

益生菌发酵植物多糖及益生菌制品开发现状

马泽^{1,2,3}, 沈禾婧^{1,2,3}, 王凤忠^{1,2,3}, 范蓓^{1,2,3*}, 白亚娟^{1,2,3*}

(1. 三亚中国农业科学院国家南繁研究院, 海南三亚 572024) (2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工综合性重点实验室, 北京 100193) (3. 海南省农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572025)

摘要: 植物源多糖作为益生元, 被肠道微生物利用后产生短链脂肪酸等多种代谢物, 帮助机体维持免疫稳态, 目前市场上单一益生元产品逐步向益生菌-益生元产品发展, 发酵过程中多糖结构及生物活性的变化成为研究的焦点。本文综述了益生菌发酵对植物多糖分子质量、单糖组成等主要结构及肠道调节、免疫调节功能的影响, 分析了发酵后植物多糖相较于发酵前所具备的优势, 调研了消费市场上益生菌-多糖益生元产品的种类、主要功效等产业现状, 旨在为开发益生菌、益生元产品提供参考。下一步研究需继续深化益生菌转化多糖代谢途径和机制, 以优化发酵效率和提升多糖特性, 为开发融合益生菌与植物源多糖的功能食品提供理论支持。

关键词: 益生菌; 多糖; 益生元; 发酵食品

文章编号: 1673-9078(2025)10-424-435

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0948

Current Status of Development of Probiotic Fermented Plant Polysaccharides and Probiotic Products

MA Ze^{1,2,3}, SHEN Hejing^{1,2,3}, WANG Fengzhong^{1,2,3}, FAN Bei^{1,2,3*}, BAI Yajuan^{1,2,3*}

(1. National Nanfan Research Institute (Sanya), Chinese Academy of Agricultural Sciences, Sanya 572024, China)
(2. Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs//Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)
(3. Sanya Institute, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 572025, China)

Abstract: Plant-derived polysaccharides, as prebiotics, are utilized by gut microbiota to produce short-chain fatty acids and other metabolites that help maintain immune homeostasis. Currently, the market for single prebiotic products is gradually developing towards probiotic-prebiotic products, and the changes in polysaccharide structure and biological activity during fermentation have become the focus of research. This article reviews the effects of probiotic fermentation on the main structural characteristics such as molecular weight and monosaccharide composition, as well as intestinal regulation and immune regulatory functions of plant polysaccharides. This review analyzes the advantages of fermented plant polysaccharides compared with those before fermentation, and investigates the industrial status such as the types and main effects of the probiotic-polysaccharide prebiotic products in the consumer market. The goal is to provide a reference for the development of probiotic and prebiotic products. Future research should

引文格式:

马泽, 沈禾婧, 王凤忠, 等. 益生菌发酵植物多糖及益生菌制品开发现状[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 424-435.

MA Ze, SHEN Hejing, WANG Fengzhong, et al. Current status of development of probiotic fermented plant polysaccharides and probiotic products [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 424-435.

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-09-13; 接受日期: 2024-09-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600303); 三亚中国农业科学院国家南繁研究院“南繁专项”项目(YYLH2307; YBXM2417); 海南省农业科学院科技创新项目(HAAS2024KJCX01)

作者简介: 马泽(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物与医药, E-mail: muzixianshengdeyouxiang@outlook.com

通讯作者: 范蓓(1981-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: fanbei517@163.com; 共同通讯作者: 白亚娟(1989-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: xbaizxyq@sina.com

continue to elucidate the metabolism pathways and mechanisms of probiotic conversion of polysaccharides to optimize fermentation efficiency and improve polysaccharide properties, thereby providing theoretical support for the development of functional foods that integrate probiotics and plant-based polysaccharides.

Key words: probiotics; polysaccharides; prebiotics; fermented foods

以乳酸菌为代表的促进肠道健康的益生菌，在发酵食品中应用久远且广泛。经益生菌发酵的食品其原有的质构特性、营养特性会发生改变，并产生特殊的风味口感^[1-4]，深受人们喜爱。益生菌能够通过分泌多种碳水化合物活性酶发生酶促反应、代谢产生有机酸等途径，使不易被人体直接吸收的植物源性有益成分转化为人体可吸收、易吸收的状态。功能性低聚糖、植物多糖等益生元作为益生菌增殖的重要底物，能够在人体胃液环境中保持稳定，大肠通常是其被分解利用的主要场所^[5]。植物多糖是一种广泛存在于植物界的天然大分子聚合物，由10个或以上的单糖通过缩合反应联接，主要分布在植物的细胞壁或细胞膜中^[6]。天然植物多糖具有免疫调节^[7]、抗氧化^[8]、降血糖^[9]、降血脂^[10]等多种生物活性。天然多糖的复杂结构与高分子量导致其在人体内吸收困难，制约了其生物活性发挥。随着对植物源多糖研究的深入，通过化学、生物修饰等手段优化多糖的理化性质与生物活性，以满足不同的应用需求。

作为一种生物修饰方法，肠道益生菌能够通过降解多糖等益生元生成短链脂肪酸、胆汁酸等生物活性物质^[11]，调节肠道微生物群落的结构与功能^[12]，还能通过神经递质调控脑肠交互作用缓解焦虑与压力。益生元与益生菌之间的相互作用增强了其在肠道菌群-肠-脑中维护健康平衡的功能^[13]。经益生菌发酵处理，植物多糖的产率得到提高，益生作用等功能活性得到增强^[14,15]。

本文综述了益生菌发酵对植物多糖主要结构及功能的影响，分析了发酵后植物多糖相较于发酵前所具备的优势，调研了国内主流电商平台市场占比前2%的益生菌-多糖益生元品牌的产品成分、主要功效以及消费者接受程度等产业现状，旨在为开发益生菌、益生元、合生元产品提供参考。

1 益生菌发酵对植物多糖化学结构的影响

益生菌发酵作为一种生物转化技术，主要通过其代谢过程中产生的酶对底物的结构进行修饰以提高目标活性成分的含量或产生新的有效成分。对于多糖而言，益生菌发酵主要对其分子量、单糖组成、糖苷键等化学结构及多糖得率产生影响。由于结构决定活性，

在化学结构改变的同时，多糖的生物活性、溶液特性等也会随之改变^[16]，可能会产生新的有益功能。

1.1 益生菌发酵对多糖得率及分子量的影响

提取植物多糖的方法主要有溶剂提取法^[17,18]、强化提取法^[19]和生物提取法^[20]。溶剂提取法主要包括水提、酸提、碱提，强化提取法主要包括微波、超声波、超高压等，生物提取法包括单一酶法和复合酶法。益生菌发酵本质上是一种复合酶法提取，利用益生菌所产生的丰富酶系，瓦解植物细胞壁使内容物溶出的同时对多糖结构进行改性。较之其它提取方法，益生菌发酵提取能耗低、污染小、成本低，是提高植物粗多糖得率的有效方法。选取合适的菌种及发酵条件对有效提高目标产物得率与活性至关重要。姜敬维等^[21]表明青稞经植物乳杆菌发酵处理后， β -葡聚糖含量较之保加利亚乳杆菌和鼠李糖乳杆菌处理组显著增加，均一性和溶解性更好，增强了小鼠耐缺氧和抗疲劳的能力。刘涛等^[22]利用粪链球菌、芽孢杆菌、酵母菌以及乳酸菌发酵猫爪草原药，发现由4种益生菌发酵后的猫爪草多糖含量与未发酵猫爪草原药相比均有提高，其中酵母菌发酵组的猫爪草多糖产量最高，达到9.06%。管立军等^[23]利用嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌和植物乳杆菌发酵刺五加叶，发现干酪乳杆菌发酵组多糖含量最高，为12.7 mg/g。Grazina等^[24]利用乳酸菌发酵黑麦饮料，将发酵液中阿拉伯木聚糖和低聚木糖的产量提高至300和1100 mg/L。微生物发酵法并不能广泛提高植物多糖得率，这与微生物分泌的碳水化合物酶种类和多糖结构息息相关。赵玉洁等^[25]利用乳酸菌发酵藿香、半枝莲、陈皮和甘草四种药材，发现仅乳酸菌发酵甘草组的多糖含量显著提高，其它组多糖含量在发酵后降低或无显著差异。混合菌种发酵对多糖的消耗量也并不一定高于单一菌种发酵。黄振勇等^[26]利用植物乳杆菌和保加利亚乳杆菌分别发酵铁皮石斛汁，其多糖含量分别比原汁降低了41.63%和41.43%，而将保加利亚乳杆菌与植物乳杆菌以1:1配比发酵石斛汁时，石斛汁中的多糖含量从原来的5.02%降至3.82%，降低了23.9%。这可能是由于益生菌之间存在互利共生的关系从而减少了对碳源的消耗。

研究表明，多糖相对分子质量是影响多糖结构-

功能关系的重要特征^[27],适当大小的多糖利于调整自身结构与蛋白受体结合以发挥其生物活性。高分子量多糖由于团聚效应等使得活性结构域不能有效暴露,低分子量多糖不能形成有效活性结构,这些均导致其生物活性降低^[28]。在益生菌发酵过程中,大分子量的多糖会被益生菌分泌的碳水化合物酶水解为单糖或寡糖,降低多糖的分子量,有可能暴露出更多的活性结构域,提高多糖的功能活性。发酵龙眼多糖的相对分子质量(33.39 kDa)比未发酵的龙眼多糖(3 182.52 kDa)低约 100 倍^[29],植物乳杆菌 NCU116 发酵使胡萝卜多糖相对分子质量从 29.8 kDa 降低到 23.1 kDa^[4]。郑欣等^[30]利用不同乳酸菌对荔枝汁进行发酵,发现总糖含量下降了 120 g/L,可见乳酸菌发酵对荔枝汁中总糖含量影响较大。经植物乳杆菌 FM17 发酵后的波罗蜜多糖分子量从 320.21 kDa 显著降低至 243.62 kDa^[31],这可能是因为乳酸菌发酵过程中分泌葡萄糖苷酶导致多糖链降解^[32]。此外,这些益生菌在发酵过程中会产生有机酸,降低溶液 pH 值,这可能促进多糖酸水解,进一步降低分子量^[33]。

多糖在发酵过程中相对分子质量的改变可归因于微生物的降解和合成,多糖特定的糖苷键被微生物分泌的碳水化合物酶选择性地裂解是主要过程。发酵过程中植物细胞壁的破损,使得多糖结构片段化,相对分子质量降低使得多糖的提取率大大提升。例如,植物乳杆菌 NCU116 可以通过水解聚半乳糖醛酸和鼠李糖半乳糖醛酸-I 间的化学键降低胡萝卜多糖的分子量^[4]。植物多糖在益生菌发酵的过程中会作为碳源被益生菌消耗,导致总糖含量降低,可以采取诸如混合菌种发酵的方法减少消耗。多数乳酸菌在利用多糖生长的同时会合成胞外多糖,这是多糖得率与分子量增加的另一原因。

1.2 益生菌发酵对多糖单糖组成的影响

越来越多的证据证实,多糖的结构中可能存在由寡糖片段形成的“活性中心”^[34],而单糖的组成和比例构成了寡糖片段的基本单元,可直接影响多糖的理化性质和生物活性^[35]。益生菌发酵对多糖中单糖的影响主要集中在含量占比、连接方式、连接类型等,这些改变使得发酵后的多糖生物活性发生一定程度的变化。乳酸菌 RP38 与酿酒酵母 JJ4 共同发酵龙须菜多糖后,其硫酸酯多糖比例从 0.03% 提升至 0.12%,硫酸酯基更易于识别,显著增强了多糖清除羟自由基和超氧阴离子自由基的能力^[36]。Pei 等^[16]利用鼠李糖乳杆菌发酵金银花后提取多糖,发现其单糖组成种类新增加了果糖和阿拉伯糖,占比分别为 2.94%、13.84%,

单糖组成种类显著改变。Wan 等^[4]研究表明,益生菌发酵能断裂多糖链重复单元间的连接,有效降低胡萝卜水溶性多糖的分子质量,降低其分子尺寸分散程度。Huang 等^[37]利用乳杆菌发酵龙眼多糖后,总糖质量分数从 78.42% 降至 69.31%,多糖相对分子质量下降,中性糖、糖醛酸和葡萄糖含量减少,单糖组成中阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖和甘露糖含量增加,占比由 43.63:20.32:8.79:2.35 转变为 48.55:22.72:9.29:3.28,这说明龙眼多糖被乳杆菌发酵分解利用。综上所述,益生菌发酵主要通过打断植物多糖的聚合连接,降低分子量。新生成的低分子量多糖易于被人体肠道微生物利用,且更容易接触到免疫调节、神经调节等活性作用位点,其生物活性也更为有益和多元。

1.3 益生菌发酵对多糖超微形貌的影响

多糖具有相对较大的分子量和复杂的结构,对多糖活性的影响密切相关。益生菌发酵可改变多糖中的光学活性发色团,影响多糖的光学性质^[38],还能够对多糖的化学键、官能团、单糖种类及比例、空间结构、氢键交联密度以及分子间的连接和聚集等产生影响,使多糖的分子量降低从而影响其活性。发酵过程中产生的某些特殊空间构型可以突出其适宜的活性位点,并使一些活性片段更好地发挥作用。这一现象的表现体现就是多糖的超微形貌粗糙化,意味着多糖的微观颗粒变得更小,更容易被细胞膜受体识别,生物活性增强,生物利用度提高。海红米经乳酸菌发酵后其纤维素及木质素被分解,亲水活性基团暴露,其保水性、溶解度以及胆固醇吸附能力显著增强^[39]。Chen 等^[40]通过扫描电镜可以观察到益生菌发酵前后天麻多糖由纤维疏松、表面光滑的线状网络结构转变为不规则片状结构。龙眼多糖发酵后,其表面结构呈现出具有交叉缠绕和不规则折叠的枯萎藤状,以及表面粗糙和空腔的颗粒状结构^[29]。Wan 等^[4]发现植物乳杆菌 NCU116 发酵胡萝卜多糖后其表面结构变得更加粗糙,产生了更多的碎片颗粒。由此可见,益生菌发酵改变了多糖的二级、三级结构,使多糖的空间构象更加卷曲,暴露出更多的活性基团,同时降低了多糖粘度,增加了其与细胞表面受体的接触机会和亲和力,促进了多糖与细胞之间的相互作用。多糖在提取的过程中会因为机械力、生化反应等外部作用导致分子量减小,活性基团暴露,相比而言,发酵过程中益生菌会破坏植物多糖的原始连接或聚集体结构,使其定向发生变化^[40],活性基团暴露位点可控,更易于被细胞受体识别,相对于纯物理或纯化学提取其活性有效增强。具体结构和活性变化如表 1 所示。

表 1 益生菌发酵对多糖结构的影响
Table 1 Effects of probiotic fermentation on polysaccharide structure

多糖	益生菌	多糖提取率	结构变化	活性变化	文献
青稞 β -葡聚糖	植物乳杆菌	β -葡聚糖提取率 5.07%	均一性提高 分子量降低	小鼠密闭缺氧存活时间延长 26.6%，游泳缺氧存活时间延长 22.6%	[21]
	保加利亚乳杆菌	β -葡聚糖提取率 5.14%	均一性提高 分子量降低	小鼠密闭缺氧存活时间延长 42.3%，游泳缺氧存活时间延长 40.3%	
	鼠李糖乳杆菌	β -葡聚糖提取率 5.05%	均一性显著提高 分子量降低	小鼠密闭缺氧存活时间延长 36.4%，游泳缺氧存活时间延长 42.4%	
猫爪草多糖	粪链球菌	多糖提取率提高 6.73%	—	—	[22]
	枯草芽孢杆菌	多糖提取率提高 6.75%	—	—	
	酵母菌	多糖提取率提高 9.06%	—	—	
	乳酸菌	多糖提取率提高 8.63%	—	—	
藁香多糖	乳酸菌	总多糖含量降低	—	—	[25]
半枝莲多糖	乳酸菌	总多糖含量由 14.33 mg/g 增加到 16 mg/g	—	—	[25]
陈皮多糖	乳酸菌	总多糖含量由 309.33 mg/g 降低至 232 mg/g	—	—	[25]
甘草多糖	乳酸菌	总多糖含量增加至 21.33 mg/g	—	—	[25]
龙眼多糖	酿酒酵母	—	阿拉伯糖、鼠李糖、甘露糖、半乳糖、葡萄糖醛酸含量增加，分子量降低	免疫调节活性显著增强	[29]
	巴氏醋杆菌	—	阿拉伯糖、鼠李糖、甘露糖、半乳糖、含量增加，分子量降低	免疫调节活性增强	
	乳杆菌	总糖质量分数从 78.42% 降至 69.31%	分子量从 109.62 kDa 下降到 51.46 kDa 阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖和甘露糖占比由 43.63:20.32:8.79:2.35 转变为 48.55:22.72:9.29:3.28	益生元活性增强	[37]
刺五加叶多糖	嗜酸乳杆菌	多糖含量增加到 10.5 mg/g	—	自由基清除能力增强，降血糖活性增强	[23]
	干酪乳杆菌	多糖含量显著增加到 12.7 mg/g	—		
	植物乳杆菌	多糖含量增加到 11.6 mg/g	—		
铁皮石斛多糖	植物乳杆菌	总多糖含量降低 41.63%	—	羟基自由基、DPPH 自由基和超氧阴离子自由基的清除能力	[26]
	保加利亚乳杆菌	总多糖含量降低 41.43%	—		
金银花多糖	鼠李糖乳杆菌 6224	提取率从 5.57% 提高至 6.66%	分子量降低 糖醛酸含量提高 3.03 倍 微观结构由纤维松散、表面光滑变为大块不规则薄片 主要单糖由 Gal 转变为 GalA	ABTS ⁺ 自由基清除能力提升 α -淀粉酶抑制活性增强 热稳定性降低	[16]
	酿酒酵母 W5	提取率从 5.57% 提高至 5.84%	分子量降低 糖醛酸含量提高 2.91 倍 微观结构由纤维松散、表面光滑变为大块不规则薄片，结构更致密	—	

续表 1

多糖	益生菌	多糖提取率	结构变化	活性变化	文献
胡萝卜果肉多糖	植物乳杆菌 NCU116	—	分子量分布变窄 平均分子量降低	降血糖活性增强	[4]
波罗蜜多糖	植物乳杆菌 FM 17	—	葡萄糖、半乳糖和甘露糖的比例分别从 26.86%、32.32%、20.34% 下降到 11.23%、38.62%、28.86%，分子量从 320.21 ± 6.86 kDa 显著降低到 243.62 ± 9.32 kDa	DPPH 和 ABTS ⁺ 自由基清除活性增强	[31]
荔枝多糖	保加利亚乳杆菌	总糖含量下降 120 g/L	—	—	[30]
	嗜热链球菌				
	乳酸链球菌				
天麻多糖	植物乳杆菌	—	分子量降低，表面形貌碎片化	抗氧化活性增强	[40]
	假丝酵母				
	酿酒酵母				
	枯草芽孢杆菌				
海红米糖多糖	鼠李糖乳杆菌 (BNCC185356)	—	颗粒变小，结构更为疏松	持水性、溶解性显著增加	[39]
	嗜酸乳杆菌 (BNCC336636)				
	嗜热链球菌				
龙须菜多糖	乳酸菌 RP38	—	硫酸酯多糖比例从 0.03% 提升至 0.12%	—	[36]
	酿酒酵母 JJ4				
	嗜酸乳杆菌 (BNCC336636)				
	嗜热链球菌				

2 益生菌发酵对植物多糖生物活性的影响

经益生菌发酵处理的植物多糖对肠道健康的调控效能、免疫机能的提升以及降血糖等多项生理活性表现出显著的增强效应。具体机理如图 1 所示。

2.1 肠道健康调节

肠道是人体营养物质吸收转化和免疫调节的重要场所，肠道内环境稳态是肠道微生物与肠道免疫相互作用的结果。活性多糖既能通过调节肠道微生物-代谢产物构成谱发挥生理活性，又能直接参与调节肠道免疫反应，是改善肠道健康的重要功能物质^[41]。

2.1.1 肠道菌群调节

肠道菌群可编码人体自身不能合成的碳水化合物酶，降解消化道内难消化多糖，主要代谢产物为短链

脂肪酸，包括乙酸、丙酸和丁酸等。短链脂肪酸能促进肠道粘蛋白产生，抑制炎症因子生成，为肠上皮细胞供能，维持粘膜免疫平衡，促进肠道健康^[42,43]。经植物乳杆菌发酵的黄精多糖能显著增加小鼠粪便中有益细菌属水平上 *Lactobacillus*、*Barnesiella* 等的相对丰度，降低病原菌 *Clostridium XIVa*、*Helicobacter*、*Streptococcus*、*Alistipes* 的相对丰度，有效改善肠道菌群紊乱^[44]。经过枯草芽孢杆菌发酵的枸杞多糖可以增加结肠炎小鼠肠道中多种菌属的丰度，显著提升短链脂肪酸的含量，降低肠道炎症^[45]。Gao 等^[46]研究表明植物乳杆菌 NCU116 可通过分泌如 β -半乳糖苷酶、 α -糖苷酶、 α -葡萄糖苷酶和 α -甘露糖苷酶等碳水化合物活性酶催化苦瓜多糖分解，经发酵的苦瓜多糖可显著增加糖尿病大鼠肠道菌群中 *Lactococcus laudensis* 和 *Prevotella loescheii* 的相对丰度，促进肠道内益生菌或有益共生菌的丰度，改善糖尿病肠道微环境。

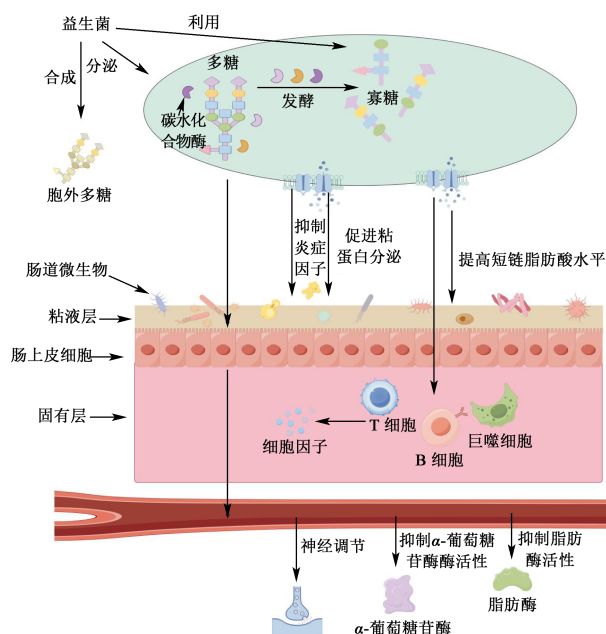


图1 益生菌发酵植物多糖发挥健康调节作用的示意图

Fig.1 The Mechanism of health benefits of probiotic fermented plant polysaccharides

2.1.2 肠道屏障保护

保护肠道屏障完整性是保护宿主免受有害物质侵害的重要前提。Chen 等^[47]发现经酿酒酵母和枯草芽孢杆菌发酵的麦麸多糖能够显著提升便秘斑马鱼模型绒毛高度与隐窝深度的比值,促进肠道蠕动,增强肠道屏障,改善斑马鱼肠道健康。

2.2 免疫调节

多糖作为一种免疫调节物质能够激活巨噬细胞,促进B淋巴细胞等产生细胞因子,从而发挥免疫调节作用,经益生菌发酵后的多糖免疫调节能力显著增强。通过乳杆菌发酵龙眼果肉多糖能显著促进 RAW264.7 巨噬细胞增殖及白细胞介素 (IL)-6 分泌,提升免疫调节效能^[48]。采用发酵芦笋多糖干预环磷酰胺诱导的肝毒性模型小鼠,使得小鼠从 Th17 主导的急性炎症反应转变为 Th1 主导的防御性免疫反应^[49]。多糖的单糖组成和分子量是影响其免疫调节活性的主要原因,例如,甘露糖和阿拉伯糖治疗均通过抑制炎症反应和改善屏障损伤来缓解 DSS 诱导的结肠炎^[50],由鼠李糖和半乳糖组成的多糖具有独特的抗炎作用,可显著抑制 IL-1 β 的产生^[51],经过蜂蜜加工后具有较高半乳糖含量的黄芪,其多糖对 DSS 诱导的结肠炎具有更有益的作用^[52]。Liu 等^[53]发现多糖的相对分子质量较高与其抗炎特性呈负相关。葡聚糖、甘露聚糖、果胶多糖、阿拉伯半乳聚糖、岩藻多糖、半乳聚糖、透明质酸、果聚糖和木聚糖是已有研究发现的具有免疫刺激活性的多糖,被称为免疫刺激性多糖,

能够与免疫系统相互作用并增强宿主免疫应答,普通多糖经过选择性结构修饰后,就有可能成为具有免疫刺激活性的多糖^[54]。综上所述,发酵多糖在调节炎症方面的潜在作用可能归因于相对分子质量的降低、单糖组成的变化,益生菌对其结构的选择性修饰。

2.3 抗氧化作用

机体中自由基浓度过高是许多疾病发生的起因与伴随病症。经益生菌发酵的植物多糖能有效调节机体氧化应激水平,其机制主要是益生菌分泌的酶系降解多糖,使得更多活性基团暴露,同时有益代谢产物增加也进一步调节了氧化应激水平。经植物乳杆菌和鼠李糖乳杆菌发酵的滇黄精多糖减轻氧化应激和阻止细胞程序性死亡,抵抗心肌细胞缺氧和复氧损伤能力显著提高^[55]。经鼠李糖乳杆菌发酵处理的枸杞果汁在增强氧化受损细胞生存能力和抑制炎症反应等方面活性显著提升^[56]。经植物乳杆菌发酵的波罗蜜多糖表现出比未发酵多糖更强的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除活性^[31]。经布拉氏酵母发酵后的山药多糖表现出分子量更低、抗氧化活性更高的特点^[57]。安欣等^[58]通过鼠李糖乳杆菌发酵宁夏枸杞干果,发现提取物总糖含量显著增加, DPPH 自由基清除能力提升 186.5%, ABTS⁺ 自由基清除能力显著增强。经过益生菌发酵后的多糖除自身活性提高外,因发酵副产物的生成还会产生新的活性功能,例如铁皮石斛汁在经过嗜酸乳杆菌与副干酪乳杆菌联合发酵后产生的没食子酸加强了其抗炎、抗氧化的功效^[59]。有研究表明,低分子量的聚合物具有更高的抗氧化活性,这可能是由于与高分子量多糖处于相似条件下时,它们能够呈现出更多的还原端,接受更多的自由基^[60,61],多糖的抗氧化活性还与鼠李糖、阿拉伯糖和半乳糖醛酸的比例有关^[62]。由此推测,在益生菌发酵的过程中,多糖中单糖比例发生变化,分子量减小呈现出更多还原端,抗氧化活性增强。

2.4 降血糖作用

血糖长期处于较高浓度会导致一系列慢性疾病发生,尽管有许多药物干预措施,包括口服降糖药和注射胰岛素来治疗糖尿病,但这些疗法均有不良并发症^[63],植物多糖具有降血糖作用,益生菌发酵能够有效提高多糖的降血糖活性。在利用乳酸菌发酵刺梨汁的研究中发现,发酵后刺梨汁多糖的降血糖效果显著提升,且不同乳酸菌株发酵刺梨汁的活性功能表现存在差异,其中副干酪乳杆菌 SR10-1 发酵刺梨汁后其多糖降血糖效果最好^[64]。Xiang 等^[65]研究发现经植物乳杆菌 dy-1 发酵处理的大麦 β -葡聚糖在酸性条件下表

现出更好的 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶和脂肪酶的抑制活性。经植物乳杆菌 NUC116 发酵处理的胡萝卜果肉多糖相较于未发酵组,对 II 型糖尿病大鼠具有更好的降血糖效果^[66]。经植物乳杆菌 NCU116 发酵的苦瓜多糖能够优化高脂肪饮食和链脲佐菌素诱导的 II 型糖尿病大鼠的肠道菌群,提高短链脂肪酸的产生,从而改善糖尿病大鼠的高血糖,高胰岛素血症,高脂血症和氧化应激^[46]。植物多糖的抗糖尿病活性与其各种理化性质之间存在显著相关性,包括溶解度、粘度、分子量、单糖组成等。这些特性共同促进了植物多糖在管理糖尿病方面的治疗潜力^[67]。分子量较低的植物多糖链上的羟基和羧基较多,促进了酶和多糖复合物的形成,从而产生了更高的葡萄糖苷酶抑制性^[68]。植物多糖分子量对抗糖尿病作用的影响并不是简单的线性关系,分子量较高的多糖黏度较高,抑制了淀粉的消化吸收,同样具有较好的降糖活性^[69]。

2.5 降血脂作用

高血脂是心血管疾病的主要诱因之一,多糖能通过改善肠道微环境、降低甘油三酯水平以及调节胆固醇和胆汁酸的吸收,发挥调节血脂作用。Yang 等^[70]发现经过干酪乳杆菌发酵处理,马尾藻多糖对脂肪酶的抑制能力显著提高,主要是由于多糖分子量减小,发酵后形成的网状结构有效阻止了酶与底物的结合。Gao 等^[46]发现经植物乳杆菌 NCU116 发酵的苦瓜多糖降低总胆固醇、三酰甘油和低密度脂蛋白的能力显著提升。经干酪乳杆菌发酵的黄精多糖对脂肪酶的抑制活性显著提升^[71]。经益生菌发酵后的植物多糖可能是通过降低分子量形成网络结构阻止酶和底物结合^[70],形成多空腔的复杂结构捕获、结合胆固醇和胆汁酸阻止脂肪的形成,从而降低血脂。

3 市售益生菌-益生元产品现状

市面上销售的新型益生菌产品主要是通过一些特殊的技术,实现益生菌靶向肠道,通过改变肠道微环境促进人体健康。我国益生菌产品主要以食品及补充剂为主,近年来产品形式丰富,行业产值每年递增,企业竞争加剧。

3.1 益生菌-益生元制剂类

益生菌-益生元制剂类产品主要通过高剂量活菌结合特殊包埋技术,实现优质益生菌靶向肠道定植。

片剂类:主要形式有咀嚼片、糖果等,以便携美味为产品特色。例如主打调节肠道健康的“每日的菌”益生菌咀嚼片,融入了多种益生菌,包括植物乳杆菌

Lp90、长双歧杆菌 BL21、植物乳杆菌 Lp05、动物双歧杆菌乳亚种 BLa36、乳双歧杆菌 Bla80,同时添加低聚木糖和水果发酵提取物作为益生元,以促进益生菌的活性。上述益生菌均从本土发酵植物中提取,每片含有高达 50 亿 CFU 活性益生菌,具有耐胃酸、耐胆汁的特性,能够在肠道精准释放。针对口腔异味问题,波普专研开发的益生菌微泡含片糖果,融合了鼠李糖乳酪杆菌 R0011、瑞士乳杆菌 LAFTI L10、唾液联合乳杆菌 HA-118、植物乳杆菌 N13、鼠李糖乳酪杆菌 LR-G14、罗伊氏粘液乳杆菌 LR-G100、副干酪乳杆菌 LPC-G110 以及嗜酸乳杆菌 NCFM 八种明星菌株,添加低聚果糖作为益生元,旨在通过调节口腔及胃肠道微生物群落平衡,从根本上改善口腔异味。

粉剂类:该剂型是市场上菌种补充剂的主要产品形式,可便捷地添加于牛奶、果汁等多种饮品中,其适用性广泛,满足了不同消费者的需求。例如,江中制药开发的益生菌冻干粉固体饮料,运用了三层包埋技术及冷冻干燥技术,添加了具有专利保护的植物乳杆菌 LP45、植物乳杆菌 CN2018 等菌株和低聚异麦芽糖、抗性糊精、低聚果糖水苏糖等益生元,通过益生菌-益生元复配增强产品的健康效益。汤臣倍健推出的 Yep 小绿盾益生菌固体饮料,每袋添加益生菌 150 亿 CFU 高活性益生菌,添加了低聚果糖作为益生元。万益蓝 WonderLab 小蓝瓶益生菌产品融合了包括动物双歧杆菌乳亚种 HN019、嗜酸乳杆菌 NCFM、动物双歧杆菌乳亚种 Bi-07、植物乳植杆菌 Lp-115 以及动物双歧杆菌乳亚种 BI-04 五种益生菌,每个最小食用单元的益生菌总活菌数量高达 400 亿,远高于同类产品总活菌数,运用高活冻干技术确保了益生菌在肠道中的存活率高达 99.9%,添加了低聚木糖、水苏糖及低聚果糖等益生元,进一步促进肠道健康。益适优针对婴儿、儿童、女性、老年人以及成人等不同群体,通过特殊菌株与益生元复配,开发了满足特定人群需求的定制化产品。例如,在专为婴儿设计的益生菌粉中,融合了两种具有母乳专利的菌株乳双歧杆菌 Probio-M8 和发酵乳杆菌 CECT5716,选择聚葡萄糖、低聚果糖、抗性糊精作为益生元;针对女性需求设计的菌粉中添加了乳双歧杆菌 V9 以平衡私密菌群,同时选用聚葡萄糖、抗性糊精作为益生元。乐力公司从健康诉求维度对其产品线进行了划分,涵盖了肠道健康、胃部健康、身材管理、敏感体质、口腔健康、骨骼健康及免疫营养等多个方面,其明星产品是应对消费者减重瘦身需求的产品,乐力引入了俗称“瘦子菌”的乳双歧杆菌 B420,优选了菊粉、聚葡萄糖、低聚果糖以及低聚异麦芽糖等益生元,通过调节肠道微生物群落平衡实现减重。

表 2 益生菌-益生元产品

Table 2 Probiotic-prebiotic products

产品名称	益生菌	配料（除益生菌）	品牌
益生菌冻干粉固体饮料活菌型	植物乳植杆菌 LP45、两歧双歧杆菌 TMC3115、唾液链球菌嗜热亚种 S131、唾液链球菌嗜热亚种 S709、鼠李糖乳酪杆菌 LR863、副干酪乳酪杆菌 L578、动物双歧杆菌乳亚种 BAL531、嗜酸乳杆菌 La28、副干酪乳酪杆菌 YMC1069、鼠李糖乳酪杆菌 LR519、罗伊氏粘液乳杆菌 L840、双歧杆菌长亚种 L693、格氏乳杆菌 L838、氏乳杆菌保加利亚亚种 L8、瑞士乳杆菌 L551、短双歧杆菌 L956、长双歧杆菌婴儿亚种 L998	低聚异麦芽糖、葡萄糖、玉米淀粉、赤藓糖醇、乳糖醇、低聚果糖水苏糖、抗性糊精、维生素 C、食品用香精益生元总含量≥30%	江中制药
WonderLab	动物双歧杆菌乳亚种 HN019、嗜酸乳杆菌 NCFM、动物双歧杆菌乳亚种 Bi-07、植物乳植杆菌 Lp-115、动物双歧杆菌乳亚种 BI-04	低聚木糖、水苏糖、低聚果糖、麦芽糊精、乳酸菌复配粉	万益蓝
金斯利安孕妇乳母益生菌粉	鼠李糖乳酪杆 IMC501、副杆酪乳酪杆菌 IMC502、鼠李糖乳酪杆菌 HN001、动物双歧杆菌乳亚种 HN019	全脂乳粉、脱脂乳粉、低聚异麦芽糖、抗性糊精、焦磷酸铁、维生素 A、维生素 D、维生素 B12、叶酸、乳酸菌粉 MI SYN BIO	斯利安
波普专研口香益生菌微泡片（多肉葡萄风味）	鼠李糖乳酪杆菌 R0011、瑞士乳杆菌 LAFTI L10、唾液联合乳杆菌 HA-118、植物乳植杆菌 N13、鼠李糖乳酪杆菌 LR-G14、罗伊氏粘液乳杆菌 LR-G100、副干酪乳酪杆菌 PC-G110、嗜酸乳杆菌 NCFM	山梨糖醇、碳酸氢钠、DL- 苹果酸、微晶纤维素、乳糖醇、麦芽糊精、低聚果糖、抗坏血酸、低聚果糖、红葡萄果汁粉、硬脂酸镁、食用香精、麦芽糊精、绿咖啡复合粉（固体饮料）、速溶绿茶粉、三氯蔗糖、食用香料、着色剂（诱惑红铝色淀）	波普专研
Yep 小绿盾	嗜酸乳杆菌 DDS-1、鼠李糖乳杆菌 UALr-06、乳双歧杆菌 UABla-12	低聚果糖、水溶性膳食纤维	汤臣倍健
益适优女性专享款	动物双歧杆菌亚种 V9、干酪乳杆菌 Zhang	聚葡萄糖、异麦芽酮糖醇、乳糖醇、抗性糊精、水蜜桃粉、柠檬酸	益适优
益适优成人通用款	动物双歧杆菌乳亚种 V9、干酪乳酪杆菌 Zhang，植物乳植杆菌 P-8	低聚果糖、草莓粉、乳糖醇、赤藓糖醇、聚葡萄糖	
益适优儿童专享款	动物双歧杆菌乳亚种 Probio-M8、发酵粘液乳杆菌 CECT 5716	聚葡萄糖、低聚果糖、乳糖醇、哈密瓜粉、抗性糊精、复配营养素（L- 乳酸钙、维生素 A（醋酸视黄酯）、维生素 D3（胆钙化醇））	
B420 固体饮料（瘦身）	动物双歧杆菌乳亚种 B420、植物乳植杆菌 Lp90、长双歧杆菌长亚种 BL21、鼠李糖乳酪杆菌 LRa05、嗜酸乳杆菌 LA85、动物双歧杆菌乳亚种 BLa80、干酪乳酪杆菌 LC89、动物双歧杆菌乳亚种 BLa36、植物乳植杆菌 N13、青春双歧杆菌 BAC30、鼠李糖乳酪杆菌 HN001、动物双歧杆菌乳亚种 HN019	菊粉、聚葡萄糖、乳糖醇、赤藓糖醇、西柚果汁粉、低聚果糖、低聚异麦芽糖、白芸豆提取物（0.4%）	乐力
定敏佳益生菌 M-16V 固体饮料（抗过敏）	动物双歧杆菌乳亚种 BAL06、植物乳植杆菌 LP28、短双歧杆菌 M-16V、鼠李糖乳酪杆菌 HN001、植物乳植杆菌 DR7、鼠李糖乳酪杆菌 LRH113、副干酪乳酪杆菌 LPC48	低聚异麦芽糖（3.7%）、聚葡萄糖（3.4%）抗性糊精（2.9%）	
益生菌清口含片	植物乳杆菌 360、植物乳杆菌 LP226、植物乳杆菌 LP220	山梨糖醇、食用香精香料、硬脂酸镁、DL- 苹果酸、柠檬酸、三氯蔗糖、胭脂红	
啵儿爽益生菌口香爆珠	副干酪乳酪杆菌 ADP-1、植物乳植杆菌 Lp05	天然薄荷脑	每日的菌
益生菌咀嚼片（青苹果猕猴桃味）	凝结芽孢杆菌 BC01、植物乳杆菌 H6	山梨糖醇、植物综合酵素粉（奇异果、荔枝、荠菜、香蕉、桑叶、柠檬、桑葚、樱桃、杨梅、水蜜桃）（15%）、低聚木糖（15%）、青苹果粉（10%）、猕猴桃粉、柠檬酸、DL- 苹果酸、硬脂酸镁山楂	
每日活菌	乳酸菌	FOS 低聚果糖、生牛乳	
味全活性乳酸菌	副干酪乳杆菌 LPC100	水、白砂糖、脱脂乳粉、食用葡萄糖、低聚异麦芽糖、食品添加剂（乳酸、柠檬酸钠）、食品用香精	味全
养乐多活菌型乳酸菌饮品	副干酪乳酪杆菌	水、白砂糖、脱脂奶粉、食用葡萄糖、食品用香精	养乐多

续表 2

产品名称	益生菌	配料（除益生菌）	品牌
每益天	副干酪乳酪杆菌	饮用水、风味发酵乳、饮用水、脱脂乳粉、食用葡萄糖、白砂糖、聚葡萄糖、果胶、可溶性大豆多糖、乳酸、食品用香精	伊利
安慕希利乐钻活性益生菌酸奶	鼠李糖乳酪杆菌 LGG、德氏乳杆菌保加利亚亚种、唾液链球菌嗜热亚种	生牛乳、乳清蛋白粉、赤藓糖醇、木糖醇、羟丙基二淀粉磷酸酯、白砂糖、果胶（来源于苹果或柑果类果皮）、琼脂、三氯蔗糖、食品用香精	
优益 C	副干酪乳酪杆菌 PC-01	水、白砂糖、脱脂乳粉、食用葡萄糖、食品用香精	蒙牛
可口可乐纤维+	—	水、抗性糊精、食品添加剂（二氧化碳、焦糖色、磷酸、苯甲酸钠、阿斯巴甜（含苯丙氨酸）、安赛蜜、柠檬酸钠、咖啡因、蔗糖素）、食用香精	可口可乐

3.2 益生菌-益生元食品类

益生菌食品品类五花八门，主要集中在乳制品、饮料、零食^[72]。益生菌乳制品中乳酸菌饮料占比过半，目前市面上主流的乳酸菌饮品有伊利“每益添”、蒙牛“优益 C”、养乐多、君乐宝“每日活菌”以及味全，企业常以独家明星菌复配常见菌为销售卖点，其主要添加的益生菌种类有保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、副干酪乳杆菌、鼠李糖乳杆菌、干酪乳杆菌、乳双歧杆菌、嗜酸乳杆菌、植物乳杆菌，复配可溶性大豆多糖等益生元，其中植物乳杆菌 ST-III 为光明乳业首创，副干酪乳酪杆菌代田株是养乐多集团自主研发且使用。这类饮品的短板在于含糖量比较高，蛋白质含量不足。益生菌活菌贮藏条件严苛，若运输或货架阶段未能全程冷链，益生菌饮品中活菌数量将显著降低，如此乳酸菌饮品就变成了一瓶昂贵的、健康功能不足的糖水。

另一类益生菌乳制品是酸奶，通常分为常温酸奶和低温酸奶。在营养成分方面，常温酸奶和低温酸奶中的蛋白质、钙、维生素等含量相差无几。低温酸奶中仍保留有活菌，其营养核心在于酸奶发酵过程中消耗掉乳糖，是乳糖不耐人群补充蛋白与钙质的优质来源。伊利集团推出了国内市场上第一款常温活性益生菌酸奶—安慕希益生菌酸奶，其中添加了伊利明星益生菌鼠李糖乳酪杆菌 LGG，打破了活菌乳产品必须低温运输保存的产业现状。

发酵饮料类产品：植物源发酵底物比如果蔬汁是市场上常见的益生菌和益生元的非乳制品载体，经益生菌发酵的果蔬汁，能够提高果蔬中营养物质的生物利用度，改善植物源果蔬汁的感官特性，延长货架期，满足乳糖不耐受者以及素食者的多元化产品需求^[73]。马立娟等^[74]采用植物乳杆菌和酿酒酵母混合发酵菠萝汁，在保有菠萝本身的营养物质和特有香气的同时，又赋予了产品一定的发酵风味，获得口感良好的菠萝发酵饮品。荔枝汁的营养价值和保健功能受到广泛认

可，但荔枝汁含糖量高(16%~18%)，不符合人们所追求的低糖食品理念。利用乳酸菌发酵创制发酵荔枝果汁，将荔枝中的大量的游离糖作为乳酸菌增殖底物消耗，降低发酵果汁可溶性多糖与游离糖含量的同时，产生了乳酸菌风味特征成分，生成具有调节肠道健康的功能性荔枝汁饮料产品，对于提高人民健康水平、拓展荔枝加工途径具有重要意义^[30]。

非发酵饮料类产品：可口可乐公司推出的“可口可乐纤维+”产品中添加了抗性糊精，具有促进肠道有益菌增殖的作用，但其添加量有限，实际益生作用效果尚不明确。但是，市场上的益生菌产品健康效果良莠不齐，有些产品健康概念被夸大宣传。若食品本身是高糖高脂，那么在其中添加益生菌形成的产品对健康的改善效果也十分有限。例如喜茶的经典产品“多肉葡萄”新增了在奶茶中加入 Ganeden BC30 益生菌的选项，而“多肉葡萄”茶饮中高热量的芝士及添加糖占比更大，该类益生菌的益生效果更多是健康概念炒作与对消费者的心理安慰。

目前市场上益生菌—益生元产品处于快速发展期。面对消费者人群特征、使用场景以及健康提升诉求的市场需求，从单一的、非特定的益生菌群逐步形成了细分、独家且个性化复配益生菌群，同时添加诸如低聚异麦芽糖、聚葡萄糖、抗性糊精、菊粉等效果成熟的益生元，以促进益生菌在胃肠道内的增殖和定植。详见表 2 所示，下一步益生菌—益生元产品开发方向，除了筛选、研发具有自主知识产权益生菌建立产品壁垒外，进一步挖掘我国各地区特有的植物资源进行定向发酵丰富优质益生元来源，具备巨大的个性化开发潜力，同时也为地方性农作物高值化发展提供了全新的市场化思路。

4 存在问题与展望

益生菌能通过分泌碳水化合物酶降解多糖，益生

菌代谢产物中的乳酸、乙酸等小分子酸类通过降低发酵液 pH 进一步降低多糖的相对分子量、改变单糖组成比例、暴露更多活性位点以增强植物多糖的生物活性。然而,当前针对益生菌发酵植物多糖的研究主要集中在碳水化合物活性酶对多糖降解作用上,降解后多糖结构特征与生物活性之间的构效关系尚不明确,多糖发酵前后对其参与的信号转导途径与关键靶分子作用研究尚不深入,发酵过程中有机酸积累和氧化反应生成的自由基对植物多糖影响的研究尚不足。发酵中益生菌降解利用多糖的作用机制尚不清楚,多糖在发挥益生作用时是否存在与其它成分的协同,在协同作用中多糖起主要作用还是次要作用,益生菌、益生元、益生菌代谢产物三者对健康调节的作用谁占主导,有无协同作用,还需进一步研究。作为定向调节多糖特性的有效方法,如何有效控制和提高益生菌发酵效率在增强多糖活性的技术值得进一步研究。此外,益生菌发酵植物多糖产品的开发研究聚焦于利用发酵性能优异的菌株对不同植物进行发酵,菌种选择缺乏合理的依据,植物种类很多,尚未实现植物个性化。因此,创制益生菌-益生元产品时,需要发现具有发酵性能优良且贴合所发酵植物特性的菌株并建立相应的理论依据。

随着研究的深入,采用先进的蛋白组学、代谢组学等分子生物学技术、高通量测序技术等手段,益生菌转化植物源多糖的代谢路径及作用机制将逐渐清晰,如何调控和优化发酵效率以提高多糖特性的方法也将进一步探讨。基础理论夯实是益生菌在健康食品、功能食品领域对普通农产品价值赋能的重要基石。

参考文献

- [1] JAHN LJ, REKDAL VM, SOMMER MOA. Microbial foods for improving human and planetary health [J]. Cell, 2023, 186(3): 469-478.
- [2] 李保龙,向雪松,张必科.发酵食品的微生物特征及其健康作用[J].卫生研究,2022,51(6):1040-1044.
- [3] DONG Y S, LI M H, YUE X Q. Current research on probiotics and fermented products [J]. Foods, 2024, 13(9): 1406.
- [4] WAN Y J, HONG T, SHI F H, et al. Probiotic fermentation modifies the structures of pectic polysaccharides from carrot pulp [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 251: 117116.
- [5] 赵明,陈香利,孔祥辉.食药菌多糖益生元效应及其对肠道微生态系统影响的研究进展[J].食用菌学报,2022,29(4):107-116.
- [6] XIE J H, TANG W, JIN M L, et al. Recent advances in bioactive polysaccharides from *Lycium barbarum* L., *Zizyphus jujuba* mill, *Plantago* spp., and *Morus* spp.: structures and functionalities [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 148-160.
- [7] 林智敏,肖健.植物多糖免疫调节作用研究进展[J].标记免疫分析与临床,2022,29(7):1252-1255.
- [8] WANG Z, XIE J, SHEN M, et al. Sulfated modification of polysaccharides: synthesis, characterization and bioactivities [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 74: 147-157.
- [9] 王云鹏,张晓苗,谢卫红,等.天然活性多糖降血糖功能的研究进展[J].食品工业,2023,44(6):238-242.
- [10] 吴雅清,许瑞安.降血脂多糖的研究进展[J].中国中药杂志,2018,43(17):3451-3459.
- [11] 周丽免,赵雯,刘伟贤,等.益生菌调节肠道菌群改善功能性消化不良研究进展[J].中国食品学报,2023,23(8):417-427.
- [12] ZHANG N, JIN M L, WANG K M, et al. Functional oligosaccharide fermentation in the gut: improving intestinal health and its determinant factors-a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 284: 119043.
- [13] LIU X Q, SU S P, YAO J Y, et al. Research advance about plant polysaccharide prebiotics, benefit for probiotics on gut homeostasis modulation [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103831.
- [14] 孙慧峰,朱钧溢,国立东,等.乳酸菌生物转化药食同源植物活性成分研究进展[J].食品工业科技,2022,43(7):474-481.
- [15] 王紫菱,劳嘉,钟灿,等.食疗中草药乳酸菌发酵与生物转化研究进展与展望[J].食品与发酵工业,2023,49(8):318-324,334.
- [16] PEI F Y, CAO X B, WANG X M, et al. Structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from blue honeysuckle after probiotic fermentation [J]. LWT, 2022, 165: 113764.
- [17] ZHOU S Y, RAHMAN A, LI J H, et al. Extraction methods affect the structure of goji (*Lycium barbarum*) polysaccharides [J]. Molecules, 2020, 25(4): 936.
- [18] 王国霞,牛祎琳,牛富婷,等.不同提取方法对密银花多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2024,45(24):196-203.
- [19] 王润平,张宏福,路小彬,等.星点设计优化人参叶多糖的超声辅助提取[J].中国饲料,2024,11:33-38.
- [20] 端木传宇,孙洋,张瑜,等.黑莓多糖酶法提取工艺优化及体外降血糖活性研究[J].食品工业科技,2024,45(22):200-207.
- [21] 姜敬维,李玟君,李建湘,等.乳酸菌发酵对青稞 β -葡聚糖加工特性及其耐缺氧和抗疲劳作用影响[J].食品研究与开发,2023, 44(14):30-35.
- [22] 刘涛,王瑞,陈富生.提高发酵猫爪草多糖产量的菌种筛选[J].畜禽业,2022,33(12):9-11.
- [23] 管立军,李家磊,王崑仑,等.乳酸菌发酵对刺五加叶活性成分、体外抗氧化作用与降血糖相关酶的影响[J].食品工业科技, 2022,43(7):155-162.
- [24] JUODEIKIENE G, VIDMANTIENE D, TENKANEN M, et al. Non-Alcoholic beverages from fermented cereals with increased oligosaccharide content [J]. Food Technology and Biotechnology, 2016, 54(1):36-44.
- [25] 赵玉洁,邹悦,周金羽,等.益生菌发酵对中药总黄酮与总多糖含量的影响[J].中国兽药杂志,2022,56(8):73-79.
- [26] 黄振勇,张娥珍,淡明,等.乳酸菌发酵对铁皮石斛活性物质含量及其抗氧化能力的影响[J].热带作物学报,2020,41(3):572-578.
- [27] XUE H K, HAO Z T, GAO Y C, et al. Research progress on the hypoglycemic activity and mechanisms of natural polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126199.

- [28] HU J, PANG W H, CHEN J L, et al. Hypoglycemic effect of polysaccharides with different molecular weight of *Pseudostellaria heterophylla* [J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2013, 13(1): 267.
- [29] HU T G, ZHU W L, YU Y S, et al. The variation on structure and immunomodulatory activity of polysaccharide during the longan pulp fermentation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222(PA): 599-609.
- [30] 郑欣,余元善,吴继军,等.不同乳酸菌在荔枝汁中的发酵特性研究[J].广东农业科学,2013,40(7):95-98.
- [31] YU Y Y, ZHU Z S, XU Y J, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* FM 17 fermentation on jackfruit polysaccharides: physicochemical, structural, and bioactive properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258(Pt2): 128988.
- [32] YANG J, DU J H, ZHANG L G, et al. Properties of pectin extracted from fermented and steeped hawthorn wine pomace: A comparison [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 174-182.
- [33] SONG S, LIU X Y, ZHAO B T, et al. Effects of *Lactobacillus plantarum* fermentation on the chemical structure and antioxidant activity of polysaccharides from bulbs of lanzhou lily [J]. ACS Omega, 2021,6(44): 29839-29851.
- [34] HE P F, ZHANG A Q, ZHANG F M, et al. Structure and bioactivity of a polysaccharide containing uronic acid from *Polyporus umbellatus* sclerotia [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 152: 222-230.
- [35] 陈庆,李超,黄婷,等.刺梨多糖的理化性质、体外抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制活性[J].现代食品科技,2019,35(11):114-119.
- [36] 陈秉彦,林晓姿,李维新,等.乳酸菌联合酿酒酵母发酵对龙须菜多糖结构特征及抗氧化性的影响[J].食品科学技术学报,2023, 41(3):107-115.
- [37] HUANG F, HONG R Y, YI Y, et al. *In vitro* digestion and human gut microbiota fermentation of longan pulp polysaccharides as affected by *Lactobacillus fermentum* fermentation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147: 363-368.
- [38] WU J J, CHEN M M, SHI S S, et al. Hypoglycemic effect and mechanism of a pectic polysaccharide with hexenuronic acid from the fruits of *Ficus pumila* L. in C57BL/KsJdb/db mice [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 178: 209-220.
- [39] 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.
- [40] CHEN L H, WANG Z H, MAO Y Y, et al. Effect of solid-state co-fermentation on the structural characteristics and bioactivities of polysaccharides in the medicinal residues of *Gastrodia ganoderma* [J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104945.
- [41] 黄宇哲,吴前震,许腾龙,等.多糖对炎症性疾病及肠道菌群调控作用的研究进展[J].中国药理学通报,2022,38(11):1601-1606.
- [42] BLAAK EE, CANFORA EE, THEIS S, et al. Short chain fatty acids in human gut and metabolic health [J]. Beneficial Microbes, 2020, 11(5): 411-455.
- [43] ARA K, FILIPE D V, PETIA KD, et al. From dietary fiber to host physiology: short-chain fatty acids as key bacterial metabolites [J]. Cell, 2016, 165(6): 1332-1345.
- [44] 张智,包智影,孙家佳,等.发酵黄精多糖对肥胖小鼠肠道菌群的影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(3):95-105.
- [45] 李蓉,杨萍,李明鉴,等.发酵枸杞多糖通过调节肠道微生态缓解葡聚糖硫酸钠诱导的溃疡性结肠炎[J].中国药科大学学报, 2024,55(2):236-245.
- [46] GAO H, WEN J J, HU J L, et al. Polysaccharide from fermented *Momordica charantia* L. with *Lactobacillus plantarum* NCU116 ameliorates type 2 diabetes in rats [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 201: 624-633.
- [47] CHEN Q Y, MAO J J, WANG Y, et al. Fermented wheat bran polysaccharides improved intestinal health of zebrafish in terms of intestinal motility and barrier function [J]. Fermentation, 2023, 9(3): 293.
- [48] FEI H, HONG R Y, ZHANG R F, et al. Dynamic variation in biochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp during fermentation process [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 915-921.
- [49] ZHANG Z H, FAN S T, HUANG D F, et al. Polysaccharides from fermented asparagus officinalis with *Lactobacillus plantarum* NCU116 alleviated liver injury via modulation of glutathione homeostasis, bile acid metabolism, and SCFA production [J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7681-7695.
- [50] YANG M J, ZHANG Q W, TAHA R, et al. Polysaccharide from *Atractylodes macrocephala* Koidz. ameliorates DSS-induced colitis in mice by regulating the Th17/Treg cell balance [J].Frontiers in Immunology, 2022, 13: 1021695.
- [51] SUN J, CHEN H, KAN J, et al. Anti-inflammatory properties and gut microbiota modulation of an alkali-soluble polysaccharide from purple sweet potato in DSS-induced colitis mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 708-722.
- [52] WU J C, LI C Y, BAI L S, et al. Structural differences of polysaccharides from Astragalus before and after honey processing and their effects on colitis mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 815-824.
- [53] LIU R M, SHI S S, XIONG S, et al. Quality markers of dendrobium officinale by “oligosaccharide-spectrum-effect” relationships [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 914380.
- [54] FERREIRA SS, PASSOS CP, MADUREIRA P, et al. Structure-function relationships of immunostimulatory polysaccharides: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 132: 378-396.
- [55] ZHANG P, ZHANG H, WU M Q, et al. Physicochemical properties, antioxidant and cardioprotective activities of polysaccharides from fermented *Polygonatum kingianum* with *Lactobacillus* species [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 216: 118699.
- [56] 张金兰,魏巍,杨云,等.乳酸菌发酵对枸杞果汁体外抗氧化和抗炎活性的影响[J].中国酿造,2023,42(2):76-82.
- [57] SHAO Y W, KANG Q Z, ZHU J Q, et al. Antioxidant properties and digestion behaviors of polysaccharides from Chinese yam fermented by *Saccharomyces boulardii* [J]. LWT, 2022, 154(15): 112752.
- [58] 安欣,李桐彤,胡佳雪,等.鼠李糖乳杆菌发酵枸杞汁营养与风味特性及其抗氧化活性和体外抑制黄嘌呤氧化酶活性的研究[J].食品工业科技,2025,46(1):239-247.
- [59] 林华嗣,黄庆,田胜兰,等.乳酸菌发酵前后铁皮石斛汁中功能活性物质与风味成分的比较[J].现代食品科技,2023,39(12):253-261.
- [60] MA S, XU J X, LAI T, et al. Inhibitory effect of fermented *Flammulina*

- velutipes* polysaccharides on mice intestinal inflammation [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 934073.
- [61] TANG G H, LIU J H, SUN X Y, et al. Carboxymethylation of desmodium styracifolium polysaccharide and its repair effect on damaged HK-2 cells [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 3: 1-25.
- [62] ZOU G, REN J, WU D, et al. Characterization and heterologous expression of UDP-Glucose 4-Epimerase from a *hericium erinaceus* mutant with high polysaccharide production [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, 9: 796278.
- [63] RIDDY DM, DELERIVE P, SUMMERS RJ, et al. G protein-coupled receptors targeting insulin resistance, obesity, and type 2 diabetes mellitus [J]. *Pharmacological Reviews*, 2018, 70(1): 39-67.
- [64] 冯丹丹,胡萍,许浩翔,等.乳酸菌发酵刺梨汁体外降血糖、降血脂活性研究[J].*食品与发酵工业*,2022,48(8):212-219.
- [65] XIAO X, TAN C, SUN X J, et al. Effects of fermentation on structural characteristics and *in vitro* physiological activities of barley β -glucan [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 231: 115685.
- [66] WAN Y J, SHI H F, XU R, et al. Origin of hypoglycemic benefits of probiotic-fermented carrot pulp [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(3): 895-904.
- [67] WANG H T, LI H L, HOU Y T, et al. Plant polysaccharides: sources, structures, and antidiabetic effects [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2023, 51: 101013.
- [68] XIAO M, JIA X, WANG N F, et al. Therapeutic potential of non-starch polysaccharides on type 2 diabetes: from hypoglycemic mechanism to clinical trials [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2024, 64(4): 1177-1210.
- [69] ZHOU Z J, YE F Y, LEI L, et al. Fabricating low glycaemic index foods: enlightened by the impacts of soluble dietary fibre on starch digestibility [J]. *Trends in Food Science&Technology*, 2022, 122: 110-122.
- [70] YANG Y, OUYANG D, SONG J Y, et al. Physicochemical properties and biological characteristics of *Sargassum fusiforme* polysaccharides prepared through fermentation of *Lactobacillus* [J]. *Fermentation*, 2023, 9(9): 835.
- [71] YANG J J, ZHANG X, DAI J F, et al. Effect of fermentation modification on the physicochemical characteristics and anti-aging related activities of *Polygonatum kingianum* polysaccharides [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 235: 123661.
- [72] 李新,臧学丽.微生物发酵食品的保健功效[J].*现代食品*,2022, 28(2):54-56.
- [73] ELENA B, VINCENZO C, BENEDETTA B, et al. Wild *Lactobacillus casei* group strains: potentiality to ferment plant derived juices [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 314.
- [74] 马立娟,王超,杜丽平,等.植物乳杆菌和酿酒酵母发酵菠萝汁的性能比较及产物分析[J].*中国酿造*,2018,37(3):72-77.