

高向新, 陈永福, 乌斯嘎勒. 益生菌微胶囊的制备及其在食品中应用的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(3): 19–28. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090256

GAO Xiangxin, CHEN Yongfu, Wusigale. Research Progress of Preparation and Application of Probiotic Microencapsulation in Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(3): 19–28. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090256

· 青年编委专栏—益生菌与抗菌肽 (客座主编: 孙志宏、付才力) ·

益生菌微胶囊的制备及其在食品中应用的研究进展

高向新, 陈永福, 乌斯嘎勒*

(内蒙古农业大学乳品生物技术与工程教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要: 益生菌对人体健康有益而被广泛应用于食品领域, 但其易受温度、氧气、湿度、压力、胃酸和胆汁盐等不利环境因素影响。为使益生菌在加工、储藏、消化过程中保持高存活率, 人们利用不同的微胶囊技术对益生菌进行包埋和保护。益生菌微胶囊技术通过创建一种物理屏障来提高益生菌对不良环境的抗性力, 减少保护基质中益生菌的损伤, 从而使其到达目标部位顺利释放并发挥作用。文章概述了益生菌的起源、种类及益生功效, 重点总结了益生菌微胶囊常用制备方法的基本原理及优缺点, 包括挤压法、乳化法、喷雾干燥法、冷冻干燥法、喷雾冷却法、复凝聚法、静电纺丝、电喷雾和撞击气溶胶法, 进而重点讨论了益生菌微胶囊技术在乳制品、肉制品、非乳饮料及焙烤制品等食品中的应用优势和可能性。虽然众多研究进行体外模拟消化, 但仍存在一定局限性, 对于现有的问题, 未来仍然需要通过扩大包埋方法、开展体内实验、建立系统性数据库等方法来满足益生菌食品的工业化生产需求, 以为开发新型益生菌食品提供理论借鉴和参考。

关键词: 益生菌, 微胶囊, 食品, 应用

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)03-0019-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090256

本文网刊:



Research Progress of Preparation and Application of Probiotic Microencapsulation in Food

GAO Xiangxin, CHEN Yongfu, Wusigale *

(Key Laboratory of Dairy Biotechnology and Engineering, Ministry of Education, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Probiotics are widely used in the food field because they are beneficial to human health, while they are susceptible to adverse environmental factors such as temperature, oxygen, humidity, pressure, stomach acid and bile salts. In order to maintain high survival rate of probiotics during processing, storage and digestion, different microencapsulation technologies have been used for encapsulation and protection of probiotics. Probiotic microencapsulation technology can improve the resistance of probiotics to adverse environment by creating a physical barrier, and reduce the damage of probiotics in the protective matrix, so that they can reach the target site at full potency. The review article summarizes the source, type and efficacy of probiotics, and mainly summarizes the fundamental principles, advantages and disadvantages of the common probiotic microencapsulation technologies, including extrusion, emulsification, spray drying, freeze drying, spray chilling, complex coacervation, electrospinning, electrospraying and impinging aerosols. Furthermore, an overview of the application advantages and possibilities of probiotic microencapsulation technologies in dairy products, meat products, non-milk beverages and baked products are discussed. Although many studies *in vitro* digestion, there are still some limitations. As for the existing problems, it is necessary to expand the microencapsulation technologies, carry out *in vivo*

收稿日期: 2022-09-26

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金 (2022QN03022); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY22498)。

作者简介: 高向新 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 乳酸菌资源开发利用, E-mail: gaoliangxin01@163.com。

* 通信作者: 乌斯嘎勒 (1993-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 乳酸菌资源开发利用, E-mail: wusigale@imau.edu.cn。

experiments, and establish a systematic database to meet the industrial production needs of probiotic food. It provides theoretical reference for developing new probiotic food.

Key words: probiotics; microencapsulation; food; application

益生菌是一类可在宿主肠道内发挥有益健康功效的活的微生物^[1]。研究表明,益生菌在调节人体肠道菌群平衡和维护人体健康方面发挥着重要作用,这也使得越来越多的人关注益生菌食品的开发^[2]。但是由于益生菌易受到温度、氧气、水分活度、压力、pH、过氧化氢、消化酶等因素的影响,很难保持活性抵达肠道并发挥有益作用^[3]。因此,如何使得益生菌活着到达肠道成为目前研究人员面临的一种挑战^[4]。研究发现微胶囊技术是保持益生菌活力的有效方法^[5],且理想的微胶囊技术可以保护益生菌在加工、储藏过程和在上消化道(口腔、胃、小肠)中不被释放,而在下消化道(结肠)释放,其通过壁材的包埋使益生菌穿上了一层“防护罩”,可在一定条件下与外界形成隔离,为益生菌提供微观稳态环境^[6],从而保护益生菌安全到达肠道并发挥作用^[7]。因此,本文概述了益生菌的起源及益生功效、益生菌微胶囊技术的包埋机理及特点以及益生菌微胶囊在乳制品、肉制品、非乳饮料、焙烤制品中的应用,以为益生菌食品在工业化生产中提供理论参考。

1 益生菌简介

益生菌一词源于希腊语中的“pro”和“biotic”^[8],在 1908 年,由俄罗斯科学家、诺贝尔奖获得者 Elie Metchnikof 首次提出。在 1974 年,美国学者 Parker 提出益生菌的概念,并将其定义为“维持宿主肠道内微生物平衡的微生物或物质”。由于这一定义范围较广,Fuller 在 1989 年将其改为“作为食品补充剂,可调节宿主肠道菌群平衡对宿主产生益处的活的微生物”^[9]。直到 2001 年,FAO/WHO 正式将益生菌定义为“活的微生物,足量摄入后对宿主的健康有益”。后来,在 2013 年国际益生菌和益生元科学协会(ISAPP)

在 FAO/WHO 定义的基础上进行了简单修改,并强调了益生菌菌株鉴定和安全性评价的重要性^[10]。

益生菌种类繁多,目前所知的益生菌大部分为革兰氏阳性菌,主要包括乳杆菌属和双歧杆菌属,以及一些非乳酸菌的丁酸梭菌、布拉迪酵母菌、凝结芽孢杆菌、纳豆芽孢杆菌和大肠杆菌^[11]。不同益生菌的益生功效各不相同,主要取决于自身的功能特性及代谢产物的独特属性,可归结于以下几种,如改善肠道菌群平衡,提高人体免疫能力;降解生物大分子物质,促进胃肠道消化吸收;刺激宿主合成抗癌物质(如短链脂肪酸和亚油酸),抑制体内致病菌的产生等^[12-14]。虽然益生菌具有诸多益处,但仍有人会担心口服益生菌的安全性,而根据益生菌在食品中的使用历史和各类研究人员的临床试验结果表明,目前人类补充摄入的益生菌通常被认为是安全的,其不会在人群中增加患病的风险^[10]。口服益生菌方便快捷,但由于人体胃肠道环境复杂,使得益生菌以适当数量到达肠道成为一种挑战,而益生菌微胶囊技术是保护益生菌存活性的一种有效方法^[15]。

2 益生菌微胶囊制备

益生菌微胶囊技术是将益生菌包埋于具有半透性和生物相容性基质载体的一种技术,通过创建一种物理屏障提高益生菌对不良环境的抗性力,减少保护基质中益生菌的损伤,然后使其到达目标部位顺利释放并发挥作用^[16]。目前许多微胶囊技术已被用于益生菌的包埋,常见的微胶囊技术有挤压法、乳化法、喷雾干燥法、冷冻干燥法等(表 1)。

2.1 挤压法

挤压法是一种物理包埋方法,通过将制备好的益生菌及壁材混合物以液滴的形式在压力作用下挤

表 1 不同类型的益生菌微胶囊技术及特点

Table 1 Technologies and characteristics of different types of probiotic microcapsules

益生菌微胶囊技术	适用壁材	特点	参考文献
挤压法	海藻酸盐、卡拉胶、壳聚糖、黄原胶、明胶、果胶、乳清蛋白、菊粉	• 成本低廉、操作简单、条件温和、尺径均匀 • 生产量小、尺径较大	[17-21]
乳化法	海藻酸盐、卡拉胶、壳聚糖、黄原胶、明胶、果胶、乳清蛋白、羧甲基纤维素钠、阿拉伯胶	• 生产量大、尺径较小 • 油相残留、尺径分布不均	[22-24]
喷雾干燥法	麦芽糊精、脱脂乳粉、乳清蛋白、大豆分离蛋白、明胶、果胶、阿拉伯胶、海藻酸盐、低聚果糖、乳清粉、菊粉	• 尺径可控、成本低廉、生产量大、复水能力强 • 产品稳定性差	[25-26]
冷冻干燥法	黄原胶、卡拉胶、海藻酸盐、果糖、麦芽糊精、大豆分离蛋白、乳糖、甘露糖、山梨醇	• 产品稳定性好、适用于热敏性物质包埋 • 成本昂贵、操作复杂、产品表皮皱缩	[27-28]
喷雾冷却法	植物脂肪	• 尺径可控、成本低廉 • 包埋效率低	[29]
复凝聚法	阿拉伯胶、果胶、海藻酸盐、黄原胶、卡拉胶、羧甲基纤维素钠、乳清蛋白、明胶、酪蛋白、 β -乳球蛋白	• 生产量大 • 工艺复杂、成本昂贵	[30-31]
静电纺丝	乳清蛋白、大豆分离蛋白、明胶、玉米醇溶蛋白、酪蛋白、淀粉、纤维素、果胶、瓜尔胶、壳聚糖、海藻酸盐、卡拉胶、黄原胶、葡聚糖	• 方便快捷、经济高效、条件温和、适应性强	[32-34]
电喷雾			
撞击气溶胶法	海藻酸钠	• 连续生产、生产量大、产品尺径小	[35]

出到固化液(通常为 Ca^{2+})中而形成微小的凝胶珠^[36]。该方法通常使用各类多糖对益生菌进行包埋,如海藻酸盐、壳聚糖、黄原胶等,特别是使用海藻酸盐作为壁材居多,其主要原因是海藻酸盐凝胶中的阴离子可与 Ca^{2+} 相互作用形成一种特殊“蛋壳”状的稳定结构,从而达到保护益生菌的效果。相比于单海藻酸盐包埋,复合壁材的互补使用可进一步保护益生菌免受外界不良环境的损伤,从而维持益生菌在胃肠道中的稳定性和提高益生菌的存活率^[37]。例如, Azam 等^[19]研究表明海藻酸钠和卡拉胶的联合使用可形成稳定的基质,在储藏和模拟胃肠液消化过程中可保持较高益生菌存活率。此外,益生元与益生菌的协同作用也可抵抗胃酸低 pH 及肠道胆汁盐的影响,从而对益生菌起到保护作用^[38], Gandomi 等^[20]将菊粉和海藻酸钠、壳聚糖联合使用后发现菊粉的引入提高了加入苹果汁中的鼠李糖乳酪杆菌(*Lactocaseibacillus rhamnosus*)的存活率。

挤压法因操作简单、成本低廉、工艺温和等特点广泛用于益生菌的包埋,这种方法对益生菌的损伤较小,可在保证在不破坏益生菌的条件下提高益生菌的存活率^[21]。但该方法生产的凝胶珠的尺寸易受到水凝胶的粘度和浓度、固化液的浓度、喷头与固化液液面的距离、喷头尺径、温度、电压、流速等外界因素的影响,而且由于以往的挤压法通常使用单喷头挤压,生产效率较慢,因此使得挤压法不能应用于大规模的生产^[39]。为了提高该方法工业化应用中的可行性,目前研究人员已开发出了多喷嘴微胶囊造粒仪、旋转圆盘雾化器等多种自动化设备以解决该问题,从而使其满足不同工业化生产需求^[40]。

2.2 乳化法

乳化法是一种化学包埋方法,通过将益生菌与壁材溶液的混合物(分散相)加入到含有乳化剂的油类介质(连续相)中,然后在搅拌作用下其形成稳定的水油乳化液,并经过交联得到互不相溶的微胶囊^[41]。该过程通常使用海藻酸盐、卡拉胶和果胶等多糖壁材作为交联剂使其发生离子凝胶化反应,有机溶剂则作为连续相使界面发生聚合。此外,乳清蛋白由于具有良好的凝胶和乳化特性也应用于益生菌的包埋^[22]。该方法中乳化液的稳定性对于微胶囊的生产至关重要。而乳化剂作为一种表面活性剂,其可维持乳化液体系的平衡且提高微胶囊的包埋率,其中表面活性剂中的 HLB 值(亲水疏水平衡值)越低,则在 O/W 型乳化液中稳定性越好^[42]。Martins 等^[43]研究表明,不同乳状液类型(水包油型 O/W 或油包水型 W/O)的稳定性存在差异,相比于 O/W 型乳状液, W/O 型乳状液较不稳定,其在制备的过程中更易发生油相和氯化钙的分离。由于益生菌的亲水特性,故而优选 W/O 型乳化液体系,因此在制备过程中添加吐温、司盘等表面活性剂可提高乳化液的稳定性^[44]。

乳化法适合于工业化的生产且制备的益生菌存

活率较高,可通过控制搅拌速度生产更小的尺径。但该方法制备的微胶囊粒径大小分布较广,通常处于 1~100 μm 之间,而且微胶囊的尺寸分布不均以及形状不易控制。除此之外,生产过程中的剧烈搅拌也不利于益生菌存活,并且该方法由于需要大量植物油使得生产成本增加,且油相的引入对微胶囊的味道也会产生影响,以及油相介质的灭菌和去除问题也无法得到有效解决,从而增加生产工艺的负担^[23]。为此,研究人员利用明胶和羧甲基纤维素钠两个水相溶液制备 W/W 型(水包水型)的乳化液,其不含表面活性剂和油相,且在不同浓度和温度下可形成 W/W 型乳化液,将鼠李糖乳酪杆菌包埋后得到的微胶囊在模拟胃肠液里消化后仍可保持较高存活率^[24]。

2.3 喷雾干燥法

喷雾干燥法是工业上常用的微胶囊包埋技术,通过将雾化后的液体物料暴露于热风干燥器中进行热交换,以快速除去水分干燥成粉,然后利用离心分离等技术将粉末从气流中分离出来^[45]。其可通过改变益生元的来源、干燥载体基质和生产工艺参数来保持益生菌的高活力状态。该方法由于过程简单、易于操作、成本低廉、加工效率较高、微胶囊尺径可控等特点备益生菌食品开发者的青睐^[46]。此外,干燥后的粉末可延长食品货架期,方便保存,冲泡简单。喷雾干燥法通常在 50~220 $^{\circ}\text{C}$ 的温度条件进行,注入干热空气后,使液体物料在高速状态下雾化成 10~200 μm 的细小颗粒^[47]。制备过程的温度对于益生菌的存活至关重要,低温降低水分的蒸发效率造成颗粒物聚集,高温破坏细胞膜降低益生菌存活能力^[48]。一般来说,喷雾干燥过程中益生菌的损伤主要受到出口温度的影响,而不是进口温度^[49]。此外,除了温度,物料粘度、进料速度、雾化压力等因素也是影响益生菌存活率和包埋率的关键参数^[50]。

目前,淀粉、蛋白质、多糖等食品级大分子物质已应用于喷雾干燥,特别是阿拉伯胶和麦芽糊精^[51]。麦芽糊精由于具有高活化能和防止热应激的功能而广泛适用于喷雾干燥,可以防止菌体细胞膜损伤,在雾化过程减少益生菌的迁移,促进玻璃态形成而延长产品货架期和防止储存过程发生氧化应激^[52]。此外,其他包埋材料也被用于热保护剂,如菊粉、乳清蛋白以及一些多糖物质等,这些壁材具有溶解性好、玻璃化转变温度高、干燥快等特点而满足喷雾干燥法的工艺需求^[25]。另外,研究发现不同包埋材料在喷雾干燥过程中对益生菌包埋率影响差异较小,而在消化和储藏阶段对菌株存活率影响较大^[53]。Andrade 等^[26]发现,植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum*) CCMA-0359 和短发酵剂乳杆菌(*Levilactobacillus brevis*) CCMA-1284 在干燥过程中乳清粉和麦芽糊精乳清粉的包埋率均>86%,在模拟胃肠液和储藏实验中两种包埋材料能较好地维持植物乳植杆菌活力,而短乳杆菌只能在乳清粉的包埋下存活。

2.4 冷冻干燥法

冷冻干燥法是低温保护益生菌的常用技术,通过将样品中的游离水在短时间冻结升华制成粉末。在高冻结速率状态下形成小冰晶可有效地减少益生菌细胞因破裂失水而造成细胞失活,从而降低益生菌对温度条件的敏感性,提高益生菌的存活率和储藏稳定性^[54]。相比于其他微胶囊技术,冷冻干燥设备昂贵,操作难度大,维修成本和能源消耗费用较高,而且冻干过程中失水会导致微胶囊表面皱缩和裂纹,呈现不规则的孔隙结构,以及包埋材料和工艺参数也会使其形态结构发生改变,易使氧气进入微胶囊内部而降低益生菌的存活率^[55]。

通常用于冷冻干燥法的包埋材料是高分子聚合物,但其由于快速干燥而阻止内部蒸汽释放,导致载体基质中气泡的形成,使内部空间产生诸多凹坑。海藻酸盐、黄原胶、卡拉胶等一些多糖物质可与脂质脂肪膜上的极性基团形成氢键以防止脱水过程细胞的损伤^[27]。而且壁材不同,呈现的形态外貌各不相同,微胶囊通常为球形,但有时也会出现椭圆形。相比于椭圆形微胶囊,球形微胶囊与空气的接触面积较小,能够降低储藏过程中氧气的氧化侵害^[56]。Chen 等^[28]发现在冻干过程中仅使用乳蛋白单壁材对益生菌的保护作用极其微小,但添加冻干保护剂后可明显提高保加利亚乳杆菌的存活率,这是由于冻干保护剂表面所带的羟基与乳蛋白上的极性分子或氢键相互作用后形成稳定结构^[57],从而减少冰结晶、膜破裂和氧化应激等外界因素对细胞的威胁^[58]。

2.5 其他方法

喷雾冷却法是类似喷雾干燥法的一种相对较新的益生菌包埋方法。将含有益生菌的溶液通过喷嘴雾化,形成的液滴与低于载体材料熔点的冷冻空气(如液氮中)接触,进而转化为固体颗粒物。该方法使用脂类物质进行包埋,当温度达到载体材料熔点时,在肠道脂肪酶的作用下将其消化而释放芯材。此外,该方法可控制微胶囊的尺径,成本低廉,产量较高,然而该方法包埋效率较低,易使益生菌暴露于外部环境^[29]。

复凝聚法是由两种或两种以上带相反电荷的生物聚合物之间的静电相互作用而形成可溶性复合物的方法。该方法通常使用牛奶蛋白或明胶作为阳离子,多糖物质作为阴离子,从而水凝胶所带电荷相反而发生凝聚反应^[30]。然而,凝聚过程易受到 pH、离子强度、聚合物浓度、生物聚合物的比例、生物聚合物的分子量、温度和均质化程度等因素的影响。此方法拥有较高的包埋效率、高通量容量和微胶囊的控释特性,但工艺较为复杂、价格昂贵且难以扩大规模^[31]。

静电纺丝和电喷雾是一种电流体动力学技术^[59],其基本原理是利用静电力使聚合物溶液在高压状态下带有自由电荷,当带电聚合物溶液射流趋向接地的

收集器时,溶剂蒸发使得液滴发生收缩和固化,从而固体聚合物沉积于收集器中。静电纺丝和电喷雾两者之间的区别在于聚合物壁材中分子的聚合程度,而控制该参数的基本方法是改变聚合物溶液浓度。聚合物溶液浓度较高时射流稳定可形成微米或纳米纤维(静电纺丝),溶液浓度较低时射流不稳定形成细小的微粒(电喷雾)。这两种方法的壁材均易溶于水或乙醇,作为食品中的载体,通常以蛋白质和碳水化合物等天然聚合物为主,如乳清蛋白、玉米醇溶蛋白、酪蛋白、淀粉、纤维素等^[32-33]。静电纺丝和电喷雾均方便快捷、经济高效且适应性强,强电场的应用也不会对益生菌产生较大伤害,而且两种方法都可在温和条件下表现出较高的包埋效率^[34]。

撞击气溶胶法是新型的微胶囊包埋方法,其使用两种单独的气溶胶,一种是海藻酸盐溶液和菌悬液的混合物,另一种是氯化钙溶液,通过双流体喷嘴将海藻酸盐菌悬液混合物和氯化钙溶液分别注入容器顶部和底部,在加压气体的推动下,通过金属钙离子与海藻酸盐发生的交联反应,生产平均直径小于 40 μm 的水不溶性的海藻酸盐微凝珠,从容器底部的出口收集包埋益生菌的海藻酸盐微凝胶颗粒。该方法具有连续生产、产量更高、产品粒径小等特点,适用于包埋微生物等热敏性物质^[35]。

3 在食品中的应用与挑战

健康饮食已成为现代生活方式的主流,益生菌潜在的健康益处使得益生菌补充剂和食品在过去几年得到迅猛发展。2019 年全球益生菌的市场估值为 488.8 亿美元,预计 2026 年将达到 944.8 亿美元^[60]。传统乳制品是食品中常用于携带益生菌的一种天然载体,所含的乳糖可为益生菌提供储存和生长过程中必需的营养物质^[61]。近年来益生菌在肉制品、非乳饮料、焙烤制品等非乳制品中的应用(图 1)也越来越受到关注。表 2 总结了近年来益生菌微胶囊在食品中的应用。

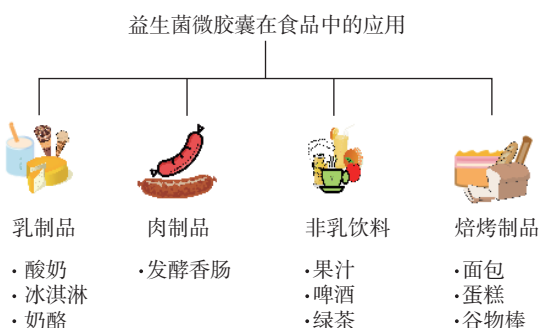


图 1 益生菌微胶囊在食品中的应用
Fig.1 Application of probiotic microcapsules in food

3.1 乳制品

乳制品因其营养丰富等特点吸引了众多生产商将其作为理想载体物质进行益生菌的递送^[62]。随着时间的延长,营养物质耗尽、菌株产酸等原因使得发酵后的乳制品发生活菌数下降和后酸化等现象。为

表 2 益生菌微胶囊在食品中的应用
Table 2 Application of probiotic microcapsules in food

菌种	菌株	微胶囊技术	包埋材料	包埋率	食品基质	参考
动物双歧杆菌乳亚种	Bb-12	挤压法	海藻酸钠、菊粉	91.00%	酸羊奶	[64]
		喷雾干燥法	海藻酸钠、黄原胶、 β -环糊精	95.00%	意大利腊肠	[73]
		乳化法	脱脂乳粉、大豆卵磷脂	-	草莓苹果混合汁、菠萝汁	[84]
嗜酸乳杆菌	ATCC-4356	挤压法	乳清蛋白、黄原胶	99.80%	酸奶	[65]
	LA02-ID-1688	挤压法	海藻酸钠、卡拉胶	98.00%	冰激淋	[66]
		挤压法	海藻酸钙	89.40%	巧克力谷物棒	[92]
	LA-5	乳化法	海藻酸钠、鱼明胶	-	面包	[94]
		撞击气溶胶法	海藻酸钠	-	低脂奶油干酪	[67]
鼠李糖乳酪杆菌	ATCC-53103	喷雾干燥法	分离乳清蛋白、Huaazontle改性淀粉	-	即饮绿茶	[81]
	GG	乳化法	海藻酸钠	-	苹果汁	[83]
	GG	电喷雾法	海藻酸钠、二氧化硅	-	啤酒	[86]
植物乳植杆菌	ATCC-8014	复凝聚法	乳清蛋白和阿拉伯胶	95.80%	白奶酪	[68]
	BG-112	喷雾干燥法	丙烯酸酯S100	80.60%	意大利腊肠	[74]
		乳化法	海藻酸钠	-	干发酵香肠	[75]
副干酪乳酪杆菌	6062	乳化法	海藻酸钠	-	酸奶	[69]
罗伊氏粘液乳杆菌		挤压法、乳化法	海藻酸钠	-	发酵香肠	[76]
格氏乳杆菌	ATCC-19992	乳化法	海藻酸钠	-	苹果汁	[82]
乳酸乳球菌	ABRIINW-N19	挤压法	海藻酸钠、低聚果糖、菊粉	98.40%	橙汁	[85]
戊糖片球菌	ARGMG-12	挤压法	海藻酸钠	-	气泡橙汁	[88]
干酪乳酪杆菌	ATCC-39392	乳化法	海藻酸钠、抗性淀粉	-	奶油蛋糕	[93]
清酒广布乳杆菌、肠膜明串珠菌		挤压法	海藻酸钠	80.05%	野味香肠	[77]
嗜酸乳杆菌、动物双歧杆菌乳亚种		喷雾冷却法	植物脂肪	-	谷物棒	[91]

此, 研究人员将益生菌微胶囊添加于乳制品中以缓解这些问题产生的不良影响。而将益生菌微胶囊添加到乳制品中改善益生菌存活率、产品风味质地、产品功效价值、产品稳定性是当前人们所面临的主要挑战^[63]。Pradeep 等^[64]在由嗜热链球菌和德氏乳杆菌保加利亚亚种发酵好的酸羊奶中添加由挤压法制备的海藻酸钠与菊粉复合材料包埋的动物双歧杆菌乳亚种 Bb-12 微胶囊, 其初始活菌数为 9 lg CFU/g, 且包埋率高于 87%。经过 28 d 4 ℃ 储藏后, 添加游离菌的酸奶活菌数为 5.33 lg CFU/g, 包埋后的活菌数仍可达到 8 lg CFU/g, 满足益生菌摄入量的推荐水平, 而包埋对酸奶的后酸化程度影响较小, 与添加游离菌的酸奶相比, 添加微胶囊的酸奶在储藏期间的 pH 仅比其高 0.1。

Khorshidi 等^[65]研究了益生菌微胶囊对于传统酸奶的理化特性的影响, 研究表明挤压法包埋后的嗜酸乳杆菌与传统发酵剂(嗜热链球菌和德氏乳杆菌保加利亚亚种)联合使用可提高酸奶的粘性, 而且在初始活菌数都为 8.79 lg CFU/g 的情况下, 相比于游离菌(5.16 lg CFU/g), 微胶囊中的嗜酸乳杆菌在 4 ℃ 下储藏 28 d 仍能维持 6.98 lg CFU/g 的活菌数。另外, Afzaal 等^[66]以海藻酸钠和卡拉胶为壁材, 生产游离和挤压法包埋的嗜酸乳杆菌 ATCC-4356 冰激淋, 在 -20 ℃ 条件下储藏 120 d, 包埋后的活菌数(海藻酸钠和卡拉胶中的分别为 8.74 lg CFU/g 和 8.39 lg CFU/g)显著高于游离菌(6.12 lg CFU/g)。益生菌微胶囊的添加也使得冰激淋在储藏期间的粘性增加, 而在颜色

外观、风味质地和整体接受度上均无显著差异。Ningtyas 等^[67]利用撞击气溶胶法将鼠李糖乳酪杆菌包埋于海藻酸钠微凝胶, 其初始活菌数为 7.50 lg CFU/g, 添加到低脂奶油干酪中, 在 4 ℃ 下储藏 5 周后鼠李糖乳酪杆菌的活菌数为 7.11 lg CFU/g, 而未包埋的奶油干酪中的活菌数则从初始活菌数 8.19 lg CFU/g 下降到 7.48 lg CFU/g, 降低幅度高于包埋后的奶油干酪, 且经过包埋后奶油干酪硬度明显增加, 而 pH、水分、脂肪和蛋白质含量均未出现显著变化。

近年来, 合生元的引入使得提升微胶囊中益生菌存活率有了新方法, 旨在利用益生菌与益生元的协同效应提高益生菌的活菌数。例如, Sharifi 等^[68]利用复凝聚法制备了乳清蛋白和阿拉伯胶复合壁材共包埋植物甾醇和植物乳植杆菌 ATCC-8014 的微胶囊, 并将其添加到伊朗白奶酪中, 研究植物乳植杆菌在伊朗白奶酪储藏期间的存活力。与仅包埋植物乳植杆菌的奶酪相比, 储藏 61 d 后共包埋植物甾醇和植物乳植杆菌的奶酪显示出较高的存活率。Li 等^[69]研究发现, 将乳化法制备的副干酪乳酪杆菌 6062 和乳糖醇形成的合生元微胶囊应用于搅拌酸奶, 在 4 ℃ 储藏 21 d 副干酪乳酪杆菌 6062 的活菌数仍可保持 7.69 lg CFU/g, 相比于初始菌降低了 0.59 lg CFU/g, 此外, 微胶囊的引入也缓解了酸奶后酸化程度, 使酸奶呈现出组织细腻、表面光滑、质地粘稠的良好特性。目前, 新希望集团有限责任公司已将益生菌微胶囊应用于活润晶球风味发酵乳, 其通过采用双层包埋技术来提高益生菌的存活率。总之, 目前益生菌微胶

囊在乳制品中的应用展现出良好的应用趋势,但对于市场化的大量推广仍需进一步研究。

3.2 肉制品

肉制品是日常生活中必不可少的产品之一,含有较高生物价的蛋白质和必需的微量营养素,但又容易引发健康障碍的饱和脂肪酸等。近年来人们过度消费肉制品导致一系列疾病发生,如心血管疾病、II型糖尿病和癌症等^[70],从而促使众多研究人员开发富含益生菌的肉制品,以降低该产品引发疾病的风险。由于肉类基质和脂肪的包裹,肉制品可以作为递送益生菌的良好载体,保护益生菌免受胃液中的H⁺和肠液中的胆汁盐与消化酶的损伤^[71]。

肉制品通常需要经过高温杀菌加工处理,且生产中使用的高浓度盐等物料影响益生菌的生物活性,不利于益生菌在肉制品中的应用^[72]。目前,益生菌在肉制品中的应用主要体现在发酵香肠的研究。发酵香肠无需经过热加工就能食用,可保证摄入益生菌的存活率。Gomes等^[73]研究了含有益生菌动物双歧杆菌乳亚种 Bb-12 微胶囊的意大利腊肠,结果表明,含有益生菌微胶囊和腌制盐的腊肠与仅含有腌制盐的腊肠在质量和感官特性方面均无差异,且包埋后的动物双歧杆菌乳亚种 Bb-12 存活率不受腌制盐浓度的影响,这表明益生菌微胶囊可作为一种益生菌补充剂添加于肉制品。另有研究表明,在意大利腊肠的生产过程中,利用喷雾干燥法使丙烯酸酯 S100 对植物乳植杆菌 BG-112 进行包埋,将其添加于腊肠中发现微胶囊能提高菌株在高温环境下的稳定性^[74]。

此外,Pasqualin等^[75]对于发酵香肠中添加乳化法包埋的植物乳植杆菌进行研究,发现经过60 d储藏,相比于发酵香肠中添加的游离菌(8.02 lg CFU/g),发酵香肠中海藻酸钠包埋后的植物乳植杆菌活菌数(8.34 lg CFU/g)更高,且含微胶囊的发酵香肠(0.602 mg MDA/kg)的脂质氧化程度(MDA,丙二醛)较含游离菌发酵香肠(0.625 mg MDA/kg)的脂质氧化程度更低。另外,Muthukumarasamy等^[76]利用挤压法和乳化法将罗伊氏粘液乳杆菌包埋于海藻酸钠微凝胶,并将制备好的凝胶珠加入到发酵肉制品中,研究发现微胶囊可提高发酵香肠中罗伊氏粘液乳杆菌的存活率,且在感官品质方面也未出现明显改变。然而,Mrkonjic等^[77]在野味香肠中添加挤压法制备的包埋于海藻酸钠的天然发酵剂(清酒广布乳杆菌和肠膜明串珠菌),包埋后的天然发酵剂活力和香肠质量并没有得到改善。因此,益生菌微胶囊在肉制品中的应用仍具有一定局限性。

3.3 非乳饮料

天然果汁富含多种营养成分,其经益生菌发酵后可产生多种对人体健康有益的活性代谢产物和芳香物质^[78]。近年来,众多研究人员将益生菌添加于果汁饮料,以开发新型方便快捷的果汁饮品来满足不同人群的消费需求^[79]。目前,益生菌在饮料中的开发主

要受三个方面的影响,一是益生菌本身对环境温度的敏感性;二是饮料中的低 pH 会对益生菌造成损伤;三是基质的选择也是影响益生菌存活率的重要因素,从而使得益生菌产品表现出货架期短、稳定性差等特点^[80]。

Barrueta等^[81]利用喷雾干燥法将鼠李糖乳酪杆菌 ATCC-53103 与绿茶提取物共包埋制备即饮益生菌绿茶饮料,在4℃储藏35 d后活菌数含量仍可高于7 lg CFU/g,较初始活菌数下降了2 lg CFU/g。此外,Varela等^[82]将利用乳化法制备的海藻酸钠格氏乳杆菌 ATCC-19992 微胶囊应用于苹果汁中,将苹果汁在4℃下储藏28 d后,苹果汁中经包埋后的益生菌活菌数显著高于游离菌的活菌数。Romero等^[83]也用相同的方法和基质证实了微胶囊技术对鼠李糖乳酪杆菌 GG 的保护作用。另外,果汁类型也是影响益生菌稳定性的关键因素,小型浆果 pH 较低,影响益生菌存活。Sarka等^[84]发现,将游离态和乳化法包埋后的动物双歧杆菌乳亚种 Bb-12 加入到菠萝汁中,然后在22℃下储藏28 d后两者均可保持较高的活力,并且菠萝汁中加入微胶囊并不会改变原有的果汁口感,但是在草莓苹果混合汁中储藏14 d时游离态和乳化法包埋后的动物双歧杆菌乳亚种 Bb-12 均出现死亡现象。此外,Nami等^[85]为了提高益生菌在橙汁中的存活率,将挤压法制备的包埋于海藻酸盐、低聚果糖和菊粉的益生菌微胶囊添加于橙汁中,在4℃下储藏42 d后发现,菊粉等益生元的引入可提高乳酸乳球菌 ABRIINW-N19 在橙汁中的存活能力。

啤酒和气泡果汁作为时尚饮品深受消费者喜爱,将益生菌与其结合已成为一种新兴趋势,益生菌微胶囊的引入有助于减少产品中酒精和气泡对益生菌的损伤,从而保护益生菌维持较高活力。Haffner等^[86]研究发现,在5 vol% 啤酒中加入电喷雾制备的鼠李糖乳酪杆菌 GG 的海藻酸盐/二氧化硅微凝胶珠,在4℃储藏7 d后酒精未对益生菌造成严重损伤,活菌数仅从初始的6.71 lg CFU/g 降低至5.86 lg CFU/g。但是,产品中的活菌数并不能满足益生菌对宿主发挥有益功效的最低摄入量(6 lg CFU/g)^[87],而通过提高食品基质中菌株的初始活菌数含量是一种达到目标数量的有效方法。Tanganurat^[88]发现将挤压法制备的初始菌数为11.38 lg CFU/g 的戊糖片球菌 ARGMG-12 微胶囊添加于气泡橙汁中,在保质期14 d内活菌数仍可高达8 lg CFU/g,满足推荐的益生菌最低摄入量要求。

3.4 焙烤制品

益生菌与焙烤制品的巧妙结合是一种新奇的食品开发方法。谷物作为焙烤制品中的常用基料含有诸多营养价值和功效,其可降低心血管疾病、糖尿病等非传染性疾病,但谷物中的一些抗营养因子不利于人体消化吸收,而益生菌可通过发酵谷物来降低抗营

养因子的含量,从而促进机体对谷物中的营养物质进行消化和吸收^[89]。但是,焙烤食品通常处于 200 ℃ 左右的高温环境,益生菌在此温度条件下难以存活,因此研究人员采取微胶囊技术对益生菌进行保护,可有效提高益生菌在焙烤食品中的存活率^[90]。

Bampi 等^[91]开发了一种由喷雾冷却法生产的植物脂肪包埋嗜酸乳杆菌和动物双歧杆菌乳亚种的谷物棒,经过包埋处理后的益生菌在 25 ℃ 条件下储藏 30 d,活菌数满足益生菌的最低摄入量要求,在感官接受度上与传统谷物棒也无明显差异。为延长益生菌谷物棒的保存日期,Lasta 等^[92]将挤压法制备的嗜酸乳杆菌 LA02-ID-1688 海藻酸钙凝胶珠与巧克力液混合后涂抹于谷物棒表层,经过 25 ℃ 下 120 d 储藏仍可维持 90% 的存活率,在 75 ℃ 烘烤 10 min 后嗜酸乳杆菌活菌数(4.52 lg CFU/g)显著低于 55 ℃ 烘烤 10 min 后的活菌数(13.13 lg CFU/g),但均高于游离菌的活菌数(4.38 lg CFU/g)。

Zanjani 等^[93]将乳化法制备的干酪乳酪杆菌 ATCC-39392 海藻酸钠/抗性淀粉微胶囊添加到奶油蛋糕中,在 25 ℃ 条件下储藏 28 d 仍具有较高的活菌数(>7 lg CFU/g)。此外,Hadidi 等^[94]利用乳化法将嗜酸乳杆菌 LA-5 包埋于海藻酸钠水凝胶,然后将其置于不同浓度的鱼明胶溶液(0.5%、1.5%、3.0%)进行涂膜处理后将添加于面包,在 175 ℃ 下烘烤 6 min,活菌数均低于 6 lg CFU/g。由于面包中营养物质丰富,在室温储藏过程中活菌数出现增长现象。储藏 7 d 后,含有 1.5% 和 3.0% 浓度鱼明胶的微胶囊中活菌数分别为 7.82 lg CFU/g 和 7.66 lg CFU/g,显著高于 0.5% 浓度鱼明胶的微胶囊活菌数(5.57 lg CFU/g)。综上,经微胶囊处理后益生菌存活率得到明显改善,这表明微胶囊可以作为焙烤食品中引入益生菌的一种良好策略,而微胶囊的水分活度等因素会对焙烤制品的口感存在一定影响^[95],因此实际应用仍需深入研究。

4 总结与展望

益生菌具有诸多益生功效,但极端条件易造成益生菌损伤甚至失活。益生菌微胶囊技术可保护益生菌在制备、储存和胃肠道消化过程中维持高存活率。目前,不同的益生菌微胶囊技术已应用于益生菌的包埋,并且也表现出良好的稳定性和感官特性。然而,益生菌微胶囊技术并不能确保益生菌在所有情况下均能保持最佳活性,因此仍需继续深入研究才能实现其在食品中的良好应用。此外,由于一些益生菌包埋方法耗费的成本较高,而只有将成本降到可接受的范围才会让益生菌微胶囊产品在全球化市场中保持竞争力,因此在益生菌微胶囊产品的工业化生产中也应关注产品的成本效益和益生菌在保质期内的存活率。总之,益生菌微胶囊在食品中的应用仍处于发展阶段。在未来的研究中应扩大现有的包埋方法,逐步开展体内实验,以及在后期的研究中可以根据不同的因素建立系统性的数据库,进而指导科研人员设计最

佳的益生菌微胶囊产品。

参考文献

- [1] ZHANG X, WANG X Z, ZHANG P. Probiotics regulate gut microbiota: An effective method to improve immunity[J]. *Molecules*, 2021, 26(19): 6076.
- [2] 阿热爱·巴合提, 谭春明, 李平兰. 益生菌的分类及其多领域应用研究现状[J]. *生物加工过程*, 2022, 20(1): 88–94. [AREAI B, TAN C M, LI P L. Classification of probiotic bacteria and their current research status in multiple fields of application[J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2022, 20(1): 88–94.]
- [3] SHARMA R, MOKHTARI S, JAFARI S M, et al. Barley-based probiotic food mixture: Health effects and future prospects[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 1: 104287.
- [4] SIPAILIENE A, PETRAITRAITYTE S. Encapsulation of probiotics: Proper selection of the probiotic strain and the influence of encapsulation technology and materials on the viability of encapsulated microorganisms[J]. *Probiotics & Antimicrobial Proteins*, 2018, 10: 1–10.
- [5] WANG Y, JIANG Y, DENG Y, et al. Probiotic supplements: Hope or hype?[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 160.
- [6] FRAKOLAKI G, KATSOULI M, GIANNOU V, et al. Novel encapsulation approach for *Bifidobacterium subsp. lactis* (BB-12) viability enhancement through its incorporation into a double emulsion prior to the extrusion process[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 130: 109671.
- [7] ZHU Y, WANG Z, BAI L, et al. Biomaterial-based encapsulated probiotics for biomedical applications: Current status and future perspectives[J]. *Materials & Design*, 2021, 210: 110018.
- [8] BARAJAS A P, GONZALEZ A M, ESPINOSA A H. Recent advances in probiotic encapsulation to improve viability under storage and gastrointestinal conditions and their impact on functional food formulation[J]. *Food Reviews International*, 2021: 1–22.
- [9] MITROPOULOU G, NEDOVIC V, GOYAL A, et al. Immobilization technologies in probiotic food production[J]. *Journal of Nutrition and Metabolism*, 2013, 2013: 716861.
- [10] International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP). Probiotics[EB/OL]. (2020)[2022]. <https://isappscience.org/for-scientists/resources/probiotics/>.
- [11] 罗洒, 赵炜, 李诗瑶, 等. 快速发展多元化的益生菌市场[J]. *食品科技*, 2021, 46(8): 38–45. [LUO S, ZHAO W, LI S Y, et al. Rapid development of a diversified probiotic market[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 46(8): 38–45.]
- [12] 林炫财, 林杨凡, 何璇昱, 等. 益生菌在胃肠道疾病中的应用[J]. *现代消化及介入诊疗*, 2021, 26(5): 643–646. [LIN X C, LIN Y F, HE X Y, et al. Application of probiotics in gastrointestinal diseases[J]. *Modern Digestion & Intervention*, 2021, 26(5): 643–646.]
- [13] LIU Q, YU Z, TIAN F, et al. Surface components and metabolites of probiotics for regulation of intestinal epithelial barrier[J]. *Microbial Cell Factories*, 2020, 19(1): 23.
- [14] LIU G, HUANG Y, REIS F S, et al. Impact of nutritional and environmental factors on inflammation, oxidative stress, and the microbiome[J]. *Biomed Research International*, 2019, 2019: 5716241.
- [15] GOMEZ M L G, MORFIN R C, PEREZ M R, et al. Optimization of electrospraying conditions for the microencapsulation of probiotics and evaluation of their resistance during storage and in-

- vitro* digestion[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 69: 438–446.
- [16] HII Y S, LAW M C, SAN C Y. Experimental and numerical study of the impinging aerosols method for the micro-encapsulation of phosphate solubilising microorganisms (PSMs)[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 174: 108118.
- [17] PRASANNA P H P, CHARALAMPOPOULOS D. Encapsulation of *Bifidobacterium longum* in alginate-dairy matrices and survival in simulated gastrointestinal conditions, refrigeration, cow milk and goat milk[J]. *Food Bioscience*, 2018, 21: 72–79.
- [18] QI X, SIMSEK S, OHM J B, et al. Viability of *Lactobacillus rhamnosus* GG microencapsulated in alginate/chitosan hydrogel particles during storage and simulated gastrointestinal digestion: Role of chitosan molecular weight[J]. *Soft Matter*, 2020, 16(7): 1877–1887.
- [19] AZAM M, SAEED M, AHMAD T, et al. Characterization of biopolymeric encapsulation system for improved survival of *Lactobacillus brevis*[J]. *Food Measure*, 2022, 16: 2292–2299.
- [20] GANDOMI H, ABBASZADEH S, MISAGHI A, et al. Effect of chitosan-alginate encapsulation with inulin on survival of *Lactobacillus rhamnosus* GG during apple juice storage and under simulated gastrointestinal conditions[J]. LWT-Food Science & Technology, 2016, 69: 365–371.
- [21] TA L P, BUJNA E, ANTAL O, et al. Effects of various polysaccharides (alginate, carrageenan, gums, chitosan) and their combination with prebiotic saccharides (resistant starch, lactosucrose, lactulose) on the encapsulation of probiotic bacteria *Lactobacillus casei* 01 strain[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 1136–1144.
- [22] OBEROI K, TOLUN A, ALTINTAS Z, et al. Effect of alginate-microencapsulated hydrogels on the survival of *Lactobacillus rhamnosus* under simulated gastrointestinal conditions[J]. *Foods*, 2021, 10(9): 1999.
- [23] SINGH P, MEDRONHO B, MIGUEL M G, et al. On the encapsulation and viability of probiotic bacteria in edible carboxymethyl cellulose-gelatin water-in-water emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 41–50.
- [24] SILVA M, CHANDRAPALA J. Ultrasonic emulsification of milk proteins stabilized primary and double emulsions: A review[J]. *Food Reviews International*, 2021, 37(6): 1–23.
- [25] VIVEK K, MISHRA S, PRADHAN R C. Characterization of spray dried probiotic Sohiong fruit powder with *Lactobacillus plantarum*[J]. LWT-Food Science & Technology, 2020, 117: 108699.
- [26] ANDRADE D P, RAMOS C L, BOTREL D A, et al. Stability of microencapsulated lactic acid bacteria under acidic and bile juice conditions[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54: 2355–2362.
- [27] MIRTIC J, RIJAVEC T, ZUPANCIC S, et al. Development of probiotic-loaded microcapsules for local delivery: Physical properties, cell release and growth[J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2018, 121: 178–187.
- [28] CHEN H Y, LI X Y, LIU B J, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus bulgaricus* and survival assays under simulated gastrointestinal conditions[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 29: 248–255.
- [29] ARSLAN T S, ERBAS M. Single and double layered microencapsulation of probiotics by spray drying and spray chilling[J]. LWT-Food Science & Technology, 2017, 81: 160–169.
- [30] BOSNEA L A, MOSCHAKIS T, NIGAM P S, et al. Growth adaptation of probiotics in biopolymer-based coacervate structures to enhance cell viability[J]. LWT-Food Science & Technology, 2017, 77: 282–289.
- [31] ERATTE D, DOWLING K, BARROW C J, et al. Recent advances in the microencapsulation of omega-3 oil and probiotic bacteria through complex coacervation: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 121–131.
- [32] ZHANG Y, LI B, HAN L. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* KLDS 1.0391 by electrostatic spray increases viability after *in vitro* digestibility[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(2): e12416.
- [33] MOJAVERI S J, HOSSEINI S F, GHARSALLAOUI A. Viability improvement of *Bifidobacterium animalis* Bb12 by encapsulation in chitosan/poly(vinyl alcohol) hybrid electrospun fiber mats[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116278.
- [34] GHORANI B, TUCKER N. Fundamentals of electrospinning as a novel delivery vehicle for bioactive compounds in food nanotechnology[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 227–240.
- [35] SOHAIL A, TURNER M S, COOMBES A, et al. Survivability of probiotics encapsulated in alginate gel microbeads using a novel impinging aerosols method[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2011, 145(1): 162–168.
- [36] BENNACEF C, DESOBRY B S, PROBST L, et al. Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106782.
- [37] SANTOS M A S, MACHADO M T C. Coated alginate-chitosan particles to improve the stability of probiotic yeast[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(5): 2122–2131.
- [38] QAZIYANI S D, POURFARZAD A, GHEIBI S, et al. Effect of encapsulation and wall material on the probiotic survival and physicochemical properties of synbiotic chewing gum: Study with univariate and multivariate analyses[J]. *Heliyon*, 2019, 5(7): e02144.
- [39] 蔡文静, 孙嘉蕾, 韩雪. 益生菌微胶囊的研究进展[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 36–42. [CAI W J, SUN J L, HAN X. Research progress of probiotic microcapsules[J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 36–42.]
- [40] FANGMEIER M, LEHN D N, MACIEL M J, et al. Encapsulation of bioactive ingredients by extrusion with vibrating technology: Advantages and challenges[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(9): 1472–1486.
- [41] FRAKOLAKI G, GIANNOU V, KEKOS D, et al. A review of the microencapsulation techniques for the incorporation of probiotic bacteria in functional foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 61(9): 1515–1536.
- [42] LOYEAU P A, SPOTTI M J, VINDEROLA G, et al. Encapsulation of potential probiotic and canola oil through emulsification and ionotropic gelation, using protein/polysaccharides Maillard conjugates as emulsifiers[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 150: 111980.
- [43] MARTINS E, PONCELET D, RODRIGUES R C, et al. Oil

- encapsulation in core-shell alginate capsules by inverse gelation II: comparison between dripping techniques using W/O or O/W emulsions[J]. *Journal of Microencapsulation*, 2017, 34(6): 522–534.
- [44] 蒋苏颖, 杨亚强, 黄叶, 等. 植物乳杆菌 CICC 20270 微胶囊的制备及其特性[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(21): 29–34.
- [JIANG S Y, YANG Y Q, HUANG Y, et al. Preparation and properties of microcapsules of *Lactobacillus plantarum* CICC 20270[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(21): 29–34.]
- [45] MIS S K, JIANG N, YUAN M, et al. The effect of the ultra-high-pressure homogenization of protein encapsulants on the survivability of probiotic cultures after spray drying[J]. *Foods*, 2019, 8(12): 689.
- [46] 陶菊, 侯丹平, 尹肖寒, 等. 喷雾干燥技术在益生菌微胶囊制品中的应用研究进展[J]. *食品工业*, 2019, 40(4): 271–275.
- [TAO W, HOU D P, YIN X H, et al. Research progress in the application of spray drying technology in probiotic microencapsulated products[J]. *The Food Industry*, 2019, 40(4): 271–275.]
- [47] RAJAM R, SUBRAMANIAN P. Encapsulation of probiotics: Past, present and future[J]. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 2022, 11: 46.
- [48] FARAHMANDI K, RAJAB S, TABANDEH F, et al. Efficient spray-drying of *Lactobacillus rhamnosus* PTCC 1637 using total CFU yield as the decision factor[J]. *Food Bioscience*, 2020, 40: 100816.
- [49] AREPALLY D, GOSWAMI T K. Effect of inlet air temperature and gum Arabic concentration on encapsulation of probiotics by spray drying[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2019, 99: 583–593.
- [50] XAVIER D S D, CASAZZA A A, ALIAKBARIANI B, et al. Improved probiotic survival to *in vitro* gastrointestinal stress in a mousse containing *Lactobacillus acidophilus* La-5 microencapsulated with inulin by spray drying[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2019, 99: 404–410.
- [51] LEYLAK C, OZDEMIR K S, GURAKAN G C, et al. Optimisation of spray drying parameters for *Lactobacillus acidophilus* encapsulation in whey and gum arabic: Its application in yoghurt[J]. *International Dairy Journal*, 2021, 112: 104865.
- [52] VANISKI R, SILVA S C, SILVA B R A, et al. Improvement of *Lactobacillus acidophilus* La-5 microencapsulation viability by spray-drying with rice bran protein and maltodextrin[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(4): e15364.
- [53] BARRO N P R, SILVA L M D, HASSEMER G D S, et al. Microencapsulation of probiotic *Lactobacillus helveticus* with different wall materials by spray drying[J]. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2021, 11(4): 11221–11232.
- [54] 陈胜杰, 高翔, 袁戎宇. 真空冷冻干燥法制备益生菌粉的冻干保护剂配方优化[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 182–187.
- [CHEN S J, GAO X, YUAN R Y. Optimization of lyophilized protective agent formulation for the preparation of probiotic powder by vacuum freeze-drying method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(1): 182–187.]
- [55] BETORET E, BETORET N, CALABUIG J L, et al. Effect of drying process, encapsulation, and storage on the survival rates and gastrointestinal resistance of *L. salivarius* spp. *salivarius* included into a fruit matrix[J]. *Microorganisms*, 2020, 8: 654.
- [56] MOTALEBI M Z, REZAZADEH B M, ALIZADEH K M, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* LA-5 and *Bifidobacterium animalis* BB-12 in pectin and sodium alginate: A comparative study on viability, stability, and structure[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(9): 5103–5111.
- [57] PREMJI Y, MITRA J. Optimization of electrospray-assisted microencapsulation of probiotics (*Leuconostoc lactis*) in soy protein isolate-oil particles using Box-Behnken experimental design[J]. *Food Bioprocess Technology*, 2021, 14: 1712–1729.
- [58] 王丽红, 杨辉, 孔阳, 等. 3 种益生菌转化纳米冻干菌粉工艺研究与形态表征[J]. *食品科技*, 2020, 45(4): 1–6.
- [WANG L H, YANG H, KONG Y, et al. Process study and morphological characterization of three probiotic transformed nanoselenium lyophilized bacterial powder[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(4): 1–6.]
- [59] 刘畅, 张心明. 电流体动力学应用进展[J]. *工业技术创新*, 2016, 3(5): 1047–1051.
- [LIU C, ZHANG X M. Advances in electrohydrodynamic applications[J]. *Industrial Technology Innovation*, 2016, 3(5): 1047–1051.]
- [60] FUSCO V, FANELLI F, CHIEFFI D. Authenticity of probiotic foods and dietary supplements: A pivotal issue to address[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 12: 1–18.
- [61] 章志超, 吴鑫. 益生菌的功能特性及其在乳制品中的应用[J]. *现代食品*, 2018, 3: 7–10.
- [ZHANG Z C, WU X. Functional properties of probiotics and their applications in dairy products[J]. *Modern Food*, 2018, 3: 7–10.]
- [62] CASSANI L, GOMEZ Z A, SIMAL G J. Technological strategies ensuring the safe arrival of beneficial microorganisms to the gut: From food processing and storage to their passage through the gastrointestinal tract[J]. *Food Research International*, 2020, 129: 108852.
- [63] MALEKI M, ARIANI P, SHARIFI S M. Fortifying of probiotic yogurt with free and microencapsulated extract of *Tragopogon collinus* and its effect on the viability of *Lactobacillus casei* and *Lactobacillus plantarum*[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(7): 3436–3448.
- [64] PRADEEP P P H, CHARALAMPOPOULOS D. Encapsulation in an alginate-goats' milk-inulin matrix improves survival of probiotic *Bifidobacterium* in simulated gastrointestinal conditions and goats' milk yoghurt[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2019, 72(1): 132–141.
- [65] KHORSHIDI M, HESHMATI A, TAHERI M, et al. Effect of whey protein-and xanthan-based coating on the viability of microencapsulated *Lactobacillus acidophilus* and physiochemical, textural, and sensorial properties of yogurt[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(7): 3942–3953.
- [66] AFZAAL M, SAEED F, ARSHAD M U, et al. The effect of encapsulation on the stability of probiotic bacteria in ice cream and simulated gastrointestinal conditions[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2019, 11(4): 1348–1354.
- [67] NINGTYAS D W, BHANDARI B, BANSAL N, et al. The viability of probiotic *Lactobacillus rhamnosus* (non-encapsulated and encapsulated) in functional reduced-fat cream cheese and its textural properties during storage[J]. *Food Control*, 2019, 100: 8–16.
- [68] SHARIFI S, REZAZAD B, ALIZADEH M, et al. Use of

whey protein isolate and gum Arabic for the co-encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* and phytosterols by complex coacervation: Enhanced viability of probiotic in Iranian white cheese[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 113: 106496.

[69] LI H, LIU T, YANG J, et al. Effect of a microencapsulated synbiotic product on microbiology, microstructure, textural and rheological properties of stirred yogurt[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 152: 112302.

[70] KHAN M I, ARSHAD M S, ANJUM F M, et al. Meat as a functional food with special reference to probiotic sausages[J]. *Food Research International*, 2011, 44(10): 3125–3133.

[71] RODRIGUES F J, CEDRAN M F, BICAS J L, et al. Encapsulated probiotic cells: Relevant techniques, natural sources as encapsulating materials and food applications-A narrative review[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109682.

[72] 葛芮瑄, 罗玉龙, 剧柠. 传统发酵肉制品中微生物菌群对风味形成的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(6): 2295–2307.

[GE R X, LUO Y L, JU N. Progress of research on microflora on flavor formation in traditional fermented meat products[J]. *Microbiology China*, 2022, 49(6): 2295–2307.]

[73] GOMES B D O, OLIVEIRA C D M, MARINS A R D, et al. Application of microencapsulated probiotic *Bifidobacterium animalis* ssp. *lactis* BB-12 in Italian salami[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(10): e15841.

[74] MACHADO V L I, SILVA B R A D, KALSCHNE D L, et al. Functional fermented sausages incorporated with microencapsulated *Lactobacillus plantarum* BG 112 in Acrycoat S100[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 148: 111596.

[75] PASQUALIN C C, RUIZ C C, HERRERO A M, et al. Effect of encapsulated *Lactobacillus plantarum* as probiotic on dry - sausages during chilled storage[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(12): 3613–3621.

[76] MUTHUKUMARASAMY P, HOLLEY R A. Microbiological and sensory quality of dry fermented sausages containing alginate-microencapsulated *Lactobacillus reuteri*[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2006, 111(2): 164–169.

[77] MRKONJIC F M, ZGOMBA M A, HULAK N, et al. The survival rate and efficiency of non-encapsulated and encapsulated native starter cultures to improve the quality of artisanal game meat sausages[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2021, 58(2): 710–719.

[78] LI S, TAO Y, LI D, et al. Fermentation of blueberry juices using autochthonous lactic acid bacteria isolated from fruit environment: Fermentation characteristics and evolution of phenolic profiles[J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130090.

[79] ZHANG Y, LIU W, WEI Z, et al. Enhancement of functional characteristics of blueberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 139: 110590.

[80] ROSOLEN M D, BORDINI F W, LUZ G D, et al. Survival of microencapsulated *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* R7 applied in different food matrices[J]. *Applied Biochemistry Biotechnology*, 2022, 194(5): 2135–2150.

[81] BARRUETA T H, BUSTOS F M, TOSTADO E C, et al. Encapsulation of probiotics in whey protein isolate and modified huauzontle's starch: An approach to avoid fermentation and stabilize

polyphenol compounds in a ready-to-drink probiotic green tea[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 124: 109131.

[82] VARELA P A, ROMERO C O O, CASTILLO O A G, et al. Encapsulation of *Lactobacillus gasseri*: Characterization, probiotic survival, *in vitro* evaluation and viability in apple juice[J]. *Foods*, 2022, 11: 740.

[83] ROMERO C O O, VARELA P A, CASTILLO O A G, et al. Encapsulation of *Lactocaseibacillus rhamnosus* GG: Probiotic survival, *in vitro* digestion and viability in apple juice and yogurt[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(4): 2141.

[84] SARKA H, KRISTYNA R, KRISTINA B, et al. Fruit juices with probiotics-New type of functional foods[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2018, 36(4): 284–288.

[85] NAMI Y, LORNEZHAD G, KIANI A, et al. Alginate-persian gum-prebiotics microencapsulation impacts on the survival rate of *Lactococcus lactis* ABRIINW-N19 in orange juice[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2020, 124: 109190.

[86] HAFFNER F B, PASC A. Freeze-dried alginate-silica microparticles as carriers of probiotic bacteria in apple juice and beer[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2018, 91: 175–179.

[87] HOW Y H, LAI K W, PUI L P, et al. Co-extrusion and extrusion microencapsulation: Effect on microencapsulation efficiency, survivability through gastrointestinal digestion and storage[J]. *Food Process Engineering*, 2022, 45(3): e13985.

[88] TANGANURAT P. Probiotics encapsulated fruit juice bubbles as functional food product[J]. *International Journal of GEOMATE*, 2020, 19(72): 145–150.

[89] BUDHWAR S, SETHI K, CHAKRABORTY M. Efficacy of germination and probiotic fermentation on underutilized cereal and millet grains[J]. *Food Production Processing and Nutrition*, 2020, 2(1): 12.

[90] ARSLAN T S, ERBAS M, GORGULU A. The use of probiotic-loaded single and double layered microcapsules in cake production[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2018, 11: 840–849.

[91] BAMPI G B, BACKES G T, CANSIAN R L, et al. Spray chilling microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* and *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* and its use in the preparation of savory probiotic cereal bars[J]. *Food Bioprocess Technology*, 2016, 9: 1422–1428.

[92] LASTA E L, SILVA P R E D, DEKKER R F H, et al. Encapsulation and dispersion of *Lactobacillus acidophilus* in a chocolate coating as a strategy for maintaining cell viability in cereal bars[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 20550.

[93] ZANJANI M A K. Microencapsulation of *Lactobacillus casei* with calcium alginate-resistant starch and evaluation of survival and sensory properties in cream-filled cake[J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, 6(26): 5511–5517.

[94] HADIDI M, MAJIDIYAN N, JELYANI A Z, et al. Alginate/fish gelatin-encapsulated *Lactobacillus acidophilus*: A study on viability and technological quality of bread during baking and storage[J]. *Foods*, 2021, 10(9): 2215.

[95] GHASEMI L, NOURI L, NAFCHI A M, et al. The effects of encapsulated probiotic bacteria on the physicochemical properties, staling, and viability of probiotic bacteria in gluten-free bread[J]. *Journal of Food Process and Preservation*, 2022, 46(3): e16359.