巩昌熙, 胡博洋, 张妮, 等. 红枣风味富硒酸奶溶豆的研发及产品特性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 333−341. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090246

GONG Changxi, HU Boyang, ZHANG Ni, et al. Development and Product Characterization of Jujube-flavored Selenium-enriched Yogurt Melts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 333−341. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090246

·工艺技术·

红枣风味富硒酸奶溶豆的研发及产品特性分析

巩昌熙, 胡博洋, 张　妮, 陶琪阳, 马　玲*

（山西农业大学食品科学与工程学院, 山西晋中 030801）

摘　要: 为满足消费者对营养化、功能化食品的需求，并促进乳制品多元化开发及红枣和富硒资源的高值化利用，本研究采用富硒鼠李糖乳杆菌、保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌复合菌种进行发酵，制备富硒酸奶基料，并通过添加红枣粉，开发红枣风味富硒酸奶溶豆。基于单因素实验与响应面试验优化工艺参数，以感官评分为核心指标，确定最佳工艺条件为：红枣粉添加量 0.5 g，预冻温度−45 ℃、真空冷冻干燥温度 38 ℃。在此优化条件下，产品感官评分达 87.38 分，并呈现优异的营养与功能特性：膳食纤维含量为 0.32%，总硒含量 19.27 μg/100 g，维生素 C 含量 1.85 mg/100 g，总抗氧化能力 FRAP 值为 14.17 mmol/L。与普通酸奶溶豆相比，本品在硒、维生素 C 及膳食纤维含量方面均显著提升，具有良好的口感与质构特性。扫描电镜与二级结构分析表明，其微观结构更紧密连续，β-折叠构象比例增加，证实蛋白质结构稳定性增强。此外，产品的速溶性与抗氧化活性也得到明显改善。综上，本研究为功能型乳制品创新及农业资源高值化利用提供了理论与实践依据。

关键词: 红枣, 富硒, 酸奶溶豆, 工艺优化, 微观结构

中图分类号: TS252.42　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0333−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025090246　　本文网刊:

Development and Product Characterization of Jujube-flavored Selenium-enriched Yogurt Melts

GONG Changxi, HU Boyang, ZHANG Ni, TAO Qiyang, MA Ling*

（College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China）

Abstract: To address consumer demand for nutritious and functional foods, and to promote the diversification of dairy products as well as the high-value utilization of jujube and selenium-rich resources, this study developed jujube-flavored selenium-enriched yogurt melts by first preparing a selenium-enriched yogurt base using a composite starter culture consisting of selenium-enriched *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus bulgaricus*, and *Streptococcus thermophilus*, followed by the incorporation of jujube powder. The process parameters were optimized via single-factor and response surface methodology (RSM) experiments, with sensory evaluation as the key indicator. The optimal conditions were: 0.5 g jujube powder addition, and pre-frozen at −45 ℃, then freeze-drying at 38 ℃. Under these conditions, the product achieved a sensory score of 87.38, with dietary fiber content of 0.32%, total selenium content of 19.27 μg/100 g, vitamin C content of 1.85 mg/100 g, and total antioxidant capacity (FRAP value) of 14.17 mmol/L. Compared to ordinary samples, the developed product exhibited higher levels of selenium, vitamin C, and dietary fiber, and better sensory and texture characteristics. Scanning electron microscopy and secondary structure analysis revealed a denser and more continuous microstructure, with an increased proportion of β-sheet conformations, confirming improved protein structural stability. In addition, the product

收稿日期: 2025−09−22

基金项目: 山西农业大学大学生国家级创新训练计划项目（S202410113112）; 晋中国家农高区科技创新项目（JZGJNGQKJCX202304）; 山西省现代农业产业技术体系建设项目（2026CYJSTX13-12）。

作者简介: 巩昌熙（2003−）, 男, 大学本科, 研究方向: 食品科学, E-mail: 18135120523@163.com。

*** 通信作者:** 马玲（1980−）, 男, 博士, 研究方向: 食品科学, E-mail: ml0359@163.com。

showed clearly improved instant solubility and antioxidant activity. In summary, this study provides a novel approach for functional dairy product development and resource utilization.

Key words: jujube; selenium-rich; yogurt melts; process parameters optimization; microscopic structure

酸奶溶豆是以酸奶为主要原料，在添加或不添加其它配料后经过冷冻干燥工艺制成的休闲、方便食品，其具有酸甜口味，酥脆可口，易于湿润分散的特点，定期食用不仅可以补充营养，促进食欲，并能调节胃肠道功能，深受消费者喜爱。

红枣（*Ziziphus jujuba* Mill.）作为中国传统食品的原料[1]，富含蛋白质、维生素、碳水化合物等，此外还含有多糖、黄酮类化合物和三萜类化合物等功能因子，因而具有抗氧化、抗炎和免疫调节的能力，具有开发功能性食品的潜力[2−5]。山西占全国红枣产区的 1/5，其气候和土壤条件为种植优质红枣提供了有利条件[6]。红枣作为配料在其它产品中应用较多，极大提升了产品的附加值[7−8]。

硒作为人体必需的微量元素，其生物有效性受摄入形式影响显著。中国约 72% 的耕地土壤缺硒，导致居民通过膳食途径的日均硒摄入量（47 μg）低于世界卫生组织（WHO）推荐的成人安全摄入范围（50~250 μg）[9−10]。而人体补硒主要以安全性和生物活性更高的有机硒摄入，研究表明，通过微生物代谢可将无机硒源（如亚硒酸钠）定向转化为生物活性更高的有机硒形态（以硒代蛋氨酸为代表），该转化过程可使硒元素的生物利用率提升 3~5 倍，同时降低无机硒的潜在毒性风险[11−13]。

现有研究显示，溶豆的品质优化主要集中在原料配比与干燥工艺两方面。在原料方面，段秋虹等[14]通过调整酸奶与玉米淀粉比例及添加蛋白质，改善了溶豆的风味与质构；王振宇[15]将封装硒肽的微胶囊应用于溶豆中，提升了产品的营养与口感。在干燥工艺上，Hnin 等[16]比较了红外冷冻干燥与真空冷冻干燥对玫瑰风味酸奶溶豆品质的影响，发现红外冷冻干燥在节能、护色及活性成分保留方面具有优势；Lao 等[17]进一步探讨了红外冷冻干燥结合微波真空干燥的工艺对羽衣甘蓝酸奶溶豆的影响，证实其在缩短时间、降低能耗的同时能保持溶豆风味。然而，溶豆现有产品仍面临风味单一、功能性设计不足等问题，将富硒乳酸菌发酵应用于溶豆以及溶豆干燥过程的研究鲜有报道。

基于此，本研究创新性融合山西红枣资源与富硒乳酸菌发酵，开发红枣风味富硒酸奶溶豆，旨在突破传统溶豆风味、功能，延伸红枣产业链，同时为缺硒人群提供高值化营养补充方案，兼具市场前景与健康效益。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鼠李糖乳杆菌（*L. rhamnosus*）、保加利亚乳杆菌（*L. bulgaricus*）、嗜热链球菌（*S. thermophilus*） 山西农业大学食品科学与工程学院乳品实验室；牛乳 山西农业大学牧场；红枣粉 山西宝珠山食品股份有限公司；盐酸、硫酸、氢氧化钠、苯酚、无水乙醇 天津风船化学试剂有限公司；亚硒酸钠 上海阿拉丁生化科技股份有限公司；3,3'-二氨基联苯胺 上海麦克林生化科技股份有限公司；2,2-联氮-二（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸）二铵盐 北京索莱宝科技有限公司；所用试剂均为分析纯。

PR224ZH/E 电子分析天平 奥豪斯仪器（常州）有限公司；P4 紫外可见分光光度计 上海美谱达仪器有限公司；HSY-26 电热恒温水浴锅 上海跃进医疗器械有限公司；BC/BD-519GHEP 海尔冷柜 青岛海尔特种电冰柜有限公司；TMS-Pro 质构仪 美国 FTC 公司；HC-3016R 高速冷冻离心机 安徽中科中佳科学仪器有限公司；LDZX-75KBSH 立式高压灭菌锅 上海申安医疗器械厂；3nhJDG-0.2 真空冷冻干燥机 兰州科近真空冻干技术有限公司；DZD400/2S 真空包装机 南通腾通包装机械有限公司；SW-CJ-2FB 超净工作台 浙江绍兴博伟仪器设备有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菌种活化及富硒发酵剂的制备 试验采用 MRS 液体培养基，以 5%（v/v）的接种比例将鼠李糖乳杆菌进行活化培养，37 ℃ 恒温静置传代三次。在鼠李糖乳杆菌培养 5 h 时添加入 12.5 μg/mL 的亚硒酸钠，培养 24 h，富硒率为 89.21%[18]，将活化好的菌株扩大培养得到富硒鼠李糖乳杆菌。保加利亚乳杆菌和嗜热链球菌同样以 3% 的接种量活化三代，最终以（嗜热链球菌∶保加利亚乳杆菌=1∶1）∶富硒鼠李糖乳杆菌=1∶1 的复合比例进行共培养配制，制得功能型富硒发酵剂。

1.2.2 红枣风味富硒酸奶溶豆的制作

红枣粉
↓
新鲜生牛乳→加热→加糖溶解→杀菌→冷却→接入菌种→发酵→后熟→混合搅拌→装入模具→预冻→真空冷冻干燥→脱模→包装

1.2.3 操作要点

1.2.3.1 加热、加糖溶解、灭菌 将新鲜生牛乳搅拌加热至 50 ℃，加 7%（w/w）白砂糖溶解，继续搅拌至 95 ℃ 灭菌 10 min。

1.2.3.2 冷却、接入菌种、发酵、后熟、混合搅拌 将其冷却至 42 ℃。红枣风味富硒酸奶：加入 1.2.1 中活化好的发酵剂 3%（v/v），搅拌均匀于 42 ℃ 静置发酵 4 h，直至酸奶能够充分凝固，酸度达到 70°T 时终止发酵，发酵完成后于 4 ℃ 冰箱中冷藏后熟 12 h，后熟完成后加入红枣粉搅拌均匀。富硒酸奶：同上接种

富硒混菌发酵剂，发酵及后熟条件相同，但不添加红枣粉。普通酸奶：接种未富硒的混菌发酵剂，发酵及后熟条件相同，且不添加红枣粉。

1.2.3.3　装入模具、预冻、真空冷冻干燥、脱模、包装

将 1.2.3.2 中的三组酸奶倒入模具中，在不同的温度下预冻，然后在不同温度下进行真空冷冻干燥，样品含水量在 3.80%~4.00%(w.b.)时干燥结束[19]。脱模后，立即密封保存，标记红枣风味富硒酸奶溶豆为 JD-Se-YGD，富硒酸奶溶豆为 Se-YGD，普通酸奶溶豆为 YGD。

1.2.4　单因素实验

1.2.4.1　红枣粉添加量对红枣风味富硒酸奶溶豆感官品质的影响　以凝固后的酸奶为研究对象，设定红枣粉添加量为 0、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1 g(以整体产品 10 g 为基准)，在预冻温度−40 ℃、预冻 1 h、干燥温度 40 ℃、冷冻干燥时间 20 h 的固定条件下，观察不同红枣粉添加量对酸奶溶豆的感官方面的变化影响，确定合适的红枣粉添加量。

1.2.4.2　预冻温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官品质的影响　以凝固后的酸奶为研究对象，设置预冻温度为−20、−40、−60、−80 ℃，保持红枣粉添加量为 0.5 g、预冻 1 h、干燥温度 40 ℃、冷冻干燥时间 20 h，观察不同预冻温度对溶豆的感官方面的变化影响，确定合适的预冻温度。

1.2.4.3　干燥温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官品质的影响　以凝固后的酸奶为研究对象，设定冷冻干燥温度为 20、30、40、50、60 ℃，控制红枣粉的添加量为 0.5 g、预冻温度为−40 ℃、预冻 1 h、冷冻干燥时间 20 h，观察不同干燥温度对溶豆的感官方面的变化影响，确定合适的干燥温度。

1.2.5　响应面试验　基于单因素实验的探究结果，固定预冻时间 1 h、冷冻干燥时间 20 h、升华温度 40 ℃的条件下，选取红枣粉的添加量(A)、预冻温度(B)和干燥温度(C)3 个主要因素，以溶豆制品的感官评价得分作为响应指标，运用 Design-Expert 10 软件构建三因素三水平响应面分析模型，试验因素水平设计见表 1。

表 1　响应面试验因素和水平

Table 1　Factors and levels of response surface test

水平	因素		
	A红枣粉添加量(g)	B预冻温度(℃)	C干燥温度(℃)
−1	0.3	−20	30
0	0.5	−40	40
1	0.7	−60	50

1.2.6　感官评定标准　参考刘昀等[20]的评价体系，并考虑产品自身属性特征，组织 20 名(男女比例 1:1)无明显味觉偏好的专业感官评定人员，依据色泽(权重为 10%)、外观(权重为 20%)、气味(权重为 20%)和口感(权重为 50%)进行评分，如表 2 所示。

表 2　红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分标准

Table 2　Sensory evaluation of scoring criteria for jujube flavored selenium-enriched yogurt melts

项目(权重)	评分标准	感官评分
色泽(10%)	表面色泽均一	8~10
	表面出现轻微的色泽不均	4~7
	产品大面积出现色泽不均	0~3
外观(20%)	外形完整，表面饱满，无塌陷变形	16~20
	外形完整，表面略有孔隙，轻微塌陷变形	9~15
	形状不规则，表面孔隙较多，有明显塌陷变形	0~8
气味(20%)	奶香味浓郁，有红枣的香味	16~20
	有淡奶香味、红枣香味，有少许异味	9~15
	无奶香、红枣气味或有异味	0~8
口感(50%)	无明显颗粒感，无硬芯，入口即化，口感顺滑，酸甜味适中	40~50
	有沙状颗粒感，无硬芯，酸甜味稍重或稍淡	20~39
	颗粒感明显，有硬芯，需要咀嚼才可吞咽，酸甜味过重或过淡	0~19

1.2.7　膳食纤维、总硒、维生素 C 含量测定　膳食纤维含量测定采用酶重量法，具体操作参照 GB 5009.88-2014 测定；硒含量依据 GB 5009.93-2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》测定；维生素 C 含量采用 2,6-二氯靛酚滴定法，具体参照 GB 5009.86-2016 进行测定。

1.2.8　质构特性测定　参考张一宁等[21]方法设置参数，每组样品测定 3 次取平均值。

1.2.9　傅里叶变换红外光谱分析　参照赵婷[22]的方法进行。取冻干后的溶豆样品与干燥的溴化钾 1:100(w/w)混合，经研钵充分研磨压片后进行红外光谱扫描，扫描波数为 400~4000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数 32 次。

1.2.10　溶豆微观结构观察　参照刘立鹏等[23]的方法并作适当调整。取适量冻干的溶豆样品，黏着于样品台上，镀金后上镜观察。工作条件：加速电压 10 kV。

1.2.11　速溶性测定　参考孟晓华等[24]的方法加以修改，精准称取 0.5 g 溶豆试样，转移到 100 mL 烧杯中，加入 10 mL 去离子水，置于 40 ℃恒温水浴锅中水浴加热，用计时器记录样品完全溶解的时间即为速溶性。

1.2.12　总抗氧化能力 FRAP 值测定　参考 Shori[25]的方法加以修改，依次配制并吸取浓度为 0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 $mmol·L^{-1}$ 的 $FeSO_4$ 溶液各 60 μL，使其与 540 μL FRAP 工作液(由 pH3.6 的 300 mmol/L 乙酸-乙酸钠缓冲液、8 mmol/L TPTZ 溶液、20 mmol/L $FeCl_3$ 溶液按 10:1:1 混匀)充分混合。在水浴中 37 ℃保持 10 min。使用去离子水为参比溶液，在 593 nm 波长下测定各浓度梯度溶液的吸光度值，绘制吸光度与浓度之间的标准曲线。在 0.100~1.000 mmol/L 的浓度范围内，吸光度与 $FeSO_4$

浓度之间存在良好的线性关系。建立的标准曲线为 y=0.1633x−0.0005，R^2=0.9991。以溶豆样品代替 $FeSO_4$ 溶液按照上述方法测定吸光值，根据 $FeSO_4$ 标准曲线计算样品的 FRAP 值，即 $FeSO_4$ 当量，单位为 mmol/L。按下式计算 FRAP 值。

$$FRAP(mmol/L)=\frac{A_1+0.0005}{0.1633}$$

式中，A_1 为样品在 593 nm 处的吸光度。

1.3 数据处理

实验结果进行 3 次重复，结果用平均值±标准差表示。使用 IBM SPSS Statistics 27 进行方差分析，采用 Origin 软件进行制图及 Design-Expert10 进行试验设计及响应面分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 红枣粉添加量对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响 由图 1 可知，随红枣粉添加量的增加，红枣风味富硒酸奶溶豆的感官评分趋势整体上为先增大后减小。当红枣粉为 0.5 g 时，红枣风味富硒酸奶溶豆感官评价达到最大值，为 86.4 分，此时红枣风味明显，红枣风味富硒酸奶溶豆口感最佳，无硬芯出现，当添加量较低时，红枣风味富硒酸奶溶豆的红枣香味不足，风味不突出，导致感官评分不高。但过多的红枣粉会导致酸味过多，并影响整个感官质量。因此，本研究选择 0.3、0.5、0.7 g 红枣粉添加量进行响应面优化试验，以进一步确定其最佳添加量，在保证红枣风味富硒酸奶溶豆良好口感的同时，最大程度提升其品质。

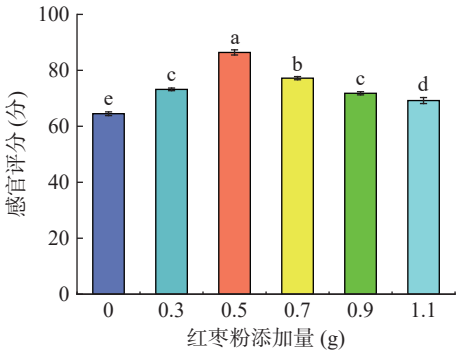


图 1 红枣粉添加量对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响

Fig.1 Effect of jujube powder addition on sensory evaluation of jujube flavored selenium-enriched yogurt melts

注：不同小写字母表示有显著性差异（P<0.05），图 2~图 3、图 8~图 9 同。

2.1.2 预冻温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响 由图 2 可知随着预冻温度的降低，红枣风味富硒酸奶溶豆的感官评分趋势整体上为先增大后减小。在预冻温度为−40 ℃ 时，红枣风味富硒酸奶溶豆感官评价达到最大值，为 85.5 分。当预冻温度降至−60 ℃ 时，产品感官会出现发酸的情况，导致感官评分下降。在−40 ℃ 时达到结构完整性、风味保留、口感顺滑的最佳平衡，而温度过高或过低均会因冰晶异常或质构变化导致其品质下降。因此，本研究选择预冻温度−20、−40、−60 ℃ 进行响应面优化试验，旨在找到最适宜的预冻温度条件，以提升红枣风味富硒酸奶溶豆的综合品质。

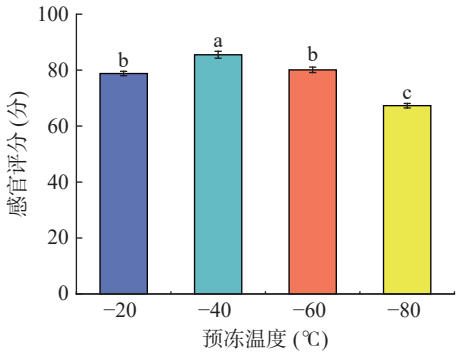


图 2 预冻温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响

Fig.2 Effect of pre-freezing temperature on sensory evaluation of jujube flavored selenium-enriched yogurt melts

2.1.3 干燥温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响 由图 3 可知，红枣风味富硒酸奶溶豆的感官评分随着干燥温度的增加，呈现出先上升后下降的趋势，在干燥温度为 40 ℃ 时，红枣风味富硒酸奶溶豆的感官评分达到最高，为 85.9 分。当干燥温度为 20 ℃ 时，由于温度过低，红枣风味富硒酸奶溶豆干燥不完全，成型质量较差，内部水分残留较多，不仅影响口感，还可能缩短保质期。而当干燥温度升高至 60 ℃ 时，红枣风味富硒酸奶溶豆脱模易碎，过于干燥，这是因为过高的温度使溶豆表面水分快速蒸发，导致内部结构过度收缩。因此，本研究选择干燥温度 30、40、50 ℃ 进行响应面优化试验，以确定最佳干燥温度，确保红枣风味富硒酸奶溶豆在保证良好口感和成型质量。

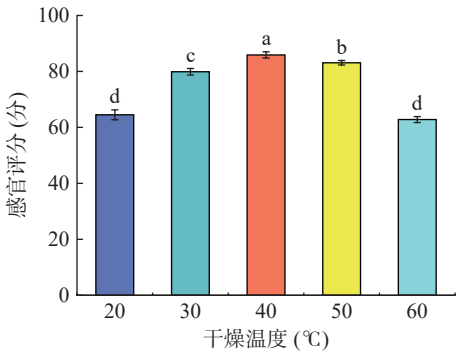


图 3 干燥温度对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分的影响

Fig.3 Effect of drying temperature on sensory evaluation of jujube flavored selenium-enriched yogurt melts

2.2 响应面试验

2.2.1 响应面优化试验结果 以红枣粉添加量、预冻温度及干燥温度为自变量，感官评分设为响应值，采用三因素三水平的响应面分析法，对红枣风味富硒

酸奶溶豆的配方组成及加工工艺参数开展系统优化。根据所列因素水平表，利用 Design-Expert10 软件设计出 17 组试验，试验结果见表 3。

表 3　响应面试验方案与结果

Table 3　Response surface experimental design and results

试验号	A红枣粉添加量	B预冻温度	C干燥温度	感官评分(分)
1	0	0	0	86.9
2	0	0	0	86.3
3	0	−1	1	73.2
4	1	1	0	74.8
5	−1	−1	0	60.4
6	0	1	1	78.2
7	−1	1	0	69.2
8	1	0	1	68.3
9	0	0	0	84.8
10	1	0	−1	73.2
11	0	1	−1	82.5
12	0	−1	−1	79.6
13	0	0	0	85.7
14	1	−1	0	68.2
15	−1	0	1	65.2
16	−1	0	−1	61.7
17	0	0	0	84.6

利用 Design-Expert10 软件对输入的试验数据进行方差分析，由表 4 可知，回归模型的 F 值为 43.20，P 值<0.0001，表明模型极显著。失拟项 P 值为 0.0673>0.05，不显著，说明方程拟合度较高，模型适用于优化红枣风味富硒酸奶溶豆的配方及工艺。在回归模型中，一次项因素 A、B 的 P 值分别为 0.0009 和 0.0025，均达到极显著水平(P<0.01)，因素 C 的 P 值为 0.0481，达到显著水平(P<0.05)，证实红枣粉添加量、预冻温度与干燥温度三者均为影响产品感官品质的关键工艺参数。二次项(A、B、C)的 P 值均小于 0.01，达到极显著水平，表明各因素与响应值之间存在明显的非线性关系，即存在最优工艺参数区间。利用 Design-Expert10 软件进行二次多项式回归拟合，得红枣粉添加量(A)、预冻温度(B)、干燥温度(C)对感官评分(Y)的二元多项回归方程：

$$Y=85.56+2.15A-1.89B+2.44C-1.35AB-0.40AC+0.52BC-12.99A^2-3.72B^2-3.47C^2$$

表 4　回归与方差结果分析

Table 4　Analysis of regression and variance results

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	1245.50	9	138.39	43.20	<0.0001	**
A	98.00	1	98.00	30.59	0.0009	**
B	67.86	1	67.86	21.19	0.0025	**
C	18.30	1	18.30	5.71	0.0481	*
AB	1.21	1	1.21	0.38	0.5583	
AC	17.64	1	17.64	5.51	0.0513	
BC	1.10	1	1.10	0.34	0.5758	
A^2	868.55	1	868.55	271.15	<0.0001	**
B^2	40.14	1	40.14	12.53	0.0095	**
C^2	72.08	1	72.08	22.50	0.0021	**
残差	22.42	7	3.20			
失拟项	18.02	3	6.01	5.46	0.0673	不显著
纯误差	4.40	4	1.10			
总离差	1267.92	16				

注：“*”显著(P<0.05)；“**”极显著(P<0.01)。

2.2.2　响应曲面及等高线分析　在固定其中一个因素的前提下，研究另外两个因素对红枣风味富硒酸奶

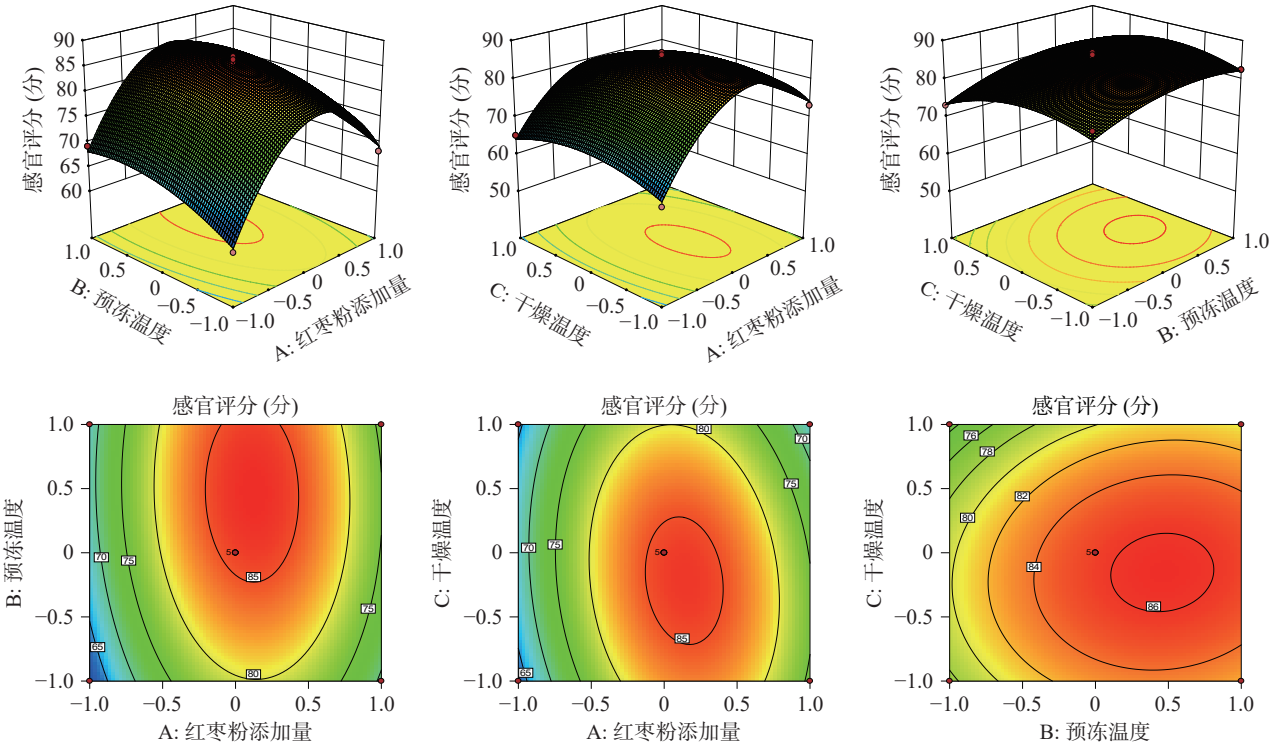


图 4　各因素交互作用对红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分影响的响应面及等高线

Fig.4　Response surface and contour plots of the interaction effects of various factors on sensory evaluation of jujube flavored selenium-enriched yogurt melts

溶豆感官评分的影响，响应曲面及等高线图结果如图 4 所示，各交互作用曲面均呈现一定的起伏。然而方差分析表明，各交互项（AB、AC、BC）均未达到显著水平（$P>0.05$）。这表明，图中的坡度差异并不能说明交互作用显著，而主要反映了各因素主效应的相对强弱。具体来看，AB 与 AC 曲面较陡，等高线呈椭圆，表明因素 A 的主效应较强，响应值对其变化更为敏感，BC 等高线呈近圆形，表明响应值对因素 B 和 C 的变化敏感度相近且交互作用微弱。

2.2.3 最佳工艺的确定及模型验证 利用 Design-Expert10 软件分析得到最佳的工艺参数：红枣粉添加量 0.53 g、预冻温度−44.45 ℃、干燥温度 38.1 ℃。通过方程求解得到预测值为红枣风味富硒酸奶溶豆感官评分为 87.31 分。为方便产品生产操作，将最佳配方调整为：红枣粉添加量 0.5 g、预冻温度−45 ℃、干燥温度 38 ℃。通过三次平行试验对最优配方进行验证，所获产品的感官评价结果为 87.38 分，与理论预测值拟合度高，说明本研究所得的响应面模型能较好地预测和反映红枣粉添加量、预冻温度、干燥温度等因素对酸奶溶豆感官评分的影响。

2.3 酸奶溶豆的制备结果

不同酸奶溶豆的样品如图 5 所示，每个样品约为 0.5 g，从中可以看出 JD-Se-YGD 呈淡黄色，外形完整，而 Se-YGD 和 YGD 呈乳白色，外形较完整。加入红枣粉不仅改变了溶豆的色泽、风味，同时有利于保持其完整的结构。

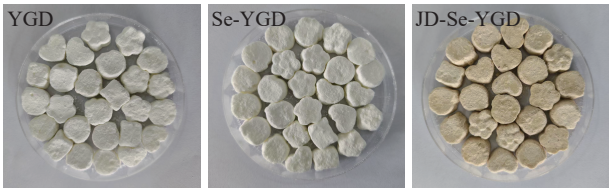


图 5 不同酸奶溶豆的外观图

Fig.5 Appearance of different yogurt melts

2.4 膳食纤维、总硒、维生素 C 含量分析

不同酸奶溶豆样品的膳食纤维、总硒、维生素 C 含量如表 5 所示，从中可以看出 JD-Se-YGD 的膳食纤维含量为 0.32%，显著高于 Se-YGD 和 YGD（$P<0.05$），因为红枣本身就是膳食纤维的优质来源，添加红枣粉提高了产品中的膳食纤维含量，增加了酸奶溶豆的营养价值[3]。在总硒含量方面，该酸奶溶豆为 19.27 μg/100 g，富硒发酵剂处理赋予了酸奶溶豆一定的硒含量，但 JD-Se-YGD 硒含量显著低于 Se-YGD（$P<0.05$），可能后续红枣粉加入稀释了产品中的硒，不过，整体仍能满足一定的硒摄入需求。此外，红枣的加入还使酸奶溶豆的维生素 C 含量达到 1.85 mg/100 g，显著高于其余二者的酸奶溶豆的维生素 C 含量（$P<0.05$），这是由于红枣本身含有丰富的维生素 C[26]。

表 5 酸奶溶豆的营养指标检测结果

Table 5 Results of nutritional index for yogurt melts

样品名称	膳食纤维(%)	总硒含量(μg/100 g)	维生素C(mg/100 g)
JD-Se-YGD	0.32±0.01^{a}	19.27±0.35^{b}	1.85±0.07^{a}
Se-YGD	0.12±0.05^{b}	23.53±0.50^{a}	0.92±0.11^{b}
YGD	0.08±0.02^{b}	1.69±0.06^{c}	0.87±0.06^{b}

注：同列不同小写字母表示有显著性差异（$P<0.05$），表6~表7同。

2.5 溶豆质构特性分析

不同酸奶溶豆的质构特性如表 6 所示，从中分析可知，添加红枣粉的 JD-Se-YGD 在硬度、弹性及内聚性方面均略高于 Se-YGD 与 YGD，而粘附性则较低，但组间差异均未达到统计学显著性（$P>0.05$）。这一结果可能与红枣粉较低的添加量有关，在实验研究的添加量范围内对质构没有较大的影响，所有样品均保持了相似的质构特性。

表 6 不同酸奶溶豆的质构特性

Table 6 Textural characteristics of different yogurt melts

样品名称	硬度(N)	粘附性(N/mm)	弹性(mm)	内聚性
JD-Se-YGD	4.89±0.03^{a}	0.21±0.01^{a}	1.54±0.12^{a}	1.34±0.12^{a}
Se-YGD	4.83±0.24^{a}	0.28±0.01^{a}	1.53±0.09^{a}	1.31±0.15^{a}
YGD	4.84±0.14^{a}	0.29±0.02^{a}	1.51±0.18^{a}	1.29±0.06^{a}

2.6 溶豆傅里叶变换红外光谱分析

不同酸奶溶豆的红外结果如图 6 所示，分析可知，不同酸奶溶豆的红外吸收峰相似，表明化学成分差异较小，富硒与添加红枣粉并未引起其结构的显著改变。酰胺 I 带振动特征的敏感性可以推测蛋白质二级结构的组成，参考惠丹阳[27] 的方法将酰胺 I 带进行峰的分类，1600~1640 cm^{-1} 为分子内 β-折叠，1641~1650 cm^{-1} 为无规则卷曲，1651~1660 cm^{-1} 为 α-螺旋，1661~1685 cm^{-1} 为 β-转角，1686~1700 cm^{-1} 为反向平行 β-折叠。使用 Peak Fit v 4.12 对酰胺 I 带红外光谱图进行基线校正、去卷积处理、二阶导数拟合。

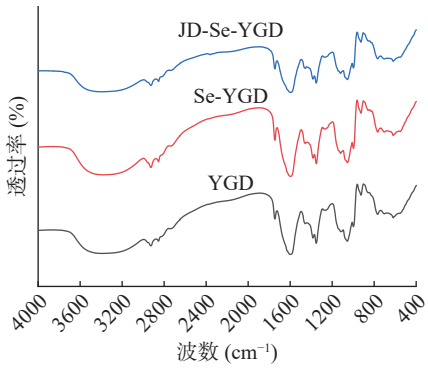


图 6 不同酸奶溶豆的傅里叶变换红外光谱图

Fig.6 Fourier transform infrared spectra of different yogurt melts

表 7 所示为蛋白质二级结构的占比情况。β-折叠、α-螺旋代表蛋白分子的有序性，β-转角能够反映蛋白分子的松散程度。总体来看，所有样品的蛋白质二级结构均以 β-折叠为主导，其次是 β-转角和 α-螺

旋，这表明蛋白质形成了高度有序、稳定的结构。与 YGD 相比，Se-YGD 的 α-螺旋与 β 转角含量减少，分别为 16.98%、32.26%，β-折叠含量增加到 50.75%。这表明富硒可以减缓蛋白向无序转变，这一结果与冯明菊等[28] 的研究结果类似。这可能是硒代蛋氨酸与酪蛋白相结合，诱导分子间 β-折叠堆积，形成稳定的氢键网络。JD-Se-YGD 与 Se-YGD 相比，α-螺旋与 β 转角含量减少到 16.35%、29.86%，β-折叠含量增加到 53.79%。这表明 α-螺旋和 β-转角的结构向 β-折叠转化，β-折叠含量又与蛋白质聚集程度密切相关，推测红枣中的膳食纤维通过氢键与静电作用调控了蛋白聚集使得 β-折叠含量增加[29]。

表 7　不同酸奶溶豆的二级结构占比
Table 7　Proportion of secondary structures in different yogurt melts

样品名称	酸奶溶豆二级结构占比(%)		
	β-折叠	α-螺旋	β-转角
JD-Se-YGD	53.79±0.34^{a}	16.35±0.24^{c}	29.86±0.29^{c}
Se-YGD	50.75±0.25^{b}	16.98±0.14^{b}	32.26±0.32^{b}
YGD	46.33±0.32^{c}	18.88±0.20^{a}	34.79±0.24^{a}

2.7　溶豆微观结构观察

不同酸奶溶豆样品的扫描电镜结果如图 7 所示，从中可以看出，YGD 整体结构较为松散，呈现由不规则纤维状酪蛋白网络构成的立体框架，内部空隙大小不均且分布较多，网络节点间连接相对稀疏。与 YGD 相比，Se-YGD 中富硒成分的引入使网络结构有所优化，酪蛋白胶束交联更紧密，空隙数量减少且尺寸缩小，网络节点间连接更密集，呈现出较为紧密、坚固的空间结构。JD-Se-YGD 中添加红枣粉的富硒酸奶溶豆，空隙有一定的减少，间距明显降低，使整体网络呈现连续且致密的特征，颗粒与蛋白基质的界面结合清晰，未见明显团聚现象，这可能是红枣粉中膳食纤维与蛋白质通过氢键与静电作用形成的柔性骨架，填充了网络空隙，形成了规整、贯通的微孔通道[30]。

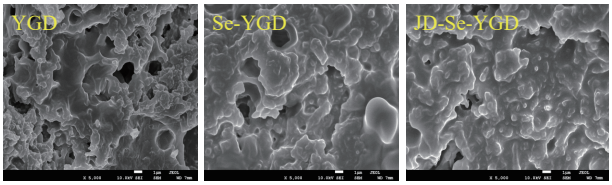


图 7　不同酸奶溶豆的扫描电镜图(5000×)
Fig.7　Scanning electron microscope images of different yogurt melts (5000×)

2.8　速溶性分析

不同样品的速溶性结果如图 8 所示，从中可以看出，JD-Se-YGD 快速溶化性更好，只需要 75.28 s 就能够溶解，而 Se-YGD 和 YGD 所需要时间较长。这与微观结构结果一致，孔隙不均、连接稀疏导致水分溶解时，水分渗透路径可能不连续，溶解速度变慢[31]。JD-Se-YGD 水溶解更快主要是由于红枣中果胶等物质引起的，其具有强亲水性和持水性，能通过氢键等作用与水分子强力结合，从而驱动水分的快速渗透[32]。其次红枣粉和酸奶混入后果胶会与酸奶中的蛋白质、油脂等成分结合，影响溶豆的内部结构，极大促进了水分的快速渗透[33]。这一结果与微观结构的结果相呼应，表明网络结构的连续性与均匀性是决定酸奶溶豆速溶性能的关键微观特征。

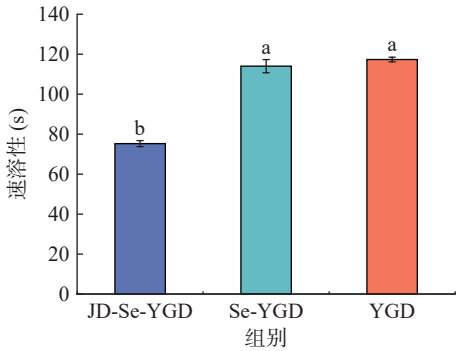


图 8　不同酸奶溶豆的速溶性
Fig.8　Instant solubility of different yogurt melts

2.9　总抗氧化能力分析

不同酸奶溶豆的总抗氧化能力如图 9 所示，从中分析可知，JD-Se-YGD 具有最大的总抗氧化能力，其 FRAP 值为 14.17 mmol/L，高于 Se-YGD 和 YGD；这可能与红枣和硒的协同作用有关，而且冷冻干燥的工艺有利于保留抗氧化活性成分，与表 5 中较高的维生素 C 含量相对应，另外富硒乳酸菌发酵提高了酸奶溶豆的抗氧化能力[34]。红枣中的黄酮类物质、多酚类等抗氧化物质与硒的协同作用，也促进了 JD-Se-YGD 的抗氧化能力[35]。

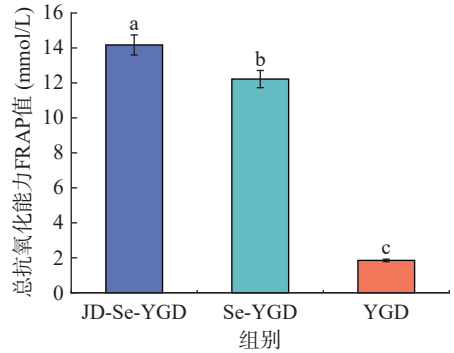


图 9　不同酸奶溶豆的总抗氧化能力
Fig.9　Total antioxidant capacity of different yogurt melts

3　结论

本研究对红枣风味富硒酸奶溶豆工艺及基本配方和品质特性进行研究，通过单因素实验和响应面优化试验，以感官评分为指标，确定了最佳配方为红枣粉添加量 0.5 g、加工工艺为预冻温度−45 ℃、干燥温度 38 ℃。在此条件下，产品的感官评分为 87.38 分，溶解时间 75.28 s，产品膳食纤维含量、总硒含量和维生素 C 含量分别达到 0.32%、19.27 μg/100 g 和

1.85 mg/100 g，总抗氧化能力 FRAP 值为 14.17 mmol/L。产品质构特性良好，整体网络呈现连续且致密的特征。红枣风味富硒酸奶溶豆的研发，为丰富酸奶溶豆的开发提供了试验依据，为红枣和富硒资源的开发利用提供了新方向。

© 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］ 鲁周民. 红枣原汁制备及饮料加工研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2010. ［LU Z M. Study on extracting jujube juice and processing beverage[J]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.］

［2］ ZHU D Q, JIANG N, WANG N, et al. A literature review of the pharmacological effects of jujube[J]. Foods, 2024, 13(2): 16.

［3］ 吴喆, 朱佳敏, 刘军, 等. 红枣主要活性成分及其功能活性研究进展[J]. 现代食品科技, 2024, 40(9): 359−369. ［WU Z, ZHU J M, LIU J, et al. Research progress on the main active components of jujube and their functional activities[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 359−369.］

［4］ RUAN W, LIU J L, ZHANG S X, et al. Sour jujube (*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*): A bibliometric review of its bioactive profile, health benefits and trends in food and medicine applications[J]. Foods, 2024, 13(5): 636.

［5］ 张紫怡, 赵斐然, 索晓毅, 等. 枣及其活性成分抗炎作用机制的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 407−416. ［ZHANG Z Y, ZHAO F R, SUO X Y, et al. Research progress on the anti-inflammatory mechanism of *Ziziphus jujuba* Mill. and its bioactive ingredients[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 407−416.］

［6］ 王振雅, 韩旭峰, 王振斌. “钻石模型”视角下的山西保德红枣产业发展研究[J]. 云南农业大学学报(社会科学), 2016, 10(3): 19−23. ［WANG Z Y, HAN X F, WANG Z B. Research on red dates industry of baode based on diamond model[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science), 2016, 10(3): 19−23.］

［7］ CAI W T, ZHUANG H N, WANG X Y, et al. Functional nutrients and jujube-based processed products in *Ziziphus jujuba*[J]. Molecules, 2024, 29(14): 3437−3437.

［8］ 张云亮, 范洪臣, 窦博鑫, 等. 红枣相关产品的研究进展[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(4): 146−150. ［ZHANG Y L, FAN H C, DOU B X, et al. Research progress of red jujube related products[J]. Storage and Process, 2021, 21(4): 146−150.］

［9］ 苏梦容, 王妍, 阮莲, 等. 富硒营养强化剂的开发利用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(5): 137−147. ［SU M R, WANG Y, RUAN L, et al. Research progress on the development and utilization of selenium-enriched nutritional fortifiers[J]. China Food Additives, 2025, 36(5): 137−147.］

［10］ 侯春艳, 杨趁仙. 富硒生物活性肽的制备、生物活性及构效关系研究进展[J]. 中国油脂, 2025, 50(1): 115−121. ［HOU C Y, YANG C X. Progress on the preparation, bioactivity and structure-activity relationship of selenium-enriched bioactive peptides[J]. China Oils and Fats, 2025, 50(1): 115−121.］

［11］ 刘晓蕊, 李旭男, 李民, 等. 富硒乳酸菌的生物活性及其在动物生产中的应用[J]. 饲料工业, 2025, 46(15): 21−28. ［LIU X R, LI X N, LI M, et al. Biological activity of selenium rich lactic acid bacteria and their application in animal production[J]. Feed Industry, 2025, 46(15): 21−28.］

［12］ 王睿楠, 李金宇, 卢阳阳, 等. 乳酸菌富硒机制及硒化产物特性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(7): 378−386. ［WANG R N, LI J Y, LU Y Y, et al. Research progress on selenium enrichment mechanism and selenized product characteristics of lactic acid bacteria[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(7): 378−386.］.］

［13］ YANG J P, YANG H. Recent development in Se-enriched yeast, lactic acid bacteria and bifidobacteria[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 63(3): 11−15.

［14］ 段秋虹, 郭楠楠, 游新侠, 等. 烘烤型酸奶溶豆的研制[J]. 食品工业, 2018, 39(3): 16−19. ［DUAN Q H, GUO N N, YOU X X, et al. Study on the producing of baking yogurt melts[J]. The Food Industry, 2018, 39(3): 16−19.］

［15］ 王振宇. 封装硒肽微胶囊的美拉德反应产物制备及其用于富硒溶豆产品的开发研究[D]. 武汉：武汉轻工大学, 2023. ［WANG Z Y. Preparation of the maillard reaction products ofselenium-enriched peptide encapsulated bymicrocapsules and the development ofselenium-enriched yogurt melts[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023.］

［16］ HNIN K K, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Influence of novel infrared freeze drying of rose flavored yogurt melts on their physicochemical properties, bioactive compounds and energy consumption[J]. Food & Bioprocess Technology, 2019, 12(12): 2062−2073.

［17］ LAO Y Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. Drying Technology, 2020, 38: 621−633.

［18］ 景晨茜. 硒化乳酸菌胞外多糖结构及抗氧化性研究[D]. 晋中：山西农业大学, 2021. ［JING C X. Study on the structure and antioxidant activity of extracellularpolysaccharide of selenium lactic acid bacteri[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2021.］

［19］ 劳艳艳. 基于羽衣甘蓝的蔬菜酸奶溶豆高效干燥制备及其特性研究[D]. 无锡：江南大学, 2020. ［LAO Y Y. Study on the efficient drying technology and the effectson characteristics of vegetable yogurt melts based on kale[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.］

［20］ 刘昀, 张婷, 石琳, 等. 天然彩色酸奶溶豆的制备工艺及其优化[J]. 现代食品, 2020(3): 108−111. ［LIU Y, ZHANG T, SHI L, et al. Preparation technology and optimization of natural color yogurt beans[J]. Modern Food, 2020(3): 108−111.］

［21］ 张一宁, 陈怡岑, 李晓楠. 杂粮溶豆配方的研究[J]. 粮食加工, 2023, 48(4): 37−40,92. ［ZHANG Y Y, CHEN Y C, LI X N. Study on the formula of multi-grain soluble bean[J]. Grain Processing, 2023, 48(4): 37−40,92.］

［22］ 赵婷. 藜麦蛋白酸奶的研制及贮藏期品质分析[D]. 晋中：山西农业大学, 2024. ［ZHAO T. Development of quinoa protein yogurt and qualityanalysis during storage period[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2024.］

［23］ 刘立鹏, 李雪晴, 李红娟, 等. 脱脂乳的不同热处理工艺对酸奶质构和微观结构的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(3): 26−30. ［LIU L P, LI X Q, LI H J, et al. Effect of different heat treatment processes of skim milk on texture and microstructure of yogurt[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(3): 26−30.］

［24］ 孟晓华, 徐贵华, 姬玉梅. 海棠果溶豆的研制[J]. 食品工业

科技，2023，44(14)：191−199. ［MENG X H, XU G H, JI Y M. Development of begonia fruit dissoluble beans[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 191−199.］

［25］ SHORI B A. Proteolytic activity, antioxidant, and α-Amylase inhibitory activity of yogurt enriched with coriander and cumin seeds[J]. LWT, 2020, 133(3): 109912.

［26］ FAZIO A, TORRE C L, CAROLEO M C, et al. Effect of addition of pectins from jujubes (*Ziziphus jujuba* Mill.) on vitamin c production during heterolactic fermentation[J]. Molecules, 2020, 25(11): 2706.

［27］ 惠丹阳, 华舒雨, 唐裕芳, 等. 大豆蛋白部分替代牛乳蛋白对酸奶理化性质及结构的影响[J]. 食品与发酵工业，2023，49(15)：122−128. ［HUI D Y, HUA S Y, TANG Y F, et al. Effect of partial replacement of milk protein by soy protein on the physicochemical properties and structure of yogurt[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 122−128.］

［28］ 冯明菊, 熊华, 王晓雅, 等. 富硒糙米蛋白理化特性及抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技，2020，41(15)：34−42. ［FENG M J, XIONG H, WANG X Y, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of protein in selenium-enriched brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 34−42.］

［29］ JOSHI V, SHIVACH T, YADAV N, et al. Circular dichroism spectroscopy as a tool for monitoring 76 aggregation in monoclonal antibody therapeutics[J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(23): 11606−11613.

［30］ CORREDIG M, SHARAFBAFI N, KRISTO E. Polysaccharide-protein interactions in dairy matrices, control and design of structures[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(8): 1833−1841.

［31］ MURRIETA-PAZOS I, GAIANI C, GALET L, et al. Comparative study of particle structure evolution during water sorption: Skim and whole milk powders[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011, 87(1): 1−10.

［32］ CHEN P H, KUO T Y, KUO J Y, et al. Novel chitosan–pectin composite membranes with enhanced strength, hydrophilicity and controllable disintegration[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(4): 1236−1242.

［33］ PAN H, ZHOU S, CHU X, et al. Effects of thermal denaturation on the interactions between soluble soybean polysaccharides and casein and whey protein[J]. Molecules, 2025, 30(21): 4207.

［34］ WANG L L, LIU Q Q, LI Y H, et al. Revealing the impact of organic selenium-enriched *Lactiplantibacillus plantarum* NMl21 on yogurt quality through volatile flavor compounds and untargeted metabolomics[J]. Food Chemistry, 2025, 474: 143223.

［35］ PARHIZKARY M, JAFARI M S, ASSADPOUR E, et al. Pea protein-coated nanoliposomal encapsulation of jujube phenolic extract with different stabilizers; characterization and *in vitro* release[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101771.