吴伟, 陈颜馨, 邓思怡, 等. 油茶饼粕蛋白研究进展及在食品应用中的展望 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 468−478. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060206

WU Wei, CHEN Yanxin, DENG Siyi, et al. Research Progress of *Camellia oleifera* Seed Cake Protein and Its Prospect in Food Application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 468−478. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060206

· 专题综述 ·

油茶饼粕蛋白研究进展及在食品应用中的展望

吴　伟[1,2], 陈颜馨[1], 邓思怡[1], 文子欣[1], 龙亚南[1], 朱华国[1,2,*]

（1.黄冈师范学院生物与农业资源学院, 湖北黄冈 438000;
2.黄冈师范学院经济林木种质改良与资源综合利用湖北省重点实验室, 湖北黄冈 438000）

摘　要: 为充分挖掘油茶饼粕中的蛋白资源，本文从油茶饼粕蛋白（*Camellia oleifera* seed cake protein，COSCP）的营养价值、功能特性、生物活性、功能修饰以及在食品中的应用等方面进行了梳理，发现 COSCP 是一种具有高营养价值、优异功能特性和可持续性的食品原料，有望在功能性食品和原料的开发中发挥关键作用；指出 COSCP 的研究重点包括开发高效的提取技术、深入发掘其功能特性以实现在各类食品中的创新应用，以及探索其营养组成和潜在健康益处等方面。此外，推动快消食品的开发、开展消费者接受度调查以及评估其环境影响，以及进一步研究提高 COSCP 稳定性和适口性的有效手段，并优化其在各类食品应用中的功能特性是今后的重点研究方向。上述结果为油茶饼粕的高值化利用提供了重要参考。

关键词: 油茶饼粕, 蛋白质, 功能修饰, 食品应用

中图分类号: TS227　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0468−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060206

本文网刊:

Research Progress of *Camellia oleifera* Seed Cake Protein and Its Prospect in Food Application

WU Wei[1,2], CHEN Yanxin[1], DENG Siyi[1], WEN Zixin[1], LONG Yanan[1], ZHU Huaguo[1,2,*]

（1.College of Biology and Agricultural Resources, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China;
2.Hubei Key Laboratory of Economic Forest Germplasm Improvement and Resources Comprehensive Utilization, Huanggang Normal University, Huanggang 438000, China）

Abstract: In order to explore the full potential of *Camellia oleifera* seed cake protein (COSCP), this paper reviews the nutritional value, functional properties, bioactivity, functional modification, and food applications of COSCP, which reveals that COSCP is a food ingredient with high nutritional value, excellent functional properties, and sustainability, poised to play a key role in the development of functional foods and ingredients. The present paper sets out the current research priorities for COSCP, including the development of efficient extraction techniques, the deepening of understanding of its functional properties to enable innovative applications across food categories, and the exploration of its nutritional composition and potential health benefits. In addition, future research should concentrate on the advancement of fast-moving consumer goods development, the conducting of consumer acceptance studies, the assessment of environmental impacts, the investigation of effective methods to enhance COSCP stability and palatability, and the optimisation of its functional characteristics for a range of food applications. The above findings provide significant references for the high-value utilisation of *Camellia* seed cake meal.

收稿日期: 2025−06−18

基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队（T2023025）; 湖北省自然科学基金联合基金项目（2025AFD333）; 湖北省中央引导地方科技发展专项（2024CSA071）; 湖北省大学生创新创业训练计划项目（S202510514028）。

作者简介: 吴伟（1979−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物功效物质基础研究, E-mail: wuwei410@qq.com。

*** 通信作者:** 朱华国（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物遗传改良与综合利用, E-mail: zhuhuaguo@hgnu.edu.cn。

Key words: *Camellia oleifera* seed cake; protein; functional modification; food application

到 2050 年，全球人口预计将达到 100 亿人，对富含蛋白的食物需求预计将上升 30% 以上[1]。蛋白质是重要的常量营养素之一，在生物体的能量供应、促进生长发育和组织修复方面发挥着重要的作用[2]。蛋白质也广泛应用于食品领域，主要作为乳化剂、起泡剂和胶凝剂，以改善食品的质地，增强感官特性和功能[3]。随着消费者对食品蛋白需求的不断提升，畜牧业逐渐发展壮大，牲畜的养殖、运输和屠宰过程给全球的水资源、土地和能源供应带来越来越大的挑战[4]。同时，肉类中的高脂肪含量可能与血脂异常、动脉粥样硬化、冠心病、高血压等心血管疾病和癌症有关[5]。因此，人们致力于寻找健康、环保和可持续的蛋白质来源[6]。植物蛋白由于其可获得性、可持续性、低成本和高营养价值[7]，已被广泛用作食品工业的替代蛋白，开发新型植物替代蛋白已成为一种新兴的研究趋势。

在中国，油茶（*Camellia oleifera*）种植面积已突破 467 万公顷，油茶籽产量约 400 万吨[8]。油茶籽主要用于榨油，而油茶饼粕（*Camellia oleifera* seed cake，COSC）是油茶榨油过程中产生的主要副产物，我国每年产生的约 70 万吨饼粕大部分被废弃[9]，造成了极大的资源浪费和环境污染[10]。研究表明，COSC 含有 14%~20% 的粗蛋白质，且含有丰富的必需氨基酸。此外，与传统植物蛋白（如大豆蛋白）相比，油茶饼粕蛋白（*Camellia oleifera* seed cake protein，COSCP）呈现出更优异的持水持油能力、发泡性能和乳化性能[11−12]，更强的消化稳定性[13−14]，表明其具备成为高功能特性蛋白质的潜力[9]。尽管 COSCP 具有以上优点，但其应用仍然非常有限。因此，本文梳理了 COSCP 的营养价值、功能特性、生物活性、功能修饰和在食品中的应用，深入分析其在食品应用方面存在的困难和挑战，并提出策略，以期为其高值化应用提供参考。

1　COSCP 概述

1.1　营养价值

作为最重要的油料作物之一，油茶籽含油量达到 40%~50%。将油茶籽压榨后，可直接获得优质茶籽油，而其主要副产物 COSC 中约含 45% 的碳水化合物、20% 的粗蛋白、10%~20% 的茶皂素、6.3% 的粗脂肪、5.3% 的灰分以及 2%~3% 的多酚类物质[15]。其中，碳水化合物、蛋白质、皂苷和多酚作为主要的生物活性成分，在化工、农业、水产养殖、医药及健康产业方面具有较好的应用前景。研究表明，COSCP 的体外消化率达到 76.6%，表明其具有高营养价值与营养特性[16]。COSCP 主要包含四个组分：白蛋白（45.86%）、谷蛋白（40.33%）、球蛋白（5.62%）和醇溶蛋白（4.25%）[11,17]。其中，主要组分谷蛋白由于其价格低廉且富含多种必需氨基酸等优点，被认为是一种优质的植物蛋白来源[13,18]。COSCP 属于优质蛋白质，富含赖氨酸（2.34 g/100 g 蛋白质）、色氨酸（1.57 g/100 g）、苏氨酸（2.26 g/100 g）、亮氨酸（5.91 g/100 g）、异亮氨酸（2.84 g/100 g）、组氨酸（1.32 g/100 g）、苯丙氨酸（3.26 g/100 g）和缬氨酸（1.93 g/100 g）等必需氨基酸[16]。其中，较于豆粕和油菜籽粕蛋白，其色氨酸的含量更高。色氨酸对人体蛋白质的合成、神经系统、免疫系统、消化系统都具有重要的意义。因此，COSCP 可作为一种色氨酸营养强化剂，在功能食品领域有较好的应用前景。油茶饼粕、豆粕和油菜籽粕的营养成分含量和氨基酸组成对比见表 1。

表 1　油茶饼粕、豆粕和油菜籽粕的营养成分含量和氨基酸组成[19−24]

Table 1　Nutrients and amino acid composition of CSC, soybean meal, and rapeseed meal[19−24]

化学组成	油茶饼粕	豆粕	油菜籽粕
干物质(%)	97.0	88.0	88.0
粗蛋白(%)	20.0	44.0	35.1
粗脂肪(%)	6.0	1.7	2.8
粗纤维(%)	6.3	6.4	12.6
灰分(%)	5.3	6.4	6.6
碳水化合物(%)	45	9.4	9.3
必需氨基酸(g/100 g蛋白质)			
赖氨酸	2.34	2.63	1.73
甲硫氨酸	0.13	1.30	1.00
苯丙氨酸	3.26	2.15	1.45
组氨酸	1.60	1.10	0.98
异亮氨酸	2.84	1.93	1.40
亮氨酸	5.91	3.17	2.42
苏氨酸	2.26	1.64	1.44
色氨酸	1.57	0.57	0.51
缬氨酸	1.93	2.01	1.76
非必需氨基酸(g/100 g蛋白质)			
蛋氨酸	1.39	0.56	0.69
精氨酸	9.49	3.08	2.36
丙氨酸	2.66	1.88	1.34
甘氨酸	2.71	2.03	1.53
天冬氨酸	7.87	4.80	3.78
谷氨酰胺	21.49	–	–
脯氨酸	1.70	2.28	1.83
丝氨酸	2.51	1.92	1.34

1.2　功能特性

COSCP 的功能特性是设计新型功能食品的关键因素。研究表明，COSCP 具备优异的溶解性、持水持油性、乳化性和发泡性以及凝胶化性能，使其在食品体系的多样化应用中展现出巨大潜力。

1.2.1　溶解性　蛋白质的溶解度直接决定了其乳化、发泡和胶凝等功能特性，对于开发高性能食品至关重要。COSCP 的溶解度水平受磷酸化、pH 和温度的影响。COSCP 主要由谷蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和

白蛋白等 4 个组分组成，其中谷蛋白约占 40.33%，其溶解性仅为 5.86%±0.48%，可能是因为大分子表面的低电荷引起分子间的弱排斥作用，从而影响了谷蛋白的起泡性、乳化性、消化性等特性，限制了其在食品工业中的应用[25−26]。然而，谷蛋白磷酸化后其溶解度显著增加，在 pH 为 9.0 时磷酸化后溶解度达到最大值 58.08%±1.75%，这可能是由于谷蛋白的磷酸化程度增强，导致其表面富集更多的负电荷，增加了谷蛋白大分子之间的排斥力，以及谷蛋白表面的亲水磷酸基团可以与水分子形成氢键，促进水和蛋白质相互作用，从而增加溶解度[27]。COSCP 的溶解性也受蛋白等电点的影响，COSC 中提取的多数蛋白质呈 U 型溶解度曲线，在等电点附近(pH3~4)溶解度最低，在等电点以外的碱性 pH 条件存在最大溶解度[28−29]。此外，温度也是影响 COSCP 的溶解度的重要因素，温度低于热变性中值时，可以通过增强蛋白质与水的相互作用来改善 COSCP 的溶解度。

1.2.2 持水持油性 持水力(water holding power，WHC)和持油力(oil holding capacity，OHC)表示单位质量的蛋白质内部结构所能容纳的水或油的量。天然 COSCP 的 WHC 受蛋白质分子磷酸化的影响，未磷酸化谷蛋白的持水力显著低于磷酸化谷蛋白，这可能是因为磷酸化改变了蛋白和水分子间的界面，增强了其水合能力，从而降低了蛋白中 α-螺旋的含量[30]。天然 COSCP 中白蛋白和谷蛋白的 WHC 主要受大分子表面亲水性基团和带电基团数量的影响。蛋白质表面亲水基团和带电基团与水分子形成氢键可有效提高蛋白质 WHC，从而提高食品的感官品质且延长食品货架期，大大增强了蛋白类功能食品的应用潜力[19]。研究表明，COSCP 的 OHC 显著高于大豆分离蛋白，这可能与其表面疏水性有关，因 COSCP 含较多的表面亲脂基团，易与脂类中羟基结合，促进对脂肪的吸收能力，改善食品风味[31−32]。因此，高 OHC 特性有利于 COSCP 更有效掺入到增肉剂、植物基肉类类似物等高含油量的食品中，进一步拓展了 COSCP 的应用领域。

1.2.3 乳化性和发泡性 乳化性和发泡性受 pH、离子浓度、表面疏水性和净电荷等因素影响。COSCP 优异的乳化发泡性能使其在食品工业中具有较好的应用前景。乳化特性是指通过降低油水界面的界面张力以及形成包裹液滴的保护层来防止液滴聚结，当蛋白质吸附到油水界面时，会最大限度地发生构象变化以有利于与各相的相互作用。COSCP 的乳化能力在一定范围内随 pH 增大而增大，COSCP 的乳化活性指数在 pH 9 时达到最大值，可能原因是溶解度的增加使 COSCP 能够快速吸附在油水界面促进乳液形成；同时蛋白质表面的负电荷随着 pH 的增加而增多，阻止了蛋白质的聚集，提高了乳化性[32−33]。此外，pH 在 8~12 时，乳液的稳定性最强，原因是多肽链在碱性溶液中展开，使蛋白质溶解度增大，结构更为灵活，从而更好地吸附于油水界面[13]。Cui 等[12]和 Zhang 等[34] 研究发现，获得稳定乳液的最佳 COSCP 浓度范围为 0.5%~3%(w/v)，当浓度高于 3% 时，未吸附的蛋白质部分会发生絮凝、聚集和沉淀；而较低的浓度会导致在液滴表面的蛋白吸附不足，影响乳液的稳定性。研究发现，与大豆分离蛋白相比，COSCP 乳化稳定性更强[35]。因此，COSCP 乳液稳定性高的特性，既有利于延长乳制品、饮料等产品的货架期，又可以进一步拓展其在肉类、冰激凌及烘焙产品中的应用。发泡性是指蛋白质在气-液界面形成坚韧薄膜，使大量气泡并入并保持稳定的能力。泡沫存在于许多食品中，为食物提供了独特的质地和味道，蛋白质作为发泡剂可以促使泡沫形成，提高泡沫的稳定性[36−37]。此外，在食品生产中，泡沫因其轻盈的口感提升了整体的食用体验，如啤酒、香槟等饮品，泡沫增添了饮品的层次感。研究表明，溶液 pH 为 7 时，COSCP 的发泡性强于大豆分离蛋白，但起泡稳定性较差。这可能是因为油茶籽蛋白中还残存少部分茶皂素[35]。因此，通过去除茶皂素可以进一步提升 COSCP 的发泡性能，从而有效提升食品的品质。

1.2.4 凝胶性 蛋白质凝胶化是指蛋白质分子通过物理或化学作用形成三维网络结构的过程，该结构能够截留大量水分并呈现介于液体与固体之间的凝胶状态。天然 COSCP 凝胶制备过程中热诱导导致蛋白质变性，以及油脂提取过程中蛋白质与皂苷的络合作用，都削弱了蛋白质展开及重组成凝胶结构的能力。然而，通过添加其他聚合物增强 COSCP 凝胶性能的研究已经取得了进展。Nie 等[38] 研究发现，虽然单独使用 COSCP 无法形成凝胶，但通过以甘油作为增塑剂和柠檬酸作为交联剂，可成功将 COSCP 与壳聚糖结合制备出凝胶。Lu 等[39] 研究发现，适量的添加卡拉胶可促进网络中的分子相互作用，凝胶强度得到了增强；添加多糖也可以提高 COSCP 凝胶的性能。综上，虽然天然 COSCP 凝胶性能有所不足，但通过添加剂的合理搭配，可大大拓展其应用领域，在食品、制药及其他行业功能性凝胶的制备方面有较好的应用前景。

1.3 生物活性

1.3.1 抗氧化活性 蛋白质组分的抗氧化活性主要取决于其结构构象、水解度、疏水性和氨基酸组成，蛋白质的氨基酸组成如蛋氨酸、色氨酸、酪氨酸、组氨酸、半胱氨酸、脯氨酸等，在自由基清除活性方面表现出不同的作用机制。COSCP 由于富含天冬氨酸和谷氨酸，展现出较强的抗氧化潜力[40−41]。体内实验结果显示，碱性蛋白酶水解 COSC 得到的小分子肽，能显著增强四氯化碳中毒小鼠肝脏中超氧化物歧化酶(SOD)和谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的活性，并降低丙二醛(MDA)水平，展现出较强的抗氧化活性[42]。利用风味酶、胰蛋白酶、中性蛋白酶、木瓜蛋白酶和碱性蛋白酶分别对 COSCP 进行水解，所得

水解产物具有不同的 DPPH 自由基清除能力和铁离子螯合能力[16]。以上结果为利用 COSCP 开发抗衰老、抗疲劳等功能性食品提供了新的视角，也展现了在治疗某些慢性疾病如心血管疾病等方面具有潜在的应用价值。

1.3.2　降血糖活性　当前，糖尿病的流行成为严重的公共卫生问题之一。科学研究表明，不健康饮食、超重和肥胖等是高血糖症的主要危险因素，而饮食干预被认为是一种有效的控制血糖的措施。COSCP 用碱性蛋白酶水解后得到 GHSLESIK（869.4607 Da）、GLTSLDRYK（1051.5662 Da）和 SPGYYDGR（913.3930 Da）三种小分子肽，这些肽段均通过氢键和盐桥相互作用表现出较强的 α-葡萄糖苷酶抑制活性，其中 Asp542 被确定为关键作用靶点[43]。Zhang 等[44] 利用碱性蛋白酶水解 COSCP 后，分离纯化获得 LVLYYEY 和 LLLLPSY 两种肽段，但它们在抑制 α-葡萄糖苷酶时呈现出不同的作用机制，LLVLYYEY 属于非竞争性 α-葡萄糖苷酶抑制剂，而 LLLLPSYSEF 则是混合型 α-葡萄糖苷酶抑制剂。进一步研究表明，COSC 肽段即使在模拟胃肠消化后仍能维持其抑制活性[44]，表现出在抗糖尿病应用方面的良好应用前景，为降血糖膳食补充剂的开发提供了一种天然来源。

1.3.3　降血脂活性　血脂异常是指血浆中总胆固醇（TC）、甘油三酯（TG）、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）和高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）等指标的异常改变。高脂血症与动脉粥样硬化、冠心病及中风等心脑血管疾病存在明确的因果关系。降血脂的有效方法包括合理饮食、适量运动和药物治疗，可以有效帮助管理高血脂问题，而通过膳食补充剂或保健食品辅助降血脂则是安全性极高的降脂疗法之一。COSC 蛋白提取物能够吸附胆酸盐，并抑制胰脂肪酶（PL）和胆固醇酯酶活性[45]。通过碱性蛋白酶水解 COSCP 得到的多肽可显著降低高脂血症 SD 大鼠的血脂水平，在以 1000 mg/kg 剂量给药后，血清中 TC 和 TG 水平分别降低了 52.35% 和 34.48%；血浆 HDL-C 水平升高了 30.77%，动脉粥样硬化指数（AI）下降了 74.24%[46]。上述结果为降血脂功能性健康食品的开发提供了新的视角。

1.3.4　抗高血压活性　食源性降血压肽可作为血管紧张素转化酶（ACE）抑制剂的潜在替代品，用于预防和治疗高血压。使用碱性蛋白酶和胃蛋白酶水解 COSCP 得到的小分子肽，其 ACE 抑制活性分别为 71.52% 和 58.91%，显示了良好的抗高血压潜力，且肽中疏水氨基酸比例越高则 ACE 抑制活性越强[42,47]；郭显荣[48] 研究发现，利用双酶复合水解 COSCP 可以增强 ACE 抑制活性，碱性蛋白酶首次水解的肽显示出 44.5% 的 ACE 抑制活性，继续用胰凝乳蛋白酶水解后活性增加到 60.4%。以上结果显示，COSC 多肽可能适合作为治疗高血压及相关心血管疾病的药物。然而，目前关于 COSC 多肽抗高血压的作用机制仍不明确。高血压的病理效应是多方面的，未来进一步发掘抗高血压及其相关合并症的新药物靶点，对于开发新型抗高血压肽具有更积极的意义。

1.3.5　免疫调节活性　近年来，免疫调节活性是功能肽生物活性研究的热点。免疫活性肽主要通过调节淋巴细胞的功能，影响抗体的产生、单核巨噬细胞的功能，调节细胞因子的分泌，以及通过影响淋巴细胞内钙离子的传导、第二信使 cAMP 和 cGMP 的活性，以及巨噬细胞中一氧化氮和诱导型一氧化氮合酶的分泌等方式，来调节机体的免疫功能。研究报道，多种植物源肽类和蛋白质能够影响细胞因子的产生、抗体的生成以及免疫系统的发育，这些刺激作用都与肽类和蛋白质对活性氧的影响有关[7]。研究发现，经碱性蛋白酶水解得到的 COSC 多肽可增强环磷酰胺诱导小鼠的脾淋巴细胞增殖能力；在迟发型超敏反应试验中，正常小鼠的特异性细胞免疫应答也显著提高，凸显了其免疫调节的潜力[49]。综上，COSC 蛋白及多肽在增强疾病预防能力和维持身体健康方面有较好的应用前景。

2　COSCP 的功能修饰

COSCP 的持水力和溶解度较低，限制了其在食品领域的应用[13,25]，通过糖基化、磷酸化、蒸汽爆破、超声波、酶改性、酸碱化、酰基化、电离辐射和超临界等多种修饰方法可以改善其在不同食品体系中的适应性（图 1、表 2）[50]。

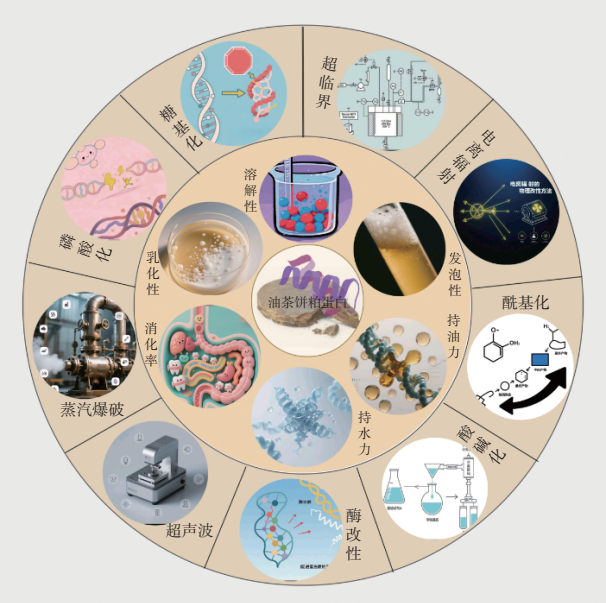


图 1　COSCP 的功能特性及改性方法

Fig.1　Functional properties and modification methods of COSCP

2.1　物理修饰

超声波、微波、超微粉碎、热处理等技术手段，以及近年来用于蛋白改性的创新方法如超滤、电离

辐射、脉冲电场、超临界等物理修饰可以增强蛋白的溶解性、乳化性、起泡性及凝胶性等。Zhang 等[13]研究了蒸汽爆破对 COSCP 功能特性的影响，结果表明热处理影响了蛋白质的二级和三级结构，导致蛋白质肽链的刚性降低，柔韧性增加，热处理后 COSCP 的乳化活性指数和乳液稳定性指数比对照组分别提高了 1.94 倍和 2.37 倍，起泡性和乳化性均优于天然 COSCP。超声波（350 W）连续处理 COSCP 60 min 后，二级结构产生变化，离子键含量的占比提升，乳化性、起泡性及蛋白质凝胶的硬度及弹性均有不同程度的提高[51]。可见，物理修饰不会影响蛋白质一级结构，且安全性高、耗能低、高效，对蛋白质的营养功能影响小[52]，通过改变 COSCP 的二级或三级结构，提高蛋白的溶解性、乳化活性、热稳定性等。包括超声、微波、高压处理在内的新型物理处理技术虽然被认为是未来极具潜力物理改性方法[53]，但也存在局限性，例如超声处理等方法所需设备复杂，工业化生产难以实现；热处理改性强度相对较小且效果具有可逆性，时间延长可能导致蛋白重新团聚。

2.2 化学修饰

蛋白质化学改性是通过改变蛋白质的结构、静电荷力、疏水基团等，从而改变其功能性质。化学改性方法包括酸碱化、酰基化、磷酸化、糖基化等[54]，在改善植物蛋白功能方面取得了显著的成效。磷酸化是指将磷酸基团加到蛋白质中特定氨基酸的侧链上，增强表面负电荷并改变蛋白质的构象[55]。碱处理通常用于加速磷酸化反应，通过破坏蛋白质的非共价键，使蛋白质上更多的位点暴露于磷酸化反应中[56]。Yu 等[25] 研究表明，碱辅助磷酸化改性 COSCP，溶解度最大为 58.08%±1.75%，可能是磷酸化导致蛋白表面带有更多负电荷，增加了大分子之间的排斥力，使其更容易分散到水中。同时，表面的亲水磷酸基团可以与水分子形成氢键，增加蛋白质与水的相互作用，提高溶解度[27]。COSCP 磷酸化后其 WHC 显著高于对照组，可能是由于磷酸化改变了蛋白-水界面，增强了蛋白的水合作用，从而降低了蛋白中 α-螺旋的含量[30]。此外，蛋白质氨基和还原糖羰基之间的糖基化反应是一种简便、环境友好的增强植物蛋白功能特性的方法。通过超声（300 W，20 min）辅助糖基化（65 ℃，90 min）共处理可显著增强植物蛋白的乳化特性，在适当的加热条件下促进美拉德反应，改善水合作用，使溶解度显著高于天然蛋白[57−60]，可能是由于蛋白质氨基酸残基与多糖醛基之间的共价键结合，增加了水和蛋白质的相互作用[61]。此外，亲水性多糖可能在蛋白质周围形成保护层，减少蛋白质-蛋白质相互作用和交联，从而提高蛋白质的溶解度[62]。综上，化学修饰虽然操作相对简便，改性效果较好，但也存在化学试剂残留，产生副产物等问题，这对食品级蛋白质的安全性仍是巨大挑战。

2.3 酶修饰

酶修饰是指使用特定的蛋白水解酶改变蛋白质的结构特性，可用于分解或构建蛋白质结构，以实现特定的功能特性。酶修饰为定制蛋白质功能提供了一种可控的解决方法，从而改善食品的营养和功能特性。蛋白水解酶（如胃蛋白酶等）在水解过程中切断一级氨基酸序列中的肽键，释放出小分子短链肽[19]，而非蛋白水解酶（如转谷氨酰胺酶）则通过促进蛋白质交联提高蛋白质的凝胶性、乳化性和持水能力[63−64]。酶水解过程受酶类型、底物性质、酶与底物比例、pH、温度、压力等多种因素的影响[65]。因此，为了平衡食品应用中 COSCP 所需的功能特性，按需选择和优化酶促水解条件至关重要[66]。虽然酶修饰的改性效果较好，但也存在改性范围有限，酶生产成本偏高、不稳定等局限性。

3 COSCP 在食品中的应用

COSCP 作为一类兼具营养价值和功能特性的天然植物蛋白，因其独特的表面活性作用在食品领域中展现出广阔的应用前景，近年来已成功地应用于保鲜膜、乳化剂、蛋白补充剂和食品包封递送系统等方面（图 2）。

表 2 COSCP 改性方法

Table 2 COSCP modification method

改性方法	处理方法	原理	优势	效能瓶颈	参考文献
物理改性	蒸汽爆破	高压蒸汽对原料浸润后，瞬间泄压使原料内部蒸汽瞬间膨胀而“爆破”，使纤维断裂、细胞破碎等。	提高了起泡性和乳化性能等，减少了植物蛋白中营养物质的流失，增强谷物和膳食蛋白质功能。	极端高温会导致蛋白质结构发生不可逆变化，存在改性效果不理想和产业化难等不足。	[13,67]
	超声波	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。	提高了蛋白质凝胶的硬度及弹性。	极端高温会对蛋白质的结构，影响活性。	[68–69]
化学改性	磷酸化	蛋白质氨基酸侧链加上磷酸基团后，增强其表面负电荷并改变构象，从而增加功能特性。	提高了蛋白溶解性、持水力和持油能力。	化学试剂残留可能会引起食品污染。	[55,25]
	超声辅助糖基化	高强度超声将部分蛋白结构展开，暴露更多糖基化位点并最终促进糖基化反应。	改善了蛋白质界面性能及乳剂容易脂质氧化而酸败等问题。	研究仍处于实验室规模。	[58–59,70]
生物改性	酶改性	蛋白质与酶作用后发生交联与水解，构象发生改变。	提高了蛋白质的乳化性、凝胶性、抗氧化性等。蛋白水解物易被人体消化、吸收。	改性范围有限，且酶生产成本偏高、不稳定。	[54,66,71]



图 2　COSCP 在食品领域的应用

Fig.2　Application of COSCP in food field

3.1　包封递送系统

COSCP 在生物活性化合物包封及靶向递送的纳米载体设计方面展现出了巨大潜力。Huang 等[72] 成功制备了一种含 3%COSCP 的皮克林乳液，对表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）的保护作用十分显著，肠道生物可及性提高了 30.8%。此外，Yu 等[11] 采用 COSCP 白蛋白通过自组装设计纳米粒子用于叶黄素的包封和递送，包封效率达到 43.82%±5.69%，载药量为 5.89%±0.78%，且生物可及性从最初的 26.8%±4.4% 提高到 57.3%±9.6%。通过使用转谷氨酰胺酶对 COSCP 进行交联，最终获得了分散良好、呈球形的负载阿霉素 COSCP 纳米粒子，平均粒径约为 65 nm，通过舒张血管，使更多的阿霉素在肿瘤部位聚集，增强了其对癌症的治疗效果[73]。以上结果凸显了 COSCP 作为可持续原料用于递送系统设计的潜力，表明其在食品和制药领域有较好的应用前景。

3.2　食品添加剂

作为高价值的副产物，COSCP 在食品工业中作为添加剂展现出了巨大的应用潜力[74]。研究人员已成功利用 COSCP 开发出了健康食品，如 COSCP 牛奶，其风味与普通牛奶和豆奶相似[75]。在冰淇淋生产中，用 COSCP 替代 20% 的全脂奶粉，在维持诱人外观和细腻质地的同时，冰淇淋的膨胀率达到 98.5%，融化率为 38.16%。同时，感官评价得分达到 76.3±1.13，表明消费者接受度较高[76]。此外，还可用于开发植物性乳制品替代品，如非乳制奶精、牛奶和酸奶。除了营养价值外，由于其乳化特性，COSCP 作为功能性成分在植物性肉类增补剂和肉类类似物产品中也展现出良好的应用潜力。然而，COSCP 在植物性肉类中的应用也面临一些挑战，例如需要解决凝胶能力相对较差以及持水能力较低等问题。

3.3　食品包装

植物源蛋白、多糖及其复合物在成本效益、可持续性和生物降解性方面相较于传统的石油基塑料薄膜具有优势[77]。Nie 等[38] 评估了添加 COSCP 的壳聚糖基生物膜的性能，表现出优异的生物降解性（20 d 内可降解），并且在吸水性、拉伸强度、柔韧性、水分稳定性等方面性能得到提升。此外，生物膜基质中添加 COSCP 显著提高了其抗氧化和抗菌功效，能有效抑制大肠杆菌、金黄色葡萄球菌和副溶血性弧菌等病原菌的生长，显著延长了草莓等易腐水果的货架期[78]。此外，与用于可食用薄膜生产的乳清蛋白等相比，使用 COSCP 可在不添加额外活性成分的情况下制备功能性薄膜，是优化 COSC 高质化利用、应对可持续发展需求以及推动绿色材料研究的一项有效策略。

4　面临的挑战及对策

COSCP 作为一种兼具营养价值和功能特性的天然植物蛋白，其独特的表面活性作用在食品领域中展现出广阔的应用前景。随着植物性蛋白的需求不断增长，COSCP 在开发营养食品和研发食品配方方面为制造商提供了新的选择。然而，COSCP 在实际应用中还面临抗营养因子、分离纯化难度大、稳定性弱、适口性差及市场接受度低等问题，可以通过微生物降解、酶辅助提取、高温处理、微生物发酵、酶解、冷等离子体、超声波辅助提取以及临床干预研究等方法应对挑战（图 3）。

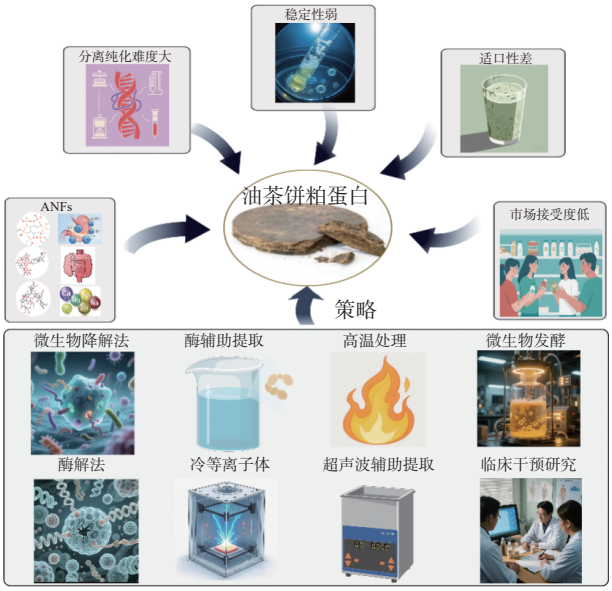


图 3　COSCP 应用中的挑战及策略

Fig.3　Challenges and strategies in the application of COSCP

4.1　抗营养因子（ANFs）

COSCP 中主要存在的抗营养因子包括皂苷、植酸、单宁等。皂苷是一类三萜类或甾体类化合物，广泛存在于豆类、谷物等多种作物中，具有苦味，高浓度时具有毒性。皂苷通过抑制某些代谢或消化酶活性，并与铁、锌、维生素 E 等必需营养素结合，从而影响机体对营养的吸收。此外，皂苷可能导致低血糖，并抑制蛋白质消化及维生素、矿物质的吸收，进

而引发肠漏症[69]。此外,茶皂素因具有强烈的表面活性和溶血作用,直接接触或食用一定剂量可能会导致肠胃不适,严重时将引起炎症、呕吐、腹泻等症状。植酸以肌醇六磷酸的形式存在于多种植物中。作为次级代谢产物,它天然富集于豆类、谷物、油籽及所有植物性食物的种子中。在种子内,植酸以植素或植酸盐的形式储存在种皮中。植酸会阻碍铁、锌、镁和钙等矿物质的吸收[79],同时也会抑制胃蛋白酶、胰蛋白酶和淀粉酶等消化酶的功能[80]。植酸的带负电结构会与铁、镁、钙、锌等带正电的离子结合形成复合物,从而降低这些矿物质的吸收率,进而减少其生物利用度。作为一种螯合剂,植酸被认为是一种重要的 ANFs[81]。单宁是一类分子量约为 500 Da 的植物多酚化合物。作为次级代谢产物,单宁在叶片、果实和树皮中含量尤为丰富[82]。已知单宁可通过其羟基与蛋白质的羰基形成复合物,从而影响蛋白质消化率,并抑制必需氨基酸和矿物质的吸收利用[83]。天然存在的单宁主要分为两类:a.可水解单宁—由没食子单宁和鞣花单宁组成;b.缩合单宁—以原花青素为主要成分。豆类麸皮等农产品中富含单宁,通过形成单宁-蛋白质复合物显著降低蛋白质消化率[84]。

食品中的 ANFs 不仅会降低营养素利用率导致营养不良,在高剂量摄入时还具有毒性。由于 COSCP 中的 ANFs 限制了其在食品领域的应用,因此去除 ANFs 对 COSCP 高值化利用至关重要。现有的植物源食品中 ANFs 消除方法各具优劣:高温处理对抗原蛋白、蛋白酶抑制剂等不稳定的 ANFs 尤为有效;脱壳工艺则有助于去除主要存在于种壳中的单宁等 ANFs。化学法因毒性及潜在环境危害应用受限,而酶制剂在稳定 ANFs 去除方面效果显著,目前已广泛应用于食品工业。微生物降解法较酶解法效率更高,但其效果取决于菌种类型、添加量及发酵条件,深入研究不同菌株在发酵中的具体作用机制及菌株间互作效应,对开发具有高营养价值的植物源食品至关重要。

4.2 分离纯化难度大

COSC 中粗蛋白质结构复杂、易与酚类化合物等杂质形成偶联物,从中回收高纯度、高生物利用度的蛋白质具有一定难度,要实现 COSC 中蛋白质资源的高值化利用,亟需开发高效、低成本的分离纯化技术。三相分配提取(TPP)、高压放电提取(HVED)和酶辅助提取(EAE)等新型植物蛋白提取技术可用于 COSCP 提取。Qiu 等[85] 采用 TPP 技术进行 COSCP 提取时,硫酸铵用量为 40%(w/v),料液与叔丁醇比为 1∶1(v/v),液固比为 40∶1(v/w),提取温度为 40 ℃,溶液 pH 为 6.0,提取时间为 1.5 h 时,最终 COSCP 得率为 15.17%(w/w)。Li 等[86] 采用 HVED 技术从 COSC 中提取蛋白质,在较短的提取时间内获得了相对较高的蛋白质提取率(5.65%),高于对照样品(4.24%),同时,获得的蛋白质平衡产率和质量传递系数更高。相较于传统提取技术,HVED 具有细胞破壁率高,溶剂消耗量少,操作条件温和,提取物的抗氧化活性强等优点。吕静等[51] 采用超声波辅助酶法提取 COSCP,在最佳工艺条件下回收率最高可达 83.3%±0.6%,较对照组提高了 54%,且蛋白展现出较好的抗氧化特性和体外降脂能力。EAE 通过酶解细胞膜释放蛋白质,提高了 COSCP 的提取率,方法简单环保,具有较强的应用性。再借助超声波和微波辅助处理,能大幅缩短提取时间,增加蛋白提取率。后续可尝试联合深共晶溶剂(DES)方法等进一步提高 COSCP 提取率,缩短提取时间,减少试剂损耗。

4.3 稳定性弱

从 COSC 中分离和纯化蛋白的方法存在回收率低、纯度低、成本高、易产生膜污染与生物污染、工艺耗时等问题,可能导致如蛋白变性、溶解性和乳化能力降低等问题。目前已有研究报道通过蛋白酶解法生成蛋白衍生肽可以改善其他植物蛋白乳化能力及稳定性,而且与非热加工技术联用也取得了较好的效果,例如高压静水压(HHP)和超声波等食品加工技术已被用于改善马铃薯蛋白/肽的乳化性能与稳定性[87−88]。建议未来 COSCP 稳定性研究主要聚焦以下三点:a.探索其他新兴食品加工技术(如冷等离子体)在 COSCP 上的应用;b.发掘利用发酵工艺生产具有强乳化能力及稳定性高的 COSCP 衍生肽,这可能为酶解法提供一种更经济的替代方案;c.着力开发针对 COSCP 及衍生肽与食品基质中其他成分相互作用的新分析方法,对于阐明其在加工前、加工中及加工后的整体生物活性具有重要意义。

4.4 适口性较差

植物蛋白所带有的不良风味和气味,如苦味、青草味等是影响消费者接受度的主要因素,常见异味物质主要通过脂质氧化、乙醇发酵以及美拉德反应多种途径形成[89]。多种加工技术(如发酵、酶处理、挤压加工、压力处理)以及不同的储存与包装条件可以减少植物蛋白食品异味的形成,其中微生物发酵是一种被广泛采用的生物技术方法,用于改变植物蛋白食品的风味化学特性和挥发性成分。用多种乳酸菌和酵母发酵豌豆蛋白分离物,可将己醛、丁醛和非醛降低至检测限以下,并将含量最丰富的“青草味”挥发性物质 2-戊基呋喃浓度降低至未接种组的六分之一[90]。在食品加工过程中,也可以通过酶处理减少异味前体物质和挥发性化合物的含量。Yoo 等[91] 的研究表明,对经过预加热处理的大豆分离蛋白使用复合酶 Protamex®进行处理后,己醛、戊醇和己醇的含量显著降低,同时“豆腥味”的感官评分也有所下降。综上,以上研究也为改善 COSCP 适口性提供了思路。

4.5 市场接受度较低,消费者认知有限

消费者对 COSCP 营养价值、可持续特性及其益处的理解程度,直接影响了人们的购买意愿。目前

仍缺乏验证含植物蛋白食品功效的临床干预研究，开展此类研究将有助于广大消费群体更清晰地认知和理解功能性食品基质。相较于经过生物营养强化的传统食品，单纯补充剂对消费者的吸引力明显不足。因此，必须通过科学证据证实植物蛋白基食品宣传的生物活性功能。通过持续向消费人群传递 COSCP 健康优势和环境友好性质，推动功效验证以提升价值感知和信任度；制定精准的营销沟通策略是有效克服认知不足、激发需求增长，最终推动 COSCP 在食品行业广泛应用的关键路径。

5　结论

COSCP 是一种具有高营养价值、优异功能特性和可持续性特点的食品原料。随着植物基蛋白需求的不断增长，COSCP 为食品制造商提供了一个新的选择。通过探索 COSCP 在各类食品中的应用潜力，可以充分发挥其多功能特性的优势，助力构建更加可持续和健康的食品体系。同样，COSCP 在食品技术中的应用也具有多样性和广阔前景。从植物基肉制品替代品到无乳制品，再到无麸质烘焙食品，COSCP 为满足日益增长的创新食品需求提供了一种可持续且营养的解决方案。随着植物基蛋白领域研究与开发的不断深入，COSCP 有望在功能性食品和原料的开发中发挥关键作用。当前的研究重点包括开发高效的提取技术、深入发掘其功能特性以实现在各类食品中的创新应用，以及探索其营养组成和潜在健康益处。推动快消食品的开发、开展消费者接受度调查以及评估其环境影响，对于促进 COSCP 在食品系统中的可持续整合至关重要。因此，需要进一步研究提高 COSCP 稳定性和适口性的有效手段，并优化其在各类食品应用中的功能特性。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] VENKATESWARA RAO M, C K S, RAWSON A, et al. Modifying the plant proteins techno-functionalities by novel physical processing technologies: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(19): 4070−4091.

[2] KREIDER R B, CAMPBELL B. Protein for exercise and recovery[J]. The Physician and Sportsmedicine, 2009, 37(2): 13−21.

[3] O'SULLIVAN J, MURRAY B, FLYNN C, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 141−154.

[4] HAYES M. Challenges regarding protein provision for the growing global population: Improving the environmental impact of traditional protein supply chains and maximising use of coproducts and alternative, new resources[J]. Global Challenges, 2023, 7(5): 2300059.

[5] YOU W P, FENG S H, DONNELLY F. Total meat (flesh) supply may be a significant risk factor for cardiovascular diseases worldwide[J]. Food Science & Nutrition, 2023, 11(6): 3203−3212.

[6] LEROY F, ABRAINI F, BEAL T, et al. Animal board invited review: Animal source foods in healthy, sustainable, and ethical diets - An argument against drastic limitation of livestock in the food system[J]. Animal, 2022, 16(3): 100457.

[7] di SOTTO A, VITALONE A, di GIACOMO S. Plant-derived nutraceuticals and immune system modulation: An evidence-based overview[J]. Vaccines, 2020, 8(3): 468.

[8] 刘海, 郭少海, 李慧, 等. 油茶饼粕综合利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(5): 187−195. [LIU Hai, GUO Shaohai, LI Hui, et al. Comprehensive utilization of *Camellia oleifera* seed cake: A review[J]. Food Research and Development, 2025, 46(5): 187−195.]

[9] 王承瑞, 刘思思, 易有金, 等. 油茶籽饼粕中活性成分对果蔬保鲜作用的研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 121−126. [WANG Chengrui, LIU Sisi, YI Youjin, et al. Advance in the effect of active ingredients of oil-tea *Camellia* seed cake and meal on the preservation of fruits and vegetables[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(10): 121−126.]

[10] LI Xu, SHEN Shian, DENG Junlin, et al. Antioxidant activities and functional properties of tea seed protein hydrolysates (*Camellia oleifera* Abel.) influenced by the degree of enzymatic hydrolysis[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(6): 2075−2082.

[11] YU Ningxiang, SHAO Shengxin, HUAN Weiwei, et al. Preparation of novel self-assembled albumin nanoparticles from *Camellia* seed cake waste for lutein delivery[J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133032.

[12] CUI Chuanjian, WEI Ziqi, HONG Zhibo, et al. Preparation of water-in-oil Pickering emulsion stabilized by *Camellia oleifera* seed cake protein and its application as EGCG delivery system[J]. LWT, 2023, 179: 114656.

[13] ZHANG Shanying, ZHENG Lili, ZHENG Xiaoyan, et al. Effect of steam explosion treatments on the functional properties and structure of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seed cake protein[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 93: 189−197.

[14] ZHANG S, YIN F, ZHENG L, et al. Steam-exploded camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seed protein improves the stability of camellia seed oil emulsions[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(7): 4175−4182.

[15] JIAN Honglei, LIAO Xiaoxia, ZHU Liwei, et al. Synergism and foaming properties in binary mixtures of a biosurfactant derived from *Camellia oleifera* Abel and synthetic surfactants[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 359(2): 487−492.

[16] LI Xu, DENG Junlin, SHEN Shian, et al. Antioxidant activities and functional properties of enzymatic protein hydrolysates from defatted *Camellia oleifera* seed cake[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(9): 5681−5690.

[17] RAWDKUEN S, MURDAYANTI D, KETNAWA S, et al. Chemical properties and nutritional factors of pressed-cake from tea and Sacha Inchi seeds[J]. Food Bioscience, 2016, 15: 64−71.

[18] LUAN Fei, ZENG Jiuseng, YANG Yan, et al. Recent advances in *Camellia oleifera* Abel: A review of nutritional constituents, biofunctional properties, and potential industrial applications[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 75: 104242.

[19] ZONGO A W, JIN C Y, YU N X, et al. Exploring *Camellia oleifera* Abel seed cake as sustainable source of protein for food applications: A review[J]. Food Chemistry, 2025, 470: 142595.

[20] 陈培荣, 陈明睿, 郑小雨, 等. 不同产地油茶籽饼的营养成分

分析研究[J]. 家畜生态学报, 2024, 45(11): 37−42. [CHEN Peirong, CHEN Mingrui, ZHENG Xiaoyu, et al. Analysis of nutritional components of tea seed cake in different regions[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2024, 45(11): 37−42.]
[21] 田金可, 程宽, 何江峰, 等. 非豆粕类蛋白原料替代豆粕在畜禽生产中的研究进展[J]. 饲料工业, 2025, 46(23): 52−59. [TIAN Jinke, CHENG Kuan, HE Jiangfeng, et al. Research progress on non-soybean meal protein raw materials replacing soybean meal in livestock and poultry production[J]. Feed Industry, 2025, 46(23): 52−59.]
[22] 魏红芳, 郭建来. 胶原蛋白粉与豆粕营养成分比较研究[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013(7): 67−68. [WEI Hongfang, GUO Jianlai. Comparative study on nutritional components of collagen powder and soybean meal[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2013(7): 67−68.]
[23] 曾斌, 唐敏, 唐伟, 等. 油茶副产物营养价值、生物活性功能及在动物养殖中的应用[J]. 饲料研究, 2023, 46(23): 158−162. [ZENG Bin, TANG Min, TANG Wei, et al. Nutritional value, bioactive function and application in animal breeding of *Camellia oleifera* byproduct[J]. Feed Research, 2023, 46(23): 158−162.]
[24] 张欢欢, 梁叶星, 张玲, 等. 双低油菜籽蛋白氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 235−241. [ZHANG Huanhuan, LIANG Yexing, ZHANG Ling, et al. Amino acid composition and nutritional evaluation of double low rapeseed proteins[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(12): 235−241.]
[25] YU Ningxiang, WANG Yijue, SHAO Shengxin, et al. Functional properties of glutelin from *Camellia oleifera* seed cake: Improvement by alkali-assisted phosphorylation through changes in protein structure[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100438.
[26] WANG Yaru, ZHANG Bao, FAN Jinlei, et al. Effects of sodium tripolyphosphate modification on the structural, functional, and rheological properties of rice glutelin[J]. Food Chemistry, 2019, 281: 18−27.
[27] REN Liuyang, LIU Jingyuan, ZHANG Xueqi, et al. Emulsion, gelation, physicochemical properties and microstructure of phosphorylated and succinylated egg yolk[J]. LWT, 2020, 131: 109675.
[28] CHALAMAIAH M, JYOTHIRMAYI T, DIWAN P V, et al. Antioxidant activity and functional properties of enzymatic protein hydrolysates from common carp (*Cyprinus carpio*) roe (egg)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(9): 5817−5825.
[29] YAO Guanglong, HE Wei, WU Yougen, et al. Structure and functional properties of protein from defatted *Camellia oleifera* seed cake: Effect of hydrogen peroxide decolorization[J]. International Journal of Food Properties, 2019, 22(1): 1283−1295.
[30] CHEN Yixuan, CHEN Jianchu, CHANG Cheng, et al. Physicochemical and functional properties of proteins extracted from three microalgal species[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 510−517.
[31] MA K K, GROSSMANN L, NOLDEN A A, et al. Functional and physical properties of commercial pulse proteins compared to soy derived protein[J]. Future Foods, 2022, 6: 100155.
[32] YU Wang, ZHONG Haiyan, FANG Xuezhi, et al. Physicochemical properties and antioxidant potential of protein isolate from *Camellia* cake (*Camellia oleifera* Abel.): Effect of different processing techniques on industrial scale[J]. LWT, 2023, 184: 114993.
[33] HU Zhenying, QIU Liang, SUN Yong, et al. Improvement of the solubility and emulsifying properties of rice bran protein by phosphorylation with sodium trimetaphosphate[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 288−299.
[34] ZHANG Qing, LI Lin, LAN Qiuyu, et al. Protein glycosylation: A promising way to modify the functional properties and extend the application in food system[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2506−2533.
[35] 熊挺, 陈敏娥, 张炳亮. 油茶籽粕蛋白质提取工艺及功能特性研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(1): 27−30. [XIONG Zheng, CHEN Mine, ZHANG Bingliang. Research on extraction of protein from *Camellia oleifera* seed meal and the functional properties[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21(1): 27−30.]
[36] DEOTALE S, DUTTA S, MOSES J A, et al. Foaming characteristics of beverages and its relevance to food processing[J]. Food Engineering Reviews, 2020, 12(2): 229−250.
[37] FOEGEDING E A, LUCK P J, DAVIS J P. Factors determining the physical properties of protein foams[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(2-3): 284−292.
[38] NIE Xinling, SHI Hao, WANG Fei, et al. Biodegradable chitosan-based biofilms incorporated with *Camellia oleifera* residue protein for food packaging[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 157: 110436.
[39] LU Z, LEE P R, YANG H S. Kappa-carrageenan improves the gelation and structures of soy protein isolate through the formation of hydrogen bonding and electrostatic interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108585.
[40] LIU Guoyan, ZHU Wenqi, ZHANG Jie, et al. Antioxidant capacity of phenolic compounds separated from tea seed oil *in vitro* and *in vivo*[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131122.
[41] YU Xinjin, ZHAO Zhimei, YAN Xiaoli, et al. Extraction optimization of tea saponins from *Camellia oleifera* seed meal with deep eutectic solvents: Composition identification and properties evaluation[J]. Food Chemistry, 2023, 427: 136681.
[42] 龚吉军. 油茶粕多肽的制备及其生物活性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011. [GONG Jijun. The research on the preparation and bioactivities of peptide derived from *Camellia oleifera* Abel seed meal[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2011.]
[43] FENG Jun, MA Yilong, SUN Ping, et al. Purification and characterisation of *α*-glucosidase inhibitory peptides from defatted *Camellia* seed cake[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(1): 138−147.
[44] ZHANG Yuanping, WU Fenghua, HE Zhiping, et al. Optimization and molecular mechanism of novel *α*-glucosidase inhibitory peptides derived from *Camellia* seed cake through enzymatic hydrolysis[J]. Foods, 2023, 12(2): 393.
[45] 朱静, 吕静, 陈龙, 等. 超声波辅助酶法提取油茶粕蛋白工艺优化及其功能活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(18): 108−115. [ZHU Jing, LÜ Jing, CHEN Long, et al. Optimization of ultrasound-assisted enzymatic extraction of protein from *Camellia oleifera* seed-cake and evaluation of its functional activity[J]. Food Research and Development, 2023, 44(18): 108−115.]
[46] 龚吉军, 钟海雁, 黄卫文, 等. 油茶粕多肽降血脂活性研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(10): 24−28. [GONG Jijun, ZHONG Haiyan, HUANG Weiwen, et al. Study on lipidemia-lowering activities of oil-tea seed meal peptides[J]. Food Research and Development, 2012, 33(10): 24−28.]
[47] YAO Guanglong, HE Wei, WU Yougen, et al. Purification of angiotensin-I-converting enzyme inhibitory peptides derived from

Camellia oleifera Abel seed meal hydrolysate[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019(1): 7364213.
[48] 郭显荣. 不同来源的油茶粕蛋白酶解制备 ACE 抑制肽[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015. [GUO Xianrong. Preparation of ACE inhibitory peptides by proteins extracted from different *Camellia* meal[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2015.]
[49] 龚吉军, 黄卫文, 钟海雁, 等. 油茶粕多肽对小鼠免疫调节功能的影响[J]. 中国食品学报, 2013, 13(12): 21−27. [GONG Ji-jun, HUANG Weiwen, ZHONG Haiyan, et al. Immunomodulatory effects of oil-tea seed meal peptide in mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(12): 21−27.]
[50] NIKBAKHT NASRABADI M, SEDAGHAT DOOST A, MEZZENGA R. Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106789.
[51] 吕静, 杨洁茹, 李坤, 等. 不同提取工艺对油茶籽粕蛋白质结构及功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 102−110. [LÜ Jing, YANG Jieru, LI Kun, et al. Effects of different extraction processes on the structure and functional properties of *Camellia* seeds protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 102−110.]
[52] 卫萍, 游向荣, 张雅媛, 等. 火麻蛋白加工特性、改性及其活性肽研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 231−242. [WEI Ping, YOU Xiangrong, ZHANG Yayuan, et al. Review of processing properties and modification of hemp protein and its bioactive peptides[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 231−242.]
[53] de VRIES H, MIKOLAJCZAK M, SALMON J M, et al. Small-scale food process engineering: Challenges and perspectives[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 46: 122−130.
[54] 安红周, 陈金换, 闫涵笑, 等. 不同改性技术对植物蛋白功能特性和食用品质影响的研究进展[J]. 中国油脂, 2026, 51(1): 42−49. [AN H Z, CHEN J H, YAN H X, et al. Research progress on the effects of different modification techniques on the functional properties and edible quality of plant proteins[J]. Chinese Oil, 2026, 51(1): 42−49.]
[55] SONG Weimeng, HU Li, MA Zhihui, et al. Importance of tyrosine phosphorylation in hormone-regulated plant growth and development[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(12): 6603.
[56] HU Yangyang, WU Zhen, SUN Yangying, et al. Insight into ultrasound-assisted phosphorylation on the structural and emulsifying properties of goose liver protein[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131598.
[57] JIANG Wen, WANG Yiyang, MA Cuicui, et al. Pea protein isolate-inulin conjugates prepared by pH-shift treatment and ultrasonic-enhanced glycosylation: Structural and functional properties[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132511.
[58] HAN Ge, ZHAO Siqi, LIU Qian, et al. High-intensity ultrasound combined with glycation enhances the thermal stability and *in vitro* digestion behaviors of myofibrillar protein aqueous solution[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 251: 126301.
[59] ZOU Reng, XU Jing, GUO Zengwang, et al. Exploring sustainable sources and modification techniques of plant-based alternative proteins for high internal phase emulsion systems: From *Camellia oleifera* seed meal, copra meal, and soybean meal[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111256.
[60] YAO Shunyu, LI Wu, WU Yue, et al. The impact of high-intensity ultrasound-assisted extraction on the structural and functional properties of hempseed protein isolate (HPI)[J]. Foods, 2023, 12(2): 348.
[61] DU Yanxue, SHI Suhua, JIANG Yan, et al. Physicochemical properties and emulsion stabilization of rice dreg glutelin conjugated with *κ*-carrageenan through Maillard reaction[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(1): 125−133.
[62] MENG Xiangyong, LI Tingting, SONG Teng, et al. Solubility, structural properties, and immunomodulatory activities of rice dreg protein modified with sodium alginate under microwave heating[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(8): 2556−2564.
[63] BUČKO S, KATONA J, POPOVIĆ L, et al. Influence of enzymatic hydrolysis on solubility, interfacial and emulsifying properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 271−278.
[64] BUCHERT J, ERCILI CURA D, MA H R, et al. Crosslinking food proteins for improved functionality[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2010, 1: 113−138.
[65] AHMADIFARD N, MURUETA J H C, ABEDIAN-KENARI A, et al. Comparison the effect of three commercial enzymes for enzymatic hydrolysis of two substrates (rice bran protein concentrate and soy-been protein) with SDS-PAGE[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(2): 1279−1284.
[66] 马燕, 李红萧, 王田林, 等. 酶法改性-挤压联用技术改善植物蛋白品质特性的研究进展[J]. 食品科技, 2025, 50(1): 85−92. [MA Yan, LI Hongxiao, WANG Tianlin, et al. Research progress on improving quality characteristics of plant protein by enzymatic modification and extrusion combined technology[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(1): 85−92.]
[67] 吴甜甜. 蒸汽爆破预处理对芝麻粕蛋白结构与功能特性的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2022. [WU Tiantian. Effect of steam explosion pretreatment on structure and functional properties of sesame meal protein[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2022.]
[68] LI Shiyu, ZHU Yingying, HAO Xiyu, et al. High internal phase Pickering emulsions stabilized by the complexes of ultrasound-treated pea protein isolate/mung bean starch for delivery of *β*-carotene[J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138201.
[69] ZHANG Yi, DI Ruipeng, ZHANG Huixin, et al. Effective recovery of casein from its aqueous solution by ultrasonic treatment assisted foam fractionation: Inhibiting molecular aggregation[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 284: 110042.
[70] NAKAMURA S, KATO A, KOBAYASHI K. Enhanced antioxidative effect of ovalbumin due to covalent binding of polysaccharides[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1992, 40(11): 2033−2037.
[71] 李心怡, 邵家威, 李建章. 酶法改性及其在蛋白基胶黏剂的应用研究进展[J]. 林业工程学报, 2024, 9(5): 13−26. [LI Xinyi, SHAO Jiawei, LI Jianzhang. Research progress on enzymatic modification and its application in protein-based adhesives[J]. Journal of Forestry Engineering, 2024, 9(5): 13−26.]
[72] HUANG Ziwei, WU Xuehui, LAN Xiaohe, et al. *Camellia oleifera* oil body as a delivery system for curcumin: Encapsulation, physical, and *in vitro* digestion properties[J]. Food Biophysics, 2023, 18(4): 596−605.
[73] QIAN Xiaoping, SHEN Tinghui, ZHANG Xiaoke, et al. Biologically active *Camellia oleifera* protein nanoparticles for improv-

ing the tumor microenvironment and drug delivery[J]. Biomaterials Science, 2020, 8(14): 3907−3915.
[74] 刘楚岑, 裴小芳, 周文化, 等. 油茶饼粕中主要成分及其综合利用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 227−232. [LIU Chucen, PEI Xiaofang, ZHOU Wenhua, et al. Research progress on the main components and comprehensive utilization of *Camellia oleifera* cake[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 227−232.]
[75] 李远志, 赖红华. 茶籽蛋白奶的研制[J]. 食品科技, 1995, 20(3): 20−21. [LI Yuanzhi, LAI Honghua. Development of tea seed protein milk[J]. Food Science and Technology, 1995, 20(3): 20−21.]
[76] 陈艺婷. 油茶籽粕蛋白的制备及其在冰淇淋中的应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022. [CHEN Yiting. Preparation of *Camellia* seed cake protein and its application in ice cream[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.]
[77] PEYDAYESH M, BAGNANI M, SOON W L, et al. Turning food protein waste into sustainable technologies[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(5): 2112−2154.
[78] 刘鹏, 姚思敏薇, 陈诗晴, 等. 草莓贮藏保鲜技术的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(5): 119−121. [LIU Peng, YAO Siminwei, CHEN Shiqing, et al. Research progress on storage technology of strawberry[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(5): 119−121.]
[79] POPOVA A, MIHAYLOVA D. Antinutrients in plant-based foods: A review[J]. The Open Biotechnology Journal, 2019, 13(1): 68−76.
[80] KUMAR V, SINHA A K, MAKKAR H P S, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 945−959.
[81] GRASES F, PRIETO R M, COSTA-BAUZA A. Clinical Aspects of Natural and Added Phosphorus in Foods[M]. New York: Springer New York, 2017: 175-183.
[82] TIMOTHEO C A, LAUER C M. Toxicity of vegetable tannin extract from *Acacia mearnsii* in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(3): 659−664.
[83] RAES K, KNOCKAERT D, STRUIJS K, et al. Role of processing on bioaccessibility of minerals: Influence of localization of minerals and anti-nutritional factors in the plant[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 37(1): 32−41.
[84] LAMPART-SZCZAPA E, SIGER A, TROJANOWSKA K, et al. Chemical composition and antibacterial activities of lupin seeds extracts[J]. Food/Nahrung, 2003, 47(5): 286−290.
[85] QIU Changyang, CHEN Zhihong, HU Fenjuan, et al. Simultaneous extraction of oil, protein and polysaccharide from residual seed cake of *Camellia oleifera* Abel. using three phase partitioning[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117994.
[86] LI Zongming, LIU Lei, FAN Yang, et al. Kinetic modeling for high voltage electrical discharge extraction based on discharge energy input[J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126168.
[87] ZHAO Ruixuan, LIU Xinshuo, LIU Wei, et al. Effect of high-intensity ultrasound on the structural, rheological, emulsifying and gelling properties of insoluble potato protein isolates[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 85: 105969.
[88] FALADE E O, MU Taihua, ZHANG Miao. Improvement of ultrasound microwave-assisted enzymatic production and high hydrostatic pressure on emulsifying, rheological and interfacial characteristics of sweet potato protein hydrolysates[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106684.
[89] LEONARD W, ZHANG Pangzhen, YING Danyang, et al. Surmounting the off-flavor challenge in plant-based foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(30): 10585−10606.
[90] el YOUSSEF C, BONNARME P, FRAUD S, et al. Sensory improvement of a pea protein-based product using microbial co-cultures of lactic acid bacteria and yeasts[J]. Foods, 2020, 9(3): 349.
[91] YOO S H, CHANG Y H. Volatile compound, physicochemical, and antioxidant properties of beany flavor-removed soy protein isolate hydrolyzates obtained from combined high temperature pretreatment and enzymatic hydrolysis[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2016, 21(4): 338−347.