

大豆蛋白淀粉样纤维制备、功能特性及应用研究进展

朱秀清, 韩田露, 刘纪元, 郭汝杞, 朱 颖, 黄雨洋, 刘琳琳*
(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: 大豆蛋白具有较高的营养价值、优异的功能特性, 在食品工业中备受关注, 常被用于改善食品的加工性能和提高食品的营养价值。然而天然大豆蛋白的功能特性发挥有限, 无法满足食品加工的需求, 大豆蛋白改性成为研究热点。热、高压、酶法等改性技术得到了广泛应用并取得了突破。大豆蛋白单体或多肽可以在酸和高温的条件下进行自组装, 随后聚集成淀粉样纤维, 能够改变大豆蛋白溶解性、凝胶性等。为了更好地了解大豆蛋白淀粉样纤维的研究进展, 本文综述了大豆蛋白淀粉样纤维的制备方法、形成机制, 并分析了处理条件对大豆蛋白淀粉样纤维的影响, 概述了大豆蛋白淀粉样纤维的溶解性、凝胶性、起泡性、乳化性等功能特性, 总结了大豆蛋白淀粉样纤维的应用, 并对其未来发展进行了展望, 以期为大豆蛋白淀粉样纤维在食品领域的应用提供参考。

关键词: 大豆蛋白; 淀粉样纤维; 制备; 功能特性; 应用

Progress in Preparation, Functional Characteristics and Application of Soybean Protein Amyloid-like Fibrils

ZHU Xiuqing, HAN Tianlu, LIU Jiyuan, GUO Ruqi, ZHU Ying, HUANG Yuyang, LIU Linlin*
(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: Soybean protein has high nutritional value and excellent functional characteristics, which has attracted much attention in the food industry, and is often used to improve the processing performance and nutritional value of foods. However, the functional characteristics of natural soybean protein are only limitedly applied, which cannot meet the needs of food processing, so modification of soybean protein has become a research focus. Modification technologies such as heat, high pressure and enzymatic treatments have been widely used and breakthroughs have been made. Soybean protein monomer or polypeptides can self-assemble and aggregate into amyloid-like fibrils under acid and high temperature conditions, resulting in changes the solubility and gelation properties of soybean protein. To enhance our understanding of recent progress in soybean protein amyloid-like fibrils (SPAF), this paper reviews the preparation methods and the formation mechanism of SPAF analyzes the influence of processing conditions on SPAF, and outlines the functional characteristics of SPAF such as solubility, gelation, foaming and emulsification properties. Furthermore, this review summarizes the application of SPAF and gives an outlook on future development in this field. It is our hope that this review will provide a reference for the application of SPAF in the food field.

Keywords: soybean protein; amyloid-like fibrils; preparation; functional characteristics; application

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240527-220

中图分类号: TS201.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 03-0296-10

收稿日期: 2024-05-27

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: 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

*通信作者简介: 刘琳琳(1986—)(ORCID: 0000-0003-0111-7190), 女, 副教授, 博士, 研究方向为大豆、谷物化学及加工原理。Email: keaiduolinlin@126.com

引文格式:

朱秀清, 韩田露, 刘纪元, 等. 大豆蛋白淀粉样纤维制备、功能特性及应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 296-305.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240527-220. <http://www.spkx.net.cn>

ZHU Xiuqing, HAN Tianlu, LIU Jiyuan, et al. Progress in preparation, functional characteristics and application of soybean protein amyloid-like fibrils[J]. Food Science, 2025, 46(3): 296-305. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240527-220. <http://www.spkx.net.cn>

大豆蛋白 (soybean proteins, SPs) 是一种重要的植物蛋白资源, 可以作为增稠剂、胶凝剂和泡沫稳定剂等, 广泛应用于食品工业中^[1]。SPs的功能特性很大程度上取决于它们的结构以及它们与其他食品成分相互作用的能力。天然SPs结构紧凑, 功能性不能充分发挥, 例如溶解性和胶凝能力较弱, 会限制其在食品或其他相关领域中的应用^[2]。目前主要通过热处理^[3]、发酵^[4]、酶催化^[5]、高水分挤出^[6]、糖基化^[7]等方式改善SPs的特性。而蛋白淀粉样纤维化是进一步拓宽和丰富其功能特性的有前途的策略之一^[8-9]。蛋白淀粉样纤维最早被发现于阿尔茨海默病、帕金森病和朊病毒病等疾病中^[10]。在适当的处理条件下, 乳蛋白、卵蛋白、SPs^[11]、绿豆蛋白^[12]、豇豆蛋白^[13]、鹰嘴豆蛋白^[12]等易在体外转化为淀粉样纤维^[11]。大豆蛋白淀粉样纤维 (soybean protein amyloid-like fibrils, SPAF) 是在低离子强度的酸性环境下通过热诱导形成的以交叉 β -结构为主体结构的纤维聚集体^[14-15]。SPAF的形成改善了SPs的多种功能特性, 如溶解性、黏度、凝胶性、起泡性、乳化性等^[16]。具有优良功能性的SPAF在食品行业中的应用将有利于推动功能性食品的开发和食品工业的发展。基于此, 本文首先对SPAF的制备、结构以及形成机制等进行综述, 然后总结淀粉样纤维化处理条件对SPAF形态和结构的影响, 并对SPAF的未来发展进行展望。

1 SPAF的制备及结构

1.1 SPs组成

SPs约占大豆干基的40%, 主要由球蛋白组成。根据其沉降系数的不同, SPs可以分为2S、 β -伴大豆球蛋白 (7S)、大豆球蛋白 (11S) 和15S等组分^[2]。2S组分含有2S球蛋白和细胞色素c等低分子质量蛋白, 以及Kunitz型胰蛋白酶抑制剂。15S组分是聚合物 (可能为甘氨酸二聚体), 是一种次要组分, 通常占SPs的10%。7S和11S是SPs贮藏蛋白主体, 约占粗蛋白总量的70%^[17]。7S是一种三聚体糖蛋白, 由3个亚基 α 、 α' 和 β 组成^[18], 亚基通过氢键和疏水相互作用结合在一起^[19]。11S由5个亚基 ($A_{1a}B_{1b}$ 、 $A_{1b}B_{2}$ 、 $A_{2}B_{1a}$ 、 $A_{3}B_{4}$ 、 $A_{5}A_{4}B_{3}$) 组成, 每个亚基是由一个酸性 (A) 多肽通过二硫键连接一个特定的碱

性 (B) 多肽构成^[20], 酸性-碱性肽通过疏水和/或氢键作用力络合形成三聚体, 两个三聚体相互堆叠, 从而形成六聚体糖蛋白。7S和11S组分的结构如图1所示。

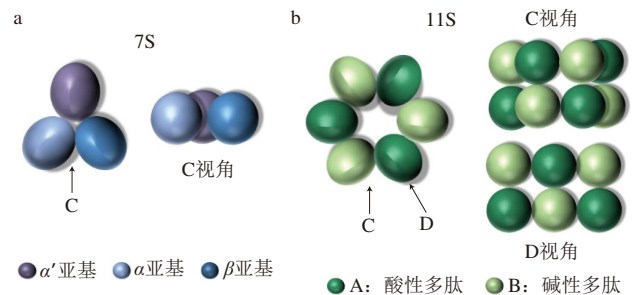


图1 SPs 7S (a) 和11S (b) 结构示意图^[21]

Fig. 1 Schematic diagrams of the structures of soybean protein 7S (a) and 11S (b)^[21]

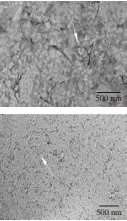
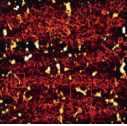
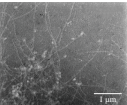
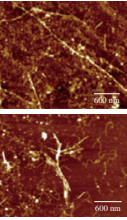
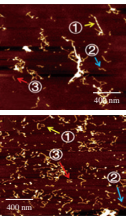
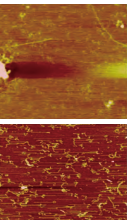
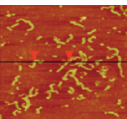
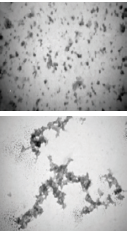
1.2 SPAF的制备

以大豆分离蛋白 (soybean protein isolate, SPI)、7S、11S等为原料, 将其制备成蛋白溶液, 在pH 2.0的条件下通过搅拌数小时并加热直至蛋白变性而形成SPAF^[22]。在此过程中, 蛋白质单体会发生水解、展开, 并通过分子间相互作用 (如疏水相互作用、氢键和静电相互作用) 自组装成淀粉样纤维结构^[15]。SPAF在制备过程中还可以通过物理、化学、生物方式辅助进行。不同的处理条件下形成的SPAF形态和分子间相互作用力不同, 例如SPI溶液在pH 2.0和80 °C加热6 h并超声会出现分支状和紧密缠绕的SPAF形态^[23]; 7S溶液在pH 2.0和85 °C加热0~20 h会出现柔性SPAF形态^[24]; 11S在pH 2.0和85 °C条件下添加0~200 mmol/L $CaCl_2$ 溶液加热16 h会出现长条形的半柔性SPAF形态^[25], 不同原料及不同制备条件下形成的SPAF形态特征及分子间主要驱动力见表1。

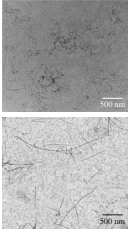
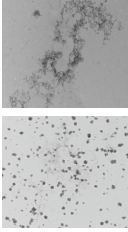
表1 SPAF的制备条件、纤维形态以及分子间主要驱动力
Table 1 Preparation conditions, morphology and intermolecular driving forces of SPAF

原料类型	制备条件	纤维形态	图示	分子间主要驱动力	参考文献
	pH 2.0、85 °C 加热20 h	纤维的宽度为1~50 nm、 长度为100~400 nm		氢键	[26]

续表1

原料类型	制备条件	纤维形态	图示	分子间主要驱动力	参考文献
	pH 2.0、80 ℃加热8 h，超声10 min	纤维的形态表现出分支状和紧密缠绕的聚集体，随着超声时间的延长，缠绕的纤维聚集体转变为尺寸更小、粒径更均一的纤维		疏水相互作用	[27]
	pH 2.0、85 ℃加热8 h，加入胰蛋白酶	纤维平均长度为194 nm，几乎没有分支，并且在形态上显得更灵活		疏水相互作用	[28]
SPI	pH 2.0、85 ℃，添加160 mmol/L NaCl溶液，微波加热60 min	纤维分支、较长，并以扭曲的形式存在		疏水相互作用、氢键	[29]
	pH 2.0、85 ℃加热，50 mmol/L ZnCl ₂ 溶液、MgCl ₂ 溶液、Na ₂ HPO ₄ 溶液、Na ₂ SO ₄ 溶液	Zn ²⁺ 和Mg ²⁺ 加快了纤维的形成，促进了缠绕和较长的刚性结构，HPO ₄ ²⁻ 和SO ₄ ²⁻ 会导致纤维结构短、粗、不均匀（图示为Zn ²⁺ 和HPO ₄ ²⁻ 条件）		氢键、疏水相互作用和静电相互作用	[30]
	蛋白质量分数分别为2%、4%、6%、8%和10%，pH 2.0，90 ℃加热	较高的蛋白质量分数（≥8%）形成刚性、直的原纤维，2%~6%时易形成柔性纤维（图示为8%和4%条件）		氢键	[31]
	盐酸、醋酸处理蛋白溶液至pH 2.0，加热5 h	盐酸处理的纤维外观呈长而细、无分支，部分呈弯曲状态，长度为450~920 nm；醋酸处理的纤维呈蠕虫状的卷曲状，长度约为700~1 500 nm（图示为盐酸和醋酸条件）		氢键	[32]
	pH 2.0、85 ℃加热0~20 h	7S及其亚基在20 h时转变为平均长度为800 nm和300 nm的蠕虫状纤维（图示为20 h时7S形态）		疏水相互作用	[24]
7S	pH 2.0、95 ℃加热0~6 h	15 min时形成蠕虫状纤维的平均长度为135 nm、宽度为14 nm，在6 h时形成平均长度为270 nm、宽度为35 nm的纤维膜（图示为15 min和6 h条件）		疏水相互作用	[23]

续表1

原料类型	制备条件	纤维形态	图示	分子间主要驱动力	参考文献
7S、11S	pH 2.0、80 ℃加热30 h	7S纤维细长且成团；11S纤维既有蚯蚓状的，也有细长笔直的		疏水相互作用	[33]
SPI、7S、11S	pH 2.0、85 ℃加热16 h，80 mmol/L CaCl ₂ 溶液	7S形成的纤维卷曲和柔韧，类似于蠕虫状；11S纤维为长条形的半柔性结构		疏水相互作用	[25]

1.3 SPAF的结构

SPAF具有分层结构，通常是由几根宽为10 nm内和长约1 μm的纤丝横向捆绑在一起。每个纤丝都由一个交叉β-结构组成。交叉β-结构是β链通过氢键网络垂直于原纤维的长轴堆叠，形成一个β-折叠片层，一对β-折叠片层形成一个侧链紧密交错的立体拉链结构。其中片层间隔为10~11 Å，股链间隔约为4.8 Å^[34]（图2）。淀粉样纤维是在酸及高温加热条件下制备的，达到了蛋白变性条件从而导致蛋白质构象变化和水解，释放出了活性肽，此过程中蛋白质的二级结构、三级结构与其聚集程度密切相关^[35]。SPI加热形成的纤维聚集体随着加热时间的延长而显著变小，含有规则的二级结构^[36]。7S比11S更容易发生二级结构的变化，且7S比11S的多肽水解明显，因此以SPI、7S、11S不同原料形成的淀粉样纤维结构有差异。7S比11S具有更高的形成淀粉样纤维的能力，具有更低的半高宽和更高的卷曲周期性。7S的α、α'和β亚基在淀粉样纤维形成过程中会表现出不同的形态，这与它们的氨基酸组成和肽段的典型序列有关^[37]。11S的酸性亚基形成纤维需要较短的时间、较高的温度和较宽的pH值范围，11S的碱性亚基可以通过疏水作用力和二硫键与酸性亚基快速聚集，导致酸性亚基α-螺旋向β-折叠的转变减少^[38]。

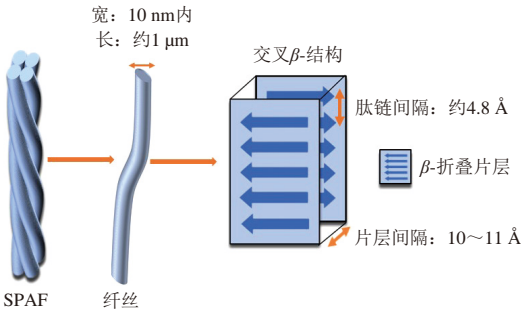


图2 SPAF结构示意图^[34]

Fig. 2 Schematic diagram of SPAF structure^[34]

淀粉样纤维化主要影响蛋白质的二级结构,且不同原料及处理条件对SPAF蛋白质二级结构的影响不同,一般表现为 α -螺旋含量减少, β -折叠含量增加^[22](图3)。SPI溶液在pH 2.0、85℃条件下加热20 h形成的淀粉样纤维, α -螺旋含量下降(26.10%降到25.70%), β -折叠含量增加(37.90%增到44.30%)^[26]。改变处理条件(pH 2.0、85℃加热8 h并加入胰蛋白酶),SPI淀粉样纤维的 α -螺旋含量也会下降(16.37%降到7.23%), β -折叠含量增加(31.70%增到41.60%)^[28]。7S蛋白溶液在pH 2.0、85℃条件下加热16 h同时添加80 mmol/L CaCl₂溶液诱导,形成的淀粉样纤维 α -螺旋含量下降(28.03%降到17.73%), β -折叠含量增加(34.43%增到45.80%)。同样处理条件下11S淀粉样纤维的 α -螺旋含量下降(27.56%降到14.48%), β -折叠含量增加(30.27%增到46.12%)^[25]。

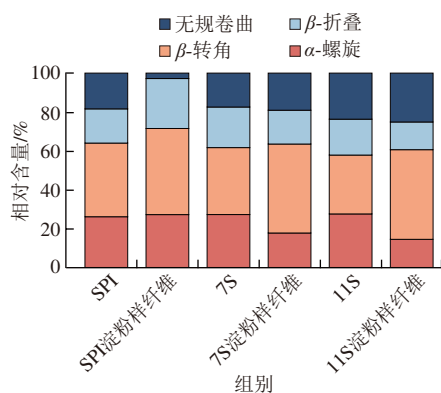


图3 SPI、SPI淀粉样纤维、7S、7S淀粉样纤维、11S、11S淀粉样纤维的二级结构含量^[25,30]

Fig. 3 Secondary structure contents of SPI, SPI amyloid-like fibrils, 7S, 7S amyloid-like fibers, 11S and 11S amyloid-like fibrils^[25,30]

1.4 SPAF形成机制

SPAF形成过程分为滞后期、生长期和成熟期3个阶段^[8],组成“S”状的生长动力学曲线(图4)。曲线前部的滞后期是一个缓慢的自发成核过程,为进一步形成有序结构做准备。随后的陡峭过渡带被称为生长期,此时形成的原丝快速生长连续延伸形成淀粉样纤维,在此阶段SPAF或肽的总转化率最高^[39]。SPAF达到平衡状态或蛋白质耗尽之前,相对稳定的阶段称为成熟期。

SPAF的形成机制分为单体模型(图4a)和多肽模型(图4b)。SPAF单体模型是蛋白质单体在变性和活化后释放出可以自组装的细胞核,通过向细胞核中添加单体蛋白而快速生长,导致瞬时存在的纤维状结构形成,例如球形低聚物。低聚物可以形成交叉 β -结构,并线性生长成纤维,最后单个纤维进一步形成纤维状蛋白质聚集体(初次成核)^[42]。将低聚物添加到由现有聚合形成的初级均匀成核的表面,使彼此聚合到一定程度形成一种

具有高自由能的“核”,称为“临界核”,其具有比SPI单体更强的相互聚合能力,可附着在纤维表面上开始不断伸长形成成熟的SPAF(二次成核)^[41]。多肽模型是蛋白质在热变性和酸性水解条件下展开球状蛋白结构,暴露了以天然状态埋藏在球状蛋白核心中的官能团产生的活性肽,而不是完整的蛋白质单体。随后肽将 β 链通过分子间相互作用(如疏水相互作用、氢键和静电相互作用)堆叠形成交叉 β -结构从而形成纤维,纤维横向捆绑自组装成淀粉样纤维^[39]。总之SPI单体和肽都是SPAF的主要成分^[42]。

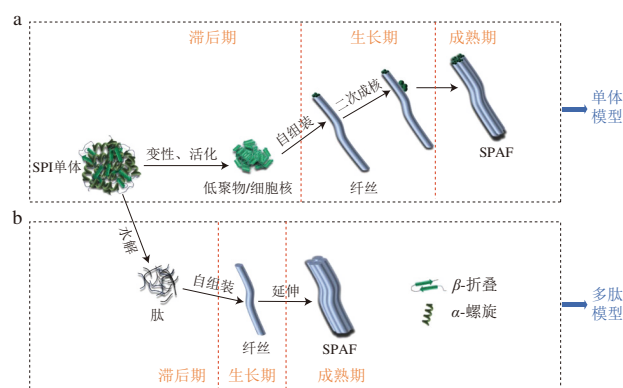


图4 SPAF的“S”状生长动力学曲线、单体模型(a)和多肽模型(b)^[40-41]

Fig. 4 S-Shaped growth kinetics curve, monomer model (a) and polypeptide model (b) of SPAF^[40-41]

2 纤维化处理条件对SPAF形态及结构的影响

SPAF是在低pH值和低离子强度条件下形成的,蛋白浓度^[31]、离子强度是影响SPAF的主要因素,不同的处理条件均可导致形成的SPAF形态、结构改变或无定形聚集体的形成^[43]。其他处理条件,如超声处理^[44]、酶处理^[28]也对蛋白纤维聚集体的最终形态及结构有显著影响^[45]。

2.1 蛋白浓度的影响

形成良好形态及结构的淀粉样纤维重要的先决条件是达到最佳蛋白质浓度。在适当的范围内,水解后的蛋白质浓度越高,富含谷氨酰胺的肽越多,形成的淀粉样纤维越长,形态越好^[46]。形成SPAF适宜的蛋白质量分数一般为2%~10%。SPI溶液在80℃和pH 2.0条件下加热16 h,蛋白质量分数为3.0%会形成长的半柔性纤维;蛋白质量分数为7.5%会形成短的蠕虫状原纤维^[47]。在pH 2.0和90℃加热条件下,蛋白质量分数为2%~6%容易形成由成对的双链原丝组成的卷曲纤维。较高的蛋白质量分数($\geq 8\%$)条件下易形成刚性、直的原纤维,并且一定范围内增加蛋白浓度会导致SPAF结构更稳定^[31]。

随蛋白质量分数升高(由2%增加到8%),更多细胞核的形成可能会增加SPAF的周期性,并促进沿骨架堆叠

的 β -折叠伸长,样品中 β -折叠的比例显著增加,平行 β -折叠占主导地位^[47]。但部分纤维丝的横向聚集达到临界点(蛋白质质量分数增加到10%)时,就可能发生从短、卷曲、直的带状到无定形聚合体转变^[31]。蛋白浓度对SPAF的影响机理如图5所示。

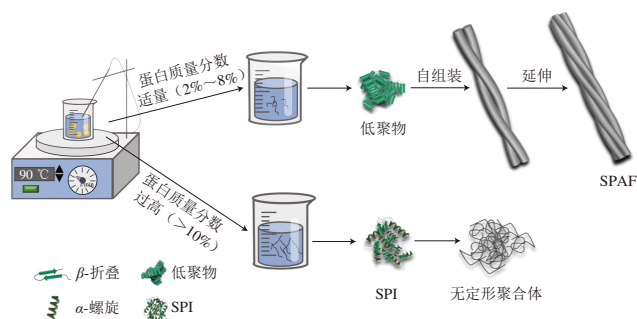


图5 蛋白浓度对SPAF的影响机理示意图^[31]

Fig. 5 Schematic diagram of the mechanism by which protein concentration influences SPAF^[31]

2.2 离子强度的影响

离子强度是目前已知影响SPAF的关键因素^[48]。离子可以通过特异性结合改变蛋白质的状态和稳定性,改变蛋白质-溶剂系统的性质,并屏蔽静电相互作用从而影响SPAF的形态和结构^[49]。离子分为阴离子和阳离子,如 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^{-} 等。SPI淀粉样纤维呈长的半柔性分枝状,并聚集在一起缠结成网络结构。盐离子浓度较低时纤维之间形成物理缠结,结构更粗。盐浓度的增加会导致更多的核结构形成,从而加速了淀粉样纤维的形成,产生更多的短链蠕虫状纤维且更柔韧。SPI溶液在pH 2.0及加热条件下随NaCl浓度的增加会导致SPI分子间的静电斥力降低,使纤维更柔韧且更短^[50]。在添加80 mmol/L CaCl_2 溶液的酸性加热条件下, SPI、11S、7S的纤维形成速率最快且纤维最多^[25]。类似的,长的半柔性 β -乳球蛋白纤维会在低pH值和低离子强度条件下形成,而短的蠕虫状纤维则在更高的离子强度条件下形成。这是由于低离子强度条件下相对较强的静电斥力会导致蛋白质结构单元以有序的系统排列附着在生长的纤维上,而在较高离子强度条件下更快的生长则使纤维更加无序和混乱^[43]。

Mg^{2+} 和 Zn^{2+} 会诱导蛋白质构象的展开,暴露更多的疏水区域,从而增加SPAF的表面疏水性,引起纤维结构的变化^[51]。并且含有 Mg^{2+} 和 Zn^{2+} 的样品形成了紧密的 β -折叠结构,使SPAF的排列更加紧凑有序^[30]。 Cl^{-} 主要是通过与 Na^{+} 、 Ca^{2+} 结合影响纤维的结构。NaCl对SPAF的二级结构有显著影响,主要表现为 β -折叠含量增加^[50]。低离子强度会促进富含 β -折叠的SPAF形成,高离子强度会抑制 α -螺旋向 β -折叠的转变从而抑制SPAF形成^[50]。在低 CaCl_2 浓度(0~80 mmol/L)和pH 2.0条件下

加热SPI溶液16 h, SPI会形成富含 α -螺旋和 β -折叠的纤维聚集体^[52]。低NaCl浓度(160 mmol/L)和pH 2.0、80 °C加热SPI溶液时,样品中 β -折叠的转化速率增加,加速SPAF的形成^[50]。

2.3 超声处理的影响

在蛋白淀粉样纤维的形成过程中应用超声波可加速蛋白质自发生成核,促进SPAF的形成^[53]。超声过程利用气泡反复生长和破裂产生的强大剪切力,会导致单体蛋白质自发生成核和纤维断裂的加速,最终产生均匀和短的淀粉样原纤维^[54](图6)。超声处理对淀粉样纤维的形成有两种作用:一种是通过解折叠蛋白质和增加解折叠蛋白质之间的碰撞频率从而促进纤维化的效果;另一种是破坏或瓦解已经形成的淀粉样纤维^[55]。超声波处理可以有效地控制蛋白质纤维的长度和聚集状态^[27]。随着超声时间的延长, SPI溶液在酸、热(pH 2.0、80 °C)条件下缠结的淀粉样纤维聚集体会转变成更小的纤维且具有更均匀的粒径^[56]。改变超声条件(pH 2.0、85 °C)后,破坏了蛋白质的微观结构, SPI形态变为均匀分散的球形颗粒,粒径变小,形成了半柔性的细链聚集体^[44]。

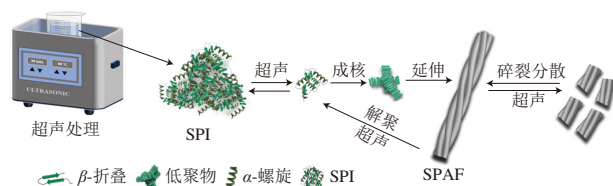


图6 超声处理对SPAF的影响机理示意图^[54]

Fig. 6 Schematic diagram of the mechanism by which ultrasonic treatment influences SPAF^[54]

通过超声处理增加了SPI的表面疏水性,改变了SPI的二级和三级结构,促进了蛋白质去折叠,提高了纤维的形成速率^[56]。超声处理后SPI的 β -折叠总含量增加,更有利于水解肽的产生和SPAF的形成^[44,57]。并且超声处理蛋白淀粉样纤维化是一个可逆过程,加速了纤维解聚成单体的过程^[54]。

2.4 酶处理

影响蛋白质折叠的相互作用包括非共价键(如疏水相互作用、氢键、静电相互作用、范德华力)和共价键(如二硫键、肽键)。由于这些相互作用,蛋白质对周围环境的变化非常敏感^[45]。酶会在酸性加热的环境下通过水解肽键使蛋白质变性,这些变性的中间产物可能会成为纤维化的前体^[28],并且酶处理会影响SPAF的形态及结构^[58]。酶水解产生的多肽在酸水解之前为SPAF的自组装做准备。酸加热环境下随着酶水解的进行,纤维形态受到酶水解的影响,一部分不稳定单体聚合形成大小和形态不同的非线性聚集体。7S在pH 2.0和95 °C条件下加热60 min并通过木瓜蛋白酶水解后,倾向于形成短蠕虫状纤维,而未水解的蛋白质则形成成长的半柔性原纤维^[23]。

酶解会影响SPAF的二级结构,二级结构的变化会更好地反映蛋白自组装过程。胰蛋白酶处理的SPAF在pH 2.0和85℃条件下加热时的结构更灵活,加热8 h后 β -折叠相对含量继续增加,达到 $(62.13 \pm 0.15)\%$ ^[28]。胰蛋白酶修饰的SPI将产生疏水性氨基酸,如精氨酸和赖氨酸导致表面疏水性显著增加。酶水解和蛋白质自组装结合提高了SPI的功能特性,形成的SPAF卷曲具有较大周期性结构以及更高的疏水性,不易于被酶水解^[59]。

2.5 其他处理条件对SPAF的影响

除上述条件外,pH值对SPAF的影响也不可忽视^[52]。当SPI溶液的pH值低于蛋白的等电点时,蛋白表面的正电荷数量持续增加,直到正电荷数量达到一定程度而不能被有效屏蔽,会引起其空间取向的变化,导致SPI分子聚集,利于纤维化^[60]。pH值升高对SPAF结构的影响可大致分为两个阶段,即静电中和引起的形态变化(pH 6)和 β -折叠含量减少引起的结构分解(pH 6)^[61]。微波加热及加热时间对SPAF的二级结构影响显著,表现为 β -折叠含量增加和 α -螺旋含量减少^[29]。酸调控也会影响SPAF的结构。醋酸诱导后SPAF的 β -折叠结构比例会高于盐酸诱导^[32]。

3 SPAF的功能特性及应用

蛋白质作为维持生命活动的重要物质基础,具有丰富的营养价值。与天然蛋白质相比,SPAF具有生物相容性且无毒,并具有黏度、溶解性、凝胶性、起泡性、乳化性等多种功能特性^[39]。SPAF由于其优良的功能特性以及极高的纵横比、纤维表面上大量的官能团、高刚度等已经越来越多地作为功能材料或构件应用于各种领域^[62]。

3.1 溶解性

大多数食品的pH值在4~7之间,接近许多蛋白质的等电点,在此pH值范围内制备的SPI淀粉样纤维与热处理SPI相比,氨基酸组成、电位差别不大,但是溶解度较低^[63]。超声波处理的SPI淀粉样纤维的溶解度更高,是因为超声波促进了蛋白质的展开,使亲水基团暴露出来,增强了蛋白质与水的相互作用,提高了纤维的溶解度^[56]。糖接枝改性后的SPI经酸热处理后,纤维的形成能力提高^[64],有利于蛋白发生纤维化聚集,其溶解度在酸性和中性条件下均有所提高^[65]。SPAF溶解性是重要的功能特性,发泡性、乳化性和凝胶性与其溶解性密切相关^[2]。

3.2 黏度

在酸性和高温条件下,SPAF溶液的黏度和流动性会受到淀粉样纤维化条件的影响。与天然蛋白质溶液相比,在pH 2.0和80℃加热15 h形成的SPAF溶液黏度增加^[35]。超声波处理的SPAF会暴露更多的结合位点,为纤维的形成创造更有利的条件,并且处理后的SPAF溶液平均粒径从 (191.90 ± 5.40) nm减小到 (151.83 ± 3.27) nm,

且黏度降低^[66]。蛋白淀粉样纤维的黏度还与蛋白组分有关。7S结合到SPI纤维中会导致SPI淀粉样纤维的黏度高于11S淀粉样纤维^[36]。在纤维化过程中由于SPs流体力学直径增加和缠结网络的形成^[9],SPAF会具有高黏度与高纵横比,可使其用作增稠剂以提高食品质量^[67]。

3.3 凝胶性

蛋白淀粉样纤维在低蛋白质浓度条件下诱导凝胶形成,增强蛋白质细链凝胶网络结构的有序性,加速颗粒凝胶中不均匀随机聚集体产生,改善蛋白质凝胶性^[13]。不同的因素会影响SPAF制成凝胶及凝胶的流变性质^[68]。如霍夫梅斯特离子的加入会影响SPAF的折叠和聚集^[69],加入离子的SPAF样品会表现出凝胶状和弹性行为,其中阳离子通过增强纤维结构提高凝胶强度^[30]。SPAF和多糖可在富含水的环境中作为生物聚合物交联,形成具有强大保水能力和一定弹性的水凝胶系统^[70]。SPAF拥有理想的吸水膨胀能力和可形成一定机械强度水凝胶的胶凝能力^[71],对于凝胶食品的质地和感官特性改变至关重要,在食品工业中被广泛用作胶凝剂^[72]。例如用SPAF制备的水凝胶比天然蛋白质制备的水凝胶具有更好的机械强度^[73]。

SPAF凝胶和乳液可作为营养物质和药物的载体,可以在加工和储存过程中保护环境敏感的营养物质和药物,甚至以活性形式将其输送到靶向器官^[45]。这是由于SPAF具有多个官能团,可以与不同营养物质和药物的相互作用。SPI会通过淀粉样纤维化自组装和聚集形成复杂的细丝、凝胶和薄膜网络,用于酶、小分子和药物的固定化^[74]。表没食子儿茶素没食子酸酯与SPAF形成复合物后,其生物可及性显著提高^[57];超声处理的SPAF与姜黄素复合10 min后,复合物表现出了良好的胶体稳定性、抗氧化活性^[75]和缓释性能^[27]; β -胡萝卜素与SPAF之间交联也会显著提高 β -胡萝卜素的热稳定性和光稳定性^[76]。SPAF水凝胶体系也可作为生物活性化合物的递送载体^[77]。

3.4 起泡性

泡沫能够赋予产品特殊的口感、风味和外观,是许多食品的重要组成部分,广泛应用于冰淇淋、蛋糕和蛋白酥饼等食品中^[78]。蛋白质可作为表面活性成分形成高弹性的界面膜,防止泡沫的聚集。蛋白质溶液经淀粉样纤维化后会显示出优异的起泡性,包括泡沫形成和稳定性^[50]。SPAF的起泡性会受不同因素影响,调节和控制溶液的pH值是提高SPAF泡沫稳定性的有效策略之一^[22]。中性pH值条件下SPAF的泡沫稳定性明显高于低pH值条件下的泡沫稳定性^[60];通过静电作用形成的SPAF与甲壳素纳米晶须的复合物凝聚体也会明显改善SPI的起泡性^[14]。影响纤维起泡性的重要因素之一是表面疏水性,而经蛋白酶、胃蛋白酶等酶修饰的SPI形成的淀粉样纤维表现出表面疏水性增加,有利于提高SPI纤维的起泡性^[22]。

泡沫稳定性通常受液膜的排出和气泡聚结的影响,而表面黏弹性的增加可减少液膜排水^[72]。与天然蛋白质相比,11S淀粉样纤维表现出更高的膨胀模量和更复杂的非线性响应,有助于增强蛋白质的黏弹性,可用作泡沫稳定剂^[14]。在实际加工过程中往往需要高浓度蛋白质稳定泡沫,大大增加了生产成本,限制了其在食品工业中的应用。而蛋白淀粉样纤维能在短时间内快速降低界面的表面张力,并在气泡周围形成更高弹性的网络结构,即使在低蛋白水平下(0.1%),SPAF仍具有出色的泡沫稳定性,其远高于相同含量的天然大豆球蛋白^[72]。

3.5 乳化性

变性的大豆球蛋白在热处理后结构发生进一步变化形成SPAF,具有更好的乳化效果^[79]。SPAF具有极高纵横比和高疏水性,抑制液滴流动,同时碰撞并连接颗粒形成稳定的高黏度缠结网络,其乳液具有更高界面模量的界面,提供了更大的排除体积,有效降低界面张力^[80],因此SPAF的乳化活性指数和乳化稳定性指数增加^[39]。SPAF可用作乳化剂和乳化稳定剂^[81],一方面,吸附在细小油滴的油-水界面上,防止相邻油滴相互黏连形成更大的油滴^[40];另一方面借助搅拌和超声处理进一步降低纤维的尺寸并提高油滴周围的覆盖效率^[82]。同时SPAF形成的Pickering乳液具有优异的不可逆界面吸附和抗聚集性能,能提高乳液中其他营养物质的生物利用率^[83]。

4 结 语

SPAF一般是SPs等原料在较低的pH值和较高的温度条件下蛋白质单体发生水解、展开并通过分子间相互作用自组装而形成的。其表现为有序 β -折叠含量增加、蛋白质的黏度高、具有较好溶解度和凝胶性等。不同原料及处理方式形成的纤维形态及结构不同,如SPI经pH 2.0和80℃加热8 h,超声10 min后纤维的形态会表现为分支状和紧密缠结的聚集体,SPI的表面疏水性增加、二级和三级结构改变、促进蛋白质去折叠,提高了纤维的形成速率。7S经pH 2.0和85℃加热0~20 h后纤维的形态为平均长度分别为800 nm和300 nm的蠕虫状,二级结构变化明显主要表现为 β -折叠的总含量增加。11S经pH 2.0和80℃加热30 h后纤维的形态会表现为蚯蚓状或细长笔直,其碱性亚基可以通过疏水作用力和二硫键与酸性亚基快速聚集,减少酸性亚基的 α -螺旋向 β -折叠转变。SPAF也因其优异的性能使其在食品领域广泛应用。其中SPAF的有序结构可以用作生物活性成分和有效的载体,以提高药物的生物利用度,但此方向的研究还处于起步阶段,对原纤维-原纤维、原纤维-营养物质等相互作用有待进一步研究。同时,尽管目前研究表明SPAF在食品领域是安全的,但对其在胃肠道中的变化及转化机制仍需

进一步探讨,应根据其形成条件、来源以及特性对SPAF的安全性进行明确评估,推动未来SPAF在食品、药品和化妆品中得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] 栾滨羽,张波,孟昂,等.大豆蛋白组分制备及其功能性的研究进展[J].食品科学,2023,44(13):360-367. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220623-256.
- [2] SUI X N, ZHANG T Y, JIANG L Z. Soy protein: molecular structure revisited and recent advances in processing technologies[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2021, 12: 119-147. DOI:10.1146/annurev-food-062220-104405.
- [3] XI J, YAO L L, LI S. Identification of β -conglycinin α' subunit antigenic epitopes destroyed by thermal treatments[J]. Food Research International, 2021, 139: 109806. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109806.
- [4] LIU L B, CHEN X Q, HAO L L, et al. Traditional fermented soybean products: processing, flavor formation, nutritional and biological activities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(7): 1971-1989. DOI:10.1080/10408398.2020.1848792.
- [5] ZHANG Q Z, CHENG Z Z, WANG Y, et al. Combining alcalase hydrolysis and transglutaminase-cross-linking improved bitterness and techno-functional properties of hypoallergenic soybean protein hydrolysates through structural modifications[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 151: 112096. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112096.
- [6] ZHANG T Y, DOU W, ZHANG X, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 702-710. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.060.
- [7] CAI J S, FENG J Y, NI Z J, et al. An update on the nutritional, functional, sensory characteristics of soy products, and applications of new processing strategies[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 676-689. DOI:10.1016/j.tifs.2021.04.039.
- [8] JANSSENS K J A, ROMBOUTS I, GROOTAERT C, et al. Rational design of amyloid-like fibrillary structures for tailoring food protein techno-functionality and their potential health implications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 84-105. DOI:10.1111/1541-4337.12404.
- [9] MOHAMMADIAN M, MADADLOU A. Technological functionality and biological properties of food protein nanofibrils formed by heating at acidic condition[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 115-128. DOI:10.1016/j.tifs.2018.03.013.
- [10] VILES J H. Metal ions and amyloid fiber formation in neurodegenerative diseases. Copper, zinc and iron in Alzheimer's, Parkinson's and prion diseases[J]. Coordination Chemistry Reviews, 2012, 256(19/20): 2271-2284. DOI:10.1016/j.ccr.2012.05.003.
- [11] YU Z C, LI N, LIU Y A, et al. Formation, structure and functional characteristics of amyloid fibrils formed based on soy protein isolates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127956. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.127956.
- [12] LIU J, TANG C H. Heat-induced fibril assembly of vicilin at pH 2.0: reaction kinetics, influence of ionic strength and protein concentration, and molecular mechanism[J]. Food Research International, 2013, 51(2): 621-632. DOI:10.1016/j.foodres.2012.12.049.
- [13] LI T, WANG L, ZHANG X X, et al. Assembly behavior, structural characterization and rheological properties of legume proteins based amyloid fibrils[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106396. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106396.

- [14] WAN Z L, YANG X Q, SAGIS L M C. Contribution of long fibrils and peptides to surface and foaming behavior of soy protein fibril system[J]. *Langmuir*, 2016, 32(32): 8092-8101. DOI:10.1021/acs.langmuir.6b01511.
- [15] AKHARUME F U, ALUKO R E, ADEDEJI A A. Modification of plant proteins for improved functionality: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(1): 198-224. DOI:10.1111/1541-4337.12688.
- [16] ALAVI F, EMAM-DJOMEH Z, MOHAMMADIAN M, et al. Physicochemical and foaming properties of nanofibrillated egg white protein and its functionality in meringue batter[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105554. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.105554.
- [17] BOEHM J D, NGUYEN V, TASHIRO R M, et al. Genetic mapping and validation of the loci controlling 7S α' and 11S A-type storage protein subunits in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.][J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2018, 131(3): 659-671. DOI:10.1007/s00122-017-3027-9.
- [18] IPPOUSHI K, WAKAGI M, HASHIMOTO N, et al. Absolute quantification of the α , α' , and β subunits of β -conglycinin from soybeans by liquid chromatography/tandem mass spectrometry using stable isotope-labelled peptides[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 1223-1228. DOI:10.1016/j.foodres.2018.10.009.
- [19] ZHAO S J, KONG D H, LIAN X B, et al. A review of recent developments for applicational performances in soybean protein-bonded wood composites[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2024, 132: 103676. DOI:10.1016/j.ijadhadh.2024.103676.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LI X Y, LI G Y, ZENG Q Z, et al. The formation of soy protein fibrils-chitin nanowhisker complex coacervates: relationship to mixed foam stability[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 652: 129783. DOI:10.1016/j.colsurfa.2022.129783.
- [23] XIA W J, ZHANG H, CHEN J Y, et al. Formation of amyloid fibrils from soy protein hydrolysate: effects of selective proteolysis on β -conglycinin[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 268-276. DOI:10.1016/j.foodres.2017.08.059.
- [24] WANG J M, YANG X Q, YIN S W, et al. Growth kinetics of amyloid-like fibrils derived from individual subunits of soy β -conglycinin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(20): 11270-11277. DOI:10.1021/jf202541m.
- [25] MIAO L M, ZHU J Y, PENG X H, et al. Effects of CaCl_2 concentration on fibrils formation and characteristics of soybean protein isolate and β -conglycinin/glycinin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108769. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108769.
- [26] ZHAO H S, MA Z, JING P. Interaction of soy protein isolate fibrils with betalain from red beetroots: morphology, spectroscopic characteristics and thermal stability[J]. *Food Research International*, 2020, 135: 109289. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109289.
- [27] JI F Y, WANG Z J, BAI X H, et al. Ultrasound-treated soy protein fibrils: a potential vehicle for curcumin with improved water solubility, antioxidant activity and sustained-release property[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 143: 108929. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108929.
- [28] AN D, LI L. The effect of limited proteolysis by trypsin on the formation of soy protein isolate nanofibrils[J]. *Journal of Chemistry*, 2020, 2020: 8185037. DOI:10.1155/2020/8185037.
- [29] AFKHAMI R, VARIDI M J, VARIDI M, et al. Improvement of heat-induced nanofibrils formation of soy protein isolate through NaCl and microwave[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108443. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108443.
- [30] CAO Z C, WANG X S, ZHAO J W, et al. Elucidating the modulatory influence of Hofmeister divalent ions on the structural dynamics and rheological properties of soy protein amyloid fibrils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109871. DOI:10.1016/j.foodhyd.2024.109871.
- [31] ZHENG Y X, GAO Y X, CHANG Y Y, et al. Concentration-regulated fibrillation of soy protein: structure and *in vitro* digestion[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(29): 11170-11179. DOI:10.1021/acs.jafc.3c02206.
- [32] 高喧翔, 梅馨澜, 朱泽丹, 等. 酸性调控对大豆分离蛋白纤维功能性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(2): 113-119. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000679.
- [33] ZHANG Y R, DEE D R. Morphology, formation kinetics and core composition of pea and soy 7S and 11S globulin amyloid fibrils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(11): 4755-4765. DOI:10.1021/acs.jafc.2c08704.
- [34] CHATANI E, YUZU K, OHASHI Y, et al. Current understanding of the structure, stability and dynamic properties of amyloid fibrils[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(9): 4349. DOI:10.3390/ijms22094349.
- [35] TANG C H, WANG C S. Formation and characterization of amyloid-like fibrils from soy β -conglycinin and glycinin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(20): 11058-11066. DOI:10.1021/jf1021658.
- [36] WANG Y J, SHEN Y T, QI G Y, et al. Formation and physicochemical properties of amyloid fibrils from soy protein[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 149: 609-616. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.01.258.
- [37] AKKERMANS C, VAN DER GOOT A J, VENEMA P, et al. Micrometer-sized fibrillar protein aggregates from soy glycinin and soy protein isolate[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(24): 9877-9882. DOI:10.1021/jf0718897.
- [38] DONG S R, XU H H, LI B Y, et al. Inhibition or improvement for acidic subunits fibril aggregation formation from β -conglycinin, glycinin and basic subunits[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 263-269. DOI:10.1016/j.jcs.2016.07.002.
- [39] MENG Y, WEI Z H, XUE C H. Protein fibrils from different food sources: a review of fibrillation conditions, properties, applications and research trends[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 121: 59-75. DOI:10.1016/j.tifs.2022.01.031.
- [40] YUE J X, YAO X L, GOU Q X, et al. Recent advances of interfacial and rheological property based techno-functionality of food protein amyloid fibrils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 132: 107827. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107827.
- [41] CAO Y, TANG X, YUAN M, et al. Computational studies of protein aggregation mediated by amyloid: fibril elongation and secondary nucleation[M]//*Progress in molecular biology and translational science*. Amsterdam: Elsevier, 2020: 461-504. DOI:10.1016/bs.pmbts.2019.12.008.
- [42] WEI Z H, HUANG Q R. Assembly of iron-bound ovotransferrin amyloid fibrils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 89: 579-589. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.11.028.

- [43] LOVEDAY S M, ANEMA S G, SINGH H. β -Lactoglobulin nanofibrils: the long and the short of it[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 67: 35-45. DOI:10.1016/j.idairyj.2016.09.011.
- [44] ZHAO C B, CHU Z J, MIAO Z C, et al. Ultrasound heat treatment effects on structure and acid-induced cold set gel properties of soybean protein isolate[J]. *Food Bioscience*, 2021, 39: 100827. DOI:10.1016/j.fbio.2020.100827.
- [45] CAO Y P, MEZZENGA R. Food protein amyloid fibrils: origin, structure, formation, characterization, applications and health implications[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 269: 334-356. DOI:10.1016/j.cis.2019.05.002.
- [46] LAMBRECHT M A, MONGE-MORERA M, GODEFROIDT T, et al. Hydrothermal treatments cause wheat gluten-derived peptides to form amyloid-like fibrils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(6): 1963-1974. DOI:10.1021/acs.jafc.0c05868.
- [47] VANDENAKKER C C, ENGEL M F M, VELIKOV K P, et al. Morphology and persistence length of amyloid fibrils are correlated to peptide molecular structure[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(45): 18030-18033. DOI:10.1021/ja206513r.
- [48] XIANG N, WU S H, WEI Z X, et al. Characterization of iron reducibility of soy protein amyloid fibrils and their applications in iron fortification[J]. *Food Chemistry*, 2021, 353: 129420. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129420.
- [49] MAREK P J, PATSALO V, GREEN D F, et al. Ionic strength effects on amyloid formation by amylin are a complicated interplay among debye screening, ion selectivity, and hofmeister effects[J]. *Biochemistry*, 2012, 51(43): 8478-8490. DOI:10.1021/bi300574r.
- [50] JI F Y, XU J J, OUYANG Y Y, et al. Effects of NaCl concentration and temperature on fibrillation, structure, and functional properties of soy protein isolate fibril dispersions[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111862. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111862.
- [51] HANE F, LEONENKO Z. Effect of metals on kinetic pathways of amyloid- β aggregation[J]. *Biomolecules*, 2014, 4(1): 101-116. DOI:10.3390/biom4010101.
- [52] JU Q, WANG J R, ZHOU H L, et al. Influence of pH and ionic strength on the physicochemical and structural properties of soybean β -conglycinin subunits in aqueous dispersions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126927. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.126927.
- [53] TAWALBEH D, AHMAD W A N W, SARBON N M. Effect of ultrasound pretreatment on the functional and bioactive properties of legumes protein hydrolysates and peptides: a comprehensive review[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(8): 5423-5445. DOI:10.1080/87559129.2022.2069258.
- [54] YAGI H, HASEGAWA K, YOSHIMURA Y, et al. Acceleration of the depolymerization of amyloid β fibrils by ultrasonication[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics*, 2013, 1834(12): 2480-2485. DOI:10.1016/j.bbapap.2013.08.013.
- [55] CHATANI E, LEE Y H, YAGI H, et al. Ultrasonication-dependent production and breakdown lead to minimum-sized amyloid fibrils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(27): 11119-11124. DOI:10.1073/pnas.0901422106.
- [56] ABDULSTAR A R, ALTEMIMI A B, AL-HILPHY A R. Exploring the power of thermosonication: a comprehensive review of its applications and impact in the food industry[J]. *Foods*, 2023, 12(7): 1459. DOI:10.3390/foods12071459.
- [57] TONG X H, CAO J, TIAN T, et al. Changes in structure, rheological property and antioxidant activity of soy protein isolate fibrils by ultrasound pretreatment and EGCG[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 122: 107084. DOI:10.1016/j.foodhyd.2021.107084.
- [58] MORA L, TOLDRA F. Advanced enzymatic hydrolysis of food proteins for the production of bioactive peptides[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2023, 49: 100973. DOI:10.1016/j.cofs.2022.100973.
- [59] HOUSMANS J A J, HOUBEN B, MONGE-MORERA M, et al. Investigating the sequence determinants of the curling of amyloid fibrils using ovalbumin as a case study[J]. *Biomacromolecules*, 2022, 23(9): 3779-3797. DOI:10.1021/acs.biomac.2c00660.
- [60] WAN Y L, GUO S T. The formation and disaggregation of soy protein isolate fibril: effects of pH[J]. *Food Biophysics*, 2019, 14(2): 164-172. DOI:10.1007/s11483-019-09567-1.
- [61] WANG Y X, YANG X Y, LI L. Formation of pH-responsive hydrogel beads and their gel properties: soybean protein nanofibers and sodium alginate[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 329: 121748. DOI:10.1016/j.carbpol.2023.121748.
- [62] WEI G, SU Z Q, REYNOLDS N P, et al. Self-assembling peptide and protein amyloids: from structure to tailored function in nanotechnology[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(15): 4661-4708. DOI:10.1039/c6cs00542j.
- [63] 陈震东, 陈嘉琦, 王金梅, 等. 热诱导大豆蛋白纤维聚集体的分离及性质研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(6): 172-177. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.027.
- [64] DAVE A C, LOVEDAY S M, ANEMA S G, et al. Glycation as a tool to probe the mechanism of β -lactoglobulin nanofibril self-assembly[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(14): 3269-3278. DOI:10.1021/jf405441g.
- [65] 王梦萍, 陈燕琼, 王金梅, 等. 糖接枝处理改善大豆蛋白纤维聚集体泡沫稳定性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 249-255. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.04.035.
- [66] HU A N, LI L. Effects of ultrasound pretreatment on functional property, antioxidant activity, and digestibility of soy protein isolate nanofibrils[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 90: 106193. DOI:10.1016/j.ultsonch.2022.106193.
- [67] CHEN D, JONES O G, CAMPANELLA O H. Plant protein-based fibers: fabrication, characterization, and potential food applications[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023, 63(20): 4554-4578. DOI:10.1080/10408398.2021.2004991.
- [68] WOODARD D, BELL D, TIPTON D, et al. Gel formation in protein amyloid aggregation: a physical mechanism for cytotoxicity[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(4): e94789. DOI:10.1371/journal.pone.0094789.
- [69] LI T, WANG L, ZHANG X X, et al. Effect of ionic strength on assembly behaviors and rheological properties of rice glutelin based fibrils[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 100: 103224. DOI:10.1016/j.jcs.2021.103224.
- [70] FENG J L, LIU S, SUN N, et al. Combining different ionic polysaccharides and pH treatment improved functional properties of soybean protein amyloid fibrils through structural modifications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 153: 110027. DOI:10.1016/j.foodhyd.2024.110027.
- [71] KHALES I H, LU W, NISHINARI K, et al. Fundamentals of composites containing fibrous materials and hydrogels: a review on design and development for food applications[J]. *Food Chemistry*, 2021, 364: 130329. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130329.
- [72] WAN Z L, YANG X Q, SAGIS L M C. Nonlinear surface dilatational rheology and foaming behavior of protein and protein fibrillar aggregates in the presence of natural surfactant[J]. *Langmuir*, 2016, 32(15): 3679-3690. DOI:10.1021/acs.langmuir.6b00446.

- [73] JI F Y, LIU H H, WANG C Y, et al. Remodeling the structure of soy protein fibrils to hydrogels for co-encapsulation of (–)-epigallocatechin gallate (EGCG) and curcumin: role of EGCG[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109439. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.109439.
- [74] KNOWLES T P J, OPPENHEIM T W, BUELL A K, et al. Nanostructured films from hierarchical self-assembly of amyloidogenic proteins[J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5(3): 204-207. DOI:10.1038/nnano.2010.26.
- [75] HU Y, HE C X, JIANG C J, et al. Complexation with whey protein fibrils and chitosan: a potential vehicle for curcumin with improved aqueous dispersion stability and enhanced antioxidant activity[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105729. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.105729.
- [76] TIAN T, LIU S, LI L X, et al. Soy protein fibrils- β -carotene interaction mechanisms: toward high nutrient plant-based mayonnaise[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184: 114870. DOI:10.1016/j.lwt.2023.114870.
- [77] SHEN Y, POSAVEC L, BOLISSETTY S, et al. Amyloid fibril systems reduce, stabilize and deliver bioavailable nanosized iron[J]. Nature Nanotechnology, 2017, 12(7): 642-647. DOI:10.1038/nnano.2017.58.
- [78] JANSSEN F, MONTERDE V, WOUTERS A G B. Relevance of the air-water interfacial and foaming properties of (modified) wheat proteins for food systems[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(3): 1517-1554. DOI:10.1111/1541-4337.13120.
- [79] ZHANG W N, ZHONG Q X. Microemulsions as nanoreactors to produce whey protein nanoparticles with enhanced heat stability by thermal pretreatment[J]. Food Chemistry, 2010, 119(4): 1318-1325. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.08.043.
- [80] GAO Z M, HUANG Y, ZHAO J J, et al. Edible Pickering emulsion stabilized by protein fibrils: part 2. Effect of dipalmitoyl phosphatidylcholine (DPPC)[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71: 245-251. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.03.028.
- [81] PANG S X, SHAO P, SUN Q J, et al. Relationship between the emulsifying properties and formation time of rice bran protein fibrils[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 122: 108985. DOI:10.1016/j.lwt.2019.108985.
- [82] SERFERT Y, LAMPRECHT C, TAN C P, et al. Characterisation and use of β -lactoglobulin fibrils for microencapsulation of lipophilic ingredients and oxidative stability thereof[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 143: 53-61. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.06.026.
- [83] MOAYEDZADEH S, MADADLOU A, ASL A K. Formation mechanisms, handling and digestibility of food protein nanofibrils[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 45(1): 50-59. DOI:10.1016/j.tifs.2015.05.005.