郑婵敏, 王晓明, 杨丹, 等. 超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对绿豆淀粉结构及绿豆功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 138−145. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020127

ZHENG Chanmin, WANG Xiaoming, YANG Dan, et al. Effects of Ultrasonic-assisted $CaCl_2$ Soaking on the Starch Structure and Functional Properties of Mung Beans[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 138−145. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020127

· 研究与探讨 ·

超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对绿豆淀粉结构及绿豆功能特性的影响

郑婵敏[1], 王晓明[2], 杨　丹[2], 孔　璐[2], 倪昆琳[2], 臧婉初[2], 杨庆余[2,*], 孙炳新[1,*]

（1.沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;
2.沈阳师范大学粮食学院, 辽宁沈阳 110034）

摘　要: 为探究 Ca^{2+}对绿豆复合体系内淀粉结构和功能特性的影响，采用不同浸泡形式对绿豆进行浸泡，利用 X 射线衍射、扫描电镜、红外光谱等对绿豆的结构进行分析，利用水合特性、热特性、糊化特性等明确绿豆淀粉功能性质的变化规律，根据 DPPH 自由基清除能力、$ABTS^+$自由基清除能力对绿豆抗氧化性进行表征，并分析淀粉的体外消化特性。结果表明，与超声处理、$CaCl_2$ 浸泡相比，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对绿豆淀粉结构及绿豆功能特性影响效果最显著，绿豆淀粉相对结晶度降低 7.87%，绿豆淀粉颗粒间形成不规则块状和团状的聚集体，淀粉有序度降低 0.12，双螺旋度降低 0.15；吸水性指数升高 2.73，膨胀力升高 1.94，起始糊化温度升高 26.86 ℃，焓值降低 1.05 J/g；$ABTS^+$自由基清除能力提高 12.18%，DPPH 自由基清除能力提高 14.2%，绿豆淀粉水解率下降 10.02%。本研究为开发低 GI、高抗氧化性的绿豆食品奠定理论基础。

关键词: 绿豆, 超声, $CaCl_2$ 浸泡, 淀粉水解率

中图分类号: TS214.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0138−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020127

本文网刊:

Effects of Ultrasonic-assisted $CaCl_2$ Soaking on the Starch Structure and Functional Properties of Mung Beans

ZHENG Chanmin[1], WANG Xiaoming[2], YANG Dan[2], KONG Lu[2], NI Kunlin[2], ZANG Wanchu[2], YANG Qingyu[2,*], SUN Bingxin[1,*]

(1.College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;
2.College of Grain Science and Technology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: To investigate the effect of Ca^{2+} on the structural and functional properties of starch in the mung bean composite system, mung beans were subjected to various soaking treatments. The structural characteristics of the mung beans were analyzed using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and infrared spectroscopy (FT-IR), among other techniques. The functional properties of mung bean starch were evaluated through hydration characteristics, thermal properties, and gelatinization behavior. Additionally, the antioxidant capacity of the mung beans was assessed based on their DPPH and $ABTS^+$ free radical scavenging abilities, and the *in vitro* digestibility of the starch was systematically analyzed. The results demonstrated that ultrasonic-assisted $CaCl_2$ soaking treatment exhibited the most significant impact on the structural and functional properties of mung bean starch and mung bean, compared to individual ultrasonic treatment

收稿日期: 2025−02−20

基金项目: 国家重点研发计划（2021YFD1600604）; 辽宁省揭榜挂帅科技攻关项目（022020641-JH1/109）; 2023 年度辽宁省教育厅基本科研项目重点攻关项目（JYTZD2023185）; 国家现代农业产业技术体系辽宁省创新团队建设; 辽宁（东戴河）带土移植转化中心科技项目; 区域特色食品发展与技术创新; 2024 年辽宁省高等学校基本科研基金研究生研究专项（SYNUXJ2024053）。

作者简介: 郑婵敏（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1181891957@qq.com。

*** 通信作者:** 杨庆余（1982−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 植物源食品开发与综合利用, E-mail: yangqy0311@163.com。
孙炳新（1981−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品包装与农产品贮藏保鲜, E-mail: packsun@163.com。

or $CaCl_2$ soaking alone. Specifically, the relative crystallinity of mung bean starch decreased by 7.87%, and irregular block-like and clustered aggregates formed between starch particles. The orderliness of the starch decreased by 0.12, and the double helix degree declined by 0.15. Furthermore, the water absorption index increased by 2.73, the swelling capacity rose by 1.94, the initial gelatinization temperature increased by 26.86 ℃, and the enthalpy value decreased by 1.05 J/g. In terms of antioxidant activity, the DPPH radical scavenging ability improved by 12.18%, and the $ABTS^+$ radical scavenging ability increased by 14.2%. Additionally, the hydrolysis rate of mung bean starch decreased by 10.02%. This study provides a theoretical foundation for the development of mung bean-based foods with low glycemic index (GI) and high-antioxidant properties.

Key words: mung bean; ultrasound; $CaCl_2$ soaking; starch hydrolysis rate

绿豆又名植豆，在我国有悠久的种植历史，可药食兼用[1]，具有“清热解毒、利尿消暑”、降血脂、抗菌抑菌等功效[2]。绿豆主要成分包括淀粉、蛋白质、脂肪、膳食纤维、矿物质、维生素和大量生物活性化合物，是一种高蛋白、中淀粉、低脂肪的作物[3]。绿豆含有丰富的必需氨基酸，其中赖氨酸、苏氨酸和亮氨酸含量较高[4]，可与谷物蛋白的必需氨基酸组成形成互补[5]。绿豆中膳食纤维含量约为 12.6%，高膳食纤维能促进肠道蠕动和消化道健康[6]。同时，绿豆中含有大量多酚、黄酮等生物活性成分，具有很好的抗氧化性能[7]。绿豆淀粉占绿豆营养成分 50% 以上，其中抗性淀粉含量达到 20%~30%，具有稳定血糖的功能[8−10]，然而，天然绿豆淀粉存在溶解度低、热稳定性差及易回生等问题，严重制约其食品加工适用性。为提升功能特性及扩大食品工业应用范围，对绿豆淀粉进行改性处理尤为必要。

目前主要改性方法包括化学改性、物理改性（超声、湿热等）、酶法改性、复合改性（与胶体、多酚、多糖或金属盐等形成复合物）等[8,11]。超声处理作为一种绿色、安全、高效的物理技术，广泛应用于食品工业[12−13]。超声效应主要包括热效应、机械效应及空化效应[14]，可加速离子在溶液中的运动速度[15]。$CaCl_2$ 是一种低毒、化学稳定性高的无机氯盐，与直链淀粉和支链淀粉化学反应活性高，可以促进淀粉、纤维素和聚乙烯醇等多羟基聚合物的相容性[16]。Ca^{2+} 与淀粉上的羟基（O-H）结合形成钙-淀粉螯合物，可以提高抗性淀粉含量，起到稳定血糖的功效。Liu 等[17] 研究超声波辅助低钠盐腌制牛肉，发现超声处理加速水和 Na^+ 的扩散，大大加快腌制液的渗透速度。胡秀发等[18] 研究超声辅助 NaCl 浸泡黑豆，发现黑豆硬度、糊化度和消化特性与 NaCl 浓度密切相关。Yang 等[19] 发现钙离子处理可通过提高黑豆活性物质的稳定性来增强黑豆的抗氧化和降血糖活性。本团队前期研究发现，Ca^{2+} 与淀粉 O-H 的螯合作用有利于淀粉-脂质/蛋白质-钙三元复合物形成，促进抗性淀粉含量增加。但是，Ca^{2+} 对绿豆淀粉结构和功能因子的功能特性研究鲜有报道，因此，本研究基于超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡绿豆，分析绿豆淀粉结构及绿豆功能特性的变化规律，阐明 Ca^{2+} 对绿豆功能特性的影响机制。

本文探究不同浸泡方式对绿豆淀粉结构及绿豆功能特性影响。采用 X 射线衍射、扫描电镜、红外光谱等对绿豆结构进行表征，通过水合特性、热特性、糊化特性等明确绿豆性质的变化规律，利用 DPPH 自由基清除能力、$ABTS^+$ 自由基清除能力对绿豆抗氧化性进行表征，分析绿豆淀粉体外消化特性，阐明 Ca^{2+} 对绿豆淀粉结构和功能特性的影响机制，为开发高品质绿豆基食品提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

绿豆　沈阳信昌粮食贸易有限公司；氯化钙　食品级，河南万邦化工科技有限公司；α-淀粉酶（5 U/mg）、胃蛋白酶（30000 U/mg）、胰酶（4000 U/mg）、糖基化酶（100000 U/g）、2,2'-联氮-双（3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸盐）（ABTS）　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；2,2-二苯基-1-苦基肼（DDPH）　分析纯，上海瑞永生物科技有限公司；3,5-二硝基水杨酸（DNS）　分析纯，北京酷来博科技有限公司；其他试剂为分析纯。

Ultima Ⅳ X-射线衍射仪　日本理学公司；TENSON Ⅱ傅里叶变换红外光谱仪　德国 Bruker 公司；NHITACHIS-4800 扫描电子显微镜　日本日立高科技公司；DSC-Q20 差示扫描量热仪　美国 TA 仪器公司；RVA-TECMASTER 快速粘度分析仪　澳大利亚 PerkinElmer 仪器公司；FW80 型粉碎机　天津市泰斯特仪器有限公司；GFL-125 型热风干燥机　天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司；722 型紫外可见分光光度计　上海佑科仪器仪表有限公司；HH-6 型数显恒温水浴锅　上海皓庄仪器有限公司；SB-25-12DT 超声清洗机　宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　准确称取一定量的绿豆样品，分别置于盛满水的烧杯中，所有组别均按照料液比 1∶10（g/mL）对绿豆样品进行处理。其中，对照组在 25 ℃ 条件下，使用去离子水浸泡 8 h；超声组在超声功率 300 W、超声温度 50 ℃ 的条件下，对绿豆进行超声处理 20 min，再用去离子水浸泡；$CaCl_2$ 浸泡组则采用 1.5% 的 $CaCl_2$ 溶液代替去离子水，与对照组相同条件进行浸泡；超声辅助氯化钙浸泡组（超声/$CaCl_2$）

是先经过与超声组相同的超声处理，再转移至 1.5% 的氯化钙溶液中浸泡。浸泡完的绿豆放置烘箱干燥，干燥温度为 45 ℃，干燥时间为 24 h，研磨后过 80 目筛，备用。

1.2.2 X-射线衍射的测定 参考 Zhou 等[20] 和陆林[21] 的方法并略加修改，采用 X-射线衍射仪对绿豆粉进行扫描测定，该设备在 40 kV 和 20 mA 的 Cu-Kα 辐射下运行，Ni 片滤波，扫描速度设置为 5°/min，扫描范围的衍射角 2θ 为 5°~40°，使用 MDI Jade 6.5 软件分析相对结晶度。

1.2.3 傅里叶红外光谱的测定 采用傅里叶红外光谱仪对绿豆粉进行扫描测试，参照况玉玉等[22] 的方法稍作修改：设置扫描波数范围为 400~4000 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 64 次，用溴化钾粉末压片做空白扣除背景。使用 Omnic8.2 软件对谱图进行自动基线校正与傅里叶自去卷积处理，去卷积时使用半峰宽为 19 cm^{-1}，增强因子为 1.9，得到去卷积后的图谱，导出图谱的数据，计算各峰的峰值强度比值。

1.2.4 微观结构的表征 参考刘惠娟等[23] 的方法并略加修改，使用扫描电子显微镜来分析绿豆粉显微结构形态。利用双面胶带将干燥的样品沉积在铜短柱上，吹去多余样品后，在加速电压 1.0 kV 的电流下喷金处理，并在 500×和 2000×放大倍率下拍摄绿豆粉的颗粒形貌照片。

1.2.5 水合特性的测定 吸水性指数(Water Absorption Index, WAI)、膨胀力(Swelling Power, SP)和水溶性指数(Water Solubility Index, WSI)等水合特性的测定参考韩聪[24] 的方法稍作修改：准确称取 1.00 g(m_0)绿豆粉样品于已知质量的离心管中，加入 20 mL 去离子水，4.5 g 剧烈涡旋 5 min，样品被完全分散均匀，将离心管置于 90 ℃ 水浴锅中保温 30 min，冷却至室温，然后在 4500 r/min 下离心 20 min，取上清液于铝盒 m_1 中，105 ℃ 下恒重后记为 m_2，沉淀物质量记为 m_3，根据公式计算水合特性的指标。

$$WAI = \frac{m_3}{m_0} \quad 式（1）$$

$$WSI = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \quad 式（2）$$

$$SP = \frac{m_3}{m_0 \times (1 - WSI)} \quad 式（3）$$

式中，m_0 为样品质量，g；m_1 为铝盒质量，g；m_2 为干上清和铝盒的质量，g；m_3 为沉淀物质量，g。

1.2.6 热力学特性测定 参考董茗洋等[25] 的方法，采用差示扫描量热仪(DSC)对绿豆粉进行热特性测定。准确称取 3 mg 样品于铝锅样品皿中，加入 6.00 μL 蒸馏水，密封在铝锅中，将制好的样品于室温下平衡过夜，以 10 ℃/min 升温速率获得样品在从 20~120 ℃ 的焓值变化曲线。

1.2.7 糊化特性的测定 参考陈甜[26] 的方法并稍作修改，称取 3 g 绿豆干基粉放入银筒中，加入 25 mL 的蒸馏水，使用快速粘度分析仪进行测试。起始温度 50 ℃，转速为 960 r/min，10 s 内转速降为 160 r/min，保持 50 s，以 5 ℃/min 速率在 423 s 内升至 95 ℃，95 ℃ 保温 2 min，以 5 ℃/min 降温至 50 ℃，2 min 后终止程序。采用快速粘度仪自带数据软件记录数据。

1.2.8 淀粉水解率的测定 参考 Yang 等[27] 的方法并稍作修改进行体外消化性实验，将 1.00±0.02 g 样品溶于 3 mL 磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L，pH6.9)中，加入 1 mL α-淀粉酶(37 ℃ 预热)，充分混合 15 s(保持在 37 ℃)，并加入 6 mL 胃蛋白酶-瓜尔胶溶液(含 0.05 g 胃蛋白酶、0.05 g 瓜尔胶、2.4 mL 0.4 g/L NaCl、3.6 mL 0.1 mol/L pH6.9 磷酸盐缓冲液)。将反应体系在 pH1.5 和 37 ℃ 下持续搅拌 30 min，将磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L，10 mL，pH6.9)、$MgCl_2$-$CaCl_2$(125 μL，Mg^{2+} 0.06 mol/L，Ca^{2+} 0.28 mol/L)、胰酶制剂(125 μL，600 U)、糖化酶(400 μL，400 U)加入系统中，用蒸馏水将最终模拟系统稀释至 50 mL。在特定时间点(0、10、20、30、45、60、90、120 和 180 min)，取出等分试样(1 mL)，并与 4 mL 无水乙醇(在 60 ℃ 下预热)混合，沸水浴灭酶后自然冷却，8000 r/min 离心 10 min，取上清液。DNS 溶液测定还原糖的方法。参照 GB 5009.9-2016《食品安全国家标准食品中淀粉的测定》测定总淀粉含量计算淀粉的水解率。

$$淀粉水解率(\%) = \frac{取样时间点还原糖释放量 \times 0.9}{总干物质量} \times 100 \quad 式（4）$$

使用淀粉含量测定试剂盒测定天然淀粉的总淀粉含量。

1.2.9 抗氧化性的测定

1.2.9.1 $ABTS^+$自由基清除活性测定 $ABTS^+$自由基清除的测定参照 Yang 等[28] 的方法并略作修改。使用前，用乙醇稀释 ABTS 溶液，使对照品在 734 nm 处的最终吸光度为 0.70±0.01，将 0.5 g 绿豆样品溶于 15 mL 60% 乙醇中。随后，将 1.4 mL ABTS 溶液与 0.1 mL 绿豆样品溶液混合。将该混合溶液涡旋 1 min，并在室温下于黑暗环境中保持 5 min。然后将样品在 8000 r/min 离心 5 min，收集上清液用于检测。使用分光光度计在 734 nm 处测定吸光度。根据公式(5)测定 $ABTS^+$自由基清除率：

$$ABTS^+自由基清除率(\%) = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad 式（5）$$

式中，A_0 表示不含样品的 ABTS 溶液的吸光度；A_1 表示含 ABTS 溶液和样品的吸光度；A_2 表示不含 ABTS 溶液的吸光度。

1.2.9.2　DPPH 自由基清除活性测定　DPPH 自由基清除率的测定参照 Yang 等[28] 的方法并略作修改。将 0.5 g 绿豆样品溶解于 15 mL 60% 乙醇中。然后，将 1.4 mL 乙醇 0.1 mmol/L DPPH 溶液与 0.1 mL 绿豆样品溶液混合。将该混合溶液涡旋 1 min，并在室温下在黑暗环境中保持 30 min。以 8000 r/min 离心 5 min 后，收集上清液进行检测。使用分光光度计在 517 nm 处测定吸光度。然后，根据公式（6）测定 DPPH 自由基清除率：

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

式中，A_0 为不含样品的 DPPH 溶液的吸光度；A_1 表示含 DPPH 溶液和样品的吸光度；A_2 为不含 DPPH 溶液的吸光度。

1.3　数据处理

所有实验均重复三次，用平均值±标准偏差表示实验结果，采用 SPSS26.0 软件进行统计学分析，Origin2021 绘图，ANOVA 对数据进行差异显著性分析（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　超声辅助浸泡对绿豆结晶结构的影响

图 1 为不同处理方式对绿豆结晶特性的影响。由图 1 可知，绿豆原淀粉的结晶度为 13.25%，$CaCl_2$ 浸泡、超声处理、超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的结晶度分别为 7.81%、6.84%、5.38%。三种处理方式后的绿豆淀粉结晶度均呈现降低的趋势，超声辅助 $CaCl_2$ 处理使淀粉结晶度降低显著（P<0.05）。可能是因为超声引起的空化作用，导致淀粉解旋，单螺旋解聚，淀粉有序结构受到破坏，淀粉相对结晶度下降[29]。Yang 等[30] 研究发现，超声处理糯玉米淀粉导致糯玉米淀粉结晶度降低。Ca^{2+} 与直链淀粉上的 O-H 相互作用，阻碍直链淀粉的重排，从而阻碍其结晶[31]。该结果与樊艳叶[32] 的研究结果一致。超声波促进了 Ca^{2+} 对绿豆淀粉颗粒结晶区的破坏[33]。因此，超声辅助 Ca^{2+} 浸泡对绿豆淀粉结构影响显著。

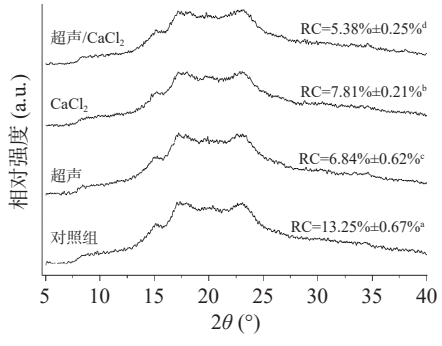


图 1　不同处理方式对绿豆结晶结构的影响

Fig.1　Effects of different processing methods on the crystal structure of mung beans

注：图中不同字母代表具有显著性差异（P<0.05）；图 4 同。

2.2　超声辅助浸泡对绿豆结构的影响

图 2 为不同处理方式对绿豆红外光谱的影响。在 3000~3600 cm^{-1} 区域的光谱带归属于 O-H 的伸缩振动，1700~1750 cm^{-1} 区域的谱带归属于 C=O 的伸缩振动，800~1000 cm^{-1} 归属于 C-O 和 CH_2 的伸缩振动[27,34]。由图 2 可知，经过处理后的绿豆，3282 cm^{-1} 处的吸收峰减小，这对应 O-H 吸收峰，说明淀粉分子中 O-H 吸收强度减弱，可能是 Ca^{2+} 与淀粉 O-H 之间形成螯合结构，导致 O-H 吸收强度减弱[27]；在 1743 cm^{-1} 处的吸收峰增强，这对应 C=O 吸收峰，说明 C=O 吸收强度增强，可能是 Ca^{2+} 与绿豆蛋白质中的羧基结合，形成羧酸钙，这种结合会导致蛋白质构象变化，使 C=O 吸收峰强度增大。Wu 等[35] 研究发现，酸性条件有利于羧基与钙螯合，可能是羧基在去质子化后形成与 Ca^{2+} 有效配位的羧酸盐阴离子，与 Ca^{2+} 形成稳定的螯合物；而超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡有助于 Ca^{2+} 与淀粉 O-H 和蛋白质羧基之间形成稳定螯合物。

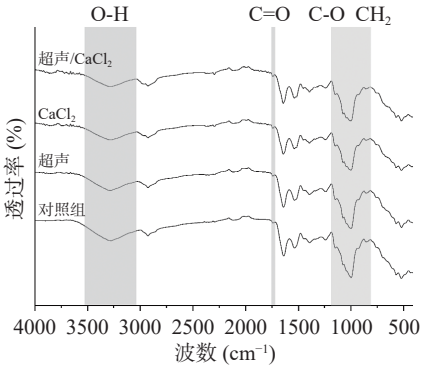


图 2　不同处理方式对绿豆红外光谱的影响

Fig.2　Effects of different processing methods on the infrared spectra of mung beans

2.3　超声辅助浸泡对绿豆短程有序结构的影响

表 1 为不同处理方式对绿豆短程有序结构的影响。淀粉的有序性和无定型区与淀粉在 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处的特征峰有所关联[36]，利用峰高比 1047/1022 cm^{-1} 和 995/1022 cm^{-1} 的变化作为淀粉有序度（DO）和双螺旋度（DD）变化的指标[37]。由表 1 可知，与对照组相比，通过超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆，1047/1022 cm^{-1} 比值由 1.17 降低到 1.05，995/1022 cm^{-1} 比值由 1.41 降低到 1.26，绿豆淀粉的短程有序性下降。可能是超声处理过程中产生的空化效应、机械效应和剪切效应等多种作用方式共同作用于淀粉，破坏淀粉分子链间和分子内的氢键，导致淀粉螺旋或原有的有序排列被破坏，从而降低淀粉短程有序性。Ca^{2+} 与淀粉的羟基氧之间的阳离子吸引力可能降低 O-H 和醚氧之间形成的强氢键的比例，从而降低了淀粉的有序度和双螺旋度[38]。Huang 等[39] 研究发现，超声改性玉米淀粉导致玉米淀粉的短程有序度降低。

表 1 不同处理方式对绿豆短程有序结构的影响

Table 1 Effects of different processing methods on the short-range ordered structure of mung beans

样品名称	DO(1047/1022 cm^{-1})	DD(995/1022 cm^{-1})
对照组	1.17±0.004^{a}	1.41±0.018^{a}
超声	1.06±0.002^{c}	1.32±0.012^{c}
$CaCl_2$	1.10±0.013^{b}	1.36±0.024^{b}
超声/$CaCl_2$	1.05±0.003^{d}	1.26±0.005^{d}

注: 同列不同字母代表具有显著性差异(P<0.05); 表2~表4同。

2.4 超声辅助浸泡对绿豆微观结构的影响

图 3 为不同处理方式对绿豆微观结构的影响。由图 3 可知, 未经处理的绿豆, 其淀粉颗粒形状完整, 大部分呈现椭圆形, 表面光滑。超声处理的绿豆颗粒表面粗糙, 其表面出现裂纹, 颗粒皱缩, 颗粒碎片增加。经过 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆仍能观察到完整的颗粒结构, 颗粒出现相互聚集的现象, 形成不规则的块状和团状的聚集体, 经超声和 $CaCl_2$ 共处理的绿豆, 团聚现象更显著。可能是 Ca^{2+}与淀粉分子中的氧原子形成配位键, 促进淀粉与 Ca^{2+}之间交联生成螯合物, 导致团聚现象产生, 引起颗粒变大[40]。这与红外光谱的研究结果一致。

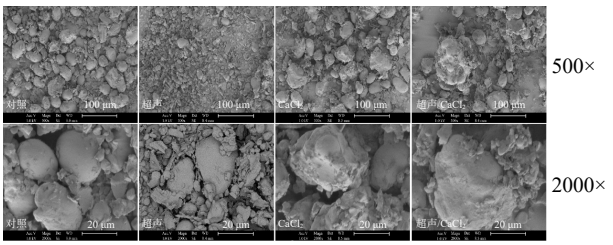


图 3 不同处理方式对绿豆微观结构的影响

Fig.3 Effects of different processing methods on the microstructure of mung beans

2.5 超声辅助浸泡对绿豆水合特性的影响

图 4 为不同处理方式对绿豆水合特性的影响。由图 4 可知, 通过超声处理、$CaCl_2$ 浸泡和超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆, WAI 分别升高 0.39、2.37、2.73; SP 分别升高 0.43、1.48、1.94; 其中, $CaCl_2$ 浸泡组水合特性高于超声处理组, 超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡组与 $CaCl_2$ 浸泡组吸水性指数没有显著性差异。可能是

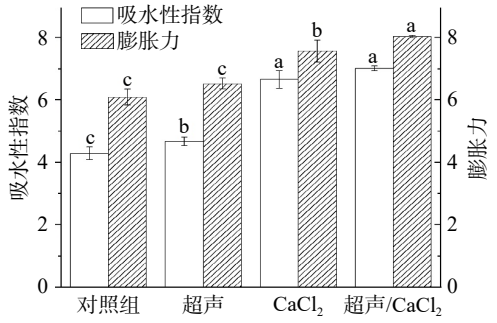


图 4 不同处理方式对绿豆水合特性的影响

Fig.4 Effects of different processing methods on the hydration characteristics of mung beans

超声破坏淀粉颗粒的结晶结构, 无定形区比例增加, 从而提高绿豆的水合能力[41]。Ca^{2+}具有较高的电荷密度, 能够与水分子发生静电相互作用, 从而减少体系中的游离水含量。同时, Ca^{2+}还能与淀粉分子中的脱水葡萄糖环上的氧原子形成强相互作用, 促使淀粉分子间的氢键解离, 增强淀粉分子的吸水能力[42]。$CaCl_2$ 浸泡组通过化学键重构淀粉网络与水分子捕获效应, 在分子尺度实现“吸水-锁水”双重优化; 超声处理依赖物理结构破坏, 提升吸水速率, 缺乏化学稳定机制, 导致保水性不足, 因此, $CaCl_2$ 浸泡组处理效果优于超声组; 当 $CaCl_2$ 的化学吸水机制已接近饱和状态时, 与 $CaCl_2$ 浸泡组相比, 超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡组吸水性指数没有显著差异。

2.6 超声辅助浸泡对绿豆热力学性质的影响

表 2 为不同处理方式对绿豆热力学性质的影响。由表 2 可知, 与对照组相比, 超声处理的绿豆起始糊化温度和焓值显著降低(P<0.05), 通过 $CaCl_2$ 和超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆, 起始糊化温度分别上升 25.66、26.86 ℃; 焓值分别下降 0.67、1.05 J/g。可能是超声波处理后, 淀粉颗粒破损, 表面出现裂纹, 水分子容易渗入淀粉颗粒内部, 导致起始糊化温度降低[43]; 焓值降低可能是超声破坏淀粉分子间氢键, 晶体结构强度减弱, 双螺旋堆积密度变松散, 因此破坏结晶结构所需要的能量降低。Ca^{2+}具有较强的水合能力, 当其与淀粉共存时, 会与淀粉颗粒竞争体系中的自由水分子, 降低淀粉颗粒对水分的可利用性, 淀粉分子链的展开和糊化需要克服更大的能垒, 淀粉糊化需要更多的能量[41], 起始糊化温度升高; Ca^{2+}与 O-H 配位, 氢键数量减少, 双螺旋结构被破坏, 焓值降低[44]。研究结果与淀粉结构研究结果一致。超声处理导致绿豆结构改变使得 Ca^{2+}更容易渗透到淀粉基质中[45], 增强 Ca^{2+}与淀粉中 O-H 的螯合能力。因此, $CaCl_2$ 浸泡提高了绿豆的热稳定性, 超声与 Ca^{2+}联合具有协同增效的作用。

表 2 不同处理方式对绿豆热力学性质的影响

Table 2 Effects of different processing methods on the thermodynamic properties of mung beans

样品名称	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	结束温度(℃)	焓值(J/g)
对照组	62.76±0.78^{c}	71.80±0.75^{c}	80.98±0.08^{c}	2.35±0.05^{a}
超声	61.19±0.19^{d}	72.64±0.74^{c}	79.22±0.65^{c}	1.31±0.27^{c}
$CaCl_2$	88.42±0.40^{b}	94.10±0.27^{b}	102.69±2.05^{b}	1.68±0.02^{b}
超声/$CaCl_2$	89.62±0.16^{a}	95.46±0.78^{a}	105.78±1.56^{a}	1.30±0.03^{c}

2.7 超声辅助浸泡对绿豆糊化特性的影响

表 3 为不同处理方式对绿豆糊化特性的影响。由表 3 可知, 与对照组相比, 通过超声处理、$CaCl_2$ 浸泡以及超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆, 峰值粘度分别上升 196.66、601.66、673 cP; 终值粘度分别上升 638、35、161 cP; 超声处理使得淀粉的回生值上升 394.33 cP, 通过 $CaCl_2$ 浸泡以及超声辅助 $CaCl_2$ 浸

泡绿豆，回生值分别降低 119.67、62.34 cP，且超声处理组的谷值粘度和终值粘度均高于其他组。可能是超声作用使淀粉颗粒的溶胀力增大，导致淀粉颗粒体积分数增大，颗粒间的摩擦力增大，从而提高绿豆淀粉的峰值粘度和终值粘度[43]，而支链淀粉的部分降解和静电排斥力的降低可能导致更高的回生值[44]；超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡导致粘度增加可能是：一方面，淀粉上 Ca^{2+}和 O-H 之间形成配位键，抑制了淀粉颗粒在加热过程中的爆裂。另一方面，Ca^{2+}会增强淀粉颗粒的吸水和溶胀[46]，因此峰值粘度和终值粘度上升。回生值下降可能是因为 Ca^{2+}与淀粉相互交联作用，使得直链淀粉不易发生重结晶[47]。超声处理通过深度溶胀和预糊化层保护，显著提高淀粉颗粒体积分数和结构稳定性，从而在高温剪切阶段（谷值）和冷却阶段（终值）维持更高粘度；而 $CaCl_2$ 处理增强溶胀，但抑制崩解和高温结构失稳限制了粘度提升，因此，超声处理组谷值粘度和终值粘度优于其他组。Wang 等[48] 研究发现，与常规碱萃相比，超声辅助碱萃取的豌豆淀粉具有更高的粘度。Bin 等[49] 对不同甲氧基果胶浓度下的小麦粉进行研究，果胶分子的 COO^-和 Ca^{2+}离子之间充分形成交联导致体系的粘度增加，而 Ca^{2+}含量不足会导致体系粘度降低。

表 3　不同处理方式对绿豆糊化特性的影响

Table 3　Effects of different processing methods on the pasting characteristics of mung beans

样品名称	峰值粘度（cP）	谷值粘度（cP）	终值粘度（cP）	回生值（cP）
对照组	655.67±16.92^{d}	593.00±6.08^{d}	959.67±23.03^{c}	366.67±17.16^{b}
超声	852.33±6.03^{c}	836.67±6.66^{a}	1597.67±20.40^{a}	761.00±16.46^{a}
$CaCl_2$	1257.33±9.07^{b}	747.67±19.86^{c}	994.67±32.88^{c}	247.00±13.08^{d}
超声/$CaCl_2$	1328.67±35.00^{a}	806.67±4.16^{b}	1120.67±5.13^{b}	304.33±12.22^{c}

2.8　超声辅助浸泡对绿豆淀粉水解率的影响

图 5 为不同处理方式对绿豆淀粉水解率的影响。由图 5 可知，经过 180 min 体外消化，清水浸泡的绿豆淀粉水解率为 59.94%，超声处理的绿豆淀粉水解率上升到 60.13%，$CaCl_2$ 浸泡和超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆淀粉水解率分别下降到 55.51%、49.92%。可能是超声处理过程中产生的强大剪切力会破坏颗粒结晶度，解聚淀粉链，淀粉颗粒表面空隙增大，增加淀粉与淀粉酶的接触概率，淀粉水解率增加。超声处理的绿豆淀粉经过 30 min 体外消化后，其淀粉水解率明显增加。可能是超声处理促进淀粉与淀粉酶之间的充分接触，显著提高淀粉水解效率。Ca^{2+}与果胶中的羧基形成交联，可有效维持细胞结构完整性，提高细胞壁的屏障功能，阻止淀粉消化酶进入细胞，从而抑制淀粉的消化[19]。超声处理下，绿豆淀粉与 $CaCl_2$ 的充分作用，显著提高 Ca^{2+}对绿豆淀粉的作用，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对抑制绿豆淀粉水解具有协同增效的作用。

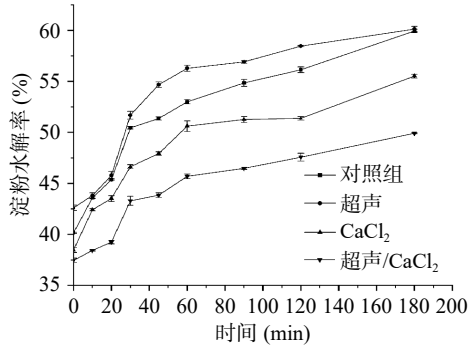


图 5　不同处理方式对绿豆淀粉消化特性的影响

Fig.5　Effects of different processing methods on the digestion characteristics of mung bean starch

2.9　超声辅助浸泡对绿豆抗氧化性的影响

表 4 为不同处理方式对绿豆抗氧化性的影响。由表 4 可知，通过超声处理、$CaCl_2$ 浸泡和超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡的绿豆，$ABTS^+$自由基清除率分别升高 4.99%、4.28%、12.18%；DPPH 自由基清除率分别升高 8.99%、5.07%、14.2%。可能是超声波的机械效应可增强苯丙氨酸解氨酶（PAL）和酪氨酸解氨酶（TAL）的活性，PAL 和 TAL 是多酚合成途径中的关键酶[50]，有效增加绿豆体系中多酚含量。同时，超声波的空化和机械效应增强了细胞膜的通透性，促进了离子和代谢物的扩散和跨膜转运[51]；Ca^{2+}与酚羟基的氧原子形成配位键，Ca-O 配位键的形成降低了 O-H 间的电子云密度，提高了酚羟基的供氢能力[52]，Ca^{2+}与细胞壁上的羧基之间形成了交联桥，降低了多酚的甲氧基化程度，防止了细胞中多酚羟基的取代[19]，因此，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡有利于多酚在绿豆体系内的富集，有效提高多酚的稳定性和抗氧化性，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对提高绿豆的抗氧化性具有显著作用。

表 4　不同处理方式对绿豆抗氧化能力的影响

Table 4　Effects of different processing methods on the antioxidant capacity of mung beans

样品名称	$ABTS^+$自由基清除率（%）	DPPH自由基清除率（%）
对照组	67.43±0.01^{c}	15.16±0.06^{c}
超声	72.42±0.00^{b}	24.15±0.01^{ab}
$CaCl_2$	71.71±0.04^{b}	20.23±0.02^{bc}
超声/$CaCl_2$	79.61±0.02^{a}	29.36±0.00^{a}

3　结论

本文探究了超声处理、$CaCl_2$ 浸泡以及超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡处理对绿豆淀粉结构和绿豆功能的影响。与对照组相比，三种处理方式均降低绿豆相对结晶度、淀粉颗粒内部结构向无序状态转变；O-H 吸收峰减小，C=O 吸收峰增大；其中，超声处理的绿豆颗粒表面粗糙，颗粒碎片增加，$CaCl_2$ 浸泡的绿豆颗粒出现相互聚集现象，且超声辅助 $CaCl_2$ 处理团聚现象更显著。此外，三种处理方式均提高了绿豆的水合特性和粘度，降低了焓值，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡显著提高绿豆的热稳定性；超声处理导致绿豆淀粉水解率上升，$CaCl_2$ 浸泡以及超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡处理导致绿

豆淀粉水解率下降；在抗氧化性方面，三种处理方式均能有效提高绿豆的抗氧化性。实验结果表明，超声辅助 $CaCl_2$ 浸泡对改善绿豆淀粉结构和绿豆功能特性有协同增效作用，本研究可为绿豆低升糖、高抗氧化性食品的开发提供理论基础。

© 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］ 靳晓琳, 贾易天, 张小梅, 等. 氯化钙处理对发芽绿豆营养品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 151−158. ［JIN Xiaolin, JIA Yitian, ZHANG Xiaomei, et al. Effects of calcium chloride treatment on nutritional components and antioxidant capacity of germinated mung bean[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 151−158.］

［2］ 李若凝, 刘兴浩, 李春红, 等. 适宜加工高绿豆含量面条的绿豆品种筛选研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(6): 59−66. ［LI Ruoning, LIU Xinghao, LI Chunhong, et al. Preparation of noodles with high mung bean content and selection of suitable mung bean cultivars for processing[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(6): 59−66.］

［3］ 刘阳. 超声协同碳酸氢钠处理对绿豆预熟化品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. ［LIU Yang. The effect of ultrasound combined with sodium bicarbonate treatment on the pre ripening quality of mung beans[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.］

［4］ 刘畅. 超高压处理对全籽粒绿豆理化和加工特性的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020. ［LIU Chang. Effect of ultra high pressure treatment on physicochemical and processing characteristics of whole grain mung bean[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.］

［5］ 周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 16−23,12. ［ZHOU Sumei, LI Ruoning, TANG Jian, et al. Nutritional components and health functions of mung bean and its application in the development of plant-based food[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 16−23,12.］

［6］ 吴木兰. 明绿豆营养特性与产地溯源研究及其高蛋白绿豆脆饼开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. ［WU Mulan. Research on nutritional properties and origin tracing of Ming mung beans (*Vigna radiata* L.) and development of protein-rich mung bean crackers[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.］

［7］ 曹菲. 绿豆热处理对绿豆挂面品质及储藏稳定性影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. ［CAO Fei. Study on the effect of mung bean heat treatment on the quality and storage stability of mung bean dried noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.］

［8］ 冯田田. 不同方法改性绿豆淀粉及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2023. ［FENG Tiantian. Modification of mung bean starch by different methods and its application[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2023.］

［9］ DAS M, SANTRA S, CHAKRABORTY M, et al. Resistant starch: Insights into better health and metabolism[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 59: 103275.

［10］ 董幸. 绿豆抗性淀粉的制备及其对小鼠肠道代谢的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020. ［DONG Xing. Preparation of mung bean resistant starch and its effect on intestinal metabolism in mice[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.］

［11］ 贾敏. 表儿茶素对绿豆淀粉理化、消化特性的影响及其抑制消化酶机制初探[D]. 太原: 山西大学, 2024. ［JIA Min. Effects of epicatechin on the physicochemical and digestive properties of mung bean starch and its mechanism of digestive enzyme inhibition: A preliminary study[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2024.］

［12］ HE Mingyu, WU Xixi, GAO Tian, et al. Effects of ultrasonic and chemical dual modification treatments on the structural, and properties of cornstarch[J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139221.

［13］ 张敏. 超声辅助发酵对添加甘薯生浆面团及馒头品质影响研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022. ［ZHANG Min. Effect of ultrasonic-assisted fermentation on the quality of sweet potato pulp dough and steamed bread[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.］

［14］ 周凌晨. 豆渣的超声改性处理及其应用于面条的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2024. ［ZHOU Lingchen. Study on ultrasonic modification of okara and the application to noodles[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.］

［15］ SAMARAH N H, AL-QURAAN N A, AL-WRAIKAT B S. Ultrasonic treatment to enhance seed germination and vigour of wheat (*Triticum durum*) in association with γ-aminobutyric acid (GABA) shunt pathway[J]. Functional Plant Biology, 2023, 50(4): 277−293.

［16］ 王家麟. 高直链玉米淀粉糊化特性及成膜性能研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023. ［WANG Jialin. Study on gelatinization and film forming characteristics of high amylose corn starch[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023.］

［17］ LIU Lei, NIU Fengnan, XIONG Yating, et al. Ultrasound-assisted low-sodium salt curing to modify the quality characteristics of beef for aging[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107134.

［18］ 胡秀发, 陈燕美, 张喜玲, 等. 超声辅助 NaCl 浸泡对熟化黑豆结构和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 121−127. ［HU Xiufa, CHEN Yanmei, ZHANG Xiling, et al. Structure and digestive qualities of cooked black beans after soaked in NaCl with the assistance of ultrasound[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 121−127.］

［19］ YANG Qingyu, GU Chenqi, ZHANG Xiling, et al. The research on metabolomics mechanism of calcium ion-induced whole black bean polyphenols and biological activities[J]. LWT, 2024, 195: 115851.

［20］ ZHOU Jiankang, ZHANG Zhuo, QIAO Jiawei, et al. Investigating the effect of different contents of mung beans on the structure and function of extruded buckwheat noodles[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100501.

［21］ 陆林. 鹰嘴豆粉强化对饼干淀粉消化性与质构的影响及其机制[D]. 无锡: 江南大学, 2022. ［LU Lin. The effect and its mechanism of chickpea flour fortification on the starch digestibility and texture of biscuits[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.］

［22］ 况玉玉, 杨莎, 张念念, 等. 紫菜粉对面条品质特性及微观结构的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 111−121. ［KUANG Yuyu, YANG Sha, ZHANG Niannian, et al. Effect of *Porphyra powder* on the quality and microstructure of noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 111−121.］

［23］ 刘惠娟, 赵春燕, 龚加顺. 蕉芋淀粉和玉米淀粉理化特性对比分析[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 271−277. ［LIU Huijuan, ZHAO Chunyan, GONG Jiashun. Comparative analysis of starch physicochemical properties between *Canna edulis* Ker starch and corn starch[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(3): 271−277.］

［24］ 韩聪. 全苦荞挂面的研制及其品质改良[D]. 无锡: 江南大学, 2021. ［HAN Cong. Development and quality improvement of

whole Tartary buckwheat noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
[25] 董茗洋, 陈革, 杨庆余. 不同胶体对马铃薯淀粉基材料3D打印特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 44−52. [DONG Mingyang, CHEN Ge, YANG Qingyu. Effect of different colloids on 3D printing properties of potato starch-based materials [J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 44−52.]
[26] 陈甜. 发芽莲子全粉特性及其应用研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014. [CHEN Tian. The properties of germinative lotus seed powder and research on application[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.]
[27] YANG Qingyu, ZHANG Xiling, GU Chenqi, et al. The mediation mechanism of calcium ions on black bean type 3 resistant starch: Metabolomics, structure characteristics and digestibility[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138883.
[28] YANG Qingyu, LI Man, GU Chenqi, et al. Effect of fucoidan on structure and bioactivity of Chinese steamed bread[J]. Foods, 2024, 13(7): 1057.
[29] SHARMA S, THAKUR K, SHARMA R, et al. Molecular morphology & interactions, functional properties, rheology and *in vitro* digestibility of ultrasonically modified pearl millet and sorghum starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127476.
[30] YANG Qingyu, LU Xuanxuan, CHEN Yongzhi, et al. Fine structure, crystalline and physicochemical properties of waxy corn starch treated by ultrasound irradiation[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 51: 350−358.
[31] HOOYBERGHS K, BAI Y M, NOENS L, et al. Impact of calcium-starch interactions on the textural and oil absorption properties of deep-fried potato mashes[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110344.
[32] 樊艳叶. 碱/盐处理对木薯淀粉结构的影响[D]. 南宁: 广西民族大学, 2020. [FAN Yanye. Effect of alkali/salt treatment on the structure of cassava starch[D]. Nanning: Guangxi University for Nationalities, 2020.]
[33] WANG Jialin, LIU Wei, SUI Jie, et al. Effect of ultrasound/$CaCl_2$ co-treatment on the microstructure, gelatinization, and film-forming properties of high amylose corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 134067.
[34] LU Hao, XIONG Liu, LI Man, et al. Separation and characterization of linear glucans debranched from normal corn, potato and sweet potato starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 196−206.
[35] WU Xiaoping, HU Yanyu, ZHENG Shuhong, et al. Food-derived calcium chelating peptides: Biological functional components for better calcium bioavailability[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 150: 104595.
[36] 赵忠云, 徐慧, 吴宗俊, 等. 冷冻球磨处理对燕麦淀粉结构、理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(16): 54−62. [ZHAO Zhongyun, XU Hui, WU Zongjun, etc. The effect of frozen ball milling on the structure and physicochemical properties of oat starch[J]. Food Industry Technology, 2025, 46(16): 54−62.]
[37] SHEN Meng, HUANG Kai, CAO Hongwei, et al. Rheological, thermal, and *in vitro* starch digestibility properties of oat starch-lipid complexes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268: 131550.
[38] SHI Xingxing, ZHONG Quanfa, ZHANG Shuidong. Starch-calcium inclusion complexes: Optimizing transparency, anti-fogging, and fluorescence in thermoplastic starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 348: 122842.
[39] HUANG Xuemei, CHEN Longwei, LIU Yaochi. Effects of ultrasonic and ozone modification on the morphology, mechanical, thermal and barrier properties of corn starch films[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109376.
[40] ZHU Jianjun, SUN Yunbo, SUN Wenzhong, et al. Calcium ion-exchange cross-linked porous starch microparticles with improved hemostatic properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 435−444.
[41] ABEDI E, ALTEMIMI A B, ROOHI R, et al. Understanding starch gelatinization, thermodynamic properties, and rheology modeling of tapioca starch-polyol blends under pre- and post-ultrasonication[J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(3): 2985−3001.
[42] ABEDI E, POURMOHAMMADI K. Aggregation behaviors of sonicated tapioca starch with various strengths of Hofmeister salts under pre- and post-ultrasonic treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105826.
[43] KUMARI S, KAUR B P, THIRUVALLUVAN M. Ultrasound modified millet starch: Changes in functional, pasting, thermal, structural, *in vitro* digestibility properties, and potential food applications[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 110008.
[44] JAFARI M, KOOCHEKI A. Impact of ultrasound treatment on the physicochemical and rheological properties of acid hydrolyzed sorghum starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128521.
[45] ZHUANG Yang, WANG Yudong, YANG Hong. Effect of cation valence on the retrogradation, gelatinization and gel characteristics of maize starch[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139307.
[46] WANG X C, McCLEMENTS D J, XU Z L, et al. Preparation and characterization of calcium-binding starch and its application in microwaveable pre-fried foods[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110328.
[47] CAI Qiling, LI Xiaoping, DING Xinxin, et al. Effects of quercetin and $Ca(OH)_2$ addition on gelatinization and retrogradation properties of Tartary buckwheat starch[J]. Lwt, 2023, 178: 114488.
[48] WANG Hongwei, XU Ke, MA Ying, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104868.
[49] TAN A F M B F M, YULIARTI O, WONG C I A, et al. Structural and *in vitro* starch digestion of wheat flour noodles by calcium mediated gelation of low methoxyl pectin[J]. Food Structure, 2024, 42: 100394.
[50] YU Shibo, ZHANG Shu, LU Lele, et al. Effects of combined ultrasound and calcium ion pretreatments on polyphenols during mung bean germination: Exploring underlying mechanisms[J]. Food Research International, 2024, 195: 114947.
[51] WANG Lidong, LI Xiaoqiang, GAO Fei, et al. Effect of ultrasound combined with exogenous GABA treatment on polyphenolic metabolites and antioxidant activity of mung bean during germination[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106311.
[52] 朱立才. 植物多酚的高速逆流色谱分离及特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010. [ZHU Licai. Isolation of plant polyphenols by high-speed counter-current chromatography and their characterization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.]