

# 亚油酸联合米谷蛋白对挤压大米淀粉复合物的影响

马小淇<sup>1</sup>, 王可心<sup>1</sup>, 于小帅<sup>1,2</sup>, 辛 广<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>2,3\*</sup>, 肖志刚<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 沈阳农业大学 食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 渤海大学 食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013; 3. 沈阳师范大学 粮食安全协同创新中心, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 为考察亚油酸 (LOA) 联合米谷蛋白 (RG) 对挤压大米淀粉 (ERS) 的分子结构和理化性质的影响, 以大米淀粉 (RS)、RG 和 LOA 为原料, 通过双螺杆挤压机制备了 RG 添加量 (以 RS 质量计, 下同) 为 10%、不同 LOA 添加量 (以 RS 质量计, 下同) 的 ERS-RG-LOA 三元复合物。采用 XRD、FTIR、低场核磁共振波谱仪 (LF-NMR)、DSC、流变仪、快速黏度分析仪、SEM 和激光粒度仪对其进行表征和测试。结果表明, 与 ERS 和只添加 RG 制备的 ERS-RG 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物的短程有序结构显著增加, 相对结晶度增大, 黏弹性能、热稳定性及对水分子的束缚能力增强, 糊化温度提高, 呈现出更致密的微观结构, 峰值黏度降低; 当 LOA 添加量为 1% 时, ERS-RG-LOA 三元复合物的相对结晶度为  $14.54\% \pm 0.51\%$ , 短程有序度为  $0.971 \pm 0.005$ , 储能模量明显升高, 结合水 ( $1.77\% \pm 0.06\%$ ) 与弱结合水 ( $4.39\% \pm 0.01\%$ ) 含量有所增加; 与 ERS-RG 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物的吸水指数没有显著变化, 但水溶性指数显著降低。

**关键词:** 挤压; 大米淀粉; 米谷蛋白; 亚油酸; 相互作用; 食品化学品

中图分类号: TS213.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2025) 06-1341-09

## Effect of linoleic acid coupled with rice glutenin on extruded rice starch complex

MA Xiaoqi<sup>1</sup>, WANG Kexin<sup>1</sup>, YU Xiaoshuai<sup>1,2</sup>, XIN Guang<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2,3\*</sup>, XIAO Zhigang<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Food Science College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China; 2. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou 121013, Liaoning, China; 3. Co-Innovation Center of Grain Safety, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of linoleic acid (LOA) combined with rice glutenin (RG) on the molecular structure and physicochemical properties of extruded rice starch (ERS), ERS-RG-LOA ternary complexes with 10% RG (based on the mass of RS, the same below) and different LOA amount (based on the mass of RS, the same below) were prepared from rice starch (RS), RG and LOA via a twin-screw extruder, and characterized by XRD, FTIR, low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) spectrometer, DSC, rheometer, fast viscosity analyser, SEM, and laser particle sizing instrument. The results showed that compared with ERS and ERS-RG prepared by adding RG only, ERS-RG-LOA ternary complexes exhibited significant increase in the short-range ordered structure, the relative crystallinity and the pasting temperature, enhancement in the viscoelasticity, the thermal stability and the binding ability of water molecules, a denser microstructure, and reduction in the peak viscosity. ERS-RG-LOA ternary complex with 1% amount of LOA displayed a relative crystallinity of  $14.54\% \pm 0.51\%$ , a short-range order degree of  $0.971 \pm 0.005$ , significantly higher energy storage modulus, and increased bound ( $1.77\% \pm 0.06\%$ ) and weakly-bound ( $4.39\% \pm 0.01\%$ ) water contents. The ERS-RG-LOA ternary complex showed little difference in the water absorption index compared with ERS-RG, but significantly lower water solubility index.

**Key words:** extrusion; rice starch; rice glutenin; linoleic acid; interaction; food chemicals

收稿日期: 2024-06-21; 定用日期: 2024-07-09; DOI: 10.13550/j.jxhg.20240494

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32072139); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目 (RC210305); 沈阳市粮油深加工重点实验室课题基金资助项目 (2023001, 2023009)

作者简介: 马小淇 (1999—), 女, 博士生, E-mail: mxiaoqq@163.com。联系人: 王 鹏 (1989—), 男, 副教授, 博士, E-mail: wpeng\_mail@126.com; 肖志刚 (1972—), 男, 教授, 博士, E-mail: zhigang\_xiao@126.com。

大米淀粉 (RS) 是重要的谷物淀粉, 可为人体提供所需的碳水化合物, 在食品行业具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。但在以大米淀粉为原料的食品加工过程中, 淀粉的老化会使食品质地变硬、失去韧性、容易破碎, 导致其食用品质下降、货架期缩短, 这限制了大米淀粉在食品开发中的应用<sup>[2]</sup>。因此, 需要对大米淀粉进行适当改性处理以增强其加工适用性。目前, 常见大米淀粉改性处理方法有物理法、化学法、酶法和复合法。其中, 挤压法具有短时高效和节能环保等优势, 广泛应用于食品加工中<sup>[3]</sup>。挤压是一种集加热、剪切、成型于一体的高效多功能食品加工技术, 在挤压过程中, 高压和高剪切力作用可以使蛋白质、脂质和微量营养素快速结合并发生相互作用, 形成具有特定结构、性质和功能的复合物<sup>[4]</sup>。然而, 由于高温挤压后淀粉的有序结构被破坏、分子链降解, 导致挤压淀粉产品的黏弹性降低、吸水性变差<sup>[5]</sup>。目前, 常使用酯化剂作为稳定剂和保型剂, 协同挤压加工技术对淀粉进行改性处理, 但出于食品安全考量和食品添加剂国家标准限制, 酯化剂的安全添加量很难达到预期效果。因此, 在提高挤压大米淀粉产品质量的同时, 保证其健康性和适用性是当前亟待解决的问题。

本课题组系列研究表明, 米谷蛋白协同挤压不但能够有效延缓大米淀粉的回生, 还可以显著提高大米淀粉的抗消化性<sup>[6-8]</sup>。蛋白质作为惰性填料, 会使淀粉凝胶化过程中分子链重新排列, 对淀粉凝胶网络结构产生影响, 从而影响淀粉产品的质地<sup>[9]</sup>。GUO 等<sup>[10]</sup>研究发现, 鹰嘴豆蛋白 (CPI) 填充在谷物粉网络中可以形成致密的凝胶网络, 显著提高 CPI-谷物复合物凝胶的硬度。因此, 有必要对大米淀粉-米谷蛋白复合物进一步研究, 使其拥有更好的理化性质和营养价值。在热处理过程中添加脂类物质已被证明可以调控淀粉的分子结构和理化特性。MARISCAL 等<sup>[11]</sup>研究发现, 添加质量分数 1.0% 和 1.5% 棕榈酸后的玉米饼的老化程度明显降低。CHANG 等<sup>[12]</sup>研究证实, 在淀粉糊化过程中, 直链淀粉的单螺旋结构中嵌入脂质, 形成疏水性的直链淀粉-脂质复合物 (RS5), 可以抑制直链淀粉形成双螺旋结构, 延缓淀粉的老化。相比于其他脂类物质, 亚油酸是大米主要的内源性物质之一, 是人体无法合成而必须从食物中获得的必需多不饱和脂肪酸, 在适宜加工条件下, 亚油酸可能更容易与淀粉复合且食用安全性更高。

在加工过程中, 淀粉、蛋白质和脂类会发生复杂的相互作用形成三元复合物, 该类型复合物具有更高的相对结晶度和短程分子有序度, 从而影响产

品的风味、质构特性以及营养特性<sup>[13]</sup>。目前, 有关亚油酸联合米谷蛋白对挤压大米淀粉的分子结构和理化性质的影响鲜见报道。

本文拟以不同比例的大米淀粉、米谷蛋白、亚油酸为原料, 通过双螺杆挤压技术制备三元复合物 (ERS-RG-LOA), 并利用 XRD、FTIR、SEM、低场核磁共振波谱仪 (LF-NMR) 等对三元复合物的长程有序和短程有序结构、水分分布、微观结构进行表征, 并测定三元复合物的理化性质。以期为进一步了解挤压过程中大米淀粉、蛋白质和脂质之间的相互作用提供理论依据, 为开发挤压大米淀粉基产品提供参考。

## 1 实验部分

### 1.1 材料、试剂与仪器

大米淀粉 (RS, 质量分数 98.68%, 另含质量分数 0.21% 的脂肪、0.46% 的蛋白质和 0.33% 的灰分)、米谷蛋白 (RG, 蛋白质质量分数 95%), 江西金农生物科技有限公司; 亚油酸 (LOA, 分析纯), 武汉佰兴生物科技有限公司; 去离子水, 自制。

UVTE-36 型双螺杆挤压机, 长沙创享食品科技有限公司; DWF-100 型电动粉碎机, 河北省科研仪器厂; NHITACHIS-3400 型扫描电子显微镜 (SEM), 日本 Hitachi 公司; AV400 型核磁共振波谱仪 (NMR)、D8 Advance 型 X 射线衍射仪 (XRD)、TENSOR II 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), 德国 Bruker 公司; Q20 型差示扫描量热仪 (DSC)、DHR-3 型流变仪, 美国 TA 仪器公司; Mastersizer 300 型激光粒度仪, 英国 Malvern 公司; Super3 快速黏度分析仪 (RVA), 美国 Newport 公司。

### 1.2 方法

将 RS、RG、LOA 以质量比 100 : 10 : 1 充分混合均匀, 将混合物料装入密封袋中平衡 12 h 后用双螺杆挤压机进行挤压, 设置挤压参数为: 螺杆转速 300 r/min, 喂料速度 15 kg/h, 在挤压过程中额外添加占物料质量 35% 的蒸馏水, 挤压各区段温度设定为 40、50、50、90、90、20 °C。将挤出物置于烘箱中 32 °C 烘干 24 h 后, 制得淡黄色米粒状 ERS-RG-LOA 三元复合物, 记为 ERS-RG-1% (百分数均为 LOA 添加量, 以 RS 质量计, 下同), 研磨过 100 目筛后密封备用。

采用上述相同方法和步骤, 调整  $m(\text{RS}) : m(\text{RG}) : m(\text{LOA}) = 100 : 10 : 0.5, 100 : 10 : 3, 100 : 10 : 5, 100 : 10 : 10$ , 制得 ERS-RG-LOA 三元复合物, 分别记为 ERS-RG-0.5%、ERS-RG-3%、ERS-RG-5%、ERS-RG-10%。

采用上述相同方法和步骤, 只用 RS, 制得挤出物记为 ERS;  $m(\text{RS}) : m(\text{RG}) = 100 : 10$  制得二元复合物记为 ERS-RG。

### 1.3 表征和测试

#### 1.3.1 长程有序结构测定

参考文献[5]方法, 采用 XRD 对样品的长程有序结构进行测定, 使用载玻片将样品在样品槽中铺满压紧, 靶材 Cu, 管电压 40 kV, 管电流 40 mA,  $K_{\alpha}$  射线波长为 0.1541 nm, 扫描速率  $2^{\circ}/\text{min}$ , 步长  $0.02^{\circ}$ , 扫描范围  $2\theta=4^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。使用 MDI Jade 6 软件计算结晶度。

#### 1.3.2 短程有序结构测定

参考文献[14]方法并稍作修改。使用 FTIR 对样品的短程有序结构进行分析。取适量样品放入仪器中, 以空气为背景, 扫描分辨率为  $4\text{ cm}^{-1}$ , 扫描次数 64 次, 波数范围  $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 。使用 OMNIC 9.7 版软件对数据进行处理, 记录在  $1047$ 、 $1022\text{ cm}^{-1}$  处的峰高, 将两峰峰高比值记为双螺旋有序度 (DO), 用于表示样品的短程有序性。

#### 1.3.3 LF-NMR 测定

参考文献[7]方法并稍作修改。采用 LF-NMR 对样品的水分状态和水分分布进行测定, 参数设置如下: 磁场强度 0.5 T, 磁场温度  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $90^{\circ}$  脉冲时间  $6.52\text{ }\mu\text{s}$ ,  $180^{\circ}$  脉冲时间  $12\text{ }\mu\text{s}$ , 采样点 240018, 频谱宽度 100 kHz, 回波个数 4000, 重复扫描次数 4 次, 重复采样时间 4000 ms。

#### 1.3.4 DSC 测定

参考文献[15]方法并稍作修改。采用 DSC 测定样品的热力学性质, 称取 2.5 mg 样品于坩埚中, 加入蒸馏水  $7.5\text{ }\mu\text{L}$ , 用压片机密封坩埚后放置 12 h 备用。以空白坩埚为对照, 设置加热速率为  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 从  $20^{\circ}\text{C}$  升温至  $120^{\circ}\text{C}$ , 记录样品糊化的起始温度 ( $T_0$ )、峰值温度 ( $T_p$ )、终止温度 ( $T_c$ ) 和焓值 ( $\Delta H$ )。

#### 1.3.5 流变特性测定

参考文献[16]方法并稍作修改。使用流变仪对样品的流变学性质进行测定, 平板直径 40 mm, 间隙 1 mm。将制备好的 1 mL 完全糊化样品均匀分散在平板上, 用硅油覆盖样品暴露的表面以避免水分蒸发。在  $25^{\circ}\text{C}$  下保持 1 min 后, 在线性区域以 0.1% 的恒定应变在 0.1~10 Hz 的频率范围内进行动态频率扫描测试。

#### 1.3.6 糊化特性测定

参考文献[17]方法并稍作修改, 称取 3 g 样品于样品筒中, 然后加入 25 mL 蒸馏水, 用塑料桨快速搅动 10 次后使样品完全分散, 使用 RVA 测定样品的糊化特性, 每个样品重复测定 3 次。

#### 1.3.7 吸水性和水溶性指数测定

参考文献[18]方法并稍作修改。准确称量 1.00 g 样品于质量  $m$  (g) 的离心管中, 样品和离心管总质量记为  $m_1$  (g)。在离心管中加入 12 mL 蒸馏水于  $30^{\circ}\text{C}$  下振摇 30 min, 然后以 4500 r/min 离心 15 min, 收集上清液至培养皿中在  $(105\pm 2)^{\circ}\text{C}$  下干燥至固体物恒重后, 质量记为  $m_2$  (g)。去除上清液后的离心管和管内沉淀物总质量记为  $m_3$ 。根据公式 (1) 和 (2) 分别计算吸水性 (WAI, g/g) 和水溶性指数 (WSI, %)。

$$\text{WAI} = (m_3 - m_1) / (m_1 - m) \quad (1)$$

$$\text{WSI} / \% = [m_2 / (m_1 - m)] \times 100 \quad (2)$$

#### 1.3.8 SEM 测试

参考文献[19]方法, 取少量样品使用双面导电胶带固定在样品台上, 并使用溅射镀膜机进行喷金处理。采用 SEM 在工作电压 2 kV, 工作电流  $10\text{ }\mu\text{A}$  下放大 200 倍、5000 倍观察样品的微观结构。

#### 1.3.9 粒度分布测试

参考文献[20]方法并稍作修改。将淀粉加入去离子水中在 1500 r/min 的速率搅拌并超声分散均匀后, 使用激光粒度仪测定样品的粒径分布, 淀粉颗粒尺寸为体积加权平均直径 ( $\mu\text{m}$ )。

### 1.4 数据处理

所有实验平行测定 3 次, 所得结果表示为“平均值 $\pm$ 标准差”, 使用 SPSS 27.0 对数据进行方差分析, 以  $P < 0.05$  表示差异显著性; 使用 Origin 2021 进行数据处理和图像绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 三元复合物长程有序结构分析

图 1 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 XRD 谱图, 表 1 为相对结晶度数据。

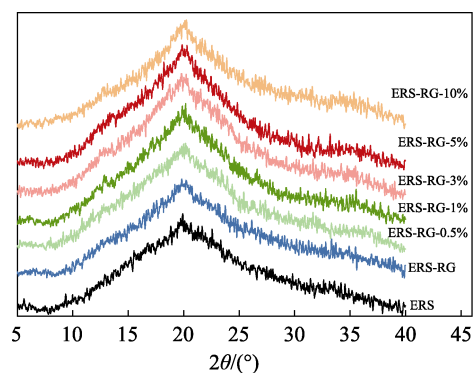


图 1 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

从图 1 可以看出, 经挤压处理得到的三元复合物, 原大米淀粉的典型特征峰 ( $2\theta=15^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $18^\circ$  和  $23^\circ$ ) 消失<sup>[19]</sup>, 在  $2\theta=20^\circ$  处产生了新的特征峰。这是因为, 挤压过程中的高温和高剪切作用使淀粉降解和糊化, 导致其失去原有晶型结构<sup>[20]</sup>。添加 RG 与 LOA 对 ERS 晶型结构无显著影响, 二元复合物和三元复合物的晶体均呈现典型的 V 型结构, 差异在于, ERS 和 ERS-RG 呈现宽的 V 型衍射峰, ERS-RG-LOA 三元复合物呈现出更加尖锐的 V 型衍射峰。这可能是因为, 在 ERS、RG、LOA 制备的三元复合物结构中, 有更多的有序结晶生成<sup>[21]</sup>。

从表 1 可以看出, ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的相对结晶度均显著高于 ERS。ERS-RG 相对结晶度较高可能是因为, 在挤压场中, 淀粉分子链与米谷蛋白伸展的侧链发生相互作用, 引发淀粉分子链重排, 从而导致形成了更多的有序结晶结构<sup>[22]</sup>。随着 LOA 添加量的增加, ERS-RG-LOA 三元复合物相对结晶度呈先增大后减小的趋势, 当 LOA 添加量为 1% 时, ERS-RG-1% 的结晶度 ( $14.54\% \pm 0.51\%$ ) 最高, 其 V 型结构也最为明显。这是因为, 淀粉分子结构的重排实质上是淀粉分子链内和链间形成氢键, 使淀粉分子结构由非晶态转变为晶态的过程。当 LOA 添加量  $>1\%$  后, 随着 LOA 添加量 ( $3\% \sim 10\%$ ) 的增加, ERS-RG-3%~ERS-RG-10% 相对结晶度下降, 这可能是因为, LOA 添加量较大时, 由于其溶解度较差而自聚集, 未能与淀粉形成复合物<sup>[23]</sup>, 减少了有序结晶结构的形成, ZHAO 等<sup>[24]</sup>报道了类似的结果。

### 2.2 三元复合物短程有序结构分析

图 2 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 FTIR 谱图。

从图 2A 可以看出, 与 ERS 相比, ERS-RG 在  $1536\text{ cm}^{-1}$  处产生了新的吸收峰, 这可能是由于挤压过程中大米淀粉与米谷蛋白发生美拉德反应, 而引起 C=O、C—N 和 N—H 特征峰的伸缩振动<sup>[7]</sup>。当 LOA 添加量  $>1\%$  后, ERS-RG-3%~ERS-RG-10% 在  $2847$  和  $1730\text{ cm}^{-1}$  附近处出现了新的吸收峰, 这可归因于游离 LOA 分子结构上的 C—H 和 C=O 伸缩振动。而 LOA 添加量为 0.5% 和 1% 时, ERS-RG-0.5% 和 ERS-RG-1% 的 FTIR 谱图中并未出现游离 LOA 的特征峰, 这是因为, LOA 添加量较低 ( $\leq 1\%$ ) 时, 亚油酸能够与大米淀粉完全复合, 亚油酸通过疏水相互作用进入到直链淀粉的螺旋空腔中, 因此掩盖了 LOA 的特征峰, 而米谷蛋白的主链羰基或极性残基通过非共价相互作用或美拉德反应与淀粉相互作用, 形成了 ERS-RG-0.5% 和 ERS-RG-1%<sup>[25]</sup>。

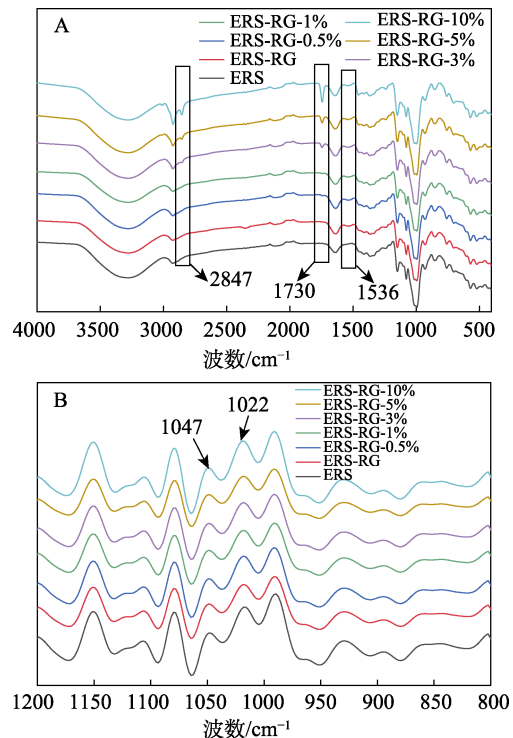


图 2 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 FTIR 谱图 (A) 和去卷积图 (B)

Fig. 2 FTIR spectra (A) and deconvolution patterns (B) of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

ERS-RG-LOA 三元复合物在  $1047$  和  $1022\text{ cm}^{-1}$  处的特征峰分别对应于淀粉的无定形和有序结构<sup>[26]</sup>。从图 2B 和表 1 的 DO 值可以看出, 与 ERS 相比, RG 和 LOA 同时添加显著提高了 ERS-RG-LOA 三元复合物的有序度, 并且 ERS-RG-1% 的 DO 值从 ERS 的  $0.896 \pm 0.010$  升高到  $0.971 \pm 0.005$  ( $P < 0.05$ ), 短程有序结构显著增加。这是因为, 同时添加 RG 和 LOA 会诱导断裂的淀粉分子重新缠绕聚集, 在短程水平上形成了更有序的分子结构, 其变化趋势与相对结晶度的变化趋势相似。

### 2.3 三元复合物水分分布分析

图 3 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的水分状态和分布图。

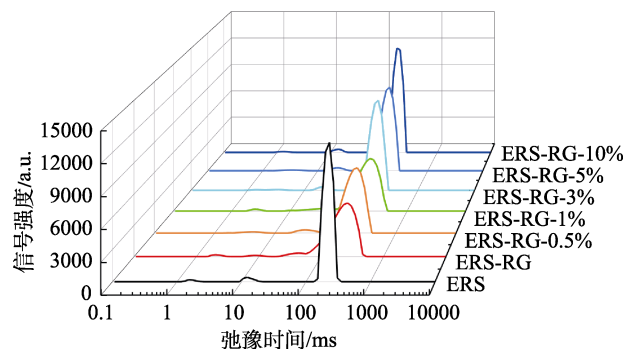


图 3 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的水分状态和分布曲线

Fig. 3 Water state and distribution curves of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

从图 3 和表 1 可以看出, 与 ERS 相比, ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的弱结合水 ( $T_{22}$ ) 弛豫时间向较高值方向移动, 表明 LOA 与 RG 的添加使淀粉内部弱结合水的流动性增强。这是因为, 挤压使 LOA 和 RG 通过疏水相互作用与淀粉分子相结合, 从而抑制了复合物截留水的能力。但 ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物 (ERS-RG-10%除外) 的自由水 ( $T_{23}$ ) 含量 ( $A_{23}$ ) 显著减少 ( $P<0.05$ ), ERS-RG-1% 的结合水 ( $T_{21}$ ) 含量 ( $A_{21}$ ) 与弱结合水 ( $T_{22}$ ) 含量 ( $A_{22}$ ) 显著升高, 分别由 ERS 的  $1.12\% \pm 0.02\%$  升高

至  $1.77\% \pm 0.06\%$ 、 $2.79\% \pm 0.01\%$  升高至  $4.39\% \pm 0.01\%$ 。这表明, ERS-RG-LOA 三元复合物对水分子的束缚能力增强, 更多的水分子留在晶体结构中, 游离水分子与淀粉分子团结合形成了更高有序性的晶体结构<sup>[27]</sup>。这可能是因为, LOA 的空间位阻及 LOA 与淀粉链的结合作用, 阻止了直链淀粉与支链淀粉之间氢键的形成, 从而降低了挤压淀粉中水的扩散和渗出。而 LOA 添加量为 10% 的 ERS-RG-10% 的  $A_{23}$  明显更高, 这是由于, 游离 LOA 包裹在淀粉颗粒表面, 抑制了水分子侵入淀粉凝胶体系。

表 1 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的相对结晶度、短程有序度及不同状态水的含量

Table 1 Relative crystallinity, short-range ordered degree and content of different states water of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

样品名	相对结晶度	DO 值	$A_{21}$	$A_{22}$	$A_{23}$
ERS	$7.58\% \pm 0.47\%c$	$0.896 \pm 0.010c$	$1.12\% \pm 0.02\%c$	$2.79\% \pm 0.01\%f$	$96.08\% \pm 0.01\%b$
ERS-RG	$10.66\% \pm 0.38\%d$	$0.926 \pm 0.006d$	$2.38\% \pm 0.03\%a$	$4.10\% \pm 0.02\%b$	$93.51\% \pm 0.03\%e$
ERS-RG-0.5%	$13.90\% \pm 0.18\%a$	$0.967 \pm 0.013b$	$1.56\% \pm 0.04\%c$	$3.98\% \pm 0.03\%c$	$94.46\% \pm 0.02\%c$
ERS-RG-1%	$14.54\% \pm 0.51\%a$	$0.971 \pm 0.005a$	$1.77\% \pm 0.06\%b$	$4.39\% \pm 0.01\%a$	$93.84\% \pm 0.03\%f$
ERS-RG-3%	$13.85\% \pm 0.80\%a$	$0.970 \pm 0.003a$	$1.16\% \pm 0.02\%d$	$3.00\% \pm 0.02\%d$	$95.84\% \pm 0.01\%d$
ERS-RG-5%	$12.36\% \pm 0.32\%b$	$0.950 \pm 0.002c$	$1.00\% \pm 0.01\%f$	$2.97\% \pm 0.04\%c$	$96.03\% \pm 0.02\%c$
ERS-RG-10%	$12.22\% \pm 0.11\%bc$	$0.925 \pm 0.007d$	$0.73\% \pm 0.03\%e$	$2.59\% \pm 0.01\%e$	$96.69\% \pm 0.06\%a$

注: 同一行中不同小写字母上标表示具有显著性差异 ( $P<0.05$ ), 下同。

## 2.4 三元复合物热力学特性分析

表 2 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的热力学特性数据。

热焓 ( $\Delta H$ ) 值可用来表示淀粉分子内部晶体结构的完整程度,  $\Delta H$  越高, 表示淀粉分子糊化所需能量越高。从表 2 可以看出, RG 的加入并未使 ERS-RG 的  $\Delta H$  显著升高, 这与本课题组前期的研究<sup>[15]</sup>结果一致。而同时添加 LOA 与 RG 的 ERS-RG-LOA 三元复合物 (ERS-RG-10%除外) 在 70~106 °C 的  $\Delta H$  增加, 这是由于淀粉-亚油酸 I 型

复合物的形成。在 100 °C 附近出现的峰是 I 型复合物, 它以快速成核形成, 具备基本的 V 型复合物结构, 它的出现也提供了 ERS-RG-LOA 三元复合物存在的证据<sup>[28]</sup>。ERS-RG-LOA 三元复合物 (除 ERS-RG-10%外)  $\Delta H$  值均高于 ERS 和 ERS-RG, 表明 ERS 的热稳定性通过添加 LOA 和 RG 而得到增强。当 LOA 添加量为 1% 时, ERS-RG-1% 的  $\Delta H$  值 [ $(5.85 \pm 0.17)$  J/g] 最大, 表明其含有更高、有序度和更多的晶体结构, 这与 XRD 结果 (图 1) 一致<sup>[29]</sup>。

表 2 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 复合物热力学特性、糊化特性参数

Table 2 Thermal properties and pasting properties of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

样品名	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值黏度/cP	终值黏度/cP
ERS	$89.70 \pm 0.45a$	$98.81 \pm 0.16ab$	$102.44 \pm 0.21c$	$2.37 \pm 0.06c$	$1360.33 \pm 10.41a$	$213.33 \pm 11.68d$	$1147.00 \pm 8.54a$	$249.67 \pm 13.87e$
ERS-RG	$87.06 \pm 0.57b$	$98.96 \pm 0.53ab$	$104.77 \pm 0.36a$	$2.60 \pm 0.16c$	$795.00 \pm 11.79f$	$229.67 \pm 19.14cd$	$564.67 \pm 14.29f$	$313.00 \pm 7.81d$
ERS-RG-0.5%	$87.81 \pm 0.66b$	$99.54 \pm 0.47a$	$103.77 \pm 0.88abc$	$3.22 \pm 0.04d$	$1019.67 \pm 10.97b$	$252.33 \pm 10.79b$	$768.00 \pm 17.78b$	$397.67 \pm 9.02c$
ERS-RG-1%	$79.79 \pm 0.43f$	$96.88 \pm 0.28cd$	$104.31 \pm 0.56ab$	$5.85 \pm 0.17a$	$999.00 \pm 6.56c$	$252.00 \pm 9.64b$	$747.00 \pm 10.58c$	$393.00 \pm 5.57c$
ERS-RG-3%	$81.45 \pm 0.83e$	$96.36 \pm 0.95d$	$104.61 \pm 1.23a$	$5.44 \pm 0.23b$	$966.33 \pm 14.64d$	$247.00 \pm 8.00bc$	$718.67 \pm 9.45d$	$428.67 \pm 13.05b$
ERS-RG-5%	$83.97 \pm 1.06d$	$97.87 \pm 1.70bc$	$103.09 \pm 1.47abc$	$3.72 \pm 0.11c$	$916.33 \pm 10.07e$	$245.67 \pm 5.03bc$	$669.67 \pm 13.65e$	$424.00 \pm 15.10b$
ERS-RG-10%	$85.12 \pm 0.85c$	$99.10 \pm 0.60ab$	$102.89 \pm 0.63bc$	$1.11 \pm 0.19f$	$521.00 \pm 12.00e$	$437.67 \pm 20.60a$	$83.00 \pm 3.61f$	$972.00 \pm 8.19a$

注:  $1 \times 10^{-3}$  Pa·s=1 cP。下同。

## 2.5 三元复合物流变特性分析

图 4 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的动态流变特性。

储能模量 ( $G'$ ) 用来反映凝胶的弹性性能, 这是直链淀粉在冷却早期的聚集所引起的; 损耗模量 ( $G''$ ) 表示每个变形周期内以黏性耗散形式损失的

能量<sup>[30]</sup>。从图 4A 可以看出, ERS-RG 和 ERS-RG-0.5%~ERS-RG-5%的  $G'$  值均比 ERS 更高, 表明淀粉和蛋白质分子与连续相的 LOA 之间的相互作用可以加强淀粉链段的缠结, 形成更稳定的三维网络结构, 这与 LI 等<sup>[2]</sup>的发现相似。高 LOA 添加量(>1%)的 ERS-RG-3%~ERS-RG-10%的  $G'$  值明显较 ERS-RG-1%低, 这可能是由于过多的游离脂肪酸与直链淀粉相结合, 延缓了直链淀粉在老化初期的聚集, 因此表现出较低的  $G'$  值。从图 4B 可以看出, 与 ERS 和 ERS-RG 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物的  $G''$  值显著升高, 表明 ERS-RG-LOA 三元复合物的形成增强了淀粉凝胶的刚性和抵抗外部剪切的能力<sup>[31]</sup>。上述结果表明, LOA 的添加有助于三元复合物凝胶的形成及黏弹性能的增加。

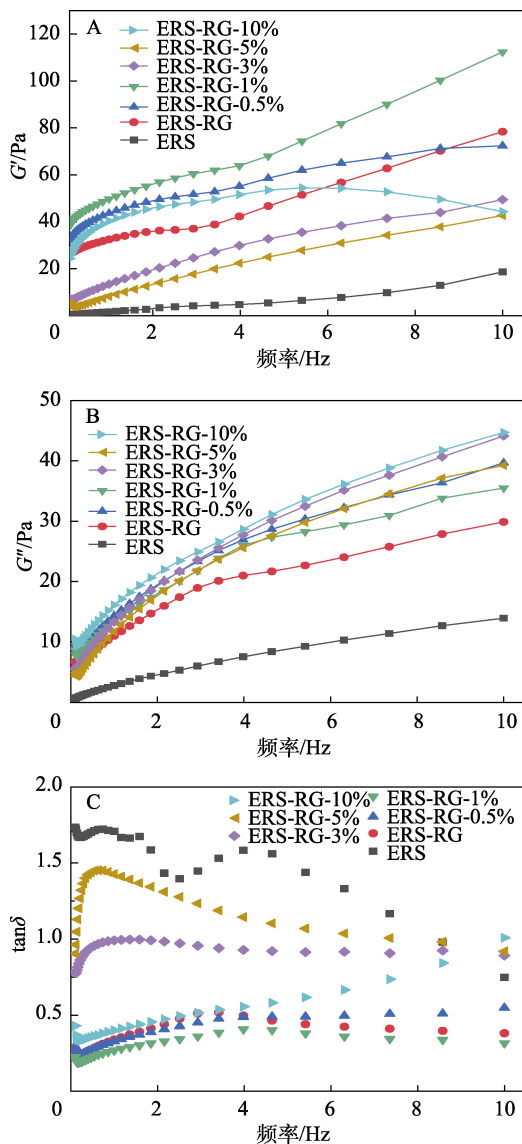


图 4 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的储能模量 (A)、损耗模量 (B)、 $\tan\delta$  (C) 曲线  
Fig. 4 Storage modulus (A), loss modulus (B), and  $\tan\delta$  (C) of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

$\tan\delta$  ( $\tan\delta=G''/G'$ ) 值通常用于反映类固体或类液体材料的总体黏弹性行为,  $\tan\delta < 1$  代表材料更具弹性或类似固体的行为, 而  $\tan\delta > 1$  代表材料具有典型的黏性凝胶行为。从图 4C 可以看出, ERS 的  $\tan\delta$  值最高, 说明淀粉凝胶由原来的黏性性质转变为弹性性质<sup>[32]</sup>。

### 2.6 三元复合物糊化特性分析

图 5 和表 2 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的糊化特性曲线和黏度参数。

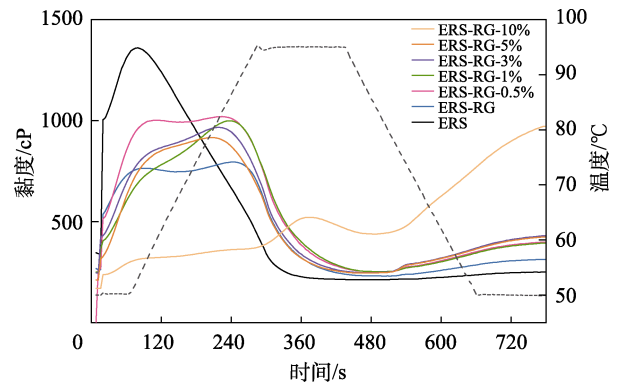


图 5 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 RVA 曲线  
Fig. 5 RVA curves of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

由图 5 和表 2 可以看出, 与 ERS 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物 (除 ERS-RG-0.5%和 ERS-RG-10%外) 的峰值黏度显著下降 ( $P < 0.05$ )。这可能有三方面的原因: 第一, 加热过程中形成的三元复合物能够在淀粉颗粒表面形成不溶性膜, 抑制水分进入颗粒内部, 从而提高了样品的糊化温度, 降低峰值黏度<sup>[33-34]</sup>; 第二, 由于在挤压过程中米谷蛋白和脂肪酸会与淀粉竞争吸水, 从而降低了淀粉的溶胀力和持水性; 第三, LOA 和 RG、ERS 之间的相互作用降低直链淀粉浸出量, 从而降低峰值黏度<sup>[35]</sup>。与 ERS 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物的黏度峰出现后移, 这可能是由于, ERS-RG-LOA 三元复合物的分子缠结更加紧密, 需要更高的糊化温度使直链淀粉浸出。ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物在初始加热阶段出现了一个新的黏度峰, 这可能是由未复合的淀粉之间相互作用导致的。另外, ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物在冷却和保持阶段出现新的黏度峰, 这是由于淀粉-脂肪酸、淀粉-蛋白质以及淀粉-脂肪酸-蛋白质复合物的重新缔合和缠结, 因此, 在一定程度上增加了其终值黏度<sup>[36]</sup>。ERS-RG-10%在 RVA 加热的初始阶段, 过量的游离脂肪酸相互作用形成聚集体黏附在淀粉颗粒的表面, 限制了直链淀粉的溶解, 从而阻碍了淀粉网状结构的形成<sup>[37]</sup>。

2.7 三元复合物的吸水性和水溶性指数分析

图 6 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 WAI 和 WSI。

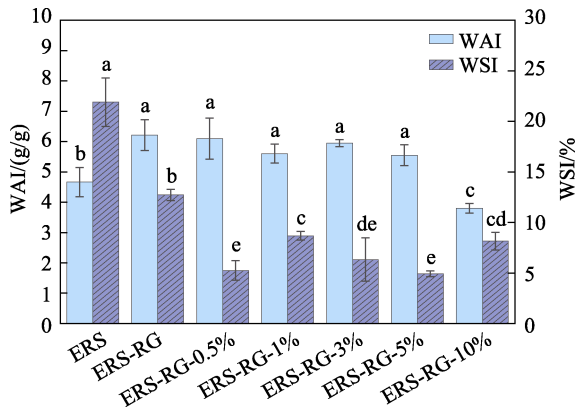


图 6 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 WAI 和 WSI

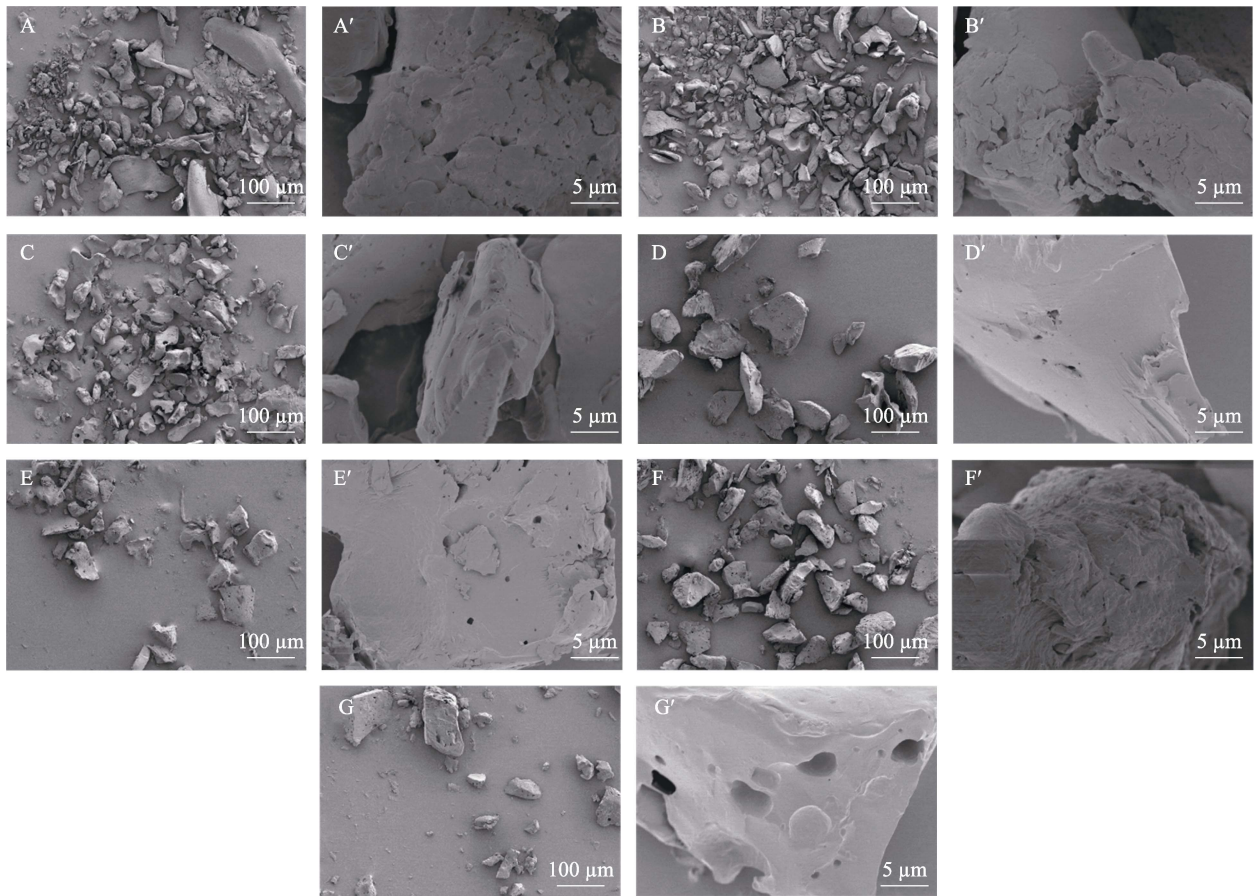
Fig. 6 WAI and WSI of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

WAI 用于反映样品吸收水分的能力; WSI 表示样品中可溶性组分的百分比。从图 6 可以看出, 与 ERS 相比, ERS-RG 的 WAI 值显著增加 ( $P < 0.05$ ),

说明 ERS-RG 具有较高的溶胀能力, 而 ERS-RG-LOA 三元复合物对比 ERS-RG, 其 WAI 值没有显著变化, 表明加入 LOA 对 ERS-RG 的溶胀能力没有明显影响。这是因为, WAI 值受淀粉分子内和分子间相互作用的影响<sup>[38]</sup>, 当 RG 和 LOA 通过挤压在高温高压的情况下与 ERS 发生反应, 破坏了淀粉原本的晶体结构, 从而导致水分子更容易进入到淀粉分子中<sup>[39]</sup>。而 LOA 添加量为 10% 的 ERS-RG-10% 的 WAI 值出现显著下降, 可能是由于过多的游离脂肪酸包裹在淀粉颗粒表面, 从而抑制了水分子进入到淀粉分子中, 这与 LF-NMR 结果(图 3)一致。与 ERS-RG 相比, ERS-RG-LOA 三元复合物的 WSI 值显著降低(从 12.72% 降低到 4.92%), 表明加入 LOA 会使三元复合物中的溶性物质减少, 这可能是因为, ERS、RG、LOA 间的相互作用降低了直链淀粉浸出量<sup>[18]</sup>, 而 ERS-RG-10% 的 WSI 值升高可能是由于未与淀粉发生反应的游离脂肪酸析出。

2.8 三元复合物微观形态分析

图 7 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的 SEM 图。



A、A'—ERS; B、B'—ERS-RG; C、C'—ERS-RG-0.5%; D、D'—ERS-RG-1%; E、E'—ERS-RG-3%; F、F'—ERS-RG-5%; G、G'—ERS-RG-10%

图 7 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物在不同放大倍数下的 SEM 图

Fig. 7 SEM images of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes at different magnifications

从图 7A~G 可以看出,与 ERS(图 7A)、ERS-RG(图 7B)相比,加入 LOA 后的 ERS-RG-LOA 三元复合物(图 7C~G)的微观形貌明显不同,大块片状和棱状物质减少,颗粒形状更加一致且聚集程度减小,颗粒的破碎程度小而完整性更高<sup>[40]</sup>。

从图 7A'~G'可以看出,与 ERS(图 7A')、ERS-RG(图 7B')相比,随着 LOA 添加量的增加,ERS-RG-0.5%(图 7C')和 ERS-RG-1%(图 7D')的表面形态更加致密,空隙减少,颗粒表面由粗糙逐渐变得光滑。这可能是因为,添加 LOA 后,ERS-RG-LOA 三元复合物具有更连续、更致密的三维网状结构,这与流变特性的结果(图 4)一致。另外,未添加 LOA 的 ERS、ERS-RG 的孔洞大小不均且形状不规则,这可能是由于挤压过程中水分在挤出瞬间发生汽化<sup>[19]</sup>;添加 LOA 的 ERS-RG-LOA 三元复合物的孔洞呈圆形且分布均匀,这可能是未与淀粉发生反应的脂肪酸造成的。

## 2.9 三元复合物粒径分布分析

图 8 为 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物的粒径分布曲线。

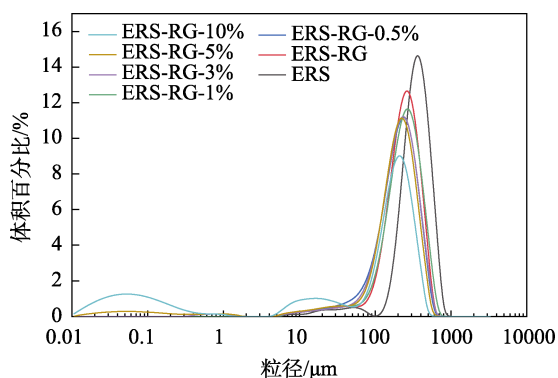


图 8 ERS、ERS-RG 和 ERS-RG-LOA 三元复合物粒径分布曲线

Fig. 8 Particle size distribution curves of ERS, ERS-RG and ERS-RG-LOA ternary complexes

从图 8 可以看出,与 ERS 相比,添加 RG 后的 ERS-RG 粒径分布峰明显左移,平均粒径减小。这可能是因为,ERS-RG 的形成打破了淀粉颗粒间的氢键,或者是米谷蛋白在支链淀粉结晶过程中起到了空间位阻的作用。而同时添加 RG 和 LOA 后,ERS-RG-LOA 三元复合物的最大单元粒径分布峰降低,这是因为,RG 和 LOA 与大米淀粉竞争吸水限制了大米淀粉颗粒的膨胀,从而使三元复合物粒径减小<sup>[41]</sup>;另外,挤压环境的高温高剪切作用会使 LOA 进入到直链淀粉的螺旋空腔中,RG 与支链淀粉通过氢键和疏水相互作用聚集,形成粒径分布不均匀的复合物,因此改变了复合物的粒径。ERS-RG-10%的粒径显著减小,这可能是因为,过多的

LOA 使复合物干燥后形成了疏松多孔的结构(图 7),因此更容易破碎成较小粒径的颗粒,最小单元粒径(0.01~1 μm)比例的升高可能是由于游离 LOA。

## 3 结论

通过双螺杆挤压技术制备了不同质量比的 ERS-RG-LOA 三元复合物。

(1) 在挤压过程中,LOA 和 RG 分别通过疏水相互作用和化学键与 RS 发生反应,对淀粉的结构及理化性质产生影响,进而改变三元复合物的性质。

(2) 与 ERS 和 ERS-RG 相比,添加 RG 和 LOA 的 ERS-RG-LOA 三元复合物具有更高的相对结晶度、短程有序度、黏弹性、热稳定性以及水结合能力,表面更加均匀致密。

(3) 当 LOA 添加量为 1% 时,制备的 ERS-RG-LOA 三元复合物 ERS-RG-1% 相对结晶度最高(14.54%±0.51%),晶体短程有序度最大(0.971±0.005),储能模量( $G'$ )最大,tan $\delta$  值最低,弹性性质最佳,结合水(1.77%±0.06%)与弱结合水(4.39%±0.01%)含量有所增加,微观结构更为致密。

本文可对深入理解淀粉与蛋白质、脂质之间的相互作用机制提供思路,也为淀粉基食品的开发与利用提供了理论支持和实践指导。

## 参考文献:

- [1] AMAGLIANI L, O'REGAN J, KELLY A L, *et al.* Chemistry, structure, functionality and applications of rice starch[J]. *Journal of Cereal Science*, 2016, 70: 291-300.
- [2] LI Y T, OBADI M, SHI J L, *et al.* Rheological and thermal properties of oat flours and starch affected by oat lipids[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 102: 103337.
- [3] LIU Q, JIAO A Q, YANG Y Y, *et al.* The combined effects of extrusion and recrystallization treatments on the structural and physicochemical properties and digestibility of corn and potato starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151(4): 112238.
- [4] NA-NAKORN K, HAMAKER B R, TONGTA S. Physicochemical and rheological properties of cooked extruded reformed rice with added protein or fiber[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151(1): 112196.
- [5] WANG P, FU Y, WANG L S, *et al.* Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch[J]. *Starch-Strke*, 2016, 69(7/8): 1600201.
- [6] YU X S, WANG P, WANG L S, *et al.* Inhibition mechanism of rice glutelin on extruded starch digestion: From the structural properties of starch and enzyme activity[J]. *Food Research International*, 2023, 175: 113790.
- [7] YU X S, WANG L S, ZHANG J J, *et al.* Understanding effects of glutelin on physicochemical and structural properties of extruded starch and the underlying mechanism[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 304: 120513.
- [8] WANG L S, DUAN Y M, TONG L F, *et al.* Insights into the interaction mechanism of glutelin and rice starch during extrusion processing: The role of specific mechanical energy[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134850.

- [9] BRAVO-NÚÑEZ Á, GARZÓN R, ROSELL C M, *et al.* Evaluation of starch-protein interactions as a function of pH[J]. *Foods*, 2019, 8(5): 155.
- [10] GUO J, ZHANG M, ADHIKARI B, *et al.* Formulation and characterization of 3D printed chickpea protein isolate-mixed cereal dysphagia diet[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(Part 5): 127251.
- [11] MARISCAL R M, FIGUEROA J, SANTIAGO-RAMOS D, *et al.* Amylose lipid complexes formation as an alternative to reduce amylopectin retrogradation and staling of stored tortillas[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(5): 1651-1657.
- [12] CHANG F D, HE X W, FU X, *et al.* Effects of heat treatment and moisture contents on interactions between lauric acid and starch granules[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2014, 62(31): 7862-7868.
- [13] CHEN J, CAI H L, ZHANG M N, *et al.* Effects of rice protein on the formation and structural properties of starch-lipid complexes in instant rice noodles incorporated with different fatty acids[J]. *Food Bioscience*, 2023, 54: 102851.
- [14] YANG Y Y, BAO H Y, WANG Y H, *et al.* Mechanisms of rice protein hydrolysate regulating the *in vitro* digestibility of rice starch under extrusion treatment in terms of structure, physicochemical properties and interactions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 127315.
- [15] WANG L S (王丽爽), YU X S (于小帅), DUAN Y M (段玉敏), *et al.* Effect of glutelin on structure and properties of extrusion starch complex[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2023, 40(8): 1819-1825, 1848.
- [16] CHEN J, CAI H L, YANG S, *et al.* The formation of starch-lipid complexes in instant rice noodles incorporated with different fatty acids: Effect on the structure, *in vitro* enzymatic digestibility and retrogradation properties during storage[J]. *Food Research International*, 2022, 162: 111933.
- [17] WANG L (王莉), WANG P (王鹏), YU X S (于小帅), *et al.* Effects of curdlan on wheat starch retrogradation and freeze-thaw stability in the extrusion system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (农业工程学报)*, 2024, 40(1): 331-338.
- [18] LIU Q, JIAO A Q, YANG Y Y, *et al.* The combined effects of extrusion and recrystallization treatments on the structural and physicochemical properties and digestibility of corn and potato starch[J]. *LWT*, 2021, 151: 112238.
- [19] WANG K X (王可心), WANG L S (王丽爽), HUO J J (霍金杰), *et al.* Effect of extrusion screw speed on the multiscale structure of starch in reconstituted rice[J]. *Food Science (食品科学)*, 2024, 45(12): 212-219.
- [20] LI D X (李德祥). Effect of particle size on physicochemical properties of high amylose maize starch and construction of starch-based composite film[D]. Wuxi: Jiangnan University (江南大学), 2024.
- [21] HAO Z W, XU H J, YU Y Y, *et al.* Insights into ball milling treatment promotes the formation of starch-lipid complexes and the relation between multi-scale structure and *in vitro* digestibility based on intermolecular interactions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 146: 109277.
- [22] NILSSON K, JOHANSSON M, SANDSTRÖM C, *et al.* Pasting and gelation of faba bean starch-protein mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 138: 108494.
- [23] TANG M C, COPELAND L. Analysis of complexes between lipids and wheat starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 67(1): 80-85.
- [24] ZHAO T, LI X P, MA Z, *et al.* Multiscale structural changes and retrogradation effects of addition of sodium alginate to fermented and native wheat starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 163: 2286-2294.
- [25] MARINOPOULOU A, PASTERGIADIS E, RAPHAELIDES S N, *et al.* Morphological characteristics, oxidative stability and enzymic hydrolysis of amylose-fatty acid complexes[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 141: 106-115.
- [26] XIONG J, LI Q Y, SHI Z X, *et al.* Interactions between wheat starch and cellulose derivatives in short-term retrogradation: Rheology and FTIR study[J]. *Food Research International*, 2017, 100: 858-863.
- [27] XIONG H, WANG Z J, CHEN L, *et al.* Effects of sucrose fatty acid ester addition on the structural, rheological and retrogradation behavior of high amylose starch-based wood adhesive[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019, 89: 51-58.
- [28] CAI C X, TIAN Y Q, SUN C R, *et al.* Resistant structure of extruded starch: Effects of fatty acids with different chain lengths and degree of unsaturation[J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131510.
- [29] LEE M H, KIM H R, LIM W S, *et al.* Formation of debranched wheat starch-fatty acid inclusion complexes using saturated fatty acids with different chain length[J]. *LWT*, 2021, 141: 110867.
- [30] YIN X X, ZHENG Y X, KONG X L, *et al.* RG-I pectin affects the physicochemical properties and digestibility of potato starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 117: 106687.
- [31] MIRZABABAE S M, OZMEN D, HESARINEJAD M A, *et al.* A study on the structural, physicochemical, rheological and thermal properties of high hydrostatic pressurized pearl millet starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 223: 511-523.
- [32] LIU Z P, YANG J X, SHI Z T, *et al.* Effect of stearic acid on the microstructural, rheological and 3D printing characteristics of rice starch[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 590-596.
- [33] GARCIA M C, FRANCO C M L. Effect of glycerol monostearate on the gelatinization behavior of maize starches with different amylose contents[J]. *Starch-Stärke*, 2015, 67(1/2): 107-116.
- [34] WANG S J, WANG J R, YU J L, *et al.* Effect of fatty acids on functional properties of normal wheat and waxy wheat starches: A structural basis[J]. *Food Chemistry*, 2016, 190: 285-292.
- [35] QIU S, YADAV M P, LIU Y, *et al.* Effects of corn fiber gum with different molecular weights on the gelatinization behaviors of corn and wheat starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 53: 180-186.
- [36] DU J, LYU M Y, ZHANG H L, *et al.* Synergistic effect of endogenous gluten and oleic acid on wheat starch digestion by forming ordered starch-fatty acid-protein complexes during thermal processing[J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 6: 100422.
- [37] TAN L B, KONG L Y. Starch-guest inclusion complexes: Formation, structure, and enzymatic digestion[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(5): 780-790.
- [38] FU Z Q, WANG L J, LI D, *et al.* Effects of partial gelatinization on structure and thermal properties of corn starch after spray drying[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 88(4): 1319-1325.
- [39] LIU Y F, CHEN J, LUO S J, *et al.* Physicochemical and structural properties of pregelatinized starch prepared by improved extrusion cooking technology[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 175: 265-272.
- [40] LU H, YANG Z, YU M T, *et al.* Characterization of complexes formed between debranched starch and fatty acids having different carbon chain lengths[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 167: 595-604.
- [41] KUANG J W (邝吉卫). Mechanisms of wheat starch-gluten interactions during the thermal processing and the quality of simulated dough[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology (陕西科技大学), 2024.