

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80265

功能性降糖食品原料研究及应用进展

王振武¹ 陈晓晴² 丁宁¹ 陈雅玲³ 陈絮蒙⁴ 夏新斌³

(1. 湖南中医药大学中西医结合学院, 湖南 长沙 410208; 2. 湖南中医药大学针灸推拿与康复学院, 湖南 长沙 410208; 3. 湖南中医药大学人文与管理学院, 湖南 长沙 410208; 4. 湖南中医药大学药学院, 湖南 长沙 410208)

摘要: 2型糖尿病涉及多种病理机制, 中医常利用黄连、黄芪等药食同源物质实现多靶点协同降糖。以这些药食同源药材为主要原料, 开发代餐、零食与水饮等功能性降糖食品, 成为2型糖尿病管理的创新策略。文章系统综述了功能性药食同源物质保护胰岛 β 细胞、提高胰岛素敏感性、抑制 α -淀粉酶、调节脂质代谢和调控肠道菌群五类降糖机制, 总结了现阶段较为成熟的功能性降糖产品及加工技术, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 2型糖尿病; 药食同源; 功能性食品; 食品加工

Research and application progress of functional raw materials for blood glucose-lowering foods

WANG Zhenwu¹ CHEN Xiaoqing² DING Ning¹ CHEN Yaling³ CHEN Xumeng⁴ XIA Xinbin³

(1. School of Integrated Chinese and Western Medicine, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 2. School of Acupuncture-Moxibustion, Tuina and Rehabilitation, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 3. School of Humanities and Management, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China; 4. School of Pharmacy, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha, Hunan 410208, China)

Abstract: Type 2 diabetes mellitus involves a variety of pathological mechanisms. Chinese medicine treatment often employs the Chinese medicinal materials such as Coptidis Rhizoma and Astragali Radix with both medicinal and edible values to achieve multi-target synergistic blood glucose-lowering effects. Using these materials as the main ingredients to develop functional foods such as meal replacements, snacks, and drinks for lowering blood glucose becomes an innovative strategy for managing type 2 diabetes mellitus. This paper systematically reviews five blood glucose-lowering mechanisms of functional foods and drug ingredients, including protection of islet β -cells, enhancement of insulin sensitivity, inhibition of α -amylase, regulation of lipid metabolism, and modulation of intestinal flora. Furthermore, this paper summarizes the mature functional blood glucose-lowering products and processing technologies and makes an outlook on their future development directions.

Keywords: type 2 diabetes mellitus; with both medicinal and edible values; functional foods; food processing

2型糖尿病(type 2 diabetes mellitus, T2DM)是一种全球性的代谢疾病, 其发病率与肥胖、不良生活方式等因素密切相关。据国际糖尿病联盟统计, 全球糖尿病患者已超5.37亿, 其中T2DM占比高达90%以上^[1]。传统降糖药物虽能短期控制血糖, 但长期使用易产生胃肠副作用、低血糖及耐药性等不良反应^[2]。在此背景下, 药食同源物质

凭借其多成分、多途径的降糖机制备受关注。黄芩、玉竹等多种药食同源物质可通过保护胰岛 β 细胞、改善胰岛素敏感性、抑制糖脂代谢关键酶活性及调节肠道菌群等机制协同降糖。

功能性降糖食品将传统中医药理论与现代加工技术结合, 一是依据中医药传统经方选取药食同源原料, 二是

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(编号: S2024JJQYLH0684); 国家级大学生创业训练项目(编号: S202410541041X)

通信作者: 夏新斌(1976—), 男, 湖南中医药大学教授, 博士。E-mail: 280771087@qq.com

收稿日期: 2025-03-24 改回日期: 2025-08-17

引用格式: 王振武, 陈晓晴, 丁宁, 等. 功能性降糖食品原料研究及应用进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 216-224.

Citation: WANG Zhenwu, CHEN Xiaoqing, DING Ning, et al. Research and application progress of functional raw materials for blood glucose-lowering foods[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 216-224.

辅以热处理、发酵、多糖修饰等定向加工工艺赋能原料生物活性的提高^[3-4]。这类产品的开发不仅可满足T2DM患者饮食管理需求,还能推动大健康产业发展。文章拟结合最新研究成果,综述食药资源物质成分降糖作用机制,总结现阶段较为成熟的降糖产品及加工技术,为进一步开发功能性降糖食品及个性化营养干预方案提供理论依据。

1 食药资源成分降血糖作用的主要机制

1.1 保护胰岛 β 细胞

苦瓜、黄连、罗汉果等食药同源降糖原料可以通过促进胰岛素分泌来维持胰岛 β 细胞的功能稳态。胰岛素分泌持续不足时,会使胰岛 β 细胞发生退行性病变。而当胰岛 β 细胞功能和数量下降,又将进一步降低胰岛素的分泌。食药同源型中药可通过促进胰岛素分泌,减轻胰岛 β 细胞的退行性病变及其他胰岛内分泌细胞对胰岛 β 细胞分泌胰岛素的抑制。苦瓜性味苦,寒,归心、脾、胃经,可通过增加抗氧化酶和多元醇途径酶的水平,增强胰岛素的分泌功能^[5]。与此同时,不同品种的苦瓜多糖含量不同,降糖效果也有所差异。在苦瓜短圆形、长圆形和条形等常见瓜形中,条形苦瓜较短圆形和长圆形苦瓜多糖含量更高,对于血糖的调控效果更明显。除了增强相关酶活性外,激活细胞内外信号通路也是促进胰岛素合成的重要途径。黄连性味苦,寒,归心、脾、胃经,可抑制胰岛 β 细胞上的通道电流,促进胰岛 β 细胞的胞吐作用,增加胰岛素的分泌^[6]。通过比较酒味连、姜味连、萸味连等不同黄连炮制品对糖代谢的调节功能,发现不同炮制方法的降糖效果差异较小。罗汉果性味甘,凉,归肺、大肠经,通过激活腺苷酸活化蛋白激酶(AMPK)通路,诱导自噬促进胰岛素分泌^[7];茶黄素则通过调控胰岛 β 细胞细胞内 Ca^{2+} 浓度来调节胰岛素分泌^[8]。可见,当胰岛 β 细胞功能障碍时,多种性味苦寒与甘凉的食药同源功能性物质可通过调节各类酶水平与激活/抑制信号通路,直接或间接地保护胰岛 β 细胞分泌胰岛素的功能。

食药同源降糖原料苦瓜、红曲米、黄芪可通过调节胰岛 β 细胞的分化过程维持胰岛 β 细胞的功能稳态。机体胰岛 β 细胞在成熟分化过程中需要多种转录因子的参与,当这些转录因子表达受抑制时,胰岛 β 细胞可能反向褪去成熟细胞的特征,丧失部分或全部胰岛素分泌能力,称之为“去分化”^[9]。Lu等^[10]研究发现,叉头转录因子O1(FOXO1)通过竞争胰腺-十二指肠同源盒1基因(PDX1)启动子区,抑制PDX1的表达从而实现胰岛 β 细胞的去分化。食药同源物质苦瓜、红曲米可通过调控FOXO1/PDX1通路,下调FOXO1并抑制胰岛 β 细胞去分化。此外,黄芪性味甘、微温,归肺、脾经,激活 β 细胞分化相关基因表达的同时,增强胰腺导管类器官中C肽的分泌特异

性,从而诱导胰管祖细胞向胰岛素生成细胞定向分化^[11]。因此,通过信号通路调节来促进转录因子和 β 细胞分化基因的表达,是药食同源物质影响胰岛 β 细胞去分化、维持胰岛 β 细胞功能的重要途径。

在T2DM发生发展过程中常伴随糖脂代谢异常、高含量NO、炎症反应等情况,这将诱发胰岛 β 细胞凋亡与自噬,导致其功能障碍或数量减少。此情况下,及时修复机体细胞形态及功能是经济而高效的方式。减少内环境中细胞自噬与凋亡发生是药食同源物质发挥修复功能的重要途径之一。其性味甘、微苦,温,归肝、胃经,其皂苷可介导Rho相关卷曲螺旋蛋白激酶2抑制细胞凋亡,从而减少胰岛细胞凋亡和自噬^[12]。此外,食药同源物质莢膜黄芪还可通过Kelch样ECH关联蛋白1/核因子E2相关因子2通路,防止细胞内活性氧过量产生,从而提高胰岛 β 细胞活力,减少胰岛 β 细胞凋亡^[13]。综上,多种食药同源物质不仅能直接促进胰岛素分泌维持其功能,还可以通过多途径改善损伤环境,或基于多重信号通路减少胰岛 β 细胞去分化、修复细胞功能损伤及数量减少。

1.2 提高胰岛素敏感性

胰岛素敏感性是维持血糖平衡的关键因素,香芹、黄精、黄芩等食药同源原料可以增强机体对于胰岛素的反应程度。胰岛素敏感性降低将使葡萄糖不能有效进入细胞,致使血糖升高,称为胰岛素抵抗(IR)。葡萄糖转运体蛋白(GLUTs)介导着机体糖代谢的限速步骤,是维持体内糖稳态的关键,其表达减少或功能缺陷均可引发IR。香芹性味辛、甘,微温,归肺、胃、肝经,香芹酚通过促进GLUTs的表达,提高细胞对于胰岛素的敏感性,增强葡萄糖进入细胞的过程^[14]。黄精性味甘,平,归脾、肺、肾经,黄精多糖可减少炎性细胞因子的分泌,促进IR脂肪细胞GLUT-4的表达和葡萄糖的摄取,减轻脂肪细胞的胰岛素抵抗^[15]。多花黄精的多糖含量略高于黄精与滇黄精,表明多花黄精的减轻胰岛素抵抗能力可能更强。此外,胰岛素受体底物-1和磷脂酰肌醇3-激酶也与糖代谢密切相关,负责调节葡萄糖摄取和代谢,是预防IR经典信号通路的关键因子^[16]。黄芩素可通过激活胰岛素受体底物-1和磷脂酰肌醇3-激酶一系列蛋白激酶,增强胰岛素信号与细胞内的响应,减轻IR^[17];葵花性味甘,平,归大肠、肝经,黄蜀葵花可以通过激活糖尿病小鼠的胰岛素受体底物1/磷脂酰肌醇3-激酶/丝氨酸—苏氨酸激酶通路来预防胰岛素抵抗^[18]。可以推测,GLUTs、胰岛素受体底物-1与磷脂酰肌醇3-激酶作为胰岛素信号转导通路的重要靶蛋白,可能是食药同源物质提高胰岛素敏感性,改善机体IR的重要途径。

除了促进胰岛素信号通路的表达,食药同源物质核桃、黄芪还可通过对胰岛素抑制信号的负调节来预防IR。细胞外信号调节激酶(ERK)等关键性丝氨酸/苏氨酸激酶

可介导 IRS 的丝氨酸磷酸化,致使 IRS-1 与胰岛素受体的结合受到抑制,是胰岛素系统重要的负调节因子。核桃性味甘,温,归肾、肺、大肠经,胰岛素抵抗可通过核桃衍生肽抑制 ERK 途径得到显著改善^[19]。此外,蛋白酪氨酸磷酸酶-1B 也是胰岛素信号转导关键的负调控因子,通过去磷酸化酪氨酸磷酸化蛋白,抑制胰岛素信号的正常转导,降低组织对胰岛素的敏感性^[20]。而黄芪甲苷可以抑制蛋白酪氨酸磷酸酶-1B 的活性,促进细胞摄取葡萄糖,从而改善胰岛素抵抗^[21]。综上,药食同源物质不仅能正向调节胰岛素信号通路中关键蛋白的表达,也可负向调节 ERK、蛋白酪氨酸磷酸酶-1B 等胰岛素抑制信号因子,具备协调统一的双重作用。

1.3 抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性

α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶是调节餐后血糖的关键酶,也是白芸豆、黄精、青钱柳、葫芦等药食同源原料发挥降糖功能的有效途径。 α -淀粉酶首先将食物中的淀粉分解为寡糖, α -葡萄糖苷酶进一步将寡糖水解为葡萄糖,抑制二者活性可降低小肠上部对碳水化合物的吸收。目前,阿卡波糖等药物已被应用于临床通过抑制两种酶的活性来达到降糖作用^[22],但这类药物常伴有恶心、胀气、腹泻等不良反应^[23]。从药食同源物质中寻找天然的 α -淀粉酶或 α -葡萄糖苷酶抑制剂,是创新药物和功能性食品研发的另一思路。白芸豆性味甘平,归脾、胃、肾经,在胃肠模拟消化试验中,白芸豆可显著抑制 α -淀粉酶活性,同时还具有良好的抗氧化活性,可利用性较强^[24]。目前使用白芸豆为主要原料,已开发出多款保健品及功能性食品,市场反响良好^[25]。另有多项研究发现,黄精^[26]、囊藤^[27]、青钱柳^[28]和葫芦^[29]等多种药食同源物质也能有效抑制 α -淀粉酶或 α -葡萄糖苷酶活性,降血糖效果显著,可作为未来开发 α -淀粉酶或 α -葡萄糖苷酶抑制剂的食品级资源。与阿卡波糖、伏格列波糖、米格列醇等降糖药物相比,药食同源资源物质多具有悠久的民间食用历史,安全性较高,也几乎不会造成胃肠不适^[30-31]。因此,从中提取的天然成分可认为是开发 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制剂较为理想的原料。

1.4 调节脂质代谢

黄芪、木瓜、茶多糖、大蒜等药食同源原料可改善因脂质代谢功能障碍导致的与肥胖相关的糖尿病。脂质代谢功能障碍主要包括脂肪因子分泌失调,这将导致肝脏、骨骼肌和脂肪等关键代谢组织发生脂肪堆积,从而发生胰岛素抵抗^[32]。如药食同源物质黄芪显著降低非酯化脂肪酸和低密度脂蛋白胆固醇水平,改善因脂肪沉积引发的胰岛素抵抗^[33];木瓜性味酸温,归肝、脾经,通过激活 AMPK 通路改善高脂肪饮食诱导的肥胖小鼠和脂肪细胞的脂质沉积,降低血糖水平^[34];茶多糖可通过 AMPK/

FoxO1 信号通路抑制脂肪生成,降低脂肪堆积的风险^[35]。此外,机体脂肪组织可以释放出充满脂质的外泌体颗粒,经脂肪组织巨噬细胞摄取,释放脂肪酸^[36]。这些游离脂肪酸将通过体循环与胰岛素靶组织作用,直接或间接影响 2 型糖尿病的发展。Bian 等^[37]研究发现,大蒜性味辛温,归脾、胃、肺经,可通过诱导巨噬细胞代谢重编程,抑制脂肪组织巨噬细胞对外泌体的摄取并减少脂肪酸的释放,降低游离脂肪酸对胰岛 β 细胞的危害。综上,多种药食同源物质对于降低脂肪沉积、抑制脂肪生成与促进脂肪分解具有高效性,有望成为防治 2 型糖尿病及肥胖症等代谢疾病的潜力物质。

1.5 调控肠道菌群

黄芩、黄连、黄精、人参等药食同源原料可通过维持肠道菌群稳态来提高人体糖脂代谢水平。肠道菌群作为宿主体内的共生微生物群落,直接参与碳水化合物、脂质等物质的分解、合成及能量分配过程。肠道菌群失调通过调控宿主能量代谢稳态、破坏肠道屏障功能及激活慢性炎症通路,进而驱动糖尿病、肥胖等代谢性疾病的病理进程。Zhang 等^[38]研究发现,黄芩—黄连通过调节结肠肠乳杆菌富集,抑制 Toll 样受体 4 信号通路炎症作用,改善血糖。除了结肠肠乳杆菌富集外,肠道厚壁菌门/拟杆菌门的比例降低也可减少机体能量摄入,提高糖脂代谢水平。黄精可降低肠道厚壁菌门丰度,增加拟杆菌门丰度,调节肠道菌群结构,增加益生菌数量,减少有害菌数量,由此降低高脂诱导的 T2DM 小鼠血糖、血脂水平,改善胰岛素抵抗并增加葡萄糖耐受^[39]。人参性味甘微苦微温,归脾、肺、心、肾经,人参皂苷 Rg5^[40]和人参皂苷 T19^[41]的降血糖作用均与降低 T2DM 小鼠肠道中厚壁菌门/拟杆菌门的比例有关。由此可见,药食同源物质可能通过调节肠道菌群结构、降低厚壁菌门丰度,提高糖脂代谢水平,维持人体代谢稳态。

1.6 影响肝脏糖代谢

绿豆芽等常见的药食同源原料还可通过介导肝脏糖代谢过程,调控血糖水平。肝脏可通过调控肝糖原的合成与分解、糖异生等途径调节血糖水平,是糖代谢的核心器官。而肝糖异生紊乱将增加葡萄糖的生产与输出,这是糖尿病发病的重要原因之一^[42]。糖原合成激酶 3 (GSK3) 作为一种丝氨酸/苏氨酸激酶,可调控糖原代谢等多种生理活动,其亚型 GSK3 β 可调节肝脏糖原的合成,调控血糖水平^[43]。药食同源物质绿豆芽性味甘凉,归脾、胃、肝经,可激动 IRS/GSK3 β 通路调控糖原合成,促进肝糖原含量增加,调节肝糖异生紊乱^[44]。除了维持肝糖原的稳态之外,减少内源性葡萄糖的生成也是调节肝脏糖代谢的重要途径。Zheng 等^[45]研究发现,鸢尾素通过 FOXO1 下调减少糖异生,并通过 GSK3 增加糖生成,从而

改善葡萄糖稳态。因此,药食同源物质具有通过调节糖代谢的相关酶活性和通路信号来维持肝糖原的合成与分解、糖异生等途径的稳态作用,可视为2型糖尿病的新型治疗策略。功能性食品的降糖作用机制见表1。

表1 功能性食品降糖作用机制

Table 1 Blood glucose-lowering mechanisms of functional foods

功能	途径	原料	文献
保护胰岛 β 细胞	增加抗氧化酶水平,促进胰岛素分泌	苦瓜皂苷	[5]
	激活 AMPK 通路,促进胰岛素分泌	罗汉果	[7]
	调控胰岛 β 细胞胞内 Ca^{2+} 浓度,促进胰岛素分泌	茶黄素	[8]
	调控 FOXO1/PDX1 通路,抑制 β 细胞去分化	苦瓜	[10]
	增强 C 肽分泌特异性,诱导胰岛素生成细胞的定向分化	黄芪甲苷	[11]
	介导 Rho 信号通路,降低细胞凋亡	三七皂苷	[12]
	介导 Kelch 样 ECH 关联蛋白 1/核因子 E2 通路	茺膜黄芪	[13]
提高胰岛素敏感性	促进 GLUTs 的表达,增强葡萄糖进入细胞的过程	香芹酚	[14]
	减少炎症细胞因子的分泌,促进胰岛素信号通路因子 GLUT-4 表达	黄精多糖	[15]
	激活胰岛素信号通路胰岛素受体底物 1 表达	黄芩素	[17]
		黄蜀葵花	[18]
	抑制 ERK 途径,抑制胰岛素负调节	核桃	[19]
抑制酶活性	抑制蛋白酪氨酸磷酸酶-1B 的活性,促进细胞摄取葡萄糖	黄芪甲苷	[21]
	抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性	白芸豆	[24]
		黄精	[26]
		羹藤	[27]
		青钱柳	[28]
		葫芦	[29]
		黄芪	[33]
调节脂质代谢	降低非酯化脂肪酸和低密度脂蛋白胆固醇水平	木瓜	[34]
	激活 AMPK 通路改善脂质沉积	茶多糖	[35]
	通过 AMPK/FoxO1 抑制脂肪生成	大蒜	[37]
	抑制外泌体的摄取,减少脂肪酸释放	黄芩	[38]
调控肠道菌群	抑制 Toll 样受体 4 信号通路炎症作用,改善结肠肠乳杆菌富集	黄精	[39]
	改善肠道厚壁菌门/拟杆菌门比例	人参皂苷	[40]
		绿豆芽	[44]
影响肝脏糖代谢	激动 IRS/GSK3 β 通路促进肝糖原合成	鸢尾素	[45]
	通过 FOXO1 下调减少糖异生		

2 产品开发现状

2.1 功能性代餐类

代餐食品指用于部分或全部代替主食的一种产品,因其热量低、高纤维、高营养密度及食用方便的特点,现已成为现代人饮食调整和体重管理阶段不可忽略的选择。在人们日渐提升的关注下,代餐食品的形式趋于丰富,包括代餐粉、代餐面包与代餐米面等。代餐粉冲泡方便、口感丰富,热量低的同时能增加日常膳食纤维摄入,因而受到大众普遍青睐。目前,市场上已开发出基于中医药理论指导,以药食同源物质为主要原料制备的代餐粉,如枸杞代餐粉、青钱柳代餐粉、谷物代餐粉^[46]、海带代餐粉^[47]等。这些产品具有一定的健脾祛湿、促进新陈代

谢的功效,保健功能明显,受到众多减肥人士以及亚健康人群的欢迎。与代餐粉相比,以薏仁与红豆为原料研制的代餐面包,紫薯、薏米、扁豆、莲子、亚麻籽为原料制备的代餐米在保证便捷性的同时,更加符合大众的日常饮食习惯。但由于这些代餐食品加工原料中包含不同种类中药材,其食品的湿润度、分散性以及溶解度均会受到影响,与传统同类型食物相比口感有一定差异,未来仍需不断优化配方和加工工艺。

2.2 功能性零食类

功能性零食是指添加了有益健康的功效性成分的休闲零食,可实现膳食纤维控糖、益生菌助消化等多种健康需求,兼具便捷性与适口性,突破传统零食“高热量低营

养”的局限,实现“即食即补”的精准健康管理。尤其是体积小、耐贮藏、易携带的品类,如饼干、果冻等,在功能性零食类中备受关注。现已开发出五层龙饼干^[48]、荞麦无糖饼干^[49]等产品,在保留饼干便捷、饱腹优点的同时发挥中药控糖作用。除饼干外,番石榴的有效成分等药食同源物质也被提取,用以制备降糖果冻^[50],受到市场的广泛好评。此外,乳制品符合大众的营养期待,也是非常受欢迎的零食品类之一。功能性乳制品富含益生菌、乳酸菌等微生物,在调节胃肠道菌群及肠道环境、提高食欲、改善因饮食习惯引起的代谢性紊乱等功能方面具有先天优势。罗汉果共生酸奶可通过调节肠道菌群丰度及肠道微生物产物,改善因高脂饮食导致的代谢紊乱,具有调控肝脏糖代谢的作用。荞麦酸奶、蒲公英酸奶等药食同源酸奶在改善肠道微生物的同时,具备酸甜口感,有助于满足和控制糖尿病人群的食欲。目前药食同源功能性零食种类多样,中药配伍丰富,但有关改善功能性零食口感的研究与专利较少。与此同时,由于中药配伍的复杂性,功能性零食虽口感正常但常带有一定特殊风味,如何在提高零食的降糖功能的同时满足大众的口味期待是功能性零食的主要研究方向。

2.3 功能性水饮类

常见功能性茶包括桑叶茉莉茶、葛根麦冬复合茶、咖啡叶黑茶、木姜叶柯全发酵茶等的传统茶复配产品,或以藤茶、青钱柳和桑叶等代用茶为主要原料研制的单一或复配产品。这些功能性茶产品种类丰富,辅助降糖效果明显,市场反馈较好。除茶多酚外,茶类原料中三萜、皂苷等成分也具有降糖作用,且这些成分之间可能产生协同作用。因此,不断优化原料配伍,平衡口味与功能性,是功能性茶类研究的主要方向。

其他功能性降糖水饮类则多搭配具有天然甜味的药食同源物质,利用其独特的风味减少糖或代糖的添加。常见的控制血糖的饮品包括刺梨桑叶苦瓜饮料、苦杏仁饮料以及玉米须饮料等。这些功能性饮料口感清爽顺滑,具备一定的维持人体血糖健康水平的功能,打破了消费者对于“饮料升糖”的固有偏见,具有较大的市场价值。但草本植物的风味是否可被大众普遍接受,仍有待进一步调试配方及深入研究。

2.4 功能型天然甜味剂

甜味剂作为一种用来改善食品风味及品质的食品添加剂,可按照来源分为天然甜味剂与人工合成甜味剂,均具备高甜度、低热量、应用广等特点^[51]。已有多项研究^[52]证实,人工合成甜味剂的应用与人群心血管疾病和癌症发生风险呈显著正相关。从植物或微生物中提取的天然甜味剂可能是更为安全的选择,成为甜味植物开发利用的重要方向。与此同时,许多药用甜味植物具备降糖的生物活性,如罗汉果、木姜叶可通过抑制 α -淀粉酶和 α -葡

萄糖苷酶活性降低血糖波动^[53]。将从这些药用甜味植物中提取的罗汉果苷、三叶苷等甜味化合物开发成的天然甜味剂在赋予食品甜味的同时,还具有一定的降糖功能活性,因而具备更大的市场开发潜力。由此看来,天然甜味剂对于降糖功能性食品的研发至关重要。虽然天然甜味剂较人工合成甜味剂的安全性更高,但仍存在一定的健康隐患。新近研究^[54]发现,长期过量摄入甘草甜素可能导致高血压、低血钾以及心脏与肌肉疾病。因此,如何在丰富新型天然甜味剂种类与味型的同时,完善天然甜味剂的添加标准,是未来扩大天然甜味剂应用有待解决的问题。功能性降糖食品的产品开发与优缺点总结如图 1 所示。



图 1 功能性降糖食品的产品开发与优缺点总结

Figure 1 Summary of the applications, advantages, and limitations of blood glucose-lowering functional foods

3 加工工艺进展

3.1 物理加工

食品物理加工技术因其高效性与生态友好性优势,契合现代食品工业对加工工艺的环境兼容性与产品安全性的双重需求。其中,热处理作为经典非化学加工手段,可通过蒸煮、油炸等热加工方式实现食品熟化,同步优化终产物物质构特性与风味品质。然而,热处理在蒸煮过程中会破坏淀粉分子间的氢键,解开螺旋状结构、损失结晶度,通过增强酶的水解作用,增加淀粉消化率和食物血糖生成指数(GI)。因此,当通过蒸、煮、炸等热处理增加药食同源功能性食品风味时,需考虑传统热处理方式对于功能性降糖食品的淀粉消化率与GI值变化。而湿热处理技术通过在10%~30%水含量下进行90~120℃的加热处理,使食品具备蒸、煮、炸等特殊风味的同时促进淀粉样品聚集,降低淀粉水解速度与GI值^[55]。如现代莲藕淀粉加工使用湿热处理,将莲藕的抗性淀粉从27.7%~35.4%

降低到2.7%~20.0%,可有效提高莲藕淀粉的抗消化性能,并增强其降糖功能特性^[56]。由此看来,在传统热加工处理的基础上改良的湿热加工技术可为开发具备降糖与养生保健的功能性食品提供技术支持。此外,与湿热加工技术改变食品加工含水量环境不同,挤压技术直接通过高压作用增加淀粉局部分子密度并降低淀粉分解率,也可一定程度降低GI值^[57]。菠萝蜜籽淀粉采取挤压的方式进行改性,快消化淀粉含量、慢消化淀粉含量和淀粉含量分别从17.32%,53.80%,30.22%下降到7.89%,42.58%,23.92%,有效降低淀粉水解率和GI值^[58]。综上,新发展的湿热加工与挤压技术等物理加工技术不仅生产效率高、成本低廉,还可通过改变淀粉结构提高产品调控血糖的功效,是未来降糖功能性食品生产加工与应用的技术保障。

3.2 生物加工

生物加工方法主要是利用微生物发酵、酶法处理与发芽等形式进行加工处理,可改变产品结构 and 组成,并改善其加工性能、增强功能活性。发酵技术作为最原始的生物加工技术,不仅能促进活性物质的释放与转化,降低食品GI值,还能将所用微生物的有益代谢产物保留于产品之中,提高产品营养品质实现协同增效。乳酸菌、酵母菌在发酵杂粮中发挥的协同作用,不仅富含膳食纤维和多糖等功能成分,还具备促进降糖活性成分的释放、生成及转化、调节血糖相关酶活性等功能^[59]。短期发酵可通过改变淀粉的多尺度结构和酶解性,增强淀粉抗消化能力^[60]。然而传统发酵工艺周期较长,且在发酵过程中可能会出现非营养物质或有毒成分,不利于食品安全控制。现代酶法技术处理则根据不同食物来源及特点使用不同的酶类,通过人工介导选择酶的种类来减少加工过程有毒化合物等不确定成分的产生。酶法技术可以通过水解淀粉颗粒表面不规则部分,破坏链段间的糖苷键,使得淀粉分子改性,以此降低淀粉的分子消化特性。如栗子粉的加工就是利用酶法处理,增加还原糖并减少淀粉水解,降低栗子粉的GI值^[61]。以茯苓为原料,利用纤维素酶、木聚糖酶协同红曲菌固态发酵茯苓能提高茯苓活性成分含量,增强茯苓活性成分降糖能力^[62]。除此之外,酶法加工还可结合超声波,用之提取的柠檬皮多糖高降糖活性组分保存最佳,有助于柠檬皮多糖高降糖活性成分的筛选^[63]。因此,酶法加工与发酵技术都可通过改变淀粉结构、增强淀粉抗消化能力,但酶法加工较发酵技术食品安全性更高,是药食同源功能性食品加工技术的全新选择。与前两者较为广泛的加工场景相比,发芽处理技术是谷物加工的一种特有形式。经发芽处理的谷物原料的抗氧化能力及对 α -淀粉酶的抑制率有所增强,可显著降低高脂饮食诱导的空腹血糖、血脂、胰岛素抵抗^[64]。因此,常见收集谷物后将其浸泡待其发芽后加工。这种加工方式

操作简单、经济节约,并能有效增强原料降糖功能活性,但现有发芽处理研究尚集中于谷物加工。未来可考虑进一步拓展发芽处理工艺的领域,将其广泛应用于其他药食同源功能性食品原料加工生产之中。

3.3 化学修饰

化学修饰是指运用化学手段引入不同的活性基团,使原有多糖的羟基替换成硫酸基团、羧甲基和硒酯基等目标基团,从而改变多糖的功能性^[65]。枸杞与二甲基甲酰胺于50℃搅拌12h可用于制备枸杞多糖,而使用三氧化二硫吡啶制备的鼠尾藻硫酸多糖还可有效抑制 α -葡萄糖苷酶活性。除了硫酸化修饰法制备多糖外,羧甲基化修饰法制备的多糖同样能改变食品的生物活性。羧甲基化多糖是指多糖大分子链中单糖分子上的某一个或几个羟基被羧甲基基团取代而形成的一类生物活性多样的多糖衍生物。羧甲基化修饰的罗汉果多糖能提高罗汉果多糖的抗氧化性能。羧甲基化的棕榈仁膨化膳食纤维 α -淀粉酶活性抑制率变强^[66]。此外,硒化修饰也被应用于食品多糖的制备过程中,可将多糖与硒元素有机结合成硒多糖,有效增强多糖的生物活性^[67]。如桔梗硒多糖对 α -糖苷酶的抑制作用强于桔梗多糖。综上,化学修饰可以通过引入特定基团来提升食品多糖的降糖活性,丰富多糖功能,但需要平衡修饰效率、安全性与成本,才能推动功能性多糖在降糖食品中的广泛应用。

4 总结与展望

药食同源物质功能性食品开发应用为糖尿病管理提供了全新视角。中医药理论指导下的成分配伍揭示了天然化合物通过多靶点协同调控代谢网络的科学逻辑,为现代功能食品设计提供了“整体调节”的新范式。而现代食品加工技术的深化应用,则优化活性成分的生物利用度,并通过调控淀粉-蛋白互作形成抗消化结构,推动低血糖生成指数食品从实验室走向工业化生产。当前市场上的新型功能性食品已具备一定的血糖、血脂调节作用,展现出广阔的市场应用潜力及学术价值,但加工工艺的优化与产品风味的调和仍是未来研究的关键方向。

参考文献

- [1] LIN X L, XU Y F, PAN X W, et al. Global, regional, and national burden and trend of diabetes in 195 countries and territories: an analysis from 1990 to 2025[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14790.
- [2] ZHAO G M, ZHANG Q, WU F, et al. Comparison of weight loss and adverse events of obesity drugs in children and adolescents: a systematic review and meta-analysis[J]. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 2022, 15(9): 1119-1125.
- [3] YU D S X, HUI C K, ISMAIL-FITRY M R, et al. High-pressure processing and heat treatment of Murrah buffalo milk:

- comparative study on microbial changes during refrigerated storage[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2025, 426: 110926.
- [4] AUGUSTIN M A, HARTLEY C J, MALONEY G, et al. Innovation in precision fermentation for food ingredients[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(18): 6 218-6 238.
- [5] RICHTER E, GEETHA T, BURNETT D, et al. The effects of momordica charantia on type 2 diabetes mellitus and Alzheimer's disease[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(5): 4 643.
- [6] ZHAO M M, LU J, LI S, et al. Berberine is an insulin secretagogue targeting the KCNH6 potassium channel[J]. *Nature Communications*, 2021, 1(1): 6 342.
- [7] ZHANG Y L, ZHOU G S, PENG Y, et al. Anti-hyperglycemic and anti-hyperlipidemic effects of a special fraction of Luohanguo extract on obese T2DM rats[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2020, 247: 112273.
- [8] XU S Y, CHEN Y, GONG Y S. Improvement of theaflavins on glucose and lipid metabolism in diabetes mellitus[J]. *Foods*, 2024, 13(11): 1 763.
- [9] ZHUANG L, LI Q, YOU W J, et al. Complement C3 promotes islet β -cell dedifferentiation by activating Wnt/ β -catenin pathway[J]. *iScience*, 2024, 27(10): 111064.
- [10] LU K Y, CHEN S H, LIN Y S, et al. An antidiabetic nutraceutical combination of red yeast rice (*Monascus purpureus*), bitter melon (*Momordica charantia*), and chromium alleviates dedifferentiation of pancreatic β cells in db/db mice[J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(12): 6 718-6 726.
- [11] YU W, WANG Y N, JIANG D, et al. A saponin from astragalus promotes pancreatic ductal organoids differentiation into insulin-producing cells[J]. *Phytomedicine*, 2022, 102: 154190.
- [12] LIU X, NING K H, LI J C, et al. Panax notoginseng saponins inhibit apoptosis and alleviate renal ischemia-reperfusion injury through the ROCK2/NF- κ B pathway[J/OL]. *Molecular Biotechnology*. (2025-02-17) [2025-02-22]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39820856/>.
- [13] CHEN H P, LOU Y M, LIN S Y, et al. Formononetin, a bioactive isoflavonoid constituent from Astragalus membranaceus (*Fisch.*) Bunge, ameliorates type 1 diabetes mellitus via activation of Keap1/Nrf2 signaling pathway: an integrated study supported by network pharmacology and experimental validation[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2024, 322: 117576.
- [14] HOCA M, BECER E, VATANSEVER H S. Carvacrol is potential molecule for diabetes treatment[J]. *Archives of Physiology and Biochemistry*, 2024, 130(6): 823-830.
- [15] CAI J L, ZHU Y L, ZUO Y J, et al. Polygonatum sibiricum polysaccharide alleviates inflammatory cytokines and promotes glucose uptake in high-glucose-and high-insulin-induced 3T3-L1 adipocytes by promoting Nrf2 expression[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2019, 20(4): 3 951-3 958.
- [16] LIU J, WANG X, ZHU Y Q, et al. Theabrownin from dark tea ameliorates insulin resistance via attenuating oxidative stress and modulating IRS-1/PI3K/Akt pathway in HepG2 cells[J]. *Nutrients*, 2023, 15(18): 3 862.
- [17] 杜云鹏, 李涵, 黄榕蔓, 等. 黄芩素促进胰岛素敏感性的细胞内机制: 从受体内化到胰岛素抵抗的转变[J]. *工业微生物*, 2024, 54(2): 167-169.
- DU Y P, LI H, HUANG R M, et al. Exploring the intracellular mechanism of baicalin promoting insulin sensitivity: the transition from receptor internalization to insulin resistance[J]. *Industrial Microbiology*, 2024, 54(2): 167-169.
- [18] ZHAO J, TOSTIVINT I, XU L D, et al. Efficacy of combined abelmoschus Manihot and irbesartan for reduction of albuminuria in patients with type 2 diabetes and diabetic kidney disease: a multicenter randomized double-blind parallel controlled clinical trial[J]. *Diabetes Care*, 2022, 45(7): e113-e115.
- [19] WANG J, WU T, FANG L, et al. Peptides from walnut (*Juglans mandshurica Maxim.*) protect hepatic HepG2 cells from high glucose-induced insulin resistance and oxidative stress[J]. *Food & Function*, 2020, 11(9): 8 112-8 121.
- [20] BEHL T, GUPTA A, SEHGAL A, et al. Exploring protein tyrosine phosphatases (PTP) and PTP-1B inhibitors in management of diabetes mellitus[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2022, 153: 113405.
- [21] ZHOU X, WANG L L, TANG W J, et al. Astragaloside IV inhibits protein tyrosine phosphatase 1B and improves insulin resistance in insulin-resistant HepG2 cells and triglyceride accumulation in oleic acid (OA)-treated HepG2 cells[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 268: 113556.
- [22] DI STEFANO E, TSOPMO A, OLIVIERO T, et al. Bioprocessing of common pulses changed seed microstructures, and improved dipeptidyl peptidase-IV and α -glucosidase inhibitory activities[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 15308.
- [23] SUN L J, WARREN F J, GIDLEY M J, et al. Mechanism of binding interactions between young apple polyphenols and porcine pancreatic α -amylase[J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 468-474.
- [24] JÄGER R, ABOU SAWAN S, PURPURA M, et al. Proprietary α -amylase inhibitor formulation from white kidney bean (*Phaseolus vulgaris L.*) promotes weight and fat loss: a 12-week, double-blind, placebo-controlled, randomized trial[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 12685.
- [25] CHEN C, HUANG J, OMEDI J O, et al. Characteristics of the microstructure and the key components of white kidney bean sourdough bread induced by mixed-strain fermentation and its

- influence on gut microbiota[J]. *Food & Function*, 2023, 14(16): 7413-7425.
- [26] LUO J Y, CHAI Y Y, ZHAO M, et al. Hypoglycemic effects and modulation of gut microbiota of diabetic mice by saponin from *Polygonatum sibiricum*[J]. *Food & Function*, 2020, 11(5): 4327-4338.
- [27] SRINUANCHAI W, NOOIN R, PITCHAKARN P, et al. Inhibitory effects of *Gymnema inodorum* (Lour.) Decne leaf extracts and its triterpene saponin on carbohydrate digestion and intestinal glucose absorption[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 266: 113398.
- [28] LI C G, DENG S P, LIU W, et al. α -Glucosidase inhibitory and anti-inflammatory activities of dammarane triterpenoids from the leaves of *Cyclocarya paliurus*[J]. *Bioorganic Chemistry*, 2021, 111: 104847.
- [29] ZHANG H X, XU J, WANG M Z, et al. Steroidal saponins and sapogenins from fenugreek and their inhibitory activity against α -glucosidase[J]. *Steroids*, 2020, 161: 108690.
- [30] 刘明波, 何新叶, 杨晓红, 等. 《中国心血管健康与疾病报告2023》要点解读[J]. *中国全科医学*, 2025, 28(1): 20-38.
- LIU M B, HE X Y, YANG X H, et al. Interpretation of report on cardiovascular health and diseases in China 2023[J]. *Chinese General Practice*, 2025, 28(1): 20-38.
- [31] 胡妮娜, 张晓娟. 黄芪的化学成分及药理作用研究进展[J]. *中医药信息*, 2021, 38(1): 76-82.
- HU N N, ZHANG X J. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Astragalus membranaceus*[J]. *Information on Traditional Chinese Medicine*, 2021, 38(1): 76-82.
- [32] ZHANG B, YANG Y, XIANG L, et al. Adipose-derived exosomes: a novel adipokine in obesity-associated diabetes[J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2019, 234(10): 16692-16702.
- [33] LIU J, REN J, ZHOU L L, et al. Proteomic and lipidomic analysis of the mechanism underlying astragaloside IV in mitigating ferroptosis through hypoxia-inducible factor 1 α /heme oxygenase 1 pathway in renal tubular epithelial cells in diabetic kidney disease[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2024, 334: 118517.
- [34] KANG Y M, KANG H A, COMINGUEZ D C, et al. Papain ameliorates lipid accumulation and inflammation in high-fat diet-induced obesity mice and 3T3-L1 adipocytes via AMPK activation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(18): 9885.
- [35] KUANG D D, LI X Y, QIAN X P, et al. Tea polysaccharide ameliorates high-fat diet-induced renal tubular ectopic lipid deposition via regulating the dynamic balance of lipogenesis and lipolysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2024, 72(22): 12582-12595.
- [36] FLAHERTY S E, GRIJALVA A, XU X Y, et al. A lipase-independent pathway of lipid release and immune modulation by adipocytes[J]. *Science*, 2019, 363(6430): 989-993.
- [37] BIAN Y P, LI W Z, JIANG X Q, et al. Garlic-derived exosomes carrying miR-396e shapes macrophage metabolic reprogramming to mitigate the inflammatory response in obese adipose tissue[J]. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 2023, 113: 109249.
- [38] ZHANG C H, SHENG J Q, SARSAIYA S, et al. The anti-diabetic activities, gut microbiota composition, the anti-inflammatory effects of *Scutellaria - coptis* herb couple against insulin resistance-model of diabetes involving the toll-like receptor 4 signaling pathway[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2019, 237: 202-214.
- [39] CHAI Y Y, LUO J Y, BAO Y H. Effects of *Polygonatum sibiricum* saponin on hyperglycemia, gut microbiota composition and metabolic profiles in type 2 diabetes mice[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, 143: 112155.
- [40] WEI Y G, YANG H X, ZHU C H, et al. Hypoglycemic effect of ginsenoside Rg5 mediated partly by modulating gut microbiota dysbiosis in diabetic db/db mice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(18): 5107-5117.
- [41] XU J, LI T, XIA X Y, et al. Dietary ginsenoside T19 supplementation regulates glucose and lipid metabolism via AMPK and PI3K pathways and its effect on intestinal microbiota[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(49): 14452-14462.
- [42] CHADT A, AL-HASANI H. Glucose transporters in adipose tissue, liver, and skeletal muscle in metabolic health and disease[J]. *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, 2020, 472(9): 1273-1298.
- [43] MERINO B, FERNÁNDEZ-DÍAZ C M, PARRADO-FERNÁNDEZ C, et al. Hepatic insulin-degrading enzyme regulates glucose and insulin homeostasis in diet-induced obese mice[J]. *Metabolism*, 2020, 113: 154352.
- [44] HE C X, WANG K, XIA J, et al. Natural exosomes-like nanoparticles in mung bean sprouts possesses anti-diabetic effects via activation of PI3K/Akt/GLUT4/GSK-3 β signaling pathway[J]. *Journal of Nanobiotechnology*, 2023, 21(1): 349.
- [45] ZHENG S, CHEN N X, KANG X J, et al. Irisin alleviates FFA induced β -cell insulin resistance and inflammatory response through activating PI3K/AKT/FOXO1 signaling pathway[J]. *Endocrine*, 2022, 75(3): 740-751.
- [46] 杨瑞芳, 白建江, 汤剑豪, 等. 谷物代餐粉的要素及开发趋势分析[J]. *食品与机械*, 2023, 39(12): 221-226.
- YANG R F, BAI J J, TANG J H, et al. Analysis of the elements and development trends of cereal meal replacement powder[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(12): 221-226.
- [47] 张李, 聂诗明. 复方海带代餐粉的辅助降血脂作用[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 178-182.
- ZHANG L, NIE S M. Auxiliary hypolipidemic effect of compound kelp meal substitute powder[J]. *Food & Machinery*,

- 2021, 37(11): 178-182.
- [48] SIRIBADDANA S, MEDAGAMA A, WICKRAMASINGHE N, et al. The effect of salacia reticulata extract biscuits on blood sugar control of type 2 diabetes mellitus patients: a two-period, two-sequence, crossover, randomized, triple-blind, placebo-controlled, clinical trial[J]. *Cureus*, 2023, 15(9): e45921.
- [49] NADIAN N, AZIZI M H, ABBASTABAR AHANGAR H, et al. Textural and sensory characteristics of sugar-free biscuit formulated with quinoa flour, isomalt, and maltodextrin[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(12): 6 501-6 512.
- [50] SAMPATH KUMAR N S, SARBON N M, RANA S S, et al. Extraction of bioactive compounds from *Psidium guajava* leaves and its utilization in preparation of jellies[J]. *AMB Express*, 2021, 11(1): 36.
- [51] MUÑOZ-LABRADOR A, HERNANDEZ-HERNANDEZ O, MORENO F J. A review of the state of sweeteners science: the natural versus artificial non-caloric sweeteners debate. *Stevia rebaudiana* and *Siraitia grosvenorii* into the spotlight[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2024, 44(6): 1 080-1 102.
- [52] GOMEZ-DELGADO F, TORRES-PÉÑA J D, GUTIERREZ-LARA G, et al. Artificial sweeteners and cardiovascular risk [J]. *Current Opinion in Cardiology*, 2023, 38(4): 344-351.
- [53] JIANG J Q, FAN H L, ZHOU J, et al. *In vitro* inhibitory effect of five natural sweeteners on α -glucosidase and α -amylase[J]. *Food & Function*, 2024, 15(4): 2 234-2 248.
- [54] MORA M R, DANDO R. The sensory properties and metabolic impact of natural and synthetic sweeteners[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(2): 1 554-1 583.
- [55] CHEN Y Y, AN D, LI S, et al. Oxygen promotes radical-mediated heterogeneous hydrothermal degradation of konjac glucomannan: molecular structure and influence mechanism [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 289: 138848.
- [56] YE H Y, LAI L S. Effect of single and dual hydrothermal treatments on the resistant starch content and physicochemical properties of lotus rhizome starches[J]. *Molecules*, 2021, 26(14): 4 339.
- [57] 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): 3 964-3 973.
- [58] ZHANG Y T, ZHANG Y J, LI B, et al. *In vitro* hydrolysis and estimated glycemic index of jackfruit seed starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 1 109-1 117.
- [59] 杨欢, 刘敬科, 李朋亮, 等. 乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包降糖效果研究进展[J]. *食品与机械*, 2024, 40(11): 211-218.
- YANG H, LIU J K, LI P L, et al. Research progress on hypoglycemic effect of coarse grain bread fermented by lactic acid bacteria and yeast[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(11): 211-218.
- [60] TU Y, HUANG S X, CHI C D, et al. Digestibility and structure changes of rice starch following co-fermentation of yeast and *Lactobacillus* strains[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 184: 530-537.
- [61] YANG Z L, WU Y W, OUYANG J. Effect of cooking method and enzymatic treatment on the *in vitro* digestibility of cooked and instant chestnut flour[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2023, 78(1): 166-172.
- [62] 彭灿灿, 刘涛, 邓俊劫, 等. 酶处理协同红曲菌固态发酵茯苓对其化学成分的影响[J]. *食品与机械*, 2025, 41(3): 17-25.
- PENG C C, LIU T, DENG J J, et al. Effects of enzyme treatment combined with *Monascus* solid-state fermentation on chemical composition of *Poria cocos*[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(3): 17-25.
- [63] 蒋忠桂, 李迪, 李开凤, 等. 高降糖活性柠檬皮多糖制备工艺优化及结构表征[J]. *食品与机械*, 2024, 40(4): 187-195.
- JIANG Z G, LI D, LI K F, et al. Optimization of preparation process and preliminary structure characterization of polysaccharides from lemon peel with high hypoglycemic activity[J]. *Food & Machinery*, 2024, 40(4): 187-195.
- [64] KIM H, KIM O W, AHN J H, et al. Metabolomic analysis of germinated brown rice at different germination stages[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1 130.
- [65] XIAO Y D, HUANG Q L, ZHENG Z M, et al. Construction of a *Cordyceps sinensis* exopolysaccharide-conjugated selenium nanoparticles and enhancement of their antioxidant activities [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 99: 483-491.
- [66] ZHENG Y J, TIAN H L, LI Y, et al. Effects of carboxymethylation, hydroxypropylation and dual enzyme hydrolysis combination with heating on physicochemical and functional properties and antioxidant activity of coconut cake dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2021, 336: 127688.
- [67] CHENG L Z, WANG Y F, HE X X, et al. Preparation, structural characterization and bioactivities of Se-containing polysaccharide: a review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 82-92.