

# 魔芋葡甘聚糖对玉米淀粉凝胶冻融稳定性的改善作用

赵则越<sup>1</sup>, 徐昊<sup>1</sup>, 孙苏晴<sup>1</sup>, 姜慧南<sup>2</sup>, 顾雯沁<sup>1</sup>, 孟祥忍<sup>1,3</sup>, 赵琳琳<sup>1,3\*</sup>

(1. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127) (2. 扬州大学食品科学与工程学院, 江苏扬州 225127)

(3. 扬州大学中餐繁荣基地, 江苏扬州 225127)

**摘要:** 为了研究魔芋葡甘聚糖 (Konjac Glucomannan, KGM) 对玉米淀粉凝胶冻融稳定性的改善效果及作用机制, 该研究通过添加不同质量分数 (0.5%、1%、1.5%) 的 KGM 至玉米淀粉中, 制备出淀粉-KGM 复合凝胶。经过三次冻融循环后, 测定分析凝胶析水率的变化, 并利用扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、低场核磁共振 (Low-field Nuclear Magnetic Resonance Instrument, LF-NMR)、傅里叶变换红外光谱仪 (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR) 和 X 射线衍射 (X Ray Diffraction, XRD) 等设备进行测试和分析。该研究发现, KGM 改善了玉米淀粉凝胶的持水力, 三次冻融循环后, 0.5%、1% 和 1.5% KGM 分别令淀粉凝胶的析水率降低了 9.19%、14.88% 和 15.01%。微观结构分析显示, KGM 有效地缩小了孔隙尺寸, 降低了自由水的含量。1.5% KGM 将凝胶中淀粉的结晶度由 11.78% 降低至 8.32%, 将淀粉的  $R_{1048/1022}$  值由 1.124 降低至 1.032, 抑制了淀粉的重结晶和短程有序结构的形成。这些结构变化归因于 KGM-淀粉相互作用, 包括竞争性水合作用和空间位阻效应, 它们阻碍了冰晶的扩展和淀粉的回生。以上结果为开发高性能冷冻淀粉基材料提供理论依据。

**关键词:** 玉米淀粉凝胶; 冻融稳定性; 魔芋葡甘聚糖; 超微结构; 质构

文章编号: 1673-9078(2026)05-112-118

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.0255

## Enhancement of Freeze-thaw Stability in Corn Starch Gels via Konjac Glucomannan

ZHAO Zeyue<sup>1</sup>, XU Hao<sup>1</sup>, SUN Suqing<sup>1</sup>, JIANG Huinan<sup>2</sup>, GU Wenqin<sup>1</sup>, MENG Xiangren<sup>1,3</sup>, ZHAO Linlin<sup>1,3\*</sup>

(1.School of Tourism and Cuisine, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(2.School of Food Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(3.Chinese Cuisine and Research Base, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** The effects and underlying mechanisms of konjac glucomannan (KGM) on the freeze-thaw stability of corn starch gels were investigated by incorporating different mass fractions of KGM (0.5%, 1.0%, and 1.5%) into corn starch. After three freeze-thaw cycles, syneresis, microstructure, water distribution, and crystalline structure were analyzed using scanning electron microscopy (SEM), low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and X-ray diffraction (XRD). The results showed that KGM significantly enhanced the water-holding capacity of corn starch gels after three freeze-thaw cycles, with syneresis rates reduced by 9.19%, 14.88%, and 15.01% at KGM addition levels of 0.5%, 1.0%, and 1.5%, respectively. Microstructural analysis revealed that KGM reduced pore size and decreased the proportion of free water within the gel

引文格式:

赵则越,徐昊,孙苏晴,等.魔芋葡甘聚糖对玉米淀粉凝胶冻融稳定性的改善作用[J].现代食品科技,2026,42(5):112-118.

ZHAO Zeyue, XU Hao, SUN Suqing, et al. Enhancement of freeze-thaw stability in corn starch gels via konjac glucomannan [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 112-118.

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-05-21; 接受日期: 2025-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32302151); 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (202411117047Z)

作者简介: 赵则越 (2004-), 女, 本科生, 研究方向: 食品科学与烹饪科学研究, E-mail: z11772233@163.com

通讯作者: 赵琳琳 (1988-) 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品科学与烹饪科学研究, E-mail: zhaoll89@163.com

matrix. Crystallographic analysis indicated that starch recrystallization was effectively suppressed by 1.5% KGM, as evidenced by a reduction in gel crystallinity from 11.78% to 8.32% and a decrease in the  $R_{1048/1022}$  ratio from 1.124 to 1.032, suggesting disruption of short-range molecular order. These structural changes are attributed to interactions between KGM and starch, including competitive hydration and steric hindrance, which inhibit ice crystal growth and starch retrogradation. These findings provide a theoretical basis for the development of starch-based materials with improved freeze-thaw stability for frozen food applications.

**Key words:** corn starch gel; freeze-thaw stability; konjac glucomannan; ultrastructure; texture

玉米淀粉作为一种资源丰富、供应稳定且成本效益高的原料,在冷冻食品、饮料及医药等多个工业领域中展现出了其卓越的增稠与稳定功能<sup>[1]</sup>。它的基础特性在于糊化能力:淀粉颗粒随着温度的升高,吸收水分,体积逐渐膨胀,并伴随氢键的断裂,使微晶束结构在颗粒内部瓦解,进而形成半透明的粘稠糊状物质<sup>[2]</sup>。此状态下的玉米淀粉不仅具备优良的抗剪切性能,还展现出良好的热稳定性,因此常被用作食品中的增稠剂和乳化剂<sup>[3]</sup>。近年来,随着消费者对预制食品和冷冻方便食品需求的快速增长,淀粉基凝胶类产品(如速冻面点、冷冻甜品、即食酱料)的市场规模持续扩大。玉米淀粉因其价格低廉、糊化特性稳定,被广泛用于冷冻食品加工,但其凝胶在冷冻-解冻过程中易因冰晶机械损伤和分子链重排导致结构崩塌,表现为析水、硬化或粉质感加剧<sup>[4]</sup>,严重制约产品货架期和感官品质。如何安全、有效地提升玉米淀粉冻融稳定性,已成为亟待解决的技术难题。

为了减轻冻融循环对产品品质的负面影响,研究者们探索了通过添加外源物质来提升淀粉基食品的冻融稳定性。其中,亲水性胶体作为一种有效的添加剂,在与玉米淀粉以适当比例复配后,展现出了显著的协同增效作用,为改善淀粉基食品的冻融稳定性提供了新的途径<sup>[3]</sup>。魔芋葡甘露聚糖(Konjac Glucomannan, KGM)是制备凝胶类素食最常用的基材之一,作为一种非离子水胶体的膳食纤维,它具有减肥、降糖、降脂等特殊功效<sup>[5]</sup>,广受研究人员的青睐。KGM具有超强的持水性和剪切稀化特性,在淀粉基凝胶体系中表现出显著的结构稳定作用<sup>[6]</sup>,已有大量研究证实了淀粉与KGM复合对凝胶特性的有益影响。齐慧等<sup>[7]</sup>研究发现淀粉与KGM混合可以改善KGM凝胶的持水力、凝胶强度和质构特性等。童慧琳等<sup>[8]</sup>研究发现KGM可以改善玉米淀粉糊化和凝胶性能,增强淀粉糊热稳定性并能延缓其短期回生。目前关于KGM影响淀粉凝胶性能的研究多集中于流变特性、老化特性和消化特性等方向,但其调控淀粉凝胶冻融稳定性的具体作用机制仍不明确。

因此,本文创新性地引入KGM引入玉米淀粉凝

胶体系,利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、低场核磁共振(Low-field Nuclear Magnetic Resonance Instrument, LF-NMR)、傅里叶变换红外光谱(Fourier Transform Infrared Spectrometer, FT-IR)和X射线衍射(X Ray Diffraction, XRD)等技术研究凝胶经反复冻融后水分分布、微观结构、以及凝胶中淀粉的短程有序结构和结晶度的变化,解析复合凝胶的冻融劣变抑制机制,同时评估不同KGM添加量对析水率、质构特性的影响规律。为开发新型食品凝胶、提高淀粉基食品冷冻储存品质提供一定的理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

普通玉米淀粉(直链淀粉含量25%~28%),上海源叶生物有限公司;KGM(纯度≥95%),麦克林化学试剂有限公司。

DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限公司;TGL-16M台式高速冷冻离心机,上海卢湘仪离心机仪器有限公司;SCIENTZ-10N/A冷冻干燥机,北京宏达恒业科技有限公司;NDJ-5S黏度仪,力辰仪器科技有限公司;NMI20-060V-I低场核磁测定仪,苏州纽迈电子科技有限公司;D2 PHASER型X射线衍射仪,德国布鲁克AXS有限公司;IS10傅立叶红外光谱仪,美国Nicolet公司;Q200差示扫描量热仪,美国TA公司;QUANTA200扫描电子显微镜,日本明石公司;TA-XT2i质构仪,英国Stable Micro Systems公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 淀粉凝胶的制备及冻融

淀粉凝胶的制备:参考孙莹<sup>[9]</sup>的方法并稍作修改。将10 g玉米淀粉加入到200 g的去离子水当中,在85℃的恒温磁力搅拌器中搅拌30 min,冷却至室温,记为S组。

淀粉/KGM复合凝胶的制备:将0.05、0.1、0.15 g

的 KGM (淀粉质量的 0.5%、1%、1.5%) 分别溶于 200 mL 水中混合均匀, 再与 10 g 玉米淀粉混合, 用玻璃棒轻轻搅拌至玉米淀粉无沉底, 放入 85 °C 的恒温磁力搅拌器中搅拌 30 min, 冷却至室温得到淀粉 / KGM 复合凝胶, 分别记为 S+KGM0.5 组、S+KGM1.0 组和 S+KGM1.5 组。

冻融循环: 冷却后的凝胶放入 -18 °C 的冷藏室中, 冷冻 22 h, 再于室温下解冻 2 h, 至冰晶完全融化, 即为一次冻融循环<sup>[10]</sup>, 共进行 3 次冻融循环。另以未冻融 S 组作为对照。

### 1.2.2 黏度的测定

参考胡春雷等<sup>[11]</sup>的方法并稍作修改。将凝胶样品装入烧杯中, 放入 25 °C 水中平衡温度 1 h 后, 用旋转黏度仪测定试样黏度, 选取 4 号转子, 使样品完全浸没转子, 转速设定为 6 r·min<sup>-1</sup>。

### 1.2.3 析水率的测定

根据 Mei 等<sup>[10]</sup>的方法并稍作修改。先称取离心管的质量  $m_2$ , 将制备好的淀粉 / KGM 凝胶装入离心管中, 分别进行 0、1、2、3 次冻融循环。每次循环完成后, 称量离心管与凝胶的总质量  $m_1$ , 然后将样品于 5 000 r·min<sup>-1</sup> 离心 15 min, 倒掉析出的水分, 称量离心管与管内剩余凝胶的总质量  $m_3$ , 得到每次冻融循环后凝胶的析水率为:

$$\phi = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$\phi$ ——析水率, %;

$m_1$ ——样品与离心管的总质量, g;

$m_2$ ——离心管质量, g;

$m_3$ ——离心后倒掉析出水分剩余样品与离心管的总质量, g。

### 1.2.4 水分分布的测定

根据 Fu 等<sup>[12]</sup>的方法测定, 使用 LF-NMR 测定样品中的水分分布并进行核磁共振成像, 并稍作修改。将凝胶样品用保鲜膜包裹, 置于核磁管中。设定弛豫衰减时间 9 000 ms, 累加次数 4, 回波时间 0.5 ms。每个样品重复测定 3 次以上。未冻融 S 组流动性强, 无法用保鲜膜包裹, 未测定。

### 1.2.5 微观结构的测定

参考吕春月<sup>[13]</sup>的方法并稍作修改。将冻融后的凝胶经真空冷冻干燥后, 在放大倍数为 200 倍的 SEM 下, 取中心截面离子溅射喷金, 观察截面超微结构。

### 1.2.6 质构特性的测定

参考贾春利等<sup>[14]</sup>的方法并稍作修改。将经过 3 次

冻融循环的样品解冻完全后在室温下平衡 1 h, 使凝胶温度与室温接近, 测定样品的硬度和弹性。未冻融 S 组流动性强, 无法保持固定形状, 未测定。

### 1.2.7 短程有序结构的测定

参考常晓红<sup>[15]</sup>的方法, 使用 FT-IR 测定样品的短程有序结构。将样品冻干粉碎后, 称取 2 mg, 与 0.2 g 溴化钾充分研磨压片, 扫描范围为 4 000~500 cm<sup>-1</sup>, 分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>, 扫描次数为 32 次。

### 1.2.8 结晶结构的测定

参考梁锡宏<sup>[16]</sup>的方法, 使用 XRD 测定凝胶的结晶结构。将样品冻干粉碎后, 利用 CuK $\alpha$  射线进行扫描, 范围为 10~80°, 扫描速率为 10°·min<sup>-1</sup>。

## 1.3 数据统计与分析

对所有数据进行三次重复测定。运用 SPSS 软件进行显著差异分析 (Duncan), 显著差异水平取  $P < 0.05$ 。采用 Origin 2021 软件对所得数据进行绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 KGM对玉米淀粉凝胶黏度的影响

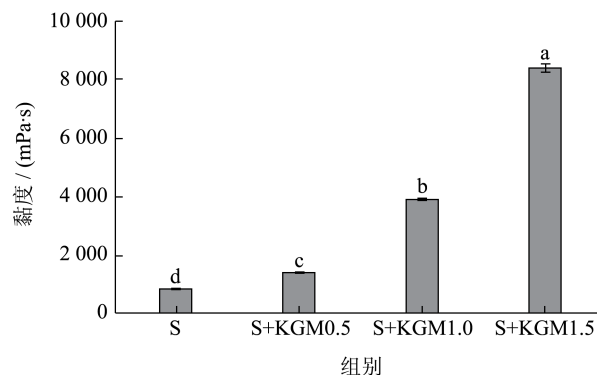


图 1 KGM 对玉米淀粉凝胶黏度的影响

Fig.1 Effect of KGM on gel viscosity of corn starch

注: 字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由图 1 可知, 玉米淀粉凝胶的黏度随着 KGM 添加量的增加而显著升高 ( $P < 0.05$ )。其中, S+KGM1.5 组的黏度达到 8 379 mP·s, 显著高于其他各组 ( $P < 0.05$ )。分析其原因可能是当 KGM 与淀粉混合形成凝胶时, KGM 与淀粉通过分子间氢键结合, 这种相互作用改善了体系的网络结构状态, 从而优化了其黏度特性<sup>[17]</sup>。类似地, 据 Charoenrein 等<sup>[18]</sup>报道, 添加 KGM 的淀粉凝胶黏度高于单纯淀粉, KGM 阻碍了淀粉颗粒的结合。玉米淀粉凝胶黏度的提高, 有利于提升食品的凝胶强度, 使食物在加工、储藏时更加稳定, 不易发生变形或破裂。同时, 高黏度

的淀粉凝胶还能够有效地保持食品中的水分,防止食品在干燥或储存过程中失去水分,从而保持食品的口感和品质。

## 2.2 KGM对玉米淀粉凝胶析水率的影响

持水性反映淀粉在一定条件下保持水分的能力,持水性与分子中的羟基数量有关。淀粉凝胶的析水率越低,说明持水力越强。从图2可知,未冻融时,三种S+KGM凝胶的析水率均显著低于纯玉米淀粉凝胶( $P<0.05$ ),且随着KGM质量浓度的增加,析水率逐渐降低。0.5%、1%和1.5% KGM分别令淀粉凝胶的析水率降低了9.19%、14.88%和15.01%。说明KGM可以提升玉米淀粉凝胶的持水力,且提升效果与质量浓度正相关。纯淀粉、S+KGM0.5和S+KGM1.0凝胶在经过一次冻融循环后析水率下降,这可能是由于凝胶冻融后的海绵状结构容易将析出的液体重新吸收<sup>[19]</sup>。随着冻融循环次数的增加,四组凝胶样品的析水率均逐渐增大,这说明凝胶的冻融稳定性在反复冻融后被削弱。据Guo等<sup>[20]</sup>报道,冻融过程形成的冰晶会破坏原本的凝胶结构,凝胶内部的空隙变大,羟基和水结合的概率降低,使得凝胶的析水率升高,持水性下降。冻融3次后,S+KGM1.0和S+KGM1.5凝胶析水率显著低于其他两组样品,持水力最好。由于KGM具有较强的吸水性和保水能力,它可以通过分子链的强亲水性在连续相中结合大量的水分子,减少淀粉-KGM共混物中的水分损失<sup>[21]</sup>,进而降低S+KGM的析水率,提高其冻融稳定性。

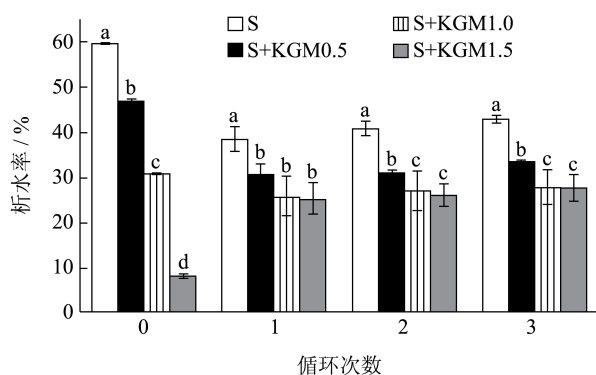


图2 KGM对冻融循环玉米淀粉凝胶析水率的影响

Fig.2 Effect of KGM on the syneresis rates of corn starch gel in freeze-thaw cycle

注:同一冻融循环下,字母不同表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 KGM对玉米淀粉凝胶水分分布的影响

如图3所示,冻融3次后,几种凝胶的 $T_2$ 图谱中可以观察到3~4个峰。其中, $T_{21}$ 和 $T_{22}$ ( $T_{2b}$ )峰代表与大分子紧密结合的结合水, $T_{23}$ 峰是截留在凝胶网络

结构中难以流动的水,也称为截留水, $T_{24}$ 峰是高流动性的自由水<sup>[22]</sup>。一般在水凝胶体系中,大部分水是凝胶网络中的截留水<sup>[23]</sup>,即在这种淀粉凝胶体系中,非可动水( $T_{23}$ 峰)的相对含量最大。

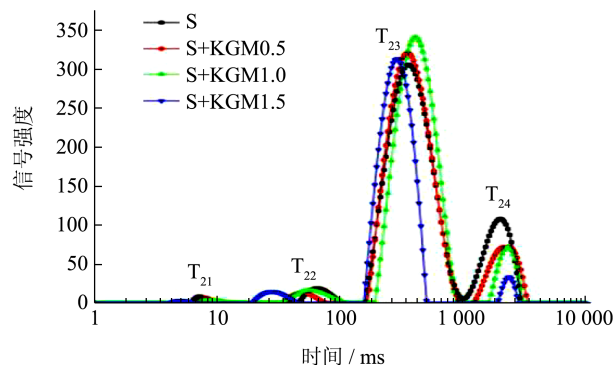


图3 3次冻融循环后不同凝胶的 $T_2$ 弛豫时间分布

Fig.3  $T_2$  relaxation time distribution of different gels after three freeze-thaw cycles

如图4所示,随着KGM质量浓度的增加,凝胶中不易流动水比例( $A_{23}$ )相对于玉米淀粉凝胶呈上升趋势,S、S+KGM0.5、S+KGM1.0和S+KGM1.5四组的 $A_{23}$ 比例分别为80.09%、84.93%、87.74%和93.05%;自由水比例( $A_{24}$ )呈下降趋势,S、S+KGM0.5、S+KGM1.0和S+KGM1.5四组的 $A_{24}$ 比例分别为15.81%、12.78%、8.34%和3.35%。以上结果说明S+KGM凝胶网络结构对各种水分的束缚能力增强,即凝胶网络与水结合的能力增强,更多的自由水转变为不易流动水。KGM提高了淀粉凝胶的持水能力,特别是含有1.5% KGM的淀粉凝胶的持水能力。类似地,刘金金等<sup>[24]</sup>研究发现KGM质量浓度的增加会促进蛋清蛋白链的展开,增加凝胶强度和持水性,LF-NMR分析显示复合凝胶中存在结合水和不易流动水,且KGM质量浓度增加提高了不易流动水的比例,但对结合水影响不大。

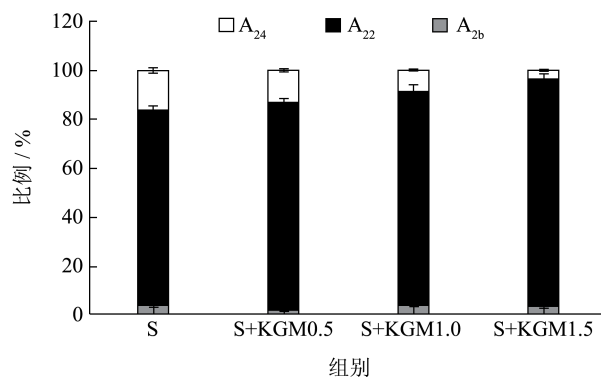


图4 3次冻融循环后不同凝胶的水分分布比例

Fig.4 Water distribution ratio of different gels after three freeze-thaw cycles

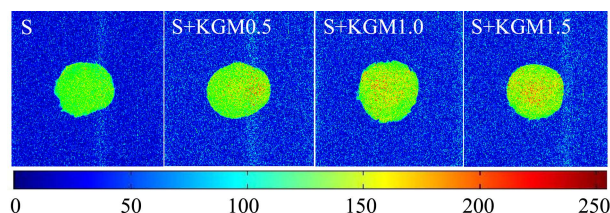


图 5 3 次冻融循环后不同凝胶的水分分布变化

Fig.5 Changes of water distribution of different gels after three freeze-thaw cycles

图 5 为磁共振成像获得的不同凝胶含水量的质子加权图像,较深的红色表示与水含量相关的氢质子密度较高。KGM 的加入会提高淀粉凝胶的水分含量,这可以从磁共振成像中密集红色区域得到证实。相比之下,纯淀粉凝胶内部红色区域较少。随着 KGM 含量从 0.5% 增加到 1.5%,红点的数量逐渐增多,说明持水力逐渐增强。这一结果与上述的水分析出率结果基本吻合,表明在淀粉凝胶体系中,冻融循环导致水分子不断析出,而 KGM 的添加则使更多的水分被有效地截留。Shang 等<sup>[25]</sup>报道,随机分散的聚合物链,如淀粉与 KGM 之间的交联反应可以形成三维网络结构,并且这种连接会随着多糖浓度的增加而加强。

## 2.4 KGM对玉米淀粉凝胶微观结构的影响

在冻融过程中,淀粉凝胶体系中形成淀粉富集区,富集区的密度越大越有助于淀粉分子链的缔合,从而形成厚丝结构,以单独相存在,在融化时,冰晶转化成液态水,容易从聚合的网络结构中溢出,这个过程被称为脱水收缩作用<sup>[26]</sup>。由图 6 观察,玉米淀粉凝胶呈现网络状结构,未冻融样品的孔洞尺寸较大但分布稀疏,经过 3 次冻融后,网络结构中出现更多密集分布的孔洞,孔隙率增加。随着 KGM 的添加,凝胶结构更致密,孔洞数量减少,且孔径变小,说明由冰晶转化的液态水的溢出减少,脱水收缩作用减轻,反映出 S+KGM 凝胶良好的持水力。其中, S+KGM1.0 和 S+KGM1.5 的网络结构不明显,连续性和完整性更好。这可能是由于添加了 KGM,从而减小了冰晶对淀粉凝胶的破坏作用,使得淀粉的主体呈现结构的完整性和连续性。Montes 等<sup>[27]</sup>也观察到类似的微观结构,将多糖掺入淀粉凝胶中,由于轻微的相分离和异质聚合物之间的相互作用,可以促进各向异性微观结构的形成。此外,由于 KGM 分子与淀粉之间的强交联,可以形成具有较小空隙的致密结构<sup>[28]</sup>。

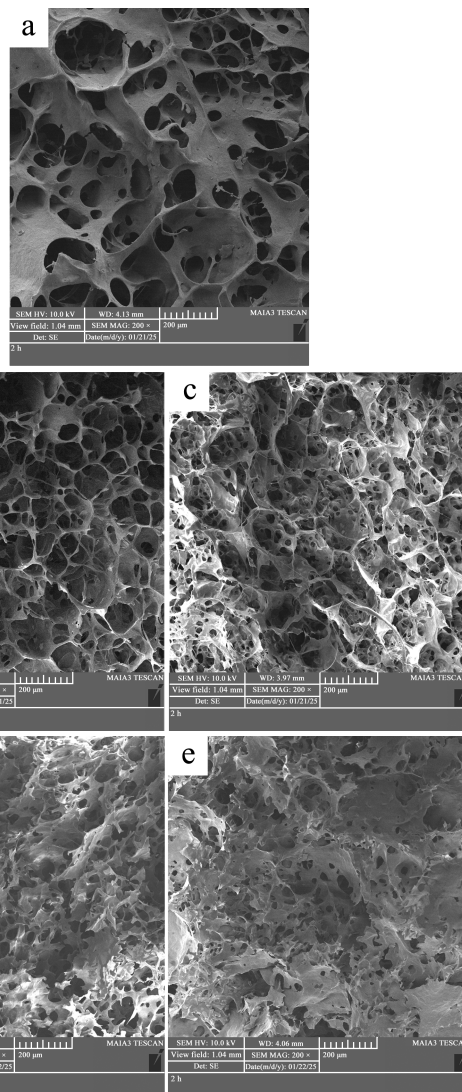


图 6 3 次冻融循环后不同凝胶的超微结构变化

Fig.6 Ultrastructural changes of different gels after three freeze-thaw cycles

注: a 为未冻融 S; b 为 S; c 为 S+KGM0.5; d 为 S+KGM1.0; e 为 S+KGM1.5。

## 2.5 KGM对凝胶中玉米淀粉短程有序结构的影响

淀粉晶体结构的变化与短程有序分子结构(双螺旋和单螺旋结构)密切相关。添加或不添加 KGM 的淀粉凝胶在三次冻融循环后的 FT-IR 光谱如图 7a 所示。在 4 000~500  $\text{cm}^{-1}$  范围内,所有样品的红外图谱吸收峰位置及形状大致相同,没有新的吸收峰出现或特征峰消失,也没有产生新的基团。所有淀粉凝胶在 3 500~3 200  $\text{cm}^{-1}$  范围内都有一个宽而强的特征峰,与拉伸振动和氢键的形成相对应<sup>[29]</sup>。淀粉凝胶在 1 200~800  $\text{cm}^{-1}$  区域内,吸收峰在 1 048  $\text{cm}^{-1}$  和 1 022  $\text{cm}^{-1}$

附近, 分别代表淀粉的有序结构和无序结构。在淀粉结构中, 用  $1\,048\text{ cm}^{-1}/1\,022\text{ cm}^{-1}$  峰强度比值反映淀粉的有序程度, 峰强度比值越大, 有序度越高<sup>[30]</sup>。如图 7b 所示, 经三次冻融后, 凝胶中淀粉的  $R_{1048/1022}$  值由 0.97 (未冻融 S 组) 升高至 1.12 (S 组), 有序度增加。而 S+KGM0.5、S+KGM1.0 和 S+KGM1.5 三组的  $R_{1048/1022}$  值分别为 1.044、1.038 和 1.032, 显著低于 S 组 ( $P<0.05$ ), 说明 KGM 在冷冻和解冻过程中可以明显抑制凝胶中淀粉有序结构的形成。

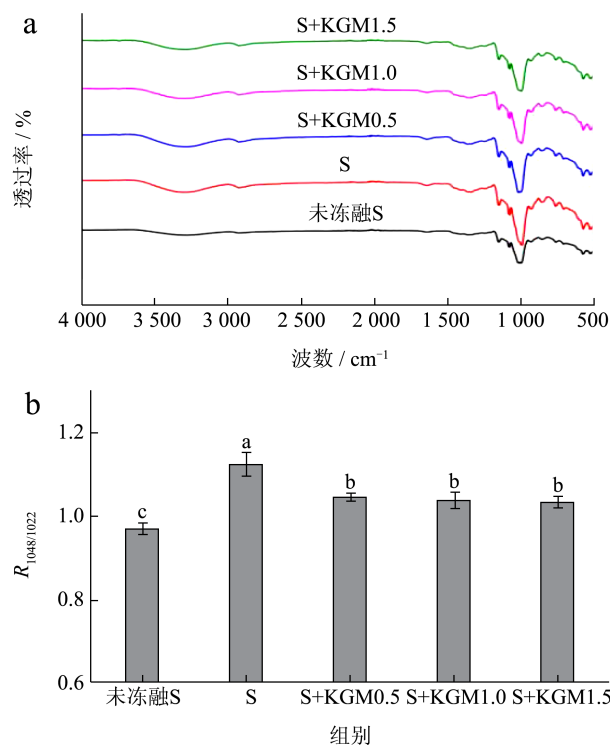


图 7 3 次冻融循环后不同凝胶的傅里叶变换红外光谱图

外光谱图和  $R_{1048/1022}$  值Fig.7 FT-IR spectra of different gels after three freeze-thaw cycles and  $R_{1048/1022}$  values注: 字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

## 2.6 KGM对凝胶中玉米淀粉结晶结构的影响

采用 XRD 对不同淀粉凝胶的晶型和结晶度进行了测定。如图 8 所示, 所有凝胶样品的衍射峰都在  $17^\circ$  和  $20^\circ$  附近, 说明 KGM 的加入没有改变玉米淀粉的晶型。淀粉凝胶在冷冻过程中, 凝胶内部的淀粉形成富集区, 双螺旋结构更加紧密, 会造成相对结晶度增加, 而相对结晶度的升高可反映淀粉回生程度的增加<sup>[31]</sup>。冻融三次后, 凝胶中淀粉的相对结晶度由 7.39% 升高至 11.78%, 而 S+KGM0.5、S+KGM1.0 和 S+KGM1.5 凝胶中淀粉的结晶度分别降至 9.08%、8.98% 和 8.32%。以上结果说明, KGM 的加入抑制了淀粉链的重结晶, 延缓了淀粉的回生。

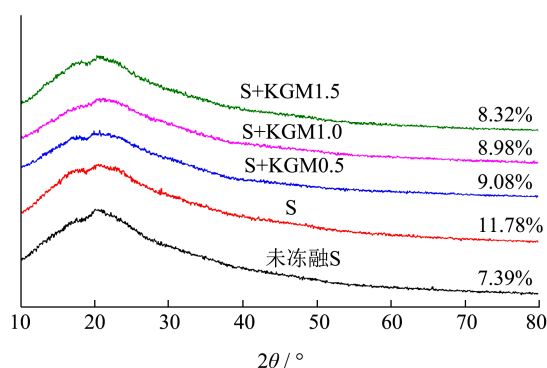


图 8 3 次冻融循环后不同凝胶的 XRD 谱图

Fig.8 XRD spectra of different gels after three freeze-thaw cycles

## 2.7 KGM对玉米淀粉凝胶质构特性的影响

据报道, 淀粉凝胶经过冻融处理后凝胶硬度和弹性会增加<sup>[32]</sup>, 这与淀粉的回生有关, 冻融使凝胶结构更稳定, 呈现“类固体”<sup>[33,34]</sup>状态。由图 9 可知, 经过三次冻融循环后, 随着 KGM 质量浓度的升高, 复合凝胶的硬度和弹性均呈显著下降趋势 ( $P<0.05$ ), 原因可能是在冷冻-解冻过程中, KGM 阻碍了直链淀粉分子间的聚集与重排, 抑制了结晶的形成, 削弱了凝胶的支撑强度, 造成 S+KGM 复合凝胶的硬度和弹性值低于单纯玉米淀粉凝胶, 改善了淀粉凝胶的质构特性。在代蕾等<sup>[35]</sup>的研究中, 发现 KGM 可以阻止直链淀粉分子重排, 削弱分子间作用力, 使其变为柔软凝胶。研究发现, 1.5% KGM 的改善效果最佳, S+KGM1.5 样品的硬度和弹性值分别降低了 60.56% 和 69.03%。

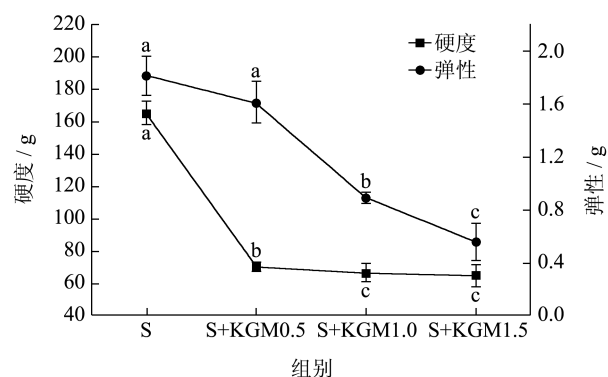


图 9 3 次冻融循环后不同凝胶的硬度和弹性变化

Fig.9 Changes of hardness and resilience of different gels after three freeze-thaw cycles

## 3 结论

研究结果表明, KGM 与玉米淀粉分子的相互作用显著提高了玉米淀粉凝胶的冻融稳定性。KGM 添加使淀粉凝胶在 3 次冻融循环后的析水率降低 9.19%~15.01%, 其中 1.5% KGM 处理组的持水能力提

升最显著,这与KGM亲水基团竞争性结合自由水分子、抑制冰晶生长密切相关。SEM与LF-NMR分析表明,KGM通过形成更致密的凝胶网络结构、降低自由水比例,形成致密的水分束缚体系,有效限制水分迁移。XRD与FT-IR光谱数据显示,1.5%KGM使凝胶中淀粉结晶度降低29.4%, $R_{1048/1022}$ 值下降8.2%,证实其通过空间位阻效应抑制淀粉链重排及短程有序结构形成,延缓回生进程。该研究为冷冻淀粉类食品的品质改良提供了理论依据,表明KGM作为天然多糖可通过水分布与结构稳定性的协同调控提升产品冻融耐受性。未来研究可进一步探索不同淀粉类型(如直链/支链比例差异)与KGM浓度梯度的适配规律,以优化复合体系的抗冻性能。

### 参考文献

- [1] 余世锋,郑喜群.玉米淀粉凝胶冻融特性影响因素及其变化机制研究进展[J].食品科技,2013,38(10):184-189.
- [2] 季佳佳.三偏磷酸钠交联玉米淀粉的理化性质研究[D].天津:天津科技大学,2010.
- [3] 张雅媛.玉米淀粉与亲水性胶体协效性和作用机理的研究[D].无锡:江南大学,2012.
- [4] 邱诗波,邓鹏鹏,钱虹,等.魔芋葡甘聚糖凝胶的研究进展[J].武汉工程大学学报,2022,44(4):355-362.
- [5] 苏晗,涂金金,陈竟豪,等.淀粉冻融特性及其品质影响因素研究现状[J].包装工程,2019,40(13):31-40.
- [6] SHANG L C, WU C L, WANG S S, et al. The influence of amylose and amylopectin on water retention capacity and texture properties of frozen-thawed konjac glucomannan gel [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106521.
- [7] 齐慧,易春兰,白菊红,等.不同淀粉对魔芋葡聚糖凝胶特性的影响及复合凝胶的制备[J].天然产物研究与开发,2024,36(12): 2074-2087.
- [8] 童慧琳,谢勇,覃小丽,等.脱乙酰魔芋葡甘聚糖对玉米淀粉糊化及凝胶特性的影响[J].中国粮油学报,2023,10:97-103.
- [9] 孙莹.魔芋葡甘聚糖对三种晶型淀粉物理化学性质的影响[D].合肥:安徽农业大学,2020.
- [10] MEI J Y, HUANG T, BAI C H, et al. Influences of chitosan on freeze-thaw stability of *Arenga pinnata* starch [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(2): 692-699.
- [11] 胡春雷,常亮,伊丽娟,等.淀粉粘度测定之布氏法与旋转粘度计法比较[J].中国食品工业,2024,15:104-106.
- [12] FU Y, ZHOU J, LIU D, et al. Effect of Mulberry leaf polysaccharides on the physicochemical, rheological, microstructure properties and *in vitro* starch digestibility of wheat starch during the freeze-thaw cycles [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109057.
- [13] 吕春月.马铃薯淀粉复合凝胶制备及其性能研究[D].沈阳:沈阳师范大学,2022.
- [14] 贾春利,黄卫宁,邹奇波,等.热稳定冰结构蛋白对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J].食品科学,2012,33(7):83-87.
- [15] 常晓红.聚葡萄糖对大米淀粉糊化和老化特性的影响[D].郑州:河南农业大学,2018.
- [16] 梁锡宏,钟建江.添加CaCl<sub>2</sub>对细菌纤维素/热塑性淀粉复合膜性能的影响[J].材料科学与工程学报,2025,43(1):1-8.
- [17] PENG L, GUO J Y, FAN J W, et al. Combined effect of Konjac glucomannan addition and ultrasound treatment on the physical and physicochemical properties of frozen dough [J]. Food Chemistry, 2023, 411: 135516.
- [18] CHAROENREIN S, TATIRAT O, RENGSUTTH K, et al. Effect of Konjac glucomannan on syneresis, textural properties and the microstructure of frozen rice starch gels [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(1): 291-296.
- [19] 王冠青,刘国栋,洪雁,等.氯化钠对玉米淀粉冻融稳定性的影响[J].食品与生物技术学报,2015,34(7):713-716.
- [20] GUO J, WANG C, LIU C, et al. Effect of Konjac glucomannan on gelatinization, retrogradation, and gelling properties of frozen wheat starch [J]. Starch-Stärke, 2021, 73: 2000025.
- [21] MA S, ZHU P, WANG M, et al. Effect of Konjac glucomannan with different molecular weights on physicochemical properties of corn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 663-670.
- [22] HU X Y, WU P, ZHANG S P, et al. Moisture conversion and migration in single-wheat kernel during isothermal drying process by LF-NMR [J]. Drying Technology, 2019, 37(7): 803-812.
- [23] PAI K, BANTHIA A K, MAJUMDAR D K. Effect of heat treatment of starch on the properties of the Starch Hydrogels [J]. Materials Letters, 2008, 67: 215-218.
- [24] 刘金金.蛋清蛋白/魔芋胶复合体系功能特性及相行为研究[D].武汉:华中农业大学,2025.
- [25] SHANG L, WU C, WANG S, et al. The influence of amylose and amylopectin on water retention capacity and texture properties of frozen-thawed Konjac glucomannan gel [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106521.
- [26] 高金梅,黄倩,郭洪梅,等.冻融循环处理对玉米淀粉凝胶结构及颗粒理化特性的影响[J].现代食品科技,2017,33(2):181-189.
- [27] MONTES L, SANTAMARIA M, GARZON R, et al. Effect of the addition of different sodium alginates on viscoelastic, structural features and hydrolysis kinetics of corn starch gels [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101628.
- [28] LI Z, ZHANG L, MAO C, et al. Preparation and characterization of Konjac glucomannan and gum arabic composite gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 183: 2121-2130.
- [29] JIA Z, LUO Y, BAIBA F J, et al. Effect of  $\beta$ -cyclodextrins on the physical properties and anti-staling mechanisms of corn starch gels during storage [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 284: 119187.
- [30] ZHANG Y, CHEN C, CHEN Y, et al. Effect of rice protein on the water mobility, water migration and microstructure of rice starch during retrogradation [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 136-142.
- [31] KUANG J, HUANG J, MA W, et al. Influence of reconstituted gluten fractions on the short-term and long-term retrogradation of wheat starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 130: 107716.
- [32] 李欣蕊,郑明珠,姜梧桐,等.冻融循环次数对淀粉结构及理化性质影响的研究进展[J].食品研究与开发,2024,45(7):181-187.
- [33] 吴岑琳.冷冻魔芋葡甘聚糖基复合凝胶保水性和质构特性的调控研究[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [34] ZHANG C, LIN S T. Physical modification of various starches by partial gelatinization and freeze-thawing with xanthan gum [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106210.
- [35] 代蕾,姬娜,熊柳,等.魔芋胶对小麦淀粉理化性质影响研究[J].粮食与油脂,2013,26(7):32-34.