

热修饰大豆分离蛋白与改性魔芋胶糖基化对产物抗水化特性的影响研究

郑雅丹¹, 游寅寅², 杨鹏¹, 顾继鹏², 冯魏¹, 陈玉峰², 刘书来², 丁玉庭²

(1.浙江衡美健康科技股份有限公司, 杭州 311100; 2.浙江工业大学 食品科学与工程学院, 杭州 310014)

摘要: **目的** 制备一种具有良好抗水化和低黏适口特性的新型大豆分离蛋白-魔芋胶复合物。**方法** 以大豆分离蛋白(Soy Protein Isolate, SPI)和可溶性膳食纤维魔芋胶(Konjac Gum, KGM)为主要原料,通过SPI热诱导聚集和KGM酸碱改性处理,经谷氨酰胺转氨酶交联并耦合糖基化反应,制得具有抗水化特性的SPI-KGM复合物。**结果** 与对照组(未经处理的SPI和KGM混合物)的表观黏度相比,天然KGM反应复合物、酸改性KGM反应复合物和碱改性KGM反应复合物常温冲调后,体系黏度分别下降了53.25%、82.68%和77.94%;100℃高温冲调后,体系黏度分别下降了59.55%、88.35%和87.22%。**结论** 经热修饰后的SPI与酸碱改性后的KGM反应形成复合物,与天然未经处理的复合物相比,复合物体系黏度显著下降,有效提高了冲调后的低黏适口性,并具有胃消化系统良好的吸水溶胀与稳定黏度,可为开发高蛋白高膳食纤维食品提供一定的理论依据。

关键词: 大豆分离蛋白;魔芋胶;糖基化;酶交联;低黏度

中图分类号:TS218 文献标识码:A 文章编号:1001-3563(2023)11-0116-08

DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.11.013

Effect of Glycosylation of Heat-modified Soy Protein and Modified Konjac Gum on Hydration Resistance of Products

ZHENG Ya-dan¹, YOU Yin-yin², YANG Peng¹, GU Ji-peng², FENG Wei¹,
CHEN Yu-feng², LIU Shu-lai², DING Yu-ting²

(1. Zhejiang Hengmei Health Technology Co., Ltd., Hangzhou 311100, China;

2. College of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare a novel soy protein isolate-konjac gum composite with excellent hydration resistance and low viscosity. Soy protein isolate (SPI) and soluble dietary fiber konjac gum (KGM) were used as the main raw materials. The SPI was heat-induced for aggregation and the KGM was treated through acid-base modification. The resulting SPI-KGM composite was cross-linked by transglutaminase coupled with glycosylation reaction to produce a hydration-resistant SPI-KGM composite. Compared with the apparent viscosity of the control (untreated mixture of SPI and KGM), the viscosity of the natural KGM reaction composite, acid-modified KGM reaction composite and base-modified KGM reaction composite decreased by 53.25%, 82.68%, and 77.94%, respectively, after room temperature reconstitution. After high-temperature reconstitution at 100 °C, the viscosity decreased by 59.55%, 88.35%, and 87.22%, respectively. The heat-modified SPI and acid-base modified KGM react to form a composite. Compared with the

收稿日期:2023-03-30

基金项目:国家自然科学基金(32172242)

作者简介:郑雅丹(1984—),女,硕士,工程师,主要研究方向为功能性健康食品的研究与开发。

通信作者:丁玉庭(1963—),男,博士,教授,主要研究方向为食品、海洋生物资源开发利用和水产品、农产品精深加工。

natural untreated composite, the viscosity of the composite system significantly decreases, effectively improving the low viscosity and swallowability after reconstitution, and has good water absorption and stable viscosity in the stomach digestive system, providing a theoretical basis for developing high-protein and high-fiber food products.

KEY WORDS: soy protein isolate; konjac gum; glycosylation; enzyme cross-linking; low viscosity

随着生活水平的提高, 饮食结构及生活方式的改变导致超重和糖尿病患者日益增多。高蛋白高膳食纤维冲调食品因其具有富营养、低热量、食用方便等特点备受关注^[1]。都阳等^[2]通过不同粉碎方式的高膳食纤维组合制备了营养丰富流动性好的代餐粉; 甘聃^[3]通过胶体和油脂添加种类及用量优化制备了分散性好、口感顺滑的代餐粉; 刘先娥^[4]以抗性淀粉为基料制备了感官特性优良的复合膳食纤维代餐粉。然而, 基于高蛋白和高膳食纤维改性的代餐冲调食品研究鲜有报道。

大豆分离蛋白(SPI)和魔芋胶(KGM)均是制备高蛋白高膳食纤维复合物食品的优选原料^[5-6]。然而, 较高浓度SPI易产生絮凝或形成凝胶网络结构^[7], 当冲调类产品中的SPI与KGM混合冲调后, 因水化作用会形成较为致密的蛋白纤维复合网络结构, 易出现黏度高和流动性差等问题, 无法满足吞食类饮品的良好适口性能要求。Wang等^[7]通过将低浓度大豆蛋白(1.0%)预热, 使大豆蛋白在热修饰后的抗水化抗聚集能力得到提高。罗清楠等^[8]运用酸降解方法, 以特性黏度为表征, 对KGM进行酸降解, 经过处理后的KGM随着分子质量降低其黏度也随之降低。糖基化修饰可改善天然蛋白质的功能特性^[9]。谷氨酰胺转氨酶(TG酶)可使蛋白质肽链相应基团发生交联, 同时促进糖分子与蛋白质发生共价结合, 形成糖基化复合物^[10]。本研究通过改性SPI和可溶性膳食纤维KGM, 并进行糖基化和TG酶耦合交联反应, 制备具有黏度低和良好吞食性能的高蛋白高膳食纤维冲调型食材, 以期为奶昔等功能多元化代餐食品的开发提供一定指导。

1 实验

1.1 材料与试剂

主要材料与试剂: SPI, 河南万邦实业有限公司; KGM (KT12型), 湖北强森魔芋科技有限公司; 柠檬酸, 浙江一诺生物科技有限公司; 氢氧化钙, 浙江一诺生物科技有限公司; 液体型谷氨酰胺转氨酶(120 U/g), 上海青瑞食品科技有限公司; 胃蛋白酶(3 000 U/g)、胰蛋白酶(400 U/g), 上海阿拉丁生物科技股份有限公司; 胶态微晶纤维素, 河北食化说原料有限公司。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备: AR2130 电子精密天平, 上海里衡仪器仪表有限公司; HYJD 超纯水器, 杭州永洁

达净化科技有限公司; HH-1 数显恒温水浴锅, 江苏省金坛市江南仪器厂; PHS-3C pH 计, 上海精密科学仪器有限公司; HR2860 打浆机, 德国飞利浦有限公司; SCIENTZ-12N 超低温冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技有限公司; FA25 高速分散机, 上海 Fluko 流体机械制造有限公司; RE52-99 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; YC-1800 实验室低温喷雾干燥机, 上海雅程仪器设备有限公司; NDJ-5S 旋转黏度计, 上海平轩科学仪器有限公司; MCR302 旋转流变仪, 奥地利安东帕有限公司; UV-VIS 紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; CR21GII 高速离心机, 日立 Hitachi 公司。

1.3 制备方法

1.3.1 热处理大豆分离蛋白的制备

参照 Wang 等^[7]的实验方法稍做修改。将质量分数为 1% 的 SPI 溶于水并搅拌 30 min 使其混合均匀, 于 90 °C 搅拌 60 min 后冷却至室温, 加入柠檬酸调节体系 pH 至 4.5 后抽滤收集沉淀, 加入饱和澄清石灰水将体系 pH 调整为 7.0 后真空冷冻干燥 72 h, 过筛得到热处理大豆分离蛋白(TS)。

1.3.2 预处理 KGM 的制备

1.3.2.1 酸降解 KGM 制备

参照 Makabe 等^[11]方法制备低分子质量 KGM。将质量分数为 10% 的 KGM 缓慢加入柠檬酸溶液中。其中柠檬酸的浓度为每克 KGM 添加 0.16 mmol, 搅拌 30 min 使其混合均匀, 80 °C 加热搅拌 3 h 使其酸解。接着向体系中倒入 2 倍体积的体积分数为 95% 的乙醇, 打浆搅拌均匀, 静置沉淀后过滤收集沉淀, 重复上述操作并合并沉淀物。最后真空冷冻干燥 72 h, 过筛得到酸降解 KGM(HK)。

1.3.2.2 碱脱乙酰基 KGM 的制备

参照 Li 等^[12]的方法加以改进。精确称取 KGM 分散在 2 倍体积的去离子水中, 在室温下搅拌并溶胀 30 min。立即加入饱和澄清石灰水, 其中氢氧化钙的浓度为每克 KGM 添加 0.03 mmol, 使 KGM 在体系中的质量分数为 10%, 搅拌 10 min 使其混合均匀, 95 °C 水浴反应 1.0 h。待脱乙酰基反应完成后, 用一系列浓度梯度乙醇溶液(体积分数为 50%、75%、95%)进行样品脱水。所得产物冷冻干燥 72 h, 过筛得到碱脱乙酰基 KGM(OHK)。

1.3.3 酶交联耦合糖基化制备 SPI-KGM 复合物

质量分数为 4% 的 TS 溶于水, 分别加入质量分

数为 1% 的 KGM、HK 或 OHK，再加入质量分数为 0.15% 为微晶纤维素作为抗结剂及质量分数为 0.06% 的谷氨酰胺转氨酶（TG 酶）以促进蛋白交联，混合物以 10 000 r/min 高速剪切分散 1 min。在 40 °C 下旋转蒸发 1 h 使底物发生一定糖基化反应，并将体系固形物浓缩至 (8.0±0.2) %，调节体系 pH 至 5.5，喷雾干燥后得到大豆分离蛋白-魔芋胶复合物（TS-K、TS-HK 和 TS-OHK）。

1.3.4 接枝度测定

按照 Li 等^[13]方法进行测定。加入磷酸缓冲溶液将样品蛋白质质量浓度调节至 2.0 mg/mL。取 4.0 mL 邻苯二甲酰试剂于试管中，加入 200 μL 样品，涡旋振荡使其混合均匀，置于 35 °C 水浴锅中反应 2 min，于 340 nm 处测定吸光值。以赖氨酸代替样品，以相同的方法做标准曲线。接枝度 (D_G) 以式 (1) 进行计算。

$$D_G = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中， C_0 为糖基化修饰前体系游离氨基的含量，mol/L； C_1 为糖基化修饰后体系游离氨基的含量，mol/L。

1.3.5 傅里叶红外光谱测定

用傅里叶红外光谱对 SPI-KGM 复合物粉末状态中蛋白的一、二级结构进行分析。称取少量干燥样品粉末与溴化钾粉末充分混合、研磨压片后于红外光谱仪舱室中进行全波长扫描。波数范围为 400~4000 cm^{-1} ，分辨率为 4 cm^{-1} ，扫描次数为 32 次。采用 Omnic 8.0 和 Peakfit 4.12 软件进行分析^[14]。

1.3.6 表面疏水性与接触角测定

参照 Li 等^[15]的方法并稍加改进，取 0.2 g 样品溶于 20 mL 去离子水中，离心取 4 mL 上清液，加入 80 μL 质量浓度为 1 mg/mL 的溴酚蓝溶液并混合均匀，室温反应 10 min 后，离心取上清液稀释 5 倍，在 595 nm 测定样品吸光度。以未加样品的溴酚蓝溶液作为空白样。表面疏水性采用式 (2) 进行计算：

$$H_0 = 80 \times \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (2)$$

式中： H_0 为表面疏水性，μg； A_0 为对照组的吸光度； A_1 为实验组的吸光度。

参考支雅雯等^[16]的方法，使用接触角测定仪测定接触角，将大豆分离蛋白-魔芋胶复合物粉末压片后，置于测定仪上，测量范围为 0~180°，滴水量为 0.5 μL。

1.3.7 溶解度测定

参考夏轩泽等^[17]方法稍作改动。配制 100 mg/mL 的大豆分离蛋白-魔芋胶复合物溶液，以 10 000 r/min 的转速高速分散 1 min 后，取 10 mL 溶液进行离心（3 500 r/min、15 min、25 °C）。分别检测离心前后分散体系中的蛋白含量。蛋白含量均采用双缩脲法进

行测定，并以牛血清蛋白作为标准蛋白。溶解度采用式 (3) 表示。

$$\text{溶解度} = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中： m_0 为离心前样品蛋白含量，mg/mL； m_1 为离心后上清液蛋白质含量，mg/mL。

1.3.8 表观黏度测定

分别用 25 °C 和 100 °C 去离子水以固液比 10:1 将 SPI-KGM 复合物进行冲调溶解，冷却后使用数字黏度计测量复水后的黏度。测量期间所有样品的温度均保持在 25 °C，选用 3 号转子，转速控制在 12 r/min。

1.3.9 消化特性表征

参考 Silva 等^[18]实验方法并稍作改动，分别制备不同离子浓度胃消化液（Stimulated Gastric Fluid, SGF）和肠道消化液（Simulated Intestinal Fluid, SIF）备用。

胃消化阶段：取 20 mL 质量分数为 6% 的复合物分散液，加入至 20 mL SGF 中，并加入 3 mL 胃蛋白酶液（50 mg/mL），用浓度为 1 mol/L 盐酸溶液调节 pH 至 1.5，在 37 °C 恒温水浴震荡（转速为 150 r/min）2 h。

肠消化阶段：取 20 mL 胃消化后分散液，分别加入 20 mL SIF，2 mL 浓度为 160 mmol/L 胆盐和 3 mL 胰蛋白酶液（100 mg/mL），用浓度为 1 mol/L 氢氧化钠调节 pH 至 7.4，并用浓度为 0.05 mol/L 的氢氧化钠溶液滴定以维持体系 pH 恒定，在 37 °C 恒温水浴震荡（转速为 150 r/min）2 h。

1.3.9.1 消化溶胀率测定

参考王文霞等^[19]通过比较消化前后质量比测量溶胀率。分别称取等量的 SPI-KGM 复合物，记为 m_0 ；分散于去离子水中，静置溶胀 30 min，过滤并称量得到溶胀后质量；将复合物干粉溶于消化模拟液中进行体外消化，消化后灭酶处理的样品过滤称量，得到消化后质量。溶胀率计算式如式 (4) 所示。

$$\text{溶胀率} = \frac{m_1}{m_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中： m_0 为样品干粉的质量，g； m_1 为样品溶胀或消化后的质量，g。

1.3.9.2 消化黏度测定

消化后的混合物按照 1.3.8 节方法进行黏度测定，仅进行 25 °C 下的测量。

2 结果与分析

2.1 魔芋胶改性方式对 SPI-KGM 复合物接枝度的影响

KGM 与 SPI 发生反应形成的 SPI-KGM 复合物的接枝度受魔芋胶改性方式的影响。由图 1 可知，KGM 的接枝度从 0% (TS) 逐渐上升至 (39.71±1.11) %

(TS-K), 表明 KGM 与 SPI 发生反应, 形成了 SPI-KGM 复合物。同样, KGM 经酸碱改性处理后, TS-HK 和 TS-OHK 组接枝度分别提高至 (48.84±1.06)% 和 (44.50±0.74)%。其中酸降解改性 KGM 使得分子质量变小, 具有更多还原性羰基, 更易与蛋白分子发生糖基化反应^[20]; 碱改性处理发生脱乙酰基反应, 导致 KGM 空间位阻效应降低, 有利于嵌入蛋白质内部, 促进了糖基化反应。

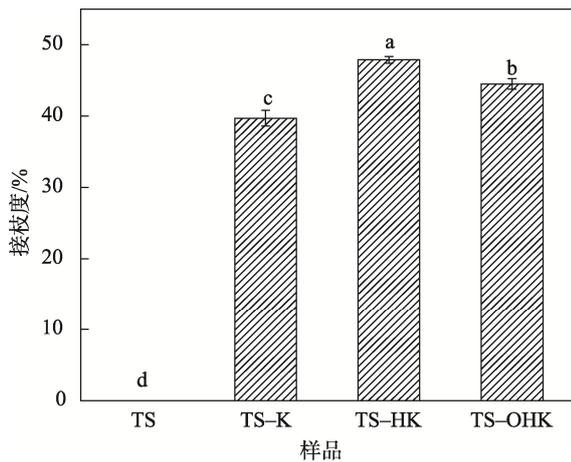


图 1 魔芋胶改性方式对 SPI-KGM 复合物接枝度的影响

Fig.1 Effect of KGM modification method on the grafting degree of SPI-KGM composite

2.2 SPI-KGM 复合物傅里叶红外光谱解析

傅里叶红外光谱可用于研究 SPI 构象变化和糖基化反应。如图 2 所示, 不同 KGM 改性方式的 SPI-KGM 复合物红外光谱图与对照组 SPI 与 TS 相

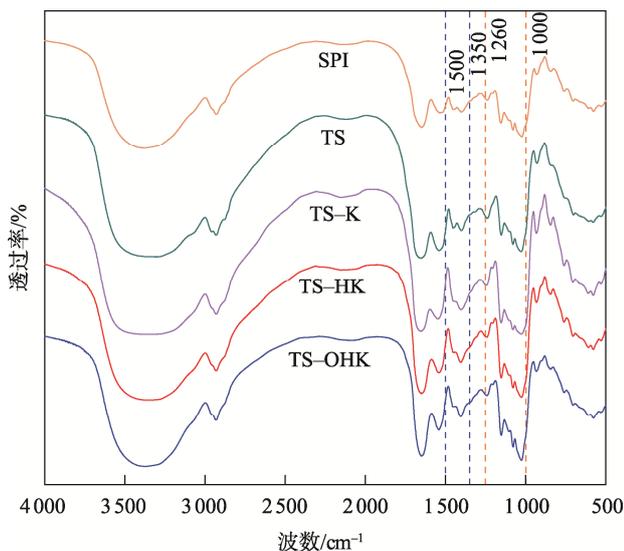


图 2 不同魔芋胶改性方式的 SPI-KGM 复合物红外光谱图

Fig.2 FT-IR spectrum of SPI-KGM composites by different KGM modification methods

比, 糖基化后的复合物在 1 500~1 350 cm⁻¹ 间的吸收会增强 (如表 1 所示), 这主要是由于 C-N 伸缩和 N-H 变化产生的。此外, 在 1 260~1 000 cm⁻¹ 处有明显的吸收峰, 这是因为 KGM 中 C-O-C 糖苷键的伸缩振动, 也显示出 SPI 与 KGM 发生了糖基化反应^[21]。

表 1 不同 SPI-KGM 复合物红外峰强度统计
Tab 1 Statistics of infrared peak intensity of different SPI-KGM composites

样品	1 500 ~ 1 350 cm ⁻¹	1 260 ~ 1 000 cm ⁻¹
SPI	1 146.2	5 994.5
TS	1 356.1	7 878.6
TS-K	2 912.3	11 495
TS-HK	2 331.7	9 965.1
TS-OHK	2 033.4	8 604.7

注: SPI 代表未经处理的大豆分离蛋白。

将红外光谱中酰胺 I 带进行去卷积和多峰拟合来计算 SPI-KGM 复合物二级结构, 如表 2 所示。TS 相较于天然 SPI 的 α -螺旋从 33.06% 下降为 31.64%, β -折叠从 19.85% 显著增大至 30.73%, 说明热处理使 TS 蛋白质发生一定程度的变性聚集。与对照 TS 的无规则卷曲 17.28% 相比, 加入 KGM 后, TS-K、TS-HK 和 TS-OHK 的无规则卷曲从 23.19% 分别增加至 28.24%、26.21% 和 29.08%, 含量明显增大。说明, 随着糖基化反应过程中多糖与蛋白质的羰基和 ϵ -氨基之间的缩合, 分子内氢键被破坏造成 α -螺旋结构进一步降低, 从而导致 α -螺旋结构伸展成 β -折叠、 β -转角或无规则卷曲等二级结构^[13]。

表 2 不同魔芋胶改性方式的 SPI-KGM 复合物二级结构相对含量比较

Tab 2 Comparison of the relative content of the secondary structure in SPI-KGM composites by different KGM modification methods %

样品	α -螺旋	β -折叠	β -转角	无规则卷曲
SPI	33.06	19.85	23.90	23.19
TS	31.64	30.73	20.34	17.28
TS-K	27.37	24.83	19.56	28.24
TS-HK	26.57	28.65	18.57	26.21
TS-OHK	29.66	22.12	19.14	29.08

注: SPI 代表未经处理的大豆分离蛋白。

2.3 SPI-KGM 复合物表面疏水性及接触角的比对分析

不同魔芋胶改性方式对 SPI-KGM 复合物表面疏水性及接触角产生一定影响。如图 3 所示, 天然 SPI 的表面疏水性为 (25.26±1.81) μg , 引入 KGM 反应后, TS-K、TS-HK 和 TS-OHK 的表面疏水性分别增加至 (37.16±1.18)、(34.87±0.58) 和 (48.75±1.16) μg 。这可能是基于 SPI 与 KGM 反应生成的复合物的空间结构发生变化, 使隐藏在分子内部的疏水性基团暴露所致^[22]。

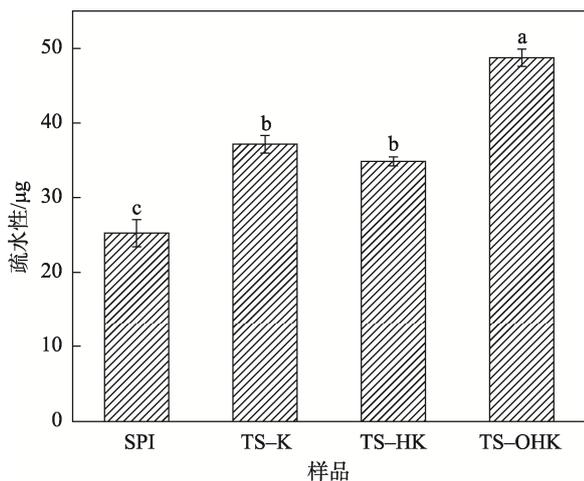


图3 魔芋胶改性方式对SPI-KGM复合物表面疏水性的影响
Fig.3 Effect of KGM modification method on the hydrophobicity of SPI-KGM composite surface

接触角 θ 代表亲水性和疏水性的大小,接触角越大显示疏水性越强^[23]。由图4可知,天然SPI接触角为 $(58.88 \pm 0.54)^\circ$,显示疏水性较弱,经过TG酶交联耦合糖基化反应后,TS-K、TS-HK和TS-OHK接触角分别增大至 $(65.52 \pm 1.66)^\circ$ 、 $(62.59 \pm 0.58)^\circ$ 和 $(68.47 \pm 1.29)^\circ$,表明疏水性得到明显增强,这与上述表面疏水性结果一致。由此可知,大豆分离蛋白-魔芋胶复合物的抗水化性有了一定程度的提高。

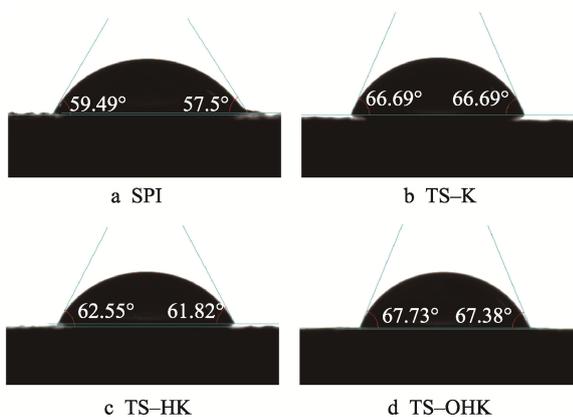


图4 魔芋胶改性方式对SPI-KGM复合物接触角的影响
Fig.4 Effect of KGM modification method on the contact angle of SPI-KGM composite

2.4 魔芋胶改性方式对SPI-KGM复合物溶解特性的影响

溶解特性一定程度反映了复合物在食用时的冲调性能。如图5所示,与天然SPI溶解度 $(68.22 \pm 1.39)\%$ 相比,KGM经过酸降解与碱改性之后,SPI-KGM复合物的溶解度从 $(76.75 \pm 1.55)\%$ (TS-K)增加到 $(85.71 \pm 0.70)\%$ (TS-HK)和 $(86.98 \pm 2.30)\%$

(TS-OHK)。由此可知,经酶交联耦合糖基化修饰改性后,特别是随着糖基化修饰程度增强,多羟基多糖与蛋白质接枝有利于复合物溶解特性的增加。这一定程度反映了复合物的冲调性能可满足各类食品的应用场景。

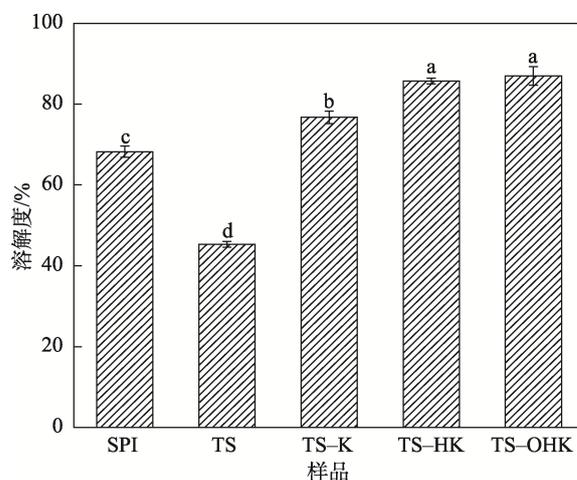


图5 魔芋胶改性方式对SPI-KGM复合物溶解度的影响
Fig.5 Effect of KGM modification method on solubility of SPI-KGM composite

2.5 魔芋胶改性方式对SPI-KGM复合物表观黏度的影响

黏度是液体食品的重要评价指标,蛋白发生水化作用后颗粒聚集会使得体系变黏稠。由图6可知,SPI与KGM直接混合溶解后的黏度为 (2616.83 ± 66.71) mPa·s,而用 100°C 的热水冲调后,其黏度则达到 (3607.50 ± 56.29) mPa·s

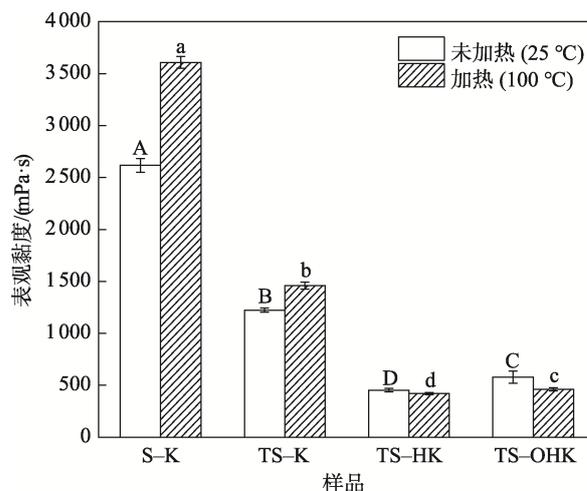


图6 冲调温度对SPI-KGM复合物分散体系表观黏度的影响
Fig.6 Effect of reconstitution temperature on apparent viscosity of SPI-KGM composite dispersion system
注: S-K 为空白对照组,代表未热处理大豆分离蛋白与未改性魔芋胶混合物。

(S-K), 导致吞食适口性较差; 这主要是由于高浓度下 SPI 分子易发生水化而展开并聚集, 从而形成高度有序的蛋白凝胶三维网络结构^[24]。与 TS-K 相比, 天然 SPI 经过热诱导和酶交联耦合糖基化修饰后, TS-HK 常温和 100 °C 冲调后的体系黏度分别降低至 (453.67±15.33) mPa·s 和 (420.33±9.50) mPa·s。同样, 碱改性 KGM 脱乙酰基后与 TS 作用得到的复合物, TS-OHK 常温和 100 °C 冲调后的体系黏度分别降低至 (577.67±58.64) mPa·s 和 (461.33±16.29) mPa·s。实验表明, 经热修饰后的 SPI 与改性 KGM 生成的糖基化复合物具有较好的抗水化能力和较低的体系黏度, 这对开发低黏度适口性好的冲调食品具有广阔的应用前景。

2.6 魔芋胶改性方式对 SPI-KGM 复合物消化溶胀特性的影响

食物的溶胀和黏度是影响饱腹感的重要因素, 通过影响胃扩张和胃排空来提升饱腹感^[25-30]。因此, 在体外消化模拟实验中选用溶胀率与黏度指标评价 SPI-KGM 复合物的饱腹感。复合物冲调后较低的溶胀率将有利于等量水分下溶质比的提高和吞食时低黏适口性的需求。如图 7 所示, 与 SPI 和 KGM 直接混合组的溶胀率 (26.57±0.82) % (S-K) 相比, 经酶交联耦合糖基化修饰后的大豆分离蛋白-魔芋胶复合物溶胀率显著降低 ($P<0.05$)。其中 TS-OHK 组溶胀率最小, 为 (16.21±1.61) %, 其次是 TS-HK 组, 溶胀率为 (16.52±0.62) %。

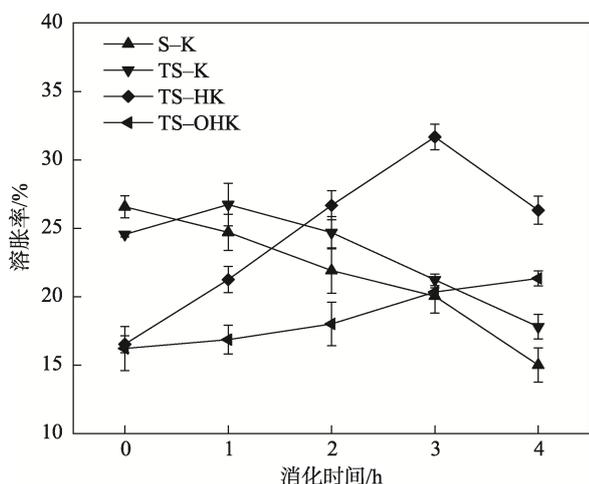


图 7 SPI-KGM 复合物的溶胀率随消化时间变化的动力学曲线

Fig.7 Kinetic curve of swelling rate of SPI-KGM composite with digestion time

注: S-K 为空白对照组, 代表未热处理大豆分离蛋白与未改性魔芋胶混合物。

在 pH 值为 1.5 的胃模拟体系中消化后, 与对照 S-K 组的溶胀率 (24.71±1.31) % 相比, SPI-KGM 的复合物 TS-K、TS-HK 和 TS-OHK 的溶胀率均有一定程度的提

高, 分别为 (26.73±1.56) %、(21.24±0.96) % 及 (16.86±1.05) %。这是基于胃中蛋白酶水解包覆复合物的蛋白质, 使复合物中魔芋多糖暴露导致的。随着消化时间延长, 对照 S-K 组的溶胀率出现逐渐降低的趋势, 而经糖基化后的复合物均表现出了一定的溶胀率上升趋势。说明复合物具有消化持续溶胀的能力, 特别是在消化 4.0 h 后, TS-OHK 组仍然保持稳定上升的趋势。

2.7 复合物的黏度消化动力学变化曲线

消化黏度反映食物在消化体系中的黏滞性和胃部排空情况, 一定程度影响着餐后饱腹感。如图 8 可见, SPI 与 KGM 直接混合后黏度较大, 起始值为 (1802.17±73.24) mPa·s (S-K), 经模拟体系 4 h 后, 降至 (1048.17±17.47) mPa·s, 消化体系的黏度变化较大, 而经糖基化后的复合物整体消化黏度变化均较小。综上消化溶胀率和消化黏度的变化可知, 热修饰 SPI 与改性 KGM 糖基化复合物作为冲调食材可维持持续的饱腹感优势。

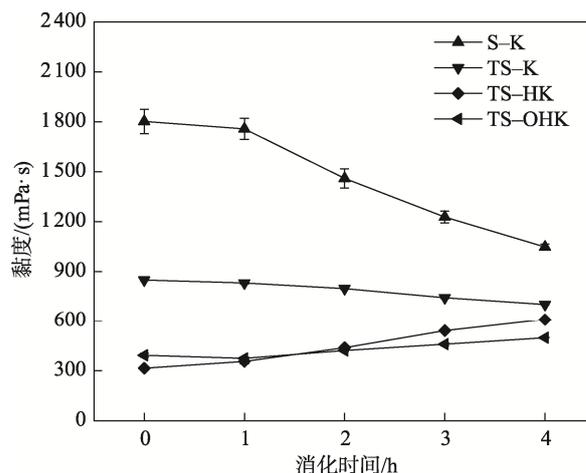


图 8 SPI-KGM 复合物的黏度随消化时间变化的动力学曲线

Fig.8 Kinetic curve of viscosity of SPI-KGM composite with digestion time
注: S-K 为空白对照组, 代表未热处理大豆分离蛋白与未改性魔芋胶混合物。

3 结语

本研究利用热处理 SPI 在 TG 酶促进下发生交联反应同时耦合糖基化, 将酸碱处理后 KGM 包裹在三维网络结构内部, 制备出具有一定抗水化特性的 SPI-KGM 复合物。结果表明, 制备的高蛋白-高膳食纤维复合物具有较好的抗水化和冲调低黏度特性。在模拟消化过程中, 复合物表现出稳定的消化溶胀与黏度特性, 可很好地满足吞食低黏度和胃中强饱腹感的代餐需求, 其中经碱改性后 KGM 反应复合物作为优

先组别。因此,热修饰大豆分离蛋白与改性魔芋胶糖基化复合物作为一种健康代餐食品原料具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 张晓彤, 吴澎. 代餐食品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(12): 342-347.
ZHANG Xiao-tong, WU Peng. Research Progress on Meal Replacement Food[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 342-347.
- [2] 都阳, 张婧婕, 何晓叶, 等. 双蛋白营养代餐粉的配制及其品质特性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 185-190.
DU Yang, ZHANG Jing-jie, HE Xiao-ye, et al. Preparation and Quality Characteristics of Dual-Protein Nutrition Meal Replacement Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 185-190.
- [3] 甘聃. 快速分散型大豆分离蛋白代餐粉配方研究[J]. 中国食物与营养, 2020, 26(5): 48-51.
GAN Dan. A Formula of Fast Dispersing Meal Replacement Powder Based on Soy Protein Isolate[J]. Food and Nutrition in China, 2020, 26(5): 48-51.
- [4] 刘先娥. 抗性淀粉——水溶性膳食纤维复配体系理化和体外消化特性及代餐粉研发[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
LIU Xian-e. Physicochemical and in Vitro Digestion Characteristics of Resistant Starch-Water-Soluble Dietary Fiber Compound System and Its Research and Development in Meal Replacement Powder[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [5] WANG X, LUO K, LIU S, et al. Improvement of Gelation Properties of Soy Protein Isolate Emulsion Induced by Calcium Cooperated with Magnesium[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 32-9.
- [6] WANG Xin, ZHOU Deng-yun, GUO Qi, et al. Textural and Structural Properties of a K-Carrageenan-Konjac Gum Mixed Gel: Effects of K-Carrageenan Concentration, Mixing Ratio, Sucrose and Ca(2+) Concentrations and Its Application in Milk Pudding[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(7): 3021-3029.
- [7] WANG J, BURTON NAVICHA W, NA X, et al. Pre-heat-Induced Soy Protein Particles with Tunable Heat Stability[J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127624.
- [8] 罗清楠, 谭玉荣, 刘宏, 等. 响应曲面法优化酸法魔芋葡甘露聚糖水解工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(6): 119-122.
LUO Qing-nan, TAN Yu-rong, LIU Hong, et al. Optimization of Hydrolysis Process of Konjac Glucomannan by Acid Method by Response Surface Methodology[J]. Food Science, 2012, 33(6): 119-122.
- [9] ZHANG Qing, LI Lin, LAN Qiu-yu, et al. Protein Glycosylation: A Promising Way to Modify the Functional Properties and Extend the Application in Food System[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2506-2533.
- [10] 付森. TGase 诱导的壳寡糖糖基化与交联对两种蛋白质的性质影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 7-8.
FU Miao. Effects of TGase-induced Glycosylation and Crosslinking of Chitosan Oligosaccharides on the Properties of Two Kinds of Protein[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016: 7-8.
- [11] MAKABE T, PRAWITWONG P, TAKAHASHI R, et al. Solution Property of Low Molar Mass Konjac Mannan[J]. Transactions of the Materials Research Society of Japan, 2008, 33(2): 471-475.
- [12] LI J, YE T, WU X, et al. Preparation and Characterization of Heterogeneous Deacetylated Konjac Glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 9-15.
- [13] LI Zhi-yu, ZHENG Yi-mei, SUN Qian, et al. Structural Characteristics and Emulsifying Properties of Myofibrillar Protein-Dextran Conjugates Induced by Ultrasound Maillard Reaction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 72: 105458.
- [14] 刘紫薇, 朱明明, 王凤新, 等. 高温湿热处理对大豆分离蛋白的结构及其功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 157-164.
LIU Zi-wei, ZHU Ming-ming, WANG Feng-xin, et al. Effect of High Temperature Hydrothermal Treatment on Structure and Functional Properties of Soybean Protein Isolate[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 157-164.
- [15] LI Ke, LIU Jun-ya, FU Lei, et al. Comparative Study of Thermal Gelation Properties and Molecular Forces of Actomyosin Extracted from Normal and Pale, Soft and Exudative-Like Chicken Breast Meat[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2019, 32(5): 721-733.
- [16] 支雅雯, 张华江, 王晓琪, 等. 不同增塑剂对大豆蛋白包装薄膜机械性能稳定性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 245-251.
ZHI Ya-wen, ZHANG Hua-jiang, WANG Xiao-qi, et al. Effect of Different Plasticizers on Mechanical Stability of Soybean Protein Packaging Films[J]. Food Science, 2018, 39(3): 245-251.
- [17] 夏轩泽, 李言, 钱海峰, 等. 改性处理对豌豆蛋白结

- 构和功能特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(5): 32-38.
- XIA Xuan-ze, LI Yan, QIAN Hai-feng, et al. Effects of Modification Treatments on Structural Characteristics and Functional Properties of Pea Protein[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(5): 32-38.
- [18] SILVA M, ZISU B, CHANDRAPALA J. Influence of Milk Protein Composition on Physicochemical And Microstructural Changes of Sono-Emulsions During *In Vitro* Digestion[J]. Food Structure, 2020, 26: 100157.
- [19] 王文霞, 张慧敏, 张慧君, 等. 阿拉伯木聚糖和壳聚糖复合膜的制备及性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 207-214.
- WANG Wen-xia, ZHANG Hui-min, ZHANG Hui-jun, et al. Preparation and Properties of Arabinoxylan and Chitosan Composite Film[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 207-214.
- [20] 张玥, 薛雨菲, 李芳, 等. 糖基化修饰对核桃谷蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 60-66.
- ZHANG Yue, XUE Yu-fei, LI Fang, et al. Effects of Glycosylation on Structural and Functional Properties of Walnut Gluten[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 60-66.
- [21] ZHANG Jian-you, ZHOU Wei, XU Ming-jiang, et al. Characterization of Silver Carp Myosin Glycated with Phosphorylated Konjac Oligo-Glucomannan[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(14): 6117-6124.
- [22] LIU J, LUO Y, GU S, et al. Physicochemical, Conformational and Functional Properties of Silver Carp Myosin Glycated with Konjac Oligo-Glucomannan: Implications for Structure-Function Relationships[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 136-44.
- [23] YUAN Y, LEE T R. Contact Angle and Wetting Properties[M]. BRACCO G: Surface Science Techniques. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 2013: 3-34.
- [24] GUO Jian, YANG Xiao-quan, HE Xiu-ting, et al. Limited Aggregation Behavior of B-Conglycinin and Its Terminating Effect on Glycinin Aggregation during Heating at pH 7.0[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3782-3791.
- [25] SHANG Long-chen, WANG Yi, REN Yan-yan, et al. *In Vitro* Gastric Emptying Characteristics of Konjac Glucomannan with Different Viscosity and Its Effects on Appetite Regulation[J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7596-7610.
- [26] MARCANO J, HERNANDO I, FISZMAN S. *In Vitro* Measurements of Intra-gastric Rheological Properties and Their Relationships with the Potential Satiating Capacity of Cheese Pies with Konjac Glucomannan[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 16-22.
- [27] GÜNTHER E A, KHRAMOVA D S, MARKOV P A, et al. Swelling Behavior and Satiating Effect of the Gel Microparticles Obtained from Callus Cultures Pectins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 300-307.
- [28] TAN Cheng-quan, WEI Hong-kui, ZHAO Xi-chen, et al. Effects of Dietary Fibers with High Water-Binding Capacity and Swelling Capacity on Gastrointestinal Functions, Food Intake and Body Weight in Male Rats[J]. Food & Nutrition Research, 2017, 61(1): 1308118.
- [29] STRIBIŢCAIA E, EVANS C E L, GIBBONS C, et al. Food Texture Influences on Satiety: Systematic Review and Meta-Analysis[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 12929.
- [30] 黄佳婷. 抗性淀粉增强饱腹感机制[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- HUANG Jia-ting. Mechanism of Satiety Enhanced by Resistant Starch[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.

责任编辑: 曾钰婵