

挤压组织化对大豆蛋白结构及大豆组织蛋白品质影响的研究进展

马润豪¹, 安红周^{1,2}, 薛义博², 黄亚男³, 杜艳^{1,2}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 河南工业大学小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 郑州 450001; 3. 河南省南街村(集团)有限公司, 河南漯河 462600)

摘要:大豆组织蛋白是一种以大豆蛋白为原料,运用挤压机的高温、高压、高剪切力使蛋白质分子原有结构改变,并最终形成具有纤维结构、口感类似动物肉的产品。旨在为大豆组织蛋白产品的研发提供理论参考,通过介绍大豆蛋白挤压组织化过程,对挤压过程中大豆蛋白的结构变化进行综述,重点阐述了挤压组织化对大豆蛋白分子间相互作用与蛋白质构象的影响,总结了原辅料及挤压工艺参数对大豆组织蛋白产品品质的影响。在大豆蛋白的组织化过程中,蛋白质的空间结构、分子间作用力发生改变,以二硫键为主的共价键对于形成纤维状和网状的蛋白质结构发挥了重要作用,不同的原辅料与挤压工艺参数对于大豆蛋白的组织化度也有不同的影响。未来,需要加大对挤压设备的创新改进,提高原料种类的适应性,开发适宜的本土化大豆组织蛋白产品。

关键词:大豆组织蛋白;挤压组织化;蛋白质结构;产品品质

中图分类号:TS229;O656.4 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2024)12-0027-08

Effect of extrusion texturization on the structure of soybean protein and the quality of textured soybean protein products: A review

MA Runhao¹, AN Hongzhou^{1,2}, XUE Yibo², HUANG Yanan³, DU Yan^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. National Engineering Research Center for Wheat & Corn Further Processing, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Henan Nanjie Village (Group) Co., Ltd., Luohe 462600, Henan, China)

Abstract: Textured soybean protein (TSP) is a type of product that uses soybean protein as raw material and uses the high temperature, high pressure, and high shear force of the extruder to change the initial structure of protein molecules, ultimately forming a product with a fibrous structure and a taste similar to animal meat. Aiming to provide a theoretical reference for the research and development of TSP products, by introducing the extrusion texturization process of soybean protein, the structural changes of soybean protein in the extrusion process were reviewed, focusing on the effects of extrusion texturization on the intermolecular interactions and protein conformation of soybean protein, and the effects of raw and auxiliary materials and extrusion process parameters on the quality of TSP were summarized. During the

收稿日期:2023-05-10;修回日期:2024-07-29

基金项目:国家重点研发计划(2022YFD2101403);河南省自然科学基金(242300420464);小麦和玉米深加工国家工程研究中心开放课题(NL2022017);河南工业大学高层次人才基金(2023BS085)

作者简介:马润豪(1998),男,硕士研究生,研究方向为组织蛋白挤压重组技术(E-mail)245039786@qq.com。

通信作者:杜艳,讲师,博士(E-mail)yandu@haut.edu.cn。

texturization process of soybean protein, the spatial structure and intermolecular forces of protein changed, and the covalent bonds, mainly disulfide bonds, played an important role in the formation of the fibrous and reticular protein structure. Different raw and auxiliary materials and extrusion process parameters had different influences on the degree of texturization of

soybean protein. In the future, it is necessary to increase innovation and improvement of extrusion equipment, improve the adaptability of raw material types, and develop TSP products suitable for localization.

Key words: textured soybean protein; extrusion texturization; protein structure; product quality

大豆组织蛋白又称组织化大豆蛋白,是一种通常以大豆浓缩蛋白、大豆分离蛋白或脱脂大豆粉为主要原料,谷朊粉、淀粉等为辅料,通过机械或化学方式改变蛋白质分子的原有结构,使其重新定向排列,形成新的纤维结构且具有类似肉类咀嚼感的大豆蛋白产品。大豆组织蛋白具有营养丰富、麸质含量较低、保质期长等特点,对素食主义者、慢性病患者友好^[1]。

大豆蛋白的组织化,是指大豆蛋白受挤压后,其构象与化学键发生改变与重组,并最终表现出纤维结构特性的过程。大豆组织蛋白常见的生产方法有纤维纺丝法、热凝固法、3D 打印法和挤压组织化法^[2]。纤维纺丝法是在 pH 大于 10 的条件下,将澄清的高浓度大豆蛋白溶液通过多孔喷嘴喷入含氯化钠的酸性溶液中,使蛋白质凝结并形成纤维结构,最终得到大豆组织蛋白。热凝固法是将大豆蛋白溶液在光滑的金属表面蒸发水分,使蛋白质产生凝固固化,最终形成大豆组织蛋白^[3]。3D 打印法是通过蛋白质在等电点附近聚集的特性,利用蛋白质与多糖之间的结合累积成型,使产品的各向异性结构在接收盘上定向排列,其产品的纤维结构不明显^[4]。挤压组织化法包含混合、搅拌、加热、加压和膨化等步骤,相较于以上 3 种生产方法,其具有挤出物纤维结构明显、操作简单、无须化学试剂且不产生废料废液等优点,在食品工业中被广泛应用。此外,挤压技术已被广泛应用于意大利面、休闲食品、改性淀粉等多种产品中^[5]。

大豆组织蛋白的种类一般依据物料(原料与水搅拌后的混合物)中的含水量划分为低水分大豆组织蛋白(物料含水量在 25% ~ 40% 之间)和高水分大豆组织蛋白(物料含水量在 40% ~ 80% 之间),物料含水量由挤压机的喂水速度和进料速度共同控制^[6-7]。低水分大豆组织蛋白加工后有烘干工序,所以在食用、使用前需要复水,形状一般为半空心的海绵状,可应用于休闲食品中,如火腿肠、肉丸子等。高水分大豆组织蛋白一般为实心条状,具有组织化程度高、纤维结构突出等特点,质地更接近动物肉,多应用于代替肉类的类肉产品,如风味素肉、人造

肉等^[8-9]。

本文通过梳理国内外文献,重点阐述挤压组织化对大豆蛋白结构的影响,从分子间相互作用与蛋白质构象的角度阐述大豆蛋白的组织化原理,介绍了蛋白质、淀粉、添加剂等原辅料与挤压温度、喂水速度、螺杆转速、进料速度等工艺参数对大豆组织蛋白品质的影响,以为大豆组织蛋白产品的研发提供理论参考。

1 大豆蛋白的挤压组织化过程与研究方法

1.1 大豆蛋白的挤压组织化过程

食品行业使用的挤压机有 3 种类型:活塞式挤压机、辊式挤压机和螺杆挤压机。在大豆组织蛋白加工过程中,螺杆挤压机最为常用。依据螺杆数量,螺杆挤压机可分为单螺杆挤压机和双螺杆挤压机^[10]。国内外制造螺杆挤压机的厂商众多,国外厂商有 Wenger(温格,美国)、Brabender(布拉本德,德国)、Coperion(科倍隆,德国)、Cletral(克莱斯特罗,法国)、Bühler(布勒,瑞士)等,国内厂商有赛百诺(济南)、富马科(长沙)等。

单螺杆挤压机通过螺杆和机筒对物料的摩擦力来输送物料,并通过摩擦热的方式加热物料,存在物料容易黏附螺杆、加热不均匀、温度不易控制等缺点,所以较少使用单螺杆挤压机生产大豆组织蛋白^[11]。与单螺杆挤压机相比,双螺杆挤压机更加稳定,应用更加广泛,高、低水分大豆组织蛋白均可用其生产。双螺杆挤压机主要部件示意图见图 1。

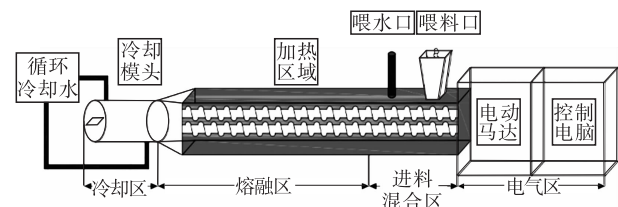


图 1 双螺杆挤压机主要部件示意图

Fig. 1 Diagram of main components of twin-screw extruder

如图 1 所示,双螺杆挤压机可分为 4 个功能区,即电气区、进料混合区、熔融区和冷却区,并进一步细分为控制电脑、电动马达、喂料口、喂水口、加热区域、冷却模头等 6 个系统。电气区主要由控制器、电动马达等组成,是用来控制挤压机的重要区域。在

进料混合区,大豆蛋白与其他配料混合进入挤压机喂料口后,在螺杆的输送作用下,原料沿螺杆横向移动,并与水混合,在螺杆剧烈的挤压搅拌作用下进一步混合与细化。当螺杆不断把物料向前输送时,挤压机机腔内的压力增大,温度升高。当物料到达挤压机的核心区域熔融区时,受到高温(130~150℃)、高压(2~5 MPa)与高剪切力(扭矩15~40 N·m)的作用,形成黏稠的“熔融态”聚合物^[12]。这时蛋白质充分变性,结构改变,共价键(二硫键)、非共价键(氢键、疏水相互作用、离子键)断裂与重新形成^[13];淀粉发生糊化、裂解与美拉德反应^[14];植物多糖发生降解^[15]。在冷却区,处于熔融态的物料被挤出模头,高温物料中的水分急骤汽化,体积膨胀,已变性的大豆蛋白分子由折叠状变为直线状,发生聚集、交联和分离,沿轴向定向排列,并最终形成有丝状结构且质感接近动物肉的大豆组织蛋白^[16]。大豆蛋白组织化过程的本质是蛋白质分子展开—重组一定向聚集的过程^[17-18]。

1.2 研究方法

鉴于大豆蛋白挤压组织化过程的“黑箱特性”,常采用“突然停机法(Dead stop operating)”或闭腔流变仪(Closed cavity rheometer, CCR)对其进行研究。“突然停机法”是指在挤压机正常工作时,将挤压机紧急断电,之后取下挤压机的双螺杆,将不同加热区域的大豆蛋白混合物刮下并用液氮冷冻保存,之后对其进行检测^[19]。闭腔流变仪是一种可以模拟挤压机在工作时内部特殊环境的设备,其可最大程度地还原大豆蛋白原料在高温、高压、高剪切力作用下发生的蛋白质-蛋白质相互作用^[20-21]。采用“突然停机法”或闭腔流变仪,对于了解挤压机不同加热区域蛋白质的变性程度有重要帮助。

2 挤压组织化对大豆蛋白结构的影响

2.1 对蛋白质分子间相互作用的影响

在检测大豆蛋白组织化过程中分子间相互作用的变化时,常用的方法是考察其在不同媒介中的溶解度^[13-14]。该方法为分别配制 pH 7.5 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液(PB)、8 mol/L 尿素溶液(Urea)、0.05 mol/L 二硫苏糖醇溶液(DTT)和 1.5 g/100.0 mL 十二烷基硫酸钠溶液(SDS),进一步按等体积组合得到:PB + Urea、PB + DTT、PB + SDS、PB + Urea + DTT、PB + Urea + SDS、PB + DTT + SDS、PB + Urea + DTT + SDS 溶液,分别测定蛋白质在这 7 种组合溶液和 PB 中的溶解度,最后通过溶解度差值表示不同类型的分子间相互作用,如表 1 所示。

表 1 8 种溶液评估的蛋白质分子间相互作用

Table 1 Protein molecular interactions evaluated by 8 solutions

溶液	分子间相互作用
PB	未变性的蛋白质
PB + Urea	氢键
PB + DTT	二硫键
PB + SDS	疏水相互作用
PB + Urea + DTT	氢键与二硫键共同作用
PB + Urea + SDS	氢键与疏水相互作用共同作用
PB + DTT + SDS	二硫键与疏水相互作用共同作用
PB + Urea + DTT + SDS	氢键、二硫键和疏水相互作用共同作用

通过以上实验方法,学者们对大豆蛋白组织化过程中分子间相互作用进行了研究。Liu 等^[22]认为二硫键对于大豆组织蛋白的纤维结构有着比非共价键更重要的作用,大豆组织蛋白形成纤维结构时需要形成更多的二硫键。Chiang 等^[23]认为氢键与二硫键的协同作用对于大豆蛋白的组织化有重要影响,并且随着谷朊粉含量的增加,二硫键的作用愈发重要,若原料中含有较多的谷朊粉,二硫键对大豆蛋白的组织化起着决定性影响,而若原料中不含谷朊粉,二硫键的重要程度与占比会出现一定程度的下降。

也有学者通过不同方法探究化学键在组织化过程中的作用。齐宝坤等^[24]研究表明,大豆组织蛋白的表面疏水性随着游离巯基含量的增加而增大,并认为这与大豆蛋白分子的解折叠和疏水性残基的暴露有关。Ma 等^[25]研究表明,随着挤出温度的持续升高,大豆蛋白的分子间相互作用发生改变,进而会对产品的乳化活性和溶解度产生负面影响。Zheng 等^[26]研究表明,在热处理过程中氢键和二硫键的形成对蛋白质的聚集起着重要作用,并对大豆蛋白的组织化有着重要影响。

综上,二硫键和疏水相互作用是大豆蛋白组织化过程中最重要的分子间相互作用,这已成为大多数学者的共识^[27-30]。

2.2 对蛋白质构象的影响

2.2.1 一级结构

在大豆蛋白组织化过程中,由于发生了较为复杂的物理、化学反应,大豆蛋白的原有高级结构被严重破坏,且最终产品的主要性质与大豆组织蛋白的一级结构相关性较弱,所以一般着重探究蛋白质的二级结构与三级结构的变化规律,较少考虑氨基酸在多肽链中的排列顺序所代表的一级结构和复杂的空间结构所代表的高级结构。

2.2.2 二级结构

大豆蛋白组织化过程中,高温、高压和高剪切力对化学键的作用引起了蛋白质分子的裂解与重新聚合,导致二级结构的破坏与改变,在此过程中一般认为 α -螺旋、无规卷曲比例下降, β -转角、 β -折叠比例增加。陈锋亮^[31]研究发现,4种蛋白质二级结构在大豆组织蛋白中均存在,具体占比大小依次为 β -折叠> β -转角>无规卷曲> α -螺旋,并认为组织化过程使得大豆蛋白中的 α -螺旋和无规卷曲转变为更稳定的 β -折叠和 β -转角。康立宁^[32]使用傅里叶变换红外光谱仪研究了挤压过程中大豆蛋白二级结构的变化,结果表明, α -螺旋结构最不稳定,会转化为稳定的 β -转角结构,并在140℃时几乎完全转化。Mozafarpour等^[33]认为,挤压过程中的高温、高压、高剪切力导致大部分大豆蛋白分子展开,二级结构发生变化,产生了大量 β -转角和无规卷曲结构。Zheng等^[26]通过实验发现,挤压工艺可以降低大豆分离蛋白中的 α -螺旋结构,增加 β -折叠结构。

2.2.3 三级结构

在研究植物蛋白组织化过程中三级结构的变化时,通常使用荧光光谱法(色氨酸荧光光谱)来解析蛋白质的构象差异,同时分析其空间微环境的变化^[34]。王秋野^[35]以豌豆蛋白和谷朊粉为主要原料,使用荧光分光光度计对植物蛋白的组织化过程进行分析,发现植物蛋白经过挤压组织化后,吸收峰发生红移,荧光强度逐渐降低,由此认为在组织化过程中植物蛋白的三级结构受到高温和高剪切的作用而被打开,隐藏于蛋白质分子内部的疏水性基团暴露出来。目前,关于大豆蛋白组织化过程中三级结构变化的研究较少,由于组织化过程中,大豆蛋白空间结构发生了复杂的变化,所以对于其三级结构的变化还有待更加深入的研究。

3 大豆组织蛋白产品品质的影响因素

3.1 原辅料

3.1.1 蛋白质

3.1.1.1 大豆蛋白

脱脂大豆粉(蛋白质含量50%~55%)、大豆浓缩蛋白(蛋白质含量65%~70%)和大豆分离蛋白(蛋白质含量90%以上)是生产大豆组织蛋白的主要原料。陈锋亮等^[36]以大豆分离蛋白为原料,生产了高、低水分大豆组织蛋白。安红周等^[37]研究发现,22种市售大豆分离蛋白的粗蛋白质含量、乳化稳定性、泡沫稳定性、氮溶解指数(NSI)、黏度、凝胶强度等理化指标存在显著性差异,进而会导致大豆

组织蛋白产品的理化性质存在差异。吴文举^[38]探究了大豆浓缩蛋白特性对大豆组织蛋白品质的影响,得出生产高、低水分大豆组织蛋白时,对于大豆浓缩蛋白的NSI、黏度、11S与7S的比值、乳化性等指标有不同最适范围。目前,有关脱脂大豆粉对于大豆组织蛋白产品品质影响的研究还处于空白阶段。

3.1.1.2 其他蛋白

随着研究方向的拓展,将其他种类的植物蛋白、动物蛋白添加到大豆蛋白中来改善大豆组织蛋白产品的口感和质地,也是一个新的方向。Chiang等^[23]研究发现,向大豆蛋白中加入一定量的小麦面筋蛋白(谷朊粉或谷朊粉原浆),可以促进蛋白质分子间与分子内二硫键的形成,增强纤维结构。Guo等^[39]研究发现,添加小麦面筋蛋白可影响大豆组织蛋白的微观结构和分子间相互作用,进而影响产品的风味特征。王莉芬^[40]以大豆分离蛋白、大豆浓缩蛋白为原料,以谷朊粉、小麦淀粉为辅料,生产了高、低水分大豆组织蛋白,使产品的组织化度升高。国外学者^[41-44]采用大豆分离蛋白、大豆浓缩蛋白为原料,以谷朊粉、脱脂大豆粉为辅料,生产了高水分大豆组织蛋白,也达到了增强纤维结构、强化弹性与韧性的目的。豌豆蛋白与花生蛋白也经常与大豆蛋白混合配料进行挤压加工,以此来解决大豆组织蛋白的豆腥味、大豆过敏等问题。另外,豌豆蛋白能吸收更多脂肪并有较高的持水性,可改善产品口感^[45-46];花生蛋白是花生榨油的重要副产物,将花生蛋白加入大豆组织蛋白的原料中也具有一定的经济性与可行性^[47]。此外,大米、玉米、大麦、燕麦、高粱等植物蛋白也可用于大豆组织蛋白的生产以改善产品的质地等^[48]。动物蛋白可以用来改善大豆组织蛋白产品的口感,例如在大豆蛋白原料中加入20%的鱼糜,可提高产品的硬度、耐嚼性、凝胶强度和组织化度^[49]。

3.1.2 淀粉

制备大豆组织蛋白时,原料中加入的淀粉总量不应超过原料的10%^[50]。在大豆蛋白的挤压组织化过程中,淀粉发挥着重要作用。淀粉通过破坏蛋白质分子内的二硫键和增加表观黏度来促进蛋白质分子的聚集,从而形成新的稳定结构^[13],而且淀粉在高温、高压、高剪切力的作用下会发生糊化与老化反应,形成凝胶,并且会分解成还原糖,参与美拉德反应,影响大豆组织蛋白产品的色泽与味道^[30,51]。

3.1.3 添加剂

在大豆组织蛋白的原料中加入适当种类的添加剂,对于改善产品口感与纤维结构有着事半功倍的效果。添加剂的类型有多种,其中被广泛应用的有

盐离子、乳化剂、增稠剂等。例如:NaCl可以通过影响蛋白质表面电荷量从而间接影响蛋白质之间的相互作用,以实现加强纤维结构的目的^[52];磷酸盐有利于游离巯基向二硫键的转化,并且可以增强产品的持水性^[53];磷脂作为乳化剂可以减少产品纤维结构;卡拉胶作为增稠剂可以减少纤维结构,而海藻酸钠作为一种从褐藻中提取的天然多糖物质,性质与卡拉胶相似,在食品中可用作增稠剂^[54-57],也可以减少纤维结构。

3.2 挤压工艺参数

3.2.1 挤压温度

温度是影响蛋白质变性的重要因素,对于大豆蛋白形成纤维结构有重要作用,也是物料加工过程中热能的主要来源。以高水分大豆组织蛋白为例,在挤压机的进料混合区,原料与水均匀混合并开始加热升温,蛋白质的天然结构被破坏,大分子降解成小片段,此时挤压温度一般在130℃左右,若温度过高则蛋白质变性严重,影响后续大豆蛋白的组织化,若温度过低,则无法充分破坏蛋白质的天然结构,影响挤出物质地。在挤压机的熔融区,挤压温度一般在130~150℃,蛋白质分子的二硫键断裂与重新形成,使物料逐渐变为熔融态,并开始组织化与形成纤维结构,此温度下形成的纤维结构较有弹性,挤出物具有较佳的咀嚼口感;若熔融区挤压温度低于130℃,物料无法完全组织化,形成的纤维结构少且易断裂;若熔融区挤压温度高于150℃,将会破坏蛋白质分子间的二硫键,使挤出物形态劣化,表面出现裂纹,色泽较深。在挤压机的冷却区,挤压温度一般不高于75℃,使熔融态物料经过冷却模头时充分冷却,蛋白质分子沿流动方向定向排列重组,最终形成稳定的纤维结构。熔融态物料在冷却过程中由于外部与中心区域的温度不同,所以当外部因为冷却而已经变为固态时,中心区域仍是熔融态,此时就会因为流速差而形成层流。若冷却区挤压温度高于75℃,将会造成挤出物表面不光滑等现象^[58-61]。

与高水分大豆组织蛋白相比,低水分大豆组织蛋白由于含水量较少,能量在物料间的传递效率更低,需要更多的能量来使大豆蛋白发生组织化,所以挤压机熔融区的最适挤压温度需要提高^[3,50]。

3.2.2 喂水速度

挤压过程中,喂水速度直接控制物料含水量。物料体系中的水分不仅直接与原料发生化学反应,同时也影响物料的流动性与黏性^[62]。含水量的高低可以改变大豆蛋白二硫键和氢键之间的相互作用,进而影响大豆蛋白的组织化度,并最终决定组织

化蛋白的色泽与硬度^[63-64]。陈锋亮等^[36]研究表明,在加工过程中提高含水量,可缩短物料在挤压机内的滞留时间,从而减小物料在挤压机内受到的机械作用,有利于大豆组织蛋白中二硫键、氢键与疏水相互作用的形成,对纤维化结构的形成有着促进作用。孙照勇等^[65]研究发现,当物料含水量由28%增大到38%时,大豆组织蛋白产品的硬度、咀嚼度、组织化度和吸水率变化趋势较缓,但当物料含水量大于38%时,大豆组织蛋白产品的硬度和咀嚼度急剧减小,组织化度和吸水率迅速增大,色泽变得较为光亮。肖志刚等^[66]以大豆分离蛋白(质量分数20%)、豌豆蛋白(质量分数45%)和谷朊粉(质量分数35%)为原料生产植物组织蛋白,通过静态流变测试发现,随着喂水速度的增大,体系的表观黏度随之增大,说明挤压过程中水分升高有利于促进蛋白质的交联和蛋白质与其他组分之间的相互作用。

3.2.3 螺杆转速与进料速度

螺杆转速与进料速度互相影响,共同决定了物料在螺杆中的分布及在每个功能区的滞留时间。螺杆的转动不仅可以将原料与水进行充分搅拌混合以避免局部温度过高,而且可以通过剪切力的形式为物料提供机械能。进料速度主要影响物料在挤压机中的填充度、滞留时间和模头压力^[50]。进料速度可以间接控制物料含水量,在保持喂水速度不变的情况下,进料速度与物料含水量成反比。进料速度与挤压机的产能必须匹配,且喂料时要保持匀速进料。喂料量过少或断料,将造成进料速度与螺杆转速不匹配,使机腔内形成空腔,挤出物膨化不均匀,严重时甚至会造成出料口喷射高温水蒸气;喂料量过多,将会堵塞螺杆,使机腔内压力过高,对挤压机的机械结构造成损害^[67]。

综上,挤压机的挤压温度、喂水速度、螺杆转速和进料速度4个参数中,挤压温度最为重要,直接影响大豆蛋白的组织化度,喂水速度决定挤出物的含水量,对于生产成本有着重要影响,螺杆转速与进料速度决定了物料在螺杆内的滞留时间。在实验室或工厂生产中,一般通过控制挤压温度、喂水速度、进料速度、螺杆转速等工艺参数来差异化生产大豆组织蛋白^[68],通过改变螺杆配置(如长径比)或模头种类也可以完善对挤压工艺的控制^[69]。冷却模头对于产品最终形成纤维结构也有着至关重要的作用,熔融态物料在进入冷却模头后会因为滞留时间的不同而形成温度梯度,进一步冷却后形成层状纤维结构^[18]。需要指出的是,由于采用不同的挤压设备、原料,使得相同的工艺参数对最终产品品质影响

也不尽相同,即挤压工艺优化的具体参数在不同挤压机、不同原料中不具备普适性。

4 结 语

大豆组织蛋白的研发与生产已取得了显著成果,并推出了多种多样的产品,丰富消费者选择的同时还做到了低碳环保。大豆组织蛋白的市场规模逐年攀升,产业利润不断扩大。但目前大豆蛋白的挤压组织化仍面临诸多技术与市场需求的挑战,如:蛋白质组织化的基础理论薄弱,对纤维结构形成的研究较少;大豆组织蛋白产品的口感、外观与动物蛋白有一定差距;大豆组织蛋白产品的消费者接受程度不高等。在国外相关大豆组织蛋白生产技术已经发展较为成熟的前提下,我国需要加大对挤压工艺与设备的创新改进,提高原料种类的适用性,进一步降低生产成本,并针对我国消费者的饮食习惯,开发出合适的本土化产品。相信在不久的将来,大豆组织蛋白产品会凭借健康、环保、价格等优势,受到国内消费者的喜爱,成为消费者必不可少的餐桌食品。

参考文献:

- [1] MULLEE A, VERMEIRE L, VANAELST B, et al. Vegetarianism and meat consumption: A comparison of attitudes and beliefs between vegetarian, semi-vegetarian, and omnivorous subjects in Belgium[J]. *Appetite*, 2017, 114: 299-305.
- [2] GASPARRE N, VAN DEN BERG M, OOSTERLINCK F, et al. High-moisture shear processes: Molecular changes of wheat gluten and potential plant-based proteins for its replacement[J/OL]. *Molecules*, 2022, 27(18): 5855 [2023-05-10]. <https://doi.org/10.3390/molecules27185855>.
- [3] 许森杰, 张莹莹, 栾广忠. 植物蛋白高湿挤压组织化综述[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(9): 311-320.
- [4] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 75: 231-242.
- [5] ALAM M S, KAUR J, KHAIRA H, et al. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2016, 56(3): 445-475.
- [6] 朱嵩, 刘丽, 张金闯, 等. 高水分挤压组织化植物蛋白品质调控及评价研究进展[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 280-286.
- [7] ISLAM M, HUANG Y, ISLAM M S, et al. Effect of high-moisture extrusion on soy meat analog: Study on its morphological and physicochemical properties[J]. *Ital J Food Sci*, 2022, 34(2): 9-20.
- [8] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 1-9.
- [9] MACDONALD R S, PRYZBYSEWSKI J, HSIEH F H. Soy protein isolate extruded with high moisture retains high nutritional quality[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(9): 3550-3555.
- [10] 李振, 相海, 赵有斌, 等. 植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展[J]. *中国油脂*, 2023, 48(9): 67-74.
- [11] LAZOU A E. Food extrusion: An advanced process for innovation and novel product development[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 64(3): 1-29.
- [12] SUN D, WU M, ZHOU C, et al. Transformation of high moisture extrusion on pea protein isolate in melting zone during: From the aspects of the rheological property, physicochemical attributes and modification mechanism[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 133: 108016 [2023-05-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108016>.
- [13] OSEN R, TOELSTED S, EISNER P, et al. Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (*Pisum sativum* L.) protein isolates[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2015, 50(6): 1390-1396.
- [14] CHEN Q, ZHANG J, ZHANG Y, et al. Protein-amylose/amylopectin molecular interactions during high-moisture extruded texturization toward plant-based meat substitutes applications[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 127: 107559 [2023-05-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107559>.
- [15] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. High-moisture extrusion of peanut protein-carrageenan/sodium alginate/wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 99: 105311 [2023-05-10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105311>.
- [16] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. Converting peanut protein biomass waste into "double green" meat substitutes using a high-moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure[J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(38): 10713-10725.
- [17] 张波, 张金闯, 张玮, 等. 原料理化特性对挤压组织化植物蛋白质量的影响[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(12): 155-163.
- [18] SANDOVAL MURILLO J L, OSEN R, HIERMAIER S, et al. Towards understanding the mechanism of fibrous texture formation during high-moisture extrusion of meat substitutes[J]. *J Food Eng*, 2019, 242: 8-20.
- [19] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [20] PIETSCH V L, BÜHLER J M, KARBSTEIN H P, et al.

- High moisture extrusion of soy protein concentrate: Influence of thermomechanical treatment on protein – protein interactions and rheological properties[J]. *J Food Eng*, 2019, 251: 11 – 18.
- [21] PIETSCH V L, KARBSTEIN H P, EMIN M A. Kinetics of wheat gluten polymerization at extrusion – like conditions relevant for the production of meat analog products[J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 85: 102 – 109.
- [22] LIU K, HSIEH F H. Protein – protein interactions during high – moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems[J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(8): 2681 – 2687.
- [23] CHIANG J H, LOVEDAY S M, HARDACRE A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues[J/OL]. *Food Struct*, 2019, 19: 100102[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2018.11.002>.
- [24] 齐宝坤, 赵城彬, 江连洲, 等. 大豆分离蛋白组成及二级结构对表面疏水性的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(5): 288 – 293.
- [25] MA W J, XIE F Y, ZHANG S, et al. Characterizing the structural and functional properties of soybean protein extracted from full – fat soybean flakes after low – temperature dry extrusion [J/OL]. *Molecules*, 2018, 23(12): 3265 [2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.3390/molecules23123265>.
- [26] ZHENG H, YAN G, LEE Y, et al. Effect of the extrusion process on allergen reduction and the texture change of soybean protein isolate – corn and soybean flour – corn mixtures[J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 64:102421[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102421>.
- [27] ZHANG J, LIU L, ZHU S, et al. Texturisation behaviour of peanut – soy bean/wheat protein mixtures during high moisture extrusion cooking[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2018, 53(11): 2535 – 2541.
- [28] WITTEK P, ZEILER N, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of soy protein: Investigations on the formation of anisotropic product structure[J/OL]. *Foods*, 2021, 10(1): 102[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.3390/foods10010102>.
- [29] MA W, QI B, SAMI R, et al. Conformational and functional properties of soybean proteins produced by extrusion – hydrolysis approach [J/OL]. *Int J Anal Chem*, 2018, 2018: 9182508[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1155/2018/9182508>.
- [30] DOU W, ZHANG X, ZHAO Y, et al. High moisture extrusion cooking on soy proteins: Importance influence of gums on promoting the fiber formation[J/OL]. *Food Res Int*, 2022, 156: 111189[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111189>.
- [31] 陈锋亮. 植物蛋白挤压组织化过程中水分的作用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [32] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [33] MOZAFARPOUR R, KOOCHEKI A, MILANI E, et al. Extruded soy protein as a novel emulsifier: Structure, interfacial activity and emulsifying property [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 93: 361 – 373.
- [34] 吴海波, 齐宝坤, 江连洲, 等. 大豆分离蛋白热性质及其空间构象对表面疏水性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(10): 42 – 46.
- [35] 王秋野. 豌豆蛋白基植物肉的研制及特性分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- [36] 陈锋亮, 魏益民, 张波. 物料含水率对大豆蛋白挤压产品组织化质量的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(4): 805 – 811.
- [37] 安红周, 吴文举, 周豫飞, 等. 大豆分离蛋白原料特性与组织蛋白品质关系的研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(4): 30 – 36.
- [38] 吴文举. 大豆浓缩蛋白原料特性对组织蛋白品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [39] GUO Z, TENG F, HUANG Z, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 105: 105752 [2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105752>.
- [40] 王莉芬. 仿牛肉大豆组织蛋白的食用品质评价及改良[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [41] WITTEK P, ELLWANGER F, KARBSTEIN H P, et al. Morphology development and flow characteristics during high moisture extrusion of a plant – based meat analogue [J/OL]. *Foods*, 2021, 10(8): 1753[2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.3390/foods10081753>.
- [42] CORNET S H V, EDWARDS D, VAN DER GOOT A J, et al. Water release kinetics from soy protein gels and meat analogues as studied with confined compression[J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 66:102528 [2023 – 05 – 10]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102528>.
- [43] SCHREUDERS F K G, DEKKERS B L, BODNÁR I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation [J]. *J Food Eng*, 2019, 261: 32 – 39.
- [44] SINGH M, TRIVEDI N, ENAMALA M K, et al. Plant – based meat analogue (PBMA) as a sustainable food: A concise review [J]. *Eur Food Res Technol*, 2021, 247(10): 2499 – 2526.
- [45] SUN X D, ARNTFIELD S D. Molecular forces involved in

- heat - induced pea protein gelation: Effects of various reagents on the rheological properties of salt - extracted pea protein gels[J]. *Food Hydrocolloid*, 2012, 28(2): 325 - 332.
- [46] ZHAO H, SHEN C, WU Z, et al. Comparison of wheat, soybean, rice, and pea protein properties for effective applications in food products[J/OL]. *J Food Biochem*, 2020, 44(4): e13157 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13157>.
- [47] 梁春艳. 高水分挤压组织化花生蛋白制备及其应用研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2022.
- [48] 方亚鹏, 赵一果, 鲁伟, 等. 食品胶体在植物蛋白肉中的应用研究[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(8): 1 - 10.
- [49] ZHANG Y, ZHANG J, CHEN Q, et al. High - moisture extrusion of mixed proteins from soy and surimi: Effect of protein gelling properties on the product quality[J/OL]. *Foods*, 2022, 11(10): 1397 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.3390/foods11101397>.
- [50] ZHANG J, LIU L, LIU H, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(20): 3267 - 3280.
- [51] 杨勇, 王中江, 陈惠惠, 等. 大豆蛋白 - 淀粉基素肉制品高湿挤压工艺优化[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(12): 133 - 144.
- [52] AÑÓN M C, DE LAMBALLERIE M, SPERONI F. Influence of NaCl concentration and high pressure treatment on thermal denaturation of soybean proteins[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2011, 12(4): 443 - 450.
- [53] 安红周, 黄山, 郭益廷, 等. 磷酸盐对高水分挤压组织化植物蛋白产品品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023(9): 115 - 124.
- [54] AFKHAMI R, VARIDI M J, VARIDI M, et al. Improvement of heat - induced nanofibrils formation of soy protein isolate through NaCl and microwave[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 139: 108443 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108443>.
- [55] 刘艳香, 谭斌, 刘明, 等. 添加剂对高水分挤压组织化复合蛋白理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 294 - 302.
- [56] YAO J, ZHOU Y, CHEN X, et al. Effect of sodium alginate with three molecular weight forms on the water holding capacity of chicken breast myosin gel[J]. *Food Chem*, 2018, 239: 1134 - 1142.
- [57] 窦薇, 张鑫, 赵煜, 等. 海藻酸钠添加对大豆浓缩蛋白植物肉特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 147 - 152.
- [58] 肖志刚, 李航, 王哲, 等. 高水分组织化复合蛋白的挤压制备及品质特性研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(1): 72 - 80, 88.
- [59] 梁春艳, 张一凡, 单秀峰, 等. 工艺参数对高水分组织化大豆蛋白产品特性及结构的影响[J]. *农产品加工*, 2022(5): 15 - 19.
- [60] DEKKERS B L, HAMOEN R, BOOM R M, et al. Understanding fiber formation in a concentrated soy protein isolate - pectin blend[J]. *J Food Eng*, 2018, 222: 84 - 92.
- [61] FERAWATI F, ZAHARI I, BARMAN M, et al. High - moisture meat analogues produced from yellow pea and faba bean protein isolates/concentrate: Effect of raw material composition and extrusion parameters on texture properties[J/OL]. *Foods*, 2021, 10(4): 843 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.3390/foods10040843>.
- [62] ZAHARI I, FERAWATI F, PURHAGEN J K, et al. Development and characterization of extrudates based on rapeseed and pea protein blends using high - moisture extrusion cooking[J/OL]. *Foods*, 2021, 10(10): 2397 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.3390/foods10102397>.
- [63] WU M, HUANG X, GAO F, et al. Dynamic mechanical properties and fractal analysis of texturized soybean protein/wheat gluten composite produced by high moisture extrusion[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2019, 54(2): 499 - 508.
- [64] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. A new insight into the high - moisture extrusion process of peanut protein: From the aspect of the orders and amount of energy input[J/OL]. *J Food Eng*, 2020, 264: 109668 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.015>.
- [65] 孙照勇, 魏益民, 张波, 等. 物料含水率对大豆蛋白挤压组织化产品特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2009, 24(10): 28 - 32.
- [66] 肖志刚, 张雪萍, 段玉敏, 等. 植物蛋白高水分挤压组织化过程中水分和冷却温度对流变特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(5): 87 - 92.
- [67] GÜMÜŞAYÖ A, ŞEKER M. Effects of extrusion parameters on physicochemical properties of third generation corn snacks expanded by microwave heating[J/OL]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(4): 15630 [2023 - 05 - 10]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15630>.
- [68] PIETSCH V L, SCHÖFFEL F, RÄDLE M, et al. High moisture extrusion of wheat gluten: Modeling of the polymerization behavior in the screw section of the extrusion process[J]. *J Food Eng*, 2019, 246: 67 - 74.
- [69] ZHANG B, ZHANG Y, DREISOERNER J, et al. The effects of screw configuration on the screw fill degree and special mechanical energy in twin - screw extruder for high - moisture texturised defatted soybean meal[J]. *J Food Eng*, 2015, 157: 77 - 83.