班世栋, 宗春阳, 王晓丹, 等. 植物乳植杆菌发酵多花黄精提高多糖产量工艺优化及其体外益生元活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 269−280. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030047
BAN Shidong, ZONG Chunyang, WANG Xiaodan, et al. Polysaccharide Production Optimization of *Polygonatum cyrtonema* Hua Fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* and Its Prebiotic Activity *in Vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 269−280. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030047

·工艺技术·

植物乳植杆菌发酵多花黄精提高多糖产量工艺优化及其体外益生元活性

班世栋[1,2,3], 宗春阳[2], 王晓丹[2], 翟晓娜[1], 窦少华[3], 张　敏[1], 李媛媛[1], 梁　亮[1], 胡雪芳[1], 张志民[1], 陈乙元[1], 裴海生[1,*]
（1.农业农村部规划设计研究院 农业农村部农产品产地初加工重点实验室, 北京 100121;
2.贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州贵阳 550025;
3.大连大学生命健康学院, 辽宁大连 116622）

摘　要: 多糖是黄精含量最高的活性成分，为了筛选通过微生物发酵黄精提高多糖含量的乳酸菌及优化发酵工艺，探索发酵物的益生元活性，本文从实验室保存的不同传统发酵食品中分离的 12 株植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）发酵黄精，通过单因素实验，系统考察了发酵时间（0~6 d）、接种量（0~9% v/v）、转速（0~200 r/min）和温度（20~40 ℃）对黄精发酵液中多糖含量的影响，利用响应面方法对发酵黄精工艺进行优化，并对发酵黄精冻干粉进行益生元活性分析。结果表明：12 株菌均能在未添加营养物质的黄精培养基中正常生长，生物量在 24~48 h 内最高达到 1×10^8 CFU/mL，但 48 h 后生物量迅速下降。发酵 48 h 后，筛选到 1 株多糖含量提高 25% 的 L6 菌株。最佳发酵工艺参数为发酵时间 3.8 d、接种量 2.5%、温度 35 ℃。在此优化条件下，发酵液中多糖含量达到 1.30 mg/mL，比优化前显著（$P<0.05$）提高了 57.71%。发酵后多糖分子量明显增加，多糖吡喃环结构发生变化，主要组成多糖的单糖中甘露糖和葡萄糖明显降解，半乳糖和半乳糖醛酸明显增加。此外，发酵物能够明显促进植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus plantarum*）CICC22213、鼠李糖乳杆菌（*Lactobacillus rhamnosus*）CICC22175 和干酪乳杆菌（*Lactobacillus casei*）FBKL1.3022 这 3 株益生菌增殖，具有潜在益生元活性，且主要短链脂肪酸乳酸和乙酸含量具有生物量依赖性。这一结果表明，通过工艺优化能够有效提升黄精发酵液中多糖的含量，为开发大健康发酵食品、根茎类药食同源食品提供了技术支撑。

关键词: 黄精, 多糖, 菌株筛选, 益生菌发酵, 响应面优化, 益生元活性
中图分类号: Q939.97　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0269−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030047　　本文网刊:

Polysaccharide Production Optimization of *Polygonatum cyrtonema* Hua Fermented by *Lactiplantibacillus plantarum* and Its Prebiotic Activity *in Vitro*

BAN Shidong[1,2,3], ZONG Chunyang[2], WANG Xiaodan[2], ZHAI Xiaona[1], DOU Shaohua[3], ZHANG Min[1], LI Yuanyuan[1], LIANG Liang[1], HU Xuefang[1], ZHANG Zhimin[1], CHEN Yiyuan[1], PEI Haisheng[1,*]
（1.Key Laboratory of Agro-products Primary Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Academy of Agricultural Planning and Engineering, Beijing 100121, China;
2.School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
3.College of Life and Health, Dalian University, Dalian 116622, China）

收稿日期: 2025−03−05
基金项目: 国家重点研发计划（2024YFD1600605-2）; 农规自主研发项目（QX202415）; 农规英才计划（QNYC-2021-10）。
作者简介: 班世栋（1986−）, 男, 博士, 研究方向: 微生物代谢调控, E-mail: bsdtaitan2018@163.com。
*** 通信作者:** 裴海生（1982−）, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 生物质资源综合利用, E-mail: peihaisheng2001@163.com。

Abstract: Polysaccharides are the main bioactive constituents of *Polygonatum cyrtonema*. To screen lactic acid bacteria strains for their ability to enhance polysaccharide accumulation during *Polygonatum cyrtonema* Hua fermentation, optimize the fermentation process parameters, and evaluate the prebiotic potential of the fermented product. Twelve laboratory-preserved *Lactiplantibacillus plantarum* strains, originally isolated from traditional fermented foods, were used as starter cultures for *P. cyrtonema* fermentation. Initial single-factor experiments systematically evaluated the effects of four critical parameters: fermentation duration (0~6 d), inoculum size (0~9% v/v), shaking rate (0~200 r/min) and temperature (20~40 ℃) on polysaccharide content. To optimize the fermentation process of *P. cyrtonema* by response surface methodology (RSM) and assess the prebiotic activity of the lyophilized powder. The results showed that all *L. plantarum* strains could grow normally in nutrient-free *P. cyrtonema* medium, achieving peak biomass (1×10^8 CFU/mL) within 24~48 h, followed by rapid decline. Strain L6 showed superior performance, increasing polysaccharide content by 25% after 48 h fermentation. RSM-derived optimal conditions (3.8 days, 2.5% inoculum, 35 ℃) produced a polysaccharide content of 1.30 mg/mL, achieving a 57.71% increase over the baseline (P<0.05). Analysis of the fermented polysaccharides revealed a notable increase in molecular weight, along with structural modifications in the pyranose rings. Specifically, the degradation of monosaccharides such as mannose and glucose was observed, while the levels of galactose and galacturonic acid increased significantly. Moreover, the fermented product significantly enhanced the growth of three probiotic strains: *L. plantarum* CICC22213, *L. rhamnosus* CICC22175 and *L. casei* FBKL1.3022. The production of primary short-chain fatty acids, lactic acid and acetic acid, was found to be biomass-dependent. These results demonstrated that strain selection coupled with process optimization can significantly improve polysaccharide accumulation in *P. cyrtonema*. The fermented product exhibits promising prebiotic properties, supporting its potential application in functional food development using this medicinal rhizome species.

Key words: *Polygonatum cyrtonema*; polysaccharides; strain screening; probiotic fermentation; response surface optimization; prebiotic activity

黄精作为一种传统中药材和药食同源植物，因富含多糖、皂苷、黄酮等多种活性成分而备受关注。其中，多糖是黄精中含量最高、生物活性最显著的组分，具有抗氧化、免疫调节、抗炎、抗肿瘤及益生元等多种生理功能[1−5]。随着消费者对功能性食品需求的增长，以黄精为原料开发新型健康产品成为研究热点。然而，黄精多糖的提取效率和生物利用率受限于其复杂结构和传统加工方式，如水提和醇提等方法存在效率低、成本高及活性损失等问题。因此，开发高效、绿色的新技术以提升黄精多糖含量及其生物活性具有重要意义。

微生物发酵作为一种兼具传统与现代特色的生物技术，通过微生物代谢可改变底物结构、提高活性成分含量或生成新型活性物质，在食品和医药领域应用广泛[6]。乳酸菌是一类安全且功能多样的益生菌，常见于酸奶、泡菜等传统发酵食品中。研究表明，乳酸菌发酵不仅改善食品的风味和质构，还能通过代谢作用分解复杂多糖或蛋白质，释放或合成具有生物活性的小分子化合物[7−8]。乳酸菌发酵可显著提高人参、枸杞等药食同源植物中多糖的含量，并赋予发酵产物益生元活性，促进肠道益生菌增殖[9−10]。利用细菌、酵母和乳酸菌发酵后，黄精多糖的提取率显著提高，其中植物乳植杆菌对多糖提取效果最为显著[11]，但是也有植物乳植杆菌发酵黄精未见多糖积累[12]，可能不同生境菌株发酵特性存在差异[13]，或者不在菌株积累多糖的最佳发酵条件。因此，针对黄精发酵菌株的筛选，以及系统优化发酵工艺以提高多糖含量的研究仍需深入。

植物多糖能够促进肠道菌群双歧杆菌、乳酸菌增殖[14]，这些益生菌能够产生短链脂肪酸调节肠道微环境，抑制致病菌生长[14−15]，部分多糖还能增强肠道免疫屏障[16]。研究表明，黄精多糖具有调节肠道菌群作用，具有潜在的益生特性[17]。而传统九蒸九制方法炮制黄精过程中，多糖含量逐渐降低[18−20]，可能降低黄精产品的益生功能。因此，利用乳酸菌发酵黄精，不仅有望提高多糖含量，还可能通过降低多糖分子量增强其益生元活性，为开发新型健康食品提供技术支持。基于此，本研究以黄精为发酵底物，从传统发酵食品中分离的 12 株植物乳植杆菌为发酵菌株，通过单因素实验和响应面法系统优化发酵工艺，筛选能显著提高黄精多糖含量的优势菌株并确定最佳发酵条件。同时，通过体外实验评估发酵产物的益生元活性，为开发具有增强功效的药食同源食品提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

干制多花黄精（*Polygonatum cyrtonema* Hua）贵州贵阳市；植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus Plantarum*）L1、L2、L3、L4、L5、L6、L7、L8、L9、L10、L11、L12　农业农村部规划设计院微生物实验室，贵州大学酿酒与食品工程学院微生物菌种保藏室，分离自酸菜（甘肃、贵州）、酸汤（贵州）、浆水（甘肃）、酸奶（内蒙古）等；植物乳植杆菌（*Lactiplantibacillus Plantarum*）CICC22213、鼠李糖乳杆菌（*Lactobacillus Rhamnosus*）CICC22175　中国工业微生物菌种保藏中心，贵州大学酿酒与食品工程学

院微生物菌种保藏室；干酪乳杆菌 ST01　从发酵食品酸汤中分离，菌种保藏在实验室；葡萄糖、硫酸、苯酚、DNS、NaOH、乙醇、$NaNO_2$、$Al(NO_3)_3$、低聚果糖　均为分析纯，北京索莱宝科技有限公司；MRS 固态、液态培养基　广东环凯微生物科技有限公司；乙酸、乳酸、葡萄糖、麦芽四糖　分析标准品，上海惠诚生物科技有限公司；右旋糖酐　分析标准品，西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；葡聚糖（分析标准品）、溴化钾（光谱纯）　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、氨基葡萄糖盐酸盐、氨基半乳糖盐酸盐单糖、岩藻糖　分析标准品，上海源叶生物科技有限公司。

PBJ-010 破壁机　中山市仁亨电器有限公司；TGL-24M 高速冷冻离心机　湖南平凡科技有限公司；UV-1780 紫外可见分光光度计　岛津仪器（苏州）有限公司；FE28 型 pH 计　梅特勒托利多科技（中国）有限公司；THZ-98A 恒温摇床　上海一恒科学仪器有限公司；FD-304 箱式真空冷冻干燥机　济南骏德仪器有限公司；Agilent LC 1260 高效液相色谱　安捷伦科技有限公司；Waters 1515 高效液相色谱仪　沃特世科技有限公司；Nicolet 6700 傅里叶红外光谱仪　赛默飞世尔科技公司。

1.2　实验方法

1.2.1　菌株在黄精培养基的生长验证

1.2.1.1　培养基制备　黄精培养基：黄精 2 g，100 mL 热水浸泡 1 h，打浆 3 min，自然 pH，115 ℃ 灭菌 20 min。

1.2.1.2　种子液制备　菌种在 MRS 固态培养基 37 ℃ 活化两次，挑取单菌落接种到灭菌的 MRS 液体培养基，37 ℃，150 r/min 摇床培养 24 h，调整菌液浓度 OD_{600} 等于 2，得种子液。

1.2.1.3　发酵液生物量检测　按照 1% 接种量，分别接种 12 株菌的种子液到黄精培养基，37 ℃ 条件下 150 r/min 摇床培养 24、48、96 h。每个时间点取 1 mL，梯度稀释，在 MRS 固态培养基涂布，计数平板中菌落数，30~300 个菌落为有效平板，每个菌种做 3 个平行。

1.2.2　发酵黄精高产量多糖菌株筛选

1.2.2.1　发酵液制备　按照 1% 接种量，接种 12 株菌的种子液到黄精培养基，37 ℃ 条件下 150 r/min 摇床培养 48 h。发酵液取 2 mL 到离心管，12000 r/min 离心 10 min，取上清液，测定上清液多糖、总糖、还原糖、总酸、pH、固形物含量，筛选多糖含量高菌株，未接种乳酸菌为对照。每个菌种接种 3 个平行。

1.2.2.2　多糖含量测定　取 1.2.2.1 上清液以 1∶4 加入无水乙醇，4 ℃ 冷藏 12 h，12000 r/min 离心 10 min，用 80% 乙醇溶液清洗 3 次，用纯净水复溶，利用苯酚-硫酸法检测样品中吸光度，根据葡萄糖标准曲线（y=9.7172x−0.0055，R^2=0.9982）换算多糖含量[21−22]。

1.2.2.3　总糖含量测定　取 1.2.2.1 上清液 0.1 mL，稀释 50 倍，利用苯酚-硫酸法检测样品中吸光度，根据不同葡萄糖浓度下建立的标准曲线（y=9.7172x−0.0055，R^2=0.9982）换算总糖含量[21−22]。

1.2.2.4　还原糖含量测定　取 1.2.2.1 上清液 0.2 mL，利用 DNS 方法检测还原糖含量。并根据葡萄糖标准曲线（y=1.8039x−0.0303，R^2=0.9994）换算发酵液还原糖含量[22]。

1.2.2.5　总酸　按照 GB 12456-2021《食品中总酸的测定》中酸碱指示剂滴定法测定上清液总酸[23]。

1.2.2.6　pH　利用 pH 为 4.0 和 6.86 标准磷酸缓冲液校准 pH 计，取 50 mL 上清液测 pH。

1.2.2.7　固形物　取上清液，利用折光计测定可溶性固形物[24]。

1.2.3　发酵黄精高产量多糖工艺优化

1.2.3.1　单因素实验　为了优化黄精发酵工艺并提高发酵液中多糖的积累，本研究基于工业发酵条件，系统考察了发酵时间、菌种接种量、溶氧（通过摇床转速调节）和发酵温度对发酵液多糖含量的影响。按照菌株筛选接种发酵，分别考察发酵时间（0、1、2、3、4、5、6 d）、菌种接种量（1%、3%、5%、7%、9%）、溶氧条件（摇床转速 0、50、100、150、200 r/min），发酵温度（20、25、30、35、40 ℃）对发酵液多糖含量的影响，考察单一因素时，其它因素固定为：发酵时间 4 d，接种量 3%，摇床转速 150 r/min，温度 37 ℃，每组实验平行 3 次。

1.2.3.2　响应面优化试验　基于单因素结果，确定显著影响发酵多糖积累的 3 因素发酵时间（A）、接种量（B）、发酵温度（C），以多糖含量（Y）作为响应值，采用 Design-Expert 13 软件，应用 Box-Behnken 方法设计试验组合，优化和验证多糖积累的最佳发酵条件，因素与水平见表 1。

表 1　响应面试验设计因素和水平

Table 1　Factors and levels of response surface methodology experimental design

水平	因素		
	A发酵时间（d）	B接种量（%）	C发酵温度（℃）
−1	2	1	30
0	4	3	35
1	6	5	40

1.2.4　多糖理化性质分析

1.2.4.1　多糖制备　黄精培养基和黄精发酵液 12000 r/min 离心 10 min，取上清液，加无水乙醇至乙醇浓度到 80%，4 ℃ 静置 22 h，离心，收集沉淀放玻璃培养皿，保鲜膜封口，−80 ℃ 预冷冻 24 h，保鲜膜扎孔，放冷冻干燥机干燥 24 h，得黄精多糖和发酵黄精多糖，干燥物研磨后装袋 4 ℃ 保存备用。

1.2.4.2 多糖分子量测定 利用高效凝胶渗透色谱法测定多糖分子量[25], 精密称取样品和不同分子量的右旋糖酐标准品(分子量 1000、5000、12000、25000、50000、80000、150000、270000、410000、670000 系列分析标准品)5 mg, 向样品中加入 0.05 mol/L NaCl 溶液 1 mL, 配制成 5 mg/mL 供试样品溶液, 8000 r/min 离心 10 min, 取上清液用 0.22 μm 的微孔滤膜过滤, 然后将样品转置于 2 mL 进样瓶中备用。以标准品相对分子质量的对数值为纵坐标, 以相应色谱峰的洗脱体积(V)为横坐标进行线性回归, 得到分子量校正曲线, 如下所示: lg 分子量 =2.11e+01−2.51e+00V+1.48e−01V^2−3.39e−03V^3。色谱柱: 聚合物基质水溶性 SEC(GFC)色谱柱(8×300 mm)2 根串联; 流动相: 0.05 mol/L NaCl 溶液; 流速: 0.50 mL/min; 柱温: 40 ℃; 进样量: 30 μL; 检测器: Waters 示差检测器。

1.2.4.3 红外光谱分析 利用 FT-IR 分析多糖官能团[26]。称取各干燥的多糖样品 1~2 mg 于在研钵中, 分别加入 KBr 粉末 200 mg 研磨均匀, 压片, 使用傅里叶变换显微红外光谱仪进行红外扫描样品, 波数范围 4000~400 cm^{-1}, 记录红外光谱图。

1.2.4.4 单糖组成分析 使用高效液相色谱法测定单糖组成, 根据文献方法改动[27]。精确称量多糖样品 5 mg, 加入 1 mL 2 mol/L TFA 酸溶液, 121 ℃ 加热 2 h。通氮气, 吹干。加入 3 mL 甲醇清洗, 再吹干, 重复甲醇清洗 2~3 次。加入 1 mL 无菌水溶解, 进行衍生化。取多糖水解液 0.2 mL 于具塞尖底离心管, 加入 0.2 mL 0.5 mol/L 氢氧化钠溶液, 0.5 mL 0.5 mol/L PMP 甲醇溶液, 涡旋混匀后于 70 ℃ 水浴中反应 1 h, 反应完成后加 0.2 mL 0.5 mol/L 盐酸中和所加入的氢氧化钠, 加氯仿 1 mL 涡旋萃取 3 次除去多余的 PMP, 弃去氯仿层后, 取 0.3 mL 加水定容至 1 mL。取上清液过 0.45 μm 微孔滤膜后转入色谱瓶中待测。配制鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、氨基葡萄糖盐酸盐、氨基半乳糖盐酸盐单糖、岩藻糖等标准品的系列浓度混合溶液, 并进行衍生化。

色谱条件: 色谱柱为 Agilent ZORBAX Eclipse-XDB-C_{18}(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 流动相为乙腈:磷酸盐缓冲液(磷酸二氢钾 12 g/L, 2 mol/L NaOH 调整 pH 至 6.8)等度洗脱, 乙腈和磷酸盐缓冲液的体积比: 17:83, 流速: 0.8 mL/min, 柱温: 30 ℃, 检测波长: 250 nm, 进样量: 10 μL。

1.2.5 发酵黄精冻干粉及黄精多糖益生元活性评价

1.2.5.1 发酵黄精冻干粉的制备 根据发酵黄精高产量多糖工艺优化参数制备发酵液, 用离心机 10000 r/min 离心 20 min, 得上清液。上清液减压蒸馏浓缩, 浓缩液分装玻璃培养皿, 保鲜膜封口, −80 ℃ 预冷冻 24 h, 保鲜膜扎孔, 放冷冻干燥机干燥 24 h, 干燥物研磨后装袋 4 ℃ 保存备用, 以不发酵的黄精培养基为对照。

1.2.5.2 培养基的制备 基础 MRS 培养基[28]: 去除葡萄糖的 MRS 培养基, 加入 0.05%(w/v)L-半胱氨酸。

阳性对照培养基[28]: 在基础 MRS 培养基中, 加入 1%(w/v)的低聚果糖。

实验培养基[28]: 在基础 MRS 培养基中, 分别加入 1%(w/v)的 L6 发酵黄精冻干粉、黄精冻干粉、发酵黄精多糖、黄精多糖。

1.2.5.3 益生菌生物量测定 植物乳植杆菌 CICC22213、鼠李糖乳杆菌 CICC22175 和干酪乳杆菌 ST01 在 MRS 固态培养基活化 2 次, 根据 1.2.1.2 方法制备种子液, 每株菌按照 1% 接种量分别接种到基础 MRS 培养基(MRS-L)、阳性对照培养基(MRS-OF)、黄精冻干粉 MRS 培养基(MRS-P)、发酵黄精冻干粉 MRS 培养基(MRS-FP)、黄精多糖 MRS 培养基(MRS-PP)、发酵黄精多糖 MRS 培养基(MRS-FPP), 37 ℃ 条件下 150 r/min 摇床培养, 在 0、48 h 测 OD_{600} 吸光度[28−29]。

1.2.5.4 短链脂肪酸测定 样品制备: 益生菌在 MRS-L、MRS-OF、MRS-P、MRS-FP 培养基发酵 48 h 后取 2 mL 发酵液, 10000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 0.45 μm 滤膜过滤, 滤液用于测乳酸和乙酸含量[30]。

色谱条件: (Agilent C_{18}, 5 μm, 4.6 mm×150 mm); 流动相: A 相(0.1% 磷酸溶液); B 相(甲醇); A:B=98:2, 流速: 0.8 mL/min, 采集时间: 20 min, 波长: 210 nm, 进样量 10 μL。不同浓度(160~830 ng/mL)乙酸、乳酸绘制标准曲线, 乙酸标准曲线为 y=0.1256x−0.0575, R^2=0.9999; 乳酸标准曲线为 y=0.2508x−0.8388, R^2=0.9993。

1.3 数据处理

每组实验重复 3 次, 采用 Microsoft Excel 2019 处理数据, Origin2024 进行数据统计分析和绘图, 采用单因素 ANOVA 检验进行显著性分析, P<0.05 表示有显著性差异。用 Design-Expert13 进行响应面优化设计。

2 结果与分析

2.1 植物乳植杆菌在黄精培养基的生长验证

为了开发零添加的益生菌发酵药食同源物质饮品, 本研究以黄精作为唯一原料进行乳酸菌发酵, 旨在降低生产成本并减少食品安全风险。研究表明, 通过对全国 8 个省的黄精(多花黄精、滇黄精)营养成分进行分析, 发现黄精中平均碳水化合物含量为 83%、蛋白质 7%、灰分 2%、氨基酸总量约 6%[31]。相比之下, 常规用于乳酸菌培养的 MRS 培养基中碳源含量为 2%, 氮源含量为 1%, 这表明黄精能够为乳酸菌发酵提供充足的营养成分, 作为乳酸菌发酵培养基是可行的。本文利用 2% 的多花黄精制备乳酸菌

发酵培养基，并观察菌种在其中的生长情况。将 12 株植物乳植杆菌接种到黄精培养基中，发现所有菌株均能正常生长。在培养 24 h 后，生物量都能超过 10^7 CFU/mL，L4、L5、L8、L10、L12 等可达到 10^8 CFU/mL。然而，培养 96 h 后，大部分菌株生物量显著降低（P<0.05），除 L5 和 L10 菌外，其它都在 10^3~10^6 CFU/mL（图 1），说明从不同生境分离的植物乳植杆菌都能在黄精培养基中正常生长，黄精不仅可作为种子液培养基，还可作为发酵饮品原浆的原料。

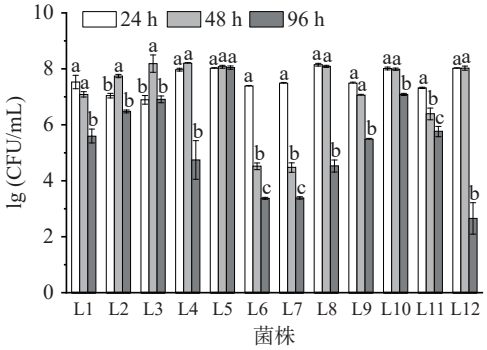


图 1　12 株植物乳植杆菌发酵黄精 24、48 和 96 h 生物量

Fig.1　Biomass production of *Lactiplantibacillus plantarum* strains during *Polygonatum cyrtonema* fermentation at 24, 48, and 96 h

注：不同小写字母表示每株菌不同时间点的生物量差异显著（P<0.05）。

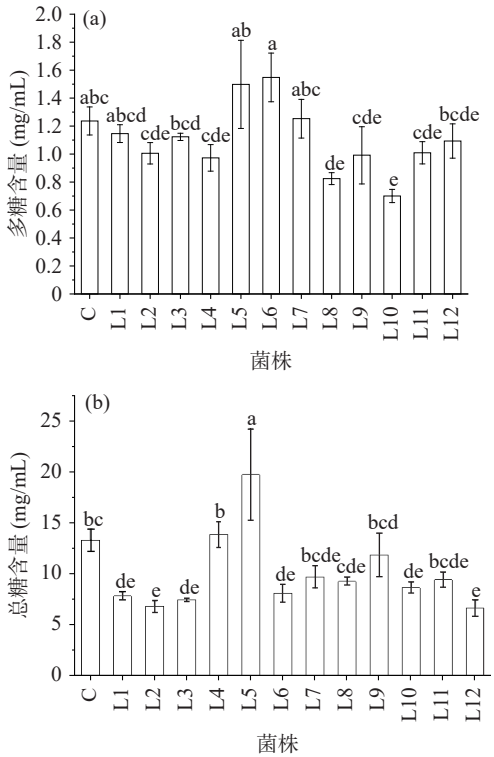


图 2　12 株菌发酵 48 h 后的多糖（a）、总糖（b）含量

Fig.2　Contents of polysaccharide (a), total sugars (b) from 12 strains after fermentation for 48 h

注：不同小写字母表示每株菌发酵后多糖和总糖含量差异显著（P<0.05）。

2.2　发酵黄精高产量多糖的菌株筛选

黄精的主要活性成分为多糖[32]。本文考察了 12 株菌发酵黄精后多糖产量及理化指标，筛选多糖产量高的菌株作为后续工艺优化和功能研究。12 株菌发酵黄精后，发现 L5 和 L6 菌种发酵后的多糖含量明显升高，而其他菌种发酵后的多糖含量明显降低（图 2a）。这一结果与已有研究一致，表明微生物发酵能够显著提高黄精多糖的提取率[33]，特别是细菌、酵母和乳酸菌发酵均能提升多糖含量，其中植物乳植杆菌的效果最为显著[11]。研究表明，乳酸菌在发酵过程中可能产生淀粉酶、纤维素酶、几丁质酶等水解酶，促进植物细胞壁的降解，从而释放更多的糖类物质[34]。此外，乳酸菌还可能合成胞外多糖[35−37]，进一步增加发酵液中的多糖含量。值得注意的是，传统九蒸九制方法处理黄精时，多糖含量呈现先增加后降低的趋势[38]，这与发酵过程中的多糖动态变化具有一定的相似性。此外，除 L4 和 L5 菌种的总糖含量高于对照组外，其他菌种的总糖含量均低于对照组（图 2b），但其生物量与大部分菌种相近（图 1），可能菌株产生了能够降解黄精基质的酶，从而增加了可溶性糖的含量[39]。由于 L6 发酵黄精后多糖含量最高，因此选择 L6 作为后续多糖发酵工艺优化菌株。

因 48 h 出现生物量拐点（图 1），故选取该时间点作为后续理化指标检测的关键阶段。结果显示，所有菌种的还原糖含量均低于对照组（图 3a），且生物量较低的菌种还原糖含量相对较高，这表明乳酸菌在增殖过程中主要利用还原糖为碳源生长。发酵液的总酸含量显著（P<0.05）升高（图 3b），而 pH 显著（P<0.05）降低（图 3c），这与乳酸菌发酵过程中产生有机酸的特性相符。研究还发现，利用九蒸九制炮制黄精后，其水提液也呈现酸性[40]，进一步验证了乳酸菌发酵对黄精酸化的影响。在乳酸菌发酵黄精后，每株菌的发酵上清液中的固形物含量明显增加（图 3d），表明乳酸菌发酵促进了可溶性固形物的生成。这可能是由于乳酸菌降解黄精基质产生的糖类物质，或者是其代谢过程中产生的有机酸、脂肪酸、氨基酸、胞外多糖等[41−44]。这些结果表明，乳酸菌发酵不仅能够改变黄精的理化性质，还能通过酶解和代谢作用提升其功能性成分的含量，为开发高附加值的黄精发酵产品提供了科学依据。

2.3　单因素对发酵黄精多糖含量的影响

基于工业生产条件，对发酵时间、接种量、溶氧（通过摇床转速调节）和温度等关键因子进行单因素实验，以评估其对黄精发酵液中多糖含量的影响。结果表明，随着发酵时间的延长，黄精溶出多糖逐渐升高，并在第 4 d 达到最高（图 4a），可能是乳酸菌增殖过程分泌的细胞壁降解酶（如果聚糖酶），释放黄精中多糖[45]。然而，在第 5 d 后显著降低，可能是乳酸菌产生的 CAZy 降解多糖的速度超过了溶出速度[39]。此外，发酵后期乳酸积累导致的 pH 下降可能进一步抑制了降解酶的活性或改变了多糖的溶解性。因此，

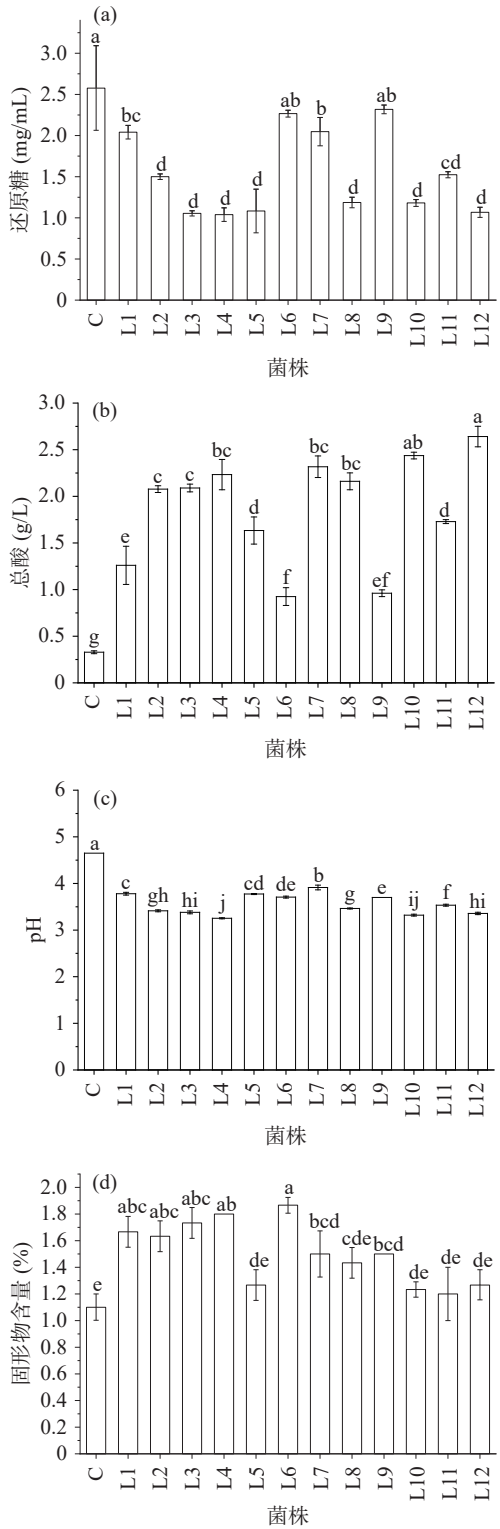


图 3 不同菌株发酵黄精 48 h 后还原糖(a)、总酸(b)、pH(c)、固形物含量(d)变化

Fig.3 Changes in reducing sugar (a), total acid (b), pH (c), and soluble solids content (d) during *Polygonatum cyrtonema* Hua fermentation by different strains after 48 h

注: 不同小写字母表示每株菌发酵后还原糖、总酸、pH 和固形物差异显著(P<0.05)。

选择第 4 d 为最佳发酵时间。当乳酸菌接种量为 3% 时, 发酵液中多糖含量最高(图 4b), 接种量过低(如 1%)可能导致乳酸菌生物量不足, 难以有效分解黄精细胞壁释放多糖, 而接种量过高(如 5%)可能引发菌

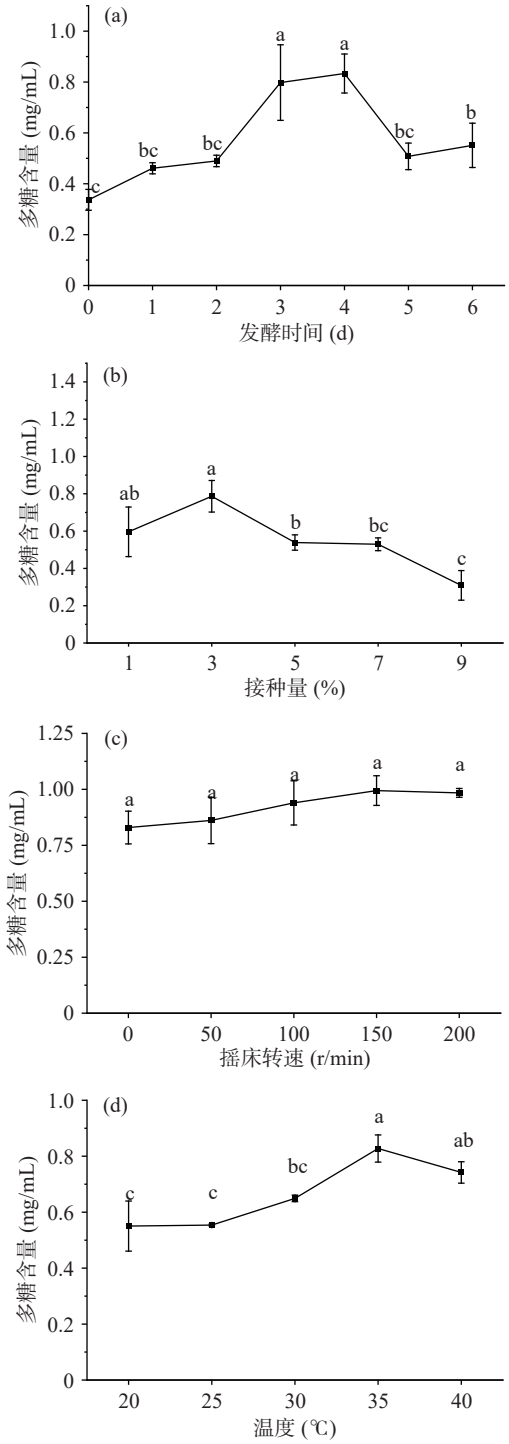


图 4 发酵时间(a)、接种量(b)、摇床转速(c)、温度(d)对发酵黄精多糖含量的影响

Fig.4 Effects of fermentation time (a), inoculum size (b), shaker speed (c), and temperature (d) on polysaccharide production

注: 不同小写字母表示不同单因素条件下多糖含量差异显著(P<0.05)。

株间的营养竞争或乳酸过量积累, 加速多糖的降解(图 4b 中多糖含量数据支持这一趋势), 说明适宜的接种量更加平衡多糖的溶出和降解。而增加发酵液溶氧, 能提高多糖含量, 但多糖差异不显著(图 4c), 可能增加的多糖产量仅仅是黄精溶出多糖, 并非乳酸菌增殖分泌的多糖引起的多糖产量增加[46], 但利用转

速增加溶氧方式并未显著影响乳酸菌发酵增加多糖产量。温度对微生物生长代谢影响较大，而 20~30 ℃ 的培养条件对多糖积累无显著影响，在 35 ℃ 条件下获得最高的多糖积累量，说明最适的生长温度对乳酸菌的生长代谢活性更强[47]，对多糖溶出有利。由于摇床转速对多糖含量的影响不显著，因此，响应面优化中仅考虑发酵时间、接种量和发酵温度三个因子。

2.4　发酵黄精多糖的工艺优化

以发酵时间(A)、接种量(B)、发酵温度(C)为响应面试验的 3 个因素，以多糖含量(Y)为响应值，通过 3 因素 3 水平的 Box-Behnken 试验设计和响应面分析方法，确定多糖积累的最佳工艺条件，结果见表 2。应用 Design-Expert 13 软件进行多元回归拟合分析，多元二次回归方程表示如下：$Y=0.801+0.089A-0.02B+0.001C-0.092AB-0.027AC+0.027BC-0.157A^2-0.149B^2-0.211C^2$。

表 2　响应面试验设计方案及结果

Table 2　Response surface methodology experimental design and results

试验号	A发酵时间	B接种量	C发酵温度	Y多糖含量(mg/mL)
1	−1	1	0	0.4897
2	1	0	1	0.5102
3	0	0	0	0.7951
4	0	−1	−1	0.4933
5	0	0	0	0.7987
6	1	0	−1	0.5605
7	0	−1	1	0.4400
8	1	1	0	0.4591
9	−1	0	1	0.3608
10	1	−1	0	0.6850
11	0	0	0	0.8060
12	−1	0	−1	0.3041
13	0	0	0	0.7934
14	−1	−1	0	0.3484
15	0	1	1	0.4444
16	0	0	0	0.8140
17	0	1	−1	0.3898

如表 3 所示，整体模型显著($P<0.05$)，失拟项不显著($P=0.0606$)，说明该回归方程可真实反映自变量和因变量的关系，模型中的 $R^2=0.9971$，调整后 R^2_{Adj} 为 0.9933，进一步表明模型的预测值与实测值之间

表 3　响应面分析试验方差分析结果

Table 3　Analysis of variance (ANOVA) results for response surface methodology experiments

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	0.5345	9	0.0594	265.56	<0.0001*
A-发酵时间	0.0633	1	0.0633	283.2	<0.0001*
B-接种量	0.0042	1	0.0042	18.86	0.0034*
C-发酵温度	7.41E-06	1	7.41E-06	0.0331	0.8607
AB	0.0337	1	0.0337	150.73	<0.0001*
AC	0.0029	1	0.0029	12.8	0.0090*
BC	0.0029	1	0.0029	13.02	0.0087*
A^2	0.1037	1	0.1037	463.69	<0.0001*
B^2	0.0934	1	0.0934	417.76	<0.0001*
C^2	0.1868	1	0.1868	835.12	<0.0001*
残差	0.0016	7	0.0002		
失拟项	0.0013	3	0.0004	5.84	0.0606
纯误差	0.0003	4	0.0001		
总和	0.5361	16			
	R^2=0.9971	R^2_{Adj}=0.9933			

注：*差异显著($P<0.05$)。

具有高度相关性，模型拟合效果良好，能够准确预测发酵条件对多糖含量的影响。各因素对多糖积累的影响顺序为：发酵时间(A)>接种量(B)>发酵温度(C)。回归模型下，一次项(A、B)、交互项(AB、AC、BC)、二次项(A^2、B^2、C^2)对响应值影响显著($P<0.05$)。

由图 5 可知，AB(发酵时间与接种量)、AC(发酵时间与温度)和 BC(接种量与温度)交互作用的坡度较陡，对多糖含量影响的显著性呈正相关[48]。通过响应面优化，得到黄精发酵多糖积累的最佳工艺参数为：发酵时间 3.8 d、接种量 2.6%、发酵温度 35.1 ℃，为了方便操作，优化工艺为：发酵时间 3.8 d、接种量 2.5%、发酵温度 35 ℃。在此条件下，发酵液中多糖含量达到 1.30 mg/mL，较优化前提高了 57.71%。文献研究表明，传统水法提取黄精多糖的溶出率为 4.41%[48]，与本研究的未发酵的空白多糖溶出率 4.12% 接近。通过响应面优化发酵工艺后，多糖含量显著提高至 6.49%($P<0.05$)。此外，酶法、超声法和超高压法等提取技术的多糖溶出率分别为 8.11%、

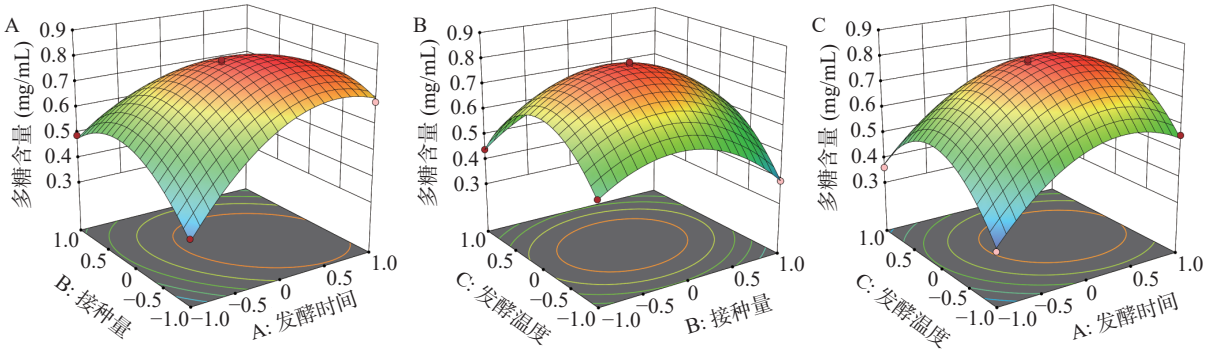


图 5　各因素交互作用对多糖含量的影响

Fig.5　Effects of interaction among various factors on polysaccharide content

5.41% 和 13.46%[48], 但这些方法在工业生产中成本较高, 限制了其大规模应用。传统九蒸九制炮制方法虽然广泛应用于黄精加工, 但炮制后多糖含量显著降低[49]。而本研究通过优化发酵工艺, 显著提升了发酵液中多糖含量, 为工业化生产提供了更具成本效益的解决方案。

2.5 多糖理化性质分析

2.5.1 分子量分析 通过高效凝胶色谱对多糖进行分子量测定, 结果见表 4, 黄精发酵后多糖分子量明显升高, 可能是菌株分泌的糖基转移酶通过糖苷键连接形成更长链的多糖结构, 或者降解多糖的小分子片段, 通过氧化交联或酶促重组形成更大分子量的聚合体[50]。

2.5.2 红外光谱分析 多糖红外光谱如图 6 所示, 3408.31 cm^{-1} 处存在强且宽的吸收峰, 为多糖分子间或分子内氢键 O-H 伸缩振动的强吸收峰; 2934.29 cm^{-1} 附近的中等强度尖峰为甲基(-CH_3)或者次甲基(-CH_2)的 C-H 伸缩振动吸收峰; 1738.62 cm^{-1} 处可归属于糖醛酸中酯化羧基的 C=O 的对称伸缩振动吸收峰, 而在 1635.48 cm^{-1} 处为糖醛酸中自由羧基 COO-的非对称伸缩振动特征吸收峰, 说明多糖样品是一种酸性多糖, 并存在酯化基团。1417.36、1375.52、1251.18 cm^{-1} 为 C-H 的变角振动吸收峰, 它们 C-H 的伸缩振动构成了糖环的特征吸收; 1031.35 cm^{-1} 再次证明了吡喃糖苷的存在, 为 C-O-H 或 C-O-C 结构中 C-O 键的弯曲振动; 935.76 cm^{-1} 处显示吡喃环的非对称环伸缩振动峰; 875.04 cm^{-1} 为 β-吡喃糖苷键的特征区域, 推测多糖中含有 β 型吡喃糖。发酵黄精多糖增加 763.11 cm^{-1} 显示吡喃环的对称环伸缩振动峰, 但在 935.76 cm^{-1} 处无振动峰, 说明发酵后多糖的吡喃环开环或取代基引入, 破坏非对称振动模式[51], 且修饰吡喃的取代基未发现新的基团。此外也有可能是样品含蛋白质、多酚等杂质, 掩盖特征峰[52−53]。

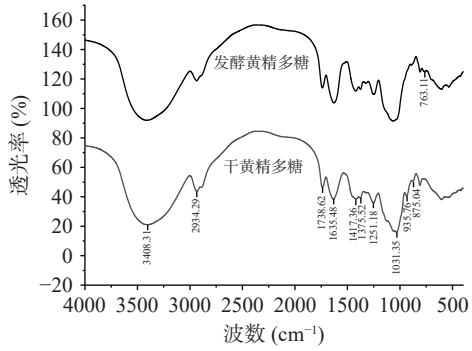


图 6 干黄精及发酵黄精多糖的红外光谱图

Fig.6 FT-IR spectra of polysaccharides from dried and fermented *Polygonatum cyrtonema*

2.5.3 单糖组成分析 通过高效液相色谱对干黄精和发酵黄精多糖的单糖组成分析, 发现黄精多糖由 9 种单糖组成, 主要由甘露糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖组成(表 5)。其单糖组成与文献报道相近[54], 多糖发酵后的甘露糖和葡萄糖明显降低, 可能菌株发酵过程消耗甘露糖和葡萄糖作为碳源, 导致其含量降低[55]。而发酵多糖的半乳糖醛酸和半乳糖明显升高, 可能是甘露糖和葡萄糖的降解提高了它们的比例, 也可能是发酵过程中菌株分泌的半乳糖氧化酶对羟基氧化, 提高了半乳糖醛酸比例[56]。

2.6 发酵黄精多糖体外益生元活性

2.6.1 黄精发酵多糖为碳源的益生菌生长情况 基于优化的发酵工艺, 本文制备了黄精发酵液冻干粉, 通过对发酵上清液醇沉制备了黄精发酵多糖, 并开展了益生菌生长情况研究。将冻干粉替代传统 MRS 培养基中的碳源。在菌株生长 48 h 后, 发现去除 MRS 培养基葡萄糖后, 三种益生菌生长均显著受限, 而在添加低聚糖后, 益生菌的增殖能力得到显著提升。此外, 黄精冻干粉可显著促进植物乳植杆菌和干酪乳杆菌的生物量积累, 同时对鼠李糖乳杆菌的生物量也有明显增加作用(图 7a)。为了考察黄精多糖对益生菌增殖效果, 在去除葡萄糖的 MRS 培养基中加入黄精多糖, 发现三株益生菌生物量明显低于作为碳源的发酵液冻干粉, 且黄精多糖对每株菌的增殖效果存在显著差异(P<0.05), 但纯化发酵后多糖作为碳源并未增加益生菌生物量(图 7b)。已有研究表明, 发酵黄精能够降低多糖聚合度, 促进益生菌增殖[57], 在益生菌发酵过程中, 发现双歧杆菌对发酵黄精多糖的利用率高于嗜酸乳杆菌, 能将植物乳植杆菌的生物量增高 2 倍, 且多糖结构对益生菌增殖效益差异较大[50]。

表 4 黄精多糖分子量

Table 4 Molecular weight of *Polygonatum cyrtonema* polysaccharides

样品	保留时间(min)	峰位分子量Mp(Da)	重均分子量Mw(Da)	数均分子量Mn(Da)
黄精多糖	37.606	3621	4616	1260
发酵黄精多糖	37.697	3422	32434	9001

表 5 黄精多糖的单糖组成摩尔百分比(%)

Table 5 Molar percentage distribution of monosaccharide constituents in *Polygonatum cyrtonema* polysaccharides (%)

样品	甘露糖	盐酸氨基葡萄糖	鼠李糖	葡萄糖醛酸	半乳糖醛酸	葡萄糖	半乳糖	木糖	阿拉伯糖
黄精多糖	56.486	0.665	2.200	2.542	2.925	14.617	14.508	1.799	4.258
发酵黄精多糖	33.580	0.586	3.966	2.122	10.076	9.856	32.757	1.400	5.657

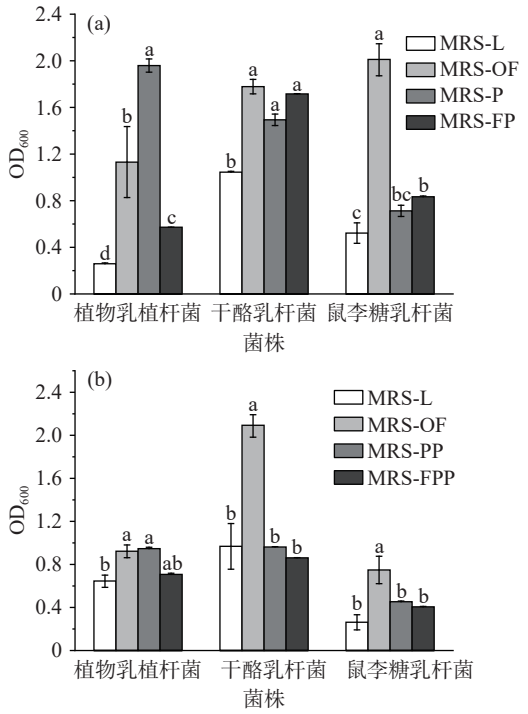


图 7　黄精发酵冻干粉(a)和黄精发酵多糖(b)对三种益生菌生物量影响

Fig.7　Effects of fermented freeze-dried powder (a) and fermented polysaccharides (b) of *Polygonatum cyrtonema* on the biomass of three probiotic strains

注：不同小写字母表示不同处理黄精冻干粉和不同处理多糖对每株益生菌生物量差异显著（P<0.05）。

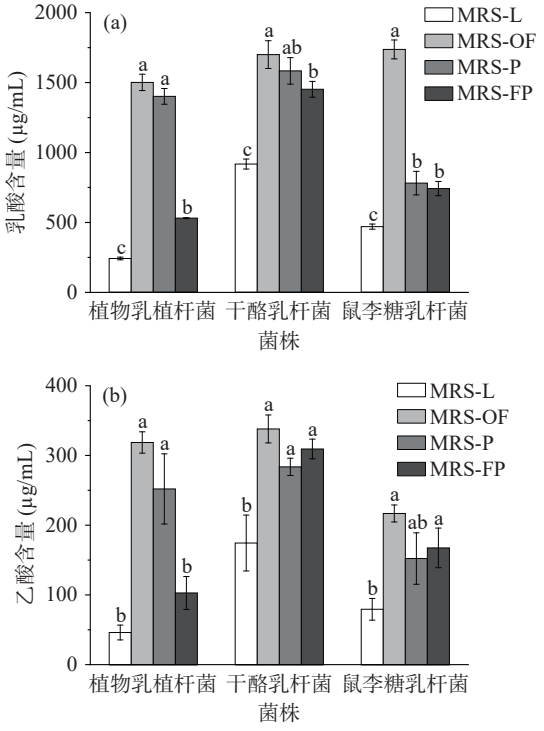


图 8　三种益生菌发酵液乳酸(a)和乙酸(b)含量

Fig.8　Levels of lactic acid (a) and acetic acid (b) in the fermentation broth of three probiotics

注：不同小写字母表示不同处理黄精冻干粉对每株益生菌代谢乳酸和乙酸差异显著（P<0.05）。

2.6.2　益生菌发酵液主要短链脂肪酸变化　研究发现，益生菌发挥益生元活性主要是通过代谢产生短链脂肪酸，降低环境 pH 抑制有害菌的生长[57−58]，增强肠道屏障，以及促进免疫细胞释放抗炎因子提供免疫力[59]。由于 3 种益生菌发酵主要产生乳酸和乙酸。因此，本文对三种益生菌的主要代谢产物乳酸和乙酸含量进行考察，结果显示发酵黄精或未发酵冻干粉都能促进乳酸和乙酸积累，且乳酸和乙酸的生成均依赖于菌株的生物量，而干酪乳杆菌表现出较强的产酸能力（图 8a 和图 8b），说明黄精发酵冻干粉具有一定的益生元活性。

3　结论

本研究利用不同生境来源的 12 株植物乳植杆菌发酵黄精，筛选到 1 株显著增加多糖产量的植物乳植杆菌 L6，通过单因素实验，确定了发酵时间、接种量和温度对发酵液中多糖含量有显著影响，并利用响应面法优化得到最佳发酵工艺：发酵时间 3.8 d、接种量 2.5%、发酵温度 35 ℃。在此条件下，发酵液中多糖含量达到 1.30 mg/mL，较优化前提高了 57.71%。对多糖理化性质分析，发现发酵后黄精多糖分子量明显增加，且发酵后多糖的甘露糖、半乳糖、半乳糖醛酸含量显著变化。此外，发现发酵冻干粉对益生菌增殖效果明显，并产生短链脂肪酸，具有一定益生元活性，这对根茎类药食同源食品开发提供理论和技术支持。对于发酵黄精冻干粉中多糖的体外益生元活性实验，以及多糖的结构还需进一步研究。

© 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] 李彦力, 苏艺, 袁晚晴, 等. 黄精主要活性成分、功能及其作用机制研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 354−363. [LI Y L, SU Y, YUAN W Q, et al. Research progress on the main active ingredients, functions, and mechanisms of action of *Rhizoma polygonati*[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 354−363.]

[2] WANG S, HE F, WU H, et al. Health-promoting activities and associated mechanisms of *Polygonati rhizoma* polysaccharides[J]. Molecules, 2023, 28(3): 1350.

[3] HE Y, CHEN Z, NIE X, et al. Recent advances in polysaccharides from edible and medicinal *Polygonati rhizoma*: From bench to market[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 195: 102−116.

[4] CUI X, WANG S, CAO H, et al. A review: The bioactivities and pharmacological applications of *Polygonatum kingianum* polysaccharides[J]. Molecules, 2018, 23(5): 1−12.

[5] 李一雪, 张尊琴, 宋虹. 多糖与益生菌相互作用研究进展[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 217−223. [LI Y X, ZHANG Z Q, SONG H. Research progress on the interaction between polysaccharides and probiotics[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 217−223.]

[6] AYIVI R D, GYAWALI R, KRASTANOV A, et al. Lactic acid bacteria: Food safety and human health applications[J]. Dairy, 2020, 1(3): 202−232.
[7] ABDUL H B N, XUAN N J, OSLAN S N H. A comprehensive review of bioactive compounds from lactic acid bacteria: Potential functions as functional food in dietetics and the food industry[J]. Foods, 2023, 12(15): 2850.
[8] DOO H, KWAK J, KEUM G B, et al. Lactic acid bacteria in Asian fermented foods and their beneficial roles in human health[J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(9): 2021−2033.
[9] 孙慧峰, 朱钧溢, 国立东, 等. 乳酸菌生物转化药食同源植物活性成分研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 474−481. [SUN H F, ZHU J Y, GUO L D, et al. Advances in the study of probiotic bacteria biotransformation of medicinal and edible plants' active components[J]. Food Processing Technology, 2022, 43(7): 474−481.]
[10] SHI H, ZHAO Y, WANG W, et al. The potential of lactic acid bacteria in fermented herbs-derived food products[J]. Food Bioscience, 2024, 64: 104714.
[11] 包智影. 微生物法提取黄精多糖及其降脂功能的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021. [BAO Z Y. Microbial-assisted extraction and hypolipidemic activity of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.]
[12] 王紫菱. 植物乳酸杆菌发酵黄精提取液工艺及成分变化研究[D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2024. [WANG Z L. Process optimization and compositional changes during *Lactobacillus plantarum* fermentation of *Polygonatum sibiricum* extract[D]. Changsha: Hunan University of Chinese Medicine, 2024.]
[13] 张国华, 何国庆. 传统发酵食品中乳酸菌多样性及其功能特性[J]. 中国食品学报, 2013, 13(9): 174−181. [ZHANG G H, HE G Q. Diversity and functional characteristics of lactic acid bacteria in traditional fermented foods[J]. Chinese Journal of Food Science, 2013, 13(9): 174−181.]
[14] 李国光. 银耳多糖益生元效应的研究[J]. 现代食品, 2021(3): 215−217. [LI G G. Study on the prebiotic effect of *Tremella* polysaccharides[J]. Modern Food, 2021(3): 215−217.]
[15] ZHAN Z, TANG H, ZHANG Y, et al. Potential of gut-derived short-chain fatty acids to control enteric pathogens[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 976406.
[16] RUYU S, BA D, LIJUAN L. Bioactive effects advances of natural polysaccharides[J]. Journal of Future Foods, 2023, 3(3): 234−239.
[17] 陈文迪. 九华黄精多糖体外消化酵解特性及其对肠道菌群作用的研究[D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2024. [CHEN W D. *In vitro* digestive enzyme hydrolysis and effects on intestinal microbiota of Jianghua Huang Jing polysaccharides[D]. Hefei: Anhui University of Chinese Medicine, 2024.]
[18] 南易. 黄精属中药玉竹和黄精的质量分析研究[D]. 天津: 天津中医药大学, 2021. [NAN Y. Quality analysis of medicinal materials from *Polygonatum* genus: A study on *Polygonatum odoratum* and *Polygonatum sibiricum* in traditional Chinese medicine[D]. Tianjin: Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2021.]
[19] LIU Q, LI M, LU H, et al. Effect of steam pretreatment on drying kinetics and quality of *Polygonatum kingianum* dried in hot-blast air[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(1): e13925.
[20] SU L, LI X, GUO Z, et al. Effects of different steaming times on the composition, structure and immune activity of *Polygonatum* polysaccharide[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2023, 310: 116351.
[21] 杨勤, 谷文超, 周浓, 等. 苯酚-硫酸法与蒽酮-硫酸法测定地参多糖的比较研究[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 343−350. [YANG Q, GU W C, ZHOU N, et al. Comparative study on the determination of polysaccharides from *Rhezoma lycopi* by phenol-sulfuric acid method and anthrone-sulfuric acid method[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(1): 343−350.]
[22] 潘东梅, 蔡维珊, 梁业婷, 等. 黄精中糖类成分的含量测定方法比较及其酒蒸工艺优化[J]. 中国药房, 2021, 32(24): 2994−3000. [PAN D M, CAI W S, LIANG Y T, et al. Comparison of determination methods for sugar components in *Polygonatum kingianum* and optimization of its wine steaming process[J]. China Pharmacy, 2021, 32(24): 2994−3000.]
[23] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 12456-2021 食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1−3. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 12456-2021 National food safety standard—Determination of total acid in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1−3.]
[24] 全国饮料标准化技术委员会. 饮料通用分析方法: GB/T 12143-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1−2. [National Technical Committee on Beverages of Standardization Administration of China. General analytical methods for beverages: GB/T 12143-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1−2.]
[25] 向瑞琪, 谢锋, 谭红, 等. 三种食用菌多糖的基本结构与抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 69−76. [XIANG R Q, XIE F, TAN H, et al. Study on the basic structures and antioxidant activities of three edible fungi polysaccharides[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(14): 69−76.]
[26] 丁子康, 李新月, 赵猛, 等. 低分子量柘果多糖的制备及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 39−46. [DING Z K, LI X Y, ZHAO M, et al. Preparation of low molecular weight probexerose polysaccharides and their antioxidant activities[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(19): 39−46.]
[27] 谭婉, 卫阳飞, 李枫林, 等. 黑果枸杞果实多糖的超声辅助双水相萃取工艺优化、单糖组成分析及胰脂肪酶抑制活性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 158−168. [TAN W, WEI Y F, LI F L, et al. Optimization of ultrasound-assisted aqueous two-phase extraction process, monosaccharide composition analysis, and evaluation of pancreatic lipase inhibitory activity of polysaccharides from black goji berry fruits[J]. Food Industry Science and Technology, 2024, 45(22): 158−168.]
[28] HUANG F, HONG R, ZHANG R, et al. Physicochemical and biological properties of longan pulp polysaccharides modified by *Lactobacillus fermentum* fermentation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 232−237.
[29] HUANG F, HONG R, ZHANG R, et al. Dynamic variation in biochemical properties and prebiotic activities of polysaccharides from longan pulp during fermentation process[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 915−921.
[30] 赵益菲, 袁瑞, 尚红岩, 等. 饲用酸化剂中乳酸、柠檬酸、富马

酸、苹果酸、甲酸、乙酸、丙酸、丁酸的同时测定[J]. 粮食与饲料工业，2024(6)：72−77. ［ZHAO Y F, YUAN R, SHANG H Y, et al. Simultaneous determination of lactic acid, citric acid, fumaric acid, malic acid, formic acid, acetic acid, propionic acid, and butyric acid in feed acidifiers[J]. Grain and Feed Industry, 2024(6)：72−77.］

［31］ 罗霜, 王剑波, 陈柯宇, 等. 不同产地药食同源黄精的成分及体外抗氧化研究[J]. 中国调味品，2023, 48(6)：59−65. ［LUO S, WANG J B, CHEN K Y, et al. Study on the components and *in vitro* antioxidant activity of medicinal and edible *Polygonatum kingianum* from different regions[J]. China Condiment, 2023, 48(6)：59−65.］

［32］ 姚荣林. 黄精的化学成分及药理研究[J]. 医疗装备，2014, 27(9)：20−21. ［YAO R L. Chemical constituents and pharmacological research of *Polygonatum* spp.[J]. Medical Equipment, 2014, 27(9)：20−21.］

［33］ 王若男, 厉荣玉, 郑鹏, 等. 黄精多糖微生物发酵提取、表征及其抗氧化活性分析[J]. 中国食品添加剂，2022, 33(9)：54−62. ［WANG R N, LI R Y, ZHENG P, et al. Extraction, characterization, and antioxidant activity analysis of polysaccharides from *Polygonatum kingianum* by microbial fermentation[J]. China Food Additives, 2022, 33(9)：54−62.］

［34］ 钟灿, 劳嘉, 周馨, 等. 植物乳杆菌发酵黄精水提液工艺优化及活性物质变化研究[J]. 现代食品，2023, 29(17)：101−105. ［ZHONG C, LAO J, ZHOU X, et al. Process optimization and changes of active substances in water extract of *Polygonatum kingianum* fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Modern Food, 2023, 29(17)：101−105.］

［35］ DEGRAIN A, MANHIVI V, REMIZE F, et al. Effect of lactic acid fermentation on color, phenolic compounds and antioxidant activity in African nightshade[J]. Microorganisms, 2020, 8(9)：1−12.

［36］ 李悦, 陈静, 张晓雨, 等. 产胞外多糖乳酸菌的筛选与体外益生特性评价[J]. 现代食品，2023, 29(14)：188−192. ［LI Y, CHEN J, ZHANG X Y, et al. Screening of extracellular polysaccharide-producing lactic acid bacteria and evaluation of their *in vitro* probiotic characteristics[J]. Modern Food, 2023, 29(14)：188−192.］

［37］ 陈靖, 周佳豪, 毛琪琪, 等. 产胞外多糖乳酸菌的筛选及鉴定[J]. 食品与机械，2023, 39(4)：26−31,169. ［CHEN J, ZHOU J H, MAO Q Q, et al. Screening and identification of extracellular polysaccharide-producing lactic acid bacteria[J]. Food and Machinery, 2023, 39(4)：26−31,169.］

［38］ 李得天, 封亮, 贾晓斌, 等. 黄精炮制原理解析及工艺优化策略[J]. 中草药，2024, 55(20)：7110−7121. ［LI D T, FENG L, JIA X B, et al. Analysis of the principles of processing *Rhizoma Polygonati* and optimization strategies for its production[J]. Chinese Herbal Medicines, 2024, 55(20)：7110−7121.］

［39］ 周祉延, 徐欣, 周媛. 人体微生物碳水化合物活性酶的研究进展[J]. 华西口腔医学杂志，2019, 37(6)：666−670. ［ZHOU Z Y, XU X, ZHOU Y. Research progress on carbohydrate active enzymes of human microbiota[J]. West China Journal of Stomatology, 2019, 37(6)：666−670.］

［40］ MAO B, YIN R, LI X, et al. Comparative genomic analysis of *Lactiplantibacillus plantarum* isolated from different niches[J]. Genes, 2021, 12(2)：241.

［41］ de SOUZA E L, de OLIVEIRA K Á R, de OLIVEIRA M E G. Influence of lactic acid bacteria metabolites on physical and chemical food properties[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 49：100981.

［42］ 胥鑫钰, 张梦梦, 王啸尘, 等. 微生物代谢组学在发酵食品研究中的应用[J]. 食品研究与开发，2024, 45(15)：210−217. ［XU X Y, ZHANG M M, WANG X C, et al. Application of microbial metabolomics in fermented food research[J]. Food Research and Development, 2024, 45(15)：210−217.］

［43］ 王会莹, 薄晓宇, 袁保壹, 等. 基于代谢组学分析 *Lentilactobacillus kefiri* IMAU10804 酸胁迫前后的代谢物差异[J]. 食品与发酵工业，2024, 50(22)：197−203,213. ［WANG H Y, BO X Y, YUAN B Y, et al. Metabolite differences of *Lentilactobacillus kefiri* IMAU10804 under acid stress based on metabolomics analysis[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(22)：197−203,213.］

［44］ 谢荔朋, 闫露, 高俊帅, 等. 乳酸菌胞外多糖在畜牧业替抗中的应用前景[J]. 福建畜牧兽医，2023, 45(5)：54−61. ［XIE L P, YAN L, GAO J S, et al. Application prospects of exopolysaccharides from lactic acid bacteria in the replacement of antibiotics in animal husbandry[J]. Fujian Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2023, 45(5)：54−61.］

［45］ 孙大庆, 齐贺, 邸子清, 等. 嗜果聚糖 *Lactiplantibacillus plantarum* 19M03 的筛选及全基因组测序分析[J]. 食品科学，2024, 45(23)：113−122. ［SUN D Q, QI H, DI Z Q, et al. Screening and whole genome sequencing analysis of fructophilic *Lactiplantibacillus plantarum* 19M03[J]. Food Science, 2024, 45(23)：113−122.］

［46］ 付龙云. 乳酸菌抗氧胁迫及有氧生长的研究[D]. 济南：山东大学，2013. ［FU L Y. Research on antioxidant stress and aerobic growth of lactic acid bacteria[D]. Jinan：Shandong University, 2013.］

［47］ 程芬, 杨长花, 宋艳丽, 等. 响应面法优化侧柏叶精油的超声辅助水蒸气蒸馏提取工艺[J]. 化学与生物工程，2024, 41(7)：18−23,29. ［CHENG F, YANG C H, SONG Y L, et al. Optimization of ultrasonic-assisted steam distillation extraction process of *Platycladus orientalis* leaf essential oil using response surface methodology[J]. Chemical and Biological Engineering, 2024, 41(7)：18−23,29.］

［48］ 何海华, 刘邵凡. 黄精多糖提取方法及其对运动机能的作用研究进展[J]. 食品安全导刊，2024(6)：122−126. ［HE H H, LIU S F. Research progress on extraction methods of polysaccharides from *Rhizoma Polygonati* and their effects on exercise performance[J]. Food Safety Guide, 2024(6)：122−126.］

［49］ 蒋彤. 多花黄精炮制化学及炮制增效机理研究[D]. 北京：中国中医科学院，2023. ［JIANG T. Chemistry and mechanism of enhanced efficacy of processed multi-flower *Polygonatum sibiricum*[D]. Beijing：Chinese Academy of Chinese Medical Sciences, 2023.］

［50］ 李蒙, 陈曦, 李宜航, 等. 黄精多糖药理作用研究进展[J]. 中医药学报，2024, 52(8)：95−101. ［LI M, CHEN X, LI Y H, et al. Advances in the pharmacological effects of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2024, 52(8)：95−101.］

［51］ 马高兴, 王晗, 杨文建, 等. 不同提取工艺对杏鲍菇多糖结构特征及免疫活性的影响[J]. 食品科学，2022, 43(17)：42−49. ［MA G X, WANG H, YANG W J, et al. Effects of different extraction methods on the structural characteristics and immunoactivities of *Pleurotus eryngii* polysaccharides[J]. Food Science, 2022, 43

(17): 42−49.]
[52] 刘芬, 杨乐, 董玲, 等. 中药配方颗粒难溶性物质与高分子化合物的红外光谱分析[J]. 中国现代中药, 2023, 25(9): 1966−1972. [LIU F, YANG L, DONG L, et al. Infrared spectroscopic analysis of insoluble substances and high-molecular compounds in traditional Chinese medicine formulations[J]. China Journal of Modern Chinese Medicine, 2023, 25(9): 1966−1972.]
[53] 张曼, 王岸娜, 吴立根, 等. 蛋白质、多糖和多酚间相互作用及研究方法[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(4): 42-46. [ZHANG M, WANG A N, WU L G, et al. Interactions among proteins, polysaccharides, and polyphenols and research methodologie[J]. Grain & Oil, 2015, 28(4): 42–46.]
[54] 汪珍. 制多花黄精多糖的抗炎活性研究及其结构解析[D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2023. [WANG Z. Studies on the anti-inflammatory activity and structural analysis of multi-flower *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. Hefei: Anhui University of Chinese Medicine, 2023.]
[55] LI C, LI J, SHANG Y, et al. Hypoglycemic and hypolipidemic activity of *Polygonatum sibiricum* fermented with *Lactobacillus brevis* YM 1301 in diabetic C57BL/6 Mice[J]. Journal of Medicinal Food, 2021, 24(7): 720−731.
[56] 刘旺, 白金波, 张王娟, 等. 黄精多糖理化性质及其对 D-半乳糖诱导小鼠氧化损伤的保护作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 425−433. [LIU W, BAI J B, ZHANG W J, et al. Study on the physicochemical properties of polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* and its protective effect on d-galactose-induced oxidative damage in mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 425−433.]
[57] ZHAN J, CHEN H, LUO L, et al. Structures of fructan and galactan from *Polygonatum cyrtonema* and their utilization by probiotic bacteria[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 267: 118219.
[58] DALILE B, VAN O L, VERVLIET B, et al. The role of short-chain fatty acids in microbiota-gut-brain communication[J]. Nature reviews Gastroenterology & Hepatology, 2019, 16(8): 461−478.
[59] CONG J, ZHOU P, ZHANG R. Intestinal microbiota-derived short chain fatty acids in host health and disease[J]. Nutrients, 2022, 14(9): 1977.