DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251107001
引用格式: 周莉, 平洋, 张亚勋, 等. 含益生元的微囊化复合益生菌存活率和释放率研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(9): 335–343.
ZHOU L, PING Y, ZHANG YX, *et al*. Study on survival rate and release rate of microencapsulated compound probiotics containing prebiobits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(9): 335–343. (in Chinese with English abstract).

含益生元的微囊化复合益生菌存活率和释放率研究

周 莉*, 平 洋, 张亚勋, 谭 静
(河南省商业科学研究所有限责任公司, 郑州 450002)

摘 要: 目的 为了提高益生菌菌体存活率, 制备微囊化复合益生菌。**方法** 本研究利用微胶囊技术, 以海藻酸钠、脱脂乳粉为壁材, 以水苏糖和魔芋微粉为芯材包裹益生菌, 通过常温保存和模拟胃肠液处理, 探究水苏糖和魔芋微粉对微囊化复合益生菌存活率和释放率的影响。**结果** 当益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉溶液质量比为 1:5:2:2:3 时, 由此制备的益生菌复合微胶囊在胃液中处理 90 min, 存活率达到 84.5%; 肠液处理 90 min, 释放率达到 93.0%; 常温保存 30 d 后, 存活率高达 93.2%; 常温保存 60 d 后, 存活率高达 90.0%。**结论** 添加的水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉能够增加微囊化益生菌在常温下储藏的存活率, 耐胃酸性能良好, 肠溶效果优异。

关键词: 益生菌; 微胶囊; 存活率; 稳定性

Study on the survival rate and release rate of microencapsulated compound probiotics containing prebiobits

ZHOU Li*, PING Yang, ZHANG Ya-Xun, TAN Jing
(*Henan Commercial Science Research Institute Co*., *Ltd*., *Zhengzhou* 450002)

ABSTRACT: Objective To improve the survival rate of probiotic cells and prepare microencapsulated compound probiotics. **Methods** In this study, microencapsulation technology was employed, using sodium alginate and skimmed milk powder as wall materials, and stachyose and konjac micro-powder as core materials to encapsulate probiotics. The effects of stachyose and konjac micro-powder on the survival rate and release rate of microencapsulated composite probiotics were investigated through room temperature storage and simulated gastrointestinal fluid treatment. **Results** When the mass ratio of probiotics, stachyose, lactulose, isomalto-oligosaccharides and konjac micro-powder solution was 1:5:2:2:3, the probiotic composite microcapsules prepared in this way had a survival rate of 84.5% after being treated in gastric juice for 90 min, a release rate of 93.0% after being treated in intestinal juice for 90 min, a survival rate as high as 93.2% after being stored at room temperature for 30 d, and a survival rate as high as 90.0% after being stored at room temperature for 60 d.

收稿日期: 2025-11-07
基金项目: 河南省科学院成果转移转化项目(231611006); 河南省科学院创新团队项目(20230104)
第一作者/*通信作者: 周莉(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品安全研究。E-mail: zhoulizuo@126.com

Conclusion The added stachyose, lactulose, isomalto-oligosaccharides and konjac micro-powder can increase the survival rate of microencapsulated probiotics during storage at room temperature, with good gastric acid resistance and excellent enteric effect.

KEY WORDS: probiotics; microcapsules; survival rate; stability

0 引 言

益生菌是人体肠道重要的生理菌，具有调节肠道菌群平衡[1−2]、抑制有害菌[3]、增强免疫力[4]、抗癌等作用，被广泛应用于食品领域、医药领域以及畜牧领域。然而，益生菌对环境较为敏感，在口服过程中，当它们随食物进入胃部时，会遭遇强酸性的胃酸环境，这些酸性物质会像无形的屏障一样，大量杀灭益生菌；随后进入小肠，又会面临胆盐的进一步破坏，经口服到达肠道前，已基本被胃酸和胆盐破坏，其在结肠活性部位的有效定植效率会大大降低[5−7]，此外，在生产、运输、销售过程中，益生菌还需经历温度波动、湿度变化、光照照射等一系列不良环境，这些因素会导致益生菌活菌数大幅减少，使其到达肠道时数量锐减，从而影响其发挥益生效果[8]。国内外科研机构正积极通过生物技术手段开发具有高酸、高温耐受性的益生菌变异菌株，旨在提升益生菌在实际应用中的存活率和功效。然而，这种方法的研发过程往往需要经历漫长的实验周期，从基因筛选、定向突变到菌株筛选与验证，每一步都耗时费力，导致研发成本居高不下。此外，基因工程改造的益生菌在安全性方面也存在争议。截至目前，尽管已有不少研究报道了这类变异菌株的构建成果，但真正实现产业化并应用于市场的产品仍寥寥无几，尚未有明确的商业化产品问世。

针对益生菌产品活性保持时间短的技术问题，开发一种保持长时间活性的益生菌产品尤为重要。近年来，微胶囊技术通过提升益生菌的胃肠道存活率、延长缓释效果和增强定植能力，显著推动了益生菌产品的研发与应用。因此，将益生菌进行微胶囊包埋，可降低环境中不良因素的影响[9−12]，其抗逆性、稳定性大幅度提高，有利于其在肠道环境下功能的发挥[13]，便于运输和长期保存。范炜平等[14]制备了 4 组不同层数微胶囊荷载鼠李糖乳杆菌，经体外模拟胃肠消化 6 h 后，微胶囊活菌数为 8.34 lg CFU/mL。高源[15]以海藻酸钠和黄原胶为壁材，采取内源乳化法对罗伊氏乳杆菌进行双层包埋。结果显示，在模拟胃酸溶液处理 90 min，罗伊氏乳杆菌存活数量维持在 6.9 CFU/g，于博安等[16]以海藻酸钠和壳聚糖为壁材，采用挤压法制作嗜酸乳杆菌微胶囊，制备的微胶囊包埋率为 84.7%，存活率为 85.3%，比游离菌提高 14.5%。ATHAYDE 等[17]用挤压与乳化法制作了含有鼠李糖乳酪杆菌的壳聚糖-海藻酸钠微胶囊，两种微胶囊在极端环境条件下具有保护效果(冷藏 28 d 存活率仍有 82%)，挤出法包埋率(86.01%)略优于乳化法(74.43%)。黄筱洋[18]制备了双歧杆菌微胶囊和母乳低聚糖与双歧杆菌共包封的合生元微胶囊，在 4 ℃储存 28 d 后，合生元微胶囊存活率为 89.50%。

水苏糖作为一种优质益生元，具备多种重要的生理功能，包括调节肠道菌群平衡、降低血糖水平、改善血压血脂、增强机体免疫调节能力等。研究表明，水苏糖能够显著促进肠道内乳酸杆菌、双歧杆菌等有益菌的增殖，并提升其产酸能力，从而维护肠道健康环境[19−21]。魔芋微粉的主要成分为葡甘露聚糖，该成分具有较好的凝胶特性和抗菌性能，能促进肠道益生菌增殖、促进肠道蠕动等[22]功效。在微胶囊制备技术领域，目前应用较为广泛的制备方法主要包括挤压法、乳化法、喷雾干燥法、冷冻干燥法以及复合凝聚法等[23]多种工艺，用于包埋益生菌细胞的材料包括海藻酸盐、阿拉伯胶、壳聚糖、明胶、乳蛋白等天然或改性高分子物质[24]。其中，挤压法因其独特的工艺优势而备受关注，该方法具有生产成本较低、能耗较小的特点，且所制备的产品通常展现出理想的理化性质。采用挤压法制备的益生菌微胶囊，具备良好的机械强度，使益生菌能够在储存过程中获得更长的保质期，并且能够显著增强其对高温、酸碱环境及消化道酶类等不良因素的抗逆性，从而提高益生菌的存活率和生物利用度[25]。

因此本研究选择挤压法制备微胶囊，以益生菌和具有显著益生活性的益生元为芯材，以海藻酸钠、脱脂乳粉、氯化钙的混合物为壁材，采用微胶囊技术制备含水苏糖和魔芋微粉的微囊化益生菌，通过考察常温保存和模拟胃肠液处理后微胶囊中益生菌的存活率和释放率，优选出适宜的芯材组分及包埋条件，评价含水苏糖和魔芋微粉的微囊化复合益生菌在益生菌保护方面的效果，本研究所制备的微囊化复合益生菌可应用在食品工业领域和保健品领域，以此为食品乳制品和功能性食品研究提供理论基础及指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

两歧双歧杆菌(ATCC 29521)、鼠李糖乳杆菌(ATCC 53103)、罗伊氏乳杆菌(ATCC 23272)、嗜酸乳杆菌(ATCC 4356)(河南省商业科学研究所有限责任公司微生物实验室传代保存)；海藻酸钠、脱脂乳粉、胃蛋白酶(1:3000 EA)、胰蛋白酶(酶活力 1:250 U)(上海源叶生物科技有限公司)；

MRS 琼脂培养基、莫匹罗星锂盐、半胱氨酸盐酸盐改良 MRS 琼脂培养基(海博生物技术有限公司); 无水氯化钙、NaCl、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉(天津市大茂化学试剂厂); $Na_2HPO_4 \cdot 12H_2O$、KH_2PO_4、NaCl(食品级, 国药集团化学试剂有限公司)。

ZDYY-III 全自动厌氧培养箱(上海川宏实验仪器有限公司); LRH-550 生化培养箱(韶关市泰宏医疗器械有限公司); YXQ-70A 立体式压力蒸汽灭菌锅(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司); C-MAG HS-4 磁力搅拌器(德国艾卡仪器设备有限公司); UNIVERSAL 320R 高速离心机(德国 Hettich 公司); AL104 电子天平(精度 0.0001 g, 梅特勒-托利多仪器上海有限公司)。

1.2　实验方法

1.2.1　菌悬液的制备方法

将两歧双歧杆菌、鼠李糖乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、嗜酸乳杆菌于 36 ℃条件下接种培养, 发酵 18 h, 得到益生菌发酵液。将益生菌发酵液以转速 8000 r/min 离心 5 min, 收集沉淀物, 得到菌泥。将得到的菌泥用 0.85%无菌生理盐水洗涤 2~3 次, 将洗涤后的菌泥重悬于无菌水中, 振荡混匀, 得到每种菌浓度均为 10^9 CFU/mL 的菌悬液。

1.2.2　微胶囊的制备方法

将菌悬液、水苏糖溶液(15%)、乳果糖溶液(3%)、低聚异麦芽糖溶液(4%)和魔芋微粉溶液(0.4%)按一定比例混合, 得到芯材混合液。

将芯材混合液、8%脱脂乳粉溶液和 2%海藻酸钠溶液按质量比 1:5:5 混合, 得到混合液。

将均匀挤压的混合液滴入 2%氯化钙溶液中, 形成微囊, 磁力搅拌器以转速 400 r/min 搅拌 15 min, 待微囊充分凝固后用蒸馏水冲洗 3 次, 除去多余的钙离子和未被包埋的菌体, 得到微囊化益生菌。菌悬液中每种益生菌的浓度均为 10^9 CFU/mL。

1.2.3　益生菌微胶囊在模拟胃液中的耐受性

参照全星语[26]的方法并略作改动。

模拟胃液的配制: 取稀盐酸 16.4 mL, 加水约 800 mL, 调 pH 到 2.0, 胃蛋白酶 10 g, 搅匀后加水定容至 1000 mL 即可。

微囊化益生菌在模拟胃液中处理的具体实验操作: 取 0.5 g 微囊化益生菌加入到模拟胃液(4.5 mL)中, 充分混匀 15 s, 在 37 ℃条件下, 以 200 r/min 在摇床中振荡处理 30、60、90、120、150 min, 分别离心并取样, 计算活菌数及存活率, 存活率计算如公式(1)所示。

$$存活率/\%=A/B\times100\% \quad (1)$$

式中: A 为处理后样品中的活菌数, CFU/mL; B 为未经处理前的活菌数, CFU/mL。

1.2.4　益生菌微胶囊在模拟肠液中的释放性

参照全星语[26]的方法并略作改动。

模拟肠液的配制: KH_2PO_4 6.8 g, 加水 500 mL 溶解, 用 0.4%的氢氧化钠调节 pH 至 6.8, 于 120 ℃灭菌 20 min; 另取胰蛋白酶 10 g, 加适量无菌水使溶解, 将两液混合后, 加水定容至 1000 mL 即可。

微囊化益生菌在模拟肠液中处理的具体实验操作: 取 0.5 g 微囊化益生菌加入到模拟肠液(4.5 mL)中, 充分混匀 15 s, 在 37 ℃条件下, 在摇床中振荡处理 30、60、90、120、150 min, 分别离心并取样, 计算活菌数及释放率, 释放率计算如公式(2)所示。

$$释放率/\%=V_2/V_1\times100\% \quad (2)$$

式中: V_1 为未经处理前的活菌数, CFU/mL; V_2 为经模拟肠液处理后, 微胶囊破裂释放的细胞活菌数, CFU/mL。

1.2.5　芯材组分对微囊化益生菌存活率和释放率的影响

探究水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉对微囊化益生菌存活率和释放率的影响, 将制备的微囊化益生菌, 进行常温下保存、模拟胃液中处理和模拟肠液中处理后取样进行活菌计数, 然后根据活菌数计算结果。

1.2.6　水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉含量对微囊化益生菌存活率和释放率的影响

探究不同水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉含量对微囊化益生菌存活率和释放率的影响, 方法同 1.2.5。

1.3　数据处理

所有实验数据均重复 3 次, 采用 WPS 365 v12.1.0.2252 处理试验数据, 采用 Microsoft Excel 做表, 均用平均值±标准偏差表示。

2　结果与分析

2.1　益生菌复合微胶囊形态特征

通过挤压法制备的益生菌复合微胶囊, 形态为白色圆形小球, 大小较为均匀, 差异不大, 基本达到预期效果。益生菌微胶囊外观图如图 1 所示。

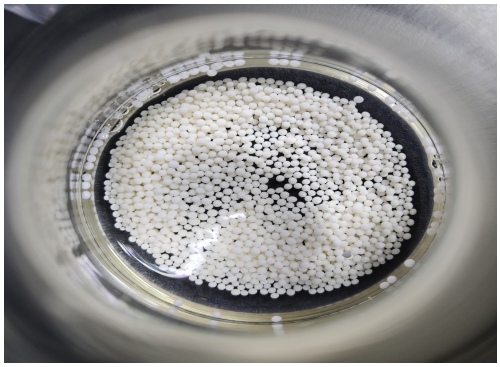


图 1　益生菌微胶囊外观图

Fig.1　Appearance of probiotic microcapsule

2.2 芯材组分的确定

以益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉作为复合芯材，选用合适的比例，有效发挥了糖类和海藻酸钠的协同作用，提高包埋率；同时，复合芯材能填充海藻酸钠凝胶的多孔结构，从而有效提升微胶囊对益生菌的保护效果。研究表明，低聚糖组合对益生菌的生长和功能效果更好[27]。如 LIU 等[28]报道，低聚果糖-低聚半乳糖-菊粉-水苏糖-低聚木糖组合更有利于发酵粘液乳杆菌 DALI02 肠道定植，此组合在停止干预后菌株拷贝数为 4.98 lg(copies/g)，显著高于空白组(P<0.05)，与 DALI02 发酵液组的菌株拷贝数相比增加了 26.72%。LIKOTRAFTIT 等[29]发现短链低聚果糖和低聚异麦芽糖能够分别增强发酵乳杆菌与长双歧杆菌抑菌活性。何庆祥等[30]发现布拉氏酵母菌散联合乳果糖可显著改善小儿肠易激综合征患儿症状，调节患儿肠道菌群。研究发现，人体摄入 α-半乳寡糖的混合物(主要含有水苏糖)可以显著提高双歧杆菌和乳酸杆菌的数量，间接抑制肠道病原体的过度增殖[31]。以上研究较为单一，将水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉同时作为益生菌复合微胶囊的芯材组分，国内鲜见相同报道。由表 1 可以看出，添加多种芯材组分的微囊化益生菌存活率高于单一芯材组分的微囊化益生菌，常温保存 60 d 后，芯材仅含益生菌的微胶囊，益生菌存活率为 55.3%，而未包埋的益生菌存活率仅为 28.0%；经模拟胃液处理 150 min 后，未包埋的益生菌存活率降至 16.0%，芯材仅含益生菌的微胶囊存活率为 45.4%，表明单一芯材的微囊化益生菌在胃液低酸环境中仍难以存活，导致未包埋益生菌在模拟肠液处理 90 min 后，释放率仅为 38.0%；相比之下，添加不同芯材组分的微囊化益生菌常温保存 60 d 后，存活

表 1 不同芯材组分对微囊化益生菌存活率及释放率的影响

Table 1 Effects of different core materials on the survival rate and release rate of microencapsulated probiotics

芯材组分	常温保存存活率/%				模拟胃液处理存活率/%		模拟肠液处理释放率/%	
	0 d	15 d	30 d	60 d	90 min	150 min	60 min	90 min
益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉	95.7±0.1	94.3±0.1	93.2±0.3	90.0±0.3	84.5±0.1	75.0±0.2	74.6±0.2	93.0±0.7
益生菌	70.0±0.4	65.2±0.2	60.1±0.2	55.3±0.3	58.7±0.4	45.4±1.2	42.2±0.8	55.8±0.9
未包埋益生菌	61.2±0.1	58.0±0.2	37.6±0.2	28.0±0.2	46.8±0.6	16.0±0.4	22.0±0.3	38.0±0.2
益生菌、水苏糖	80.3±0.3	77.2±0.2	72.1±0.3	67.0±0.2	70.9±0.1	64.3±0.2	54.0±0.2	66.1±0.2
益生菌、乳果糖	79.5±0.2	76.4±0.3	71.3±0.3	65.0±0.8	69.1±0.4	62.2±0.2	51.5±0.1	65.4±0.2
益生菌、低聚异麦芽糖	77.3±0.2	73.5±0.2	68.2±0.6	62.3±0.4	65.8±0.5	60.5±0.4	49.7±0.3	62.5±0.2
益生菌、魔芋微粉	74.4±0.2	70.1±0.7	66.0±0.5	61.2±0.6	63.6±0.4	58.5±0.3	47.6±0.2	57.3±0.2
益生菌、水苏糖、乳果糖	82.9±0.2	79.6±0.3	73.4±0.8	68.7±1.2	76.3±0.2	71.2±0.2	62.1±0.3	76.0±0.3
益生菌、水苏糖、低聚异麦芽糖	84.0±0.2	80.2±0.4	74.3±0.3	70.5±0.2	77.1±0.4	72.3±0.4	63.5±0.4	77.5±0.2
益生菌、水苏糖、魔芋微粉	81.8±0.1	78.2±0.4	72.8±0.3	68.5±0.4	75.1±1.5	70.2±0.1	61.5±0.2	73.9±0.6
益生菌、乳果糖、低聚异麦芽糖	82.6±0.2	80.0±0.2	73.6±0.2	68.9±0.3	75.9±0.1	71.4±0.2	61.8±0.2	74.0±0.3
益生菌、乳果糖、魔芋微粉	80.9±0.1	77.2±0.1	73.0±0.2	69.2±0.3	74.2±0.2	68.4±0.3	60.3±0.2	70.8±0.3
益生菌、低聚异麦芽糖、魔芋微粉	82.7±0.3	79.6±0.2	74.5±0.2	69.1±0.4	76.1±0.2	72.0±0.3	62.0±0.1	73.5±0.1
益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖	87.0±0.2	83.2±0.2	80.5±0.2	74.0±0.1	80.2±0.1	71.3±0.3	71.1±0.1	80.0±0.2
益生菌、水苏糖、乳果糖、魔芋微粉	85.6±0.3	81.9±0.2	75.4±0.3	70.9±0.1	78.3±0.3	70.9±0.2	64.0±0.2	79.5±0.1
益生菌、水苏糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉	86.1±0.1	80.3±0.2	78.0±0.2	72.2±0.2	78.1±0.3	71.0±0.2	65.0±0.1	80.6±0.2
益生菌、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉	84.1±0.1	80.8±0.3	76.5±0.2	72.1±0.2	77.6±0.1	70.8±0.2	63.0±0.2	78.8±0.3

率均超过 61%, 模拟胃液处理 150 min 后, 存活率均超过 58%, 模拟肠液处理 90 min 后, 释放率均达到 57%以上。其中, 同时添加益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉时, 存活率和肠液释放率最高, 说明这 4 种芯材组分能有效提升微囊化复合益生菌的常温储藏稳定性, 耐胃酸性能及肠溶效果。因此, 确定芯材组分为水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉。

2.3　水苏糖含量的确定

水苏糖作为一种优质益生元, 可被肠道内的益生菌如双歧杆菌、乳杆菌等发酵利用, 这一特性使得水苏糖具有促益生菌生长、维护肠道微生态平衡、提高肠道机能等作用[32–33]。王兵等[34]发现, 水苏糖可以调节儿童肠道菌群结构组成, 增加肠道菌群多样性。干昭波等[35]研究发现水苏糖对 5 种益生菌具有较好增殖效果。张光耀[36]研究结果表明, 摄入乳清蛋白-水苏糖复合物可以改善肠道内环境, 在一定程度上改善结肠炎小鼠肠道菌群丰富度和多样性, 由表 2 可知, 在芯材混合液中益生菌:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液的质量比为 1:(1~10):2:2:3 范围内, 微囊化益生菌在常温保存 60 d 后的存活率均在 78.6%及以上; 在质量比为 1:5:2:2:3 时, 常温保存 60 d 后的存活率高达 90.0%; 在模拟胃液处理 90 min 后, 存活率达到 84.5%; 在模拟胃液处理 150 min 后, 存活率达到 75.0%; 在模拟肠液处理 90 min 后, 释放率达到 93.0%。说明微胶囊在模拟胃液中抗酸能力较强, 在模拟肠液中可快速崩解, 具有肠溶速度快, 能释放大量益生菌的特点。当水苏糖溶液含量为 15%, 且益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液质量比为 1:5:2:2:3 时, 存活率和释放率均最高, 因此确定该比例其为水苏糖的含量。

2.4　乳果糖含量的确定

研究显示, 乳果糖能够促进双歧杆菌和乳酸杆菌等有益菌群的生长, 同时抑制沙门菌和大肠杆菌等致病菌的生长[37]。杨孙汀等[38]研究证实了乳果糖有助于肠道微生物群的重新平衡, 保护肠道黏膜。丁凤等[39]研究发现, 双歧杆菌四联活菌片联合乳果糖口服溶液可有效治疗小儿便秘, 平衡肠道菌群。孙伟[40]发现, 乳果糖与益生菌联用, 可增强益生菌定植效果。由表 3 可以看出, 在芯材混合液中益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液的质量比为 1:5:(1~3):2:3 范围内, 微囊化益生菌在常温保存 60 d 后的存活率均在 79.8%及以上, 在质量比在 1:5:2:2:3, 模拟胃液处理 150 min 后, 存活率达到 75.0%; 在模拟肠液处理 60 min 后, 释放率达到 74.6%; 处理 90 min 后, 释放率达到 93.0%。由此可见, 该质量比下微囊化益生菌在模拟胃液和肠液中的存活率及释放率均表现较优。

表 2　芯材混合液中水苏糖含量对微囊化益生菌存活率及释放率的影响

Table 2　Effects of stachyose content in core material mixture on survival rate and release rate of microencapsulated probiotics

编号	益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液(质量比)	常温保存存活率/%				模拟胃液处理存活率/%		模拟肠液处理释放率/%	
		0 d	15 d	30 d	60 d	90 min	150 min	60 min	90 min
1	1:0:2:2:3	84.1±0.2	80.8±0.5	76.5±0.4	72.1±0.1	77.6±0.3	64.2±0.3	61.3±0.3	79.2±0.2
2	1:1:2:2:3	91.0±0.2	87.5±0.3	84.9±0.2	81.1±0.6	78.7±0.1	70.9±0.4	65.0±0.2	81.2±0.6
3	1:3:2:2:3	93.0±0.4	89.9±0.5	86.8±0.1	83.2±0.3	82.4±0.3	73.1±0.2	69.1±0.3	89.3±0.3
4	1:5:2:2:3	95.7±0.1	94.3±0.1	93.2±0.3	90.0±0.3	84.5±0.1	75.0±0.2	74.6±0.2	93.0±0.7
5	1:7:2:2:3	90.0±0.3	88.0±0.2	84.3±0.1	81.0±0.5	80.6±0.2	71.7±0.3	64.2±0.3	85.9±0.7
6	1:9:2:2:3	89.3±0.4	85.2±0.4	83.6±0.1	79.8±0.3	79.2±0.2	70.8±0.4	63.0±0.4	81.8±0.1
7	1:10:2:2:3	87.6±0.2	84.2±0.2	81.3±0.2	78.6±0.2	77.5±0.3	65.3±0.2	62.6±0.4	80.0±0.3
8	1:11:2:2:3	86.2±0.2	82.4±0.2	78.8±0.2	74.5±0.2	75.0±0.4	64.8±0.2	61.7±0.2	78.4±0.2

表 3　芯材混合液中乳果糖含量对微囊化益生菌存活率和释放率的影响

Table 3　Effects of lactulose content in core material mixture on survival rate and release rate of microencapsulated probiotics

编号	益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液(质量比)	常温保存存活率/%				模拟胃液处理存活率/%		模拟肠液处理释放率/%	
		0 d	15 d	30 d	60 d	90 min	150 min	60 min	90 min
1	1:5:0:2:3	86.1±0.2	80.3±0.4	78.0±0.4	72.2±0.4	78.1±0.3	71.0±0.2	65.0±0.2	79.6±0.5
2	1:5:1:2:3	92.8±0.3	87.5±0.1	84.2±0.2	80.5±1.2	81.0±0.3	74.2±0.5	72.1±0.1	88.0±1.9
3	1:5:2:2:3	95.7±0.1	94.3±0.1	93.2±0.3	90.0±0.3	84.5±0.1	75.0±0.2	74.6±0.2	93.0±0.7
4	1:5:3:2:3	90.6±0.2	86.2±0.2	83.1±0.5	79.8±0.9	80.6±0.2	73.8±0.2	71.5±0.2	86.0±0.9
5	1:5:4:2:3	88.2±0.3	84.1±0.7	79.6±0.5	74.2±1.3	78.6±1.1	70.8±0.4	67.5±0.3	80.8±0.4

2.5 低聚异麦芽糖含量的确定

研究表明, 低聚糖和益生菌的协同作用能够显著提升乳酸菌发酵的功能特性[41], 并对益生菌的生长起到明显的增殖促进效果[42]。通过添加低聚糖, 可在一定程度上有效改善乳酸菌的发酵性能。钟舒睿[43]选用低聚异麦芽糖/低聚木糖/低聚半乳糖为原料, 制备的干酪乳杆菌存活率均在60%以上。李佳君等[44]以乳清蛋白和低聚异麦芽糖为壁材包埋鼠李糖乳杆菌, 4 ℃储藏 30 d 后, 微胶囊活力为 6.23 g^{-1}。由表 4 所示, 在芯材混合液中, 益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液的质量配比控制在 1:5:2:(1~3):3 范围内时, 微囊化益生菌在常温保存 60 d 后的存活率均在 79.9%及以上。同时在模拟胃液和肠液中, 该微囊化益生菌的存活率与释放率均表现出较高水平。基于上述实验结果, 最终确定益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液质量比为 1:5:2:2:3。

2.6 魔芋微粉含量的确定

由表 5 所示, 在芯材混合液中益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液的质量比为 1:5:2:2:(1~5)范围内, 微囊化益生菌在常温保存 60 d 后的存活率均在 79.2%及以上, 且在模拟胃液和肠液中的存活率和释放率均较高, 其中, 当质量比为 1:5:2:2:3 时, 微囊化益生菌在常温保存 30 d 后的存活率达到 93.2%; 在常温保存 60 d 后的存活率达到 90.0%, 在模拟胃液和肠液中的存活率和释放率最高。因此, 确定该质量最佳配比为 1:5:2:2:3。

表 4 芯材混合液中低聚异麦芽糖含量对微囊化益生菌存活率和释放率的影响

Table 4 Effects of oligosaccharide isomalt content in the core material mixture on the survival rate and release rate of microencapsulated probiotics

编号	益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液(质量比)	常温保存存活率/%				模拟胃液处理存活率/%		模拟肠液处理释放率/%	
		0 d	15 d	30 d	60 d	90 min	150 min	60 min	90 min
1	1:5:2:0:3	85.6±0.4	81.9±0.2	75.4±0.5	70.9±0.3	78.3±0.2	70.9±0.4	64.0±1.8	79.5±0.3
2	1:5:2:1:3	92.3±0.2	89.2±0.6	86.3±0.3	82.5±0.1	82.0±0.6	71.0±0.8	73.6±0.7	89.0±0.3
3	1:5:2:2:3	95.7±0.1	94.3±0.1	93.2±0.3	90.0±0.3	84.5±0.1	75.0±0.2	74.6±0.2	93.0±0.7
4	1:5:2:3:3	89.5±0.2	86.4±0.2	82.5±0.5	79.9±0.6	81.8±0.3	73.2±0.4	71.9±0.5	84.3±0.3
5	1:5:2:4:3	87.3±0.4	84.5±0.3	81.6±0.6	79.3±0.4	81.0±1.1	72.0±0.5	70.5±0.3	82.3±0.7

表 5 芯材混合液中魔芋微粉含量对微囊化益生菌存活率和释放率的影响

Table 5 Effects of konjac powder content in core material mixture on survival rate and release rate of microencapsulated probiotics

编号	益生菌溶液:水苏糖溶液:乳果糖溶液:低聚异麦芽糖溶液:魔芋微粉溶液(质量比)	常温保存存活率/%				模拟胃液处理存活率/%		模拟肠液处理释放率/%	
		0 d	15 d	30 d	60 d	90 min	150 min	60 min	90 min
1	1:5:2:2:0	87.0±0.3	83.2±0.3	80.5±0.2	74.0±0.4	80.2±0.5	71.3±0.5	71.1±0.3	80.0±0.2
2	1:5:2:2:1	89.9±0.5	85.3±0.3	83.1±0.3	79.2±0.4	81.5±0.3	72.6±0.5	72.0±0.4	81.6±0.4
3	1:5:2:2:2	93.2±0.3	90.5±0.2	87.5±0.1	83.6±0.2	82.6±0.3	73.5±0.3	72.4±0.7	83.0±0.6
4	1:5:2:2:3	95.7±0.1	94.3±0.1	93.2±0.3	90.0±0.5	84.5±0.1	75.0±0.2	74.6±0.2	93.0±0.7
5	1:5:2:2:4	91.5±1.3	88.4±0.4	85.7±0.4	82.2±0.2	81.7±0.3	72.9±0.6	73.2±0.7	79.0±0.5
6	1:5:2:2:5	90.9±0.2	87.6±0.3	84.9±0.5	81.8±0.6	80.3±0.9	71.2±0.3	72.5±0.3	76.0±1.4
7	1:5:2:2:6	88.5±0.2	84.2±0.3	80.3±0.2	76.5±0.5	80.0±0.7	70.8±0.2	71.0±0.5	74.0±1.2

3 结 论

水苏糖是一种天然的有利于调节肠道微生物群组成的益生元, 能促进双歧杆菌、乳酸菌等益生菌的活性, 改善肠道微生态并对抗肠道炎症[45]。低聚异麦芽糖作为双歧杆菌增殖因子, 可直接进入大肠, 助力双歧杆菌大量繁殖; 同时能抑制肠道有害菌, 提高机体免疫力。魔芋微粉在食品工业中应用广泛[46], 具有优良的凝胶性和抗氧化性, 富含水溶性纤维, 可抑制肠胃对糖类的吸收, 有助于降低血糖; 所含的魔芋葡甘露聚糖能阻止身体消化和吸收胆固醇, 从而有效降血脂和胆固醇; 其凝胶样成分还能阻止多种有害物质, 具有抗癌防癌功效。魔芋微粉不仅具备保健功能, 还能改善益生菌性能, 延长其货架期。

将水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖和魔芋微粉加入益生菌中共同作为芯材, 小分子低聚糖的添加一方面能增强微胶囊的隔酸隔氧性能, 保护益生菌免受胃酸侵蚀, 另一

方面, 溶解后的小分子低聚糖可作为益生元, 提升益生菌活性。研究以益生菌及具有显著益生功能的益生元为芯材, 采用海藻酸钠、脱脂乳粉为壁材, 通过微胶囊技术制备出含水苏糖和魔芋微粉的微囊化益生菌。当益生菌、水苏糖、乳果糖、低聚异麦芽糖、魔芋微粉溶液质量比为 1:5:2:2:3 时, 制备的微囊化益生菌环境抗逆性强, 稳定性较高, 存活率均在 80%以上, 在胃液中处理 90 min, 存活率达到 84.5%; 肠液处理 90 min, 释放率达到 93.0%; 常温保存 30 d 后存活率达 93.2%; 常温保存 60 d 后存活率仍达 90%, 可显著提高益生菌在货架期的活菌含量, 从而延长益生菌产品的货架期, 有助于解决菌体不耐胃酸、不易保存的问题, 使其益生功能得到有效发挥。微囊化益生菌的制备方法简单易操作, 所制备的微囊化益生菌含有多种益生元活性组分, 不添加任何化学合成物质, 保证了产品安全性, 可广泛应用于食品领域, 具有显著的经济效益。

综上, 本研究探讨了不同芯材组分对益生菌复合微胶囊存活率的影响, 重点评估其在模拟胃肠环境下对益生菌的保护作用与释放特性, 为构建高效、稳定的益生菌微胶囊体系提供了理论思路和实践参考。然而当前研究主要基于体外模型, 其在真实生理环境中的功效与安全性有待通过动物实验或临床研究进一步验证。在此基础上, 未来可深入探究该体系与肠道菌群的具体互作机制, 如结合多组学技术分析其对关键益生菌群(如双歧杆菌、乳酸杆菌等)的调控作用, 从而更全面阐释其益生元效应, 明确其在调节肠道微生态平衡、增强宿主免疫力及预防相关疾病方面的潜在应用价值。

参考文献

[1] 余帅鹏, 崔玥, 王琳, 等. 多尺度蛋白质-多糖基益生菌递送体系研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 470–482.
YU SP, CUI Y, WANG L, *et al*. Research progress of multi-scale protein-polysaccharide probiotic delivery system [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 470–482.

[2] SHEN XY, XIE AJ, LI ZJ, *et al*. Research progress for probiotics regulating intestinal flora to improve functional dyspepsia: A review [J]. Foods, 2024, 13(1): 151.

[3] LUO Y, DE-SOUZA C, RAMACHANDRAN M, *et al*. Precise oral delivery systems for probiotics: A review [J]. Journal of Controlled Release, 2022, 352: 371–384.

[4] XIA B, LIU XN, LI ZQ, *et al*. The effects of microbiota-targeted approaches in inflammatory bowel disease: Probiotics, probiotic foods, and prebiotics [J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 49: 100956.

[5] YAO HD, LIU B, HE L, *et al*. The incorporation of peach gum polysaccharide into soy protein based microparticles improves probiotic bacterial survival during simulated gastrointestinal digestion and storage [J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135596.

[6] RAZAVI S, JANFAZA S, TASNIM N, *et al*. Microencapsulating polymers for probiotics delivery systems: Preparation, characterization, and applications [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106882.

[7] 李思媛, 孙晓琛, 端木传宇, 等. 含益生菌的微胶囊制备及稳定性研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(10): 238–245.
LI SY, SUN XC, DUANMU CY, *et al*. Preparation and stability study of microcapsules containing probiotics [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2024, 24(10): 238–245.

[8] WANG DK, XU RJ, LIU S, *et al*. Enhancing the application of probiotics in probiotic food products from the perspective of improving stress resistance by regulating cell physiological function: A review [J]. Food Research International, 2025, 199: 115369.

[9] 刘晓芳, 钦佩, 黄晓东. 益生菌及其制剂的研究和应用[J]. 食品与药品, 2019, 21(6): 514–517.
LIU XF, QIN P, HUANG XD. Research and application of probiotics and their preparation [J]. Food and Drug, 2019, 21(6): 514–517.

[10] 孙玉章, 崔栩, 马丰英, 等. 益生菌微囊化技术研究进展[J]. 动物医学进展, 2018, 39(7): 86–89.
SUN YZ, CUI X, MA FY, *et al*. Research progress of probiotic microencapsulation technology [J]. Advances in Veterinary Medicine, 2018, 39(7): 86–89.

[11] 唐仁龙, 王羽中, 汪海峰. 微囊化包被技术在饲用益生菌上应用的研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2018, 54(11): 5–11.
TANG RL, WANG YZ, WANG HF. Research progress on the application of microencapsulation coating technology in feed probiotics [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2018, 54(11): 5–11.

[12] REQUE PM, BRANDELLI A. Encapsulation of probiotics and nutraceuticals: Applications in functional food industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 1–10.

[13] 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 XC, YUAN HB, *et al*. Frontier technology and research progress of probiotic encapsulation [J]. Chinese Journal of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 384–396.

[14] 范炜平, 刘鸿科, 柳参, 等. 逐层组装构建鼠李糖乳杆菌微胶囊及其模拟消化稳定性[J/OL]. 现代食品科技, 1–9. [2025-11-18]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1726
FAN WP, LIU HK, LIU S, *et al*. Construction of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsules by layer-by-layer assembly and their simulated digestive stability [J/OL]. Modern Food Science and Technology, 1–9. [2025-11-18]. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1726

[15] 高源. 罗伊氏乳杆菌高密度发酵、微胶囊化及冻干工艺研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024.
GAO Y. Research on high-density fermentation, microencapsulation and freeze-drying process of *Lactobacillus* reuteri [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024.

[16] 于博安, 董杨帅, 李佳怡, 等. 海藻酸钠/壳聚糖微胶囊对嗜酸乳杆菌存活率的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(15): 47–52.

YU BAN, DONG YS, LI JY, *et al*. The effect of sodium alginate/chitosan microcapsules on the survival rate of *Lactobacillus acidophilus* [J]. Food Research and Development, 2025, 46(15): 47–52.

[17] ATHAYDE A, BERGER LRR, DE-ALBUQUERQUE TMR, *et al*. Physiological and technological properties of probiotic *Lacticaseibacillus rhamnosus* GG encapsulated with alginate-chitosan mixture and its incorporation in whole milk [J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2024, 17: 4034–4046.

[18] 黄筱洋. 母乳低聚糖与动物双歧杆菌 F1-7 合生元微胶囊的制备及 6’-唾液酸乳糖益生作用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2024.
HUANG XY. Preparation of prebiotic microcapsules of human milk oligosaccharides and *Bifidobacterium animalis subsp*. animalis F1-7 and study onprobiotic effects of 6’-sialyllactose [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.

[19] 魏永峰, 赵雷振, 王芸, 等. 水苏糖在食品工业中的应用[J]. 齐鲁工业大学学报, 2023, 37(2): 46–51.
WEI YF, ZHAO LZ, WANG Y, *et al*. The Application of stachyose in food industry [J]. Journal of Qilu University of Technology, 2023, 37(2): 46–51.

[20] 刘宇琼, 丛嘉迅, 王倩男, 等. 复合益生菌-水苏糖共微胶囊化制备功能性乳制品的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(16): 238–246.
LIU YQ, CONG JX, WANG QN, *et al*. Research on the preparation of functional dairy products by co-microencapsulation of compound probiotics and stachyose [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(16): 238–246.

[21] 段盛林. 水苏糖的益生元活性及其应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(1): 75–82.
DUAN SL. Research progress on the prebiotic activity and application of stachyose [J]. China Food Additives, 2023, 34(1): 75–82.

[22] 王亚坤, 陈喜财, 陈泽丰, 等. 菊粉复合咀嚼片的制备及通便活性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(10): 82–86.
WANG YK, CHEN XC, CHEN ZF, *et al*. Preparation and laxative activity study of inulin composite chewable tablets [J]. Food Research and Development, 2021, 42(10): 82–86.

[23] 李然, 张瑛, 李一雪, 等. 益生菌与益生元共包埋微胶囊技术研究进展[J]. 生物加工过程, 2024, 22(2): 204–212.
LI R, ZHANG Y, LI YX, *et al*. Research progress of co-embedding microcapsules of probiotics and prebiotics [J]. Bioprocessing, 2024, 22(2): 204–212.

[24] 张敏. 植物乳杆菌微胶囊的制备及其性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
ZHANG M. Preparation and properties of *Lactobacillus plantarum* microcapsules [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[25] 周莉, 平洋, 谭静, 等. 益生菌微胶囊技术及其应用[J]. 食品工业, 2024, 45(5): 239–242.
ZHOU L, PING Y, TAN J, *et al*. Probiotic microencapsulation technology and its applications [J]. Food Industry, 2024, 45(5): 239–242.

[26] 全星语. 乳双歧杆菌微胶囊的制备及其特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024
QUAN XY. Preparation and characterization of *Lactobacillus delbrueckii* subsp. bulgaricus microcapsules [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[27] 刘悦, 韩一凤, 胡琳琳, 等. 基于 SynergyFinder 的低聚糖促进益生菌生长的组合效应探究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 63–68.
LIU Y, HAN YF, HU LL, *et al*. Investigation on the combined effects of oligosaccharides promoting probiotic growth based on synergyfinder [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 63–68.

[28] LIU XX, CHEN DW, LI QM, *et al*. Effect of complex prebiotics on the intestinal colonization ability of limosi *Lactobacillus fermentum* DALI02 [J]. Fermentation, 2023, 9(1): 25.

[29] LIKOTRAFTIT E, TUOHY KM, GIBSON GR, *et al*. Development of antimicrobial synbiotics using potentially-probiotic fecal isolates of *Lactobacillus fermentum* and *Bifidobacterium longum* [J]. Anaerobe, 2013, 20: 5–13.

[30] 何庆祥, 董磊, 郭爱玲. 布拉氏酵母菌散联合乳果糖对小儿肠易激综合征肠道菌群及 Th1/Th2 细胞水平的影响[J]. 包头医学, 2025, 49(2): 40–42.
HE QX, DONG L, GUO AIL. The effect of *saccharomyces boulardii* powder combined with lactulose on intestinal flora and Th1/Th2 cell levels in children with irritable bowel syndrome [J]. Baotou Medical Journal, 2025, 49(2): 40–42.

[31] LI T, LU X, YANG X. Evaluation of clinical safety and beneficial effects of stachyose-enriched *α*-galacto-oligosaccharides on gut microbiota and bowel function in humans [J]. Food & Function, 2017, 8(1): 262–269.

[32] 孔庆敏, 刘振国, 李琴丽, 等. 植物乳杆菌 CCFM8661 与水苏糖复合应用对小鼠铅中毒的缓解作用[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(10): 97–108.
KONG QM, LIU ZG, LI QL, *et al*. The alleviating effect of combined application of *Lactobacillus plantarum* CCFM8661 and stachyose on lead poisoning in mice [J]. Journal of Food and Biotechnology, 2024, 43(10): 97–108.

[33] ZHAO ZL, LIU W, PI XG. *In vitro* effects of stachyose on the human gut microbiota [J]. Starch-Strke, 2021, 73(7/8): 1–7.

[34] 王兵, 金慧, 皮雄娥, 等. 水苏糖对腹泻儿童肠道菌群及代谢通路的影响[J]. 中国公共卫生, 2024, 40(9): 1088–1094.
WANG B, JIN H, PI XE, *et al.* Effects of stachyose on intestinal flora and metabolic pathways in children with diarrhea [J]. Chinese Journal of Public Health, 2024, 40(9): 1088–1094.

[35] 干昭波, 王彬彬, 杜倩, 等. 益生元对益生菌体外增殖效果的研究[J]. 精细与专用化学品, 2024, 32(7): 22–27, 41.
GAN ZB, WANG BB, DU Q, *et al*. Study on the effect of prebiotics on *in vitro* proliferation of probiotics [J]. Fine and Specialty Chemicals, 2024, 32(7): 22–27, 41.

[36] 张光耀. 乳清分离蛋白-水苏糖复合物的制备及功能特性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2023.
ZHANG GY. Study on the preparation and functional properties of whey protein isolate-raftilose complex [D]. Dalian: Dalian Polytechnic

University, 2023.

[37] ALGIERI F, RODR-GUEZ-NOGALES A, GARRIDO-MESA N, *et al*.Intestinal anti-inflammatory effects of oligosaccharides derived from lactulose in the trinitrobenzenesulfonic acid model of rat colitis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(19): 4285–4297.

[38] 杨孙汀, 韩涛涛, 李景南. 乳果糖通过调节肠道菌群及其代谢产物缓解溃疡性结肠炎的机制研究[J]. 中国中西医结合消化杂志, 2025, 33(9): 826–833.
YANG ST, HAN TT, LI JN. Research on the mechanism of lactulose alleviating ulcerative colitis by regulating intestinal flora and its metabolites [J]. Chinese Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine in Digestion, 2025, 33(9): 826–833.

[39] 丁凤, 辛焕贵. 双歧杆菌四联活菌片联合乳果糖口服溶液治疗小儿便秘的临床效果及对肠道菌群的影响[J]. 临床合理用药, 2025, 18(24): 132–135.
DING F, XIN HG. Clinical effect of *Bifidobacterium* quadruple live bacterial tablets combined with lactulose oral solution in the treatment of pediatric constipation and its impact on intestinal flora [J]. Clinical Rational Drug Use, 2025, 18(24): 132–135.

[40] 孙伟. 乳果糖、布拉氏酵母菌散配合饮食调节治疗儿童功能性便秘的临床疗效及对肠道菌群的影响[J]. 中国肛肠病杂志, 2025, 45(8): 54–56.
SUN W. Clinical efficacy of lactulose and Saccharomyces boulardii combined with dietary regulation in treating functional constipation in children and its impact on gut microbiota [J]. Chinese Journal of Proctology, 2025, 45(8): 54–56.

[41] 刘洋, 瞿恒贤, 张龙飞, 等. 低聚糖对益生菌发酵乳功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(5): 75–80.
LIU Y, QU HX, ZHANG LF, *et al*. Effects of oligosaccharides on functional characteristics of probiotic fermented milk [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(5): 75–80.

[42] 李雅丽, 王默涵, 周志桥. 6 种低聚糖对肠道益生菌生长情况的影响及代谢产物分析[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 7–13.
LI YL, WANG MH, ZHOU ZQ. Effects of six oligosaccharides on the growth of intestinal probiotics and analysis of their metabolites [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 7–13.

[43] 钟舒睿. 大豆分离蛋白—低聚糖美拉德反应产物的制备及其益生菌微囊化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHONG SR. Preparation of maillard reaction products of soybean protein isolate-oligosaccharides and their probiotic microencapsulation study [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

[44] 李佳君, 刘璐, 李晓东. 干燥方式对鼠李糖乳杆菌微胶囊的活力及储藏稳定性的影响[J]. 中国乳品工业, 2017, 45(3): 21–25.
LI JJ, LIU L, LI XD. Effect of drying methods on the viability and storage stability of *Lactobacillus rhamnosus* microcapsules [J]. China Dairy Industry, 2017, 45(3): 21–25.

[45] HE LW, ZHANG FR, JIAN ZY, *et al*. Stachyose modulates gut microbiota and alleviates dextran sulfate sodium-induced acute colitis in mice [J]. Saudi Journal of Gastroenterology, 2020, 26(3): 153–159.

[46] 姜斌. 高粉碎度魔芋精粉生产技术优化及其特性分析[D]. 自贡: 四川轻化工大学, 2022.
JIANG B. Optimization of production technology and characteristic analysis of high grinding degree konjac fine powder [D]. Zigong: Sichuan University of Science and Engineering, 2022.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)