

食品胶体在植物蛋白肉中的应用研究

方亚鹏, 赵一果, 鲁伟, 厉晓杨, 孙翠霞*
(上海交通大学农业与生物学院 上海 200240)

摘要 全球人口快速增长,环境压力持续加重,动物蛋白供给紧张。细胞培养肉成本高,技术难度大,不易工业化生产。植物基仿生肉是未来食品发展的重要方向。基于干法拉丝蛋白制备的第 1 代植物肉,存在组织化程度低,质地与口感差,含盐量高,缺乏绿色标签等问题。通过高湿挤压技术制备的高水分组织化植物蛋白具有类似动物肌肉的纤维状结构和口感,是动物蛋白理想的替代品。本文聚焦高湿挤压植物蛋白基仿生肉制品,重点综述蛋白质、多糖等食品胶体在植物蛋白肉中的应用研究,并阐述脂肪模拟物的开发及其在植物肉中的应用情况。此外,本文总结植物肉产业发展所面临的关键技术挑战,并展望其发展前景。

关键词 食品胶体;高湿挤压;植物蛋白肉;脂肪模拟

文章编号 1009-7848(2022)08-0001-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.08.001

蛋白质是人类健康生活必需的营养元素,与机体的生长发育等多项生命活动紧密相关。动物源肉制品是人体补充蛋白质的主要来源,然而,动物蛋白胆固醇含量较高,且牲畜饲养占用大量土地和水资源,存在污染环境、危害人体健康等问题^[1]。至 2050 年,全球人口数量预计将超过 90 亿,人均肉类需求量增长 75%,环境压力持续加重,动物蛋白供给紧张,或将不能满足人类对蛋白质的需求。寻求新的蛋白资源已刻不容缓。

植物蛋白资源丰富、廉价易得,且具有多种生理功能,如降血糖,预防心血管疾病等。现代科学技术和大量临床医学实践证明,长期坚持食用植物性食品能够有效降低不科学饮食导致的潜在疾病风险,有效预防慢性疾病发展和控制亚健康人群数量增长,有效提高全社会的健康水平。《国民营养计划(2017—2030)》和《“健康中国”2030 规划纲要》两个纲领性文件提倡补充植物蛋白,并计划至 2030 年将居民的肉食量降低 50%^[2]。全面开发利用植物蛋白,生产绿色、环保、节能、安全、营养、健康的植物蛋白肉,是未来食品发展的重要方向。

植物蛋白肉是以植物蛋白为基料,通过一定的技术手段制备具有动物肉纤维结构、质构、颜

色、风味、口感和外观的仿生肉制品。植物肉基质的组成、成分种类和含水量会对最终产品的质地和口感产生重要影响。基于干法(水分含量<40%)挤压膨化组织化大豆蛋白制备的第 1 代植物肉虽然是市售主流产品,但是存在组织化程度低,咀嚼性差,缺乏肌肉纤维的质地与口感等问题。基于湿法(水分含量>40%)挤压植物蛋白重组技术(图 1a)生产的高水分组织化大豆蛋白的纤维化程度较高,富有弹性和韧性,无需复水即可直接食用,与动物肉具有相似的结构(图 1b),被誉为新一代“素肉”制品,在替代传统组织化大豆蛋白方面具有广阔的市场前景^[3]。然而,在高水分组织化大豆蛋白的创新研究方面,美国、日本等发达国家处于领先地位,我国因挤压设备受限尚处于起步阶段。同时,由于挤压机的黑箱特性,挤压工艺条件的复杂多变性以及物料在挤压机内化学反应的复杂性等原因,挤压过程中蛋白组织化结构形成的分子机制尚不明确,纤维状结构等品质无法有效调控^[4]。鉴于此,开展高湿挤压植物蛋白组织化特性及品质调控研究,对于提升我国食品挤压技术水平,赶超世界发达国家植物基食品产业具有重要意义。

物料性质及组成对挤压产品组织化特性的影响显著且复杂。市售组织化蛋白基植物肉的配方主要包括 6 种成分(表 1):水、蛋白质、调味剂、脂肪、黏合剂和着色剂^[5]。其中水占总成分的 50%~80%,在植物肉制品加工过程中具有增塑、提供多

收稿日期:2022-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(31901641,31972023)

作者简介:方亚鹏(1977—),男,博士,教授

通信作者:孙翠霞 E-mail: cxsunphd@sjtu.edu.cn

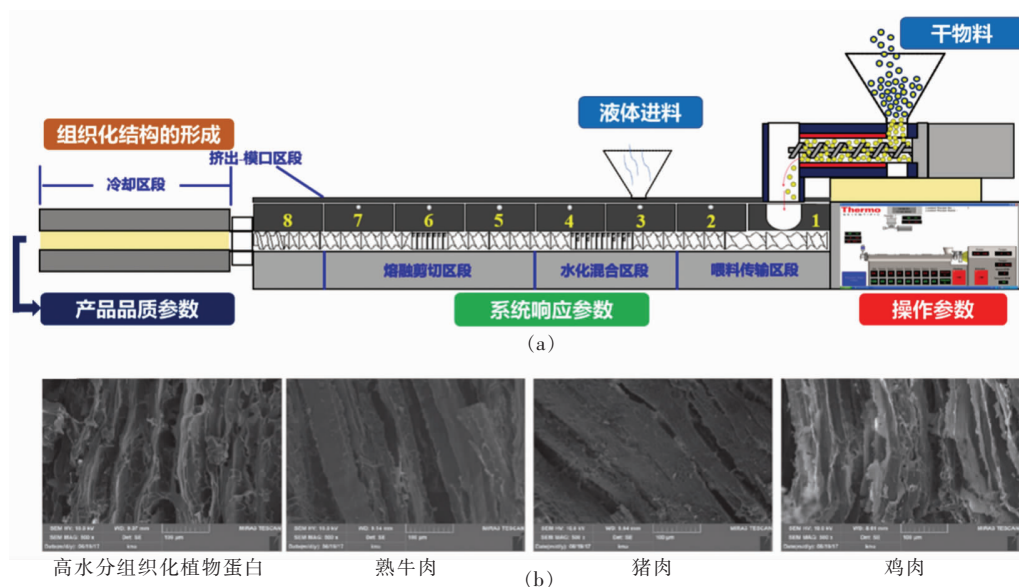


图1 双螺杆高湿挤压原理示意图(a)及高水分组织化植物蛋白与熟牛肉、猪肉、鸡肉的微观结构图(b)^[9]

Fig.1 Scheme diagram of a twin-screw extruder for high-moisture extrusion (a) and scanning electron micrographs of texturized plant protein and cooked beef, pork and chicken (b)^[9]

汁性的作用。由于蛋白质和多糖等食品胶体在产品识别和差异化中起着至关重要的作用，而脂肪类物质是改善风味、质地、口感和营养方面的关键因素，因此，本文重点介绍蛋白质、多糖等食品胶体及脂肪模拟物在植物肉中的应用研究进展。主

要包括3个方面：1)蛋白质的种类、功能及高水分组织化蛋白纤维结构的形成机制；2)多糖的种类、结构及功能对高湿挤压植物肉宏、微观结构与质构的影响；3)基于食品胶体的脂肪模拟物的开发及在植物肉中的应用。

表1 市售植物蛋白基素肉产品的主要原料组成^[5]

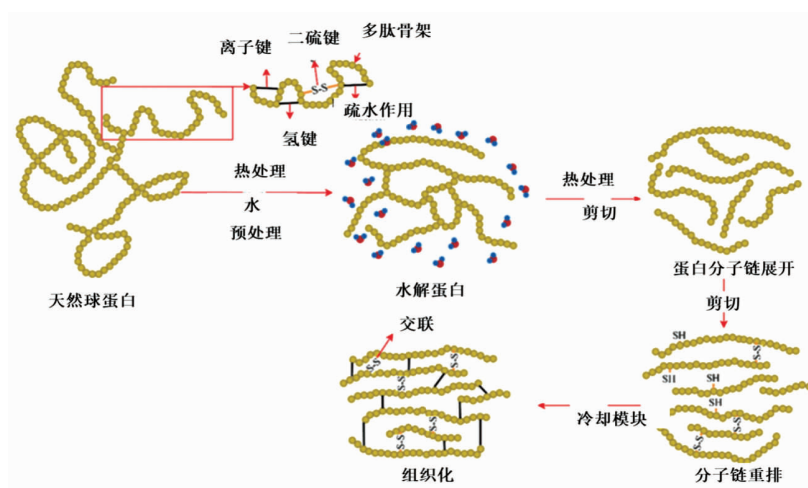
Table 1 The main components of commercial plant protein meat analogues^[5]

组分	功能	含量/%
水	乳化、多汁性、降低成本	50~80
组织化植物蛋白	结合水、质构/口感、蛋白质强化/营养	10~25
非组织化植物蛋白	结合水、乳化、质构/口感、蛋白质强化/营养	4~20
风味调料/香料	肉类风味、口味增强(盐)、掩饰豆腥味	3~10
脂肪/油	风味、质构/口感、多汁、美拉德反应	0~15
黏结剂	质构、结合水、结合蛋白质、提供膳食纤维	1~5
着色剂	外观、色泽、提高产品吸引力	0~0.5

1 蛋白质

植物蛋白主要由球状蛋白组成，维持其高级空间结构的作用力主要是非共价键或次级键等弱相互作用^[6]。挤压蒸煮过程中，在温度场、剪切场、压力场和水的综合作用下(图2)，天然球蛋白高级结构被破坏，蛋白质发生变性和结构重组，形成类似动物肌肉纤维的织态结构^[7]。蛋白质的组织化

过程主要涉及维持蛋白质高级结构较弱的相互作用力的改变，以及蛋白质构象在挤压过程中的变化情况。因不同的蛋白质具有不同的结构，故乳化、发泡、风味结合、黏弹性、凝胶和组织化特性等具有一定的差异。几乎所有的植物蛋白都可以作为制备植物基人造肉的原料，如豆类蛋白质、谷类蛋白质和薯类蛋白质是生产植物肉的大宗原料。

图 2 高湿挤压过程中蛋白组织化机理图^[7]Fig.2 Mechanism of texturization of protein in high-moisture extrusion^[7]

1.1 豆类蛋白质

基于原料产量、价格和功能特性的综合分析,大豆分离蛋白(Soy protein isolate, SPI)、大豆浓缩蛋白(Soy protein concentrate, SPC)和豌豆分离蛋白(Pea protein isolate, PPI)由于价格较低且具有较好的乳化性、凝胶性、持水性和脂肪结合特性,因此普遍应用于市售植物肉产品中^[8]。尽管高蛋白质纯度与植物肉的质地和外观没有正相关关系,SPI还是凭借其蛋白含量在90%以上,豆腥味较弱,颜色较浅的特点,最常用于高湿挤压植物蛋白肉的研究^[9]。SPI在含水量50%,挤压蒸煮温度124℃时可形成肉眼可见的纤维结构,且X-射线扫描结果证实各向异性结构的形成^[10]。样品中的干物质含量也影响组织化蛋白结构的形成。研究表明,35% SPC形成黏性和柔性凝胶,随着SPC含量的增加,凝胶转变为层状结构(40%)、层状和纤维(45%)以及较短、薄的纤维结构(50%)^[11]。此外,大豆蛋白是一种非常接近动物蛋白质量的植物蛋白。蛋白质质量通常是根据蛋白质消化率校正的氨基酸评分(PDCAAS)来定义,PDCAAS是衡量其必需氨基酸组成和消化率的指标。较高的PDCAAS意味着较高的蛋白质量,其中1.00是最高分。对于大豆浓缩蛋白,公布的PDCAAS为0.95,而来自母牛的常规碎牛肉的PDCAAS为0.92,可见大豆蛋白营养价值之高^[12]。然而,大豆蛋白具有抗营养因子和潜在过敏性,且有的大豆蛋白基素肉产品因转基因问题而带来诸多食品安全方面的困扰。

豌豆蛋白是豌豆淀粉加工成豌豆粉丝产生的副产物中的主要成分。豌豆蛋白的PDCAAS为0.893,其中必需氨基酸配比贴近人体需求,并且赖氨酸的含量尤其丰富。豌豆蛋白是支链氨基酸(BCAA)的主要植物来源,含量高达18.1%。支链氨基酸构成约三分之一的骨骼肌蛋白,补充支链氨基酸可以抑制骨骼肌蛋白质的降解,缓解剧烈运动后迟发性肌肉酸痛,促进肌肉恢复^[13]。豌豆蛋白致敏性低,营养价值较高,乳化性和泡沫稳定性强,已成为主流的植物肉蛋白原料。然而,豌豆蛋白凝胶能力较弱,制备的植物肉口感较软,弹性较差。为了改善豌豆蛋白的凝胶特性,在体系中常添加不同种类的盐(NaSCN, Na₂SO₄, CH₃COONa, NaCl),通过促进豌豆蛋白分子间形成更多的氢键以提升凝胶强度^[14]。研究指出高湿挤压的豌豆蛋白结构受机筒温度的影响最大,而非豌豆蛋白颗粒大小,更高的温度改变了熔化物从层流到湍流的流动剖面,发生了从平行到抛物线似纤维结构的转变^[15]。

此外,目前用于高湿挤压的豆类蛋白还包括羽扇豆、蚕豆、绿豆、鹰嘴豆等。因绿豆蛋白具有良好的胶凝能力,有助于颗粒结合和增强持水性,故常和大豆蛋白、豌豆蛋白复配使用以改善植物肉的质构,增强咀嚼性^[16]。通过调控水分、温度、螺杆转速等参数,发现挤压温度155℃、50%含水量的羽扇豆蛋白挤压物组织化结构较好,挤压特性和大豆蛋白类似^[17]。蚕豆蛋白高湿挤压也能形成纤维化结构,尤其在挤压温度140℃、水分含量54%

或 130 °C、水分含量 50%时组织化特性最好^[18]。与市售蛋白原料相比,由于组织化植物蛋白(Textured vegetable protein, TVP)具有植物肉所需的质地、

口感和外观,因此在制备植物蛋白素肉产品时常将蛋白原料和组织化蛋白混合使用^[19]。

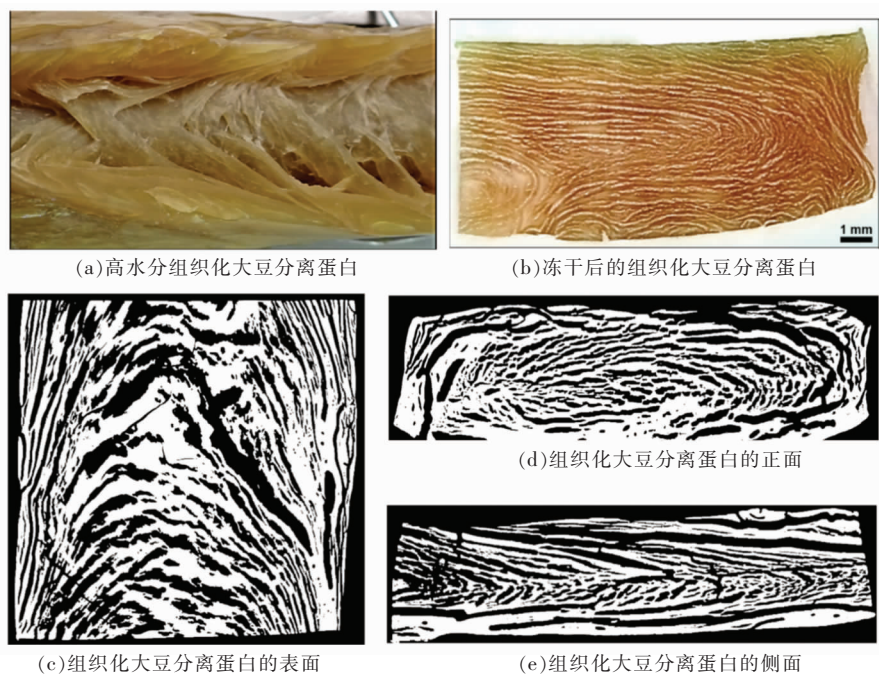


图3 高水分组织化大豆分离蛋白干燥前(a)和干燥后(b)的宏观结构及其表面(c)、正面(d)及侧面(e)的X-射线扫描图示^[10]

Fig.3 Macrostructure of high-moisture textured soybean protein isolate before (a) and after drying (b) and its surface (c), front (d) and side (e) X-ray scans^[10]

1.2 谷类蛋白质

谷物是最重要的粮食作物,常用作种子(大米、大麦、燕麦和玉米)和面粉(小麦、黑麦和玉米)。小麦蛋白(Wheat gluten, WG)是小麦粉湿法处理中重要的经济副产品,主要由麦醇溶蛋白和麦谷蛋白组成。小麦蛋白具有黏弹性、黏结能力、面团形成能力和发酵能力,是一种很有发展前景的黏结材料,可以用作肉饼的增稠剂,也可作为香肠制品的黏合剂,还可黏合大块食品制作重组食品^[20]。在家禽肉卷中,小麦蛋白的结合能力可以减少加工和制备过程中的烹饪损失,改善切片特性^[19]。发生水合作用的小麦蛋白可被挤压、编织或纺织成纤维状来生产各种仿生肉制品。高湿挤压过程中,小麦蛋白聚合导致谷蛋白之间以及谷蛋白和醇溶蛋白之间形成二硫键,通过分子内二硫键连接形成三维网络结构^[21],因此,WG与豆类蛋白质混合使用可提升组织化蛋白的纤维质感,增强弹性和韧性。研究表明,在SPC体系中,由30% WG

和50% WG组成的组织化蛋白呈现出纤维结构,其中较长纤维与较短的纤维相互连接,说明WG提高了植物肉中二硫键的含量,在形成纤维结构方面发挥了重要作用^[22]。在PPI体系中,剪切温度120 °C时,19.5%的WG可形成明显的纤维结构。在SPI体系中,当挤压温度180 °C,水分含量60%时,由35%的WG制备的组织化蛋白具有高度有序的纤维结构^[23]。

大米蛋白,根据其溶解性以及生化特性可以分为4类:清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白,其中谷蛋白还有通过二硫键连接的亚基,应用在植物肉中具有改善质构的作用^[24]。谷物蛋白具有高含量的半胱氨酸和蛋氨酸,而赖氨酸为第一限制性氨基酸。大米中赖氨酸含量较高,远高于小麦蛋白(2.3 g/16 g N)以及玉米蛋白(2.5 g/16 g N)的含量。大米蛋白的生物效价高达77,是一种优质的植物蛋白,与牛肉(77)和鱼类(76)的数值相似。为了解决豆类蛋白质氨基酸组成不均衡的问题,常

添加大米蛋白。除小麦和大米蛋白,还有玉米、大麦、燕麦、高粱蛋白。这些蛋白都可以用于组织化

蛋白的生产,然而,考虑到经济效益,不适宜量产。

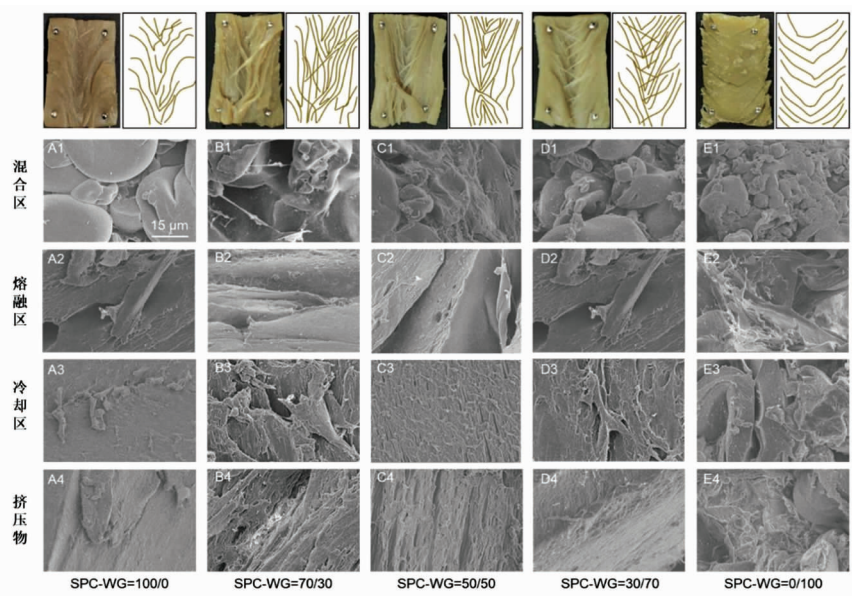


图 4 大豆浓缩蛋白与小麦蛋白不同质量比混合的高水分挤压物在不同区段的宏观与微观图示^[22]

Fig.4 Visual and SEM images of soy protein concentrate and wheat gluten mixtures with different mass ratios collected from different zones and extrudate^[22]

1.3 薯类及其它类蛋白质

虽然马铃薯块茎中蛋白质含量不高 (2.3%), 但是马铃薯蛋白营养价值较高, 含丰富的赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸和色氨酸, 生物效价约是 80, 明显高于 FAO/WHO 的标准蛋白。马铃薯糖蛋白是马铃薯蛋白的主要组成部分, 具有较好的溶解度、乳化性、起泡性及凝胶性^[25]。薯类蛋白除常用于补充豆类蛋白质以改善质地外, 还可从油菜籽、棉籽、花生、葵花籽、芝麻、红花、亚麻籽等油料作物中提取植物蛋白用作植物蛋白肉的原料^[26]。花生在我国主要用于提炼油, 剩余的豆粕中有丰富的蛋白质, 含量超 50%(干基)。花生蛋白 (Peanut protein, PP) 的开发具有较高的经济价值。当使用转谷氨酰胺酶诱导花生蛋白构象改变时, 0.1% 和 0.2% 的添加量效果较好^[27]。与卡拉胶共混能明显提升抗拉伸能力, 与海藻酸钠共混利于纤维取向, 与小麦淀粉共混形成的凝胶结构较脆弱; 当 PP/SPI/WG 混合质量比为 8:1:1 时, 挤出物纤维结构丰富, 硬度低, 弹性高^[28]。

2 碳水化合物

盐溶肌纤维蛋白在加工肉类的纹理形成和水固定中起主导作用。在植物蛋白基素肉产品中, 碳水化合物通常作为黏合剂和结构助剂用于改善纹理度, 增加植物肉的持水性, 改善产品质地。碳水化合物可以分为 2 大类: 第 1 类是多糖及其衍生物胶体, 第 2 类是可消化淀粉。

2.1 多糖类胶体及其衍生物

多糖类胶体可从海藻 (如卡拉胶和海藻素)、树木 (阿拉伯胶) 中提取, 或通过微生物发酵产生 (黄原胶)。由于具有多元醇 (OH 基团) 结构, 通常带有负电荷基团 (硫和羧基), 能够通过氢键和离子-偶极子相互作用强结合水, 从而提高植物肉的厚度和稠度, 减少烹饪损失。

卡拉胶是一类从红藻中提取的硫酸化阴离子多糖。根据半乳糖/脱水半乳糖链上硫酸盐基团的数量和位置主要分为 3 大类: κ 型、 λ 型和 ι 型。其中 κ 型-卡拉胶在每个二糖的重复单元含有一个硫酸基, 而 ι 型和 λ 型分别含有 2 个和 3 个硫酸基^[29]。在一定条件下, κ 型-卡拉胶和 ι 型-卡拉胶

因加热引起分子内的闭环作用形成“双螺旋结构”能够形成热可逆凝胶,故对挤压物质构调控具有重要作用。除了卡拉胶的类型,添加量也对组织化蛋白的结构产生重要影响。在较低的卡拉胶添加量(小于1%)下,随着卡拉胶添加量的增加,高湿挤压花生蛋白的组织化度呈先增加后降低的趋势,且在添加量0.1%时纤维化结构最显著(图5a),同时硬度和咀嚼度降低^[30]。在中等添加量(1%~3%)时,卡拉胶在一定程度上降低SPI挤压物的硬度、内聚性和黏性,对弹性无显著影响,如添加1.5% ι -卡拉胶,可促进高水分挤压大豆浓缩蛋白纤维化结构的形成(图5b)^[31]。在较高添加量(3%~7%)时, ι -卡拉胶(6%)在SPC挤出物中形成了更

紧凑的网络结构(图5c),增加了纤维化程度,提高了复水率和消化率,其中二硫键和氢键是维持组织化结构的主要作用力^[32]。

许多植物肉制品中含有甲基纤维素,它是一种改性膳食纤维,在动物肉中具有增强乳化的效果,在植物肉中加入适量的甲基纤维素可发挥黏结剂的作用^[33]。从营养角度来看,甲基纤维素在胃肠道中可产生一种黏稠溶液,与其它膳食纤维一样,对葡萄糖代谢有作用。添加瓜尔胶可进一步提高SPI挤压样品的硬度、弹性、内聚性和黏性^[34]。果胶分布在SPI的连续相中,当果胶浓度和剪切温度升高时,果胶纤维长度增加,各向异性增加^[35]。

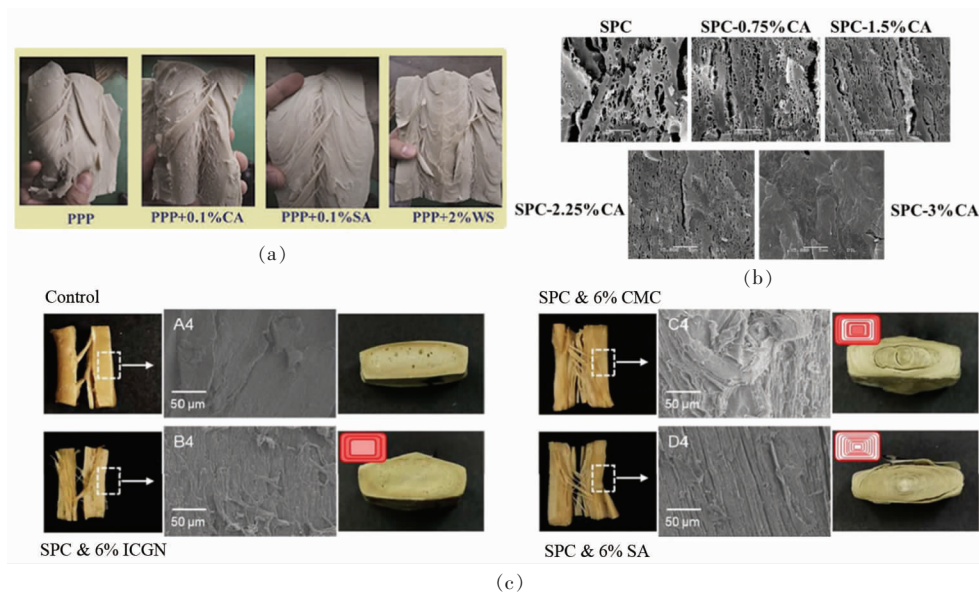


图5 不同添加量的卡拉胶对高水分花生蛋白^[30](a)和大豆浓缩蛋白(b和c)纤维化结构的影响^[31-32]

Fig.5 The effects of carrageenan addition amount with different levels on the fibrous structure of high-moisture peanut protein^[30] (a) and soy protein concentrate (b and c) ^[31-32]

2.2 淀粉

淀粉作为一类高分子碳水化合物,可分为直链淀粉和支链淀粉,遇水经糊化和老化可形成凝胶。由于具有价格低、可再生、生物降解快等优点,因此常作为增稠剂和稳定剂被广泛用于肉制品加工中。植物肉产品中,除蛋白质外,淀粉是主要的组分,通过与水结合并固定脂肪,改善流变性、质地和稠度,减少水分析出,并使油乳化。在高湿挤压过程中,2%小麦淀粉通过破坏分子内二硫键,增强疏水相互作用和增加表观黏度来稳定新形成

的构象,从而促进蛋白质分子的聚集,提升花生蛋白挤压物的组织化度^[30]。通过控制直链淀粉/支链淀粉的比例,可以调控豌豆蛋白的流变特性,支链淀粉的添加有助于豌豆蛋白挤压物各向异性结构的形成,同时豌豆蛋白挤压物的消化性也受到影响^[36]。微观结构表征证明,将豌豆淀粉和豌豆蛋白混合挤压,蛋白聚集体分散在淀粉基质中,挤压物较脆,说明两者的界面吸附特性较差^[37]。高支链蜡质玉米淀粉与豌豆分离蛋白可形成具有黏弹性的非冷致面团,具有协同增稠的作用^[38]。

3 脂肪模拟物

动物脂肪是肉类风味、质地、多汁性和口感的主要因素。天然脂肪是混合甘油酯的混合物,多为饱和脂肪酸。脂肪的熔点随着其中脂肪酸碳链的增长和饱和度的增大而增高。猪肉脂肪熔点约为 28~48 °C,牛肉脂肪熔点为 40~50 °C。日常看到的动物脂肪均是固体,而植物脂肪中多为不饱和脂肪酸,沸点较低,常温为液态。为了模拟动物脂肪,主要选用熔点高的椰子油(24 °C)、棕榈油(最高可达 58 °C)用作植物脂肪^[39]。为了开发类似动物脂肪的质地和口感,从热带水果中提取的固体脂肪,如椰子和可可豆,与含有更多不饱和脂肪酸的液体油,如葵花籽油和菜籽油混合。为了让植物汉堡和香肠看起来像普通绞碎的牛肉和猪肉香肠肉饼那样有大理石花纹,饱和及不饱和油的混合物被搅成白色脂肪小球。为了保证营养和风味,会添加香油和牛油果油。

研究表明,在 pH 3,大豆蛋白-卡拉胶溶液质量分数 1%,复合比例 15:1,不含盐离子时,可通过静电作用形成均一、稳定的复合物,平均粒径 500 nm 左右。以该复合物为稳定剂制备油相为 60%的乳液,将乳液通过 60 °C 烘箱干燥去除水相后制备油凝胶,可用于脂肪替代^[40]。除了卡拉胶,魔芋胶也可发挥脂肪替代的作用。SPI 和椰子油混

合形成乳液,把魔芋胶粉加入形成的乳液中,再把木薯淀粉和 TG 酶溶液与上述乳液混合均匀,最后置于 50 °C 水浴锅中 30 min 形成乳液凝胶,将得到的乳液凝胶真空脱气 30 s,95 °C 烘焙 60 min,即可得到脂肪模拟物。通过微观结构解析可以发现,淀粉和 TG 酶的添加有助于乳液凝胶网络结构的形成。通过模拟脂肪和猪肉脂肪的宏观、微观结构,结合感官评价及质构测定及相关性分析,结果表明:SIK4(1% SPI+4%魔芋胶)口感评分最高,S5K6(5% SPI+6%魔芋胶)与猪肉脂肪的质地最相似^[41]。除了卡拉胶、魔芋胶外,可得然胶(Curdlan, CL)和大豆蛋白复合制备的乳液凝胶也可以制备脂肪替代物(图 6)。用大豆蛋白(1%~5%)制备乳液(0~20%),然后加入可得然胶(4%~7%),经 90 °C 热处理 1 h 制备乳液凝胶,干燥后得到脂肪替代物。根据加热温度,可得然胶可形成 2 种类型的凝胶:热可逆低凝固凝胶(~55 °C)和热不可逆高凝固凝胶(~80 °C)。可得然胶的热凝胶形成特性与构象转变密切相关。SPI/可得然胶复合物制备的乳液凝胶的凝胶行为以可得然胶的热凝胶性能为主。通过凝胶强度、质构和色泽表征发现,含油量为 10%的乳液凝胶在质地和颜色上最接近脂肪,可用作脂肪替代物制备植物基低脂肉制品^[42]。

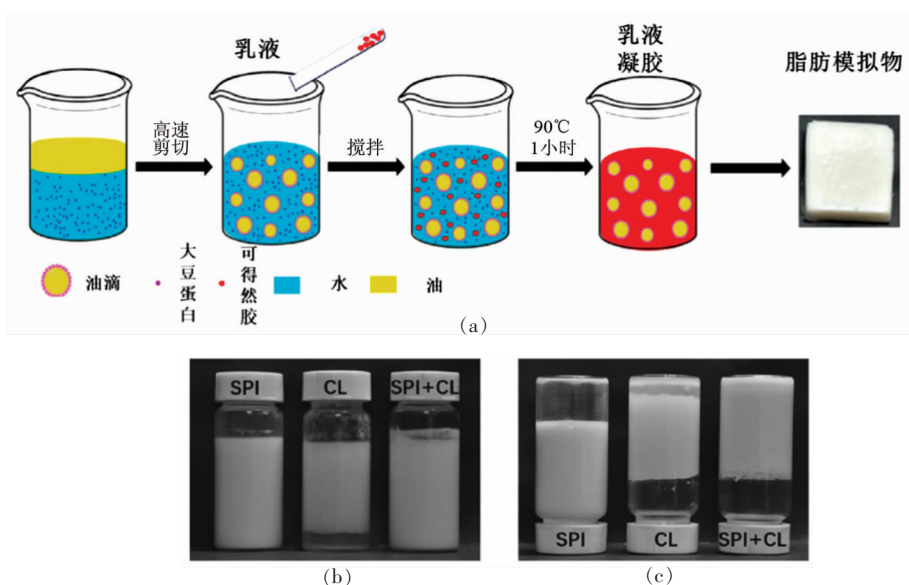


图 6 可得然胶-大豆蛋白复合物制备的乳液凝胶用于脂肪模拟^[42]

Fig.6 Soybean protein isolate/curdlan complexes-based emulsion gel for fat mimics^[42]

4 总结与展望

大豆蛋白等常用的植物蛋白含致敏原, 营养品质低于动物蛋白, 过度依赖进口, 且面临转基因带来的食品安全问题。豌豆蛋白凝胶强度较弱, 以其为基料制备的仿生肉制品很难与动物源牛肉和猪肉制品媲美。深度挖掘我国特色豆类蛋白, 是丰富植物蛋白来源, 解决仿生肉原料单一问题, 缓解我国长期依赖进口大豆的现状, 实现仿生肉制品结构与营养品质创新提升的有效途径。

我国植物性食品产业处于初期模仿和升级阶段。目前, 市售植物基仿生肉产品技术含量较低, 技术水平落后于国际水平, 仅在一定程度上模仿肉制品味道或外形, 实际口感与肉制品相比有较大差距。如何制备与动物源肉制品具有相似的色泽、质地、风味和口感的仿生肉制品, 是亟需解决的行业卡脖子问题。植物蛋白肉在组分优化、质构改良和风味提升方面的突破, 是未来植物基食品面临的关键技术问题。

此外, 植物蛋白高湿挤压组织化特性的表征指标、测定手段和方法不够完善和科学, 需建立和完善植物蛋白基仿生肉产业的监管体系和法律法规, 对植物蛋白基仿生肉生产全过程实施监管, 在产品安全性和营养成分评价方面形成一整套独立的标准体系和客观的监管体系, 促进植物蛋白基仿生肉产业的良性发展。

参 考 文 献

- [1] SUN C X, GE J, HE J, et al. Processing, quality, safety, and acceptance of meat analogue products[J]. *Engineering*, 2021, 7(5): 674-678.
- [2] MILMAN O, LEAVENWORTH S. China's plan to cut meat consumption by 50% cheered by climate campaigners[J]. *The Guardian*, 2016, 20: 1-2.
- [3] SAMARD S, RYU G H. A comparison of physico-chemical characteristics, texture, and structure of meat analogue and meats[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2708-2715.
- [4] 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 Technology*, 2018, 18(7): 1-9.
- [5] EGBERT R, BORDERS C. Achieving success with meat analogs[J]. *Food Technology*, 2006, 60(1): 28-34.
- [6] RENKERMA J M S. Relations between rheological properties and network structure of soy protein gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18(1): 39-47.
- [7] VATANSEVER S, TULBEK M C, RIAZ M N. Low- and high-moisture extrusion of pulse proteins as plant-based meat ingredients: A review[J]. *Cereal Foods World*, 2020, 65(4): 12-14.
- [8] 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]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 251: 11-18.
- [9] GEERTS M E J, DEKKERS B L, VAN DER PADT A, et al. Aqueous fractionation processes of soy protein for fibrous structure formation[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 45: 313-319.
- [10] 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): 102.
- [11] GRABOWSKA K J, ZHU S, DEKKERS B L, et al. Shear-induced structuring as a tool to make anisotropic materials using soy protein concentrate[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 188: 77-86.
- [12] HUGHES G J, RYAN D J, MUKHERJEA R, et al. Protein digestibility-corrected amino acid scores (PDCAAS) for soy protein isolates and concentrate: Criteria for evaluation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(23): 12707-12712.
- [13] BABAULT N, PAÏZIS C, DELEY G, et al. Pea proteins oral supplementation promotes muscle thickness gains during resistance training: A double-blind, randomized, placebo-controlled clinical trial vs. whey protein[J]. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2015, 12(1): 3.
- [14] 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 Hydrocolloids*, 2012, 28(2): 325-332.
- [15] OSEN R, TOELSTEDE S, WILD F, et al. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 127: 67-74.
- [16] BRANCH S, MARIA S. Evaluation of the functional properties of mung bean protein isolate for development of textured vegetable protein[J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(4): 1595-1605.
- [17] PALANISAMY M, FRANKE K, BERGER R G, et al. High moisture extrusion of lupin protein: Influence of extrusion parameters on extruder responses and product properties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(5): 2175-2185.
- [18] CARMO C S D, KNUTSEN S H, MALIZIA G, et al. Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100014.
- [19] MALAV O P, TALUKDER S, GOKULAKRISHNAN P, et al. Meat analog: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(9): 1241-1245.
- [20] NAWROCKA A, SZYMAŃSKA-CHARGOT M, MIŚ A, et al. Aggregation of gluten proteins in model dough after fibre polysaccharide addition[J]. *Food Chemistry*, 2017, 231: 51-60.
- [20] PIETSCH V L, EMIN M A, SCHUCHMANN H P. Process conditions influencing wheat gluten polymerization during high moisture extrusion of meat analog products[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 198: 28-35.
- [21] 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]. *Food Structure*, 2019, 19: 100102.
- [22] ZHANG X, ZHAO Y, ZHANG T Y, 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: 113561.
- [23] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, et al. Composition and protein profile analysis of rice protein ingredients[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2017, 59: 18-26.
- [24] LEE J S, OH H, CHOI I, et al. Physico-chemical characteristics of rice protein-based novel textured vegetable proteins as meat analogues produced by low-moisture extrusion cooking technology[J]. *LWT*, 2022, 157: 113056.
- [25] HUSSAIN M, QAYUM A, ZHANG X X, et al. Potato protein: An emerging source of high quality and allergy free protein, and its possible future based products [J]. *Food Research International*, 2021, 148(4/5): 110583.
- [26] JOSHI V K, KUMAR S. Meat Analogues: Plant based alternatives to meat products - A review[J]. *International Journal of Food and Fermentation Technology*, 2015, 5(2): 107-119.
- [27] ZHANG J C, CHEN Q L, LIU L, et al. High-moisture extrusion process of transglutaminase-modified peanut protein: Effect of transglutaminase on the mechanics of the process forming a fibrous structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106346.
- [28] ZHANG J C, LIU L, ZHU S, et al. Texturisation behaviour of peanut-soy bean/wheat protein mixtures during high moisture extrusion cooking[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(11): 2535-2541.
- [29] DE RUITER G A, RUDOLPH B. Carrageenan biotechnology[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1997, 8(12): 389-395.
- [30] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, 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]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105311.
- [31] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues [J]. *LWT*, 2018, 87: 546-552.
- [32] 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: 111189.
- [33] SCHUH V, ALLARD K, HERRMANN K, et al. Impact of carboxymethyl cellulose (CMC) and microcrystalline cellulose (MCC) on functional character-

- istics of emulsified sausages[J]. *Meat Science*, 2013, 93(2): 240–247.
- [34] NANTA P, SKOLPAP W, KASEMWONG K. Influence of hydrocolloids on the rheological and textural attributes of a gluten-free meat analog based on soy protein isolate [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): e15244.
- [35] DEKKERS B L, HAMOEN R, BOOM R M, et al. Understanding fiber formation in a concentrated soy protein isolate-pectin blend[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 222: 84–92.
- [36] CHEN Q L, ZHANG J C, ZHANG Y J, et al. Rheological properties of pea protein isolate-amylose/ amylopectin mixtures and the application in the high-moisture extruded meat substitutes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106732.
- [37] JEBALIA I, MAIGRET J E, RÉGUERRE A L, et al. Morphology and mechanical behaviour of pea-based starch-protein composites obtained by extrusion[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115086.
- [38] DOBSON S, LAREDO T, MARANGONI A G. Particle filled protein-starch composites as the basis for plant-based meat analogues[J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 892–903.
- [39] 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.
- [40] TAVERNIER I, PATEL A R, VAN DER MEEREN P, et al. Emulsion-templated liquid oil structuring with soy protein and soy protein: κ -Carrageenan complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 65: 107–120.
- [41] RAN X L, LOU X W, ZHENG H Q, et al. Improving the texture and rheological qualities of a plant-based fishball analogue by using konjac glucomannan to enhance crosslinks with soy protein[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 75: 102910.
- [42] CUI B, MAO Y Y, LIANG H S, et al. Properties of soybean protein isolate/curdlan based emulsion gel for fat analogue: Comparison with pork backfat[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 206: 481–488.

Studies on the Application of Food Colloids in Plant Protein Meat Analogues

Fang Yapeng, Zhao Yiguo, Lu Wei, Li Xiaoyang, Sun Cuixia*

(*School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240*)

Abstract Human beings are facing the challenge of supplying sufficient proteins in relation to the rapid world population growth, and the increased environmental pressure. The cultured meat takes a high cost, and its production is still in the laboratory scale. The development of plant-based meat products is a key direction in the food industry. The plant-based meat products prepared based on dry extruded protein show the poor texture and taste, have high salt content and lack of green label. The textured vegetable proteins (TVP) prepared by the high-moisture extrusion (HME) are becoming ideal substitutes for animal proteins due to their similar texture and taste of muscle fibers. This paper focused on high-moisture extruded plant-based meat analogues, mainly clarified the application of food colloids such as protein and polysaccharides in plant meat analogues. The development of fat mimics and their potential application in plant meat analogues were also described. In addition, the key technical challenges faced by the plant meat industry are summarized, and the development prospects of plant meat analogues were proposed.

Keywords food colloids; high-moisture extrusion; plant protein meat analogues; fat mimics