

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240226

网络首发日期: 2025-04-30; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20250430.1115.001>

低聚果糖添加量对板栗淀粉回生抑制作用与消化性能的影响

鲍世迪, 李志航, 王田心, 王浩

(天津科技大学食品科学与工程学院, 食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457)

摘要: 为了替代板栗加工过程中使用高热量蔗糖作为甜味剂, 进一步抑制板栗淀粉的回生, 本研究通过比较黏度、糊化焓值、抗性淀粉含量、硬度、水分分布、短程有序性等, 系统研究不同添加量(10%~50%)低聚果糖对板栗淀粉糊化、消化及回生性质的影响, 并与加工常用的蔗糖进行对比。结果表明: 加入低聚果糖后, 糊化温度显著升高, 黏度显著降低($P<0.05$), 并且随着添加量的增加, 板栗淀粉的溶胀力、回生值和糊化焓值逐渐降低, 与板栗原淀粉相比, 分别降低了 21.4%、38.8% 和 26.1%。同时, 低聚果糖能够显著提高慢消化淀粉和抗性淀粉的含量($P<0.05$)。在 4℃ 储存期间, 添加量为 50% 的低聚果糖使板栗淀粉的硬度、咀嚼性、 $R_{1055/1021}$ 降低了 16.0%、23.2% 和 37.1%, 提高了板栗淀粉的透明度和持水能力, 降低了储能模量。当添加量相同时, 低聚果糖比蔗糖更能抑制淀粉的回生。本研究为利用低聚果糖改善产品品质、减缓淀粉回生、开发新型低热量板栗产品提供了数据支持。

关键词: 板栗淀粉; 低聚果糖; 糊化; 消化; 回生

中图分类号: TS235.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2026)04-0025-10

Effects of Oligofructose Addition on the Retrogradation Inhibition and Digestive Properties of Chestnut Starch

BAO Shidi, LI Zhihang, WANG Tianxin, WANG Hao

(College of Food Science and Engineering, State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: To replace the high-calorie sucrose employed as a sweetener in the processing of chestnuts and further inhibit the retrogradation of chestnut starch, the effects of different addition amounts (10%-50%) of oligofructose on the gelatinization, digestion and retrogradation properties of chestnut starch were investigated systematically by viscosity, gelatinization enthalpy value, resistant starch content, hardness, water distribution, short-range order, etc., compared with the commonly used sucrose in processing. The results showed that after the addition of oligofructose the gelatinization temperature was significantly increased and the viscosity was significantly decreased ($P<0.05$). Moreover, as the addition amounts increased, the swelling power, retrogradation value and gelatinization enthalpy value of chestnut starch gradually decreased by 21.4%, 38.8% and 26.1%, respectively, compared with the original chestnut starch. Meanwhile, oligofructose could significantly increase the contents of slowly digestible starch and resistant starch ($P<0.05$). During the storage at 4℃, the addition of 50% oligofructose reduced the hardness, chewiness and $R_{1055/1021}$ value of chestnut starch by 16.0%, 23.2% and 37.1%, respectively, while enhancing the transparency and water-holding capacity, and decreasing the storage modulus. And oligofructose is more able to inhibit starch retrogradation than sucrose with the equal amount added. This study provides data support for using oligofructose to improve product quality, postpone starch retrogradation and develop new low-calorie chestnut products.

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2025-01-14

基金项目: 食品营养与安全教育部重点实验室及天津市食品营养与安全重点实验室(天津科技大学)开放课题资助项目(2018015)

作者简介: 鲍世迪(2001—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生; 通信作者: 王田心, 讲师, wtxwang@tust.edu.cn

Key words: chestnut starch; oligofructose; gelatinization; digestion; retrogradation

引文格式:

鲍世迪,李志航,王田心,等.低聚果糖添加量对板栗淀粉回生抑制作用与消化性能的影响[J].天津科技大学学报,2026,41(4):25-34.

Bao Shidi, Li Zhihang, Wang Tianxin, et al. Effects of oligofructose addition on the retrogradation inhibition and digestive properties of chestnut starch[J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2026, 41(4): 25-34.

板栗是我国重要的粮食作物之一,经济价值和营养价值极高,具有多种保健功能^[1],主要成分为淀粉,其结构和功能直接影响板栗产品的品质^[2]。板栗淀粉颗粒大多数呈椭圆形,表面光滑无锯齿和凹痕,淀粉颗粒具有明显的偏光十字,直链淀粉含量在10%~30%之间,颗粒晶体结构属于C型,糊化温度范围为55.5~63.5℃^[3]。近年来,研究人员采用物理、化学、生物等改性方法对淀粉进行改性处理,解决淀粉由于容易发生回生而引起产品的质量和口感变差的问题,提高了淀粉的利用价值^[4]。小分子糖和亲水胶体因其极高的持水性可以影响淀粉的流变、质构等性能,并且具有绿色高效、安全环保的特点^[5]。刘微等^[6]在大米淀粉中添加海藻糖,降低了短程有序性和回生程度,抑制了水分的迁移。王建宇等^[7]在小麦淀粉中添加大豆低聚糖,降低了小麦淀粉的结晶度,延缓了淀粉回生。

市场上的板栗产品如糖炒栗子、板栗罐头、板栗饼干等均使用蔗糖作为甜味剂,不仅可以改变产品的色泽,还能够提高产品的质量,但其热量较高,易导致肥胖。低聚果糖是一种聚合度为2~9的非还原性糖,是蔗糖分子以 β -(1 $\rightarrow$ 2)糖苷键与1~3个果糖分子结合形成的蔗果三糖、蔗果四糖和蔗果五糖及其混合物,甜度约为蔗糖的30%~60%,热量约为蔗糖的30%。与蔗糖相比,低聚果糖具有低热量、防龋齿、对血糖影响小、促进矿物质吸收等优点^[8]。多项研究发现,添加低聚果糖可以延缓淀粉老化,防止食品变硬,延长产品货架期。李洁等^[9]发现在冷鲜米饭中添加低聚果糖后,其中的羟基与水和淀粉之间形成氢键,抑制了淀粉分子复合物的聚集,不仅可以降低米饭储存过程中的硬度,抑制米饭的回生,还能减少米饭中水分的流失,提高冷鲜米饭的持水能力。Sudha等^[10]研究发现在制备面包时,添加低聚果糖能够有效降低淀粉的结晶度,提高面包的保水性,可以将低聚果糖作为一种良好的保湿剂。然而,低聚果糖改善板栗淀粉糊化和消化性质以及抑制其回生作用规律的研究尚不充分。

本研究以板栗为材料,采用碱法提取板栗淀粉

后,通过比较黏度、糊化焓值、抗性淀粉含量、硬度、水分分布、短程有序性等,研究不同添加量(10%~50%)的低聚果糖对板栗淀粉糊化、消化与回生性质影响的规律;与加工中最常用的蔗糖作对比,研究其对产品品质、食品货架期的影响,以为低聚果糖应用在新型板栗产品与板栗淀粉改性中提供数据支持,进一步扩展低聚果糖在易回生板栗及其他淀粉基食品的应用范围。

1 材料与方法

1.1 材料

板栗,购自河北唐山迁西,品种为燕山早丰;葡萄糖、蔗糖,天津市风船化学试剂科技有限公司;低聚果糖、乙酸、溴化钾、乙酸钠,天津鼎国生物技术有限公司;氢氧化钠,天津市津东天正精细化学试剂厂;3,5-二硝基水杨酸(DNS)试剂、猪胰 α -淀粉酶(9 U/mg)、糖化酶(100 U/mg),上海源叶生物科技有限公司;其他试剂均为分析纯试剂。

HH-4J型磁力搅拌恒温水浴锅,常州市金坛区宝塔新宝仪器厂;TDZ5-Ws型台式离心机,Thermo Fisher公司;DH-101-2s型电热恒温鼓风干燥箱,天津市中环实验有限公司;UVmini-1240型紫外-可见分光光度计,日本岛津公司;FD-1-50型真空冷冻干燥机,北京博医实验仪器有限公司;PHS-3C型pH计,上海浦春计量仪器有限公司;Kulturstr 51-55型黏度仪,德国Brabender公司;DSC 3500 Sirius型差示扫描量热仪,德国耐驰公司;Rotational Rheometer MARS 60型动态流变仪,德国哈克公司;MicroMR-25型低场核磁共振仪,上海纽迈电子科技有限公司;TA-XT Plus型质构仪,英国Stable Micro Systems公司;IS50型傅里叶变换红外光谱仪,美国尼高力公司。

1.2 实验方法

1.2.1 板栗淀粉的提取

采用碱法^[11]提取板栗淀粉。新鲜板栗进行脱壳、去涩皮处理,反复清洗后按料液比1:2的比例加水磨浆120 s后,先用4层纱布过滤,然后用200目筛

网过滤,滤液在 4℃ 沉降 12 h,弃上清液。在沉淀物中加入 4 倍体积质量分数为 0.15% 的 NaOH 溶液,混合均匀,4℃ 沉降 12 h 后倒去碱液,加入蒸馏水反复清洗,直至上清液为中性。将沉淀物置于 30℃ 鼓风干燥箱中干燥至含水量低于 10%,得到板栗原淀粉。

1.2.2 复配体系的制备

将低聚果糖(淀粉干质量 10%、30%、50%)、蔗糖(淀粉干质量 30%)各自单独添加到板栗淀粉中,加入去离子水,配制成质量分数 6% 的复配体系母液,并进一步稀释成质量分数 1% 和 2% 的复配体系,30℃ 孵育 90 min,待用。板栗原淀粉溶液命名为 CS,板栗原淀粉与 30% 蔗糖复配体系命名为 CS-30% Suc,板栗原淀粉与低聚果糖复配体系分别命名为 CS-10% Fos、CS-30% Fos、CS-50% Fos。

1.2.3 板栗淀粉回生样品的制备

将 1.2.2 节制备的 6% 板栗淀粉复配体系于 95℃ 糊化 30 min 后,用冰水浴快速冷却至室温,4℃ 储存 1、7、14 d 后得到板栗淀粉回生样品。

1.2.4 糖-板栗淀粉复配体系糊化特性的测定

溶胀力的测定:参照 Waterschoot 等^[12]的方法并进行适当修改。将 1.2.2 节制备的 2% 板栗淀粉复配体系置于离心管中,95℃ 糊化 30 min,隔 2 min 取出振荡,快速冷却后 8 000 r/min 离心 15 min,上清液在 105℃ 烘箱中烘至质量恒定。称取沉淀部分质量,按照式(1)计算溶胀力。以 CS 作为空白,CS-30% Suc 作为对照。

$$S = \frac{m_2}{m - m_1} \quad (1)$$

式中: S 为溶胀力,%; m 为淀粉的质量, g; m_1 为上清液干燥后所得干物质的质量, g; m_2 为沉淀物的质量, g。

糊化性质的测定:使用黏度仪对板栗淀粉的糊化性质进行测定。将 1.2.2 节制备的 6% 板栗淀粉复配体系放入样品容器中搅拌均匀,设置升温程序:初始温度设置为 30℃,以 1.5℃/min 的速率升温到 95℃,保持 30 min,以同样的速率降温至 50℃后继续恒温 30 min。

热力学性质的测定:将 1.2.2 节制备的 6% 板栗淀粉复配体系混合均匀,移取 8 mg 样品置于 DSC 坩埚中,密封压盖,4℃ 水合 12 h,用差示扫描量热仪进行升温测定,以空坩埚为对照。设置程序:升温范围为 20 ~ 120℃,升温速率为 10℃/min,氮气流量为

50 mL/min。

1.2.5 体外消化特性的测定

标准曲线的绘制:精确称取烘干至质量恒定的葡萄糖 100 mg,用蒸馏水溶解并定容至 100 mL,得到 1 mg/mL 葡萄糖标准溶液。准确移取 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mL 葡萄糖标准溶液,用 DNS 比色法测定还原糖含量,绘制标准曲线,得到回归方程 $y = 0.3376x + 0.0351$, $R^2 = 0.9990$ 。

板栗淀粉的体外消化特性的测定参考 Englyst 等^[13]的方法并略作修改。配制 200 U/mL 猪胰 α -淀粉酶溶液和 50 U/mL 糖化酶溶液,4℃ 冷藏待用。取 1.2.2 节制备的 6% 板栗淀粉复配体系 2 mL,加入醋酸钠缓冲溶液(0.2 mol/L, pH 5.2)并定容至 5 mL;再加入 3 ~ 4 颗用醋酸钠缓冲溶液洗涤过的玻璃珠并振荡,95℃ 充分糊化 30 min,冷却至 37℃,加入 20 mL 混合酶溶液(16 mL 猪胰 α -淀粉酶溶液和 4 mL 糖化酶溶液,提前将混合酶溶液置于 37℃ 恒温振荡器上保温),在 37℃ 恒温振荡器上充分反应 0、20、120 min 后收集 0.2 mL 消化液,立即加入 0.8 mL 无水乙醇,10 000 r/min 离心 5 min,取上清液。用 DNS 比色法计算葡萄糖的含量。快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)含量的计算公式如下。

$$w_{RDS} = \frac{(m_{20} - m_0) \times 0.9}{m_T} \times 100\% \quad (2)$$

$$w_{SDS} = \frac{(m_{120} - m_{20}) \times 0.9}{m_T} \times 100\% \quad (3)$$

$$w_{RS} = 1 - w_{RDS} - w_{SDS} \quad (4)$$

式中: w_{RDS} 表示快消化淀粉含量,%; w_{SDS} 表示慢消化淀粉含量,%; w_{RS} 表示抗性淀粉含量,%; m_{20} 和 m_{120} 分别表示 20 min 和 120 min 内释放的葡萄糖质量, mg; m_0 表示淀粉中游离葡萄糖质量, mg; 0.9 为葡萄糖换算为淀粉的系数; m_T 表示样品中总淀粉的质量, mg。

1.2.6 糖-板栗淀粉复配体系回生特性的测定

透明度的测定:将 1.2.2 节制备的 1% 板栗淀粉复配体系在 95℃ 水浴锅中彻底糊化,其间不停搅拌并加入蒸馏水,保证体积与糊化前的复配体系一致,室温下冷却后于 4℃ 储藏。分别于 0、1、3、7、14 d 测定 620 nm 波长处的透明度。

凝胶质构的测定:将 1.2.3 节制备的板栗淀粉回生样品(直径 20 mm,高 10 mm)使用质构仪进行全质构测定分析。测试参数为:探头 P/5,测试前速度 2.0 mm/s,测试中和测试后速度 1.0 mm/s,压缩比

50%, 触发力 5 g。

水分分布的测定: 将 1.2.3 节制备的板栗淀粉回生样品用低场核磁共振技术测定水分分布。将保鲜膜包裹的板栗淀粉回生样品(直径 20 mm, 高 10 mm)置于直径为 25 mm 的核磁共振管中, 采用 CPMG 序列进行测试。测试参数为: TW = 1 000 ms、TE = 0.1 ms、NECH = 18 000、NS = 8、TD = 225 028。

动态流变指标的测定: 将 1.2.3 节制备的板栗淀粉回生样品(直径 20 mm, 高 10 mm)转移到配备直径 25 mm(间隙 1 mm)平行板的旋转流变仪上进行动态频率扫描。参考秦志鹏等^[14]的方法并进行适当修改, 在线性黏弹性应变区域(1%应变)内, 频率设置为 0.1 ~ 10 Hz, 温度为 25 ℃, 记录弹性模量(G')和损耗模量(G'')随频率的变化。

短程有序性的测定: 使用傅里叶变换红外光谱仪, 对板栗淀粉回生样品进行结构分析, 将 1.2.3 节制备的板栗淀粉回生样品冷冻干燥。参照宋靖郑等^[15]的方法并进行适当修改, 取冷冻干燥的板栗淀粉回生样品 1 mg 和烘干至质量恒定的溴化钾 150 mg, 充分研磨后压片。测定参数: 扫描波数 400 ~ 4 000 cm^{-1} , 扫描次数 64 次, 分辨率 4 cm^{-1} , 纯溴化钾用于背景校正。

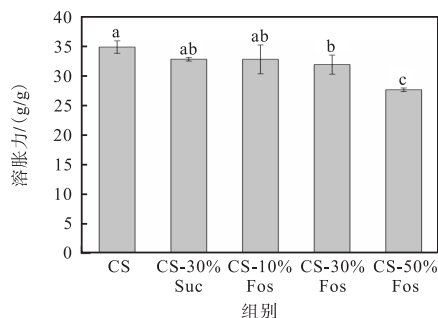
1.3 数据统计与分析

所有测定数据均重复 3 次, 结果用“平均值 ± 标准差”表示, 用 SPSS 27.0 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 复配体系溶胀力的分析

溶胀力表示淀粉颗粒在糊化过程中吸收水分而膨胀的过程^[16]。与蔗糖和低聚果糖复配处理后, 糖-板栗淀粉复配体系的溶胀力结果如图 1 所示。



注: 不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 糖-板栗淀粉复配体系的溶胀力

Fig. 1 Swelling power of sugar-chestnut starch composite system

对照组板栗原淀粉的溶胀力为 34.67 g/g, 随着低聚果糖添加量的增加, 溶胀力呈现逐渐下降的趋势, 在 50%添加量时达到最低, 为 27.25 g/g, 与板栗原淀粉相比, 降低了 21.4%。这说明低聚果糖抑制了板栗淀粉的溶胀。一方面, 这是由于低聚果糖含有多个羟基, 能够与板栗淀粉竞争水分, 使可用于淀粉溶胀的水分减少^[17]; 另一方面, 可能是低聚果糖吸附或者附着在板栗淀粉的表面, 在一定程度上也限制了板栗淀粉的溶胀。综合分析, 低聚果糖对板栗淀粉溶胀力的影响大于蔗糖, 其原因是在相同添加量下, 低聚果糖比蔗糖具有更高的相对分子质量和更多的羟基数量, 淀粉链与糖链通过氢键形成“糖桥”结构, 聚合后限制板栗淀粉的溶胀^[18]。

2.2 复配体系糊化性质的分析

淀粉在加热过程中, 水分子进入淀粉颗粒内部, 使淀粉颗粒的体积迅速膨胀, 淀粉颗粒结构受到破坏, 淀粉体系黏度上升, 逐渐达到峰值黏度, 继续加热, 淀粉颗粒破裂, 逐渐降至谷值黏度, 冷却后淀粉分子重排, 达到最终黏度。糖-板栗淀粉复配体系布拉班德糊化参数见表 1。与 CS 相比, CS-Fos 复配体系的黏度显著降低, 峰值黏度均值由 1 800.00 BU 下降至 1 679.67 BU, 谷值黏度均值由 740.33 BU 下降至 565.33 BU, 最终黏度均值由 1 048.00 BU 下降至 785.33 BU; CS-Suc 复配体系的峰值黏度均值下降至 1 753.33 BU, 谷值黏度和最终黏度与 CS 无显著性区别 ($P > 0.05$), 但有略下降的趋势。这可能是因为: 糖中含有较多的羟基, 具有很强的亲水性, 与水分子的结合能力显著高于淀粉, 使板栗淀粉与水分子的结合能力减弱, 淀粉体系的黏度下降^[14]。同时, 板栗淀粉的糊化温度均值从 58.77 ℃升高至 59.60 ℃, 表明低聚果糖的加入延迟了板栗淀粉的糊化行为。加入低聚果糖后, 回生值显著下降, 且在添加量为 50%时最为明显, 均值由 359.33 BU 下降至 220.00 BU, 降低了 38.8%, 表明低聚果糖的加入阻碍了淀粉体系中直链淀粉的分子重排, 延缓了板栗淀粉的短期回生。对比回生值可知, 当糖的添加量均为 30%时, 低聚果糖阻碍淀粉回生的效果高于蔗糖。裴斐等^[19]在低聚果糖对大米淀粉回生特性的影响中发现, 低聚果糖能够显著降低大米淀粉的回生值, 是因为低聚果糖分子在淀粉周围形成了水合层, 从而减缓了大米淀粉的短期回生。

2.3 复配体系热力学性质的分析

淀粉在糊化过程中吸水膨胀, 淀粉分子扩散, 分子内和分子间的氢键断裂, 在这个过程中伴随着能量

的变化,可以通过差示扫描量热仪进行测定^[20]。糖-板栗淀粉复配体系热力学参数见表 2。起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)、结束温度(T_c)随着低聚果糖添加量的增加而显著升高,CS-Fos 复配体系的起始温度、峰值温度、结束温度均有所上升,这是由于糖和淀粉聚合物在淀粉的非晶态区域形成了稳定的氢键,降低了氢键位点的体积密度,与水相比,溶剂的塑化能力降低^[21]。与糊化温度趋势变化相反,添加低聚果糖的板栗淀粉的糊化焓值(ΔH)的均值相对于原淀粉,由 9.47 J/g 显著降低至 7.00 ~ 7.58 J/g,添加量为 50%时 ΔH 最小,与原淀粉相比降低了 26.1%,表明熔化形成淀粉晶体结构需要的能量减少,进一步说明了

低聚果糖与淀粉分子竞争水分,抑制了板栗淀粉的溶胀,渗漏出的直链淀粉分子变少,结晶区向非晶区转变,从而使糊化焓值降低^[22]。对比各处理组可知,低聚果糖复配体系的糊化焓值与蔗糖复配体系之间无显著性差异($P>0.05$),但随着低聚果糖添加量的增大,整体上呈现下降趋势。糖添加量均为 30%时,添加低聚果糖的糊化焓值更低。低聚果糖或蔗糖的加入影响了体系中水分的迁移,不利于直链淀粉重结晶,从而使淀粉的短期回生速率减慢,这是由于低聚果糖或蔗糖的羟基与水 and 淀粉之间形成氢键,从而抑制淀粉分子之间的聚集。这与前面黏度的结果相似。

表 1 糖-板栗淀粉复配体系布拉班德糊化参数

Tab. 1 Brabender gelatinization parameters of sugar-chestnut starch composite system

样品	糊化温度/℃	峰值黏度/BU	谷值黏度/BU	最终黏度/BU	崩解值/BU	回生值/BU
CS	58.77 ± 0.15 ^c	1 800.00 ± 27.06 ^a	740.33 ± 15.31 ^a	1 048.00 ± 23.90 ^a	1 067.00 ± 3.61 ^{bc}	359.33 ± 16.77 ^a
CS-30% Suc	60.30 ± 0.26 ^a	1 753.33 ± 19.35 ^{ab}	706.67 ± 22.94 ^a	1 000.33 ± 8.96 ^a	1 046.67 ± 22.85 ^c	293.67 ± 20.50 ^b
CS-10% Fos	59.63 ± 0.15 ^b	1 687.67 ± 14.84 ^c	644.33 ± 18.93 ^b	939.33 ± 47.34 ^b	993.67 ± 17.24 ^d	279.00 ± 2.65 ^b
CS-30% Fos	59.77 ± 0.12 ^b	1 717.00 ± 48.28 ^{bc}	567.00 ± 43.09 ^c	810.33 ± 29.37 ^c	1 150.00 ± 42.88 ^a	243.33 ± 15.31 ^c
CS-50% Fos	59.60 ± 0.44 ^b	1 679.67 ± 26.35 ^c	565.33 ± 4.04 ^c	785.33 ± 22.05 ^c	1 114.33 ± 29.67 ^{ab}	220.00 ± 19.08 ^c

注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

表 2 糖-板栗淀粉复配体系热力学参数

Tab. 2 Thermodynamic parameters of sugar-chestnut starch composite system

样品	T_0 /℃	T_p /℃	T_c /℃	ΔH /(J/g)
CS	61.77 ± 0.25 ^d	66.43 ± 0.32 ^c	72.87 ± 0.51 ^c	9.47 ± 0.94 ^a
CS-30% Suc	63.47 ± 0.12 ^c	68.23 ± 0.25 ^b	74.90 ± 0.30 ^b	7.82 ± 0.92 ^b
CS-10% Fos	61.83 ± 0.06 ^d	66.73 ± 0.06 ^c	73.00 ± 0.46 ^c	7.58 ± 0.98 ^b
CS-30% Fos	63.97 ± 0.15 ^b	68.53 ± 0.21 ^b	74.53 ± 0.38 ^b	7.21 ± 0.26 ^b
CS-50% Fos	65.63 ± 0.06 ^a	70.60 ± 0.10 ^a	76.83 ± 0.25 ^a	7.00 ± 0.69 ^b

注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

2.4 复配体系体外消化性的分析

淀粉被人体消化吸收后为人体提供能量,根据淀粉的水解速率,将淀粉分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)^[23]。糖-板栗淀粉复配体系的体外消化特性结果见表 3。

表 3 糖-板栗淀粉复配体系的体外消化特性

Tab. 3 *In vitro* digestive properties of sugar-chestnut starch composite systems

样品	RDS 含量/%	SDS 含量/%	RS 含量/%
CS	26.35 ± 0.59 ^a	0.29 ± 0.12 ^c	73.36 ± 0.58 ^b
CS-30% Suc	20.19 ± 1.58 ^b	1.49 ± 0.19 ^b	78.32 ± 1.54 ^a
CS-10% Fos	20.85 ± 1.16 ^b	1.99 ± 0.74 ^{ab}	77.32 ± 1.15 ^a
CS-30% Fos	20.26 ± 0.74 ^b	2.28 ± 0.26 ^a	77.62 ± 0.47 ^a
CS-50% Fos	19.10 ± 1.92 ^b	2.59 ± 0.45 ^a	78.31 ± 1.71 ^a

注:不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

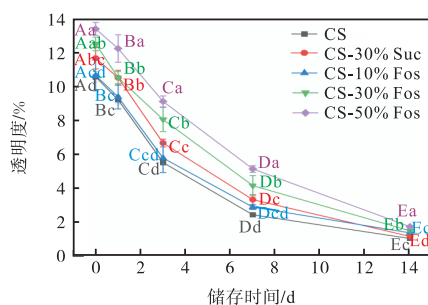
板栗原淀粉的 RDS、SDS 和 RS 的含量分别为(26.35 ± 0.59)%、(0.29 ± 0.12)%和(73.36 ± 0.58)%。

低聚果糖加入以后,复配体系的 RDS 含量呈下降趋势,SDS 和 RS 含量呈上升趋势,表明低聚果糖能够在一定程度上抑制板栗淀粉的消化,且低聚果糖添加量为 50%时 SDS 和 RS 含量最大。淀粉在食物中的溶胀力与淀粉消化密切相关,可以通过降低淀粉颗粒的溶胀力增加 SDS 和 RS 含量^[16],这与前面溶胀力的测定结果一致。复配体系的 RS 含量增加可能是由于低聚果糖的加入,增加了共混体系中的羟基基团,部分低聚果糖渗透到板栗淀粉颗粒中通过氢键相互作用,另一部分在板栗淀粉颗粒周围形成水合层包裹,阻碍了消化酶与淀粉之间的接触位点,从而对淀粉颗粒形成保护,抑制酶解,最终表现为 RS 含量增加^[24]。在糖添加量均为 30%时,两种复配体系的 RDS 和 RS 无明显区别,但 SDS 有显著差异,分别为(1.49 ± 0.19)%和(2.28 ± 0.26)%,说明在产品加工过程中,添加低聚果糖不仅能够降低热量的摄入,更能

维持血糖的稳定。

2.5 复配体系回生后透明度的分析

淀粉透光率反映了透明度的高低,吸光度越高,透光率越低。膨胀后淀粉糊中残留的淀粉颗粒和回生后形成的凝胶束与透明度成反比,同时透明度还可以反映淀粉的回生程度^[18]。参考李松南等^[25]的方法绘制蔗糖和低聚果糖对板栗淀粉透明度的影响变化曲线。糖-板栗淀粉复配体系回生的透明度如图2所示。



注:不同小写字母表示同一时间下不同添加量的显著性差异($P < 0.05$),不同大写字母表示同一添加量下不同时间的显著性差异($P < 0.05$)。

图2 糖-板栗淀粉复配体系回生的透明度

Fig. 2 Transparency of the retrogradation of sugar-chestnut starch composite system

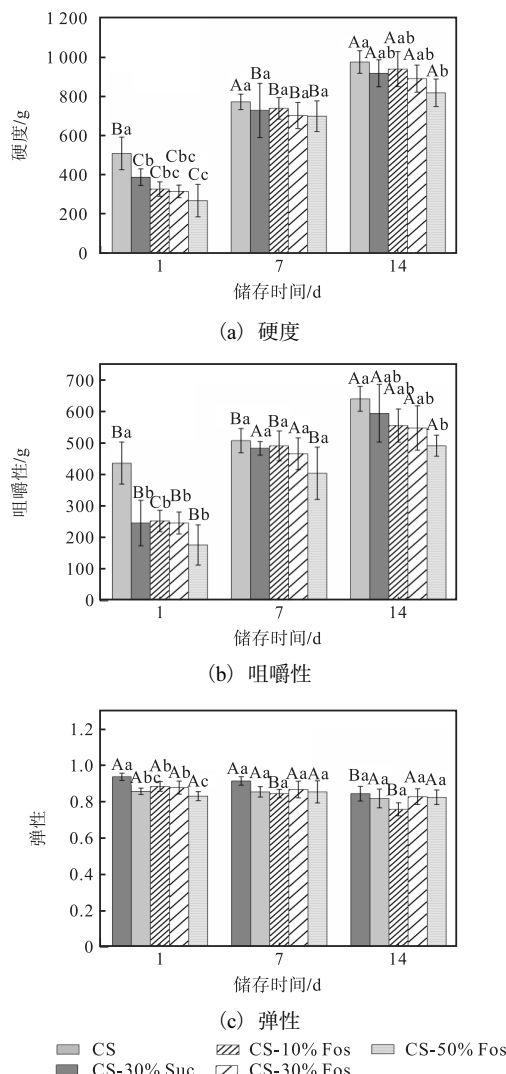
复配体系的透明度与板栗原淀粉的变化趋势相同,即随储存时间的增加而降低,前7 d快速下降,在第14天明显变慢,说明板栗淀粉的回生作用随着储存时间的增加而加剧,回生速度先快后慢^[26]。与板栗原淀粉相比,添加低聚果糖增加了透明度,并且透明度与添加量成正比。这可能是因为:一方面,低聚果糖与水分子都可以与淀粉形成氢键,减弱了淀粉分子间形成氢键的能力,从而降低了淀粉分子的尺寸,板栗淀粉的透明度也因此增大;另一方面,加入低聚果糖以后,淀粉与糖之间相互作用,有利于稳定板栗淀粉的无定形区,阻碍结晶结构的形成^[27]。在4℃储存14 d后,CS的透明度下降至1.05%,CS-30% Suc的透明度下降至1.17%,CS-Fos复配体系分别下降至1.38%、1.50%、1.75%,在相同添加量下低聚果糖的透明度高于蔗糖,抑制板栗淀粉回生的效果更强。

2.6 复配体系回生后质构特性的分析

硬度是模拟人体牙齿咀嚼样品所需要的力度,反映淀粉凝胶受到外力作用后分子间作用力的情况,硬度越大,淀粉回生越严重。糖-板栗淀粉复配体系回生的质构特性如图3所示。

随着储存时间的延长,未添加糖的板栗原淀粉与复配体系的硬度和咀嚼性都显著增加,但弹性无明显

变化。板栗淀粉凝胶在储存过程中发生了明显的硬化,主要是在淀粉储存的过程中,淀粉分子通过羟基结合形成的氢键重新排列成有序的结构,糊化后淀粉的胶体结构被破坏,淀粉的吸水能力下降,导致板栗淀粉凝胶因失水而变硬^[28]。



注:不同小写字母表示同一时间下不同添加量的显著性差异($P < 0.05$),不同大写字母表示同一添加量下不同时间的显著性差异($P < 0.05$)。

图3 糖-板栗淀粉复配体系回生的质构特性

Fig. 3 Textural properties of the retrogradation of sugar-chestnut starch composite system

板栗淀粉储存至第14天时,对照组板栗淀粉的硬度、咀嚼性分别为974.07 g、642.41 g,CS-30% Suc复配体系的硬度、咀嚼性分别为916.94 g、596.59 g。随着低聚果糖添加量的增加,板栗淀粉的硬度降低至938.55 g、889.98 g、818.20 g,咀嚼性降低至557.51 g、549.79 g、493.52 g,可知CS-50% Fos复配体系的硬度和咀嚼性的变化最为明显,分别降低16.0%和23.2%。

这可能是高浓度低聚果糖能够与复配体系竞争可利用的水分,降低了形成稳定回生结构的程度,从而使硬度和咀嚼性减小,抑制了板栗淀粉的回生。综上所述,低聚果糖可以改变板栗淀粉的质地,降低板栗淀粉的硬度和咀嚼性,并且在添加量为 50%时延缓板栗淀粉回生的效果最显著。

2.7 复配体系回生后水分分布的分析

糖-板栗淀粉复配体系回生的水分分布见表 4。

体系中存在 3 种水分,分别为结合水、半结合水和自由水^[29], A_{21} 、 A_{22} 、 A_{23} 分别表示这 3 种状态水分的相对含量。在板栗淀粉回生的过程中体系的结合水含量逐渐降低,自由水含量逐渐升高,这是因为回生过程中淀粉分子链间相互作用增强,形成的分子内氢键迫使淀粉链与水分子形成的分子外氢键断裂,结合水转变为自由水,凝胶持水力下降^[30],但是蔗糖和

低聚果糖的加入,本质上并没有改变板栗淀粉中水分的存在形式。在储存前期加入低聚果糖后, A_{21} 显著升高, A_{23} 显著降低,说明低聚果糖的加入能够抑制淀粉分子间交联,阻碍水分子的移动,增强淀粉凝胶的持水能力。储存至 14 d 时,板栗原淀粉的自由水含量为 $(86.47 \pm 0.69)\%$,蔗糖和低聚果糖复配体系自由水含量分别增长至 $(84.61 \pm 0.83)\%$ 、 $(83.85 \pm 0.99)\%$ 、 $(83.81 \pm 0.24)\%$ 、 $(83.16 \pm 0.33)\%$,均显著低于对照组,其中降低效果最明显的是 CS-50% Fos。在糖添加量相同时,低聚果糖抑制自由水增长的能力高于蔗糖。结果表明,添加低聚果糖可以抑制板栗淀粉的回生,这可能是由于低聚果糖与板栗淀粉或水之间形成了大量的氢键,自由水含量降低,限制了淀粉链的活性,从而使板栗淀粉的回生受到抑制^[31]。

表 4 糖-板栗淀粉复配体系回生的水分分布

Tab. 4 Moisture distribution in the retrogradation of sugar-chestnut starch composite system

时间/d	样品	$A_{21}/\%$	$A_{22}/\%$	$A_{23}/\%$
1	CS	19.41 ± 0.62^{Ab}	1.77 ± 0.16^{Ab}	78.81 ± 0.67^{Ba}
	CS-30% Suc	21.32 ± 0.30^{Aa}	1.87 ± 0.14^{Ab}	76.81 ± 0.40^{Cb}
	CS-10% Fos	21.03 ± 0.51^{Aa}	1.74 ± 0.03^{Bb}	77.23 ± 0.50^{Cb}
	CS-30% Fos	21.05 ± 0.15^{Aa}	1.88 ± 0.04^{Ab}	77.08 ± 0.17^{Cb}
	CS-50% Fos	21.78 ± 0.52^{Aa}	2.55 ± 0.15^{Aa}	75.67 ± 0.42^{Cc}
7	CS	20.16 ± 0.28^{Ab}	1.29 ± 0.12^{Bd}	78.55 ± 0.40^{Bb}
	CS-30% Suc	18.55 ± 0.38^{Bd}	2.06 ± 0.03^{Aa}	79.38 ± 0.38^{Ba}
	CS-10% Fos	19.43 ± 0.29^{Bc}	1.86 ± 0.02^{Ab}	78.71 ± 0.29^{Bb}
	CS-30% Fos	19.39 ± 0.28^{Bc}	1.84 ± 0.12^{Ab}	78.77 ± 0.33^{Bab}
	CS-50% Fos	20.95 ± 0.36^{Ba}	1.49 ± 0.04^{Cc}	77.53 ± 0.34^{Bc}
14	CS	12.37 ± 0.51^{Bc}	1.15 ± 0.18^{Bd}	86.47 ± 0.69^{Aa}
	CS-30% Suc	13.41 ± 0.90^{Cbc}	1.98 ± 0.07^{Aa}	84.61 ± 0.83^{Ab}
	CS-10% Fos	14.70 ± 0.94^{Ca}	1.45 ± 0.05^{Cc}	83.85 ± 0.99^{Abc}
	CS-30% Fos	14.39 ± 0.23^{Cab}	1.80 ± 0.16^{Aab}	83.81 ± 0.24^{Abc}
	CS-50% Fos	15.12 ± 0.32^{Ca}	1.72 ± 0.04^{Bb}	83.16 ± 0.33^{Ac}

注:不同小写字母表示同一时间下不同添加量的显著性差异 ($P < 0.05$),不同大写字母表示同一添加量下不同时间的显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.8 复配体系回生后动态流变特性的分析

动态流变特性是反映淀粉凝胶食品内部结构变化的重要指标。储能模量 (G') 代表能量贮存而可恢复的弹性性质,损耗模量 (G'') 代表能量消散的黏性性质,分别反映样品的类固体和类液体特性^[32]。糖-板栗淀粉复配体系回生的动态流变特性曲线如图 4 所示。

板栗淀粉与复配样品在储存过程中储能模量 (G')、损耗模量 (G'') 和损耗因子 ($\tan\delta$) 随频率变化,所有样品在 0.1 ~ 10 Hz 范围内, G' 和 G'' 具有频率依赖性, G' 均高于 G'' 并无交叉,表明板栗淀粉在储存过

程中形成的凝胶网络具有较强的弹性特征,呈现出弱凝胶行为^[33]。 $\tan\delta$ 均低于 1,表明凝胶结构较弱,以弹性为主,在加入低聚果糖后 $\tan\delta$ 显著增大,说明黏性更强,不易回生。与布拉班德黏度测定结果类似,低聚果糖的加入对板栗淀粉的黏弹性有显著影响。 G' 是衡量淀粉回生过程中流变性变化的有效指标,其数值越大表明淀粉凝胶体强度越高。随着储存时间的增加,板栗淀粉凝胶、复配体系凝胶的 G' 都逐渐增大,说明在 4 °C 储存的过程中板栗淀粉的弹性性质增加,回生程度增大。与板栗原淀粉相比,加入低聚果糖后 G' 显著下降,表明复配体系的弹性减弱,这可能

是低聚果糖加入后附着在淀粉分子的表面,阻碍了淀粉的溶胀,直链淀粉分子浸出量下降,导致弹性模量下降,抑制了板栗淀粉的回生,CS-50% Fos 的 G' 降低效果最明显。样品储存至 7 d 时,CS-30% Fos 和 CS-50% Fos 的 G'' 均明显低于 CS-30% Suc,与前面黏度测定结果一致,说明低聚果糖抑制板栗淀粉回生的能力更强。这可能是因为低聚果糖的相对分子质量较大且亲水性较强,不仅在糊化过程中限制了淀粉分子的溶胀,而且限制了直链/支链淀粉利用水分子形成重结晶的能力,从而使淀粉的回生进一步受到抑

制^[34]。与蔗糖相比,低聚果糖具有更多的羟基,与淀粉分子之间形成的氢键更多,阻碍淀粉分子聚集的能力更强。总体而言,低聚果糖可以降低体系的黏弹性,抑制板栗淀粉的回生,并且效果优于蔗糖。

2.9 复配体系回生后短程有序性的分析

傅里叶变换红外光谱特定波数附近的各相关峰强度比值(R)用来衡量淀粉的短程有序性和双螺旋结构的变化^[35]。糖-板栗淀粉复配体系回生的短程有序性结果见表 5。

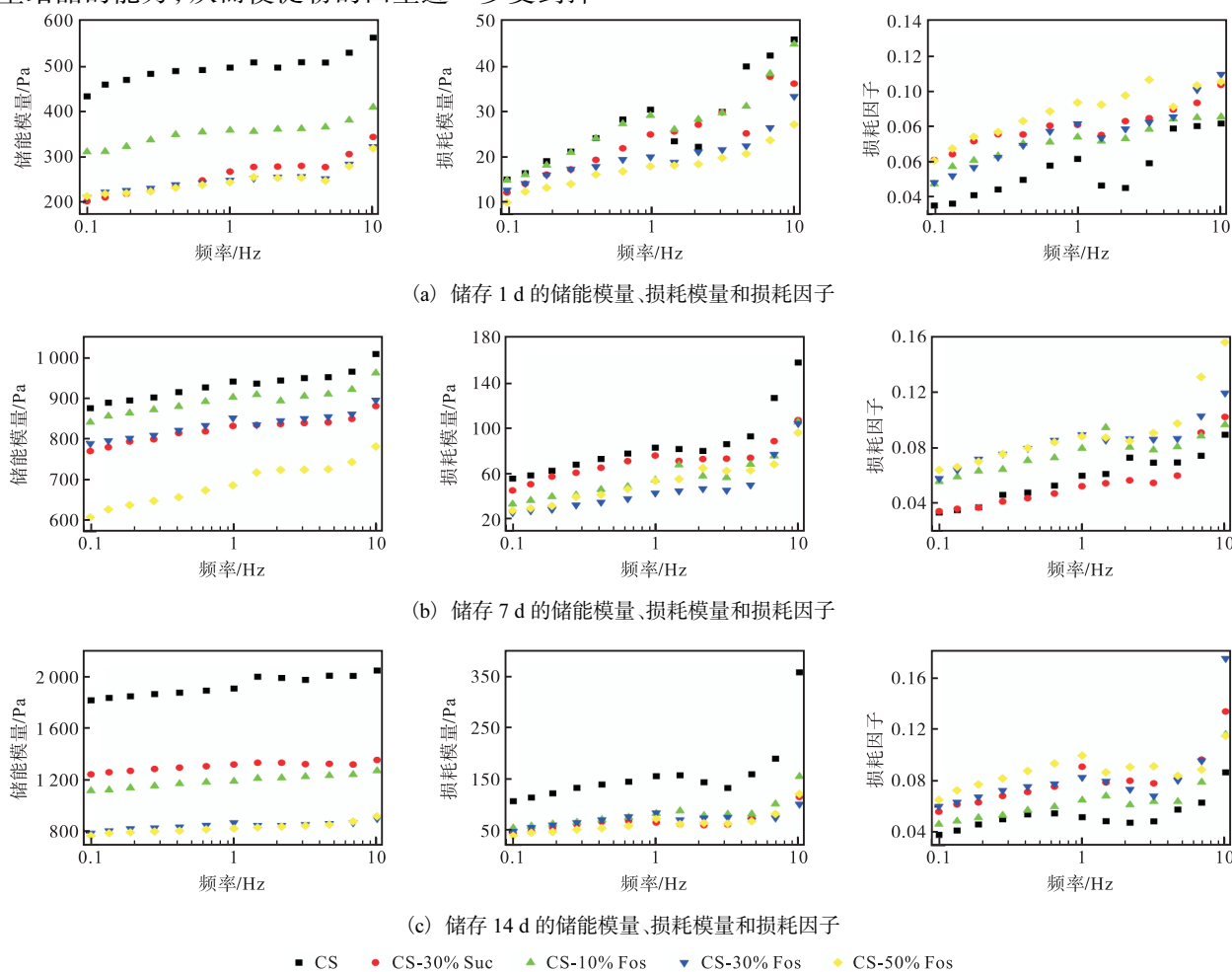


图 4 糖-板栗淀粉复配体系回生的动态流变特性曲线

Fig. 4 Dynamic rheological profiles of the retrogradation of sugar-chestnut starch composite system

储存 1 d 时,CS 的 $R_{1055/1021}$ 和 $R_{1041/996}$ 的均值分别为 1.13 和 0.61;储存到 14 d 时, $R_{1055/1021}$ 的均值升高到 1.51, $R_{1041/996}$ 的均值降低到 0.40,表明板栗淀粉在储存过程中发生了回生,双螺旋的堆积密度在淀粉颗粒表面附近区域变得更加紧密。这可能是因为低聚果糖的添加与暴露出来的淀粉分子链末端的自由羰基通过氢键相互作用,而缺乏电子的羰基被水分子附着并渗透到淀粉晶型结构中,从而导致淀粉的双螺旋

重新排列^[36]。添加低聚果糖后,板栗淀粉复配体系的 $R_{1055/1021}$ 均显著低于板栗原淀粉,说明低聚果糖能够抑制板栗淀粉短程有序结构的形成,这一现象的出现可能是因为复配体系的亲水性增强,降低了淀粉分子链的移动性,减弱了板栗淀粉的回生能力^[14]。同时,低聚果糖加入后容易插入淀粉分子内部,影响淀粉颗粒结晶区结晶结构的形成,使淀粉的短程有序程度降低^[37]。回生 14 d 时,CS-30% Suc 和 CS-30% Fos 的

$R_{1055/1021}$ 均值分别为 1.36 和 0.99, 说明低聚果糖对板栗淀粉的回生有更好的抑制效果, 并且在添加量为 50% 时抑制效果最好, $R_{1055/1021}$ 降低了 37.1%, 这与前面动态流变特性结果一致。

表 5 糖-板栗淀粉复配体系回生的短程有序性

Tab. 5 Short-range ordering of the retrogradation of sugar-chestnut starch composite system

时间/d	样品	$R_{1055/1021}$	$R_{1041/996}$
1	CS	1.13 ± 0.03^{Ba}	0.61 ± 0.03^{Ab}
	CS-30% Suc	0.81 ± 0.06^{Cb}	0.76 ± 0.06^{Ab}
	CS-10% Fos	0.76 ± 0.10^{Bbc}	0.61 ± 0.07^{Ab}
	CS-30% Fos	0.66 ± 0.12^{Bc}	0.66 ± 0.09^{Ab}
	CS-50% Fos	0.50 ± 0.06^{Bd}	1.00 ± 0.20^{Aa}
7	CS	1.39 ± 0.24^{ABa}	0.58 ± 0.05^{Ab}
	CS-30% Suc	1.01 ± 0.05^{Bb}	0.64 ± 0.04^{Ab}
	CS-10% Fos	1.02 ± 0.03^{Ab}	0.58 ± 0.04^{Ab}
	CS-30% Fos	0.85 ± 0.04^{ABbc}	0.66 ± 0.04^{Ab}
	CS-50% Fos	0.79 ± 0.03^{Ac}	0.86 ± 0.14^{Aa}
14	CS	1.51 ± 0.06^{Aa}	0.40 ± 0.11^{Ba}
	CS-30% Suc	1.36 ± 0.04^{Aa}	0.44 ± 0.08^{Ba}
	CS-10% Fos	1.11 ± 0.16^{Ab}	0.30 ± 0.03^{Ba}
	CS-30% Fos	0.99 ± 0.16^{Ab}	0.42 ± 0.03^{Ba}
	CS-50% Fos	0.95 ± 0.19^{Ab}	0.50 ± 0.07^{Ba}

注: 不同小写字母表示同一时间下不同添加量的显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示同一添加量下不同时间的显著性差异 ($P < 0.05$)。

低聚果糖对板栗淀粉回生的抑制作用影响板栗淀粉的短程有序性和双螺旋结构, 改变分子间氢键不断缔合的硬化现象, 包括透明度的增加、水分渗出的抑制及消化率的降低^[38]。上述实验表明, 在板栗淀粉中加入低聚果糖, 不仅可以提高透明度和持水能力, 还可以降低硬度、咀嚼性和 $R_{1055/1021}$, 减弱板栗淀粉的回生能力; 应用于生产中不仅能够提高板栗产品的质地, 还能延长食品的货架期。

3 结 论

低聚果糖的加入提高了板栗淀粉的糊化温度, 抑制了板栗淀粉的溶胀, 进而降低了体系的黏度。与板栗原淀粉相比, 添加低聚果糖的板栗淀粉溶胀力、回生值和糊化焓值均显著降低 ($P < 0.05$), 分别降低了 21.4%、38.8% 和 26.1%。体外消化实验表明, 添加低聚果糖可以增加慢消化淀粉与抗性淀粉的含量, 降低板栗淀粉的消化率, 与蔗糖相比, 更能维持血糖的稳定。在 4 °C 储存过程中, 添加 50% 低聚果糖可以使板栗淀粉的硬度、咀嚼性和 $R_{1055/1021}$ 分别降低 16.0%、23.2% 和 37.1%。低聚果糖并没有改变板栗淀粉的水分分布, 但是降低了体系中自由水的含量, 提高了体

系的持水能力和透明度, 减弱了板栗淀粉的回生能力。动态流变学测试表明板栗淀粉凝胶为弱凝胶, 以弹性为主, 加入低聚果糖后储能模量 G' 下降, 进一步说明低聚果糖可以减缓板栗淀粉回生的速率。在糖添加量相同的条件下, CS-Fos 复配体系的自由水含量、 $R_{1055/1021}$ 、储能模量 G' 均显著低于 CS-Suc 复配体系, 说明低聚果糖延缓回生的效果更好。

本研究表明低聚果糖对板栗淀粉的糊化、消化和回生性质有不同程度的影响, 且均在添加量为 50% 时对板栗淀粉改性效果最显著。低聚果糖不仅能够提高板栗淀粉的热稳定性, 改善板栗淀粉的糊化性质, 抑制板栗淀粉的回生, 储存 14 d 的 CS-50% Fos 与储存 1 d 的对照组板栗原淀粉的回生效果区别最小, 同时还能够降低淀粉消化率, 减少热量的摄入, 并且效果优于蔗糖。上述改性处理能够提高淀粉糊的透明度, 改善食品外观, 提高产品的光泽度, 还可以降低凝胶硬度, 增强持水能力, 改善淀粉在食品中的加工性能。基于上述实验结论, 后续研究可以开发新型热稳定性强、热量低、适口性好的板栗产品。本实验仅在 4 °C 储存条件下探讨添加 (10% ~ 50%) 低聚果糖对板栗淀粉回生性质的影响, 后续可以研究在不同温度下储存时, 较低添加量的低聚果糖对板栗淀粉性质的影响, 模拟实际食品生产条件, 为低聚果糖代替蔗糖作为食品改良剂并应用于板栗产品的开发与应用提供依据。

参考文献:

- [1] Liu Chao, Wang Shujun, Chang Xu, et al. Structural and functional properties of starches from Chinese chestnuts [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 568–576.
- [2] Wang Zhi, Han Meng, Liu Yang, et al. Insights into the multiscale structure and thermal characteristics of chestnut starch [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 104973.
- [3] 陈俊芳. 安徽板栗淀粉的理化性质及其糊化特性的研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010: 6–41.
- [4] 肖璐. 酶法制备改性玉米淀粉及其物理与消化特性研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2019: 5–25.
- [5] Pirsá S, Hafezi K. Hydrocolloids: structure, preparation method, and application in food industry [J]. Food Chemistry, 2023, 399: 133967.
- [6] 刘微, 杜秉健, 孙京超, 等. 海藻糖对大米淀粉回生特性的影响 [J]. 食品科学技术学报, 2023, 41 (5): 136–143.

- [7] 王建宇,陈湘宁,冯晓光,等. 大豆低聚糖对小麦粉凝胶性质与体外消化率的影响[J]. 河北农业大学学报, 2020, 43(4): 91-96.
- [8] 陈又铭,李宁,袁卫涛,等. 低聚果糖的功能性质及其在食品中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(1): 11-15.
- [9] 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): 1-9.
- [10] Sudha M L, Soumya C, Saravanan M, et al. Influence of short chain fructo-oligosaccharide (SC-FOS) on the dough rheological, microstructural properties and bread quality during storage[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 158: 113102.
- [11] 唐全华,谭沙,钱鑫,等. 不同处理方法对花桥板栗淀粉理化性质及体外消化特性的影响[J]. 农产品加工, 2024, 23(13): 1-7.
- [12] Waterschoot J, Gomand S V, Delcour J A. Impact of swelling power and granule size on pasting of blends of potato, waxy rice and maize starches[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52: 69-77.
- [13] Englyst H N N, Kingman S M M, Cummings J H H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992, 46(S2): S33-S50.
- [14] 秦志鹏,韩四海,李佩艳,等. 阿拉伯木聚糖-甘薯淀粉复合体系理化特性表征[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 225-232.
- [15] 宋靖郑,韩四海,刘建学,等. 阿魏酸协同糊化处理对马铃薯淀粉的改性作用[J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 51-59.
- [16] Jia Rui, Cui Chen, Gao Li, et al. A review of starch swelling behavior: its mechanism, determination methods, influencing factors, and influence on food quality[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 321: 121260.
- [17] 林家禾,朱梓逸,王展. 低聚果糖在方便米粥中的应用及工艺优化[J]. 食品工业, 2023, 44(10): 13-16.
- [18] 付丽红,白凌曦,李晓斌,等. 不同糖对改性藜麦淀粉特性的影响[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 265-270.
- [19] 裴斐,倪晓蕾,孙昕扬,等. 低聚果糖对大米淀粉回生特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 27-33.
- [20] 汪名春,韦冷云,朱培蕾,等. 菊糖对小麦淀粉糊热力学及流变学特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 24-29.
- [21] Allan M C, Mauer L J. Variable effects of twenty sugars and sugar alcohols on the retrogradation of wheat starch gels[J]. Foods, 2022, 11(19): 3008.
- [22] 常晓红,张蓓,郝明远,等. 聚葡萄糖对大米淀粉凝胶老化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 69-72.
- [23] Kumari B, Sit N. Comprehensive review on single and dual modification of starch: methods, properties and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 126952.
- [24] Chen Li, Ren Fei, Zhang Zhi, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415-421.
- [25] 李松南,李雅琴,金姗姗,等. 短柄枹栎种子淀粉的理化性质研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(15): 56-60.
- [26] 周大年. 不同寡糖对甘薯淀粉糊化和回生特性的影响[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017: 10-45.
- [27] 张晓宇. 小分子糖对木薯淀粉性质的影响研究[D]. 无锡:江南大学, 2012: 11-58.
- [28] 张春媛,张海华,张士康,等. 茶多糖对小麦淀粉老化影响研究[J]. 食品工业, 2014, 35(10): 1-4.
- [29] 方玲玲. 核磁共振技术应用于葛根淀粉晶体结构与老化特性的研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2017: 21-38.
- [30] 王思琪,许秀颖,崔维建,等. 大豆异黄酮对玉米淀粉老化的影响及体系水分迁移研究[J]. 中国食品学报, 2022, 22(6): 232-241.
- [31] 陈瑾,赵阳,李欣然,等. 低聚半乳糖-豌豆淀粉复配体系理化及加工特性研究[J]. 中国调味品, 2023, 48(6): 87-91.
- [32] Fei Wei, Rong Li, Qi Xiang, et al. Effects of Premna microphylla turcz polysaccharide on rheological, gelling, and structural properties of mung bean starch and their interactions[J]. Food Research International, 2024, 189: 114561.
- [33] Zhang Xinping, Shen Huishan, Qiao Jingyue, et al. Impact of flaxseed gum on the aggregate structure, pasting properties, and rheological behavior of waxy rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132421.
- [34] 王日思. 不同分子量段可溶性膳食纤维对大米淀粉性质的影响[D]. 南昌:南昌大学, 2016: 15-53.
- [35] Lu Hong, Ma Rui, Chang Rong, et al. Evaluation of starch retrogradation by infrared spectroscopy[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106975.
- [36] 李妍,吴天昊,吴玉柱,等. 玉木耳多糖对玉米淀粉回

- 新型工业化, 2020, 10(7): 21–22.
- [5] 姜磊, 刘建华, 张冬阳, 等. 二进制粒子群算法中 V 型转换函数的应用分析[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(4): 263–270.
- [6] Nguyen B H, Xue Bing, Andreae P, et al. A new binary particle swarm optimization approach: momentum and dynamic balance between exploration and exploitation[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 51(2): 589–603.
- [7] Pashaei E, Pashaei E, Aydin N. Gene selection using hybrid binary black hole algorithm and modified binary particle swarm optimization[J]. Genomics, 2019, 111(4): 669–686.
- [8] Bharti K K, Singh P K. Opposition chaotic fitness mutation based adaptive inertia weight BPSO for feature selection in text clustering[J]. Applied Soft Computing, 2016, 43: 20–34.
- [9] Aljehani S, Alotaibi Y. Preserving privacy in association rule mining using multi-threshold particle swarm optimization[J]. Information Sciences, 2025, 692: 121673.
- [10] Lu Dan, Li Wenfeng, Zhang Linjuan, et al. Multi-objective optimization and reconstruction of distribution networks with distributed power sources based on an improved BPSO algorithm[J]. Energies, 2024, 17: 4877.
- [11] Zhao Qing, Zhang Chengkui, Li Hao, et al. An error discovery and correction for the family of V-shaped BPSO algorithms[PP/OL]. V1. arXiv (2024–07–25) [2024–09–01]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.17889>.

责任编辑: 郎婧

(上接第 16 页)

- [31] 章彬佳, 邱子梁, 张杰. 睡眠药物发展简史[J]. 世界睡眠医学杂志, 2020, 7(7): 1169–1173.
- [32] Li Yimeng, Shen Chunyun, Jiang Jianguo. Sedative and hypnotic effects of the saponins from a traditional edible plant *Liriope spicata* Lour. in PCPA-induced insomnia mice[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 327: 118049.
- [33] 魏嵘, 王振, 李怀平, 等. 酸枣仁茯苓粉、大豆肽粉对失眠模型小鼠的改善睡眠作用[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 359–366.
- [34] 徐飞飞, 田雅娟, 李钦青, 等. 酸枣仁-茯苓-党参水提取物对小鼠睡眠的改善作用及机制研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 300–308.

责任编辑: 郎婧

(上接第 34 页)

- 生及消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(8): 78–90.
- [37] Wang Rong, Wan Jian, Liu Cheng, et al. Pasting, thermal, and rheological properties of rice starch partially replaced by inulin with different degrees of polymerization[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 228–232.
- [38] 吕欣, 张雅媛, 李春梅, 等. 麦芽糖淀粉酶抑制淀粉质食品回生的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(11): 66–74.

责任编辑: 郎婧