郝燕萍, 刘振民, 张欢畅, 等. 副干酪乳酪杆菌对发酵乳储藏稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 381−391. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120201

HAO Yanping, LIU Zhenmin, ZHANG Huanchang, et al. Effect of *Lacticaseibacillus paracasei* on the Storage Stability of Fermented Milk[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 381−391. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120201

· 贮运保鲜 ·

副干酪乳酪杆菌对发酵乳储藏稳定性的影响

郝燕萍[1,2], 刘振民[1,*], 张欢畅[1], 马松林[1,2], 吴正钧[1], 韩　瑨[1]

（1.光明乳业研究院, 上海乳业生物工程技术研究中心, 乳业生物技术国家重点实验室, 上海 201103;
2.上海海洋大学 食品学院, 上海 201306）

摘　要: 为探究五株副干酪乳酪杆菌对发酵乳稳定性的影响，通过不同菌种所作发酵乳的乳清析出率、流变、质构、Zeta 电位、粒径及 Lumisizer 分析确定储藏期间稳定性的变化。结果表明，储藏期副干酪乳酪杆菌 BDII 的乳清析出率最低，1 d 时为 24.62%，4 d 时为 29.44%，7 d 时为 28.73%，而 J4 乳清析出率最高，1 d 时为 43.75%，4 d 时为 42.55%，7 d 时为 38.55%。副干酪乳酪杆菌 BDII 显著改善了发酵乳的流变特性和质构特性，尤其在黏度、硬度方面，BDII 发酵乳储藏期间储能模量和损耗模量变化趋势同 J4、STI-13 均较缓慢，BDII 储能模量由 67.20 Pa 提高至 88.80 Pa，损耗模量由 23.60 Pa 提高至 42.90 Pa；硬度由 68.00 g·sec 提高至 85.00 g·sec，黏度由 127.00 g·sec 提高至 145.00 g·sec。此外，BDII 发酵乳的 Zeta 电位值随储藏时间变化逐渐增加且期间变化趋势最小，仅增加了 2.50 mV；BDII 发酵乳粒径变化与 J17 趋势一致，稳定性相同；Lumisizer 分析发现 BDII 发酵乳乳清析出量最小，透光率最低，具有最佳稳定性。总之，不同菌种所作发酵乳具有不同的稳定性，其中副干酪乳酪杆菌 BDII 发酵乳质地均匀细腻，储藏稳定性最佳，为发酵乳稳定性的研究提供了新的参考。

关键词: 发酵乳, 质地, 储藏, 稳定性, 副干酪乳酪杆菌

中图分类号: TS252.54　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0381−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120201　　本文网刊:

Effect of *Lacticaseibacillus paracasei* on the Storage Stability of Fermented Milk

HAO Yanping[1,2], LIU Zhenmin[1,*], ZHANG Huanchang[1], MA Songlin[1,2], WU Zhengjun[1], HAN Jin[1]

（1.Bright Dairy Research Institute, Shanghai Dairy Bioengineering Technology Research Centre, State Key Laboratory of Dairy Biotechnology, Shanghai 201103, China;
2.School of Food Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China）

Abstract: To investigate the effect of five strains of *Lacticaseibacillus paracasei* on the stability of fermented milk, the changes in stability during storage were determined by whey precipitation rate, rheology, texture, Zeta potential, particle size and Lumisizer analysis of fermented milk made by different strains. The results showed that *Lacticaseibacillus paracasei* BDII had the lowest whey precipitation rate during storage, 24.62% at 1 d, 29.44% at 4 d, and 28.73% at 7 d, and then J4 exhibited the highest whey precipitation rate, reaching 43.75% at 1 d, 42.55% at 4 d, and 38.55% at 7 d. *Lacticaseibacillus paracasei* BDII significantly improved the rheological and textural properties of fermented milk, the storage modulus and loss modulus of BDII fermented milk during the storage period showed the same trend as those of J4, STI-13, which were slower, while the storage modulus of BDII increased from 67.20 to 88.80 Pa, and the loss modulus increased from 23.60 to 42.90 Pa. The hardness of BDII fermented milk increased from 68.00 to 85.00 g·sec, the viscosity increased from 127.00 to 145.00 g·sec. In addition, the Zeta potential of BDII fermented milk increased gradually with the storage time and the trend was the smallest during the period, which only increased by 2.50 mV. The particle size of BDII

收稿日期: 2024−12−17

基金项目: 市国资委企业创新发展和能级提升项目（2022013）。

作者简介: 郝燕萍（1997−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 乳品科学与技术, E-mail: hypfairy@163.com。

*** 通信作者:** 刘振民（1974−）, 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 乳品研究与开发, E-mail: liuzhenmin@brightdairy.com。

fermented milk had the same trend as that of J17, the same stability. Lumisizer analysis revealed that BDII fermented milk had the smallest amount of whey precipitated, the lowest light transmission rate, and the best stability. In conclusion, the fermented milk made by different strains has different stability, among which *Lacticaseibacillus paracasei* BDII fermented milk has a uniform and delicate texture and the best storage stability. These results provide a new reference for the study of the stability of fermented milk.

Key words: fermented milk; texture; storage; stability; *Lacticaseibacillus paracasei*

发酵乳的品质、风味与稳定性紧密相关,是吸引消费者的关键因素,这些因素很大程度上受发酵菌种的影响[1]。目前市场上的产品常用保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌发酵制作酸奶,而副干酪乳酪杆菌因具益生特性常作为复配菌株,单独探究副干酪乳酪杆菌发酵特性的文献较少。纯益生菌发酵可以保证食品的营养价值,同时赋予食品益生菌效应,改善其功能特性,如:改善肠道菌群,降低血脂水平,预防癌症,增强免疫力,提高抗氧化能力等[2−4]。此外,副干酪乳酪杆菌作为中温菌具有较强的产香和产酸潜力。

目前,益生菌发酵多侧重于探究非发酵型益生菌乳的理化特性、感官特性及益生菌活菌数[5−6],潜在益生菌发酵乳发酵剂的筛选[7],益生菌发酵乳的代谢[8],小型反刍动物益生菌发酵乳的理化特性[9],益生菌发酵豆乳饮料、益生菌发酵活性乳饮料等[10−11]。JANG 等[5] 和 OLIVEIRA 等[6] 都制作了非发酵型益生菌奶并探究其理化特性;JANG 等[5] 将植物乳杆菌和鼠李糖乳酪杆菌加入到巴氏杀菌乳中,观察到 14 d 冷藏期间益生菌对乳的成分和感官特性无影响,抗氧化能力提高;OLIVEIRA 等[6] 将嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、鼠李糖乳酪杆菌、双歧杆菌加入到牛乳中,发现仅嗜酸乳杆菌表现出良好的感官品质。NAMI 等[7] 基于益生特性和功能性从 44 株乳酸杆菌中筛选出 4 株菌(植物乳杆菌、干酪乳杆菌和短乳杆菌),这些菌株可作为乳制品的主要发酵剂,提高乳制品的质量和保健功能。SUN 等[8] 使用副干酪乳酪杆菌 PC-01 和青春双歧杆菌 B8589 混合发酵制作发酵乳,通过 LC-MS 分析发现与单独发酵相比混合发酵增强了发酵乳的益生菌功能,如 γ-氨基丁酸和短链脂肪酸的水平。PINTO 等[9] 探究添加和不添加菊粉的双歧杆菌和嗜酸乳杆菌共培养羊乳制作发酵乳的工艺和理化特性,发现添加菊粉的发酵乳中共轭亚油酸和游离脂肪酸含量更高。副干酪乳酪杆菌 PC646 发酵乳饮料在检测其风味变化时发现益生菌可赋予发酵乳较好的感官特性和贮藏稳定性[10]。副干酪乳酪杆菌 PC-01 和青春双歧杆菌 B8589 混合制作活性乳酸菌饮料并探究其理化及代谢特性,发现其具有较好的货架期稳定性和潜在的健康属性[11]。综上,鲜有研究探究副干酪乳酪杆菌作为唯一益生菌制作发酵乳并研究其储藏期间稳定性的。

课题组前期通过对本实验的五株副干酪乳酪杆菌进行表型分析发现菌株具有较好的蛋白酶活力。蛋白酶活力与质地软化密切相关,当蛋白酶活力较高时可有效分解蛋白(如:乳清蛋白和酪蛋白),从而使质地更加细腻柔软,稳定性更佳[12]。为了探究副干酪乳酪杆菌对发酵乳的质地的影响,分别追踪了菌株在发酵及储藏期间 pH、滴定酸度的变化,并重点对 7 d 储藏期间的乳清析出率、流变、质构、Zeta 电位、粒径进行监测,以确定发酵乳储藏期间的稳定性变化。本文采用多种手段对不同发酵剂作用下发酵乳的稳定性变化进行详细分析,进一步丰富发酵乳发酵剂种类,为纯益生菌发酵的发酵乳提供理论数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

副干酪乳酪杆菌 J4、J8、J15、J17　健康婴儿粪便,光明乳业研究院菌种库−80 ℃ 保存;副干酪乳酪杆菌 BDII　国产酸马奶,光明乳业研究院菌种库−80 ℃ 保存;商业发酵株嗜热链球菌 STI-13　丹麦科汉森股份有限公司;鲜乳　光明乳业股份有限公司;氢氧化钠标准滴定液、酚酞试剂　国药化学试剂有限公司。

恒温水浴锅　GFL 公司;5810R 低温高速离心机　上海安谱实验科技股份有限公司;TA-XT plus 质构分析仪　英国 Stable Micro Systems;Bioscreen C 全自动生长曲线分析仪　芬兰 Oy Growth Curves 公司;MCR302 动态流变仪　奥地利 Anton Paar 公司;Nano-ZS 90 Zeta 电位粒径仪、MS 3000 激光粒径仪　英国马尔文仪器有限公司;Lumisizer 稳定性分析仪　罗姆(江苏)仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　副干酪乳酪杆菌生长曲线　参考高雅茹等[13] 的方法,于 MRS 平板复苏保存在−80 ℃ 冰箱的副干酪乳酪杆菌,复苏后 37 ℃ 连续培养 2 代并于第 3 代时挑取单菌落接种于 MRS 肉汤中,取 300 μL 于生长曲线微孔板,使用全自动生长曲线分析仪连续监测 30 h,记录 OD_{600} 值。

1.2.2　发酵乳的制作　a.预热,称取一定量的鲜乳,将优倍乳预热至 40~50 ℃;b.配料,添加 7% 的白砂糖;c.均质,500 r/min 均匀搅拌 5 min 至白砂糖全部溶解;d.巴杀,将乳加热至 90 ℃ 灭菌 5 min;e.冷却,将灭菌乳冷却至 40 ℃ 接种;f.接种,将母发酵剂嗜热链球菌和副干酪乳酪杆菌 J4、J8、J5、J17、BDII(培养 12 h 后)均以 0.3% 的接种量分别接种于牛奶中,混合均匀后放入 37 ℃ 培养箱中发酵;g.后熟,酸奶

发酵结束后，放入 4 ℃ 冰箱中后熟 12 h。期间 STI-13 发酵乳取发酵 0、1、3、5 h 及储藏 1、4、7 d 的样品留作备用，J4、J8、J15、J17 发酵乳取 0、6、12、14、16、18 h 及储藏 1、4、7 d 的样品留作备用，BDII 发酵乳取发酵 0、6、12、14 h 及储藏 1、4、7 d 的样品留作备用。

1.2.3　发酵乳 pH 与滴定酸度的测定　取 10 g 发酵乳样品于 50 mL 离心管，使用 pH 计测定。滴定酸度参考 GB 5009.239-2016《食品酸度的测定》中酚酞指示剂法。

1.2.4　乳清析出率检测　参考吴悦等[14] 的方法，取 10 g 发酵乳样品，10000 r/min 离心 10 min，吸取上清液并称重。

$$乳清析出率(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

式中：m_1 表示发酵乳重量，g；m_2 表示乳清重量，g。

1.2.5　流变性能检测　参考 ALEMAN 等[15] 和罗园等[16] 的方法，取储藏 1 d 的发酵乳样品在 25 ℃ 下用动态流变仪测定动态黏弹性。测试参数：采用 CC27-SN27450 号转子及 CC27-SS23848 号模具，剪切速率范围为 0.1~100 s^{-1}。

取储藏期发酵乳样品在 25 ℃ 下用动态流变仪进行流变学测定。测试参数：采用 CC27-SN27450 号转子及 CC27-SS23848 号模具，以 5% 的应变进行频率扫描，扫描范围为 0.1~10 Hz。记录储能模量(G')、损耗模量(G")。

1.2.6　质构特性分析　取储藏 1、4、7 d 的 30 mL 样品进行质构测定。参考梅琴琴等[17] 的方法，选择 A/BE-d35 压力盘，参数设置为：触发力为 5 g，测试前探头行进速率为 2 mm/s，测试中探头行进速率为 2 mm/s，探头回程的行进速率为 6 mm/s，下压距离为 10 mm。

1.2.7　Zeta 电位和粒径分析　参考罗园等[16] 的方法，取适量样品用 Zeta 电位粒度仪 Zeta potential 模式检测 Zeta 电位，平衡时间为 120 s。用水做分散剂，取 9 mL 水稀释 1 mL 发酵乳，混匀后取 1 mL 样品加入 U 型加样器中。

参考罗园等[16] 和薛玉清等[18] 的方法，取适量样品使用激光粒度仪测定粒径，参数设置：1000 r/min，25 ℃，发酵乳折射率 1.52，吸收率 0.01，水的折射率为 1.33，测试时间为 10 s，遮光度 0.1%~20%。

1.2.8　Lumisizer 稳定性分析　参考薛玉清等[18] 的方法，取适量样品使用 Lumisizer6121-31 进行发酵乳的稳定性分析，参数设置：25 ℃ 1800 r/min 下 10 s/条测试 180 条谱线。

1.3　数据处理

每组实验至少重复 3 次。统计学数据统一使用 IBM SPSS Statistics26 进行单因素 ANOVA 分析伴随 Duncan 多重比较，其中 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。采用 Origin2024 进行图形绘制。

2　结果与分析

2.1　副干酪乳酪杆菌生长曲线绘制

细菌的生长曲线反映菌株在适宜条件下随时间动态变化的过程。五株副干酪乳酪杆菌的生长曲线如图 1 所示。J4 于 10~24 h 处对数生长期，25 h 左右进入稳定期。J8 在 10~20 h 呈对数生长，20 h 后

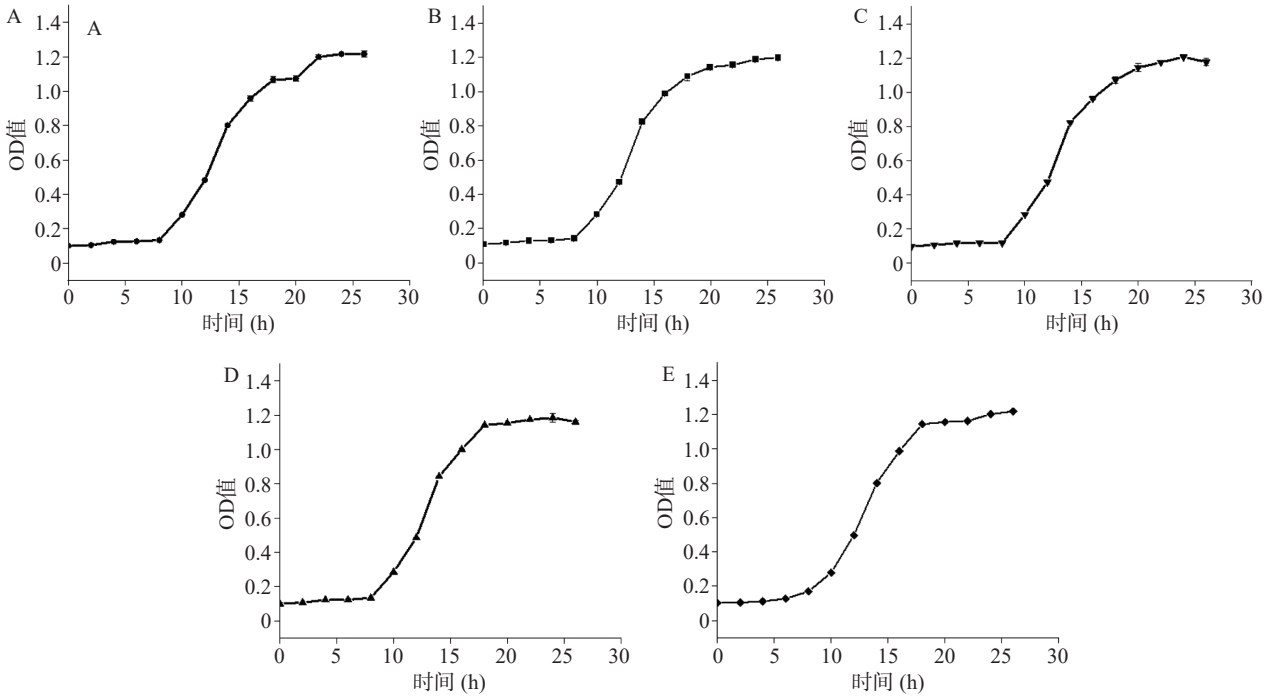


图 1　副干酪乳酪杆菌生长曲线图

Fig.1　Growth curves of *Lacticaseibacillus paracasei*

注：A：J4；B：J8；C：J15；D：J17；E：BDII。

进入稳定期。J15 在 9~20 h 处于对数生长期，20 h 后进入稳定期。J17 在 9~18 h 呈对数生长，18 h 后进入稳定期。BDII 在 9~18 h 处于对数生长期，18 h 后进入稳定期。SHAHBAZ 等[19] 也发现干酪乳杆菌 PUPro3 在 6~24 h 呈对数生长期。因此处于对数生长期的菌株活力最高，可能此时菌株的发酵能力也最强，一般选择此时期的菌株接种发酵。

2.2 pH 和滴定酸度变化分析

2.2.1 发酵期间 pH 和滴定酸度变化分析 pH 和滴定酸度可以反映发酵过程中菌株的代谢情况、指示发酵进程。五株副干酪乳酪杆菌发酵期间 pH 和滴定酸度变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知，六种发酵乳发酵期间 pH 整体呈下降趋势，滴定酸度整体呈上升趋势。由图 2A 可知，根据发酵状态及终点 pH 判断 J4 和 J17 在 18 h 尚未达到发酵终点，J8 和 J15 在 18 h 达到发酵终点，BDII 在 14 h pH 已达发酵终点，而 STI-13 在 5 h 时到达发酵终点。由图 2B 可知，J8、J15 在 18 h 时，滴定酸度为 75.00°T；BDII 在 14 h、STI-13 在 5 h 时，滴定酸度达到 70.00°T。BDII 和 STI-13 产酸能力强于 J4、J8、J15、J17，因此不同菌株发酵过程中产酸能力不同，导致 pH 和滴定酸度到达发酵终点的时间不同[20]。菌株发酵过程中代谢产物积累会导致发酵乳 pH 的变化，使得不同乳酸菌体现出不同的产酸能力[21−22]。BDII 发酵需 14 h，STI-13 发酵仅需 5 h，BDII 和 STI-13 产酸能力强，因此缩短了发酵时间、提高了发酵速率。

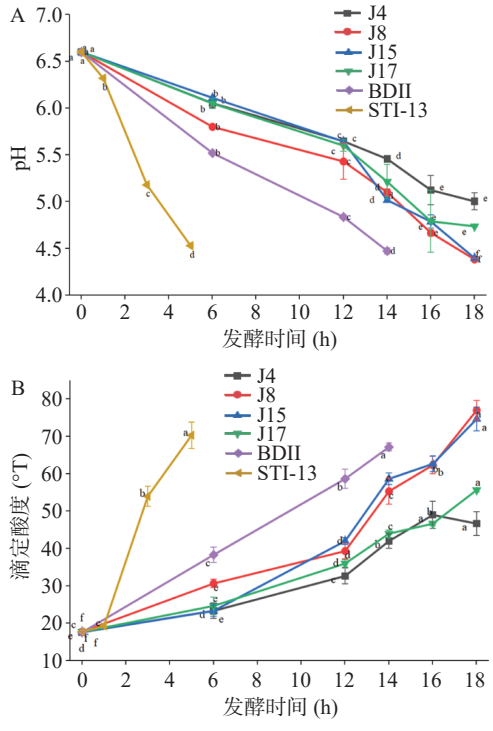


图 2 发酵期间不同发酵乳 pH 和滴定酸度变化

Fig.2 Changes in pH and titratable acidity of different fermented milk during fermentation

注：不同的小写字母表示组内具有显著性差异（P<0.05）。

2.2.2 储藏期间 pH 和滴定酸度变化分析 储藏过程中 pH 和滴定酸度的变化可以反馈发酵乳微生物的代谢活动状态以及酸性代谢物的积累和消耗情况。储藏期间发酵乳 pH 和滴定酸度的变化如图 3 所示。整体来看，发酵乳 pH 由 4.50 降至 3.60，滴定酸度由 80.00°T 增加至 180.00°T，pH 整体呈下降趋势，滴定酸度整体呈上升趋势。由图 3A 可知，J4 和 J17 储藏期间 pH 变化幅度较大，J4 的 pH 由 4.45 降至 3.75，J17 的 pH 由 4.10 降至 3.70，特别是 J4，可能是 J4 发酵乳在储藏期间发酵剂菌体仍在生长，分解剩余的乳糖产生乳酸所致[23]；J8、J15、BDII 储藏期间 pH 变化幅度相似，呈下降趋势，BDII 和 J8 的 pH 较低；STI-13 在储存期间 pH 变化较缓慢，由 4.20 降至 4.00。由图 3B 可知，J4 和 STI-13 储藏期间滴定酸度变化趋势相近，J8、J15、J17、BDII 储藏期间滴定酸度变化趋势相近。因此，副干酪乳酪杆菌代谢活性高，发酵乳在储藏期间酸性物质变化明显；该工艺较好的控制发酵乳的酸度变化，未出现后酸化现象[24]。

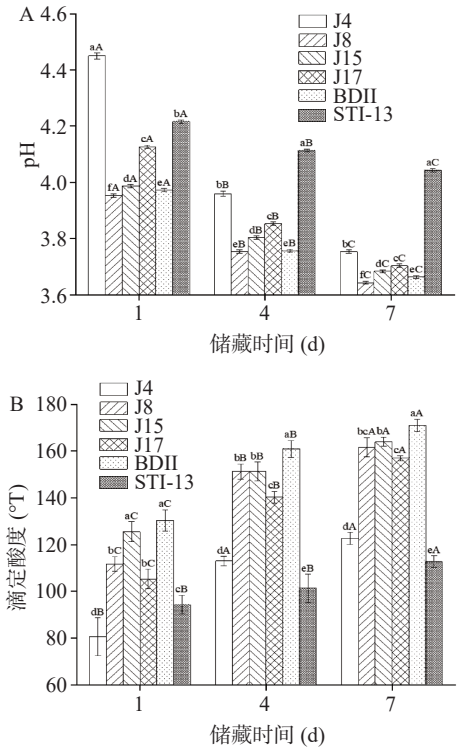


图 3 储藏期间不同发酵乳 pH 和滴定酸度变化

Fig.3 Changes in pH and titratable acidity of different fermented milk during storage

注：不同的小写字母表示组间具有显著性差异（P<0.05）；不同的大写字母表示组内具有显著性差异（P<0.05）；图 4 同。

2.3 发酵乳乳清析出率变化分析

乳清析出率和离心沉淀率的变化是产品开发和贮藏时需要考虑的重要因素，其反映凝胶保留液体成分的能力，与发酵乳的稳定性有关，间接影响消费者的满意度。一般地凝胶结构的弱化会使蛋白质分子发生重排，使得网络结构对水分束缚能力下降，导致

乳清析出的现象[25]。由图 4 可知，不同发酵乳储藏期间乳清析出率不同，J4 乳清析出率明显高于其它发酵乳，STI-13 乳清析出率次之，J8、J15、J17、BDII 的乳清析出率变化不显著，但 BDII 发酵乳的乳清析出率相对略低；对 BDII 发酵乳，第 1 d 低于第 4 d 和第 7 d，第 4 d 和第 7 d 则差异不显著。一般乳清析出率越低发酵乳析水稳定性越好，BDII 发酵乳乳清析出率显著最低，因此 BDII 发酵乳相对稳定，且随着储藏时间的增加稳定性有差异。其中 J4 乳清析出最多，可能与菌株的产酸速率、胞外多糖的量有关。J4 在储藏过程中 pH 下降最快，可能是 J4 在储藏期间生长迅速，大量利用蛋白，使得酪蛋白结构破坏，引起脱水收缩；也有可能是胞外多糖产生较少或产生多糖较为单一，弱化了其与蛋白络合形成的网络结构的强度[26]。总之，储藏期间各发酵乳的乳清析出率差异显著，其中 BDII 乳清析出率相对较低，1 d 时为 24.62%，4 d 时为 29.44%，7 d 时为 28.73%，而 J4 乳清析出率最高，1 d 时 43.75%，4 d 时为 42.55%，7 d 时为 38.55%，因此 BDII 相较于其它发酵乳析水稳定性最好。

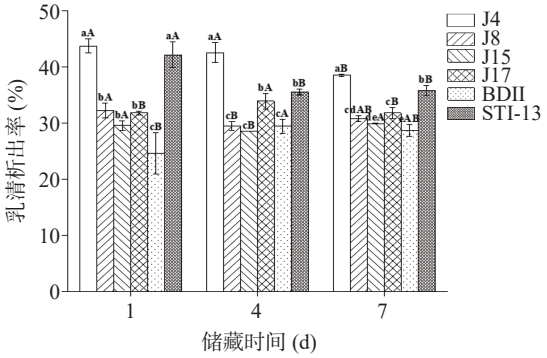


图 4　储藏期间不同发酵乳乳清析出率变化

Fig.4　Changes in whey precipitation rate of different fermented milk during storage

2.4　发酵乳流变学分析

2.4.1　发酵乳表观黏度分析　发酵乳的表观黏度反映样品的稳定性，黏度越大，稳定性越好。由图 5 可知，六种发酵乳在 0.1~100 s^{-1} 的剪切速率范围内表观黏度逐渐降低，呈现剪切稀化现象，表现为假塑性流体特征。剪切变稀的原因可能是发酵乳的分子间和分子内结构被破坏[27]。发酵乳在 100 s^{-1} 时表观黏度变化为 STI-13>BDII>J4>J15>J17>J8；推测出现该种现象的原因是 STI-13 产生的亲水性的多糖较多，多糖这种黏性物质可以增加发酵乳的黏度，使得 STI-13 的表观黏度最高，而 J8 产生的多糖含量低，J8 表观黏度最小[28−29]。因此 STI-13 发酵乳的黏度显著更高，BDII 次之。

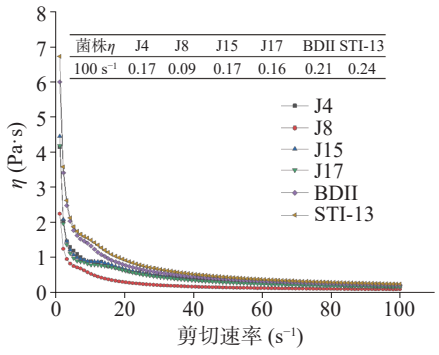


图 5　不同发酵乳表观黏度随剪切速率变化

Fig.5　Changes of apparent viscosity versus shear rate for different fermented milk

注：图中表格是剪切速率为 100 s^{-1} 时的表观黏度。

2.4.2　发酵乳储能模量、损耗模量和 tanθ 分析　食品的流变特性与质地、口感有关，通过流变分析可深入了解食品的组成、内部结构及分子形态。食品的流变可通过储能模量(G')、损耗模量(G")反映，当损耗正切角 tanθ 值(损耗模量与储能模量的比值)处于 0~1，说明储能模量 G'大于损耗模量 G"，表现出弹性行为，意味着材料具有更强的固体性质，与黏度特性相关，尤其是在乳制品的稳定性和口感方面更为理想[30]。

由图 6A~I 可知，储藏期间发酵乳的储能模量随频率的增加而先增大后减小，损耗模量随频率的增加逐渐增大，tanθ 随频率的增加逐渐增大。J4、J8、J15、J17 的储能模量随储藏时间的增加而增大，BDII 和 STI-13 的储能模量随储藏时间的增加呈先减小后增大的趋势；J4 损耗模量随储藏时间的增加呈先减小后增大的趋势，J8、J15、J17 的损耗模量随储藏时间的增加而增大，STI-13 损耗模量随储藏时间的增加呈先减小后增大的趋势，BDII 损耗模量第 1、4 d 相似，第 7 d 增大。因此发酵剂的种类和储藏时间对发酵乳的储能模量和损耗模量有显著影响。发酵乳样品的储能模量大于损耗模量，说明发酵乳具有弹性特性，主要由于其内部结构中的乳蛋白和脂肪相互作用形成的网络结构使得发酵乳在一定条件下能够抵抗变形展现出固体样行为，这种固体样行为符合发酵乳制品的流变行为[31]。储藏 1 d 时 BDII 的曲线(储能模量、损耗模量)高于其它发酵乳，储藏 4 d 时 J8 曲线高于 BDII 等发酵乳，储藏 7 d 时 J8 曲线高于 BDII 等发酵乳。整体而言，BDII、J4 发酵乳储藏期间储能模量和损耗模量变化趋势同 STI-13 均较缓慢，0.1~10 Hz 范围内，BDII 储能模量由 67.20 Pa 提高至 7 d 的 88.80 Pa(变化 21.60 Pa)，损耗模量由 23.60 Pa 提高至 42.90 Pa(变化 19.30 Pa)；STI-13 储能模量由 51.50 Pa 提高至 75.20 Pa(变化 23.70 Pa)，损耗模量由 19.40 Pa 提高至 36.40 Pa(变化 17.00 Pa)；J4 储能模量由 38.00 Pa 提高至 67.40 Pa(变化 29.40 Pa)，损耗模量由 16.30 Pa 提高至 35.90 Pa(变化 19.60 Pa)，其他发酵乳储能模量和损耗模量变化跨度较大，因此 J4、BDII 和 STI-13 发酵乳的流变稳定性较好。J4、BDII 和 STI-13 的储能模量和损耗模量变化趋势相似，可能是因为在储藏期间酪蛋白重排形成牢固的凝胶网状结构，发酵乳表现

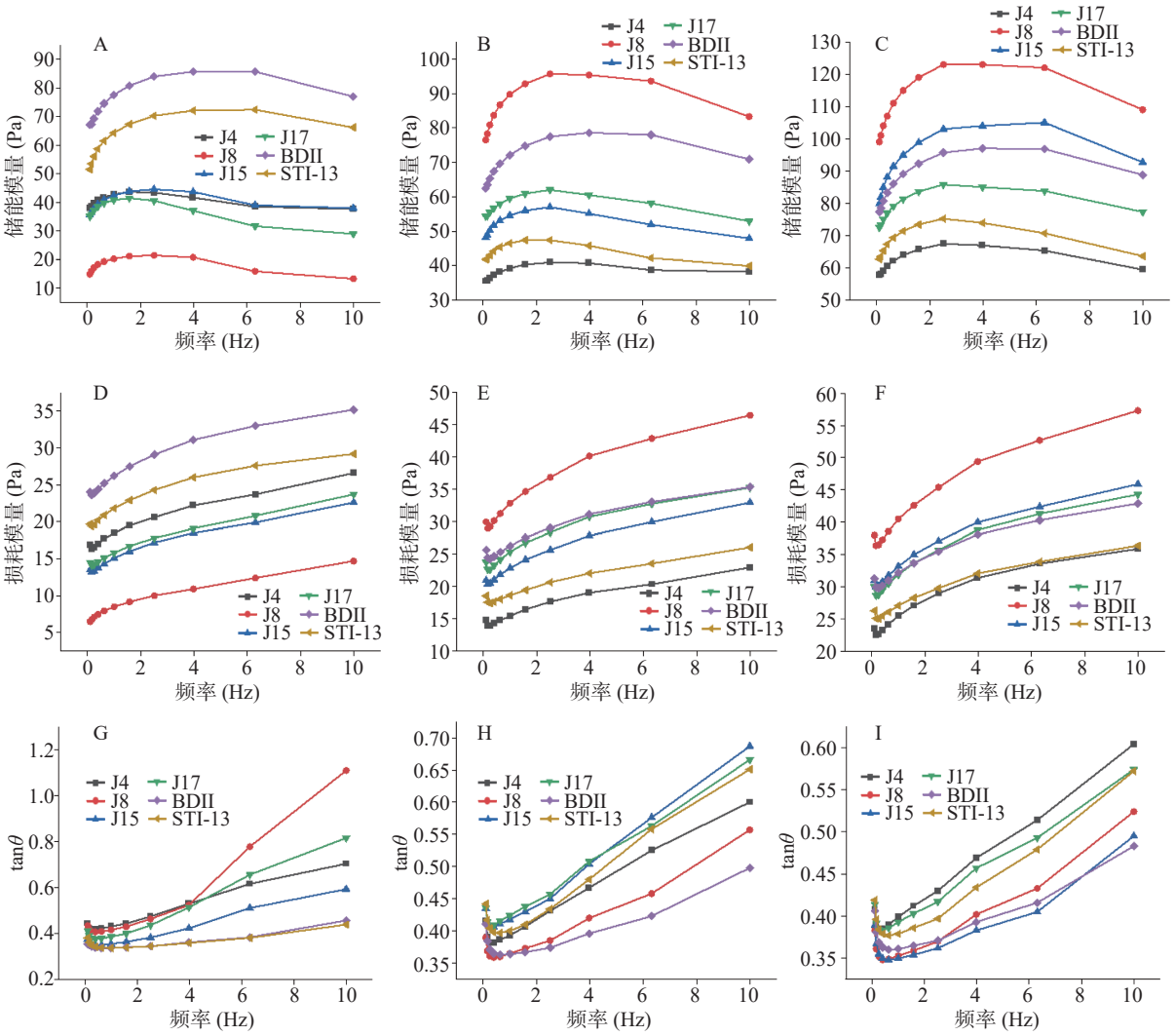


图 6 储藏期间不同发酵乳流变分析结果

Fig.6 Results of the rheological analysis of different fermented milk during the storage period

注: A~C: 储能模量随频率变化图, A: 储藏 1 d; B: 储藏 4 d, C: 储藏 7 d; D~F: 损耗模量随频率变化图, D: 储藏 1 d, E: 储藏 4 d, F: 储藏 7 d; G~I: tanθ 随频率变化图, G: 储藏 1 d, H: 储藏 4 d, I: 储藏 7 d。

为低流动性的高弹性、高黏度的稳定状态[32]。

由图 6G~I 可知, J4、J8、J17 损耗正切角随储藏时间增大而减小, J15 损耗正切角随储藏时间先增大后减小, BDII 损耗正切角随储藏时间呈先增大后减小、总体增大的趋势, STI-13 损耗正切角随储藏时间呈先增大后减小、总体增大的趋势。只有 J8 发酵乳的损耗正切角第 1 d 大于 1, 说明此时损耗模量大于储能模量, 即发酵乳呈现更多液体特性, 稳定性较差; 其它发酵乳 tanθ 处于 0~1 之间, 说明储能模量大于损耗模量, 发酵乳以弹性为主。发酵乳损耗正切角随扫描频率的增加而增大, 因为随扫描频率不断上升, 内部分子开始运动, 克服内部摩擦力需要的功增多, 因此损耗正切角 tanθ 上升[33]。储藏期间 BDII 损耗正切角值变化范围最小(位于 0.34~0.50 之间), 可能意味着发酵乳的组成和结构稳定性较高, 益生菌 BDII 的添加利于发酵乳储藏期间的稳定性形成。因此在稳定性和口感方面 BDII 发酵乳更理想。总之, 储藏期间六种发酵乳弹性模量、黏性模量的增加表明发酵乳均具有牢固的凝胶结构, 但是 BDII 黏度相对较高及储藏期间损耗正切角值最小, 因此 BDII 的稳定性和口感显著优于其它发酵乳。

2.5 发酵乳的质构特性

发酵乳的质构特性通过硬度、稠度、黏聚性、黏度指标反馈。如表 1 所示, 发酵乳的硬度、稠度、黏度及黏聚性这些指标的变化与冷藏储存的时间和发酵剂的种类有关。硬度定义为在第一次压缩过程中记录的最大力值, 反映了形成特定形变所需的力量, 即发酵乳对表面变形的抵抗力; 稠度作为描述发酵乳在搅拌过程中所受阻力大小的参数; 黏度定义为在单次复位循环中探头所受力与时间的比值, 反映了发酵乳的黏着性特征; 黏聚性通过在探头回缩过程中生成的负峰面积来衡量, 代表了发酵乳的结合强度[34]。不同发酵乳在相同储藏期间质构特性不同, 其中第 1 d 和第 4 d 时 BDII 的硬度、黏聚性和黏度大于其它发酵乳, BDII 第 7 d 黏聚性高于其它; 冷藏储存第 7 d 时 J8 的硬度略大于 BDII, 黏度略大于 BDII。不同

表 1　不同发酵乳储藏期间质构变化

Table 1　Changes in texture during storage of different fermented milk

时间(d)	发酵乳	硬度(g·sec)	稠度(g·sec)	黏聚性(g)	黏度(g·sec)
1	J4	27.15±0.54^{eC}	118.99±3.31^{dC}	−16.82±0.36^{aA}	−58.45±2.42^{aB}
	J8	64.36±1.13^{bC}	276.27±12.67^{aB}	−47.79±4.34^{cdA}	−111.88±7.67^{cA}
	J15	56.68±2.95^{cC}	241.53±11.01^{bC}	−43.69±4.12^{cA}	−104.31±2.84^{bcA}
	J17	47.33±1.58^{dB}	198.52±4.93^{cB}	−33.32±1.57^{bA}	−97.30±4.23^{bA}
	BDII	68.19±2.73^{aB}	272.77±8.34^{aC}	−52.02±2.64^{dA}	−126.71±5.08^{dA}
	STI-13	56.79±1.03^{cC}	244.33±6.27^{bB}	−44.27±1.65^{cA}	−111.34±4.07^{cB}
4	J4	31.06±0.99^{dA}	133.72±5.09^{eA}	−18.81±2.23^{aB}	−56.78±6.97^{aA}
	J8	80.81±1.17^{aA}	336.23±13.51^{bA}	−60.77±2.2^{cdB}	−129.93±9.55^{dB}
	J15	71.68±1.32^{bA}	312.05±7.92^{cA}	−57.16±3.20^{cC}	−122.37±7.71^{cdB}
	J17	61.57±4.91^{cA}	262.81±19.55^{dA}	−49.47±4.07^{bB}	−102.86±10.51^{bB}
	BDII	84.95±3.82^{aA}	358.18±12.09^{aA}	−62.52±1.41^{dB}	−144.87±8.88^{eB}
	STI-13	72.51±0.90^{bA}	307.27±7.23^{cA}	−58.63±1.68^{cdC}	−113.40±3.51^{bcB}
7	J4	29.11±4.23^{dB}	129.34±18.70^{dB}	−18.35±4.53^{aB}	−56.28±13.01^{aA}
	J8	77.28±1.63^{aB}	327.87±4.02^{aA}	−56.55±0.64^{cdB}	−132.20±7.61^{cB}
	J15	61.50±0.71^{bcB}	270.47±6.27^{bcB}	−49.84±0.31^{bcB}	−105.07±5.64^{bA}
	J17	57.65±3.24^{cA}	247.30±14.09^{cA}	−44.60±2.78^{bB}	−101.99±5.85^{bB}
	BDII	72.32±4.55^{aB}	308.07±16.83^{aB}	−57.88±4.94^{dAB}	−122.21±8.96^{cA}
	STI-13	64.46±2.98^{bB}	277.24±13.09^{bB}	−50.85±5.17^{bcB}	−107.11±4.35^{bA}

注: 黏聚性和黏度的负号无实际意义, 看绝对值即可。不同的小写字母表示6个样品具有显著性差异(P<0.05), 不同的大写字母表示3个时期具有显著性差异(P<0.05); 表2、表3同。

发酵剂制作的发酵乳质构特性不同, 可能是不同发酵剂产生多糖的能力不同, 进一步改变发酵乳的黏度, BDII 产生多糖较多, 因此储藏前期黏度高, 后期一些物质耗尽致使不得不利用残存多糖, 导致黏度略下降; 推测硬度的下降可能与蛋白代谢有关, 发酵时发酵剂利用蛋白的能力不同, 储藏前期利用能力弱的发酵剂仍在缓慢分解残余蛋白, 因此硬度略升高, 后期利用能力强, 硬度下降, 因此 J8 硬度略大于 BDII[35]。随着储藏时间的变化六种发酵乳硬度、黏度、稠度、黏聚性均呈趋势性变化, 硬度、稠度随储藏时间的增大呈先增大后减小的趋势, 黏聚性随储藏时间的增加呈先增大后略有减小的趋势; 黏聚性代表发酵乳的结合程度, 与乳清析出率相关, 而胞外多糖又具有桥梁的作用, 因此总的来说质构结果的差异可能是由于多糖的分子量、单糖组成和结合方式不同造成的[36]。J4 黏度随储藏时间的变化先减小后趋于稳定, 其它发酵乳的黏度随储藏时间的变化先增大后略有起伏, 其中与第 4 d 相比, 第 7 d 时 J15、BDII、STI-13 的黏度变化显著减小(P<0.05)。因此第 1 d 与第 7 d 相比, 发酵乳的硬度、稠度和黏聚性在储藏期间整体增大, J8 发酵乳的黏度在储藏期间明显增大, 而 J15、J17 发酵乳的黏度在储藏期间整体略有增大且差异不显著。

2.6　发酵乳 Zeta 电位和粒径分析

2.6.1　发酵乳 Zeta 电位分析　Zeta 电位是表征胶体和悬浮液稳定性的重要参数, 通常用于评估凝胶颗粒电荷之间相互作用力。一般来说, 电荷稳定则凝胶稳定, Zeta 电位绝对值大于 30.00 mV 时体系通常被认为具有良好的稳定性, 此时颗粒之间的相互排斥力较强, 能够有效防止凝胶聚沉[37]。

不同发酵乳储藏期间 Zeta 电位变化情况如表 2 所示, 所有发酵乳的 Zeta 电位均为正值, 处于 0~20 mV 之间。刘晋琦等[38] 为探究绿豆发酵乳的稳定性, 对其进行了 Zeta 电位分析, 发现绿豆发酵乳的 Zeta 电位绝对值处于 9.56~16.23 mV, 本实验中 Zeta 电位绝对值与其相差不大, 稳定性相对较优。发酵乳的 Zeta 电位在不同储藏期不同, 储藏 1 d 时 BDII 的 Zeta 电位值相对较高, 储藏 4 d 时 J17 的 Zeta 电位相对较高, BDII 次之; 储藏 7 d 时 J4 的 Zeta 电位值最高(19.07±0.61 mV), J8 最低(15.20±2.50 mV), 其它发酵乳的 Zeta 电位相同, 为 15.90 mV。六种发酵乳的 Zeta 电位值随储藏时间的增加而逐渐增加, 即净电荷增加, 在此期间较大的静电斥力降低了凝胶聚沉的现象, 使发酵乳稳定性提高[39]。此外, 在储藏期间发酵乳 Zeta 电位值变化趋势 J4 最大, J15 和 BDII 的 Zeta 电位值变化趋势较小, J15 仅增加了 2.70 mV, BDII 仅增加了 2.50 mV, 与其它发酵乳相比 BDII 发酵乳在储藏期间 Zeta 电位是稳定变化的, 说明 BDII 发酵乳凝胶颗粒表面电荷相对稳定, 冷藏储存对 BDII 的品质和稳定性影响最小。

表 2　不同储藏期发酵乳 Zeta 电位变化(mV)

Table 2　Changes in Zeta potential of fermented milk during different storage periods (mV)

发酵乳	1 d	4 d	7 d
J4	0.11±0.05^{dC}	1.86±0.47^{dB}	19.07±0.61^{aA}
J8	12.47±1.23^{aB}	12.80±1.80^{bB}	15.20±2.50^{bA}
J15	13.27±0.67^{aB}	13.43±0.40^{bB}	15.90±0.20^{bA}
J17	10.53±0.59^{bB}	15.43±0.83^{aA}	15.90±0.21^{bA}
BDII	13.47±1.22^{aA}	14.30±0.70^{abA}	15.90±0.22^{bA}
STI-13	7.30±0.88^{cB}	8.34±0.42^{cB}	15.90±0.23^{bA}

2.6.2 发酵乳粒径分析 不同发酵乳储藏期间粒径分布见图 7 和表 3。如图 7A 所示，储藏 1 d 时 J4 和 J15 发酵乳的粒径呈双峰集中分布于 200~3000 μm 之间，其它发酵乳呈单峰集中分布于 200~1500 μm 之间；如图 7B 所示，储藏 4 d 时，J4、J8 和 J15 发酵乳粒径呈单峰集中分布于 200~1300 μm 之间，J17、BDII、STI-13 发酵乳粒径呈双峰集中分布于 0~500 μm 之间；如图 7C 所示，储藏 7 d 时，发酵乳的粒径均呈双峰分布，粒径多集中分布于 0~800 μm 之间；因此六种发酵乳的粒径随储藏时间的增加而减小，粒径越小，发酵乳分布越均匀，沉降速度越慢，稳定性越好。发酵乳粒径呈双峰分布，说明凝胶颗粒大小不均一，可能是随着储藏时间的增加凝胶间蛋白相互作用聚集导致[1]。

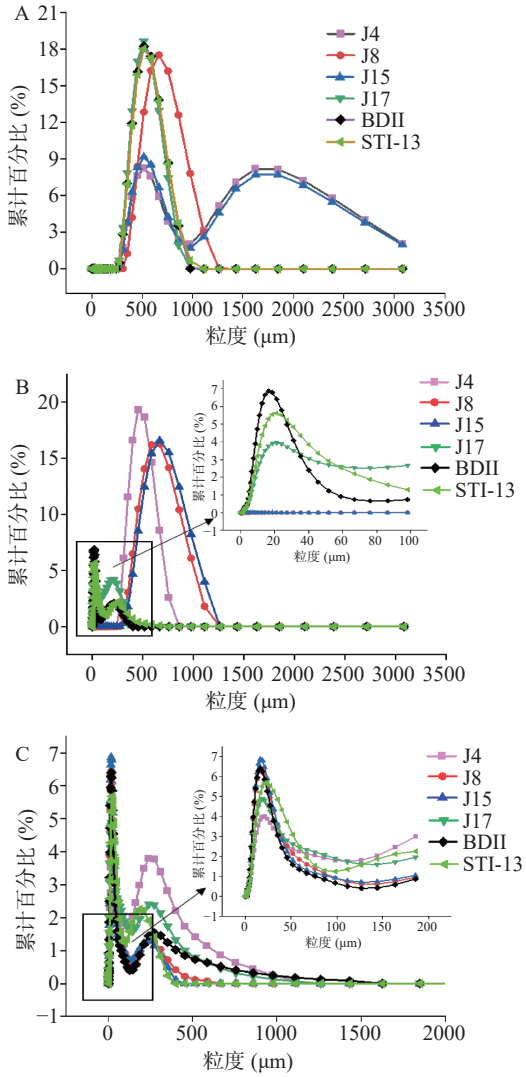


图 7 储藏期间发酵乳的粒径变化

Fig.7 Changes in particle size of fermented milk during storage

注：A：1 d；B：4 d；C：7 d。

发酵乳中的球形颗粒可以用直径描述大小，非球形颗粒可用不同的粒径参数表征。发酵乳粒径大小表征参数 D(10)、D(50)、D(90)及 D[4,3]、D[3,2]在储藏期间变化情况，如表 3 所示。D[4,3]、D(10)

表 3 不同储藏期发酵乳的粒径变化

Table 3 Changes in particle size of fermented milk at different storage periods

表征参数	发酵乳	1 d	4 d	7 d
D(10) (μm)	J4	439.11±1.66^{aA}	359.46±0.79^{cB}	11.27±0.04^{aC}
	J8	426.33±52.98^{abcA}	451.24±2.94^{bA}	7.93±0.06^{eB}
	J15	435.62±2.67^{abB}	466.66±10.89^{aA}	8.13±0.02^{dC}
	J17	384.35±2.41^{cA}	10.94±0.15^{dB}	9.62±0.18^{bB}
	BDII	393.54±6.64^{bcA}	8.10±0.01^{dB}	7.81±0.01^{eB}
	STI-13	408.41±13.51^{abcA}	9.51±0.05^{dB}	9.43±0.02^{cB}
D(50) (μm)	J4	1160.77±14.00^{aA}	497.30±1.51^{cB}	50.59±0.39^{aC}
	J8	603.32±85.37^{cA}	660.73±3.93^{bA}	20.81±0.37^{dB}
	J15	897.76±59.15^{bA}	681.53±26.70^{aB}	20.21±0.08^{dC}
	J17	541.99±3.09^{cA}	48.70±2.63^{dB}	30.69±1.57^{bC}
	BDII	554.67±8.97^{cA}	20.33±0.04^{eB}	20.54±0.05^{dB}
	STI-13	597.09±47.01^{cA}	28.08±0.18^{eB}	27.68±0.41^{cB}
D(90) (μm)	J4	2487.85±2.17^{aA}	677.45±2.83^{bB}	382.01±3.79^{aC}
	J8	836.44±133.34^{bA}	953.40±5.03^{aA}	111.86±24.01^{dB}
	J15	2448.62±11.68^{aA}	977.61±48.66^{aB}	107.71±6.68^{dC}
	J17	747.96±3.71^{bA}	252.50±14.51^{cB}	246.94±38.61^{bB}
	BDII	771.81±17.88^{bA}	174.90±2.40^{dC}	280.70±19.18^{bB}
	STI-13	1187.21±661.30^{bA}	218.43±5.29^{cB}	170.73±4.91^{cB}
D[4,3] (μm)	J4	1304.66±4.64^{aA}	509.15±1.55^{bB}	141.77±1.79^{aC}
	J8	618.97±89.93^{bA}	682.97±3.97^{aA}	48.08±5.76^{cB}
	J15	1246.95±17.65^{aA}	702.74±28.93^{aB}	44.03±0.80^{cC}
	J17	555.74±3.26^{bA}	96.52±6.48^{cB}	81.70±14.13^{bB}
	BDII	569.62±9.79^{bA}	50.14±0.13^{dC}	86.55±6.62^{bB}
	STI-13	691.19±179.59^{bA}	67.80±1.70^{cB}	56.17±1.41^{cB}
D[3,2] (μm)	J4	850.95±4.58^{aA}	481.70±1.40^{cB}	27.42±0.09^{aC}
	J8	581.35±80.87^{bA}	631.77±3.57^{bA}	15.87±0.26^{dB}
	J15	813.20±12.70^{aA}	651.95±23.68^{aB}	15.91±0.06^{dC}
	J17	522.72±3.00^{bA}	26.10±0.59^{dB}	21.19±0.68^{bC}
	BDII	534.88±8.59^{bA}	15.86±0.03^{dB}	15.83±0.08^{dB}
	STI-13	587.30±66.27^{bA}	20.05±0.11^{dB}	19.73±0.17^{cB}

表征发酵乳中小颗粒粒径的参数，D[3,2]、D(90)表征发酵乳中大颗粒粒径的参数，D(50)为粒径分布中间值，是表示粒度大小的典型值[31]。发酵乳粒径变化参数 D(10)、D(50)、D(90)及 D[4,3]、D[3,2] 随储藏时间的增加显著减小；相同储藏期间不同发酵乳粒径在不同参数间变化相差较大的是 J4、J8、J15、STI-13，BDII 和 J17 的粒径变化差异相近，说明发酵剂对发酵乳的粒径影响较大，进而影响其稳定性。表 3 的粒径变化情况与图 7 相符。整个储藏过程中就 D(50)而言，J4 的粒径变化最大，颗粒大小最不均一，最不稳定；J17、BDII 与 STI-13 的粒径变化小且储藏至第 4 d 时趋于稳定，颗粒大小均一，稳定性相对较好；出现这种现象的原因可能是在 1~4 d 储藏期间 J4 发酵乳的发酵剂仍在利用蛋白发酵，使得蛋白结构发生变化，可能会改变凝胶结构，使得凝胶颗粒分布不均匀；同时发酵产生的酸性物质使 pH 下降过快，引起脱水收缩，降低了持水能力，增加流动性，促进析出乳清，从而使稳定性下降[40]。总之，BDII 和 J17 粒径变化趋势一致，大小相近，稳定性较其它发酵乳更优。

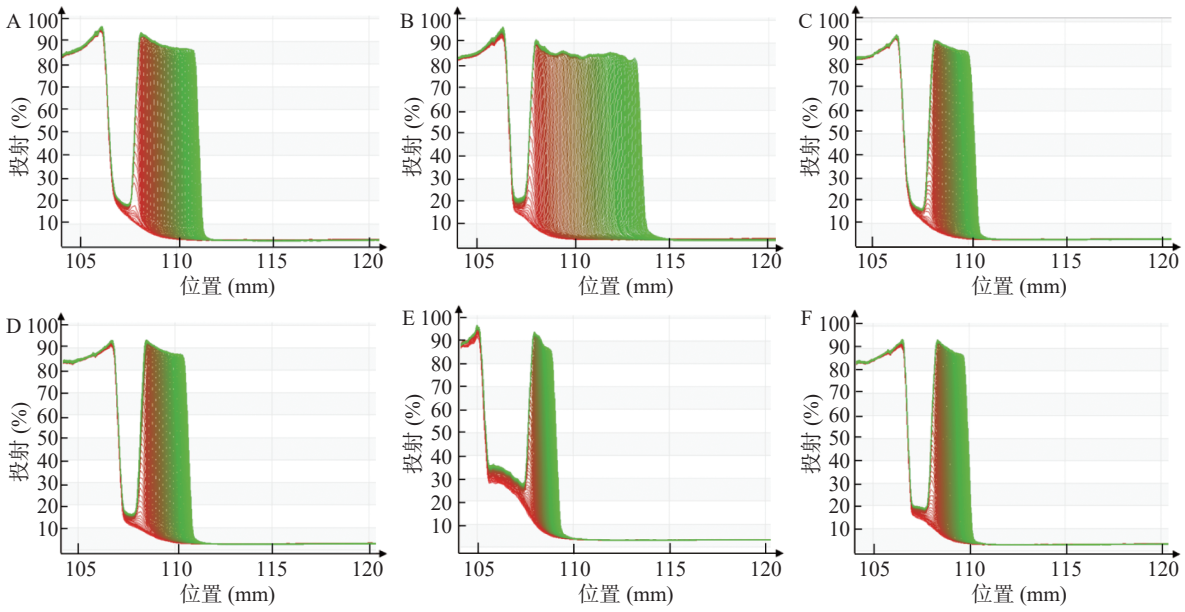


图 8　不同发酵乳样品透光率图谱

Fig.8　Transmittance profiles of different fermented milk samples

注：A：J4；B：J8；C：J15；D：J17；E：BDII；F：STI-13。

2.7　发酵乳稳定性分析

Lumisizer 稳定性分析仪通过离心力的作用和光学系统的显示可实时监测发酵乳的乳清与凝胶结合的稳定性情况，分析结果主要通过透光率图谱、澄清指数及不稳定指数呈现[18,41]。不同发酵乳 Lumisizer 检测结果如图 8，该曲线图为透光率图谱，横轴从左至右代表离心管中样品的透光率情况，有光谱处为乳清析出量，无光谱处为凝胶沉淀量。不同发酵乳的透光率不同，J8 的乳清析出量大于 J4，J15 和 J17 乳清析出量次之，BDII 的乳清析出量最小，透光率最小，稳定性最高。不同发酵乳稳定性分析过程中不稳定指数结果如图 9，不稳定指数越大，体系越不稳定，凝胶与乳清越容易分离，反之则越稳定。不稳定指数显示，J8>J4>J17>J15>STI-13>BDII，J8 发酵乳乳清析出最严重，J4 次之，BDII 最稳定，与图 8 透光率图谱结果一致。J4 的乳清析出率最大，乳清析出多，因此透光率高，不稳定性高；而 J8 的乳清析出率变化与 Lumisizer 分析结果存在差异可能是乳清析出率作为传统判断产品稳定性的指标会有偏差，另外流变分析中 J8 发酵乳的表观黏度最低，因此其不稳定指数最大[42]。总之，透光率图谱和不稳定指数均反映 BDII 的凝胶沉降量最小，透光率较高，稳定性更佳。

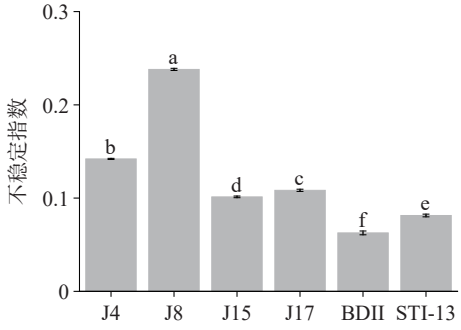


图 9　不同发酵乳样品的不稳定指数

Fig.9　Instability index of different fermented milk samples

注：不同的小写字母表示样品之间具有显著性差异（P<0.05）。

3　结论

本研究就副干酪乳酪杆菌发酵乳的稳定性展开探讨，通过追踪菌株在发酵和储藏期间多项指标的变化发现：BDII 的乳清析出率最低，J4 乳清析出率最高；BDII 显著改善了发酵乳的流变特性和质构特性，储藏期间 BDII 发酵乳的 Zeta 电位值稳定变化且趋势最小、粒径变化与 J17 趋势一致、乳清析出量最小且透光率最低，具有最佳稳定性。因此 BDII 的综合性能最强，商业前景较好。与商业发酵剂嗜热链球菌相比，副干酪乳酪杆菌产酸能力偏弱，发酵时间相对较长，但是副干酪乳酪杆菌所需发酵温度低；与中温发酵剂相比，副干酪乳酪杆菌的发酵时间较短、效率高，因此副干酪乳酪杆菌 BDII 可作为有潜力的发酵菌株应用。此外本研究存在两点不足，其一是未对发酵乳的结构稳定性进行分析，其二是发酵剂的添加量未进行优化，因此后续可针对发酵乳的结构稳定性进行详细探究以了解影响发酵乳储藏稳定性内部因素以及可通过优化发酵剂 BDII 的添加量缩短发酵时间，提高工业效率。

© 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] NGUYEN H T H, GOMES REIS M, WA Y H, et al. Differences in aroma metabolite profile, microstructure, and rheological properties of fermented milk using different cultures[J]. Foods, 2023, 12(9): 1875.

[2] MISRA S, PANDEY P, MISHRA H N. Novel approaches for co-encapsulation of probiotic bacteria with bioactive compounds, their health benefits and functional food product development: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 340−351.
[3] TAO Li, WANG Jingyi, ZHU Qiyuan, et al. Effect of fermentation with *Lactobacillus fermentum* FL-0616 on probiotic-rich bean powders[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(3): 1144−1152.
[4] VILLACRÉS E, QUELAL M B, FERNÁNDEZ E, et al. Impact of debittering and fermentation processes on the antinutritional and antioxidant compounds in *Lupinus mutabilis* sweet[J]. LWT, 2020, 131: 109745.
[5] JANG H J, KIM J H, LEE H S, et al. Physicochemical analysis of non-fermented probiotic milk with probiotic *Lactobacillus plantarum* Ln1 isolated from Korea traditional fermented food[J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(6): 731−737.
[6] OLIVEIRA D, VIDAL L, ARES G, et al. Sensory, microbiological and physicochemical screening of probiotic cultures for the development of non-fermented probiotic milk[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 79: 234−241.
[7] NAMI Y, HAGHSHENAS B, VASEGHI BAKHSHAYESH R, et al. Novel autochthonous *Lactobacilli* with probiotic aptitudes as a main starter culture for probiotic fermented milk[J]. LWT, 2018, 98: 85−93.
[8] SUN Yaru, GUO Shuai, WU Ting, et al. Untargeted mass spectrometry-based metabolomics approach unveils biochemical changes in compound probiotic fermented milk during fermentation[J]. NPJ Science of Food, 2023, 7: 21.
[9] PINTO J M S, SOUSA S, RODRIGUES D M, et al. Effect of probiotic co-cultures on physico-chemical and biochemical properties of small ruminants' fermented milk[J]. International Dairy Journal, 2017, 72: 29−35.
[10] 陈国欢. 副干酪乳酪杆菌 PC646 在活性发酵豆乳饮料中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [CHEN Guohuan. Research on the application of *Lacticaseibacillus paracasei* PC646 in active fermented soy milk beverage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]
[11] 杨阳. 副干酪乳酪杆菌 PC-01 和青春双歧杆菌 B8589 在活性乳酸菌饮料中的应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022. [YANG Yang. Application of *Lacticaseibacillus paracasei* PC-01 and *Bifidobacterium adolescentis* B8589 in active *Lactobacillus* beverage[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.]
[12] LAN Weiqing, ZHAO Jiaxin, LIU Lin, et al. Relevance of cathepsins activity and texture in slightly acidic electrolyzed water-slurry iced mackerel (*Pneumatophorus japonicus*)[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101924.
[13] 高雅茹, 张灏, 黄晓宇, 等. 屎肠球菌 ID4 产生的细菌素及作用机制研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 16−24. [GAO Yaru, ZHANG Hao, HUANG Xiaoyu, et al. Studies on antibacterial activity and mechanism of *Enterococcus faecium* ID4 bacteriocin[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 16−24.]
[14] 吴悦, 张敏, 徐加加, 等. 凝固型赤小豆酸奶制作及品质分析研究[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2024, 52(5): 14−21. [WU Yue, ZHANG Min, XU Jiajia, et al. Study on the production and quality analysis of solidified adzuki bean yogurt[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(5): 14−21.]
[15] ALEMAN R S, CEDILLOS R, PAGE R, et al. Physicochemical, microbiological, and sensory characteristics of yogurt as affected by various ingredients[J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(6): 3868−3883.
[16] 罗园, 覃小丽, 谢仁香, 等. 不同氧化度的魔芋葡甘露聚糖对凝固型酸奶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 106−113. [LUO Yuan, QIN Xiaoli, XIE Renxiang, et al. Effect of konjac glucomannan with different oxidizing degrees on the quality of set-type yoghurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 106−113.]
[17] 梅琴琴, 董思远, 范文静, 等. 凝固型脱皮亚麻籽仁发酵乳的研制及贮藏稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 111−121. [MEI Qinqin, DONG Siyuan, FAN Wenjing, et al. Study on the development and storage stability of solidified dehulled flaxseed fermented milk[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 111−121.]
[18] 薛玉清, 许丹虹, 冯玉红, 等. 海藻酸丙二醇酯和果胶在饮用型桑椹酸奶中的应用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 273−280. [XUE Yuqing, XU Danhong, FENG Yuhong, et al. Study on the application of propylene glycol alginate and pectin in drinking mulberry yoghurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 273−280.]
[19] SHAHBAZ F, MUCCEE F, SHAHAB A, et al. Isolation and *in vitro* assessment of chicken gut microbes for probiotic potential[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1278439.
[20] ZIARNO M, ZAREĘBA D, ŚCIBISZ I, et al. Texture and water holding capacity of oat drinks fermented with lactic acid bacteria, bifidobacteria and *Propionibacterium*[J]. International Journal of Food Properties, 2024, 27(1): 106−122.
[21] 祝小霞, 石慧敏, 叶建仁. *Bacillus megaterium* ZS-3 最佳发酵培养条件优化[J]. 微生物学杂志, 2024, 44(6): 42−52. [ZHU Xiaoxia, SHI Huimin, YE Jianren. Optimization of fermentation conditions for *Bacillus megaterium* ZS-3[J]. Journal of Microbiology, 2024, 44(6): 42−52.]
[22] 李哲远, 杨勇, 艾连中, 等. 罗伊氏粘液乳杆菌碳源利用及环境耐受性分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 26−32. [LI Zheyuan, YANG Yong, AI Lianzhong, et al. Analysis of carbon source utilization and environmental tolerance of *Limosilactobacillus reuteri*[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(17): 26−32.]
[23] 杨柳, 尤丽新, 马井喜. 凝固型原味酸奶在贮存期间活菌数和 pH 值的变化[J]. 吉林农业, 2010(11): 38, 92. [YANG Liu, YOU Lixin, MA Jingxi. Changes of viable bacteria number and pH value of solidified plain yogurt during storage[J]. Jilin Agriculture, 2010(11): 38, 92.]
[24] 闫志国. 发酵乳在贮藏期间的理化性质的变化[J]. 乳业科学与技术, 2011, 34(2): 74−76,86. [YAN Zhiguo. Fermented milk during storage change of physical and chemical properties[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2011, 34(2): 74−76,86.]
[25] 吴俊霞, 程建明, 薛峰. 枸杞大豆蛋白植物基酸奶理化性质研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 193−198. [WU Junxia, CHENG Jianming, XUE Feng. Physiochemical properties of plant-based yogurt prepared by wolfberry and soy protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 193−198.]
[26] 马杰, 周建中, 张涛, 等. 植物基杏仁酸奶的研制及不同发酵剂对酸奶品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(21): 57−67. [MA Jie, ZHOU Jianzhong, ZHANG Tao, et al. Development of plant-based almond yogurt and influence of different starter cultures

on yogurt quality[J]. Food Research and Development, 2023, 44(21): 57−67.]
[27] 赵华, 张敏, 姚梦珂, 等. 低聚半乳糖对植物乳杆菌 NMGL2 发酵乳加工特性的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(1): 1−7. [ZHAO Hua, ZHANG Min, YAO Mengke, et al. Effects of galactooligosaccharides on processing characteristics of *Lactobacillus plantarum* NMGL2 fermented milk[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(1): 1−7.]
[28] 李培培, 郭帅, 张启航, 等. 乳酸乳球菌乳亚种 BL19 对动物双歧杆菌乳亚种发酵乳品质的改善[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 201−212. [LI Peipei, GUO Shuai, ZHANG Qihang, et al. Quality improvement of fermented milk by *Lactococcus lactis* subsp. *lactis* BL19 on *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 201−212.]
[29] 许艳玲. 杏鲍菇多糖对发酵乳品质的影响[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2021. [XU Yanling. Effect of *Pleurotus eryngii* polysaccharide on the quality of fermented milk[D]. Harbin: Helongjiang University, 2021.]
[30] WANG H, WANG C N, GUO M R. Effects of addition of strawberry juice pre- or postfermentation on physiochemical and sensory properties of fermented goat milk[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(6): 4978−4988.
[31] OULD SAADI L, ZAIDI F, SANZ T, et al. Effect of faba bean and chickpea mucilage incorporation in the structure and functionality of kefir[J]. Food Science and Technology International, 2020, 26(6): 503−511.
[32] 苗壮壮, 杨淑娟, 刘凯龙, 等. 乳双歧杆菌 Probio-M8 和副干酪乳杆菌 PC-01 对发酵乳微流变学特性及稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 103−110. [MIAO Zhuangzhuang, YANG Shujuan, LIU Kailong, et al. Effects of *Bifidobacterium lactis* probio-M8 and *Lactobacillus paracasei* PC-01 on the multi-speckle diffusing wave spectroscopy and stability of fermented milk[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(3): 103−110.]
[33] 李少华. α-乳白蛋白磷脂复合物的超高压辅助制备及在奶酪中的应用[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020. [LI Shaohua. Ultra-high pressure assisted preparation of α-lactoalbumin phospholipid complex and its application in cheese[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.]
[34] 刘志忠, 刘立伟, 刘志刚, 等. 唾液链球菌嗜热亚种与动物双歧杆菌乳亚种复合发酵对发酵乳品质的改善作用[J]. 食品科学, 2025, 46(2): 89−98. [LIU Zhizhong, LIU Liwei, LIU Zhigang, et al. Effect of co-fermentation with *Streptococcus salivarius* subsp. *thermophilus* and *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* on improving the quality of fermented milk[J]. Food Science, 2025, 46(2): 89−98.]
[35] ZHOU Yingjun, XU Yifan, SONG Shuai, et al. Effect of different probiotic fermentations on the quality of plant-based hempseed fermented milk[J]. Foods, 2024, 13(24): 4076.
[36] WANG Liang, TIAN Huimin, LIU Wei, et al. Effects of EPS-producing *Leuconostoc mesenteroides* XR1 on texture, rheological properties, microstructure and volatile flavor of fermented milk[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103371.
[37] 贺茹. 粘性与非粘性乳酸菌对发酵乳凝胶特性和体外消化特性的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020. [HE Ru. Effects of ropy and non-ropy lactic acid bacteria on gel properties and *in vitro* digestion of fermented milk[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.]
[38] 刘晋琦, 朱童, 邢莉那, 等. 绿豆品种对发酵绿豆乳质构特性与感官品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(5): 106−113. [LIU Jinqi, ZHU Tong, XING Lina, et al. Effects of mung bean varieties on textural characteristics and sensory quality of fermented mung bean milk[J]. Food Science, 2025, 46(5): 106−113.]
[39] HECK A, NÖBEL S, HINRICHS J. Inline particle size analysis during technical-scale processing of a fermented concentrated milk protein-based microgel dispersion: Feasibility as a process control[J]. Dairy, 2023, 4(1): 180−199.
[40] 马萍萍, 卢涵, 蒿静静, 等. 双歧杆菌对发酵乳品质改善作用研究[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(11): 45−51. [MA Pingping, LU Han, HAO Jingjing, et al. Study on the effect of *Bifidobacterium* on improving the quality of fermented milk[J]. China Dairy Industry, 2024, 52(11): 45−51.]
[41] ŻBIKOWSKA A, SZYMAŃSKA I, KOWALSKA M. Impact of inulin addition on properties of natural yogurt[J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4317.
[42] 褚少兴, 刘艳, 徐清溪, 等. 乳清发酵饮料的开发[J]. 饮料工业, 2024, 27(1): 62−69. [CHU Shaoxing, LIU Yan, XU Qingxi, et al. Development of whey fermented beverage[J]. The Beverage Industry, 2024, 27(1): 62−69.]