

# 乳酸菌发酵在谷物产品中的应用及研究进展

马春敏, 付佳宁, 吴巧艳, 王冰, 杨杨, 边鑫, 张娜\*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028)

**摘要:** 谷物食品是人类能量摄入的主要来源之一, 随着人们生活水平的提高, 谷物食品的营养价值和食用品质受到了广泛关注。发酵是改善食品性质、功能及营养缺陷的重要方法, 也是谷物加工的重要手段。乳酸菌能够利用碳水化合物进行生长代谢, 在食品工业中被广泛应用于各种发酵制品, 其发酵产生的代谢产物有许多重要的生理功能, 包括调节肠道菌群平衡、提高免疫力、抗菌和抗肿瘤等。因此, 乳酸菌发酵在谷物食品中的研究与应用, 对提升食品品质具有重要意义。本文综述了乳酸菌发酵对谷物营养成分、生物功能和结构、理化性质的影响, 总结了乳酸菌发酵谷物产品的优势以及乳酸菌发酵在多种谷物产品中的应用, 分析了乳酸菌发酵谷物食品目前研究的不足及可能的发展方向, 拟为乳酸菌发酵在谷物中的研究与开发提供参考。

**关键词:** 乳酸菌; 发酵; 谷物产品

## Application and research progress of lactic acid bacteria fermentation in cereal products

MA Chun-Min, FU Jia-Ning, WU Qiao-Yan, WANG Bing, YANG Yang, BIAN Xin, ZHANG Na\*

(School of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028)

**ABSTRACT:** Cereal food is one of the main sources of human energy intake, and its nutritional value and edible quality have received widespread attention with the improvement of people's living standards. Fermentation is an important method for improving food properties, functions, and nutritional deficiencies, as well as an important means of grain processing. Lactic acid bacteria can utilize carbohydrates for growth and metabolism, and are widely used in various fermented products in the food industry. The metabolites produced by fermentation have many important physiological functions, including regulating the balance of intestinal flora, improving immunity, anti-bacterial and anti-tumor probiotics. Therefore, the research and application of lactic acid bacteria fermentation in grain food is of great significance for improving food quality. This paper reviewed the effects of lactic acid bacteria fermentation on nutrient composition, biological function, structure and physicochemical properties of cereals, summarized the advantages of lactic acid bacteria fermentation of cereal products and its application in a variety of cereal products. The deficiency and possible development direction of lactic acid bacteria fermentation cereal food were analyzed in order to provide reference for the research and development of lactic acid bacteria fermentation in cereal.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2021YFD2100902-3)、国家自然科学基金项目(32072258)、中央引导地方科技发展专项项目(ZY2022B-HRB-12)、黑龙江省青年人才托举项目(2022QNTJ010)、黑龙江省普通高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2020218)

**Fund:** Supported by the National Key Research and Development Project of China (2021YFD2100902-3), the National Natural Science Foundation of China (32072258), the Central Guiding Local Science and Technology Development Special Project (ZY2022B-HRB-12), the Heilongjiang Province Youth Talent Promotion Project (2022QNTJ010), and the Young Innovative Talent Training Plan for Ordinary Higher Education Institutions in Heilongjiang Province (UNPYSCT-2020218)

\*通信作者: 张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。E-mail: foodzhangna@163.com

\*Corresponding author: ZHANG Na, Ph.D., Professor, Harbin University of Commerce, No.1 Xuehai Street, Songbei District, Harbin 150028, China. E-mail: foodzhangna@163.com

**KEY WORDS:** lactic acid bacteria; fermentation; cereal products

## 0 引言

谷物在世界范围内的种植量大,是亚洲人的传统主食,其中含有碳水化合物、蛋白质、维生素、膳食纤维等多种营养成分,是机体能量的主要来源。但谷物中含有大量淀粉,会引起机体血糖的快速升高,对糖尿病人群不利;另外,谷物中含有抗营养因子(植酸、多酚等),可能会限制谷物中营养物质的吸收利用<sup>[1]</sup>,使营养物质损失较多。乳酸菌发酵相比于蒸煮、研磨、浸泡等传统加工方法,谷物营养成分损失较少,并可以改善谷物的风味及营养缺陷,因此成为谷物加工方法的首选。

乳酸菌是一类能利用碳水化合物发酵产生大量乳酸的革兰氏阳性菌<sup>[2]</sup>,是应用于许多传统发酵食物中的优势菌种,如酸菜、腐乳、米粉等。乳酸菌发酵食品不仅能够提升食物风味,还可以调节机体肠道菌群,促进营养成分吸收,提高免疫力,降血糖,降血压,降低胆固醇,抗肿瘤以及预防癌症等。乳酸菌常用来发酵面包、发糕、馒头、谷物饮料等谷物产品,主要通过其代谢产物对谷物成分进行有益的转化,从而提升产品品质。不同种类的乳酸菌对谷物的发酵效果有所差异,如植物乳杆菌在稻米和大麦中的发酵作用较好,而发酵乳杆菌则适合于小麦和燕麦等其他类型的谷物。近年来,谷物发酵及其在食品中的应用受到了广泛的关注,但针对乳酸菌发酵谷物方面尚未见系统的综述报道。因此,本文综述了乳酸菌发酵对谷物营养价值、生物功能、结构和理化性质的影响,阐述了发酵谷物产品的优势以及在多种谷物产品中的应用,为乳酸菌发酵谷物产品的研究提供了理论基础,并对乳酸菌发酵谷物食品进行了展望,为乳酸菌发酵谷物产品的进一步研究与开发利用提供了参考。

## 1 乳酸菌发酵对谷物营养价值的影响

乳酸菌发酵大大提高了谷物中营养成分的生物利用度,提高了谷物的营养价值。乳酸菌发酵后,谷物淀粉的消化率降低、蛋白质的消化吸收增强、膳食纤维含量增加、维生素得到强化、矿物质生物利用度增加,谷物的营养价值得到提升。

### 1.1 常规营养成分

谷物中碳水化合物含量约占 70%~80%。人们摄入较多的碳水化合物会导致血糖水平升高,引发糖尿病等一系列疾病。乳酸菌发酵产生的代谢产物能够改善谷物中淀粉的结构<sup>[3]</sup>,促进抗性淀粉的形成,防止血糖水平的升高;另外,乳酸菌产生的有机酸通过降低谷物基质的 pH、延迟胃中食物的排空时间,降低淀粉的消化速度,从而达到控

制血糖指数的目的。谷物中的蛋白质优质且营养丰富,但谷物蛋白在人体中的消化率较低,谷物中含有的抗营养因子(植酸、单宁、酚类等)会竞争性地与消化酶结合蛋白质,使蛋白质不易被消化吸收。研究发现,经乳酸菌发酵可以降低抗营养因子交联,代谢产生的蛋白酶改变谷物蛋白质结构,促进谷物蛋白质的消化<sup>[4]</sup>,提高谷物蛋白的营养价值。谷物中的麦谷蛋白和醇溶蛋白是麸质的两种重要组成成分,会引起部分人群的过敏反应,也称麸质不耐受。而乳酸菌能够降解麸质中麦谷蛋白和醇溶蛋白,使其达到麸质敏感症人群的耐受程度,从而扩展了谷物产品的食用人群。膳食纤维是一种植物碳水化合物,约占谷物质量的 3%~5%,不被人体吸收,具有促进胃肠道蠕动,改善糖尿病、心血管疾病的作用。但膳食纤维常存在于细胞壁中,难以进行加工利用。ANNA 等<sup>[5]</sup>研究发现,乳酸菌发酵后产生的有机酸激活谷物中的多种内源酶,使细胞壁被降解,存在于细胞壁中的膳食纤维被释放,总膳食纤维含量增加,从而使谷物的营养价值得到提升。

### 1.2 微量营养成分

维生素是人体必不可少的营养成分,虽不提供能量,但能够调节人体的代谢,若摄入不足会导致各种疾病的产生。但绝大多数维生素人体自身不能合成,必须从食物中获取。谷物中维生素 B<sub>1</sub>、维生素 B<sub>2</sub>、维生素 B<sub>9</sub> 的含量尤为丰富,是维生素的良好来源。但大多数维生素稳定性差,不利于人体的吸收利用。乳酸菌发酵是一种强化、富集谷物中的维生素的方法,尤其对于谷物中含量较多的 B 族维生素。发酵后谷物中的维生素 B<sub>1</sub>、维生素 B<sub>2</sub>、维生素 B<sub>9</sub> 的含量增加<sup>[6]</sup>。谷物中的矿物质可以维持机体正常生理功能,但谷物中的抗营养因子会阻碍矿物质的吸收利用,其中植酸是最有效的抗营养因子,植酸易与矿物质形成结合态,竞争性的与机体争夺铁、钙、镁、锌、锰等金属离子,与金属离子产生螯合作用,干扰矿物质的吸收<sup>[7-8]</sup>,是机体矿物质缺乏的主要原因。但植酸可被植酸酶脱磷酸化,形成游离盐和酯,不能与金属离子螯合,从而增加谷物中矿物质的吸收利用。研究发现,乳酸菌发酵显著降低了谷物食品中的植酸含量。乳酸菌代谢产生的有机酸通过降低 pH (pH 5.5 左右)的方式,激活谷物中的内源性植酸酶降解植酸,为内源谷物植酸酶活性的发挥创造有利条件<sup>[9]</sup>,促进了矿物质的吸收利用。罗昆等<sup>[10]</sup>在黑豆面团中添加具有高植酸酶活性的乳酸菌 L-19,能够有效降解植酸,杂粮面包的抗营养因子含量降低,谷物产品的营养价值得到提升。

## 2 乳酸菌发酵对谷物生物功能的影响

乳酸菌发酵提高谷物的生物功能主要是通过其产生的代谢产物实现,如有机酸、胞外多糖、特殊酶系等<sup>[11]</sup>。乳酸

菌在食物中被人体摄入后,能够在酸性的胃肠道中生存并繁殖,并产生抑制一些有害菌生长的有机酸,从而使人体胃肠道中的有害菌大大减少,例如乳酸的产生使金黄色葡萄球菌的生长受到抑制<sup>[12-13]</sup>。这些酸类物质使摄入人体的钙、磷、铁等人体必需的营养元素更容易被人体吸收<sup>[13-14]</sup>,乳酸菌通过代谢牛奶中的乳糖使发酵奶制品中的乳糖减少或消失<sup>[15]</sup>,可解决由机体乳糖酶活性低或缺乏引起的乳糖不耐受。有机酸、胞外多糖、过氧化氢、脂肪酸、细菌素、乙醇等代谢产物提高了乳酸菌的抗菌功能。胞外多糖具有抗炎和抗菌活性,易粘附在肠上皮细胞上,使乳酸菌在胃肠道定植,阻碍病原体的粘附,并通过肠道蠕动快速清除病原菌,使乳酸菌具有竞争性地排除肠道病原体的能力<sup>[16]</sup>,对肠道健康和免疫系统有调节作用,被认为是抗生素的理想替代品<sup>[17]</sup>。乳酸菌的抗菌作用已被广泛应用于谷物产品的加工及保鲜中<sup>[18]</sup>。如小麦面包中的乳酸菌主要通过结合乳酸菌细胞壁成分去除霉菌毒素,抑制产霉菌毒素真菌的生长<sup>[19]</sup>,以增强其抗菌能力。

另外,乳酸菌的存在可以激活体内的一些免疫细胞,如 NK 细胞、T 淋巴细胞、吞噬细胞等,能够增强机体对抗病原菌入侵的能力,使机体的抵抗力得到提高<sup>[20]</sup>。肠道中免疫球蛋白(immune globulin, IgA)受到乳酸菌的刺激后数量增多,防止外袭菌在肠道粘附生长并繁殖,从而增强机体的免疫屏障<sup>[21]</sup>。乳酸菌细胞壁中的肽聚糖可以使免疫系统受到刺激产生免疫应答,体内肿瘤因子和致突变酶的活性受到抑制,在一定程度上防止肠道肿瘤的进一步恶化<sup>[22]</sup>。胞外多糖可以激活巨噬细胞和自然杀伤细胞,抑制炎症微环境,防止体内正常细胞突变为癌细胞,减少癌症及肿瘤的发生<sup>[23]</sup>。因此,利用乳酸菌发酵谷物能够提升谷物的抗菌功能,增强营养物质的吸收利用,增强机体免疫力,减少肿瘤和癌症的发生,成为赋予谷物产品生物功能的一种新手段。

### 3 乳酸菌发酵对谷物理化性质的影响

#### 3.1 乳酸菌发酵对淀粉分子结构的影响

乳酸菌发酵能够显著影响谷物产品中淀粉的多尺度结构,使谷物的功能性质发生改变。乳酸菌发酵时产生酶导致淀粉水解,使原来表面光滑的淀粉颗粒表面被破坏和腐蚀,半晶结构和晶层的厚度增加,非晶层的厚度没有变化。乳酸菌发酵会影响淀粉层状结构的顺序、淀粉结构的致密性和相对结晶度<sup>[24]</sup>。低含量发酵剂时,乳酸菌对淀粉进行酶解,酶解作用的增加,使淀粉层状结构的顺序降低、致密度及相对结晶度降低。发酵剂含量增加时,层状结构的顺序、致密度、相对结晶度反向增加。淀粉的有序结构先减少后增加,随着发酵剂的增加,淀粉首先被降解,单螺旋结构增加,双螺旋结构降低,发酵剂含量增加后,单螺旋结构减少,双螺旋结构增加<sup>[25]</sup>。是由于淀粉的无定

型结构对酶解具有较高的敏感性,在发酵过程中首先被乳酸菌分泌的酶水解,无定型结构的淀粉分子的降解显著增加了支链淀粉的柔性面积,提供灵活的区域,导致支链淀粉进行了重组。发酵剂含量增加时,酶解作用增强,与此同时,支链淀粉的重组也有序增加。乳酸菌发酵不改变淀粉的结晶类型,但会改变淀粉中晶体结构的比例,原淀粉呈 A+V 杂化晶体结构,微生物发酵有助于淀粉的降解,可能增加直链淀粉的含量,直链淀粉与脂质易形成淀粉-脂质复合物,使淀粉中的 A 型晶体减少, V 型晶体增加(图 1)<sup>[25]</sup>。乳酸菌发酵通过对淀粉结构的改善,增强了谷物产品的性质,赋予了谷物产品新的功能特性,可通过控制菌种发酵剂的添加量,得到高品质的谷物产品,为进一步发酵谷物产品提供了理论依据。

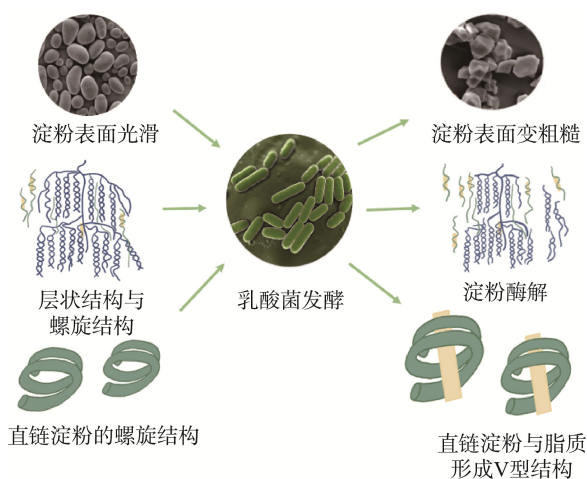


图1 淀粉多尺度结构变化<sup>[25]</sup>

Fig.1 Multi-scale structural changes of starch<sup>[25]</sup>

#### 3.2 乳酸菌发酵对淀粉糊化特性的影响

淀粉在高温下溶胀、分裂形成均匀糊状溶液的特性,称为淀粉的糊化<sup>[26]</sup>。谷物中淀粉的糊化特性对产品品质具有重要影响。随着发酵时间的增加,乳酸菌发酵后淀粉的糊化温度先增加后降低再增加、峰值温度不断增加、峰值黏度下降<sup>[27]</sup>。闵伟红等<sup>[28]</sup>研究发现乳酸菌处理的大米粉峰值黏度下降,糊化温度降低,糊化时间缩短,经过发酵的大米粉更容易糊化。王东坤等<sup>[29]</sup>使用植物乳杆菌发酵强化鲜湿米粉品质时发现发酵后大米淀粉糊化黏度和起始糊化温度降低,峰值黏度及回生值均明显下降。乳酸菌产生的代谢产物有机酸与生物酶作用于淀粉的无定形区,淀粉结构被破坏,淀粉结合水的能力增强,淀粉更容易被糊化,导致糊化温度的降低。乳酸菌发酵将支链淀粉的短链水解,长支链淀粉水解为较短链的支链淀粉,淀粉颗粒变小,促进淀粉的颗粒膨胀和水解,从而峰值黏度下降<sup>[30]</sup>。因此,乳酸菌发酵有利于促进谷物淀粉的糊化。

### 3.3 发酵对淀粉老化特性的影响

淀粉溶液经缓慢冷却或淀粉凝胶经长期放置, 会变为不透明甚至产生沉淀的现象为淀粉的老化。淀粉的老化会影响谷物的品质, 不利于谷物产品的生产。王博等<sup>[31]</sup>研究发现兼性异型植物乳杆菌发酵的全麦面包的老化率降低了 44.11%。TORRIERI 等<sup>[32]</sup>研究发现产胞外多糖乳酸菌添加量为 30% 时, 发酵的酸面团可以减缓面包的老化。经糊化后的淀粉分子又因分子间氢键的不断缔合又重新自动排序, 形成不溶解的高度致密性的分子微束, 导致产品出现硬化。研究发现乳酸菌发酵后淀粉回升值降低<sup>[33]</sup>, 表明发酵淀粉更不易发生老化。

### 3.4 乳酸菌发酵对淀粉持水能力和溶解性的影响

淀粉的持水能力、溶解度体现了淀粉与水结合的能力, 在一定程度上影响谷物产品的加工特性和食品品质。乳酸菌发酵能够影响淀粉的持水性和溶解性。曾锐等<sup>[34]</sup>研究发现乳酸菌对海红米糠进行发酵处理后海红米糠的持水性和溶解度均显著增加。卫娟等<sup>[35]</sup>研究发现淀粉在酿酒酵母-短乳杆菌发酵过程中的溶解度随发酵时间的增加显著降低, 但发酵 24 h 后溶解度显著升高。发酵后的淀粉中有更多羟基与水形成氢键, 淀粉颗粒表面变粗糙, 孔隙较大, 淀粉颗粒中水分的毛细作用增加, 使产品的持水能力增加<sup>[36]</sup>。产品加热糊化过程中, 直链淀粉与支链淀粉脱支溶出, 溶解度随温度的上升而增加<sup>[37]</sup>。若达到糊化温度, 直链淀粉溶出加快, 溶解度迅速上升。

### 3.5 乳酸菌发酵对淀粉其他性质的影响

乳酸菌发酵还会对淀粉的凝胶特性、凝沉性、膨胀度、透明度等其他理化性质产生影响。乳酸菌发酵能够增加淀粉的凝胶特性、凝沉性、膨胀度、透明度, 能够改善发酵产品品质。郭东旭等<sup>[38]</sup>研究发现添加乳酸菌发酵酸面团能显著降低青麦仁面包的硬度、咀嚼性, 增大弹性。王文琪等<sup>[39]</sup>研究发现, 植物乳杆菌、类食品乳杆菌和发酵乳杆菌发酵与自然发酵制作的空心面条相比, 硬度、弹性和咀嚼性分别提高了 22.85%、4.49% 和 19.36%。乳酸菌发酵使淀粉分子降解, 淀粉结构改变, 直链淀粉的含量升高, 淀粉分子间的氢键容易使淀粉聚合成束状结构, 导致淀粉的凝沉性增加。原光滑淀粉颗粒表面被乳酸菌发酵后变粗糙,

使得淀粉表面积增大, 在水中能吸收更多的水分, 膨胀增加, 透光率增加, 淀粉的透明度增加。

乳酸菌发酵对谷物中淀粉的分子结构、糊化特性、老化特性、持水性、溶解性和凝胶特性、凝沉性、膨胀度、透明度等性质都具有一定的改良作用, 从而改善食品品质。

## 4 乳酸菌发酵谷物产品的优势

谷物经菌种发酵后, 可以改善谷物食品的理化性质和加工性能, 使谷物食品具有较低的血糖指数、理想的质地、良好的风味、延长其保质期、营养价值丰富。因此, 乳酸菌发酵谷物产品较未发酵产品而言极具优势。

### 4.1 降低产品血糖指数

血糖指数也称血糖生成指数(glycemic index, GI), 是衡量人体摄入食物后引起餐后自身血糖水平变化的有效指标<sup>[40]</sup>。食用高 GI 食物后, 食物在体内快速的消化吸收, 血糖波动剧烈, 长期食用高 GI 食物人群的慢性疾病发病率增加。而低 GI 食物在胃肠道中消化较慢, 对血糖影响较小, 有利于保持餐后血糖稳定。谷物中淀粉含量较高, 食用后体内血糖上升较快。乳酸菌发酵谷物产品通过降低其血糖指数和减轻机体的胰岛素抵抗, 降低机体的血糖水平。MCKEOWN 等<sup>[41]</sup>研究发现添加纯培养物比自发发酵更能有效降低 GI 值。

乳酸菌能够调节肠道菌群, 肠道益生菌可有效控制血糖, 与血糖上升呈负相关, 乳酸菌通过抑制病原菌对机体的入侵和定植, 增加有益菌含量, 提高肠道粘膜屏障功能, 从而影响机体血糖代谢, 有效缓解糖尿病症状。乳酸菌成分及代谢产物的降糖途径汇总于表 1。乳酸菌在发酵过程中产生有机酸会延迟胃排空或抑制淀粉酶活性, 从而降低小肠淀粉摄取率<sup>[42]</sup>。生理机制会改变酸的急性作用, 如乳酸能够降低淀粉消化速率, 乙酸和丙酸能够降低小肠 pH, 由此降低  $\alpha$ -淀粉酶  $\alpha$ -葡萄糖苷酶等淀粉消化酶的活性, 从而降低淀粉的消化性和血糖指数<sup>[43]</sup>。

乳酸菌代谢产生的胞外多糖能有效抑制促炎细胞因子的表达, 提高机体免疫能力, 从而调节了糖尿病患者的糖脂代谢能力。研究表明, 机体的抗氧化能力与糖尿病发病机制密切相关, 糖尿病患者的抗氧化防御系统能力降低, 清除自由基效率下降, 自由基对胰岛素受体的攻击会引起

表 1 乳酸菌发酵谷物产品的降糖途径  
Table 1 Hypoglycemic mechanism of lactic acid bacteria fermentation cereal

乳酸菌成分及代谢产物	降糖途径	文献来源
有机酸	抑制淀粉酶活性; 改善肠道菌群, 增强机体免疫; 促进胰岛素分泌; 提高抗性淀粉含量	[42-43]
胞外多糖	提高机体免疫; 抑制 $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性	[44-45]
特殊酶系	修复机体氧化损伤, 提高抗氧化能力	[20,46]
肽聚糖	改善肠道菌群组成; 改善机体抗氧化能力, 促进胰岛素分泌	[47-48]

胰岛素抵抗<sup>[49]</sup>, 导致血糖升高。胰岛素抵抗是糖尿病发生发展的主要原因之一, 在谷物产品中添加乳酸菌发酵能够减轻机体的胰岛素抵抗, 添加乳酸菌发酵的谷物面包的血糖调节能力进一步增强<sup>[50]</sup>, 胰岛素抵抗被有效降低, 有利于 II 型糖尿病的预防和治疗。乳酸菌代谢产生的特殊酶系: 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶和金属硫蛋白等活性物质可以降低氧化产物含量、减缓氧化应激、提高机体的抗氧化能力, 从而减缓胰岛素抵抗<sup>[44]</sup>, 降低机体血糖。肽聚糖作为乳酸菌细胞壁的组成成分, 能够通过改善肠道菌群组成, 提高机体抗氧化能力, 促进机体胰岛素分泌等方面从而降低血糖指数<sup>[45]</sup>。乳酸菌发酵谷物产品对改善血糖水平具有重要意义, 更利于糖尿病人群控制疾病, 扩展糖尿病患者食品的研发。

#### 4.2 改善产品风味及性质

添加乳酸菌发酵能够在改善谷物产品的性质的同时, 显著提高谷物产品的风味。韩艳秋等<sup>[51]</sup>乳酸菌发酵薯干后发现赋予薯干香气的醇类、酯类、醛类物质的含量显著增加, 发酵薯干的风味物质成分更为丰富。乳酸菌发酵会产生胞外多糖, 会使谷物面团的流变性得到提高, 降低谷物面制品的硬度, 减少相关添加剂的食用, 改善产品口感。罗伊氏乳杆菌 E81 产生的胞外多糖使酸面团获得更高的弹性<sup>[52]</sup>。产多糖乳酸菌的应用使发酵面团的呈现良好的三维网状结构, 制备的面包弹性和咀嚼性都明显好于原面团<sup>[53]</sup>。乳酸菌发酵后, 产品中的挥发性风味化合物含量显著增加, 大大增强谷物产品的风味<sup>[54]</sup>, 感官可接受性得到提高。植物乳杆菌发酵的酸面团表现出更好的黏弹性、延伸性和持水性, 富集香气挥发性化合物<sup>[55]</sup>; 发酵的米粉能改善米粉风味特性、提高米粉的持水性<sup>[56]</sup>, 同时还可以提高米粉的质构和蒸煮品质。乳酸菌发酵改善谷物产品的风味和性质, 弥补谷物产品的缺陷, 为谷物产品的扩展与开发提供了有效的基础。

#### 4.3 延长产品货架期

传统发酵的鲜面包, 谷物饮料等产品的贮藏期较短; 添加乳酸菌发酵可以延长贮藏期。有研究表明, 在汉堡面包的种面中添加乳酸菌发酵剂, 货架期从 12 d 延长至 15 d<sup>[57]</sup>。在农家干酪的发酵剂中添加高产细菌素的干酪乳杆菌 KLDS 1.0338, 贮藏过程中干酪的细菌生长速率减慢, 在冷藏条件下, 农家干酪的保质期延长一倍<sup>[58]</sup>。乳酸菌发酵过程能产生的乳酸可降低食品的 pH, 抑制使食品腐败的微生物生长, 以延长发酵制品的货架期。在传统发酵面包中添加乳酸菌发酵, 其代谢产物乳酸和苯丙酸等具有抗真菌活性, 显著减少黄曲霉和疣状青霉的数量, 相比于普通面包和添加防腐剂的的面包相比, 货架期得到延长<sup>[59]</sup>。另外, 乳酸菌还可以通过提高产品的抗氧化性质延长其货架期。在用于食品包装的可食用薄膜中添加 2% 的乳酸菌后, 薄膜的抗氧化活性明显增强, 货架期得到延长<sup>[46]</sup>。

#### 4.4 其他优势

乳酸菌发酵谷物产品的优势, 除降低产品血糖指数, 改善产品风味及性质, 延长产品货架期外, 还使产品具有乳酸菌自身的益生功能, 如增强机体免疫力、调节肠道菌群、降血糖、降血脂等。同时乳酸菌发酵谷物还具有良好的冷冻性能。OUYANG 等<sup>[60]</sup>研究发现乳酸菌与酵母菌复合菌种共同发酵制成的苦荞酸面团中, 结合水含量降低 0.48%, 非流动水和自由水含量分别提高 0.18% 和 0.3%, 面筋保持更均匀和规则的网络结构, 同时苦荞酸面团具有良好的防冻保护效果。

### 5 乳酸菌发酵在谷物产品中的应用

乳酸菌发酵在谷物产品中应用广泛, 主要产品有乳酸菌谷物面包、乳酸菌谷物饮料、乳酸菌馒头和乳酸菌发酵酱等等。下面阐述了乳酸菌发酵在这些食品中的应用情况。

#### 5.1 乳酸菌谷物面包

随着人们生活水平的提高, 饮食更加多元化, 心血管疾病、糖尿病等发病率逐年增加, 人们更加追求健康饮食, 倾向于食用低 GI 值的食物。杂粮面包、全麦面包等发酵谷物制品是代替米饭等血糖指数偏高食物的较好选择。乳酸菌发酵的杂粮面包增强了其血糖调节功效, 通过调节肠道菌群、促进胰岛素分泌、抑制消化酶活性 3 方面降低面包的血糖指数<sup>[47]</sup>。另外, 部分人群对小麦中的麸质成分敏感, 食用含麸质的食物会引起麸质不耐受, 包括自身免疫性乳糜泻、小麦过敏和非乳糜泻性麸质敏感症, 最常见的为乳糜泻。乳酸菌发酵面包可以改善谷物中麸质不耐受的问题。由于小麦粉中独特的麦谷蛋白和醇溶蛋白, 能形成其他谷物不具备的麸质, 又称面筋, 能够赋予面团良好的黏弹性。面筋的网络结构如图 2 所示。

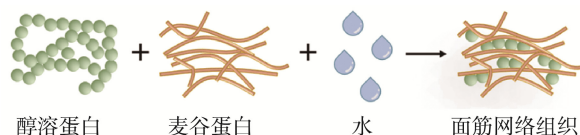


图2 面筋网络组织的形成

Fig.2 Formation of gluten network organization

乳酸菌可以降解麸质蛋白, 使其发酵的无麸质酸面团制品中麸质含量不超过 20 mg/kg。面包的比容影响其柔软度, 相同质量的面包比容越大, 柔软度越高, 乳酸菌发酵后面包的比容显著增加。比容的增加主要是由于乳酸菌代谢产生的有机酸和胞外多糖。有机酸带来的酸性环境使酵母菌产气量增加, 面团的蓬松度增加; 还使面筋蛋白的三维网状结构被破坏, 面包的柔软度随之增加<sup>[48]</sup>。胞外多糖通过与谷蛋白的交联作用, 增强面团的稳定性和储气能力, 面包的比容得到增强<sup>[61]</sup>。

## 5.2 谷物发酵饮料

发酵饮料是各种原料经微生物发酵配制而成,酒精含量在 1%(体积分数)以下的饮料<sup>[62]</sup>。市场上的发酵饮料主要有发酵乳饮料、果蔬汁发酵饮料、蛋白发酵饮料、谷物发酵饮料、食用菌发酵饮料等。谷物发酵饮料是以各种谷物为主要原料,用酶法将谷物中的淀粉水解为低聚糖发酵而制成。在谷物发酵饮料中,游离氨基酸、游离钙、游离铁等成分的含量相比于原谷物大大提高。研究发现用紫甘蓝色素可对谷物发酵料中的氨基酸态氮进行快速检测,且氨基酸含量越高,鲜味越好<sup>[63]</sup>。发酵后不仅保存了谷物中的营养成分,又具有乳酸菌发酵带来的保健作用。格瓦斯饮料是典型的谷物发酵饮料,采用俄式大面包为主要原料,添加酒花、麦芽糖经乳酸菌和多菌株混合发酵制成的含低度酒精的饮料,具有促进肠道健康、开胃、健脾、降血压、消除疲劳等作用,在东欧国家十分盛行。除此之外,多种新型格瓦斯也相继被研发,丰富了格瓦斯饮料的口味。以面包和红薯为主料发酵制成的红薯格瓦斯发酵饮料营养丰富、酸甜爽口、滋味独特<sup>[64]</sup>。以青稞和绿豆为原料,原料比例 7:3,以生香酵母和保加利亚乳杆菌为发酵剂、添加 0.25% 28℃条件下发酵 24 h 得到具有较好的抗氧化活性的青稞绿豆格瓦斯<sup>[65]</sup>。以大麦芽、玉米粉和大米为原料,经乳酸菌和安琪活性干酵母共同发酵,将发酵液调味、杀菌、充气得到新型谷物格瓦斯饮料,营养丰富,价格低廉,具有独特的风味。大麦芽、绿豆为原料还可制成风味优良的绿豆发酵饮料<sup>[66]</sup>。

谷物发酵饮料中,谷物发酵乳也倍受欢迎。谷物发酵乳中富含活性乳酸菌以及乳酸菌代谢产物,具有诸多营养保健功能<sup>[67]</sup>。发酵乳中的乳酸菌代谢产生的 $\beta$ -半乳糖苷酶能够促进乳糖分解,可以缓解乳糖不耐受的问题,还可以提高产品中膳食纤维、抗性淀粉和低聚糖的含量<sup>[68]</sup>。谷物发酵乳分为谷物汁型发酵乳和谷物颗粒型发酵乳<sup>[69]</sup>。谷物汁型发酵乳是在谷物发酵乳制作中,将谷物磨浆后,经过液化和糖化处理后将得到的谷物汁添加到原料乳中一起发酵生产发酵乳。如以燕麦为原材料,将燕麦汁与脱脂乳混合,添加乳酸菌发酵得到富含可溶性膳食纤维和不饱和脂肪酸的益生菌发酵乳<sup>[70]</sup>。将糊化灭菌后的荞麦汁与牛乳混合后添加乳酸菌发酵,得到一款具有独特荞麦风味,营养丰富的荞麦发酵乳<sup>[71]</sup>。大米发酵乳、大麦发酵乳、玉米发酵乳、红豆发酵乳等谷物发酵乳也相应被研发。谷物发酵乳不仅降解谷物中的抗营养因子,提高其营养价值,丰富发酵乳的风味。谷物颗粒型发酵乳是把谷物直接添加到酸乳中或者加入到牛乳中与酸乳共同发酵制成的发酵乳。燕麦、山药和薏米等经挤压膨化再超微粉碎后,添加到复原乳中,接种乳酸菌发酵剂能够发酵生产一款全谷物发酵乳<sup>[72]</sup>。以全谷物为添加物制备的发酵乳风味独特、具有抗氧化和抗消化特性<sup>[73]</sup>,更加适宜于糖尿病患者食用,并满足健康人群对低热量乳品的需求。

## 5.3 乳酸菌发酵馒头

馒头是面粉、水和酵母菌经一定比例混合而成的面团经过揉制、醒发、蒸制而成的食品,是我国的传统主食之一。传统发酵馒头是以小麦粉为原料,酵母菌为发酵剂蒸制而成的。传统发酵馒头中的淀粉含量较高,导致馒头的血糖指数较高,对身体健康有较大影响。杂粮馒头能够降低馒头的血糖指数,但杂粮馒头的口感相对较差。将单一的酵母发酵剂更换为乳酸菌与酵母菌复合发酵剂后,乳酸菌与酵母菌的协同作用降低了馒头的血糖指数,馒头的咀嚼性、弹性、质地、风味也得到改善,兼顾馒头的营养与感官品质。乳酸菌和酵母菌的相互作用还会影响面团的酸化和贮藏能力。发酵馒头的乳酸菌主要是通过异型发酵的乳杆菌进行发酵<sup>[74]</sup>,异型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。二氧化碳会使面团松软,形成的面团体积膨大,面团柔软。酵母菌可利用乳酸菌代谢产生的有机酸等物质大量生长繁殖,酵母菌数量增多,二氧化碳含量增大,面团的持气量增加,面团的柔韧性得到改善<sup>[75-76]</sup>。与此同时,酵母菌发酵产生的大量氨基酸,能够被乳酸菌作为代谢底物,同时诱导乳酸菌自身的蛋白酶和肽酶水解蛋白质产生氨基酸,发酵后面团的风味物质增加<sup>[77]</sup>。戊糖片球菌和安琪高活性干酵母进行复配,戊糖片球菌添加量为 $3.0 \times 10^7$  CFU/g,酵母菌添加量 $1.0 \times 10^{10}$  CFU/g,和面 14 min,发酵 5 h 制备的富麸馒头的比容显著增加,硬度和咀嚼性降低,风味物质增加<sup>[78]</sup>。

## 5.4 乳酸菌发酵酱

发酵酱是中国传统特色发酵调味品之一,是许多美食的必备调味料,主要是以大豆、小麦、蚕豆等谷物为原料蒸熟,捣碎后经微生物发酵而制成的半固态食品,有黄豆酱、小麦酱,豆瓣酱等。发酵酱的味道与香味对于其品质至关重要,风味物质是由于微生物的代谢活动产生,发酵过程中微生物的种类复杂繁多,主要有霉菌、酵母菌、芽孢杆菌属和乳酸菌等<sup>[79]</sup>。研究发现,乳酸菌与发酵酱风味物质的形成有密切关系,是影响发酵酱风味的主要菌属之一<sup>[80]</sup>。研究发现,吉林市农家传统发酵豆酱中戊糖片球菌是发酵的优势乳酸菌菌群<sup>[81]</sup>。乳酸菌发酵过程中会将谷物中的蛋白质分解成多肽和各种氨基酸,还原糖会与氨基酸发生美拉德反应,生成类黑色素的褐色物质及各种挥发性风味物质,能够增加发酵酱的色泽与风味,使豆酱味道丰富无异味。其中谷氨酸和天冬氨酸可以与无机盐产生发酵酱典型的鲜味成分<sup>[82]</sup>。东北传统发酵豆酱中的氨基酸含量显著高于生豆粉和熟豆粉的氨基酸含量<sup>[83]</sup>。代谢产生的有机酸是发酵酱酸味的来源,乳酸菌能通过发酵谷物中的营养物质产生乳酸、柠檬酸等非挥发性有机酸,提供了发酵酱所需的酸味,使发酵酱的口感丰富<sup>[84]</sup>。乳酸菌还可以降低原料中的抗营养因子含量<sup>[85]</sup>,如植酸等、蛋白酶抑制剂,提高营养成分的吸收。

将乳酸菌发酵对谷物产品的品质影响汇总于表 2。

表 2 乳酸菌发酵对谷物产品的品质影响  
Table 2 Effects of lactic acid bacteria fermentation on the quality of cereal products

乳酸菌发酵谷物食品	品质影响	参考文献
面包	增加比容, 增加风味, 降低麸质不耐受, 弹性增加, 降低血糖指数, 降低硬度, 营养价值增加, 延长货架期	[45,48]
发酵饮料	促进肠道健康, 缓解乳糖不耐受, 风味独特	[65]
馒头	降低血糖指数, 营养价值增加, 柔软度增加, 风味增强, 延长保质期	[42,77]
豆酱	促进营养物质的吸收, 改善风味	[81,85]

## 6 结束语

乳酸菌发酵食品产生的有机酸、胞外多糖、特殊酶系等物质使发酵食品具有提高免疫力、降血糖、降血压、降低胆固醇、抗肿瘤以及预防癌症等多种生物活性, 符合人们对健康食品的需要。目前, 乳酸菌广泛应用于发酵乳制品加工、发酵肉制品加工、发酵果蔬加工、发酵谷物制品加工、调味品生产等方面。谷物是许多亚洲人民的传统主食, 充分利用谷物资源, 可以提高谷物在食品加工领域的利用价值。利用乳酸菌发酵谷物可改变其理化性质及产品特性, 但不同种类的乳酸菌对谷物的发酵效果和品质改善作用有所差异。因此, 在实际生产中, 选择适合的乳酸菌菌株进行发酵是十分重要的。

当前的研究中, 乳酸菌的保存方式、应用范围及安全性等方面, 仍需要进一步深入探索。未来的研究可以从以下几个方面展开: (1)优化乳酸菌发酵工艺; (2)研究乳酸菌在谷物中的代谢机制; (3)探索乳酸菌与其他微生物的共同作用效应, 评估乳酸菌发酵谷物产品的安全性和功能性。这些研究将为乳酸菌在发酵谷物产品中的应用提供更为可靠的理论基础, 并促进乳酸菌发酵在食品行业中的应用。

## 参考文献

- [1] MATIN MK, ZOHREH HE, MOHAMMAD HA. isolation and identification of lactic acid bacteria with phytase activity from sourdough [J]. Food Sci Nutr, 2019, 7(11): 3700–3708.
- [2] 王丽丽. 乳酸菌的分离及酸奶的发酵[J]. 食品安全导刊, 2016, (11): 135–135.  
WANG LL. Isolation of lactic acid bacteria and fermentation of yogurt [J]. China Food Saf Mangaz, 2016, (11): 135–135.
- [3] TU Y, HUANG S, CHI C, *et al.* Digestibility and structure changes of rice starch following co-fermentation of yeast and *Lactobacillus* strains [J]. Int J Biol Macromol, 2021, 184: 530–537.
- [4] ASHAOLU JT, REALE A. A holistic review on euro-asian lactic acid bacteria fermented cereals and vegetables [J]. Microorganisms, 2020. DOI: 10.3390/microorganisms8081176
- [5] ANNA R, URSULA K, RAFFAELE C, *et al.* The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal dough fermentation [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(8): 2993.
- [6] CAPOZZI V, RUSSO P, DUEÑAS MT, *et al.* Lactic acid bacteria producing B-group vitamins: A great potential for functional cereals products [Z]. 2013.
- [7] LIN L, TAO S, YUAN Z, *et al.* Superhydrophobic modification of aluminum alloy via chemical etching and phytic acid/metal ion self-assembly [J]. Appl Phys A, 2022. DOI: 10.1007/s00339-022-05444-w
- [8] RODEHUTSCORD M. Mineral and phytic acid content as well as phytase activity in flours and breads made from different wheat species [J]. Int J Mol Sci, 2023. DOI: 10.3390/ijms24032770
- [9] 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 WC, LUO K, CHENG X, *et al.* Study on Fermentation of low phytase nutritional bread by lactic acid bacteria with high phytase yield and black bean sour dough [J]. Food Mach, 2021, 37(2): 186–193.
- [10] 罗昆, 曹伟超, 马子琳, 等. 高产植酸酶乳酸菌发酵对黑豆面包蛋白质品质及烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 111–117.  
LUO K, CAO WC, MA ZL, *et al.* Effects of lactic acid bacteria fermentation with high phytase yield on protein quality and baking characteristics of black bean bread [J]. Food Sci, 2021, 42(6): 111–117.
- [11] FOSSI BT, EKABE DE, TOUKAM LL, *et al.* Probiotic lactic acid bacteria isolated from traditional cameroonian palm wine and corn beer exhibiting cholesterol lowering activity [J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11708.
- [12] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ S, RAMOS IM, RODRÍGUEZ-PÉREZ M, *et al.* Lactic acid bacteria as biocontrol agents to reduce *Staphylococcus aureus* growth, enterotoxin production and virulence gene expression [J]. LWT, 2022, 170: 114025.
- [13] 华鹤良. 乳酸菌的分离鉴定及其抗菌肽与发酵性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2014.  
HUA HL. Isolation and identification of lactic acid bacteria and their antimicrobial peptides and fermentation properties [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2014.
- [14] NAGAOKA S. Yogurt production [Z]. 2019.
- [15] 王淑梅, 张爽, 张莉丽, 等. 乳酸菌调节机体免疫作用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(4): 16–18, 27.  
WANG SM, ZHANG S, ZHANG LL, *et al.* Research progress on the regulation of immune function by lactic acid bacteria [J]. Cere Oil, 2022, 35(4): 16–18, 27.
- [16] YANG S, XU X, PENG Q, *et al.* Exopolysaccharides from lactic acid bacteria, as an alternative to antibiotics, on regulation of intestinal health and the immune system [Z]. 2023.
- [17] WERNING ML, HERNÁNDEZ-ALCÁNTARA AM, RUIZ MJ, *et al.* Biological functions of exopolysaccharides from lactic acid bacteria and their potential benefits for humans and farmed animals [J]. Foods, 2022, 11(9): 1284.
- [18] 耿瑶, 曹颖, 崔焯堃, 等. 食品中乳酸菌的种类及应用前景研究进

- 展[J]. 食品工业, 2023, 44(3): 234–238.
- GENG Y, CAO Y, CUI WK, *et al.* Research progression the types and application prospects of lactic acid bacteria in food [J]. Food Ind, 2023, 44(3): 234–238.
- [19] HOUSSNI IEL, KHEDID K, ZAHIDI A, *et al.* The inhibitory effects of lactic acid bacteria isolated from sourdough on the mycotoxigenic fungi growth and mycotoxins from wheat bread [J]. Biocatal Agric Biotechnol, 2023. DOI: 10.1016/j.bcab.2023.102702
- [20] 王怡明. 乳酸菌及其生物工程研究新进展[J]. 科技风, 2022, (10): 152–154.
- WANG YM. Research progress of lactic acid bacteria and their bioengineering [J]. Sci Technol Wind, 2022, (10): 152–154.
- [21] GARBACZ K. Anticancer activity of lactic acid bacteria [C]. Semin, Cancer Biol, 2022, 86: 356–366.
- [22] 张钊瑞. 乳酸菌肽聚糖的功能特性及其对鲜切苹果品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- ZHANG ZR. Functional characteristics of *Lactobacillus* peptidoglycan and its effect on quality of fresh-cut apples [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [23] RODRIGO S, SENASINGHE K, QUAZI S. Molecular and therapeutic effect of CRISPR in treating cancer [J]. Med Oncol, 2023, 40(2): 81.
- [24] 孟凯丽. 多菌种发酵多孔挂面过程中淀粉和蛋白的变化及营养特性研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023.
- MENG KL. Study on the changes and nutritional characteristics of starch and protein during multi-strain fermentation of porous noodles [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.
- [25] TU Y, HUANG S, CHI C, *et al.* Digestibility and structure changes of rice starch following co-fermentation of yeast and *Lactobacillus* strains [J]. Int J Biol Macromol, 2021, 184: 530–537.
- [26] 叶为标. 淀粉糊化及其检测方法[J]. 粮食与油脂, 2009, (1): 7–10.
- YE WB. Starch gelatinization and its detection method [J]. Cere Oil, 2009, (1): 7–10.
- [27] XUE L, XIAONA G, KEXUE Z. Effect of fermentation on the quality of dried hollow noodles and the related starch properties [J]. Foods, 2022, 11(22): 3685.
- [28] 闵伟红, 李里特, 王朝辉. 乳酸菌发酵对大米淀粉物理化学性质的影响[J]. 食品科学, 2004, (10): 73–76.
- MIN WH, LI LT, WANG ZH. Effects of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties of rice starch [J]. Food Sci, 2004, (10): 73–76.
- [29] 王东坤, 张佳艳, 李才明, 等. 植物乳杆菌强化发酵对鲜湿米粉品质的影响及作用机理分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 134–139.
- WANG DK, ZHANG JY, LI CM, *et al.* Effect and mechanism analysis of enhanced fermentation of *Lactobacillus plantarum* on quality of fresh and wet rice flour [J]. Food Ferment Ind, 2022, 48(7): 134–139.
- [30] LIANG Z, YI M, SUN J, *et al.* Physicochemical properties and volatile profile of mung bean flour fermented by *Lactocaseibacillus casei* and *Lactococcus lactis* [J]. LWT, 2022, 163: 113565.
- [31] 王博, 张维清, 李鹏, 等. 不同发酵类型乳酸菌对全麦面包品质影响研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 2023: 1–10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036055
- WANG B, ZHANG WQ, LI P, *et al.* Effects of different fermentation types of lactic acid bacteria on the quality of whole wheat bread [J/OL]. Food Ferment Ind, 2023: 1–10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.036055
- [32] TORRIERI E, PEPE O, VENTORINO V, *et al.* Effect of sourdough at different concentrations on quality and shelf life of bread [J]. LWT, 2014, 56(2): 508–516.
- [33] 方鲁平. 优良乳酸菌和酵母菌发酵液体酸面团的品质和蛋白组分变化研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
- FANG LP. Study on the changes of quality and protein components of liquid sour dough fermented by fine lactic acid bacteria and yeast [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023.
- [34] 曾锐, 汪卓, 陈菁, 等. 乳酸菌发酵对海红米糠的结构和功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 119–124.
- ZENG R, WANG Z, CHEN J, *et al.* Effects of lactic acid bacteria fermentation on structure and functional properties of sea red rice bran [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(11): 119–124.
- [35] 卫娟, 洪静, 郑学玲. 酸面团发酵对小麦淀粉结构和理化性质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 15–21.
- WEI J, HONG J, ZHANG XL. Effects of sour dough fermentation on structure and physicochemical properties of wheat starch [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2021, 42(2): 15–21.
- [36] MENGQI P, ZIFU Z, SONG C, *et al.* Physicochemical properties and volatile components of pea flour fermented by *Lactobacillus rhamnosus* L08 [J]. Food Biosci, 2022, 46: 101590.
- [37] ISA NLM, KORMIN F, IWANSYAH AC, *et al.* Physicochemical properties and characterization of fermented cassava flour by lactic acid bacteria [J]. IOP Conf Ser: Earth Environ Sci, 2021, 736(1): 012023.
- [38] 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 DX, ZHANG KY, GAO LL, *et al.* Effect of lactic acid bacteria on the quality of green wheat kernel bread [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(1): 61–67, 74.
- [39] 王文琪, 王志强, 沈海军, 等. 乳酸菌发酵对空心面条品质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2023: 1–10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035210
- WANG WQ, WANG ZQ, SHEN HJ, *et al.* Effect of lactic acid bacteria fermentation on quality of hollow noodles [J/OL]. Food Ferment Ind, 2023: 1–10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035210
- [40] 王笑颖, 冯艺飞, 战虎. 浅谈血糖生成指数研究现状[J]. 现代食品, 2021, (11): 143–146.
- WANG XY, FENG YF, ZHAN H. Discussion on the research status of glycemic index [J]. Mod Prod, 2021, (11): 143–146.
- [41] MCKEOWN NM, MEIGS JB, LIU S, *et al.* Carbohydrate nutrition, insulin resistance, and the prevalence of the metabolic syndrome in the framingham offspring cohort [J]. Diabetes Care, 2004, 27(2): 538–546.
- [42] SIEPMANN FB, ALMEIDA BS, WASZCZYNSKYJ N, *et al.* Influence of temperature and of starter culture on biochemical characteristics and the aromatic compounds evolution on type II sourdough and wheat bread [J]. LWT, 2019, 108: 199–206.
- [43] MANSUR AR, JEONG GA, LEE CJ. Preparation physicochemical properties, and *in vivo* digestibility of thermostable resistant starch from malic acid-treated wheat starch [J]. Food Rev Int, 2022, 162: 112159.
- [44] LEBOVITZ HE. Insulin resistance: Definition and consequences [J]. Eexp Clin Endocr Diab, 2001, 109(S2): S135–S148.
- [45] 买尔哈巴·艾合买提, 曹英, 崔卫东, 等. 乳酸菌发酵驼乳工艺优化及抑制  $\alpha$ -淀粉酶和  $\alpha$ -葡萄糖苷酶活性的研究[J]. 中国乳业, 2022, (8):



- 97-107.  
MERHABA A, CAO Y, CUI WD, *et al.* Study on optimization of camel milk fermentation process and inhibition of  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase activities by lactic acid bacteria [J]. *Chin Dairy Ind*, 2022, (8): 97-107.
- [46] 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 XF. Study on intervention and mechanism of exopolysaccharide producing lactic acid bacteria in type 2 diabetes mellitus [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [47] 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.  
AN J, LIU JK, SHENG QH, *et al.* Research progress on improving quality and hypoglycemic mechanism of multi-grain bread fermented by lactic acid bacteria [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(24): 1-10.
- [48] HU Y, ZHANG J, WANG S, *et al.* Lactic acid bacteria synergistic fermentation affects the flavor and texture of bread [J]. *J Food Sci*, 2022, 87(4): 1823-1836.
- [49] EVANS JL, GOLDFINE ID, MADDUX BA, *et al.* Are oxidative stress-activated signaling pathways mediators of insulin resistance and  $\beta$ -cell dysfunction? [J]. *Diabetes*, 2003, 52(1): 1-8.
- [50] PEI J, FENG Z, REN T, *et al.* Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley [J]. *Eng Life Sci*, 2018, 18(1): 48-54.
- [51] 韩艳秋, 叶春苗, 李莉峰. 乳酸菌发酵对薯干质构和风味的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(15): 50-54.  
HAN YQ, YE CM, LI LF. Effect of *Lactobacillus* fermentation on texture and flavor of potato [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44(15): 50-54.
- [52] SUN L, LI X, ZHANG Y, *et al.* A novel lactic acid bacterium for improving the quality and shelf life of whole wheat bread [J]. *Food Control*, 2020, 109: 106914
- [53] İSPIRLI H, ÖZMEN D, YILMAZ MT, *et al.* Impact of glucan type exopolysaccharide (EPS) production on technological characteristics of sourdough bread [J]. *Food Control*, 2020, 107: 106812.
- [54] ABEDFAR A, HOSSEININEZHAD M, CORSETTI A. Retracted: Effect of wheat bran sourdough with exopolysaccharide producing *Lactobacillus plantarum* (NR\_104573. 1) on quality of pan bread during shelf life [Z]. 2019.
- [55] PEI J, FENG Z, REN T, *et al.* Selectively screen the antibacterial peptide from the hydrolysates of highland barley [J]. *Eng Life Sci*, 2018, 18(1): 48-54.
- [56] 王登宇, 孔垂琴, 王冰, 等. 乳酸菌发酵对混合米粉理化特性及年糕品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(3): 229-239.  
WANG DY, KONG CQ, WANG B, *et al.* Effects of lactic acid bacteria fermentation on physicochemical properties of mixed rice flour and quality of rice cake [J]. *Chin J Food Sci*, 2023, 23(3): 229-239.
- [57] 周雪. 乳酸菌发酵剂在汉堡面包防腐中的应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.  
ZHOU X. Application of lactic acid bacteria starter culture in the preservation of hamburger bread [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [58] 于微, 马春丽, 孙婷婷, 等. 产细菌素乳酸菌的筛选及对农家干酪保质期的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(3): 142-146.  
YU W, MA CL, SUN TT, *et al.* Screening of bacteriocin-producing *Lactobacillus* and its effect on shelf life of cottage cheese [J]. *Food Sci*, 2015, 36(3): 142-146.
- [59] DOPAZO V, ILLUECA F, LUZ C, *et al.* Evaluation of shelf life and technological properties of bread elaborated with lactic acid bacteria fermented whey as a bio-preservation ingredient [Z]. 2023.
- [60] OUYANG B, DUAN M, ZHU S, *et al.* Effect of tartary buckwheat sourdough fermented by different exogenous lactic acid bacteria on antifreeze property of frozen dough [J]. *Food Chem Adv*, 2023, 2: 100182.
- [61] 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 QB, CHENG X, CHEN C, *et al.* Effect of mixed bacteria fermented sour dough on flavor and baking characteristics of whole wheat bread [J]. *Food Mach*, 2020, 36(4): 32-39.
- [62] 王磊, 陈宇飞, 刘长姣. 发酵饮料的开发现状及研究前景[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(10): 379-382.  
WANG L, CHEN YF, LIU CJ. Development status and research prospect of fermented beverage [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2015, 36(10): 379-382.
- [63] 高向阳, 王彦花, 郭楠楠. 谷物酿造料酒氨基酸态氮含量和级别的快速检测[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(18): 7293-7297.  
GAO XY, WANG YH, GUO NN. Rapid determination of amino acid nitrogen content and level in grain brewing wine [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 12(18): 7293-7297.
- [64] 李文鹏, 李雪晖, 田龙, 等. 红薯格瓦斯复合发酵饮料的研制[J]. *南阳师范学院学报*, 2018, 17(3): 26-30.  
LI WP, LI XH, TIAN L, *et al.* Development of sweet potato kvass complex fermented beverage [J]. *J Nanyang Normal Univ*, 2018, 17(3): 26-30.
- [65] 潘云峰. 青稞绿豆格瓦斯的制备、功效特性研究及其副产物的利用[D]. 成都: 四川轻化工大学, 2019.  
PAN YF. Study on the preparation, efficacy and properties of *Gvass* from green barley and mung bean and utilization of its by-products [D]. Chengdu: Sichuan University of Light Chemical Engineering, 2019.
- [66] 温慧, 刘婷, 张智威, 等. 绿豆格瓦斯的研制及成分分析[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(3): 169-176, 20.  
WEN H, LIU T, ZHANG ZW, *et al.* Preparation and composition analysis of mung bean gas [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(3): 169-176, 20.
- [67] 王雪宁, 万丹丹. 乳酸菌的功能作用及在食品工业中的应用[J]. *食品安全导刊*, 2020, (3): 88.  
WANG XN, WAN DD. Function of lactic acid bacteria and its application in food industry [J]. *Chin Food Saf Mangaz*, 2020, (3): 88.
- [68] 包一帆. 低血糖生成指数全谷物发酵乳的研制[D]. 扬州: 扬州大学, 2017.  
BAO YF. Development of whole grain fermented milk with low glycemic index [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2017.
- [69] 马先红, 王莹, 张清环, 等. 谷物酸奶的研究现状[J]. *粮食与油脂*, 2017, 30(10): 6-8.  
MA XH, WANG Y, ZHANG QH, *et al.* Research status of cereal yogurt [J]. *Cere Oil*, 2017, 30(10): 6-8.
- [70] BEKERS M, MARAUSKA M, LAUKEVICS J, *et al.* Oats and fat-free milk based functional food product [J]. *Food Biotechnol*, 2001, 15(1): 1-12.
- [71] 刘刚. 荞麦酸奶加工工艺的研究[J]. *农产品加工*, 2009, (11): 11-12.

- LIU G. Study on processing technology of buckwheat yogurt [J]. *Process Agric Prod*, 2009, (11): 11–12.
- [72] 杨淑妮, 李理. 全谷物酸奶的理化及功能特性研究[J]. *中国乳品工业*, 2016, 44(4): 17–20.
- YANG SN, LI L. Study on physicochemical and functional properties of whole grain yogurt [J]. *Chin Dairy Ind*, 2016, 44(4): 17–20.
- [73] 苏颖晶. 发酵剂对全谷物酸牛奶功能特性的影响及糖代谢作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- SU YJ. Effects of starter culture on functional characteristics and glucose metabolism of whole grain sour milk [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [74] 代永刚, 田志刚, 南喜平. 乳酸菌及其生理功能研究的进展[J]. *农产品加工(学刊)*, 2009, (7): 24–26, 29.
- DAI YG, TIAN ZG, NAN XP. Research progress of lactic acid bacteria and their physiological functions [J]. *Acad Period Farm Prod Process*, 2009, (7): 24–26, 29.
- [75] LHOMME E, ONNO B, CHUAT V, *et al.* Genotypic diversity of *Lactobacillus sanfranciscensis* strains isolated from French organic sourdoughs [J]. *Int J Food Microbiol*, 2016, 226: 13–19.
- [76] CONTARINO R, BRIGHINA S, FALLICO B, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) produced by biocontrol yeasts [J]. *Food Microbiol*, 2019, 82: 70–74.
- [77] 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.
- [78] 马扶强. 乳酸菌酵母菌复合发酵制备富麸馒头[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- MA FQ. Preparation of gluten-rich steamed bread by Lactic acid bacteria yeast complex fermentation [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022.
- [79] 张颖. 豆酱自然发酵过程微生物多样性分析研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- ZHANG Y. Analysis of microbial diversity during natural fermentation of bean paste [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [80] 邓威, 韩篷慧, 王美淇, 等. 传统豆酱微生物群落演替及风味物质变化的研究进展[J]. *中国调味品*, 2023, 48(2): 213–220.
- DENG W, HAN PH, WANG MQ, *et al.* Research progress of microbial community succession and flavor substance changes in traditional soybean paste [J]. *Chin Cond*, 2023, 48(2): 213–220.
- [81] 左丽丽, 高永欣, 王钰涓, 等. 传统发酵豆酱中乳酸菌的分离及鉴定[J]. *中国调味品*, 2020, 45(11): 117–120.
- ZUO LL, GAO YX, WANG YJ, *et al.* Isolation and identification of lactic acid bacteria from traditional fermented bean paste [J]. *Chin Cond*, 2020, 45(11): 117–120.
- [82] 康旭, 乔鑫, 李冬生, 等. 豆酱中黄豆氨基酸变化与挥发性物质的关系[J]. *食品科技*, 2011, 36(6): 281–286.
- KANG X, QIAO X, LI DS, *et al.* Relationship between amino acids of soybean and volatile substances in soybean paste [J]. *Food Sci Technol*, 2011, 36(6): 281–286.
- [83] 武俊瑞, 顾采东, 田甜, 等. 豆酱自然发酵过程中蛋白质和氨基酸的变化规律[J]. *食品科学*, 2017, 38(8): 139–144.
- WU JR, GU CD, TIAN T, *et al.* Changes of protein and amino acid during natural fermentation of soybean paste [J]. *Food Sci*, 2017, 38(8): 139–144.
- [84] 解梦汐. 基于宏蛋白质组学对不同发酵豆酱菌群结构和代谢功能的差异研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- XIE MX. Study on the difference of structure and metabolic function of different fermented bean paste bacteria based on macroproteomics [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [85] DAS D, SARKAR S, WANN SB, *et al.* Current perspectives on the anti-inflammatory potential of fermented soy foods [J]. *Food Res Int*, 2022, 152: 110922.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

## 作者简介



马春敏, 博士, 讲师, 主要研究方向为谷物化学利用与研究。

E-mail: chunmin\_ma@163.com



张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。

E-mail: foodzhangna@163.com