苏盼盼, 乔靖玥, 王小婷, 等. 燕麦 β-葡聚糖对糯米粉水合能力及加工性能的调控作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 129−137. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060308

SU Panpan, QIAO Jingyue, WANG Xiaoting, et al. Effect of Oat β-Glucan on the Hydration Capacity and Technological Properties of Waxy Rice Flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 129−137. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060308

·研究与探讨·

燕麦 β-葡聚糖对糯米粉水合能力及加工性能的调控作用

苏盼盼[1,2], 乔靖玥[1], 王小婷[1], 申慧珊[1,2,3], 张艳艳[1,2], 刘兴丽[1,2], 宋梦锟[1,2], 张莹莹[1,2], 朱莹莹[1,2], 张　华[1,3], 李素云[1,3], 王宏伟[1,2,3,*]

（1.郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450002;
2.面制食品国家地方联合工程研究中心（河南）, 河南郑州 450002;
3.中原食品实验室, 河南漯河 462300）

摘　要: 本研究拟系统探讨燕麦 β-葡聚糖添加（1%、2%、3%、4%、5%）对糯米粉水合行为及加工性能的影响，以期为糯米粉基产品的品质与功能提升提供依据。结果表明，随着 β-葡聚糖添加量的增加，糯米粉-β-葡聚糖复合体系的粒径由 58.86 μm 降至 53.17 μm，休止角和滑角显著增大（P<0.05），流动性降低；吸水能力和溶解度分别由 14.3% 和 7.63% 提高至 16.6% 和 15.38%，膨胀度略有下降，接触角减小，表明复合体系的亲水性增强、水合能力显著提升（P<0.05）。同时，糯米粉的糊化起始温度由 70.7 ℃ 升高至 73.8 ℃，峰值黏度由 695.6 mPa·s 下降至 433.6 mPa·s，表明糯米粉的热稳定性增强。此外，β-葡聚糖的添加能够导致糯米粉复合凝胶稠度系数与储能模量降低，流动指数升高，表明其可弱化糯米粉凝胶体系的弹性和网络结构稳定性。综上所述，燕麦 β-葡聚糖可通过增强糯米粉的水合能力，进而改善其加工性能，推动其在功能性食品领域的开发与应用。

关键词: 燕麦 β-葡聚糖, 糯米粉, 水合能力, 加工特性

中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0129−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060308　　本文网刊:

Effect of Oat β-Glucan on the Hydration Capacity and Technological Properties of Waxy Rice Flour

SU Panpan[1,2], QIAO Jingyue[1], WANG Xiaoting[1], SHEN Huishan[1,2,3], ZHANG Yanyan[1,2], LIU Xingli[1,2], SONG Mengkun[1,2], ZHANG Yingying[1,2], ZHU Yingying[1,2], ZHANG Hua[1,3], LI Suyun[1,3], WANG Hongwei[1,2,3,*]

（1.College of Food and Bioengineering Department, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
2.National & Local Joint Engineering Research Center of Cereal-Based Foods Laboratory (Henan), Zhengzhou 450002, China;
3.Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China）

Abstract: This work aimed to evaluate the impact of oat β-glucan addition (1%, 2%, 3%, 4%, and 5%) on the hydration behavior and technological characteristics of waxy rice flour, with the goal of providing a scientific foundation for enhancing the quality and functional properties of waxy rice flour-based products. The results demonstrated that as the β-glucan addition level increasing, the average particle size of rice flour-β-glucan composite decreased from 58.86 μm to 53.17 μm. Nevertheless, the repose and sliding angle of the composite significantly increased (P<0.05), which implied reduced

收稿日期: 2025−06−25

基金项目: 河南省重点研发项目（231111113200）; 河南省高校科技创新人才支持计划（25HASTIT040）; 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目（2024GGJS078）; 河南省国际科技合作项目（252102521006）; 河南省留学人员择优资助项目（202501）。

作者简介: 苏盼盼（2003−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉基米面食品加工, E-mail: 1798376140@qq.com。

*** 通信作者:** 王宏伟（1988−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 淀粉基米面食品加工, E-mail: hwwang@zzuli.edu.cn。

flowability. The water absorption capacity and solubility increased from 14.3% and 7.63% to 16.6% and 15.38%, respectively. In contrast, the swelling power slightly decreased, and the contact angle was reduced, suggesting enhanced hydrophilicity and significantly improved hydration capacity of the composite system. Meanwhile, the onset temperature of waxy rice flour increased from 70.7 ℃ to 73.8 ℃, and the peak viscosity decreased from 695.6 mPa·s to 433.6 mPa·s, indicating an enhancement in its thermal stability. In addition, the addition of *β*-glucan led to a reduction in the consistency coefficient and storage modulus of the composite gel, while the flow behavior index increased, suggesting weakened elasticity and structural stability of gel network. In conclusion, oat *β*-glucan can enhance the hydration capacity of waxy rice flour and thereby improve its processing properties, thus promoting its development and application in the field of functional foods.

Key words: oat *β*-glucan; waxy rice flour; hydration capacity; technological properties

糯米粉以高含量的支链淀粉为主要成分，同时含有适量的脂质和蛋白质，具有较高的营养价值。其独特的糊化特性和粘弹性，能够在加热后形成柔软致密的凝胶结构，从而赋予相关产品良好的质构、风味及口感，因此被广泛应用于制作汤圆、年糕、糍粑等传统中式食品[1]。然而，糯米粉的高黏度特性导致其制品在食用过程中容易出现黏牙不爽口、吞咽困难等现象；此外，糯米粉的持水能力相对较弱，使得其制品在冷冻贮藏过程中易发生水分迁移，进而引发冻裂、结构松散及口感劣变等问题，严重影响产品的品质稳定性和消费接受度[2]。因此，如何改善糯米粉的水合特性，并调控其黏度特性，已成为提升糯米粉制品加工适应性和品质稳定性的关键研究方向。目前，研究人员主要通过物理改性、亲水性胶体与多糖添加及原料协同调配等手段，调控糯米粉的结构与功能特性，从而提升其加工性能和产品品质。其中，亲水性胶体和功能性多糖的添加作为常见且有效的改良手段，能够显著调节糯米粉的水合行为及加工特性。王艳[3] 的研究发现，亚麻籽和沙蒿胶的添加可通过调控糯米淀粉的水分迁移与颗粒膨胀度，改变其糊化行为并提升汤圆结构的稳定性；张喻等[4] 发现，海藻糖的添加显著提高了糯米粉的吸水能力和持水能力，导致糊化温度升高，糊化黏度呈现先增大后减小的趋势；张宁等[5] 的研究则表明，木糖醇通过与水分子结合影响淀粉的水合能力，从而调节其糊化和流变性能，改善了最终产品的品质。尽管亲水胶体和多糖在糯米粉改良中展现出良好的应用前景，但 *β*-葡聚糖作为一种重要的功能性多糖，有关其在糯米粉体系中应用的相关研究仍较为有限，亟需进一步深入探讨。

β-葡聚糖作为一类典型的非淀粉多糖，广泛存在于燕麦、大麦等谷物细胞壁中，其分子结构中富含羟基和少量羧基等亲水基团，因而具有良好的亲水性、水溶性和胶凝特性。此外，*β*-葡聚糖还表现出多种生理活性，如降血糖、降血脂以及改善肠道健康等[6]。已有研究表明，*β*-葡聚糖可通过其分子内部的亲水性基团（如羟基、羧基等）与淀粉分子发生非共价相互作用，从而影响淀粉的水合能力及其加工性能。Li 等[7] 的研究指出，*β*-葡聚糖通过与淀粉分子发生非共价作用，限制了淀粉颗粒的膨胀和糊化过程，从而导致体系糊化黏度降低；赵娅杰等[8] 研究指出，*β*-葡聚糖通过其内部亲水性基团与小麦淀粉分子形成氢键，从而抑制淀粉颗粒的膨胀和溶解，导致体系峰值黏度降低，糊化温度升高；Li 等[9] 研究表明，*β*-葡聚糖通过其分子内部的羟基与玉米淀粉分子发生相互作用，提升了体系的水合能力，显著增强了流变性能，使体系表现出更稳定的凝胶结构。尽管有关 *β*-葡聚糖在单一淀粉体系中作用机制的研究已较为深入，但其在复杂全粉体系中对加工性能的影响尚缺乏系统性探讨，尤其针对糯米粉体系的相关研究仍较为匮乏。

基于此，本研究选取来源广泛且常见的燕麦 *β*-葡聚糖，按照不同比例（1%、2%、3%、4%、5%）分别添加至糯米粉中，研究其对糯米粉粒径大小、粉末流动性、水分吸湿-解吸行为、糊化和流变等理化特性的影响，以期探明 *β*-葡聚糖对糯米粉水合能力及加工性能的调控规律，为 *β*-葡聚糖在糯米制品中的应用研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

糯米粉（水分含量 12.18%、蛋白质 6.68%、脂肪 0.62%、灰分 0.32%） 郑州三全食品股份有限公司；燕麦 *β*-葡聚糖（碳水化合物 81.74%、*β*-葡聚糖 76.45%、灰分 6.74%、水分含量 5.61%、粗蛋白 4.13%、脂质 1.78%） 上海源叶生物科技有限公司。

JA20002 型电子天平 上海良平仪器仪表有限公司；TD-5M 低速离心机 成都蜀科科技有限公司；OCA20 接触角测量仪 德国 Dataphysics 公司；MCR302 机械流变仪 奥地利安东帕公司；RVA 4500 快速黏度仪 瑞典 Perter 仪器有限公司；Mastersizer3000 激光粒度仪 英国马尔文仪器有限公司；DVS Intrinsic 动态水蒸气吸附仪 英国 Surface Measurement Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 混合粉的制备 将 *β*-葡聚糖按不同比例（1%、2%、3%、4%、5%）添加至糯米粉中，并充分混合均匀，制备成一系列不同配比的混合粉，分别将其命名为 WRF-1%、WRF-2%、WRF-3%、WRF-4% 和 WRF-5%。其中，原糯米粉样品作为对照组，记为 WRF。

1.2.2 粒径的测定 参考王宏伟等[10] 的方法，使用

Mastersizer3000 激光粒度仪分析样品粒径。将样品按照 1∶100(w/w)的比例充分分散于蒸馏水中。测定范围为 0.02~2000 μm，折射率为 1.53%，散射强度为 3 mW，扫描区域为 0.02°~163°。通过测量颗粒对激光的散射角度，从而计算出颗粒的粒径。

1.2.3　粉体流动性的测定　参考 Ngamnikom 等[11]的方法，测定粉末的流动性。

1.2.3.1　松装密度(ρ_b)　准确称取 5 g 样品缓慢倒入 10 mL 量筒中，轻轻敲击量筒壁，使粉体自然下沉直至稳定，当粉体在量筒中的体积不再发生明显变化时，记录此时体积 v，粉体松装密度通过公式(1)计算：

$$\text{松装密度 (g/mL)} = \frac{m}{v} \qquad \text{式（1）}$$

式中，m 为粉末的质量，g；v 为粉末在量筒中堆积的体积，mL。

1.2.3.2　振实密度(ρ_t)　完成松装密度测试后，继续对量筒进行反复振动，直至粉末颗粒充分重排并趋于紧实。当粉体的高度和体积连续数次振动后均无明显变化时，记录振实后体积 v'。振实密度通过公式(2)计算：

$$\text{振实密度 (g/mL)} = \frac{m}{v'} \qquad \text{式（2）}$$

式中，m 为粉末的质量，g；v'为振实后的粉末体积，mL。

1.2.3.3　豪斯纳比　其数值按公式(3)计算，用来评估粉末的压缩性。

$$\text{豪斯纳比(\%)} = \frac{\rho_t}{\rho_b} \qquad \text{式（3）}$$

式中，ρ_t为粉末的振实密度，g/mL；ρ_b为粉末的松装密度，g/mL。

1.2.3.4　卡尔指数　其数值按公式(4)计算，用来评估粉末的内聚性。

$$\text{卡尔指数(\%)} = \frac{\rho_t - \rho_b}{\rho_t} \times 100 \qquad \text{式（4）}$$

式中，ρ_t为粉末的振实密度，g/mL；ρ_b为粉末的松装密度，g/mL。

1.2.3.5　休止角　将玻璃漏斗垂直固定于铁架台上，使漏斗下端距离坐标纸的高度 H 为 5.0 cm。以恒定速率将粉末注入漏斗，使其在圆板上自然堆积成圆锥状。测量圆锥体的底部半径 R。休止角通过公式(5)计算：

$$\text{休止角(°)} = \arctan\left(\frac{H}{R}\right) \qquad \text{式（5）}$$

式中，H 为粉末的振实密度，cm；R 为粉末的松装密度，cm。

1.2.3.6　滑角　将样品均匀平铺于长为 10 cm×8 cm 的玻璃平板上，形成厚度约为 1 cm 的粉层。将玻璃板一端固定另一端缓慢匀速抬升，当粉体整体开始滑动时立即停止，并测量升起端与水平面的垂直高度 H。滑角通过公式(6)计算：

$$\text{滑角(°)} = \arcsin\left(\frac{H}{L}\right) \qquad \text{式（6）}$$

式中，H 为玻璃板抬升高度，cm；L 为玻璃板的长度，cm。

1.2.4　水分吸附等温线的测定　参考赵学伟等[12]的方法，称取 1 g 样品置于动态水蒸气吸附仪(Dynamic Vapor Sorption，DVS)中，设定温度为 25 ℃，以 200 mL/min 的氮气流作为载气，模式选择 0~90%~0相对湿度吸附、脱附水蒸汽全循环，湿度步长为 10%。当样品质量变化速率(dm/dt)≤0.002%/min 时判定达到平衡，记录各湿度点的吸附数据。

1.2.5　吸水能力的测定　参考王宏伟等[10]的方法测定糯米粉吸水能力，将 1 g 样品(干基)加到 10 mL 去离子水中，充分搅拌 30 min，随后以 4000 r/min 离心 20 min，倒出上清液，用滤纸将多余的水分除去，记沉淀重量为 W_1。吸水能力通过公式(7)计算：

$$\text{吸水能力(\%)} = \frac{W_1}{W} \qquad \text{式（7）}$$

式中，W_1 为湿沉淀物的重量，g；W 为样品的干重，g。

1.2.6　溶解度和膨胀度的测定　参考 Wang 等[13]的方法将 2% 样品混合液置于 85 ℃ 的水浴锅中持续振荡加热 30 min，待其冷却至室温后，以 4000 r/min 离心 20 min，将上清液倒入已烘干至恒重的铝盒中，至于 105 ℃ 下烘干至恒重，称重记为 M_1，称取沉淀重量记为 M_2，按式(8)与式(9)分别计算样品的溶解度和膨胀度。

$$\text{溶解度(\%)} = \frac{M_1}{M} \times 100 \qquad \text{式（8）}$$

$$\text{膨胀度(g/g)} = \frac{M_2}{M - M_1} \qquad \text{式（9）}$$

式中，M 为样品干重，g；M_1 为上清液烘干后的重量，g；M_2 为离心后沉淀物重量，g。

1.2.7　接触角的测定　参考实验室前期研究方法[10]，采用液滴法测定混合物的静态水接触角。称取 200 mg 样品，在 25 MPa 压力下制成厚度约 1.0 mm 的薄片，在其表面滴加纯水，通过佳能 EOS 80D 数码相机拍摄液滴形貌，并使用接触角软件分析液滴切线与样品表面形成的接触角。

1.2.8　糊化特性的测定　参照 Cui 等[14]的方法，准确称取 25 g 去离子水和 1.50 g 样品(干基)于快速黏度仪样品筒中，用搅拌器轻轻上下搅拌使其均匀分散，并在 30 s 内放入仪器中进行测试。测试程序为：先以 960 r/min 的转速在 50 ℃ 下搅拌 1 min，然后将转速降至 160 r/min 并保持不变；在此转速下，以 5 ℃/min 的速率升温至 95 ℃，保持 2.5 min，再以相同速

率降温至 50 ℃，并在该温度下继续保持 2 min。

1.2.9 流变学特性的测定

1.2.9.1 静态流变特性 参考王艳等[15]的方法，将 1.2.8 糊化后的样品放在 40 mm 的平板夹具上，对样品进行切边处理，并在边缘涂抹硅油以防止水分蒸发。选择测试程序为 Flow Pamp 模式，测试间距为 1000 μm。测试样品的表观黏度和剪切应力随着剪切速率的变化关系，之后采用幂律方程进行拟合分析，公式如式(10)所示：

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad \text{式（10）}$$

式中：τ 为剪切应力，Pa；K 为稠度系数，Pa·s^n；γ 为剪切速率，s^{-1}；n 为流动指数。

1.2.9.2 动态流变特性 采用 Oscillation Frequency 模式对样品进行振幅扫描，测试参数[16]：温度为 25 ℃、间距为 1000 mm，确定样品的线性黏弹区域。根据振幅扫描结果，选定应变 1% 进行动态频率扫描，扫描范围为 1~100 rad/s，扫描温度为 25 ℃，扫描结束后，记录样品的储能模量(G')、损耗模量(G")和损耗角正切值(tanδ)。

1.3 数据处理

上述所有实验均重复 3 次，结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，采用单因素方差分析和 Duncans 多重比较法检验显著性（P<0.05），图表绘制使用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 β-葡聚糖对糯米粉粒径大小的影响

由表 1 可知，原糯米粉的平均粒径为 58.86 μm，然而，随着 β-葡聚糖添加量的增加，糯米粉-β-葡聚糖复合体系的粒径分布呈现出明显的减小趋势。具体而言，体积平均粒径 $D_{(4,3)}$ 从 58.86 μm 降至 53.17 μm，$d_{(10)}$、$d_{(50)}$和 $d_{(90)}$分别从 10.46 μm、49.21 μm 和 121.79 μm 减少至 9.49 μm、43.29 μm 和 110.98 μm。这可能是由于 β-葡聚糖在分散过程中可吸附于糯米粉颗粒表面，在颗粒之间形成空间位阻，从而有效阻止颗粒的重新聚集和团聚现象的发生。此外，β-葡聚糖还可通过调节颗粒间的表面能，削弱颗粒之间的相互吸引力，从而进一步促进颗粒在体系中的稳定分散，导致整体粒径向更小粒径区间偏移[17]。Ma 等[18]的研究表明，魔芋葡甘露聚糖的添加可以显著减小玉米淀粉的粒径（P<0.05）。与上述研究结果一致。值得注意的是，粉体粒径的减小不仅有助于提高其分散稳定性和流变性能，同时可能通过增强水分与基质的接触效率，进而改善其水合行为、加工特性及最终产品的品质。

表 1 β-葡聚糖对糯米粉粒径大小的影响

Table 1 Effect of β-glucan addition on the particle size distribution of waxy rice flour

样品	$D_{(4,3)}$(μm)	$d_{(10)}$(μm)	$d_{(50)}$(μm)	$d_{(90)}$(μm)
WRF	58.86±0.12^{a}	10.46±0.01^{b}	49.21±0.14^{a}	121.79±0.25^{a}
WRF-1%	58.28±0.63^{ab}	11.76±0.23^{a}	47.39±0.36^{b}	121.50±1.38^{a}
WRF-2%	57.58±0.11^{b}	9.80±0.80^{cd}	47.10±0.11^{bc}	121.35±0.41^{a}
WRF-3%	56.47±0.33^{c}	9.99±0.11^{c}	46.55±0.23^{c}	117.89±0.73^{b}
WRF-4%	53.93±0.30^{d}	9.83±0.10^{cd}	43.92±0.12^{d}	112.32±1.26^{c}
WRF-5%	53.17±0.35^{d}	9.49±0.14^{d}	43.29±0.28^{e}	110.98±0.59^{c}

注：同列数据不同上标字母表示数据具有显著性差异（P<0.05），表2~表5同。

2.2 β-葡聚糖对糯米粉流动性的影响

粉体流动性是其在加工输送过程中表现出的流动能力，通常通过松装密度、振实密度、豪斯纳比和卡尔指数等参数进行综合评价。由表 2 可知，随着 β-葡聚糖添加量的增加，松装密度呈现先升后降（由 0.60 g/cm^3 升至 0.63 g/cm^3 后降至 0.59 g/cm^3）的趋势，振实密度在 0.84~0.92 g/cm^3 之间波动，而豪斯纳比由 1.32 增至 1.49，卡尔指数则由 24.48% 升高至 33.21%。这些结果表明，β-葡聚糖的添加增强了糯米粉粉体的可压缩性，同时明显降低其流动性。

该趋势亦可通过休止角和滑角的变化得到进一步佐证。随着 β-葡聚糖含量的增加，休止角由 44.31° 上升至 49.54°，滑角由 33.82° 上升至 43.98°，表明粉体颗粒间的摩擦力和内聚力增强，流动性下降。这一现象可能与 β-葡聚糖本身具有较强的黏性和亲水性有关，其在糯米粉颗粒表面形成吸附层，增加了颗粒间的相互作用力，从而抑制其自由滑动和堆积重排，降低燕麦-β-复合体系整体的流动性[19]。此外，随着 β-葡聚糖的添加，混合粉粉体的粒径逐渐减小，吸湿性增强，颗粒表面更易形成水膜或黏附层，从而提升了颗粒间的摩擦力和内聚力，最终导致粉体流动性下降[20]。

2.3 β-葡聚糖对糯米粉水分吸附等温线的影响

水分吸附等温线用于描述粉体在不同相对湿度下的水分吸附特性。图 1 为样品在 25 ℃ 下的水分吸附等温曲线。由图 1(A)可知，原糯米粉水分吸附

表 2 β-葡聚糖对糯米粉流动性的影响

Table 2 Effect of β-glucan addition on the flowability of waxy rice flour

样品	松装密度(g/cm^3)	振实密度(g/cm^3)	豪斯纳比	卡尔指数(%)	休止角(°)	滑角(°)
WRF	0.60±0.05^{b}	0.90±0.06^{ab}	1.32±0.02^{b}	24.48±1.27^{b}	44.31±0.36^{c}	33.82±0.94^{e}
WRF-1%	0.61±0.02^{b}	0.84±0.05^{b}	1.39±0.13^{ab}	27.47±7.05^{ab}	42.59±0.18^{d}	35.78±0.66^{d}
WRF-2%	0.61±0.00^{b}	0.85±0.00^{ab}	1.41±0.01^{ab}	29.16±0.32^{ab}	45.86±0.35^{b}	38.73±1.36^{c}
WRF-3%	0.63±0.01^{a}	0.92±0.03^{a}	1.46±0.03^{ab}	31.48±1.59^{ab}	46.69±0.19^{b}	41.11±0.73^{b}
WRF-4%	0.60±0.01^{b}	0.88±0.02^{ab}	1.48±0.03^{a}	32.59±1.56^{ab}	49.51±0.91^{a}	43.54±0.36^{a}
WRF-5%	0.59±0.01^{b}	0.89±0.01^{ab}	1.49±0.01^{a}	33.21±0.37^{a}	49.54±1.01^{a}	43.98±0.40^{a}

等温线呈现为“S”型，属于 II 型等温线，即非多孔固体表面的多分子层吸附[21]。当水分活度较低时，平衡水分含量随水活度增加缓慢，说明此阶段主要以单层吸附为主；而在较高水分活度区域时，平衡水分含量增幅明显加快，表明随着表面吸附位点趋于饱和，水分子逐渐在已吸附水分子上继续堆积，吸附行为由单层吸附逐渐转向多层吸附。这与 Zhao 等[22] 观察到的糯米粉水分吸附等温线形状一致。此外，由吸附与解吸曲线对比可知，在相同水分活度条件下，解吸过程的平衡水分含量普遍高于吸附过程，表现出明显的滞后现象。该现象表明水分在吸附进入糯米粉体系后，在解吸过程中不能完全沿原路径释放。这可能与体系结构变化及水分子与糯米粉分子间氢键作用有关。图 1(B)显示，随着 β-葡聚糖添加量的增加，糯米粉-β-葡聚糖复合体系的平衡水分含量普遍提升，而 WRF-5% 样品的吸附曲线明显高于其他样品，表明 β-葡聚糖的添加显著增强了复合体系的亲水性和吸湿性。这可能是由于 β-葡聚糖富含羟基等亲水性基团，且在颗粒表面形成致密的吸附层，增加了与水分的结合位点，同时粒径减小带来的比表面积增大也进一步促进了水分的吸附。

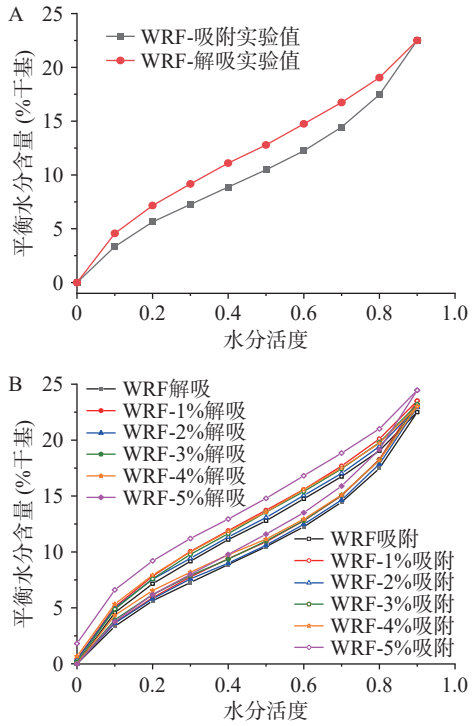


图 1　糯米粉-β-葡聚糖复合体系的水分吸附等温曲线

Fig.1　Moisture adsorption isotherm curves of WRF-β-glucan composite system

2.4　β-葡聚糖对糯米粉吸水能力的影响

糯米粉的吸水能力是反映其与水相互作用程度的重要功能特性。对于大分子物质来说，通常涉及水分子与聚合物分子链间的相互作用，如氢键的形成[10]。由表 3 可知，随着 β-葡聚糖添加量的增加，糯米粉-β-葡聚糖复合体系的吸水能力逐渐增强，具体表现为由 14.35% 逐渐上升至 16.62%。表明 β-葡聚糖的添加显著增强了糯米粉的亲水性。这归因于 β-葡聚糖分子内部丰富的亲水性官能团(如羟基、羧基等)能够与水分子形成稳定的氢键，同时其在糯米粉颗粒表面形成吸附层，从而促进水分的结合与保留，显著提升了复合体系的吸水能力[23]。这意味着 β-葡聚糖的添加不仅改善了糯米粉的亲水性和吸水性能，还有助于提升其制品的保水性，从而延缓贮藏过程中的品质劣变。

表 3　β-葡聚糖对糯米粉水合能力的影响

Table 3　Effect of β-glucan addition on the water binding ability of waxy rice flour

样品	吸水能力(%)	溶解度(%)	膨胀度(g/g)	接触角(°)
WRF	14.35±0.44^{d}	7.63±0.11^{e}	8.83±0.15^{a}	92.17±0.68^{a}
WRF-1%	15.24±0.32^{c}	8.62±0.16^{d}	8.64±0.07^{b}	89.80±0.74^{b}
WRF-2%	15.52±0.25^{bc}	8.92±0.09^{d}	8.40±0.11^{c}	86.40±0.10^{c}
WRF-3%	15.78±0.37^{b}	11.64±0.04^{c}	8.29±0.00^{cd}	82.75±1.44^{d}
WRF-4%	16.47±0.43^{a}	14.70±0.13^{b}	8.14±0.00^{de}	80.55±1.66^{d}
WRF-5%	16.62±0.24^{a}	15.38±0.21^{a}	8.08±0.02^{e}	78.02±0.81^{e}

2.5　β-葡聚糖对糯米粉溶解度和膨胀度的影响

糯米粉溶解度指的是糯米粉在加热过程中，可溶性成分(如直链淀粉、小分子碳水化合物等)溶解于水的能力。由表 3 可知，原糯米粉的溶解度为 7.63%，添加 β-葡聚糖后，混合粉的溶解度显著提高至 15.38%(P<0.05)。这可能是由于 β-葡聚糖能够促进水分渗透到复合体系中糯米粉颗粒的内部，从而使较小的淀粉颗粒在其黏附作用下更易发生溶出，进而提高了复合体系的溶解度[24]。

膨胀度指的是糯米粉在加热过程中的颗粒膨胀程度，反映其吸水后体积增大的能力。由表 3 可见，膨胀度呈现减小趋势，由 8.83 g/g 减少至 8.08 g/g。这种现象可能是由于 β-葡聚糖吸附在糯米粉的表面，从而使得糯米粉在加热过程中膨胀变得困难，导致膨胀度显著降低(P<0.05)。另一方面，由于 β-葡聚糖与糯米粉之间竞争性吸水，弱化了糯米粉所能吸收的自由水量，进而导致其无法充分膨胀[25]。

2.6　β-葡聚糖对糯米粉接触角的影响

接触角是指水滴在固体表面上形成的角度，反映了固体表面与水之间的相互作用程度。通常，接触角越小，亲水性越强。从表 3 和图 2 可以看出，随着 β-葡聚糖添加量的增加，燕麦-β-葡聚糖复合体系的接触角由 92.17°下降至 78.02°，呈现出明显的减小趋势。这表明 β-葡聚糖的添加增强了复合体系的亲水性。这一现象可能是由于 β-葡聚糖分子中丰富的亲水性基团与水分子形成非共价作用，如氢键，从而提高了粉体表面对水分的亲和力[26]。上述结果与水分吸附等温线、吸水能力以及溶解度的变化趋势一致，进一步验证了 β-葡聚糖的添加可显著提升糯米粉-β-葡聚糖复合体系的水合能力。

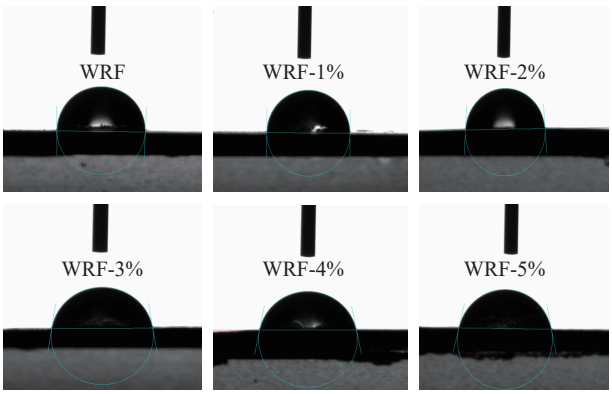


图 2 β-葡聚糖对糯米粉接触角的影响

Fig.2 Effect of β-glucan addition on the contact angle of waxy rice flour

2.7 β-葡聚糖对糯米粉糊化特性的影响

糊化特性是指糯米粉在加热吸水过程中，淀粉颗粒逐渐吸水膨胀、晶体结构被破坏，最终形成均匀粘稠的糊状体系。一般而言，淀粉基原料糊化黏度的变化主要源于淀粉分子链间的相互作用及其分子结构的转变，这些因素影响了淀粉颗粒的溶胀程度，进而导致体系黏度的变化[27]。结合图 3 与表 4 可知，随着 β-葡聚糖添加量的增加，起始糊化温度（PT）则由 70.73 ℃ 升高至 73.87 ℃，这可能是由于 β-葡聚糖的添加抑制了水分的渗透与糯米粉颗粒的膨胀，从而导致复合体系起始糊化温度升高[28]。而糯米粉-β-葡聚糖复合体系的峰值黏度（PV）、最终黏度（FV）和崩解值（BD）分别由 695.64、1268.5 和 58.77 mPa·s 显著（$P<0.05$）降低至 433.62、815.71 和 19.54 mPa·s，这可能是由于 β-葡聚糖具有较强的亲水性，与糯米粉分子竞争性吸水，抑制了糯米粉颗粒的充分膨胀，导致糊化黏度降低[29]；回生值（SB）反映了淀粉分子链在冷却过程中重排与聚集的能力，且随着 β-葡聚糖添加量的增加而逐渐降低。这主要是因为 β-葡聚糖分子链上的亲水基团（如羟基）通过非共价相互作用与糯米粉分子结合，同时其较大的空间位阻阻碍了淀粉分子链的互作和缠绕，抑制了凝胶网络结构的形成，从而减弱了淀粉分子链间的重排[30]。这种作用导致复合体系的短期回生能力下降，抗老化性能增强。该结论与 Li 等[31] 关于 β-葡聚糖减少淀粉分子重排、延缓老化的研究结果相一致。综上，β-葡聚糖能够有效调控糯米粉的糊化行为，从而改善其加工流变特性，并在延缓糯米制品老化方面具有潜在的应用价值。

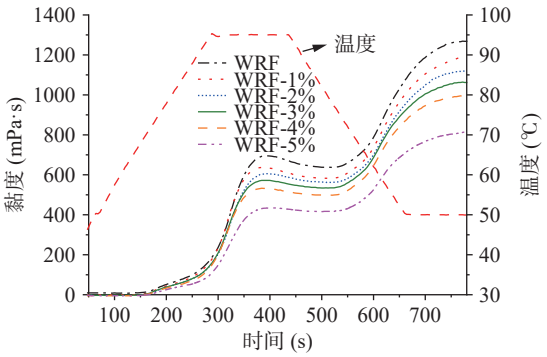


图 3 β-葡聚糖对糯米粉糊化特性的影响

Fig.3 Effect of β-glucan addition on the pasting properties of waxy rice flour

2.8 β-葡聚糖对糯米粉流变特性的影响

2.8.1 静态流变 在流变学中，对于非牛顿流体（糯米粉分散体系属于非牛顿流体），表观黏度是指在一定的剪切速率下，流体所表现出来的黏度。表观黏度越低，糯米粉分散体系的流动性越好[32]。剪切应力是

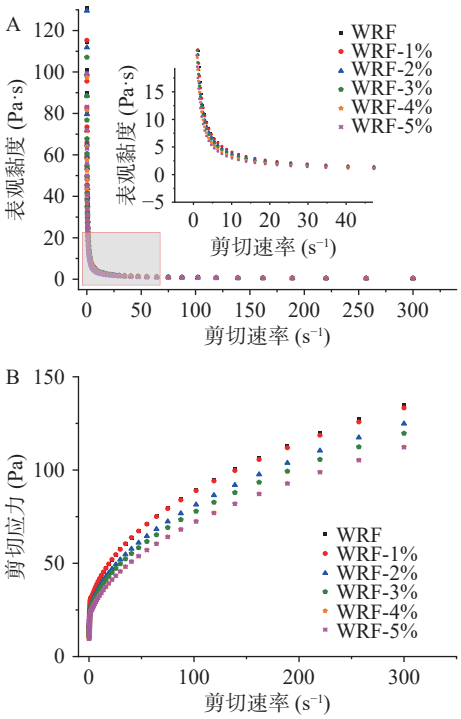


图 4 糯米粉-β-葡聚糖复合体系的静态流变学特性

Fig.4 Apparent viscosity and shear stress of waxy rice flour with the addition of β-glucan

表 4 β-葡聚糖对糯米粉糊化特性的影响

Table 4 Effect of β-glucan addition on the pasting properties of waxy rice flour

样品	糊化温度（℃）	峰值粘度（mPa·s）	最终粘度（mPa·s）	崩解值（mPa·s）	回生值（mPa·s）
WRF	70.73±0.52^{d}	695.64±18.24^{a}	1268.53±20.62^{a}	58.77±5.15^{a}	197.67±9.64^{a}
WRF-1%	71.54±0.45^{c}	637.94±17.35^{b}	1189.72±19.47^{b}	57.65±4.72^{a}	190.34±7.85^{a}
WRF-2%	72.11±0.37^{b}	605.13±17.52^{c}	1120.24±18.72^{c}	43.43±5.21^{b}	171.22±11.34^{b}
WRF-3%	72.52±0.43^{b}	572.38±16.33^{d}	1062.57±19.15^{d}	36.53±6.37^{c}	144.64±12.54^{c}
WRF-4%	73.24±0.51^{a}	532.51±16.92^{e}	995.92±20.23^{e}	34.71±4.72^{c}	128.42±12.11^{d}
WRF-5%	73.87±0.42^{a}	433.62±18.12^{f}	815.71±23.43^{f}	19.54±3.24^{d}	108.50±10.92^{e}

指在流体内部，相邻两层流体之间由于相对运动而产生的单位面积上的作用力。剪切应力大小反映了糯米粉分散体系的内部阻力，当剪切应力越大时，说明体系内部抵抗流动的阻力越大。从图 4 中可以看到，与原糯米粉相比，混合粉糊化后的表观黏度和剪切应力均随着剪切速率的增加有所下降。原因可能是：一方面，β-葡聚糖的加入破坏了支链淀粉分子间的缠结与交联作用，导致凝胶网络结构松散，与上述糊化特性的回生值结果一致；另一方面，随着 β-葡聚糖的添加，体系内出现明显的竞争性吸水现象，从而抑制了糯米粉的充分吸水与膨胀，导致糯米粉中的分子链无法完全舒展，黏度降低，与峰值黏度下降结果一致[33−34]。这表明糯米粉-β-葡聚糖复合体系具有更高的流动性，有利于提升其加工适应性，在生产过程中更容易实现泵送和管道输送，减少堵塞风险并降低能耗。

采用幂律方程对复合体系的流动性进行拟合分析，进一步分析 β-葡聚糖对复合体系剪切行为的影响。在幂律模型中，参数 K 定义为稠度系数，其值大小直接反映体系的增稠能力；流动指数 n 则表征流体的流动特性，具体表现为：当 n=1 时体系呈现牛顿流体行为，当 1<n<∞时表现出胀塑性流体特征，而当 n<1 时则呈现假塑性流体行为[35]。拟合后的相关参数见表 5，随着 β-葡聚糖的添加，体系的稠度系数明显降低，由 7.50 降至 4.00，表明体系黏稠性下降。这是由于 β-葡聚糖强的水合能力及其间位阻效应，干扰了糯米粉分子链间的缠绕与交联，削弱了复合体系对剪切应力的抵抗能力，从而降低了其整体黏度水平。此外，糯米粉-β-葡聚糖复合凝胶体系的流动指数均小于 1，表明复合体系为假塑性流体[36]。随着 β-葡聚糖的添加，复合体系的流动指数逐渐增加，可能是由于 β-葡聚糖的添加减少了糯米粉聚合物分子链间的聚集与缠结，降低了体系分子排列的规整性，从而导致其流动指数增大。

表 5　糯米粉-β-葡聚糖复合体系静态流变曲线拟合参数
Table 5　Power law parameters for steady flow behavior of waxy rice flour with the addition of β-glucan

样品	稠度系数(K)	流动指数(n)	决定系数(R^2)
WRF	7.50±0.16^{a}	0.49±0.01^{b}	0.999
WRF-1%	6.26±0.88^{b}	0.52±0.03^{ab}	0.999
WRF-2%	6.14±0.28^{b}	0.51±0.01^{ab}	0.999
WRF-3%	5.41±0.60^{bc}	0.52±0.02^{ab}	0.999
WRF-4%	4.61±0.62^{cd}	0.54±0.02^{a}	0.999
WRF-5%	4.00±0.22^{d}	0.55±0.01^{a}	0.999

2.8.2　动态流变　储能模量(G')表征样品的弹性，值越大表明凝胶弹性储能能力越强，结构刚性越高；损耗模量(G")表征样品的黏性，值越大反映凝胶黏性耗能特性越显著，流动性越好。损耗角正切值(tanδ)衡量样品黏性与弹性之间的关系，其值的大小与样品的流动性呈正比。由图 5 可知，糯米粉-β-葡聚糖复合凝胶的模量值随着角频率的增加而呈正相关关系，表现为储能模量和损耗模量均随角频率升高而增加，这表明在高频剪切作用下，聚合物链段的运动受到限制，分子间的物理缠结以及氢键、范德华力等相互作用难以被打破，形成相对“锁定”的结构并使得体系对外界扰动更加“刚硬”，导致复合凝胶表现出更强的弹性特征与黏性特征[37]。然而，β-葡聚糖的添加导致复合凝胶储能模量降低，表明复合凝胶在受到外力作用时，分子链更容易相对滑动，从而降低了凝胶体系的弹性和结构稳定性，反映出体系内部结构的弱化和网络强度的下降。此现象可能是由于 β-葡聚糖的添加阻碍了糯米粉凝胶内部聚合物分子链间的相互作用与缠结，削弱了凝胶网络的构建能力，导致凝胶结构松散、稳定性下降，从而影响其力学强度和储能模量，且 β-葡聚糖的强水合能力也可能弱化糯米淀粉分子链间的自由体积及可移动性，导致储能模量降低[38]。此外，所有复合凝胶的 tan δ 值均小于 1，表明其主要表现出弹性特征。

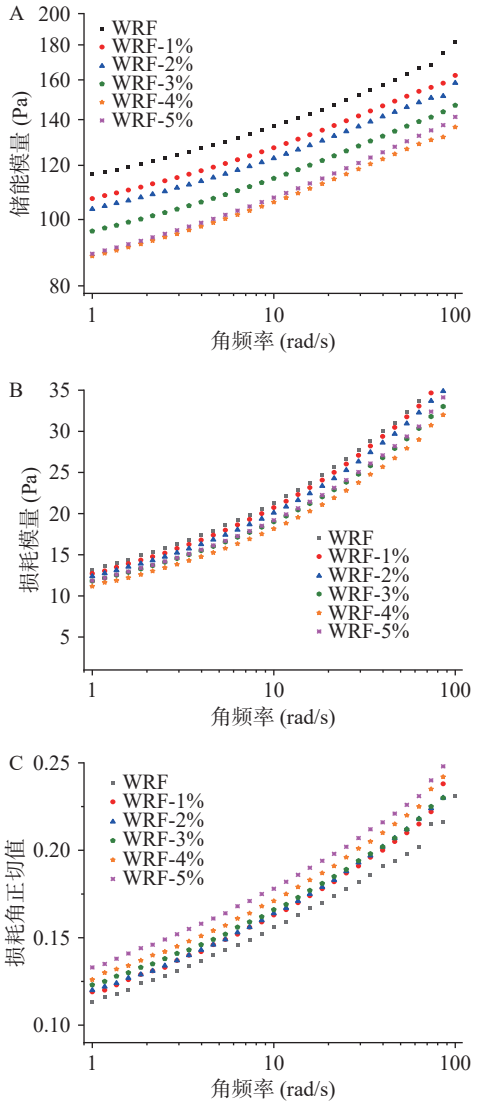


图 5　糯米粉-β-葡聚糖复合体系的频率扫描模量图
Fig.5　Frequency sweep modulus diagram of waxy rice flour with the addition of β-glucan

2.9　糯米粉加工特性的相关性分析

为进一步揭示各加工特性指标之间的内在联系，采用皮尔逊相关分析方法对糯米粉粒径、接触角、吸水能力、溶解度、膨胀度、糊化特性及流变特性等参数进行系统分析，相关性分析如图 6 所示。结果表明，粒径与豪斯纳比(−0.59)、休止角(−0.61)、吸水能力(−0.62)呈负相关，与接触角(0.95)、膨胀度(0.94)呈正相关。说明 *β*-葡聚糖的添加导致粒径减小，削弱了粉体的流动性，但是有助于增强复合体系的水合能力。这是由于糯米粉颗粒减小，比表面积增大，粉体之间的摩擦力和内聚力增强，从而导致流动性降低。而接触角与吸水能力(−0.65)呈负相关，进一步佐证了亲水性增强可提高体系的吸水能力。吸水能力与膨胀度(−0.69)、峰值黏度(−0.68)呈显著负相关，说明复合体系在吸水能力增强的同时，淀粉颗粒的膨胀受到抑制，导致糊化过程中黏度下降。此外，吸水能力与流动系数(0.81)呈显著(P<0.05)正相关，其流变行为趋向于牛顿流体特征，这可能是由于复合体系水合能力的增强，以及复合体系膨胀度与糊化黏度的下降，削弱了分子链间的缠结与交联作用，导致凝胶网络结构松散、弹性降低，从而使体系在剪切作用下更易发生流动[39]。

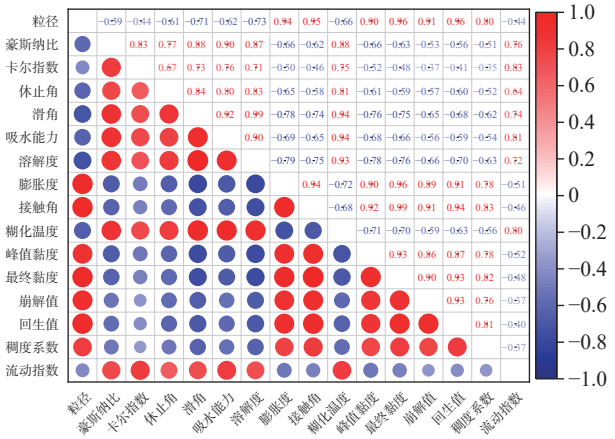


图 6　糯米粉加工特性的相关性分析

Fig.6　Correlation analysis of the processing properties of waxy rice flour

3　结论

本研究系统探究了不同添加量的燕麦 *β*-葡聚糖对糯米粉水合能力及加工特性的影响。结果表明：随着 *β*-葡聚糖的添加，糯米粉-*β*-葡聚糖复合体系的粒径、流动性和膨胀度呈下降趋势，而水吸附能力、吸水能力和溶解度则逐渐提高，表明 *β*-葡聚糖的添加增强了复合体系的水合能力。此外，随着 *β*-葡聚糖的添加，糊化温度升高，峰值黏度和储能模量降低，表明体系热稳定性增强，抗老化能力提升，凝胶网络结构被破坏。本研究从水合能力变化的角度揭示了燕麦 *β*-葡聚糖对糯米粉加工特性的调控作用，可为其在糯米粉食品中的应用提供理论依据。然而，目前有关 *β*-葡聚糖对糯米粉制品结构与品质影响的研究仍不够深入，后续工作可进一步聚焦其在实际产品体系中的应用效果与作用机制。

© 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] ALI M M, HASHIM N. Exploring nutritional compositions, volatile compounds, health benefits, emerging processing technologies, and potential food products of glutinous rice: A review[J]. Rice Science, 2024, 31(3): 251−268.

[2] TIAN Yu, LI Jiaxin, NIE Mengzi, et al. The impact of gelatinization property differences based on amylopectin structure variations on the glutinous rice flour properties and quality of Daifuku [J]. Food Chemistry: X, 2025, 27: 102423.

[3] 王艳. 亲水胶体对汤圆品质的影响规律及其互作机制研究[D]. 郑州：郑州轻工业大学, 2022. [WANG Yan. Effects of hydrocolloids on the quality properties of glutinous dumplings and their interaction mechanism[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2022.]

[4] 张喻, 章丽琳, 张琼, 等. 海藻糖添加量对糯米粉理化性质影响研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 28−30,43. [ZHANG Yu, ZHANG Lilin, ZHANG Qiong, et al. The impacts of trehalose on the characteristics of glutinous rice powders[J]. Food & Machinery, 2016, 32(9): 28−30,43.]

[5] 张宁, 徐丽娜, 王展, 等. 木糖醇对糯米粉理化性质及汤圆品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 51−58. [ZHANG Ning, XU Lina, WANG Zhan, et al. Effects of xylitol on physicochemical properties of glutinous rice flour and quality of glutinous rice dumplings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 51−58.]

[6] 陈林林, 郝熙, 李昕彤, 等. 非淀粉多糖对淀粉特性影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 386−394. [CHEN Linlin, HAO Xi, LI Xintong, et al. Research progress on the effect of non-starch polysaccharides on starch properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 386−394.]

[7] LI Qiao, LIU Juan, ZHAI Huisheng, et al. Extraction and characterization of waxy and normal barley *β*-glucans and their effects on waxy and normal barley starch pasting and degradation properties and mash filtration rate[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 302: 120405.

[8] 赵娅杰, 王佳怡, 牟安琼, 等. 青稞 *β*-葡聚糖对不同筋力小麦面团劣变的影响机制研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(1): 24−30. [ZHAO Yajie, WANG Jiayi, MOU Anqiong, et al. Study on the effect mechanism of highland barley *β*-glucan on deterioration of wheat dough with different gluten strengths[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(1): 24−30.]

[9] LI Liang, ZHAO Yajie, MOU Anqiong, et al. Influence of highland barley *β*-glucan on textural, structural, and rheological characteristics of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 307: 141971.

[10] 王宏伟, 王小婷, 国思琪, 等. 不同贮藏期小麦淀粉水合能力变化对面条品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 122−130. [WANG Hongwei, WANG Xiaoting, GUO Siqi, et al. Effect of wheat starch hydration on noodle quality under different storage periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 122−130.]

[11] NGAMNIKOM P, SONGSERMPONG S. The effects of freeze, dry, and wet grinding processes on rice flour properties and

their energy consumption[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 104(4): 632−638.
[12] 赵学伟, 魏笑笑, 郭豫, 等. 小麦粉中水分子成簇及其在水分扩散中的作用：基于等温吸附的观察[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 9−16. [ZHAO Xuewei, WEI Xiaoxiao, GUO Yu, et al. Water clustering in wheat flour and its role in water diffusion: Observation based on sorption isotherm[J]. Food Science, 2024, 45(24): 9−16.]
[13] WANG Yanan, WANG Qifeng, SHI Xueying, et al. Fabrication of oat β-glucan-starch composite systems by sequential extraction as batters for deep-fried mushrooms to prevent oil penetration [J]. Food Chemistry, 2025, 472: 142976.
[14] CUI Yanmin, HAN Xuedong, HUANG Xin, et al. Effects of different sources of β-glucan on pasting, gelation, and digestive properties of pea starch[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108172.
[15] 王艳, 王宏伟, 王凯旭, 等. 湿热处理对大米淀粉流变特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 48−52. [WANG Yan, WANG Hongwei, WANG Kaixu, et al. Effect of heat-moisture treatment on rheological properties of rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 48−52.]
[16] LAZARIDOU A, MARINOPOULOU A, MATSOUKAS N P, et al. Impact of flour particle size and autoclaving on β-glucan physicochemical properties and starch digestibility of barley rusks as assessed by *in vitro* assays[J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2014, 4(1): 58−73.
[17] 樊红秀, 李艳霞, 刘婷婷, 等. 挤出处理对玉米粉流变及其成膜特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 89−98. [FAN Hongxiu, LI Yanxia, LIU Tingting, et al. Effect of extrusion treatment on the rheological and film formation properties of corn flour[J]. Food Science, 2021, 42(15): 89−98.]
[18] MA Shuping, ZHU Peilei, WANG Mingchun. Effects of konjac glucomannan on pasting and rheological properties of corn starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 234−240.
[19] WANG Lei, YE Fayin, FENG Liyuan, et al. The effects of oat β-glucan incorporation on the quality, structure, consumer acceptance and glycaemic response of steamed bread[J]. Journal of Texture Studies, 2017, 48(6): 562−570.
[20] LI Songnan, ZHANG Bin, TAN C P, et al. Octenylsuccinate quinoa starch granule-stabilized Pickering emulsion gels: Preparation, microstructure and gelling mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 40−47.
[21] HÉBRARD A, OULAHNA D, GALET L, et al. Hydration properties of durum wheat *Semolina*: Influence of particle size and temperature[J]. Powder Technology, 2003, 130(1−3): 211−218.
[22] ZHAO Xuewei, ZHANG Hua, DUAN Ruiqian, et al. The states of water in glutinous rice flour characterized by interpreting desorption isotherm[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(6): 1491−1501.
[23] AHMED J. Effect of barley β-glucan concentrate on oscillatory and creep behavior of composite wheat flour dough[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 152: 85−94.
[24] 张晶. 超高压处理对燕麦淀粉/β-葡聚糖复配体系的影响及抑制淀粉老化机制的研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学, 2021. [ZHANG Jing. Study on the effects of ultra-high pressure treatment on oat starch/β-glucan compound system and mechanism of inhibiting retrogradation of starch[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.]
[25] ZHANG Shanshan, YUE Minghui, WANG Sihua, et al. Insights into the modification of physicochemical properties and digestibility of pea starch gels with barley β-glucan[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(7): 2833−2844.
[26] ANDRADE C T, SIMÃO R A, THIRÉ R M S M, et al. Surface modification of maize starch films by low-pressure glow 1-butene plasma[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 61(4): 407−413.
[27] XU M J, SALEH A S M, LIU Y, et al. The changes in structural, physicochemical, and digestive properties of red adzuki bean starch after repeated and continuous annealing treatments[J]. Starch-Stä rke, 2018, 70(9-10): 1700322.
[28] 周玉杰, 李安平, 杨玉蓉, 等. 瓜尔豆胶对锥栗淀粉糊化和流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 65−69. [ZHOU Yujie, LI Anping, YANG Yurong, et al. Effect of guar gum on gelatinization and rheological properties of *Castanea henryi* starch[J]. Food Science, 2017, 38(23): 65−69.]
[29] TU J C, ADHIKARI B, BRENNAN M A, et al. Interactions between sorghum starch and mushroom polysaccharides and their effects on starch gelatinization and digestion[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108504.
[30] NGUYEN T T L, FLANAGAN B M, TAO K Y, et al. Effect of processing on the solubility and molecular size of oat β-glucan and consequences for starch digestibility of oat-fortified noodles[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131291.
[31] LI Sixuan, ZHANG Min, REN Xin, et al. Effects of oat β-glucan on the retrogradation behavior of rice starch and its potential mechanism[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129509.
[32] SUN Chanchan, LIU Rui, LIANG Bin, et al. Microparticulated whey protein-pectin complex: A texture-controllable gel for low-fat mayonnaise[J]. Food Research International, 2018, 108: 151−160.
[33] 张姗姗. 大麦 β-葡聚糖与不同晶型淀粉互作机理研究及其应用[D]. 淄博：山东理工大学, 2024. [ZHANG Shanshan. Study on interaction mechanism between barley β-glucan and different crystalline starches and its application[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2024.]
[34] 李妍, 崔维建, 赵城彬, 等. 玉米淀粉-玉木耳多糖复配体系理化及结构性质[J]. 食品科学, 2021(4): 58−64. [LI Yan, CUI Weijian, ZHAO Chengbin, et al. Physicochemical and structural properties of corn starch-*Auricularia cornea* ehrenb. polysaccharide blends[J]. Food Science, 2021(4): 58−64.]
[35] 刘敏, 赵欣, 阚建全, 等. 黄原胶对莲藕淀粉糊化性质及流变与质构特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 45−50. [LIU Min, ZHAO Xin, KAN Jianquan, et al. Effect of xanthan gum on pasting, rheological and texture properties of *Lotus* root starch[J]. Food Science, 2018, 39(6): 45−50.]
[36] 王丽, 李淑荣, 句荣辉, 等. 淀粉流变学特性在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(10): 212−215. [WANG Li, LI Shurong, JU Ronghui, et al. Research progress in application of starch rheological properties in food processing[J]. The Food Industry, 2022, 43(10): 212−215.]
[37] ALI SHAHZAD S, HUSSAIN S, MOHAMED A A, et al. Effect of hydrocolloid gums on the pasting, thermal, rheological and textural properties of chickpea starch[J]. Foods, 2019, 8(12): 687.
[38] HAO Zongwei, HAN Shengjun, XU Huajian, et al. Insights into the rheological properties, multi-scale structure and *in vitro* digestibility changes of starch-β-glucan complex prepared by ball milling[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224: 1313−1321.
[39] IZYDORCZYK M S, DEXTER J E. Barley β-glucans and Arabinoxylans: Molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products-a review[J]. Food Research International, 2008, 41(9): 850−868.