坚果粕深加工与粕蛋白制备开发研究进展

周易润[1]，赵宸[1]，苗占坤[1]，刘浩宇[1]，刘满顺[1,2]，梁丽松[3]，王欣[1*]

（1.西北农林科技大学食品科学与工程学院，陕西杨陵 712100）

（2.西北农林科技大学葡萄酒学院，陕西杨陵 712100）（3.中国林业科学研究院林业研究所，北京 100091）

摘要：目前全球坚果年产量呈快速增长态势，但“增产不增收”难题日趋突出，进而“精深加工”成为近年来坚果产业转型升级的关键。作为油脂及蛋白含量丰富的潜在大宗油料资源，核桃油等坚果油脂及植物乳成为坚果精深加工的主要方向之一，而其主要副产物坚果粕的综合利用问题也成为制约坚果加工产业发展的关键问题之一。本文聚焦核桃、杏仁、腰果和榛子四大坚果粕，通过对比大宗油料粕，综合分析明确了不同坚果粕的营养组分特征与开发潜力；并从动物饲料、功能食品配料、活性成分提取等方面较为系统地分析了坚果粕的加工利用现状；作为坚果粕中的主要营养组分，粕蛋白极具开发潜力及应用价值，因此本文针对粕蛋白制备工艺及加工、功能、安全特性等方面的研究现状进行了系统的整理及分析，明确了其研究开发过程中的关键问题及发展方向。综上所述，坚果粕作为一种高值副产物，其未来的开发应用具有广阔的前景，是推动坚果产业转型升级的关键。

关键词：坚果粕；营养成分；食品工业；蛋白特性；安全性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0692

Research Progress on Deep Processing of Nut Meal and Development of Meal Protein

ZHOU Yirun[1], ZHAO Chen[1], MIAO Zhankun[1], LIU Haoyu[1], LIU Manshun[1,2], LIANG Lisong[3], WANG Xin[1*]

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2.College of Enology,Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(3.Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry,Beijing,100091,China)

Abstract: The rapid development of the worldwide nut business is being accompanied by the growing problem of "increasing production without corresponding income growth". Consequently, "intensive processing" has emerged as a pivotal driver for the transformation and upgrading of the nut industry in recent years. As a potential bulk oilseed resource rich in oils and proteins, nut-derived products such as walnut oil and plant-based nut milks have become key focuses of intensive nut processing. Meanwhile, the comprehensive utilization of nut meal—the primary byproduct of nut processing—has become a critical bottleneck constraining industry development.This study centers on four major nut meals—walnut, almond, cashew, and hazelnut—and conducts a comparative analysis with conventional oilseed meals to elucidate their nutritional profiles and development potential. It systematically reviews current utilization approaches for nut meals, including applications in animal feed, functional food ingredients, and bioactive compound extraction. As the primary nutritional component in nut meals, meal proteins exhibit significant development potential and application value. Therefore, this paper comprehensively examines research progress in protein extraction techniques, processing methods, functional properties, and safety characteristics, identifying key challenges and future research directions.In summary, nut meal represents a high-value byproduct with broad prospects for future development and application, positioning it as a crucial catalyst for advancing the transformation and upgrading of the nut industry.

Key words: nut meal; nutritional composition; food industry; protein characteristics; safety

坚果产业是全球农业经济的重要组成部分，其中核桃、榛子、杏仁和腰果并称“四大坚果”，因其高营养和经济价值，近年来种植规模迅速扩张。根据《2024 中国坚果贸易形势与消费趋势研究报告》显示，2023 年全球坚

收稿日期：2025-05-17；修回日期：2025-07-01；接受日期：2025-07-08

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD1600404）；咸阳市重点研发计划项目（L2022-ZDYF-GY-010；L2024-ZDYF- ZDYF-NY-0008）

作者简介：周易润（2006-），男，本科生，研究方向：食品加工副产物高值转化研究，E-mail：yirunzhou2006@163.com

通讯作者：王欣（1988-），男，博士，副教授，研究方向：食品功能化加工及副产物高值利用，E-mail：wangxin_2018@nwsuaf.edu.cn

果市场规模估计在 603.2 亿美元，预计到 2030 年将达到 877.5 亿美元，2024~2030 年复合年增长率将达到 5.5%；报告也显示，预计在 2024~2029 年间，全球坚果市场的增长速度将达到 6.46%，其中亚太地区将成为全球坚果市场增速最快的地区[1]。然而，产业快速发展的背后，“增产不增收”问题日益突出：市场供需失衡导致价格波动剧烈，初级产品附加值低，农民收益难以保障，严重制约产业可持续发展。在此背景下，通过加工提升附加值，走产业转型路成为行业共识。目前国内外对坚果的加工利用多集中在通过焙烤果仁得到即食干果类产品、利用螺旋热榨、螺旋冷榨、液压压榨和水剂法等方式制取坚果油[2-4]，以及通过打浆调配坚果乳饮料[5]等。榨油、制浆等初加工技术虽能延长产业链，但产生的主要副产物——坚果粕往往被直接丢弃或作为低值饲料，不仅造成资源浪费，还加剧环境压力。

坚果粕是指坚果榨油或加工后的残渣，其蛋白质含量丰富，也可用于生产酚类化合物、类黄酮、生物活性肽、氨基酸、膳食纤维、维生素和天然色素等多种生物活性物质[6-14]，营养价值与开发利用价值高。相较于豆粕、菜籽粕等大宗油料粕（原料成本低、工业化利用成熟），坚果粕的原料成本高昂，不同蛋白组分及其比例复杂，其功能特性与大豆蛋白存在显著差异。近年来，随着功能食品、生物材料等领域的兴起，植物蛋白的需求激增，而坚果粕又是潜在的优质蛋白来源（相关报道表明，四种坚果粕中都检出有 17~18 种氨基酸，其中精氨酸和谷氨酸含量较为丰富，而针对坚果粕中脯氨酸和色氨酸的检测差异，可能是由于检测方法不同导致的[15-18]），并具有多种生物活性（如抗氧化[19]、抗癌[20]和抗炎[21]等），被视为开发功能性肽、植物基食品添加剂的理想原料。本文聚焦核桃、榛子、杏仁和腰果四大坚果粕，对比分析坚果粕与大宗油料粕的组成差异，分析其营养特征，总结了坚果粕的加工利用现状；与此同时系统分析了坚果粕蛋白的制备工艺、功能特性、加工特性与安全性，为未来坚果粕的高值化利用，以及坚果产业转型升级提供了研究方向。

1 不同坚果粕的组分与营养价值

1.1 坚果粕的来源

坚果粕是坚果在油脂提取或打浆后的剩余固体残渣，其也是目前坚果加工的主要副产物之一。这种副产物主要包含蛋白质、碳水化合物和膳食纤维等组分，但由于栽种环境、坚果种类和具体品种的影响，不同坚果粕的组分之间存在较大差异，与此同时，坚果的加工与制备方法也是影响坚果粕营养组分构成的重要因素之一。例如，常用的坚果油制备方法有压榨法和浸提法[22]，压榨过程中的高压和高温处理，对于坚果粕蛋白的组成及活性会产生一定影响。

1.2 原料占比与营养成分分析

表 1 不同种类坚果粕和大宗油料粕主要营养组分

Table 1 Comparative Analysis of Key Nutritional Components in Various Nut Meals and Conventional Oilseed Meals

	粕种类	粕比重	主要成分质量分数/%						
		%	总蛋白	总脂肪	灰分	碳水化合物	总纤维	水分	参考文献
坚果粕	杏仁粕	45~55	42.92	14.54	4.98	5.37	14.05	7.07	[23]
	脱脂杏仁粕		64.80	5.40	4.40	—	0.32	—	[24]
	酶解杏仁粕		24.4	9.25	—	—	—	—	[25]
	脱脂核桃粕	30~40	32.70~39.50	16.76~29.15	2.75~3.89	20.60~37.77	—	3.76~5.06	[26]
	热榨核桃粕		27	37	5	28	—	3	[27]
	脱脂腰果粕	—	35.4	15.1	5.45	34.50	1.05	8.50	[28]
	全脂腰果粕		22.1	40.23	3.73	24.04	0.90	8.90	[28]
	压榨榛子粕	40~50	31.30	13.86	—	—	15.16	9.33	[29]
	低变性榛子粕		53.3	10.86	5.16	—	—	7.33	[30]
	脱脂低变性榛子粕		58.8	1.5	5.69	—	—	5.55	[30]
大宗	大豆粕	78~84	43~50	2~3	—	—	3~7	—	[31]

油料粕	油菜粕	60~65	33.16	0.5~6	—	—	11.25	—	[32]
	花生粕	49~60	43.1	6.00	5.51	31.80	4.3	9.50	[28]
	葵花籽粕	50~71	36~38	20~25	11~12	—	7~10	—	[33]

注：—表示参考文献中无记录。粕比重（%）=坚果榨油后剩余粕的质量/原坚果仁的重量×100%。

不同坚果粕和大宗油料粕在原料中的比重及营养成分差异显著。如表 1 所示，与传统大宗油料粕相比，坚果粕比重较低，表明坚果出油率高，是良好的油料作物；且坚果粕中蛋白含量较高，是优质的植物蛋白来源。坚果粕中的营养物质主要包括蛋白、脂肪、碳水化合物和少量的纤维等。坚果粕中，杏仁粕和榛子粕的蛋白含量较为丰富，最高可以达到 60%左右，腰果粕和核桃粕蛋白含量相对较低。大宗油料粕中，大豆粕蛋白含量达 43%~50%，油菜粕蛋白含量较少。通过对比脱脂前后的坚果粕，发现脱脂处理可以显著提高蛋白的比重，如脱脂杏仁粕的蛋白占比可以提升到脱脂前的 1.5 倍。坚果粕的脂肪含量显著高于大宗油料粕，其油脂的提取与榨油工艺有关，通过浸提方法得到的坚果粕脂肪含量低于压榨法得到的粕，表明浸提法提油率更高，粕比重更低。通过对比纤维含量可以看出，大宗油料粕纤维含量较高，适合反刍动物饲料，坚果粕中榛子粕和杏仁粕由于其纤维含量也相对较高，常用于代替部分饲料。总体来看，大宗油料粕适合大规模工业化利用，而坚果粕因蛋白含量高，适合开发高附加值产品。因此，本文将重点聚焦于粕蛋白的制备与特性研究，探索坚果粕深加工和综合利用的发展方向。

2 坚果粕的加工利用现状

表 2 坚果粕的研究与加工利用

Table 2 Research Progress and Technological Applications of Nut Meals

种类	坚果粕潜在营养功能	研究方法或手段	应用开发方向	参考文献
腰果粕	提高饲料摄入量	添加 250 g kg^{-1} 腰果粉的饲料	肉用鹌鹑饲料	[34]
	便于吸收消化	酶解、除杂、真空浓缩、喷雾干燥	腰果肽粉	[35]
	活性肽含量丰富	打浆	全腰果（粕）活性肽营养品	[36]
杏仁粕	体外抗氧化活性	碱性蛋白酶和风味蛋白酶复合酶酶解	制备抗氧化肽	[37]
	蛋白含量丰富	热碱法	提取分离蛋白	[38]
	蛋白含量丰富	食品加工配料	彩色马铃薯杏仁粕曲奇	[39]
	改善心血管健康	乳酸菌发酵与酶解	杏仁基乳制品	[40]
核桃粕	蛋白含量丰富	碱溶酸沉与超声辅助、亚临界水萃取、反胶束法萃取	制备核桃蛋白	[41,42]
	提高饲料转化率，促进家禽增重，改善肠道健康	在饲料中添加核桃粕	饲料	[43,44]
	高膳食纤维	奶粉、红枣粉、果胶等复配	核桃粕代餐粉	[45]
	抗氧化活性	山核桃粕抗氧化肽包被山核桃油	冷冻干燥制备微胶囊粉	[46]
	降血压活性、提高免疫活性、抗疲劳活性、改善学习记忆活性、抗肿瘤活性、调节体内代谢紊乱活性、抑菌活性、醒酒活性、辐射防护、润肠通便、抗氧化活性	动物模型、细胞实验、酶解	提取核桃肽	[22,47-49]
	预防高尿血酸症	小鼠模型灌胃	提取多酚	[50]
	游离氨基酸含量丰富	微生物发酵	核桃粕酱油	[51]
		食品加工配料	核桃粕馕	[52]
	降低血糖、调节肠胃、增强免疫	乳酸菌发酵	核桃粕酸乳饮料	[53]
	核桃多肽溶解度、乳化性、起泡性、吸油性	酶解提取核桃粕肽与枸杞、杏仁复配	核桃粕蛋白肽枸杞杏仁复合饮品	[54]
	抗氧化、抗衰老、抗癌、预防神经退变和提高记忆	微生物发酵	山核桃发酵酱	[55]

		高膳食纤维	化学法提取	提取膳食纤维	[56]
		富含矿物质、膳食纤维及多酚等营养物质	固态发酵	核桃粕风味纳豆	[57]
榛子粕		蛋白含量丰富	酶解辅助碱溶酸沉	提取蛋白	[58]
		含有丰富的蛋白质、多糖、矿物质、维生素及少量脂肪等营养物质	打浆调配	低脂榛仁蛋白饮料	[59]
		含有大量的蛋白质	微生物发酵	榛子蛋白粕酱油	[60]
		含有大量的蛋白质、淀粉等营养物质	微生物发酵	榛子粕发酵酱	[61]
		保健抗癌、降血糖血脂、提高免疫力	酶制剂发酵后复配	榛子粕复合酒	[62]
		保健抗癌、降血糖血脂、提高免疫力	榛子粕拍碎后复配	榛子糊保健食品	[63]
		调节血脂	酶解醇沉	提取可溶性膳食纤维	[64]

随着坚果产业转型升级的需求不断增大，国内外不少学者聚焦于坚果的深加工与资源的有效利用。表 2 总结了国内外学者对坚果粕的加工利用和研究现状。总体来看，目前对核桃粕的研究与产品开发较为广泛，对于腰果粕的研究报道较少。从开发利用方式来看，坚果粕目前多用于生产动物饲料、食品加工配料、新型风味食品、功能营养食品，以及提取生物活性物质等领域。从应用背景来看，用坚果粕部分代替动物饲料，在某些方面可以实现家畜的增重与饲料的摄入量，但与添加量密切相关，如 Danilo 等[34]发现可以添加 250 g·kg^{-1} 的腰果粕部分代替玉米和豆粕饲养肉用鹌鹑；陈忠魁等[43]研究发现饲料中添加 5%的核桃饼对生长肥育猪的增重效果最好，为坚果粕代替牲畜饲料提供可行性。此外，坚果粕营养丰富，作为食品加工配料风味独特，可以通过喷雾干燥制粉、打浆等工艺，将粕的初加工产品应用于食品加工配料进行食品生产，如杏仁粕曲奇、复合调配乳饮料等。同时，坚果粕加工产品的开发也增加了市场上食品的种类与多样性，有一些学者通过微生物发酵与酶制剂发酵，生产坚果粕酱油、坚果粕酱、坚果粕发酵乳、调配乳饮料和核桃粕风味纳豆等风味食品，为人们提供了更多创新型口味和选择。坚果粕中的活性肽、多酚等物质还具有抗氧化、抗衰老、提高大脑记忆力和调节体内代谢紊乱等诸多功效。随着人们生活水平的提高，越来越多的保健养生产品面向市场，有学者将坚果粕与多种药食同源的原料进行复配，开发出了如榛子酒、腰果活性肽含片、运动剂和咀嚼片等系列功能性营养品。除作为食品原料用于动物养殖和新型食品开发外，国内外学者还更加关注坚果粕中抗氧化肽、可溶性膳食纤维等生物活性成分的提取，以期获得纯度更高的营养与功能物质，用于大宗食品功能配料的制备和加工。但目前市面上的坚果粕作为原料出售的产品形式单一，仅用于动物饲料、植物肥料等领域，且加工方式局限于磨粉，并没有通过深加工提取的高纯度活性肽、膳食纤维等作为功能配料流入食品加工领域。总体而言，尽管现有许多坚果粕加工的新型风味产品面向大众，但目前国内外学者对坚果粕中功能活性物质的研究仅局限在小型实验室阶段，在将科研成果转化为可广泛流通使用的食品配料方面上仍然存在不足，在一定程度上限制了对坚果粕的深入开发。蛋白质在坚果粕的营养成分中占有极大比例，是促进坚果粕开发的关键，为此，了解蛋白质的制备工艺和功能特性，对实现坚果粕的深加工、促进成果转化具有重要指导意义。

3 坚果粕蛋白的制备工艺及其特性研究

3.1 坚果粕蛋白的制备方法

表 3 坚果粕蛋白的制备方法

Table 3 Preparation Methods of Nut Meal Protein

	试验方法	提取原理	优点	缺点	参考文献
物理提取	超声处理	利用声波产生的高频振荡，作用于液体对物料产生的一种空化作用，能在瞬间产生较强的机械剪切力，使蛋白质的空间构象发生改变，进一步改变蛋白质的性质	操作简单、蛋白吸油性高、可以提高与钙离子螯合的能力与稳定性	提取率较低	[65-68]
	加热处理	破坏维持蛋白质结构的化学键，改变蛋白质高级结构和分子间聚集方式，从而影响蛋白特性	操作简单	提取率较低，加热处理容易破坏蛋白结构	[66]

	亚临界水萃取	亚临界水萃取法是将水作为提取剂，通过改变压力，使水的温度达到 100~374 ℃范围，此时水仍然是液态。与常温水相比有更强的分解能力和溶解有机物的特性，类似于有机溶剂	提取时间短、提取效率高、对环境友好	—	[69]
	微波处理	微波加热诱导的细胞壁破裂导致蛋白质在紧凑结构中的分解增加，从而增加可溶性蛋白质浓度，这可以产生更多的酶活性位点	操作简单，可以提高与钙离子螯合的能力与稳定性	提取率较低，高温容易破坏蛋白结构	[66,68]
化学提取	盐析法	是将蛋白质溶于稀盐溶液中，再通过添加盐离子使提取液达到一定的饱和浓度，从而析出蛋白质	提取的蛋白质纯度较高	—	[70]
	反胶束法	反胶束体系是表面活性剂溶解在有机溶剂中，形成的纳米级聚集体	工艺条件温和，降低了蛋白质失活与变性风险，且对环境的污染较小而被广泛采用	—	[42]
	碱溶酸沉法	利用蛋白质在碱性条件下的高溶解性和在等电点时的低溶解性进行分离	操作简单、成本较低，吸油性和乳化稳定性好	酸碱消耗大、对环境不友好	[30,66,71]
复合提取	辅助碱提	加热辅助碱提，通过高温破坏蛋白结构，增强在碱性溶液中的溶解性。超声和微波能破坏蛋白质的氢键和疏水相互作用，使蛋白质结构部分展开，提高溶解性	缩短提取时间、蛋白提取率高、特水性好	工序复杂、蛋白聚集程度大	[38,41,70]
	辅助酶解	可使蛋白质部分变性，暴露出更多的酶切位点提高水解度	蛋白溶解度高、聚集程度小	蛋白持水性差、起泡性差	[72]
	碱酶两步法	先使蛋白质在碱性条件下溶解，再用碱性蛋白酶酶解，最后酸沉	蛋白持水性高、起泡性好、聚集程度小	—	[71]
酶法提取	酶解法	通过蛋白酶特异性切割蛋白质中的肽键，将大分子蛋白质分解为小分子多肽或氨基酸。酶的选择性决定了产物分子量和功能特性	加工条件温和、蛋白溶解度高、泡沫稳定性和乳化性好	成本较高、蛋白持水性差	[37,71, 73-75]

注：—表示参考文献中未提及。

表 4 不同方法制备的坚果粕蛋白提取率（%）

Table 4 Protein Extraction Rate of Nut Meal Prepared by Different Methods

		杏仁粕蛋白	榛子粕蛋白	核桃粕蛋白	腰果粕蛋白	参考文献
物理提取	超声处理	—	25%~32%	—	—	[66,67]
	亚临界水萃取法	—	—	75.01%	—	[69]
化学提取	碱溶酸沉法	75.9%~87.58%	11.5%	70.87%~82%	—	[30,38,66,70,76,77]
	反胶束法	—	—	68.7%	—	[42]
酶解法		—	—	62.76%	—	[74,75]
复合提取		—	53.16%	71%~80.56%	—	[41,58]

注：—表示参考文献中无记录。提取率（%）=（提取液中目标蛋白质的总量/原料中目标蛋白质的理论总量）×100%。

表 3 和表 4 总结了坚果粕蛋白的一般制备方法和不同方法的粕蛋白提取率。目前制备坚果粕蛋白常用的方法包括物理提取法（如超声、加热、亚临界水萃取和微波处理）、化学提取法（如盐析法、反胶束法和碱溶酸沉法）、复合提取法和酶法提取。通过分析各种方法在制备过程中的原理、优缺点和提取率，有利于把握关键加工工艺参数，并指导企业进行成本预估和核算。

3.1.1 物理提取

物理提取方法是制备粕蛋白较为常用的方法，包括微波、超声、蒸煮和加热等，通过物理手段（如机械力、热能、压力和电磁波等）破坏细胞结构，改变坚果粕蛋白的分子结构、空间构象或聚集状态，从而改善其功能特性（如溶解性、乳化性、凝胶性等）。物理提取方法提取蛋白操作简单、提取时间短，可以提高粕蛋白与钙离子螯

合的能力与稳定性，且通过超声处理得到的粕蛋白吸油性较好；但粕蛋白提取率较低、处理过程中的高温容易破坏蛋白结构，其蛋白特性受处理时间、功率和温度等条件的影响。通过优化处理条件，可以得到最佳提取工艺，如谢为峰等[65]得出提高杏仁粕溶解度的最佳超声处理条件为超声功率 500 W，蛋白质质量浓度 4 g·mL^{-1}，超声时间 15 min；仲月等[66]通过响应面法优化处理，得出当加热处理时间 8.26 min，超声波处理时间 14.74 min，微波处理时间 27.41 s 时，处理后榛子蛋白溶解率从 5.53%提高到 9.34%。亚临界水萃取法是一种绿色友好型物理方法，克服了传统超声、微波等提取率低、能耗大的弊端，同时又具有提取时间短等优点，Wang 等[69]通过亚临界水辅助提取核桃粕蛋白，在最佳提取工艺为 pH 值 9.0、料液比 l:25 g·mL^{-1}、提取温度 133 ℃的条件下得到的蛋白提取率可达到 75.01%。尽管物理提取方法在实际应用中操作简便，可以适当改善蛋白特性，但单一的物理处理对粕蛋白提取率的贡献并不显著，常作为辅助方法与碱溶酸沉、酶解等方法复合使用，起到缩短处理时间、提高提取效率、改善部分蛋白特性的作用。

3.1.2 化学提取

目前文献中报道的化学提取方法主要包括碱溶酸沉法、盐析法、反胶束法等。其中，碱溶酸沉法是从各种物料中提取蛋白质最常用的方法，其利用蛋白质在碱性条件下的高溶解性和在等电点时的低溶解性进行分离，操作简单、成本较低，蛋白持水性较好，但酸碱消耗大、对环境不友好、溶解性较低。通过碱溶酸沉法制备的蛋白特性受提取时间、温度、pH 值等条件的影响，张春红等[30]得到提取榛子分离蛋白的最佳工艺条件为：料液比 1:15，碱提 pH 值 9.0，碱提温度 50 ℃，碱提时间 70 min，酸沉 pH 值 4.5，此条件下榛子分离蛋白的溶解性、持水性和吸油性分别为 34.0%、2. 6 mL·g^{-1} 和 2.15 mL·g^{-1}，乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性分别为 61.2%、85.0%、86.5%和 24.0%。李晶晶等[70]通过对比不同提取方法对杏仁蛋白结构和功能的影响，发现盐析法制备的杏仁蛋白纯度和提取率较高，且乳化特性和起泡特性较好，但盐析法操作复杂，在提取粕蛋白的过程中会产生一部分可溶性盐，需要进行脱盐处理，耗时长，无法应用于工业生产。反胶束制备蛋白，其工艺条件温和，降低了蛋白质失活与变性风险，且对环境的污染较小而被广泛采用，与传统碱提相比，提取率较高。王宪昌等[42]在反胶束相中提取核桃蛋白，得到蛋白提取率为 68.7%，而碱提酸沉法的提取率为 63.7%，可见反胶束法蛋白提取率较高。总的来看，化学提取较物理提取，其蛋白提取率高、条件较为温和、适用范围广，降低了蛋白变性的风险；但传统的碱溶酸沉提取时间长、蛋白聚集性大，需要在其基础增加辅助工艺，提高提取效率、优化工艺参数；一些新型方法，如反胶束法，克服了传统碱提对环境不友好、酸碱消耗大的弊端，但应用在提取坚果粕蛋白的研究中较为鲜见，其应用于制备杏仁、榛子等蛋白的可能性有待研究。

3.1.3 酶法提取

酶法提取是继碱溶酸沉之后较为普遍的方法，其通过蛋白酶特异性切割蛋白质中的肽键，将大分子蛋白质分解为小分子多肽或氨基酸。通过酶法提取的蛋白溶解度高、泡沫稳定性和乳化性好，且加工条件温和，但成本较高、蛋白持水性差，制备的蛋白特性受酶的种类、酶解时间、酶解温度和酶解 pH 值影响大。刘猛等[74]利用蛋白酶酶解，在 pH 值 9.0、酶解温度 45 ℃、酶解时间 55 min、料液比 1:12 g·mL^{-1} 的条件下，得到核桃蛋白提取率达 62.76%；王琳等[73]利用木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶复合酶解，在两种酶比 1:2，pH 值 8，酶底比 1%，底物质量分数 2%，酶解温度 50 ℃的条件下，得到的杏仁蛋白水解度为 23.6%。在制备蛋白时，国内外学者常选用一种或多种碱性蛋白酶，也有学者针对结合酶的特异性提取生物活性肽，如赵换霞等[37]在碱性蛋白酶—风味蛋白酶的复合酶用量 6 725 U·g^{-1}（碱性蛋白酶为 3 645 U·g^{-1}，风味蛋白酶为 2690 U·g^{-1}）、底物质量分数为 3%、温度 60 ℃、pH 值为 8.2 的条件下制备扁杏仁抗氧化肽，其对羟基自由基的清除率和水解度分别为 84.18%和 20.87%。总的来看，酶法制备坚果粕蛋白，具有提取率较高、加工条件温和等优点，但由于其成本较大、加工时间较长、蛋白持水性差，在一定程度上限制了其在大规模制备坚果粕蛋白中的应用。此外，酶的选择性决定了产物分子量和功能特性，在提取坚果粕中的功能活性成分及其机制研究中具有广阔的应用前景。

3.1.4 复合提取

常用的复合提取方法是先通过物理预处理，破碎坚果粕的细胞壁，导致细胞内容物流出、蛋白构象发生变化、暴露出更多的基团与酶切位点，再加以酶解或碱溶酸沉，作用于某些化学键和基团，从而达到提高蛋白的溶解度、改善部分蛋白特性、同时缩短提取时间、优化工艺参数的效果。Sari 等[72]通过超声波和微波预处理辅助酶解杏仁脱脂粕，得到的粕蛋白最优水解度分别为 10.95%、8.87%，而未处理的对照样品的水解度为 5.76%；且与传统碱提相比，蛋白质回收率分别提高了 1.16 倍和 1.18 倍。邸红艳等[41]在传统碱提的基础上，通过功率密度 120 W/L，

超声时间 30 min，超声温度 55 ℃，料液比 1:25，pH 值为 9 的超声辅助处理核桃粕，其蛋白得率可达 71.00%，纯度可达 72.69%。除物理辅助外，碱酶两步法也是常用的复合方法。石宁蕙等[71]通过比较不同提取方法对甜杏仁蛋白形态及功能性的影响，发现碱酶两步法制备的甜杏仁蛋白具有较好的持水性和起泡性，且蛋白结构较为疏松，表明是碱酶两步法对其有一定程度的降解；石宁蕙等[71]的研究还指出，超声辅助不利于提高甜杏仁蛋白的溶解性、持水性、乳化性与乳化稳定性，但对其吸油性略有改善，可能是超声处理产热使部分蛋白发生变形，同时使一些原本隐藏的基团暴露出来。总的来看，复合提取在一定程度上可以提高提取的效率、优化工艺参数，通过降低蛋白表观聚集程度改善粕蛋白的吸油性，适用于对蛋白的吸油性要求高的加工过程中，但对其他特性，如起泡性与起泡稳定性、乳化性与乳化稳定性、持水性的影响不大，具体原因可能与试验原料和条件有关，需要进一步论证。

3.1.5 小结

不同制备方法得到的蛋白在空间结构和加工特性上有显著差异。针对坚果粕蛋白的空间结构与制备方法之间的关系，目前国内外学者的研究较少，不足以进行总结和构效分析，因而在一定程度上制约了粕蛋白的开发。有 Jiang 等[78]将深共晶溶剂提取的 tiger nut meal（DES-TNP）与碱溶酸沉法提取的 tiger nut meal（ASAE-TNP）进行了全面比较，发现 DES-TNP 的纯度显著高于 ASAE-TNP，此外，DES-TNP 和 ASAE-TNP 在微观、二级和三级结构和分子量分布上存在差异。这种差异导致了不同的功能特性，使 DES-TNP 在 pH 值为 13 时表现出更好的溶解性、乳化性和起泡性。由表 3 和表 4 可以看出，酶解法和碱溶酸沉法是最普遍的提取方法。酶法提取率相对较高，但持水性差、成本高，多应用于特异性制备活性肽；碱溶酸沉法制备的蛋白特性相对较好、提取率高，在生产加工中有着广泛应用。但传统的制备方法都面临着能耗大、对环境不友好的问题，一些绿色创新、环境友好型方法如反胶束法、亚临界水萃取法等备受关注，但其广泛适用性仍需试验验证。有许多学者将多种复合方法和传统方法进行对比，但仅把蛋白质的溶解性作为评价指标，只有少数对乳化性、起泡性等加工特性进行了测定分析，且试验原料单一，在一定程度上限制了粕蛋白制备方法的创新，对坚果粕产业的加工缺乏指导意义。因此，分析坚果粕蛋白的多种制备方法，对综合认识其优缺点、降低制备过程的能源损耗、结合所需特性选择合适的制备方法具有重要意义。

3.2 坚果粕蛋白的特性

3.2.1 加工特性

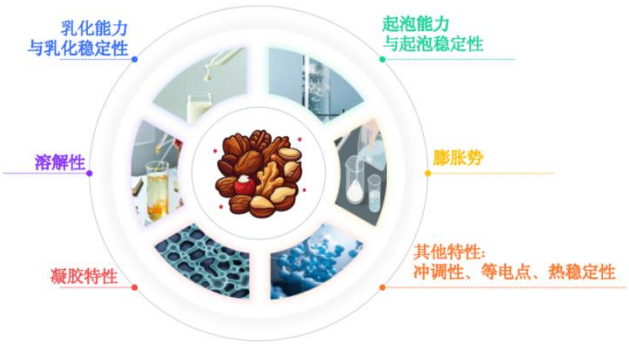

图 1 坚果粕蛋白的加工特性

Fig.1 Functional Evaluation and Processing Attributes of Nut Meal Proteins

3.2.1.1 乳化能力与乳化稳定性

乳化能力是衡量坚果粕中蛋白质促进油-水型乳状液形成能力的指标。乳化稳定性标志着蛋白质维持乳状液稳定存在的能力。蛋白质的乳化能力与乳化稳定性直接影响食品的质地、感官特性和保质期，在食品工业中作为天然乳化剂被广泛使用。相关研究表明，坚果粕蛋白的乳化能力和稳定性与粕的浓度、pH 值和离子强度等相关。当坚果粕浓度增大时，蛋白质浓度增大，提高了界面膜的强度和厚度，从而增加了乳化性和稳定性，但由于坚果粕中蛋白质相对较少，且含有一定量的脂肪和纤维，故乳化性增幅越来越小。蛋白质在等电点附近发生絮凝，溶解度较小，而在偏离等电点时，蛋白质溶解度较大，说明榛子粉的乳化性与其蛋白质的溶解度有着密切的关系，即由于蛋白质分子表面的结构和所带电荷性所决定的。马勇等[29]通过实验得出榛子粉乳化性和乳化稳定性随其浓度

增加而增大，当榛子粉溶液质量浓度为 2~8 mg mL^{-1} 时，蛋白质乳化能力和乳化稳定性增幅最大，当榛子粉质量浓度约为 10 mg mL^{-1} 时，乳化能力增幅变小；在碱性条件下榛子粉乳化性很好，在等电点附近乳化性较差；NaCl 浓度在 0~0.4 mol/ L 时，榛子粉的乳化性和乳化稳定性随浓度的增大而增大。Geow 等[67]在超声和渗透脱水对脱脂榛子粕功能特性的影响的研究表明，在提取过程中，超声振幅、溶剂与固体比和提取温度在最高设置下会影响蛋白质乳化性（从 1%到 1.4%）。通过优化坚果粕蛋白的制备工艺，改善其乳化能力与乳化稳定性，使其可以作为一种天然乳化剂，应用于风味冰淇凌、坚果乳饮料、坚果酱和面包的制作中；也可以与多糖（如阿拉伯胶）通过静电吸附形成复合壁材，作为包埋脂溶性营养素（如维生素 E、类胡萝卜素）的功能性食品载体。

3.2.1.2 起泡能力与起泡稳定性

蛋白质的起泡能力是指蛋白质能降低气-液界面的表面张力而帮助形成气泡的能力。泡沫的稳定性是指蛋白质维持泡沫稳定的能力。蛋白质的起泡能力与稳定性和 pH 值、蛋白质含量相关，且只有在合适的溶解度范围内，蛋白质才会表现出一定的起泡性。在蛋白等电点附近，由于溶解性差，导致大部分蛋白质没有参与到起泡中来，起泡能力差，而这些不溶的蛋白质粒子能提高泡沫表面黏度，对稳定泡沫有利；可溶性蛋白存在有利于乳化能力的提高，而不利于乳化稳定性和起泡稳定性；蛋白质含量与起泡能力密切相关，蛋白质含量越高，其起泡能力就越强。祝美云等[79]通过实验得出榛子粉乳化性和起泡性与品种密切相关，去皮处理提高了榛子粉的乳化性和起泡性；榛子蛋白在 pH 值为 2.5 时，起泡能力较好，当 pH 值为 4.5 时，接近榛子粕蛋白的等电点[29]，榛子粉起泡能力较差，在等电点之后，随着 pH 值的增大，起泡能力提高；坚果粕蛋白的起泡能力和起泡稳定性在食品工业中也展现出重要价值，在烘焙食品加工领域，坚果粕蛋白可部分代替蛋清蛋白，在面糊中通过搅打形成均匀气泡，赋予产品蓬松质地，在高温烘烤时，蛋白网络凝固固定气泡结构，防止塌陷；在酸性饮料（如植物基奶昔）中，可以通过 pH 值调节维持泡沫稳定性；在挤压加工中，蛋白泡沫结构形成多孔质地，模拟肉类纤维感，膨化食品中通过快速减压形成气泡，提升酥脆度；在功能性食品领域，可以利用坚果粕蛋白泡沫包埋益生菌或风味物质，提高活性成分稳定性，以及用充气结构替代脂肪，降低热量（如低脂巧克力慕斯）等。合理利用坚果粕蛋白的起泡性与泡沫稳定性，有望推动植物基食品升级，但天然坚果粕蛋白起泡能力弱于蛋清或乳清蛋白，且高纯度提取和工艺成本较高，易致敏，未来需重点关注过敏原脱除、风味优化及规模化生产技术的突破，以更好地满足植物基和清洁标签产品的需求。

3.2.1.3 溶解性

蛋白质的溶解性与其在实际生产应用中功能性质的发挥有关，较高的溶解性可确保蛋白质均匀分散于水相中，充分发挥其乳化、凝胶、发泡等作用，尤其在液态或半固态食品体系中至关重要。坚果粕蛋白质的溶解性与温度、物质组成以及制备工艺密切相关。殷贺中等[80]发现各品种榛子粉溶解性在一定温度范围内随着温度的升高而增加，但超过一定温度后，溶解度随着温度的继续升高而降低，如巴塞罗那品种的去皮榛子，在 30 ℃时溶解度约为 13.2%，在 70 ℃时的溶解度约为 16.2%，而当温度继续升高到 90 ℃时，溶解度下降到 13.5%；在榛子粉的主要组成物质中，可溶性蛋白质含量、淀粉含量和可溶性糖含量与榛子粉的溶解性存在一定正相关关系，但不同温度条件下各物质对榛子粉溶解性影响的程度不同，在相对低温条件下，可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量与榛子粉溶解性的关系更加密切，在相对高温条件下，二者与榛子粉溶解性相关性降低，而淀粉与之相关性有所提高。在制备坚果粕蛋白中，超声、微波、酶解和碱溶酸沉等工艺可以对溶解性产生影响。如石宁蕙等[71]研究发现，酶法处理可以显著提高甜杏仁粕蛋白的溶解性。蛋白质的溶解性在食品工业中有着广泛应用。高溶解性蛋白在中性或酸性条件下稳定分散，以防止分层与沉淀，可以应用于坚果奶、植物蛋白饮料、即饮咖啡等植物基液态食品；通过酶解或糖基化可以提高溶解性，使蛋白达到速溶效果，从而应用于功能性蛋白粉，或作为营养强化剂的载体包埋维生素、矿物质等营养素，实现均匀释放。未来，应创新绿色加工技术，减少能耗与化学试剂使用，同时探索坚果粕蛋白在可食用包装膜、pH 值响应型溶解蛋白实现精准营养递送等领域的可行性，突破传统植物蛋白的应用局限，成为多功能食品配料的理想选择。

3.2.1.4 膨胀势

坚果粕蛋白的膨胀势是指其吸水或吸油后体积膨胀的能力，这一特性直接影响食品的质构、持水性及加工性能。在植物基食品、膨化产品及功能性配料中，膨胀势的调控对优化产品品质至关重要。蛋白的膨胀主要包括吸水膨胀和热致膨胀。吸水膨胀是蛋白质通过氢键、离子—偶极作用吸附水分，导致分子链伸展和体积增大；热致膨胀是高温下蛋白质变性展开，形成多孔网络结构（如挤压膨化）。殷贺中等[80]发现各品种榛子粉膨胀势都表现

为在温度低于 70 ℃时，随着温度的升高而增加，但超过 70 ℃后膨胀势水平的变化很小，表明该温度下其膨胀能力已基本达到极限；淀粉含量越高，膨胀势越高，而蛋白质的存在对榛子粉膨胀势产生不利影响。通过挤压膨化、超微粉碎、酶解提取等关键技术，可以提高粕蛋白的膨胀势，应用于形成多孔酥脆质地的膨化食品（如蛋白脆片、膨化谷物棒）、疏松韧性的烘焙食品（如高蛋白面包、无麸质糕点），以及多汁的植物基肉制品（如素肉饼、植物基香肠）中，是未来食品质构设计与功能化升级的核心。

3.2.1.5 凝胶特性

坚果粕蛋白的凝胶特性是指其在一定条件下形成三维网络结构的能力，这种能力赋予食品特定的质构、持水性和稳定性。在植物基食品、仿肉制品及功能性食品中，凝胶特性是替代动物蛋白的核心性能之一。蛋白质凝胶的形成有热诱导、离子诱导、酸诱导三种机制，其特性与蛋白浓度、pH 值、离子强度、温度等密切相关。殷贺中等[81]研究表明，凝胶的硬度和弹性随着榛子粉浓度的增大而增大；而当葡萄糖酸内酯（GDL）添加量增加时，凝胶的硬度相应的增强，而并不是 GDL 添加量越大，凝胶弹性就越好，且其弹性的变化则与榛子蛋白质的品种有一定相关性。蛋白质的凝胶特性赋予了食品特定的质构，热凝胶可模拟动物蛋白的熔融拉伸性，用于植物基奶酪的生产；冷凝胶可用于酸奶定型，避免高温破坏益生菌活性；细胞培养肉是目前蛋白研究的热点领域，蛋白凝胶可以作为细胞生长支架，模拟肌肉纹理；高持水性凝胶可用于低热量食品，如植物基布丁、果冻、代餐能量棒等，替代高糖明胶体系。通过凝胶特性的深度开发，坚果粕蛋白正成为植物基食品革命的核心驱动力。未来需突破“质构—风味—成本”三角平衡难题，推动其从实验室创新走向规模化工业应用。

3.2.1.6 其他加工特性

坚果粕蛋白除以上几种常见加工特性外，还具有等电点、冲调性、热稳定性和持水性等特性，它们与产品的质构与品质密切相关。马勇等[29]测定出榛子蛋白质等电点为 4.52；代暘鑫等[77]测定出核桃粕蛋白的等电点为 4.5。石宁蕙等[71]研究发现，酶法和超声辅助酶法提取的甜杏仁蛋白持水性比较差，碱溶酸沉法提取的蛋白持水性较为理想。Geow 等[67]研究表明，超声辅助溶剂提取可以提高榛子粕蛋白持水性（从 1.1%到 1.7%）。此外，冲调性是指坚果粕蛋白加工成粉后，能够较好地溶于水形成均匀分散的稳定溶液的性质，影响了冲剂类食品的复水速度与稳定性；在食品物料加工过程中，蛋白质多具有热敏性，需要对加工过程的温度进行严格把控。因此，分析和利用坚果粕的等电点、冲调性、热稳定性和持水性，对于优化其在食品加工中的适用性、改善产品品质具有重要意义，在指导植物肉制品、植物基饮料、烘焙食品的生产中有着广泛的应用。

3.2.2 功能特性

图 2 坚果粕蛋白的功能特性

Fig.2 Functional Properties of Nut Meal Protein

坚果粕中富含多种人体必需氨基酸，以及碳水化合物、脂肪、维生素、矿物质和膳食纤维等营养物质，具有较高的营养价值与多种生物活性成分。许多学者从坚果粕中提取生物活性肽，具有抑菌、抗氧化的功能特性，可作为功能性食品的天然抗氧化剂、防腐剂；部分坚果粕生物活性肽还具有抗衰老、降血脂等诸多功效，在护肤品、保健品中也有着广阔发展前景。

在抑菌方面，胡悦等[47]以核桃粕为原料，提取分离抗菌多肽，并对 HAAPK 肽的抗菌机制进行了研究，结果发现，采用浓度为 1.0 MIC 的 HAAPK 肽作用于金黄色葡萄球菌时，相较于空白对照组，蛋白质浓度、胞内电解

质和丙酮酸含量分别下降了 55.0%、17.75%、76.84%，该结果表明，HAAPK 肽导致了细胞内容物泄露；此外，AKP 含量增加到对照组的约 9 倍，LPS 含量增加 18.25%，β-半乳糖苷酶含量降低 68.57%，可能是由于 HAAPK 肽破坏了细菌的细胞膜；ATP、ATPase、SDH、MDH 含量分别降低了 93.28%、8.08%、82.63%和 86.89%，胞浆中 ICDH 活性增加到对照组的近 2 倍，表明 HAAPK 肽干扰了细胞内能量代谢。综上，HAAPK 肽联合了细胞膜膜损伤和扰乱能量代谢作用，从而发挥抗菌活性。在抗炎方面，Udenigwe 等[82]用胃蛋白酶和胰腺蛋白酶模拟杏仁蛋白的胃肠道处理，产生的高分子量分数水解物可以调节激活细胞中促炎细胞因子、白细胞介素（IL）-6、IL-1β 和肿瘤坏死因子（TNF）-α 的水平，这表明，杏仁蛋白水解物有着抗炎活性。在抗氧化方面，Gheise 等[83]对比了核桃、榛子、杏仁和芝麻脱油粕的营养成分、体外营养价值和抗氧化活性，得出脱油粕的蛋白质组分在肠道水平具有高度可消化性，可以增加肠道蛋白质流动，特别是对于含有高度可降解蛋白质的脱油榛子粕。在抗癌方面，Jahanbani 等[84]测试了核桃蛋白水解物对人乳腺癌和结肠癌细胞系存活率的影响，结果显示肽段对乳腺癌和结肠癌细胞的生长抑制率分别为 63%和 51%，表明核桃蛋白水解肽段具有显著的抗氧化和抗癌活性。在提高大脑记忆力方面，申烨华等[85,86]从核桃粕中酶解制备核桃多肽，利用多肽组学结合生物信息学、分子对接，筛选出具有乙酰胆碱酯酶抑制活性的多肽，并通过体外活性实验验证，所得核桃多肽具有较好的乙酰胆碱酯酶抑制活性，具有改善学习和记忆的功效。郭雪霖[87]总结了杏仁粕、核桃粕、腰果粕蛋白肽的多种生物活性，在抗氧化、抗衰老、抗炎等方面功能显著。

相关研究表明，坚果粕蛋白活性肽功能特性丰富，在功能性食品、药品和化妆品领域中具有广阔应用前景。但目前国内外学者对于活性肽的功能活性研究目前多局限在通过动物模型和细胞实验验证其功能上，对于蛋白活性肽的制备纯化和具体的功能机制、代谢过程研究较少，在一定程度上限制了坚果粕蛋白的开发。

3.2.3 安全性

图 3 坚果粕的安全性

Fig.3 Safety of Nut Meal

3.2.3.1 致敏性

坚果粕蛋白可能含有过敏原，对于坚果过敏人群存在潜在危害[88]。如核桃仁中含有五种致敏蛋白，即 2S 白蛋白、7S 球蛋白、LTP、11S 球蛋白和前纤维蛋白[89]；榛子中过敏原包括 *Cor a 1*、*Cor a 2*、*Cor a 6* 和 *Cor a 8~Cor a 15* 十一种；腰果中过敏原包括 *Ana o 1*、*Ana o 2* 和 *Ana o 3* 三种；杏仁中过敏原分为 *Pru du 3~6*、*Pru du 8* 及 *Pru du 10* 六种[90]。随着坚果已成为现代饮食结构中不可缺少的部分，坚果过敏也正成为全世界普遍存在的食品安全问题。因此，探索坚果脱敏技术对提高坚果的安全性、促进坚果产业发展至关重要。目前常用的脱敏方法有热处理、辐射处理、超高压处理等物理方法；添加单宁和多酚、糖基化等化学方法；酶解、基因工程、微生物发酵等

生化法。上述方法中，单一的脱敏技术也易出现过敏物残留、改变食品风味、破化营养价值等缺点，而针对不同过敏原性质而采用的多种技术联合脱敏表现出显著优势，在极大破坏致敏成分的同时又保留了食品中营养成分，其中一些方法还起到了为食品添加特殊风味的作用。

3.2.3.2 微生物污染

坚果粕在加工和储存过程中可能受到霉菌、细菌等微生物的污染，尤其是黄曲霉毒素等有害物质，在核桃、杏仁、榛子中污染检出率和污染程度较高。目前已经鉴定出的黄曲霉毒素达 18 种，其中黄曲霉毒素 B 污染最普遍、毒性最强，其易引发急、慢性毒性，致癌、致畸以及免疫抑制等多种危害，严重威胁果品安全，危害人类健康。因此，开发黄曲霉毒素的脱毒手段、防控措施和检测技术具有重要意义。目前常用的脱毒手段有物理吸附、照射技术、热处理、微生物吸附、微生物降解以及臭氧降解等[91]。其中，生物降解目前看来是比较有发展前景的脱毒手段，但降解产物的安全性仍需进一步探讨，能够大规模生产、应用的降解制剂仍需进一步开发。

3.2.3.3 重金属和农药残留

坚果种植过程中可能接触到重金属和农药，重金属和农药残留在人体内可长期积累，危害神经系统、造血系统及肾脏等，是影响坚果安全性的重要因素。常见的重金属包括铅、镉、汞等。铅会干扰血红素合成（抑制 *δ*-氨基乙酰丙酸脱水酶和铁螯合酶），破坏神经系统（尤其儿童，血脑屏障未完善），导致认知障碍，血铅浓度≥50 μg/L 即可引起儿童智力下降。镉蓄积于肾脏，竞争性取代锌酶中的锌，诱发氧化应激和肾小管损伤，尿镉≥5 μg/g 肌酐时肾小管功能障碍风险显著增加。汞通过血脑屏障和胎盘，破坏神经元微管，WHO 暂定每周耐受摄入量（PTWI）1.6 μg/kg 体重。常见的农药残留有有机磷类、有机氯类和拟除虫菊酯类。有机磷类的农药会不可逆抑制乙酰胆碱酯酶，导致神经突触乙酰胆碱蓄积，引发震颤、呼吸衰竭，每日允许摄入量为 0.01 mg/kg 体重。有机氯类的农药会干扰钠钾通道，激活雌激素受体，若长期蓄积于脂肪组织，可能致癌。拟除虫菊酯类农药会延迟神经元钠通道关闭，引发重复神经放电。综上所述，农药和重金属残留对老人、小孩、妇女危害风险较大，应严格控制生产中农药的使用，加强对农产品的质量检测，降低危害人群摄入风险。

3.2.3.4 加工过程中的有害物

除原料生产、储藏中存在的安全问题外，加工过程中的有害物质也是坚果安全性的一大隐患。丙烯酰胺是一种常见的热加工伴生物，在高温（>120 ℃）加工食品时通过美拉德反应生成，如油炸、烘焙坚果。国际癌症研究机构（IARC）将其列为 2A 类致癌物，动物实验显示其具有神经毒性和致癌性。相关研究表明，葵花籽加工过程中，随着烘烤温度的升高和烘烤时间的延长，*α*-二羰基化合物的含量不断升高，且在 150 ℃的温度和 60 min 的时间下生成的含量最高[92]。因此，在高温焙烤、压榨坚果时，需要严格控制加工过程中的温度和时间，防止温度过高产生大量丙烯酰胺。此外，在对坚果进行前处理，特别是使用有机溶剂时，可能存在的试剂残留也具有潜在的毒性。因此，在坚果加工过程中，应优化加工条件，不宜在高温下长时间加热，同时控制有机溶剂的用量，降低加工过程中的有害物水平。

3.2.4 小结

坚果粕蛋白作为一种优质植物蛋白来源，具有复杂的蛋白特性。体现在广泛的加工适用性范围、与产品质构和品质相关的功能性质以及潜在的安全问题。在生产加工过程中，坚果粕蛋白的乳化性、起泡性、溶解性和凝胶特性等加工特性是重要观测指标，与产品的品质和功能性质的发挥密切相关。不同的物质组成和制备工艺会对蛋白的加工特性产生较大影响，需要选择合适的制备工艺，同时严格控制料液比、温度、pH 值等关键因素，才能在提高蛋白品质、优化加工效率、降低成本的同时充分发挥蛋白的各种功能特性，突破传统植物蛋白应用的局限性，实现在烘焙食品、细胞培养肉、植物基饮料、功能性食品载体等领域的广泛应用。

坚果粕蛋白在营养上具有潜力，但也存在过敏原、抗营养因子、致癌物质、重金属和农药残留等潜在风险。其中，最主要的是过敏原、黄曲霉毒素、重金属的检测。目前的检测方法多样，但最普遍使用的还是高效液相色谱法和原子吸收光谱法，通常出结果的时间较快，最准确的是质谱法，但由于成本较高，还未普遍使用。对于坚果过敏人群以及肝病患者，需要谨慎选择食用；对于广大食用者，需要谨慎挑选坚果品质，发现异色、霉变、苦味或哈喇味时立即丢弃。未来，应不断加强对坚果的加工控制，对于加工企业要做好严格的生产监管、储藏控制和加工条件优化来保障其安全性；在原料控制方面，种植基地和农户应做到绿色安全生产、妥善控制农药的使用，有效防治微生物污染和病虫害；同时，在检测监管方面，应从坚果产地和流通过程控制好坚果食品的质量安全问题，主要是坚果生长、运输过程中对黄曲霉毒素的控制及对坚果的防腐及外观的抗氧化剂及食品添加剂的使用，

并要进一步建立低成本、准确、高效的检测方法。

4 思考展望

坚果粕作为坚果加工过程中的副产品，含有丰富的蛋白质、纤维和脂肪，营养价值高，是良好的食品原料，具有极大开发潜力。目前对坚果粕的利用广泛集中在动物饲料和新型风味食品开发等领域，对关键功能组分的提取、不同制备方法与粕蛋白的构效关系以及向大宗食品配料转化方面缺乏研究和开发，整体高值化转化程度低，难以解决坚果原料高成本的问题。因此，未来坚果粕的精深加工方向需要聚焦以下几个问题：（1）提高坚果粕的整体利用率，进而降低转化成本，单一组分的开发，一方面会造成资源浪费，另一方面会导致转化成本较高，而多组分及全组分开发可有效解决相关问题；（2）聚焦功能性、高值化产品的开发转化，特别是功能性蛋白、活性肽等大宗功能配料或健康食品的开发，提高坚果粕的转化经济效益；（3）针对坚果粕加工的特种技术及装备的开发，如坚果粕的高效预处理技术，粕蛋白的绿色提取技术，功能肽的定向水解制备技术、粕蛋白脱敏技术及其匹配的关键装备等；（4）强化坚果粕开发过程的安全控制研究，明确不同坚果粕的安全风险关键控制点，研发特征风险因子清除技术等，提高产品的营养安全性。坚果粕的精深加工是坚果产业未来发展的关键主题之一，也是促进坚果产业转型升级，提高区域经济发展的有效手段，具有广阔的开发前景。

参考文献

[1] 亚洲研究所.2024 中国坚果贸易形势与消费趋势研究报告 [EB/OL].(2025-03-26)[2025-06-21]. https://www.qishangcha.com/docs/133749.html

[2] NAVARRO, SANDRA L B, RODRIGUES, et al. *Macadamia* oil extraction methods and uses for the defatted meal byproduct [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54: 148-154.

[3] KASEKE T, FAWOLE O A, OPARA U L. Chemistry and functionality of cold-pressed *Macadamia* nut oil [J]. INFORM: International News on Fats, Oils and Related Materials, 2022, 33(3): 24-30.

[4] INÊS J.B. FERREIRA A B, B E M C A A, B J A S, et al. Green emerging extraction technologies to obtain high-quality vegetable oils from nuts: A review [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2022, 76: 102931.

[5] SEN D, KAHVECI D. Production of a protein concentrate from hazelnut meal obtained as a hazelnut oil industry by-product and its application in a functional beverage [J]. Waste and Biomass Valorization, 2020, 11(10): 5099-5107.

[6] RAMANDEEP K, VALIVETI K T, B B K, et al. Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of three different cashew wastes [J]. Bioresource Technology, 2023, 376: 128859.

[7] SUBHAMOY D, KSHITIZ K, SINGH V S, et al. Bioactive compounds and its optimization from food waste: review on novel extraction techniques [J]. Nutrition & Food Science, 2022, 52(8): 1270-1288.

[8] SENOL H. Enhancement in methane yield from anaerobic co-digestion of walnut shells and cattle manure [J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2020, 39(6): 13524.1-13524.11.

[9] FU L, GENG S, CHEN H,et al. Extraction of deoiled walnut dietary fibers and effects of particle sizes on the physiochemical properties [J]. Food Science and Technology Research, 2019, 24(6): 981-990.

[10] OLIVIER B A, MING G, YONGLIN W, et al. Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes [J]. Reviews on Environmental Health, 2019, 34(1): 57-68.

[11] MOHANTY A, ROUT P R, DUBRY B, et al. A critical review on biogas production from edible and non-edible oil cakes [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2022, 12: 949-966.

[12] BALLHORN D J. Chapter 14-cyanogenic glycosides in nuts and seeds [J]. Nuts & Seeds in Health & Disease Prevention, 2011, 2011: 129-136.

[13] DAHLER J, MCCONCHIE C, TURNBULL C. Quantification of cyanogenic glycosides in seedlings of three *Macadamia* (*Proteaceae*) species [J]. Australian Journal of Botany, 1995, 43(6): 619-628.

[14] A Q H D, A K D C, B K G L, et al. Quantification of inositol phosphates in almond meal and almond brown skins by HPLC/ESI/MS [J]. Food Chemistry, 2017, 229: 84-92.

[15] 杨丽颖.核桃粕品质分析及素肉研发[D].阿拉尔:塔里木大学,2024.

[16] 殷贺中.不同种脱脂榛子粉,榛子蛋白粉理化性质比较研究[D].郑州:河南农业大学.

[17] 卢冉,王炳智,田英姿.不同品种杏仁氨基酸组成分析及综合评价[J].食品科学,2021,42(24):7.

[18] FANELLI N S, TORRES-MENDOZA L J, ABELILLA J J S H H. Chemical composition of copra, palm kernel, and cashew co-products from South-East Asia and almond hulls from Australia [J]. Animal Bioscience, 2023, 36(5): 768-775.

[19] ZHU K, MA J, CONG J, et al. The road to reuse of walnut by-products: A comprehensive review of bioactive compounds, extraction and identification methods, biomedical and industrial applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 16.

[20] HONG Z, XIE J, TAO L, et al. Exploration of cyclooxygenase-2 inhibitory peptides from walnut dreg proteins based on in silico and in vitro analysis [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(3): 1636-1644.

[21] HONG Z, SHI C, HU X, et al. Walnut protein peptides ameliorate DSS-Induced ulcerative colitis damage in mice: An in silico analysis and in vivo investigation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(42): 16.

[22] 尚晓丹,张瑞,孙玲,等.核桃饼粕在动物生产中的应用[J].饲料研究,2024,47(1):158-161.

[23] 冯秀华,张学勤,孙景琦.杏仁粕营养成分分析[J].内蒙古农牧学院学报,1993,14(3):3.

[24] 徐克芹,朱绪春,张党权,等.西伯利亚杏仁粕营养物质测定与其氨基酸组成评价[J].经济林研究,2019,37(1):133-138.

[25] 徐晓燕,张磊,侯伟伟,等.甜杏仁油品质及杏仁粕成分的分析[J].中国食物与营养,2013,19(8):53-57.

[26] 程赞,刘红开,赵晓燕,等.不同品种脱脂核桃粉营养成分及功能特性的研究[J].中国粮油学报,2023,38(6):52-59.

[27] SUBRA-PATERNAULT P, GARCIA-MENDOZA M P, SAVOIRE R, et al. Impact of hydro-alcoholic solvents on the oil and phenolics extraction from walnut (*Juglans regia L.*) press-cake and the self-emulsification of extracts [J]. Foods, 2022, 11(2): 186.

[28] AKANDE T O, AKINWUMI A O, ABEGUNDE T O. Cashew reject meal in diets of laying chickens: nutritional and economic suitability [J]. Journal of Animal Science and Technology, 2015, 57(1): 1-6.

[29] 马勇,周佩.榛子粉的主要成分和功能特性研究[J].食品与发酵工业,2008,34(11):4.

[30] 张春红,盛芳,宋晓艺.榛子分离蛋白提取及其功能特性的研究[J].中国油脂,2011,36(8):3.

[31] E.O. OVIEDO-RONDÓN, TOSCAN A, FAGUNDES N S, et al. Soybean meal nutrient composition, amino acid digestibility, and energy content according to the country of origin and year of harvest evaluated via NIRS [J]. Journal of Applied Poultry Research, 2024, 33(3): 100448.

[32] ZHU X, CHEN Y, HAO S, et al. Improvement of the nutritional quality of rapeseed meal through solid-state fermentation with *B. subtilis*, *S. cerevisiae*, and *B. amyloliquefaciens* [J]. Fermentation 2023, 9: 492.

[33] 杨荣,王华朗,宋增廷.葵花籽粕的营养价值及其综合利用[J].广东饲料,2020,9:29.

[34] FERNANDES D R, FREITAS E R, WATANABE P H, et al. Cashew nut meal in the feeding of meat quails[J].Tropical Animal Health and Production, 2016, 48(4): 711-717.

[35] 艾华仲.一种腰果肽粉的生产工艺:201510952682[P][2025-03-03].

[36] 郭凯,曹存芳,孙亚玲.全腰果(粕)活性肽营养品及其制备方法:CN201911357007.8[P].CN110973622A[2025-03-03].

[37] 赵换霞,张海生,黄璞,等.扁杏仁抗氧化肽的制取工艺研究[J].食品工业科技,2015,36(17):243-248+252.

[38] 陈一,何晓叶.热碱法提取杏仁粕分离蛋白的工艺研究[J].安徽农业科学,2012,40(32):3.

[39] 苏艳玲,尉弘.彩色马铃薯杏仁粕曲奇的研制[J].农产品加工,2022,13:29-33.

[40] ARECHE F O, CÁCERES, CARMEN GISELA MINDANI, et al. Optimizing protein quality and bioactive peptide production in almond-based dairy alternatives through lactic acid fermentation and enzyme-assisted hydrolysis for cardiovascular health benefits [J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 62:413-432.

[41] 邸红艳,马海乐,王洋,等.超声辅助提取核桃粕蛋白的工艺研究[J].现代食品科技,2019,35(7):164-172.

[42] 王宪昌,虎海防,赵晓燕,等.反胶束法提取核桃粕中蛋白的前萃工艺研究[J].中国粮油学报,2014,29(1):91-94.

[43] 陈忠魁,郭怀.利用漆籽饼,核桃仁饼,橡仁粉饲喂生长肥育猪试验[J].饲料工业,1989,11:3.

[44] ARJOMANDI M A, SALARMOINI M. Walnut meal as an excellent source of energy and protein for growing Japanese quails [J].Iranian Journal of Applied Animal Science, 2016, 6(4): 925-930.

[45] 孟岳成,李延华,邓杨勇,等.一种山核桃粕代餐粉的制备方法:202410735781[P][2025-03-03].

[46] 崔莉,朱海军,张涛,等.一种以薄壳山核桃饼粕肽为壁材的高抗氧化活性薄壳山核桃油微胶囊及其制备方法:江苏省,CN117243378A[P]. 2023-12-19

[47] 胡悦,余晓红,王笃军,等.一种核桃粕源的抗菌多肽及其应用:202411617740[P].2025-03-03.

[48] LIAO W, ZHANG R, DONG C, et al. Novel walnut peptide–selenium hybrids with enhanced anticancer synergism: facile synthesis and mechanistic investigation of anticancer activity [J]. International Journal of Nanomedicine, 2016, 11: 1305-1321.

[49] LIN L, XIAO D, SONG W, et al. A breakthrough computational strategy for efficient enzymatic digestion of walnut protein to prepare antioxidant peptides [J]. Food Chemistry, 2025, 476: 143311.

[50] XU D Y, MA Y G, NIU R N, et al. Prevention and mechanisms of walnut meal polyphenol extract on hyperuricemia [J]. Science & Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 120055.

[51] TAN C L, PENG L, WANG M, et al. High temperature steaming pretreatment improves quality and flavor of the walnut meal soy sauce [J]. LWT, 2025, 215: 117249.

[52] 魏骊霏,许晶,王晓雨,等.核桃粕馕产品的研发及其品质分析[J].粮食与油脂,2024,37(5):74-78.

[53] 杨媛媛,潘建龙,宴正明,等.核桃粕多肽酸乳饮料稳定剂配方优化及性能表征[J].食品与发酵工业,2019,45(8):156-161.

[54] 赵声兰,和小明,陈朝银,等.核桃饼粕蛋白肽枸杞杏仁复合饮品的研制[J].中国酿造,2015,34(9):153-158.

[55] 郭晓燕,王英臣.山核桃粕发酵酱的研制[J].食品研究与开发,2018,39(20):95-101.

[56] 耿舒雯.核桃粕膳食纤维理化特性分析及其咀嚼片制备工艺研究[D].西安:陕西师范大学,2019.

[57] 孙娜,朱秀娟,何九军,等.核桃粕纳豆发酵工艺优化及其品质分析[J].中国酿造,2023,42(9):156-162.

[58] 刘辉,马齐兵,胡传荣,等.榛子蛋白提取及纯化的工艺优化[J].中国油脂,2021,46(5):71-74.

[59] 孙凯峰,胡伟.低脂榛仁蛋白饮料的研制[J].安徽农业科学,2016,33:94-98.

[60] 贾君,王立江,徐银.榛子蛋白粕酿制酱油的探讨[J].中国酿造,2008,1:3.

[61] 吕春茂,乌日娜,杨明源,等.一种榛子粕发酵酱及其制备工艺:202311410729[P][2025-03-03].

[62] 吴中波.一种以榛子粕为原料酿制的复合榛子酒:CN201610207655.5[P].CN105733880A[2025-03-03].

[63] 吴中波.一种榛子粕为原料制备的保健食品及工艺:CN201510574357.5[P].CN105167013A[2025-03-03].

[64] 长春中医药大学.一种榛子粕可溶性膳食纤维的制备方法及其在调血脂方面的应用:202111308267.3[P]. 2022-03-11.

[65] 谢为峰,罗丰收,解超男,等.超声波处理对杏仁粕蛋白质理化和功能性质的改性研究[J].农产品加工,2016,17:1-3+7.

[66] 仲月,李新华,吴企禾,等.物理改性方法提高榛子蛋白溶解率及变化机制研究[J].食品科技,2017,42(7):79-85.

[67] GEOW C H, TAN M C. Pretreatment effect of osmotic dehydration on ultrasound-assisted solvent extraction: functional properties of defatted hazelnut meal [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45: e16007.

[68] MEN D, WANG Z, XIANG Q, et al. Effects of ultrasonic and microwave pretreatments on calcium chelating capacity, structure and stability of walnut meal protein peptides [J]. Food Science, 2024, 45(8): 193-201.

[69] 汪正兴,韩强,郜海燕,等.响应面试验优化亚临界水提取核桃粕蛋白工艺及其氨基酸分析[J].食品科学,2017,38(20):191-196.

[70] 李晶晶,罗婷婷,胡海玥,等.不同提取方法对杏仁蛋白结构和功能特性的影响[J].食品工业科技,2025,46(5):72-80.

[71] 石宁蕙,叶健明,祖力皮亚·艾麦提,等.不同提取方法对甜杏仁蛋白形态及其功能性的影响[J].保鲜与加工,2020,20(2):127-132.

[72] SARI T P, SIROHI R, TYAGI P, et al. Protein hydrolysates prepared by alcalase using ultrasound and microwave pretreated almond meal and their characterization [J]. Journal of Food Science & Technology, 2024, 61(6): 1157-1164.

[73] 王琳,李芳,王文杰,等.双酶酶解杏仁蛋白制备杏仁肽工艺研究[J].农产品加工,2015,18:24-26+29.

[74] 刘猛,樊凤娇,曲谱,等.酶解法提取核桃粕中蛋白质的工艺优化[J].食品工业,2021,42(4):5.

[75] 张娅妮,阮晓惠,陈浩,等.核桃蛋白的酶解工艺优化及产物特性研究[J].中国油脂,2021,46(10):18-23.

[76] 刘猛,李祥,樊凤娇.影响核桃粕蛋白溶出率的提取条件[J].食品工业,2021,12:42.

[77] 代暘鑫,徐莹,毕爽,等.核桃粕蛋白提取纯化工艺优化及其功能性质分析[J].食品工业科技,2023,44(2):241-252.

[78] JIANG X, GAO F, MA Y, et al. Protein from tiger nut meal extracted by deep eutectic solvent and alkali-soluble acid precipitation: A comparative study on structure, function, and nutrition [J]. Food Chemistry, 2024(Sep.15): 452.

[79] 祝美云,殷贺中,梁丽松,等.榛子粉乳化性与起泡性研究[J].果树学报,2013,30(4):7.

[80] 殷贺中,梁丽松,王贵禧.榛子粉溶解性和膨胀势与其主要物质组成的关系[J].中国农业科学,2013,46(11):2321-2329.

[81] 殷贺中,梁丽松,王贵禧.不同品种榛子粉、榛子蛋白粉凝胶特性的研究[J].食品工业科技,2013,34(23):134-137+146.

[82] UDENIGWE C C, JE J Y, CHO Y S, et al. Almond protein hydrolysate fraction modulates the expression of proinflammatory cytokines and enzymes in activated macrophages [J]. Food & Function, 2013, 4(5): 777-783.

[83] EMAM G N J, AHMAD R, SHAHNEH A Z, et al. Comparative evaluation of nutrient composition, in vitro nutritional value, and antioxidant activity of de-oiled meals from walnut, hazelnut, almond, and sesame [J]. Tropical Animal Health and Production, 2023, 55(5): 333.

[84] JAHANBANI R, GHAFFARI S M, SALAMI M, et al. Antioxidant and anticancer activities of walnut (*Juglans regia L.*) protein hydrolysates using different proteases [J]. Plant Foods Hum Nutr, 2016, 71(4): 402-409.

[85] 申烨华,张玉姣,李聪,等.一种来源于核桃粕的具有乙酰胆碱酯酶抑制活性的核桃多肽及其应用:202410358887[P][2025-03-08].

[86] 申烨华,林立钶,李聪,等.一种具有辅助改善记忆功效的核桃多肽与 DHA 复合乳液.CN202211418373.1[2025-03-08].

[87] 郭雪霖,李延华,孟岳成,等.树坚果脱油工业副产物的生物利用,活性分析及其潜在应用[J].中国粮油学报,2024,39(10):207-215.

[88] ROBOTHAM J M, TEUBER S S, SATHE S K, et al. Linear IgE epitope mapping of the English walnut (*Juglans regia*) major food allergen, Jug r 1 [J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2002, 109(1): 143-149.

[89] 徐枫钦,曲文娟,马海乐,等.加热处理对核桃果实中营养成分组成与含量的影响[J].食品工业,2021,9:42.

[90] 候艳丽,周佳悦,王凡宇,等.坚果中主要过敏原种类、检测及脱敏技术研究进展[J].食品工业科技,2023,44(3):421-431.

[91] 王刘庆,王瑶,王多,等.坚果和干果中黄曲霉毒素的污染、检测与控制[J].食品安全质量检测学报,2018,9(22):5791-5798.

[92] 刘文婷.加工条件和加工辅料对烘烤葵花籽中伴生危害物生成的影响[D].南昌:南昌大学,2023.