

低聚果糖对冷鲜米饭特性及微观结构的影响

李洁¹, 周昭¹, 贾芮¹, 艾有伟^{1,2}, 韩娅红¹, 侯温甫^{1,2,3*}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 湖北武汉 430023) (2. 湖北省荆楚特色食品产业技术研究院, 湖北荆州 434000) (3. 农产品加工与转化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430023)

摘要: 淀粉的回生作用是导致贮藏期间冷鲜米饭的品质降低的主要原因。为明晰低聚果糖对冷鲜米饭品质的影响, 研究了不同质量分数(1%、2%、3%、4%)的低聚果糖处理对大米的吸水率的影响以及蒸煮后米饭的质构、食味值、碘蓝值的影响, 进一步采用扫描电镜观察米饭的微观形貌, 采用差示扫描量热(DSC)、傅里叶红外光谱、X射线衍射技术解析低聚果糖对米饭的回生特性影响的机制。结果表明, 浸泡15 min后质量分数为1%的低聚果糖处理组的吸水率为17.60%, 与对照组相比显著提高了11.69% ($P < 0.05$); 贮藏期间, 质量分数为1%的低聚果糖处理使得米饭贮藏7 d后的硬度显著降低, 与对照组相比降低了13.17%, 且维持食味值的效果最佳, 与对照组比较, 质量分数为1%的低聚果糖处理组的回生焓值、相对结晶度较小, 红外光谱1 047/1 022 cm^{-1} 的比值从1.07降至1.02, 米饭的微观结构较紧密, 表现出较好的抗回生特性。综上所述, 低聚果糖在维持冷鲜米饭品质和抑制淀粉重结晶发挥一定的作用, 其在延缓淀粉类产品的回生方面的应用提供了有利的数据支撑。

关键词: 米饭; 低聚果糖; 微观结构; 抗回生特性

文章编号: 1673-9078(2025)06-198-205

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0569

Effects of Fructooligosaccharides on the Properties and Microstructure of Chilled Rice

LI Jie¹, ZHOU Zhao¹, JIA Rui¹, AI Youwei^{1,2}, HAN Yahong¹, HOU Wenfu^{1,2,3*}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

(2. Hubei Industrial Technology Research Institute of Jingchu Special Foods, Jingzhou 434000, China)

(3. Hubei Key Laboratory of Processing and Transformation of Agricultural Products, Wuhan 430023, China)

Abstract: Starch retrogradation is the main contributor to quality deterioration of chilled rice during storage. To clarify the influence of fructooligosaccharides on the quality of chilled rice, the effects of adding different mass fractions (1%, 2%, 3%, and 4%) of fructooligosaccharide on water absorption by soaking rice, and fraction-dependent effects on the texture, taste value, and iodine blue value of rice after cooking were studied. Rice microscopic morphology was observed through scanning electron microscopy. Differential scanning calorimetry, Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR), and X-ray diffraction were employed to analyze the mechanism by which fructooligosaccharides influence rice retrogradation. After soaking in 1% (m/m) fructooligosaccharides for 15 min, the water absorption rate of rice reached 17.60%, representing a significant increase

引文格式:

李洁, 周昭, 贾芮, 等. 低聚果糖对冷鲜米饭特性及微观结构的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 198-205.

LI Jie, ZHOU Zhao, JIA Rui, et al. Effects of fructooligosaccharides on the properties and microstructure of chilled rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 198-205.

收稿日期: 2024-04-27

基金项目: 湖北省教育厅重点项目(D20221613); 中央引导地方科技发展专项项目(2022BGE247)

作者简介: 李洁(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜禽产品质量与安全控制, E-mail: 1803884635@qq.com

通讯作者: 侯温甫(1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 生鲜产品质量控制与安全, E-mail: hwf407@163.com

of 11.69% compared with that of the control group ($P<0.05$). After storage for 7 days, the hardness of rice treated with 1% fructooligosaccharides significantly reduced by 13.17% compared with that of the control group. Taste was best preserved with 1% fructooligosaccharide treatment. Compared with those of the control group, the enthalpy of regeneration and relative crystallinity of the 1% fructooligosaccharide treatment group were lower. The FT-IR ratio of 1 047/1 022 cm^{-1} in the infrared spectrum decreased from 1.07 to 1.02. The treated rice exhibited a more compact and dense microstructure and improved retrogradation resistance compared with the control rice. In short, fructooligosaccharides maintained the quality of chilled rice and inhibited starch recrystallization. This study provides data supporting the application of fructooligosaccharides in delaying the retrogradation of starch-based products.

Key words: rice; fructooligosaccharides; microstructure; anti-retrogradation characteristics

随着“懒人经济”的快速增长、消费者生活节奏的加快及消费者对方便食品的追捧，具有保质期长、食用方便的冷鲜米饭应时而生。方便食品需满足消费者即食、营养与风味需求。冷鲜米饭在加工中，淀粉回生会导致品质劣变。而抑制淀粉回生可提升冷鲜米饭的抗老化特性，维持其良好食味品质。

回生是糊化后的淀粉分子链通过氢键缔合形成的双螺旋结构趋于有序化形成晶体的过程。淀粉回生可分为短期回生和长期回生，短期回生是由直链淀粉导致的，长期回生是支链淀粉的重新排列导致的，影响淀粉回生的原因有淀粉分子结构（直链淀粉和支链淀粉的比值）、淀粉中的水分含量和外源添加物质（蛋白质、脂类、糖、多酚和盐等）等^[1,2]。大米淀粉的回生导致大米硬度增加，大米的柔软性和粘弹性下降，极大地降低了大米的食用品质，制约了方便米饭产业化发展。大米中占比超过 90% 的主要成分是淀粉，其对于大米及其制品的加工特性、品质以及功能具有决定性的影响。因此，调控大米淀粉回生是创制高品质冷鲜米饭的关键手段，为解决我国冷鲜米饭产业的瓶颈问题提供重要的意义。

大米淀粉的结构决定其营养功能与食品加工品质。目前，已有多种外源添加物被尝试用于控制淀粉的回生，包括海藻酸钠^[3]、草鱼蛋白水解物^[4]等。多糖类也是常用于淀粉回生抑制的研究中，研究发现可溶性大豆多糖作为一种非淀粉类凝胶多糖，可产生水合现象，形成水合层，增强淀粉内部保水能力，以达到抑制淀粉回生的作用^[5-7]。多项研究表明，低聚果糖可以改善以淀粉为主要成分的食品的品质，被广泛用于面包、汉堡等产品中，Park 等^[8]研究发现添加低聚果糖可以提高面包的烘烤品质；Alves 等^[9]使用低聚果糖（FOS）值替代动物脂肪生产低脂牛肉汉堡。同时，低聚果糖具有低热值，无龋齿、促进双歧杆菌增殖、降血糖，改善血清脂质，

促进微量元素吸收等优良生理功能，被公认为天然活性物质，是一种功能性甜味剂，同时其甜度仅为蔗糖的 0.3~0.6 倍，甜味纯正，又比蔗糖甜味清爽，利用低聚果糖的抑制淀粉回生改善冷鲜米饭品质具有良好的实践价值。

本研究以不同质量分数的低聚果糖浸泡大米为处理组，探究大米吸水率变化以及经蒸煮后的米饭在贮藏期内质构、食味值、碘蓝值、热特性、傅里叶红外光谱、微观结构及晶体结构的变化，解析低聚果糖对冷鲜米饭淀粉回生的影响规律及机制，为利用低聚果糖在冷鲜米饭保鲜的应用提供理论依据。

1 实验方法

1.1 材料与试剂

成泰金熊香丝苗米，广东成泰米业有限公司；食品级低聚果糖，佳禾旭日商贸有限公司；碘化钾、碘、氯化氢溶液，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

F-30FZ630 九阳电饭煲，杭州九阳生活电器有限公司；TA-XT.plus 质构仪，英国 Stable Micro Systems 公司；STA1B-RHS1A-RFDM1A 米饭食味计，佐竹机械有限公司；UV-5100 紫外-可见光分光光度计，上海元析仪器有效公司；Q2000 型 DSC，美国 TA 公司；日立 SU5000 扫描电子显微镜；Bruker D8 AdvanceX 射线衍射仪，布鲁克公司。

1.3 方法

1.3.1 样品的制备

对照组：将大米于 25 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡在去离子水中 30 min（米水质量为 1:1.4），大米浸泡后连同浸泡液放入电饭煲蒸煮 35 min，蒸煮结束后焖 1 min，

25 ℃冷却 30 min, 即得到对照组; 处理组: 配制不同质量分数的低聚果糖溶液 (1%、2%、3%、4%), 将大米于 25 ℃分别浸泡在不同质量分数的低聚果糖溶液中 30 min (米水质量为 1:1.4), 大米浸泡后连同浸泡液放入电饭煲蒸煮 35 min, 蒸煮结束后焖 1 min, 25 ℃冷却 30 min, 分别得到 1%-FOS、2%-FOS、3%-FOS、4%-FOS 处理组。蒸煮的米饭冷却后, 放置于 4 ℃冰箱中冷藏 0、3、5、7 d 后, 再测定其指标。

1.3.2 吸水率的测定

参考吴艺婕^[10]的方法测定大米吸水率并略作改动。称取约 10 g (精确到 0.001 g) 大米 m_1 放入 50 mL 带盖离心管并加入 30 mL 去离子水, 分别浸泡 5、15、25、35 min 后取出米粒, 用滤纸吸干表面水分后称重记为 m_2 。浸泡吸水率按下式计算:

$$X = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X ——大米吸水率, %;

m_1 ——大米浸泡前的质量, g;

m_2 ——大米浸泡后的质量, g。

1.3.3 质构的测定

取 3 粒米饭呈“Y”字型放置于质构仪载物台上。参数设定: P/36 型圆柱探头、测前速度 2 mm/s、测中速度 1 mm/s、测后速度 1 mm/s、压缩比 50%、触发力 5 gf。测定样品的质构数据, 每个样品重复测定 10 次。

1.3.4 米饭食味值的测定

参考薛薇等^[11]的方法测定食味值并稍作修改。米饭贮藏结束后, 称取 8 g 样品装入直径 30 mm、高 9 mm 的不锈钢试样圆环内, 制成饼状后于食味计测定, 每次测定 3 个平行。

1.3.5 碘蓝值的测定

参考周小理等^[12]的方法测定碘蓝值并稍作修改。准确称取米饭 5.0 g, 然后装入 50 mL 离心管中, 然后加 50 mL 沸水浸泡 3 min, 离心 (3 000 r/min, 15 min) 取上清液 5 mL, 在上清液中加入 0.5 mL 0.1 mol/L KI-I₂ 溶液和 0.5 mL 0.1 mol/L HCl, 然后加水定容至 50 mL, 静置 15 min 后于 620 nm 波长处测定吸光值, 即为碘蓝值。

1.3.6 热特性的测定

参考 Naseer 等^[13]的方法测定米饭的热特性。将

米饭冻干磨成粉后, 准确称取 2 mg 样品置于 DSC 坩埚中, 并加入 6 μ L 去离子水, 混合均匀后密封。将密封后的坩埚于室温条件下平衡 24 h, 用空坩埚作参比。通入氮气 (氮气流量 50 mL/min), 升温速度 10 ℃/min, 由 20 ℃升至 100 ℃, 得到起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、终值温度 (T_c) 和老化焓值 (ΔH)。每个样品测定 3 次平行。

1.3.7 傅里叶红外光谱的测定

根据卢紫君等^[14]的方法测定回生米饭的 FT-IR 并略做修改。4 ℃贮藏的回生米饭放于冷冻干燥机中进行干燥, 粉碎过 200 目筛, 制得样品。将样品与 KBr 按质量比 1:100 混合, 充分研磨, 测量范围为 4 000~400 cm^{-1} , 扫描次数为 64 次, 分辨率 4 cm^{-1} 。以吸光度 1 047/1 022 cm^{-1} 比值间接代表回生程度的大小。

1.3.8 微观结构

参考张苹等^[15]的方法观察米饭的微观结构并稍作改动。将不同处理条件下的米饭进行真空冷冻干燥后, 挑选完整的米粒用刀片从米粒中部切断, 样品横断面朝上, 横截面溅射镀金后用扫描电镜在 3 kV 的加速电压下观察。

1.3.9 晶体结构

参考 Liu 等^[16]的方法测定米饭的晶体结构并略作改动。将 4 ℃贮藏的米饭放于冷冻干燥机中进行干燥, 粉碎过 200 目筛用于测定。条件: 电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描角度范围 5~40 °, 扫描速率 5 °/min, 步长 0.02 °。

1.4 数据处理

运用 Origin 软件对实验数据进行作图, 运用 SPSS 软件进行显著差异分析 (Duncan), 显著差异水平取 $P < 0.05$, 所有数据均为 3 次平行测量的平均值。

2 结果与分析

2.1 低聚果糖溶液对大米吸水率的影响

吸水率反映大米吸水程度和膨胀程度, 其影响大米蒸煮后米饭的口感、质地和外观以及质构特性, 尤其米饭的硬度。大米蒸煮前浸泡吸水膨胀, 其淀粉体内外出现微小裂缝, 有利于水分的吸收及加热后的淀粉均一糊化^[17]。水分通过裂纹从大米外层进入大米内层, 浸泡完成后裂纹消失, 大米的吸水率

越高,其蒸煮品质越好,米饭内部水分含量越高,其贮藏过程淀粉回生受抑制,米饭淀粉回生程度低。不同质量分数低聚果糖浸泡大米后吸水率的变化如图1所示,吸水率随着浸泡时间的延长而升高,25 min后吸水率趋于稳定,浸泡后大米外部有大量的裂痕,致使大量水分进入淀粉内部,淀粉内外部水分趋于平衡。质量分数为1%的低聚果糖处理组的吸水率显著高于对照组,大米浸泡5、15、25、35 min时吸水率分别提高了5.81%、11.69%、4.23%、6.32%,大米浸泡35 min后的吸水率达到最大值21.22%。低聚果糖具有多羟基结构,其结构与水结合的能力强,从而有一定的吸水性。因此,当大米浸泡在低聚果糖溶液中时,低聚果糖的性质使其快速吸收大量水分,进而导致大米膨胀、其表面结构疏松,形成更大空隙,大米内部水分子含量增加,则增加大米的吸水率。

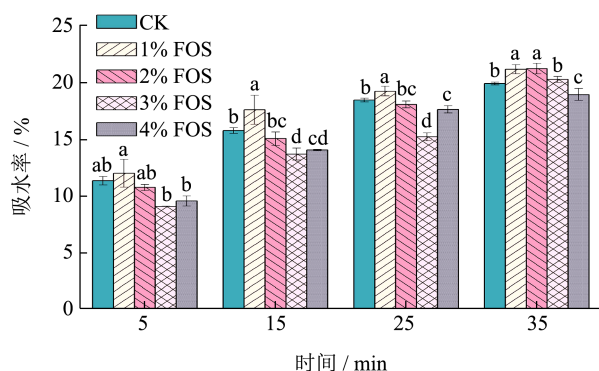


图1 不同质量分数低聚果糖对大米吸水率的影响

Fig.1 Influence of different fructo-oligosaccharide concentrations on water absorption of rice

注:不同字母表示同一时间下不同质量分数的显著性差异, ($P < 0.05$)。

2.2 低聚果糖溶液对米饭质构的影响

淀粉糊化后,米饭在冷藏期间由于分子重排极易发生回生作用,米饭失去原有的弹性和湿润感,变得干燥粗糙,导致米饭的硬度增加,食用品质下降^[18]。不同质量分数低聚果糖对米饭质构的影响如图2所示。结果表明,随着贮藏时间的增加,米饭的硬度、咀嚼性均显著增加,回复性无明显变化。米饭贮藏第7天,对照组米饭的硬度、咀嚼性分别为1 521.68、921.18 gf,随着低聚果糖质量分数的增加,米饭的硬度分别为1 321.29、1 333.84、1 420.80、1 398.46 gf,米饭的咀嚼性分别为894.76、820.26、1 114.76、978.94 gf。由数据

可知,低聚果糖处理组的硬度、咀嚼性均显著低于对照组,由此表明低聚果糖的添加能延缓米饭冷藏期间变硬的程度。其中质量分数为1%的低聚果糖处理使得米饭贮藏7 d后的硬度显著降低,与对照组相比降低了13.17%,相对于对照组和其他处理组,其回生程度最低。结果表明,大米在蒸煮前经过低聚果糖浸泡处理有助于延缓冷藏期间米饭硬化程度。低聚果糖对延缓直链淀粉的重排有一定的作用,从而抑制米饭回生^[8]。

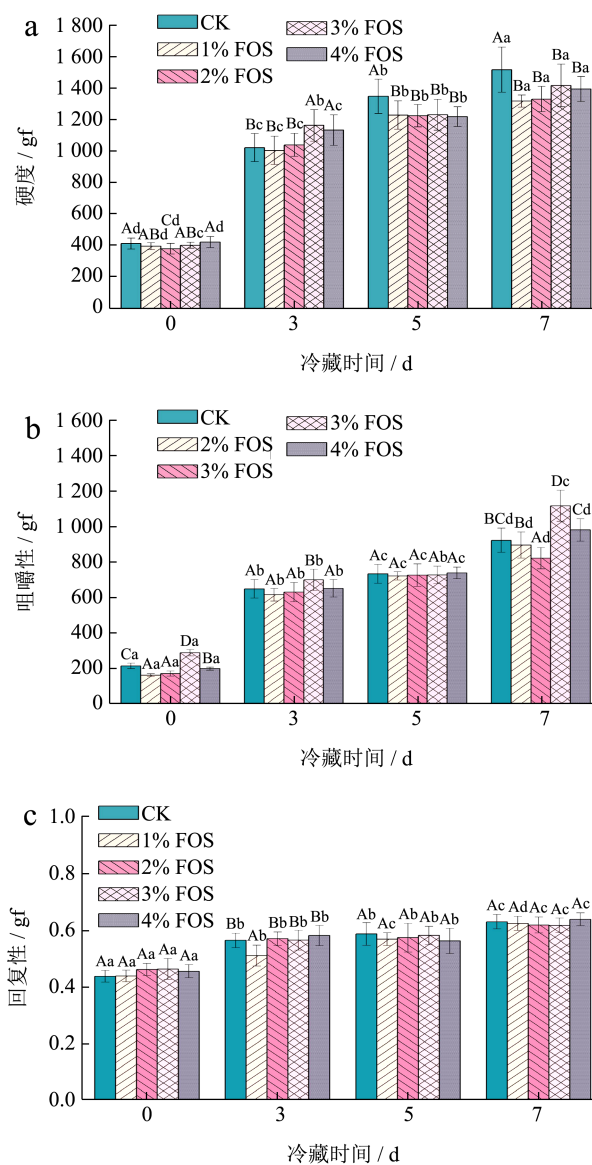


图2 不同质量分数低聚果糖对米饭质构的影响

Fig.2 Influence of different oligofructose concentrations on texture of rice

注:不同大写字母表示同一时间下不同质量分数的显著性差异;不同小写字母表示同一质量分数下不同时间的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

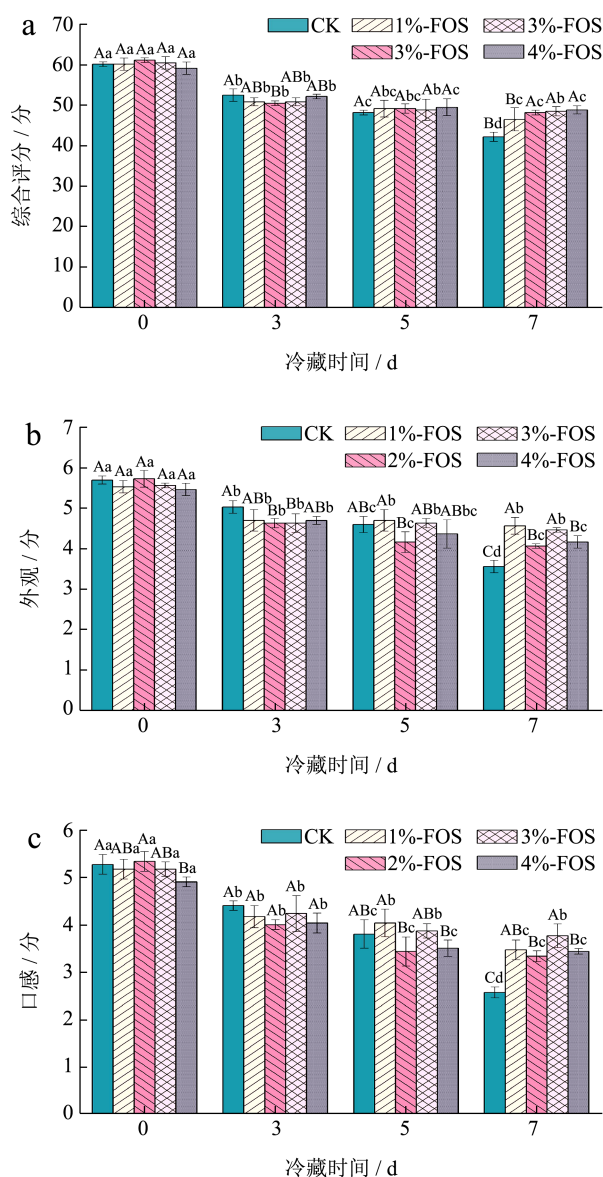


图3 不同质量分数低聚果糖对米饭食味值的影响

Fig.3 Influence of different oligofructose concentrations on the taste value of rice

2.3 低聚果糖溶液对米饭食味值的影响

米饭的食味值是对米饭食用品质的综合评定,主要包括米饭的口感、外观等方面。一般来说,食味值越高,代表米饭品质越好。如图3所示,米饭在0~7 d内的综合评分、外观及口感均呈显著下降趋势,其中米饭的口感得分下降最明显,这可能与米饭在贮藏过程中直链淀粉和脂肪酸的增加、水分含量下降相关,其中油酸与淀粉分子结合形成淀粉-脂质复合物,从而米饭变硬,黏度变小,导致米饭的食用品质下降^[19]。在贮藏期内,对照组的米饭的综合评分从60.33分降至42.33分,降低了29.83%,低聚果糖处理组的米饭的综合评分降低的范围在

17.42%~22.65%;对照组的米饭的外观从5.70分降至3.57分,合计降低了37.43%的外观评分,低聚果糖处理组的米饭的外观最高降低了29.07%,质量分数为1%的低聚果糖处理组仅降低了17.47%;在米饭口感方面,对照组的米饭口感降低了51.26%,处理组的米饭的口感仅降低了27.10%~37.50%。由此可知,低聚果糖处理的米饭在冷藏期间的综合评分、外观、口感均优于对照组,表现出了良好的米饭品质的维持作用。

2.4 低聚果糖溶液对米饭碘蓝值的影响

碘蓝值是可溶性直链淀粉与碘结合能力,可表示米饭的回生程度^[20]。冷藏期间米饭发生回生,淀粉分子从无序结构转变为致密的结晶结构,结晶的淀粉分子相互包裹,与碘反应的可溶性淀粉少,故米饭的碘蓝值降低,表明回生程度大。同时,贮藏期间,蛋白质包裹淀粉,使得米饭中的可溶性淀粉减少,不溶性淀粉增加,导致米饭的碘蓝值下降^[21]。图4表示贮藏期米饭碘蓝值的变化,贮藏期间米饭的碘蓝值呈显著降低,在贮藏7 d内,对照组的米饭的碘蓝值从最初的0.165下降至0.116,下降率为29.70%,回生较多。米饭贮藏第0天时,质量分数为1%~4%的低聚果糖处理组的碘蓝值分别为0.173、0.173、0.172、0.170,贮藏第7天后,质量分数为1%~4%的低聚果糖处理组的碘蓝值分别为0.155、0.144、0.141、0.142。质量分数为1%~4%的低聚果糖处理组的碘蓝值下降率的范围在10.40%~18.02%,其中,质量分数为1%的低聚果糖处理组的碘蓝值下降了10.40%,下降率最低,表明其很好地保持米饭原有的品质,回生程度较低。

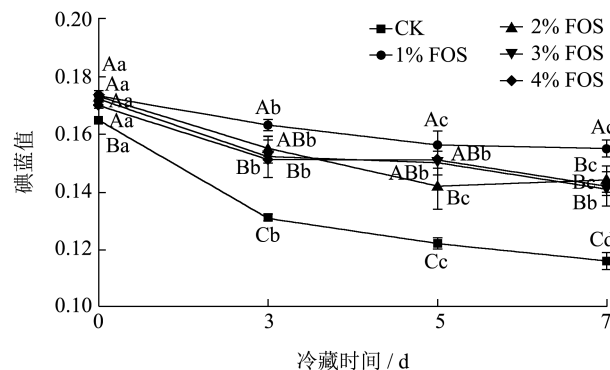


图4 不同质量分数低聚果糖对贮藏米饭碘蓝值的影响

Fig.4 Influence of different oligofructose concentrations on iodine blue value in rice storage

2.5 低聚果糖溶液对米饭热特性的影响

回生焓值(ΔH)表示淀粉糊化发生重结晶后

再次破坏晶体结构所需的能量。回生焓值越高，表示淀粉结构熔融时所需能量越大，则淀粉回生程度越大。贮藏 7 d 后，不同质量分数低聚果糖对冷鲜米饭热特性的影响如表 1 所示，样品的起始温度 T_0 在 40~43 ℃ 之间、峰值温度 T_p 在 44~46 ℃ 之间、终止温度 T_c 在 54 ℃ 左右，三者温度变化不明显，研究表明支链淀粉的重结晶融化峰是在 40~70 ℃ 范围内^[22]，可见米饭贮藏期的回生主要由支链淀粉重结晶引起的。处理组的回生焓值均小于对照组，说明低聚果糖可以抑制淀粉晶体堆积，延缓米饭的回生速度。随着低聚果糖质量分数的增加，回生焓值显著降低，由 1.79 J/g 减少至 1.18 J/g，其中质量分数为 1% 的低聚果糖处理后的米饭回生焓值与对照组相比显著降低了 34.08% ($P<0.05$)，可能在该质量分数下，低聚果糖能够最有效地渗透到淀粉颗粒内部，与淀粉分子相互作用，从而最大程度地抑制淀粉回生。Korus 等^[23]发现益生元添加过量，导致面包屑硬度的增加，硬度与回生程度成正相关，因此可间接表明添加低聚果糖过量导致削弱其对淀粉回生的抑制作用。Ding 等^[24]研究发现，由于麦芽糖醇有羟基，容易与水 and 淀粉形成氢键，从而抑制淀粉分子化合物发生聚集，则需要更少的能量来分解。低聚果糖亦含有大量的羟基，其抑制淀粉回生可能与麦芽糖醇类似。

2.6 低聚果糖溶液对米饭红外光谱的影响

对贮藏 7 d 的米饭进行傅里叶红外光谱分析，如图 5 所示。在 4 000~400 cm^{-1} 范围内不同样品组的红外吸收基团类型相似，说明低聚果糖和米饭淀粉分子在结合过程中未改变各自的基本化学结构，

而是通过氢键等非共价键的相互作用，形成相互交织、紧密相连的三维凝胶网络。3 700~3 100 cm^{-1} 处的吸收峰是羟基伸缩振动与分子间氢键相互作用的直接体现^[25]，添加不同质量分数低聚果糖后，回生米饭的羟基伸缩振动峰的波数均向较低的波数处移动，说明加入低聚果糖后混合体系之间的氢键作用力在增强^[26]。短程有序性可以通过红外光谱在 800 cm^{-1} 至 1 200 cm^{-1} 范围内的特定吸光度比值来定量评估，1 047 cm^{-1} 的吸光度值揭示了淀粉的结晶程度，而 1 022 cm^{-1} 的吸光度值则反映了淀粉的非结晶程度^[27]。因此，可以通过计算 1 047 cm^{-1} 与 1 022 cm^{-1} 两个波长处吸光度的比值大小反映米饭淀粉回生程度的大小。由表 2 可知，米饭回生 7 d 后，处理组的 1 047/1 022 cm^{-1} 比值均比对照组低，表明低聚果糖可以抑制淀粉回生。其中，质量分数为 1% 的低聚果糖处理组的 1 047/1 022 cm^{-1} 与对照组相比，下降了 4.67%，说明添加质量分数为 1% 的低聚果糖对米饭淀粉有较好的抑制效果。

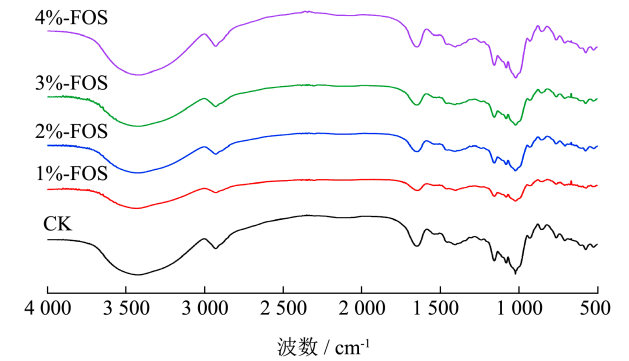


图 5 不同质量分数低聚果糖对贮藏米饭红外光谱的影响
Fig.5 Influence of different mass fractions of fructooligosaccharide on infrared spectrum of stored rice

表 1 不同质量分数低聚果糖对贮藏7 d后冷鲜米饭热特性的影响

Table 1 Effect of fructo-oligosaccharides on thermal properties of chilled rice after 7 days storage				
质量分数/%	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
0	40.17 ± 0.13^b	44.53 ± 1.17^b	54.79 ± 0.78^{ab}	1.79 ± 0.04^a
1	43.29 ± 0.11^a	46.26 ± 0.59^a	54.51 ± 0.13^{ab}	1.18 ± 0.03^d
2	42.95 ± 0.49^a	47.06 ± 0.40^a	54.92 ± 0.18^a	1.56 ± 0.03^b
3	42.64 ± 0.49^a	46.73 ± 0.64^a	53.92 ± 0.28^b	1.45 ± 0.02^c
4	43.35 ± 0.55^a	46.93 ± 0.31^a	54.5 ± 0.38^{ab}	1.45 ± 0.08^c

注：小写字母表示不同低聚果糖质量分数的差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 不同质量分数低聚果糖对回生米饭1 047/1 022 cm^{-1} 比值的影响

Table 2 Effects of different mass fractions of oligofructose on the ratio of 1 047/1 022 cm^{-1} of recycled rice					
质量分数/%	0	1	2	3	4
1 047/1 022 cm^{-1} 比值	1.07 ± 0.002	1.02 ± 0.008	1.03 ± 0.001	1.03 ± 0.001	1.04 ± 0.007

2.7 低聚果糖溶液对米饭微观结构的影响

米饭冷藏 7 d 后的微观结构形貌见图 6。由图可知，新鲜米饭呈现完整、均匀的多孔状蜂窝结构，该结构使得米饭柔软、有弹性。这是由于米饭在蒸煮过程中，淀粉颗粒吸水膨胀并糊化而形成的多孔结构。相对于新鲜米饭，贮藏 7 d 后的米饭结构更紧密，孔洞减少且不规则，同时也出现裂痕，这是由于米饭中的淀粉在回生过程中重新结晶和排列，导致淀粉分子间的相互作用增强，形成更为紧密、有序的结构，结晶化过程可能导致米饭内部的应力累积；同时米饭在贮藏过程中失去水分，导致米饭体积收缩，内部应力收缩而增加，当内部应力超过米饭的抗拉强度时，横截面就可能出现裂痕。与对照组的米饭相比，添加不同质量分数低聚果糖的米饭结构较为松散、孔洞数量较多。低聚果糖具有保水性^[28]，使淀粉的持水性增加，对维持米饭的水分保持起到一定的积极作用。

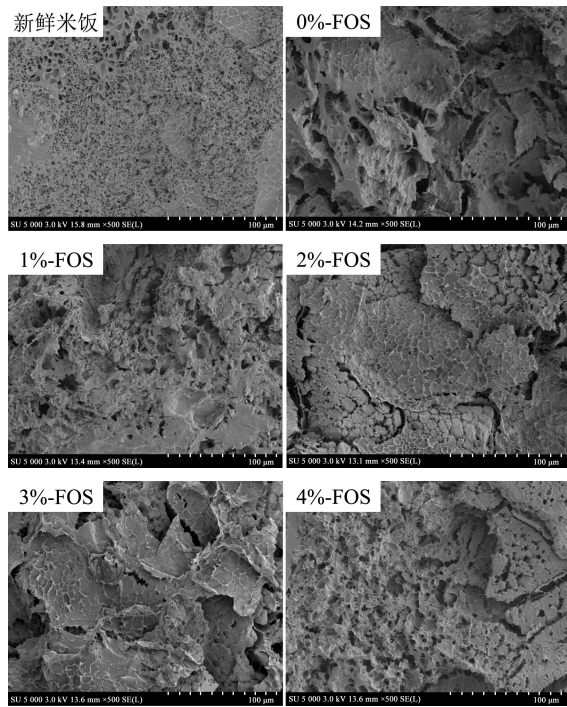


图 6 冷藏 7 d 后米饭的微观结构形貌
Fig.6 Microstructure of rice after 7 days cold storage

2.8 低聚果糖对米饭晶体结构的影响

淀粉主要分为两种结构，即结晶型和非结晶型，结晶型结构又分为 A、B、C、V 四种类型，谷物淀粉中主要有 A 型结构^[29]。未经糊化的天然大米的衍射角 (2θ) 在 15.06° 、 16.98° 、 18° 和 23.02° 衍射角出现衍射强峰，即表现为典型的谷物淀粉 A 型 X 射线图谱^[30]。对未糊化大米及 4°C 贮藏 7 d 后的米

饭进行 X-射线衍射分析，如图 7 所示。糊化的米饭未出现大米原料的 A 型结构衍射峰，这是因为大米淀粉在糊化过程中，其结晶结构发生破坏，导致结晶峰消失^[31]。大米淀粉贮藏 7 d 后，在 17° 、 20° 出现衍射峰，表示 A 型结构分别转变为 B 型、V 型^[32]，B 型晶体衍射峰的出现主要是由于支链淀粉部分重结晶^[33]；而 V 型晶体结构稳定，主要由直链淀粉、脂肪酸组合^[34]。由图中数据可知，未经糊化的天然大米结晶度为 11.52%，糊化并贮藏后，随着低聚果糖质量分数的增加，米饭的结晶度分别为 4.77%、2.28%、2.17%、1.73%、3.44%，处理组的结晶度均小于对照组，说明低聚果糖可以抑制淀粉重结晶，这与裴斐等^[35]的研究呈现类似的趋势。低聚果糖属于亲水物质，该特性抢夺淀粉回生所需的水分子，达到抑制淀粉回生的作用，同时低聚果糖抑制淀粉溶胀，减少直链淀粉的渗出而起到抑制淀粉回生。

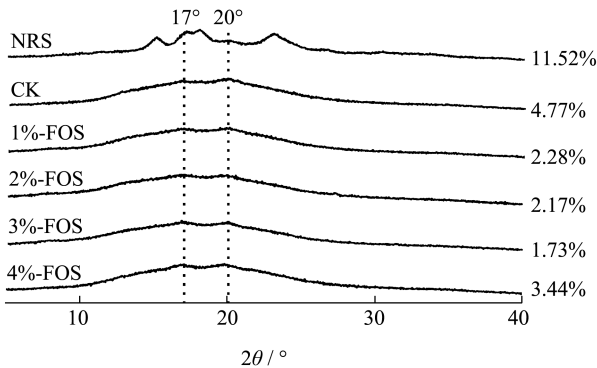


图 7 不同质量分数低聚果糖对大米淀粉的 X-射线衍射图的影响
Fig.7 Effect of fructo-oligosaccharides with different mass fractions on X-ray diffraction patterns of rice starch
注: NRS 为未经糊化的天然大米粉。

3 结论

本研究探讨了不同质量分数（1%、2%、3%、4%）低聚果糖浸泡对冷鲜米饭冷藏期间品质的影响以及不同质量分数低聚果糖浸泡处理对米饭产品的抗回生的效果。研究表明，低聚果糖浸泡处理不仅能够提高大米的吸水率同时对蒸煮后冷藏期间的米饭的硬度增加有延缓，能够维持米饭冷藏过程中的食味值。低聚果糖处理组的米饭的碘蓝值更高，热特性焓变值较低、红外光谱 $1\,047/1\,022\text{ cm}^{-1}$ 比值更小、微观结构较紧密，结晶度较低，表明了低聚果糖对米饭具有良好的抑制米饭回生的作用，尤其

是质量分数为 1% 的低聚果糖处理对冷鲜米饭品质的维持最佳。

参考文献

- [1] CHANG Q, ZHENG B D, ZHANG Y, et al. A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 186: 163-173.
- [2] 陈悦宇. 小分子糖对莲子淀粉回生特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2021.
- [3] LI Q Q, WANG Y S, CHEN H H, et al. Retardant effect of sodium alginate on the retrogradation properties of normal cornstarch and anti-retrogradation mechanism [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 1-9.
- [4] XIAO J H, ZHONG Q X. Suppression of retrogradation of gelatinized rice starch by anti-listerial grass carp protein hydrolysate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 72: 338-345.
- [5] 王思远, 齐军茹, 杨晓泉. 大豆多糖对大米淀粉糊化及凝胶特性的影响[J]. *中国酿造*, 2011, 7: 155-158.
- [6] 肖东, 周文化, 陈帅, 等. 亲水多糖对鲜湿面货架期内水分迁移及老化进程的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 298-303.
- [7] ZHAO Q Z, TIAN H, CHEN L, et al. Interactions between soluble soybean polysaccharide and starch during the gelatinization and retrogradation: effects of selected starch varieties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106765.
- [8] PARK E Y, JANG S B, LIM S T. Effect of fructooligosaccharide and isomalto-oligosaccharide addition on baking quality of frozen dough [J]. *Food Chemistry*, 2016, 213: 157-162.
- [9] ALVES R D A, SOUSA A M B D, MADEIRA D S S, et al. Low-fat beef burgers containing fructooligosaccharides: physicochemical properties, cooking characteristics, and sensory evaluation [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(9): e14649.
- [10] 吴艺婕. 不同蒸煮条件对黑米饭品质及低GI特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [11] 薛薇, 张聪男, 王莉, 等. 不同品种大米理化性质及其淀粉结构对米饭食用品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(9): 37-45.
- [12] 周小理, 王惠, 周一鸣, 等. 不同烹煮方式对米饭食味品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 75-80.
- [13] NASEER B, NAIK H R, HUSSAIN S Z, et al. Viscothermal behavior and structural characterization of temperate highland himalayan rice cultivars [J]. *Starch-Stärke*, 2021, 73(3-4): 1-13.
- [14] 卢紫君, 赵时珊, 蔡芳, 等. 陈化前后大米的淀粉结构及理化性质分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(6): 126-135.
- [15] 张苹, 伍鹏, 段续, 等. 米饭冷藏时间对老年人胃排空和体外动态消化特性的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2023, 42(3): 94-101.
- [16] LIU Y Q, XIE H F, SHI M M. Effect of ethanol-water solution on the crystallization of short chain amylose from potato starch [J]. *Starch-Stärke*, 2016, 68(7-8): 683-690.
- [17] 邓灵珠. 大米蒸煮与米饭物性及食味形成机理[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- [18] 夏青, 曹磊, 宋玉, 等. 不同抗老化剂对方便米饭回生及品质影响的研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(7): 28-31.
- [19] 杨伟军, 李宏升, 林莹. 脂肪酸对大米淀粉热特性及质构品质影响的研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(4): 1-4.
- [20] 闫紫君. 速冻方便米饭的制作工艺和冻藏品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [21] 周显青, 刘敬婉. 加速陈化对粳稻米饭蒸煮、食味品质及质构特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(6): 8-15.
- [22] 陈轩, 马晓灵, 向莉, 等. 军用方便米饭的回生特性研究[J]. *食品科技*, 2018, 43(8): 158-163.
- [23] KORUS J, GRZELAK K, ACHREMOWICZ K, et al. Influence of prebiotic additions on the quality of gluten-free bread and on the content of inulin and fructooligosaccharides [J]. *Food Science and Technology International*, 2006, 12(6): 489-495.
- [24] DING S Y, PENG B, LI Y Q, et al. Evaluation of specific volume, texture, thermal features, water mobility, and inhibitory effect of staling in wheat bread affected by maltitol [J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 123-130.
- [25] 王心, 闫璟圆, 张倩, 等. 甜菜果胶对小麦淀粉老化的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(7): 169-176.
- [26] LIU W M, ZHANG Y T, XU Z, et al. Cross-linked corn bran arabinoxylan improves the pasting, rheological, gelling properties of corn starch and reduces its *in vitro* digestibility [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107440.
- [27] ZHOU D T, MA Z, YIN X X, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of field pea starch modified by physical, enzymatic, and acid treatments [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 386-394.
- [28] 赵伟丽, 李晓东, 李东花, 等. 微胶囊化对植物乳杆菌在高盐干酪中存活率的影响[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(5): 98-105.
- [29] LI C, DHITAL S, GILBERT R G, et al. High-amylose wheat starch: structural basis for water absorption and pasting properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 245: 116557.
- [30] LI W H, BAI Y F, MOUSAA S A S, et al. Effect of high hydrostatic pressure on physicochemical and structural properties of rice starch [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(6): 2233-2241.
- [31] HU Y, HE C X, ZHANG M Y, et al. Inhibition from whey protein hydrolysate on the retrogradation of gelatinized rice starch [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 105840.
- [32] GUO J Y, LIU F, GAN C F, et al. Effects of konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructural properties of dough and the performance of steamed bread [J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130853.
- [33] 肖瑜, 杨新标, 林楠, 等. 不同蛋白质对大黄米淀粉老化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(16): 45-51.
- [34] LIN L, YANG H, CHI C D, et al. Effect of protein types on structure and digestibility of starch-protein-lipids complexes [J]. *LWT*, 2020, 134: 110175.
- [35] 裴斐, 倪晓蕾, 仲磊, 等. 3种功能性甜味剂对大米蒸煮品质和消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 66-72.