

金征宇教授主持“粮油食品的可持续加工”特约专栏文章之六

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.03.006

张艳秋, 许畅, 裴亚琼. 亚麻籽油浓度对 WP/KGM 协同稳定的类蛋黄酱稳定性影响[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(3): 41-47.

ZHANG Y Q, XU C, PEI Y Q. Impact of flaxseed oil concentration on stabilization of mayonnaise-like emulsion co-stabilized by WP and KGM[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(3): 41-47.

亚麻籽油浓度对 WP/KGM 协同稳定的类蛋黄酱稳定性影响

张艳秋, 许 畅, 裴亚琼✉

(武汉商学院 食品科技学院, 湖北 武汉 430056)

摘 要: 针对传统蛋黄酱的高胆固醇、高脂、高热量的问题, 以乳清蛋白(whey protein, WP)和魔芋葡甘聚糖(Konjac glucomannan, KGM)代替蛋黄、以亚麻籽油为油相, 制备无胆固醇、高 ω -3 不饱和脂肪酸的类蛋黄酱, 并探究亚麻籽油浓度对类蛋黄酱外观、微观粒径与结构、堆叠性、挤出成型等物理稳定性及流变特性的影响。结果表明: 随着油相浓度的增加, 液滴粒径从 30.8 μ m 降低至 17.1 μ m, 且液滴的均一性增加; 体系中液滴具有良好的分散性, 微观结构观察显示液滴间无絮凝现象; 油相浓度从 40% 增加到 80% 时, 类蛋黄酱样品的流变特性从流体性质(40% 时, $G' < G''$) 变为类固体凝胶性质(50%~80%, $G' > G''$), 粘度、弹性模量与粘性模量均随着油相浓度的增加而增加, 抵抗一定外力作用下形变及变形后恢复原状能力逐渐增强, 堆叠性、挤出成型亦随油相浓度的增加而增加。综上, 可通过调控类蛋黄酱中亚麻籽油的浓度, 制备较低粘度、流动性强的类蛋黄酱(油浓度 40%~60%) 应用于流动性和分散性要求高的酱汁类调味品中, 或制备较高粘度、堆叠性强的类蛋黄酱(油浓度 70%~80%) 应用于有成型、涂沫要求的调味品中。

关键词: 类蛋黄酱; 亚麻籽油; 魔芋葡甘聚糖; 流变特性

中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)03-0041-07

网络首发时间: 2023-04-26 17:22:08

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20230426.1441.012.html>

Impact of Flaxseed Oil Concentration on Stabilization of Mayonnaise-like Emulsion Co-stabilized by WP and KGM

ZHANG Yan-qiu, XU Chang, PEI Ya-qiong✉

(College of Culinary and Food Engineering, Wuhan Business University, Wuhan, Hubei 430056, China)

Abstract: Traditional mayonnaise has some dietary health problems such as high cholesterol, high fat and high calories. In this work, the mayonnaise-like emulsions with cholesterol-free and high omega-3 unsaturated

收稿日期: 2023-03-13

基金项目: 湖北省自然科学基金面上项目(2020CFB481); 大学生创新创业训练项目(202011654034)

Supported by: Hubei Provincial Natural Science Foundation of China (No. 2020CFB481); National Innovation and Entrepreneurship Training Program for Undergraduate (No. 202011654034)

作者简介: 张艳秋, 女, 1999 年出生, 本科, 研究方向为食品营养与安全。E-mail: 2334709975@qq.com.

通讯作者: 裴亚琼, 女, 1986 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为食品营养与功能配料。E-mail: peiyaqiong@wbu.edu.cn.

fatty acid were prepared with whey protein (WP) and Konjac glucomannan (KGM) instead of egg yolk, and linseed oil as the oil phase. The effect of flaxseed oil concentration on the physical stability, such as appearance, droplet size and microstructure, stacking and extrusion formability, and rheological properties of mayonnaise-like emulsions were investigated. The results showed that the droplets size was decreased from 30.8 μm to 17.1 μm and the uniformity of droplet-size increased with the increase of oil phase concentration. The microstructure observation showed there was no flocculation among droplets indicating a good dispersion. Moreover, when the oil phase concentration was increased from 40% to 80%, the rheological properties of the mayonnaise-like emulsion were changed from fluid properties ($G' > G''$ at 40%) to solid gel properties (50%~80%, $G' > G''$). The viscosity, elastic modulus and viscous modulus were all increased with the increase of oil phase concentration, suggesting the ability to resist deformation under a certain external force and to return to the original state after deformation was gradually enhanced. The stacking property and extrusion formability were also increased with the increase of oil phase concentration. In conclusion, by adjusting the concentration of flaxseed oil, mayonnaise-like emulsion(flaxseed oil concentration: 40%~60%) with low viscosity and strong fluidity could be prepared for use in sauces and condiments with high fluidity and dispersity requirements, or mayonnaise-like emulsion (flaxseed oil concentration: 70%~80%) with high viscosity and strong stacking property could be prepared for use in condiments with molding and coating requirements.

Key words: mayonnaise; flaxseed oil; Konjac glucoside; rheological property

蛋黄酱是西餐沙拉酱的基本调味酱之一，由食用油（70%~80%）、鸡蛋蛋黄（或全蛋液）、调味料等搅拌均质制作而成的水包油半固态乳化体系。随着方便食品、快餐行业的快速兴起以及中西方饮食习惯和膳食结构的融合，蛋黄酱研发与应用前景极大。传统蛋黄酱高胆固醇、高脂、高热量，易高发肥胖、心血管、糖尿病等慢病，且作为乳化剂的蛋黄存在沙门氏杆菌污染导致的致病风险问题^[1]，无法满足消费者对健康食品的需要。因此蛋黄酱的营养功能化与健康安全性改良已成为近年来的研究热点。

蛋黄酱配方改良主要集中于两方面：1）高胆固醇问题：降低蛋黄酱中胆固醇的含量，开发低胆固醇蛋黄酱、无胆固醇的类蛋黄酱。文献报导以小分子表面活性剂、淀粉、纤维素、黄原胶、动植物蛋白质、蛋白/多糖、多酚复合颗粒^[2]为乳化剂/乳化稳定剂，部分或全部替代蛋黄^[3]，制备品质稳定的低胆固醇或无胆固醇蛋黄酱。2）高脂问题：一方面降低蛋黄酱中油脂含量，以膳食纤维作为脂肪模拟物，补偿油脂降低导致的产品品质（粘度、口感、风味及外观）下降问题；另一方面用富

含有益于健康的多不饱和脂肪酸（polyunsaturated fatty acids, PUFAs）的油脂^[4]全部或部分代替饱和程度高的油脂，如鱼油、橄榄油、菜籽油、亚麻籽油^[5-8]，以降低饱和脂肪酸的比例，创新地研发稳定性与功能性兼具的蛋黄酱产品。

亚麻籽油富含必需 ω -3 不饱和脂肪酸 α -亚麻酸，含量高达 55% 以上，被认为具有营养功能之外的健康益处，包括预防心血管疾病、增强脂类代谢^[9-10]等。与传统普通食用油相比，以亚麻油（20%~40%）、亚麻籽提取物（5%~15%）取代部分油相制备高 ω -3 脂肪酸的蛋黄酱在感官特征上无显著差异，且因含有大量的酚酸、生育酚等天然抗氧化剂，具有较好的生化稳定性^[6,11]。油相组成及油相浓度对蛋黄酱流变特性、稳定性及感官属性均有影响^[3]；Mozafari 等^[12]以黄原胶/豆奶为乳化剂与乳化稳定剂、葵花油为油相，优化低脂胆固醇蛋黄酱配方，发现随着油相浓度增加，蛋黄酱从普通粘性流体（油相浓度<40%）转变为具有屈服应力和凝胶性质的厚奶油状类固体（油相浓度>40%）；壳聚糖/硬脂酸复合物稳定的蛋黄酱粒径随着油相浓度的增加而增大，但乳析指数

随着油相浓度增加而降低^[13]。本文在前期研究基础上,以乳清蛋白(WP)代替蛋黄,以魔芋葡甘聚糖(KGM)为稳定剂,研究亚麻籽油浓度(40%~80%)对类蛋黄酱微观粒径、产品外观、堆叠性、挤出成型及流变特性的影响规律。以期为功能性类蛋黄酱的研发提供一定的理论基础,并拓展亚麻籽油在乳化类调味酱中的应用。

1 材料与方法

1.1 实验原料

食品级亚麻籽油(FO):内蒙古锡林郭勒盟;乳清蛋白(WP):阿拉丁试剂;魔芋葡甘聚糖(KGM):湖北强森魔芋科技有限公司;白醋、芥末、白砂糖、食盐等调味品均为食品级:市售。

1.2 仪器与设备

美善品 TM5 多功能料理机:德国福维克集团;CX40 金相显微镜:宁波舜宁仪器有限公司;微米粒度仪、Kinexus2500 流变仪:英国马尔文仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 类蛋黄酱的制备

配制 30% WP 分散液于 4 °C 冰箱中静置 8 h,使蛋白质分子完全水合,备用。配制 5% KGM, 25 °C 磁力搅拌(600 r/min) 2 h 分散均匀后备用。

表 1 蛋黄酱配料组成

Table 1 The composition of mayonnaise (% w/w)

配料	蛋黄酱样品				
	40FO	50FO	60FO	70FO	80FO
油相: % FO	40	50	60	70	80
总水相:	60	50	40	30	20
30% WP	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7
5% KGM	6	6	6	6	6
白醋	3	3	3	3	3
糖	2	2	2	2	2
盐	2	2	2	2	2
超纯水	40.3	30.3	20.3	10.3	0.3

参考 Biller 等^[5]的方法适当修改,按表 1 配料比例制备不同 FO 浓度的类蛋黄酱样品。乳化前,将糖、盐溶解在白醋溶液中,与 KGM 分散液、WP 分散液及超纯水一起倒入料理机(WP 与

KGM 的终浓度分别为 2%、0.3%),在 1 000 rpm 转速下混合均匀。然后调整转速为 3 000 rpm,缓慢滴入油相,随着乳化程度增加,待样品变得粘稠并呈现白色乳化状态时,加速滴加油相,搅拌至 2 min 时暂停,将机器中挂壁的油脂刮下搅拌均匀,最后搅拌 1 min 即制备完成,待实验测试。类蛋黄酱样品与市售蛋黄酱(80%菜籽油为油相、1.1%全蛋液为乳化剂)进行对比分析。

1.3.2 类蛋黄酱粒径分析

使用激光光散射技术(Mastersizer 2000)测定乳液液滴的平均粒径及粒径分布,连续水相及分散相亚麻籽油的折射率分别为 1.33 和 1.474;测量在 25 °C 条件下进行,测试前超声分散,搅拌速度为 2 000 r/min。以体积平均粒径($D_{4,3}$)、表面积平均粒径($D_{3,2}$)表征体系液滴粒径大小。

1.3.3 类蛋黄酱的微观结构

取稀释后的一滴样品置于载玻片上,轻轻盖上盖玻片,避免产生气泡;使用光学显微镜观察类蛋黄酱微观结构并捕获清晰的图像。

1.3.4 类蛋黄酱外观质地与堆叠性观察

取类蛋黄酱样品置于载玻片上静置 5 min,观察其外形和油脂析出情况;同时用一次性胶头滴管吸取样品在载玻片上画“Z”字,静置 5 min 观察其堆叠情况和挤出状态。

1.3.5 类蛋黄酱的流变测定

采用马尔文流变仪测定类蛋黄酱的流变特性,测试包括静态剪切流变和动态频率扫描实验,测试参数设置如下:静态剪切扫描:剪切速率 0.1~100 S^{-1} ;动态频率扫描前对类蛋黄酱进行应变扫描,参数设置:频率 1.0 Hz、振幅应变(strain %) 0.01%~10%,确定样品的线性粘弹区(LVER)。动态频率扫描:振幅应变 0.5%、频率 10.0~0.1 Hz。测试在 25 °C 条件下进行,使用直径为 40 mm 锥板(4°),平板间距为 1 000 μm ,样品加载后,等待 2 min 回复后测试。

1.4 统计分析

所有实验至少进行三次,用 SPSS 20.0 和 Origin 2022 对数据进行统计分析与参数拟合,运用方差分析法(ANOVA)对数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 类蛋黄酱的粒径

如图 1 油相浓度对类蛋黄酱粒径的影响结果表明：不同油相浓度时，乳化体系粒径分布均表现为双峰分布，大的主峰位于较小粒径范围内，体积分数较小的肩峰位于 100 μm 处。KGM 的粘度效应与空间位阻效应，在样品制备过程中可能影响油相的分散，降低体系粒径分布均匀性。随着亚麻籽油浓度的增加，类蛋黄酱的体积平均粒径 ($D_{4,3}$) 与表面积平均粒径 ($D_{3,2}$) 均显著减小，油相浓度为 80% 时类蛋黄酱粒径最小， $D_{4,3}$ 与市售蛋黄酱的粒径无显著差异。这一结果与大多文献报道的乳状液体系液滴粒径会随着油相浓度的增加而增加的结论不同。乳化体系中液滴的粒径与油相浓度的关系非常复杂，主要受乳化剂浓度及乳化

方式（高能乳化与低能乳化）的影响。研究表明，在乳化方式一定的条件下，油相浓度对体系液滴粒径的影响分两种情况：1) 当乳化剂浓度较低时，油浓度增加，乳化剂不足以覆盖所有液滴表面，液滴趋向于聚结，以减少油滴的总比表面积，粒径变大；2) 当体系连续相中乳化剂足够时，随着油相浓度的增加，液滴比表面积增加（粒径变小），且液滴的均一性增加^[14]。课题组前期研究了乳化剂浓度对粒径的影响（亚麻籽油浓度为 70%），当 $WP > 1\%$ 时，WP 浓度对 $D_{4,3}$ 无显著影响（数据未提供）。间接说明本文中 2% WP 为第二种情况（即乳化剂浓度足够），解释了类蛋黄酱粒径随着油相浓度的增加而降低。且油相浓度较高时，液滴堆积更为密集，增加液滴间相互作用及网络结构形成趋势，可能导致类蛋黄酱的粘度与稳定性增加^[14]。

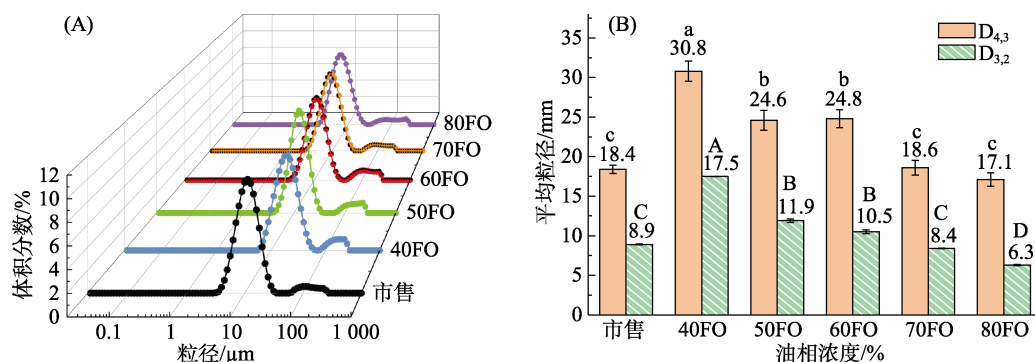


图 1 亚麻籽油浓度对类蛋黄酱粒径分布 (A)、体积平均粒径 ($D_{4,3}$) 与表面积平均粒径 ($D_{3,2}$) 的影响 (B)
Fig.1 Effects of flaxseed oil level on droplet size distribution (A), volume-weighted average droplet size ($D_{4,3}$) and Surface area droplet size of mayonnaise ($D_{3,2}$)(B)

2.2 类蛋黄酱微观结构观察

液滴大小是影响类蛋黄酱稳定的重要因素之一，能反应各因素对蛋黄酱物理稳定性的影响规律。粒径测试从整体角度分析体系粒径分布及液滴粒径大小情况；尽管显微镜观察视野具有局部性，但能直观地观察体系中液滴粒径形态、大小及是否存在絮凝等现象。亚麻籽油浓度对类蛋黄酱微观结构影响结果如图 2 所示：所有样品液滴分散性良好，无明显絮凝现象。随着油相浓度的增加，直观地观察到体系中液滴粒径逐渐减小，显微镜微观结构与 2.1 粒径测试结果一致。结果说明：以 WP 为乳化剂、KGM 为乳化稳定剂，可形成与市售蛋黄酱（含油量 80%）相似微观尺寸

结构的类蛋黄酱体系。

2.3 类蛋黄酱的外观质地与堆叠性观察

蛋黄酱的外观及可堆叠性能直接反应其质地、流动性、润滑性、支撑性、固型性等品质特征^[15]。如图 3A 所示，不同油相浓度的样品均呈乳白色均匀质地，无油水分离现象，直观的表明 KGM 与 WP 可协同代替蛋黄制备稳定的类蛋黄酱。40%~60% 油相浓度时，类蛋黄酱流动性较强，倒立后样品流向底部；油相浓度较高时，样品表现为类固态凝胶属性。270 天贮藏期内，尽管低油相浓度时出现乳析现象，但不同油相浓度样品均具有良好的稳定性，无油水分离现象（图 3B）。

类蛋黄酱样品挤出于载玻片静置 5 min 后均

出现明显的软塌现象,但随着油相浓度增加堆叠性有所提高。70%~80%油相浓度时,堆叠性明显

提高,呈类固体状态,油相浓度为 80%时堆叠性最强(图 3C)。

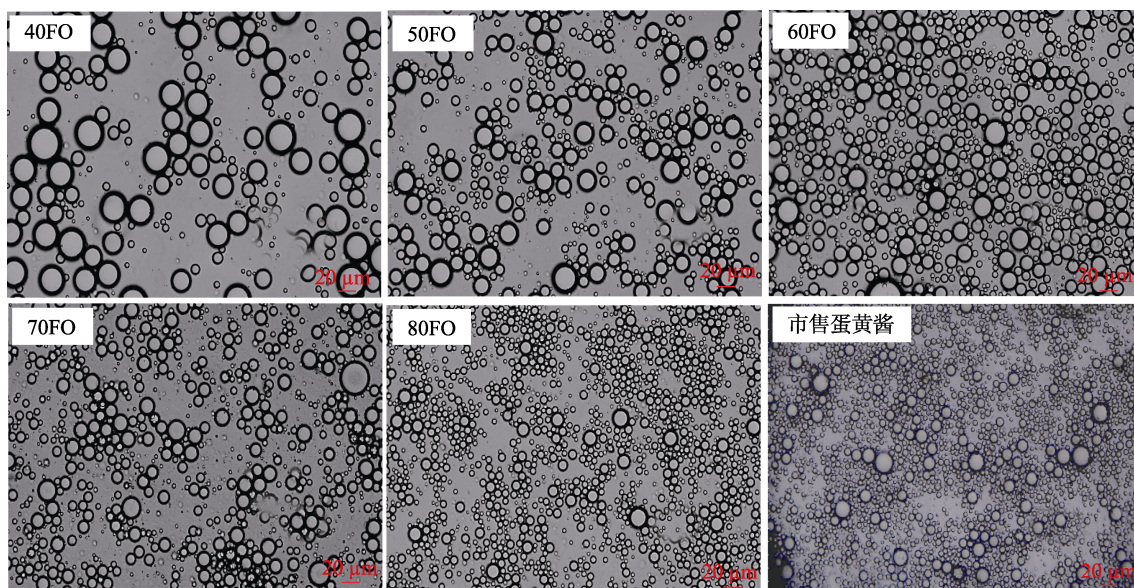


图 2 亚麻籽油浓度对类蛋黄酱微观结构的影响,标尺为 20 μm

Fig.2 Effects of flaxseed oil concentration on the microstructure of mayonnaise. Scale bar: 20 μm

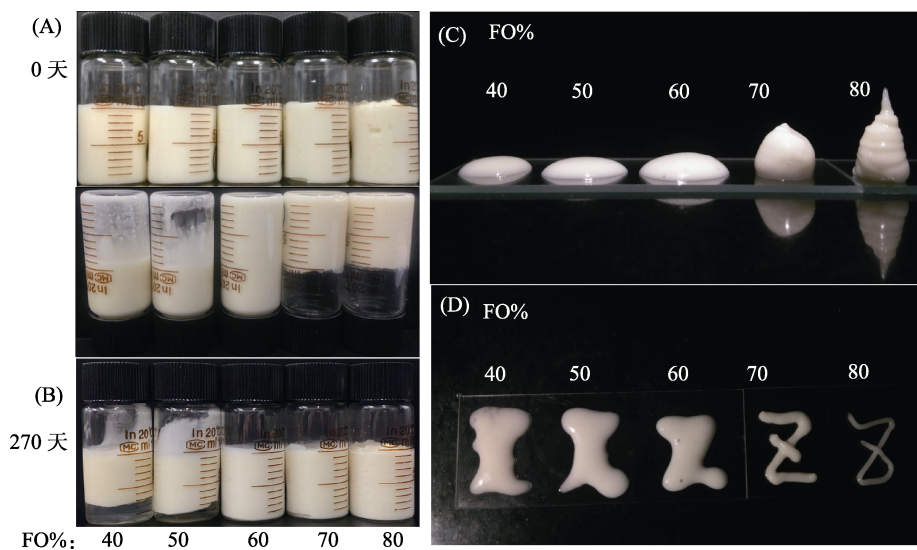


图 3 亚麻籽油添加量 (FO%) 对类蛋黄酱外观质地的影响

Fig.3 Effects of flaxseed oil concentration (FO%) on appearance and texture of mayonnaise

图 3D 中更直观的显示类蛋黄酱样品的挤出成型情况:油相浓度在 40%~50%时,样品挤出后具有一定流溢性,表现为在载玻片表面不能呈现“Z”字型,倾向于流动溢出;随着油相浓度增加,挤出成型效果逐渐提高。综上结果,油相浓度在一定范围内可调控类蛋黄酱样品的外观质地、堆叠性与挤出成型效果。低浓度油相的类蛋黄酱可应用于分散性要求高的酱汁类调味品中;而高油

相浓度的类蛋黄酱则可应用于具有涂抹性要求的调味品中,其良好的堆叠性及挤出成型性或可应用于 3D 打印食品中^[16]。

2.4 类蛋黄酱的流变特性

静态剪切流变结果如图 4A 所示,不同油相浓度的类蛋黄酱样品的粘度均随着剪切速率的增加而降低,表现为强烈的剪切稀化行为。剪切作用对蛋黄酱体系的微观结构产生一定程度的破

坏,破坏程度随着剪切速率的上升而增加,在高剪切速率时,体系微观结构被完全破坏,粘度趋于平衡^[17]。在剪切速率 $0.1\sim 100\text{ S}^{-1}$ 范围内,类蛋黄酱的粘度与剪切应力均随着油相浓度的增加而增加。油相浓度为 70% ($839.6\text{ Pa}\cdot\text{s}$)、80% ($3\,061\text{ Pa}\cdot\text{s}$) 时,样品初始粘度均明显高于市售

蛋黄酱 ($352\text{ Pa}\cdot\text{s}$),而油相浓度为 40%~60%时,样品初始粘度均远远低于市售蛋黄酱 ($1.663\sim 79.69\text{ Pa}\cdot\text{s}$)。这是因为油相浓度越高,液滴堆积更密集,液滴间相互作用更强,破坏体系网络结构的应力更大^[14]。此结果与前文中宏观外观和显微镜微观结构相验证。

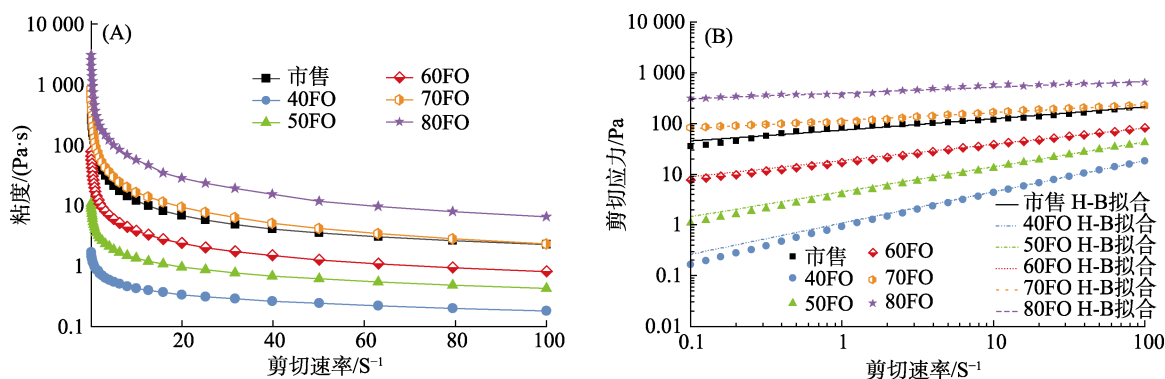


图 4 亚麻籽油浓度对类蛋黄酱流变特性的影响:表现粘度随剪切速率变化 (A),剪切应力随剪切速率变化 (B)

Fig.4 Effects of flaxseed oil concentration rheological characteristic of mayonnaise: the apparent viscosity curves dependent on shear rate (A), the change of shear strain dependent on shear rate (B)

对剪切速率与剪切应力作 Herschel-Bulkley 方程拟合 (H-B 拟合), 有较高的拟合吻合度, 剪切速率—剪切应力曲线与 H-B 拟合曲线相重叠 (图 4B), 拟合系数 R^2 均大于 0.95 (表 2)。类蛋黄酱样品的流体指数 (n) 均小于 1, 表明样品均为典型的假塑性流体。油相浓度增加, 稠度系数 K 增加, 样品粘度增大; 而随油相浓度的增加流体指数减小, 说明类蛋黄酱样品偏离流体程度越大, 越接近类固态的凝胶状性质^[18]。此拟合参数与前文中堆叠性及挤出呈型现象一致。

表 2 类蛋黄酱的剪切应变随速率变化曲线的

Herschel-Bulkley 方程拟合参数

Table 2 Herschel-Bulkley equation fitting parameters for mayonnaise of shear strain dependant on shear rate

蛋黄酱	$K/\text{Pa}\cdot\text{s}$	n	R^2
市售	65.69	0.25	0.98
油相浓度/%			
40	1.86	0.62	0.99
50	4.50	0.49	0.99
60	18.57	0.32	0.99
70	114.28	0.16	0.99
80	398.87	0.11	0.95

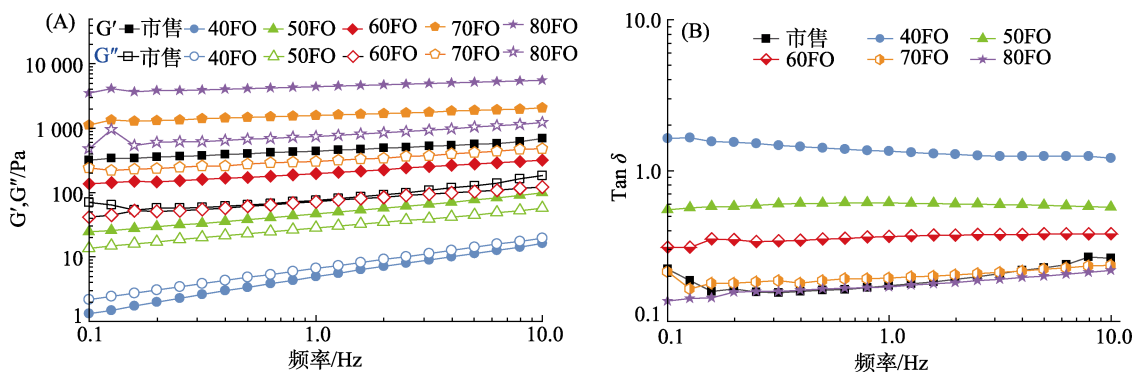


图 5 亚麻籽油浓度对类蛋黄酱流变特性的影响:弹性模量 (G') 与粘性模量 (G'') 随扫描频率变化 (A), 损耗角正切 ($\text{Tan } \delta$) 随扫描频率变化 (B)

Fig.5 Effects of flaxseed oil concentration rheological characteristic of mayonnaise: the change of elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') dependent on frequency(A), $\text{Tan } \delta$ dependent on frequency (B)

图 5 显示了油相浓度对类蛋黄酱体系动态粘弹性的影响。蛋黄酱样品的弹性模量 (G') 与粘性模量 (G'') 均随着油相浓度的增加而增加: 表观粘度增加, 粘性模量增加; G' 越高, 类蛋黄酱体系液滴间相互作用力越强, 在一定的外力作用下, 越不易发生形变^[19]。油相浓度为 40% 时, 体系的 $G'' > G'$, $\tan \delta (G''/G') > 1$, 体系的粘性属性占主导, 表现为流体的性质。与之相反, 油相浓度大于 40% 时, 样品的 G' 均大于 G'' , $\tan \delta < 1$, 且随着油相浓度的增加而逐渐降低。表明类蛋黄酱体系的弹性属性占主导, 体系具有类固体的凝胶性质。较低的 $\tan \delta$, 体系弹性更强, 抵抗一定外力作用下形变的能力更强, 且变形后回复原状的能力更强, 越利于产品流通过程的稳定性^[18]。

3 结论

以 KGM/WP 代替蛋黄的乳化作用、以富含 PUFAs 的亚麻籽油为油相, 制备无胆固醇、高 ω -3 不饱和脂肪酸的类蛋黄酱, 并研究油相浓度对类蛋黄酱物理稳定性及流变特性的影响。结果表明: 随着油相浓度增加 (40%~80%), 类蛋黄酱的液滴粒径逐渐变小, 微观结构图直观显示液滴粒径也随油相浓度增加而减小, 且液滴间无絮凝、分散性良好; 外观稳定性、堆叠性、挤出成型性均随着油相浓度的增加而增加。流变测试结果也表明类蛋黄酱样品的表观粘度、弹性模量 (G')、粘性模量 (G'') 均与油相浓度成正比, 油相浓度高于 40% 时, 表现为类固体的凝胶性质, 具有较好的物理稳定性。亚麻籽油富含 PUFAs, 且具有特殊的风味。因此, 以此为油相制备的类蛋黄酱的化学氧化稳定性、风味感官及消费者可接受度需进一步研究。

参考文献:

- [1] AKCICEK A, KARASU S, BOZKURT F, et al. Egg yolk-free vegan mayonnaise preparation from pickering emulsion stabilized by gum nanoparticles with or without loading olive pomace extracts[J]. ACS Omega, 2022, 7(30): 26316-26327.
- [2] HOSSEINI R, RAJAEI A. Potential pickering emulsion stabilized with chitosan-stearic acid nanogels incorporating clove essential oil to produce fish-oil-enriched mayonnaise[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116340.
- [3] TASLIKH M, MOLLAKHALILI-MEYBODI N, ALIZADEH A M, et al. Mayonnaise main ingredients influence on its structure as an emulsion[J]. Journal of Food Science and Technology,

- 2022, 59(6): 2108-2116.
- [4] MANN J I. Diet and risk of coronary heart disease and type 2 diabetes[J]. The Lancet, 2002, 360(9335): 783-789.
- [5] BILLER E, WASZKIEWICZ-ROBAK B, LONGO E, et al. Effects of the addition of spray-dried whey on the stability of fat-reduced mayonnaise-type emulsions during storage[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2018, 95(3): 337-348.
- [6] EL-WASEIF M, SAED B, FAHMY H, et al. Mayonnaise enriched with flaxseed oil: omega-3 fatty acids content, sensory quality and stability during the storage[J]. Foods, 2022, 11(15).
- [7] MIGUEL G A, JACOBSEN C, PRIETO C, et al. Oxidative stability and physical properties of mayonnaise fortified with zein electrosprayed capsules loaded with fish oil[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 263: 348-358.
- [8] DI MATTIA C, BALESTRA F, SACCHETTI G, et al. Physical and structural properties of extra-virgin olive oil based mayonnaise[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 764-770.
- [9] HOPKINS E J, CHANG C, LAM R S H, et al. Effects of flaxseed oil concentration on the performance of a soy protein isolate-based emulsion-type film[J]. Food Research International, 2015, 67: 418-425.
- [10] GOYAL A, SHARMA V, UPADHYAY N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(9): 1633-1653.
- [11] TEKIN Z H, KARASU S. Cold-pressed flaxseed oil by-product as a new source of fat replacers in low-fat salad dressing formulation: Steady, dynamic and 3-ITT rheological properties[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14650.
- [12] MOZAFARI H R, HOSSEINI E, HOJJATOLESAMI M, et al. Optimization low-fat and low cholesterol mayonnaise production by central composite design[J]. Journal of food science and technology, 2017, 54: 591-600.
- [13] HOSSEINI R S, RAJAEI A. Potential pickering emulsion stabilized with chitosan-stearic acid nanogels incorporating clove essential oil to produce fish-oil-enriched mayonnaise[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 241: 116340.
- [14] DAPČEVIĆ HADNAĐEV T, DOKIĆ P, KRSTONOŠIĆ V, et al. Influence of oil phase concentration on droplet size distribution and stability of oil-in-water emulsions[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2013, 115(3): 313-321.
- [15] 杨曦. 基于混合食品多糖体系的凝胶特性及调控机制[D]. 陕西师范大学, 2020.
- YANG X. Gel properties and regulation mechanism based on mixed food polysaccharide system[D]. Shaanxi Normal University, 2020.
- [16] 潘燕墨, 孙钦秀, 刘书成, 等. 小麦淀粉改善虾仁糜物料特性及其 3D 打印适应性[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 63-69.
- PAN Y M, SUN Q X, LIU S C, et al. Wheat starch improves the properties of shrimp surimi and its 3D printability[J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(21): 63-69.
- [17] KATSAROS G, TSOUKALA M, GIANNOGLOU M, et al. Effect of storage on the rheological and viscoelastic properties of mayonnaise emulsions of different oil droplet size[J]. Heliyon, 2020, 6(12): e05788.
- [18] PRIMACELLA M, WANG T, ACEVEDO N C. Characterization of mayonnaise properties prepared using frozen-thawed egg yolk treated with hydrolyzed egg yolk proteins as anti-gelator[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 529-536.
- [19] 宋子烨, 蒋将, 刘元法. 橄榄油与椰子油混油基对类蛋黄酱乳液流变及冻融稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 52-57.
- SONG Z Y, JIANG J, LIU Y F. Rheology and freeze-thaw stability of mayonnaise-like emulsion based on olive oil/coconut oil blends[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 52-57. 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。