

膳食纤维调节糖尿病降血糖作用的研究进展

张颖¹, 马立飞^{2*}

(1. 河北北方学院附属第一医院, 张家口 075000; 2. 河北北方学院医学检验学院, 张家口 075000)

摘要: 目前糖尿病患者在慢性病人中占比较大。由于糖尿病严重威胁着人类健康, 近年来众多科研工作者及医生对其治疗和康复的关注度日益增加。糖尿病的治疗一般为药物治疗和饮食控制, 由于药物治疗会产生不良副作用, 因此饮食控制备受青睐。膳食纤维是被临床证明在调节和控制血糖方面具有显著改善作用的一种营养素, 但是目前关于其具体的降糖机制尚不明晰, 主要研究集中在糖代谢和胰岛素代谢方面, 对于降糖机制的深度探索仍然亟待开展。本文综述了膳食纤维对糖尿病的预防及治疗资料, 包括膳食纤维的定义、结构、功能、膳食纤维的降糖机制、膳食纤维对糖尿病的临床治疗实例等, 通过从不同的方面对膳食纤维的降糖作用进行总结, 以为膳食纤维类功能性食品的开发和资源的综合利用提供一些理论依据。

关键词: 膳食纤维; 胰岛素抵抗; 降血糖; 机制

Research progress of dietary fiber regulating hypoglycemic effect in diabetes mellitus

ZHANG Ying¹, MA Li-Fei^{2*}

(1. *The First Affiliated Hospital of Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China;*
2. *School of Medical Laboratory, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China*)

ABSTRACT: At present, diabetic patients account for a relatively large proportion of the chronically ill population. Because diabetes is a serious threat to human health, many scientific researchers and doctors have paid more and more attention to its treatment and rehabilitation in recent years. Diabetes is usually treated with medication and diet, because of the adverse side effects of medication, diet control is favored. Dietary fiber is a nutrient which has been proved clinically to have a significant improvement in regulating and controlling blood sugar. However, it is still unclear about its specific hypoglycemic mechanism, and the main research focuses on glucose metabolism and insulin metabolism, in-depth exploration of the hypoglycemic mechanism still needs to be carried out urgently. This paper reviewed the data of dietary fiber on the prevention and treatment of diabetes, including the definition, structure, function, hypoglycemic mechanism of dietary fiber, clinical treatment of diabetes with dietary fiber, etc., and summarized the hypoglycemic effect of dietary fiber from different aspects, so as to provide some theoretical basis for the development of dietary fiber functional food and the comprehensive utilization of resources.

KEY WORDS: dietary fiber; insulin resistance; hypoglycemia; mechanism

*通信作者: 马立飞, 主要研究方向为功能性食品、生物信息学、医学信息学、分子生物学。E-mail: qa5761@163.com

*Corresponding author: MA Li-Fei, School of Medical Laboratory, Hebei North University, Zhangjiakou 075000, China. E-mail: qa5761@163.com

0 引言

近年来随着人们生活水平的提升,人们的饮食习惯和结构发生了重大的改变,糖尿病的发病率也日趋上升,据不完全数据统计,2017年糖尿病患者数量已达1.2亿,35岁以上人群占比接近90%,呈现一定的年轻化趋势,预计2030年患病人数会增加至3.66亿^[1]。糖尿病主要分为2种类型:1型和2型,其中2型糖尿病患者人数占总患者人数的90%以上,2型糖尿病和1型糖尿病最大的区别是前者以胰岛素抵抗为其主要的发病机制,主要表现为组织细胞对于胰岛素敏感性降低,进而对葡萄糖的摄取和利用率降低,导致组织细胞不能维持血糖的稳定,造成血糖升高。糖尿病的常规治疗为药物治疗,药物治疗是通过不同的药物治疗机制,将血糖控制在一定的范围内,降低对身体组织器官的损伤。然而长期服用此类药物,容易产生耐药性、抗药性,还会导致一些副作用的发生,使糖尿病患者痛苦难忍^[2]。膳食纤维被称作人类第七大营养素,对人体健康和慢性病的改善具有重要的作用^[3]。相关学者认为糖尿病患者的血糖控制主要依赖于日常饮食^[4],2019年刊登在英国医学杂志《柳叶刀》上面的一项最新研究结果表明摄入较多膳食纤维的人群患慢性疾病的几率较低,日摄入25~29g膳食纤维有助于身体健康,若每日摄入量达到35~40g,则能够降低15%的过早死亡风险^[5]。2020年一项大型前瞻性队列研究实验证明膳食纤维的摄入量,特别是来自水果的膳食纤维,与几种慢性疾病(心血管疾病、癌症、2型糖尿病等)的发病风险和死亡率呈负相关^[6-8]。临床证明膳食纤维具有通便、减肥、降血脂、降血糖等功能,由于膳食纤维的能效甚多,所以一直是营养学家和临床医学科研人员的重点研究对象^[9]。膳食纤维可以作为糖尿病患者的饮食治疗,中国营养学会推荐膳食纤维的参考摄入量为25~30g/d,因此合理的摄入膳食纤维对人体的健康大有裨益^[10-11]。本文通过收集汇总近年来膳食纤维在降血糖方面的文献资料,分别从膳食纤维的定义、分类、功能、降糖机制、国内外降血糖的研究进展等方面进行阐述总结,以期对糖尿病患者的康复治疗提供一定的理论支持。

1 膳食纤维的定义、分类及功能

“膳食纤维”是20世纪50年代最初由Hipsley提出,后来人们对其研究越来越频繁,在1998年,美国谷物化学学会将膳食纤维定义为:“在人体小肠内不被消化吸收而在大肠中全部或部分被发酵的植物可食部分或碳水化合物类似物”^[12]。膳食纤维可分为水溶性膳食纤维和非水溶性膳食纤维,主要包括非淀粉类多糖、抗性糊精、低聚果糖、木质素等。膳食纤维具有一些理化特性,如含水力、粘性、

易发酵、离子交换性等,一般来说由于非水溶性膳食纤维空间结构所含的亲水基团较少,所以其含水力弱于水溶性膳食纤维。可溶性膳食纤维由于其结构特性,容易形成粘稠液体,如果胶、大豆可溶性多糖、瓜尔胶等都属于这类膳食纤维,由于具有增粘特性,所以水溶性膳食纤维会延迟胃排空时间,阻碍消化酶和内溶物混合,减慢消化吸收速度,达到减肥的作用,膳食纤维在进入大肠后,由于大肠内部菌群可以利用这些基质进行发酵,产生一些短链脂肪酸或肠肽物质,还会产酸使肠道pH值降低导致微生态发生变化,进而也有助于钙、铁等矿物质的吸收利用^[13]。非水溶性膳食纤维的主要特点是孔隙率,与增加粪便体积缩短小肠转运时间相关,具有通便、防治便秘及结肠癌的作用^[14-15]。酸性多糖如果胶、树胶等有较强的离子交换功能,对于一些重金属如铁、锰等具有吸附能力,因此可以做重金属解毒剂使用^[16]。

膳食纤维的功能主要包括:(1)减肥,膳食纤维提升肠道内与饱腹感相关的激素水平,降低胃排空速度^[17]。(2)降低血糖水平,水溶性膳食纤维进入胃肠道后会变粘稠,可以延迟小肠内碳水化合物吸收利用时间,从而阻碍餐后血糖的升高^[18]。(3)可以产生短链脂肪酸,改善肠道菌群,有助于肠道内益生菌的繁衍生长,短链脂肪酸还可以降低肠道内的pH值,改善钙、铁等矿物质的吸收利用率^[19]。(4)降低胆固醇,水溶性膳食纤维可以降低血清总胆固醇和低密度脂蛋白的浓度^[20]。(5)膳食纤维可以与一些重金属如Hg、Cu、Zn、Pb等吸附结合,具有清除重金属的功能^[21]。

2 膳食纤维的降糖作用及机制

膳食纤维如荞麦、瓜尔胶、黄原胶等结构虽然有差异,但是大多数具有降血糖的功能,可参与胰岛素抵抗相关异常代谢的调节。其功效与结构、物理特性、来源密切相关,如溶解性、粘稠度等。膳食纤维的降糖机制目前尚无定论,主要的假说分为两类:(1)作用于糖代谢,(2)作用于胰岛素^[22]。

2.1 作用于糖代谢的机制研究

作用于糖代谢的降糖机制研究主要分为两部分:抑制葡萄糖吸收和抑制某些水解酶的活性。食物摄入之后,在胃里进行初步的消化,成为食糜,然后进入小肠内,小肠内的各种酶对其进行消化分解,吸收利用,所以餐后血糖会升高,并达到峰值。膳食纤维摄入后会变粘稠,和食物混合并且阻碍食物的分解利用,抑制葡萄糖的吸收利用,并且增加胃排空时间,维持血糖水平的稳定。许多的研究表明摄入足够的膳食纤维能够降低糖尿病患者餐后的血糖水平,同时减少患有葡萄糖不耐受、高胰岛素血症和餐后高脂血症等慢性疾病的风险因素^[23-24]。CASSIDY等^[25]在2018年关于膳食纤维对餐后血糖水平的影响及应用潜力

研究发表了一篇报告, 众多研究表明可溶性膳食纤维, 包括 β -葡聚糖、瓜尔胶、车前草和海藻酸盐等, 通过其有益的粘性特性, 在摄入淀粉等大分子碳水化合物后能够降低葡萄糖的消化率和吸收率。膳食纤维能够降低血糖水平与许多机制有关, 包括吸附、延缓葡萄糖扩散和在消化过程中抑制 α -淀粉酶活性等。这些机制已被许多体外和体内实验证实, 先前的研究资料表明膳食纤维能有效吸附葡萄糖, 延缓葡萄糖扩散, 并抑制 α -淀粉酶的活性, 降低淀粉的总消化率^[26-27]。MYRIAM 等^[28]在 2016 年研究发现膳食纤维进入胃肠道以后可推迟食糜进入十二指肠的时间, 从而延缓血糖的升高, 食糜增多积攒成团, 减少了与消化酶的接触面, 膳食纤维和食糜混合即稀释了内容物又降低了酶的活性, 使消化的速度降低。BENITEZ 等^[29]通过体外实验发现咖啡羊皮纸含有非水溶性膳食纤维能够较强地吸附葡萄糖, 且随着葡萄糖浓度的增加, 吸附性越强。实验还表明羊皮纸不溶性膳食纤维对葡萄糖的扩散有抑制作用。羊皮纸对葡萄糖利用率的抑制效果类似于纤维素, 抑制 α -淀粉酶活性, 可延长碳水化合物的消化时间, 降低葡萄糖吸收速率, 抑制餐后血糖升高。KAY 等^[30]通过体外模拟小肠消化实验证明布丁基质中的可溶性膳食纤维可以在小肠内产生粘性物质, 阻止葡萄糖的吸收, 降低餐后血糖峰值和胰岛素。碳水化合物进入肠胃, 会被很多糖类水解酶水解为葡萄糖, 所以控制这些水解酶的活性, 能够降低血糖的升高, 如 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶, 糖类物质进入人体, 先被 α -淀粉酶水解为寡糖, 然后在进入小肠后又被 α -葡萄糖苷酶水解为葡萄糖, 导致餐后血糖的升高。KHALED 等^[31]通过动物实验研究可溶性膳食纤维对高脂高糖小鼠 α -淀粉酶活性的影响发现果胶(可溶性膳食纤维)能够显著抑制 α -淀粉酶活性(与高血糖相关的关键酶), 可导致血糖水平下降 24%。贾燕芳等^[32]研究了竹笋壳在体外和体内酶解后生成不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维和总膳食纤维的降血糖性能。结果表明可溶性膳食纤维具有显著的葡萄糖吸附性, 并且对 α -淀粉酶的抑制作用与阿拉伯胶相似, 能显著提高胰岛素水平。综上所述, 膳食纤维可以通过对糖代谢的影响和干预最终能够使血糖水平控制在合理的范围内。

2.2 作用于胰岛素的机制研究

正常人的胰岛素是由胰岛素细胞分泌的, 主要作用是促进血糖分解和合成糖原贮存, 控制血糖水平在一定的区间范围, 糖尿病人的胰岛素细胞发生损坏不能分泌足够的胰岛素, 所以导致血糖合成的糖原较少, 血糖不能够贮存, 进而导致血糖水平的升高。膳食纤维可以对胰岛素进行双向调节, 既避免多余的胰岛素产生, 也防止胰岛素分泌不足。膳食摄入后血糖会刺激胰岛素的过度分泌, 导致胰腺的负担加重^[33]。膳食纤维进入肠道内吸水变粘稠, 减缓糖类物质的分解和吸收利用, 从而将血糖水平控制在安

全范围。此外膳食纤维可以增加糖类物质刺激胰岛素分泌的敏感性, 在膳食纤维摄入以后, 增加糖类对胰岛素的敏感性, 使血糖合成糖原贮存, 血糖得到控制。SANCHEZ 等^[34]研究表明膳食纤维可上调肝脏胰岛素受体基因的表达, 增强胰岛素信号转导通路, 促进肝脏组织对葡萄糖的摄取利用, 提高胰岛素敏感性。糖尿病是一种慢性内分泌疾病, 主要特征为胰岛素抵抗、 β 细胞损伤、脂代谢紊乱等^[35-37], 胰岛素抵抗是指一些关键性靶组织降低了对胰岛素的敏感性。胰岛素敏感性降低导致对大量糖的利用率降低进而导致血糖的水平极速升高。肝脏、脂肪、骨骼肌等组织是关键靶组织, 胰岛素在糖代谢过程中主要作用于这些靶组织产生胰岛素抵抗, 所以膳食纤维对靶组织的作用能直接改善胰岛素抵抗^[38]。LIU 等^[39]探讨柑橘果胶对 2 型糖尿病大鼠的抗糖尿病作用及其可能的作用机制, 结果表明柑橘果胶能够改善糖尿病大鼠的糖耐量、肝糖原含量和血脂水平, 能显著改善胰岛素抵抗。朱小花^[40]通过建立糖尿病小鼠模型研究香蕉粉对 2 型糖尿病胰岛素抵抗的改善作用, 结果证明香蕉粉干预组血糖明显降低, 肝糖原含量增加 74.15%。WU 等^[41]从榕树中提取出果胶多糖, 并研究其对高血糖、肝糖原代谢等的改善作用, 结果证明果胶多糖能够激活 IRS-1/PI3K/Akt/GSK3 β /GS 胰岛素信号通路和 AMPK/GSK3 β /GS 信号通路, 并调控参与肝糖生成和糖原分解过程中葡萄糖激酶、磷酸烯醇式丙酮酸羧激酶和葡萄糖-6-磷酸酶的表达。膳食纤维主要通过提高肌肉组织对胰岛素的敏感性及促进对葡萄糖摄取改善骨骼肌胰岛素抵抗作用^[42]。LIA 等^[43]研究竹笋纤维对小鼠胰岛素敏感性的调节作用, 发现竹笋纤维干预后的小鼠中 PGC-1 α 、磷酸化 AMPK 和 p38 蛋白表达水平显著升高, 这与胰岛素靶组织中 Akt 磷酸化呈正相关。表明膳食纤维可以通过增强胰岛素信号传导和激活 PGC-1 α (过氧化物增殖激活受体协调激活因子)来改善胰岛素敏感性。由此可知, 膳食纤维既可以减缓糖类的消化分解也可以刺激胰岛素敏感性使血糖控制在一定范围内。

3 膳食纤维对糖尿临床治疗的实例

膳食纤维对糖尿病人的预防和血糖控制具有重要意义, 针对糖尿病患者的治疗有很多的临床案例, 下面列举几个实例, 希望能够使人们意识到膳食纤维对血糖控制的重要性。孙玉东^[44]选取 23 例妊娠期糖尿病患者, 分为实验组和对照组, 研究分析高膳食纤维治疗妊娠期糖尿病的临床价值, 结果证明高膳食纤维可以调节患者血糖血脂指标, 改善不良妊娠的结局。麦麸膳食纤维是小麦中纯天然的膳食纤维, 戴春等^[9]通过麦麸膳食纤维来控制中老年糖尿病患者的血糖, 证明膳食纤维可以辅助血糖控制, 降低胰岛素抵抗, 稳定血糖变化幅度。张萍等^[45]通过增加食物中膳食纤维的含量来对糖尿病人的血糖进行干预, 实验结果表

明相比于常规组, 实验组在空腹、餐后 2 h 后血糖及糖化血红蛋白含量变低, 说明对血糖的干预效果良好。何书勋等^[46]比较了单一膳食纤维和多种膳食纤维对 2 型糖尿病人胰岛素敏感性和胰岛 β 细胞功能的影响, 选取 300 例未接受胰岛素治疗的病人, 随机分为常规组、单一膳食纤维组、多种膳食纤维组, 实验结果发现通过干预的患者空腹胰岛素、糖化血红蛋白、胰岛素抵抗指数均低于常规组, 且多种膳食纤维组较单一膳食纤维组具有更明显的下降趋势。

4 结 论

膳食纤维的种类比较多, 大多数具有减肥、降血脂、降血糖、预防心血管疾病等作用, 目前各国没有统一的膳食纤维的推荐摄入量, 中国营养学会推荐日摄入量为 25~30 g/d, 日常饮食注意蔬菜、水果、全谷物等的充分摄入, 虽然膳食纤维对血糖的降低有显著作用, 但目前并没有规定其最大摄入量。膳食纤维可以增加饱腹感, 不仅减肥而且还控制血糖。另外还减缓食物消化速率, 一般食物消化吸收越快, 血糖升高也越快, 所以摄入一定量的膳食纤维能够帮助糖尿病患者控制血糖水平。目前已经有许多的临床实验证明膳食纤维具有降糖作用, 能够降低胰岛素敏感性及减弱胰岛素抵抗。随着营养知识的普及和教育的开展, 越来越多的人开始关注如何科学营养搭配膳食, 膳食纤维作为已知的第七大营养素, 特别是对于糖尿病患者的血糖控制具有显著作用, 希望今后能开发更多的膳食纤维产品, 拓展更宽广的市场, 为糖尿病患者带来更多福音。

参考文献

- [1] 吴晓缺, 孙静. 糖尿病患者自我管理现状及影响因素分析[J]. 现代医药卫生, 2018, 2(34): 129-131.
WU XQ, SUN J. Self management status and influencing factors of diabetic patients [J]. Mod Med Health, 2018, 2(34): 129-131.
- [2] 唐绍微, 窦茜茜, 莫金秋, 等. 芒果苷及其衍生物对糖尿病小鼠的降糖作用[J]. 医药导报, 2018, 37(4): 441-444.
TANG SW, DOU XX, MO JQ, *et al.* Hypoglycemic effect of mangiferin and its derivatives on diabetic mice [J]. Med J, 2018, 37(4): 441-444.
- [3] 朱峰, 陈景鑫, 蓝蔚青. 菊粉的功能特性与开发利用研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 34-39.
ZHU F, CHEN JY, LAN WQ. Research progress on the functional properties and utilization of inulin [J]. Packag Eng, 2019, 40(1): 34-39.
- [4] 林兵, 杨勤兵, 于永超, 等. 营养干预对初诊 2 型糖尿病超重肥胖患者身体成分和血糖的作用[J]. 中华预防医学杂志, 2018, 52(12): 1276-1280.
LIN B, YANG QB, YU YC, *et al.* Effects of nutritional intervention on body composition and blood glucose of newly diagnosed overweight and obese patients with type 2 diabetes [J]. Chin J Prev Med, 2018, 52(12): 1276-1280.
- [5] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, *et al.* Carbohydrate quality and human health: A series of systematic reviews and meta-analyses [J]. Lancet, 2019, 393: 434-445.
- [6] ML A, JH B, XT A, *et al.* Effects of insoluble dietary fiber from wheat bran on noodle quality - science direct [J]. Grain Oil Sci Technol, 2020, 4(1): 1-9.
- [7] ABOUD KY, IACOMINI M, SIMAS FF, *et al.* High methoxyl pectin from the soluble dietary fiber of passion fruit peel forms weak gel without the requirement of sugar addition [J]. Carbohydr Polym, 2020, 246: 116616.
- [8] MAHESHWARI G, SOWRIRAJAN S, JOSEPH B. β -Glucan, a dietary fiber in effective prevention of lifestyle diseases-An insight [J]. Bioact Carbohydr Dietary Fibre, 2019, 19: 100187.
- [9] 戴春. 麦麸膳食纤维对控制中老年糖尿病患者血糖效果研究[J]. 中国食物与营养, 2020, 247(3): 59-62.
DAI C. Effect of wheat bran dietary fiber on blood glucose control in middle-aged and elderly patients with diabetes [J]. China Food Nutr, 2020, 247(3): 59-62.
- [10] 范美球, 徐谷根. 膳食纤维对肥胖型 2 型糖尿病患者的获益机制[J]. 中华肥胖与代谢病电子杂志, 2018, 4(1): 58-61.
FAN MQ, XU GG. Benefit mechanism of dietary fiber on obese patients with type 2 diabetes [J]. Chin J Obesity Metabol Dis, 2018, 4(1): 58-61.
- [11] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量速查手册: 2013 版[M]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
Chinese society of nutrition. Quick reference intakes of dietary nutrients for Chinese residents: 2013 edition [M]. Beijing: China Standards Press, 2014.
- [12] HWANG YJ, YOON KY. Enzymatic hydrolysis of perilla seed meal yields water-soluble dietary fiber as a potential functional carbohydrate source [J]. Food Sci Biotechnol, 2020, 29(7): 987-996.
- [13] 向岑, 荣耀, 迟明, 等. 菊粉生物学作用及机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 212-218, 224.
XIANG C, RONG R, CHI M, *et al.* Research progress on biological action and mechanism of inulin [J]. Food Res Dev, 2020, 41 (19): 212-218, 224.
- [14] KACZMARCZYK MM, MILLER MJ, FREUND GG. The health benefits of dietary fiber: Beyond the usual suspects of type 2 diabetes mellitus, cardiovascular disease and colon cancer [J]. Metabol-Clin Exp, 2012, 61(8): 1058-1066.
- [15] 徐田辉, 苏玉, 黄亮, 等. 蒸汽爆破-超微粉碎米糠膳食纤维对 2 型糖尿病小鼠的降血糖作用[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 9-15.
XU TH, SU Y, HUANG L, *et al.* Hypoglycemic effect of steam explosion superfine grinding rice bran dietary fiber on type 2 diabetic mice [J]. Chin J Cere Oils, 2020, 35(10): 9-15.
- [16] 张宗颖, 兰凤英, 陈新宇, 等. 食物营养素降血糖功效和机制研究进展[J]. 粮油食品科技, 2019, 27(4): 36-39.
ZHANG ZY, LAN FY, CHEN XY, *et al.* Research progress on

- hypoglycemic effect and mechanism of food nutrients [J]. *Cere Oils Food Sci Technol*, 2019, 27 (4): 36–39.
- [17] 邵继智. 膳食纤维与肠内营养[J]. *中华普通外科杂志*, 1996, (4): 202–208.
- SHAO JZ. Dietary fiber and enteral nutrition [J]. *Chin J General Surg*, 1996, (4): 202–208.
- [18] OTLES S, OZGOZ S. Health effects of dietary fiber [J]. *Acta Sci Polonor, Technol Alim*, 2014, 13(2): 191–202.
- [19] DAVISON KM, TEMPLE NJ. Cereal fiber, fruit fiber, and type 2 diabetes: explaining the paradox [J]. *Diabet Complicat*, 2017, 32(2): 240–245.
- [20] ENCARNACAO JC, AB-RANTES AM, PIRES AS, *et al.* Revisit dietary fiber on colorectal cancer: butyrate and its role on prevention and treatment [J]. *Cancer Metast Rev*, 2015, 34(3): 465–478.
- [21] ARA, KOH, FILIPE, *et al.* From dietary fiber to host physiology: Short-chain fatty acids as key bacterial metabolites [J]. *Cell*, 2016, 165(6): 1332–1345.
- [22] 狄志鸿, 杨善岩, 聂蓉蓉, 等. 膳食纤维降糖作用及机理研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(20): 138–141.
- DI ZH, YANG SY, NIE RR, *et al.* Research progress on hypoglycemic effect and mechanism of dietary fiber [J]. *Food Res Dev*, 2014, 35(20): 138–141.
- [23] BAYSH E, EVANSJL, MAKIKC, *et al.* Chitin-glucan fiber effects on oxidized low-density lipoprotein: A randomized controlled trial [J]. *Eur J Clin Nutr*, 2013, 67(1): 2–7.
- [24] YUAN JYF, SMEELE RJM, HARRINGTON KD, *et al.* The effects of functional fiber on postprandial glycemia, energy intake, satiety, palatability and gastrointestinal wellbeing: A randomized crossover trial [J]. *Nutr J*, 2014, 13(1): 1–9.
- [25] CASSIDY YM, MCSORLEY EM, ALLSOPP PJ. Effect of soluble dietary fibre on postprandial blood glucose response and its potential as a functional food ingredient [J]. *J Funct Foods*, 2018, 46: 423–439.
- [26] CHAU CF, HUANG YL, LEE MH. *In vitro* hypoglycemic effects of different insoluble fiber-rich fractions prepared from the peel of *Citrus sinensis* L. cv. Liucheng [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(22): 6623–6626.
- [27] OU S, KWOK KC, YAN L, *et al.* *In vitro* study of possible role of dietary fiber in lowering postprandial serum glucose [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(2): 1026–1029.
- [28] MYRIAM M, GRUNDY L, CATHRINA, *et al.* Re-evaluation of the mechanisms of dietary fibre and implications for macronutrient bioaccessibility, digestion and postprandial metabolism [Z]. 2016.
- [29] BENITEZ V, REBOLLO-HERNANZ M, HERNANZ S, *et al.* Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient: Functional and physiological characterization [J]. *Food Res Inter*, 2019, 122: 105–113.
- [30] KAY BA, TRIGATTI K, MACNEIL MB, *et al.* Pudding products enriched with yellow mustard mucilage, fenugreek gum or flaxseed mucilage and matched for simulated intestinal viscosity significantly reduce postprandial peak glucose and insulin in adults at risk for type 2 diabetes [J]. *J Funct Foods*, 2017, 37: 603–611.
- [31] KHALED H, ALI BM, BEN AN, *et al.* Inhibitory effect of fermented pectin on digestive enzymes related to obesity, hyperlipidemia and hyperglycaemia and liver-kidney tissues toxicities [J]. *Bioact Carbohydr Dietary Fibre*, 2018, 16: S2212619818300202.
- [32] 贾燕芳, 石伟勇. 毛竹笋壳膳食纤维添加剂的制备研究[J]. *科技通报*, 2010, 26(3): 458–461, 476.
- JIA YF, SHI WY. Study on the preparation of dietary fiber additive from bamboo shoot shell [J]. *Sci Technol Bull*, 2010, 26 (3): 458–461, 476.
- [33] 王竹, 杨月欣, 韩军花, 等. 抗性淀粉对饮食诱发葡萄糖耐量异常的预防[J]. *营养学报*, 2002, 24(1): 48–52.
- Wang Z, Yang YX, Han JH, *et al.* Prevention of diet induced abnormal glucose tolerance by resistant starch [J]. *Acta Nutr Sin*, 2002, 24(1): 48–52.
- [34] SÁNCHEZ D, MIGUEL M, ALEIXANDRE A. Dietary fiber, gut peptides, and adipocytokines [J]. *J Med Food*, 2012, 15(3): 223–230.
- [35] VIEIRA R, SOUTO SB, ELENA SL, *et al.* Sugar-lowering drugs for type 2 diabetes mellitus and metabolic syndrome—strategies for *in vivo* administration: Part-II [J]. *J Clin Med*, 2019, 8(9): 1332.
- [36] HASNAIN SZ, PRINS JB, MCGUCKIN MA. Oxidative and endoplasmic reticulum stress in -cell dysfunction in diabetes [J]. *J Mol Endocrinol*, 2016, 56(2): 33–54.
- [37] PETERSEN MC, VATNER DF, SHULMAN GI. Regulation of hepatic glucose metabolism in health and disease [J]. *Nat Rev Endocrinol*, 2017, 13(10): 572–587.
- [38] BESSEICHEA, RIVELINEJP, GAUTIER JF, *et al.* Metabolic roles of PGC-1 and its implications for type 2 diabetes [J]. *Diabet Metabol*, 2015, 41(5): 347–357.
- [39] LIU Y, DONG M, YANG Z, *et al.* Anti-diabetic effect of citrus pectin in diabetic rats and potential mechanism via PI3K/Akt signaling pathway [J]. *Int J Biol Macromol*, 2016, 89: 484–488.
- [40] 朱小花. 香蕉粉对 II 型糖尿病胰岛素抵抗的改善作用及其机制研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- ZHU XH. Improvement effect of banana powder on insulin resistance in type II diabetes mellitus and its mechanism [D]. *Guangzhou: South China Agricultural University*, 2016.
- [41] WU J, CHEN M, SHI S, *et al.* Hypoglycemic effect and mechanism of a pectic polysaccharide with hexenuronic acid from the fruits of *Ficus pumila* L. in C57BL/KsJ db/db mice [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 178: 209–220.
- [42] 王艳峰, 杨锡洪, 曹峻嵩, 等. 膳食纤维调节 2 型糖尿病血糖作用研究进展[J]. *食品与机械*, 2020, 228(10): 12–17, 23.
- WANG YF, YANG XH, CAO JH, *et al.* Research progress of dietary fiber regulating blood glucose in type 2 diabetes [J]. *Food Mach*, 2020, 228(10): 12–17, 23.
- [43] LIA X, FUA B, GUOA J, *et al.* Bamboo shoot fiber improves insulin sensitivity in high-fat diet-fed mice [J]. *J Funct Foods*, 2018, 49: 510–517.

(责任编辑: 韩晓红)

- [44] 孙玉东. 高膳食纤维治疗对妊娠期糖尿病的临床价值分析[J]. 医学食疗与健康, 2020, 18(20): 19-20.

SUN YD. Analysis of clinical value of high dietary fiber in the treatment of gestational diabetes mellitus [J]. Med Dietother Health, 2020, 18(20): 19-20.

- [45] 张萍, 王玲. 增加膳食纤维对糖尿病患者血糖的干预作用分析[J]. 中国保健营养, 2019, 29(30): 228.

ZHANG P, WANG L. Analysis of the intervention effect of dietary fiber on blood glucose in patients with diabetes [J]. China Health Nutr, 2019, 29(30): 228.

- [46] 何书励, 马方, 刘鹏举, 等. 多种膳食纤维对2型糖尿病患者胰岛素抵抗的影响[J]. 中国医刊, 2019, 54(4): 435-438.

- [47] HE SL, MA F, LIU PJ, *et al.* Effect of multiple dietary fiber on insulin resistance in patients with type 2 diabetes [J]. Chin Med J, 2019, 54(4): 435-438.

作者简介

张颖, 主要研究方向为功能性食品、护理学、教育学。

E-mail: uh3770@163.com

马立飞, 主要研究方向为功能性食品、生物信息学、医学信息学、分子生物学。

E-mail: qa5761@163.com