王志达,张桂芳,李珊珊,等. 膳食纤维改性技术及其食品应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 506−517. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070206

WANG Zhida, ZHANG Guifang, LI Shanshan, et al. Research Progress on Modification Technology of Dietary Fiber and Its Food Application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 506−517. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070206

· 专题综述 ·

膳食纤维改性技术及其食品应用的研究进展

王志达[1],张桂芳[2],李珊珊[1],张东杰[1,2,3,*]

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院,黑龙江大庆 163319;
2.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心,黑龙江大庆 163319;
3.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室,黑龙江大庆 163319)

摘　要: 膳食纤维(Dietary Fiber, DF)改性通过调控其分子结构、理化性质与功能表现,已成为提升其应用价值的重要途径,在食品与营养领域的潜力日益受到关注。本文系统综述了 DF 改性的主要技术方法(物理、化学、生物及其联合改性)及其在食品体系中的应用进展,总结了不同改性方法对 DF 理化性质、结构及功能特性的影响,并展望了 DF 改性的未来发展方向与应用前景。综述表明,合适的改性方法可显著改善 DF 的持水、持油、膨胀及吸附特性,并增强其抗氧化、降血糖和降血脂等功能特性,从而拓展 DF 在各类健康食品中的应用潜力。未来研究应致力于开发绿色、高效的改性工艺体系,加强改性 DF 结构与功能构效关系的解析,建立标准化安全性与功效评价规范,以促进 DF 在高附加值健康食品与精准营养领域的创新应用。

关键词: 膳食纤维,改性技术,理化性质,功能特性,食品应用

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0506−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070206

本文网刊:

Research Progress on Modification Technology of Dietary Fiber and Its Food Application

WANG Zhida[1], ZHANG Guifang[2], LI Shanshan[1], ZHANG Dongjie[1,2,3,*]

(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
2.National Coarse Cereals Engisneering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;
3.Key Laboratory of Agro-Products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Provincial, Daqing 163319, China)

Abstract: Dietary fiber (DF) modification has emerged as a crucial strategy for enhancing its functional value by precisely tailoring its molecular structure, physicochemical properties, and performance. This approach continues to attract growing interest in the fields of food science and nutrition due to its broad application potential. This review systematically examines the principal techniques for modifying DF, including physical, chemical, biological, and combined methods. And highlights recent advances in their application within food systems. It further synthesizes the effects of various modification strategies on the structural attributes, physicochemical properties, and functional behaviors of DF. The analysis indicates that appropriate modification methods can markedly improve the water-holding, oil-binding, swelling, and adsorption capacities of DF, while also enhancing functional properties such as antioxidant, hypoglycemic, and hypolipidemic activities. These improvements significantly broaden the potential applications of DF in a diverse range of health-promoting foods. Moving forward, research should prioritize the development of efficient and environmentally sustainable modification technologies, elucidate the structure-function relationships of modified DF, and establish standardized protocols for

收稿日期: 2025−07−17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1202705-6);黑龙江省杂粮生产与加工优势特色学科项目(2022-78);黑龙江八一农垦大学“三纵”基础培育项目(ZRCPY202330)。

作者简介: 王志达(2000−),男,硕士研究生,研究方向:粮食、油脂及植物蛋白工程,E-mail: 2237843656@qq.com。

*** 通信作者:** 张东杰(1966−),男,博士,教授,研究方向:食品科学,E-mail: byndzdj@126.com。

safety and efficacy evaluation. Such efforts will accelerate the innovative utilization of DF in high-value functional foods and precision nutrition.

Key words: dietary fiber; modification technology; physicochemical properties; functional characteristic; food applications

膳食纤维是人体必需的“第七大营养素”，因具有调节肠道菌群、降低心血管疾病风险、改善睡眠、预防肥胖、促进肠道蠕动，以及调节血糖和血脂水平等多种生理功能，已成为当前食品与营养领域的研究热点[1−2]。“膳食纤维”一词由 Hipsley（1953）首次提出。当时，人们认为 DF 是指难以被人体酶消化的植物成分的总称。自 20 世纪 70 年代 Burkitt 提出“膳食纤维假说”并将其缺乏与多种慢性疾病关联以来，膳食纤维的研究历程经历了从初步认知（基本生理功能）到功能探索，再到改性优化的演变[3]。世界卫生组织（WHO）将 DF 定义为 10 个和 10 个以上聚合度的碳水化合物聚合物，且该物质不能被人体小肠内的酶水解，并对人体有健康效益。健康的生理效应（如改善便秘、降低血总胆固醇）及科学的证据基础（如动物实验、人体临床试验）是其功能性评价标准。DF 是一类无法被人体消化系统直接吸收的复杂多糖，广泛存在于各类植物中。根据溶解性的差异，膳食纤维可分为不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber, IDF）和可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber, SDF）。

IDF 主要由纤维素、半纤维素和木质素等组成，其致密的微观结构赋予细胞壁强大的机械强度，使其难以通过酶解或其他方法降解[4]。SDF 则主要由菊粉和果胶等组成，由于其优异的水溶性，这类物质展现出独特的生物学特性。Qiao 等[5] 研究显示 DF 能够调节血清胆固醇水平；Hong 等[6] 则证实了其具有抗炎活性。尽管 SDF 对人体健康有诸多益处[7]，但天然原料中的含量通常仅为 3%~4%，远不能满足应用需求，即 10% 以上的 SDF 含量要求[8]。在食品工业生产及日常消费过程中，大量富含 IDF 的副产物，如植物表皮、果渣、大豆渣以及榨汁残渣等，多数被用作动物饲料甚至直接丢弃，如果蔬加工副产品我国综合利用率不足 40%，可见其利用率极低[9−10]。这不仅造成了膳食纤维资源的大量浪费，还引发了一系列环境问题，如土壤污染与温室气体排放。随着科技发展，研究者开始通过多种改性手段提升 DF 的含量和功能特性等，以克服其天然形式在应用中的局限性。近年来，DF 改性研究从单一方法（物理、化学和生物法）逐步转向多种技术协同的联合改性策略。联合改性技术（如超高压联合酶解、微波联合酶解等）通过协同效应显著提升了 DF 理化特性和功能活性，同时致力于平衡改性效率与安全性这一当前存在的关键科学问题，已成为该领域的研究主流。

DF 具有调节肠道菌群、降低心血管疾病风险等多种生理功能，通过对 DF 进行改性，可显著改善 DF 的结构、理化性质和功能特性，并提高附加值。本文旨在系统介绍 DF 的物理、化学、生物及联合改性方法，总结不同改性技术对其结构、理化性质（如持水力、持油力）和功能特性（如降血糖血脂活性、抗氧化性）的影响，并探讨改性 DF 在食品工业中的应用现状与前景，为 DF 进一步开发利用提供理论依据与技术支持。

1　膳食纤维的分类和组成

DF 按溶解性可分为 SDF 和 IDF。其中，SDF 可溶于水，吸水后形成黏稠的凝胶状物质，其主要成分为果胶、β-葡聚糖、菊粉等，主要来源于豆类和果蔬类。IDF 不溶于水，其主要成分为纤维素、半纤维素、木质素及部分抗性淀粉，主要来源于谷物和蔬菜；按发酵特性可分为易发酵型（如低聚果糖）、部分发酵型（如抗性淀粉）、难发酵型（如部分木质素）；按传统来源可分为天然 DF 与非天然 DF。天然膳食纤维指直接从植物性食物中获取的纤维成分；而非天然膳食纤维则是经过分离和提取过程，从天然原料中获得的，具备特定生理功能的纤维，如改性膳食纤维（菊粉、低聚果糖等），这些成分常被添加到食品中，以提高其纤维含量或改善肠道菌群、血糖、血脂、睡眠等功能特性[1]。近年来，微生物源与海洋生物源等新兴来源膳食纤维因结构独特、功能特异成为研究热点。如岩藻聚糖的硫酸化程度与其抗凝血、抗肿瘤活性直接相关；微生物葡聚糖（如凝结芽孢杆菌产物）可通过调节 TLR（Toll 样受体）通路增强免疫；壳聚糖因其阳离子特性可用于功能性包埋载体或抗菌剂[11]。目前这些纤维已应用于功能性食品中，未来研究应聚焦于其规模化安全生产，以推动其在精准营养与食品中的应用。常见膳食纤维的组成及其食物分布、理化性质详见表 1。

2　膳食纤维改性的必要性分析

2.1　理化特性优化

膳食纤维具有水合、持油、吸附等特性，天然膳食纤维一般存在水溶性欠佳、流变特性不稳定等固有不足，持水能力强的膳食纤维如同天然“锁水剂”，能在食品体系中高效捕捉并牢牢锁定水分，通过构建稳定的水分网络结构，维持食品良好形态；高持油性的膳食纤维可以防止烹饪过程中脂肪的流失，显著改善食品的风味和口感，并使高脂食品更稳定，有助于延长保质期[18]。另外，天然膳食纤维的分子结构缺乏共价交联网络，导致其热稳定性较低，这极大地限制了它在食品中的应用。燕麦 β-葡聚糖在高温或者酸碱环境中，容易发生分子降解，进而造成凝胶强度降低[19]，而通过化学修饰手段，像羧甲基化、乙酰化等，引入亲水基团，能够显著提高膳食纤维的水溶性等理

表 1 常见 DF 组成及其食物分布、理化性质

Table 1 Composition of common DF and its food distribution, physical and chemical properties

组成	食物分布	结构	分子量范围（kDa）	溶解性	结晶类型
纤维素[12]	谷物(麸皮)、蔬菜、豆类等	由β-D-葡萄糖单体通过β-1,4-糖苷键线性连接而成的高分子聚合物	50~2500	不溶	纤维素Ⅰ型
半纤维素[13]	谷物、豆类、蔬菜、水果等	半纤维素主链由木糖、甘露糖、半乳糖等单糖通过β-1,4-糖苷键相连，侧链单糖通过α-糖苷键与主链相连，结构多样	通常<50	难溶	无定形
果胶[14]	水果、蔬菜、豆类等	由半乳糖醛酸及其衍生物组成的复杂多糖，主链富含半乳糖醛酸	50~300	可溶	无定形
木质素[15]	菌类等	由三种苯丙烷单元(对香豆醇、松柏醇、芥子醇)通过醚键和碳碳键连接形成的复杂三维无定形高分子聚合物	0.1~1000	不溶	无定形
抗性淀粉[16]	未成熟的水果、土豆、豆类等	D-葡萄糖构成	2~15	不溶	B型、V型
菊粉[17]	菊苣根、洋葱等	由D-果糖分子通过β-(2,1)-糖苷键连接而成，并以一个葡萄糖分子终止	3-6	可溶	无定形
β-葡聚糖[12]	燕麦、大麦麸皮等	主要通过β-1,3-糖苷键和β-1,4-糖苷键交替连接形成线性主链	10~10000	可溶	无定形

化性质[20]，有效改善其在饮料、酸奶等体系中的稳定性；运用超高压均质、超微粉碎等物理技术，把颗粒粒径减小至纳米级，可显著增强膳食纤维在体系中的分散均匀性，减少沉淀分层现象，增强持水性、持油性等性质[21]。除此之外，通过交联改性，膳食纤维能在分子间形成共价网络结构，从而提升其热稳定性和机械强度，使其适合应用于高温烘焙、挤压膨化等复杂的加工工艺[22]。合理的改性方法可突破天然膳食纤维的性能局限。

2.2 功能活性强化

传统膳食纤维所具备的基础生理功能，如肠道调节等，已无法满足人们日益增长的健康需求。通过改性能够定向开发出血糖调控、胆固醇吸附、免疫调节等新型功能。如经过交联改性的玉米膳食纤维，对胆固醇的吸附能力可提升至 50%，促进胆固醇随粪便排出，有助于降低冠心病和脑卒中等慢性病[23]。多项研究表明，不同的 DF 改性方法都有利于提高其降糖活性。胡萝卜渣经复合酶、超微粉碎和高静水压力处理后，DF 结构改善，葡萄糖吸收能力等功能特性显著提高[24]。在评价葡萄渣纤维浓缩物微粉化对膳食纤维抗氧化能力的影响中，有实验表明，微粉化提高了葡萄渣纤维浓缩物的 $ABTS^+$自由基清除活性及氧自由基吸收能力，从而提高了葡萄渣 DF 的抗氧化活性[25]。

2.3 品质提升

感官特性是膳食纤维应用于高端食品中最关键、最直接的限制因素，也是改性的核心驱动力之一。改性后 DF 可有效消除粗糙口感。谷物麸皮等不溶性纤维颗粒大、硬度高，粗糙感强，如经超微粉碎后，纤维粉碎至微米级，颗粒尺度低于口腔触觉感知阈值，从而获得极其细腻、顺滑的口感，可添加到酸奶、冰淇淋、巧克力等对口感要求极高的食品中。其次，纤维常带有“谷糠味”“豆腥味”“涩味”等，其可通过物理改性促成的美拉德反应、微生物代谢等有效去除。另外，深色的纤维会严重影响终产品(如白面包、浅色饮料)的色泽，通过漂白、酶处理等改性手段可以改善纤维的白度[26]，减少其对产品外观的负面影响，提高产品品质。

3 膳食纤维改性技术

DF 的改性方法主要包括物理、化学、生物及联合改性等。物理改性可分为热处理技术和非热处理技术。因具有高效、绿色等优势，在食品改性中应用广泛[27]，然而，物理改性在设备体积较大、操作便捷性欠佳等方面仍存在明显不足。化学改性具有耗能低、操作简便等优势，但该方法可能导致化学物质残留，进而引发食品安全风险[27]。生物改性条件温和、高效，但由于严格的环境要求，生物改性仍面临挑战[28−29]。联合改性方法是指使用两种或两种以上的方法对 DF 进行改性，重点包括物理-物理改性，物理-化学改性，物理-生物改性以及生物-生物改性。克服单一改性的局限性，实现优势互补，可以极大地促进 DF 的结构和功能性质的改善，在食品等领域展现出巨大的应用潜力，为功能性成分的深度开发与高值化利用提供了创新路径。

3.1 物理改性技术

3.1.1 热处理技术 蒸汽爆炸(Steam Explosion, SE)是一种新兴的物理改性技术，主要应用于木材纤维或高蛋白物质的处理。SE 利用高温高压水蒸气渗透原料，通过瞬时释放产生的机械能破坏细胞壁和大分子结构，导致纤维素、半纤维素和木质素的糖苷键断裂，促使 IDF 部分降解并转化为 SDF[30]。SE 能够实现更快的传质、更低的能源成本和更简单的技术操作[31]。近年来，蒸汽爆炸技术在食品加工中的利用率不断增加，得到广泛应用。Zhou 等[32] 通过 SE 法改性薏麸可溶性膳食纤维后发现，改性产物不仅表现出较强的抗氧化特性，还对肠道微生物群发挥关键调控作用，最终对人体肠道健康具有显著增强效应。何晓琴等[33] 发现经 SE 改性最优条件(1.2 MPa、90 s)处理后，豆渣 SDF 的持水力、持油力等理化指标显著提升，展现出优异的葡萄糖吸附能力和 α-淀粉酶活性抑制能力，分别较未改性提高了 29.52% 和 19.90%。

Tang 等[34] 与 Kong 等[35] 分别针对薏皮和糙米粉的研究表明，SE 处理后同样能够改善其持水力、持油力等理化性质，SDF 表面粗糙多孔，比表面积增加，有效增强其葡萄糖吸附能力和 α-淀粉酶活性抑制能力，分别较未改性提高了 57.77%、37.80%。

微波技术是利用电磁波使极性分子高频振荡摩擦生热（热效应），并可能伴随电磁场对物质的非热作用，实现高效加热与改性。微波改性具有操作简单、条件温和等特点，是目前提取膳食纤维和对膳食纤维改性的一种常见办法[36]。Wu 等[37] 通过研究微波改性花生壳可溶性膳食纤维发现，微波处理的 SDF 表现出更好的热稳定性和理化性质。宋朝霞等[38] 研究表明，改性小麦麸皮 SDF 表面呈现复杂的网状结构，与未改性小麦麸皮 SDF 相比，改性后比表面积增大，改性 SDF 在持水力、水膨胀力和持油力方面显著提高。微波处理可以赋予膳食纤维更强的生物活性、抗氧化活性等[39]。

3.1.2　非热处理技术　超微粉碎从上世纪 70 年代开始在食品加工等领域兴起。DF 的理化性质与其粒径有着密切的联系。超微粉碎技术是通过机械力（如撞击、剪切、研磨）或流体动力，在低温或常温环境下，将物料粉碎至微米甚至纳米级粒度。Wang 等[40] 和 Yang 等[41] 对豌豆膳食纤维改性研究发现，DF 比表面积增加，粒径减小，胆固醇吸附能力显著增强。Zhao 等[42] 通过超微粉碎对奇异果渣中的不溶性膳食纤维进行改性发现，改性后 IDF 的比表面积从 44.4 增加到 192.9 $m^2 \cdot kg^{-1}$，膨胀能力、持水持油持脂能力提高。对胆固醇吸附能力和 α-淀粉酶活对性的抑制也有所增强，但 Wen 等[43] 利用超微粉碎对麦麸膳食纤维进行处理后发现结果相反，经改性后的膳食纤维持水性和持油性能力下降，其原因可能是因为粉碎过程破坏了膳食纤维的结构，暴露更多亲水基团和还原性基团。

超声技术因其绿色、安全、高效等优点而备受关注[44]。通过空化效应破坏多糖化学键，导致植物细胞壁破裂和空泡化，从而促进生物活性成分的溶出[45]。超声处理是改性 DF 的一种常用的技术，可以使其组分更好地溶解[18]，分子量降低，抗氧化、胆固醇吸附等功能增强[46]。牛希等[47] 研究结果表明，超声改性后的燕麦膳食纤维持水力、水膨胀力、持油力均显著提高，表面结构疏松多孔，相对结晶度升高，部分纤维素组分重新分布，向可溶性膳食纤维转化，热稳定性得到改善。Hassan 等[48] 从奇亚籽中提取 DF，通过超声处理后可溶性纤维含量显著提高，比表面积增大，其持水力、持油力及葡萄糖吸附能力显著提升。Kalla-Bertholdt 等[49] 对燕麦和豌豆膳食纤维进行超声改性后也呈现相同结果。

挤压技术通过高效传热、快速混合和高速剪切来实现物料结构重塑与性能改善的加工方法。挤压技术很早就已被用于食品领域。同样，Xue 等[50] 研究中，通过挤压香菇渣得到膳食纤维后，葡萄糖延迟和胆汁酸延迟指数显著增加。Qiao 等[51] 研究了双螺杆挤出对甘薯残留物可溶性膳食纤维的影响，研究结果表明，挤出的 SDF 显示出较高的水平（9.63%~29.25%），理化性质和葡萄糖吸收能力、抗氧化能力等均显著改善。

动态高压微射流（Dynamic High Pressure Microfluidization，DHPM）是一种利用超高液压压力和高速剪切力对物料进行物理改性的先进技术，通过特殊设计的微通道，使物料在瞬间高压（通常 100~300 MPa）下产生极高流速（最高可达音速），经历剧烈的剪切、碰撞和空化效应，这些物理力量的协同作用使 DHPM 成为改变膳食纤维结构的有效手段，通过降低膳食纤维粒径，增大其表面积以改善膳食纤维的结构和功能特性。Luo 等[52] 研究发现，动态高压微射流显著减小了竹笋壳 DF 的粒径，结晶度和热稳定性提高，保水能力增强，对油、亚硝酸盐离子、葡萄糖和胆固醇的结合能力显著提升，这归因于粒径减小和多孔结构的形成。王淑玉等[53] 研究发现，山楂果渣膳食纤维在 200 MPa 循环 3 次时达到最佳水合性能，持水力、持油力和膨胀力分别提高 2.08 倍、8.34 倍和 2.25 倍。值得注意的是，持油力提升幅度显著高于持水力，这表明 DHPM 特别有利于形成疏水性孔隙结构，对油脂分子具有更强包埋能力。该技术因设备成本高、易堵塞等方面使应用受到限制，未来，如果能着力解决这些难题，动态高压微射流技术将会深受欢迎。

低温等离子体（Cold Plasma，CP）凭借低能耗、高效率及环境友好等显著特性，在食品加工领域展现出重要的应用潜力[54]。该技术通过气体放电过程产生包含电子、离子、自由基及亚稳激发粒子等多种活性物质的复杂体系[55]，这些活性物质能够有效破坏目标物质的共价键，进而引发一系列重要的理化反应。目前，冷等离子体技术已在食品改性领域取得诸多进展。Mehta 等[56] 对玉米麸皮和米糠的处理显示，CP 处理显著提高低聚木糖的提取率，并增强其体外消化率和抗炎活性。Zhu 等[57] 通过 CP 技术对甘蔗中的纤维素进行修饰，降低了结晶度，提升了纤维素的溶解速率和溶解度。这种非热特性尤其适用于热敏性膳食纤维的改性，显著提升了膳食纤维的功能特性，在食品等领域展现出广阔应用前景。随着技术的不断优化，其有望成为膳食纤维深加工的主流技术之一。

脉冲电场提取技术（Pulsed Electric Field，PEF）是一种利用短时高电压脉冲处理物质的非热处理方法[58]，因其独特的处理方式，在提升食品理化性质方面显示出了巨大的潜力。基于电极间快速交变电场的脉冲电场技术，可实现植物组织目标成分的高效萃取。该方法通过非热物理作用机制显著降低传统热加工过程的不良影响。许多研究表明，PEF 处理可以

提高膳食纤维的提取率[59]，并改变它们的结构和理化性质[60]。Fan 等[61] 通过脉冲电场提取桔皮可溶性膳食纤维发现，PEF 处理 SDF 表现出较高的水溶性、持水持油能力，稳定性更高，并且 Pb^{2+}结合能力和抗氧化活性更强。汤洁[62] 与 Fan 等[61] 研究结果一致，PEF 处理后，膳食纤维功能性得到提升。Wang 等[63] 使用不同方法从花生壳中提取可溶性膳食纤维，结果表明，PEF-SDF 具有最高的持水力、持油力和乳化性能，分子量更小。PEF-SDF 葡萄糖吸附能力和多酚吸附能力最强。PEF 技术比较于其他物理技术独特之处在于能够有效地抑制微生物生长和酶的活性，有效杀灭多种微生物[64]。

如表 2 所示，超微粉碎技术能显著减小膳食纤维粒径，但可能破坏结构致功能性下降。超声技术操作条件温和，但效率低，不适合大规模生产。动态高压微射流技术可在短时间内高效改性，连续化生产，具备工业化潜力，但设备成本高昂，且易堵塞。挤压技术处理效率高，但对不同来源膳食纤维适应性差，实验室与工业上均应用广泛。低温等离子体技术效率高，具有针对性，潜力大，但设备成本高，处理效果受多种因素影响大，主要处于实验室研究阶段。脉冲电场技术处理时间极短，能耗低、可杀灭微生物，但设备投资大，技术要求高，工业化应用不成熟。综合来看，动态高压微射流技术和挤压技术更具备发展优势。其中低温等离子体、脉冲电场等这类应用于 DF 改性中的新型绿色改性技术具有发展潜能，若能使技术更加成熟和降低设备成本，有望成为新的主流方向。

3.2 化学改性技术

化学改性是化学试剂与膳食纤维活性基团反应，通过断裂或形成化学键改变其结构与组成，以改善功能特性的技术。化学改性方法主要包括酸碱处理法、羧甲基化改性、羟丙基化改性等。

羧甲基化和羟丙基化是目前最常用的化学改性方法。DF 的羧甲基化、羟丙基化改性，是由于 DF 链上一部分游离羟基被其他官能团取代，从而改变了其组成和功能特性[65]。Zheng 等[66] 通过羧甲基化和羟丙基化处理椰子饼膳食纤维，发现两种方法改性后椰子饼膳食纤维持水性、持油性、淀粉酶活性抑制等能力均有显著提升，其中羧甲基化处理表现出更强的功能性。同样，Kanwar 等[67] 研究了羧甲基化和羟丙基化对高粱膳食纤维的改性。结果表明，两种改性方法均显著提高了 DF 的吸水能力、溶胀能力、吸油能力和可溶性膳食纤维含量，与 Zheng 等[66] 结果一致，其中羧甲基化处理效果更加显著。

另外，酸碱处理法也适用于 DF 改性。DF 在酸性或碱性条件下会被分解，促进糖苷键的断裂，从而增加了 SDF 的含量，并显著改善膳食纤维产品的功能特性。Wang 等[68] 分别使用柠檬酸和氢氧化钠对猕猴桃膳食纤维进行改性，发现经酸处理得到的 DF 结构更疏松，其持水性、持油性、亚硝酸盐离子吸附性等显著提高。碱处理后 DF 性能也略有改善。Bader 等[69] 使用酸碱处理结合挤压，对小麦和高粱不溶性膳食纤维改性发现，虽然不同处理都增加了可溶性纤维含量，但酸碱处理显示出非常显著的效果。碱性过氧化氢处理可以溶解半纤维素、果胶等，使 IDF 转变为 SDF。Zhang 等[70] 研究发现，过氧化氢处理显著降解了半纤维素、木质素和果胶，并提高膳食纤维含量，使结构更加松散，进而提高了物理化学性质和发酵性。

化学改性方法可显著提升 DF 的功能特性与营养品质，但相较于物理和生物改性来说，存在处理安

表 2 DF 物理改性技术

Table 2 DF physical modification technology

改性技术		原理	原料	条件	功能改善
热处理技术	蒸汽爆破技术	高压蒸汽能转机械能破壁	苦荞麸皮[33]	1.2 MPa、90 s	DF的持水力、持油力显著提升；DF表面呈现多孔状，葡萄糖吸附、胆固醇吸附、抗氧化特性提高，对调节肠道微生物群起关键作用
	微波技术	电磁波使分子振动生热	小麦麸皮[38]	450 W、2 min	DF热稳定性和理化性质改善，SDF含量增加；结晶结构破坏，形成多孔结构；抗氧化性、胆固醇、重金属吸附能力提升
	超微粉碎技术	机械力粉碎至超微粉	豌豆[40]	1800 W、粉碎30 s，停30 s，循环两次，	DF持水性、持油力、溶解性提升，颗粒粒径减小，比表面积增大；结晶度降低，胆酸钠吸附能力、胆固醇吸附能力等增强
	超声波技术	空化效应、机械效应和热效应	燕麦[48]	50 ℃、360 W、30 min	SDF持水、持油和溶解度显著提高，粒径减小，热稳定性得到改善；DF对胰肪酶和α-淀粉酶的抑制、降血糖、降血脂和抗炎作用增强
非热处理技术	挤压技术	挤压剪切改变物料性状	甘薯[52]	转速180 r/min、进料速度17 Hz、水分40%温度150 ℃	DF持水力、溶胀力、持油能力和热稳定性提高；葡萄糖吸附能力、胆固醇吸附能力、亚硝酸盐离子吸附能力和阳离子交换能力、抗氧化性显著增加
	动态高压微射流技术	高压射流粉碎细化物料	山楂[54]	420 MPa	SDF溶解性提升，乳化稳定性、流变性改善；粒径减小，结晶度，热稳定性和保水能力增强；对油、亚硝酸盐离子、葡萄糖和胆固醇结合能力提升
	低温等离子体技术	高能粒子改性物质	甘蔗[58]	3~12 min、40~70 kV	DF理化性质增强，溶解度提高；DF结晶度提升，热稳定性增强，且葡萄糖吸附能，抗氧化能力显著增加
	脉冲电场技术	电场作用改变物质特性	桔皮[62]	45 ℃、20 min，电场强度6.0 kV/cm、脉冲数30	DF水溶性、持水持油、稳定性提高，结晶度降低，Pb^{2+}结合力、抗氧化能力增强

全性这一关键问题，并且在化学改性过程中所使用的化学试剂（如强酸、强碱等）可能存在残留风险，导致改性产物的营养保留率下降、功能特性不稳定等问题。

3.3 生物改性技术

生物改性是借助微生物代谢或酶催化，对目标物质特定成分及分子结构进行生物转化。具有反应条件温和、专一性强、反应速度快等优势，生物改性主要分为酶解法和微生物发酵法两种。

酶法主要通过纤维素酶和木聚糖酶等将膳食纤维中的大分子水解为小分子，从而改善官能团的暴露，影响 DF 的生物活性[71]，达到改性的目的。周龙珠等[72] 以酶法改性油莎豆粕，提取油莎豆粕可溶性膳食纤维，发现改性后 SDF 孔隙增多，比表面积增加，暴露出更多的极性基团，结晶度降低，较改性前结构特性有所改善。此外，纤维素酶改性使油莎豆粕 SDF 的持水力、膨胀性和持油力较改性前分别提高，抗氧化能力增强。Shen 等[73] 使用复合酶从黑豆壳中提取 DF，改性后 SDF 得率提高，持水力、持油力等增强，改性纤维表现出显著的胆固醇结合能力。酶处理可以有效地提高 SDF 含量和改善 DF 的功能，与物理和化学处理相比，酶处理具有绿色、高效等明显优势。但是，因酶的成本高，对酶剂量的优化和回收尤为重要。

发酵法改性是一种利用微生物发酵的改性方法，以大分子膳食纤维作为微生物的碳源，应用选育的菌种，在一定条件下控制发酵的程度，使膳食纤维的糖苷键断裂，分解为小分子化合物[74]。常用于发酵的微生物包括酵母如酿酒酵母和白色念珠菌，丝状真菌如曲霉属、毛霉属，细菌如乳酸菌属和芽孢杆菌属，这些微生物可帮助纤维素降解以提高营养可用性和消化性，还能提升氨基酸和维生素的含量，降低抗营养因子的含量。Wu 等[75] 研究通过分析发酵前后大豆渣中 DF 含量和理化性质的变化，结果表明，与发酵前相比，发酵后大豆渣中 SDF 含量增加。此外，DF 的持水、持油、膨胀力随着结构的精细而显著增加，更有效地平衡和调节小鼠肠道微生物群。Chu 等[76] 在发酵处理梨渣膳食纤维中，利用安卡红曲霉液体发酵从梨渣中提取膳食纤维，发现 SDF 含量从 7.9 g/100 g 增加到 12.6 g/100 g，平均粒径减小。发酵后 DF 保水、保油和溶胀能力也得到增强。

大量富含可溶性膳食纤维、维生素、矿物质等成分如果渣、豆渣及榨汁残渣等副产物利用率极低，生物改性技术常在这类副产品 DF 改性中发挥着重要作用。生物改性可以显著改善 DF，使 IDF 向 SDF 转变，并增强其功能性。

3.4 联合改性技术

联合改性是指利用两种或多种技术共同作用。常用的联合方法为物理-物理联合、物理-化学联合、物理-生物联合、生物-生物联合。研究发现，与单一改性方法相比，两种或多种技术的联合后表现出更高的 SDF 产量和更好的特性。Zheng 等[77] 采用超微粉碎和纤维素酶水解分别联合羟丙基化、羧甲基化和磷酸盐交联来改善小米麸膳食纤维。与单独超微粉碎和纤维素酶水解相比，三种混合改性更有效地提高了小米麸膳食纤维的可溶性膳食纤维含量、表面积、水溶胀性和黏度。同时表现出最高的大豆油（3.32 g/g）、胆固醇（20.75 mg/g）和胆酸钠（72.04 mg/g）的吸附能力，优异的降血糖特性。Tu 等[78] 利用乳酸菌发酵和动态高压微流化联合处理大豆残渣 DF，发现单独使用发酵 SDF 含量提高 15% 以上，但微生物发酵联合微流化后达到 35% 的 SDF，并且通过这种联合改性的膳食纤维生理活性显著提高。Zhang 等[79] 通过碱结合高速均质进行柑橘 DF 改性，改善了其功能特性。相对于单处理方法，联合处理后水溶胀能力、持水能力显著增强。联合改性破坏了柑橘纤维的结晶区域，形成更粗糙的表面和多孔的内部结构，SDF 的含量提高更为显著。Bu 等[80] 利用纤维素酶-木聚糖酶协同处理联合双螺杆挤压对荞麦麸膳食纤维（BBDF）进行改性发现，协同修饰能够更高效地提升 BBDF 中可溶性膳食纤维的含量，使其从初始的 10.68% 大幅提升至 32.67%，有效增强了 BBDF 的功能特性和益生元活性，表现出最高的葡萄糖和胆固醇吸附能力。联合处理能够有效破坏 BBDF 分子间的相互作用，改变其晶体结构和分子间作用力，从而为功能特性的改善提供了结构层面的解释。利用合适的组合改性方法可以满足多样化的改性需求，实现了优势互补。

4 改性膳食纤维的应用

研究表明，富含膳食纤维的食品对人体有益，不仅能够预防肠道等疾病，还能够调节机体功能[81]。通过改性后的膳食纤维功能性得到改善，已广泛应用于面制品、乳制品和肉制品中。

4.1 面制品中的应用

在健康饮食理念日益普及的今天，面制品作为人们日常饮食的重要组成部分，其营养与健康属性愈发受到关注。目前，已有很多将富含膳食纤维的加工副产物如麦麸、米糠、β-葡聚糖、菊粉等一些生物高聚物等加到面制馒头、面包和饼干中，以提高膳食纤维的摄入量[82]。范美琪等[83] 利用酶法改性超微麦麸制备 SDF 含量较高的麦麸馒头，发现经过改性后的麦麸制备的全麦馒头，与未改性麦麸制备的馒头相比，改性后的麦麸使馒头硬度、咀嚼性显著降低，在质构、比容等方面的品质得到提高，同时延长了产品的货架期。这是因为改性后的麦麸可溶性阿拉伯木聚糖含量增加，与面筋网络之间的氢键相互作用，这种网络结构具备包裹部分淀粉与水分的能力，进而增强面筋的持气性。利用酶的特异性，能高效地将 IDF 转化为 SDF，大幅提高持水性和分子流动性，与淀粉竞争水分和结合位点的能力显著增强，延长货架

期，并使馒头品质得到改善[84]。渠琦等[85]探究了改性甘薯渣膳食纤维对酥性饼干品质的影响，相同条件下实验结果表明，添加改性膳食纤维会使酥性饼干内部结构更疏松，同时酥性饼干的硬度、弹性、咀嚼性增加，饼干更加酥脆，口感更佳。膳食纤维对面制品的消极作用也一直深受关注，通常认为是因膳食纤维的加入对面筋蛋白的稀释作用。但随着研究深入，又发现纤维的加入会使面团吸水率增加，导致面筋在形成过程中可利用的水分减少，影响其品质。除了这些因素外，加工工艺也是一个非常关键的因素，膳食纤维若想在面制品中进一步推进，这些问题的解决尤为关键。

4.2 乳制品中的应用

在乳制品工业里，膳食纤维的应用极为广泛，已经从简单的“营养强化”发展到多功能应用的阶段，它同时扮演着益生元、质构改良剂、脂肪替代品和甜味补偿剂等多重角色。具体产品如酸奶、乳酸菌饮料和奶酪等。通过在饮料、布丁和低脂冰淇淋中分别添加了 4%、4% 和 2% 的可溶性大豆多糖，使这些产品的流变参数和稳定性均有所改善，并且口感更佳[86]。Kumari 等[87]研究了酶改性豌豆皮膳食纤维对酸奶的影响，从质地、流变性、微观结构和感官属性以及益生元潜力方面评估了酸奶的特性。当纤维添加量在 1%~2.5% 时，酸奶凝胶硬度和脱水收缩性降低，内聚性却有所增加。微观结构表明，完整的酪蛋白凝胶在 1.5% 的纤维浓度下均匀配位，这很可能是凝固型酸奶凝胶基质的最佳纤维添加量。此外，离心沉淀率较低(8.04%)，Zeta 电位从−2.56 mV 升至−12.73 mV，改善了其分层现象，离心稳定性提升。该研究还指出这种酶改性豌豆皮膳食纤维在酸奶中具备益生元潜力，有助于改善肠道微生态。同样，通过超声和微波处理的 SDF 加到酸奶中后使其粘度增加，脱水率降低，并表现出更强的稳定性[88]。除酸奶外，在奶油、奶昔等乳制品中，膳食纤维也逐渐崭露头角。随着研究的深入，更多具有独特功能特性的膳食纤维将被发现并应用于乳制品中。

4.3 肉制品中的应用

肉类是高生物价蛋白质、维生素和矿物质的丰富来源，但缺乏膳食纤维，并且含有大量的胆固醇[89]。研究发现，DF 可以在肉制品中作为增量剂、填充剂等，DF 添加到肉制品后，肉制品质地、感官品质和储存稳定性[90]都会得到不同的改善。刘伟兰[91]将麦麸膳食纤维粉添加到肉丸中，改善了肉丸的质构，提高了肉丸的营养价值和功能。Wongkaew 等[92]利用微波辅助提取的芒果皮果胶制备低脂中式干肠，同样发现具有良好的效果，可有效替代中式香肠中的脂肪，在降低生产成本的同时也改善了其品质和营养。Li 等[93]通过模拟胃消化，发现青稞 DF 对脂质氢过氧化物抑制率为 77.4%，对丙二醛(MDA)的抑制率 52.3%。研究结果表明，改性处理可有效破坏 DF 原有的致密结构，使其部分结晶区解聚、分子间作用力减弱，从而促进了原本被包埋的天然抗氧化成分(如多酚类化合物)的释放，并暴露出更多的活性官能团(例如羟基)。这些结构变化增强了膳食纤维的自由基清除能力，可有效中断脂质氧化的链式反应[94]。此外，改性后的膳食纤维其比表面积显著增大，孔隙结构更为发达。这种形态学特征的改变增强了其物理吸附能力，能够通过包埋或吸附作用与肉制品中的游离脂肪酸结合，从而减少脂肪与氧气的接触面积，抑制脂肪氧化。但膳食纤维在肉制品中的应用仍有部分缺点存在，如不同类型膳食纤维对产品性质影响各异，像小麦纤维添加量增加会使香肠硬度上升，而菊粉添加量增加则降低鸡肉肠硬度和内聚性。未来，还需进一步优化其在肉制品中的应用工艺，并且持续探索新型膳食纤维，从特殊植物、微生物或海洋生物中提取的膳食纤维，可能具有独特功能，如更强的抗氧化性、益生元活性或更好的稳定性，具有很强的开发潜能。

4.4 其他食品中的应用

改性 DF 除了应用于面制品、乳制品、肉制品三类传统食品，还广泛应用于其他类食品中。近年来，益生菌饮料越来越受欢迎，具有较高生物活性的发酵 DF 已被广泛应用于饮料中。Voss 等[95]研究了一种新型合成元豆渣饮料，使用益生菌发酵的豆渣饮料在储存过程中始终保持活力，豆渣饮料抗氧化性、ACE(血管紧张素转换酶)抑制活性和无糖异黄酮含量增加，这表明豆渣饮料可能被用作潜在的功能性食品，同时减少农业废弃物的积累。周美辰等[96]通过螺杆挤压制备高膳食纤维多谷物复合代餐粉，当挤出温度为 149 ℃ 时，产品感官评分达到了最高值 97.14，食用口感更佳的同时，还能增强饱腹感，有助于控制总热量摄入。另外，大量研究表明，在婴儿配方奶粉中加入果胶可能是缓解婴儿反流和腹泻的安全策略[97]，果胶已被证明可调节细胞因子的产生、巨噬细胞活性表达，所有这些都有助于其抗炎作用，对早产儿肠道炎症以及患有炎症性肠病(IBD)的儿童和成人十分重要。

改性膳食纤维通过精准的加工技术，正从传统的“粗犷”原料向高附加值、功能化、精准化的健康配料转变。其应用已深入到了功能性如体重管理、血糖调控、肠道微生态平衡，以及保健品、婴幼儿特殊膳食等多个前沿领域。未来的发展将更加依赖于跨学科的合作(食品科学、营养学、微生物组学、材料学等)，通过绿色高效的改性技术以及严格的安全性与功效评价，不断为人类健康和可持续农业发展带来更多可能。

5 总结与展望

当前，膳食纤维改性技术已实现突破性进展。物理、化学及生物方法的协同应用，通常能产生 1+1>2 的叠加改性效果，可精准调控膳食纤维的颗粒

形态与分子结构，进而显著提升其持水性、吸附性及生物活性等核心功能特性。改性处理对膳食纤维结构特征的改变具有多维度性，具体表现为分子量的降低、单糖组成的定向调整及分子链结构的规律性重构等。与之相对应，其理化性质也实现了系统性改善，如形成多孔网状微观结构、增强持水力、持油力和提高热稳定性阈值。同时，改性后的膳食纤维展现出优异的生物活性，包括靶向降血糖活性与胆固醇水平调节活性等，这使得改性膳食纤维在功能性食品开发领域具备不可替代的应用潜力。然而，膳食纤维的开发应用仍面临多重制约。部分膳食纤维存在口感粗糙、功能单一等问题，严重限制了其在食品领域的应用。未来，需从分子层面深化对不同改性技术组合协同作用机制的研究，明确各类改性方法对膳食纤维结构与功能特性影响的内在规律，为实现改性效果的精准调控提供理论支撑。

DF 改性过程中对安全风险的控制尤为重要。物理改性如挤压等高温高压过程可能产生丙烯酰胺等有害物质。化学改性处理过程中使用的强酸强碱，有机溶剂等，若后续纯化（如沉淀、过滤）不彻底，可能导致试剂残留，引起腐蚀消化道或慢性毒性等食品安全隐患。生物改性过程中，若发酵菌种选择不当可能产生有毒的霉菌，或发酵过程控制不严导致杂菌污染，可能产生真菌毒素（如黄曲霉毒素）、生物胺等有害代谢产物。并且商业酶制剂本身可能含有微量微生物代谢残留物、内毒素或致敏性蛋白。依据 GB 14880-2012《食品安全国家标准 食品营养强化剂使用标准》，国家明确规定了可用于食品的膳食纤维来源常见的包括低聚果糖、低聚半乳糖、菊粉、多聚果糖、聚葡萄糖、抗性糊精等。这些物质作为营养强化剂使用时，必须遵循 GB 14880-2012 中规定的使用范围和限量；若作为普通食品原料，则按生产需要适量使用（但需符合相应质量规格标准）。新的膳食纤维成分或采用新工艺（包括改性工艺）生产的膳食纤维，通常需要按照 GB 15193.1-2014《食品安全性毒理学评价程序》进行安全性评估，证明其安全性。

在应用层面，膳食纤维作为一种功能性成分，其开发应用已成为食品科学、营养学及相关交叉领域的研究前沿。在食品加工领域，不溶性膳食纤维的添加量与产品感官品质呈现显著负相关关系，而可溶性膳食纤维对食品感官品质的负面影响则更低。此外，可溶性膳食纤维可在肠道内通过微生物发酵作用，被降解为短链脂肪酸、乳酸等多种对人体健康具有重要生理活性的代谢产物。基于可溶性与不溶性膳食纤维的本质特性差异，二者在开发应用中呈现出差异化的发展方向与价值维度。相较于不溶性膳食纤维，可溶性膳食纤维凭借其优异的水溶性特征，展现出更显著的加工应用潜力。

从基础研究可以看出，膳食纤维有着巨大的发展潜力，但仍存在诸多不足。未来，膳食纤维的发展需构建多维度协同推进体系：一方面，DF 改性过程中存在着安全风险，在 DF 改性中，使用食品级/GRAS（公认安全）菌种与酶制剂、优化工艺参数避免有害物形成，并对终产品进行残留物与毒素的专项监测十分重要；另一方面，拓宽天然膳食纤维获取途径，如微生物、海洋生物等，深入研究改性方法对膳食纤维生物活性的影响，为改性 DF 的生理功能提供理论指导；此外，为更好地将改性 DF 应用于食品工业，要攻克高效、绿色、低成本的工业化改性工艺难题以及参数控制，推动其进一步应用；最后，结合市场需求和消费者偏好，开发多样化、个性化的改性膳食纤维产品尤为重要。

© 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] 寿飞燕, 李刚, 毛樱, 等. 高血压合并 2 型糖尿病患者膳食纤维摄入与糖脂代谢关系的研究进展[J]. 中华高血压杂志, 2024, 32(9): 892−895. [SHOU Feiyan, LI Gang, MAO Ying, et al. Research progress on the relationship between dietary fiber intake and glucose and lipid metabolism in patients with hypertension complicated with type 2 diabetes mellitus[J]. Chinese Journal of Hypertension, 2024, 32(9): 892−895.]

[2] 刘洵. 瓯柑果渣膳食纤维的功能特性及其对高脂饮食小鼠肥胖和肠道菌群的调节作用[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2024. [LIU Xun. Functional properties of dietary fiber from ougan pomace and its regulatory effect on obesity and intestinal flora in high-fat diet mice[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2024.]

[3] 尹立晨. 豆渣膳食纤维的改性及其在酸奶冰淇淋中的应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022. [YIN Lichen. Modification of okara dietary fiber and its application in frozen yogurt[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.]

[4] 刘思雨. 超临界 CO_2 体系辅助酶-超声技术从酱油渣中制备可溶性膳食纤维[J]. 当代化工研究, 2024(21): 188−190. [LIU Siyu. Preparation of soluble dietary fiber soy sauce residue using supercritical CO_2 system aided by enzyme-ultrasonic technology[J]. Modern Chemical Research, 2024(21): 188−190.]

[5] QIAO Congcong, ZENG Fankun, WU Nana, et al. Functional, physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from rice bran with extrusion cooking treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 121: 107057.

[6] HONG C J, CHEN S Y, HSU Y H, et al. Protective effect of fermented okara on the regulation of inflammation, the gut microbiota, and SCFAs production in rats with TNBS-induced colitis[J]. Food Research International, 2022, 157: 111390.

[7] BADER UL AIN H, SAEED F, AHMED A, et al. Improving the physicochemical properties of partially enhanced soluble dietary fiber through innovative techniques: A coherent review[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): e13917.

[8] 吕秉霖, 袁尔东. 膳食纤维的改性及应用[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(3): 78−81. [LÜ Binglin, YUAN Erdong. Modification and application of dietary fiber[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2019, 44(3): 78−81.]

[9] CANTU-JUNGLES T M, ZHANG X W, KAZEM A E, et al.

Microwave treatment enhances human gut microbiota fermentability of isolated insoluble dietary fibers[J]. Food Research International, 2021, 143: 110293.
[10] YAN Ling, LI Tian, LIU Changhong, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding treatment on physicochemical/functional properties of pear pomace and chemical composition of its soluble dietary fibre[J]. LWT, 2019, 107: 171−177.
[11] 邓轶, 叶新山. 聚糖合成驱动的药物发现[J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(8): 2272−2285. [DENG Yi, YE Xinshan. Drug discovery driven by glycan synthesis[J]. Science in China: Chemistry, 2025, 55(8): 2272−2285.]
[12] FALADE E O, KOUAMÉ K J E, ZHU Y Y, et al. A review: Examining the effects of modern extraction techniques on functional and structural properties of cellulose and hemicellulose in Brewer's Spent Grain dietary fiber[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122883.
[13] ZHOU X W, LI W J, MABON R, et al. A critical review on hemicellulose pyrolysis[J]. Energy Technology, 2017, 5(1): 52−79.
[14] MUDGIL D. Chapter 3-the interaction between insoluble and soluble fiber[M]. SAMAAN R A. Dietary Fiber for the Prevention of Cardiovascular Disease. Academic Press. 2017: 35-59.
[15] LIU J, LI X, LI M, et al. Lignin biorefinery: Lignin source, isolation, characterization, and bioconversion[M]. Advances in Bioenergy. Amsterdam: Elsevier, 2022: 211-270.
[16] MA Z, BOYE J I. Research advances on structural characterization of resistant starch and its structure-physiological function relationship: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(7): 1059−1083.
[17] MENSINK M A, FRIJLINK H W, van der VOORT M K, et al. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 130: 405−419.
[18] GAN Jiapan, HUANG Ziyan, YU Qiang, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105549.
[19] 董吉林, 杨媚, 申瑞玲. 不同热处理下燕麦膳食纤维的结构变化及其对胃肠道健康的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(14): 192−195. [DONG Jilin, YANG Mei, SHEN Ruiling. Structure changes of oat dietary fiber during different thermal processing and their effects on gastrointestinal tract health[J]. Food Research and Development, 2017, 38(14): 192−195.]
[20] 李肖肖. 基于肠道菌群探讨羧甲基改性小麦膳食纤维对Ⅱ型糖尿病小鼠的改善作用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022. [LI Xiaoxiao. The effect of carboxymethylated wheat bran dietary fiber on type Ⅱ diabetic mice through gut microbiota[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.]
[21] 朱仁威, 谭沙, 刘庆庆, 等. 不同处理方法对刺梨果渣可溶性膳食纤维结构和体外降脂功能的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 100−107. [ZHU Renwei, TAN Sha, LIU Qingqing, et al. Effects of different treatments on the structure and *in vitro* hypolipidemic function of soluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* tratt pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 100−107.]
[22] 张颖, 王早兰, 王晓宇, 等. 膳食纤维改性方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(2): 399−411. [ZHANG Ying, WANG Zaolan, WANG Xiaoyu, et al. Research progress on modification methods of dietary fiber[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(2): 399−411.]
[23] 温丽华, 郑艺欣, 骆贤亮, 等. 协同改性膳食纤维的方法及其在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(12): 411−420. [WEN Lihua, ZHENG Yixin, LUO Xianliang, et al. Research progress on synergistic modification methods for dietary fiber and the application of modified dietary fiber in food processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 411−420.]
[24] YU Guoyong, BEI Jia, ZHAO Jing, et al. Modification of carrot (*Daucus carota* Linn. var. Sativa Hoffm.) pomace insoluble dietary fiber with complex enzyme method, ultrafine comminution, and high hydrostatic pressure[J]. Food Chemistry, 2018, 257: 333−340.
[25] BENDER A B B, SPERONI C S, MORO K I B, et al. Effects of micronization on dietary fiber composition, physicochemical properties, phenolic compounds, and antioxidant capacity of grape pomace and its dietary fiber concentrate[J]. LWT, 2020, 117: 108652.
[26] ZHAO J, XIE W, CHEN Z, et al. Enhancement of dough processing and steamed bread quality with nodified soybean residue dietary fiber[J]. Foods, 2025, 14(3): 346−346.
[27] YANG Chaoran, SI Jingyu, CHEN Yi, et al. Physicochemical structure and functional properties of soluble dietary fibers obtained by different modification methods from *Mesona chinensis* Benth. residue[J]. Food Research International, 2022, 157: 111489.
[28] GUO Xiaogang, CHEN Kaiyi, CHEN Li, et al. Effects of cold post-fermentation process on microbial diversity and biogenic amines in protease-assisted fermented sufu[J]. Foods, 2025, 14(5): 735.
[29] LIU Na, WANG Yuan, AN Xiaoping, et al. Composition, antioxidant and development-promoting activity of fermentation modified crude polysaccharides from stem and leaves of *Chenopodium album* L[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2024, 11(1): 88.
[30] 游艳芝, 苏萃扬, 张亮, 等. 膳食纤维不同改性技术研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 406−416. [YOU Yanzhi, SU Cuiyang, ZHANG Liang, et al. A review of different modification technologies for dietary fiber[J]. Food Science, 2025, 46(13): 406−416.]
[31] ZHANG Shanying, PAN Yonggui, ZHENG Lili, et al. Application of steam explosion in oil extraction of *Camellia seed* (*Camellia oleifera* Abel.) and evaluation of its physicochemical properties, fatty acid, and antioxidant activities[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(3): 1004−1016.
[32] ZHOU S X, TANG X J, HEGYI F, et al. *In vitro* digestion and fermentation characteristics of soluble dietary fiber from adlay (*Coix lacryma*-jobi L. var. ma-yuen Staft) bran modified by steam explosion[J]. Food Research International, 2024, 192: 114747.
[33] 何晓琴, 刘昕, 李苇舟, 等. 蒸汽爆破处理苦荞麸皮膳食纤维改性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 46−54. [HE Xiaoqin, LIU Xin, LI Weizhou, et al. Modification of dietary fiber from Tartary buckwheat bran by steam explosion[J]. Food Science, 2021, 42(9): 46−54.]
[34] TANG Xinjing, WANG Zhirong, ZHENG Jiong, et al. Physicochemical, structure properties and *in vitro* hypoglycemic activity of soluble dietary fiber from adlay (*Coix lachryma*-jobi L. var. ma-yuen Stapf) bran treated by steam explosion[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1124012.
[35] KONG Feng, ZENG Qinghua, LI Yue, et al. Effect of steam explosion on nutritional components, physicochemical and rheological properties of brown rice powder[J]. Frontiers in Nutrition, 2022,

9：954654.
［36］ 李佳星，赵林伟，乔颍鑫. 小麦麸皮的改性方法及应用研究进展［J］. 现代食品，2021，27(11)：22−24. ［LI Jiaxing, ZHAO Linwei, QIAO Yingxin. Research process on Modi fication of wheat bran［J］. Modern Food，2021，27(11)：22−24.］
［37］ WU Qiong, WU Xinru, WANG Zifei, et al. Fermentation-synergized physical modification：Enhancing physicochemical properties and bioactivities of soluble dietary fiber from peanut shells［J］. Food Chemistry：X，2025，29：102667.
［38］ 宋朝霞，杨振，刘毅，等. 微波改性对小麦麸皮膳食纤维结构和理化性质的影响［J］. 食品科技，2023，48(8)：180−185. ［SONG Zhaoxia, YANG Zhen, LIU Yi, et al. Effects of microwave modification on the structure and physicochemical properties of wheat bran dietary fiber［J］. Food Science and Technology，2023，48(8)：180−185.］
［39］ GUO Qiushan, SUN Dawen, CHENG Junhu, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry［J］. Trends in Food Science & Technology，2017，67：236−247.
［40］ WANG Meng, CHEN Xuanhong, DONG Leichao, et al. Modification of pea dietary fiber by ultrafine grinding and hypoglycemic effect in diabetes mellitus mice［J］. Journal of Food Science，2021，86(4)：1273−1282.
［41］ YANG Renhui, YE Ying, LIU Weiting, et al. Modification of pea dietary fibre by superfine grinding assisted enzymatic modification：Structural, physicochemical, and functional properties［J］. International Journal of Biological Macromolecules，2024，267：131408.
［42］ ZHAO Dingwei, GUO Chenxi, LIU Xuebo, et al. Effects of insoluble dietary fiber from kiwi fruit pomace on the physicochemical properties and sensory characteristics of low-fat pork meatballs［J］. Journal of Food Science and Technology，2021，58(4)：1524−1537.
［43］ WEN Ya, NIU Meng, ZHANG Binjia, et al. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments［J］. LWT，2017，75：344−351.
［44］ YU Xinxin, ZHU Ke, HU Faguang, et al. Effects of ultrasonic treatment on the physicochemical, structural, and functional properties of soluble dietary fiber from coffee peels［J］. Ultrasonics Sonochemistry，2025，114：107247.
［45］ AL FARUQ A, FARAHNAKY A, TORLEY P J, et al. Sustainable approaches to boost soluble dietary fibre in foods：A path to healthier foods［J］. Food Hydrocolloids，2025，162：110880.
［46］ MARTINEZ-SOLANO K C, GARCIA-CARRERA N A, TEJADA-ORTIGOZA V, et al. Ultrasound application for the extraction and modification of fiber-rich by-products［J］. Food Engineering Reviews，2021，13(3)：524−543.
［47］ 牛希，史乾坤，赵城彬，等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响［J］. 食品科学，2020，41(23)：130−136. ［NIU Xi, SHI Qiankun, ZHAO Chengbin, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber［J］. Food Science，2020，41(23)：130−136.］
［48］ HASSAN Z, IMRAN M, AHMAD M H, et al. Ultrasound-assisted modification of insoluble dietary fiber from *Chia*（*Salvia hispanica* L.）seeds［J］. Journal of Food Quality，2021，2021(1)：5035299.
［49］ KALLA-BERTHOLDT A M, BAIER A K, RAUH C. Potential of modification of techno-functional properties and structural characteristics of *Citrus*, apple, oat, and pea dietary fiber by high-intensity ultrasound［J］. Foods，2023，12(19)：3663.
［50］ XUE Zihan, MA Qiqi, GUO Qingwen, et al. Physicochemical and functional properties of extruded dietary fiber from mushroom *Lentinula edodes* residues［J］. Food Bioscience，2019，32：100452.
［51］ QIAO Hanzhen, SHAO Huimin, ZHENG Xiaojing, et al. Modification of sweet potato（*Ipomoea batatas* Lam.）residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion［J］. Food Chemistry，2021，335：127522.
［52］ LUO Xianliang, WANG Qi, FANG Dongya, et al. Modification of insoluble dietary fibers from bamboo shoot shell：Structural characterization and functional properties［J］. International Journal of Biological Macromolecules，2018，120：1461−1467.
［53］ 王淑玉，何大柃，张建才，等. 动态高压微射流对山楂果渣膳食纤维理化和结构特性的影响［J］. 食品科学，2024，45(17)：174−182. ［WANG Shuyu, HE Daling, ZHANG Jiancai, et al. Effect of dynamic high-pressure microjet on physicochemical and structural properties of dietary fiber from hawthorn pomace［J］. Food Science，2024，45(17)：174−182.］
［54］ GANESAN B, et al. Cold plasma technology in food processing：Recent advances and future perspectives［J］. Trends in Food Science & Technology，2021，113：57−70.
［55］ MIR M A, et al. Cold plasma：An emerging technology for food preservation and safety［J］. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2016，56(15)：2426−2440.
［56］ MEHTA D, PUROHIT A, BAJARH P, et al. Cold plasma processing improved the extraction of xylooligosaccharides from dietary fibers of rice and corn bran with enhanced *in-vitro* digestibility and anti-inflammatory responses［J］. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2022，78：103027.
［57］ ZHU Hong, HAN Zhuorui, CHENG Junhu, et al. Modification of cellulose from sugarcane（*Saccharum officinarum*）bagasse pulp by cold plasma：Dissolution, structure and surface chemistry analysis［J］. Food Chemistry，2022，374：131675.
［58］ 代名君. 葛花黄酮不同提取方法工艺优化及其在乳饮料中的应用研究［D］. 长春：吉林农业大学，2016. ［DAI Mingjun. Different technologies for extracting flavonoids from pueraria *Lobata* and its application in milk beverages［D］. Changchun：Jilin Agricultural University，2016.］
［59］ MARTÍNEZ J M, LUENGO E, SALDAÑA G, et al. C-phycocyanin extraction assisted by pulsed electric field from Artrosphira platensis［J］. Food Research International，2017，99：1042−1047.
［60］ ZHANG Zhihong, WANG Langhong, ZENG Xinan, et al. Effect of pulsed electric fields（PEFs）on the pigments extracted from spinach（*Spinacia oleracea* L.）［J］. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2017，43：26−34.
［61］ FAN Rui, WANG Lei, FAN Jingfang, et al. The pulsed electric field assisted-extraction enhanced the yield and the physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel［J］. Frontiers in Nutrition，2022，9：925642.
［62］ 汤洁. 高纤维素酶活菌株发酵联合电脉冲改性酸橙皮膳食纤维及其理化功能活性研究［D］. 南昌：南昌大学，2024. ［TANG Jie. Fermentation of high cellulase-activated bacterial strains combined with electric pulse modification of dietary fibre from *Citrus aurantium* L. and its physicochemical functional activityits［D］. Nanchang：Nanchang University，2024.］
［63］ WANG Lei, FAN Rui, YAN Yanhua, et al. Characterization of the structural, physicochemical, and functional properties of solu-

ble dietary fibers obtained from the peanut shell using different extraction methods[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1103673.
[64] 赵伟, 杨瑞金, 张文斌, 等. 高压脉冲电场对食品中微生物、酶及组分影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2010, 26(3): 153−157. [ZHAO Wei, YANG Ruijin, ZHANG Wenbin, et al. The progress on effects of pulsed electric fields on microorganisms, enzymes and constituents in food[J]. Food and Machinery, 2010, 26(3): 153−157.]
[65] ZHENG Yajun, LI Yan, TIAN Hailong. Effects of carboxymethylation, acidic treatment, hydroxypropylation and heating combined with enzymatic hydrolysis on structural and physicochemical properties of palm kernel expeller dietary fiber[J]. LWT, 2020, 133: 109909.
[66] ZHENG Yajun, TIAN Hailong, LI Yan, et al. Effects of carboxymethylation, hydroxypropylation and dual enzyme hydrolysis combination with heating on physicochemical and functional properties and antioxidant activity of coconut cake dietary fibre[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127688.
[67] KANWAR P, YADAV R B, YADAV B S. Cross-linking, carboxymethylation and hydroxypropylation treatment to sorghum dietary fiber: Effect on physicochemical, micro structural and thermal properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123638.
[68] WANG Kunli, LI Mo, WANG Yuxiao, et al. Effects of extraction methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber extracted from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*)[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106162.
[69] BADER UL AIN H, SAEED F, KHAN M A, et al. Comparative study of chemical treatments in combination with extrusion for the partial conversion of wheat and sorghum insoluble fiber into soluble[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 2059−2067.
[70] ZHANG Yue, QI Junru, ZENG Weiqi, et al. Properties of dietary fiber from *Citrus* obtained through alkaline hydrogen peroxide treatment and homogenization treatment[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 125873.
[71] MA Rui, CHEN Jianan, ZHOU Xuejie, et al. Effect of chemical and enzymatic modifications on the structural and physicochemical properties of dietary fiber from purple turnip (*Brassica rapa* L.)[J]. LWT, 2021, 145: 111313.
[72] 周龙珠, 王朋, 董双, 等. 纤维素酶改性油莎豆粕可溶性膳食纤维结构与功能研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 241−251. [ZHOU Longzhu, WANG Peng, DONG Shuang, et al. Studies on structure and function of cellulase-modified soluble dietary fiber from *Cyperus esculentus* meal[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(7): 241−251.]
[73] SHEN Meng, WANG Weihao, CAO Longkui. Soluble dietary fibers from black soybean hulls: Physical and enzymatic modification, structure, physical properties, and cholesterol binding capacity[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(6): 1668−1674.
[74] 李家洲, 肖玉平, 黄荣林, 等. 发酵佛手瓜渣产膳食纤维的工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2011, 22(2): 193−197. [LI Jiazhou, XIAO Yuping, HUANG Ronglin, et al. Research on production of dietary fiber from chayotes by fermentation[J]. China Food Additives, 2011, 22(2): 193−197.]
[75] WU Li, TANG Chunhong, CHEN Linli, et al. Modified dietary fiber from soybean dregs by fermentation alleviated constipation in mice[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100810.
[76] CHU Zhaolin, LIU Lanhua, MU Dongdong, et al. Research on pear residue dietary fiber and *Monascus* pigments extracted through liquid fermentation[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(7): 4136−4147.
[77] ZHENG Yajun, WANG Xueying, SUN Yue, et al. Effects of ultrafine grinding and cellulase hydrolysis separately combined with hydroxypropylation, carboxymethylation and phosphate crosslinking on the *in vitro* hypoglycaemic and hypolipidaemic properties of millet bran dietary fibre[J]. LWT, 2022, 172: 114210.
[78] TU Zongcai, CHEN Lili, WANG Hui, et al. Effect of fermentation and dynamic high pressure microfluidization on dietary fibre of soybean residue[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3285−3292.
[79] ZHANG Yue, LIAO Jinsong, QI Junru. Functional and structural properties of dietary fiber from *Citrus peel* affected by the alkali combined with high-speed homogenization treatment[J]. LWT, 2020, 128: 109397.
[80] BU Tingting, YU Yue, KONG Xiao, et al. Physicochemical, functional, and *in vitro* fermentation characteristics of buckwheat bran dietary fiber modified by enzymatic extrusion[J]. Foods, 2025, 14(8): 1300.
[81] NIE Qixing, HU Jielun, GAO He, et al. Bioactive dietary fibers selectively promote gut microbiota to exert antidiabetic effects[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(25): 7000−7015.
[82] 师萱, 陈娅, 罗金华. 膳食纤维在焙烤食品中应用[J]. 粮食与油脂, 2009, 22(3): 4−6. [SHI Xuan, CHEN Ya, LUO Jinhua. The application of dietary fiber in baked foods[J]. Journal of Cereals & Oils, 2009, 22(3): 4−6.]
[83] 范美琪, 郝建雄, 赵丹丹. 酶法改性超微麦麸的工艺优化及对馒头品质的影响[J]. 食品科技, 2025, 50(3): 158−164. [FAN Meiqi, HAO Jianxiong, ZHAO Dandan. Optimization of enzymatic modification of ultrafine wheat bran and its influence on the quality of steamed buns[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 158−164.]
[84] 马瑞杰, 温纪平, 徐启恩. 阿拉伯木聚糖(AX)添加量对馒头品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 47−51. [MA Ruijie, WEN Jiping, XU Qien. Effect of addition of Arabinoxylan on the quality of steamed bread[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 47−51.]
[85] 渠琦, 马舒宁, 梁静怡, 等. 酶改性甘薯渣膳食纤维对酥性饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 142−149. [QU Qi, MA Shuning, LIANG Jingyi, et al. Effect of enzyme-modified dietary fiber from sweet potato residue on the quality of cookies[J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 142−149.]
[86] CHEN W P, DUIZER L, CORREDIG M, et al. Addition of soluble soybean polysaccharides to dairy products as a source of dietary fiber[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(6): C478−C484.
[87] KUMARI T, DAS A B, DEKA S C. Effect of enzymatic modified pea peel dietary fibre on syneresis, texture, rheology and microstructural properties of yogurt[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(23): 30001−30013.
[88] DONG Ruihong, LIAO Wang, XIE Jianhua, et al. Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: Microstructure, rheology and storage stability[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102901.
[89] YOUNIS K, YOUSUF O, QADRI O S, et al. Incorporation of soluble dietary fiber in comminuted meat products: Special emphasis on changes in textural properties[J]. Bioactive Carbohy-

drates and Dietary Fibre, 2022, 27: 100288.
［90］ YOUNIS K, AHMAD S, AHMAD M M. Mosambi peel powder incorporation in meat products: Effect on physicochemical properties and shelf life stability[J]. Applied Food Research, 2021, 1(2): 100015.
［91］ 刘伟兰. 麦麸膳食纤维在肉丸中的应用[D]. 广州：华南理工大学, 2011. ［LIU Weilan. The application of wheat bran fiber in meatball[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.］
［92］ WONGKAEW M, SOMMANO S R, TANGPAO T, et al. Mango peel pectin by microwave-assisted extraction and its use as fat replacement in dried Chinese sausage[J]. Foods, 2020, 9(4): 450.
［93］ LI Jinxin, ZHANG Hao, YANG Xijuan, et al. Effect of fiber-bound polyphenols from highland barley on lipid oxidation products of cooked pork during *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 5070−5076.
［94］ 刘学成, 王文亮, 弓志青, 等. 金针菇膳食纤维改性、理化性质及抗氧化、降血脂活性[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 90−98. ［LIU Xuecheng, WANG Wenliang, GONG Zhiqing, et al. Modification, physicochemical properties and lipid-lowering and antioxidant activity of dietary fiber from *Flammulina velutipes*[J]. Food Science, 2021, 42(23): 90−98.］
［95］ VOSS G B, MONTEIRO M J P, JAUREGI P, et al. Functional characterisation and sensory evaluation of a novel synbiotic okara beverage[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127793.
［96］ 周美辰, 李凤林, 禚同友, 等. 高膳食纤维多谷物复合代餐粉工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 39−42. ［ZHOU Meichen, LI Fenglin, ZHUO Tongyou, et al. Study on high dietary fiber and multi-grain compound meal replacement powder process[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(2): 39−42.］
［97］ DONADIO J L S, FABI J P, SZTEIN M B, et al. Dietary fiber pectin: Challenges and potential anti-inflammatory benefits for preterms and newborns[J]. Frontiers in Nutrition, 2024, 10: 1286138.