

麦麸膳食纤维从“副产物”到“功能性配料”的研究进展与产业化路径

黄伟兆, 周立红*

广西中医药大学公共卫生与管理学院预防医学系营养与食品卫生学教研室, 广西 南宁

收稿日期: 2026年1月4日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

麦麸作为小麦加工的关键副产物, 富含膳食纤维, 其高值化利用对于推动农业可持续发展和满足健康食品需求具有重要意义。本文审视麦麸资源化利用对减少农业废弃物、促进循环经济的意义, 同时从公共营养学角度, 探讨其作为功能性配料在慢性病膳食干预中的价值。文章系统综述了通过物理、化学及生物发酵等改性技术破解麦麸致密结构、定向提升可溶性膳食纤维得率与功能活性的研究进展。文章首先解析了麦麸膳食纤维的初始结构特征, 并重点阐述了通过物理、化学及生物发酵等改性技术, 可有效打破其致密结构, 显著提升可溶性膳食纤维的比例与功能活性。改性后的麦麸膳食纤维展现出卓越的理化特性与多元健康功效, 包括调控血糖血脂、改善肠道健康、增强抗氧化及免疫调节能力。在此基础上, 本文进一步探讨了其在不同健康需求人群主食产品中的开发实践与应用潜力, 并分析了产业化过程中面临的技术挑战与未来发展方向, 旨在为麦麸膳食纤维的全面高值化利用提供理论依据与实践参考。综上所述, 麦麸膳食纤维未来产业化成功的关键在于破解改性成本控制、产品风味质构优化以及基于循证营养学的功效标准化评价等核心挑战, 从而打通从实验室研究到规模化市场应用的路径。

关键词

麦麸, 膳食纤维, 副产物, 功能性配料, 健康食品

Research Progress and Industrialization Pathways for Wheat Bran Dietary Fiber from “By-Product” to “Functional Ingredient”

Weizhao Huang, Lihong Zhou*

Teaching and Research Office for Nutrition and Food Hygiene, Department of Preventive Medicine, School of Public Health and Management, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning Guangxi

*通讯作者。

文章引用: 黄伟兆, 周立红. 麦麸膳食纤维从“副产物”到“功能性配料”的研究进展与产业化路径[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(2): 121-130. DOI: 10.12677/hjfn.2026.152014

Abstract

As a key by-product of wheat processing, wheat bran is rich in dietary fiber. Its high-value utilization is of significant importance for promoting sustainable agricultural development and meeting the demand for healthy foods. This review examines the role of wheat bran resource utilization in reducing agricultural waste and fostering a circular economy, while also exploring its value as a functional ingredient for dietary intervention in chronic diseases from a public nutrition standpoint. The article systematically reviews the research progress on breaking down the compact structure of wheat bran and directionally enhancing the yield and functional activity of soluble dietary fiber through modification techniques such as physical, chemical, and biological fermentation. The article first analyzes the initial structural characteristics of wheat bran dietary fiber, and focuses on elaborating how modification techniques such as physical, chemical, and biological fermentation can effectively break down its compact structure and significantly increase the proportion and functional activity of soluble dietary fiber. After modification, wheat bran dietary fiber demonstrates excellent physicochemical properties and diverse health benefits, including the regulation of blood glucose and lipid levels, improvement of intestinal health, and enhancement of antioxidant and immunomodulatory capacities. Furthermore, this review discusses its development and application potential in staple food products tailored to populations with different health needs, analyzes the technical challenges encountered during industrialization, and outlines future development directions. The aim is to provide both a theoretical foundation and practical references for the comprehensive high-value utilization of wheat bran dietary fiber. In conclusion, the key to successful industrialization of wheat bran lies in addressing core challenges such as controlling modification costs, optimizing product flavor and texture, and establishing standardized efficacy evaluations based on evidence-based nutrition, thereby bridging the path from laboratory research to large-scale market application.

Keywords

Wheat Bran, Dietary Fiber, By-Product, Functional Ingredient, Health Food

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

麦麸, 作为小麦加工的主要副产物, 富含膳食纤维(dietary fiber, DF), 但其高值化利用一直是产业痛点[1]。近年来, 通过深入的结构解析、功能特性挖掘及精准的终端产品开发, 麦麸膳食纤维正展现出巨大的潜力, 有望从廉价的饲料原料转型为高附加值的功能性食品配料[2]。麦麸的高值化利用, 不仅关乎农业生产链的资源效率与环境污染压力, 还关乎能否为日益增长的慢性病预防需求提供经济有效的膳食解决方案[3]。全球范围内对可持续与循环经济的倡导, 使得农业副产物的资源化利用成为研究热点。与此同时, 消费者对健康饮食的关注促使市场对天然、具有明确健康益处的功能性配料需求激增[4]。然而, 从麦麸到健康食品的转型过程仍面临关键挑战, 如植酸不仅影响矿物质吸收, 其涩味也影响产品口感; 而木质化结构是导致口感粗糙、SDF 溶出率低的主因。对麸皮中植酸等抗营养因子的高效去除、膳食纤维口感与溶解性的改良, 以及在大规模生产中保持其功能活性的稳定性就显得极为重要[5] [6]。因此, 系

统梳理从基础研究到产业应用的知识体系显得尤为重要。本文旨在从结构基础、功能特性、产品创新及健康作用机制四个维度, 系统阐述该领域的最新进展, 并辨析其产业化路径中的关键技术瓶颈与未来发展方向, 以期为推动麦麸膳食纤维的全面高值化提供理论框架与实践参考。本文首先解析结构本底, 进而阐明通过改性如何赋能其功能, 然后探讨如何将功能化配料转化为针对特定人群的可接受主食, 最后在总结全篇基础上, 从产学研融合角度展望产业化路径。

2. 麦麸膳食纤维的结构解析与改性增效

2.1. 麦麸膳食纤维种类与初始构成

在初始构成上, 麦麸是一个复杂的异质体系, 主要由最外层的果皮、中层的种皮和糊粉层, 及胚芽和部分胚乳组成[7]。其中, 糊粉层富含蛋白质、维生素和矿物质, 营养价值极高。其核心成分是膳食纤维, 总膳食纤维含量高达 35%~50% [8], 但其天然组成以不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)为主, 占比可达 90%以上, 而可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量较低, 仅占 2%~5% [9] [10]。这种“高 IDF, 低 SDF”的结构限制了其功能特性和应用口感, 是其实现高值化转化的物质基础。通过调节可溶性/不溶性麦麸膳食纤维配比设计食品基质结构, 可以得到某些益处, 比如减轻对小麦蛋白消化的抑制作用[11]。这种初始结构决定了天然麦麸纤维虽具有增加粪便体积等基本物理作用, 但在调节糖脂代谢、肠道菌群等需要高度微生物可及性与溶解性的高级生理功能方面受限。

2.2. 麦麸膳食纤维结构解析

研究普遍采用扫描电镜、傅里叶变换红外光谱、X-射线衍射等技术对麦麸 DF 结构进行表征[12]。未改性的 IDF 结构致密、表面光滑[13]。通过改性, 其结构可转变为疏松、多孔、无序的蜂窝状或网状结构, 结晶度降低, 比表面积增大, 这是其功能增强的结构基础[9] [10] [13]。

2.3. 麦麸膳食纤维改性技术提升 SDF 比例与功能

为了提高 SDF 含量和改善功能性, 物理、化学、生物及联合改性技术被广泛应用[14]。

2.3.1. 生物发酵法(微生物/酶法)

这是目前研究最多、效果显著且绿色的改性方法。利用棘孢木霉[15]、好食脉孢霉[16]、纳豆芽孢杆菌[17]、乳酸菌及酵母菌等发酵[18], 能有效降解 IDF。例如, 棘孢木霉发酵使 SDF 得率从 6.25%提高至 22.38% [15]; 超声辅助发酵工艺可使 SDF 得率达到 25.78% [19], 纳豆芽孢杆菌发酵后, 可溶性膳食纤维(SDF)含量增加 92.0% [20]。

2.3.2. 物理/化学法

挤压膨化、蒸汽爆破、超微粉碎、碱性过氧化氢、感应电场等技术也能有效破坏纤维结构, 提高 SDF 含量和理化性质[10] [13] [21] [22]。例如, 超微粉碎后麦麸 DF 的持水力和持油性显著改善[21]。通过适宜的改性技术, 麦麸 DF 实现了从“致密 IDF”到“高活性 SDF”的结构转变, SDF 占比可提升数倍, 为其功能特性的飞跃奠定了基础[9] [10] [12]。

2.3.3. 不同改性技术的营养学特性比较与选择

生物发酵法在提升 SDF 的同时, 常伴随益生菌代谢产物的积累, 可能协同增强益生元效果; 物理法则能较好保持纤维的宏观物理特性(如持水性), 对于开发缓解便秘的产品更具优势。在选择改性技术时, 需综合考虑目标健康功效、成本及对食品基质最终风味的影响。

3. 麦麸膳食纤维的核心功能特性解析

改性后的麦麸 DF, 尤其是 SDF, 展现出卓越的多功能特性, 具有降血糖、降血脂和改善肠道健康等功能, 是其作为功能性配料的核心价值所在[23]。其健康效益主要通过三大机制实现: 物理机制、化学与生化机制以及微生态机制。

3.1. 优异的理化特性

改性后的麦麸 DF 持水力、持油性、膨胀力、溶解性均显著提升[9] [10] [13]。这些特性有助于改善食品品质、增强饱腹感, 并在体内结合油脂, 对于控制体重和血脂有积极意义。Lyly 等以 19 名 18~30 岁健康志愿者为对象, 对比含瓜尔胶、麦麸、燕麦 β -葡聚糖三种不同理化性质膳食纤维的饮料、无纤维饮料及全麦面包, 通过 10 分量表测量 120 分钟内饱腹感等相关属性, 麦麸饮料的饱腹感曲线下面积(area under the curve, AUC)高于无纤维饮料, 麦麸饮料的饱腹感曲线下面积虽略高于无纤维饮料, 但在此样本量下未达到统计学显著水平($P=0.085$), 其饱腹效应有待更大规模研究确认[24]。其持水持油性对于延缓胃排空、增加食糜粘度有直接贡献, 这是饱腹感的物理基础。麦麸可以稳定维生素 A (棕榈酸视黄酯), 使棕榈酸视黄酯/油/麸皮混合物成为食品强化的有趣添加剂, 乳化(12%~45%)的维生素 A 生物可及性高于散装油基系统(6%~9%), 原因在于乳化(82%~83%)的脂质消化比散装油基系统(56%~59%)更广泛[25]。

3.2. 调控血糖代谢

麦麸可以通过抑制消化酶活性、吸附葡萄糖与延缓扩散、影响淀粉消化行为等机制调节血糖代谢。麦麸 SDF 对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶具有可逆的竞争性抑制作用, 能有效延缓淀粉的分解与吸收[26]-[28]。SDF 能直接吸附葡萄糖, 并形成扩散屏障, 使葡萄糖透析延迟率最高可达 88% [2]。添加麦麸 DF 可提升食品中抗性淀粉(resistant starch, RS)的比例(提升 20%), 并显著降低面条等主食的淀粉水解率和预估血糖生成率(expected glycemic index, EGI) [2] [28] [29]。动物实验和体外试验均证实, 摄入麦麸 DF 可显著降低餐后血糖峰值和糖化血清蛋白水平[27] [30]。其延缓葡萄糖吸收的作用, 与后续在肠道中作为发酵底物产生短链脂肪酸(short chain fatty acids, SCFAs)的机制相衔接, 而丙酸已被证明具有参与肝糖异生、调节食欲的全身性效应。

3.3. 调节血脂代谢

麦麸 DF, 特别是改性后的 SDF, 对胆固醇、胆酸钠具有较强的吸附能力[2] [13]。这种吸附作用在模拟胃肠环境下均能稳定发挥, 将胆固醇代谢为胆汁酸, 降低血清总胆固醇和甘油三酯的效果[10] [31]。色氨酸代谢已被证明参与各种代谢疾病的发病机制[32]-[34], 在 Yan 的一项研究中发现, 而麦麸增加了促进健康的细菌(如阿克曼氏菌和乳酸杆菌)的丰度, 这些细菌与色氨酸衍生的吲哚代谢物显著相关, 这种调节作用伴随着空腹血糖和总甘油三酯的降低[35]。

3.4. 改善肠道健康与调节菌群

益生元特性是麦麸 DF 最受关注的功能之一, 包括促进 SCFAs 产生、优化肠道菌群结构和缓解便秘与结肠炎等机制[36]。体外发酵实验表明, 麦麸 DF 能被肠道微生物发酵, 产生大量的乙酸、丙酸、丁酸等 SCFAs, 降低肠道 pH 值, 营造健康的肠道环境[37] [38]。麦麸 DF 能显著增加有益菌的相对丰度, 同时抑制有害菌的生长[39]。发酵改性后的麦麸 DF 对菌群的调节作用更为显著[27] [39]。动物实验证实, 麦麸 DF 能提高便秘小鼠的粪便含水率和排便量, 缩短首粒黑便排出时间[10]。同时, 它可通过上调抗炎因子(IL-10)、下调促炎因子(IL-6, TNF- α , IL-1 β)水平, 有效缓解 DSS 诱导的结肠炎[10]。

麦麸 SDF 中阿拉伯木聚糖(Arabinoxylan, AX)的精细结构(如阿魏酸修饰、侧链取代度、分子量分布)直接影响其益生元特异性[40] [41]。例如, 低分子量、低取代度的 AX 更容易被双歧杆菌和乳酸菌利用, 通过其糖苷水解酶和酯酶系统降解为阿拉伯寡糖和阿魏酸, 进而促进短链脂肪酸的生成[42]。此外, 有研究发现, 当使用自制的麦麸 AX 为碳源发酵液可以显著上调益生菌乳酸杆菌属和副拟杆菌属相对丰度, 对脂肪肝小鼠具有缓解作用; 通过粪便代谢组学技术分析可以发现, 其主要是通过参与精氨酸和脯氨酸代谢等信号通路来调节脂代谢[43]。因此, 通过改性调控 SDF 的精细结构, 可实现对其益生元功能的“定向设计”, 满足不同肠道微生态人群的需求。

3.5. 增强抗氧化与免疫活性

发酵和改性过程能通过微生物酶解或物理化学手段, 有效破坏麦麸致密的细胞壁结构[44], 从而释放并结合更多的酚类物质, 这些被解放的酚类物质作为天然的电子供体, 使麦麸 DF 具备显著的 DPPH、ABTS+、羟基自由基清除能力[9] [10] [13] [45]。此外, 研究表明改性后的 SDF 能激活巨噬细胞 RAW264.7, 促进 NO、超氧化物歧化酶等免疫因子的分泌, 展现出良好的免疫调节潜力[13]。这不仅强化了机体的氧化防御系统, 更通过调节先天免疫应答, 展现了其在功能性食品和免疫佐剂方面的巨大应用潜力。

4. 针对不同人群的主食产品开发与实践

基于上述功能, 麦麸 DF 可精准应用于不同健康需求的主食开发中。首先, 需明确目标人群的核心健康诉求(如控糖、降脂、通便), 进而选择面条、馒头、饼干等适宜的主食载体。在技术实践中, 关键在于通过各种手段, 解决高纤维添加带来的质构劣化与口感粗糙问题, 以平衡健康功能与消费接受度。如在 Büşra Solmaz 的研究中, 采用微波与高压灭菌等稳定化处理能有效提升麸皮饼干的抗氧化活性与矿物质含量, 并优化膳食纤维组成, 为开发高附加值功能性烘焙产品提供了可行路径[46]。过去的经验表明, 单纯追求高添加量往往以牺牲感官品质为代价, 导致市场接受度低。在 David Zeevi 的研究中, 他们团队在 800 人队列中连续监测了为期一周的血糖水平, 测量了对 46,898 顿饭的反应, 并发现对相同膳食的反应存在很大差异, 这表明通用饮食建议的效用可能有限[47]。未来的开发方向应更侧重于精准营养设计, 即根据不同人群的肠道菌群特征与代谢表型, 定制化开发特定结构的麦麸 DF 配料, 能够掩蔽不良风味, 实现“美味与健康”的统一(表 1)。将麦麸纤维融入主食面临高添加量与优良感官品质的冲突, 应对策略包括(1) 前处理: 采用发酵、酶解或超微粉碎预处理, 改善纤维口感; (2) 配方复配: 与亲水胶体或某些蛋白质复配, 改善质构; (3) 工艺优化: 如采用低温长时间发酵来软化麸皮质地。从社会经济价值看, 麦麸

Table 1. Development and implementation of wheat bran-supplemented staple food products tailored for different populations
表 1. 针对不同人群的添加麦麸主食产品开发与实践

目标人群	核心健康诉求	主食载体开发	关键技术要点与功效验证	特异性作用机制
糖尿病患者/血糖异常人群	控制餐后血糖, 提高胰岛素敏感性	低 GI 面条[28] [29]、高纤馒头[48]-[50]、全麦/高纤饼干[51] [52]	添加量: 面条中 SDF 或发酵麦麸添加量 6%~10%可显著降低 eGI [28] [29]。 功效: 临床与动物实验证实可有效降低餐后血糖和胰岛素抵抗[30] [53]。	AX 代谢产物某些产物可调节肠道菌群和激活肠-脑轴, 如丁酸可以抑制小胶质细胞活化, 减少 β 淀粉样蛋白的沉积, 改善患者认知功能, 这对肥胖和胰岛素抵抗相关的神经炎症具有潜在的保护作用[54]。
心脑血管疾病风险人群	降低胆固醇, 控制体重	高纤馒头[48]、发酵挂面[55]、膳食纤维饮料[2]	功能验证: 产品具备优异的胆固醇、胆酸盐吸附能力[2] [16]。协同作用: 与燕麦、菊粉等复配, 增强降脂效果[51]。	AX 可以通过降低胆汁酸通过肠道的时间, 不仅能减少胆汁酸与结肠细胞的接触, 还能促进胆固醇排泄[56]。

续表

便秘及肠道功能紊乱人群	润肠通便, 改善肠道菌群	发酵面制品(酸面团馒头/面包) [48]-[50]、高纤饼干[10] [51]、膳食纤维咀嚼片[57] [58]	技术: 酸面团发酵技术可有效改善高纤馒头质构, 提升接受度[48] [49]。 功效: 动物实验证明其通便、调节菌群、抗结肠炎效果明确[10]。	低分支度 AX 更易被双歧杆菌利用[59], 产生丙酸与乙酸, 从而降低肠道 pH, 抑制致病菌[60]。
追求均衡营养与免疫提升的大众	补充膳食纤维, 增强免疫力	强化纤维的日常主食(面包、面条、饼干) [29] [51] [52]、发酵乳[61]	添加策略: 通过酶改性或超微粉碎, 在保证口感的前提下将总添加量提升至 18% [29]。 功能: 产品兼具抗氧化和免疫激活潜力[13] [61]。	β -葡聚糖可以通过激活自然杀伤细胞、巨噬细胞和 T 淋巴细胞的免疫活性, 诱导细胞因子分泌并调控补体级联反应, 增强人体免疫力[62] [63]。

DF 的高值化利用不仅能直接提升小麦加工副产物的经济回报, 变“废”为宝, 契合循环经济与可持续发展理念, 更能催生一系列具有明确健康声称的功能性主食产品, 满足消费升级需求, 创造新的市场增长点。在社会效益层面, 其推广有助于改善国民膳食纤维摄入不足的现状, 为预防和控制糖尿病、心脑血管疾病等慢性病提供有效的膳食干预策略, 潜在降低公共医疗支出, 具有重大的公共卫生意义。

尽管当前产品开发仍多以人群分类为基础, 但未来趋势是向“精准营养”迈进, 即未来麦麸纤维产品的开发应走向“结构导向型精准设计”。基于宏基因组学与代谢组学证据, 可识别不同人群肠道菌群对 SDF 结构的响应特征。例如, 2 型糖尿病患者肠道中普氏菌丰度较高[64], 其对 AX 的利用能力较强, 可设计高 AX 含量的发酵麦麸产品[65]; 而肥胖人群肠道中拟杆菌属对低分支度 AX 响应更佳, 可通过酶法改性实现定向修饰[59] [66]。此类“结构-菌群-功能”三元联动的研究, 将推动麦麸纤维从“泛功能配料”迈向“个性化营养干预工具”。

5. 总结与展望

麦麸膳食纤维已不再是简单的“粗纤维”, 通过现代食品技术赋能, 它已成为一种结构明确、功能多样、应用前景广阔的战略性功能配料。从“高 IDF”到“高 SDF”的结构转变, 是其持水、吸附、益生元等核心功能实现跃升的关键。针对面条、馒头、饼干等主流主食, 已探索出通过发酵、酶解、复配等工艺解决质构劣化问题的有效方案, 为产业化提供了技术支撑。在调控血糖血脂、优化肠道菌群、润肠通便、抗氧化免疫等方面形成了从体外、动物到人体的较为完整的科学证据链。未来研究可以聚焦其对全身多器官系统影响的全面评估[67]-[69]。

膳食纤维的健康功效已经明确[70]-[76]。为推动麦麸纤维的全面产业化, 未来研究开发应着力于精准营养、风味与质构突破和标准化与法规等方面。深化不同结构 DF 与特定健康结局(如特定菌群、免疫指标)的构效关系研究[77], 实现“定制化”配料开发。继续攻关高添加量下的口感与风味问题, 开发更易被消费者接受的美味健康产品。建立改性麦麸 DF 的质量标准、安全性与功效评价规范, 为市场准入和消费者信任奠定基础。除了工业化应用, 改性的麦麸 DF 还可以作为一种日常烹饪原料发挥其健康功效[78]。通过跨学科的持续创新与产业链协同, 麦麸膳食纤维必将成功实现从“副产物”到“黄金配料”的华丽转身, 为全民健康膳食和粮食副产物高值化利用创造巨大价值。

基金项目

广西中医药大学校级重点项目(2021ZD004)。

参考文献

[1] 梁伟. 基于固态发酵的麦麸膳食纤维性质改善及其对面团品质的调控机制研究[D]: [博士学位论文]. 咸阳: 西北

- 农林科技大学, 2025.
- [2] 厉芝, 张婷, 孙杰, 等. 酶-酸协同法提取小麦麸皮可溶性膳食纤维及其高纤饮料的创制[J/OL]. 食品工业科技: 1-20. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025050246>, 2026-01-08.
 - [3] 黄金连, 周立红. 环境营养学研究进展[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(1): 101-109.
 - [4] 蔡万豪, 代正阳, 吴文旋, 等. 乳酸菌对甘蔗渣青贮品质的影响及青贮甘蔗渣饲喂效果研究[J]. 中国畜牧杂志, 2026, 62(1): 274-279.
 - [5] 宋云飞, 王瑞虎, 张璐, 等. 过热蒸汽处理对小麦及其加工副产物质量安全影响研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业: 1-11. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.044127>, 2026-01-08.
 - [6] 高健耘. 十种药用真菌固态发酵对谷物营养成分的改善[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 辽宁大学, 2023.
 - [7] 张淑贤, 许涛, 张乐天, 等. 体外两步法和体内法评价驴不同 CHO-FS/NFC 比例饲粮及 8 种饲料原料干物质降解率及发酵参数[J/OL]. 经济动物学报: 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/22.1258.S.20241227.1859.002>, 2026-01-08.
 - [8] 杭志奇, 韩清波, 许景松. 麦麸膳食纤维的研制[J]. 食品工业, 2011, 32(1): 16-19.
 - [9] 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/OL]. 食品工业科技: 1-17. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070206>, 2026-01-08.
 - [10] 樊朵朵. 麦麸膳食纤维的改性及其功能特性研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
 - [11] Zhang, L., Jiang, Q., Sun, B., Wang, X. and Ma, S. (2025) Designing Food Matrix Structure by Adjusting the Ratio of Soluble/Insoluble Wheat Bran Dietary Fiber to Mitigate the Inhibition on Wheat Protein Digestion: Application in Noodles. *Food Chemistry*, **487**, Article 44773. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144773>
 - [12] 张梦云. 麦麸膳食纤维的改性和应用及其对乳酸菌的益生效应[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
 - [13] 王珊珊. 棘孢木霉发酵提高麦麸可溶性膳食纤维及其功能特性研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2024.
 - [14] 吴庆峰. 改性麦麸对面饼品质的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
 - [15] 庞伟, 韩新新, 王珊珊, 等. 棘孢木霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维工艺优化[J/OL]. 天津科技大学学报: 1-8. <https://doi.org/10.13364/j.issn.1672-6510.20250008>, 2026-01-08.
 - [16] 赵文亮, 陈从雯, 熊玲, 等. 超声辅助发酵麦麸可溶膳食纤维工艺优化及功能研究[J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 152-165.
 - [17] 张鑫, 包新新, 庞锦睿, 等. 膳食纤维改性及应用研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(12): 225-231.
 - [18] 李佳洋, 符晨星, 王芳, 等. 发酵小麦麸的营养特性及其在动物生产中应用的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(11): 93-101.
 - [19] 赵文亮, 陈从雯, 熊玲, 等. 超声辅助发酵制备麦麸可溶性膳食纤维的工艺优化及结构功能研究[J/OL]. 中国食品学报: 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/11.4528.TS.20250612.1553.014>, 2026-01-08.
 - [20] Zhang, S., Wang, A., Lu, Z., Lu, F. and Zhao, H. (2024) Fermentation of Millet Bran with *bacillus Natto*: Enhancement of Bioactivity Levels and the Bioactivity of Bran Extract. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **104**, 6196-6207. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13455>
 - [21] 王磊, 廖晨, 孟哲, 等. 改性麦麸膳食纤维功能和结构特性研究[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(7): 179-181.
 - [22] 陶春生, 陈存社, 王克俭. 挤压改性麦麸膳食纤维对面条品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(9): 132-136.
 - [23] Chaichoompu, E., Ruengphayak, S., Wattananitchakorn, S., Wansuksri, R., Yonkoksung, U., Suklaew, P.O., *et al.* (2024) Development of Whole-Grain Rice Lines Exhibiting Low and Intermediate Glycemic Index with Decreased Amylose Content. *Foods*, **13**, Article 3627. <https://doi.org/10.3390/foods13223627>
 - [24] Lyly, M., Liukkonen, K., Salmenkallio-Marttila, M., Karhunen, L., Poutanen, K. and Lahteenmaki, L. (2009) Fibre in Beverages Can Enhance Perceived Satiety. *European Journal of Nutrition*, **48**, 251-258. <https://doi.org/10.1007/s00394-009-0009-y>
 - [25] Van Wayenbergh, E., Verkempinck, S.H.E., Courtin, C.M. and Grauwet, T. (2025) The Impact of Wheat Bran on Vitamin A Bioaccessibility in Lipid-Containing Systems. *Food Chemistry*, **490**, Article 145082. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.145082>
 - [26] 张逢温, 杨文丹, 张宾乐, 等. 发酵麦麸对面包膳食纤维组成及烘焙特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 1-6+11.
 - [27] 郭瑞芳. 麦麸可溶性膳食纤维对挂面消化特性及肠道菌群的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.

- [28] 郭瑞芳, 周站杰, 周雨轩, 等. 麦麸可溶性膳食纤维挂面对肠道菌群的影响[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 139-144+162.
- [29] 许锐. 酶改性麦麸及其在高膳食纤维面条制作中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
- [30] 赵雪, 吕晓玲, 李静, 等. 两种麦麸可溶性膳食纤维对 BALB/c 小鼠通便功能的影响[J]. 中国食品添加剂, 2016(3): 98-102.
- [31] Jan, B., Basist, P., Mohapatra, S., Khan, M.U. and Choudhary, B. (2025) Dietary Fiber: A Comprehensive Review of Its Sources, Health Benefits, and Mechanisms Driving Nutraceutical Effects. *Recent Advances in Food, Nutrition & Agriculture*, **16**, e2772574X378014. <https://doi.org/10.2174/012772574x378014250727175222>
- [32] Gabela, A.M., Mthembu, N. and Hadebe, S. (2026) Tryptophan Metabolism in Health and Disease- Implications for Non-Communicable Diseases. *Immunology Letters*, **277**, Article 107093. <https://doi.org/10.1016/j.imlet.2025.107093>
- [33] Luo, Z., Liu, Y., Wang, X., Fan, F., Yang, Z. and Luo, D. (2024) Exploring Tryptophan Metabolism: The Transition from Disturbed Balance to Diagnostic and Therapeutic Potential in Metabolic Diseases. *Biochemical Pharmacology*, **230**, Article 116554. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2024.116554>
- [34] Niu, B., Pan, T., Xiao, Y., Wang, H., Zhu, J., Tian, F., *et al.* (2024) The Therapeutic Potential of Dietary Intervention: Based on the Mechanism of a Tryptophan Derivative-Indole Propionic Acid on Metabolic Disorders. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **65**, 1729-1748. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2299744>
- [35] Yan, T., Shi, L., Liu, T., Zhang, X., Yang, M., Peng, W., *et al.* (2023) Diet-Rich in Wheat Bran Modulates Tryptophan Metabolism and Ahr/IL-22 Signalling Mediated Metabolic Health and Gut Dysbacteriosis: A Novel Prebiotic-Like Activity of Wheat Bran. *Food Research International*, **163**, Article 112179. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112179>
- [36] Fu, Y., Wang, Y., Zhang, J., Ren, J. and Fang, B. (2025) Prebiotic Structural Diversity Shapes Gut Microbial Diversity, Community Composition, and Metabolic Activity *in Vitro*. *Foods*, **14**, Article 3774. <https://doi.org/10.3390/foods14213774>
- [37] 张静雯, 刘芮杉, 申瑞玲, 等. 麦麸膳食纤维多酚复合物的理化性质和发酵特性研究[J]. 河南农业科学, 2025, 54(10): 171-179.
- [38] 周站杰. 发酵麦麸膳食纤维对挂面消化特性及肠道菌群的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
- [39] 周站杰, 郭瑞芳, 何宇坤, 等. 白腐菌发酵麦麸膳食纤维对肠道菌群的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2025, 46(2): 79-86.
- [40] 刘非凡, 徐森, 展小彬, 等. 弱碱性电解水润麦对小麦表面微生物及水分分布的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 128-137.
- [41] 郭萌萌. 阿拉伯木聚糖在啤酒酿造中的变化[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [42] Müller, M., Hermes, G.D.A., Emanuel E., C., Holst, J.J., Zoetendal, E.G., Smidt, H., *et al.* (2020) Effect of Wheat Bran Derived Prebiotic Supplementation on Gastrointestinal Transit, Gut Microbiota, and Metabolic Health: A Randomized Controlled Trial in Healthy Adults with a Slow Gut Transit. *Gut Microbes*, **12**, Article 1704141. <https://doi.org/10.1080/19490976.2019.1704141>
- [43] 冯国莹. 麦麸阿拉伯木聚糖功能评价及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2025.
- [44] Khashaba, R.A., Lou, H., Gu, Z., Omer, S.H.S., Wang, X. and Zhao, R. (2025) Enhancing Wheat Bran Quality: Comparing the Effects of Conventional Thermal Processing and Microwave-Assisted Hydrolysis. *Food Chemistry*, **489**, Article 144984. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.144984>
- [45] Li, Y., Chen, X., Wang, G., Xu, L., Liu, Y., Yuan, C., *et al.* (2025) The Release Patterns and Potential Prebiotic Characteristics of Soluble and Insoluble Dietary Fiber-Bound Polyphenols from Pinot Noir Grape Pomace *in Vitro* Digestion and Fermentation. *Food Chemistry: X*, **29**, Article 102694. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102694>
- [46] Solmaz, B., Levent, H. and Şahin, N. (2025) The Influence of Various Cereal Brans, Stabilized through Hot Air, Microwave, and Autoclave Methods, on the Physicochemical Properties of Cookies. *Food Science & Nutrition*, **13**, e70328. <https://doi.org/10.1002/fsn3.70328>
- [47] Zeevi, D., Korem, T., Zmora, N., Israeli, D., Rothschild, D., Weinberger, A., *et al.* (2015) Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses. *Cell*, **163**, 1079-1094. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.11.001>
- [48] 王晓. 酸面团发酵对麦麸膳食纤维馒头品质的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2025.
- [49] 黄芮. 混菌固态发酵麦麸膳食纤维对馒头品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南工业大学, 2024.
- [50] 许锐, 李闻, 秦韶爽, 等. 酶法改性对麦麸膳食纤维及面团品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 460-469.
- [51] 谢贵各, 桑振亮, 冯桂宝, 等. 利用菊粉与改性麦麸制作高膳食纤维营养饼干的研究[J]. 食品与发酵科技, 2023,

- 59(6): 96-102.
- [52] 郑绍达. 响应面法在麦麸膳食纤维饼干研制中的应用[J]. 农产品加工, 2016(6): 12-16.
- [53] 闫晓光. 挤压处理麦麸提取膳食纤维的工艺及性质研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [54] Lim, S.H., Kim, M.J. and Lee, J. (2019) Intake of Psyllium Seed Husk Reduces White Matter Damage in a Rat Model of Chronic Cerebral Hypoperfusion. *Nutrition Research*, **67**, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2019.04.002>
- [55] 宁恒, 马森, 李力. 麦麸膳食纤维对发酵挂面品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 115-122.
- [56] 袁小平, 王静, 姚惠源. 小麦麸皮阿魏酰低聚糖对红细胞氧化性溶血抑制作用的研究[J]. 中国粮油学报, 2005(1): 13-16.
- [57] 汤葆莎, 赖谱富, 吴俐, 等. 秀珍菇麦麸膳食纤维咀嚼片粉末直接压片工艺参数优化[J]. 福建农业学报, 2018, 33(9): 969-974.
- [58] 汤葆莎, 赖谱富, 吴俐, 等. 麦麸膳食纤维咀嚼片配方优化及其体外抗氧化能力[J]. 食品科学, 2017, 38(24): 171-176.
- [59] Hald, S., Schioldan, A.G., Moore, M.E., Dige, A., Lærke, H.N., Agnholt, J., *et al.* (2016) Effects of Arabinoxylan and Resistant Starch on Intestinal Microbiota and Short-Chain Fatty Acids in Subjects with Metabolic Syndrome: A Randomized Crossover Study. *PLOS ONE*, **11**, e0159223. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159223>
- [60] Hopkins, M.J., Englyst, H.N., Macfarlane, S., Furrie, E., Macfarlane, G.T. and McBain, A.J. (2003) Degradation of Cross-Linked and Non-Cross-Linked Arabinoxylans by the Intestinal Microbiota in Children. *Applied and Environmental Microbiology*, **69**, 6354-6360. <https://doi.org/10.1128/aem.69.11.6354-6360.2003>
- [61] 吴丽萍, 孙虹, 董康珍, 等. 改性燕麦麸水溶性膳食纤维对发酵乳品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(9): 40-49.
- [62] 武文豪, 黄鸿灿, 徐应霞, 等. 功能性宠物食品研究进展[J]. 经济动物学报, 2025, 29(1): 30-38.
- [63] 汪志强, 王君巧, 聂少平. 酵母 β -葡聚糖的免疫和益生元功能及其在食品中应用的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(7): 191-196.
- [64] Zhang, X., Shen, D., Fang, Z., Jie, Z., Qiu, X., Zhang, C., *et al.* (2013) Human Gut Microbiota Changes Reveal the Progression of Glucose Intolerance. *PLOS ONE*, **8**, e71108. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071108>
- [65] 黄克愁. 在不同肠型肠道菌群中膳食纤维和多酚的发酵特性与其对菌群组成的影响[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [66] Ley, R.E., Turnbaugh, P.J., Klein, S. and Gordon, J.I. (2006) Human Gut Microbes Associated with Obesity. *Nature*, **444**, 1022-1023. <https://doi.org/10.1038/4441022a>
- [67] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2024) Dietary Milk Phospholipids Increase Body Fat and Modulate Gut Permeability, Systemic Inflammation, and Lipid Metabolism in Mice. *Journal of Dairy Science*, **107**, 10190-10202. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25235>
- [68] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2019) Milk Polar Lipids Modulate Lipid Metabolism, Gut Permeability, and Systemic Inflammation in High-Fat-Fed C57BL/6J Ob/Ob Mice, a Model of Severe Obesity. *Journal of Dairy Science*, **102**, 4816-4831. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15949>
- [69] Zhou, A.L. and Ward, R.E. (2024) Dietary Milk Polar Lipids Modulate Gut Barrier Integrity and Lipid Metabolism in C57BL/6J Mice during Systemic Inflammation Induced by Escherichia Coli Lipopolysaccharide. *Journal of Dairy Science*, **107**, 7578-7593. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-24759>
- [70] Zhou, A.L., Hergert, N., Rompato, G. and Lefevre, M. (2015) Whole Grain Oats Improve Insulin Sensitivity and Plasma Cholesterol Profile and Modify Gut Microbiota Composition in C57BL/6J Mice. *The Journal of Nutrition*, **145**, 222-230. <https://doi.org/10.3945/jn.114.199778>
- [71] 梁明俐, 卢培, 缪艳萍, 等. 燕麦 β -葡聚糖对大鼠营养性肥胖发生过程中血糖和体重的调节作用具有特殊的剂量效应[C]//中国营养学会益生菌益生元与健康分会. 第五届益生菌益生元科学大会论文集. 南宁: 广西中医药大学瑞康临床医学院, 广西中医药大学第一临床医学院, 广西中医药大学公共卫生与管理学院, 2023: 15-16.
- [72] 梁明俐, 缪艳萍, 黎钰兰, 等. 不同剂量燕麦 β -葡聚糖对老年大鼠空腹血糖和糖耐量的影响[J]. 食品与营养科学, 2023, 12(3): 207-212.
- [73] 周立红. 高脂膳食添加荷叶粉对糖耐量和肝脏的影响[C]//亚洲营养学会联合会, 中国营养学会. 第 14 届亚洲营养大会论文摘要集——基础营养与研究. 南宁: 广西中医药大学公共卫生与管理学院, 2023: 147.
- [74] 周立红, 黄金连, 张彤, 等. 甘蔗纤维对高脂模型雌性大鼠体重、脂肪组织和糖耐量的影响[C]//中国营养学会. 第十七届全国营养科学大会摘要集. 南宁: 广西中医药大学, 2025: 17.

- [75] 周立红, 卢培, 黎东慧, 等. 高脂高糖膳食添加甘蔗渣对糖耐量和脂肪组织的影响[C]//亚洲营养学会联合会, 中国营养学会. 第 14 届亚洲营养大会论文摘要集——食品与营养. 南宁: 广西中医药大学公共卫生与管理学院, 广西中医药大学第一临床医学院, 2023: 147.
- [76] Zhou, A.L., Huang, Z. and Ward, R. (2023) P03-090-23 Oat β -Glucan Had Dose-Effect on Glucose Tolerance, Body Weight and Fat Depots in Rats Fed Moderately High Fat Diets. *Current Developments in Nutrition*, **7**, Article 100601. <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2023.100601>
- [77] Ye, Y., Deng, Y., Yi, R., Qin, Y., Zhang, T., Huang, J., *et al.* (2025) Anthocyanin-enriched Purple Potato Flour Modulates Gut Microbiota and Short-Chain Fatty Acids to Prevent Hypertension: Insights from Preclinical Models and Mendelian Randomization Analysis. *Food & Function*, **16**, 8359-8377. <https://doi.org/10.1039/d5fo03028e>
- [78] 周立红. 烹饪医学学科发展历程与思路研究[J]. 食品与营养科学, 2024, 13(1): 133-142.