

降低大米GI值改性技术措施研究进展

周冰莹¹, 牛晓冉¹, 严伟龙², 罗 希¹, 刘思敏¹, 吴泽宇¹, 张文成^{1*}

¹合肥工业大学食品与生物工程学院, 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥

²安徽省蒸谷米食品科技有限公司, 安徽 滁州

收稿日期: 2025年2月26日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月8日

摘 要

高血糖生成指数(glycemic index, GI)食物被认为与肥胖、糖尿病和心血管疾病等健康问题相关联。大米作为主要粮食, 其高GI可能引发血糖快速升高, 增加肥胖和慢性病风险。因此, 降低大米GI值的研究备受关注。本文系统综述了降低大米GI的关键技术, 深入分析了不同加工方式对GI值的影响机制, 并探讨了未来发展趋势, 为低GI食品加工技术的选择提供了科学素材。

关键词

大米, 抗性淀粉, 血糖生成指数, 改性

Research Progress on Modification Technology for Reducing the GI Value of Rice

Bingying Zhou¹, Xiaoran Niu¹, Weilong Yan², Xi Luo¹, Simin Liu¹, Zeyu Wu¹, Wencheng Zhang^{1*}

¹Engineering Research Center of Bio-Process from Ministry of Education, School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

²Anhui Parboiled Rice Food Technology Co. Ltd., Chuzhou Anhui

Received: Feb. 26th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 8th, 2025

Abstract

Foods with high glycemic index (GI) value are considered to be associated with health problems such as obesity, diabetes and cardiovascular disease. As the main grain, rice with high GI value could lead to increasing the risk of obesity and chronic diseases. Therefore, research on reducing the GI value of rice has attracted much attention. This article systematically summarizes the key technol-

*通讯作者。

文章引用: 周冰莹, 牛晓冉, 严伟龙, 罗希, 刘思敏, 吴泽宇, 张文成. 降低大米 GI 值改性技术措施研究进展[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(3): 265-273. DOI: 10.12677/hjfn.2025.143030

ogies for reducing rice GI value, deeply analyzes the impact mechanism of different processing methods on GI values, and explores future development trends, providing scientific materials for the selection of low GI food processing technologies.

Keywords

Rice, Resistant Starch, Glycemic Index, Modification

Copyright © 2025 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

作为全球最大的水稻生产国，中国的水稻年产量持续多年位居世界第一，2023 年中国大米产量占全球总产量的 28.90%，而消费量更是达到全球消费总量的 29.63% [1]。全球约有 4.63 亿人患有糖尿病，预计到 2040 年，这一数字将增加到 7.4 亿 [2]。血糖生成指数(glycemic index, GI)是描述人体对食物的消化吸收速率，以及反映机体进食后血糖升高程度的重要指标。依照 GI 的不同，可以将食物分为高 GI 食物($GI > 70$)、中 GI 食物($55 < GI \leq 70$)、低 GI 食物($GI \leq 55$)。米，尤其非精制大米，是人类膳食中宏量营养素和微量营养素的重要来源，可以提供碳水化合物、蛋白质、镁、锌、铜、维生素 B6、膳食纤维等 [3]。同时，大米中钠钾、脂肪含量低，不含胆固醇。在亚洲，大米的烹饪方式以蒸煮为主，不额外添加黄油、人造奶油、动物脂肪等辅料，因此以大米为主食的膳食模式通常较为健康。但是，一些精制大米的 GI 值较高，可能导致餐后血糖快速升高，不利于代谢健康。随着生活水平的提高，人们对饮食要求越来越多样化、科学化。而许多生活疾病大都源于饮食不科学、不均衡引起的，如糖尿病、心脑血管疾病、肥胖、便秘等，对人类健康造成不可逆后果。

2. 低 GI 值大米

低 GI 功能大米可以降低餐后血糖，同时还具有抗高血压、抗氧化、降血脂、肠道保护以及降低心脑血管疾病发生率的多重保健功效，是防治慢性系统性代谢疾病的首选食物，对于以大米为主食的人们来说，低 GI 功能性大米的出现是一个福音 [4]。因此，低 GI 值大米一直是研究的热点。

淀粉是一种重要的生物聚合物，在自然界中含量丰富。淀粉是由葡萄糖单元通过 α -1,4-糖苷键和 α -1,6-糖苷键连接而成的高分子碳水化合物，根据其分子结构特征主要可分为直链淀粉和支链淀粉。直链淀粉是由 200~2000 个葡萄糖单元通过 α -1,4-糖苷键线性连接形成的双螺旋结构，而支链淀粉则具有高度分支化的结构，其分支点由 α -1,6-糖苷键构成 [5]。从酶解特性来看，淀粉酶的水解作用需要与淀粉分子的非还原末端结合，由于直链淀粉的末端数量显著少于支链淀粉，因此其酶解速率较慢，导致直链淀粉含量与淀粉的血糖生成指数呈负相关关系。基于淀粉在人体内的消化吸收特性，可将其分为三类：快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)。

抗性淀粉含量是影响稻米 GI 值的主要因素。抗性淀粉是一种只能在大肠中分解，而在小肠中无法被分解吸收的淀粉，具有良好的稳定餐后血糖水平、肠道保护、控制体重的效果，受到研究者的广泛关注 [4]。研究表明 [6]，米制品中抗性淀粉的含量与其血糖反应密切相关，当抗性淀粉含量升高时，餐后血糖峰值显著降低，从而导致米制品的 GI 值下降。这一特性使得抗性淀粉在调控餐后血糖反应方面具有重要的营养学意义。

3. 大米的改性

近年来, 针对降低大米血糖生成指数的研究取得了显著进展, 相关方法学在传统技术改良和创新方法开发两个维度均得到深入探索。在传统加工技术方面, 通过半熟化、发芽和抛光等工艺可有效调节大米的 GI 值。在物理改性领域, 当前研究趋势分为热加工和非热加工处理两种方法。此外, 基于分子相互作用的改性策略也受到广泛关注, 包括淀粉与植物化学物质的络合作用以及低 GI 成分的强化等方法, 这些技术通过改变淀粉的消化特性, 实现了对大米制品 GI 值的有效调控[7]。

3.1. 物理加工方法

食品物理加工技术具有高效、绿色、环保等优势, 符合对食品加工技术环境友好与产品安全性要求。物理加工技术又分为热物理加工技术和非热物理加工技术。

3.1.1. 热加工处理

1) 蒸煮

蒸煮是一种常见的米制品加工方式, 传统的蒸煮通常会提高产品的 GI 值。影响蒸煮的因素有很多, 高温促进淀粉糊化, 但过高温可能导致淀粉过度降解; 蒸煮时间影响淀粉糊化程度和抗性淀粉(RS)的形成; 水分含量影响淀粉的糊化效率和最终质地。王勇等[8]研究表明淀粉在高温、高压作用下糊化, 原有的结晶结构遭到破坏, 冷却回生后形成新的结构, 在整个过程中结晶度增加, 并形成更加紧密的晶型, 提升整体抗消化能力, 使米制品 GI 降低。Wang 等[9]在 120℃、水分含量为 20%、25%和 30%的温度下使用湿热处理 2 小时, 以改性普通和高直链玉米淀粉; 在两种淀粉的水分含量为 30%时观察到 RDS 的最大下降; 在 30%的水分含量下, RS 增加了近 1000%, 研究表明, 湿热处理是将高直链淀粉转化为 RS 的好方法。董志雄[10]探究了不同添加量的 RS2 型(Hi-maizeTM260)抗性淀粉和苦荞对米线的品质特性和消化特性的影响, 发现 RS2 抗性淀粉能够显著降低米线的 GI 值, RS 含量显著升高, 当添加量达到 40%时, 米线的 GI 值从对照组的 78.36 降为 65.62, 降低了 16.3%, 同时苦荞能够显著降低米线的 GI 值, RS 的含量显著升高, 米线整体淀粉水解率降低, GI 值从 81.44 降低到 67.07, 降低了 17.6%。

2) 挤压膨化

近年来, 挤压膨化工艺挤压技术被广泛应用于低 GI 米制品开发中。挤压膨化工艺是运用高温、高压、剪切作用的一种短时高效的加工方式, 其原料适应性极强, 常见的谷物制品均能作为其原料[11]。挤压膨化的影响因素有温度、压力、剪切力、水分含量和螺杆转速等。高温促进淀粉糊化和支链淀粉的裂解; 高压条件下淀粉分子结构发生改变, 促进抗性淀粉的形成; 剪切力影响淀粉分子链的断裂和重组; 水分含量影响淀粉的糊化效率和膨化效果; 转速影响淀粉在挤压过程中的受热和剪切程度[12]。在挤压过程中会使一部分支链淀粉裂解, 形成新的短直链淀粉, 增加直链淀粉含量, 同时直链淀粉在挤压膨化作用下形成 RS, 增加 RS 的含量。挤压膨化还可以使 IDF 转变为 SDF, 使产品 GI 值降低。Neder-Suárez 等[13]评估了添加柠檬酸的挤压蒸煮工艺对天然玉米淀粉中的物理化学变化和抗性淀粉形成的影响, 研究发现 RS 含量随含水率的降低而增加, 在 18%的水分含量和 5.2%的柠檬酸含量下获得最高的 RS 产量(1.15 g/100 g)。Liu 等[14]探讨了挤压温度对杂粮重组米理化性质、食用品质和消化率的影响。随着挤压温度的升高, 糊化度增加, 而水、蛋白质、总淀粉和支链淀粉的含量大幅降低, 结果表明杂粮再造稻的理想挤压温度为 90℃, 最佳挤压温度在杂粮复原稻生产中的关键作用, 杂粮复原稻具有低 GI 和高营养质量的特点。

3.1.2. 非热加工处理

1) 超声波处理

超声波处理是利用超声的空化作用, 超声波能够在保持淀粉颗粒结构情况下, 作用于淀粉分子糖苷键, 一般为淀粉支链淀粉分子侧链 α -1,6 糖苷键上, 促使侧链断裂, 分子量降低, 形成不易被直链淀粉酶消化的抗性淀粉。超声波空化作用引起的短时间低热环境对食品的物化性质不会产生不利影响, 延缓肠道对葡萄糖的吸收, 血糖上升幅度减小。超声时间是影响超声处理的一个重要因素。Yılmaz 等[15]研究发现增加超声处理时间可以提高淀粉改性的效率。Guo 等[16]发现超声处理能够显著促进淀粉颗粒的解聚, 同时增强其水结合能力、短程有序结构及双螺旋结构的稳定性, 从而有效改善了陈年米粉的凝胶质地特性。张楚佳等[17]研发超声法制备抗性粳米淀粉的最优条件为: 在超声功率为 200 W 的条件下, 淀粉乳质量分数 30%, 超声温度 30℃, 超声时间 20 min, 在此条件下制备的抗性淀粉含量为 15.02%。Niu 等[18]利用超声处理玉米淀粉, 发现 RS 含量随着超声功率的增加而增加。这种现象可归因于超声处理诱导的结构淀粉排列的干扰, 随后导致被破坏的淀粉链重新组装成更大的 V 型晶体结构, 可能有助于 RS 的增强。Tang 等[19]采用超声辅助水热法制备新型莲藕淀粉-肉豆蔻酸复合物。天然莲藕淀粉的 RS 为 34.58%, 而莲藕淀粉-肉豆蔻酸复合物表现出较高的 RS (67.03%) 含量。

2) 辐照处理

辐照处理是指食品或原料受到具有高能、高穿透能力光子的非电离辐射后, 食品成分或微生物发生物理或化学反应的过程。辐照处理会破坏淀粉颗粒中的糖苷键, 降低淀粉分子量。淀粉中短链分子在辐照过程中通过结合 α -1,6 糖苷键、 β -1,2 和 β -1,3 糖苷键交联形成支链。分支越多, 难消化物质的比率越高, 导致淀粉消化速率降低, 血糖稳定性好。He 等[20]研究发现辐照处理使淀粉的分子结构发生了变化, 淀粉分子链断裂, 分子量降低, 从而改变其流变特性和糊化行为。辐照破坏淀粉的结晶区域, 降低相对结晶度, 进而影响其热特性和消化特性, 促进抗性淀粉(RS)的形成, 降低淀粉的消化率, 从而改善其营养特性。辐照剂量越高, 淀粉分子链断裂和交联作用越明显。魏常锦[21]使用总剂量为 10 kGy 的 60 Co 辐照淀粉, 剂量率为 5 Gy·min⁻¹, 制备抗性淀粉得率为 12.36%。Lei 等[22]通过电子束和 X 射线辐照天然马铃薯淀粉, 直链淀粉含量增加, 这可能归因于支链淀粉解支形成短直链淀粉链和长链直链淀粉解聚。电子束处理的淀粉比 X 射线处理的淀粉表现出更高的稳定性和更低的溶胀能力。Peng 等[23]通过高剂量伽马辐照改变马铃薯淀粉, 发现表观直链淀粉含量与 γ 照射剂量呈负相关, RS 含量随着照射剂量的增加而增加。

3) 高压处理

高压处理的工作原理是食品暴露在高静水压力(通常在 100 至 800 MPa 之间)下, 这会导致淀粉分子和其他成分的结构发生变化, 促进 RS 的形成。高压处理能将 A 型天然淀粉转化为 V 型, 还可能形成类黄酮-淀粉复合物。此外, 会显著增加短 A 链的比例, 降低总结晶度, 使淀粉的结晶结构变得松散。同时会使抗性淀粉中的直链淀粉含量增加, 有助于提高淀粉对酶消化的抵抗力。Wang 等[24]研究发现压力是影响高压处理最重要的因素, HHP 下玉米淀粉经历了三个重要的机械化学阶段: 胁迫、聚集和团聚。HHP 通过破坏非共价键和共价键, 导致淀粉颗粒的长链分子受损, 使淀粉的结构和理化性质发生变化。Chen 等[25]采用分子动力学模拟在原子水平上探讨压力对直链淀粉分子构象的影响。结果表明高压降低了分子内氢键, 增加了直链淀粉-溶剂氢键, 同时高压使直链淀粉聚合物更加“粗壮”。Hsiao 等[26]通过高压加工木豆奶, 发现 400 MPa 的高压处理有效地增加了木豆奶的 RS 含量, 并导致 GI 降低。

4) 脉冲电场

脉冲电场技术是利用瞬间高压脉冲在物料中形成脉冲电场, 对物料产生多种效应。脉冲电场可能会使淀粉颗粒的结晶结构发生改变。适度的脉冲电场处理, 可能会破坏淀粉分子链间的一些氢键等作用力, 使部分结晶区域有序性降低, 结晶度下降, 从而为后续淀粉分子链的重排创造条件, 有利于对抗性淀粉的形成。电场强度是影响淀粉改性的重要因素。Hong 等[27]研究发现随着电场强度的增加, 淀粉分子间

氢键被破坏,淀粉结构出现更多变形,淀粉颗粒上出现更多的突起和凹坑。Chen 等[28]提出了一种脉冲电压协同酯化过程中体外淀粉消化特性的潜在机制模型。与天然淀粉相比,脉冲电压辅助酯化 OSA-淀粉在 3.0 kV/cm 时 RS 含量显著增加 17.13%。相比之下,未经 PEF 处理的 OSA 改性淀粉仅增加了 5.91%。Sheba Mae 等[29]通过脉冲电场处理燕麦粉,发现增加电场强度导致 RS 比例增加,并有效减慢淀粉消化速率。

3.2. 生物加工方法

生物加工方法主要是利用微生物发酵、酶制剂水解或发芽处理等形式进行加工处理过程。其本质是利用酶的作用,实现改变产品结构和组成,并改善加工性能、增强功能活性的目的。

3.2.1. 发酵

发酵是一种代谢过程,在微生物作用下使食物发生理想的变化[30]。发酵过程中会释放出维生素、生物碱、有机酸、酚类化合物等多种营养物质,不仅赋予了食品新型风味,营养特性也有所提升。随着人们对健康、环保和食品安全的日益重视,开发绿色食品加工工艺已成为目前国内外的研究热点。发酵技术作为一种淀粉的生物改性技术,在生产食品工业上的改性淀粉具有很大的优越性[31]。因为通过发酵处理改性的淀粉,不含化学试剂的残留,产品的理化性质得到明显的改善,因此淀粉的发酵处理改性将会是淀粉非化学改性研究的一个重要领域。

Wei 等[32]研究发现发酵菌种是影响淀粉改性的一个重要条件,不同微生物(如植物乳杆菌、酵母菌等)对淀粉的降解和改性效果不同。发酵过程中,直链淀粉含量先增加后减少,支链淀粉链长分布发生变化。这是由于发酵初期,微生物产生的酶(如 β -淀粉酶)和有机酸会解支链淀粉的短侧链,导致直链淀粉含量增加,随着发酵时间的延长, α -淀粉酶和酸水解作用会降解直链淀粉,使其含量下降。由于酶和酸的作用,导致支链淀粉的结构发生变化。张玉荣等[33]发现植物乳杆菌发酵大米得到发酵大米淀粉制作的粉条,不易断裂且有较好的延展性。王登宇等[34]以嗜酸乳杆菌、清酒乳杆菌为发酵剂发酵混合米粉,发现混合米粉的黏度升高,衰减值和回升值降低,增强了凝胶产品的稳定性。王东坤等[35]研究发现,乳酸菌发酵过程中产生的酸和酶等物质使淀粉水解,直链淀粉含量升高,降低了淀粉吸水膨胀的程度,糊化黏度不高。由此可见,发酵使淀粉的理化特性发生了显著的改变,进而可以使其制备的淀粉制品在质构、口感和风味等方面得到明显的改善,对淀粉的应用有了进一步的推动作用。然而,值得注意的是,发酵过程中原料中的非营养因子和潜在有毒化合物可能发生转化,这些变化可能对食品品质产生不利影响。因此,建立完善的发酵食品安全性控制体系和质量检测方法仍是未来研究的重要方向。

3.2.2. 酶法处理

酶法处理是食品加工中常用的生物方法。酶法改性可以选择不同酶制剂而达到不同修饰效果,通常根据不同食物来源及特点,使用不同的酶来改变其淀粉分子结构及性质,达到降低消化性能的效果。酶法改性具有安全、高效和成本低等优势,在当前是比较受欢迎的改性方式之一[36]。

Park 等[37]研究发现时间是影响酶法淀粉改性的的重要因素,大米淀粉的平均分子量随着酶处理时间的增加而降低,酶处理后链长分布也变宽,因为 4α Gase 将 α -葡聚糖从一条链转移到另一条链。武晓莉[38]采用酶法改性协同湿热处理技术对糯米淀粉的结晶结构进行调控研究。体外消化实验数据证实,处理后可显著提高抗性淀粉含量,样品的 RS 含量达到 92.7%,这为开发功能性淀粉制品提供了重要的理论依据。徐佩琳[39]通过对酶法改性制备的山药抗性糊精进行研究,发现其具有更好的水溶性、热稳定性、冻融稳定性。酶法改性淀粉减少了化学试剂的使用,在一定程度上不会对人体产生危害,更加绿色环保。研制出新型酶法改性淀粉的方法对改性淀粉的应用具有极大的促进作用,也将促进食品工业的蓬勃发展

[40]。Woo 等[41]通过酶促修饰研究发现，支链淀粉在酶解作用下生成低分子量线性短链组分，这一结构变化显著提高了抗性淀粉的含量，并增强了淀粉制品的冻融稳定性。其作用机制主要归因于支链淀粉的分支结构能够有效抑制凝胶网络中的脱水收缩现象，从而维持凝胶体系的稳定性。此外，Singla 等[42]发现酶改性淀粉降低了淀粉糊的粘度，同时赋予其独特的流变行为，增加了淀粉的弹性行为和消化率。这些发现为开发功能性淀粉制品提供了重要的理论依据和技术支持。

3.2.3. 发芽处理

发芽作为一种生物加工技术，可有效提升谷物和粗粮的食用价值，显著改善其烹饪特性和感官品质[43]。在种子发芽过程中，会发生一系列复杂的生理生化反应，其中储存的淀粉和蛋白质等大分子营养物质被降解[44]，同时合成 γ -氨基丁酸和酚类化合物等生物活性物质[45]，并降低植酸等抗营养因子的含量[46]。这些变化不仅提高了谷物和粗粮的营养价值，还显著改善了其食用口感。

发芽时间和不同基因型种类的淀粉均是影响淀粉改性的因素。Xing 等[47]研究发现发芽时间越长，淀粉的降解和结构变化越显著；不同基因型的藜麦淀粉对发芽处理的响应不同，尤其是直链淀粉含量的差异显著影响淀粉的降解模式。发芽过程中，酶在淀粉颗粒表面随机吸附并形成孔洞，随后孔洞扩展为通道，促进酶进一步渗透到颗粒内部，最终导致颗粒表面出现明显的皱褶和孔洞，而低直链淀粉含量的淀粉颗粒更容易被酶攻击，形成更多的孔洞；发芽过程中，直链淀粉和支链淀粉的分子链被酶水解，导致平均分子量降低，分子尺寸增加。近年来，针对发芽荞麦的营养价值和功能特性已开展了多项研究。Zhou 等[48]的研究表明，荞麦经 7 天发芽处理后，其维生素 C 含量较原始样品提高了 14 倍；总黄酮含量增加至 4.2 倍；芦丁含量提升约 300%；同时，DPPH、ABTS 和超氧自由基清除活性分别提高了 107%、144%和 88%。Seerat Bhinder 等[49]系统研究了不同发芽时间(24~96 小时)对荞麦营养成分及其在松饼加工中的应用影响。研究发现，发芽超过 72 小时可显著增强荞麦粉的抗氧化活性，这主要归因于游离类黄酮的积累，发芽 48~72 小时可提高荞麦粉中必需氨基酸和 γ -氨基丁酸的含量，将发芽 24~48 小时的荞麦粉应用于松饼制作，可显著降低产品的血糖生成指数(GI)，其 GI 值明显低于未发芽荞麦粉制作的松饼。这些研究结果为开发功能性发芽谷物制品提供了重要的理论依据。

通过上述对大米改性分析，将 9 种方法进行比较，具体结果见表 1。

Table 1. Comparison of different modification technologies
表 1. 不同改性技术的比较

改性技术	优点	缺点	适用场景	对 GI 值的影响
蒸煮	操作简单，成本低	可能破坏部分营养成分	家庭烹饪、工业化生产	降低 GI 值
挤压膨化	高效，适合大规模生产	设备成本高，能耗大	工业化生产	显著降低 GI 值
超声波处理	绿色环保，不破坏营养成分	设备成本高，处理时间较长	实验室研究、小规模生产	降低 GI 值
辐照处理	高效，可大规模应用	可能产生辐照残留	工业化生产	显著降低 GI 值
高压处理	高效、绿色环保、保留营养成分	设备成本高、能耗高、技术复杂	功能性食品开发、实验室研究、高端食品	显著降低 GI 值
脉冲电场	高效快速、节能环保、保留食品品质	设备成本高、技术复杂、安全性问题	功能性食品开发、实验室研究、工业化生产	降低 GI 值
发酵	增加营养价值，改善口感	工艺复杂，发酵时间较长	功能性食品开发	降低 GI 值
酶法处理	高效，绿色环保	酶制剂成本高	功能性食品开发	显著降低 GI 值
发芽处理	增加营养价值，改善口感	处理时间较长	功能性食品开发	降低 GI 值

4. 结论与展望

随着我国居民生活水平的提高和膳食结构的改变,消费者对食品多样化、功能化和营养化的需求日益增长。低 GI 食品因其在预防和控制糖尿病、肥胖症及心脑血管疾病等慢性病方面的功能,逐渐受到关注。然而,尽管市场上低 GI 食品种类繁多,相关加工技术仍存在局限性。湿热处理、微波技术及酶法的应用大多处于实验室阶段,需进一步完善技术或与其他技术结合以实现工业化生产。生物加工多采用单一菌株发酵,未来可探索混合益生菌的协调发酵及工艺优化,为生物型低 GI 食品的开发提供更多选择。此外,超声波处理加发酵和挤压膨化加酶法处理在未来将被考虑作为复合改性方法进一步降低 GI 值。超声波处理可以破坏淀粉颗粒结构,增加发酵过程中微生物的接触面积,从而提高发酵效率。挤压膨化可以改变淀粉的物理结构,增加酶法处理的效率,从而显著降低 GI 值。未来研究可以探索将多种改性技术结合使用的复合改性方法,以提高低 GI 米制品的开发效率和应用效果。

低 GI 食品的快速的发展反映了国民健康意识的增强,基于现代健康饮食趋势,其市场前景广阔。然而,目前大众对低 GI 概念的认知仍不足,需加强低 GI 饮食对健康意义的宣传。后续研究应深入探索各成分降低 GI 的作用机理,为低 GI 食品研究提供更坚实的理论基础。现阶段低 GI 米制品的研究多采用单一添加物,对产品品质的改善有限,未来可加强复合添加物的研制,以提升产品性能。此外,当前低 GI 米制品的开发多集中于重组米和米粉等基础产品,未来可在此基础上创新,开发更多样化的新型低 GI 米制品,如低 GI 米饼干、低 GI 米糕、速溶低 GI 米片等,以满足消费者日益增长的健康需求。低 GI 食品的发展潜力巨大,但需在技术优化、市场推广和产品创新等方面持续努力,以满足消费者日益增长的健康需求。

基金项目

安徽省重点研究与开发计划项目(202204c06020075)、凤阳县科技计划项目(2023CXCY01)。

参考文献

- [1] 蒋林青, 邹应腾. 低升糖水稻在降低血糖指数方面研究进展及发展前景[J]. 中外食品工业, 2024(19): 79-81.
- [2] Bloomgarden, Z. and Handelsman, Y. (2023) Diabetes Epidemiology and Its Implications. In: Jenkins, A.J. and Toth, P.P., Eds., *Lipoproteins in Diabetes Mellitus*, Springer International Publishing, 881-890. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26681-2_31
- [3] 安然, 安晓宁, 刘宝宁, 等. 大米发展及米饭蒸煮技术研究进展[J]. 中外食品工业, 2024(12): 120-122.
- [4] 郑兴飞, 谢海, 王红波, 等. 低 GI 功能性稻米的研究进展与展望[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(S1): 1-3+10.
- [5] Compart, J., Singh, A., Fettke, J. and Apriyanto, A. (2023) Customizing Starch Properties: A Review of Starch Modifications and Their Applications. *Polymers*, **15**, Article No. 3491. <https://doi.org/10.3390/polym15163491>
- [6] 乔瀚, 高嫚, 孟翔烁, 等. 低 GI 米制品研究进展[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 8-10+62.
- [7] Ngo, T.V., Kunyane, K. and Luangsakul, N. (2023) Insights into Recent Updates on Factors and Technologies That Modulate the Glycemic Index of Rice and Its Products. *Foods*, **12**, Article No. 3659. <https://doi.org/10.3390/foods12193659>
- [8] 王勇, 应剑, 董志忠, 等. 低升糖指数大米研究进展[J]. 生物产业技术, 2017(4): 41-47.
- [9] Wang, H., Zhang, B., Chen, L. and Li, X. (2016) Understanding the Structure and Digestibility of Heat-Moisture Treated Starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, **88**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.03.046>
- [10] 董志雄. 基于 RS2 型抗性淀粉和苦荞的低 GI 米线配方研制[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023.
- [11] 马永轩, 张名位, 魏振承, 等. 挤压膨化对大米和糙米理化与营养特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(12): 9-12.
- [12] Téllez-Morales, J.A. and Rodríguez-Miranda, J. (2023) Improved Extrusion Cooking Technology: A Mini Review of Starch Modification. *Journal of Culinary Science & Technology*, **23**, 1-10. <https://doi.org/10.1080/15428052.2022.2163952>

- [13] Neder-Suárez, D., Amaya-Guerra, C.A., Pérez-Carrillo, E., Quintero-Ramos, A., Mendez-Zamora, G., Sánchez-Madrigal, M.Á., *et al.* (2019) Optimization of an Extrusion Cooking Process to Increase Formation of Resistant Starch from Corn Starch with Addition of Citric Acid. *Starch-Stärke*, **72**, Article ID: 1900150. <https://doi.org/10.1002/star.201900150>
- [14] Liu, R., Geng, Z., Li, T., Zhang, M., Zhang, C., Ma, T., *et al.* (2024) Effects of Different Extrusion Temperatures on the Physicochemical Properties, Edible Quality and Digestive Attributes of Multigrain Reconstituted Rice. *Food & Function*, **15**, 6000-6014. <https://doi.org/10.1039/d4fo00044g>
- [15] Yılmaz, A. and Tugrul, N. (2023) Effect of Ultrasound-Microwave and Microwave-Ultrasound Treatment on Physicochemical Properties of Corn Starch. *Ultrasonics Sonochemistry*, **98**, Article ID: 106516. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106516>
- [16] Guo, Y., Song, R., Zhu, S., Liu, X. and Wang, X. (2024) Effects of Ultrasonic Treatment on the Texture Quality of Aged Rice Flour. *Journal of Cereal Science*, **117**, Article ID: 103918. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103918>
- [17] 张楚佳, 贾楚辉, 高嫒, 等. 3 种物理方法制备抗性糯米淀粉的结构与物化特性[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 193-207.
- [18] Niu, R., Raza, H. and Wang, M. (2025) Introducing Vitexin in Rice Starch Using Ultrasound to Enhance V-Type Resistant Starch. *LWT*, **215**, Article ID: 117287. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117287>
- [19] Tang, J., Liang, Q., Ren, X., Raza, H. and Ma, H. (2022) Insights into Ultrasound-Induced Starch-Lipid Complexes to Understand Physicochemical and Nutritional Interventions. *International Journal of Biological Macromolecules*, **222**, 950-960. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.242>
- [20] He, C., Zhang, R., Fan, R., Yu, J., Hu, J., Peng, Q., *et al.* (2024) Starch Modification by Low-Dose Electron Beam Irradiation: A Comprehensive Study between Buckwheat Starch, Potato Starch and Pea Starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, **283**, Article ID: 137810. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137810>
- [21] 魏常锦. 农产品抗性淀粉制备的研究进展[J]. 农业与技术, 2021, 41(17): 28-30.
- [22] Lei, X., Yu, J., Hu, Y., Bai, J., Feng, S. and Ren, Y. (2023) Comparative Investigation of the Effects of Electron Beam and X-Ray Irradiation on Potato Starch: Structure and Functional Properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, **236**, Article ID: 123909. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123909>
- [23] Peng, Z., Wang, X., Liu, Z., Zhang, L., Cheng, L., Nia, J., *et al.* (2024) Modifying the Resistant Starch Content and the Retrogradation Characteristics of Potato Starch through High-Dose Gamma Irradiation. *Gels*, **10**, Article No. 763. <https://doi.org/10.3390/gels10120763>
- [24] Wang, N., Dong, Y., Zhang, H., Wang, B., Cao, J., Dai, Y., *et al.* (2023) Exploring the Mechanism of High Hydrostatic Pressure on the Chemical Activity of Starch Based on Its Structure and Properties Changes. *Food Chemistry*, **418**, Article ID: 136058. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136058>
- [25] Chen, Z.-G., *et al.* (2020) The Analysis of the Effects of High Hydrostatic Pressure (HHP) on Amylose Molecular Conformation at Atomic Level Based on Molecular Dynamics Simulation. *Food Chemistry*, **327**, Article ID: 127047. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127047>
- [26] Hsiao, Y. and Wang, C. (2020) Microbial Shelf-Life, Starch Physicochemical Properties, and in Vitro Digestibility of Pigeon Pea Milk Altered by High Pressure Processing. *Molecules*, **25**, Article No. 2516. <https://doi.org/10.3390/molecules25112516>
- [27] Hong, J., Zeng, X., Han, Z. and Brennan, C.S. (2018) Effect of Pulsed Electric Fields Treatment on the Nanostructure of Esterified Potato Starch and Their Potential Glycemic Digestibility. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **45**, 438-446. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.11.009>
- [28] Chen, B., Xiao, Y., Ali, M., Xu, F., Li, J., Wang, R., *et al.* (2024) Improving Resistant Starch Content of Cassava Starch by Pulsed Electric Field-Assisted Esterification. *International Journal of Biological Macromolecules*, **276**, Article ID: 133272. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133272>
- [29] Duque, S.M.M., Leong, S.Y., Agyei, D., Singh, J., Larsen, N., Sutton, K., *et al.* (2022) Understanding the Mechanism of How Pulsed Electric Fields Treatment Affects the Digestibility and Characteristics of Starch in Oat Flour. *Applied Sciences*, **12**, Article ID: 10293. <https://doi.org/10.3390/app122010293>
- [30] 韩春然, 牙韩琴, 那治国, 等. 发酵方式对玉米粉加工特性及淀粉精细结构的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(2): 93-100.
- [31] 廖卢艳, 吴卫国. 发酵技术在淀粉改性上的应用[J]. 中国酿造, 2014, 33(1): 20-22.
- [32] Wei, C., Ge, Y., Zhao, S., Liu, D., Jiliu, J., Wu, Y., *et al.* (2022) Effect of Fermentation Time on Molecular Structure and Physicochemical Properties of Corn Ballast Starch. *Frontiers in Nutrition*, **9**, Article ID: 885662. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.885662>
- [33] 张玉荣, 周显青, 李庆光, 等. 植物乳杆菌发酵大米粉及其淀粉特性变化[J]. 粮食与饲料工业, 2012(8): 18-22+25.

- [34] 王登宇, 孔垂琴, 王冰, 等. 乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(3): 229-239.
- [35] 王东坤, 张佳艳, 李才明, 等. 植物乳杆菌强化发酵对鲜湿米粉品质的影响及作用机理分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 134-139.
- [36] 赵秋艳, 陈伊超, 王田林, 等. 酶法改性豌豆蛋白及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 1-10.
- [37] Park, H.R., Kang, J., Rho, S. and Kim, Y. (2020) Structural and Physicochemical Properties of Enzymatically Modified Rice Starch as Influenced by the Degree of Enzyme Treatment. *Journal of Carbohydrate Chemistry*, **39**, 250-266. <https://doi.org/10.1080/07328303.2020.1788574>
- [38] 武晓莉. 酶法改性协同湿热处理调控糯米淀粉结晶结构及其体外消化行为评价[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2024.
- [39] 徐佩琳. 酸热法和微波预处理-酶法制备山药抗性糊精及其特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [40] 李翠翠, 谢章艳, 贾笑莉, 等. 山药淀粉的改性及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(2): 6-9.
- [41] Woo, S., Kim, J., Jeong, H., Shin, Y., Hong, J., Choi, H., *et al.* (2021) Development of Freeze-Thaw Stable Starch through Enzymatic Modification. *Foods*, **10**, Article No. 2269. <https://doi.org/10.3390/foods10102269>
- [42] Singla, D., Singh, A., Dhull, S.B., Kumar, P., Malik, T. and Kumar, P. (2020) Taro Starch: Isolation, Morphology, Modification and Novel Applications Concern—A Review. *International Journal of Biological Macromolecules*, **163**, 1283-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.093>
- [43] Guan, Q., Ding, X., Jiang, R., Ouyang, P., Gui, J., Feng, L., *et al.* (2019) Effects of Hydrogen-Rich Water on the Nutrient Composition and Antioxidative Characteristics of Sprouted Black Barley. *Food Chemistry*, **299**, Article ID: 125095. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125095>
- [44] Yılitrak, S., Kocadağlı, T., Çelik, E.E., Özkaynak Kanmaz, E. and Gökmen, V. (2021) Effects of Sprouting and Fermentation on Free Asparagine and Reducing Sugars in Wheat, Einkorn, Oat, Rye, Barley, and Buckwheat and on Acrylamide and 5-Hydroxymethylfurfural Formation during Heating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **69**, 9419-9433. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c03316>
- [45] Ding, J., Johnson, J., Chu, Y.F. and Feng, H. (2019) Enhancement of γ -Aminobutyric Acid, Avenanthramides, and Other Health-Promoting Metabolites in Germinating Oats (*Avena sativa* L.) Treated with and without Power Ultrasound. *Food Chemistry*, **283**, 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.136>
- [46] Kayisoglu, C., Altikardes, E., Guzel, N. and Uzel, S. (2024) Germination: A Powerful Way to Improve the Nutritional, Functional, and Molecular Properties of White- and Red-Colored Sorghum Grains. *Foods*, **13**, Article No. 662. <https://doi.org/10.3390/foods13050662>
- [47] Xing, B., Teng, C., Sun, M., Zhang, Q., Zhou, B., Cui, H., *et al.* (2021) Effect of Germination Treatment on the Structural and Physicochemical Properties of Quinoa Starch. *Food Hydrocolloids*, **115**, Article ID: 106604. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106604>
- [48] Zhou, X., Hao, T., Zhou, Y., Tang, W., Xiao, Y., Meng, X., *et al.* (2014) Relationships between Antioxidant Compounds and Antioxidant Activities of Tartary Buckwheat during Germination. *Journal of Food Science and Technology*, **52**, 2458-2463. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1290-1>
- [49] Bhinder, S., Singh, N. and Kaur, A. (2022) Impact of Germination on Nutraceutical, Functional and Gluten Free Muffin Making Properties of Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum*). *Food Hydrocolloids*, **124**, Article ID: 107268. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107268>