

3种天然来源乳化剂在功能油脂乳液凝胶中的应用

陆姝欢¹, 刘芳¹, 胡雄¹, 熊文¹, 肖敏¹, 项威², 陈鹏³, 李翔宇^{1,2}

(1. 嘉必优生物技术(武汉)股份有限公司, 武汉 430073; 2. 武汉中科光谷绿色生物技术有限公司, 武汉 430075;
3. 中国农业科学院油料作物研究所, 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室,
农业农村部油料加工重点实验室, 武汉 430062)

摘要:旨在探索 $n-3$ 多不饱和脂肪酸功能油脂在水相体系中的创新应用, 以大豆磷脂、乳清蛋白、辛烯基琥珀酸淀粉 3 种天然来源乳化剂制备功能油脂乳液, 通过测定乳液加热前后的粒径、Zeta-电位、微观形态, 以及不同储存时间下的粒径、整体稳定性指数(TSI)和表观形态考察其热稳定性和储藏稳定性。同时, 以黄原胶和结冷胶分别对乳液包埋建立乳液水凝胶, 并测定水凝胶的流变学特性和质构特性。结果表明: 在 75 °C 加热处理 30 min 后, 3 种乳化剂制备的功能油脂乳液均具有一定的热稳定性, 其中乳清蛋白乳液的体积平均粒径($D_{[4,3]}$)最小, 其 Zeta-电位和微观形态均无明显变化, 热稳定性最佳; 随着储存时间(0~7 d)的延长, 乳清蛋白乳液的 $D_{[4,3]}$ 无明显变化, TSI 增长最缓, 表观形态未出现明显析出分层, 储藏稳定性最好; 在 65 °C 下, 3 种乳化剂乳液制备的水凝胶表观黏度均增加, 在 25 °C 下, 相比其他 2 种乳液, 乳清蛋白乳液对于水凝胶体系的储能模量(G')、损耗模量(G'')、硬度、黏附性的增加总体更具优势, 其中乳清蛋白乳液和黄原胶制备的水凝胶具有最高的 G' 、 G'' 以及硬度。综上, 乳清蛋白作为乳化剂负载功能油脂在水凝胶产品的创新应用中具有较高的应用价值及可实施性。

关键词: $n-3$ 多不饱和脂肪酸功能油脂; 乳清蛋白; 大豆磷脂; 辛烯基琥珀酸淀粉; 乳液; 水凝胶

中图分类号: TS201.4; TS201.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-7969(2025)03-0140-06

Application of 3 natural emulsifiers in functional oil emulsion gels

LU Shuhuan¹, LIU Fang¹, HU Xiong¹, XIONG Wen¹, XIAO Min¹,
XIANG Wei², CHEN Peng³, LI Xiangyu^{1,2}

(1. CABIO Biotech (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430073, China; 2. Wuhan Zhongke Optics Valley Green Biotechnology Co., Ltd., Wuhan 430075, China; 3. Key Laboratory of Oilseeds Processing of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China)

Abstract: To explore the innovative application of $n-3$ polyunsaturated fatty acid functional oil in the aqueous phase system, the functional oil emulsions were prepared with three emulsifiers from natural sources of soybean phospholipids, whey proteins, and octenylsuccinic acid starch. The thermal and storage stabilities of the emulsions were investigated by determining the particle size, Zeta-potential, microscopic morphology before and after heating, and the particle size, Turbiscan stability index (TSI), and apparent morphology at different storage time. The emulsion hydrogel was coated with xanthan gum

and gellan gum, and the rheological and texture properties of the hydrogel were determined. The results showed that the functional oil emulsions prepared with the three emulsifiers were thermally stable after heating at 75 °C for 30 min, among which the whey proteins emulsion had the smallest volume mean diameter ($D_{[4,3]}$), no obvious

收稿日期: 2023-11-07; 修回日期: 2024-11-11

基金项目: 国家现代农业产业技术体系(CARS-14); 国家自然科学基金项目(32072267)

作者简介: 陆姝欢(1982), 女, 高级工程师, 博士, 研究方向为生物化学(E-mail) sophia_lu@cabio.cn。

通信作者: 李翔宇, 高级工程师, 博士(E-mail) neal_lee@cabio.cn。

changes in Zeta - potential and microscopic morphology, and were the most thermally stable. With the prolongation of the storage time (0 - 7 d), there was no obvious change in the $D_{[4,3]}$ of the whey proteins emulsion, and the TSI growth was the slowest, the apparent morphology did not show obvious precipitation delamination, the storage stability was the best. The apparent viscosity of the hydrogel prepared by three functional oil emulsions increased at 65 °C. At 25 °C, the whey proteins emulsion was overall more favorable than the other two emulsions for improving the energy storage modulus (G'), loss modulus (G''), hardness and adhesion of the hydrogel system, with the hydrogels of whey proteins emulsion and xanthan gum having the highest G' , G'' and hardness. In conclusion, whey proteins as an emulsifier loaded with functional oils has high application value and implementability in the innovative application of finished hydrogel products.

Key words: $n - 3$ polyunsaturated fatty acid functional oil; whey proteins; soybean phospholipids; octenylsuccinic acid starch; emulsion; hydrogel

脂类是人体必需的三大宏量营养素之一,具有提供脂溶性维生素和必需脂肪酸等功能,其中, $n - 3$ 多不饱和脂肪酸($n - 3$ PUFA)中 $\alpha -$ 亚麻酸(ALA)、二十二碳六烯酸(DHA)、二十碳五烯酸(EPA)等在认知功能障碍、糖尿病、心脑血管疾病、血压生理健康等方面均表现出改善作用,因此其在营养健康方面受到较多的关注^[1-5]。但富含 $n - 3$ PUFA 的功能油脂易氧化,目前主要应用于软胶囊、微囊粉等,商业应用场景较为单一。目前,有学者针对油脂的模拟消化研究发现,食用基质中的油滴粒径应尽量小以保证脂质的完全消化,促进疏水活性成分的释放及溶解。另外,均质后较小的油体粒径可增强乳液中油脂的储藏稳定性及氧化稳定性,并加快脂肪酸在体内的释放^[6]。因此,对于 $n - 3$ PUFA 功能油脂进行物理分散制备乳化油滴颗粒、建立水相体系进行工业化应用,可提升其加工及健康效益属性^[7],而乳化剂的选择以及应用特性对于加工制品的品质至关重要。

大豆磷脂、乳清蛋白、辛烯基琥珀酸淀粉(简称“OSA 淀粉”,下同)作为脂质、蛋白质、碳水化合物 3 种天然来源的代表型乳化剂,已有成熟稳定的商业化原料供应及相关乳化应用研究^[8-11]。但天然来源乳化剂在实际商业应用中仍有一定限制,常需要配合合成类乳化剂以提升体系稳定性。凝胶是具有弹性特征的半固体,分为水凝胶及油凝胶。研究表明,凝胶化对于体系的物理稳定性、氧化稳定性以及递送稳定性等均有明显改善效应^[12-14],在食品工业中广泛应用于糖果、酸奶等产品。基于凝胶高度可塑性及稳定性,目前有探讨多层乳液体系对于油脂水相乳化体系稳定性及应用特性的影响研究,但主要基于实验室条件,而商业化凝胶型油脂产品多

以夹心形式进行应用,功能油脂乳液凝胶型产品缺乏工业化应用导向型研究。

基于此,本文从实际应用及清洁标签出发,在符合目前工业化生产设备条件的基础上,探讨大豆磷脂、乳清蛋白、OSA 淀粉 3 种天然来源乳化剂对于较高负载功能油脂在水相体系中的热稳定性和储藏稳定性的影响,并分别与黄原胶、结冷胶进行凝胶化应用,分析 3 种乳化剂对凝胶流变学特性和质构特性的影响,以期确立符合当前工业化生产条件的油脂乳液凝胶应用研究基础论据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

大豆磷脂,嘉吉公司;乳清蛋白,恒天然集团;OSA 淀粉,宜瑞安食品配料有限公司;DHA 藻油,嘉必优生物技术(武汉)股份有限公司;亚麻籽油,金龙鱼粮油食品股份有限公司;黄原胶,梅花生物公司;结冷胶,阜丰集团有限公司;尼罗红,上海麦克林生化科技股份有限公司;叠氮钠,国药集团化学试剂有限公司。

高速剪切均质机,德国 IKA 集团;高压均质机,美国安拓思纳米技术有限公司;纳米粒径分析仪、激光粒度分析仪,英国马尔文泛利有限公司;荧光倒置显微镜,德国莱卡公司;多重光散射仪,法国 Formulacion 仪器公司;动态剪切流变仪,英国 TA 仪器公司;质构仪,美国 FTC 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 乳液的制备

分别配制质量浓度分别为 3、2、2 g/100 mL 的大豆磷脂、乳清蛋白、OSA 淀粉水溶液,搅拌 4 h 后,将混合均匀的质量比为 1:1 的 DHA 藻油/亚麻籽油分别与上述 3 种乳化剂水溶液按质量比 2:8 混合,

在10 000 r/min 下高速剪切5 min 获得粗乳液后,再使用高压均质机在30 MPa 下循环均质2次,分别制得大豆磷脂乳液、乳清蛋白乳液和OSA 淀粉乳液。

1.2.2 乳液的热稳定性和储藏稳定性实验

将制备的乳液在75℃下加热搅拌30 min 后,测定相关指标,考察乳液的热稳定性。将制备的乳液装入干净且透光性良好的玻璃瓶中,室温下封瓶避光存放,分别在储存0、1、3、7 d 取样测定相关指标,考察乳液的储藏稳定性。

1.2.3 水凝胶的制备

分别配制质量分数为2% 的黄原胶和结冷胶,搅拌均匀后,于90~100℃加热搅拌30 min 制备凝胶溶液,以质量比1:1 将3种乳液分别与黄原胶、结冷胶凝胶溶液混合,在75℃保温搅拌30 min 后冷却备用。另分别制备质量分数为1% 的黄原胶及结冷胶胶液(不添加乳液,其余步骤同上)作为对照。

1.2.4 乳液相关指标测定

1.2.4.1 粒径、Zeta - 电位

粒径:参考 Cheng 等^[15] 的方法,利用激光粒度分析仪测定样品粒径。

Zeta - 电位:将乳液与5 mmol/L 磷酸盐(PBS)缓冲液(pH 7)以体积比1:250 混匀,再使用纳米粒径分析仪测量样品的 Zeta - 电位。

1.2.4.2 微观形态

参考 Cheng 等^[15] 的方法,将乳液用5 mmol/L PBS 缓冲液(pH 7)稀释100 倍,以尼罗红染料进行混合染色,取适量样品于载玻片上,在荧光倒置显微镜下40 倍进行观察。

1.2.4.3 整体稳定性指数(TSI)和表观形态

参考 Raikos 等^[16] 的方法,通过多重光散射仪测定乳液相分离的稳定性。将样品置于特定的检测瓶中扫描样品的高度,采集每次透射和反向散射数据,在25℃下测量反射光与透射光的比率,使用 Turbisoft 计算 TSI。同时肉眼观察储存期间样品的表观形态。

1.2.5 水凝胶相关指标测定

1.2.5.1 流变学特性

参考 Liu 等^[17] 的方法,使用动态剪切流变仪,惯量夹具(20 mm 的直径,0°的平板)进行样品的动态流变测量。在(25.0 ± 0.1)℃下测量样品剪切黏弹性的储能模量(G')和损耗模量(G''),测量角频率范围为1~100 rad/s。在(65.0 ± 0.1)℃下测定样品在0.001~5 s⁻¹剪切速率下的表观黏度。

1.2.5.2 质构特性

参考李原等^[18] 的方法测定样品的质构特性。

测定条件:选用 TA/2 柱形探头;目标模式为位移;测试前速度为2.00 mm/s,测试中速度和测试后速度均为1.00 mm/s;检测距离为20.00 mm。每组样品平行测定6次,结果取平均值。

1.2.6 数据分析

除特殊说明外,实验均重复3次,结果以“平均值 ± 标准偏差”表示。采用 SPSS 18 软件对实验数据进行显著性分析,使用 Origin 2024 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同天然来源乳化剂对乳液热稳定性的影响

2.1.1 对体积平均粒径($D_{[4,3]}$)和 Zeta - 电位的影响

加热前后3种乳液 $D_{[4,3]}$ 和 Zeta - 电位如图1所示。

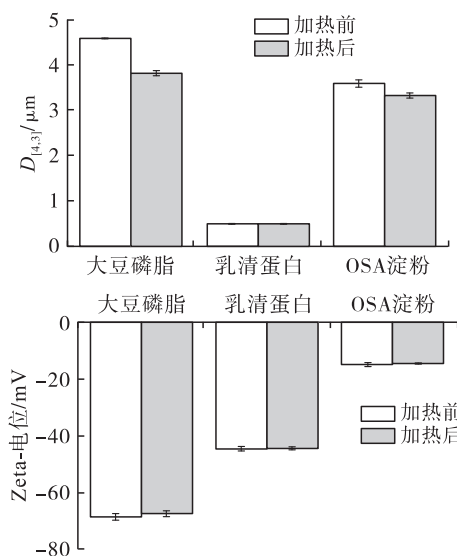


图1 加热前后3种乳液的 $D_{[4,3]}$ 和 Zeta - 电位

Fig. 1 $D_{[4,3]}$ and Zeta - potential of three emulsions before and after heating

由图1可知,加热前大豆磷脂、乳清蛋白、OSA 淀粉乳液的 $D_{[4,3]}$ 分别为4.59、0.40、3.60 μm ,加热后大豆磷脂乳液及OSA 淀粉乳液的 $D_{[4,3]}$ 出现略微降低趋势,而乳清蛋白乳液的 $D_{[4,3]}$ 基本不变。

Zeta - 电位可用于评价乳液形成的生物聚合物周围表面电荷变化,较高的 Zeta - 电位绝对值表明乳液液滴间的静电斥力较强,有助于乳液体系的稳定^[8]。由图1可知,加热前后,3种乳液的 Zeta - 电位变化不大,其中加热前的大豆磷脂乳液的 Zeta - 电位绝对值最高,为68.8 mV,OSA 淀粉乳液的最低,为14.9 mV,这与大豆磷脂较强的极性有关。

2.1.2 对微观形态的影响

加热前后3种乳液的微观形态如图2所示。

由图2可以看出,乳清蛋白乳液具有最小的粒径分布,而大豆磷脂乳液与OSA 淀粉乳液的微观粒

径较为接近且加热后两者的较小颗粒均出现一定的增加,这与 2.1.1 的 $D_{[4,3]}$ 结果一致。

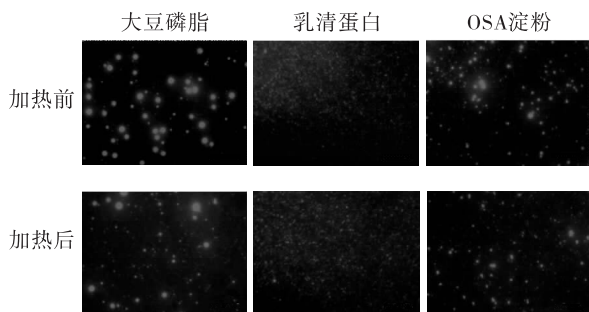


图 2 加热前后 3 种乳液的微观形态

Fig. 2 Microscopic morphology of three emulsions before and after heating

综上,在 75 °C 加热处理 30 min 后,3 种乳液的 Zeta - 电位及微观形态观察中未发现实质性的改变,大豆磷脂乳液及淀粉乳液的 $D_{[4,3]}$ 出现略微降低趋势,表明 3 种乳液在热加工中具有良好的稳定性,无破乳、絮凝等现象的发生,且乳清蛋白乳液在粒径方面表现出更显著的优势。乳液体系的稳定主要通过静电效应及空间位阻实现,乳化剂通常具有自乳化能力,在加热作用及机械力作用下可平衡吸附,即使是容易热变性的蛋白质包埋的油体在 90 °C 下仍保持相对较好的热稳定性,同时外来热及机械等能量的存在可能对乳液的分散稳定有一定的提升效应^[7-8,19]。

2.2 不同天然来源乳化剂对乳液储藏稳定性的影响

2.2.1 对 $D_{[4,3]}$ 、TSI 的影响

3 种乳液在不同储存时间下的 $D_{[4,3]}$ 、TSI 如图 3 所示。

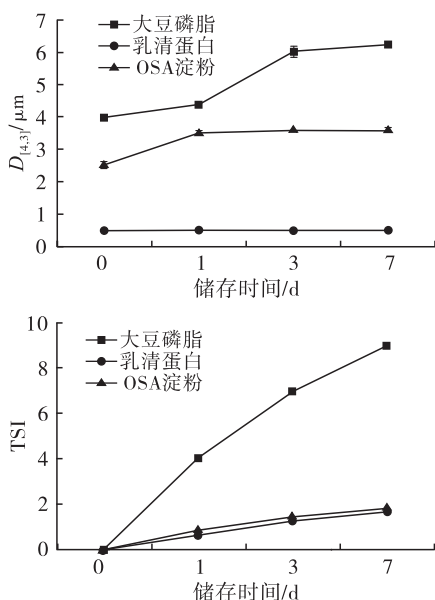


图 3 不同储存时间下 3 种乳液的 $D_{[4,3]}$ 和 TSI

Fig. 3 $D_{[4,3]}$ and TSI of three emulsions in storage experiment

由图 3 可知,随储存时间的延长,乳清蛋白乳液的 $D_{[4,3]}$ 较为稳定,大豆磷脂乳液及 OSA 淀粉乳液的 $D_{[4,3]}$ 均出现不同程度的增加,稳定性下降,这可能是由于乳清蛋白乳液具有更小的粒径,体系更稳定所致。由图 3 还可知,随储存时间的延长,乳清蛋白乳液及 OSA 淀粉乳液的 TSI 增加趋势较缓,而大豆磷脂乳液沉降较为明显,储存 7 d 后其 TSI 增加到 9。有研究同样观察到蛋白质类乳液在 30 d 的储存期内较为稳定,而磷脂乳液随储存时间的延长则出现明显的破乳、油脂析出分层现象^[20]。这是因为磷脂的分子质量相对较小,形成的界面膜机械强度较弱、柔韧性不佳,导致其构建的乳液体系稳定性较差^[21]。

2.2.2 对表观形态的影响

3 种乳液储存 7 d 时的表观形态如图 4 所示。



图 4 储存 7 d 时 3 种乳液的表观形态

Fig. 4 Apparent morphology of three emulsions stored for 7 d

由图 4 可知,大豆磷脂乳液在储存 7 d 时已发生较为明显的沉降分层现象,有一定油脂析出,而乳清蛋白乳液及 OSA 淀粉乳液与其 TSI 结果一致,未观察到明显的表观变化。

综上,在储藏期内乳清蛋白乳液的稳定性较好,而大豆磷脂乳液虽然具有最高的 Zeta - 电位绝对值,静电斥力较强,但其在储藏期内发生粒径增加和明显的分层,储藏稳定性较差。这是因为相对静电效应。粒径同样是影响乳液体系稳定性的重要因素,拥有更小粒径的乳液可以获得更好的物理稳定性表现,因而本研究条件下制备的大豆磷脂乳液的粒径较大,在重力沉降及较弱的界面强度等影响下易出现破乳分层,而乳清蛋白乳液相比大豆磷脂乳液表现出较低的 Zeta - 电位绝对值及显著的储藏稳定性表现优势,可能得益于空间位阻作用^[7,11,19]。

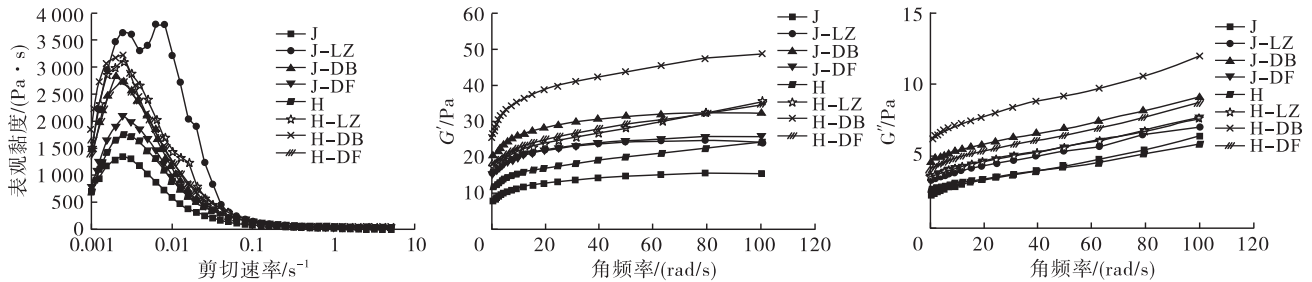
2.3 不同天然来源乳化剂制备的乳液对水凝胶的影响

2.3.1 对凝胶流变特性的影响

鉴于上述乳液体系具有一定的热稳定性,但储藏过程中出现逐步沉降情况,因此探讨上述乳液在

凝胶体系中的应用以提升其加工及可实施性。3种

乳液制备的水凝胶的流变学特性如图5所示。



注:J为结冷胶胶液;J-LZ、J-DB、J-DF分别为大豆磷脂、乳清蛋白、OSA淀粉乳液与结冷胶制备的水凝胶;H为黄原胶胶液;H-LZ、H-DB、H-DF分别为大豆磷脂、乳清蛋白、OSA淀粉乳液与黄原胶制备的水凝胶。下同

Note:J. Gellan gum gel; J-LZ, J-DB and J-DF are hydrogels prepared by soybean phospholipid, whey protein, OSA starch emulsion and gellan gum, respectively. H. Xanthan gum gel; H-LZ, H-DB and H-DF are hydrogels prepared from soybean phospholipid, whey protein, OSA starch emulsion and xanthan gum, respectively. The same below

图5 3种乳化剂乳液制备的水凝胶的流变学特性

Fig. 5 Rheological properties of hydrogels prepared by three emulsions

实验发现,不同乳化剂制备的乳液与不同凝胶多糖溶液共混后均可制备出较为均一的水凝胶体系。由图5可知,在模拟凝胶液管道流通温度65℃条件下,添加3种乳液后凝胶的表观黏度均发生不同程度的增加,其中大豆磷脂乳液对凝胶体系表观黏度影响最为明显。与初始表观黏度偏高的黄原胶相比,低表观黏度的结冷胶中加入大豆磷脂乳液成胶后可获得最高的表观黏度值,在实际生产中需要注意黏度变化对于物料管道流通的影响。

由图5还可知,与表观黏度结果类似,黄原胶的 G' 和 G'' 基本均高于结冷胶的,其中25℃下乳清蛋白乳液制备的水凝胶 G' 和 G'' 最高。 G' 和 G'' 代表黏弹性,表明乳清蛋白乳液制备的水凝胶可以获得相对更高的黏弹口感。3种乳液制备的水凝胶的 G' 大于 G'' ,表明本实验制得的是弱凝胶, $\tan \delta$ (G'' 与 G' 的比值)在0.1~1之间,表明所制备的凝胶具有弹性特性及吞咽安全性^[22-24]。因此,乳清蛋白乳液制备的水凝胶在热黏度及黏弹性方面更具加工及应用优势,应用质构性能提升较大。

2.3.2 对凝胶质构特性的影响

3种乳化剂乳液制备的水凝胶的硬度和黏附性如图6所示。

由图6可知,相较于其他2种乳液,乳清蛋白乳液制备的2种水凝胶的硬度最高,表明其对凝胶的硬度具有较明显的增强效应,该现象可能与乳清蛋白加热条件下受热诱导会产生凝胶化有关^[25]。由图6还可知,乳清蛋白乳液制备的2种水凝胶的黏附性也较强,且与结冷胶相比,黄原胶制备的水凝胶体系黏附性更强,这与黄原胶和结冷胶自身凝胶特性有关^[21]。综上,相比其他2种乳液,乳清蛋白乳

液更能增强凝胶的硬度及较强增加凝胶的黏附性,基于此,其可以增强乳液凝胶的流变及质构表现。综上,乳化剂及凝胶剂的选择均会对水凝胶体系的加工及应用特性产生影响。

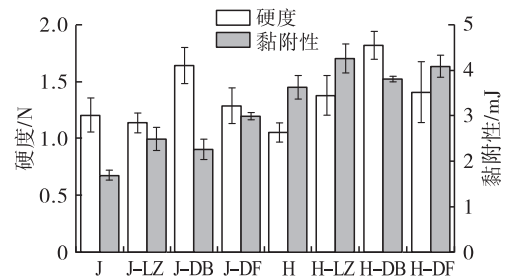


图6 3种乳化剂乳液制备的水凝胶的质构特性

Fig. 6 Texture properties of hydrogels prepared by three emulsions

3 结论

基于3种天然来源乳化剂对DHA藻油/亚麻籽油功能油脂负载应用的研究,发现在目前食品工业中具有较高可实现性的30 MPa均质压力的生产工艺条件下,3种乳化剂均可以制备出较为均一的功能油脂乳液,且在75℃加热30 min条件下未出现明显的理化指标及微观形态改变,具有一定的热加工适应性。在储藏过程中,乳清蛋白乳液及OSA淀粉乳液相对较为稳定,但在7 d内TSI仍有缓慢的增加趋势,因此进行凝胶体系的构建时需经过二次包埋固化处理以获得更高的体系理化稳定表现。以黄原胶及结冷胶2种具有代表性的天然多糖与3种乳液进行水凝胶体系的制备发现,乳清蛋白作为乳化剂制备的乳液凝胶在流变学及质构特性方面均表现较好。

综上,在负载功能油脂进行创新应用方面,以乳清蛋白作为乳化剂并进行凝胶化应用相比大豆磷脂

及 OSA 淀粉具有较优的应用性能。同时值得注意的是,蛋白质对于 pH 较为敏感,存在一定的应用限制,后续可酌情开展改善其应用特性的研究,如探讨蛋白质与磷脂交互应用,以及多酚对于蛋白质乳化体系应用特性的提升等。此外,也需要升级相关生产设备,以提高生产能力,进而提升产品品质。

参考文献:

- [1] 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量: 2023 版[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023.
- [2] JIAO J, LI Q, CHU J, et al. Effect of *n*-3 PUFA supplementation on cognitive function throughout the life span from infancy to old age: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Am J Clin Nutr*, 2014, 100(6): 1422-1436.
- [3] GUO X F, LI K L, LI J M, et al. Effects of EPA and DHA on blood pressure and inflammatory factors: A meta-analysis of randomized controlled trials[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2019, 59(20): 3380-3393.
- [4] ZHENG J S, HUANG T, YANG J, et al. Marine *n*-3 polyunsaturated fatty acids are inversely associated with risk of type 2 diabetes in Asians: A systematic review and meta-analysis[J/OL]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e44525 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044525>.
- [5] NATTO Z S, YAGHMOOR W, ALSHAERI H K, et al. *Omega*-3 fatty acids effects on inflammatory biomarkers and lipid profiles among diabetic and cardiovascular disease patients: A systematic review and meta-analysis[J/OL]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 18867 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54535-x>.
- [6] TAN Y, ZHOU H, MCCLEMENTS D J. Application of static *in vitro* digestion models for assessing the bioaccessibility of hydrophobic bioactives: A review[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2022, 122: 314-327.
- [7] 葛耀进, 黎雨浩, 彭盛峰, 等. 均质压力对亚麻籽油体乳液稳定性及体外消化的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 84-94.
- [8] 王君文, 韩旭, 李田甜, 等. 乳化剂稳定乳液的机理及应用研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 303-310.
- [9] 段子强, 秦晓鹏, 禹晓, 等. 乳清分离蛋白-南极磷虾油乳液理化稳定性和流变特性[J]. *食品科学*, 2023, 44(10): 15-21.
- [10] 王秋丽, 曾飒, 王立丹, 等. 均质条件对辛烯基琥珀酸淀粉酯制备的水油乳化体系粒径的影响研究[J]. *中国油脂*, 2018, 43(3): 144-148.
- [11] 程晨, 陈鹏, 王新天, 等. 开环异落叶松树脂酚的提取及其对乳液稳定性的影响研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(1): 91-96.
- [12] SHAKEEL A, FAROOQ U, IQBAL T, et al. Key characteristics and modelling of bigels systems: A review [J]. *Mat Sci Eng C Mater Biol Appl*, 2019, 97: 932-953.
- [13] CHO K, TARTÉ R, ACEVEDO N C. Development and characterization of the freeze-thaw and oxidative stability of edible rice bran wax-gelatin biphasic gels [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2023, 174: 114330 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114330>.
- [14] 张志慧, 李雨凝, 张光耀, 等. 不同质量比的火麻仁分离蛋白与黄原胶复合物对乳液凝胶稳定性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(17): 1-7.
- [15] CHENG C, YU X, MCCLEMENTS D J, et al. Effect of flaxseed polyphenols on physical stability and oxidative stability of flaxseed oil-in-water nanoemulsions [J/OL]. *Food Chem*, 2019, 301: 125207 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125207>.
- [16] RAIKOS V, DUTHIE G, RANAWANA V. Comparing the efficiency of different food-grade emulsifiers to form and stabilise orange oil-in-water beverage emulsions: Influence of emulsifier concentration and storage time[J]. *Int J Food Sci Technol*, 2017, 52(2): 348-358.
- [17] LIU W Y, FENG M Q, WANG M, et al. Influence of flaxseed gum and NaCl concentrations on the stability of oil-in-water emulsions[J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 79: 371-381.
- [18] 李原, 毕金峰, 易建勇, 等. 酸奶和乳清蛋白比例对冻干蓝莓酸奶品质影响研究[J]. *核农学报*, 2023, 37(8): 1578-1587.
- [19] 胡恩民, 姚秀宁, 许钰琴, 等. 超声耦合加热制备明胶稳定的水包油型乳液的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(6): 78-83.
- [20] 姚弘彬, 伍文彬, 陈涛, 等. 3 种水包油型 β -胡萝卜素乳液的稳定性和消化特性[J]. *中国油脂*, 2023, 48(6): 39-46.
- [21] WANG X, YU K, CHENG C, et al. Effect of sesamol on the physical and chemical stability of plant-based flaxseed oil-in-water emulsions stabilized by proteins or phospholipids [J]. *Food Funct*, 2021, 12(5): 2090-2101.
- [22] IRANI M, RAZAVI S M A, ABDEL-AAL E S M, et al. Viscoelastic and textural properties of canary seed starch gels in comparison with wheat starch gel [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 124: 270-281.
- [23] 杨榕, 臧一字, 吴鹏, 等. 多糖类食品胶体的功能特性及其在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(5): 283-292.
- [24] 苏翠馨, 魏世杰, 常明昌, 等. 富含蛋白质浓稠猴头菌乳的流变学及体外消化分析[J]. *食品科学*, 2024, 45(6): 24-31.
- [25] 李红娟, 刘婷婷, 邹璇, 等. 乳清蛋白-黄油乳液凝胶对低脂酸奶理化特性及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(7): 71-77.