DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250826003
引用格式: 刘悦, 任大勇, 刘猛, 等. 益生菌单菌封装技术、功能特性及其在食品工业中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 228–236.
LIU Y, REN DY, LIU M, *et al*. Research progress in single-cell encapsulation technology, functional characteristics and its applications in the food industry of probiotics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 228–236. (in Chinese with English abstract).

益生菌单菌封装技术、功能特性及其在食品工业中的应用研究进展

刘 悦[1,2], 任大勇[1], 刘 猛[3], 刘大群[2], 张程程[2], 章检明[1,2,4*]

(1. 吉林农业大学食品科学与工程学院, 长春 130000; 2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 杭州 310000; 3. 吕梁学院生物与食品工程系, 吕梁 033000; 4. 农产品质量安全全国重点实验室, 杭州 310000)

摘 要: 益生菌因对宿主具有维持肠道菌群平衡、免疫调节功能和促进营养吸收等多种健康益处而备受关注, 但其在生产加工、储存、运输(温度、pH、光照等)和体内消化(酸碱度、胃肠道酶、胆汁等)过程中存在存活率低的问题。为了降低外界环境因素对益生菌的损伤, 从而提高对益生菌的保护作用, 单菌封装技术应运而生。单菌封装技术通过物理或化学方法在单个益生菌细胞表面形成保护层, 显著提高了其稳定性和功能性。因此, 本文系统地介绍了益生菌单菌封装技术、功能特性及其在发酵果蔬汁、益生菌粉剂等食品工业中的实际应用, 并探讨了该技术在食品行业中未来的研究挑战与发展趋势。期望为益生菌单菌封装的制备及其在功能性食品领域中应用提供参考和理论依据。

关键词: 益生菌; 单菌封装; 功能特性; 食品工业

Research progress in single-cell encapsulation technology, functional characteristics and its applications in the food industry of probiotics

LIU Yue[1,2], REN Da-Yong[1], LIU Meng[3], LIU Da-Qun[2], ZHANG Cheng-Cheng[2], ZHANG Jian-Ming[1,2,4*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Jilin Agricultural University*, *Changchun* 130000, *China*; 2. *Key Laboratory of Postharvest Preservation and Processing of Fruits and Vegetables*, *China National Light Industry*, *Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province*, *Institute of Food Science*, *Zhejiang Academy of Agricultural Sciences*, *Hangzhou* 310000, *China*; 3. *Department of Biological and Food Engineering*, *Lyuliang University*, *Lyuliang* 033000, *China*; 4. *State Key Laboratory for Quality and Safety of Agro-products*, *Hangzhou* 310000, *China*)

ABSTRACT: Probiotics are recognized for their health benefits, such as regulating intestinal microbiota,

收稿日期: 2025-08-26
基金项目: 浙江省农业重大技术协同推广计划项目(2025ZDXT04-4)
第一作者: 刘悦(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向食品微生物。E-mail: hillaryly@163.com
***通信作者:** 章检明(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向食品微生物。E-mail: zjm1990523@163.com

enhancing immune function and improving nutrient absorption. However, their viability is often reduced by exposure to harsh conditions during production, storage, transportation (temperature fluctuations, pH, light, *etc*), and gastrointestinal transit (gastric acid, enzymes, bile salts, *etc*). To reduce the damage to probiotics caused by external environmental factors and thereby enhance the protective effect on probiotics, single-cell encapsulation technology has emerged. This technology involves coating individual bacterial cells with a protective layer through physical or chemical means, thereby enhancing their stability and functionality. This review systematically outlined current single-cell encapsulation techniques, functional properties of encapsulated probiotics, and their applications in the food industry, including uses in fermented fruit and vegetable juices and probiotic powders. Furthermore, it discussed future challenges and research trends in this field. The aim is to provide a theoretical foundation and practical insights for the development and functional food applications of encapsulated probiotics.

KEY WORDS: probiotics; single-cell encapsulation; functional properties; food industry

0　引　言

益生菌是指摄入足够剂量对身体有益的活性微生物[1–2], 广泛存在于人类和动物的肠道, 以及乳制品、肉制品和蔬菜制品等食品中。益生菌具有调节肠道内菌群平衡, 促进营养吸收和保持肠道健康的作用[3]。根据研究报道, 摄入 10^7 到 10^{11} 个菌落形成单位(CFU)的益生菌能改善宿主的微生态环境, 有效地促进人体健康水平的提升[4–5]。因此, 益生菌在食品和医药领域得到了广泛的应用。

随着消费者对营养健康食品需求的增加, 将益生菌添加到食品中已成为食品开发的热点[6]。但是益生菌在食品加工、运输、储存及食用过程中其存活率会大幅度降低。其中食品在加工、运输和储存过程中的环境(温度、pH、光照等)以及经口服进入人体消化道的环境(酸碱度、胃肠道酶、胆汁等)是影响存活率的关键因素[7]。例如, 益生菌在冷冻过程中, 细胞冰晶的形成会对益生菌细胞造成损害; 而在食品干燥过程中, 脱水会直接影响益生菌蛋白质结构、细胞壁以及脂膜的物理状态, 进而损害益生菌细胞结构的完整性。此外, 益生菌在进入胃肠道后, 由于胃液的强酸性和高酶活性以及肠道内的胆汁盐类, 会导致益生菌细胞结构及代谢产物活性的丧失[8], 极大地削弱存活率, 降低对人体健康的益处[9–10]。鉴于此, 开发一种能够有效提高益生菌在苛刻环境条件下存活率的技术显得尤为迫切。

目前, 科研人员正致力于益生菌封装技术的研发, 该技术旨在通过构建保护屏障来降低外界环境对益生菌的损伤, 从而提高对益生菌的保护作用[10]。喷雾干燥、冷冻干燥、流化床及乳化等传统封装方法是目前运用最广泛的封装技术[11]。虽然通过这些技术封装后, 在一定程度上提高了益生菌在加工环境和胃肠道的存活率[12]。但也有一些缺陷, 如粒径大小不一、操作复杂、设备要求高等问题[13]。研究人员为了解决上述问题, 开发了益生菌单菌封装新技术。单菌封装技术是指运用特定材料将单个微生物与外部环境相隔绝, 可以有效地提升单个细菌对环境的耐受性, 提高存活率, 从而提升益生菌在食品与医药中应用的效果[13]。

本文介绍了益生菌单菌封装的制备方法, 包括静电相互作用封装、配体络合物封装、共价结合封装、疏水性沉积封装、脂质自组装封装、生物矿化封装以及单菌封装的功能特性, 例如环境耐受性、肠道黏附性、抗菌特性和肠道定点释放等, 最后对益生菌单菌封装在发酵果蔬汁、益生菌粉剂、可食用膜等食品工业中的应用进行探讨, 期望为益生菌单菌封装的制备及其在食品领域中应用提供参考和理论依据。

1　益生菌单菌封装技术

单菌封装技术巧妙地融合了物理、化学以及生物学原理, 通过在单个益生菌表面形成保护层, 不仅能够提高封装后单个细菌在极端环境下的存活率, 还能提升肠道内附着效率[14]。目前, 单菌封装方法按作用机制可以分为静电相互作用封装、配体络合物封装、共价结合封装、疏水性沉积封装、脂质自组装封装、生物矿化封装(图 1)。这些封装技术能够将单个细菌封装, 使封装后的细菌呈现出对各类严苛环境的高度抵抗力, 且不同封装技术所形成的保护涂层展现出多元化的应用潜力[13]。

1.1　静电相互作用封装

由于益生菌的细胞膜富含带有羟基基团的磷壁酸和肽聚糖而带有负电荷[15–17], 因此能通过正负电荷相吸的静电相互作用, 直接在细菌表面吸附带有正电荷的物质(如阳离子脂质体、阳离子聚合物和阳离子纳米粒子等[18]) (表 1)。例如, ZHOU 等[19]将带正电的壳聚糖利用静电相互作用成功的吸附在了 EcN 表面, 使其能够调节肠道微生物群落, 提高肠道菌群中有益菌的数量。近些年, 利用静电作用介导的逐层自组装技术(layer-by-layer self-assembly, LbL)在益生菌单菌封装中成为最主要的方法。LbL 是指在细菌表面连续交替涂抹带相反电荷的涂层, 可以改变益生菌表面

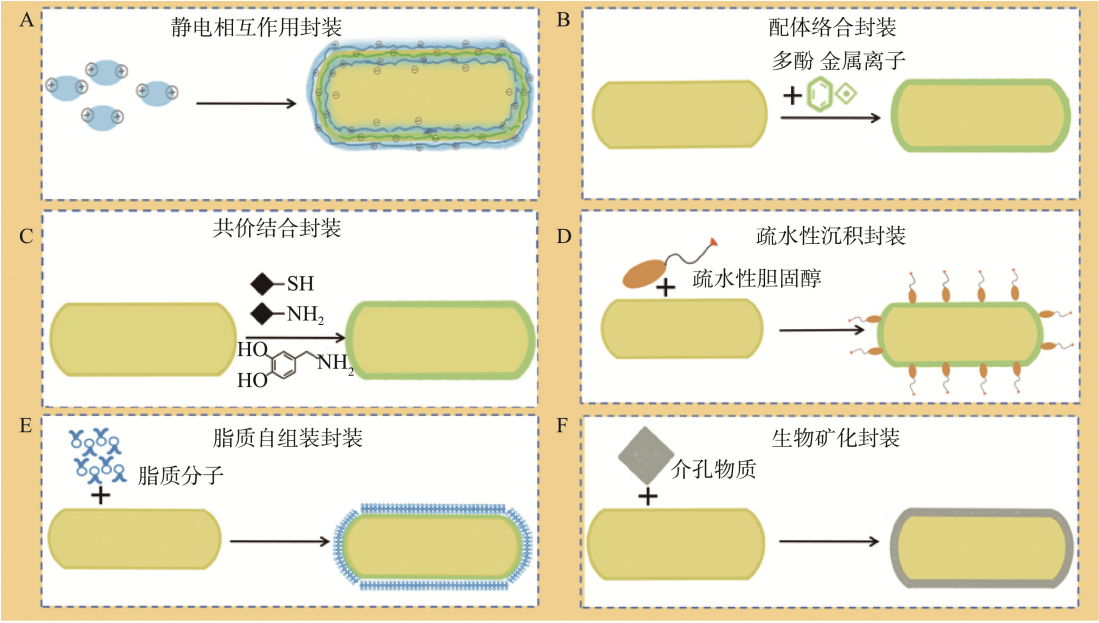


图 1 单菌封装方法

Fig.1 Single-cell encapsulation methods

表 1 静电相互作用封装益生菌方法及其关键特性

Table 1 Electrostatic interaction encapsulation method for probiotics and its key characteristics

封装方法与作用机制	封装材料	益生菌	关键特性	参考文献
静电相互作用	壳聚糖	EcN	调节肠道微生物群落	[19]
静电相互作用	ZNP、果胶	植物乳植杆菌 550	对极端条件具有超强抵抗力	[20]
静电相互作用	壳聚糖/玉米醇溶蛋白/吐温-80/岩藻多糖纳米颗粒	鼠李糖乳酪杆菌 LGG	对极端条件具有超强抵抗力	[21]
静电相互作用	海藻酸盐、壳聚糖	凝结魏茨曼氏菌	提高益生菌在胃肠道中的存活和释放	[22]
静电相互作用	黑籽蛋白、菊粉	鼠李糖乳酪杆菌	提高益生菌存活率	[23]
静电相互作用	壳聚糖、姜黄素	EcN	提高益生菌在胃肠道中的存活和黏附	[24]
静电相互作用	塔拉胶、氨基酸、红参膳食纤维	罗伊氏粘液乳杆菌 KGC 1901、干酪乳酪杆菌 KGC 1201、发酵粘液乳杆菌 KGC1601	对极端条件具有超强抵抗力和更强的黏附和增殖能力	[25]
静电相互作用	乳清蛋白分离纤维、海藻酸钠、羧甲基纤维素	植物乳植杆菌 LP90	对极端条件具有超强抵抗力	[26]
静电相互作用	壳聚糖、羧甲基纤维素	嗜酸乳杆菌	对极端条件具有超强抵抗力	[27]

注：玉米醇溶蛋白纳米颗粒(zein nanoparticles, ZNP)；大肠杆菌 Nissle 1917 (*Escherichia coli* Nissle 1917, EcN)。

电荷，显著提升益生菌在加工、运输、储存及食用过程的存活率。同时 LbL 还能促进了益生菌与肠道黏膜的稳固结合，高效地实现细菌表面的功能性集成[18,28]。LIU 等[20]研究使用 LbL 技术制备了以 ZNP 为内层，果胶为外层的双层封装植物乳植杆菌 550，其耐热性显著增强。相反，当 ZNP 用作最外层时，植物乳植杆菌 550 在储存期间的存活率显著提高。LEI 等[21]使用壳聚糖和玉米醇溶蛋白/吐温-80/岩藻多糖纳米颗粒对鼠李糖乳酪杆菌 LGG 进行 LbL 多层封装，研究发现多层封装后的 LGG 在加工、储存及胃肠道环境下的存活率显著提高。

当前，为了提升 LbL 的生物相容性，很多天然、无毒的生物聚合物材料例如硫酸葡聚糖、羧甲基纤维素、透明质酸钠、壳聚糖、多聚赖氨酸、鱼精蛋白及明胶等，已成为 LbL 单菌封装常用壁材。ANSELMO 等[22]通过 LbL 技术将海藻酸盐与壳聚糖逐层封装在凝结魏茨曼氏菌表面，提高了凝结魏茨曼氏菌在酸性和胆盐条件下的存活率以及

在肠道中的黏附与释放。MARAM 等[23]使用黑籽蛋白和菊粉单菌封装鼠李糖乳酪杆菌, 结果显示封装后的益生菌存活率显著提高。总之, LbL 具备以下 3 个优势: ①材料利用率高; ②通过调整聚合物种类、浓度及组装顺序可调控涂层特性, 适应不同需求; ③环境操作温和, 利于保持益生菌活性。因此, 这些结果表明利用 LbL 多层封装技术可有效提高益生菌在恶劣环境下的存活率。但是, LbL 也存在一些缺陷, 如当环境 pH 或离子浓度改变时(胃酸环境), 涂层易分解, 使益生菌失去保护屏障。此外, 细菌周围的高电荷密度可能会抑制代谢活性, 严重时甚至引发细胞膜损伤。因此, 可在 LbL 技术中引入氢键、疏水作用等非共价相互作用来增强涂层稳定性和安全性。

1.2　配体络合物封装

配体络合物的生成原理主要在于配位键的形成, 由一定数量的配体围绕中心离子通过配位键构成络合物[29]。金属-多酚网络(metal–phenolic networks, MPN)是目前利用配体络合物进行单菌封装最常用的手段。其原理是基于多价金属离子与酚类化合物之间的金属-酚配位作用, 二者通过配位键快速自组装形成稳定络合物, 并进一步结合至单个细菌表面[30]。目前, MPN 组装过程可分为浸入法和直接组装法。浸入法是将金属离子与多酚物质溶解在水溶液中, 将底物完全浸入其中, 在一定反应时间后, 通过金属-酚配位作用在底物表面形成稳定的涂层, 此方法适用于在不规则的底物上构建涂层, 不局限于平面 2D 的底物。但由于需要底物浸入在溶液中, 对化学原料的需求较大, 因此一定程度上制约了其在日常生活中及工业生产中的广泛应用程度。直接组装法是指将金属离子、多酚化合物与底物混合后通过一步自组装法在底物表面形成涂层。该方法相比于浸入法简便易行、重现性高、壁材来源广泛、经济安全。因此, 直接组装法是利用 MPN 组装益生菌最为常用的方法。

目前, Zn^{2+}、Cu^{2+}、Fe(III)、Ag^{+}、Ti^{4+}等多价金属离子和没食子酸(gallic acid, GA)、没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)、单宁酸(tannic acid, TA)[31–32]、茶多酚(tea polyphenols, TP)等多酚化合物是利用 MPN 封装单个益生菌研究较多的壁材[33](表 2)。WASUWANICH 等[34]通过 GA 与 Fe(III)组合对枯草芽孢杆菌进行单菌封装, 在冷冻条件下有效保护枯草芽孢杆菌的存活率。LUO 等[35]使用 TA 和 Fe(III)封装 EcN, 显著提高其肠道定植能力, 有效改善小鼠肠炎。GUO 等[36]也通过 Fe(III)和 TA 封装 EcN, 发现封装后的 EcN 增强了对抗生素的抵抗能力, 提高了在胃肠道中的稳定性。但是 MPN 涂层由于金属离子与多酚化合物接触即刻发生反应, 此方法无法控制涂层的厚度, 导致性能参数的不可控性[39]。因此, 在未来应加大对 MPN 反应条件及涂层均一性的研究。

1.3　共价结合封装

共价结合封装主要原理是利用化学物质与细菌表面的特定基团通过共价键连接, 在细菌表面形成保护层的封装技术(图 1C), 该封装技术通常能提高细菌的耐受性和存活率。目前共价结合封装的材料为多巴胺、单宁酸、石墨烯等。其中, 多巴胺是最常用的共价结合单个益生菌的封装材料, 其原理是多巴胺可氧化聚合形成聚多巴胺(polydopamine, PDA), PDA 通过与细菌细胞膜表面的胺基、巯基或羟基形成共价键或氢键, 从而在细菌表面形成一层保护层[10](表 3)。PAN 等[40]通过氧化自聚集反应将多巴胺和壳聚糖沉积到 EcN 上, 从而形成 PDA 和壳聚糖封装的 EcN。封装组 EcN 相较于未封装组在胃肠道的耐受性和存活率显著提高。WANG 等[41]制备了聚多巴胺涂层的 EcN, 该研究表明聚多巴胺涂层的 EcN 在模拟胃液中培养 4 h 后, 其活力与未封装前相比提高了 10 倍。因此, 多巴胺共价封装具有绿色环保、操作简单、易于表面修饰等特点, 该技术为功能食品与生物医药领域的开发提供了创新性解决方案, 具有广阔的产业化前景[43]。但 PDA 涂层厚度难精确控制、黑色素样特性影响光学检测等缺陷, 因此未来研究需突破现有缺陷。

1.4　疏水性沉积封装

磷脂双分子层作为细胞膜的基本结构单元, 具有极性头部与非极性尾部[44]。疏水性沉积封装原理在于一些两亲类聚合物可通过疏水相互作用在细胞膜表面沉积, 从而对单菌进行封装(图 1D)。例如, 研究发现胆固醇和脂肪酸可将疏水长链嵌在细胞膜上, 可将细菌进行封装[45–46](表 4)。

表 2　配体络合物封装益生菌方法及其关键特性

Table 2　Ligand complexation encapsulation method for probiotics and its key characteristics

封装方法与作用机制	封装材料	益生菌	关键特性	参考文献
配体络合	GA、Fe(III)	枯草芽孢杆菌	对极端条件具有超强抵抗力	[34]
配体络合	TA、Fe(III)	EcN	缓解结肠炎	[35]
配体络合	TA、Fe(III)	EcN	缓解肠炎及防止抗生素的干扰	[36]
配体络合	TA、Fe(III)	EcN	对极端条件具有超强抵抗力	[37]
配体络合	TA、Fe(III)	酵母菌	增强抵抗外部攻击能力	[38]

JIA 等[47]合成了一种由胆固醇、聚乙二醇和原卟啉为材料的两亲类光敏剂(Chol-PEG-PpIX), 该光敏剂可利用胆固醇的疏水相互作用封装在 EcN 表面。在光照条件下, $^1O_2$(单线态氧)可引发膜脂过氧化反应, 使细菌外膜通透性的增强从而 Chol-PEG-PpIX 进入细菌内部。这项研究为基于疏水作用对单个细菌封装提供了新思路。但是, 疏水作用力本身强度较低, 通常需结合其他相互作用力共同作用方能维持涂层稳定性。目前, 利用疏水性沉积封装益生菌的研究较少, 因此未来需要加大在这一领域的研究。

1.5 脂质自组装封装

一些两亲类物质除了可以通过疏水性沉积封装外, 还可以通过脂质自组装对细胞膜表面进行封装(图 1E)(表 4)。CAO 等[48]提出了一种利用脂质体封装细菌的方法, 通过生物界面超分子自组装, 在大肠杆菌外部封装一层脂质体, 显著的提高了大肠杆菌在小鼠胃部和肠道的存活率和定植率。ZHOU 等[49]通过在鼠李糖乳酪杆菌与脂质体自组装, 每个细菌表面封装了保护层, 有效保护其受到强酸和消化酶的攻击, 显著提升了鼠李糖乳酪杆菌在帕金森病老鼠模型中的肠道靶向递送效率。随后在小肠中释放, 因此未来可加强对于提高肠道释放精准性的研究。

1.6 生物矿化封装

生物矿化封装原理在于矿物质在细菌表面形成一个稳定的外壳从而保护其免受环境压力的破坏, 凭借其独特的高孔隙度、优异的力学性能、生物相容性[50]及易于表面修饰[51]等特点, 该封装方法在单菌封装研究和应用中受到了广泛的关注[52](图 1F)(表 5)。WEI 等[53]研究通过介孔二氧化硅纳米颗粒封装长双歧杆菌婴儿亚种, 并在其表面定向修饰碳量子点, 构建兼具物理屏障保护和抗菌功能的益生菌。实验发现封装后的长双歧杆菌婴儿亚种能够抵抗胃酸和抗生素, 并显著提升了在肠道中的黏附率和存活率。GENG 等[54]研究利用生物界面矿化法在脆弱拟杆菌 BF839 表面形成一层具有强抗性的碳酸钙涂层, 可提高脆弱拟杆菌在生产和口服过程中存活率。因此, 生物矿化封装对于开发细菌性口服制剂及提高制剂存活率提供了一种具有广泛应用前景的新途径[55−56]。尽管生物矿化封装具有合成简单、比表面积大大、对细菌损害小[57]等优点, 但是在工业化生产和可重复性上仍具有很大挑战, 在未来应该充分开展研究。

2 功能特性

益生菌单菌封装技术可具备以下功能: (1)提高益生菌在加工、运输、储存环境和在食用过程中胃肠环境下存活率; (2)赋予益生菌更好的肠道黏附定殖能力; (3)赋予益生菌抗菌、靶向释放等功能特性; 如图 2。

2.1 提高环境耐受性

益生菌在加工(冷冻干燥、热加工)、储存(温度波动、氧气渗透)及胃肠递送(胃酸、胆盐侵蚀)过程中易受多重破坏, 导致益生菌活性显著衰减[58]。研究表明, 单菌封装技

表 3 共价结合封装益生菌方法及其关键特性

Table 3 Covalent binding encapsulation method for probiotics and its key characteristics

封装方法与作用机制	封装材料	益生菌	关键特性	参考文献
共价结合	多巴胺、壳聚糖	EcN	对极端条件具有超强抵抗力	[40]
共价结合	多巴胺	EcN	对极端条件具有超强抵抗力	[41]
共价结合	多巴胺	酵母细胞	增强抵抗外部攻击能力	[42]

表 4 使用两亲类物质作为材料进行封装益生菌方法及其关键特性

Table 4 Method for encapsulating probiotics using amphiphilic substances as materials and its key characteristics

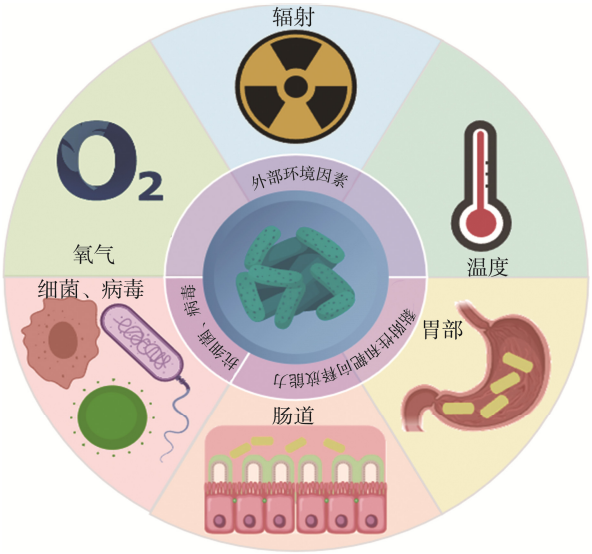
封装方法与作用机制	封装材料	益生菌	关键特性	参考文献
疏水性沉积	胆固醇、聚乙二醇和原卟啉	EcN	具有良好的抗菌性能	[47]
脂质自组装	二油酰磷脂酸、胆固醇	EcN	对极端条件具有超强抵抗力	[48]
脂质自组装	大豆卵磷脂、胆固醇和维生素 E	鼠李糖乳酪杆菌	增强益生菌对肠道胃液和消化酶的耐受性	[49]

表 5 生物矿化封装益生菌方法及其关键特性

Table 5 Biomineralization encapsulation method for probiotics and its key characteristics

封装方法与作用机制	封装材料	益生菌	关键特性	参考文献
生物矿化	二氧化硅	长双歧杆菌婴儿亚种、EcN	对极端条件具有超强抵抗力	[53]
生物矿化	聚乙烯吡咯烷酮、碳酸钙	脆弱拟杆菌(BF839)	缓解结肠炎、对极端条件具有超强抵抗力	[54]

术通过构建物理屏障阻隔外界因子(紫外线、机械应力、强酸环境)，维持菌体活性，经封装的益生菌活菌数可稳定在≥1.0×10^8 CFU/g。例如 FAN 等[37]开发的 TA/Fe(III)纳米涂层使大肠杆菌冻干存活率从 32%提升至 89%；SUNG 等[42]利用聚多巴胺封装酵母菌，使其抗溶菌酶能力提升 4.2 倍；JI 等[38]使用 TA-Fe(III)将酵母菌封装后可以保护酵母菌免受紫外线辐射、酶攻击、纳米颗粒等外部影响；FRANCO 等[59]通过单菌封装使益生菌胃酸存活率提高 1.4 倍。总之，单菌封装技术可解决传统益生菌制品货架期短、存活率低等产业难题，通过精准设计的封装体系构建防护结构，已成为保障益生菌从生产到食用全链条稳定性的关键技术。



注：本图使用 MedPeer (www.medpeer.cn)绘制。

图 2　单菌封装功能特性

Fig.2　Functional characteristics of single-cell encapsulation

2.2　提高肠道黏附能力

益生菌需通过竞争性占据宿主黏附位点以阻断病原体侵袭通路[60]，但其表面黏附蛋白在肠道消化环境中易发生结构损伤，导致黏附能力下降，直接影响黏附效果[61–62]。研究表明单菌封装技术可针对性解决此问题。HAN 等[24]采用逐层封装技术将 EcN 封装在姜黄素脂质体内，结果显示封装后的 EcN 促进了其在肠道的增殖和黏附能力。YE 等[25]研究使用红参膳食纤维制成的涂层将乳酸菌进行封装，与未封装的菌株相比，封装菌株的黏附性显著增加 4.92 倍，在 24 h 孵育后，封装菌株比未封装菌株的黏附和增殖数量明显增多。单菌封装技术通过物理屏障保护菌体表面黏附蛋白完整性，显著增强益生菌与肠道上皮的相互作用，为益生菌在肠道黏附定植提供了可靠技术保障[63]。

2.3　赋予益生菌其他功能特性

益生菌封装材料的选择直接影响益生菌本身的功能特性。例如，抗菌肽、光敏剂、病毒抗原等通过封装在益生菌表面可以赋予菌体抗菌、抗癌等功能[64–65]。本团队创新性地将多巴胺与抗菌肽 YHX-1 共价结合在植物乳植杆菌表面，构建出兼具黏附与抗菌双功能的活性乳酸菌(抑菌率>90%)，为开发新型活菌抗菌制剂提供了新思路。另一方面，单菌封装技术还能显著提升益生菌递送精准度。甲基丙烯酸共聚物(Eudragit)作为一种具备多重功能的聚合物材料，在益生菌递送中展现出了重要潜力。FENG 等[66]利用 pH 敏感材料 Eudragit 封装大肠杆菌，当进入肠道(pH>5.5)时涂层溶解并释放菌体，使目标位点活菌密度提升 3.2 倍，存活时间延长至 72 h。该策略通过“智能释放”机制有效规避胃酸损伤，同时增强益生菌在肠道的功能表达。总之，单菌封装技术不仅赋予益生菌超越其天然特性的新功能(抗菌、靶向释放等)，更实现了活性成分的时空可控释放，为开发高附加值功能性食品提供了创新技术路径。

3　在食品工业中的应用

益生菌通常被添加到食品中以提供潜在的发酵特性或健康益处[67–68]。这些产品包括乳制品、发酵肉制品和发酵果蔬制品等。然而，直接食用益生菌或含益生菌的食品存在一些问题，比如在生产、储存、运输和胃肠道过程中失去活性。因此。益生菌单菌封装技术不仅可以提升产品质量，还能提高益生菌在食品中存活率。

3.1　在发酵果蔬汁中的应用

发酵果蔬汁是利用益生菌对果蔬进行发酵制成的饮品，富含有机酸、维生素及活性酶，兼具天然风味与营养强化功能，该产品不仅延长了果蔬制品的保质期，还能促进肠道健康，符合现代消费者对天然功能性饮品的需求[69–70]，然而在生产发酵果蔬汁时，果蔬汁里的酸和酶会伤害益生菌，导致益生菌活性下降，影响发酵果蔬汁风味和营养[71]。使用单菌封装后的益生菌能显著提高其在果蔬汁酸性环境中的存活率，有效隔离有害成分并抑制杂菌污染，从而保障发酵效率和产品安全性。LI 等[26]研究发现封装后的植物乳植杆菌 LP90 在蓝莓汁中的存活率从 21%提升至 72%。相较于传统发酵剂，使用单菌封装技术可在保障菌株高活性(存活率>70%)的同时，大幅提升生产稳定性，更适合工业化应用，为开发安全、营养且风味稳定的新型发酵果蔬汁提供了关键技术支撑。

3.2　在益生菌粉剂制备中的应用

益生菌粉剂是通过冷冻干燥或喷雾干燥技术将高浓度活菌固定化的功能性制品，凭借高活菌密度和标准化生产特性，成为食品、保健品中稳定递送功能性菌群的重要载体。但是。益生菌菌粉在冷冻干燥或预处理中面临细胞膜损伤、蛋白质变性及机械剪切破坏等多重威胁[72]。单菌封装技术通过构建物理屏障可有效缓解上述损伤，例如 LIU 等[20]采用果胶和 ZNP 封装植物乳植杆菌，使菌体在

65 ℃热处理后存活率较未封装组提高 2 倍; PRIYA 等[27]利用聚电解质逐层包埋嗜酸乳杆菌, 其冷冻干燥存活率从73%提升至 92%。单菌封装技术成为提升益生菌菌粉应用价值的关键手段, 通过维持益生菌粉剂加工后的活菌数, 不仅确保了菌粉的贮藏稳定性与肠道定植效率, 还为开发耐高温、抗逆性强的功能性发酵剂提供了技术基础。

3.3 在可食用食品膜制备中的应用

可食用食品膜是以天然生物大分子为基础制成的可降解薄膜, 在食品表面上使用或作为食品成分以控制食品中的微生物和物理化学变化[73]。通过向膜中添加功能性化合物(抗氧化剂、抗菌剂、益生元和益生菌)可提高包装产品的营养价值和功能[74]。研究表明, 在可食用膜中引入益生菌可增强膜机械性能并赋予抗菌等功能, 但在成膜加工中, 益生菌面临高温、蒸发脱水及机械剪切等胁迫, 导致存活率下降[75−76]。单菌封装技术通过构建保护性屏障显著改善此问题: MARAM 等[23]采用黑籽蛋白-菊粉复合物封装鼠李糖乳酪杆菌, 使菌体在成膜加工后存活率较未封装组提高 3.1 倍, 拉伸强度和断裂伸长率分别增加 50%和32.5%。此外, 封装层可阻隔热应力传导、减少细胞膜脂质过氧化, 同时维持膜材塑化阶段的延展性(断裂伸长率大于 85%)。因此, 单菌封装技术为开发具有高活菌性的功能性可食用膜提供了关键技术支撑, 对推动活性包装在食品保鲜领域的产业化应用具有重要意义。

4 研究挑战与发展趋势

尽管益生菌单菌封装技术应用前景广泛, 但对其研究和开发处于起步阶段, 在实际应用中仍存在缺陷和不足, 主要有以下两个方面。(1)在进行单菌封装时, 如何精准地控制涂层厚度和性能参数是具有挑战的, 基于目前技术水平, 还未达到大规模生产的要求; (2)目前进行益生菌单菌封装的封装材料和封装方法所需成本较高, 导致研发与工业生产脱离。因此, 为有效提升单菌封装的功能特性、生产效率并同步降低生产成本, 未来研究应重点筛选和开发绿色、高效、可控的封装方法, 优先挖掘更具效能优势与经济性的专用封装材料。

5 结束语

益生菌单菌封装方法目的为提升益生菌在恶劣环境下的存活率, 确保其高生物利用度。本文主要综述了制备单个益生菌封装的技术, 功能特性及其在食品工业中的应用研究进展。使用不同种类的封装材料与技术可赋予益生菌对应的功能特性, 鉴于此需根据目标应用的特定需求来选定适宜的封装材料和技术。在未来, 益生菌单菌封装技术应重点考虑开发稳定、可靠、可重复和易于扩展的单菌封装工艺, 以及具有增强功能属性的食品级封装材料。此外, 对于封装材料, 因对其封装性能、安全性、生物相容性、成本效益、生产和加工的便捷性以及功能有效性进行全面评估。重要的是, 对封装后的益生菌必须进行全面的体外评估、动物模型试验以及人体临床验证, 以确保其安全性和有效性。总之, 益生菌单菌封装技术不仅可以显著提高益生菌在食品加工过程中和胃肠道环境中的存活率, 还可以推动新型功能食品的发展, 为人类健康带来更多益处。

参考文献

[1] 叶梦玲, 刘阳, 汤磊磊, 等. 肠道屏障与肠道菌群在溃疡性结肠炎中的研究进展[J]. 微生物学通报, 2024, 51(9): 3384–3397.
YE ML, LIU Y, TANG LL, *et al*. Research progress of intestinal barrier and gut microbiota in ulcerative colitis [J]. Microbiology China, 2024, 51(9): 3384–3397.

[2] PINTU C, DEEPIKA K, SHWETA S, *et al*. Probiotics-its functions and influence on the ageing process: A comprehensive review [J]. Food Bioscience, 2023, 52. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102389

[3] 刘勇彬, 胡文锋, 杨美艳, 等. 益生菌、后生元去除内毒素的机制及应用研究进展[J/OL]. 微生物学通报, 1-20. [2025-07-03]. https://doi.org/10.13344/j.microbiol.china.250459
LIU YB, HU WF, YANG MY, *et al*. Research progress in the mechanism and application of probiotics and postbiotics in removing endotoxins [J/OL]. Microbiology China, 1-20. [2025-07-03]. https://doi.org/10.13344/j.microbiol.china.250459

[4] ZHAO R, YU T, LI J, *et al*. Single-cell encapsulation systems for probiotic delivery: Armor probiotics [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2024, 332: 103270.

[5] 刘辉, 刘悦, 章检明. 产酸乳酸菌筛选、鉴定及其后生元抗氧化活性比较[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(1): 202–209.
LIU H, LIU Y, ZHANG JM. Screening and identification of acid-producing lactic acid bacteria and comparative study on antioxidant activities of postbiotic [J]. Food Research and Development, 2025, 46(1): 202–209.

[6] SALVATORE P, MARIA S, CHIARA M, *et al*. Exploring public interest in gut microbiome dysbiosis, NAFLD, and probiotics using Google trends [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 799.

[7] HOW YH, LAI KW, PUI HP, *et al*. Co-extrusion and extrusion microencapsulation: Effect on microencapsulation efficiency, survivability through gastrointestinal digestion and storage [J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(3): e13985.

[8] CAO FF, JIN LL, GAO Y, *et al*. Artificial-enzymes-armed *Bifidobacterium* longum probiotics for alleviating intestinal inflammation and microbiota dysbiosis [J]. Nature Nanotechnology, 2023, 18.6(2023): 617–627.

[9] CASSANI L, GOMEZ ZA, SIMAL GJ. 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.

[10] HAN J, MCCLEMENTS JD, LIU X, *et al*. Oral delivery of probiotics using single-cell encapsulation [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(3): e13322.

[11] CONG X, QINGFENG B, WAN W, *et al*. Novel nano-encapsulated probiotic agents: Encapsulate materials, delivery, and encapsulation systems [J]. Journal of Controlled Release: Official Journal of the

Controlled Release Society, 2022, 349: 184–205.

[12] SHAH RB, LI B, SABBAH AH, *et al*. Effects of prebiotic dietary fibers and probiotics on human health: With special focus on recent advancement in their encapsulated formulations [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102(prepublish): 178–192.

[13] FRANCO C, ABDUL WB, LIU JY, *et al*. Nanoencapsulation for probiotic delivery [J]. ACS Nano, 2021, 15(12). DOI: 10.1021/acsnano.1c09951

[14] YAPING Z, LANBO S, ZHI QZ, *et al*. Metal-phenolic network coatings for engineering bioactive interfaces [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2021, 205: 111851.

[15] NEISH SA. Microbes in gastrointestinal health and disease [J]. Gastroenterology, 2008, 136(1): 65–80.

[16] SAMUEL GVC, AMBER NB, ELEONORA S, *et al*. Microstructural and rheological transitions in bacterial biofilms [J]. Advanced Science, 2023, 10(27): e2207373.

[17] SOLANO C, ECHEVERZ M, LASA I. Biofilm dispersion and quorum sensing [J]. Current Opinion in Microbiology, 2014, 18: 96–104.

[18] 张一帆, 林思思, 吴冯, 等. 基于表面修饰的活体细菌药物及递送策略[J]. 生命科学, 2023, 35(3): 315–328.
ZHANG YF, LIN SS, WU F, *et al*. Fabrication and delivery of live bacterial therapeutics by surface modification [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2023, 35(3): 315–328.

[19] ZHOU J, LI MY, CHEN QF, *et al*. Programmable probiotics modulate inflammation and gut microbiota for inflammatory bowel disease treatment after effective oral delivery [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 3432–3432.

[20] LIU B, HU JL, YAO HD, *et al*. Improved viability of probiotics encapsulated by layer-by-layer assembly using zein nanoparticles and pectin [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108899.

[21] LEI YL, XIE ZF, ZHAO AQ, *et al*. Layer-by-layer coating of *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG (LGG) using chitosan and zein/tween-80/fucoidan nanoparticles to enhance LGG's survival under adverse conditions [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 154: 110039.

[22] ANSELMO AC, MCHUGH KJ, WEBSTER J, *et al*. Layer-by-layer encapsulation of probiotics for delivery to the microbiome [J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2016, 28(43): 9486.

[23] MARAM S, MOHAMMAD A, MOHAMMAD S, *et al*. Layer-by-layer coating of single-cell *Lacticaseibacillus rhamnosus* to increase viability under simulated gastrointestinal conditions and use in film formation [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 838416.

[24] HAN MZ, YANG S, SONG JL, *et al*. Layer-by-layer coated probiotics with chitosan and liposomes demonstrate improved stability and antioxidant properties *in vitro* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128826.

[25] YE SS, MIJIN K, NAEUN S, *et al*. Multilayer coating with red ginseng dietary fiber improves intestinal adhesion and proliferation of probiotics in human intestinal epithelial models [J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 33(10): 1309.

[26] LI SY, FAN LL, LI SJ, *et al*. Validation of layer-by-layer coating as a procedure to enhance *Lactobacillus plantarum* survival during *in vitro* digestion, storage, and fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(3): 1701–1712.

[27] PRIYA AJ, VIJAYALAKSHMI SP, RAICHUR AM. Enhanced survival of probiotic *Lactobacillus acidophilus* by encapsulation with nanostructured polyelectrolyte layers through layer-by-layer approach [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(21): 11838–11845.

[28] MICHIYA M, HIROHARU A, TOSHIYUKI K, *et al*. Layer-by-layer assembly through weak interactions and their biomedical applications [J]. Advanced Materials, 2012, 24(4): 454–474.

[29] GENG H, ZHONG QZ, LI J, *et al*. Metal ion-directed functional metal–phenolic materials [J]. Chemical Reviews, 2022, 122(13): 11432–11473.

[30] 张翠云. 金属-多酚网络复合材料的光热抗菌性能研究及其在食品活性包装中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
ZHANG CY. Study on the antibacterial properties of metal-polyphenolic network composites and their application in active food packaging [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.

[31] ZHOU C, ZOU YP, XU RL, *et al*. Metal-phenolic self-assembly shielded probiotics in hydrogel reinforced wound healing with antibiotic treatment [J]. Materials Horizons, 2023, 10(8). DOI: 10.1039/d3mh00033h

[32] ZHAO X, ZHANG R, LIU Y, *et al*. Antifouling membrane surface construction: Chemistry plays a critical role [J]. Journal of Membrane Science, 2018, 551: 145–171.

[33] 焦婷, 王稳航, 程芸, 等. 金属-多酚网络的组装、功能特性及其在食品领域中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 232–239.
JIAO T, WANG WH, CHENG Y, *et al*. Construction and functional characterization of metal-polyphenol network and its application in food field: A review of recent literature [J]. Food Science, 2022, 43(1): 232–239.

[34] WASUWANICH P, FAN G, BURKE B, *et al*. Metal-phenolic networks as tuneable spore coat mimetics [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2022, 10(37): 7600–7606.

[35] LUO HL, WU F, WANG XY, *et al*. Encoding bacterial colonization and therapeutic modality by wrapping with an adhesive drug-loadable nanocoating [J]. Materials Today, 2023, 62: 98–110.

[36] GUO Y, WU FG. Probiotics armored with metal-phenolic network-based nanocoatings for gut microbiome modulation [J]. Matter, 2023, 6(1): 23–25.

[37] FAN G, PRIS W, MARIELA RRO, *et al*. Protection of anaerobic microbes from processing stressors using metal–phenolic networks [J]. Journal of the American Chemical Society, 2021, 144(6): 2438–2443.

[38] JI HP, KYUNGHWAN K, JUNO L, *et al*. A cytoprotective and degradable metal–polyphenol nanoshell for single-cell encapsulation [J]. Angewandte Chemie, 2014, 126(46): 12628–12633.

[39] YANG J, DAI DH, LOU XY, *et al*. Supramolecular nanomaterials based on hollow mesoporous drug carriers and macrocycle-capped CuS nanogates for synergistic chemo-photothermal therapy [J]. Theranostics, 2020, 10(2): 615.

[40] PAN C, LI JJ, HOU WL, *et al*. Polymerization-mediated multifunctionalization of living cells for enhanced cell-based therapy [J]. Advanced Materials, 2021, 33(13): 2007379.

[41] WANG L, LIU JY. Dopamine polymerization-mediated surface functionalization toward advanced bacterial therapeutics [J]. Accounts of Chemical Research, 2024, 57(6): 945–956.

[42] SUNG HY, SUNG MK, KYUNG BL, *et al*. Mussel-inspired encapsulation and functionalization of individual yeast cells [J]. Journal of the American Chemical Society, 2011, 133(9): 2795–2797.

[43] LI JJ, HOU WL, LIN SS, *et al*. Polydopamine nanoparticle-mediated dopaminergic immunoregulation in colitis [J]. Advanced Science, 2022, 9(1): 2104006.

[44] 朱大年. 生理学[M]. 第七版. 北京: 人民卫生出版社, 2008.
ZHU DN. Physiology [M]. 7th Edition. Beijing: People's Medical Publishing House, 2008.

[45] ZHANG Y, LIU H, DAVID JM, *et al*. Probiotic encapsulation in

water-in-oil high internal phase emulsions: Enhancement of viability under food and gastrointestinal conditions [J]. LWT, 2022, 163: 113499.

[46] LAW KY. Definitions for hydrophilicity, hydrophobicity, and superhydrophobicity: Getting the basics right [J]. The Journal of Physical Chemistry Letters, 2014, 5(4): 686–688.

[47] JIA HR, ZHU YX, CHEN Z, *et al*. Cholesterol-assisted bacterial cell surface engineering for photodynamic inactivation of gram-positive and gram-negative bacteria [Z]. 2017.

[48] CAO ZP, WANG XY, PANG Y, *et al*. Biointerfacial self-assembly generates lipid membrane coated bacteria for enhanced oral delivery and treatment [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 5783.

[49] ZHOU X, GUO QL, GUO MM, *et al*. Nanoarmour-shielded single-cell factory for bacteriotherapy of Parkinson's disease [J]. Journal of Controlled Release, 2021, 338: 742–753.

[50] LU J, MONTY L, LI ZX, *et al*. Biocompatibility, biodistribution, and drugdelivery efficiency of mesoporous silica nanoparticles for cancer therapy in animals [J]. Small, 2010, 6(16): 1794–1805.

[51] CHAN MH, LIN HM. Preparation and identification of multifunctional mesoporous silica nanoparticles for *in vitro* and *in vivo* dual-mode imaging, theranostics, and targeted tracking [J]. Biomaterials, 2015, 46: 149–158.

[52] XIE X, LI QY, JIA LF, *et al*. Multishell colloidosome platform with sequential gastrointestinal resistance for on-demand probiotic delivery [J]. Advanced Healthcare Materials, 2023, 12(12): 2202954.

[53] WEI H, GENG W, YANG XY, *et al*. Activation of a passive, mesoporous silica nanoparticle layer through attachment of bacterially-derived carbon-quantum-dots for protection and functional enhancement of probiotics [J]. Materials Today Bio, 2022, 15: 100293.

[54] GENG ZM, WANG XY, WU F, *et al*. Biointerface mineralization generates ultraresistant gut microbes as oral biotherapeutics [J]. Science advances, 2023, 9(11): eade0997.

[55] WANG WC, LIU XF, ZHENG XJ, *et al*. Biomineralization: An opportunity and challenge of nanoparticle drug delivery systems for cancer therapy [J]. Advanced Healthcare Materials, 2020, 9(22): 2001117.

[56] HUANG P, LIAN DZ, MA HL, *et al*. New advances in gated materials of mesoporous silica for drug controlled release [J]. Chinese Chemical Letters, 2021, 32(12): 3696–3704.

[57] MARÍA VR, MONTSERRAT C, ISABEL IB, *et al*. Mesoporous silica nanoparticles for drug delivery: Current insights [J]. Molecules, 2017, 23(1): 47.

[58] ŠIPAILIENĖ A, PETRAITYTĖ 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 and Antimicrobial Proteins, 2018, 10: 1–10.

[59] FRANCO C, SALMA M, MAHROO B, *et al*. Cell-mediated biointerfacial phenolic assembly for probiotic nano encapsulation [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(26): 2200775.

[60] ANDREA MM, ROBERT AR, GLENN RG, *et al*. Adhesion mechanisms mediated by probiotics and prebiotics and their potential impact on human health [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103: 6463–6472.

[61] GILBERTO VDMP, BRUNA DOC, ANTONIO IMJ, *et al*. How to select a probiotic? A review and update of methods and criteria [J]. Biotechnology advances, 2018, 36(8): 2060–2076.

[62] NAJLA H, ABDEL KM, BOUBAKER K, *et al*. Change in cell surface properties of *Lactobacillus casei* under heat shock treatment [J]. FEMS Microbiology Letters, 2015, 362(9): fnv047.

[63] JONATHAN CLC, JOHN DFH, PAT S, *et al*. Bacterial survival and adhesion for formulating new oral probiotic foods [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(17): 2926–2937.

[64] ÁNGELA MS, RAFAEL G, PAULA O, *et al*. Nanosystems as vehicles for the delivery of antimicrobial peptides (AMPs) [J]. Pharmaceutics, 2019, 11(9): 448.

[65] XIE AJ, GAO MG, DU HS, *et al*. Next-generation probiotics delivery: Innovations and applications of single-cell encapsulation [J]. Current Opinion in Food Science, DOI: 10.1016/j.cofs.2024.101234

[66] FENG PP, CAO ZP, WANG XY, *et al*. On-demand bacterial reactivation by restraining within a triggerable nanocoating [J]. Advanced Materials, 2020, 32(34): 2002406.

[67] LIU H, LIU DY, ZHANG CC, *et al*. Whole-genome analysis, evaluation and regulation of *in vitro* and *in vivo* GABA production from *Levilactobacillus brevis* YSJ3 [J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 421: 110787.

[68] CHANDRAKANT A, MARCIA P, DUANE G, *et al*. *In vitro* bioassay based screening of antihyperglycemia and antihypertensive activities of *Lactobacillus acidophilus* fermented pear juice [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 13: 221–230.

[69] 张路遥, 张洁玮, 李梦迪, 等. 复合果蔬汁的发酵工艺及风味品质研究[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(4): 688–693.
ZHANG LY, ZHANG JW, LI MD, *et al*. Research of fermentation technology and flavor quality of compounded fruit and vegetable juice [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2021, 48(4): 688–693.

[70] LIU DY, ZHANG JM, CHEN J, *et al*. Carrot-based fermentation juice rich in sleep-promoting components improved sleep in mice [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1043055.

[71] 林文馨, 杨子瑶, 张子桐, 等. 乳酸菌发酵混合果蔬汁工艺研究[J]. 山东化工, 2023, 52 (19): 69–72.
LIN WX, YANG ZY, ZHANG ZT, *et al*. Study on fermentation technology of mixed fruit and vegetable juice by lactic acid bacteria [J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(19): 69–72.

[72] DWIVEDI R, AJITH A, RADHAKRISHNAN P, *et al*. Freeze dried probiotic carrot juice powder for better storage stability of probiotic [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 60(3): 916–924.

[73] CHEN J, ZHANG JM, LIU DY, *et al*. Preparation, characterization, and application of edible antibacterial three-layer films based on gelatin-chitosan-corn starch-incorporated nisin [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100980.

[74] KHEDRI S, SADEGHI E, ROUHI M, *et al*. Bioactive edible films: Development and characterization of gelatin edible films incorporated with casein phosphopeptides [J]. LWT, 2021, 138: 110649.

[75] 刘欢欢, 王娣, 刘大群, 等. 负载植物乳植杆菌 CXG9 的可食用复合薄膜的制备表征及抗菌特性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(13): 195–204.
LIU HH, WANG D, LIU DQ, *et al*. Characterization and antibacterial activity of edible composite films embedded with *Lactiplantibacillus plantarum* CXG9 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(13): 195–204.

[76] ZHANG JM, CHEN J, ZHANG CC, *et al*. Characterization and antibacterial properties of chitosan–polyvinyl alcohol-3-phenyllactic acid as a biodegradable active food packaging [J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100963.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)