

低血糖负荷食品研究进展

陈洁, 孟春雨, 何志勇, 曾茂茂, 秦昉

(食品科学与技术国家重点实验室, 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘要: 糖尿病作为一种慢性代谢型疾病, 在中国乃至世界范围内都受到越来越多的重视。作者综述了国内外糖尿病的发展趋势以及低血糖负荷食品的发展现状, 简单介绍了低血糖生成指数食品原料(淀粉、蛋白质、脂肪及微量元素等)的研究进展, 以及营养素组合、加工工艺及食用方式对餐后血糖水平的影响, 以期低血糖负荷食品的进一步开发提供参考。

关键词: 低血糖负荷; 糖尿病; 营养素组合; 加工工艺; 食用方式

中图分类号: TS 201.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673—1689(2016)05—0449—08

Research Progress of Low Glycemic-Load Food

CHEN Jie, MENG Chunyu, HE Zhiyong, ZENG Maomao, QIN Fang

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: As a kind of chronic metabolic diseases, diabetes mellitus has been paid more and more attention all over the world. In this paper, the development tendency of diabetes mellitus around the world and the research progress of low glycemic-index food were summarized. The food materials of low glycemic-index (starch, protein, fat and trace elements) and the effects of formulation of nutrients, the processing and the edible modes on the postprandial blood sugar level were also introduced in details. It would be useful for the further development of low glycemic-load food.

Keywords: low glycemic-load, diabetes mellitus, combination of nutrients, processing technology, edible way

糖尿病是一类代谢性疾病, 其主要表现是胰岛素分泌紊乱或作用缺陷而导致的高血糖病症。这种病症能够扰乱碳水化合物、脂肪和蛋白质在体内的代谢, 对视网膜、肾脏、神经系统、心脏和血管长期产生不良影响^[1]。高血糖是糖尿病典型症状, 主要表现为连续两次空腹血糖质量浓度不低于 140.4 mg/dL (7.8 mmol/L) 或餐后 2 小时血糖不低于 200 mg/dL (11.1 mmol/L)。长期高血糖导致糖基化产物累积, 会形成斑块堵塞血管, 严重者造成心脑血管病变,

危及生命。根据世界卫生组织统计, 目前世界范围内至少有 3 亿人正遭受糖尿病困扰, 估计到 2030 年糖尿病人数会增加一倍。在中国, 由于生活习惯和饮食结构的改变, 糖尿病患者逐年递增且逐渐呈现年轻化趋势, 据统计中国糖尿病患者人数已超过 1 亿人^[2]。

目前国内外对于糖尿病治疗、寻找新药特别是从天然药物中去筛选和研究有效、安全、方便使用的降糖药物研究很热, 然而糖尿病人群对于日常合

收稿日期: 2016-01-28

基金项目: 国家 863 计划项目(2013AA102204); 苏州市科技计划项目(SNG201402)。

作者简介: 陈洁(1969—), 女, 江苏太仓人, 工学博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事食品加工与组分变化方面的研究。

E-mail: chenjie@jiangnan.edu.cn

理饮食的认知度较差。调查研究显示,目前我国Ⅱ型糖尿病患者日常膳食中经常出现水果类和鱼虾类摄入量偏低,奶类、蔬菜类、禽畜肉类、蛋类、油脂类摄入量偏高,能量来源分配比例不合理,脂肪摄入过高,碳水化合物摄入过低的现象,该人群膳食结构不合理的问题比较突出^[3]。另外,近年来的研究显示,餐后血糖控制对于糖尿病人的病情控制越来越重要,Hanefeld等在一项1 139例30~55岁新发现的Ⅱ型糖尿病病人研究中追踪观察11年,并与同期的一项“非糖尿病病人心血管病趋势监控及其有关因素研究”作对比,结果发现前组心肌梗塞的发生率比后组高15倍,总死亡率高3.3倍,并发现前组心肌梗塞与血压、甘油三酯、餐后高血糖相关,而与空腹血糖无明显相关,说明餐后血糖是Ⅱ型糖尿病病人死亡率的独立危险因素^[4],因此控制餐后血糖对于控制糖尿病患者病程和改善具有重要意义。

另一方面中国适合于糖尿病人并能够控制餐后血糖水平的工业化食品产品的研究相对较少,商业化品种也极少。事实上市场上除了无糖奶粉、无糖豆奶粉等冲饮类蛋白或者谷物产品以外,部分“无糖食品”也仅仅是不使用糖浆或者蔗糖,产品体系中依然大量使用淀粉,对食用者的餐后血糖控制作用极其有限。因此开发具有控制餐后血糖水平功能、适合于糖尿病人的方便型加工食品显得非常重要。作者重点讨论餐后高血糖的定义及其危害、饮食结构和膳食中的各种成分对于餐后血糖的影响以及低血糖负荷食品工业化的研究开发情况,以期的高血糖人群代餐食品的开发提供参考。

1 餐后高血糖与食物血糖指数、血糖负荷

餐后高血糖(Postprandial Hyperglycemic)是指正常餐或标准试餐后食物在消化吸收过程中血糖升高值超过正常范围,负荷后高血糖是指口服75 g葡萄糖耐量试验中2 h血糖水平 ≥ 7.8 mmol/L(糖耐量受损),或 ≥ 11.1 mmol/L(糖尿病)^[7]。餐后高血糖对于糖尿病的诊断、治疗和预防有重要意义。

引起餐后高血糖的病理生理机制:Ⅱ型糖尿病患者胰岛素分泌早期表现为第一时相分泌缺失,第二时相分泌延迟,出现餐后血糖升高,而下一餐前可出现低血糖;严重高血糖阶段时,第二时相分泌也缺失,表现为餐后血糖过度升高并持续较长时间^[5]。

餐后高血糖不仅影响Ⅱ型糖尿病患者总体血糖控制水平,而且血糖浓度的大幅度波动会直接诱导心血管疾病的发生。有研究表明,餐后高血糖的葡萄糖对人体有毒害作用,一方面降低胰岛细胞的敏感性,加剧对胰岛 β 细胞的损害;另一方面,急性餐后高血糖状态可增加体内糖化产物,引起机体氧化应激状态,进而引发肥胖症、高血脂症、高血压症等多种并发症^[6]。

血糖指数(Glycemic Index,GI)是由Jenkins^[7]首先提出的概念,用于衡量食物升血糖的能力。GI值表示的是含碳水化合物的食物与参照食物(白面包或葡萄糖)相比,摄入一定时间后引起血糖应答的相对能力。

GI分数=(含有50 g碳水化合物的食物的餐后血糖应答/50 g葡萄糖(或面包)的餐后血糖应答) $\times 100$

Goni^[8]等人利用食物体外消化90 min时淀粉水解速率(HI)与食物的升血糖指数建立关系,即 $GI = 39.71 + 0.549HI$ 。低GI食物如西方传统饮食意大利面对于降低餐后血糖浓度具有显著效果^[9]。但GI只能定性反应食物的“质”却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。因此,美国哈佛大学学者Salmerón等人提出一个新概念,即血糖负荷(glycemic load, GL)^[10]。GL为食物的GI值与可利用碳水化合物的乘积,即 $GL = GI \times \text{碳水化合物含量(克)}$,GL值可以将摄入碳水化合物的“质”和“量”结合起来衡量,更能全面评价膳食总血糖效应。

2 食物中的宏量营养素及其相互作用对于餐后血糖的影响

2.1 抗性淀粉与慢消化淀粉

Englyst等人^[11]首次将食物中的淀粉分为:易消化淀粉(Rapidly Digestible Starch, RDS),慢消化淀粉(Slowly Digestible Starch, SDS)和抗性淀粉(Resistant Starch, RS)。同种食物中慢消化淀粉与抗性淀粉的含量受到加工制作方法的影响,且不同来源的食物中二者含量也有显著差异。

慢消化淀粉是能在小肠中被缓慢消化吸收的淀粉(20~120 min),它在消化过程中持续而缓慢地释放能量,维持餐后血糖稳定^[12]。慢消化淀粉在人体胃肠道内缓慢消化的机制有以下两种:物理结构减

少了酶的接触;化学结构降低了酶反应速率。除此之外,胃排空速率的降低、肠道内消化物黏度的增大、酶抑制剂以及食品其他组分相互作用都会降低消化速率^[13]。大米、玉米、糯米等生谷物淀粉都是天然慢消化淀粉的来源^[14]。慢消化淀粉的制备方法主要有物理改性、化学改性、酶法改性以及复合改性。其中物理改性方法主要包括湿热处理^[15-16]、反复冷却老化处理^[17]等。化学改性方法包括酸碱沉淀法^[18]、辛烯基琥珀酸酐酯化^[19]等;酶法改性包括普鲁兰酶脱支处理^[20]、 β -淀粉酶和葡萄糖苷酶双酶处理^[21]等。慢消化淀粉的研究与开发,目前是高血糖人群膳食等功能食品领域的研究热点之一。

抗性淀粉是一类特殊的膳食纤维,1993年欧洲抗消化淀粉协会(EURESTA)年将其定义为“不被健康人体小肠所消化吸收的淀粉及其降解产物的总称”。有报道指出,抗性淀粉对于预防结肠癌、高血糖症、高胰岛素血症、糖尿病以及肥胖症有重要作用。抗性淀粉主要被分为4类,即RS1、RS2、RS3和RS4。其中RS1主要是因细胞壁或蛋白质的屏障作用较难与淀粉酶接触的淀粉,又称物理包埋淀粉,多存在于部分研磨谷物及豆类中;RS2因其具有致密结构及部分结晶结构而具有天然抗消化作用,大多存在于生的马铃薯、香蕉和高直链玉米淀粉中;RS3又称回生淀粉,因直链淀粉在回生过程中形成高度结晶化区域,阻止淀粉酶必需基团的活性部位与 α -1,4糖苷键结合,使直链淀粉结晶具有抗消化能力,且此种结晶结构在加热状态下不易被破坏,因此回生淀粉可以作为食品添加剂应用于食品工业中^[22]。此类抗性淀粉主要由压热法^[23]或微波法^[24]制得;RS4是经物理或化学改性后,由于淀粉分子结构变化或官能团的引入而产生的抗酶解淀粉,如羧甲基淀粉、交联淀粉等,此类抗性淀粉可以由酸处理^[25]或酶处理法^[26]制得。抗性淀粉口感细腻,持水力低,不会影响食品的风味和质地,在烘焙食品、挤压食品中有实际应用^[27]。

2.2 膳食纤维

膳食纤维主要存在于植物性食物中,它在人体小肠内抗消化吸收而在大肠内可以进行部分或全部发酵。膳食纤维按其溶解性可以分为水溶性膳食纤维与不溶性膳食纤维,其中水溶性膳食纤维主要包括果胶等亲水胶体物质和部分半纤维素,不溶性膳食纤维包括纤维素、木质素及部分半纤维素^[28]。

在许多情况下,膳食纤维的生理学活性很大程度上取决于其水溶性。水溶性膳食纤维可以改变流质或半流质食品的黏度,进而改变其结构特性,它们形成的凝胶和黏性网络在抑制淀粉消化、控制血糖升高方面具有重要作用。不溶性膳食纤维主要来源于粗加工的全谷类或豆类食品中,其显著作用是降低II型糖尿病发病机率的作用。谷粒的完整性和膳食纤维的慢消化特性能够延缓餐后碳水化合物的吸收。有实验表明,瓜尔豆胶可以在淀粉颗粒表面形成保护膜,减少淀粉与酶的接触,延缓淀粉分解速率^[29]。燕麦麸中存在的可溶性膳食纤维 β -葡聚糖对糖尿病小鼠具有缓解体重下降、饮水饮食增多等症状的作用,能够有效控制血糖持续升高,提高糖尿病小鼠糖耐量^[30]。与瓜尔胶相比, β -葡聚糖对人体餐后血糖控制方面具有更显著功效^[31]。

2.3 蛋白质与脂肪对于降低碳水化合物消化速率的影响

蛋白质是人体重要结构功能物质。在高蛋白食物中,蛋白质分子间形成致密网络将淀粉分子包裹其中,使淀粉消化速度降低。如面粉中谷蛋白之间交联形成能够包裹淀粉分子的网络,使酶无法顺利与淀粉颗粒接触,抑制淀粉在小肠内水解速度^[32]。除此之外,食物中蛋白质、游离脂肪酸都可以与直链淀粉形成复合物。实验发现,油酸、亚油酸和硬脂酸与淀粉的二元配合物与 α -淀粉酶接触敏感性分别降低75%、80%、90%,三元配合物的酶接触敏感性分别降低42%、58%、40%,表明食物中蛋白质、脂肪酸与直链淀粉的相互作用可以减少淀粉与消化酶接触概率,延缓淀粉消化吸收^[33]。

脂肪能够延缓胃排空速度并刺激肠抑胃肽(GIP)释放,而GIP对于葡萄糖诱导的胰岛素分泌有增强作用。人体实验表明,脂肪与碳水化合物一起摄入后,可以维持餐后胰岛素浓度基本不变而餐后血糖浓度降低45%左右^[34]。另外,游离脂肪酸的疏水端可以与直链淀粉螺旋链内部通过疏水相互作用结合形成复合物,降低淀粉的体外消化速率。实验结果显示,月桂酸与直链淀粉结合后使淀粉的体外消化率降低26%^[35]。

3 食物中的降血糖活性成分

3.1 多酚

多酚化合物是分子结构中有若干个酚性羟基

的植物成分的总称,主要包括酚酸类和黄酮类化合物。多酚类化合物都有一定的抗氧化能力,对能产生过氧化作用而导致结构和功能损伤的超氧阴离子和羟自由基等自由基有明显的清除作用,其抗氧化功能对糖尿病等慢性病的预防具有良好效果^[36]。

有研究表明,植物多酚可以通过抑制碳水化合物水解酶如小肠葡萄糖苷酶与胰 α -淀粉酶来延迟淀粉水解,延缓葡萄糖的释放和吸收,可以使餐后血糖缓慢升高,从而达到控制血糖的效果^[37]。Ponnusamy^[38]等人的实验结果表明,双去氧姜黄素能够抑制人体内胰 α -淀粉酶的活性、控制淀粉消化速率从而降低餐后血糖值。赵燕威^[39]等人研究发现,苹果多酚对链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠具有降低血糖、提高糖耐量的保护作用,且苹果多酚对葡萄糖淀粉酶、蔗糖酶和麦芽糖酶具有显著的抑制作用。

3.2 苷类

植物中提取物的降血糖因子,因其来源安全可靠、生物活性好而在食品工业得到广泛应用。由甜菊叶中提取的甜菊苷能够刺激胰岛 β 细胞分泌胰岛素,从而对Ⅱ型糖尿病患者的餐后血糖控制有很好的效果^[40]。苦瓜总皂苷能够通过促进Ⅱ型糖尿病大鼠肝糖原合成、抑制肝糖原分解以及增加胰岛素敏感性而达到降血糖作用效果^[41]。这些研究成果为缓释糖食品中植物提取物的选择提供了更多可能性。

3.3 生物碱

生物碱是存在于植物或动物体内一类含氮的碱性有机化合物,因其具有显著的生物活性而被广泛开发用于食品、药品及保健品领域。生物碱主要通过抑制碳水化合物消化酶的活性和刺激胰岛素分泌等途径对餐后血糖进行控制。实验表明,荞麦植物种子中提取的D-荞麦碱在体外环境下对 α -葡萄糖苷酶具有微弱的抑制作用,在小鼠体内进行蔗糖消化时可以降低健康小鼠的餐后血糖浓度,由此可看出D-荞麦碱对蔗糖酶也有一定的抑制作用^[42]。同样,桑树叶中提取的1-脱氧野尻霉素(DNJ)在低剂量摄入后即可对人体餐后血糖和胰岛素分泌产生影响,可作为食品强化剂用于高血糖人群保健食品中^[43]。

3.4 其他

植物中其他功能成分也具有降血糖功效。有研

究表明,肉桂醛在高脂诱导的小鼠体内展现了较强的抗氧化、消炎、降血压、降血脂效用,且几种效应相互协同,保护了胰岛 β 细胞,降低了胰腺的工作负荷,降低了胰岛素抵抗,增加了胰岛素分泌敏感性,从而降低了餐后血糖浓度,使糖尿病症状有所缓解^[44]。

4 辅助降血糖的有效方法

4.1 营养素组合

植物多酚可与其他功能性成分协同作用增强降血糖作用。刘安军^[45]等人将茶多酚与茶多糖混合并研究其对高血糖小鼠身体指标的影响,结果表明,茶多糖与茶多酚协同作用可以降低高血糖小鼠的血糖值,提高脾指数及胸腺指数,促进葡萄糖转化成肝糖原,与茶多糖单独作用相比效果显著。其他植物如海藻、洛神葵、菊花、桑叶、印度枳、蝶豆花中提取的酚类物质都具有抑制淀粉消化酶的作用,且不同植物中酚类与黄酮类混合使用时可同时对多种消化酶具有抑制效应^[46]。

除此之外,食物中的蛋白质通过亲和作用将多酚化合物结合到蛋白质网络结构中,对体系中的多酚有吸附、浓缩和稳定的作用,且得到的复合物对肥胖和高血糖小鼠仍具有显著的降血糖功效^[47-48]。

4.2 加工工艺

食品加工导致了食品质构的改变,影响食品的营养特性,如淀粉的消化率。增加食物中慢消化淀粉和抗性淀粉的含量,降低加工制作过程中淀粉糊化程度来生产缓升糖食品。

有研究者用大米淀粉与鸭脚稗淀粉为原料研究了高压蒸汽处理(一轮、五轮)、滚筒干燥、挤压膨化、烘烤等工艺对原料淀粉中抗性淀粉含量的影响。结果证明,冷却过程可以增加抗性淀粉结晶量,因此反复的高压蒸汽-冷却处理所得到的抗性淀粉含量最高^[49]。

湿热处理在保持淀粉颗粒完整性的情况下改变淀粉物理化学性质,其对淀粉消化性能的影响也受到研究者的广泛关注。湿热处理对淀粉理化性质的改变主要表现在以下几个方面:改变淀粉的晶型与淀粉链之间相互结构,增加淀粉糊化温度,减少颗粒膨胀和直链淀粉浸出,增加淀粉的热力学稳定性,提高抗性淀粉含量^[50]。Chen^[51]等人对小麦面粉/淀粉进行湿热处理(120℃,24h)后发现,水分含量升

高有利于增加抗性淀粉含量。

微波加热过程使热量更有效地侵入食物内部,导致淀粉及其他食品组分发生热变化。Zhang^[52]等人研究了微波处理一种芭蕉芋淀粉后发现,小功率(400 W)和大功率(1 000 W)的微波处理都有利于抗性淀粉形成。

挤压是一个高温短时的机械热力蒸煮过程,它可以在水分含量较低情况下对淀粉进行高温和物理剪切作用。因此,在挤压过程中易导致淀粉糊化、颗粒破碎展开,与淀粉消化酶的接触增加,在消化过程中易被酶解生成多糖。挤压产物的性质与食品中其他组分、加工过程中进料速度、机筒温度、螺杆转速和物理水分含量有关^[53-54]。

蒸煮过程是处理淀粉食物最常见的加工过程,在过量水分存在时,食物中的淀粉可以发生糊化。糊化的淀粉易被消化酶水解,消化速率显著增加。Reed^[55]等人研究了蒸煮、干炒等工艺处理的大米淀粉,经猪胰 α -淀粉酶水解后发现蒸煮后的大米淀粉水解率最高,而干炒后淀粉中抗性淀粉增加量最大。

综上所述,可以减少淀粉消化速率的加工工艺具有以下特点:减少淀粉颗粒损坏、糊化,增加脂肪-直链淀粉复合物的含量,在冷却储藏过程中促进淀粉老化。

4.3 食用方式

“先食蔬菜”和“生食蔬菜”是防止餐后高血糖病症及预防糖尿病的两大理念。生食作为一种糖尿病饮食的新观念也逐渐在国内外流行。糖尿病患者是适合生食疗法的主要人群。有研究者以II型糖尿病患者为研究对象,研究了先食蔬菜、然后蛋白质和脂肪、最后进食碳水化合物和混食对餐后血糖和胰岛素浓度的影响,结果表明,前者餐后30~60 min血糖波动和胰岛素需求量均小于后者,主要因为蔬菜中的膳食纤维增加了饱腹感,蛋白质和脂肪的优先摄入也降低了胃排空速率和肠道蠕动速度,调节了胰岛素的分泌,从而减缓了餐后血糖波动幅度^[56]。

5 低血糖负荷食品的现状与工业化研究开发前景

目前国内外市场上现有的针对高血糖人群的食品主要分为3大类:植物提取物、无糖淀粉类食品以及含微量元素及维生素保健品。据文献[27]报道,植物中含有的酚类、黄酮、皂苷、多糖、生物碱等

功能因子具有较好的降血糖效果。具有上述几种特殊成分的植物,如苦荞、大麦、苦瓜、荷叶等,将提取物浓缩混合即成低能量高营养价值保健食品,如国内外市场均有出售的苦瓜、葛根、洋参软胶囊,此种产品可作为降血糖辅助药物食用,有一定的降血糖功效。另外,国内市场现有以桑叶、荷叶等植物原料为主要成分的袋泡茶,其制作工艺简单,其降血糖的临床效率及辅助降血糖的保健功能仍有待研究。

无糖淀粉食品主要是不添加蔗糖、葡萄糖等易升血糖原料的产品,如饼干、奶粉、坚果、饮料等,其产品主要特点为高蛋白、高膳食纤维,将麦芽糖、果糖、蔗糖等原料用糖醇代替。如国内市场大量出现的无糖饼干、无糖面包、无糖豆浆等,但无糖食品并不一定是低热量食品,含有淀粉的无糖代餐食品的缓升血糖效果尚需在实验中进一步证实,且过量食用木糖醇对肠胃有刺激作用,易造成胀气、腹泻等不良效应。目前国外市场中出现适用于高血糖人群的代餐冲调粉,因其营养全面、口感温和、缓升糖效果显著而受到人们的喜爱。微量元素类和维生素类降血糖保健品在国内外均有出售,其中用于辅助降血糖的三价铬化合物保健食品中主要添加甲基吡啶铬作为功能物质,维生素类降血糖保健食品的成分则以生物素为主。以上两种保健品大多以胶囊制品的形式出售,且具有较好的辅助降血糖功效。

6 展望

综上所述,目前低血糖负荷的可供高血糖人群或者糖尿病人群一日三餐或者能量/营养补充的大规模工业化食品比较少。事实上,世界范围内糖尿病患者及潜在人群呈现逐年增长的趋势,高血糖病症的预防和控制也成为人们关注的焦点,因此缓升血糖食品有着良好的发展潜力和市场前景。但目前的关于膳食中营养素或者功能成分的研究仅局限于研究单一降血糖因子或加工工艺的机制与作用,而营养素与食物组分之间相互作用以及加工对于功能因子以及食品的餐后血糖影响效应及机制的研究寥寥无几。因此尽管关于如何控制糖尿病进程或者高血糖人群营养膳食的理论研究有着充分的进步,但是这些理论对于如何应用于商业化并形成对控制高血糖或者糖尿病人群餐后血糖水平的工业化产品的开发形成支撑尚有很大的距离。因此,面对巨大的社会和商业需求,关于食品组分与降血

糖功能因子之间的相互作用,加工对于膳食中组分和功能因子的餐后血糖影响效应亟待进一步研究,

同时,具有缓升血糖效应或者低血糖负荷效应的食品开发也将具有很大的市场前景。

参考文献:

- [1] American Diabetes Association. Diagnosis and classification of diabetes mellitus[J]. **Diabetes Care**, 2014, 37: 81-90.
- [2] Parkin C. Diabetes in China[J]. **Diabetes Forecast**, 2015, 68(1): 32-33.
- [3] 武韬,刘思彤,毛宏辉,等. 2 型糖尿病患者膳食现状调查及营养治疗研究[J]. 北京农学院学报, 2010, 25(3): 66-69.
WU Tao, LIU Sitong, MAO Honghui, et al. Current dietary status and clinical nutrition therapy for type 2 diabetic patients[J]. **Journal of Beijing University of Agriculture**, 2010, 25(3): 66-69. (in Chinese)
- [4] Hanefeld M. 餐后高血糖[J]. 国外医学内分泌学分册, 2002, 22(6): 353.
Hanefeld M. Postprandial hyperglycemia[J]. **Foreign Medical Sciences: Section of Endocrinology**, 2002, 22(6): 353. (in Chinese)
- [5] 翁焕, 严励. 餐后高血糖控制对总体血糖达标的影响[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2009, 25(1): 4-7.
WENG Huan, YAN Li. Impact of postprandial hyperglycemia control on the treat-to-target blood glucose management [J]. **Chinese Journal of Endocrinology and Metabolism**, 2009, 25(1): 4-7. (in Chinese)
- [6] 姚军, 高妍. 餐后高血糖及其评价[J]. 中国实用内科杂志, 2004, 24(7): 395-396.
YAO Jun, GAO Yan. Postprandial hyperglycemia and its evaluation [J]. **Chinese Journal of Practical Internal Medicine**, 2004, 24(7): 395-396. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] Goni I, Garcia-Alonso A, Saura-Calixto F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. **Nutrition Research**, 1997, 17(3): 427-437.
- [9] Krishnan M, Prabhasankar P. Studies on pasting, microstructure, sensory, and nutritional profile of pasta influenced by sprouted finger millet (*Eleucina coracana*) and green banana (*Musa paradisiaca*) flours [J]. **Journal of Texture Studies**, 2010, 41(6): 825-841.
- [10] Salmeron J, Manson J A 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.
- [11] 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: 33-50.
- [12] 缪铭. 慢消化淀粉的特性及形成机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [13] 张根义, 王明珠, 彭善丽. 慢消化淀粉的结构基础和机理[J]. 食品与生物技术学报, 2010, 29(4): 481-487.
ZHANG Genyi, WANG Mingzhu, PENG Shanli. Controlled glucose delivery in food for optimal health [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2010, 29(4): 481-487. (in Chinese)
- [14] 缪铭, 张涛, 秦啸天, 等. 谷物淀粉的慢消化特性与餐后血糖应答[J]. 营养学报, 2009(3): 218-221.
MIAO Ming, ZHANG Tao, QIN Xiaotian, et al. Slow digestibility of cereal starch and postprandial glycemic response [J]. **Acta Nutrimenta Sinica**, 2009(3): 218-221. (in Chinese)
- [15] 汪树生, 高楠楠, 苏玉春, 等. 湿热处理对玉米淀粉慢消化组分的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2013(12): 26-28.
WANG Shusheng, GAO Nannan, SU Yuchun, et al. Effect of heat-moisture treatment on digestibility of corn starch[J]. **Cereal & Feed Industry**, 2013(12): 26-28. (in Chinese)
- [16] 张二娟, 何小维. 湿热处理法制备慢消化淀粉及其性质研究[J]. 食品工业科技, 2010(5): 121-123.
ZHANG Erjuan, HE Xiaowei. Study on preparation of slowly digestible starch by heat-moisture treatment and its properties[J]. **Science and Technology of Food Industry**, 2010(5): 121-123. (in Chinese)
- [17] Tian Y, Zhang L, Xu X, et al. Effect of temperature-cycled retrogradation on slow digestibility of waxy rice starch [J]. **International Journal of Biological Macromolecules**, 2012, 51(5): 1024-1027.
- [18] 沙晨希, 田耀旗, 金征宇. V1- 型慢消化淀粉的制备与鉴定[J]. 食品与机械, 2013(3): 37-39.
SHA Chenxi, TIAN Yaoqi, JIN Zhengyu. Preparation and identification of V1-type slowly digestible starch [J]. **Food &**

- Machinery**, 2013(3):37-39.(in Chinese)
- [19] 何金华. 慢消化淀粉的制备及其性质研究[D]. 无锡:江南大学, 2007.
- [20] 熊月琴, 何小维, 张二娟, 等. 脱支重结晶制备慢消化淀粉及其性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2010(10):42-45.
XIONG Yueqin, HE Xiaowei, ZHANG Erjuan, et al. The preparation and properties of slowly digestible starch produced by recrystallization and debranching[J]. **Food and Fermentation Industries**, 2010(10):42-45.(in Chinese)
- [21] 高群玉, 王琳. 双酶协同制备玉米慢消化淀粉及其性质研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(10):2425-2430.
GAO Qunyu, WANG Lin. Preparation and properties of corn slowly digestible starch with dual-enzymes treatment [J]. **Modern Food Science and Technology**, 2013, 29(10):2425-2430.(in Chinese)
- [22] Baghurst P A, Baghurst K I, Record S J. Dietary fibre, non-starch polysaccharides and resistant starch: a review [J]. **Food Australia**, 1996, 48(3):3-35.
- [23] 阮思莲, 马岁祥, 吴泉琦, 等. 压热法制备紫山药抗性淀粉[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(7):293-295.
RUAN Silian, MA Suixiang, WU Xiaoqi, et al. Preparation of purple *Dioscorea alata* L. resistant starch by pressure-heating treatment[J]. **Journal of Anhui Agricultural Sciences**, 2015, 43(7):293-295.(in Chinese)
- [24] 郝征红, 张炳文, 郭珊珊, 等. 超微粉碎-微波联用技术制备绿豆抗性淀粉条件优化[J]. 食品科学, 2014(24):69-73.
HAO Zhenghong, ZHANG Bingwen, GUO Shanshan, et al. Optimization of preparation of resistant starch from mung bean by superfine grinding-coupled with microwave irradiation[J]. **Food Science**, 2014(24):69-73.(in Chinese)
- [25] 刘亚伟, 张杰. 抗性淀粉制备工艺研究[J]. 食品与机械, 2003(1):19-20.
LIU Yawei, ZHANG Jie. Preparation of resistant starches[J]. **Food & Machinery**, 2003(1):19-20.(in Chinese)
- [26] 张焕新. 抗性淀粉酶法制备及其特性与应用的研究[D]. 无锡:江南大学, 2012.
- [27] Zhao J, Zhang W, Zhu X, et al. The aqueous extract of *Asparagus officinalis* L. by-product exerts hypoglycaemic activity in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2011, 91(11):2095-2099.
- [28] 刘成梅, 李资玲, 梁瑞红, 等. 膳食纤维的生理功能与应用现状[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(1):122-125.
LIU Chengmei, LI Ziling, LIANG Ruihong, et al. The application actuality and physiological function of dietary fiber [J]. **Food Research and Development**, 2006, 27(1):122-125.(in Chinese)
- [29] Brennan C S, Blake D E, Ellis P R, et al. Effects of guar galactomannan on wheat bread microstructure and on the In vitro and In vivo digestibility of starch in bread[J]. **Journal of Cereal Science**, 1996, 24(2):151-160.(in Chinese)
- [30] 赵范, 刘会平, 刘晓庆, 等. 燕麦麸 β -葡聚糖降血糖及抗氧化作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(6):2131-2137.
ZHAO Fan, LIU Huiping, LIU Xiaoqing, et al. Effect of oat bran β -glucan on hypoglycemic and antioxidant[J]. **Journal of Food Safety and Quality**, 2015, 6(6):2131-2137.(in Chinese)
- [31] Braaten J T, Wood P J, Scott F W, et al. Oat gum lowers glucose and insulin after an oral glucose load [J]. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 1991, 53(6):1425-1430.(in Chinese)
- [32] Berti C, Riso P, Monti L D, et al. In vitro starch digestibility and in vivo glucose response of gluten-free foods and their gluten counterparts[J]. **European Journal of Nutrition**, 2004, 43(4):198-204.
- [33] Zhang G, Maladen M, Campanella O H, et al. Free fatty acids electronically bridge the self-assembly of a three-component nanocomplex consisting of amylose, protein, and free fatty acids [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2010, 58(16):9164-9170.
- [34] Collier G, O'Dea K. The effect of coingestion of fat on the glucose, insulin, and gastric inhibitory polypeptide responses to carbohydrate and protein[J]. **The American Journal of Clinical Nutrition**, 1983, 37(6):941-944.
- [35] Crowe T C, Seligman S A, Copeland L. Inhibition of enzymic digestion of amylose by free fatty acids in vitro contributes to resistant starch formation[J]. **The Journal of Nutrition**, 2000, 130(8):2006-2008.
- [36] Scalbert A, Manach C, Morand C, et al. Dietary polyphenols and the prevention of diseases[J]. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 2005, 45(4):287-306.
- [37] Lacroix I M E, Li - Chan E C Y. Overview of food products and dietary constituents with antidiabetic properties and their putative mechanisms of action: a natural approach to complement pharmacotherapy in the management of diabetes [J]. **Molecular Nutrition & Food Research**, 2014, 58(1):61-78.
- [38] Ponnusamy S, Zinjarde S, Bhargava S, et al. Discovering Bisdemethoxycurcumin from *Curcuma longa* rhizome as a potent small

- molecule inhibitor of human pancreatic α -amylase, a target for type-2 diabetes[J]. **Food Chemistry**, 2012, 135(4):2638-2642.
- [39] 赵艳威, 孙静, 宋光明, 等. 苹果多酚的降血糖作用及机制研究[J]. 食品研究与开发, 2014 35(7):72-74.
ZHAO Yanwei, SUN Jing, SONG Guangming, et al. Research on the mechanism of apple polyphenol reducing blood glucose in rat model diabetes[J]. **Food Research and Development**, 2014, 35(7):72-74. (in Chinese)
- [40] Gregersen S, Jeppesen P B, Holst J J, et al. Antihyperglycemic effects of stevioside in type 2 diabetic subjects [J]. **Metabolism**, 2004, 53(1):73-76.
- [41] 马春宇, 于洪宇, 王慧娇, 等. 苦瓜总皂苷对 2 型糖尿病大鼠降血糖作用机制的研究[J]. 天津医药, 2014, 42(4):321-324.
MA Chunyu, YU Hongyu, WANG Huijiao, et al. Hypoglycemic mechanism of total saponins of momordica charantia in type 2 diabetes mellitus rats[J]. **Tianjin Medical Journal**, 2014, 42(4):321-324. (in Chinese)
- [42] Gómez L, Molinar-Toribio E, Calvo-Torras M Á, et al. D-Fagomine lowers postprandial blood glucose and modulates bacterial adhesion[J]. **British Journal of Nutrition**, 2012, 107(12):1739-1746.
- [43] Kimura T, Nakagawa K, Kubota H, et al. Food-grade mulberry powder enriched with 1-deoxynojirimycin suppresses the elevation of postprandial blood glucose in humans[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2007, 55(14):5869-5874.
- [44] Farrokhsfall K, Khoshbaten A, Zahediasl S, et al. Improved islet function is associated with anti-inflammatory, antioxidant and hypoglycemic potential of cinnamaldehyde on metabolic syndrome induced by high tail fat in rats [J]. **Journal of Functional Foods**, 2014, 10:397-406.
- [45] 刘安军, 邓颖, 王雅静. 茶多糖及协同因子的降血糖作用研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(2):139-141.
LIU Anjun, DENG Ying, WANG Yajing. Research of hypoglycemic effects of tea polysaccharide and synergy factors[J]. **Modern Food Science and Technology**, 2012, 28(2):139-141. (in Chinese)
- [46] Adisakwattana S, Ruengsamran T, Kampa P, et al. In vitro inhibitory effects of plant-based foods and their combinations on intestinal α -glucosidase and pancreatic α -amylase[J]. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, 2012, 12(1):110.
- [47] Roopchand D E, Kuhn P, Poulev A, et al. Biochemical analysis and in vivo hypoglycemic activity of a grape polyphenol-soybean flour complex[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2012, 60(36):8860-8865.
- [48] Roopchand D E, Kuhn P, Krueger C G, et al. Concord grape pomace polyphenols complexed to soy protein isolate are stable and hypoglycemic in diabetic mice[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 2013, 61(47):11428-11433.
- [49] Mangala S L, Malleshi N G, Tharanathan R N. Resistant starch from differently processed rice and ragi (finger millet) [J]. **European Food Research and Technology**, 1999, 209(1):32-37.
- [50] Gunaratne A, Hoover R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. **Carbohydrate Polymers**, 2002 49(4):425-437.
- [51] Chen X, He X, Fu X, et al. In vitro digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat-moisture treatment[J]. **Journal of Cereal Science**, 2015, 63:109-115.
- [52] Zhang J, Wang Z W, Shi X M. Effect of microwave heat/moisture treatment on physicochemical properties of Canna edulis Ker starch[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 2009, 89(4):653-664.
- [53] Martínez M M, Rosell C M, Gómez M. Modification of wheat flour functionality and digestibility through different extrusion conditions[J]. **Journal of Food Engineering**, 2014, 143:74-79.
- [54] Hagenimana A, Ding X, Fang T. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking[J]. **Journal of Cereal Science**, 2006, 43(1):38-46.
- [55] Reed M O, Ai Y, 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):1076-1081.
- [56] 陆希. 社区 2 型糖尿病患者膳食营养状况调查及干预模式的研究[D]. 南京: 南京医科大学, 2014.