

魏斯氏菌胞外多糖在发酵食品中的应用进展

黄倩¹, 梁安健¹, 朱鹏程², 李东亮², 唐俊妮^{1,*}

(1.西南民族大学食品科学与技术学院, 四川 成都 610225; 2.四川中烟工业有限责任公司, 四川 成都 610021)

摘要: 乳酸菌的胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)是乳酸菌在生长过程中代谢到细胞外的一种天然高分子聚合物, 具有抗肿瘤、抗氧化、降胆固醇、促进肠道平衡等多种生物活性, 还可以作为食品的增稠剂、乳化剂、稳定剂。魏斯氏菌(*Weissella*)发现时间较短, 具有较强的产EPS能力。本文主要综述了魏斯氏菌的来源、多糖的合成途径、分类和功能, 以及魏斯氏菌所产EPS在发酵食品中的相关应用, 旨在为魏斯氏菌和其EPS的生产和应用研究提供科学依据。

关键词: 魏斯氏菌; 胞外多糖; 发酵; 益生菌

Progress in the Application of Extracellular Polysaccharides of *Weissella* in Fermented Foods

HUANG Qian¹, LIANG Anjian¹, ZHU Pengcheng², LI Dongliang², TANG Junni^{1,*}

(1. College of Food Sciences and Technology, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China;

2. China Tobacco Sichuan Industry Co. Ltd., Chengdu 610021, China)

Abstract: Exopolysaccharides (EPS) are natural high polymers metabolized into the extracellular space by lactic acid bacteria during their growth. EPS have a broad spectrum of biological activities including antitumor, antioxidant, cholesterol-lowering, and intestinal microflora balance promoting functions. They can also be used as a food thickening agent, emulsifier, and stabilizer. *Weissella*, which was discovered recently, has a strong ability to produce EPS. This article mainly reviews the sources of *Weissella* and the synthesis pathway, classification, functions and application in fermented foods of EPS produced by *Weissella*. Hopefully, this review will provide a scientific basis for the processing and application of EPS from *Weissella*.

Keywords: *Weissella*; exopolysaccharides; fermentation; probiotics

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230312-111

中图分类号: Q939.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2024)04-0352-08

引文格式:

黄倩, 梁安健, 朱鹏程, 等. 魏斯氏菌胞外多糖在发酵食品中的应用进展[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 352-359.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230312-111. <http://www.spkx.net.cn>

HUANG Qian, LIANG Anjian, ZHU Pengcheng, et al. Progress in the application of extracellular polysaccharides of *Weissella* in fermented foods[J]. Food Science, 2024, 45(4): 352-359. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230312-111. <http://www.spkx.net.cn>

发酵是世界上最古老且最经济的食物制备方法之一, 是一种利用微生物的生长、代谢以保存食物的技术^[1]。发酵过程中微生物会产生各种天然活性物质, 包括酶^[2]、多糖^[3]、细菌素^[4]、有机酸等^[5]。乳酸菌的胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)是乳酸菌在生长过程中代谢到细胞外的一种天然高分子聚合物, 根据多糖的组成

可以将其分为同多糖(homopolysaccharides, HoPS)和杂多糖(heteropolysaccharides, HePS)两类^[6]。多糖具有抗肿瘤^[7]、抗氧化^[8]、降胆固醇^[9]、促进肠道平衡^[10]等多种生物活性, 还可以作为食品的增稠剂、乳化剂、稳定剂^[11]。

魏斯氏菌(*Weissella*)主要存在于发酵的植物性食物^[12], 从发现至今不过短短30 a, 但相关研究表明, 魏斯氏菌中

收稿日期: 2023-03-12

基金项目: 卷烟减害降焦四川省重点实验室开放课题项目(川烟工技[2022]220号);

西南民族大学研究生创新型科研项目(ZD2023038)

第一作者简介: 黄倩(1999—)(ORCID: 0009-0006-7328-3517), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品安全与食品微生物。

E-mail: huangqian0221@163.com

*通信作者简介: 唐俊妮(1971—)(ORCID: 0000-0001-7442-2394), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品安全与食品微生物。

E-mail: 392783291@qq.com

的部分菌株具有高产EPS的能力^[13-14]。从魏斯氏菌发酵产物中分离出的多糖种类繁多、功能各异,可用于食品加工过程,改善产品质量和产品特性,具有广泛的研究意义。

1 魏斯氏菌简介

魏斯氏菌属于厚壁菌门、杆菌纲、乳酸菌目、明串珠菌科,细胞呈短杆、端圆或类球状。其形态单个、成对或短链,属于革兰氏阳性菌,不运动,不形成内生芽孢,接触酶阴性,不产生细胞色素^[15]。其微观形态及部分生理生化特征与明串珠菌、乳杆菌属极其相似,在过去常被归类于类肠膜明串珠菌属(*Leuconostoc paramesenteroides*)。随着分子生物学的进步,1993年德国学者Norbert Weiss发现魏斯氏菌与类肠膜明串珠菌属DNA谱存在差异,在系统发育树上属于新的分支,后经23S rRNA测定也印证了这一发现,魏斯氏菌由此得名。

目前已经从环境中分离出包括类肠膜魏斯氏菌(*W. paramesenteroides*)、融合魏斯氏菌(*W. confusa*)、坎氏魏斯氏菌(*W. kandleri*)、耐盐魏斯氏菌(*W. ahalotolerans*)等在内的25种魏斯氏菌^[16](表1),主要来源包括3个方面:动物的皮肤、粪便;人类的唾液、母乳、肠道;传统发酵食品如泡菜、葡萄酒、香肠等^[12]。

表1 魏斯氏菌的来源
Table 1 Sources of Weissella

菌株及编号	来源	参考文献
发酵蛤魏斯氏菌 <i>W. jogaejeotgali</i> (KP027016)	海鲜	[17]
葡萄魏斯氏菌 <i>W. uvarum</i> (KF999666)	葡萄酒	[18]
大米魏斯氏菌 <i>W. oryzae</i> (AB690345)	水稻	[19]
灶马魏斯氏菌 <i>W. diestrammenae</i> (JQ646523)	蟋蟀肠道	[20]
雁魏斯氏菌 <i>W. fabalis</i> (HE576795)	可可豆	[21]
鲸魏斯氏菌 <i>W. ceti</i> (FN813251)	鲸鱼	[22]
贝宁魏斯氏菌 <i>W. beninensis</i> (EU439435)	贝宁类昆虫	[23]
可可魏斯氏菌 <i>W. fabaria</i> (FM179678)	豆科植物	[24]
加纳魏斯氏菌 <i>W. ghanensis</i> (AM882997)	加纳可可	[25]
土壤魏斯氏菌 <i>W. soli</i> (AY028260)	土壤	[26]
食糜魏斯氏菌 <i>W. cibaria</i> (AJ295989)	面包	[27]
泡菜魏斯氏菌 <i>W. kimchii</i> (AF312874)	泡菜	[28]
韩国魏斯氏菌 <i>W. koreensis</i> (AY035891)	泡菜	[29]
泰国魏斯氏菌 <i>W. thailandensis</i> (AB023838)	泰国发酵鱼	[30]
耐盐魏斯氏菌 <i>W. halotolerans</i> (AB022926)	发酵香肠	[31]
赫伦魏斯氏菌 <i>W. hellenica</i> (S67831)	发酵香肠	[31]
微小魏斯氏菌 <i>W. minor</i> (AB022920)	发酵香肠	[31]
坎氏魏斯氏菌 <i>W. kandleri</i> (AB022922)	德国微生物实验室	[31]
融合魏斯氏菌 <i>W. confusa</i> (AB023241)	肠道	[32]
类肠膜魏斯氏菌 <i>W. paramesenteroides</i> (AB023238)	肠道	[33]
鹿科魏斯氏菌 <i>W. muntiaci</i> (8H-2)	动物粪便	[34]
蟑螂魏斯氏菌 <i>W. cryptocerci</i> (26KH-42)	昆虫肠道	[35]
酸奶魏斯氏菌 <i>W. sagaensis</i> (X0750)	酸奶	[36]
绿色魏斯氏菌 <i>W. viridescens</i> (AB023236)	肉类	[37]
熊蜂魏斯氏菌 <i>W. bombi</i> (LK054487)	熊蜂	[38]

2 魏斯氏菌所产EPS的合成、分类、物理特性

魏斯氏菌所产的EPS功能与其结构有着密切联系。Lakra等^[39]从发酵面团中分离出的*W. confusa* MD1能产甘露聚糖,通过扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察发现该甘露聚糖表面光滑,呈现不规则排列的球状结构,具有这样结构的EPS能够改善食品质地,可以作为乳化剂和增稠剂。Kavitake等^[13]从发酵食品中分离的魏斯氏菌能产半乳聚糖,该多糖呈现淀粉样球状结构,且排列致密,具有海绵状的疏松多孔结构。Du Renpeng等^[40]从*W. confusa* H2中分离的右旋糖酐在电镜下表面光滑,且具有片状支链结构,片状支链结构使得右旋糖酐具有改变食品流变性的功能。汤晓娟^[41]从*W. confusa* QS813分离出的EPS在较低质量浓度(1 mg/mL)下呈现纤维状结构,而在高质量浓度(5 mg/mL)下由于氢键间相互作用促进了分子聚合,高质量浓度下的多糖呈现片状结构,这种独特的结构说明该多糖能作为一种黏度增稠剂运用在食品加工业中。

2.1 魏斯氏菌所产EPS的合成途径

大多数乳酸菌通过两种不同的途径合成EPS,分别是Wzx/Wzy依赖性途径和蔗糖酶的细胞外生物合成途径^[42]。与细胞外合成途径相比,Wzx/Wzy依赖性途径合成的EPS更为复杂^[43]。具体可以划分为5个步骤(图1)。第1步是磷酸转移酶系统(phosphotransferase system, PTS)将葡萄糖、半乳糖、乳糖等合成原料转运至细胞内部,同时将单糖、二糖等原料磷酸化;第2步是EPS的活性产物形成,半乳糖-1-磷酸与葡萄糖-6-磷酸分别在半乳糖-1-磷酸尿酸转移酶和葡萄糖磷酸变位酶的作用下合成重要中间产物葡萄糖-1-磷酸,再通过尿苷二磷酸葡萄糖焦磷酸化酶(UDP-glucose pyrophosphorylase, UGPase)、UDP-半乳糖-4-表达异构酶等酶系的作用下分别合成UDP-葡萄糖、UDP-半乳糖和dTDP-鼠李糖^[44];第3步是重复单元的合成,处于细胞膜中的十一碳烯酚二磷酸酯锚定物将重复单元连接与组装^[45];第4步是重复单元向胞外运输,此过程的关键酶是翻转酶(Wzx)^[42],将组装好的重复单元运输至周质空间或细胞外膜;第5步是重复单元的聚合与释放,重复单元聚合成链EPS,再释放到细胞外部。

魏斯氏菌与明串珠菌、乳杆菌、片球菌等菌株一样,所产EPS一般通过蔗糖酶的细胞外生物合成途径进行。胞外蔗糖酶裂解蔗糖分子得到的前体,负责多糖合成的酶类(如葡聚糖酶和果聚糖酶)将底物中的单糖(如葡萄糖、果糖)组装至正在合成的多糖链上,合成完毕后多糖链直接释放至胞外环境中^[46]。由此途径所产多糖侧链的分支结构将受到葡聚糖酶和果聚糖酶的影响^[47]。

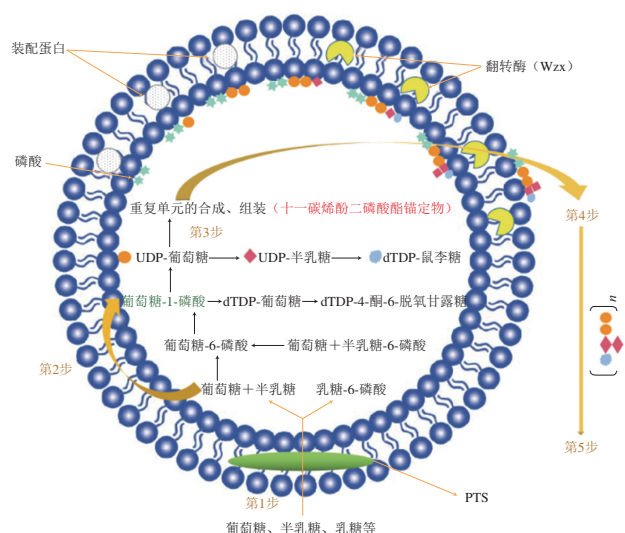


图1 乳酸菌通过Wzx/Wzy依赖性途径合成EPS

Fig. 1 EPS biosynthesis process by Wzx/Wzy dependent pathway in LAB

2.2 魏斯氏菌所产EPS的分类和功能

大多数魏斯氏菌都具有产EPS的能力,且EPS产量较高。根据多糖的组成单位,又可将其分为HoPS和HePS^[48]。如图2所示, HoPS由单一连续重复的单糖组成,如由单一的D-葡萄糖、D-果糖组成葡聚糖、果聚糖^[49]。相较于HoPS, HePS的组成复杂得多, HePS由3~8种不同单糖组成,单糖种类包括L-鼠李糖、半乳糖等,在合成过程中还连接了部分有机物(如氨基酸、有机酸等)和无机物(如硫酸盐、磷酸盐等)^[50],不同乳酸菌所产EPS在结构和分子质量上都有较大的差异。

葡聚糖是魏斯氏菌产的一种EPS,葡聚糖的产生与葡聚糖酶密切相关,该酶催化蔗糖合成 α -D-葡聚糖。菌株种类不同,产糖能力和糖的性质都有所不同。赫伦魏斯氏菌(*W. hellenica* SKkimchi3)所产葡聚糖产量为77 g/L^[14],而优化发酵条件后的*W. confusa*的EPS产量高达97.5 g/L;食窦魏斯氏菌(*W. cibaria* PDER21)^[51]产出的 α -D-葡聚糖在300℃时可以保持优异的热稳定性,其抗氧化活性可达89.5%,持水能力为103.7%,水溶性指数为80.7%,具有优越的抗氧化和持水性能。

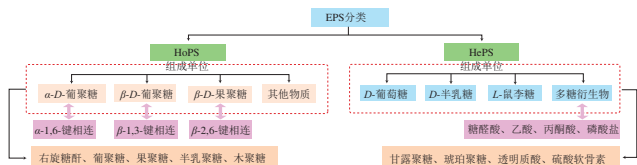


图2 两种不同类型多糖的分类及组成单位

Fig. 2 Classification and composition unites of exopolysaccharides

产右旋糖酐是魏斯氏菌的一个典型特征,右旋糖酐是由葡萄糖脱水缩合而成的一种生物多糖,属于葡聚糖的一种,由重复的 α -D-吡喃葡萄糖单元(主要含有

α -1,6-糖苷键)构成^[52],主要通过其侧链的不同分支进行区分。Du Renpeng等^[40]采用葡聚糖凝胶柱(Sephadex G-100)纯化了*W. confusa* H2所产EPS,该多糖是由葡萄糖通过 α -1,6-糖苷键构成的右旋糖酐,SEM图像呈现不规则片状凸起,高度在5~30 nm之间、分子排列紧密,说明所产右旋糖酐与水有较强的亲和力。Zhao Dan等^[53]从*W. confusa* XG-3中分离出的右旋糖酐也得到了类似的结果。右旋糖酐的片状分支可以改变食品的流变性质,对于蛋白凝胶的保水性和色泽都有较好的改善作用^[54],因此,可用于食品加工行业。

除了上述的两种EPS外,魏斯氏菌还具有产半乳糖、果聚糖、甘露聚糖等其他种类多糖的能力。Kavitake等^[55]从*W. confusa* KR780676分离的半乳糖聚糖在处理酵母突变细胞模型中展现了强大的抗氧化能力(对1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基和一氧化氮具有较高的清除活性,半清除活性分别为450 μ g/mL和138 μ g/mL)、抗细胞凋亡能力(抑制Pep4和Fisi1蛋白的表达)和抗衰老能力(酿酒酵母BY4741野生型菌株的细胞活力增加了8.0%,*Sod2*基因表达活性增加了10%~15%)。优化生长条件的*W. cibaria* MD2产果聚糖的能力可达12.58 g/L,该多糖热稳定性较高,降解温度可达279.90℃,能够促进寿命调控因子(*DAF-16*基因)的核定位,增加秀丽隐杆线虫的抗氧化能力^[39]。*W. confusa* MD1所产甘露聚糖由单一的甘露糖构成,呈现疏松多孔球状结构,对金黄色葡萄球菌、单核细胞增生李斯特菌、伤寒沙门菌所产生的生物被膜有较强的破坏性,可用于食品加工中致病菌的防控^[56]。

2.3 魏斯氏菌所产EPS的结构和物理特性

EPS的性质和功能主要取决于多糖的结构和官能团。多糖结构分为初级结构和高级结构,初级结构主要涉及主链和支链的组成,高级结构则涉及主链的构象和多糖间非共价键作用^[57]。采用傅里叶变换中红外光谱对魏斯氏菌所产的多糖进行结构分析和鉴定,通过分析化学键的拉伸振动,判断多糖的结构变化。Lakra等^[39]发现EPS MD2在3 464.55 cm^{-1} 附近出现了宽拉伸峰,这归结于多糖中含有的羟基;2 931.65 cm^{-1} 处出现的较弱吸收峰、1 676.9 cm^{-1} 处的特征吸收峰,分别是由于C—H的拉伸振动及C=O基团的不对称拉伸引起;900~1 200 cm^{-1} 范围内出现的1 157.8 cm^{-1} 和1 046.8 cm^{-1} 两个吸收峰分别归因于C—OH基团和糖苷键的C—O—C拉伸振动;832.4 cm^{-1} 出现吸收峰说明EPS MD2结构中含有呋喃环。Yilmaz等^[51]的研究也发现魏斯氏菌所产的EPS结构中含有羟基和C=O基团。

魏斯氏菌所产EPS的热稳定性与其结构有密切关系。相关学者在对EPS进行热稳定性分析时发现, EPS的热重变化具体可以分为两个阶段^[58]。第1阶段出现在0~90℃, 在此阶段水分损失较少, 只有11.64%; 第2阶段则出现在209~320℃, 质量分数会下降25.35%^[42]。第1阶段的质量损失只与EPS结构中的羧基相关, 羧基易与水发生结合和分离, 温度升高导致EPS中的结晶水挥发; 第2阶段的质量损失则是由于C—O和C—C等化学键断裂, 高温下多糖降解, 释放出CO、CO₂、H₂O等^[59]。食品加工企业对产品的加工温度大概在80~200℃, 因此, 热稳定性较好的魏斯氏菌EPS可作为品质改良剂进行运用。

3 魏斯氏菌所产EPS在发酵食品中的应用

魏斯氏菌发现时间较短, 对其特性的研究较少, 且目前仍未被欧洲食品安全管理局纳入安全资格认定的列表中。但国内外有学者研究证明其具备成为益生菌的潜力^[36-37]。乳酸菌生产的EPS通常被认为是安全的, 这意味着它们可以用于食品加工、益生元生产和医学应用。

3.1 EPS作为乳化剂在食品中的应用

乳化剂是将两种互不相溶的液体(水和油)进行混合, 形成稳定、均匀分散体的物质^[60]。多糖亲水链上连接的疏水基团使得多糖具有两亲性, 能够作为天然乳化剂。EPS作为乳化剂具有多种优点, 具体表现为来源广泛、结构稳定, 还能以自身黏度保持乳液的稳定^[61]。Yalmanci等^[62]将明串珠菌多糖添加于低脂蛋黄酱中, 3%的添加量就能改善产品的流变特性和稳定性。从海藻中分离出的菌株*Rhodobacter johrii* CDR-SL7Ci具有产EPS RH-7的能力^[63], 纯化后EPS的水溶液(0.1%)在25℃时黏度为8.2 cP, 其乳化活性与黄原胶相当, 且在高碱(pH 9.0)、高温(80℃)条件下也能维持较好的乳化活性。

多糖可以通过形成多糖-蛋白质双层界面改变乳液界面、凝胶性质、流变学属性, 增强由蛋白质稳定的乳液稳定性^[60], 魏斯氏菌属所产EPS同样具有良好的乳化性能。Kavitake等^[64]从菌株*W. confusa* KR780676中分离纯化的EPS对花生油和橄榄油有突出的乳化活性和乳化稳定性, 且较低浓度的EPS就能达到较好的乳化效果。Devi等^[65]针对*W. confusa* KR780676菌株所产EPS也开展了相关研究, 结果显示该多糖对葵花籽油乳化活性可达69.4%, 由该多糖制成的悬浊液在15 d内能保持良好的稳定性。从*W. cibaria* PN3可以分离出两种不同的表面活性剂, 一种存在于细胞内部, 一种分泌至细胞外^[66]。通过优化生产工艺, 最大产量分别可达1.46 g/L和1.99 g/L, 产生的表面张力可达31~33 N/m, 临界胶束质量浓度分别为1.6 g/L

和3.2 g/L, 对棕榈油、大豆油等都有较好的乳化活性。魏斯氏菌所产的EPS乳化能力不仅与菌株所产多糖的品种相关, 与食品加工过程中的温度、酸碱度、盐离子种类和浓度密切相关。

3.2 EPS作为抗氧化剂在食品中的应用

在生物细胞代谢过程中, 氧化作用是一个重要的生理过程, 在此过程中会产生大量的自由基和超氧阴离子, 参与细胞间信号传递和遗传表达^[67]。当氧化-还原反应平衡被打破时, 机体就会出现蛋白质、核酸、脂质损伤, 引发各种慢性疾病。魏斯氏菌所产多糖较为突出的生物特性为抗氧化性。从*W. confusa* OF126分离纯化的EPS在4 mg/mL剂量下, 对羟自由基的清除活性为(86.50±0.02)%, 显著高于同剂量的抗坏血酸(83.10±0.09)%^[49]; 对DPPH自由基的清除活性随EPS质量浓度的增加而增加。通过乙醇沉淀、脱蛋白后从*W. cibaria* PDER21培养物中分离出了EPS-1、EPS-2、EPS-3 3种多糖^[59]。在质量浓度5.0 mg/mL条件下, EPS-1和EPS-3对DPPH自由基的清除能力分别达到82.0%和42.2%; 同质量浓度下, EPS-1和EPS-3对羟自由基的清除能力分别为50.5%和31.8%, 对超氧阴离子自由基的清除活性分别为67.2%和52.5%。从韩国泡菜中分离的*W. cibaria* SY003, 所产EPS在较低质量浓度时(1 mg/mL)对2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)阳离子自由基的清除活力能达到90%^[68]。

EPS的抗氧化机制至今尚未明晰, 但其抗氧化活性受多种因素的影响, 如单糖组成、分子质量或官能团^[69]。带负电荷的基团使EPS处于酸性环境中有利于发生水解反应, 暴露更多具有良好抗氧化性能的半缩醛羟基^[70]。也有报道称EPS中所含的甘露糖可能使其具有较强的抗氧化活性^[71], 这可能是因为甘露糖更容易获取异位上的氢。魏斯氏菌所产的EPS对DPPH自由基、羟自由基、ABTS阳离子自由基都有较强的活性, 在一定程度上还能抑制脂肪氧化, 因此, 可以将其纯化用于食品中, 制备具有抗氧化活性的功能性食品。

3.3 EPS作为抗冷冻剂在食品中的应用

“冷链”已经成为连接家庭和生产企业的枢纽, 但传统冷冻方法的降温速率较慢, 冷冻过程中容易形成的粗大、不规则的冰晶体, 会破坏冻藏产品的细胞结构, 导致产品出现质构损伤、营养物质损失等问题。早有研究表明, 微生物所产的EPS不仅可以包裹菌体本身, 提高菌体抵抗反复冻融的能力^[72], 也能够显著抑制冰晶再结晶^[73], 从而使EPS作为食品中的抗冷冻剂成为可能。

已有学者将魏斯氏菌所产EPS添加至发酵面团中, 研究冷冻贮藏过程中面筋蛋白的变化。如Tang Xiaojuan等^[74]从传统酸面团中筛选出1株高产EPS的*W. confusa* QS813,

利用筛选出的菌株制作纯菌发酵的酸面团,应用于冷冻馒头的制备。研究结果显示,添加1% EPS的淀粉凝胶在经过冻融循环处理后仍能保持较为均匀、致密的网状结构,还能延缓由于冰晶造成的水分迁移。在冻融循环处理的发酵面团中添加魏斯氏菌产生的EPS,可增强谷蛋白大聚合体聚集(产量增加0.88%)、延缓其降解速率(可以降低3.07%),同时还能增加游离巯基的含量^[75]。EPS和酸面团的酸化协同作用抑制了淀粉凝胶内冰晶的形成、重结晶及淀粉分子的聚集和解聚,延缓了水分迁移,从而抑制了支链淀粉的长期回生,降低了老化速率;EPS侧链残基又能与面筋蛋白通过化学键结合,减少由于反复冻融导致的蛋白结构出现形变,进一步改善冻融发酵面团的产品质量。

运用乳酸菌产的EPS制作传统面包已经有数十年的历史,多糖具有替代亲水胶体的潜力,能够减少面团由于冷冻造成的品质劣变;同时,发酵过程中所产的EPS是一种天然品质改良剂,符合现代人民追求健康、无添加产品的需求。低分支度、高分子质量的EPS对发酵面团的改善作用效果更好^[76]。

3.4 EPS作为风味改良剂在其他食品中的应用

在酱油、泡菜、白酒、鱼酱等食品发酵过程中,耐盐性魏斯氏菌可以将葡萄糖转化成乳酸,形成的特殊香味物质让发酵食品变得更为醇香,还能使发酵食品的口感更加醇厚、色泽更为鲜亮。*W. cibaria*是泡菜自然发酵前期的优势菌株,张楠笛等^[77]使用食窦魏斯氏菌协同植物乳杆菌共同发酵,在发酵前期(0~4 d)可以迅速提升泡菜体系中乳酸菌产乳酸和乙酸的含量,改善泡菜产品发酵风味,提升产品品质;发酵过程中产生的挥发性物质总质量浓度为6.096 mg/L,显著高于植物乳杆菌单一发酵组(3.188 mg/L)。魏斯氏菌用于酱油发酵过程中可以增加挥发性脂肪酸的含量,改善酱油的口感和风味;所产EPS对酱油中 α -型和(或) β -型多糖的合成有一定贡献,赋予酱油更多益生作用^[78]。陈绍依等^[79]对茅台镇不同大曲的菌落结构和生产性能进行对比,发现魏斯氏菌属作为发酵过程中的优势菌株,与酯化力、液化力、糖化力、乙酸、乙酸乙酯、乳酸乙酯、正戊醇呈正相关,是影响大曲糖化力、液化力和酯化力的主要菌群,赋予大曲特殊风味。在酸奶中添加EPS与鱼明胶进行协同发酵,可以使酸奶蛋白网状结构更加致密,特征挥发性风味物质如双乙酰、2-壬酮、2,3-戊二酮等含量明显增多,感官品质得以提升^[80]。

4 魏斯氏菌作为益生菌在食品中的应用潜力

细菌所产EPS除了能作为食品加工过程中的乳化剂、抗氧化剂、抗冷冻剂、风味改良剂外,还具有抗菌、抗

病毒、抗炎、抗肿瘤等多种生物活性。魏斯氏菌能够在肠道中定植、溶血试验呈现阴性、消除豆类食品中的抗营养因子^[16],这些特质都表明魏斯氏菌具有益生菌的潜能。蹇宇等^[81]对食窦性魏斯氏菌在环境胁迫下的生长状况进行研究,结果显示食窦性魏斯氏菌对酸、温度、人工胃液、NaCl的耐受性较好,在0.1%胆盐环境中可保持70%的活性。Kumari等^[82]从奶酪中分离出具有产EPS能力的魏斯氏菌*W. cibaria* CH2,该菌株在人工胃液中保持180 min后,活菌数仅下降5.3%,经人工肠液处理240 min后仍有较高活性,在对其基因组进行分析时发现具有降胆固醇、合成维生素、必需氨基酸和 β -半乳糖苷酶的基因。Park等^[83]从*W. confusa* VP30分离出EPS用于便秘小鼠模型中,发现该EPS可以有效改善小鼠便秘情况。李文等^[84]从泡菜中分离的魏斯氏菌*W. hellenica* WS-419对甘油三酯分解能力可达42.8%,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌有良好的抑菌效果。从泡菜中分离的另一种食窦魏斯氏菌不仅能够清除DPPH自由基和超氧阴离子自由基,还能够有效降解泡菜中的亚硝酸盐,降解率最高可达99.5%。Kibar等^[27]纯化了*W. cibaria* EIR/PP2所产的EPS,发现该多糖对变性链球菌所产生生物被膜的抑制活性可达70%,能够促进牙周细胞组织的愈合和再生。

魏斯氏菌可在肠道中定殖,调节肠道免疫反应,维持肠道微生物平衡,还能通过其代谢产物调节宿主的肠道上皮屏障功能,增强宿主健康^[85]。同时,魏斯氏菌能够产细菌素抑制病原微生物生长、分泌EPS破坏生物被膜的完整性、产有机酸从而营造低pH值环境等干扰病原菌的代谢^[86],这些均证明魏斯氏菌具有成为益生菌的潜力。

5 结 语

魏斯氏菌发现的时间较短,但作为乳酸菌,它具有产EPS、有机酸、细菌素的能力,不仅可以改善食品品质、增强食物风味、改善食物流变性质,还能抑制有害菌生长,平衡肠道微生物环境。

乳酸菌所产的生物多糖不仅被证实对多种食品具有品质改良作用,能够改善发酵食品的质地和风味,还能够抗氧化、吸附重金属^[87-88],因此可将其应用在食品工业、医疗业和农业领域。但乳酸菌生产EPS属于自然发酵过程,具有发酵时间长、成本高、产量低等缺点,部分魏斯氏菌具有高产EPS的能力,未来可以通过分子生物学技术、基因组学技术等构建高产EPS的菌株,能够解决EPS产量少、应用范围窄等问题,为推广EPS的应用和功能性产品的开发提供强有力的支持。

参考文献:

- [1] SANLIER N, GOKCEN B B, SEZGIN A C. Health benefits of fermented foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(3): 506-527. DOI:10.1080/10408398.2017.1383355.
- [2] AGUILAR-ZÁRATE P, GUTIÉRREZ-SÁNCHEZ G, MICHEL M R, et al. Production of a fungal punicalagin-degrading enzyme by solid-state fermentation: studies of purification and characterization[J]. Foods, 2023, 12(4): 903. DOI:10.3390/foods12040903.
- [3] LI Z, ZHENG M Z, ZHENG J S, et al. *Bacillus* species in food fermentations: an underappreciated group of organisms for safe use in food fermentations[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 50: 101007. DOI:10.1016/j.cofs.2023.101007.
- [4] DAI J Y, FANG L M, ZHANG M M, et al. Isolation and identification of new source of bacteriocin-producing *Lactobacillus plantarum* C010 and growth kinetics of its batch fermentation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2022, 38(4): 67. DOI:10.1007/s11274-022-03244-1.
- [5] LI J W, MA D B, TIAN J H, et al. The responses of organic acid production and microbial community to different carbon source additions during the anaerobic fermentation of Chinese cabbage waste[J]. Bioresource Technology, 2023, 371: 128624. DOI:10.1016/j.biortech.2023.128624.
- [6] FUSO A, BANCALARI E, CASTELLONE V, et al. Feeding lactic acid bacteria with different sugars: effect on exopolysaccharides (EPS) production and their molecular characteristics[J]. Foods, 2023, 12(1): 215. DOI:10.3390/foods12010215.
- [7] FARAG M M S, MOGHANNEM S A M, SHEHABELDINE A M, et al. Antitumor effect of exopolysaccharide produced by *Bacillus mycoides*[J]. Microbial Pathogenesis, 2020, 140: 103947. DOI:10.1016/j.micpath.2019.103947.
- [8] ZHANG C, ZHANG L, LIU H, et al. Antioxidation, anti-hyperglycaemia and renoprotective effects of extracellular polysaccharides from *Pleurotus eryngii* SI-04[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 219-228. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.01.009.
- [9] KORCZ E, KERENYI Z, VARGA L. Dietary fibers, prebiotics, and exopolysaccharides produced by lactic acid bacteria: potential health benefits with special regard to cholesterol-lowering effects[J]. Food & Function, 2018, 9(6): 3057-3068. DOI:10.1039/c8fo00118a.
- [10] WU X T, LI P L, SHEN Q, et al. The ecological regulating effect of exopolysaccharides produced by *Bifidobacterium* on intestinal microecological imbalance[J]. Ekoloji, 2018, 27(106): 859-865.
- [11] BAJPAI V K, RATHER I A, MAJUMDER R, et al. Exopolysaccharide and lactic acid bacteria: perception, functionality and prospects[J]. Bangladesh Journal of Pharmacology, 2016, 11(1): 1-23. DOI:10.3329/bjp.v11i1.23819.
- [12] KAVITAKE D, DEVI P B, SHETTY P H, et al. Overview of exopolysaccharides produced by *Weissella* genus: a review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2964-2973. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.08.185.
- [13] KAVITAKE D, DEVI P B, SINGH S P, et al. Characterization of a novel galactan produced by *Weissella confusa* KR780676 from an acidic fermented food[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 681-689. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2016.01.099.
- [14] KIM M J, SEO H N, HWANG T S, et al. Characterization of exopolysaccharide (EPS) produced by *Weissella hellenica* SKkimchi3 isolated from kimchi[J]. Journal of Microbiology, 2008, 46(5): 535-541. DOI:10.1007/s12275-008-0134-y.
- [15] 金红星, 杨希寅, 成文玉. 辣白菜中分离含内源性性质粒的魏斯氏菌及其鉴定[J]. 中国酿造, 2012, 31(1): 77-79. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2012.01.023.
- [16] TEIXEIRA C G, FUSIEGER A, MILIAO G L, et al. *Weissella*: an emerging bacterium with promising health benefits[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2021, 13(4): 915-925. DOI:10.1007/s12602-021-09751-1.
- [17] LEE S H, KU H J, AHN M J, et al. *Weissella jogaejeotgali* sp. nov., isolated from jogae jeotgal, a traditional Korean fermented seafood[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2015, 65: 4674-4681. DOI:10.1099/ijsem.0.000631.
- [18] NISIOTOU A, DOUROU D, FILIPPOUSI M-E, et al. *Weissella uvarum* sp. nov., isolated from wine grapes[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2014, 64(11): 3885-3890. DOI:10.1099/ijms.0.066209-0.
- [19] TOHNO M, KITAHARA M, INOUE H, et al. *Weissella oryzae* sp. nov., isolated from fermented rice grains[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, 63(4): 1417-1420. DOI:10.1099/ijms.0.050013-0.
- [20] OH S J, SHIN N R, HYUN D W, et al. *Weissella diestrammenae* sp. nov., isolated from the gut of a camel cricket (*Diestrammena coreana*)[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, 63(8): 2951-2956. DOI:10.1099/ijms.0.047548-0.
- [21] SNAUWAERT I, PAPAEXANDRATOU Z, DE VUYST L, et al. Characterization of strains of *Weissella fabalis* sp. nov. and *Fructobacillus tropaeoli* from spontaneous cocoa bean fermentations[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2013, 63(5): 1709-1716. DOI:10.1099/ijms.0.040311-0.
- [22] VELA A I, FERNÁNDEZ A, BERNALDO DE QUIRÓS Y, et al. *Weissella ceti* sp. nov., isolated from beaked whales (*Mesoplodon bidens*)[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2011, 61(11): 2758-2762. DOI:10.1099/ijms.0.028522-0.
- [23] PADONOU S W, SCHILLINGER U, NIELSEN D S, et al. *Weissella beninensis* sp. nov., a motile lactic acid bacterium from submerged cassava fermentations, and emended description of the genus *Weissella*[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, 60: 2193-2198. DOI:10.1099/ijms.0.014332-0.
- [24] DE BRUYNE K, CAMU N, DE VUYST L, et al. *Weissella fabaria* sp. nov., from a Ghanaian cocoa fermentation[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2010, 60: 1999-2005. DOI:10.1099/ijms.0.019323-0.
- [25] DE K, CAMU N, LEFEBVRE K, et al. *Weissella ghanensis* sp. nov., isolated from a Ghanaian cocoa fermentation[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2008, 58(12): 2721-2725. DOI:10.1099/ijms.0.65853-0.
- [26] MAGNUSSON J, JONSSON H, SCHNÜRER J, et al. *Weissella soli* sp. nov., a lactic acid bacterium isolated from soil[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, 52(3): 831-834. DOI:10.1099/00207713-52-3-831.
- [27] KIBAR H, ARSLAN Y E, CEYLAN A, et al. *Weissella cibaria* EIR/P2-derived exopolysaccharide: a novel alternative to conventional biomaterials targeting periodontal regeneration[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 2900-2908. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2020.10.106.
- [28] CHOI H J, CHEIGH C I, KIM S B, et al. *Weissella kimchii* sp. nov., a novel lactic acid bacterium from kimchi[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, 52(2): 507-511. DOI:10.1099/00207713-52-2-507.

- [29] LEE J S, LEE K C, AHN J S, et al. *Weissella koreensis* sp. nov., isolated from kimchi[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, 52(4): 1257-1261. DOI:10.1099/00207713-52-4-1257.
- [30] TANASUPAWAT S, SHIDA O, OKADA S, et al. *Lactobacillus acidipiscis* sp. nov. and *Weissella thailandensis* sp. nov., isolated from fermented fish in Thailand[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2000, 50(4): 1479-1485. DOI:10.1099/00207713-50-4-1479.
- [31] COLLINS M D, SAMELIS J, METAXOPOULOS J, et al. Taxonomic studies on some leuconostoc-like organisms from fermented sausages: description of a new genus *Weissella* for the *Leuconostoc paramesenteroides* group of species[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1993, 75(6): 595-603. DOI:10.1111/j.1365-2672.1993.tb01600.
- [32] HOLZAPFEL W, KANDLER O. Taxonomy of the species *Lactobacillus Beijerinck*. VI. *Lactobacillus coprophilus* subsp. confusus nov. subsp., a new variety of the subspecies *Betabacterium*[J]. Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene, 1969, 123(7): 657-666.
- [33] GARVIE E I. The growth factor and amino acid requirements of species of the genus *Leuconostoc*, including *Leuconostoc paramesenteroides* (sp. nov.) and *Leuconostoc oenos*[J]. Microbiology, 1967, 48(3): 439-447. DOI:10.1099/00221287-48-3-439.
- [34] LIN S T, WANG L T, WU Y C, et al. *Weissella muntiaci* sp. nov., isolated from faeces of Formosan barking deer (*Muntiacus reevesi*)[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020, 70(3): 1578-1584. DOI:10.1099/ijsem.0.003937.
- [35] HEO J, HAMADA M, CHO H, et al. *Weissella cryptocerci* sp. nov., isolated from gut of the insect *Cryptocercus kyebangensis*[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2019, 69(9): 2801-2806. DOI:10.1099/ijsem.0.003564.
- [36] LI Y Q, TIAN W L, GU C T. *Weissella sagaensis* sp. nov., isolated from traditional Chinese yogurt[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020, 70(4): 2485-2492. DOI:10.1099/ijsem.0.004062.
- [37] NIVEN C F, EVANS J B. *Lactobacillus viridescens* nov. spec., a heterofermentative species that produces a green discoloration of cured meat pigments[J]. Journal of Bacteriology, 1957, 73(6): 758-759. DOI:10.1128/jb.73.6.758-759.1957.
- [38] PRAETP J, MEEUS I, CNOCKAERT M, et al. Novel lactic acid bacteria isolated from the bumble bee gut: *Convivina intestini* gen. nov., sp. nov., *Lactobacillus bombicola* sp. nov., and *Weissella bombi* sp. nov.[J]. Antonie van Leeuwenhoek: Journal of Microbiology and Serology, 2015, 107(5): 1337-1349. DOI:10.1007/s10482-015-0429-z.
- [39] LAKRA A K, RAMATCHANDIRANE M, KUMAR S, et al. Physico-chemical characterization and aging effects of fructan exopolysaccharide produced by *Weissella cibaria* MD2 on *Caenorhabditis elegans*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111100. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111100.
- [40] DU R P, PEI F Y, KANG J, et al. Analysis of the structure and properties of dextran produced by *Weissella confusa*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 204: 677-684. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.02.038.
- [41] 汤晓娟. 产胞外多糖面团发酵及其冷冻面团抗冻机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 19-30.
- [42] ZHOU Y, CUI Y, QU X. Exopolysaccharides of lactic acid bacteria: structure, bioactivity and associations: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 207: 317-332. DOI:10.1016/j.carbpol.2018.11.093.
- [43] AHUJA V, BHATT A K, BANU J R, et al. Microbial exopolysaccharide composites in biomedicine and healthcare: trends and advances[J]. Polymers, 2023, 15(7): 1801. DOI:10.3390/polym15071801.
- [44] LAWS A, GU Y, MARSHALL V. Biosynthesis, characterisation, and design of bacterial exopolysaccharides from lactic acid bacteria[J]. Biotechnology Advances, 2001, 19(8): 597-625. DOI:10.1016/S0734-9750(01)00084-2.
- [45] SCHMID J, SIEBER V, REHM B. Bacterial exopolysaccharides: biosynthesis pathways and engineering strategies[J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 496. DOI:10.3389/fmicb.2015.00496.
- [46] ZANNINI E, WATERS D M, COFFEY A, et al. Production, properties, and industrial food application of lactic acid bacteria-derived exopolysaccharides[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(3): 1121-1135. DOI:10.1007/s00253-015-7172-2.
- [47] ANWAR M A, KRALJ S, PIQUÉ A V, et al. Inulin and levan synthesis by probiotic *Lactobacillus gasseri* strains: characterization of three novel fructansucrase enzymes and their fructan products[J]. Microbiology, 2010, 156(4): 1264-1274. DOI:10.1099/mic.0.036616-0.
- [48] MALANG S K, MAINA N H, SCHWAB C, et al. Characterization of exopolysaccharide and ropy capsular polysaccharide formation by *Weissella*[J]. Food Microbiology, 2015, 46: 418-427. DOI:10.1016/j.fm.2014.08.022.
- [49] ADESULU-DAHUNSI A T, SANNI A I, JEYARAM K, et al. Extracellular polysaccharide from *Weissella confusa* OF126: production, optimization, and characterization[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 514-525. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.01.060.
- [50] ZEIDAN A A, POULSEN V K, JANZEN T, et al. Polysaccharide production by lactic acid bacteria: from genes to industrial applications[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2017, 41: S168-S200. DOI:10.1093/femsre/fux017.
- [51] YILMAZ M T, ISPIRLI H, TAYLAN O, et al. Bioactive and technological properties of an alpha-D-glucan synthesized by *Weissella cibaria* PDER21[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 285: 119227. DOI:10.1016/j.carbpol.2022.119227.
- [52] 陈爽, 张心钰, 吴昊, 等. 低分子量右旋糖酐的氧化改性及其理化特性[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 13-19. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201820003.
- [53] ZHAO D, JIANG J, LIU L, et al. Characterization of exopolysaccharides produced by *Weissella confusa* XG-3 and their potential biotechnological applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 178: 306-315. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.02.182.
- [54] 汤回花, 陈骏飞, 刘毕琴, 等. 右旋糖酐/蚕豆蛋白复合凝胶的流变特性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 69-75; 207. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.4.0797.
- [55] KAVITAKE D, VEERABHADRAPPA B, SUDHARSHAN S J, et al. Oxidative stress alleviating potential of galactan exopolysaccharide from *Weissella confusa* KR780676 in yeast model system[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1089. DOI:10.1038/s41598-022-05190-2.
- [56] LAKRA A K, DOMDI L, TILWANI Y M, et al. Physicochemical and functional characterization of mannan exopolysaccharide from *Weissella confusa* MD1 with bioactivities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 143: 797-805. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.09.139.
- [57] GONG Y J, ZHANG J, GAO F, et al. Structure features and *in vitro* hypoglycemic activities of polysaccharides from different species of *Maidong*[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 173: 215-222. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.05.076.

- [58] HAN P P, SUN Y, WU X Y, et al. Emulsifying, flocculating, and physicochemical properties of exopolysaccharide produced by cyanobacterium *Nostoc flagelliforme*[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 172(1): 36-49. DOI:10.1007/s12010-013-0505-7.
- [59] ZHU Y T, WANG C T, JIA S S, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of the exopolysaccharide from *Weissella cibaria* SJ14 isolated from Sichuan paocai[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 820-828. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.12.228.
- [60] 王君文, 韩旭, 李田甜, 等. 乳化剂稳定乳液的机理及应用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(21): 303-310. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191201-003.
- [61] 黄小倩, 李佳琪, 孙家会, 等. 多糖的修饰及其改善乳化性能的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 437-445. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022060256.
- [62] YALMANCI D, DERTLI E, TEKIN-CAKMAK Z H, et al. Utilization of exopolysaccharide produced by *Leuconostoc lactis* GW-6 as an emulsifier for low-fat mayonnaise production[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 226: 772-779. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2022.12.069.
- [63] SRAN K S, SUNDHARAM S S, KRISHNAMURTHI S, et al. Production, characterization and bio-emulsifying activity of a novel thermostable exopolysaccharide produced by a marine strain of *Rhodobacter johrii* CDR-SL 7Cii[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 127: 240-249. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.01.045.
- [64] KAVITAKE D, BALYAN S, DEVI P B, et al. Evaluation of oil-in-water (O/W) emulsifying properties of galactan exopolysaccharide from *Weissella confusa* KR780676[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1579-1585. DOI:10.1007/s13197-020-04262-3.
- [65] DEVI P B, KAVITAKE D, SHETTY P H. Physico-chemical characterization of galactan exopolysaccharide produced by *Weissella confusa* KR780676[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 93: 822-828. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2016.09.054.
- [66] SUBSANGUAN T, KHONDEE N, NAWAVIMARN P, et al. Reuse of immobilized *Weissella cibaria* PN3 for long-term production of both extracellular and cell-bound glycolipid biosurfactants[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2020, 8: 751. DOI:10.3389/fbioe.2020.00751.
- [67] 黄越, 陈乃耀, 赵雪聪, 等. 氧化应激参与放射性脑损伤的研究进展[J]. 神经解剖学杂志, 2019, 35(2): 221-224. DOI:10.16557/j.cnki.1000-7547.2019.02.019.
- [68] PARK S, SARAVANAKUMAR K, SATHIYASEELAN A, et al. Cellular antioxidant properties of nontoxic exopolysaccharide extracted from Lactobacillales (*Weissella cibaria*) isolated from Korean kimchi[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112727. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112727.
- [69] WERNING M L, HERNÁNDEZ-ALCÁNTARA A M, RUIZ M J, et al. Biological functions of exopolysaccharides from lactic acid bacteria and their potential benefits for humans and farmed animals[J]. Foods, 2022, 11(9): 1284. DOI:10.3390/foods11091284.
- [70] GUO Y X, PAN D D, LI H, et al. Antioxidant and immunomodulatory activity of selenium exopolysaccharide produced by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis*[J]. Food Chemistry, 2013, 138(1): 84-89. DOI:10.1016/j.foodchem.2012.10.029.
- [71] XU R H, SHANG N, LI P L. *In vitro* and *in vivo* antioxidant activity of exopolysaccharide fractions from *Bifidobacterium animalis* RH[J]. Anaerobe, 2011, 17(5): 226-231. DOI:10.1016/j.anaerobe.2011.07.010.
- [72] 李江, 何培青, 陈靠山, 等. 南极适冷菌 *Pseudoaltermonas* sp. S-15-13 胞外多糖低温保护作用的研究[J]. 海洋科学进展, 2007(2): 215-219. DOI:10.3969/j.issn.1671-6647.2007.02.012.
- [73] 王继锋, 石侃, 安玮, 等. 酒球菌(*Oenococcus oeni*)产胞外聚合物培养基的优化及其抗冷冻干燥性能评价[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(15): 157-163. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020591.
- [74] 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 Chemistry, 2018, 95(1): 117-129. DOI:10.1094/CCHEM-08-17-0174-R.
- [75] ZHANG B, OMEDI J O, ZHENG J, et al. Exopolysaccharides in sourdough fermented by *Weissella confusa* QS813 protected protein matrix and quality of frozen gluten-red bean dough during freeze-thaw cycles[J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101180. DOI:10.1016/j.fbio.2021.101180.
- [76] 吴玉新, 陈佳芳, 马子琳, 等. 乳酸菌发酵米粉面团生化特性及其对馒头蒸制特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 64-71. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190217-085.
- [77] 张楠笛, 祝林, 许琴, 等. 食蜜魏斯氏菌协同植物乳杆菌改善四川泡菜风味[J]. 食品科学, 2020, 41(14): 102-108. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190626-332.
- [78] 李巧玉. 魏斯氏菌在酱油发酵过程的含量变化及特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 30-31.
- [79] 陈绍依, 郎莹, 邱树毅, 等. 茅台镇不同区域酱香大曲微生物群落结构及生产性能对比[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 134-143. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220825-309.
- [80] 王雪杭, 李瑞东, 蒋云龙, 等. 植物乳杆菌胞外多糖协同鱼明胶改善低脂酸奶品质特性[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 73-81. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220816-187.
- [81] 蹇宇, 陈孝勇, 易若琨, 等. 环境胁迫下食蜜魏斯氏菌的耐受性评价[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 128-133; 138. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.24.023.
- [82] KUMARI M, KUMAR R, SINGH D, et al. Physiological and genomic characterization of an exopolysaccharide-producing *Weissella cibaria* CH2 from cheese of the western Himalayas[J]. Food Bioscience, 2020, 35: 100570. DOI:10.1016/j.fbio.2020.100570.
- [83] PARK S H, LEE M R, YANG S Y, et al. *In vivo* functional effects of *Weissella confusa* VP30 exopolysaccharides on loperamide-induced constipation in rats[J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(13): 1703-1715. DOI:10.1007/s10068-022-01159-z.
- [84] 李文, 陈银元, 陈立明, 等. 两株魏斯氏菌的益生特性比较[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(15): 37-43. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.020151.
- [85] 黄道梅, 贾秋思, 胡露, 等. 四川传统泡菜中抗氧化活性食蜜魏斯氏菌的筛选、鉴定及其特性分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(17): 121-126. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.17.016.
- [86] 蒋同, 李龙岩, 张菊梅, 等. 功能益生菌对代谢综合征的治疗作用及其机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 233-243. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220728-311.
- [87] 吕秀莉, 岳莹雪, 平丽筠, 等. 益生菌黏附机制及其拮抗肠道致病菌研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 313-320. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220522-282.
- [88] 王烁, 姜静, 杜仁鹏, 等. 乳酸菌胞外多糖的生物合成、特性和应用[J]. 生物技术, 2022, 32(3): 394-401. DOI:10.16519/j.cnki.1004-311x.2022.03.0063.