

# 可溶性大豆多糖对大米淀粉物化特性的影响

武娜, 杨杨, 边鑫, 范婧, 马春敏, 任丽琨, 张娜\*

(哈尔滨商业大学食品工程学院, 哈尔滨 150028)

**摘要:** **目的** 探究可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)对大米淀粉物化特性的影响。**方法** 以大米淀粉为原料, 将 SSPS 以不同比例与米淀粉进行混合, 分析 SSPS 对大米淀粉膨胀度、透明度、冻融稳定性、糊化特性以及流变学特性的影响。**结果** 与对照组相比, 在大米淀粉中加入 SSPS 可显著降低淀粉的膨胀度及溶解度, 当 SSPS 添加量为 10%时, 膨胀度和溶解度最低, 分别为 10.99 g/g (95℃)和 70.52%。随着 SSPS 添加量和冻融次数的增加, 体系的析水率呈上升趋势。糊化性质表明, SSPS 的添加使淀粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、崩解值及回生值均降低, 但是糊化温度上升。动态流变学结果表明样品体系  $G'$  均大于  $G''$ , 且呈现出频率依赖性, 说明具有典型的弱凝胶特性。**结论** 可溶性大豆多糖在一定程度上可以改善大米淀粉的特性, 为 SSPS 在淀粉基食品中的应用提供理论指导。

**关键词:** 大米淀粉; 可溶性大豆多糖; 物化特性

## Effects of soluble soybean polysaccharides on the physical and chemical properties of rice starch

WU Na, YANG Yang, BIAN Xin, FAN Jing, MA Chun-Min, REN Li-Kun, ZHANG Na\*

(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

**ABSTRACT: Objective** To investigate the effects of soluble soybean polysaccharides (SSPS) on the physical and chemical properties of rice starch. **Methods** Using rice starch as raw material, SSPS was mixed with rice starch in different proportions to investigate the effects of SSPS on the swelling, transparency, freeze-thaw stability, pasting characteristics and rheological properties of rice starch. **Results** Compared with the control group, the addition of SSPS to rice starch significantly reduced the swelling and solubility of starch, and the lowest swelling and solubility were 10.99 g/g (95℃) and 70.52%, respectively, when SSPS was added at 10%. With the increase of SSPS addition and the number of freeze-thaws, the water leaching rate of the system showed an increasing trend. The pasting properties showed that the addition of SSPS decreased the peak viscosity, trough viscosity, final viscosity, disintegration value and regeneration value of starch, but increased the pasting temperature. The dynamic rheology results showed that the sample system  $G'$  was larger than  $G''$  and exhibited frequency dependence, indicating that it had typical weak gel properties. **Conclusion** Soluble soybean polysaccharide can improve the properties of rice

**基金项目:** 黑龙江省科技重大专项(2020ZX08B02)、国家重点研发计划项目(2021YFD2100902-3)、国家自然科学基金项目(32072258)、中央财政支持地方高校发展专项资金优秀青年人才支持计划项目

**Fund:** Supported by the Heilongjiang Province Science and Technology (2020ZX08B02), the National Key Research and Development Program (2021YFD2100902-3), the National Natural Science Foundation of China (32072258), and the Outstanding Young Talents Program Supported by Special Funds from the Central Finance to Support the Development of Local Universities

\***通信作者:** 张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。E-mail: foodzhangna@163.com

\***Corresponding author:** ZHANG Na, Ph.D, Professor, Harbin University of Commerce, Food Chemistry, No.1, Xuehai Street, Songbei District, Harbin 150028, China. E-mail: foodzhangna@163.com

starch to some extent, it provides theoretical guidance for the application of SSPS in starch-based foods.

**KEY WORDS:** rice starch; soluble soybean polysaccharide; physical and chemical properties

## 0 引言

大米是世界上种植最广, 需求量最高的粮食作物之一, 是世界上一半以上人口的食粮<sup>[1]</sup>。淀粉是大米最主要的成分, 约占大米干重的 75%~85%, 其基本结构为葡萄糖, 由直链淀粉和支链淀粉组成<sup>[2]</sup>。作为一种常见的碳水化合物, 淀粉为人类提供了超过 60% 的能量。淀粉的理化特性及其结构在淀粉基食品的加工中起到至关重要的作用。然而, 天然大米淀粉存在易老化、不耐热、容易受加工贮藏条件影响等缺点, 限制了其在食品工业中的应用。因此, 有必要采取一定措施改善其性质。目前国内外有关于淀粉改性的研究大多集中于添加外源物质(多酚<sup>[3]</sup>、蛋白质<sup>[4]</sup>等)与淀粉发生相互作用, 增强淀粉的理化性能, 从而改善淀粉的加工适用度。

近些年, 研究学者发现多糖也可以与淀粉相互作用起到改变淀粉结构及理化性质的作用。廖瑾等<sup>[5]</sup>研究结果表明, 阿拉伯胶可以降低马铃薯淀粉的峰值黏度及崩解值, 使其具有更好的热稳定性。王慧云等<sup>[6]</sup>研究发现, 添加亚麻多糖能降低淀粉的热特性, 但其膨胀力和冻融稳定性均有所提高, 这与 MUADKLAY 等<sup>[7]</sup>研究亚麻多糖对木薯淀粉冻融稳定性影响的结果一致。此外, 金娃等<sup>[8]</sup>在研究中发现, 添加海藻糖不仅可以显著提高淀粉糊的透明度及冻融稳定性, 还可以改善淀粉的凝沉性, 从而起到抑制淀粉老化的作用。普鲁兰多糖也可以起到抑制淀粉糊化的作用, 此外还可以降低淀粉的消化率<sup>[9]</sup>。这些研究表明不同多糖类物质对于淀粉的理化特性都具有积极的影响, 在实际应用当中, 也可以在一定程度上起到改善淀粉基食品品质的作用。因此, 研究多糖对淀粉理化特性的影响对提升其淀粉基食品有重要的意义。

可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)是从豆制品加工副产物豆渣中提取出来的一种阴离子多糖<sup>[10]</sup>。由于其黏度低、水溶性好、抗黏结性好, 此外还具有良好的乳化性、起泡性、稳定性等功能特性, 因此在食品加工中被广泛应用。已有研究表明, SSPS 的添加能够提高碎米粉糊化液的糊化温度和糊化时间, 降低其黏度和回生值, 有助于提高糊化液的剪切稳定性并且能够增加结合水的含量, 从而起到抑制米制品回生的作用<sup>[11]</sup>。此外, SSPS 被应用在小麦制品中, 增加小麦面团的析水率、稳定时间和粉质指数, 降低其弱化度, 从而改善其面制品产品品质<sup>[12]</sup>。

但是, 目前有关 SSPS 对大米淀粉性质的影响还鲜见报道。因此本研究以大米淀粉为主要原料, 研究不同添加

量的可溶性大豆多糖对大米淀粉糊化特性、膨胀度、溶解度、透明度、冻融稳定性及流变学特性的影响, 以期可为可溶性大豆多糖在淀粉基食品中的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

粳米(黑龙江省五常金禾米业有限公司); SPSS(食品级, 浙江一诺生物科技有限公司); 氢氧化钠、碘、碘化钾(分析纯, 天津市光复科技发展有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

DF-101S 恒温磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司); FA2004 分析天平(精度 0.0001 mg, 上海越平科学仪器有限公司); FW-135 粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司); TDL-4A 离心机(上海菲恰尔分析仪器有限公司); UI-1810PC 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限公司); HWS 恒温水浴锅(上海元析仪器有限公司)。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 大米淀粉的制备

大米淀粉的制备参考 SINGH 等<sup>[13]</sup>的方法并稍作修改, 大米磨粉过 80 目筛, 按照料液比为 1:5 (g/mL)加入浓度为 0.085 mol/L 的 NaOH 溶液, 于 40°C 磁力搅拌 4 h, 得到的悬浮液在 4000×g 条件下离心 15 min, 刮去上层附着的黄色物质, 加水稀释成淀粉乳, 再次离心(反复此操作直至沉淀表面无黄色软层), 调节 pH 7, 再一次离心得到淀粉精浆, 于 45°C 条件下干燥 24 h 得到大米淀粉。

#### 1.3.2 膨胀度和溶解度的测定

参照 SHARMA 等<sup>[14]</sup>的方法稍作修改, 分别称取适量的大米淀粉, 按淀粉干质量的 0%、2%、4%、6%、8%、10%加入 SPSS, 分散在蒸馏水中配制成 1% 的淀粉乳浊液。混合均匀后, 置于沸水浴中糊化 30 min, 冷却至室温后于 5000×g 条件下离心 20 min, 称量离心管中剩余的沉淀物质, 按公式(1)计算膨胀度。吸取上清液在 105°C 烘干至恒重, 称得水溶淀粉质量, 由公式(2)计算其溶解度。

$$\text{膨胀度}/\% = \frac{P}{W - A} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{溶解度}/\% = \frac{A}{W} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $A$  为水溶淀粉质量, g;  $W$  为起始淀粉质量, g;  $P$  为膨胀淀粉质量, g。

#### 1.3.3 透光率的测定

按照 1.3.2 的方法制备 1% 的淀粉乳浊液, 冷却至室温后, 以蒸馏水为空白对照, 于 620 nm 波长处测定其透光率,

重复 3 次, 结果取平均值。

### 1.3.4 冻融稳定性的测定

按照 1.3.2 的方法制备 10% 的淀粉乳浊液, 冷却至室温后, 于  $-24^{\circ}\text{C}$  条件下冷冻 22 h, 取出后于  $30^{\circ}\text{C}$  水浴锅中水浴 2 h, 在  $5000\times\text{g}$  条件下离心 15 min, 弃去上清液, 称取沉淀物质量, 计算析水率[如公式(3)], 此冻融循环操作重复 5 次<sup>[15]</sup>。

$$\text{析水率}/\% = \frac{(\text{糊质量} - \text{沉淀物质量})}{\text{糊质量}} \times 100\% \quad (3)$$

### 1.3.5 糊化特性的测定

参照 OH 等<sup>[16]</sup>的方法稍作修改, 准确称取 3 g 分别添加 0%、2%、4%、6%、8%、10% SPSS 的大米淀粉与 25 mL 蒸馏水混合均匀后加入到 RVA 铝罐中开始测定。具体测定条件为:  $50^{\circ}\text{C}$  保持 1 min; 以  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  升温至  $95^{\circ}\text{C}$ ; 在  $95^{\circ}\text{C}$  下保持 7 min; 以  $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的速度降至  $50^{\circ}\text{C}$ ; 在  $50^{\circ}\text{C}$  下保持 4.5 min; 旋转浆在前 10 s 为 960 r/min, 之后保持在 160 r/min。

### 1.3.6 动态流变学特性的测定

取 1.3.5 测试后的淀粉糊放入流变仪测定平台, 具体测定条件为: 检测板径为 50 mm, 板间距 1 mm, 在  $25^{\circ}\text{C}$ 、1% 的应变力下, 频率变化范围为 0.1~10 Hz, 测量样品的储能模量( $G'$ )和损耗模量( $G''$ )的变化。

## 1.4 数据处理

实验重复测定 3 次, 结果用平均值 $\pm$ 标准偏差表示, 采用 SPSS 8.5 对数据进行统计分析和处理, 采用 Duncan 法进行差异显著性分析,  $P<0.05$  表示差异显著。

## 2 结果与分析

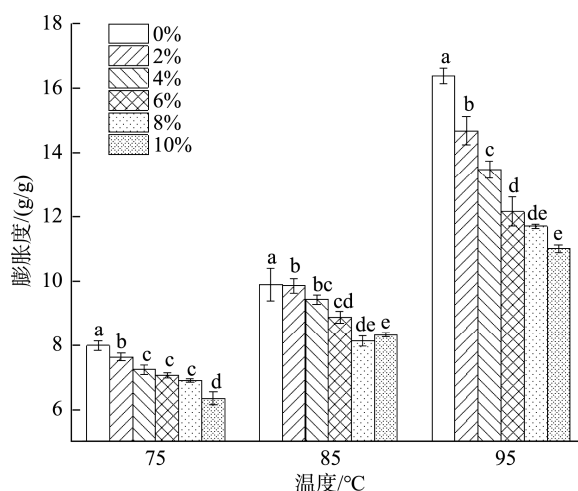
### 2.1 SPSS 对大米淀粉膨胀度的影响

淀粉的膨胀度反映了淀粉颗粒吸收水分的能力, 与颗粒中的支链淀粉有关<sup>[17]</sup>。如图 1 所示, 大米淀粉的膨胀度随着温度的升高逐渐增加,  $75^{\circ}\text{C}$  下膨胀度为 7.97 g/g, 当温度升高到  $95^{\circ}\text{C}$  时, 膨胀度为 16.37 g/g, 增加了 51.37%, 温度的升高使得淀粉的膨胀度提高可能是高温促使未溶解的淀粉吸水膨胀所导致<sup>[18]</sup>。在每个温度( $75$ 、 $85$ 、 $95^{\circ}\text{C}$ )下, 大米淀粉的膨胀度随着 SPSS 添加量的增加整体呈现降低趋势, 当 SPSS 的添加量为 10% 时, 淀粉的膨胀度显著减小 ( $P<0.05$ )。在  $75$ 、 $85$ 、 $95^{\circ}\text{C}$  下分别降低了 20.45%、23.62%、30.86%。这可能是由于 SPSS 包裹在淀粉周围, 与淀粉竞争水分, 降低了淀粉颗粒发生膨胀时所需的水分, 从而抑制了淀粉的吸水膨胀。

### 2.2 SPSS 对大米淀粉溶解度的影响

淀粉的溶解度反映了淀粉颗粒膨胀过程中的溶解程

度。淀粉颗粒在水分子的参与下加热糊化, 当糊化到一定程度时发生膨胀, 直链淀粉开始浸出, 溶解在体系中<sup>[19]</sup>。由图 2 可知, 添加 SPSS 后, 淀粉的溶解度显著降低 ( $P<0.05$ ), 当多糖的添加量为 8%~10% 时, 下降效果不再明显 ( $P>0.05$ ), 呈现基本稳定状态, 当多糖的添加量达到 10% 时, 大米淀粉的溶解度由 80.90% 下降至 70.52%, 说明 SPSS 限制了淀粉的溶解, 这与郑明静<sup>[20]</sup>的研究一致。淀粉溶解度的降低归因于 SPSS 的添加附着在淀粉颗粒表面, 降低了淀粉与水分子的相互作用, 从而也限制了直链淀粉的浸出和支直链淀粉的溶出, 使得可溶解的淀粉减少, 从而导致溶解度降低<sup>[21]</sup>。



注: a~e: 不同的上标字母分别表示同一温度下各组之间存在显著性差异,  $P<0.05$ , 下同。

图 1 SPSS 对大米淀粉膨胀度的影响

Fig.1 Effects of SPSS on the swelling degree of rice starch

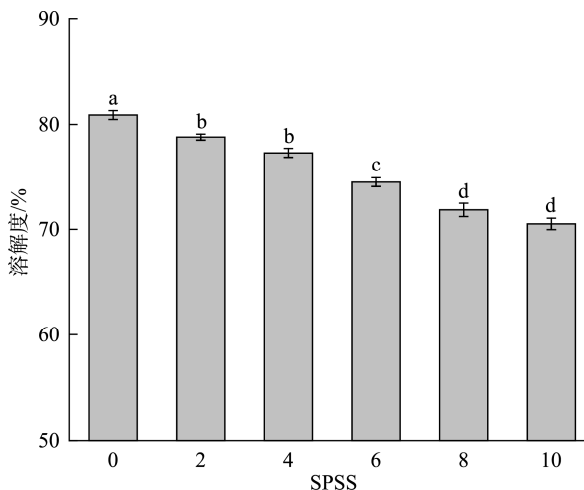


图 2 SPSS 对大米淀粉溶解度的影响

Fig.2 Effects of SPSS on the solubility of rice starch

### 2.3 SSPS 对大米淀粉透明度的影响

淀粉糊的透明度反映了淀粉颗粒糊化时的膨胀程度及分子之间的缔合程度, 与淀粉颗粒的大小、直链淀粉含量及直链淀粉、支链淀粉比例有关<sup>[22]</sup>。淀粉经过加热吸水膨胀, 当淀粉膨胀完全且分子间不发生缔合, 此时, 体系中不存在残留的淀粉, 则淀粉糊的透明度高, 反之, 则透明度降低。

如图 3 所示, 淀粉的透明度随着 SSPS 添加量的增加显著降低( $P < 0.05$ ), 当添加量为 8% 时, 下降趋势不再显著( $P > 0.05$ )。当 SSPS 添加量为 10% 时, 透明度达到最小值为 5.352, 与空白组相比降低了 3.312, 说明多糖的含量对淀粉的透明度变化起重要作用, 这可能是由于在糊化过程中, 大豆多糖通过附着在淀粉颗粒表面从而限制了淀粉与水分子相结合, 使游离在体系中的淀粉颗粒增多, 透明度降低。此外, 添加 SSPS 后, 淀粉分子之间发生缔合, 产生更多的聚集, 从而降低了淀粉糊的透光度<sup>[23]</sup>。

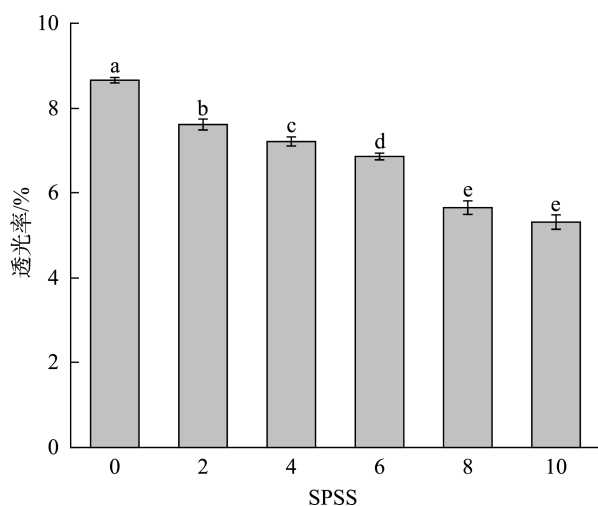


图 3 SSPS 对大米淀粉透光率的影响

Fig.3 Effects of SSPS on the light transmission of rice starch

### 2.4 SSPS 对大米淀粉冻融稳定性的影响

冻融稳定性是指淀粉在冷冻贮藏后经过解冻, 还能保持原有组织结构的程度<sup>[24]</sup>。图 4 显示了经过 5 次冻融循环处理大米淀粉以及 SSPS-大米淀粉混合体系析水率的变化。随着冻融循环次数的增加体系的析水率呈现上升趋势, 这是因为冻融处理使得淀粉体系被破坏, 出现大量的孔洞, 导致析水率的增加<sup>[25]</sup>。析水率的变化在前 3 次冻融循环处理中尤为明显, 之后趋于相对稳定状态, 这说明淀粉在糊化过程中吸收的水分绝大部分已经析出, 随着冻融循环的继续进行, 体系内的水分越来越少, 所以, 可以析出的水分也变少。结果表明, SSPS 添加量的增加, 促进了析水率的增加, 使冻融稳定性变差, 造成这一现象的原因可能是在糊化过程中, SSPS 的添加与淀粉竞争水分, 减少了淀粉

可吸收的水分。此外, 多糖通过附着在淀粉颗粒表面, 抑制了淀粉的溶胀, 所以, 有部分淀粉颗粒没有发生吸水膨胀, 导致体系中的自由水增多, 以此在经过冻融处理后, 大量的水分会被析出。这一结果与周子丹等<sup>[26]</sup>研究一致, 阿拉伯胶和魔芋胶的添加均能使木薯淀粉的析水率增加, 但是当加入瓜尔胶和海藻酸钠时结果相反, 这可能是由于海藻酸钠作为一种阴离子多糖胶, 可以固定体系中的水分, 降低了其形成冰晶的可能性, 从而降低析水率, 此外, 瓜尔胶则主要是依靠分子间的相互作用力来降低析水率。

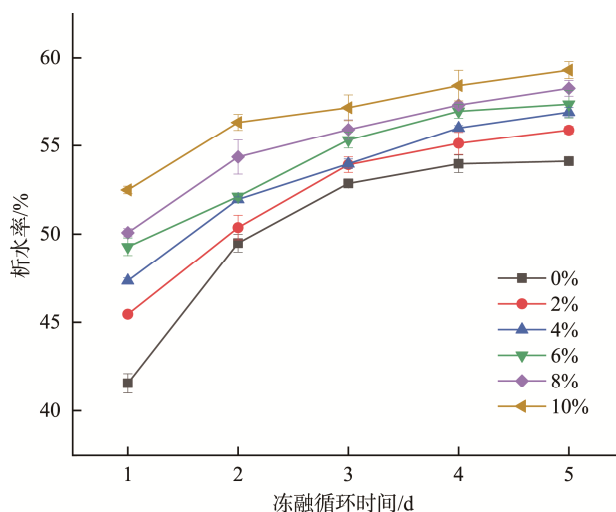


图 4 SSPS 对大米淀粉冻融稳定性的影响

Fig.4 Effects of SSPS on the freeze-thaw stability of rice starch

### 2.5 SSPS 对大米淀粉糊化特性的影响

糊化特性是指在水分子的参与下, 淀粉颗粒经过加热吸水溶胀、破裂, 最后形成均匀的糊状液的过程, 通常被用来表征黏性、热稳定性和老化趋势<sup>[27]</sup>。由图 5 和表 1 可知, 相对于大米淀粉, 添加 SSPS 后, 体系的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度均呈下降趋势, 当 SSPS 添加量为 10% 时, 淀粉的峰值黏度、低谷黏度和最终黏度分别下降了 1840.00、1168.00 和 1695.00 cP, 说明 SSPS 可以显著降低大米淀粉糊化时的黏度, 造成这一结果是由于在糊化过程中, SSPS 的参与降低了淀粉糊化所需要的水分, 从而抑制了淀粉的糊化, 淀粉与多糖之间的相互作用降低了直链淀粉的浸出, 导致淀粉的黏度降低<sup>[28]</sup>。同时, 随着 SSPS 添加量的增加, 淀粉的回生值逐渐降低, 当多糖的添加量为 6% 时, 回生值达到最低, 说明, SSPS 可以延缓淀粉的短期回生。崩解值反映了淀粉颗粒加热后的热稳定性和被破坏程度<sup>[29]</sup>, 如表 1 所示, 不添加 SSPS 的淀粉体系崩解值达到 1056.00 cP, 当添加 2% 的可溶性多糖后, 体系的崩解值急剧下降至 484.50 cP, 当多糖添加量增加到 10% 时, 崩解值下降到 296.50 cP, 下降了 759.50 cP, 说明多糖对淀粉颗粒有明显的保护作用, 并且, 随着多糖添加量的增加, 作用效

果越明显。糊化温度的上升说明, 多糖的参与抑制了淀粉的膨胀, 从而导致在更高的温度下, 淀粉才能发生糊化<sup>[30]</sup>。

## 2.6 SSPS 对大米淀粉流变学特性的影响

动态流变学频率扫描用来表征淀粉糊黏弹性的变化, 反应了多糖对淀粉凝胶弹性特性及黏性特性的影响,  $G'$  即储能模量, 又称为弹性模量,  $G''$  即损耗模量, 又称黏性模量, 当  $G' > G''$  时, 体系性质类似固体, 当  $G'' > G'$  时, 体系性质类似流体<sup>[31]</sup>。 $\delta$  为损耗角, 其正切值  $\tan\delta$  为  $G''$  与  $G'$  的比值, 代表体系的黏弹特性,  $\tan\delta$  越小, 体系流动性越差, 说明分子间交联程度越高。

$\tan\delta$  均小于 1, 说明  $G' > G''$ , 弹性模量强于黏性模量, 呈现类固体性质。如图 6 所示, 随着振荡频率增加, 样品体系的  $G'$  和  $G''$  均显著增加 ( $P < 0.05$ ), 并呈现频率依赖性, 说明体系具有典型的弱凝胶特性<sup>[32]</sup>。与大米淀粉相比, SSPS 的添加显著降低 ( $P < 0.05$ ) 体系的  $G'$  和  $G''$ , 并且随着 SSPS 添加量的增加, 降低效果越显著, 这可能是由于 SSPS 具有较多的羟基等极性基团, 通过氢键与渗出的直

链淀粉分子缔合, 阻碍了直链淀粉分子间的聚集, 降低了体系的黏弹性<sup>[33]</sup>。

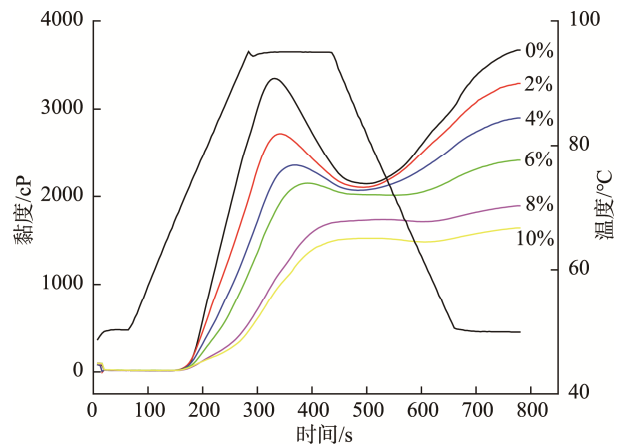
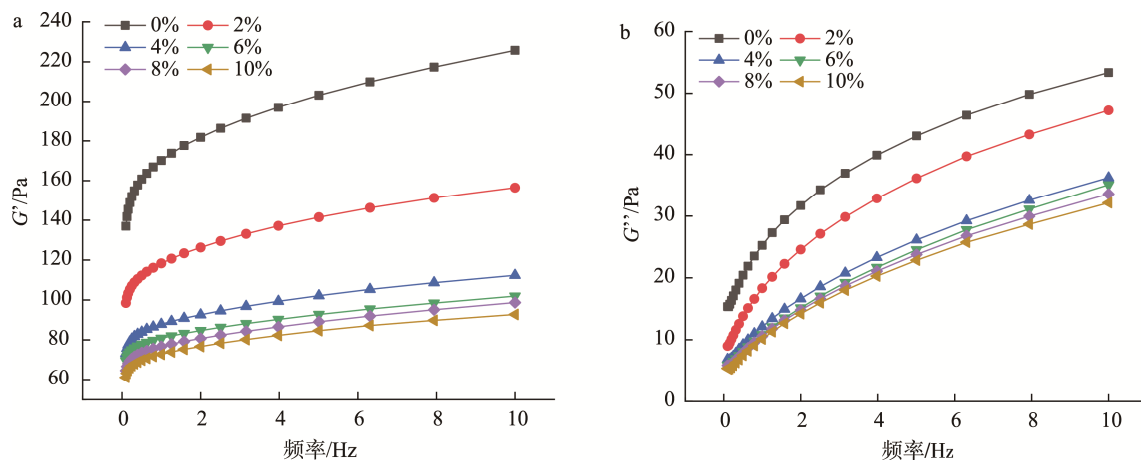


图 5 SPSS-大米淀粉体系糊化曲线  
Fig.5 Pasting curves of SPSS-rice starch systems

表 1 SPSS 对大米淀粉糊化特性的影响  
Table 1 Effects of SPSS on starch pasting properties of rice

含量/%	峰值黏度/cP	低谷黏度/cP	崩解值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	糊化温度/°C
0	3309.50±17.68 <sup>a</sup>	2341.00±76.37 <sup>a</sup>	1056.00±169.71 <sup>a</sup>	3363.50±7.68 <sup>a</sup>	1465.50±48.79 <sup>a</sup>	72.00±0.92 <sup>d</sup>
2	2734.00±22.63 <sup>b</sup>	2192.50±65.76 <sup>b</sup>	484.50±183.14 <sup>b</sup>	3333.50±60.10 <sup>b</sup>	1084.00±145.66 <sup>b</sup>	72.98±0.53 <sup>d</sup>
4	2378.00±28.28 <sup>c</sup>	2086.00±25.46 <sup>b</sup>	200.50±126.57 <sup>b</sup>	2886.00±18.38 <sup>c</sup>	708.50±173.24 <sup>c</sup>	73.50±0.00 <sup>d</sup>
6	2067.50±118.09 <sup>d</sup>	1714.00±15.56 <sup>c</sup>	198.50±85.56 <sup>b</sup>	2342.50±102.53 <sup>d</sup>	473.50±101.12 <sup>c</sup>	75.03±1.10 <sup>c</sup>
8	1676.50±14.85 <sup>e</sup>	1356.50±31.82 <sup>d</sup>	320.00±16.97 <sup>b</sup>	1898.50±6.36 <sup>c</sup>	542.00±25.46 <sup>c</sup>	85.95±0.64 <sup>b</sup>
10	1469.50±20.51 <sup>f</sup>	1173.00±24.04 <sup>e</sup>	296.50±3.54 <sup>b</sup>	1668.50±36.06 <sup>f</sup>	495.50±12.02 <sup>c</sup>	89.70±0.00 <sup>a</sup>

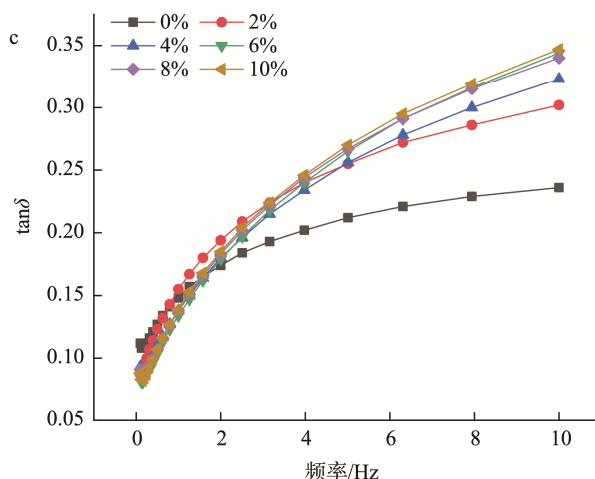
注: 同列不同小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ )。



注: a: 储能模量  $G'$ ; b: 损耗模量  $G''$ ; c: 正切值  $\tan\delta$ 。

图 6 SPSS 对大米淀粉流变特性的影响

Fig.6 Effects of soluble soybean polysaccharide on rheological properties of rice starch



注: a: 储能模量  $G'$ ; b: 损耗模量  $G''$ ; c: 正切值  $\tan\delta$ 。

图 6(续) SPSS 对大米淀粉流变特性的影响

Fig.6 Effects of soluble soybean polysaccharide on rheological properties of rice starch

### 3 结 论

本研究探究了不同添加量的 SSPS 对大米淀粉物化特性的影响, 研究发现, SSPS 的添加降低了大米淀粉的膨胀度、溶解度及透光率, 并且随着 SSPS 添加量的增加, 作用效果越明显。添加 SSPS 后, 对大米淀粉的糊化特性具有显著影响( $P < 0.05$ ), SSPS 阻碍了淀粉之间的相互作用, 使得混合体系的糊化黏度、崩解值及回生值均降低, 此外, 糊化温度的增加, 说明 SSPS 的添加提高了淀粉的热稳定性。与对照组相比,  $G'$  和  $G''$  的降低进一步说明, SSPS 能够降低大米淀粉的黏度。因此, 向淀粉中加入 SSPS, 可以一定程度上改善大米淀粉的物化特性, 从而为 SSPS 在淀粉基食品中的应用提供了理论指导, 为大米淀粉的品质提升提供了可靠的技术支撑。

#### 参考文献

- [1] BIELECKA J, MARKIEWICZ ZR, NOWAKOWSKI P, *et al.* Identifying the food sources of selected minerals for the adult European population among rice and rice products [J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1251.
- [2] GOVINDARAIU I, ZHUO GY, CHAKRABORTY I, *et al.* Investigation of structural and physico-chemical properties of rice starch with varied amylose content a combined microscopy, spectroscopy, and thermal study [J]. *Food Hydrocolloid*, 2022, 122: 107093.
- [3] GISBERT M, ALEIXANDRE A, SINEIRO J, *et al.* Interactions between *Ascophyllum nodosum* seaweeds polyphenols and native and gelled corn starches [J]. *Foods*, 2022, 11(8): 1165.
- [4] PANG ZH, BOUROUIS I, SUN MY, *et al.* Physicochemical properties and microstructural behaviors of rice starch/soy proteins mixtures at different proportions [J]. *Int J Biol Macromol*, 2022, 209(B): 2061–2069.
- [5] 廖瑾, 张雅媛, 洪雁, 等. 阿拉伯胶对马铃薯淀粉糊化及流变性质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2010, 29(4): 567–571.

- [6] LIAO J, ZHANG YY, HONG Y, *et al.* Effects of Gum Acacia on gelatinization and rheological properties of potato starch [J]. *J Food Biotechnol*, 2010, 29(4): 567–571.
- [7] 王慧云, 赵阳, 陈海华, 等. 亚麻多糖对薯类改性淀粉糊化特性和冻融稳定性的影响[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(7): 176–184.
- [8] WANG HY, ZHAO Y, CHEN HH, *et al.* Effects of flax polysaccharide on gelatinization characteristics and freeze-thaw stability of potato modified starch [J]. *J Chin Instit Food Sci Technol*, 2014, 14(7): 176–184.
- [9] MUADKLAY J, CHAROENREIN S. Effects of hydrocolloids and freezing rates on freeze-thaw stability of tapioca starch gels [J]. *Food Hydrocolloid*, 2008, 22(7): 1268–1272.
- [10] 金娃, 陈威, 赵凯, 等. 海藻糖对三种淀粉理化性质的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(2): 152–155.
- [11] JIN W, CHEN W, ZHAO K, *et al.* Effects of trehalose on physicochemical properties of three starches [J]. *Chin Season*, 2021, 46(2): 152–155.
- [12] CHEN L, TIAN Y, ZHANG Z, *et al.* Effect of pullulan on the digestible, crystalline and morphological characteristics of rice starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 63: 383–390.
- [13] 杨慧娇, 蔡志祥, 张洪斌, 等. 水溶性大豆多糖的分子表征和溶液流变学性质[J]. *食品科学*, 2016, 37(1): 1–5.
- [14] YANG HJ, CAI ZX, ZHANG HB, *et al.* Molecular characterization and rheological properties of water-soluble soybean polysaccharide [J]. *Food Sci*, 2016, 37(1): 1–5.
- [15] 刘传菊, 赵玉, 汤尚文, 等. 可溶性大豆多糖对碎米粉物化特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(9): 7–13, 21.
- [16] LIU CJ, ZHAO Y, TANG SW, *et al.* Effects of soluble soybean polysaccharide on physicochemical properties of rice flour [J]. *Chin J Cereals Oils*, 2021, 36(9): 7–13, 21.
- [17] 王雨, 刘翀, 洪静, 等. 可溶性大豆多糖对中筋小麦粉面团特性和生面团品质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(3): 177–183.
- [18] WANG Y, LIU C, HONG J, *et al.* Effects of soluble soybean polysaccharide on the characteristics of wheat flour dough and quality of

- fresh surface [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(3): 177–183.
- [13] SINGH H, LIN JH, HUANG WH, *et al.* Influence of amylopectin structure on rheological and retrogradation properties of waxy rice starches [J]. *J Cereal Sci*, 2012, 56(2): 367–373.
- [14] SHARMA V, KAUR M, SANDHU KS, *et al.* Effect of cross-linking on physico-chemical, thermal, pasting, *in vitro* digestibility and film forming properties of Faba bean (*Vicia faba* L.) starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 159: 1–34.
- [15] AZIMA F, NAZIR N, EFNDI HC. Characteristics of physico-chemical and functional properties of starch extracts from tubers [J]. *J Phys: Conf Series*, 2020, 1469(1): 1–9.
- [16] OH SM, CHOI HD, CHOI HW, *et al.* Starch retrogradation in rice cake: Influences of sucrose stearate and glycerol [J]. *Foods*, 2020, 9(12): 1–13.
- [17] 李松南, 李雅琴, 金姗姗, 等. 短柄栲栳种子淀粉的理化性质研究[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(15): 56–60.
- LI SN, LI YQ, JIN SS, *et al.* Study on physicochemical properties of starch from seeds of *Oakum brevifolia* [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(15): 56–60.
- [18] HE R, SHANG WT, PAN YG, *et al.* Effect of drying treatment on the structural characterizations and physicochemical properties of starch from canistel (*Lucuma nervosa* A. DC) [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 167(2): 539–546.
- [19] CAI JW, MAN JM, HUANG J, *et al.* Relationship between structure and functional properties of normal rice starches with different amylose contents [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 125: 35–44.
- [20] 郑明静. 莲子淀粉与亲水性胶体协同性及其作用机理的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- ZHENG MJ. Study on synergism and mechanism of Lotus seed starch and hydrophilic gel [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [21] 王承彦. 魔芋葡甘聚糖与冷冻小麦淀粉相互作用研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
- WANG CY. Study on interaction between Konjac glucomannan and frozen wheat starch [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [22] YUE L, QIN L. The interaction between tea polyphenols and rice starch during gelatinization [J]. *Food Sci Technol Int*, 2011, 17(6): 569–577.
- [23] MYA B, BO L, FANG Z, *et al.* Interactions between caffeic acid and corn starch with varying amylose content and their effects on starch digestion [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106544
- [24] LIU M, MA H, LIANG Y, *et al.* Effect of multiple freezing/thawing cycles on the physicochemical properties and structural characteristics of starch from wheat flours with different gluten strength [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 149: 619–625.
- [25] TU DK, OU YJ, ZHENG YX, *et al.* Effects of freeze-thaw treatment and pullulanase debranching on the structural properties and digestibility of lotus seed starch-glycerin monostearin complexes [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 177: 447–454.
- [26] 周子丹, 罗志刚, 王颖. 多糖胶对木薯淀粉糊冻融稳定性影响[J]. *粮食与油脂*, 2011, (9): 4.
- ZHOU ZD, LUO ZG, WANG Y. Effects of polysaccharide gum on freeze-thaw stability of cassava starch paste [J]. *Grains Oils*, 2011, (9): 4.
- [27] JIN N, KONG DD, WANG HY. Effects of temperature and time on gelatinization of corn starch employing gradient isothermal heating program of rapid visco analyzer [J]. *J Food Process Eng*, 2019, 42(7): 13264.
- [28] QIU S, YADAV MP, LIU Y, *et al.* Effects of corn fiber gum with different molecular weights on the gelatinization behaviors of corn and wheat starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, 53(2): 180–186.
- [29] ZHAN YH, XING JL, LI YN, *et al.* Effects of pectin on the physicochemical properties and freeze-thaw stability of waxy rice starch [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2419.
- [30] FAN XA, HUI ZA, YAN WB, *et al.* Effects of tamarind seed polysaccharide on physicochemical properties of corn starch treated by high pressure homogenization [J]. *LWT*, 2021, 150: 1–10.
- [31] 何艳芳. 甲基硬脂酰基牛磺酸钠层状液晶乳液体系及流变学研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- HE YF. Study on layered liquid crystal emulsion system and rheology of sodium methyl stearyl taurine [J]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2016.
- [32] YANG C, ZHONG F, DOUGLAS GH, *et al.* Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends [J]. *Food Chem*, 2019, 280: 51–58.
- [33] YURIS A, MATIA M, LARA, *et al.* Molecular interactions in composite wheat starch-*Mesona chinensis* polysaccharide gels: Rheological, textural, microstructural and retrogradation properties [J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 9: 1–12.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)

## 作者简介



武娜, 硕士, 主要研究方向为大豆、谷物化学加工及机理。  
E-mail: wn1384859864611@163.com



张娜, 博士, 教授, 主要研究方向为谷物化学与粮食高值化利用。  
E-mail: foodzhangna@163.com