

乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包降糖效果研究进展

杨 欢^{1,2} 刘敬科² 李朋亮² 刘 晶¹ 张爱霞²

(1. 河北经贸大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050061;

2. 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所, 河北 石家庄 050051)

摘要: 乳酸菌和酵母菌共同发酵制作的杂粮面包, 富含膳食纤维和多糖等功能成分, 可以控制血糖升高。该综述基于乳酸菌、酵母菌在发酵杂粮中发挥的协同作用, 从促进降糖活性成分的释放、生成及转化、抑制升高血糖相关酶活性 3 个方面, 阐述了乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包降糖机制, 并对其未来发展方向进行了展望。

关键词: 乳酸菌; 发酵; 杂粮面包; 协同作用; 降糖增效

Research progress on hypoglycemic effect of coarse grain bread fermented by lactic acid bacteria and yeast

YANG Huan^{1,2} LIU Jingke² LI Pengliang² LIU Jing¹ ZHANG Aixia²

(1. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Economics and Trade, Shijiazhuang, Hebei 050061, China; 2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract: Coarse grain bread fermented with lactic acid bacteria and yeast is rich in functional components, such as dietary fiber and polysaccharide, which can help regulate blood sugar levels. This review explores the synergistic effects of lactic acid bacteria and yeast during the fermentation of coarse grains and their role in enhancing the bread's hypoglycemic properties. Specifically, it examines three key mechanisms: promoting the release, generation and transformation of hypoglycemic active ingredients and inhibiting the activity of blood sugar-related enzymes, and looks forward to the future development direction.

Keywords: lactic acid bacteria; mixed grain bread; plant lactobacillus; fermentation; sugar lowering and efficiency enhancing

大部分杂粮中含有调节血糖功效的膳食纤维、多糖和多酚等成分, 而且淀粉含量较低, 有助于将葡萄糖缓释到血液中, 是研制低血糖生成指数 (glycemic index, GI) 食品的优质原料^[1]。杂粮种类繁多, 广义上指水稻、小麦、玉米和薯类以外的粮豆作物。不同品种杂粮中功能成分组成和含量也不同, 具有血糖调节作用的主要功效成分及代表性的杂粮原料如表 1 所示。膳食纤维作为杂粮中普遍存在的营养和功能成分, 进入人体胃肠道后, 易形成较高黏度的凝胶状态, 降低葡萄糖的吸收速率, 具有控制血压、降低血糖、改善血脂水平等功能, 对维持人体健康具

有重要意义^[11]。研究^[12]证明, 杂粮中多糖类成分对血糖调节具有重要作用, 将外源性多糖注入糖尿病大鼠体内, 能有效降低破坏 β -胰岛细胞的一氧化氮合酶活性和一氧化氮的含量, 提高超氧化物歧化酶活性, 从而保护胰岛 β 细胞, 有效促进胰岛素分泌, 起到稳定血糖的作用。多酚和黄酮类化合物所含有的酚羟基官能团, 能够抑制自由基诱导的氧化应激, 清除机体内过剩自由基, 防止心血管疾病和糖尿病的发生^[13]。

乳酸菌 (lactic acid bacteria, LAB) 种类繁多, 广泛存在于自然界和动物肠道系统中, 其调节机体胃肠道菌群

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目 (编号: HBCT2024080205); 河北省农林科学院现代农业科技创新专项课题资助项目 (编号: 2022KJCXZX-SSS-1); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目 (编号: CARS-06-14.5-A29)

通信作者: 刘晶 (1972—), 女, 河北经贸大学教授, 博士。E-mail: 595857708@qq.com

张爱霞 (1977—), 女, 河北省农林科学院生物技术与食品科学研究所研究员, 博士。E-mail: zhangaixia1977@126.com

收稿日期: 2024-06-02 **改回日期:** 2024-11-04

表 1 杂粮中不同调节血糖活性成分及其降糖机理

Table 1 Different hypoglycemic active ingredients in miscellaneous grains and their hypoglycemic mechanisms			
降糖活性成分	杂粮品种	降糖机制与效果	参考文献
膳食纤维	苦荞、芸豆、小米	抑制 α -葡萄糖苷酶作用、改善大鼠胰岛素抵抗、糖化血红蛋白水平和葡萄糖耐量	[2—3]
酚类化合物	藜麦、大麦、谷子	抑制 α -葡萄糖苷酶活性,减缓小肠中单糖生成速度,激活 AMPK、抑制 SR EBP2 通路	[4—5]
黄酮、花青苷	大麦、黑豆	增强骨骼肌细胞 L6 中葡萄糖的摄取,促进磷酸化的蛋白激酶 B(p-Akt)和葡萄糖转运蛋白 4(GLUT4)的表达	[6] ⁴⁷⁻⁵⁷
异黄酮	大豆	改善“多食”和“多饮”的症状,降低血清血糖、调节肠道菌群,降低全身炎症反应与胰岛素抵抗	[7]
β -葡聚糖	燕麦、高粱	降低 TNF- α 和 IL-1 β 水平、增加优势菌丰度	[8—9]
多肽	藜麦、红豆	抑制 α -葡萄糖苷酶和胰脂肪酶活性	[10]

平衡、促进维生素合成以及缓解乳糖不耐受等益生功能与人体健康密切相关。研究发现,添加 LAB 发酵能够增加红豆酸面团中小分子多肽和有机酸的含量,可控制食欲并抑制体内脂肪积累,具有显著降血糖作用^[14],利用酸奶—酸面团发酵能够促进蛋白质水解、酚类化合物增溶、增加肽和游离氨基氮含量,提高 DPPH 自由基清除率和铁还原能力^[15]。可见,LAB 协同酵母菌发酵杂粮面团,对提升产品功能特性具有重要意义。该综述旨在探讨基于 LAB、酵母菌与杂粮的协同作用,通过对降糖活性成分的释放、生成和转化,以及对调节血糖相关酶类活性的抑制作用,综合阐述乳酸菌协同酵母菌发酵杂粮面包的降糖增效作用,以期对功能型杂粮面包类产品研发及控糖机理研究提供参考。

1 乳酸菌、酵母菌与杂粮的协同作用

1.1 乳酸菌与酵母菌的协同作用

面团发酵过程中 LAB 和酵母菌主要为共生关系^[16]。乳酸菌利用酵母菌发酵过程中产生的营养因子如丙酮酸盐、维生素、甘露糖等来刺激 LAB 的生长;酵母菌利用 LAB 产生的单糖、乳酸盐、半乳糖等代谢物作为它们的能源物质,促进自身生长繁殖^[17]。酵母菌发酵产生大量的酸性物质促进乳酸菌诱导自身肽酶和蛋白酶水解蛋白质产生新氨基酸,促使二者活菌数量增加,同时降低另一菌株发酵液 pH 值下降速率,促进面团中活性物质的产生,且混合培养过程中,甲酸、乙酸、丙酸的产出量显著提高,对产品风味品质具有一定改善效果^[18]。

乳酸菌与酵母菌的协同培养受到温度的调控。酵母菌在 30℃ 培养时生长较快,在共发酵过程中维持厌氧环境^[19],LAB 在 37℃ 培养时利用酵母菌的代谢产物大量繁殖,同时将二糖或多糖分解为易水解的单糖,促进酵母菌繁殖。酵母菌和 LAB 不仅能够相互利用代谢产物,还能交换信号分子,促进增殖。李博等^[20]研究发现,粪肠球菌 LAB4、植物乳杆菌 LAB7、干酪乳杆菌 LAB9 均能产生自体诱导物 2(autoinduction-2, AI-2),信号分子 AI-2 参与调

控共生环境中的相关物质,从而有利于乳酸菌的生长,而酵母菌能够促进信号分子 AI-2 的产生,也可将其消化吸收,从而表现出抑制作用,进一步确认了酵母菌与 LBA 之间的共生关系。

1.2 生物发酵与杂粮的协同作用

杂粮中丰富的营养成分为 LAB 和酵母菌的繁殖提供充足的营养,促进微生物的增殖;而微生物发酵能够显著提高杂粮中营养成分的生物利用率,改善杂粮的加工性能,同时具有降低产品血糖生成指数的效果^[21]。乳酸菌、酵母菌与杂粮间的协同作用如图 1 所示。在发酵过程中,杂粮中的膳食纤维与维生素供给 LAB,促进 LAB 的生长繁殖并代谢产生大量乙酸、乳酸等短链脂肪酸,这些酸性物质可降低发酵面团 pH 值,激活谷物中内源性蛋白酶降解面筋蛋白,改善面团流变学特性,而且面团酸度的提高有利于抗性淀粉的形成,减缓淀粉的消化速率,起到调节血糖平衡的作用^[22]。曹伟超等^[23]研究发现,乳酸片球菌 L-19 发酵黑豆酸面团,避免了其他蛋白酶系与植酸发生非特异性结合而引发的失活,黑豆蛋白水解程度提升。黑豆蛋白水解肽能够阻断葡萄糖转运蛋白 GLUT2 和 SGLT1,使 Caco-2 细胞对葡萄糖吸收率降低了 21.5%,喂养黑豆蛋白水解肽(150 mg/kg)的高血糖大鼠餐后血糖水平降低了 22.7%~47.7%^[24]。可见,经 LAB 发酵后的杂粮对调节血糖水平具有积极意义。经乳酸菌发酵后的荞麦面包中总酚含量提高 21.3%,DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力提高 2 倍左右,改善了抗氧化活性,食用荞麦面包可调节糖尿病人的肠道菌群丰度与结构,促进肠道菌群抗生素等物质的释放,起到增强机体免疫力的效果^[25]。

2 促进降糖活性成分的释放

杂粮含有较为丰富的脂肪、蛋白质、微量元素等营养物质和具有调节血糖作用的功能因子,通过微生物发酵技术利用发酵杂粮过程中产生的酶类可以水解植物细胞壁,大幅度释放多酚、黄酮、膳食纤维、氨基酸等活性

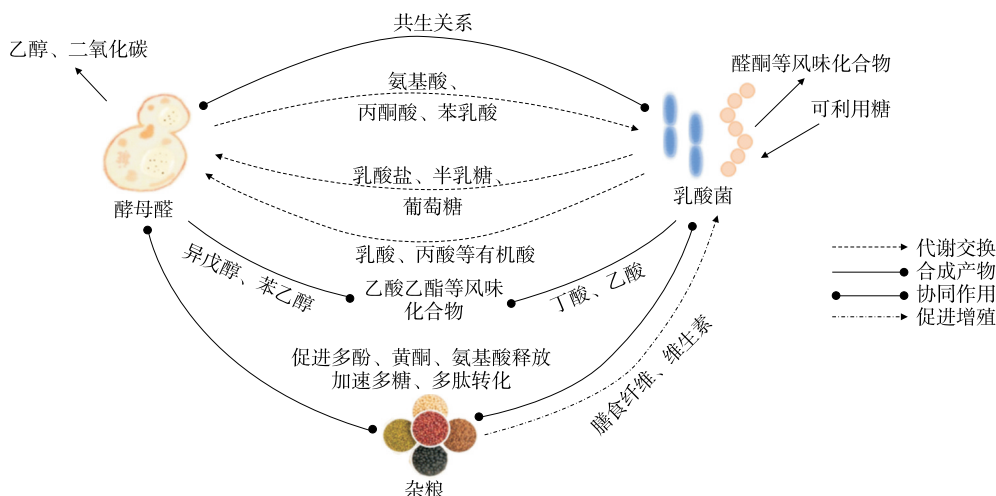


图1 乳酸菌、酵母菌与杂粮的协同作用

Figure 1 Synergistic effects of lactic acid bacteria, yeast and miscellaneous grains

物质^[26]。

2.1 酚类化合物

2.1.1 黄酮 黄酮类化合物包括酮醇类、黄烷酮醇类、异黄酮等,是杂粮中重要的功能成分,与糖脂代谢密切相关^[27]。黄酮通常以稳定的结合态形式存在于杂粮中,生物发酵技术促使植物细胞壁发生皱缩或破裂释放游离态的黄酮,提高其生物活性,发酵过程普遍使全麦制品中可溶性黄酮含量提升5.9%~11.4%,经高温烘烤后生成的美拉德反应产物对面包皮中可溶性黄酮含量也产生了积极影响^[28]。豆类中含有高浓度的异黄酮和花青素,主要以与葡萄糖结合的糖苷形式稳定存在,通过生物发酵产生的 β -葡萄糖苷酶作用转化为糖苷配基形式,促进黄酮的游离和释放,经胃肠消化后其总黄酮含量较未处理提高1.22倍和1.03倍^[29],同样,利用枯草芽孢杆菌BCRC14715发酵黑豆,总黄酮含量增长率高达48%^[30]。游离黄酮可增强胰岛素敏感性,改善胰岛素信号传导;也能促进葡萄糖在肌肉和脂肪组织中的运输和利用,从而控制血糖水平^[31]。表明生物发酵可促进杂粮中功能性黄酮的释放,提高生物利用度,调节糖脂代谢,对人体健康有益。

2.1.2 多酚 多酚类物质广泛存在于杂粮中,具有抗氧化、抑菌、预防2型糖尿病、抗癌等多种功能特性^{[6]5-6}。多酚通常以束缚型或结合型存在。生物发酵技术可使谷物细胞壁分解,使多酚与纤维素间的酯键、糖苷键或醚键断裂,细胞膜通透性增强,结合态多酚转化为游离态发挥其功能特性。酵母菌与乳酸菌对植物细胞壁作用及游离酚释放如图2所示^[32]。枯草芽孢杆菌发酵芸豆,产生的 α -葡萄糖苷酶,将共轭形式出现的酚类化合物中的 β -糖苷键水解为相应的酚类苷元,增加可溶性多酚浓度,在48,96 h分别达到96%,126%,而经植物乳杆菌发酵芸豆,其中反式对香豆酸含量显著增加,96 h后达到最高浓度^[33]。程

新等^[34]研究表明,混菌发酵生成乳酸,降低共生环境pH的同时,总酚含量增加1.61~1.97倍,有利于抑制 α -淀粉酶活性,生产出低GI面包产品。Li等^[35]利用干酪乳杆菌发酵大豆过程中,反式肉桂酸、4-羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸和阿魏酸的含量不断增加,其中反式肉桂酸含量升高4.9倍。食用此类具有抑制肠道消化酶活性、促进胰岛素合成与分泌、抑制葡萄糖转运、调节肠道菌群作用的发酵产品,可有效维持人体内血糖动态平衡。

2.2 膳食纤维

膳食纤维(dietary fiber, DF)是一类不能被人体水解酶类分解,可被肠道微生物利用的特殊碳水化合物,具有调控血糖的功能^[36]。DF直接添加到食品中会降低食物的感官品质,通常利用微生物发酵法生成小分子可溶性膳食纤维,改善膳食纤维的理化性质与功能特性^[37]。将纳豆芽孢杆菌应用于小米麸皮发酵,使可溶性膳食纤维含量从2.3%增加到13.2%。由于发酵降解了半纤维素和纤维素,改性小米麸DF形成了更多的多孔、松散的结构和更多的多糖,DPPH自由基清除能力和总酚含量也显著提高^[38]。经乳酸菌发酵的黑豆面包、全麦面包同样具有更高的总膳食纤维与可溶性膳食纤维水平^[39]。微生物发酵后的改性膳食纤维疏松多孔结构增加了其吸附脂类、胆固醇和糖类的能力,阻碍了这些成分在人体中的吸收,促使其发挥出降脂控糖的功效,谷物中大分子结构被微生物所产的酶、酸破坏,形成更多可溶性膳食纤维利于人体消化^[40]。总之,经乳酸菌发酵后的杂粮具有更多的可溶性膳食纤维,不仅能够增加饱腹感,其网状结构可以对 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶形成束缚,抑制酶的活性^[41],从而延缓葡萄糖的释放,利于调节血糖平衡。

微生物发酵DF目的是将改性产品应用于功能性食品工业,以提高植物及其副产品的经济价值和利用率,但

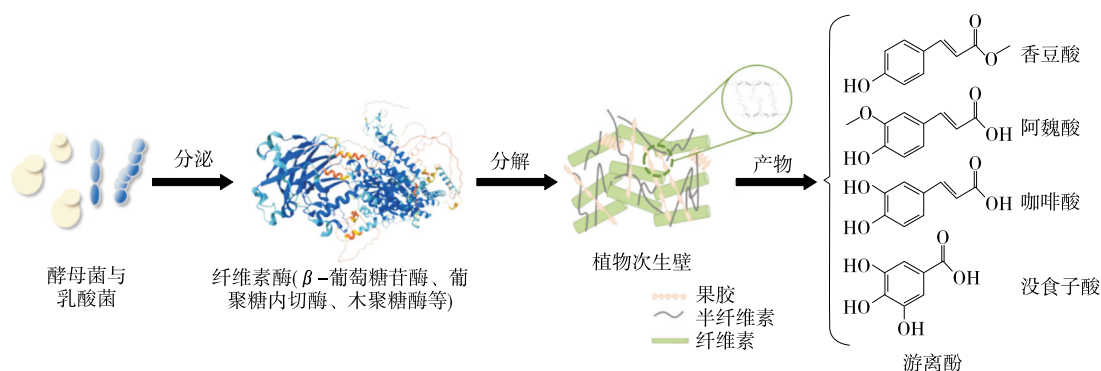


图2 酵母菌与乳酸菌对植物细胞壁作用及游离酚释放示意图

Figure 2 Schematic diagram of the effects of yeast and lactic acid bacteria on plant cell walls and the release of free phenols

膳食纤维的改性受菌种、发酵环境 pH、温度、接种量、时间的影响,未来需要对改性技术进行标准化,筛选优质原材料,优化 DF 葡萄糖吸附能力强的工艺技术,提高材料利用率。

2.3 氨基酸

氨基酸是构成机体蛋白质的基本单元,是人体不可缺少的营养成分。LAB 在生长代谢过程中产酸并生成一些水解酶类,将谷物中大分子蛋白质水解为小分子氨基酸,增加了游离氨基酸的含量。有研究^[35]表明,大豆粉经干酪乳杆菌发酵,总必需氨基酸含量增加 10.25%,谷氨酸的增加幅度最大,从 (108.30 ± 1.03) mg/100 g 增加到 (682.51 ± 3.05) mg/100 g。羽扇豆粉接种乳酸片球菌和萨基乳杆菌后,分别经过液态与固态发酵,缬氨酸含量显著升高 ($P > 0.05$),且有较高亮氨酸水平^[42],此类支链氨基酸可以调节机体胰岛素的分泌和胰岛素敏感性,并调控组织中葡萄糖转运载体的表达,进而增强骨骼肌对葡萄糖的吸收,预防糖尿病及肌肉减少症的发生^[43]。微生物发酵过程中提高了蛋白质的水解程度,释放大量小分子氨基酸、有机酸和芳香族化合物,尤其是生成一些具有抗氧化活性的氨基酸,增强了产品的抗氧化功能特性^[44]。多种杂粮粉与面粉混合物进行酸发酵,可制成富含 γ -氨基丁酸的功能性面包^[45], γ -氨基丁酸是胰腺分泌胰岛素的强促剂,并能有效预防糖尿病,具有诱导降压、利尿和镇静作用,对人体健康有益^[46]。

3 促进降糖活性成分的生成及转化

食品原料在生物发酵过程中,其大分子物质经过酶的水解和加工,结构发生分解或转化,通过一系列生物化学反应可形成新的化合物,呈现出更强的降糖活性,从而增强发酵食品的降血糖效果,如葡萄糖的减少和功能多糖的转化、血糖调节活性肽的生成、有机酸和短链脂肪酸的生成等。

3.1 糖类物质

食品中可水解淀粉等糖类物质进入人体后被淀粉酶

水解成葡萄糖是人体血糖的直接来源。功能性多糖是一类以糖苷键连接在一起的高分子多聚化合物,具有调节肠道菌群的作用^[47]。有研究^[48]表明,在藜麦面团中接种产胞外多糖的 LAB 发酵制作酸面团,与自然发酵酸面团比较,通过转化具有较低的葡萄糖含量,对降低食品中可利用糖具有重要意义。利用乳酸菌发酵麸皮制品,促进了糖苷键降解,诱导麦麸细胞壁结构分解,增加 O—H 和 C—O 基团释放,提高了糖醛酸含量,同时乳酸菌繁殖会消耗更多的葡萄糖和半乳糖,降低单糖的含量^[49],有利于低血糖生成指数食品的研发。燕麦、大麦和黑小麦等很多杂粮中含有丰富的 β -葡聚糖,具有较强的吸水性和黏附性,进入人体后能够减缓葡萄糖的吸收,抑制糖异升,稳定血糖水平^[50]。

3.2 血糖调节活性肽

蛋白质分子大都呈球形颗粒状,很多发酵食品制作过程中,微生物大量繁殖代谢产生的蛋白酶会水解底物蛋白,破坏发酵基质中蛋白的球状结构,使大量的水被结合到蛋白表面生成聚集体,形成小分子活性肽^[51]。血糖调节活性肽是一类作用于酶活性位点和/或催化位点的氨基酸结合,阻止酶与底物相互作用减少葡萄糖的产生或通过二肽基肽酶抑制活性诱导餐后胰岛素分泌、抑制葡萄糖转运蛋白抑制剂发挥降血糖作用^[52]。研究^[53-54]表明,大豆、鹰嘴豆、燕麦、藜麦等杂粮中均检测出了具有抑制 α -葡萄糖苷酶、 α -淀粉酶、二肽基十肽酶 IV 活性的肽段。利用植物乳杆菌和酿酒酵母菌发酵面团,检测到活性肽含量增加,表现出对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的抑制活性增强^[55]。总之,利用 LAB 发酵豆类制品可导致蛋白质、碳水化合物分子结构改变,转化出不同种类、数量的游离氨基酸和生物活性肽,提高大豆蛋白消化性,同时减缓蛋白质在胃肠道的消化分解,降低糖异生这一过程产生的葡萄糖,对平衡人体血糖水平具有一定调节作用。

3.3 短链脂肪酸

乳酸、乙酸、丙酮酸等有机酸是乳酸菌发酵的重要代

谢产物,具有降低肠道pH值、维持肠道菌群稳态的作用,一定程度上缓解2型糖尿病的胰岛素抵抗^[56]。利用微生物发酵制作食品,随着生物发酵过程的进行,大大提高了面包中戊二酸、丁酸类、乳酸、乙酸、延胡索酸等有机酸的含量,具有增强肝脏保护作用,维持糖代谢途径的动态平衡利于维持血糖平衡^[57]。短链脂肪酸提供含碳前体分子,并通过触发信号通路调节细胞代谢,调控胃肠道微生物群,降低炎症反应及调节血糖水平。由杂粮制作的面包短链脂肪酸的转化效率更高,利用植物乳杆菌发酵麸皮喂养8周龄小鼠,小鼠粪便中乙酸、丙酸、丁酸、戊酸方面均提升^[58],乙酸和丙酸的积累有助于调节肝脏和胆固醇代谢,丁酸在维持上皮细胞完整性、抑制炎症和影响结肠细胞基因的表达中起着重要作用^[59],利于避免因炎症因子导致的胰岛素抵抗和血糖升高。乳酸菌主要是通过增加总短链脂肪酸含量来逆转高脂膳食诱导的肠道生态失调,从而降低炎症因子含量,改善血糖水平^[60]。

4 调节与血糖密切相关的酶类活性

酶是一类生物催化剂,参与生物新陈代谢、营养和能量转换等许多催化反应过程,确保细胞内错综复杂的物质代谢过程有条不紊地进行。 α -葡萄糖苷酶可增强小肠对葡萄糖的吸收能力,进而提升机体的血糖和血脂水平,因此,通过抑制淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性可以实现降低血糖和血脂的目标,同时降低胰蛋白酶抑制率,有利于人体更好地吸收营养成分和矿物质^[61]。研究^[62]表明,单菌发酵和混合乳酸菌发酵均能提高鹰嘴豆乳的 α -葡萄糖苷酶抑制率,其中 *L. acidophilus* ATCC 4356 发酵 24 h 时 α -葡萄糖苷酶抑制率最强,经植物乳杆菌发酵的鹰嘴豆粉水提液,其总抗氧化活性、 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性均显著提高。酸面团制作的面包中可吸收的葡萄糖较少,体外 α -淀粉酶抑制作用显著,对调节血糖稳态有积极作用,同时酸面团具有抑制血管紧张素转化酶活性的能力,减少血管紧张素I转化为血管紧张素II,降低醛固酮分泌、钠重吸收,合理调节血压^[63]。豆类因含有较多的植酸和单宁,易与蛋白质和矿物质等营养成分形成结合态,会抑制胰蛋白酶活性,不利于人体利用和吸收营养物质;添加乳酸菌后,大豆面包的胰蛋白酶抑制率降低,起到保护机体细胞和器官,抑制感染和炎症发生的作用,对糖尿病的治疗具有积极作用,因为炎症不仅能够诱发糖尿病,还能加速糖尿病的恶化^[64]。

5 结论

杂粮含有膳食纤维、多糖、酚类化合物等具有调节血糖作用的功能物质,是研发糖尿病人群食品的重要原料。利用乳酸菌协同酵母菌发酵制作杂粮面包产品,不仅改善了杂粮面包的感官品质,还增强了产品的降血糖功能特性。乳酸菌协同酵母菌发酵食品是一个复杂的生物过

程,包含微生物细胞的生长、代谢和一系列的生物化学反应,以及食品组分间的相互作用。因此,乳酸菌、酵母菌发酵杂粮面包产品降血糖功能特性的增强,不只是由于某一种成分的变化,而是在复杂的变化过程中多种具有血糖调节作用因素共同发挥作用的结果。在后续研究中,应充分利用蛋白质组学、基因组学和微生物组学等多组学技术,进一步挖掘乳酸菌和酵母菌代谢途径,探究食品组分间发生的化学作用,明确功能活性成分产生条件和变化规律,利用工艺优化最大程度保留功能物质,对探索调节血糖效果机理、杂粮面包的研发和推广具有重要意义。

参考文献

- [1] 何国卿,李庆龙,李江其,等.全谷物杂粮米及其发展前景初探[J].农业机械,2012(6): 26-29.
HE G Q, LI Q L, LI J Q, et al. Preliminary exploration of whole grain and miscellaneous rice and its development prospects[J]. Agricultural Machinery, 2012(6): 26-29.
- [2] 王益杰,程烨,胡俊杰,等.苦荞碱性提取物对2型糖尿病模型大鼠降糖作用研究[J].中国药师,2019,22(5): 805-808.
WANG Y J, CHENG Y, HU J J, et al. Effect of alkaline extracts from *Fagopyrum tataricum* (L.) gaertn in type 2 diabetes mellitus rats[J]. China Pharmacist, 2019, 22(5): 805-808.
- [3] GARCIA-CORDERO J M, MARTINEZ-PALMA N Y, MADRIGAL-BUJADAR E, et al. Phaseolin, a protein from the seed of *Phaseolus vulgaris*, has antioxidant, antigenotoxic, and chemopreventive properties[J]. Nutrients, 2021, 13(6): 1 750.
- [4] 鲜瑶,宋戈,廖侠,等.大麦苗粉调节血糖血脂的临床研究[J].营养学报,2017,39(3): 307-309.
XIAN Y, SONG G, LIAO X, et al. A clinical trial on the regulation of blood glucose and lipids by barley leaves powder [J]. Journal of Nutrition, 2017, 39(3): 307-309.
- [5] LEE J H, LEE S Y, KIM B, et al. Barley sprout extract containing policosanols and polyphenols regulate AMPK, SREBP2 and ACAT2 activity and cholesterol and glucose metabolism in vitro and in vivo[J]. Food Research International, 2015, 72: 174-183.
- [6] 陈忠琴.黑豆中营养因子与抗营养因子及其相关机制的研究[D].天津:天津大学,2020.
CHEN Z Q. Study on the nutritional and antinutritional factors of black soybeans (*Glycine max* (L.) Merr.) and the related mechanisms[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [7] 陈翼张.大豆异黄酮通过调节肠道菌群预防糖尿病所致骨质疏松症[D].太原:山西医科大学,2022: 5-14.
CHEN Y Z. Effects of Soybean Isoflavones on bone health and gas-tro-intestinal microbiota in type 2 diabetes mellitus mice [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2022: 5-14.
- [8] ZHU Y Y, DONG L E, HUANG L, et al. Effects of oat

- β -glucan, oat resistant starch, and the whole oat flour on insulin resistance, inflammation, and gut microbiota in high-fat-diet-induced type 2 diabetic rats[J]. *Journal of Functional Foods*, 2020, 69: 103939.
- [9] 刘博. 燕麦葡聚糖抗炎与降脂功能的评估及其分子机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017: 28-42.
- LIU B. The anti-inflammation and anti-hyperlipidemia effects and the potential molecular mechanism of oat-beta-glucan[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017: 28-42.
- [10] TANG Y, ZHANG B, LI X H, et al. Bound phenolics of quinoa seeds released by acid, alkaline, and enzymatic treatments and their antioxidant and alpha-glucosidase and pancreatic lipase inhibitory effects[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(8): 1 712-1 719.
- [11] 李林燕. 大麦膳食纤维降血糖作用机制及其物质基础研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 47-87.
- LI L Y. Study on the hypoglycemic mechanism and the material basis of barley dietary fiber[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 46-87.
- [12] 张茁, 孙文, 刘铜华, 等. 山柰酚对 2 型糖尿病小鼠骨骼肌 PI3K-AKT-GLUT4 信号通路的影响[J]. *世界科学技术: 中医药现代化*, 2016, 18(7): 1 139-1 143.
- ZHANG Z, SUN W, LIU T H, et al. Effects of kaempferol on PI3K-AKT-GLUT4 signaling pathway in skeletal muscle of type 2 diabetes mice[J]. *World Science and Technology: Modernization of Traditional Chinese Medicine*, 2016, 18(7): 1 139-1 143.
- [13] JENSEN G S, WU X L, PATTERSON K M, et al. In vitro and in vivo antioxidant and anti-inflammatory capacities of an antioxidant-rich fruit and berry juice blend. Results of a pilot and randomized, double-blinded, placebo-controlled, crossover study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56 (18): 8 326-8 333.
- [14] 张宾乐. 红豆酸面团乳酸菌发酵及其提高冷冻面团烘焙品质机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 17-20.
- ZHANG B L. Red bean sourdough fermented by lactic acid bacteria and its mechanism studies on improving frozen dough baking properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 17-20.
- [15] GRAA C, EDELMANN M, RAYMUNDO A, et al. Yoghurt as a starter in sourdough fermentation to improve the technological and functional properties of sourdough-wheat bread[J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 88: 104877.
- [16] 邹奇波, 程新, 陈诚, 等. 混菌发酵酸面团对全麦面包风味与烘焙特性的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 32-39.
- ZOU Q B, CHENG X, CHEN C, et al. Effects on flavor and baking characteristics of whole wheat bread by fermented sourdough with the mixed culture[J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 32-39.
- [17] ADESULU-DAHUNSI A T, DAHUNSI S O, OLAYANJU A. Synergistic microbial interactions between lactic acid bacteria and yeasts during production of Nigerian indigenous fermented foods and beverages[J]. *Food Control*, 2020, 110: 106963.
- [18] 黄璟, 梁丽婷, OMEDI J O, 等. 戊糖片球菌发酵猕猴桃对面包香气与烘焙特性的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(1): 3-14.
- HUANG J, LIANG L T, OMEDI J O, et al. Aroma and baking characteristics of kiwifruit and its bread fermented by *Pediococcus pentosaceus*[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(1): 3-14.
- [19] LISZKOWSKA W, BERLOWSKA J. Yeast fermentation at low temperatures: adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds[J]. *Molecules*, 2021, 26(4): 1 035.
- [20] 李博, 顾悦, 燕彩玲, 等. 高产信号分子 AI-2 乳酸菌的筛选及鉴定[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 185-188.
- LI B, GU Y, YAN C L, et al. Screening and identification of AI-2 high-producing lactic acid bacteria[J]. *Food Industry Technology*, 2016, 37(2): 185-188.
- [21] 马春敏, 付佳宁, 吴巧艳, 等. 乳酸菌发酵在谷物产品中的应用及研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(22): 29-38.
- MA C M, FU J N, WU Q Y, et al. Application and research progress of lactic acid bacteria fermentation in cereal products [J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2023, 14(22): 29-38.
- [22] 刘璐. 高产果聚糖运动发酵单胞菌选育及其在面包烘焙中的应用[D]. 成都: 成都大学, 2023: 30-35.
- LIU L. Breeding of high levan-producing *Zymomonas mobilis* and application in bread baking[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 30-35.
- [23] 曹伟超, 罗昆, 程新, 等. 高产植酸酶乳酸菌及其黑豆酸面团发酵低植酸营养面包研究[J]. *食品与机械*, 2021, 37(2): 186-193.
- CAO W C, LUO K, CHENG X, et al. Studies on screening of high-yield phytase-producing lactic acid bacteria and its low-phytate nutritional breads through black bean sourdough fermentation[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(2): 186-193.
- [24] MOJICA L, ELVIRA G D M, GRANADOS S, et al. Evaluation of the hypoglycemic potential of a black bean hydrolyzed protein isolate and its pure peptides using in silico, in vitro and in vivo approaches[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 31: 274-286.
- [25] 张思佳, 张薇, 苏晓琴, 等. 乳杆菌发酵对荞麦面包抗氧化及烘焙特性影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(19): 49-53.
- ZHANG S J, ZHANG W, SU X Q, et al. Effect of lactic acid bacteria fermentation on the antioxidant and baking properties of buckwheat bread[J]. *Food Industry Technology*, 2015, 36 (19): 49-53.
- [26] PEREZ-ALVARADO O, ZEPEDA-HERNANDEZ A,

- GARCIA-AMEZQUITA L E, et al. Role of lactic acid bacteria and yeasts in sourdough fermentation during breadmaking: evaluation of postbiotic-like components and health benefits [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 969460.
- [27] 陈斌, 刘洁, 詹敏敏, 等. 黄酮类化合物与肠道菌群互作研究进展[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(6): 369-381.
- CHEN B, LIU J, ZHAN M M, et al. Research progress on the interaction between flavonoids and gut microbiota[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2022, 22(6): 369-381.
- [28] TIAN W F, CHEN G J, TILLEY M, et al. Changes in phenolic profiles and antioxidant activities during the whole wheat bread-making process[J]. *Food Chemistry*, 2021, 345: 128851.
- [29] 赵瑜婕. 植物乳杆菌释放杂粮中多酚及其应用研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2021: 30-38.
- ZHAO Y J. Study on the release of polyphenols from coarse grains by *Lactobacillus plantarum* and its application[D]. Wuhan: Wuhan Light Industry University, 2021: 30-38.
- [30] JUAN M Y, CHOU C C. Enhancement of antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content of black soybeans by solid state fermentation with *Bacillus subtilis* BCRC 14715[J]. *Food Microbiology*, 2010, 27(5): 586-591.
- [31] YANG H J, KIM H J, KIM M J, et al. Standardized chungkookjang, short-term fermented soybeans with *Bacillus lichemiformis*, improves glucose homeostasis as much as traditionally made chungkookjang in diabetic rats[J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 2013, 52(1): 49-57.
- [32] ACOSTA-ESTRADA B A, GUTIERREZ-URIBE J A, SERNA-SALDIVAR S O. Bound phenolics in foods, a review [J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 46-55.
- [33] LIMON R I, PENAS E, TORINO M I, et al. Fermentation enhances the content of bioactive compounds in kidney bean extracts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 343-352.
- [34] 程新, 黄璟, JACOB O O, 等. 湿热处理和混菌发酵对白芸豆面包淀粉消化率的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(13): 59-65.
- CHENG X, HUANG J, JACOB O O, et al. Effects of heat-moisture treatment and mixed culture fermentation on starch digestibility of white kidney bean bread[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(13): 59-65.
- [35] LI S L, JIN Z Y, HU D J, et al. Effect of solid-state fermentation with *Lactobacillus casei* on the nutritional value, isoflavones, phenolic acids and antioxidant activity of whole soybean flour[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 125: 109264.
- [36] 王立东, 李晓强, 李振江, 等. 杂粮中活性组分对血糖调控作用的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(12): 17-21.
- WANG L D, LI X Q, LI Z J, et al. Research progress on the regulation of blood glucose by active components in coarse cereals[J]. *Grain and Oils*, 2021, 34(12): 17-21.
- [37] YU C Y, FANG Y, HUANG W W, et al. Effect of surfactants on the production and biofunction of *Tremella fuciformis* polysaccharide through submerged fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 163: 113602.
- [38] CHU J X, ZHAO H Z, LU Z X, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto*[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 79-86.
- [39] 曹伟超, 张宾乐, OMEDI J O, 等. 功能性乳酸菌发酵黑豆麦麸酸面团面包的营养及烘焙特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 142-150.
- CAO W C, ZANG B L, OMEDI J O, et al. Nutritional and baking characteristics of black bean-wheat bran sourdough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 142-150.
- [40] 杨晨夕, 张珮珮, 徐阳, 等. 发酵改性膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(4): 342-353.
- YANG C X, ZHANG P P, XU Y, et al. Physiological function of fermented modified dietary fiber and its application in food [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(4): 342-353.
- [41] HE T, ZHANG X, ZHAO L, et al. Insoluble dietary fiber from wheat bran retards starch digestion by reducing the activity of alpha-amylase[J]. *Food Chemistry*, 2023, 426: 136624.
- [42] BARTKIENE E, BARTKEVICS V, RUSKO J, et al. The effect of *Pediococcus acidilactici* and *Lactobacillus sakei* on biogenic amines formation and free amino acid profile in different lupin during fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2016, 74: 40-47.
- [43] HORIUCHI M, TAKEDA T, TAKANASHI H, et al. Branched-chain amino acid supplementation restores reduced insulinotropic activity of a low-protein diet through the vagus nerve in rats[J]. *Nutrition & Metabolism*, 2017, 14(1): 59.
- [44] COLOSIMO R, GABRIELE M, CIFELLI M, et al. The effect of sourdough fermentation on *Triticum dicoccum* from Garfagnana: ¹H NMR characterization and analysis of the antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2020, 305: 125510.
- [45] CODA R, RIZZELLO C G, GOBBETTI M. Use of sourdough fermentation and pseudo-cereals and leguminous flours for the making of a functional bread enriched of γ -aminobutyric acid (GABA) [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010, 137(2/3): 236-245.
- [46] HAGIWARA H, SEKI T, ARIGA T. The effect of pre-germinated brown rice intake on blood glucose and PAI-1 levels in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. *Food & Nutrition Science Notes*, 2004, 68(2): 444-447.
- [47] 付王威. 白扁豆多糖对II型糖尿病大鼠的降血糖作用及其机制初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2021: 32-47.
- FU W W. Hypoglycemic effect and mechanism of White hyacinth bean polysaccharide in type II diabetic rats[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021: 32-47.

- [48] 张娅. 产胞外多糖乳酸菌发酵藜麦酸面团对面包品质的影响及面包制作配方的优化[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021: 18-23.
- ZHANG Y. Effect of quinoa sourdough fermented by extracellular polysaccharide-producing lactic acid bacteria on bread quality and optimization of bread making recipe[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2021: 18-23.
- [49] 陈秋燕. 益生菌发酵前后麦麸多糖的结构特征及其对斑马鱼抗氧化功能和肠道健康的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022: 12-17.
- CHEN Q Y. Research on characterization of wheat bran polysaccharides before and after probiotic fermentation and its effects on antioxidant function and intestinal health of zebrafish [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022: 12-17.
- [50] 谭婉碧, 王琴飞, 余厚美, 等. 植物源功能活性多糖的提取及其研究进展[J]. 热带农业科学, 2022, 42(7): 90-98.
- TAN W B, WANG Q F, YU H M, et al. Research progress, extraction and functional activity of plant polysaccharides[J]. Tropical Agricultural Science, 2022, 42(7): 90-98.
- [51] 李玉蝶, 李玟君, 汪海燕, 等. 戊糖乳杆菌发酵对花生不同蛋白组分结构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 74-79.
- LI Y D, LI W J, WANG H Y, et al. Effect of *Lactiplantibacillus pentosus* fermentation on the structure of peanut proteins[J]. Food Science, 2023, 44(22): 74-79.
- [52] WANG F, ZHANG Y Y, YU T T, et al. Oat globulin peptides regulate antidiabetic drug targets and glucose transporters in Caco-2 cells[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 42: 12-20.
- [53] QUINTERO-SOTO M F, CHAVEZ-ONTIVEROS J, GARZON-TIZNADO J A, et al. Characterization of peptides with antioxidant activity and antidiabetic potential obtained from chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein hydrolyzates[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(7): 2 962-2 977.
- [54] CHEN X, HE X M, SUN J, et al. Phytochemical composition, antioxidant activity, α -glucosidase and acetylcholinesterase inhibitory activity of quinoa extract and its fractions[J]. Molecules, 2022, 27(8): 2 420.
- [55] NISSEN L, SAMAEI S P, BABINI E, et al. Gluten free sourdough bread enriched with cricket flour for protein fortification: antioxidant improvement and volatilome characterization[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127410.
- [56] 沈玖君. 4种食源性植物配方对糖尿病小鼠的降糖效果及作用机制的初探[D]. 重庆: 西南大学, 2018: 44-51.
- SHEN J J. Preliminary discussion of hypoglycemic effect and its mechanism of four food-derived plant formulas in diabetic mice[D]. Chongqing: Southwest University, 2018: 44-51.
- [57] 谭浩东. 发酵乳杆菌 M4 在营养强化型酸面团面包中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022: 38-40.
- TAN H D. Application of *Limosilactobacillus fermentum* M4 in fortified sourdough bread[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022: 38-40.
- [58] 刘倩倩. 微生物发酵对麦麸化学组分及其功能特性的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 27-30.
- LIU Q Q. Study of microbial fermentation on chemical components of wheat bran and its functional properties[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 27-30.
- [59] ZHOU D T, MA Z, HU X Z. Isolated pea resistant starch substrates with different structural features modulate the production of short-chain fatty acids and metabolism of microbiota in anaerobic fermentation in vitro[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(18): 5 392-5 404.
- [60] YAN J, XUE Q Y, CHEN W Y, et al. Probiotic-fermented rice buckwheat alleviates high-fat diet-induced hyperlipidemia in mice by suppressing lipid accumulation and modulating gut microbiota[J]. Food Research International, 2022, 155: 111125.
- [61] CARDULLO N, MUCCILLI V, PULVIRENTI L, et al. C-glucosidic ellagitannins and galloylated glucoses as potential functional food ingredients with anti-diabetic properties: a study of α -glucosidase and α -amylase inhibition [J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126099.
- [62] 徐超. 乳酸菌发酵对鹰嘴豆乳营养成分及降血糖活性的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 16-22.
- XU C. Effects of Lactic acid bacteria fermentation on nutrient composition and hypoglycemic activity of chickpea milk[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 16-22.
- [63] DIOWKSZ A, MALIK A, JASNIEWSKA A, et al. The inhibition of amylase and ACE enzyme and the reduction of immunoreactivity of sourdough bread[J]. Foods, 2020, 9 (5): 656.
- [64] 黄凯, 郑田要, 李聚海, 等. 大豆中植酸和胰蛋白酶抑制剂的抗营养和抗癌效应[J]. 中国油脂, 2008, 33(12): 28-31.
- HUANG K, ZHENG T Y, LI J H, et al. Anti nutritional and anti-carcinogenic effects of phytic acid and trypsin inhibitor in soybean[J]. Chinese Oil and Fat, 2008, 33(12): 28-31.