张义全, 党祺藩, 尉莹, 等. 青稞酒糟 β-葡聚糖提取及其对酸奶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 256−264. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060120

ZHANG Yiquan, DANG Qifan, YU Ying, et al. Extraction of β-Glucan from Highland Barley Distillers' Grains and Its Effect on Yogurt Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 256−264. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060120

· 工艺技术 ·

青稞酒糟 β-葡聚糖提取及其对酸奶品质的影响

张义全[1,*], 党祺藩[1], 尉　莹[2], 吕　倩[1], 刘　茜[1]

(1.青海大学农牧学院, 青海西宁 810016;
2.青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海西宁 810016)

摘　要: 青稞酒酿造过程会产生大量青稞酒糟（Highland barley distillers' grains，HBDG），其中 β-葡聚糖是其主要活性成分之一。为促进资源高效利用并充分挖掘 HBDG 潜在价值，本研究以 HBDG 为原料，采用超声辅助溶剂提取法优化 β-葡聚糖提取工艺，并系统评价其作为功能性添加剂对酸奶品质的影响。首先，以 β-葡聚糖提取率为指标，系统考察了超声功率、超声时间、提取温度、pH 和液料比对提取率的影响，以确定最佳工艺参数。随后，将提取所得 β-葡聚糖以 0~1.0%（w/v）的浓度梯度添加至发酵乳基质中，测定其对酸奶酸度、pH、持水力、质构特性、黏度、流变学特性、微观结构以及感官品质的影响。结果表明：HBDG β-葡聚糖最佳提取工艺条件为超声功率 256 W、超声时间 10 min、提取温度 75 ℃、pH9.1、液料比 10∶1 mL/g，在此条件下提取率可达 50.76%±0.63%。在酸奶品质方面，随着 β-葡聚糖添加量增加，酸奶 pH、持水力、黏度得到显著升高（P<0.05），而酸度则显著降低（P<0.05）。特别地，添加 0.5%（w/v）β-葡聚糖的酸奶展现出更好的质构特性、更高的储能模量（G'）与损耗模量（G"），表明其具有更优的黏弹性；同时，该组酸奶也获得最高的感官评分。扫描电镜结果显示，β-葡聚糖的添加促进了酪蛋白胶束间的聚集。综上所述，超声辅助溶剂提取法可高效提取 HBDG 中的 β-葡聚糖；将其以 0.5% 浓度应用于酸奶中，能够有效改善产品质构、流变学特性和微观结构，并提升感官品质。研究结果为 HBDG 资源的高值化利用及功能性乳制品的开发提供了理论基础与技术路径。

关键词: 青稞酒糟, β-葡聚糖, 超声辅助提取, 酸奶品质

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0256−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060120　　本文网刊:

Extraction of β-Glucan from Highland Barley Distillers' Grains and Its Effect on Yogurt Quality

ZHANG Yiquan[1,*], DANG Qifan[1], YU Ying[2], LÜ Qian[1], LIU Qian[1]

(1.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China;
2.State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Highland barley distillers' grains (HBDG), a major by-product of highland barley wine production, contain β-glucan as one of its principal bioactive components. To promote resource efficiency and fully exploit the potential value of HBDG, this study utilized HBDG as raw material to optimize the extraction process of β-glucan using ultrasound-assisted solvent extraction and systematically evaluated its effects as a functional additive on yogurt quality. Initially, the effects of ultrasonic power, ultrasonic time, extraction temperature, pH, and liquid-to-solid ratio on β-glucan extraction yield were systematically investigated to determine the optimal extraction parameters, with extraction yield serving as the indicator. Subsequently, the extracted β-glucan was incorporated into fermented milk at concentrations ranging from 0 to 1.0% (w/v). Its effects on yogurt acidity, pH, water-holding capacity (WHC), textural properties, viscosity, rheological characteristics,

收稿日期: 2025−06−11

基金项目: 青海省科技计划项目（2024-ZJ-966）; 青海大学两级财政资金支持项目（SSYS-2025-03）。

作者简介/通信作者*: 张义全（1992−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 农畜产品加工, E-mail: zhangyiquan111@163.com。

microstructure, and sensory attributes were determined. The results indicated that the optimal extraction conditions for β-glucan from HBDG were: Ultrasonic power 256 W, ultrasonic time 10 min, extraction temperature 75 ℃, pH9.1, and liquid-to-solid ratio 10∶1 mL/g. Under these conditions, the extraction yield reached 50.76%±0.63%. Regarding yogurt quality, increasing the β-glucan addition level significantly increased the pH, WHC, and viscosity (P<0.05), while significantly decreasing the acidity (P<0.05). Notably, yogurt supplemented with 0.5% (w/v) β-glucan exhibited superior textural properties and higher storage modulus (G') and loss modulus (G"), indicating improved viscoelasticity. This formulation also achieved the highest sensory score. Scanning electron microscopy (SEM) revealed that β-glucan addition promoted aggregation between casein micelles. In conclusion, ultrasound-assisted solvent extraction is an efficient method for isolating β-glucan from HBDG. Incorporating this β-glucan into yogurt at a concentration of 0.5% effectively enhances product texture, rheological properties, and microstructure while improving sensory quality. These findings provide a theoretical foundation and technical pathway for the high-value utilization of HBDG resources and the development of functional dairy products.

Key words: highland barley distillers' grains (HBDG); β-glucan; ultrasonic-assisted extraction; yogurt quality

青稞（*Hordeum vulgare* L. var. nudum Hook. F）是我国青藏高原地区重要的粮食作物[1]。较高的淀粉含量（平均 59.25%）使其成为青稞酒酿造的主要原料之一[2]。青稞酒酿造过程中会产生大量副产物酒糟（也称酒醅糟），仅西藏地区酒糟年产量超 90 万吨，却因低值化处理导致资源浪费[3−4]。但是，青稞酒糟中仍富含蛋白质及功能活性成分，其中 β-葡聚糖（一种重要的可溶性膳食纤维）平均含量达 1.53%±0.40%[5]，该成分已被证实具有调节血糖、胆固醇及增强免疫力等功能[6]，在功能食品中具有应用潜力。因此，开发青稞酒糟 β-葡聚糖高效提取技术，对提升青稞产业资源价值至关重要。

目前，传统方法如溶剂法[7] 和酶解法[8] 已被广泛用于各类原料中 β-葡聚糖的提取。然而，这些方法普遍存在提取时间长、提取效率低等局限性。近年来，超声辅助提取技术因其利用超声波空化效应可高效破坏植物细胞壁，显著提升 β-葡聚糖提取率而备受关注[9]。例如，郭欢[10] 通过超声辅助溶剂提取法，将青稞 β-葡聚糖提取率从 2.93%（传统溶剂法）提高至 3.28%。超声辅助提取不仅能提高效率，还能改善青稞 β-葡聚糖的溶解性、发泡性等功能特性[11]。在食品应用方面，添加燕麦或酵母来源的 β-葡聚糖已被证实可提升酸奶的黏弹性和持水力及口感[12−13]；在全麦面包中添加青稞 β-葡聚糖则能有效增强面包咀嚼性并降低其体外消化率[14]。尽管如此，物理辅助提取技术（如超声辅助法）在青稞酒糟 β-葡聚糖提取中的应用研究仍鲜有报道。同时，现有关于 β-葡聚糖在酸奶体系中的研究多集中于燕麦、酵母等来源，青稞酒糟来源的 β-葡聚糖对酸奶质构特性、流变学特性及感官品质的影响尚未明确。

因此，本研究以青稞酒糟为原料，采用超声辅助溶剂提取法提取青稞酒糟 β-葡聚糖，探究其最佳提取工艺参数，并系统评价所得 β-葡聚糖对酸奶品质的影响，涵盖基础理化特性、质构特性、流变学特性、微观结构以及感官品质，旨在为青稞酒糟的高值化利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

青稞酒糟　青海互助天佑德青稞酒股份有限公司提供；巴氏鲜牛奶　购自一家亲超市；直投式乳酸菌酸奶发酵剂（1×10^9 CFU/g）　北京川秀科技有限公司；高温 α-淀粉酶（40000 U/g）　北京索莱宝科技有限公司；β-葡聚糖（混联）检测试剂盒　爱尔兰 Megazyme 公司；其他提取用试剂均为国产分析纯。

JSM-6610LV 扫描电子显微镜　日本电子株式会社；WD7A-419 质构仪　美国博勒飞 Brookfield（中国）有限公司；SYD-0628 动态剪切流变仪　北京航天科宇测试仪器有限公司；MZ-NDJ-8S 旋转粘度计　深圳市秒准测量技术有限公司；YF2-3 高速粉碎机　北京普诺众达科技有限公司；PHS-3E pH 计　上海仪电科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　青稞酒糟 β-葡聚糖提取工艺优化

1.2.1.1　青稞酒糟预处理　参考ÖZEN 等[15] 的方法并作适当修改，将青稞酒糟样品置于 40 ℃ 电热鼓风干燥箱中，干燥至恒重，使用高速粉碎机将干燥后的青稞酒糟样品粉碎，使用 60 目筛网进行筛选，筛选后的青稞酒糟粉末装入自封袋中，放置于 4 ℃ 冰箱中保存备用。

1.2.1.2　单因素实验　参考李晶等[5]、于丽雅等[9]、游茂兰等[16] 的方法并作适当修改，具体实验步骤如下：称取 10 g 青稞酒糟粉末，按照设定的料液比加入去离子水，同时采用 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液调整溶液 pH，经过一定条件的超声提取后，一定温度下水浴 1 h，离心（4500 r/min、10 min）取上清液，沉淀加水重复处理一次，合并两次上清液并调节 pH 为 6.0，加入 0.1% 耐高温 α-淀粉酶，置于 90 ℃ 环境下，处理 35~50 min，选用 0.1 mol/L 碘液作为指示剂，直至碘液不变色确认淀粉完全水解，采用 1 mol/L HCl 调整 pH 为 4.5，静置析出蛋白复合物后再次离心（4500 r/min，10 min），取上清液，加入三倍体积 95% 乙醇水溶液处理 12 h 后离心（4500 r/min，10 min），

取沉淀进行冷冻干燥，得到青稞酒糟 β-葡聚糖粗品。

采用控制变量法，在超声功率 250 W、超声时间 10 min，提取温度 75 ℃、pH9.0、液料比 10∶1 mL/g 基础上，以青稞酒糟 β-葡聚糖提取率为评价指标，分别考察超声功率(150、200、250、300、350 W)、超声时间(5.0、7.5、10.0、12.5、15.0 min)、提取温度(65、70、75、80、85 ℃)、pH(8.0、8.5、9.0、9.5、10.0)以及液料比(6∶1、8∶1、10∶1、12∶1、14∶1 mL/g)对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响。青稞酒糟 β-葡聚糖提取率按公式(1)计算，其中，β-葡聚糖质量采用 Megazyme 检测试剂盒进行测定。

$$\beta\text{-葡聚糖提取率}(\%)=\frac{m_1}{m_2}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_1 为提取所得的 β-葡聚糖质量，g；m_2 为原料中 β-葡聚糖质量，g。

1.2.1.3 响应面试验 根据单因素实验结果，选择超声功率(A)、超声时间(B)、pH(C)和液料比(D)为自变量，以青稞酒糟 β-葡聚糖提取率为响应值，进行四因素三水平的响应面试验，试验设计见表 1。

表 1 响应面试验设计

Table 1 Design of response surface methodology experimental

因素	水平		
	−1	0	1
A超声功率(W)	200	250	300
B超声时间(min)	8	10	12
C pH	8.5	9	9.5
D液料比(mL/g)	9∶1	10∶1	11∶1

1.2.2 青稞酒糟 β-葡聚糖对酸奶品质的影响

1.2.2.1 酸奶制作 参考 QU 等[17] 的方法，并稍作修改。称取青稞酒糟 β-葡聚糖(0、0.1、0.2、0.5、1.0 g)溶解至 100 g 巴氏鲜牛乳中，制备质量分数分别为 0%、0.1%、0.2%、0.5% 和 1.0% 的青稞酒糟 β-葡聚糖巴氏鲜牛乳，在室温无菌条件下按照 0.2% 接种量接种直投式乳酸菌酸奶发酵剂，置于生化培养箱中，43 ℃ 下恒温发酵培养 8~10 h，终止发酵后迅速转移至 4 ℃ 冷藏设备进行 24 h 低温后熟处理。

1.2.2.2 酸奶酸度与 pH 测定 参照王璐瑶[18] 的方法，取 10.0 g 样品并加入 20 mL 蒸馏水进行稀释，采用酚酞为酸碱指示剂，用 0.1 mol/L NaOH 标准溶液进行滴定，终点为溶液呈现浅红色(30 s 内不褪色)，并记录消耗的 NaOH 标准溶液体积，样品的酸度数值以°T 表示，按公式(2)进行计算；称取 10.0 g 酸奶样品于烧杯中，加入 20 mL 去离子水并将其搅拌均匀，静置 5 min 后，采用校准后的 pH 计进行测定，记录室温下平衡后的稳定读数。

$$°T = V\times 10 \qquad 式（2）$$

式中：V 为滴定消耗的 NaOH 标准溶液的体积(mL)。

1.2.2.3 酸奶持水力测定 参考李慧等[19] 的方法，称取 10.0 g 酸奶样品于离心管中离心(4500 r/min、15 min)，按公式(3)计算持水力。

$$持水力(\%)=\frac{M}{10}\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：M 为弃去上清液后沉淀的质量，g。

1.2.2.4 酸奶质构特性测定 参考 ZHAO 等[20] 的方法，并在此基础上进行改进，采用质构剖面分析(Texture Profile Analysis, TPA)，测试目标为形变，配备 TA-4/1000 圆柱形探头，测试条件为触发力 5 g，测试速度 1.5 mm/s，目标值 40%，停留时间 5 s。将样品置于样品台中心，启动测试，记录硬度、弹性、内聚性、咀嚼性等参数，每组样品重复测试 5 次。

1.2.2.5 酸奶黏度测定 参考李真等[12] 的方法，将待测酸奶置于室温环境下，采用旋转粘度计测定样品黏度，将待测样品搅拌均匀，选用 3 号转子在 30 r/min 恒定转速下持续测定 60 s，以 10 s 为间隔记录数据，计算均值获得样品表观黏度值。

1.2.2.6 酸奶流变学特性测定 参考黄宛怡等[21] 的方法，使用频率扫描模式，测试样品在 0.1~10 Hz 之间的储能模量(G')和损耗模量(G")的变化。测试条件为板直径 40 mm，间隙 1000 μm、加载间隙 1000 μm、温度控制为 25 ℃、恒定应变为 0.5%。

1.2.2.7 酸奶微观结构测定 取 1 g 酸奶样品用去离子水(1∶6)进行稀释，冷冻干燥 24~36 h 后喷金处理，在 10 kV 加速电压下进行电镜扫描，观察酸奶样品微观结构。

1.2.2.8 酸奶感官品质测定 参考秦驰等[22] 的方法，组建 10 人感官评定小组，采用 9 分制，按照表 2 感官评价标准进行量化评分(1=极差，5=可接受，9=极优)。

表 2 酸奶感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria of yogurt

指标	标准	分数
色泽(9分)	颜色不均匀，轻微变色或分层	1~4
	颜色较正常但光泽度不足	5~8
	颜色均匀、呈乳白色，光泽感强	9
口感(9分)	轻微颗粒感或粘稠度不协调	1~4
	顺滑度一般，粘稠度适中但缺乏层次	5~8
	口感顺滑，粘稠度适中且有细腻乳脂感	9
风味(9分)	酸甜不协调，有不愉快后味	1~4
	酸甜协调，无明显特色	5~8
	酸甜平衡，奶香醇厚	9
组织状态(9分)	乳清析出，质地不均匀	1~4
	质地均匀，无乳清析出，流动性适中	5~8
	质地细腻均匀，呈现理想凝胶状态	9

1.3 数据处理

所有实验均设三个重复，数据以平均值±标准误差表示。实验数据经 Excel 初步整理后，采用 SPSS

27.0 进行分析，通过单因素方差分析（ANOVA）完成组间差异的初步检验，再以 Duncan 多重比较法进一步明确差异组别，以 $P<0.05$ 作为统计学显著性判定阈值。Box-Behnken 实验设计及相应方差分析通过 Design-Expert 13.0 完成，图表绘制使用 Origin 2021 软件。

2　结果与分析

2.1　青稞酒糟 β-葡聚糖提取工艺优化试验

2.1.1　超声功率对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

如图 1 所示，在超声功率为 150~250 W 时，β-葡聚糖提取率与超声功率呈正相关，可能是超声空化作用产生的微射流效应，有效促进了细胞壁结构破坏及有效成分释放[23]。当功率升高至 250 W 时体系达到最佳提取状态，此时提取率达 47.48%±0.33%，但当功率升高至 300 W 后提取率发生降低，这归因于高强度超声引发的局部温升效应，导致 β-葡聚糖发生降解，以及一些非糖类杂质溶出[16,23]。

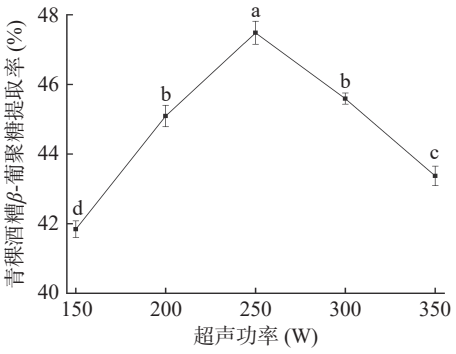


图 1　超声功率对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

Fig.1　Effect of ultrasonic power on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

注：不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2~图 5、图 7~图 9 同。

2.1.2　超声时间对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

由图 2 可知，在超声时间为 5.0~10.0 min 时，随着超声时间延长，β-葡聚糖提取率快速提高，这是由于超声空化效应持续累积，促使细胞壁破碎及糖类物质充分溶出[24]。超声时间为 10 min 时，β-葡聚糖提取率达到最大值 47.17%±0.41%，表明此时空化效应与热扩散效应协同作用效果最优。然而，超声时间超过 10.0 min 后提取率发生下降，这可能是因为长时间声场作用使溶液温度上升，导致糖类分子部分降解[16,23]。

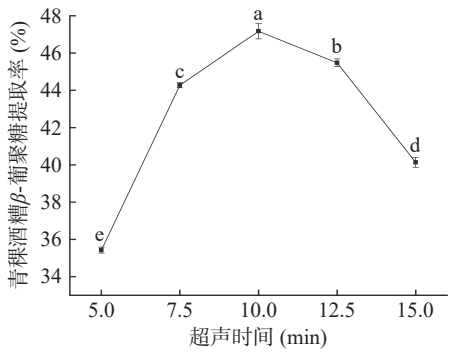


图 2　超声时间对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

Fig.2　Effect of ultrasonic time on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

2.1.3　提取温度对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

由图 3 可见，在提取温度为 65~75 ℃ 时，β-葡聚糖提取率增幅最为显著（$P<0.05$），提取率持续增长至峰值 47.98%±0.26%，这是由于此阶段分子热运动提升了传质效率[9]。当温度接近 80 ℃ 时提取率到达稳定期，表明此时青稞酒糟 β-葡聚糖可能接近溶出饱和状态或达到稳定性阈值，进一步升温则会使 β-葡聚糖发生降解，同时发生美拉德反应，进而导致 β-葡聚糖提取率下降[23,25]。

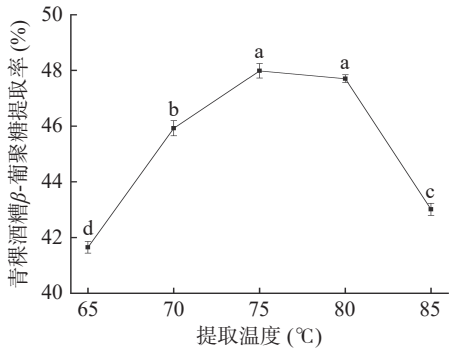


图 3　提取温度对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

Fig.3　Effect of extraction temperature on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

2.1.4　pH 对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

由图 4 可知，在 pH 为 8.0~9.0 时，提取率随 pH 升高而逐渐增大，这可能是氢键作用与离子强度的协同效应优化了多糖-溶剂相互作用，促进了青稞酒糟 β-葡聚糖的高效溶出[26]。然而，随着体系 pH 进一步升高，提取率呈现明显下降趋势，强碱性条件会导致 β-葡聚糖构象稳定性降低或化学键断裂[5]。

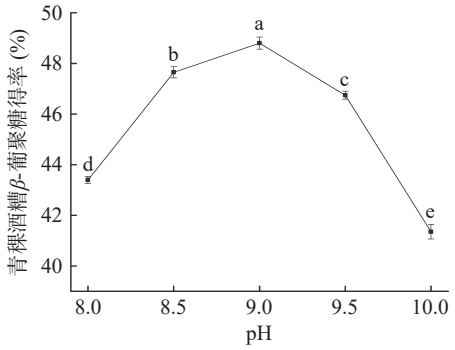


图 4　pH 对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

Fig.4　Effect of pH on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

2.1.5　液料比对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

由图 5 可知，当液料比从 6∶1 增至 10∶1 时，青稞酒糟 β-葡聚糖得到充分溶解，提取率逐渐上升。但随着

液料比的持续增大，β-葡聚糖提取率呈现出缓慢下降的趋势，这可能与体系中蛋白质的大量溶出有关[5]。

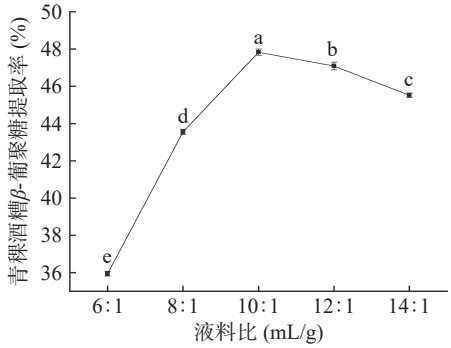


图 5 液料比对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响

Fig.5 Effect of liquid-to-solid ratio on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

2.2 青稞酒糟 β-葡聚糖提取响应面试验结果

2.2.1 响应面试验方案与结果 综合单因素实验结果，选取对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率影响较为显著的四个因素，超声功率(A)、超声时间(B)、pH(C)和液料比(D)为响应自变量，以青稞酒糟 β-葡聚糖提取率为响应值，进行四因素三水平响应面优化试验，结果如表 3 所示。经多元回归拟合对实验结果进行响应面分析，得出青稞酒糟 β-葡聚糖提取率(Y)与各因素变量之间关系的二次回归方程：

$$Y=51.37+1.13A+1.07B+0.8483C+0.9008D-1.47AB+0.07AC+0.455AD+0.4675BC-0.395BD-0.0275CD-4.25A^2-4.93B^2-3.99C^2-4D^2$$

根据表 4 回归方程方差分析显示，该回归模型统计学意义极显著($P<0.0001$)。其判定系数($R^2=0.9543$)，说明 95.43% 的响应值变异量可通过所选响应变量进行解释；失拟项检验结果显示 $P=0.1240$ (>0.05)，说明模型拟合度较好；经自由度校正后的调整判定系数($R^2_{adj}=0.9087$)进一步证实了模型的可靠性，表明其能有效解释 90.87% 的响应值变化规律。各因素对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率的影响大小顺序为 A(超声功率)>B(超声时间)>D(液料比)>C(pH)。综上所述，用于优化青稞酒糟 β-葡聚糖提取工艺条件所建立的响应面模型可行。

表 3 响应面试验方案与结果

Table 3 Design and results of response surface methodology experimental

实验号	A 超声功率 (W)	B 超声时间 (min)	C pH	D 液料比 (mL/g)	提取率 (%)
1	200	8	9.0	10∶1	36.81±0.26
2	300	8	9.0	10∶1	44.82±0.31
3	200	12	9.0	10∶1	42.91±0.18
4	300	12	9.0	10∶1	45.04±0.22
5	250	10	8.5	9∶1	41.63±0.33
6	250	10	9.5	9∶1	43.52±0.41
7	250	10	8.5	11∶1	43.71±0.28
8	250	10	9.5	11∶1	45.49±0.15
9	200	10	9.0	9∶1	42.01±0.34
10	300	10	9.0	9∶1	41.52±0.22
11	200	10	9.0	11∶1	43.48±0.18
12	300	10	9.0	11∶1	44.81±0.25
13	250	8	8.5	10∶1	41.19±0.34
14	250	12	8.5	10∶1	42.11±0.21
15	250	8	9.5	10∶1	41.52±0.22
16	250	12	9.5	10∶1	44.31±0.37
17	200	10	8.5	10∶1	41.52±0.29
18	300	10	8.5	10∶1	42.68±0.33
19	200	10	9.5	10∶1	43.37±0.12
20	300	10	9.5	10∶1	44.81±0.27
21	250	8	9.0	9∶1	40.82±0.36
22	250	12	9.0	9∶1	43.01±0.25
23	250	8	9.0	11∶1	42.61±0.17
24	250	12	9.0	11∶1	43.22±0.34
25	250	10	9.0	10∶1	51.31±0.12
26	250	10	9.0	10∶1	51.91±0.24
27	250	10	9.0	10∶1	52.12±0.37
28	250	10	9.0	10∶1	51.11±0.19
29	250	10	9.0	10∶1	50.41±0.22

表 4 回归方程方差分析

Table 4 Analysis of variance (ANOVA) for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	368.01	14	26.29	20.90	<0.0001	**
A-超声功率	15.37	1	15.37	12.22	0.0036	**
B-超声时间	13.72	1	13.72	10.91	0.0052	**
C-pH	8.64	1	8.64	6.87	0.0202	*
D-液料比	9.74	1	9.74	7.74	0.0147	*
AB	8.64	1	8.64	6.87	0.0201	*
AC	0.0196	1	0.0196	0.0156	0.9024	
AD	0.8281	1	0.8281	0.6585	0.4307	
BC	0.8742	1	0.8742	0.6952	0.4184	
BD	0.6241	1	0.6241	0.4963	0.4927	
CD	0.0030	1	0.0030	0.0024	0.9616	
A^2	117.26	1	117.26	93.24	<0.0001	**
B^2	157.53	1	157.53	125.26	<0.0001	**
C^2	103.36	1	103.36	82.19	<0.0001	**
D^2	103.55	1	103.55	82.34	<0.0001	**
残差	17.61	14	1.26			
失拟项	15.76	10	1.58	3.41	0.1240	
纯误差	1.85	4	0.4617			
总离差	385.61	28				
R^2=0.9543	R^2_{Adj}=0.9087		R^2_{Pred}=0.7571			

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

2.2.2 响应面数学模型分析 通过 Design-Expert 13.0 软件对实验数据进行分析，并绘制响应面图。如图 6 所示，基于响应面法的交互效应分析表明，除 AB 因素外，其余因素(AC、AD、BC、BD、CD)交互作用对提取率的影响不显著($P>0.05$)。AB 交互作用的响应面呈现显著非线性特征($P<0.05$)，其曲面曲率较大，等高线呈典型椭圆形，相比之下，其他交互组合的响应面较为平缓，表明其交互效应较弱。综上所

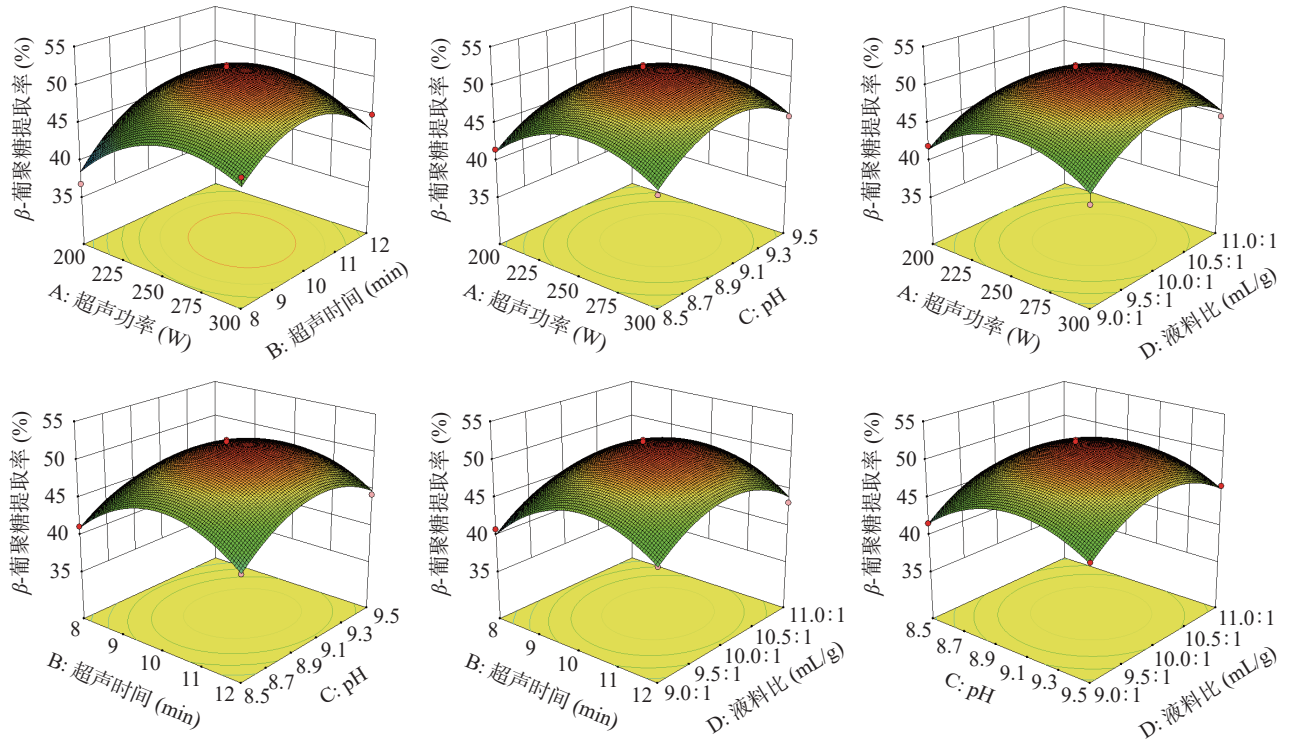


图 6　各因素交互作用对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率影响的响应面图

Fig.6　Response surface plot of the interaction effect of each factor on β-glucan extraction yield from highland barley distillers' grains

述，各因素交互作用对青稞酒糟 β-葡聚糖提取率影响顺序依次为：AB>BC>AD>BD>AC>CD，与 F 值判断结果一致。

2.2.3　最优提取工艺验证　根据模型分析，系统预测得出的最佳工艺条件为：超声功率 256.20 W、超声时间 10.18 min、pH9.06、液料比 10.12∶1 mL/g，此条件下青稞酒糟 β-葡聚糖提取率为 51.59%。根据实际条件调整最佳提取工艺为超声功率 256 W、超声时间 10 min、pH9.1、液料比 10∶1 mL/g，并进行三次重复验证实验，测得 β-葡聚糖提取率为 50.76%±0.63%，与模型预测值接近，该模型可靠。

2.3　青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶酸度与 pH 的影响

由图 7 可知，青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对凝固型酸奶的酸度和 pH 具有一定影响。随着添加量从 0% 增至 1.0%，酸度由 77.08±0.69°T 逐渐降至 70.51±0.82°T，而 pH 从 4.30±0.02 升至 4.37±0.02。这可能是青稞酒糟 β-葡聚糖通过结合游离氢离子或形成凝胶网络减缓乳酸菌代谢产酸速率，导致酸度下降和 pH 上升[27]。

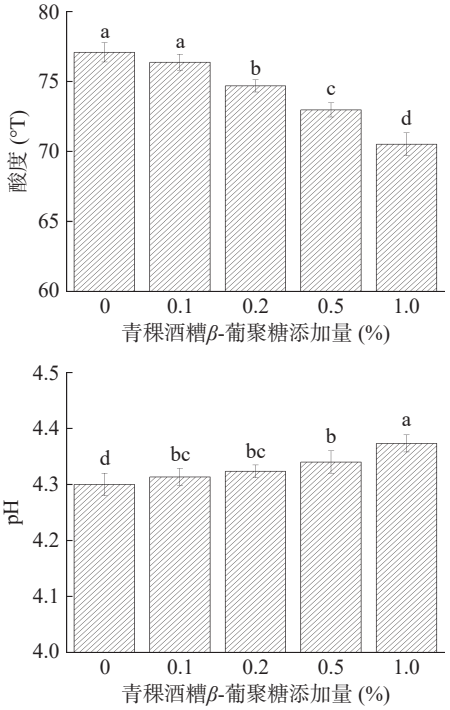


图 7　不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶酸度与 pH 的影响

Fig.7　Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the acidity and pH of yogurt

2.4　青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶持水力的影响

如图 8 所示，随着青稞酒糟 β-葡聚糖添加量的增大，酸奶持水力从 69.61%±0.11% 逐步增大至 70.74%±0.14%，添加量在 0.1%~0.2% 时，持水力增幅较小，而添加量增至 0.5% 后持水力显著增大（P<0.05），表明 β-葡聚糖在高浓度下可能通过增强凝胶网络结构或结合自由水分子，有效提高持水能力[13]。

2.5　青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶质构特性的影响

如表 5 所示，随着青稞酒糟 β-葡聚糖添加量的增加，酸奶黏附性、硬度、内聚性和弹性均得到显著提高（P<0.05）。多糖可通过促进与蛋白质的交联作用有效增强酸奶凝胶强度，使酸奶的黏附性和硬度得

表 5 不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶质构特性的影响

Table 5 Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the textural properties of yogurt

添加量(%)	黏附性(mJ)	硬度(gf)	内聚性	弹性(mm)	胶着性(g)	咀嚼性(mJ)
0	−32.01±0.28^{a}	57.08±0.23^{c}	0.41±0.02^{c}	3.21±0.03^{c}	23.40±0.29^{e}	0.74±0.02^{d}
0.1	−32.87±0.27^{b}	57.29±0.19^{c}	0.42±0.01^{c}	3.27±0.04^{bc}	24.06±0.37^{d}	0.77±0.01^{d}
0.2	−33.66±0.16^{c}	57.41±0.26^{bc}	0.45±0.02^{b}	3.36±0.06^{ab}	25.83±0.25^{c}	0.85±0.02^{c}
0.5	−34.85±0.35^{d}	58.02±0.21^{a}	0.49±0.01^{a}	3.41±0.06^{a}	28.43±0.31^{a}	0.95±0.03^{a}
1.0	−34.12±0.14^{c}	57.77±0.17^{ab}	0.48±0.01^{a}	3.29±0.05^{bc}	27.73±0.28^{b}	0.89±0.01^{b}

注: 同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 表6同。

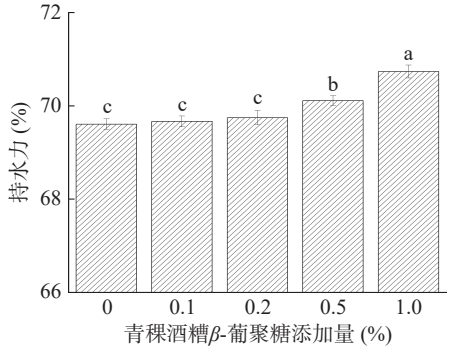


图 8 不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶持水力的影响

Fig.8 Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the water-holding capacity of yogurt

到提高[28]。添加量为 0.5% 时, 酸奶胶着性和咀嚼性达到最大值, 说明此添加浓度使酸奶口感更加醇厚。这可能是因为青稞酒糟 β-葡聚糖溶于水后形成高黏度溶液, 使得酸奶咀嚼至可吞咽状态时需要更多能量[21]。综上, 青稞酒糟 β-葡聚糖添加量为 0.5% 时, 酸奶的硬度、胶着性及咀嚼性等核心质构指标达到最优。

2.6 青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶黏度的影响

如图 9 所示, 随着 β-葡聚糖添加量从 0 增至 1.0%, 酸奶黏度显著提高(P<0.05), 在低浓度区间(0~0.2%), 黏度增幅较缓, 这可能与 β-葡聚糖分子初步分散并形成局部网络有关[28]。β-葡聚糖添加量提高至中高浓度(0.5%~1.0%)时, 黏度显著增加(P<0.05), 表明高浓度下 β-葡聚糖通过分子交联形成更致密的凝胶结构, 增强了酸奶黏度[28]。

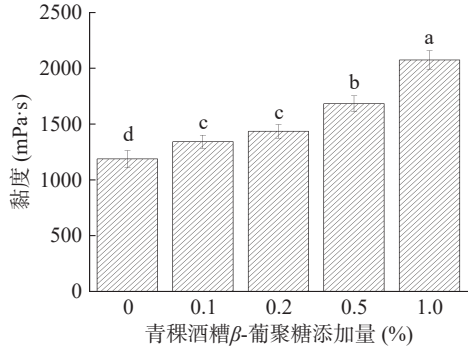


图 9 不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶黏度的影响

Fig.9 Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the viscosity of yogurt

2.7 青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶流变特性的影响

由图 10 可知, 随着 β-葡聚糖添加量的增加, 酸奶的流变特性呈现显著变化(P<0.05)。在 0.1~10 Hz 频率扫描范围内, 所有样品的储能模量(G')均高于损耗模量(G"), 表明体系以弹性凝胶网络为主导(G' > G"), 符合典型凝固型酸奶的粘弹性特征[29]。由图 10A 可知, 随着 β-葡聚糖添加量的增加, G'和 G"均呈现上升趋势, 且 G'的增幅更为显著(P<0.05), 这表明 β-葡聚糖通过蛋白质-多糖相互作用强化了凝胶交联密度[28]。此外, 所有样品在频率扫描中 G'与 G"的曲线斜率较小, 说明凝胶结构在宽频范围内具有较高的稳定性, 未出现明显结构松弛现象, tanδ(G"/G')值介于 0.24~0.28, 进一步说明体系以弹性为主导[29]。随着青稞酒糟 β-葡聚糖添加量增加, tanδ 整体变化趋势较小, 表明多糖的引入对体系的粘性耗散比例影响较小[21]。综上所述, 适量添加青稞酒糟 β-葡聚糖(0.5%~1.0%)可改善凝固型酸奶的流变性能, 使其内部形成更为稳定的凝胶网络。

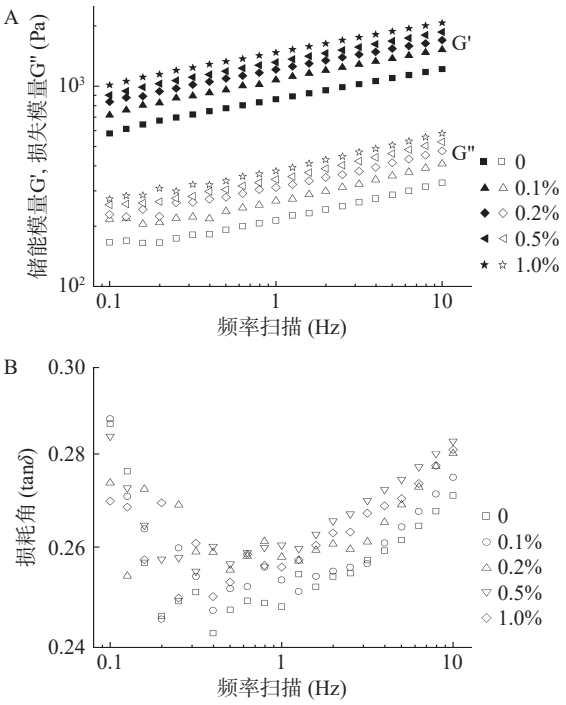


图 10 不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶流变特性的影响

Fig.10 Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the rheological properties of yogurt

2.8　青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶微观结构的影响

不同 β-葡聚糖添加量酸奶的凝胶网络结构如图 11A 所示（500×），由图 11A 可知，不添加 β-葡聚糖的酸奶凝胶网络呈现松散多孔结构，蛋白质聚集体间连接较弱，孔隙尺寸较大。不含多糖的蛋白质凝胶网络结构稳定性较低[30−31]。随着 β-葡聚糖添加量由 0.1% 增至 1.0% 时，酸奶凝胶网络结构的致密性和强度逐步提升，这与质构特性结果一致。β-葡聚糖添加量为 0.1% 时，蛋白质聚集体间的交联增强。因为，β-葡聚糖能够将蛋白质包裹起来促进蛋白质间的交联[32]。当 β-葡聚糖添加量增加至 0.2%~1.0% 时，酸奶形成致密的凝胶结构。这是由于蛋白质基质的连续性被破坏，β-葡聚糖促进蛋白质聚集成簇[33]。综上所述，添加青稞酒糟 β-葡聚糖能够显著影响酸奶的凝胶结构。

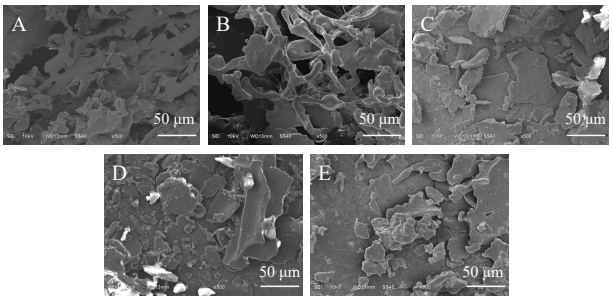


图 11　不同青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对微观结构的影响

Fig.11　Effects of varying supplementation levels of highland barley distillers' grain derived β-glucan on the microstructure of yogurt

注：图中 A 为未添加青稞酒糟 β-葡聚糖酸奶的微观结构图，图 B~图 E 分别是青稞酒糟 β-葡聚糖添加量为 0.1%、0.2%、0.5%、1.0% 的酸奶微观结构图。

2.9　青稞酒糟 β-葡聚糖添加量对酸奶感官品质的影响

由表 6 可知，随着青稞酒糟 β-葡聚糖添加量的上升，色泽评分浮动较小，表明其对色泽影响不显著（P>0.05）。风味评分整体稳定，表明青稞酒糟 β-葡聚糖对风味无显著影响（P>0.05）。随着酸奶中 β-葡聚糖含量的增加，其口感评分也相应提高。KAUR 等[34] 的研究表明，β-葡聚糖在酸奶中作为稳定剂，可提高稠度系数，从而改善酸奶的整体口感。组织状态也随 β-葡聚糖添加量的增加逐步改善。这是因为 β-葡聚糖的引入促进了蛋白质的交联，使凝胶网络结构更稳定[32]。综合分析表明，添加 0.5% β-葡聚糖可显著提升酸奶口感和组织状态，同时维持其色泽与风味。

表 6　感官品质评价结果

Table 6　Results of sensory evaluation

青稞酒糟β-葡聚糖添加量(%)	色泽	口感	风味	组织状态
0	8.10±0.27^{a}	7.10±0.21^{b}	7.80±0.21^{a}	8.30±0.13^{b}
0.1	8.00±0.12^{a}	7.10±0.19^{b}	7.90±0.18^{a}	8.40±0.20^{ab}
0.2	8.10±0.19^{a}	7.20±0.25^{ab}	7.80±0.16^{a}	8.40±0.24^{ab}
0.5	8.20±0.22^{a}	7.60±0.24^{a}	7.70±0.14^{a}	8.70±0.15^{a}
1.0	8.10±0.26^{a}	7.40±0.16^{ab}	7.80±0.22^{a}	8.50±0.11^{ab}

3　结论

本研究采用超声辅助溶剂法成功提取了青稞酒糟中的 β-葡聚糖，并系统评价了其添加对酸奶品质特性的影响。结果表明，青稞酒糟 β-葡聚糖的最佳提取工艺参数为：超声功率 256 W、超声时间 10 min、提取温度 75 ℃、pH9.1、液料比 10∶1 mL/g；在此条件下，β-葡聚糖提取率达 50.76%±0.63%。在酸奶应用中，添加青稞酒糟 β-葡聚糖能有效抑制后酸化过程，并显著提升酸奶的持水力、质构特性、流变学特性及感官品质。这表明青稞酒糟 β-葡聚糖通过增强凝胶强度、促进酪蛋白胶束聚集，在改善酸奶质构与口感方面具有显著潜力。综合考量品质提升效果，酸奶中青稞酒糟 β-葡聚糖的适宜添加量应控制在 0.5% 左右。本研究为青稞酒糟高值化利用及功能性酸奶开发提供了理论依据，未来研究可深入探讨 β-葡聚糖与乳蛋白、脂肪等组分的相互作用机制及其对食品品质特性的影响。

© 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] 王志龙, 乔祥梅, 刘列, 等. 中国大麦品种登记现状及分析[J]. 中国种业, 2025(1): 9−14. [WANG Zhilong, QIAO Xiangmei, LIU Lie, et al. Status and analysis of barley variety registration in China[J]. China Seed Industry, 2025(1): 9−14.]

[2] XIE Jingjing, HONG Yan, GU Zhengbiao, et al. Highland barley starch: Structures, properties, and applications[J]. Foods, 2023, 12(2): 387.

[3] 李倩, 裴朝曦, 王之盛, 等. 不同类型酒糟营养成分组成差异的比较研究[J]. 动物营养学报, 2018, 30(6): 2369−2376. [LI Qian, PEI Zhaoxi, WANG Zhisheng, et al. Comparative study on nutrients compositions of different types of distillers' grains[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(6): 2369−2376.]

[4] 卢皓, 田金平, 吕一铮, 等. 白酒酿造固体废弃物资源化利用新进展[J]. 环境工程, 2022, 40(11): 231−236,250. [LU Hao, TIAN Jinping, LÜ Yizheng, et al. Review on research progress of resource recovery Baijiu distiller's grain[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(11): 231−236,250.]

[5] 李晶, 曹颖, 张彧格, 等. 青稞酒糟中 β-葡聚糖提取工艺优化及理化特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 180−188. [LI Jing, CAO Ying, ZHANG Yuge, et al. Optimization of extraction process of β-glucan from highland barley vinasse and analysis of its physicochemical properties[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(5): 180−188.]

[6] 高若涵, 马楠, 王霞, 等. 谷物 β-葡聚糖提取、分离纯化、生物活性及应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 407−414. [GAO Ruohan, MA Nan, WANG Xia, et al. Cereal β-glucan extraction, isolation and purification, bioactivity and application studies in review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 407−414.]

[7] 徐也, 唐辉春, 蔺泽荣, 等. 响应面法优化糯青稞 β-葡聚糖提取工艺[J]. 农产品加工, 2025(3): 38−42. [XU Ye, TANG Huichun, LIN Zerong, et al. Optimization of β-glucan from waxy hull-less barley by response surface methodology[J]. Academic Pe-

riodical of Farm Products Processing, 2025(3): 38−42.]
[8] 王珊珊, 赵雯玮, 朱肖翔, 等. 青稞酒糟中 β-葡聚糖的提取方法[J]. 食品安全导刊, 2024(29): 128−130. [WANG Shanshan, ZHAO Wenwei, ZHU Xiaoxiang, et al. Extraction method of β-glucan from barley distilling lees[J]. China Food Safety Magazine, 2024(29): 128−130.]
[9] 于丽雅, 石梦梦, 王月琴, 等. 微波超声联用处理对青稞 β-葡聚糖理化性质及结构特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 185−192. [YU Liya, SHI Mengmeng, WANG Yueqin, et al. Effect of microwave-ultrasound treatment on physicochemical and structural properties of highland barley β-glucan[J]. Food Science, 2024, 45(8): 185−192.]
[10] 郭欢. 青稞 β-葡聚糖的提取分离、结构表征、化学修饰及其生物活性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020. [GUO Huan. Extraction, isolation, structural characterization, chemical modification, and biological activities of Qingke (*Hordeum vulgare* L.) β-glucans[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2020.]
[11] 游茂兰. 提取方法和部位分布对青稞 β-葡聚糖理化性质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020. [YOU Maolan. Effects of extraction methods and location distribution on physicochemical properties of highland barley β-glucan[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.]
[12] 李真, 张钰, 蔡杰, 等. 燕麦 β-葡聚糖对凝固型酸奶发酵特性及贮藏品质的影响[J]. 轻工学报, 2025, 40(2): 23−30. [LI Zhen, ZHANG Yu, CAI Jie, et al. Effect of oat β-glucan on fermentation characteristics and storage quality of set yogurt[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(2): 23−30.]
[13] AL-SAHLANY S T G, AL-KAABI W J, Al-MANHEL A J A, et al. Effects of β-glucan extracted from *Saccharomyces cerevisiae* on the quality of bio-yoghurts: *In vitro* and *in vivo* evaluation[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(5): 3607−3617.
[14] ZHANG Qi, YANG Yueyue, JIN Zhengyu, et al. Effects of highland barley protein and β-glucan addition on the flour structure, bread quality and starch digestibility of whole wheat bread[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(11): 6068−6080.
[15] ÖZEN S, ÜNLÜ A, ÖZBEK H N, et al. β-glucan extraction from hull-less barley by a novel approach: Microwave-assisted pressurized CO_2/H_2O[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(12): 4781−4793.
[16] 游茂兰, 覃小丽, 段娇娇, 等. 超声-微波协同提取青稞 β-葡聚糖[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(8): 178−183. [YOU Maolan, QIN Xiaoli, DUAN Jiaojiao, et al. Ultrasonic-microwave synergistic extraction of β-glucan from hull-less barley[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(8): 178−183.]
[17] QU X Q, NAZARENKO Y, YANG W, et al. Effect of oat β-glucan on the rheological characteristics and microstructure of set-type yogurt[J]. Molecules, 2021, 26(16): 4752.
[18] 王璐瑶. 乙醇分级火龙果茎多糖性质表征及其在凝固型酸奶中的应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [WANG Luyao. Characterization of polysaccharides from pitaya stem in ethanol separation and its application in set-type yogurt[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
[19] 李慧, 吴伟都, 朱慧, 等. 搅拌型酸奶黏度及持水性测定的研究[J]. 粮食与食品工业, 2018, 25(2): 56−59. [LI Hui, WU Weidu, ZHU Hui, et al. Studies on the determination of viscosity and water-holding property of stirred yoghurt[J]. Cereal & Food Industry, 2018, 25(2): 56−59.]
[20] ZHAO Peiyao, LI Nana, CHEN Lingyun, et al. Effects of oat β-glucan on the textural and sensory properties of low-fat set type pea protein yogurt[J]. Molecules, 2023, 28(7): 3067.
[21] 黄苑怡, 劳晓, 刘勇勇, 等. 燕麦 β-葡聚糖添加对酸奶质构及流变特性的影响[J]. 工业微生物, 2023, 53(3): 113−119. [HUANG Yuanyi, LAO Xiao, LIU Yongyong, et al. On the effect of oat β-glucan supplement on the texture and rheological properties of yogurt[J]. Industrial Microbiology, 2023, 53(3): 113−119.]
[22] 秦驰, 赵研, 张栩瑕, 等. 奇亚籽多糖的提取及其在凝固型酸奶中的应用[J]. 中国林副特产, 2023(1): 1−5,14. [QIN Chi, ZHAO Yan, ZHANG Xuxia, et al. Extraction of *Chia seed* polysaccharide and its application in coagulated yoghurt[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2023(1): 1−5,14.]
[23] LIU B, DING T, ZHENG Y F, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process for polysaccharide from lactarius deliciosus by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Agricultural Biotechnology, 2024, 13(6): 46−51.
[24] SHEN Lipeng, PANG Shuixiu, ZHONG Mingming, et al. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 101: 106646.
[25] 黄玉炎, 柴小岩, 何桀, 等. 超声辅助冻融法提取燕麦麸 β-葡聚糖[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(3): 68−72. [HUANG Yuyan, CHAI Xiaoyan, HE Jie, et al. Ultrasonic assisted freeze-thaw extraction of β-glucan from oat bran[J]. Food Research and Development, 2021, 42(3): 68−72.]
[26] YANG Yueyue, WANG Yihui, JIAO Aiquan, et al. Understanding the mechanisms of β-glucan regulating the *in vitro* starch digestibility of highland barley starch under spray drying: Structure and physicochemical properties[J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138385.
[27] 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.
[28] DAI Yiqiang, WANG Zhe, WANG Zhongjiang, et al. Stabilizing effect of *Leuconostoc mesenteroides* Lm10 produced dextran *in situ* on stirred soy yogurt: Structure-function relationship[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122948.
[29] Le BA T, DAM M S, Le PHUONG N, et al. A review of processing techniques and rheological properties of yogurts[J]. Journal of Texture Studies, 2025, 56(1): e70006.
[30] PAULA VILELA T, GOMES A M, FERREIRA J P. Yogucheeses–Yoghurts fortified with melted cheese: Microstructural, textural and rheological characterisation[J]. International Journal of Dairy Technology, 2021, 74(4): 689−699.
[31] 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.]
[32] WIJAYA W, PATEL A R, SETIOWATI A D, et al. Functional colloids from proteins and polysaccharides for food applications[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 68: 56−69.
[33] YE A Q, HEWITT S, TAYLOR S. Characteristics of rennet–casein-based model processed cheese containing maize starch: Rheological properties, meltabilities and microstructures[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(4): 1220−1227.
[34] KAUR R, RIAR C S. Sensory, rheological and chemical characteristics during storage of set type full fat yoghurt fortified with barley β-glucan[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(1): 41−51.