

功能性成分对食物血糖应答影响的研究进展

丁方莉^{1,2}, 柳嘉^{1,2}, 高铭^{1,2}, 王晴^{1,2}, 李珊珊^{1,2}, 潘聪^{1,2}, 刘士伟^{1,2},
李雅丽^{1,2}, 周志桥^{1,2}, 段盛林^{1,2*}

(¹中国食品发酵工业研究院有限公司 北京 100015

²功能主食创制与慢病营养干预北京市重点实验室 北京 100015)

摘要 近些年来,糖尿病已成为影响国民健康的重要慢性疾病。在防控糖尿病病情进展过程中,饮食管理尤为重要,亟需研发可降低血糖波动的低血糖生成指数(GI)产品。一些功能性成分,如膳食纤维、糖醇和植物提取物等可以用抑制消化酶活性,阻碍消化酶与碳水化合物的接触,减缓葡萄糖的吸收等方式实现降低食物血糖应答的目的。本文综述近年来有关功能性成分对血糖应答的影响研究,旨在为后续的低 GI 产品研发以及糖尿病患者膳食指导提供一些的帮助。

关键词 功能性成分; 膳食纤维; 植物提取物; 血糖应答; 降低 GI

文章编号 1009-7848(2022)08-0364-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.08.039

对于糖尿病人群,血糖的控制尤为重要。在日常饮食中既要控制血糖,还要注意摄入各种营养成分。研究表明,除了碳水化合物本身可引起血糖的升高外,一些功能性成分,如膳食纤维、糖醇和植物提取物等也可影响血糖波动。这些功能性成分本身不会引起血糖升高,而是通过抑制碳水化合物的消化和吸收,从而降低食物的血糖应答^[1-2]。研究功能性成分对食物血糖应答的影响,对低血糖生成指数(Glycemic index, GI)产品的研发和糖尿病人日常膳食指导有着重要的意义。

血糖应答(Glycemic responses, GR)是指食物对血糖波动的影响情况。通过血糖应答研究既可以用来测试一些含有可利用碳水化合物的食物对血糖的影响,还可以用来研究一些不含可利用碳水化合物的原料对食物血糖应答的效应。将一些功能性成分,如膳食纤维、糖醇以及植物提取物等加入产品中,可以显著降低产品的 GI 值^[3]。膳食纤维属于不可利用碳水化合物,可通过延缓食物中可利用碳水化合物被消化的速度以及小肠对葡萄糖的吸收,从而降低食物血糖应答^[4]。植物提取物主要是通过其中含有的天然活性成分对碳水化

合物消化酶的抑制,进而抑制碳水化合物消化速率,从而降低食物血糖应答效应^[5]。本文通过大量的文献检索,首次对食源性功能性成分产生的食物血糖应答降低效应相关的研究进行梳理,旨在为相关的科学研究、低 GI 产品研发以及糖尿病人的膳食指导提供一定的帮助。

常见的功能性成分有功能糖和植物提取物两大类,可通过抑制碳水化合物消化速率,降低食物的血糖应答^[6-7]。将其作为低 GI 产品的研发配料可直接应用于糖尿病人日常饮食当中。

1 功能糖对食物血糖应答的影响

功能糖主要包括膳食纤维和功能性糖醇。功能糖中除部分糖醇外,其它均属于不可利用碳水化合物,不仅不具备血糖增长的能力,还可以延缓食物中可利用碳水化合物被消化的速度,从而降低食物餐后血糖应答^[7]。

1.1 功能性膳食纤维对食物血糖应答的影响

膳食纤维包括非水溶性纤维(如纤维素、半纤维素、木质素等)和水溶性膳食纤维(如果胶、琼脂和低聚糖等)。水溶性膳食纤维可以通过增加体系黏度阻碍消化酶与碳水化合物的接触,进而抑制碳水的消化^[6,8]。研究表明,制作白面包时加入可溶性膳食纤维阿拉伯木聚糖纤维(12 g/75 g 可利用碳水化合物)可使白面包 GI 值降至 41^[9]。另有研究表明,食用白面包的同时饮用 250 mL 含 10 g

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目
(2019YFF0216704)

作者简介: 丁方莉(1995—),女,硕士生,工程师

通信作者: 段盛林 E-mail: dslbeijing@163.com

菊粉的水,可使白面包 GI 值降到 46^[9]。不可溶性膳食纤维对 GI 值的影响要小于可溶性膳食纤维,加入黏性不溶性膳食纤维羽扇豆仁纤维(9 g/50 g 可利用碳水化合物)几乎不影响白面包的 GI 值^[10]。

功能性低聚糖是一类重要的膳食纤维,主要包括水苏糖、棉籽糖、异麦芽酮糖、乳酮糖、低聚果糖、低聚木糖、低聚半乳糖、低聚异麦芽糖、低聚异麦芽酮糖、低聚龙胆糖、大豆低聚糖、低聚壳聚糖等,其在人体肠道内不仅不能被消化吸收、延长胃排空时间,还可影响碳水化合物的消化吸收^[11]。作为替代蔗糖的新型功能性糖源,功能性低聚糖应用在食品研发过程中可以降低食物整体的血糖应答,是一种具有广泛适用范围和应用前景的功能性成分。麦麸中含有丰富的膳食纤维,将富含低聚阿拉伯木聚糖和抗性淀粉的麦麸提取物加入到白面包中会降低白面包的餐后血糖应答^[12]。同样地,瓜尔豆胶作为一种广泛应用的膳食纤维,不仅可以通过延长食物在胃内停留时间减缓糖吸收速度,还可通过抑制碳水与消化酶的接触降低碳水化合物的消化速率,进而降低食物 GI 值^[13]。与果胶相比,100%小麦粉+2%果胶制作的小麦面包 GI 值为 85,而加 2%瓜尔豆胶的面包 GI 仅为 66;在 50 g 葡萄糖测试中加入 14.5 g 瓜尔豆胶可使葡萄糖 GI 值降到 62^[14]。

有研究表明,燕麦中的 β -葡聚糖可通过抑制淀粉酶的活性从而降低食物餐后血糖应答。其质量浓度在 7.5 mg/mL 以下时,对猪胰 α -淀粉酶活性抑制率在 15.87%以下,抑制程度有限;当增加到 10 mg/mL 以上时,其对猪胰 α -淀粉酶的抑制率迅速增加;当质量浓度达到 30 mg/mL 时,对猪胰 α -淀粉酶活性抑制率可达 54.33%^[15]。燕麦 β -葡聚糖对淀粉酶的抑制活性可显著降低食物中淀粉的消化率以及消化速率,从而降低食物血糖应答,且其抑制作用与剂量呈正相关^[16]。此外,一些复杂的低聚糖如阿卡波糖还具有抑制 α -葡萄糖苷酶的作用,通过抑制碳水化合物的消化,从而显著降低 GI 值。每 50 g 可利用碳水化合物中加入 0.2 g 阿卡波糖就可使白面包 GI 降到为 50^[17]。

此外,膳食纤维具有很强的吸附作用,可通过吸附葡萄糖,从而调节食物血糖应答^[18]。青稞、燕麦、马铃薯中含有的膳食纤维均具有良好的葡萄

糖吸附能力^[19]。膳食纤维还可通过延缓葡萄糖被胃肠道吸收的速率,从而降低食物的血糖应答,如火龙果皮中的膳食纤维具有很强的葡萄糖透析阻滞能力,可有效延缓和阻滞葡萄糖在胃肠道的吸收,从而降低血糖水平^[20]。

综上,膳食纤维可通过两大渠道降低食物的血糖应答效应:一是延长胃排空时间和抑制底物与消化酶的接触,从而减缓碳水化合物的消化速率;二是通过其具有的吸附和形成凝胶的能力,阻碍肠液中葡萄糖的吸收和扩散。

1.2 糖醇对食物血糖应答的影响

单一糖饮食模式已经对人们的健康产生了不良影响,而功能性糖醇由于风味较佳,且引起血糖波动的能力较低,是最有潜力的一种替代糖类。糖醇是一类多元醇,广泛存在于水果和蔬菜中,可作为低热甜味剂添加到食品中。食品中最常用的多元醇有山梨醇、甘露醇、木糖醇、赤藓糖醇、麦芽糖醇、乳糖醇和异麦芽糖醇。其中,赤藓糖醇、甘露糖醇、乳糖醇等只可部分被人体吸收利用,对血糖升高影响较小。木糖醇、山梨糖醇引起血糖波动的能力很弱,GI 值分别为 21 和 28^[21]。在低 GI 产品研发过程中,糖醇类的加入不仅不会损失产品原有的风味,通过将高 GI 的糖类如葡萄糖、蔗糖等部分替换为糖醇,可整体降低食物的血糖应答。

有研究表明,一些糖醇可直接通过降低消化酶的活性从而显著抑制碳水化合物的消化,如赤藓糖醇、异麦芽酮糖醇和山梨糖醇具有抑制 α -葡萄糖苷酶活性的作用^[22],将其应用到糖尿病患者饮食中,可降低其餐后血糖应答,有利于维持血糖平稳。也有研究表明赤藓糖醇可通过抑制小肠对葡萄糖的吸收、增加肌肉对葡萄糖的摄取、提高葡萄糖代谢酶活性、调节肌肉 4 型葡萄糖转运蛋白和胰岛素受体底物-1 蛋白表达等途径,发挥降低餐后血糖的作用^[23]。值得注意的是,有体外研究表明,麦芽糖醇也可抑制 II 型糖尿病大鼠小肠葡萄糖吸收,并增加胰岛素介导的肌肉葡萄糖摄取,而在正常或者 2 型糖尿病大鼠体内无此效果^[24]。此外,有动物实验表明,木糖醇可以促进机体胰岛素分泌,从而间接促进血糖降低,实现降低食物餐后血糖应答的作用^[25]。

2 植物提取物对食物血糖应答的影响

植物提取物是指是以植物为原料,按照对提取的最终产品的用途的需要,经过物理化学提取分离过程,定向获取和富集植物中的某一种或多种有效成分,而不改变其有效成分结构而形成的产品。来源于植物界的提取物有效成分主要有黄酮类、生物碱类、多糖类、挥发油类、醌类、萜类、木脂素类、香豆素类、皂苷类、强心苷类、酚酸类及氨基酸与酶等;来源于海洋的植物提取物有效成分主要有甾醇、萜类、皂甙、不饱和脂肪酸、多糖和糖苷、大环内酯、聚醚类化合物和多肽等;植物中的天然活性成分由于具有抗氧化、抗衰老、抗应激、增强免疫等多种生物活性,对人体健康有益^[26]。近年来,随着化学分析方法的发展,植物提取物中具有降血糖的活性因子逐渐被挖掘出来,其中包括皂甙、萜、多肽、氨基酸、多糖、黄酮、不饱和脂肪酸、生物碱、硫键化物和苯丙素酚等^[27]。这些活性物质广泛存在于天然的植物包括蔬菜、水果以及一些药食同源的中药材中,均有作为降低食物血糖应答的功能因子的潜力。植物提取物可通过抑制消化酶活性、减缓葡萄糖吸收以及抑制碳水化合物消化速率等渠道实现降低食物血糖应答的作用^[28-29]。

2.1 多酚及黄酮类活性物质对对食物血糖应答的影响

植物多酚作为一类天然大分子化合物广泛存在于植物体内,具有改善心血管疾病、抗肿瘤、降血糖、降血脂、治疗神经退行性疾病等作用,并在农业、食品等领域得到了很好的应用^[26]。近年来的一些研究表明,食源性的多酚可降低食物的血糖应答,这对于低GI产品的研发具有重要的指导意义^[30-31]。研究表明,多酚类化合物主要是通过抑制消化酶活性以及抑制葡萄糖的转运和吸收,从而实现降低食物餐后血糖的作用^[30-31]。

碳水化合物进入到人体后主要是通过胰 α -淀粉酶和肠 α -葡萄糖苷酶的消化,引起血糖升高。胰淀粉酶是由胰腺分泌的一种水解酶,是作用于可溶性淀粉、直链淀粉、糖原等 α -1,4-葡聚糖,水解 α -1,4-糖苷键的酶^[32]。葡萄糖苷酶存在于小肠刷状缘细胞的微绒毛上,是一种小肠上皮细胞的膜结合酶,在碳水化合物消化过程中起着重要

作用,可通过抑制胰 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性来降低碳水化合物的消化速率,从而降低食物的餐后血糖应答。临床用的 α -葡萄糖苷酶抑制剂如阿卡波糖和伏格列波糖等,虽然是目前治疗非胰岛素依赖型糖尿病的理想药物,但是会对肠胃产生很大的副作用,如肠胃胀气和腹泻等^[33]。植物化学物质具有多种健康保护特性,广泛存在于蔬菜、水果和谷物中的多种活性物质如多酚、黄酮等均具有抑制碳水化合物消化的活性^[34-35]。多酚类化合物可通过抑制淀粉酶和葡萄糖苷酶的活性、增加慢消化和抗消化淀粉的占比等实现降低食物血糖应答的效果。研究发现,花青素和葡聚糖联合作用可使白米饭的GI值(72)降低至55.0,降低效果非常显著^[36]。Roy等^[37]进行了一项有关褐藻类植物活性成分降血糖的研究,体外试验和体内测试得到的结果一致,褐藻类植物泡叶藻和墨角藻中的多酚提取物均可通过抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性,进而抑制碳水化合物的消化,降低食物的血糖应答效应。此外,甘蔗提取物中的多酚类物质还可通过抑制肠道细胞对葡萄糖和果糖的吸收,进而降低食物的GI值^[38];绿茶中的多酚可以抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性从而降低餐后血糖水平^[5]。富含多酚类活性物质的植物如苦瓜、葫芦巴、常春藤,仙人掌、人参、俄罗斯龙蒿、肉桂、木虱和大蒜等^[39],也是低GI产品研发的重要功能性原料。

黄酮类化合物是最普遍的酚类化合物,具有抗氧化、抗癌、抗炎、化学预防和心脏保护作用等活性^[26]。流行病学研究数据表明,富含黄酮类化合物的植物是预防和治疗糖尿病的天然膳食来源^[40]。相关研究发现,多种富含黄酮化合物的植物提取物能够通过抑制消化酶的活性从而降低碳水化合物的消化率^[41]。葡萄柚中含有许多黄酮类物质,如橙皮苷、柚皮苷和山奈酚等,葡萄柚提取物对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶均有抑制作用,此外柑橘中含有的类黄酮提取物也可抑制淀粉的消化^[42]。浆果中通常富含黄酮类化合物,其提取物也具有相应的降低消化酶活性的作用。Grussu等^[43]通过体外试验研究发现浆果多酚如罗汉果和覆盆子提取物主要发挥抑制 α -淀粉酶的作用。 α -淀粉酶抑制剂的使用可以抑制碳水化合物的消化,然

而大量未消化碳水化合物在大肠内的积累又会对机体产生副作用。因此,发掘更多的主要作用于 α -葡萄糖苷酶的植物提取物对人体健康更有意义。

葡萄糖在小肠内的吸收主要通过两个转运载体完成:低浓度时通过钠依赖性葡萄糖转运蛋白 1(SGLT1)的作用,高浓度时依靠低亲和力的促进转运体葡萄糖转运体 2(GLUT2)的作用^[44]。抑制葡萄糖转运蛋白的活性可以抑制葡萄糖在小肠内的吸收,进而抑制餐后血糖升高。富含黄酮类和皂苷类的植物提取物不仅可发挥抑制消化酶活性的作用,还可抑制葡萄糖转运蛋白 SGLT1 和 GLUT2 的活性,进而降低食物的血糖应答效应^[45]。从草莓中提取的糖苷类黄酮——紫椴苷可以抑制 α -淀粉酶的消化活性以及 SGLT1 和 GLUT2 介导的肠细胞对葡萄糖的摄取,从而降低食物血糖应答^[46]。

2.2 生物碱类活性物质对食物血糖应答的影响

生物碱类大多存在于植物中,故又称为植物碱,是一类含氮的有机碱性化合物。生物碱分子中大多含有含氮杂环,如吡啶、吲哚、喹啉、嘌呤等,也有少数是胺类化合物。生物碱在植物中常与有机酸结合成盐存在,还有少数以糖苷、有机酸酯和酰胺的形式存在^[29]。生物碱主要通过抑制碳水化合物消化、增加糖代谢、改善肠道菌群结构等途径实现其降低餐后血糖应答的效应^[28]。

1-脱氧野尻霉素(DNJ),是一种生物碱类活性物质,不仅可抑制葡萄糖苷酶的活性,还具有很强的稳定性。野尻霉素最先是从小链霉菌中发现,而天然 DNJ 首先是从小根皮中分离到的^[47]。目前已从桑树、鸭跖草、风信子以及沙参属植物中分离鉴定到 DNJ,其中桑树中的 DNJ 含量最高^[47]。在包含 36 位空腹血糖受损受试者的试验中,补充桑叶提取物的受试者们的餐后血糖控制得到了显著改善^[48],这与其中含有的 DNJ 发挥的抑制肠道 α -糖苷酶活性的作用有关^[49]。将桑叶提取物加入到麦芽糖、蔗糖、麦芽糊精和葡萄糖中,可使其 GI 值分别降低 53.11%,33.51%,31.00%和 8.12%^[50]。在健康人群的试验探究中,发现桑叶茶同玉米淀粉一起进食,可显著抑制人体对玉米淀粉的吸收^[51]。这一结论对桑叶提取物相关的低 GI 产品研发有着很大的启示,由于玉米淀粉属于快消化淀

粉,GI 值偏高,而在以玉米淀粉为原料的相关产品中加入桑叶提取物,既不会破坏玉米淀粉的品质,又可以显著降低产品的 GI 值。

此外,从中药黄连中分离的一种季铵生物碱,也即小檗碱,亦称黄连素,能显著降低肠道糖化酶和葡萄糖醛酸酶的活性,减少血糖吸收,从而整体降低食物的餐后血糖应答^[52]。

2.3 蛋白类物质对食物血糖应答的影响

食物中的蛋白类物质如氨基酸、生物活性多肽和大分子蛋白可对食物餐后血糖应答产生影响^[2]。食物中含有的蛋白质除了一些特定的蛋白成分可作为碳水化合物消化酶抑制剂外,其主要是通过将淀粉颗粒团簇嵌入纤维和蛋白质基质中,从而降低淀粉水解率,进而降低食物的餐后血糖应答^[53]。一些动物蛋白类成分如牛奶和鸡蛋中的氨基酸和多肽类^[54]可通过调节胰岛素、抑制消化酶活性从而实现降低餐后血糖的效果^[55]。相似地,植物提取物中含有的一些蛋白类物质也具有此作用,如大豆中提取的蛋白类成分也可以提高机体胰岛素敏感性,促进机体的胰岛素分泌^[56]。黑豆中提取的多肽物质可以通过抑制 SGLT1 和 GLUT2 的表达从而降低小肠对葡萄糖的吸收^[57]。

植物在进化过程为了免遭病虫害的袭击会在细胞中形成一种结构异化的防御屏障,可对植物起到一定的保护作用,这种保护物质便是 α -淀粉酶抑制剂(α -AI)^[58]。 α -AI 能抑制淀粉的消化吸收,降低餐后血糖,并可减少糖向脂肪的转化,具有很重要的临床应用意义^[40]。而从谷物中提取的 α -AI 在食用方面也更加安全可靠。刘文芝等^[59]从黏玉米中提取纯化出了一种蛋白类新型 α -AI,对人唾液淀粉酶、猪胰淀粉酶及玉米淀粉酶有明显的抑制作用。白芸豆中蛋白质的含量很高,可达 20%,是优质蛋白的重要资源^[60],研究表明,白芸豆蛋白质中含有高活性的 α -淀粉酶抑制剂,它能够通过与淀粉酶形成酶-抑制剂复合物而使酶失活^[61],从而阻碍食物中碳水化合物的水解和消化。杨明琰^[60]从白芸豆中分离纯化出了一种 α -AI 糖蛋白,这种糖蛋白中蛋白质和糖链的连接方式为 O-糖肽键。构效关系研究结果表明糖蛋白中单独的糖链和蛋白链都没有生物活性,只有糖链和蛋白链结合在一起形成完整的糖蛋白时才对猪胰淀

粉酶具有抑制活性。由于蛋白质热稳定性低, 誉艳等^[62]从白芸豆蛋白中制备出了一种热稳定性更高的白芸豆多肽, 使其对淀粉酶的抑制活性也更加稳定。

综上, 植物中提取获得的蛋白质类活性物质可通过抑制碳水化合物的消化和机体胰岛素的分泌, 从而降低食物餐后血糖波动。因此, 对于需要日常控制血糖水平的人群, 可适量增加此类蛋白质类物质的摄入。

2.4 其它

除了多酚、黄酮、生物碱以及蛋白类活性物质可有效降低食物餐后血糖之外, 皂苷作为广泛存在于植物提取物中的一类由三萜或螺旋甾烷组成的苷类化合物, 也具有此效应。研究表明, 皂苷类活性成分可以通过降低消化酶活性、抑制葡萄糖在小肠内的吸收和促进胰岛素分泌, 从而降低食物餐后血糖应答^[27, 63]。例如, 药食同源植物玉竹中的玉竹总皂苷能够直接修复受损胰岛细胞, 提高胰岛素水平; 红参中含有的人参皂苷成分可抑制肠道对葡萄糖的吸收, 并通过上调葡萄糖转运体的表达, 促进葡萄糖的消耗, 从而起到稳定血糖的作用^[64]。

葫芦巴是豆科植物戎芦巴的种子, 具有降血糖、降血脂、抗肿瘤等多种功效。有研究通过体外模拟小肠葡萄糖吸收的试验, 发现葫芦巴提取物也具有抑制葡萄糖吸收的作用, 其可能是通过抑制肠道刷缘膜部位葡萄糖转运从而降低食物血糖应答的^[65]。

有研究表明薄荷类植物芡欧鼠尾草的种子——奇亚籽可以增加糖耐量, 这与其中含有的奇亚籽油有关。奇亚籽油可增加热休克蛋白 HSP70 和 HSP25 的表达, 而热休克蛋白 HSP70 和 HSP25 可以抑制高脂肪饮食引起的葡萄糖和胰岛素不耐受, 在增加糖耐量、促进胰岛素信号传导、增加骨骼肌对胰岛素敏感性等方面起着非常重要的调节作用^[66]。

3 结论

血糖应答较低的食物更有利于糖尿病人餐后血糖的稳定, 低 GI 膳食指导以及低 GI 产品的研发对于糖尿病人身体健康有着十分重要的意义。

食物原料中含有的膳食纤维、糖醇等功能糖以及天然植物提取物中的活性因子可通过多种作用方式降低食物中碳水化合物的消化和吸收, 从而降低食物的餐后血糖应答, 这对于低 GI 产品的研发具有重要的指导意义。然而, 有关植物提取物降低餐后血糖应答的机制研究尚不成熟, 很多具有降低餐后血糖应答的功能性成分的作用机制也不清楚; 因此, 未来有关功能性成分降低餐后血糖应答的研究除了深耕活性物质的挖掘之外, 还应构建更完善的机制研究方法, 从而促进作用机制的系统探究。本文综述了近年来有关功能性成分对食物血糖应答的影响研究以及一些功能性成分降低血糖应答的作用方式, 旨在为后续相关更深入的研究以及挖掘可降低食物血糖应答的原料提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- [1] 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 L Z, DING W Y, et al. Inhibitory effects of soluble dietary fibers on the *in vitro* digestion of corn starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(19): 1-6.
- [2] 杨月欣. 食物血糖生成指数: 一个关于调节血糖的新概念[M]. 北京: 北京医科大学出版社, 2004.
YANG Y X. Food glycemic index: A new concept about regulating blood glucose[M]. Beijing: Beijing Medical University Press, 2004.
- [3] LU Z X, WALKER K Z, MUIR J G, et al. Arabinoxylan fiber, a byproduct of wheat flour processing, reduces the postprandial glucose response in normoglycemic subjects[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2000, 71(5): 1123-1128.
- [4] LIU H F, ZENG X Y, HUANG J Y, et al. Dietary fiber extracted from pomelo fruitlets promotes intestinal functions, both *in vitro* and *in vivo*[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 252: 117186.
- [5] LOCHOCKA K, BAJERSKA J, GLAPA A, et al. Green tea extract decreases starch digestion and absorption from a test meal in humans: A randomized, placebo-controlled crossover study[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 12015.

- [6] 刘成梅, 方冲, 刘云飞, 等. 不同添加物对挤压重组米血糖生成指数和理化性质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(3): 96-102.
LIU C M, FANG C, LIU Y F, et al. Effects of different additives on glycemic index and physicochemical properties of extruded rice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(3): 96-102.
- [7] 陈超刚, 林秀红, 何凤怡, 等. 添加益生元的混合食品对血糖生成指数和血糖负荷的影响[J]. 新医学, 2019, 50(12): 919-923.
CHEN C G, LIN X H, HE F Y, et al. Effect of adding prebiotics to mixed foods on glycemic index and glycemic load [J]. Journal of New Medicine, 2019, 50(12): 919-923.
- [8] 吴斯妍, 贾鑫, 杨栋, 等. 膳食纤维功能特性及构效关系的研究进展[J]. 中国食物与营养, 2019, 25(6): 47-50.
WU S Y, JIA X, YANG D, et al. Research progress on the relationship between functionalities and structure-function of dietary fiber[J]. Food and Nutrition in China, 2019, 25(6): 47-50.
- [9] FOSTERPOWELL K, MILLER J B. International tables of glycemic index[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1995, 62(4): 871S.
- [10] JOHNSON S K, MCQUILLAN P L, SIN J H, et al. Sensory acceptability of white bread with added Australian sweet lupin (*Lupinus angustifolius*) kernel fibre and its glycaemic and insulinaemic responses when eaten as a breakfast[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2003, 83(13): 1366-1372.
- [11] 陈远, 杨月欣, 李东, 等. 一种具有降低食物血糖生成指数的复合功能糖: CN103053903A[P]. 2013-04-24[2021-04-16].
CHEN Y, YANG Y X, LI D, et al. A compound functional sugar with the function of reducing food glycemic index: CN103053903A [P]. 2013-04-24 [2021-04-16].
- [12] BOLL E, EKSTR M L, COURTIN C M, et al. Effects of wheat bran extract rich in arabinoxylan oligosaccharides and resistant starch on overnight glucose tolerance and markers of gut fermentation in healthy young adults[J]. European Journal of Nutrition, 2016, 55(4): 1661-1670.
- [13] 徐箬. 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.
XU Q. Development of low GI bread and determination of glycemic index of its final product[D]. Handan: Hebei Engineering University, 2020
- [14] BRAATEN J T, WOOD P J, SCOTT F W, et al. Oat gum lowers glucose and insulin after an oral glucose load[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1991, 53(6): 1425-1430.
- [15] 张宇. 燕麦 β -葡聚糖对淀粉消化吸收和血糖的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
ZHANG Y. Oats β -effects of glucan on starch digestion and absorption and blood glucose[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015
- [16] 朱婷, 谢晶, 邵则淮, 等. 燕麦 β -葡聚糖降血糖性能研究进展[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 381-386.
ZHU T, XIE J, SHAO Z Z, et al. Research progress of hypoglycemic effect of oat β -glucan[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(3): 381-386.
- [17] MUNARI A, PINTO W, ANDRACA C, et al. Lowering glycemic index of food by acarbose and *Plantago psyllium* mucilage[J]. Archives of Medical Research, 1998, 29(2): 137.
- [18] 蔡沙, 隋勇, 施建斌, 等. 马铃薯膳食纤维物化特性分析及其对马铃薯热干面品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 87-94.
CAI S, SUI Y, SHI J B, et al. Physicochemical properties of potato dietary fiber and its influence on the quality of hot dry noodles made from potato starch[J]. Food Science, 2019, 40(4): 87-94.
- [19] 王艳丽, 刘凌, 孙慧, 等. 膳食纤维的微观结构及功能特性研究[J]. 中国食品添加剂, 2014(2): 98-103.
WANG Y L, LIU L, SUN H, et al. The study on microstructure and functional property of diet fiber[J]. China Food Additives, 2014(2): 98-103.
- [20] 张玉锋, 孙丽平, 庄永亮, 等. 火龙果皮中膳食纤维含量及其物理化学特性[J]. 食品科学, 2012, 33(19): 164-167.
ZHANG Y F, SUN L P, ZHUANG Y L, et al. Dietary fiber contents and physicochemical characteristics of fiber-rich powder from pitaya (*Hylocereus undatus*) peel[J]. Food Science, 2012, 33(19): 164-167.
- [21] WOLEVER T M. The glycemic index[J]. World Review of Nutrition & Dietetics, 1990, 62(6): 120.
- [22] 刘国玉, 柳嘉, 万宁, 等. 小分子糖及糖醇体外抑制

- α -葡萄糖苷酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 36-41.
- LIU G Y, LIU J, WAN N, et al. The inhibitory effects of functional sugars and sugar alcohols on α -glucosidase activity *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(3): 36-41.
- [23] CHUKWUMA C I, MOPURI R, NAGIAH S, et al. Erythritol reduces small intestinal glucose absorption, increases muscle glucose uptake, improves glucose metabolic enzymes activities and increases expression of Glut-4 and IRS-1 in type 2 diabetic rats[J]. European Journal of Nutrition, 2018, 57(7): 2431-2444.
- [24] CHUKWUMA C I, IBRAHIM M A, ISLAM M S. Maltitol inhibits small intestinal glucose absorption and increases insulin mediated muscle glucose uptake *ex vivo* but not in normal and type 2 diabetic rats[J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2016, 68(1): 73-81.
- [25] ISLAM M S, INDRAJIT M. Effects of xylitol on blood glucose, glucose tolerance, serum insulin and lipid profile in a type 2 diabetes model of rats[J]. Annals of Nutrition & Metabolism, 2012, 61(1): 57-64.
- [26] 刘湘, 汪秋安. 天然产物化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 1-5.
- LIU X, WANG Q A. Natural product chemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 1-5.
- [27] 陈芳, 刘东波. 中药活性成分降血糖作用机制研究进展[J]. 中医药学报, 2012, 40(4): 123-127.
- LIU F, LIU D B. Advances in anti-diabetes mechanism of active components in traditional Chinese medicine[J]. Acta Chinese Medicine and Pharmacology, 2012, 40(4): 123-127.
- [28] 赵秀玲, 范道春. 桑椹的生理活性成分、提取检测及药理作用研究进展[J]. 药物分析杂志, 2017, 37(3): 18-25.
- ZHAO X L, FAN D C. Review of physiological active components, extraction and detection methods and pharmacological bioactivities of mulberry[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2017, 37(3): 18-25.
- [29] 朱晓丹, 江冰洁, 刘新元, 等. 植物提取物中黄酮多酚及生物碱类化合物治疗 2 型糖尿病研究进展[J]. 中国现代中药, 2019, 21(11): 1592-1598.
- ZHU X D, JIANG B J, LIU X Y, et al. Research progress in the treatment of type 2 diabetes by flavonoids, polyphenols and alkaloids in plant extracts[J]. Chinese Modern Chinese Medicine, 2019, 21(11): 1592-1598.
- [30] 阮妙芸, 张根义. 茶多酚对淀粉酶抑制作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2008(11): 4371-4373.
- RUAN M Y, ZHANG G Y. Study on the inhibition of tea polyphenol on amylase[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008(11): 4371-4373.
- [31] OYETAYO F L, AKOMOLAFE S F, OLADAPO I F. A comparative study on the estimated glycemic index (eGI), phenolic constituents, antioxidative and potential antihyperglycemic effects of different parts of ripe *Citrus paradisi* fruit[J]. Oriental Pharmacy and Experimental Medicine, 2019, 19(1): 81-89.
- [32] 孔露, 孔茂竹, 余佳熹. 藜麦淀粉消化特性与理化特性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 290-295.
- KONG L, KONG M Z, YU J X. Digestibility and physicochemical properties of quinoa starch [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(4): 290-295.
- [33] 张姣姣. 植物提取物中 α -葡萄糖苷酶抑制剂的研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2019, 49(3): 62-65, 69.
- ZHANG J J. Research progress of α -glucosidase inhibitor from plant extracts[J]. Qinghai Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019, 49(3): 62-65, 69.
- [34] PULIDO R, BRAVO L, SAURA-CALIXTO F. Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay [J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(8): 3396-3402.
- [35] DING F L, ZHANG N X, WANG Z Y, et al. The radioprotective effect of polyphenols from pinecones of *Pinus koraiensis* and their synergistic effect with *Auricularia auricula-judae* (Bull.) J. schrt polysaccharides[J]. Starch - Strke, 2019, 71: 1800009.
- [36] LEE J J L, CHAN B, CHUN C, et al. A preparation of β -glucans and anthocyanins (LoGiCarb™) lowers the *in vitro* digestibility and *in vivo* glycemic index of white rice[J]. RSC Advances, 2020, 10(9): 5129-5133.
- [37] ROY M C, ANGUENOT R, FILLION C, et al. Effect of a commercially-available algal phlorotannins extract on digestive enzymes and carbohydrate absorption *in vivo*[J]. Food Research International,

- 2011, 44(9): 3026–3029.
- [38] JI J, YANG X, FLAVEL M, et al. Antioxidant and anti-diabetic functions of a polyphenol-rich sugarcane extract[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2019, 38(8): 1–11.
- [39] AJDA O, ULRICH N P. An overview of herbal products and secondary metabolites used for management of type two diabetes[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2017, 8: 436.
- [40] WILSON T, MEYERS S L, SINGH A P, et al. Favorable glycemic response of type 2 diabetics to low-calorie cranberry juice[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 73(9): H241–H245.
- [41] HUA F, ZHOU P, WU H Y, et al. Inhibition of α -glucosidase and α -amylase by flavonoid glycosides from Lu'an GuaPian tea: Molecular docking and interaction mechanism[J]. *Food & Function*, 2018, 9: 4173–4183.
- [42] LAURA D, ETXEBERRIA U, LOSTAO M P, et al. Helichrysum and grapefruit extracts inhibit carbohydrate digestion and absorption, improving postprandial glucose levels and hyperinsulinemia in rats[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2013, 61(49): 12012–12019.
- [43] GRUSSU D, STEWART D, MCDUGALL G J. Berry polyphenols inhibit α -amylase *in vitro*: Identifying active components in rowanberry and raspberry[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(6): 2324–2331.
- [44] 卢焱, 孙佩佩, 宋代军. 肠道上皮主要葡萄糖转运载体及其作用机制[J]. *动物营养学报*, 2018, 30(1): 50–58.
- LU Y, SUN P P, SONG D J. Intestinal epithelium major glucose transporters and their action mechanisms[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(1): 50–58.
- [45] 张磊. 黄芪对肠上皮细胞葡萄糖吸收的影响及其调控机制的研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2016.
- ZHANG L. Effect of *Astragalus membranaceus* on glucose absorption of intestinal epithelial cells and its regulatory mechanism[D]. Guangzhou: Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2016.
- [46] GOTO T, HORITA M, NAGAI H, et al. Tiliroside, a glycosidic flavonoid, inhibits carbohydrate digestion and glucose absorption in the gastrointestinal tract[J]. *Molecular Nutrition & Food Research*, 2011, 56(3): 435–445.
- [47] 周晓玲, 孙凌云, 张进, 等. 1-脱氧野尻霉素的来源及合成研究进展[J]. *蚕业科学*, 2011, 37(1): 105–111.
- ZHOU X L, SUN L Y, ZHANG J, et al. Research progress in origin and synthesis of 1-deoxynojirimycin[J]. *Science of Sericulture*, 2011, 37(1): 105–111.
- [48] KIM J Y, OK H M, KIM J, et al. Mulberry leaf extract improves postprandial glucose response in prediabetic subjects: A randomized, double-blind placebo-controlled trial[J]. *Journal of Medicinal Food*, 2015, 18(3): 306–313.
- [49] ASAI A, NAKAGAWA K, HIGUCHI O, et al. Effect of mulberry leaf extract with enriched 1-deoxynojirimycin content on postprandial glycemic control in subjects with impaired glucose metabolism[J]. *Journal of Diabetes Investigation*, 2011, 2(4): 318–323.
- [50] WANG R H, LI Y F, WEI M, et al. Mulberry leaf extract reduces the glycemic indexes of four common dietary carbohydrates[J]. *Medicine*, 2018, 97(34): e11996.
- [51] JÓZEF CZUK J, MALIKOWSKA K, GLAPA A, et al. Mulberry leaf extract decreases digestion and absorption of starch in healthy subjects—A randomized, placebo-controlled, crossover study[J]. *Advances in Medical Sciences*, 2017, 62(2): 302–306.
- [52] YU Y L, LIU L, WANG X T, et al. Modulation of glucagon-like peptide-1 release by berberine: *In vivo* and *in vitro* studies[J]. *Biochemical Pharmacology*, 2010, 79(7): 1000–1006.
- [53] 丁方莉, 柳嘉, 林静, 等. 食物血糖应答测试方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 24(1): 355–362.
- DING F L, LIU J, LIN J, et al. Research progress of food glucose response test method[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 24(1): 355–362.
- [54] JASON A, KEVIN M, INDIKA E, et al. The moderating role of response to a blood glucose challenge in postprandial cognition following consumption of milk, fruit juice, and water (FS05-05-19)[J]. *Current Developments in Nutrition*, 2019, 3(Supplement_1), DOI:10.1093/cdn/nzz052.FS05-05-19.
- [55] YE J, BOTTA A, SIMTCHOUK S, et al. Egg white consumption increases GSH and lowers oxidative damage in 110 week old geriatric mice hearts[J].

- The Journal of Nutritional Biochemistry, 2019, 76: 108252.
- [56] LI S S, MEJIA S B, LYTVYN L, et al. Effect of plant protein on blood lipids: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Journal of the American Heart Association Cardiovascular & Cerebrovascular Disease, 2017, 6(12): e006659.
- [57] MOJICA L, MEJIA E, MENJIVAR M, et al. Antidiabetic effect of black bean peptides through reduction of glucose absorption and modulation of SGLT1, GLUT2 and DPP - IV in *in vitro* and *in vivo* models[J]. The FASEB Journal, 2016, 30(S1): 125.6-125.6.
- [58] 钟颖颖, 何绮怡, 冯俊超, 等. 白芸豆中 α -淀粉酶抑制剂的提取纯化及活性测定条件优化[J]. 现代食品科技, 2019, 35(8): 225, 254-260.
- ZHONG Y Y, HE Q Y, FENG J C, et al. Extraction and purification and activity determination conditions optimization of α -amylase inhibitor in white kidney bean[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(8): 225, 254-260.
- [59] 刘文芝, 郭德军, 衣海龙, 等. 粘玉米中 α -淀粉酶抑制剂的分离纯化及性质研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(6): 116-119.
- LIU W Z, GUO D J, YI H L, et al. Study on the extraction technology and character of α -amylase inhibitor from myxo-maize[J]. Food Industry Science and Technology, 2009, 30(6): 116-119.
- [60] 杨明琰. 白芸豆中 α -淀粉酶抑制剂糖蛋白的提取纯化, 组成结构及生物活性研究[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- YANG M Y. Extraction, purification, composition and bioactivities of α -amylase inhibitor glycoprotein from white kidney beans[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.
- [61] SANTIMONE M, KOUKIEKOLO R, MOREAU Y, et al. Porcine pancreatic α -amylase inhibition by the kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) inhibitor (α -AII) and structural changes in the α -amylase inhibitor complex[J]. Biochimica et Biophysica Acta, 2004, 1696(2): 181-190.
- [62] 訾艳, 王常青, 陈晓萌, 等. 具有 α -淀粉酶抑制活性的白芸豆多肽的制备及其热稳定性研究[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 190-195.
- ZI Y, WANG C Q, CHEN X M, et al. Preparation and thermal stability of white kidney bean polypeptide with α -amylase inhibitory activity[J]. Food Science, 2015, 36(13): 190-195.
- [63] 王忠萍, 张静, 陈运中. 苦瓜总皂苷的响应面法提取条件及降血糖活性的研究[J]. 时珍国医国药, 2019, 30(12): 2845-2848.
- WANG Z P, ZHANG J, CHEN Y Z. Optimization of extraction of total saponins of *Momordica charantia* L. using response surface methodology and its antioxidative activity *in vitro*[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2019, 30(12): 2845-2848.
- [64] LAI D M, TU Y K, LIU I M, et al. Mediation of beta-endorphin by ginsenoside Rh2 to lower plasma glucose in streptozotocin-induced diabetic rats [J]. Planta Medica, 2006, 72(1): 9-13.
- [65] THERASA S V, SIVARAJ A, SIVAKUMAR C, et al. *Eugenia jambolana* seed extract inhibit uptake of glucose across rat everted gut sacs *in vitro*[J]. International Journal of Pharmaceutical Research & Development, 2010, 2(1): 359-362.
- [66] GUPTA A A, BOMHOFF G L, MORRIS J K, et al. Lipoic acid increases heat shock protein expression and inhibits stress kinase activation to improve insulin signaling in skeletal muscle from high-fat-fed rats[J]. Journal of Applied Physiology, 2009, 106(4): 1425.

Research Progress on the Effects of Dietary Functional Raw Components on Postprandial Blood Glucose Response

Ding Fangli^{1,2}, Liu Jia^{1,2}, Gao Ming^{1,2}, Wang Qing^{1,2}, Li Shanshan^{1,2}, Pan Cong^{1,2}, Liu Shiwei^{1,2},
Li Yali^{1,2}, Zhou Zhiqiao^{1,2}, Duan Shenglin^{1,2}

¹China National Research Institute of Food and Fermentation Industries Co. Ltd., Beijing 100015

²Beijing key Laboratory of the Innovative Development of Functional Staple and the Nutritional Intervention for Chronic Disease, Beijing 100015)

Abstract Recent years, diabetes has become an important chronic disease affecting national health. In order to prevent and improve diabetes, it is urgent to develop more low glycemic index products. Some functional ingredients such as dietary fiber, sugar alcohol and plant extracts could reduce food glucose response by inhibiting the activity of digestive enzymes, hindering the contact between digestive enzymes and carbohydrates, and slowing down the absorption of glucose, which is conducive to the development of low GI products. In this paper, the latest research progress about the effect of functional component on blood glucose response were reviewed, for the development of low GI products and dietary guidance for diabetic patients.

Keywords functional components; dietary fiber; plant extract; glycemic response; GI reduction

《中国食品学报》2023年征订启事

《中国食品学报》(月刊)是中国食品科学技术学会的会刊(国际标准连续出版物号:ISSN 1009-7848;国内统一连续出版物号:CN 11-4528/TS),是代表我国现代食品科学技术发展水平的学术期刊,属中国科技核心期刊和中文核心期刊。目前已被国内外许多著名检索机构收录为源期刊,如美国《工程索引》(EI)、美国《化学文摘》(CA)、《食品科学与技术文摘》(FSTA)、中国科学引文数据库(CSCD)、荷兰《文摘引文数据库》(Scopus)、《日本科学技术振兴机构(中国)数据库》(JSTChina)等。

《中国食品学报》刊载内容主要有:食品及食品工业发展相关的原料、配料、工艺、工程、包装、机械、流通、检测、安全、综合利用、新产品等方面的科研成果、研究报告以及食品科学与技术的发展趋势等方面的综述。目前设置的栏目有:名家论坛、青年论坛、基础研究、营养与功能、加工技术、食品贮藏与保鲜、分析与检测、综述等。欢迎国内外食品及相关专业领域的科研人员踊跃订阅。

定 价: 60元/期,全年12期,共计720元(含邮资)

联 系 人: 蒋老师

联系电话: 010-65223596 转 831

传 真: 010-65264731

邮 箱: chinaspj@vip.163.com

通讯地址: 北京市海淀区阜成路北三街8号9层(邮编100048)



《中国食品学报》官方微信



《中国食品学报》投稿平台