

安江, 刘敬科, 生庆海, 等. 乳酸菌发酵杂粮面包品质改善和降糖机理研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 1-10. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050176

AN Jiang, LIU Jingke, SHENG Qinghai, et al. Research Progress on the Quality Improvement and Hypoglycemic Mechanism of Multi-grain Bread Fermented by Lactic Acid Bacteria[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 1-10. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050176

· 青年编委专栏—益生菌与抗菌肽 (客座主编: 孙志宏、付才力) ·

乳酸菌发酵杂粮面包品质改善和降糖机理研究进展

安江^{1,2}, 刘敬科², 生庆海¹, 赵巍², 李朋亮², 贾艳菊¹, 张爱霞^{2,*}, 刘晶^{1,*}

(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: 杂粮面包因其营养丰富, 血糖生成指数较低受到人们的欢迎。由于杂粮的添加降低了面包的品质, 通过乳酸菌发酵不仅使杂粮面包的品质得到提高, 而且增强了杂粮面包的血糖调节功效。本文在阐述乳酸菌和酵母菌共生关系基础上, 综述了乳酸菌发酵对杂粮面包的比容、感官品质、营养、风味和贮藏稳定性等品质的改善效果, 通过分析乳酸菌代谢与杂粮中活性成分的互作关系, 探讨乳酸菌发酵杂粮面包的降糖机理, 包括调节肠道菌群, 增强机体免疫; 提高抗氧化能力, 促进胰岛素分泌; 抑制消化酶活性, 影响糖代谢通路三方面。本研究的目的是为杂粮面包产业的快速发展和糖尿病患者食品的研发提供参考。

关键词: 杂粮, 乳酸菌, 面包, 品质, 降糖机理

中图分类号: TS213.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)24-0001-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022050176



本文网刊:

Research Progress on the Quality Improvement and Hypoglycemic Mechanism of Multi-grain Bread Fermented by Lactic Acid Bacteria

AN Jiang^{1,2}, LIU Jingke², SHENG Qinghai¹, ZHAO Wei², LI Pengliang², JIA Yanju¹, ZHANG Aixia^{2,*}, LIU Jing^{1,*}

(1. College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Economics and Trade, Shijiazhuang 050061, China;

2. Institute of Biotechnology and Food Science, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Multi-grain bread is popular because of its rich nutrition and low glycemic index. The mouthfeel of bread is not ideal for the addition of multi-grains, lactic acid bacteria fermentation not only improved the quality of multi-grain bread, but also enhanced its blood glucose regulation effect. On the basis of the symbiotic relationship between lactic acid bacteria and yeasts, this paper reviews the improvement effect of lactic acid bacteria fermentation on the specific volume, sensory quality, nutrition, flavor and storage stability of multi-grain bread. By analyzing the interaction between the metabolism of lactic acid bacteria and the active components in cereals, the hypoglycemic mechanism of lactic acid bacteria fermentation of multi-grain bread reducing blood sugar in cereals bread fermented by lactic acid bacteria is discussed, including three aspects: Regulating intestinal flora and enhancing immunity, improving antioxidant capacity and promoting insulin secretion, inhibiting digestive enzyme activity and affecting glucose metabolism pathways. This study aims to

收稿日期: 2022-05-17

基金项目: 河北省农林科学院科技创新专项课题资助 (2022KJCXZX-SSS-1); 现代农业产业技术体系建设专项资金资助 (CARS-06-14.5-A29); 2021 年度引进留学人员资助项目 (C20210360); 河北省重点研发计划项目 (21327112D)。

作者简介: 安江 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 健康食品的研究与开发, E-mail: 2108919621@qq.com。

*** 通信作者:** 张爱霞 (1977-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品营养和食品加工, E-mail: zhangaixia1977@126.com。

刘晶 (1974-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 健康食品的研究与开发, E-mail: 595857708@qq.com。

provide a reference for the rapid development of the multi-grain bread industry and the development of foods for diabetic patients.

Key words: multi-grain; lactic acid bacteria; bread; quality; hypoglycemic mechanism

杂粮面包是以小麦粉添加一种或几种杂粮(燕麦、小米、荞麦、红豆等)制作面包的统称。与普通小麦面包相比,杂粮面包含有更加丰富的矿物质、维生素、膳食纤维、抗性淀粉和多酚等营养成分^[1-2],对人体健康大有裨益,尤其很多杂粮具有较低的血糖生成指数^[3],非常适合血糖控制人群食用。但是,由于杂粮的加工适应性差^[4-5],在一定程度上阻碍了杂粮面包产业的快速发展,因此探索一种切实有效的杂粮面包品质改良技术成为了研究者们关注的焦点。

乳酸菌是一类具有保护肠道健康、提高机体免疫和改善慢性疾病功能的有益微生物^[6]。乳酸菌与酵母菌间存在共生关系,将乳酸菌发酵技术应用于杂粮面包,能大大提高杂粮面包的品质,增强杂粮面包的营养和功能特性。研究证实,添加乳酸菌发酵提高了荞麦面包、鹰嘴豆面包的比容和柔软度,改善杂粮面包的烘焙特性和感官接受程度^[7-8]。乳酸菌发酵增加了黑豆面包总膳食纤维和水溶性膳食纤维含量^[9],提高杂粮面团的抗氧化能力和氨基酸产量^[10],并有效抑制霉菌生长提高杂粮面包的贮藏稳定性^[11]。而且,添加乳酸菌发酵的杂粮面包血糖调节能力进一步增强^[12-13],研究者们对乳酸菌代谢与杂粮互作调节血糖间的关系也展开了一系列研究。本文首先对乳酸菌和酵母菌的代谢关系进行梳理,分析乳酸菌发酵对杂粮面包品质的改善效果,通过探索杂粮发酵过程中乳酸菌代谢与血糖调节因子间的关系,进一步明确乳酸菌发酵杂粮面包降糖机理,以期杂粮面包产业的发展 and 糖尿病患者食品的研究提供参考。

1 乳酸菌发酵酸面团加工技术研究

1.1 乳酸菌发酵酸面团中的主要微生物

乳酸菌发酵酸面团是一个复杂的微生物体系,发酵过程中乳酸菌和酵母菌占主导地位。目前,已从乳酸菌发酵酸面团中分离出来多种乳酸菌,主要是乳杆菌属和片球菌属,其中短乳杆菌、发酵乳杆菌、干酪乳杆菌、植物乳杆菌和旧金山乳杆菌常用于杂粮面包的发酵^[14]。乳酸菌的发酵类型是影响酸面团品质的一个重要因素,不同发酵类型的乳酸菌发酵过程中产气量不同,从而影响面团的体积。同型乳酸发酵是通过糖酵解途径将葡萄糖转化为乳酸,整个发酵过程不产气,形成的酸面团体积变化较小,常见的乳酸菌有乳杆菌属、肠球菌属和链球菌属,典型菌种主要有德氏乳杆菌和嗜酸乳杆菌;异型乳酸发酵是通过戊糖磷酸途径将葡萄糖糖转化为乳酸、二氧化碳和乙酸,形成的酸面团体积膨大,较为柔软,常见的乳酸菌有乳杆菌属、明串珠菌属和魏斯氏菌属,典型菌种主要有发酵乳杆菌和短乳杆菌;兼性异型乳酸发酵是同

时进行糖酵解途径和戊糖磷酸途径,产生的二氧化碳增大了酸面团的体积,常见的乳酸菌有乳杆菌属和片球菌属,典型菌种主要有植物乳杆菌和干酪乳杆菌^[15]。酸面团主要是通过异型发酵的乳杆菌进行发酵^[15]。

酵母菌也是乳酸菌发酵酸面团中的主要微生物。酵母菌利用面团中丰富的糖类产生二氧化碳,保持面团的松软,同时产生多种生物活性物质(如肽、氨基酸、维生素和多酚)、挥发性和非挥发性化合物,赋予面团营养与风味^[16]。面团中乳酸菌利用糖类产生有机酸等物质,为酵母菌生长繁殖提供了适宜的环境,酵母菌数量增加,产气量增大,同时乳酸菌的酸化作用改善了面团的柔韧性,增加了面团持气量,最终面团体积膨大,风味物质增加,改善了产品的质地、香味和滋味^[17-18]。研究发现,酵母菌种类繁多,分布最广的酵母菌种类是酿酒酵母、少孢哈萨克斯坦酵母、库德里阿兹威毕赤酵母和德尔布有孢圆酵母,其中酿酒酵母是最为常见的酵母菌种类,具有良好的面团发酵性能^[16]。

1.2 乳酸菌和酵母菌的互作机理

乳酸菌和酵母菌的相互作用会影响面团的酸化、风味和贮藏能力。了解乳酸菌和酵母菌间的代谢关系,不仅为面团和杂粮面包的品质改善提供理论基础,还为食品工业开发新的微生物发酵剂提供新思路。

面团发酵过程中乳酸菌和酵母菌间的代谢关系主要是共生关系。酵母菌将二糖水解为葡萄糖,促进乳酸菌的生长;乳酸菌利用葡萄糖产生有机酸等物质,能够给酵母菌提供适宜的生长环境^[17]。酸面团发酵过程中,乳酸和乙酸的含量有所提高,这与酵母菌和乳酸菌相互利用代谢产物有关。酵母菌发酵产生大量的氨基酸,能够作为乳酸菌的代谢底物,同时诱导乳酸菌利用自身的蛋白酶和肽酶水解蛋白质产生氨基酸,增加风味物质^[18]。乳酸菌与酵母菌相互作用对菌株的繁殖和代谢均有积极作用,通过影响菌株的碳水化合物的运输、能量代谢、半乳糖代谢和氨基酸代谢等机制增加代谢产物的含量^[19]。比如酵母菌与植物乳杆菌互作可以生成苯乳酸,通过添加酵母液,苯乳酸生物合成底物浓度增加,促进乳酸菌的生长,提高苯乳酸的合成效率^[20]。酸面团中乳酸菌与酵母菌间不会产生消极影响,而酵母菌的生长能够抑制面粉中自然存在的微生物生长,减缓 pH 下降速度,发酵 24 h,接种酿酒酵母的酸面团 pH 高于未添加组^[21]。乳酸菌和酵母菌的共生关系有利于彼此的生长繁殖,共同发酵产生的有机酸和氨基酸等,丰富了面团的营养风味,减轻了面团的霉变程度。

1.3 乳酸菌发酵酸面团制备技术

通过自然发酵法制作酸面团是一种古老的食物加工技术,主要的微生物包括乳酸菌和酵母菌。酸面团历史悠久,应用范围广泛,在国外主要用于面包的发酵,制作酸面包;在我国酸面团又称为“老面”或“老酵头”等,主要用于馒头和包子的发酵,如今也用来制作面包^[14]。乳酸菌发酵酸面团制备技术有四种,表 1 是四种制备技术的接种方式、发酵方式、菌株类型、发酵条件、面团状态、使用方法以及优缺点。人工接种的菌株类型为优势菌株,菌株代谢产物清晰,便于生产和运输;自然接种、人工和自然接种的菌株类型不确定,风味物质较多,但产品存在安全隐患。

2 乳酸菌发酵对杂粮面包品质的改善

杂粮普遍缺乏面筋蛋白,因此制作的面包存在体积小、质构性能差、口感不佳等问题,乳酸菌发酵对杂粮面包品质改善方面发挥着极其重要的作用。下面主要从乳酸菌发酵对改善杂粮面包比容、感官品质、营养、风味和贮藏稳定性方面进行阐述。

2.1 乳酸菌发酵提高杂粮面包的比容

比容是评价杂粮面包品质的重要指标,相同质量的杂粮面包比容越大柔软度越高。研究发现,杂粮普遍缺乏面筋蛋白,添加杂粮制作的面包比容降低,以大豆、燕麦等为原料配制的杂粮混合粉代替 5%、10%、15% 和 20% 小麦粉研制的杂粮面包,随着混合粉添加量增加,面包比容逐渐降低^[28],添加乳酸菌发酵后杂粮面包的比容增加,杂粮面包更加柔软^[29]。研究表明,添加适宜含量的乳酸菌会提高杂粮面包的比容,添加过量乳酸菌会抑制酵母菌的生长,不利于面团发酵,在紫薯面包中酵母菌和乳酸菌添加量比为 1:2 时,紫薯面团柔软度较佳,紫薯面包比容最大^[30]。不同种类乳酸菌对杂粮面包比容的改善效果不同,食蜜魏斯氏菌和融合魏斯氏菌发酵荞麦面包,比容分别增加 10.60% 和 2.62%,食蜜魏斯氏菌产胞外多糖含量较高,具有较好改善荞麦酸面包品质的效果^[7];添加植物乳杆菌发酵的杂粮面包比容增加 15.20%,结构更柔软,口感更佳^[31]。分析添加乳酸菌提高杂粮面包比容的原因,可能为乳酸菌发酵产生有机酸激活杂粮面团中的谷物内源性蛋白酶,使面筋蛋白的三维网状结构受到破坏,杂粮面团的柔软度得到

提高^[31];酸性环境还提高酵母菌的产气能力,增加杂粮面团的体积;乳酸菌发酵增加的亲水基团与面筋蛋白形成致密的网络结构,加强对结合水的束缚能力,提高杂粮面团的弹性和韧性,改善杂粮面团的持气能力^[32];乳酸菌发酵产物胞外多糖与蛋白质形成交联作用,增强杂粮面团的稳定性和储气能力^[33],改善杂粮面包比容。因此,乳酸菌发酵可以增强酵母菌的产气能力和杂粮面团的持气能力,改善杂粮面团的柔软度和稳定性,提高杂粮面包的比容。

2.2 乳酸菌发酵改善杂粮面包的感官品质

杂粮面包感官品质主要从外观、色泽、质地和风味口感等方面进行评价。杂粮中含有较高的膳食纤维,在面团中添加杂粮,会降低面团及面筋蛋白的结构,影响产品的感官品质。乳酸菌的添加,降低了杂粮面包的硬度、胶粘性 and 咀嚼性,增大了内聚性和弹性,对杂粮面包的质构有积极影响^[31]。黑豆麦麸面包加入乳酸片球菌和戊糖片球菌后,面包的硬度分别降低 12.51% 和 16.80%,弹性增大,咀嚼性降低^[9],改善了杂粮面包的品质。乳酸菌发酵会改变面团揉混特性和流变特性,从而影响杂粮面包的感官品质。面团经副干酪乳杆菌发酵后,粉质曲线更加稳定,扭矩和形成时间增大,面团的面筋强度和加工特性增强^[34],制作的杂粮面包口感更佳。Clarke 等^[35]测定了酸面团的流变特性,结果表明酸面团的添加不同程度地降低了面团的黏弹性,更容易加工,制作的杂粮面包更柔软。荞麦面包中添加植物乳杆菌和发酵乳杆菌后,改善了产品的色泽、风味和口感,并且发酵乳杆菌对荞麦面包感官品质改善效果更好^[36]。武盟等^[8]利用高产 α -半乳糖苷酶乳酸菌发酵制作的鹰嘴豆面包,外观饱满,香气浓郁,质地更加松软,整体可接受度达到 7.2 分。有学者认为乳酸菌提供的酸性环境改变了面筋蛋白的电荷量,增强了蛋白质分子间的电荷斥力,蛋白质的缠绕度降低,使面团延展性更好,杂粮面包弹性增大,硬度降低,杂粮面包的品质得到改善^[37]。另一个原因是杂粮面团中膳食纤维在酸性环境下溶解度增大,面筋蛋白的机械强度降低,添加的乳酸菌降低了膳食纤维对面筋网络结构造成的破坏,加强面筋网络之间的连接^[38]。乳酸菌发酵可以改变蛋白质的结构,改善膳食纤维对杂粮面团的破坏程

表 1 乳酸菌发酵酸面团制备技术

Table 1 Preparation technology of lactic acid bacteria fermented sourdough

接种方式	发酵方式	菌株类型	发酵条件	面团状态	使用方式	优点	缺点	参考文献
自然接种	自然、连续传代发酵	菌株类型不确定,来源于环境	室温发酵,温度20~30℃,时间6~24 h;	固态	直接使用	发酵时间短,面团制备方便	菌株不确定,存在安全隐患;产品品质不稳定	[22~23]
人工接种	非连续液态发酵	接种目标乳酸菌	适宜温度发酵,高于30℃;时间2~5 d	半流体	直接使用,额外添加酵母菌	菌株代谢产物清晰;生产效率高	发酵时间长	[23~24]
人工接种	非连续液态发酵	接种目标乳酸菌	适宜温度发酵	固态、粉状	直接使用,额外添加酵母菌	菌株代谢产物清晰;贮存、运输方便	发酵时间长,能源消耗大;干燥处理设备成本高	[23~25]
人工和自然接种	混菌、连续传代发酵	菌株类型不确定	适宜温度发酵	固态	直接使用	面团的糯韧性增强;风味物质增多	优势菌株代谢产物不清晰;发酵时间长	[26~27]

度,降低杂粮面包的硬度,提高杂粮面包的弹性,改善了杂粮面包的感官品质。

2.3 乳酸菌发酵对杂粮面包营养的影响

杂粮面包的营养物质组成决定了其价值,营养物质越丰富,营养价值越高。杨紫璇等^[39]在大豆面团中引入植物乳酸菌,显著提高了酸面团中低分子量蛋白肽和总游离氨基酸的含量,苯丙氨酸、赖氨酸等氨基酸含量大幅度上升,提高营养物质的消化吸收率。乳酸片球菌和戊糖片球菌发酵制成的杂粮面包,可溶性膳食纤维含量增加,总游离氨基酸含量增加一倍,显著提高必需氨基酸的含量^[9-10],改善了营养物质组成。研究分析认为,乳酸菌发酵杂粮面团生成的有机酸,激活了面团内的谷物内源性蛋白酶,导致蛋白质解聚,蛋白质的水解、大分子肽链的断裂和游离氨基酸的释放都会提高面团中氨基酸的含量^[39]。谷物中含有较高含量的抗营养因子——植酸,易与蛋白质和矿物质等营养成分形成结合态,不利于人体对营养成分的吸收。研究发现,在黑豆面团中添加具有高植酸酶活性的乳酸菌 L-19,有效降解植酸,降低了杂粮面包的抗营养因子含量,蛋白质和矿物质等营养成分游离态增多,杂粮面包的营养品质得到提升^[40]。同时乳酸菌发酵产生的有机酸也具有降解植酸,降低抗营养因子的效果^[41]。添加乳酸菌发酵形成的酸性环境能够激活杂粮面团的内源植酸酶,催化植酸水解为肌醇和磷酸,形成磷酸盐和非金属螯合化合物,提高了矿物质的利用率,改善了杂粮面包的营养品质^[42]。综上所述,乳酸菌发酵可以降低植酸含量,改善营养物质组成,提高蛋白质和矿物质的利用率,大大提高杂粮面包的营养品质。

2.4 乳酸菌发酵改善杂粮面包的风味

风味是影响烘焙产品感官质量的重要因素,包括产品的气味和滋味两个方面。酵母菌和乳酸菌具有协同作用,乳酸菌发酵将麦芽糖转化为葡萄糖,酵母菌利用葡萄糖生成二氧化碳、乙醇和少量其他化合物,大大改善了杂粮面包的风味特性^[19-20]。鹰嘴豆面包中添加乳酸菌增加了面包中醇类、醛类等风味物质的含量和种类,赋予面包独特的花香、果香和奶香,乳酸菌发酵生成的氨基酸和有机酸改善了面包的甜咸味,降低了豆粉的豆腥味^[8]。周一鸣等^[43]利用乳酸菌发酵杂粮面包,风味物质增加至 49 种,提高了风味化合物的峰面积,使面包具有奶油和坚果香味。青麦仁面包添加酸面团后,增加了 4 种风味物质,酸类物质含量增加了 45.9%,改善了面包的酸味和青草香味^[44]。乳酸菌发酵杂粮面团过程中产生了 3-甲基-1-丁醇、醋酸乙酯和苯乙醇等挥发性物质,提高了杂粮面包的咸味和香味^[45]。有研究表明乳酸菌发酵增加了有机酸^[46]和游离氨基酸^[35]的含量,杂粮面包风味和香味更浓郁。面团中谷氨酸结合钠离子形成的谷氨酸钠和小分子肽链都提高了杂粮面包的咸鲜味^[47]。乳酸菌发酵杂粮面包增加了有机酸和游离氨

基酸的含量,赋予杂粮面包独特的气味和滋味,改善了杂粮面包的风味。

2.5 乳酸菌发酵延长杂粮面包的货架期

杂粮面包的贮藏品质与杂粮面包的老化程度和微生物造成的腐败程度有关,通过杂粮面包的货架期体现。淀粉老化是淀粉在糊化后由无序恢复到有序的过程,降低了杂粮面包的品质,从而缩短杂粮面包的货架期。添加酸面团的杂粮面包在贮藏过程中硬度和咀嚼性增加缓慢,弹性变化较小,杂粮面包的品质更加稳定^[44]。贮藏 7 d 后,添加酸面团的杂粮面包硬度变化较小,面包品质得到保障^[11]。研究发现乳酸菌发酵产生的胞外多糖,有效保持了杂粮面包的水分^[11],并且限制了淀粉糊贮存期间高摩尔质量抗性淀粉的形成,从而延缓了淀粉的老化^[48]。乳酸菌发酵延长杂粮面包货架期的另外一个原因是乳酸菌代谢产物能够破坏腐败菌的细胞结构,具有抑菌能力^[49]。史梦洁等^[50]利用乳酸菌发酵小麦胚芽油,乳酸菌代谢产物可明显提升抗真菌活性,对杂粮面包贮藏过程中出现的黑曲霉具有良好的抑制作用,使杂粮面包霉变推迟 3 d。酸面团中乳酸菌代谢产生的有机酸提高了杂粮面包的抗菌活性,有效抑制了杂粮面包中霉菌的产生^[51]。汉堡面包添加乳酸菌发酵剂后,贮藏 15 d 发生霉变,保质期延长了 3 d,延缓了腐败菌的生长繁殖^[52]。酸面团中的乳酸菌在发酵过程中还会释放低分子质量的活性化合物来发挥抗菌活性功能,如苯基、3-苯基乳酸、4-羟基苯基乳酸、环二肽和抗真菌肽等物质,通过复杂的协同作用组成了抗真菌抑制机制^[52]。在藜麦面团中添加食淀粉乳杆菌,代谢产生了 3-苯基乳酸、4-羟基苯基乳酸和环二肽等物质,对黑曲霉和镰刀菌等具有抑制作用^[53]。利用植物乳杆菌发酵杂粮面团,代谢产物环二肽和 3-苯基乳酸协同作用,延缓了霉变的发生,延长了杂粮面包的货架期^[54]。乳酸菌在抗真菌能力方面具有高度的菌株特异性,需要选择合适的乳酸菌应用于面包防腐。乳酸菌发酵产生的胞外多糖延缓了淀粉的老化,代谢生成的有机酸和活性化合物延缓了杂粮面包霉变的发生,提高了杂粮面包的贮藏品质,延长了杂粮面包的货架期。

3 乳酸菌发酵杂粮面包的降糖机理

杂粮富含多糖、膳食纤维、抗性淀粉和酚类等具有血糖调节作用的功能因子,乳酸菌和酵母菌发酵生成的代谢产物,如有机酸、活性肽和胞外多糖等也具有调节血糖的作用(见表 2)。同时,杂粮中富含的多糖类物质能够促进乳酸菌的增殖,提高其代谢产物的产量,并且乳酸菌代谢产物有机酸具有提高杂粮活性成分含量的能力,将乳酸菌和杂粮相结合,两者互相促进,共同作用,增强了杂粮面包的血糖调节功能。乳酸菌发酵杂粮面包的血糖调节作用机理主要包括以下三方面。

表 2 乳酸菌发酵杂粮面包的降糖机理
Table 2 Hypoglycemic mechanism of multi-grain bread bread fermented by lactic acid bacteria

乳酸菌代谢产物	乳酸菌作用	杂粮活性成分	杂粮作用	降糖机理	文献来源
胞外多糖	淋巴细胞↑; 促炎因子↓	大豆异黄酮	肠道通透性↑; 促炎因子↓	肠道屏障功能和机体免疫↑	[56-58,62-65]
肽聚糖	短链脂肪酸↑; 有害菌↓	燕麦β-葡聚糖、黄酮、膳食纤维	丙酸、乙酸和抗菌素↑; 总短链脂肪酸↑	肠道菌群↑	[59-61,66]
肽聚糖、蛋白酶	自由基↓; 抗氧化肽↑	多酚	自由基↓	抗氧化能力↑	[36,39,61,67-69]
有机酸	杂粮活性成分↑; 胰岛β细胞↑	膳食纤维、皂苷类、燕麦肽	胰岛β细胞↑; 胰岛素敏感性↑	胰岛素分泌↑	[70-74]
胞外多糖、有机酸	α-葡萄糖苷酶活性↓; 抗性淀粉↑	花青素、抗性淀粉	α-葡萄糖苷酶和α-淀粉酶活性↓	消化酶活性↓	[75-81]
α-半乳糖苷酶	D-手性肌醇↑	D-手性肌醇、多酚	糖异生途径↓; 腺苷酸激活蛋白激酶和丝氨酸/苏氨酸激酶的磷酸化↑	影响糖代谢通路	[8,82-84]

3.1 调节肠道菌群组成，增强机体免疫

糖尿病患者的肠道菌群中益生菌数量减少, 有害菌数量增加, 肠道屏障功能遭到破坏, 炎症发生频繁, 导致机体免疫能力降低, 血糖调节能力较差^[55]。乳酸菌发酵产生特殊代谢产物如胞外多糖、乳酸菌素和有机酸等, 改善了肠道菌群的组成, 缓解了炎症的发生, 增强了机体免疫能力, 降低了糖尿病发生率^[56]。植物乳杆菌代谢产生的胞外多糖能有效抑制小鼠中的促炎细胞因子的表达, 提高机体免疫能力^[57], 从而调节了糖尿病患者的糖脂代谢能力。干酪乳杆菌胞外多糖促进肠道内淋巴细胞的分化和增殖, 启动肠道黏膜屏障功能, 增强机体免疫, 改善了糖尿病的症状^[58]。乳酸菌发酵产物有机酸和提供的酸性环境能够抑制肠道内沙门氏菌的繁殖, 增加免疫相关菌群的相对丰度, 通过改善肠道菌群, 预防机体出现糖尿病和炎症反应^[59-60]。乳酸菌细胞壁中的肽聚糖具有提高短链脂肪酸种类和含量, 改善肠道微生物丰度的效果, 促进了有益菌群的增殖, 抑制了有害菌群的生长^[61], 改善了糖尿病人的肠道菌群组成, 提高了血糖调节能力。

杂粮中富含各种生物活性物质, 通过乳酸菌发酵后生物活性成分的含量得到提高, 能够调节糖尿病人的肠道菌群结构, 生物活性物质被肠道菌群利用后释放抗菌素等物质, 具有增强机体免疫力的效果。研究发现, 乳酸菌发酵的燕麦面团 β-葡聚糖相互交联成网络结构, 更加稳定, 烘焙过程中含量不变^[62-63]; 大豆酸面团经乳酸菌发酵后, 面包的大豆异黄酮含量和总酚含量得到显著性提高^[39]; 黑豆麦麸酸面团经两种乳酸菌发酵后, 面包的总膳食纤维质量分数均高于 6%^[9]。燕麦面包中含有的燕麦 β-葡聚糖在高脂饮食小鼠中显示出良好的肠道菌群调节能力, 肠道菌群利用葡聚糖产生丙酸和抗菌素等, 降低肠道内 pH, 增加肠道中有益菌属比例, 降低有害菌属含量, 增加小鼠体重, 降低空腹血糖水平^[64-66]。杂粮面包含有的 β-葡聚糖、黄酮类化合物和膳食纤维均可增加大鼠的肠道菌群多样性, 降低拟杆菌属丰度, 提高大鼠结肠内乙酸和总短链脂肪酸含量, 调节糖脂类代谢, 从而

达到改善糖尿病的效果^[67]。大豆面包中的大豆异黄酮能够改善肠道免疫功能和通透性, 保护糖尿病患者的肠黏膜屏障, 同时降低促炎细胞因子的表达, 增加益生菌的比例, 减轻糖尿病患者炎症的发生^[68]。

3.2 提高抗氧化能力，促进胰岛素分泌

糖尿病的发生与机体氧化损伤有关, 体内自由基过多会侵害胰岛素受体, 造成周围组织无法有效摄取葡萄糖, 血糖水平升高, 长期的高血糖导致机体自由基清除能力降低, 组织器官易被氧化损伤, 形成恶性循环^[56]。乳酸菌以杂粮基质为基础代谢, 产生有机酸改变了杂粮中多酚等活性化合物的结合状态, 使活性成分含量增加。在荞麦面包制作中添加乳酸菌, 荞麦面团总酚含量提高 21.3%、DPPH 和 ABTS 自由基清除能力提高 2 倍左右, 并且乳酸菌的添加改善了烘焙对抗氧化活性物质的影响^[36], 能够减轻机体的胰岛素抵抗^[69]。采用乳酸菌 NM701 发酵红豆乳 94 h, 多酚含量增加了 18.28%, 提高了抗氧化能力^[70], 减轻机体氧化损伤, 调节血糖水平。除了黄酮、总酚外, 抗氧化活性肽也具有较强的抗氧化功能。从茅台酒曲中分离出一种游离大豆异黄酮植物乳杆菌用于研制大豆酸面包, 乳酸菌发酵分泌蛋白酶水解肽链, 增加了抗氧化活性肽的含量, 大大增强了产品的抗氧化能力^[39], 抑制糖尿病患者自由基的积累, 减轻胰岛素抵抗。利用复配乳酸菌制备芸豆和大豆的发酵液, 经过乳酸菌发酵后抗氧化活性的小分子多肽增多, 酚类物质增加, 提高了羟基自由基清除能力^[71], 有助于减轻自由基对胰岛素受体的侵害, 具有预防糖尿病的效果。乳酸菌细胞壁存在的肽聚糖成分, 具有较强的自由基清除能力, 而且肽聚糖含量与抗氧化能力成正比, 植物乳杆菌和瑞士乳杆菌中肽聚糖含量较高^[61], 在改善机体抗氧化能力方面效果更好, 有效缓解了糖尿病症状。

胰岛素是调节糖代谢的重要激素, 胰岛 β 细胞发生氧化损伤, 会降低胰岛素的分泌, 同时在胰岛素抵抗阶段, 胰岛素敏感性降低, 分泌过多的胰岛素也会造成各种器官和功能损害, 最终导致糖尿病^[56]。杂粮面包中的黄酮、多糖等化合物, 具有清除自由基的

作用,可以保护胰岛细胞免受伤害^[72]。乳酸菌发酵提供的酸性环境能够水解杂粮中的酚酸酯和黄酮苷,提高酚酸还原酶和脱氢酶的活性,增强黄酮类物质的生成和释放,防止氧化对胰岛 β 细胞的伤害,降低机体血糖水平^[73]。谷物和杂粮面包中富含膳食纤维和皂苷类增加了胰岛细胞的数量,有利于糖尿病大鼠的胰岛细胞的恢复,促进胰岛素的分泌^[74-75]。燕麦面包含有的多肽成分,具有提高胰岛素敏感性的能力,改善了胰岛素抵抗作用,调节了糖尿病小鼠的血糖水平^[76]。

3.3 抑制消化酶活性,影响糖代谢通路

α -葡萄糖苷酶将食物中的碳水化合物水解成葡萄糖和其他单糖,产生过量的单糖会导致糖尿病,而乳酸菌代谢物胞外多糖对 α -葡萄糖苷酶具有抑制作用,胞外多糖含量越高,抑制作用越强^[77]。Nurhayati等^[78]从发酵48 h的两种红薯中分离和筛选出18株乳酸菌能够产生胞外多糖的乳酸菌,具有抑制 α -葡萄糖苷酶的作用。胞外多糖的产生量与乳酸菌的发酵温度有关,当发酵温度较低或过高时,乳酸菌分泌较少的胞外多糖, α -葡萄糖苷酶抑制率较低^[79]。以藜麦和燕麦等杂粮制作的面包具有较低的血糖生成指数,杂粮中丰富的抗性淀粉和膳食纤维能够降低消化酶的敏感性,有助于延缓淀粉水解率^[80]。杂粮面包经乳酸菌发酵后淀粉消化率进一步降低,采用植物乳杆菌和戊糖片球菌发酵的白芸豆面包淀粉消化率达到40%,血糖生成指数值为42.88显著低于对照生芸豆面包,乳酸菌发酵产生的有机酸影响了杂粮中淀粉结晶区的比例,提高了面包的抗性淀粉含量,不易被 α -淀粉酶分解,人体小肠无法消化,从而达到降低血糖的效果^[81]。乳酸菌的细胞壁属于纤维素类似物,可以减缓肠道对碳水化合物的吸收速率,延长消化时间,具有调节血糖水平的效果^[82]。

杂粮中还含有一些生物活性成分具有提高细胞在高糖环境时糖原合成酶的活性,抑制 α -淀粉酶活性,淀粉水解率降低,从而达到降低血糖的效果^[83]。黑豆富含花青素能够降低 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶的活性,并且存在剂量效应关系,抑制作用强于阿卡波糖,有较好的降血糖活性^[84],花青素稳定性较差,乳酸菌发酵产生的有机酸能够延缓花青素的降解速率^[85]。糖尿病小鼠中胰岛素受体(IR β)和磷酸肌糖-3-激酶(PI3Kp85)的表达水平下调,IRS-2和AKT的磷酸化水平降低,而苦荞中含有D-手性肌醇(DCI),能够上调IR β 和PI3Kp85表达水平,抑制肝脏糖异生途径,表达PKC ϵ -PI3K/AKT信号通路来降低小鼠的肝脏葡萄糖输出量^[86],乳酸菌发酵能够提高 α -半乳糖苷酶活性,使苦荞中DCI衍生物的半乳糖苷键断裂,增加DCI含量,改善葡萄糖代谢通路,减轻糖尿病症状^[8,87]。AMP活化蛋白激酶(AMPK)具有改善高血糖的效果,从赤小豆中提取的多酚化合物上调了糖尿病小鼠中AMPK磷酸化水平,通过刺激AMPK和丝氨酸/苏氨酸激酶的磷酸化来改善葡萄

糖水平^[88]。

4 展望

近年来面包已经成为国人必不可少的重要面食产品之一,尤其添加杂粮的面包以其营养丰富和显著的功能特性备受人们喜爱。通过大量研究已经证实,乳酸菌发酵对杂粮面包的品质、营养和贮藏稳定性具有较好的改善效果,而且乳酸菌发酵杂粮面包具有调节人体血糖水平等功能特性。研究学者已开展了乳酸菌发酵黑豆面包、红豆面包、燕麦面包和荞麦面包等杂粮面包的研究,但是还处于研发阶段,乳酸菌发酵杂粮面包在很多方面还需要进一步深入研究:充分利用现代分子生物技术和微生物组学技术筛选优异、安全的新型乳酸菌菌株,适用于杂粮面包的研发和推广;不同杂粮面包中乳酸菌复配技术和发酵条件研究,生产出品质优良的杂粮面包;乳酸菌发酵杂粮面包在调节血糖效果的临床验证和血糖调节机理研究,总之,随着人们生活水平提高,营养和健康日益受到关注,因此具有一定保健作用的功能食品将具有广阔的市场前景。

参考文献

- [1] HONG J M, LIN B M, ZHANG S, et al. Analysis and evaluation of nutritional components in 6 kinds of minor cereals[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(18): 6254-6260.
- [2] FU J, ZHANG Y, HU Y, et al. Concise review: Coarse cereals exert multiple beneficial effects on human health[J]. Food Chemistry, 2020, 325(4): 126761.
- [3] HOU D, ZHAO Q, YOUSAF L, et al. In vitro starch digestibility and estimated glycemic index of mung bean as affected by endogenous proteins and lipids, and exogenous heat-processing methods[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75(4): 1-6.
- [4] 戴媛,冷进松,傅婷婷.豌豆蛋白面包的制作工艺优化及其品质[J].食品工业科技,2020,41(11):194-199. [DAI Y, LENG S, FU T T. Process optimization and quality of pea protein bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(11): 194-199.]
- [5] 商亚芳,蔡华珍,操珍.荞麦苗粉面包的配方和工艺优化[J].食品工业科技,2021,42(15):177-182. [SHANG Y F, CAI H Z, CAO Z. Formulation and process optimization of buckwheat flour bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(15): 177-182.]
- [6] OH Y J, NAM K, Y KIM, et al. Effect of a nutritionally balanced diet comprising whole grains and vegetables alone or in combination with probiotic supplementation on the gut microbiota[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2021, 26(2): 121-131.
- [7] 陈佳芳,汤晓娟,蒋慧,等.不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦面团对面团筋网络结构和面包烘焙特性的影响[J].食品科学,2018,39(6):1-6. [CHEN J F, TANG X J, JIANG H, et al. Effects of different exopolysaccharides lactic acid bacteria fermentation on gluten network structure and baking properties of buckwheat sour dough[J]. Food Science, 2018, 39(6): 1-6.]
- [8] 武盟,曹伟超,程新,等.高产 α -半乳糖苷酶乳酸菌发酵对鹰嘴豆面团生化特性及其面包烘焙品质的影响[J].食品科学,

- 2021, 42(10): 146–153. [WU M, CAO W C, CHENG X, et al. Effects of α -galactosidase lactobacillus fermentation on biochemical characteristics of chickpea sour dough and bread baking quality[J]. Food Science, 2021, 42(10): 146–153.]
- [9] 曹伟超, 张宾乐, Omedi Jacob OJOBI, 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): 9. [CAO W C, ZHANG B L, OMEDI J O, et al. Nutritional and baking characteristics of black bean wheat gluten sour dough bread fermented by functional lactic acid bacteria[J]. Food Science, 2022, 43(2): 9.]
- [10] MAMHOUD A, NIONELLI L, BOUZAIN T, et al. Selection of lactic acid bacteria isolated from Tunisian cereals and exploitation of the use as starters for sourdough fermentation[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016, 225: 9–19.
- [11] NAMI Y, GHAREKHANI M, AALAMI M, et al. Lactobacillus-fermented sourdoughs improve the quality of gluten-free bread made from pearl millet flour[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(10): 4057–4067.
- [12] GALLI V, VENTURI M, PINI N, et al. Exploitation of sourdough lactic acid bacteria to reduce raffinose family oligosaccharides (RFOs) content in breads enriched with chickpea flour[J]. *European Food Research and Technology*, 2019, 245(11): 2353–2363.
- [13] PEI J, FENG Z, REN T, et al. Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2018, 18(1): 48–54.
- [14] VOGELMANN S A, SEITTER M, SINGER U, et al. Adaptability of lactic acid bacteria and yeasts to sourdoughs prepared from cereals, pseudocereals and cassava and use of competitive strains as starters[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2009, 130(3): 205–212.
- [15] LHOMME E, ONNO B, CHUAT V, et al. Genotypic diversity of *Lactobacillus sanfranciscensis* strains isolated from French organic sourdoughs[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 226: 13–19.
- [16] VUYST L D, HARTH H, KERREBROECK S V, et al. Yeast diversity of sourdoughs and associated metabolic properties and functionalities[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2016: 26–34.
- [17] CONTARINO R, BRIGHINA S, FALLICO B, et al. Volatile organic compounds produced by Biocontrol yeasts[J]. *Food Microbiol*, 2019, 82: 70–74.
- [18] LISZKOWSKA W, BERLOWSKA J. Yeast fermentation at low temperatures: Adaptation to changing environmental conditions and formation of volatile compounds[J]. *Molecules*, 2021, 26(4): 1035.
- [19] SIEUWERTS S, BRON P A, SMID E J. Mutually stimulating interactions between lactic acid bacteria and *Saccharomyces cerevisiae* in sourdough fermentation[J]. *LWT*, 2018, 90: 201–206.
- [20] 张成林, 钱怡霖, 刘尊英. 酵母菌代谢产物对植物乳杆菌 AB-1 生产苯乳酸的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(11): 145–151. [ZHANG C L, QIAN Y L, LIU Z Y. Effects of yeast metabolites on production of phenyllactic acid by *Lactobacillus plantarum* AB-1[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(11): 145–151.]
- [21] 王丽群. 酿酒酵母与白面粉乳杆菌混合发酵对馒头品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2021, 7: 77–81. [WANG L Q. Effects of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus siliginis* on steamed bread quality[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2021, 7: 77–81.]
- [22] 杨浣漪. 传统酸面团中酿酒酵母和旧金山乳杆菌的种内多样性及其互作研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. [YANG H Y. Study on the intraspecies diversity and interaction between *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus sanfrancisco* in traditional sour dough[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.]
- [23] DE V L, VAN K S, LEROY F. Microbial ecology and process technology of sourdough fermentation[J]. *Advances in Applied Microbiology*, 2017, 100: 49–160.
- [24] CARNEVALI P, CIATI R, LEPORATI A, et al. Liquid sourdough fermentation: Industrial application perspectives[J]. *Food Microbiology*, 2007, 24: 150–154.
- [25] BRANDT M J. Sourdough products for convenient use in baking[J]. *Food Microbiol*, 2007, 24(2): 161–164.
- [26] SIRAGUSA S, DI C R, ERCOLINI D, et al. Taxonomic structure and monitoring of the dominant population of lactic acid bacteria during wheat flour sourdough type I propagation using *Lactobacillus sanfranciscensis* starters[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75: 1099–1109.
- [27] VUYST L D, KERREBROECK S V, HARTH H, et al. Microbial ecology of sourdough fermentations: Diverse or uniform? [J]. *Food Microbiology*, 2014, 37: 11–29.
- [28] INDRANI D, SOUMYA C, RAJIV J, et al. Multigrain bread - its dough rheology, microstructure, quality and nutritional characteristics[J]. *Journal of Texture Studies*, 2010, 41(3): 302–319.
- [29] ZHANG D, TAN B. Effects of different solid-state fermentation ratios of *S. cerevisiae* and *L. plantarum* on physico-chemical properties of wheat bran and the quality of whole wheat bread [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(11).
- [30] 王芳, 冯冲, 徐翔, 等. 混合发酵对紫薯面团的特性[J]. *食品工业*, 2021, 42(5): 4. [WANG F, FENG C, XU X, et al. Effects of mixed fermentation on the characteristics of purple potato dough[J]. *Food industry*, 2021, 42(5): 4.]
- [31] HU Y, ZHANG J, WANG S, et al. Lactic acid bacteria synergistic fermentation affects the flavor and texture of bread[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(4): 1823–1836.
- [32] 孙银凤, 徐岩, 黄卫宁, 等. 不同发酵基质的酸面团对酵母面团体系面包烘焙及老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(506): 63–68. [SUN Y F, XU Y, HUANG W N, et al. Effect of sourdough with different fermentation substrates on baking and aging characteristics of yeast dough system bread[J]. *Food Science*, 2015, 36(506): 63–68.]
- [33] 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): 8. [ZOU Q B, CHENG X, CHEN C, et al. Effects of fermented sour dough with mixed bacteria on flavor and baking characteristics of whole wheat bread[J]. *Food and Machinery*, 2020, 36(4): 8.]
- [34] 王立峰, 厉琨, 徐斐然, 等. 副干酪乳杆菌对小麦发酵面团流

- 变特性与风味的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 230-238. [WANG L F, LI J, XU F R, et al. Effects of *Lactobacillus paracei* on rheological properties and flavor of wheat fermented dough[J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(7): 230-238.]
- [35] CLARKE C I, SCHOBERT T J, DOCKERY P, et al. Wheat sourdough fermentation: Effects of time and acidification on fundamental rheological properties[J]. *Cereal Chemistry*, 2004, 81: 409-417.
- [36] 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. Effects of lactobacillus fermentation on antioxidant and baking properties of buckwheat bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(19): 49-53.]
- [37] COUCH, GRACE W. Effect of sourdough fermentation parameters on bread properties[J]. Food and Nutrition Sciences, 2016, 12: 2581-2634.
- [38] 张书静, 王展, 沈汪洋, 等. 膳食纤维对面团和面筋蛋白影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(296): 12-14. [ZHANG S J, WANG Z, WANG H Y, et al. Research Progress on the effects of dietary fiber from lactic acid bacteria and yeast on dough and gluten protein[J]. Grain and Fat, 2020, 33(296): 12-14.]
- [39] 杨紫璇, 张宾乐, 蒋慧, 等. 茅台酒曲植物乳杆菌大豆酸面团发酵面包的营养与抗氧化特性[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(6): 37-42. [YANG Z X, ZHANG B L, JIANG H, et al. Nutritional and antioxidant properties of Fermented bread with *Lactobacillus plantarum* soya acid dough from Maotai Liquor[J]. Food and fermentation industries, 2018, 44(6): 37-42.]
- [40] 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, LUN K, CHENG X, et al. Study on high phytase lactic acid bacteria and black bean sour dough fermentation of low phytase nutritional bread[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 186-193.]
- [41] LEENHARDT F, LEVRAT-VERNY M A, CHANLIAUD E, et al. Moderate decrease of pH by sourdough fermentation is sufficient to reduce phytate content of whole wheat flour through endogenous phytase activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(1): 98-102.
- [42] NIELSEN M M, D AMSTRUP M L, THOMSEN A D, et al. Phytase activity and degradation of phytic acid during rye bread making[J]. European Food Research & Technology, 2007, 225(2): 173-181.
- [43] 周一鸣, 欧阳博雅, 向茜, 等. 不同乳酸菌发酵酸面团对面包品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 176-183. [ZHOU Y M, OUYANG B Y, XIANG Q, et al. Effects of different lactic acid bacteria on the quality and flavor of bread fermented sour dough[J]. Food Science, 2022, 43(2): 176-183.]
- [44] 郭东旭, 张康逸, 高玲玲, 等. 乳酸菌发酵酸面团对青麦仁面包品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 61-67, 74. [GUO D X, ZHANG K Y, GAO L L, et al. Effect of lactic acid bacteria fermented sour dough on quality of green wheat kernel bread[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 61-67, 74.]
- [45] FUJIMOTO A, ITO K, NARUSHIMA N, et al. Identification of lactic acid bacteria and yeasts, and characterization of food components of sourdoughs used in Japanese bakeries[J]. *J Biosci Bioeng*, 2019, 127(5): 575-581.
- [46] LINKO Y Y, JAVANAINEN P, LINKO S. Biotechnology of bread baking[J]. Trends in Food Science & Technology, 1997, 8(10): 339-344.
- [47] ZHAO C J, GÄNZLE M G. Synthesis of taste-active γ -glutamyl dipeptides during sourdough fermentation by *Lactobacillus reuteri*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(40): 7561-7568.
- [48] BUKSA K, KOWALCZYK M, BORECZEK J. Extraction, purification and characterisation of exopolysaccharides produced by newly isolated lactic acid bacteria strains and the examination of their influence on resistant starch formation[J]. Food Chem, 2021, 15(362): 130221.
- [49] Zhao X, Li M, Tang J, et al. The role of lactic acid bacteria in anti-pathogenic microorganism infection[J]. Journal of Microbiology, 2018, 38(6): 107-113.
- [50] 史梦洁, 闫博文, SADIQ F A, 等. 乳酸菌协同小麦胚芽油发酵对黑曲霉生长活性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(19): 144-148, 156. [SHI M J, YAN B W, SADIQ F A, et al. Effects of lactobacillus and wheat germ oil fermentation on growth activity of aspergillus niger[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(19): 144-148, 156.]
- [51] MOTA-GUTIERREZ J, FRANCIOSA I, RUGGIRELLO M, et al. Technological, functional and safety properties of lactobacilli isolates from soft wheat sourdough and their potential use as anti-mould cultures[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2021, 37(9): 146.
- [52] 周雪. 乳酸菌发酵剂在汉堡面包防腐中的应用[D]. 黑龙江: 东北农业大学, 2020. [ZHOU X. Application of lactic acid bacteria starter in hamburger bread preservative[D]. Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2020.]
- [53] AXEL C, ROECKER B, BROSNAN B, et al. Application of *Lactobacillus amylovorus* DSM19280 in gluten-free sourdough bread to improve the microbial shelf life[J]. Food Microbiol, 2014, 47: 36-44.
- [54] MOORE M M, BELLO F D, ARENDT E K. Sourdough fermented by *Lactobacillus plantarum* FST1.7 improves the quality and shelf life of gluten-free bread[J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 226(6): 1309-1316.
- [55] VED A, RAIS N, AHMAD R, et al. Prevalence of diabetes mellitus and socio-demographic survey in the community of western uttar pradesh, india in the year 2019-2020[J]. *International Journal of Current Research*, 2021, 13(1): 10-15.
- [56] WANG G, SI Q, YANG S, et al. Lactic acid bacteria reduce diabetes symptoms in mice by alleviating gut microbiota dysbiosis and inflammation in different manners[J]. Food & Function, 2020, 11(7): 5898-5914.
- [57] CHON H, CHOI B, JEONG G, et al. Suppression of pminflammatory cytokine production by specific metabolites of *Lactobacillus plantarum* 10hk2 via inhibiting NF- κ B and p38 MAPK expressions[J]. Microbiology and Infectious Diseases, 2010, 33(6): 41-49.

- [58] REN Q Q, TANG Y J, ZHANG L L, et al. Exopolysaccharide produced by *Lactobacillus casei* promotes the differentiation of CD4⁺T Cells into Th17 Cells in BALB/c mouse peyer's patches *in vivo* and *in vitro*[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(9): 2664–2672.
- [59] UU J, XUE J Z, ZHU Z N, et al. Lactic acid inhibits NF- κ B activation by lipopolysaccharide in rat intestinal mucosa microvascular endothelial cells[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(6): 954–959.
- [60] ZIMMER J, LANGE B, FRICK JS, et al. A vegan or vegetarian diet substantially alters the human colonic faecal microbiota[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2012, 66(1): 53–60.
- [61] 王凯旋. 乳酸菌肽聚糖的制备、结构及其生理功能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. [WANG K X. Preparation, structure and physiological function of peptidoglycan from lactic acid bacteria[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.]
- [62] KATINA K, LAITILA A, JUVONEN R, et al. Bran fermentation as a means to enhance technological properties and bioactivity of rye[J]. *Food Microbiology*, 2007, 24(2): 175–186.
- [63] ANDERSSON A M, RUEGG N, AMAN P. Molecular weight distribution and content of water-extractable 13-glucan in rye crisp bread[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008(47): 399–406.
- [64] GONG L, CAO W, CHI H, et al. Whole cereal grains and potential health effects: Involvement of the gut microbiota[J]. *Food Research International*, 2018, 103(Jan.): 84–102.
- [65] 吕振岳, 马达, 许洪高, 等. 燕麦 β -葡聚糖对高脂饮食小鼠肥胖及肠道菌群影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(12): 5024–5030. [LV Z Y, MA D, XU H G, et al. Effects of oat β -glucan on obesity and intestinal microflora in high-fat diet mice[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2021, 12(12): 5024–5030.]
- [66] WANG J, XIE B, SUN Z. The improvement of carboxymethyl β -glucan on the antibacterial activity and intestinal flora regulation ability of lotus seedpod procyanidins[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 137(3): 110441.
- [67] 王勇, 宋歌, 庞邵杰, 等. 应用 Illumina NovaSeq 测序技术比较 3 种杂粮对大鼠肠道菌群的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 100–106. [WANG Y, SONG G, PANG S J, et al. Illumina NovaSeq sequencing technology was used to compare the effects of three kinds of cereals on intestinal microflora in rats[J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 100–106.]
- [68] LUO Q H, CHENG D J, HUANG C, et al. Improvement of colonic immune function with soy isoflavones in high-fat diet-induced obese rats[J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1139.
- [69] TIJANA M, SLAVICA S, SUZANA I. Effect of fermentation on antioxidant properties of some cereals and pseudo cereals[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 957–963.
- [70] 董英丽. 乳酸菌对红豆发酵特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013. [DONG Y L. Study on fermentation characteristics of red bean by lactic acid bacteria[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.]
- [71] 李志芳, 张裕, 王颖, 等. 芸豆/大豆复合发酵液工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(1): 164–169. [LI Z F, ZHANG Y, WANG Y, et al. Optimization and antioxidant activity of mixed fermented liquid of kidney bean and soybean[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2022, 37(1): 164–169.]
- [72] SINGH J, KAKKAR P. Modulation of liver function, antioxidant responses, insulin resistance and glucose transport by *oxylinum indicum* stem bark in STZ induced diabetic rats[J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2013, 62(6): 722–731.
- [73] 葛丽霞, 陈静. 大豆异黄酮对糖尿病大鼠抗氧化能力的影响[J]. *食品科学*, 2007, 28(3): 327–329. [GE L X, CHEN J. Effects of soybean isoflavone on antioxidant capacity of diabetic rats[J]. *Food Science*, 2007, 28(3): 327–329.]
- [74] ZAFAR T A, KABIR Y. Chickpeas suppress postprandial blood glucose concentration, and appetite and reduce energy intake at the next meal[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(4): 1–8.
- [75] 佐兆杭, 王颖, 刘淑婷, 等. 杂豆膳食纤维对糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. *食品科学*, 2018, 39(17): 177–181. [ZUO Z H, WANG Y, LIU S T, et al. Effects of soybean dietary fiber on hypoglycemia in diabetic rats[J]. *Food Science*, 2018, 39(17): 177–181.]
- [76] 张慧娟, 黄莲燕, 尹梦, 等. 燕麦多肽降血糖功能的研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(10): 360–363, 384. [ZHANG H J, HUANG L Y, YIN M, et al. Study on hypoglycemic function of oat polypeptide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(10): 360–363, 384.]
- [77] 李向菲. 产胞外多糖乳酸菌对 2 型糖尿病的干预及其机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [LI X F. Intervention and mechanism of extracellular polysaccharide producing lactic acid bacteria in type 2 diabetes mellitus[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
- [78] NURHAYATI R, MIFTAKHUSSOLIKHAH, FREDIAN-SYAH A, et al. Lactic acid bacteria producing inhibitor of alpha glucosidase isolated from ganyong and kimpul[J]. *Iop Conference*, 2017, 101(1): 12009.
- [79] 杨同香, 王芳, 李全阳. 温度对酸乳中乳酸菌胞外多糖作用机制的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(9): 58–61. [YANG T X, WANG F, LI Q Y. Effect of temperature on extracellular polysaccharide of lactic acid bacteria in yoghurt[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(9): 58–61.]
- [80] 贾彦杰, 申飞, 钱志伟, 等. 添加杂粮粉改善面包品质及营养特性分析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(12): 9. [JIA Y J, SHEN F, QIAN Z W, et al. Analysis of improving bread quality and nutritional characteristics by adding coarse grain flour[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(12): 9.]
- [81] 程新, 黄璟, JACOB Ojobi Omedi, 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): 7. [CHENG X, HUANG J, JACOB O O, et al. Effects of moist heat treatment and mixed fermentation on starch digestibility of white kidney bean bread[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2021, 47(13): 7.]
- [82] MARITIM AC. Diabetes oxidative stress and anfioidants[J]. *Biochem Mol Toxicol*, 2003, 17: 24–37.
- [83] BAO T, WANG Y, LI Y T, et al. Antioxidant and antidiabetic properties of tartary buckwheat rice flavonoids after *in vitro* digestion[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2016, 17(12):

941-951.

[84] 高秀娥, 梁雪晴, 刘薇, 等. 黑豆花青素精制及降血糖活性研究 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(16): 51-56. [GAO X E, LIANG X Q, LIU W, et al. Purification and hypoglycemic activity of anthocyanins from black bean[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(16): 51-56.]

[85] 杨宁. 乳酸菌发酵樱桃汁工艺优化及樱桃果粉的制备 [D]. 新乡: 河南科技大学, 2020. [YANG N. Optimization of lactic acid bacteria fermentation process of cherry juice and preparation of cherry fruit powder [D]. Xinxiang: Henan University of Science and Technology, 2020.]

[86] FEIER, CHENG, LIN, et al. D-chiro-inositol ameliorates

high fat diet-induced hepatic steatosis and insulin resistance via PKC ϵ -PI3K/AKT pathway[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2019, 6(21): 5957-5967.

[87] 勾秋芬. 酿酒酵母发酵对苦荞中 D-手性肌醇含量的影响 [D]. 成都: 四川师范大学, 2009. [GOU Q F. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* fermentation on d-chiral inositol content in Tartary buckwheat [D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2009.]

[88] SHIN, SATO, YUUKA, et al. Azuki bean (*Vigna angularis*) extract stimulates the phosphorylation of AMP-activated protein kinase in HepG2 cells and diabetic rat liver[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(7): 2312-2318.