

植物蛋白基仿生肉研究进展

赵新月¹, 张毓玲¹, 朱梦佳¹, 高春昊¹, 任广利², 高翔^{1*}

(¹ 青岛大学生命科学学院 山东青岛 266071

² 山东宏仔生物科技有限公司 山东枣庄 277200)

摘要 植物蛋白基仿生肉,简称植物蛋白肉,是植物蛋白的新兴利用途径之一。近年来,在价格、产品品质、环境保护、营养健康等多重因素的作用下,植物蛋白肉愈加受到消费者及食品研究人员的关注,开发利用潜力巨大。本文总结植物蛋白肉的主要组成成分及其在产品品质中的作用,概述植物蛋白肉的加工技术以及在风味、质构、色泽、营养健康方面的研究现状和评价方法,以期对我国植物蛋白肉及相关领域研究提供参考。

关键词 植物蛋白; 仿生肉; 加工技术; 风味; 营养

文章编号 1009-7848(2024)12-0479-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.12.042

植物蛋白基仿生肉 (Plant-Based Meat Analogue, PBMA),简称植物蛋白肉或植物基肉,是以大豆蛋白、小麦蛋白等植物蛋白质为主要原料,辅以黏合剂、油脂、色素、风味剂及其它功能性食品添加剂,通过特定的加工方法制成的与动物肉质构、风味和色泽相近的食品。植物蛋白肉的诞生与植物蛋白制品的发展有着密切的关系。传统植物蛋白制品,如豆腐、小麦面筋 (Seitan) 和利用寡孢根霉菌 (*Rhizopus oligopus*) 发酵生产的丹贝 (Tempeh) 等,对于植物蛋白肉的诞生与发展具有推动作用,奠定了植物蛋白基仿生肉的生产 and 食用基础^[1-3]。随着原料的丰富和加工技术的进步,种类更多样,口感味道与动物肉更接近的新型植物蛋白制品——植物蛋白肉开始占据更多的肉制品市场份额,具有代表性的有素香肠、素肉饼、素肉丸等。

近年来,出于经济、环境保护及健康等原因,植物蛋白肉受到科研工作者、生产商及消费者的关注^[4]。首先,挤压型大豆蛋白肉的价格仅为动物肉的 1/2~1/8,相比于价格高昂的动物肉,植物蛋白肉或许是更经济的选择^[5]。同时,随着世界人口的增长和消费水平的提高,人们对肉类的需求量日益增加,在 20 世纪下半叶,世界人口的肉类需

求增长了 5 倍^[6]。由于生产单位质量的动物蛋白相对植物蛋白需要更多的资源投入,如生产所需的水、土地和能源等^[7-9],因此为满足蛋白质需求量增长而激增的动物肉产量也对环境及自然资源造成巨大的压力。为了保障粮食安全同时兼顾环境保护,植物蛋白肉的推广食用是一个理想的选择。此外,传统肉制品的健康与安全问题也影响消费者对于植物蛋白肉的态度。Larsson 等^[10]认为,每天食用 120 g 红肉或 30 g 加工肉会显著增加患结肠癌的相对风险。心血管疾病和糖尿病的发病也与食用红肉有关^[11]。肉类中发现的食源性病原体,如沙门氏菌、弯曲杆菌和大肠杆菌,在美国每年导致数百万例疾病的发生^[12]。此外,相对动物肉产品,植物蛋白肉能更好地满足动物福利支持者或者素食主义者的需求^[13]。

从 20 世纪中期至今,欧美国家植物蛋白基仿生肉的生产加工已有显著的进步,在口感、口味、营养成分等方面都有很大突破,产业规模也较为可观。2019 年,全球最大的替代蛋白质品牌之一 Beyond Meat,以近 15 亿美元的估值公开上市,该公司主要产品为植物汉堡、植物基鸡肉和植物基香肠。总部位于宾夕法尼亚州的初创公司 Good Catch Foods 则另辟蹊径,致力于开发生产以扁豆、鹰嘴豆、蚕豆和其它豆类为原料基础的素食金枪鱼、蟹饼和鱼饼。法国初创公司 Odentella 以金色奥杜藻 (*Odontella aurita*) 为原料,于 2018 年 4 月推出了第一款纯素食熏制三文鱼产品。2022 年 5 月 10 日,国家发展和改革委员会发布的《“十四

收稿日期: 2023-12-12

基金项目: 山东省高等学校青年创新团队项目(2023KJ233)

第一作者: 赵新月,女,本科

通信作者: 高翔 E-mail: gaoliang@qdu.edu.cn

五”生物经济发展规划》中提出,要发展合成生物学技术,探索研发“人造蛋白”等新型食品,实现食品工业迭代升级,降低传统养殖业带来的环境资源压力。这为国内植物蛋白基仿生肉产业的快速发展提供了政策性支持。可以预见,在技术进步和优惠政策的推动下,我国植物蛋白肉产业将迎来前所未有的发展机遇。本文总结植物蛋白基仿生肉中蛋白质、碳水化合物和油脂等组分的应用及对产品品质的影响,植物蛋白肉加工技术以及在风味、质构、色泽、营养健康方面的研究现状和评价方法,以期对我国植物蛋白肉相关领域的研究提供参考。

1 植物蛋白基仿生肉中各组分及其作用

1.1 蛋白质

蛋白质是植物蛋白基仿生肉中最为重要的组分,不同植物蛋白在溶解性、界面性质(乳化和发泡)、凝胶状况、纹理化、营养和风味结合等方面的差异显著影响着植物蛋白肉的特性。部分用于加工植物蛋白肉的植物蛋白及其结构特点如表1所示。目前,生产植物蛋白基仿生肉常用的植物蛋白有大豆、豌豆、小麦、花生等的蛋白,它们来源广泛,常常是作为油脂、淀粉加工等的副产品^[4]。大豆和豌豆蛋白等球状蛋白经热挤压等方法加工后可形成丝状结构,同时配合具有天然纤维结构的

小麦面筋蛋白或者某些真菌蛋白,可以部分模仿动物肉的纹理与质感,并储存一定量的水分^[5]。球状蛋白也因表面的极性与非极性区域而常常表现出乳化功能,这在一些添加植物蛋白的乳化型香肠中表现尤为显著^[6]。玉米醇溶蛋白等水不溶性蛋白质有助于植物蛋白肉中理想结构特征的形成。Mattice等^[7]利用静电纺丝、抗溶剂沉淀及机械拉伸法生产单条玉米醇溶蛋白纤维或纤维网络,并将其添加到大豆分离蛋白凝胶中以构建植物蛋白肉,发现玉米醇溶蛋白纤维可以改善植物蛋白肉质,同时这一方法在耗能、成本、规模化生产和生产效率方面也具有良好的可行性。另外,由于植物蛋白与周围环境中风味分子之间特定的疏水相互作用与静电相互作用,蛋白质也会影响到产品整体的风味特征,这一点已经在植物蛋白溶液中得到证实^[8-10]。除了上述常用的植物蛋白,一些真菌、微藻、菜籽等其它植物来源的新型蛋白原料也被尝试添加到植物蛋白肉中。Xia等^[20]以不同比例的酵母蛋白和大豆分离蛋白混合物为原料,利用高水分挤压法生产植物蛋白肉,发现酵母蛋白粉含量为40%(干基)时,植物蛋白肉的硬度、耐嚼性和纤维度达到最大值,同时亮度提高。这一团队还将雨生红球藻藻渣添加到豌豆蛋白粉中并生产植物蛋白肉。雨生红球藻藻渣使高水分挤出物具有红肉的色泽,同时也促进了植物蛋白肉中层状

表1 植物蛋白基仿生肉所用的植物蛋白

Table 1 Plant protein used in plant-based meat analogue

蛋白质种类	结构特点	参考文献
大豆蛋白	大豆中90%的蛋白质以贮藏蛋白形式存在,由大豆球蛋白(六聚体,300~380 ku, 11S)和 β -伴球蛋白(糖蛋白,三聚体,150~200 ku,7S)组成	[23]~[25]
豌豆蛋白	贮藏蛋白为清蛋白(albumin)和球蛋白(globulin)。球蛋白主要由 legumin(11S,六聚体,320~380 ku),vicilin(7S,三聚体,170 ku)和 convicilin 组成	[26]~[28]
小麦面筋蛋白	贮藏蛋白为麦醇溶蛋白(gliadin,球状,25~100 ku,具延伸性,弹性小)和麦谷蛋白(glutenin,纤维状,大于100 ku,具弹性,延伸性小)	[29]
花生蛋白	分为清蛋白(水溶性蛋白,2S)和盐溶性蛋白,盐溶性蛋白包括花生球蛋白(14S)和伴花生球蛋白(三聚体,9S)	[30]
玉米醇溶蛋白	蛋白分子呈棒状,长轴比为25:1或10:1,富含 α -螺旋	[31]
大米蛋白	贮藏蛋白为谷蛋白和醇溶蛋白。蛋白中分子结构的亚基相对分子质量分别为38, 25, 16 ku	[32]
藻胆蛋白	根据吸收波长被分为4类:藻红蛋白(PE)、藻红蓝蛋白(PEC)、藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC)。藻胆蛋白属于多亚基蛋白质,基本结构单位是 α (12~20 ku)和 β (15~22 ku)两个亚基。藻红蛋白中还存在着一种特殊的 γ 亚基(30 ku)	[33]

结构和纤维结构的形成,显著改善了挤出物的质地品质^[21]。Zahari 等^[22]以 50:50 的菜籽浓缩蛋白和黄豌豆分离蛋白混合物为原料,利用高水分挤压法制得的植物蛋白肉在氨基酸组成、颜色和质地特性方面具有良好的品质。

1.2 碳水化合物

碳水化合物,如各种单糖、二糖、寡糖和多糖,也是植物蛋白基仿生肉中重要的组成成分。这些组分为植物蛋白肉提供各种功能属性,如提供甜味、促进凝胶形成、乳化、增稠和提高稳定性等^[34]。在动物肉制品中,纹理构建与肉中水分的固定是由肌原纤维蛋白来完成,而在植物蛋白肉中则可以由多糖类碳水化合物部分实现^[34-35]。这些多糖类物质大概可以分为^[14,36-38]:1)来自小麦、大豆、苹果等可食用植物细胞壁的粗纤维;2)可消化淀粉,包括直链淀粉和支链淀粉,如小麦淀粉、玉米淀粉和马铃薯淀粉等;3)多糖胶及其衍生物,如卡拉胶、褐藻胶、阿拉伯胶和黄原胶等。有研究表明,添加大豆纤维(5%~10%)可以提高植物蛋白肉的切割强度以至与鸡胸肉相近,同时使其质地更具方向性和更精细^[39]。此外,这些多糖通常具有富含负电荷基团(含硫基团和羧基)的多元醇结构,故能通过氢键和离子偶极相互作用强烈结合水,加之其可形成毛细管的功能,因而具有优良的保水能力,从而在改善产品厚度、稠度和减少烹饪损失方面发挥重要作用^[36,40-41]。柑橘纤维的高内表面积、保水能力和表观黏度,使其具有与磷酸盐相似的作用,将其代替三聚磷酸钠添加到博洛尼亚香肠中不会显著改变香肠在冷藏过程中的大部分物理、化学或感官特性^[42]。Palanisamy 等^[43]的研究表明,1.5%的 Iota-卡拉胶(ICGN)的加入可以提高大豆浓缩蛋白高水分挤出物的持水能力,同时改善挤出物的组织化度,使挤出物具有较高的感官评分和整体接受度。

1.3 油脂

在肉和肉制品中,动物脂肪是影响风味、质地、多汁性和口感的主要因素。因此,植物蛋白基仿生肉中脂肪的选择与调配也是极为重要的一点^[44]。传统植物蛋白肉的脂质含量较低,而在新型植物蛋白肉中,油菜籽油、椰子油、葵花籽油、玉米油、芝麻油、可可脂等多种植物来源的油脂被广泛

使用^[14,45]。一方面,氢化植物油或者椰子油、棕榈油等含相对较多饱和脂肪酸的固体脂肪可以在热加工时融化成“肉汁”,造就植物肉入口时的多汁与柔润特性^[14];另一方面,固体脂肪可以使混合油脂的结晶特性更接近动物脂肪,从而模拟动物肉的白色脂肪组织,这有助于提高植物蛋白肉的外观品质^[46]。Dreher 等^[47]利用高剪切分散器对菜籽油(部分氢化)与大豆蛋白悬浮液的混合物进行热乳化,冷却后添加转谷氨酰胺酶以诱导蛋白质交联,制作出的乳化交联脂肪晶体网络在流变学特性、熔融及感官特性方面与动物脂肪组织具有很高的相似性。之后作者将大豆蛋白高水分挤出物与通过这一方法制作出的仿制脂肪粉碎后混合,生产出的植物基萨拉米香肠具有白色大理石花纹,在外观方面具有良好的评分^[48]。另外,芝麻油、鳄梨油等植物油对植物蛋白肉的风味和营养也有促进作用^[36]。值得注意的是,使用热挤压法生产植物蛋白肉时,原料中过多的油脂(>5wt%)会造成螺杆与原料间过度的润滑,导致剪切作用的弱化,最终影响植物蛋白肉的纤维形成^[49]。

除了蛋白质、碳水化合物、油脂等主要组成成分,生产高质量的植物蛋白基仿生肉还需要使用各种其它组分,包括色素、酵母抽提物等调味剂,磷酸盐等保水缓冲成分,防腐剂和营养保健成分等^[36]。植物蛋白肉生产所需原辅料及其作用如表 2 所示。

2 植物蛋白基仿生肉加工技术及方法

无论是质地、风味和外观上紧密模拟动物全肌肉的植物蛋白肉,还是模拟加工肉(汉堡肉饼、香肠等)的重组型产品,大多数都以纹理模拟为目标,其中的关键是将球状蛋白经过机械加工转化成纤维状结构^[36]。目前,许多传统及新型加工技术已被开发应用于植物蛋白基仿生肉的生产,如热挤压、高温剪切诱导、纺丝、3D 打印等技术(表 3,图 1)。这一领域的研究工作尚未完善,随着植物蛋白基仿生肉市场的扩大及在研究和开发方面的进步,这方面可能会取得相当大的进展。

2.1 热挤压

目前,热挤压是使用最广泛的纹理化方法,通常以单/双螺杆挤压机完成,具有高生产率、低成

表2 植物蛋白基仿生肉原辅料^[14,35-36,45-46]Table 2 Raw and auxiliary materials in plant-based meat analogue^[14,35-36,45-46]

植物蛋白肉原辅料分类	原料	功能
蛋白质	大豆蛋白、豌豆蛋白、小麦蛋白、花生蛋白、真菌蛋白、微藻蛋白	形成纤维、凝胶,乳化作用
碳水化合物	蔗糖、小麦粉、玉米淀粉、黄原胶、卡拉胶、甲基纤维素	形成凝胶,增稠,保水,乳化
油脂	椰子油、葵花籽油、玉米油、芝麻油、可可脂、磷脂	改善风味与口感,提高营养价值
调味剂	氯化钠、谷氨酸(钠)、核苷酸(钠)、糖或代糖、酱油、醋、乳酸、酵母抽提物、各种香料和草药	改善风味,防腐
着色剂	焦糖色、甜菜提取物、胡萝卜素、番茄红素、豆类血红蛋白	模拟动物肉色泽,改善营养价值
维生素和矿物质	氯化钙、硫酸亚铁、磷酸盐、维生素C、B族维生素	保水,抗氧化,提高营养价值

本、多功能性和高能源效率等优点。该方法的原理是使植物蛋白经水合作用、高温、高压和机械相互作用处理而形成纤维结构^[50-52]。挤出过程大致包括3个主要步骤^[53-55]:首先,含有植物蛋白的原料与水混合均匀;随后,混合物在螺杆挤出机中高温、高压、高剪切力等条件的共同作用下,其中的蛋白质熔融变性并发生定向结合,形成类似纤维状的结构;最后,熔融变性的蛋白质从高温、高压释放到常温、常压的环境中,水分汽化,致使挤压产品的外观和结构发生变化,使得冷却后的产品具有一定的复水性和弹性。热挤压植物蛋白肉产品特性受到原料种类、原料含水量、挤压温度、螺杆转速和加料速度等多种因素的影响^[56-58]。根据物料水分含量的不同,热挤压可分为低水分挤压、中等水分挤压和高水分挤压,用于低水分或高水分状态下植物蛋白肉生产的双螺杆挤压结构如图1中所示^[36,59-61]。低水分挤压(物料水分含量<30%)适用于以浓缩大豆蛋白或豌豆蛋白为原料的组织化植物蛋白(TVP, textured vegetable protein)的制备,再水化后的TVP具有类似肉颗粒的质地,可进一步作为植物蛋白香肠等重组型产品的主要原料^[62]。高水分挤压(也称为湿挤压,物料水分含量50%~70%)适用于以植物蛋白为原料构建肉样纤维结构,相应原料配方也更复杂多样,因此更适用于生产全肌肉型植物基仿制产品如素肉排等^[63-65]。高水分挤压时主要的熟化能是水蒸气冷凝释放的热能,故与低水分挤压相比高水分挤压所需加工温度更低,更为节能环保。另外,高水分挤压技术生产的植物蛋白肉使用前无需复水,且产品组织化程度高,弹性好,质地更接近动物肉制品,营养因子和生理活性因子损失少,可以作为仿制动物肉

产品或其加工原料,经过简单处理后直接食用^[66]。由于高水分挤压技术生产素肉具有较为显著的优势,因而在未来具有巨大的应用潜力。花生蛋白、酵母蛋白、雨生红球藻等多种原料已经被用于高水分挤压法制备植物蛋白肉研究以期获得高品质产品^[20-21,67]。值得注意的是,尽管蛋白质分子经热挤压可以很容易地交联成纤维,但在显微镜下,蛋白质纤维不是定向排列的,在结构上与动物肉中的纤维排布并不相同^[68]。

2.2 湿纺丝和电纺丝

湿纺丝和电纺丝都是利用蛋白质溶液制造纤维的技术^[52]。在湿纺丝的情况下,含有蛋白质的溶液通过喷丝头挤出,然后浸入凝固液中发生沉淀和固化,形成厚度约为20 μm的拉伸细丝,最终经洗涤后收集。湿纺丝的简要生产流程如图1中所示^[69]。Cui等^[69]使用湿纺丝技术制备了基于海藻酸钠/大豆分离蛋白复合物的食用纤维,该纤维模拟了动物肌肉的纤维结构和理化性能,具有良好的保水能力和抗拉强度。然而,由于湿纺丝使用的凝固液和洗涤液中通常含有化学交联剂、有机溶剂等非食用性化学试剂,因而湿纺丝技术在食品安全和环境友好方面表现欠佳^[3]。针对这一问题,静电纺丝是一种优化方案。在静电纺丝时,蛋白质溶液从相对接地电极具有电势的中空针喷出,积聚在喷出液滴表面的电荷会导致液滴表面不稳定而使得蛋白质溶液转变成非常薄的纤维(≈100 nm),最终蛋白质纤维被电势吸引到接地电极。目前,食品级电纺丝主要用于生产生物活性成分(如多酚和益生菌)载体或输送系统所使用的纳米纤维,同时这一技术也在植物蛋白肉纤维生产方面表现出了良好效果^[70-71]。据报道,静电纺丝技术已

经成功将乳清蛋白、大豆蛋白,玉米醇溶蛋白和酪蛋白溶液加工成可食用纤维^[72]。此外,由于需要使用蛋白质溶液作为纺丝液,所以湿纺丝和电纺丝技术对蛋白原料的溶解性要求较高。

2.3 高温剪切诱导

高温剪切诱导是一种制备植物蛋白基仿生肉的新兴技术,目前已达到中试规模。这一技术被开发应用于植物蛋白肉生产是基于流动诱导结构的原理^[73]。高温剪切诱导装置(Couette Cell 装置或 Shear Cell 装置)由两个嵌套锥/圆筒组成,外层锥/圆筒保持固定,内层锥/圆筒可以匀速旋转,两个锥筒之间的空腔保持密封。Couette Cell 剪切诱导

装置结构如图 1 中所示^[74-75],将待加工混合物添加到“剪切区”,即筒间隙,之后确定合适的转速、温度和加工时间等加工参数。在剪切力和热的作用下,植物蛋白质原料会转变为具有均一、分层纤维结构的植物蛋白肉^[73,76]。据报道,高温剪切诱导技术可将豌豆蛋白与小麦面筋蛋白混合物加工为植物蛋白肉,产品具有分层的纤维结构,且强度与煮熟的鸡肉相近^[77]。

2.4 3D 打印技术

新兴的 3D 打印技术(增材制造),近年来也被应用于以植物蛋白为主要原料打印肉样纤维。3D 打印植物蛋白肉主要涉及两个步骤:首先是植物

表 3 植物蛋白基仿生肉加工技术和所用设备^[52,81-82]

Table 3 Processing technologies and corresponding equipment of plant-based meat analogue^[52,81-82]

加工技术	设备类型	优点
热挤压法	单/双螺杆挤压机	高生产率、低成本、应用程度高、节能、有助于抗营养因子的破坏或转化从而提高蛋白质消化率
高温剪切诱导	Couette Cell 装置或 Shear Cell 装置	经济高效、工艺条件温和、加工原理明确
湿纺丝	湿纺丝装置:喷丝头,凝固浴,导丝盘和卷绕装置	可生产特定纤维
电纺丝	静电纺丝装置:喷丝头、高压电源、接收装置	可生产非常薄的纤维
3D 打印	3D 打印装置	能定制质地类似于肌肉纤维的产品、方便控制产品的配方
冷冻结构化	单向冷冻机	可以产生多孔和纤维状的微观结构

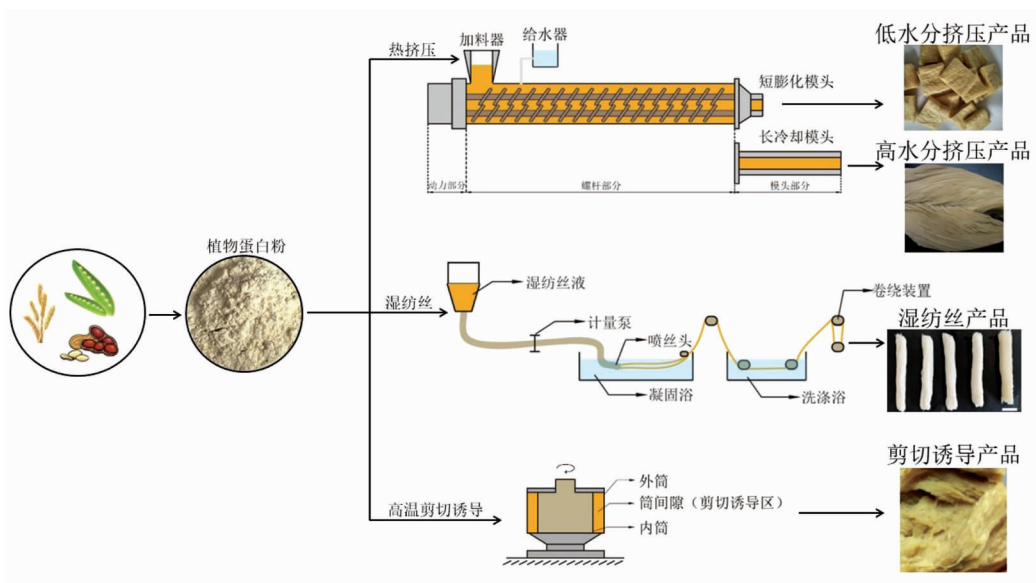


图 1 热挤压、湿纺丝、高温剪切诱导生产植物蛋白肉示意图

Fig.1 Schematic diagram for the production of plant-based meat analogue by extrusion, wet spinning and shear-induced structuring

蛋白粉末与水混合形成糊状物；其次是喷嘴挤出混合物同时以模仿肌肉纤维的方式逐层打印出产品^[78]。目前,大豆、小麦、豌豆、蘑菇等来源的蛋白已被用于3D打印植物蛋白肉的生产^[79]。据报道,2018年,西班牙的NOVAMEAT公司利用3D打印技术生产了以豌豆、海藻为主要原料的素牛排,其纤维直径在100~500 μm之间,且产品口感、味道等感官特性与普通牛排相似。应用3D打印技术生产植物蛋白肉时,转谷氨酰胺酶等添加剂的应用可以使植物蛋白肉具有理想的硬度和流变性^[80]。

3 植物蛋白基仿生肉品质衡量及改善方法

尽管多种原料及加工技术已被用于植物蛋白基仿生肉的生产,但植物蛋白肉的品质相比动物肉及肉制品仍存在不足,最为关键的就是植物蛋白肉与动物肉在风味、口感、外观及营养方面的差距。风味方面,植物肉不仅难以模拟动物肉加工后产生的复杂风味,而且容易产生“豆腥味”等不良风味。口感方面,豆类蛋白质的天然球状结构并不利于构建类似动物肌肉的纤维结构及赋予蛋白质纤维一定的水结合能力,导致产品咀嚼感与多汁程度差^[86]。营养及安全方面,植物蛋白的氨基酸模式往往不如动物蛋白理想,加之植物蛋白肉加工处理时应用的各种强力手段(均质化、高温、挤压等)往往导致营养素损失,这使得植物蛋白肉的营养不易达到动物肉的水平。此外,植物原料中某些抗营养、致敏因子和复杂加工后可能产生的有毒物质和致癌物质也加重了消费者对于植物蛋白肉的顾虑。针对这些问题,国内外研究者在植物蛋白基仿生肉的品质特性原理及改进方面做了大量的工作,并应用多种方式准确评估植物蛋白肉的品质。

3.1 风味改善

风味是食品的重要感官特性之一,而这正是植物蛋白基仿生肉对动物肉模拟的一个主要短板。对于植物蛋白肉来说,其风味改善的关键点有两个:减轻植物原料带来的不良风味;尽可能模仿动物肉的特殊风味。

以植物蛋白肉中常用的大豆蛋白为例,其不良风味一部分是亚油酸和亚麻酸经脂氧合酶过度氧化而产生的豆腥味,另一部分则是异黄酮和皂

苷造成的非挥发性苦涩味^[83]。针对这一问题,主要是从原料入手,通过加热、溶剂萃取、酶分解和基因工程育种等方法降低植物原料中产生不良风味的小分子物质或相关酶的浓度,也可以通过香精香料的合理使用掩盖这些异味^[84]。另外,吸附法是比较新兴的一种方法,Sakai等^[85]将环糊精葡聚糖转移酶(CGT)应用于大豆蛋白基植物肉饼,CGT催化产生的环糊精(CD)不仅能有效吸附各种脂肪醇、脂肪醛和芳香族化合物,显著降低豆腥味相关化合物的挥发量,同时还可以改善肉饼的质地,提高其持水和持油能力。

在动物肉烹调时,其中的风味前体经美拉德反应、脂肪酸氧化、硫胺素热降解等复杂的分解、氧化、还原过程转化为1000多种挥发性化合物,构成熟肉制品独特而复杂的香气^[86]。而植物基原料中风味前体的浓度与动物肉相差甚远,因而需要多种添加剂的辅助以尽可能的模仿动物肉的风味。为提高风味前体的浓度,还原糖、氨基酸、硫胺素、核苷酸等被添加到植物蛋白肉中,以期在加热时能产生熟肉风味^[14]。此外,现阶段许多研究集中于美拉德反应肽(MRPs),这是一种酶解蛋白和还原糖经美拉德反应生成的肽衍生物,它具有多种风味特征,能够模拟特定肉制品的味道和香气,因此MRPs在植物蛋白基仿生肉风味改善方面具有很大的应用潜力^[87]。来自于植物的天然调味剂如水解植物蛋白(HVP)、酵母提取物(YE)和天然香料(如辣椒、大蒜、砂仁、迷迭香多酚、胡椒等)也常用在植物蛋白肉中,以起到掩蔽不良味道和促进风味释放的作用^[88]。藻类和微藻因其特有的海腥味而被用于制作植物基鱼肉和其它植物基海洋产品,某些通过发酵生产的真菌蛋白也能产生类似肉的香气和味道^[89]。在植物蛋白肉的风味品质评价方面,可以使用电子鼻、电子舌和气相色谱-质谱联用技术检测挥发性风味物质的种类和浓度,也可通过味觉及嗅觉评定衡量植物蛋白肉的风味品质。

3.2 质构模拟

植物蛋白基仿生肉的质构主要影响着产品口感,如咀嚼感、黏弹性、汁水(水分或油脂)含量等,是决定植物蛋白肉品质的关键因素之一^[36]。对于植物蛋白肉来说,影响质构的主要因素有:纤维结

构、凝胶状态、液体保持和脂肪情况。目前,以组织化植物蛋白(TVP)为主要原料的重组型植物蛋白肉,如香肠、汉堡肉饼、鸡块等,产品的质构与相应动物肉产品相近^[90]。这一类产品的纤维结构主要通过真菌蛋白等纤维状蛋白或者热挤压、纺丝等加工手段来实现,而合适的凝胶、液体保持和脂肪情况则需要植物多糖胶、磷酸盐和油脂等辅料的参与。此外,由于全肌肉型产品(如牛排、羊腿、鸡胸肉等)的组成和组织结构较为复杂,使用植物基原料和现有加工手段生产的植物蛋白肉的质构与相应动物肉产品差距较大,一些添加剂和加工处理方法的使用可以部分提升质构品质。Jin等^[91]使用转谷氨酰胺酶处理了以腐竹为原料制作的植物基牛肉干,发现转谷氨酰胺酶改善了植物蛋白的交联,使素肉干具有了更柔软的质地和与牛肉干相似的嚼劲。窦薇等^[92]发现在大豆浓缩蛋白挤出物中添加6%的海藻酸钠,制备出的植物蛋白肉组织化程度高,蒸煮效果较好,咀嚼感好。也有研究者使用热可逆凝胶——卡拉胶部分替代植物蛋白肉中的脂肪,从而在热加工时促进汁水的产生^[93]。在质构品质评价方面,除了感官评价外,目前常用流变仪和全质构测试(texture profile analysis, TPA)法对植物蛋白肉的流变学和受力特性测量分析^[94]。扫描电子显微镜(SEM)、共焦激光扫描显微镜(CLSM)、立体显微镜(SM)光学显微镜被用于评估植物蛋白肉的微观结构,特别是纤维结构的形成情况,一些光学技术最近也被用于测量植物蛋白肉的纤维形成,例如荧光偏振光谱法和光子迁移法^[95-96]。未来,口腔处理仪器的配合使用或许能帮助我们更好理解植物蛋白肉的咀嚼特性,这是一种记录处理人类口腔咀嚼待测样品时肌肉和下颌活动等咀嚼行为的仪器。此外,研究者们还关注植物蛋白肉中脂肪/类脂肪颗粒的粒径和分布情况,这一组数据通常由共焦激光扫描显微镜(CLSM)、基于静态光散射的颗粒尺寸测量仪、激光多普勒电泳仪和原子力显微成像-红外光谱(AFM-IR)获得^[97-99]。传统肉制品保持和结合水分能力的经典指标是持水量(water holding capacity, WHC)和烹饪损失(cooking loss, CL),但在应用于植物蛋白肉时应重新确定测定条件^[98]。对于植物蛋白肉中水的分布和状态(结合水,自由水),

多使用核磁共振(NMR)测定评估。对冻干后的植物蛋白肉进行微型计算机断层扫描(micro-CT)测量,也可获得植物蛋白肉中的水分分布情况^[100]。

3.3 色泽模拟

色泽是植物蛋白基仿生肉的重要感官品质指标之一,它会直接影响消费者的食欲和购买意愿。植物蛋白肉的色泽情况可分为颜色和光泽两方面。首先,植物蛋白肉缺乏生鲜动物肉所具有的(粉)红色和烹调后的棕褐色,这一问题主要通过着色剂解决。一些热稳定的色素类,如焦糖色素、姜黄、赤藓红素和类胡萝卜素,可以为植物基香肠等产品提供所需的色调,并在烹饪后仍保持颜色稳定。许多富含色素的植物提取物也被添加到植物蛋白肉中,如辣椒油树脂、红木籽提取物,以及番茄提取物,这些提取物往往还具有抗氧化、防腐等作用^[35]。对于某些需要表现出由"生"到"熟"过程中颜色变化的产品(如植物基汉堡肉饼),甜菜根提取物是一个很好的着色选择,它可以赋予生植物蛋白肉粉红色,并在加热烹调时发生降解而呈现棕褐色^[14,35]。大豆血红蛋白也值得关注。2019年12月,美国食品药品监督管理局(FDA)批准了大豆血红蛋白在植物基碎肉制品中的使用^[101]。在烹饪过程中,大豆血红蛋白会释放血红素辅因子,同时催化一些生物分子的反应而产生具有肉香风味的化合物,这对于植物蛋白肉的颜色和风味都有帮助^[102-103]。目前大豆血红蛋白已经能通过转基因毕赤酵母高效表达生产^[103]。另外,控制植物基肉制品的表面粗糙度和湿度可以改善植物蛋白肉的表面光泽,从而使植物蛋白肉在加热前表面湿润、光滑、对光的反射较强,加热后则表面粗糙、干燥、反射程度减弱^[46]。在植物蛋白肉的色度评价方面,多使用色度计获取亮度、颜色和色差等数据^[98]。

3.4 营养及健康作用

肉及肉制品的摄入对人类的健康至关重要,它提供了充足的蛋白质、脂肪、某些矿物质和维生素。相对动物肉,植物蛋白基仿生肉在营养及健康方面还存在几点主要问题:1)植物蛋白的氨基酸组成及比例不如动物肉更能满足人体需要,植物蛋白中赖氨酸、蛋氨酸或者半胱氨酸含量相对较低^[104]。应用不同植物蛋白的互补作用或许可以使植物蛋白肉氨基酸组成更加合理,但同时要注意

平衡植物蛋白肉的质构、风味等其它品质。Zahari等^[22]以油菜籽浓缩蛋白:黄豌豆分离蛋白=50:50的混合蛋白粉成功挤压出了外观和质地良好的植物蛋白肉。通过对2种蛋白及混合蛋白粉氨基酸组成的测定,作者发现油菜籽浓缩蛋白补偿了黄豌豆分离蛋白中含硫氨基酸的缺乏,使得混合蛋白粉的氨基酸组成与大豆、牛奶来源的蛋白质相当。2)植物蛋白肉中部分矿物质和维生素,如铁、锌和维生素B₁₂等缺乏或利用度不高。3)植物原料中存在抗营养因子。对原料进行预处理可以很好地解决这个问题,例如用植酸酶去除大豆分离蛋白中的植酸,通过加热灭活其中的胰蛋白酶抑制剂等^[36]。4)为了表现出优良的品质特征,植物蛋白肉常常使用超过20种添加剂,其中也可能包含传统肉制品中不常用的防腐剂、稳定剂和着色剂等,如二氧化钛、甲基纤维素和卵磷脂,这显然违背了清洁标签(clean label)的基本要求^[36]。5)椰子油等饱和脂肪的使用和高盐含量增加了植物蛋白肉的健康风险,高温、高压加工手段的使用也不可避免地导致营养素的损失和有毒及致癌物质的生成^[105]。总的来看,尽管植物蛋白肉的所谓优势之一是健康益处,但为了使植物蛋白肉与动物肉特性更相近而采用的复杂配方与加工技术往往与这一优势相冲突。针对这一问题,可以考虑优先使用天然来源的添加物和应用成熟的加工方式以提升植物蛋白肉的品质,如使用植物多酚替代合成抗氧化剂减少肉中的有毒及致突变物质含量,采用热挤压法而非湿纺丝生产植物蛋白肉等^[106]。在植物蛋白肉的营养品质评价方面,主要是对各类营养素的含量及品质进行评估,如蛋白质的氨基酸模式、脂质的脂肪酸组成和胆固醇含量、维生素及矿物质的含量及吸收利用率等方面^[100]。

4 总结与展望

世界人口对肉及肉制品不断增长的需要,在促进畜牧及肉类加工产业规模扩大的同时,也使植物蛋白基仿生肉产业拥有了广阔的前景和巨大的发展潜力。本综述详细介绍了植物蛋白基仿生肉主要组分的特点及作用、生产加工技术以及品质改善领域的相关知识及研究进展。如今,新型植物蛋白肉的品质相对传统的大豆蛋白素肉已经有

了长足的进步,植物蛋白、碳水化合物、油脂等原料及着色剂、抗氧化剂等食品添加剂组成了植物蛋白肉的基础,热挤压、高温剪切诱导及纺丝等手段能较好地将植物蛋白加工成肉样纤维,配合均质、吸附、电子鼻/舌、全质构测试等辅助或测评技术,植物蛋白肉的口感、色泽、味道与相应动物肉产品的差距正逐渐缩小。尽管如此,植物蛋白肉在感官品质、成本、营养健康及安全三方面的质量往往难以同步提高。解决这一问题仍然需要注意以下方面:1)需重视基础理论研究,不同蛋白质、碳水化合物等组分的功能及相互作用,不同加工方式及工艺参数对植物蛋白肉品质的影响及作用机理,加工过程中物料的性质变化,添加剂的选用及配比等很多细微方面值得深入研究及探索。2)与农业、计算机、材料等其它领域的交叉也很有必要,例如使用基因工程育种技术降低植物原料中影响风味或消化吸收的物质,通过计算机辅助的方式优化加工参数,利用图像识别评价植物蛋白肉品质,运用材料学的方法分析并改进产品结构等。3)关于植物蛋白肉的标准,目前只有中国食品科学技术学会提出的团体标准《植物基肉制品》。应加强植物蛋白肉产品相关标准法规的修改与制定,以满足该产业快速发展的需要。未来,在植物蛋白肉基础研究进步和植物蛋白肉行业快速发展的双重推动下,美味健康、价格合理、深受消费者喜爱的植物蛋白基仿生肉的大规模生产一定会实现。

参 考 文 献

- [1] BABU P D, VIDHYALAKSHMI R. A low cost nutritious food 'Tempeh'- A review[J]. World Journal of Dairy & Food Sciences, 2009, 4(1): 22-27.
- [2] DAY L. Wheat gluten: Production, properties and application[J]. Handbook of Food Proteins, 2011, 12(2): 267-288.
- [3] 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(3): 702-710.
- [4] HE J, EVANS N M, LIU H, et al. A review of research on plant - based meat alternatives: Driving

- forces, history, manufacturing, and consumer attitudes[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2639–2656.
- [5] OLADEJI A E, BUSIE M D. Effect of textured soy protein (TSP) inclusion on the sensory characteristics and acceptability of local dishes from Nigeria[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2019, 5(1): 671–749.
- [6] AIKING H. Future protein supply[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2011, 22(2/3): 112–120.
- [7] BRUINSMA J. The resource outlook to 2050. by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050[C]. *FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*. Rome: Food and Agriculture Organisation of the UN, 2009.
- [8] RANEY T, STEINFELD H, SKOET J. The State of Food and Agriculture 2009: Livestock in the Balance[C]. *FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050*. Rome: Food and Agriculture Organisation of the UN, 2009.
- [9] STEINFELD H, GERBER P, WASSENAAR T, et al. Livestock's long shadow: Environmental issues and options[J]. *Renewable Resources Journal*, 2007, 24(4): 15–17.
- [10] LARSSON S C, WOLK A. Meat consumption and risk of colorectal cancer: A meta-analysis of prospective studies[J]. *International Journal of Cancer*, 2010, 119(11): 2657–2664.
- [11] SONG Y, MANSON J E, BURING J E, et al. A Prospective study of red meat consumption and type 2 diabetes in middle-aged and elderly women: The women's health study[J]. *Diabetes Care*, 2004, 27(9): 2108–2115.
- [12] CDC Estimates of Foodborne Illness in the United States[EB/OL]. (2010–12–15)[2023–8–10]. <http://www.cdc.gov/foodborneburden/2011-foodborne-estimates.html>.
- [13] POSSIDONIO J. Consumer perceptions of conventional and alternative protein sources: A mixed-methods approach with meal and product framing[J]. *Appetite*, 2021, 156(1): 104860.
- [14] KYRIAKOPOULOU K, DEKKERS B, VAN DER GOOT A J. Sustainable Meat Production and Processing[M]. Oxford: Academic Press, 2019: 103–126.
- [15] DELCOUR J A, JOYE I J, PAREYT B, et al. Wheat gluten functionality as a quality determinant in cereal-based food products[J]. *Annual Review of Food Science & Technology*, 2012, 3(1): 469.
- [16] MCCLEMENTS D J, GROSSMANN L. The science of plant-based foods: Constructing next-generation meat, fish, milk, and egg analogs[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 4049–4100.
- [17] MATTICE K D, MARANGONI A G. Comparing methods to produce fibrous material from zein[J]. *Food Research International*, 2019, 128(2): 108804.
- [18] GUO J, HE Z Y, WU S F, et al. Binding of aromatic compounds with soy protein isolate in an aqueous model: Effect of pH[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(10): e12817.
- [19] WANG K, ARNTFIELD S D. Effect of salts and pH on selected ketone flavours binding to salt-extracted pea proteins: The role of non-covalent forces[J]. *Food Research International*, 2015, 77(1): 1–9.
- [20] XIA S G, SHEN S, SONG J, et al. Physicochemical and structural properties of meat analogues from yeast and soy protein prepared via high-moisture extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2023, 402(15): 134265.
- [21] XIA S G, YONG X, XUE C H, et al. Structural and rheological properties of meat analogues from *Haematococcus pluvialis* residue-pea protein by high moisture extrusion[J]. *LWT*, 2021, 154(15): 112756.
- [22] 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]. *Foods*, 2021, 10(10): 2397.
- [23] UTSUMI S, MATSUMARA Y, MORI T. Structure-function relationships of soy proteins[M]. Florida: CRC Press, 1997: 36.
- [24] 黄友如, 裘爱泳, 华欲飞. 大豆蛋白结构与功能的关系[J]. *中国油脂*, 2004, 29(11): 24–28.
- HUANG Y R, QIU A Y, HUA Y F. Structure-function relationships of soybean protein[J]. *China Oils and Fats*, 2004, 29(11): 24–28.
- [25] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- KANG L N. Texturization technology and mechanism of soy protein by high moisture extrusion[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- [26] GUEGUEN J, CHEVALIER M, BARBOT J, et al. Dissociation and aggregation of pea legumin induced

- by pH and ionic strength[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 1988, 44(2): 167–182.
- [27] SHEWRY P R. Seed storage proteins: Structures and biosynthesis[J]. *Plant Cell*, 1995, 7(7): 945–956.
- [28] 梁哈妮. 豆类蛋白质的乳化性质及其结构--功能相关性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- LIANG H N. The emulsion properties and the relationship of structure–function of legumes protein[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [29] 贾光锋, 范丽霞, 王金水. 小麦面筋蛋白结构、功能性及应用[J]. *粮食加工*, 2004, 29(2): 4.
- JIA G F, FAN L X, WANG J S. The structure of functional properties and using wheat gluten protein [J]. *Grain Processing*, 2004, 29(2): 4.
- [30] 徐飞, 刘丽, 石爱民, 等. 亚基水平上花生蛋白组成、结构和功能性质研究进展[J]. *食品科学*, 2016, 37(7): 6.
- XU F, LIU L, SHI A M, et al. Composition, structures and functional properties of peanut seed protein at subunit level: A review[J]. *Food Science*, 2016, 37(7): 6.
- [31] 陈涛, 刘耘, 李理, 等. 玉米醇溶蛋白的特性与应用[J]. *粮油加工与食品机械*, 2003, 34(6): 50–52.
- CHEN T, LIU Y, LI L, et al. Characteristics and applications of zein[J]. *Cereals and Oils Processing*, 2003, 34(6): 50–52.
- [32] JULIANO B O, BOULTER D. Extraction and composition of rice endosperm glutelin[J]. *Phytochemistry*, 1976, 15(11): 1601–1606.
- [33] SINHA R P, LEBERT M, KUMAR A, et al. Spectroscopic and biochemical analyses of UV effects on phycobiliproteins of *Anabaena sp.* and *Nostoc carmium*[J]. *Plant Biology*, 2015, 108(2): 87–92.
- [34] WILLIAMS P A, PHILLIPS G O. *Handbook of Hydrocolloids* [M]. 3rd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021: 3–26.
- [35] KOŁODZIEJCZAK K, ONOPIUK A, SZPICER A, et al. Meat analogues in the perspective of recent scientific research: A review [J]. *Foods*, 2022, 11(1): 105.
- [36] SHA L, XIONG Y L. Plant protein–based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102(8): 51–61.
- [37] KUMAR P, CHATLI M K, MEHTA N, et al. Meat analogues: Health promising meat substitutes [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(5): 923–932.
- [38] TARTÉ R. *Ingredients in meat products: Properties, functionality and applications*[M]. New York: Springer Science + Business Media, 2009: 25–56.
- [39] SMETANA S, LARKI N A, PERNUTZ C, et al. Structure design of insect–based meat analogs with high–moisture extrusion[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 229(14): 83–85.
- [40] BLACKWOOD A D, SALTER J, DETTMAR P W, et al. Dietary fibre, physicochemical properties and their relationship to health[J]. *Journal of the Royal Society for the Promotion of Health*, 2000, 120(4): 242.
- [41] STEVENSON C D, DYKSTRA M J, LANIER T C. Capillary pressure as related to water holding in polyacrylamide and chicken protein gels[J]. *Journal of Food Science*, 2013, 78(2): C145–C151.
- [42] POWELL M K J, SEBRANEK J G, PRUSA K J, et al. Evaluation of citrus fiber as a natural replacer of sodium phosphate in alternatively–cured all–pork Bologna sausage[J]. *Meat Science*, 2019, 157(11): 107883.
- [43] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues[J]. *LWT Food Science & Technology*, 2018, 87(1): 546–552.
- [44] CALKINS C R, HODGEN J M. A fresh look at meat flavor[J]. *Meat Science*, 2007, 77(1): 63–80.
- [45] BOHRER B M. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8(4): 10.
- [46] MCCLEMENTS D J, GROSSMANN L. A brief review of the science behind the design of healthy and sustainable plant–based foods[J]. *NPJ Science of Food*, 2021, 5(5): 17.
- [47] DREHER J, BLACH C, TERJUNG N, et al. Formation and characterization of plant - based emulsified and crosslinked fat crystal networks to mimic animal fat tissue[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(2): 421–431.
- [48] DREHER J, KÖNIG M, HERRMANN M, et al. Varying the amount of solid fat in animal fat

- mimetics for plant-based salami analogues influences texture, appearance and sensory characteristics [J]. *LWT*, 2021, 143(10): 111–140.
- [49] CHEFTEL J C, KITAGAWA M, QUÉGUINER C. New protein texturization processes by extrusion cooking at high moisture levels[J]. *Food Reviews International*, 1992, 8(2): 235–275.
- [50] 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 Hydrocolloids*, 2018, 85(12): 102–109.
- [51] 孙志欣. 高湿挤压技术生产组织化大豆蛋白工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
- SUN Z X. Study on textured soy protein produced by high moisture extrusion technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009.
- [52] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81(11): 25–36.
- [53] GELLRICH C, WIESER H, SCHIEBERLE P. Biochemical characterization and quantification of the storage protein (secalin) types in rye flour[J]. *Cereal Chemistry*, 2003, 80(1): 102–109.
- [54] 迟玉杰, 朱秀清, 李文滨. 大豆蛋白质加工新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 203–220.
- CHI Y J, ZHU X Q, LI W B. New Technology for Soybean Protein Processing[M]. Beijing: Science Press, 2008: 203–220.
- [55] 李诚. 小麦蛋白双螺杆挤压组织化工艺及机理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- LI C. Texturization processing of wheat gluten using a twin-screw extruder and mechanism involved[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [56] CHEN F L, WEI Y M, ZHANG B, et al. System parameters and product properties response of soybean protein extruded at wide moisture range [J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 96(2): 208–213.
- [57] YAN J, CHI Y J. Effects of twin-screw extrusion on soluble dietary fibre and physicochemical properties of soybean residue[J]. *Food Chemistry*, 2013, 138(2/3): 884–889.
- [58] 马宁, 朱科学, 郭晓娜, 等. 挤压组织化对小麦面筋蛋白结构影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2013, 28(1): 60–64.
- MA N, ZHU K X, GUO X N, et al. Study on the influence of textured extrusion on the structure of wheat gluten protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2013, 28(1): 60–64.
- [59] AKDOGAN H. High moisture food extrusion[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1999, 34(3): 195–207.
- [60] 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(1): 100–102.
- [61] 陈林, 余林, ETELAIE R, 等. 仿生素肉糜制品加工中原辅料的应用研究进展[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(2): 12.
- CHEN L, YU L, ETELAIE R, et al. Progress on the application of raw materials and ingredients in the processing of comminuted meat-analog products [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(2): 12.
- [62] 魏益民, 康立宁, 张余. 食品挤压理论与技术: 中[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009: 140–159.
- WEI Y M, KANG L N, ZHANG C. Food extrusion theory and technology Middle volume[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009: 140–159.
- [63] SCHMID E M, FARAHNAKY A, ADHIKARI B. High moisture extrusion cooking of meat analogs: A review of mechanisms of protein texturization [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(6): 4573–4609.
- [64] ISOBE S, NOGUCHI A. High moisture extrusion with twin screw extruder: Fate of soy protein during the repetition of extrusion cooking [J]. *J Jpn Soc Food Sci Technol*, 1987, 34(7): 456–461.
- [65] WILD F, CZERNY M, JANSSEN A M, et al. The evolution of a plant-based alternative to meat: From niche markets to widely accepted meat alternatives [J]. *Agro Food Industry Hi Tech*, 2014, 25(1): 45–49.
- [66] ZHANG Z Y, ZHANG L J, HE S D, et al. High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(8): 4873–4908.
- [67] REHRAH D, AHMEDNA M, GOKTEPE I, et al. Extrusion parameters and consumer acceptability of a

- peanut - based meat analogue[J]. 2009, 44(10): 2075-2084.
- [68] LIN S, HUFF H E, HSIEH F, et al. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog[J]. *Journal of Food Science*, 2002, 67(3): 1066-1072.
- [69] CUI B, LIANG H S, LI J, et al. Development and characterization of edible plant-based fibers using a wet-spinning technique[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133(12): 107965.
- [70] LIBRÁN C M, CASTRO S, LAGARON J M. Encapsulation by electrospray coating atomization of probiotic strains[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 39(1): 216-222.
- [71] NIEUWLAND M, GEERDINK P, BRIER P, et al. Reprint of 'Food-grade electrospinning of proteins' [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 24(4): 138-144.
- [72] BHUSHANI J A, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Electrospinning and electro spraying techniques: Potential food based applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2014, 38(1): 21-33.
- [73] KRINTIRAS G A, DIAZ J G, VAN DER GOOT A J, et al. On the use of the couette cell technology for large scale production of textured soy-based meat replacers [J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 169(2): 205-213.
- [74] CORNET S H V, SNEL S J E, SCHREUDERS F K G, et al. Thermo-mechanical processing of plant proteins using shear cell and high-moisture extrusion cooking[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(12): 3264-3280.
- [75] KRINTIRAS G A, GÖBEL J, VAN DER GOOT A J, et al. Production of structured soy-based meat analogues using simple shear and heat in a Couette Cell[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 160(17): 34-41.
- [76] SNEL S J E, BELLWALD Y, VAN DER GOOT A J, et al. Novel rotating die coupled to a twin-screw extruder as a new route to produce meat analogues with soy, pea and gluten[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 81(5): 103152.
- [77] SCHREUDERS F K G, DEKKERS B L, BODNAR I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261(22): 32-39.
- [78] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75(5): 231-242.
- [79] RAMACHANDRAIAH K. Potential development of sustainable 3D-printed meat analogues: A review[J]. *Sustainability*, 2021, 13(2): 938.
- [80] LIPTON J, ARNOLD D, NIGL F, et al. Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing[C]. 21st annual international Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas at Austin, 2010.
- [81] BOUKID F. Plant-based meat analogues; from niche to mainstream[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(2): 297-308.
- [82] SINGH A, SIT N. Meat analogues: Types, methods of production and their effect on attributes of developed meat analogues[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2022, 15(12): 2664-2682.
- [83] KUMARI S, MEMBA L J, DAHUJA A, et al. Elucidation of the role of oleosin in off-flavour generation in soymeal through supercritical CO₂ and biotic elicitor treatments[J]. *Food Chemistry*, 2016, 205(16): 264-271.
- [84] 朱芙蓉, 徐宝才, 周辉. 大豆制品中腥味形成机理及去腥工艺研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(4): 150-158.
- ZHU F R, XU B C, ZHOU H. Review on formation mechanism and deodorization technology of beany flavor in soybean and soybean products [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(4): 150-158.
- [85] SAKAI K, SATO Y, OKADA M, et al. Cyclodextrins produced by cyclodextrin glucanotransferase mask beany off-flavors in plant-based meat analogs [J]. *Plos One*, 2022, 17(6): e0269278.
- [86] 崔春, 吴肖, 赵谋明, 等. 清炖牛肉与红烧牛肉香气成分差异性分析[J]. *现代食品科技*, 2011, 27(4): 461-464, 472.
- CUI C, WU X, ZHAO M M, et al. Difference analysis of stewed beef and red-cooked beef volatile compounds[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2011, 27(4): 461-464, 472.
- [87] SUN A, WU W, SOLADOYE O P, et al. Maillard

- reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: A review [J]. *Food Research International*, 2022, 151(1): 110823.
- [88] LI X J, LI J. The flavor of plant-based meat analogues[J]. *Cereal Foods World*, 2020, 65(4): 40.
- [89] MCHUGH T, AVENA-BUSTILLOS R. How plant-based meat and seafood are processed [J]. *Food Technology*, 2019, 73(10): 83-84, 87.
- [90] ISMAIL I, HWANG Y H, JOO S T. Meat analog as future food: A review[J]. *Journal Of Animal Science And Technology*, 2020, 62(2): 111-120.
- [91] JIN Y, SONG K Y, KIM Y. A soy-based jerky made from transglutaminase-treated yuba film [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(12): e17180.
- [92] 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.
- [93] STANDARDS B. Saturated fat reduction in processed meat products - Reducing saturated fats in foods[J]. *Reducing Saturated Fats in Foods*, 2011(3): 210-233.
- [94] FRIEDMAN H H, WHITNEY J E, SZCZESNIAK A S. The texturometer-A new instrument for objective texture measurement [J]. *Journal of Food Science*, 1963, 28(4): 390-396.
- [95] RANASINGHESAGARA J, HSIEH F, YAO G, et al. Characterizing fiber formation in meat analogs using an anisotropic photon migration model[C]. *Proc. SPIE 6381, Optics for Natural Resources, Agriculture, and Foods*. Boston: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2006, 63810D.
- [96] YAO G, LIU K S, HSIEH F. A new method for characterizing fiber formation in meat analogs during high-moisture extrusion[J]. *Journal of Food Science*, 2004, 69(7): 303-307.
- [97] GODSCHALK-BROERS L, SALA G, SCHOLTEN E. Meat analogues: Relating structure to texture and sensory perception[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 22-27.
- [98] 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.
- [99] ZHANG X, ZHAO Y, ZHAO X H, et al. The texture of plant protein-based meat analogs by high moisture extrusion: A review[J]. *Journal of Texture Studies*, 2023, 54(3): 351-364.
- [100] FU J L, SUN C X, CHANG Y Y, et al. Structure analysis and quality evaluation of plant-based meat analogs [J]. *Journal of Texture Studies*, 2023, 54(3): 383-393.
- [101] 厦门 WTO/TBT-SPS 通报咨询工作站. 美国 FDA 批准大豆血红蛋白用作色素[EB/OL]. (2019-12-19) [2023-8-10]. <http://swj.xm.gov.cn/xmtbt-sps/show.asp?id=60958>.
- [102] JIN Y, HE X, ANDOH-KUMI K, et al. Evaluating potential risks of food allergy and toxicity of soy leghemoglobin expressed in pichia pastoris[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2017, 62(1): 1700297.
- [103] 苏悦. 微生物高效表达异源豆血红蛋白的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- SU Y. Study on efficient expression of heterologous leghemoglobin in microorganisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [104] MILLWARD D J. The nutritional value of plant-based diets in relation to human amino acid and protein requirements[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1999, 58(2): 249-260.
- [105] FATEMEH B, MARZIEH K, ABDORREZA M. Heterocyclic aromatic amines in cooked food: A review on formation, health risk-toxicology and their analytical techniques[J]. *Food Chemistry*, 2019, 280(10): 240-254.
- [106] XIONG Y L. Inhibition of hazardous compound formation in muscle foods by antioxidative phytophenols [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2017, 1398(1): 37-46.

Research Process of Plant-based Meat Analogue

Zhao Xinyue¹, Zhang Yuling¹, Zhu Mengjia¹, Gao Chunhao¹, Ren Guangli², Gao Xiang^{*}

(¹College of Life Sciences, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong

²Shandong Hongzai Biotechnology Co., Ltd., Zaozhuang 277200, Shandong)

Abstract Plant-based meat analogue, also called plant-based meat, is one of the novel approaches to use plant protein. In recent years, under the influence of multiple factors such as price, product quality, environmental protection, nutrition and health, plant-based meat has attracted more and more attention from consumers and food researchers, exhibiting great potential for development and utilization. This paper summarized the main components of plant-based meat analogue and their roles in product quality, and analyzed the processing technologies applied in processing plant-based meat, as well as the research status and evaluation methods in flavor, texture, color, nutrition and health, aiming to provide references for the research of plant-based meat analogue and related fields in China.

Keywords plant protein; meat analogue; processing technology; flavor; nutrients