

鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元介导 维护肠道屏障相关的研究进展

张煜博, 李佳睿, 庞琪瑶, 赵海洁, 李鸿萱, 张宇, 姜毓君, 满朝新*
(东北农业大学 食品学院 乳品科学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 鼠李糖乳杆菌因其良好的益生特性被广泛研究和应用。鼠李糖乳杆菌的重要代谢产物——胞外多糖, 可作为后生元, 发挥抗氧化、抗肿瘤、降血脂与降胆固醇以及维护肠道内屏障等多种生物学活性。鼠李糖乳杆菌胞外多糖介导和维护肠道屏障稳态领域是当前的研究热点, 对其相关研究进行归纳总结具有十分重要的意义。因此, 该文将国内外鼠李糖乳杆菌胞外多糖介导维护肠道屏障稳态的相关研究进行归纳和总结, 以期鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元在维护肠道屏障方面的后续研究和应用提供理论基础。

关键词: 乳酸菌; 鼠李糖乳杆菌; 胞外多糖; 肠道屏障; 后生元

Research Progress on Extracellular Polysaccharides of *Lactobacillus rhamnosus* as Postbiotics Mediation for Intestinal Barrier Maintenance

ZHANG Yubo, LI Jiarui, PANG Qiyao, ZHAO Haijie, LI Hongxuan, ZHANG Yu, JIANG Yujun,
MAN Chaoxin*

(Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, College of Food Science, Northeast Agricultural
University, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

Abstract: *Lactobacillus rhamnosus* has been widely studied and applied due to its good probiotic characteristics. Extracellular polysaccharides, an important metabolite of *L. rhamnosus*, can act as postbiotics to exert various biological activities, such as antioxidant, anti-tumor, lipid-lowering, cholesterol-lowering, and intestinal barrier maintenance. The field of extracellular polysaccharides mediating and maintaining intestinal barrier homeostasis by *L. rhamnosus* is currently a research hotspot, and a summary of the related studies is of great significance. Therefore, this study summarized the relevant research on the intestinal barrier maintenance homeostasis mediated by extracellular polysaccharides of *L. rhamnosus* at home and abroad. A theoretical basis was thus expected to be provided for the further research and application of extracellular polysaccharides of *L. rhamnosus* as postbiotics in maintaining the intestinal barrier.

Key words: *Lactobacillus*; *Lactobacillus rhamnosus*; extracellular polysaccharides; intestinal barrier; postbiotics

引文格式:

张煜博, 李佳睿, 庞琪瑶, 等. 鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元介导维护肠道屏障相关的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(4):192-199.

ZHANG Yubo, LI Jiarui, PANG Qiyao, et al. Research Progress on Extracellular Polysaccharides of *Lactobacillus rhamnosus* as Postbiotics Mediation for Intestinal Barrier Maintenance[J]. Food Research and Development, 2025, 46(4):192-199.

乳酸菌是革兰氏阳性球菌的一种, 能够利用可发酵碳水化合物(大多为蔗糖、葡萄糖等)生成大量乳酸, 在自然界中分布非常广泛, 其中包含大量的种属, 具有丰富的物种多样性^[1]。乳酸菌在发酵食品^[2]、食品添加

剂^[3]等诸多方面发挥着非常重要的生理作用, 是被广泛使用的一种益生菌。鼠李糖乳杆菌作为乳酸菌的一种, 同样具有优良的生物学活性和益生特性。

益生菌是一类摄入足够量活体就可以对宿主起到

基金项目: 黑龙江省自然科学基金杰出青年项目(JQ2023C002)

作者简介: 张煜博(2004—), 男(汉), 本科在读, 研究方向: 益生菌及其代谢产物。

*通信作者: 满朝新, 男(汉), 教授, 研究方向: 益生菌及其代谢产物。

有益效果的微生物,它们能够在宿主的肠道内部、生殖道内部以及宿主的其他部位定植,可以改善宿主的健康状况,并对疾病起到一定的预防作用,通常包括乳酸菌、酵母菌、双歧杆菌等^[4]。但由于益生菌对生长环境的要求较为严苛,需要在制备、加工、运输、储存等过程以及消化系统的极端条件下保证一定的存活率^[5],且具有耐药基因转移的风险。而研究表明,不是所有的机制与临床效益都与益生菌活菌直接相关^[6],所以作为已灭活的益生菌及其代谢产物——后生元,这一概念被人们提出。后生元能够很好的弥补益生菌的相关缺陷,因此人们逐渐将研究对象向后生元转移,后生元逐渐成为当今的研究热点。国际益生菌和益生元科学协会对后生元的定义是对宿主健康有利的非活微生物和/或其组分,主要包括灭活细菌、细菌组分以及菌体代谢产物。其中细菌组分包括肽聚糖、磷壁酸、表层蛋白等,代谢产物主要包含短链脂肪酸、胞外多糖、细菌素等^[7]。其中胞外多糖(extracellular polysaccharides, EPS)是非常具有代表性的一种,对人体没有副作用、无毒性、且来源安全可靠、具有抗氧化^[8]、抗肿瘤^[9]、维护肠道屏障^[5]、调节机体免疫^[10]等生物学活性。鼠李糖乳杆菌作为被广泛使用的益生菌菌种,也具有产生胞外多糖这一特性。

在鼠李糖乳杆菌胞外多糖的相关应用中,其作为后生元对肠道屏障稳态的介导维护,受到了广泛的关注,是目前的研究热点,对该多糖相关研究进行归纳总结具有十分重要的意义。因此本文主要就鼠李糖乳杆菌胞外多糖的结构和相关的生理功能,尤其是其介导下维护肠道屏障的相关问题进行分析研究,以期对鼠李糖乳杆菌胞外多糖的进一步开发和利用提供一定的

理论基础和新的思路。

1 鼠李糖乳杆菌胞外多糖的分类、结构及功能

为了对外界环境进行更好的适应,乳酸菌能够在环境中分泌胞外多糖,根据所分泌胞外多糖的不同位置,可以将其分为两大类:黏液多糖和荚膜多糖。前者在细胞壁外侧分泌,后者在细胞壁周边进行黏附,绝大多数乳酸菌都能够产生黏液多糖和荚膜多糖^[11],而对于从酸菜当中分离提取的鼠李糖乳杆菌 JAAS8 来说,该菌株在 MRS 肉汤或以葡萄糖为碳源的半定义培养基中进行培养时,两种形式的胞外多糖都能够得到,其中黏液多糖的主要生长阶段是指数生长阶段,而荚膜多糖只在发酵阶段中产生,对鼠李糖乳杆菌 JAAS8 的培养基进行提取纯化,进一步得到多糖样品,并对其进行分析,可以得到以下结论:黏液多糖由半乳糖、葡萄糖和 N-乙酰氨基葡萄糖组成,物质的量比为 4:1:1,荚膜多糖由半乳糖和 N-乙酰氨基葡萄糖组成,物质的量比为 5:1^[12]。

根据化学组成的不同,胞外多糖可以分为由同一种单糖进行重复连接而构成的同多糖,和由不同种类的单糖先连接形成重复单元,再由重复单元进行连接而构成的杂多糖^[11]。研究表明,鼠李糖乳杆菌分泌产生的胞外多糖属于杂多糖^[13],其中包含很多重复的核心糖单元,如图 1 所示,主要由鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、以及少量的氨基糖(如 N-乙酰氨基葡萄糖)、甘露糖以及相关的非糖组分(如丙酮酸盐)等组成,分子量一般为 $4 \times 10^4 \sim 2 \times 10^7$ Da,胞外多糖的合成较为复杂,合成体系通常包括糖基、糖基受体、酰基供体、脂质中间体和酶系统 5 个因子,是一个耗能过程^[11]。

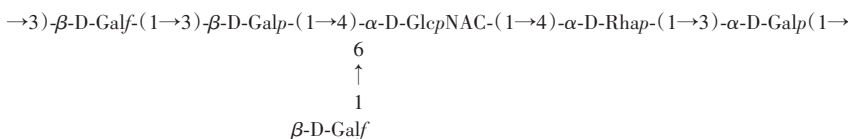


图 1 鼠李糖乳杆菌 GG (*Lactobacillus rhamnosus* GG, LGG)的胞外多糖核心糖单元

Fig.1 Extracellular polysaccharide core sugar units of *L. rhamnosus* GG

鼠李糖乳杆菌的基因决定了鼠李糖乳杆菌的性状以及其分泌产生胞外多糖的能力和所产生胞外多糖的结构和功能。对 25 株全基因组测序的鼠李糖乳杆菌胞外多糖合成基因簇分析发现,9 株鼠李糖乳杆菌基因组中包含典型的基因簇,包括 15 个基因,分别为 NCTC13764、ATCC11443、NCTC13710、SCT-10-10-60、BIO5326、Lc705、ASCC290、Pen 和 LOCK900;5 株基因组中的基因组成与 LGG 菌株相同,分别为 4B15、MGYG-HGUT-01293、LR-B1、BIO6870 和 LRB^[13]。根据预测,编码 EPS 产生和聚合调控的基因具有相似性,即位于 EPS 操纵子开头的基因 *wzd* 和 *wze*,以及位于簇尾的基因 *wzr* 和 *wzb*^[14]。不同的基因在胞外多糖的

合成过程中起着不同的作用,其中,决定链长的基因被分成两个紧密排列的区域(*wzd* 和 *wze*),*wzx* 参与多糖转运,*wzr* 为多糖转录调节基因,*wzy* 是多糖重复单元聚合酶基因,*wzb* 为磷蛋白磷酸酶,其他为特异性糖基转移酶^[15]。在这些基因的共同作用下,鼠李糖乳杆菌胞外多糖得以合成,并发挥其生理功能。

鼠李糖乳杆菌胞外多糖的生理学功能多种多样,大体上可以分为以下几种。

1.1 抗氧化活性

抗氧化自由基简称为抗氧化,人体在放射性物质射线照射、外界环境污染以人体自身的新陈代谢等活动下会产生源源不断的自由基^[16]。根据陈亮^[11]的体外

化学抗氧化试验证明,鼠李糖乳杆菌 ZFM216 的胞外多糖具有良好的清除稳定自由基、超氧阴离子自由基、羟基自由基的能力和好的还原力,同时能够提高生物体内超氧化物歧化酶(superoxide dismutases, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)等多种抗氧化酶的活性、激活和促进巨噬细胞的增殖、增强巨噬细胞对活性氧簇的吞噬能力,从而达到抗氧化的效果。

1.2 抗肿瘤活性

恶性肿瘤是人体正常抗癌基因、抑癌基因等突变,细胞增殖凋亡失去正常调控,发生恶性增殖而引起的一种疾病,也被称为癌症。癌细胞过度生长繁殖,并且具有向机体其他组织或器官进行侵入和转移的能力。国内外多项研究表明显示,乳酸菌胞外多糖是具有天然抗肿瘤能力的活性物质,主要作用机理包括以下3种:1)对肿瘤细胞的增殖进行抑制;2)使肿瘤细胞被诱导凋亡;3)提高宿主免疫力,增强宿主免疫调节功能^[17]。菌株的来源、胞外多糖的存在形式、胞外多糖的结构特征及分子量均对其抗肿瘤活性存在一定影响^[18]。

1.3 调节机体免疫

机体免疫系统由免疫器官、免疫细胞、免疫分子等组成。免疫系统是能够执行免疫应答、清除外界入侵病原体以及发挥免疫功能的重要系统,可分为非特异性免疫、特异性免疫。胞外多糖作为一种非特异性免疫调节物质,能够对机体的非特异性免疫发挥作用,激活巨噬细胞和自然杀伤细胞(natural killer cell, NK 细胞)等免疫细胞,并促进免疫分子的分泌,以达到增强机体免疫的效果。同时,胞外多糖也能对特异性免疫发挥一定作用,能够促进 T 淋巴细胞对淋巴因子的分泌和刺激 B 淋巴细胞产生抗体等^[19],从而在一定程度上达到调节机体免疫的效果。

鼠李糖乳杆菌胞外多糖具有多种生理功能,其主要生理功能及作用原理如表 1 所示。

表 1 鼠李糖乳杆菌胞外多糖的生理功能及作用原理

Table 1 Physiological functions and principles of extracellular polysaccharides of *L. rhamnosus*

| 生理功能 | 菌株 | 原理 | 参考文献 |
|--------|---|---|------------|
| 抗氧化活性 | 鼠李糖乳杆菌 ZFM216 | 清除稳定自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基和提高抗氧化酶活性、促进巨噬细胞的增殖 | [11] |
| 抗肿瘤活性 | 鼠李糖乳酸杆菌 RW-9595M | ①抑制肿瘤细胞的增殖 ②诱导肿瘤细胞凋亡 ③增强宿主免疫调节功能 | [17] |
| 调节机体免疫 | 鼠李糖乳杆菌 KL37 | ①激活免疫细胞 ②促进免疫因子分泌 | [17] |
| 维护肠道屏障 | 鼠李糖乳杆菌 KF5 鼠李糖乳杆菌 Y37 鼠李糖乳杆菌 ZFM216 | ①维护肠道微生物屏障 ②维护肠道化学屏障 ③维护肠道物理屏障 ④维护肠道免疫屏障 | [5, 19-22] |

2 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对维护肠道屏障的作用

动物体对于营养物质的消化、吸收主要发生在肠道内部,与此同时,肠道也是机体发挥防御保护作用的重要组成部分^[23],肠道屏障结构和功能的完整对维持机体正常肠道功能起到重要作用,肠道屏障包括微生物屏障、化学屏障、物理屏障以及免疫屏障^[19],是外界入侵肠道时的第一道防线^[24]。肠道微生物屏障是指在肠道内部存活,能够与宿主相互共生的肠道微生物。肠道微生物群落的健康稳定一方面能够减少致病菌在肠道内部的定植,另一方面还能够增强肠道上皮屏障功能并维持肠道稳态^[20]。肠道化学屏障的主要组分是胃肠道分泌产生的化学物质,例如:胆汁、胃酸、消化性溶菌酶、黏多糖、糖蛋白等,能够在改善肠道环境,减少肠道损害等方面发挥相应作用。肠道物理屏障是机体重要的天然生理屏障,主要由连续单层的肠道上皮细胞以及细胞之间的紧密连接与细胞外的黏液层所构成^[21],能够将肠道环境与其他物质分隔开,从而阻止有害细菌和有毒物质进入肠道,达到维护肠道稳态的目的。肠道免疫屏障在维持肠道健康以及机体免疫稳态等方面发挥着至关重要的作用^[22],主要由肠道浆膜层免疫细胞和免疫细胞因子组成,免疫屏障中不同种类的免疫细胞能够协同作用,对病原体产生适应性免疫应答,同时也能够以表型转换等方式对与其共生细菌和饮食抗原保持相应的免疫耐受^[25],对肠道以及整个人体的免疫稳态起到防护作用。鼠李糖乳杆菌对胆汁盐以及多种抗生素等都具有一定抗性^[26],对肠道环境的适应与耐受能力较强,在肠道内表面的黏着率高,能够很好地定植在肠道内部,从而能够帮助机体抵抗肠道细菌感染^[27]。鼠李糖乳杆菌分泌的胞外多糖对肠道屏障的维护也起到非常重要的作用。

2.1 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对微生物屏障的影响

肠道内含有数量庞大、种类繁多的微生物,这些微生物共同组成了机体的肠道微生物屏障^[28]。肠道菌群是机体消化道内微生物的集合^[29],维持机体内部的动态平衡,被叫做“动态器官”^[30],根据其数量的多少,肠道菌群被划分为两类,主要(优势)菌群和次要菌群,能够增强宿主对水分的吸收能力、软化粪便、并使肠道进行缓和的蠕动,更容易排泄,同时也能促进维生素的合成,排除有害物质以及避免各种细菌病毒的侵害。健康机体的肠道菌群的数量、分布等处于一个相对平衡稳定的状态,一旦这种平衡稳定的状态被打破,就会导致肠道菌群失调,从而引发一系列的病理变化,对机体的健康状况造成影响。鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元,能够改变肠道菌群的种类和数量、改变肠道菌群的群落结构、并促进菌体在肠道表面上的黏附,同时能够作为肠道菌群的能源物质,为肠道菌群提供能量,产生相应的代谢产物,从而维护肠道的微生物屏障,促进

机体肠道的健康发展。

2.1.1 改变肠道菌群的种类和数量

胞外多糖能够有选择性的促进机体内有益菌的生长繁殖,同时对有害菌的生长和有害物质的分泌起到一定的抑制作用。鼠李糖乳杆菌 KF5 的胞外多糖能够有效促进人体肠道内双歧杆菌的生长繁殖,同时具有使人体肠道菌群多样性显著提高的能力^[5]。根据吴江等^[31]的实验,将鼠李糖乳杆菌 Y37 的胞外多糖作为碳源,用粪便当中的细菌来模拟肠道菌群进行培养,得出结论:胞外多糖对肠道内双歧杆菌的生长起到促进作用,并能够维持肠道内益生菌的数量。EPS 还能对生物膜的形成起到抑制作用,并增强细菌生物膜对于抗生素的敏感性,从而降低有害菌的耐药性,以达到间接抑制有害菌生长繁殖的目的^[32]。这些结果都表明了 EPS 对肠道菌群有一定影响,能够增加肠道内细菌的物种丰富度、调整肠道微生物的群落结构、调节肠道内有益菌落和有害菌落之间的平衡,从而维持机体的健康状况。

2.1.2 促进菌体在肠道上的黏附

肠道上皮细胞表面上有较厚的黏液层,主要成分为黏蛋白、多糖和脂类等^[33]。有害菌需要穿过黏液层才能依附在肠道上皮细胞上,肠道黏液对肠道致病菌在肠道的黏附起到一定的阻碍作用,同时对益生菌的识别和黏附起到一定的促进作用,从而使益生菌与致病菌之间产生竞争黏附,起到维护肠道健康的作用。细胞主要依靠脂磷壁酸、表层蛋白、多糖和肽聚糖等细胞表面成分起到一定的黏附作用。胞外多糖在肠道内能够作为碳源,可以被肠道菌群利用,降解产生丁酸盐,丁酸盐能够帮助促进维持肠道黏膜结构的完整性,从而促进菌体在肠道上的黏附,减少致病菌在肠道内的生存与繁殖的空间,进一步对机体的健康发挥作用。

2.1.3 作为肠道菌群的能源物质

细菌的胞外多糖对人体胃肠道的消化表现出较高的抵抗力,能够作为肠道菌群的碳源,作为一种能源物质被肠道菌群利用,分解代谢产生乳酸以及短链脂肪酸(short chain fatty acids, SCFAs)^[34]。短链脂肪酸是肠道菌群代谢的产物之一,主要包括乙酸、丙酸和丁酸等^[35]。短链脂肪酸能够作为肠道上皮细胞的能量来源,维持肠上皮细胞结构形态与生理功能,同时对肠道黏膜屏障的完整性也发挥着重要作用^[36],调节肠道内部环境、使机体的血液流速加快、改善肠道内膜黏液层组织结构。肠道菌群代谢产生的乳酸能够使所处肠道环境的 pH 值降低,从而使细菌和病毒的感染能力降低,生长发育减缓^[37],对肠道的健康状况进行维护。

2.2 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对化学屏障的影响

肠道化学屏障主要包括肠道杯状细胞分泌的黏蛋白(mucoprotein, MUC)、肠上皮细胞分泌的黏液、消化

液以及正常细菌分泌产生的抑菌物质和代谢产物,例如:短链脂肪酸、胆汁酸、色氨酸等,肠道抑菌物质主要包括胆汁、溶菌酶、黏多糖和糖蛋白等^[38],能够覆盖肠黏膜,减少有害物质和病原体的侵蚀。黏蛋白包括跨膜黏蛋白和形成凝胶的黏蛋白两类,其中 MUC1、MUC3、MUC13 等跨膜黏蛋白可形成一定的结构——糖萼,大多数覆盖在肠道细胞的顶表面,而 MUC2、MUC5、MUC6 等形成凝胶的黏蛋白,则从杯状细胞中分泌出来并形成黏液骨架,主要以多聚体的形式存在^[39]。肠道杯状细胞分泌的黏蛋白能够起到类似于润滑剂的作用,从而减少肠道内容物对肠道上皮细胞可能带来的机械损伤,同时也能够防止肠道上皮细胞遭到肠道内酸性食糜和肠道病原体的侵扰^[23]。胞外多糖作为一种能源物质,经肠道菌群降解,产生短链脂肪酸,对有害菌的生长繁殖进行抑制,调节肠道 pH 值^[40],并且经肠道菌群发酵产生的短链脂肪酸能够被结肠所吸收,能够为 MUC2 的合成和分泌提供能量^[21],促进黏蛋白的生成,从而对肠道化学屏障进行一定程度的维护。但目前为止关于鼠李糖乳杆菌胞外多糖对肠道化学屏障的研究相对较少,有待进一步进行分析和研究,以增加对鼠李糖乳杆菌胞外多糖的了解和应用。

2.3 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对物理屏障的影响

鼠李糖乳杆菌胞外多糖对肠道物理屏障也存在着一一定的影响。肠道物理屏障主要由肠道上皮细胞之间的紧密连接和肠上皮细胞组成,一般情况下,只有水分子以及小分子水溶性物质能够选择性通过肠道物理屏障^[41]。面对外界微生物的入侵,肠道物理屏障能够起到一定的抵抗作用。当肠道上皮细胞或者细胞之间的紧密连接遭到破坏,肠道的物理屏障将受到损伤,肠黏膜的通透性增强^[42],导致肠道菌群的平衡失调,进而引发多种疾病。益生菌通过刺激上皮细胞之间的紧密连接,调节上皮屏障功能,诱导黏液产生和维持上皮细胞的完整性来发挥其相应作用^[43]。除此之外,由肠道菌群分解胞外多糖产生的短链脂肪酸也能够对肠道上皮细胞的增殖与分化进行调节,减少细胞的凋亡,从而增强肠道的物理屏障功能^[44],其中丁酸能够对紧密连接蛋白和肠黏膜上皮黏液的表达进行上调,从而对肠道黏膜的完整性进行维护,达到维护肠道物理屏障的作用^[45]。

根据陈亮^[11]的实验,鼠李糖乳杆菌 ZFM216 胞外多糖能够对小鼠肠道的生长发育起到促进作用,能够有效恢复免疫抑制小鼠的结肠长度。紧密连接结构能够维持细胞的完整性,对炎症的预防也发挥着重要的作用,鼠李糖乳杆菌以及其分泌产生的胞外多糖对紧密连接结构能起到保护作用,从而缓解病原体引起的肠道炎症和损伤^[46]。闭合蛋白、紧密蛋白-1 是构成细胞间紧密连接的重要物质,对维持肠道物理屏障和肠

黏膜通透性、控制信号的传递与传导以及肠道的吸收等方面发挥着重要作用,过氧化氢能够影响闭锁小带蛋白-1、闭合蛋白和紧密蛋白-1的表达,导致细胞凋亡,肠道屏障功能损害。鼠李糖乳杆菌胞外多糖能够显著提高闭锁小带蛋白-1、闭合蛋白和紧密蛋白-1水平的表达,表明胞外多糖的预处理能够通过上调紧密连接蛋白的表达减轻过氧化氢给肠道造成的损伤,进而维持肠道的物理屏障^[47]。

2.4 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对免疫屏障的影响

肠道作为人体最大消化器官的同时,也还是人体最大的免疫器官^[48],肠道免疫细胞因子和肠道浆膜层免疫细胞等构成了肠道免疫屏障^[49]。免疫细胞由巨噬细胞、T淋巴细胞、B淋巴细胞、浆细胞、树突状细胞等组成,免疫细胞因子包括各类抗体、淋巴因子以及溶解酶等。免疫细胞因子被认为对免疫系统的功能起到决定和调节的作用,与相应的受体结合,对细胞的增殖和分化起到调节作用,对炎症反应起到促进或者抑制作用^[50]。鼠李糖乳杆菌胞外多糖能够通过调节免疫细胞因子的分泌以及激活肠道免疫细胞来维持肠道免疫屏障。

细胞免疫因子在肠道免疫系统担负着重要作用,是肠道免疫系统的重要组成部分,其中一部分对于炎症反应具有抑制作用,如白细胞介素-4(interleukin 4, IL-4)和白细胞介素-10(interleukin 10, IL-10)等,另一部分则对炎症反应具有促进作用,如肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor, TNF- α)、白细胞介素-6(interleukin 6, IL-6)、白细胞介素-8(interleukin 8, IL-8)和白细胞介素-1 β (interleukin 1 β , IL-1 β)等^[49]。不同菌株胞外多糖对于肠道免疫屏障的调节机制不同,对先天性免疫的免疫细胞因子的表达和适应性免疫均能起到相应的促进作用。巨噬细胞在人体内各组织之中广泛存在,是免疫系统的重要组成成分,能够对病原体进行吞噬,清除感染、损伤及衰老细胞,同时还能够处理、呈递抗原信息^[51]。鼠李糖乳杆菌 KL37 胞外多糖在浓度为 3~300 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时能够有效诱导巨噬细胞产生免疫细胞因子,尤其是促炎因子[肿瘤坏死因子 TNF- α 、IL-6、白细胞介素-12(interleukin 12, IL-12)]和抑炎因子(IL-10)的表达^[52]。一氧化氮是对巨噬细胞抗菌活性和抗肿瘤免疫反应发挥重要作用的重要物质,一氧化氮的浓度能够反应免疫应答程度,鼠李糖乳杆菌胞外多糖 ZFM216 能够促进巨噬细胞产生一氧化氮,同时通过上调诱导型一氧化氮合酶(inducible nitric oxide synthase, iNOS)、TNF- α 、IL-1 β 、IL-6-mRNA 的表达来促进 TNF- α 、IL-1 β 、IL-6 等细胞免疫因子的产生,并能够激活 TLR4/MAPK/NF- κB 信号通路来实现巨噬细胞 RAW246.7 的免疫激活^[53],从而实现肠道免疫屏障的维护。

综上,鼠李糖乳杆菌胞外多糖对于肠道屏障的作用机理如图 2 所示。

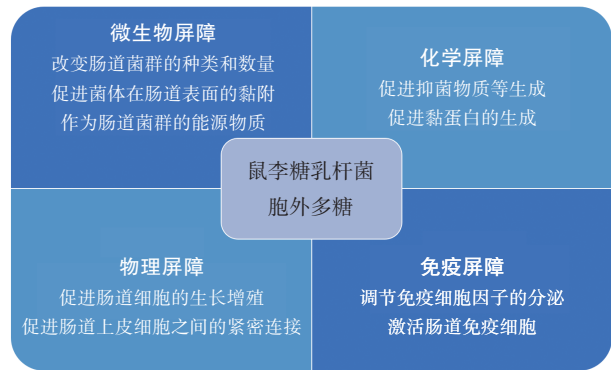


图 2 鼠李糖乳杆菌胞外多糖对肠道屏障的介导维护作用
Fig.2 Mediated maintenance of intestinal barrier by extracellular polysaccharides of *L. rhamnosus*

3 鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元的应用

后生元是指对宿主健康有益的非活微生物和/或其组分^[54],具有安全系数高、保质期长、生产与运输过程易于储存、化学结构明确且没有耐药基因转移风险等诸多优势,在相关产品中得到了广泛应用。

日本对于后生元的研究起始于 1964 年日本的光岡知足博士,随后日本各大高校和企业积极参与相关研究,产出大量研究成果,奠定了日本在后生元领域的领先地位^[55]。除此之外,美国、德国等其他国家也针对后生元逐渐展开研究。对于国内来说,关于后生元的理论研究以及产业化虽然与其他国家相比仍处于起步阶段,但已经得到各界的支持,并积极进行产品转化。例如与常温酸奶结合:常温酸奶较为温和,相比于纯牛乳来说,对肠胃刺激较小,能够贴合中国消费者的饮食习惯并满足消费者的健康需求,深受大众喜爱,后生元的应用优势与常温酸奶的特点相互契合^[56],鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元的一种,也发挥着一定的作用,鼠李糖乳杆菌 JAAS8 胞外多糖能够提高酸奶的保水能力和黏度^[12],能够改善酸奶的流变特性、增加酸奶的营养价值,进一步丰富酸奶的健康特性。鼠李糖乳杆菌 RW-9595M 的胞外多糖被证明是一种有效的生物增稠剂^[57],能够作为食品添加剂改善食品的物理性质,具有潜在的胞外多糖的相关健康特性。万姝含^[17]对鼠李糖乳杆菌 BMBL0606 胞外多糖进行提取纯化,将其作为抗氧化滴丸的有效活性成分,为日后鼠李糖乳杆菌胞外多糖在食品、医药等领域的应用转化提供一定的理论依据。

鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元在肠道屏障稳态制剂方面具有广阔的潜力,可以将鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为一种食品添加剂,在食品研发与制作过程中使用,在改变食品的物理性质和营养价值的同时,待

其抵达肠道后,发挥其介导与维护肠道屏障的作用,或者借鉴万姝含^[17]的思路,直接提取鼠李糖乳杆菌胞外多糖的有效活性成分,将其制成滴丸或者口服液、胶囊等类似形式,使其能够顺利抵达肠道内部,从而对肠道的物理屏障、化学屏障、微生物屏障以及免疫屏障起到介导与维护的作用。

4 结论

随着大众健康意识的不断提高以及对健康饮食的需要,生产含有后生元的健康产品将成为研究热点和市场潮流。鼠李糖乳杆菌胞外多糖具有抗氧化、抗肿瘤、提高免疫力、降血糖与血脂等多种生理功能,尤其针对肠道屏障方面,能够对肠道微生物屏障、肠道物理屏障、肠道化学屏障、肠道免疫屏障4个方面均起到一定程度的维护作用。但目前鼠李糖乳杆菌胞外多糖的产品种类相对较为单一,市场普及度不高,希望今后鼠李糖乳杆菌胞外多糖作为后生元,能够更多被转化应用到产品中,开发出对肠道健康有益的新产品,改善人体肠道稳态、降低肠道疾病发病率,满足人们的健康需要,也希望能够进一步加大对后生元产品的监管力度,制定并明确相应生产规范标准,促进鼠李糖乳杆菌胞外多糖的扩大生产和市场应用与转化。

参考文献:

- [1] 王丽丽. 乳酸菌的分离及酸奶的发酵[J]. 食品安全导刊, 2016(33): 135.
WANG Lili. Isolation of lactic acid bacteria and fermentation of yogurt[J]. China Food Safety Magazine, 2016(33): 135.
- [2] 马春敏, 付佳宁, 吴巧艳, 等. 乳酸菌发酵在谷物产品中的应用及研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 29-38.
MA Chunmin, FU Jianing, WU Qiaoyan, et al. Application and research progress of lactic acid bacteria fermentation in cereal products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 29-38.
- [3] 杜兰威, 单蕊, 赵蕾, 等. 乳酸菌的功能及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(13): 221-224.
DU Lanwei, SHAN Rui, ZHAO Lei, et al. The function of *Lactobacillus* and its application in food industry[J]. Food Research and Development, 2019, 40(13): 221-224.
- [4] 郑雪松, 孙建伟, 董碟, 等. 食品中的益生元和益生菌对肠道微生物的作用和影响研究[J]. 现代食品, 2023, 29(20): 139-141.
ZHENG Xuesong, SUN Jianwei, DONG Die, et al. Study on the effects of prebiotics and probiotics in foods on gut microorganisms[J]. Modern Food, 2023, 29(20): 139-141.
- [5] 李寒露, 冯晓敏, 仲飞亮, 等. 后生元功效及机制的研究进展[J]. 中国食品工业, 2023(21): 86-90.
LI Hanlu, FENG Xiaomin, ZHONG Feiliang, et al. Research progress on the efficacy and mechanism of Metazoa[J]. China Food Industry, 2023(21): 86-90.
- [6] CUEVAS-GONZÁLEZ P, LICEAGA A, AGUILAR-TOALÁ J. Postbiotics and paraprobiotics: From concepts to applications[J]. Food Research International, 2020, 136109502-109502.
- [7] BARROS C P, GUIMARÃES J T, ESMERINO E A, et al. Paraprobiotics and postbiotics: Concepts and potential applications in dairy products[J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 32: 1-8.
- [8] YANG X, HANG X M, TAN J, et al. Differences in acid tolerance between *Bifidobacterium breve* BB8 and its acid-resistant derivative *B. breve* BB8dpH, revealed by RNA-sequencing and physiological analysis[J]. Anaerobe, 2015, 33: 76-84.
- [9] 赵婧, 高永娇, 孙靖辰, 等. 乳酸菌胞外多糖的研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2023, 35(5): 51-56, 105.
ZHAO Jing, GAO Yongjiao, SUN Jingchen, et al. Research progress of exopolysaccharide from lactic acid bacteria[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023, 35(5): 51-56, 105.
- [10] SINGH P, SAINI P. Food and health potentials of exopolysaccharides derived from lactobacilli[J]. Microbiology Research Journal International, 2017, 22(2): 1-14.
- [11] 陈亮. 鼠李糖乳杆菌胞外多糖的分离纯化及其免疫调节作用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023.
CHEN Liang. Isolation and purification of exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* and its immunomodulatory effects[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023.
- [12] YANG Z N, LI S Y, ZHANG X, et al. Capsular and slime-polysaccharide production by *Lactobacillus rhamnosus* JAAS8 isolated from Chinese sauerkraut: Potential application in fermented milk products[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, 110(1): 53-57.
- [13] 姜云芸, 刘红霞, 李洪亮, 等. 鼠李糖乳杆菌胞外多糖的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(10): 135-140.
JIANG Yunyun, LIU Hongxia, LI Hongliang, et al. Research progress on exopolysaccharides of *Lactobacillus rhamnosus*[J]. China Food Additives, 2020, 31(10): 135-140.
- [14] PETROVA M I, MACKLAIM J M, WUYTS S, et al. Comparative genomic and phenotypic analysis of the vaginal probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GR-1[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1278.
- [15] LAPOINTE G, ATLAN D, GILBERT C. Characterization and site-directed mutagenesis of Wzb, an O-phosphatase from *Lactobacillus rhamnosus*[J]. BMC Biochemistry, 2008, 9: 10.
- [16] 任吴疆, 张静, 霍清, 等. 鼠李糖乳杆菌 R9639 对小鼠肠道菌群及抗氧化能力的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(13): 1-8.
REN Wujiang, ZHANG Jing, HUO Qing, et al. Effects of *Lactobacillus rhamnosus* R9639 on intestinal flora and anti-oxidation capacity of mice[J]. Food Research and Development, 2022, 43(13): 1-8.
- [17] 万姝含. 鼠李糖乳杆菌胞外多糖滴丸开发[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2019.
WAN Shuhan. Development of dropping pills made by exopolysaccharide extracted from *Lactobacillus rhamnosus* fermented liquid [D]. Shenyang: Liaoning University, 2019.
- [18] 秦孟春, 张玲芳, 胡顺安, 等. 乳酸菌胞外多糖抗肿瘤活性研究进展[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(9): 36-40.
QIN Mengchun, ZHANG Lingfang, HU Shun'an, et al. Research progress on antitumor activity of exopolysaccharides by lactic acid bacteria[J]. China Dairy Industry, 2023, 51(9): 36-40.
- [19] ANDERSON R C, DALZIEL J E, GOPAL P K, et al. The role of intestinal barrier function in early life in the development of colitis [M]//Colitis. New York: InTech, 2012.
- [20] CHANGCHIEN C H, HAN Y C, CHEN H L. Konjac glucomannan polysaccharide and inulin oligosaccharide enhance the colonic mucosal barrier function and modulate gut-associated lymphoid tissue immunity in C57BL/6J mice[J]. The British Journal of Nutrition, 2020, 123(3): 319-327.
- [21] 黄龙昌, 王鹏, 王新颖. 乳杆菌与肠道机械屏障的研究进展[J]. 肠外与肠内营养, 2023, 30(5): 315-320.
HUANG Longchang, WANG Peng, WANG Xinying. Research prog-

- ress of *Lactobacillus* and intestinal mechanical barrier[J]. Parenteral & Enteral Nutrition, 2023, 30(5): 315-320.
- [22] 杨阳, 高迪, 薛洁枚, 等. 多糖对肠黏膜屏障影响的研究进展[J]. 肠外与肠内营养, 2021, 28(2): 117-121.
- YANG Yang, GAO Di, XUE Zhanmei, et al. Effect of polysaccharide on intestinal mucosal barrier function[J]. Parenteral & Enteral Nutrition, 2021, 28(2): 117-121.
- [23] 牛晓雨, 邢媛媛, 李大彪. 植物活性成分对动物肠道屏障功能的调控作用及其机制[J]. 畜牧兽医学报, 2024, 55(04): 1467-1477.
- NIU Xiaoyu, XING Yuanyuan, LI Dabiao. Regulation and mechanism of plant active ingredients on intestinal barrier function in animals[J]. Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2019, 55(4): 1467-1477.
- [24] WANG K, WU L Y, DOU C Z, et al. Research advance in intestinal mucosal barrier and pathogenesis of Crohn's disease[J]. Gastroenterology Research and Practice, 2016, 2016: 9686238.
- [25] CORRIDONI D, ANTANAVICIUTE A, GUPTA T, et al. Single-cell atlas of colonic CD8⁺ T cells in ulcerative colitis[J]. Nature Medicine, 2020, 26: 1480-1490.
- [26] 苏帅, 孙会, 于航宇, 等. 鼠李糖乳杆菌的生物学功能[J]. 动物营养学报, 2019, 31(1): 97-101.
- SU Shuai, SUN Hui, YU Hangyu, et al. Biological function of *Lactobacillus rhamnosus*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 97-101.
- [27] CHEN L F, LI H Y, LI J Y, et al. *Lactobacillus rhamnosus* GG treatment improves intestinal permeability and modulates microbiota dysbiosis in an experimental model of sepsis[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2019, 43(3): 1139-1148.
- [28] LAVELLE A, SOKOL H. Gut microbiota - derived metabolites as key actors in inflammatory bowel disease[J]. Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology, 2020, 17: 223-237.
- [29] SASSO J M, AMMAR R M, TENCHOV R, et al. Gut microbiome-brain alliance: A landscape view into mental and gastrointestinal health and disorders[J]. ACS Chemical Neuroscience, 2023, 14(10): 1717-1763.
- [30] 李圆圆, 莫天录, 姚永杰. 肠道菌群调控抑郁炎症反应和氧化应激的机制及应用前景[J]. 科学通报, 2023, 68(33): 4480-4490.
- LI Yuanyuan, MO Tianlu, YAO Yongjie. The mechanism and application prospect of intestinal flora regulating inflammatory response and oxidative stress in depression[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(33): 4480-4490.
- [31] 吴江, 吴正钧, 邵丽, 等. 两种乳酸菌胞外多糖对人体粪便菌群的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2013, 25(7): 750-756, 761.
- WU Jiang, WU Zhengjun, SHAO Li, et al. Modification of faecal microbiota by lactic acid bacteria exopolysaccharides *in vitro*[J]. Chinese Journal of Microecology, 2013, 25(7): 750-756, 761.
- [32] PRADEEPA, SHETTY A D, MATTHEWS K, et al. Multidrug resistant pathogenic bacterial biofilm inhibition by *Lactobacillus plantarum* exopolysaccharide[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2016, 8(1): 7-14.
- [33] 崔燕丽, 徐晓芬, 吴正钧, 等. 乳酸菌胞外多糖对人类肠道菌群的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2016, 28(7): 851-856.
- CUI Yanli, XU Xiaofen, WU Zhengjun, et al. The influence of lactic acid bacteria exopolysaccharides on human intestinal flora[J]. Chinese Journal of Microecology, 2016, 28(7): 851-856.
- [34] HONGPATTARAKERE T, CHERNTONG N, WICHIENTHOT S, et al. *In vitro* prebiotic evaluation of exopolysaccharides produced by marine isolated lactic acid bacteria[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 846-852.
- [35] 钟晨瑜, 蔡珂丹. 短链脂肪酸在慢性肾脏病中作用及机制的研究进展[J]. 中国病理生理杂志, 2021, 37(10): 1900-1904.
- ZHONG Chenyu, CAI Kedan. Progress in role of short-chain fatty acids in chronic kidney diseases[J]. Chinese Journal of Pathophysiology, 2021, 37(10): 1900-1904.
- [36] 王浦, 王斯琪, 吕丹, 等. GC/MS 检测慢性肾脏病患者血清与粪便中 SCFAs 含量[J]. 现代消化及介入诊疗, 2020, 25(4): 440-443.
- WANG Pu, WANG Siqi, LV Dan, et al. Determination of short chain fatty acids in serum and feces of patients with chronic kidney disease by GC/MS[J]. Modern Digestion & Intervention, 2020, 25(4): 440-443.
- [37] YOUNES J A, LIEVENS E, HUMMELEN R, et al. Women and their microbes: The unexpected friendship[J]. Trends in Microbiology, 2018, 26(1): 16-32.
- [38] 伍冲梅, 谢果珍, 郑淘, 等. 葛根芩连汤的应用及其对肠道屏障影响的研究进展[J]. 中国感染控制杂志, 2023, 22(12): 1540-1546.
- WU Chongmei, XIE Guozhen, ZHENG Tao, et al. Research progress on the application of Gegen Qinlian Decoction and its effect on the intestinal barrier[J]. Chinese Journal of Infection Control, 2023, 22(12): 1540-1546.
- [39] GRONDIN J A, KWON Y H, FAR P M, et al. Mucins in intestinal mucosal defense and inflammation: Learning from clinical and experimental studies[J]. Frontiers in Immunology, 2020, 11: 2054.
- [40] JOSHI A, GUO J X, HOLLERAN J L, et al. Evaluation of the pharmacokinetic drug-drug interaction potential of iohexol, a renal filtration marker[J]. Cancer Chemotherapy and Pharmacology, 2020, 86(4): 535-545.
- [41] 吴雅茹, 魏凯悦, 王彩丽. 肠道菌群失衡与肠道屏障损伤在糖尿病肾脏疾病中的研究进展[J]. 肾脏病与透析肾移植杂志, 2023, 32(5): 477-480, 454.
- WU Yaru, WEI Kaiyue, WANG Caili. Research progress of intestinal flora imbalance and intestinal barrier injury in diabetic kidney disease[J]. Chinese Journal of Nephrology, Dialysis & Transplantation, 2023, 32(5): 477-480, 454.
- [42] 惠华英, 何云山, 吴仪, 等. 肠道湿热证泄泻小鼠模型的研制及葛根芩连汤疗效[J]. 中国中医基础医学杂志, 2021, 27(9): 1380-1385.
- HUI Huaying, HE Yunshan, WU Yi, et al. Establishment of a diarrheal mouse model with intestinal dampness-heat syndrome and the effects of Gegen Qinlian Decoction[J]. Journal of Basic Chinese Medicine, 2021, 27(9): 1380-1385.
- [43] LEBEER S, BRON P A, MARCO M L, et al. Identification of probiotic effector molecules: present state and future perspectives[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2018, 49: 217-223.
- [44] FU X D, LIU Z M, ZHU C L, et al. Nondigestible carbohydrates, butyrate, and butyrate-producing bacteria[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(sup1): S130-S152.
- [45] 毛慧芳, 梁永林. 黏质阿克曼菌及其代谢物短链脂肪酸与溃疡性结肠炎肠黏膜屏障的相关性研究[J]. 微生物学报, 2023, 63(4): 1411-1431.
- MAO Huifang, LIANG Yonglin. Relationship of *Akkermansia muciniphila* and the metabolites short chain fatty acids with intestinal mucosal barrier in ulcerative colitis[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2023, 63(4): 1411-1431.
- [46] 单强, 王雪, 朱要宏, 等. 鼠李糖乳杆菌抗炎机制及其在防治家畜疾病中的应用前景[J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54(11): 4537-4550.
- SHAN Qiang, WANG Xue, ZHU Yaohong, et al. Application pros-

- pect of anti-inflammatory mechanism of *Lactobacillus rhamnosus* and its prevention and treatment in livestock diseases[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2023, 54(11): 4537-4550.
- [47] LI J Z, LI Q K, GAO N, et al. Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus rhamnosus* GG alleviate hydrogen peroxide-induced intestinal oxidative damage and apoptosis through the Keap1/Nrf2 and Bax/Bcl-2 pathways *in vitro*[J]. Food & Function, 2021, 12(20): 9632-9641.
- [48] BAIN C C, SCOTT C L, URONEN-HANSSON H, et al. Resident and pro-inflammatory macrophages in the colon represent alternative context-dependent fates of the same Ly6Chi monocyte precursors[J]. Mucosal Immunology, 2013, 6(3): 498-510.
- [49] 吴洪亚, 高亚男, 王加启, 等. 乳铁蛋白对肠道屏障保护作用的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 371-380.
WU Hongya, GAO Yanan, WANG Jiaqi, et al. Advancements on the protective effect of lactoferrin on the intestinal barrier[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 371-380.
- [50] VAZQUEZ M I, CATALAN-DIBENE J, ZLOTNIK A. B cells responses and cytokine production are regulated by their immune microenvironment[J]. Cytokine, 2015, 74(2): 318-326.
- [51] ROQUILLY A, MINTER N J D, VILLADANGOS J A. Spatiotemporal adaptations of macrophage and dendritic cell development and function[J]. Annual Review of Immunology, 2022, 40: 525-557.
- [52] CISZEK-LENDI M, NOWAK B, SRÓTEK M, et al. Immunoregulatory potential of exopolysaccharide from *Lactobacillus rhamnosus* KL37: Effects on the production of inflammatory mediators by mouse macrophages[J]. International Journal of Experimental Pathology, 2011, 92(6): 382-391.
- [53] CHEN L, GU Q, ZHOU T. Statistical optimization of novel medium to maximize the yield of exopolysaccharide from *Lactocaseibacillus rhamnosus* ZFM216 and its immunomodulatory activity[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 924495.
- [54] 白娜, 李周勇, 康小红. 后生元的研究进展[J]. 食品科技, 2022, 47(1): 20-25.
BAI Na, LI Zhouyong, KANG Xiaohong. A review of researches progress on postbiotics[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(1): 20-25.
- [55] 王琦. 日本后生元研究历史、现状及前景: [C]//第十七届益生菌与健康国际研讨会摘要集. 杭州, 2022: 146-147.
WANG Qi. History, Current Situation and Prospect of Postbiotic Research in Japan[C]//Abstract Collection of the 17th International Symposium on Probiotics and Health. Hangzhou, 2022: 146-147.
- [56] 刘红霞, 李雪利, 吴秀英, 等. 后生元研究进展及应用现状[J]. 食品科学, 2024, 45(1): 326-333.
LIU Hongxia, LI Xueli, WU Xiuying, et al. Progress on research and application of postbiotics[J]. Food Science, 2024, 45(1): 326-333.
- [57] CHABOT S, YU H L, DE LÉSÉLEUC L, et al. Exopolysaccharides from *Lactobacillus rhamnosus* RW-9595M stimulate TNF, IL-6 and IL-12 in human and mouse cultured immunocompetent cells, and IFN- γ in mouse splenocytes[J]. Le Lait, 2001, 81(6): 683-697.

责任编辑:王艳

收稿日期:2024-04-04

(上接第 191 页)

- 盐及阻断亚硝酸胺合成的研究[J]. 滨州医学院学报, 2019, 42(2): 119-122, 160.
MI Wei, HAN Lizhen, HAN Fulei, et al. Study on the effects of hawthorn proanthocyanidins on anti-oxidation, removing nitrite and inhibiting nitrosamine synthesis[J]. Journal of Binzhou Medical University, 2019, 42(2): 119-122, 160.
- [41] 肖珍, 谢笔钧, 孙智达. 莲房原花青素对紫甘蓝泡菜亚硝酸盐的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2018, 39(11): 67-73, 79.
XIAO Zhen, XIE Bijun, SUN Zhida. Inhibitory effect of LSPC on nitrite in pickled cabbage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(11): 67-73, 79.
- [42] 黄武, 侯晓杰, 侯旭杰, 等. 花生红衣原花青素对冷鲜猪肉脂质氧化的影响[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 163-167.
HUANG Wu, HOU Xiaojie, HOU Xujie, et al. Effect of procyanidins in peanut skins on lipid oxidation in chilled pork[J]. The Food Industry, 2022, 43(2): 163-167.
- [43] 张莉, 陈蕴智, 滕玉红, 等. 壳聚糖-原花青素高抗氧化抑菌薄膜的研究[J]. 包装工程, 2020, 41(15): 103-109.
ZHANG Li, CHEN Yunzhi, TENG Yuhong, et al. Chitosan-procyanidine antibacterial film with high antioxidant activity[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 103-109.
- [44] 王爱玲. 提取条件和原花青素对罗非鱼皮明胶成膜性的影响[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.
WANG Ailing. Effect of extraction conditions and procyanidins on film formation of *Tilapia* skin gelatin[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2022.
- [45] GENSKOWSKY E, PUENTE L A, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Assessment of antibacterial and antioxidant properties of chitosan edible films incorporated with maqui berry (*Aristotelia chilensis*)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 64(2): 1057-1062.
- [46] 沈洁, 王家俊, 刘幸幸, 等. 原花青素/醋酸纤维素可降解包装薄膜的结构与抗氧化性能[J]. 浙江理工大学学报, 2011, 28(6): 865-870.
SHEN Jie, WANG Jiajun, LIU Xingxing, et al. The research on the structures and antioxidant properties of procyanidins/cellulose acetate packaging membrane[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2011, 28(6): 865-870.

加工编辑:孟琬星

收稿日期:2023-12-28