申慧珊, 王嘉奇, 程上珍, 等. 不同分子量可溶性大豆多糖对马铃薯淀粉老化行为的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 138−146. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070248

SHEN Huishan, WANG Jiaqi, CHENG Shangzhen, et al. Effect of Soluble Soybean Polysaccharides with Different Molecular Weights on the Retrogradation Behavior of Potato Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 138−146. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070248

· 研究与探讨 ·

不同分子量可溶性大豆多糖对马铃薯淀粉老化行为的影响

申慧珊[1,2,3], 王嘉奇[1], 程上珍[1], 王宏伟[1,2,3], 张莹莹[1,2], 张艳艳[1,2], 刘兴丽[1,2], 张　华[1,2,3,*]

（1.郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450001;
2.面制食品国家地方联合工程研究中心（河南）, 河南郑州 450001;
3.中原食品实验室, 河南漯河 462300）

摘　要: 淀粉老化是淀粉基食品在储存过程中品质下降和保质期缩短的主要原因。因此，本文将不同分子量可溶性大豆多糖（Soluble soybean polysaccharide，SSPS）与马铃薯淀粉的复合凝胶在 4 ℃ 贮藏 7 d，通过贮藏过程中凝胶的硬度、水分分布、老化度、老化动力学、结晶结构和短程有序结构的变化，研究不同分子量 SSPS 对淀粉老化行为的影响规律和作用机制。结果表明，在贮藏过程中，三种分子量 SSPS 的添加均可显著降低淀粉凝胶的硬度、结晶度、短程有序度和老化度，减少水分的迁移，抑制淀粉凝胶的老化（P<0.05），其中 L-SSPS 的抑制效果最强。L-SSPS 抑制马铃薯淀粉凝胶老化主要是因为 L-SSPS 的分子量小、分子链短，包含更多羟基，能够更有效地与淀粉竞争水分子，从而抑制直链淀粉和支链淀粉的重结晶，延缓了淀粉凝胶的老化过程。Avrami 老化动力学分析表明，添加 SSPS 降低了淀粉凝胶的结晶速率常数 k，延长了半回生时间 $t_{1/2}$。研究结果揭示了 SSPS 分子量对淀粉老化行为的影响规律，为改善淀粉基食品品质和延长货架期提供理论指导。

关键词: 可溶性大豆多糖, 分子量, 马铃薯淀粉, 复合凝胶, 老化行为

中图分类号: TS231　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0138−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070248

本文网刊:

Effect of Soluble Soybean Polysaccharides with Different Molecular Weights on the Retrogradation Behavior of Potato Starch

SHEN Huishan[1,2,3], WANG Jiaqi[1], CHENG Shangzhen[1], WANG Hongwei[1,2,3], ZHANG Yingying[1,2], ZHANG Yanyan[1,2], LIU Xingli[1,2], ZHANG Hua[1,2,3,*]

（1.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2.National & Local United Engineering Laboratory of Wheat Flour Food, Zhengzhou 450001, China;
3.Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China）

Abstract: Starch retrogradation is a major cause of quality deterioration and shortened shelf life in starch-based foods during storage. This study investigated the effects and mechanisms of soluble soybean polysaccharides (SSPS) with different molecular weights on the retrogradation behavior of potato starch during storage. The changes of gel hardness, water distribution, retrogradation degree, retrogradation kinetics, crystalline structure, and short-range ordered structure during storage were analyzed to understand the impact of different molecular weight SSPS on starch retrogradation. The results showed the addition of three SSPS with different molecular weights significantly reduced the hardness, crystallinity, short-range order, and retrogradation degree of starch gels, and decreased the water migration, and all three SSPS could inhibit the retrogradation of starch gels during storage (P<0.05). Notably, L-SSPS had the strongest ability to inhibit starch retrogradation.

收稿日期: 2025−07−21

基金项目: 河南省重点研发专项（231111113200）; 国家自然科学基金青年项目（32402156）; 河南省高等学校重点科研项目（25A550001）。

作者简介: 申慧珊（1994−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 淀粉结构修饰和功能化调控, E-mail: shen1685778117@163.com。

*** 通信作者:** 张华（1975−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 速冻食品加工与安全控制, E-mail: 2009046@zzuli.edu.cn。

L-SSPS inhibited the retrogradation of potato starch gels mainly because L-SSPS had a small molecular weight and short molecular chains, and contained more hydroxyl groups. This allowed it to compete more effectively with starch for water molecules, thereby inhibiting the recrystallization of amylose and amylopectin and retarding the retrogradation process of starch gels. Avrami kinetic analysis revealed that the addition of SSPS reduced the crystallization rate constant k of the starch gel and prolonged the half-retrogradation time $t_{1/2}$. It provides a scientific basis for the SSPS molecular weight on starch retrogradation behavior, providing theoretical guidance for improving the quality of starch-based foods and extending their shelf life.

Key words: soluble soybean polysaccharide; molecular weight; potato starch; composite gel; retrogradation behavior

淀粉基食品（馒头、面条、面包、粉丝等）是人们日常饮食结构中的重要组成部分。然而，淀粉基食品在贮藏过程中容易老化，导致食品出现质地硬化、弹性下降、口感粗糙等品质劣变问题[1]，不仅显著降低食品的感官品质和消费者接受度，更严重影响其加工性能，从而制约了淀粉基食品产业的可持续发展。目前，国内外主要通过调控原料组分、添加食品添加剂、控制贮藏条件和优化加工工艺等方法延缓淀粉基食品老化[2−4]，其中添加食品添加剂（多糖、蛋白质、乳化剂、酶制剂和亲水胶体等）的应用最广泛[5−6]。

可溶性大豆多糖（Soluble soybean polysaccharide, SSPS）是一种天然阴离子多糖，来源于再利用豆渣，具有良好的乳化性、持水性、抗老化性及抗凝结性。近年来，SSPS 在淀粉基食品体系中得到广泛应用，研究表明，SSPS 能有效抑制淀粉颗粒膨胀[7]，降低糊化黏度[8]，减弱淀粉凝胶的弹性和硬度[9]，延缓淀粉凝胶的老化[10]。赵启竹[11] 指出，SSPS 通过包被在淀粉颗粒表面、调控体系中的水分迁移以及与淀粉分子之间的相互作用等机制抑制淀粉的老化。Wang 等[12] 证实，添加 0.2% 的 SSPS 能够有效抑制方便米饭老化，其作用机制可能是 SSPS 与支链淀粉侧链的相互作用抑制了淀粉分子通过氢键的交联，从而阻碍了有序结构的形成，进而延缓方便米饭的老化进程。值得注意的是，由于原料来源和生产工艺的差异，不同 SSPS 的分子量分布、酯化度以及蛋白质含量等关键参数存在显著差异，这些结构特征的差异导致其功能特性产生明显区别[13−14]。因此，推测不同分子结构的 SSPS 抑制淀粉老化的机制和效果可能存在差异。然而，不同分子量 SSPS 对淀粉老化行为的影响鲜有报道。

马铃薯是全球第四大粮食作物，淀粉产量高、来源广泛。近年来，随着全球对粮食安全与可持续发展的重视，马铃薯的主食化进程不断推进。然而，在马铃薯主食产品的加工与贮藏过程中，淀粉老化问题严重制约了产品品质的提升和货架期的延长，已成为产业面临的关键技术挑战。基于此，本研究将三种不同分子量 SSPS 与马铃薯淀粉混合制备复合凝胶，并将其在 4 ℃ 贮藏不同时间，通过测定复合凝胶贮藏过程中的硬度、水分分布、短程有序结构、结晶结构及老化度的变化，并结合 Avrami 老化动力学模型，研究不同分子量 SSPS 对马铃薯淀粉老化行为的影响规律和作用机制，以期为淀粉基食品的品质调控和抗老化剂的精准应用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

马铃薯淀粉　上海易恩化学技术有限公司；豆渣（食用级）　平顶山金晶生物科技股份有限公司；硝酸钠　国药集团化学试剂有限公司；叠氮化钠、溴化钾　上海麦克林生化科技股份有限公司；所有试剂均为分析纯。

UltiMate3000 型高效液相色谱仪　美国 Thermo 公司；DAWN HELEOS-Ⅱ多角度光散射检测器、OPTILAB T-rex 示差折光检测器　美国 Wyatt 公司；TA-XT Plus 物性测试仪、DSC Q20 差示扫描量热仪　美国 TA 公司；NMI-20 低场核磁共振分析仪　上海纽迈电子科技有限公司；Bruker Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪　德国 Bruker 公司；BWS 465-785S 便携式拉曼光谱系统　美国 Microtrac 有限公司；ULTIMA IV 型 X 射线衍射仪　日本理学公司。

1.2　实验方法

1.2.1　可溶性大豆多糖的制备及分子量测定　根据张权等[15] 的方法并加以修改，将豆渣与蒸馏水按固液比 1∶27（w/v）混合，分别用盐酸调节 pH 至 4.2、3.5 和 3.0，然后于 115 ℃ 灭菌锅中分别反应 120、120 和 150 min。冷却至室温后，离心（6000 r/min, 10 min, 25 ℃），收集上清液，将其用 3.0 mol/L 氢氧化钠溶液调节 pH 至 11.0，在 82 ℃ 条件下加热 120 min 去除甲氧基，然后进行抽滤，使上清液浓缩至原体积的 1/10，再将浓缩液与 95% 的乙醇按体积比 1∶3（v/v）混合，离心（6000 r/min, 10 min, 25 ℃），得到 SSPS 沉淀物，复溶于水，旋蒸以除去乙醇，冷冻干燥（45 ℃, 12 h）后研磨，获得不同分子量 SSPS。

采用高效体积排阻色谱-多角度光散射检测器-示差折光检测器（HPSEC-MALLS-RI）联用技术测定 SSPS 的分子量。具体实验方法如下：将 SSPS 样品溶解于含 0.02% 叠氮化钠的 0.1 mol/L 硝酸钠溶液中，配制成终浓度为 1 mg/mL 的样品溶液，经 0.45 μm 滤膜过滤后进样分析。色谱分析条件为：采用 Ohpak SB-805 HQ（300×8 mm）和 Ohpak SB-803 HQ（300×8 mm）色谱柱串联，柱温维持在 45 ℃；流动相为含 0.02% 叠氮化钠的 0.1 mol/L 硝酸钠溶液，流速 0.6 mL/min；进样量 100 μL，等度洗脱 75 min[16]。

根据测定结果将三种 SSPS 分别命名为高分子量可溶性大豆多糖(H-SSPS)、中分子量可溶性大豆多糖(M-SSPS)和低分子量可溶性大豆多糖(L-SSPS)。H-SSPS 的重均分子量(Mw)和数均分子量(Mn)分别为 1014.02 kDa 和 778.07 kDa, M-SSPS 的 Mw 和 Mn 分别为 747.03 kDa 和 575.28 kDa, L-SSPS 的 Mw 和 Mn 分别为 133.02 kDa 和 29.44 kDa。

1.2.2 不同分子量可溶性大豆多糖-马铃薯淀粉凝胶样品的制备 分别选取 H-SSPS、M-SSPS 和 L-SSPS 按照 0.5% 和 1.0% 的质量比添加至马铃薯淀粉中, 充分混合均匀后, 用蒸馏水配制成 15%(质量百分比, w/w)的混合液, 在 95 ℃ 的水浴中振荡加热 30 min, 倒入培养皿中定型, 冷却至室温后, 在 4 ℃ 条件下分别贮藏 1 d 和 7 d。一部分淀粉凝胶进行硬度和水分分布的测定, 剩余淀粉凝胶冷冻干燥后研磨, 过 100 目筛, 用于结构和老化度测定[17]。样品依次命名为 H-SSPS-0.5-Gel、H-SSPS-1.0-Gel、M-SSPS-0.5-Gel、M-SSPS-1.0-Gel、L-SSPS-0.5-Gel、L-SSPS-1.0-Gel。以纯马铃薯淀粉制备的凝胶作为对照组, 命名为“Potato Starch Gel”。

1.2.3 硬度的测定 将 1.2.2 中制备的凝胶切成 2.5 cm×2.5 cm×2.0 cm 的小方块, 置于物性测试仪载物台上, 测试条件: TPA 模式, 探头型号 P/50, 测前速率 2 mm/s, 测中速率 1 mm/s, 测后速率 1 mm/s, 压缩比 40%[18]。

1.2.4 水分分布的测定 采用低场核磁共振分析仪, 使用 CPMG(Carr-Purcell-Meiboom-Gill)脉冲序列测量。将 1.2.2 中制备的凝胶放入核磁管中, 置于恒定磁场中射频线圈中心处, 以 CPMG 脉冲序列测定样品自旋-自旋弛豫时间 T_2。测试条件: 磁体-探头 NMI20-015V-I mm, 主频 SF=18 MHz, 采样频率 SW=200 kHz, 采样点数 TD=1600104, 重复扫描次数 NS=4, 半回波时间 TE=1 ms, 测试完成进行数据反演得到 T_2 弛豫图谱[19]。

1.2.5 短程有序结构的测定 傅里叶红外光谱的测定: 准确称取 1 mg 冻干的淀粉凝胶粉末与 100 mg 已过 100 目筛且烘至恒重的溴化钾置于玛瑙研钵中研磨, 充分研磨混合均匀后压片。测试条件: 以空气为背景, 扫描范围 4000~400 cm^{-1}, 分辨率 4 cm^{-1}, 累计扫描 64 次[20]。

拉曼光谱的测定: 参照 Shen 等[21] 的方法并稍作改动, 将凝胶冻干粉末放在样品台上, 并保持样品表面平整和光滑。在样品测试前先进行背景扫描, 以消除仪器背景信号对样品信号的干扰。测试条件: 扫描范围 3400~400 cm^{-1}, 波长 785 nm, 分辨率 3 cm^{-1}。样品的短程有序结构通过 480 cm^{-1} 处的半峰宽(FWHM)来量化。

1.2.6 结晶结构的测定 参照张现芳等[22] 的方法并稍作修改, 将凝胶冻干粉末在室温下平衡 24 h 后, 均匀地平铺在样品池中, 压紧后放置于 X 射线衍射仪样品台中, 使用铜靶(Cu Kα)X 射线源, 测试条件: 电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描范围 4°~50°, 步长 0.01°, 扫描速率 5°/min。

1.2.7 老化度的测定 使用差示扫描量热仪测定热力学特性。准确称取 3 mg 由 1.2.2 制备的混合大豆多糖-马铃薯淀粉粉末与 9 μL 去离子水置于铝制坩埚中, 在 4 ℃ 平衡 24 h 后, 以 10 ℃/min 的速率从 40 ℃ 升温至 120 ℃, 测得样品的糊化焓。待 DSC 坩埚冷却后, 在 4 ℃ 条件下分别贮藏 1、7、14、21、35 d, 测定样品的老化焓。测试条件为: 温度范围 40~120 ℃, 升温速率 10 ℃/min。老化度的计算如式(1)所示[23]:

$$\text{老化度}(\%) = \frac{\Delta H_t}{\Delta H_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, ΔH_t 表示样品贮藏 t 时的老化焓, J/g; ΔH_0 表示样品的糊化焓, J/g。

1.2.8 老化动力学 Avrami 方程(即 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov 方程)是描述相变过程中结晶动力学行为的经典模型, 最初用于描述等温条件下聚合物结晶的成核与生长机制。而淀粉老化过程伴随直链淀粉分子重排及微晶结构的形成, 其动力学行为与聚合物结晶具有相似的分阶段特征。因此, Avrami 方程可以用来研究淀粉老化的动力学特征和结晶程度[24]。老化动力学方程及衍生式如式(2)~式(4)所示:

$$\alpha(t) = \frac{\Delta H_t - \Delta H_0}{\Delta H_\infty - \Delta H_0} = 1 - \exp(-kt^n) \quad \text{式(2)}$$

$$\ln[-\ln(1-\alpha(t))] = \ln k + n\ln t \quad \text{式(3)}$$

$$t_{1/2} = \left(-\frac{\ln 0.5}{k}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{式(4)}$$

其中, $\alpha(t)$: 回生淀粉 t 时的相对结晶度, 范围为 0(未结晶)~1(完全结晶); ΔH_∞: 回生淀粉的最大老化焓, J/g; ΔH_t: 回生淀粉 t 时老化焓, J/g; ΔH_0: 淀粉糊化焓, J/g; n: Avrami 指数, 表征淀粉结晶成核机制与晶体生长维度; t: 回生时间, d; k: 老化速率常数, 反映淀粉回生的动力学速率, d^{-n}; $t_{1/2}$: 半回生时间, 是淀粉回生度达到 50% 所需要的时间, d。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次, 使用 IBM SPSS Statistics 27 软件分析数据并通过 Duncan 多重比较法进行显著性检验(P<0.05), 使用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同分子量可溶性大豆多糖对贮藏过程中马铃薯淀粉凝胶硬度的影响

硬度是表征淀粉凝胶老化的重要指标之一[25], 随着老化程度的加深, 淀粉凝胶的硬度会明显增加。如表 1 所示, 贮藏时间从 1 d 延长到 7 d, 所有淀粉凝

表 1　不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 d 和 7 d 的硬度

Table 1　Hardness of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 d and 7 d

样品	贮藏时间	
	1 d	7 d
Potato Starch Gel	772.35±2.25^{Bb}	2780.99±77.49^{Aa}
H-SSPS-0.5-Gel	753.46±15.46^{Bb}	2034.07±69.48^{Ab}
H-SSPS-1.0-Gel	918.66±6.29^{Ba}	2056.57±72.69^{Ab}
M-SSPS-0.5-Gel	759.67±13.83^{Bb}	1876.35±7.93^{Ac}
M-SSPS-1.0-Gel	760.98±1.24^{Bb}	1714.94±9.09^{Ad}
L-SSPS-0.5-Gel	617.20±9.94^{Bc}	1541.77±16.32^{Ae}
L-SSPS-1.0-Gel	371.93±1.24^{Bd}	1439.05±4.89^{Ae}

注：同列上标小写字母表示不同分子量SSPS之间存在显著差异（P<0.05），同行上标大写字母表示不同贮藏时间之间存在显著差异（P<0.05），表2~表5同。

胶的硬度均显著增加（P<0.05），表明淀粉凝胶在贮藏过程中发生了明显的老化现象。这是由于在贮藏过程中，直链淀粉和支链淀粉分子通过氢键作用发生重排和缔合形成更致密的三维网络结构，从而增加了淀粉凝胶的硬度[26]。此外，贮藏过程中凝胶体系发生水分迁移和相分离，一部分水分从淀粉凝胶网络中析出，导致凝胶基质浓度升高，进一步促进了分子链的紧密堆积，最终表现为凝胶硬度的显著增加[27]。

在贮藏第 7 d 时，添加 SSPS 的淀粉凝胶的硬度显著低于天然马铃薯淀粉凝胶（P<0.05），表明 SSPS 的添加能有效抑制凝胶体系硬度的增加，延缓淀粉凝胶的老化，这与 Zhao 等[28] 的研究结果较一致。这是因为 SSPS 分子结构中富含羟基、羧基等强亲水性基团，使其具有优异的水合能力，能够与淀粉分子竞争性结合水分[17]，显著降低了淀粉分子周围的水分含量，抑制了淀粉分子链通过氢键相互作用进行的重排和缔合，从而延缓了淀粉凝胶的老化过程，抑制了硬度增加。此外，SSPS 能够在淀粉分子周围形成一层物理屏障，一方面抑制直链淀粉的溢出，另一方面阻碍其与支链淀粉分子的重排，导致淀粉凝胶难以形成有序致密的三维网络结构，进一步减缓了凝胶硬度的增加[29]。

贮藏 7 d 后，当 SSPS 添加量相同时，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，添加 L-SSPS 淀粉凝胶的硬度显著下降（P<0.05），表明 L-SSPS 在延缓淀粉老化方面具有更好的作用。这可能是因为 L-SSPS 具有较短的分子链，更容易与淀粉分子结合，从而阻碍淀粉重结晶；同时，其较小的分子量使得分子链上具有更多暴露的游离羟基，这些羟基能够更有效地与体系中的水分子结合，延缓直链淀粉双螺旋结构的形成以及支链淀粉的重结晶过程，抑制淀粉凝胶的老化并延缓硬度的增加[30]。

2.2　不同分子量可溶性大豆多糖对贮藏过程中马铃薯淀粉凝胶水分分布的影响

水分作为影响淀粉老化过程的关键因素，其含量与分布状态与淀粉分子的重排行为存在显著相关性[31]。老化过程中，水分子一方面以自由水状态促进淀粉分子链的迁移，另一方面以结合水状态参与重结晶[32]。表 2 显示了添加不同分子量 SSPS 的马铃薯淀粉凝胶贮藏过程中水分分布的变化。T_{21} 为强结合水的弛豫时间，代表与淀粉等大分子紧密结合的水；T_{22} 为弱结合水的弛豫时间，代表存在于淀粉等大分子之间的水；T_{23} 为自由水的弛豫时间，代表体系中流动性最强的水；A_{21}、A_{22} 和 A_{23} 分别表示强结合水、弱结合水和自由水的峰面积。如表 2 所示，随着贮藏时间从 1 d 延长至 7 d，添加 SSPS 的淀粉凝胶的结合水含量（A_{21}+A_{22}）下降，自由水含量增加。这可能是因为在贮藏过程中，直链淀粉通过氢键作用逐渐形成有序的双螺旋结构并发生重结晶现象，同时支链淀粉侧链也参与结晶区的构建，与直链淀粉共同形成更为致密的结晶结构，导致水分子排出[33]。在贮藏 1 d 时，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，添加 SSPS

表 2　不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 d 和 7 d 的水分分布

Table 2　Water distribution of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 d and 7 d

贮藏时间	样品	弛豫时间（ms）			峰面积比（%）		
		T_{21}	T_{22}	T_{23}	A_{21}	A_{22}	A_{23}
1 d	Potato Starch Gel	1.67±0.01^{b}	16.22±0.00^{c}	1196.11±0.00^{a}	0.47±0.07^{d}	2.92±0.03^{a}	96.61±0.04^{a}
	H-SSPS-0.5-Gel	2.40±0.03^{a}	21.22±0.00^{b}	1045.69±0.00^{b}	1.27±0.18^{c}	2.65±0.10^{b}	96.08±0.28^{ab}
	H-SSPS-1.0-Gel	3.03±0.28^{a}	24.49±0.63^{a}	1045.69±0.00^{b}	1.95±0.10^{a}	2.27±0.1^{c}	95.78±0.00^{b}
	M-SSPS-0.5-Gel	3.23±0.00^{a}	24.50±4.63^{a}	1045.69±0.00^{b}	1.90±0.04^{a}	2.19±0.01^{c}	95.91±0.00^{ab}
	M-SSPS-1.0-Gel	2.31±0.02^{a}	19.89±1.89^{b}	1045.69±0.00^{b}	1.88±0.23^{ab}	2.23±0.05^{c}	95.89±0.28^{ab}
	L-SSPS-0.5-Gel	3.20±1.46^{a}	21.22±0.00^{b}	1045.69±0.00^{b}	1.55±0.78^{bc}	2.24±0.03^{c}	96.21±0.74^{ab}
	L-SSPS-1.0-Gel	2.71±0.02^{a}	22.37±3.30^{b}	1045.69±0.00^{b}	1.78±0.50^{b}	2.23±0.2^{c}	95.99±0.20^{ab}
7 d	Potato Starch Gel	0.79±0.07^{d}	58.28±5.53^{a}	799.23±0.00^{a}	2.61±0.40^{a}	0.90±0.22^{d}	96.49±0.19^{b}
	H-SSPS-0.5-Gel	2.06±0.58^{c}	19.89±0.80^{c}	799.23±0.00^{a}	1.89±0.03^{d}	1.62±0.10^{c}	96.52±0.14^{ab}
	H-SSPS-1.0-Gel	1.91±0.36^{c}	19.89±1.88^{c}	799.23±0.00^{a}	0.90±0.35^{c}	2.15±0.01^{a}	96.85±0.03^{a}
	M-SSPS-0.5-Gel	3.70±0.00^{a}	17.39±1.60^{d}	799.23±0.00^{a}	1.15±0.19^{c}	2.16±0.05^{a}	96.72±0.24^{ab}
	M-SSPS-1.0-Gel	2.47±0.00^{b}	26.02±2.40^{b}	799.23±0.00^{a}	1.03±0.04^{c}	2.01±0.01^{b}	96.96±0.07^{a}
	L-SSPS-0.5-Gel	3.26±0.62^{a}	22.75±2.18^{c}	799.23±0.00^{a}	1.24±0.11^{c}	1.83±0.09^{b}	96.93±0.02^{a}
	L-SSPS-1.0-Gel	2.93±1.08^{b}	26.02±1.42^{b}	799.23±0.00^{a}	1.85±0.02^{d}	1.89±0.14^{b}	96.27±0.17^{b}

淀粉凝胶的自由水含量下降，而对于添加不同分子量 SSPS 的淀粉凝胶，其自由水含量差异不显著。在贮藏 7 d 时，除 L-SSPS-1.0-Gel 外，其他添加不同分子量 SSPS 的淀粉凝胶自由水含量也没有显著性差异。

在贮藏第 1 d 时，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，添加 SSPS 的淀粉凝胶的 T_{21} 和 T_{22} 显著增加（$P<0.05$），而 T_{23} 显著减小（$P<0.05$）。这可能是因为 SSPS 的羟基与淀粉分子链形成竞争性结合作用，SSPS 通过氢键作用部分取代了淀粉链间的强结合水，削弱了水分子与淀粉链之间的结合，促进了水分子与淀粉双螺旋结构之间的相互作用，从而抑制自由水的流动性。在贮藏第 7 d 时，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，添加 SSPS 的淀粉凝胶的 T_{22} 左移，表明在贮藏过程中，添加 SSPS 的淀粉凝胶体系中水分子与淀粉凝胶网络结构中的相互作用较为稳定。在贮藏第 7 d，天然马铃薯淀粉凝胶的弱结合水含量从 1 d 时的 2.92% 降低到了 0.90%，而添加 SSPS 的淀粉凝胶的弱结合水含量保持相对稳定，表明适量 SSPS 的添加能够增加淀粉凝胶的持水能力。在 SSPS 影响方便米饭老化的研究中指出，SSPS 通过与淀粉分子竞争吸水提高了米饭的保水性，抑制了淀粉的老化进程[12]。

2.3 不同分子量可溶性大豆多糖对贮藏过程中马铃薯淀粉凝胶短程有序结构的影响

傅里叶红外光谱和拉曼光谱主要通过测定分子构象和结晶区化学键的振动来分析淀粉的老化行为，它们都能反映淀粉凝胶在老化过程中的分子重排现象。淀粉老化过程中分子链发生重排，形成更多有序的结晶结构，通常表现为红外光谱中 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处的吸光度比值（$R_{1047/1022}$）增加，1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处的吸收峰分别对应于淀粉的结晶结构和无定形结构；同时拉曼光谱中 480 cm^{-1} 处的半峰宽（FWHM）降低[34]。图 1 和表 3 显示了添加不同分子量 SSPS 的马铃薯淀粉凝胶贮藏过程中短程有序结构的变化。如表 3 所示，贮藏时间从 1 d 延长到 7 d，所有淀粉凝胶样品的 $R_{1047/1022}$ 显著上升（$P<0.05$），同时 FWHM 值显著下降（$P<0.05$），表明淀粉凝胶在贮藏过程中发生老化。贮藏 7 d 后，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，SSPS 的添加降低了淀粉凝胶的 $R_{1047/1022}$ 值，且 $R_{1047/1022}$ 值随着

表 3 不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 和 7 d 的 $R_{1047/1022}$ 和 FWHM

Table 3 $R_{1047/1022}$ and FWHM of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 and 7 d

项目	样品	1 d	7 d
$R_{1047/1022}$	Potato Starch Gel	0.989 ± 0.004^{Ba}	1.044 ± 0.001^{Aa}
	H-SSPS-0.5-Gel	0.979 ± 0.000^{Bb}	1.033 ± 0.001^{Aa}
	H-SSPS-1.0-Gel	0.950 ± 0.000^{Bc}	1.008 ± 0.003^{Ab}
	M-SSPS-0.5-Gel	0.894 ± 0.006^{Bd}	0.949 ± 0.002^{Ac}
	M-SSPS-1.0-Gel	0.873 ± 0.003^{Be}	0.926 ± 0.006^{Ad}
	L-SSPS-0.5-Gel	0.862 ± 0.007^{Bf}	0.891 ± 0.015^{Ae}
	L-SSPS-1.0-Gel	0.837 ± 0.001^{Bg}	0.866 ± 0.004^{Af}
FWHM（cm^{-1}）	Potato Starch Gel	16.27 ± 0.15^{Ag}	14.27 ± 0.70^{Bf}
	H-SSPS-0.5-Gel	18.64 ± 0.01^{Ae}	16.74 ± 0.02^{Be}
	H-SSPS-1.0-Gel	17.73 ± 0.07^{Af}	16.91 ± 0.15^{Be}
	M-SSPS-0.5-Gel	20.21 ± 0.02^{Ad}	19.76 ± 0.00^{Bd}
	M-SSPS-1.0-Gel	21.66 ± 0.07^{Ac}	20.87 ± 0.14^{Bc}
	L-SSPS-0.5-Gel	22.85 ± 0.02^{Ab}	21.88 ± 0.09^{Bb}
	L-SSPS-1.0-Gel	23.68 ± 0.03^{Aa}	22.81 ± 0.02^{Ba}

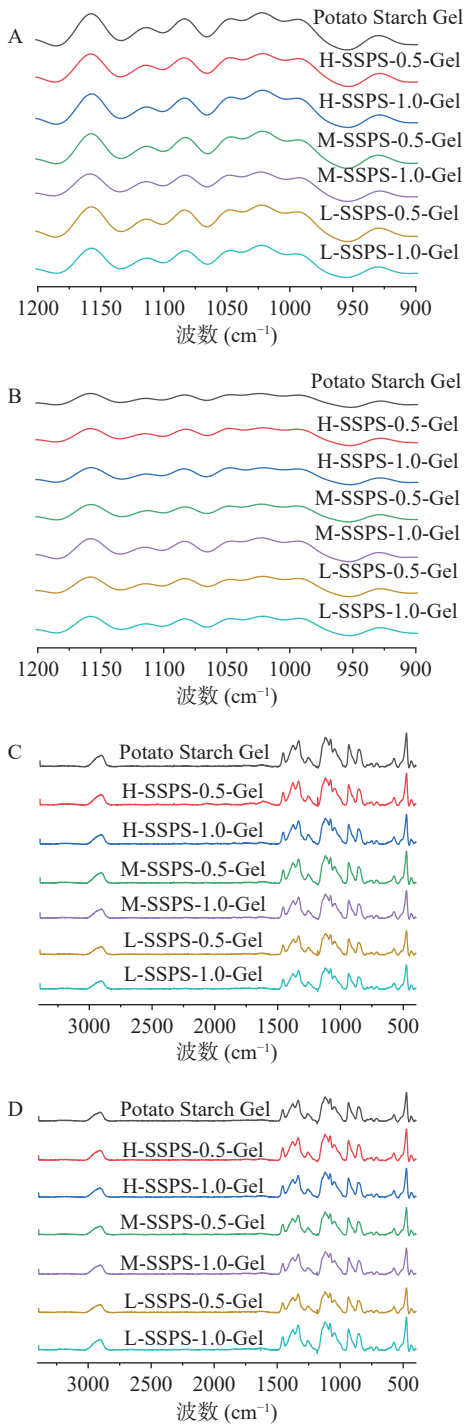


图 1 不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 和 7 d 的红外光谱和拉曼光谱

Fig.1 FTIR spectra and Raman spectral of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 and 7 d

注：A 和 B 为淀粉凝胶贮藏 1 和 7 d 的去卷积红外光谱；C 和 D 为淀粉凝胶贮藏 1 和 7 d 的拉曼光谱。

SSPS 添加量的增加呈下降趋势，而 FWHM 值则表现出上升趋势。这些结果证实 SSPS 能有效抑制淀粉分子重排，并延缓老化进程[35]。

在相同贮藏时间内，当 SSPS 添加量相同时，随着 SSPS 分子量的减小，SSPS-淀粉复合凝胶的 $R_{1047/1022}$ 值逐渐降低，而 FWHM 值则逐渐升高，其中 L-SSPS 对淀粉凝胶短程有序度增长的抑制效果最为明显，表明 L-SSPS 在抑制淀粉分子短程有序排列和延缓淀粉老化方面更具优势。这可能是由于 L-SSPS 分子结构中游离羟基含量较高，使其能够更有效地与水分子结合。通过这种竞争性水合作用，L-SSPS 既干扰了直链淀粉和支链淀粉的重结晶过程[29]，延缓了淀粉凝胶的整体老化进程，又直接导致了凝胶有序度的降低。

2.4　不同分子量可溶性大豆多糖对贮藏过程中马铃薯淀粉凝胶结晶结构的影响

X 射线衍射（XRD）能够通过检测淀粉凝胶中结晶区的形成和变化来反映淀粉凝胶的老化程度。从图 2 中可以观察到，所有淀粉凝胶在 17°附近出现一个明显的衍射峰，而 SSPS 的添加对衍射峰的位置没有明显的影响，表明 SSPS 没有改变淀粉凝胶的晶体类型。添加 H-SSPS 和 L-SSPS 后，17°处的衍射峰强度明显下降，且 L-SSPS 马铃薯淀粉凝胶的下降幅度更明显，表明在淀粉凝胶贮藏过程中，SSPS 能够有效抑制淀粉分子的重结晶，且 L-SSPS 抑制淀粉重结晶的能力更强。

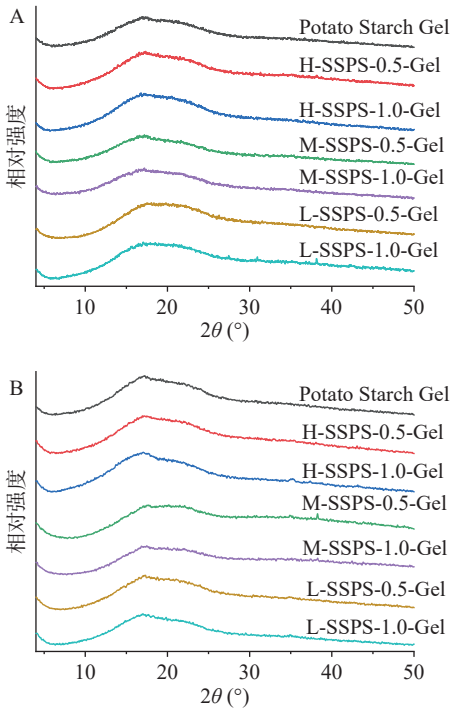


图 2　不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 d(A)和 7 d(B)的 XRD 图谱

Fig.2　Crystalline structure of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 d (A) and 7 d (B)

由表 4 可知，随着贮藏时间的延长，所有淀粉凝胶样品的相对结晶度显著增加（$P<0.05$），表明淀粉凝胶在贮藏过程中发生了老化。贮藏 7 d 后，与天然马铃薯淀粉凝胶相比，SSPS 的添加显著降低了淀粉凝胶的相对结晶度（$P<0.05$），且结晶度随着 SSPS 添加量的增加而显著降低。一方面，可能是由于 SSPS 通过羟基与直链淀粉分子形成氢键，阻碍了直链淀粉双螺旋结构的形成，从而抑制了直链淀粉重结晶，降低了淀粉的相对结晶度[36]。另一方面，SSPS 还抑制了淀粉分子之间的缔合，干扰了支链淀粉分子链间的相互作用，阻止其有序排列并形成更稳定的结晶结构，最终导致结晶度的降低。在魔芋葡甘露聚糖对淀粉结晶度的研究中指出，淀粉的结晶度随着多糖含量的增加而显著降低，是因为多糖和淀粉分子之间的相互作用抑制了淀粉的重结晶[36]。

表 4　不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏 1 d 和 7 d 的相对结晶度

Table 4　Relative crystallinity of different molecular weights SSPS-potato starch gel stored at 1 d and 7 d

样品	贮藏时间	
	1 d	7 d
Potato Starch Gel	13.70 ± 0.10^{Bc}	21.60 ± 0.14^{Aa}
H-SSPS-0.5-Gel	14.13 ± 0.04^{Bb}	19.10 ± 0.14^{Ab}
H-SSPS-1.0-Gel	15.53 ± 0.02^{Ba}	16.26 ± 0.06^{Ac}
M-SSPS-0.5-Gel	12.84 ± 0.08^{Bd}	15.15 ± 0.07^{Ade}
M-SSPS-1.0-Gel	12.20 ± 0.06^{Be}	14.91 ± 0.01^{Ae}
L-SSPS-0.5-Gel	11.70 ± 0.14^{Bf}	15.35 ± 0.07^{Ad}
L-SSPS-1.0-Gel	10.74 ± 0.12^{Bg}	12.85 ± 0.21^{Af}

贮藏 7 d 后，当 SSPS 添加量相同时，淀粉凝胶的相对结晶度随着 SSPS 分子量的减小呈逐渐下降趋势。这可能是由于 L-SSPS 的分子量较小、分子链较短，并且含有更多的羟基，导致 L-SSPS 能够更有效地与淀粉竞争水分子，从而干扰直链淀粉和支链淀粉的重结晶过程，显著降低淀粉凝胶的结晶度，进而延缓其老化过程。从上述结果可以得出，SSPS 抑制了晶体结构的重新形成，并且抑制效果随 SSPS 分子量的减小而增加。

2.5　不同分子量可溶性大豆多糖对贮藏过程中马铃薯淀粉凝胶老化度的影响

差示扫描量热法是研究淀粉老化行为的经典方法之一。淀粉凝胶老化后，在升温过程中会产生晶体熔解的吸热峰。通过测定吸热峰的熔融焓变（ΔH），可以量化淀粉的老化程度。ΔH 值越大，说明淀粉中形成的重结晶区域越多，分子排列越有序，老化程度也就越显著[37]。

添加不同分子量 SSPS 的马铃薯淀粉凝胶在贮藏过程中的老化焓和老化度如表 5 所示。随着贮藏时间的延长，所有淀粉凝胶的老化焓均呈上升趋势，这表明随着贮藏时间的延长，淀粉老化程度增加。在其他谷物淀粉中也发现了这种趋势[38–39]。这是因为老化初期直链淀粉分子通过氢键相互作用重结晶，老

表 5 不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶贮藏过程中的老化焓和老化度

Table 5 Retrogradation enthalpy and retrogradation degree of different molecular weights SSPS-potato starch gel during storage

样品	老化焓(J/g)				
	1 d	7 d	14 d	21 d	35 d
Potato Starch Gel	1.78±0.05^{Ea}	4.03±0.03^{Da}	9.90±0.04^{Ca}	14.28±0.00^{Ba}	14.69±0.01^{Aa}
H-SSPS-0.5-Gel	1.46±0.01^{Eb}	2.99±0.12^{Db}	7.53±0.09^{Cb}	11.69±0.02^{Bb}	12.30±0.05^{Ab}
H-SSPS-1.0-Gel	1.46±0.01^{Dbc}	2.89±0.01^{Cb}	7.39±0.01^{Bc}	11.30±0.00^{Ac}	11.26±0.00^{Ac}
M-SSPS-0.5-Gel	1.41±0.00^{Ebc}	2.77±0.00^{Dc}	7.10±0.00^{Cd}	10.94±0.01^{Bd}	11.26±0.00^{Acd}
M-SSPS-1.0-Gel	1.41±0.00^{Ec}	2.65±0.07^{Dd}	7.09±0.05^{Cd}	10.90±0.01^{Be}	11.21±0.02^{Ad}
L-SSPS-0.5-Gel	1.09±0.07^{Dd}	2.34±0.08^{Ce}	7.05±0.12^{Bd}	10.87±0.01^{Af}	11.00±0.02^{Ae}
L-SSPS-1.0-Gel	1.09±0.03^{Dd}	2.28±0.07^{Ce}	7.04±0.08^{Bd}	10.86±0.01^{Af}	10.94±0.05^{Af}
			老化度(%)		
Potato Starch Gel	10.68±0.30^{Ea}	24.14±0.17^{Da}	59.34±0.22^{Ca}	85.58±0.02^{Ba}	88.05±0.07^{Aa}
H-SSPS-0.5-Gel	10.40±0.04^{Eab}	21.25±0.82^{Db}	53.51±0.62^{Cb}	83.10±0.16^{Bb}	87.42±0.38^{Ab}
H-SSPS-1.0-Gel	10.29±0.09^{Db}	20.39±0.07^{Cc}	52.15±0.06^{Bc}	79.73±0.02^{Ac}	79.44±0.01^{Ac}
M-SSPS-0.5-Gel	9.88±0.01^{Ec}	19.42±0.00^{Dd}	49.80±0.02^{Cd}	76.70±0.06^{Bd}	78.96±0.01^{Ad}
M-SSPS-1.0-Gel	9.88±0.03^{Ec}	18.60±0.51^{De}	49.75±0.35^{Cd}	76.46±0.05^{Be}	78.70±0.17^{Ad}
L-SSPS-0.5-Gel	7.48±0.46^{Dd}	16.03±0.54^{Cf}	48.31±0.85^{Be}	74.56±0.06^{Af}	75.41±0.11^{Ae}
L-SSPS-1.0-Gel	7.25±0.23^{Dd}	15.23±0.47^{Cg}	47.01±0.52^{Bf}	72.57±0.05^{Ag}	73.10±0.32^{Af}

注: 同行上标大写字母表示不同贮藏时间之间存在显著差异, P<0.05。

化后期直链淀粉的晶核为支链淀粉的重结晶提供了条件, 导致淀粉老化程度增加[40]。与天然马铃薯淀粉凝胶相比, 添加 SSPS 的淀粉凝胶在贮藏 1、7、14、21 和 35 d 时的老化焓均显著降低(P<0.05), 表明 SSPS 的添加能够有效抑制淀粉在老化过程中的重结晶行为, 延缓淀粉的短期和长期老化。淀粉凝胶在不同贮藏时间的老化度变化趋势与老化焓一致, 且在相同的 SSPS 添加量条件下, 老化度随着 SSPS 分子量的减小而降低, L-SSPS 对淀粉短期和长期老化的抑制效果最突出。

2.6 不同分子量可溶性大豆多糖-马铃薯淀粉凝胶的老化动力学

Avrami 指数 n 和速率常数 k 常作为评价老化速率的指标。表 6 总结了添加不同分子量 SSPS 的淀粉凝胶的老化动力学方程及参数, 所有样品的决定系数 R^2>0.980, 表明添加不同分子量 SSPS 的马铃薯淀粉凝胶体系在贮藏过程中的重结晶行为均符合 Avrami 方程。天然马铃薯淀粉凝胶和添加 H-SSPS 的淀粉凝胶的 n 值均小于 1, 说明淀粉凝胶通过瞬时成核形成晶体结构。添加 M-SSPS 和 L-SSPS 的淀粉凝胶的 n 值均大于 1 且非常接近 1, 说明该体系重结晶过程是瞬时成核和自发成核共同作用的一维棒状晶体, 并且以瞬时成核为主, 并可能伴随少量自发成核[41]。n 值接近 1, 表明晶体成核过程主要在贮藏初期, 淀粉凝胶老化在贮藏初始阶段变化明显。由表 6 可知, SSPS 的添加增大了 n 值, 这与 SSPS 和淀粉分子的结合有关, 即添加 SSPS 减缓了淀粉凝胶重结晶速率, 抑制了淀粉凝胶老化。

表 6 不同分子量 SSPS-马铃薯淀粉凝胶的老化动力学参数

Table 6 Retrogradation kinetic parameters of different molecular weights SSPS-potato starch gel

样品	Avrami方程	n	lnk	k	$t_{1/2}$(d)	R^2
Potato Starch Gel	y=0.938x−1.702	0.938	−1.702	0.182	4.055	0.987
H-SSPS-0.5-Gel	y=0.955x−1.931	0.955	−1.931	0.145	5.003	0.989
H-SSPS-1.0-Gel	y=0.938x−1.959	0.938	−1.959	0.141	5.240	0.996
M-SSPS-0.5-Gel	y=1.015x−1.964	1.015	−1.964	0.140	4.868	0.984
M-SSPS-1.0-Gel	y=1.048x−2.048	1.048	−2.048	0.129	5.124	0.989
L-SSPS-0.5-Gel	y=1.126x−2.078	1.126	−2.078	0.125	4.916	0.980
L-SSPS-1.0-Gel	y=1.169x−2.128	1.169	−2.128	0.119	4.975	0.980

结晶速率常数 k 表征单位时间内晶体生长的相对速率, 与晶体成核方式和线性生长速率有关, k 值与淀粉老化速率正相关[31,42]。相比天然马铃薯淀粉凝胶, 添加 SSPS 的淀粉凝胶的 k 值明显降低, 且 k 值随 SSPS 的添加量升高而下降, 说明 SSPS 的添加量可以影响淀粉凝胶的老化速率。当 SSPS 添加量相同时, k 值随着 SSPS 分子量的减小而降低, 说明 L-SSPS 对淀粉老化的抑制效果最突出。天然马铃薯淀粉凝胶的半回生时间 $t_{1/2}$ 仅为 4.055 d, 而添加 SSPS 的淀粉凝胶的 $t_{1/2}$ 延长至 4.868~5.240 d, 进一步验证了 SSPS 的抗老化效果。此模型拟合结果与前文有关淀粉凝胶有序结构的实验结论基本一致。综合动力学参数分析可知, SSPS 可通过调控结晶成核机制与生长维度, 有效延缓马铃薯淀粉凝胶的老化进程。

3 结论

本文研究了三种不同分子量 SSPS 对马铃薯淀粉凝胶老化行为的影响。研究结果表明, 在贮藏过程中, 添加三种不同分子量 SSPS 均显著降低淀粉凝胶的硬度、相对结晶度、短程有序度和老化度(P<0.05)。与此同时, 还可有效减少凝胶内部的水分迁移, 从而抑制淀粉凝胶的老化。在这三种不同分子量的 SSPS 中, L-SSPS 表现出最强的抑制效果。L-SSPS 能够有效抑制马铃薯淀粉凝胶的老化, 主要是由于其分子量小、分子链短, 并且含有更多的羟基。

这些特性使得 L-SSPS 能够更有效地与淀粉竞争水分子，从而干扰直链淀粉和支链淀粉的重结晶过程，进而延缓淀粉凝胶的老化过程。Avrami 老化动力学结果表明，添加 SSPS 降低了马铃薯淀粉凝胶的结晶速率常数 k，并延长了半回生时间 $t_{1/2}$。本研究结果为开发基于 SSPS 的天然抗老化剂提供了理论依据，对改善淀粉基食品的品质稳定性、延长货架期具有重要指导意义。未来可进一步探讨 SSPS 分子结构差异对不同种类淀粉的凝胶和老化特性的影响规律及其在复杂食品体系中的适用性。

© 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] YU Wanxu, YU Yudie, LI Jing, et al. Effects of deacetylated konjac glucomannan on the retrogradation properties of pea, mung bean and potato starches during the storage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304: 140922.

[2] 李子钰, 余世锋. 高压湿热处理对玉米淀粉回生性质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 66−69. [LI Ziyu, YU Shifeng. Effect of high pressure wet and heat treatment on structure and properties of maize starch[J]. The Food Industry, 2021, 42(3): 66−69.]

[3] DUN Huiyu, LIANG Hongshan, ZHAN Fuchao, et al. Influence of O/W emulsion on gelatinization and retrogradation properties of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105652.

[4] VERNON-CARTER E J, ALVAREZ-RAMIREZ J, BELLO-PEREZ L A, et al. Inhibition of the amylolytic hydrolysis of starch by ethanol[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 285−290.

[5] LIN Zexue, GENG Donghui, QIN Wanyu, et al. Effects of damaged starch on glutinous rice flour properties and sweet dumpling qualities[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 181: 390−397.

[6] HONG Tingting, WANG Lulu, XU Yue, et al. Comparative study of soluble soybean polysaccharides on bread staling under acidic conditions[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 133950.

[7] WANG Huimin, QIU Junjie, WU Yanwen, et al. Impact of soluble soybean polysaccharide on the gelatinization and retrogradation of corn starches with different amylose content[J]. Food Research International, 2024, 184: 114254.

[8] HONG Tingting, YANG Tian, CHEN Liangyu, et al. Soluble soybean polysaccharides-induced changes in pasting properties of wheat flour under acidic conditions: From the view of starch molecular structure[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(3): 799−810.

[9] LIU Dan, LI Zhi, FAN Ziwei, et al. Effect of soybean soluble polysaccharide on the pasting, gels, and rheological properties of kudzu and *Lotus* starches[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 443−452.

[10] LAN Guowei, XIE Shumin, DUAN Qingfei, et al. Effect of soybean polysaccharide and soybean oil on gelatinization and retrogradation properties of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130772.

[11] 赵启竹. 可溶性大豆多糖对淀粉老化的抑制及影响因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [ZHAO Qizhu. Inhibition of soluble soybean polysaccharides on starch retrogradation and influencing factors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[12] WANG Jian, HE Yutang, LI Xuyang, et al. Effect of soluble soybean polysaccharides on the short- and long-term retrogradation properties of instant rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 4850−4857.

[13] 何喜珍. 不同分子量大豆多糖的制备、表征和抗氧化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2016. [HE Xizhen. Preparation, characterization and antioxidation study of different molecular weight of soluble soybean polysaccharides[D]. Shanghai: East China Normal University, 2016.]

[14] 韩晴. 不同来源水溶性大豆多糖功能特性及基本结构的比较研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019. [HAN Qing. Comparative study on functional properties and structure of soluble soybean polysaccharides from different sources[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.]

[15] 张权, 陈洁, 曾茂茂, 等. 制造过程对可溶性大豆多糖结构和产物起泡性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 33−38. [ZHANG Quan, CHEN Jie, ZENG Maomao, et al. Effect of processing parameters on the structure of soybean polysaccharide and its foaming properties[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 33−38.]

[16] 徐洁茹. 可溶性大豆多糖的乙酰化修饰及其特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [XU J R. Preparation and characterization of acetylated soluble soybean polysaccharides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[17] 徐平, 王月慧, 陈磊, 等. 可溶性大豆多糖对鲜湿豆丝货架期内贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 144−152. [XU, WANG Y H, CHEN L, et al. Effect of soluble soybean polysaccharide on storagequality of fresh wet bean thread during shelf life period[J]. Food Science, 2023, 44(17): 144−152.]

[18] 申慧珊, 程上珍, 潘豫昌, 等. 可溶性大豆多糖对糯米粉理化特性及速冻汤圆品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 143−150. [SHEN Huishan, CHENG Shangzhen, PAN Yuchang, et al. Effects of soluble soybean polysaccharide on physicochemical properties of glutinous rice flour and quality of quick-frozen sweet dumplings[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 143−150.]

[19] 吴阳阳, 温娅晴, 艾志录, 等. 磁场辅助冻结对冷冻熟制面条冻藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(9): 229−237. [WU Yangyang, WEN Yaqing, AI Zhilu, et al. Effects of magnetic field-assisted freezing on frozen storage quality of frozen cooked noodles[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(9): 229−237.]

[20] 张百刚, 杨善德, 李燕, 等. 文成糯山药多糖纯化与体外生物活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 113−121. [ZHANG Baigang, YANG Shande, LI Yan, et al. Purification and *in vitro* bioactivity of polysaccharide from Wencheng waxy yam[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 113−121.]

[21] SHEN Huishan, CHENG Shangzhen, MA Jieqing, et al. Controlling starch multi-scale structure and physicochemical properties of freeze-thawed dough with different levels of *Artemisia sphaerocephala* Krasch gum[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 111020.

[22] 张现芳, 黄婷, 刘石生. 谷蛋白及改性谷蛋白对木薯淀粉理化性质和消化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(24): 22−30. [ZHANG Xianfang, HUANG Ting, LIU Shisheng. Influence of gluten and modified gluten on the physicochemical and digestive properties of cassava starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(24): 22−30.]

[23] SANGWONGCHAI W, TANANUWONG K, KRUSONG

K, et al. Starch chemical composition and molecular structure in relation to physicochemical characteristics and resistant starch content of four Thai commercial rice cultivars differing in pasting properties[J]. Polymers, 2023, 15(3): 574.

[24] MYGDALIA A S, NOUSKA C, HATZIKAMARI M, et al. A sourdough process based on fermented chickpea extract as leavening and anti-staling agent for improving the quality of gluten-free breads[J]. Food Research International, 2022, 159: 111593.

[25] QIU S, PUNZALAN M E, ABBASPOURRAD A, et al. High water content, maltose and sodium dodecyl sulfate were effective in preventing the long-term retrogradation of glutinous rice grains-A comparative study[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105247.

[26] HOU Cuidan, ZHAO Xiaohui, TIAN Mengqi, et al. Impact of water extractable Arabinoxylan with different molecular weight on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2020, 318: 126477.

[27] SHEN H S, WANG J Q, LI X H, et al. Investigation of electron beam irradiation in inhibiting retrogradation behavior of mung bean starch gel[J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172(P3): 112168.

[28] ZHAO Qizhu, TIAN Hao, CHEN Long, 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.

[29] 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. [WANG S Y, QI J R, YANG X Q. Effect of soybean polysaccharides on gelatinization and gel properties of rice starch[J]. China Brewing, 2011(7): 155−158.]

[30] ZHANG M Y, GOLDING B J, PRISTIJONO P, et al. Effects of Huangjing polysaccharides on the properties of sweet potato starch[J]. LWT, 2024: 116474.

[31] OH S M, KIM H Y, BAE J E, et al. Physicochemical and retrogradation properties of modified chestnut starches[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(6): 1723−1731.

[32] 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. [WANG S Q, XU X Y, CUI W J, et al. Effect of soy lsoflavones on the retrogradation properties of corn starch and water migration research[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(6): 232−241.]

[33] ZHAO Kaifeng, JIA Ziyang, HOU Lili, et al. Study on physicochemical properties and anti-aging mechanism of wheat starch by anionic polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127431.

[34] MUTUNGI C, PASSAUER L, ONYANGO C, et al. Debranched cassava starch crystallinity determination by Raman spectroscopy: Correlation of features in Raman spectra with X-ray diffraction and ^{13}C CP/MAS NMR spectroscopy[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(1): 598−606.

[35] LÜ Yue, CAI Xiujuan, SHI Naiwen, et al. Emulsification performance and stabilization mechanism of okra polysaccharides with different structural properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 153: 109997.

[36] SCHWARTZ J M, Le BAIL K, GARNIER C, et al. Available water in konjac glucomannan-starch mixtures. Influence on the gelatinization, retrogradation and complexation properties of two starches[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 41: 71−78.

[37] BAI Jie, ZHANG Leshan, JIA Xin, et al. Multi-scale structural changes and mechanistic analysis of wheat starch gels with common proteins in short-term retrogradation at low temperature [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109160.

[38] 张晓宇, 张丹丹, 李荣芳, 等. 皂荚糖胶对玉米淀粉老化性质的影响及体系的水分分布[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 31−36. [ZHANG Xiaoyu, ZHANG Dandan, LI Rongfang, et al. Effects of *Gleditsia sinensis* lam. gum on the retrogradation properties of corn starch and water distribution in mixture systems[J]. Food Science, 2021, 42(12): 31−36.]

[39] CHEN Long, REN Fei, ZHANG Zipei, et al. Effect of pullulan on the short-term and long-term retrogradation of rice starch[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 115: 415−421.

[40] NIU Liya, WU Leiyan, XIAO Jianhui. Inhibition of gelatinized rice starch retrogradation by rice bran protein hydrolysates [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175: 311−319.

[41] 徐露. 改良剂对粉圆食用品质及老化特性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023. [XU Lu. Effects of improvers on the edible qualities and the retrogradation properties of tapioca pearl [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.]

[42] HAN K T, KIM H R, MOON T W, et al. Isothermal and temperature-cycling retrogradation of high-amylose corn starch: Impact of sonication on its structural and retrogradation properties[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105650.