

孙莹, 王龙, 朱秀清, 等. 植物基蛋白肉的研究现状与挑战 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 438–446. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080327

SUN Ying, WANG Long, ZHU Xiuqing, et al. Research Status and Challenge on Plant-based Protein Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 438–446. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080327

· 专题综述 ·

植物基蛋白肉的研究现状与挑战

孙莹¹, 王龙¹, 朱秀清^{2*}, 江连洲³

(1. 哈尔滨商业大学旅游烹饪学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

2. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028;

3. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要: 随着社会发展进步, 健康饮食、绿色可持续发展等观念受到广泛认同。相比于传统肉, 植物基蛋白肉具有营养丰富、环境友好且节约生产要素等优势, 成为当下的研究热点。本研究简要梳理了植物基蛋白肉近年来的国内外研究现状、发展历程, 系统介绍了植物基蛋白肉的原料组成、挤压技术以及质量评价方法。最后, 总结了植物基蛋白肉研究中现存的主要问题, 并结合实际研究进展提出展望。未来, 应以深入研究植物基蛋白肉产品的外观、风味、质地等感官特性为主, 同时兼顾营养和安全性。高湿挤压技术作为未来发展方向, 除调整含水量、挤压温度和其他工艺参数外, 还需重点关注冷却模具的改进。

关键词: 植物肉, 营养, 高水分挤压技术, 大豆

中图分类号: TS219

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)17-0438-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080327

本文网刊:



Research Status and Challenge on Plant-based Protein Meat

SUN Ying¹, WANG Long¹, ZHU Xiuqing^{2*}, JIANG Lianzhou³

(1. Tourism & Cuisine College, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

3. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: With the development of society, the idea of healthy diet and the green sustainable development are widely recognized. Compared with traditional meat product, with advantages of rich nutrition and environment-friendly factors of production, plant-based protein meat substitutes has become the research focus. In this report, both domestic and overseas research status and development process of plant-based protein meat substitutes in recent years are briefly analyzed, it also systematically introduced the raw materials needed, extrusion technology and quality evaluation methods. In the end of this report, the existing main problems are summarized, and corresponding expectations are putted forward based on the actual research process. In the future, the appearance, flavour, texture and other sensory attributes should be deeply studied, while taking the nutrition and food safety into account. As the development trend in the future, in addition to water content adjustment, extrusion temperature and other process parameters, high moisture extrusion technology should also focus on the improvement of cooling die.

Key words: plant-based protein meat; nutrition; high moisture extrusion; soybean

21 世纪以来, 得益于改革开放的丰硕发展成果, 中国城乡人民生活水平显著提高, 膳食结构持续升级, 肉类消耗量也呈跳跃式上升趋势^[1]。全面小康水平推动下的居民肉类消费需求仅靠国内农业生产资

源远远难以维持, 当前除了大力发展畜牧业之外, 国内主要依靠肉制品进口来填补肉类消费量的缺口^[2]。然而, 传统肉制品生产存在效率低、水资源消耗高、温室气体排放对环境污染严重等问题; 近年来, 受国

收稿日期: 2022-09-02

基金项目: “2020 年度哈尔滨商业大学“青年创新人才”支持计划 (2020CX01); 黑龙江省自然科学基金联合引导 (LH2022C048)。”

作者简介: 孙莹 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 烹饪科学, E-mail: sunying625@163.com。

* 通信作者: 朱秀清 (1968-), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 蛋白质分子化学及大豆深加工, E-mail: xqzhuwang@163.com。

外新冠疫情影响,肉制品进口困难,且考虑到国际贸易保护主义等诸多因素,依靠进口满足国内肉类消费量存在不确定性^[1-3]。当前中国亟需寻找一条符合可持续发展观的路径来解决国内肉制品供需不平的问题。

随着现代先进食品加工技术的创新,国外 Beyond Meat、Impossible Foods 等植物肉生产、销售企业通过与肯德基、必胜客、麦当劳等巨头连锁快餐店合作使得植物基蛋白肉制品出现在大众餐饮之中,进而快速占领了消费市场,并且发展势头迅猛^[4]。此外,近年来素食主义生活理念在国内日趋流行,而植物基蛋白肉作为素食领域的“新能源”,素食主义者对其抱有强烈的新奇感,受猎奇心驱使更愿意尝试这种新兴食品^[1]。相比于传统肉制品,植物基蛋白肉有资源可持续、环境友好、绿色健康、营养丰富等方面的优势,也因此成为解决传统肉制品供给不足、环境压力等问题的有效方法。目前,国内对植物基蛋白肉产品的质量评价方法缺乏系统研究。因此,本文在阐述植物基蛋白肉的发展历程、研究现状、市场需求的基础上,分析植物基蛋白肉的营养性和高水分挤压技术用于制备植物肉的现状、归纳常用于评价高湿挤压组织化植物蛋白品质的系统研究方法。最后,总结了植物基蛋白肉研究中现存的问题,并结合实际研究进展提出展望。

1 发展历程与研究现状

植物基蛋白肉,简称植物肉、素肉、组织化植物蛋白(TVP)、肉类拟物^[4]等,是目前主要的两类人造肉之一(另一类为培养肉)。植物基蛋白肉是采用现代食品加工技术,以植物性蛋白为主要原料,通过纺丝、挤压和热剪切等制备技术,将植物基蛋白原料加工成具有类肉性的纤维状仿真肉^[5]。

1.1 发展历程

植物基蛋白肉的起源可以追溯到公元 965 年的古代中国,当时已有以大豆为原料制作豆腐并食用的文献记载^[6]。据考证,《清异录·官志》记载“时藪为青阳丞,日市豆腐数个,邑人呼豆腐为小宰羊”^[7]。事实上,豆腐作为植物基蛋白制品的最好例证,其制作原理与植物肉有一定的相似之处。基于现代食品加工技术生产的第一代植物基蛋白肉产品始现于二十世纪初。1922 年,美国麦迪逊食品公司以大豆为原料开发出“大豆素肉”产品,是最早明确提出“素肉”这一概念的植物基蛋白肉制品;1947 年,Robert Boyer 开发了一种有纹理的可食用大豆蛋白纤维,于 1952 年 5 月 6 日申请了美国专利^[7]。二十一世纪初,第二代植物肉产品开始上市。伴随食品科学和挤压工艺的进步,植物基蛋白肉模拟动物肉的仿真性得到了一定的提升。2019 年,植物基牛肉汉堡成为《麻省理工学院技术评论》发布的全球十大突破性技术之一^[8]。2020 年 12 月 15 日,中国食品科学技术学会发布的《植物基肉制品》团体标准将植物基蛋白肉定义为,

以植物原料(如豆类、谷物类等,也包括藻类及真菌类等)或其他加工品作为蛋白质、脂肪的来源,添加或不添加其他辅料、食品添加剂(含营养强化剂),经加工制成的具有类似畜、禽、水产等动物肉制品品质构、风味、形态等特征的食品,从而填补了植物基蛋白肉的标准空白,更有利于引导植物基蛋白肉行业规范发展^[9]。

1.2 研究现状

近年来,随着越来越多的企业加入植物基蛋白肉产品的研发行列,植物基蛋白肉市场也在不断扩张。国外的植物基蛋白肉产品主要以素肉饼、素肉肠和素肉块为主,可加工成汉堡、香肠、炸鸡块等,其产品价格高于国内同类产品^[5]。在国外快餐连锁企业与植物基蛋白肉生产、销售企业的联合推广下,植物基蛋白肉制品在国内有了一定的市场规模,国内的植物基蛋白肉产品主要以素肉饼、素肉馅、素肉丸和素肉块为主,可加工成传统菜肴的仿制品(素鸡、素腰片等)及休闲食品^[10]。

国内外研究者针对植物基蛋白肉的研究主要集中在原料来源、挤压工艺、基本配方及产品品质四个方面,并取得了较好的进展,少量文献研究了植物基蛋白肉的消费者认知及接受度、营养和安全评估以及机体内部的消化吸收特性。低湿挤压工艺已发展相对成熟,是目前国内市场生产植物基蛋白肉的主流技术,高湿挤压产品尚未规模化生产^[11]。表 1 展示了国内外关于高湿挤压植物肉产品的主要成分、添加剂、挤压参数和产品特性的部分研究成果。

在产品品质方面,部分研究者以大豆蛋白为主要原料制备高水分拉丝蛋白,通过关联拉丝蛋白质构与肉丸品质,明确了剪切和拉伸性能是影响肉丸品质的关键指标,并研究植物纤维、磷酸盐等对肉丸蒸煮过程质地的影响,发现添加植物纤维 1%、磷酸盐 0.2% 可明显改善肉丸的多汁性、黏结性和蒸煮稳定性^[10]。在加工工艺方面,王强等^[11]人揭示了高湿挤压过程中基于蛋白多尺度结构变化的纤维结构形成分子机制,并研发出植物蛋白素牛肚、素肠、素风干牛肉等 10 余个符合国内消费者习惯的新产品。在消化特性方面,Xie 等^[20]基于小鼠的动物实验最新研究表明,植物基蛋白肉削弱了小鼠的胃肠消化功能,它们在体内的消化和吸收性能不如真肉,该发现为研究者对于植物基蛋白肉在机体内部的消化特性的相关研究提供了新的见解。在原料来源方面,除不同种类的植物蛋白通过复配用于挤压生产植物基蛋白肉外,现阶段国内已开始植物基蛋白肉专用大豆品种选育的相关研究,以获得更好的蛋白质来源和提高产品质量^[21]。

2 基本原料组分

营养价值是消费者选择植物基蛋白肉产品时的重要考虑因素^[22]。相比于动物肌肉,植物基蛋白肉最大的特点是由多种营养素及其它成分的混合而成,因

表 1 高湿挤压植物肉产品的主要成分、添加剂、挤压参数和产品特性

Table 1 Major ingredients, additives, extrusion parameters and product characteristics in the high moisture texture of plant-based protein meat products

主要成分	添加剂	挤压参数	产品特性	参考文献
豌豆蛋白80%、谷朊粉20%	无添加剂	挤压温度140℃、螺杆转速150 r/min、进料速率12 kg/h、含水量60%	减少了气孔数量、纤维结构丰富、硬度低、弹性较高	[12]
大豆浓缩蛋白	6%海藻酸钠	含水量60%、挤压温度150℃、螺杆转速150 r/min、进料速率12 kg/h	增强了挤出物的纤维特性,具有良好的咀嚼性和组织化度	[13]
大豆分离蛋白50%、谷朊粉50%	无添加剂	含水量60%; 进料速率8 kg/min; 螺杆转速150 r/min; 挤压温度150℃	高纤维结构,较高的再水化能力	[14]
90%大豆分离蛋白, 10%小麦淀粉	无添加剂	含水量60%、螺杆转速150 r/min、挤压温度160℃、进料速率6.80 kg/h	高度纤维化,有序定向结构,营养价值无变化	[15]
大豆分离蛋白50%、谷朊粉30%和豌豆蛋白20%	无添加剂	螺杆转速280 r/min、挤压温度160℃固体添加量8.5 kg/h、水分添加量14.0 kg/h	表面光滑,整体成型好,可作为鸡肉仿肉制品	[16]
豌豆蛋白	海藻酸钠0.32%、L-半胱氨酸0.08%、复合磷酸盐0.31%	螺杆转速162 r/min、含水量54%、喂料速度10 kg/h、挤压温度169℃	色泽、粘弹性和组织化度明显提高、综合得分0.92	[17]
亚临界芝麻蛋白粉70%、谷朊粉30%	无添加剂	喂料速度2 kg/h、挤压温度160℃、水分含量65%、螺杆转速190 r/min	持水性增加了14.16%、吸水性减少了14.52%、蛋白消化率增加了11.18%	[18]
大豆浓缩蛋白	卡拉胶3%、羧甲基纤维素钠6%、海藻酸钠9%	含水量60%、挤压温度150℃、进料速率12 kg/h、螺杆转速150 r/min	丰富的纤维结构,提高了再水化率和消化率	[19]

此可根据物料本身营养缺陷进行针对性补充。理想的植物基蛋白肉应该在蛋白质、脂肪和碳水化合物三大主要供能营养素上接近或优于动物肉,并且能够提供维持人体正常生理活动所需的维生素、矿物质及一些天然植物活性成分^[23]。在生产植物基蛋白肉时,需综合考虑外观、口感、风味、质地等重要的产品感官品质,以及充分模拟动物肉的芳香物质和营养成分。植物基蛋白肉主要由植物蛋白、油脂、碳水化合物、维生素和矿物质以及一些其它功能性物质组成,根据相关研究,表 2 列举了生产植物基蛋白肉的基本成分配方和代表性物质及作用。

2.1 蛋白质

植物基蛋白肉一般含有 50%~70% 的植物基蛋白原料^[5]。植物蛋白原料的选择往往取决于蛋白质的可用性、产量、价格、氨基酸组成和蛋白质提取潜力、功能特性(乳化、凝胶性能、持水性等)的影响,大豆蛋白、小麦面筋蛋白(谷朊粉)、豌豆蛋白是目前生产植物基蛋白肉最广泛使用的植物基蛋白原料^[24],而目前正在开发中的蛋白来源包括蚕豆、羽扇豆、鹰嘴豆、马铃薯、绿豆、玉米、燕麦、亚麻籽、花生、芝麻和向日葵等植物^[25-27]。蛋白质来源是影响纤维结构形成的重要因素,豆类蛋白主要由球蛋白、白蛋白和

少量的谷蛋白组成,其中 7S 球蛋白和 11S 球蛋白占大豆分离蛋白的 90%,因此具有良好的凝胶能力以及乳化、填充和粘合功能^[28]。此外,相关研究表明,食用豆类已经显示出许多健康益处,如降低患 II 型糖尿病的风险、降低总胆固醇和低密度脂蛋白胆固醇水平等^[10]。小麦面筋蛋白中的氢键、二硫键和疏水性相互作用被认为是类肉纤维结构形成的原因,可提高产品的持水性、并且成本较低,因而被广泛使用^[29]。豌豆蛋白具有无过敏源的优点,但成本较高且韧性差。其他植物蛋白,包括马铃薯蛋白、绿豆蛋白、大米蛋白和花生蛋白、玉米醇溶蛋白等,凝胶性能较差,因此大豆分离蛋白不仅用作植物模拟肉中组织蛋白的原料,还可用作填料、粘合剂和凝胶剂与其它植物基蛋白原料结合制备植物基蛋白肉,以提高产品质地^[30]。赵知微等^[31]研究发现,添加 3%~7% 谷朊粉以大豆分离蛋白为原料的植物基蛋白肉产品,组织化程度高、纤维结构致密,口感更接近于动物肉。从营养角度来看,多样化和平衡性的植物基蛋白质摄入有助于预防许多慢性疾病。来自植物的蛋白质与动物肌肉蛋白相比通常缺乏某一种必需氨基酸,如谷物通常缺乏赖氨酸,而豆类通常含有较低水平的含硫必需氨基酸(蛋氨酸、半胱氨酸),因此将不同来源的植物

表 2 植物基蛋白肉基本成分表

Table 2 Basic ingredients of plant-based protein meat

成分	代表物质	作用
植物蛋白	大豆蛋白、豌豆蛋白、花生蛋白等	主要成分,模拟动物肉质构
水	饮用水	作为反应溶剂、起乳化作用等
油脂	椰子油、菜籽油、玉米油、棕榈油等	起润滑作用、改善风味等
碳水化合物	马铃薯淀粉、玉米淀粉、膳食纤维等	改善蛋白质的纤维结构
其它营养素	维生素、矿物质、天然植物活性成分等	均衡营养、增强保健功效
风味物质/调味品	食盐、酵母提取物、肉类酶解产物、香料等	增强风味,掩盖异味
黏合剂	甲基纤维素、淀粉、阿拉伯胶、黄原胶等	结合各成分、固定油脂
着色剂	焦糖色素、甜菜提取物、大豆血红蛋白	增加外观相似度

性蛋白通过复配添加到植物基蛋白肉基本配方中,有助于获得必需氨基酸的全面补充,从而产生健康益处。目前,全世界对动物肉的需求持续增长,动物肉将继续作为蛋白质的主要来源,植物基蛋白肉制品是一种饮食选择,未来不太可能取代传统动物肉类及其制品,但使用植物基蛋白肉制品弥补动物肉类蛋白供应不足,以确保蛋白质的可持续来源具有广阔前景。植物基蛋白肉产品的开发对植物基蛋白原料的需求正在增加,未来科研人员应当着眼于大食物观,探索更加丰富和优质的植物基蛋白原料,以应对人口增加而导致的肉类蛋白供应不足。

2.2 油脂

油脂是人体所需的六大营养素之一,在植物基蛋白肉工艺配方中添加油脂(一般为植物性,2%~10%)有助于产品风味释放,且植物性油脂富含必需脂肪酸、不含胆固醇等,有利于增强植物基蛋白肉的健康功效^[22]。植物基蛋白肉产品中最常用油脂是菜籽油、椰子油、葵花油和大豆油,此外有报道用于植物基蛋白肉产品的油脂包括玉米油、花生油、棕榈油、芝麻油、芥子油等^[32-33]。李岩等^[34]研究不同脂肪酸组成的植物油脂对植物基蛋白肉风味及感官属性的影响,发现含芥酸、油酸较多的油菜籽油可明显增强植物基蛋白肉的风味和质地,因此更适用于植物肉。从椰子和可可豆中提取的固体脂质与其它植物性油脂(如葵花籽油、油菜籽油)混合,可以使植物基蛋白肉产品的味道和感觉更像动物脂肪,而饱和与不饱和脂肪酸混合的白色脂肪颗粒可以添加到植物素肉汉堡中,使其呈现类似牛肉的大理石花纹状外观^[32]。油脂可减小加工过程中物料与设备的摩擦系数,增强物料的流动性。但在挤压过程中,油脂过量添加会导致物料在强剪切力作用下发生滑移现象,从而导致挤出物不能稳定成型,进而影响挤出产品品质^[9]。除一些天然植物性油脂外,改性植物油用于植物基蛋白肉产品也有相关报道,经过氢化液态的植物油转化为固体脂肪,可以更好的模拟动物脂肪的机械性质^[26]。总之,适当的油脂添加增强了植物基蛋白肉产品的多汁性、嫩度和口感,并且有助于产品稳定成形,但过量添加会对产品产生负面影响,因此在生产植物基蛋白肉产品时需根据产品实际需求选取合适的植物性油脂和添加量。

2.3 碳水化合物和膳食纤维

碳水化合物可作为黏合剂有效改善植物基蛋白肉产品的质地和稠度以及稳定性,玉米淀粉和小麦淀粉是目前植物基蛋白肉产品中最常用的淀粉。加工过程中淀粉发生降解产生还原糖类,经美拉德反应也可影响产品的色泽和风味。作为黏合剂的果胶、瓜尔胶、阿拉伯胶、黄原胶、卡拉胶和甲基纤维素等能提高产品稳定性和改变产品结构方面发挥着重要作用^[30]。膳食纤维不仅可以增加饱腹感,减少脂肪摄入,而且可起到预防糖尿病等疾病的作用^[9]。添加粉

状麦麸膳食纤维既能提高营养价值也有助于增加植物基蛋白肉制品的粘合力 and 质地^[9]。纤维素会影响植物蛋白肉产品的凝胶性和持水性等,在加工过程中纤维素发生膨胀,结合水能力增强,有利于提高产品的持水性。洪滨等人发现,淀粉含量的高低会影响植物基蛋白肉产品的形状、硬度和风味^[35]。用于黏合剂的碳水化合物一般分为两类,一类是通过物理填充方式将水和脂肪等物料结合在一起的淀粉类物质,起改善产品质地和稠度的作用。另一类具有弱分子间力与共价键交联作用,用于改善产品稳定性、形状的凝胶剂或纤维素类物质,对维持植物蛋白肉微观结构比较重要,如甲基纤维素等,但存在一定安全问题,因此一些天然膳食纤维,如蘑菇纤维、水果和蔬菜膳食纤维以及谷物膳食纤维,正在成为甲基纤维素的理想替代品^[32]。此外,添加碳水化合物有助于提高植物基蛋白肉的持水性,提高产品的嫩度,不同的烹饪方式(如蒸、煮、炸和油炸)对植物基蛋白肉产品在烹饪过程中水分损失的影响不同,碳水化合物中较多的羟基可以减少游离水的含量,或者通过构建网络结构提高植物基蛋白肉产品在加工过程中的保水能力。

2.4 维生素和矿物质

动物肉制品含有较为全面的维生素和矿物质营养成分,如牛肉是烟酸、硫胺素、维生素 B₆ 和 B₁₂、锌、硒和胆碱的良好来源^[9]。因此植物蛋白肉中维生素和微量矿物质元素的种类是否齐全、含量的高低等也是影响其营养性优劣的重要因素。植物性食物中的抗营养因子,如单宁、多酚和植酸等,可能导致矿物质元素吸收的降低,影响矿物质的消化率和可用性^[10]。植物性食物中非血红素铁含量较高,但与动物性食物中血红素铁相比,不易被人体吸收利用。此外,植物蛋白肉产品原料组成中维生素与矿物质的缺乏、加工过程中的营养素流失也是影响其维生素与矿物质含量的重要因素。因此,同样会在植物基蛋白肉基本配方中加入 B 族维生素、铁、锌等多种营养强化剂,以平衡产品的维生素和矿物质营养。曾艳等^[36]报道以不同植物基蛋白原料生产的植物基蛋白肉产品部分维生素和矿物质含量接近或优于传统的肉制品。Harnack 等^[37]比较发现,美国部分植物性牛肉替代产品具有比牛肉更好的营养功能(膳食纤维、铁、锰、铜、叶酸和烟酸含量高、饱和脂肪含量低),但锌、维生素 B₁₂ 含量少于牛肉。目前有关植物基蛋白肉产品的微量营养素质量评估的文献较少,且不同产品的微量营养素的种类和含量差异较大,因此评价植物基蛋白肉产品的微量营养素质量需根据产品实际情况进行客观比较,此外还应考虑抗营养因子、烹饪加工的影响。

2.5 其他添加成分

除上述营养物质外,还需在配方中加入风味物质、着色剂、黏合剂等成分,以改善产品口味、外观和质地等品质^[7]。植物蛋白发生美拉德反应可产生

多种风味物质,但种类单一、味道寡淡,不能很好模拟动物肉的风味,因此可通过加入酵母抽提物、牛肉香膏、肉类酶解产物等物质,以提供核苷酸、多肽、氨基酸、维生素类的水溶性物质、碳源等,从而掩盖异味、提高风味物质浓度和种类以及保留率。此外,调味成分如水解植物蛋白或味精可以用蘑菇浓缩物代替,以增强风味和配制风味^[30]。动物肌肉中的肌红蛋白决定其自身肉色,而植物基蛋白肉制品需通过添加着色剂来模拟动物肉色。常用着色剂有甜菜提取物、焦糖色素等。除此之外,研究发现大豆血红蛋白具有与肌红蛋白比较相似的食品化学性质,被美国 Impossible Foods 公司开发着色剂用于旗下产品^[36]。此外,海藻酸钙水溶液、微生物谷氨酰胺转氨酶、苹果提取物、二氧化钛等添加剂也被添加到植物基蛋白肉产品中,目的是提高植物基蛋白肉产品的整体硬度和弹性^[38]。在植物基蛋白肉中添加各种添加剂以充分模拟动物肉类的风味、质地和外观等属性是必要的,但各种添加剂的加入对于植物基蛋白肉产品的健康、安全影响还需进一步调查评估。

3 挤压技术

挤压技术用于生产植物基蛋白肉已有 50 多年的历史,是目前生产植物基蛋白肉产品的主流技术及研究热点^[22]。挤压机是食品工业中广泛应用的生产设备,被称为生化反应器^[39]。20 世纪 80 年代,双螺杆挤压机因其出色的加工能力、较低的能耗、较宽的湿度范围、具备自洁能力等优势,开始取代单螺杆挤压机成为挤压技术制备 TVP 的核心设备。单螺杆挤压机具有易操作、成本低等特点,但混合、分散和均质化效果差,物料温差大和难以喂粉状物料。只适用于简单的膨化食品、饲料、榨油(或酿酒)原料预处理等^[5]。双螺杆挤压机螺杆可高速运转、效率高、换料和清理便捷、对环境污染低,对物料水分要求相对宽松,可在一定范围内不受水分、油分的限制,可灵活应用于多种食品的加工,因此在工业上应用广泛^[39]。

3.1 低湿挤压工艺

物料的含水量是影响挤压制品性能的重要因

素,也是关键工艺参数之一。依据物料含水量不同,挤压法分为低湿挤压(20%~40%)和高湿挤压(60%~80%),挤压过程中,不同的植物基替代蛋白原料挤压产品感官属性、组织化度及微观结构均有所不同^[40]。

表 3 为低湿挤压与高湿挤压技术特征对比。

低湿挤压技术(Low moisture extrusion, LME)应用于 20 世纪 60 年代,经国内外研究人员大力研发,已发展相对成熟,是目前国内市场上加工植物肉产品的主流技术^[41]。挤压组织化植物基蛋白的原理较为复杂。目前研究表明,在低水分挤压过程中,经挤压机的充分搅拌、剪切、以及高温高压的环境共同作用,植物蛋白与水的混合物中维持蛋白结构的化学键(氢键、二硫键等)被破坏、内部的疏水基团暴露,形成可塑化的熔融体,此时粘度明显增加^[42]。当植物蛋白原料从挤压机内的高温、高压条件下挤出时,突然释放的压力使蛋白膨化形成海绵状结构。低湿挤压过程中,原料水分含量不变的情况下,增加蛋白质含量会导致脆性、硬度和脆度增加,但会降低颜色强度。添加蔬果原料,因其细胞壁结构的改变,导致不溶性膳食纤维通常发生降解,可提高产品可溶性膳食纤维含量。挤压过程中螺杆速度导致剪切力的变化,剪切力在改变蛋白质材料的营养价值中起着重要作用。大豆蛋白的高温变性使抗营养因子(如抗胰蛋白酶因子、凝集素等)失活,同时提升消化率,减少了不良挥发性化合物和苦味(但极高的温度会导致蛋白质消化率和赖氨酸生物利用率降低)^[43]。低水分挤压得到的植物基蛋白肉水分含量低、呈膨化的海绵状结构、具有类似动物肉的咀嚼感和弹性,使用前需要复水处理。低湿挤压法生产的植物肉作为肉类补充剂已广泛应用于肉制品,以防止收缩,提高加工肉制品(如香肠和牛肉馅饼)的保水能力,代表食品有火腿肠、鱼丸、辣条、豆干等^[7]。低水分挤压技术对原料要求范围较宽、但存在整体温度要求较高、能耗高、传输效率较低、挤出产品仿真性较差等缺点。

3.2 高湿挤压工艺

高湿挤压技术(High Moisture Extrusion, HME)

表 3 挤压工艺特征对比

Table 3 Comparison of extrusion process characteristics

工艺	低湿挤压	高湿挤压
起源	20世纪60年代	20世纪90年代
挤压设备	单、双螺杆挤压机均可	双螺杆挤压机(带冷却模头)
技术特点	能耗高、传输效率低等	能耗低、传输效率高、具备自洁能力
原料	要求范围较宽	要求蛋白含量较高
水分含量	20%~40%	60%~80%
产品外观		
市场状况	技术成熟、市售主流产品	技术和市场尚未成熟,未来发展方向

应用于 20 世纪 90 年代。与低水分挤压不同,用于高水分挤压技术的双螺杆挤压机需带有冷却模口,物料流动到冷却管中时,温度降低、管壁的阻力与前进的推力使得蛋白质重新交联排列,由熔融体重新转变为稳定状态,最终形成具有丰富的纤维和致密组织结构的植物蛋白肉^[44]。高湿挤出过程从原料到最终挤出物可分为五个步骤,包括原料填充、加水混合、熔融、模具成型和冷却,高湿挤压系统具有较长的冷却模具,允许在相对较低的温度下(低于 75℃)形成纤维结构,这有助于蛋白质分子的重排,为大豆蛋白提供了致密的纤维结构和良好的灵活性,同时最大限度地保留了营养素和生物活性物质^[19]。此外,高湿挤压技术还可以促进蛋白质凝胶化、重组和脂肪乳化、避免产品膨化,因此高湿挤压得到的植物基蛋白肉具有组织化程度高、营养成分损失少、硬度适宜、弹性和内聚性较好、即食性且无需复水等优点,是比较理想的动物肌肉替代产品,可直接加工成为素汉堡、素鸡、素虾、工程肉等形态和风味多样的食品。有关研究表明,含水量的增加可以显著降低拉伸强度、硬度、咀嚼性和聚集度,大豆分离蛋白在 60% 水分含量下挤压出产品,具有较好的类似动物肉的纤维结构^[42]。高湿挤压技术具有加工温度低、效率高、能耗低等优势,但面临理论基础薄弱、原料性状差异控制难度较大、相关标准缺乏、生产设备昂贵、挤压设备研发落后和产品的后续工艺(如包装、杀菌、贮藏)缺乏研究等挑战,以及食品安全和营养潜在的其它问题,因此制约着高湿挤压产品的规模化生产^[14]。

4 质量评价方法

传统肉制品的质量评价已有较为完备的品评方法体系,现有的分析技术适用于传统的畜禽肉类品质分析,但计量差异尚未协调一致,无法确定是否可以使用这些方法表征植物基蛋白肉产品的品质。因此,植物基蛋白肉产品的质量评估是当前面临的关键问题之一,目前对植物基蛋白肉品质的研究主要集中在感官评价和仪器分析上,不同的分析技术可用于客观评估植物基蛋白肉产品的不同品质,从而有助于提高质量、发展趋势和市场需求。McClements等^[45]提出可从原料(水分、蛋白质、油脂、碳水化合物和矿物质的含量)、工艺(螺杆转速、温度等工艺参数)、产品特性(外观、质地、持水性、组织化度等)、感官评价,包括描述性(经过培训的感官评价员)和情感性(消费者)四个方面依次进行植物基蛋白肉的质量评价,从而建立一个标准化的植物基蛋白肉产品质量评价体系。随着植物基蛋白肉产品的深入研究,建立植物基蛋白肉产品质量的标准化分析方法有助于计划实验、准确描述产品特性,以便指导、改进现有产品和工艺,并开发新的产品和工艺^[45]。

4.1 感官评价

感官分析是一种食品质量分析方法,通过评价人员的各个感觉器官测量食品的颜色、味道、质地和

香气等各种质量属性来确定产品的可接受性。感官评价的指标主要有色泽、气味、口感、嫩度、硬度、黏弹性和多汁性等。优质植物基蛋白肉产品要求表面光滑,呈乳白色或浅黄色(以具体蛋白原料为依据)、口感细腻、软硬适中、有较好的纤维化结构、肉感明显、无不良气味且具有肉的风味^[41]。肖志刚等^[46]将色泽、口感、组织、气味作为因素,应用模糊矩阵确定权重依次为 0.175、0.285、0.325、0.215,最终得到当喂水速度为 14 kg/h、大豆分离蛋白添加量为 40% 的条件下制备的素肉饼感官评分最高,这表明植物基蛋白肉产品的质地对其感官评价结果影响最显著。感官评价结果直接反映产品品质的优劣,但评估植物基蛋白肉产品时,必须考虑烹饪后产品的质量,不同的烹饪方法、个人喜好、批次和其他客观因素可能会导致感官分析的质地结果出现偏差^[45],具有较强的主观性、不能量化样品间的差异值,因此通常将感官评价和仪器分析结合以达到客观、准确评价产品品质优劣的目的。

4.2 仪器分析法

仪器分析法常用设备有质构仪、色度计、差示扫描量热仪、光谱仪、光学显微镜和扫描电子显微镜等。通过光学显微镜和扫描电子显微镜可清楚观察到 TVP 的纤维结构,因此可直观反映产品的组织化度。研究人员通常会展示植物基蛋白肉产品的实物照片和扫描电子显微镜图片,以提供有关植物基蛋白肉产品的外观和微观结构的信息,此外为了量化产品颜色的视觉参数,常使用色度计测量表面颜色。Savadkoobi 等^[47]研究了掺入漂白番茄渣对素香肠颜色的影响,结果表明,含有 7% 的番茄渣的无肉香肠的亮度和黄色增加,表明随着番茄渣的添加,产品颜色逐渐变黄。质构仪是基于力学原理可用来分析挤出物的组织化度、纤维丝强度、质构特性(硬度、弹性、咀嚼度等)的仪器设备。魏益民等^[48]采用质构仪以 A/CKB 探头对仪样品进行切割,以横向剪切力与纵向剪切力的比值表示组织化度,该值越大表明产品的纤维化程度越强。张波等^[49]采用质构仪拉伸模式, A/TG 探头测量组织化产品的抗拉伸力,以此表示纤维丝强度;采用 TPA 模式测量组织化产品的硬度、弹性、咀嚼度和内聚性,进而表征挤压植物基蛋白肉产品的质地特性。光谱仪主要应用于分析高湿挤压植物基蛋白肉的组织化度,包括红外光谱法、荧光偏振光谱法、光反射率法、核磁共振波光谱法。色度计、差示扫描量热仪通常结合感官评价使用,通过测定产品的热焓值、色差值来分析产品的热稳定性和色泽的优劣。仪器分析结果可以量化产品各项指标的具体差异,但不足以体现顾客对产品的真实体验,因此,将感官评价和仪器分析结合用于评价植物基蛋白肉制品的品质,所得到的结果才能更加客观与准确。此外,植物基蛋白肉产品的一个重要质量属性是其多功能可烹饪性,即使用多种烹饪方法进行烹

饪,包括烧烤、蒸煮、煎炸、烘焙和微波等。因此,应系统地测试不同烹饪方法对所选植物基蛋白肉产品的结构和物理化学性质的影响。产品应制成标准化样品,如立方体(1 cm×1 cm×1 cm),并在标准条件下烹饪。烹饪后,应测量样品的微观结构、外观、形态、质地等特性,并与设计用来替代的动物肉类样品进行比较,从而说明样品与被模拟动物肉的相似程度。

5 挑战与展望

植物基蛋白肉的生产不仅要模拟动物肉制品的肉质结构,还需要深入研究此类产品的外观、风味等感官特性、同时兼顾营养和安全性,以克服围绕这些因素的各种挑战。随着消费者对植物基蛋白肉产品的了解与尝试,以及高湿挤压技术的进步,植物基蛋白产品的发展潜力愈发巨大,但目前在产品品质、设备研发、品质保藏、市场推广方面面临如下挑战^[50]。

尽管应用高湿挤压技术已能够较好模拟动物肌肉的纤维结构与质地,但在弹性、嫩度等口感方面区别较大,对动物肉特有的芳香物质也不能很好复刻。当下对于植物基肉制品风味调控主要是通过添加肉味香精等模拟动物肉的风味,但存在肉味香精包埋效果差,香气弱,粉味重等问题。此外,大豆等豆类蛋白存在豆腥味、脂氧合酶引起的青草味和豆味、皂甙和异黄酮(抗营养因子)引起的涩味等。影响高湿挤压植物基蛋白肉产品质量的关键挤压参数(含水量、螺杆转速和挤压温度等)已得到广泛研究与优化,但蛋白质纤维结构的关键形成机理、螺杆配置和冷却模具的设计与改进有待进一步研究^[40]。目前关于植物基蛋白肉品质保藏方面的相关研究匮乏。高湿挤压组织化大豆蛋白在储藏过程中感官品质和安全品质极易发生劣变,因此在获得高品质组织化植物蛋白肉的基础上,对其产品包装、杀菌、贮藏条件进行研究,也是研究人员面临的待解决问题之一。同时也应考虑加工、储存过程中有害物质生成的问题。作为新型加工食品,由于加工技术、生产设备和成本等因素的制约,目前市售植物基蛋白肉产品价格普遍高于传统肉制品。产品的较低性价比,不仅限制消费群体的扩大,而且影响消费者的复购行为^[1]。

为消费者提供营养美味、安全卫生和绿色健康的食品是所有食品从业人员的追求。未来食品以更大范围多学科交叉的食品科学研究为发展趋势,旨在满足消费者对数量和品质需求的同时,尽可能减少对资源的占用和对环境的破坏。未来研究人员应致力于开发设计出能够满足生理需要,富含维生素、矿物质、必需氨基酸、膳食纤维、天然植物化学成分等能够促进健康的成分,并具有味道好、烹饪简便、价格便宜等性质的植物基蛋白肉制品,使得消费者能够更加容易的接受这种新兴食品^[23]。目前大多数市售植物基蛋白肉产品还没有达到这一要求,相信随着高湿挤压技术的进步,未来植物基蛋白肉必会成为营养美味、绿色健康且消费者广泛接受的加工食品。

参考文献

- [1] 刘聪,石奇,钱龙. 中国人造植物肉产业的发展现状、驱动机制与前景预测[J]. 农林经济管理学报, 2021, 20(6): 759-768. [LIU C, SHI Q, QIAN L. Development status, driving mechanism and prospect of chinese plant-based meat[J]. Journal of Agroforestry Economics and Management, 2021, 20(6): 759-768.]
- [2] 中国工程院院士陈坚: 植物蛋白肉和动物培养肉系统研究亟待加强[J]. 中国食品学报, 2019, 19(11): 254. [CHEN J. Academician of Chinese academy of engineering: The research on plant protein meat and animal culture meat system needs to be strengthened[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec, 2019, 19(11): 254.]
- [3] 韩亮, 万俊毅. 人造肉对传统肉的可替代性: 回顾与展望[J]. 新疆农垦经济, 2021(12): 74-83. [HAN L, WAN J Y. The Substitution of artificial meat for traditional meat: Review and prospect[J]. Xinjiang State Farms Economy, 2021(12): 74-83.]
- [4] 高育哲, 肖志刚, 何梦宇, 等. 植物素肉的研究现状及趋势[J]. 粮食与饲料工业, 2020(4): 32-34. [GAO Y Z, XIAO Z G, HE M Y, et al. Research status and development trend of vegetarian meat[J]. Cereal & Feed Industry, 2020(4): 32-34.]
- [5] 欧雨嘉, 郑明静, 曾红亮, 等. 植物蛋白肉研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 299-305. [OU Y J, ZHENG M J, ZENG H L, et al. Advance in plant-based meat research[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 299-305.]
- [6] 张金闯, 魏益民, 张波, 等. 组织化大豆蛋白生产工艺研究与应用进展[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(10): 135-139. [ZHANG J C, WEI Y M, ZHANG B, et al. The research on production technology and application process of textured soybean protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 135-139.]
- [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): 1-10. [JIANG L Z, ZHANG X, DOU W, et al. Advance and challenges in plant-based meat[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(8): 1-10.]
- [8] 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. [JIN X. Study on the extrusion properties process optimization and application of textured plant protein[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021.]
- [9] 周亚楠, 王淑敏, 马小清, 等. 植物基人造肉的营养特性与食用安全性[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4402-4410. [ZHOU Y N, WANG S M, MA X Q, et al. Nutritional characteristics and edible safety of plant-based artificial meat[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(11): 4402-4410.]
- [10] ZHANG T, 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.
- [11] ZHANG J, CHEN Q, KAPLAN D L, et al. High-moisture extruded protein fiber formation toward plant-based meat substitutes applications: Science, technology, and prospect[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022(128): 202-216.
- [12] 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. [WANG Q Y. Preparation and properties analysis of pea protein-based meat analogues[D]. Northeast Agricultural University, 2021.]
- [13] 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. [DOU W,

- ZHANG X, ZHAO Y, et al. Effect of sodium alginate addition on the extrusion characteristics of soy protein concentrate[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 147–152.]
- [14] 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]. *Food Research International*, 2022, 156(6): 111–189.
- [15] MACDONALD R S, PRYZBYSZEWSKI J, HSIEH F H. Soy protein isolate extruded with high moisture retains high nutritional quality[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(9): 3550–3555.
- [16] 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. [XI-AO Z G, LI H, WANG Z, et al. Extrusion preparation and quality characteristics of high moisture textured compound protein [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(1): 72–80, 88.]
- [17] 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. [PENG H H, WANG S H, ZHANG J, et al. Effects of additives on the quality of pea protein high-moisture[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 188–195.]
- [18] 黄纪念, 孙强, 张富重, 等. 挤压组织化对芝麻蛋白理化性质及结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 44(2): 60–68. [HUANG J N, SUN Q, ZHANG F Z, et al. Study on the influence of extrusion texturization on the physical and chemical properties and structure of sesame protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 44(2): 60–68.]
- [19] ZHANG X, ZHAO Y, ZHANG T, et al. High moisture extrusion of soy protein and wheat gluten blend: An underlying mechanism for the formation of fibrous structures[J]. *LWT*, 2022, 163(15): 113561.
- [20] XIE Y, CAI L, HUANG Z, et al. Plant-based meat analogues weaken gastrointestinal digestive function and show less digestibility than real meat in mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(39): 12442–12455.
- [21] BAO A, ZHANG C, HUANG Y, et al. Genome editing technology and application in soybean improvement[J]. *Oil Crop Science*, 2020, 5(1): 31–40.
- [22] 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. [WANG Q, ZHANG J C. Research status, opportunities and challenges of high moisture extrusion technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec*, 2018, 18(7): 1–9.]
- [23] 侯威. 食品科学家的目标是让植物肉更美味、更健康[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(6): 392–393. [HOU W. Food scientists aim to develop more delicious and healthy plant-based meat[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec*, 2021, 21(6): 392–393.]
- [24] 刘梦然, 毛衍伟, 罗欣, 等. 植物蛋白素肉原料与工艺的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 293–298. [LIU M R, MAO Y W, LUO X, et al. Research progress on materials and technologies of plant-based meat[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 293–298.]
- [25] WEBB D, LI Y, ALAVI S. Chemical and physicochemical features of common plant proteins and their extrudates for use in plant-based meat[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 131: 129–138.
- [26] GASTALDELLO A, GIAMPIERI F, DE GIUSEPPE R, et al. The rise of processed meat alternatives: A narrative review of the manufacturing, composition, nutritional profile and health effects of newer sources of protein, and their place in healthier diets[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 127: 263–271.
- [27] 江连洲, 田甜, 朱建宇, 等. 植物蛋白加工科技研究进展与展望[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(6): 6–20. [JIANG L Z, TIAN T, ZHU J Y, et al. Progress and prospect of plant protein processing technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec*, 2022, 22(6): 6–20.]
- [28] LI Z, REGENSTEIN J M, ZHOU L Y, et al. Soy protein isolates: A review of their composition, aggregation, and gelation[J]. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, 2022, 21(2): 1940–1957.
- [29] CHIANG J H, TAY W, ONG D S M, et al. Physicochemical, textural and structural characteristics of wheat gluten-soy protein composited meat analogues prepared with the mechanical elongation method[J]. *Food Structure*, 2021, 28: 100–183.
- [30] KYRIAKOPOULOU K, KEPPLER J K, VAN DER GOOT A J. Functionality of ingredients and additives in plant-based meat analogues[J]. *Foods*, 2021, 10(3): 600.
- [31] 赵知微. 素肉饼配方及加工工艺的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013. [ZHAO Z W. Study on formulation and processing technology of veggie meat-like patty[D]. Jiangnan University, 2013.]
- [32] ZAHARI I, ÖSTBRING K, PURHAGEN J K, et al. Plant-based meat analogues from alternative protein: A systematic literature review[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2870.
- [33] AHMAD M, QURESHI S, AKBAR M H, et al. Plant-based meat alternatives: Compositional analysis, current development and challenges[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(2): 100–154.
- [34] 李岩, 曾祥权, 杜文斌, 等. 不同植物油对植物肉风味及感官特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 31–44. [LI Y, ZENG X Q, DU W B, et al. Effect of different vegetable oils on flavor and sensory characteristics of plant-based meat[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 40(2): 31–44.]
- [35] 洪滨, 解铁民, 高扬, 等. 淀粉对高水分挤压组织化蛋白特性的影响[J]. *食品工业*, 2014, 35(7): 184–189. [HONG B, XIE T M, GAO Y, et al. The influence on characteristic of high moisture meat analogue by starch[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(7): 184–189.]
- [36] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 338–350. [ZENG Y, HAO X C, DONG T, et al. Research progress on raw material development, processing technology and nutritional properties of plant based meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 338–350.]
- [37] HARNACK L, MORK S, VALLURI S, et al. Nutrient composition of a selection of plant-based ground beef alternative products available in the United States[J]. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 2021, 121(12): 2401–2408.
- [38] FU J, SUN C, CHANG Y, et al. Structure analysis and quality evaluation of plant - based meat analogs[J]. *Journal of Texture Studies*, 2022.
- [39] 张金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 275–283. [ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(14): 275–283.]
- [40] 许森杰, 张莹莹, 栗广忠. 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. [XU M J, ZHANG Y Y, LUAN G Z. A Review on application of high-moisture extrusion

to textured vegetable protein[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(9): 311-320.]

[41] 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. [ZHU S, LIU L, ZHANG J C, et al. Advances in quality control and evaluation of high moisture textured vegetable protein[J]. Food Science, 2018, 39(19): 280-286.]

[42] 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]. Foods, 2021, 10(8): 1753.

[43] 付晓航, 李赫, 曹金诺, 等. 挤压加工对植物组织蛋白功能性影响的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 179-183.

[FU X H, LI H, CAO J N, et al. Research progress on the effects of extrusion processing on the functionality of textured vegetable protein[J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 179-183.]

[44] ZHANG X, ZHAO Y, ZHAO X, et al. The texture of plant protein - based meat analogs by high moisture extrusion: A review[J]. Journal of Texture Studies, 2022, <https://doi.org/10.1111/jtxs.12697>.

[45] MCCLEMENTS D J, WEISS J, KINCHLA A J, et al. Methods for testing the quality attributes of plant-based foods: Meat-and processed-meat analogs[J]. Foods, 2021, 10(2): 260.

[46] 肖志刚, 霍金杰, 王哲, 等. 模糊数学评价法优化素肉饼工艺及其品质研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6): 118-123. [XIAO Z G, HUO J J, WANG Z, et al. Processing and mechanism of high moisture textured soy protein[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(6): 118-123.]

[47] SAVADKOOHI S, HOOGENKAMP H, SHAMSI K, et al. Color, sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace[J]. Meat Science, 2014, 97(4): 410-418.

[48] 魏益民, 康立宁, 张波, 等. 高水分大豆蛋白组织化生产工艺和机理分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 193-197. [WEI Y M, KANG L N, ZHANG B, et al. Process and mechanism analysis of high-moisture soybean protein texturization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10): 193-197.]

[49] ZHANG B, ZHANG Y Q, 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 texturized defatted soybean meal[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 157: 77-83.

[50] 李兆丰, 孔昊存, 刘延峰, 等. 未来食品: 机遇与挑战[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 1-13. [LI Z F, KONG H C, LIU Y F, et al. Future foods: Opportunity and challenge[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Tec, 2022, 22(4): 1-13.]