

# 分级醇沉兰州百合多糖体外消化耐受及益生活性比较

范文广<sup>1</sup>, 姜珊<sup>1</sup>, 康红梅<sup>2\*</sup>, 潘香逸<sup>1</sup>, 刘彩云<sup>2\*</sup>, 朱渭俊<sup>3</sup>

(1. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 甘肃兰州 730050) (2. 甘肃省科学院生物研究所, 甘肃省微生物资源开发利用重点实验室, 甘肃兰州 730000) (3. 临洮康源乳品有限责任公司, 甘肃定西 730500)

**摘要:** 兰州百合是中国药食同源甜百合, 为深入分析其主要功能成分之一百合多糖的益生潜力, 提升百合资源利用率, 该文采用超声波复合酶提取法, 体积分数分别为 60%、80% 和 95% 乙醇提取获得 3 种百合多糖 (LLP), 研究其体外消化耐受性和益生活性。结果显示, 随乙醇体积分数增加, 兰州百合多糖可溶性总糖、提取率、蛋白质和模拟胃肠液耐受性均有提高, 其中 LLP-95% 的可溶性总糖含量、得率分别高达 19.83% 和 23.77%, 模拟胃液中 6 h 水解度仅为 5.90%, 蛋白质质量分数较少仅 4.09%。以其作为碳源, 植物乳杆菌发酵 48 h 时益生指数 PI、pH 值和 OD600 分别为 0.96、4.73 和 0.75, 显著优于低聚果糖组和其他多糖组; 在模拟胃液和肠液培养 40 min, LLP-95% 处理菌液存活率分别为 25.89% 和 56.00%, 与其他几组相比显著提高了菌株存活率。该研究证明, LLP-95% 具有良好消化耐受性, 可以促进植物乳杆菌的增殖并提高菌株在模拟胃肠液环境中的存活率, 具有较好的益生元潜力, 为功能性食品和药品研发提供了科学依据。

**关键词:** 兰州百合多糖; 分级醇沉; 益生活性; 体外模拟消化; 植物乳杆菌

文章编号: 1673-9078(2026)03-171-178

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1948

## Comparison of Lanzhou Lily Polysaccharides with Gradient Ethanol Precipitation and Their *in Vitro* Digestive Tolerance and Prebiotic Activity

FAN Wenguang<sup>1</sup>, JIANG Shan<sup>1</sup>, KANG Hongmei<sup>2\*</sup>, PAN Xiangyi<sup>1</sup>, LIU Caiyun<sup>2\*</sup>, ZHU Weijun<sup>3</sup>

(1. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)  
(2. Laboratory of Microbial Resources Exploitation and Application of Gansu Province, Institute of Biology, Gansu Academy of Science, Lanzhou 730000, China) (3. Lintao Kangyuan Dairy Co. Ltd., Dingxi 730500, China)

**Abstract:** Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor* Salisb.), a medicinal and edible plant found in China, is commonly referred to as the sweet lily. To further investigate the prebiotic potential of lily polysaccharides (LLP), one of its major bioactive components, and enhance the utilization of lily resources, ultrasonic-assisted enzymatic extraction with volume fractions of 60%, 80%, and 95% ethanol was conducted to obtain three types of LLP. Their *in vitro* digestive tolerance and prebiotic activity were then examined. Results demonstrated that as the ethanol volume fraction increased, the soluble total sugar content, extraction yield,

引文格式:

范文广, 姜珊, 康红梅, 等. 分级醇沉兰州百合多糖体外消化耐受及益生活性比较[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 171-178.

FAN Wenguang, JIANG Shan, KANG Hongmei, et al. Comparison of Lanzhou lily polysaccharides with gradient ethanol precipitation and their *in vitro* digestive tolerance and prebiotic activity [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 171-178.

收稿日期: 2024-12-29; 修回日期: 2025-04-18; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32460607); 甘肃省科学院应用研究与开发项目 (2020JK-02); 甘肃省科技计划资助项目 (25CXGA050); 甘肃省农业农村厅科技支撑项目 (KJZC-2025-24)

作者简介: 范文广 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物保鲜、农产品加工, E-mail: fanwenguang\_88@163.com

通讯作者: 康红梅 (1973-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 环境资源, E-mail: lzkanhgm@163.com; 共同通讯作者: 刘彩云 (1977-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: 547178707@qq.com

protein content, and tolerance to simulated gastric and intestinal fluids of Lanzhou LLP improved. Notably, LLP-95% exhibited a soluble total sugar content and extraction yield of 19.83% and 23.77%, respectively, with a hydrolysis degree as low as 5.90% in simulated gastric fluid after 6 h. Additionally, the protein content was relatively low (4.09%). When LLP-95% was used as a carbon source, *Lactobacillus plantarum* fermentation for 48 h resulted in a prebiotic index of 0.96, pH of 4.73, and OD600 of 0.75, significantly outperforming fructooligosaccharides and the other polysaccharide groups. Furthermore, after a 40-min incubation in simulated gastric and intestinal fluids, the survival rates of LLP-95%-treated bacterial suspensions were 25.89% and 56.00%, respectively, which were significantly higher than those of the other groups. This study demonstrated that LLP-95% possesses good digestive tolerance, promotes the proliferation of *L. plantarum*, and enhances bacterial survival in simulated gastrointestinal environments, indicating a strong prebiotic potential. These findings provide scientific evidence for the development of functional foods and pharmaceuticals.

**Key words:** Lanzhou lily polysaccharide; graded ethanol precipitation; prebiotic activity; *in vitro* simulated digestion; *Lactobacillus plantarum*

百合属植物以其优雅的花姿和迷人的香气著称,广泛分布于北半球。它既可作为观赏植物进行盆栽或园艺栽培,又可用于食用和保健领域,制成诸如百合明胶粉和干百合鳞茎等产品。在我国,百合属植物的鳞茎被用作传统中药已有多个世纪。其中,可食用的百合鳞茎品种主要包括宜兴百合、龙牙百合、兰州百合和川百合等<sup>[1]</sup>。它的花瓣大而肉厚,洁白如玉,甘甜爽口,含有多种生物活性成分,如多糖、甾体皂苷和秋水仙碱等<sup>[2]</sup>,其中,百合多糖是其主要活性成分之一,具有抗菌、免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、降血糖和调节肠道菌群等多种生物活性<sup>[3-5]</sup>。

益生菌是一类活性微生物,当摄入足够量时,可为宿主提供健康益处,主要包括双歧杆菌和乳酸菌。它们通过选择性刺激肠道菌群和短链脂肪酸的生长来发挥功能。能够增进宿主健康的食品成分被称为益生元<sup>[6]</sup>。益生菌与益生元之间存在着协同作用,其组合被定义为“合生元”,通过改变肠道菌群及其代谢对宿主产生有益影响。例如,公认的益生元如低聚果糖、菊粉能够增加有益的肠道微生物特征<sup>[7]</sup>。为了满足不断增长的市场需求,已经开发了多种新型益生元,包括真菌类(如黑木耳多糖)、天然类(如阿拉伯树胶)、植物源类(如低聚木糖)等<sup>[8]</sup>。许多膳食非消化多糖已被认定为益生元,它们通过调节肠道微生物的活性,选择性刺激有益细菌种群的生长,并积累有机酸等各种代谢终产物,从而抑制病原体。一些研究表明植物源提取多糖,例如竹笋、脱脂椰子渣、柿子和褐藻等<sup>[9-12]</sup>,已有作为新型益生元的前景。Wang等<sup>[13]</sup>提到大多数植物源益生元由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖和半乳糖组成;类似地,兰州百合中的多糖在先前研究中具有相似单糖组成<sup>[5]</sup>,其益生元潜力有待进一步验证。

兰州百合在生长和采收过程中,外皮常常遭受损

伤而导致最外层的鳞茎被弃置。这些废弃的鳞茎中富含多糖等多种生物活性物质。为减少资源浪费并提升其附加价值,本文探索了废弃鳞茎的有效利用途径。目前,关于兰州百合多糖的研究主要集中在其结构组成、抗氧化及免疫调节等方面,而对其益生活性的研究尚未有相关报道。为了探讨兰州百合多糖的益生潜力,本文研究分级醇沉兰州百合多糖在模拟胃肠液中的水解程度,并评估它们作为碳源对植物乳杆菌的增殖以及经处理的菌液在体外模拟胃肠液中的耐受性。本研究旨在评估分级醇沉兰州百合多糖的益生活性差距,为其在益生元领域的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor* Salisb.),产地甘肃省兰州市七里河区西果园镇;植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*, GSICC 31247),甘肃省微生物菌种保藏中心;凝乳酶(20 000 U·g<sup>-1</sup>),纤维素酶(50 000 U·g<sup>-1</sup>),上海源叶生物科技有限公司;模拟胃肠液,创峰自动化科技有限公司;葡萄糖、低聚果糖,上海源叶生物科技有限公司;氯化钠、苯酚、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、盐酸、冰乙酸、无水乙醇等化学试剂均为分析纯。

SG2200HPT 超声波清洗机,上海冠特超声仪器有限公司;TGL-16gR 高速离心机,安亭科学仪器厂;MGC-350HP-2 生化培养箱,上海予卓仪器有限公司;HH-2 型电热恒温水浴锅,北京科伟永兴仪器有限公司;RE-2000B 旋转蒸发仪,上海亚荣生化仪器厂;LGI-25C 冷冻干燥机,四环福瑞科仪科技发展有限公司;LDZF-50L-II 型立式压力蒸汽灭菌锅,上海申安医疗器械厂;UV752N 紫外可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 兰州百合多糖提取和制备

百合多糖的提取采用超声波复合酶提取法<sup>[14]</sup>并做改进。将废弃百合鳞茎清洗后, 50 ℃烘干至恒重, 粉碎后过 100 目筛, 80 ℃乙醇脱脂回流 3 次, 烘干至恒重。用超声波复合酶辅助热水提取, 提取温度 50 ℃、提取时间 25 min、超声波功率 220 W、复合酶(凝乳酶: 纤维素酶=1.5:1)和料液比为 1:25 (g·mL<sup>-1</sup>), 重复提取 3 次。提取结束后, 混合提取液过滤残渣, 6 000 r·min<sup>-1</sup>离心 10 min, 收集上清液。50 ℃, 260 r·min<sup>-1</sup>旋转蒸发浓缩至原体积的 1/3, 得到浓缩液, 备用。

各取 3 份 100 mL 的浓缩液, 取体积分数 60%、80% 和 95% 的乙醇溶液, 分别混合浓缩液。将混合物放置在 4 ℃冰箱中, 进行醇沉处理过夜。然后, 以 8 000 r·min<sup>-1</sup>的速度离心 10 min 底部沉淀。将沉淀加入适量水进行洗涤, 并在通风橱中放置 1~2 h 再旋转蒸发浓缩至原体积的 1/2, 以去除残余的无水乙醇。最后, 将洗净的沉淀进行冷冻干燥处理 24 h, 得到 3 种兰州百合多糖, 分别标记为 LLP-60%、LLP-80% 和 LLP-95% 并称重, 并按下式 (1) 计算各得率。

$$c=\frac{m_1}{m_2}\times 100\%$$

(1)

式中:

$c$ ——得率, %;

$m_1$ ——冻干后各组分重量, g;

$m_2$ ——提取前经处理的兰州百合粉, g。

1.2.2 模拟胃肠液对3种兰州百合多糖耐受性的影响

参考 Zhou 等<sup>[15]</sup>方法, 将低聚果糖 (CK) 与 3 种兰州百合多糖分别配制成 1 g·mL<sup>-1</sup> 的溶液。将 5 mL 模拟胃液分别加入到 5 mL CK 和多糖组中, 温度条件为 37 ℃, 振荡速率 130 r·min<sup>-1</sup>, 反应时间为 6 h。分别在第 1、2、4、6 h 收集反应混合物, 并测定还原糖质量分数。水解度计算如公式 (2) 所示:

$$D=\frac{x_1-x_0}{w-w_0}\times 100\%$$

(2)

式中:

$D$ ——水解度 (DH), %;

$w$ ——总糖质量分数, g/100 g;

$x_0$ 、 $x_1$ ——分别是 0 h 和检测时间时的还原糖质量分数, g/100 g。

1.2.3 兰州百合多糖对植物乳杆菌的增殖作用及体外消化耐受 (模拟胃肠液)

1.2.3.1 植物乳杆菌的活化

提前配置营养肉汁固体和液体培养基, 调节 pH 值为 7, 进行高压灭菌处理, 成分如表 1 所示。将植

物乳杆菌 GSICC 31247 冻干粉以体积分数 1% 比例加入营养肉汁液体培养基中培养 48 h, 菌株经传代 2 次后活化完成, 再涂布至营养肉汁固体培养基上观察菌落形态。菌悬液经一定稀释倍数后观察菌落为圆形、光滑、乳黄色, 呈繁星小点状分布, 确定为植物乳杆菌无杂菌污染 (图 1 所示), 用接种环蘸取营养肉汁固体培养基上单个菌落, 转入营养肉汁液体培养基制成菌悬液进行后续实验。

表 1 营养肉汁固体培养基成分  
Table 1 Nutrient gravy solid medium components

| 成分   | 质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> ) |
|------|---------------------------|
| 蛋白胨  | 5.0 g                     |
| 牛肉膏  | 10.0 g                    |
| 酵母膏  | 5.0 g                     |
| 葡萄糖  | 5.0 g                     |
| NaCl | 5.0 g                     |
| 琼脂   | 15.0 g                    |

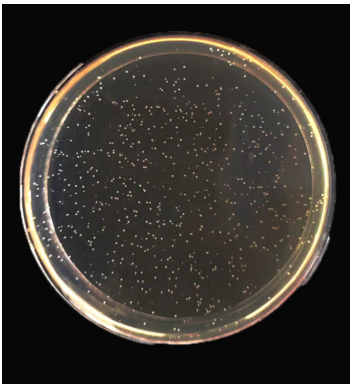


图 1 植物乳杆菌在固体培养基上培养状态

Fig.1 Cultivation state of *Lactobacillus plantarum* on solid medium

1.2.3.2 植物乳杆菌的培养

参考 Mohd 等<sup>[10]</sup>的方法, 取若干试管, 向每管加入 10 mL 营养肉汁液体培养基。由于葡萄糖的存在有可能会影响菌株对益生元的选择<sup>[16]</sup>, 将使用所需益生元来取代原始培养基中的葡萄糖, 按照质量分数 0.5%, 分别向无碳源的营养肉汁培养基中加入低聚果糖和 3 种百合多糖, 充分振荡溶解后, 高压灭菌。随后, 在无糖 (CK<sub>1</sub>)、低聚果糖 (CK<sub>2</sub>)、LLP-60%、LLP-80% 和 LLP-95% 组中分别接种已激活的实验菌株, 接种比例为体积分数 1%。37 ℃下培养 48 h 后取样, 测定各液体培养基的 OD<sub>600</sub> 和 pH 值, 评价兰州百合多糖对实验菌株增殖和产酸的影响。在 0、6、12、18、24、30、36、42 和 48 h 取样, 绘制生长曲线和 pH 值变化。

1.2.3.3 菌落计数

菌落计数参照 GB4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》方法进行。



1.2.3.4 pH值测定

在培养 0、12、24 和 48 h 时，分别取样 5 mL，用 pH 计测定。

1.2.3.5 益生指数PI

参考林军<sup>[17]</sup>的方法，在无糖培养基添加 3 种百合多糖作为唯一碳源，以添加等量葡萄糖和无糖培养基作为阳性(+)和阴性(-)对照，在植物乳杆菌发酵的 0 h 和 48 h，取发酵液测定其 OD<sub>600</sub>，计算 PI 值，计算如公式(3)所示：

$$E = \frac{A_{P48}-A_{P0}-(A_{K48}-A_{K0})}{A_{G48}-A_{G0}-(A_{K48}-A_{K0})}$$
 (3)

式中：

E——益生指数 (PI)；

A<sub>P48</sub>——培养基碳源为不同醇沉度多糖 48 h 发酵液 OD<sub>600</sub>；

A<sub>P0</sub>——培养基碳源为不同醇沉度多糖 0 h 发酵液 OD<sub>600</sub>；

A<sub>K48</sub>——培养基碳源为葡萄糖 48 h 发酵液 OD<sub>600</sub>；

A<sub>K0</sub>——培养基碳源为葡萄糖 0 h 发酵液 OD<sub>600</sub>；

A<sub>G48</sub>——无糖培养基 48 h 发酵液 OD<sub>600</sub>；

A<sub>G0</sub>——无糖培养基 0 h 发酵液 OD<sub>600</sub>。

1.2.3.6 总糖、还原糖和蛋白质测定

总糖测定参考行标 SN/T4260-2015《出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚硫酸法》，还原糖测定参考国标 GB5009.7-2016《食品中还原糖的测定》，蛋白质测定采用考马斯亮蓝 G 250 法测定<sup>[18]</sup>。总糖标准曲线： $Y_1=0.745\ 6X_1+0.133\ 4$ ， $R_1^2=0.999\ 3$ ；还原糖标准曲线： $Y_2=0.711\ 1X_2-0.005\ 8$ ， $R_2^2=0.999\ 2$ ；蛋白质标准曲线： $Y_3=0.512\ 4X_3+0.907\ 0$ ， $R_3^2=0.999\ 4$ 。

1.2.3.7 植物乳杆菌体外模拟胃肠液耐受性

参照赵勇等<sup>[19]</sup>的方法，将低聚果糖(CK)和 3 种百合多糖以体积分数 1% 加入模拟胃液和模拟肠液中，随后分别接种体积分数 1% 的植物乳杆菌菌悬液，置于 37 ℃ 恒温培养。在 0、10、20、30 和 40 min 取样，使用平板计数法测定植物乳杆菌的存活率。

1.3 数据分析

每个试验重复 3 次，试验数据以 IBM SPSS Statistics 27 软件进行统计分析，并用 Duncan 检验等多重方法比较组间差异，以  $P<0.05$  作为差异显著性判断标准。实验结果以平均值 ± 标准偏差表示，采用 Origin 2024 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同体积分数乙醇对兰州百合多糖提取效果的影响

如表 2 所示，不同体积分数乙醇提取的多糖在

可溶性总糖含量、得率和蛋白质含量上存在显著差异 ( $P<0.05$ )。实验范围内，当乙醇的体积比例升高时，可溶性总糖含量、得率和蛋白质含量均大幅提升。LLP-95% 的可溶性总糖含量显著高于 LLP-60% 和 LLP-80% ( $P<0.05$ )，为 LLP-60% 所得总糖含量的 1.90 倍；得率显著高于 LLP-60% 和 LLP-80% ( $P<0.05$ )，为 23.77%，约是 LLP-60% 和 LLP-80% 的 1.71 倍和 1.20 倍；蛋白质含量 4.09%，为 LLP-60% 的约 2.40 倍。兰州百合多糖中的蛋白质含量较低，在 1%~4% 之间。

以上研究表明，随着乙醇体积分数的增高，百合多糖的提取过程中，可溶性总糖含量、得率以及蛋白质含量均呈现上升趋势，这与先前分级醇沉提取多糖的研究相似<sup>[5,20]</sup>，由于乙醇溶液中的溶剂效应不仅影响多糖的溶解性，还可能导致多糖构成及其生物活性的改变。在低体积分数的乙醇溶液中，多糖可能保持原有的聚集结构或大分子形态，而在高体积分数乙醇溶液中，多糖的分子结构可能被轻微破坏或解聚，有助于更多糖单元的释放，相对分子质量较小的多糖逐渐被沉淀出来，从而提高可溶性总糖质量分数和提取率<sup>[21]</sup>。此外，高体积分数乙醇溶液在沉淀过程中会导致多糖与蛋白质的共沉淀，从而使提取物中的蛋白质质量分数有所增加。

表 2 3 种兰州百合多糖的可溶性总糖含量、得率及蛋白质含量

Table 2 Soluble total sugar content, extraction rate and protein content of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides

| 组别      | 可溶性总糖含量/%                 | 得率/%                      | 蛋白质含量/%                  |
|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| LLP-60% | 10.36 ± 0.18 <sup>c</sup> | 13.91 ± 0.13 <sup>c</sup> | 1.73 ± 0.04 <sup>c</sup> |
| LLP-80% | 18.67 ± 0.30 <sup>b</sup> | 20.43 ± 0.12 <sup>b</sup> | 3.08 ± 0.06 <sup>b</sup> |
| LLP-95% | 19.83 ± 0.31 <sup>a</sup> | 23.77 ± 0.19 <sup>a</sup> | 4.09 ± 0.10 <sup>a</sup> |

注：不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) (下同)。

2.2 模拟胃肠液对3种兰州百合多糖耐受性的影响

3 种兰州百合多糖在模拟胃肠液中水解度的变化如图 2 所示。由图 2a 可知，3 种百合多糖在胃液中的水解度随时间延长而增加。在 1~2 h 内，LLP-60% 的水解度速度较快，2 h 已超过 4%，而其他 3 组的水解度仅约 2%，LLP-95% 最为稳定。2 h 后，各组水解度持续上升，继续反应到 6 h，LLP-95% 的水解度为 5.90%，显著低于 CK (6.22%)，次之为 LLP-80% (6.64%)，LLP-60% 的水解度最高为 7.73% ( $P<0.05$ )。图 2b 显示，在模拟肠液中 4 种糖耐受性均较好，水解度先上升后趋于平缓。在 1~2 h 内水解度速度较快，

可以看出 LLP-95% 耐受性显著优于 LLP-60% 和 LLP-80% ( $P<0.05$ )。2~6 h 水解速度逐渐稳定。最终 6 h 时除 LLP-60% (0.22%) 外, LLP-95% (0.14%)、LLP-80% (0.17%) 与 CK (0.15%) 的水解度无显著差异。

在报导的兰州百合多糖主要由葡萄糖、甘露糖和半乳糖等糖单元通过多种糖苷键(如  $\alpha$ -1,4、 $\alpha$ -1,6 和  $\beta$ -1,4) 连接形成<sup>[22]</sup>。其中,  $\alpha$ -1,4 和  $\beta$ -1,4 糖苷键由于其优异的水合作用特性, 能够促使多糖在胃肠液中吸水膨胀, 形成高粘度的溶液, 从而在胃肠道内形成保护性薄膜, 为消化过程提供一定的屏障<sup>[23]</sup>。人体消化酶对碳水化合物水解主要在于  $\alpha$ -糖苷键,  $\beta$ -糖苷键赋予兰州百合多糖较高的化学稳定性, 有效延迟其在胃肠道中的降解, 并改善肠道功能。张心驰等<sup>[5]</sup>研究也表明, 兰州百合多糖能够较好地抵抗  $\alpha$ -淀粉酶的水解, 且相对分子质量小的兰州百合多糖抑制能力更强。本实验结果表明, 兰州百合多糖在模拟胃肠液中耐受性较好, 表现出与其他多糖(如竹荪和黄参多糖)<sup>[24,25]</sup> 相似的性质, 进一步支持兰州百合多糖在胃肠道环境中的稳定性和生物活性物质的持续释放特性, 推断其具有抗消化性的益生元功能, 有助于维护胃肠道健康。

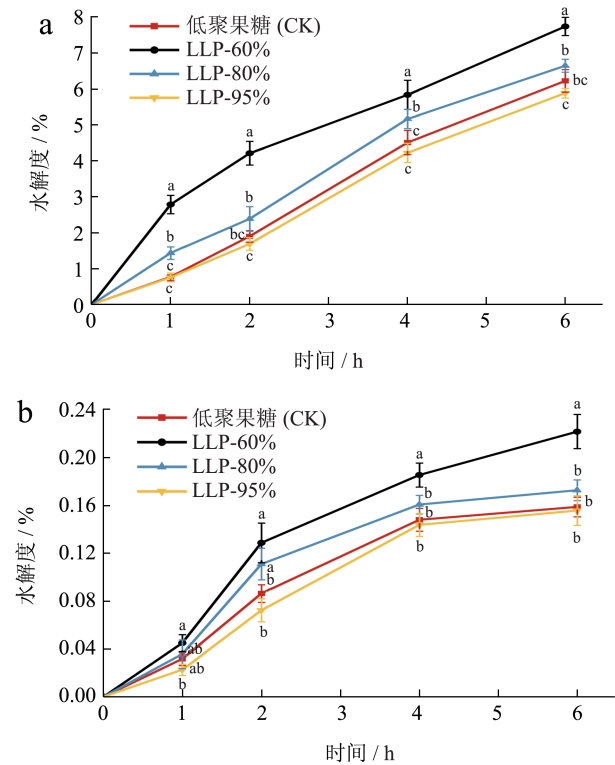


图2 模拟胃肠液对3种兰州百合多糖的水解度的变化情况  
Fig.2 Changes of hydrolysis degree of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides by simulated gastrointestinal fluid

注: a-模拟胃液; b-模拟肠液。不同小写字母表示在相同处理时间, 不同组有显著性差异 ( $P<0.05$ ) (下同)。

2.3 3种兰州百合多糖对植物乳杆菌增殖的影响

通过公式得出3种兰州百合多糖对植物乳杆菌益生指数PI的影响, 如表3所示。3种百合多糖对植物乳杆菌均具有益生效果, 除了 LLP-60% 组外, 其他组对菌株的PI值均达到0.6以上。LLP-95% 组的益生效果显著高于 LLP-60% 和 LLP-80% 组 ( $P<0.05$ ), 优于 CK 组, 表明高体积分数乙醇的百合多糖其对菌株的益生元效果较好。

表3 3种兰州百合多糖对植物乳杆菌生长益生指数PI的影响  
Table 3 Effects of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides on the probiotic index of *Lactobacillus plantarum*

| 组别        | 益生指数 PI           |
|-----------|-------------------|
| 低聚果糖 (CK) | $0.87 \pm 0.03^a$ |
| LLP-60%   | $0.40 \pm 0.04^c$ |
| LLP-80%   | $0.64 \pm 0.01^b$ |
| LLP-95%   | $0.96 \pm 0.03^a$ |

糖类物质可被益生菌作为碳源酵解利用, 代谢产生乙酸、丙酸、丁酸等短链脂肪酸以及乳酸等, 这些有机酸会导致培养基 pH 值降低, 可以通过测定培养基 pH 值间接判断益生菌生长状况。pH 值变化曲线如图3所示, 3种多糖组 pH 值均低于 CK<sub>1</sub>, 说明其均能被菌株利用发酵产酸。除 CK<sub>1</sub> 组外, 剩下4组菌株在0~12 h 产酸速率较快, 其中 CK<sub>2</sub> 组的 pH 值显著低于其他组 ( $P<0.05$ ); 在 12~24 h 阶段, CK<sub>2</sub> 组产酸速率变慢, LLP-95% 组的产酸量逐渐超过 CK<sub>2</sub> 组, LLP-60% 和 LLP-80% 组的 pH 值也继续下降, 但产酸量不如前两组; 在 24~48 h 阶段趋势逐渐变缓, pH 值在 48 h 均达到最低, LLP-95% 组的 pH 值为 4.73, 显著低于 CK<sub>1</sub> 组 (6.48)、CK<sub>2</sub> 组 (4.75)、LLP-60% 组 (4.84) 和 LLP-80% 组 (4.82) ( $P<0.05$ )。这说明 LLP-95% 有较好的刺激菌株生长产酸效果。

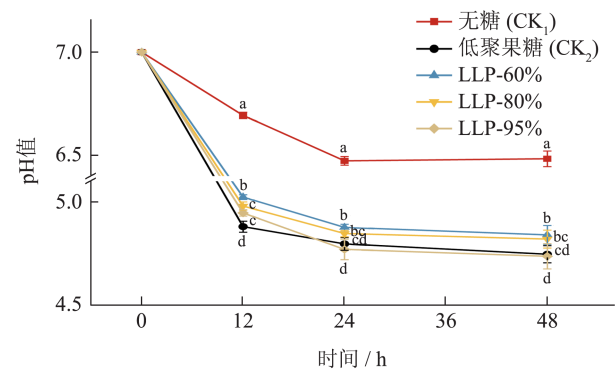


图3 3种兰州百合多糖对植物乳杆菌 pH 值变化情况  
Fig.3 Changes of pH value of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides on *Lactobacillus plantarum*

植物乳杆菌生长情况以  $OD_{600}$  作为评价指标,生长柱状图如图 4 所示。不管是哪种醇沉所得的多糖对菌株的增殖作用均优于  $CK_1$  组, $CK_1$  组增殖在 24 h 后  $OD_{600}$  无明显差异,其他组均有一定的先下降后上升趋势。 $CK_2$  组和 LLP-95% 组下降后上升的趋势比 LLP-60% 和 LLP-80% 组更显著,说明前两者增殖效果更好。培养 6~18 h 时, $OD_{600}$  呈下降趋势, $CK_2$  组的  $OD_{600}$  显著高于其他几组 ( $P<0.05$ ),与 pH 值下降趋势对应。在 30 h 时,除  $CK_1$  组外其他几组  $OD_{600}$  差异不显著。30 h 后 LLP-95% 组的生长速度明显加快, $OD_{600}$  显著高于  $CK_1$ 、 $CK_2$ 、LLP-60% 和 LLP-80% 组 ( $P<0.05$ )。培养终点时,以 LLP-95% 作为碳源对植物乳杆菌的增殖效果最佳,其  $OD_{600}$  为 0.75 显著高于  $CK_1$  组 (0.54)、 $CK_2$  组 (0.70)、LLP-60% 组 (0.63) 和 LLP-80% 组 (0.67) ( $P<0.05$ )。

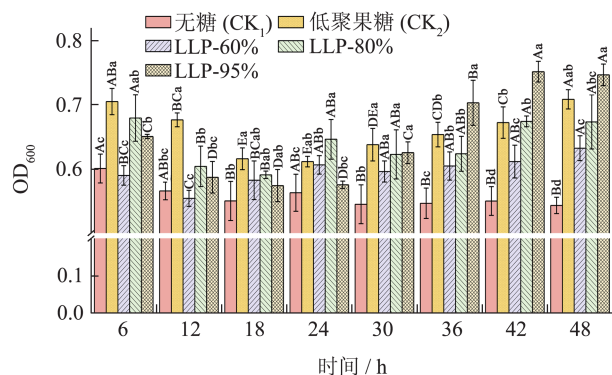


图 4 3 种兰州百合多糖对植物乳杆菌生长柱状图的影响

Fig.4 Effects of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides on growth histogram of *Lactobacillus plantarum*

注:不同小写字母表示在相同处理时间,不同组有显著性差异 ( $P<0.05$ );不同大写字母表示在同组,不同时间有显著性差异 ( $P<0.05$ )。下同。

以上结果表明,兰州百合多糖与低聚果糖具有相似的益生作用,尤其是高体积分数乙醇的百合多糖能够有效促进菌株的产酸和增殖,显示出其作为益生元的优良特性。培养前期菌株的普适性快速增殖可能源于基础培养基中氨基酸或维生素的刺激作用,多糖主要作为能源物质通过 EMP 途径快速产酸。植物乳杆菌在缺乏碳源的培养基中也能少量生长,可能是由于培养基中其他营养成分含有少量碳源,由于缺少主要碳源,菌株的生长速率、 $OD_{600}$  以及有机酸的产量相对较低。在培养的中后期,植物乳杆菌的生长受到碳源的较大影响,表明该菌株对不同碳源存在选择性偏好,LLP-95% 的益生效果较为显著,可能是由于其富含更多可溶性总糖和蛋白质,且含有较高比例的小分子量多糖<sup>[26]</sup>,小分子量多糖的高效性可能源于其更易穿透

菌株细胞壁的特性。在先前黄皮多糖<sup>[27]</sup>的研究中促进乳酸菌产酸也发现了类似的结果。

## 2.4 植物乳杆菌体外模拟胃肠液耐受性

经 3 种兰州百合多糖处理的植物乳杆菌在模拟胃肠液中的耐受性影响如图 5 所示。图 5a 为菌株在模拟胃液中耐受变化,4 个实验组的存活率整体趋势相似,均随时间延长而逐渐降低。10~20 min 阶段存活率下降较缓,LLP-95% 组的存活率显著高于其他组 ( $P<0.05$ ),且超过 55%,而 LLP-60% 组的存活率仅为 40% 左右。40 min 时,LLP-95% 组的存活率为 25.89%,显著高于 CK 组 (20.75%)、LLP-60% 组 (15.50%) 和 LLP-80% 组 (19.16%) ( $P<0.05$ )。如图 5b 所示,菌株在模拟肠液中的耐受性随着时间延长存活率均逐渐降低。培养初期 LLP-95% 组的存活率显著高于其他几组 ( $P<0.05$ ),20 min 后 CK 和 LLP-60% 组的存活率较差,LLP-80% 和 LLP-95% 组对菌株保护作用较好。在 30~40 min 菌株存活率趋向稳定,最终 LLP-95% 组 (56.00%) 和 LLP-80% 组 (54.39%) 的存活率显著高于 CK 组 (47.86%) 和 LLP-60% 组 (41.00%) ( $P<0.05$ )。

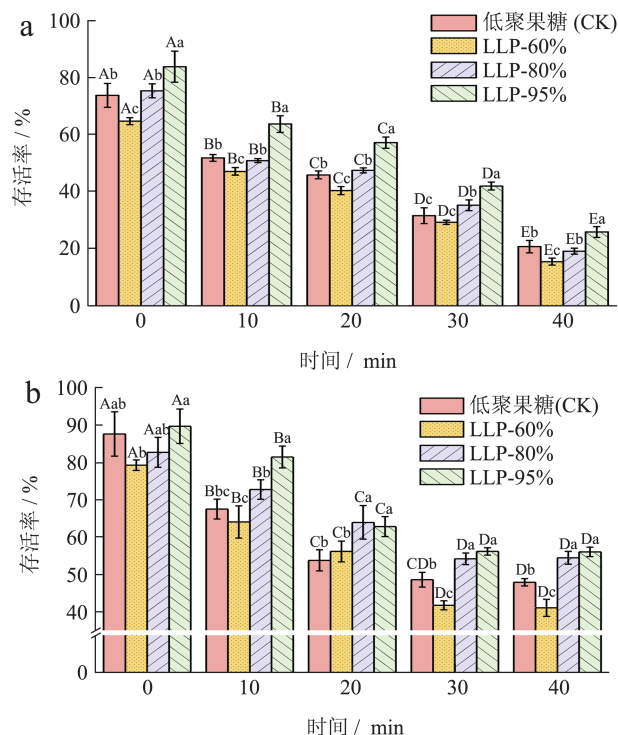


图 5 3 种兰州百合多糖对植物乳杆菌在模拟胃肠液中耐受性的影响

Fig.5 Effects of three kinds of Lanzhou lily polysaccharides on tolerance of *Lactobacillus plantarum* in simulated gastrointestinal fluid

注: a-模拟胃液; b-模拟肠液。



上述研究表明,高体积分数乙醇的兰州百合多糖能够显著提高植物乳杆菌在模拟胃肠液中的存活率。这可能是通过大分子屏障对益生菌发挥保护作用,多糖溶液的高粘度延缓胃酸扩散,有助于菌株抵御胃酸的水解作用。其次多糖作为胞外基质成分,LLP-95%富含更多的可溶性总糖和蛋白质,这可能有助于在胃肠道中调控有益离子、营养物质及其他物质的选择性吸收,支持生物膜内代谢微环境<sup>[23]</sup>。推断该作用机制不仅能提升益生菌在胃肠道内的生存能力,还有助于其在肠道粘膜上的粘附与定植,进而促进其潜在的益生作用。张丽华等<sup>[28]</sup>研究表明香菇多糖显著提高益生菌在模拟胃液系统中的存活率,与本研究结果具有相似之处。

### 3 结论

本研究探讨了不同体积分数乙醇对兰州百合多糖提取及其益生特性的影响。研究发现,随着乙醇体积分数的增高,提取率随之增加,且醇沉出的多糖和蛋白质质量分数也相应增多,其中体积分数95%乙醇的提取效果最佳。3种兰州百合多糖在模拟胃肠液中表现出高度不易消化性,其耐受性随着沉淀的乙醇体积分数的增高而增强。植物乳杆菌能分解兰州百合多糖后发酵产酸,相比之下LLP-95%具有更高的益生指数,能够显著促进菌株增殖并提高产酸量。对比3种兰州百合多糖,LLP-95%显著提高了植物乳杆菌在模拟胃肠液中的存活率。本文以兰州百合废弃鳞茎为原料进行研究,不仅为百合资源再利用提供可行的思路,还证明了其益生领域的应用潜力,为功能性食品和药品的研发提供了科学依据,具有重要的研究和工程意义。

### 参考文献

- [1] LIANG Z X, ZHANG J Z, XIN C, et al. Analysis of edible characteristics, antioxidant capacities, and phenolic pigment monomers in *Lilium* bulbs native to China [J]. Food Research International, 2022, 151: 110854.
- [2] LI W, WANG Y, WEI H, et al. Structural characterization of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) polysaccharides and determination of their associated antioxidant activity [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(15): 5603-5616.
- [3] HUI H P, JIN H, YANG X Y, et al. The structure and antioxidant activities of three high molecular weight polysaccharides purified from the bulbs of Lanzhou lily [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 17(1): 800-812.
- [4] HUI H P, LI X Z, JIN H, et al. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of two heteropolysaccharides purified from the bulbs of *Lilium davidii* var. *unicolor* Cotton [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 133: 306-315.
- [5] 张心驰,惠和平,郭栋费,等.梯度醇沉兰州百合多糖结构及降血糖活性分析[J].精细化工,2023,40(10):2231-2240.
- [6] CHANDRASEKARAN P, WEISKIRCHEN S, WEISKIRCHEN R. Effects of probiotics on gut microbiota: An overview [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(11): 6022.
- [7] GÓMEZ-GALLEGO C, EL-NEZAMI H. Editorial: Novel developments for promoting health through microbiota modulation [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1331665.
- [8] 翟征远,白晓悦,靖一志,等.食品中益生元的研发和应用研究进展[J].食品科学技术学报,2024,42(2):10-18.
- [9] CHEN G J, RAN C X, LI C F, et al. Comparisons of prebiotic activity of polysaccharides from shoot residues of bamboo (*Chimonobambusa quadrangularis*) via different ethanol concentrations [J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(5): 13171.
- [10] MOHD N N, ABBASILIASI S, MARIKKAR M N, et al. Defatted coconut residue crude polysaccharides as potential prebiotics: Study of their effects on proliferation and acidifying activity of probiotics *in vitro* [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(1): 164-173.
- [11] YANG Z Y, XU M F, LI Q, et al. The beneficial effects of polysaccharide obtained from persimmon (*Diospyros kaki* L.) on the proliferation of *Lactobacillus* and gut microbiota [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 182: 1874-1882.
- [12] OKOLIE C L, RAJENDRAN S R, UDENIGWE C C, et al. Prospects of brown seaweed polysaccharides (BSP) as prebiotics and potential immunomodulators [J]. Journal of Food Biochemistry, 2017, 41(5): 12392.
- [13] WANG T, YE Z C, LIU S D, et al. Effects of crude *Sphallerocarpus gracilis* polysaccharides as potential prebiotics on acidifying activity and growth of probiotics in fermented milk [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 149: 111882.
- [14] TANG Z J, HUANG G L, HUANG H L. Ultrasonic-assisted extraction, analysis and properties of purple mangosteen scarfskin polysaccharide and its acetylated derivative [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 10: 107010.
- [15] ZHOU R, WANG Y T, LI C, et al. A preliminary study on preparation, characterization, and prebiotic activity of a polysaccharide from the edible mushroom *Ramaria flava* [J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(9): 14371.
- [16] 陈韞慧,方思璇,陈佳琪,等.不同益生元对植物乳杆菌生长的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(21):28-33.
- [17] 林军.紫薯多糖提取分离、抗氧化活性及其双歧杆菌增殖作用研究[D].长沙:湖南大学,2022.
- [18] 祝连彩,唐士金,周丽.考马斯亮蓝G250法测定蛋白质含量的教学实践及方法学探讨[J].教育教学论坛,2020,23:266-269.
- [19] 赵勇,雷湘兰,蔡仁教,等.富硒蓝莓全果果酒体外消化特性研究[J].中国酿造,2022,41(10):100-105.
- [20] DAI K Y, WANG R H, MU L, et al. Structural characteristics and anti-tumor activity of alcohol-precipitated polysaccharides from *Cordyceps militaris* under different ethanol concentrations [J].

International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 278(2): 134784.

[21]

YAN J K, WANG C, YU Y B, et al. Physicochemical characteristics and *in vitro* biological activities of polysaccharides derived from raw garlic (*Allium sativum* L.) bulbs via three-phase partitioning combined with gradient ethanol precipitation method [J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128081.

[22]

WANG M, TANG H P, BAI Q X, et al. Extraction, purification, structural characteristics, biological activities, and applications of polysaccharides from the genus *Lilium*: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 267(1): 131499.

[23]

YAN W Q, LUO J H, YU Z L, et al. A critical review on intestinal mucosal barrier protection effects of dietary polysaccharides [J]. Food and Function, 2024, 15(2): 481-492.

[24]

黄庆斌,郑志昌,陈竟豪,等.不同醇沉竹荪多糖组分对青春双歧杆菌体外增殖作用的影响[J].食品工业科技,2020,41(4):86-91,119.

[25]

叶子晨,王腾,杨云.黄参粗多糖对植物乳杆菌CGMCC-15801和鼠李糖乳杆菌CGMCC-16103增殖的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(4):207-212.

[26]

DOU Z M, CHEN C, FU X. Digestive property and bioactivity of blackberry polysaccharides with different molecular weights [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(45): 12428-12440.

[27]

钟思彦,邹波,吴继军,等.黄皮多糖结构表征及抗氧化与益生活性研究[J].食品与发酵工业,2025,51(3):234-242.

[28]

张丽华,冯路瑶,李顺峰,等.分级醇沉香菇多糖益生活性研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(4):258-264.