



超声波改性大豆蛋白研究进展

白复笑¹, 李萌萌¹, 卞科¹, 杨立新²

(1. 河南工业大学 粮油食品学院/河南工业大学谷物资源转化与利用省级重点实验室, 河南 郑州 450001; 2. 郑州佰沃生物质材料有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要:大豆蛋白资源丰富, 具有良好的营养功能和独特的加工特性, 是优质的植物蛋白资源之一。但大豆蛋白天然的功能特性不能够满足实际应用, 因此需要对其改性。本文简要介绍了大豆蛋白的组成、功能特性及其改性现状, 主要综述了超声波改性对大豆蛋白的溶解性、乳化性、起泡性、凝胶性等功能特性的影响, 并简单介绍了大豆蛋白经超声波改性后的应用现状, 为深入了解超声波改性大豆蛋白作用机理、拓宽改性大豆蛋白的应用范围提供参考。

关键词:大豆蛋白; 超声波改性; 功能特性

Research Progress of Ultrasonic Modified Soybean Protein

BAI Fu-xiao¹, LI Meng-meng¹, BIAN Ke¹, YANG Li-xin²

(1. School of Food Science and Technology / Key Laboratory of Grain Resources Conversion and Utilization, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Baiwo Biomass Material Co., Ltd, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As a high-quality plant protein resource, soybean protein has a good nutritional function and unique processing characteristics. However, soybean protein has not been well utilized because of the defects of the natural functional properties, so the improvement of its functional properties is demanded. This paper introduces the composition, functional characteristics and the modification of soybean protein, reviewed the effects of ultrasonic modification on the solubilities, emulsifying properties, foaming performance and gel properties of soybean protein, and briefly introduces the application prospect of soybean protein after ultrasonic modification. It aims at providing a reference for further understand the mechanism of ultrasonic modified soy protein and broadening the application range of modified soy protein.

Keywords: Soybean protein; Ultrasonic modification; Functional characteristics

大豆蛋白质的必需氨基酸含量高且比例较为均衡, 易被人体消化吸收, 可以直接作为人体蛋白质的来源, 其不仅营养价值高, 资源丰富, 而且还可以提供调节人体血清胆固醇、预防心血管等疾病发生的有益成分, 具有抗肥胖和抗癌等作用^[1-3]。此外, 由于大豆蛋白具有与食品的感官品质、加工性质等相关的各种功能特性, 所以得到了广泛的应用。但是, 由于大豆蛋白的功能特性不能够满足食品工业发展的需求, 且其在加工处理过程中易产生不良风味甚至可能含有一些沉积性毒性物质^[4], 因此迫切需要改善大豆蛋白的功能特性从而扩大其应用范围。

目前, 国内外对大豆蛋白的改性方法主要有物理法、化学法和酶法等, 而超声波改性作为一种有效的物理改性手段, 由于在实践操作过程中的安全性优于化学改性, 且具有方向性好、穿透性强的优

点, 在大豆蛋白改性中的应用受到更多的关注。本文主要综述了超声时间、超声功率对大豆蛋白功能特性的影响, 为深入了解超声波改性大豆蛋白的作用机理提供了理论参考, 另外综述了改性后大豆蛋白的应用现状, 对开发新型大豆蛋白食品及拓宽改性大豆蛋白的非食品应用领域具有重要意义。

1 大豆蛋白概述

1.1 大豆蛋白的组成

根据溶解性的不同, 大豆蛋白可分为球蛋白和清蛋白; 根据生理功能的不同, 可分为贮藏蛋白和生物活性蛋白; 根据溶液沉降系数的不同, 可分为 2S、7S、11S 和 15S 不同组分, 主要成分是 7S 和 11S, 其分别为 β -伴大豆球蛋白和大豆球蛋白, 占全部蛋白质的 70% 以上。

收稿日期: 2017-11-27

基金项目: 中原学者人才项目(豫科人组[2015]2号); 河南省谷物资源转化与利用省级重点实验室 2017 年度开放课题(PL2017007)。

第一作者简介: 白复笑(1993-), 女, 硕士, 主要从事谷物加工理论与技术研究。E-mail: 375531583@qq.com。

通信作者: 卞科(1960-), 男, 硕士, 教授, 主要从事粮油食品加工研究。E-mail: kebian@163.com。

1.2 大豆蛋白的功能特性

大豆蛋白的功能特性可分为水合性质、溶解度和界面性质3类^[5]。水合性质取决于蛋白质-水相互作用;溶解度指蛋白质和蛋白质、蛋白质和溶剂间相互作用的热力学表现形式;而界面性质主要是指乳化性能和起泡性能。

1.3 大豆蛋白的改性

目前,国内外对大豆蛋白的改性方法主要有物理法、化学法、酶法等。物理改性方法有微波改性、热改性和超声波改性等,即指利用热、机械或声波等作用改变蛋白质分子高级结构。朱建华等^[6]研究了超声波处理对大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)溶解性的影响,结果表明SPI溶液经不同功率的超声处理后溶解度随超声功率的增大而增大;化学法指对蛋白质的氨基、羧基和巯基等进行化学修饰,通过改变蛋白质表面的电荷分布从而改变其功能特性,包括去酰胺、糖基化、磷酸化、水解及氧化等^[7-9]方法,Barman等^[10]向大豆蛋白中引入醋酸酐,将其嫁接成乙酰化形式,结果表明溶解度在pH 4.5~7.0范围内提高,同时显著提高了溶液的起泡性;酶法改性是指利用酶有限度的水解肽键和酰胺键或者进行分子间的共价交联,研究表明使用胰蛋白酶限制性水解SPI,可显著改善其乳化性^[11-12]。

2 超声波处理对大豆蛋白功能特性的影响

超声波是一种高于人类听觉阈值(>16 kHz)的机械波,可分为两种不同的频率范围:高频超声波(100 kHz~1 MHz)和低频超声波(16~100 kHz)^[13]。超声波在介质中传播时,能够使介质之间产生机械振动,从而产生空化效应,而空化过程所产生的瞬时强压和局部高温能对溶液中悬浮的粒子产生强烈的声化学效果^[14-15]。

超声波改性是指采用高强度的超声波,在溶液中产生高温、强剪切力和高压,以分解蛋白质,或者加速某些反应的改性方法^[16-17]。经超声波改性后,大豆蛋白分子结构疏松,暴露了内部的一些非极性基团,改善了大豆蛋白的功能特性。大量研究表明超声功率和时间是影响大豆蛋白改性效果的两个主要因素,虽然温度、酸碱性等一些外在因素也会影响试验结果,但这些变量在试验过程中不容易控制,不利于工业化推广应用。因此本文综述了超声功率、超声波处理时间对大豆蛋白功能特性的影响。

2.1 超声波处理对大豆蛋白溶解性的影响

溶解性是蛋白质生理特性及其他加工特性的

前提和基础,大豆蛋白的溶解性一般可表示为:蛋白质分散指数(protein dispersion index, PDI)和氮溶解指数(nitrogen dissolution index, NSI)。只有当蛋白质充分溶解时,其功能特性才能表现出来,因此提高大豆蛋白的溶解性对改善其功能特性具有实际意义。超声波具有剪切和能量双重属性,所产生的空化效应能打开蛋白质的高级结构,破坏蛋白质分子内键,活性亚基或肽被释放出来,因此大豆蛋白的溶解性经超声波处理后得到显著增加^[17-18]。

2.1.1 超声处理时间对大豆蛋白溶解性的影响

王小英等^[19]研究了超声处理对大豆蛋白溶解性的影响,结果表明超声时间越长,大豆蛋白的NSI越高,且在超声时间为20 min时NSI达到最大值;孙燕婷等^[15]的研究也表明,随着超声波处理时间的增长,大豆蛋白的溶解性显著增加;同样地,Jambrak等^[20]分别利用槽式超声波和探头式超声波处理大豆浓缩蛋白(soy protein concentrate, SPC),结果表明,探头式超声波对大豆蛋白溶解性影响更大。这些结果的产生可能是:超声波的空穴效应使蛋白分子的空间结构部分伸展,导致肽键断裂,更多内部的亲水性基团暴露出来,改善了其溶解性。

当然也有学者对大豆蛋白溶解度提高的机理持不同意见,Tang等^[21]研究认为SPI经过超声波处理后在溶解的过程中形成了以氢键和二硫键来维持结构的可溶性聚合物,而这个聚合物的增加是导致大豆蛋白溶解度提高的最根本原因;另外,Wanlop等^[22]研究表明,经过超声处理后,球状蛋白质分子的溶剂化能力发生了改变,导致蛋白质的可压缩性增强,从而更易分散在溶剂中,因此增强其溶解度。

2.1.2 超声功率对大豆蛋白溶解性的影响

随着超声功率的增大,加大了反应溶液的能量密度,从而在溶液中发生剧烈振荡,随之改善大豆蛋白的溶解性。朱建华等^[6]采用不同超声功率处理SPI溶液,结果表明,大豆蛋白溶解度随着超声功率的增大而增大;Hu等^[13]研究同样表明,大豆蛋白溶液的溶解度随着超声功率的增加而增加,并且溶解度在超声功率为600 W时达到最大值,这可能是由于超声波处理充分伸展了蛋白质的空间结构,使其相互间的作用力下降,从而增强了溶解性。

2.2 超声波处理对大豆蛋白乳化性能的影响

乳化性属于蛋白质的界面性质。大豆蛋白的乳化性能可由乳状液稳定性(emulsifying stability, ES)、乳化活性(emulsifying activity, EA)和乳化能

力(emulsifying capacity, EC)3个指标来评价。但大部分市售产品的乳化性能并未达到理想要求,因此需要对其进行改性。大量研究证明,超声波处理对大豆蛋白的乳化性能有明显的改善作用,Jonathan等^[23]研究表明,经过超声波处理的SPI在乳化能力和乳状液稳定性两方面均得到改善。

2.2.1 超声处理时间对大豆蛋白乳化性能的影响

超声波处理时间对大豆蛋白乳化性能有一定影响。孙冰玉等^[14]研究表明,超声时间为3~7 min时可显著改善醇法SPC的乳化性;孙燕婷等^[15]研究了超声处理时间对SPI乳化性能的影响,结果表明,SPI乳化性能随着超声波处理时间的逐渐增加呈现先提高后下降并趋于平稳的现象。

两位学者的研究结果证明,蛋白质分子的空间结构随着超声波处理时间的增加而愈加疏松,从而使极性部分朝向水相,非极性部分朝向脂质,因此提升了大豆蛋白的乳化性能。但是,蛋白质变性程度随着超声时间继续延长而加大,超声时间过长会导致不溶性蛋白质含量增多,随之乳化性能降低^[24-25]。

2.2.2 超声功率对大豆蛋白乳化性能的影响

杨会丽等^[26]研究表明,随着超声功率的逐渐增加,SPI的乳化能力和乳化稳定性先上升后下降;宋旻等^[27]研究表明,相比于超声时间,超声功率对SPI乳化稳定性的影响程度更大,同时当超声功率逐渐增加至498.05 W时,SPI乳化稳定性达到最大值。显然,超声功率的增加能够显著提高大豆蛋白的乳化性能。由此可见,蛋白质分子的空间结构经超声波处理后遭到破坏,使更多的分子展开并聚集在溶液表面,引起油-水间张力下降,因此SPI的乳化性能得到提高。但是,随着超声功率的增加,高能量的机械振荡使蛋白变性愈发严重,所以EC和ES随之下降^[28]。

2.3 超声波处理对大豆蛋白起泡性能的影响

大豆蛋白同时具有疏水性和亲水性两种基团,因而在溶液中表现出较强的界面活性。起泡性能作为蛋白质重要的界面性质之一,有两种表示方式:起泡力(foaming power, FP)和泡沫稳定性(foam stability, FS)。虽然大豆蛋白分子可以形成稳定的亚稳态泡沫,但是与工业生产要求仍存在一定差距,因此通过超声波改性提高大豆蛋白的起泡性具有一定意义。

2.3.1 超声波处理时间对大豆蛋白起泡性能的影响

大豆蛋白若在起泡过程中能快速吸附在溶液

界面处,随之进行分子重排并且在界面处形成具有黏弹性的薄膜,则该发泡剂性能优良^[29]。随着超声波处理时间的增加,大豆蛋白部分链段展开在溶液界面,使泡沫更好地形成和进一步稳定,但是大豆蛋白起泡力随着超声时间继续增加而逐渐下降。孙冰玉等^[29]研究表明,SPC起泡性随着超声波处理时间的增加呈现先增大后减小的趋势;朱建华等^[6]和包中宇等^[30]的研究同样证明了这一结果;Rocío等^[31]研究表明高强度超声波处理20 min时,起泡能力明显提高,但是泡沫稳定性并未受到影响;这也说明了蛋白质的起泡能力和泡沫稳定性并不是受同一基团控制的。

2.3.2 超声功率对大豆蛋白起泡性能的影响

杨会丽等^[26]对超声处理后SPI起泡性进行了研究,结果表明,超声波处理能够不同程度的提高SPI的起泡力和泡沫稳定性;朱建华等^[6]研究表明,SPI起泡力随着超声功率的增加而逐渐增加,这是因为超声功率的增加通过破坏蛋白质分子空间结构,导致暴露了更多的内部基团,从而在提高溶液表面疏水性的同时降低了其表面张力,所以SPI起泡能力逐渐增加^[32]。

2.4 超声波处理对大豆蛋白凝胶性的影响

大豆蛋白分子可分为分散型和凝胶型两类,分散型主要使用在乳制品中,而凝胶型则在肉制品加工制作中使用比较广泛。凝胶化作用和形成凝胶结构是大豆蛋白质重要的功能特性,凝胶强度主要由储能模量(G')及损耗模量(G'')来表征, G' 与贮存于样品中抵制变形的能量相关,是衡量凝胶强度的一种尺度,反映样品的弹性,而 G'' 则是指材料在发生形变时损耗的能量大小,反映样品的粘性。研究证明,经超声波处理后,大豆蛋白凝胶强度显著提高,这是由于分散均匀的蛋白质体系和大豆蛋白亚基互相缠绕形成了致密的凝胶网络^[33-35]。但是,目前关于超声波改性对大豆蛋白凝胶性影响的研究并不深入,因此本文综合论述了超声时间和超声功率对大豆蛋白凝胶性的影响。

SPI分子的内部结构经超声波振荡处理后发生了变化,导致分子间交互作用力加大,因此改善了SPI凝胶强度。田海娟等^[36]研究表明,在一定的试验条件下,超声时间的延长和功率的增加能够提高大豆蛋白的凝胶强度,而超声功率的影响效果更为显著,同时还指出经MTGase诱导对超声波改性后的大豆分离蛋白凝胶强度明显高于未经超声波改性处理的样品;唐传核等^[37]研究表明,在一定试验

条件下,未经超声处理形成凝胶的G'在持续增加,而经超声处理的G'则先增加后降低,这说明经过超声处理的SPI凝胶强度逐渐增大;Zhang等^[38]研究表明,高强度超声处理能够部分打开SPI空间结构,使得游离巯基的含量显著增加,以致在TGase的诱导下分子间能充分进行反应,改善了蛋白质分子的凝胶强度。以上几位学者的研究都证明了超声波处理能够显著提高SPI分散液的粘弹性(即凝胶特性),并且在转谷氨酰胺酶存在的条件下,蛋白质结构展开的更加充分,分子之间的相互反应更加完全,以致形成的TSCG有更加均一和致密的微观结构,随之凝胶强度得到改善。

3 超声波改性大豆蛋白的应用现状

天然的大豆蛋白质拥有独特的功能特性,因其所具有乳化性和起泡性而被广泛地应用于奶茶、果汁等饮品中,同时它的凝胶化作用也使食品能够具有期望的质构与口感。经过超声波处理的大豆蛋白,其功能特性得到显著改善,从而更好地得到应用。

3.1 改性大豆蛋白在食品工业中的应用

经过超声波改性后,大豆蛋白的乳化性能和溶解性均得到改善,因此能更好的应用于食品工业中。宋旻等^[27]研究证明,将经超声处理的SPI替代乳化剂添加到奶茶中,其稳定性已达市售奶茶的标准,与普通奶茶相比其稳定性更好、营养价值更高;另有研究表明,经超声改性的SPI溶解度提高了86%左右^[39],因此更有利于其在酸性果汁饮料中的添加,提高饮品的食用价值。

大豆蛋白经超声波改性后亲水和亲油基团更加活跃,可在油水界面较好的伸展,同时将其与水溶性胶、大豆卵磷脂一起混合,产生较好的混浊现象,而混浊的外观是天然果汁及蛋白饮品的一种重要特征。姜雪等^[40]通过响应面进行工艺优化,发现一定的超声处理条件下,样品浊度稳定性系数较对照样提高了11.12%,这为工业化生产双蛋白饮品提供了参考。

3.2 改性大豆蛋白在非食品工业中的应用

大豆蛋白经超声波改性后,获得了较好的功能特性,因此其在非食品工业中的应用更加广阔。例如,传统的大豆蛋白进行纺织或者再加工效果不佳,而经超声波处理后,大豆蛋白纤维的上染百分率及上染速率得到改善,显著高于常规染色^[41],这是因为超声波作用使其内部结构发生了变化。目

前,已有较多学者采用大豆作为制备木材胶黏剂的原料,贾翀等^[42]的试验证明,大豆胶经超声波处理40 min时胶合性能最好,其指标可达国标二类胶合板的要求。此外,超声波处理可有效地提高大豆蛋白质塑料的拉伸强度和阻湿性,可能是超声波的空化效应使得到的分散液更加均一,分子间反应更加充分,因此得到的大豆蛋白基膜更加坚韧与紧密^[43]。

4 存在问题及展望

目前,关于超声波改性大豆蛋白的研究仍存在以下几个问题:(1)大豆蛋白的功能特性得以改善的机理尚不清楚,需要进一步分析其微观结构的变化;(2)利用超声波改性后,大豆蛋白本身的营养成分是否受到影响需要进一步研究;(3)目前,经超声改性后的大豆蛋白较多的应用于食品工业中,而在非食品工业中应用还有待更大范围的推广。

超声波改性具有绿色环保、节约能源等特点,大豆蛋白经超声波处理后功能特性得到显著改善,从而拓宽了其应用范围。但是,对于超声波改性大豆蛋白的研究,未来应专注于机理层面,充分了解其功能性改善的具体微观结构变化,从而更好地将宏观与微观联系起来;同时还要对大豆蛋白本身的营养成分做改性前后的对比分析,使大豆蛋白的功能特性在得到改善的同时还能保证其营养价值不受到影响;另外应寻求新市场,将经过超声波改性的大豆蛋白更多地应用于诸多加工和生产,以创造更大价值。随着超声波改性大豆蛋白的进一步深入研究和创新,大豆蛋白必将得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1] Friedman M, Brandon D L. Nutritional and health benefits of soy proteins[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(3): 1069-1086.
- [2] Nishinari K, Fang Y, Guo S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39(2): 301-318.
- [3] 杨敏,田少君,周瑞宝,等.大豆浓缩蛋白物理改性研究进展[J].粮油食品科技,2007,15(6):42-45. (Yang M, Tian S J, Zhou R B. et al. Research progress on the physical modification of soy protein concentrate [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2007, 15(6): 42-45.)
- [4] 李川,蒋和体.大豆蛋白改性[J].食品工业科技,2000(3): 75-76. (Li C, Jiang H T. The modification of soy protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2000(3): 75-76.)
- [5] 谢良,王璋,蔡宝玉.大豆分离蛋白的组成与功能性质[J].

- 中国粮油学报, 2000, 15(6): 6-10. (Xie L, Wang Z, Cai B Y. Composition and functional properties of soy protein isolate [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2000, 15(6): 6-10.)
- [6] 朱建华, 杨晓泉. 超声处理对大豆蛋白分子结构的影响[J]. 粮油加工, 2010(7): 39-42. (Zhu J H, Yang X Q. The effect of sonication on molecular structure of soybean protein [J]. Grain and Oil Processing, 2010(7): 39-42.)
- [7] Wang X B, Zhang Y H, Jiang L Z. Improvement of emulsifying properties of soybean protein isolate through glycosylation modification [J]. Advanced Materials Research, 2013, 781-784: 1495-1499.
- [8] Sung H Y, Chen H J, Liu T Y, et al. Improvement of the functionalities of soy protein isolate through chemical phosphorylation [J]. Journal of Food Science, 2010, 48(3): 716-721.
- [9] Liu H, Wang H, Geng W, et al. The influence of soybean isolate protein modified by acylation on the pH-sensitive property of gel [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science & Technology, 2017, 17(5): 25-32.
- [10] Barman B G, Hansen J R, Mossey A R. Modification of the physical properties of soy protein isolate by acetylation [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1977, 25(3): 638.
- [11] Qi M, Hettiarachchy N S, Kalapathy U. Solubility and emulsifying properties of soy protein isolates modified by pancreatin [J]. Journal of Food Science, 1997, 62(6): 1110-1115.
- [12] 张佩, 吴丽. 大豆蛋白改性的研究进展及其在食品中的应用 [J]. 山东食品发酵, 2008(1): 51-54. (Zhang P, Wu L. Research progress of soybean protein modification and its application in food [J]. Shandong Food Fermentation, 2008(1): 51-54.)
- [13] Hu H, Wu J, Li-Chan E C Y, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 647-655.
- [14] 孙冰玉, 石彦国. 超声波对醇法大豆浓缩蛋白乳化性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2006, 21(4): 60-63. (Sun B Y, Shi Y G. Effect of ultrasound on emulsification of soy protein concentrate by alcohol method [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(4): 60-63.)
- [15] 孙燕婷, 黄国清, 肖军霞, 等. 超声处理对大豆分离蛋白溶解性和乳化活性的影响 [J]. 中国粮油学报, 2011, 26(7): 22-26. (Sun Y T, Huang G Q, Xiao J X, et al. The effect of sonication on solubility and emulsification activity of soy protein isolate [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(7): 22-26.)
- [16] 杨光胜, 陈复生, 张丽芬, 等. 大豆蛋白改性技术研究进展 [J]. 粮食与油脂, 2013, 26(11): 1-3. (Yang G S, Chen F S, Zhang L F, et al. Research progress of soybean protein modification technology [J]. Cereals & Oils, 2013, 26(11): 1-3.)
- [17] Huang L, Ding X, Dai C, et al. Changes in the structure and dissociation of soybean protein isolate induced by ultrasound-assisted acid pretreatment [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 727-732.
- [18] 张涛, 魏安池, 刘若瑜. 大豆蛋白改性技术研究进展 [J]. 粮油食品科技, 2011, 19(5): 26-29. (Zhang T, Wei A C, Liu R Y, Research progress of soybean protein modification technology [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2011, 19(5): 26-29.)
- [19] 王小英, 李娜. 超声处理对大豆蛋白溶解性及蛋白组分的影响 [J]. 中国油脂, 2009, 34(4): 31-34. (Wang X Y, Li N. The effect of sonication on soybean protein solubility and protein components [J]. China Oils and Fats, 2009, 34(4): 31-34.)
- [20] Jambrak A R, Lelas V, Mason T J, et al. Physical properties of ultrasound treated soy proteins [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(4): 386-393.
- [21] Tang C H, Wang X Y, Yang X Q, et al. Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(4): 432-437.
- [22] Wanlop C, Erica D, Julian M D. Impact of cosolvents (polyols) on globular protein functionality: Ultrasonic velocity, density, surface tension and solubility study [J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(8): 1475-1484.
- [23] O'Sullivan J, Park M, Beevers J. The effect of ultrasound upon the physicochemical and emulsifying properties of wheat and soy protein isolates [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 69: 77-84.
- [24] Chen L, Chen J, Ren J, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of soy protein isolates and on the emulsifying properties of hydrolysates [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(6): 2600-2609.
- [25] Karki B, Lamsal B P, Grewell D, et al. Functional properties of soy protein isolates produced from ultrasonicated defatted soy flakes [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2009, 86(10): 1021-1028.
- [26] 杨会丽, 马海乐. 超声波对大豆分离蛋白物理改性的研究 [J]. 中国酿造, 2009, 28(5): 24-27. (Yang H L, Ma H L. Study on the physical modification of soy protein isolate by ultrasonic [J]. China Brewing, 2009, 28(5): 24-27.)
- [27] 宋旻. 超声—烷基化改性大豆分离蛋白及其在奶茶中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. (Song Y. Ultrasound-alkylation modified soy protein isolate and its application in milk tea [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.)
- [28] Wang X, Jiang L, Xu W. Phosphorylation of soybean protein isolates under ultrasound treatment to improve their emulsifying properties [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2013, 11(3): 270-273.
- [29] 孙冰玉, 石彦国. 超声波对醇提大豆浓缩蛋白起泡性的影响 [J]. 中国食品学报, 2006, 6(6): 100-104. (Sun B Y, Shi Y G. The effect of ultrasound on foaming properties of alcohol concentrated soy protein concentrate [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2006, 6(6): 100-104.)
- [30] 包中宇. 超声波技术对大豆分离蛋白功能性质、结构及凝胶特性的影响 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015. (Bao Z Y. The effect of ultrasonic technology on functional properties, structure and gel properties of soy protein isolate [D]. Nanchang: Nanchang University, 2015.)
- [31] Morales R, Martínez K D, Ruiz-Henestrosa P V M, et al. Modifi-

cation of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: Particle size effect[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26:48-55.

[32] Mu L X, Zhao M M, Yang B, et al. Effect of ultrasonic treatment on the graft reaction between soy protein isolate and gum acacia and on the physicochemical properties of conjugates[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2010, 58(7): 4494.

[33] Tang C H, Jiang Y, Yang X Q, et al. Effect of ultrasonic treatment on gelling properties of commercial soy protein isolate[J]. Chinese Cereals & Oils Association, 2005, 20(5): 72-77.

[34] Qin X S, Luo S Z, Cai J, et al. Transglutaminase-induced gelation properties of soy protein isolate and wheat gluten mixtures with high intensity ultrasonic pretreatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 31: 590.

[35] Furukawa T, Ohta S. Ultrasonic-induced modification of flow properties of soy protein dispersion[J]. Agricultural & Biological Chemistry, 2006, 47(4): 745-750.

[36] 田海娟, 王蕾, 张智宇. 超声波改性与 MTGase 诱导的大豆分离蛋白凝胶强度的研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(21): 29-32. (Tian H J, Wang L, Zhang Z Y. Ultrasound modification and MTGase induced soy protein isolate gel strength[J]. Food Research and Development, 2015, 36(21): 29-32.)

[37] 唐传核, 姜燕, 杨晓泉, 等. 超声处理对商用大豆分离蛋白凝胶性能的影响[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(5): 72-77. (Tang C H, Jiang Y, Yang X Q, et al. The effect of sonication on the performance of commercial soy protein isolate gel[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2005, 20(5): 72-77.)

[38] Zhang P P, Tan H, Shaolong F, et al. Effect of high intensity ultrasound on transglutaminase-catalyzed soy protein isolate cold set gel[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 380-387.

[39] 袁道强, 杨丽. 超声波改性提高大豆分离蛋白酸性条件下溶解性的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2008(1): 27-28. (Yuan D Q, Yang L. The research of ultrasound modification enhances solubility of soy protein isolate under acidic conditions[J]. Cereal & Feed Industry, 2008(1): 27-28.)

[40] 姜雪, 韩越, 杨瑞雪, 等. 超声波处理在双蛋白饮品中的应用[J]. 食品工业, 2015, 36(10): 179-183. (Jiang X, Han Y, Yang R X, et al. The application of ultrasonic treatment in double protein drinks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(10): 179-183.)

[41] 张宇, 唐淑娟, 宋晓峰. 超声波在大豆蛋白纤维染色工艺中的应用[J]. 针织工业, 2006, 47(6): 47-49. (Zhang Y, Tang S J, Song X F. The application of ultrasound in soybean protein fiber dyeing process[J]. Knitting Industries, 2006, 47(6): 47-49.)

[42] 贾翀, 陈凤琦, 孙莎, 等. 超声波处理豆胶对胶合板胶合强度的影响[J]. 林产工业, 2015, 42(7): 18-20. (Jia C, Chen F Q, Sun S, et al. The effect of ultrasonic treatment of soybean gum on the bonding strength of plywood[J]. China Forest Products Industry, 2015, 42(7): 18-20.)

[43] Wang Z, Zhang N, Wang H Y, et al. The effects of ultrasonic/microwave assisted treatment on the properties of soy protein isolate/titanium dioxide films[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 57(2): 548-555.