

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2025.02.012

陈金换, 安红周, 孙嘉瑜, 等. 植物蛋白的改性加工及热点应用领域研究进展[J]. 粮油食品科技, 2025, 33(2): 83-89.

CHEN J H, AN H Z, SUN J Y, et al. Research progress on modified processing and hot application areas of plant proteins[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2025, 33(2): 83-89.

# 植物蛋白的改性加工及热点 应用领域研究进展

陈金换, 安红周, 孙嘉瑜, 张皓冰, 黄泽华✉

(河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 与动物蛋白相比, 植物蛋白的生产低碳环保、资源丰富且营养价值高, 但其低溶解性、乳化性和成膜性等特点限制了它们在食品中的应用。本文简要介绍了植物蛋白的改性方法, 综述了改性对传统的大豆蛋白、小麦蛋白、微藻蛋白等蛋白质在食品领域中的应用研究和植物肉、植物奶、植物蛋等新兴植物蛋白的开发应用现状。当前的研究除集中在改善蛋白质的功能性、营养性、风味等品质外, 更注重提高生物利用度、可持续发展以及开发新型食品或食品添加剂等热点方向。这些研究进展为植物蛋白在食品工业中的进一步应用提供了科学依据, 也为满足消费者对健康、环保和多样化食品的需求开辟了新途径。

**关键词:** 植物蛋白; 改性; 植物基食品; 应用

中图分类号: TS210 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2025)02-0083-07

网络首发时间: 2025-02-24 16:17:23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20250224.1435.002>

## Research Progress on Modified Processing and Hot Application Areas of Plant Proteins

CHEN Jin-huan, AN Hong-zhou, SUN Jia-yu, ZHANG Hao-bing, HUANG Ze-hua✉

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** Compared to animal proteins, plant proteins are characterized by low-carbon and environmentally friendly production, abundant resources and high nutritional value. However, their low solubility,

收稿日期: 2022-06-22; 修回日期: 2024-07-31; 录用日期: 2024-08-02

基金项目: 2023 年度中央引导地方科技发展资金项目“新资源蛋白高效生物合成与仿生蛋白肉关键技术研究 and 产业化应用”(Z20231811011); 河南省科技研发计划联合基金(应用攻关类)“大麦  $\beta$ -葡聚糖提升植物基替代蛋白多汁性关键技术研究及应用”(242103810082); 河南工业大学小麦玉米深加工国家工程研究中心开放课题计划“基于小麦面筋蛋白水合及组分演变的植物蛋白肉品质调控研究”(NL2022011); 国家级大学生创新创业计划项目(202310463057, 202210463068, 202210463003)

Supported by: 2023 Central Guide Local Science and Technology Development Fund Project “Research and Industrial Application of Key Technologies for Efficient Biosynthesis of New Resource Proteins and Biomimetic Protein Meat (No. Z20231811011); Henan Science and Technology Research and Development Program Joint Fund (Application Research) “Research and Application of Barley  $\beta$ -glucan to Enhance the Juiciness of Plant-based Replacement Protein (No. 242103810082); Open Project Program of National Engineering Research Center for Wheat and Corn Deep Processing, Henan University of Technology “Regulation of Vegetable Protein Meat Quality based on Hydration and Component Evolution of Wheat Gluten Protein (No. NL2022011); National College Students' Innovative Undertaking Projects (No. 202310463057, 202104306, 202210463003)

第一作者: 陈金换, 女, 2000 年出生, 在读硕士生, 研究方向为植物蛋白挤压技术, E-mail: c18838593962@126.com

通信作者: 黄泽华, 男, 1988 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为替代蛋白和粮油副产品利用, E-mail: huangzh@haut.edu.cn

emulsification and film-forming properties limit their application in food products. This paper briefly introduced the modification methods of plant proteins and reviewed research on the application of modifications to traditional proteins such as soy protein, wheat protein, and microalgae protein in the food field; the current development and application status of emerging plant proteins such as plant-based meat, plant-based milk, and plant-based eggs are discussed. Studies have shown that current research not only focused improving the functionality, nutritional value, and sensory qualities such as flavor of proteins but also emphasized enhancing bioavailability, sustainability and developing new food products or food additives. These research advancements have provided a scientific basis for the further application of plant proteins in the food industry and open up new avenues to meet consumer demands for healthy, environmentally friendly, and diverse food products.

**Key words:** plant protein; modification; plant-based foods; application

植物蛋白基食品营养丰富, 含有多种维生素和矿物质, 如维生素 B 族、维生素 E、铁和锌等, 这些营养素在维持人体正常功能和增强免疫力等方面至关重要。蛋白质一般分为动物蛋白和植物蛋白, 与动物蛋白相比, 植物蛋白的可持续性和环境友好性使其成为现代人健康饮食的选择之一。单一的植物蛋白有大豆蛋白、小麦蛋白、豌豆蛋白等, 它们单独使用时可能无法满足食品工业对蛋白质性能的多样化需求, 而混合蛋白通过科学配比不同种类的植物蛋白, 可以实现氨基酸的互补效应, 提高蛋白质整体的生物学价值, 通过一些加工技术(如超高压处理、挤压变性等)条件的优化, 进一步调控蛋白质的分子结构, 有利于我们在开发新型食品中挖掘植物蛋白的潜能<sup>[1]</sup>。为了满足消费者对高蛋白含量的需求, 已有研究表明, 酵母蛋白经发酵和纯化技术处理后, 可以提高蛋白质的含量和纯度<sup>[2]</sup>。此外, 植物蛋白的氨基酸组成不完整、生物利用率低、口感较差等劣势限制了其在食品行业的发展, 而经改性处理后的植物蛋白的功能特性更佳, 更易被人体消化吸收, 同时新型植物蛋白产品逐渐脱颖而出, 这促使人们的饮食结构从动物性饮食转向植物性饮食。

植物蛋白是素食者饮食中主要的蛋白质来源, 蛋白经改性后可制成形、味、口感等与动物食品相似的仿肉制品, 而且还补充了人体必需的营养物质。例如植物汉堡替代牛肉汉堡时, 大多数植物汉堡的铁、锌等矿物质的生物利用率与牛肉相当, 而真菌蛋白汉堡的锌含量较高, 是素食消费者摄入矿物质的来源之一<sup>[3]</sup>。此外, 食品加

工中利用蛋白质变性还可以制成豆腐、酸乳、腌蛋等。如今, 人们对非转基因、素食蛋白原料的需求是可持续的, 营养价值高且保健功能优良的植物蛋白正不断地被发掘, 例如豌豆蛋白、羽扇豆蛋白、鹰嘴豆蛋白、藻类蛋白等新兴植物蛋白通过转化为形式更新颖、营养更全面的健康产品, 进而加快了食品市场的发展。

本文简要介绍了各种改性方法的机理及功能性质, 并举例说明了改性在大豆蛋白、小麦蛋白、微藻蛋白、豌豆蛋白、准谷物蛋白等方面的应用。此外, 综述了植物蛋白在植物肉、植物奶、植物蛋、植物蛋白肽等方面的应用研究, 为未来蛋白质的可持续发展提供参考。

## 1 植物蛋白改性技术的概述

植物蛋白改性技术主要是通过物理、化学和生物方法对植物蛋白进行加工处理, 改变其结构和性质, 从而提高其功能性、稳定性和应用性。如表 1 所示。物理改性主要通过物理手段(热处理、高压处理、挤压、超声波等)改变蛋白质的分子结构, 此过程不需要添加化学试剂, 具有环保和安全的优势<sup>[4]</sup>。化学改性一般包括酸碱化、糖基化、酰基化等, 在化学反应中, 蛋白质会发生键的断裂, 且在试剂的催化下会形成新的肽键, 从而改变原有蛋白质结构的完整性<sup>[5]</sup>。生物改性中最常见的方法是酶法处理, 酶解是通过水解酶与蛋白质底物发生催化反应, 导致蛋白质分子中的肽键发生水解反应, 蛋白质被分解成较小的肽段和氨基酸, 从而改善蛋白质的功能特性<sup>[6]</sup>。

表 1 植物蛋白改性技术的分类表  
 Table 1 Classification of plant protein modification techniques

改性方法	处理方式	改性原理	功能性质	参考文献
物理改性	热处理	主要基于高温对蛋白质分子内部结构以及相互作用力的影响。	蛋白质氢键被破坏, 疏水基团暴露, 蛋白质溶解度、热稳定性改变。	[4]
	挤压处理	在高温、高压、高剪切作用下, 蛋白质发生水解、变性。	改变蛋白质分子间相互作用力, 溶解度提高。	[7]
	脉冲电场	蛋白质的极性基团吸收能量产生自由基, 促进蛋白质的聚集或展开。	改善了蛋白质的疏水性、乳化性, 提高了蛋白质的巯基含量。	[8]
	高压处理	蛋白质的表面电荷分布改变, 增加了蛋白质的聚集度, 形成螺旋卷曲, 化学键发生变化。	提高了蛋白质的热稳定性, 改善了乳液的稳定性。	[9]
	超声波	基于超声波的空化效应和机械效应, 影响蛋白质的分子结构, 破坏分子间作用力。	蛋白质表面疏水性提高, 粒径减小, 乳化性改善。	[10]
	辐照	利用高能射线穿透物质并与其中的原子和分子发生相互作用, 破坏蛋白质内部的化学键, 蛋白质构象发生变化。	降低蛋白质的致敏性, 改变乳化性, 提高乳化活性。	[11]
化学改性	酸处理	弱酸条件下水解蛋白质分子, 主要通过增加蛋白质表面疏水基团的数量来实现。	提高蛋白质的溶解性、乳化性和起泡性等。	[12]
	碱处理	在一定的 pH 条件下, 蛋白质分子的肽键发生断裂, 蛋白极性基团暴露, 发生交联反应。	提高蛋白质在水中的乳化性和溶解性。	[13]
	磷酸化	添加磷酸化试剂对蛋白质进行改性, 改变蛋白质的等电点。	改善蛋白质的溶解度, 提高蛋白质的乳化能力、持水能力。	[5]
	酰基化	酰化试剂(丁二酸酐、乙酸酐)与蛋白质分子中的亲核基团发生反应, 形成酰胺键或酯键, 从而引入酰基基团的过程。	改变蛋白质的疏水性和亲水性, 影响其乳化性、稳定性和溶解性。	[14]
	糖基化	糖类与蛋白质发生美拉德反应, 生成糖基化蛋白。	提高蛋白质的热稳定性, 改善其溶解度、持水性、持油性等。	[15]
生物改性	酶改性	蛋白质与酶相互作用, 蛋白质发生交联与水解, 构象发生改变。	提高蛋白质的乳化性、凝胶性、抗氧化性等。	[6]

## 2 蛋白改性技术在食品领域中的应用

### 2.1 改性技术在大豆蛋白中的应用

大豆蛋白的产品有大豆蛋白粉、大豆浓缩蛋白、大豆分离蛋白等, 在食品行业中应用广泛。如图 1 所示。Zhu 等<sup>[16]</sup>研究谷氨酰胺转氨酶(TG 酶)与大豆蛋白对青稞面条的协同作用, 两者结合改善了蛋白质的网络结构, 使淀粉颗粒紧密包裹, 从而增强了蛋白质的持水性和热稳定性, 使得面条具有最佳的流变和质构性能。

目前, 素食肉产品已经逐渐出现在食品市场上, 大豆蛋白成为素食肉制品的主要原材料。以大豆组织蛋白为原材料生产的素火腿肠, 没有大豆组织蛋白原有的豆腥味, 且肉质饱满, 具有较好的风味特征<sup>[17]</sup>。乳酸发酵和酶水解可以改善大豆压榨饼的特性和人造肉的质地, 压榨饼发酵减少了苦味, 增加了多汁性, 平衡了肉类类似物的

味道<sup>[18]</sup>。基于对人造肉原理的应用分析, 利用挤压技术对豆类中的蛋白质进行重组, 蛋白质分子结构发生不可逆变化, 其纤维结构被改变, 形成具有鸡肉纹理的组织化蛋白, 在此基础上研究仿生肉素食产品, 制成的素肉易成型、且感官品质优良。

### 2.2 改性技术在小麦蛋白中的应用

小麦蛋白是由小麦淀粉生产的副产物, 其蛋白质含量达到 72%~85%。Li 等<sup>[19]</sup>研究酶解对小麦面筋(Wheat gluten, WG)有补充营养、促进消化等功能特性的影响, WG 经蛋白酶改性后的溶解度显著提高, 蛋白结构的  $\beta$ -折叠的含量降低, 而氢键和离子键的结合效应增加, 改性 WG 的粘弹性减小, 表面疏水性、热稳定性、吸水能力和结晶度均有所提高。WG 是小麦淀粉生产的副产品, 是一种具有独特粘弹性的高功能成分, 适合生产可食用的生物降解薄膜。单宁

酸和没食子酸改性处理 WG 后,发现单宁酸可使薄膜变得更硬、更耐腐蚀、弹性和柔性更低,同时降低了水蒸气的渗透性<sup>[20]</sup>。以 WG 为原材料制备的天然衍生物纳米复合材料可用于食品保鲜,水果表面的小麦面筋蛋白复合涂层以及复合包装膜对 6 种不同呼吸代谢的水果都表现出显著地保鲜性能,延长了水果的保质期,节能环保<sup>[21]</sup>。

### 2.3 改性技术在玉米蛋白中的应用

玉米醇溶蛋白是玉米中的主要蛋白质。玉米籽粒中约含干重 10% 的蛋白质,其中 50%~60% 为醇溶蛋白。玉米醇溶蛋白具有良好的成膜性和黏接性,因此,作为新型生物材料在开发可生物降解的食品包装材料方面有巨大的潜力。Tadele 等<sup>[22]</sup>利用脂肪酰氯(己酰氯、癸酰氯和棕榈酰氯)对玉米醇溶蛋白进行酯化反应,结果表明,癸酰氯改性后的玉米醇溶蛋白样品的拉伸强度比未改性的脂肪酸高出 500%,总体而言,可以将玉米醇溶蛋白转化为可熔融加工的薄膜,用于可持续食品的包装材料。此外,玉米蛋白是一种来自玉米的无麸质储存蛋白,可以为淀粉面团提供延展性。为了改善玉米醇溶蛋白在无麸质面团中的粘弹性,利用乙醇塑化增强玉米醇溶蛋白的疏水相互作用,促进玉米醇溶蛋白网络的展开,从而改善了面团的相容性,乙醇塑化促进了广泛的纤维网络形成<sup>[23]</sup>。玉米醇溶蛋白在 160~190 °C 下热处理时,高温条件促进了更高分子量玉米醇溶蛋白的产生,提高了面团的弹性,热诱导的玉米醇溶蛋白交联和结构的重排增强了其在无麸质面团中的功能特性,改善了面包的整体品质<sup>[24]</sup>。

### 2.4 改性技术在新兴植物蛋白中的应用

与传统蛋白质来源(大豆、小麦、玉米等)相比,新兴的植物蛋白种类(微藻蛋白、鹰嘴豆蛋白、豌豆蛋白等)的出现不仅丰富了植物蛋白的食品市场,也为消费者提供了更多健康、环保的食品选择,如图 1 所示。微藻(螺旋藻、蛋白核小球藻等)含有高达 60%~70% 的蛋白质,且易于消化,是优质蛋白质的来源。目前,微藻已被

允许用作食品添加物,可满足人类饮食的需求。改性后的微藻蛋白具有优异的界面稳定性,可以取代表面活性剂和动物蛋白来稳定乳液<sup>[25]</sup>。此外,螺旋藻经高水分挤压技术生产的挤出物提高了蛋白质的消化率和抗氧化性能,与纯大豆基挤出物相比,微藻和大豆浓缩蛋白复合挤压减少了纹理,但增加了柔软度,同时最大限度地保留了产品的营养价值<sup>[26]</sup>。

刘奕彤<sup>[27]</sup>利用植物乳酸菌发酵鹰嘴豆粉,将未发酵和发酵的鹰嘴豆粉部分替代小麦粉制作发酵饼干,添加发酵鹰嘴豆使饼干面团中的水分流动性减弱,硬度增加,结构更致密,面团更易成型。豌豆蛋白经改性后可作为有效的乳化剂制备食品纳米乳液,提高维生素 D 的生物利用率,用于开发维生素 D 的新型非乳制品的功能性食品,改善老年人群维生素缺乏的状况<sup>[28]</sup>。

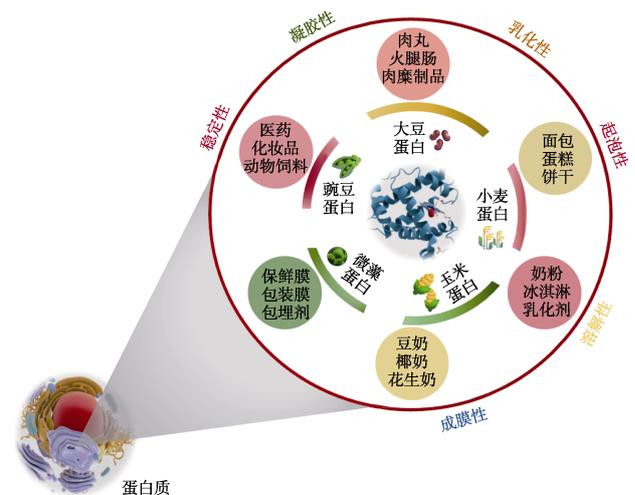


图 1 植物蛋白的部分应用图示

Fig.1 Illustration of partial application of plant protein

### 2.5 改性技术在准谷物中的应用

随着全球人口的不断增加,谷物产量无法满足正常的粮食供应,为了平衡传统谷物资源,人们将目光转向与其组成成分和功能相似的准谷物上。藜麦、荞麦和苋菜是最重要的准谷物,它们营养价值丰富,蛋白质含量高,而且还可作为含麸质食品的替代物,对于乳糜泻患者是最佳的饮食选择。目前,假谷物已经应用于烘焙食品、发酵饮料、挤压制品等食品领域中,如表 2 所示。

表 2 准谷物的多领域应用

Table 2 Multi-field applications of pseudo cereals

应用领域	简介	参考文献
面制品	荞麦面团经过挤压蒸煮的工艺优化后, 增强了面团的稳定性和粘弹性, 降低了荞麦面的蒸煮损失和破碎率。	[29]
饮料制品	荞麦经发酵处理后生产的荞麦饮料口感纯正, 酸甜适中, 有独特的荞麦香气。	[30]
发酵制品	在啤酒的生产中, 苋菜和藜麦的使用提高了酿酒酵母的性能和发酵速度, 丰富了麦汁中必需金属离子的含量。	[31]
膨化制品	高蛋白的藜麦粉、荞麦经挤压技术产生的挤出物比较稳定, 制成的膨化零食色泽诱人、保留了各谷物的营养特色。	[32]
肉制品	假谷物的高蛋白、高膳食纤维、低脂肪等特点可以作为肉类制品的替代物。	[33]

### 3 植物蛋白的开发应用

植物蛋白在食品体系中应用广泛, 主要用于植物蛋白肉、植物蛋白奶、植物蛋以及植物蛋白肽等。

#### 3.1 植物蛋白肉

植物蛋白肉是以蛋白质、脂质、碳水化合物和其它植物营养素为主要物质, 模拟真肉的质地、外观和风味而制成的产品。蛋白质具有的溶解性、持水性、持油性、乳化性、发泡性以及凝胶性等特点是植物蛋白肉形成纤维结构的必备特性, 其所含的油脂和风味物质可以改善肉制品的外观, 促进挥发性风味物质的形成。目前, 植物肉纤维成型的方法有纺纱法、挤出剪切、3D 打印等。曾艳<sup>[34]</sup>等采用纺纱法、挤压及剪切法对植物蛋白肉进行加工, 塑造了蛋白肉的纤维状结构, 改善了蛋白质的质构特性, 此方法可用于规模化蛋白肉的加工工艺中。牛肉与豌豆蛋白(1:1)混合在高水分挤压条件下生产的挤出物柔软且分层, 纤维结构明显, 且牛肉与豌豆浓缩蛋白的挤出物具有类似真肉的气味和鲜味<sup>[35]</sup>。除此之外, 3D 打印作为一项快速发展的数字技术也逐渐发展起来。3D 打印主要对产品结构进行改性, 从而产生质地柔软的食品。豌豆分离蛋白和鸡肉末分别作为 3D 打印测试的主要植物蛋白和肉类来源, 在豌豆分离蛋白糊状物中加入 20% 的鸡肉肉末, 实现了产品更好的纤维结构以及印刷的适宜性<sup>[36]</sup>。

#### 3.2 植物蛋白奶

作为健康概念的主打产品, “植物基”系列产品引起了大众的关注, 消费者越来越倾向于以谷物、坚果、豆类、油籽等为基础生产的植物蛋白奶等植物性饮料。目前, 市场上的植物奶大多以植物果仁、果肉、种仁等为主要原料, 采用浸泡、破碎、磨浆、调配、均质、杀菌等工艺加工制成的浑浊型乳状饮料, 因外观和口感与牛奶相似, 故被称为“植物奶”。植物蛋白奶营养丰富、口感好。常见的植物奶有豆奶、燕麦奶、椰奶、杏仁奶等。Kulczyk 等<sup>[37]</sup>向豌豆、向日葵和菜豆中添加 0.5% 的瓜尔豆胶研制的产品被认为是一种类似牛奶的蔬菜饮料, 不仅口感与牛奶相似, 而且营养价值与牛奶相当。也有研究表明, 通过测定羽扇豆和鹰嘴豆中所含的蛋白质、脂肪酸、酚类化合物等的含量发现, 二者均蛋白含量高且对人体健康有益, 以羽扇豆和鹰嘴豆为原料, 利用植物乳酸菌发酵获得的益生菌饮料, 可以增强饮料的营养特性<sup>[38]</sup>。

#### 3.3 植物蛋

植物蛋是人们从黄豆、豌豆、绿豆、高粱和葵花籽中提取蛋白质成分, 然后混合调配生产的食品。目前的“植物蛋”没有壳, 外观是一种粉末, 通常以瓶装胶状物的形式销售, 更像是人造蛋黄酱。之所以被称为“植物蛋”, 是因为它可以代替鸡蛋用于制作蛋糕、面包、蛋黄酱之类的食品, 其目的是模拟鸡蛋的营养、功能甚至风味。2018 年 Eat Just 官方推出的植物蛋以绿豆为主要原料, 绿豆可制成模仿炒蛋的凝胶状, 产品通过胡萝卜提取物和姜黄素呈现鸡蛋的黄色。根据 Eat Just 提供的数据, 与常规鸡蛋的生产过程相比, 植物蛋减少了 98% 的用水量、93% 的二氧化碳排放量以及 86% 的土地用量, 在低碳环保方面更具发展优势<sup>[39]</sup>。此外, 植物蛋的原料不含胆固醇和过敏原, 适合作为汉堡肉饼、熟香肠等素食替代品, 对于患高血脂的消费者是一个不错的选择。

#### 3.4 植物蛋白肽

植物蛋白肽主要是从植物或者农作物中通过酶解或微生物发酵等工艺过程制得的一种水溶性

蛋白。有研究证实植物蛋白抗氧化肽在食品体系中有潜在的应用价值，主要包括两个方面，一是防止脂质的过氧化；二是作为食品添加剂提高食品的营养价值<sup>[40]</sup>。此外，植物蛋白肽饮料作为抗疲劳功能性运动食品也受到社会的广泛关注。运动员经过高强度的训练后，口服植物蛋白肽饮料可以补充体内必须的支链氨基酸，能够延缓运动性疲劳症状的出现，促进体能恢复<sup>[41]</sup>。植物蛋白肽按照一定比例添加到功能性食品中，可以调节蛋白食品的硬度，使产品呈现出较好的口感，增强了抗疲劳功能性食品的风味特性，显著改善了产品的品质<sup>[42]</sup>。

#### 4 前景展望

随着人们对植物性饮食需求的增加，未来可能会出现更多的新兴植物蛋白，这些蛋白的出现会取代部分动物蛋白，在缓解环境压力的同时保证了消费者对蛋白质的正常摄取。蛋白质的营养价值和功能特性决定了它们在食品中的用途，但植物蛋白容易受到温度、pH 值、离子强度等因素的影响，从而限制了植物蛋白在食品行业的应用。利用物理、化学和生物改性技术可以改变食品蛋白质的结构，调节蛋白质的功能，但要实现某些蛋白特定功能的改进，需要选择和控制加工技术，因为这些技术可能会在加工过程中抑制蛋白质的预期功能或降低蛋白质的营养价值。

从商业化角度来看，化学改性技术会产生有毒副产物，且成本高，还要考虑监管方面的问题。物理和生物改性技术因其不涉及化学试剂在食品加工中应用比较广泛。总之，随着人们健康饮食理念的普及和环保意识的提升，政府和相关机构对植物蛋白行业的支持力度不断加大，植物蛋白改性技术也将不断创新升级，改性植物蛋白的应用将从食品领域（冷饮、蛋糕、植物性饮料等）向医药、化妆品等更多领域延伸发展，应用领域的拓展将进一步推动植物蛋白改性技术的发展。

#### 参考文献：

[1] JIMENEZ-MUNOZ L M, TAVARES G M, CORREDIG M. Design future foods using plant protein blends for best nutritional

- and technological functionality[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 113: 139-50.
- [2] MA J, SUN Y, MENG D, et al. Yeast proteins: The novel and sustainable alternative protein in food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 135: 190-201.
- [3] LATUNDE-DADA G O, KAJARABILLE N, ROSE S, et al. Content and availability of minerals in plant-based burgers compared with a meat burger[J]. Nutrients, 2023, 15(12): 2732.
- [4] AKHARUME F U, ALUKO R E, ADEDEJI A A. Modification of plant proteins for improved functionality: A review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 198-224.
- [5] SONG W, HU L, MA Z, et al. Importance of tyrosine phosphorylation in hormone-regulated plant growth and development[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(12): 6603.
- [6] PIMIAO H, WENKE Z, LEI C, et al. Enhancement of functional properties, digestive properties, and *in vitro* digestion product physiological activity of extruded corn gluten meal by enzymatic modification[J]. Science of Food and Agriculture, 2023, 104(6): 3477-3486.
- [7] MOSIBO O K, FERRENTINO G, ALAM M R, et al. Extrusion cooking of protein-based products: potentials and challenges[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 62(9): 2526-2547.
- [8] MALIK M A, SHEIKH M A, MIR N A. A review on pulsed electric field modification of proteins: Effect on the functional and structural properties[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104636.
- [9] CARPENTER T W R M S J F. High hydrostatic pressure as a tool to study protein aggregation and amyloidosis[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Protein Structure and Molecular Enzymology, 2002, 1595(1-2): 224-234.
- [10] LIU Q, CHEN T, CHEN L, et al. High internal phase emulsions stabilized with ultrasound-modified spirulina protein for curcumin delivery[J]. Foods, 2024, 13(9): 1324.
- [11] HASSAN A B, MAHMOUD N S, ELMAMOUN K, et al. Effects of gamma irradiation on the protein characteristics and functional properties of sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2018, 144: 85-91.
- [12] LEE H, YILDIZ G, DOS SANTOS L C, et al. Soy protein nano-aggregates with improved functional properties prepared by sequential pH treatment and ultrasonication[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 55: 200-209.
- [13] CHEN C, LIU Z, XIONG W, et al. Effect of alkaline treatment duration on rapeseed protein during pH-shift process: Unveiling physicochemical properties and enhanced emulsifying performance[J]. Food chemistry, 2024, 459: 140280.
- [14] LAWAL O S, ADEBOWALE K O, ADEBOWALE Y A. Functional properties of native and chemically modified protein concentrates from bambarra groundnut[J]. Food Research International, 2007, 40(8): 1003-1011.
- [15] HONGJIAN Z, YAN T, SIYI P, et al. Glycation improved the interfacial adsorption and emulsifying performance of  $\beta$ -conglycinin to stabilize the high internal phase emulsions[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2023, 12(14): 2706.
- [16] ZHU J, LIU Z, CHEN L, et al. Impact of protein network restructured with soy protein and transglutaminase on the structural and functional characteristics of whole-grain highland

- barley noodle[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 133: 107909.
- [17] 徐肖涵. 大豆组织蛋白素火腿肠的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.  
XU X H. Research on the textured soy protein vegetarian ham sausage[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [18] RAZAVIZADEH S, ALENCIKIENE G, VAICIULYTE-FUNK L, et al. Utilization of fermented and enzymatically hydrolyzed soy press cake as ingredient for meat analogues[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2022, 165: 113736.
- [19] LI W, ZHOU Q, XU J, et al. Insight into the solubilization mechanism of wheat gluten by protease modification from conformational change and molecular interaction perspective[J]. *Food Chemistry*, 2024, 447: 138992.
- [20] HAGER A S, VALLONS K J R, ARENDT E K. Influence of gallic acid and tannic acid on the mechanical and barrier properties of wheat gluten films[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(24): 6157-6163.
- [21] CHEN Y, LI Y, QIN S, et al. Antimicrobial, UV blocking, water-resistant and degradable coatings and packaging films based on wheat gluten and lignocellulose for food preservation[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2022, 238: 109868.
- [22] T. T D, ROHAN S, H. M T. Fatty acid modified zein films: Effect of fatty acid chain length on the processability and thermomechanical properties of modified zein films[J]. *Industrial Crops & Products*, 2023, 192: 116028.
- [23] ZHANG Y, WU F, WANG J, et al. Impacts of ethanol-plasticization and extrusion on development of zein network and structure of zein-starch dough[J]. *Food Chemistry*, 2024, 433: 137351.
- [24] FEDERICI E, SELLING G W, CAMPANELLA O H, et al. Thermal treatment of dry zein to improve rheological properties in gluten-free dough[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 115: 106629.
- [25] BERTSCH P, BOECKER L, MATHYS A, et al. Proteins from microalgae for the stabilization of fluid interfaces, emulsions, and foams[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 108: 326-342.
- [26] CAPORGNO M P, BOCKER L, MUSSNER C, et al. Extruded meat analogues based on yellow, heterotrophically cultivated *Auxenochlorella protothecoides microalgae*[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102275.
- [27] 刘奕彤. 乳酸菌发酵对鹰嘴豆蛋白多级结构和消化性的影响及其应用[D]. 无锡: 江南大学, 2023.  
LIU Y T. Effect of lactic acid bacteria fermentation on multilevel structure and digestibility of chickpea protein and its application[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.
- [28] WALIA N, CHEN L. Pea protein based vitamin D nanoemulsions: Fabrication, stability and *in vitro* study using Caco-2 cells[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125475.
- [29] GAO L, CHENG W, FU M, et al. Effect of improved extrusion cooking technology modified buckwheat flour on whole buckwheat dough and noodle quality[J]. *Food Structure-Netherlands*, 2022, 31: 100248.
- [30] XIAO S, PAN Y, LI X, et al. Effects of tartary buckwheat in enhancing bioactive compounds and sensory properties of traditional fruit kombucha beverage[J]. *Cereal Chemistry*, 2024, 101(1): 274-281.
- [31] KORDIALIK-BOGACKA E, BOGDAN P, CIOSEK A. Effects of quinoa and amaranth on zinc, magnesium and calcium content in beer wort[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(5): 1706-1712.
- [32] MUNOZ-PABON K S, PARRA-POLANCO A S, ROA-ACOSTA D F, et al. Physical and paste properties comparison of four snacks produced by high protein quinoa flour extrusion cooking[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2022, 6: 852224.
- [33] FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, VIUDA-MARTOS M, PÉREZ-ALVAREZ J A. Quinoa and chia products as ingredients for healthier processed meat products: technological strategies for their application and effects on the final product[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 40: 26-32.
- [34] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 338-345+350.  
ZENG Y, HAO X C, DONG T, et al. Research progress on raw material development, processing technology, and texture-nutritional characteristics of plant-based meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 338-345+350.
- [35] PORI P, AISALA H, LIU J, et al. Structure, texture, and sensory properties of plant-meat hybrids produced by high-moisture extrusion[J]. *Food Science and Technology*, 2023, 173: 114345.
- [36] WANG T, KAUR L, FURUHATA Y, et al. 3D Printing of Textured Soft Hybrid Meat Analogues[J]. *Foods*, 2022, 11(3): 478.
- [37] KULCZYK E, DROZLOWSKA-SOBIERAJ E, BARTKOWIAK A. Novel Milk Substitute Based on Pea, Bean and Sunflower Seeds with Natural Bioactive Stabilisers[J]. *Plants-Basel*, 2023, 12(12): 2303.
- [38] CRISTE A D, URCAN A C, COROIAN C O, et al. Plant-based beverages from germinated and ungerminated seeds, as a source of probiotics, and bioactive compounds with health benefits-part 1: legumes[J]. *preprints*, 2023, 13(6): 1185.
- [39] 周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. *粮油食品科技*, 2022, 30(2): 16-23+12.  
ZHOU S M, LI R N, TANG J, et al. Nutritional and functional characteristics of mung bean and its application in plant-based food development[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2022, 30(2): 16-23+12.
- [40] WEN C, ZHANG J, ZHANG H, et al. Plant protein-derived antioxidant peptides: Isolation, identification, mechanism of action and application in food systems: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 308-322.
- [41] 李松涛. 植物蛋白肽饮料对缓解篮球运动员疲劳的功能研究[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(9): 233-234.  
LI S T. Functional study of plant protein peptide beverage on alleviating fatigue in basketball players[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(9): 233-234.
- [42] 李荣华, 郑旗. 部分植物蛋白肽在抗疲劳功能食品中的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(2): 529-535.  
LI R H, ZHENG Q. Research progress of some plant protein peptides in anti-fatigue functional foods[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2022, 13(2): 529-535. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。