

剧柠, 张悦, 郭帅, 等. 谷物联合益生菌在发酵乳制品应用中的现状、机遇和挑战 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 469–479. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100128

JU Ning, ZHANG Yue, GUO Shuai, et al. Present Situation, Opportunity and Challenge of Application of Cereals Combined Probiotics in Fermented Dairy Products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 469–479. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100128

· 专题综述 ·

谷物联合益生菌在发酵乳制品应用中的现状、机遇和挑战

剧 柠¹, 张 悦¹, 郭 帅^{1,*}, 刘雅琪¹, 高 岩¹, 顾晓亮¹, 贺旭丽¹, 黄艳华²

(1. 宁夏大学食品科学与工程学院, 宁夏银川 750021;

2. 吴忠市农产品质量安全检测中心, 宁夏吴忠 751100)

摘 要: 谷物富含膳食纤维、维生素和矿物质等活性物质, 而益生菌具有调节肠道菌群、提高免疫力等功效。将谷物与益生菌联合应用于发酵乳制品, 不仅保留了传统乳制品的营养和功能特性, 还增加了谷物和益生菌所提供的额外营养, 为消费者提供了更为全面且均衡的膳食选择, 以满足其多样化的营养需求。因此, 将谷物与益生菌联合应用可作为提升发酵乳制品功能特性、改善质地和风味的新策略。基于此, 本文概述了谷物和益生菌特性, 以及二者之间的相互作用机制 (协同作用), 重点综述了谷物与益生菌结合对发酵乳制品在风味、质地、组织结构以及功能特性等方面的影响, 并探讨了将二者应用于发酵乳制品后可能面临的挑战, 为推动发酵乳制品行业的创新与发展提供了新思路。

关键词: 谷物, 益生菌, 发酵乳制品, 功能特性, 新策略

中图分类号: TS252.54

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)18-0469-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100128

本文网刊:



Present Situation, Opportunity and Challenge of Application of Cereals Combined Probiotics in Fermented Dairy Products

JU Ning¹, ZHANG Yue¹, GUO Shuai^{1,*}, LIU Yaqi¹, GAO Yan¹, GU Xiaoliang¹, HE Xuli¹, HUANG Yanhua²

(1. College of Food Science and Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Wuzhong Agricultural Products Quality and Safety Testing Center, Wuzhong 751100, China)

Abstract: Grains are rich in active substances such as dietary fiber, vitamins, and minerals, while probiotics possess the efficacy of regulating the intestinal flora and enhancing immunity. The combined application of grains and probiotics in fermented dairy products not only preserves the nutritional and functional properties of traditional dairy products but also adds the extra nutrients offered by grains and probiotics, providing consumers with a more comprehensive and balanced dietary option to satisfy their diversified nutritional demands. Hence, the joint application of grains and probiotics can serve as a novel strategy for enhancing the functional characteristics, ameliorating the texture and flavor of fermented dairy products. On this basis, the article outlines the characteristics of grains and probiotics, as well as the interaction mechanism (synergistic effect) between them. It focuses on reviewing the influence of the combination of grains and probiotics on the flavor, texture, organizational structure, and functional characteristics of fermented dairy products and explores the possible challenges after applying the two to fermented dairy products, providing new insights for promoting the innovation and development of the fermented dairy products industry.

Key words: cereal; probiotics; fermented dairy products; functional characteristics; new strategy

收稿日期: 2024-10-14

基金项目: 中央引导地方科技发展专项项目 (2024FDR05071); 宁夏回族自治区重点研发计划项目 (2021BEF02022); 国家自然科学基金地区项目 (32160593)。

作者简介: 剧柠 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 乳制品加工及乳品微生物学, E-mail: juning1122@163.com。

* 通信作者: 郭帅 (1995-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 乳酸菌资源开发与利用、乳制品加工技术研究, E-mail: guoshuai19950419@163.com。

发酵乳制品是通过特定的微生物发酵过程,将原料乳转化为具有独特风味和质地的乳制品^[1]。它作为乳制品的一个重要分类,涵盖了酸奶、发酵乳酪、开菲尔、酸奶酒等。同时,发酵乳制品也是益生菌的良好载体,被认为对增强人体免疫力、维持肠道菌群平衡、促进消化等方面具有积极作用^[2-4]。近年来,将富含生物活性成分的植物原料融入发酵乳制品中,以增强其功能性,已成为开发功能性食品的重要途径^[5],这一趋势不仅符合市场对于创新型功能性食品的需求,也推动了该领域的快速发展。随着科技的不断进步和工艺的持续优化,富含生物活性成分的植物原料被广泛应用于发酵乳制品的生产中,旨在改善产品的风味、口感,并有效延长保质期。这些创新策略不仅提升了产品的营养价值,也为市场的进一步扩张提供了强有力的推动力。

谷物是满足全球膳食需求的最重要植物类别之一,其广泛的膳食来源、丰富的营养成分及生物活性物质,赋予了人体多种健康益处^[6]。谷物在全球范围内广泛种植,适应性强,产量高,易于储存和运输,使得它们成为人类历史上最重要的食物之一。无论是在发展中国家还是发达国家,谷物均在人们的膳食结构中占据着举足轻重的地位。谷物中主要包含碳水化合物(如淀粉、膳食纤维)、脂肪、蛋白质、维生素(如B族维生素等)和矿物质(如钙、铁、锌、硒等),同时含有生物活性物质,如多酚类化合物(如类黄酮、酚酸和木质素)、植物甾醇和酶类(如淀粉酶、蛋白酶等)^[7]。由于不同种类的谷物及多样的市场需求,生产者将其应用于各个行业领域。在功能性食品领域,利用谷物中的活性成分,研究人员可以开发出具备特定健康功效的功能性食品,使其具备降血压、预防糖尿病、预防过敏以及增强免疫力等功效^[8]。在发酵乳制品领域,谷物作为辅料的加入,可以优化发酵乳制品的口感、风味、质地和功能特性。然而,由于谷物粗糙且颜色较深,使得谷物和谷物制品的感官品质较差^[6]。同时,由于限制性氨基酸(苏氨酸、赖氨酸和色氨酸等)以及抗营养素(植酸、单宁和多酚)的存在,谷物中的营养物质的消化率及矿物质的生物利用度均有所下降^[9],进而使得其营养质量表现不佳。据报道,采用多种加工处理方法,可以显著提升谷物及其制品的营养质量^[10-12]。其中,发酵技术被证实为增强谷物营养质量的优选手段之一^[13]。研究指出,发酵可为植酸的酶促降解创造有利环境,促进矿物质和蛋白质的释放,提高营养物质的生物利用度和消化率^[9],因此被认为是提升谷类产品营养价值和功能价值的有效工具,这为食品行业带来了新的机遇。

益生菌因其对人体健康具有多方面的积极影响,逐渐受到广大公众的关注与认可。当达到建议的摄入浓度时,益生菌可以提高人体免疫力并治疗多种疾病。益生菌发酵食品可通过减少抗营养素、提高矿物质利用率以及增强蛋白质和碳水化合物的消化

率来改善营养质量,在许多国家作为优质营养资源发挥重要作用^[14]。然而,单一的益生菌发酵乳制品已经不能满足当前消费者的需求以及食品行业的发展。以乳制品为基质,将谷物与益生菌结合使用可能会发挥1+1>2的效果^[14-15],具有广阔的市场前景。基于此,本文综述了谷物的特性及应用现状、益生菌的应用现状、谷物与益生菌的协同作用(相互作用机制)及二者联合使用在发酵乳制品中的应用。重点关注谷物与益生菌联合使用改善发酵乳制品的功能特性、提升其质地和风味研究,并探讨了将二者应用后面临的挑战,为功能性食品的发展提供新的思路。

1 谷物特性及其应用现状

谷物主要分为禾谷类和豆菽类。禾谷类包括小麦、莠麦、大麦、燕麦、青稞、水稻、藜麦、薏苡、粟、玉米、高粱、糜子、黍等;豆菽类包括蚕豆、豇豆、豌豆、绿豆、大豆等。禾谷类作物主要结构包括胚乳、胚芽和种皮。胚乳中主要含有碳水化合物如淀粉,是膳食的重要来源^[16];胚芽中富含蛋白质,维生素和矿物质(如维生素B、铁、镁、锌)等,具有促进人体生长发育和新陈代谢等作用^[17];种皮中通常含有少量蛋白质,富含膳食纤维、维生素B、维生素E(α -生育酚、生育三烯醇等)、维生素K、 γ -谷维素、酚类化合物等,具有促进肠道蠕动^[18]、抗氧化^[19]等作用。豆菽类作物主要结构包括子叶、胚、种皮。子叶中富含蛋白质,还含有碳水化合物、脂肪等;胚中含有维生素和矿物质,如维生素B、铁等;种皮中含有膳食纤维等。因产地的独特性,不同地区所种植的作物拥有别具一格的成分,具体见表1。例如内蒙古地区的燕麦,由于良好的地理优势、肥沃的土地、充足的水源、大幅的昼夜温差以及适宜的夏季气温和充足的光照^[20],使得其含有丰富的 β -葡聚糖,具有降低胆固醇、调节血糖的重要功效^[21]。中国西藏地区的青稞富含 β -葡聚糖、 γ -氨基丁酸等^[22],这些物质具有抗氧化等作用。在高海拔极端环境生长的作物,如南美洲高海拔地区的藜麦,是目前已知唯一的植物界全蛋白谷物,联合国粮农组织推荐藜麦作为最适宜人类食用的全营养品^[23]。基于谷物丰富的营养特性,科研工作者着手于将其应用于各个不同的行业领域。目前,已有研究将健康谷物应用于乳品加工,通过深入探索后发现这一举措不仅丰富了乳品的营养种类,还丰富了乳品的风味、进一步拓展了健康谷物的应用领域^[24]。

2 益生菌概述及应用现状

益生菌通常被定义为在适量摄入后能够对宿主健康产生有益影响的存活微生物。在人类生产生活中,益生菌已有悠久的历史。截止到目前,将益生菌添加到乳中以生产发酵乳制品的研究层出不穷。这些研究不仅致力于优化益生菌在乳制品中的应用工艺,同时强调了益生菌发酵乳制品对人类健康的益处,如调节肠道菌群^[49]、改善肠道细菌移位^[50]、增强免疫力^[51]、促进营养吸收、改善营养状况^[52]等

表 1 谷物基本信息与功能
Table 1 Basic information and function display of cereals

分类	名称	主要种植地	主要影响成分	功能	参考文献
禾谷类	小麦	中国、印度、法国、乌克兰、美国、加拿大、俄罗斯、澳大利亚	叶黄素、玉米黄质、小麦胚芽凝集素、小麦胚芽多糖、不溶性膳食纤维	影响视力、缓解便秘	[6,25–26]
	水稻	中国(东北、东南、西南地区)、印度、非洲、拉丁美洲、加勒比地区	叶黄素、玉米黄质; 硒、水稻蛋白、抗性淀粉	影响视力、抗氧化、抗高血压、抗糖尿病、降低胆固醇、调节体内激素水平、抗抑郁	[27–31]
	藜麦	中国、美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、欧洲	生物活性肽、多糖、皂苷、多酚、类黄酮	抗氧化、抗糖尿病、抗高血压、抗炎、抗肥胖	[32]
	苡麦	中国、俄罗斯	酚类化合物(咖啡酸、香豆酸、香兰素、阿魏酸)、植物甾醇(β -谷甾醇、豆甾醇和菜油甾醇等)	抗氧化、降低胆固醇水平	[33]
	大麦	埃塞俄比亚沃莱塔高原地区、中国、美国、澳大利亚、加拿大、俄罗斯	β -葡聚糖、酚类化合物	降低冠心病风险、抗氧化活性、预防结肠癌、预防糖尿病风险、预防肥胖	[34–35]
	玉米	中国、印度、美国、巴西、加拿大、阿根廷	膳食纤维、酚类化合物、玉米黄素	抗氧化、保护眼睛免受紫外线伤害、维持肠道健康、降低胆固醇和血糖	[35]
	糜子	印度、美国、中国、尼日尔、尼日利亚	植物蛋白、膳食纤维、不饱和脂肪酸	维持肠道健康、有利于心血管健康	[36]
	高粱	中国、美国、澳大利亚、南非、印度	酚类化合物、原花青素	预防和治疗糖尿病和肥胖、抗氧化	[37–38]
	小米	中国、印度、非洲、伊朗、土耳其	多酚、黄酮类物质、 γ -氨基丁酸、蛋氨酸、 Ω -3脂肪酸	预防2型糖尿病抗氧化、降低癌症风险	[39–40]
	大豆	中国、美国、巴西、澳大利亚、阿根廷	异黄酮、花青素、黄烷-3-醇、甘氨酸	改善血管功能、损害肠道免疫功能	[41–42]
豆类	豌豆	加拿大、中国、俄罗斯、印度、美国、欧洲国家	豌豆蛋白、黄酮类、酚酸类	抗氧化、降压、调节肠道细菌活性、抗肾纤维化	[43–45]
	绿豆	中国、印度、印度尼西亚	绿豆蛋白水解物、多肽、可溶性膳食纤维、半纤维素(阿拉伯木聚糖、木葡聚糖、半乳甘露聚糖)、多酚	阻止食品蛋白水解的添加剂、抗氧化、抗糖化、免疫刺激、益生元; 缓解高脂膳食和链脲霉素诱导的前期糖尿病	[46–48]

功效。因此,在食品行业中,益生菌从传统的发酵食品向功能性食品的应用不断扩展。Verdenelli 等^[53]进行的一项随机、双盲和安慰剂对照试验表明,每天食用含有鼠李糖乳杆菌 IMC 501®和副干酪乳酪杆菌 IMC 502®两种益生菌菌株的食品有助于改善肠道微生物群,并增强健康成年人的排便习惯。Yadav 等^[54]研究了使用三种不同益生菌菌株制备的益生菌发酵乳的治疗潜力,包含鼠李糖乳酪杆菌 MTCC: 5957、鼠李糖乳杆菌 MTCC: 5897 和发酵粘液乳杆菌 MTCC: 5898。结果显示,喂食益生菌发酵乳显著改善了糖尿病大鼠的葡萄糖代谢、血清炎症状态、氧化应激和血脂谱,每天摄入益生菌发酵乳可有效对抗 I 型糖尿病及其并发症^[54]。以上研究均揭示了益生菌或以益生菌为基础制备的产品对人类健康发挥的益处及潜力。然而,随着人们健康意识的提高和消费习惯的改变,目前的益生菌发酵乳制品形式单一,已不能满足消费者的需求。因此,如何开发形式多样、营养全面且丰富的功能性发酵乳制品成为当前科研工作者关注的焦点。

3 谷物联合益生菌在发酵乳制品的应用

3.1 谷物和益生菌的相互作用机制

将谷物应用到发酵乳制品是当前食品领域发展的必然趋势。因此,深入研究益生菌与谷物之间的协同作用对于将二者联合并应用于乳制品至关重要。本节概述了谷物和益生菌的协同机制,重点介绍不同益生菌对谷物营养成分和功能特性的影响以及谷物

在益生菌维持生物活性中的重要作用。

3.1.1 益生菌发酵谷物后营养成分的变化 益生菌因其在谷物发酵中可参与代谢蛋白质、脂肪和乳糖等多种营养素而被广泛关注^[55]。研究表明,乳酸菌发酵不仅能够促进小麦^[56–57]、玉米^[58–59]和大麦粉^[60]中酚类物质^[56](阿魏酸、对香豆酸、肉桂酸、咖啡酸、羧基酸、对羟基苯甲酸和没食子酸)和氨基酸^[58,60]的释放,还能降低抗营养因子如植酸和单宁的含量^[57,59,61–62],从而提高谷物的营养价值和抗氧化活性^[61]。Das 等^[63]强调利用嗜酸乳杆菌发酵燕麦可产生大量各种 B 族维生素(包括 B1、B2、B3、B5、B6、B7 和 B9)以及维生素 E。而 Altaf 等^[61]则发现,干酪乳酪杆菌发酵小麦显著提高了蛋白质含量和脂质含量,并减少了植酸含量,增强了氨基酸的含量。此外,Decimo 等^[64]的研究表明,植物乳植杆菌发酵玉米麸能显著增加玉米中可溶性膳食纤维的含量,并降低植酸的含量,有助于促进机体对钙、镁等重要元素的吸收。Sokrab 等^[65]的研究也报道了类似的结果,发现乳酸菌发酵的玉米粉中微量元素含量发生了显著改变。Salar 等^[66]的研究指出,随着玉米中总酚含量的增加,发酵过程中 β -葡萄糖苷酶的活性增强,有助于水解酚苷并释放游离酚类物质,这一现象可能与微生物发酵过程中产生的酶作用于谷物化学结构的修饰有关。此外,乳酸菌发酵谷物会产生过氧化氢、细菌素和有机酸(如乳酸、乙酸、丙酸和丁酸)等物质,这些物质能够抑制有害细菌和病原体的生长,从

表 2 谷物经不同类型益生菌发酵后营养成分的变化

Table 2 Changes of nutritional components of cereals fermented by different types of probiotics

微生物	谷物类型	营养成分变化	参考文献
副干酪乳酪杆菌A1 2.6和戊糖片球菌GS-B	藜麦、荞麦	总酚含量↑	[68]
植物乳植杆菌(P-S1016)	大麦	游离酚含量↑、表儿茶素和大麦碱↑	[69]
鼠李糖乳杆菌和酵母酿酒酵母	荞麦、大麦、黑麦	总酚含量↑	[70]
食淀粉乳杆菌(NRRL B-4540)	高粱	植酸盐含量↓、粗蛋白含量↑	[71]
枯草芽孢杆菌(KCTC 13241)	麦麸	酚类物质含量和类黄酮含量↑	[72]
球形芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌	麦麸	阿魏酰苷含量↑	[73]
纳豆芽孢杆菌	小米、麸皮	可溶性膳食纤维含量↑、多糖含量↑	[74]
蜡状芽孢杆菌	麦麸	非淀粉多糖含量↓	[75]
假链双歧杆菌(ATCC 27919)	黑麦、小麦	植酸含量↓	[76]
动物双歧杆菌	燕麦	游离氨基酸含量↑	[77]
粪肠球菌(M2)	麦麸	可溶性膳食纤维含量↑、阿魏酸含量↑、植酸含量↓	[78]
乳酸片球菌(M16)	米糠	阿魏酸含量↑	[79]
嗜热链球菌	麦麸	阿拉伯木聚糖含量↑、植酸含量↓	[80]
酿酒酵母	米糠	蛋白质含量及生物活性↑	[71]
乳酸杆菌	燕麦	酚类、燕麦生物碱和黄酮类化合物含量↑	[81]

注: “↑”代表谷物经发酵后营养成分含量增加, “↓”代表谷物经发酵后营养成分含量降低。

而提高食品的安全性和保存性^[67]。近年来,许多研究都集中于探索益生菌发酵谷物(如小麦、米、玉米、大麦、高粱、小米、燕麦)后营养成分的变化(表 2)。综上所述,微生物发酵技术在改善谷物营养价值和促进人体健康方面的潜力巨大。通过选用合适的菌种和优化发酵条件,可以有效降解抗营养因子、丰富营养成分和提高消化吸收率,这对开发新型功能性食品具有重要意义。

3.1.2 益生菌发酵谷物后功能特性的变化 益生菌发酵谷物可产生诸多益处(图 1)。研究表明,益生菌发酵使得麦麸中总多酚含量从 0.20 g/100 g 增加至 0.81 g/100 g, DPPH 和 ABTS⁺自由基清除率显著提高^[82]。此外,益生菌发酵大麦后,其中的游离酚提取物在抑制 ROS 的产生、改善细胞活力、细胞膜完整性和 SOD 活性方面发挥着重要作用,且在发酵过程

中,抗氧化多糖、抗氧化肽和酚类化合物的含量显著增加^[69]。总体而言,在多种情况下,益生菌发酵有助于提高谷物的抗氧化能力。肥胖及其相关的代谢综合征已成为一项全球性挑战,近年来的研究揭示了益生菌发酵谷物在缓解这一问题的潜力。如 Zhang 等^[83]通过动物实验发现,植物乳植杆菌发酵大麦提取物可以调节肥胖大鼠的脂质代谢,改善胰岛素抵抗。Gu 等^[84]发现,植物乳植杆菌发酵大麦提取物蛋白显著提高了 3T3-L1 细胞中 UCP1、PGC-1 以及其他与降脂和产热直接相关基因的表达。研究表明,益生菌发酵谷物后其中的多酚有利于微生物的代谢和生长,并能抑制炎症细胞因子的产生^[85-86]。Yin 等^[87]分离出一种黑曲霉菌株,将其应用于发酵麦麸后发现其显著增加了麦麸中结合阿魏酸的释放,进一步研究发现发酵麦麸可降低 TNF- α 和 IL-6 等炎症因子的表达,抑制脂多糖诱导的炎症反应。Gabriele 等^[88]利用酵母菌和乳酸菌共发酵小麦粉,结果提示发酵后的小麦粉表现出更高的抗氧化活性,在转染的 HT-29 细胞中,发酵液通过降低 IL-8 和 COX-2 炎症介质的表达,有效保护 TNF- α 诱导的变化,这在治疗肠道炎症性疾病中具有潜在作用。也有研究表明曲霉菌发酵的大麦提取物可减少慢性酒精性肝损伤,并通过抑制氧化应激进而抑制炎症增殖。此外,发酵黑米糠提取物可以影响炎症关键标志物的基因表达,从而缓解炎症反应^[89]。

3.1.3 谷物对益生菌功能特性的影响 大量研究表明,谷物是益生菌生长的良好基质,其中所含的复杂碳水化合物,如淀粉、膳食纤维与低聚糖等,不仅为乳酸菌生长提供了所需的营养因子,同时也是益生元的重要组成部分。此外,谷物中还富含蛋白质、矿物质以及各种植物化学物质,如多酚类化合物和黄酮类化合物等,这些成分为益生菌提供了充足的能量和营

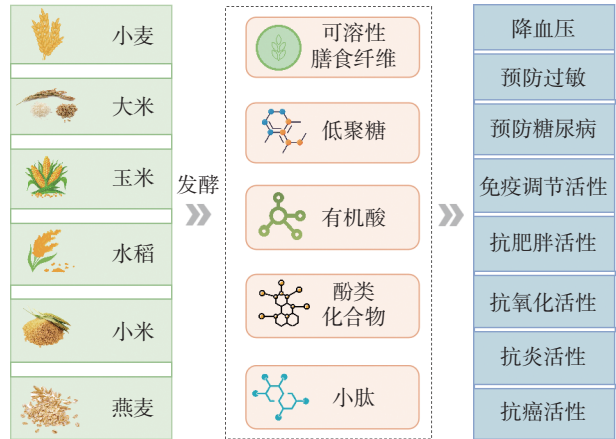


图 1 谷物在益生菌作用下释放生物活性化合物进而发挥功能特性概况

Fig.1 Release of bioactive compounds from grains in the presence of probiotics, leading to functional properties

养支持, 同时还能保护益生菌免受外界环境的影响, 促进其生长和繁殖。Hang 等^[90]研究发现, 植物乳植杆菌在牛奶发酵过程中蛋白质水解能力较差、酸化能力弱, 但当加入燕麦提取物后, 牛乳中植物乳植杆菌的生长速率显著提高。同样地, 有研究显示向浓缩脱脂牛奶中接种了干酪乳酪杆菌, 并添加了米糠可使干酪乳酪杆菌在整个储存期间的活性保持在 $8.0 \log \text{CFU/g}$ 以上, 说明米糠在维持酸奶中干酪乳酪杆菌的活性发挥着重要功能^[91]。Kaur 等^[92]在含有嗜酸乳杆菌 LA5 和双歧杆菌 BB12 的益生菌酸奶中添加不同含量的鹰嘴豆粉后发现, 鹰嘴豆粉对双歧杆菌 BB12 有显著的保护作用。 β -葡聚糖是大多数谷物中的关键活性成分, 研究表明, 在含有燕麦 β -葡聚糖的酸奶中, 副干酪乳酪杆菌的生长速率显著增强^[93]。另一项研究显示, 添加 β -葡聚糖可延长双歧杆菌在酸奶中的存活时间, 表明其对双歧杆菌的保护作用^[94]。探究将荞麦粉和燕麦麸对发酵乳的影响时发现, 添加这两种物质后酸奶中益生菌的稳定性得到显著提高^[95]。这些研究均强调了谷物对益生菌发挥的积极影响。

3.2 谷物联合益生菌改善发酵乳制品功能特性

食品的功能特性长期以来一直是科研工作者及广大消费者共同关注的焦点。尤其在当前社会, 随着人们生活质量的日益提升以及健康意识的显著增强, 对食品功能特性的关注更加深入与广泛。因此, 探讨谷物与益生菌联合应用对发酵乳制品功能特性的改善作用至关重要。迄今为止, 已有多项研究报道了将谷物与益生菌结合应用于乳制品, 并取得了一系列较好的成果, 包括提高发酵乳制品的抗氧化能力、调节血糖水平、改善炎症等(图 2)。如 Choi 等^[96]利用植物乳植杆菌 JSA 22 发酵大米胚芽来生产米胚芽酸奶, 经鉴定, 发酵后的米胚芽酸奶中赖氨酸和 γ -氨基丁酸含量均有所增加, 同时表现出较强的抗氧化活性。动物实验进一步表明, 小鼠摄入米胚芽酸奶两周后, B 细胞数量降低, 同时刺激了干扰素- γ 和白细胞介素-2 的浓度, 具有潜在的免疫调节作用。Gohari 等^[97]通过采用嗜酸乳杆菌、嗜热链球菌和两歧双歧

杆菌发酵的燕麦酸奶对糖尿病大鼠进行干预, 结果显示燕麦酸奶在血糖控制、脂质代谢、肝脏健康和调控肠道微生物群的组成方面具有显著改善作用。另外的研究表明, 将燕麦与益生菌共同发酵制得的发酵乳产品能显著降低高胆固醇血症大鼠体内甘油三酯、胆固醇、低密度脂蛋白和极低密度脂蛋白水平, 呈现出协同降低胆固醇的效果^[98]。研究显示, 发酵后的藜麦中的天然多糖物质与多酚物质通过疏水相互作用和氢键结合, 形成多糖-多酚复合物, 此复合物可以上调胰高血糖素原和激素原转化酶表达进而影响胰岛素的释放^[99]; 动物实验进一步说明, 发酵后的藜麦酸奶可以抑制 α -淀粉酶的活性, 并显著增加总酚含量, 这可能是由于谷物中的酚类物质以结合形式存在, 其在益生菌的作用下释放出的酸、碱、酶等物质会将结合型酚类物质转化为活性更强的游离型酚类物质^[100]。米糠中含有清除自由基的物质, 例如 β -谷甾醇、酚类物质和类胡萝卜素。Demirci 等^[91]将 1%、2%、3% 的米糠添加到接种了干酪乳酪杆菌 431 的牛乳中获得发酵酸奶, 并对终产品的抗氧化活性进行评估, 发现 DPPH 自由基的清除活性显著增强, 说明米糠的添加强化了酸奶的抗氧化特性。朱晓雪等^[101]制备的荞麦酸奶显示, 其抗氧化能力显著优于普通酸奶。另有研究表明, 将玉米汁和半脱脂奶粉混合, 经过酸奶发酵剂、植物乳植杆菌和干酪乳酪杆菌共同发酵, 牛奶中的酪蛋白可以和酚类物质结合, 提高酸奶的抗氧化能力^[102]。Chaudhary 等^[103]探讨了富含小米的益生菌(瑞士乳杆菌 MTCC 5463)发酵乳在缓解糖尿病大鼠的糖尿病并发症方面的作用, 结果表明, 富含小米的益生菌发酵乳干预后显著降低了糖尿病大鼠的空腹血糖、总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白和极低密度脂蛋白水平, 并改善了糖尿病大鼠的多食多饮症状以及体重。另外, 在益生菌发酵山羊奶中添加大麦粉可提高碳水化合物、总固体、膳食纤维、灰分、总蛋白质、水溶性氮、总挥发性脂肪酸、饱和脂肪酸、油酸、亚油酸、 α -亚麻酸的含量, 这些物质在促进人体健康中发挥着重要作用, 同时益生菌的活力也明显增强^[104]。综上所述, 谷物联合益生菌应用于乳制品具有显著的健康促进作用, 为人们追求更健康的饮食提供了新的选择。

3.3 谷物联合益生菌改善发酵乳品质地、风味及营养成分

不同种类的谷物对酸奶的整体组织结构会产生不同程度的影响, 进而影响其质地、保质期和风味特性。众所周知, 为了提高发酵乳制品的质地特性, 制造商普遍会在其生产过程中添加增稠剂。考虑到食品的安全性问题, 寻找天然物质代替增稠剂便成为食品领域的重点。植物原料中富含内源糖, 如棉子糖、水苏糖、 β -葡聚糖等, 通过益生菌发酵可形成一种天然的胞外多糖, 该物质是一种单糖, 可作为增稠剂代替传统食品添加剂, 改善产品的质地和口感, 提高产



图 2 谷物联合益生菌对发酵乳制品的影响

Fig.2 Effect of grains combined with probiotics on fermented dairy products

品的安全性^[105]。此外, Kaur 等^[92]的研究表明, 添加不同含量的鹰嘴豆粉(0、1%、2.5%、5% w/v)至益生菌酸奶中, 对酸奶的理化特性产生积极影响, 其中含有 2.5% 和 5% 鹰嘴豆粉的酸奶表现出较高的酸度, 可能是由于鹰嘴豆粉促进了益生菌和发酵剂的生长, 具有益生元效应, 此外, 鹰嘴豆粉的添加显著提高了酸奶的持水量和粘度, 降低了其对脱水收缩的敏感性。持水力是评价网络结构或者凝胶结构重要参数之一, 豌豆、鹰嘴豆、蚕豆等谷物富含蛋白质、糖蛋白等物质, 可以有效提高酸奶的持水能力^[106]。类似效果也可通过添加大豆纤维实现, 随着加入的大豆纤维浓度逐渐增加, 酸奶的持水力显著提高, 这是由于大豆纤维本身具有很强的持水能力, 会将原本的自由水滞留在网络的空隙中, 另外大豆纤维还可以改善酸奶的凝胶结构, 低浓度的大豆纤维与蛋白质聚集形成独特的复合物结构, 高浓度大豆纤维相互交错可以形成凝胶状结构, 进而改善酸奶的凝胶结构^[107]。Ismail 等^[104]的研究指出, 在山羊酸奶中添加大麦粉可增加凝乳张力和保水能力, 并缩短凝固时间, 减少脱水收缩敏感性。Coman 等^[95]的研究发现, 使用鼠李糖乳杆菌 IMC 501®、副干酪乳酪杆菌 IMC 502®及其 1:1 组合 SYN BIO®发酵荞麦粉和燕麦麸进行酸奶发酵, 可加快发酵乳 pH 的降低。Ganguly 等^[14]利用乳清-脱脂乳、发芽珍珠粟粉和液态大麦麦芽提取物制备了乳品-谷物复合物, 并使用益生菌菌株嗜酸乳杆菌 NCDC-13 进行发酵, 经鉴定, 发酵乳的粘度和持水能力显著提高, 脂肪、灰分和总膳食纤维含量降低, 蛋白质含量和微量元素(钙、铁、锌)的提取率明显增加; 此外, 发酵使植酸和多酚含量显著降低, 蛋白质和淀粉的消化率显著提高。但也有研究指出, 添加来自不同来源的纤维(大豆、大米、燕麦、玉米和甜菜)通常会降低发酵乳制品的整体风味和质地。

为生产以谷物和发酵乳为基础的营养酸奶, El-Aidie 等^[108]采用了酸奶发酵剂和瑞士乳杆菌并结合小麦、燕麦、高粱、裸大麦和大麦等谷物对牛奶进行发酵, 制成五种谷物发酵乳产品。这些产品在室温储存 120 天, 测定了储存期间所有样品的可滴定酸度、水分、脂肪、总氮、灰分、纤维、矿物质、氨基酸含量和总乳酸菌数。结果显示, 以燕麦和大麦制备的酸奶其可接受性方面表现最佳, 其次是裸大麦、高粱和小麦, 因此, 建议使用酸奶发酵剂和瑞士乳杆菌混合物, 结合燕麦或大麦, 生产高营养保健产品。此外, Tomic 等^[109]评估了将不溶性小黑麦纤维作为强化成分添加至酸奶中后对富含纤维酸奶的感官特性和消费者接受度的影响, 结果显示, 虽然不溶性小黑麦纤维会导致强化酸奶呈现黄褐色、谷物味, 并具有明显的沙质/砂砾感, 但数据显示了消费者对小黑麦酸奶的喜爱, 表明了小黑麦中的不溶性膳食纤维作为强化成分在生产富含纤维的发酵乳制品中具有良好潜力。由

此产生的酸奶被认为是一种新型功能性食品, 对于倾向于食用高纤维的消费者来说可能是合适的选择之一。此外, 在发酵乳中添加藜麦粉以探讨藜麦粉对益生菌活性的影响时发现, 尽管添加藜麦粉对发酵时间没有影响, 但有助于发酵乳在储存期间的后酸化^[110]。Zannini 等^[111]利用胞外多糖生产菌 *Weissella cibaria* MG1 开发了一款新型藜麦酸奶, 结果显示, 使用 *Weissella cibaria* MG1 发酵的藜麦酸奶其活菌数、持水量、粘度和胞外多糖量显著高于对照组, 微观结构观察表明, 胞外多糖-蛋白质网络结构的改变是发酵藜麦乳的质地改善的主要原因。

谷物在发酵过程释放出的特有香气为发酵乳制品带来独特的风味。在谷物发酵乳制品中, 美拉德反应、脂肪酸代谢以及酶解等能够形成芳香化合物, 赋予酸奶良好的风味^[112]。对于拒绝摄入过多脂肪与卡路里食品的消费者来说, 添加 1.5% 和 2% 的烤大麦粉代替部分乳脂加入到酸奶饮料中可以获得良好的风味, 并且大麦粉的使用增加了酸奶的酸度、总酚化合物含量、抗氧化活性和保水能力^[113]。值得一提的是, 谷物添加到发酵乳制品中还能延长其保质期, 这是因为谷物中含有的酚类化合物(阿魏酸、香豆酸等)、醛类、醇类等具有一定的抗菌作用, 这些天然的抗氧化物质可以抑制有害菌的生长, 延长发酵乳制品的保质期。此外, 谷物中的纤维素等成分可以吸附发酵过程中产生的有害物质, 降低产品酸败的风险。

4 谷物联合益生菌在发酵乳制品应用中的挑战

经过精心挑选的谷物, 由于其独特的口感和丰富的功能特性, 常被作为优质的辅料添加至乳制品中, 这不仅丰富了发酵乳制品的种类, 还显著提升了其营养价值, 充分满足了消费者对健康与美味并重的双重需求。然而, 目前在将谷物和益生菌应用于乳品生产过程中仍面临挑战。谷物联合益生菌发酵乳制品按照生产工艺主要分为两种: 一是在发酵前加入谷物, 二是在乳制品发酵后加入谷物。发酵前加入谷物需要对谷物进行一系列处理, 如超微粉碎、烘烤、打浆、液化、糖化等, 然后与牛奶按一定比例混合再进行发酵。经过发酵, 谷物的不良风味可得到消除, 同时谷物中的淀粉也可转化为短链脂肪酸等有益物质, 同时提高蛋白质消化率和多酚类物质的含量、改变脂肪酸含量和占比等, 使发酵乳制品的营养价值更高^[114]。但这一工艺对发酵的菌种、条件和工艺等要求较高^[101, 115-116]。另一种工艺是在乳制品发酵后加入谷物, 这需要对谷物进行烘烤、蒸煮、挤压膨化、切碎或研磨等处理, 以确保发酵乳制品口感丰富且营养价值强化, 同样需要不断优化工艺条件以确定最佳参数^[117-118]。因此, 为了将谷物应用于乳品中, 明确最优的加工参数(确定谷物添加顺序、前处理条件、选择适当浓度的材料、筛选特定微生物、明确发酵的时间和温度等因素)是当前研究面临的挑战, 也是未

来研究应该聚焦的重点。此外,研发针对特定消费人群的谷物发酵乳制品(如专门针对肥胖和糖尿病人群),通过优化谷物组合来扩大消费者市场,通过消费者的感官评价来测试接受程度等方面都是未来研究的重点难题。值得一提的是,大多数谷物类发酵食品的加工技术还处于实验室阶段,距离大规模工业化还有很长的路要走。因此,为了满足工业化生产的需求,进一步优化加工工艺与配方已成为发酵谷物食品加工研究领域的核心方向。今后要把重点放在工业化生产上,研究发酵技术,实现规模化生产。此外,目前关于谷物发酵产品健康益处的研究仅限于小鼠和其他动物,仍然缺乏足够的临床验证。因此,需要进一步设计临床试验,以揭示谷物发酵产品对人体健康的深层作用机制。谷物为基础的发酵产品通常受到产品感官特性的限制,因此在健康和良好风味之间取得平衡以满足世界各地消费者的口味是一项挑战。

5 结论

本文综述了谷物和益生菌的特性,探讨了谷物与益生菌之间的协同作用,重点概述了谷物与益生菌联合应用于发酵乳制品的潜力,包括提升发酵乳制品功能性的机制,改善发酵乳制品质地、风味及营养成分的重要作用,这些论述为后续研究奠定了重要的理论基础。未来的研究可以聚焦于谷物型发酵乳制品的工艺优化,包括谷物组合、谷物添加顺序、特定益生菌的筛选以及发酵条件等方面,研发针对特定消费人群的谷物型发酵乳制品,并结合临床试验,进一步探究其改善肠道健康、增强免疫力、调节血糖等深层机理,为高品质发酵乳制品的生产提供重要的理论依据和实践指导。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 王国骄,洪青,刘振民,等. 益生菌发酵乳对机体健康作用的研究进展[J]. 中国乳业, 2024(7): 106–110. [WANG G J, HONG Q, LIU Z M, et al. Research progress on the health benefits of probiotic fermented milk to the body[J]. China Dairy Industry, 2024(7): 106–110.]
- [2] ZOUMPOPOULOU G, POT B, TSAKALIDOU E, et al. Dairy probiotics: Beyond the role of promoting gut and immune health[J]. *International Dairy Journal*, 2017, 67: 46–60.
- [3] CHEN L, BAGNICKA E, CHEN H, et al. Health potential of fermented goat dairy products: composition comparison with fermented cow milk, probiotics selection, health benefits and mechanisms[J]. *Food & Function*, 2023, 14(8): 3423–3436.
- [4] ZEPEDA-HERNÁNDEZ A, GARCIA-AMEZQUITA L E, REQUENA T, et al. Probiotics, prebiotics, and synbiotics added to dairy products: Uses and applications to manage type 2 diabetes[J]. *Food Research International*, 2021, 142: 110208.
- [5] STOBIECKA M, KRÓL J, BRODZIAK A. Antioxidant activity of milk and dairy products[J]. *Animals*, 2022, 12(3): 245.
- [6] RAWAT M, VARSHNEY A, RAI M, et al. A comprehensive review on nutraceutical potential of underutilized cereals and cereal-based products[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2023, 12: 100619.
- [7] KUMAR K. Nutraceutical potential and processing aspects of oyster mushrooms (*Pleurotus species*) [J]. *Current Nutrition & Food Science*, 2020, 16(1): 3–14.
- [8] XIANG H, SUN-WATERHOUSE D, WATERHOUSE G I N, et al. Fermentation-enabled wellness foods: A fresh perspective[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2019, 8(3): 203–243.
- [9] CHEN H G, CHEN T, GIUDICI P, et al. Vinegar functions on health: Constituents, sources, and formation mechanisms[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2016, 15(6): 1124–1138.
- [10] XIA Q, WANG L P, XU C C, et al. Effects of germination and high hydrostatic pressure processing on mineral elements, amino acids and antioxidants *in vitro* bioaccessibility, as well as starch digestibility in brown rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2017, 214: 533–542.
- [11] ZHU F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products[J]. *Food Chemistry*, 2018, 264: 358–366.
- [12] 张林威, 王雅怡, 黄亮, 等. 3 种干燥方式对蒸谷米品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(3): 40–48. [ZHANG L W, WANG Y Y, HUANG L, et al. Study on the impact of 3 drying methods on the quality of steamed rice[J]. *Chinese Journal of Grain and Oil*, 2025, 40(3): 40–48.]
- [13] 张克一, 洪滨, 张珊, 等. 发酵对糙米营养品质影响及其在米制产品中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2025, 46(6): 320–329. [ZHANG J Y, HONG B, ZHANG S, et al. Research progress on effects of fermentation on nutritional quality of brown rice and its application in metric products[J]. *Food Science*, 2025, 46(6): 320–329.]
- [14] GANGULY S, SABIKHI L, SINGH A K. Effect of probiotic fermentation on physico-chemical and nutritional parameters of milk-cereal based composite substrate[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(8): 3073–3085.
- [15] CIRIC A, RADU N, ZAHARIE M G O, et al. Potential anti-tumor effect of functional yogurts formulated with prebiotics from cereals and a consortium of probiotic bacteria[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1250.
- [16] 常蕾, 李馨怡, 姚洋, 等. 粳糯性黄米淀粉的结构和理化特性[J]. *食品科学*, 2025, 46(10): 88–94. [CHANG L, LI X Y, YAO Y, et al. Japonica glutinous yellow rice starch structure and physical and chemical properties[J]. *Food Science*, 2025, 46(10): 88–94.]
- [17] 郭毅斌, 申琪, 管芳圆, 等. 稻谷胚芽对糖尿病大鼠糖代谢紊乱的改善作用[J]. *环境与职业医学*, 2019, 36(2): 99–105. [GUO Y W, SHEN Q, GUAN F Y, et al. Effect of rice germ on glucose metabolism disorder in diabetic rats[J]. *Environmental and Occupational Medicine*, 2019, 36(2): 99–105.]
- [18] TAMURA K, HEMSWORTH G R, DÉJEAN G, et al. Molecular mechanism by which prominent human gut bacteroidetes utilize mixed-linkage beta-glucans, major health-promoting cereal polysaccharides[J]. *Cell Reports*, 2017, 21(2): 417–430.
- [19] 胡婷, 王鑫, 耿可赞, 等. 超微粉碎对黑米糠多酚的组成及活性的影响[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(12): 209–217. [HU T, WANG X, GENG K Z, et al. Superfine grinding of black rice bran the composition and activity of polyphenol[J]. *The Influence of Modern Food Science and Technology*, 2024, 40(12): 209–217.]
- [20] 那亚, 乌仁曹, 李峰, 等. 15 个燕麦品种在内蒙古西部黄河南岸地区生产性能综合评价[J]. *饲料研究*, 2022, 45(24): 97–101.

- [NA Y, WU R C, LI F, et al. Comprehensive evaluation of production performance of 15 Oat varieties in the south bank of the Yellow River in western Inner Mongolia[J]. *Journal of Feed Research*, 2019, 45(24): 97-101.]
- [21] 张美莉. 内蒙古特色杂粮燕麦深加工研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(5): 109-113. [ZHANG M L. Research progress of deep processing of oat with special grain in Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 43(5): 109-113.]
- [22] 唐辉春, 徐也, 马树琳, 等. 不同地区青稞品种品质对比分析[J]. *中国食品工业*, 2024(19): 122-124. [TANG H C, XU Y, MA S L, et al. Comparative analysis on the quality of highland barley varieties in different regions[J]. *China Food Industry*, 2024(19): 122-124.]
- [23] PATHAN S, SIDDIQUI R A. Nutritional composition and bioactive components in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) greens: A review[J]. *Nutrients*, 2022, 14(3): 558.
- [24] SHEVADE A V, O'CALLAGHAN Y C, KENNEDY D, et al. Cereal type significantly affects the composition and reconstitution characteristics of dried fermented milk-cereal composites[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 3097-3105.
- [25] WU B, MA Z, BOKEN V K, et al. Regional differences in the performance of drought mitigation measures in 12 major wheat-growing regions of the world[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107888.
- [26] GUAN C B, ZHANG Y K, WANG H Q, et al. Effects of wheat germ polysaccharides prepared by ultra-high pressure on functional constipation and gut microbiota[J]. *Food Bioscience*, 2024, 57: 103347.
- [27] QI Z H, ZHOU X, TIAN L, et al. Distribution of mycotoxin-producing fungi across major rice production areas of China[J]. *Food Control*, 2022, 134: 108572.
- [28] ZENG J Y, GUAN D X, DAI Z H, et al. Selenium contents, speciation and bioaccessibility of Se-enriched rice grains from Chinese markets[J]. *Soil & Environmental Health*, 2023, 1(3): 100037.
- [29] ROY T, SINGH A, SARI T P, et al. Rice protein: Emerging insights of extraction, structural characteristics, functionality, and application in the food industry[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 123: 105581.
- [30] ASAKURA S, KANEKO K, KAWANO K, et al. Characterization of rice endosperm-derived antidepressant-like peptide (REAP): An orally active novel tridecapeptide derived from rice protein[J]. *Peptides*, 2024, 177: 171184.
- [31] TIOZON R J N, FETTKE J, SREENIVASULU N, et al. More than the main structural genes: Regulation of resistant starch formation in rice endosperm and its potential application[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2023, 285: 153980.
- [32] REN G X, TENG C, FAN X, et al. Nutrient composition, functional activity and industrial applications of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Food Chemistry*, 2023, 410: 135290.
- [33] CHEN D F, SHI J L, HU X Z. Enhancement of polyphenol content and antioxidant capacity of oat (*Avena nuda* L.) bran by cellulase treatment[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2016, 59(3): 397-403.
- [34] MENA E, KASTRO C. Nutritional value and mineral content analysis of selected landrace barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties grown in highland area of Wolaita zone, Ethiopia[J]. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2024, 15: 101079.
- [35] LIM W L, COLLINS H M, SINGH R R, et al. Method for hull-less barley transformation and manipulation of grain mixed-linkage beta-glucan[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2018, 60(5): 382-396.
- [36] SINGH P, SINGH R, BHADAURIA V, et al. The functionality and extraction of protein from sorghum, finger millet, and Kodo millet: A review[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2024, 59(1): 512-521.
- [37] OFOSU F K, ELAHI F, DALIRI E B, et al. Flavonoids in decorticated sorghum grains exert antioxidant, antidiabetic and anti-obesity activities[J]. *Molecules*, 2020, 25(12): 2854.
- [38] LI Z H, ZHAO X Y, ZHANG X W, et al. The effects of processing on bioactive compounds and biological activities of sorghum grains[J]. *Molecules*, 2022, 27(10): 3246.
- [39] BELLO O M, OGBESEJANA A B, BALKISU A, et al. Polyphenolic Fractions from three millet types (fonio, finger millet, and pearl millet): Their characterization and biological importance[J]. *Clinical Complementary Medicine and Pharmacology*, 2022, 2(1): 100020.
- [40] SHARMA S, SAXENA D C, RIAR C S. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity[J]. *Food Chemistry*, 2018, 245: 863-870.
- [41] YAMASHITA Y, WANG L, NAKAMURA A, et al. Black soybean improves the vascular function through an increase in nitric oxide and a decrease in oxidative stress in healthy women[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2020, 688: 108408.
- [42] ZHANG Y L, DUAN X D, FENG L, et al. Soybean glycinin impaired immune function and caused inflammation associated with PKC- ζ /NF- κ B and mTORC1 signaling in the intestine of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 106: 393-403.
- [43] GE J, SUN C X, CORKE H, et al. The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: Current status, challenges, and perspectives[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 1835-1876.
- [44] GARCÍA ARTEAGA V, KRAUS S, SCHOTT M, et al. Screening of twelve pea (*Pisum sativum* L.) cultivars and their isolates focusing on the protein characterization, functionality, and sensory profiles[J]. *Foods*, 2021, 10(4): 758.
- [45] WU D T, LI W X, WAN J J, et al. A Comprehensive review of pea (*Pisum sativum* L.): Chemical composition, processing, health benefits, and food applications[J]. *Foods*, 2023, 12(13): 2527.
- [46] ZHU Y S, SUN S, FITZGERALD R. Mung bean proteins and peptides: nutritional, functional and bioactive properties[J]. *Food & Nutrition Research*, 2018, 62.
- [47] WU D T, WAN J J, LI W X, et al. Comparison of soluble dietary fibers extracted from ten traditional legumes: Physicochemical properties and biological functions[J]. *Foods*, 2023, 12(12): 2352.
- [48] YANTI, VIOLINA V, PUTRI C E, et al. Branched chain amino acid content and antioxidant activity of mung bean tempeh powder for developing oral nutrition supplements[J]. *Foods*, 2023, 12(14): 2789.
- [49] REDONDO-USEROS N, GHEORGHE A, DÍAZ-PRIETO L E, et al. Associations of probiotic fermented milk (PFM) and yogurt consumption with *Bifidobacterium* and *Lactobacillus* components of the gut microbiota in healthy adults[J]. *Nutrients*, 2019, 11(3): 651.

- [50] ILLIKOUD N, MANTEL M, ROLLI-DERKINDEREN M, et al. Dairy starters and fermented dairy products modulate gut mucosal immunity[J]. *Immunology Letters*, 2022, 251: 91–102.
- [51] ZOU H, WANG H, ZHANG Z Y, et al. Immune regulation by fermented milk products: the role of the proteolytic system of lactic acid bacteria in the release of immunomodulatory peptides[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(28): 10498–10516.
- [52] WU T, WANG G, ZHI Q X, et al. Probiotics interact with lipids metabolism and affect gut health[J]. *Frontiers in nutrition*, 2022, 9: 917043.
- [53] VERDENELLI M C, SILVI S, CECCHINI C, et al. Influence of a combination of two potential probiotic strains, *Lactobacillus rhamnosus* IMC 501® and *Lactobacillus paracasei* IMC 502® on bowel habits of healthy adults[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2011, 52(6): 596–602.
- [54] YADAV R, DEY D K, VIJ R, et al. Evaluation of anti-diabetic attributes of *Lactobacillus rhamnosus* MTCC: 5957, *Lactobacillus rhamnosus* MTCC: 5897 and *Lactobacillus fermentum* MTCC: 5898 in streptozotocin induced diabetic rats[J]. *Microbial Pathogenesis*, 2018, 125: 454–462.
- [55] ARSLAN-TONTUL S, ERBAS M. Co-culture probiotic fermentation of protein-enriched cereal medium (Boza)[J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 2020, 39(1): 72–81.
- [56] ANTOGNONI F, MANDRIOLI R, POTENTE G, et al. Changes in carotenoids, phenolic acids and antioxidant capacity in bread wheat doughs fermented with different lactic acid bacteria strains[J]. *Food Chemistry*, 2019, 292: 211–216.
- [57] ASRES D T, NANA A, NEGA G. Complementary feeding and effect of spontaneous fermentation on anti-nutritional factors of selected cereal-based complementary foods[J]. *BMC Pediatrics*, 2018, 18(1): 394.
- [58] PONTONIO E, DINGEO C, GOBBETTI M, et al. Maize milling by-products: From food wastes to functional ingredients through lactic acid bacteria fermentation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 561.
- [59] ROGER T, NGOUNÉ L T, CARL M F M. Nutritional properties and antinutritional factors of corn paste (Kutukutu) fermented by different strains of lactic acid bacteria[J]. *International Journal of Food Science*, 2015, 2015: 502910.
- [60] XIAO X, LI J, XIONG H, et al. Effect of extrusion or fermentation on physicochemical and digestive properties of barley powder[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 794355.
- [61] ALTAF A, JHA B. Evaluating the impact of fermentation by multiple probiotics on proximate composition, amino acid profile, antioxidant activity and Dephytinization of wheat grains[M]. 2022.
- [62] RANJAN A, SAHU N P, DEO A D, et al. Solid state fermentation of de-oiled rice bran: Effect on *in vitro* protein digestibility, fatty acid profile and anti-nutritional factors[J]. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 2019, 119: 1–5.
- [63] DAS G, MARIA J M. Nutrient profile of fermented oats[J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2017, 2: 69–71.
- [64] DECIMO M, QUATTRINI M, RICCI G, et al. Evaluation of microbial consortia and chemical changes in spontaneous maize bran fermentation[J]. *AMB Express*, 2017, 7(1): 205.
- [65] SOKRAB A M, MOHAMED A I A, BABIKER E E. Effect of fermentation on antinutrients, and total and extractable minerals of high and low phytate corn genotypes[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(10): 2608–2615.
- [66] SALAR R K, CERTIK M, BREZOVA V. Modulation of phenolic content and antioxidant activity of maize by solid state fermentation with *Thamnidium elegans* CCF 1456[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 17(1): 109–116.
- [67] ISMAEL M, GU Y, CUI Y, et al. Lactic acid bacteria isolated from Chinese traditional fermented milk as novel probiotic strains and their potential therapeutic applications[J]. *3 Biotech*, 2022, 12(12): 337.
- [68] ROCCHETTI G, MIRAGOLI F, ZACCONI C, et al. Impact of cooking and fermentation by lactic acid bacteria on phenolic profile of quinoa and buckwheat seeds[J]. *Food Research International*, 2019, 119: 886–894.
- [69] WU H, LIU H N, LIU C Q, et al. Hullless black barley as a carrier of probiotics and a supplement rich in phenolics targeting against H₂O₂-induced oxidative injuries in human *Hepatocarcinoma* Cells[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 8: 790765.
- [70] ĐORĐEVIĆ T M, ŠILER-MARINKOVIĆ S S, DIMITRIJEVIĆ-BRANKOVIĆ S I. Effect of fermentation on antioxidant properties of some cereals and pseudo cereals[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 957–963.
- [71] DAY C N, MORAWICKI R O. Effects of fermentation by yeast and amylolytic lactic acid bacteria on grain sorghum protein content and digestibility[J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 2018(1): 3964392.
- [72] ILYAS M Z, LEE J K, ALI M W, et al. Relative assessment of biochemical constituents and antioxidant potential of fermented wheat grains using *Bacillus subtilis* KCTC 13241[J]. *Fermentation*, 2022, 8(3): 113.
- [73] CHEN Q Y, HAO X R, WANG Y, et al. Optimization of fermentation process for feruloylated glycosides from wheat bran and evaluation of its antioxidant and probiotic activities *in vitro*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42: 138–145.
- [74] 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.
- [75] FENG Y, WANG L, KHAN A, et al. Fermented wheat bran by xylanase-producing *Bacillus cereus* boosts the intestinal microflora of broiler chickens[J]. *Poultry Science*, 2020, 99(1): 263–271.
- [76] GARCÍA-MANTRANA I, MONEDERO V, HAROS M. Myo-inositol hexakisphosphate degradation by *Bifidobacterium pseudocatenulatum* ATCC 27919 improves mineral availability of high fibre rye-wheat sour bread[J]. *Food Chemistry*, 2015, 178: 267–275.
- [77] ZHANG N, LI D, ZHANG X Q, et al. Solid-state fermentation of whole oats to yield a synbiotic food rich in lactic acid bacteria and prebiotics[J]. *Food & Function*, 2015, 6(8): 2620–2625.
- [78] MAO M L, WANG P, SHI K X, et al. Effect of solid state fermentation by *Enterococcus faecalis* M2 on antioxidant and nutritional properties of wheat bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020, 94: 102997.
- [79] KAUR B, CHAKRABORTY D, KAUR G, et al. Biotransformation of rice bran to ferulic acid by pediococcal isolates[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 170(4): 854–867.
- [80] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 28–36.
- [81] BERNAL-CASTRO C, ESPINOSA-POVEDA E, GUTIÉRREZ-CORTÉS C, et al. Vegetable substrates as an alternative for the inclusion of lactic acid bacteria with probiotic potential in food

- matrices[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2024, 61(5): 833–846.
- [82] LU X J, JING Y, LI Y Y, et al. *Eurotium cristatum* produced β -hydroxy acid metabolite of monacolin K and improved bioactive compound contents as well as functional properties in fermented wheat bran[J]. *LWT*, 2022, 158: 113088.
- [83] ZHANG J Y, XIAO X, DONG Y, et al. The anti-obesity effect of fermented barley extracts with *Lactobacillus plantarum* dy-1 and *Saccharomyces cerevisiae* in diet-induced obese rats[J]. *Food & Function*, 2017, 8(3): 1132–1143.
- [84] GU Y, XIAO X, PAN R, et al. *Lactobacillus plantarum* dy-1 fermented barley extraction activates white adipocyte browning in high-fat diet-induced obese rats[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(4): e13680.
- [85] SELHUB E M, LOGAN A C, BESTED A C. Fermented foods, microbiota, and mental health: ancient practice meets nutritional psychiatry[J]. *Journal of Physiological Anthropology*, 2014, 33(1): 2.
- [86] FENG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Recent research process of fermented plant extract: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 65: 40–48.
- [87] YIN Z N, WU W J, SUN C Z, et al. Antioxidant and anti-inflammatory capacity of ferulic acid released from wheat bran by solid-state fermentation of *Aspergillus niger*[J]. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2019, 32(1): 11–21.
- [88] GABRIELE M, PUCCI L, ÁRVAY J, et al. Anti-inflammatory and antioxidant effect of fermented whole wheat on TNF α -stimulated HT-29 and NF- κ B signaling pathway activation[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 45: 392–400.
- [89] CHUNG W S, WANG J H, BOSE S, et al. Hepatoprotective effect of *Lentinus edodes* mycelia fermented formulation against alcoholic liver injury in rats[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2015, 39(3): 251–262.
- [90] HANG F, JIANG Y Z, YAN L W, et al. Preliminary study for the stimulation effect of plant-based meals on pure culture *Lactobacillus plantarum* growth and acidification in milk fermentation[J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(5): 4078–4087.
- [91] DEMIRCI T, AKTAŞ K, SZERI D, et al. Rice bran improve probiotic viability in yoghurt and provide added antioxidative benefits[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 36: 396–403.
- [92] KAUR S M, LYU F, SHARKIE T P, et al. Probiotic yogurt fortified with chickpea flour: Physico-chemical properties and probiotic survival during storage and simulated gastrointestinal transit[J]. *Foods*, 2020, 9(9): 1144.
- [93] LAZARIDOU A, SERAFEIMIDOU A, BILIADERIS C G, et al. Structure development and acidification kinetics in fermented milk containing oat β -glucan, a yogurt culture and a probiotic strain[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 39: 204–214.
- [94] ROSBURG V, BOYLSTON T, WHITE P. Viability of bifidobacteria strains in yogurt with added oat beta-glucan and corn starch during cold storage[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(5): 439–444.
- [95] COMAN M M, VERDENELLI M C, CECCHINI C, et al. Effect of buckwheat flour and oat bran on growth and cell viability of the probiotic strains *Lactobacillus rhamnosus* IMC 501®, *Lactobacillus paracasei* IMC 502® and their combination SYN BIO®, in synbiotic fermented milk[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2013, 167(2): 261–268.
- [96] CHOI H S, SEONG H, KIM S A, et al. Lysine-fortified rice germ yogurt fermented with *Lactiplantibacillus plantarum* JSA 22 and its beneficial health effects[J]. *Journal of Functional Foods*, 2023, 109: 105787.
- [97] GOHARI S, MAHDY S. Biological attributes of unfermented and fermented oat milk compared to cow milk in alloxan-induced diabetic rats[M]. 2019.
- [98] SANGWAN S, SINGH R. Synergistic effect of oats and LGG fermented milk on lowering hypercholesterolemia in rats[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 82: 164–169.
- [99] OBAROAKPO J U, LIU L, ZHANG S, et al. *In vitro* modulation of glucagon-like peptide release by DPP-IV inhibitory polyphenol-polysaccharide conjugates of sprouted quinoa yoghurt[J]. *Food Chemistry*, 2020, 324: 126857.
- [100] LIU Y Y, HUANG K, ZHANG Y, et al. Manufacture and characterization of a novel dairy-free quinoa yogurt fermented by modified commercial starter with *Weissella confusa*[J]. *Food Chemistry*, 2023, 19: 100823.
- [101] 朱晓雪, 龚绵红, 杨秉坤, 等. 不同种类及加工方式对杂粮酸奶体外抗氧化活性的比较[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(8): 268–275. [ZHU X X, GONG M H, YANG B K, et al. Comparison of *in vitro* antioxidant activity of different types and processing methods on mixed grain yogurt[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2023, 39(8): 268–275.]
- [102] LINGUA M S, GIES M, DESCALZO A M, et al. Impact of storage on the functional characteristics of a fermented cereal product with probiotic potential, containing fruits and phytosterols[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 130993.
- [103] CHAUDHARY J K, MUDGAL S. Antidiabetic and hypolipidaemic action of finger millet (*Eleusine coracana*)-enriched probiotic fermented milk: An *in vivo* rat study[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2020, 58(2): 192–202.
- [104] ISMAIL M M, HAMAD M F, ELRAGHY E M. Using goat's milk, barley flour, honey, and probiotic to manufacture of functional dairy product[J]. *Probiotics Antimicrob Proteins*, 2018, 10(4): 677–691.
- [105] WANG Y, MEHMOOD S, MAINA N H, et al. Synthesis in situ of heteropolysaccharide by *Levilactobacillus brevis* AM7 during fermentation of oat and hemp and its effect on the techno-functional properties of oat yogurt type model[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109416.
- [106] HUSSEIN H, AWAD S, EL-SAYED I, et al. Impact of chickpea as prebiotic, antioxidant and thickener agent of stirred bio-yoghurt[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2020, 65(1): 49–58.
- [107] CHEN B F, ZHAO X J, CAI Y J, et al. Incorporation of modified okara-derived insoluble soybean fiber into set-type yogurt: Structural architecture, rheological properties and moisture stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108413.
- [108] EL-AIDIE S, EL-DIEB S, ELNAWAWY M, et al. Nutraceutical food based on cereal and probiotic fermented milk[J]. *International Journal of Dairy Science*, 2017, 12: 377–384.
- [109] TOMIC N, DOJNOV B, MIOCINOVIC J, et al. Enrichment of yoghurt with insoluble dietary fiber from triticale-A sensory perspective[J]. *LWT*, 2017, 80: 59–66.
- [110] CASAROTTI S N, CARNEIRO B M, PENNA A L B. Evaluation of the effect of supplementing fermented milk with quinoa flour on probiotic activity[J]. *Journal of Dairy Science*, 2014, 97(10): 6027–6035.
- [111] ZANNINI E, JESKE S, LYNCH K M, et al. Development of novel quinoa-based yoghurt fermented with dextran producer

- Weissella cibaria* MG1[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2018, 268: 19–26.
- [112] FAN X K, LI X F, DU L H, et al. The effect of natural plant-based homogenates as additives on the quality of yogurt: A review[J]. *Food Bioscience*, 2022, 49: 101953.
- [113] ABDELDAIEM A M, ALI A H, SHAH N, et al. Physicochemical analysis, rheological properties, and sensory evaluation of yogurt drink supplemented with roasted barley powder[J]. *LWT*, 2023, 173: 114319.
- [114] ZIARNO M, CICHONSKA P. Lactic acid bacteria-fermentable cereal-and pseudocereal- based beverages[J]. *Microorganisms*, 2021, 9(12): 2532.
- [115] 闫瑞宇, 张锦锦, 陈孟涵, 等. 基于 GC-IMS 技术分析荞麦益生菌发酵乳的风味物质[J]. *食品科技*, 2022, 47(4): 303–309.
- [YAN R Y, ZHANG J J, CHEN M H, et al. Analysis of flavor substances in buckwheat probiotic fermented milk based on GC-IMS[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(4): 303–309.]
- [116] 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 S N, LI L. Study on physicochemical and functional properties of whole grain yogurt[J]. *Dairy Industry of China*, 2016, 44(4): 17–20.]
- [117] 郑铤, 王嘉毅, 刘咸筠. 杂粮酸奶加工技术及营养价值的研究进展[J]. *农产品加工*, 2024(20): 82–87, 97. [ZHENG N, WANG J Y, LIU X J. Research progress on processing technology and nutritional value of multigrain yogurt[J]. *Agricultural Processing*, 2024(20): 82–87, 97.]
- [118] 李红艳, 彭少晶, 杨发光, 等. 一种 PP 杯装益生菌谷物脆常温酸奶及其制备方法: 中国, 202311323799[P]. 2024-02-06. [LI H Y, PENG S J, YANG F G, et al. A kind of PP cup probiotic cereal crisp normal temperature yogurt and its preparation method: China, 202311323799[P]. 2024-02-06.]