

GI值的测定方法和影响因素及低GI食品生理学功能的研究进展

靳玉龙

(西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 西藏拉萨 850000)

摘要: 食物血糖生成指数 (Glycemic Index, GI) 是反应食物消化吸收速率及餐后血糖应答的重要指标, 能够确切地反映食物摄入一段时间后人体血糖的波动状态。根据 GI 的数值, 一般将食物分为: 高 GI 食物 ($GI > 70$)、中 GI 食物 ($55 < GI \leq 70$)、低 GI 食物 ($GI \leq 55$) 三类。大量循证医学研究显示, 低 GI 食品能够有效预防空腹血糖调节受损和葡萄糖耐量减退, 从而能够降低糖尿病的发生风险, 减轻胰岛细胞的负担, 避免血糖的剧烈波动, 更有利于血糖保持稳定从而预防糖尿病、控制肥胖、抗高血压等并发症的发生, 对保持身体健康具有重要作用。该研究综述了近年来血糖生成指数的检测方法及制品的研究进展, 介绍了影响对血糖生指数因素及低 GI 食品生理学功能, 展望了其应用前景。

关键词: 血糖生成指数; 影响因素; 生理学; 检测方法; 研究进展

文章编号: 1673-9078(2024)03-350-360

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.3.0024

Research Progress on Determination Methods and Influencing Factors of GI Value and the Physiological Functions of Low GI Foods

JIN Yulong

(Institute of Agricultural Products Development and Food Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China)

Abstract: Food Glycemic Index (GI) is an important index reflecting food digestion and absorption rates and postprandial glycemic response, which can accurately reflect the fluctuation of human blood glucose after food intake for a period of time. According to the value of GI, foods are generally divided into three categories: high GI food ($GI > 70$), medium GI food ($55 < GI \leq 70$) and low GI food ($GI \leq 55$). A large number of evidence-based medical studies have shown that low GI foods can effectively prevent the impairments of fasting blood glucose regulation and glucose tolerance, thereby reducing the risk of diabetes and the burden of islet cells and avoiding the vigorous fluctuation of blood sugar, which is more conducive to maintaining the stability of blood sugar so as to prevent the occurrence of diabetes, control obesity, counteract hypertension and other complications. These effects of low GI foods are important to keeping the body healthy. In this paper, research progress on the determination methods of blood GI and GI products is reviewed, the factors affecting GI and the physiological functions of low GI foods were presented, and the application prospects of GI determination methods and low GI foods are provided.

Key words: glycemic index; influence factor; physiological; detection method; research progress

引文格式:

靳玉龙.GI值的测定方法和影响因素及低GI食品生理学功能的研究进展[J].现代食品科技,2024,40(3):350-360.

JIN Yulong. IResearch progress on determination methods and influencing factors of GI value and the physiological functions of low GI foods [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 350-360.

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 国家自然科学基金地区基金项目 (32060532); 西藏自治区财政厅专项项目 (XZNKYSPS-2023-C-045); 西藏自治区拉萨市达孜区科技计划项目 (XZDZKJ-2021-01); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1000305)

作者简介: 靳玉龙 (1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 食品工程; E-mail: 1229009920@qq.com

根据国际糖尿病联盟(International Diabetes Federation, IDF)发布的《2021IDF全球糖尿病地图》显示,2021年全球约有5.37亿成年人患有糖尿病,全世界9%的健康支出花在了糖尿病上,总额达9.66亿美元;670万人死于糖尿病。十年间,我国糖尿病患者由9000万增加至1.4亿,增幅56%,中国也成为世界糖尿病病人最多的国家,患病人数约占全世界的25%,我国与糖尿病相关的医疗支出排名世界第二。在人体健康体系维护中,合理膳食是提高机体免疫力、抵御各种饮食性疾病的重要措施^[1]。《中国居民营养与慢性病状况报告》也指出预防和控制慢病的关键在于科学合理膳食,有效的膳食策略可以避免患者使用更高成本的治疗方式。积极生活方式干预(如饮食干预、运动等),能够有效预防空腹血糖调节受损和葡萄糖耐量减退。研究显示,血糖控制一定程度上是导致糖尿病的危险因素^[2]。考虑到饮食碳水化合物对能量摄入和血糖水平的影响,目前临床上提出多种膳食模式,低升糖指数饮食(Low Glycemic Index Diet, LGID)、热量限制饮食(Energy-restricted Diet, ED)、终止高血压饮食(Dietary Approaches to Stop Hypertension, DASH)、碳水化合物限制饮食(Carbohydrate-restricted Diet, CD)和富含纤维素饮食(Fiber-enriched Diet, FD)等。其中,低GI以其独特的生理特性用于糖尿病研究。

全球有关低GI饮食与健康的研究已经半个世纪,鉴于其在近代人类发展中对人体健康的深度影响,部分国家已经将GI作为生产食品的营养指标之一^[3];在我国低GI的概念也已经写进中国居民膳食指南、中国糖尿病医学营养治疗指南、特殊医学用途配方食品的相关标准等。本文就针对GI的检测、影响因素及生理功效等方面等进行综述,旨在为开发低血糖指数食品提供理论依据。

1 血糖生成指数(GI)及测定方法

1.1 GI与GL的概念的提出

1981年,加拿大科学家Dr. Jenkins首次提出食物血糖生成指数GI,1997年FAO/WHO专家委员会将GI定义为:含50g碳水化合物试验食物血糖应答曲线下面积(Area Under the Curve, AUC)与等量碳水化合物标准食物(一般为葡萄糖或白面包)血糖应答之比。GI是反应食物消化吸收速率及餐后血糖应答的重要指标,能够确切地反映食物摄

入一段时间后人体血糖的波动状态^[4]。GI能从“质”的角度重新区分CHO(Carbohydrate, CHO),是对靠测量膳食能量和碳水化合物摄入量进行饮食控制的补充和提升^[5]。但GI只能定性的反应食物的“质”,不能反应膳食总能量的控制、平衡膳食的搭配及食物碳水化合物的量。基于此,Salmerón等^[6]提出血糖负荷(Glycemic Load, GL)的概念。GL将摄入的碳水化合物的“质”与“量”结合考量,对实际提供的食物或总体膳食模式的血糖效应进行定量测定,可全面评价食物的总血糖效应,弥补了GI不能真实反应单位重量食物的血糖效应的缺陷。一般利用食物的GI值与可利用碳水化合物的乘积,即 $GL=GI \times \text{碳水化合物含量(g)}$ 计算。

根据GI的数值,以葡萄糖或白面包为参考食物(GI值为100),一般将食物分为三类:高GI食物($GI>70$)、中GI食物($55<GI\leq 70$)、低GI食物($GI\leq 55$)^[7]。

高GI的食物进入人体后,迅速被消化系统吸收,并进入血液产生血糖峰值,促使胰岛素分泌增加,导致血糖下降速度快,血糖变化剧烈;相比之下,低GI食物消化速度慢,吸收率低,对血糖影响小,胰岛素需求量也相应较少,从而避免血糖的剧烈波动,更有利于血糖保持稳定^[8]。研究表明,低GI食物制品具有预防糖尿病、控制肥胖、抗高血压等诸多益处,对保持身体健康具有重要作用^[9]。根据食物GL的大小,将食物分为高GL食物($GL>20$),说明食用一定量的食物后血糖的变化明显;中GL食物($10\leq GL\leq 20$),说明食用相应质量的食物后对人体血糖产生一定的影响;低GL食物($GL<10$),表明食用相应质量的食物对人体血糖影响不大。一般具有低GL食物通常GI也低,具有中等或高GL食物,则GI值或高或低。

1.2 GI的检测

目前,GI的测定一般有人体试验法及体外模拟消化法,其中人体试验法法是食物GI主要的测定方法,也是食品通过GI认证的主要方法。国际组织-国际标准化组织(IX-ISO)于2010年发布了《食品-血糖指数(GI)的测定和食品分类的建议》,规定了测定食品中碳水化合物的GI的方法。

1.2.1 体内测定法

我国国家卫生健康委员会2019年发布了《食物血糖生成指数测定方法》的行标规定测定GI的标

准方法为人体试验法。要求至少筛选符合测试条件的 12 人进行参考食物（通常为葡萄糖）、试食测定（在 5~10 min 进食完毕），从第一口进食时间开始计时，测定空腹血糖及餐后 2 h 内血糖值（15、30、45、60、90、120 min），以时间为横坐标，血糖浓度为纵坐标绘制血糖应答曲线图，并计算 IAUC，从而计算受试食物的 GI 值。

有研究者提出，体内消化法可以分为人体试验法和小鼠体内消化法^[10]。也有人认为小鼠体内消化法，不应该被认定为是检测食物 GI 的方法。它只能表明小鼠在饲喂待测食物后的血糖反应。动物试验（小鼠试验）在低 GI 食品研究方面，主要用于研究低 GI 食品对糖脂代谢调节作用的影响，为低 GI 食品的开发提供参考依据^[11-13]。

表 1 体外测定GI方法

Table 1 GI was determined *in vitro*

消化方法	计算公式	备注	来源
<p>选取了 21 种产品，用咀嚼法测定产品的消化率。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 每种产品中使用等量的潜在有效淀粉（1 g）。 2. 将咀嚼后的产物放入一个含有 6 mL 0.5 mol/L 磷酸钠缓冲溶液（含 50 mg 胃蛋白酶），受试者用 5 mL 磷酸盐缓冲液（pH 值 6.9）漱口 60 秒，并将漱口液吐入烧杯。搅拌内容物，pH 值调整为 1.5。每个样品在 37 °C 孵育 30 min。 3. 用 NaOH 将 pH 值重新调整到 6.9，并将样品转移到透析袋，加入 1 mL 猪胰 α-淀粉酶液，定容至 30 mL。 4. 每半小时取出等分（2 mL）透析液，用 3,5-二硝基水杨酸（DNS）法分析还原糖含量。 	$eGI=0.862HI+8.1981$ <p>($r=0.877, P<0.0001$)</p>	<p>HI (Hydrolysis Index) 为水解指数，为测试样品曲线下面积 (AUC) 与参考样品曲线下面积 (AUC) 之比</p>	[18]
<p>选取了 39 种已知 GI 值的富含淀粉的食物。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 水浴振荡破坏食物颗粒； 2. 在管中加入瓜尔胶； 3. 样品先与胃蛋白酶在盐酸中培养，然后在醋酸钠缓冲液中与蔗糖酶、胰 α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶孵育，温度为 37 °C； 4. 分别在 20 和 120 min 后取样分，分别用于计算快速消化淀粉（RDS）、慢消化淀粉（SDS）和抗性淀粉（RS）。 	$GI=78.026 \times \frac{RAG}{AV} + 17.607$ <p>($R^2=0.578$)</p>	<p>RAG (Rapidly Available Glucose) 为速效葡萄糖；AV (Available Carbohydrate) 为可利用的碳水化合物</p>	[19]
<p>选取 10 种富含淀粉的食物进行体外消化和 GI 值测定。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 食物处理后，50 mg 样品加入 10 mL HCl-KCl 缓冲液（pH 值 1.5）与 0.2 mL 胃蛋白酶在 40 °C 水浴振荡 1 h； 2. 样品与 α-淀粉酶（2.6 U/50 mg 食物部分）在 pH 值 6.9 和 37 °C 水浴振荡培养 3 h； 3. 每 30 min 取等分，测定淀粉消化量。 	$GI=0.549HI+39.71$ <p>($R^2=0.799$)</p> $GI=0.863 \times H_{90} + 39.71$ <p>($R^2=0.826$)</p>	<p>HI (Hydrolysis Index) 为水解指数，为测试样品曲线下面积 (AUC) 与参考样品曲线下面积 (AUC) 之比，通常为白面包；H_{90} 为淀粉水解 90 min 的百分比</p>	[20]
<p>30 种富碳水化合物食品，包括谷物、薯类、淀粉等。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 样品去除可溶性糖后，与 α-淀粉酶和淀粉葡萄糖苷酶混合液于 37 °C 恒温水浴温孵育； 2. 取样测定由淀粉释放的葡萄糖含量，乘以系数 0.9 即得每个时间点消化的淀粉量 S₂₀、S₁₂₀、S₂₄₀、S_{16h}； 3. 根据各时间点消化的淀粉量占总淀粉的百分比计算消化率 (S TSch, %)；16 h 后仍未消化的淀粉即抗性淀粉 (RS)。 	$GI=39.65+EAG-1.07RS$ <p>($r=0.798, P<0.01$)</p>	<p>EAG 为易利用糖（120 min 消化的淀粉量与葡萄糖之和）</p>	[21]
<p>20 种 GI 在 36 到 81 之间的富含淀粉的食物。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 食品被煮熟后，用研钵磨碎、过筛； 2. 利用猪胰 α-淀粉酶（4 U/10 mg 淀粉）在 37 °C 和 pH 值 7.4 水浴； 3. 测定不同时间淀粉消化量。 	$GI=0.74+C_{90}+19.2$ <p>($R^2=0.524$)</p>	<p>C_{90} 为 90 min 后的淀粉消化量</p>	[22]
<p>6 份水稻样品，用完整的煮熟的白米颗粒进行分析。用磁棒搅拌模拟口腔咀嚼和胃肠蠕动情况。用 α-淀粉酶（250 U/350~500 mg 样品）和淀粉葡萄糖苷酶（1 250 U/350~500 mg 样品）在 pH 值 6 和 37 °C 培养测定淀粉消化量。</p>	$GI=1.14 \times Q_{300} - 20.58$ <p>($R^2=0.952$)</p>	<p>Q_{300} 为 0~300 μm 的分解水稻颗粒与 0~3 000 μm 的体积比</p>	[23]

1.2.2 体外测定法

国内外预测食品 GI 值的体外方法较多，但不同方法预测 GI 值的有效性或精确度尚未经过验证，缺乏统一的执行标准。体外模拟消化法常用于试验研究，相比于人体试验法，更加快捷、经济，可以在不违背伦理道德规范前提下，先在体外实验过程中估计食品的 GI，然后选择最优的产品或者配方再进行人体试验。GI 主要反应的是食物在体内消化中的血糖应答反应，机体摄入不同类型的碳水化合物，会引起相应的血糖反应^[14]。而体外模拟消化法一般通过建立体外消化模型利用淀粉酶、蛋白酶、胰酶等模拟人体口腔、胃肠道对食物进行体外消化，测定食物中淀粉的水解率，得到水解指数，通过公式从而可以估计食物的血糖生成指数即 eGI^[15-17]。大多数体外模型只测量淀粉消化过程，没有考虑吸收和胰岛素反应的影响，不能很好地模拟人类消化系统的，如其生理、解剖学和动态生化条件，无法阐明食物体内消化率相关的现实 / 生理因素。本文体外模拟消化测试将主要从静态体外消化模型、动态体外消化模型、数值型模型进行阐述。

1.2.2.1 静态体外消化模型

在体外消化过程中的淀粉水解曲线符合一级动力学方程 $C = C_{\infty} (1 - e^{-kt})$ ，通过拟合得到所需数

值，计算出 0~120（或 180）min 的淀粉体外消化曲线下面积（AUC），得出淀粉水解指数（Hydrolysis Index, HI）， $HI (\%) = AUC_{\text{样品}} / AUC_{\text{标准品}} \times 100$ 。目前 eGI 计算公式有以下几种（见表 1），通过对不同消化方法和测定公式对消化模型进行了比较。尽管体外模拟试验比人体试验更便宜，但其在预测 GI 上并不一定准确。虽然这些体外测定模型能够预测食物的 GI 值，但不可能重现食物的整个餐后血糖反应曲线。

1.2.2.2 动态体外消化模型

静态体外消化模型测试得到的数据往往生理相关性较低，无法揭示与食品体内消化相关的现实或生理因素。动态体外消化模型因为可通过设置相应的步骤来更好地模拟真实的人体内消化环境^[24]。

1.2.2.3 数值模型

数值模型通常指的是对待测食品进行初步消化或基本组分分析，得到与之相关的样品消化、理化以及不同食品组分的含量等参数，而后基于数值统计和软件进行分析得到的一种经验型预测 GI 模型。正常饮食过程中，消费者往往需要同时消费不同种类的食物。因此，为评估一份复合餐的 GI 值，FAO 以该复合餐中各类食物自身的 GI 值为准，并利用相关数据库获得该复合餐中各类食物的 GI 值^[24]。

表 2 动态体外消化模型

Table 2 Dynamic *in vitro* digestion model

模型	测定方法
TIMcarbo 模型	TIMcarbo 模型是动态体外消化测试食品餐后血糖反应的经典模型，其不仅模拟了口腔消化对血糖生成浓度的影响，同时还综合考虑了葡萄糖、果糖等物质在小肠的吸收过程。其操作步骤可概括为： (1) 待测食品利用机器粉碎模拟人口腔对食物的咀嚼作用后进入到动态的胃肠道模拟消化系统内，得到消化产物； (2) 消化产物经计算机自动分析，得到葡萄糖、果糖等物质的含量与时间的变化，并得到葡萄糖释放曲线。
小肠模型	1、将屠宰后的鸡肠安装在工程小肠模型中。2、使用蠕动泵 a 将含有葡萄糖溶液灌注入肠内。 3、打开蠕动泵 b 用 SIF 溶液循环冲洗。4、每隔一段时间从缓存出口收集溶液，测定葡萄糖含量。

表 3 数值模型

Table 3 Numerical model

模型	测定方法
FAO 预测模型	FAO 以该复合餐中各类食物自身的 GI 值为准，并利用相关数据库获得该复合餐中各类食物的 GI 值，代入到公示中，进而来计算其 GI 值： $GI_{\text{预测}} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \times GI_i}{\sum_i C_i}$ 式中： i 指的是单一或者复杂食品中的基本营养成分数， $i=1,2,3,\dots$ ； C_i ($i=1,2,3,\dots$) 指的是 i 种营养元素所含的可利用碳水化合物的含量； GI_i ($i=1,2,3,\dots$) 指的是第 i 种营养素的 GI 值。
COMSOL Multiphysics 模型	基于商业计算机软件 COMSOL Multiphysics 建立了一个可模拟人小肠内液体流动、碳水化合物消化和葡萄糖吸收过程的数值模型，进而开发了一种模拟人体消化和预测不同碳水化合物食品葡萄糖吸收率的工具，有助于控制热量的摄入过程。

2 影响GI的因素

2.1 食物本身的因素

食物中所含有的成分会影响食物的GI值,汪丽萍等^[24]通过研究发现谷物配比对多谷物共挤压粉eGI影响较大,食品的eGI与其所含有营养成分含量具有相关性,其中共挤压粉中蛋白质、膳食纤维、直链淀粉、抗性淀粉、脂肪/淀粉含量与eGI呈负相关。康晶燕等^[25]利用实验证实了膳食纤维、脂肪和蛋白质会抑制淀粉类食物的消化从而减缓葡萄糖释放速率。

Meng等^[26]通过调查不同数量的碳水化合物及与其他宏量营养素组合对食物的GI和GL值的影响,发现在添加高碳水化合物早餐麦片的情况下,相应提高25%、50%和100%的标准食物,导致葡萄糖AUCi值分别比标准值高32%、44%和65%。同时还观察到所测膳食GI和GL值的差异;最高含量的蛋白质(50g)与标准碳水化合物挑战的组合导致葡萄糖AUCi值降低25%,从而导致较低的GI和GL值;在标准碳水化合物挑战中添加100%能量的脂肪对葡萄糖AUCi没有显著影响。

2.1.1 碳水化合物

碳水化合物是唯一可以直接增加血清中葡萄糖浓度的营养素,可以直接或间接刺激人体胰岛素的分泌^[27],而机体摄入不同类型的碳水化合物,如淀粉的结晶结构、支/直比、淀粉链长等的差异对淀粉酶解都产生影响。根据淀粉的消化速度可分为三类:快速消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS),是指在20min内消化的淀粉,在摄入后人体血糖水平立即上升,为人体提供必要的能量,缓慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS),是指在20~120min内消化的淀粉,其在小肠中被缓慢但完全消化,以维持人体血液中葡萄糖浓度的稳定;抗性淀粉(Resistant Starch, RS),是指在120min以上消化的淀粉,不能被人体消化道消化,可以通过厌氧发酵被结肠中的菌群降解^[28]。血糖生成指数与RDS、SDS、RS含量显著相关,研究人员通过物理、化学、酶解等方式处理淀粉,通过降低SDS含量,提高RS含量来降低食品的GI。秦仁炳等^[29]通过压热处理后淀粉-脂质复合物的RDS、SDS质量分数显著下降,RS质量分数显著增加,体外酶促消化率和eGI显著降低。张子睿^[30]研究发现,随着葡萄籽原花青素添加量的增加,葡萄原花青素对淀粉酶

的活性也有一定的抑制作用。

直链淀粉含量与淀粉水解速率呈显著负相关,对淀粉的酶解具有明显的抑制作用^[31]。支链淀粉的长度影响淀粉消化速率,短支链的支链淀粉含量与RDS呈正相关,而长支链的支链淀粉有更好的结晶特性和稳定性,与SDS和RS正相关^[32]。徐菁等^[33]分析发现鹰嘴豆淀粉和豌豆淀粉中直链淀粉和抗性淀粉含量较高,淀粉的水解率增幅比较缓慢,最终水解率较其他种类淀粉低,测得的eGI分别为48.89、59.90。

不同类型的淀粉颗粒水解速率不同,采用X-衍射分析,淀粉颗粒结晶结构主要分为A型、B型、C型及V型。通过比较不同类型淀粉酶解敏感性发现,V型<B型<C型<A型^[34]。

综合以上发现,淀粉的类型、水解速率以及影响淀粉水解速率的因素都直接或者间接的影响GI值的高低,因而如何选择相关碳水化合物制品对于身体健康的维持至关重要。

2.1.2 蛋白质

在食品加工过程中,蛋白质在一定程度上能够降低淀粉的消化速率,主要因为以下几方面^[35]:一是蛋白质作为物理屏障,阻止消化酶与淀粉颗粒之间的接触,从而抑制淀粉水解;二是糊化过程中蛋白质网络分子形成促进淀粉-蛋白质聚集体的形成,其高密度结构阻碍了淀粉的水解;三是蛋白质与淀粉之间通过氢键、疏水相互作用等,抑制消化酶与淀粉的结合;四是蛋白质可以作为酶抑制剂,能够降低淀粉酶的活性,从而降低消化速率。

Ye等^[36]通过研究内源性蛋白质米淀粉消化率影响发现,米粉中的蛋白质通常附着在淀粉颗粒的表面,从而抑制了淀粉颗粒与酶接触。Li等^[37]研究发现,与不含蛋白质的玉米淀粉相比,含内源性蛋白质的玉米粉体外消化率显著下降,主要是RSD含量从91.37%下降至77.52%,RS含量从4.58%上升15.18%;从微观结构发现蛋白质可以部分或完全包裹淀粉颗粒形成团聚体,此外蛋白质的存在能显著降低玉米粉的膨胀力,提高糊化温度、及热稳定性,有效地保护淀粉颗粒不受剪切;Zhang等^[38]探究了外源蛋白质对淀粉消化速率的影响,发现在只有乳清分离蛋白与玉米淀粉共糊化时,能够降低RSD含量,提高RS含量,而但淀粉与蛋白质分别糊化并在消化过程中混合时,对淀粉的消化率没有影响,此外,乳清分离蛋白也可以通过抑制 α -淀粉酶和淀

粉葡萄糖苷酶的活性抑制淀粉水解。周长春等^[39]研究发现碳水化合物与蛋白质构成比例调整对II型糖尿病餐后血糖有显著影响, 适量增加糖尿病患者蛋白质的摄入比例, 可增加患者的明显饱腹感, 避免诱发血糖波动。

2.1.3 脂类物质

油脂在一定程度上也能够降低淀粉消化速率, 最主要的原因是, 脂类物质与淀粉形成复合物, 淀粉结构晶型发生改变, 由A、B型等转变为A+V、B+V、V型等结晶度更高的复合物, 从而降低淀粉的消化率。

黄强等^[40]研究了常用食用油脂和加热方式对小麦淀粉结构和体外消化性的影响, 发现淀粉与脂质复合后, 结合脂质含量显著增加, 结晶结构由A型转变为A+V型; 与恒定高温相比, 持续升温热处理形成的复合物更稳定, 且复合物的SDS及RS含量均显著增加。陈雪华等^[41]利用热水法制备不同脂质-玉米淀粉复合物, 研究结果表明淀粉-脂质复合物的RDS含量降低、SDS和RS含量增加。张昀等^[42]探究饱和脂肪酸的碳链长度对糯麦A、B淀粉-脂质复合物结构及体外消化特性的影响。黄承刚等^[43]研究表明玉米淀粉-硬脂酸复合物的形成使得晶体构象变为V型结构。Khatun等^[44]采用液相色谱-质谱联用(LC-MS)对天然大米脂类三酰甘油(TAGs)、二酰甘油(DAGs)、磷脂酰胆碱(PCs)和溶血磷脂(LPLs)进行了分析, 发现在米粉中添加脂质提取物会降低淀粉的消化率, 从而影响淀粉消化, 发现结晶性区淀粉-脂质复合物比无定形区淀粉-脂质复合物对淀粉消化率的抑制作用更大, 此外在大米淀粉体外消化过程中, 直链淀粉-脂质复合物与葡萄糖浓度之间无相关性。Lu等^[45]通过研究内源性蛋白质和脂类在藜麦淀粉消化率中的作用发现, 藜麦粉中的蛋白质和脂类强烈的抑制淀粉消化, 凝胶网络是影响不同藜麦淀粉消化过程的主要因素。但也有研究者提出内源性的豆科植物的脂肪含量与豆类eGI无显著关系^[46]。Chiavaroli^[47]研究表明, 米饭的餐后血糖反应大于意大利面。然而, 当这些食物中加入番茄酱和特级初榨橄榄油时, 米饭最大空腹血糖峰值降低了, 这种降低可能是因为高碳水化合物餐中添加了脂肪。

2.1.4 膳食纤维

膳食纤维是一种不被人体吸收利用的非淀粉多糖, 但在保持消化系统健康上的有着重要作用。膳

食纤维能够减缓小肠对葡萄糖的吸收, 主要是膳食纤维增加了肠液粘度, 阻碍葡萄糖的扩散, 从而降低肠液中的有效浓度, 三是膳食纤维通过影响 α -淀粉酶从而影响淀粉降解作用, 延长酶解时间, 降低葡萄糖的释放速率^[48]。可溶性膳食纤维与不可溶性膳食纤维都能通过吸附葡萄糖、抑制葡萄糖扩散以及改变胰淀粉酶二级结构来减缓葡萄糖的流动进程和淀粉消化速率^[49]。李智等^[50]通过研究青稞 β -葡聚糖(Barley β -glucan, BBG)、黄原胶(Xanthan Gum, XG)、魔芋胶(Konjac Glucomannan, KGM)和罗望子胶(Gamarind Seed Polysaccharide, TSP)对玉米淀粉消化的影响, 探究可溶性膳食纤维降低餐后血糖响应的机理。发现添加0.1%的BBG、XG、KGM和TSP对淀粉水解的抑制率分别达到11.59%、35.90%、30.54%和19.62%, 并能将淀粉的eGI值分别降低12.05、45.54、38.90和15.00。并且, 随着可溶性膳食纤维在胃肠道体系下的表观黏度的增大eGI值呈下降趋势, 可溶性膳食纤维能够抑制玉米淀粉的消化, 并且其黏度是降低餐后血糖响应的重要因素。

在饼干中添加大豆膳食纤维^[51]、燕麦麸和菊粉^[52]、白萝卜不溶性膳食纤维^[53]、马铃薯抗性淀粉^[54]、改性奇亚籽粕可溶性膳食纤维^[55]等都能够降低饼干的eGI值。

在人体试验中, 膳食纤维对血糖反应研究结果不一致。有研究称, 富含纤维的食物, 无论是可溶性纤维还是不可溶性纤维, 都会导致较低的GI或GL^[56]。而其他一些研究报告称, 食物中的纤维含量, 无论哪种类型, 对餐后血糖反应、胰岛素反应或GI或GL值没有显著影响^[27]。

2.2 加工烹饪方式

烹调过程会影响食物的消化率, 加工烹饪导致了食品质构的改变, 使淀粉分子膨胀, 从而软化食品, 从而影响食品的GI。相同食材在不同的烹饪方法下, 其消化特性会发生较大的改变。对谷物类食品来说, 通过降低食品在加工制作过程中淀粉糊化程度等来控制食物的GI。不同加工方式处理对GI的影响不尽相同。

张素敏等^[57]将提取的淀粉, 经蒸煮、高温油炸、烘焙3种方式处理, 在不同热处理后测定体外消化情况, 黄米淀粉蒸煮后的消化率为68%、烘焙后的消化率为52%、油炸后的消化率为51%。Yu等^[58]研究了煮法、蒸法、微波加热法、炒法和煎法

对面条抗性淀粉(RS)含量和消化特性的影响。RS含量受蒸煮时间的影响较大,不同蒸煮方法对面条的最佳蒸煮方式影响不同。微波和炒制面条的RS含量较高(0.59%~0.99%),煮制面条和蒸制面条的RS含量较低(0.43%~0.44%)。微波面条消化速度最慢,eGI最低。梅梦莹等^[59]研究发现蒸和烙2种烹饪方式的淀粉水解率相似,炸和烤的2种烹饪方式的淀粉水解率相似。淀粉水解率的大小依次为蒸>烙>烤>炸,同时4种烹饪方式对淀粉的损失程度都差不多。

2.3 其他影响因素

有研究表明食物GI值,存在高度个体差异现象。Matthan等^[60]通过对63名无慢性疾病的志愿者研究发现,使用推荐方法计算白面包的GI值为62,个体内和个体间的平均标准差达到20%和25%。并且在单纯增大样本量后,其标准差并没有得到改善,充分反映了个体在食物GI值测定的过程中存在的差异性。崔婷^[61]在国内首次研究了人群中不同主食习惯对于食物血糖应答的影响,结果提示,受试者长期以面食或米饭为主食的习惯对受试物的餐后血糖应答和食物。

3 低GI饮食的生理学功能

饮食中碳水化合物对能量摄入和血糖水平都有一定影响,GI和GL高的饮食可能与包括II型糖尿病(T2D)和心血管疾病(CVD)在内的慢性疾病的高风险相关。但也有科学家^[62,63]质疑GI与任何健康相关结果的关联,认为GI与疾病之间的关系不明确,最强的干预研究发现GI与疾病风险的生理指标之间几乎没有关系,即使是观察性研究,GI与疾病之间的关系也是有限的。

3.1 低GI食品与糖尿病

众所周知,糖尿病是因胰岛素绝对或相对分泌不足以及靶组织细胞对胰岛素敏感性降低引起蛋白质、脂肪和电解质等一系列代谢紊乱综合征,以高血糖为主要标志,其中95%糖尿病患者为II型糖尿病(T2DM)。T2DM患者的主要特征是餐后胰岛素峰值延迟、分泌峰值降低,血糖上升过快,而低GI饮食有利于改善餐后血糖和胰岛素反应,从而降低糖尿病和其他心脏代谢疾病的风险^[64]。

饮食GI与T2DM的风险呈正相关^[65],与GL相比,GI的相关性更强,大约一个标准偏差的摄入

与GL相关的风险增加的两倍多;高GL饮食对健康的年轻受试者血脂有负面影响,其中GL与LDL(低密度脂蛋白)之间呈正相关,与HDL(高密度脂蛋白)之间呈负相关性。这一关系在女性中更加明显^[66]。Ojo等^[67]根据临床试验,评估低GI饮食作为II型糖尿病成人的血糖控制标志,表明低GI饮食在控制糖化血红蛋白和空腹血糖方面比高GI饮食更有效。

此外,低GI饮食显著性降低妊娠期糖尿病患者的空腹血糖水平、胰岛素治疗的需要和降低新生儿出生体重。其降低血糖机制主要归因于低GI饮食的生理特性,低GI食物进入胃肠道后消化吸收慢、停留时间长,葡萄糖释放缓慢,有效减少了血糖波动,有利于血糖控制^[68]。

3.1.1 低GI食品与心血管疾病

饮食和生活方式模式被认为是心血管疾病(CVD)和死亡率的主要因素。特别是,摄入高碳水化合物(不包括水果和蔬菜,更多的加工碳水化合物)的饮食与代谢异常相关,随之可能增加心血管疾病的风险和相关的死亡率。

在高质量的荟萃分析研究中,也观察到高GI和GL如何影响心血管病的相互矛盾的关联,高GI或高GL与CVD事件的风险增加相关,尤其是在女性中^[66]。在一般人群中,高GI增加了健康人群心血管疾病危险因素的趋势和死亡率,高GL增加了包括心血管疾病在内的严重心脏病的风险或全因死亡率,特别是在女性中;高GI和高GL都是女性冠心病的危险因素,高GL与CVD结局相关^[69]。此外,在健康受试者和心血管疾病患者中,低GI饮食也有利于心血管疾病风险因素的降低,包括血脂-脂蛋白浓度和炎症标志物^[70]。

3.1.2 低GI食品与癌症

影响糖代谢的因素不仅与糖尿病和心血管疾病有关,而且对包括癌症在内的其他慢性疾病都起着重要的作用,特别是,由于长期高血糖导致血液胰岛素长期处于高水平状态被认为是GI/GL造成癌症风险的增加潜在机制^[71]。

高GI/GL的饮食与特定癌症风险的增加有关。基于对流行病学文献的综合评价发现,高GI与结肠、膀胱和肾癌的风险增加有关,GL与这些肿瘤部位无显著相关性,GL与子宫内膜癌之间存在中等正相关;胃癌、前列腺癌和肺癌与GI和GL无关^[72,73]。然而其他项荟萃分析发现,GI与肺癌风险

呈正相关^[74]。高 GI 和 GL 饮食增加了乳腺癌的风险，特别是在绝经后妇女中^[75]。此外，膳食 GI 与膀胱癌风险呈正相关，与卵巢癌风险呈负相关，与淋巴瘤风险呈负相关^[76]。

3.1.3 低GI食品与消化道慢性疾病

过去几十年饮食摄入量的显著变化导致慢性消化道炎症性疾病发病率的增加，这直接影响人们的生活质量。有研究表明，饮食中不同量的碳水化合物可能是慢性消化道炎症性疾病病因的因素之一^[77]。饮食中的 GI 可能通过改变肠道菌群而增加消化道炎症性疾病的风险。高 GI 食物可能会改变肠道菌群，导致免疫功能紊乱，这些免疫功能障碍导致肠道炎症和结肠炎。当膳食纤维摄入量增加时，会降低饮食的总 GI，这可能是纤维摄入量高的人群肠道炎症性疾病风险降低的原因^[78]。

在伊朗一项成年人膳食 GI/GL 与肠易激综合征 (IBS) 发病关系发现，饮食 GI 值最高的参与者比最低的参与者患肠易激综合征的风险更高，饮食 GI 与 IBS-便秘为主的发生率呈显著正相关，饮食 GL 与肠易激综合征总风险及其亚型之间无显著相关性。饮食 GI 和 GL 与肠易激综合征的严重程度之间未发现显著相关性^[79]。此外一项通过评估膳食 GI/GL 溃疡性结肠炎 (UC) 风险之间的关系的研究证明饮食 GI 与 UC 风险呈正相关^[80]。

3.1.4 低GI饮食与肥胖

超重和肥胖发生率逐年上升，在世界各地造成严重的不良健康后果，可能会诱发心血管疾病、糖尿病、高血压等疾病。高 GI 食物进入血液后能引起血糖峰值明显增高，进而刺激机体分泌更多胰岛素，降低血糖进而导致饥饿感产生，使热量摄取增加、脂肪囤积最终引起肥胖。此外，高 GI 食物还会选择性地刺激与渴望和进食行为相关的大脑区域，血糖波动和神经刺激的双重作用下，下一餐的进食量会随之增加，长此以往下去，会造成营养过剩的不良结局，最终引发肥胖。通过饮食及运动是控制体重的有效方式之一，低 GI/GL 的饮食策略可能会带来更大的健康益处，低 GI/GL 饮食对身体组成、脂质分布、空腹胰岛素、瘦素等有积极影响。

对于体质量超标的成年人 ($BMI \geq 25 \text{ kg/m}^2$)，低 GI/GL 饮食在减轻体质量方面没有优势，与高 GI/GL 饮食相比，低 GI/GL 饮食改善了超重成人的血脂状况，降低了空腹血糖和胰岛素；低 GI/G 饮食能极大的减少肥胖者 ($BMI \geq 30 \text{ kg/m}^2$) 的体质量

量^[81]。Basharat 等^[82]通过一项随机对照试验研究低血糖指数饮食对肥胖产后妇女体质量减轻的影响，发现低血糖指数饮食对减轻体质量有显著影响，对体质量指数、体脂率和脂肪量也有积极影响。

在一项评估中国西南超重/肥胖人群中实施限制脂肪的低血糖指数饮食对体质量控制和血脂变化的试验发现，低 GI 饮食干预 3 个月后，超重/肥胖受试者的体质量指数、腰围、腰臀比、体脂率、内脏脂肪面积、基础代谢、胆固醇和甘油三酯显著降低，说明限制脂肪的低血糖指数饮食可能有助于中国西南地区超重/肥胖人群控制体质量，降低血液胆固醇和甘油三酯^[83]。

3.1.5 低GI食品的其他健康意义

低 GI 食品除在糖尿病、心血管疾病、癌症等方面有一定作用之外，低 GI 食品已被证明对癫痫^[84]、偏头痛^[85]、儿童和青少年的认知功能^[86]绝经后妇女抑郁有益。这可能是因为摄入高 GI 饮食可能导致胰岛素抵抗，胰岛素抵抗与体积和神经认知缺陷模式有关，此外反复高血糖可诱导保护性的脑葡萄糖转运下调，导致自主神经激活阈值降低。反调节激素反应可导致焦虑、易怒和饥饿等症状，而神经性低血糖症的表现可包括认知障碍、情绪和行为变化以及疲劳。

4 结论

随着时代的进步，我国居民营养状况有明显的改善，膳食结构有明显的改变，碳水化合物的供能从高到低，形成了较为明显的变化，但是目前我国大多数人仍以谷类食物为主。谷物主要成分为淀粉，与血糖反应之间存在密切相关。在现在人类大健康产业新起的大背景下，基于营养与健康提出的 GI 概念越来越被认同，低 GI 健康产品开发应用成为热点，逐渐受到市场青睐。

但在我国低 GI 产品的开发还存在一定问题。目前国内市场上低 GI 产品不够丰富，研发的产品只在原料成分上做文章，缺少真正的技术含量；应该在营养功能合理的基础上，利用中国传统养生食材，通过生物发酵、挤压等高新技术等，开发低 GI 产品，而不是为低 GI 而低 GI。再者低 GI 食品的评价标准方面缺乏一定的合理性和有效性。目前我国关于 GI 的标准只有《食物血糖生成指数测定方法》一个，缺乏其他标准或法律法规来规范低 GI 食品的市场准入；应该加大对市场上 GI 产品的规

范。此外低 GI 食品是否真的能有相应的生理功效,还有待商榷,食物引起人体血糖变化,这是一个复杂的生理作用,受到很多因素的影响。各类营养素摄入都能够影响血糖的变化,而有关宏量营养素例如糖类、脂肪、蛋白质与 GI 的相互关系还缺乏中长期数据支持。需要持续开展关于上述食物成分对 GI 影响及生理功效的影响。低 GI 制品在如今的健康饮食要求下,必然将成为产品开发的重点,而如何从机理中深入阐释,从而指导人体健康生活,也将是低 GI 制品发展中的必要之路。

参考文献

- [1] 丁钢强.中国居民膳食指南科学研究报告(2021)[M].北京:中国营养学会,2021.
- [2] MILLER B R, NGUYEN H, HU C J, et al. New and emerging drugs and targets for type 2 diabetes: reviewing the evidence [J]. *Am Health Drug Benefits*, 2014, 7(8): 452-463.
- [3] 钟雪婷,康建平,华苗苗,等.基于血糖生成指数的最新应用研究进展[J].*粮油食品科技*,2020,28(2):66-72.
- [4] BAKHT R S, LING W, SHILIN L, et al. Health benefits of konjac glucomannan with special focus on diabetes [J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2015, 5(2): 179-187.
- [5] LUDWIG D S. The glycemic index: Physiological mechanisms relating to obesity, diabetes, and cardiovascular disease [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2002, 287(18): 2414-2423.
- [6] SALMERÓN J, MANSON J E, STAMPFER M J, et al. Dietary fiber glycemic load and risk of non-insulin-dependent diabetes mellitus in women [J]. *Jama*, 1997, 277(6): 472-477.
- [7] LUDWIG D S. Dietary glycemic index and obesity [J]. *Journal of Nutrition*, 2000, 130(2S Suppl): 280-283.
- [8] JENKINS D J A, KENDALL C W C, AXELSEN M, et al. Viscous and non-viscous fibres, on absorbable and low glycemic index carbohydrates, blood lipids and coronary heart disease [J]. *Current Opinion in Lipidology*, 2000, 11(1): 49-56.
- [9] LI D, ZHANG P W, GUO H H, et al. Taking a low glycemic index multi-nutrient supplement as breakfast improves glycemic control in patients with type 2 diabetes mellitus: a randomized controlled trial [J]. *Nutrients*, 2014, 6(12): 5740-5755.
- [10] 徐箴.低GI面包的研制及其终产品血糖生成指数的测定[D].邯郸:河北工程大学,2020.
- [11] 那治国,余爽,贺书珍,等.低GI杂粮可冲调粉辅助降血糖作用[J].*食品工业科技*,2023,44(1):28-37.
- [12] 肖萍,刘欣悦,王雪,等.以红小豆或绿豆为基料低GI值冲调粉功能评价[J].*食品研究与开发*,2020,41(24):31-37.
- [13] 余梦玲,张三杉,张巧,等.低血糖生成指数面条对糖尿病小鼠糖脂代谢的影响[J].*食品工业科技*,2022,43(23):353-359.
- [14] 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.
- [15] 柳芳伟,张珊珊,陈苏明,等.3种富含多糖面包的体外消化酵解特性[J].*食品科学*,2021,42(3):143-149.
- [16] 邓慧清,吴卫国,廖卢艳,等.挤压杂粮重组米体外消化特性研究[J].*中国粮油学报*,2022,37(6):10-17.
- [17] 王妍文.马铃薯蒸煮预处理品质改良及其在低GI面包中的应用基础研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2021.
- [18] GRANFELDT Y, BJÖRCK I, DREWS A, et al. An in vitro procedure based on chewing to predict metabolic response to starch in cereal and legume products [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(9): 649-660.
- [19] ENGLYST H N, VEENSTRA J, HUDSON J. Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: a potential *in vitro* predictor of the glycemic response [J]. *British Journal of Nutrition*, 1996, 75(3): 327-337.
- [20] GOŃI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [21] 李建文,王竹,杨晓莉,等.富碳水化合物食品血糖生成指数的体外回归模型[J].*卫生研究*,2009,38(3):359-362.
- [22] EDWARDS C H, COCHETEL N, SETTERFIELD L, et al. A single-enzyme system for starch digestibility screening and its relevance to understanding and predicting the glycaemic index of food products [J]. *Food & Function*, 2019, 10(8): 4751-4760.
- [23] ZOU W, BUTARDO, V. M, TOUTOUNJI M, et al. Harnessing particle disintegration of cooked rice grains for predicting glycaemic index [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 248: 116789-116789.
- [24] 汪丽萍,韩玲玉,刘艳香,等.谷物配比对多谷物共挤压粉估计血糖生成指数的影响[J].*中国食品学报*,2021, 21(2):72-79.
- [25] 康品燕,傅楠,王勇,等.混合膳食组成对体外消化过程中GI与食物消解的影响[J].*现代食品科技*,2018,34(2):102-109.
- [26] MENG HUICUI, MATTHAN N R, AUSMAN L M, et al. Effect of macronutrients and fiber on postprandial glycemic responses and meal glycemic index and glycemic load value determinations [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2017, 105(4): 842-853.
- [27] 王莹莹.低碳水化合物饮食与空腹血糖异常及糖尿病的横断面研究[D].合肥:安徽医科大学,2022.
- [28] LU X X, MA R R, ZHAN J L, et al. The role of protein and its hydrolysates in regulating the digestive properties of starch: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 125: 54-65.
- [29] 秦仁炳,王书军,项丰娟,等.淀粉-脂质复合物在热加工过

- 程中的结构变化及其对体外消化性影响[J].食品科学,2021,42(1):47-51.
- [30] 张子睿.低GI马铃薯馒头的开发及其对原花青素体外释放的研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [31] LIN L S, ZHANG L, CAI X L, et al. The relationship between enzyme hydrolysis and the components of rice starches with the same genetic background and amylopectin structure but different amylose contents [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 84: 406-413.
- [32] WANG R, ZHANG H, CHEN Z X, et al. Structural basis for the low digestibility of starches recrystallized from side chains of amylopectin modified by amylosucrase to different chain lengths [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241(C): 116352.
- [33] 徐箐,柳嘉,林静,等.低GI淀粉原料的筛选及理化特性和体外消化特性的研究[J].食品研究与开发,2020,41(20):8-14.
- [34] 魏芷茜,欧雨嘉,汤俊杰,等.淀粉消化的影响因素及其速率调控的研究进展[J].福建农林大学学报(自然科学版),2022,51(3):289-297.
- [35] 周梦露,钱晓洁,孙冰华,等.蛋白质及其水解物对谷物淀粉糊化、回生及消化性的影响研究进展[J].中国粮油学报,2022,37(2):180-187.
- [36] YE J P, HU X T, LUO S J, et al. Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour [J]. Food Research International, 2018, 106: 404-409.
- [37] LI W D, GU Z B, CHENG L, et al. Effect of endogenous proteins and heat treatment on the *in vitro* digestibility and physicochemical properties of corn flour [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108220.
- [38] ZHANAG S H, YANG C H, ZHU S, et al. Understanding the mechanisms of whey protein isolate mitigating the digestibility of corn starch by *in vitro* simulated digestion [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124(PA): 107211.
- [39] 周常春,敬然,谢晓敏.碳水化合物与蛋白质构成比对2型糖尿病患者餐后血糖的影响[J].宁夏医学杂志,2019,41(9):850-852.
- [40] 黄强,丁丽,舒琴,等.食用油脂与加热方式对小麦淀粉结构和体外消化性的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(11):9-15,38.
- [41] 陈雪华,陈山,陈旭,等.玉米淀粉-脂质复合物对曲奇饼干体外消化和血糖生成指数的影响[J].食品安全质量检测学报,2022,13(8):2680-2686.
- [42] 张响,张康逸,赵迪,等.糯麦淀粉-脂质复合物的结构及体外消化特性[J].食品工业科技,2022,43(20):97-106.
- [43] 黄承刚,李津源,徐任园,等.直链淀粉含量对淀粉-脂肪酸复合物形成及理化特性的影响[J].食品工业科技,2022,43(13):49-55.
- [44] KHATUN A, WATERS D L E, LIU L. The impact of rice lipid on *in vitro* rice starch digestibility [J]. Foods, 2022, 11(10): 1528-1528.
- [45] LU S Y, LI J, JI J Y, et al. Endogenous protein and lipid facilitate the digestion process of starch in cooked quinoa flours [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108099.
- [46] 崔亚楠,张晖,王立,等.蛋白质、脂肪对豆类理化特性及体外消化特性的影响[J].中国粮油学报,2018,33(2):12-17.
- [47] CHIAVAROLI L, PEDE D, ASTA D M, et al. The importance of glycemic index on post-prandial glycaemia in the context of mixed meals: A randomized controlled trial on pasta and rice [J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2020, 31(2): 615-625.
- [48] 欧仕益,高孔荣,赵谋明.膳食纤维抑制餐后血糖升高的机理探讨[J].食品科学,1998,3:48-52.
- [49] 官印珑,周丽妍,王辉,等.动态高压微射流对刺梨果渣膳食纤维及其抑制淀粉消化和葡萄糖扩散的影响[J].食品科学,2022,43(9):79-86.
- [50] 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):1-6,12.
- [51] 钟明明,齐宝坤,孙禹凡,等.生物解离大豆膳食纤维对饼干质构及消化特性的影响[J].食品科学,2019,40(2):18-24.
- [52] 李楠,张良,刘倩楠,等.膳食纤维对饼干体外消化速率的抑制作用[J].现代食品科技,2020,36(8):110-116.
- [53] 李琳,张小康,周子政,等.白萝卜不溶性膳食纤维提取方法的比较及其对饼干消化的影响[J].农产品加工,2020,14:38-41.
- [54] 程冰,李梦琴,赵龙珂,等.马铃薯抗性淀粉对韧性饼干品质及消化性能的控制[J].食品安全质量检测学报,2022,13(12):3746-3753.
- [55] 韩冉,余倩倩,孔宇,等.改性奇亚籽粕可溶性膳食纤维对韧性饼干品质的影响[J].食品研究与开发,2021,42(9):131-137.
- [56] CAPRILES V D, ARÊAS J A G. Effects of prebiotic inulin-type fructans on structure, quality, sensory acceptance and glycemic response of gluten-free breads[J]. Food & Function, 2013, 4(1): 104-10.
- [57] 张素敏,张瑞,王晓闻.不同热处理方法对黄米淀粉体外消化及品质特性的影响[J].食品工业,2021,42(4):54-57.
- [58] TIAN Y, LI M, TANG A X, et al. RS content and eGI value of cooked noodles (I): Effect of cooking methods [J]. Foods, 2020, 9(3): 328-328.
- [59] 梅梦苧,温磊,龚子容,等.烹饪方式对小麦粉发酵面食营养价值的影响[J].农产品加工,2022,6:17-21.
- [60] MATTHAN N R, AUSMAN L M, MENG H, et al. Estimating the reliability of glycemic index values and potential sources of methodological and biological variability [J]. The American Journal of Clinical Nutrition. 2016, 104(4): 1004-1013.
- [61] 崔婷.主食习惯与食物血糖生成指数的关系研究[D].石家庄:河北医科大学,2018.
- [62] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses [J]. The Lancet, 2019, 393(10170): 434-445.
- [63] VEGA-LÓPEZ S, VENN B J, SLAVIN J L. Relevance of the glycemic index and glycemic load for body weight, diabetes, and cardiovascular disease [J]. Nutrients, 2018, 10(10): 1361-1361.
- [64] 张莉.低血糖指数医用食品对2型糖尿病营养治疗的有效

- 性分析[J].当代医学,2021,27(25):118-119.
- [65] JAYEDI A, SOLTANI S, JENKINS D, et al. Dietary glycemic index, glycemic load, and chronic disease: an umbrella review of meta-analyses of prospective cohort studies [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 62(9): 11-10.
- [66] FERNANDES A C, MARINHO A R, LOPES C, et al. Dietary glycemic load and its association with glucose metabolism and lipid profile in young adults [J]. *Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases*, 2021, 32(1): 125-133.
- [67] OMOROGIEVA O, OSARHUMWESE O O, FAJEMISIN A, et al. The effect of dietary glycaemic index on glycaemia in patients with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Nutrients*, 2018, 10(3): 373-373.
- [68] 火睿. 饮食干预对2型糖尿病和妊娠期糖尿病患者的血糖及相关因素影响的Meta分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [69] DWIVEDI A K, DUBEY P, REDDY S Y, et al. Associations of glycemic index and glycemic load with cardiovascular disease: updated evidence from meta-analysis and cohort studies [J]. *Current Cardiology Reports*, 2022, 24(3): 141-161.
- [70] WANG QIONG, XIA WEI, ZHAO ZHIGANG, et al. Effects comparison between low glycemic index diets and high glycemic index diets on HbA1c and fructosamine for patients with diabetes: A systematic review and meta-analysis [J]. *Primary Care Diabetes*, 2015, 9(5): 362-369.
- [71] BIDDINGER S B, LUDWIG D S. The insulin-like growth factor axis: a potential link between glycemic index and cancer [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 82(2): 277-278.
- [72] LU Y T, GUNATHILAKE M, LEE J, et al. The interaction between glycemic index, glycemic load, and the genetic variant ADIPOQ T45G (rs2241766) in the risk of colorectal cancer: a case-control study in a Korean population [J]. *European Journal of Nutrition*, 2022, 61: 2601-2614.
- [73] FEDERICA T, CARLOTTA G, LIVIA S A A, et al. Glycemic index, glycemic load and cancer risk: an updated meta-analysis [J]. *Nutrients*, 2019, 11(10): 2342-2342.
- [74] ZHU L, SHU Y, LIU C, et al. Meta-analysis dietary glycemic index, glycemic load intake, and risk for lung cancer: A meta-analysis of observational studies [J]. *Nutrition*, 2022, 99-100: 111676-111676.
- [75] ALBOGHOBEISH Z, HOSSEINI B F, ASKARI F, et al. Dietary carbohydrate intake glycemic index and glycemic load and the risk of prostate cancer among iranian men: a case-control study [J]. *Nutrition and Cancer*, 2021, 74(3): 1-7.
- [76] LONG TINGTING, LIU KE, LONG JIEYI, et al. Dietary glycemic index, glycemic load and cancer risk: a meta-analysis of prospective cohort studies [J]. *European Journal of Nutrition*, 2022, 61(4): 2115-2127.
- [77] JIN Z Q, LU H G, WU Q B, et al. A meta-analysis of dietary carbohydrate intake and inflammatory bowel disease risk: evidence from 15 epidemiology studies [J]. *Revista Espanola De Enfermedades Digestivas : Organo Oficial De La Sociedad Espanola de Patologia Digestiva*, 2019, 111(1): 5-9.
- [78] SEYED M M, ALIREZA M, AMMAR H K, et al. The relationship of dietary glycemic index and glycemic load with irritable bowel syndrome [J]. *Majallah-i Dānishgāh-i Ulūm-i Pizishkī-i Qum*, 2019, 13(3): 10-22.
- [79] MINA M, JAMAL R, ZAHRA Y, et al. Dietary glycemic index, glycemic load and risk of ulcerative colitis: results from a case-control study [J]. *Nutrition & Food Science*, 2021, 50(1): 50-60.
- [80] PERIN L, CAMBOIM I G, LEHNEN A M. Low glycaemic index and glycaemic load diets in adults with excess weight: Systematic review and meta-analysis of randomised clinical trials [J]. *Journal of human nutrition and dietetics: the official journal of the British Dietetic Association*, 2022, 35(6): 1124-1135.
- [81] BASHARAT S, GILANI S A, BURQ A I, et al. Low glycaemic index diet is effective in managing weight among obese postpartum women [J]. *The Journal of the Pakistan Medical Association*, 2018, 68(4): 548-553.
- [82] LIU Y P, SUN P, SHUAI P, et al. Fat-restricted low-glycemic index diet controls weight and improves blood lipid profile: A pilot study among overweight and obese adults in Southwest China [J]. *Medicine*, 2021, 100(21): e26107.
- [83] REZAEI S, HARSINI S, KAVOOSI M, et al. Efficacy of low glycemic index treatment in epileptic patients: a systematic review [J]. *Acta Neurologica Belgica*, 2018, 118(3): 339-349.
- [84] FINSTERER J, FRANK M. Low-Glycemic-Index diet relieving migraine but inducing muscle cramps [J]. *Journal of Neurosciences in Rural Practice*, 2019, 10(3): 552-554.
- [85] CELIA A B, VICENTE MM V, ESTELA J L, et al. Comparative effect of low-glycemic index versus high-glycemic index breakfasts on cognitive function: a systematic review and meta-analysis [J]. *Nutrients*, 2019, 11(8): 1706-1706.
- [86] GANGWISCH J E, HALE L, GARCIA L, et al. High glycemic index diet as a risk factor for depression: analyses from the Women's Health Initiative [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2015, 102(2): 454-463.