

# 大豆蛋白乳液的研究进展

赵妍嫣<sup>1,2</sup>, 卢星星<sup>1,2</sup>, 夏楠<sup>1,2</sup>, 郑志<sup>1,2\*</sup>

(1. 安徽省农产品精深加工重点实验室, 合肥 230601; 2. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 合肥 230601)

**摘要:** 食品乳液作为活性物质的传递体系一直是国内外的研究热点。大豆蛋白作为一种植物高分子蛋白质, 具有独特的营养价值和良好的乳化性, 在改善食品感官品质和提高乳液体系稳定性上具有显著的优势。由于双亲性和高表面活性, 大豆蛋白乳液得到了迅速的发展, 纳米乳液、微米乳液、多重乳液、Pickering 乳液、多层乳液等新型乳液以及基于乳液的固体脂质颗粒、微胶囊化和水凝胶填充颗粒, 在食品、保健品、化妆品等领域有着广泛的应用前景。本研究主要综述了大豆蛋白基本结构与功能特性的关系, 阐明了大豆蛋白乳液的基本性质与制备方法, 并对大豆蛋白乳液的应用以及未来的发展前景进行了展望, 以期为大豆蛋白乳液的加工与应用提供参考。

**关键词:** 大豆蛋白; 乳液; 制备方法; 基本性质; 应用前景

## Research progress of soy protein emulsion

ZHAO Yan-Yan<sup>1,2</sup>, LU Xing-Xing<sup>1,2</sup>, XIA Nan<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhi<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory for Agriculture Products Processing of Anhui Province, Hefei 230601, China; 2. College of Food and Bioengineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**ABSTRACT:** Food emulsion as a transfer system of active substances, has been a hot topic both at home and abroad. Soybean protein is a kind of plant polymer protein with unique nutritional value and good emulsification, and has remarkable advantages in improving food sensory quality and the stability of emulsion system. Due to amphiphilicity and high surface activity, soybean protein emulsion has been rapidly developed. Nanoemulsions, micron emulsions, multiple emulsions, Pickering emulsions, multi-layer emulsions and other new emulsions, as well as emulsion-based solid lipid particles, microencapsulation and hydrogel filled particles have a wide application prospect in food, health products, cosmetics and other fields. This paper reviewed the basic properties and the relationship between the basic structure and functional properties of soybean protein, and clarified the preparation methods of soybean protein emulsion, including high energy emulsification and low energy emulsification. Finally, this article prospected the application and future development prospect of soybean protein emulsion, in order to provide reference for the processing and application of soybean protein emulsion.

**KEY WORDS:** soy protein; emulsion; preparation method; basic properties; research prospect

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400601)

Fund: Supported by National Key Research and Development Project (2018YFD0400601)

\*通讯作者: 郑志, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: zhengzhi@hfut.edu.cn

\*Corresponding author: ZHENG Zhi, Ph.D, Professor, Hefei University of Technology, No 485 Danxia Road, Shushan District, Hefei 230601, China. E-mail: zhengzhi@hfut.edu.cn

## 1 引言

随着人们对健康饮食的日益重视, 大豆蛋白占据着越来越大的市场份额, 满足了人们对健康、绿色生活的追求<sup>[1]</sup>。大豆蛋白是完全蛋白质, 其营养价值与动物蛋白相当, 且不含胆固醇和饱和脂肪酸, 易于消化吸收。因此, 它对人体生理代谢以及膳食结构的调节具有重要作用。

近年来, 食品乳液作为活性物质的传递体系一直是国内外的研究热点<sup>[2]</sup>。许多食品都具有乳液结构, 包括牛奶、饮料、奶油等。失稳现象一直是食品乳液存在的问题, 因此选择适宜的乳化剂提高乳液稳定性显得尤为重要。大豆蛋白质作为一种两性亲水表面活性物质, 蛋白质从连续相向油水界面的扩散, 吸附到油滴表面后形成界面膜, 抑制了液滴之间相互靠近和聚集, 降低界面张力和整体自由能, 从而增加乳化体系的稳定性。本研究论述了大豆蛋白的基本结构, 重点阐述了大豆蛋白乳液的制备方法、基本性质、应用, 探讨了大豆蛋白乳液的发展前景, 以期为我国的大豆蛋白乳液的研究与应用领域提供有价值的信息。

## 2 大豆蛋白的结构

大豆蛋白富含人体必需的 8 种氨基酸, 营养价值高<sup>[3]</sup>, 具有良好的起泡性、凝胶性、乳化性和持水性等理化特性。根据沉降速度不同, 大豆蛋白可分为 2S、7S、11S、15S 4 个组分, 其中 7S 和 11S 占全部蛋白质的 70% 以上。大豆蛋白的结构特征决定了功能特性。二级结构主要是多肽链依靠氢键形成的  $\alpha$ -螺旋、 $\beta$ -折叠、 $\beta$ -转角、无规卷曲。氢键含量越高, 二级结构刚性越大; 反之, 表现出极大的柔性。当  $\alpha$ -螺旋含量降低, 大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI) 的 4 种分子构象含量发生变化, 表面疏水性增加<sup>[4,5]</sup>。三级结构是多肽链在二级结构基础上发生的再折叠和卷曲, 依靠疏水相互作用, 氢键, 范德华力和静电作用维持, 疏水氨基酸侧链在分子内部, 亲水侧链在分子表面。当蛋白质解折叠, 埋藏在分子内部的疏水性氨基酸残基暴露, 游离巯基含量增加, 表面疏水性增强, 提高了蛋白质在油水界面的吸附, 从而改善乳液的乳化性; 同时, 油滴平均粒径越小, 蛋白质的乳化能力越好。因此, 大豆蛋白吸附到油水界面后, 可以降低界面张力, 提高乳液的稳定性, 是乳液中理想的乳化剂。

## 3 大豆蛋白乳液的制备方法

大豆蛋白乳液主要由溶有蛋白质的水相和油相相混合而成。按照形成液滴粒径的大小, 乳液分为普通乳液和纳微米乳液。乳液制备方法较多, 最典型的方法是高能乳化法和低能乳化法, 其中高能乳化法是大豆蛋白乳液的常用形成手段。

### 3.1 高能乳化法

高能乳化法是利用产生强分散力的外界机械设备, 在乳化过程中将油相和水相破碎成所需粒径范围的液滴。常用的设备有高压均质机、超声波和微射流。

#### 3.1.1 高压均质法

高压均质法是在最短的时间内, 油水两相受到高强度的剪切力和压力, 液滴迅速发生相互作用, 形成具有较小粒径的乳状液。空穴效应、湍流效应和层流效应会引起剪切力和压力, 通常高压均质机的工作压力为 50~350 MPa。Xu 等<sup>[6]</sup>对大豆蛋白乳液进行超高压均质处理, 改变了纳米乳液中大豆分离蛋白中 7S、11S 蛋白的二级结构, 增强了乳液的稳定性。Li 等<sup>[7]</sup>对大豆分离蛋白乳液进行超声 (ultrasound, US) 和高压均质化 (high pressure homogenization, HPH) 处理。与 US 相比, HPH 促进了 SPI 表面更多疏水残基的暴露, 制备的纳米乳液具有更小的平均粒径, 更高的表面电荷、乳化产率和稳定性, 但 HPH 所需的能量比 US 高。高压均质法所需能耗大, 在生产过程中会升高乳液的温度, 不适用于生产粘度高的乳液体系。但高压均质可以制备理想的乳液粒径, 效率高, 极大地减少了表面活性剂和助表面活性剂的用量, 为食品生产中乳化剂限量提供了解决思路。

#### 3.1.2 超声乳化法

超声乳化法是在强烈的超声波作用下, 由于振动和空化作用, 乳液中产生空化气泡, 气泡在不断生长、破灭的过程中产生局部高温高压, 改变液滴粒径与蛋白质分子的聚集程度, 进而影响乳液的流变性。Huang 等<sup>[8]</sup>研究超声波和酸处理对大豆分离蛋白的聚集、结构和乳化特性的影响。在 0.001 mol/L HCl 下, 超声处理会增加可溶性 SPI 的含量。超声处理 10 min 制备的乳液具有较小的液滴粒径和长期稳定性, 20 min 后, SPI 的二级结构发生明显变化。Ma 等<sup>[9]</sup>观察在 pH 3.5 时, 超声处理增强了大豆分离蛋白-柑橘果胶复合物之间的静电相互作用, 液滴粒径减小且分布均匀, 这使复合物具有更理想的乳化性能, 为复合蛋白的实际加工利用提供了理论参考。由于缺乏成熟的工业级超声设备, 超声乳化法不适用于乳液的大批量工业化生产。但超声波法实际操作简单, 制备的乳液粒径一般小于高压均质法所制备的乳液粒径, 且乳化剂需求量少, 能耗低。

#### 3.1.3 微射流法

微射流法是粗乳液进入到微射流乳化机中, 被分成 2 部分, 在出口处两股乳液发生强烈碰撞, 使液滴高度破碎, 实现乳液的均质化。冯丽丽等<sup>[10]</sup>分析了超声处理 SPI 乳液所得液滴粒径成双峰分布, 而高压微射流处理的 SPI 乳液液滴呈单峰分布, 高压微射流法制备的乳液乳化均匀一致性更好。Chen 等<sup>[11]</sup>对大豆分离蛋白进行了高压微流化和胰酶水解处理, 微流化显著增强了 SPI 的胰酶水解, 产生了更多具有表面活性的可溶性肽, 对蛋白质产生理想的功能

修饰,使其成为有效的食品乳化剂。微射流法所用仪器的精密度高,生产成本低,操作较为复杂,但与超声乳化相比,其制备的液滴粒径更小,适合精密度要求较高的如生物、医学等领域。

### 3.2 低能乳化法

低能乳化法是利用自身的内能制备大豆蛋白乳液的方法。膜乳化法,自乳化法,相转变法是常用的低能乳化法。膜乳化法可有效控制液滴尺寸和分布,是一种低能耗的、操作条件温和的新型纳米乳化技术<sup>[12]</sup>。自乳化法是当油相与水相混合时,利用自身化学能在特定温度下自发形成乳液。相转变法是指改变物化条件使乳液在水包油与油包水类型之间相互转变。它主要包括在固定温度下改变组成的相转变浓度法(phase transition concentration, PIC)法和在固定组成下改变温度的相转变温度法(phase transition temperature, PIT)法<sup>[13]</sup>。低能乳化法因需大量高浓度表面活性剂,影响食品口感,故不常用于食品级乳液的工业化生产,主要在医药领域去包埋和载运一些功能因子。

与高能乳化法相比,低能乳化法需要的能量更低,成本低,不需要借助外界的机械设备,但需要添加浓度较高的表面活性和助表面活性剂才能形成均一稳定的乳液。高能乳化法制备的乳液体系稳定性更好,液滴粒径小,所需表面活性剂的浓度较低,适合于大规模的工业化生产。

## 4 大豆蛋白乳液的性质

乳液稳定性是各种功能特性的基础,稳定性一旦遭到破坏,就会出现一系列物化失稳现象。一般而言,单一的大豆蛋白难以维持乳状液的稳定性,通常将蛋白质与其他大分子或小分子乳化剂结合、对蛋白质分子改性、添加抗氧化剂、制备蛋白纳米颗粒等措施改变蛋白质分子的溶解性、起泡性、持水性、乳化性等,提高乳液的稳定性。大豆蛋白乳液的性质主要有物理稳定性、化学稳定性、界面性质。

### 4.1 物理稳定性

大豆蛋白乳液的物理稳定性有酸碱稳定性、离子稳定性、贮藏稳定性、冻融稳定性等。当乳液失稳时,常会发生分层、絮凝、奥氏熟化等不稳定现象<sup>[14]</sup>。贮藏过程中液滴粒径与分布、PDI、电位,光学性质等参数表征了乳液的物理稳定性。液滴粒径越大,液滴的粒度分布越宽,乳液越易发生聚集分层现象<sup>[15]</sup>; zeta 电位的绝对值越低,导致液滴之间的静电排斥力越小,吸引力越大,体系越不稳定。Wang 等<sup>[16]</sup>通过超声波辅助美拉德反应打开大豆分离蛋白的致密结构,分子柔性增加,聚集程度减小,冻融循环后降低乳析指数,为大豆分离蛋白冷冻食品的工业化生产提供了理论技术指导。崔竹梅<sup>[17]</sup>通过疏水相互作用将大豆蛋白的芳香族氨基酸残基与芦丁结合形成复合物,降低

油滴的粒径,明显提高了乳液的酸碱稳定性和离子稳定性,为复合乳液的应用提供新的思路。

### 4.2 化学稳定性

大豆蛋白乳液中最重要的化学稳定性是氧化稳定性,油脂和活性物质的氧化分解会极大降低食品的感官品质和理化性质<sup>[18]</sup>。油相含有大量不饱和脂肪酸,因油水界面较大的比表面积,水相中的助氧化剂或过渡金属离子会与油滴充分接触,产生大量自由基和小分子醛酮等物质,这些产物又会和蛋白质发生共氧化,导致蛋白质构象发生变化,影响乳液的氧化稳定性。油相的种类、界面组成、液滴粒径,蛋白浓度等均会对乳液中脂肪的氧化产生一定的抑制作用,但界面特性的影响最大。增加界面膜的厚度,增强油水界面膜的粘弹性和液滴表面的正电荷等可减缓油脂的氧化速率。通过向乳液中添加一定量的色素类,酚类,多肽类,甾醇类等<sup>[19-22]</sup>天然抗氧化剂作为氢供体,用来清除链引发阶段产生的游离自由基,从而抑制油脂和功能因子的氧化。天然抗氧化剂成本低,安全性高,深入开发复合天然抗氧化剂对食品乳液的抗氧化研究有着广阔的发展前景<sup>[23,24]</sup>。

### 4.3 界面流变性

界面是指油相和水相相互接触且具有一定厚度的区域,其化学组成一般有油相,水相,蛋白质或其他活性物质。根据界面的受力方式,界面流变性分为界面剪切流变性和界面扩张流变性<sup>[25]</sup>,剪切流变学是在保持面积不变的情况下改变形状,可以预测乳状液的长期聚结稳定性<sup>[26,27]</sup>。界面扩张流变学是测定平衡状态下乳液界面的黏弹性,反映界面分子排列,构象变化,脱吸附等相关信息<sup>[28,29]</sup>。当大豆蛋白从水相中扩散出来,逐渐吸附,重排到油-水界面上,相邻蛋白质分子间发生共价二硫交联或非共价相互作用,会降低界面张力,形成具有粘弹性和一定强度的界面膜。界面膜的黏性,厚度和静电荷决定了乳液的稳定性。界面膜中蛋白质达到饱和状态,粘弹性增强,可在一定程度上抑制液滴的聚集和脂肪的氧化。通过对蛋白进行物化修饰,可形成具有一定润湿性的颗粒<sup>[30,31]</sup>。将蛋白质与其他物质进行复合,可增强界面膜的强度,增强蛋白质-蛋白质的交联程度,提高乳液的稳定性。

## 5 大豆蛋白乳液的应用

目前,我国是世界最大的大豆进口国,仅 2019 年大豆的进口总量就高达 8551.1 吨,创大豆历史需求第二高峰<sup>[32]</sup>。大豆蛋白乳液在日常生活中的应用越来越广泛。

在食品领域,将大豆蛋白乳液添加到肠类、火腿、罐头等肉制品<sup>[33]</sup>中,代替传统淀粉,改进产品持水力,赋予肉制品丰富的口感和良好的弹性。在面制品<sup>[34,35]</sup>中添加适量大豆蛋白乳液,可以提高产品的蛋白质含量,改善面制

品的感官品质, 延长了产品的货架期。特别是近年来, Beyond Meat、OmniPork、Impossible Foods 人造肉品牌异军突起<sup>[36]</sup>, 以大豆蛋白为原料的人造蛋白肉既能符合健康、绿色的养生理念, 还能满足消费者对肉感的需求与消费者们的需求不谋而合, 一跃成为国内外销售市场的新宠。同时, 大豆蛋白乳液为原料的乳制品和复合型饮料也受到广大消费者的喜爱。

为了进一步扩大大豆蛋白乳液在非食品领域的应用, 研究人员将大豆蛋白乳液或乳液凝胶可以作为姜黄素<sup>[37]</sup>、茶多酚<sup>[38]</sup>、核黄素<sup>[39]</sup>、白藜芦醇<sup>[40]</sup>、 $\beta$ -胡萝卜素<sup>[41]</sup>等功能活性成分的运送载体, 提高活性成分的利用率。大豆蛋白粉<sup>[42]</sup>、大豆活性肽<sup>[43]</sup>在调节血糖和血压、抗氧化、抗肿瘤、提高免疫力等方面发挥着越来越重要的作用。改性大豆蛋白是薄膜、胶黏剂、可降解塑料的包装基质材料, 提高物理机械强度, 具有绿色、环保、安全、成本低廉的特性<sup>[44]</sup>。此外, 对大豆蛋白进行酶解改性得到大量的氨基酸和小肽, 提高产品的乳化性和起泡性, 赋予产物抗氧化活性, 作为特定需求的化妆品添加剂<sup>[45]</sup>。

## 6 发展前景

近年来, 随着人们对天然绿色产品需求的日益强烈, 大豆蛋白在食品、医药、化妆品等领域发展迅速。除传统大豆蛋白乳液外, 纳微乳液<sup>[46]</sup>、多重乳液<sup>[47]</sup>、Pickering 乳液<sup>[48]</sup>、多层乳液<sup>[49]</sup>等新型乳液以及基于乳液的固体脂质颗粒<sup>[50]</sup>、微胶囊化<sup>[51]</sup>和水凝胶填充颗粒<sup>[52]</sup>等也吸引了越来越多研究者的兴趣。对于大豆蛋白乳液的发展方向进行了以下分析:

(1)与欧美国家相比, 国内对植物蛋白肉的生产技术和应用缺乏系统的研究, 应进一步深入研究动物肉制纤维结构, 开发新的技术改善大豆蛋白肉的口感, 满足消费者的味觉需求; 研发成本低廉的食品级菌株合成植物血红素, 弥补植物肉色泽的不足, 提高消费者的接受度, 改善国民的膳食结构, 实现营养均衡与互补。

(2)大豆蛋白乳液在包埋和缓释水溶性, 脂溶性功能成分和风味物质上有着广阔的市场前景。大豆蛋白乳液仍需进一步研究油相、水相、表面活性剂等复杂食品体系中一系列反应, 将大豆蛋白与花青素、甜菊糖苷、芦丁等物质复合, 提高乳液的稳定性; 优化包埋技术, 完善体外消化系统, 实现功能性物质的定点释放和吸收。

(3)在环保绿色的时代主题下, 禁塑令的颁布和绿色包装工程的实施推动了大豆蛋白膜的研发。未来, 应改进制备工艺, 对大豆蛋白进行改性处理, 解决纯大豆蛋白膜机械强度差、疏水性弱的问题; 开发具有抑菌、抗氧化功能的保鲜膜, 可食用膜, 复合膜, 满足各类食品的包装需求, 扩大商业应用规模。

## 7 结 论

本文主要综述了大豆蛋白基本结构与功能特性的关系, 阐明了大豆蛋白乳液的基本性质与制备方法, 并对大豆蛋白乳液的应用以及未来的发展前景进行了展望。大豆蛋白营养丰富, 其结构与功能特性息息相关, 随着对大豆蛋白乳液制备方法和性质研究的不断深入, 大豆蛋白乳液的应用前景会越来越广泛。

## 参考文献

- [1] Ortolá R, Struijk EA, García-Esquinas E, *et al.* Changes in dietary intake of animal and vegetable protein and unhealthy aging [J]. *Am J Med*, 2020, 133(2): 231–239.
- [2] Soria-Hernández C, Serna-Saldívar S, Chuck-Hernández C. Physicochemical and functional properties of vegetable and cereal proteins as potential sources of novel food ingredients [J]. *Food Technol Biotechnol*, 2015, 53(3): 269–277.
- [3] Katayama M, Wilson LA. Utilization of soybeans and their components through the development of textured soy protein foods [J]. *J Food Sci*, 2008, 73(3): 158–164.
- [4] Wang C, Jiang LZ, Wei DX, *et al.* Effect of Secondary structure determined by FTIR spectra on surface hydrophobicity of soybean protein isolate [J]. *Procedia Eng*, 2011, (15): 4819–4827.
- [5] Kamata Y, Ochiai K, Yamauchi F. Relationship between the properties of emulsion systems stabilized by soy protein digests and the protein conformation [J]. *J Agric Chem Soc Jpn*, 2014, 48(5): 1147–1152.
- [6] Xu J, Dipaloke M, Chang SKC. Physicochemical properties and storage stability of soybean protein nanoemulsions prepared by ultra-high pressure homogenization [J]. *Food Chem*, 2018, (240): 1005–1013.
- [7] Li Y, Liu BH, Jiang LZ, *et al.* Interaction of soybean protein isolate and phosphatidylcholine in nanoemulsions: A fluorescence analysis [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, (87): 814–829.
- [8] Huang LR, Ding XN, Li YL, *et al.* The aggregation, structures and emulsifying properties of soybean protein isolate induced by ultrasound and acid [J]. *Food Chem*, 2019, (279): 114–119.
- [9] Ma XB, Yan TY, Hou FR, *et al.* Formation of soy protein isolate (SPI)-citrus pectin (CP) electrostatic complexes under a high-intensity ultrasonic field: Linking the enhanced emulsifying properties to physicochemical and structural properties [J]. *Ultrason Sonochem*, 2019, (59): 104748.
- [10] 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.  
Feng LL, Wu X, Huang ZG, *et al.* Effects of ultrasound and high pressure microjet treatment on micro-minification of soybean separated protein [J]. *Food Mach*, 2017, 33(12): 12–16.
- [11] Chen L, Chen JS, Yu L, *et al.* Improved emulsifying capabilities of hydrolysates of soy protein isolate pretreated with high pressure microfluidization [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2016, (69): 1–8.
- [12] Liu W, Yang XL, Winston-Ho WS. Preparation of uniform-sized multiple emulsions and micro/nano particulates for drug delivery by membrane emulsification [J]. *J Pharm Sci-U.S.*, 2011, 100(1): 75–93.
- [13] Vinh TDT, Hien LTM, Dao DTA. Formulation of black pepper (*Piper*

- nigrum* L.) essential oil nano-emulsion via phase inversion temperature method [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8(4): 1741–1752.
- [14] 曾庆晗, 陈帅, 高彦祥. 姜黄素乳液的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(1): 341–348.
- Zeng QH, Chen S, Gao YX. Advances in the study of curcumin emulsions [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(1): 341–348.
- [15] Li QY, Zheng JB, 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 Hydrocolloid*, 2020, (100): 105167.
- [16] Wang YY, Zhang AQ, Wang XB, *et al.* The radiation assisted-Maillard reaction comprehensively improves the freeze-thaw stability of soy protein-stabilized oil-in-water emulsions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, (103): 105684.
- [17] 崔竹梅. 大豆蛋白—芦丁复合乳状液的稳定性及其对  $\beta$ -胡萝卜素缓释效应的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- Cui ZM. Study on the stability of soybean protein-rutin compound emulsion and its effect on  $\beta$ -carotene sustained release [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [18] 沈鹏辉, 樊诗堃, 赵谋明, 等. 氧化对大豆蛋白结构、乳液稳定性及消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 7–14.
- Shen PH, Fan SK, Zhao MM, *et al.* Effects of oxidation on structure, emulsion stability and digestive characteristics of soybean protein [J]. *Food Sci*, 2019, 40(14): 7–14.
- [19] Shao P, Qiu Q, Xiao J, *et al.* Chemical stability and *in vitro* release properties of  $\beta$ -carotene in emulsions stabilized by ulva fasciata polysaccharide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, (102): 225–231.
- [20] Zhang Y, Ye XQ, Xu ZM, *et al.* Inhibitory effect of proanthocyanidins from Chinese bayberry (*Myrica rubra* Sieb et Zucc) leaves on the lipid oxidation in an emulsion system [J]. *LWT*, 2017, (80): 517–522.
- [21] Noon J, Mills TB, Norton IT. The use of antioxidant rutin hydrate pickering particles to combat lipid oxidation in O/W emulsions [J]. *J Food Eng*, 2020, (274): 109830.
- [22] 丁俭, 齐宝坤, 毛惠婷, 等. 抗坏血酸对大豆蛋白乳液抗氧化稳定性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(7): 67–73.
- Ding J, Qi BK, Mao HTG, *et al.* Antioxidant stability of ascorbic acid on soy protein emulsion [J]. *J Chin Cere Oil Assoc*, 2017, 32(7): 67–73.
- [23] Noon J, Mills TB, Norton IT. The use of natural antioxidants to combat lipid oxidation in O/W emulsions [J]. *J Food Eng*, 2020, (281): 110006.
- [24] 常馨月, 陈程莉, 龚娣, 等. 天然抗氧化剂抑制油脂氧化的研究进展[J]. *中国油脂*, 2020, 45(4): 46–50.
- Chang XY, Chen CL, Gong D, *et al.* Advances in the study of natural antioxidants inhibiting oil oxidation [J]. *Chin Oil Fat*, 2020, 45(4): 46–50.
- [25] Berton-Carabin C, Genot C, Gaillard C, *et al.* Design of interfacial films to control lipid oxidation in oil-in-water emulsions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 33(1): 99–105.
- [26] Böttcher S, Keppler J, Drusch S. Mixtures of Quillaja saponin and beta-lactoglobulin at the oil/water-interface: Adsorption, interfacial rheology and emulsion properties [J]. *Colloid Surf A*, 2016, (518): 46–56.
- [27] 李伟伟. 高乳化性大豆蛋白的制备及其界面流变性质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- Li WW. Preparation and interfacial rheological properties of high emulsifying soybean protein [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [28] 沈兰. 构象特征影响蛋白乳化与界面性质的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- Shen L. A study on the influence of conformational characteristics on protein emulsification and interfacial properties [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [29] Milad K, Parisa B, Aadithya K, *et al.* Polymeric-nanofluids stabilized emulsions: Interfacial versus bulk rheology [J]. *J Colloid Interf Sci*, 2020, (576): 252–263.
- [30] McCann TH, Guyon L, Fischer P, *et al.* Rheological properties and microstructure of soy-whey protein [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, (82): 434–441.
- [31] Lim H, Jo M, Ban C, *et al.* Interfacial and colloidal characterization of oil-in-water emulsions stabilized by interface-tunable solid lipid nanoparticles [J]. *Food Chem*, 2020, (306): 105619.
- [32] 苏剑, 纪尧. 2020年中国大豆和玉米供求分析[J]. *中国经济报告*, 2020, (3): 77–82.
- Su J, Ji Y. Analysis of soybean and corn supply and demand in China 2020 [J]. *China Econ Rep*, 2020, (3): 77–82.
- [33] Zamuz S, Purriños L, Galvez F, *et al.* Influence of the addition of different origin sources of protein on meat products sensory acceptance [J]. *J Food Proc Pres*, 2019, 43(5): e13940.
- [34] 李翠芳, 张钊, 王才立, 等. 大豆分离蛋白在面包中的应用研究[J]. *大豆科技*, 2020, (1): 21–27.
- Li CF, Zhang Z, Wang CL, *et al.* Application of soy protein isolate in bread [J]. *Soybean Sci Technol*, 2020, (1): 21–27.
- [35] 郭兴凤, 阎欣, 王瑞红, 等. 大豆分离蛋白与大豆蛋白酶水解产物复配对面条品质的影响[J]. *中国油脂*, 2019, 44(2): 153–157.
- Guo XF, Yan X, Wang RH, *et al.* Effect of soybean protein isolate and soybean protease hydrolysate on noodle quality [J]. *Chin Oil Fat*, 2019, 44(2): 153–157.
- [36] 李晶晶. 人造肉, 味蕾革命还是资本盛宴?[J]. *中国发明与专利*, 2019, 16(7): 66–70.
- Li JJ. Artificial meat, a revolution of taste bud or a capital feast? [J]. *China Invent Pat*, 2019, 16(7): 66–70.
- [37] Pan K, Chen HQ, Baek SJ, *et al.* Self-assembled curcumin-soluble soybean polysaccharide nanoparticles: Physicochemical properties and *in vitro* anti-proliferation activity against cancer cells [J]. *Food Chem*, 2018, (246): 82–89.
- [38] Chanphai P, Bourassa P, Kanakis CD, *et al.* Review on the loading efficacy of dietary tea polyphenols with milk proteins [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, (77): 322–328.
- [39] Beicht J, Zeeb B, Gibis M, *et al.* Influence of layer thickness and composition of cross-linked multilayered oil-in-water emulsions on the release behavior of lutein [J]. *Food Funct*, 2013, 4(10): 1457–1467.
- [40] Wei Y, Li C, Zhang L, *et al.* Influence of calcium ions on the stability, microstructure and *in vitro* digestion fate of zein-propylene glycol alginate-tea saponin ternary complex particles for the delivery of resveratrol [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, (106): 105886.
- [41] 刘付. 大豆蛋白皮克林稳定剂的构建、表征及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- Liu F. Construction, characterization and application of soybean protein Pickering stabilizer [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [42] 陈培侨. 一种适用于糖尿病人的植物蛋白粉[P]. 中国: CN110973643A,

- 2020-04-10.  
Chen PQ. A plant protein powder for diabetics [P]. China: CN110973643A, 2020-04-10.
- [43] Hao YQ, Fan X, Guo HM, *et al.* Overexpression of the bioactive lunasin peptide in soybean and evaluation of its anti-inflammatory and anti-cancer activities *in vitro* [J]. *J Biosci Bioeng*, 2020, 129(4): 395–404.
- [44] Gautam S, Sharma B, Jain P. Green Natural Protein Isolate based composites and nanocomposites: A review [J]. *Polymer Testing*, 2020, (6): 106626.
- [45] Shen PH, Zhou FB, Zhang YH, *et al.* Formation and characterization of soy protein nanoparticles by controlled partial enzymatic hydrolysis [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, (105): 631–640.
- [46] Kumar M, Bishnoi RS, Shukla AK, *et al.* Techniques for formulation of nanoemulsion drug delivery system: A review [J]. *Prev Nutr Food Sci*, 2019, 24(3): 225–234.
- [47] Dima C, Dima S. Water-in-oil-in-water double emulsions loaded with chlorogenic acid: Release mechanisms and oxidative stability [J]. *J Microencapsul*, 2018, 35(6): 584–599.
- [48] Kargar M, Fayazmanesh K, Alavi M, *et al.* Investigation into the potential ability of Pickering emulsions (food-grade particles) to enhance the oxidative stability of oil-in-water emulsions [J]. *J Colloid Interf Sci*, 2012, 366(1): 209–215.
- [49] Sivapratha S, Sarkar P. Multiple layers and conjugate materials for food emulsion stabilization [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2017, 58(6): 877–892.
- [50] Zafeiri I, Smith P, Norton IT, *et al.* Fabrication, characterisation and stability of oil-in-water emulsions stabilised by solid lipid particles: the role of particle characteristics and emulsion microstructure upon Pickering functionality [J]. *Food Funct*, 2017, 8(7): 2583–2591.
- [51] Chen FP, Liu LL, Tang CH. Spray-drying microencapsulation of curcumin nanocomplexes with soyprotein isolate: Encapsulation, water dispersion, bioaccessibility and bioactivities of curcumin [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, (105): 105821.
- [52] Park JY, Doyle PS. Multifunctional hierarchically-assembled hydrogel particles with pollen grains via Pickering suspension polymerization [J]. *Langmuir ACS J Surf Colloid*, 2018, 34(48): 14643–14651.

(责任编辑: 李磅礴)

### 作者简介



赵妍嫣, 博士, 副教授, 主要研究方向为农产品精深加工。

E-mail: zhaoyy@163.com



郑志, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全检测。

E-mail: zhengzhi@hfut.edu.cn