34]</sup>。此外, Zeta 电位和平均粒径反映蛋白质溶液的稳定性、聚集程度及分子结构变化。

在 80 °C 和 90 °C 下, Zeta 电位绝对值随热处理时间延长而减小<sup>[35]</sup>; 在 100 °C 下, Zeta 电位先减小后增大, 伴随平均粒径增加。这表明热处理改变了蛋白质结构并影响其在油水界面的吸附作用。随着加热温度升高, 乳液的平均粒径初减后又增大, 粒径分布系数逐渐增大<sup>[36]</sup>。在 50 °C 下, 乳液粒径较小且分布集中, 因蛋白质结构未显著变化; 而 90 °C 加热使蛋白质展开, 疏水基团暴露<sup>[32]</sup>, 形成可溶性聚集体, 阻碍了对油滴的有效包裹, 导致乳液粒径增大。此外, 1% 大豆蛋白在 95 °C 加热时, 乳状液颗粒大小和黏度显著增加, 透射电镜显示高温下形成较大蛋白质聚集体, 比 75 °C 处理的乳液粒径更大<sup>[37]</sup>。

热处理通过促进蛋白质分子间的聚集和凝聚作用, 导致蛋白质颗粒尺寸的增大。这种聚集作用通常伴随着蛋白质溶解性的降低和稳定性的变化。此外, 热处理还能够改变大豆蛋白的电荷状态, 影响与其他物质的相互作用, 包括水、油脂以及食品体系中其他成分等。

## 3 热处理对大豆蛋白乳液性质的影响

### 3.1 乳化性

乳化性是物质在水和油之间形成均匀、稳定乳液的能力, 良好的乳化剂具有亲水性和亲油性<sup>[11]</sup>。乳化活性(EAI)指物质形成乳液的能力, 而乳化稳定性

(ESI)则评价其抵抗分层的能力<sup>[14]</sup>, 二者共同影响乳液的稳定性和均匀性。

采用不同的加热方式和参数(常压保温、超高温瞬时加热以及喷雾干燥<sup>[38]</sup>)制备的 SPI 溶液在热处理前期乳化性和稳定性暂时下降, 但随时间延长, 这些特性并未显著变化。乳化性和稳定性受到蛋白质柔顺性和疏水性的影响<sup>[39]</sup>, 疏水性增加可以促进蛋白质快速迁移至界面, 而柔顺性则有助于分子在界面的重新排列。热处理后, 大豆分离蛋白的疏水性提高, 同时形成可溶性聚集体, 这可能导致蛋白质的柔顺性下降, 从而影响乳化性能。在热处理过程中, 大豆蛋白的部分结构展开, 增加了其表面的疏水性<sup>[40]</sup>, 如图 2 所示。热处理促进了可溶性聚集体的形成, 增加了吸附蛋白含量, 并改善了 EAI 和 ESI<sup>[41]</sup>。低浓度短时间热处理可以提升大豆分离蛋白的 EAI<sup>[42]</sup>, 但当浓度升高至 10% 时, EAI 反而下降。这表明过度的热处理可能导致蛋白质的变性和乳化性能的下降。热处理通过促进大豆蛋白分子去折叠和再组装, 暴露出更多的亲水和疏水基团, 从而增强其在油水界面上的吸附能力, 有助于形成更稳定的乳液结构。此外, 热处理可改变大豆蛋白分子之间的相互作用, 影响其在乳化过程中的分散状态和效率。同时, 热处理还可能破坏大豆蛋白分子中的二硫键共价交联, 加速蛋白质基团的膨胀, 并促进非极性区域间疏水基团的相互作用, 从而提升乳化能力。

综上所述, 热处理对大豆蛋白乳液的乳化性具有复杂的影响。适当的热处理可以优化蛋白质的结构和功能, 提高乳液的稳定性和乳化性能, 但过度的热处理可能导致蛋白质的变性和乳化性能的下降。

### 3.2 流变性

热处理通过增强乳液中分子间的相互作用, 增加储能模量( $G'$ )<sup>[43]</sup> 和损耗模量( $G''$ )<sup>[44]</sup>, 从而提高了液体对变形的抵抗力。它还可能引起分子结构的改变, 影响乳液的流变性能, 包括储能模量、损耗模量和黏度等。

众多研究已经证实, 大豆蛋白在不同热处理条

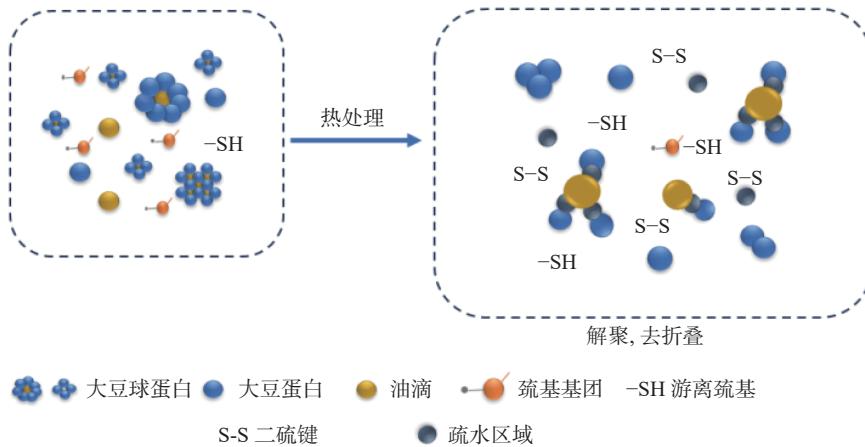


图 2 热处理对大豆蛋白乳液蛋白空间结构的影响

Fig.2 Effect of heat treatment on the spatial structure of soy protein in emulsion

件下的流变特性会发生显著变化。预热处理引起蛋白质部分变性,其中 G'大于 G'',表明形成了稳定的弱凝胶结构<sup>[45]</sup>。随着蛋白质间相互作用的增强,乳液的表观粘度增加,流动性能指数(n)降低,流动稠度指数(K)升高,进一步证实了液滴间相互作用的加强。再加热过程中,G'的显著增加揭示了热处理对乳液结构稳定性的积极影响,尤其是在蛋白质浓度较高的情况下。这些变化归因于二硫键和疏水作用的增强,促进了分子间的聚集<sup>[46]</sup>。热处理增加了大豆蛋白乳液的表观粘度并减弱了其流动性,使乳液表现出非牛顿流体的特性<sup>[37]</sup>。这一现象归因于热处理促进了液滴间的相互作用和絮凝,导致粘度增加<sup>[37]</sup>。n 的下降和 K 的上升进一步表明了液滴间相互作用的强化。再加热处理后,乳液粘度的提高与蛋白质热变性及其聚集抗性的增强密切相关<sup>[47]</sup>。在酸性条件下,通过增加加热时间,纤维成型 SPI 溶液的 G'和 G''显著增加,表明热变性和酸变性显著改变了 SPI 溶液的弹性变形性和粘性特性,促进了液态与凝胶态之间的转变<sup>[48]</sup>。在未加热状态下,SPs(未改性大豆蛋白分散体)和 MSPs(改性大豆蛋白分散体)的 G'无显著差异。然而,当蛋白质浓度提高时,SPs 的 G'显著增加,而 MSPs 的 G'保持稳定。MSPs 在热处理后的流动性能和稳定性优于 SPs,主要归因于其蛋白质结构的改善和表面疏水性的增强<sup>[17]</sup>。高温处理显著增强了 SPI 凝胶的弹性和粘性,G'和 G''均明显高于未处理样品<sup>[49]</sup>。这与高温促进了纤维素纳米纤维数量的增加及其氢键强度的增强有关,从而提升了凝胶的黏度和流变性能。这些结果表明,热处理是调控大豆蛋白乳液流变特性的有效手段。

综上所述,热处理显著改善了大豆蛋白乳液的流变特性,这主要表现在增加储能模量、增强蛋白质结构的稳定性以及改善其流动性和凝胶能力。通过调整大豆蛋白分子的结构和相互作用,热处理优化了乳液在应变下的流变行为,增强了油-水界面的吸附能力,促进了更稳定的乳液结构的形成,并提高了乳液的整体稳定性。此外,热处理还影响了大豆蛋白分子间的分散和流动特性,进一步提升了乳液的流变性能。

### 3.3 界面蛋白吸附量

界面蛋白含量是评估乳液稳定性的重要指标之一,通常与蛋白质在油水界面的吸附量成正比<sup>[50]</sup>。热处理通过改变大豆蛋白分子的结构和构象,有效调节其在油水界面的吸附能力和相互作用方式,进而影响大豆蛋白乳液的界面蛋白吸附量。研究表明,热处理后的 SPI 表现出较大的表观扩散速率和较短的平衡吸附时间<sup>[51]</sup>,表明热处理能够提升其界面行为和吸附能力。加热过程促使大豆蛋白分子结构展开,伴随着表面疏水性的提升和多肽链间相互作用的加强。这一变化不仅促进了蛋白分子结构的展开,还增强了多肽链之间的相互作用,导致二硫键连接的聚集体形

成。经过加热处理的 SPI 稳定乳液的吸附率(AP%)随着存储时间的延长而提高,尤其在 90 °C 和 120 °C 的加热条件下,AP% 达到了最高值。这表明适当的热处理不仅改善了大豆蛋白的界面吸附性能,还能在存储过程中进一步提升乳液的稳定性。经过热变性的 SPI 稳定乳液相较于天然 SPI 稳定乳液,具有更高的界面蛋白浓度<sup>[52]</sup>,这主要归因于其表面疏水性的增强以及在油/水界面的聚集,促进了蛋白质的吸附。因此,经过加热处理的 SPI 稳定乳状液展现出更好的物理稳定性,因为更多的蛋白质在油水界面上形成覆盖,有效防止了桥接絮凝的发生。

总体而言,热处理对大豆蛋白乳液界面蛋白吸附量的影响主要表现在改变蛋白质构象、提高吸附能力和增强乳液稳定性等方面。通过调控热处理的条件,影响大豆蛋白在乳液形成过程中的界面吸附量,进而优化乳液的稳定性。

### 3.4 稳定性

热处理可以改变大豆蛋白的结构和性质,进而影响大豆蛋白乳液的稳定性。在热处理过程中,大豆蛋白部分原有的二级和三级结构遭到破坏,导致蛋白质分子间的相互作用发生改变。这种结构的变化导致大豆蛋白乳液的稳定性降低,乳液易于发生相分离、凝结或沉淀现象。然而,适当的热处理可以通过改变蛋白质的结构,促使其内部的疏水基团暴露,从而增强蛋白质的界面活性。研究表明,通过预热处理,可以获得热稳定性增强的大豆蛋白<sup>[46]</sup>。有研究进一步证实,在 120 °C 的高温下加热 SPI,可以制备出物理稳定性更好的水包油乳液<sup>[53]</sup>,且在加热过程中并未观察到宏观相分离现象。这说明,在适宜的高温下进行热处理,可以显著提升 SPI 稳定乳液的物理稳定性。热处理后的 SPI 降低了乳液的  $\zeta$ -电位绝对值,并通过减小油滴粒径及增加界面上吸附蛋白质的百分比,提高了乳液在储存过程中的物理稳定性。适当的热处理不仅能够改善大豆蛋白乳液的稳定性,还能通过恰当的加热促使蛋白质中的疏水区域暴露,增加蛋白质之间的相互作用,从而提升乳液的整体稳定性。

## 4 热处理大豆蛋白乳液的应用

### 4.1 3D 打印

SPI 作为一种多功能食品成分,在 3D 食品打印中得到了特别关注。Chen 等<sup>[54]</sup>的研究温度对基于 SPI 的浆料流变特性、可打印性,以及最终 3D 打印产品结构和纹理特性的影响。研究表明,通过调节打印温度,可以显著提升不同配方蛋白墨水的 3D 打印性能。对大豆蛋白糊进行不同时间(20、25、30 min)的预热<sup>[55]</sup>,提高其可打印性和自凝胶性,随着预变性程度的增加,蛋白质中有序的二级结构逐渐减少,三级结构展开。大豆蛋白的可打印性、成型质量提高,自然状态下不适合打印的大豆蛋白在 3D 打印后实现了自胶化。研究了温度对大豆分离蛋白(SPI)浆料

流变特性、3D 打印性能和质地特性的影响。所有蛋白膏体均表现出剪切变薄的特性, 高温提高了 SPI 膏体的储能模量( $G'$ )、屈服应力( $\tau_y$ )和最小流动应力( $\tau_f$ )。促进了大豆蛋白颗粒之间紧密连接的形成, 从而导致了高密度 3D 结构的形成。

3D 打印技术在食品加工领域的应用前景广阔<sup>[56]</sup>, 而大豆分离蛋白作为一种重要的食品成分, 通过与其他成分的协同作用和工艺参数的优化, 展现出在 3D 食品打印中的巨大潜力<sup>[57]</sup>。随着研究的不断深入和技术的持续进步, 3D 打印食品有望为消费者提供更加个性化和创新的食品选择。

#### 4.2 活性物质递送

大豆蛋白作为一种天然聚合物, 因其丰富的天然来源、良好的水溶性、生物相容性、可生物降解性, 以及其非免疫原性和潜在的抗癌特性, 广泛用于生物活性化合物的递送研究<sup>[58]</sup>。经过 4 h 糖基化反应后的 EGCG、麦芽糖、SPI 三元缀合物, 形成的厚保护层显著提升了  $\beta$ -胡萝卜素的稳定性和抗氧化性, 有效阻止其降解<sup>[59]</sup>。此外, 采用碱共价交联法制备的 SPI-EGCG 和改性 SPI(HSPI)-EGCG 聚合物显示, HSPI-E 在负载率和生物可及性方面优于 SPI-E, 显著改善了姜黄素的热稳定性、酸稳定性和控释特性, 展现出卓越的保护能力<sup>[60]</sup>。同时, 通过微流态化和热处理调控制备的复合纳米颗粒提高了均匀性和形状稳定性, 并表现出了良好的胃稳定性与姜黄素的持续释放<sup>[61]</sup>。此外, 结合超声和热处理的纯大豆分离蛋白(UHSPI)与多酚结合, 提高了包封效率和乳化活性, 增强了与多酚的相互作用, 从而形成更稳定的纳米配合物<sup>[62]</sup>。这些改良后的大豆分离蛋白在共同递送姜黄素和儿茶素时显示出显著效果。当在 pH3 和 11 条件下以及 60 °C 热处理时, 改性后的大豆亲脂蛋白能够高效加载白藜芦醇, 其封装效率高达 78%。这些研究结果为大豆蛋白基材料在营养物质传递中的应用提供了新的视角和基础。

综上所述, 大豆蛋白不仅在食品工业中具有重要应用, 其在生物医药领域, 特别是在生物活性物质的递送系统中, 也展现出巨大的潜力和价值。大豆蛋白基递送系统能够为生物活性化合物提供有效的保护, 并提高其稳定性和生物利用度, 为开发新型食品和药品提供了新的思路和方法。

#### 4.3 生物塑料

生物塑料是一种由可再生生物质资源制成的环保材料, 这些资源包括碳水化合物、蛋白质、天然橡胶以及回收的食物垃圾等<sup>[63]</sup>。生物塑料被视为一种环境友好型替代材料。大豆蛋白作为一种生物塑料的原料, 通过与甲醛(HCHO)进行交联反应, 可以制备出具有广泛应用前景的生物塑料。SPI 基生物塑料融合了动态 NB 连接和矿物有机框架(CHA)杂交体<sup>[64]</sup>。动态 NB 键, 具备牺牲配位键的特性, 作为有效的能量耗散剂, 能够显著提升生物聚合物膜的内聚

力和机械强度。现已研发了一种需要更低甘油含量的大豆蛋白热塑性塑料薄膜<sup>[65]</sup>, 这种方法降低了成本并提高了环保性。通过热处理制备的大豆蛋白, 有望成为一种成本效益高且环境友好的生物热塑料开发途径。利用热处理大豆蛋白制成的热塑性大豆蛋白膜, 在干燥和湿润的条件下均展现出更优异的拉伸性能。

综上所述, 生物塑料的开发利用不仅有助于减少对化石燃料的依赖, 降低环境污染, 还为传统塑料提供了一种可持续的替代方案。大豆蛋白基生物塑料因其卓越的性能和环保特性, 展现出在生物塑料领域中的广阔应用前景。

### 5 结论与展望

本文综述了热处理对大豆蛋白乳液理化性质、稳定性和功能特性的影响, 揭示了热处理通过改变大豆蛋白的构象和构象稳定性, 对其乳化性能的影响。尽管已有研究取得了一定进展, 但仍存在一些问题和挑战, 需要进一步深入探讨。当前研究多集中于热处理对大豆蛋白乳液理化性质的影响, 而对于其在模拟食品加工过程中的稳定性和功能性变化的研究相对较少。未来的研究应更多关注热处理在不同食品加工条件下对大豆蛋白乳液性质的影响, 如高温加热、酸碱条件下的稳定性和功能性变化。其次, 不同热处理条件对大豆蛋白乳液的影响机制尚不完全清楚。未来的研究应深入探讨蛋白质构象变化、相互作用力的变化等与食品品质的相关性, 以及这些变化如何影响大豆蛋白乳液的功能性。此外, 开发新型热处理技术以改善大豆蛋白乳液的功能性能, 提高其在食品加工中的应用价值, 也是未来研究的重要方向。这包括探索新的热处理方法、优化现有工艺参数, 以及结合其他改性技术, 如高压、超声等, 以进一步提升大豆蛋白乳液的性能。最后, 本文在综述过程中发现, 尽管对大豆蛋白乳液的研究已取得一定进展, 但仍有较大的完善空间。建议未来的研究在深入分析现有问题的基础上, 有针对性地提出发展思路, 通过多学科交叉合作, 提高研究的深度和广度, 为大豆蛋白乳液的发展应用提供更加全面的理论支持和技术指导。随着对大豆蛋白乳液制备方法和性质的深入研究, 其在食品工业中的应用前景将更加广阔。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] DAMODARAN S. Protein stabilization of emulsions and foams[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 70(3): R54–R66.
- [2] 赵妍嫣, 卢星星, 夏楠, 等. 大豆蛋白乳液的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(17): 5942–5947. [ ZHAO Yanyan, LU Xingxing, XIA Nan, et al. Research progress on soy protein emulsion[J]. *Journal of Food Safety and Quality Detection*, 2020, 11(17): 5942–5947. ]

- [3] HASHIGUCHI T, HASHIGUCHI M, TANAKA H, et al. Comparative analysis of seed proteome of *Glycine max* and *Glycine soja*[J]. *Crop Science*, 2020, 60(3): 1530–1540.
- [4] ZHAO Y, TIAN R, XU Z, et al. Recent advances in soy protein extraction technology[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2022, 100(3): 187–195.
- [5] KANG S, BAI Q, QIN Y, et al. Film-forming properties and mechanisms of soy protein: Insights from beta-conglycinin and glycinin[J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 253(8): 127611.
- [6] TANG C H. Emulsifying properties of soy proteins: A critical review with emphasis on the role of conformational flexibility[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(12): 2636–79.
- [7] HOYT E A, CAL P M S D, OLIVEIRA B L, et al. Contemporary approaches to site-selective protein modification[J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2019, 3(3): 147–171.
- [8] ZHANG T, XU J, CHEN J, et al. Protein nanoparticles for Pickering emulsions: A comprehensive review on their shapes, preparation methods, and modification methods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 26–41.
- [9] 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.
- [10] GUO F, XIONG Y L, QIN F, et al. Surface properties of heat-induced soluble soy protein aggregates of different molecular masses[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(2): C279–C287.
- [11] SHAO Y, TANG C H. Characteristics and oxidative stability of soy protein-stabilized oil-in-water emulsions: Influence of ionic strength and heat pretreatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 37: 149–158.
- [12] CUI Z, CHEN Y, KONG X, et al. Emulsifying properties and Oil/Water (O/W) interface adsorption behavior of heated soy proteins: Effects of heating concentration, homogenizer rotating speed, and salt addition level[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(7): 1634–1642.
- [13] WILLIAMS P A. Food emulsions: Principles, practice, and techniques[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2008, 36(2): 223–224.
- [14] LIANG Y, PATEL H, MATIA-MERINO L, et al. Effect of pre- and post-heat treatments on the physicochemical, microstructural and rheological properties of milk protein concentrate-stabilised oil-in-water emulsions[J]. *International Dairy Journal*, 2013, 32(2): 184–191.
- [15] ÇAKIR-FULLER E. Enhanced heat stability of high protein emulsion systems provided by microparticulated whey proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 47: 41–50.
- [16] MA W, WANG J, WU D, et al. The mechanism of improved thermal stability of protein-enriched O/W emulsions by soy protein particles[J]. *Food & Function*, 2020, 11(2): 1385–1396.
- [17] ZHANG R, WEI Y, ZOU B, et al. Soy protein particles as stabilizers of heat-stable O/W emulsions with 20% protein content[J]. *Food Chemistry*, 2024, 457: 140157.
- [18] WANG M P, CHEN X W, GUO J, et al. Stabilization of foam and emulsion by subcritical water-treated soy protein: Effect of aggregation state[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 619–628.
- [19] XU J, MUKHERJEE D, CHANG S K C. Physicochemical properties and storage stability of soybean protein nanoemulsions prepared by ultra-high pressure homogenization[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240: 1005–1013.
- [20] 冯丽丽, 吴雪, 黄志刚, 等. 超声与高压微射流处理对大豆分离蛋白微细化的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 12–16.
- [21] FENG Lili, WU Xue, HUANG Zhigang, et al. The impact of ultrasonic and high pressure microfluidization processing on the micronization of soy protein isolate[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(12): 12–16.]
- [22] XI J, YAO L, LI S. Identification of beta-conglycinin alpha' subunit antigenic epitopes destroyed by thermal treatments[J]. *Food Res Int*, 2021, 139: 109806.
- [23] 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*, 2009, 34(3): 520–540.
- [24] LI T, BU G, XI G. Effects of heat treatment on the antigenicity, antigen epitopes, and structural properties of  $\beta$ -conglycinin[J]. *Food Chemistry*, 2020, 346: 128962.
- [25] MILLS E N, MARIGHETO N A, WELLNER N, et al. Thermally induced structural changes in glycinin, the 11S globulin of soya bean (*Glycine max*)—an in situ spectroscopic study[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2003, 1648(1–2): 105–114.
- [26] WOLF W J. Physical and chemical properties of soybean proteins[J]. *The Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1977, 54: A112–A117.
- [27] TIMR S, MADERN D, STERPONE F. Protein thermal stability[J]. *Prog Mol Biol Transl Sci*, 2020, 170: 239–272.
- [28] HUANG Z, QU Y, HUA X, et al. Recent advances in soybean protein processing technologies: A review of preparation, alterations in the conformational and functional properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 248: 125862.
- [29] CHOI Y, LEE J, JO Y J, et al. High internal phase emulsions stabilized by physically modified mung bean protein isolates under different pHs[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 155: 110200.
- [30] TEZUKA M, YAGASAKI K, ONO T. Changes in characters of soybean glycinin groups I, IIa, and IIb caused by heating[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(6): 1693–1699.
- [31] SORGENTINI DA, WAGNER J R, ANON M C. Effects of thermal treatment of soy protein isolate on the characteristics and structure-function relationship of soluble and insoluble fractions[J]. *J Agric Food Chem*, 1995, 43(9): 2471–2479.
- [32] LI X, CHEN L, HUA Y, et al. Effect of preheating-induced denaturation during protein production on the structure and gelling properties of soybean proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105846.
- [33] WU D, WU C, WANG Z, et al. Effects of high pressure homogenization treatment on the physicochemical and emulsifying properties of proteins from scallop (*Chlamys farreri*) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 537–545.
- [34] GUPTA A, BADRUDDOZA A Z M, DOYLE P S. A general route for nanoemulsion synthesis using low-energy methods at constant temperature[J]. *Langmuir*, 2017, 33(28): 7118–7123.
- [35] 齐宝坤, 赵城彬, 江连洲, 等. 不同热处理温度下大豆11S球蛋白Zeta电位、粒径和红外光谱分析[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 54–58. [QI Baokun, ZHAO Chengbin, JIANG Lianzhou, et al. Analysis of Zeta potential, particle Size, and infrared spectroscopy of soybean 11S globulin at different heat treatment temperatures[J]. *Food Science*, 2018, 39(24): 54–58.]
- [36] 李芳, 郭亚丽, 朱亚军, 等. 热处理对大豆蛋白乳液稳定性的

- 影响研究[J]. 粮食与饲料工业, 2016(3): 35–39. [ LI Fang, GUO Yali, ZHU Yajun, et al. Research on the impact of heat treatment on the stability of soy protein emulsion[J]. Cereal and Feed Industry, 2016(3): 35–39. ]
- [ 37 ] KEERATI-U-RAI M, CORREDIG M. Heat-induced changes in oil-in-water emulsions stabilized with soy protein isolate[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(8): 2141–2148.
- [ 38 ] 郭凤仙, 熊幼翎, 何志勇, 等. 热处理对大豆分离蛋白功能特性的影响[J]. 食品与机械, 2009, 25(6): 9–11, 21. [ GUO Fengxian, XIONG Youling, HE Zhiyong, et al. The impact of heat treatment on the functional properties of soy protein isolate[J]. Food and Machinery, 2009, 25(6): 9–11, 21. ]
- [ 39 ] (美)KESHUN LIU 著, 江连洲主译. 大豆化学·加工工艺与应用[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2005.07. [ (US) KESHUN LIU, Translated by JIANG Liangzhou. Soybean chemistry, processing technology and applications[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 2005.07. ]
- [ 40 ] WANG J M, XIA N, YANG X Q, et al. Adsorption and dilatational rheology of heat-treated soy protein at the oil–water interface: Relationship to structural properties[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(12): 3302–3310.
- [ 41 ] HU J, YU B, YUAN C, et al. Influence of heat treatment before and/or after high-pressure homogenization on the structure and emulsification properties of soybean protein isolate[J]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 253(7): 127411.
- [ 42 ] PETRUCCELLI S, ANON M C. Relationship between the method of obtention and the structural and functional properties of soy protein isolates. 1. structural and hydration properties. [Erratum to document cited in CA121: 203669] [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 43(3): 854.
- [ 43 ] HUANG G, LIU G, XU Z, et al. Stability, rheological behavior and microstructure of Pickering emulsions co-stabilized by soy protein and carboxymethyl chitosan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108773.
- [ 44 ] WU C, NAVICHA W B, HUA Y, et al. Effects of removal of non-network protein on the rheological properties of heat-induced soy protein gels[J]. *LWT*, 2018, 95: 193–199.
- [ 45 ] FU L, HE Z, ZENG M, et al. Effects of preheat treatments on the composition, rheological properties, and physical stability of soybean oil bodies[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(10): 3150–3159.
- [ 46 ] MA W, WANG T, WANG J, et al. Enhancing the thermal stability of soy proteins by preheat treatment at lower protein concentration[J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125593.
- [ 47 ] WANG J, NA X, NAVICHA W B, et al. Concentration-dependent improvement of gelling ability of soy proteins by preheating or ultrasound treatment[J]. *LWT*, 2020, 134: 110170.
- [ 48 ] XU Z, WANG X, GAO Y, et al. Structural insights into acidic heating-induced amyloid fibrils derived from soy protein as a function of protein concentration[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 145: 109085.
- [ 49 ] HUANG Z G, WANG X Y, ZHANG J Y, et al. Effect of heat treatment on the nonlinear rheological properties of acid-induced soy protein isolate gels modified by high-pressure homogenization[J]. *LWT*, 2022, 157: 113094.
- [ 50 ] ZHOU Y Y, YUE W T, LUO Y M, et al. Preparation and stability characterization of soybean protein isolate/sodium alginate complexes-based nanoemulsions using high-pressure homogenization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 154: 112607.
- [ 51 ] SHEN Q, XIONG T, ZHENG W, et al. The effects of thermal treatment on emulsifying properties of soy protein isolates: Interfacial rheology and quantitative proteomic analysis[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111326.
- [ 52 ] LI Q, ZHENG J, GE G, et al. Impact of heating treatments on physical stability and lipid-protein co-oxidation in oil-in-water emulsion prepared with soy protein isolates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 100: 105167.
- [ 53 ] ZHENG H G, YANG X Q, TANG C H, et al. Preparation of soluble soybean protein aggregates (SSPA) from insoluble soybean protein concentrates (SPC) and its functional properties[J]. *Food Research International*, 2008, 41(2): 154–164.
- [ 54 ] CHEN J, SUN H, MU T, et al. Effect of temperature on rheological, structural, and textural properties of soy protein isolate pastes for 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 323: 110917.
- [ 55 ] YU X, ZHAO Z, ZHANG N, et al. Effects of preheating-induced denaturation treatments on the printability and instant curing property of soy protein during microwave 3D printing[J]. *Food Chem*, 2022, 397: 133682.
- [ 56 ] CHEN J, MU T, GOFFIN D, et al. Application of soy protein isolate and hydrocolloids based mixtures as promising food material in 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 76–86.
- [ 57 ] PHUHONGSUNG P, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics[J]. *LWT*, 2020, 122: 109019.
- [ 58 ] MALTAIS A, REMONDETTO G E, SUBIRADE M. Soy protein cold-set hydrogels as controlled delivery devices for nutraceutical compounds[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(7): 1647–1653.
- [ 59 ] GENG M, FENG X, WU X, et al. Characterization and utilization of soy protein isolate-(−)-epigallocatechin gallate–maltose ternary conjugate as an emulsifier for nanoemulsions: Enhanced physicochemical stability of the β-carotene nanoemulsion[J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 110243.
- [ 60 ] LI J, CHEN Z. Fabrication of heat-treated soybean protein isolate-EGCG complex nanoparticle as a functional carrier for curcumin[J]. *LWT*, 2022, 159: 113059.
- [ 61 ] WEI Y, WANG C, LIU X, et al. Effects of microfluidization and thermal treatment on the characterization and digestion of curcumin loaded protein–polysaccharide–tea saponin complex nanoparticles[J]. *Food & Function*, 2021, 12(3): 1192–1206.
- [ 62 ] WANG H, LI Z, MENG Y, et al. Co-delivery mechanism of curcumin/catechin complex by modified soy protein isolate: Emphasizing structure, functionality, and intermolecular interaction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 152: 109958.
- [ 63 ] XU C, NASROLLAHZADEH M, SELVA M, et al. Waste-to-wealth: Biowaste valorization into valuable bio(nano)materials[J]. *Chemical Society Reviews*, 2019, 48(18): 4791–822.
- [ 64 ] LI K, JIN S, JIANG S, et al. Bioinspired mineral–organic strategy for fabricating a high-strength, antibacterial, flame-retardant soy protein bioplastic via internal boron–nitrogen coordination[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 132616.
- [ 65 ] YANG Y, REDDY N. Biothermoplastics from soyproteins by steaming[J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, 36(1): 116–121.