

提取方法对玉米纤维胶乳化性能的影响

吾成龙¹ 任莹¹ 李兴国¹ 唐雷鸣² 孙小红¹

(1. 浙江海洋大学食品与药学院, 浙江 舟山 316022; 2. 舟山市食品药品检验检测研究院, 浙江 舟山 316022)

摘要: [目的] 探究 3 种提取方法(碱提、酶提和酸提)对玉米纤维胶(CFG)乳化性能的影响。[方法] 以玉米麸皮为原料, 分别利用氢氧化钠、木聚糖酶及甲酸—乙酸—水溶液提取 CFG, 测定 CFG 乳液的粒径、Zeta 电位、流变性、乳油澄清指数、外观和微观结构的变化。[结果] 3 种 CFG 乳液均表现出剪切稀变特性, 其黏度随剪切速率的增加而降低。酶提 CFG 乳液黏度最高, 凝胶性能最好, 粒径最小[(751.6±22.5) nm], Zeta 电位绝对值最大[(-31.4±0.94) mV], 贮藏末期的乳油澄清指数最佳[(81.0±1.6)%]。表明提取方法对 CFG 的乳化性能有显著影响($P<0.05$), 酶提 CFG 的蛋白质含量最高, 支化度最大, 相对分子质量相对较小, 这些特性使其在乳液中具有更高的界面吸附能力和流动性, 能够快速到达油—水界面, 形成稳定的界面膜。[结论] 酶提法得到的 CFG 乳化性能最优, 有望成为高效的天然食品添加剂。

关键词: 玉米麸皮; 玉米纤维胶; 提取方法; 乳化性能

Effect of extraction methods on emulsifying properties of corn fiber gum

WU Chenglong¹ REN Ying¹ LI Xingguo¹ TANG Leiming² SUN Xiaohong¹

(1. College of Food Science and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China;

2. Zhoushan Institute for Food and Drug Control, Zhoushan, Zhejiang 316022, China)

Abstract: [Objective] To investigate the influence of three extraction methods (alkaline, enzymatic, and acidic) on the emulsification characteristics of corn fiber gum (CFG). [Methods] Corn bran was used as the raw material, and CFG was extracted using sodium hydroxide, xylanase, and formic-acetic acid-water solutions. The changes in particle size, Zeta potential, rheological properties, creaming index, appearance, and microstructure of CFG emulsions were measured. [Results] All three CFG emulsions exhibited shear-thinning behavior, with viscosities decreasing as the shear rate increased. The enzymatically extracted CFG emulsion had the highest viscosity, best gel properties, smallest particle size [(751.6±22.5) nm], highest absolute Zeta potential [(-31.4±0.94) mV], and best creaming index value [(81.0±1.6)%] at the end of storage. These results demonstrated that the extraction method significantly affected the emulsifying properties of CFG ($P<0.05$). The enzymatically extracted CFG had the highest protein content, largest degree of branching, and smallest molecular weight. These characteristics enabled it to exhibit higher interfacial adsorption ability and fluidity in the emulsion, allowing it to quickly reach the oil-water interface and form a stable interfacial film. [Conclusion] The enzymatically extracted CFG demonstrates the best emulsification performance, making it a promising natural food additive with high efficiency.

Keywords: corn bran; corn fiber gum; extraction method; emulsifying property

玉米(*Zea mays* L.),作为全球产量领先的粮食作物,其深加工产业的迅猛发展为人提供了丰富的能量来源,同时也产生了数量可观的加工副产物^[1]。玉米麸皮,作为玉米淀粉加工过程中的主要副产物之一,其产量约

占玉米加工总量的 10%~15%。玉米麸皮中含有约 50%~79% 的膳食纤维,其中阿拉伯木聚糖(AX)是其主要成分^[2]。此外,玉米麸皮还含有一定量的蛋白质以及少量的淀粉和脂类等成分。目前,玉米麸皮主要用作饲料,其在

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金项目(编号:ZCLQN25C2002);舟山市市级应用技术研究项目(编号:2025C31028)

通信作者: 唐雷鸣(1988—),男,舟山市食品药品检验检测研究院高级工程师,硕士。E-mail:383471911@qq.com

孙小红(1990—),男,浙江海洋大学讲师,博士。E-mail:sunxh@zjou.edu.cn

收稿日期: 2025-05-08 **改回日期:** 2025-12-09

引用格式: 吾成龙,任莹,李兴国,等. 提取方法对玉米纤维胶乳化性能的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(6): 39-45.

Citation: WU Chenglong, REN Ying, LI Xingguo, et al. Effect of extraction methods on emulsifying properties of corn fiber gum[J]. Food & Machinery, 2026, 42(6): 39-45.

食品工业等高附加值领域的应用尚处于相对初级的阶段,产业附加值较低,一定程度造成了资源浪费^[3]。

玉米纤维胶(CFG)是一种从玉米加工副产物中提取的天然膳食纤维,以阿拉伯木聚糖复合物为其主体成分^[4]。CFG具有多种生理功效,如预防慢性疾病等,使其在食品和医药等领域具有广阔的应用前景^[5]。阿拉伯木聚糖的结构较为复杂,其由 β -D-吡喃木糖残基构成线性骨架, α -L-阿拉伯呋喃糖组成的侧链通过C(O)-2、C(O)-3或C(O)-2,3键连接到主链上。此外,少量阿魏酸通过酯键连接到阿拉伯呋喃糖的C(O)-5位,这一结构特点赋予了阿拉伯木聚糖独特的物理和化学性质^[6]。CFG中除了含有阿拉伯木聚糖复合物外,还含有共价交联蛋白质、少量脂肪和酚酸等成分。尽管这些成分在CFG中的含量相对较少,但其对CFG的功能特性起到了重要的作用,例如赋予其良好的乳化活性及界面反应能力,使CFG在食品乳液的制备和稳定等方面具有潜在的应用价值。

实际生产过程中,由于不同玉米纤维的来源差异以及提取方法不同,CFG中蛋白质含量、支化程度以及阿魏酸含量等均会受到影响,进而导致CFG的理化性质和功能特性出现显著差异。张朵朵等^[7]采用碱提法从小麦麸皮中提取了阿拉伯木聚糖,并优化其乳液稳定性。目前,有关CFG提取工艺的研究主要集中在单一提取方法的优化上,缺乏对不同提取工艺之间系统性的对比研究,这在一定程度上限制了CFG在食品工业中的广泛应用。乳化性能作为CFG重要的功能之一,对CFG在食品乳液等产品中的应用具有关键意义。研究拟以玉米麸皮为原料,比较酸法、碱法与酶法对CFG乳化性能的影响规律,为CFG在食品工业中的高效应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米麸皮:灰分、水分、蛋白质和淀粉含量分别为 $(5.78\pm 0.6)\%$ 、 $(6.96\pm 0.31)\%$ 、 $(10.28\pm 0.28)\%$ 、 $(4.83\pm 0.31)\%$,玉锋实业集团有限公司;

大豆油:一级品质,山东鲁花集团有限公司;

木聚糖酶($\geq 2\ 500\ \text{U/g}$):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

流变仪:AR2000型,美国TA公司;

高速剪切机:DRS2000型,德国IKA公司;

冷冻干燥机:LGJ型,北京四环科学仪器厂;

Zeta电位分析仪:Zetasizer Nano zs90型,美国麦奇克仪器有限公司;

生物光学显微镜:NE610FL+CKL-型,上海山汉光电科技有限公司;

磁力搅拌器:Cimarec型,美国赛默飞公司。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理 将玉米麸皮研磨过筛后,与正己烷按料液比1:8(g/mL)混匀,200 r/min搅拌2 h,静置30 min,倒出含油上清液,105℃烘干2 h。向除油后的玉米麸皮中加入8倍体积蒸馏水,500 W功率下煮沸1 h,持续搅拌促使淀粉充分糊化。待温度降至40℃时,加入 α -淀粉酶,60℃水浴2 h,通过碘液检验确认淀粉完全水解。加入蛋白酶,40℃保温4 h,冷却至室温,10 000×g离心10 min,沉淀用2倍体积无水乙醇冲洗2次,沉淀于60℃干燥6 h。

1.3.2 碱提CFG 参照Yan等^[8]的方法稍作修改。将预处理后的玉米麸皮与1%的NaOH按料液比1:10(g/mL)混匀,100℃水浴,避光,150 r/min搅拌反应3 h,10 000×g离心10 min,收集上清液。用相同的碱溶液对沉淀进行二次处理,合并两次上清液,用浓盐酸调整pH至5。15 000×g离心20 min,取上清液,缓慢加入2倍体积无水乙醇,搅拌混匀,静置过夜,过滤,收集沉淀,采用100%乙醇冲洗,冷冻干燥48 h,得碱提CFG。

1.3.3 酶提CFG 参照Kaur等^[9]的方法稍作修改。将预处理后的玉米麸皮按料液比1:10(g/mL)浸入去离子水中,按料液比1:2 500(g/mL)加入木聚糖酶。pH 4.8、50℃提取4 h,95℃水浴20 min,12 000×g离心10 min,取上清液,静置醇沉24 h,采用100%乙醇冲洗,冷冻干燥48 h,得酶提CFG。

1.3.4 酸提CFG 参照Liu等^[10]的方法稍作修改。将预处理后的玉米麸皮与甲酸—乙酸—水溶液(体积比30:60:10)按料液比1:10(g/mL)混匀,添加0.1% HCl作为催化剂。85℃、200 r/min搅拌4 h,控制固液比为1:20(g/mL)。10 000×g离心10 min,收集上清液。采用相同的酸溶液对沉淀进行再次处理,合并两次上清液,15 000×g离心20 min,取上清液,加入2倍体积无水乙醇,搅拌混匀,静置12 h,过滤,收集沉淀,用100%乙醇冲洗,冷冻干燥48 h,得酸提CFG。

1.3.5 蛋白质残留量测定 按GB 5009.5—2016执行。

1.3.6 单糖组成测定 参照Yang等^[11]的方法。

1.3.7 相对分子质量测定 参照Xie等^[12]的方法稍作修改。称取适量样品用流动相溶解,配制成质量浓度约1~3 mg/mL溶液,过0.22 μm 微孔滤膜后上机测试。流速1.0 mL/min,柱温45℃;进样量50 μL ;流动相0.1 mol/L硝酸钠(0.01%叠氮化钠),等度洗脱。通过样品的黏度、出峰时间等,利用GPC软件拟合计算出样品的相对分子质量。

1.3.8 乳液制备 将质量分数为3%的CFG溶液与大豆油按质量比7:3混匀。15 000 r/min乳化5 min,制得CFG乳液。

1.3.9 乳液粒径和Zeta电位测定 参照Liu等^[13]的方法稍作修改。用Zeta电位分析仪对乳液的粒径和Zeta电位进行分析。测定前,将乳液按照1:120(g/mL)进行稀释,每个样品平行测定5次,结果取平均值。

1.3.10 乳液凝胶性测定 参照Skendi等^[14]的方法稍作修改。夹具为直径40 mm的平行板,间距1 mm。频率温度25℃,应变1%,频率0.1~100.0 Hz。

1.3.11 乳液黏度随剪切速率的变化分析 参照Kaur等^[9]的方法稍作修改。使用流变仪配备循环浴和电子控制加热系统,温度为25℃,剪切速率为0~100 s⁻¹。

1.3.12 乳液的视觉观测分析 参照Wang等^[15]的方法稍作修改。将制备好的乳液加入特制容器瓶中,25℃恒温贮藏。分别于乳液制备后的第0、12天进行拍照记录,分析乳状液的物理稳定性变化情况。

1.3.13 乳液的显微观测分析 参照Boostani等^[16]的方法稍作修改。用移液管吸取10 μL乳液,将其均匀滴加至洁净的载玻片中央,轻轻盖上盖玻片,使乳液在盖玻片与载玻片之间均匀分布,避免产生气泡。将制备好的样品放置于光学显微镜的载物台上,通过不同倍数的物镜观察乳液的微观结构。

1.3.14 乳液稳定性测定 参照Shi等^[17]的方法稍作修改。以乳油澄清指数(CI)作为评价指标,对乳液的稳定情况进行量化分析,每隔2 d观察乳液的分层情况。按式(1)计算CI值。

$$I_c = \frac{H_1}{H_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

I_c ——乳油澄清指数,%;

H_1 ——上层乳状层高度,cm;

H_2 ——瓶中液体总高度,cm。

1.3.15 数据处理与分析 所有试验重复3次,结果以平均值±标准差表示。使用SPSS 27.0软件对数据进行统计分析和显著性差异分析, $P<0.05$ 表示差异显著,采用Origin 2021软件绘图。

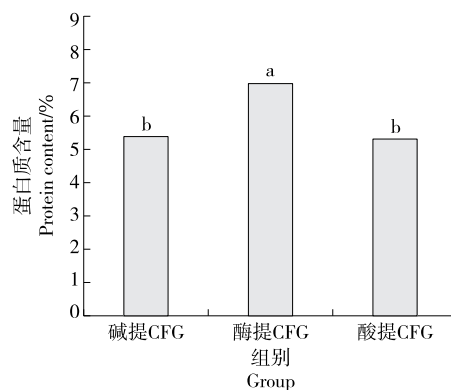
2 结果与分析

2.1 残留蛋白分析

由图1可知,酶提CFG的蛋白质含量显著高于碱提CFG和酸提CFG($P<0.05$),可能是因为酶法提取条件温和,能够更好地保留蛋白质的天然结构和功能,同时避免了酸碱条件对蛋白质的破坏。Chen等^[18]研究表明,蛋白质在天然多糖的乳化活性中起着重要作用。因此,酶提CFG的高蛋白质含量使其可作为一种潜在的食品乳化剂。

2.2 单糖组成及其支化度分析

由图2可知,3组CFG的支化度具有显著性差异($P<$

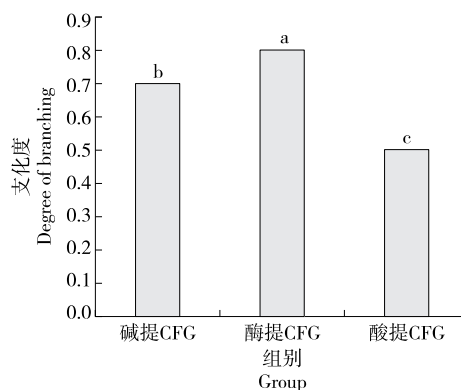


小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图1 CFG的蛋白含量

Figure 1 Protein content of CFG

0.05)。其中,酶提CFG的支化度最高。高支化度可能是由于提取过程中,木聚糖骨架上的侧链阿拉伯呋喃糖残基分布的非随机性较高^[11]。支化度较高能够增加CFG在界面上的吸附面积,提高界面膜的稳定性,从而增强CFG在乳液体系中的功能表现。采用1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)衍生化结合高效液相色谱法测定得出,CFG主要由阿拉伯糖、半乳糖和木糖等单糖组成。



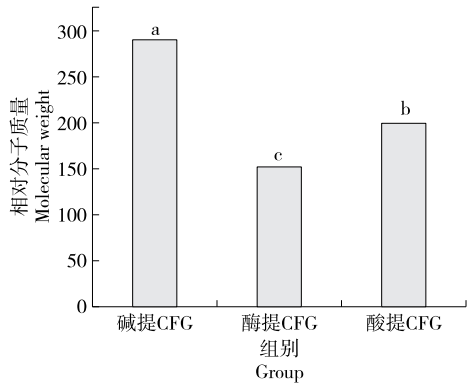
小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图2 CFG的支化度

Figure 2 Degree of branching in CFG

2.3 相对分子质量分析

由图3可知,各组CFG的相对分子质量存在显著差异($P<0.05$),碱提CFG的相对分子质量最大。这可能与提取过程中对CFG分子链的影响有关,碱提过程中,弱碱性条件有助于保留CFG的完整结构。此外,木聚糖酶选择性水解CFG的主链,破坏了CFG主链的完整性,导致酶提CFG的相对分子质量较小。而碱通常破坏CFG链间的交联以及CFG与细胞壁其他组分的交联,对CFG主链影响相对较小。CFG的相对分子质量范围与Skendi等^[14]的研究基本一致。低相对分子质量多糖通常在水中溶解性



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 CFG的相对分子质量

Figure 3 Molecular weight of CFG

较好,能够更均匀地分布在乳液中,提高其在界面上的吸附效率。

2.4 乳液的粒径和Zeta电位

由图4可知,各组CFG乳液在粒径和Zeta电位上存在显著差异 ($P < 0.05$)。乳液制备初期(第0天),酶提CFG乳液的粒径显著小于碱提CFG乳液和酸提CFG乳液的 ($P < 0.05$),酶提CFG乳液可能在液滴表面形成更致

密的吸附层或构建三维网络结构,物理阻隔液滴的聚集与合并,从而降低液滴之间的布朗运动,降低碰撞概率,提高乳液稳定性^[19]。贮藏12 d后,所有乳液的粒径均显著增加 ($P < 0.05$),但酶提CFG乳液的粒径仍保持最小。Pan等^[20]研究表明,乳状液的粒径变化主要取决于液滴的初始尺寸以及液滴抗絮凝和抗聚集的能力,酶法提取的CFG有助于形成更细小的乳液液滴。在Zeta电位方面,酶提CFG乳液的Zeta电位绝对值最大,显著高于碱提CFG乳液和酸提CFG乳液的 ($P < 0.05$)。Zeta电位绝对值越高,乳液液滴间的静电斥力越强,稳定性也越高^[21]。这意味着酶提CFG乳液液滴之间的静电斥力最强,能够更有效地阻止液滴聚结,从而表现出最佳的乳液稳定性。相比之下,碱提CFG乳液和酸提CFG乳液的Zeta电位绝对值相对较小,稳定性稍差^[22]。这与Liu等^[10]的试验结果一致。提取方法对CFG乳液的粒径和Zeta电位具有显著影响 ($P < 0.05$),进而影响乳液的稳定性。

2.5 乳液的黏度随剪切速率的变化

由图5可知,乳液制备初期(第0天),不同提取方法的CFG乳液黏度存在明显差异 ($P < 0.05$)。酶提CFG乳液的黏度最大,碱提的次之,酸提的最小。这可能是因为

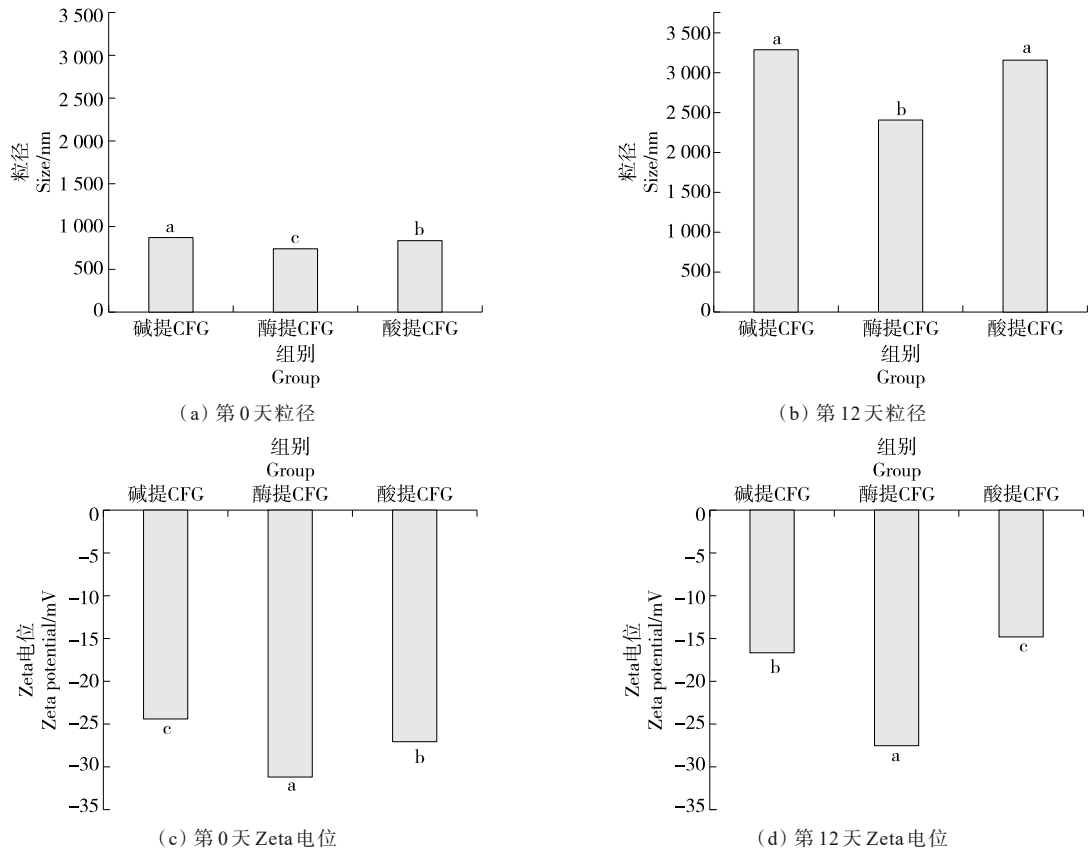
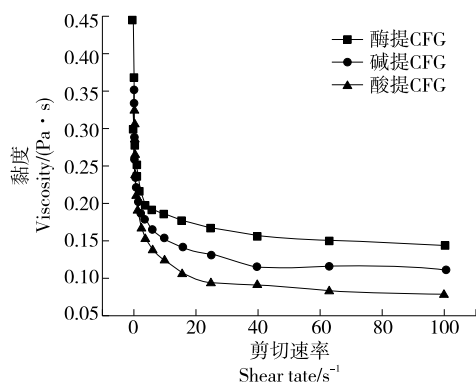
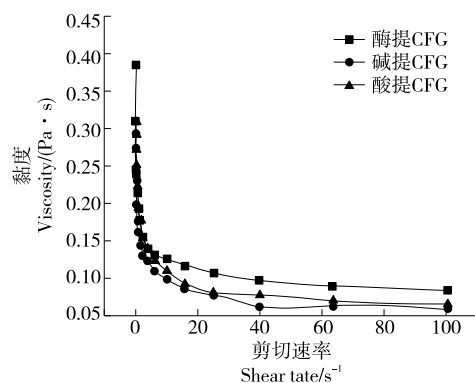


图4 CFG乳液的粒径和电位

Figure 4 Particle size and Zeta potential of CFG emulsion



(a) 第0天



(b) 第12天

图5 CFG乳液的黏度随剪切速率的变化

Figure 5 Variation in viscosity of CFG emulsion with shear rate

酶提CFG的支化度较大,能够形成更紧密的网络结构,具有更高的黏度。随着剪切速率的增加,所有乳液黏度均呈下降趋势,表现出典型的剪切稀变特性,与Giorgi等^[23]的研究趋势相符,为非牛顿流体的典型特征。这种现象可以归因于剪切力作用下,乳液中的颗粒排列发生变化,分子间作用力减弱,黏度降低^[23]。贮藏12 d后,所有乳液的黏度均有所下降,可能是贮藏过程中乳液的微观结构发生了一定程度的变化。

2.6 乳液的凝胶性

由图6可知,贮藏第0天或第12天,乳液的 G' 从大到小均为酶提CFG>碱提CFG>酸提CFG。贮藏第12天,3组CFG乳液的 G' 均显著大于第0天的($P<0.05$),表明随着贮藏时间的延长,乳液的凝胶性增强。酶提CFG乳液的 G' 始终最高,说明其凝胶性最强,与其最小的粒径和最大的Zeta电位绝对值密切相关。这与Sun等^[24]的研究结果一致,表明CFG乳液具有良好的凝胶性。酶提CFG乳液具有较小的粒径更有助于形成致密的凝胶网络,液滴之间结合得更紧密,从而能更好地增强乳液的稳定性和凝胶性^[25]。酶提CFG的高支化度构造也使得乳液具有

较好的凝胶性。此外,CFG乳液的凝胶特性还受CFG浓度等因素影响。高浓度的CFG能够提供更多的交联点,形成更致密的网络结构,从而更好地限制液滴运动,减少液滴之间的聚集和聚结现象^[26]。后续可以优化CFG浓度进一步提高其在食品乳液中的应用效果。

2.7 乳液的显微观察分析

由图7可知,酶提CFG乳液的液滴均呈现规则的球形,碱提CFG乳液和酸提CFG乳液分布着大小不均匀的液滴。酶提CFG乳液的液滴尺寸更小,这与乳液粒径的结果一致。随着贮藏时间的延长,各组CFG乳液的液滴尺寸均有所增大,是由于液滴之间的聚集现象^[27]。其中,碱提CFG和酸提CFG的乳液液滴凝聚较为严重,酶提CFG的乳液液滴尺寸增加最小且分布最均匀,与乳液粒

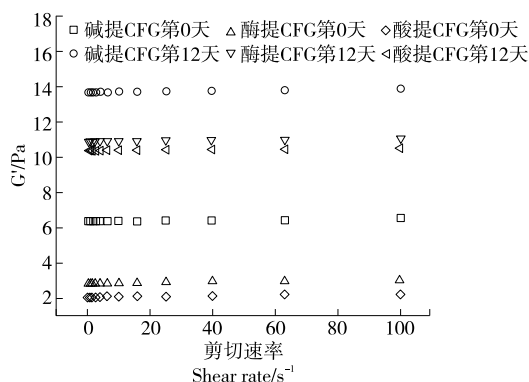


图6 CFG乳液的凝胶性

Figure 6 Gel-forming ability of CFG emulsion

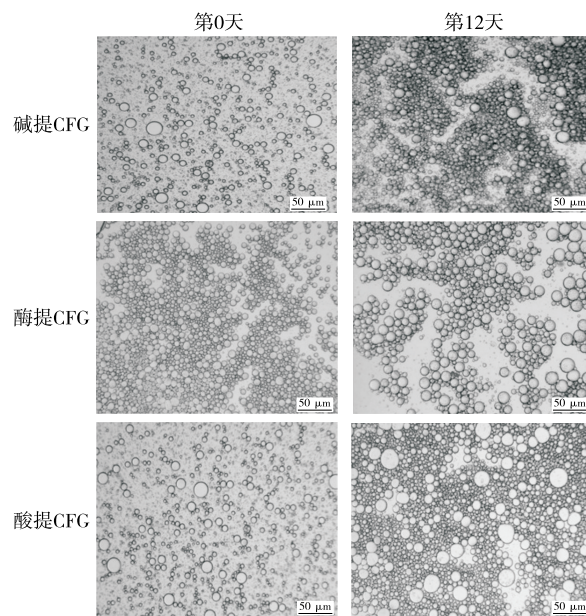


图7 CFG乳液显微镜观察图

Figure 7 Microscopic observation image of CFG emulsion

径结果趋势相一致。Chutinara 等^[28]研究发现,酶提 CFG 可以更快地稳定界面,快速形成黏弹性膜,减慢液滴重新聚结的速度,从而产生更小的液滴。

2.8 乳液的稳定性分析

由图 8 可知,贮藏第 12 天,乳液的 CI 值从大到小依次为酶提 CFG>碱提 CFG>酸提 CFG,与乳液黏性测试结果一致。CI 是指油滴在贮藏过程中与乳液水相的聚集和分离程度,可用于评价乳液的贮藏稳定性^[29]。贮藏第 12 天,酶提 CFG 乳液的 CI 值最佳,表明其稳定性最好,分层现象最不明显。酶提 CFG 乳液在贮藏第 0 天和第 12 天均表现出较好的稳定性,碱提 CFG 乳液和酸提 CFG 乳液在贮藏第 12 天则出现更大程度的分层和沉淀。结合蛋白质残留量、单糖组分和相对分子质量的试验结果可以得出,酶提 CFG 具有更多的蛋白质残留量以及更高的支化度,具有良好的溶解性和界面吸附能力,因此在乳液中表现出更好的乳化性能和乳液稳定性。酶提 CFG 乳液的液滴分布均匀,形态稳定,而碱提 CFG 乳液和酸提 CFG 乳液的液滴则出现了较明显的聚集和变形现象。由此证明,酶提 CFG 乳液展现出最佳的稳定性。

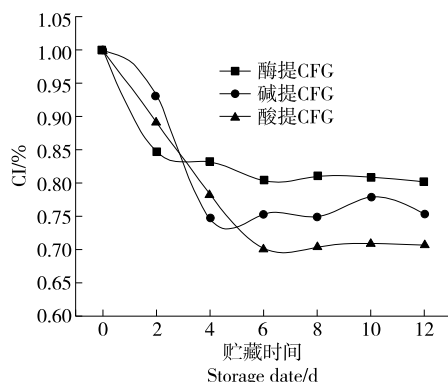


图 8 CFG 乳液的 CI 值

Figure 8 CI value of CFG emulsion

3 结论

研究了酸法、碱法和酶法 3 种提取方法对玉米纤维胶乳化性能的影响。结果表明,酶法提取的玉米纤维胶在乳化性和乳液稳定性方面表现最佳。酶提玉米纤维胶展现出最高的蛋白质含量、最大的支化度以及相对较小的相对分子质量。这些特性赋予了酶提玉米纤维胶乳液更小的粒径、更高的 Zeta 电位绝对值,以及显著的黏度和凝胶性。这些因素共同作用,有效防止了液滴聚集和聚结,从而显著提升了乳液的稳定性。相比之下,碱提玉米纤维胶和酸提玉米纤维胶的乳化性能相对较弱,可能与其分子结构和组成差异有关。此外,酶提玉米纤维胶的高支化度结构和良好的溶解性使其在乳液中具有更高的界面吸附能力,能够快速形成稳定的界面膜,减缓液滴的重

新聚结速度。这一特性对于维持乳液的长期稳定性至关重要。同时,酶提玉米纤维胶的高蛋白质含量进一步增强了其乳化性能,这与蛋白质在天然多糖乳化活性中的重要作用相一致。未来可进一步探索玉米纤维胶在不同食品体系中的应用效果,以及其与其他食品成分的相互作用,以充分发挥其功能特性,推动食品工业的发展。深入研究玉米纤维胶的分子结构与乳化性能之间的关系,将有助于开发更高效的天然乳化剂,满足食品工业对高品质、天然添加剂的需求。

参考文献

- [1] 马丽媛,黄雪莹,尚尔坤,等. 超声辅助酶法提取玉米皮中多糖及其抗氧化性测定[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 186-192, 202.
- [2] MA L Y, HUANG X Y, SHANG E K, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from corn bran and determination of their antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 186-192, 202.
- [3] SUN X H, WU C L, MA L, et al. Positive improvement of nutritional profile and safety of maize processing by-products: effects of *Bacillus subtilis* fermentation treatment[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 223: 117775.
- [4] CHEN L, GUO Y, LIU X, et al. Cellulase with *Bacillus velezensis* improves physicochemical characteristics, microbiota and metabolites of corn germ meal during two-stage co-fermentation[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2024, 40(2): 59.
- [5] 肖猛,贾星,程丽婷,等. 阿拉伯木聚糖强化对面团特性和面包烘焙品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(8): 1-8.
- [6] XIAO M, JIA X, CHENG L T, et al. Effects of Arabinosyran fortification on dough characteristics and bread quality[J]. Food Research and Development, 2023, 44(8): 1-8.
- [7] ZHANG Z Y, YANG P, ZHAO J B. Ferulic acid mediates prebiotic responses of cereal-derived Arabinosylans on host health[J]. Animal Nutrition, 2022, 9: 31-38.
- [8] BOUKID F. Corn (*Zea mays* L.) Arabinosyran to expand the portfolio of dietary fibers[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103181.
- [9] 张朵朵,朱婷伟,陈复生,等. 小麦麸皮阿拉伯木聚糖/豌豆分离蛋白复合物的乳化性能研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(4): 1-8.
- [10] ZHANG D D, ZHU T W, CHEN F S, et al. Emulsifying properties of wheat bran Arabinosyran/pea protein isolate complex[J]. Food Research and Development, 2022, 43(4): 1-8.
- [11] YAN J X, JIA X, FENG L P, et al. Rheological and emulsifying properties of Arabinosylans from various cereal brans[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 90: 102844.
- [12] KAUR A, SINGH B, YADAV M P, et al. Isolation of

- Arabinoxylan and cellulose-rich Arabinoxylan from wheat bran of different varieties and their functionalities[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106287.
- [10] LIU A X, ZHANG S J, WANG W T, et al. Effects of different pretreatments on wheat bran and its Arabinoxylan obtained by sequential extraction with dilute alkali and alkali-urea mixture [J]. Foods, 2025, 14(4): 696.
- [11] YANG T H, CHIU C Y, LU T J, et al. The anti-obesity effect of polysaccharide-rich red algae (*Gelidium amansii*) hot-water extracts in high-fat diet-induced obese hamsters[J]. Marine Drugs, 2019, 17(9): 532.
- [12] XIE H, YING R F, HUANG M G. Effect of Arabinoxylans with different molecular weights on the gelling properties of wheat starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 209: 1 676-1 684.
- [13] LIU Y, HU X B, YE Y F, et al. Emulsifying properties of wheat germ: influence of pH and NaCl[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105431.
- [14] SKENDI A, BILIADERIS C G, IZYDORCZYK M S, et al. Structural variation and rheological properties of water-extractable Arabinoxylans from six Greek wheat cultivars[J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 526-536.
- [15] WANG J, HOU X X, HANNACHI K, et al. A multi-scale approach to Arabinoxylan-based emulsions: from molecular features, interfacial properties to emulsion behaviors[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258: 128881.
- [16] BOOSTANI S, HOSSEINI S M H, GOLMAKANI M T, et al. The influence of emulsion parameters on physical stability and rheological properties of Pickering emulsions stabilized by hordein nanoparticles[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105520.
- [17] SHI Z J, MA H X, TANG C, et al. Preparation, characterization and stability of water-in-oil Pickering emulsions stabilized by acylated EGCG derivatives[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115524.
- [18] CHEN H, QIU S, GAN J, et al. New insights into the functionality of protein to the emulsifying properties of sugar beet pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 262-270.
- [19] YANG Y Q, FANG Z W, CHEN X, et al. An overview of Pickering emulsions: solid-particle materials, classification, morphology, and applications[J]. Frontiers in Pharmacology, 2017, 8: 287.
- [20] PAN Y, WU Z Z, ZHANG B, et al. Preparation and characterization of emulsion stabilized by octenyl succinic anhydride-modified dextran for improving storage stability and curcumin encapsulation[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 326-332.
- [21] ZOU X L, KANG Z L, LI Y P, et al. Effect of sodium bicarbonate on solubility, conformation and emulsion properties of pale, soft and exudative meat myofibrillar proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 157: 113097.
- [22] 杜鹏莹, 任国艳, 赵冰, 等. 负载白藜芦醇 Pickering 乳液保鲜衬垫对冷鲜牛肉的保鲜效果[J]. 食品科学, 2025, 46(13): 324-333.
- DU L Y, REN G Y, ZHAO B, et al. Effect of preservative liner made with resveratrol-loaded Pickering emulsion on the preservation of chilled beef[J]. Food Science, 2025, 46(13): 324-333.
- [23] GIORGI F, COGLITORE D, CURRAN J M, et al. The influence of inter-particle forces on diffusion at the nanoscale [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12689.
- [24] SUN N X, ZHUANG F P, WANG C Y, et al. Enzymatically cross-linked Arabinoxylan hydrogel: effect of glucose oxidase on the gel characteristics and oral colon-targeted delivery for naja atra neurotoxin[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 383: 112248.
- [25] MARTÍNEZ-LÓPEZ A L, CARVAJAL-MILLAN E, MICARD V, et al. *In vitro* degradation of covalently cross-linked Arabinoxylan hydrogels by bifidobacteria[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 76-82.
- [26] BAO Z J, WU J P, CHENG Y, et al. Effects of lipid peroxide on the structure and gel properties of ovalbumin[J]. Process Biochemistry, 2017, 57: 124-130.
- [27] 李琳, 孙一熙, 秦文, 等. 限制性酶解结合糖基化改性对大豆分离蛋白乳化性质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 1-11.
- LI L, SUN Y X, QIN W, et al. Effects of limited enzymolysis and glycosylation on emulsifying properties of soybean protein isolates[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 1-11.
- [28] CHUTINARA C, SAGIS L M C, LANDMAN J. Interfacial rheological properties of pepsin-hydrolyzed lentil protein isolate at oil-water interfaces[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110201.
- [29] LI K, LI Y, LIU C L, et al. Improving interfacial properties, structure and oxidative stability by ultrasound application to sodium caseinate prepared pre-emulsified soybean oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 131: 109755.