

低血糖指数食品的研究进展

李 华, 吴庆峰, 薛晴晴, 李玉栋, 刘鑫慧

河南工业大学 粮油食品学院, 河南 郑州 450001

摘要:随着人们对大健康概念的认识加深,以及对身体健康重视度的增强,极大程度地促进了低血糖指数(GI)食品的发展,长期食用低GI食品对降低糖尿病患者餐后血糖水平、减少胰岛素需求、改善饱腹感有重要作用。综述了不同食品组分及加工方式对食品GI的影响,以及低GI食品的常见种类和开发现状,并对低GI食品发展存在的问题进行探讨,展望了低GI代餐食品的未来发展趋势。

关键词:血糖生成指数;糖尿病;低GI食品

中图分类号:TS201.4

文献标志码:A

文章编号:1673-2383(2023)02-0119-08

DOI:10.16433/j.1673-2383.2023.02.016

Research progress on low-glycemic index foods

LI Hua, WU Qingfeng, XUE Qingqing, LI Yudong, LIU Xinhui

College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: The foods with low-glycemic index(GI) has been greatly developed, along with the deepening of people's awareness of health and the enhancement of people's attention to physical health. The consumption of low-GI food with long term plays an important role in reducing postprandial blood glucose level, reducing insulin demand and improving satiety in diabetes patients. This paper reviewed the effects of different components and food processing methods on the GI of foods, as well as the research progress on type of production and development present situation for low-GI foods. The problems in the current production and the future development of low-GI foods were also discussed in this paper.

Key words: glycemic index; diabete; low-GI foods

随着人民生活水平的提高、饮食习惯的改变及人口老龄化的加重,糖尿病已成为目前威胁全人类健康的公共卫生问题之一^[1]。糖尿病是一种由于胰岛素分泌不足引起的综合性代谢疾病,临床表现为人体内血糖水平长期高于正常值,导致糖代谢紊乱而引起一系列的并发症。糖尿病主要分为1型和2型,其中2型糖尿病患者占该病总人数的90%以上。研究表明,2型糖尿病发病原因与遗传、环境和肥胖等有关,不合理的膳食结构是影响糖尿病患者健康的重要因素之一^[2]。

我国是世界上糖尿病患者绝对人数最多的国家,患病率和患病人数均呈上升趋势。根据国

际糖尿病联合会(IDF)相关数据显示^[3],2021年中国糖尿病患者人数约为1.41亿人,健康中国行动(2019—2030年)估算糖尿病前期患病率为总人口35.2%。糖尿病及其并发症严重影响着患者的身体健康和生活质量,也加重了社会医疗资源和保障的负担,因此,对于糖尿病的防治迫在眉睫。

血糖指数(glycemic index, GI)是衡量人体摄入食品后血糖水平变化的有效指标,是评价碳水化合物的重要生理学参数。GI是一个相对值,反映了与标准食物相比,不同食物对餐后血糖的升高速率和能力。利用GI对食品中的碳水化合物含量进行排序和分类,是一种全新的分析和评价食品的方法。一般以葡萄糖或白面包为

收稿日期:2022-06-13

基金项目:河南省科技攻关项目(212102110333)

作者简介:李华(1978—),女,吉林吉林人,博士,副教授,研究方向为食品加工理论基础研究,E-mail:lixian7810@163.com。

标准食物,并将其血糖指数定为100,与之对比所得其他食物的分类:GI<55,低血糖指数食物;55≤GI≤70,中等血糖指数食物;GI>70,高血糖指数食物。

近年来,食品GI的概念正在被越来越多的人关注,国内外对有关食品GI的研究和认识也在不断深入。澳大利亚和新西兰已经将GI作为生产食品的营养指标之一。我国对食品GI的研究应用于糖尿病患者的膳食管理、居民营养教育和食欲研究等多项用途中。其中,GI的应用为糖尿病患者的膳食健康提供了指导性的思路,也对糖尿病的预防和控制起积极作用。食品的GI在糖尿病患者的膳食干预治疗中的作用也将越来越大。

1 低GI食物与糖尿病的关系

目前,还没有彻底治愈糖尿病的药物,一般采用饮食疗法、运动疗法、监测和药物治疗相结合的方法进行预防。以GI为指导的饮食干预是治疗糖尿病的基础,可以在控制总能量摄入的基础上,兼顾营养成分,使糖尿病患者的饮食更加科学合理,对病程各个阶段的预防和控制具有重要意义。

胰岛素是葡萄糖代谢的主要调节因子,在糖代谢中起着关键作用^[4]。胰岛素抵抗是诱发2型糖尿病的重要原因之一,抵抗能力的大小与食物GI呈正相关性,长期食用高GI食物会引起胰岛素水平升高,造成胰岛素抵抗^[5-6],因此,需要胰岛β细胞分泌和释放超过正常量的胰岛素,才能使相应效应器官产生正常的生理效应。胰岛素抵抗会引发高胰岛素血症,呈现糖代谢紊乱以及胰岛β细胞功能不足的恶性循环,引发2型糖尿病。相比较正常人,糖尿病患者对胰岛素的需求更高,以刺激机体抑制肝糖异生和利用外围葡萄糖^[7]。临床上通过改善胰岛素抵抗,可以达到降血糖的作用。研究表明^[4,8-10],低GI食物能够改善胰岛素抵抗、胰岛素敏感性和胰腺分泌功能,并有效缓解糖脂代谢异常。同时,低GI食物可以减缓餐后机体对碳水化合物的消化和吸收,降低葡萄糖释放速率,从而减少对胰岛素的需求。

张晴等^[11]研究显示,低GI食物可以降低2型糖尿病患者空腹及餐后2h血糖水平。Li等^[12]对2型糖尿病患者进行饮食干预12周后发现,低GI饮食可以降低2型糖尿病患者血糖水平,体内还产生大量短链脂肪酸,能诱导机体释

放酪酪肽(肠道衍生激素),抑制胃酸分泌,进而控制进食的欲望,有利于患者控制体重。Wang等^[13]分析表明,相比较于高GI食物,低GI食物使糖尿病患者的糖化血红蛋白平均降低了9%,具有与口服降糖药物相似的临床作用。Botero等^[14]研究发现,低GI食物可以提升糖尿病患者机体的总体抗氧化能力,从而延缓糖尿病等相关代谢疾病的恶化。综上所述,长期食用低GI食物对人体健康有益,对糖尿病患者的干预治疗具有重要意义。

2 影响食品GI的因素

2.1 食品组分

各类食品及原料均是由多种组分构成的复杂体系,其组成成分主要包括淀粉、蛋白质、脂肪、膳食纤维、矿物质等,这些组分对淀粉的消化率以及抗性淀粉的形成会产生不同影响,进而影响食品的血糖指数。因此,食品的组成成分对调节食品血糖生成指数具有至关重要的作用。

2.1.1 淀粉

淀粉是为人体提供能量最主要碳水化合物来源,经过消化道后被水解成葡萄糖,引发人体血糖值的波动。通过控制食品中淀粉的消化率,可以调节体内葡萄糖稳态以及能量代谢水平^[15]。淀粉的颗粒大小、颗粒结构和直支比例等均会影响淀粉在人体肠道的消化率,进而影响食品的餐后血糖水平^[16-18]。

一般来说,淀粉颗粒体积越小,与酶接触的比表面积越大,消化速率越高,餐后血糖值升高越快。淀粉颗粒表面存在的孔洞和通道数量、大小和形状等也会影响淀粉消化率,这些因素决定了酶对淀粉作用的难易程度及作用位点^[19]。Gallant等^[20]研究表明:水稻淀粉有与内部通道相连的外围孔,具有“由内而外”的消化率模式,淀粉酶较容易进入孔洞进行酶水解反应;而马铃薯淀粉和高直链玉米淀粉具有难以消化的“由外而内”模式,淀粉酶不容易进入淀粉颗粒内部,从而具有较低的淀粉消化速率,更适合糖尿病患者食用。

淀粉颗粒是由许多直链和支链淀粉分子构成的聚合体,颗粒中的直/支链淀粉比例也会影响食品GI。与支链淀粉相比,直链淀粉分子量小,聚合度低,分支程度轻,空间构象卷曲成螺旋形,结构更加致密。由于淀粉酶作用淀粉时需要结合在淀粉链的末端,相比于直链淀粉支链淀粉

具有更多的端点,因此体内消化过程中支链淀粉更容易被淀粉酶降解生成葡萄糖,引起血糖的上升^[21-22]。Srikaeo 等^[23]通过添加高直链玉米粉来调整米粉中不同淀粉类型比例,结果表明,随着米粉中直链淀粉含量的增加,淀粉回生能力更强,米粉 GI 明显降低。因此,直链淀粉含量越高,食品 GI 通常越低。

2.1.2 蛋白质

蛋白质和部分氨基酸具有刺激胰岛素分泌的功能^[24],与高脂肪食品相比,高含量蛋白质会促进胰岛素分泌,减慢胃排空速度^[25],进而降低餐后血糖反应,保持更低的血糖和胰岛素水平。

蛋白质可以在淀粉颗粒周围形成物理涂层进而缓解淀粉水解,表面蛋白会抑制淀粉的溶胀并且阻止消化酶接触淀粉分子,从而降低食品 GI。Yang 等^[26]在玉米淀粉中添加不同比例的乳清蛋白分离物,进行体外消化模拟实验,结果表明蒸煮过程中蛋白质和淀粉分子之间发生氢键相互作用,形成淀粉-蛋白质复合物,蛋白质构成的物理屏障在空间上阻碍了淀粉酶靠近淀粉的作用位点,导致富含蛋白质的淀粉类食品 GI 降低。

2.1.3 脂肪

食品中脂肪氧化分解会消耗大量葡萄糖分解的中间产物,阻碍葡萄糖的彻底氧化分解,导致血糖浓度增加,胰岛素分泌增加^[27]。当膳食中游离脂肪酸浓度较高时,肌肉摄取脂肪酸进行氧化供能的作用会增强,从而减少葡萄糖的利用,胰岛 β 细胞分解胰岛素的功能受损,发生糖尿病的风险增高。当多不饱和脂肪酸含量较高时,特别是长链 n-3 系列具有改善糖代谢和胰岛素敏感性的功能,具有预防糖尿病发生和发展的生物学作用^[28]。动物油脂富含游离脂肪酸,而橄榄油、鱼油、坚果等富含多不饱和脂肪酸。

脂肪会对淀粉酶产生一定抑制作用,阻碍淀粉与淀粉酶结合,其中长链饱和单甘油酯比短链单甘油酯更能抵抗淀粉酶对淀粉的消化作用^[29]。此外,脂肪还能够延迟胃排空时间并可刺激肠抑胃肽的释放,进而使胰岛素分泌增强以降低餐后血糖值^[30]。Ren 等^[31]研究了脂肪对小米体外淀粉消化速率和 GI 的影响,结果显示,与未脱脂小米相比,脱脂小米中快消化淀粉含量显著增加,慢消化淀粉含量和抗性淀粉含量显著减少,餐后血糖显著上升。原因是小米烹饪过程中淀粉和脂肪之间形成的 5 型抗性淀粉,即直链淀粉-脂肪复合物,可以延缓葡萄糖在小肠中的消化速率

和吸收率^[32],从而降低小米 GI。

2.2 加工方式

食品经加工后,质构特性、营养特性和消化性均发生变化,GI 也会因食品加工和储存条件的影响而发生改变^[33],例如蒸、煮、炸等热处理,抛光、碾磨、挤压等机械力处理及低温储存方式等,通过加工和储存方式调控食品 GI 对于新产品开发具有重要意义。

2.2.1 热处理

高温下的蒸、煮、炸等食品熟化方式可赋予产品良好的质地和风味,并提升各种营养素的生物利用度,改变蛋白质和淀粉的消化率。Wolever 等^[34]研究发现在大米的蒸煮过程中,随着蒸煮时间的增加,大米淀粉逐渐糊化,高温也促进了淀粉分子的溶出。同时,蒸煮过程中淀粉分子间的氢键被水破坏、螺旋状结构解开、结晶度损失,淀粉在消化过程中更容易受到酶的水解作用,从而增加大米 GI^[35]。Reed 等^[36]研究了不同烹饪方式对马铃薯淀粉结构及水解率的影响,相对蒸煮方式而言,煎炸马铃薯的抗性淀粉含量较高,淀粉水解率较低。这也是因为煎炸过程中,食用油中的游离脂肪酸与马铃薯中直链淀粉形成直链淀粉-脂质复合物,并在马铃薯淀粉颗粒上形成不溶性膜,具有较高抗消化性。He 等^[37]发现蒸煮过程中,缩短加热时间并降低蒸煮温度会导致淀粉中分子链堆积,慢消化淀粉和抗性淀粉含量增加,同时降低了酶在淀粉颗粒中的扩散和渗透,最终降低淀粉的消化率。

2.2.2 机械力处理

食品加工会对蛋白质、淀粉等组分结构造成破坏,如大米抛光过程中,麸皮层被去除,胚乳层暴露出来,产生了大量破损淀粉。不完整的淀粉粒容易被淀粉酶降解,淀粉消化率增加而导致 GI 上升^[38-39]。食品的颗粒大小影响食品组分在体内外的消化率。Farooq 等^[40]研究发现,大米经碾磨后,得到粗粒 (<300 ~ 450 mm)、中等粒 (150 ~ 300 mm) 和细粒 (<150 mm) 3 种组分,细粒组分的米粉蒸煮后淀粉消化率明显高于其他两种组分,相对应地血糖应答水平也明显升高。与碾磨工艺相比,挤压大米的 GI 更低,可能是因为挤压过程中升温 and 剪切力破坏了淀粉结构,直链淀粉分子间或与支链淀粉长直链间通过氢键作用重新排列形成抗性淀粉。

2.2.3 低温储存

温度可以显著影响淀粉糊化和老化程度,从

而改变淀粉消化率。Guraya 等^[41]发现煮熟的糯米和粳米在 1℃下冷却后,淀粉消化率分别降低了 59%和 42%。直链淀粉和支链淀粉分子在低温下会形成双螺旋结构,进一步失去结合水的能力。双螺旋分子无法到达淀粉酶的结合位点,水解反应受到抑制^[42],生成的抗性淀粉减缓食用后体内血糖应答反应,降低糖尿病的患病风险。

3 低 GI 食品

我国的主食主要是淀粉基为主的馒头、面条、米饭和米粉等,其中碳水化合物含量均达到 70%以上,摄入体内后很容易转变成糖分,引起餐后血糖值升高^[43]。近年来国内市场上出现的代餐食品多以五谷杂粮为主,按照不同配比搭配而成的一类综合性产品,具有食用方便等优点。对于糖尿病患者而言,要严格控制淀粉的摄入量,因此,亟须开发既具有饱腹感又能控制血糖的食品,低 GI 代餐食品基于此需求应运而生。

3.1 低 GI 代餐饼干

在疏水相互作用下,脂肪酸、芳香族化合物以及其他小的配体分子会进入由直链淀粉分子形成的螺旋腔中,形成淀粉-脂质复合物(5型抗性淀粉)单螺旋结构^[44]。淀粉-脂质复合物可以有效抵抗淀粉酶的水解,降低淀粉的消化率^[45]。陈雪华等^[46]研究表明,在饼干中添加不同脂质(包括饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸)与玉米直链淀粉的复合物,可以降低饼干的体外消化率与餐后血糖值,为糖尿病患者的代餐饼干开发提供参考。Di Cairano 等^[47]利用麦芽糖醇、菊粉、抗性淀粉代替传统饼干生产中的蔗糖与面粉,制得的饼干 GI、脆性和甜度降低,黏附性和坚果味增加。

袁漠思等^[48]设计了适合糖尿病人群食用的低 GI 饼干,产品中加入了雷公藤内酯和二甲基胍改性纤维素,阻碍了葡萄糖的扩散和吸收,同时还能预防结肠癌和心脏病,增强肠液的黏度等。

3.2 低 GI 代餐粉

膳食纤维是碳水化合物中的一类非淀粉多糖,具有延缓血糖上升、促进肠道蠕动等功能^[49]。任向楠等^[50]研究了食用燕麦代餐粉的饱腹感、血糖值及胰岛素应答变化,与大米粉相比,燕麦代餐粉含有更丰富的可溶性膳食纤维,可以延缓胃中食物消化,避免胃部过早排空。因此,长期食用膳食纤维含量高的代餐粉有助于维持正常血糖水平和胰岛素功能。

酵母肽是利用多种酶降解酵母蛋白,破除酵母壁并从酶解体系中分离纯化而制成的小分子多肽,含有丰富的氨基酸、B族维生素和矿物质铬等营养成分,是优质的蛋白质来源,具有调节消化系统、降低心血管疾病等功能^[51-52]。左旋肉碱可改善人体餐后胰岛素抵抗水平,对血糖控制起辅助作用^[53-54]。赵可心等^[55]通过添加优质蛋白酵母肽、左旋肉碱、高膳食纤维紫甘薯粉、木耳粉以及多种谷物粉制成了酵母肽代餐粉。其水提取物能促进细胞吸收葡萄糖,减缓细胞内肝糖原的降解,促进糖脂代谢,从而维持人体正常的糖代谢平衡。

任昱灿等^[56]开发了苦荞叶排毒保健代餐粉,苦荞叶中含丰富的黄酮类化合物和膳食纤维,具有降血糖和抗氧化的活性,为糖尿病患者提供了可靠的代餐选择,也为后续深入开发低 GI 代餐粉提供了一定的参考。

3.3 低 GI 馒头

α -葡萄糖苷酶是碳水化合物消化降解的关键酶,抑制酶的活性可以减缓淀粉分解,降低糖尿病患者餐后血糖水平^[57]。金慧敏等^[58]以青稞粉、藜麦粉和荞麦粉为主要原料,复配动植物双蛋白,所得烤制杂粮馒头对 α -葡萄糖苷酶具有较强体外消化抑制作用,较纯小麦粉馒头可显著降低糖尿病患者的血糖水平。

铬是碳水化合物和脂质代谢中的一种必需营养素,可以协助维持人体的糖耐受性和增强胰岛素敏感性,膳食补充铬对于糖尿病等并发症的辅助治疗具有有益疗效^[59-60]。南瓜中有较高的铬含量,陈颖等^[61]据此研制了一款南瓜绿豆馒头,相比较普通馒头具有更平稳的餐后血糖水平与较低的血糖峰值,更适合糖尿病患者食用。

刘士伟等^[62]以高筋小麦粉为主要原料,复配马铃薯粉、苦荞粉、青稞粉等原料研发了一款低 GI 杂粮馒头,其餐后血糖浓度变化趋势较为稳定。张三杉等^[63]通过添加全麦粉与荞麦粉,结合柚子果肉、奇亚籽、菊粉以及淀粉回生处理工艺研制的杂粮馒头,弥补了市场上普通馒头口感不佳,碳水化合物含量高的缺点,为低 GI 馒头的开发提供了参考。

3.4 低 GI 面条

豆科植物含有较高的膳食纤维和抗性淀粉,这些物质不被消化和吸收,能有效抑制餐后葡萄糖升高^[64]。Yoshimoto 等^[65]研究表明仅由黄豌豆粉制成的面条具有较低 GI 并缓解胰岛素抵

抗。华燕菲^[66]研究的一款适合糖尿病患者食用的低GI小米绿豆面条,在全麦粉为31%、绿豆全粉为19%、谷朊粉为10%、交联淀粉为10%、食盐为0.5%、鸡蛋为8%的配方下,面条感官最佳,GI为48.94,氨基酸营养价值优于小麦面条,更能满足人体对氨基酸的需求。王润等^[67]通过在青稞粉中添加20%豌豆粉、5%荞麦粉、5%藜麦粉,制作的青稞低GI挤压面条,具有较高的营养价值与抗氧化活性,有助于减少糖尿病、心血管疾病等。

Ademosun等^[68]研究表明,在面条中加入35%未成熟车前草粉和10%橙皮可以降低碳水化合物水解酶活性与餐后血糖水平,提高抗氧化酶活性。

4 存在的问题及展望

随着社会不断发展以及人们对健康食品益处的认识,功能性代餐食品具有丰富的营养价值、对某些疾病潜在的治疗效果,已成为一种追求健康饮食的新时尚。低GI代餐食品作为一类新型食品,在工厂生产、市场销售、终端消费各环节缺乏严格的监管法律,导致目前存在产品标准化程度不够、行业监管力度不足和市场方向把控不准等问题^[69]。另外,在线销售和电子商务逐渐成为“快、省、广”的主流销售途径,在线零售平台极大地促进了代餐食品销售,并在宣传时往往夸大其词甚至虚假宣传,导致部分消费者盲目追捧。低GI代餐食品严格意义上属于营养保健品,可以起到预防和辅助治疗某些疾病的功能,但是易与其他食品衍生制剂相混淆,应与功能性食品、益生菌、食品补充剂加以区分,更不能替代药品^[70]。当前市场上的低GI代餐产品仍集中在将各种谷物成分整合到低GI代餐食品中,侧重研究淀粉含量和类型,忽略了营养元素的种类和含量不均衡的问题,以及改善肠道微生物的低GI产品研发较少。

因此,进一步改善低GI代餐食品感官品质、增加代餐食品种类和提高市场占有率,产品配方改良、工艺优化及利用新资源开发新产品是目前该类产品研发的关键问题和主要挑战。随着低GI代餐食品综合品质、研发工艺和标准化水平的提高,会进一步激发食品科研工作者对健康食品的研发,以应对不断增加的慢性病风险。

参考文献:

- [1] OJO O, OJO O O, ADEBOWALE F, 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.
- [2] 刘珊珊. 基于CGM的I型与II型糖尿病分类算法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [3] FEDERATION D. IDF diabetes atlas [M]. 10th ed. Brussels, Belgium: International Diabetes Federation, 2021.
- [4] RIZKALLA S W, TAGHRID L, LAROMIGUIERE M, et al. Improved plasma glucose control, whole-body glucose utilization, and lipid profile on a low-glycemic index diet in type 2 diabetic men [J]. *Diabetes care*, 2004, 27(8): 1866-1872.
- [5] WILLETT W, MANSON J, LIU S M. Glycemic index, glycemic load, and risk of type 2 diabetes [J]. *The American journal of clinical nutrition*, 2002, 76(1): 274S-280S.
- [6] MCKEOWN N M, MEIGS J B, LIU S M, et al. Carbohydrate nutrition, insulin resistance, and the prevalence of the metabolic syndrome in the Framingham offspring cohort [J]. *Diabetes care*, 2004, 27(2): 538-546.
- [7] WILD S H, ROGLIC G, GREEN A, et al. Global prevalence of diabetes: estimates for the year 2000 and projections for 2030 [J]. *Diabetes care*, 2004, 27(10): 2569.
- [8] SACKS F M, CAREY V J, ANDERSON C A M, et al. Effects of high vs low glycemic index of dietary carbohydrate on cardiovascular disease risk factors and insulin sensitivity [J]. *JAMA*, 2014, 312(23): 2531.
- [9] GAO R R, DUFF W, CHIZEN D, et al. The effect of a low glycemic index pulse-based diet on insulin sensitivity, insulin resistance, bone resorption and cardiovascular risk factors during bed rest [J]. *Nutrients*, 2019, 11(9): 2012.
- [10] HU Z G, TAN R S, JIN D, et al. A low glycemic index staple diet reduces postprandial

- glucose values in Asian women with gestational diabetes mellitus [J]. *Journal of investigative medicine*, 2014, 62(8): 975-979.
- [11] 张晴, 周建超, 赵妍娟, 等. 低血糖指数糖尿病膳食对 2 型糖尿病患者代谢及营养状况的影响研究 [J]. *中国全科医学*, 2012, 15(12): 1319-1321.
- [12] 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.
- [13] WANG Q, XIA W, ZHAO Z G, 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.
- [14] BOTERO D, EBBELING C B, BLUMBERG J B, et al. Acute effects of dietary glycemic index on antioxidant capacity in a nutrient-controlled feeding study [J]. *Obesity*, 2009, 17(9): 1664-1670.
- [15] MIAO M, HAMAKER B R. Food matrix effects for modulating starch bioavailability [J]. *Annual review of food science and technology*, 2021, 12: 169-191.
- [16] TESTER R F, KARKALAS J, QI X. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship [J]. *World's poultry science journal*, 2004, 60(2): 186-195.
- [17] SINGH J, DARTOIS A, KAUR L. Starch digestibility in food matrix: a review [J]. *Trends in food science & technology*, 2010, 21(4): 168-180.
- [18] TESTER R F, QI X, KARKALAS J. Hydrolysis of native starches with amylases [J]. *Animal feed science and technology*, 2006, 130(1/2): 39-54.
- [19] MIAO M, JIANG B, CUI S W, et al. Slowly digestible starch: a review [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2015, 55(12): 1642-1657.
- [20] GALLANT D J, BOUCHET B, BALDWIN P M. Microscopy of starch: evidence of a new level of granule organization [J]. *Carbohydrate polymers*, 1997, 32(3/4): 177-191.
- [21] WANG S J, LI P Y, ZHANG T, et al. *In vitro* starch digestibility of rice flour is not affected by method of cooking [J]. *LWT-food science and technology*, 2017, 84: 536-543.
- [22] BUTARDO V M, FITZGERALD M A, BIRD A R, et al. Impact of down-regulation of starch branching enzyme IIb in rice by artificial microRNA-and hairpin RNA-mediated RNA silencing [J]. *Journal of experimental botany*, 2011, 62(14): 4927-4941.
- [23] SRIKAEK K, SANGKHIAW J. Effects of amylose and resistant starch on glycaemic index of rice noodles [J]. *LWT-food science and technology*, 2014, 59(2): 1129-1135.
- [24] FU Z, GILBERT E R, LIU D M. Regulation of insulin synthesis and secretion and pancreatic beta-cell dysfunction in diabetes [J]. *Current diabetes reviews*, 2013, 9(1): 25-53.
- [25] ODENIGBO A, RAHIMI J, NGADI M, et al. Starch digestibility and predicted glycemic index of fried sweet potato cultivars [J]. *Functional foods in health and disease*, 2012, 2(7): 280.
- [26] YANG C H, ZHONG F, DOUGLAS GOFF H, et al. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends [J]. *Food chemistry*, 2019, 280: 51-58.
- [27] PARRY S A, ROSQVIST F, MOZES F E, et al. Intrahepatic fat and postprandial glycemia increase after consumption of a diet enriched in saturated fat compared with free sugars [J]. *Diabetes care*, 2020, 43(5): 1134-1141.
- [28] TELLE-HANSEN V H, GAUNDAL L, MYHRSTAD M C W. Polyunsaturated fatty acids and glycemic control in type 2 diabetes [J]. *Nutrients*, 2019, 11(5): 1067.
- [29] SMART C E M, EVANS M, O'CONNELL S M, et al. Both dietary protein and fat increase postprandial glucose excursions in children with type 1 diabetes, and the effect is additive [J]. *Diabetes care*, 2013, 36

- (12): 3897-3902.
- [30] 崔亚楠. 低血糖指数原料(谷物、豆类)及工艺筛选和配方冲调粉的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [31] REN X, CHEN J, MOLLA M M, et al. *In vitro* starch digestibility and *in vivo* glycemic response of foxtail millet and its products [J]. *Food & function*, 2016, 7(1): 372-379.
- [32] SHU X L, JIA L M, YE H X, et al. Slow digestion properties of rice different in resistant starch [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2009, 57(16): 7552-7559.
- [33] FARDET A. Minimally processed foods are more satiating and less hyperglycemic than ultra-processed foods: a preliminary study with 98 ready-to-eat foods [J]. *Food & function*, 2016, 7(5): 2338-2346.
- [34] WOLEVER T M S, JENKINS D J A, KALMUSKY J, et al. Comparison of regular and parboiled rices: explanation of discrepancies between reported glycemic responses to rice [J]. *Nutrition research*, 1986, 6(4): 349-357.
- [35] JUNG E Y, SUH H J, HONG W S, et al. Uncooked rice of relatively low gelatinization degree resulted in lower metabolic glucose and insulin responses compared with cooked rice in female college students [J]. *Nutrition research*, 2009, 29(7): 457-461.
- [36] REED M O, AI Y F, LEUTCHER J L, et al. Effects of cooking methods and starch structures on starch hydrolysis rates of rice [J]. *Journal of food science*, 2013, 78(7): H1076-H1081.
- [37] HE M, QIU C, LIAO Z H, et al. Impact of cooking conditions on the properties of rice: combined temperature and cooking time [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 117: 87-94.
- [38] TRAN T T B, SHELAT K J, TANG D, et al. Milling of rice grains. the degradation on three structural levels of starch in rice flour can be independently controlled during grinding [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2011, 59(8): 3964-3973.
- [39] SHOBANA S, JAYANTHAN M, SUDHA V, et al. Glycaemic properties of brown rice [M]//Brown rice. Cham: Springer International Publishing, 2017: 123-133.
- [40] FAROOQ A M, LI C, CHEN S Q, et al. Particle size affects structural and *in vitro* digestion properties of cooked rice flours [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2018, 118: 160-167.
- [41] GURAYA H S, JAMES C, CHAMPAGNE E T. Effect of cooling, and freezing on the digestibility of debranched rice starch and physical properties of the resulting material [J]. *Starch-stärke*, 2001, 53(2): 64-74.
- [42] YANG Y, ZHENG S S, LI Z, et al. Influence of three types of freezing methods on physicochemical properties and digestibility of starch in frozen unfermented dough [J]. *Food hydrocolloids*, 2021, 115: 106619.
- [43] 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.
- [44] SHI L F, HOPFER H, ZIEGLER G R, et al. Starch-menthol inclusion complex: structure and release kinetics [J]. *Food hydrocolloids*, 2019, 97: 105183.
- [45] LIU Y F, CHEN L, XU H S, et al. Understanding the digestibility of rice starch-Gallic acid complexes formed by high pressure homogenization [J]. *International journal of biological macromolecules*, 2019, 134: 856-863.
- [46] 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.
- [47] DI CAIRANO M, CONDELLI N, CELA N, et al. Formulation of gluten-free biscuits with reduced glycaemic index: focus on *in vitro* glucose release, physical and sensory properties [J]. *LWT-food science and technology*, 2022, 154: 112654.
- [48] 袁汉思, 肖元涛. 一种适合糖尿病患者食用的低血糖生成值(GI)的饼干: CN108174900A [P]. 2018-06-19.
- [49] SHIROSAKI M, KOYAMA T, YAZAWA K.

- Anti-hyperglycemic activity of kiwifruit leaf (*Actinidia deliciosa*) in mice [J]. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 2008, 72(4): 1099-1102.
- [50] 任向楠, 周瑾, 何梅, 等. 燕麦配方代餐粉对成人的饱腹感影响研究 [J]. *营养学报*, 2020, 42(2): 115-121, 129.
- [51] LI Y L, WANG S, QUAN K Y, et al. Co-administering yeast polypeptide and the probiotic, *Lactocaseibacillus casei* Zhang, significantly improves exercise performance [J]. *Journal of functional foods*, 2022, 95: 105161.
- [52] 梁天蛟. 壳寡糖的制备及其在酵母多肽分离纯化上的应用研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2015.
- [53] DAMBROVA M, LIEPINSH E. Risks and benefits of carnitine supplementation in diabetes [J]. *Experimental and clinical endocrinology & diabetes*, 2014, 123(2): 95-100.
- [54] 王诗琪, 郭昆全. 左旋肉毒碱与 2 型糖尿病 [J]. *中国糖尿病杂志*, 2017, 25(11): 1051-1053.
- [55] 赵可心, 段盛林, 韩诗雯, 等. 酵母肽体重控制代餐粉调节糖脂代谢功能评价 [J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(5): 46-51.
- [56] 任昱灿, 姚波, 郭雨, 等. 苦荞叶荷叶排毒保健代餐粉的研究及工艺优化 [J]. *农产品加工*, 2017(4): 25-28.
- [57] 王静, 刘丁丽, 罗丹, 等. 体外模拟消化对藜麦抗氧化活性、 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制活性影响研究 [J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(4): 51-58.
- [58] 金慧敏, 党斌, 张文刚, 等. 低 GI 烤制杂粮复合馒头工艺配方优化及品质分析 [J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(3): 148-156.
- [59] ASBAGHI O, FATEMEH N, MAHNAZ R K, et al. Effects of chromium supplementation on glycemic control in patients with type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Pharmacological research*, 2020, 161: 105098.
- [60] CHEN W Y, MAO F C, LIU C H, et al. Chromium supplementation improved post-stroke brain infarction and hyperglycemia [J]. *Metabolic brain disease*, 2016, 31(2): 289-297.
- [61] 陈颖, 王风雷, 陈秋平. 南瓜绿豆馒头的研制及其对血糖值的影响研究 [J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(20): 86-88.
- [62] 刘士伟, 王成祥, 段盛林, 等. 基于模糊数学感官评价的杂粮馒头配方优化及低 GI 验证 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(21): 375-380.
- [63] 张三杉, 余梦玲, 雷激, 等. 低血糖生成指数杂粮馒头的研制 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(22): 214-220.
- [64] CLEMENTE A, OLIAS R. Beneficial effects of legumes in gut health [J]. *Current opinion in food science*, 2017, 14: 32-36.
- [65] YOSHIMOTO J, KATO Y, BAN M, et al. Palatable noodles as a functional staple food made exclusively from yellow peas suppressed rapid postprandial glucose increase [J]. *Nutrients*, 2020, 12(6): 1839.
- [66] 华燕菲. 低 GI 小米绿豆面条配方优化及其品质特性的研究 [D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2020.
- [67] 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.
- [68] ADEMOSUN A O, ODANYE O S, OBOH G. Orange peel flavored unripe plantain noodles with low glycemic index improved antioxidant status and reduced blood glucose levels in diabetic rats [J]. *Journal of food measurement and characterization*, 2021, 15(4): 3742-3751.
- [69] 王小月. 代餐市场有待标准规范 [N]. *消费日报*, 2021-08-09(A2).
- [70] DALIU P, SANTINI A, NOVELLINO E. From pharmaceuticals to nutraceuticals: bridging disease prevention and management [J]. *Expert review of clinical pharmacology*, 2019, 12(1): 1-7.

(责任编辑 金铁成)