DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2026.17.005

低分子量κ-卡拉胶对酸奶品质的影响规律

李美秀[1],杨远帆[1,2,3,4],洪涛[1,2,3,4],姜泽东[1,2,3,4],倪辉[1,2,3,4,5],郑明静[1,2,3,4*]
(1.集美大学 海洋食品与生物工程学院,福建 厦门 361021;2.福建省食品微生物与酶工程重点实验室,福建 厦门 361021;3.厦门市食品与生物工程技术研究中心,福建 厦门 361021;4.厦门南方海洋研究中心 海藻资源化利用与深加工重点实验室,福建 厦门 361021;5.厦门海洋职业技术学院 海洋生物学院,福建 厦门 361021)

摘 要:为拓展低分子量κ-卡拉胶的应用途径,研究低分子量κ-卡拉胶对酸奶品质的影响规律。利用酸水解结合超滤制备低分子量κ-卡拉胶多糖,以酸奶的pH值、酸度、持水力、发酵菌活菌数、质地特性和感官评分为指标,阐明低分子量κ-卡拉胶多糖、活菌发酵条件等因素对酸奶品质的影响规律。结果表明,低分子量κ-卡拉胶能够显著提高酸奶持水性、活菌数和感官评分等。低分子量κ-卡拉胶酸奶的最优配方为低分子量κ-卡拉胶添加量0.30%、活菌发酵时间9 h、发酵剂接种量1.00%、蔗糖添加量8%,在该条件下,酸奶酸度为(87.67±1.15)°T,持水力为(68.91±0.61)%;活菌数为(2.54±0.14)×10⁶ CFU/mL,提高了28.28%;感官评分分由67.29±2.87增加至88.89±1.17。研究结果表明,低分子量κ-卡拉胶多糖可以改善酸奶的质构特性,提高酸奶的活菌数和感官评分。

关键词:κ-卡拉胶;多糖降解;益生菌;酸奶;质构特性

Influence of Low Molecular Weight κ-Carrageenan on the Quality of Yogurt

LI Meixiu[1], YANG Yuanfan[1,2,3,4], HONG Tao[1,2,3,4], JIANG Zedong[1,2,3,4], NI Hui[1,2,3,4,5], ZHENG Mingjing[1,2,3,4*]
(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering, Xiamen 361021, Fujian, China; 3. Xiamen Food and Biological Engineering Technology Research Center, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. Key Laboratory of Seaweed Resource Utilization and Deep Processing, Xiamen South Ocean Research Center, Xiamen 361021, Fujian, China; 5. School of Marine Biology, Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: To broaden the application scope of low-molecular-weight κ-carrageenan, this study investigated the regulatory effects and mechanisms of low-molecular-weight κ-carrageenan on yogurt quality. Low-molecular-weight κ-carrageenan polysaccharides were prepared via acid hydrolysis combined with ultrafiltration. Taking pH value, titratable acidity, water-holding capacity, viable count of fermentative bacteria, textural properties and sensory scores of yogurt as evaluation indicators, to elucidate the effects of low-molecular-weight κ-carrageenan polysaccharides, viable bacteria fermentation conditions and other factors on yogurt quality. The outcomes suggest that low-molecular-weight κ-carrageenan could significantly enhance the water-holding capacity, viable bacterial count and sensory scores of yogurt. The optimal formulation for low-molecular-weight κ-carrageenan fortified yogurt was concluded as follows: the addition amount of low-molecular-weight κ-carrageenan was 0.30%, fermentation duration was 9 h, starter culture inoculum size was 1.00%, and sucrose dosage was 8%. Under these optimal conditions, the titratable acidity of yogurt reached (87.67±1.15) °T, the water-holding capacity was (68.91±0.61)%, and the viable bacterial count was (2.54±0.14)×10⁶ CFU/mL, with an increase of 28.28%. Meanwhile, the sensory score rose from 67.29±2.87 to 88.89±1.17. In conclusion, low-molecular-weight κ-carrageenan polysaccharides can effectively improve the textural characteristics, viable bacterial count and sensory scores of yogurt.

基金项目:福建省自然科学基金优青项目(2024J09041);"十四五"国家重点研发计划项目(2023YFD2100603)
作者简介:李美秀(1996—),女(汉),硕士,研究方向:水产品加工。
*通信作者:郑明静(1990—),女(汉),副教授,博士,研究方向:食品加工技术。

Key words: κ-carrageenan; degradation modification; probiotics; yogurt; textural properties

引文格式:
李美秀,杨远帆,洪涛,等 . 低分子量 κ-卡拉胶对酸奶品质的影响规律[J]. 食品研究与开发,2026,47(17):33-42.
LI Meixiu, YANG Yuanfan, HONG Tao, et al. Influence of Low Molecular Weight κ-Carrageenan on the Quality of Yogurt[J]. Food Research and Development,2026,47(17):33-42.

卡拉胶(carrageenan)又称角叉菜胶,是从多种红藻细胞壁中提取的含有硫酸基团的线性高分子亲水性多糖,其长链由 1,3-α-D 吡喃半乳糖和 1,4-β-D 吡喃半乳糖为基本骨架交替相连[1],被广泛应用于食品工业中。天然的卡拉胶分子量大,降解的方法主要有化学降解[2-3]、酶降解[4]和物理降解[5-6]等,其降解产物具有多种生物活性,包括免疫调控活性[7]、抗病毒活性[8]、抗氧化活性[9]以及降血脂活性[10]等。酸奶已逐渐成为人们喜爱的乳制品之一,其中的蛋白质和矿物质不仅十分丰富,还含有大量的活乳酸菌,具有促进肠道健康、免疫调节等作用[11]。卡拉胶常作为增稠剂、稳定剂应用在酸奶制品中,例如 Skryplonek 等[12]将 0.15% κ-卡拉胶添加到冷冻酸奶中,该添加量下酸奶的硬度和黏度最高,提升了产品感官品质和外观接受度。Zhang 等[13]发现 κ-卡拉胶可以促进果胶诱导的液态酸奶凝胶化,诱导酪蛋白聚集成连续的网络结构,形成稳定的 κ-卡拉胶/果胶/酪蛋白胶束混合物。但是,目前低分子量 κ-卡拉胶在酸奶产品中的应用鲜有报道。

随着人们保健意识的加强,当前诸多研究聚焦于将具有生物活性、益生元功效的功能性多糖协同益生菌发酵来生产功能性酸奶,使多糖的生理活性充分体现,发挥保健功效的同时,又能有效优化酸奶的质构特性,提高产品品质[14]。例如,Li 等[15]发现,与空白组的发酵乳相比,添加杏鲍菇多糖的发酵乳的抗氧化性和益生功能提升,同时其乳酸菌数量、硬度和黏度也得到提高。Wu 等[16]在正常发酵的酸奶体系中添加蒸汽爆破海带多糖,结果表明,该处理方式在保持酸奶原有的口感和香气基础上,持水量得到了显著提高,水分分布得到了优化,酸奶的黏附性及其消化过程中乳酸杆菌和乳球菌的活力也得到了提高。由此可见,大分子量的卡拉胶通过降解修饰所得到的低分子量衍生物,或许可更高效地发挥益生元功能,进而实现促进益生菌生长繁殖、调节机体血脂平衡等功效。

因此,为研究低分子量 κ-卡拉胶多糖对酸奶品质的影响,通过酸水解结合超滤技术制得低分子量 κ-卡拉胶多糖,并采用德氏乳杆菌保加利亚亚种与嗜热链球菌进行复合发酵,以酸奶的理化指标、感官评分和质地特性为考察指标,采用单因素试验与正交试验优化低分子量 κ-卡拉胶酸奶的发酵工艺,以期为低分子量 κ-卡拉胶产品的应用性能研究奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

德氏乳杆菌保加利亚亚种、嗜热链球菌:西安园葵生物科技有限责任公司;纯牛奶:内蒙古伊利实业集团股份有限公司;硫酸、酚酞、氢氧化钠(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;MRS 肉汤培养基:北京路桥科技有限公司;κ-卡拉胶(κ-carrageenan,KC):绿新(福建)食品有限公司;蔗糖:河南万邦化工科技有限公司。

PHSJ-3F 型 pH 计:上海仪电科学仪器股份有限公司;DLAB D-160 型均质机:大龙兴创实验仪器(北京)股份公司;ZXRD-B5110 型恒温鼓风干燥箱、ZSBB-728 型电热恒温水浴锅:上海智城分析仪器制造有限公司;Microfuge 20 型高速离心机:贝克曼库尔特有限公司;TA.TOUCH 型质构仪:上海泽圣经贸有限公司。

1.2 方法

1.2.1 低分子量 κ-卡拉胶多糖片段的酸奶制备工艺

1.2.1.1 低分子量 κ-卡拉胶多糖片段的制备

参考 Lu 等[17]的方法并加以修改。2.0 g KC 溶于 150 mL 60 ℃水中,待体系温度稳定后加入 50 mL 0.8 mol/L 硫酸溶液,使 KC 的最终浓度为 10 mg/mL,硫酸浓度为 0.2 mol/L,于 60 ℃水浴反应 0.5 h,随后取出反应液,快速冷却至室温,用 NaOH 溶液中和至 pH7,利用超滤装置收集相对分子质量小于 20 000 的低分子量 κ-卡拉胶片段,用截留分子量为 500 Da 的透析袋透析 72 h,最后将透析袋中的溶液冻干,即可得到低分子量 κ-卡拉胶多糖片段,并命名为 SO-2。

1.2.1.2 SO-2 酸奶工艺流程

纯牛奶→添加蔗糖→添加 SO-2→混合后灭菌(90 ℃,15 min)→冷却(42 ℃)→接种发酵剂(德氏乳杆菌保加利亚亚种与嗜热链球菌的质量比为 1∶1)→搅拌混匀→罐装→发酵(42 ℃)→冷藏后熟(4 ℃,12 h)→酸奶成品。

1.2.2 单因素试验的发酵条件

基础配方:100 mL 纯牛奶,0.3% KC,1.00% 发酵剂接种量,8% 蔗糖。

1.2.2.1 SO-2 添加量

在基础配方上，设置 SO-2 添加量分别为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%，发酵时间 8 h，通过考察 SO-2 添加量对酸奶 pH 值、酸度、持水力、活菌数、感官评价、质构特性的影响，确定适宜的 SO-2 添加量。

1.2.2.2 发酵时间

在基础配方上，设置发酵时间分别为 6、7、8、9、10 h，通过考察发酵时间对酸奶 pH 值、酸度、持水力、活菌数、感官评价、质构特性的影响，确定制备 SO-2 酸奶的最佳发酵时间。

1.2.2.3 发酵剂接种量

在基础配方上，设置发酵剂接种量分别为 0.25%、0.50%、1.00%、1.50%、2.00%，发酵时间 8 h，通过考察发酵剂接种量对酸奶 pH 值、酸度、持水力、活菌数、感官评价、质构特性的影响，确定制备 SO-2 酸奶适宜的发酵剂接种量。

1.2.2.4 蔗糖添加量

在基础配方上，设置蔗糖添加量分别为 6%、7%、8%、9%、10%，发酵时间 8 h，通过考察蔗糖添加量对酸奶 pH 值、酸度、持水力、活菌数、感官评价、质构特性的影响，确定制备 SO-2 酸奶适宜的蔗糖添加量。

1.2.3 酸奶 pH 值测定

酸奶的 pH 值使用 pH 计平行测定 3 次产品的 pH 值，得到平均值。

1.2.4 酸奶的酸度测定

酸奶的酸度测定参考 GB 5009.239—2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》。

1.2.5 酸奶的持水力测定

酸奶的持水力测定方法如下：称取离心管质量，记为 m_1(g)；向离心管中加入一定量待测酸奶样品，称量离心管与酸奶总质量，记为 m_2(g)；离心结束后去除上层析出的水分，称量离心管与底部凝乳沉淀物的总质量，记为 m_3(g)。每组样品平行测定 3 次，结果取平均值。酸奶的持水力(W,%)按公式(1)进行计算。

$$W = (m_2 - m_3)/(m_2 - m_1) \times 100 \quad (1)$$

1.2.6 乳酸菌活菌数的测定

酸奶的乳酸菌活菌数测定参考 GB 4789.35—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》。

1.2.7 感官评价

感官评定人员由 11 人组成，满分 100，去掉 1 个最高分和 1 个最低分，取剩下 9 人评分的平均值，感官评价标准见表 1。

1.2.8 酸奶的质构特性测定

采用质构仪测定酸奶样品的质构特性，选用圆柱形探头，设定仪器运行参数为测前速率 1 mm/s、测试速率 1 mm/s、测后回程速率 2 mm/s，测定后得到酸奶硬度、弹性、胶着性、咀嚼性、黏聚性等质构指标。

表 1 酸奶的感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for yogurt

项目	评分标准	分值
色泽（30 分）	呈均匀乳白色，颜色鲜艳，有光泽	24~30
	呈乳白色，但颜色略显暗淡或不够均匀	18~<24
	淡黄色，色泽偏差明显	10~<18
	呈灰白色，色泽严重不佳	3~<10
	绿色、黑色斑点或有霉菌，不合格品	0~<3
组织状态（30 分）	凝固良好，质地细腻光滑，无气泡、沉淀物	24~30
	凝固基本完整，略有少量气泡或沉淀，质地较细腻	18~<24
	凝固欠佳，气泡或沉淀明显，质地稍粗糙	10~<18
	凝固不完全，大量气泡或沉淀，质地粗糙	3~<10
	未凝固或严重分离，存在异物，不合格品	0~<3
气味（20 分）	酸奶香味浓郁纯正，无异味，具有明显的乳酸香气和奶香	16~20
	酸奶香味较浓，轻微异味但不影响整体感受	11~<16
	酸奶香味较淡，异味明显但总体上可接受	5~<11
	酸奶香味淡薄，异味显著影响品尝体验	1~<5
	无酸奶香味，有强烈异味，不合格品	0~<1
口感（20 分）	顺滑度极好，品质细腻，酸甜适当，口感醇厚	16~20
	顺滑度较好，酸甜平衡略有欠缺，口感较醇厚	11~<16
	顺滑度一般，酸甜度不均衡，口感略显单薄	5~<11
	粗糙，酸度过强或过弱，缺乏层次感，口感不佳	1~<5
	极端粗糙，无法接受的酸甜比例，无愉悦口感，不合格品	0~<1

1.2.9 正交试验

按 $L_9(3^4)$正交试验表开展四因素三水平的正交试验，以酸奶的感官评分为评价指标，因素水平见表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment

水平	A SO-2 添加量/%	B 发酵时间/h	C 发酵剂接种量/%	D 蔗糖添加量/%
1	0.2	7	0.5	7
2	0.3	8	1.0	8
3	0.4	9	1.5	9

1.3 数据处理

通过 Origin 2021、Microsoft Office、Excel 2021、IBM SPSS statistics 26 等软件对试验数据处理分析和图表绘制，采用单因素分析进行显著性分析，$p<0.05$ 表示差异显著。每个试验至少重复 3 次，数据结果表示为平均值±标准差。

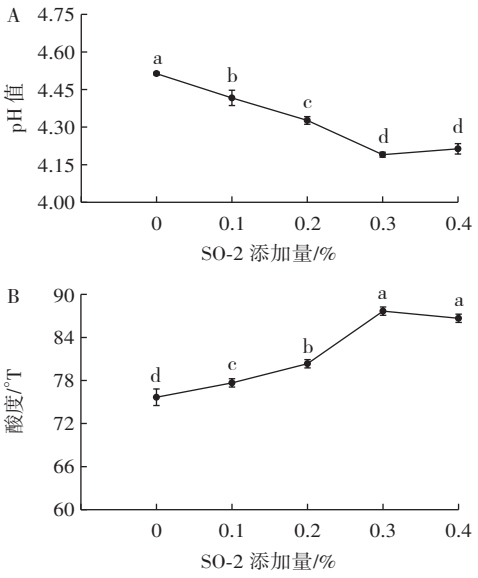
2 结果与分析

2.1 SO-2 添加量对酸奶理化指标的影响

2.1.1 SO-2 添加量对酸奶 pH 值及酸度的影响

卡拉胶作为增稠剂或稳定剂，可以通过增强酸奶凝胶网络的稳定性，改善酸奶的质地，增加其黏稠度和稳定性，也会在一定程度上影响发酵菌的生长环境和

代谢活动。SO-2 添加量对酸奶 pH 值及酸度的影响见图 1。



A. pH 值;B. 酸度。不同小写字母表示存在显著性差异,$p<0.05$。

图 1 SO-2 的添加量对酸奶 pH 值和酸度的影响

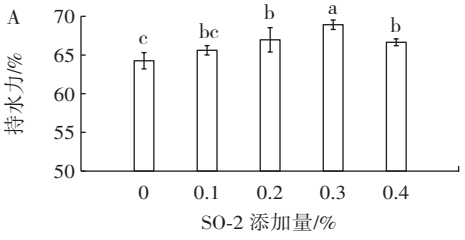
Fig.1 Effect of SO-2 addition amount on the pH value and acidity of yogurt

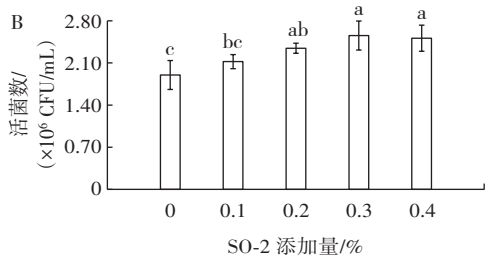
由图 1 可知,随着 SO-2 添加量从 0% 增加到 0.3%,酸奶的 pH 值从 4.51 逐渐减小至 4.19;酸度由 75.67 °T 提高至 87.67 °T($p<0.05$);SO-2 添加量高于 0.3% 时,酸奶 pH 值和酸度变化均不显著($p>0.05$)。结果表明,SO-2 可为发酵菌的生长提供碳源,促进发酵代谢,加速体系 pH 值下降。因此,确定 0.3% 为 SO-2 较合适的添加量。

2.1.2 SO-2 添加量对酸奶持水力及活菌数的影响

多糖的添加可以增强酸奶的黏性和弹性,有助于维持产品的稳定性,减少储存期间的脱水收缩现象,保持良好的持水力[18]。SO-2 添加量对酸奶持水力及活菌数的影响见图 2。

如图 2A 所示,酸奶的持水力效果随着 SO-2 添加量的增加呈先增强后减弱的趋势。当 SO-2 添加量为 0.3% 时,酸奶的持水力达到最高值,相比于未添加的组别,持水力提高了 7.24%($p<0.05$);SO-2 添加量持续增加,酸奶的持水力反而降低。这可能是因为多糖的羟基结构促进酸奶体系中稳定的氢键、疏水作用等





A. 持水力;B. 活菌数。不同小写字母表示存在显著性差异,$p<0.05$。

图 2 SO-2 的添加量对酸奶持水力和活菌数的影响

Fig.2 Effect of SO-2 addition amount on the water holding capacity and viable bacteria count of yogurt

分子作用力的形成,更促进了酸奶三维凝胶结构的形成,防止乳清析出[18]。有研究表明,高浓度的多糖会破坏酸奶的凝胶微观结构,导致乳清析出[19],持水力下降[20]。

由图 2B 可知,未添加 SO-2 的酸奶体系中发酵菌活菌数为(1.90±0.24)×10⁶ CFU/mL;添加 SO-2 能够显著提升发酵菌的活菌数,在 0.3% 的添加量下最多可达到(2.56±0.24)×10⁶ CFU/mL;但添加量为 0.4% 时,活菌数开始减少为(2.51±0.22)×10⁶ CFU/mL。结果表明,浓度适宜的 SO-2 能够显著促进酸奶中发酵菌的生长,与上述 pH 值和酸度的结果相一致,可能与前面提及 SO-2 对酸奶结构稳定性和持水力的提高密切相关。研究表明,活性多糖促进酸奶的有机酸的积累和持水性提升,形成更加稳定的微环境(适宜的 pH 值、温度和水分分布),适量多糖有利于乳酸菌的生长繁殖[21],不是添加量越多,活菌数越高[22]。过量的多糖可能会导致酸奶过于黏稠,水分活度下降,限制发酵菌的扩散和代谢效率,从而影响其数量的增长[23]

2.1.3 SO-2 添加量对酸奶感官评价和质构特性的影响

SO-2 添加量对酸奶感官评价和质构特性的影响见表 3。

表 3 SO-2 的添加量对酸奶感官评价和质构特性的影响

Table 3 Effect of SO-2 addition amount on the sensory evaluation and textural properties of yogurt

SO-2 添加量/%	感官评分	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/g	胶着性/g	黏聚性/g
0	67.33±3.94^{c}	6.52±0.61^{b}	0.97±0.01^{a}	5.63±0.30^{b}	6.55±0.33^{b}	0.57±0.02^{a}
0.1	75.56±2.55^{b}	12.20±4.00^{a}	0.94±0.04^{a}	9.75±1.72^{a}	9.13±1.07^{a}	0.55±0.07^{a}
0.2	81.89±3.66^{a}	15.24±2.72^{a}	0.95±0.05^{a}	9.91±2.36^{a}	9.25±2.36^{a}	0.60±0.04^{a}
0.3	83.78±3.31^{a}	16.95±4.53^{a}	0.97±0.02^{a}	10.08±2.45^{a}	9.36±0.78^{a}	0.60±0.01^{a}
0.4	76.56±4.00^{b}	12.51±1.41^{a}	0.92±0.06^{a}	9.55±2.46^{a}	9.24±1.16^{a}	0.55±0.05^{a}

注:同列不同字母表示差异显著,$p<0.05$。

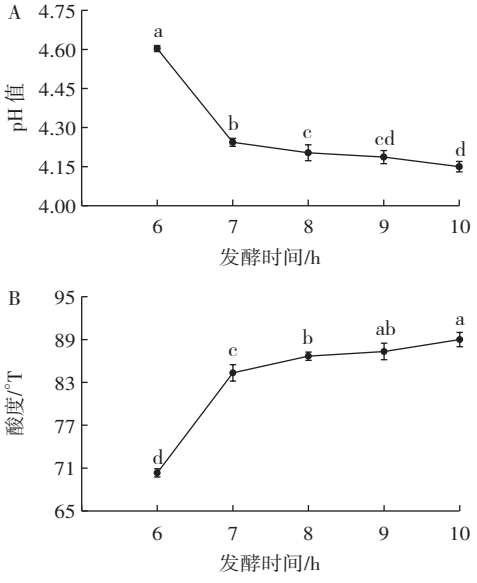
由表 3 可知，与持水力、发酵活菌数相一致，酸奶产品的感官评分和质构品质与 SO-2 添加量整体上呈正相关的关系，当添加量为 0.3% 时，感官评分、硬度、弹性等相关指标到达最佳，说明适量的 SO-2 可以改善酸奶的组织状态、风味及口感，也与前期结构稳定性、持水力增加有关。但 SO-2 添加量超过 0.3% 之后，感官评分和相关质构特性降低；与上述提到高浓度的 SO-2 抑制了发酵菌的生长增殖、破坏三维凝胶网络结构、造成产品色泽和滋味变差等密切相关。Aljewicz 等[24]的研究结果显示，添加浓度高于 0.25% 的 β-葡聚糖时，发酵剂细菌数量减少并延长了牛奶酸化过程，这一现象也与 Yang 等[20]的研究结果类似。

综合持水力、活菌数、感官指标以及质构特性，选择 SO-2 添加量为 0.2%、0.3%、0.4% 进行后续正交试验。

2.2　发酵时间对酸奶的理化指标的影响

2.2.1　发酵时间对酸奶 pH 值和酸度的影响

酸奶发酵过程中，发酵时间直接影响酸奶制品的 pH 值和酸度。主要是因为发酵菌在适宜的温度下产生乳酸，pH 值下降和酸度增加，蛋白质逐渐凝固并形成特有的酸奶质地[25]。发酵时间对酸奶 pH 值和酸度的影响见图 3。



A. pH 值；B. 酸度。不同小写字母表示存在显著性差异，p<0.05。

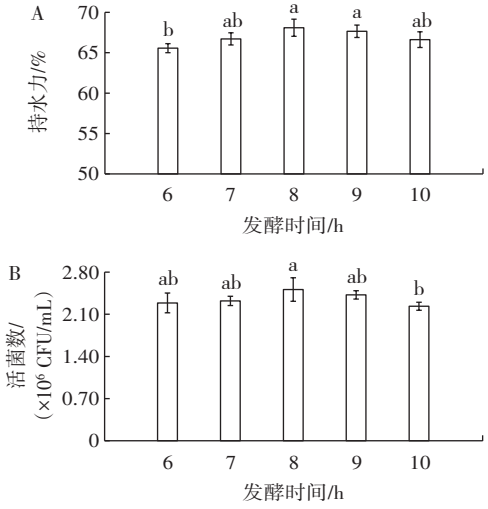
图 3　发酵时间对酸奶 pH 值和酸度的影响

Fig.3　Effects of fermentation time on the pH value and acidity of yogurt

由图 3 可知，随着发酵时间的延长，酸奶的 pH 值快速下降、酸度快速上升，特别是 6~8 h 时（p<0.05）；而 8~10 h 时 pH 值逐渐平缓、酸度缓慢上升。酸奶的 pH 值过低和酸度过高，不仅会抑制发酵菌的生长，还可能破坏酸奶的结构稳定性和产品风味[26]。因此，发酵时间选择为 8~10 h 比较适宜。

2.2.2　发酵时间对酸奶持水力及活菌数的影响

酸奶的持水力也称为保水性或脱水收缩性，指酸奶保持其内部水分的能力[27]；其性能高低会影响其产品稳定性，若持水力太弱会导致酸奶的凝乳效果不佳，乳清析出情况严重，从而影响酸奶的质地和口感[28]。发酵时间对酸奶持水力及活菌数的影响见图 4。



A. 持水力；B. 活菌数。不同小写字母表示存在显著性差异，p<0.05。

图 4　发酵时间对酸奶持水力和活菌数的影响

Fig.4　Effects of fermentation time on the water holding capacity and viable bacteria count of yogurt

由图 4A 可以看出，酸奶持水力在整个发酵阶段先上升后下降，发酵 8 h 和 9 h 时的酸奶持水力效果较好，其中发酵 8 h 时的酸奶的持水力最高，相比与发酵 6 h，提高了 3.85%（p<0.05）。结果表明，足够的发酵时间才能使发酵菌充分繁殖，发酵菌将乳糖转化为乳酸，当 pH 值下降到蛋白质等电点以下时，促进酸奶凝固形成三维网络结构，截留更多的水分，提高酸奶的持水性[29]。如果发酵时间过长，可能会导致酸度过高，进而引起蛋白质过度变性和聚集，破坏酸奶内部结构，导致乳清分离现象增加，降低酸奶的持水力[26]。由此，8 h 是酸奶发酵最适宜的时间。

在酸奶发酵过程中，发酵菌活菌数与酸奶的理化特性有交互影响[30]。与 pH 值和酸度结果相一致，发酵时间对酸奶的发酵菌活菌数的影响整体上呈现先上升后下降的趋势（图 4B）。发酵时间为 8 h 时的活菌数高于发酵时间 6 h 时，其他组活菌数差异较小。在适宜的发酵时间里，发酵菌利用牛奶中的营养物质进行代谢繁殖[31]。当发酵继续进行，活菌数有所降低，可能是由于营养物质逐渐消耗，体系中代谢产物（如乳酸）积累使酸奶的酸度过高，不利发酵菌的生长以致于增长速率减缓[32]，达到相对稳定的阶段。

2.2.3　发酵时间对酸奶的感官评价和质构特性的影响

发酵时间对酸奶的感官评价和质构特性的影响

见表 4。

表 4　发酵时间对酸奶感官评价和质构特性的影响

Table 4　Effects of fermentation time on the sensory evaluation and textural properties of yogurt

发酵时间/h	感官评分	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/g	胶着性/g	黏聚性/g
6	64.67±2.78^{d}	11.23±0.16^{a}	0.93±0.02^{a}	5.87±0.38^{a}	6.97±1.01^{a}	0.54±0.11^{a}
7	77.11±2.62^{b}	11.93±1.28^{a}	0.94±0.05^{a}	6.74±1.76^{a}	7.10±1.44^{a}	0.56±0.02^{a}
8	86.67±2.55^{a}	14.67±0.72^{a}	0.95±0.03^{a}	7.95±1.34^{a}	7.99±1.26^{a}	0.59±0.05^{a}
9	84.44±3.91^{ab}	12.84±0.80^{a}	0.94±0.06^{a}	7.58±1.55^{a}	7.80±1.74^{a}	0.58±0.04^{a}
10	68.78±2.33^{c}	12.59±2.10^{a}	0.89±0.12^{a}	6.95±1.18^{a}	7.31±0.99^{a}	0.53±0.13^{a}

注：同列不同字母表示差异显著，p<0.05。

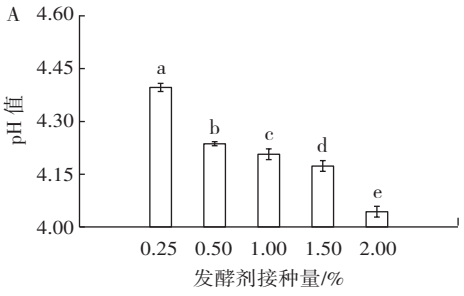
由表 4 可知，感官评分最高出现在发酵 8 h 时；随着发酵的不断进行，酸奶的感官特性如组织状态和滋味等均有下降的趋势。与感官评分相一致，酸奶的凝胶硬度、弹性、咀嚼性、胶着性和黏聚性呈现先增大后减小的趋势，但是变化不显著（p>0.05），在发酵 8 h 时，酸奶的硬度、弹性等质构指标最佳。这可能是因为随着发酵进行，发酵菌产生的乳酸使牛奶中的蛋白质变性并形成三维网状结构，发酵时间合适时呈现出良好的凝固状态，有助于增加酸奶的黏稠度和硬度[33]；而过度发酵可能导致结构破坏，引起质地粗糙或乳清析出等问题。另外，适当的发酵时间促进乳香、发酵香等香气的增加；反之，过长的发酵时间可能导致香气成分失衡，产生不良气味或酸涩口感，这也是发酵 10 h 时感官评分显著降低的主要原因。

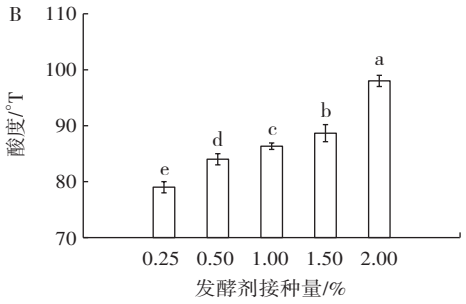
综合持水力、活菌数、感官指标以及质构特性，选择发酵时间为 7、8、9 h 进行后续正交试验。

2.3　不同发酵剂接种量对酸奶的理化指标的影响

2.3.1　不同发酵剂接种量对酸奶 pH 值及酸度的影响

较高的发酵剂接种量意味着更多的发酵菌参与发酵过程，这将导致乳糖更快地转化为乳酸，从而加速 pH 值的下降。不同发酵剂接种量对酸奶 pH 值及酸度的影响见图 5。





A. pH 值；B. 酸度。不同小写字母表示存在显著性差异，p<0.05。

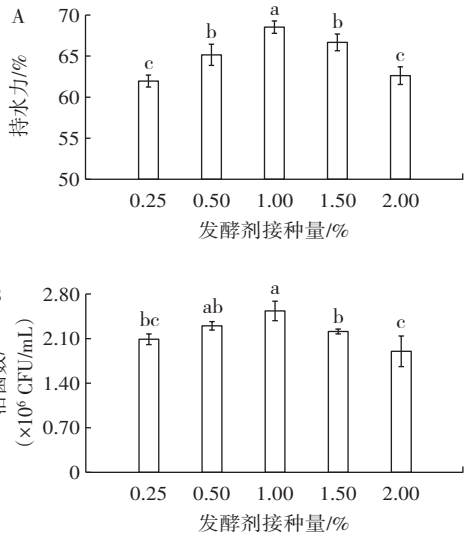
图 5　发酵剂接种量对酸奶 pH 值和酸度的影响

Fig.5　Effects of starter inoculum amount on the pH value and acidity of yogurt

如图 5 所示，发酵时间相同，而发酵剂接种量逐渐增加，酸奶的 pH 值下降明显，酸度上升，发酵剂接种量为 2.00% 时，其 pH 值达到最低值，酸度高达 98 °T（p<0.05）。虽然高发酵剂接种量可以使酸奶的 pH 值迅速降低，缩短达到理想酸度所需的时间。但发酵剂接种量过高，酸奶酸度过高，不但口感会过于酸涩，而且还可能引起蛋白质过度变性，导致质地问题如乳清分离[32]。有研究表明，酸度在 70~90 °T 时食用较佳[34]。

2.3.2　不同发酵剂接种量对酸奶持水力和活菌数的影响

发酵菌在发酵过程中的代谢产物如乳酸会导致牛奶蛋白质变性并形成三维凝胶网络结构，对于提高酸奶的持水力非常重要[33]。不同发酵剂接种量对酸奶持水力和活菌数的影响见图 6。



A. 持水力；B. 活菌数。不同小写字母表示存在显著性差异，p<0.05。

图 6　发酵剂接种量对酸奶持水力及活菌数的影响

Fig.6　Effects of starter inoculation amount on the water holding capacity and viable bacteria count of yogurt

如图 6A 所示，随着发酵剂接种量的增加，酸奶持水力先上升后下降。当发酵剂接种量为 1.00% 时，持水力最大，与发酵剂添加量 0.25% 对比，持水力提高了 10.60%（p<0.05）。这与 Wang 等[26]的研究类似，较高的发酵剂接种量可以加速乳酸的生成，从而加快蛋白质网络的形成，增强产品的持水力，减少乳清分离现象；反之，发酵剂接种量过高可能导致 pH 值迅速下降，引起蛋白质过度收缩，同样会造成蛋白质网络结构不佳、持水力降低、乳清析出等问题。

由图 6B 可知，发酵剂接种量从 0.25% 增加到 1.00% 时，活菌数从（2.09±0.08）×10^6 CFU/mL 增加到了（2.53±0.15）×10^6 CFU/mL。继续增加发酵剂接种量，活菌数下降，发酵剂接种量为 2.00% 时，活菌数降至最小[（1.90±0.24）×10^6 CFU/mL]。由此说明，当发酵剂接种量过大时，有限的营养资源、氧气供应不足、代谢废物积累等因素可能无法支持所有发酵菌的有效增殖，反而导致部分细菌因竞争压力而死亡或处于休眠状态，限制了发酵菌的最大活菌数。综合分析，以发酵剂接种量 1.00% 的发酵菌最为适宜。

2.3.3　不同发酵剂接种量对酸奶感官评价和质构特性的影响

不同发酵剂接种量对酸奶感官评价和质构特性的影响见表 5。

表 5　发酵剂接种量对酸奶感官评价和质构特性的影响

Table 5　Effects of inoculum dose on the sensory evaluation and textural properties of yogurt

发酵剂接种量/%	感官评分	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/g	胶着性/g	黏聚性/g
0.25	75.44±2.35^c	13.37±1.06^c	0.97±0.01^a	5.67±0.81^c	6.08±0.80^c	0.58±0.01^a
0.50	80.56±2.83^b	14.66±0.74^b	0.95±0.02^a	8.67±0.52^b	8.91±0.38^b	0.56±0.05^a
1.00	89.78±2.28^a	16.56±0.25^a	0.97±0.03^a	11.73±1.09^a	12.06±0.91^a	0.61±0.04^a
1.50	70.56±3.17^d	15.65±0.27^{ab}	0.95±0.02^a	8.90±0.71^b	9.38±0.47^b	0.56±0.02^a
2.00	60.22±2.68^e	15.53±0.27^{ab}	0.96±0.01^a	8.62±0.45^b	9.23±0.34^b	0.58±0.01^a

注：同列不同字母表示差异显著，p<0.05。

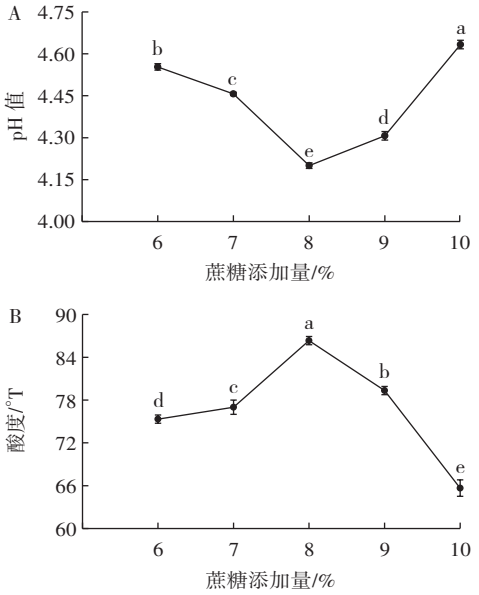
由表 5 可以看出，发酵剂接种量为 1.00% 时，酸奶的感官得分、硬度和咀嚼性最高，但是在该发酵剂接种量下酸奶的弹性和黏聚性无显著影响；随着发酵剂接种量的持续增加，酸奶的感官评分、硬度和咀嚼性等指标均开始出现不同程度的下降趋势。硬度和咀嚼性的上升表明发酵剂接种量的逐渐增加有助于增强酸奶凝胶结构的强度，这与持水力提升相一致。但是，发酵剂接种量过多不仅会导致酸奶口感偏酸，甜味感太弱，同时酸奶凝胶结构稳定性也会变差。王紫琳等[35]研究显示，适量的发酵剂接种量不仅能促进均匀且稳定的蛋白质网络的快速形成，还会促进发酵过程中乳酸以及其他挥发性化合物的生成，有助于形成丰富而和谐的香气。综上，过多或过少的发酵剂接种量均可能导致凝胶结构不够坚固或受到破坏、香气成分失衡，影响产品的感官和质构等品质。

综合持水力、活菌数、感官指标以及质构特性，选择发酵剂接种量 0.50%、1.00%、1.50% 进行后续正交试验。

2.4　蔗糖添加量对酸奶的理化指标的影响

2.4.1　蔗糖添加量对酸奶 pH 值及酸度的影响

蔗糖本身不会直接改变酸奶的 pH 值，但是可以作为碳源，促进乳酸菌的生长和代谢活动，进而影响发酵体系的 pH 值和酸度[35]。另一方面，作为甜味剂，蔗糖可以调整酸奶的甜味水平。蔗糖添加量对酸奶 pH 值及酸度的影响见图 7。



A. pH 值；B. 酸度。不同小写字母表示存在显著性差异，p<0.05。

图 7　蔗糖添加量对酸奶 pH 值和酸度的影响

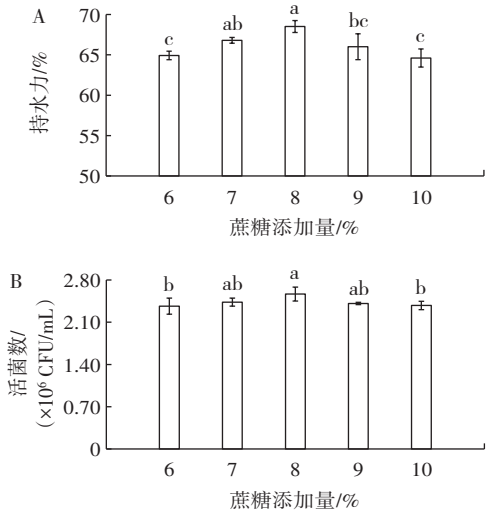
Fig.7　Effect of sucrose addition amount on the pH and acidity of yogurt

由图 7 可以看出，随着蔗糖添加量的增多，酸奶的 pH 值呈现先降后升的趋势，与之相反，酸度先升后降。当蔗糖添加量为 8% 时，酸奶的 pH 值最低，而酸度值最高（p<0.05）。而蔗糖添加量为 10% 时反而抑制发酵菌的生长，因此，8% 的蔗糖添加量为最佳。

2.4.2　蔗糖添加量对酸奶持水力和活菌数的影响

蔗糖添加量对酸奶持水力和活菌数的影响见图 8。

由图 8 可知，酸奶发酵整个阶段中，随着蔗糖添加量逐渐增多，酸奶的持水力和活菌数呈现先升后降的趋势。当蔗糖添加量为 8% 时，酸奶的持水力最强，活



A. 持水力；B. 活菌数。不同小写字母表示存在显著性差异，$p<0.05$。

图 8　蔗糖添加量对酸奶持水力和活菌数的影响

Fig.8　Effects of sucrose addition on water holding capacity and viable bacteria count of yogurt

菌数为(2.57±0.12)×10⁶ CFU/mL，达到最大值；继续增加到 9% 时，酸奶的持水力和活菌数开始下降。这可能是随着蔗糖的增加，酸奶体系的渗透压和总固形物不断增加，自由水的数量减少[36]。适量蔗糖可以提供额外的能量来源，有助于促进乳酸菌的生长和代谢活动，进而加快乳酸的生成，有利于蛋白质的变性和凝固，形成更紧密的蛋白质网络；加上较大的体系稠度，更有利于将水分子束缚在酸乳中，使乳清析出得以改善，进而提高酸奶的持水力；但是蔗糖浓度过大，渗透压过高，抑制乳酸菌的发酵，从而间接影响酸奶的持水力[37-39]。因此，蔗糖添加量为 8% 最合适。

2.4.3　蔗糖添加量对酸奶感官评价和质构特性的影响

蔗糖添加量对酸奶感官评价和质构特性的影响见表 6。

表 6　蔗糖添加量对酸奶的感官评价及质构特性影响

Table 6　Effects of sucrose dosage on sensory evaluation and textural properties of yogurt

蔗糖添加量/%	感官评分	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/g	胶着性/g	黏聚性/g
6	74.44±2.65^{c}	6.90±1.26^{c}	0.86±0.12^{a}	3.90±0.44^{c}	5.12±0.60^{c}	0.59±0.05^{a}
7	83.44±1.59^{b}	10.62±1.21^{b}	0.87±0.09^{a}	5.38±1.43^{c}	8.80±2.29^{b}	0.61±0.14^{a}
8	88.78±4.09^{a}	16.42±2.15^{a}	0.91±0.05^{a}	11.85±0.29^{a}	11.89±0.31^{a}	0.63±0.01^{a}
9	73.44±3.57^{c}	12.33±1.57^{b}	0.83±0.12^{a}	8.85±2.00^{b}	7.11±0.29^{bc}	0.62±0.12^{a}
10	63.22±1.72^{d}	9.39±2.35^{bc}	0.83±0.13^{a}	6.23±1.63^{c}	6.20±1.73^{c}	0.49±0.00^{a}

注：同列不同字母表示差异显著，$p<0.05$。

由表 6 可以看出，酸奶中的蔗糖添加量不足 8% 时，酸奶产生的甜味不够，人们对发酵风味的总体接受能力较差；当酸奶中的蔗糖添加量超过 8% 时，酸奶的甜味变重，酸味被掩盖，不仅感官品质不佳，还会增加生产成本，因此当蔗糖添加量为 8% 时感官评分最佳。说明添加适量的蔗糖可以使酸奶的味道更加柔和、甜美，改善整体风味；而过量的蔗糖会使酸奶变得过于甜腻，掩盖了酸奶本身的奶香和发酵香气。此外，不同添加量的蔗糖对酸奶硬度、咀嚼性、胶着性的影响整体呈现先增加后降低趋势，当蔗糖添加量为 8% 时，各指标均达到最大值，对弹性和黏聚性没有显著性影响。适量的蔗糖有助于形成更紧密且均匀的蛋白质网络结构，从而提高酸奶的凝固性和稳定性，减少乳清分离现象的发生[35]。但是，蔗糖添加量过高，通过增加渗透压抑制酸奶发酵，从而影响产品凝胶的形成，降低产品的质构品质。

综合持水力、活菌数、感官指标以及质构特性，选择蔗糖添加量为 7%、8%、9% 进行后续正交试验。

2.5　正交试验结果

正交试验结果如表 7 所示。

表 7　正交试验结果

Table 7　Results of orthogonal experiment

编号	因素				感官评分
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	81.89
2	2	2	2	1	84.89
3	3	3	3	1	75.33
4	1	3	2	2	92.22
5	2	1	3	2	82.44
6	3	2	1	2	85.89
7	1	2	3	3	79.78
8	2	3	1	3	88.89
9	3	1	2	3	83.11
K_1	253.89	247.44	256.67	242.11	
K_2	256.22	250.56	260.22	260.55	
K_3	244.33	253.89	237.55	251.78	
k_1	84.63	82.48	85.56	80.70	
k_2	85.41	83.52	86.74	86.85	
k_3	81.44	84.63	79.18	83.93	
R	3.97	2.15	7.56	6.18	
主次顺序	C>D>A>B				
最优组合	$A_2B_3C_2D_2$				

由表 7 中的极差值 R 可得，各因素对酸奶感官评分的影响主次顺序为 C>D>A>B，即发酵剂接种量>蔗糖添加量>SO-2 添加量>发酵时间，由此得出最优工艺的水平组合为 $A_2B_3C_2D_2$，即最佳工艺为 SO-2 添加量为 0.30%、发酵时间 9 h、发酵剂接种量为 1.00%、蔗糖添加量为 8%，按照最优组合进行 3 次重复试验进行验证，该条件下的 SO-2 酸奶酸甜可口，风味极佳，感官评

分为88.89±1.17。正交试验方差分析见表8。

由表8可知，4个因素中蔗糖添加量和发酵剂接种量对添加SO-2的益生菌酸奶的感官评分影响最显著，其中最小影响因素为发酵时间，符合极差的分析结果。

正交最佳组合与κ-卡拉胶（KC）理化指标和质构指标对比见表9。

由表9可知，与添加KC相比，正交最佳组合制备的SO-2酸奶的感官评分显著提高，并且其酸度、持水力和活菌数均显著增加，表明该SO-2的添加能够更好地促进酸奶发酵，此时感官评分为88.89±1.17。此外，添加SO-2后，该酸奶的活菌数达到了（2.54±0.14）×10⁶ CFU/mL，符合GB 19302—2025《食品安全国家标准 发酵乳》中对发酵乳和风味发酵乳的乳酸菌含量（1×10⁶ CFU/mL）要求，比KC酸奶增加了28.28%的活菌量。同时，SO-2酸奶的咀嚼性和胶着性显著高于KC酸奶，分别提高31.94%和20.65%（p<0.05）。Zhang等[40]研究了乳酸菌胞外多糖分子量对酸奶的影响及其机理，结果显示乳杆菌产生的胞外多糖分子量越高，酸奶的凝胶状态越好，这是因为高分子量胞外多糖可以与蛋白质更紧密地结合，有效地填充酪蛋白簇的网络结构，形成更紧密的凝胶网络结构。而在本研究中，对比KC，可能是因为SO-2暴露出更多羟基、硫酸基团等活性基团，更能促进发酵菌的生长以及酸奶蛋白网络结构的形成，进而提高酸奶产品的活菌数、持水力、硬度、咀嚼性等质构特性。

表8 正交试验方差分析

Table 8 Variance analysis of orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	F比	F临界值	显著性
SO-2添加量	26.66	2	0.54	4.6	
发酵时间	14.19	2	0.29	4.6	
发酵剂接菌量	99.74	2	2.02	4.6	显著
蔗糖添加量	57.33	2	1.16	4.6	显著
误差	197.9	8			

表9 正交最佳组合与KC理化指标和质构指标对比

Table 9 Comparison of physicochemical and textural properties between optimal orthogonal combination and original carrageenan

组别	pH值	酸/°T	持水力/%	活菌数/（×10⁶ CFU/mL）	感官评分	硬度/g	弹性/mm	咀嚼性/g	胶着性/g	黏聚性/g
正交最佳组合	4.20±0.01^b	87.67±1.15^a	68.91±0.61^a	2.54±0.14^a	88.89±1.17^a	12.84±0.80^a	0.89±0.02^a	7.56±0.03^a	7.83±0.12^a	0.58±0.01^a
KC	4.51±0.02^a	75.33±0.58^b	64.36±0.68^b	1.98±0.14^b	70.11±1.05^b	10.04±2.04^a	0.94±0.04^a	5.73±0.19^b	6.49±0.24^b	0.56±0.04^a

注：同列不同字母表示差异显著，p<0.05。

3 结论

本文研究了低分子量κ-卡拉胶多糖片段即SO-2的添加对酸奶品质的影响，对酸奶pH值、酸度、持水力、活菌数、感官评价、质构特性指标进行分析，通过正交试验确定最优工艺组合。结果表明，SO-2能够提高酸奶的有机酸积累、持水性、质构品质和活菌数，在SO-2添加量为0.3%时，持水性提高了7.24%，活菌数由（1.90±0.24）×10⁶ CFU/mL增加到了（2.56±0.24）×10⁶ CFU/mL。通过单因素和正交试验，确定SO-2酸奶的最优配方：SO-2添加量为0.30%，发酵时间为9 h，发酵剂接种量为1.00%，蔗糖添加量为8%，此时产品的感官评分为88.89±1.17。进一步研究发现，相比KC，添加了SO-2的酸奶活菌数提高了28.28%；同时，咀嚼性和胶着性分别显著提高31.94%和20.65%。结果提示，低分子量κ-卡拉胶可作为良好的酸奶生产功能配料，有助于提升酸奶的品质。研究成果可以提高低分子量κ-卡拉胶的应用途径，为低分子量κ-卡拉胶功能性产品及其酸奶开发提供理论支持。

参考文献：

[1] GUO Z L, WEI Y S, ZHANG Y, et al. Carrageenan oligosaccharides: A comprehensive review of preparation, isolation, purification, structure, biological activities and applications[J]. Algal Research, 2022, 61: 102593.

[2] KAMIŃSKA-DWÓRZNICKA A, ANTCZAK A, SAMBORSKA K, et al. Acid hydrolysis of kappa-carrageenan as a way of Gaining new substances for freezing process modification and protection from excessive recrystallisation of ice[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(8): 1799-1806.

[3] HUANG H B, WANG Q, NING Z C, et al. Preparation, antibacterial activity, and structure-activity relationship of low molecular weight κ-carrageenan[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266: 131021.

[4] HUMAYUN S, HOWLADER M M, RJABOVS V, et al. Biological activity of enzymolysed ι-carrageenan of polydisperse nature[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109621.

[5] TECSON M G, ABAD L V, EBAJO V D Jr, et al. Ultrasound-assisted depolymerization of kappa-carrageenan and characterization of degradation product[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105540.

[6] BOUANATI T, COLSON E, MOINS S, et al. Microwave-assisted depolymerization of carrageenans from *Kappaphycus alvarezii* and *Eucheuma* spinosum: Controlled and green production of oligosaccharides from the algae biomass[J]. Algal Research, 2020, 51: 102054.

[7] STEPHANIE B, ERIC D, SOPHIE F M, et al. Carrageenan from *Solieria chordalis* (Gigartinales): Structural analysis and immunological activities of the low molecular weight fractions[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(2): 448-460.

[8] WANG W, ZHANG P, YU G L, et al. Preparation and anti-influenza

A virus activity of κ-carrageenan oligosaccharide and its sulphated derivatives[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 880-888.
[9] SUN Y J, YANG B Y, WU Y M, et al. Structural characterization and antioxidant activities of κ-carrageenan oligosaccharides degraded by different methods[J]. Food Chemistry, 2015, 178: 311-318.
[10] ZHU C H, MOU M J, YANG L L, et al. Enzymatic hydrolysates of κ-carrageenan by κ-carrageenase-*CLEA* immobilized on amine-modified ZIF-8 confer hypolipidemic activity in HepG2 cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126401.
[11] LE ROY C I, KURILSHIKOV A, LEEMING E R, et al. Yoghurt consumption is associated with changes in the composition of the human gut microbiome and metabolome[J]. BMC Microbiology, 2022, 22(1): 39.
[12] SKRYPLONEK K, HENRIQUES M, GOMES D, et al. Characteristics of lactose-free frozen yogurt with κ-carrageenan and corn starch as stabilizers[J]. Journal of Dairy Science, 2019, 102(9): 7838-7848.
[13] ZHANG H K, GOFF H D, LIU C M, et al. Blending pectin and κ-carrageenan converted the liquid yogurt induced by pectin into the solid yogurt[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122869.
[14] XIAO R, ZHENG Y. Overview of microalgal extracellular polymeric substances (EPS) and their applications[J]. Biotechnology Advances, 2016, 34(7): 1225-1244.
[15] LI S Q, SHAH N P. Effects of *Pleurotus eryngii* polysaccharides on bacterial growth, texture properties, proteolytic capacity, and angiotensin-I-converting enzyme-inhibitory activities of fermented milk[J]. Journal of Dairy Science, 2015, 98(5): 2949-2961.
[16] WU J B, LIN Y Q, ZENG Z K, et al. Steam-exploded *Laminaria japonica* polysaccharide improved set yogurt quality: Based on flavor, storage stability and dynamic *in vitro* digestive properties[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2025, 100: 103933.
[17] LU X M, LI N Y, ZHAO R J, et al. *In vitro* prebiotic properties of garlic polysaccharides and its oligosaccharide mixtures obtained by acid hydrolysis[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 798450.
[18] LIN L, QIAN X Q, HE J Y, et al. Improving physicochemical properties and gel formation mechanism of nutty plant-based yogurt with *Tremella fuciformis* polysaccharides[J]. Food Chemistry, 2025, 466: 142255.
[19] DE JONG S, VAN DE VELDE F. Charge density of polysaccharide controls microstructure and large deformation properties of mixed gels[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(7): 1172-1187.
[20] YANG J J, SUN J W, YAN J Y, et al. Impact of *Potentilla* anserine polysaccharide on storage properties of probiotic yak yoghurt[J]. International Dairy Journal, 2023, 141: 105585.
[21] 王辉, 张洪凯, 余子阳, 等 . 卡拉胶对酸乳稳定性的影响与机制[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 1-7.
WANG Hui, ZHANG Hongkai, YU Ziyang, et al. Effect of carrageenan on the stability of yogurt and its mechanism[J]. Food Science, 2025, 46(8): 1-7.
[22] 郝静, 杨晨芝, 丁霄, 等 . 杏鲍菇多糖对乳酸菌发酵及酸奶品质的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 177-180.
HAO Jing, YANG Chenzhi, DING Xiao, et al. Effect of polysaccharides from *Pleurotus eryngii* on fermentation of lactic acid bacteria and quality of yogurt[J]. The Food Industry, 2020, 41(11): 177-180.
[23] 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.
[24] ALJEWICZ M, MAJCHER M, NALEPA B. A comprehensive study of the impacts of oat β-glucan and bacterial curdlan on the activity of commercial starter culture in yogurt[J]. Molecules, 2020, 25(22): 5411.
[25] AHMAD I, HAO M Y, LI Y, et al. Fortification of yogurt with bioactive functional foods and ingredients and associated challenges - A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 558-580.
[26] WANG L, WANG P, DENG W L, et al. Evaluation of aroma characteristics of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) juice using gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 108: 400-406.
[27] GRASSO N, ALONSO-MIRAVALLES L, O′MAHONY J A. Composition, physicochemical and sensorial properties of commercial plant-based yogurts[J]. Foods, 2020, 9(3): 252.
[28] 杨洁茹, 陈顺心, 邓毅浩, 等 . 大豆植物基酸奶的研制[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(6): 15-19.
YANG Jieru, CHEN Shunxin, DENG Yihao, et al. Manufacture of soybean plant-based yoghurt[J]. Cereal & Food Industry, 2022, 29(6): 15-19.
[29] LEAL M R S, ALBUQUERQUE P B S, RODRIGUES N E R, et al. A review on the use of polysaccharides as thickeners in yogurts[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2024, 8: 100547.
[30] 范瑞, 林伟锋, 顾宗珠, 等 . 乳酸菌活菌数对酸乳理化特性的影响[J]. 中国乳品工业, 2008, 36(1): 16-18, 31.
FAN Rui, LIN Weifeng, GU Zongzhu, et al. Effect of viable count of *Lactobacillus* on the physical and chemical feature of the yoghourt[J]. China Dairy Industry, 2008, 36(1): 16-18, 31.
[31] BURGAIN J, SCHER J, FRANCIUS G, et al. Lactic acid bacteria in dairy food: Surface characterization and interactions with food matrix components[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014, 213: 21-35.
[32] 罗叶名, 傅虹飞, 索朗嘉措, 等 . 枸杞酸奶的制备、质构品质和风味物质分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 249-261.
LUO Yeming, FU Hongfei, SUO Langjiacuo, et al. Preparation and analyses of textural quality and flavor substances of goji berry yoghurt[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(1): 249-261.
[33] LESME H, RANNOU C, FAMELART M H, et al. Yogurts enriched with milk proteins: Texture properties, aroma release and sensory perception[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 98: 140-149.
[34] 王悦, 陶亮, 杨传辉, 等 . 核桃燕麦发酵酸奶工艺条件研究[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(1): 10-19.
WANG Yue, TAO Liang, YANG Chuanhui, et al. Optimization of processing conditions of fermented yogurt with walnut and oat[J]. China Food Additives, 2023, 34(1): 10-19.
[35] 王紫琳, 刘俐彤, 杨会, 等 . 高山黑蜜酸奶的制备工艺优化及品质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 215-225.
WANG Zilin, LIU Litong, YANG Hui, et al. Preparation process optimization and quality analysis of *Leucosceptrum canum* honey yogurt[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 215-225.
[36] JØRGENSEN C E, ABRAHAMSEN R K, RUKKE E O, et al. Processing of high-protein yoghurt-A review[J]. International Dairy Journal, 2019, 88: 42-59.
[37] 吴文芳, 李宝磊, 侯保朝, 等 . 发酵乳稳定性及其影响因素研究进展[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(8): 46-53.
WU Wenfang, LI Baolei, HOU Baochao, et al. Research progress on the stability of fermented milk and its influencing factors[J]. China Dairy Industry, 2024, 52(8): 46-53.
[38] 成少宁, 王芬, 乔冬, 等 . 抑制酸奶后发酵桑叶活性成分筛选及桑叶黄酮酸奶工艺[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(10): 60-64.
CHENG Shaoning, WANG Fen, QIAO Dong, et al. Screening of active ingredients for inhibiting post-fermentation of mulberry leaves yoghurt and processing technology of mulberry leaf flavone yoghurt[J]. China Dairy Industry, 2020, 48(10): 60-64.
[39] 李金洋, 胡婷婷, 王雨心, 等 . 枸杞决明子功能性酸奶的发酵工艺研究[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版), 2024, 38(5): 93-99.
LI Jinyang, HU Tingting, WANG Yuxin, et al. Optimization of fermentation process of barbary wolfberry *Cassia* functional yogurt by response surface methodology[J]. Journal of LanZhou University of Arts and Science (Natural Sciences Edition), 2024, 38(5): 93-99.
[40] ZHANG K Y, TANG H W, FARID M S, et al. Effect of *Lactobacillus helveticus* exopolysaccharides molecular weight on yogurt gel properties and its internal mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 262: 130006.

责任编辑:王艳
收稿日期:2026-03-24