

低血糖生成指数食品加工关键技术及 产品开发现状分析

梁佳欣¹, 刘莹¹, 李志江^{1,2,3}, 王立东^{1,2,4*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 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, 大庆 163319; 3. 黑龙江省杂粮加工及质量安全工程技术研究中心, 大庆 163319; 4. 黑龙江省普通高等学校谷物副产物综合利用重点实验室, 大庆 163319)

摘要: 随着生活方式与饮食结构的不断改变, 亚健康 and 慢性病趋于低龄化、常态化, 糖尿病患者及肥胖者人数激增。高糖类食品引起的剧烈血糖波动是诱发肥胖及慢性病高发的重要原因, 饮食治疗是目前糖尿病的主要辅助治疗手段, 以低血糖生成指数(glycemic index, GI)为基础的饮食可以降低患糖尿病等慢性疾病的风险, 并有效改善糖尿病患者的血糖水平。因而低 GI 食品的研发倍受关注。本文综述了低 GI 食品加工的关键技术及国内外产品开发现状, 分析不同加工方式导致食品内部不同成分相互作用从而引起 GI 值变化的机制, 阐明未来发展趋势, 为低 GI 食品加工方式的选择提供有效依据, 消费者可结合自身要求选择相应产品, 同时也为未来低 GI 食品的开发提供参考。

关键词: 血糖生成指数; 相互作用; 关键技术; 产品开发

Analysis on key technologies and product development status of low glycemic index food processing

LIANG Jia-Xin¹, LIU Ying¹, LI Zhi-Jiang^{1,2,3}, WANG Li-Dong^{1,2,4*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Department of National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 3. Heilongjiang Engineering Research Center for Coarse Cereals Processing and Quality Safety, Daqing 163319; 4. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Grain by-products in Colleges and Universities of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China)

ABSTRACT: With the continuous changes in lifestyle and diet, sub-health and chronic diseases tend to be younger and normalized, the number of diabetics and obese people have increased significantly. The sharp blood sugar fluctuations caused by high-sugar foods are an important cause of obesity and chronic diseases, and diet therapy is the main auxiliary treatment method for diabetes, and diet based on low glycemic index (GI) diet can reduce the risk of chronic diseases such as diabetes, and effectively improve the blood sugar level of diabetics. Therefore, the research and development of low GI foods has attracted much attention. This paper reviewed the key technologies of low GI food processing and the development status of low GI products at home and abroad, analyzed the mechanism of

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(2021ZX12B06)、中央引导地方科技发展专项(DQKJJYD0001)

Fund: Supported by the Heilongjiang Province Millions of Engineering Science and Technology Major Project (2021ZX12B06), and the Central Government Guides Local Science and Technology Development Special Projects (DQKJJYD0001)

***通信作者:** 王立东, 副教授, 主要研究方向为淀粉资源的深度加工与利用。E-mail: wanglidong-521@163.com

***Corresponding author:** WANG Li-Dong, Associate Professor, Deep Processing and Utilization of Starch Resources, Heilongjiang Bayi Agricultural University, No.5, Xinfeng Road, High-tech Zone, Daqing 163319, China. E-mail: wanglidong-521@163.com

different processing methods leading to the interaction of different components in food and causes the change of GI value, clarified the future development trend, so as to provide an effective basis for the selection of low GI food processing methods, consumers can choose corresponding products according to their own requirements, aiming to provide a reference for the development of low GI foods in the future.

KEY WORDS: glycemic index; interaction; key technologies; product development

0 引言

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指标^[1]。高 GI 食物与低 GI 食物的血糖水平如图 1 所示。低 GI 食品通常指 GI<55 的食品, 在人体内吸收缓慢, 不会引起血糖大幅度改变, 对预防肥胖、糖尿病以及心脑血管疾病的预防起到积极作用^[3]。糖尿病是由胰岛素分泌缺乏或抵抗引起的疾病, 目前已成为威胁人类健康重大疾病之一。饮食治疗目前是糖尿病主要辅助治疗手段, 因而低 GI 食品的开发愈发受到人们关注。

《“健康中国 2030”规划纲要》中指出, 实现慢病管理需要加强饮食营养干预, 低 GI 饮食是很好的选择^[4]。研究表明, 食品中营养成分如蛋白质、脂质, 功能性成分如膳食纤维、多酚、多肽等能够改善机体的血糖水平。摄入蛋白质可以通过减缓胃排空率、促进胰岛素分泌和影响淀粉消化率来平衡血糖^[5]。脂质与淀粉之间可形成螺旋复合物, 直链淀粉-脂质螺旋复合物显示出抗淀粉酶水解性, 淀粉水解的百分比随之降低^[6]。功能性成分本身不会增加血糖浓度, 且摄入后会抑制碳水化合物的消化与吸收, 从而降低食物的血糖应答^[7]。将上述成分加入产品中, 可有效降低产品的 GI 值。目前国内外对于低 GI 食品的研究不仅包括如馒头、重组米及面条等主食, 还包括方便食品及休闲食品, 如发酵类饮品等。此外, 不同的前处理及加工方式对食品质构、性状及消化特性会产生不同影响, 其 GI 值也有所不同^[8]。例如: 谷物的精加工导致其膳食纤维、维生素及其他营养物质损失, 碳水化合物富集, 使其血糖生成指数升高。

目前国内外低 GI 食品市场存在品类单一、品质不佳等问题。因此, 改善低 GI 食品品质, 增加低 GI 食品种类将成为低 GI 食品研发的关键问题和主要挑战。本文主要概括了低血糖生成指数食品加工的关键技术及国内外产品开发现状, 对不同加工方式导致食品内部不同成分相互作用引起的 GI 值变化机制进行了分析, 旨在为低血糖生成指数食品加工方式的选择及新产品开发提供参考。

1 低 GI 食品加工关键技术分析

食品原料经不同加工方式处理后, 其组分结构和特性会产生改变, 易引起食品 GI 值发生变化。食品加工过程

中常用的技术方法按其类别主要分为物理法、化学法和生物法 3 大类。化学法处理由于具有一定污染, 安全性低, 应用较少。下面将重点阐述物理法及生物法两种加工方式对食品中相关成分及 GI 值的影响。

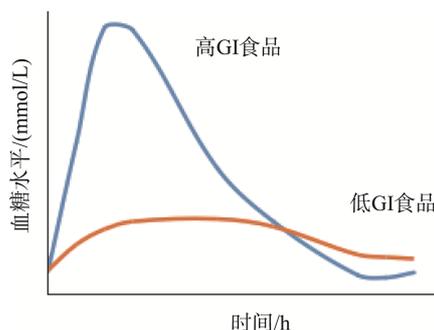


图 1 高、低 GI 食物的血糖水平^[2]

Fig.1 Blood glucose level of high and low GI foods^[2]

1.1 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。

1.1.1 热加工处理

湿热处理指在限制水含量(10%~30%)条件下进行的加热处理(90~120°C), 仅涉及水和热, 无需添加化学试剂, 是一种环境友好型加工方法, 是生产绿色食品的重要手段^[9]。因在高温高湿环境下发生的直链淀粉-脂质、蛋白质-淀粉交联等基质之间的聚合团聚现象, 可在一定程度上限制其对淀粉颗粒的破坏作用^[10]。湿热处理会促进淀粉样品聚集, 其短程有序性和结晶度得到增强, 从而导致慢消化淀粉和抗性淀粉(resistant starch, RS)的总量显著增加, 对酶的抗性增强, 淀粉水解速度减缓, GI 值有所下降。WANG 等^[11]对椰子淀粉依次进行脱支改性及湿热处理, 为采用该法处理椰子淀粉得到具有低消化率和增强功能特性的如粉丝和面包椰子淀粉类产品提供了理论支持。湿热处理淀粉因设备运行成本较高、热量渗透不均匀而在食品工业实现大规模工艺生产方面存在一定的难度。

挤压处理的原理是在高温、高压和剪切力的作用下使产品结构、营养和功能特性发生改变^[12]。在挤压过程中通过蛋白质变性、淀粉糊化/解聚以及组分之间的交联/结合,

导致了食品组分的结构变化^[13]。挤压处理能促进淀粉与脂肪酸形成淀粉-脂肪酸复合物抑制淀粉酶解,有效提高了淀粉的抗消化性,从而获得低GI产品^[14]。挤压处理具有能耗低、制取过程连续性强以及加工周期短等优点,与其他加工方式如湿热处理相结合,能进一步有效提高淀粉的抗消化性,有助于进一步降低食品GI。

微波处理利用了微波的共振原理及其穿透性,使食品内部极性分子与微波产生共振,产生类似摩擦现象,能在短时间达到均匀加热的效果。微波处理后,淀粉分子构象发生改变,直链淀粉和支链淀粉从淀粉中解离,尤其在低温老化阶段有利于结晶重排,促进回生淀粉中有序和双螺旋结构形成,形成较强抗酶性结构^[15]。LYDA等^[16]研究发现,微波法烹饪米饭中的纤维、灰分和总淀粉含量与传统烹饪方式并无太大差别,但其中的总酚含量和抗氧化活性高于常规煮米饭。微波加工食品营养成分损失较少,成品能起到稳定餐后血糖的效果。但目前微波技术应用还处于实验室阶段,仍需完善技术以进行工业化生产。

1.1.2 非热加工处理

非热加工处理法能有效避免热量对食品感官和风味的负面影响,在食品领域起着重要作用。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^[17]。与支链淀粉相比,直链淀粉分子结构上葡萄糖分子排列整齐,不易受 α -淀粉酶影响。超声波空化作用引起的短时间低热环境对食品的物理/化学性质不会产生不利影响,且果蔬汁中营养物质如多酚、花青素及胡萝卜素等营养成分得到很好保留,延缓肠道对葡萄糖的吸收,血糖上升幅度减小^[18]。采用超声波技术处理珍珠小米粉,其GI值从58.25降低至48.49^[19]。相较于传统方法,超声波技术的应用缩短了时间、减少溶剂消耗、降低成本和提高产率,是目前食品非热处理中的主要加工方法。

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^[20]。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^[21]。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。ZHANG等^[22]在采用Co- γ 辐照下处理人参不定根,检测其提取物发现,经辐射处理的总皂苷含量和抗氧化自由基清除能力显著提高,抗氧化能力显著增强,能显著降低小鼠的血糖值和脂质水平,过高剂量的辐照会使氨基酸残基氧化、断裂,改变生物大分子的功能完整性^[23]。目前,辐照处理在食品生产加工领域仅作为一种辅

助技术措施应用,商业化的大规模应用还需要进一步的工艺技术研究。

1.2 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。

1.2.1 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。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^[24]。TAO等^[25]研究证实黑曲霉发酵产生的纤维素酶促进了植物细胞壁分解及活性成分释放,导致淀粉吸收率减小,食品GI值降低,血糖波动减缓,对血糖控制起到了积极作用。此外,有研究表明:植物乳杆菌发酵胡萝卜果肉时,多糖分子量及结构发生变化,具有更强的羟基自由基清除能力,保护细胞免受高血糖引起的损害^[26]。然而,发酵前后原料的非营养因子或有毒化合物的变化可能不利于食品质量,发酵食品的安全性控制与检测还有待完善。

1.2.2 酶法处理

酶法处理是食品加工中常用的生物方法。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。不同酶作用位点与作用方式也有所差异,如QIAO等^[27]研究发现采用碱性蛋白酶法得到的多肽抗氧化活性最佳,对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶活性具有较强抑制作用。而采用普鲁兰酶对甘薯淀粉进行脱支处理,制备得到的抗性淀粉含量为35.23%,有效地减缓了淀粉在体内的分解^[28]。目前仅通过酶法制备低GI食品的工艺较少,一般都是将物理改性方法与酶法结合进行使用。

1.2.3 发芽处理

发芽是常见的营养富集生物加工方式,能使谷物中蛋白质、脂肪及总酚含量增加,提高产品营养属性,改变淀粉颗粒表面形态、淀粉组成及理化性质等。发芽早期时,种子原料中的营养成分并未被大量消耗, γ -氨基丁酸、酚类、黄酮类活性物质在发芽处理过程中被富集^[29],抗氧化能力及对 α -淀粉酶的抑制率也有所增强^[30],可显著降低高脂饮食诱导的空腹血糖、血脂、胰岛素抵抗。发芽处理具有操作简单、经济节约、营养富集等优点,可进一步对发芽条件进行研究,广泛应用于食品加工生产之中。

不同加工处理方式对食品结构与理化特性的影响也有所差异,表1总结了常用于生产低GI食品的几种加工处理方式所需条件、对食品结构的影响以及对降低食品的GI值是否有利。

表 1 加工方式对食品 GI 值的影响
Table 1 Effects of processing methods on food GI value

| 加工方式 | 处理条件 | 对食品结构的影响 | 是否有利 | 文献来源 |
|------|----------------------------------|---|------|---------|
| 湿热处理 | 水分<35%, 温度: 84~120°C | 有利于淀粉双螺旋结构有序形成, 使得分子链间作用增强, α -淀粉酶敏感性降低 | 有利 | [9-11] |
| 挤压处理 | 挤压温度: 81°C, 螺杆转速: 128 r/min | 蛋白质变性、淀粉糊化/解聚以及组分之间交联/结合, 导致食品组分结构变化, 降低食品 GI | 有利 | [12-14] |
| 微波处理 | 功率为 12 W/g, 时间: 3 min | 加速直链淀粉从淀粉颗粒中游离出来, 并导致直链淀粉和支链淀粉分支为短链, 形成较强的抗酶性结构 | 有利 | [15-16] |
| 超声处理 | 功率: 500 W, 时间: 3~15 min | 淀粉颗粒表面可能产生孔洞, 淀粉中直链淀粉含量减少, 慢消化淀粉含量增加 | 有利 | [17-19] |
| 辐照处理 | γ 射线, 辐照剂量: 10~50 kGy | 辐照生成 β -键和羧基, β -键不能被人体酶消化, 而辐照淀粉的羧基抑制酶的攻击 | 有利 | [20-23] |
| 发酵 | 温度: 37°C 恒温 真空条件 发酵时间: 8 h | 蛋白质二级结构 β -转角占比显著增加, β -折叠和无规则卷曲降低, 黏聚性和弹性有所增加 | 有利 | [24-26] |
| 酶法改性 | 普鲁兰酶 预处理温度: 95°C | 水解支链淀粉 α -1,6 糖苷键, 形成短直链淀粉分子, 并在室温条件下适当的直/支淀粉比例及淀粉分子大小有利于形成抗酶解淀粉 | 有利 | [27-28] |
| 发芽处理 | 温度: 25°C 时间: 96 h | 种子中抗营养因子的减少提高了 γ -氨基丁酸和多酚类等活性物质含量上升, 抑制淀粉酶进行水解, 减弱了葡萄糖的转运 | 有利 | [29-30] |

2 低 GI 食品的开发现状分析

2.1 主食类食品

当前, 以精细米面为主食的饮食结构易引起糖尿病、高血压等多种慢性疾病。主食定量, 粗细搭配, 提倡 GI 主食成为主食食品发展新趋势^[31]。谷物和薯类食品中含有蛋白质、碳水化合物及多种微量元素等营养物质, 可作为人体经济且重要的能量来源。人们日常食用的不同谷物和薯类及其相关制品在人体内引起的血糖波动存在差异, 其 GI 值不同。表 2 显示了部分谷物和薯类及其制品的 GI 值, 为其作为相关原料替代品的选择提供参考。

表 2 部分作物及其制品 GI 值^[32]
Table 2 GI value of some crops and their products^[32]

| 食品种类 | 名称及其 GI 值 |
|------|--|
| 谷薯作物 | 甜玉米 55; 荞麦 54; 山药 51; 芋头 48; 豌豆 42; 小麦 41; 扁豆 38; 黑麦 34; 鹰嘴豆 33; 绿豆 27; 大麦 25; 芸豆 24 |
| 谷薯制品 | 燕麦片粥 55; 乌冬面 55; 米粉 54; 意大利面 49; 藕粉 33; 豆腐 32; 豆腐干 24; 马铃薯粉条 13.6 |
| 果蔬作物 | 猕猴桃 52; 葡萄 43; 椰子 40; 苹果 36; 草莓 29; 柚子 25; 火龙果 25; 百香果 16 |

2.1.1 面制品

我国面制品如馒头、面条等作为传统主食深受人们喜爱^[33]。然而, 通过传统方法蒸制的馒头 GI 值约为 85, 白面包 GI 值约为 75, 均属于高 GI 食品。因此, 在低 GI 主食食品的开发中, 应着重缓解主食中碳水化合物的消化吸收速

度, 增加主食中的膳食纤维及其他功能性成分的含量。

馒头作为中国传统主食代表, 一般以小麦粉为原料, 添加水及发酵剂后, 经揉制、发酵、汽蒸制成^[34]。降低馒头 GI 值大多从其原料入手, 即在小麦粉中加入营养物质, 在降低食品 GI 值的同时其营养价值也有所提高。张子睿等^[35]研究葡萄籽原花色素对马铃薯馒头中淀粉消化特性影响, 发现在原料中加入花青素, 花青素氢键与淀粉结合会导致淀粉水解速率降低, 消化特性被抑制, 因而马铃薯馒头 GI 值显著降低。或采用杂粮、低 GI 原料对小麦粉进行代替或部分替代, 如采用具有“三高两低”(即高纤维、高蛋白、高维生素、低脂、低糖)特性的青稞粉为原料制成的馒头 GI 值为 70±11, 虽依旧属于高 GI 食物, 但相较于国际血糖指数表中小麦馒头的 GI 值(88)有所降低^[36]; 以莲藕为原料部分替代小麦粉制成的馒头, 产品 GI 值降低, 具有较高含量的膳食纤维、蛋白质和多糖, 不但营养价值得到了提高, 而且还具有降血糖、降血脂和抗氧化等作用^[37]。

面条作为我国传统主食主体, 占面制品消费份额中很大部分。可通过将小麦粉与其他低 GI 谷物进行复配得到低 GI 面条。多种谷物的复配不仅增加了面条中营养物质与活性物质的种类与含量, 其功能特性也有所增强^[38]。青稞含有丰富的对人体有益的生物活性化合物, 如纤维成分、 β -葡聚糖和多酚等。王润等^[39]以青稞生粉为主, 豌豆粉、荞麦粉、藜麦粉为辅料而制成了食用性较好的低 GI 杂粮面条, 产品具有较高营养价值, 多酚含量与抗氧化活性也有所提高^[40]。

面包作为世界大部分地区饮食的重要组成部分, 已有 6000 多年历史^[41]。以精制小麦粉为原料制成的面包, 其

营养价值较低且摄入餐后血糖值会迅速提高,而以全麦粉为原料的制品虽营养价值高于精制小麦粉且 GI 值略低,但其感官品质较差。可根据消费者不同需求,通过不同种类杂粮粉与小麦粉进行复配或取代以得到更优配方。例如用大麦芽粉和大豆粉替代小麦粉制成的面包,其蛋白质、脂肪、支链淀粉和钙含量显著改善,可满足消费者对营养性的需求^[42];而以苋菜粉为原料制成面包,其中的 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性相较于小麦面包有所降低,测定其 GI 值仅为 42 左右,具有优异的抗氧化和抗糖尿病性能^[43];将山药粉和辣木粉对小麦面包的原料进行部分替代,增加了膳食纤维含量,制得的复合面包 GI 值仅为 37.78,抗消化性更好,且饱腹感更强^[44]。

2.1.2 米及米制品

中国是米食最悠久的国家,以大米为原料,常见的食品种类包括米饭、米粉等,GI 值约为 70~79,属于高 GI 食品^[45]。因此,长时间将大米作为单一主食对餐后血糖控制不利。近年来,具有高膳食纤维、低 GI 且外观与普通大米相似的重组米得到广泛研究。重组米是将大米与其他谷物、低 GI 原料进行粉碎后通过挤压制成,不同粉碎方法与粉碎条件会使颗粒粒度发生不同变化,食品中不同组分如淀粉相应的性质也随之改变^[46]。其营养价值及餐后血糖控制效果都优于普通大米^[47]。对于米制品,则可在其中加入相应的营养物质^[48]或采用其他抗消化性较强淀粉对大米淀粉进行替代^[49],以得到营养价值更高、感官品质更优,且 GI 值更低的综合质量更好的产品。此外,不同烘焙方法得到的大米及其制品的 GI 值也有所不同,因此可通过优化加工条件与产品配方相结合来获得 GI 值更低的产品。NASEER 等^[50]通过改变烘焙条件和成分组成,在高直链淀粉米粉中添加 4.66%的羧甲基纤维素制备出低 GI 无麸质饼干,可作为糖尿病等慢性病患者的饮食补充。

目前,采用低 GI 谷薯作物来替代或部分替代小麦粉成为低 GI 主食研发的主要方向之一。获得的产品 GI 值可显著降低,但大多数产品存在外观粗糙、风味或适口性差等问题,导致消费者感官评价较低。因此,可在产品烹饪方法、功能性成分添加或配方优化等方面进行深入研究,在降低食品 GI 值的基础上,同时对其感官品质提供保障。

2.2 方便食品

随着经济的飞速发展和生活、工作节奏的加快,人们对方便食品的需求随之增大。蛋糕及饼干类食品广受消费者的喜爱,但普通蛋糕原料一般为小麦粉及鸡蛋,摄入后会引起血糖的剧烈波动,而以扁豆粉为原料制作无麸质蛋糕时,豆类的添加显著影响淀粉组分的体外水解,相较于无麸质小麦制品其快消化淀粉含量较少,GI 值也有所降低^[51];在原料中加入活性物质也可有效降低蛋糕的 GI 值, MIRAB 等^[52]向海绵蛋糕中添加石榴皮提取物,研究结果

表明石榴皮提取物对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性有一定的抑制作用,进而降低了制得的海绵蛋糕的 GI 值。饼干制品的原料多种多样,可通过对原料进行适当选择从而制得相应的低 GI 产品, CHINMA 等^[53]以小米和斑巴拉花生为原料生产的饼干中的蛋白质、体外蛋白质消化率、慢消化淀粉和抗性淀粉、总酚含量与抗氧化活性显著高于普通饼干,且快消化淀粉、淀粉水解指数相较于普通饼干均有所降低。此外,功能性多糖替代蔗糖可进一步降低食品的 GI 值。彭辉等^[54]采用普通面粉和玉米淀粉混合替代低筋面粉,低聚异麦芽糖替代蔗糖而制成的饼干,具有较低的 GI 值约为 42.3,食用后不会引起餐后血糖的剧烈波动,为糖尿病患者提供了更多选择。

以藜麦、燕麦、薏仁和荞麦等具有可调节血糖的生物活性成分的多种杂粮为原料制成杂粮粥,因荞麦中的荞麦碱和黄酮类、皂苷类物质燕麦中的燕麦 β -葡聚糖,以及薏米中的薏米多糖等可直接通过降低消化酶的活性从而显著抑制碳水化合物消化,从而降低餐后血糖应答,得到的制品的 GI 值降低至 50.77^[55],有助于控制餐后血糖稳定;多谷物复合粉具有营养丰富、食用便捷等优点而受到消费者青睐^[56]。玉米中含有亚油酸、维生素 E、膳食纤维等成分能够起到降低血脂、血压以及抗癌、清除自由基等多重作用,刘静雪等^[57]将玉米作为基准原料,复配多种低 GI 谷物粉:糯米改性粉、荞麦改性粉、菊芋改性粉等制成的低 GI 谷物复合营养粉,可供糖尿病患者、肠胃消化不好的人群食用,具有低 GI、高膳食纤维等特征。传统的方便食品多为高碳水、高油高糖混合物,且营养结构单一。目前,关于将豆类、代糖和活性物质引入至休闲食品的制作生产方式很好地改善了上述问题,且为糖尿病、高血脂等代谢性疾病患者的饮食提供了更多选择。

2.3 休闲食品

随着市场的不断升级,消费者对休闲食品需求也随之升级。为满足消费者需求,休闲食品更注重食品的绿色性、天然性和健康性。水果因其富含矿物质、维生素、微量元素以及膳食纤维,成为人们日常膳食的重要组成部分。有研究表明,适当摄入新鲜水果对血糖控制起到积极作用^[58],这是因为果蔬中含有天然多酚类物质,可作为消化酶的抑制剂而降低消化酶活性,从而阻止消化酶降解人体摄入的淀粉类物质,降低了血糖水平^[59]。与完整水果相比,果汁中的果糖更容易被吸收,因此 GI 值也要略高于新鲜水果。董宇豪等^[60]以桑葚、百香果、柚子和火龙果为原料制成的复合果汁相较于单一果汁,对葡萄糖苷酶的抑制效果更好,即升糖速度更为缓慢,有助于血糖的稳定。目前,休闲食品中突出添加膳食纤维、维生素、矿物质等营养成分,提高休闲食品的产品附加值,是休闲食品的一大发展方向。

3 结论与展望

随着我国居民生活水平不断提高, 膳食结构的改变, 消费者对食品多样化、功能化、营养化的需求随之增大。低 GI 食品具有预防和控制糖尿病、肥胖症、心脑血管等慢性病的功能。目前, 市面上的低 GI 食品琳琅满目, 采用的相关加工方式能有效降低食品 GI 值, 但依旧存在一些局限性。湿热处理、微波技术及酶法的应用还大多处于实验室阶段, 仍需完善技术或与其他技术有机结合以进行更多工业化生产; 目前生物加工多采用单一菌株发酵, 未来可进一步研究混合益生菌的协调发酵及工艺优化, 为生物型低 GI 食品开发提供更多选择, 扩大低 GI 食品市场; 还可通过进一步研究低 GI 原料的替代量及其他活性物质的添加以提高产品的营养性和感官特性。低 GI 食品的飞速发展及普及, 体现了国民健康意识的不断增强。基于现代健康饮食的新趋势, 低 GI 食品将会有更广阔的市场空间。

参考文献

- [1] JENKINS DJ, WOLEVER TM, TAYLOR RH, *et al.* Glycemic index of foods: A physiological basis for carbohydrate exchange [J]. *Clin Nutr*, 1981, 34(3): 362–366.
- [2] KAUR J, KAYR K, SINGH B, *et al.* Insights into the latest advances in low glycemic foods, their mechanism of action and health benefits [J]. *J Food Meas Charact*, 2021, 16(1): 533–546.
- [3] JENKINS JA, DEHGHAN M, MENTE A, *et al.* Glycemic index, glycemic load, and cardiovascular disease and mortality [J]. *New Eng J Med*, 2021, 384(14): 226S–273S.
- [4] 郭清. “健康中国 2030”规划纲要的实施路径[J]. *健康研究*, 2016, 36(6): 601–604.
GUO Q. The implementation path of the “Healthy China 2030” outline [J]. *Health Res*, 2016, 36(6): 601–604.
- [5] XU XL, BEAN S, WU XR, *et al.* Effects of protein digestion on *in vitro* digestibility of starch in sorghum differing in endosperm hardness and flour particle size [J]. *Food Chem*, 2022, 383(383): 1–6.
- [6] JIN ZQ, BAI FL, CHEN YB, *et al.* Interactions between protein, lipid and starch in foxtail millet flour affect the *in vitro* digestion of starch [J]. *Cyta-J Food*, 2019, 17(1): 640–647.
- [7] 李智, 艾连中, 丁文字, 等. 可溶性膳食纤维对玉米淀粉体外消化的抑制作用[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(19): 1–6.
LI Z, AI LZ, DING WY, *et al.* Inhibition of soluble dietary fiber on *in vitro* digestion of corn starch [J]. *Food Ind Technol*, 2019, 40(19): 1–6.
- [8] 胡爱军, 李靖, 王梦婷, 等. 抗性淀粉的制备、功能和应用研究进展[J]. *许昌学院学报*, 2022, 41(5): 66–70.
HU AIJ, LI J, WANG MT, *et al.* Research progress on the preparation, function and application of resistant starch [J]. *J Xuchang Univ*, 2022, 41(5): 66–70.
- [9] 陈静茹, 孟庆佳, 康乐, 等. 低血糖生成指数谷物及其制品研究进展与法规管理现状[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(18): 338–343.
CHEN JR, MENG QJ, KANG L, *et al.* Research progress and regulatory management status of cereals and their products with low glycemic production index [J]. *Food Ind Technol*, 2020, 41(18): 338–343.
- [10] 贾泽宇, 卞科, 刘远晓, 等. 热处理对小麦粉品质特性影响的研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2023. DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000015
JIA ZY, BIAN K, LIU YX, *et al.* Research progress on the effect of heat treatment on the quality characteristics of wheat flour [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2023. DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000015
- [11] WANG RM, XIE QT, WANG SY, *et al.* The structural, functional and digestive characteristics of acorn starch after combined debranching and heat-moisture treatment and their relationships [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(12): 7622–7633.
- [12] CLAUDIA A, ELIANA P, LILLIAN B, *et al.* Healthy novel gluten-free formulations based on beans, carob fruit and rice: Extrusion effect on organic acids, tocopherols, phenolic compounds and bioactivity [J]. *Food Chem*, 2019, 292(292): 304–313.
- [13] MAPENGO CR, EMMAMBUX MN. Processing technologies for developing low GI foods—A review [J]. *Starch Stärke*, 2022, 74(7–8): 1–10.
- [14] CERVANTES-RAMÍREZ JE, CABRERA-RAMIREZ AH, MORALES-SÁNCHEZ E, *et al.* Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 246(246): 1–10.
- [15] LI J, HAN W, ZHANG B, *et al.* Structure and physicochemical properties of resistant starch prepared by autoclaving-microwave [J]. *Starch Stärke*, 2018, 70(9–10): 1–29.
- [16] LYDA C, NANTAWAN T, WANNASAWAT R. Effect of microwave cooking on quality of riceberry rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *J Food Qual*, 2020, 2020(2020): 1–9.
- [17] 白婷, 靳玉龙, 朱明霞, 等. 超声波改性淀粉的研究进展[J]. *粮食与食品工业*, 2019, 26(6): 30–33.
BAI T, JIN YL, ZHU MX, *et al.* Research progress in starch modification by ultrasonic [J]. *Cere Food Ind*, 2019, 26(6): 30–33.
- [18] 高瑞萍, 朱建飞, 周文斌, 等. 超声加工技术对果蔬汁品质影响及其作用机制研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(7): 326–338.
GAO RP, ZHU JF, ZHOU WB, *et al.* Progress in understanding the effect and action mechanism of ultrasound processing on the quality of fruit and vegetable juices [J]. *Food Sci*, 2022, 43(7): 326–338.
- [19] VIDHYALAKSHMI R, MEERA MS. Dry heat and ultrasonication treatment of pearl millet flour: Effect on thermal, structural, and *in-vitro* digestibility properties of starch [J]. *J Food Meas Charact*, 2023, 199(199): 1–11.
- [20] PAN MF, YANG JY, LIU KX, *et al.* Irradiation technology: An effective and promising strategy for eliminating food allergens [J]. *Food Res Int*, 2021, 148(148): 1–11.
- [21] LAM ND, QUYNH TM, DIEP TB, *et al.* Effect of gamma irradiation and pyrolysis on indigestible fraction, physicochemical properties, and molecular structure of rice starch [J]. *J Food Proc Preserv*, 2021, 45(10): 1–12.
- [22] ZHANG L, QI X, LU XT, *et al.* Study on hypoglycemic effects of irradiated ginseng adventitious roots [J]. *Food Chem*, 2022, 13(13): 1–10.

- [23] 陈雅纯, 郭明珠, 王利文, 等. 贝类原肌球蛋白致敏性消减技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(3): 172-179.
CHEN YC, GUO MZ, WANG LW, *et al.* Research progress on allergenic reduction technology of shellfish tropomyosin [J]. Food Res Dev, 2022, 43(3): 172-179.
- [24] SINGH AK, REHAL J, KAUR A, *et al.* Enhancement of attributes of cereals by germination and fermentation: A review [J]. Crit Rev Food Sci, 2015, 55(11): 1-61.
- [25] TAO X, YONGHENG Z, QI C, *et al.* Modulating the digestibility of cassava starch by esterification with phenolic acids [J]. Food Hydrocolloid, 2021. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100234
- [26] WAN YJ, SHI HF, XU R, *et al.* The origin of hypoglycemic benefits of probiotic-fermented carrot pulp [J]. Food Chem, 2019, 67(3): 1-34.
- [27] QIAO H, BI X, ZHANG Y, *et al.* Enzymic polypeptide antioxidant activity and inhibitory activity on α -glucosidase and α -amylase from *Paeonia ostii* cake [J]. Ind Crop Prod, 2020, 146(C): 1-12.
- [28] 朱木林, 叶成宇, 陆国权. 酶法制备甘薯抗性淀粉工艺优化研究[J]. 食品工业, 2014, 35(8): 70-73.
ZHU ML, YE CY, LU GQ. Enzymatic preparation of sweet potato resistant starch process optimization [J]. Food Ind, 2014, 35(8): 70-73.
- [29] ENYINNAYA CC, AYUBA IP, EMMANUEL AO, *et al.* Physicochemical properties, *in vitro* digestibility, antioxidant activity and consumer acceptability of biscuits prepared from germinated finger millet and Bambara groundnut flour blends [J]. Heliyon, 2022, 8(10): 1-7.
- [30] LI R, WANG Q, ZHAO GL, *et al.* Effects of germination time on phenolics, antioxidant capacity, *in vitro* phenolic bioaccessibility and starch digestibility in sorghum [J]. Int J Food Sci Technol, 2022, 57(8): 5175-5185.
- [31] 苏晓梅. 谷物食品的种类及其营养价值[J]. 食品安全导刊, 2022, (11): 148-150.
SU XM. Types of cereal foods and their nutritional value [J]. Chin Food Saf Magaz, 2022, (11): 148-150.
- [32] 张卓琼, 郭军. 低血糖生成指数食品研究与开发应用现状[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(1): 313-320.
ZHANG ZQ, GUO J. Research and development application status of low glycemic index food [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(1): 313-320.
- [33] 李傲荣. 碱性电解水对重庆小面面团理化特性及面条品质影响[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
LI AOR. Effects of alkaline electrolyzed water on physicochemical properties of Chongqing noodles dough and its noodle quality [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [34] 孟克迪. 馒头风味的研究进展[J]. 现代面粉工业, 2021, 35(3): 54.
MENG KD. Research progress of steamed bun flavor [J]. Mod Flour Ind, 2021, 35(3): 54.
- [35] 张子睿, 田金虎, 张惠玲, 等. 葡萄籽原花色素对马铃薯馒头中淀粉消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 234-240.
ZHANG ZR, TIAN JH, ZHANG HL, *et al.* Effect of grape seed proanthocyanidins on starch digestion properties in potato steamed buns [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(7): 234-240.
- [36] 方圆, 任欣, 彭洁, 等. 青稞及其制品的体内外淀粉消化特性研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 144-152.
FANG Y, REN X, PENG J, *et al.* Study on *in vivo* and *in vitro* starch digestion characteristics of barley and its products [J]. J Food Sci Technol, 2021, 39(1): 144-152.
- [37] LI XY, GUO YQ, CHEN LR, *et al.* Texture and bio-functional characteristics of a Chinese steamed bread prepared from lotus root powder partially replacing wheat flour [J]. Sci Rep UK, 2021, 11(1): 1-7.
- [38] JASHANDEEP K, KAMALJIT K, BALJIT S, *et al.* Insights into the latest advances in low glycemic foods, their mechanism of action and health benefits [J]. J Food Meas Charact, 2021, 16(1): 533-546.
- [39] 王润, 党斌, 杨希娟, 等. 青稞低 GI 挤压面条制作工艺优化及营养与抗氧化活性分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 37-44.
WANG R, DANG B, YANG XJ, *et al.* Optimization of production process and analysis of nutritional and antioxidant activity of barley low GI extruded noodles [J]. J Chin Cere Oils Ass, 2019, 34(6): 37-44.
- [40] ZHANG Y, YIN L, RASHEED HA, *et al.* Effects of chitosan on the physicochemical properties, *in vitro* starch digestibility, antimicrobial potentials, and antioxidant activities of purple highland barley noodles [J]. LWT, 2020, 132: 1-8.
- [41] 吴淑蒙. 玉米油酸面团对面包品质的影响及风味形成机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
WU SM. Study on the effect of corn oleic dough on bread quality and flavor formation mechanism [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [42] PATCHIMAPORN U, CARGELE M, RONY S, *et al.* Comparative study of physicochemical, nutritional, phytochemical, and sensory properties of bread with plantain and soy flours partly replacing wheat flour [J]. Food Sci Nutr, 2022, 10(9): 3085-3097.
- [43] OLAGUNJU AI, OLUWAJUYITAN TD, OYELEYE SI. Multigrain bread: Dough rheology, quality characteristics, *in vitro* antioxidant and antidiabetic properties [J]. J Food Meas Charact, 2021, 1: 1851-1864.
- [44] MÉLISSA KAA, BN BK, KABLAN GJI, *et al.* Effect of incorporation of yam flour and moringa powder in wheat bread on glycemic response [J]. Pol J Food Nutr Sci, 2022, 13(9): 781-796.
- [45] 王浩瑞, 李小平. GI 值测定方法及加工方式对谷物 GI 值的影响研究进展[J]. 食品科学, 2022. DOI: 11.2206.ts.20221110.2026.018.html
WANG HR, LI XP. Research progress on the influence of GI value determination methods and processing methods on grain GI value [J]. Food Sci, 2022. DOI: 11.2206.ts.20221110.2026.018.html
- [46] 郎双静, 武彦春, 李晓, 等. 流化床气流超微粉碎不同操作参数对玉米淀粉粒度的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(6): 198-206.
LANG SJ, WU YC, LI X, *et al.* Effects of different operating parameters on the particle size of corn starch in fluidized bed airflow ultrafine pulverization [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(6): 198-206.
- [47] 代娇, 李凤林, 谢天, 等. 低 GI 高膳食纤维重组米加工工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(6): 30-35.
DAI J, LI FL, XIE T, *et al.* Study on processing technology of low GI and high dietary fiber restructured rice [J]. Cere Oils, 2022, 35(6): 30-35.
- [48] SOFI SA, SINGH J, CHHIKARA N, *et al.* Quality characterization of

- gluten free noodles enriched with chickpea protein isolate [J]. *Food Biosci*, 2020, 36: 1–32.
- [49] GENG DH, ZHANG XJ, GAN J, *et al.* Understanding the texture and digestibility attributes of rice noodles supplemented with common vetch starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 222: 772–782.
- [50] NASEER B, NAIK HR, HUSSAIN SZ, *et al.* Exploring high amylose rice in combination with carboxymethyl cellulose for preparation of low glycemic index gluten-free shelf-stable cookies [J]. *Brit Food J*, 2021, 123(12): 4240–4263.
- [51] GULARTE MA, GÓMEZ M, ROSELL CM. Impact of legume flours on quality and *in vitro* digestibility of starch and protein from gluten-free cakes [J]. *Food Bioproc Technol*, 2012, 5(8): 1–9.
- [52] MIRAB B, GAVLIGHI HA, SARTESHNIZI RA, *et al.* Production of low glycemic potential sponge cake by pomegranate peel extract (PPE) as natural enriched polyphenol extract: Textural, color and consumer acceptability [J]. *LWT*, 2020, 134(134): 1–8.
- [53] CHINMA CE, IBRAHIM PA, ADEDEJI OE, *et al.* Physicochemical properties, *in vitro* digestibility, antioxidant activity and consumer acceptability of biscuits prepared from germinated finger millet and Bambara groundnut flour blends [J]. *Heliyon*, 2022, 8(10): 1–7.
- [54] 彭辉, 刘绍, 黄染林, 等. 一种低 GI 饼干的研制[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 156–162.
- PENG H, LIU S, HUANG RL, *et al.* Development of a low-GI biscuit [J]. *Food Technol*, 2020, 45(12): 156–162.
- [55] 于振, 曹雨露, 韩冬, 等. D-最优混料设计优化低 GI 藜麦杂粮粥配方[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(15): 117–122.
- YU Z, CAO YL, HAN D, *et al.* D-optimal mixture design to optimize the recipe of low GI *Quinoa* multigrain porridge [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(15): 117–122.
- [56] 张丽娟, 李燕, 周剑丽, 等. 一种降糖代餐粉的配方研究及质量评价[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(9): 95–100.
- ZHANG LJ, LI Y, ZHOU JL, *et al.* Formulation study and quality evaluation of a kind of hypoglycemic meal replacement powder [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(9): 95–100.
- [57] 刘静雪, 李凤林, 高婷婷, 等. 低 GI 高膳食纤维谷物复合营养粉工艺[J]. *食品工业*, 2019, 40(9): 149–153.
- LIU JX, LI FL, GAO TT, *et al.* Low GI high dietary fiber grain complex nutrient powder process [J]. *Food Ind*, 2019, 40(9): 149–153.
- [58] 苏健, 覃玉, 潘晓群, 等. 新鲜水果摄入与 2 型糖尿病患者血糖控制关系的研究[J]. *中华高血压杂志*, 2020, 28(8): 800.
- SU J, TAN Y, PAN XQ, *et al.* Association between fresh fruit consumption and glycemic control in patients with type 2 diabetes [J]. *Chin J Hyp*, 2020, 28(8): 800.
- [59] 陈天晴. 膳食多酚抑制 α -葡萄糖苷酶活性的构效关系研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- CHEN TQ. The structure-activity relationship of dietary polyphenols inhibiting α -glucosidases [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2018.
- [60] 董宇豪, 陈春, 扶雄. 桑葚、百香果、柚子及火龙果复合果汁协同抑制 α -葡萄糖苷酶的作用及机制[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(2): 87–93.
- DONG YH, CHEN C, FU X. The synergistic inhibition of α -glucosidase by mulberry, passion fruit, grapefruit and dragon fruit complex juices [J]. *Mod Food Technol*, 2022, 38(2): 87–93.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



梁佳欣, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。
E-mail: 2629842587@qq.com



王立东, 副教授, 主要研究方向为淀粉资源的深度加工与利用。
E-mail: wanglidedong-521@163.com