

植物基肉制品研究进展：原料功能特性、结构重组技术、安全评价体系与未来挑战

陈思好¹, 赵芬^{1*}, 李赫¹, 刘新旗¹, 马翥²

(1. 北京工商大学老年营养与健康教育部重点实验室, 国家大豆加工产业技术创新中心, 中国轻工业植物蛋白创新与资源开发重点实验室, 北京 100048) (2. 北京赛升药业股份有限公司, 北京 100176)

摘要: 近年来, 植物基肉制品 (Plant-based Meat Analogs, PBMA) 作为人造肉的核心分支, 因其通过植物原料精准模拟动物肉类的感官特性, 已成为全球食品工业的研究热点。该类产品以豆类、谷物 (如小麦) 及油料作物 (如葵花籽) 提取的蛋白-脂质复合基质为基础, 依托结构重组技术仿制传统肉类的质构、风味与外观特征, 为可持续膳食提供纯素食解决方案。随着精准提取技术、分子修饰工艺及合成生物学工具的快速发展, 生产技术革新对提升 PBMA 的规模化生产效率与感官仿真度具有决定性作用, 其工业化体系优化已成为当前领域核心研究方向。本文系统综述了 PBMA 的原料功能特性、主流生产技术 (涵盖高水分挤压组织化、纺丝蛋白纤维化、3D 打印结构工程等) 及安全性评价框架, 深入解析各类技术的工艺机制、应用优势与实施瓶颈, 并评述典型商业化案例的技术路径。旨在为 PBMA 的产业化工艺设计与生产实践优化提供理论参照与技术指导。

关键词: 植物基肉; 原料; 生产技术; 安全性; 生产企业与产品

文章编号: 1673-9078(2025)10-125-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1001

Research Progress on Plant-based Meat Analogs: Raw Material Properties, Restructuring Techniques, Safety Evaluation Systems, and Future Challenges

CHEN Sihao¹, ZHAO Fen^{1*}, LI He¹, LIU Xinqi¹, MA Biao²

(1. Key Laboratory of Geriatric Nutrition and Health, Ministry of Education, National Soybean Processing Industry Technology Innovation Center, Key Laboratory of Plant Protein Innovation and Resource Development, China Light Industry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

(2. Beijing Science Sun Pharmaceutical Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In recent years, plant-based meat analogs (PBMA), a core type of alternative meat, have emerged as a key research topic in the global food industry owing to their precise emulation of the sensory characteristics of animal meat using plant-based ingredients. Such products are fundamentally based on protein-lipid composite matrices extracted from legumes, cereals (e.g., wheat), and oilseeds (e.g., sunflower seeds). PBMA simulate the texture, flavor, and appearance of conventional meat through the use of restructuring techniques, providing vegan options for sustainable diets. The rapid advancement in precision extraction

引文格式:

陈思好, 赵芬, 李赫, 等. 植物基肉制品研究进展: 原料功能特性、结构重组技术、安全评价体系与未来挑战[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 125-135.

CHEN Sihao, ZHAO Fen, LI He, et al. Research progress on plant-based meat analogs: raw material properties, restructuring techniques, safety evaluation systems, and future challenges [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 125-135.

收稿日期: 2025-02-29; 修回日期: 2025-04-08; 接受日期: 2025-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2100204)

作者简介: 陈思好 (2003-), 女, 本科生, 研究方向: 植物蛋白营养与健康, E-mail: SihaoChen.Chelsea@hotmail.com

通讯作者: 赵芬 (1984-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: zhaofen@btbu.edu.cn

techniques, molecular modification methods, and synthetic biology tools has established a foundation for improving production scalability and efficiency as well as the sensory similarity of PBMA. The optimization of their industrial production systems has emerged as a core research direction in this field. This review systematically summarizes the functional properties of raw materials, mainstream production technologies (including high-moisture extrusion texturization, spun protein fiber formation, and 3D printing-based structural engineering), and safety evaluation frameworks for PBMA. Additionally, it provides a comprehensive analysis of the processes, advantages, and implementation bottlenecks associated with various technologies, while also reviewing the technological pathways employed in typical commercialization case studies. The present review is expected to provide a theoretical reference and technical guidance for the design of industrial processes and optimization of production practices for PBMA.

Key words: plant-based meat; raw materials; production technology; safety; commercial production

蛋白质是人体日常生命活动必不可少的营养成分,参与维持各种生理功能。目前,人体摄入的蛋白质主要分为动物蛋白和植物蛋白两大类。动物蛋白主要来源于肉类,其氨基酸组成较为完善,生物利用率和蛋白质质量评分较高,因此被认为是优质蛋白的主要来源,营养价值普遍优于植物蛋白。然而,摄入大量动物蛋白会导致动物脂肪和胆固醇增加,进而对人体健康构成潜在威胁^[1]。随着经济的发展和居民生活水平的提升,人们对肉类产品的健康属性愈发关注。同时,人口持续增长也带来了对肉制品需求的显著上升。根据联合国预测,到2050年,全球人口预计将接近97亿,传统畜牧业面临资源紧张、环境压力大等多重挑战^[2]。当前全球肉类生产能力已接近极限,依靠传统的家畜繁育方式难以满足全部肉类产品的需求,传统畜牧业正面临严峻考验。为了应对这些挑战,植物基肉应运而生。

植物基肉的主要成分是植物蛋白,植物蛋白主要来源于大豆、小麦、豌豆等原料,淀粉、脂肪和纤维素作为辅助材料。通过挤压成型、食品3D打印和静电纺丝等技术,蛋白质发生改性、分子链取向改变并重新交联,最终制成模拟动物肉结构和质地的蛋白质制品^[3]。植物基肉具有较高的蛋白质含量和较低的脂肪含量,其良好的食品加工特性、高营养价值及较高的蛋白质含量使其成为优质的蛋白质来源,丰富了人们的餐桌,提供了更多的膳食选择。植物基肉的原料资源丰富,位于食物链的上游,有助于缓解传统肉类生产中存在的环境保护、动物保护及动物福利问题。据估计,植物基肉可减少95%的土地使用、90%的水资源消耗以及85%的温室气体排放^[4]。

预计植物基肉产业在2026年前将以7.91%的复合年均增长率(Compound Annual Growth Rate, CAGR)增长,亚太地区有望成为增长最快的市场。目前,西方国家的植物基肉市场已经取得了显著发展。2019年,美国的植物基肉销售额达到9.39亿美元,同比增长18.4%,而传统肉制品的销售额仅增长了2.7%^[5]。相

比之下,中国的植物基肉产业仍处于初级阶段,市场份额有限,关键技术体系尚未完善。当前亟需加大研发投入,扩大产业规模。尽管植物基肉符合低碳、绿色、可持续发展的理念,但在其安全性方面的认识仍不够全面^[6]。尽管植物基肉近年来发展迅速,但其在口感、风味、外观色泽及质构等方面与传统动物肉制品仍存在较大差异。为更好地贴近真实肉类的感官体验,亟需对其在视觉、嗅觉与味觉维度上的特征进行系统研究与优化。这不仅有助于提升产品质量,也对促进植物基肉产业的可持续扩张、增强消费者接受度与市场竞争力具有重要意义^[7]。

1 植物肉原材料

植物蛋白根据其溶解性可分为球蛋白、清蛋白、谷蛋白和醇溶蛋白^[8]。植物基肉生产过程中,选择合适的植物蛋白原料至关重要。不同的植物蛋白原料具有各自独特的特性,这些特性会直接影响到加工技术的选择。主要的植物蛋白原料包括:(1)油料蛋白:如大豆^[9]、花生^[10]、油菜籽^[11]和亚麻籽。这些原料中的蛋白质大多为球蛋白,富含赖氨酸、色氨酸和蛋氨酸,易发生聚集和交联,从而更容易形成有序的纤维结构。(2)谷类蛋白质:如小麦^[12]、稻米和大麦^[11]。谷类蛋白主要包括谷蛋白和醇溶蛋白,富含脯氨酸和谷氨酸,具有较强的分子稳定性,有利于提高植物蛋白肉的硬度和弹性。(3)杂粮蛋白:包括玉米^[13]、小米、豌豆^[14]、蚕豆^[15]、鹰嘴豆等。尤其是豌豆蛋白,由于低致敏性和较高的营养价值,已成为植物基肉制造的热门原料。豌豆蛋白在水合作用下能显著提高脂肪吸收能力,进而改善肉制品的质构。(4)其他来源的蛋白质:食用菌(如香菇)^[16]、水果和蔬菜(如土豆^[11]、豇豆、面包果种子^[17]、猴面包树果实^[18])。不同原料蛋白质含量比较见表1。

在所有蛋白来源中,大豆蛋白、小麦蛋白和豌豆蛋白是使用最广泛的^[19]。通过脱脂及部分或全部去除碳水化合物得到的大豆分离蛋白或大豆浓缩蛋白,不

含胆固醇，且具有低脂肪和低热量的特点，与传统动物蛋白相比是一种优质蛋白。然而，大豆中存在的致敏物质及豆腥味仍需在未来的研究中进一步改善^[20]。小麦中蛋白质含量约为 13%，营养价值较高。其蛋白质具备良好的吸水能力，在水化作用下结构得以展开，可被拉伸形成丝状、线状或膜状结构，进而构建起具弹性和黏性的网络，有助于模拟肉类的纤维组织结构^[20]。豌豆蛋白因含有丰富的优质氨基酸且致敏性较低，近年来日益受到重视。相比大豆蛋白，豌豆蛋白在相同水分条件下具有更强的持油能力。此外，通过调节盐离子浓度或加工参数，还可影响其分子间作用力，从而显著提升其在肉制品中的质构表现^[21]。

表 1 不同原料蛋白质含量比较

Table 1 Comparison of protein content in different raw materials

蛋白分类	蛋白来源	蛋白含量 (以干重计) /%
油料蛋白	大豆	38
	花生	25
	油菜籽	20
	亚麻籽	20
谷类蛋白质	小麦	13
	稻米	8
	大麦	11
	玉米	10
杂粮蛋白	小米	12
	豌豆	22
	蚕豆	25
	鹰嘴豆	22
其他蛋白	香菇	25
	土豆	2
	豇豆	3
	面包果种子	7
	猴面包树果	2

2 植物肉生产技术

2.1 挤压膨化

挤压技术是一种常用于食品加工中的机械加工工 艺。其基本流程包括：原料经粉碎、加湿、混合等预 处理后，在高温高压条件下，通过特定结构的模具， 被强制挤出，从而形成具有特定形状和内部结构的产 品。该技术的核心设备为挤压膨化机（如图 1 所示）。 在挤压过程中，物料在高温和高剪切力的协同作用下， 在极短时间内完成一系列物理和化学变化过程，包括 混合、水合、剪切、均质化、压缩、除气、热压积累、 巴氏杀菌、料流定向、成型、膨胀以及部分干燥等步

骤^[22]。蛋白质的三级与四级结构所依赖的非共价作用 力遭到破坏，导致表面电荷逐渐均一，分子间的氢键、 二硫键和离子键部分断裂，从而转变为一种具可塑性的 熔融状态。随着蛋白分子链之间发生聚集、团聚与 交联反应，逐步构建出具有一定有序性的纤维状结构。 在经历高温快速冷却至低温的过程中，最终形成一种 模拟肉类肌理的植物蛋白制品。当前用于植物基肉加 工的挤压成型技术主要包括单螺杆挤压、低水分挤压 和高水分挤压三类方式^[23]。单螺杆挤压因其设备结构 简洁、操作便捷且成本较低，常用于基本的膨化类食 品加工或作为肉类制品中的填充成分，适用范围相对 有限。低水分挤压技术则因工艺较为成熟，能生产出 柔韧性较强的产品，但其成品往往需经过复水等后处 理步骤，整体加工周期较长。相比之下，高水分挤压 在工艺集成化水平上具有明显优势，所制得的植物蛋 白产品在质构上更接近动物肉，但在风味表现与口感 层面仍有进一步优化空间^[24]。

影响挤压成型技术中产品质量的主要因素包括温度 和压力。高温高压有助于蛋白质纤维结构的形成，但过 高会破坏已形成的纤维结构，导致产品疏松，硬度、咀 嚼性和弹性降低，最佳温度范围在 140~160 ℃，最佳 压力范围为 200~400 MPa^[25]。挤压加工在很大程度上 会改变挤出产物的理化特征、生物活性及其营养属性。 通过该工艺处理后的蛋白质结构发生变化，更有利于 酶的识别与作用，从而提升酶解效率和多肽生成率。 经挤压改性后的植物蛋白可表现出多种有益的生理功 能，包括抗氧化、降血压、调节血糖与血脂、增强免 疫系统功能及潜在的抗肿瘤活性等。在 Alonso 等^[26]进 行的一项研究中，喂食挤压处理豌豆饲料的大鼠体重 增长明显高于喂食生豌豆饲料的大鼠。挤压处理后， 抗营养因子如蛋白酶抑制剂和凝集素的含量显著降低， 改善了蛋白质的消化吸收率，从而提高了食物转化率 和蛋白质利用效率^[27]。Valdez-Flores 等^[28]的研究指出， 挤压工艺参数的优化有助于提升辣木蛋白水解产物的 降压功能活性。与此同时，El-Hady 等^[29]的研究结果 表明，豆类原料经过挤压处理后，其蛋白质在体外的 消化率明显上升，同时抗营养因子的含量显著下降， 包括植酸、单宁、 α -淀粉酶抑制剂以及胰蛋白酶抑制 剂等成分。挤压处理对蛋白质的生物活性和营养特性 具有积极影响，不仅增强了其消化率，还减少了挤出 物中的抗营养因子含量^[30]。

挤压成型技术是植物蛋白肉工业加工的主要方式， 具有规模化、工业化、连续化、高效节能、原料适用性广、 工艺集成度高及污染物排放少等优势，已成为全球植 物基肉产业发展的关键技术。例如，Beyond Meat 和

Impossible Foods 等国际知名企业均采用高水分挤压技术生产植物蛋白肉, 其产品在欧美市场占有重要份额。据 Statista 数据显示, 2022 年全球植物基肉市场规模已达到 74 亿美元, 预计到 2030 年将增长至 150 亿美元以上, 其中大部分产品采用挤压成型技术加工^[31]。此外, 国内企业如星期零 (Zrou) 和珍肉 (Zhenmeat) 也广泛应用该技术, 开发出多种植物肉制品, 如植物香肠、植物肉丸等, 适应消费者对健康与可持续食品的需求。这些成功的商业案例表明, 挤压成型技术不仅具有强大的理论基础, 也在实际应用中表现出广阔的前景和市场潜力。

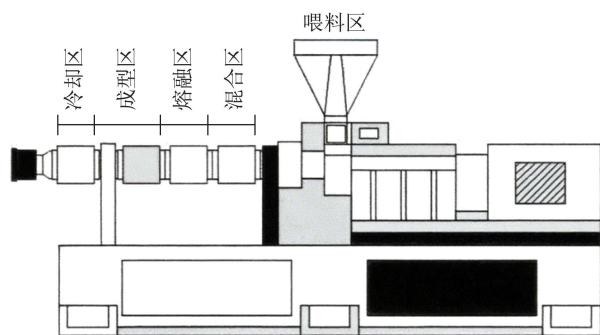


图 1 挤压膨化示意图

Fig.1 Schematic diagram of extrusion puffing

2.2 3D打印

食品领域中 3D 打印技术的应用依赖于计算机生成的三维设计模型^[32]。该过程通过软件进行逐层离散和数控成形系统的控制, 利用激光束、电子束等技术, 将特殊材料 (如细胞组织) 逐层堆积并黏结, 最终形成实体产品^[33]。这种制造方法也被称为增材制造和固体自由成形制造^[34]。目前, 食品领域中可用的 3D 打印技术主要包括三种类型: 挤出型食品 3D 打印、粉末凝结型食品 3D 打印和喷墨打印 (Ink-Jet Printing, IJP)。

挤出型食品 3D 打印通过数字化控制将材料沿预定路径逐层挤出, 最终形成三维食品^[35]。这种食品打印方式是实现食品数字化三维设计和营养控制的重要手段。挤出型 3D 打印操作简单, 但对食品材料的流动性要求较高。挤出型 3D 打印机主要有三种挤出原理: 注射器式挤出、气压式挤出和螺杆式挤出^[36]。注射器式食品 3D 打印机适用于半固态和固态材料的挤出, 如土豆泥和红豆沙。气压式挤出适合打印流动性良好的流体材料。螺杆式挤出虽然使用较少, 但在实现挤出形状的空间控制方面具有挑战性。目前, 挤出式食品 3D 打印设备主要基于三种不同的成型机制: 常温挤出、热熔挤出和凝胶挤出。常温挤出依赖于原材料本身具备一定的黏稠性, 使其在挤出过程中能够顺利堆叠并保持结构稳定。热熔挤出则通过对原料进行加热,

使其达到熔融状态, 从而提升其流动性, 便于挤出成型, 冷却至室温后材料迅速凝固, 能够较好地维持打印成型的轮廓与结构。而凝胶挤出则利用具有温敏凝胶特性的成分, 根据温度变化在流动态与凝胶态之间转换, 以实现成型过程的可控性和结构保持力^[37]。

在食品 3D 打印领域, 粉末黏结型打印也是一种较为常见的成型方式。该技术通过按层铺粉并选择性地对粉末进行黏结处理, 逐层构建出符合预设设计的三维结构, 从而实现产品的整体成型。相比于挤出式打印, 这一方法具有打印速度更快的优势, 且在表现复杂几何结构方面具备更强的适应性, 能够实现更加精细和多样化的食品造型。粉末黏结型 3D 打印通常包括三种主要形式: 选择性激光烧结、热风熔融烧结及液体黏结技术。其中, 选择性激光烧结通过红外激光作为能量源, 精确照射特定区域, 使粉末材料在指定位置熔融并固化, 从而逐层构建出预设的三维结构^[38]。热空气熔融烧结与选择性激光烧结类似, 但将激光热源替换为热空气。液体黏合 3D 打印通过使用具有黏结特性的液体, 将二维粉末薄片组合成复杂的三维模型。

喷墨式食品 3D 打印技术可视为传统二维打印在食品行业的应用延伸, 其主要功能是在已有食品表面添加图案或装饰。这种打印方式依赖于保持材料在流动状态下通过喷嘴喷出, 使装饰物质均匀沉积于食品表层。与挤出型 3D 打印不同, 喷墨打印并不通过逐层堆叠来构建整个食品结构, 而是以局部喷印的方式迅速完成预设设计, 因此在效率和批量化方面更适用于工业生产需求。

由于个体健康状况和营养需求的差异, 所需的食品也各不相同。食品 3D 打印技术能够根据特定人群的营养需求配置原料, 实现个性化饮食。随着技术的不断进步和研究的持续深入, 食品 3D 打印技术正逐步与精准营养理念相融合。它不仅能够满足人们对食品视觉美感的追求, 还能通过对各种食材的营养成分和能量含量进行精准分析, 科学地制定出个性化的营养 3D 打印方案, 从而为人们提供既美观又营养均衡的食品。这种方式能够最大程度地满足个性化营养健康的需求。例如, 荷兰的 TNO 研究团队已经开发出一种基于个性化营养需求的食品 3D 打印系统, 该系统能够根据用户的健康数据, 如年龄、性别、体质量和活动水平, 定制食品的营养成分^[39]。例如, 针对老年人群体, 系统可以通过精确调整钙、维生素 D 等营养成分的比例, 帮助改善骨密度和免疫功能。此外, 食品 3D 打印还可以根据运动员的高蛋白需求, 设计富含优质蛋白质和氨基酸的食品, 帮助提高肌肉恢复能力和运动表现。随着食品 3D 打印技术的不断发展,

一些企业如 Redefine Meat 已经开始探索利用 3D 打印技术制作高蛋白质植物肉。这种植物肉不仅能够高度还原肉类的外观和口感，还能通过精准的工艺控制，调配脂肪、蛋白质等营养成分的比例，从而满足消费者对低脂、高蛋白食品的健康需求^[40]。根据市场调查，消费者对于能够提供定制营养的食品 3D 打印产品的兴趣逐年增加，预计到 2027 年，个性化营养食品市场将达到超过 10 亿美元^[41]。

2.3 静电纺丝

静电纺丝是一种借助高压静电场生成纳米级连续纤维的先进纺丝方法。该工艺通常采用碱性高粘度蛋白溶液作为原料，溶液通过带有微小孔径（约 0.002 5 mm）的喷头板在外力作用下被推挤成细小液流。在接触到酸性凝固液后，这些液流迅速凝固，形成具有方向性的纤维材料。与未经改性的蛋白质相比，这些由静电纺丝技术制备的蛋白纤维在功能特性上表现更优，能够应用于各类食品配方中，或与适当的粘结剂结合，制造出多样的结构化食品产品^[42]。静电纺丝技术在食品行业中具有以下优势：（1）设备简单且纺丝成本低；（2）生物活性物质易于被嵌入纳米纤维中；（3）纳米纤维膜的比表面积大；（4）静电纺丝是一种非热加工方法，有利于保持生物活性物质的功能性。然而，该工艺成本高、工艺复杂，对蛋白质材料有特定要求，且并不适用于所有蛋白质。在组织化蛋白的生产过程中，可能会生成有毒物质和大量废水（如有毒二肽赖氨丙氨酸和硫氨酸的生成）。这些挑战使该技术的工业化难度较大，逐渐被挤压技术所取代。

尽管存在一定技术挑战，静电纺丝技术在植物基肉类替代品的开发中仍具有潜在优势，特别是在模拟肉类质地和增加食品营养成分方面取得了显著进展。例如，荷兰的 FoodBioNet 研究小组通过静电纺丝技术成功制备了大豆蛋白纤维，这些纤维被用于制作植物基肉类替代品，模拟传统肉类的纤维结构和口感。这项技术能够通过调节纤维的密度和排列方式，实现食品的多样化质感，满足消费者对“肉类”口感的需求。

油料蛋白多为球蛋白，易发生热诱导聚集和交联，具有较强的纤维结构形成能力，适合利用挤压技术（尤其是高水分挤压）重构“肉感”。此外，大豆分离蛋白具有良好的凝胶性和流变性能，也适用于 3D 打印，通过调整打印糊料的流动性和稳定性，可精准控制成型结构^[43]。谷类蛋白以醇溶蛋白和谷蛋白为主，分子结构稳定、富含谷氨酸，能形成良好的弹性网络，尤其是小麦蛋白（面筋）具备优异的成膜性和拉伸性，非常适合挤压形成纤维状结构^[44]。同时，其溶解性适

中，具备一定黏弹特性，也可用于静电纺丝制备纳米纤维，增强植物肉产品的层次感和口感仿真度。杂粮蛋白（尤其豌豆蛋白）低致敏、营养丰富，吸脂性和水化能力强，适合挤压重组为纤维状肉制品。其流变性能良好，也适合 3D 打印糊料体系，常与膳食纤维或其他多糖共混，提升打印稳定性和结构保形性。其他蛋白来源较为多样，部分含量低或蛋白质结构不稳定，单独使用时挤压成型困难。香菇和豆类蛋白常作为风味强化或营养补充成分，适合与其他蛋白混合制备复合原料，借助 3D 打印逐层沉积构建结构^[45]。同时，蔬果蛋白中富含的天然胶体和多糖有助于形成纺丝液，适用于静电纺丝制备结构增强材料，用于植物肉的表面结构或肌肉纤维模拟。

3 植物肉的安全性

植物基肉制品的安全性主要涵盖两方面：原料自身安全性与加工过程中潜在的安全风险（如图 2 所示）。从种植到加工的全链条中，任一环节的疏漏都可能显著影响终端产品的质量与安全。因此，在关注植物基肉制品原料安全性的同时，其加工过程的安全性亦须予以同等重视。

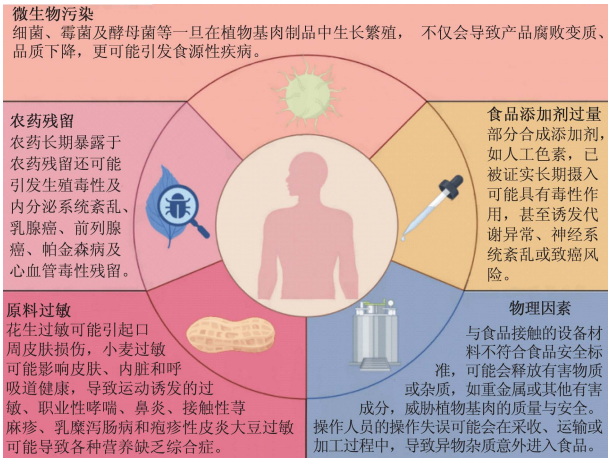


图 2 植物肉安全性

Fig.2 Safety of plant-based meat

3.1 原材料

3.1.1 农药残留

农药（包括杀虫剂、杀菌剂等）在全球范围内被广泛施用，以保障食品和纤维生产、维护人类健康及改善生活环境。尽管高效农药的开发取得了显著进展，但施用的农药中仅有小部分能直接作用于目标生物。这意味着绝大部分施用农药最终会以残留物的形式进入环境食物链（包括陆地和水生系统），并在其中逐渐积累，对人类健康构成潜在的长期风险^[46]。植物生长

过程中施用的农药可通过食物链传递并在人体内蓄积,可能引发中毒及一系列神经系统症状,并对肝脏、肾脏、神经系统等多器官系统造成损害,甚至增加癌症风险。研究表明,长期暴露于农药残留还可能引发生殖毒性及内分泌系统紊乱、乳腺癌^[47]、前列腺癌^[48]、帕金森病^[49]及心血管毒性^[50]。在植物基肉生产过程中,若原料种植环节使用高毒性农药,短期内即可能引发原料急性污染问题。长期摄入含有高农药残留的植物基肉制品,可导致农药在人体内蓄积,引发生理功能紊乱,最终造成慢性中毒。中国国家食品安全风险评估中心2020年的监测数据显示,在143份植物蛋白样本中,大豆类产品的农药残留超标率达5.6%,主要检出草甘膦与乐果。这一现状对植物基肉原料的筛选与预处理提出了更严格的质量控制要求。目前,超临界CO₂萃取、乙醇洗涤等前处理技术已在蛋白提取前阶段得到应用,可有效降低部分脂溶性农药残留。

3.1.2 原料致敏

大豆、花生、小麦等作为植物基肉制品主要原料的致敏性,是其不容忽视的健康风险因素。近三十年来,全球食物过敏发病率持续攀升,据相关文献报道,其已影响全球约6%~13%的人口,构成一项重大的公共卫生负担^[51]。根据不同的免疫反应机制,食物过敏反应可分为三大类: IgE介导型、非IgE介导型(即以细胞为主的免疫反应),以及IgE与细胞共同介导的混合型。IgE介导的过敏反应通常在接触致敏物质后几分钟至两小时内迅速出现,常见症状包括皮肤出现荨麻疹、局部或全身性血管性水肿、恶心、咽喉瘙痒、胃肠道不适、呼吸困难,严重者可诱发危及生命的全身性过敏反应^[52]。在过敏反应中,免疫系统会产生抗体,这些抗体与大豆、花生或小麦等过敏原结合,触发免疫反应,导致过敏症状。常见的过敏症状包括皮肤瘙痒、呼吸困难、喉部肿胀、胃肠不适、荨麻疹、呕吐及腹泻等。以花生为例,其过敏反应可在口周部位引发皮肤损伤;而小麦过敏则可能波及皮肤、消化系统及呼吸道,引起多种疾病表现,如运动诱发的过敏反应、职业性哮喘、过敏性鼻炎、接触性荨麻疹,以及与乳糜泻相关的肠病和疱疹样皮炎等^[53]。在某些严重情况下,过敏反应可能引发危及生命的过敏性休克。大豆过敏可能导致各种营养缺乏综合征^[6]。根据美国食品及药物管理局的数据,大豆过敏在儿童中发生率约为0.4%~0.7%。研究表明,大豆蛋白中的Gly m 5与Gly m 6是其主要的致敏组分^[54]。热处理及酶解处理虽能在一定程度上降低其致敏性,但挤压加工后仍可能残留具有活性的致敏表位^[55]。相比之下,豌豆蛋白过敏率较低,属低致敏性蛋白,目前尚未被纳入过敏原名单。通过模

拟胃肠消化试验发现,豌豆蛋白在加工过程中的主要致敏蛋白可被有效降解,具有较好的安全性^[56]。

3.2 加工过程

3.2.1 物理因素

植物基肉的安全性受多种物理因素的影响,主要包括加工设备、操作人员和包装材料。植物基肉的安全性与加工设备密切相关,设备在食品生产和加工过程中发挥着至关重要的作用。设备的选择、设计、清洁、维护及操作都会直接影响植物基肉的安全性。如果与食品接触的设备材料不符合食品安全标准,可能会释放有害物质或杂质,如重金属或其他有害成分,威胁植物基肉的质量与安全。操作人员的操作失误可能会在采收、运输或加工过程中,导致异物或杂质意外进入食品,影响植物基肉的口感和质量,并对消费者的健康构成潜在威胁。例如,玻璃、金属、塑料碎片、木屑、绳索等异物可能会导致口腔、食道或胃肠道的损伤。此外,植物基肉的安全性还受到包装材料中有害成分的影响。例如,塑料包装材料的塑化过程可能干扰人体内分泌系统^[57]。纸类包装材料中可能含有对人体健康不利的重金属,而金属包装材料在酸碱条件下会发生迁移,进入食品后可能导致人体慢性中毒。

3.2.2 化学因素

食品添加剂是指为改善食品风味、质地、外观及保存性等特性而添加于食品中的非基本成分,按其作用分类,食品添加剂可分为防腐类、抗氧化类、调味类、增稠类、酸度调节类、着色剂、增味剂及香精香料等多种类型^[58]。在植物基肉制品的加工过程中,为了更真实地还原传统肉类在色泽、质构和风味上的特征,通常需要复配使用多种功能性添加成分,例如调味剂、着色剂、防腐剂、黏合剂以及质构改良剂等。这些成分不仅提升了产品的感官接受度,也延长了货架期并优化了加工性能。例如,淀粉、菊粉、甲基纤维素、阿拉伯胶等被广泛应用于增强结构稳定性;天然着色剂如红曲红、甜菜红和番茄红等被用于提升产品色泽,而如大豆血红素等新型功能性色素,则能够赋予植物肉“出血感”和“肉香”,提升仿真度。不可能汉堡(Impossible Burger)中的大豆血红素已于2019年被美国食品及药物管理局批准为合法添加剂^[59],但在中国、欧盟和日本等地区尚未获得认可,其安全性和监管合法性仍存争议。

然而,食品添加剂的过度或不当使用可能对人体健康造成潜在危害。部分合成添加剂,如人工色素,已被证实长期摄入可能具有毒性作用,甚至诱发代谢异常、神经系统紊乱或致癌风险^[60]。此外,某些添加

剂如酒石酸锌在高剂量摄入下可能导致生化指标异常,尤其对儿童和哮喘患者存在更高风险^[61]。添加剂还可能干扰营养素吸收,增加肝脏和肾脏负担,进一步削弱植物肉作为“健康替代品”的消费形象。因此,在推动植物肉产业发展的过程中,企业应严格遵守相关法规,控制添加剂使用量,并优先选用安全性高的天然替代品,以保障消费者健康并提升产品信任度。

3.2.3 微生物因素

微生物通常通过土壤、水和空气的污染进入食品表面。此外,食品中所含的生物大分子,如蛋白质、多糖和脂类,为微生物的代谢活动提供了充足的营养来源,进而引发食品腐败变质,可能对人体健康造成潜在危害^[62]。植物基肉制品在其整个生产、储运与消费过程中,均面临不同程度的微生物污染风险,需加强全过程的卫生控制与质量管理。生产过程中,设备或人员卫生操作不规范,可引入微生物并促其快速繁殖。销售环节的包装破损等因素,则为环境微生物侵入提供了途径。细菌、霉菌及酵母菌等一旦在植物基肉制品中生长繁殖,不仅会导致产品腐败变质、品质下降,更可能引发食源性疾病。

4 植物肉市场

4.1 海外市场

近年来,植物基肉制品市场呈现显著扩张态势,不仅吸引了众多跨国食品巨头入局,也催生了一批新兴的初创公司^[63]。2019年,美国植物基肉公司 Beyond Meat 在纳斯达克上市,以其合成植物蛋白制成的素食汉堡获得认可,尤其是 Beyond Burger,这款产品是最早使用豌豆蛋白的植物基肉产品之一。Beyond Meat 是植物基肉行业的领军企业,也是全球植物基肉初创公司中首个上市的公司。此后,植物基肉行业的热度不断上升,吸引了国内外企业和资本的广泛关注和投资。成立于1936年的食品企业 Morningstar Farms,致力于植物基肉制品的研发与生产,其核心原料包括挤压改性的植物蛋白(如小麦面筋和大豆浓缩蛋白)、水解蛋白(来源于玉米、小麦和大豆)以及大豆分离蛋白。该公司已开发出多种形式的植物基产品,涵盖冷冻预制肉馅、植物培根、素香肠、仿牛肉碎、素鸡肉饼和低脂素鸡排等,种类丰富,旨在为消费者提供更健康、可持续的肉类替代选择。此外,李嘉诚投资的 Impossible Foods 已扩展至全球7 000多家餐厅。2019年,Impossible Foods 与汉堡王合作推出了 Impossible Whopper,这款植物基汉堡由小麦蛋白、马铃薯蛋白和大豆分离蛋白复配而成,口感与牛肉非常相似,其

中添加了从大豆根部提取的血红素,以提升风味^[64]。2018年,肯德基在英国与替肉品牌 Quorn 合作。2020年4月,肯德基在中国市场推出了全新植物蛋白产品“植培黄金鸡块”,该产品由纯植物原料制成,旨在为消费者提供高品质蛋白的新选择。同月21日,星巴克也在中国发布了其植物基午餐系列,其中采用了由“人造肉第一股”Beyond Meat 公司提供的植物肉产品,进一步拓展了植物基饮食的应用场景。除了美国市场外,其他国家也在积极推动植物基肉制品的发展。以加拿大为例,Gardein 公司以大豆分离蛋白、小麦面筋与豌豆蛋白为主要原料,研发出一款用于替代传统炸鸡块的植物基脆皮鸡肉产品;英国的 Sgaia's Vegan Meats 则利用小麦面筋和大豆蛋白为基础蛋白源,开发出名为“Mheat”的植物基汉堡,力求为消费者提供更具可持续性的肉类替代解决方案^[65]。新加坡的 NextGenFoods 公司使用独有的 Lipi 植物油混合技术与蛋白挤压工艺生产出 TiNDLE 植物基鸡肉产品,其风味和口感与传统鸡肉相似。

4.2 国内市场

尽管中国本土植物基肉制品公司已发展多年,但整体产业竞争力仍显薄弱,技术水平与海外发达国家存在差距。多数企业仍主要依赖大豆蛋白、小麦蛋白等基础原料,所产制品质地较为粗糙,多呈现传统豆制品的类肉口感。尽管在产品风味与外观上力求模拟传统肉制品,但在实际质构特性上仍有显著不足,常表现为色泽暗淡、缺乏光泽、肉感欠佳,且难以模拟咀嚼脂肪与软骨的独特口感^[66]。在国际市场上,植物基肉制品主要以汉堡肉饼、植物香肠和仿鸡块等形式为主,并常作为原料进一步加工为汉堡、热狗或炸鸡块等终端消费产品。然而,这类产品在加工工艺和原料成本方面通常较高。相比之下,中国市场则以传统素食肉制品占据主导地位,如以植物蛋白为基础开发的素肉饼、素鸡、素鸭等,其工艺相对成熟,整体生产成本更具经济性,因而更易于被大众消费者接受^[67]。虽然中国在植物基肉的加工技术方面起步略晚于欧美国家,但近年来发展势头迅猛。福肴公司作为东方集团旗下企业,是国内较早开展高水分植物蛋白肉研究的单位之一。该公司率先在中国建成首条高水分蛋白肉自动化生产线,运用双螺杆挤压技术对蛋白质进行结构化处理,成功实现高水分条件下的组织构建。目前,其已开发出30余种高水分植物蛋白肉产品,覆盖多种应用场景与消费需求。位于宁波的素莲食品则打造了覆盖全品类的植物肉供应链,具备从蛋白纤维化、组织结构重构到风味调配的多项核心技术,基于

大豆组织蛋白的工艺，推出了包括植物肉松、素午餐肉、仿五花肉以及植物虾滑在内的多样化产品组合^[68]。自 1993 年起，深圳齐善食品即以植物蛋白（如大豆分离蛋白、豌豆蛋白、小麦粉）为主要原料，响应国内外消费者对植物性食品的需求，迄今已自主研发百余种速食产品，涵盖素排、素狮子头、素东坡肉、素火腿零食及脆皮素鸭等形态。珍肉食品科技有限公司则率先推出国内首款基于豌豆蛋白的市售植物肉月饼，并已实现规模化生产。香港绿色生活方式平台 Green

Monday，通过其旗下九家 Green Common 超市，推广包括植物猪肉产品 Omnipork 在内的系列产品。在科研层面，江南大学、北京工商大学、华南理工大学及中国农业科学院农产品加工研究所等机构已在该领域取得显著进展，掌握了植物基肉制品的关键核心技术。市场前景方面，杜邦营养与生物科学公司 2020 年的分析表明，中国对植物基肉制品的需求持续攀升，预计到 2025 年，其市场规模将突破约 154 亿元^[65]。植物基肉制品主要生产企业及产品如表 2 所示。

表 2 植物基肉制品主要生产企业及产品

Table 2 Major producers and products of plant-based meat products

公司	建立时间	国家	主要产品	主要原材料	信息来源
Beyond Meat	2009	美国	Beyond Burger Beyond Sausage Beyond Meatballs	豌豆蛋白，大豆蛋白，绿豆蛋白，大米蛋白	http://www.beyondmeatchina.com.cn/
MorningStar Farms	1975	美国	vegan meat pie vegan sausage vegan chicken	大豆蛋白，谷物蛋白	https://www.morningstarfarms.com/en_US/home.html
Impossible Foods	2011	美国	Impossible Burger Impossible Sausage	大豆蛋白，小麦蛋白，大豆血红蛋白	https://impossiblefoods.com/cn
Lightlife	1979	美国	vegan sausage vegan sliced meat vegan hamburger vegan bacon	大豆蛋白，小麦蛋白	https://lightlife.com/
No Evil Foods	2014	美国	vegan sausage vegan bacon vegan ham vegan chicken	大豆蛋白，小麦蛋白	https://noevilfoods.com/
Tofurky	1980	美国	vegan turkey vegan sausage	大豆蛋白，小麦蛋白	https://tofurky.com/
Quorn	1985	英国	vegan chicken vegan hamburger	菌蛋白	https://www.quorn.us/about-quorn
Sgaia's Vegan Meats	2015	英国	vegan bacon vegan sausage vegan steak vegan hamburger	大豆蛋白，小麦蛋白	https://www.sgaiafoods.co.uk/
Meatless Farm	2016	英国	vegan chicken vegan beef vegan pork	大豆蛋白，豌豆蛋白	https://meatlessfarm.com/
Next Gen Foods	2021	新加坡	TiNDLE	大豆蛋白，小麦蛋白	https://tindle.com/
Les Nouveaux Fermiers	2018	法国	vegan chicken vegan chicken wing vegan sausage	豌豆蛋白	https://happyvore.com/
Gardein	2003	加拿大	vegan chicken vegan meatball vegan fish	大豆蛋白，小麦蛋白	https://www.gardein.com/
Orient-Fuyao	1978	中国	vegan crispy fried pork vegan stewed meatball vegan meatball	豌豆蛋白，大豆分离蛋白	https://www.orient-fuyao.com/
Sulianfood	2010	中国	vegan fish vegan shredded fish	大豆蛋白	https://www.sulianfood.com/
Qishanfoods	1993	中国	vegan steak vegan sausage	大豆分离蛋白	http://www.qishanfoods.com/index.html

续表2

公司	建立时间	国家	主要产品	主要原材料	信息来源
Zhenmeat	2019	中国	vegan moon cakes	豌豆蛋白	https://zhenmeat.com/zh/flavor
Green Monday	2018	中国	Omnipork	豌豆蛋白, 大豆蛋白, 蛇黄油蛋白	https://greenmonday.org/zh-hant/
Shuangtafood	1992	中国	vegan chicken vegan tenderloin vegan ham	豌豆蛋白	http://www.shuangtafood.com/
Starfieldcn	2019	中国	vegan beef vegan chicken	大豆蛋白, 小麦蛋白	https://www.starfieldcn.com/starfield.html#id_04

4.3 中国植物肉行业的区域化发展

中国植物基肉制品行业在快速发展的同时，呈现出显著的区域化特征。市场需求、生产基地布局、技术研发方向以及政策环境的地域性差异，共同塑造了各区域独特的发展路径。首先，市场端呈现鲜明梯度。东部沿海地区，尤其是北京、上海、广州等一线城市，依托较高的消费能力与成熟的健康理念，已成为植物基肉制品的主要消费市场，消费者接受度较高，有效推动了行业的早期普及。相较之下，中西部地区市场尚处于培育阶段，但随着消费升级趋势的深化，其未来发展潜力不容忽视。其次，生产制造能力呈现区域集聚。目前，核心生产基地主要分布于江苏、浙江、广东等经济发达省份，这些地区不仅具备雄厚的制造基础，更拥有完善的产业链配套与研发资源。值得注意的是，随着产业规模扩张，河北、山东等省份也在积极布局生产基地，助力国内整体产能提升。最后，技术研发方向体现地域侧重。南方地区（如广东、福建）的企业，更着力于提升产品的口感与风味特性，以契合消费者对口感的精细化需求。而北方地区（特别是北京）的科研机构，则更专注于营养成分优化、生产工艺创新及新型原料开发，致力于驱动产品品质的持续升级。为促进植物基肉制品产业发展，多地政府相继出台了包括税收优惠、资金扶持等在内的支持政策。这些政策不仅有效激励了企业的创新研发活动，也促进了地方产业链的整合与升级^[69]。

5 结论与展望

植物基肉制品产业历经数年的技术积累与市场培育，已初步完成从实验室研发到工业化生产的转型，并在全球范围内形成了一定的市场规模。然而，当前产业仍面临生产成本低、质构风味模拟不足、标准体系缺失及消费者接受度有限等核心挑战。基于此，本研究系统提出未来发展的四大关键方向，以推动产业实现可持续增长：（1）原料体系的多元化与功能优化。当前大豆、小麦蛋白的单一依赖制约了产品创新与成本控制。未来需重点开发非主流植物蛋白（如黑豆、

绿豆、藜麦蛋白）及新型微生物蛋白（真菌蛋白、藻类蛋白），通过复合蛋白配比与改性技术提升功能特性。例如，黑豆蛋白的高凝胶性可改善肉制品保水性，而真菌蛋白的纤维结构更利于模拟肌肉纹理。同时，副产物高值化利用（如豆渣纤维重组）可进一步降低原料成本，提升产业链经济性。（2）加工技术的协同创新与精准调控。单一挤压技术难以复刻动物肉的复杂结构。建议构建“挤压-3D 打印-风味包埋”三级工艺体系：初级挤压形成基料蛋白纤维骨架；3D 打印实现血管、脂肪组织的空间定向排布（精度需达 50~100 μm 级）；复合风味脂质体包埋技术解决热处理过程风味逸散问题。该路径可突破质构仿真的技术瓶颈，使产品在咀嚼感、汁液释放性上逼近真实肉类。（3）标准体系与科学评价框架的构建。当前行业缺乏统一的品质基准（如蛋白质消化率校正氨基酸评分）和安全阈值（如加工过程产生的丙烯酰胺控制）。亟需建立：①生产规范标准：涵盖原料农残、重金属及微生物限量；②营养标签规则：强制标示铁、锌等微量元素生物利用率；③感官评价体系：开发基于质构仪、电子舌的客观量化指标，替代主观品尝测试。政策层面需推动植物肉纳入国家食品分类体系，明确监管归属。（4）消费者认知重构与场景化营销策略。市场调研显示，超过 60% 的消费者因“口感失真”和“营养疑虑”拒绝复购。破局需采取：①科学传播：通过临床研究数据验证植物肉对心血管健康的长期益处；②场景渗透：联合餐饮企业开发中式料理专用产品（如植物五花肉、牛排切片）；③环保价值量化：在产品包装标注碳足迹及节水数据（例：每千克产品减少 CO₂ 排放 8 kg），强化环保消费认同。

在“双碳”目标驱动下，植物基肉制品不仅是蛋白供给的补充方案，更是重构可持续食品系统的核心要素。通过原料端的多样性开发、技术端的跨学科融合、监管端的标准护航以及消费端的价值认同，产业有望在 2030 年前实现生产成本下降 30%，全球市场渗透率突破 10%。未来研究应重点关注细胞培养-植物蛋白杂交技术，推动下一代仿肉产品向生物合成领域进阶。

参考文献

- [1] ZHUBI-BAKIJIA F, BAJRAKTARI G, BYTYCI I, et al. The impact of type of dietary protein, animal versus vegetable, in modifying cardiometabolic risk factors: A position paper from the International Lipid Expert Panel (ILEP) [J]. *Clinical Nutrition*, 2021, 40(1): 255-276.
- [2] NATIONS U, ECONOMIC D O, AFFAIRS S. World population prospects 2019 [Z]. United Nations. 2019
- [3] OSEN R, SCHWEIGGERT-WEISZ U. High-moisture Extrusion: Meat Analogues [M]. Reference Module in Food Science. Elsevier. 2016.
- [4] KOZICKA M, HAVLIK P, VALIN H, et al. Feeding climate and biodiversity goals with novel plant-based meat and milk alternatives [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 5316.
- [5] 赵婧,宋弋,刘攀航,等.植物基替代蛋白的利用进展[J].*食品工业科技*,2021,42(18):1-8.
- [6] 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.
- [7] 曾志鲁,黄道武,罗东辉,等.人造肉的研究进展和应用前景[J].*现代食品科技*,2022,38(10):337-341.
- [8] MALAV O, TALUKDER S, GOKULAKRISHNAN P, et al. Meat analog: A review [J]. *Critical reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 55(9): 1241-1245.
- [9] 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.
- [10] ZHANG J, LIU L, JIANG Y, et al. Converting peanut protein biomass waste into “Double Green” meat substitutes using a high-moisture extrusion process: A multiscale method to explore a process for forming a meat-like fibrous structure [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(38): 10713-10725.
- [11] TROTTER G, FERNANDES S, GRUNZ G, et al. A process for preparing a meat-analogue food product [Z]. Google Patents. 2018
- [12] PIETSCH V L, WERNER R, KARBSTEIN H P, et al. High moisture extrusion of wheat gluten: Relationship between process parameters, protein polymerization, and final product characteristics [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 259: 3-11.
- [13] SELLING G W. The effect of extrusion processing on Zein [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2010, 95(12): 2241-2249.
- [14] OSEN R. Texturization of pea protein isolates using high moisture extrusion cooking [D]. Technische Universität München, 2017.
- [15] 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.
- [16] YADAV P, AHLAWAT S, SONI N, et al. Studies on development of meat analogue rolls using various plant sources [J]. *International Journal of Agricultural Science*, 2015, 2: 47-51.
- [17] 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
- [18] ADEDOKUN I, ONYENEKE E, NWOKEKE B, et al. Proximate composition and sensory properties of meat analogue from blends of plant protein sources of Bambara nut and African breadfruit seeds [J]. *Nigerian Journal of Agriculture, Food and Environment*, 2017, 13: 198-202.
- [19] 郭子鸣,莫呈鹏,王鲁峰,等.植物蛋白肉的加工及品质特性研究进展[J].*食品安全质量检测学报*,2023,14(5):85-93.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] SULE S, OKAFOR G I, MOMOH O C, et al. Applications of food extrusion technology [J]. *MOJ Food Processing & Technology*, 2024, 12(1): 74-84.
- [23] PLATTNER B. Extrusion techniques for meat analogues [J]. *Cereal Foods World*, 2020, 65(4): 4-11.
- [24] SEE X Y, CHIANG J H, LAW L M, et al. High moisture extrusion of plant proteins: advances, challenges, and opportunities [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2025, 65(1): 143-164.
- [25] 李振,相海,赵有斌,等.植物蛋白螺杆挤压组织化技术的研究进展[J].*中国油脂*,2023,48(9):67-74.
- [26] ALONSO R, GRANT G, DEWEY P, et al. Nutritional assessment *in vitro* and *in vivo* of raw and extruded peas (*Pisum sativum* L.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(6): 2286-2290.
- [27] 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.
- [28] VALDEZ-FLORES M, GERMÁN-BÁEZ L J, GUTIÉRREZ-DORADO R, et al. Improving bioactivities of *Jatropha curcas* protein hydrolysates by optimizing with response surface methodology the extrusion cooking process [J]. *Industrial Crops and Products*, 2016, 85: 353-360.
- [29] ABD EL-HADY E, HABIBA R. Effect of soaking and extrusion conditions on antinutrients and protein digestibility of legume seeds [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2003, 36(3): 285-293.
- [30] DUGUMA H T, FORSIDO S F, BELACHEW T, et al. Changes in anti-nutritional factors and functional properties of extruded composite flour [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 713701.
- [31] LEE D Y, VENTER C, CHOI Y, et al. Market status of meat analogs and their impact on livestock industries [J]. *Food Science of Animal Resources*, 2024, 44(6): 1213-51.
- [32] 郭翔,王守伟,李莹莹,等.基于3D打印新型细胞支架构建及在细胞培育肉中的应用[J].*现代食品科技*,2024,41(5): 174-183.
- [33] MANTHAL S, KOBUN R, LEE B-B. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review [J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2020, 22: 100260.
- [34] PORTANGUEN S, TOURNAYRE P, SICARD J, et al. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 86: 188-198.

- [35] SONI R, PONAPPA K, TANDON P. A review on customized food fabrication process using food layered manufacturing [J]. LWT, 2022, 161: 113411.
- [36] SUN J, ZHOU W, YAN L, et al. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 1-11.
- [37] 刘倩楠,张春江,张良,等.食品3D打印技术的发展现状[J].农业工程学报,2018,34(16):265-273.
- [38] CHAROO N A, BARAKH ALI S F, MOHAMED E M, et al. Selective laser sintering 3D printing-an overview of the technology and pharmaceutical applications [J]. Drug Development and Industrial Pharmacy, 2020, 46(6): 869-877.
- [39] ESWARAN H, PONNUSWAMY R D, KANNAPAN R P. Perspective approaches of 3D printed stuffs for personalized nutrition: A comprehensive review [J]. Annals of 3D Printed Medicine, 2023, 12: 100125.
- [40] CARON E, VAN DE WALLE D, DEWETTINCK K, et al. State of the art, challenges, and future prospects for the multi-material 3D printing of plant-based meat [J]. Food Research International, 2024, 192: 114712.
- [41] LEE J. A 3D food printing process for the new normal era: A review [J]. Processes, 2021, 9(9): 1495.
- [42] WANG H, KONG L, ZIEGLER G R. Aligned wet-electrospun starch fiber mats [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 113-117.
- [43] AINIS W N, FENG R, VAN DEN BERG F W J, et al. Comparing the rheological and 3D printing behavior of pea and soy protein isolate pastes [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 84: 103307.
- [44] 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: 113561.
- [45] WU J, ZHU H, LI C. Potential sources of novel proteins suitable for use as ingredients in 3D food printing, along with some of the food safety challenges [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 37: 100983.
- [46] WINTERINGHAM F. Some global aspects of pesticide-residue problems [C]//Symposium on Ecological Aspects of Pesticides. Israel: Israel Journal of Entomology, 1971:171-181.
- [47] YANG K J, LEE J, PARK H L. Organophosphate pesticide exposure and breast cancer risk: A rapid review of human, animal, and cell-based studies [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(14): 5030.
- [48] PARDO L A, BEANE FREEMAN L E, LERRO C C, et al. Pesticide exposure and risk of aggressive prostate cancer among private pesticide applicators [J]. Environmental Health, 2020, 19(1): 30.
- [49] POUCHIEU C, PIEL C, CARLES C, et al. Pesticide use in agriculture and Parkinson's disease in the AGRICAN cohort study [J]. International Journal of Epidemiology, 2018, 47(1): 299-310.
- [50] EL-NAHHAL Y, EL-NAHHAL I. Cardiotoxicity of some pesticides and their amelioration [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(33): 44726-44754.
- [51] MULLINS R, WAINSTEIN B, BARNES E, et al. Increases in anaphylaxis fatalities in Australia from 1997 to 2013 [J]. Clinical & Experimental Allergy, 2016, 46(8): 1099-1110.
- [52] PETERS R L, KRAWIEC M, KOPLIN J J, et al. Update on food allergy [J]. Pediatric Allergy and Immunology, 2021, 32(4): 647-657.
- [53] JOHANSSON S, HOURIHANE J B, BOUSQUET J, et al. A revised nomenclature for allergy: an EAACI position statement from the EAACI nomenclature task force [J]. Allergy, 2001, 56(9): 813-824.
- [54] 惠天然,施一凡,唐婷,等.大豆过敏蛋白及致敏性消减技术的研究进展[J].现代食品科技,2023,39(10):357-364.
- [55] PRAGER L, SIMON J C, TREUDLER R. Food allergy-New risks through vegan diet? Overview of new allergen sources and current data on the potential risk of anaphylaxis [J]. Journal Der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft, 2023, 21(11): 1308-1313.
- [56] DING J, DONG L, JIANG P, et al. Regulation of action sites for reducing the allergenicity of pea protein based on enzymatic hydrolysis with Alcalase [J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133930.
- [57] DE PAULA L C P, ALVES C. Food packaging and endocrine disruptors [J]. Journal of Pediatrics (Rio J), 2024, 100 (Suppl 1): S40-S47.
- [58] WU L, ZHANG C, LONG Y, et al. Food additives: From functions to analytical methods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(30): 8497-8517.
- [59] WILLIAMS R A. Opportunities and Challenges for the Introduction of New Food Proteins [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2021, 12: 75-91.
- [60] AMCHOVA P, KOTOLOVA H, RUDA-KUCEROVA J. Health safety issues of synthetic food colorants [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2015, 73(3): 914-922.
- [61] UKWUKWU D, NWANJO H U, NDUKA N, et al. Biochemical and histological changes associated with Azo food dye (Tartrazine) in male albino rats [J]. Asian Journal of Research in Biochemistry, 2019, 5(1): 1-14.
- [62] SUN X, WANG J, DONG M, et al. Food spoilage, bioactive food fresh-keeping films and functional edible coatings: Research status, existing problems and development trend [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 119: 122-132.
- [63] 朱星桐,吕新河,焦锐南.植物肉行业发展现状与挑战[J].中国食品工业,2022,17:50-53.
- [64] 陈智成,邢萍萍,周健,等.“人造肉”的发展及面临的挑战[J].畜牧产业,2020,5:71-75.
- [65] 豆康宁,赵永敢,金少举,等.植物基肉制品的研究进展[J].食品与机械,2022,38(11):230-235.
- [66] 刘聪,石奇,钱龙南,等.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):759-68.
- [67] 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.
- [68] 唐春兰,马航,吴冉,等.植物蛋白肉领域发展现状与研究进展[J].现代食品,2023,29(13):26-31.
- [69] 黄季焜.践行大食物观和创新政策支持体系[J].农业经济问题,2023,5:22-35.