

# 中国植物蛋白产品创新设计与智能制造发展历程与展望

张金闯，胡安娜，王强\*

(中国农业科学院农产品加工研究所/农业农村部农产品加工综合性重点实验室，北京 100193)

**摘要：**蛋白质是人体必需的主要营养素之一，人口增加和经济增长带动了蛋白质消费快速增长，但当前蛋白质供给方式面临资源、环境、健康等诸多新挑战。因此，培育和发展蛋白原料高效获取、结构精准改造、产品智能制造等融合新技术，以新质生产力推动植物蛋白加工产业高质量发展是践行“大食物观”向植物、动物、微生物要热量、要蛋白的重要举措。该文系统梳理了中国植物蛋白资源概况，分析了植物蛋白分离提取和精深加工产业发展历程及现状，深刻剖析了蛋白质多尺度结构变化与品质功能调控的研究进展，结合智能制造论述了植物蛋白加工新技术、新工艺、新装备及新产品发展趋势。研究发现，中国植物蛋白资源丰富多样，也是一个植物蛋白消费大国，但新蛋白资源分离提取、多尺度结构解析和品质功能改良等技术装备研究仍不成熟，开发利用尚不充分。植物蛋白基肉蛋奶等新质蛋白食品是植物蛋白加工产业重要发展方向，未来应综合物理化学、生物化学、应用数学、合成生物学、人工智能等多学科交叉优势，探究新型挤压、3D打印、生物制造、AI设计等融合新技术，打造从原料高效提取到产品精准设计的技术创新、科企融合和全产业链协作新模式，创制符合中国饮食习惯的营养健康植物蛋白新产品，加快推动植物蛋白产业高质量发展。

**关键词：**植物蛋白资源；加工新技术；多尺度结构与功能；产品创新设计；智能制造

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504243

中图分类号: TS209

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-13-0001-11

张金闯, 胡安娜, 王强. 中国植物蛋白产品创新设计与智能制造发展历程与展望[J]. 农业工程学报, 2025, 41(13): 1-11.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504243 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Jinchuang, HU Anna, WANG Qiang. Development and prospects of innovative design and intelligent manufacturing for plant-based protein products in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(13): 1-11. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202504243 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

食品产业作为第一大制造业，是中国国民经济中重要的支柱型产业，纵向贯穿三产、横向融合多产，在保障民生、拉动内需、带动相关产业和区域经济发展、促进社会和谐稳定等方面具有重要作用。习近平总书记指出，要树立“大食物观”，从传统农作物和畜禽资源向更丰富的生物资源拓展，发展生物科技、生物产业，向植物、动物、微生物要热量、要蛋白<sup>[1]</sup>。2024年9月，国务院办公厅印发了《关于践行大食物观构建多元化食物供给体系的意见》指出，“要拓展食物直接和间接来源，挖掘新型食品资源，到2027年，“大农业观”、“大食物观”普遍树立，食物来源渠道得到有效拓展，到2035年，食物产业链条健全完善，食物品种更加丰富多样”<sup>[2]</sup>。2025年2月，中央一号文件《关于进一步深化农村改革扎实推进乡村全面振兴》再次强调，“构建多

元化食物供给体系，全方位多途径开发食物资源，培育发展生物农业，开拓新型食品资源”<sup>[3]</sup>。农业农村部在落实中央一号文件工作部署的实施意见中明确指出，“培育发展生物农业，开发植物肉（植物基肉制品）等新型食物资源，促进藻类食物开发”。中国正在加速构建多元化食物供给创新体系，推动传统农业及农产品加工业向生物农业、合成生物学等新兴领域延伸，实现从“吃得饱”向“吃得好”“吃得健康”的跨越式发展，挖掘和利用好新蛋白资源，开发丰富多样的新质蛋白食品（以不依赖传统畜牧业或传统渔业方式获得的蛋白资源为原料，经一定加工工艺制得的新型食品）<sup>[4]</sup>，对保障蛋白质高效供给、减少碳排放和改善人民生命健康具有重要意义。

蛋白质是人类健康生活必需的营养元素，一日三餐均有蛋白质摄入，主要包括动物蛋白和植物蛋白两大类。植物蛋白是人类膳食中重要的蛋白质来源，全球蛋白产量的80%为植物蛋白，而81.7%的蛋白质在从植物蛋白转化为动物肉类蛋白的过程中损失<sup>[5-6]</sup>。中国肉类消费量占全球的1/3左右，而生产动物肉制品温室气体排放量占总排放量的17%~34%，比整个交通运输业还要多，已成为加速气候变化的驱动力之一<sup>[7-8]</sup>。动物蛋白在发达国家居民饮食所含蛋白质中的比重可达50%以上，而中国则在30%~40%之间，而这一数字将会随着人均收入

收稿日期: 2025-04-28 修订日期: 2025-06-03

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目(Y2025QC30); 北京市自然科学基金面上项目(6242027); 中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001); GFIC(谷孚)国际创新基金项目(GFICRG202402)

作者简介: 张金闯, 博士, 副研究员, 研究方向为植物蛋白资源利用与新质蛋白食品研究。Email: [zhangjinchuang@caas.cn](mailto:zhangjinchuang@caas.cn)

\*通信作者: 王强, 博士, 研究员, 研究方向为粮油加工与营养健康。Email: [wangqiang06@caas.cn](mailto:wangqiang06@caas.cn)

水平的提高快速增长(尤其是发展中国家)<sup>[9]</sup>。2050 年全球人口将达到 97 亿,食物需求量将在现有基础上增加 70%,肉类需求量将达到 4.7 亿 t,依赖传统畜牧业的肉类供应或将难以满足人类对蛋白质的需求<sup>[8,10]</sup>。在“大食物观”指引下,充分挖掘各类可食用新蛋白资源及其功能和发展植物蛋白基肉蛋奶、细胞培养肉、微生物蛋白等新质蛋白食品,是食品产业实现资源高效利用和绿色低碳发展的重要途径之一。

科技创新是推动“大食物观”科学理念落实和食品产业高质量发展的第一要素。全球食品科技界正在探索以颠覆性生产方式进行蛋白质等组分的高效转化和制造,如美国 Air Protein 公司尝试从空气中获取食物,利用微生物造蛋白,这将极大地改变未来的粮食生产方式,避免增加更多的排放或环境问题。南京农业大学周光宏团队使用第六代猪肌肉干细胞培养 20 d,获得了中国第一块细胞培养肉,极大缩短了动物肉的生产周期<sup>[11]</sup>。相较细胞培养肉和微生物蛋白,植物蛋白具有来源广泛、价格低廉、产业链完整、消费者接受度高等优势。近年来,植物蛋白精深加工技术也取得了新突破,如中国农业科学院王强团队研制了高水分挤压法植物基肉制品高效制造技术,实现了花生、豌豆等植物蛋白纤维结构定向调控和动物肉肌纤维拉伸强度模拟,提供了新的蛋白补充策略<sup>[12]</sup>。英国利兹大学 KEW 团队将豌豆、马铃薯和葵花籽等植物蛋白转化为高性能润滑微凝胶,改善了植物蛋白在食品中的功能应用,为植物基肉制品更加可口多汁提供了解决方案<sup>[13]</sup>。江南大学陈坚团队利用酿酒酵母、毕赤酵母等实现了肌红蛋白的高效合成,并成功用于植物基肉制品风味、色泽和口感的改善<sup>[14]</sup>。因此,借助人工智能、合成生物学、感知科学等颠覆性、革命性、引领性新技术,培育发展高效生物酶制剂精准设计、蛋白质结构重组、多维增材制造等食品领域新质生产力(以创新起主导作用,摆脱传统经济增长方式、生产力发展路径,具有高科技、高效能、高质量特征,符合新发展理念的先进生产力质态),是推动蛋白资源高效利用的根本动力。

因此,本文系统梳理了中国植物蛋白资源概况,分析了植物蛋白分离提取和精深加工产业发展历程及现状,深刻剖析了蛋白质多尺度结构变化与品质功能调控的研究进展,结合智能制造论述了植物蛋白加工新技术及新产品,旨在为中国植物蛋白资源挖掘、新质蛋白食品创新设计与智能制造提供技术支撑与决策依据,助力加快中国食品领域新质生产力培育,推动食品产业提档升级和高质量发展,服务保障国家粮食安全战略。

## 1 中国植物蛋白资源概况

全球具有丰富的植物蛋白资源,据联合国粮食及农业组织(FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations)和 USDA (United States Department of Agriculture)数据测算,油料作物如大豆、花生、油菜籽等每年提供的蛋白质总量约 2 亿 t;谷物如玉米、小麦、

稻谷等每年提供的蛋白质总量超过 2.5 亿 t;豌豆、蚕豆、绿豆、燕麦、藜麦、马铃薯等杂粮杂豆和蔬菜中也将提供一定数量的功能特性各异的特色植物蛋白<sup>[15-16]</sup>。此外,藻类蛋白、菌类蛋白和昆虫蛋白等新蛋白资源因其较高的营养价值也备受关注,英国、德国、瑞士、新西兰等多家机构已相继开始研究,部分已商业化<sup>[17-19]</sup>。FAO 数据显示,2022 年,全球人均植物蛋白摄入量为 52.95 g/d,动物蛋白则为 37.73 g/d,即植物蛋白年需求量超过 1.5 亿 t,动物蛋白则超过 1.1 亿 t,其中,中国人均植物蛋白摄入量为 75.87 g/d,动物蛋白则为 52.09 g/d,即中国植物蛋白年需求量接近 4 000 万 t,动物蛋白年需求量超过 2 700 万 t<sup>[5]</sup>。可见,中国人饮食结构中蛋白质的摄入以植物蛋白为主,在人均蛋白摄入比重中占比 61% 左右,中国植物蛋白消费量占全球 27%,是一个植物蛋白消费大国。表 1 对中国主要植物蛋白资源进行了统计,中国谷物、油料、豆类以及薯类等植物蛋白折合年产量超过 6 500 万 t,约为猪、牛、羊、鸡、鱼肉以及禽蛋等动物蛋白折合年产量(约 2 700 万 t)的 2.5 倍,其中,油菜籽、花生和玉米是国产供给水平较高的植物蛋白来源,但在食品中的利用率占比不足 25%。可见,中国蛋白质总量供给充足,但仍以植物蛋白为主,实际粗蛋白(饼/粕/粉)产量在 1 800 万 t 以上,而动物蛋白则相对短缺。中国植物蛋白产品种类多样,食用植物蛋白类产品是中国传统习俗,并已深深融入到中国特色的饮食文化当中,但仍以豆腐、豆干、豆浆、组织/拉丝蛋白、蛋白粉、蛋白乳、蛋白肽等传统食品为主,也有相当一部分用于动物饲料,在传统工艺深度挖掘和新技术、新产品开发方面存在不足<sup>[20]</sup>。

因此,中国可食用的植物蛋白资源丰富,但实际产能和食品有效利用率较低(平均不足 40%),如国产大豆粕(大豆蛋白初产品)年产量不足 100 万 t,且主要用于饲料,一些新蛋白资源尚未得到完全开发,在我国优质蛋白质资源相对短缺状态下,发展植物蛋白资源并提高其有效利用率具有重要意义。针对核桃、葵花籽、豌豆等新兴植物蛋白,鱼糜、畜禽血液等廉价动物蛋白,酵母、食用菌、微藻等高效微生物蛋白,以及蚕蛹、蝗虫等特色昆虫蛋白开展各类别蛋白的功能特性和营养价值深度挖掘,进行个性化合理搭配,弥补植物蛋白氨基酸组成不全等缺陷,研制营养健康多源混合蛋白产品,将成为新质蛋白资源开发利用的重要方向。

## 2 植物蛋白产业发展历程与现状

随着植物蛋白资源不断被开发利用,推动形成了植物蛋白产业,早期植物蛋白加工以大豆蛋白为主,逐步向豌豆、小麦、大米等多元化植物蛋白原料延伸,产品品类从传统豆制品扩展至植物基肉制品、植物奶、植物蛋、植物基酸奶、营养补充剂等细分领域,可满足消费者对低脂、低胆固醇的健康需求,如图 1 所示。早在 20

世纪 60 年代，日本和美国等国家开始研发植物蛋白工业化生产线包括蛋白粉、浓缩蛋白、分离蛋白和组织化蛋白等。中国则在 20 世纪 80 年代才开始植物蛋白工业化生产，主要以引进国外生产线进行化学或结合生物酶解提取为主，且植物蛋白利用率较低，90% 以上作为饲料，而约 5% 用于食品工业，且产品单一<sup>[16]</sup>。经过 40 余年的发展，中国植物蛋白产业逐渐兴起，蛋白质分离纯化、

挤压组织化、酶法交联、高压均质、生物发酵等技术工艺不断成熟，国产化装备性能大幅度改进提升，大豆、花生、小麦、豌豆、大米、马铃薯等植物蛋白作为食品配料、补充剂、乳化剂、功能水解物、可食用涂层成分以及各种功能化合物的载体等，在火腿肠、速冻食品、饮料、糕点及休闲食品等方面得以广泛应用，但仍有相当一部分植物蛋白用作动物饲料<sup>[16,36]</sup>。

表 1 中国主要植物蛋白资源统计

Table 1 Statistics on major plant protein resources in China

来源 Source	种类 Category	产量 Yield/10 kt	蛋白含量 Protein content/%	折合蛋白产量 Equivalent to protein yield/10 kt	实际粗蛋白 (饼/粕/粉) 产量及食用蛋白应用 比例 Crude protein yield (10 kt) and the application proportion of edible protein	蛋白组成及功能特性 Protein composition and functional properties	主要用途 Main use	参考文献 Reference
谷物 Cereals	稻谷 (壳重占比 25%)	20 753.50	5~8	1 037.67~1 660.28	30 (30%~35%)	主要由谷蛋白 (占 80% 以上) 和球蛋白 (约 12%) 组成，具有低致敏性、高生物效价的特点	婴儿食品、植物基肉制品、营养强化剂等	[21]
	小麦	14 009.90	8~16	1 120.79~2 241.58	50~60 (65%~70%)	主要由清蛋白、球蛋白、麦醇溶蛋白和麦谷蛋白组成，富含谷氨酸 (占比约 42%)	面制品改良、肉制品与植物基肉制品、特殊食品等	[22]
	玉米	29 491.70	8~12	2 359.34~3 539.01	270 (约 25%)	以醇溶蛋白 (60% 以上) 为主，疏水性强、溶解性差，但成膜性优异	玉米蛋白粉 (食品涂层)、饲料添加剂、乙醇燃料等	[23]
	谷子	261.81	12.62	33.04	- (约 85%)	含人体所需的 8 种必需氨基酸，其中脯氨酸和天门冬氨酸含量较玉米和大米分别高出 40%、55%	婴幼儿辅食、植物蛋白饮料、营养强化食品添加剂等	[24]
	高粱	309.39	11	27.85	- (10%~15%)	以醇溶蛋白 (37%~72%) 为主，与单宁结合导致蛋白消化率降低	主要用于饲料	[25]
薯类 Tubers	马铃薯	1 788.26	11.99~13.41	214.41~239.81	15~18 (约 40%)	必需氨基酸含量为 20.1%，占总氨基酸的 47.9%，与鸡蛋蛋白必需氨基酸/总氨基酸 (49.7%) 相当，致敏蛋白含量较少	肉制品填充剂、植物基产品黏合剂等	[26]
豆类 Pulses	大豆	2 084.17	41.18~53.61	858.26~1 098.02	50~80 (25%~30%)	以球蛋白和伴球蛋白 (80% 以上) 为主，具有较高营养价值和生物利用率，乳化性与凝胶性强	乳品替代 (豆奶)、蛋白粉、豆粕饲料、植物基肉制品、烘焙强化等	[20]
	绿豆	38.93	21.33~26.61	8.30~10.36	- (60%~65%)	富含赖氨酸，总必需氨基酸评分高于豌豆蛋白，具有与大豆蛋白相近的溶解度和持油性	植物基食品、肉制品和营养补充剂	[27]
	豌豆	153	23~25	35.19~38.25	12 (70%~75%)	以球蛋白 (55%~80%) 为主，高赖氨酸 (6%~7%)，低致敏性	植物蛋白饮料、豌豆蛋白粉 (健身食品)、植物基肉制品、婴儿配方食品 (低敏蛋白) 等	[28]
	红小豆	24.70	16.33~29.20	4.03~7.21	2.5~3 (60%~65%)	主要为球蛋白 (约 50%)，其中 7S 球蛋白为主要的组成成分，具有较好的溶解性和乳化性	保健食品、婴幼儿营养强化食品、植物基甜品原料等	[29]
油料 Oil crops	花生 (壳重占比 30%)	1 923.07	24~36	461.54~692.31	370~440 (15%~20%)	以球蛋白 (60%~70%) 和伴球蛋白 (30%) 为主，高精氨酸 (12%)，但致敏性强	面制品改良、肉制品加工、乳制品与饮品开发、高蛋白零食、植物基肉制品等	[30]
	核桃	590.06	12.80~15	75.53~88.51	50~60 (25%~30%)	主要含球蛋白和伴球蛋白，含较高比例的精氨酸，具有促进一氧化氮合成、改善心血管功能的潜力	蛋白粉、能量棒、营养补充剂、生物活性肽等	[31]
	油菜籽	1 631.74	17~26	277.40~424.25	约 930 (15%~20%)	以 2S 白蛋白和 12S 球蛋白为主，含硫氨基酸丰富，但含芥酸	可食用膜、营养强化剂、蛋白肽等	[32]
	芝麻	45.34	19.87~24.25	9.01~10.99	11~14 (10%~15%)	以芝麻球蛋白 (60% 以上) 为主，氨基酸组成相对平衡，致敏性低	食品配料、递送载体、可食用膜等	[33]
	葵花籽	174.13	30	52.24	80~85 (20%~25%)	以球蛋白 (70% 以上) 为主，含有含硫氨基酸 (蛋氨酸 1.5%)，但需脱壳去除绿原酸	烘焙食品、饮品与乳制品、植物基食品、营养补充剂等	[34]
	亚麻籽 (胡麻籽)	25.87	18.6	4.81	约 8 (5%~8%)	主要成分为球蛋白 (26%~58%) 和清蛋白 (20%~42%)，支链氨基酸的含量较高	保健食品 (Omega-3 来源)、烘焙原料、植物基食品等	[35]
总计 Total		73 305.57	17.55~22.33	6 579.41~10 168.52	>1 878.5 (平均 35%~38%)			

注：实际粗蛋白产量及食用蛋白应用比例数据根据相关行业报告测算，“-”代表未查询到具体数据。

Note: Crude protein production and its application in foods are calculated according to relevant industry reports, and "-" represents that the specific data have not been found.

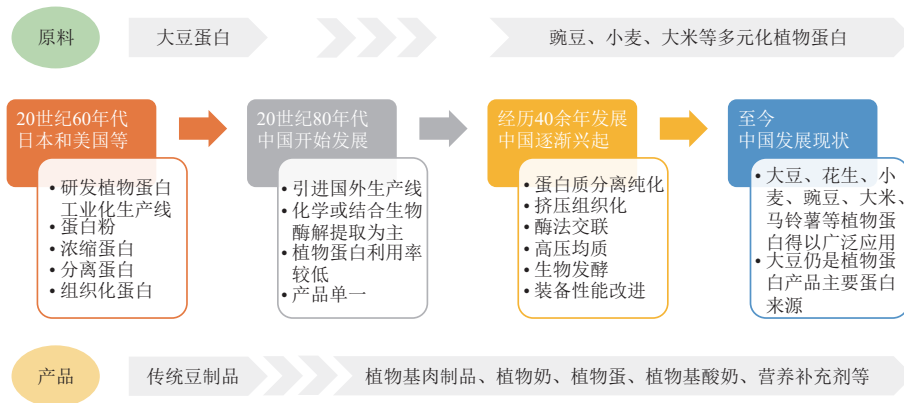


图1 植物蛋白加工产业发展历程

Fig.1 The development history of the plant protein processing industry

据华经情报网信息<sup>[37]</sup>, 2023年, 中国植物蛋白市场规模已经达到了271.3亿元, 其中, 大豆仍是植物蛋白产品主要蛋白来源, 市场规模为151.6亿元, 占植物蛋白市场规模的一半以上, 而随着产业升级和消费理念的普及, 植物蛋白需求还将进一步扩大, 呈现平稳增长态势。

近年来, 以大豆、花生、小麦、豌豆等植物蛋白或其加工品作为原料, 经一定加工工艺开发具有类似畜、禽、水产等动物肉制品品质、风味、形态等特征的植物基肉制品(即植物肉)是当前植物蛋白产业的焦点, 已引起全球各国高度重视, 将成为解决蛋白质供给不足、温室气体排放以及人类营养均衡问题的重要选择之一<sup>[38-39]</sup>。2019年在《麻省理工学院技术评论》上发布的全球十大突破性技术中, 植物基牛肉汉堡成功入选<sup>[40]</sup>, 同年, 植物基肉制品代表企业美国Beyond Meat公司在纳斯达克挂牌上市, 首日股价收涨163%。植物基肉制品在中国也引起广泛关注, 新兴企业不断出现, 资本市场持续活跃, 产业快速发展, 出现了植物基肉饼、植物基饺子、植物基五花肉等各类产品30多种, 市场规模由2019年的2.03亿元增长至2023年的3.70亿元。但近年来, 全球植物基肉制品市场从火热到遇冷, 2023年, 全球植物基肉制品市场规模约为11.8亿美元, 较上一年度下降12.59%, 市场需求不及预期, 面临着从法规到技术突破、供应链以及消费者教育、市场接受度等一系列问题<sup>[41]</sup>。消费者调查结果显示, 与美国(74.7%)相比, 中国(95.6%)和印度(94.5%)的消费者对于植物基肉制品的接受率更高<sup>[42]</sup>。但目前的植物基肉制品产品多为碎肉、馅料制品且食品添加剂使用较多, 在外观、口感、风味和营养等方面都需要进一步改进提高, 仍难以满足中国饮食习惯和消费理念的长周期需求, 导致植物基肉制品市场规模出现逐渐下滑趋势。

因此, 植物蛋白产业发展与新产品研发须紧密结合中国国情和中国饮食习惯, 未来应综合物理化学、生物化学、应用数学、合成生物学、人工智能等多学科交叉优势, 通过技术创新、科企融合和产业链协作, 加强植物蛋白加工制造工艺和配套装备的创新设计, 提高产品

综合品质, 降低加工过程中的能耗、减少废水等污染物排放, 推动植物蛋白产业高质量发展。

### 3 植物蛋白多尺度结构解析及其品质功能

深度解析植物蛋白多尺度结构, 并通过加工条件对蛋白质结构进行修饰改性, 是调控其品质功能的关键。蛋白质是以氨基酸为单元构成的典型大分子化合物, 由氨基酸通过一定的顺序连接在一起, 再通过分子内、分子间的各种作用力达到平衡形成特定的空间结构, 相对分子质量常为 $10^4 \sim 10^5$ 。原料中的植物蛋白以共价键连接在一起的多聚体形式存在, 主要分为水溶性的清蛋白、盐溶性的球蛋白、醇溶蛋白和溶于稀酸(碱)的谷蛋白<sup>[15]</sup>。清蛋白和球蛋白主要存在于豆类和杂粮类作物(如大豆、藜麦等)中, 而醇溶蛋白和谷蛋白主要存在于谷物(如小麦等)中, 如图2所示。蛋白质一级结构、二级结构、三级结构、四级结构等的差异决定了其水合特性、表面活性、流变特性、乳化能力等理化和功能特性, 在食品这一多相、多组分的复杂体系中, 蛋白质多尺度结构变化及与其他组分互作将最终影响产品品质功能<sup>[43]</sup>。当前, 蛋白质设计与结构预测已成为当前化学和生命科学领域的研究热点, 2024年, 美国科学家大卫·贝克、英国科学家戴米斯·哈萨比斯和美国科学家约翰·詹珀因开发可被用于预测和设计蛋白质结构的计算工具被授予诺贝尔化学奖, 戴米斯·哈萨比斯和约翰·詹珀成功利用人工智能技术预测了几乎所有已知蛋白质的结构, 而大卫·贝克掌握了蛋白质的构建模块, 通过输入所需的蛋白质结构, 推导出相应的氨基酸序列, 从而创造出全新的蛋白质, 开启了蛋白质“从头设计”的新篇章。

加工过程中, 蛋白质的构象一般是不稳定的, 在酸、碱、热、剪切、压力、有机溶剂或辐射处理时, 其二、三、四级结构会发生不同程度的改变, 从而引起蛋白质品质功能的变化, 如热处理(煮鸡蛋)通过破坏氢键和疏水作用改变三级结构, 导致蛋白质变性凝固, 形成凝胶网络结构等。蛋白质结构改性是其从原料到产品形成过程中的必须环节, 加工过程中, 蛋白质在温度、压力、剪切力、pH值、生物酶等耦合作用条件下, 通过形成凝

胶、溶胶、薄膜、泡沫和乳液等结构体系参与植物蛋白类食品的加工和制造，进而影响产品的感官品质、安全品质和营养品质<sup>[44-46]</sup>。比如，植物蛋白在加热过程中，非极性基团和巯基暴露，在疏水作用力和二硫键作用下发生聚集反应<sup>[47]</sup>，蛋白质-蛋白质和蛋白质-溶剂之间相互平衡，最终形成凝胶<sup>[48]</sup>。清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白都可以形成各向同性（如酸奶）或各向异性（如纤维结构）凝胶，谷蛋白和醇溶蛋白水合时，能够形成网状凝胶结构，但清蛋白和球蛋白需要物理、化学或酶改性后进一步形成凝胶。以大豆蛋白为例，其二级结构以  $\beta$ -折叠为主（区别于动物蛋白的  $\alpha$ -螺旋），易形成柔性聚合物链，赋予其软物质特性，可通过自组装形成凝胶或纤维结构， $\beta$ -折叠结构通过疏水作用形成交联

网络，决定其乳化性、保水性和机械强度。此外，大豆蛋白通过疏水区域与脂质结合，亲水区域稳定水相，形成乳化物界面层，广泛用于乳制品、酱料等食品的乳化稳定。其与多糖（如卡拉胶）形成复合物时，静电作用增强界面稳定性，抑制乳液分层，并提升复合膜的阻隔性和拉伸强度。然而，当前中国植物蛋白原料品质特性各异，且存在混收混用的现象，导致植物蛋白原料品质稳定性较差，同时，植物蛋白原料中自带的多糖、油脂、矿物质等不明确微量组分在加工过程中与蛋白质互作机制不清楚，致使植物蛋白加工过程难以精准控制，产品品质参差不齐。此外，部分植物蛋白中含有过敏原、抗营养因子、豆腥味、苦涩味等，影响蛋白质的消化、吸收等营养品质。



图 2 植物蛋白多尺度结构解析及其品质功能

Fig.2 Multiscale structural analysis of plant proteins and their quality and function

因此，构建植物蛋白高效分离与精准分级体系，结合加工技术革新（如挤压成型、3D 打印）、物理场辅助改性（超声/微波/脉冲电场）及生物靶向调控（酶解-发酵协同），在实现蛋白质结构改造与功能优化的同时同步脱除抗营养因子、异味物质及致敏成分；进一步整合小角 X 射线散射、纳米红外光谱、分子动力学模拟等蛋白质多尺度结构综合表征新手段，系统解析加工过程中蛋白质构象演化、聚集态转变及组分互作网络，阐明蛋白质多尺度结构变化与品质功能的关联机制，将成为突破植物蛋白加工品质精准调控与功能定向设计的关键路径。

#### 4 植物蛋白制备工艺创新与产品设计

蛋白质分离提取、调质改性和加工成型是植物蛋白产品加工的核心工艺，通过提高蛋白质含量、改善蛋白

品质品质功能和形成特定的质构，促进新产品的开发。植物蛋白分离提取是其成为食品原料的第一步，当前主要的方法为碱溶酸沉、醇沉、超声/微波辅助、酶解-碱提联用等方法，用于制备蛋白含量不等的蛋白粉、浓缩蛋白、分离蛋白等植物蛋白原料<sup>[49]</sup>。近年来，低温压榨、亚临界/超临界萃取、干法分离、膜分离、静电分离等绿色、温和、高效的蛋白提取工艺受到广泛关注<sup>[50-52]</sup>，如通过高频振动与电场穿孔协同破坏细胞壁，使豌豆蛋白提取率提升至 85%~92%，同时保留热敏性功能成分。同时，人工智能在蛋白原料制备方面具有显著优势，如上海交通大学洪亮团队建立的 AI 大模型“启明星”已构建出亿级蛋白质的“功能图谱”，能够精准、高效地设计出耐热、耐碱、耐酸等“超能”蛋白质，满足定制蛋白质的需求，把蛋白质生产由缓慢的试错变为高效率的精准设

计<sup>[53]</sup>。此外,单细胞微生物蛋白技术利用微藻、真菌等高效生产高纯度蛋白,可突破传统作物种植获取蛋白资源的限制。

植物蛋白加工技术分为物理法、化学法、生物法以及耦合加工等几类,包括挤压、超高压、高压均质、电子束辐照、糖基化、磷酸化、酶解和发酵等,用于制备植物基肉蛋奶制品、蛋白能量棒、功能性蛋白粉、蛋白乳、蛋白肽等产品<sup>[36]</sup>。以植物基肉制品加工为例,由于天然植物蛋白在氨基酸组成、分子间作用力、空间构象等方面与动物蛋白存在较大差异,难以直接模拟由肌动蛋白和肌球蛋白构成的肌纤维及肌束的结构<sup>[8,54]</sup>。因此,需借助加热、剪切、压力等食品加工技术条件使天然球状植物蛋白伸展、重排、交联、冷却固定,从而构建类似动物肉的纤维纹理及结构。目前常用的植物基肉制品加工技术包括挤压、剪切、纺丝、冷冻、机械拉伸和3D打印等<sup>[55-58]</sup>,其中,挤压技术是加工制备植物基肉制品的关键核心技术,并已实现工业化生产,但目前以低水分挤压技术(含水率20%~40%)为主,产品质地松散,咀嚼性较差,多以碎肉形式用于肉丸、肉饼、饺子等肉制品添加物<sup>[16]</sup>。高水分挤压技术(含水率40%~80%)是食品挤压技术发展过程中一次历史性的革命,蛋白质经高水分挤压可形成丰富的纤维结构和类似动物

肉的质地,具有工艺集成度高、能耗低、无污染等优势,是当前植物蛋白质构重组和植物基肉制品纤维口感提升的关键核心技术,可以实现模拟整块熟肉质地,并已逐步实现了产业化应用<sup>[59-60]</sup>。

随着新一轮科技革命和产业变革的纵深演变,新一代前沿技术与装备等在食品领域不断渗透融合,驱动全球食品产业向高技术、全营养、智能化、可持续方向快速发展。近年来,生物制造技术不断发展并与食品加工技术深度融合,利用组织工程原理,细胞培养肉被成功创制<sup>[8]</sup>,通过组织工程技术与未来食品科技融合,探索植物基肉制品与细胞培养肉结合的新质蛋白食品生产方式成为研究前沿热点。以色列理工学院 LEVENBERG 团队<sup>[61]</sup>以植物蛋白的纤维结构作为细胞培养肉的支架,开发了与动物肉口感几乎一致的植物基肉制品和细胞培养肉结合产品,提供了一种新的肉类生产方式。南京农业大学周光宏团队<sup>[11]</sup>对比分析了挤压后的大豆、花生和小麦蛋白作为细胞支架的情况,发现肌肉细胞可以在挤压花生蛋白支架上很好粘附和增殖分化。而美国塔夫斯大学 KAPLAN 团队<sup>[62]</sup>研究发现,小麦谷蛋白作为一种廉价而丰富的植物蛋白,可用于开发三维多孔支架,用于细胞培养肉新型肉制品研发,如图3所示。

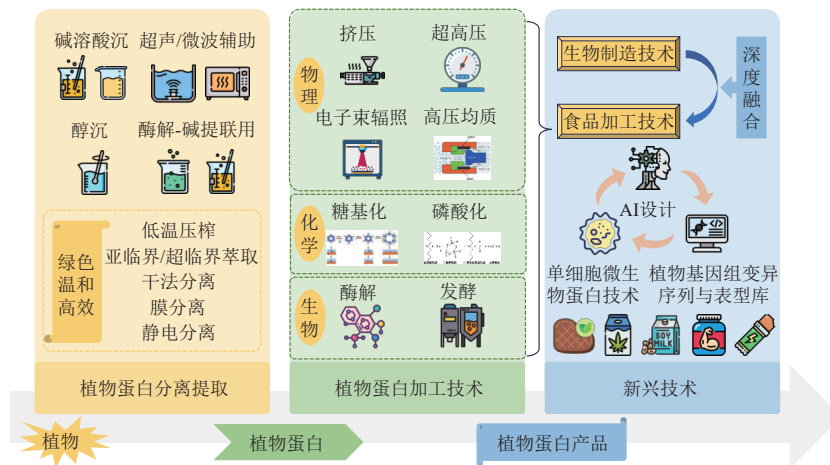


图3 植物蛋白制备与加工工艺<sup>[63-65]</sup>

Fig.3 Preparation and processing technology of plant proteins<sup>[63-65]</sup>

因此,植物蛋白分离提取工艺已逐渐成熟,基于AI设计、单细胞微生物蛋白等精准高效的新型功能性蛋白原料制备技术将成为蛋白资源获取的重点方向。同时,挤压质构重组、3D打印、组织工程等技术融合发展,为植物基肉制品等植物蛋白新产品创制与品质提升提供了有效支撑。并且加快植物蛋白全链条加工工艺有效衔接和熟化转化,实现高品质植物蛋白产品大规模低成本高效制造,对于满足中国消费者对高蛋白食品的新需求具有重要意义。

## 5 植物蛋白加工技术装备升级与智能制造

装备是植物蛋白加工过程中涉及的温度场、力场、

声波场、电磁场、压力场等的动力来源,这些多物理场相互作用直接影响产品质量和过程能效<sup>[66]</sup>,主要分布在筛选粉碎、分离提取、调质改性、质构重组、固定成型、冷冻/干燥、杀菌包装等植物蛋白加工各个环节(图4)。近年来,超高温、超高压、超低温、超微粉碎、超强光、高压电磁场等食品加工新技术逐渐兴起,中国植物蛋白加工装备在制造成本、规模化放大、个性化水平等方面取得了显著进步,但与德国、瑞士、美国等发达国家相比,在处理效率、物料适配性、传动/传感精确性、操控模型开发和使用寿命等多个关键指标上依然存在劣势,不少关键核心技术仍受制于人<sup>[67]</sup>。

以植物蛋白挤压装备制造为例,经过近百年的革新

发展，挤压技术装备从化工领域逐渐引入到食品领域，研究对象也从淀粉拓展到蛋白，螺杆数量从单螺杆发展到双螺杆、多螺杆，物料水分从低水分（20%~40%）提高到高水分（40%~80%）范围，产品类型也从膨化食品过渡到组织/拉丝蛋白等，成为了植物蛋白质重组与植物基肉制品加工制造的关键核心技术。法国蒙彼利埃大学 CHEFTEL 教授<sup>[68]</sup>首次提出高水分挤压技术概念，并强调了冷却成型模具的重要性。同时，法国克莱斯特罗集团公司和美国 APV 贝克公司较早地研发了实验室规模的挤压机，用于高水分挤压过程中蛋白质纤维结构形成工艺研究<sup>[69]</sup>。中国农业科学院王强团队联合湖南富马科食品工程技术有限公司等相关企业研制了积木式可调节螺杆构型和冷却成型模具等关键核心装备部件，与虚拟仿真技术结合，创建了植物基肉制品“制备过程-蛋白结构变化-品质精准调控”可视化平台，推动了高水分挤压技术中试规模生产和应用<sup>[70-71]</sup>。此外，美国康奈尔大学 RIZVI 团队<sup>[72]</sup>、美国密西西比大学 REPKA 团队<sup>[73]</sup>等在超临界 CO<sub>2</sub> 挤压、充气挤压、双阶或多级挤压、挤压-3D 打印等设备联用方面取得了突破，使挤压过程具有工作效率高、营养损失小、个性化程度高等特点<sup>[70]</sup>。荷兰瓦赫宁根大学 DER GOOT 团队<sup>[74]</sup>参照高水分挤压技术

原理，创制了 shear-cell 剪切装备，通过剪切力的调控实现蛋白质纤维结构的高效制备，且极大降低了生产能耗，引起行业广泛关注。近年来，随着挤压过程中的物料结构信息变化的采集精确度提高、数学模型的构建和多维物理仿真软件的开发，在实现植物蛋白组织化过程数据精准预测与品质调控方面取得了新突破，促使挤压技术朝着个性化、可视化和智能化方向发展<sup>[71, 75]</sup>。此外，蛋白组分高效提取分离关键技术、材料及装备包括超临界流体萃取、高速离心提取技术、膜分离技术也取得了新突破，如王龙等<sup>[50]</sup>通过植物蛋白提取装置控制系统的研究，研发了一套基于膜分离技术的藻蓝蛋白提取装置控制系统，保证了藻蓝蛋白质量，提高了提取效率。而新型多物理场加工技术如磁场辅助冻结、超声波辅助冻结以及高压辅助冻结等在弥补传统加工方法能耗高、精度不足与可持续性差等方面也表现出重要潜力<sup>[66]</sup>。近年来，人工智能的理论和技術日益成熟，应用领域也不断扩大，但是人工智能技术在食品领域的研究较少，引入人工智能技术，建立制造资源的几何模型、功能模型、物理模型，模拟制造过程和未来产品，实现从感官和视觉上使人获得完全如同真实产品的感受，将是提升 3D 打印等食品装备设计优化水平的一个有效手段<sup>[67]</sup>。

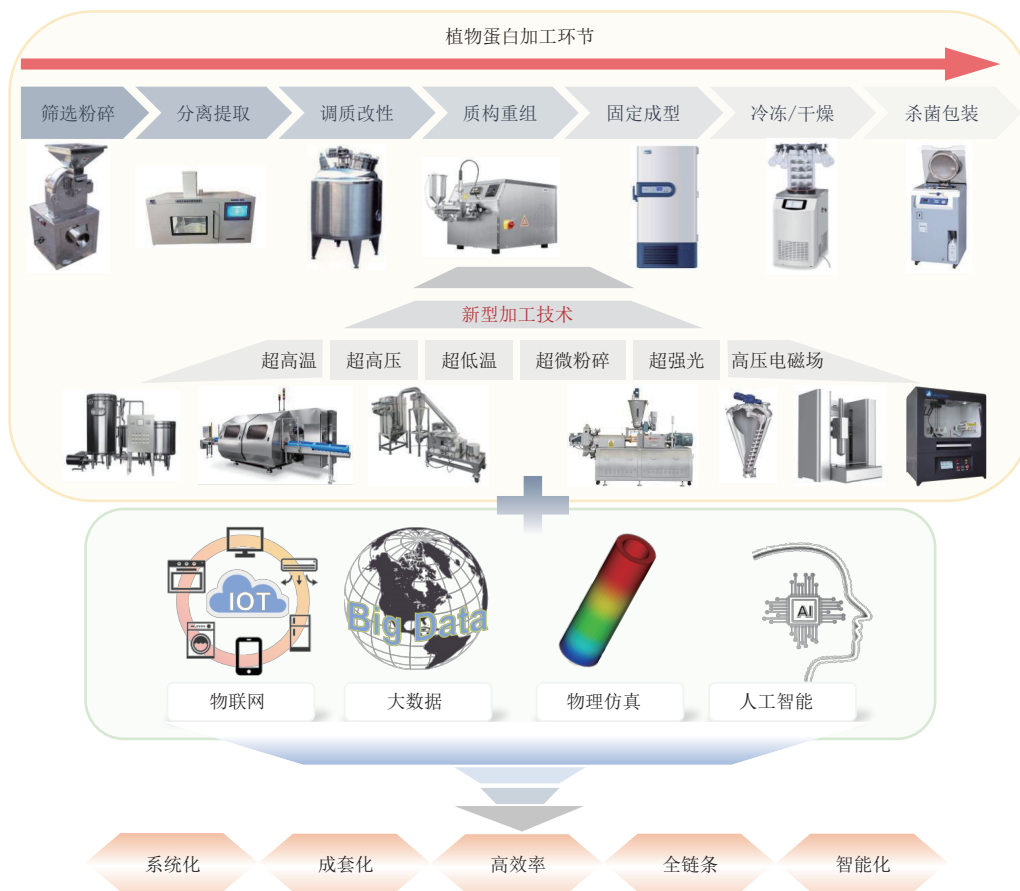


图 4 植物蛋白加工环节与装备升级

Fig.4 Plant protein processing steps and equipment upgrade

因此，随着物联网、大数据、物理仿真、人工智能等高新技术迅猛发展，系统化、成套化、高效率、全链条、智能化加工技术装备的改进提升，食品原位感知、

数字化加工、3D/4D/5D/6D 多维精准打印、智能挤压成型等技术将在植物蛋白产品加工中起到重要作用，将加速植物蛋白加工产业的转型升级和提质增效。

## 6 结论与展望

植物蛋白资源是人类主要蛋白质来源之一, 培育和发展植物蛋白精深加工产业是践行“大食物观”向植物、动物、微生物要热量、要蛋白, 培育发展新质生产力的重要举措, 在保障蛋白质高效供给、减少碳排放、改善人民生命健康等方面具有重要意义。中国蛋白质总量供给充足, 但仍以植物蛋白为主, 而动物蛋白则相对短缺, 植物蛋白加工利用还存在原料品质稳定性较差、有效利用率较低、全链条加工技术装备落后等瓶颈问题。中国人饮食结构中蛋白质的摄入以植物蛋白为主, 是植物蛋白消费大国, 但中国植物蛋白加工业工业化生产走过了近50年, 产品仍以豆腐、豆干、豆浆、组织/拉丝蛋白、蛋白粉、蛋白乳、蛋白肽等传统食品为主, 口感、风味、营养等方面已难以满足中国消费者的需求。充分挖掘各类可食用新蛋白资源及其功能和发展植物蛋白基肉蛋奶、细胞培养肉、微生物蛋白等融合蛋白新质蛋白食品, 是食品产业实现资源高效利用和绿色低碳发展的重要途径之一, 已成为当前植物蛋白加工制造领域的前沿热点, 但近年来植物基食品行业一度遇冷, 50%以上的市场仍在欧美等发达国家, 根本原因在于植物基食品加工技术的进步与消费者的认知理念严重脱节, 产品外观、口感、风味和营养等方面仍需改进提高, 科企融合和产业链协作效能未充分发挥, 如问题导向不明确、产业技术路线不成熟、上下游衔接不通畅等。

解决以上问题, 必须树立高效、绿色、低碳、健康新理念, 挖掘植物、动物、微生物蛋白新原料, 发展颠覆性、革命性、引领性新技术, 拓展数字化、个性化、精准化新产品, 培育智能制造、循环发展、三产融合新业态。一是充分了解植物蛋白原料资源的基本情况, 开展植物蛋白原料加工适宜性评价, 同时挖掘微生物、藻类、昆虫等各类蛋白质的开发利用潜能, 探索多源蛋白质原料的科学配比, 实现蛋白质资源及其副产物的高值化利用。二是注重技术和装备创新, 高度关注新型绿色加工技术的应用如高水分挤压技术、3D打印、生物技术等, 利用多学科交叉优势加强制造工艺和装备的创新设计, 提高植物蛋白产品综合品质, 降低加工过程中的能耗、减少废水等污染物排放, 实现植物蛋白加工过程的精准调控和智能制造。三是加强标准法规制定和科普宣传, 积极引导消费者正确认知植物基肉制品等植物蛋白新产品, 根据中国饮食习惯, 充分考虑色香味型和营养等多个层面, 开发更适合中国消费者的高品质植物蛋白产品, 满足不同人群的个性化需求。四是注重一二三产业融合发展, 加强从原料到终端产品的市场体系构建, 促进科企融合和产业链协作, 推动科技成果转化落地, 依靠科技进步实现植物蛋白加工制造业高质量发展。

### 【参 考 文 献】

[1] 新华网. (两会授权发布) 习近平看望参加政协会议的农业界社会福利和社会保障界委员[EB/OL]. (2022-03-06) [2025-04-28]. <http://www.news.cn/politics/leaders/2022-03/06/>

c\_1128443977.htm.

[2] 新华社. 国务院办公厅印发《关于践行大食物观构建多元化食物供给体系的意见》[EB/OL]. (2024-09-15) [2025-04-28]. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content\\_6974842.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202409/content_6974842.htm).

[3] 新华社. 中共中央 国务院关于进一步深化农村改革 扎实推进乡村全面振兴的意见[EB/OL]. (2025-02-23) [2025-04-28]. [https://www.gov.cn/zhengce/202502/content\\_7005158.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202502/content_7005158.htm).

[4] 李兆丰, 孔昊存, 刘潇, 等. 新质蛋白: 机遇与挑战[J]. 生物工程学报, 2025, 41(5): 1691-1704.  
LI Zhaofeng, KONG Haocun, LIU Xiao, et al. NeoProtein: Opportunity and challenge[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(5): 1691-1704. (in Chinese with English abstract)

[5] FAO. World Food and Agriculture-Statistical Yearbook 2024[M]. Rome: FAO, 2024.

[6] ALEXANDER P, BROWN C, ARNETH A, et al. Losses, inefficiencies and waste in the global food system[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 153: 190-200.

[7] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.

[8] RUBIO N R, XIANG N, KAPLAN D L. Plant-based and cell-based approaches to meat production[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-11.

[9] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(50): 20260-20264.

[10] NATIONS U. World population prospects 2019[EB/OL]. (2019-06-17)[2025-04-28]. <https://www.un.org/development/desa/pd/news/world-population-prospects-2019-0>.

[11] ZHENG Y, CHEN Y, ZHU H, et al. Production of cultured meat by culturing porcine smooth muscle cells in vitro with food grade peanut wire-drawing protein scaffold[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111561.

[12] 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.

[13] KEW B, HOLMES M, LIAMAS E, et al. Transforming sustainable plant proteins into high performance lubricating microgels[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 4743.

[14] QIAN Y, LIANG G, DONG J, et al. Effect of myoglobin on the flavor, color and texture of high-moisture soy protein concentrate-wheat gluten extrudates[J]. *Food Chemistry*, 2025, 473: 143102.

[15] GROSSMANN L, WEISS J. Alternative protein sources as technofunctional food ingredients[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2021, 12(1): 93-117.

[16] 张金闯. 高水分挤压过程中花生蛋白构象变化及品质调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.  
ZHANG Jinchuang. Conformational Changes and Quality Control of Peanut Protein During the High-moisture Extrusion Process[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019. (in Chinese with English abstract)

[17] CAPORGNO M P, BÖCKER L, MÜSSNER C, et al. Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides* microalgae[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102275.

[18] MOHAMAD MAZLAN M, TALIB R A, CHIN N L, et al. Physical and microstructure properties of oyster mushroom-soy

- protein meat analog via single-screw extrusion[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1023.
- [19] KIIRU S M, KINYURU J N, KIAGE B N, et al. Extrusion texturization of cricket flour and soy protein isolate: Influence of insect content, extrusion temperature, and moisture - level variation on textural properties[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(8): 4112-4120.
- [20] 郭顺堂, 徐婧婷. 我国大豆食品产业发展现状及存在的问题[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(3): 1-8. GUO Shuntang, XU Jingting. Development status and existing problems of soybean food industry in China[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [21] 石彦国, 贺殷媛, 陈凤莲, 等. 大米蛋白与蒸煮品质相关性研究进展[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(4): 1-9. SHI Yanguo, HE Yinyuan, CHEN Fenglian, et al. Research progress on relationship between rice protein and cooking quality[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(4): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [22] 曲敏, 姜佩秀, 贾圆芳, 等. 热诱导下小麦蛋白结构与功能性质变化研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(15): 11-19. QU Min, JIANG Peixiu, JIA Yuanfang, et al. Research progress on structural and functional changes of wheat protein induced by heat[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(15): 11-19. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵新淮, 徐红华, 姜毓君. 食品蛋白质: 结构、性质与功能[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [24] 李琳, 金丽娜, 郭佩佩, 等. 富硒小米蛋白的理化性质、功能特性及结构研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(3): 259-267. LI Lin, JIN Lina, GUO Peipei, et al. Physicochemical properties, functional characteristics, and structure of selenium-enriched millet protein[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(3): 259-267. (in Chinese with English abstract)
- [25] 陈振家, 杨雅婧, 陈琼玲, 等. 不同品种高粱醇溶蛋白理化性质的研究[J]. *中国粮油学报*, 2024, 39(12): 114-125. CHEN Zhenjia, YANG Yajing, CHEN Qionglin, et al. Study on physicochemical properties of different varieties of kafirin[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(12): 114-125. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘彦彤, 孙伟, 董墨思, 等. 马铃薯糖蛋白 Patatin 的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 331-337. LIU Yaotong, SUN Wei, DONG Mosi, et al. Recent progress in research on patatin, the major potato tuber protein[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 331-337. (in Chinese with English abstract)
- [27] 谢冕, 张名位, 邓媛元, 等. 绿豆蛋白的结构、提取及其在食品中的应用[J]. *现代食品科技*, 2025, 41(4): 97-108. XIE Mian, ZHANG Mingwei, DENG Yuanyuan, et al. The structure, extraction methods, and application in food of mung bean protein[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, 41(4): 97-108. (in Chinese with English abstract)
- [28] 宋佳琪, 于小帅, 段玉敏, 等. 挤压对豌豆蛋白构象调控及其与组织化结构关联性的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2025, 40(3): 200-208. SONG Jiaqi, YU Xiaoshuai, DUAN Yumin, et al. Research progress on the conformational regulation of pea protein by squeezing and its correlation with histological structure[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2025, 40(3): 200-208. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张波, 黄英, 薛文通. 红小豆分离蛋白功能特性研究[J]. *食品科学*, 2012, 33(19): 71-74. ZHANG Bo, HUANG Ying, XUE Wentong. Functional properties of adzuki bean protein isolate[J]. *Food Science*, 2012, 33(19): 71-74. (in Chinese with English abstract)
- [30] 崔颢凡, 郭芹, 李振源, 等. 花生蛋白组成与结构对其功能特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(10): 449-459. CUI Haofan, GUO Qin, LI Zhenyuan, et al. Effects of peanut protein composition and structure on its functional properties[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(10): 449-459. (in Chinese with English abstract)
- [31] 沈敏江, 刘红芝, 刘丽, 等. 核桃蛋白质的组成、制备及功能特性研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(1): 123-128. SHEN Minjiang, LIU Hongzhi, LIU Li, et al. Review on the composition, preparation and functional properties of walnut protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2014, 29(1): 123-128. (in Chinese with English abstract)
- [32] 冉仁森, 陈锦屏, 米瑞芳, 等. 油菜籽菜籽蛋白提取研究进展[J]. *食品工业*, 2013, 34(11): 215-218. RAN Rensen, CHEN Jinping, MI Ruifang, et al. The research development of extraction rapeseed protein[J]. *The Food Industry*, 2013, 34(11): 215-218. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周际松, 周倩, 吴萍, 等. 芝麻蛋白的组成、结构、功能特性及其应用[J/OL]. *现代食品科技*, 2025, 1-14. [2025-03-14] <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0485>. ZHOU Jisong, ZHOU Qian, WU Ping, et al. Composition, structure, functionalities, and applications of sesame protein[J/OL]. *Modern Food Science and Technology*, 2025, 1-14. [2025-03-14] <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0485>. (in Chinese with English abstract)
- [34] 秦那日苏, 李泓颖, 李雪馨, 等. 超声波对脱色葵花籽蛋白色泽和功能特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(4): 99-105. QIN Narisu, LI Hongjie, LI Xuexin, et al. Effects of ultrasound on color and functional properties of decolorized sunflower seed protein[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(4): 99-105. (in Chinese with English abstract)
- [35] 马德坤, 王汝华, 吕筱, 等. 亚麻籽蛋白特性及营养价值分析[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 257-264. MA Dekun, WANG Ruhua, LV Xiao, et al. Physicochemical and functional properties and nutritional value of flaxseed protein[J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 257-264. (in Chinese with English abstract)
- [36] 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 Lianzhou, TIAN Tian, ZHU Jianyu, et al. Research progress on plant protein processing science and technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(6): 6-20. (in Chinese with English abstract)
- [37] 华经情报网. 2024 年中国植物蛋白行业发展现状及趋势分析, 消费升级促进行业发展, 下游应用领域不断拓宽[EB/OL]. (2025-02-19) [2025-04-28]. <https://www.huaon.com/channel/trend/1053768.html>.
- [38] MORACH B, WITTE B, WALKER D, et al. Food for thought: The protein transformation[J]. *Industrial Biotechnology*, 2021, 17(3): 125-133.
- [39] SAMPEDRO J. A sustainable protein ratio[J]. *Nature Food*, 2024, 5(5): 357-358.
- [40] MIT Technology Review. 10 breakthrough technologies 2019[EB/OL]. (2019-02-27)[2025-04-28]. <https://www.technologyreview.com/10-breakthrough-technologies/2019/>.
- [41] 胡海娟, 王守伟, 李宇轩, 等. 替代蛋白食品工业化发展思考[J]. *中国工程科学*, 2025, 27(1): 258-268. HU Haijuan, WANG Shouwei, LI Yuxuan, et al. Thoughts on the industrialization of alternative protein foods[J]. *Strategic*

- Study of CAE, 2025, 27(1): 258-268. (in Chinese with English abstract)
- [42] 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.
- [43] 王强, 李琳, 鞠兴荣, 等. 多尺度结构变化与食品品质功能调控研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(1): 1-11. WANG Qiang, LI Lin, JU Xingrong, et al. Research progress on multi-scale structure change and quality function of food[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [44] 金征宇, 江连洲, 王兴国, 等. 品质导向的粮油食品精准加工分子基础与调控[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(5): 1-18. JIN Zhengyu, JIANG Lianzhou, WANG Xingguo, et al. Molecular basis and regulation of quality-oriented precision processing for cereal and oil-based Foods[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(5): 1-18. (in Chinese with English abstract)
- [45] KAMADA A, RODRIGUEZ-GARCIA M, RUGGERI F S, et al. Controlled self-assembly of plant proteins into high-performance multifunctional nanostructured films[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 3529.
- [46] CAO Y, MEZZENGA R. Design principles of food gels[J]. *Nature Food*, 2020, 1(2): 106-118.
- [47] 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.
- [48] XU C, CHEN Y, ZHAO S, et al. Mechanical regulation of polymer gels[J]. *Chemical Reviews*, 2024, 124(18): 10435-10508.
- [49] ETZBACH L, GOLA S, KÜLLMER F, et al. Opportunities and challenges of plant proteins as functional ingredients for food production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(50): e2319019121.
- [50] 王龙, 闫平, 任杰, 等. 基于膜分离技术的植物蛋白提取装置控制系统的设计[J]. *工业控制计算机*, 2016, 29(4): 47, 49. WANG Long, YAN Ping, REN Jie, et al. Control system of vegetable protein extraction based on membrane separation technology[J]. *Industrial Control Computer*, 2016, 29(4): 47, 49. (in Chinese with English abstract)
- [51] 王金顺, 朱新亮, 张善茹, 等. 亚临界低温萃取技术在制取全脱脂花生蛋白粉上的应用[J]. *粮食加工*, 2023, 48(1): 65-68.
- [52] ZHU H, TANG H, CHENG Y, et al. Electrostatic separation technology for obtaining plant protein concentrates: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 113: 66-76.
- [53] ZHOU Z, ZHANG L, YU Y, et al. Enhancing efficiency of protein language models with minimal wet-lab data through few-shot learning[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5566.
- [54] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 51-61.
- [55] 葛志优, 王羽, 高艳娥, 等. 植物蛋白肉超声振动 3D 打印方法与试验[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(20): 259-268. GE Zhiyou, WANG Yu, GAO Yan'e, et al. Method and experiment of the ultrasonic vibration 3D printing for plant protein-based meat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(20): 259-268. (in Chinese with English abstract)
- [56] SÄGESSER C, MAIR T, BRAUN A, et al. Application of a shear cell for the simulation of extrusion to test the structurability of raw materials[J]. *Food Hydrocolloids*, 2025, 160: 110736.
- [57] DEHNAD D, GHORANI B, EMADZADEH B, et al. Electrospinning of legume proteins: Fundamentals, fiber production, characterization, and applications with a focus on soy proteins[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 151: 109795.
- [58] 李同庆, 张金闯, 刘浩栋, 等. 不同来源豌豆分离蛋白高水分挤压特性[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(5): 224-231. LI Tongqing, ZHANG Jinchuang, LIU Haodong, et al. Characterization of the high moisture extrusion of pea protein isolate from various sources[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(5): 224-231. (in Chinese with English abstract)
- [59] 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 Qiang, ZHANG Jinchuang. 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. (in Chinese with English abstract)
- [60] SUI X, ZHANG T, ZHANG X, et al. High-moisture extrusion of plant proteins: Fundamentals of texturization and applications[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2024, 15(1): 125-149.
- [61] BEN-ARYE T, SHANDALOV Y, BEN-SHAUL S, et al. Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat[J]. *Nature Food*, 2020, 1(4): 210-220.
- [62] XIANG N, YUEN JR J S, STOUT A J, et al. 3D porous scaffolds from wheat glutenin for cultured meat applications[J]. *Biomaterials*, 2022, 285: 121543.
- [63] 纪慧杰, 朱彩平. 高压均质技术在植物天然活性成分提取中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(9): 317-323. JI Huijie, ZHU Caiping. Application of high-pressure homogenization technology in extracting active ingredients from plants[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(9): 317-323. (in Chinese with English abstract)
- [64] 任昊天, 王墨阳, 黄艳玲, 等. 大豆蛋白改性技术及其联合应用的研究进展[J]. *粮油食品科技*, 2025, 33(1): 87-94. REN Haotian, WANG Moyang, HUANG Yanling, et al. Research progress on soy protein modification techniques and its combined application[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2025, 33(1): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [65] 欧文华, 曹天翔, 张冬梅, 等. 米糠蛋白乳化性能及其改性方法研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(1): 204-211, 240. OU Wenhua, CAO Tianxiang, ZHANG Dongmei, et al. Research progress on emulsifying properties and modification methods of rice bran protein[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(1): 204-211, 240. (in Chinese with English abstract)
- [66] 杨化宇, 刘东红, 廖小军, 等. 多物理场下食品组分的交互响应及真实场景加工控制方法[J]. *中国食品学报*, 2024, 24(5): 126-137. YANG Huayu, LIU Donghong, LIAO Xiaojun, et al. Interactive responses of food components under multiphysics fields and control strategies for processing in real scenarios[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2024, 24(5): 126-137. (in Chinese with English abstract)
- [67] 刘东红. 食品加工技术装备的科技需求[J]. *中国农村科技*, 2018(9): 74-79.
- [68] CHEFTEL J, KITAGAWA M, QUÉGUINER C. New protein texturization processes by extrusion cooking at high moisture levels[J]. *Food Reviews International*, 1992, 8(2): 235-275.
- [69] ZHANG J, LIU L, LIU H, et al. Changes in conformation and quality of vegetable protein during texturization process by extrusion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*,

- 2019, 59(20): 3267-3280.
- [70] 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 Jinchuang, LIU Li, LIU Hongzhi, et al. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(14): 275-283. (in Chinese with English abstract)
- [71] ZHANG J, MENG Z, CHENG Q, et al. Plant-based meat substitutes by high-moisture extrusion: Visualizing the whole process in data systematically from raw material to the products[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(8): 2435-2444.
- [72] AFIZAH M N, RIZVI S S. Functional properties of whey protein concentrate texturized at acidic pH: Effect of extrusion temperature[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(1): 290-298.
- [73] TIWARI R V, PATIL H, REPKA M A. Contribution of hot-melt extrusion technology to advance drug delivery in the 21st century[J]. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 2016, 13(3): 451-464.
- [74] 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.
- [75] EMIN M, WITTEK P, SCHWEGLER Y. Numerical analysis of thermal and mechanical stress profile during the extrusion processing of plasticized starch by non-isothermal flow simulation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 294: 110407.

## Development and prospects of innovative design and intelligent manufacturing for plant-based protein products in China

ZHANG Jinchuang, HU Anna, WANG Qiang\*

(Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

**Abstract:** The Food industry is one of the largest manufacturing sectors in the national economy of China. It can greatly contribute to the development of industries and regional economies, thus promoting social harmony and stability. Cultivating and developing innovative technologies are important measures to implement the "big food concept", such as the efficient synthesis of protein raw materials, precise structural modification, and intelligent manufacturing of the products, as well as the high-quality development of the plant protein processing industry. Alternatively, the protein is one of the essential nutrients for the human body. The calories and protein can also be obtained from plants, animals, and microorganisms. It is of great significance for the efficient supply of the protein. The carbon emissions are reduced to improve people's lives and health. There are rich and diverse plant protein resources. However, their development and utilization are not sufficient so far. It is still lacking in technologies and equipment, such as the separation and extraction of the new protein resources, multi-scale structure analysis, as well as quality and function. This review aims to systematically outline the landscape of the plant protein resources in China. A systematic analysis was made to explore the evolution and current status of the plant protein separation, extraction, and deep processing industries. The progress was also provided on the multiscale structures, the quality, and functionality regulation of the proteins. The plant protein processing and products were further summarized in the context of intelligent manufacturing. The technical support and decision-making were provided to explore the plant protein resources, in order to innovate the NeoProtein foods during intelligent manufacturing. The new-quality productive forces accelerated the cultivation to drive the upgrading and high-quality transformation of the food industry and the national food security. Technology innovation was the first factor to implement the scientific concept of the "big food concept" and the high-quality development in the food industry. A new generation of frontier technologies and equipment continued to integrate in the food field against the scientific and technological revolution and industrial transformation. The global food industry was driven to rapidly develop in the direction of high technology, full nutrition, intelligence, and sustainability. A sufficient supply of total protein was observed in China. But it was still mainly plant protein, while the animal protein was relatively scarce. The bottleneck problems were determined in the processing and utilization of the plant protein, such as the low stability of the raw material quality, low effective utilization rate, and backward processing and equipment in the whole chain. NeoProtein food was a promising potential direction of plant protein processing, such as plant-based protein meat, eggs, and milk. Therefore, it is imperative to integrate the multidisciplinary strengths, covering physical chemistry, biochemistry, applied mathematics, synthetic biology, and artificial intelligence, in order to explore the emerging integrated technologies, like novel extrusion, 3D printing, biomanufacturing, and AI-driven design. New large models can be expected to trigger technological innovation, science-industry integration, and the whole-industry-chain collaboration from the raw materials to finished products. The nutritious and healthy products with plant protein can also be tailored for the Chinese dietary habits, thereby accelerating the high-quality development of the plant protein industry.

**Keywords:** plant-based protein resources; innovative processing technologies; multi-scale structure and function; product innovation design; intelligent manufacturing