

高水分挤压组织化植物蛋白纤维结构 形成机制研究进展

李雪菲¹, 相海², 任嘉嘉², 姚占斌², 张艺潇³

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 中机康元粮油装备(北京)有限公司, 北京 100083; 3. 中国人民解放军 32381 部队, 北京 100072)

摘要:高水分挤压组织化技术是目前生产具有类似动物肉的纤维结构和口感的组织化植物蛋白的主要加工技术。旨在为未来新型植物性肉类类似物的加工和产品设计提供理论参考,从原辅料(植物蛋白、添加剂)、挤压系统参数(水添加量、挤压温度、螺杆转速和喂料速度)、冷却模头三个方面阐述对植物蛋白高水分挤压过程中纤维结构形成的影响机制。蛋白质分子间相互作用力是组织化植物蛋白纤维结构形成的关键,而不同的植物蛋白原料其组织化结构所依赖的蛋白质分子间作用力不同。添加剂可以改变蛋白质等分子内或分子间的作用方式和程度,从而直接影响组织化植物蛋白成品纤维结构的形成。挤压参数主要通过影响蛋白质结构来影响产品质构特性。冷却模头有利于各向异性纤维结构的形成。

关键词:植物蛋白;组织化;高水分挤压;纤维结构;水添加量;挤压温度;冷却模头

中图分类号:TS229;TQ936.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)06-0067-06

Research progress on the formation mechanism of high – moisture extrusion textured vegetable protein fiber structure

LI Xuefei¹, XIANG Hai², REN Jiajia², YAO Zhanbin², ZHANG Yixiao³

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China; 2. China Machinery Kangyuan Cereals and Oil Equipment (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100083, China; 3. Unit 32381 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

Abstract:High – moisture extrusion texturing technology is currently the main processing technology for producing textured vegetable protein with a fibrous structure and taste similar to animal meat. In order to provide a theoretical reference for the future processing and product design of new plant – based meat analogues, the mechanisms influencing the formation of fibrous structures during high – moisture extrusion of plant proteins were described from three aspects: raw and auxiliary materials (vegetable protein, additives), extrusion system parameters (moisture addition, extrusion temperature, screw speed and feeding speed) and cooling die head. Protein intermolecular interactions are key to the formation of textured vegetable protein fiber structures, and different vegetable protein depends on different protein intermolecular interactions for their textured structures. Additives can change the mode and degree of

intra – or intermolecular interaction of proteins, thus directly influencing the formation of the fiber structure of the finished textured vegetable protein. Extrusion parameters affect the textural properties of the product mainly by influencing the protein structure. The cooling die head facilitates the formation of anisotropic fiber structures.

收稿日期:2022-07-22;修回日期:2023-03-06

基金项目:国家“十四五”重点研发计划“大宗油料加工副产物综合利用关键技术与装备集成及产业化示范”(2021YFD2100405)

作者简介:李雪菲(1998),女,硕士研究生,研究方向为油脂加工工艺(E-mail)lixuefei1130@163.com。

通信作者:相海,研究员(E-mail)xh9377@263.net。

Key words: vegetable protein; texturing; high - moisture extrusion; fiber structure; moisture addition; extrusion temperature; cooling die head

据联合国粮农组织报道,预计到2050年,肉类需求量将达到4.65亿t,现有供给水平将产生约1亿t的缺口,传统的畜牧业已难以满足人类的需求^[1],全球肉类生产和消费方式将面临严峻挑战。同时,传统畜牧业存在的资源消耗、环境污染、人体健康等问题,使得以植物蛋白为基料,经重组加工、调味等工序后制得的可以模仿肉类质地结构和口感的肉类替代品越来越受消费者欢迎^[2]。同时,利用挤压组织化技术将蛋白质资源丰富的植物、昆虫、菌类等通过食品加工技术制备成具有高附加值的肉类替代品,不仅对保障人类蛋白质的高效供给和生命健康有重要的意义,也可以更加有效的方式来利用现有资源满足市场需求^[3]。

高水分挤压组织化技术(水分含量 $\geq 40\%$)具有高效率、低成本、低能耗、多功能性等特点,是目前生产肉类替代品的主要加工技术,也是目前最有前景的新型食品加工技术之一,其生产过程是原辅料在螺杆内经过混合、挤压、剪切、熔融后,植物蛋白内部的原有化学键被破坏,相邻蛋白质及蛋白质与水之间重新发生团聚、聚集和交联等反应,蛋白质分子重新定向排列并经冷却模头固化后形成典型的各向异性纤维结构^[4-6],其组织特征、质构、纤维结构等与动物肉十分相似。

然而,高水分挤压组织化技术对原料的蛋白质含量、油脂含量要求极为严格^[7],对设备要求也较高,末端需要连接一个长的冷却模头来使蛋白质分子重新排列成致密的纤维结构,且产品的质构特性与生产设备、操作参数、原料配方等关联密切,任一因素发生变化都会使最终产品的纤维结构发生变化,因此在蛋白质挤压过程中各向异性纤维结构的形成需要在机制层面上得到更好的理解,以实现对接压组织化产品纤维结构的精准调控。为此,本文通过对国内外文献的梳理,总结了影响组织化植物蛋白纤维结构形成的影响因素,从原辅料(植物蛋白、添加剂)、挤压系统参数、冷却模头等方面阐述植物蛋白高水分挤压过程中各向异性纤维结构形成的机制,以期对未来新型植物性肉类类似物的加工和产品设计提供理论参考。

1 原辅料的影响

1.1 植物蛋白

植物蛋白是植物基肉制品最重要的原料组分,蛋白质通过变性、交联、聚合等反应形成的网络结构构成了植物基肉制品的“骨架”^[8]。生产植物基肉制品的植物蛋白主要来源有:①豆类蛋白,如大豆、豌豆、鹰嘴豆等;②坚果蛋白,如花生等;③谷物蛋白,如小麦、大米、大麦等;④菌类及藻类蛋白,如香菇、茶树菇、微藻等。

蛋白质分子间相互作用力是组织化植物蛋白纤维结构形成的关键。挤压过程中蛋白质分子间相互作用力主要有肽键、二硫键、氢键、离子键等^[8],但是在维持组织化产品结构中起主要作用的相互作用力,不同的学者有不同的研究结果。如:Hager等^[9]研究发现,组织化大豆蛋白结构的形成主要依赖于疏水相互作用、氢键、二硫键,并明确在较低温度($\leq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)挤出时,主要是通过蛋白质非共价键的变化和分子间二硫键的形成而产生纤维结构,在较高温度($\geq 180\text{ }^{\circ}\text{C}$)挤出时,则是通过分子间肽键的形成产生蛋白质聚合,这与Zhang^[10]、Liu^[11]等的研究结论一致;洪滨等^[12]研究发现,以大豆分离蛋白和小麦蛋白为原料挤压生产高水分组织蛋白的过程中,二硫键是维持大豆蛋白聚合物结构的主要化学键;魏益民等^[13-14]研究认为,在花生蛋白高水分挤压组织化过程中,疏水相互作用和氢键起主要作用,其次是二硫键,这与Afizah等^[15]的研究结论一致;Osen等^[16]研究发现,在豌豆蛋白高水分挤压过程中,蛋白质-蛋白质之间化学键的变化仅限于二硫键、氢键、疏水相互作用等较弱相互作用力的改变,没有发生肽键等主要化学键的形成,其中二硫键对结构稳定起主要作用。

1.2 添加剂

在组织化植物蛋白原料中添加合适的添加剂可以改善其形态和组织结构。氧化还原剂、酸碱调节剂、盐离子、乳化剂等添加剂的加入可以改变蛋白质等分子内或分子间的作用方式和程度^[8],直接影响组织化植物蛋白成品纤维结构的形成。表1为植物基肉制品中常用添加剂。

表1 植物基肉制品中常用添加剂

添加剂种类	添加剂名称	作用机制	对产品的影响	参考文献
盐离子	Na ⁺ /Ca ²⁺	改变蛋白质之间相互作用;影响蛋白质溶解度和变性程度	蛋白网状结构更加紧密,利于组织化	[17-19]
乳化剂	磷脂	利于蛋白质分子交联,参与蛋白质-脂质-淀粉复合物的形成	纤维结构形成较少	[17-18]
氧化还原剂	L-半胱氨酸	促进蛋白质之间的交联	显著提升纤维结构	[17,20]
	L-抗坏血酸	提高二硫键含量	显著提升纤维结构,增加硬度和咀嚼度	[21]
酸碱调节剂	碳酸氢钠	促进二硫键的形成和脱氢丙氨酸诱导的交联作用	形成较多的空隙和纤维结构	[17,22-24]
	三聚磷酸钠	降低二硫键含量,降低聚合作用及交联度	促使挤压产品形成片状结构,增加黏着性和弹性	[21,25]
增稠剂、稳定剂	海藻酸钠	蛋白质无规卷曲相对含量明显降低;形成黏弹性胶体	产品结构更细腻,纤维状组织结构更加紧密	[21,26-27]
	卡拉胶	易于极性水分子作用,充填蛋白网络	外观成型差,结构软塌,纤维结构形成较少	[17-18]

2 挤压系统参数的影响

水添加量、挤压温度、喂料速度和螺杆转速等挤压参数密切关联着挤压过程和产品的纤维化程度,研究挤压系统参数对组织化植物蛋白产品质构特性的影响,有助于优化加工工艺,提高组织化植物蛋白生产加工的产业化水平。

2.1 水添加量

原料中水添加量是区别高水分(≥40%)和低水分(<40%)挤压组织化工艺的重要指标,也是使组织化植物蛋白具有类似于动物肉的外观和结构的直接影响因素。洪滨等^[12]研究发现,水分含量会显著影响氢键、二硫键、疏水键的形成,有助于蛋白质的伸展变性,且水分含量的降低会引起蛋白质内部疏水键数量增加,当水分含量下降至一定程度时,疏水键有可能取代二硫键,成为维持蛋白质结构的主要化学键。肖志刚等^[28-29]研究发现,水添加量的变化对高水分组织化蛋白产品质构特性的影响较为显著,随水添加量的增加,高水分组织化蛋白产品的硬度和咀嚼性皆呈现大幅度降低的趋势,产品的弹性降低幅度相对较小;另外,在一定范围内,水添加量的升高有利于蛋白质的交联和蛋白质与其他组分之间的相互作用,提高其流变学性质,从而使得组织化植物蛋白的纤维网络结构增强。

2.2 挤压温度

挤压温度是蛋白质分子构象变化的主要影响因素,也是决定组织化植物蛋白产品质构特性的关键因素。挤压温度会影响水分蒸发速度,从而影响产品内部结构的松散程度和孔洞数量,进而改变挤出物的网络结构。挤压温度过低,蛋白质内部熟化不

均匀,结构松散,成型效果较差;挤压温度过高,水分散失较快,持水性较差^[30],但同时更易形成多孔结构,持油性更强^[31]。不同的原料所需的挤压温度不同,只有在达到特定温度后,蛋白质分子链才能完全展开再进行重排形成纤维结构。其中:大豆蛋白高水分挤压温度需高于130℃才能得到纤维结构显著、形态完整的组织化蛋白产品,花生蛋白需高于140℃^[32],而谷朊粉由于蛋白质分子质量大、非共价作用键数量多,挤压温度必须高于150℃。郎珊珊等^[32]研究发现:当机筒温度从120℃升至150℃时,花生蛋白在升温过程中逐步形成组织化,形态从松散到密实且具有纤维化,硬度、弹性、剪切力均逐渐升高;当机筒温度处于150℃时,挤压组织化花生蛋白具有较好的纤维网络结构,富有弹性和嚼劲;机筒温度继续升高至160℃时,挤压组织化花生蛋白开始焦化,硬度、弹性、剪切力随即降低。洪滨等^[12]研究发现,套筒温度在140~150℃之间时,组织化蛋白产品形成的化学键最多,组织化程度最好。

2.3 螺杆转速

螺杆转速宏观上主要通过改变物料在挤压机腔内的停留时间和剪切强度来影响产品品质,微观上通过影响蛋白质结构来影响产品质构特性。杨勇等^[33]试验发现:螺杆转速过慢,物料停留时间过长导致物料过度熟化,随着螺杆转速的增加,组织化程度更好,持水性和持油性逐渐增加,产品组织化程度显著提高;但当螺杆转速大于120 r/min后,因剪切力过大,影响自由巯基和二硫键含量,产品组织化程度降低,持水性随之下降。

2.4 喂料速度

喂料速度主要通过影响蛋白质在挤压机内的填充度、停留时间和出口处的压力等来改变物料受热的程度,进而改变挤出物的品质^[34]。郎珊珊等^[32]试验发现,当喂料速度低于 350 kg/h 时,挤压机内压力梯度建立缓慢,物料停留时间长,物料的水分被充分汽化,挤出物形态松散;提高喂料速度,植物蛋白逐渐形成组织化,喂料速度达到 550 kg/h 时组织化程度最好;喂料速度增至 750 kg/h 时,模具出口压力增大,物料极易发生喷射状况,出料不均匀,挤出物质地疏松。

3 冷却模头的影响

冷却模头可以有效地防止基体在挤出过程中的膨胀,有利于各向异性纤维结构的形成。但现有研究对冷却模头内纤维结构的形成机制主要有以下两种解释^[35]:①蛋白质分子的排列。各向异性纤维结构的形成最初在大豆蛋白的低水分挤压过程中被发现^[35-37],蛋白质分子沿流动方向展开有序排列,形成新的共价键、二硫键^[36-40]或异肽键^[35,40]等相互作用力稳定挤出物,导致挤出物纤维结构呈现各向异性。之后,对高水分挤压的研究采用蛋白质对比理论,研究蛋白质-蛋白质相互作用的变化与产物结构的相关性^[41-46]。②多相体系的存在。根据托尔斯泰的生物聚合物(即蛋白质和多糖)的热力学不相容导致相分离体系^[47],在挤出过程中,组织化植物蛋白呈现出明显的多相体系,由富水的分散相和贫水的连续相(即富蛋白质的连续相)组成。在挤出机模具中,分散相发生变形,沿流动方向定向,然后冷却凝固,形成典型的各向异性结构^[48]。

针对上述两种不同的解释,不同的学者采用不同的研究方法来证明自己的研究结果。张金闯^[49]利用 FTIR 进行蛋白质二级结构的研究,发现物料在蒸煮区和冷却模头处,蛋白质分子内氢键等非共价键被破坏或减弱, α -螺旋和 β -折叠比例显著降低,无规卷曲比例显著增加,通过模口区(冷却模头)后,蛋白质分子链展开并沿流动方向有序聚集,蛋白质二级结构比例未显著变化,但 α -螺旋和 β -折叠的比例显著增大。Zhang 等^[50]利用 X 射线显微成像技术和红外光谱等技术,证实纤维结构是由冷却区蛋白质分子的相分离和重排引起的,氢键和二硫键是维持蛋白质纤维结构的主要作用力。Chen 等^[51]揭示了在模口区,支链淀粉和硬脂酸协同诱导蛋白质分子链展开,形成松散的空间构象,促使成型区蛋白质分子重排并阻碍蛋白质分子链回弹,形成扁平状纤维结构,提出了高水分挤压过程中

蛋白质纤维结构形成的“分层叠变”理论。Witek 等^[35]将冻结的挤出物沿流动方向切割,嵌入切片介质中,分析其微观结构,结果发现,挤出物中有明显的多相系统,通过挤压过程水再分配形成了富水的分散相和富蛋白质的连续相,将挤出物冷冻干燥后进行 X 射线检测,利用密度差可以得到明显的分散相取向,多相形貌呈典型的 Hagen - Poiseuille 流型,并且在高水分挤压过程的数值模拟中得到了类似的流动分布。Witek 等^[52]发现螺杆段已经存在多相体系,在整个冷却模头段,随着物料温度的升高,分散相的单个颗粒更加拉长,挤出物的各向异性结构更加明显。

还有学者发现借助仿真计算流体力学可以克服冷却模头的黑箱特性以及在线检测技术的限制,使冷却模头内物料的流动状态和纤维结构形成的动态过程可以被更加形象地展示出来。Witek 等^[52]使用 ANSYS POLYFLOW 模拟了物料从模具适配器到整个冷却模头的冷却过程,发现从物料中心到外部存在的温度梯度导致高剪切速率和高剪切应力,中心处的流体加速产生延伸流,从而产生拉应力;物料温度的变化对模具压力、产品结构和挤出物的形貌均有影响,温度升高导致模具压力降低,各向异性结构更加明显,分散相的形状更加变形,即形成更尖的 V 形;对整个模具截面中两种选定物料温度的形态发展分析表明,螺杆截面中已经存在潜在的多相体系,分散相的粒径,即单个颗粒的粒径,似乎不受模具截面变化的影响,而形貌主要受变形和取向的影响。Sandoval Murillo 等^[53]使用物质点法(MPM)结合 Cahn - Hilliard 相分离模型,对冷却成型过程进行数值模拟,发现当相分离率、热传导率和流速之比在一定的数值范围内时,可以获得类似纤维的结构,且导致纤维结构形成的物理机制是由温度梯度影响下的旋节线相分离引起的。Hogg 等^[54]通过 ANSYS CFX 进行了数值研究,得到沿冷却模型的流型变化,同时通过着色试验得到具有流动轮廓的彩色样品,经对比,与数值模拟研究结果一致。

4 结语

目前,植物基肉制品的生产和研发过程已有较显著成果,但是植物基肉制品在产品价格、口感、风味等方面还存在一些问题和不足,仍面临许多技术发展和市场需求的挑战。今后应加强以下方面的研究:提高不同来源植物蛋白原料的挤压适用性;加强基础理论研究,强化挤压设备研发和工艺机制研究的联系;对高水分组织化植物蛋白加工过程实现智能化、可视化、精准化、通用化的品质调控等。

参考文献:

- [1] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N, et al. Meat analogues: health promising sustainable meat substitutes [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2017, 57(5): 923 - 932.
- [2] 梁北珂. “人造肉”发展现状及对农业科技的启示[J]. *黑龙江粮食*, 2020(7): 20 - 22.
- [3] MESSIEN J L, CHIHI M L, SOK N, et al. Effect of globular pea proteins fractionation on their heat - induced aggregation and acid cold - set gelation [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 46: 233 - 243.
- [4] 蒋华彬. 小麦蛋白高水分挤压组织化特性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
- [5] 朱嵩. 基于高水分挤压技术的花生蛋白素肠制备及其贮藏特性研究[D]. 北京:中国农业科学院,2019.
- [6] MARYSE T, DUMAY E, CHEFTEL J C. Influence of process variables on the characteristics of a high moisture fish soy protein mix texturized by extrusion cooking [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 1996, 29(5/6): 526 - 535.
- [7] 江连洲, 张鑫, 窦薇, 等. 植物基肉制品研究进展与未来挑战[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(8): 7 - 16.
- [8] 陈琼玲, 张金闯, 刘丽, 等. 高水分挤压过程中大分子相互作用研究进展[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(8): 350 - 359.
- [9] HAGER D F. Effects of extrusion upon soy concentrate solubility[J]. *J Agric Food Chem*, 1984, 32(2): 293 - 296.
- [10] ZHANG W B. Chemical cross - linking and molecular aggregation of soybean protein during extrusion cooking at low and high moisture content [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2011, 44(4): 957 - 962.
- [11] LIU K S, 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.
- [12] 洪滨, 解铁民, 高扬, 等. 原料体系对高水分组织蛋白纤维化结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(2): 23 - 27.
- [13] 魏益民, 张余, 张波, 等. 花生蛋白高水分挤压组织化过程中的化学键变化[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(11): 2575 - 2581.
- [14] 魏益民, 康立宁, 张余. 食品挤压技术与理论: 中卷 [M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [15] AFIZAH M N, RIZVIS S H. Functional properties of whey protein concentrate texturized at acidic pH: effect of extrusion temperature [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2014, 57(1): 290 - 298.
- [16] OSEN R, TOELSTED S, EISNERP, 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.
- [17] 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.
- [18] 贾旭. 小麦谷朊粉在大豆蛋白挤压组织化中的应用研究[D]. 郑州:河南工业大学,2010.
- [19] KITABATAKE N, MEGARD D, CHEFTEL J C. Continuous gel formation by HTST extrusion - cooking: soy proteins[J]. *J Food Sci*, 1985, 50(5): 1260 - 1265.
- [20] LI M, LEE T C. Effect of cysteine on the functional properties and microstructures of wheat flour extrudates [J]. *J Agric Food Chem*, 1996, 44(7): 1871 - 1880.
- [21] 杨文, 秦新生, 马叶盛, 等. 添加剂对组织化小麦蛋白结构的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(10): 1 - 7, 15.
- [22] 徐添, 赵妍嫣, 袁蓓蕾, 等. 双螺杆挤压处理对小麦蛋白组织化程度的影响[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(15): 87 - 90, 96.
- [23] 贾旭. 碱性条件对组织化蛋白品质的影响[J]. *肉类工业*, 2016, 37(8): 24 - 26, 30.
- [24] LI T, GUO X N, ZHU K X, et al. Effects of alkali on protein polymerization and textural characteristics of textured wheat protein[J]. *Food Chem*, 2018, 239: 579 - 587.
- [25] 杨文. 添加剂对组织化小麦蛋白理化性质及结构影响的研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [26] 彭慧慧, 王思花, 张静, 等. 添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤出物品质的影响及复配配方优化[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 188 - 195.
- [27] 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*, 2017, 239(15): 1134 - 1142.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 高培栋, 赵楠, 关凯方, 等. 高湿挤压技术制作松柏复合素肉的工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(5): 258 - 263.
- [31] 左进华. 大豆蛋白的挤压改性工艺及在面包中的应用研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2009.
- [32] 郎珊珊, 阎树田, 石戴卫. 操作参数对挤压组织化花生蛋白质构特性的影响[J]. *中国油脂*, 2014, 39(12): 23 - 26.
- [33] 杨勇, 王中江, 陈慧慧, 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.
- [34] 金鑫. 植物蛋白挤压组织化性质、工艺优化及应用研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021.
- [35] WITTEK P, ZEILER N, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of soy protein: investigations on the formation of anisotropic product structure [J]. *Foods*, 2021, 10(1): 10-13.
- [36] BURGESS L D, STANLEY D W. A possible mechanism for thermal texturization of soybean protein[J]. *Can Inst Food Sci Technol J*, 1976, 9(4): 228-231.
- [37] JEUNINK J, CHDFTEL J C. Chemical and physicochemical changes in field bean and soybean proteins texturized by extrusion[J]. *J Food Sci*, 1979, 44(5): 1322-1325.
- [38] BAIRD D G. The effect of heat and shear on the viscoelastic properties of soy flour dough[J]. *J Food Process Eng*, 1982, 5(4): 231-245.
- [39] SHEARD P R, LEDWARD D A, MITCHELL J R. Role of carbohydrates in soya extrusion [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1984, 19(4): 475-483.
- [40] SHEARD P R, FELLOWS A, LEDWARD D A, et al. Macromolecular changes associated with the heat treatment of soya isolate [J]. *Int J Food Sci Technol*, 1986, 21(1): 55-60.
- [41] PRUDENCIO S H, AREAS J G. Protein - protein interactions in the extrusion of soya at various temperatures and moisture contents [J]. *J Food Sci*, 2010, 58(2): 378-381.
- [42] SIMONSKY R W, STANLEY D W. Texture - structure relationships in textured soyprotein. V. Influence of pH and protein acylation on extrusion texturization [J]. *Can Inst Food Sci Technol J*, 1982, 15(4): 294-301.
- [43] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Texture and chemical characteristics of soy protein meat analog extruded at high moisture [J]. *J Food Sci*, 2000, 65(2): 264-269.
- [44] CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B. Chemical cross-linking and molecular aggregation of soybean protein during extrusion cooking at low and high moisture content [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2010, 44(4): 957-962.
- [45] FANG Y Q, ZHANG B, WEI Y M. Effects of the specific mechanical energy on the physicochemical properties of texturized soy protein during high - moisture extrusion cooking [J]. *J Food Eng*, 2014, 121: 32-38.
- [46] SAMARD S, GU B, RYU G. Effects of extrusion types, screw speed and addition of wheat gluten on physicochemical characteristics and cooking stability of meat analogues [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(11): 4922-4931.
- [47] ZAHARI I, FERAWATI F, HELSTAD A, et al. Development of high - moisture meat analogues with hemp and soy protein using extrusion cooking [J/OL]. *Foods*, 2020, 9(6): 772 [2022-07-22]. <https://doi.org/10.3390/FOODS9060772>.
- [48] TOLSTOGUZOV V B. Functional properties of food proteins and role of protein - polysaccharide interaction [J]. *Food Hydrocolloid*, 1991, 4(6): 429-468.
- [49] 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.
- [50] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, 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.
- [51] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, 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 [2022-07-22]. <https://doi.org/10.1016/J.foodhyd.2022.107559>.
- [52] 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 [2022-07-22]. <https://doi.org/10.3390/foods10081753>.
- [53] 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.
- [54] HOGG E, HORNEBER T, RAUH C. Experimental and numerical analyses of the texturisation process of a viscoelastic protein matrix in a cooling die after high moisture extrusion cooking [C]// Fachtagung "Experimentelle Stromungsmechanik", September 5-7, 2017. Karlsruhe, Germany: German Association for Laser Anemometry, 2017:1-42.