

无麸质食品品质改良与功能提升关键技术研究进展

张新悦, 马梓铭, 白玉, 刘严聪, 柴雨昕, 汤轶伟, 齐文慧, 王利文*

河北农业大学食品科技学院, 河北 保定

收稿日期: 2025年12月20日; 录用日期: 2026年1月18日; 发布日期: 2026年1月27日

摘要

无麸质食品作为麸质不耐受和乳糜泻患者必需的膳食替代品, 其研究范畴已从单一原料替代拓展为涵盖病理机制、原料开发、加工技术、品质改良及安全控制多方面的系统性领域。本文系统综述了该领域的最新研究进展: 在机制层面, 重点剖析了麸质引发的免疫机制与肠道菌群的相互作用, 揭示了乳糜泻症状持续存在的潜在根本原因。在原料与加工方面, 关注传统谷物、杂粮、及加工副产物的高值化利用, 并结合多种绿色加工技术, 有效提升产品的质构与营养品质。在品质改良方面, 阐明亲水胶体、蛋白质改良剂及功能性成分通过协同复配作用模拟了麸质网络结构, 从而提改善产品持气性与口感; 在安全性控制方面, 综述了覆盖生产、加工、流通全链条的交叉污染防控体系。总体而言, 尽管无麸质市场持续扩大且消费需求日趋多元, 但仍面临原料成本高与产品品质不均等挑战。因此, 未来研究方向应聚焦于菌群-免疫机制解析、低成本绿色加工技术创新、标准化评价体系建立以及精准营养模式的推广应用, 以推动无麸质食品向功能化、个性化与可持续化方向发展。

关键词

无麸质食品, 乳糜泻, 肠道菌群, 品质改良, 检测技术

Research Progress of Key Technologies for Quality Improvement and Functional Enhancement of Gluten-Free Food

Xinyue Zhang, Ziming Ma, Yu Bai, Yancong Liu, Yuxin Chai, Yiwei Tang, Wenhui Qi, Liwen Wang*

College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei

Received: December 20, 2025; accepted: January 18, 2026; published: January 27, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张新悦, 马梓铭, 白玉, 刘严聪, 柴雨昕, 汤轶伟, 齐文慧, 王利文. 无麸质食品品质改良与功能提升关键技术研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(1): 101-110. DOI: [10.12677/hjfn.2026.151012](https://doi.org/10.12677/hjfn.2026.151012)

Abstract

As essential dietary alternatives for individuals with gluten intolerance and celiac disease, research on gluten-free foods has long expanded from the simple replacement of single ingredients to a systematic field covering pathological mechanisms, raw materials, processing technologies, quality improvement, and safety control. By reviewing relevant literature, this paper provides a systematic overview of the latest research progress on gluten-free foods, with a focus on analyzing the immune mechanisms leading to gluten intolerance and their interaction with the gut microbiota, further uncovering potential fundamental reasons for the persistent symptoms of celiac disease. Regarding raw materials, research focuses on the high-value utilization of diversified ingredients such as traditional grains, coarse grains, and by-products, combined with various green processing technologies, significantly enhancing the texture and nutritional characteristics of gluten-free foods. In terms of quality improvement, the synergistic combination of hydrocolloids, protein modifiers, and functional components effectively simulates the gluten network structure, thereby improving the product's gas retention and mouthfeel. For safety control, not only has a cross-contamination prevention system covering the entire chain from production, processing, to circulation been established, but approaches to further reducing hazard risks and ensuring the safety of gluten-free foods have also been proposed. Overall, the current gluten-free market continues to grow, and consumer demand is showing diverse trends, but challenges such as high raw material costs and uneven product quality remain. Therefore, future research should focus on elucidating microbiota-immune mechanisms, developing low-cost green processing technologies, establishing standardized evaluation systems, and promoting precise nutrition models, driving gluten-free foods toward functionalization, personalization, and sustainability, providing new ideas for healthy food development.

Keywords

Gluten-Free Foods, Celiac Disease, Intestinal Flora, Quality Improvement, Detection Technology

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

麸质是小麦、大麦等谷物中的蛋白质复合物，是赋予传统面制品独特黏弹质构的关键。然而，其对于全球约 1% 的乳糜泻(Celiac Disease, CD)患者以及高达 6%~10% 的非乳糜泻麸质敏感(Non-Celiac Gluten Sensitivity, NCGS)人群构成了严重的健康威胁。鉴于此，我国已将含麸质的谷物及其制品明确列为 GB 7718-2011《预包装食品标签通则》中的八大强制标识过敏原之一[1]，凸显了其公共卫生重要性。

目前，严格遵循无麸质饮食(Gluten-Free Diet, GFD)是缓解相关症状的唯一有效临床干预手段。然而，GFD 的推广与实践面临着双重瓶颈：其一，食品品质挑战，即无麸质产品因缺乏面筋蛋白网络，常表现出质构疏松、感官体验不佳、货架期短等固有缺陷；其二，临床疗效局限，约有 30% 的乳糜泻患者即便在严格执行 GFD 后，其临床症状依旧持续或复发(Non-Responsive Celiac Disease, NRCD)。这一现象表明，我们对于麸质不耐受的病理生理学机制认知尚不完整，亟需从更深层次进行探索。

在此背景下，食品科学与临床医学的交叉融合推动了无麸质研究进入新阶段。当前研究热点聚焦于：
1) 原料创新与改性：利用糯米、山药等天然无麸质资源，借助挤压、超声等物理改性技术，模拟麸质功能，提升产品品质；2) 机制探索：深入剖析“肠道菌群 - 宿主免疫”轴在麸质不耐受中的作用机制，为

开发新型干预策略提供理论依据；3) 安全控制：发展基于微生物发酵或生物传感器的技术，以实现对食品中痕量麸质的快速、精准检测。

近年来，随着食品科学与医学的交叉研究，无麸质食品的开发利用得到了快速发展。通过用超声波、挤压膨化等技术改造加工设备实现副产物的资源化利用，并分析了肠道菌群-免疫轴的机制与影响因素，通过微生物发酵等建立生物传感器对食品中的物质浓度进行精确测定等都是当前的研究热点。本文立足于无麸质食品领域的基础理论、关键技术创新、质量安全控制策略以及未来产业发展趋势，以期为该领域的学术研究与产业化应用提供全面的参考与前瞻性指导。

本文立足于现有研究文献，旨在系统性地综述无麸质食品的基础理论、关键技术创新、质量安全控制及产业趋势，为该领域的学术研究与产业实践提供全面参考。

2. 麸质不耐受的病理机制与肠道菌群作用

麸质不耐受相关的免疫反应呈现出显著的个体异质性。其病理机制主要可分为两类：经典乳糜泻(Celiac Disease, CeD)所表现出的 HLA (人类白细胞抗原)依赖型免疫激活，以及非乳糜泻麸质敏感(NCGS)的非 HLA 依赖型炎症反应。

2.1. 免疫激活的遗传易感性

在 CeD 患者中，摄入的麸质来源麦醇溶蛋白片段(如 33-mer 多肽)因无法被完全消化，在小肠内的肠相关黏膜淋巴组织(Gut-Associated lymphoid tissue GALT)中经组织型转谷氨酰胺酶 2(tTG2)的脱氨修饰后，与 HLA-DQ2/DQ8 分子以高亲和力的形式相结合。该抗原-HLA 复合物被呈递到 CD4⁺T 细胞上，T 细胞进而被活化成 Th1 型淋巴细胞，促进 IFN- γ 和 TNF- α 等促炎因子被释放出来，最终导致肠绒毛萎缩、隐窝增生等病理变化[2]。绝大部分 CeD 患者携带 HLA-DQ2 或 DQ8 基因型，而其余 10% 患者则与 HLA-DQ7 等其他亚型相关，这也体现了 CeD 发病的遗传背景多样性[3]。

2.2. 肠道菌群的结构功能异常与代谢紊乱

作为“人体第二基因组”的肠道微生物群落参与麸质不耐受的发生发展过程。Zambrano M J L 等[2]通过分析 39 例 NRCD 患者的粪便宏基因组，并结合临床与人口学指标，将患者分为两个显著不同的菌群集群：“低度症状”菌群集群表现为高度模块化的微生物网络，并依赖局部枢纽节点，说明此类菌群处于应激状态但仍保留部分功能；而“高度症状”菌群集群则呈现更紧密但对抗性更强的网络结构，且富集了具有 Th17 激活及促炎作用的相关菌群(拟杆菌属及肠杆菌科等)。与此相对，无症状 CeD 患者的菌群网络具有较高的连通性及较强的抵抗力，即使在模拟生态扰动下仍能维持稳定结构稳定。

菌群代谢紊乱会进一步加重炎症微环境。时浚元等人[3]指出，麸质摄入可通过破坏“菌群-黏液层-免疫”轴形成恶性循环：菌群紊乱导致黏液层降解菌(如拟杆菌)过度增殖，破坏肠物理屏障而致使麸质抗原渗漏并激活固有免疫，最终形成持续的炎症链式反应。

2.3. 无麸质饮食的外延健康效应与争议

GFD 的健康效应不仅仅用于治疗乳糜泻，其对其他自身免疫性疾病的潜在益处正受到关注。林祥华[4]通过 Meta 分析，评估了 GFD 对自身免疫性甲状腺疾病(AITD)的影响。结果显示，GFD 虽未显著影响甲状腺功能指标(TTGAb:0.792; FT3:0.976; FT4:1.043; TSH:0.720)，但可降低血清 TPOAb 水平(平均降低 25.10 个单位)以及 TGAb 水平(平均降低 21.82 个单位)。推测其机制可能涉及：通过调节全身性免疫反应来改善由自身抗体介导的炎症过程；同时 GFD 可能能够减少肠内抗原的暴露程度，进而减轻全身炎症负荷。然而，其确切机制仍需更多高质量的随机对照试验加以证实[4]。

3. 无麸质食品原料创新与加工技术突破

3.1. 多元化原料体系构建与副产物高值化

无麸质原料开发已从单一谷物替代(如玉米、大米), 转向功能化、差异化的开发格局, 并逐步形成以传统谷物、新型杂粮、副产物及非常规原料为主体的功能性无麸质原料多元体系。尽管大米和玉米仍是当前无麸质原料的主流选择, 但其营养不均衡和功能特性不等短板, 推动研究者对新型替代源的系统性探索与开发。例如, Dalal A 等[5]探索了发芽荞麦粉在无麸质面条中的应用, 发现发芽处理可使荞麦粉蛋白含量提升至 13.02%, 膳食纤维增至 11.07%, 并显著增加芦丁(337.79 mg/100 g)、 γ -氨基丁酸(371.76 mg/100 g)等生物活性物质的含量。同时, 借助发芽过程的保护作用, 此类活性物质经烹饪后仍可保持高达 96%以上的保留率, 这对于提高无麸质面制品的营养价值具有重要支撑。

副产物的高值化利用是原料创新的另一重要途径。朱恬琛等[6]以糯米山药皮为功能性辅料制备无麸质饼干中, 不仅使饼干纤维素含量增至 174.77 mg/g, 还通过增加酯类和烃类化合物的种类与数量, 显著改善了风味。在糯米山药皮的无麸质饼干研制过程中发现, 其中含有的膳食纤维因其良好的持水、持油性的优势, 可有效改善面团的流变学性质。此外, 昆虫蛋白逐渐成为一种新型无麸质蛋白源, Tauferová A 等[7]研究发现, 低浓度(<5%)添加可在不影响感官接受度的前提下, 提升面包的多酚含量和抗氧化能力, 这也为可持续蛋白质来源的开发提供了新思路。

针对特定原料的改性也是目前无麸质产品开发的核心研究方向之一。荞麦作为典型的无麸质谷物, 其加工面临着适口性差的关键瓶颈。黄志杰, 贾鑫[8]系统梳理了利用生物酶催化、微生物发酵、胶体复配等改性技术对荞麦质构和营养特性的调控效应, 发现挤压膨化处理可通过高温高压破坏荞麦淀粉的结晶结构, 显著改善其流变特性, 使其更适合无麸质食品加工。但该技术可能造成热敏性营养素(如黄酮类物质)的部分流失, 且对设备参数的精准控制要求较高。而马铃薯全粉因无麸质、营养密度高且成本可控等特点, 成为了无麸质面条的理想原料, 朝鲁[9]通过优化复配体系, 将木薯淀粉(10%)、大米水解蛋白(6%)和食盐(1%)按 3:2:1 进行复配, 并结合双螺杆挤压工艺进行优化, 在喂料速度 10 r/min、螺杆转速 150 r/min、温度 75°C 的条件下, 制得的面条蒸煮特性接近传统小麦面条, 且在贮藏期内表现出优异的强度和韧性。然而在该复配体系中大米水解蛋白的来源及成本存在影响其规模化应用的可能性, 且不同原料批次间的品质稳定性仍需进一步验证。目前无麸质原料改性研究多聚焦于单一技术的效果验证, 但针对改性后原料在复杂食品体系中的互作机制研究不足, 这也是未来仍需重点关注的方向。

3.2. 绿色加工技术创新与多技术联用策略

物理加工技术凭借绿色、高效的技术特性, 成为处理无麸质原料的理想方法之一。其中超声波是一种非热加工方法, 借助空化效应产生的局部高温高压和剪切力, 能够精准调控原料的微观结构和功能特性。Farrokhi M 等[10]采用超声波处理大米-玉米淀粉复合粉, 发现在特定条件(15%含水率, 温度 20°C, 10 min)下, 粉体的吸水性和溶胀力降低, 而吸油性和水溶性提高, 凝胶弹性显著增强。这种结构改性归因于空化泡破裂产生的冲击波使淀粉颗粒表面粗糙化, 增加了分子间相互作用位点。不过该技术存在处理批次规模较小、参数对改性效果敏感性较高等局限, 仅适用于小批量精细化原料处理。

挤压膨化技术是将挤压、膨胀、变性等多项技术联合而成的一种成熟加工工艺, 通过高温(120°C ~150°C)、高压(3~5 MPa)与高剪切力的协同作用, 将原料固相分散成较细的颗粒, 进而促进其中的多糖和蛋白质实现淀粉糊化、蛋白质变性和美拉德反应。朝鲁[9]开发的挤压型无麸质马铃薯全粉面条, 通过优化木薯淀粉、大米水解蛋白和食盐的复配比例, 结合优化挤压参数, 制备出蒸煮品质优良且 L*值接近普通小麦粉面条的挤压型无麸质马铃薯全粉面条, 有效解决了传统无麸质面制品色泽偏暗的问题。同时扫

扫描电子显微镜(SEM)观察证实,挤压熟化使面团形成了均匀致密的网络结构,这构成了其质构优化的微观基础[9]。但该工艺对原料粒径均匀度要求较高,不同批次的马铃薯差异可能对产品质构品质均有影响波动。

微生物发酵技术作为绿色加工的另一支柱,在改善无麸质产品品质方面优势独特。刘建等[11]利用植物乳杆菌(0.26%),协同两种胶体(羧甲基纤维素 0.27%, 魔芋精粉 0.26%)对无麸质马铃薯面条进行预处理,使面条咀嚼性从 41.61 mJ 提升至 129.83 mJ。其机制在于,发酵时所产生的有机酸不仅可以调节面团 pH 值,促进面筋蛋白类似物的形成;还通过降低水分活度,抑制微生物生长,延长产品货架期。该技术优势在于同步实现质构强化与防腐保鲜,但发酵过程中有机酸的过量积累可能导致产品酸度偏高,影响产品品质及食用安全。

上述三种技术适用于不同场景,超声波技术适用于小批量热敏原料改性,挤压膨化适配规模化生产,微生物发酵侧重质构与货架期协同改善,但三者间缺乏多技术耦合的效果验证;未来需构建“非热加工-热加工-生物发酵”的多技术联用体系,从而扩大技术应用场景。同时建立原料特性-加工参数-产品品质的关联模型,进而提升无麸质原料加工的精准性与稳定性。

3.3. 烘焙食品关键技术与改良剂协同作用机制

无麸质烘焙食品的品质提升,核心在于模拟麸质蛋白的网络构建能力和持气性,这高度依赖于亲水胶体、蛋白改良剂和纤维类物质的协同作用。亲水胶体作为无麸质烘焙的“结构骨架”,不同种类的胶体展现出巨大差异化功能。Pérez T R 等[12]系统比较了羟丙基甲基纤维素(HPMC)、洋车前子壳纤维和黄原胶对无麸质面包品质的影响,发现增加 HPMC 添加量至 4.4 g/100 g 粉可形成连续凝胶网络,从而降低面团挤出力,但不影响面包的比容和硬度;洋车前子壳纤维添加量增至 13.2 g/100 g 粉虽通过持水膨胀而增加面团弹性,但会因纤维过度吸水导致面包芯胶黏性增加;而去除黄原胶则会改变面团流变学特性,使面包芯更柔软、颜色更浅,这与黄原胶的假塑性流变行为和对美拉德反应的促进作用有关[12]。对比三类胶体的应用特性:HPMC 在面团加工性与面包质构的平衡方面表现最优,洋车前子壳纤维更侧重面团弹性强化,黄原胶则主要调控面包的流变特性与色泽;但三者的协同复配效应尚未系统阐明,且高添加量下的成本与适口性短板仍需突破。

蛋白改良剂的应用是提升无麸质烘焙食品品质的另一关键。孙司卉等[13]系统探究了大豆分离蛋白(SPI)、豌豆分离蛋白(PPI)、玉米醇溶蛋白(Zein)、乳清浓缩蛋白(WPC)及蛋清蛋白(EWP)对无麸质米面包的影响。研究发现添加 12% 的大豆蛋白会诱导热变性反应,进而构建均匀的蛋白网状结构,使面包气孔数最多、质地细腻,持水性及感官品质均达到最优水平;添加 9% 的 WPC 则能依托其乳化性和凝胶性,显著降低米面包硬度,使面团弹性达到 0.82%,使无麸质面团达到最接近小麦面团的质构特性;植物蛋白与动物蛋白的复配(如大豆蛋白与乳清蛋白按 2:1 比例复配[14])可发挥协同效应,兼具植物蛋白的营养优势和动物蛋白的功能特性[13]。具体不同蛋白改良剂作用机制对比见表 1。

新型复配体系的开发,持续拓展无麸质烘焙的技术边界。郝素颖等[15]探究了马铃薯-大米蛋白复合凝胶对马铃薯全粉面团的影响,结果显示当马铃薯与大米蛋白复配比例为 1:0.5 时,形成的凝胶网络孔径更小、结构更致密,其保水性相较单独作用时提升 36.6%,乳化稳定性同步提升 31.7%。但该复配体系对加工温度的敏感性较高,高温易导致凝胶网络坍塌,故限制了其在高温烘焙工艺中的应用,后续以此复配体系为基础,探究不同复配体系与多种加工技术的联合使用,突破单一技术和复配体系的使用限制。顾荣荧等[16]在开发的无麸质面包配方中,将乳清蛋白(8%)、土豆粉(25%)和黄原胶(5%)三元复配使面包表皮金黄、口感酥软,比容达到 2.8 mL/g,接近传统小麦面包水平,这归因于乳清蛋白的持气性、土豆粉的膨胀性和黄原胶的网络支撑作用的协同[16]。以上两种复配体系对面团性质的改善和内部结构的为后

续无麸质面团性质的改善提供参考,未来可以探究多元复配体系对无麸质面团的性质的改变,进而拓宽无麸质食品原料来源。此外多元复配体系与加工技术联合作用,能够为原料的加工提供更加广阔的应用空间。

Table 1. Mechanisms of action and optimal addition levels of common additives in gluten-free baked goods
表 1. 无麸质烘焙食品常用改良剂的作用机制与最佳添加量

改良剂类别	典型代表	最佳添加量	主要作用机制
亲水胶体	黄原胶	1%~5%	增加体系黏度,改善气体保留能力[12][16]
	HPMC	2%~4.4%	形成凝胶网络,延缓淀粉老化[12]
植物蛋白	大豆分离蛋白	8%~12%	热变性形成蛋白网络,增强持水性[13]
	大米水解蛋白	6%	改善面团延展性,优化断面结构[9]
动物蛋白	乳清浓缩蛋白	5%~9%	降低面包硬度,提升弹性[13]
纤维类	洋车前子壳纤维	5%~13.2%	增加膳食纤维,改善面团延展性[12]
	糯米山药皮	10%~15%	提供功能性膳食纤维,改善风味[6]

4. 品质改良策略与功能提升路径

4.1. 功能成分协同复配技术与互作机制

无麸质食品的品质改良已从单一添加剂应用,发展为基于多组分协同效应的复配策略。其核心在于通过不同功能成分间的物理化学互作,模拟或补偿麸质网络的功能。其中,亲水胶体与蛋白质的协同作用是研究最广泛的复配技术之一,其协作机制主要包括:1) 胶体通过增加连续相黏度,为蛋白网络的形成提供支撑骨架;2) 蛋白质通过变性聚集填充胶体网络的空隙,形成“胶体-蛋白”互穿网络;3) 两者通过氢键、疏水相互作用和静电作用增强体系稳定性。胡良术等[17]的综述指出,无麸质面包中胶体(如瓜尔胶、刺槐豆胶)与蛋白(如蛋清蛋白、乳清蛋白)的复配存在一个最佳区间(通常分别为1%~5%和8%~12%),在此范围内可获得最佳的结构改良效果。

在无麸质产品结构改良的基础上,功能性复配体系还是提升其营养健康附加值的关键技术路径。多糖-多酚复合体系在无麸质产品中展现出协同增效的潜力,可以强化抗氧化性能和营养品质。朱恬琛等[6]将糯米山药皮中的功能性膳食纤维与多酚类物质作为原料协同加入饼干中,既显著提升了产品的膳食纤维与酚类物质含量,还通过多酚与淀粉分子间的氢键作用,延缓了饼干的油脂氧化进程;但该复合组分的添加量需控制在一定范围内。若过量添加会使饼干口感偏涩。进一步机制分析显示,糯米山药皮中的多酚物质可通过形成氢键的方式抑制淀粉重结晶并增强淀粉结构的稳定性,使淀粉结构更稳定,进而延缓饼干老化过程。Tauferová A 等[7]探究了膳食纤维和昆虫粉对无麸质面包营养特性的影响,发现添加量为9%亚麻籽的面包在感官评价中表现最佳,且多酚含量和抗氧化能力显著提高。对比两类复配体系的应用特性,可得出糯米山药皮复合组分更适配饼干类焙烤产品,侧重淀粉老化与油脂氧化的协同调控;而亚麻籽粉体系在面包类产品的营养强化与感官平衡方面表现更优,但受消费者认知与质构短板的限制。未来应结合相应优势,发展多元适用模型,以提升复配体系的产业化落地。

4.2. 生物酶解技术创新与新型制剂应用

生物酶作为绿色、高效的生物催化剂,因其反应条件温和、专一性强的特性,在无麸质食品的品质改良中应用日益广泛。Pashaei M 等[18]系统综述了酶在无麸质烘焙食品中的技术与营养作用,明确了不

同酶类的功能定位：木聚糖酶、葡聚糖酶等细胞壁降解酶可降解非淀粉多糖，从而降低面团黏度，改善加工性能；蛋白酶则可修饰植物蛋白结构，增强其凝胶性和乳化性；而淀粉酶的适度水解则能调节淀粉的糊化特性，延缓老化。近年研究进一步证实，酯酶可以通过催化脂类物质的水解与合成，进而改善无麸质面包的风味物质组成，尤其可促进短链脂肪酸酯的生成，丰富面包产品的香气层次。

新型酶制剂与定向酶解技术的开发，进一步拓展了酶在无麸质领域的应用场景。例如，定向水解蛋白酶可通过特异性切割植物蛋白的疏水性区域，修饰植物蛋白表面疏水性的同时增大其乳化活性，甚至在豌豆蛋白体系中可使乳化稳定性提升 31.7% [18]。转谷氨酰胺酶则可在大豆蛋白体系中通过催化蛋白质分子之间的交联，模拟麸质的网络构建能力，使其凝胶强度提升 40%左右，使这一技术也适用于无麸质素食肉制品的开发。

4.3. 结构改良的物理化学方法

除生物与化学方法外，物理场处理为无麸质原料改性提供了绿色高效的新途径。其作用机制主要包括能量输入引起的分子结构重排和界面性质改变。超声波处理(20~40 kHz)具有空化效应，在空化泡破裂瞬间产生的高温高压(最高可达 5000 K、100 MPa)，以及所形成的较强的剪切力可以使淀粉颗粒表面形成凹坑，既增大了颗粒比表面积，又提升了淀粉与蛋白质之间的接触面积，进而提高了二者的作用强度[10]。Farrokhi M 等[10]研究发现，在 20℃下对大米-玉米淀粉复合粉超声处理 10 min 后，可使复合粉的油吸收能力相较未处理组提升 25%，且凝胶弹性提升 30%。其机制在于，超声波处理破坏了淀粉颗粒的景区结构，是颗粒表面更多羟基基团被暴露，增强了分子间的相互作用。

4.4. 功能化设计的多元路径

在品质改良的基础上，通过靶向添加功能性成分，可赋予无麸质产品特定的健康益处，实现“功能化设计”。如在无麸质面包中添加 5%~10%的菊粉，既能够提升其膳食纤维含量，还可作为益生元起调节肠道菌群的作用，进而促进双歧杆菌等有益菌的增殖[7]；但高增加量(>10%)易导致产品质构偏硬，口感发黏，且菊粉的益生元活性易受高温影响。而茶多酚(0.2%)与维生素 E (0.1%)的复合添加，可通过协同抗氧化作用，起延缓无麸质烘焙食品的油脂氧化的作用，将货架期从 15 天延长至 30 天[19]。不过该复合体系易使产品呈现轻微褐变，且茶多酚的苦涩味可能导致产品适口性降低。故为保证口感，茶多酚需配合风味调节剂协同使用。此外，选用本身即富含功能成分的原料，是无麸质产品功能化设计的低成本路径之一。刘月瑶[20]指出，藜麦作为全营养无麸质谷物，其蛋白质中必需氨基酸均衡，且富含多酚类、皂甙类[21]等生物活性物质，可作为功能化无麸质食品的优质原料，其高蛋白、低 GI 的特点，使其成为开发面向老年群体或特定健康需求人群的功能性无麸质食品的理想原料之一。但藜麦的皂苷类物质具有轻微刺激性，需要通过预处理降低其含量，且藜麦原料成本较高于普通无麸质谷物。故为降低成本，藜麦的规模化应用受限。

5. 安全性控制与检测技术进展

5.1. 交叉污染风险与全链条防控体系

麸质的交叉污染是当前无麸质食品安全问题的核心挑战，即使是痕量麸质(>20 mg/kg)也足以诱发乳糜泻患者的临床症状。Zandonadi P R 等[22]指出，无麸质食品在生产、加工、运输和储存过程中均有可能受到含麸质食品的污染，尤其是处于共用生产线的情况下，设备的麸质残留是主要污染源。风险链条更向上游延伸至原料端：例如，燕麦在种植过程中可能因小麦、大麦等作物周边田地的花粉飘散而发生交叉授粉，导致其含有麸质蛋白。与此同时，一个易被忽视的社会性风险即低收入人群因经济限制，常

通过共用厨房设施接触麸质，加剧了营养不安全隐患[22]。

为应对此挑战，建立全链条的交叉污染防控体系迫在眉睫。从生产端就应需采取专产专用生产线和严格的清洁程序，如脉冲式清洗技术(热水 + 压缩空气)可有效清除设备缝隙中的麸质残留；原料采购上可采用供应商审核制度，要求其提供麸质含量合格检测报告(含量需 < 20 mg/kg)；而流通环节可采取无麸质食品与含麸质食品的物理隔离从而避免二次污染[3]。并利用区块链技术，实现从农田到餐桌的全程跟踪，通过严格记录原料来源、加工过程和流通路径，提升消费者对无麸质食品的信任度[23]。

5.2. 污染物控制与货架期安全技术

无麸质食品的原料特性使其面临特殊的污染物风险，需要采取针对性的控制措施。由于大米等无麸质谷物其根系特性，对土壤中的砷、汞等重金属具有高富集性，在生产加工前可通过产地环境监测和品种改良从源头控制[22]。而真菌毒素污染同样不容忽视，玉米原料中黄曲霉毒素 B1 的检出率可达 12%，需采用物理吸附(如活性炭)与生物降解(如真菌毒素降解酶)联合脱毒[23]。

货架期延长技术的研究创新为无麸质食品的商业化提供了有力支撑。目前主流技术包括：气调包装，通过调控包装内气体组分(如 70% N₂ + 30% CO₂)降低环境氧分压并抑制霉菌的有氧代谢，可使无麸质面包的货架期延长 15 天[24]。但该气体比例对不同品类无麸质食品(如烘焙类、即食类)的适配性差异较大，且包装材料需具备高气体阻隔性，间接增加了产品的终端生产成本；天然防腐剂的复配，如茶多酚 0.1% 与乳酸链球菌素 0.05% 协同应用，在抑制细菌生长的同时，也避免了使用化学防腐剂所引发的安全争议[19]；新兴物理杀菌技术，如超声波辅助热杀菌(60°C、20 min)，利用空化效应增强了杀菌效果，在减少热处理对营养成分破坏的同时保证了产品的微生物安全性[10]。也有研究数据表明，将无麸质即食面制品的商业无菌包装技术和食用天然防腐剂添加技术以及杀菌工艺结合在一起使用，可将无麸质即食面制品的货架期延长达到 90 天以上。

6. 产业现状与未来发展趋势

6.1. 市场格局演变与消费需求多元化

全球无麸质食品市场正经历快速增长，在 2019 年无麸质食品的全球市场份额为 216.1 亿美元，预计 2027 年其市场规模将达 240 亿美元[19]。而北美和欧洲作为较为成熟的市场，其无麸质食品占据了全球 70% 以上的份额，宣称其产品创新已从基础的“无麸质”升级为聚焦“功能性延伸”和“清洁标签”。如北美市场 45% 的无麸质食品添加了益生菌、膳食纤维等功能成分，而欧洲市场 70% 的无麸质面包宣称“仅含以下 5 种原料”[19]。在亚太地区尤其是中国市场的增长潜力巨大，2024 年增速达 12.3%，但产品仍以大米、玉米等基础主食为主，高端功能性市场存在巨大发展空间。

在消费需求方面无麸质食品也呈现出明显的多元化趋势，从最初满足乳糜泻患者的医疗性需求，现在逐步扩展到健康人群的功能性消费和生活方式消费。调查显示，在大多数情况下无麸质食品消费者中约 30% 的并无医学诊断的麸质不耐受，而是出于减肥、肠道健康等原因选择 GFD [24]。消费者画像分析表明，35~45 岁女性是无麸质食品的主要消费群体，其购买决策中“营养均衡”(82%)、“口感体验”(76%) 和“品牌信任”(68%) 为三大关键因素。此外，对于 Z 世代消费者而言，产品的可持续属性(如有机认证、可降解包装)则成为新的重要考量因素[24]。

6.2. 产业发展挑战与可持续创新路径

尽管无麸质食品产业具备广阔的市场与健康需求潜力，但当前产业推进过程中仍面临多维度的现实挑战：

首先是原料成本高昂，其中无麸质专用原料如大米粉、玉米淀粉的价格较传统麦类原料高30%~50%，同时由于无麸质食品的不成型特性，加工过程中需要额外的改良剂和技术投入从而改善品质，导致无麸质食品售卖价格通常是同类传统食品的2~3倍[22]。这一价格差距更加剧了低收入人群的食品短缺和营养不安全。在发展中国家尤为明显，数据表明乳糜泻患者中约25%的人群因经济压力无法严格执行GFD。

其次是产品品质与营养的局限性。无麸质烘焙食品普遍存在质构坚硬、弹性不足、易老化等问题。根据消费者调研中显示，仅43%的受访者对无麸质面包的口感表示满意[24]。与此同时无麸质食品的营养不均衡问题也较为突出，与传统食品相比其膳食纤维含量低28%，铁含量低35%，需通过强化手段弥补[23]。与此同时，由于缺乏统一的品质评价标准，导致市场产品质量参差不齐，既影响了消费者的信心，也制约了产业的规范化发展。

6.3. 未来技术创新与产业趋势

可持续发展已成为引领无麸质食品产业创新的核心理念，贯穿于从原料到消费的全生命周期。这包括推广有机种植、采用节能加工技术(如节能挤压设备、太阳能烘干)以及开发可降解包装材料(如淀粉基薄膜)[22]。

未来的技术创新方面将主要围绕以下四个方向精进：

- 1) 精准营养干预：基于患者肠道菌群特征(如NRCD的菌群集群)和遗传背景(HaT基因型)，开发个性化无麸质饮食方案[2][25]；
- 2) 智能加工：利用机器学习优化配方，如通过神经网络模型预测亲水胶体复配的最佳比例[17]；
- 3) 功能升级：将无麸质食品与慢性病管理结合，开发辅助调控甲状腺抗体的功能食品[4]；
- 4) 新原料开发：探索藻类蛋白、真菌菌丝体等非常规无麸质原料，解决传统原料的营养短板[20]。

7. 结论

本文系统综述了无麸质食品领域的研究进展，揭示了一条由“机理认知-技术创新-产业应用”构成的完整创新链条。对“肠道菌群-免疫”互作机制的深入阐明，为麸质相关疾病的临床难题提供了新干预靶点；多元化原料开发与绿色加工技术的突破，为提升产品质构、营养与安全性的协同提升奠定了坚实基础；而消费者需求的演变，则持续驱动着产业向功能化、个性化和可持续方向迭代。

展望未来，为推动该领域的进一步发展，研究需着力突破以下瓶颈：

- 1) 基础研究层面：深入解析“菌群-代谢-免疫-肠屏障”四维互作网络的关键调控因子与信号通路，为开发基于精准营养调控的功能食品提供更坚实的理论依据；
- 2) 技术应用层面：聚焦低成本、高效益的品质改良技术，如基因编辑改良无麸质谷物的加工特性，同时构建多技术耦合的加工体系以平衡产品品质与成本；
- 3) 产业标准层面：建立覆盖原料溯源、加工过程、终端产品的全流程无麸质食品品质评价标准与认证体系，以规范市场秩序，保障消费者权益；
- 4) 临床转化层面：开展多中心，大样本的高质量随机对照试验，验证无麸质饮食在其他慢性病管理中的协同作用，以科学证据拓展其应用场景。

综上所述，随着消费者健康意识的觉醒和多学科技术的深度融合，无麸质食品正从特殊医疗需求导向的“小众产品”，向健康生活方式驱动的“普惠选择”演变。通过全产业链的协同创新，无麸质食品产业不仅有望为全球数亿相关人群带来更健康、更美味的饮食方案，更将为食品工业的营养精准化、生产绿色化转型与可持续高质量发展提供一个极具价值的范式。

基金项目

河北省高等教育教学改革研究与实践项目, 2025GJJG118, 2023GJJG095, 2023GJJG115。

参考文献

- [1] 杨若婷, 戴智勇, 潘丽娜, 等. 食物过敏原检测标准及标识现状[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 1-10.
- [2] Zambrano, M.J.L., Pleguezuelos, L.B., Aguilar, A.E., *et al.* (2025) Microbiome Gut Community Structure and Functionality Are Associated with Symptom Severity in Non-Responsive Celiac Disease Patients Undergoing a Gluten-Free Diet. *mSystems*, **10**, e0014325.
- [3] 时浚元, 田海芝, 任正楠, 等. 肠道菌群对膳食麸质引起乳糜泻的影响研究进展[J]. 中国食品学报, 2025, 1-10.
- [4] 林祥华. 无麸质饮食对自身免疫性甲状腺疾病影响的 meta 分析[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [5] Dalal, A. and Joshi, S. (2025) Nutritional, Functional, and Bioactive Characterization of Gluten-Free Noodles Using Germinated Buckwheat Flour. *Cereal Research Communications*, **53**, 1631-1644. <https://doi.org/10.1007/s42976-025-00645-4>
- [6] 朱恬琛, 庄晗笑, 张天竹, 等. 基于糯米山药皮的无麸质饼干研制及其对挥发性物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 299-306.
- [7] Tauferová, A., Pečová, M., Czerniková, A., Dordević, D. and Tremlová, B. (2024) Effect of Fiber and Insect Powder Addition on Selected Organoleptic and Nutritional Characteristics of Gluten-Free Bread. *Processes*, **12**, Article No. 970. <https://doi.org/10.3390/pr12050970>
- [8] 黄志杰, 贾鑫. 不同改性技术在无麸质荞麦食品中的应用[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 27-34.
- [9] 朝鲁. 挤压型无麸质马铃薯全粉面条的研发[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [10] Farrokhi, M., Ramos, I.N. and Silva, C.L.M. (2025) Impact of Ultrasound on a Gluten-Free Composite Flour Based on Rice Flour and Corn Starch for Breadmaking Applications. *Foods*, **14**, Article No. 1094. <https://doi.org/10.3390/foods14071094>
- [11] 刘建, 雷英杰, 任元元, 等. 无麸质马铃薯发酵面条品质优化研究[J]. 食品与发酵科技, 2023, 59(3): 60-64.
- [12] Torres-Pérez, R., Martínez-García, E., Siguero-Tudela, M.M., García-Segovia, P., Martínez-Monzó, J. and Igual, M. (2024) Enhancing Gluten-Free Bread Production: Impact of Hydroxypropyl Methylcellulose, Psyllium Husk Fiber, and Xanthan Gum on Dough Characteristics and Bread Quality. *Foods*, **13**, Article No. 1691. <https://doi.org/10.3390/foods13111691>
- [13] 孙司卉, 杨杨, 任丽琨, 等. 外源蛋白改良剂对米面团热力学性能及面包品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(3): 149-161.
- [14] 张轶然, 刘轶斐, 孙宛舒, 等. 食品中麸质及其生物传感检测方法研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(13): 292-299.
- [15] 郝素颖, 冯晓博, 国中琪, 等. 马铃薯-大米蛋白复合凝胶对马铃薯全粉面团水合及流变性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 1-14.
- [16] 顾荣荧, 屠文超, 邱鹤翔, 等. 一种无麸质面包的工艺研究[J]. 农产品加工, 2023(23): 35-40.
- [17] 胡良术, 何林阳, 杨杨, 等. 无麸质面包品质提升技术及研究现状[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 408-418.
- [18] Pashaei, M., Bahmanyar, F., Tahmouzi, S., Nasab, S., Sadrabad, E., Mollakhalili-Meybodi, N., *et al.* (2025) The Role of Enzymes in Gluten-Free Bakery Products: A Review of Technological and Nutritional Perspectives. *Applied Food Research*, **5**, Article ID: 100923. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100923>
- [19] 张宝月, 陈卓, 沈思含, 等. 无麸质食品现状、品质特性与发展分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 186-193.
- [20] 刘月瑶, 路飞, 高雨晴, 等. 黍麦的营养价值、功能特性及其制品研究进展[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 56-65.
- [21] 吴娜娜, 王娜, 谭斌, 等. 无麸质食品品质改良研究进展[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(4): 24-28.
- [22] Zandonadi, R.P. and Romão, B. (2025) Gluten-free Diet in the Context of Food and Nutrition Security, Food Safety, and Sustainability. *Nutrition Reviews*, nuaf069. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuaf069>
- [23] 谢强, 范家兴, 罗丹, 等. 无麸质食品的研究现状与风险管理[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(8): 18-26.
- [24] 张帅, 韩冰, 任丽琨, 等. 无麸质食品品质提升研究现状[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4899-4907.
- [25] Amelie, T., Srihitha, A., Michelle, P.G., *et al.* (2025) Hereditary Alpha-Tryptasemia Is Associated with Ongoing Symptoms in Individuals with Celiac Disease Despite Following a Gluten-Free Diet. *American Journal of Gastroenterology*.