

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230182

数字出版日期: 2024-07-12; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240710.1902.006>

植物乳植杆菌 YC 胞外多糖的理化性质和 对发酵乳加工特性的影响

白 冰¹, 刘海涛¹, 刘欢欢^{1,2}, 彭心怡^{1,2}, 李贞景^{1,2}, 郭庆彬^{1,2}

(1. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457;

2. 天津科技大学食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457)

摘 要: 对植物乳植杆菌 YC 胞外多糖 (*Lactiplantibacillus plantarum* YC exopolysaccharides, LPE) 进行理化性质 (化学组成及含量、扫描电子显微镜分析、傅里叶变换红外光谱分析、相对分子质量、单糖组成) 测定, 并将 LPE 按照不同比例 (0.1%、0.5%、1%) 添加到脱脂乳中, 对发酵乳发酵及冷藏过程中理化性质、微生物变化、流变特性以及质构特性进行测定。结果表明: LPE 的总糖含量为 67.94%, 蛋白质含量为 1.24%, 糖醛酸含量为 9.72%, LPE 呈现出分支多孔的网状结构, 相对分子质量为 1.01×10^6 , 是主要由甘露糖、葡萄糖和半乳糖构成的酸性杂多糖; LPE 不仅能有效降低发酵乳的 pH, 还有效增加了发酵乳的持水力、硬度和稠度, 且 LPE 的添加对发酵乳的黏度和黏弹性均有提升。本研究为植物乳植杆菌胞外多糖的研究及在发酵乳中的应用提供参考。

关键词: 植物乳植杆菌 YC; 胞外多糖; 发酵乳加工; 质构; 流变学特性

中图分类号: TS252.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)06-0021-09

Physicochemical Properties of Extracellular Polysaccharide from *Lactiplantibacillus plantarum* YC and Its Effect on Processing Characteristics of Fermented Milk

BAI Bing¹, LIU Haitao¹, LIU Huanhuan^{1,2}, PENG Xinyi^{1,2}, LI Zhenjing^{1,2}, GUO Qingbin^{1,2}

(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The physical and chemical characteristics of *Lactiplantibacillus plantarum* YC exopolysaccharides (LPE) were ascertained, including chemical composition and content, scanning electron microscopy examination, Fourier transform infrared spectrum analysis, relative molecular weight and monosaccharide composition. After adding LPE to skim milk powder in different proportions (0.1%, 0.5% and 1%), the physicochemical, microbial, rheological and textural properties of fermented milk during fermentation and refrigeration processes were studied. The results showed that LPE was an acid heteropolysaccharide with a total sugar content of 67.94%, protein content of 1.24%, uronic acid content of 9.72% and relative molecular weight of 1.01×10^6 , showing a branched porous network structure. It was mainly composed of mannose, glucose and galactose. Furthermore, LPE not only effectively reduced the pH of fermented milk, but also increased its water holding capacity, hardness, and viscosity. Meanwhile, the addition of LPE also enhanced the surface viscosity and viscoelasticity of fermented milk. Overall, these results have provided a reference for the study of LPE and its application in fermented milk.

Key words: *Lactiplantibacillus plantarum* YC; exopolysaccharide; fermented milk processing; texture; rheological properties

收稿日期: 2023-10-06; 修回日期: 2024-03-26

基金项目: 食品营养与安全国家重点实验室开放课题 (SKLFNS-KF-202103, SKLFNS-KF-202004); 天津市教委科研计划项目 (2018KJ093)

作者简介: 白 冰 (1997—), 女, 黑龙江人, 硕士研究生; 通信作者: 李贞景, 助理研究员, lizhenjing@tust.edu.cn

引文格式:

白冰,刘海涛,刘欢欢,等.植物乳植杆菌 YC 胞外多糖的理化性质和对发酵乳加工特性的影响[J].天津科技大学学报,2024,39(6):21-29.

BAI B, LIU H T, LIU H H, et al. Physicochemical properties of extracellular polysaccharide from *Lactiplantibacillus plantarum* YC and its effect on processing characteristics of fermented milk[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(6): 21-29.

植物乳植杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*) 是一种存在于人和动物黏膜(口腔、胃肠道、阴道等)^[1], 且被广泛应用的益生菌^[2-3]。许多发酵产品,如泡菜、奶酪、酸奶、香肠等^[4]均含有植物乳植杆菌。植物乳植杆菌不仅具有良好的保健效果,还可以增强免疫功能、抑制病原菌、降低血清总胆固醇含量^[5]。此外,植物乳植杆菌在平衡肠道微生物群、减轻乳糖不耐受以及癌细胞控制等方面也有一定效果^[6-7],例如和双歧杆菌协同用于防治由消化道菌群功能失调所致的便秘、急慢性泄泻、胃气胀、消化不良等症状^[8-9]。

植物乳植杆菌胞外多糖(exopolysaccharides, EPS)是指乳酸菌在生长过程中分泌到细胞壁外的荚膜多糖或黏液多糖的总称。这些多糖通常由多种单糖分子组成,包括葡萄糖、半乳糖、甘露糖等。它们的相对分子质量和黏性较大,能够形成软凝胶状的结构。由于 EPS 特殊的物理化学性质和生物活性,使其在食品、医药和生物技术等领域中具有广泛的应用前景。另外, EPS 还具有多种生理功能,包括降血压、抗肿瘤、调节肠道菌群结构等。高产 EPS 的乳酸菌的资源开发与应用成为当前的研究热点。

在菌种资源开发方面,研究者们致力于筛选和鉴定高产 EPS 的乳酸菌菌株。从不同的环境样品中收集乳酸菌,再利用分子生物学和生物化学手段进行筛选与鉴定。在应用方面,高产 EPS 的乳酸菌在食品、保健品、医药等领域都具有广阔的应用前景。Bengoa 等^[10]从开菲尔中分离的副干酪乳杆菌 CIDCA 8339 和 CIDCA 83124 产生的 EPS 均在一定程度上改变了健康儿童的粪便微生物群的活性和组成,有助于减少肠道炎症。从芥菜泡菜中分离到的高 EPS 戊糖乳杆菌 SLC 13 菌株具有益生菌特性、抗生素耐受性、细菌素产生能力、耐酸性、胆汁耐受性和免疫增强作用^[11]。此外, EPS 还具有抗氧化、抗菌、免疫调节等多种生物活性,可以应用于药物开发和医疗保健产品中。例如,植物乳植杆菌 LP6 中的胞外多糖(EPS-3)对 PC12 细胞的氧化损伤具有明显的保护作用^[12];从植物乳植杆菌 JLK0142 中分离的 EPS 可以有效改善 RAW 264.7 细胞的免疫调节活性,并刺激环磷酸腺苷

导的免疫,抑制小鼠的免疫系统^[13]。当前的研究重点包括深入了解 EPS 的生物活性机制、开发高效的 EPS 提取技术等。这将进一步推动 EPS 在各个领域的应用,并为相关产业提供有益的资源 and 产品。

本实验以课题组前期分离并筛选的具有降尿酸功能的植物乳植杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*) YC^[14]为出发菌株,得到了其发酵产生的植物乳植杆菌 YC 胞外多糖,测定其理化性质,并将不同浓度的植物乳植杆菌 YC 胞外多糖加入脱脂乳中进行发酵,计算发酵乳的 pH、持水力、活菌数、质构特性、流变特性等指标,评估植物乳植杆菌 YC 胞外多糖对发酵乳性质的影响,以期 EPS 的进一步研究和应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料

植物乳植杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*) YC 保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心,保藏编号为 CGMCC 25306。

MRS 肉汤培养基,天津市江天化工技术股份有限公司;脱脂乳粉,湖南栢望三立食品有限公司;植物乳植杆菌发酵剂 YO-MIX 883 LYO,丹麦丹尼斯克公司。

PB-10 型 pH 计,赛多利斯公司;MARS 60 型旋转流变仪,德国哈克公司;TA-XT 型质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;1260 infinity II 型高效液相色谱仪,安捷伦科技有限公司;ICS5000+离子色谱仪,赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 植物乳植杆菌 YC 胞外多糖的提取

将 3% 植物乳植杆菌 YC 接种于 MRS 肉汤培养基中,37℃培养 24 h 进行活化,添加 80% 三氯乙酸溶液至发酵液(终质量分数 4%),4℃静置过夜;4℃、10 000 r/min 离心 30 min 除去蛋白质,取上清液,旋转蒸发至原体积的 1/4 后,加入 3 倍体积的无水乙醇,4℃静置醇沉过夜;4℃、10 000 r/min 离心

20 min, 沉淀用超纯水溶解, 在 8 000 ~ 14 000 透析袋中透析 48 h, 每 8 h 换水一次, 冷冻干燥, 即得植物乳植杆菌 YC 胞外多糖 (*Lactiplantibacillus plantarum* YC exopolysaccharides, LPE)^[15-16]。

1.2.2 化学组成含量测定

采用苯酚-硫酸法^[17]测定总糖含量, 采用考马斯亮蓝法^[18]测定蛋白质含量, 采用硫酸-咔唑法^[19]测定糖醛酸含量。

1.2.3 扫描电子显微镜观察

通过扫描电子显微镜 (SEM) 分别对 LPE 的表面结构和形态进行观察。

1.2.4 傅里叶变换红外光谱分析

使用溴化钾 (KBr) 压片技术, 将 200 mg KBr 粉末与 2 mg LPE 混合, 并利用压片设备将其制成薄片, 在 400 ~ 4 000 cm^{-1} 波数范围进行扫描。

1.2.5 相对分子质量分布

将相对分子质量分别为 10 000、40 000、70 000、500 000、2 000 000 的葡聚糖标准品 (T-10、T-40、T-70、T-500、T-2000) 和 LPE 各 1.0 mg 溶于 1.0 mL 超纯水中, 取 20 μL 用高效液相色谱仪检测。色谱条件: 检测器为示差检测器 (RID), 流动相为超纯水, 流量为 0.6 mL/min, 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$, RID 35 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.6 单糖组成

取干净色谱瓶, 称取 1.5 mg LPE, 加入 1 mL 2 mol/L 三氟乙酸 (TFA) 溶液, 121 $^{\circ}\text{C}$ 加热 2 h; 通氮气, 吹干, 加入 99.99% 甲醇清洗, 再吹干, 重复甲醇清洗 2 ~ 3 次; 加入超纯水溶解, 转入色谱瓶中待测。

称取岩藻糖 (Fuc)、鼠李糖 (Rha)、阿拉伯糖 (Ara)、半乳糖 (Gal)、葡萄糖 (Glc)、木糖 (Xyl)、甘露糖 (Man)、果糖 (Fru)、核糖 (Rib)、半乳糖醛酸 (Gal-UA)、葡萄糖醛酸 (Gul-UA)、甘露糖醛酸 (Glc-UA)、古罗糖醛酸 (Man-UA) 这 13 种单糖标准品各 10 mg, 溶于 1 mL 水中, 各取 500 μL 加水配制成 50 $\mu\text{g/mL}$ 的标准品混标, 用离子色谱仪进行测定。

色谱条件: 液相色谱柱为 DionexTMCarboPacTM PA20 (150 $\times$ 3.0 mm, 10 μm); 进样量为 5 μL ; 流动相 A 为 H_2O , 流动相 B 为 0.1 mol/L NaOH 溶液, 流动相 C 为 0.1 mol/L NaOH 与 0.2 mol/L CH_3COONa 混合溶液; 流量为 0.5 mL/min; 柱温为 30 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.7 发酵乳的制备

分别添加 0.1%、0.5%、1% 的 LPE 到 12% 脱脂乳中, 60 ~ 70 $^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 10 min; 20 000 r/min 剪切 2 min, 反复剪切 3 次, 对均质后的脱脂乳进行灭菌处

理。分别接种各试样组发酵剂 (接种量为 3%), 发酵剂组成: 唾液链球菌嗜热亚种和德氏乳杆菌保加利亚亚种。将接种后的脱脂乳放置在 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中发酵, 以凝乳的形成作为发酵终点的判定。将已凝乳的发酵乳置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中冷藏, 从后熟 12 h 起记为第 0 天^[20-21]。

1.2.8 发酵乳指标的测定

在冷藏的第 0、3、6、9、12 天, 对发酵乳的 pH、持水力、活菌数、质构特性、流变特性指标进行测定。

采用数显 pH 计测定发酵乳的 pH。

发酵过程中活菌数变化的测定参考 GB 4789.35—2023^[22]进行操作。

持水力的测定: 取发酵乳样品 10.0 g, 10 $^{\circ}\text{C}$ 、10 000 r/min 离心 30 min 后弃去上清液, 称量沉淀的质量。按照式 (1) 计算持水力 (w_{water})。

$$w_{\text{water}} = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_0 为离心管质量, m_1 为离心管和发酵乳的总质量, m_2 为离心后沉淀和离心管总质量。

使用质构仪对发酵乳进行质构特性测定, 参数设置: 圆柱形探头, 直径为 45 mm, 测试距离为 20 mm, 测试速度为 2 mm/s, 触发力为 5 g。测定发酵乳的稠度、硬度和内聚性 3 个指标。

发酵乳剪切性能的测定: 使用旋转流变仪测定发酵乳的剪切指标, 托盘型号为 P35 mm, 夹具型号为 P35TiL, 剪切速率为 0.1 ~ 100 s^{-1} , 温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

发酵乳频率扫描: 使用旋转流变仪测定发酵乳的频率, 托盘型号为 P35 mm, 夹具型号为 P35TiL, 频率范围为 0.1 ~ 100 s^{-1} , 温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

感官评价: 参照 GB 19302—2010^[23] 的评价标准, 随机邀请 20 名测评员对冷藏 0、3、6、9、12 d 发酵乳的口感、色泽、气味、滋味、组织状态进行评分^[24-25]。发酵乳的感官评价标准见表 1。

表 1 发酵乳感官评价标准

Tab. 1 Sensory evaluation criteria of fermented milk

项目	评价标准	评分
口感	入口绵密顺滑, 浓稠度适中	15 ~ 20
	入口较为绵密顺滑, 浓稠度一般	10 ~ <15
	口感不够绵密顺滑, 较浓或较稀	5 ~ <10
	口感粗糙, 过浓或过稀	0 ~ <5
色泽	颜色均匀, 呈乳白色	15 ~ 20
	色泽较为均一, 呈乳白色	10 ~ <15
	色泽不够均一, 颜色较为暗沉	5 ~ <10
	色泽发灰发黄或呈现其他异常颜色	0 ~ <5

续表

项目	评价标准	评分
气味	口感纯正,带有酸奶独特的香气	15~20
	奶味较为纯正,稍有酸奶独特的芳香	10~<15
	奶味不太纯正,酸奶香味较淡	5~<10
	无酸奶香气	0~<5
滋味	滋味浓郁香醇,酸甜适中	15~20
	滋味较为浓郁香醇,酸甜适中	10~<15
	偏酸或偏甜	5~<10
	过酸或过甜	0~<5
组织	凝乳均匀细腻,无气泡,无乳清析出	15~20
	凝乳较为均匀,有少量气泡伴随轻微乳清析出	10~<15
	凝乳不均匀,有明显气泡伴随大量乳清析出	5~<10
状态	凝乳不良,有大量气泡,乳清析出严重	0~<5

1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据处理,结果以“平均值±标准差”表示,*表示组间差异显著($P<0.05$),**表示组间差异极显著($P<0.01$)。

2 结果与分析

2.1 LPE 的理化性质

2.1.1 LPE 的化学组成

LPE 的总糖含量为 $(67.94 \pm 2.94)\%$,蛋白质含量为 $(1.24 \pm 0.12)\%$,糖醛酸含量为 $(9.72 \pm 1.21)\%$ 。这表明 LPE 是一种纯度较高并且含有少量蛋白质的酸性多糖。

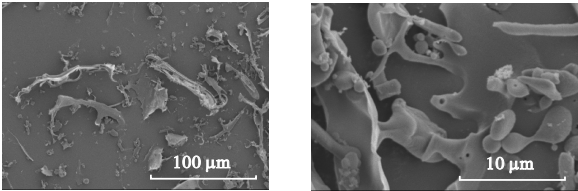
2.1.2 扫描电子显微镜观察

采用扫描电子显微镜观察 LPE 表面形貌特征(图 1),LPE 表面呈现不规则碎片状,放大 5 000 倍观察,可见其表面粗糙且暗淡,呈现分支多孔的网状结构,推测 LPE 可能有较好的吸湿性。

2.1.3 LPE 的傅里叶变换红外光谱分析

傅里叶变换红外光谱扫描结果如图 2 所示。在 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围内观察到典型的多糖吸收峰模式。在 $3\,361.56\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个宽峰,代表羟基—OH 的伸缩振动峰,表明样品中存在大量羟基。在 $2\,932.89\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个吸收峰,代表饱和的 C—H 键的对称伸缩振动峰。在 $1\,651.46\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个吸收峰,代表脂肪族 C=C 的伸缩振动峰,可能与苯环的共轭作用有关。在 $1\,544.29\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个弱吸收峰,由 N—H 的弯曲振动引起。在 $1\,450.81\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个吸收峰,代表 C=H 键的弯曲振动峰。在 $1\,074.59\text{ cm}^{-1}$ 处观察到 1 个吸收峰,由羧酸 C—O 的伸缩振动引起的。 614 cm^{-1} 处的吸收

峰为醇 COH 的面外弯曲振动引起的。这些吸收峰的观察结果提供了关于样品中不同官能团的信息,有助于对样品的化学成分进行分析和鉴定。



(a) 放大 500 倍 (b) 放大 5000 倍

图 1 LPE 的扫描电子显微镜图

Fig. 1 Scanning electron microscope image of LPE

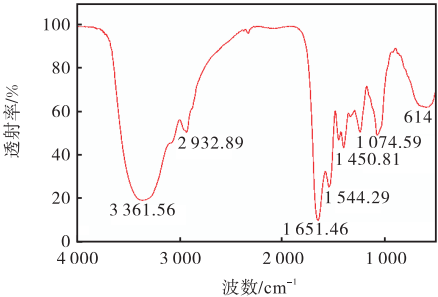


图 2 LPE 的傅里叶变换红外光谱扫描

Fig. 2 Fourier transform infrared spectrum scanning of LPE

2.1.4 LPE 的相对分子质量分布和单糖组成

依据标准曲线 $y = -0.371\,3x + 9.579$, $R^2 = 0.991\,1$, 计算得到 LPE 的相对分子质量为 1.09×10^6 。

LPE 的单糖组成分析结果见表 2。

表 2 LPE 的单糖组成分析

Tab. 2 Analysis of monosaccharide composition of LPE

单糖名称	单糖组成百分比/%	单糖组成摩尔质量比/%
Fuc	1.19	1.29
Rha	8.35	9.04
Ara	2.28	2.70
Gal	16.61	16.38
Glc	22.78	22.46
Xyl	0.00	0.00
Man	31.01	30.58
Fru	0.00	0.00
Rib	4.32	5.11
Gal-UA	2.22	2.03
Gul-UA	0.00	0.00
Glc-UA	11.25	10.29
Man-UA	0.00	0.00

由表 2 可知,LPE 主要含有的 3 种单糖分别为半乳糖、葡萄糖、甘露糖,摩尔质量比为 $16.38 : 22.78 : 31.01$,表明 LPE 是以甘露糖、葡萄糖和半乳糖为主的酸性杂多糖。此前有报道称植物乳植杆菌合成的

EPS 多为杂多糖(HePS), 只有少数是同多糖(HoPS), 而 HePS 通常以葡萄糖、半乳糖、甘露糖为主要的单糖组分^[26], 与本文研究结果一致。

2.2 LPE对发酵乳加工特性的影响

2.2.1 不同 LPE 添加量对发酵乳 pH 的影响

LPE 对发酵乳储藏过程中 pH 的影响如图 3 所示。在整个冷藏过程中, 各组发酵乳的 pH 整体呈下降趋势。对照组的 pH 从 4.65 下降到 4.25, 而实验组的 pH 从 4.60 下降到 4.20。可以看出, 对照组的 pH 始终高于实验组的 pH, 表明添加 LPE 可以有效降低发酵乳的 pH。Du 等^[27]发现, 较低的 pH 有助于抑制酸奶中有害细菌的生长, 延缓产品的变质。

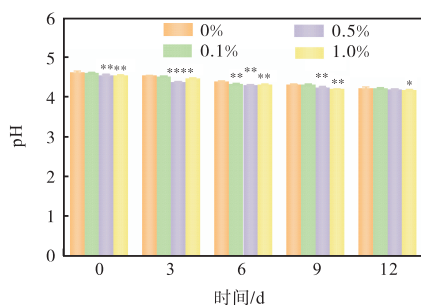


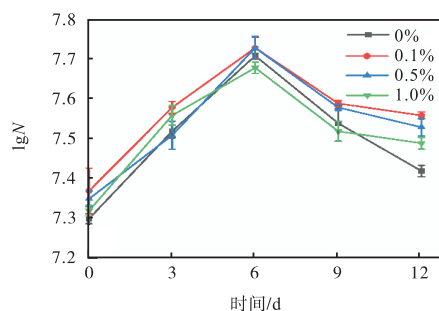
图 3 LPE对发酵乳储藏过程中 pH 的影响

Fig. 3 Effect of LPE on pH during storage of fermented milk

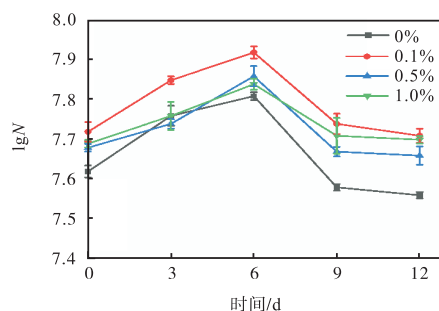
2.2.2 发酵过程中活菌数的变化

发酵乳中的活菌数为 N , 单位为 CFU/mL。LPE 对发酵乳储藏过程中活菌数的影响如图 4 所示。在冷藏期间, 德氏乳杆菌保加利亚亚种和唾液链球菌嗜热亚种的活菌数均呈现先升高后降低的趋势, 且在第 6 天时达到最高值。在前 9 天各组的德氏乳杆菌保加利亚亚种数均无明显差异, 表示各组的活菌数保持相对稳定。在第 12 天时, 对照组的活菌数下降 3.76%, 而实验组的下降则趋于平缓, 0.1%、0.5%、1.0% 组分别下降了 2.20%、2.59%、2.86%。各组的唾液链球菌嗜热亚种活菌数则相对差异较大, 其中 0.1% 组的唾液链球菌嗜热亚种活菌数最高, 相对于菌数达到最高的第 6 天, 在第 12 天时 0.1% 组下降了 2.65%, 0.5% 组和 1.0% 组整体变化趋势差异不大, 相对于第 6 天分别下降了 2.54% 和 1.79%, 而对照组下降则最为明显, 相较于第 6 天下降了 3.20%, 表明添加一定量的 LPE 可以增加发酵乳中的德氏乳杆菌保加利亚亚种和唾液链球菌嗜热亚种活菌数, 其中以 0.1% 的用量最为明显。这可能是由于适量的 LPE 能够促进乳酸菌更好地利用发酵乳中的营养物质, 而在贮藏 9 d 后活菌数逐渐减少可能由于随着发酵期的延长, pH 下

降, 不利于乳酸菌的生长。乳酸菌能够更好地改善胃肠道的菌群环境, 从而有效抑制腐败微生物的生长。LPE 可以作为一种潜在的益生元, 促进发酵乳中乳酸菌的生长, 增强发酵乳的益生元特性。



(a) 德氏乳杆菌保加利亚亚种



(b) 唾液链球菌嗜热亚种

图 4 LPE对发酵乳储藏过程中活菌数的影响

Fig. 4 Effect of LPE on live bacteria count during storage of fermented milk

2.2.3 不同 LPE 添加量对发酵乳持水力的影响

发酵乳的持水力是指蛋白质凝胶网络持水的能力。持水力是衡量发酵乳质量的一个重要指标, 如果持水力弱, 很可能会引起乳清沉淀。LPE 对发酵乳储藏过程中持水力的影响如图 5 所示。

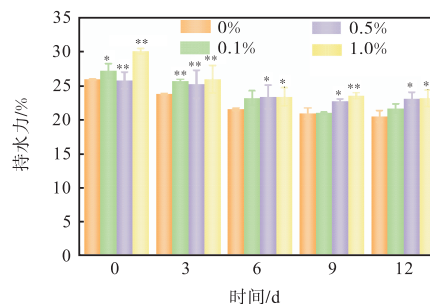


图 5 LPE对发酵乳储藏过程中持水力的影响

Fig. 5 Effect of LPE on the water retention during storage of fermented milk

由图 5 可知, 各组发酵乳的持水力都呈现下降趋势, 而实验组的持水能力均高于对照组。这表明 LPE 的加入提高了发酵乳的持水力, 减少了乳清沉淀, 限

制了发酵乳的脱水和收缩,从而提高了发酵乳的稳定性。

2.2.4 不同 LPE 添加量对发酵乳质构特性的影响

LPE 对发酵乳储藏过程中质构特性的影响如图 6 所示。对照组和实验组的稠度、硬度和内聚性在前 3 d 均大幅下降,此后均趋于稳定。在起始时间 0%组的稠度最低,而 0.5%组的稠度最高,可能是由于适量

添加 LPE 能增加发酵乳的稠度,而随着时间的延长,对照组相对实验组的下降趋势较为缓慢,其中 0.5%组的稠度变化最大,下降了 43.02%,可能是由于发酵后期乳清大量析出。在这 12 d 内对照组的硬度均大于实验组,植物乳植杆菌发酵剂的加入可能会导致发酵乳变软^[28]。1.0%组的内聚性变化最小,而其他组的差异均不明显。

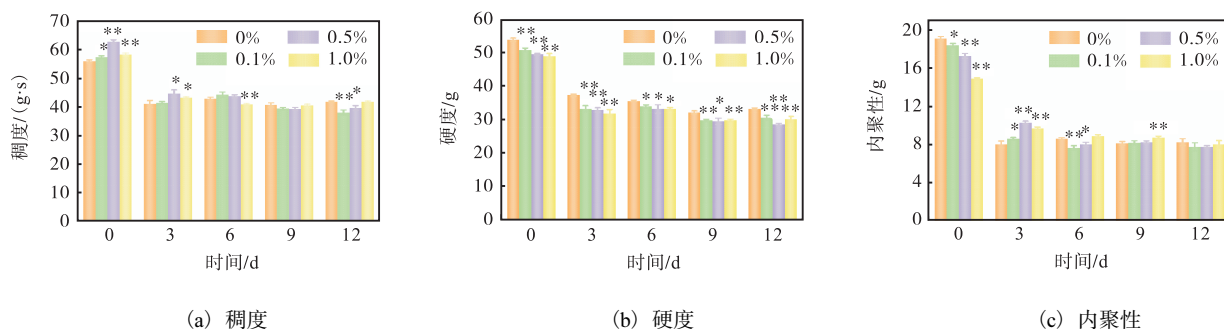


图 6 LPE对发酵乳储藏过程中质构特性的影响

Fig. 6 Effect of LPE on the texture properties of fermented milk during storage

2.2.5 不同 LPE 添加量对发酵乳流变特性的影响

发酵乳储藏过程中黏度随剪切力的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,各组的黏度均随着剪切速率的增加而减小,而且黏度均随着 LPE 添加量的增多而增大,1.0%组的始终最高,表明发酵乳的黏度与

LPE 的添加量有关,0%组和 0.1%组的差别始终不大,储藏 6 d 和 12 d 时均低于对照组。Hassan 等^[29]的研究表明,低浓度的多糖与酪蛋白形成的网络结构不够牢固,会影响其黏度。冷藏后期各组的黏度均有所下降,可能是由冷藏过程中酸度的升高所致^[30-31]。

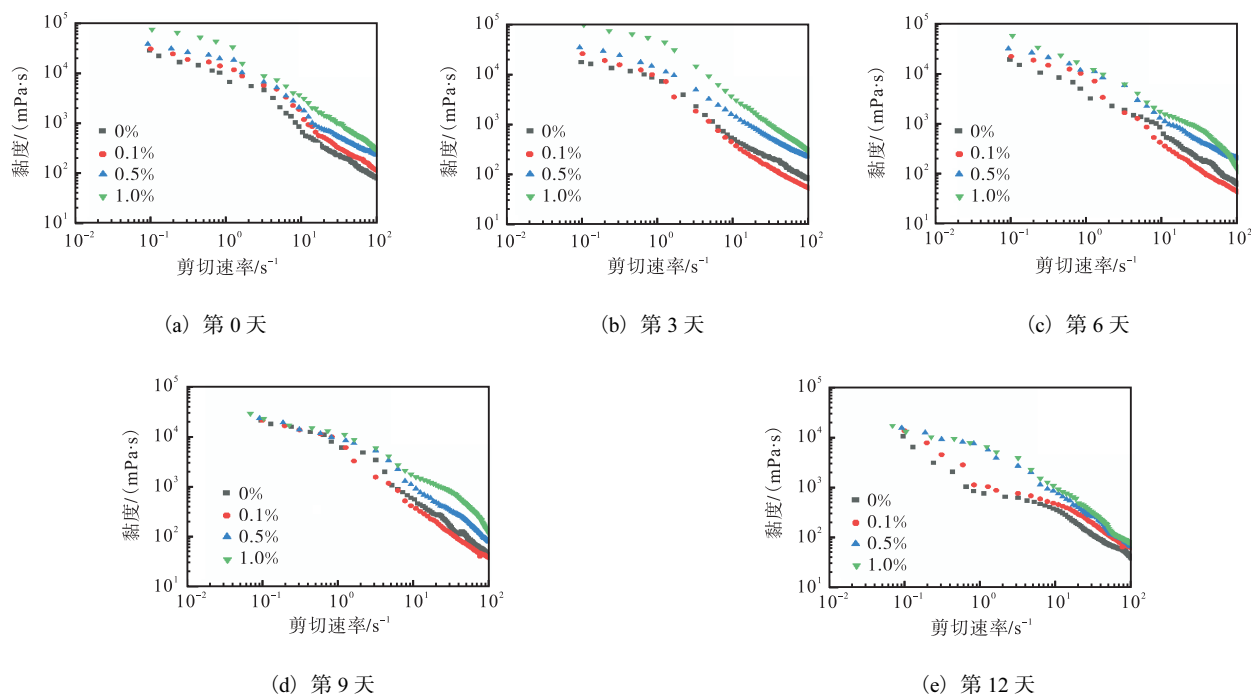


图 7 发酵乳储藏过程中黏度随剪切力的变化曲线

Fig. 7 Curve of viscosity change with shear force during storage of fermented milk

LPE 对发酵乳储藏过程中频率的影响如图 8 所示。各组的 G' 和 G'' 值都随着扫描频率的增加而增

大,且与对照组相比,实验组的值始终更高,而 G' 值始终大于 G'' ,这表明了发酵乳的弹性大于黏性,呈现

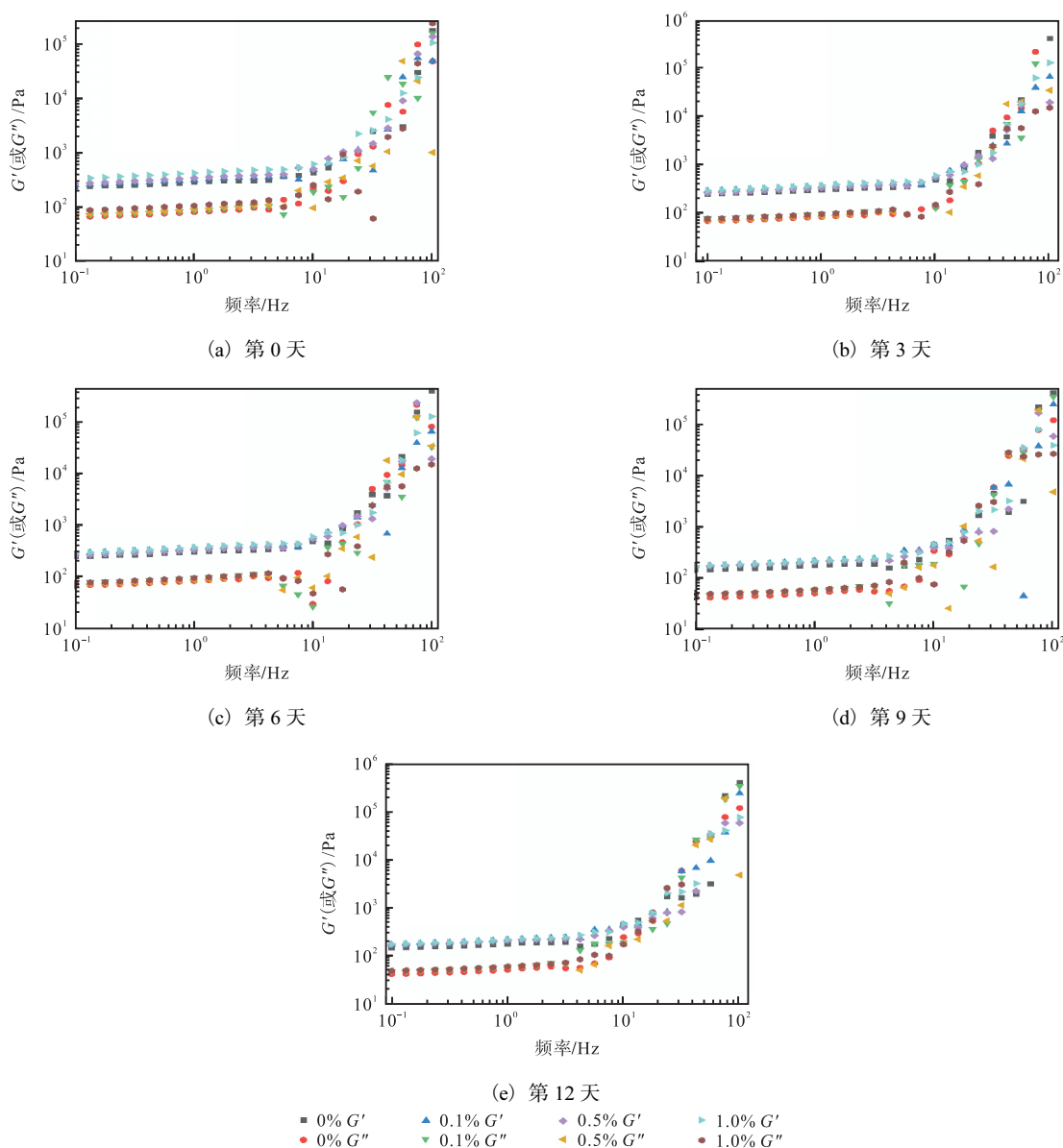


图 8 LPE 对发酵乳储藏过程中频率的影响

Fig. 8 Effect of LPE on frequency of fermented milk during storage

固体特性。储藏过程中实验组的值均高于对照组, 表明在发酵乳中添加 LPE 可以有效增加发酵乳的黏弹性。在第 3 天时 G' 和 G'' 的值最高, 在发酵后期逐渐下降, 这可能是由于发酵后期酸度上升及乳清的大量析出导致发酵乳黏弹性降低。

2.2.6 不同 LPE 添加量对发酵乳感官评价的影响

LPE 对发酵乳储藏过程中感官品质的影响如图 9 所示。由图 9 可知, 对照组的评分显著低于实验组, 表明添加 LPE 后的发酵乳口感更好, 其中 0.5% 组评分最高, 表明适量添加 LPE 可以增加发酵乳的口感, LPE 添加量增加到 1% 则会降低发酵乳的风味。虽然乳酸菌的 EPS 大多是无味的, 但是它确实

延长了奶制品在口中停留的时间, 从而增强了味觉感受^[32]。

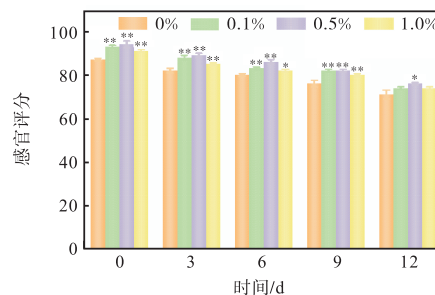


图 9 LPE 对发酵乳储藏过程中感官品质的影响

Fig. 9 Effects of LPE on sensory quality of fermented milk during storage

3 结 论

通过测定 LPE 的理化性质可知, LPE 的总糖含量为 67.94%, 蛋白质含量为 1.24%, 糖醛酸含量为 9.72%, 表面呈分支多孔的网状结构。LPE 的相对分子质量为 1.01×10^6 , 主要由半乳糖、葡萄糖、甘露糖按摩尔质量比 16.38 : 22.78 : 31.01 组成。

在发酵乳发酵和冷藏过程中, 添加 LPE 可以有效降低发酵乳的 pH, 并且可以有效改善发酵乳的持水能力, 从而提高发酵乳的稳定性。添加 0.1% LPE 可以增加发酵乳中的德氏乳杆菌保加利亚亚种和唾液链球菌嗜热亚种的活菌数。添加适量的 LPE 可以降低发酵乳的硬度, 增加发酵乳的稠度, 而对内聚性的影响不大。在发酵乳中添加一定量的 LPE 可以有效增加发酵乳的黏弹性, 并且可以使其与酪蛋白形成的网络结构更加紧密, 而添加 0.5% LPE 则有利于改善发酵乳的口感。本研究为发酵乳的加工和胞外多糖的应用提供了参考。

参考文献:

- [1] KOWSALYA M, SUDHA K G, ALI S, et al. Sustainability and controlled release behavior of microencapsulated *Lactobacillus plantarum* PRK7 and its application in probiotic yogurt production[J]. Food bioscience, 2023, 52: 102430.
- [2] HICKISCH A, BEER R, VOGEL R F, et al. Influence of lupin-based milk alternative heat treatment and exopolysaccharide-producing lactic acid bacteria on the physical characteristics of lupin-based yogurt alternatives[J]. Food research international, 2016, 84: 180–188.
- [3] YILMAZ T, ŞİMŞEK Ö. Potential health benefits of ropy exopolysaccharides produced by *Lactobacillus plantarum*[J]. Molecules, 2020, 25 (14) : 3293.
- [4] CHEN X, LIU G, ZHAO L, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* X7022 ameliorates loperamide-induced constipation and modulates gut microbiota in mice[J]. Food bioengineering, 2022, 1 (3/4) : 252–263.
- [5] SUN H, WARREN J, YIP J, et al. Factors influencing gallstone formation: a review of the literature[J]. Biomolecules, 2022, 12 (4) : 550.
- [6] CAO F, DING Q, ZHUGE H, et al. *Lactobacillus plantarum* ZJUIDS14 alleviates non-alcoholic fatty liver disease in mice in association with modulation in the gut microbiota[J]. Frontiers in nutrition, 2023, 9: 1071284.
- [7] XU Y, ZHANG W, ZHU M, et al. *Lactobacillus plantarum* GMNL-662 and *Lactobacillus plantarum* 299v prevent osteoporosis in mice with colitis by down-regulating *Akkermansia* in the gut microbiome[J]. Journal of functional foods, 2022, 99: 105328.
- [8] ISMAEL M, GU Y, CUI Y, et al. Probiotic of *Lactiplantibacillus plantarum* NWAUFU-BIO-BS29 isolated from Chinese traditional fermented milk and its potential therapeutic applications based on gut microbiota regulation[J]. Foods, 2022, 11 (23) : 3766.
- [9] LIU G, KHAN I, LI Y, et al. Overcoming anxiety disorder by probiotic *Lactiplantibacillus plantarum* LZU-J-TSL6 through regulating intestinal homeostasis[J]. Foods, 2022, 11 (22) : 3596.
- [10] BENGGOA A A, DARDIS C, GAGLIARINI N, et al. Exopolysaccharides from *Lactobacillus paracasei* isolated from kefir as potential bioactive compounds for microbiota modulation[J]. Frontiers in microbiology, 2020, 11: 583254.
- [11] BIBI A, XIONG Y A, RAJOKA M S, et al. Recent advances in the production of exopolysaccharide (EPS) from *Lactobacillus* spp. and its application in the food industry: a review[J]. Sustainability, 2021, 13 (22) : 12429.
- [12] LI J Y, MENG J, GAO S M, et al. Exopolysaccharide from *Lactobacillus plantarum* LP6: antioxidation and the effect on oxidative stress[J]. Carbohydrate polymers, 2013, 98 (1) : 1147–1152.
- [13] WANG J, WU T, FANG X, et al. Characterization and immunomodulatory activity of an exopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* JLK0142 isolated from fermented dairy tofu[J]. International journal of biological macromolecules, 2018, 115: 985–993.
- [14] 李贞景, 柴沛含, 刘欢欢, 等. 一株能降解尿酸的植物乳植杆菌、益生菌组合物及其应用: 115786187A[P]. 2023–03–14.
- [15] 赖田甜, 赵华, 姚梦柯, 等. 植物乳植杆菌 NMGL2 胞外多糖对其生长特征及发酵乳加工特性的影响[J]. 中国酿造, 2022, 41 (2) : 113–118.
- [16] CROWLEY S, MAHONY J, VAN SINDEREN D. Comparative analysis of two antifungal *Lactobacillus plantarum* isolates and their application as bioprotectants in refrigerated foods[J]. Journal of applied microbiology, 2012, 113 (6) : 1417–1427.

- [17] DUBIOS M, GILLES K A, HAMILTON J K, et al. Colorimetric method for determination of sugar and related substances[J]. Analytical chemistry, 1956, 28: 250–256.
- [18] BARBOSA H, SLATER N K H, MARCOS J C. Protein quantification in the presence of poly(ethylene glycol) and dextran using the Bradford method[J]. Analytical biochemistry, 2009, 395(1): 108–110.
- [19] BITTER T, MUIR H M. A modified uronic acid carbazole reaction[J]. Analytical biochemistry, 1962, 4(4): 330–334.
- [20] 蔡森, 郝晓娜, 罗天淇, 等. 植物乳植杆菌 YW11 胞外多糖对酸乳加工特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 39–45.
- [21] 孙盛, 陈作国, 俞赞霞, 等. 产胞外多糖植物乳植杆菌 WHH589 的免疫活性及其在发酵乳中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 43–50.
- [22] 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. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [23] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 发酵乳: GB 19302—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [24] 王艺会, 蔡森, 张敏, 等. 添加酪蛋白水解肽改善酸乳的加工特性[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 34–41.
- [25] 王雪杭, 李瑞东, 蒋云龙, 等. 植物乳植杆菌胞外多糖协同鱼明胶改善低脂酸奶品质特性[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 73–81.
- [26] SAIF F A A, SAKR E A E. Characterization and bioactivities of exopolysaccharide produced from probiotic *Lactobacillus plantarum* 47FE and *Lactobacillus pentosus* 68FE[J]. Bioactive carbohydrates and dietary fibre, 2020, 24: 100231.
- [27] DU H, WANG X, YANG H, et al. Effects of mulberry pomace polysaccharide addition before fermentation on quality characteristics of yogurt[J]. Food control, 2023, 153: 109900.
- [28] YANG T, WU K, WANG F, et al. Effect of exopolysaccharides from lactic acid bacteria on the texture and microstructure of buffalo yoghurt[J]. International dairy journal, 2014, 34(2): 252–256.
- [29] HASSAN A N, IPSEN R, JANZEN T, et al. Microstructure and rheology of yogurt made with cultures differing only in their ability to produce exopolysaccharides[J]. Journal of dairy science, 2003, 86(5): 1632–1638.
- [30] WANG J, ZHAO X, TIAN Z, et al. Characterization of an xopolysaccharide produced by *Lactobacillus plantarum* YW11 isolated from Tibet Kefir[J]. Carbohydrate polymers, 2015, 125: 16–25.
- [31] URSHEV Z L, DIMITROV Z P, FATCHIKOVA N S, et al. Partial characterization and dynamics of synthesis of high molecular mass exopolysaccharides from *Streptococcus thermophilus*[J]. World journal of microbiology and biotechnology, 2008, 24(2): 171–179.
- [32] OLIVEIRA M N, SODINI I, REMEUF F, et al. Effect of milk supplementation and culture composition on acidification, textural properties and microbiological stability of fermented milks containing probiotic bacteria[J]. International dairy journal, 2001, 11(11/12): 935–942.

责任编辑: 郎婧