

玉米淀粉-大豆分离蛋白/卵白蛋白复合物 体外消化率和理化特性的比较

洪玉珠¹, 张佳乐¹, 张龙鑫¹, 周彬¹, 胡冰², 褚上^{1*}

(1. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068) (2. 大连民族大学生命科学学院, 辽宁大连 116600)

摘要: 为降低玉米淀粉 (Corn Starch, CS) 消化速率, 增加抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 含量, 本研究通过湿热处理 (Heat Moisture Treatment, HMT) 将玉米淀粉 (CS) 与大豆分离蛋白 (Soy Protein Isolate, SPI) 或卵白蛋白 (Ovalbumin, OVA) 制成淀粉-蛋白质复合物, 研究了蛋白质质量分数 (5%、10%、15% 和 20%) 对淀粉-蛋白质复合物的理化、流变和消化特性的影响。差示扫描量热法和动态黏弹性结果证明, 蛋白质的加入限制了淀粉颗粒的溶胀。X-射线衍射数据显示添加 SPI/OVA 后玉米淀粉结晶度从 28.75% 分别下降到 24.92% 和 25.29%。扫描电子显微镜表明, 添加的蛋白质包裹着淀粉颗粒, 作为物理屏障抑制淀粉的消化。体外消化结果表明, 添加 SPI 和 OVA 使玉米淀粉快速消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS) 含量分别降低了 10.39% 和 14.9%。总之, 添加这两种蛋白质都降低了玉米淀粉的消化率, 且 OVA 对玉米淀粉消化速率的抑制作用大于 SPI, 该研究为开发含有淀粉-蛋白质复合物的低血糖食品提供了可能性。

关键词: 玉米淀粉; 大豆分离蛋白; 卵白蛋白; 理化特性; 体外消化

文章编号: 1673-9078(2024)08-70-80

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.8.1061

Comparison of *in Vitro* Digestibility and Physicochemical Properties of Corn Starch-soy Protein Isolate/Ovalbumin Complexes

HONG Yuzhu¹, ZHANG Jiale¹, ZHANG Longxin¹, ZHOU Bin¹, HU Bing², CHU Shang^{1*}

(1. School of Biotechnology and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2. School of Life Science, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China)

Abstract: In order to reduce the digestion rate of corn starch (CS) and increase the content of resistant starch (RS), this study used heat moisture treatment (HMT) to prepare starch-protein complexes by combining CS with a soy protein isolate (SPI) or ovalbumin (OVA). The effects of the mass fractions of proteins (5%, 10%, 15%, and 20%) on the physicochemical, rheological, and digestive properties of the starch-protein complexes were studied. Differential scanning calorimetry and dynamic viscoelasticity revealed that the swelling of starch granules was limited by the addition of proteins. X-ray

引文格式:

洪玉珠,张佳乐,张龙鑫,等.玉米淀粉-大豆分离蛋白/卵白蛋白复合物体外消化率和理化特性的比较[J].现代食品科技,2024,40(8):70-80.

HONG Yuzhu, ZHANG Jiale, ZHANG Longxin, et al. Comparison of *in vitro* digestibility and physicochemical properties of corn starch-soy protein isolate/ovalbumin complexes [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(8): 70-80.

收稿日期: 2023-09-06

基金项目: 辽宁省民生科技计划项目 (2021JH2/10200019); 大连市科技计划项目 (2021JB12SN038)

作者简介: 洪玉珠 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 淀粉消化性能调控, E-mail: 2353364375@qq.com

通讯作者: 褚上 (1987-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然食品多糖分子结构与性质研究, E-mail: shang.chu@hbut.edu.cn

diffraction data showed that the crystallinity of corn starch decreased from 28.75% to 24.92% and 25.29% after the addition of SPI or OVA, respectively. Scanning electron microscopy showed that the added proteins wrapped around the starch granules and acted as a physical barrier inhibiting starch digestion. Moreover, *in vitro* digestion analysis showed that SPI and OVA additions lowered the rapidly digestible starch (RDS) content of corn starch by 10.39% and 14.9%, respectively. In conclusion, addition of both proteins decreases starch digestibility, and the OVA has a stronger inhibitory effect on the digestibility of starch than SPI. The findings of this study provide insights for developing low glycemic index foods containing starch-protein complexes.

Key words: corn starch; soy protein isolate; ovalbumin; physicochemical property; *in vitro* digestion

玉米是淀粉生产的主要来源之一，淀粉作为人类饮食中的重要能量来源，对食品的适口性、质地、保质期、加工过程，以及成品的感官特性有重要影响^[1,2]。由于加工淀粉的快速消化特性，富含淀粉的饮食会增加许多疾病的发生率，例如肥胖、II型糖尿病和心血管疾病等^[3]。研究表明，食用含缓慢消化淀粉（Slowly Digestible Starch, SDS）和抗性淀粉（Resistant Starch, RS）多的食物对人体健康更有益。SDS 可提供持续的葡萄糖释放，在小肠中缓慢消化，这被认为是最理想的膳食淀粉形式^[4]；RS 在小肠中不能被消化，但能产生短链脂肪酸，可改善结肠健康^[5]。由于代谢综合征的高发病率，消费者对葡萄糖释放缓慢且持续的主食需求越来越大。

据报道，通过物理屏障、空间位阻效应，或添加其他食品成分可以降低淀粉类食品的消化率，并提高其产品的货架稳定性^[6,7]。热湿处理（Heat Moisture Treatment, HMT）被认为是一种绿色安全的物理改性技术，它可以改变淀粉理化特性，满足食品加工中的不同需求^[8]。研究表明，HMT 可以引起淀粉结晶度、颗粒溶胀度、糊化行为等特性的变化^[9,10]。同时，蛋白质在缓解淀粉水解和餐后血糖反应中也发挥着重要作用。研究发现，二者间相互作用涉及氢键、静电相互作用、范德华力和疏水相互作用等^[11]。这些作用存在于两种聚合物的不同片段和侧链之间，而主导力取决于蛋白质的比例、淀粉和蛋白质的结构以及加工条件等^[12]。淀粉与蛋白质的相互作用不仅影响了淀粉的理化性质，而且影响了淀粉的消化^[13]。例如，面筋蛋白截留了小麦淀粉颗粒，面粉的紧密结构延缓了酶的进入，剩余的面筋网络阻止了大量支链淀粉的浸出^[14]。Yang 等^[15]发现，乳清分离蛋白降低了快速消化淀粉（Rapidly Digestible Starch, RDS）的含量，并增加了 SDS 和 RS 含量，乳清分离蛋白蒸煮后在玉米淀粉颗粒周围形成包封。有研究表明，HMT 影响淀粉-大豆肽

复合物的理化性质和消化率特性。同时，随着大豆肽添加量的增加，RDS 含量降低，RS 含量增加^[16]。因此，淀粉-蛋白质复合物中淀粉的消化率可能受到许多因素的影响，如淀粉和蛋白质的类型、淀粉-蛋白质混合比、加工方法和条件等。

大豆分离蛋白（Soy Protein Isolate, SPI）蛋白质含量高于 90%，适合作为预防肥胖和糖尿病的蛋白质来源^[17]；卵白蛋白（Ovalbumin, OVA）因其营养价值和功能特性被广泛应用于食品、营养保健品等行业^[18]。由于 OVA 的消化率高于 SPI，且两者在氨基酸组成及结构特性等方面存在差异^[19]，所以，二者对淀粉-蛋白质复合物消化特性等性质的影响也可能存在差异。此外，不同蛋白质及添加浓度对淀粉-蛋白质复合物性质的影响尚没有充足的报道。因此，本研究选用 HMT 来诱导 CS-SPI/OVA 的形成，此方法比物理混合等方法有更好的抗酶解效果^[16]。最终来探究蛋白质类型和添加量对复合物的理化特性和体外消化率的影响，这可能有助于提高淀粉类食品的品质。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

玉米淀粉（Corn Starch, CS；水分质量分数：12.11%）和大豆分离蛋白（Soy Protein Isolate, SPI），上海源叶生物科技有限公司；卵白蛋白（Ovalbumin, OVA），上海麦克林生化有限公司；胰酶（P7545，酶活 200 U/mg），美国 sigma 公司；淀粉葡糖苷酶（酶活 100 000 U/mL），上海麦克林生化科技有限公司；葡萄糖试剂盒，上海荣盛生物药业有限公司；其余试剂均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

RVA4500 快速黏度分析仪，斯戴普（北京）

科技有限公司; Micro DSC III 微量热 DSC, 法国 SETARAM 公司; MCR92 安东帕流变仪, 奥地利安东帕有限公司; TA-XTPlus 物性分析仪, 英国 Stable Micro System 公司; JSM-6390LV 扫描电子显微镜, 日本 HITACHI 公司; X-射线衍射仪, 德国 Bruker AXS 有限公司; Nicoletis-50 傅立叶变换红外光谱仪, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; TU-1900 型双光束紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

在密封容器中称量 CS, 并将其水分质量分数调至 20%。在 25 °C 平衡 24 h 后, 加入不同质量分数的 SPI/OVA (5%、10%、15% 和 20%, 基于淀粉干重) 并混合均匀。将混合物置于称量瓶中 (50 mm×30 mm), 用铝箔覆盖, 并在 110 °C 的热风干燥箱中加热 18 h。冷却至室温后, 在 50 °C 下干燥 12 h, 常温球磨并通过 100 目筛。粉末在 4 °C 下储存, 直到进行下一步分析。样品被标记为: H-CS、H-CSSPI-5%、H-CSSPI-10%、H-CSSPI-15%、H-CSSPI-20%、H-CSOVA-5%、H-CSOVA-10%、H-CSOVA-15% 和 H-CSOVA-20%。

1.3.2 糊化特性测定

使用快速黏度分析仪测量样品的糊化特性。将每个样品 (2.5 g) 精确称重到 RVA 罐中, 并加入 25 mL 去离子水。在糊化试验之前, 用塑料桨搅拌混合物。使用仪器提供的标准 2 获得样品的糊化曲线。简而言之, 淀粉浆在 50 °C 下平衡 1 min, 以 6 °C/min 的速率从 50 °C 加热至 95 °C, 在 95 °C 下保持 5 min, 然后以 6 °C/min 的速率冷却至 50 °C, 并在 50 °C 保持 2 min。前 10 s 搅拌桨的速度为 960 r/min, 然后 160 r/min 直到测试完成^[20]。

1.3.3 流变学行为测定

使用安东帕流变仪测量样品的流变学行为, 该仪器配备平行几何板 (直径 50 mm, 间隙 1 mm)。将样品质量分数为 10% 的悬浮液在 100 °C 水浴中加热 30 min 至完全糊化, 冷却至室温后将混合物加载到夹具上, 刮除多余样品, 用硅油密封防止水分蒸发。线性黏弹性区域在 1 Hz 频率和 0.01%~100% 的应变扫描下确定^[15]。

1.3.3.1 频率扫描测试

通过糊化程序将样品悬浮液从 25 °C 加热至 90 °C,

然后冷却至 25 °C。在 0.5% 应变下进行 0.1~100 rad/s 的动态频率扫描。

1.3.3.2 温度扫描测试

将质量分数为 10% 的样品悬浮液以 2 °C/min 的速率从 25 °C 加热至 90 °C, 在 90 °C 下保持 10 min, 然后以 4 °C/min 的速率冷却至 25 °C, 在 25 °C 下保持 15 min。所有测试均在 0.5% 应变和 1 Hz 频率下进行。记录 G' 与时间和温度的关系。

1.3.4 凝胶的质构特性测定

按照 1.3.2 的步骤糊化淀粉, 糊化后的样品在 4 °C 下冷藏 24 h, 控制凝胶长、宽及高均为 10 mm。采用质构仪 TPA 模式对凝胶进行分析。探头类型: P/5; 测前速度: 2 mm/s, 测试速度 1 mm/s; 测后速度 5 mm/s; 触发力: 5 g; 测试压缩比: 50%; 两次压缩之间停留时间为 3 s, 压缩部位为整块凝胶表面, 每组样品 4 次平行。

1.3.5 溶胀度的测定

制备质量分数为 10% 的样品悬浮液, 将悬浮液分别在 60、70、80 和 90 °C 下加热 60 min, 冷却后以 6 000 r/min 离心 20 min。丢弃上清液后, 根据每克样品的残留物重量计算溶胀度。

1.3.6 热力学性质测定

热力学行为用微量热差示扫描量热计进行测试。用蒸馏水配置样品质量分数为 30% 的悬浮液, 在 25 °C 下平衡 24 h。精确称量 800 mg 样品溶液和蒸馏水置于样品罐和参考罐中。以 1 °C/min 的速度从 25 °C 加热至 90 °C。记录起始温度 (T_0)、峰值温度 (T_p)、结束温度 (T_c) 和焓变值 (ΔH)。

1.3.7 扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)

将样品用双面碳胶带安装在铝样品台上, 并喷涂一层薄金。在 10~30 kV 加速电压下操作的 SEM 系统, 记录 2 000 倍下的淀粉颗粒和复合物形貌。

1.3.8 X-射线衍射

X-射线衍射仪在 40 kV 和 30 mA 下使用 Cu K α 辐射 ($\lambda=0.154$ nm) 操作。将样品平铺在玻璃容器中, 扫描角度范围为 5~35° (2θ), 扫描速度为 5 °/min。相对结晶度为结晶峰峰面积与总衍射峰峰面积之比。

1.3.9 傅里叶变换红外光谱 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy, FT-IR)

称取样品与 KBr 以 1:60 的质量比混合, 将混

合物在红外灯下充分研磨,取 60 mg 制成薄片在室温下以透射模式从 4 000~400 cm^{-1} 进行扫描,分辨率为 4 cm^{-1} ,累计扫描 64 次。为了研究淀粉和蛋白质之间的相互作用,在 1 060~960 cm^{-1} 的波数范围内对样品的光谱进行了去卷积,增强因子为 1.9,半峰宽为 19。去卷积 FT-IR 光谱广泛用于各种研究,以验证分子水平上的结构变化^[21,22]。

1.3.10 体外消化率的测定

通过 Englyst 方法^[23]对样品的体外消化率进行评估,并进行了一些修改。将 200 mg 样品悬浮在 5 mL 去离子水中,通过涡旋充分混合。将蒸煮的样品置于沸水浴中 30 min,持续搅拌,以防止淀粉结块。未蒸煮和蒸煮的样品在摇动水浴(37 $^{\circ}\text{C}$)中孵育 30 min。然后加入 10 mL (0.2 mol/L, pH 值 5.2) 乙酸钠缓冲液,并在 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中平衡 10 min。将 5 mL 胰淀粉酶(8 mg/mL)和 65 μL 淀粉葡萄糖苷酶添加到每个试管中。在 37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴中消化,20 min 和 120 min 时,收集 0.1 mL 消化液并与 0.9 mL 无水乙醇混合以停止酶促反应。然后 8 000 r/min 离心 5 min,上清液使用葡萄糖试剂盒测定葡萄糖含量,根据葡萄糖含量计算 RDS、SDS 和 RS 的含量。

1.4 数据统计分析

所有实验一式三份,以平均值 \pm 标准差呈现。结果分析通过方差分析和邓肯多范围检验在 5% 显著性水平上进行。使用 SPSS 26.0 进行数据分析,Origin 2019 进行图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 糊化特性

玉米淀粉-蛋白质复合物的糊化黏度图和相应的糊化特性如表 1 所示。包括淀粉糊的峰值黏度(最大黏度);谷值黏度(峰值黏度后的最小黏度);崩解值(峰值黏度和最小黏度之间的差异);回生值(最终黏度和最小黏度之间的差异);以及最终黏度(冷却结束时的黏度)。显然,随着蛋白质组分的增加,淀粉-蛋白质复合物的糊化行为表现出显著差异($P<0.05$)。与 CS 相比,H-CS 的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值和回生值都降低。添加质量分数低于 15% 的 SPI/OVA 后,玉米淀粉-蛋白质复合物的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度均高于纯玉米淀粉。黏度值的增加可能是由于蛋白质的加入导致了连续相中淀粉有效浓度的增加^[24]。一些研究也有同样的结果,例如,大豆蛋白和豌豆蛋白可以增加蛋白质-淀粉复合物的总黏度^[25]。

崩解值反映了样品在高温和高速剪切力下的耐受性。样品受到机械剪切应力,导致淀粉颗粒完整性损失,随后淀粉颗粒破裂,导致淀粉糊黏度降低^[26]。当添加 5% SPI/OVA 时,玉米淀粉-蛋白质复合物的崩解值最低。这表明,适量的蛋白质可以抑制淀粉-蛋白质复合物中淀粉颗粒的破裂^[27]。H-CSOVA 样品的 BD 值均高于 H-CSSPI 样品。因此,H-CSSPI 复合物表现出较高的剪切和温度稳定性。

表 1 蛋白质类型和添加量对玉米淀粉-蛋白质复合物糊化特性的影响

Table 1 Effect of protein type and amount on pasting properties of corn starch-protein complex

样品	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	崩解值/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	糊化温度/ $^{\circ}\text{C}$
CS	1 383.00 \pm 4.96 ^d	1 144.00 \pm 9.09 ^c	239.00 \pm 5.71 ^d	1 413.00 \pm 7.36 ^d	269.00 \pm 9.84 ^c	85.62 \pm 0.20 ^a
H-CS	1 123.00 \pm 7.41 ^f	869.00 \pm 3.74 ^b	254.00 \pm 4.49 ^c	1 116.00 \pm 7.40 ^c	247.00 \pm 5.24 ^f	81.35 \pm 0.35 ^b
H-CSSPI-5%	1 584.00 \pm 8.29 ^a	1 353.00 \pm 2.94 ^a	231.00 \pm 5.71 ^{de}	1 669.00 \pm 10.65 ^a	316.00 \pm 7.93 ^{bc}	79.12 \pm 0.06 ^{cd}
H-CSSPI-10%	1 460.00 \pm 14.97 ^c	1 185.00 \pm 9.27 ^c	275.00 \pm 5.79 ^{ab}	1 645.00 \pm 11.81 ^a	460.00 \pm 3.29 ^a	77.93 \pm 0.45 ^f
H-CSSPI-15%	1 365.00 \pm 11.89 ^d	1 086.00 \pm 6.34 ^f	279.00 \pm 5.66 ^a	1 543.00 \pm 15.75 ^b	457.00 \pm 9.41 ^a	78.07 \pm 0.20 ^f
H-CSSPI-20%	1 268.00 \pm 24.09 ^e	1 003.00 \pm 15.94 ^e	265.00 \pm 8.22 ^b	1 465.00 \pm 29.57 ^c	462.00 \pm 14.63 ^a	78.90 \pm 0.18 ^{de}
H-CSOVA-5%	1 554.00 \pm 11.03 ^b	1 342.00 \pm 8.60 ^a	212.00 \pm 2.62 ^f	1 644.00 \pm 4.98 ^a	302.00 \pm 6.94 ^{cd}	79.37 \pm 0.16 ^c
H-CSOVA-10%	1 464.00 \pm 6.48 ^c	1 242.00 \pm 4.49 ^b	221.00 \pm 2.87 ^{ef}	1 565.00 \pm 8.17 ^b	323.00 \pm 7.07 ^b	79.10 \pm 0.04 ^{cd}
H-CSOVA-15%	1 381.00 \pm 2.83 ^d	1 166.00 \pm 3.29 ^d	214.00 \pm 1.25 ^f	1 469.00 \pm 0.00 ^c	302.00 \pm 3.29 ^{cd}	79.12 \pm 0.02 ^{cd}
H-CSOVA-20%	1 374.00 \pm 13.44 ^d	1 133.00 \pm 8.98 ^e	241.00 \pm 7.48 ^d	1 418.00 \pm 8.05 ^d	285.00 \pm 5.31 ^{de}	78.73 \pm 0.02 ^c

注: 同列不同上标表示具有显著差异($P<0.05$)。

回生是加热的淀粉悬浮液在冷却过程中黏度的恢复,这时候直链淀粉在冷却过程中发生重结晶。所有复合物的回生值均大于CS和H-CS ($P < 0.05$)。回生值反映了冷淀粉糊的稳定性和老化趋势,H-CSOVA的老化率低于H-CSSPI样品。H-CSSPI和H-CSOVA的糊化温度(从85.62 °C分别降至78.90 °C和78.73 °C)随蛋白质质量分数的增加而显著降低 ($P < 0.05$)。其他研究人员也报道了类似的结果,玉米淀粉-蛋白质混合物的糊化温度低于玉米糊^[28]。

2.2 流变学行为

食品的流变学在质量控制、感官评价、过程评估和产品开发中发挥着重要作用^[29]。了解蛋白质如何影响淀粉基食品体系的流变特性,对食品加工具有重要意义。图1a、1b显示了淀粉蛋白糊样品的储能模量(G')和损耗模量(G'')随频率的变化。样品的 G' 和 G'' 都随着频率的增加而增加, G' 的变化大于 G'' ,表明蛋白质的添加对CS的弹性性质有很大影响。然而,对于CS样品, G' 几乎与频率无关。通常,淀粉凝胶更强,更不会受频率的影响^[30]。蛋白质的添加明显影响了 G' 和 G'' ,而且SPI引起的影响比OVA更明显。在整个频率范围内,系统的 G' 值高于 G'' ,反映出淀粉蛋白质复合物凝胶弹性特性优于黏性特性。在频率范围内,大多数淀粉-蛋白质复合物的 G' 值高于对照样品(CS)的测定值,低于HMT玉米淀粉(H-CS)。结果表明,HMT改变了淀粉的 G' ,并且是一个正变化。蛋白质的存在也改变了 G' ,其影响取决于蛋白质的类型和蛋白质的添加量。

温度扫描技术可用于研究淀粉基系统加热和冷却过程中的流变学变化,并确定其糊化温度。淀粉-蛋白质复合物的 G' 加热曲线如图1c、1d所示。在从25 °C加热到90 °C期间, G' 显著增加,这代表了样品的相转变。在没有蛋白质的情况下,玉米淀粉的糊化开始于约60 °C。与CS相比,随着蛋白质比例的增加, G' 峰值先升高后降低,这与峰值黏度的趋势一致。在加热阶段,淀粉-蛋白质复合物的 G' 随着温度的升高而逐渐升高,直到达到峰值,然后在进一步加热时降低,这是由于溶胀的淀粉颗粒破裂, G' 值降低。此外,随着温度从95 °C降至25 °C, G' 逐渐增加。在冷却过程中,糊化的淀粉回生,这通常会导致模量增加。随着蛋白质添加量的增加,淀粉-蛋白质复合物的 G' 和 G'' 降低,凝胶结构更加松散,凝胶强度降低。这可能是由于蛋白质的加入,降低了淀粉-蛋白质复合物中淀粉的相对浓度。由温度扫描确定的模量变化趋势与RVA黏度变化趋势

一致;也就是说,各种淀粉-蛋白质体系的模量和黏度在加热过程中先升高后降低,而模量和黏度则在随后的冷却过程中再次升高;大多数淀粉-蛋白质体系的模量和黏度低于相应的纯淀粉体系。因此,适量的蛋白质有利于淀粉凝胶的形成。

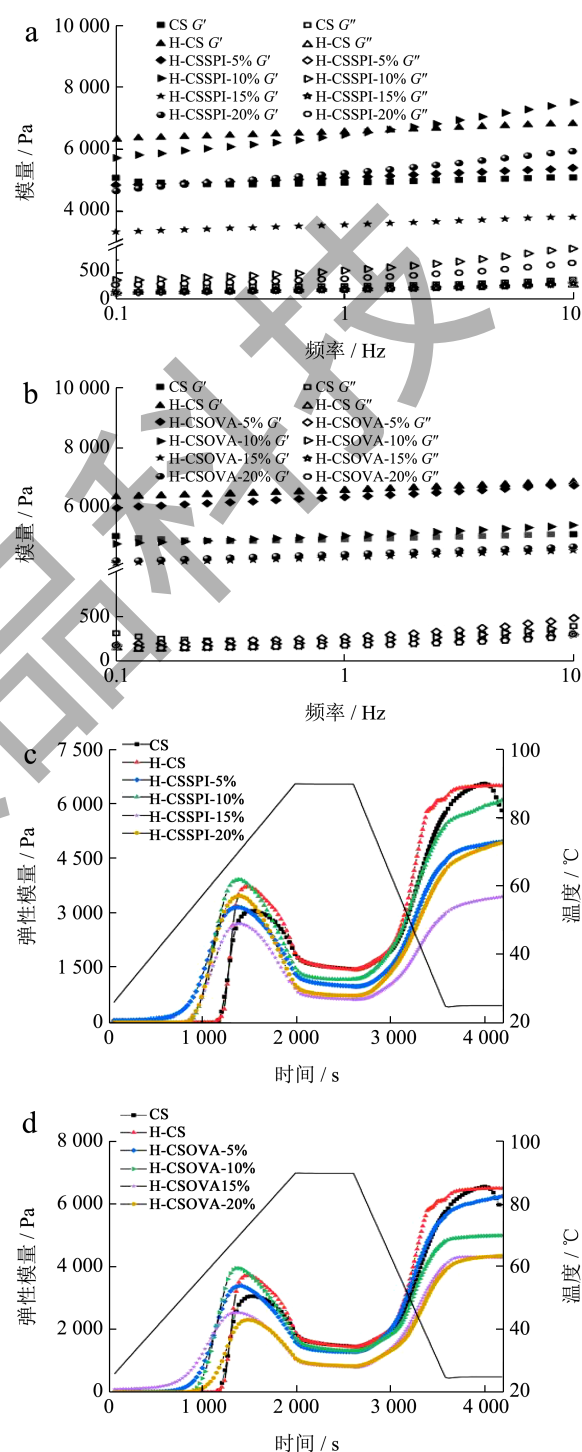


图1 频率 (a, b) 和加热冷却时间 (c, d) 对玉米淀粉-蛋白质糊动态流变特性的影响

Fig.1 Dynamic viscoelasticity of corn starch-protein pastes affected by (a, b) frequency, (c, d) function time during heating and cooling

表 2 蛋白质类型和添加量对玉米淀粉-蛋白质复合物物质特性的影响

Table 2 Effect of protein type and amount on texture properties of corn starch-protein

样品	硬度/g	弹性	黏聚性	咀嚼度	回复性
CS	39.09 ± 1.44 ^b	0.71 ± 0.11 ^{dc}	0.36 ± 0.09 ^c	10.02 ± 0.742 ^d	0.13 ± 0.13 ^{ab}
H-CS	34.92 ± 0.29 ^c	0.83 ± 0.19 ^a	0.46 ± 0.24 ^a	13.32 ± 1.07 ^a	0.11 ± 0.21 ^b
H-CSSPI-5%	44.33 ± 2.26 ^a	0.80 ± 0.17 ^{ab}	0.40 ± 0.09 ^b	14.23 ± 0.59 ^a	0.12 ± 0.08 ^{ab}
H-CSSPI-10%	36.46 ± 0.89 ^c	0.74 ± 0.12 ^c	0.39 ± 0.13 ^b	10.76 ± 0.38 ^{bc}	0.13 ± 0.19 ^{ab}
H-CSSPI-15%	32.65 ± 0.25 ^d	0.71 ± 0.11 ^d	0.39 ± 0.12 ^b	9.233 ± 0.37 ^d	0.14 ± 0.05 ^a
H-CSSPI-20%	12.33 ± 0.19 ^f	0.61 ± 0.01 ^f	0.36 ± 0.03 ^c	2.743 ± 0.93 ^f	0.14 ± 0.12 ^a
H-CSOVA-5%	43.29 ± 0.36 ^a	0.79 ± 0.07 ^b	0.42 ± 0.09 ^b	14.31 ± 0.33 ^a	0.13 ± 0.08 ^{ab}
H-CSOVA-10%	36.20 ± 0.86 ^c	0.78 ± 0.08 ^b	0.42 ± 0.06 ^b	11.80 ± 0.59 ^b	0.12 ± 0.12 ^{ab}
H-CSOVA-15%	14.80 ± 0.28 ^c	0.70 ± 0.02 ^{dc}	0.39 ± 0.07 ^b	4.100 ± 0.18 ^c	0.12 ± 0.05 ^{ab}
H-CSOVA-20%	14.12 ± 0.28 ^{cf}	0.68 ± 0.02 ^c	0.39 ± 0.08 ^b	3.787 ± 0.15 ^{cf}	0.13 ± 0.04 ^{ab}

注: 同列不同上标表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

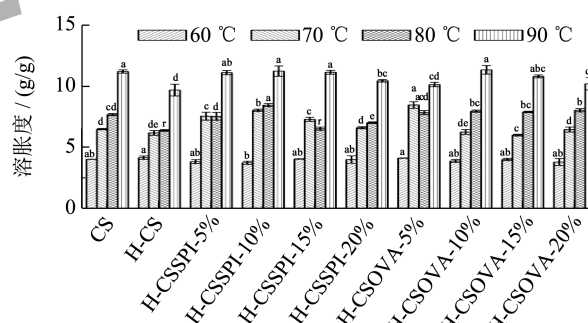
2.3 质构特性

质构特性 (TPA) 参数包括硬度、弹性、黏聚性、咀嚼度和回复性。硬度表征凝胶能承受的最大力; 弹性和回复性则表征凝胶的弹性及形变后的恢复能力。蛋白质对玉米淀粉凝胶特性的影响见表 2。添加蛋白质后, 体系硬度、弹性都有显著的变化。添加质量分数为 5% 的 SPI/OVA 可以显著提高玉米淀粉凝胶的硬度和弹性 ($P < 0.05$), 蛋白质质量分数为 5%~10% 时, 蛋白质类型对玉米淀粉凝胶的质构特性无显著影响。当 SPI/OVA 质量分数达到 20% 时, 硬度下降最为明显, 从 39.09 g 分别降低到 12.33 g 和 14.12 g。淀粉凝胶的形成是由于回生过程淀粉分子相互聚集, 形成具有一定强度的网络结构。体系直链淀粉含量越高, 分子缠绕作用越强, 当蛋白质质量分数过高时, 蛋白质与直链淀粉分子相互作用, 弱化了体系的凝胶结构^[31]。

2.4 溶胀度

玉米淀粉-大豆分离蛋白/卵白蛋白复合物的溶胀度如图 2 所示。CS 及其 CS-SPI/OVA 复合物的溶胀度随温度的增加 (60~90 °C) 而增加。但在 60 °C 孵育时, 所有样品的溶胀度均无显著性差异, 这是因为 CS 的糊化温度尚未达到。溶胀度可以反映淀粉颗粒与水分子之间的相互作用。当样品的悬浮液被加热时, 淀粉颗粒膨胀, 水分子进入颗粒, 导致直链淀粉的浸出和支链淀粉分子的膨胀^[32]。淀粉的溶胀行为主要归因于其支链淀粉, 而直链淀粉是淀粉颗粒溶胀的抑制剂。直链淀粉抑制淀粉膨胀并保持膨胀颗粒的完整性。与 CS 相比, HMT 降低

了溶胀度, 主要是在 80 °C 和 90 °C 的高温下。HMT 后 CS 溶胀度的降低可能是由于直链淀粉和支链淀粉分子的重组, 限制水合作用, 从而减少淀粉颗粒的膨胀。其他因素如蛋白质-淀粉相互作用、直链淀粉和支链淀粉结构也会影响淀粉颗粒的溶胀度。不同蛋白质和添加量对 CS 及其蛋白质复合物在溶胀度上的影响是相似的。蛋白质的添加对 H-CSOVA 溶胀度的影响大于 H-CSSPI。淀粉-蛋白质复合物之间溶胀度的差异可能是由于蛋白质拥有不同的结构。



不同蛋白质质量分数的玉米淀粉-蛋白质复合物

图 2 玉米淀粉-蛋白质复合物的溶胀度

Fig.2 Swelling power of corn starch-protein complexes

2.5 热力学分析

淀粉-蛋白质复合物的糊化温度 (T_o 、 T_p 和 T_c) 和焓变 (ΔH) 汇总在表 3 中。如表 3 所示, 由于淀粉糊化, CS 在 67.75 °C 时出现吸热峰。随着 SPI/OVA 质量分数的增加, 吸热峰逐渐向右 (更高温度) 移动, 从 67.75 °C 分别移动到 70.78 °C 和 71.81 °C, H-CSSPI 显示出比 H-CSOVA 更低的糊化温度。HMT 提高了 CS 的糊化温度, 无论有无蛋白质。

与 CS 相比, H-CSSPI 和 H-CSOVA 的 T_0 、 T_p 、 T_c 显著增加 ($P < 0.05$)。同时, 蛋白质变性在淀粉表面形成的包封可以抑制淀粉颗粒的膨胀, 从而导致复合物的糊化温度高于玉米淀粉。此外, 淀粉-蛋白质复合物的 ΔH 显著降低 ($P < 0.05$), 这可能归因于部分玉米淀粉被蛋白质取代, 从而降低了淀粉的有效浓度。此外, 蛋白质的存在可能会在糊化过程中对淀粉颗粒的水流动性造成干扰, 导致淀粉-蛋白质系统中的淀粉-水相互作用较小, 因此 ΔH 显著下降。所有样品都显示出明显的单一吸热峰。其他研究也报道了淀粉-蛋白质混合物的单吸热峰^[22,25]。这可能归因于本研究中的低蛋白质浓度 ($\leq 20\%$), 因此蛋白质的热吸收峰与淀粉的热吸收峰完全重叠。对乳清蛋白-淀粉热特性的研究表明, 只有当蛋白质比率高于 20% 时才出现两个峰^[21]。

2.6 SEM

通过 SEM 观察到的玉米淀粉-蛋白质复合物的表面形态如图 3 所示。天然玉米淀粉颗粒为圆形或椭圆形, 其表面光滑, 无凹坑和裂缝, 直径范围为 5~20 μm , 与之前的报导一致^[16]。与正常玉米淀粉样品不同, 湿热处理的淀粉具有更多的聚集颗粒, 这可能是由浸出的直链淀粉造成的^[33]。湿热处理后, 淀粉-蛋白质复合物呈现出不同于 CS 的形貌。在含有 SPI/OVA 的复合物中发现了更多的颗粒团聚物或聚集体, 但淀粉保留了其原始形貌。随着蛋白质质量分数的增加, 聚集物增大。值得注意的是, H-CSOVA 是淀粉颗粒嵌入蛋白质基质中, 体外消化证明, H-CSOVA 比 H-CSSPI 更能阻碍水和酶接触淀粉, 抑制淀粉的糊化和消化。

2.7 X-射线衍射

玉米淀粉-蛋白质复合物的 X-射线衍射图和相对结晶度如图 4 所示。CS 显示出典型的 A 型结构, 在 15° 和 23° 处具有强烈的单衍射峰, 在 17° 和 18° 处具有未解析的双峰。CS 呈现半结晶结构, 颗粒中有结晶和无定形薄片。H-CS 的相对结晶度低于 CS, 这表明淀粉结晶已被破坏, 但结晶模式未受影响。这种结晶度的降低可能是由于 HMT 导致半结晶薄片中的结晶度降低或非晶峰面积增加^[16]。

尽管蛋白质的类型和添加量不影响 CS 的晶体结构, 但随着蛋白质质量分数的增加, H-CSSPI 的

相对结晶度从 27.49% 下降到 24.92%, H-CSOVA 的相对结晶率下降到 25.29%。这是由于蛋白质的加入形成了水扩散和热渗透的物理屏障。此外, 蛋白质从淀粉颗粒中吸收水分, 并与晶体结构中^[34]。与 CS 和 H-CS 相比, 添加蛋白质的玉米淀粉相对结晶度更低, 这与 DSC 显示的 ΔH 结果相一致。

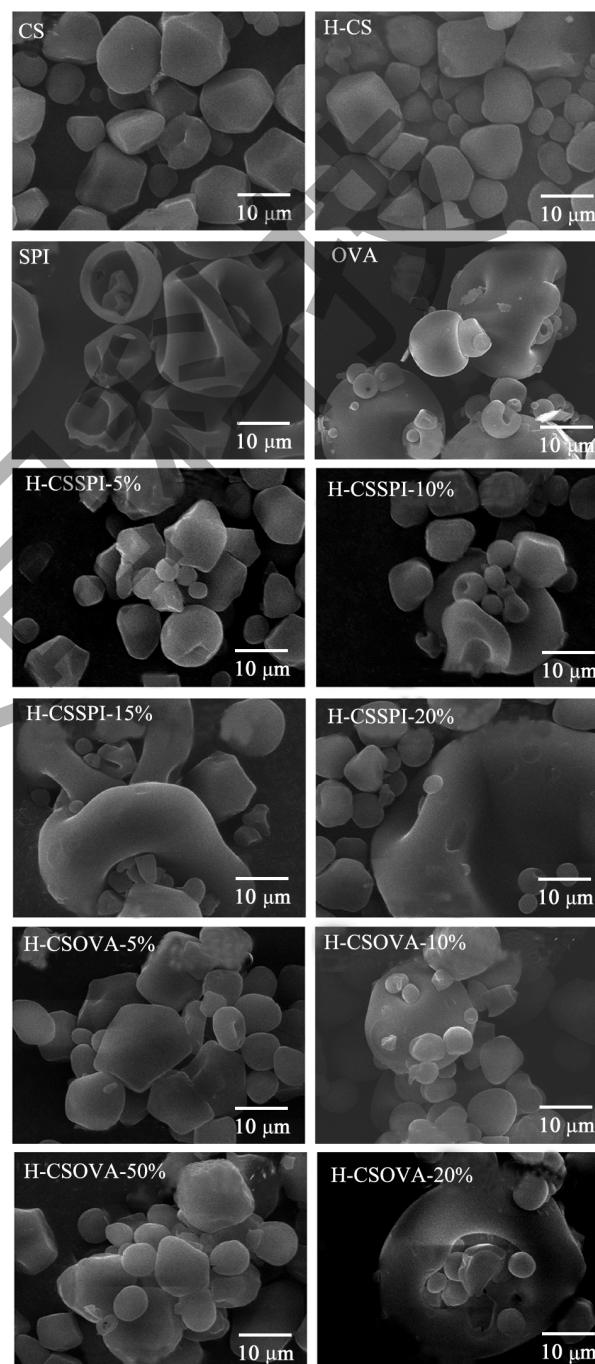


图 3 玉米淀粉-蛋白质复合物的扫描电子显微镜图像
($\times 2000$)

Fig.3 Scanning electron microscopic images of corn starch-protein complexes ($\times 2000$)

表 3 蛋白质类型和添加量对玉米淀粉-蛋白质复合热特性的影响

Table 3 Effect of protein type and amount on thermal properties of corn starch-protein complex

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J/g})$
CS	62.03 ± 0.17^c	67.75 ± 0.25^h	74.78 ± 0.11^d	3.90 ± 0.18^a
H-CS	63.71 ± 0.26^d	69.74 ± 0.16^g	81.68 ± 0.27^a	3.52 ± 0.16^b
H-CSSPI-5%	64.69 ± 0.69^c	70.16 ± 0.26^f	79.58 ± 0.15^b	3.15 ± 0.08^{de}
H-CSSPI-10%	64.76 ± 0.77^c	70.55 ± 0.25^{de}	78.19 ± 0.66^c	3.27 ± 0.49^{cd}
H-CSSPI-15%	65.23 ± 0.09^{bc}	70.64 ± 0.16^{de}	78.38 ± 0.29^c	3.15 ± 0.15^{de}
H-CSSPI-20%	64.96 ± 0.55^{bc}	70.78 ± 0.09^d	78.24 ± 0.31^c	3.02 ± 0.11^e
H-CSOVA-5%	65.05 ± 0.13^{bc}	70.51 ± 0.12^e	80.13 ± 0.08^b	3.56 ± 0.07^b
H-CSOVA-10%	65.55 ± 0.26^{ab}	71.17 ± 0.12^c	79.73 ± 0.23^b	3.38 ± 0.05^{bc}
H-CSOVA-15%	66.01 ± 0.02^a	71.45 ± 0.03^b	79.48 ± 0.19^b	3.24 ± 0.05^{cd}
H-CSOVA-20%	66.16 ± 0.68^a	71.81 ± 0.08^a	79.43 ± 0.58^b	3.31 ± 0.07^{cd}

注: 同列不同上标表示具有显著差异 ($P < 0.05$); T_0 : 起始糊化温度, T_p : 峰值糊化温度, T_c : 结束糊化温度, ΔH : 糊化焓。

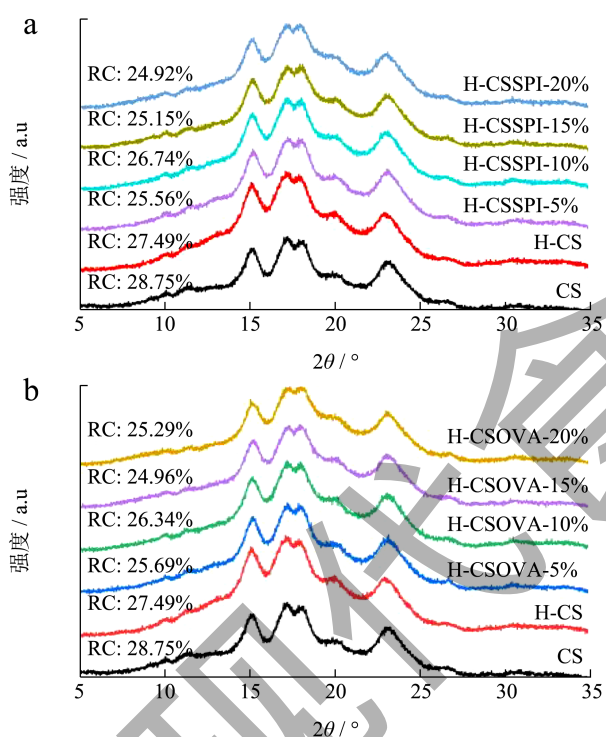


图 4 玉米淀粉-蛋白质复合物的 X-射线衍射图

Fig.4 X-ray diffraction of corn starch-protein complexes

注: (a) 玉米淀粉-大豆分离蛋白复合物; (b) 玉米淀粉-卵白蛋白复合物。

2.8 傅里叶变换红外光谱

玉米淀粉-蛋白质复合物的 FT-IR 光谱如图 5 所示。H-CSSPI 和 H-CSOVA 光谱分别为图 5a、5b。对于所有淀粉样品, 在 $3\ 000\sim 3\ 700\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰与 O-H 拉伸和分子间氢键有关。随着蛋白质添加量的增加, 样品的氢键区域没有显著差异。蛋白质 $1\ 655\sim 1\ 540\ \text{cm}^{-1}$ 处的光谱带被分配给酰胺 I 带

($1\ 580\sim 1\ 720\ \text{cm}^{-1}$) 和酰胺 II 带 ($1\ 480\sim 1\ 580\ \text{cm}^{-1}$)。H-CSSPI 和 H-CSOVA 光谱分别在 $3\ 268\ \text{cm}^{-1}$ 和 $3\ 282\ \text{cm}^{-1}$ 处显示出特征宽峰, 它对应于 O-H 基团的拉伸振动。添加蛋白质后, 条带从 $3\ 298\ \text{cm}^{-1}$ 移动到较低的波段 ($3\ 287\ \text{cm}^{-1}$), 表明蛋白质和 CS 之间可能发生氢键相互作用。与 CS 相比, H-CSSPI/OVA 样品中没有发现新的吸收峰 (图 5a、5b), 表明 SPI/OVA 和 CS 之间没有形成共价键。

根据 H-CSSPI/OVA 的去卷积 FT-IR 光谱, 研究其短程有序化结构 (图 5c、5d)。 $1\ 100\sim 900\ \text{cm}^{-1}$ 区域的条带对淀粉结构的变化很敏感。 $995\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰与淀粉 C-6 羟基的分子内氢键有关, 而 $1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 的吸收峰则与淀粉的无定形结构有关。 $1\ 047\ \text{cm}^{-1}$ 处的吸收峰与淀粉的晶体结构有关。 $1\ 047/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$ 与 $1\ 022/995\ \text{cm}^{-1}$ 峰值强度之比被视为淀粉短程有序结构的指标^[35]。光谱显示, 在 $1\ 047$ 、 $1\ 022$ 和 $995\ \text{cm}^{-1}$ 处, 所有样品都有典型的淀粉带。

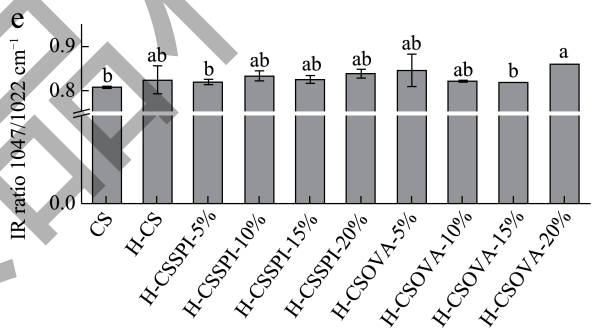
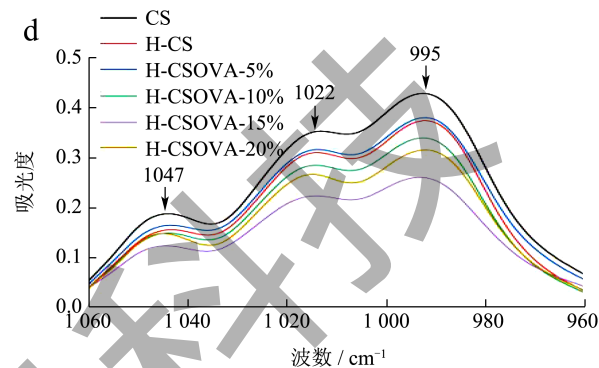
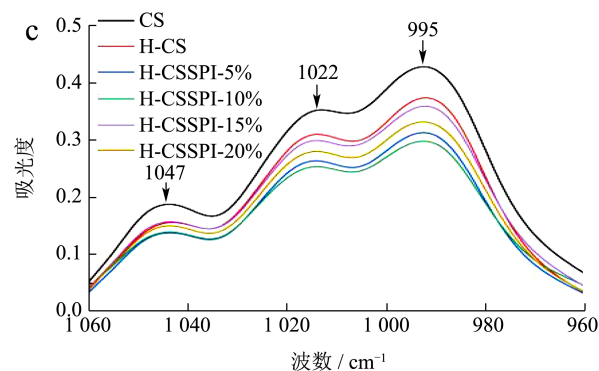
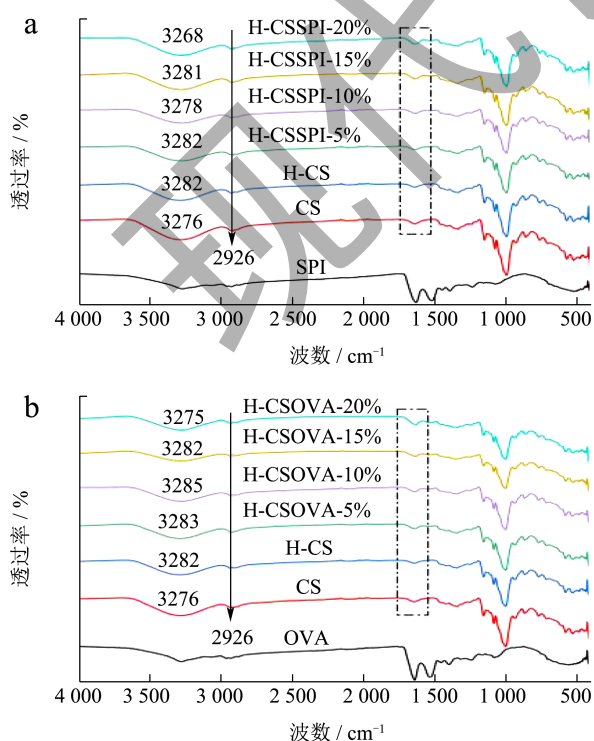
添加质量分数为 20% 的蛋白质后, H-CSSPI 的峰强度比 ($R\ 1\ 047\ \text{cm}^{-1}/1\ 022\ \text{cm}^{-1}$) 从 0.822 增加到 0.838, 而 H-CSOVA 的峰强度比从 0.822 增至 0.859 (图 5e)。这些结果表明, 蛋白质影响淀粉分子的重排, 改善了淀粉的有序结构。此外, 与 CS 相比, H-CSSPI/OVA 显示出较小的 $R\ 1\ 022/995\ \text{cm}^{-1}$ (图 5f), 表明 H-CSSPI/OVA 复合物具有更高层次的短程有序化结构。此外, H-CSOVA 的结构比 H-CSSPI 更有序。

2.9 体外消化特性

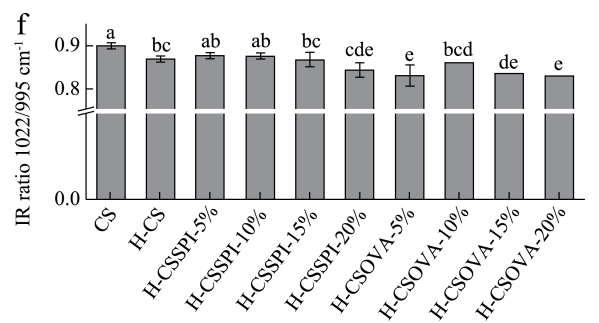
人类食用的大多数淀粉和淀粉基食品都经过了

不同类型的加工或烹饪。然而，这些热处理可以改变RS的含量。因此本研究在测定体外消化率时遵循了熟化程序。SPI和OVA对玉米淀粉体外消化率的影响见表4所示。对于所有未煮熟的样品，玉米淀粉-蛋白质复合物中的RDS含量与CS相比显著增加 ($P < 0.05$)。与H-CS相比，玉米淀粉-蛋白质复合物的RDS含量显著降低 ($P < 0.05$)。玉米淀粉RDS含量随蛋白质质量分数的增加而降低。

对于煮熟的样品，CS有最高的消化淀粉含量(95.08%)。所有煮熟的玉米淀粉-蛋白质复合物显示出低于CS和H-CS的RDS含量。SPI/OVA的添加在不同程度上降低了所有样品的RDS含量，同时增加了RS含量。较低的RDS含量和较高的RS含量与较高的蛋白质添加量相关，各种类型的蛋白质可能具有特定/最佳添加范围，以降低样品的淀粉消化率^[19]。此外，不同质量分数(5%、10%、15%和20%)下，OVA对玉米淀粉消化的阻滞作用比SPI更显著 ($P < 0.05$)。煮熟的CS及其复合物的消化率显著高于未煮熟的淀粉样品，这是由于蒸煮过程中颗粒结构的破坏，使其更易被酶水解。SDS、RS组分之和随蛋白质添加量的增加而稳步增加。与CS和H-CS相比，复合物的SDS和RS总和更高，RDS含量更低。添加蛋白质后，CS的消化率降低，这可能是由于蛋白质基质成为淀粉和淀粉酶之间的物理屏障，并减少了消化酶的接触位点，延迟了淀粉-蛋白质复合物中淀粉的水解。



不同蛋白质质量分数的玉米淀粉-蛋白质复合物



不同蛋白质质量分数的玉米淀粉-蛋白质复合物

图5 玉米淀粉-大豆分离蛋白(a)/卵白蛋白(b)复合物的FT-IR光谱, 玉米淀粉-大豆分离蛋白(c)/卵白蛋白(d)复合物的解卷积FT-IR光谱, FT-IR光谱在1047/1022 cm⁻¹(e)和1022/995 cm⁻¹(f)的峰强度比

Fig.5 FT-IR spectra of corn starch-soy protein isolate (a) / ovalbumin (b) complexes. Deconvoluted FT-IR spectra of corn starch-soy protein isolate (c) / ovalbumin (d) complexes. The ratios of bands at 1047, 1022 cm⁻¹ (e) and 1022, 995 cm⁻¹ (f) of FT-IR spectra

表 4 蛋白质类型和含量对玉米淀粉-蛋白质复合物体外消化率的影响

Table 4 Effect of protein type and amount on the *in vitro* digestibility of corn starch-protein complex

样品	未蒸煮			
	RDS/%	SDS/%	RS/%	SDS+RS/%
CS	13.08 ± 0.007 ^c	24.86 ± 0.017 ^b	62.06 ± 0.024 ^{cd}	86.92 ± 0.07 ^a
H-CS	32.92 ± 0.02 ^a	12.52 ± 0.09 ^c	54.56 ± 0.03 ^c	67.08 ± 0.02 ^c
H-CSSPI-5%	25.55 ± 0.08 ^c	29.76 ± 0.06 ^a	44.69 ± 0.04 ^f	74.45 ± 0.08 ^c
H-CSSPI-10%	25.42 ± 0.02 ^c	15.51 ± 0.08 ^d	59.07 ± 0.02 ^d	74.58 ± 0.02 ^c
H-CSSPI-15%	20.40 ± 0.01 ^d	10.52 ± 0.08 ^{ef}	69.08 ± 0.06 ^a	79.60 ± 0.12 ^b
H-CSSPI-20%	20.10 ± 0.01 ^d	12.47 ± 0.01 ^e	67.43 ± 0.01 ^{ab}	79.90 ± 0.01 ^b
H-CSOVA-5%	29.36 ± 0.01 ^b	6.11 ± 0.01 ^g	64.53 ± 0.01 ^{bc}	70.64 ± 0.01 ^d
H-CSOVA-10%	28.15 ± 0.01 ^b	19.36 ± 0.01 ^c	52.49 ± 0.01 ^c	71.85 ± 0.01 ^d
H-CSOVA-15%	21.87 ± 0.02 ^d	12.69 ± 0.01 ^e	65.44 ± 0.01 ^b	78.13 ± 0.02 ^b
H-CSOVA-20%	21.57 ± 0.01 ^d	9.53 ± 0.02 ^f	68.90 ± 0.02 ^a	78.43 ± 0.01 ^b
样品	蒸煮			
	RDS/%	SDS/%	RS/%	SDS+RS/%
CS	56.30 ± 0.01 ^a	38.78 ± 0.03 ^b	4.92 ± 0.03 ^c	43.70 ± 0.01 ^f
H-CS	53.62 ± 0.01 ^{ab}	24.16 ± 0.01 ^f	22.22 ± 0.01 ^{abc}	46.38 ± 0.01 ^{ef}
H-CSSPI-5%	52.84 ± 0.01 ^{abc}	34.04 ± 0.02 ^c	13.12 ± 0.02 ^d	47.16 ± 0.01 ^{def}
H-CSSPI-10%	50.41 ± 0.01 ^{bcd}	29.71 ± 0.02 ^{cde}	19.88 ± 0.04 ^{bc}	49.59 ± 0.01 ^{cde}
H-CSSPI-15%	49.11 ± 0.03 ^{bcde}	25.82 ± 0.01 ^{ef}	25.07 ± 0.04 ^{ab}	50.89 ± 0.03 ^{bcde}
H-CSSPI-20%	45.91 ± 0.02 ^{def}	28.32 ± 0.01 ^{ef}	25.77 ± 0.01 ^a	54.09 ± 0.01 ^{abc}
H-CSOVA-5%	50.85 ± 0.03 ^{bc}	29.10 ± 0.01 ^{de}	20.05 ± 0.03 ^{bc}	49.15 ± 0.03 ^{de}
H-CSOVA-10%	48.25 ± 0.04 ^{cde}	30.57 ± 0.02 ^{cd}	21.18 ± 0.03 ^c	51.75 ± 0.03 ^{bcd}
H-CSOVA-15%	44.87 ± 0.02 ^{ef}	36.03 ± 0.02 ^c	19.10 ± 0.01 ^{abc}	55.13 ± 0.02 ^{ab}
H-CSOVA-20%	41.40 ± 0.02 ^f	47.07 ± 0.01 ^a	11.53 ± 0.05 ^d	58.60 ± 0.02 ^a

注: 同列不同上标表示具有显著差异 ($P < 0.05$); RDS: 快速消化淀粉, SDS: 缓慢消化淀粉, RS: 抗性淀粉。

3 结论

添加 SPI 或 OVA 对 CS 的理化性质和消化性能有显著影响。SPI 或 OVA 的存在延缓了玉米淀粉的糊化, 降低了玉米淀粉的糊化温度。通过扫描电镜观察到蛋白质包裹淀粉颗粒并形成聚合物, 作为阻碍淀粉消化的物理屏障。体外消化实验表明, 添加 SPI 或 OVA 导致 RDS 含量显著降低, 而 SDS 和 RS 含量的总和增加。质量分数为 20% 的 SPI/OVA 使玉米淀粉的 RDS 含量分别降低了 10.39% 和 15.90%, OVA 降低玉米淀粉 RDS 的效果显著 ($P < 0.05$) 大于 SPI。H-CSSPI 和 H-CSOVA 性质差异可能与二者在微观形貌及短程有序化结构等方面的差异有关。综合分析, 添加质量分数为 15% 的 OVA 是降低玉米淀粉 RDS 含量最高效的方法。利用 HMT 诱导淀粉-蛋白质复合物的形成有助于避免餐后血糖过高, 减轻胰腺负担, 可为健康主食的加工和发展提供理论依据。

参考文献

- [1] COPELAND L, BLAZEK J, SALMAN H, et al. Form and functionality of starch [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(6): 1527-1534.
- [2] WANG S J, COPELAND L. Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: a review [J]. Food Function, 2013, 4(11): 1564-1580.
- [3] AUGUSTIN L S A, KENDALL C W C, JENKINS D J A, et al. Glycemic index, glycemic load and glycemic response: An International Scientific Consensus Summit from the International Carbohydrate Quality Consortium (ICQC) [J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2015, 25(9): 795-815.
- [4] LEHMANN U, ROBIN F. Slowly digestible starch-its structure and health implications: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2007, 18(7): 346-355.
- [5] BINDELS L B, WALTER J, RAMER-TAIT A E. Resistant starches for the management of metabolic diseases [J]. Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care, 2015, 18(6): 559-565.
- [6] MOHAMED I O. Effects of processing and additives on

- starch physicochemical and digestibility properties [J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2021, 2: 100039.
- [7] YU M H, LIU B, ZHONG F, et al. Interactions between caffeic acid and corn starch with varying amylose content and their effects on starch digestion [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106544.
- [8] BEMILLER J N, HUBER K C. Physical modification of food starch functionalities [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2015, 6(1): 19-69.
- [9] XIAO Y, LIU H, WEI T, et al. Differences in physicochemical properties and *in vitro* digestibility between tartary buckwheat flour and starch modified by heat-moisture treatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 86: 285-292.
- [10] KUNYANEE K, LUANGSAKUL N. The impact of heat moisture treatment on the physicochemical properties and *in vitro* glycemic index of rice flour with different amylose contents and associated effects on rice dumpling quality [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 154: 112694.
- [11] 缪铭,江波,张涛.食品典型组分相互作用的研究进展[J].食品科学,2008,10:625-629.
- [12] WANG J, ZHAO S M, MIN G, et al. Starch-protein interplay varies the multi-scale structures of starch undergoing thermal processing [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 175: 179-187.
- [13] LIU B, ZHONG F, YOKOYAMA W, et al. Interactions in starch co-gelatinized with phenolic compound systems: Effect of complexity of phenolic compounds and amylose content of starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 247: 116667.
- [14] ZOU W, SISSONS M, WARREN F J, et al. Compact structure and proteins of pasta retard *in vitro* digestive evolution of branched starch molecular structure [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 152: 441-449.
- [15] YANG C H, ZHONG F, DOUGLAS GOFF H, et al. Study on starch-protein interactions and their effects on physicochemical and digestible properties of the blends [J]. Food Chemistry, 2019, 280: 51-58.
- [16] CHEN X, LUO J W, FU L L, et al. Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2019, 297: 124957.
- [17] AOYAMA T, FUKUI K, TAKAMATSU K, et al. Soy protein isolate and its hydrolysate reduce body fat of dietary obese rats and genetically obese mice (yellow KK) [J]. Nutrition, 2000, 16(5): 349-354.
- [18] HADIS R, VANDANA C, NAVNIDHI C, et al. Ovalbumin, an outstanding food hydrocolloid: Applications, technofunctional attributes, and nutritional facts, A systematic review [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108514.
- [19] ADETIYA R, MARGARET A B, JAMES M, et al. *In-vitro* digestibility, protein digestibility corrected amino acid, and sensory properties of banana-cassava gluten-free pasta with soy protein isolate and egg white protein addition [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 520-527.
- [20] QIAO D L, TU W Y, LIAO A P, et al. Multi-scale structure and pasting/digestion features of yam bean tuber starches [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 213: 199-207.
- [21] LU Z H, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214-222.
- [22] SUN S L, JIN Y Z, HONG Y, et al. Effects of fatty acids with various chain lengths and degrees of unsaturation on the structure, physicochemical properties and digestibility of maize starch-fatty acid complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 110: 106224.
- [23] ENGLYST K N, ENGLYST H N, HUDSON G J, et al. Rapidly available glucose in foods: an *in vitro* measurement that reflects the glycemic response [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1999, 69(3): 448-454.
- [24] ZHENG M Z, XIAO Y, YANG S, et al. Effect of adding zein, soy protein isolate and whey protein isolate on the physicochemical and *in vitro* digestion of proso millet starch [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 55(2): 776-784.
- [25] QIU C, LI X J, JI N, et al. Rheological properties and microstructure characterization of normal and waxy corn starch dry heated with soy protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 48: 1-7.
- [26] RIBOTTA P D, COLOMBO A, ROSELL C M. Enzymatic modifications of pea protein and its application in protein-cassava and corn starch gels [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(1): 185-190.
- [27] WANG L F, ZHANG L, WANG H L, et al. Insight into protein-starch ratio on the gelatinization and retrogradation characteristics of reconstituted rice flour [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 146: 524-529.
- [28] RIBOTTA P D, ROSELL C M. Effects of enzymatic modification of soybean protein on the pasting and rheological profile of starch-protein systems [J]. Starch-Stärke, 2010, 62(7): 373-383.
- [29] JAMILAH B, MOHAMED A, ABBAS K A, et al. Protein-starch interaction and their effect on thermal and rheological characteristics of a food system: A review [J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2009, 7(2): 169-174.
- [30] JOSHI M, ALDRED P, PANOZZO J F, et al. Rheological and microstructural characteristics of lentil starch-lentil protein composite pastes and gels [J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35: 226-237.
- [31] 杨翠红.乳清分离蛋白对淀粉消化特性的影响及其作用机制研究[D].无锡:江南大学,2019.
- [32] YANG Y Y, JIAO A Q, ZHAO S N, et al. Effect of removal of endogenous non-starch components on the structural, physicochemical properties, and *in vitro* digestibility of highland barley starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106698.
- [33] ZHANG Y, ZHAO X T, BAO X Y, et al. Effects of pectin and heat-moisture treatment on structural characteristics and physicochemical properties of corn starch [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106664.
- [34] CHEN X, HE X W, ZHANG B, et al. Effects of adding corn oil and soy protein to corn starch on the physicochemical and digestive properties of the starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104: 481-486.
- [35] WARREN F J, GIDLEY M J, FLANAGAN B M. Infrared spectroscopy as a tool to characterise starch ordered structure-a joint FTIR-ATR, NMR, XRD and DSC study [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 139: 35-42.