

复合海藻酸钠益生菌微胶囊研究进展

常诗晗, 武俊瑞, 李紫晶, 史玉东, 乌日娜

Research Progress on Probiotic Microcapsules by Compound Sodium Alginate

CHANG Shihan, WU Junrui, LI Zijing, SHI Yudong, and WU Rina

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

益生菌微胶囊技术及其在食品中的应用研究进展

Research Progress on Microcapsulation Technology and Its Application in Food

食品工业科技. 2019, 40(16): 354-362 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.059>

植物蛋白微胶囊对益生菌包埋的研究进展

Progress in the research of plant protein materials for probiotics encapsulation

食品工业科技. 2017(05): 385-389 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.05.065>

海藻酸钠薰衣草精油微胶囊的制备及其性能研究

Preparation and Performance Study of Sodium Alginate Lavender Essential Oil Microcapsules

食品工业科技. 2019, 40(23): 47-53 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.23.008>

微胶囊技术在益生菌CICC 6075冰淇淋中的应用

Application of Microencapsulation Technology in Ice Cream with Probiotic CICC 6075

食品工业科技. 2020, 41(21): 67-74 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019120324>

益生菌副干酪乳杆菌R8双层包埋工艺研究

Study on the Double-layer Embedment of Probiotic *Lactobacillus paracasei* R8

食品工业科技. 2019, 40(5): 7-11 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.05.002>

紫苏醛-海藻酸钠复合涂膜抗花生黄曲霉菌研究

The anti-*Aspergillus flavus* activity of composite coating of perillaldehyde-sodium alginate in peanut

食品工业科技. 2017(14): 263-266 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.051>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

常诗晗, 武俊瑞, 李紫晶, 等. 复合海藻酸钠益生菌微胶囊研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 372–377. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030156

CHANG Shihan, WU Junrui, LI Zijing, et al. Research Progress on Probiotic Microcapsules by Compound Sodium Alginate[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 372–377. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030156

· 专题综述 ·

复合海藻酸钠益生菌微胶囊研究进展

常诗晗^{1,2}, 武俊瑞^{1,3}, 李紫晶^{1,3}, 史玉东^{4,*}, 乌日娜^{1,2,*}

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

2. 辽宁省食品发酵技术工程研究中心, 辽宁沈阳 110161;

3. 沈阳市微生物发酵技术创新重点实验室, 辽宁沈阳 110866;

4. 内蒙古蒙牛乳业(集团)股份有限公司研发中心, 内蒙古呼和浩特 011500)

摘要: 海藻酸钠微胶囊制备的研究一直是微胶囊技术的重要组成部分。由海藻酸钠制成的益生菌胶囊有孔隙和裂缝, 通过利用不同壁材与海藻酸钠组合形成复合海藻酸钠微胶囊, 可对益生菌起到更有效的保护作用。本文概述了三类材料对海藻酸钠微胶囊复合的研究进展, 包括添加益生元刺激益生菌增长, 共混纳米材料来提升机械性能, 利用涂层成膜材料减少外部物质进入或内部芯材渗透。总结不同包埋结构的优缺点, 并对益生菌微胶囊包埋的发展趋势进行了展望, 以为复合海藻酸钠益生菌微胶囊的科学研究提供参考。

关键词: 复合海藻酸钠, 益生菌, 微胶囊化, 益生元, 纳米材料, 涂层成膜

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)03-0372-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030156



本文网刊:

Research Progress on Probiotic Microcapsules by Compound Sodium Alginate

CHANG Shihan^{1,2}, WU Junrui^{1,3}, LI Zijing^{1,3}, SHI Yudong^{4,*}, WU Rina^{1,2,*}

(1. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Engineering Research Center of Food Fermentation Technology, Shenyang 110161, China;

3. Shenyang Key Laboratory of Microbial Fermentation Technology Innovation, Shenyang 110866, China;

4. R & D Center, Inner Mongolia Mengniu Dairy (Group) Co., Ltd., Hohhot 011500, China)

Abstract: The preparation of sodium alginate microcapsules is crucial aspect of microcapsule technology. However, probiotic capsules made solely from sodium alginate tend to have pores and cracks, by using different wall materials combined with sodium alginate to form composite sodium alginate microcapsules, it can play a more effective protective effect on probiotics. This paper provides a summary of the research progress made in compounding sodium alginate microcapsules using three different materials, including addition of prebiotics to enhance the growth of probiotics, the blending of nanomaterials to enhance mechanical properties, and the utilization of coating film-forming materials to minimize the ingress of external substances or the permeation of internal core materials. The paper presents a comprehensive overview of the pros and cons of different embedding structures, and provides a projection of the future development of probiotic microcapsule embedding. The ultimate goal is to provide valuable insights for scientific inquiry and experimentation in the field of compound sodium alginate of probiotic microcapsules.

Key words: compound sodium alginate; probiotics; microencapsulation; prebiotics; nanomaterial; coating film

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972047); 沈阳市科技创新平台项目(21-103-0-14, 21-104-0-28)。

作者简介: 常诗晗(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: changshihan927@163.com。

* 通信作者: 史玉东(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品科学, E-mail: As-king@163.com。

乌日娜(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: wrn6956@163.com。

益生菌被称为“活微生物”,它通过降低肠道 pH、抑制有害微生物的黏附以及分泌细菌素来拮抗致病菌,保护肠道免受病原体侵害,维持肠道生态平衡,调节免疫系统^[1-2]。而要在宿主体内达到预期效果,益生菌的活菌数必须在 10^6 CFU/g 以上^[3]。但益生菌对胃中低 pH 和近端肠内高浓度胆盐环境都很敏感且在加工、储存过程中容易失活。因此,在益生菌菌株到达宿主肠道位点前,创造严格的生长环境以及开发有效保护益生菌活性的技术具有重要意义^[4]。

微胶囊技术被广泛应用于提高益生菌在不同环境的生存能力,是提高菌体耐受性,保持菌体活性和稳定,发挥益生作用的有效方法^[5]。在制备益生菌微胶囊过程中,不同壁材的使用是决定益生菌存活率高低及对外界不良环境抵抗能力高低的一个关键因素。随着对益生菌微胶囊化的研究越来越多,微胶囊化壁材的选择也更加广泛。

前人综述更关注某一种微胶囊壁材包埋递送的潜力,但随着新型材料的持续出现和益生菌包埋靶点的逐渐多样化,微胶囊改良的关键转向了能否组合不同的材料,以达到放大优点、弥补不足的目的。本文介绍了三种不同类型的壁材与海藻酸钠进行复合,对目前海藻酸钠微胶囊的复合改良思路以及不同壁材复合微胶囊对益生菌相关性能的影响进行归纳,最后对微胶囊化益生菌的前景进行展望。

1 海藻酸钠概述

海藻酸钠(SA)是微胶囊化的首选壁材,它能在多价阳离子的存在下立即形成颗粒。作为最常见的海藻酸盐,海藻酸钠具有无毒、可生物降解等特点^[6]。近年来,海藻酸钠微胶囊的制备十分受关注,主要体现在微胶囊直径的控制,保护芯材性质、微生物包埋等方面^[7],这些作用与海藻酸钠的结构和性质密切相关。

1.1 海藻酸钠结构与性质

海藻酸钠是一种安全、无毒、生物相容性良好的天然多糖,它由 β -D-甘露糖酸(M)和 α -L-月桂酸(G)组成。在制备微胶囊过程中,G 单元上的 Na^+ 与 Ca^{2+} 交换,在海藻酸盐分子之间形成交联,构成一个类似于“蛋盒”的网络结构^[8],这一稳定的结构能在酸、高胆盐、氧气等不利环境下保护芯材(图 1、图 2)。

海藻酸钠的水溶液具有较强的黏性,溶液的粘度主要受聚合度和浓度的影响^[9]。海藻酸钠微胶囊在胃酸中能够稳定生存,到达小肠溶解后^[10],还能抑制消化酶,减少胆固醇和葡萄糖的吸收,并控制脂肪消化^[11]。

1.2 海藻酸钠作为壁材的优点与局限性

海藻酸钠具有良好的生物相容性、无毒、低成本以及成胶机制简单等优点,是目前使用最广泛的包埋材料。但是单独的海藻酸钠微胶囊存在一些局限性,例如稳定性弱,在低酸环境下,其完整性易受离子和螯合剂的影响并且海藻酸钠微胶囊内的生物聚合网

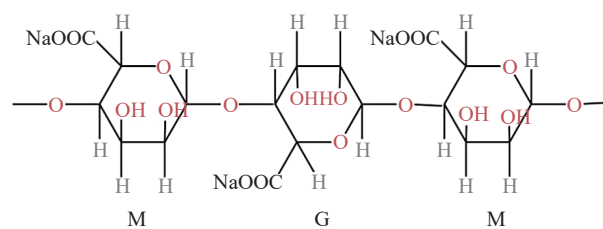


图 1 海藻酸钠结构式

Fig.1 Sodium alginate structural formula

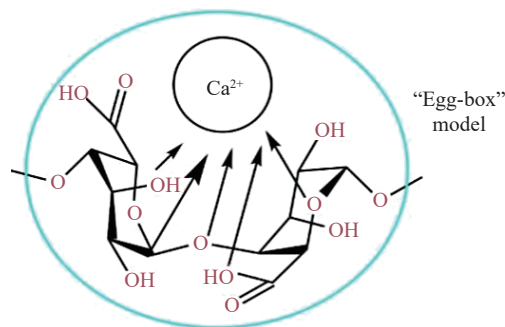


图 2 海藻酸钠与 Ca^{2+} 形成的“蛋盒”结构

Fig.2 “Egg-box” model formed by sodium alginate and Ca^{2+}

络相对多孔,存在生物分子渗漏严重、机械强度低等缺陷^[12]。该问题可以通过将海藻酸钠与其他生物聚合物复合,利用无机或有机填料材料掺入生物聚合物网络内^[13]或通过用生物聚合物层涂覆微凝胶来解决^[14]。

2 不同类型壁材复合海藻酸钠

将不同生物聚合物材料复合海藻酸钠后对益生菌进行保护和递送是解决单独海藻酸钠包被所存在问题的首选方式^[15]。主要的复合壁材有三种类型:a.添加益生元壁材刺激益生菌增长^[16];b.添加纳米级粒子来降低孔隙率及提高机械性能;c.在海藻酸钠微粒外成膜,减少外部物质进入或内部芯材渗透^[17]。表 1 列出了制备海藻酸钠复合壁材益生菌微胶囊及其效果。

2.1 益生元复合海藻酸钠

益生元是可发酵的碳水化合物,能够选择性刺激肠道中有益微生物的生长,以此来对宿主产生益生作用。菊粉和抗性淀粉是在微胶囊包埋中较常见的益生元,它们可以与益生菌协同,进而作为某些益生菌的增殖因子,维持优势菌的地位^[18]。

2.1.1 菊粉复合 SA 在益生菌包埋体系中,多糖和益生元的结合是较为常见的方法之一。海藻酸钠作为一种天然多糖可以提高包埋系统的稳定性,菊粉作为益生元存在促进微生物发酵并增加菌群数量。将菊粉添加到海藻酸钠微胶囊中,经过连续胃液处理 2 h 和肠液处理 3 h 后,未经包埋的鼠李糖乳杆菌活菌数下降了 6.7 个对数值,而被包埋的菌体活菌数仅下降 1.5 个对数值^[19]。Fayed 等^[20]将海藻酸盐负载的微胶囊与菊粉混合共同包埋动物双歧杆菌,发现模拟胃液中双歧杆菌的最大生存能力达到初始种群的 88.29%,明显高于游离细菌的活菌数量。

表 1 复合海藻酸钠微胶囊的代表性研究
Table 1 Representative study of composite sodium alginate microcapsules

壁材	菌种	包埋率	性质改进	参考文献
海藻酸钠-壳聚糖	植物乳杆菌	85.60%	活菌数仅下降0.5个对数值,提高了在胃液中存活率	[50]
海藻酸钠-抗性淀粉	干酪乳杆菌、木糖葡萄糖球菌	86.37%	70℃热处理后活菌数活仅减少1个对数值,提高了耐热性能	[51]
海藻酸钠-海带纳米纤维素	植物乳杆菌	83.51%	贮藏4周后活菌数仍能达到10 ⁸ CFU/g,提高储存期间存活率	[52]
海藻酸钠-壳聚糖	嗜酸乳杆菌、双歧杆菌	96.68%	制备的饲料置于水中12 h后,仅有13.04%发生溶解,有很好的水稳定性	[53]
海藻酸钠-果胶	干酪乳杆菌	87.56%	在冷冻干燥后饮料粉末中的益生菌存活率比游离菌提高87.56%	[54]
海藻酸钠-菊粉	鼠李糖乳杆菌、动物双歧杆菌	92.83%	储存8 d后,产品中活菌数保持在9.0 lg CFU/g以上,提高储存期间存活率	[55]
海藻酸钠-乳清蛋白	两歧双歧杆菌	80.00%	人工胃液处理后菌体存活率≥70%,乳清蛋白形成营养保护层,降低微胶囊通透性	[56]

此外,菊粉更是一类有良好应用前景的靶向递送载体。它的结构由 β -(2-1)-连接的果糖单元组成,D-果糖基键以单个葡萄糖终止,其特点在于异头碳呈 β 构型,在胃中不被消化,这一特性使其具有靶向递送到肠道的潜力^[21]。与海藻酸钠复合后形成的微胶囊具有良好的 pH 敏感性,能很好地控制芯材的释放,同时缓解芯材的突释现象。Nami 等^[22]将海藻酸钠与菊粉混合制备乳酸菌微囊,在模拟消化条件下微胶囊中益生菌存活率 $\geq 61\%$,同时其包埋成分中的菊粉是肠道定位释放的良性载体,促使益生菌在结肠 2 h 后释放,并稳定长达 12 h。菊粉也可充分应用到食品中,通常被用作可食性复合包装膜^[23],延长食品货架期和保质期。利用菊粉复合海藻酸钠包埋动物双歧杆菌并将其添加到酸奶中,在贮藏 30 d 后,复合菊粉的微胶囊比单独海藻酸钠微胶囊中的活菌数提高了 1.2 个对数值,较未包埋菌株的存活率提高了 75.44%^[24]。说明选择适合的壁材能够在很大程度上增加益生菌产品在贮藏过程中的稳定性,极大地提高了其实用价值。

2.1.2 抗性淀粉复合 SA 抗性淀粉作为自然界中的生物聚合物物质具有许多优点,包括多样化的功能性,能有效保护益生菌活力的抗酶解特性,作为缓释载体为芯材提供稳定运载以及具有良好的成膜特性,同时也可作为宿主结肠微生物或被包埋益生菌的碳源,发挥益生元功效^[25]。使用抗性淀粉和海藻酸钠来制备微胶囊可以改善益生菌的定植能力,提高益生菌的存活率^[26]。这可能与淀粉结构和细菌之间的黏附能力相关,黏附作用能够通过利用碳源实现促进菌株定植的目的^[27]。Ta 等^[28]研究了海藻酸钠与多种益生元成分组合后对干酪乳杆菌生存能力的影响,发现使用抗性淀粉-海藻酸钠包封的微胶囊是最稳定的,在暴露于模拟胃液 45 min 后,被包埋的活菌数仅下降了 1 lg(CFU/g),保护了超过 80% 的初始活菌。

抗性淀粉的添加对冻干后微胶囊中的益生菌存活也是十分有利的,将含有抗性淀粉的嗜酸乳杆菌海藻酸钠微胶囊冻干粉在胃肠道液处理 6 h 后活菌数仍可以保持在 10⁶ CFU/g 以上^[29]。抗性淀粉与海藻酸钠结合使用可以促进凝胶化的协同作用,为益生菌提供进一步的保护,但如果添加抗性淀粉过量也可能

会导致海藻酸钠凝胶基质的破坏,增大酸性环境下细菌死亡的风险^[30]。

益生元为益生菌提供营养,促进益生菌增殖,使得海藻酸钠基微胶囊中的活菌数量保持在较高水平。同时复合后的微胶囊具有更好的缓释靶向性,为益生菌的肠道靶向递送提供了新的途径,但是其对海藻酸钠的机械性能提升以及在减小孔隙率方面不如纳米材料。

2.2 纳米材料复合海藻酸钠

纳米包封是一项新兴的包埋技术,纳米材料不仅具有较高的生物相容性和生物利用度,而且能够有效促进包封物质向肠黏膜^[31]的渗透。采用纳米材料改性海藻酸钠,所形成的复合材料具有三维空间网络结构,能有效提高海藻酸钠的机械强度和阻隔性^[32]。

纤维素纳米微晶(CNC)是一种基于纤维素的纳米材料,由棒状纳米颗粒组成^[33]。作为一种新型的无毒纳米材料,在食品工业中具有很大的应用潜力,Huq 等^[34]研究了 CNC 对海藻酸钠基益生菌微胶囊的影响,发现 CNC 对海藻酸钠微球的抗压强度提高了 40% 并且能够降低海藻酸盐基质在冷冻干燥期间的孔隙率。在通过胃肠道过程中,与单独海藻酸钠微球相比,添加 CNC 的微胶囊中菌株的存活率提高了 37%。这可能是因为 CNC 填充到海藻酸钠结构中后会形成氢键使结构变得紧密,即使在冻干条件下微胶囊表面孔隙依旧很小,提高了对益生菌的保护作用。纳米微纤丝(CNF)作为另一种基于纤维素的纳米材料,能很好地改善海藻酸钠体系的氢键结合能力,促进海藻酸钠分子链与 Ca²⁺间形成盐桥,强化凝胶体系的网络结构,提高海藻酸钠胶粒的机械强度,以此来避免海藻酸钠微胶囊在不利环境下崩解造成的菌体损失。陈秉彦等^[35]制备的载菌海藻酸钠-纳米纤维素胶经胃肠液消化后活菌数下降 1.51 lg CFU/g,显著低于单独海藻酸钠组 2.99 lg CFU/g。可见纳米微纤丝作为强化海藻酸钠载体的优良壁材可以抵抗胃中的酸性环境,提高益生菌的胃肠道耐受性,进而使活菌数量得到提升。

使用纳米材料共混复合海藻酸钠,可降低微胶囊的孔隙率,提升海藻酸钠的稳定性和机械性能,但是也会存在分散困难、易聚集,影响产物均一性等问

题。这是因为物理共混改性并未改变海藻酸钠的化学结构,不能从根源上有效解决海藻酸钠亲水性强的问题,利用化学方法对海藻酸钠的结构进行修饰可以赋予其更强的理化性能^[36]。

2.3 涂层成膜材料复合海藻酸钠

除了上述两种方法外,使用成膜材料(如壳聚糖、乳清蛋白)构建外部涂层使其形成保护膜^[37],也是提高微胶囊益生菌在胃肠消化过程中稳定性的方法。这些涂层材料与微胶囊的表面相互作用,在微胶囊上产生额外的膜(层),这种结构能降低微胶囊的渗透性,减少在储存期间益生菌暴露于氧气,并改善其在低 pH 和高温下的稳定性,在很大程度上提高了对益生菌的保护,而且能够提高粘附性能以及保证活性物质的受控释放^[38]。

2.3.1 壳聚糖复合 SA 壳聚糖作为一种天然多糖,具有良好的吸湿性、透气性、成膜性、可降解性、抑菌活性等优点,是外部涂层的常用材料之一。海藻酸钠与壳聚糖均为天然的高分子材料,安全性好,无毒副作用,在动物机体内能够自然降解。二者作为聚电解质材料,在对活性物质进行封装时不仅能够减小孔隙且在缓释过程中起重要作用^[39]。其原理在于海藻酸钠是一种聚阴离子物质^[40],壳聚糖是一种聚阳离子物质,可与海藻酸钠形成聚合电解质络合物,离子凝胶中的钠离子在氯化钙中被钙离子取代,形成不溶于水的海藻酸钙,形成交联凝胶体系^[41],二者通过钙离子交联作用,降低微胶囊的孔隙率,可以很好地抵抗胃肠道的恶劣条件。利用壳聚糖进行外壳涂层,应用两者的静电交联聚合作用,起到缓释和封装隔离等作用,使微胶囊中的益生菌稳定性得到明显改善^[42]。Phu-ong 等^[43]使用海藻酸钠与壳聚糖封装植物乳杆菌,在模拟胃液 2 h 后,活菌数损失为 2.14 lg CFU/mL,为益生菌提供了有效的保护,具有良好的缓释药物性能。

不仅如此,这两种壁材复合制备的微胶囊膜致密性好,海藻酸钠-壳聚糖复合物中,壳聚糖的质子化氨基基团(NH_3^+)和海藻酸钠的羧酸盐基团(COO^-)之间的离子相互作用的形成导致更致密的膜^[44],弥补了海藻酸钠微胶囊通透性大的缺点,能够减少胆盐等不利因素的渗透,增强对益生菌的保护作用。Kamalian 等^[45]选取海藻酸钠和壳聚糖对假小链双歧杆菌进行包裹,发现添加壳聚糖的益生菌对胆盐的耐受性比单独海藻酸钠胶囊更强,且比其游离细胞有着更长的存活时间。海藻酸钠-壳聚糖复合体在与胆盐作用时可在微胶囊表面形成一层不溶性的物质,因而限制了胆汁扩散到微胶囊的内部,从而防止胆汁与益生菌的直接作用,可以保持益生菌在肠道中的释放效率。其原因可能是海藻酸盐与壳聚糖一道,作为壁材对于保护益生菌活力方面具有一个较高水平的协同作用。

2.3.2 乳清蛋白复合 SA 乳清蛋白营养价值高、网络锁水性强,对益生菌的活性有很好的保护作用。其优异的胶凝特性常被用作益生菌载体^[46],基于其两性

特性,通常与带负电荷的多糖(例如海藻酸盐)混合。当溶液 pH 高于乳清蛋白等电点时,蛋白质表面的“正电补丁”效应会将乳清蛋白自身的净电荷改变为正,从而引起与带负电荷的多糖相互作用形成可保护益生菌菌株的高密度凝胶网络。Luo 等^[47]利用海藻酸钠-乳清蛋白复合材料包埋植物乳杆菌,在扫描电子显微镜下观察到复合微胶囊的表面形成了致密而粗糙的聚集体,并且可以在微胶囊内部观察到附着的菌体细胞。与裸菌相比,包埋的益生菌在 4 °C 下的储存稳定性提高了约 15%,冻干后菌体存活率提高了 65.37%。Han 等^[48]制备的海藻酸盐-乳清蛋白微胶囊,用于保护和递送保加利亚乳杆菌和副干酪乳杆菌,与裸菌相比,微胶囊中菌体的存活率提高了 38.26%。海藻酸钠和乳清蛋白的复合,不仅可以减少乳清的废弃率,提高利用率以实现产品增值,而且为开发益生菌微胶囊新壁材提供了一种有效的方法。

使用成膜涂层材料包埋能有效提高益生菌的稳定性,如贮存稳定性、胃酸耐受性和温度耐受性等,并且该技术适用性强,任何益生菌都可以利用该技术包埋。其次,由于多种功能壁材的协同作用,多层包埋技术能有效提高益生菌的益生效果,如帮助益生菌在肠道内定植和释放等。然而,如果外壳涂层过多会使操作步骤复杂,生产成本提高,并且制备得到的微胶囊粒径普遍偏大^[49],增加益生菌芯材释放的难度,影响在胃肠道中的释放。而且由于工艺的复杂性和包埋层厚度的稳定性难以控制,较难实现工业化的应用。

3 结语与展望

海藻酸钠具有诸多优点,是微胶囊理想的壁材之一,已被广泛应用到益生菌包埋技术中,但单一的微胶囊壁材通常存在缺陷。选择合适的材料对海藻酸钠进行复合有利于加强对益生菌的保护作用,例如使用某些益生元材料刺激益生菌生长,提高包埋体系的靶向性缓释,共混纳米材料提升微胶囊整体的机械性能以及复配涂层成膜材料减小孔隙率,加强膜致密性。复合壁材制备的微胶囊结构稳定性更高,对益生菌的封装能力更强、缓控释放能力更好,此类研究有着广阔的前景。

未来海藻酸钠益生菌微胶囊包埋的发展方向可从以下几个方面展开:其一,可以在一些新型壁材与其复合改性方面进一步深入研究,提高海藻酸钠复合微胶囊机械性能和成胶稳定性、构建可控的释放系统以及进一步延缓益生菌释放的速率;其二,对壁材与益生菌结合的特性进行探究,以便更好地确定是否能提高益生菌在不良条件下的抗逆能力,为益生菌微胶囊带来新的组合形式和更好的包埋效果。此外,重点关注海藻酸钠与具有靶向作用壁材的复合,利用此特点与微胶囊技术结合,可在未来食品中应用于靶向定位系统,解决相关问题。复合海藻酸钠益生菌微胶囊提高了益生菌的使用价值,为新的益生菌制品开

发奠定了基础,在食品、医疗、保健等领域具有巨大的潜力。

参考文献

- [1] DING X, XU Y, WANG Y, et al. Carboxymethyl konjac glucomannan-chitosan complex nanogels stabilized double emulsions incorporated into alginate hydrogel beads for the encapsulation, protection and delivery of probiotics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 289: 119438.
- [2] XIE J, YAO M, LU Y, et al. Impact of encapsulating a probiotic (*Pediococcus pentosaceus* Li05) within gastro-responsive microgels on *Clostridium difficile* infections[J]. *Food & Function*, 2021, 12(7): 3180–3190.
- [3] THAIANE M, LOPES E J, CODEVILLA C F, et al. Development and characterization of microcapsules containing *Bifidobacterium* Bb-12 produced by complex coacervation followed by freeze drying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 90: 412–417.
- [4] LI H, LI Y, ZHANG T, et al. Co-encapsulation of *Lactobacillus paracasei* with lactitol in caseinate gelation cross-linked by *Zea mays* transglutaminase[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 147: 111535.
- [5] 陈臣, 张晓丛, 袁海彬, 等. 益生菌包埋前沿技术及其研究进展[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(1): 384–396. [CHEN C, ZHANG X C, YUAN H B, et al. Research progress on the advanced technology of embedding for probiotics[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(1): 384–396.]
- [6] PANICHIKKAL J, PRATHAP G, NAIR R A, et al. Evaluation of plant probiotic performance of *Pseudomonas* sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nanoparticles[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 166: 138–143.
- [7] 项郑昊, 周化岚, 张建国. 海藻酸钠微胶囊制备及其在微生物包埋中的应用[J]. *工业微生物*, 2021, 51(1): 43–49. [XIANG Z H, ZHOU H L, ZHANG J G, et al. Preparation of alginate microcapsules and its application in industrial microbiology[J]. *Industrial Microbiology*, 2021, 51(1): 43–49.]
- [8] JI R, WU J, ZHANG J, et al. Extending viability of *Bifidobacterium longum* in chitosan-coated alginate microcapsules using emulsification and internal gelation encapsulation technology[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1389.
- [9] SHARIATINIA Z, JALALI A M. Chitosan-based hydrogels: Preparation, properties and applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 115: 194–220.
- [10] SARKAR S, DAS D, DUTTA P, et al. Chitosan: A promising therapeutic agent and effective drug delivery system in managing diabetes mellitus[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116594.
- [11] NEZAMDOOST-S N, KHALEDABAD M A, AMIRI S, et al. Alginate and derivatives hydrogels in encapsulation of probiotic bacteria: An updated review[J]. *Food Bioscience*, 2023, 52: 102433.
- [12] 付琬璐, 李娜, 王杨松, 等. 改性海藻酸钠的研究应用[J]. *辽宁化工*, 2020, 49(2): 208–210. [FU W L, LI N, WANG Y S, et al. Research and application of modified sodium alginate[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2020, 49(2): 208–210.]
- [13] WANG X, FENG N, SHI Z, et al. Stimuli-responsive flexible membrane via co-assembling sodium alginate into assembly membranes of rod-like cellulose nanocrystals with an achiral array[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 262: 117949.
- [14] WU Y, ZHANG G. Synbiotic encapsulation of probiotic *Lactobacillus plantarum* by alginate-arabinoxylan composite microspheres[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 93: 135–141.
- [15] LI Q, LIN H, LI J, et al. Improving probiotic (*Lactobacillus casei*) viability by encapsulation in alginate-based microgels: Impact of polymeric and colloidal fillers[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108028.
- [16] 杨新建, 朱建晨, 田璐, 等. 基于海藻酸钠的复合壁材包被嗜酸乳杆菌及其效果评估[J]. *饲料工业*, 2019, 40(22): 34–40. [YANG X J, ZHU J C, TIAN L, et al. Effect evaluation of encapsulated *Lactobacillus acidophilus* by composite wall material based on sodium alginate[J]. *Siliao Gongye*, 2019, 40(22): 34–40.]
- [17] 李晴, 唐文倩, 谢柳佳, 等. 不同壁材包埋对益生菌性能的影响[J]. *食品与发酵科技*, 2020, 56(6): 92–99. [LI Q, TANG W Q, XIE L J, et al. Effects of different wall materials on characteristics of microencapsulated probiotics[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2020, 56(6): 92–99.]
- [18] 赵德胜. 不同壁材对益生菌微胶囊性能的影响[J]. *中国乳品工业*, 2017, 45(2): 29–32. [ZHAO D S. Effects of wall material on characteristics of microencapsulated probiotics[J]. *China Dairy Industry*, 2017, 45(2): 29–32.]
- [19] SBEHAT M, ALTAMIMI M, SABBAAH M, et al. Layer-by-layer coating of single-cell *Lactocaseibacillus rhamnosus* to increase viability under simulated gastrointestinal conditions and use in film formation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 838416.
- [20] FAYED B, ABOOD A, EL-SAYED H S, et al. A synbiotic multiparticulate microcapsule for enhancing inulin intestinal release and *Bifidobacterium* gastro-intestinal survivability[J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 193: 137–43.
- [21] LIU S, FANG Z, NG K. Incorporating inulin and chitosan in alginate-based microspheres for targeted delivery and release of quercetin to colon[J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111749.
- [22] 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-Food Science and Technology*, 2020, 124: 109190.
- [23] 朱峰, 陈景垚, 蓝蔚青. 菊粉的功能特性与开发利用研究进展[J]. *包装工程*, 2019, 40(1): 34–39. [ZHU F, CHEN J Y, LAN W Q. Research progress on the functional properties and utilization of inulin[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(1): 34–39.]
- [24] FAYED B, EL-SAYED H S, ABOOD A, et al. The application of multi-particulate microcapsule containing probiotic bacteria and inulin nanoparticles in enhancing the probiotic survivability in yoghurt[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2019, 22: 101391.
- [25] 黄雅萍, 叶景芬, 邓凯波, 等. 抗性淀粉用于微胶囊制备的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(7): 218–224. [HUANG Y P, YE J G, DENG K B, et al. Research progress of resistant starch for microencapsulation[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(7): 218–224.]
- [26] YAO M, XIE J, DU H, et al. Progress in microencapsulation of probiotics: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 857–874.
- [27] 黄雅萍, 刘霞, 杨书捷, 等. 莲子抗性淀粉体外消化的结构变化对短双歧杆菌增殖的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(8): 69–79. [HUANG Y P, LIU X, YANG S J, et al. Effect of structural changes of lotus seed resistant starch through digestion *in vitro* on *Bifidobacterium breve* proliferation[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2022, 22(8): 69–79.]
- [28] 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.

- [29] ETCHEPARE M D A, RADDATZ G C, CICHOSKI A J, et al. Effect of resistant starch (Hi-maize) on the survival of *Lactobacillus acidophilus* microencapsulated with sodium alginate[J]. *Journal of Functional Foods*, 2016, 21: 321–329.
- [30] HASSAN H, GOMAA A, SUBIRADE M, et al. Novel design for alginate/resistant starch microcapsules controlling nisin release[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 153: 1186–1192.
- [31] REQUE P M, BRANDELLI A. Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114: 1–10.
- [32] 王卉, 白燕, 杨波, 等. 海藻酸钠/微晶纤维素复合壁材的性能及对精油微胶囊缓释性的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(2): 111–116. [WANG H, BAI Y, YANG B, et al. Properties and effect on controlled release of essential oil microcapsules of sodium alginate/microcrystalline cellulose composite wall[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(2): 111–116.]
- [33] KHAN A, SALMIERI S, FRASCHINI C, et al. Genipin cross-linked nanocomposite films for the immobilization of antimicrobial agent[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(17): 15232–15242.
- [34] HUQ T, FRASCHINI C, KHAN A, et al. Alginate based nanocomposite for microencapsulation of probiotic: Effect of cellulose nanocrystal (CNC) and lecithin[J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 168: 61–69.
- [35] 陈秉彦, 林晓姿, 李维新, 等. 海藻酸钠-纳米纤维素胶粒对乳酸菌胃肠液耐受性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 179–185. [CHEN B Y, LIN X Z, LI W X, et al. Effects of sodium alginate-nanocellulose beads on the viability of lactic acid bacteria in simulated gastrointestinal fluid[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 179–185.]
- [36] 柴雅, 王鸿儒, 姚一军, 等. 海藻酸钠改性材料的研究进展[J]. *现代化工*, 2018, 38(7): 57–61. [CHAI Y, WANG H R, YAO Y J, et al. Research progress on modified sodium alginate materials[J]. *Modern Chemical Industry*, 2018, 38(7): 57–61.]
- [37] LI W, LIU L, TIAN H, et al. Encapsulation of *Lactobacillus plantarum* in cellulose based microgel with controlled release behavior and increased long-term storage stability[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 223: 115065.
- [38] 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*, 2018, 58(11): 1864–1877.
- [39] XUE W, LIU B, ZHANG H, et al. Controllable fabrication of alginate/poly-L-ornithine polyelectrolyte complex hydrogel networks as therapeutic drug and cell carriers[J]. *Acta Biomaterialia*, 2022, 138: 182–192.
- [40] ZHONG Y, YANG M, CHEN J, et al. Pre-crosslinking with putrescine improves mechanical and thermal properties of alginate film[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 340: 111314.
- [41] JING H, HUANG X, DU X, et al. Facile synthesis of pH-responsive sodium alginate/carboxymethyl chitosan hydrogel beads promoted by hydrogen bond[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 278: 118993.
- [42] QI X, SIMSEK S, CHEN B, et al. Alginate-based double-network hydrogel improves the viability of encapsulated probiotics during simulated sequential gastrointestinal digestion: Effect of biopolymer type and concentrations[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 165(PtB): 1675–1685.
- [43] PHUONG T L, BUJNA E, KUN S, et al. Electrospayed mucoadhesive alginate-chitosan microcapsules for gastrointestinal delivery of probiotics[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2021, 597: 120342.
- [44] VANDENBERG G W, DROLET C, SCOTT S L, et al. Factors affecting protein release from alginate-chitosan coacervate microcapsules during production and gastric/intestinal simulation[J]. *Journal of Controlled Release*, 2001, 77: 297–307.
- [45] KAMALIAN N, MIRHOSSEINI H, MUSTAFA S, et al. Effect of alginate and chitosan on viability and release behavior of *Bifidobacterium pseudocatenulatum* G4 in simulated gastrointestinal fluid[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 111: 700–706.
- [46] KRUNIC T Z, RAKIN M B. Enriching alginate matrix used for probiotic encapsulation with whey protein concentrate or its trypsin-derived hydrolysate: Impact on antioxidant capacity and stability of fermented whey-based beverages[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 130931.
- [47] LUO X, FAN S, HE Z, et al. Preparation of alginate-whey protein isolate and alginate-pectin-whey protein isolate composites for protection and delivery of *Lactobacillus plantarum*[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111794.
- [48] HAN C, XIAO Y, LIU E, et al. Preparation of Ca-alginate-whey protein isolate microcapsules for protection and delivery of *L. bulgaricus* and *L. paracasei*[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 1361–1368.
- [49] 李洪波, 李春爽, 张天琪, 等. 干酪乳杆菌/乳糖醇双层合生元微胶囊制备及其在橙汁中的应用[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(4): 93–99. [LI H B, LI C S, ZHANG T Q, et al. Preparation of *Lactobacillus casei*/lactitol synbiotic microcapsule and its application in orange juice[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(4): 93–99.]
- [50] VAZIRI A S, ALEMZADEH I, VOSSOUGH M. Improving survivability of *Lactobacillus plantarum* in alginate-chitosan beads reinforced by Na-tripolyphosphate dual cross-linking[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 440–447.
- [51] BILENLER T, KARABULUT I, CANDOGAN K. Effects of encapsulated starter cultures on microbial and physicochemical properties of traditionally produced and heat treated sausages (sucuks)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 75: 425–433.
- [52] BASU S, BANERJEE D, CHOWDHURY R, et al. Controlled release of microencapsulated probiotics in food matrix[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 238: 61–69.
- [53] 吴小嫚, 胡乐琴. 复合法制备嗜酸乳杆菌-双歧杆菌益生菌微胶囊饲料工艺及体外消化特性研究[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(1): 372–381. [WU X M, HU Y Q. Study on preparation and *in vitro* digestive characteristics of *Lactobacillus acidophilus*-*Bifidobacterium* probiotics microcapsules feed by composite method[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(1): 372–381.]
- [54] JOUKI M, KHAZAEI N, RASHIDI-ALAVIJEH S, 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.
- [55] ALVAREZ M V, BAMBACE M F, QUINTANA G, et al. Prebiotic-alginate edible coating on fresh-cut apple as a new carrier for probiotic *Lactobacilli* and *Bifidobacteria*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 137: 110483.
- [56] 周莉, 王晓瑞, 谭静, 等. 海藻酸钠-乳清蛋白复合益生菌微胶囊的构建及性能评价[J]. *中国食品添加剂*, 2020, 31(4): 108–113. [ZHOU L, WANG X R, TAN J, et al. Construction and performance evaluation of sodium alginate whey protein composite probiotics microcapsules[J]. *China Food Additives*, 2020, 31(4): 108–113.]