

2种类型三赞胶加工功能特性的比较

郑雪梅¹, 乞锋辉², 靳晓伟², 刘学珍², 孙哲浩^{1*}, 李巧玲¹

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 河北石家庄 050018) (2. 河北泮川生物科技有限公司, 河北邢台 051730)

摘要: 为了更好的将三赞胶应用到食品工业中, 该文研究了工业化生产的两种类型三赞胶(FZ-200和FZ-400)的基本成分以及加工功能特性之间的差异。FZ-200的水分含量和脂肪含量略高于FZ-400, 蛋白质和灰分含量较为接近。两种类型的三赞胶的红外光谱图相似, 结构中均含有大量的缩合羟基, 并且具有 α -和 β -两种构型的吡喃糖。DSC热分析FZ-200在122.8、181.2和225.9℃有三个放热峰, 而FZ-400在152.1和228.6℃有两个放热峰。低质量分数三赞胶溶液为典型的假塑性流体, 当三赞胶的质量分数高于0.3%时开始形成凝胶, 相同质量分数时, FZ-200的凝胶强度都高于FZ-400。随着三赞胶质量分数的增加, 其乳化指数在升高, 乳化能力增强, FZ-200质量分数为0.25%时, 乳化指数最高, 可达100%。在相同三赞胶质量分数下, FZ-200的乳化指数及凝胶强度均优于FZ-400, 实际应用时可根据客户具体需求进行推广应用。

关键词: 三赞胶; 加工功能特性; 乳化; 凝胶

文章编号: 1673-9078(2025)12-172-179 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1414

Comparison of Processing Functional Characteristics of Two Types of Sanzan Gum

ZHENG Xuemei¹, QI Fenghui², JIN Xiaowei², LIU Xuezhen², SUN Zhehao^{1*}, LI Qiaoling¹

(1.College of Food and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

(2.Hebei Fengchuan Biotechnology Co. Ltd., Xingtai 051730, China)

Abstract: To improve sanzan gum use in the food industry, it is essential to elucidate the differences in the basic components and processing techniques between two types of Sanzan gum (FZ-200 and FZ-400) exhibiting varying functional characteristics. The results showed that moisture and fat contents of FZ-200 were slightly higher than those of FZ-400, whereas their protein and ash contents were relatively similar. The infrared spectra of the two types of Sanzan gum were similar, with a large number of bound hydroxyl groups and α - and β -configurations of pyranose. The DSC thermal analysis of FZ-200 showed three exothermic peaks at 122.8, 181.2, and 225.9 °C, whereas that of FZ-400 showed two peaks at 152.1 °C and 228.6 °C. The low mass fraction of the Sanzan gum solution exhibited characteristics of a standard pseudoplastic fluid. When the mass fraction of Sanzan gum exceeded 0.3%, gel formation began, and at equivalent mass fractions, the gel strength of FZ-200 exceeded that of FZ-400. With the increase in the mass fraction of Sanzan gum, its emulsification index increased, and its emulsifying ability was enhanced. The highest emulsification index occurred at a mass fraction of 0.25% for FZ-200, reaching a maximum of 100%. At equivalent mass fractions of Sanzan gum, FZ-200 exhibited superior emulsification index and gel strength than FZ-400, indicating greater suitability for practical applications

引文格式:

郑雪梅, 乞锋辉, 靳晓伟, 等. 2种类型三赞胶加工功能特性的比较[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 172-179.

ZHENG Xuemei, QI Fenghui, JIN Xiaowei, et al. Comparison of processing functional characteristics of two types of Sanzan gum [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 172-179.

收稿日期: 2024-09-23 ; 修回日期: 2024-11-01 ; 接受日期: 2024-11-07
基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (246Z7102G)
作者简介: 郑雪梅 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品大分子功能特性, E-mail: 1473884933@qq.com
通讯作者: 孙哲浩 (1971-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 食品大分子功能特性, E-mail: 1548936038@qq.com

and customer-specific requirements.

Key words: Sanzan gum; processing functional characteristic; emulsifying; gel

三赞胶是以鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas* sp.) 菌株 TP-3 (*Sphingomonas sanxanigenens* sp. nov.) 为产生菌, 以淀粉或葡萄糖等为主要原料, 经生物发酵、提取、干燥、粉碎而成的微生物胞外多糖, 其结构是由鼠李糖、甘露糖、葡萄糖醛酸和葡萄糖这四种单糖组成的杂多糖^[1]。大多数鞘氨醇胶在发酵完成后都需要有机溶剂来提取, 这种方法不仅生产成本高而且产率也相对较低, 而三赞胶无需借助任何有机溶剂(乙醇、异丙醇、丙酮等), 只需要将发酵液 pH 值调至 3.0 左右即可分离, 操作方便也降低了生产成本^[2], 同时也增强其安全性。三赞胶是第一个由我国自主研发并实现工业化生产的生物多糖类胶体, 因其具有独特的理化特性以及安全无毒性, 国家卫生健康委 2020 年批准三赞胶作为食品添加剂新品种, 在肉灌肠类、果蔬汁(浆)饮料、植物蛋白饮料中作为增稠剂、稳定剂使用, 2023 年又批准在风味饮料、调制乳及其它蛋白饮料中的拓展应用。

三赞胶具有优异的增稠、剪切稀化^[3]、凝胶和乳化特性^[4], 能形成螺旋缠绕结构的弹性凝胶, 其水溶液是一种典型的假塑型流体, 粘度随着剪切速率的增加而降低^[5]。三赞胶性质稳定, 在高温、高压、高油、高盐条件下, 仍然具有良好的增稠、稳定泡沫、凝胶、乳化和分散性能^[6,7]。近些年, 生产厂家依据应用场景的不同开发了几种不同类型的三赞胶, 本研究选取了 FZ-200、FZ-400 两种类型的三赞胶进行比较研究, 对其水分、蛋白质、脂肪及灰分等基本成分进行了分析, 并重点对其热性质、流变性质、乳化能力以及凝胶能力等加工功能特性进行了研究, 为其在食品工业中的广泛应用提供一定的技术基础数据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

三赞胶(FZ-200、FZ-400), 河北泮川生物科技有限公司; 大豆油, 中粮佳悦(天津)有限公司; 盐酸, 天津市北方天医化学试剂厂; 硫酸, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 氢氧化钠、无水乙醇和无水碳酸钠均为分析纯, 天津市永大化学试剂有限公司; 硫酸铜、硫酸钾、硫酸铵、硼酸、甲基红、溴甲酚绿和石油醚(沸程 30~60 °C)均为分析纯, 天津市大茂化学试剂厂; 抑菌剂 Prolin300, 南京九佳科技有限公司。

1.2 仪器与设备

AL204 万分天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; ZZ-C10001 电子天平, 永康市戎睿商贸有限公司; GZX-9076MBE 电热鼓风干燥箱, 上海博讯实业有限公司; SKD-1100 全自动凯氏定氮仪, 上海沛欧分析仪器有限公司; SZF-06A 粗脂肪测定仪, 上海新嘉电子有限公司; SGM2843 智能箱式电阻炉, 洛阳市西格马仪器制造有限公司; SYG-2-4 电热恒温水浴锅, 天津市泰斯特仪器有限公司; HD2004W 电动搅拌机, 上海司乐仪器有限公司; BRUKER ALPHA II 红外光谱仪, 北京布鲁克科技有限公司; DSC3500 差示扫描量热仪, 德国耐驰仪器制造有限公司; HAAKE MARS 40 流变仪, 赛默飞世尔科技有限公司; I50-50G 高剪切均质机, 上海依肯机械设备有限公司; TA.XT plus 质构仪, 英国 Stable Micro Systems 公司; BCD-175E 新飞冰箱, 河南新飞电器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 基本成分的测定

水分含量具体操作依据 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法进行测定; 蛋白质含量具体操作依据 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法进行测定; 脂肪含量具体操作依据 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法进行测定; 灰分含量具体操作依据 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的食品中总灰分的测定方法进行测定。

1.3.2 红外光谱的测定

参考杨国帅^[8]的方法。称取 2.0 mg 样品, 置于仪器分析区内, 将样品压紧, 进行测量, 红外光谱仪的扫描波长范围为 4 000~400 cm⁻¹。

1.3.3 热性质的测定

称取 2.5 mg 样品置于坩埚中, 以空坩埚作为参照, 以 10 °C/min 的加热速率从 20 °C 加热至 400 °C, 空气流量为 100 cm³/min^[9]。

1.3.4 流变性质的测定

1.3.4.1 动态流变性质的测定

配制 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0% 不同质量分数的三赞胶溶液, 在

85 ℃下水浴加热,用电动搅拌机搅拌至充分溶解,冷却至室温,采用 HAAKE MARS 40 流变仪进行测试,设定测量温度为 25 ℃,应变扫描范围为 0.01%~100%,恒定频率为 1 Hz,记录样品储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随应变 γ 的变化^[10]。

1.3.4.2 静态流变性质的测定

参考尚琪等^[11]的方法并稍加修改。配制 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0% 不同质量分数的三赞胶溶液,在 85 ℃下水浴加热,用电动搅拌机搅拌至充分溶解,冷却至室温,采用 HAAKE MARS 40 流变仪进行测试,平行板间距为 1 mm,剪切速率为 0.1~100 s⁻¹,温度为 25 ℃,测定并记录剪切应力和粘度随剪切速率的变化情况,运用 Herschel-Bulkley 模型回归拟合分析数据方程如下:

$$\tau = K\gamma^n$$
(1)

式中:

τ ——剪切应力, Pa;

K ——稠度系数, Pa·sⁿ;

γ ——剪切速率, s⁻¹;

n ——流体指数。

1.3.5 乳化能力的测定

配制 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25% 不同质量分数的三赞胶溶液,分别在 85 ℃下水浴加热,用电动搅拌机搅拌至充分溶解,冷却至室温。然后将质量分数为 20% 大豆油缓慢加入到不同质量分数的三赞胶溶液中,边加大豆油边用玻璃棒搅拌,之后使用高剪切均质机在 10 000 r/min 下剪切 2 min,使其形成均匀的分散体系^[12]。加入质量分数为 0.05% 的 Proclin300 作为微生物防腐剂,将制备好的乳液装入 50 mL 带有刻度的样品瓶中,然后将乳液储存在 4 ℃冰箱中,观察 1、14、30 d 的变化,并记录乳液分层后乳化层的高度,乳化指数 (Emulsification Index, EI) 计算公式如下所示^[13]。

$$B = \frac{H_1}{H_2} \times 100\%$$
(2)

式中:

B ——乳化指数 (EI), %;

H_1 ——乳液乳化层高度, cm;

H_2 ——乳液总高度, cm。

1.3.6 凝胶能力的测定

参考牛海佳等^[14]的方法并稍作修改。配制 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0% 不同质量分数的三赞胶溶液,分别在 85 ℃下水浴加热,用电动搅拌机搅拌至充分溶解,冷却至室温,用质构

仪来测定三赞胶的凝胶性能。探头采用 P/6 探头,测前速率、测中速率及测后速率均为 1 mm/s,应变为 30%,触发力为 5.0 g。

1.3.7 数据分析

每次实验重复测定三次取平均值,采用 Origin 2018 进行作图,使用 SPSS 27 对实验数据进行显著性分析, $P < 0.05$ 说明具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 基本成分的分析

两种类型三赞胶的基本成分含量测定结果如表 1 所示,可以看出, FZ-200 的水分含量和脂肪含量稍高于 FZ-400,蛋白质含量和灰分含量无明显差异。

表 1 三赞胶的基本成分含量 (%)

Table 1 Basic composition content of Sanzan gum (%)				
类型	水分	蛋白质	脂肪	灰分
FZ-200	7.33 ± 0.17	8.74 ± 0.18	4.16 ± 0.23	10.61 ± 0.16
FZ-400	6.68 ± 0.03	8.98 ± 0.07	3.30 ± 0.24	10.88 ± 0.16

2.2 红外光谱分析

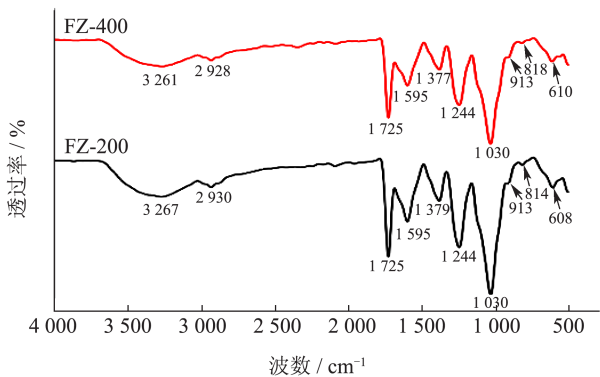


图 1 不同类型三赞胶的红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of different types of Sanzan gum

FZ-200 和 FZ-400 三赞胶的红外光谱图如图 1 所示。两种类型的红外光谱图相似,在 3 261、3 267 cm⁻¹ 处有 -OH 伸缩振动的强吸收峰,一般来讲,游离羟基的吸收峰比较尖锐,而缔合羟基的吸收峰比较宽缓。三赞胶中羟基的吸收峰较宽,表明三赞胶分子结构中含有大量的缔合羟基^[15]。2 928、2 930 cm⁻¹ 处的吸收峰为 C-H 的伸缩振动^[16],1 725 和 1 244 cm⁻¹ 处的吸收峰分别代表 C=O 和 C-O 的伸缩振动,说明三赞胶组分中含有糖醛酸,608、610 cm⁻¹ 处的吸收峰说明三赞胶中含有吡喃糖环^[17],在 1 595 cm⁻¹ 处出现了与羧酸盐有关的不对称伸缩^[18],1 379 cm⁻¹ 处归因于 C-H 的伸缩振动^[19],1 030 cm⁻¹ 处可能为 C-O-H 或 C-O-C 键

的伸缩振动峰^[20], 在 913 cm^{-1} 处存在吸收峰, 表明在三赞胶结构中存在 β -构型的糖苷键, 814 、 818 cm^{-1} 处的吸收峰代表三赞胶中还存在 α -构型的糖苷键^[21]。

2.3 热性质分析

差示扫描量热法 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 是一种在程序控制温度下, 测定试样与参考物体的功率差值与温度的关系的方法^[22]。不同类型三赞胶的 DSC 热分析图如图 2 所示。由图中可以看出, FZ-200 在 122.8 、 181.2 和 $225.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 显示三个放热峰, 而 FZ-400 在 152.1 和 $228.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 显示两个放热峰, 这可能与糖环的降解和多糖的大分子链的分解有关^[23]。FZ-200 和 FZ-400 分别在 250.8 和 $245.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 显示熔融吸热峰, 这可能归因于三赞胶受热后水分的损失^[24]。此外, FZ-200 的吸热峰比 FZ-400 的宽, 可能是由于 FZ-200 的水分含量高^[25], 这与基本成分含量测定结果相一致。

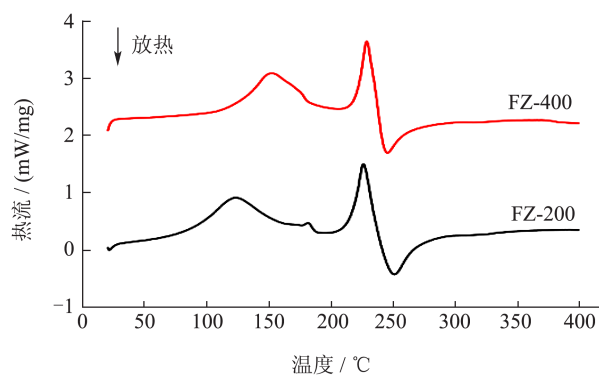


图 2 不同类型三赞胶的 DSC 图

Fig.2 DSC plots of different types of Sanzan gum

2.4 流变性质分析

2.4.1 动态流变性质分析

图 3 中 a、b 和 c、d 分别为 FZ-200 和 FZ-400 不同质量分数三赞胶溶液的应变扫描图, 由图中可以看出, 当 FZ-200 和 FZ-400 溶液质量分数为 0.1% ~ 0.2% 时, G'' 大于 G' , 表明体系以粘性性质占主导。当三赞胶溶液的质量分数为 0.3% ~ 1.0% 时, 随着三赞胶溶液质量分数的升高, 储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 都在增加, 且 G' 大于 G'' , 说明体系弹性性质占主导, 三赞胶溶液更趋向于“类固体”, 说明了弱凝胶结构的形成, 随着应变的增加, 在临界应变点 ($G'=G''$) 时, 凝胶会发生向溶胶的转变^[9], 即当三赞胶溶液的质量分数在 0.2% ~ 1.0% 时, G' 大多高于 G'' 。以上表明, 在低质量分数下, 表现出粘性性质占主导, 高质量分数下, 弹性性质占主导。

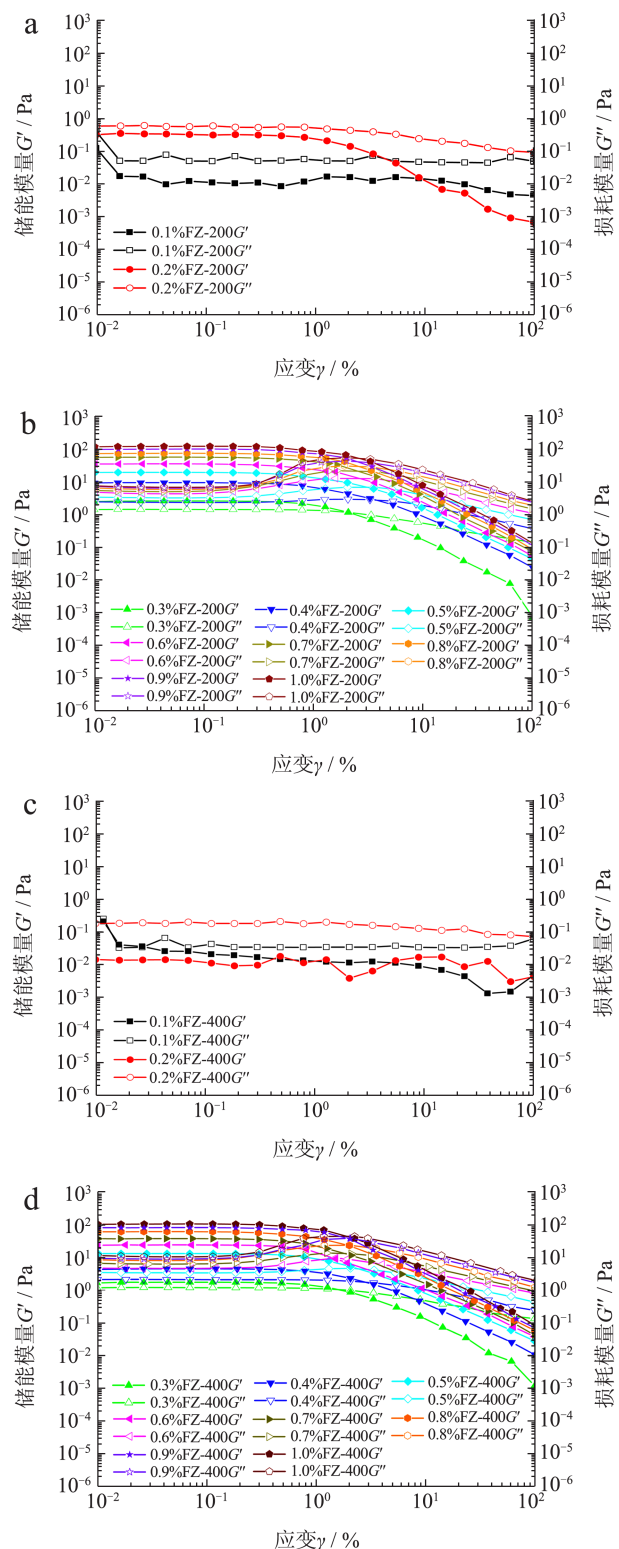


图 3 不同质量分数三赞胶应变扫描曲线

Fig.3 Strain sweep of Sanzan gum with different mass fraction

2.4.2 静态流变性质分析

图 4 中 a、b、c、d 和 e、f、g、h 分别为 FZ-200 和 FZ-400 在 0.1% ~ 1.0% 质量分数下的静态流变曲线。从图 4 中 a、b 和 e、f 可以看出, 当三赞胶溶液的质

量分数为0.1%~0.2%时,剪切应力随着剪切速率的增大而增大,当三赞胶溶液的质量分数为0.3%~1.0%时,剪切应力随着剪切速率的增大先增大后趋于平缓,且在同一剪切速率下,三赞胶溶液的质量分数越高,剪切应力越大。由图4中b、c和g、h可知,三赞胶的粘度随着剪切速率的增大而降低,然后趋于平缓。李慧等^[26]在研究黄原胶对流质配方食品流变特性的影响

时也有类似的结果。通过Herschel-Bulkley模型对三赞胶静态剪切流变特性曲线进行拟合,结果如表2所示,随着三赞胶溶液质量分数的升高,稠度系数K增加,流体指数n减小,当三赞胶溶液质量分数大于0.4%时,流体指数n趋于稳定,并且n均小于1,表明三赞胶溶液为假塑性流体^[27]。此外,在同一质量分数下,FZ-200的稠度系数高于FZ-400。

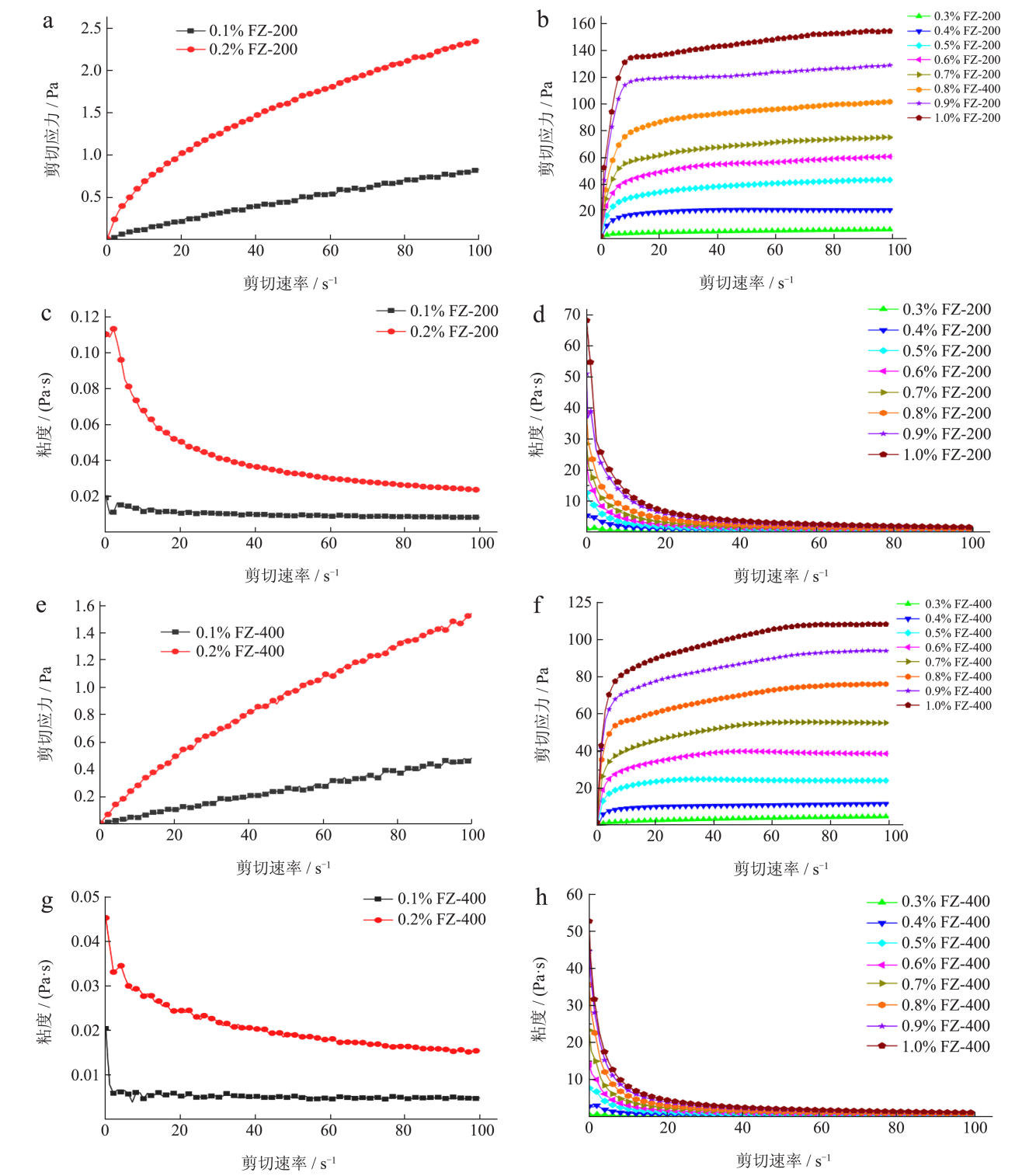


图4 不同质量分数三赞胶静态流变曲线

Fig.4 Static rheological curve of Sanzan gum with different mass fraction

表 2 不同质量分数三赞胶静态流变拟合参数				
Table 2 Static rheological fitting parameters of Sanzan gum with different mass fraction				
类型	三赞胶质量 分数/%	稠度系数 $K/\text{Pa}\cdot\text{s}^n$	流体指数 n	决定系数 R^2
FZ-200	0.1	0.02	0.80	1.00
	0.2	0.25	0.49	1.00
	0.3	4.49	0.16	0.99
	0.4	353.60	0.01	0.92
	0.5	485.57	0.01	0.99
	0.6	978.30	0.01	0.99
	0.7	999.67	0.01	0.98
	0.8	1 399.67	0.01	0.98
	0.9	2 613.67	0.01	0.90
	1.0	3 253.00	0.01	0.94
FZ-400	0.1	0.01	0.95	0.99
	0.2	0.07	0.67	1.00
	0.3	1.38	0.30	1.00
	0.4	258.27	0.01	0.96
	0.5	460.17	0.01	0.88
	0.6	813.80	0.01	0.95
	0.7	833.50	0.01	0.99
	0.8	857.75	0.01	0.99
	0.9	1 719.67	0.01	0.99
	1.0	1 832.00	0.01	0.99

2.5 乳化能力分析

食品胶添加到食品中可增加体系粘度，体系中的分散相不容易聚集和凝聚，使分散体系稳定，可以作为乳化稳定剂，添加到果汁饮料、啤酒、糕点裱花中，通过增稠或增加水相粘度，来阻止或减弱分散的油粒小球发生迁移和聚集^[28]。不同质量分数三赞胶在贮藏中的乳化指数和表现如图 5 和图 6 所示，将不同质量分数三赞胶水溶液与大豆油混合，可观察到明显的乳化层，随着三赞胶质量分数的增加，乳化稳定性提高，在相同质量分数三赞胶下，FZ-200 的乳化指数高于 FZ-400。FZ-200 质量分数为 0.25% 时，乳化指数最高，可达 100%，这可能是由于有序的凝胶网络结构在油滴表面形成了致密的界面膜，有效抑制了油滴的絮凝，促进了乳液凝胶的物理稳定^[29]。

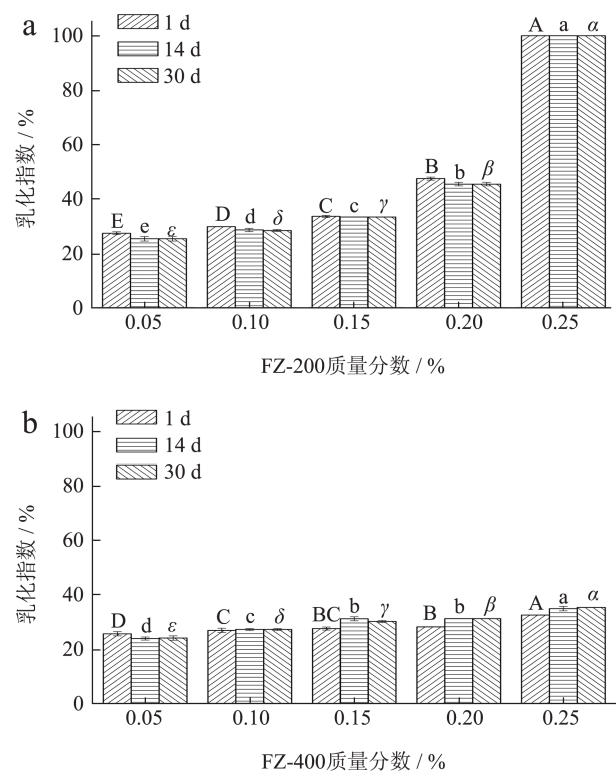


图 5 不同质量分数三赞胶在贮藏中的乳化指数

Fig.5 Emulsification index of Sanzan gum with different mass fraction in storage

注：图上不同字母代表同种类型不同质量分数的三赞胶在相同贮藏时间下乳化指数变化的显著性差异 ($P<0.05$)。

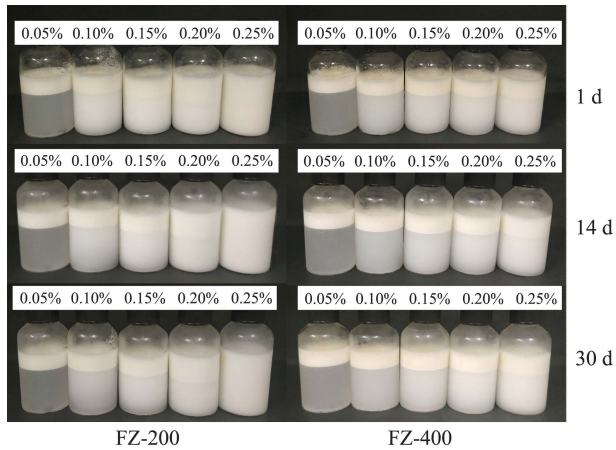


图 6 不同质量分数三赞胶在贮藏中的乳液凝胶表现

Fig.6 Different mass fraction of Sanzan gum in storage emulsion gel appearance

2.6 凝胶能力分析

凝胶性能的好坏直接影响到食品的质地和口感，尤其是在肉制品加工中，良好的凝胶性能可以增强持水性、同时更好地分散油滴，提高产品的乳化性，从而赋予凝胶肉制品良好的质地和口感。例如，亲水胶体能够明显提高肌原纤维蛋白凝胶强度、持水性以及

相关功能特性，从而获得最佳品质的产品^[30]。在凝胶强度测定过程中，随着测试探头的下压，凝胶体开始出现破裂，此时记录凝胶破裂点时所施加的力作为凝胶强度^[31]。从流变结果可以看出，当三赞胶质量分数高于 0.3% 时表现出弱凝胶结构，因此三赞胶溶液质量分数选择 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9% 及 1.0%，分别测量其凝胶强度。具有凝胶强度的三赞胶在测定后形成不可逆的小洞口，而当三赞胶质量分数为 0.3% 时，测定后恢复其形状，几乎看不到插入的痕迹，没有数据表征，因此图中未画出。随着三赞胶质量分数的增加，形成了更加致密的网络结构，宏观表现为凝胶强度的增加（见图 7），并且当三赞胶质量分数相同时，FZ-200 的凝胶强度高于 FZ-400。当 FZ-200 质量分数在 0.4%~0.5% 范围内，凝胶强度显著增加，增加了 75.76%，而 FZ-400 质量分数在 0.6%~0.7% 范围内，凝胶强度增长幅度才相对较快，增加了 36.93%。Wu 等^[2]研究发现，当鞘氨醇 Ss 的浓度大于 0.4% 时，Ss 凝胶的弹性也在明显增加。

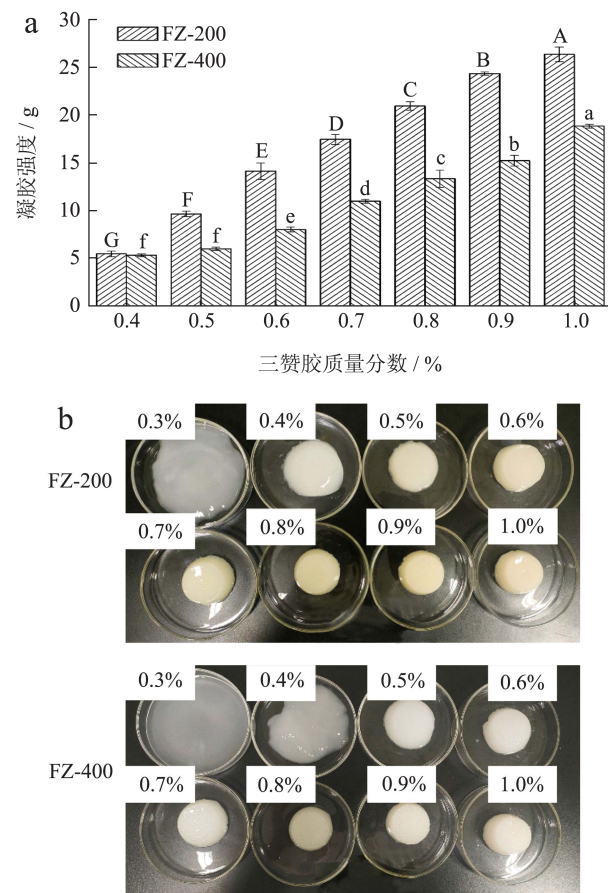


图 7 不同质量分数三赞胶的凝胶强度及表现

Fig.7 Gel strength and appearance of Sanzan gum with different mass fraction

注：图上不同字母代表同种类型不同质量分数的三赞胶的凝胶强度的显著性差异（ $P<0.05$ ）。

3 结论

该研究对比分析了工业化生产的 FZ-200、FZ-400 两种类型的三赞胶，测定了水分、蛋白质、脂肪和灰分含量，利用红外光谱仪、差示扫描量热仪、流变仪和质构仪等仪器对三赞胶进行表征，结果表明，三赞胶具有良好的凝胶及乳化能力，其低质量分数下增稠，高质量分数时具有凝胶的能力对于其应用具有重要意义。两种类型的三赞胶表现出一些共性，但又有其独特性。FZ-200 的水分含量和脂肪含量略高于 FZ-400，蛋白质和灰分含量无明显差异。FZ-200 与 FZ-400 有相似的红外光谱图，表明其具有相似的结构，DSC 分析结果表明，FZ-200 有三个放热峰，而 FZ-400 有两个放热峰，这可能与两种类型三赞胶生产时后续的分离提取工艺的差别导致糖环的降解和多糖的大分子链的分解程度不同有关。两种类型三赞胶在低质量分数下表现出假塑性流体性质，当质量分数高于 0.3% 时，都能形成凝胶结构。FZ-200 的乳化及凝胶性能优于 FZ-400，在将后的实际应用中，客户可以根据需求进行合理的选用。

参考文献

- [1] HUANG H D, WANG W, MA T, et al. *Sphingomonas sanxanigenens* sp. nov., isolated from soil [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2009, 59(Pt 4): 719-723.
- [2] WU M M, LI G Q, HUANG H D, et al. The simultaneous production of sphingan Ss and poly(R-3-hydroxybutyrate) in *Sphingomonas sanxanigenens* NX02 [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 823: 361-368.
- [3] 吴伟都,刘小杰,成官哲,等.不同浓度对三赞胶溶液流变学特性的影响研究[J].中国食品添加剂,2024,35(4):227-233.
- [4] WU M M, ZHAO X, SHEN Y Q, et al. Efficient simultaneous utilization of glucose and xylose from corn straw by *Sphingomonas sanxanigenens* NX02 to produce microbial exopolysaccharide [J]. Bioresource Technology, 2020, 319: 124126.
- [5] 孙跃辉,赵丽娟.三赞胶及其在食品加工中的应用研究进展[J].中国食品,2022,15:125-127.
- [6] LI J, SUN L, LI B L, et al. Evaluation on the water state of frozen dough and quality of steamed bread with proper amount of sanxan added during freeze-thawed cycles [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 108: 103564.
- [7] 王千千,梁志强,李春,等.一种新型微生物多糖-三赞胶的研究进展[J].乳品与人类,2023,2:26-31.
- [8] 杨国帅.毕赤酵母中黄原胶内切酶的表达及共培养制备低分子量黄原胶[D].无锡:江南大学,2023.
- [9] WU M M, SHI Z, HUANG H D, et al. Network structure and functional properties of transparent hydrogel sanxan produced by *Sphingomonas sanxanigenens* NX02 [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 176: 65-74.

- [10] RAZI M S, MOTAMEDZADEGAN A, SHAHIDI S, et al. Steady and dynamic shear rheology as a tool for evaluation of the interactions between egg white albumin and basil seed gum [J]. *Rheologica Acta*, 2020, 59 (prepublish): 1-15.
- [11] 尚琪,赵保堂,杨富民,等.黄原胶与瓜尔豆胶复配对藜麦汁流变学特性的影响[J].食品与发酵科技,2022,58(3):64-73.
- [12] WANG Y T, WANG S S, LI R, et al. Synergistic effect of corn fiber gum and chitosan in stabilization of oil in water emulsion [J]. *LWT*, 2022, 154(11): 112592.
- [13] 肖志刚,时超,杨柳,等.疏水改性藜麦淀粉的制备及其Pickering乳液乳化性研究[J].现代食品科技,2018,34(12):19-25.
- [14] 牛海佳,刘爱国,王鹏程,等.菊粉对刺云实胶-黄原胶复配体系质构和流变特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(5):70-76.
- [15] 邵培,刘传菊,谌银强,等.黄原胶对燕麦淀粉凝胶特性的影响[J].食品科技,2019,44(5):264-270.
- [16] 马高兴,王晗,杨文建,等.不同提取工艺对杏鲍菇多糖结构特征及免疫活性的影响[J].食品科学,2022,43(17):42-49.
- [17] PU X Y, MA X L, LIU L, et al. Structural characterization and antioxidant activity *in vitro* of polysaccharides from angelica and astragalus [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 137: 154-164.
- [18] CHEN J, LI H, FANG C Q, et al. In situ synthesis and properties of Ag NPs/carboxymethyl cellulose/starch composite films for antibacterial application [J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(3): 838-847.
- [19] 王银平.玉米耳多糖的制备、结构表征及其与乳清蛋白相互作用研究[D].长春:吉林大学,2020.
- [20] REN G M, XU L M, LU T Y, et al. Structural characterization and antiviral activity of lentinan from *Lentinus edodes* mycelia against infectious hematopoietic necrosis virus [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 115: 1202-1210.
- [21] CAI Z N, LI W, MEHMOOD S, et al. Structural characterization, *in vitro* and *in vivo* antioxidant activities of a heteropolysaccharide from the fruiting bodies of *Morchella esculenta* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 195: 29-38.
- [22] 杨婷.苦荞蛋白-黄原胶复合物的构建及其在Pickering乳液中的应用研究[D].成都:成都大学,2023.
- [23] RAZMKHAH S, MOHAMMADIFAR A M, RAZAVI A M S, et al. Purification of cress seed (*Lepidium sativum*) gum: Physicochemical characterization and functional properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 141: 166-174.
- [24] MOHAMMADI N, EHSANI R M, BAKHODA H. Characterization of Saez as a natural chewing gum [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 137(3): 825-829.
- [25] KONG L S, YU L, FENG T, et al. Physicochemical characterization of the polysaccharide from *Bletilla striata*: Effect of drying method [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 1-8.
- [26] 李慧,付鑫,任元海,等.黄原胶对流质配方食品流变特性的影响[J].食品工业,2020,41(3):45-49.
- [27] 李月,赵江丽,张笑莹,等.梨膏的流变学特性及其影响因素[J].食品安全质量检测学报,2023,14(16):259-267.
- [28] 张献伟,周梁,蒋爱民,等.食品胶特性及其在食品中应用[J].食品与机械,2011,27(1):166-169.
- [29] 王然.EGCG对淀粉基乳液凝胶性质的影响[J].农业工程学报,2024,40(4):329-336.
- [30] 徐一宁,曹传爱,贺俊杰,等.亲水胶体调控胶原纤维蛋白热诱导凝胶形成机制的研究进展[J].食品科学,2024,45(6):285-293.
- [31] 欧凯,吴伟都,赵志红,等.具有凝胶性能的黄原胶溶液凝胶强度的测定及其流变特性研究[J].饮料工业,2020,23(1):22-26.