

周烨琳, 郭洪辉, 洪专, 等. 海洋多糖基益生菌微胶囊的制备及应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 351–360. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050111

ZHOU Yelin, GUO Honghui, HONG Zhuan, et al. Research Progress in Preparation and Application of Marine Polysaccharide-based Probiotics Microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 351–360. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050111

· 专题综述 ·

海洋多糖基益生菌微胶囊的制备及应用研究进展

周烨琳^{1,2}, 郭洪辉^{2,3,*}, 洪专^{2,3}, 陈晖^{2,3}, 谢全灵^{2,3}, 张怡评^{2,3}, 张铭恩²

(1.福州大学先进制造学院, 福建泉州 362200;

2.自然资源部第三海洋研究所 海洋生物资源开发利用工程技术创新中心, 福建厦门 361005;

3.厦门海洋职业技术学院海洋生物学院, 福建厦门 361100)

摘要: 益生菌具有多种益生功效, 但在加工、贮存或消化等过程中易受外界不利环境的影响而降低活性, 利用微胶囊技术可以对益生菌起到良好的保护作用, 减少或避免不利环境的影响。海洋多糖作为益生菌微胶囊壁材不仅能够提高益生菌的抗胁迫能力和稳定性, 改善益生菌产品的感官特性, 还能与益生菌产生协同作用增强治疗效果。本文分析了不同来源海洋多糖的种类和特性, 并概述了海洋多糖基益生菌微胶囊的制备方法, 同时阐述了海洋多糖基益生菌微胶囊在食品工业、生物医药、养殖饲料等领域的应用, 以期对益生菌微胶囊的未来研究方向和海洋资源高值化利用提供一些参考。

关键词: 海藻多糖, 海洋动物多糖, 海洋微生物多糖, 微胶囊, 益生菌

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)11-0351-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050111

本文网刊:



Research Progress in Preparation and Application of Marine Polysaccharide-based Probiotics Microcapsules

ZHOU Yelin^{1,2}, GUO Honghui^{2,3,*}, HONG Zhuan^{2,3}, CHEN Hui^{2,3}, XIE Quanling^{2,3},
ZHANG Yiping^{2,3}, ZHANG Mingen²

(1.College of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362200, China;

2.Technology Innovation Center for Exploitation of Marine Biological Resources, Third Institute of Oceanography,
Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China;

3.Xiamen Ocean Vocational College, School of Marine Biology, Xiamen 361100, China)

Abstract: Probiotics have a variety of probiotic effects. However, in the process of processing, storage or digestion, it is easy to reduce its activity due to the influence of external adverse environment. The use of microcapsule technology can play a good role in the protection of probiotics and reduce or avoid the impact of adverse environment. As a wall material of probiotic microcapsules, marine polysaccharides can not only boost the stress resistance and stability of probiotics, improve the sensory characteristics of probiotic products, but also enhance the therapeutic effect with probiotics. This paper analyzes the species and characteristics of marine polysaccharides from different sources. It also summarizes the preparation methods of marine polysaccharide-based probiotic microcapsules, and expounds the application of marine polysaccharide-based probiotic microcapsules in food industry, biomedicine, aquaculture feed and other fields. It is expected to provide some references for the research direction of probiotic microcapsules and the high-value utilization of marine resources.

收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 厦门市自然科学基金面上项目 (3502Z202373077); 福建省科技计划项目 (2023N0037); 厦门南方海洋研究中心项目 (22CZP008HJ10); 厦门市 2022 年公共技术服务项目资助 (3502Z20221036)。

作者简介: 周烨琳 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 海洋生物资源开发利用, E-mail: 463568955@qq.com。

* 通信作者: 郭洪辉 (1982-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 微纳米技术研发与应用及海洋生物资源开发利用, E-mail: hhguo@tio.org.cn。

Key words: seaweed polysaccharides; marine animal polysaccharides; marine microbial polysaccharides; microcapsules; probiotics

益生菌按照世界粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)的定义是指当摄入足够数量时,对宿主产生健康益处的活性微生物,包括乳酸菌、双歧杆菌等^[1-2]。益生菌能够调节机体的微生态平衡,增强对有害微生物的抑制作用,促进营养物质的消化吸收,提高机体的代谢能力。目前标准法规尚未对“足够数量”有统一表述,一般认为摄入的益生菌数量最低需要 10^6 CFU/g 或 10^6 CFU/mL 才能在宿主机体肠道中发挥其益生功能。然而在实际的加工、贮存和消化等过程中,益生菌受自身生存能力以及外界不利环境的影响,往往造成其最终定植于人体肠道中的数量和活性下降甚至消失,难以达到预期效果。微胶囊是指利用天然或合成的高分子材料,将微小体积的固体颗粒、液滴或气体包埋起来,形成粒径为微米级具有半透性或密封性的微型胶囊^[3]。微胶囊技术可以为益生菌提供物理屏障,保护其免受外部环境(如高温、高盐、胃肠环境)的影响,增强其对不利环境的抵抗能力;提高益生菌在加工、贮存和人体消化液中的存活率,更好地定植于人体肠道中发挥益生作用。

微胶囊的壁材种类繁多,一般多为碳水化合物类、蛋白质类、脂质类等^[4],壁材的选择和益生菌自身的特性都会对微胶囊的包埋效果起到决定性影响。随着海洋生物资源的开发利用,海洋多糖越来越受到研究人员的关注。海洋多糖来源广泛,具有毒性低、容易生物降解、生物相容性好等特点,海洋多糖不仅能够调节肠道中菌群的组成,促进胃肠健康,还能提高人体免疫力^[5]。海洋多糖具有特殊的凝胶性、成膜性,可作为微胶囊的一类优良壁材,在食品、医药等行业的研究应用广泛。本文介绍了海洋多糖的种类和特性以及海洋多糖制备益生菌微胶囊的方法,同时概述了海洋多糖基益生菌微胶囊在食品工业、

生物医药、养殖饲料等领域的应用,并对其研究趋势和应用前景进行探讨。

1 海洋多糖壁材的种类与特性

海洋多糖主要来源包括海洋藻类、海洋动物以及海洋微生物。海洋多糖来源丰富、安全无毒、生物相容性好,是最有应用潜力的微胶囊壁材。壁材决定了微胶囊的包埋效率、稳定性以及对芯材的控释能力。适用于微胶囊壁材的海洋多糖需具有适当的机械强度、胶凝性、成膜性、乳化性等功能特性,才能在微胶囊化过程中形成稳定的凝胶网络结构、玻璃态基质或保护膜,以包埋芯材形成胶囊保护屏障^[6-7]。不同来源、种类的海藻多糖结构和功能特性并不相同,选择海洋多糖作为壁材时需要根据其微胶囊化过程和最终产品的性质筛选最适材料。

1.1 海藻多糖壁材

海藻多糖种类繁多,常用于微胶囊壁材的有来源于红藻类的卡拉胶、琼脂、褐藻中的海藻酸钠等。卡拉胶是由 D-半乳糖和 3, 6-内醚-D-半乳糖单元,经 α -1, 3 和 β -1, 4-糖苷键交替连接而成的硫酸化多糖^[8](图 1)。研究^[9-10]认为卡拉胶为热可逆凝胶,在高温下由于相邻链之间的静电斥力而表现出无规卷曲的结构;降温冷却后转变为螺旋结构,同时阳离子的存在会引起卡拉胶分子链之间的分子间相互作用,从而导致双螺旋聚集并形成稳定的三维网络。卡拉胶还具有良好的乳化性,可改善蛋白质界面吸附性能,进一步提高蛋白乳液的稳定性,可利用乳化法将其作为复合壁材制备益生菌微胶囊^[11]。

琼脂是大型红藻类细胞壁的主要成分,为白色或黄色珠状线性多糖生物聚合物,由 D-半乳糖和 3, 6-内醚-L-半乳糖单元交替组成^[12](图 1)。琼脂具有与卡拉胶相似的胶凝性,在适当的外界刺激下,多糖

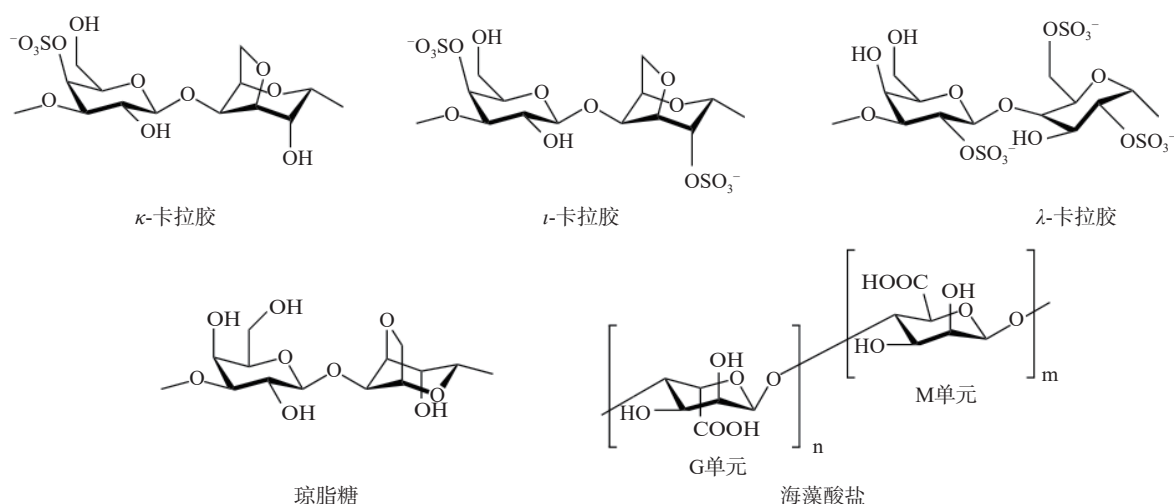


图 1 卡拉胶、琼脂糖和海藻酸盐的主要结构

Fig.1 Main structure of carrageenan, agarose and alginate

分子形成聚集区,组成稳定的三维网络结构^[13],经高压高温处理后,琼脂的双螺旋结构内分子间的氢键增加,凝胶强度可以进一步提高,有利于形成强度高、不易解体的益生菌微胶囊^[14]。

海藻酸钠是由 β -D-甘露糖醛酸(mannuronic, M)和 α -L-古罗糖醛酸(guluronic, G)通过 1 $\rightarrow$ 4 糖苷键连接,并由不同比例的 GG、MM 和 GM 片段共聚而成(图 1)。在制备微胶囊时二价阳离子(例如,钙离子)通过凝胶反应容易与海藻酸钠侧链上的 G-块交联,形成一个热稳定的网络。由于二价阳离子对 G-块具有高亲和力,凝胶的性质在很大程度上取决于 M/G 比和 G-块的长度,因此具有较高 G 含量和较低 M/G 比的海藻酸钠能产生更高凝胶强度的凝胶^[15]。海藻酸钠可通过分子间作用力形成一层薄膜,而且其机械强度、阻隔性、粘聚力等性能都具有明显的优势。此外,海藻酸钠独特的 pH 敏感性,更适用于制备益生菌微胶囊,在低 pH 环境中易形成凝胶阻止水分子进入,在胃液中能起到保护益生菌的作用,随着 pH 升高离子交联破坏,凝胶逐渐溶解,在肠道环境中能够释放益生菌^[16]。

1.2 海洋动物多糖壁材

海洋动物多糖在海洋动物中含量丰富,包括来源于甲壳类动物的壳聚糖、鱼软骨中的硫酸软骨素、鱼皮中的透明质酸等,都可作为益生菌微胶囊的壁材。壳聚糖是甲壳素经脱乙酰化反应得到,由葡萄糖胺和 N-乙酰葡萄糖胺片段通过 β -1,4 糖苷键连接而成的一种多糖(图 2),是一类可生物降解、生物相容性好、生物粘附性好的无毒天然高分子材料^[17]。壳聚糖及其衍生物具有良好的成膜性,与带负电荷的海藻酸钠不同,壳聚糖是唯一的天然阳离子多糖,能与高分子阴离子基团通过较强的离子相互作用形成强聚电解质络合物,提高微胶囊在低 pH 环境的稳定

性,增强其保护作用^[18]。此外,壳聚糖在低 pH 具有较强的抗菌活性,这是由于其氨基上的阳离子电荷密度大,对带负电荷的生物膜有较高的亲和力,大分子多糖附着在生物膜上阻止微生物进行正常的新陈代谢导致细胞死亡^[19],这使得壳聚糖在进行包埋时能起到一定的抗菌效果^[18]。因此,在选用壳聚糖作为益生菌微胶囊壁材时要充分考虑和合理利用壳聚糖对微生物的抑制作用。

硫酸软骨素(CS)是由葡萄糖醛酸和 N-乙酰氨基半乳糖组成^[20](图 2),具有低毒、高稳定性、可生物降解性等特点。CS 存在易于修饰改性的羧基和羟基,可参与多种生物材料的构建,经物理交联、化学交联或酶催化交联均能形成亲水性的具有三维网络结构的半固体凝胶^[21]。CS 具有阴离子聚电解质特性,可以通过与相反电荷物质的静电相互作用形成聚电解质复合体,这使其能够保持稳定结构包埋芯材^[22]。

透明质酸是一种非硫酸化的糖胺聚糖,由 D-葡萄糖醛酸和 N-乙酰葡萄糖胺形成的二糖交替连接而成(图 2)^[23]。透明质酸水溶解性高,力学性能差,易在体内降解,不能自主形成凝胶。因此,往往通过氢键、范德华力等相互作用力或共价键形成物理水凝胶或化学水凝胶^[24]。透明质酸通过与钙离子交联后形成凝胶结构包埋芯材,在此基础上通过与阳离子壁材复合使用形成聚电解质络合物可进一步提高包埋效果^[25]。此外,透明质酸也具有多个化学改性的位点,在修饰技术的发展下,透明质酸及其衍生物在微胶囊壁材中的应用愈加广泛。

1.3 海洋微生物多糖壁材

海洋微生物多糖主要是从海水、海泥和海藻中的细菌和真菌中分离出来,大多是微生物胞外多糖,包括 β -葡聚糖、普鲁兰多糖等。胞外多糖(EPS)可认为是聚电解质,糖醛酸和酸性取代基产生的负电荷

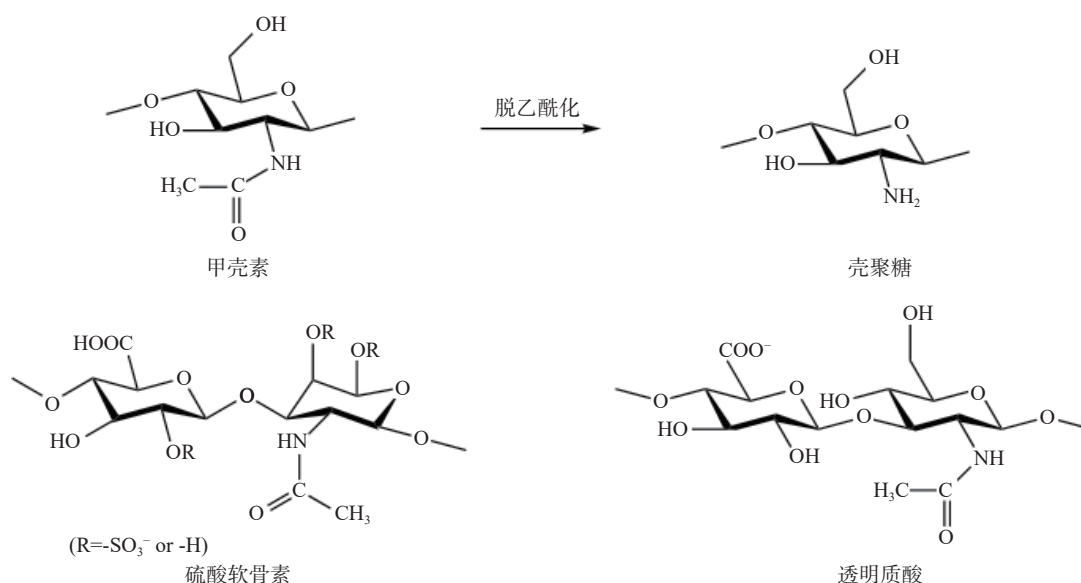


图 2 壳聚糖、硫酸软骨素和透明质酸的主要结构

Fig.2 Main structure of chitosan, chondroitin sulfate and hyaluronic acid

含量在分离的胞外多糖中有相当高的占比, EPS能与阳离子进行交联, 从而形成微型凝胶^[26]。EPS作为益生菌微胶囊壁材, 能在模拟胃肠道环境中保护益生菌, 同时还可发挥益生元功能, 促进益生菌生长, 增强人体肠道健康, 具有开发功能性食品的潜力^[27]。

β -葡聚糖主要由 D-吡喃葡萄糖单体以 β -1, 3 糖苷键为主链连接构成, 不同来源的 β -葡聚糖也存在 β -1, 4 或 β -1, 6 的糖苷键(图 3)^[28]。 β -葡聚糖具有胶凝、乳化等特性适用于制备微胶囊。 β -葡聚糖的凝胶化与其结构特征密切相关, β -1, 4 结构单元长链段以及重复的纤维三糖结构有利于形成凝胶网络包埋芯材^[29]。 β -葡聚糖具有益生元功能, 能够促进益生菌的生长, 降低人体胆固醇水平, 还能改善益生菌与人类肠道上皮细胞的黏附能力, 促进益生菌在宿主中的定植和持久性^[30]。

普鲁兰多糖是由 α -1, 4 糖苷键连接的麦芽三糖单元通过 α -1, 6 糖苷键连接构成(图 3), 是一类线性、水溶性好的中性胞外多糖^[31]。普鲁兰多糖水溶性好, 具有成膜性, 可与交联剂或其他壁材反应形成凝胶网络结构包埋芯材, 为其提供良好的保护^[32]。普鲁兰多糖作为微胶囊壁材同样可提供益生元功能, 能够有效提高益生菌微胶囊的存活率^[33], 相较于黄原胶和结冷胶, 普鲁兰多糖更适合作为益生菌的碳源, 能够选择性刺激益生菌的生长和抑制病原菌的生长, 同时对人工胃液有更强的抗性^[34]。可见, 海洋微生物多糖不仅具有一定的胶凝性、乳化性和成膜性, 能够制备益生菌微胶囊, 还可作为益生菌生长的碳源, 与益生菌结合为合生元, 提高益生菌存活率, 协同调节肠道菌群, 改善微生物菌群丰度, 促进营养物质吸收, 提高代谢能力。

2 海洋多糖基益生菌微胶囊的制备方法

目前海洋多糖基益生菌微胶囊有多种制备方法(表 1), 其制备的微胶囊结构大致可分为交联结构、基体结构和外包覆结构^[3]。挤压法、乳化法等方法制备的微胶囊通常是由离子或酶交联形成交联结构; 喷

雾干燥、冷冻干燥、电喷雾等方法制备的微胶囊是聚合物通过范德华力、氢键、疏水相互作用等方式构成囊壁形成基体结构; 而外包覆结构是在以上两类结构的基础上在表面再包裹一层聚合物, 如逐层组装法, 以进一步提升微胶囊的抗逆性和稳定性。

2.1 挤压法

挤压法是海洋多糖制备微胶囊的简单方法, 将益生菌与海洋多糖壁材溶液均匀混合装入密闭容器中, 利用压力挤压经过喷嘴以液滴形式滴入固化液中而形成微小颗粒^[35], 其过程温和, 不涉及有害溶剂, 不会对益生菌造成损害, 可在厌氧和好氧条件下进行。挤压法常用海藻酸钠为壁材, 主要是将阴离子海洋多糖与固化液中的阳离子作用形成特殊的“蛋盒结构”, 使益生菌能抵御外界的不利环境, 并保持良好的活性。Parsana 等^[36]利用挤压法制备了海藻酸钠-菊粉-壳聚糖微胶囊, 在模拟胃肠液处理后活菌数仅降低了 1.53 log CFU/g, 但其微胶囊粒径却达到了毫米级。Azam 等^[37]也同样采用挤压法, 将海藻酸钠与卡拉胶复配制备益生菌微胶囊, 所得微胶囊气孔明显减少, 在模拟胃肠道和胆盐环境中的存活率显著提高, 也仍然存在粒径较大(1.23~1.62 mm)的问题。挤压法虽操作简单、成本经济, 但是制备效率较慢难以扩大生产, 也较难获得粒径小、干燥的粉末状产品。

2.2 乳化法

乳化法也常常用于海洋多糖微胶囊的制备。海洋多糖水化后分子依照亲疏水性在油-水界面重排, 当多糖分子足够多时, 能够包裹油相形成乳滴并作为分散相, 而多糖水溶液则作为连续相, 由此产生水包油型乳液^[38]。乳化法根据交联剂来源分为外源乳化法和内源乳化法。外源乳化法是将海洋多糖溶液与益生菌混合后分散至油相, 再缓慢加入阳离子溶液形成凝胶珠, 是阳离子从海洋多糖液滴外扩散至液滴内的方法。而内源乳化法则是将海洋多糖溶液、益生菌和不溶性盐共混后再分散至油相, 不溶性盐逐渐解离出阳离子形成凝胶^[39]。以海藻酸钠为壁材原料, 利

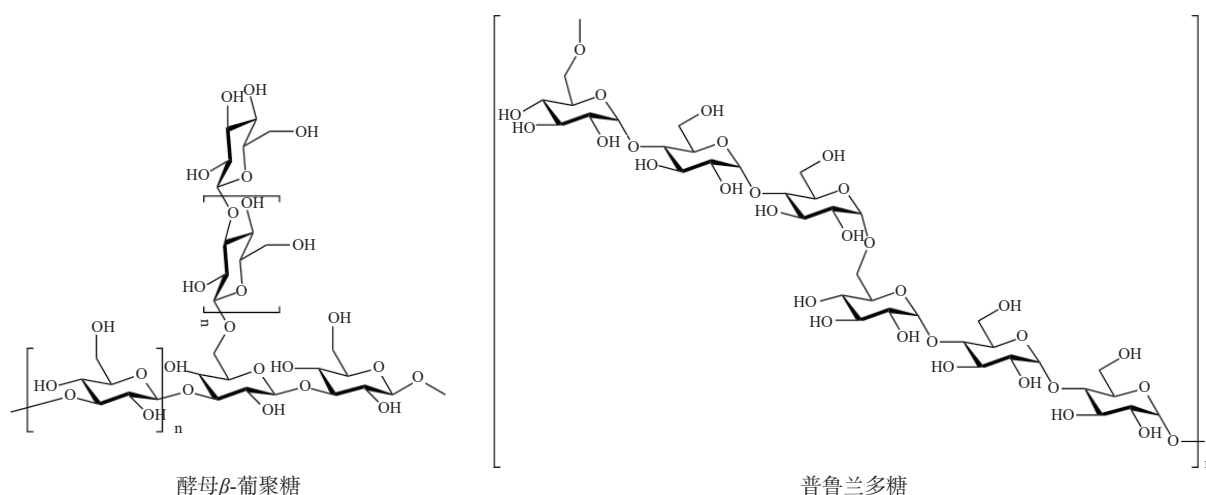


图 3 β -葡聚糖和普鲁兰多糖的主要结构

Fig.3 Main structure of β -glucan and pullulan

表 1 海洋多糖基益生菌微胶囊的常见制备方法
Table 1 Common preparation methods of marine polysaccharide-based probiotic microcapsules

益生菌微胶囊技术	适用的海洋多糖壁材	优点	缺点	参考文献
挤压法	海藻酸钠、卡拉胶、壳聚糖	操作简单、成本经济、条件温和	粒径大、制备效率慢、不利于工业化生产	[35–37]
乳化法	海藻酸钠、卡拉胶、琼脂、壳聚糖、透明质酸、 β -葡聚糖	条件温和、粒径小、产率高	乳化过程需加入油相、过程繁琐且成本高	[38–43]
喷雾干燥法	海藻酸钠、壳聚糖、 β -葡聚糖	制备效率高、成本经济、粒径小且分布均匀、适合工业化生产	干燥过程温度较高, 不适用于热敏性物质	[44–46]
冷冻干燥法	海藻酸钠、卡拉胶、透明质酸、 β -葡聚糖、普鲁兰多糖	产率高、干燥过程温度低, 适用于热敏性物质	成本和能耗高、粒径不易控制	[47–49,58]
电喷雾法	海藻酸钠、卡拉胶、壳聚糖、 β -葡聚糖、普鲁兰多糖	条件温和、操作简单、粒径小	产率低, 不利于工业化生产	[50–52,59]
逐层组装法	海藻酸钠、壳聚糖	操作简单、条件温和	制备效率慢、粒径大, 影响摄入口感	[53–57]

用外源乳化法^[40] 制备植物乳杆菌微胶囊, 不同海藻酸钠浓度和乳化时间都易影响乳化效果、微胶囊粒径分布和囊壁厚度, 甚至导致部分微胶囊粘连。而利用内源乳化法制备的益生菌微胶囊稳定性良好, 能获得较大的产量。Almeida 等^[41] 利用内源乳化法制备的海藻酸钠-乳清蛋白微胶囊在储藏 95 d 后经过 3 h 的消化处理, 活菌数从 6.63×10^5 CFU/g 降到 4.87×10^4 CFU/g, 而此时未微胶囊化的益生菌已全部失活。张国芳等^[42] 利用同样的壁材制备微胶囊也得到类似的消化结果, 经过 150 min 的胃液处理后游离菌活菌数下降了 6 个 log 值, 而微胶囊活菌数仅下降了约 3.5 个 log 值。Alehosseini 等^[43] 通过内源乳化法制备琼脂益生菌微胶囊, 在常温保存 15 d 后仍有活菌存在(游离菌仅存活 4 d), 还发现未纯化的琼脂中存在着蛋白质和多酚, 相比于仅使用纯化的琼脂 (3 log CFU/mL), 未纯化琼脂微胶囊 (4 log CFU/mL) 在储藏期具有更高的活菌数。相较于外源乳化法, 内源乳化法粒径可控、微胶囊不易聚集, 是更常用的乳化方法, 但共同的不足之处是乳化法制备过程需要加入油脂作分散相, 提高了工业化生产的成本。

2.3 喷雾干燥法

喷雾干燥法利用雾化器将海洋多糖壁材与益生菌的混合溶液雾化成微小液滴, 在加热的干燥气流中快速蒸干水分而制得粉末状微胶囊。喷雾干燥的壁材需要具有一定水溶性形成均匀料液, 水溶性良好的海洋多糖是采用喷雾干燥法制备微胶囊的常规壁材^[44], Çabuk 等^[45] 通过喷雾干燥法制备的普鲁兰多糖-乳清蛋白乳杆菌微胶囊平均粒径为 50 μm , 且表面光滑、孔洞较少, 抑制了胃酸的扩散和益生菌的泄露, 微胶囊化后胃液处理的益生菌存活率提高了 23%。Priscila 等^[46] 利用喷雾干燥制备了 β -葡聚糖益生菌微胶囊, 其平均尺寸仅为 1.5 μm , 经过消化处理后活菌数仍能达到 8.4 log CFU/mL, 同时在储藏 90 d 后仍能保持 6 log CFU/mL 以上的活菌数。虽然喷雾干燥法制得的微胶囊包埋率低于挤压法和乳化法, 而且喷干过程中的高温和干燥环境, 会使菌体受到一定的损伤, 但其具有制备效率高、能形成球型微胶囊、可连续生产的优势, 常用于工业化生产。

2.4 冷冻干燥法

冷冻干燥法是将海洋多糖复合壁材和益生菌的混合溶液放入冷冻干燥机中, 经历冷冻、初期干燥、后期干燥三阶段后得到微胶囊。利用冷冻干燥法将 β -葡聚糖用作壁材得到的益生菌微胶囊保护作用明显, 不受严酷的温度和 pH 的影响^[47]。周莉等^[48] 利用冷冻干燥制备海藻酸钠-乳清蛋白微胶囊, 相较于未冻干微胶囊, 其在胃液耐受、肠道释放、长期保存等方面都有一定的改善。邓玉娣等^[49] 通过冷冻干燥法制备的卡拉胶-膳食纤维-海藻酸钠微胶囊显著提高了双歧杆菌的耐胃酸能力, 胃液处理后仅下降了 1 个 log 值, 而未微胶囊化的双歧杆菌则完全丧失活性。冷冻干燥法能够避免喷雾干燥法的缺点, 且具有更好的稳定性, 但在冷冻阶段可能会使益生菌活性下降, 因此一般需要加入冷冻保护剂(乳糖、海藻糖等)防止益生菌冻伤, 同时冷冻干燥成本和能耗较高, 粒径控制效果较差。

2.5 电喷雾法

有研究尝试利用电喷雾技术这类不包含苛刻压力或温度条件的方法制备微胶囊, 利用高压电场从聚合物溶液中产生带电的射流, 最终可在收集器上获得干燥的细小微粒^[50]。电喷雾法适用于水溶性好的海洋多糖壁材。Ma 等^[51] 通过电喷雾法以普鲁兰多糖与阿拉伯树胶包埋后的乳杆菌在较高的温度范围内具有较好的热稳定性, 与冷冻干燥存活率 (80.92%~89.84%) 相比, 电喷雾后乳杆菌存活率更高, 可达 97.83%, 对乳杆菌具有更好的保护作用。Zacim 等^[52] 利用电喷雾制备海藻酸钙-壳聚糖微胶囊显著提高了益生菌在常温下的储藏能力, 常温 90 d 的储藏后微胶囊化的益生菌仅减少 2 个 log 值, 而未微胶囊化的益生菌则减少了 4.5 个 log 值。电喷雾技术操作简单, 无需额外的反应溶剂, 对环境友好, 同时制备条件温和, 益生菌微胶囊存活率高于常见制备方法, 微胶囊粒径分布均匀, 但是产量较低, 不利于工业化生产。

2.6 逐层组装法

逐层组装法(LBL)通过静电相互作用顺序沉积聚阳离子和聚阴离子来进行益生菌微胶囊的制备, 能

够减少微胶囊的孔隙率,提高微胶囊在不同 pH 环境的稳定性。Chehreara 等^[53]先在鼠李糖乳杆菌表面沉积一层海藻酸钠阴离子囊膜,再通过静电作用沉积壳聚糖阳离子囊膜,壳聚糖作为外层材料减少了对鼠李糖乳杆菌的生长抑制作用,制备的海藻酸钠-壳聚糖多层微胶囊能使鼠李糖乳杆菌抵抗低 pH 的模拟胃液,并在模拟肠道中缓慢释放。

逐层组装法简单,条件温和,可将不同壁材进行多层包埋,改善单一壁材的稳定性缺陷,有效减缓益生菌细胞膜通透性的增加和膜电位的下降^[54],提高了益生菌活性和微胶囊稳定性。但 LBL 也有一定缺点,由于逐层组装过程不是瞬时的,与每一层的附着时间有关,在连续层的粘合过程中可能会发生微胶囊聚集,降低后续层粘合的可用表面积,进而降低工艺效率,同时多层包埋也使得所得微胶囊体积较大,不利于粒径控制^[55]。因此,逐层组装法也常常与其他制备方法结合使用。如 Isela 等^[56]将嗜酸乳杆菌加入明胶-麦芽糊精溶液中喷雾干燥;再将微胶囊化的益生菌加入到壳聚糖-菊粉或壳聚糖-麦芽糊精溶液中逐层包埋,最后喷雾干燥得到的微胶囊粒径均匀可控,具有更好的稳定性。Beldarrain-Iznaga 等^[57]结合逐层组装法和冷冻干燥法制备了酪蛋白酸钠-海藻酸钠-壳聚糖基益生菌微胶囊,其粒径(6.2~12.2 μm)相较于未冷冻干燥的微胶囊(16.7~51.3 μm)有明显的降低,粒径分布更为集中。逐层组装法与喷雾干燥、冷冻干燥等方法相辅相成,结合使用弥补了各自的缺点,LBL 通过干燥处理后减少水分含量以控制体积,所得微胶囊粒径小而均匀;同时 LBL 避免了益生菌在干燥过程中的大量损失,使微胶囊拥有更高的活性。

3 海洋多糖基益生菌微胶囊的应用

3.1 海洋多糖基益生菌微胶囊在食品工业的应用

当前功能性食品越来越受人们追捧,益生菌食品也是其中相当重要的研究热点。目前,以海洋多糖制备的益生菌微胶囊在食品工业已有应用研究,比如应用于乳制品、烘焙产品和饮料等。

3.1.1 乳制品 应用于乳制品的海洋多糖基微胶囊在保证益生菌有较高存活率的前提下保持较优的产品感官性质。Li 等^[60]以海藻酸钠和酪蛋白酸钠包埋乳杆菌和乳糖醇制备酸奶,得到的微胶囊平均尺寸约为 300 μm ,在酸奶内部形成了更紧密的凝胶结构,减缓了酸奶的酸化,提高了酸奶的保水性,具有良好的食品感官特性。Hu 等^[61]利用 2% 海藻酸钠-果胶包埋益生菌,所得微胶囊再与酸奶混合制备成粒径在 460 μm 左右的酸奶爆珠,其质地、口感、弹性和脆度得到了较好的评价。Zanjani 等^[62]以壳聚糖作为外层包衣包裹益生菌微胶囊,经壳聚糖包衣后的双层微胶囊的平均粒径达到了 $94.58 \pm 2.28 \mu\text{m}$,同时极大地提高了乳杆菌在冰淇淋中的活力。由此可见,经过海洋多糖包埋后的益生菌不仅能够摄入到人体中更好地发挥益生功效,还能改善乳制品的感官特性和

风味。

3.1.2 烘焙产品 益生菌应用于烘焙产品的途径主要包括直接加入进面团、添加至产品表面或内部的奶油中。Mojan 等^[63]通过海藻酸钙-抗性淀粉包埋乳杆菌,并采用壳聚糖进行二次包埋,用于制作面包。微胶囊能耐受烘焙高温,显著提高了益生菌存活率。Ezekiel 等^[64]采用海藻酸钠-淀粉-壳聚糖对鼠李糖乳杆菌进行多层包埋,在 220 $^{\circ}\text{C}$ 下烘焙 20 min 后面包中的益生菌能保持着最高的活性,达到 $9.19 \log \text{CFU/g}$ 。Malmo 等^[65]制备了壳聚糖-海藻酸钠益生菌微胶囊混入蛋糕面糊中,益生菌存活率从 1% 提高至 10%。烘焙产品往往需要历经高温环境,益生菌在烘焙的过程中难以存活,海洋多糖基微胶囊显著提高了热稳定性,拓宽了益生菌在烘焙中的应用。

3.1.3 饮料 饮料的风味影响消费者的选择,益生菌的添加有利于改善其风味,但益生菌易受环境温度、pH 影响而不利于益生菌饮料的保存,因而在饮料制作中常引入微胶囊技术。Mohammad 等^[66]向饮料粉中添加海藻酸钠-木瓜籽胶乳杆菌微胶囊,储藏 60 d 后其活菌数仍能保持 10^6CFU/g 。Nami 等^[67]在橙汁中加入益生菌微胶囊,微胶囊化降低了益生菌在胃肠道的损失率($1.46 \log \text{CFU/g}$),也防止了其产酸物质的快速释放而引起的产品储藏期 pH 变化,提高了产品在储藏期间的稳定性。Alberico 等^[68]利用海藻酸钠包埋非酿酒酵母(*H. osmophila* ND1)后与酿酒酵母(*S. cerevisiae* EC1118)混合作为发酵剂制作葡萄酒,发现非酿酒酵母微胶囊化后活性提高,该菌株的发酵效率也随着提高,这有助于改善葡萄酒风味、制作乙醇含量较低的葡萄酒。

3.1.4 其他 海洋多糖基益生菌微胶囊在食品中的应用范围较广,在花蜜、肉制品上也有所研究。Morsy 等^[69]将普鲁兰多糖-海藻酸钠-乳清蛋白包埋乳杆菌后在高温、胃肠道环境的存活率较高,把微胶囊加入到花蜜中,拥有比游离乳杆菌更好的外观、口感等感官特性。Cavalheiro 等^[70]向干发酵香肠中添加乳杆菌微胶囊,储藏 60 d 后其活菌数($8.34 \log \text{CFU/g}$)高于未微胶囊化活菌数($8.02 \log \text{CFU/g}$),且降低了干发酵香肠的脂质氧化程度。海洋多糖基微胶囊的应用能大大提高益生菌的抗逆性和稳定性,改善食品的外观风味,提高发酵效率,但其也可能造成口感上的不良影响,因此在食品工业应用研究中有必要探究海洋多糖基微胶囊的尺寸、硬度等理化性质对食品感官的影响。

3.2 海洋多糖基益生菌微胶囊在生物医药的应用

在生物医药方面,海洋多糖具有一定的抗炎、抗病毒、抑制病原菌改善肠道菌群等功效,能与包埋的益生菌产生协同作用,提高疗效。海洋多糖基微胶囊也可作为多种益生菌共同作用的容器,促进益生菌各自的增殖,而不会相互影响。Gutiérrez-Zamorano 等^[71]探究益生菌的抗幽门螺杆菌作用,利用卡拉胶

封装发酵乳杆菌 UCO-979C, 发现菌株与卡拉胶之间存在协同作用, 经过微胶囊化后该菌株的抗幽门螺杆菌作用明显增强。Iqbal 等^[72] 研究微囊化益生菌混合物对代谢综合症的疗效, 依次以海藻酸钠-聚赖氨酸-海藻酸钠次序包埋三种益生菌组成的混合物, 实验表明此微胶囊化益生菌混合物显著降低了血清总胆固醇、低密度脂蛋白和甘油三酯水平, 并对肠道微生物系统有积极影响。Zhao 等^[73] 提出利用海藻酸钠将乳杆菌和枯草芽孢杆菌封装到单独的隔室中, 制备双核微胶囊, 该微胶囊表现出良好的耐酸性, 能提高益生菌活性, 具有抗炎、改善脂肪代谢、恢复肠道屏障功能等作用。但海洋多糖基微胶囊并非都对包埋对象产生积极影响, Varankovich 等^[74] 采用海藻酸钠-豌豆分离蛋白包封鼠李糖乳杆菌 R0011 和瑞士乳杆菌 R0052, 发现该微胶囊干扰了益生菌减轻结肠炎症状的能力。因此海洋多糖壁材的选择和应用需要充分考虑是否会影响益生菌自身功能的正常使用。

部分海洋多糖在包埋保护益生菌的同时靶向运输益生菌并在目标处快速释放, 提高治疗效率。Huang 等^[75] 利用甲基丙烯酸化的透明质酸和硫代化的硫代缩醛包埋益生菌后, 其负电性使其优先黏附于肠道炎症部位, 进而降解释放出益生菌治疗结肠炎。Xiao 等^[76] 采用硫代透明质酸包埋鼠李糖乳杆菌, 进入肠道后一旦接触到周围肠道病原体分泌的 H_2S , 该微胶囊就能迅速降解并释放鼠李糖乳杆菌, 对沙门氏菌肠炎有较好的治疗作用。益生菌微胶囊能够改善肠道微生物环境和人体代谢, 可在肠道发炎部位靶向释放治疗肠道炎症, 相较于抗生素等药物更为安全, 有望应用于肠道炎症的临床治疗中。

3.3 海洋多糖基益生菌微胶囊在养殖饲料的应用

用作养殖饲料的海洋多糖基微胶囊对感官特性无过高要求, 更着重于对动物的益生功效, 提高养殖动物的免疫能力和生存能力, 提高经济效益。Vidhya 等^[77] 通过海藻酸钠-壳聚糖微胶囊包埋 *Bacillus vireti* 01 益生菌和 *Gracilaria folifera* 海藻多糖, 该微胶囊能显著提高罗氏沼虾对嗜水气单胞菌抗性, 可替代抗生素用于淡水对虾养殖。Kumar 等^[78] 将海藻酸钠、壳聚糖包埋乳杆菌后添加至饲料中饲喂牛犊, 发现乳杆菌通过降低 pH、氨浓度, 增加乳酸和挥发性脂肪酸来维持肠道健康, 同时牛犊肠道内乳杆菌和双歧杆菌的数量有所增加, 而肠道致病菌减少, 牛犊的腹泻发生率也有所降低。刘耀东等^[79] 制备海藻酸钠-明胶微胶囊测验其对仔猪生长性能的影响, 试验表明海藻酸钠-明胶能高效地包埋鼠李糖乳杆菌, 饲喂含有益生菌微胶囊的饲料后仔猪的生长速度、抗腹泻能力、免疫力均有所提高。益生菌微胶囊较长的贮存期、易操作性在养殖饲料中具有很大优势, 其较强的稳定性使其在养殖中能有效地发挥益生菌作用, 提高养殖动物抗性和免疫能力, 改善肠道环境, 降

低动物死亡率、发病率。

4 结语与展望

海洋多糖作为益生菌微胶囊的重要壁材, 不仅具有良好的乳化性、胶凝性、成膜性等功能特性, 可形成三维凝胶网络结构、基质或保护膜, 对包埋的益生菌起到保护、稳定的作用, 还兼具抗炎、改善肠道菌群等功效, 能与益生菌产生协同促进作用, 同时具备一定的靶向输送释放能力, 在食品工业、生物医药、养殖饲料等领域都有广泛的应用。近年来, 随着海洋生物资源的开发, 海洋多糖因其独特的性质一直备受研究人员青睐, 由于海洋多糖的结构和功能特性很大程度上决定了益生菌的微胶囊化过程和益生菌微胶囊的性质及应用。因此, 在制备益生菌微胶囊时研究筛选海洋多糖就显得尤为重要。海洋多糖来源丰富, 种类繁多, 不同海洋多糖的单糖组成以及糖苷键连接方式复杂多样, 其结构性质和活性分析都十分困难, 有待于进一步深入研究。开发利用新型海洋多糖资源, 研制多重功效的海洋多糖基益生菌微胶囊, 将会是未来的一个发展方向。

海洋多糖基微胶囊能显著提高益生菌在储藏、不同胁迫环境中的稳定性和抗逆能力。未来探索出更多高抗逆性、功效显著且适用于不同应用领域的海洋多糖基微胶囊, 是研究人员面临的挑战。面对上述挑战, 除了充分挖掘新型海洋多糖, 还可以从以下几方面着手, 提升海洋多糖基益生菌微胶囊的性能: a. 将海洋多糖与其他高分子材料复合, 改善单一海洋多糖疏松多孔、易渗透的缺陷, 提高微胶囊膜的致密性和包埋效率; b. 海洋多糖壁材力学性能脆弱, 细胞黏附性较差, 通过物理化学改性接枝、交联等方法, 可以增加微胶囊的结构强度和力学性能, 增强微胶囊壁材的细胞粘附性; c. 进一步设计并优化微胶囊的结构, 比如采用多层包埋的方法, 克服单层微胶囊包埋的不足, 避免益生菌菌粉或菌液的泄露, 延长益生菌在室温下的贮存时间, 实现更好的靶向缓控释效果; d. 在微胶囊壁材中额外添加抗氧化剂、抗冻剂等功能性材料, 改善海洋多糖基微胶囊的功能性质, 拓宽海洋多糖基微胶囊的应用范围; e. 海洋多糖的结构特征、海洋多糖壁材之间以及与芯材益生菌间的相互作用对微胶囊稳定性、功能性的影响尚缺乏深入研究, 加强相关领域的基础研究, 有利于开发和完善海洋多糖基益生菌微胶囊的制备工艺和性能。未来随着微胶囊制备方法的日趋完善, 具体作用机制的逐渐明确和新材料、新技术的不断引入, 海洋多糖基益生菌微胶囊的应用范围将更加广泛, 这对于海洋生物资源的高值化开发利用、益生菌产业的持续健康发展都具有积极的意义。

参考文献

- [1] 张倩, 国立东, 都晓伟. 人参的益生菌发酵及其发酵产品研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 311-319. [ZHANG Q, GUO L D, DU X W. Research progress on probiotic fermentation of ginseng and its products[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 311-319.]
- [2] 曾扬, 梁雄燕, 刘晶, 等. 益生菌在动物胃肠道与呼吸道疾病中的作用研究进展[J]. 动物医学进展, 2023, 44(2): 89-93. [ZENG Y, LIANG X Y, LIU J, et al. Progress on probiotics in animal gastrointestinal and respiratory diseases[J]. Progress in Veterinary Medicine, 2023, 44(2): 89-93.]
- [3] 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 probiotics microcapsule[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(2): 36-42.]
- [4] 章智华, 钟舒睿, 彭飞, 等. 微胶囊壁材及制备技术的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(9): 246-253. [ZHANG Z H, ZHONG S R, PENG F, et al. Progress in microcapsule wall materials and preparation techniques[J]. Food Science, 2020, 41(9): 246-253.]
- [5] 陆佳俊, 刘春城, 黄昆仑, 等. 海洋食品中海洋多糖、生物活性肽与皂苷类化合物改善代谢综合征的机制[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 346-351. [LU J J, LIU C E, HUANG K L, et al. The mechanism of improving metabolic syndrome by marine polysaccharides, bioactive peptides and saponins in marine food[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(9): 346-351.]
- [6] 张入玉, 易英如, 赵吉春, 等. 膳食纤维微胶囊在益生菌包埋中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(23): 324-331. [ZHANG R Y, YI Y R, ZHAO J C, et al. Application of dietary fiber microcapsules in probiotic encapsulation: A review[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(23): 324-331.]
- [7] 曹金安, 王景平, 徐友龙, 等. 天然可生物降解聚合物壁材在微胶囊中的应用[J]. 材料导报, 2023, 37(18): 225-243. [CAO J A, WANG J P, XU Y L, et al. Application of natural biodegradable polymer wall materials in microcapsules[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 225-243.]
- [8] LIYANAGE N M, NAGAHAWATTA D P, JAYAWARDENA T U, et al. The role of seaweed polysaccharides in gastrointestinal health: Protective effect against inflammatory bowel disease[J]. Life (Basel, Switzerland), 2023, 13(4): 1026.
- [9] JU J P, YANG J Z, ZHANG W C, et al. Seaweed polysaccharide fibers: Solution properties, processing and applications[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 140: 1-18.
- [10] TAVASSOLI-KAFRANI E, SHEKARCHIZADEH H, MASOUDPOUR-BEHABADI M. Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 137: 360-374.
- [11] GEORGIA F, TRYFON K, FOTEINI L, et al. Use of encapsulated *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* through extrusion or emulsification for the production of probiotic yogurt[J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 45(7): 13792.
- [12] YUN E J, YU S, KIM Y, et al. *In vitro* prebiotic and anti-colon cancer activities of agar-derived sugars from red seaweeds[J]. Marine Drugs, 2021, 19(4): 213.
- [13] 李秀秀, 尚静, 杨曦, 等. 多糖的增稠、胶凝及乳化特性研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 300-308. [LI X X, SHANG J, YANG X, et al. A review on thickening, gelling and emulsifying properties of polysaccharides[J]. Food Science, 2021, 42(15): 300-308.]
- [14] ALBADRAN H A, MONTEAGUDOMERA A, KHUTO-RYANSKIY V V, et al. Development of chitosan-coated agar-gelatin particles for probiotic delivery and targeted release in the gastrointestinal tract[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2020, 104: 1-9.
- [15] BEAUMONT M, TRAN R, VERA G, et al. Hydrogel-forming algae polysaccharides: From seaweed to biomedical applications[J]. Biomacromolecules, 2021, 22(3): 1027-1052.
- [16] 袁晓露, 李宝霞, 黄雅燕, 等. 海藻酸钠微囊的制备及应用进展[J]. 化工进展, 2022, 41(6): 3103-3112. [YUAN X L, LI B X, HUANG Y Y, et al. Progress in preparation and application of sodium alginate microcapsules[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(6): 3103-3112.]
- [17] OLADZADABBASABADI N, MOHAMMADI N A, ARIF-FIN F, et al. Recent advances in extraction, modification, and application of chitosan in packaging industry[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 277: 118876.
- [18] CĂLINOIU L F, ȘTEFĂNESCU B E, POP I D, et al. Chitosan coating applications in probiotic microencapsulation[J]. Coatings, 2019, 9(3): 194.
- [19] SHANMUGANATHAN R, EDISON T N J I, LEWISO-SCAR F, et al. Chitosan nanopolymers: An overview of drug delivery against cancer[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 727-736.
- [20] ABOUREHAB M A S, BAISAKHIYA S, AGGARWAL A, et al. Chondroitin sulfate-based composites: A tour d'horizon of their biomedical applications[J]. Journal of Materials Chemistry. B, 2022(10): 9125-9178.
- [21] 王芹, 邱钰智, 乔桦华, 等. 硫酸软骨素类可注射水凝胶体系及其凝胶化机制[J]. 功能高分子学报, 2021, 34(3): 243-259. [WANG Q, QIU Y Z, QIAO W H, et al. Gelation systems and mechanisms of chondroitin sulfate-based injectable hydrogels[J]. Journal of Functional Polymers, 2021, 34(3): 243-259.]
- [22] JARDIM V K, JOANITTI A G, AZEVEDO B R, et al. Physico-chemical characterization and cytotoxicity evaluation of curcumin loaded in chitosan/chondroitin sulfate nanoparticles[J]. Materials Science & Engineering C, 2015, 56: 294-304.
- [23] 耿凤, 邵萌, 魏健, 等. 微胶囊技术在保护天然活性成分中的应用研究进展[J]. 食品与药品, 2020, 22(3): 250-255. [GENG F, SHAO M, WEI J, et al. Progress in application of microcapsule technology in protection of natural active ingredients[J]. Food and Drug, 2020, 22(3): 250-255.]
- [24] GRIECO M, URSINI O, PALAMÀ I E, et al. Hydrha: Hydrogels of hyaluronic acid. New biomedical approaches in cancer, neurodegenerative diseases, and tissue engineering[J]. Materials Today Bio, 2022, 17: 100453.
- [25] PAȘCALĂU V, TERTIS M, PALL E, et al. Bovine serum albumin gel/polyelectrolyte complex of hyaluronic acid and chitosan based microcarriers for sorafenib targeted delivery[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(34): 49002.
- [26] CASILLO A, LANZETTA R, PARRILLI M, et al. Exopolysaccharides from marine and marine extremophilic bacteria: Structures, properties, ecological roles and applications[J]. Marine Drugs, 2018, 16(2): 69.
- [27] 石塔拉, 赵慧娟, 宓伟, 等. 发酵乳杆菌产胞外多糖的益生元样作用研究[J]. 营养学报, 2018, 40(6): 568-573. [SHI T L, ZHAO H J, FU W, et al. Prebiotic properties of exopolysaccharides produced by *Lactobacillus fermentum*[J]. Acta Nutrimenta Sinica,

2018, 40(6): 568–573.]

[28] 陈婷, 叶发银, 赵国华. β -葡聚糖在结构化功能性配料制造中的应用进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(12): 283–292.

[CHEN T, YE F Y, ZHAO G H. Research progress of β -glucan in manufacturing structured food functional ingredients[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(12): 283–292.]

[29] KUREK M A, MOCZKOWSKA M, PIECZYKOLAN E, et al. Barley β -D-glucan-modified starch complex as potential encapsulation agent for fish oil[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 596–602.

[30] ARENA M P, SPANO G, FIOCCO D. β -Glucans and probiotics[J]. American Journal of Immunology, 2017, 13(1): 34–44.

[31] 张振琳, 孙梦圆, 张忠栋, 等. 普鲁兰多糖的改性及应用研究进展[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(4): 283–304. [ZHANG Z L, SUN M Y, ZHANG Z D, et al. Advances in modification and applications of pullulan[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(4): 283–304.]

[32] LIU Y K, LI X, SUN H Y, et al. Whey protein concentrate/pullulan gel as a novel microencapsulated wall material for astaxanthin with improving stability and bioaccessibility[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 138: 108467.

[33] 刘炯娜, 徐玉巧, 范方宇. 4 种多糖益生元对鼠李糖乳杆菌微胶囊稳定性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(2): 125–131. [LIU J N, XU Y Q, FAN F Y. Effects of four kinds of polysaccharide probiotics on the stability of *Lactobacillus rhamnosus* GG microcapsules[J]. Food Science, 2023, 44(2): 125–131.]

[34] NITHYABALASUNDARI S, NIVEDITA V, CHAKRAVARTHY M, et al. Characterization of microbial polysaccharides and prebiotic enrichment of wheat bread with pullulan[J]. LWT, 2020, 122: 109002.

[35] 宋娇娇, 王俊国, 田文静, 等. 微胶囊制备工艺对益生菌活性的影响[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(1): 25–30. [SONG J J, WANG J G, TIAN W J, et al. Effects of the microencapsulation technology on the activity of probiotics[J]. China Dairy Industry, 2016, 44(1): 25–30.]

[36] PARSANA Y, YADAV M, KUMAR S. Microencapsulation in the chitosan-coated alginate-inulin matrix of *Limosilactobacillus reuteri* SW23 and *Lactobacillus salivarius* RBL50 and their characterization[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2023, 5: 100285.

[37] AZAM M, SAEED M, AHMAD T, et al. Characterization of biopolymeric encapsulation system for improved survival of *Lactobacillus brevis*[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(3): 1–8.

[38] 李安琪, 杨曦, 张茜, 等. 多糖的乳化特性及其在乳液食品品质属性调控方面的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 322–328. [LI A Q, YANG X, ZHANG H, et al. A review of emulsifying properties of polysaccharides and their applications in enhancing textural attributes of emulsion-based foods[J]. Food Science, 2020, 41(23): 322–328.]

[39] 赵萌, 蔡沙, 屈方宁, 等. 内源乳化法制备海藻酸盐微胶囊的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 392–396. [ZHAO M, CAI S, QU F N, et al. Research progress in emulsification/internal gelation technology for the preparation of alginate microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(22): 392–396.]

[40] 程玉霞. 基于外源乳化法的植物乳杆菌微胶囊制备及性能研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2013. [CHENG Y X. Preparation and properties of *Lactobacillus plantarum* microcapsules based on

exogenous emulsification[D]. Hangzhou: Zhejiang Industrial and Commercial University, 2013.]

[41] ALMEIDA D, MACHADO D, SOUSA S, et al. Effect of emulsification/internal gelation-based microencapsulation on the viability of *Akkermansia muciniphila* upon prolonged storage and simulated gastrointestinal passage[J]. Food Hydrocolloids for Health, 2022, 2: 100084.

[42] 张国芳, 王婷婷, 刘丽波, 等. 内源乳化法制备干酪乳杆菌微胶囊[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(3): 15–20. [ZHANG G F, WANG T T, LIU L B, et al. Preparation of *Lactobacillus casei* microcapsules by endogenous emulsification[J]. China Dairy Industry, 2017, 45(3): 15–20.]

[43] ALEHOSSEINI A, PULGAR E G, GÓMEZ-MASCARQUE L G, et al. Unpurified *Gelidium* -extracted carbohydrate-rich fractions improve probiotic protection during storage[J]. LWT, 2018, 96: 694–703.

[44] SAMBORSKA K, BOOSTANI S, GERANPOUR M, et al. Green biopolymers from by-products as wall materials for spray drying microencapsulation of phytochemicals[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 108: 297–325.

[45] ÇABUK B, HARSA Ş. Whey protein-pullulan (WP/pullulan) polymer blend for preservation of viability of *Lactobacillus acidophilus*[J]. Drying Technology, 2015, 33(10): 1223–1233.

[46] PRISCILA A A C D, AMANDA A C D, FERREIRA A R R, et al. Microencapsulation of *Bacillus subtilis* and oat β -glucan and their application as a synbiotic in fish feed[J]. Journal of Microencapsulation, 2023, 40(7): 11–15.

[47] ADIL G, ASIMA S, MUDASIR A, et al. β -D-glucan as an enteric delivery vehicle for probiotics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 864–869.

[48] 周莉, 张立攀, 关炳峰, 等. 嗜酸乳杆菌冻干微胶囊的制备及耐受性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(7): 43–47. [ZHOU L, ZHANG L P, GUAN B F, et al. Preparation and tolerance research for *Lactobacillus acidophilus* lyophilized microcapsule[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(7): 43–47.]

[49] 邓玉娣, 霍蔼倩, 黎鋈华, 等. 双歧杆菌复合微胶囊的工艺优化、表征及功能特性分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 147–156. [DENG Y D, HUO A Q, LI S H, et al. Process optimization, characterization and functional properties analysis of *Bifidobacterium* composite microcapsules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 147–156.]

[50] MARÍA E M, MARÍA A R. Microencapsulation of probiotic cells: Applications in nutraceutical and food industry[J]. Nutraceuticals, 2016, 4: 627–668.

[51] MA J G, XU C, YU H L, et al. Electro-encapsulation of probiotics in gum arabic-pullulan blend nanofibres using electrospinning technology[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 111: 106381.

[52] ZAEIM D, SARABI-JAMAB M, GHORANI B, et al. Microencapsulation of probiotics in multi-polysaccharide microcapsules by electro-hydrodynamic atomization and incorporation into ice-cream formulation[J]. Food Structure, 2020, 25: 100147.

[53] CHEHREARA A, TABANDEH F, OTADI M, et al. Enhanced survival of *Lactobacillus rhamnosus* in simulated gastrointestinal conditions using layer-by-layer encapsulation[J]. Biotechnology Letters, 2022, 44(11): 1277–1286.

[54] DENG F, SUN J, DOU R, et al. Mechanism of enhancing pyrene-degradation ability of bacteria by layer-by-layer assembly bio-microcapsules materials[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 181: 525–533.

- [55] RAMOS P E, CERQUEIRA M A, TEIXEIRA J A, et al. Physiological protection of probiotic microcapsules by coatings[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 58(11): 1–14.
- [56] ISELA A F, ENRIQUE P, AURELIO L, et al. Simple and double microencapsulation of *Lactobacillus acidophilus* with chitosan using spray drying[J]. *International Journal of Food Studies*, 2015, 4(2): 188–200.
- [57] BELDARRAIN-IZNAGA T, VILLALOBOS-CARVAJAL R, SEVILLANO-ARRESTO E, et al. Functional properties of *Lactobacillus casei* c24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion[J]. *Food Research International*, 2021, 141: 110136–110136.
- [58] 朱永刚. 益生菌的微胶囊化及冻干保护剂的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021. [ZHU Y G. Research on microencapsulation and freeze-drying protectant of probiotics[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.]
- [59] PHUONG T L, BUJNA E, KUN S, et al. Electrospayed mucadhesive alginate-chitosan microcapsules for gastrointestinal delivery of probiotics[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, 597: 120342.
- [60] 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*, 2021, 152: 112302.
- [61] HU X X, LIU C Y, ZHANG H T, et al. *In vitro* digestion of sodium alginate/pectin co-encapsulated *Lactobacillus bulgaricus* and its application in yogurt bilayer beads[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 193: 1050–1058.
- [62] ZANJANI M A K, EHSANI M R, TARZI B G, et al. Promoting *Lactobacillus casei* and *Bifidobacterium adolescentis* survival by microencapsulation with different starches and chitosan and poly L-lysine coatings in ice cream[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(1): e13318–e13318.
- [63] MOJAN S, ANOUSHEH S, TARZI B G. The production of synbiotic bread by microencapsulation[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2016, 54(1): 52–59.
- [64] EZEKIEL O O, OKEHIE I D, ADEDEJI O E. Viability of *Lactobacillus rhamnosus* GG in simulated gastrointestinal conditions and after baking white pan bread at different temperature and time regimes[J]. *Current Microbiology*, 2020, 77(12): 3869–3877.
- [65] MALMO C, LA S A, MAURIELLO G. Microencapsulation of *Lactobacillus reuteri* DSM 17938 cells coated in alginate beads with chitosan by spray drying to use as a probiotic cell in a chocolate soufflé[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(3): 795–805.
- [66] MOHAMMAD J, NAIMEH K, SOMAYEH R, et al. Encapsulation of *Lactobacillus casei* in quince seed gum-alginate beads to produce a functional synbiotic drink powder by agro-industrial by-products and freeze-drying[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106895.
- [67] NAMI Y, LORNEZHAD G, KIANI A, et al. Alginate-persian gum-prebiotics microencapsulation impacts on the survival rate of *Lactococcus lactis* ABRINW-N19 in orange juice[J]. *LWT*, 2020, 124: 109190.
- [68] ALBERICO G, CAPECE A, MAURIELLO G, et al. Influence of microencapsulation on fermentative behavior of *Hanseniaspora osmophila* in wine mixed starter fermentation[J]. *Fermentation*, 2021, 7(3): 112–112.
- [69] MORSY M K, MORSY O M, ABDELMONEM M A, et al. Anthocyanin-colored microencapsulation effects on survival rate of *Lactobacillus rhamnosus* GG, color stability, and sensory parameters in strawberry nectar model[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2022, 15: 352–367.
- [70] CAVALHEIRO P C, RUIZ-CAPILLAS C, HERRERO M A, 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.
- [71] GUTIÉRREZ-ZAMORANO C, GONZÁLEZ-ÁVILA M, DÍAZ-BLAS G, et al. Increased anti-helicobacter pylori effect of the probiotic *Lactobacillus fermentum* uco-979c strain encapsulated in carrageenan evaluated in gastric simulations under fasting conditions[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 812–816.
- [72] IQBAL U H, WESTFALL S, PRAKASH S. Novel microencapsulated probiotic blend for use in metabolic syndrome: Design and *in-vivo* analysis[J]. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 2018, 46: 1–9.
- [73] ZHAO C, ZHU Y, KONG B, et al. Dual-core prebiotics microcapsule encapsulating probiotics for metabolic syndrome[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12: 42586–42594.
- [74] VARANKOVICH N, GRIGORYAN A, BROWN K, et al. Pea-protein alginate encapsulation adversely effects development of clinical signs of *Citrobacter rodentium*-induced colitis in mice treated with probiotics[J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 2018, 64(10): 744–760.
- [75] HUANG L, WANG J, KONG L, et al. ROS-responsive hyaluronic acid hydrogel for targeted delivery of probiotics to relieve colitis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 222: 1476–1486.
- [76] XIAO Y, LU C, LIU Y, et al. Encapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* in hyaluronic acid-based hydrogel for pathogen-targeted delivery to ameliorate enteritis[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(33): 36967–36977.
- [77] VIDHYA H S, THANIGAIVEL S, VIJAYAKUMAR S, et al. Effect of microencapsulated probiotic *Bacillus vireti* 01-polysaccharide extract of *Gracilaria folifera* with alginate-chitosan on immunity, antioxidant activity and disease resistance of *Macrobrachium rosenbergii* against *Aeromonas hydrophila* infection[J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2018, 73: 112–120.
- [78] KUMAR M, KALA A, CHAUDHARY L C, et al. Microencapsulated and lyophilized *Lactobacillus acidophilus* improved gut health and immune status of preruminant calves[J]. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 2022, 14: 523–534.
- [79] 刘耀东, 贾荣玲, 王国强. 益生菌微胶囊化对仔猪生长性能及免疫功能的影响[J]. *中国饲料*, 2021(3): 55–59. [LIU Y D, JIA R L, WANG G Q. Effects of probiotics microencapsulation on growth performance and immune function of piglets[J]. *China Feed*, 2021(3): 55–59.]