

徐瑶, 刘晓风, 杨月欣, 等. 碳水化合物质量指标以及血糖生成指数影响因素的进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 502–509. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050117

XU Yao, LIU Xiaofeng, YANG Yuexin, et al. Progress in Carbohydrate Quality Indicators and Factors Influencing Glycemic Index[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 502–509. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050117

· 专题综述 ·

碳水化合物质量指标以及血糖生成指数影响因素的进展

徐瑶^{1,2}, 刘晓风^{1*}, 杨月欣^{2,*}, 朱婧³

(1. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 甘肃兰州 730050;

2. 中国疾病预防控制中心营养与健康所, 北京 100050;

3. 北京市科学技术研究院生物技术与健康研究所, 北京 100089)

摘要: 碳水化合物与慢性病的关系密切, 研究日益增多, 然而对碳水化合物质量的描述尚未有明确的定义。目前常用的指标包括膳食纤维含量、全谷物摄入量、游离糖摄入量、血糖生成指数 (Glycemic index, GI) 这四个方面。高质量的碳水化合物食物一般具有高膳食纤维、全谷物食物高摄入量、低游离糖、低 GI 的特性, 其中 GI 与人体血糖应答直接相关, 是描述碳水化合物质量的重要指标。本文从消化吸收、加工方式、淀粉的组成和结构等三个方面总结了影响 GI 的因素, 并对不同食物来源的 GI 进行了分析。消化吸收速度、不同加工方式都可影响 GI, 而淀粉的组成和结构对 GI 也有直接影响。直链淀粉和支链淀粉的结构组成不同, 相比于直链淀粉, 支链淀粉具有更多的淀粉酶结合位点, 从而有更高的消化速率。因此直链淀粉含量高的食物, GI 值相对低。根据淀粉中所含支链淀粉晶型可以将淀粉分为 A 型、B 型、C 型, 3 种类型的淀粉中, A 型最容易消化, B 型和 C 型不易消化, 具有低 GI 特性。淀粉微观结构的研究将有助于深入了解 GI 的影响因素和为食物碳水化合物质量的评价补充一个新的角度。

关键词: 碳水化合物质量, 膳食纤维, 全谷物, 游离糖, 血糖生成指数 (GI), 淀粉结构

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)18-0502-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050117



本文网刊:

Progress in Carbohydrate Quality Indicators and Factors Influencing Glycemic Index

XU Yao^{1,2}, LIU Xiaofeng^{1*}, YANG Yuexin^{2,*}, ZHU Jing³

(1. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. National Institute for Nutrition and Health, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100050, China;

3. Institute of Biotechnology and Health, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100089, China)

Abstract: Carbohydrates play a crucial role in the development of chronic diseases, and although research in this area is expanding, the precise definition of carbohydrate quality remains unclear. Currently, commonly utilized indicators encompass dietary fiber content, whole grain intake, free sugars intake and the glycemic index (GI). High-quality carbohydrate foods typically exhibit high dietary fiber content, consist of whole grain components, contain low levels of free sugars, and possess a low GI. The GI, in particular, directly influences the human blood sugar response and serves as a vital measure for describing carbohydrate quality. This article provides a comprehensive overview of the factors that influence the GI, focusing on three aspects: digestion and absorption, processing methods, and starch composition and

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 中国营养学会科研基金 2022 项目; 糖尿病膳食营养研究 (20221017)。

作者简介: 徐瑶 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食物营养, E-mail: 13582121556@163.com。

* 通信作者: 刘晓风 (1966-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 功能性食品研发, E-mail: 13919060484@163.com。

杨月欣 (1955-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: yxyang@cnsoc.org。

structure. It further examines the GI values of various food sources. The rate of digestion and absorption, as well as diverse processing methods, can influence the GI. Additionally, the composition and structure of starch directly affect the GI. Amylose and amylopectin exhibit dissimilar structural compositions, with amylopectin containing more amylase binding sites than amylose, leading to a higher digestion rate. Consequently, foods with elevated amylose content tend to have relatively low GI values. Additionally, starch can be categorized into three types (A-type, B-type, and C-type) based on the crystal form of amylopectin present in the starch. Among these types, A-type starch is the most readily digestible, while B-type and C-type starch exhibit low GI characteristics due to their reduced digestibility. By studying the microstructure of starch, researchers can gain valuable insights into the influencing factors of the GI, thereby introducing a fresh perspective to the assessment of food carbohydrate quality.

Key words: carbohydrate quality; dietary fiber; whole grains; free sugars; glycemic index (GI); structure of starch

碳水化合物(Carbohydrates)作为人类七大营养素之一,是膳食能量最主要的来源。过量碳水化合物的摄入与肥胖、糖尿病以及心血管疾病等代谢性疾病相关^[1]。大量研究显示:低碳水化合物饮食(low carbohydrate diet, LCD)模式常用来应对肥胖、糖尿病等代谢性疾病。LCD 作用机制是通过限制碳水化合物的摄入,使得机体缺乏碳水化合物供能,因此选择消耗脂肪等其他物质维持机体正常运作。短期内可达到降低体重的效果^[2],短期内其在 2 型糖尿病人饮食护理中起到的作用是积极有效的^[3],对人类健康有一定的积极作用^[4]。然而,过度的 LCD 会使人出现注意力分散、记忆力衰退、酮症等不良反应,长限制碳水化合物的摄入会使人体产生缺乏微量元素等负面反应,对健康造成一定危害。因此需要引入碳水化合物的质量来全方位衡量碳水化合物的健康效应^[1]。

食物中的大多数碳水化合物被人体摄入后,可在人体消化酶分解后在胃和小肠被吸收,最终以葡萄糖的形式进入血液,为人体供能,引起人体餐后血糖升高。不同食物升高血糖的能力不同,因此传统上用血糖生成指数来代表碳水化合物质量。随着相关研究的深入,对碳水化合物质量的理解有了更多的理论基础。大量证据表明,高质量碳水化合物食物来源为:高纤维,全谷物食物,低游离糖和低精制淀粉食物^[5]。综合研究表明^[5-6],碳水化合物的质量包括以下四个维度:膳食纤维含量/摄入量、全谷物含量/摄入量、游离糖含量/摄入量、血糖指数和血糖负荷。本文从这四个维度来描述碳水化合物质量指标,并从食物来源、消化吸收、加工方式、淀粉的组成和结构等四个方面总结了影响 GI 的因素。

1 碳水化合物质量指标

1.1 膳食纤维含量

膳食纤维是指植物中天然存在的、从植物中提取或直接合成的聚合度 ≥ 3 、可食用的、不能被人体小肠消化吸收的、对人体有健康意义的碳水化合物的聚合物^[7]。高纤饮食对健康的有益效应在大量研究中得到证实,表现在通过调控总胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇、餐后血糖和胰岛素反应、空腹血糖、糖化血红蛋白等,来达到控制体重^[8]、维持人体身体健康的效应。膳食纤维的存在可以增加粪便的体积,促

进肠胃蠕动,在体内发酵可促进肠道益生菌健康,对肠道菌群产生有益影响,维持胃肠道的健康^[9]。国际碳水化合物质量联盟(international carbohydrate quality consortium, ICQC)发布的膳食纤维共识中^[7],建议食品标签应包括膳食纤维的量,并区分内源性膳食纤维和添加的外源性膳食纤维。共识中表明膳食纤维标签的建立有助于使居民膳食纤维摄入量达到 14 g/1000 kcal/d 的推荐量。

1.2 全谷物摄入量

全谷物是包括完整的、磨碎的、破碎的、去除外壳和不可食用部分后的谷物的总称。基本组成包括胚乳、胚芽和麸皮,各组成部分的相对比例必须与完整谷粒相同的相对比例存在。全谷物食品应包含至少 50% 的全谷物成分(以干重计)^[10]。全谷物是表征碳水化合物质量的一个重要组成部分,有利于控制体重,与 2 型糖尿病和心脑血管疾病以及直肠癌的发病率呈负相关^[11-12],一项 Meta 研究表明每天摄入 140~160 g 全谷物可改善超重和肥胖成人的空腹血糖水平^[13]。全谷物概念的进一步明确,将促进全谷物的进一步研究快速发展。

1.3 游离糖摄入量

游离糖是指厂商、厨师或消费者添加到食品中的单糖和双糖,蜂蜜、糖浆和果汁中天然存在的糖^[14]。游离糖摄入的不利影响,首先表现在对牙齿的损伤,研究表明高游离糖摄入量与牙周病之间存在显著正相关关系^[15],造成牙齿炎症^[16],继而影响人体的健康,与肥胖和 2 型糖尿病有关。针对此类问题,世界卫生组织发布了糖摄入量膳食指南:建议限制游离糖的摄入量不超过总能量摄入的 10%,理想情况下不超过总能量摄入的 5%^[17]。含糖饮料、果汁以及甜食作为游离糖的主要来源,为人体提供的饱腹感较差,一般在正餐之外食用,从而导致游离糖摄入量难以控制等问题。

1.4 GI

GI 是探究食物进食和血糖变化的重要指标^[18]。在 1981 年,由加拿大多伦多大学的营养学教授大卫·斯克斯(David Jenkins)博士首次提出,GI 值表示含有 50 g 有价值的碳水化合物的食物与 50 g 碳水化合物标准参考物(葡萄糖或白面包)相比,在一定时

间内(一般为餐后 2 h)引起体内血糖应答水平的比值^[19],是描述食物中碳水化合物质量的重要生理学参数。GI 作为传统的考察碳水化合物的质量的生理性指标,对于富含碳水化合物的食物,具备低 GI 特性,可被认为是高质量碳水化合物食物。将 GI 与碳水化合物本身性质和消化吸收建立联系,有利于表征高质量碳水化合物食物。

根据食物 GI 值的水平不同,可以将食物划分为低 GI 食物($GI \leq 55$)、中等 GI 食物($55 < GI \leq 70$)和高 GI 食物($GI > 70$)^[2]。图 1 为部分谷物及制品的 GI 值水平。影响食物 GI 值的因素有很多,食物本身的营养成分、食物加工的方式以及 GI 值的测定方法等都会对 GI 产生影响。

低GI食物 GI<55		中GI食物 GI55~70		高GI食物 GI>70	
食物名称	GI值	食物名称	GI值	食物名称	GI值
米粉	54	大米粥	69	馒头(富强粉)	88
荞麦(黄)	54	大麦粉	66	速冻米饭	87
玉米糝粥	51	粗麦粉	65	馒头(全麦粉)	82
玉米面粥	50	印度卷饼	62	烙饼	80
玉米饼	46	荞麦面条	59	白面包	75
黑米粥	42	黑米饭	55	油条	75
小麦	41	燕麦麸	55	糜子饭(整粒)	72
稻麸	19	乌冬面	55	小米(煮)	71

图 1 部分谷物及其制品 GI 值水平(葡萄糖=100)

Fig.1 GI value levels of some grains and products (glucose=100)

注:数据来自《中国食物成分表》标准版第 1 册(第 6 版)^[20]。

2 食物在人体中的消化吸收对 GI 的影响

食物在体内的消化吸收的程度和速率是影响食物 GI 值最主要的因素,缓慢消化或者不消化吸收的碳水化合物将降低食物的 GI。按照碳水化合物能否进行水解,以及水解后的生成物对其进行分类,可基本分为单糖类、双糖类和多糖类。单糖类为不能进行水解的糖类的基本单位,双糖类是两个单糖分子结合成的双糖,多糖是大分子聚合物糖类的统称,经消化酶逐步分解为双糖、单糖后,被人体利用。其中的单糖—葡萄糖是所有人体细胞的主要能量来源,并且几乎是人体唯一的能量来源^[21]。

淀粉是食物中主要的多糖。从消化特性角度,可以将淀粉分为快速消化淀粉(rapidly digestible starch, RDS)、慢性消化淀粉(slowly digestible starch, SDS)和抗性淀粉(resistant starch, RS)^[22]。其中 RS 在人体小肠中不能被消化吸收^[23],可完整进入结肠被微生物分解,并产生短链脂肪酸^[24]。动物研究表明 RS 对空腹血糖水平存在有益影响,RS 可通过增加胰岛素分泌和提高胰岛素敏感性。调节胰岛素敏感性的可能机制是改变脂肪酸通量 RS 在结肠可形成短链脂肪酸,包括乙酸,丙酸和丁酸盐。这些酸可能对与胰岛素代谢有关的激素的产生有刺激作用如胰

高血糖素样肽-1 和肽 YY,并且可以通过诱导胰岛素分泌,来降低食物的 GI 值^[24]。RS 在总碳水化合物中比例的增加可以改变食物的 GI,如通过基因调控使食物 RS 含量增加,或通过加工方式使非抗性淀粉转化为 RS 从而增加 RS 含量,或在复配食物时以 RS 取代原本配方中的可消化碳水化合物。高直链淀粉含量与抗性淀粉含量呈正相关关系。高直链玉米淀粉中含抗性淀粉高达 60%。淀粉消化结构分子调节机制,是利用基因工程技术生产高含量抗性淀粉的依据。直链淀粉对淀粉功能特性影响显著,使在生产中利用基因组学的方法,生产高水平直链淀粉和增加抗性淀粉数量。结合上述提高直链淀粉的产量的方法,食物中抗性淀粉的含量也会有所增加^[25]。

膳食纤维是食物中另一种重要的多糖,不被消化吸收,按照是否溶于水,把膳食纤维分为可溶性膳食纤维以及不可溶性膳食纤维两大类^[26],可溶性膳食纤维来源于果胶、魔芋等食物,能量较低、吸水性很强,可溶性膳食纤维在胃肠道内和淀粉等碳水化合物交织在一起,可以延缓碳水化合物的吸收,能够起到降低餐后血糖的作用。不可溶性膳食纤维主要来源于全谷类食物,如麸质、麦片、糙米、燕麦等全谷类食物,另外常见的蔬菜和水果中也含有部分不可溶性膳食纤维。不可溶性膳食纤维通过促进胃肠蠕动,加快食物通过胃肠道减少吸收,进而同样起到降低餐后血糖的作用,使食物 GI 值降低。

除了碳水化合物,食物中的蛋白质、脂肪也对食物的 GI 造成影响。蛋白质对 GI 的影响体现在蛋白质对食物中的淀粉的包埋作用,使得淀粉酶与淀粉的反应减慢甚至不发生反应^[27],因而降低食物 GI。此外,当食物中的蛋白质含量高时,还可以刺激机体分泌胰岛素,从而快速清除血液内葡萄糖,达到降低血糖的效果,使食物 GI 偏低^[28]。脂肪对 GI 的影响体现在脂肪可与直链淀粉结合形成复合物,减少小肠对淀粉的消化吸收^[27]。或是通过降低淀粉凝胶化,推迟食物在胃的排空,阻碍淀粉酶与淀粉的结合,并且对淀粉酶具有一定抑制作用^[28],从而降低食物 GI。

3 加工对食物 GI 的影响

以表 1 稻谷类食物的 GI 为例,分析说明加工对于食物 GI 的影响。

表 1 稻谷类食物血糖生成指数(GI)^[29]
Table 1 Rice based food glycemic index (GI)^[29]

食物名称	GI
糙米饭	70.0
大米饭	83.2
大米粥(普通)	69.4

相比于精白米,糙米的皮层富含大量的高纤维,质地紧实,通过日常的蒸煮,水分不能充分渗入糙米内部,胚乳内部的淀粉不易糊化^[30],消化吸收较慢,因此有低的 GI。加工精度是影响大米皮层以及胚芽保

留率的最直接因素,按照目前大米国家质量标准加工,营养物质的流失随着加工精度等级的提高而增大^[31]。此外,大米的粒度也会影响大米的消化速率,进而影响 GI。早有研究表明,小粒径水稻淀粉会促进淀粉消化率增加^[32]。因此选择合适的稻米加工精度和粒度,有益于降低稻谷的 GI 和保留更丰富的营养物质。此外,加水量、加工时间长短等通过影响大米的硬度、膨胀状态以及淀粉糊化程度,进而对 GI 产生影响。有研究表明^[33]:在较高的温度下烹饪大米可能会增加淀粉分子因糊化而浸出,从而增加 GI。Onvara 等^[34]通过优化试验探究烹饪温度和水对大米 GI 的影响,研究表明较低的温度和较短的时间以及较高的水比可以降低大米的 GI,因为其结构空隙较少,外围更紧凑,从而限制了酶促消化。

加工对薯类 RS 含量影响巨大,生鲜马铃薯中 RS 含量高达 75%,加工后 RS 的含量下降到 5%~10%,同时 RDS 的含量会增加到 53%~86%^[35],马铃薯淀粉结构为 B 型,B 型淀粉在水煮的条件下晶型容易被破坏消失,即加热条件下,马铃薯淀粉颗粒内部结构被破坏,而导致其更易被酶水解,消化速率加快,且水煮加热的条件更易使马铃薯淀粉糊化,促进了其消化,水煮加工使得马铃薯 GI 升高^[36]。蒸煮对薯类的影响在甘薯中同样表现明显,研究表明^[37],蒸煮后,甘薯淀粉含量从 18.15% 下降到 7%,可溶性糖含量从 11.78% 上升到 39.33%。生甘薯内含抗性淀粉 50%~60%,而熟薯降至 7%。导致了甘薯的 GI 升高。

由此可以看出控制加工条件对于食物 GI 的重要性,选择合适的加工精度、烹饪方式可以降低食物的 GI 值,保留食物中丰富的营养成分。

4 淀粉类型对 GI 的影响

淀粉按其链的结构来说,可以分为直链粉和支链淀粉。如表 2 所示,不同的链的构型决定了淀粉的消化特性。直链淀粉以卷曲螺旋形方式存在,支链淀粉是树枝型分支结构,淀粉酶在分解淀粉产生葡萄糖时,结合作用的位点是淀粉链的末端。因直链淀粉和支链淀粉的结构组成不同,支链淀粉相比于直链淀

粉具有更多的淀粉酶结合位点,所以支链淀粉相比于直链淀粉有更高的消化速率。因此直链淀粉含量高的食物,GI 值相对低。

表 2 直链淀粉与支链淀粉
Table 2 Amylose and branched starch

项目	直链淀粉	支链淀粉
组成单体	葡萄糖	葡萄糖
分子键类型	α -1,4-糖苷键	α -1,4-糖苷键和 α -1,6-糖苷键
葡萄糖基数量	200个左右	300~400个
分子量	$1\sim 2\times 10^5$	$>2\times 10^7$
聚合度	990	7200
自然淀粉中所占比例	15%~28%	72%~85%
构型	卷曲螺旋形	树枝型分枝
糊化温度	60~85 ℃	40~70 ℃
胰岛素抵抗	不产生	产生
消化速率	消化慢	消化快
对GI的影响	引起低GI的因素	引起高GI的因素

在农业种植过程中,通过品种改良培育含高直链淀粉作物,是使食物获得低 GI 的一个可行的途径。研究表明,目前高直链淀粉主要来源于玉米、大麦、水稻等作物^[38]。表 3 中总结了从淀粉合成途径中酶基因改良角度,提高禾谷类作物直链淀粉含量的途径。

直链淀粉和支链淀粉以复杂的晶体结构方式堆叠成小体结构;然后大量的小体结构以脐点为中心,呈中心环状向外聚集;聚集的小体结构形成洋葱状生长环结构,最终构成淀粉颗粒。从小体内片状结晶结构角度:支链淀粉双螺旋结构主要有两种排列方式:单斜结晶(A-型结晶)和六方结晶(B-型结晶),根据淀粉中所含支链淀粉晶型可以将淀粉分为 A 型、B 型、C 型^[43]。此种分类方式与 X-射线衍射研究中,对天然淀粉的分类具有一致性(如表 4 所示)。虽然通过单斜结晶比六方结晶稳定,以致 A 型淀粉热稳定型最强。淀粉颗粒的大小和结晶性质又影响着其对胰酶的敏感性,X-射线衍射下,B 型和 C 型淀粉表现出对胰酶的一定抗性^[44]。因此 3 种类型的淀粉

表 3 提高禾谷类作物直链淀粉含量的途径
Table 3 Ways to increase amylose content of cereal crops

途径	原理	作物类别	作用部位	作用效果	参考文献
增强颗粒结合淀粉合成酶 I (granule-bound starch synthase, GBSS I) 表达	GBSS I 酶作用于葡糖聚合体,通过糖基转移而催化 α -1,4-糖苷键的延长。	玉米	胚乳	直链淀粉含量升高了 9%~11%。	[39]
抑制可溶性淀粉酶(Soluble starch synthase, SSS)活性	SSS酶以游离态存在于质体基质中,催化淀粉链延长,主要负责支链淀粉的合成。	水稻	胚乳	直链淀粉含量由野生型的 19%,上升到育种后的23%。	[40]
抑制淀粉分支酶(starch-branching enzyme, SBE)活性	淀粉分支酶酶是淀粉体内合成支链淀粉的关键酶,它能切开 α -1,4-葡聚糖直链供体(直链淀粉或支链淀粉的直链区)的 α -1,4-糖苷键并同时催化所切下的短链与受体链(原链或其他链)间 α -1,6-糖苷键的形成,从而产生分支。	小麦	胚乳	野生型直链淀粉含量: 31%, 育种植株直链淀粉含量: 50%, 但总淀粉含量下降7.8%。	[41]
提高ADP(adenosine diphosphate)葡萄糖焦磷酸酶 (ADP-glucose pyrophosphorylase, AGPASE) 的活性	增加底物腺苷二磷酸葡萄糖(ADPG) 的浓度	水稻	胚乳	淀粉含量提高23%。	[42]

中, A 型最容易消化, B 型和 C 型不易消化。

表 4 淀粉的三种类型
Table 4 Three types of starch

项目	A型淀粉	B型淀粉	C型淀粉
含有的支链淀粉晶型	A-型晶体	B型晶体	A型晶体和B型晶体混合
小体尺寸	25~100 nm	400~500 nm	介于两者之间
淀粉颗粒大小	25~40 μm	15 μm	5~10 μm
淀粉形状	扁豆形	多角形和圆形	球形
主要分布作物	谷类作物	植物块根和块茎(薯类)	豆类及某些植物种子

5 不同食物品类的 GI 及影响因素分析

5.1 谷物

由图 1 可知, 谷物及其制品的 GI 值变化范围是 19~88。谷物的成分和加工方式是造成谷类食物 GI 值巨大差异的重要因素。谷类的成分包括淀粉、蛋白质、脂类以及膳食纤维。谷物中含有大量的碳水化合物(70%~80%), 淀粉作为高分子碳水化合物, 是谷物最重要的组成部分, 对谷物食品的 GI 值起决定性作用^[45]。综合淀粉类型对 GI 的影响, 直链淀粉和支链淀粉含量和比例对谷类食物 GI 影响较大, 结合表 3 中提高谷类食物中直链淀粉含量的方法, 可降低谷类食物 GI 值, 即可提高其碳水化合物质量。

由图 1 中还可以看出, 全谷物食物具有中低 GI 的特性。谷物的麸类部分含有大量膳食纤维 GI 值处于低水平状态。精米精面等精细加工的谷类食物 GI 水平普遍偏高。由此可知降低谷类食物加工精度, 可降低其 GI 值。

5.2 薯类

薯类作物作为世界范围内广泛种植的作物, 其中碳水化合物的含量同样可观, 主要以淀粉形式存在。薯类作物种植地区主要分布在亚洲、非洲、欧洲以及美洲等地^[46]。世界范围内薯类作物的发展走向之一, 就是淀粉型薯类开发和利用。薯类作物中的淀粉含量为 8%~29%, 全球公认三大薯类作物: 马铃薯、木薯、甘薯提供了绝大部分薯类淀粉的生产量。

大部分薯类食物为中高 GI 食物^[20]。表 2 提供的直链淀粉与支链淀粉的关系同样适用于淀粉型薯类作物。提高其中直链淀粉的含量同样也能降低薯类作物的 GI 值, 如抑制葡聚糖水二激酶(glucan-water dikinase, GWDs)活性: GWDs 是叶绿体中催化淀粉降解的一种酶。催化腺苷三磷酸(adenosine-triphosphate, ATP)的 β 磷酸转移到支链淀粉的葡萄糖残基上形成磷酸葡聚糖。作用于马铃薯块茎, 可以达到使其中直链淀粉含量由野生型的 37%, 上升到育种后的 39%^[47]。由表 3 可知, 薯类淀粉属于 B 型淀粉, 是不易消化的淀粉。与加工方式对 GI 的影响相结合, 熟制导致薯类 GI 的升高^[36]。

5.3 豆类

碳水化合物在豆类中同样以淀粉的形式存在,

大部分豆类及其加工食物为低 GI 食物^[20]。一些豆类及其加工食品的 GI 范围如: 蚕豆(40±5), 鹰嘴豆(5±1~45±1), 普通豆(9±1~75±8), 豇豆(6±1~56±0.2), 小扁豆(10±3~66±6), 绿豆(11±2~44±6), 豌豆(9±2~57±2), 木豆(7±1~54±1)和混合豆类制品(35±5~66±23)^[48]。由表 3 可知, 豆类中淀粉以 C 型淀粉为主, 这也是大多数豆类 GI 值相对谷物 GI 值较低的原因^[27]。同时 GI 范围的变化也表示了加工对豆类食物 GI 的影响。研磨处理会导致豆类颗粒大小的改变, 增大表面积, 使淀粉暴露与淀粉酶接触, 加速消化, GI 值升高^[48]。豆类中含有丰富的蛋白质, 其中大豆蛋白含量在 38% 以上, 是自然界中含量最丰富的蛋白质。蛋白质的包埋作用以及对机体分泌胰岛素的刺激作用, 使得豆类及其加工制品 GI 值处于低水平。

5.4 水果

如表 5 所示, 水果中的碳水化合物主要以葡萄糖、果糖、蔗糖三种形式存在, 在一些水果, 还以山梨醇的形式存在。水果中果糖的吸收代谢不需要胰岛素的参与; 蔗糖的水解产生的是一分子葡萄糖和一分子果糖; 山梨醇是人能缓慢消化的碳水化合物, 作为葡萄糖对应的羟基醇, 其消化吸收不经过葡萄糖代谢途径, 代谢不会引起人体血糖升高, 使得水果的 GI 值处于中等甚至低水平。

表 5 常见水果中糖类化合物
Table 5 Carbohydrates in common fruits

温度带	水果名称	主要糖类化合物含量	主要糖类化合物类型及其所占比例	参考文献
热带	菠萝	11%	蔗糖: 41%; 葡萄糖: 31%; 果糖: 28%	[49]
	荔枝	18%	蔗糖: 11%; 葡萄糖: 44%; 果糖: 45%	[50]
	枇杷	12%	蔗糖: 59%; 葡萄糖: 18%; 果糖: 23%	[51]
	芒果	17%	蔗糖: 77%; 葡萄糖: 13%; 果糖: 10%	[52]
	榴莲	16%	蔗糖: 77%; 葡萄糖: 13%; 果糖: 10%	[53]
	椰子	9%	蔗糖: 1%; 葡萄糖: 50%; 果糖: 49%	[54]
	香蕉	12%	蔗糖: 46%; 葡萄糖: 27%; 果糖: 27%	[55]
	苹果	10%	蔗糖: 21%; 葡萄糖: 15%; 果糖: 62%; 山梨醇: 2%	[55]
	梨	9%	蔗糖: 4%; 葡萄糖: 21%; 果糖: 54%; 山梨醇: 21%	[55]
	桃	6%	蔗糖: 64%; 葡萄糖: 17%; 果糖: 18%; 山梨醇: 1%	[55]
温带	李	10%	蔗糖: 47%; 葡萄糖: 24%; 果糖: 16%; 山梨醇: 13%	[55]
	葡萄	14%	蔗糖: 6%; 葡萄糖: 46%; 果糖: 48%	[55]
	蓝莓	10%	蔗糖: 4%; 葡萄糖: 45%; 果糖: 51%	[55]
	西瓜	5%	蔗糖: 14%; 葡萄糖: 12%; 果糖: 74%	[56]

结合《中国食物成分表》^[20]中给出的部分水果的 GI 值: 西瓜 GI 为 72, 属于高 GI 食物, 菠萝 GI 为 66、芒果 GI 为 55 属于中 GI 食物, 苹果 GI 为 36、梨 GI 为 36、桃 GI 为 28 等属于低 GI 水果, 可以发现, 水果中的糖类化合物的类型, 是决定 GI 值的关键。水果的甜度由糖类化合物和有机酸的类型、比例、含量水平等因素决定。从糖的角度来说, 不同糖组分对甜度

的贡献不同,果糖、蔗糖和葡萄糖的甜度分别为 1.75、1 和 0.75。可以部分解释西瓜为何是水果中 GI 值高的水果。

温度带对水果的影响主要体现在糖类化合物的含量上,热带水果含糖量整体略高于温带水果,表明气候因素对糖分的积累有影响,热带和亚热带地区日照时间长、昼夜温差大,使得水果中糖分积累多。

5.5 蔬菜

蔬菜中的碳水化合物含量偏低,以淀粉、糖、纤维素和果胶等形式存在,是人体膳食纤维(纤维素、半纤维素、果胶)的重要来源,因此绿色茎叶类蔬菜一般具有低 GI 值。

不同类别的蔬菜所含膳食纤维有所不同^[57]:瓜茄类的蔬菜,比如黄瓜、丝瓜、苦瓜、茄子、西红柿,在这些瓜茄类的蔬菜当中含有丰富的膳食纤维,尤其是可溶性膳食纤维数量更为丰富。叶菜,比如韭菜、芹菜、油麦菜、白菜;根茎类蔬菜,竹笋、藕、萝卜、莴笋等在这些叶菜当中含有更多的不溶性的膳食纤维。

6 展望

我国传统饮食习惯中以谷类作物为主食,有些地方以薯类作物为主食,是碳水化合物的主要来源。工业化的发展使得食物加工向精细化发展,精细化加工导致食物中膳食纤维和微量元素含量较低,消化速度快,血糖大幅波动。饱腹感持续时间短使得机体产生饥饿信号,导致食物摄入量增多,增加了肥胖的风险。精加工食物的摄入与胰岛素抵抗和高血糖水平相关,会增加患 2 型糖尿病的风险,且精致碳水的摄入通过增加甘油三酯的水平,增大心脏病和 2 型糖尿病的患病风险。大量研究表明碳水化合物的质量的改善对超重和肥胖、2 型糖尿病、心血管疾病等慢性病有预防和调控作用。

碳水化合物的质量指标尚未有公认的定义,但可以肯定的是膳食纤维、全谷物、游离糖、固体碳水化合物、血糖生成指数等指标均是考量食物的碳水化合物质量指数的组成因素,碳水化合物质量的研究是一个综合各方面的大集合,目前对碳水化合物质量指标只是间接性的一个描述,明确碳水化合物质量指标定义任重而道远。

GI 作为一个直接反映血糖应答的衡量指标,可以间接的表示食物碳水化合物的质量,但 GI 的限制也是显而易见的,测试个体间的差异、人体试验高测试成本以及不稳定性都会增加 GI 测定和应用的难度。影响食物 GI 的因素是多方面的,过去的研究中,以探究食物的成分、加工、消化吸收等方面对 GI 的影响居多,但对于淀粉微观结构的分析还较少。这方面的研究将有助于进一步深化了解 GI 的影响因素,为 GI 的应用和食物碳水化合物质量的评价补充一个新的角度。

参考文献

- [1] SIEVENPIPER J L. Low-carbohydrate diets and cardiometabolic health: The importance of carbohydrate quality over quantity[J]. *Nutrition Reviews*, 2020, 78(Supplement_1): 69–77.
- [2] 曹爱华,孙丽珍,崔静稳,等. 低碳水化合物饮食和低脂肪饮食对 2 型糖尿病患者体质量及血糖的影响[J]. *中国全科医学*, 2011, 14(1): 52–53. [CAO A H, SUN L Z, CUI J W, et al. Effects of a low-carbohydrate diet and a low-fat on weight and glycemic control in type 2 diabetics mellitus[J]. *Chinese General Practice*, 2011, 14(1): 52–53.]
- [3] 曾本拓,都继微. 2 型糖尿病患者低碳水化合物膳食管理的证据总结[J]. *中华护理杂志*, 2022, 57(14): 1756–1765. [ZENG B T, DU J W. Evidence summary of low-carbohydrate diets for type 2 diabetes mellitus management[J]. *Chinese Journal of Nursing*, 2022, 57(14): 1756–1765.]
- [4] PAPADOPOULOU S K, NIKOLAIDIS P T. Low-carbohydrate diet and human health[J]. *Nutrients*, 2023, 15(8): 2004.
- [5] TAN D, DREWNOWSKI A, LÊ KA. New metrics of dietary carbohydrate quality[J]. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 2023, 26(4): 358–363.
- [6] ZAZPE I, SÁNCHEZ-TAÍNTA A, SANTIAGO S, et al. Association between dietary carbohydrate intake quality and micronutrient intake adequacy in a mediterranean cohort: The sun (Seguimiento Universidad de Navarra) project[J]. *British Journal of Nutrition*, 2014, 111(11): 2000–2009.
- [7] AUGUSTIN L S A, AAS A M, ASTRUP A, et al. Dietary fibre consensus from the international carbohydrate quality consortium (icqc)[J]. *Nutrients*, 2020, 12(9): 2553.
- [8] HUANG J, LIU C, YANG Y, et al. The effects of probiotics plus dietary fiber on antipsychotic-induced weight gain: a randomized clinical trial[J]. *Translational Psychiatry*, 2022, 12(1): 185.
- [9] BARBER T M, KABISCH S, PFEIFFER A F H, et al. The health benefits of dietary fibre[J]. *Nutrients*, 2020, 12(10): 3209.
- [10] KAMP J W, JONES J M, MILLER K B, et al. Consensus, global definitions of whole grain as a food ingredient and of whole-grain foods presented on behalf of the whole grain initiative[J]. *Nutrients*, 2021, 14(1): 138.
- [11] YU W, MINGCONG F, HAIFENG Q, et al. Whole grains-derived functional ingredients against hyperglycemia: Targeting hepatic glucose metabolism[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2023: 1–22.
- [12] BARRETT E M, BATTERHAM M J, RAY S, et al. Whole grain, bran and cereal fibre consumption and cvd: A systematic review[J]. *The British Journal of Nutrition*, 2019, 121(8): 914–937.
- [13] 舒幸,姜皓琪,李彬,等. 全谷物对超重及肥胖成年人胰岛素抵抗影响的 Meta 分析[J]. *卫生研究*, 2023, 52(2): 292–299. [SHU X, JIANG H Q, LI B, et al. Effects of whole grains on insulin resistance in overweight and obese adults: A Meta-analysis[J]. *Journal of Hygiene Research*, 2023, 52(2): 292–299.]
- [14] STEELE C, EYLES H, TE M L, et al. Dietary patterns associated with meeting the who free sugars intake guidelines[J]. *Public Health Nutrition*, 2020, 23(9): 1495–1506.
- [15] KUSAMA T, NAKAZAWA N, TAKEUCHI K, et al. Free sugar intake and periodontal diseases: A systematic review[J]. *Nutrients*, 2022, 14(21): 4444.
- [16] WOELBER P, GEBHARDT D, HUJOE P P. Free sugars and gingival inflammation: A systematic review and meta-analysis[J]. *Journal of Clinical Periodontology*, 2023: CD014217.
- [17] NOCELLA G, SRINIVASAN C S. Adherence to who's nutrition recommendations in the uk: Dietary patterns and policy implications from a national survey[J]. *Food Policy*, 2019, 86.

- [18] 王怀祺, 彭星光, 刘宏生, 等. 碳水化合物食品 GI 值体外、内预测方法的研究进展[J/OL]. 食品科学: 1-19. [2023-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20220901.1733.003.html>. [WANG H B, PENG X G, LIU H S, et al. Research progress on *in vitro* and *in vivo* prediction methods for GI values of carbohydrate foods[J/OL]. Food Science, 2022:1-19.]
- [19] JENKINS D J, WOLEVER T M, TAYLOR R H, et al. Glycemic index of foods: A physiological basis for carbohydrate exchange[J]. *The American journal of clinical nutrition*, 1981, 34(3): 362-366.
- [20] 杨月欣, 中国疾病预防控制中心营养与健康所. 中国食物成分表: 标准版[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018. [YANG Y X. National institute for nutrition and health chinese center for disease control and prevention. chinese food composition table: Standard edition [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2018.]
- [21] GERALD A D. Brain glucose metabolism: Integration of energetics with function[J]. *Physiological Reviews*, 2019, 99(1): 949-1045.
- [22] ENGLYST H N, KINGMAN S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46 Suppl 2: S33-S50.
- [23] CHUNG H, SHIN D, LIM S. *In vitro* starch digestibility and estimated glycemic index of chemically modified corn starches[J]. *Food Research International*, 2008, 41(6): 579-585.
- [24] PETER D, DARRELL W C. Resistant starch: Impact on the gut microbiome and health[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2020, 61: 6166-6171.
- [25] ADRIANNA B, SYLWIA S, AMIN M K, et al. Health benefits of resistant starch: A review of the literature[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 93: 105094.
- [26] 刘月红. 了解膳食纤维[J]. 开卷有益-求医问药, 2023(3): 51-52. [LIU Y H. Understanding dietary fiber[J]. Opening a book is beneficial-seeking medical advice, 2023(3): 51-52.]
- [27] 王笑颖, 冯艺飞, 战虎. 浅谈血糖生成指数研究现状[J]. 现代食品, 2021(11): 143-146. [WANG X Y, FENG Y F, ZHAN H. Discussion on the current research status of blood glucose generation index[J]. *Modern Food*, 2021(11): 143-146.]
- [28] 范光森, 许岱, 富志磊, 等. 血糖生成指数研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2016(10): 56-68. [FAN G S, XU D, FU Z L, et al. Research progress on blood glucose generation index[J]. *China Food Additives*, 2016(10): 56-68.]
- [29] 杨月欣, 中国营养学会营养与保健食品分会. 食物血糖生成指数: 一个关于调节血糖的新概念[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2004. [YANG Y X. National Institute for Nutrition and Health Chinese Center for Disease Control and Prevention. Food glycemic index: A new concept on regulating blood sugar [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2004.]
- [30] 牛羿, 郭斐, 任海斌, 等. 大米的适度加工和流通营销趋势浅析[J]. 现代食品, 2018(22): 1-4. [NIU Y, GUO F, REN H B, et al. Analysis of the moderate processing and circulation marketing trends of rice[J]. *Modern Food*, 2018(22): 1-4.]
- [31] 陈思思, 樊琦. 我国稻谷过度加工造成营养物质损失浪费的研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(7): 10-13. [CHEN S S, FAN Q. Research on nutrient loss and waste during rice over processing in China[J]. *Cereals and Oils*, 2020, 33(7): 10-13.]
- [32] BOOHER L E, BEHAN I. Biologic utilizations of unmodified and modified food starches[J]. *The Journal of Nutrition*, 1951, 45(1): 75-99.
- [33] LI H, WEN Y, WANG J, et al. The molecular structures of leached starch during rice cooking are controlled by thermodynamic effects, rather than kinetic effects[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 73: 295-299.
- [34] ONVARA R, NAPHATRAPI L. Optimization of processing condition of instant rice to lower the glycemic index[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(1), 101-110.
- [35] 王丽, 李淑荣, 句荣辉, 等. 马铃薯淀粉的消化吸收特性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(20): 220-224. [WANG L, LI S R, JU R H, et al. Research progress on digestion and absorption characteristics of potato starch[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(20): 220-224.]
- [36] 李驰, 姚佳, 韩乔, 等. 马铃薯淀粉消化特性及多酚对其影响研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(12): 221-227. [LI C, YAO J, HAN Q, et al. Research progress on the digestion characteristics of potato starch and the effect of polyphenols on it[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(12): 221-227.]
- [37] YANQIANG Y, RONG Z, RUIXUE J, et al. Impact of different cooking methods on the chemical profile of orange-fleshed sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) [J]. *LWT*, 2023, 173: 114288.
- [38] 刘雨霏, 罗慧琳, 陈响, 等. 高直链淀粉的生物合成和应用研究进展[J]. 化学与生物工程, 2023, 40(2): 1-8,15. [LIU Y F, LUO H L, CHEN X, et al. Research progress in biosynthesis and applications of high amylose starch[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2023, 40(2): 1-8,15.]
- [39] 赵杰. 转基因高淀粉、高直链淀粉玉米新种质的创制及性状分析[D]. 济南: 山东大学, 2015. [ZHAO Y J. Creation and character analysis of new genetically modified high starch and high amylose starch maize germplasm [D]. Jinan: Shandong University, 2015.]
- [40] NAYEON R, CHUL Y, CHEON-SEOK P, et al. Knockout of a starch synthase gene *ossiiiia/flo5* causes white-core floury endosperm in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant Cell Reports*, 2007, 26(7): 1083-1095.
- [41] ANDRÉ S, BRITTANY H, XIAOQIN Z, et al. Registration of common wheat germplasm with mutations in *sbeii* genes conferring increased grain amylose and resistant starch content[J]. *Journal of Plant Registrations*, 2016, 10(2): 200-205.
- [42] D S E, M M J, CURTIS H L, et al. Seed yield and plant biomass increases in rice are conferred by deregulation of endosperm adp-glucose pyrophosphorylase[J]. *Planta*, 2003, 216(4): 656-664.
- [43] 康思健, 贾祥泽, 郑少婷, 等. 淀粉颗粒微观结构及结晶调控技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 316-322. [KANG Y J, JIA X Z, ZHENG S T, et al. Research progress on the microstructure and crystallization regulation technology of starch particles[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(19): 316-322.]
- [44] CUMMINGS J H, ENGLYST H N. Gastrointestinal effects of food carbohydrate[J]. *The American journal of clinical nutrition*, 1995, 61(4 Suppl): 9385-9455.
- [45] 燕子豪, 汪丽萍, 谭斌, 等. 谷物食品血糖生成指数研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 147-156. [YAN Z H, WANG L P, TAN B, et al. Advances in glycemic index of cereal foods[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2021, 29(3): 147-156.]
- [46] 王国扣. 世界薯类加工业的发展特点与走向[J]. 粮油加工与食品机械, 2002(1): 6-9. [WANG G K. The development characteristics and trends of the world potato processing industry[J].

Grain and Oil Processing and Food Machinery, 2002(1): 6–9.]

[47] SERGEY S K, ANDREAS B, ALEXEI V KRIVANDIN, et al. Structural and thermodynamic properties of starches extracted from gbss and gwd suppressed potato lines[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2007, 40(5): 449–460.

[48] MALEEK S, ANNAMALAI M, SHANMUGAM S, et al. Glycemic index of pulses and pulse-based products: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 61(9): 1567–1588.

[49] 刘胜辉, 臧小平, 魏长宾, 等. 高效液相色谱法测定台农 19 号菠萝糖分[J]. *广东农业科学*, 2008(12): 133–134. [LIU S H, ZANG X P, WEI C B, et al. Determination of pineapple sugar content in tainong 19 by high performance liquid chromatography[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2008(12): 133–134.]

[50] 孟祥春, 黄泽鹏, 肖志丹, 等. 5 个荔枝品种的品质及挥发性风味比较分析[J]. *果树学报*, 2022, 39(1): 68–77. [MENG X C, HUANG Z P, XIAO Z D, et al. Comparative analysis of the quality and volatile flavor of five lychee varieties[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(1): 68–77.]

[51] GIUSEPPE S, ALESSIO A, VITTORIO F, et al. Genotype influence on shelf life behaviour of minimal processed loquat (*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.) Fruit: The role of sugar, acid organics and phenolic compounds[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2022, 9(8): 1–18.

[52] MEGHA R, K. S S, MANISH S, et al. Physico-chemical

characterization and biochemical profiling of mango genotypes during different fruit development stages[J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 149: 476–486.

[53] YI T X, AZIZAH M, JEFFERY D L D, et al. Changes in the volatile profiles, organic acid contents, and sugar compositions of durian pulps during long-term frozen storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): e15285.

[54] JILIN W, HAIMING C, WENXUE C, et al. Effect of ultrasonic treatment on the activity of sugar metabolism relative enzymes and quality of coconut water[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 79: 105780.

[55] 匡立学, 聂继云, 徐国锋, 等. 水果中葡萄糖、果糖、蔗糖和山梨醇的测定[J]. *中国果树*, 2022(4): 87–91. [KUANG L X, NIE J Y, XU G F, et al. Determination of glucose, fructose, sucrose, and sorbitol in fruits[J]. *China Fruits*, 2022(4): 87–91.]

[56] 蔡佳秀. 西瓜糖含量配合力分析及分子标记辅助选择[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020. [CAI J X. Analysis of the combining ability of watermelon sugar content and molecular marker assisted selection [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.]

[57] CUI J, LIAN Y, ZHAO C, et al. Dietary fibers from fruits and vegetables and their health benefits via modulation of gut microbiota[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(5): 1514–1532.