

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230137

数字出版日期: 2024-04-17; 数字出版网址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.N.20240416.1710.008>

芝麻蛋白-茶多酚食品胶复合凝胶的应用特性研究

王丽霞, 伍京京, 赵赛岩, 张秀清, 范梦晨, 李 格

(天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457)

摘要: 以芝麻饼粕为原料, 碱溶酸沉法制备芝麻分离蛋白, 加入 0.1% 茶多酚复合食品胶制备具有一定功能特性和凝胶性能的复合凝胶产品, 并对其理化性质进行研究。通过对复合凝胶质构特性、持水能力、低场核磁、流变学特性及微观结构等方面的考察, 研究加入不同比例 (0.1%、0.3% 和 0.5%) 的黄原胶、瓜尔胶、魔芋胶和卡拉胶对芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶特性的影响。结果表明: 4 种食品胶的添加可以改善复合凝胶的硬度、弹性、内聚性和胶黏性, 提高持水能力。复合凝胶的流变学结果体现出较好的凝胶稳定性。凝胶的微观结构显示复合凝胶网络更加紧密, 孔隙更小。茶多酚、食品胶的加入使复合凝胶的性能得到改善, 为芝麻蛋白凝胶作为一种新型植物蛋白凝胶在食品工业上的应用提供理论基础。

关键词: 芝麻蛋白; 茶多酚; 食品胶; 凝胶特性; 稳定性

中图分类号: TS213

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2024)04-0054-09

Application Characteristics of Sesame Protein-Tea Polyphenols Food Gum Composite Gel

WANG Lixia, WU Jingjing, ZHAO Saiyan, ZHANG Xiuqing, FAN Mengchen, LI Ge

(College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In our present study, sesame protein isolate was prepared by alkali-solution and acid-precipitation method using sesame cake as raw material, and 0.1% tea polyphenols was added to prepare a composite gel product with certain functional properties and gel properties. Its physical and chemical properties were studied. The effects of different concentrations (0.1%, 0.3% and 0.5%) of xanthan gum, guar gum, konjac gum and carrageenan on the gel properties of sesame protein-tea polyphenols-food gum composite gel were studied by investigating the texture, water holding capacity, low field nuclear magnetic resonance, rheological properties and microstructure of the composite gel. The results showed that the addition of four kinds of food gums could improve the hardness, elasticity, cohesion and adhesiveness of the composite gel, and improve the water holding capacity. The rheological results of the composite gel showed good gel stability. The microstructure of the composite gel showed that the composite gel network was more compact and the pores were smaller. The addition of tea polyphenols and food gum improved the properties of the composite gel, which has provided a theoretical basis for the application of sesame protein gel as a new type of plant protein gel in the food industry.

Key words: sesame protein; tea polyphenols; food gum; gel properties; stability

引文格式:

王丽霞, 伍京京, 赵赛岩, 等. 芝麻蛋白-茶多酚食品胶复合凝胶的应用特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(4): 54-62.

WANG L X, WU J J, ZHAO S Y, et al. Application characteristics of sesame protein-tea polyphenols food gum composite gel[J]. Journal of Tianjin university of science & technology, 2024, 39(4): 54-62.

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-09-26

基金项目: 企业横向项目 (2020120021000595)

作者简介: 王丽霞 (1966—), 女, 河北邯郸人, 研究员, lixiawangtust@163.com

近年来,植物蛋白的加工和利用成为食品工业领域研究的热点。芝麻蛋白是一种十分优质的植物蛋白,营养丰富,含有丰富的必需氨基酸,并且有植物蛋白所具有的功能性质,尤其是具有良好的凝胶性,可以利用这一性质制备凝胶状食品。在非食品领域中,蛋白质凝胶也可以作为吸水剂、保水剂、黏合剂^[1]、药物载体^[2]、复合材料等应用于工业、农业、生物医学工程等多个领域内^[3]。在实际的研究和生产中,通常会向单一蛋白质凝胶中加入其他成分,将食品聚合物结合起来可以进一步改进和丰富凝胶性能变化行为。

茶多酚是一种天然的抗氧化剂,广泛应用于食品体系中。多酚可以与蛋白质通过发生相互作用形成蛋白-多酚复合物体系,通过影响蛋白质的结构,改变蛋白质疏水性,从而影响蛋白质的功能特性,如凝胶性、溶解性、乳化性等^[4]。茶多酚也可以作为一种添加剂使生成的复合物具有抗氧化、抑菌等功效,制备具有营养特性的功能性蛋白产品。食品胶可以作为一种具有增稠作用的食物添加剂,添加到蛋白质凝胶中改进凝胶性能和持水能力,但不同的胶体对质构特性和流变行为的影响不尽相同。

本研究将茶多酚加入芝麻蛋白凝胶,分析其对复合凝胶抗氧化性的影响;再分别加入 4 种常见的食品胶进一步改善其凝胶特性,分析它们对凝胶流变行为的影响情况,旨在为芝麻蛋白在食品工业中的应用提供理论基础,进一步推动复合蛋白凝胶的研究、开发和利用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

芝麻饼粕,山东宏博生物科技有限公司;茶多酚、黄原胶、瓜尔胶、魔芋胶、卡拉胶均为食品级,河南万邦化工科技有限公司;氢氧化钠、浓盐酸、氯化钙、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、硫酸亚铁、水杨酸、过氧化氢、铁氰化钾、三氯化铁、三氯乙酸、邻苯三酚均为分析纯,天津市江天化工技术有限公司;三羟甲基氨基甲烷(Tris),分析纯,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

SE-2000 型高速粉碎机,永康市速锋工贸有限公司;HH-2 型恒温水浴锅,天津市予华仪器科技有限公司;DF-101S 型集热式磁力搅拌器,上海秋佐科学

仪器有限公司;GL-10MD 型冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;XY-FD-1 型真空冷冻干燥机,上海欣谕仪器有限公司;BDF-86V348 型超低温冰箱,赛默飞世尔科技公司;TA.XT.Plus 型质构仪,英国 Stable Micro System 公司;MicroMR-25 型低场核磁共振仪,上海纽迈电子科技有限公司;TU-1810 型紫外-可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;MARS 60 型动态流变仪,德国哈克公司;SU-1510 型扫描电子显微镜,日本日立公司。

1.3 芝麻蛋白-茶多酚凝胶的制备

芝麻分离蛋白(sesame protein isolate, SPI)的提取参考黄纪念等^[5]的方法并稍作修改。芝麻蛋白-茶多酚凝胶的制备参考陈群等^[6]的方法。称取不同质量的芝麻分离蛋白和茶多酚,配制成芝麻分离蛋白质量分数为 10%,茶多酚质量分数为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%的复合物溶液体系,在室温下磁力搅拌 2 h 使其充分溶解,加入 3% 凝固剂氯化钙,96 ℃水浴 36 min,然后在冰水浴中放置一段时间,直至冷却至室温,再放入 4 ℃冰箱中 24 h 使其充分形成凝胶,备用。

1.4 芝麻蛋白-茶多酚凝胶体外抗氧化活性

1.4.1 DPPH 自由基清除率

DPPH 自由基清除率的测定参考郭卫芸等^[7]的方法。取不同质量浓度样液于试管中,按 1:1 的比例加入 0.2 mmol/L 的 DPPH 溶液,充分混匀后在室温下放置 30 min,在波长 517 nm 处测定溶液的吸光度,使用蒸馏水代替样品作为空白对照,根据式(1)计算 DPPH 自由基清除率(R_{DPPH})。

$$R_{DPPH} = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_1 为样品与 DPPH 溶液混合溶液吸光度, A_2 为样品与无水乙醇混合溶液的吸光度, A_0 为以蒸馏水代替样品与 DPPH 溶液混合溶液的吸光度。

1.4.2 羟自由基清除率

羟自由基清除率的测定参考王德才等^[8]的方法。取不同质量浓度样液 2.0 mL 置于试管中,加入 9 mmol/L 的硫酸亚铁溶液 2.0 mL、9 mmol/L 的乙醇-水杨酸溶液 2.0 mL 和 8.8 mmol/L 过氧化氢溶液 2.0 mL,混匀后在 37 ℃的水浴锅中反应 30 min,在波长 510 nm 处测定溶液的吸光度,以蒸馏水代替样品作为空白对照,用蒸馏水代替 8.8 mmol/L 的过氧化氢溶液作为对照组,羟自由基的清除率(R_{OH})按照式(2)计算。

$$R_{OH} = \frac{A_3 - (A_4 - A_5)}{A_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中: A_3 为空白对照组的吸光度, A_4 为复合物样品溶液的吸光度, A_5 为以蒸馏水代替过氧化氢溶液作为对照溶液的吸光度。

1.4.3 超氧阴离子自由基清除率

超氧阴离子自由基清除率的测定参考刘富康等^[9]的方法, 采用邻苯三酚自氧化法(MTT)。取 50 mmol/L 的 pH = 8.2 的 Tris-HCl 缓冲溶液 4.6 mL 于试管中, 在 25 °C 的水浴锅中保温 15 min, 加入不同质量浓度样液 1 mL、10 mmol/L 的邻苯三酚溶液 0.4 mL, 混匀, 继续在 25 °C 的水浴锅中反应 5 min, 取出后滴入几滴浓盐酸使反应终止, 在波长 352 nm 处测定混合溶液的吸光度。用乙醇代替样品溶液作为空白对照, 另配以乙醇代替邻苯三酚溶液作为对照组, 超氧阴离子自由基清除率($R_{O_2^-}$)根据以下公式计算。

$$R_{O_2^-} = \left(1 - \frac{A_7 - A_8}{A_6} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: A_6 为用乙醇代替样品溶液的空白对照组的吸光度, A_7 为复合物样品溶液的吸光度, A_8 为用乙醇代替邻苯三酚溶液对照组的吸光度。

1.4.4 总还原力测定

总还原力的测定参考崔艳平等^[10]的方法。取不同质量浓度的样液 2.0 mL 置于试管中, 加入 pH = 6.6、0.2 mol/L 的磷酸缓冲溶液 2.0 mL 和 1% 的铁氰化钾溶液 2.0 mL, 混匀后 50 °C 水浴加热 20 min, 冷却后加入 10% 三氯乙酸溶液 2.0 mL, 另取试管加入 2.0 mL 上述溶液, 加入 4.0 mL 蒸馏水和 2.0 mL 0.1% 三氯化铁溶液, 混匀后静置 10 min, 在波长 700 nm 处测定溶液的吸光度, 复合物溶液的还原能力的强弱用吸光度的大小表示。

1.5 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶理化性质研究

1.5.1 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶的制备

设置芝麻分离蛋白质量分数为 10%, 茶多酚质量分数为 0.1%, 黄原胶(XG)、瓜尔胶(GG)、魔芋胶(KGM)、卡拉胶(KC)4 种食品胶的质量分数均分别设为 0%、0.1%、0.3%、0.5% 进行芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶的制备, 方法同 1.3 节。

1.5.2 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶质构特性测定

采用质构分析仪测定凝胶的质构特性。使用 TPA 运行模式, P/100 探头, 测量前速率 4.0 mm/s; 测

量时速率 2.0 mm/s; 测量后返回速率 2.0 mm/s; 压缩程度为 50%, 触发力 10.0 g, 获得凝胶硬度、弹性、胶黏性和内聚性等参数, 每个样品平行测定 3 次。

1.5.3 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶持水能力的测定

将制备好的凝胶样品切成规格为 1 cm × 1 cm × 1 cm 的立方体, 称量其质量后放在适宜大小滤纸上吸收水分。为防止水分蒸发, 使用烧杯或者其他密闭容器将其盖住, 室温避光保存 1 h 后对脱水的凝胶样品进行称量, 根据以下公式计算出凝胶的持水能力(w_{water}), 每个样品平行测定 3 次。

$$w_{water} = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_1 为凝胶脱水前的质量, g; m_2 为凝胶脱水后的质量, g。

1.5.4 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶低场核磁共振分析

低场核磁共振参考文献[11]的方法研究芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶内部的水分分布。称量 3 g 不同的凝胶样品放入样品瓶中, 设置磁体温度 32 °C, 重复采样等待时间(TW) 500 ms, 样品瓶的瓶口用保鲜膜密封防止水分蒸发; 然后, 先将样品瓶垂直放入玻璃试管中, 再放入磁体中。放入空白对照组样品, 以 500 ms 时间间隔逐次累加找到合适的 TW, 选择名称为 Q-CPMG(CarrPurcell-Meiboom-Gill) 的序列对样品进行扫描, 序列参数设置为: 主频 SF = 22 MHz, 90 度的脉冲时间 P1 = 5.00 μs, 180 度的脉冲时间 P2 = 11.04 μs, 采样点数 TD = 217 808, 采样频率 SW = 100 kHz, 采样间隔时间 TW = 2 500 ms, 回波时间 TE = 0.180 ms, 回波个数 NECH = 12 100。对仪器采集到的数据进行反演, 得到横向弛豫时间和信号幅值之间的关系曲线。

1.5.5 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶流变学特性

使用动态流变仪测定复合凝胶的流变特性。流变学特性的测定参考 Zhang 等^[12]的方法。流变实验均在 25 °C 条件下进行, 选用 35 mm 直径的转子, 平行板间距设定为 1 mm。在振荡频率扫描模式下, 扫描频率范围为 0.1 ~ 10 Hz, 应变值为 1%, 得到弹性模量(G')、黏性模量(G'')和频率的关系曲线。使用旋转连续扫描模式测量凝胶的黏度和剪切速率的关系。速率控制模式为 CR, 剪切速率范围为 0.1 ~ 100 s⁻¹, 应变值为 1%, 得到黏度-剪切速率关系曲线。

1.5.6 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶微观结构

取冻干的凝胶样品粉末用双面导电胶带固定在金属圆盘上,在金属离子发生器中进行喷金处理屏蔽离子的干扰,使用扫描电子显微镜(SEM)寻找合适的放大倍数进行复合凝胶微观结构的观察,加速电压为 5 kV。

1.6 数据统计

使用 SPSS Statistics 26 中的多变量分析进行方差分析(ANOVA),采用 Duncan 检验法对多组样品之间进行显著性差异分析,统计显著性设定为 $P < 0.05$ 。所有数据结果均表示为“平均值 $\pm$ 标准偏差”。

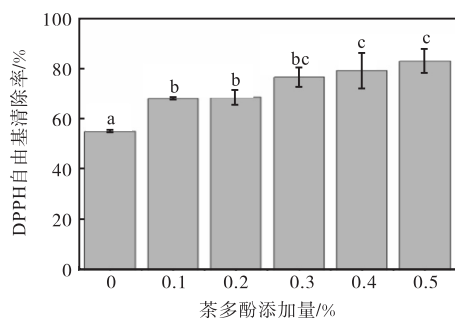
2 结果与分析

2.1 芝麻蛋白-茶多酚凝胶体外抗氧化活性

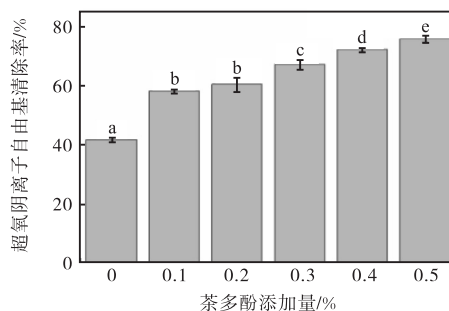
为了评估茶多酚的加入对芝麻分离蛋白体系抗氧化活性的影响,分别进行了 DPPH 自由基清除率、

超氧阴离子自由基清除率、羟基自由基清除率和总还原力的测定实验,结果见图 1。

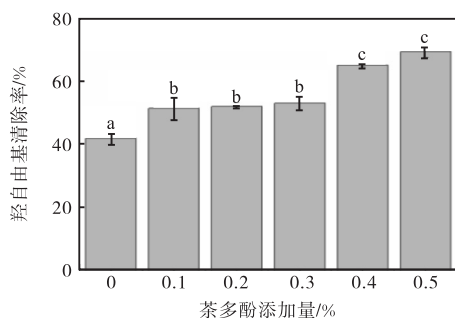
由图 1 可知,在未添加茶多酚时,纯芝麻分离蛋白样品具有一定的抗氧化活性,随着茶多酚的加入及茶多酚添加量的不断增大,复合体系的 DPPH 自由基清除率从 55.20% 升高到 83.32%,超氧阴离子自由基清除率从 41.49% 升高到 75.76%,羟自由基清除率从 41.77% 升高到 69.23%,总还原能力测定实验中吸光度从 0.439 升高到 0.794,均呈现逐渐升高的趋势。实验结果表明与单独的芝麻分离蛋白相比,添加茶多酚可以使体系的抗氧化性能得到改善。茶多酚添加量超过 0.1% 时,整体抗氧化效果提高不是很明显。且在前期对芝麻蛋白-茶多酚凝胶的持水能力的实验考察中发现,随着茶多酚添加量的增加其持水率呈下降趋势,茶多酚添加量为 0.1% 时的持水率与空白组间无显著差异($P > 0.05$),故结合实际及生产成本,本研究设定茶多酚添加量为 0.1% 进行后续实验研究。



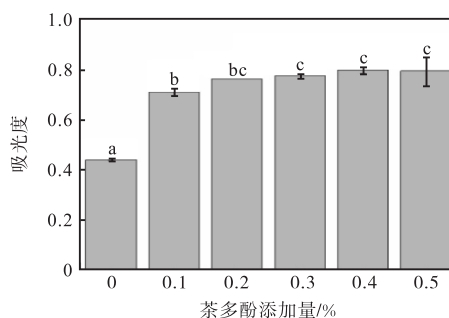
(a) DPPH 自由基清除率



(b) 超氧阴离子自由基清除率



(c) 羟自由基清除率



(d) 总还原力

注: 不同字母表示组间有显著性差异($P < 0.05$)。

图 1 复合体系的 4 种抗氧化活性

Fig. 1 Four antioxidant activities of the complex system

2.2 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶理化性质研究

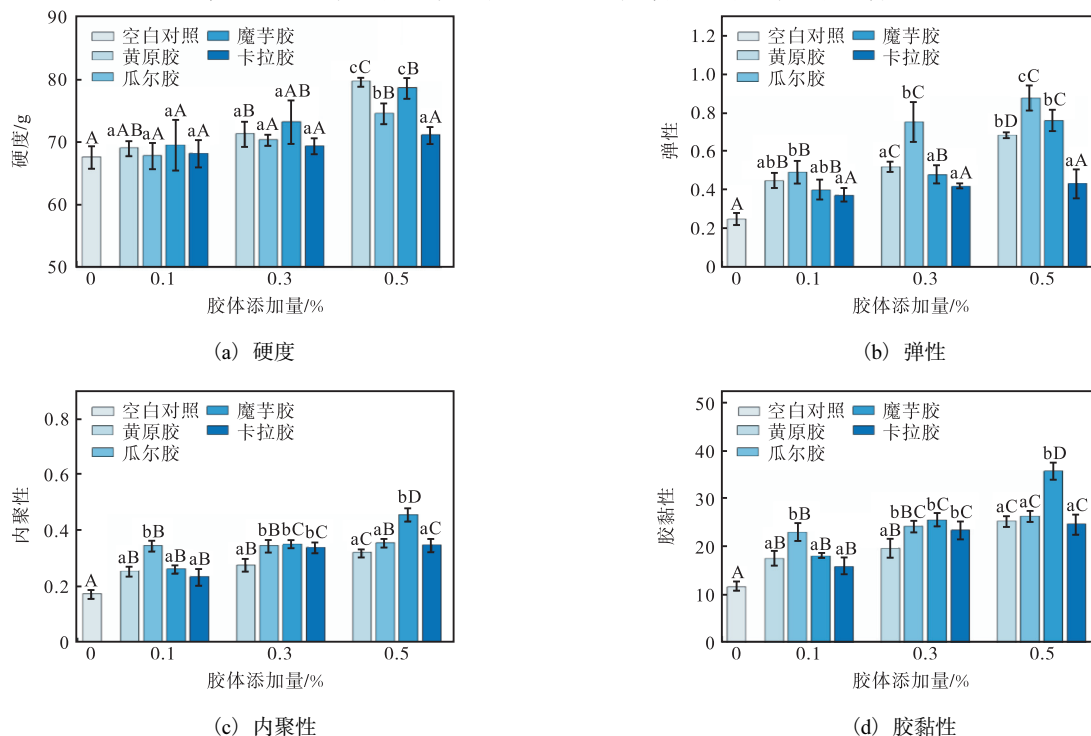
2.2.1 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶质构特性

复合凝胶的质构特性分析如图 2 所示。由图 2 可知,复合凝胶的质地特性均受到了多糖类胶体类型

和添加量的影响。凝胶硬度和弹性的实验结果表明,添加黄原胶的凝胶质地倾向于脆而硬,添加瓜尔胶的凝胶质地倾向于柔韧而有弹性。在内聚性实验中,添加胶的复合凝胶与未添加胶的蛋白质凝胶相比,内聚性均有显著增加,但在相同的胶体添加量中差异较

小, 0.5% 魔芋胶的添加显示出最好的内聚性。在胶黏性实验中, 魔芋胶组也体现出了最高的胶黏性。魔芋胶是一种热不可逆凝胶, 将其加入水溶液中, 在加热至 80 ℃ 以上一段时间后, 可以形成具有较好的凝胶

硬度、凝胶弹性和较高凝胶强度的复合凝胶^[13]。在添加了魔芋胶的实验组中, 因其具有较好的硬度和内聚性, 故显示出了最优的胶黏性, 且随着胶体添加量的增大, 实验结果具有显著性差异 ($P < 0.05$)。



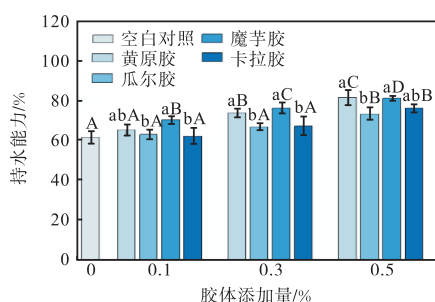
注: 不同小写字母表示同一添加量不同食品胶之间的差异显著, 不同大写字母表示同一食品胶不同添加量间的差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 复合凝胶的质构特性分析

Fig. 2 Analysis of textural properties of composite gels

2.2.2 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶持水能力

复合凝胶持水能力如图3所示。



注: 不同小写字母表示同一添加量不同食品胶之间的差异显著, 不同大写字母表示同一食品胶不同添加量间的差异显著 ($P < 0.05$)。

图3 复合凝胶持水能力

Fig. 3 Composite gel water holding capacity

由图3可知, 添加了胶的复合凝胶体系与不添加胶的相比均体现出持水率上升的趋势。在 0.1% 和 0.3% 的添加量下, 瓜尔胶和卡拉胶对复合凝胶体系的持水能力影响没有显著性差异 ($P > 0.05$), 仅在 0.5% 的添加量下表现出显著性差异 ($P < 0.05$)。添加

了黄原胶和魔芋胶的实验组中, 随着添加量的增大, 复合凝胶的持水率均显著上升。在所有实验组中, 添加了 0.5% 黄原胶的复合凝胶的持水率最高, 为 81.5%。在蛋白质凝胶体系中添加多糖类胶体可以通过诱导更多的氢键形成和疏水相互作用等分子间作用力增加水在凝胶网络之间的物理截留, 从而促进体系持水能力的提高^[14]。

2.2.3 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶低场核磁共振分析

复合凝胶的弛豫曲线如图4所示。由图4可以看出, 弛豫时间在 0.1 ~ 10 000 ms 的分布上出现了 3 个峰或 4 个峰, 根据弛豫曲线中出峰的先后时间, 将 4 个峰从左至右依次命名为 t_{21} 、 t_{22} 、 t_{23} 和 t_{24} 。图中 t_{21} 和 t_{22} 所对应的峰是凝胶中与蛋白质分子紧密结合的水分, 结合力较强, 是一般不具有流动性的结合水。 t_{23} 峰对应的是存在于凝胶网络结构中的水分, 峰面积所占比例最高, 水分含量最多的自由水, 可以反映出样品的持水能力情况。在所有添加了食品胶的复合凝胶实验组中 t_{23} 峰的峰面积比例均随着胶体添加

量的增大呈现上升的情况。这表明复合凝胶网络结构中的水分随胶体添加量的增大而增加, 持水能力随之增强。 t_{24} 峰这一部分所对应的水分是在复合凝胶中未被凝胶网络结构束缚住的水分, 它残留在了复合凝胶的表面上, 具有较强的流动性和不稳定性。 t_{24} 在未添加任何食品胶的弛豫曲线中具有最大的峰面积, 而在分别添加了食品胶的复合凝胶的弛豫曲线中, t_{24} 峰面积较小, 或与 t_{23} 峰表现出未完全分离的状态, 或未在弛豫曲线中出现。这表明食品胶的添加降低了

水的流动性, 提高了原凝胶的水结合和吸附能力, 减少了水分子在复合凝胶表面上的残留量。在加入卡拉胶的实验组中 t_{24} 峰面积比例较大或出现未分离的情况。有研究表明, 即使是在中性条件下, 将含有卡拉胶的体系在长时间的高温热处理条件下, 也会发生水解, 对凝胶强度和持水能力均会产生影响。Li 等^[15]发现, 卡拉胶与蛋白质形成凝胶的机制是羟基和静电相互作用, 制得的复合凝胶脆而坚硬, 持水性较差, 在体系中加入魔芋胶后改善了复合凝胶的性能。

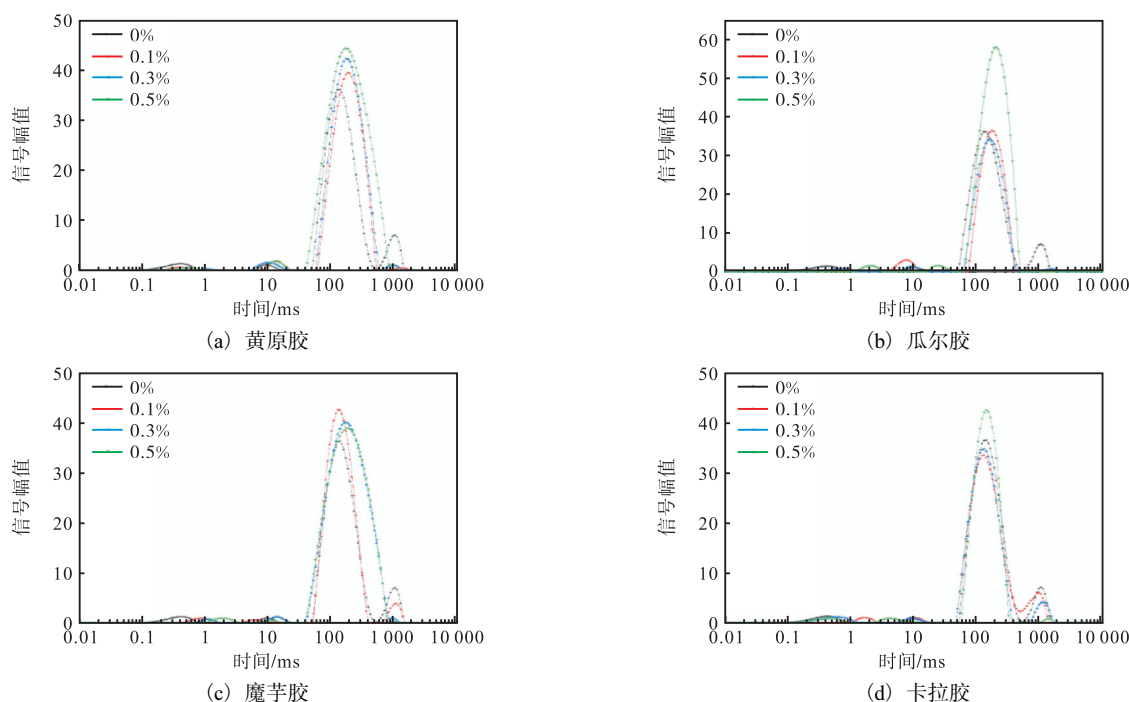


图 4 复合凝胶的弛豫曲线

Fig. 4 Relaxation profiles of composite gels

2.2.4 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶流变学特性

图 5 为复合凝胶样品的剪切速率-黏度曲线, 所有样品的表观黏度都随着剪切速率的增加而降低, 最终趋于平缓, 这表明该复合凝胶是具有剪切稀化行为的假塑性流体。在整个剪切速率范围内, 食品胶添加量为 0% 的凝胶样品的黏度是最低的, 随着不同食品胶添加量的增加, 在特定的剪切速率下也可以观察到黏度的显著增加, 这与 Zhao 等^[16]的研究结果一致。加入 4 种胶的复合凝胶的样品的黏度大小排序为魔芋胶 > 瓜尔胶 > 黄原胶 > 卡拉胶。这与质构特性中胶黏性的实验结果相一致。

流变学研究还可以测定凝胶体系的黏弹性特征, 从而评估凝胶的固液特性和稳定性。如图 6 所示, 在整个频率变化范围内, 复合凝胶样品的弹性模量 G' 几乎全部大于 G'' , 可以得知复合凝胶样品体系主要

以弹性特征为主, 有凝胶状行为, 所有凝胶均呈现类固体状态。在加入 4 种食品胶的频率扫描图中, G' 及 G'' 均随着频率的升高而升高, 表现出了较强的频率依赖性, 这说明本实验中所制备的复合凝胶体系为“弱凝胶”体系^[17]。复合凝胶体系的频率依赖性变化较其他添加量小, 表明添加了 0.5% 黄原胶的复合凝胶体系的凝胶强度更高, 凝胶性能更好, 这与质构特性测定中凝胶硬度的实验结果相一致。在蛋白质-食品胶体系中, G' 的增加是由于复合凝胶分子之间的静电相互作用引起的。在较高频率的状态下, 复合凝胶的 G' 及 G'' 呈现上下波动的状态, 说明高频率破坏了复合凝胶体系的稳定性, 复合凝胶体系在低频率下的稳定性更高。在添加了 0.5% 黄原胶、瓜尔胶和魔芋胶的复合凝胶体系中, G' 的频率依赖性变化的上下波动情况较低添加量时变小, 说明添加更多的食品胶有

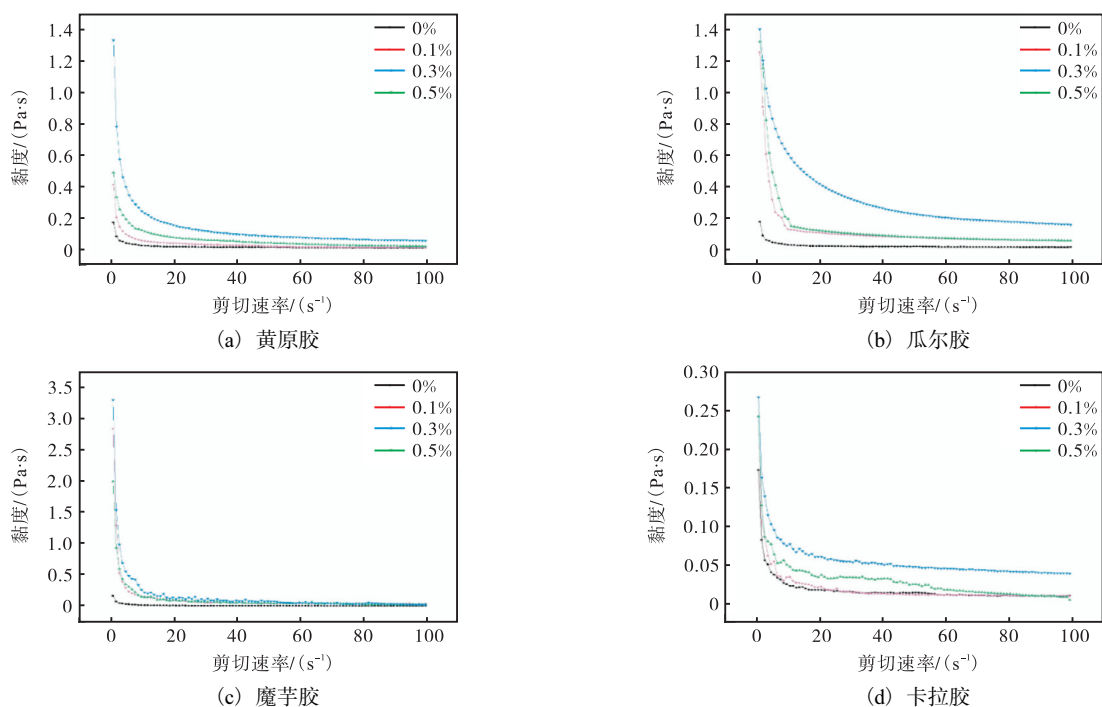
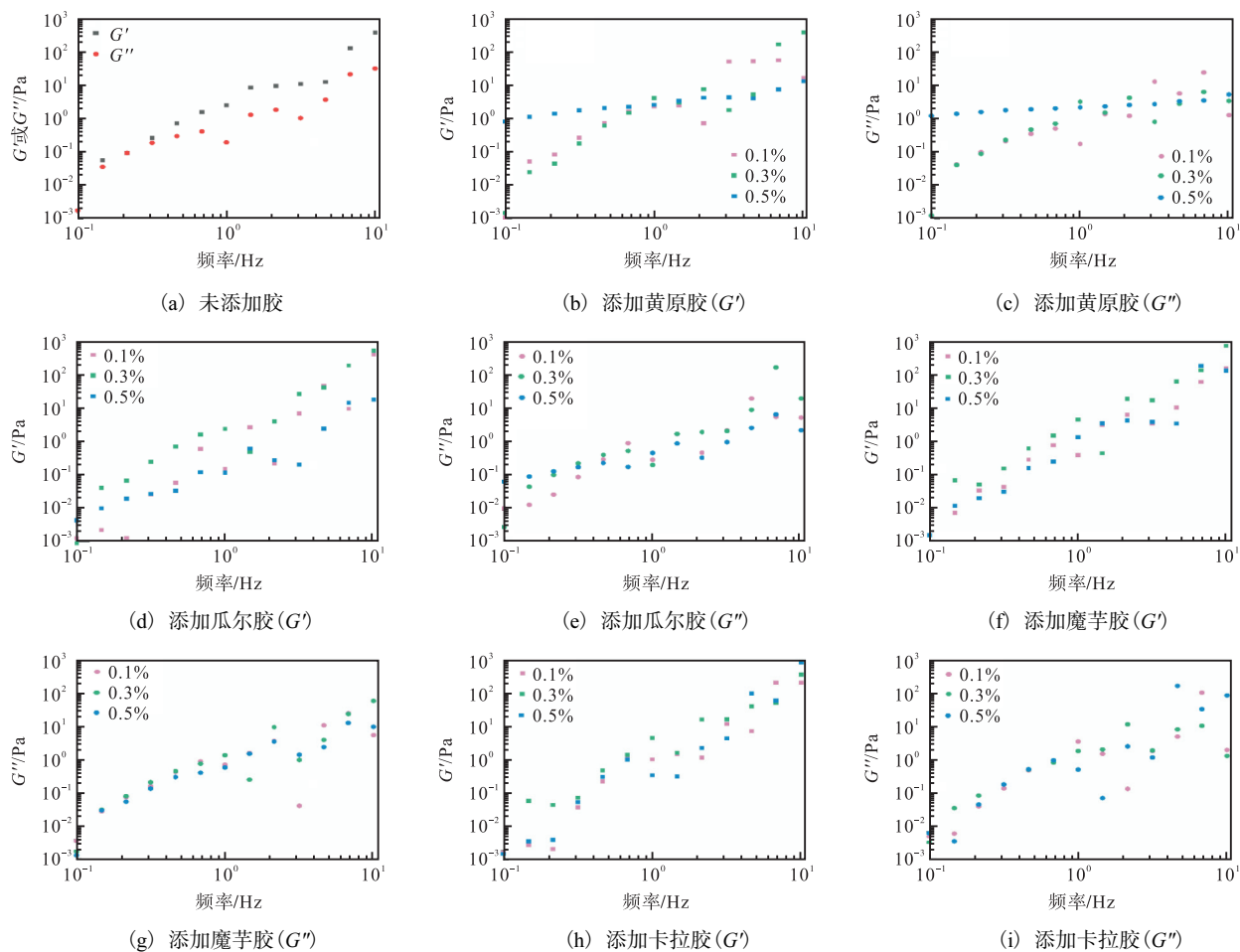


图5 不同胶添加种类和添加量对复合凝胶表观黏度的影响

Fig. 5 Effect of different gel addition types and concentrations on the apparent viscosity of composite gels

图6 不同胶添加种类和添加量的复合凝胶 G' 和 G'' 的频率依赖性变化Fig. 6 Frequency-dependent changes in G' and G'' of composite gels with different gel addition types and concentrations

助于改善复合凝胶的质地特性和网络结构, 提高复合凝胶的稳定性。如图 6(h) 和 (i) 所示, G' 及 G'' 的上下波动情况最剧烈, 说明添加了卡拉胶的复合凝胶体系稳定性最差。蛋白质和多糖之间的静电吸引或排斥力会改变体系的流变学特性 (增加或减少 G'), 有研究表明, 在蛋白质和多糖混合并发生胶凝的过程中, 多糖的添加会导致 G' 的增加, 这是生物聚合物之间的协同作用导致的, 当多糖的浓度超过临界条件时, 会发生拮抗作用, 导致 G' 的降低^[18]。

2.3.6 芝麻蛋白-茶多酚-食品胶复合凝胶微观结构

由图 7 可以看出, 纯芝麻蛋白显示出粗大且分散的凝胶网络, 结构中含有较大的孔隙, 而添加了食品

胶的复合凝胶形成的凝胶结构更加均匀致密, 孔隙较小, 表明食品胶的添加促进复合凝胶形成了更紧凑和更稳定的网络结构。这与 Jiang 等^[14]的研究结果一致。蛋白质与凝胶多糖形成网络结构的机制是在制备热诱导凝胶的过程中, 疏水基团暴露出来, 而多糖类胶体被认为具有疏水缔合的能力, 其自身可以通过疏水相互作用自我缠绕形成凝胶网络结构, 在水溶液中加热形成网络结构再与蛋白质网络结构发生互穿交联, 还可以与蛋白质发生疏水相互作用和氢键的作用导致蛋白质-多糖分子间的交联, 形成复合凝胶骨架。有研究发现, 体系的微观结构和流变特性紧密相关, 微观结构越密集, 黏性越强^[19]。

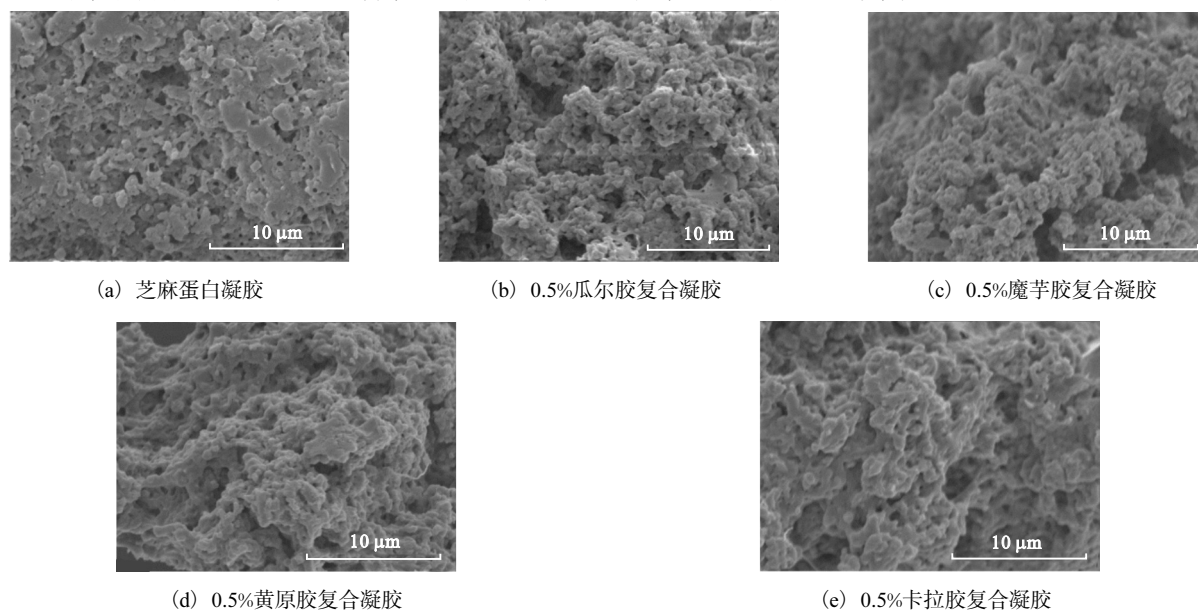


图 7 复合凝胶的扫描电镜图

Fig. 7 Scanning electron micrographs of composite gels

3 结 论

根据体外抗氧化活性实验结果, 选取茶多酚添加量为 0.1% 的芝麻蛋白-茶多酚复合凝胶体系, 通过加入 4 种食品胶进一步改善复合凝胶的凝胶性能。结果表明, 这 4 种食品胶中, 黄原胶组硬度最大、持水能力最强, 瓜尔胶组弹性最强, 魔芋胶组胶黏性最好, 卡拉胶的复合凝胶体系稳定性最差。食品胶所具有的胶黏性可以提高复合凝胶体系的黏度, 表现为更紧凑和更稳定的网络结构以及更好的流变学性能。研究结论可以为芝麻蛋白凝胶作为一种新型植物蛋白凝胶在食品工业上的应用提供理论基础。

参考文献:

[1] KUMAR M, TOMAR M, PUNIA S, et al. Plant-based

proteins and their multifaceted industrial applications[J]. LWT-Food science and technology, 2022, 154: 112620.

[2] SONG F, ZHANG L M. Gelation modification of soy protein isolate by a naturally occurring cross-linking agent and its potential biomedical application[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2009, 48(15): 7077-7083.

[3] 刘永, 崔英德, 尹国强, 等. 组织工程用蛋白基水凝胶[J]. 材料导报, 2008, 22(8): 25-28.

[4] 赵钜阳, 袁惠萍, 孙昕萌. 蛋白质-多酚复合物的形成机制及其功能性变化研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 416-425.

[5] 黄纪念, 孙强, 李梦琴, 等. 芝麻蛋白的超声提取工艺研究[J]. 粮油加工, 2009(8): 69-71.

[6] 陈群, 李康, 常桐, 等. 茶多酚对结冷胶凝胶性能的影响

- 响[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(7): 30–35.
- [7] 郭卫芸, 陈振毫, 高雪丽, 等. 茶多酚红薯粉条的研制及其抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 156–161.
- [8] 王德才, 高丽君, 高艳霞, 等. 杭白芷多糖体外抗氧化活性的研究[J]. 时珍国医国药, 2009, 20(1): 173–174.
- [9] 刘富康, 李晞晴, 杨璞, 等. 银杏叶、乌饭树叶和桑叶粗黄酮的抗氧化性研究[J]. 中国果菜, 2018, 38(1): 19–21.
- [10] 崔艳平, 郝征红, 莫丽媛, 等. 芝麻叶中多酚类的提取、成分分析及抗氧化活性研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(2): 123–128.
- [11] CHEN F Y, CHEN C, ZHAO D W, et al. On-line monitoring of the sol-gel transition temperature of thermosensitive chitosan/ β -glycerophosphate hydrogels by low field NMR[J]. Carbohydrate polymers, 2020, 238: 116–196.
- [12] ZHANG T, WANG Z, YU S, et al. Effects of pH and temperature on the structure, rheological and gel-forming properties of sugar beet pectins[J]. Food hydrocolloids, 2021, 116(2): 106646.
- [13] DU Y, ZHANG M, CHEN H. Effect of whey protein on the 3D printing performance of konjac hybrid gel[J]. LWT- Food science and technology, 2021, 140: 110716.
- [14] JIANG S, ZHAO S, JIA X, et al. Thermal gelling properties and structural properties of myofibrillar protein including thermo-reversible and thermo-irreversible curdlan gels[J]. Food chemistry, 2020, 311: 126018.
- [15] LI J, ZHANG Q, CHANG C, et al. The slow release behavior of soy protein isolate/ κ -carrageenan composite hydrogel: effect of konjac glucomannan[J]. European polymer journal, 2022, 173: 111242.
- [16] ZHAO H B, YU B, HEMAR Y, et al. Improvement of calcium sulfate-induced gelation of soy protein via incorporation of soy oil before and after thermal denaturation[J]. LWT-Food science and technology, 2020, 117: 108690.
- [17] ALTING A C, HAMER R J, KRUIF C G. Cold-set globular protein gels: interactions, structure and rheology as a function of protein concentration[J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2003, 51(10): 3150–3156.
- [18] CHAUX-GUTIERREZ A M, PEREZ-MONTERROZA E J, MAURO M A. Rheological and structural characterization of gels from albumin and low methoxyl amidated pectin mixtures[J]. Food hydrocolloids, 2019, 92: 60–68.
- [19] ANVARI M, PAN C H, YOON W B, et al. Characterization of fish gelatin-gum Arabic complex coacervates as influenced by phase separation temperature[J]. International journal of biological macromolecules, 2015, 79: 894–902.

责任编辑: 郎婧