

乳酸菌胞外多糖在食品工业中的应用研究

李佳伟, 虞宁馨, 于连升, 杜仁鹏*

(黑龙江大学 生命科学院 农业微生物技术教育部工程研究中心 黑龙江省寒区植物基因与生物发酵重点实验室
黑龙江省普通高校微生物重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 乳酸菌(LAB)胞外多糖(EPS)是部分乳酸菌在生长过程中代谢到细胞壁外的具有强大生理活性的天然高分子聚合物, 被广泛应用于医药和食品等多个领域。在食品工业中, 乳酸菌胞外多糖可以改善食品的口感、品质、外观及营养价值等。该研究主要综述乳酸菌胞外多糖的构效关系, 对其在食品工业中的应用, 如提高酸奶的粘稠度、奶酪的含水量及水合作用、烘焙食物的口感和外观、果酒的色泽度和品质、发酵调味品的香气等方面进行介绍, 并对胞外多糖在食品工业的未来发展进行展望, 旨在对乳酸菌胞外多糖在食品工业的应用提供基础。

关键词: 乳酸菌; 胞外多糖; 食品工业; 应用; 构效关系

中图分类号: Q53; TS202.3

文章编号: 0254-5071(2023)06-0017-05

doi:10.11882/j.issn.0254-5071.2023.06.004

引文格式: 李佳伟, 虞宁馨, 于连升, 等. 乳酸菌胞外多糖在食品工业中的应用研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(6): 17-21.

Application of exopolysaccharides of lactic acid bacteria in food industry

LI Jiawei, YU Ningxin, YU Liansheng, DU Renpeng*

(Key Laboratory of Microbiology, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Plant Genetic Engineering and Biological Fermentation Engineering for Cold Region, Engineering Research Center of Agricultural Microbiology Technology, Ministry of Education, School of Life Sciences, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Exopolysaccharide (EPS) of lactic acid bacteria (LAB) is a natural polymer with strong physiological activity that is metabolized to the outside of the cell wall during the growth process. It is extensively applied in many fields such as medicine and food. In the food industry, the taste, quality, appearance and nutritional value of food could be improved by LAB-EPS. The structure-function relationship of LAB-EPS was mainly reviewed, its application in the food industry, such as improving the viscosity of yogurt, the water content and hydration of cheese, the taste and appearance of baked food, the color and quality of fruit wine, and the aroma of fermented condiment were introduced. The future development of EPS in the food industry was prospected in order to provide the basis for the application of LAB-EPS in food industry.

Key words: lactic acid bacteria; exopolysaccharide; food industry; application; structure-function relationship

乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)是一类能利用可发酵碳水化合物,产生大量乳酸,无芽孢、革兰氏阳性细菌。现已知至少包含18个属,共计200多种,具有丰富的物种多样性^[1]。乳酸菌作为人体肠道益生菌,可有效缓解腹泻、乳糖不耐症等对肠道有刺激的反应。乳酸菌胞外多糖(exopolysaccharide, EPS)是部分乳酸菌在生长过程中代谢并分泌到细胞壁外的一种由重复单位和分支组成的长链、高分子聚合物,是乳酸菌适应环境变化的产物。能够产胞外多糖的乳酸菌包括链球菌属(*Streptococcus*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、明串珠菌属(*Leuconostoc*)和乳杆菌属(*Lactobacillus*),其大多数来源于乳品和植物^[2]。根据合成位置不同,乳酸菌胞外多糖可以分为依附于细胞壁的荚膜多糖

(capsular polysaccharides, CPS)和进入培养基的粘液多糖(slimepolysaccharide, SPS)^[3]。

乳酸菌胞外多糖不仅能够保护菌体自身抵御脱水、营养缺乏、有毒物质、噬菌体、渗透压和拮抗物等不利条件,还可以通过多种途径(肠机械屏障、微生物屏障及免疫屏障)保护人和动物肠道功能,维护肠道健康^[4]。作为天然大分子活性物质,乳酸菌胞外多糖具有抗菌^[5]、抗氧化^[6]、抗肿瘤^[7]和免疫调节等特性,在医药或保健品中发挥重要的作用。此外,乳酸菌胞外多糖对人体无毒副作用,已经作为天然安全无公害的食品级凝胶剂被广泛应用于乳制品、发酵饮料、奶酪、发酵面包等食品中,显著改善食品的物理化学性质(黏着性、稳定性、水合作用)和口感风

收稿日期: 2022-10-31

修回日期: 2023-02-05

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目(YQ2021C030); 中国博士后科学基金资助项目(2022MD713755); 黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z21082); ‘新时代龙江优秀硕士、博士学位论文’项目(LJYXL2022-020); 省级大学生创新创业训练计划项目(S202210212109)

作者简介: 李佳伟(2001-), 男, 本科生, 研究方向为乳酸菌胞外多糖的生物合成。

***通讯作者:** 杜仁鹏(1989-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为微生物次生代谢产物与生理。

味^[7-8],是目前食品研究领域的研究热点。当前的研究主要集中在乳酸菌胞外多糖分离纯化及功能特性上(图1),然而研究仅停留在表观层面,并未探究其构效关系。本文主要对乳酸菌胞外多糖在食品工业中的应用研究进行综述,对胞外多糖在食品工业未来的价值进行展望,旨在为乳酸菌胞外多糖在食品工业中的开发应用提供参考。



图1 乳酸菌胞外多糖的结构性质分析及在食品中的应用

Fig. 1 Structural property analysis of exopolysaccharide of lactic acid bacteria and its applications in food

1 乳酸菌胞外多糖构效关系

胞外多糖的结构包括单糖糖基种类、单糖糖基之间的排列顺序、相邻单糖糖基的连接方式以及糖链的分支情况等。乳酸菌胞外多糖的活性与其结构联系紧密,例如胞外多糖的单糖组成、分子量、链接方式及官能团组成等均可影响食品的质地和口感^[9-10]。由于乳酸菌种类多样、来源广泛,胞外多糖重复单元单糖的种类、连接方式以及组成比例存在很大差异性,使其生物活性具有多样性。

1.1 单糖组成对乳酸菌胞外多糖的影响

根据单糖成分的不同,乳酸菌胞外多糖可分为同型多糖(homopolysaccharides, HoPS)和杂型多糖(heteropolysaccharides, HePS)。HoPS是由10个或以上葡萄糖或果糖聚合而成的胞外多糖;HePS则是由半乳糖、葡萄糖、鼠李糖和N-乙酰基半乳糖胺等多种单糖组成的重复单元,每个重复单元包括3~8个单糖^[11]。在自然界中,一般HoPS的结构较为简单,产量比HePS更高^[12]。胞外多糖的单糖组成与抗氧化和抗肿瘤的活性息息相关,TANG W Z等^[13]研究表明,半乳糖可能是与抗氧化活性相关的重要因素。WU J Y等^[14]研究发现,较高葡萄糖的存在可能有助于胞外多糖的抗肿瘤作用。此外,单糖组成还可以影响食品的黏稠性,当单糖组成成分中葡萄糖的占比较高时,乳酸菌胞外多糖有利于提高发酵乳的黏度^[15]。

1.2 分子量对乳酸菌胞外多糖的影响

乳酸菌胞外多糖的分子量一般在10~6 000 kDa之间,胞外多糖因分子量不同可以应用在不用领域,其分子量与生物活性有着重要关系^[16-17]。高分子质量的胞外多糖有利于提高发酵乳的凝胶强度和黏度。MENDE S等^[10]

将不同分子质量的乳酸菌胞外多糖添加到酸乳中,发现乳酸菌胞外多糖可以显著提高酸乳的表观粘度和持水性,且分子量越高,效果更强。低分子质量的胞外多糖表现出较强的抗氧化性,并可通过诱导免疫应答,在抗肿瘤和免疫调节等方面展现出良好的功效^[18-19]。研究表明,较低分子质量的EPS能更好地与细胞表面受体结合,并且能够透过细胞膜屏障,发挥生物学功能,以此进行免疫调节和抗肿瘤功效^[14]。

1.3 空间构型对乳酸菌胞外多糖的影响

自然界中的乳酸菌胞外多糖结构复杂多样,不同结构的胞外多糖有不同的性质和稳定性。大多数的乳酸菌胞外多糖呈网状结构,这可能也是乳酸菌胞外多糖添加过量后黏度和硬度降低的原因^[20]。不同的分支结构会影响胞外多糖的物理化学性质,例如含有1,2-糖苷键的胞外多糖溶解性较差,可能是因为其外露亲水基团较少^[21]。姜静等^[22]对融合魏斯氏菌(*Weissella confusa*)胞外多糖的研究表明,持水率与其复杂结构和羟基基团密切相关。此外,胞外多糖上存在不同的基团也能够影响其功能特性。李尧等^[23]研究发现,盐酸氨基葡萄糖、半乳糖醛酸及葡萄糖醛酸的存在可能与胞外多糖的抗氧化能力有关。WANG K等^[18]研究发现,同时含有 α 和 β 型糖残基,且硫化基含量较高的胞外多糖具有较高的抗肿瘤活性。胞外多糖中取代修饰对其生物活性也具有一定影响,如硫酸化修饰或磷酸化修饰利用其基团作为非良好电子供体,能够更好地还原环内碳原子,显著增强抗氧化活性^[24]。

1.4 表面形态与乳酸菌胞外多糖的关系

乳酸菌胞外多糖的表面形态是重要的结构特征,不同的表面形态能够体现出不同的生化性质和物理性质。扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)是一种分析固体物质表面结构的仪器。利用扫描电镜探究乳酸菌胞外多糖表面的结构,发现乳酸菌胞外多糖呈现光滑、紧凑、片状、高分支等构象。结构紧凑使得胞外多糖具有良好的物理稳定性和机械稳定性,在食品工业中展现出良好的应用潜力^[25-26]。表面光滑、形态均一的胞外多糖在制备可塑性膜材料的重要潜力^[27]。原子力显微镜(atomic force microscopy, AFM)与扫描电镜类似,但可以显示出物体的三维表面图。邵丽等^[28]利用AFM测定鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus*)胞外多糖的结构,观察其多糖链构象的变化,并且验证了乳酸菌胞外多糖由高分子稀溶液理论推断的无规卷曲构象的结论。此外,乳酸菌胞外多糖能够与蛋白质之间发生相互作用而结合,使胞外多糖的结构更为稳定。

2 乳酸菌胞外多糖在发酵乳制品中的应用

乳酸菌胞外多糖具有较强的水合能力,可以提高发酵乳的粘度和组织状态,无需添加其它稳定剂^[29],被广泛应用于酸奶、奶酪等发酵乳制品中。乳酸菌胞外多糖作为天然

的稳定剂、增稠剂、凝胶剂添加到乳制品中,不仅可以改变发酵乳的流变性、乳化性及黏着性,赋予牛乳独特的质地与饱满的口感,还能够增加发酵乳制品的粘稠度,减少乳清析出,从而提升发酵乳的品质^[30]。在制作过程中,胞外多糖会跟随发酵进程通过乳酸菌的代谢缓慢产生,并在凝胶构建过程中伴随着酪蛋白凝集。随着胞外多糖的逐渐产生和网络的干扰,酪蛋白的三维网络结构可以均匀而精细,从而提高发酵乳的黏度和组织状态,使其更加光滑细腻^[31-32]。

2.1 乳酸菌胞外多糖在酸奶中的应用

酸奶在生产过程中,易出现黏度低、凝块破碎和大量乳清析出等问题,在一定程度上破坏了酸奶的口感,影响酸奶的质量。王新等^[33]研究发现,酸奶中添加乳酸菌胞外多糖可防止乳清析出,显著改善酸奶的质地口感。这是由于乳酸菌胞外多糖无规卷曲的结构^[28]、单糖组成和分子质量等特性,当添加葡萄糖含量较高的高分子质量乳酸菌胞外多糖时,可增加酸奶的黏性、流变性、持水性以及耐热性。PRASANNA P H P等^[34]将产胞外多糖的乳酸菌与不产胞外多糖的乳酸菌接种到牛乳中,发现产胞外多糖菌株的乳清析出量减少,证明乳酸菌胞外多糖能够提高产品的粘稠性,减少酸奶脱水收缩,更好地保留营养物质。蔡淼等^[35]研究发现,某些乳酸菌产生的胞外多糖能够降低酸奶的弹性,但对流变性和内聚性无显著影响,适量添加胞外多糖,其各类不同的侧链基团能促进酸奶中风味物质的形成。陈绮等^[36]将产胞外多糖的乳酸菌菌株XN1904E接种到酸奶之中,与对照组相比,实验组酸奶中的酮类、醛类、酯类和醇类风味物质的相对含量增加,醛类物质相对含量减少。胞外多糖作为乳酸菌适应环境的产物,对于逆环境具有一定的耐受性,使乳酸菌在肠道逆环境中也能够保持活性,发挥其益生功能。因此,根据不同乳酸菌胞外多糖的功能特性,有针对性的添加到酸奶中,用以提升酸奶的益生功能特性。

2.2 乳酸菌胞外多糖在奶酪中的应用

奶酪与酸奶都属于常见的发酵乳制品,均含有大量的益生菌乳酸菌,但奶酪中乳酸菌的浓度要高于酸奶。低脂干酪是奶酪经过多次发酵,降低水分和脂肪含量的产物。然而低脂干酪由于脂肪含量降低,物理特性收到破坏,水分丢失,导致干酪的质感、弹性等变差。乳酸菌胞外多糖在一定程度上能改善和提高低脂干酪的黏度、稳定性及水合作用。研究表明,乳酸菌胞外多糖能够增加干酪的产量,改变干酪的流变性和口感。高分子质量的乳酸菌胞外多糖的持水性较强,可以改善干酪的保水能力,提高干酪的水分和融化性。LYNCH K M等^[37]研究发现,在干酪中添加能够产HoPS的菌株 *Weissella* MG1,可以显著提高干酪的水分含量,但不会造成乳酪蛋白水解,对于干酪的特色风味

和香气成分也没有影响。此外,由于胞外多糖紧密的高分子结构,具有果胶、明胶等类似凝固剂的化学成分,可代替传统凝固剂,增加干酪中的咀嚼性和弹性,改善干酪的风味和口感。CAGNO R D等^[30]用产胞外多糖的嗜热链球菌 (*Streptococcus thermophilus*) 生产低脂的Caciotta意大利奶酪,胞外多糖不规则卷曲结构与蛋白质相结合^[27],使得奶酪具有较好的风味和咀嚼性。AGRAWAL P等^[38]研究发现,添加胞外多糖制作出来的切德干酪比普通不含胞外多糖的干酪更有弹性。由此可以看出,将乳酸菌胞外多糖添加在奶酪中,可以提高奶酪缩水能力的同时,还能防止营养成分的水解或流失。

3 乳酸菌胞外多糖在焙烤食品中的应用

烘焙食物作为人们喜爱的休闲食物之一,其外观和口感直接影响其销量和评价。随着民众健康观念的不断提升,人们越来越关注有利于健康的新型烘焙食品,使之逐渐成为代餐食品^[39]。但烘焙食品选用的食材一般热量较高,而大部分热量低的食材都面临着口感差的问题,所以将其作为代餐食品仍难以被人们接受。由于乳酸菌胞外多糖具有持水性,在烘焙食品中添加可以使食材与水结合更紧密,从而提高烘焙食品的口感。

3.1 乳酸菌胞外多糖在烘焙面包中的应用

全麦面包的全麦粉作为一类健康原材料,含有膳食纤维、维生素、矿物质等营养物质,还含有酚类化合物等抗氧化物,具有降血脂、降血压、软化血管等作用^[40-41]。然而,麸皮在面团形成时会与面筋蛋白和淀粉竞争结合水分子,造成面包口感变差,货架期变短^[42]。将乳酸菌胞外多糖添加到全麦面包中,可以显著改善上述问题。TANG X J等^[43-44]研究表明,融合魏斯氏菌 (*W. confusa*) 胞外多糖因其致密的网状结构^[20],将其适当添加到全麦面包中,可以提高面团的持水性,显著改善面包面团品质,提升全麦面包的口感。荞麦面包中的荞麦具有高营养、高蛋白、高纤维素和微量元素等营养优势,对比全麦粉的优点是无麸皮,但其颜色暗沉,口感粗糙,消费者接受程度较低^[45]。庄靓等^[46]研究发现,加入胞外多糖后面团的含水量和蓬松度提高,面筋强度较普通面团降低。

3.2 乳酸菌胞外多糖在无蛋蛋糕中的应用

鸡蛋作为烘焙蛋糕的主要原材料,是最常见的过敏原^[47]。然而蛋糕中不添加鸡蛋,会使蛋糕的蓬松度降低、口感下降。研究发现,乳酸菌胞外多糖在复合蛋白质以及无蛋蛋糕烘焙中具有有良好的应用。胞外多糖因具有乳化性,在面团搅打过程中,乳酸菌胞外多糖的持水性可以保持面团的水分,显著提高复合蛋白的起泡能力、气泡数量和泡沫稳定性,增加面糊粘稠度,改善无蛋蛋糕的烘焙品质^[48]。张逢温^[49]研究发现,在无蛋蛋糕中添加乳酸菌胞外多糖,蛋糕面糊的酸化水平提高,发酵更快,打发时蛋白泡沫更

稳定;烘焙过程中蛋糕更松软、蓬松,成品的色泽加深。此外,乳酸菌胞外多糖可以激活蛋白酶促进蛋白质水解,使面团中氨基酸种类和含量都增多,提高营养价值。由于乳酸菌胞外多糖溶解度高、持水能力强,能够抵消面包在储藏过程中的酸化现象,使得无蛋蛋糕不会轻易老化变硬,延长储存时间^[50]。

4 乳酸菌胞外多糖在果酒中的应用

乳酸菌胞外多糖因具有流变学特性,在果酒发酵过程中,可以提高果酒储存的稳定性,维持液体pH值^[51],增加果酒在发酵后的挥发性风味物质含量和种类^[52]。此外,果酒富含糖分^[51],能够促进乳酸菌分泌更多胞外多糖,使胞外多糖对果酒的作用效果增强。李建军等^[53]将植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*) FM-L1-3胞外多糖和肠膜明串珠菌(*Leuconostoc mesenteroides*) T-L1胞外多糖作为添加剂,添加到黑莓果酒中。结果表明,由于乳酸菌胞外多糖的流变学特性,能够降低果酒沉淀、花色苷含量及色度,显著提高果酒的澄清度和稳定性。此外,单宁过量会导致口感酸涩,EPS与唾液蛋白竞争对单宁的相互作用,干扰酸涩味道的感知,达到改变果酒口感的目的^[54]。

5 乳酸菌胞外多糖在其他食品中的应用

乳酸菌胞外多糖能够提高食品发酵过程的稳定性和发酵效率,在多种食品中得到应用。乳酸菌胞外多糖因具有良好的抗菌能力,作为防腐剂添加到食品中,不仅不会改变食品的风味,且抑菌效果比普通防腐剂更优良,在酱油等发酵调料品中使用广泛^[55]。乳酸菌胞外多糖作为泡沫稳定剂,使得啤酒中的泡沫更加持久绵密,提升啤酒的口感。胞外多糖热稳定性高、持水能力强,将其制作成食品外包装,不仅环保和密封性好,食物不易受外界因素的影响而腐败^[56]。乳酸菌胞外多糖还具有强大的抗逆性,添加到冷冻剂中,不但可以将食物速冻,还能保持食物的鲜度。

6 展望

乳酸菌胞外多糖因良好的物理性质和生物学活性而引起了各类领域科学家的重视,并且其研究进展已经成为人们关注的热点。目前对胞外多糖的研究主要集中在如何提高产量,大量研究优化乳酸菌的发酵条件及培养基组成,并借助基因工程的方法构建工程菌株,体外合成胞外多糖。随着对乳酸菌和其胞外多糖结构特点的研究不断完善,即可将胞外多糖的产量直接提升,从而应用于各个领域。此外,乳酸菌胞外多糖构效关系仍未到完全解析,乳酸菌产胞外多糖代谢途径复杂,通过基因敲除技术、分子克隆技术、蛋白纯化技术探究乳酸菌胞外多糖的催化机制和代谢途径,这些研究都有助于促进糖生物学的发展。在未来,利用合成生物学、基因工程和多组学的方法,从基因到蛋白再到多聚物的研究,将有助于全面揭示乳酸菌胞外多糖合成机理,促进乳酸菌胞外多糖的广泛应用。

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.
- [2] MORADI M, GUIMARÃES J T, SAHIN S. Current applications of exopolysaccharides from lactic acid bacteria in the development of food active edible packaging[J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 40(8): 33-39.
- [3] ZHAO D, LIU L N, JIANG J, et al. The response surface optimization of exopolysaccharide produced by *Weissella confusa* XG-3 and its rheological property[J]. *Preparat Biochem Biotechnol*, 2020, 50(10): 1014-1022.
- [4] 王琪, 肖融, 王敬, 等. 乳酸菌胞外多糖对动物肠道屏障功能的调控作用及机制[J]. 动物营养学报, 2021, 33(7): 3657-3664.
- [5] JABBARI V, KHIABANI M S, MOKARRAM R R, et al. *Lactobacillus plantarum* as a probiotic potential from Kouzeh cheese (traditional Iranian cheese) and its antimicrobial activity[J]. *Probiot Antimicrob Prot*, 2017, 9: 189-193.
- [6] 黄承敏, 陈绮, 游善兵, 等. 乳酸菌胞外多糖的分类及生物活性研究进展[J]. 中国乳业, 2019(9): 59-62.
- [7] 王坤, 牛萌萌, 赵婧. 乳酸菌胞外多糖的免疫调节及抗肿瘤特性的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(3): 51-55.
- [8] DIMITROVA S, PAVLOVA K, LUKANOV L, et al. Production of metabolites with antioxidant and emulsifying properties by antarctic strain *Sporobolomyces salmonicolor* AL₁[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2013, 169: 301-311.
- [9] GUO Y, PAN D, SUN Y, et al. Antioxidant activity of phosphorylated exopolysaccharide produced by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*[J]. *Carbohydr Polym*, 2013, 97(2): 849-854.
- [10] MENDE S, PETER M, BARTELS K, et al. Addition of purified exopolysaccharide isolates from *S. thermophilus* to milk and their impact on the rheology of acid gels[J]. *Food Hydrocolloid*, 2013, 32(1): 178-185.
- [11] OLEKSY M, KLEWICKA E. Exopolysaccharides produced by *Lactobacillus* sp.: Biosynthesis and applications[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2018, 58(3): 450-462.
- [12] GERWIG G J. Structural analysis of exopolysaccharides from lactic acid bacteria[J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 1887: 67-84.
- [13] TANG W Z, DONG M S, WANG W L, et al. Structural characterization and antioxidant property of released exopolysaccharides from *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* SRFM-1[J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 173: 654-664.
- [14] WU J Y, ZHANG Y H, YE L, et al. The anti-cancer effects and mechanisms of lactic acid bacteria exopolysaccharides *in vitro*: A review[J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 253: 117308.
- [15] PETRY S, FURLAN S, WAGHORNE E, et al. Comparison of the thickening properties of four *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* strains and physicochemical characterization of their exopolysaccharides[J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2003, 221(2): 285-291.
- [16] VOSOUGH P R, DOVOM M R E, NAJAFI M B H, et al. Biodiversity of exopolysaccharide producing lactic acid bacteria from Iranian traditional Kishk and optimization of EPS yield by *Enterococcus* spp. [J]. *Food Biosci*, 2022, 49(10): 101869.
- [17] SURAYOT U, WANG J G, SEESURIYACHAN P, et al. Exopolysaccharides from lactic acid bacteria: Structural analysis, molecular weight effect on immunomodulation[J]. *Int J Biol Macromol*, 2014, 68: 233-

- 240.
- [18] WANG K, LI W, RUI X, et al. Structural characterization and bioactivity of released exopolysaccharides from *Lactobacillus plantarum* 70810[J]. **Int J Biol Macromol**, 2014, 67: 71-78.
- [19] DI W, ZHANG L W, WANG S M, et al. Physicochemical characterization and antitumour activity of exopolysaccharides produced by *Lactobacillus casei* SB27 from yak milk[J]. **Carbohydr Polym**, 2017, 171: 307-315.
- [20] YANG T X, WU K Y, WANG F, et al. Effect of exopolysaccharides from lactic acid bacteria on the texture and microstructure of buffalo yoghurt[J]. **Int Dairy J**, 2014, 34(2): 252-256.
- [21] 李明源, 王继莲, 魏云林, 等. 细菌胞外多糖的特性及应用研究[J]. 生物技术通报, 2014(6): 51-56.
- [22] 姜静, 杜仁鹏, 郭尚旭, 等. 融合魏斯氏菌胞外多糖的分离纯化及其生化特性[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 9-15.
- [23] 李尧, 卢承蓉, 刘丹, 等. 乳酸片球菌胞外多糖的分离纯化、结构分析及抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 35-42.
- [24] ZHOU Y, CUI Y H, QU X J. Exopolysaccharides of lactic acid bacteria: Structure, bioactivity and associations: A review[J]. **Carbohydr Polym**, 2019, 207(3): 317-332.
- [25] AHMED Z, WANG Y P, ANJUM N, et al. Characterization of new exopolysaccharides produced by coculturing of *L. kefirifaciens* with yoghurt strains[J]. **Int J Biol Macromol**, 2013, 59: 377-383.
- [26] SARAVANAN C, SHETTY P K H. Isolation and characterization of exopolysaccharide from *Leuconostoc lactis* KC117496 isolated from idli batter[J]. **Int J Biol Macromol**, 2016, 90: 100-106.
- [27] 陈海燕, 李嘉雯, 李婷, 等. 高产胞外多糖嗜热链球菌的筛选及胞外多糖的结构分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 286-294.
- [28] 邵丽, 吴正钧, 张灏, 等. 鼠李糖乳杆菌胞外多糖S2的原子力显微镜观察[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 43-47.
- [29] YANG F J, XIE J M, WANG W M, et al. Regional arterial infusion with lipoxin A4 attenuates experimental severe acute pancreatitis[J]. **Plos One**, 2014, 9(9): e108525.
- [30] CAGNO R D, PASQUALE I D, DE ANGELIS M, et al. Use of micro-particulated whey protein concentrate, exopolysaccharide-producing *Streptococcus thermophilus*, and adjunct cultures for making low-fat Italian Caciotta-type cheese[J]. **J Dairy Sci**, 2014, 97(1): 72-84.
- [31] PRASANNA P H P, GRANDISON A S, CHARALAMPOPOULOS D. Screening human intestinal *Bifidobacterium* strains for growth, acidification, EPS production and viscosity potential in low-fat milk[J]. **Int Dairy J**, 2012, 23(1): 36-44.
- [32] BAI Y, LIU N. Effect of exopolysaccharide produced by *Lactobacillus casei* HS4 on microstructure and rheological properties of fermented milk[J]. **Food Sci**, 2019, 12: 153-160.
- [33] 王新, 张居典, 邵景海, 等. 胞外多糖对酸奶稳定性的研究[J]. 中国乳业, 2021(9): 125-129.
- [34] PRASANNA P H P, GRANDISON A S, CHARALAMPOPOULOS D. Microbiological, chemical and rheological properties of low fat set yoghurt produced with exopolysaccharide (EPS) producing *Bifidobacterium* strains[J]. **Food Res Int**, 2013, 51(1): 15-22.
- [35] 蔡淼, 郝晓娜, 罗天淇, 等. 植物乳杆菌YW11胞外多糖对酸乳加工特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 39-45.
- [36] 陈绮, 雷文平, 肖茜, 等. 产胞外多糖植物乳杆菌XN1904E发酵乳特性研究[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(6): 4-8, 13.
- [37] LYNCH K M, MCSWEENEY P L H, ARENDT E K, et al. Isolation and characterisation of exopolysaccharide-producing *Weissella* and *Lactobacillus* and their application as adjunct cultures in Cheddar cheese[J]. **Int Dairy J**, 2014, 34(1): 125-134.
- [38] AGRAWAL P, HASSAN A N. Characteristics of reduced fat Cheddar cheese made from ultrafiltered milk with an exopolysaccharide-producing culture[J]. **J Dairy Res**, 2008, 75(2): 182-188.
- [39] 陈旭斌. 基于多种功能活性成分在代餐烘焙食品中的应用研究[J]. 轻工科技, 2022, 38(1): 10-12.
- [40] 卢晨曦, 张国治. 全麦面包风味改良的研究进展[J]. 粮食加工, 2022, 47(3): 14-20.
- [41] 吴远宁, 周坚, 沈汪洋, 等. 全麦粉储藏稳定性的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021(7): 8-10, 23.
- [42] 孙磊. 植物乳杆菌LB-1/酵母菌协同发酵对面团组分行为及全麦面包品质提升作用研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2021.
- [43] TANG X J, ZHANG B L, HUANG W N, et al. Hydration, water distribution and microstructure of gluten during freeze thaw process: Role of a high molecular weight dextran produced by *Weissella confusa* QS813[J]. **Food Hydrocolloid**, 2019, 90: 377-384.
- [44] TANG X J, LIU N, HUANG W N, et al. Syneresis rate, water distribution, and microstructure of wheat starch gel during freeze-thaw process: Role of a high molecular weight dextran produced by *Weissella confusa* QS813 from traditional sourdough[J]. **Cereal Chem**, 2018, 95(1): 117-129.
- [45] 陈佳芳, 汤晓娟, 蒋慧, 等. 不同高产胞外多糖乳酸菌发酵荞麦酸面团对面团筋网络结构和面包烘焙特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 1-6.
- [46] 庄靓, 张宾乐, 马子琳, 等. 产乳活性多糖乳酸菌的筛选及其发酵荞麦酸面团、面包的特性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 71-77.
- [47] 宁亚维, 杨正, 马梦戈, 等. 食品中常见过敏原及检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 319-328.
- [48] 张逢温, 陈诚, 张宾乐, 等. 胞外多糖对无蛋蛋糕面糊及烘焙特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 12-18.
- [49] 张逢温. 产胞外多糖乳酸菌发酵小麦粉及其影响无蛋蛋糕烘焙品质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- [50] TIEKING M, GANZLE M G. Exopolysaccharides from cereal-associated *Lactobacilli*[J]. **Trend Food Sci Technol**, 2005, 16(1-3): 79-84.
- [51] 戴意强, 单成俊, 刘小莉, 等. 乳酸菌发酵黑莓汁增加胞外多糖工艺初探[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(18): 214-218.
- [52] 高甜甜, 阳秀莲, 曾琦鹏, 等. 杨梅果酒发酵工艺的优化及香气成分分析[J]. 食品工业, 2021, 42(6): 150-155.
- [53] 李建军, 周剑忠, 董月, 等. 乳酸菌胞外多糖对黑莓果酒品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(6): 178-181.
- [54] WATRELOT A A, SCHULZ D L, KENNEDY J A. Wine polysaccharides influence tannin-protein interactions[J]. **Food Hydrocolloid**, 2017, 63: 571-579.
- [55] 吴浪涛, 房峻, 吴新, 等. 酱油变质微生物因素及乳酸菌在防腐中的应用[J]. 中国酿造, 2021, 40(7): 22-27.
- [56] 成晓祎, 王欢, 江连洲. 蛋白与多糖基可食膜的研究进展[J]. 大豆科技, 2021(6): 41-47.