李邱, 李梦琪, 杨旭, 等. 基于不同壁材包封乳酸片球菌微胶囊的表征及其稳定性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 195−203. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010006

LI Qiu, LI Mengqi, YANG Xu, et al. Characterization and Stability of *Pediococcus acidilactici* Microencapsulated with Different Wall Materials[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 195−203. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010006

·生物工程·

基于不同壁材包封乳酸片球菌微胶囊的表征及其稳定性

李　邱, 李梦琪, 杨　旭, 任　静*

（东北农业大学食品学院乳品科学教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150030）

摘　要: 本研究以不同浓度的乳清分离蛋白（Whey Protein Isolate，WPI）、果胶（Pectin，PE）以及海藻酸钠（Alginate，ALG）作为原料，通过凝胶化法包封乳酸片球菌（*Pediococcus acidilactici*，PA），制备了 3 种微胶囊。通过对不同壁材制备的微胶囊进行形态表征、乳酸片球菌的包封效率以及模拟消化后乳酸片球菌的存活率进行分析，研究微胶囊壁材的最佳配比。此外，通过测定不同温度和时间条件下储藏后乳酸片球菌的存活率，评估微胶囊的贮藏稳定性。结果表明，ALG-WPI-PE-PA 微胶囊在冻干后保持了均匀的球形外观，形态优于 ALG-PA 和 ALG-WPI-PA 微胶囊。当 WPI 浓度为 3.0% 时，微胶囊的包封效率显著提高（P<0.05），其中 ALG-WPI-PA 的包封效率为 71.93%，而 ALG-WPI-PE-PA 的包封效率达到 94.33%，提高了 22.4%。此外，经过模拟体外消化后，包封的乳酸片球菌存活率显著提高（P<0.05）。研究确定了 WPI 在微胶囊中的最佳浓度为 3.0%，在该浓度下，乳酸片球菌的包封效率和消化后的存活率均达到最佳水平。通过贮藏实验，进一步验证了 ALG-3.0%WPI-PE-PA 能够显著提高乳酸片球菌在长时间储存条件下的生存力。本研究为乳酸菌包封技术的进一步开发和应用提供了基础，并为益生菌制剂产品的多样化提供了新的思路。

关键词: 乳酸片球菌, 海藻酸钠, 果胶, 乳清分离蛋白, 微胶囊

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0195−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010006

本文网刊:

Characterization and Stability of *Pediococcus acidilactici* Microencapsulated with Different Wall Materials

LI Qiu, LI Mengqi, YANG Xu, REN Jing*

（Key Laboratory of Dairy Science, Ministry of Education, College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China）

Abstract: In this study, three types of microspheres were prepared by encapsulating *Pediococcus acidilactici* (PA) using the gelation method with different concentrations of whey protein isolate (WPI), pectin (PE), and sodium alginate (ALG) as wall materials. The optimal ratio of microsphere wall materials was determined by analyzing the morphological characterization, encapsulation efficiency, and survival of PA after simulated digestion. In addition, the storage stability of the microspheres was evaluated by determining the survival rate of PA after storage under different temperatures and time conditions. Results showed that the ALG-WPI-PE-PA microspheres retained a homogeneous spherical appearance after lyophilization, and the morphology was superior to that of ALG-PA and ALG-WPI-PA microspheres. The encapsulation efficiency of the microspheres was significantly increased (P<0.05) when the WPI concentration was 3.0%, in which the encapsulation efficiency of ALG-WPI-PA was 71.93%, whereas the encapsulation efficiency of ALG-WPI-PE-PA reached 94.33%, which was an increase of 22.4%. In addition, the survival rate of encapsulated PA was significantly increased after

收稿日期: 2025−01−02

基金项目: 黑龙江省省属本科高校“优秀青年教师基础研究支持计划”（YQJH2023196）。

作者简介: 李邱（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: liqiuuu2000@126.com。

*** 通信作者:** 任静（1979−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: jingren@neau.edu.cn。

simulated *in vitro* digestion (P<0.05). The optimal concentration of WPI in microspheres was determined to be 3.0%, at which the encapsulation efficiency and survival of PA after digestion were optimized. Storage experiments further confirmed that ALG-3.0%WPI-PE-PA microspheres significantly enhanced the survival rate of PA for a prolonged storage period. This study provides a basis for the further development and application of lactic acid bacteria embedding technology and provides new ideas for the diversification of probiotic preparation products.

Key words: *Pediococcus acidilactici*; alginate; pectin; whey protein isolate; microencapsulation

益生菌是对宿主有益的活性微生物，适量摄入能够改善肠道健康[1−3]。因此，如何有效地将活性益生菌递送到胃肠道，成为提升肠道健康的一个重要研究方向[4−5]。研究表明，益生菌在活性达到 10^7 CFU/mL 或 10^7 CFU/g 时，才会产生显著的健康效益[6]。然而，益生菌对外界环境特别敏感，外界环境的改变可能会使其生理效果大打折扣[7−10]。为了提高益生菌的生存能力，开发更好的益生菌递送系统成为研究的热点，并且这一技术在食品和药物传递领域展现了广阔的应用前景[11−12]。

微胶囊具有明确的核壳结构，由芯材（活性物质）和壁材（外壳）组成，能够提供保护、控释或靶向功能，广泛应用于保持益生菌的活性[13−15]。微胶囊的包封效果和益生菌的存活率往往与壁材的选择密切相关。壁材必须与益生菌、食品以及宿主相容，方能确保益生菌的生存力得到有效维持[16]。藻酸盐作为一种天然聚合物，因其能与多价离子交联形成凝胶，有效包封活性物质，并赋予微胶囊稳定性、肠溶性和缓释效果，因此被广泛应用于递送材料中[17−18]。然而，藻酸盐也存在一些缺点，例如较高的孔隙率，对极端 pH 的敏感性以及较强的溶胀性，这些缺点导致了其包封效率的降低和质量的不足[19]。乳清蛋白作为一种生物活性蛋白，已被证明能够通过疏水作用提高益生菌的存活率[20−21]。但在实际应用中，乳清蛋白存在成膜性较差、刚性不足和防水性差等问题，限制了其在食品领域的应用。果胶是一种常见的天然多糖，主要来源于柑橘类和苹果等水果，且通常在水果加工过程中的副产物中获得[22−23]。果胶具有较低的成本、良好的凝胶化和乳化特性，适合用于活性物质的包封。然而，果胶的凝胶强度相对较弱，导致其在体内的降解速度较快，可能无法提供足够长时间的保护[24]，并且在处理过程中，果胶可能受到环境变化的影响，导致包封效果不稳定。

尽管单一壁材在某些情况下可以提供一定的包封效果，但由于其局限性，单一材料通常无法满足益生菌包封技术在实际应用中的高要求。因此，采用多种壁材复合的方式逐渐成为主流。例如，为了解决海藻酸钠微胶囊孔隙过大的问题，研究者尝试在包封基质中添加其他生物聚合物进行复合，以提高微胶囊的化学和机械稳定性[25]。此外，有研究者将乳清蛋白与多糖结合，利用蛋白质和多糖之间的非共价相互作用，改善乳清蛋白的功能[26]。多糖的加入不仅能改善蛋白质的溶解性和流动性，还能帮助减少蛋白质粒的聚集问题，从而提高包封效果。另有研究表明，果胶与蛋白质的相互作用可以增强凝胶系统的凝胶化和稳定性[27]。综上所述，复合不同壁材可以最大程度地发挥各个材料的优点，克服其单独使用时的不足，从而提高包封系统的稳定性、功能性以及益生菌的存活率。

因此，本研究以乳清分离蛋白、果胶以及海藻酸钠作为原料，通过凝胶化法包封具有抗氧化能力但在模拟胃肠环境中存活率不理想的乳酸片球菌，制备了 3 种微胶囊。通过对不同壁材制备的微胶囊进行形态表征、乳酸片球菌的包封效率以及模拟胃肠消化后乳酸片球菌的存活率进行分析，研究微胶囊壁材的最佳配比。此外，通过测定不同温度和时间条件下储藏后乳酸片球菌的生存力，评估微胶囊的贮藏稳定性。此研究为包封乳酸菌的进一步开发利用奠定了基础，并在丰富乳酸菌制剂产品类型上提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

乳清分离蛋白（WPI 90） 陕西天行健生物化工技术有限公司；果胶（≥70%） 沪慧（上海）生物科技有限公司；海藻酸钠、氯化钙 分析纯，阿拉丁试剂（上海）有限公司；柠檬酸钠 分析纯，天津市恒兴化学试剂制造有限公司；胃蛋白酶（≥12000 U/g）、牛胆盐 生化试剂，北京奥博星生物技术有限责任公司；乳酸片球菌（*Pediococcus acidilactici*, PA） 分离自西藏开菲尔粒；MRS 肉汤 青岛海博生物技术有限公司。

Pilot10-15EP 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司；TM 4000 扫描电子显微镜 日本 Hitachi 公司；Nicolet IS10 傅里叶变换红外光谱仪 美国 Thermo Scientific 公司；Pump 11 Elite 注射泵 美国 Harvard 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳酸片球菌的制备 将乳酸片球菌接种到 MRS 肉汤中，在 37 ℃下孵育 24 h，通过在 4 ℃ 下 6000 r/min 转速离心10 min 后收集细胞，弃上清液，将细胞悬浮在 PBS（pH7.4）中再次按照之前的离心条件离心，以此获得洗涤干净的乳酸片球菌。梯度稀释后，涂布在 MRS琼脂平板上，随后放入 37 ℃ 恒温培养箱孵育 48 h，并进行平板计数。

1.2.2 溶液的配制 壁材溶液Ⅰ：使用无菌水制备不同浓度的乳清分离蛋白（Whey Protein Isolate, WPI）

溶液，浓度分别为 4.0wt%、5.0wt%、6.0wt%、7.0wt% 和 8.0wt%[28]；壁材溶液Ⅱ：制备不同浓度的乳清分离蛋白-果胶复合物溶液，使用无菌水制备 4.0wt% 果胶（Pectin，PE）溶液，等比例加入乳清分离蛋白溶液，使得复合物溶液中乳清分离蛋白的浓度分别为 4.0wt%、5.0wt%、6.0wt%、7.0wt% 和 8.0wt%；微胶囊固定液：制备 2.0wt% 氯化钙溶液；微胶囊解囊液：制备 2.0wt% 的柠檬酸钠溶液（pH7.0）。

1.2.3　微胶囊的制备　海藻酸钠（Alginate，ALG）-PA 微胶囊：制备 2.0wt% ALG 溶液，菌液用 PBS 洗涤两次后重悬于 PBS（pH7.4），与壁材溶液Ⅲ充分混匀后，菌株的浓度为 10^{10} CFU/mL，得到微胶囊溶液。利用 32 G 注射器在流速 2 mL/min 的条件下，将微胶囊溶液滴加至固定液中，与 Ca^{2+} 固定 30 min 后，用蒸馏水冲洗 2~3 次后，得到 ALG-PA[29]。

ALG-WPI-PA 微胶囊：海藻酸钠充分溶解后，与等体积的壁材溶液Ⅱ混合，得到复合壁材Ⅰ，海藻酸钠的浓度为 2.0wt%，乳清分离蛋白的含量分别为 2.0%、2.5%、3.0%、3.5% 和 4.0%；菌液用 PBS（pH7.4）洗涤两次后重悬于 PBS（pH7.4），再将其添加到复合壁材溶液Ⅰ，后续操作同 ALG-PA 微胶囊制备过程，最终得到 ALG-2.0%WPI-PA、ALG-2.5%WPI-PA、ALG-3.0%WPI-PA、ALG-3.5%WPI-PA 以及 ALG-4.0%WPI-PA。

ALG-WPI-PE-PA 微胶囊：海藻酸钠充分溶解后，与等体积的壁材溶液Ⅱ混合，得到复合壁材Ⅱ，果胶的浓度为 2.0wt%，海藻酸钠的浓度为 2.0wt%；后续操作同 ALG-PA 微胶囊制备过程，得到 ALG-2.0%WPI-PE-PA、ALG-2.5%WPI-PE-PA、ALG-3.0%WPI-PE-PA、ALG-3.5%WPI-PE-PA 以及 ALG-4.0%WPI-PE-PA。

空载微胶囊：将壁材溶液Ⅰ或Ⅱ与海藻酸钠按照上述方法混合后，直接滴加至固定液中，或者将海藻酸钠溶液直接滴至固定液中，即得到空载微胶囊 ALG、ALG-WPI（包括 ALG-2.0%WPI、ALG-2.5%WPI、ALG-3.0%WPI、ALG-3.5%WPI 以及 ALG-4.0%WPI）和 ALG-WPI-PE（包括 ALG-2.0%WPI-PE、ALG-2.5%WPI-PE、ALG-3.0%WPI-PE、ALG-3.5%WPI-PE 以及 ALG-4.0%WPI-PE）。

1.2.4　微胶囊形貌观察　粒径测量：将微胶囊置于玻璃平板中，进行形貌观察，利用游标卡尺随机测定 30 个微胶囊的直径。

扫描电子显微镜（SEM）：样品在 60 ℃ 的烘箱中干燥 24 h，放在−80 ℃ 预冻 2 h，进行冷冻干燥。将冷冻干燥后的样品放在样品台上贴上一层双面胶，将微胶囊轻轻粘在上面吹去多余的粉末，然后在样品上喷金供 SEM 观察，加速电压为 5 kV，放射电流为 90.0 A，探针电流为 40.0 A，观察时间尽可能短，避免电子束长时间照射引起电子损伤。用扫描电镜研究微胶囊的表面形貌和微结构性质。

1.2.5　傅里叶红外光谱（FTIR）　在干燥的环境中，取适量干燥的样品和溴化钾粉末加入研钵中，充分研磨多次，放入压片机上压片，测试时先采集背景，然后采集样品的红外光谱，分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数为 32 次，测试波数范围为 400~4000 cm^{-1}，以分析复合材料组分之间的相互作用，每个样品测量三次。酰胺Ⅰ带（1700~1600 cm^{-1}）通过 PeakFit v4 软件进行解卷积分析，拟合组分峰（R^2>0.9999）并根据波数对其进行划分[26]。

1.2.6　包封效率测定　将共包封微胶囊（1.0 g）用无菌生理盐水洗涤三次后，置于 9 mL 解囊液中，于 37 ℃、100 r/min 条件下恒温振荡将微胶囊裂解 30 min[30]。裂解完成后，吸取 0.1 mL 裂解液进行梯度稀释，涂布在 MRS 琼脂平板上，37 ℃ 培养 48 h，通过活菌数来计算包封效率（%）。

$$包封效率(\%)=\frac{B\times C}{A}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：A 为未包封时活菌总数，lg CFU/g；B 为 1 g 微胶囊中活菌数，lg CFU/g；C 为制备微胶囊的总重量，g。

1.2.7　模拟胃肠消化稳定性

1.2.7.1　人工胃液及肠液制备　人工胃液（Simulated Gastric Fluid，SGF）制备：称取 0.35 g 胃蛋白酶溶解于 100 mL 0.2% 的无菌生理盐水中，用盐酸溶液调节 pH 至 2.0，再经过 0.45 μm 无菌滤膜过滤除菌。

人工肠液（Simulated Intestinal Fluid，SIF）制备：称取 0.68 g $NaHCO_3$、KH_2PO_4，0.04 g NaCl 溶于 100 mL 蒸馏水中，再加入 1 mg 胰蛋白酶和 0.3 g 牛胆盐搅拌均匀，用无菌 NaOH 溶液调整 pH 至 6.8，再经过 0.45 μm 无菌滤膜过滤除菌。

1.2.7.2　体外模拟胃肠消化　为了模拟胃肠消化，将样品与无菌蒸馏水等体积混匀后，将其等体积转移到 SGF，并在 37 ℃ 和 pH2.0 下保持 2 h。同样将其等体积转移到 SIF 中，并在 37 ℃ 和 pH7.0 中保持 2 h，2 h 后对菌落进行计数[31]。根据下面公式计算经过体外模拟胃肠消化后微胶囊中乳酸片球菌的存活率（%）。

$$存活率(\%)=\frac{B}{A}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中：A 表示消化前微胶囊中的活菌数，lg CFU/g；B 表示暴露于 SIF 后的活菌数，lg CFU/g。

1.2.8　共包封微胶囊的贮藏稳定性　将 ALG-3.0% WPI-PE-PA 微胶囊置于 25 ℃ 或 4 ℃ 环境下进行储存。25 ℃ 条件下，1 d 取一次样；4 ℃ 条件下，每隔 7 d 取一次样。在相同条件下，取未包封的游离乳酸片球菌置于相同环境条件下储藏，进行活菌计数，作为对照组，通过活菌计数来测定微胶囊的贮藏稳定性，用以研究包封对乳酸片球菌长时间储存过程中生

存力的保护作用[32]。

1.3 数据处理

所有测量至少重复 3 次，所有结果均显示为平均值±标准差。本实验使用 Origin 2021 和 SPSS 软件对数据进行处理及作图分析，$P<0.05$ 表示差异显著，$P<0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同壁材微胶囊的形貌表征

2.1.1 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊的外貌与形态特征 3 种微胶囊的直径由表 1 可知，ALG 微胶囊粒径为 1.23 mm，ALG-WPI 的微胶囊粒径为 1.87~2.37 mm，ALG-WPI-PE 粒径增加至 2.43~2.83 mm，且其大小随着乳清分离蛋白浓度的增加而增加。冷冻干燥前，微胶囊均呈均匀的乳白色球形，这是由于壁材溶液滴入固定液时，固定液中的 Ca^{2+}均匀嵌入复合壁材中会形成一种不溶于水的结构。通常，通过外部离子凝胶化产生的微胶囊无论粒径尺寸的大小都是球形的[33]。冷冻干燥后，不同壁材的微胶囊外观形貌如图 1 所示，图 1A 为 ALG 微胶囊外貌，呈较为略透明的椭圆形片状形态。图 1B~图 1F 为 ALG-WPI 微胶囊外貌形态以及图 1G~图 1K 为 ALG-WPI-PE 微胶囊外貌形态。可以观察到，由于冷冻干燥过程中结构的塌陷，无果胶添加的微胶囊形状不一且有碎片存在，表面上可以观察到一些微小的孔隙。而 ALG-WPI-PE 更能保持先前未冻干时的球形，这可能是因为添加果胶减少了表面的水分蒸发的不均匀性，避免形变，优化冻干后产物的物理性能[34]。即表明利用乳清分离蛋白和果胶复合物包封可以更好地保护微胶囊冻干后的形态。

表 1 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊直径比较

Table 1 Comparison of the diameter of ALG, ALG-WPI and ALG-WPI-PE microcapsules

名称	直径(mm)	名称	直径(mm)
ALG	1.23±0.10^{h}	ALG-2.0%WPI-PE	2.43±0.06^{c}
ALG-2.0%WPI	1.87±0.06^{g}	ALG-2.5%WPI-PE	2.47±0.10^{c}
ALG-2.5%WPI	2.00±0.10^{f}	ALG-3.0%WPI-PE	2.60±0.10^{b}
ALG-3.0%WPI	2.13±0.06^{e}	ALG-3.5%WPI-PE	2.73±0.06^{a}
ALG-3.5%WPI	2.30±0.10^{d}	ALG-4.0%WPI-PE	2.83±0.06^{a}
ALG-4.0%WPI	2.37±0.06^{cd}		

注：不同的上标小写字母(a~h)表示数值具有显著差异，$P<0.05$。

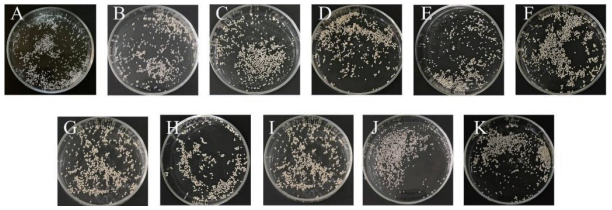


图 1 ALG、ALG-WPI 和 ALG-WPI-PE 微胶囊的外观形貌观察

Fig.1 Appearance and morphological observation of ALG, ALG-WPI, and ALG-WPI-PE microcapsules

注：A：ALG；B：ALG-2.0%WPI；C：ALG-2.5%WPI；D：ALG-3.0%WPI；E：ALG-3.5%WPI；F：ALG-4.0%WPI；G：ALG-2.0%WPI-PE；H：ALG-2.5%WPI-PE；I：ALG-3.0%WPI-PE；J：ALG-3.5%WPI-PE；K：ALG-4.0%WPI-PE；图 2 同。

2.1.2 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊的扫描电子显微镜(SEM)观察 在扫描电子显微镜下(图 2)，微胶囊表面存在皱缩、凹陷等形态损伤，这通常是由于干燥初期各部分水分蒸发不均匀，导致内部产生机械应力所致[30]。有研究表明，在冷冻干燥过程中，从藻酸盐水凝胶基质中去除冷冻水会破坏凝胶的结构，进而降低其机械性能[35]。在本研究中，ALG、ALG-WPI 微胶囊表面出现了明显的裂纹和断裂，尤其是在 ALG-2.0%WPI 及 ALG-4.0%WPI 样品中，尽管如此，凹陷区域的表面较为平滑。相较之下，壁材中具有果胶的微胶囊在冷冻干燥中皱缩现象较轻，ALG-3.0%WPI-PE 以及 ALG-3.5%WPI-PE 的表面相对光滑，整体形态较为规则。而 ALG-2.0%WPI-PE、ALG-2.5%WPI-PE 和 ALG-4.0%WPI-PE 复合物的表面则表现出了不同程度的粗糙度，这一现象与壁材中不同浓度的乳清分离蛋白所产生的交联程度差异密切相关。

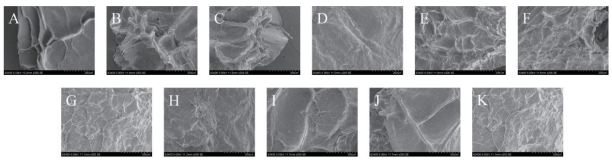


图 2 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊的扫描电镜图(200×)

Fig.2 Scanning electron microscopy images of ALG, ALG-WPI and ALG-WPI-PE microcapsules (200×)

2.1.3 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊的傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析 蛋白质-多糖复合物的形成主要是通过静电相互作用、疏水力、氢键和范德华力等多种相互作用力实现的[36]。在图 3A 中，乳清分离蛋白(WPI)的红外光谱表现出 1239 cm^{-1} 处的吸收峰，这与 C-N 伸缩振动和 N-H 弯曲振动相关[37−38]。海藻酸钠(ALG)的红外光谱显示，其羧酸基团会在 1601 cm^{-1} 处产生反对称拉伸振动，而在 1420 cm^{-1} 处则对应对称拉伸振动[39]。此外，1000~1200 cm^{-1} 区间的吸收峰与海藻酸钠的醚键振动相关[40]。果胶(PE)的红外光谱则在 1000~1100 cm^{-1} 之间出现吸收峰，这些峰主要与(C-OH)侧基的拉伸振动和(C-O-C)糖苷键的振动相关，而 1590~1600 cm^{-1} 区间的吸收峰则源于 C=O 的弯曲振动[41−42]。

值得注意的是，ALG 和 PE 具有相似的化学结构，因此它们的红外吸收峰也表现出类似的特征，进一步反映了它们在化学性质上的相似性。在图 3(B)和图 3(C)中，ALG-WPI 和 ALG-WPI-PE 两种微胶囊的红外光谱中都能观察到海藻酸钠和果胶的典型吸收峰。三种原料中 ALG、PE 以及 WPI，都在

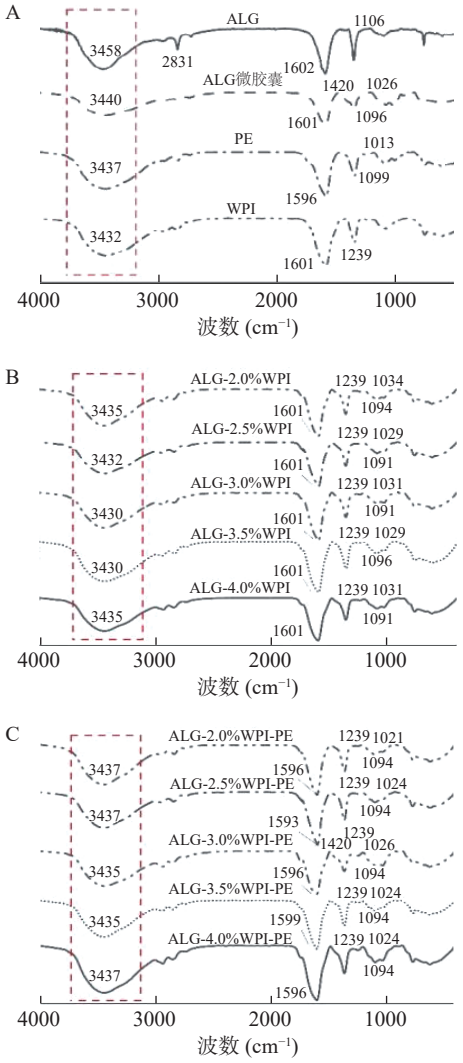


图 3　ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊及其三种原料的傅里叶红外光谱图

Fig.3　Fourier-transform infrared spectra of ALG, ALG-WPI and ALG-WPI-PE microcapsules and their three wall materials

注: A: ALG 微胶囊及原料 ALG、PE、WPI; B: ALG-WPI; C: ALG-WPI-PE。

3440 cm^{-1} 左右出现 O-H 伸缩振动的宽吸收峰[43]。比较 ALG、ALG-WPI 与 ALG-WPI-PE 微胶囊的光谱, 可以发现原料 ALG 和 Ca^{2+}结合形成 ALG 微胶囊后在 3440 cm^{-1} 的峰发生红移出现在了 3458 cm^{-1} 的位置。而乳清分离蛋白、乳清分离蛋白和果胶复合物的添加导致了 O-H 伸缩振动峰的波数发生蓝移, 表明不同壁材的混合可能削弱了分子间的氢键作用。尽管如此, 在 ALG-WPI-PE 微胶囊中, 氢键效应仍然较为显著。

酰胺Ⅰ带(1600~1700 cm^{-1})在红外光谱中主要是由于 C=O 伸缩振动引起的, 它是分析蛋白质二级结构的重要特征峰[44]。酰胺Ⅰ带向较低波数的移动通常表明蛋白质结构变得更加有序。实验结果表明 ALG-WPI-PE 与 ALG-WPI、ALG 相比, 酰胺Ⅰ带向较低波数移动, 表明 WPI 的结构变得更加有序。这表明 ALG-WPI-PE 之间可能存在静电相互作用, 有可能是乳清分离蛋白中的主要成分 *β*-乳球蛋白与海藻酸钠之间的静电相互作用[45]。为了进一步探究海藻酸钠和果胶对乳清分离蛋白二级结构的影响, 本研究对不同样品中的乳清分离蛋白二级结构进行了分析, 结果如表 2 所示。

表 2　不同类型微胶囊中乳清分离蛋白的二级结构分布

Table 2　Secondary structure distribution of whey protein isolate in different types of microcapsules

名称	*β*-折叠(%)	无规则卷曲(%)	*α*-螺旋(%)	*β*-转角(%)
ALG-2.0%WPI-PE	17.80 ± 0.91^{ef}	33.10 ± 0.60^{cde}	28.64 ± 0.93^{bcde}	20.43 ± 0.72^{bcd}
ALG-2.5%WPI-PE	19.16 ± 0.71^{bcd}	32.27 ± 0.73^{de}	27.56 ± 1.70^{de}	21.00 ± 1.01^{abc}
ALG-3.0%WPI-PE	16.10 ± 0.76^{g}	33.94 ± 0.98^{abc}	29.67 ± 0.90^{abc}	20.28 ± 0.87^{bcd}
ALG-3.5%WPI-PE	17.06 ± 0.21^{f}	32.76 ± 0.88^{cde}	28.99 ± 1.36^{abcd}	21.18 ± 0.58^{ab}
ALG-4.0%WPI-PE	17.71 ± 0.54^{ef}	32.03 ± 0.53^{e}	29.92 ± 0.57^{ab}	20.32 ± 0.50^{bcd}
ALG-2.0%WPI	18.39 ± 0.27^{cde}	34.67 ± 0.45^{ab}	29.14 ± 0.64^{abcd}	17.81 ± 0.44^{e}
ALG-2.5%WPI	19.25 ± 0.21^{bc}	33.31 ± 0.46^{cd}	27.77 ± 0.57^{cde}	19.66 ± 0.47^{cd}
ALG-3.0%WPI	21.43 ± 0.30^{a}	34.78 ± 0.79^{a}	24.43 ± 1.14^{f}	19.35 ± 0.57^{d}
ALG-3.5%WPI	18.17 ± 0.84^{de}	33.11 ± 0.21^{cde}	28.27 ± 1.15^{bcde}	20.44 ± 0.55^{bcd}
ALG-4.0%WPI	19.86 ± 0.51^{b}	33.51 ± 0.65^{bcd}	30.75 ± 0.83^{a}	15.87 ± 1.09^{f}
WPI	18.54 ± 0.21^{cde}	32.47 ± 0.62^{de}	26.89 ± 1.31^{e}	22.09 ± 0.86^{a}

注: 同列不同的上标小写字母(a~g)表示数值具有显著差异, $P<0.05$。

当 WPI 与 ALG 形成复合物时, 与其他研究一致, ALG 的存在会显著增加 *α*-螺旋的含量[45]。*β*-折叠的含量随着 WPI 浓度的增加而上升, 当 WPI 浓度达到 3.0% 时含量达到最高值, 随后开始下降。可能是因为当 WPI 浓度达到 3.0% 时, 静电结合的位点趋于饱和。过量的 WPI 分子因电荷排斥无法有效与 ALG 结合, 转而通过疏水相互作用自聚集, 导致 *β*-折叠的氢键网络被破坏含量下降[46]。无规则卷曲含量略有增加, 而 *β*-转角的含量则略微降低。进一步, 当 WPI 与 ALG 和 PE 形成三元复合物后, 无规则卷曲的含量变化不大, *α*-螺旋含量略有增加, 而 *β*-转角含量继续呈现小幅下降。总体来看, 海藻酸钠和果胶的添加对乳清分离蛋白的二级结构产生了一定的影响, 尤其是在 *β*-折叠和 *α*-螺旋的含量上有所变化。

2.2　ALG-PA、ALG-WPI-PA 与 ALG-WPI-PE-PA 的包封性能比较

包封性能对于口服递送系统至关重要, 通常通过包封效率来表示。图 4 展示了不同壁材微胶囊包封效率之间的比较。结果显示, 全部微胶囊的包封效率在 61.77%~94.33% 之间, 其中, ALG-WPI-PE-PA 微胶囊包封效率在 75.1%~94.33% 之间变化, 显著高于 ALG-WPI-PA($P<0.05$)。具体来说, ALG-2.0% WPI-PE-PA、ALG-2.5%WPI-PE-PA 和 ALG-3.0% WPI-PE-PA 微胶囊的包封效率与乳清分离蛋白的添

加量呈正相关，随着乳清分离蛋白含量的增加而增加。尽管 ALG-3.0%WPI-PE-PA 与 ALG-3.5%WPI-PE-PA 两种微胶囊的效率并无显著差异，但在数值上 ALG-3.0%WPI-PE-PA 的包封效率还是高于 ALG-3.5%WPI-PE-PA。

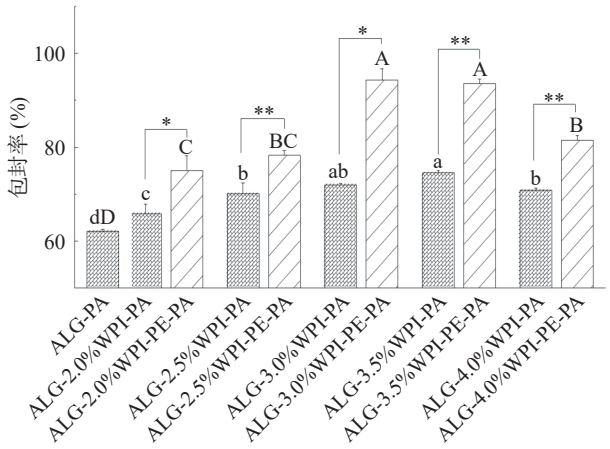


图 4 ALG-PA、ALG-WPI-PA 与 ALG-WPI-PE-PA 微胶囊的包封效率

Fig.4 Encapsulation efficiency of ALG-PA, ALG-WPI-PA and ALG-WPI-PE-PA microcapsules

注：a~d: ALG-PA 与 ALG-WPI-PA 之间的差异显著性（P<0.05）；A~D: ALG-PA 与 ALG-WPI-PE-PA 之间的差异显著性（P<0.05）；*: 表示两者之间差异显著（P<0.05）；**: 表示两者之间差异极显著（P<0.01）。

然而，ALG-4.0%WPI-PE-PA 样品的包封效率并未随乳清分离蛋白含量的增加而提高，这可能是因为过量乳清分离蛋白与果胶产生了静电斥力，或者乳清分离蛋白难以均匀分散在壁材溶液中，导致其在制备过程中损失，从而影响了包封效率。总之，本研究成功地将乳酸片球菌封装在微胶囊基质中，微胶囊基质通过乳清分离蛋白与果胶之间的相互作用（可能包括静电作用）形成。随后，海藻酸钠和 Ca^{2+} 之间的快速内聚交联反应将乳酸片球菌有效地包封在微胶囊中。

2.3 ALG-PA、ALG-WPI-PA 与 ALG-WPI-PE-PA 微胶囊模拟胃肠消化研究

为进一步研究包封对乳酸片球菌的保护作用，本实验模拟了胃肠消化过程，比较了未包封乳酸片球菌和包封后乳酸片球菌的存活率，以确定包封是否有助于乳酸片球菌抵抗胃肠环境。人体胃液在禁食状态下 pH 通常为 1.5~2.0，饱食后可能升至 2.7 左右。在实验中，我们将 SGF 的 pH 调整为 2.0，符合禁食状态下的胃酸条件，确保胃蛋白酶的活性。小肠液的 pH 在 6.8~7.5 之间，本实验中，调节 pH 至 6.8，模拟了十二指肠对胃酸的缓冲作用。加入 $NaHCO_3$ 模拟胰液和胆汁中的碳酸氢盐中和胃酸的过程。

如图 5 的结果表明，包封的乳酸片球菌在模拟体外胃肠消化后的存活率明显高于未包封的乳酸片球菌。实验中，未经包封的乳酸片球菌和包封后的乳酸片球菌在起始阶段的活菌数为 10^{10} CFU/g。经过模拟消化过程后，未包封的乳酸片球菌存活率降至 43.23%±2.75%，而包封在微胶囊中的乳酸片球菌的存活率在 62.33%~87.03% 之间，随着乳清分离蛋白含量的增加，存活率呈现上升趋势，WPI 浓度为 3.0% 时达到最大值，表明微胶囊在模拟体外消化过程中对乳酸片球菌具有有效的保护作用。具体机制上，海藻酸盐在酸性条件下转化为藻酸，并释放 Ca^{2+}，这一过程中微胶囊结构变得更加致密，从而减缓了胃酸向微胶囊核心的渗透，起到了保护作用[47]。在肠道消化过程中，Ca^{2+} 的解离有助于释放乳酸片球菌，完成肠道靶向递送。特别是在添加果胶与乳清分离蛋白复合物的情况下，乳酸片球菌在模拟消化过程中的存活率保持在 77.44%~87.03% 之间。与 ALG-WPI-PA 微胶囊相比，ALG-WPI-PE-PA 微胶囊中乳酸片球菌的存活率显著更高（P<0.01）。这可能是 ALG-WPI-PE-PA 微胶囊中果胶的加入进一步强化了乳清分离蛋白和海藻酸钠网络之间的氢键交联，增强了微胶囊的稳定性，延缓了胃酸和胆汁盐对菌体的直接接触，从而提高了乳酸片球菌的存活率。综上所述，这种包封技术可以有效地提高乳酸片球菌在胃肠消化过程中的存活率，从而为其在功能食品和益生菌应用中的效果提供更加可靠的保障。

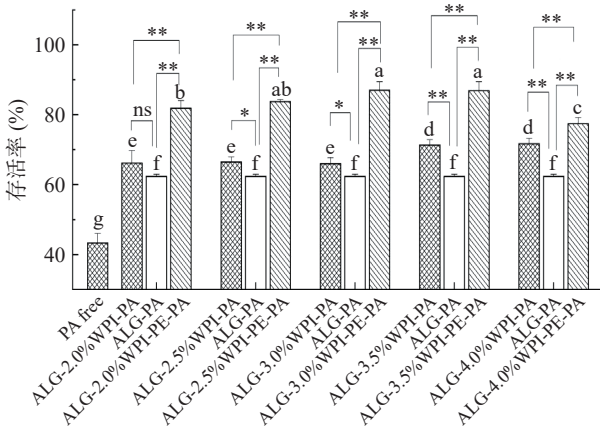


图 5 模拟胃肠消化过程后 ALG-PA、ALG-WPI-PA 与 ALG-WPI-PE-PA 微胶囊中乳酸片球菌及未包封乳酸片球菌的存活率比较

Fig.5 Comparison of survival rates of *Pediococcus acidilactici* in ALG-PA, ALG-WPI-PA and ALG-WPI-PE-PA microcapsules and free *Pediococcus acidilactici* after simulated gastrointestinal digestion process

注：不同上标小写字母（a~g）表示数值显著差异，P<0.05；*: 表示两者之间差异显著（P<0.05）；**: 表示两者之间差异极显著（P<0.01）；ns: 两者差异不显著。

2.4 储存条件对共包封微胶囊稳定性的影响

在微生物产品的贮藏稳定性测定中，25 ℃ 下 7 d 和 4 ℃ 下 49 d 是两种常见的储存条件，分别模拟了常温下的短期储存和冷藏条件下的长期储存。通过上述两种储存条件，本研究进一步探究了不同条件对 ALG-3.0%WPI-PE-PA 微胶囊储存稳定性的影

响，该微胶囊在前期各项指标检测中均表现最优。

在 25 ℃ 储存 7 d 的条件下，ALG-3.0%WPI-PE-PA 和未包封乳酸菌从第 4 d 开始出现了显著差异（P<0.05）。7 d 后，ALG-3.0%WPI-PE-PA 包封乳酸片球菌的生存力下降了 1.8 lg CFU/g，较未包封的乳酸片球菌，其在常温下的贮藏稳定性明显提高（图 6A）。确保在常温运输和存储情况下，乳酸片球菌仍能保证较高的活菌数，避免因过度损耗而影响其功能性。

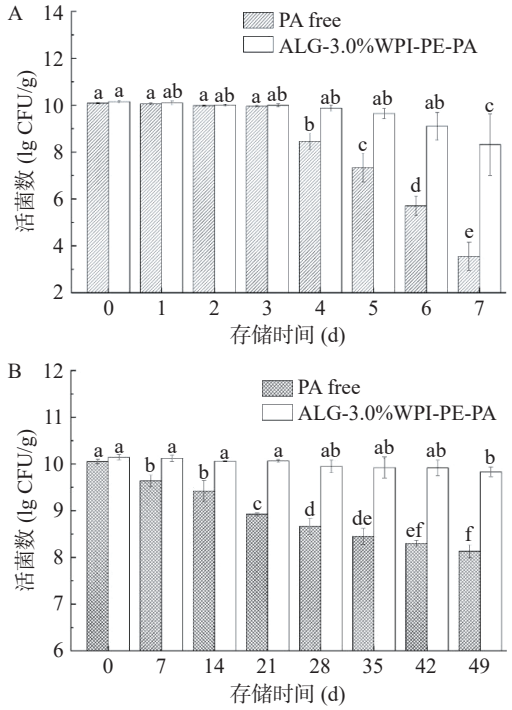


图 6　不同存储条件下 ALG-3.0%WPI-PE-PA 微胶囊以及未包封乳酸片球菌的活菌数比较

Fig.6　Comparison of viable cell counts of ALG-3.0% WPI-PE-PA microspheres and free *Pediococcus acidilactici* under different storage conditions

注：A：25 ℃ 7 d；B：4 ℃ 49 d；相同存储条件，同一种包埋方法在存储时间内，不同小写字母表示（a~f）表示数值具有显著差异，P<0.05。

与常温相比，冷藏条件下乳酸片球菌的代谢活性显著降低，细胞的增殖与衰亡速率明显减缓，从而有效延长了其存活时间。不过有研究表明，包封处理可以进一步延长其存活时间。例如，Pérez-Ruiz 等[48]的研究表明，在 4 ℃ 条件下储存 28 d 后，包封后的乳酸菌仍能保持较高的存活率（约 89.2%）。本实验的研究结果显示，在 4 ℃ 储存 49 d 后，未经包封的菌的活菌数下降了约 2 lg CFU/g（图 6B）。而在相同条件下，ALG-3.0%WPI-PE-PA 包封的乳酸片球菌活菌数下降较少，仅下降 0.3 lg CFU/g，明显优于未经包封的乳酸片球菌。因此，总结来看，ALG-3.0% WPI-PE-PA 微胶囊能有效保护乳酸片球菌，增强其在储存期间的存活能力。

3　结论

本研究探讨了不同壁材包封乳酸片球菌的效果，以乳清分离蛋白、海藻酸钠、乳清分离蛋白与果胶的复配溶液，作为壁材用于包封乳酸片球菌。实验结果表明，ALG-WPI-PE-PA 和 ALG-WPI-PA 微胶囊在包封效率及模拟消化后的乳酸片球菌的存活率方面，果胶的添加显著提高了乳清分离蛋白作为包封壁材的稳定性。具体来说，ALG-WPI-PE-PA 能够有效包封乳酸片球菌，使其能够抵抗外界环境的干扰，并提高了乳酸片球菌在体外模拟消化环境中的存活率。此外，研究还表明乳清分离蛋白在包封乳酸片球菌中的最佳浓度为 3.0%，此浓度下乳酸片球菌的包封效率和模拟消化时的存活率均达到最佳效果，为乳酸片球菌未来在肠道中的定植提供了有利条件。进一步对 ALG-3.0%WPI-PE-PA 进行了常温（25 ℃）和冷藏（4 ℃）条件下贮藏稳定性的测定，结果显示，微胶囊在这两种储存条件下均较好地保持了乳酸片球菌的生存力。本研究为乳酸菌包封技术的进一步开发和应用提供了理论基础，并为丰富乳酸菌制剂的产品类型提供了新的思路。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] XIE H, LUO X, GAO Y, et al. Co-encapsulation of *Lactobacillus plantarum* and EGCG: A promising strategy to increase the stability and lipid-lowering activity[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109768.

[2] POOPAN B, KASORN A, PUTTARAT N, et al. Freeze drying microencapsulation using whey protein, maltodextrin and corn powder improved survivability of probiotics during storage[J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 34(4): 1−12.

[3] 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. [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.]

[4] LI H, CHEN H, SHI Z, et al. Structure and physicochemical properties of rice starch modified with dodecenyl succinic anhydride and its use for microencapsulating *Pediococcus acidilactici* probiotic[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141276.

[5] JANG W J, OH D N, KIM D Y, et al. Encapsulation of probiotics with poly-γ-glutamic acid alters gut microbiota and short-chain fatty acid content by maintaining cell viability in the gastrointestinal tract[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109328.

[6] BELDARRAIN-IZNAGA T, VILLALOBOS-CARVAJAL R, SEVILLANO-ARMESTO E, et al. Functional properties of *Lactobacillus casei* C24 improved by microencapsulation using multilayer double emulsion[J]. Food Research International, 2021, 141: 110136.

[7] 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 Applica-

tions, 2023, 5: 100285.
[8] GAO H, XIE Y, LI Z, et al. Novel seamless shell-core microbead for probiotics encapsulation: Influence of gel structure on storage stability and gastrointestinal activity[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109908.
[9] SUN C, WANG S, HUANG X, et al. Enhancing probiotic viability: Impact of soy hull polysaccharide concentration on stabilized high-internal-phase emulsions encapsulated with *Lactobacillus plantarum* and their release during gastrointestinal digestive[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109959.
[10] NEZAMDOOST-SANI N, KHALEDABAD M A, AMIRI S, et al. A comprehensive review on the utilization of biopolymer hydrogels to encapsulate and protect probiotics in foods[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254: 127907.
[11] ROJAS K, VERDUGO-MOLINARES M G, VALLEJO-CARDONA A A. Use of encapsulating polymers of active compounds in the pharmaceutical and food industry[J]. Food Chemistry Advances, 2024, 4: 100619.
[12] NEUENFELDT N H, ALMEIDA FARIAS C A, DE OLIVEIRA MELLO R, et al. Effects of blueberry extract co-microencapsulation on the survival of *Lactobacillus rhamnosus*[J]. LWT, 2022, 155: 112886.
[13] LIN Y, XU J, GAO X. Development of antioxidant sodium alginate gel beads encapsulating curcumin/gum Arabic/gelatin microcapsules[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109901.
[14] NAAZ A, AFZAAL M, SAEED F, et al. The effect of different wall materials (Sodium alginate, whey protein isolate, Kappa-carrageenan and Citrus pectin) on the viability and stability of free and encapsulated *Lactobacillus acidophilus* under hostile condition[J]. Cogent Food & Agriculture, 2024, 10(1): 2404726.
[15] XU Y, YAN X, ZHENG H, et al. The application of encapsulation technology in the food Industry: Classifications, recent advances, and perspectives[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101240.
[16] YIN M, CHEN L, CHEN M, et al. Encapsulation of *Lactobacillus rhamnosus* GG in double emulsions: Role of prebiotics in improving probiotics survival during spray drying and storage[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109792.
[17] GOLNARI M, BEHBAHANI M, MOHABATKAR H. Comparative survival study of *Bacillus coagulans* and *Enterococcus faecium* microencapsulated in chitosan-alginate nanoparticles in simulated gastrointestinal condition[J]. LWT, 2024, 197: 115930.
[18] WENG Y, SUN B, JIN W, et al. Mechanistic study on phytase stabilization using alginate encapsulation[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 151: 109837.
[19] JEZNIENĖ S, BRUŽAITĖ I, ŠIPAILIENĖ A. Application of biomacromolecules encapsulation systems for the long-term storage of *Lactobacillus plantarum* F1 and *Lactobacillus reuteri* 182[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e26566.
[20] SOMPACH G, RODKLONGTAN A, NITISINPRASERT S, et al. Microencapsulating role of whey protein isolate and sucrose in protecting the cell membrane and enhancing survival of probiotic lactobacilli strains during spray drying, storage, and simulated gastrointestinal passage[J]. Food Research International, 2022, 159: 111651.
[21] HUANG Y, LU Z, LIU F, et al. Osteopontin enhances the probiotic viability of *Bifidobacteria* in pectin-based microencapsulation subjected to *in vitro* infant gastrointestinal digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109634.
[22] COSTA N de A, SILVEIRA L R, AMARAL E de P, et al. Use of maltodextrin, sweet potato flour, pectin and gelatin as wall material for microencapsulating *Lactiplantibacillus plantarum* by spray drying: Thermal resistance, *in vitro* release behavior, storage stability and physicochemical properties[J]. Food Research International, 2023, 164: 112367.
[23] 孙静, 王宇滨, 王丹, 等. 果胶提取方法、结构和改善慢性疾病研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 371−382. [SUN Jing, WANG Yubin, WANG Dan, et al. Research progress on extraction methods, structure and improvement of chronic disease of pectins[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 371−382.]
[24] 黄如梦. 基于静电喷涂的益生菌包埋体系的构建及其性能研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2021. [HUANG R M. Construction and performance study of probiotic embedding system based on electrostatic spraying[D]. Guangdong: South China University of Technology, 2021.]
[25] 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. [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.]
[26] HUANG L, CHEN Y, DING S, et al. Emulsification and encapsulation properties of conjugates formed between whey protein isolate and carboxymethyl cellulose under acidic conditions[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136995.
[27] ZHU Z, WU Y, ZHONG Y, et al. Development, characterization and *Lactobacillus plantarum* encapsulating ability of novel C-phycocyanin-pectin-polyphenol based hydrogels[J]. Food Chemistry, 2024: 138918.
[28] DU Q, ZHOU L, LYU F, et al. The complex of whey protein and pectin: Interactions, functional properties and applications in food colloidal systems–A review[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 210: 112253.
[29] SONG W, XU J, GAO L, et al. Preparation of freeze-dried porous chitosan microspheres for the removal of hexavalent chromium[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4217.
[30] MOTALEBI MOGHANJOUGI Z, REZAZADEH BARI M, ALIZADEH KHALEDABAD 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.
[31] PERAK JUNAKOVIĆ E, ŠANDOR K, TERZIĆ S, et al. Influence of encapsulation of propolis extract with 2-Hydroxypropyl-*β*-cyclodextrin (HP-*β*-CD) on polyphenolic contents during *in vitro* simulation of digestion[J]. Applied Sciences, 2023, 13(16): 9357.
[32] 孟翔宇, 赵彦巧, 李钰琨, 等. 玫瑰茄花色苷微胶囊的制备及其稳定性与释放性的评价[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 174−181. [MENG Xiangyu, ZHAO Yanqiao, LI Yukun, et al. Preparation of anthocyanin from hibiscus sabdariffa microcapsules and evaluation of stability and release[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 174−181.]
[33] MAZZA K E L, COSTA A M M, DA SILVA J P L, et al. Microencapsulation of marjoram essential oil as a food additive using sodium alginate and whey protein isolate[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 233: 123478.
[34] SHARIFI S, REZAZAD-BARI M, 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, 2021, 113: 106496.
[35] HU X, LIU C, ZHANG H, 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.
[36] ZHOU L, HUANG Y, WANG D, et al. Microencapsulation of *Lactobacillus sakei* and *Lactobacillus rhamnosus* in whey protein isolate and sodium hyaluronate for potential food-grade probiotic delivery system[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104784.
[37] CARBONARO M, NUCARA A. Secondary structure of food proteins by Fourier transform spectroscopy in the mid-infrared region[J]. Amino Acids, 2010, 38(3): 679−690.
[38] ÇAYKARA T, DEMIRCI S. Preparation and characterization of blend films of poly (vinyl alcohol) and sodium alginate[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2006, 43(7): 1113−1121.
[39] LAROSA C, SALERNO M, DE LIMA J S, et al. Characterisation of bare and tannase-loaded calcium alginate beads by microscopic, thermogravimetric, FTIR and XRD analyses[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 900−906.
[40] SAARAI A, SEDLACEK T, KASPARKOVA V, et al. On the characterization of sodium alginate/gelatine-based hydrogels for wound dressing[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 126 (S1).
[41] BICHARA L C, ALVAREZ P E, FIORI BIMBI M V, et al. Structural and spectroscopic study of a pectin isolated from citrus peel by using FTIR and FT-Raman spectra and DFT calculations[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 76: 315−327.
[42] CHANG C, WANG T, HU Q, et al. Zein/caseinate/pectin complex nanoparticles: Formation and characterization[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104: 117−124.
[43] SYNYTSYA A. Fourier transform Raman and infrared spectroscopy of pectins[J]. Carbohydrate Polymers, 2003, 54(1): 97−106.
[44] GANIM Z, CHUNG H S, SMITH A W, et al. Amide I two-dimensional infrared spectroscopy of proteins[J]. Accounts of Chemical Research, 2008, 41(3): 432−441.
[45] LIU X, QIN X, WANG Y, et al. Physicochemical properties and formation mechanism of whey protein isolate-sodium alginate complexes: Experimental and computational study[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107786.
[46] XU Y, YANG N, YANG J, et al. Protein/polysaccharide intramolecular electrostatic complex as superior food-grade foaming agent[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105474.
[47] 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.
[48] PÉREZ-RUIZ Y, MEJÍA-REYES D, ROSAS-QUIJANO R, et al. Antifungal capacity of microcapsules containing *Lactiplantibacillus plantarum* TEP15 or *Lactiplantibacillus pentosus* TEJ4 [J]. Processes, 2024, 12(4): 763.