张旭伟, 陈佳慧, 刘玉凤, 等. 超声辅助酶法改性蓝莓果渣纤维及其提升低脂酸奶贮存品质的研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 204−214. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070290

ZHANG Xuwei, CHEN Jiahui, LIU Yufeng, et al. Research on the Modification of Blueberry Residue Fiber by Ultrasound-assisted Enzymatic Method and Its Improvement of Storage Quality of Low-fat Yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 204−214. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070290

· 工艺技术 ·

超声辅助酶法改性蓝莓果渣纤维及其提升低脂酸奶贮存品质的研究

张旭伟[1], 陈佳慧[2], 刘玉凤[2], 雷昌贵[1], 孟宇竹[3], 李艾黎[2,*]

（1.河南质量工程职业学院食品与化工学院, 河南平顶山 467000;
2.东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150006;
3.平顶山技师学院现代服务系, 河南平顶山 467000）

摘　要: 为改善低脂酸奶因脂肪含量低而出现的质构劣化与乳清析出问题，并提升其贮存品质。本研究首先采用超声辅助酶法对蓝莓果渣膳食纤维（Blueberry pulp dietary fiber，BPDF）进行改性，经单因素和响应面法优化确定最佳工艺。随后，探讨了不同浓度改性 BPDF 对低脂酸奶贮存品质的影响。结果表明，在超声功率 443 W、处理时间 20 min，复合酶添加量 2.5%、温度 60 ℃、酶解时间 2.5 h 条件下，所制备的可溶性膳食纤维（Soluble dietary fiber，SDF）得率最高，达到 15.87%，且其持水力、持油力、膨胀力及溶解性等均显著提高（P<0.05）。将改性 BPDF 应用于低脂酸奶中，在 28 d 冷藏期内可显著提升产品的硬度、内聚性以及储能模量（G'）等质构与流变学指标（P<0.05）。其中，含 2% 改性 BPDF 添加组在整个贮存期内表现最佳，不仅在贮存 28 d 时乳清析出率较对照组降低 29.72%，且抗氧化性能较高（DPPH 自由基清除率始终高于 80%，$ABTS^+$自由基清除率保持在 60% 以上），感官评分最高。本研究为低脂酸奶贮存品质改善与果渣高值化利用提供新方案。

关键词: 蓝莓果渣, 膳食纤维, 低脂, 酸奶, 贮存品质

中图分类号: TS252.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0204−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070290　　本文网刊:

Research on the Modification of Blueberry Residue Fiber by Ultrasound-assisted Enzymatic Method and Its Improvement of Storage Quality of Low-fat Yogurt

ZHANG Xuwei[1], CHEN Jiahui[2], LIU Yufeng[2], LEI Changgui[1], MENG Yuzhu[3], LI Aili[2,*]

（1.College of Food and Chemical Engineering, Henan Vocational College of Quality Engineering, Pingdingshan 467000, China;
2.College of Food Science and Technology, Northeast Agricultural University, Harbin 150006, China;
3.Modern Service Department, Pingdingshan Technician College, Pingdingshan 467000, China）

Abstract: To improve the texture deterioration and whey separation problems of low-fat yogurt due to its low fat content and enhance its storage quality. In this study, the blueberry pulp dietary fiber (BPDF) was first modified by ultrasonic-assisted enzymatic method, and the optimal process was determined through single-factor and response surface optimization. Subsequently, the influence of different concentrations of modified BPDF on the storage quality of low-fat yogurt was explored. The results showed that under the conditions of ultrasonic power of 443 W, treatment time of 20 min, addition amount of compound enzyme of 2.5%, temperature of 60 ℃, and enzymatic hydrolysis time of 2.5 h, the yield of soluble di-

收稿日期: 2025−07−25

基金项目: 东北农业大学横向课题（2024HXSP040）。

作者简介: 张旭伟（1978−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品、农产品加工与检测, E-mail: zhangxuwei@163.com。

*** 通信作者:** 李艾黎（1978−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品发酵, E-mail: aili-mail@163.com。

etary fiber (SDF) prepared was the highest, reaching 15.87%. Moreover, its water-holding capacity, oil-holding capacity, swelling power and solubility were all significantly improved (P<0.05). Furthermore, the modified BPDF was applied to low-fat yogurt, which could significantly enhance the texture and rheological indicators such as hardness, cohesion, and storage modulus (G') of the product within a 28-day refrigeration period (P<0.05). Among them, the group with 2% modified BPDF addition performed the best throughout the storage period. Not only was the whey precipitation rate 29.72% lower than that of the control group at 28 days of storage, but also the antioxidant performance was higher (the DPPH free radical scavenging rate was always above 80%, and the $ABTS^+$ free radical scavenging rate remained above 60%), and the sensory score ranked first among all groups. This study provides a new solution for improving the storage quality of low-fat yogurt and the high-value utilization of fruit residue.

Key words: blueberry pulp; dietary fiber; low fat; yogurt; storage quality

低脂酸奶作为应对全球肥胖与代谢性疾病的重要健康食品，近年来市场需求持续增长[1]。然而，较低的脂肪含量（≤1.5%）往往导致酸奶体系物理稳定性失衡问题凸显，蛋白质网络支撑力不足导致凝胶结构坍塌、脱水收缩及乳清析出[2]，同时脂溶性风味物质流失造成感官品质劣化[3]。传统解决方案依赖乳清蛋白浓缩物或明胶复配体系[4]，但前者成本高昂，后者存在素食适用性争议，且过度使用非天然添加剂与当前“清洁标签”消费趋势相悖。如何实现低脂酸奶品质的优化，已成为行业亟待突破的共性技术难题。

农业副产物中膳食纤维因其持水性和胶体特性，可部分模拟脂肪的物理功能，为破解上述困境提供了新途径。但天然植物纤维普遍存在不溶性组分占比高、溶解性差以及持水力弱等缺陷[5]，需通过物理研磨、生物酶解或化学修饰等改性技术破坏纤维结晶结构，暴露活性基团以提升其功能特性[6]。改性方法各有特点，但也存在效率不高、条件剧烈等局限性。近年来，超声波以其低成本、高效率、操作简单、环保等优点而广受欢迎[7]。特别是超声辅助酶法作为一种绿色高效的复合改性策略，能够通过空化效应促进酶与底物的接触，协同破坏纤维结构，提高可溶性组分，同时最大限度地保留活性成分。如 Li 等[8]采用超声波辅助酶法将荔枝渣中的可溶性膳食纤维含量提高 6.32%。现已有改性膳食纤维在普通酸奶中的应用研究。如 Qin 等[9] 通过细研磨联合副干酪乳杆菌发酵改性柚子皮膳食纤维，从而显著提升酸奶凝胶强度；Dong 等[10] 发现改性胡萝卜膳食纤维可剂量依赖性增强酸奶的剪切应力、黏度及稠度指数；Tian 等[11] 运用射流空化结合纤维素酶改性豆渣膳食纤维，有效优化酸奶体系在贮存期的乳清沉淀速率、流变特性和质地参数。然而，改性植物纤维在低脂酸乳体系中的应用研究仍处于空白。

我国蓝莓产业年产量达 78 万吨（2024 年）[12]，位居浆果类第六大产业，加工过程中产生的果渣副产物年超 23 万吨[13]。蓝莓果渣富含果胶（40%~60%）和多酚类物质[14]，具备高值化利用潜力，但蓝莓果渣膳食纤维（Blueberry pulp dietary fiber, BPDF）中的不溶性纤维占比较高，持水力弱，直接添加易导致产品质地粗糙。基于此，本研究提出超声辅助酶法策略，通过响应面法优化复合酶配比与超声参数，提升 BPDF 中可溶性组分占比，进而通过检测质构特性、流变参数、酸度变化和抗氧化性等指标，探究改性 BPDF 对低脂酸奶贮存品质的影响。本研究旨在为改善低脂酸奶品质，推动蓝莓果渣高值化利用提供新的解决方案。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

低脂乳（脂肪含量≤1.5%）、蓝莓　市售；保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌混合菌种　丹尼斯克（中国）有限公司；耐高温 α-淀粉酶（4000 U/g）、淀粉葡萄糖苷酶（10 万 U/g）、碱性蛋白酶（200 U/g）、纤维素酶（400 U/mg）、木聚糖酶（10 万 U/mg）　上海源叶生物科技有限公司；氢氧化钠　天津市天力化学试剂有限公司；其余试剂均为分析纯。

AC2-4S1 超净工作台　新加坡艺思高科技有限公司；TGL-16 高速冷冻离心机　四川蜀科仪器有限公司；FE28 pH 计　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；10QC 色差计　深圳市三恩驰科技有限公司；SpectraMax reg iD3 酶标仪　美谷分子仪器（上海）有限公司；DY-1200C 超声波细胞破碎仪　上海德洋意邦仪器有限公司；DHP-9272 型电热恒温培养箱　上海一恒科技有限公司；S-3400N 钨灯丝扫描电子显微镜　日本日立；Theta Flow 3D 光学角接触角测量仪　芬兰百欧林科技有限公司；TA.XT Plus C 质构仪　英国 Stable Micro System 公司；HAAKE MARS 60 模块化旋转流变仪　赛默飞世尔科技公司。

1.2　实验方法

1.2.1　超声辅助酶法改性 BPDF 的工艺研究

1.2.1.1　BPDF 的制备　膳食纤维提取参考于佳琪等[15] 方法。鲜蓝莓榨汁后得蓝莓果渣，将蓝莓果渣与 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液按 1∶20（g/mL）料液比混合均匀，依次进行酶解处理。首先按磷酸盐缓冲液体积 800∶1 比例加入 α-淀粉酶，90 ℃ 加热 30 min 后调 pH 到 5.2；随后按相同比例（800∶1）加入淀粉葡萄糖化酶，60 ℃ 水浴 30 min；再以 400∶1 比例加入碱性蛋白酶，调 pH 至 8 继续反应 30 min，酶解完成后，将混合液于 2500×g 离心 10 min 后醇沉 12 h。

将醇沉混合物经 7000×g 离心 10 min 后收集沉淀，于烘箱中 60 ℃ 鼓风干燥至恒重，粉碎过 80 目筛获得 BPDF。

1.2.1.2 单因素实验 在固定基准条件（超声功率 400 W，超声时间 20 min，复合酶添加量为 2%，酶解时间 2.0 h，酶解温度 55 ℃）下，分别考察以下五因素对蓝莓果渣的可溶性膳食纤维（Soluble dietary fiber，SDF）得率的影响：超声功率（300、350、400、450、500 W）；超声时间（10、20、30、40、50 min）；复合酶（纤维素酶∶木聚糖酶=1∶1）添加量（1.5%、2.0%、2.5%、3.0%、3.5%）；酶解时间（1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 h）和酶解温度（45、50、55、60、65 ℃）。

1.2.1.3 响应面试验 基于单因素实验结果，选取超声功率（A）、超声时间（B）、酶解温度（C）作为关键变量，采用三因素三水平的 Box-Behnken 设计，以 SDF 得率结果为响应值，响应面试验设计见表 1。

表 1 响应面试验设计

Table 1 Test design of response surface

水平	因素		
	A超声功率（W）	B超声时间（min）	C酶解温度（℃）
−1	400	10	55
0	450	20	60
1	500	30	65

1.2.1.4 SDF 得率测定 采用 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》中的方法测定 SDF 含量。

1.2.2 扫描电镜分析 取干燥后的改性前和改性后的 BPDF 样品，将其研磨后，采用扫描电子显微镜观察其在放大倍数为 2000 倍和 5000 倍下的显微结构。

1.2.3 改性前后 BPDF 理化性质检测

1.2.3.1 持水力 准确称取 0.5 g BPDF 样品于离心管中，加入 25 mL 蒸馏水，37 ℃ 水浴振荡 2 h，离心（2000×g，15 min），除去上清液，用滤纸擦干离心管壁残留的水分。持水力计算如式（1）所示。

$$\text{持水力}(g/g)=\frac{M_1-M_0}{M_0} \quad \text{式（1）}$$

式中：M_1 为离心后沉淀质量，g；M_0 为样品干重，g。

1.2.3.2 持油力 参考 Jiang 等[16] 的方法稍作修改，准确称取 0.5 g BPDF 样品干粉于离心管中，加入 30 mL 大豆油于 37 ℃ 下水浴振荡 2 h，离心（2000×g，10 min），除去上清液，离心管中剩余的大豆油用滤纸吸收。持油力计算如式（2）所示。

$$\text{持油力}(g/g)=\frac{M_2-M_0}{M_0} \quad \text{式（2）}$$

式中：M_2 为离心后沉淀质量，g；M_0 为样品干重，g。

1.2.3.3 膨胀力 准确称取 1.0 g BPDF 样品放入量筒中，加入 10 mL 蒸馏水，在 25 ℃ 下混合 18 h。分别记录样品溶液的初始体积和样品溶液的水合体积。膨胀力计算如式（3）所示。

$$\text{膨胀力}(mL/g)=\frac{V_1-V_0}{M} \quad \text{式（3）}$$

式中：V_1 为膨胀后体积，mL；V_0 为膨胀前体积，mL；M 为样品干重，g。

1.2.3.4 溶解性 参考魏旭瑶等[17] 的方法，准确称取 1 g 样品于离心管中，加入蒸馏水 30 mL，75 ℃ 水浴 1 h，2000×g 离心 15 min，将上清液倒入离心管中烘干至恒重，计算如公式如（4）所示。

$$\text{溶解性}(\%)=\frac{M_1}{M_0}\times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中：M_1 为上清液干燥后的固形物质量，g；M_0 为样品干重，g。

1.2.3.5 接触角测定 采用陈秉彦等[18] 的方法，利用接触角显微镜进行评价。取 200 mg 冻干 BPDF 置于压片机上制成薄片（直径 20 mm、厚度 2 mm），采用快速精密滴定器滴加 1 mL 纯牛乳于 BPDF 薄片上，平衡 10 s 后采用高速摄像机捕捉画面，接触角通过对液滴形状进行数值分析。

1.2.4 改性 BPDF 低脂酸奶贮存品质的研究

1.2.4.1 酸奶制备 低脂奶中分别添加质量体积百分比为 0%、1%、2%、3% 的改性 BPDF，经 90 ℃ 杀菌 10 min 后冷却至 45 ℃，接种 0.1%（w/v）的酸奶发酵剂，在 42 ℃ 下发酵 6 h，然后在 4 ℃ 下后熟 24 h，终产品于 4 ℃ 下冷藏，分别在贮存期 0（后熟结束）、7、14、21 和 28 d 取样，进行品质指标测定。

1.2.4.2 质构特性 参考 Jiao 等[19] 的方法，并稍作修改，采用质构仪进行质构特性测定。采用 P0.5 探头对酸奶进行测试，设定测试距离为 20 mm，下降速度 1 mm/s，测试速度 1 mm/s，探头返回速度 10 mm/s，触发力为 10 g。

1.2.4.3 流变特性 采用流变仪进行流变特性测定。取酸奶样品于 25 ℃ 下平衡 5 min，选择直径为 40 mm 的平板。在 0.5% 应变下，以 0.1~10 Hz 的频率范围进行频率扫描测试，以确定储能模量（G'）和损耗模量（G''）。

1.2.4.4 微观结构 参考 Gomes 等[20] 的方法，将酸奶样品薄层涂在培养皿内壁上，然后冷冻干燥。再将冻干的酸奶样品镀金膜，而后使用扫描电镜在 10 kV 电压下放大 5000 倍进行测试。

1.2.4.5 乳酸菌数 依据 GB 4789.35-2023《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》对冷藏期间酸奶中的乳酸菌总数采用稀释平板计数法测定。

1.2.4.6 pH 和滴定酸度 酸奶酸度测定严格参照国家标准 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》执行：准确称取 10 g 酸奶样品，加入 20 mL 经煮沸冷却的蒸馏水稀释，以 0.5% 酚酞乙醇溶液为指示剂，用 0.1 mol/L 氢氧化钠标准溶液滴定

至微红色终点，酸度结果以吉尔涅尔度(°T)表示；同步采用校准 pH 计直接测定酸奶 pH。

1.2.4.7　乳清析出率　乳清析出率测定参考吴俊霞等[21]的方法稍作修改，准确称取 15 g 酸乳样品于离心管中，以 500×g 离心 10 min 后弃去上清液，称量残留沉淀物与离心管总质量。乳清析出率按式(5)计算。

$$乳清析出率(\%)=\frac{m_1-m_2}{m_0}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中：m_0 为酸奶质量，g；m_1 为离心前酸奶及离心管的质量，g；m_2 为弃去上清液后剩余的酸奶及离心管的质量，g。

1.2.4.8　抗氧化性检测　参照 Xu 等[22]的方法测定 DPPH 自由基清除率。参照 Chen 等[23]的方法测定 $ABTS^+$自由基清除率。

$$自由基清除率(\%)=\frac{A_0-(A_2-A_1)}{A_0}\times 100 \qquad 式（6）$$

式中：A_2 为样品测定的吸光值；A_1 为空白对照组的吸光值；A_0 为对照组的吸光值。

1.2.4.9　色度　采用色差计对酸奶色度进行色度测定[24]。测定前，在白色参考及黑色参考标准上对设备进行校准。每个样品取 3 个平行测定。色度表示为 L^*(亮度)、a^*(红-绿强度)、b^*(黄-蓝强度)。

1.2.4.10　感官评分　请 15 个经过专业培训的食品科学系人员对酸奶的感官品质进行评定，所有成员均通过 GB/T 10220-2012《感官分析 方法学 总论》基础培训，从酸奶的色泽(20)、香气(20)、口感(30)和组织状态(30)进行评价打分，满分为 100 分(表 2)。

表 2　感官评价表

Table 2　Sensory evaluation form

评价指标	评价标准
色泽(20分)	颜色均一，有光泽(14~20分)
	颜色均一，透亮度稍差(7~13分)
	颜色暗淡(6分以下)
香气(20分)	浓郁乳香味(14~20分)
	淡乳香味(7~13分)
	有不良气味(6分以下)
口感(30分)	酸味适中，口感滑爽(21~30分)
	酸味适中，但口感一般(11~20分)
	口感过酸，明显感觉颗粒感(10分以下)
组织状态(30分)	均匀稳定，组织细腻，无乳清析出(21~30分)
	有上清液析出，出现少量沉淀(10~20分)
	整体体系不均匀，出现分层现象，乳清沉淀严重(10分以下)

1.3　数据处理

所有实验均重复三次，结果以平均值±标准偏差表示。使用 SPSS 26.0 单因素方差分析(ANOVA)中的 Duncan 法检测各处理平均值的差异显著性。$P<0.05$ 表示差异显著。运用 Origin 2021 软件作图。

2　结果与分析

2.1　超声辅助酶法改性 BPDF 的优化研究

2.1.1　单因素实验结果　如图 1 可知，超声功率(A)和超声时间(B)对蓝莓果渣 SDF 得率的影响呈先升后降趋势，并分别在 450 W 和 20 min 达到峰值，得率分别为 14.15%±0.18% 和 12.78%±0.19%。这与王萌等[25]在利用超声提取麦麸膳食纤维时的结果一致，提示适度超声能有效分解细胞壁促进 SDF 溶出，

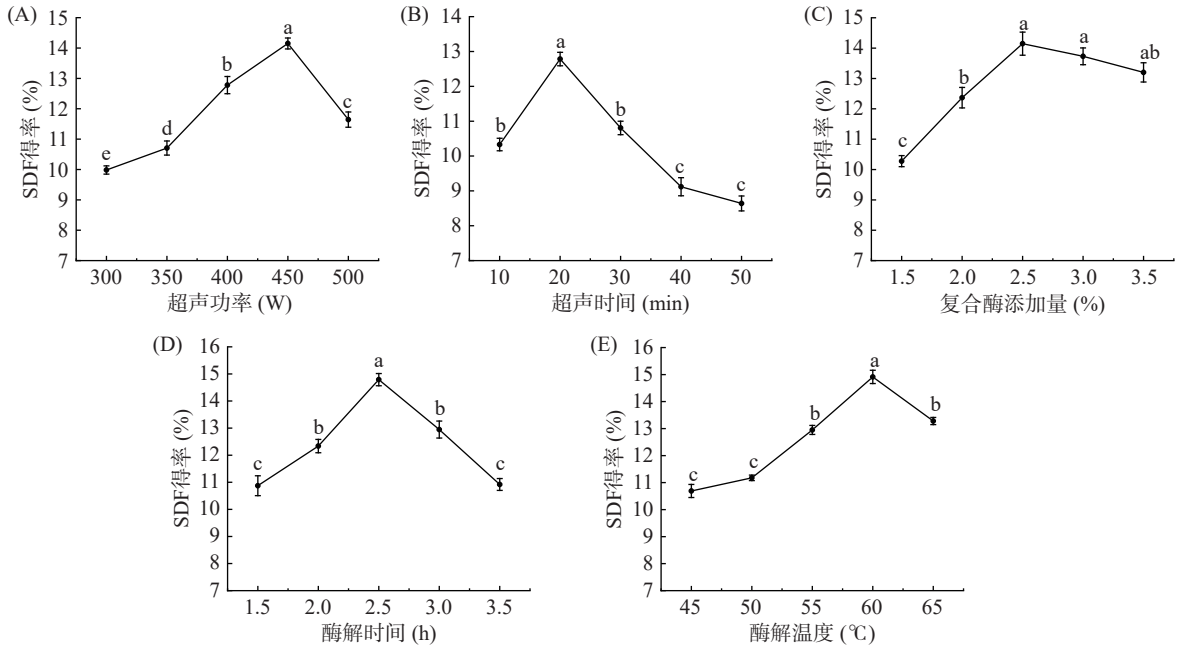


图 1　超声辅助酶法条件对 SDF 得率的影响

Fig.1　Influence of ultrasound-assisted enzyme conditions on the yield of SDF

注：A 超声功率；B 超声时间；C 复合酶添加量；D 酶解时间；E 酶解温度；不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

而过高功率或过长时间则过度破坏纤维结构导致小分子降解物增加[26−27]，降低 SDF 得率。

复合酶添加量(C)在 2.5% 时的 SDF 得率达峰值 14.14%±0.38%，提示在该浓度下，酶与底物充分结合，释放膳食纤维。而继续增加酶量可能因底物饱和效应趋于稳定，使得 SDF 得率不再显著增加；酶解时间(D)在 1.5~2.5 h 区间的 SDF 得率逐步提升，超时则引发酶自水解失活，该规律与周龙珠等[28] 研究酶解时间对油莎豆粕 SDF 得率影响的结果一致。此外，SDF 得率在酶解温度(E)在 60 ℃ 时达到峰值(14.92%±0.25%)，提示温度偏离最适范围时会因酶活性降低导致得率下降[29]。

2.1.2 响应面试验结果

2.1.2.1 试验设计及结果 响应面试验结果(表 3)经 Design-Expert.12.0 软件分析，建立 SDF 得率(Y)与超声功率(A)、超声时间(B)、酶解温度(C)的二次回归方程为：$Y=15.882-0.49375A+0.17125B+0.2625C+0.2925AB-0.675AC-0.42BC-1.92475A^2-2.92475B^2-2.70725C^2$。

表 3 响应面试验设计及结果

Table 3 Response surface test design and results

试验号	A超声功率	B超声时间	C酶解温度	SDF得率(%)
1	−1	−1	0	12.02
2	1	−1	0	9.89
3	−1	1	0	11.59
4	1	1	0	10.63
5	−1	0	−1	10.62
6	1	0	−1	11.54
7	−1	0	1	12.31
8	1	0	1	10.53
9	0	−1	−1	9.21
10	0	1	−1	10.58
11	0	−1	1	10.76
12	0	1	1	10.45
13	0	0	0	15.53
14	0	0	0	15.78
15	0	0	0	15.92
16	0	0	0	16.01
17	0	0	0	16.17

模型方差分析结果(表 4)显示回归模型极显著($P<0.0001$)且失拟项不显著($P>0.05$)，表明该模型可靠性高。模型决定系数($R^2=0.9899$)与校正系数(R^2adj=0.9769)证明该模型实际值与预测值拟合程度好，可以解释 97.69% 试验所得的 SDF 得率。显著性检验表明：超声功率(A)、超声功率-酶解温度交互项(AC)及二次项(A^2、B^2、C^2)对得率的影响极显著($P<0.01$)，而超声时间(B)、酶解温度(C)及其交互项(AB、BC)的影响不显著($P>0.05$)。从各因素影响排序为：超声功率(A)>酶解温度(C)>超声时间(B)。

2.1.2.2 各因素的交互作用对 SDF 得率的影响 图 2 的响应面分析表明所示，超声功率(A)和酶解温度(C)的交互效应呈现陡峭的响应曲面坡度及椭圆形等高线分布，表明 AC 交互作用显著($P<0.05$)，这与表 4 的方差分析结果相互验证。

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
回归模型	97.39	9	10.82	76.10	<0.0001	**
A超声功率	1.95	1	1.95	13.71	0.0076	**
B超声时间	0.2346	1	0.2346	1.65	0.2399	
C酶解温度	0.5512	1	0.5512	3.88	0.0896	
AB	0.3422	1	0.3422	2.41	0.1648	
AC	1.82	1	1.82	12.82	0.0090	**
BC	0.7056	1	0.7056	4.96	0.0612	
A^2	15.60	1	15.60	109.69	<0.0001	**
B^2	36.02	1	36.02	253.27	<0.0001	**
C^2	30.86	1	30.86	217.00	<0.0001	**
残差	0.9955	7	0.1422			
失拟项	0.7604	3	0.2535	4.31	0.0959	
纯误差	0.2351	4	0.0588			
矫正总值	98.39	16				

注：*表示$P<0.05$，差异显著；**表示$P<0.01$，差异极显著。

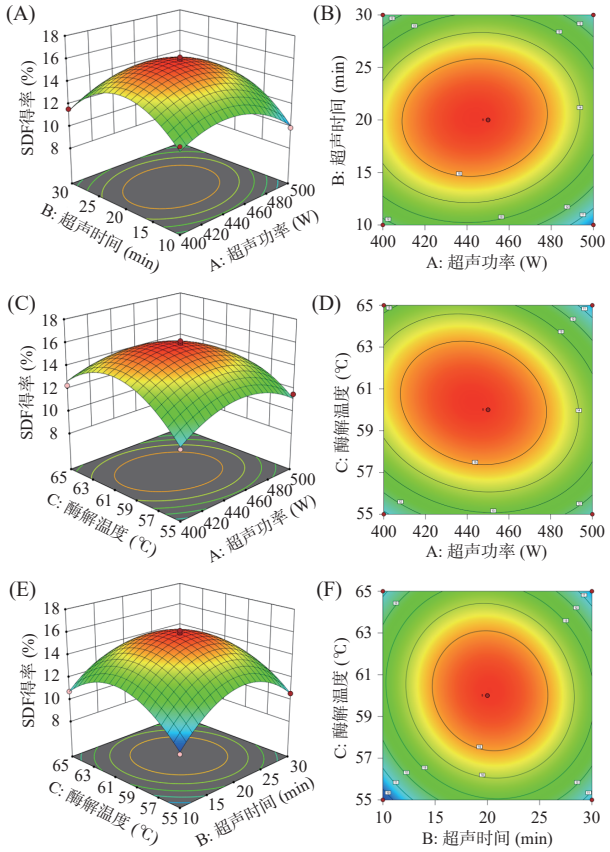


图 2 各因素交互作用对蓝莓果渣 SDF 得率影响的响应面图

Fig.2 Response surface diagram of the influence of the interaction of various factors on the SDF yield of blueberry pulp

注：超声功率与超声时间(A 和 B)；超声功率与酶解温度(C 和 D)；超声时间与酶解温度(E 和 F)。

2.1.2.3 提取工艺参数优化及验证 利用 Design-Expert.12 软件，得到蓝莓果渣改性提取 SDF 的适宜工艺条件为超声功率 443.09 W、超声时间 20.17 min、酶解温度 60.32 ℃。在此条件下，模型预测 SDF 得率为 15.93%。考虑到实际操作条件的可行性，设定

最优条件为：超声功率 443 W、超声时间 20 min、酶解温度 60 ℃，进行验证实验测得蓝莓果渣 SDF 得率的平均值为 15.87%，与理论值相接近，表明该回归模型与实际情况的拟合较好，可用于优化蓝莓果渣 SDF 的提取工艺。

2.2　BPDF 的微观结构

扫描电镜图像（图 3）直观显示，超声辅助酶改性显著改变了 BPDF 的表面形态。未改性 BPDF 呈现规则片状结构，表面较光滑且质地致密；而改性使得 BPDF 转变为疏松多孔的蜂窝状结构，沟壑与孔隙显著增多。这一形态变化使得 BPDF 内部结构暴露，有效比表面积大幅增加。分析认为，超声空化效应引起的高频机械剪切力破坏了膳食纤维的块状聚合结构，后续复合酶通过水解糖苷键进一步降解纤维束，从而形成多孔隙网络结构[30]。

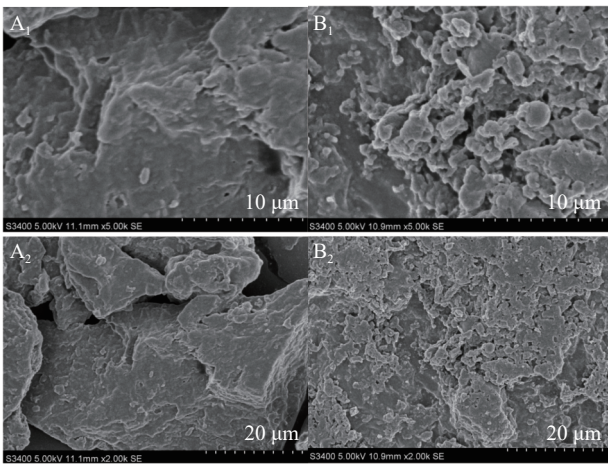


图 3　改性前后 BPDF 的微观结构变化

Fig.3　Microstructure changes of BPDF before and after modification

注：A 未改性 BPDF；B 改性后 BPDF。1 为 5000×；2 为 2000×。

2.3　BPDF 理化性质分析

表 5 显示，超声酶辅助改性使 BPDF 的持水力、持油力、膨胀力和溶解性分别较对照组提高了 0.38、0.45、1.20、0.12 倍。此增效作用可能源于改性过程诱导的纤维素氢键断裂和结构重组，促使更多亲水性羧基、羟基等基团暴露，与水结合的位点增多[31]。同时从微观结构可知，超声空化效应形成多孔褶皱结构，增大的比表面积促使疏水基团与亲油基团暴露，进而提升持油性[32]。

表 5　改性前、后 BPDF 理化性质

Table 5　Physical properties of dietary fiber in blueberry pulp before and after modification

样品	持水力(g/g)	持油力(g/g)	膨胀力(mL/g)	溶解性(%)
未改性BPDF	4.15±0.06^{b}	2.68±0.02^{b}	1.54±0.03^{b}	58.35±0.39^{b}
改性后BPDF	5.73±0.04^{a}	3.89±0.01^{a}	3.39±0.07^{a}	65.52±0.65^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

接触角作为表征膳食纤维在牛奶中润湿性的关键参数，接触角越小，表明膳食纤维粒子对乳相的亲和性越强，体系稳定性越高[33]。由图 4 可知，改性前 BPDF 与牛乳间的接触角较大，达到 73.96°；改性后显著降至 42.89°，推测原因为超声和酶处理破坏了膳食纤维的糖苷键，致使纤维结构相对松散，暴露更多亲水基团[34]。

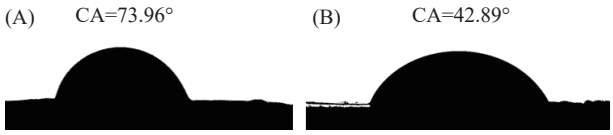


图 4　改性前（A）、后（B）BPDF 与乳体系间的接触角

Fig.4　Contact angle between BPDF and the milk system before (A) and after (B) modification

2.4　改性 BPDF 对低脂酸奶贮存期间组织结构的影响

2.4.1　质构特性　酸奶的质构特性是反映其凝胶强

表 6　酸奶贮存期间质构特性

Table 6　Texture characteristics of yogurt during storage

指标	贮存天数(d)	样品			
		对照组	1%BPDF添加组	2%BPDF添加组	3%BPDF添加组
硬度(g)	0	173.50±1.18^{Bd}	180.17±1.71^{Bc}	199.97±1.87^{Ba}	191.73±1.87^{Bb}
	7	184.40±2.05^{Ad}	188.27±1.04^{Ac}	223.43±2.50^{Aa}	202.03±3.40^{Ab}
	14	170.57±1.20^{Bd}	176.73±1.03^{Bc}	194.43±1.23^{Ba}	185.23±1.35^{Bb}
	21	159.87±1.56^{Cd}	167.23±1.15^{Cc}	182.77±1.84^{Ca}	174.20±1.42^{Cb}
	28	149.93±0.68^{Dd}	159.40±0.93^{Dc}	174.17±2.14^{Da}	162.47±1.97^{Db}
粘性(g·s)	0	219.80±4.36^{Bd}	236.63±3.15^{Bc}	268.57±3.49^{Ba}	255.03±4.89^{ABb}
	7	245.07±3.37^{Ad}	259.90±3.76^{Ac}	283.40±2.93^{Aa}	267.33±5.04^{Ab}
	14	214.67±3.18^{Bd}	224.30±7.84^{Bc}	265.03±3.49^{Ba}	247.37±5.77^{Bb}
	21	190.13±4.72^{Cd}	206.93±4.81^{Cc}	244.37±5.57^{Ca}	223.33±4.26^{Cb}
	28	170.37±2.38^{Dd}	188.60±2.93^{Dc}	228.00±3.16^{Da}	205.70±4.97^{Db}
胶着性(g)	0	72.45±1.56^{Bd}	84.95±2.75^{Bc}	115.05±3.62^{Ba}	98.85±3.82^{Bb}
	7	88.92±2.69^{Ac}	97.79±3.58^{Ac}	134.12±4.11^{Aa}	111.51±3.52^{Ab}
	14	66.34±1.29^{Cc}	79.72±2.986^{Bb}	104.04±3.27^{Ba}	88.48±4.42^{BCb}
	21	56.09±1.43^{Dc}	68.38±1.46^{Cb}	84.19±3.28^{Ca}	79.30±3.00^{Ca}
	28	46.69±1.76^{Ec}	62.21±0.92^{Cb}	74.98±3.12^{Ca}	66.51±3.99^{Dab}
内聚性(g)	0	0.42±0.01^{Bc}	0.47±0.02^{Bbc}	0.58±0.02^{ABa}	0.52±0.02^{ABb}
	7	0.48±0.01^{Ac}	0.52±0.02^{Abc}	0.60±0.01^{Aa}	0.55±0.02^{Aab}
	14	0.39±0.01^{Bc}	0.45±0.01^{BCb}	0.54±0.02^{Ba}	0.48±0.02^{BCab}
	21	0.35±0.01^{Cc}	0.41±0.01^{CDb}	0.46±0.02^{Ca}	0.45±0.01^{BCab}
	28	0.31±0.02^{Db}	0.39±0.01^{Da}	0.43±0.01^{Ca}	0.41±0.02^{Ca}

注：大写字母为贮存天数对比显著性，小写字母为组间对比显著性，P<0.05，图7、图8、表7同。

弱、内部紧实程度的重要指标。由表 6 可知，在低温贮存期间，各组酸奶的硬度、粘性、胶着性、内聚性均呈现先增加后降低趋势，这与卢钏燚等[35]关于桑葚微胶囊酸奶贮藏期间的质构变化趋势一致，且各组均在第 7 d 达到质构指标峰值，贮存后期（14~28 d）的质构指标下降，可能归因于酪蛋白的凝胶聚集结构失稳[36]。贮存初期，添加改性 BPDF 组酸奶的质构指标均高于对照组，这可能得益于膳食纤维与蛋白质基质相交联形成稳定的三维网状结构；在贮存第 21 d 时，2% 添加组的硬度 182.77±1.84 g、粘性 244.37±5.57 g·s 均显著高于 1% 和 3% 添加组（P<0.05），直至贮存第 28 d，该组仍维持较高水平质构特性，表明 2% 添加量在货架期内对维持低脂酸奶品质具有显著优势。

2.4.2　流变特性　图 5 为酸奶样品的频率扫描结果。在整个贮存期内，各组样品的储能模量（G'）和损耗模量（G"）均随频率的增加而增加，并且在 0.1~10 Hz 频率范围内 G'值始终大于 G"值。在贮存第 7 d 时，各组显示出更高的 G'和 G"，表明形成了更强的凝胶结构。在第 21 d 时，除 2% 添加组外，其余组的 G'和 G"均较第 14 d 显著下降（P<0.05）。至贮存第 28 d，2% 添加组仍具有较高的固态属性，这与 Fan 等[37]关于二元益生菌和枸杞膳食纤维对酸奶流变特性的影响结果相似，进一步验证了改性膳食纤维对酸奶凝胶网络稳定性的积极作用。

2.4.3　微观结构　如图 6，随着贮存时间延长，各酸奶样品凝乳结构发生明显变化，表现为酪蛋白胶束脱水收缩，空隙减小，渗透压升高，其中以对照组结构劣变最明显。在贮存初期至中期（0~14 d），2% 和 3% 添加组酸奶的凝乳结构连接较紧密，孔隙相对变小且组织分布较均匀。一方面可能是 BPDF 与酸奶中的酪蛋白胶束通过静电和疏水相互作用，有效地减少了孔网络结构的形成[10]，另一方面可能由于 BPDF 优化了酪蛋白凝胶网络，有助于延缓低温贮存期因脱水收缩引起的结构劣变[38]。贮存 28 d 时，对照组凝乳结构呈现聚集现象，且孔隙分布不均；2% BPDF 添

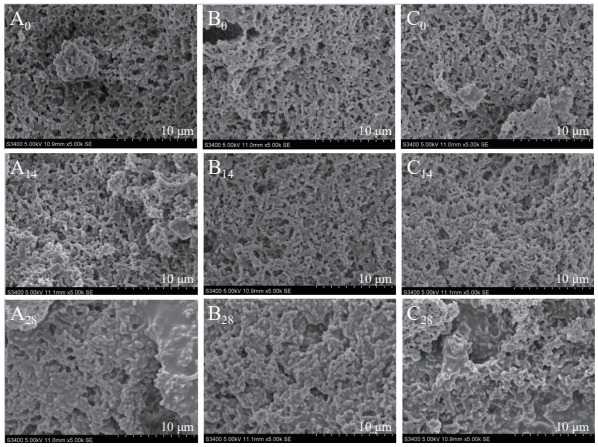


图 6　不同贮存时间酸奶样品的扫描电镜图

Fig.6　Scanning electron microscope images of yogurt samples with different storage times

注：A、B、C 分别为对照组、2% 和 3% BPDF 添加量酸奶，数字 0、14、28 表示贮存天数。

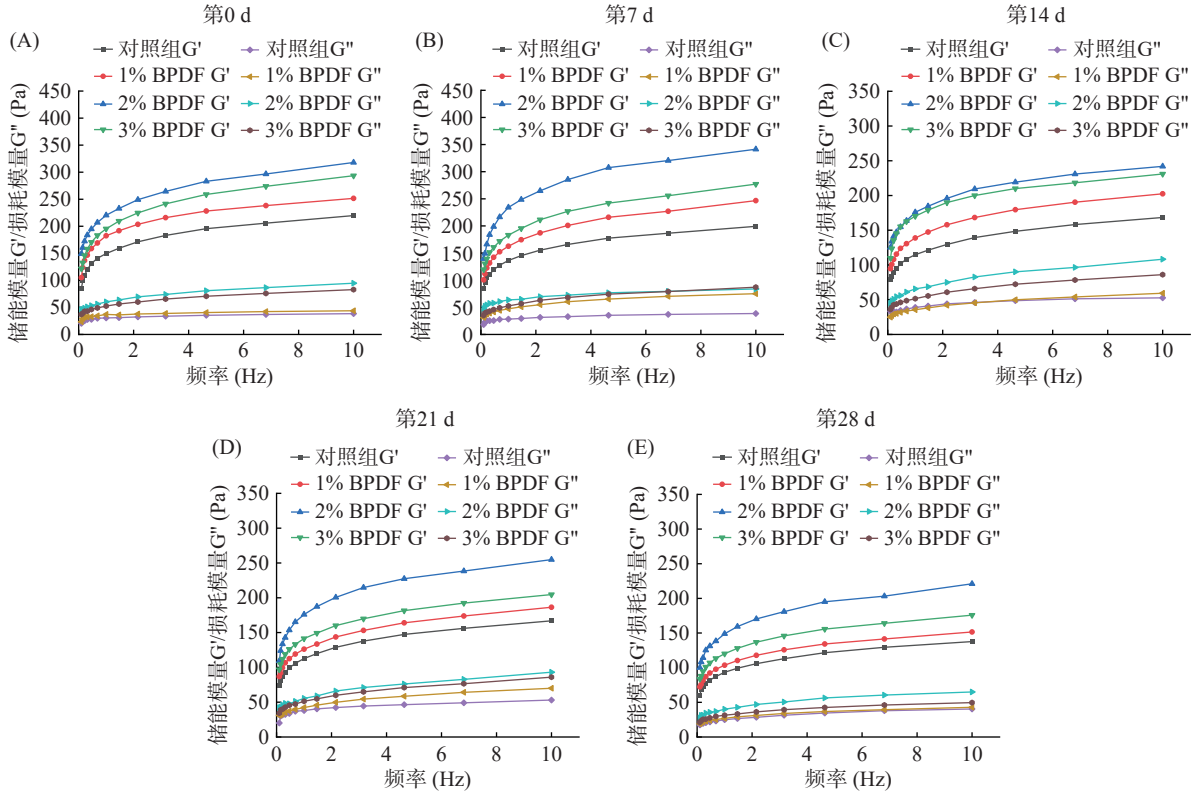


图 5　酸奶贮存期间的频率扫描曲线

Fig.5　Frequency scanning curve of yogurt during storage

注：A 第 0 d；B 第 7 d；C 第 14 d；D 第 21 d；E 第 28 d。

加组酸奶空隙较小，凝乳结构收缩紧密，酪蛋白虽有聚集趋势，但整体结构相对完整；3% BPDF 添加组的孔洞直径虽进一步减小，却可见较多的蛋白质聚物，这可能是由于高浓度纤维颗粒产生的空间位阻占据凝胶网络间隙所致[39]。

2.5　改性 BPDF 对低脂酸奶贮存期间微生物活性与理化稳定性的影响

如图 7(A)，在贮存第 21 d 时，各组酸奶的活菌数均高于 7 log CFU/g，符合 GB 19302-2010《食品安全国家标准 发酵乳》要求。与对照组相比，添加 BPDF 可显著提高活菌数(P<0.05)，可能是膳食纤维中的益生成分对乳酸菌的生长有益[40]。延长贮存期至第 28 d 后，各添加组的活菌数仍高于 6.00 log CFU/g。

与菌数变化趋势相一致的是，如图 7(B)、图 7(C)所示，在 21 d 贮存期间，1%~3% BPDF 添加组的 pH 降幅(6.18%~8.70%)与滴定酸度增幅(28%~29.5%)均显著高于对照组(P<0.05)，该结果印证了秦小婷[41]关于柚子皮 SDF 促进乳酸代谢的发现。当贮存期延长至 28 d 时，BPDF 添加组的滴定酸度均升至 105°T 以上。

如图 7(D)可知，贮存至第 21 d 时，相较于对照组，添加 1%、2%、3% 的 BPDF 分别将乳清析出率抑制了 16.23%、30.53%、42.60%。当贮存期延长至第 28 d 时，2% 添加组的乳清析出率较对照组降低了 29.72%，而质构结果欠佳的 3% 添加组的乳清析出率却显著低于 2% 添加组(P<0.05)。此现象与陈秉彦等[42]利用纳微化笋膳食纤维和 Gürbüz 等[43]利用木瓜籽粘液粉降低酸奶乳清析出结果一致，这可能源于高浓度纤维的两面性：一方面通过自身强持水网络锁住自由水，物理性阻断乳清分离；一方面又干扰酪蛋白交联，形成机械性凝胶缺陷。

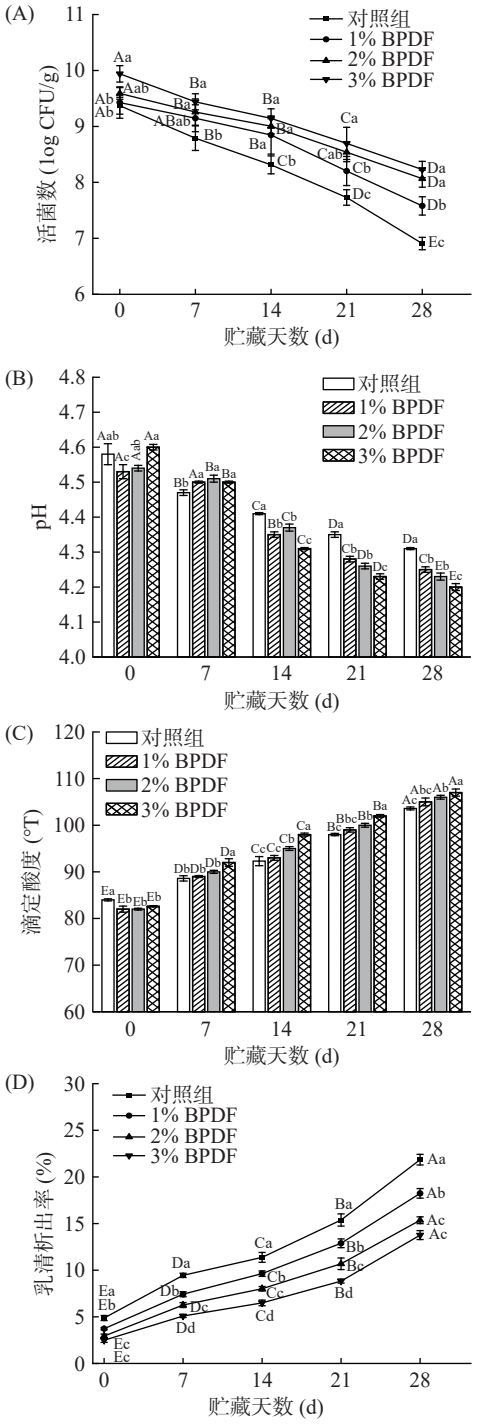


图 7　酸奶贮存期间的活菌数(A)、pH(B)、滴定酸度(C)和乳清析出率(D)变化

Fig.7　Changes of bacterial count (A), pH (B), acidity (C) and whey precipitation rate (D) of yogurt during storage

2.6　改性 BPDF 对低脂酸奶贮存期间抗氧化活性的影响

由图 8 可知，随着贮存天数的增加，对照组酸奶的 DPPH 及 $ABTS^+$自由基清除率呈显著下降趋

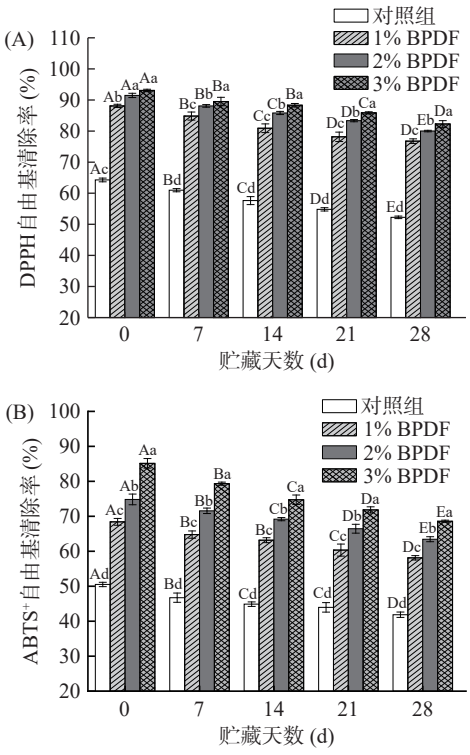


图 8　酸奶贮存期间的 DPPH(A)、$ABTS^+$(B)自由基清除率的变化

Fig.8　Changes of DPPH (A) and $ABTS^+$ (B) free radicals scavenging rates of yogurt during storage

势(P<0.05)。而添加 BPDF 可延缓酸奶的抗氧化活性的降低,且具有明显的量效关系。在 28 d 贮存期内,2% 和 3% 添加组的 DPPH 自由基清除率均高于 80%;2% 添加组的 $ABTS^{+}$自由基清除率均高于 60%,3% 添加组的 $ABTS^{+}$自由基清除率均高于 65%,显著高于其他组(P<0.05)。推测原因,可能是膳食纤维中的多糖增加了超抗氧化酶的活性[11]。

2.7 改性 BPDF 对低脂酸奶贮存期间感官的影响

2.7.1 颜色的变化 各组酸奶的 L^{*}(亮度)和 b^{*}(黄-蓝强度)值均在贮存期间呈下降趋势。其中,添加 BPDF 酸奶的 L^{*}和 b^{*}值均显著低于对照组(P<0.05),且随着 BPDF 添加量的增加而降低。而各组 a^{*}值(红-绿强度)均在贮存期呈上升趋势。其中,对照组酸奶样品的 a^{*}值为负值,添加 BPDF 酸奶的 a^{*}值为正值(P<0.05),且随着 BPDF 浓度的增加 a^{*}值升高,这可能是由于膳食纤维携带的游离多酚和花青素导致光分子的吸收受到影响[44]。

2.7.2 感官评分 如图 9 可知,对照组酸奶的感官评分(色泽、香气、口感和组织状态)在贮存期间呈下降趋势,这可能由于酸奶酸度明显增强,乳清析出增多,

表 7 酸奶贮存期间颜色变化

Table 7 Color changes of yogurt during storage

颜色属性	贮存天数(d)	样品			
		对照组	1% BPDF添加组	2% BPDF添加组	3% BPDF添加组
L^{*}	0	$84.27\pm.75^{Aa}$	64.48 ± 0.34^{Ab}	62.34 ± 0.31^{Ac}	57.24 ± 0.17^{Ad}
	7	81.44 ± 1.91^{ABa}	63.15 ± 0.26^{Bb}	60.40 ± 0.09^{Bb}	55.92 ± 0.85^{ABc}
	14	79.13 ± 0.90^{Ba}	61.27 ± 0.37^{Cb}	59.72 ± 0.29^{Bc}	55.06 ± 0.42^{BCd}
	21	77.96 ± 2.51^{BCa}	60.91 ± 0.67^{CDb}	58.70 ± 0.28^{Cb}	54.82 ± 1.02^{BCc}
	28	75.01 ± 0.68^{Ca}	59.93 ± 0.35^{Db}	57.19 ± 0.17^{Dc}	53.24 ± 0.28^{Cd}
a^{*}	0	-2.16 ± 0.11^{Cc}	3.26 ± 0.38^{Bb}	3.77 ± 0.08^{Cb}	4.21 ± 0.24^{Ba}
	7	-1.22 ± 0.23^{Bb}	3.86 ± 0.67^{Aa}	4.49 ± 0.12^{Ba}	4.78 ± 0.64^{ABa}
	14	-1.46 ± 0.13^{Bc}	4.11 ± 0.99^{Ab}	4.20 ± 0.09^{BCb}	5.06 ± 0.19^{ABa}
	21	-1.24 ± 0.11^{Bc}	4.05 ± 0.18^{Ab}	4.57 ± 0.26^{ABb}	5.31 ± 0.13^{ABa}
	28	-0.47 ± 0.46^{Ad}	4.14 ± 0.14^{Ac}	4.99 ± 0.08^{Ab}	5.86 ± 0.27^{Aa}
b^{*}	0	10.70 ± 0.69^{Aa}	6.86 ± 0.13^{Ab}	5.61 ± 0.55^{Ac}	5.04 ± 0.43^{Ac}
	7	9.90 ± 0.25^{ABa}	5.11 ± 0.19^{Bb}	4.85 ± 0.72^{Bb}	3.85 ± 0.17^{Bc}
	14	9.67 ± 0.46^{BCa}	5.05 ± 0.13^{Bb}	4.56 ± 0.78^{Cb}	3.80 ± 0.21^{Bc}
	21	9.44 ± 0.50^{BCa}	4.78 ± 0.45^{Bb}	4.27 ± 0.77^{Dbc}	3.59 ± 0.34^{Bc}
	28	8.92 ± 0.27^{Ca}	4.53 ± 0.50^{Bb}	4.03 ± 0.56^{Eb}	2.67 ± 0.16^{Cc}

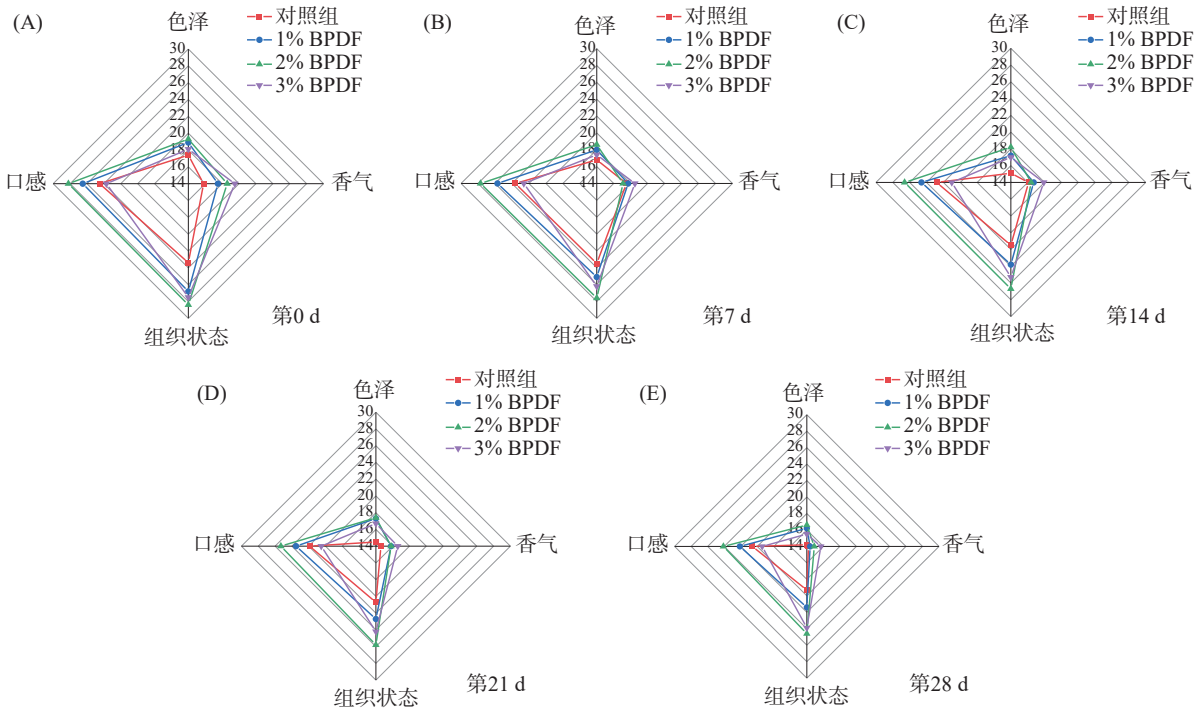


图 9 酸奶贮存期间的感官评分

Fig.9 Sensory scores of yogurt during storage

注: A 第 0 d; B 第 7 d; C 第 14 d; D 第 21 d; E 第 28 d。

致使感官评分降低。而添加改性 BPDF 酸奶的感官评分相对较高，且 2% 添加组酸奶的感官评分显著高于 1% 和 3% 添加组（$P<0.05$）。在 28 d 贮存期内，2% 添加组酸奶香气浓郁、口感适佳，其感官评分均高于 80 分，而 3% 添加组酸奶出现明显的颗粒感，评分降低为 74.5 分。

3　结论

本研究通过超声辅助酶法协同改性 BPDF，有效将其可溶性组分得率提升至 15.87%，并显著增强其持水力、持油力及膨胀力，为果渣资源高值化利用提供新路径。改性 BPDF 在低脂酸奶体系中通过静电-疏水双重作用优化酪蛋白凝胶网络结构。尽管 3% 改性 BPDF 组表现出更优的乳清持留力和乳酸菌保存率，但其质构特性显著劣化—硬度与内聚性下降，导致感官评分降低。因此，2% 添加量被确定为最优解。该组在满足贮藏稳定性基础要求（pH>4.2，滴定酸度<110°T，活菌数>10^6 CFU/mL）的前提下，还实现产品质构-功能-感官的综合平衡，符合工业化低脂酸奶开发的核心诉求。后续将进一步深入解析改性膳食纤维与酪蛋白互作的分子机理，同时拓展其在不同类型乳制品中的应用研究。

© 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］ BERET M V, WOLF I V, REBECHI S, et al. Microparticulated and concentrated whey proteins as structure and flavour enhancers in semi-skim high-protein yoghurts[J]. International Dairy Journal, 2024, 157: 106008.

［2］ YU Hongsen, CHENG Xinyue, LI Hang, et al. Effects and improvement mechanisms of ultrasonic pretreatment on the quality of fermented skim milk[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 108: 106958.

［3］ WU Jiajing, DAI Tian, LIN Rongyu, et al. Effect of protein-glutaminase on the texture, rheology, microstructure and sensory properties of skimmed set-type yoghurt[J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136831.

［4］ WU Jiajing, JIANG Deming, OUYANG Wei, et al. Optimizing skim milk yogurt properties: Combined impact of transglutaminase and protein-glutaminase[J]. Journal of Dairy Science, 2024, 107(11): 9087−9099.

［5］ ZHANG Xinzhen, GAO Yang, WANG Ran, et al. Effects of adding blueberry residue powder and extrusion processing on microstructure and *in vitro* digestibility of indica rice flour[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2024, 32: 100435.

［6］ LIU Xin, LIU Yingnan, DU Xiaoping, et al. Characterization of bamboo shoots dietary fiber modified by ball milling and its role in altering the physicochemical properties of shrimp surimi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271: 131979.

［7］ HASSAN Z, IMRAN M, AHMAD M H, et al. Ultrasound-assisted modification of insoluble dietary fiber from Chia (*Salvia hispanica* L.) seeds[J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021(1): 5035299.

［8］ LI Yina, YU Yuanshan, WU Jijun, et al. Comparison the structural, physicochemical, and prebiotic properties of litchi pomace dietary fibers before and after modification[J]. Foods, 2022, 11(3): 248.

［9］ QIN Xiaoting, YANG Chaoran, SI Jingyu, et al. Fortified yogurt with high-quality dietary fiber prepared from the by-products of grapefruit by superfine grinding combined with fermentation treatment[J]. LWT, 2023, 188: 115396.

［10］ DONG Ruihong, LIAO Wang, XIE Jianhua, et al. Enrichment of yogurt with carrot soluble dietary fiber prepared by three physical modified treatments: Microstructure, rheology and storage stability[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 75: 102901.

［11］ TIAN Yu, SHENG Yanan, WU Tong, et al. Effect of modified okara insoluble dietary fibre on the quality of yoghurt[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101064.

［12］ 李亚东, 刘成, 魏鑫, 等. 2024 年中国蓝莓产业发展报告[J]. 吉林农业大学学报, 2025, 47(1): 1−14. ［LI Yadong, LIU Cheng, WEI Xin, et al. Development report of 2024 China blueberry industry[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2025, 47(1): 1−14.］

［13］ TEJEDA-MIRAMONTES J P, GONZÁLEZ-FRÍAS S E, PADLON-MANJARREZ S, et al. Obtaining a fiber-rich ingredient from blueberry pomace through convective drying: Process modeling and its impact on techno-functional and bioactive properties[J]. Lwt, 2024, 210: 116862.

［14］ JAOUHARI Y, FERREIRA-SANTOS P, DISCA V, et al. Carbohydrases treatment on blueberry pomace: Influence on chemical composition and bioactive potential[J]. LWT, 2024, 206: 116573.

［15］ 于佳琪, 马静怡, 张静静, 等. 蒸汽爆破对石榴皮渣膳食纤维结构、理化及功能性质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(11): 263−272. ［YU Jiaqi, MA Jingyi, ZHANG Jingjing, et al. Effects of steam explosion on structural, physicochemical, and functional properties of dietary fiber from pomegranate peel residue[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(11): 263−272.］

［16］ JIANG Caixia, WEI Xuyao, LIU Xiaolan, et al. Multivariate analysis of structural and functional properties of soluble dietary fiber from corn bran using different modification methods[J]. Food Chemistry, 2025, 462: 140989.

［17］ 魏旭瑶, 姜彩霞, 曾祥瑞, 等. 复合酶改性玉米皮可溶性膳食纤维的工艺优化及理化特性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 202−209. ［WEI Xuyao, JIANG Caixia, ZENG Xiangrui, et al. Process optimization and physicochemical characteristics analysis of soluble dietary fiber from corn bran modified by composite enzymes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 202−209.］

［18］ 陈秉彦, 郭晓菲, 林晓姿, 等. 纳微化笋膳食纤维改善酸乳货架期乳清析出的作用机制[J]. 食品科学, 2024, 45(16): 10−18. ［CHEN Bingyan, GUO Xiaofei, LIN Xiaozi, et al. Mechanism of action of nanosized bamboo shoot dietary fiber in improving whey syneresis during shelf life of yogurt[J]. Food Science, 2024, 45(16): 10−18.］

［19］ JIAO Bo, WU Bicong, FU Weiming, et al. Effect of roasting and high-pressure homogenization on texture, rheology, and microstructure of walnut yogurt[J]. Food Chemistry, 2023, 20: 101017.

［20］ GOMES E R, BARROSO dos ANJOS PINTO C, STEPHANI R, et al. Effect of adding different types of soluble fibre to high-protein yoghurts on water holding capacity, particle size distribution, apparent viscosity, and microstructure[J]. International Dairy Journal, 2023, 141: 105609.

［21］ 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.]
[22] XU Kaiqian, FAN Gongjian, WU Caie, et al. Preparation of anthocyanin-rich mulberry juice by microwave-ultrasonic combined pretreatment[J]. Food Science and Biotechnology, 2022, 31(12): 1571−1581.
[23] CHEN Guangjing, ZHANG Shiqi, RAN Chunxia, et al. Extraction, characterization and antioxidant activity of water-soluble polysaccharides from *Tuber huidongense*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 431−442.
[24] 王伟佳, 高晓夏月, 刘爱国, 等. 不同热处理无乳糖酸奶与普通酸奶品质的比较[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 99−104. [WANG Weijia, GAO Xiaoxiayue, LIU Aiguo, et al. Quality comparison of lactose free yoghurt and ordinary yoghurt with different heat treatment[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 99−104.]
[25] 王萌, 刘泉, 郑喜群, 等. 高温蒸煮联合超声复合酶法改性麦麸膳食纤维工艺优化及体外益生活性[J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 266−276. [WANG Meng, LIU Quan, ZHENG Xiqun, et al. Modifying wheat bran dietary fiber using high-temperature steaming with ultrasound-assisted compound enzymatic method: Process optimization and effects on *in vitro* probiotic activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(2): 266−276.]
[26] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 130−136. [NIU Xi, SHI Qiankun, ZHAO Chengbin, et al. Effect of ultrasonic modification on physicochemical properties and structure of oat dietary fiber[J]. Food Science, 2020, 41(23): 130−136.]
[27] 刘鑫, 陈香玉, 郭锐, 等. 碧螺春多糖的超声辅助酶提取工艺优化、分离纯化及性质分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 138−146. [LIU Xin, CHEN Xiangyu, GUO Rui, et al. Process optimization of ultrasound-assisted enzyme extraction of biluochun polysaccharide and its separation, purification and property analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 138−146.]
[28] 周龙珠, 王朋, 董双, 等. 纤维素酶改性油莎豆粕可溶性膳食纤维结构与功能研究[J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 241−251. [ZHOU Longzhu, WANG Peng, DONG Shuang, et al. Studies on structure and function of cellulase-modified soluble dietary fiber from *Cyperus esculentus* meal[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(7): 241−251.]
[29] 方东亚, 郑亚凤. 笋头膳食纤维复合酶法改性工艺优化及其理化特性评价[J]. 福建农业学报, 2019, 34(3): 364−370. [FANG Dongya, ZHENG Yafeng. Enzymatic hydrolysis for producing dietary fibers from bamboo shoot byproduct[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2019, 34(3): 364−370.]
[30] WANG Jingyi, HE Shumin, TAO Sihong, et al. Structural, physicochemical, prebiotic properties of guava pulp insoluble dietary fiber and its quality enhancement ability on cow/goat yogurt: Impacts of ultrasound-assisted enzyme treatment[J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103797.
[31] FAN Xuejing, CHANG Haode, LIN Yanan, et al. Effects of ultrasound-assisted enzyme hydrolysis on the microstructure and physicochemical properties of okara fibers[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 69: 105247.
[32] 刘鸿铖, 樊红秀, 赵鑫, 等. 酶解-挤出复合法改性绿豆皮膳食纤维及其结构表征与理化性能[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 80−88. [LIU Hongcheng, FAN Hongxiu, ZHAO Xin, et al. Structural characterization and physicochemical properties of mung bean skin dietary fiber with enzymatic hydrolysis combined with extrusion modification[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(9): 80−88.]
[33] 郭晓菲. 纳微化膳食纤维制备及其在凝固型酸奶中应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2022. [GUO Xiaofei. Preparation of nano-micronized dietary fiber and its application in solidified yogurt[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.]
[34] ZHANG Zhiwei, YANG Xinyi, GAO Zhenhong, et al. Effects of modification methods on the structural characteristics and functional properties of dietary fiber from cucumber[J]. Food Chemistry, 2024, 24: 101808.
[35] 卢钏燚, 周静, 赵涛, 等. 桑葚微胶囊对酸奶品质与风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 312−321. [LU Chuanyi, ZHOU Jing, ZHAO Tao, et al. Effect of mulberry microcapsules on quality and flavor of yogurt[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 312−321.]
[36] 于鑫迪, 刘静雅, 任秀梅, 等. 功能性牦牛酸奶制备、贮藏期内品质及降嘌呤活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 20−29. [YU Xindi, LIU Jingya, REN Xiumei, et al. Preparation, quality and purine-lowering activity of functional yak yoghurt during storage period[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 20−29.]
[37] FAN Xiankang, SHI Zihang, XU Jue, et al. Characterization of the effects of binary probiotics and wolfberry dietary fiber on the quality of yogurt[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135020.
[38] 陈秉彦, 刘芸, 林晓姿, 等. 纳微化笋膳食纤维浓度干预凝固型酸奶凝胶网络形成的研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 138−145. [CHEN Bingyan, LIU Yun, LIN Xiaozi, et al. Effects of dietary fiber concentration of nano-sized bamboo shoots on the formation of yogurt gel network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 138−145.]
[39] ZHANG W H, AL-WRAIKATA M, SHU Q, et al. Enhancement effect of kale fiber on physicochemical, rheological and digestive properties of goat yogurt[J]. LWT, 2024, 207: 116649.
[40] 崔国庭, 李沁沛, 王缎, 等. 红枣多糖对乳酸菌发酵及酸奶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(19): 203−207. [CUI Guoting, LI Qinpei, WANG Duan, et al. Effect of jujube date polysaccharide on the fermentation of lactic acid bacteria and the quality of yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(19): 203−207.]
[41] 秦小婷. 超微粉碎联合乳酸菌发酵制备不同品种柚子皮可溶性膳食纤维及其在酸奶中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2024. [QIN Xiaoting. Preparation of soluble dietary fiber from different varieties of grapefruit peel by superfine grinding combined with fermentation treatment and its application in yogurt[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.]
[42] 陈秉彦, 郭晓菲, 林晓姿, 等. 纳微化笋膳食纤维改善酸奶货架期乳清析出的作用[J/OL]. 食品科学, 1−13[2025-05-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20231225.1031.002. [CHEN Bingyan, GUO Xiaofei, LIN Xiaozi, et al. The effect of nano-micronized bamboo shoot dietary fiber on improving whey precipitation during the shelf life of yogurt [J/OL]. Food Science, 1−13[2025-05-05]. https://link.cnki.net/urlid/11.2206.TS.20231225.1031.002.]
[43] GÜRBÜZ Z, ERKAYA-KOTAN T, ŞENGÜL M. Evaluation of physicochemical, microbiological, texture and microstructure characteristics of set-style yoghurt supplemented with quince seed mucilage powder as a novel natural stabiliser[J]. International Dairy Journal, 2021, 114: 104938.
[44] 许龙, 高鹏, 马海然, 等. 蓝莓多酚在发酵酸奶贮藏期稳定性研究[J]. 食品工业, 2021, 42(9): 167−171. [XU Meng, GAO Peng, MA Hairan, et al. Stability of blueberry polyphenols in fermented yoghurt during storage period[J]. The Food Industry, 2021, 42(9): 167−171.]