

大豆分离蛋白与大豆磷脂比例对超声乳化 亚麻籽油乳液特性的影响

刘聪慧,王欣

(上海理工大学 医疗器械与食品学院,上海 200093)

摘要:适宜的乳化剂组成对于乳液的特性及稳定性有重要的影响。为超声乳化制备稳定的亚麻籽油乳液,以大豆分离蛋白(SPI)和 大豆磷脂(SLT)为乳化剂,亚麻籽油为油相制备 O/W 乳液,研究 SPI 与 SLT 比例对亚麻籽油乳液特性的影响,从乳液的微观结构、水合平均粒径、多分散指数、 ζ -电位、分层稳定性、表观黏度及低场核磁共振弛豫特性等方面进行了比较。结果表明,随着 SPI 与 SLT 比例从 3:1 减小至 1:3,乳液的水合平均粒径增大,多分散指数先减小后增大, ζ -电位绝对值、乳层析指数及表观黏度总体增大,且 T_2 弛豫图谱右移,体系中氢质子所受的束缚力减小。当 SPI 与 SLT 比例为 1:1 时,乳液的多分散指数最低(0.07 ± 0.07)且粒径呈单峰分布, ζ -电位绝对值较高,乳层析指数较低,同时体系中氢质子所受的束缚力较大,表观黏度较大,说明所形成的亚麻籽油乳液体系更为均匀、稳定。

关键词:亚麻籽油;大豆分离蛋白;大豆磷脂;O/W 乳液;特性

中图分类号:TS221;TS210.9 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2022)05-0041-07

Effects of ratio of soybean protein isolate to soybean lecithin on the properties of flaxseed oil emulsion prepared by ultrasound

LIU Conghui, WANG Xin

(School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The appropriate emulsifier composition has important influence on the properties and stability of the emulsion. In order to prepare stable flaxseed oil emulsion by ultrasound, O/W emulsion was prepared with soybean protein isolate (SPI) and soybean lecithin (SLT) as emulsifier, flaxseed oil as oil phase, and the effects of ratio of SPI to SLT on the properties of flaxseed oil emulsion were studied. The microstructure, hydrodynamic average diameter, polydispersity index, ζ -potential, creaming stability, apparent viscosity, and low-field NMR relaxation behavior were compared. The results showed that as the ratio of SPI to SLT decreased from 3:1 to 1:3, the hydrodynamic average diameter of the emulsion increased, the polydispersity index first decreased then increased, and the absolute value of ζ -potential, creaming index and apparent viscosity increased overall. The transverse relaxation time (T_2) distribution shifted to the right, and the binding force of hydrogen protons in the system decreased. When the ratio of SPI to SLT was 1:1, the polydispersity index of the emulsion was the lowest (0.07 ± 0.07) with a unimodal particle size distribution. The absolute value of ζ -potential was higher, and the creaming index was lower. At the same time, the binding force of hydrogen protons in the system was relatively stronger, and the apparent viscosity was relatively larger, indicating that the formed flaxseed oil emulsion system was more uniform and stable.

Key words: flaxseed oil; soybean protein isolate; soybean lecithin; O/W emulsion; property

收稿日期:2021-04-22;修回日期:2021-11-25

基金项目:上海市科委项目(18142201200)

作者简介:刘聪慧(1996),女,硕士研究生,研究方向为功能性食品(E-mail)15522675191@163.com。

通信作者:王欣,教授(E-mail)18918629281@126.com。

亚麻籽油富含 α -亚麻酸,有助于预防心血管疾病,减少肥胖,降低患癌风险^[1]。但亚麻籽油易氧化,在其应用中可能导致食品变质、异味及营养价值降低^[2]。O/W 乳液是解决食品工业中油脂稳定性问题的缓释输送体系之一,具有安全性高、制备简单等优点^[3],因此备受关注。

研究显示,乳化方法对乳液的特性及稳定性有重要影响^[4]。常用的乳化方法包括高速剪切、高压均质及超声乳化,其中高速剪切是低能乳化方法,而高压均质和超声乳化是高能乳化方法^[5]。近年来超声乳化受到广泛关注,其是基于超声波空化现象产生高温、高压、强剪切力和机械力^[6],在较少的表面活性剂下获得具有较好特性、更小液滴的乳液^[7]。该方法具有操作简单、成本低、安全、无毒等特点^[8]。研究表明,经过不同功率(150~450 W)及时间(12~24 min)的超声处理后,大豆分离蛋白-磷脂稳定的乳液的特性均有所改善^[9]。此外,乳化剂组成对乳液特性及稳定性也有重要影响。当前,应用具有优异乳化性能和生物相容性的天然乳化剂已成为趋势。其中,大豆磷脂(SLT)是一种应用广泛且营养价值丰富的天然乳化剂^[10]。而大豆分离蛋白(SPI)因其独特的功能特性在乳液的构建中发挥着重要的作用^[11]。研究表明,一定比例的 SPI 和 SLT 可以在 O/W 界面共存并产生相互作用,从而有助于乳液特性及稳定性的改善^[12]。目前,以 SPI 和 SLT 为乳化剂采用超声乳化制备乳液的研究多集中于对超声条件的优化,如:Su^[9]研究了不同超声功率和超声时间对特定比例 SPI 和 SLT 稳定的乳液特性和稳定性的影响;江连洲等^[13]以大豆蛋白-磷脂酰胆碱复合物为乳化相,葵花籽油为油相,利用超声技术制备乳液,通过响应面优化确定大豆蛋白-磷脂酰胆碱乳液最优超声条件。而对于以 SPI-SLT 稳定的亚麻籽油乳液特性的研究还相对较少,尤其是超声乳化过程中 SPI 与 SLT 比例对亚麻籽油乳液特性的影响更鲜有报道。

本研究以超声制备稳定的亚麻籽油乳液体系为目标,重点就 SPI 与 SLT 比例对亚麻籽油乳液的微观结构、水合平均粒径、多分散指数、 ζ -电位、分层稳定性、表观黏度及低场核磁共振(LF-NMR)弛豫特性的影响进行研究,以明确其影响规律,确定适宜的 SPI 与 SLT 比例,从而为超声制备稳定的亚麻籽油乳液提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

大豆分离蛋白,分散型,上海国药集团化学试剂

有限公司;大豆磷脂,生物技术级,上海麦克林股份有限公司;亚麻籽油,中粮集团有限公司;山梨酸钾,上海麦克林股份有限公司;其他的化学试剂均为分析纯。

JY92-IIDN 型超声波细胞破碎仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;BX-53 型荧光显微镜,日本 Olympus 公司;Nano Brook 173 Plus 型动态光散射仪,美国布鲁克海文仪器公司;Zetasizer Nano-ZS90 型粒度分析仪,英国马尔文仪器有限公司;DHR-2 型旋转流变仪,美国 TA 公司;NMI-20 型低场核磁共振分析仪,苏州纽迈科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SPI 和 SLT 分散液的制备

分别取 1.5、1.0、0.5 g SPI 加至 100 mL 去离子水中,另加入 50 mg 的山梨酸钾抑制微生物的生长,室温搅拌 2 h 后 4℃ 储存过夜,使其充分水化。调节 pH 至 7.0,4℃ 下以 8 000 r/min 离心 15 min,取上清液,即得 SPI 分散液。向上述 SPI 分散液中分别加入 0.5、1.0、1.5 g 的 SLT,搅拌 2 h 使其完全水化,制得 SPI 与 SLT 总量为 20 mg/mL(以去离子水体积计),SPI 与 SLT 比例分别为 3:1、1:1、1:3 的分散液。另外,按上述方法分别制备纯 SPI 分散液和纯 SLT 分散液。

1.2.2 超声制备亚麻籽油乳液

将 2 mL 亚麻籽油缓慢加入 18 mL 的分散液中,置于冰浴中。将超声波细胞破碎仪(最大输出功率 900 W,操作频率 22 kHz)的钛探头(直径 0.686 cm)浸入液面下 1 cm 处,设定超声功率 400 W,超声时间 6 min(超声时间 4 s,间隔时间 6 s),制备 O/W 乳液,4℃ 储存。

1.2.3 微观结构观察

采用荧光显微镜观察乳液的微观结构。取 10 μ L 乳液缓慢滴于载玻片上,轻盖盖玻片,防止液滴破裂。在 100 倍油镜下观察(比例尺 10 μ m)并采集图像,使用 Cell Sens 软件观察液滴形态。

1.2.4 粒径的测定

采用动态光散射仪测定乳液的水合平均粒径和多分散指数。分散相的折光指数和吸光度分别设定为 1.480 和 0.001,连续相的折光指数设定为 1.330。为避免多重散射现象,测定前用去离子水将乳液样品稀释 50 倍。在 25℃ 下进行测试。

1.2.5 ζ -电位的测定

使用粒度分析仪测定乳液的 ζ -电位。为避免多重散射现象,测定前样品用去离子水稀释 50 倍。取 1 mL 稀释样品加入电位池(DTS1070)中,在

25 °C下平衡 2 min 后进行测定。

1.2.6 分层稳定性的测定

取新鲜乳液样品于 5 mL 透明玻璃瓶中,旋紧玻璃盖以防样品蒸发。室温避光储存,在储存 3、6、12、21 d 和 30 d 观察乳液分层情况。用乳层析指数 (I_C) 表征分层程度,计算公式如下。

$$I_C = \frac{H_S}{H_E} \times 100\% \quad (1)$$

式中: H_S 为下层水层的高度; H_E 为乳液总高度。

1.2.7 表观黏度的测定

使用旋转流变仪及其配套的同轴圆筒夹具(直径 30 mm,间隙 4 000 μm) 在 $(25.0 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 下测定乳液的表观黏度。取 15 mL 乳液于测试台中,在剪切速率 $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ 范围内测定,用 TRIOS 软件进行数据采集。

1.2.8 LF-NMR 分析

采用低场核磁共振分析仪(磁场强度 0.53 T,质子共振频率 22 MHz)分析乳液的横向弛豫行为。取 2.5 mL 乳液至核磁试管中(直径为 15 mm), 32°C 预热 10 min 后检测。选择 CPMG 序列进行横向弛豫时间 (T_2) 检测。具体参数:重复扫描次数

(NS)4 次,回波个数(Echo Count)6 000,重复采样等待时间(TW)2 000 ms,采样频率(SW)250 kHz。利用配套的 T-Invfit 反演拟合软件对弛豫衰减曲线进行拟合,得到样品的 T_2 信息,如各峰的起始弛豫时间 ($T_{2i}, i = 1, 2, \dots, n$),绝对峰面积 ($A_{2i}, i = 1, 2, \dots, n$),峰面积比例 ($R_{2i}, i = 1, 2, \dots, n$),单组分弛豫时间 (T_{2w}) 等。

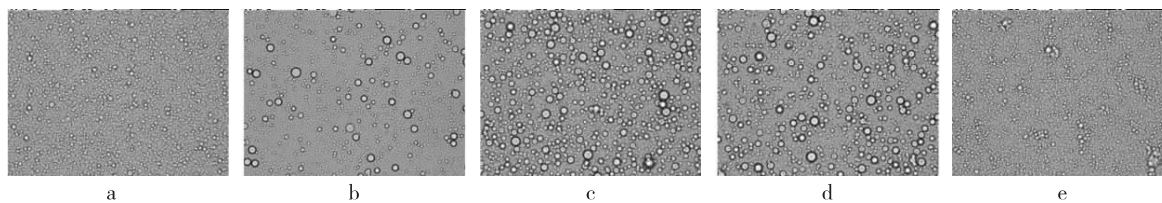
1.2.9 统计学分析

所有实验重复 3 次,结果表示为“平均值 \pm 标准差”。利用 SPSS 21.0 统计分析程序对数据进行 ANOVA 方差分析,采用 Duncan 多重极差检验评价差异的显著性 ($P < 0.05$ 为显著性差异)。采用 Origin 8.0 软件进行数据、图表及图谱分析处理。

2 结果与讨论

2.1 乳液的微观结构及粒径

乳液的液滴大小易影响乳液的物化特性,与乳液的失稳现象如相分离、液滴聚集和油上浮等密切相关^[14]。SPI 与 SLT 比例对乳液微观结构的影响见图 1,SPI 与 SLT 比例对水合平均粒径及多分散指数的影响见表 1。



注:a. 仅添加 SPI;b. SPI 与 SLT 比例 3:1;c. SPI 与 SLT 比例 1:1;d. SPI 与 SLT 比例 1:3;e. 仅添加 SLT。

图 1 SPI 与 SLT 比例对乳液微观结构的影响

表 1 SPI 与 SLT 比例对乳液水合平均粒径及多分散指数的影响

SPI 与 SLT 比例	水合平均粒径/ μm	多分散指数
仅添加 SPI	0.48 ± 0.03^a	0.26 ± 0.01^b
3:1	0.68 ± 0.01^b	0.12 ± 0.05^a
1:1	0.75 ± 0.06^c	0.07 ± 0.07^a
1:3	0.88 ± 0.02^d	0.14 ± 0.03^a
仅添加 SLT	0.48 ± 0.01^a	0.29 ± 0.03^b

注:表中不同的小写字母表示同列数据有显著性差异 ($P < 0.05$)。

由图 1 可知,与仅添加 SPI 或 SLT 相比,SPI 与 SLT 比例在 3:1 ~ 1:3 时所形成的乳液液滴尺寸较大。由表 1 可知,仅添加 SPI 或 SLT 时,乳液的水合平均粒径较小,为 0.48 μm ,但其粒径分布图(图 2)均呈双峰分布,且其多分散指数(PDI)较高,分别为 0.26 和 0.29。当 SPI 与 SLT 比例为 3:1 ~ 1:3 时,乳液的水合平均粒径在 0.68 ~ 0.88 μm 之间,且

随 SPI 与 SLT 比例的减小,乳液的水合平均粒径增大;乳液的粒径分布图(见图 2)均呈单峰分布,且 PDI 较低,为 0.07 ~ 0.14。这是因为当 SPI 和 SLT 共同作为乳化剂时,两者可以在 O/W 界面共存并产生疏水相互作用与静电相互作用,使乳液中液滴分布更均匀^[11]。当 SPI 与 SLT 比例为 1:1 时,乳液的 PDI 最低,达到 0.07,表明其具有更好的均匀性。

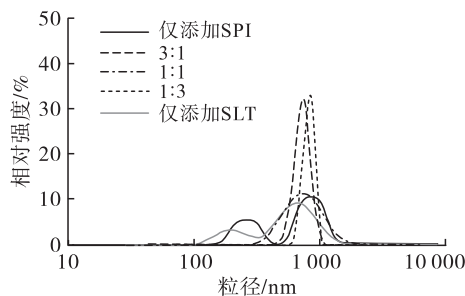
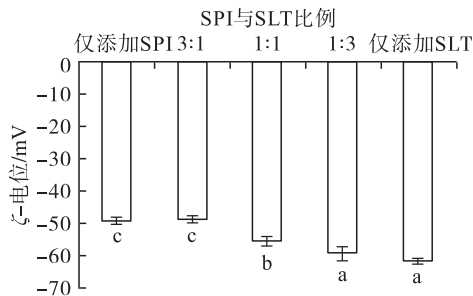


图 2 SPI 与 SLT 比例对乳液粒径分布的影响

2.2 乳液的 ζ -电位

ζ -电位是表征乳液稳定性的一个重要指标,其绝对值越高,粒子间的排斥力越大,反之粒子间越倾向于相互吸引而发生聚集^[15]。SPI与SLT比例对乳液 ζ -电位的影响如图3所示。



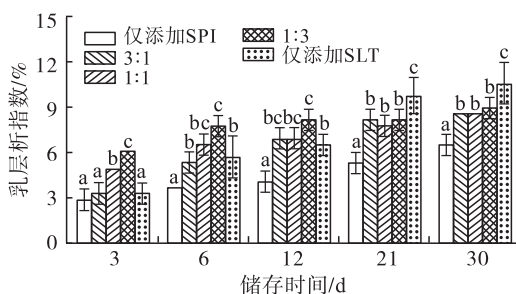
注:不同的小写字母表示有显著性差异($P < 0.05$)。

图3 SPI与SLT比例对乳液 ζ -电位的影响

由图3可知,所有样品的 ζ -电位均为负值,表明液滴周围存在阴离子^[6]。随着SPI与SLT比例的减小, ζ -电位绝对值增加,且总体大于仅添加SPI的。这可能是由于SPI与SLT之间的相互作用改变了蛋白质表面的电荷分布。研究表明,SPI与SLT之间的疏水相互作用可以打开蛋白质构象,暴露出更多带负电的残基,粒子间的静电斥力增强,使 ζ -电位的绝对值升高^[16]。增加的静电斥力可以破坏蛋白质聚集体,提高乳液的稳定性。而当仅添加SLT时乳液电位绝对值较不同SPI与SLT比例乳液的高,这可能与磷脂中含有带负电荷的磷酸基团相关^[17]。

2.3 乳液的分层稳定性

乳层析指数表示油滴在乳液中从水相聚集和分散的程度,较低的乳层析指数意味着乳液更为稳定^[9]。不同储存时间下SPI与SLT比例对乳液乳层析指数的影响如图4所示。



注:不同小写字母表示相同储存时间下不同SPI与SLT比例乳液间有显著性差异($P < 0.05$)。

图4 不同储存时间下SPI与SLT比例对乳液乳层析指数的影响

由图4可知,在30 d的储存过程中,各乳液体系乳层析指数均增加。储存3~12 d时,随SPI与

SLT比例减小,乳液的乳层析指数增加,储存3 d时,当SPI添加量从仅添加SPI下降至SPI与SLT比例1:3时乳层析指数从2.85%显著增加至6.10%,表明SPI与SLT比例为1:3时,乳液的分层稳定性最差,且差于仅添加SPI或SLT的。储存21 d时,随着SPI与SLT比例的减小,乳液的乳层析指数变化不大,且仅添加SLT稳定的乳液的乳层析指数显著大于其他组,乳液稳定性最差。整体而言,仅添加SPI时乳液的乳层析指数最低。已有研究表明^[18],表面活性剂稳定的乳液容易絮凝和聚集,而Pickering乳液具有独特的优势抵抗絮凝和聚集。另一方面,尽管磷脂与大豆蛋白之间的疏水和静电相互作用形成的界面吸附膜有助于提高乳液的稳定性^[19],但二者之间的比例对体系稳定性有重要影响。当体系中SLT过量时,有可能产生竞争吸附效应,过量的SLT取代O/W界面上的SPI,导致其聚集,从而使乳液稳定性下降。

2.4 表观黏度

作为乳液稳定性的重要表征方法之一,表观黏度主要取决于液滴之间的相互作用,且能反映蛋白质之间及蛋白质与水的相互作用^[20]。SPI与SLT比例对乳液表观黏度的影响如图5所示。

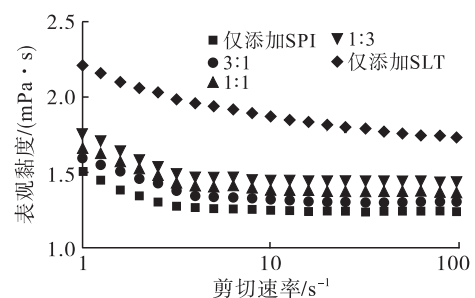


图5 SPI与SLT比例对乳液表观黏度的影响

由图5可知,在剪切速率为1~100 s⁻¹的范围内,5种乳液的表观黏度均维持在10 mPa·s以下,表明其黏度较低、质地偏稀、流动性大。在1~5 s⁻¹的低剪切速率时,5种乳液表观黏度随剪切速率的增加而降低,表现出剪切变稀的非牛顿流体特征,这可能是由于在低剪切速率下,乳液发生变形并被瓦解;在剪切速率大于5 s⁻¹时,5种乳液表观黏度保持稳定,表现为牛顿流体特征,这可能是由于剪切速率增加时,乳液瓦解速率与絮体再形成速率相当,这与王中江等^[21]报道的趋势类似。另外,随SPI与SLT比例下降,乳液的表观黏度上升,这可能与体系中黏度较大的SLT量增加,从而增加了体系的黏度有关。

2.5 乳液的 LF-NMR 弛豫行为

LF-NMR 弛豫特性可反映乳液体系中氢质子的运动状态^[22]。其中, T_2 对氢质子运动敏感, 是反映乳液形成过程中水和油分子运动的一个重要特征^[23]。氢质子受到的束缚越大, T_2 越短^[24]。乳液衰减曲线可反映样品的衰减速度, 单组分弛豫时间 (T_{2w}) 用于反映样品的总体弛豫分布, 相当于最大信号衰减到 63% 时所需的时间^[25]。SPI 与 SLT 比例对乳液衰减曲线的影响如图 6 所示。

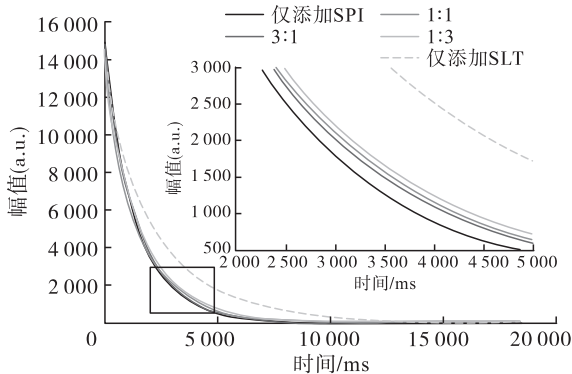


图 6 SPI 与 SLT 比例对乳液衰减曲线的影响

由图 6 可知, 当 SPI 与 SLT 比例在 3:1 ~ 1:3 时, 5 种乳液的衰减过程有明显区别。当仅添加 SPI 时, 乳液的衰减曲线具有最大的衰减速率且最先到达衰减终点。总体来说, 当 SPI 与 SLT 比例在 3:1 ~ 1:3 时, 随 SPI 与 SLT 比例减小, 乳液的衰减过程逐渐变慢。而仅添加 SLT 时, 乳液的衰减过程明显减缓, 到达衰减终点所需时间最长。这也反映在 T_{2w} 上, 见表 2。

表 2 不同 SPI 与 SLT 比例的乳液的 T_{2w}

SPI 与 SLT 比例	T_{2w}/ms
仅添加 SPI	1 070
3:1	1 150
1:1	1 194
1:3	1 240
仅添加 SLT	1 783

由表 2 可以看出, 5 种乳液的 T_{2w} 介于 1 070 ~ 1 783 ms 之间, 且随着 SPI 与 SLT 比例的减小, 乳液的 T_{2w} 逐渐增加, 表明体系中氢质子所受束缚力逐渐减小。SPI 可以在 O/W 界面形成膜, 从而限制氢质子的自由度^[26], 随 SPI 与 SLT 比例减小, O/W 界面上覆盖的蛋白颗粒减少, 其对水和油中氢质子的束缚力降低, 因此 T_{2w} 相对增大。

SPI 与 SLT 比例对亚麻籽油乳液多组分弛豫图谱的影响如图 7 所示, 图中每个弛豫峰代表一

种状态的氢质子, 可用于反映特定氢质子的弛豫信息。

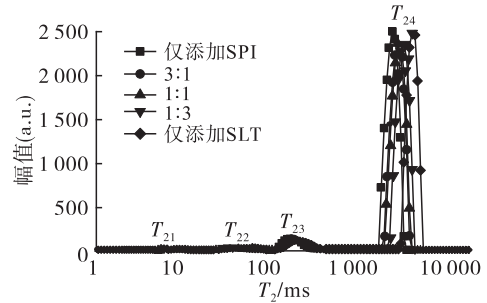


图 7 SPI 与 SLT 比例对乳液多组分弛豫图谱的影响

由图 7 可知, 当仅添加 SPI 时, 乳液的多组分弛豫图谱分别在 19.34 ms (T_{22} 峰的起始时间)、77.53 ms (T_{23} 峰的起始时间) 和 1 084.37 ms (T_{24} 峰的起始时间) 左右出现了 3 个弛豫峰, 说明体系中存在 3 种不同类型的氢质子。然而, 仅添加 SLT 时, 乳液的多组分弛豫图谱在 5.94 ms 左右 (T_{21} 峰的起始时间) 又出现了一个新的弛豫峰。当 SPI 与 SLT 比例在 3:1 ~ 1:3 之间时, T_{21} 峰也出现在相应的多组分弛豫图谱上, 但峰面积比较小。已有研究表明, 该弛豫峰与磷脂双分子层中的氢质子有关^[27]。在其他 3 个弛豫峰中, T_{24} 占比最大, 该峰与水中的氢质子响应有关^[28]。而 T_{22} 和 T_{23} 代表油中的氢质子^[19]。随 SPI 与 SLT 比例减小, T_{23} 和 T_{24} 右移, 这可能是由于对 SPI 稳定的 Pickering 乳液而言, 通过 SPI 固体颗粒覆盖在界面上形成膜来稳定 O/W 界面时, 分子间的相互作用较强, 氢质子的移动和旋转空间相对较小, 氢质子自由度较低, 因此其 T_2 较短。而 SLT 作为一种小分子表面活性剂, 主要通过降低 O/W 界面张力形成乳液^[29], SLT 为氢质子提供了更大的旋转和运动空间, 因此其 T_2 较长。因此, 乳液体系中的 SLT 越多, 氢质子所受的束缚力越弱, 其 T_2 越长。

3 结论

对于超声乳化制备的亚麻籽油乳液, SPI 与 SLT 比例对亚麻籽油的乳液特性有明显影响。随 SPI 与 SLT 比例减小, 乳液的水合平均粒径增大, 多分散指数先减小后增大, ζ -电位绝对值、表观黏度以及乳层析指数总体增加, T_2 弛豫图谱右移。当 SPI 与 SLT 比例为 1:1 时, 乳液体系的多分散指数最低 (0.07 ± 0.07) 且粒径呈单峰分布, ζ -电位绝对值较高, 乳层析指数较低, 体系中氢质子所受的束缚力较大, 表观黏度较大, 得到的亚麻籽油乳液体系相对更均匀、稳定。研究结果可为乳液体系的构建提供一定的参考。

参考文献:

- [1] BOWEN K, HARRIS W, KRIS - ETHEERTON P. *Omega* - 3 fatty acids and cardiovascular disease: are there benefits? [J]. *Curr Treat Options Cardiovasc Med*, 2016, 18(11):69 - 79.
- [2] DICKINSON E. Strategies to control and inhibit the flocculation of protein - stabilized oil - in - water emulsions [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 96:209 - 223.
- [3] SHI A M, FENG X Y, WANG Q, et al. Pickering and high internal phase Pickering emulsions stabilized by protein - based particles: a review of synthesis, application and prospective [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 109: 106117 [2021 - 04 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106117>.
- [4] LIU F, TANG C H. Emulsifying properties of soy protein nanoparticles: influence of the protein concentration and/or emulsification process [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62 (12): 2644 - 2654.
- [5] TAHA A, AHMED E, ISMAIEL A, et al. Ultrasonic emulsification: an overview on the preparation of different emulsifiers - stabilized emulsions [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 105: 363 - 377.
- [6] MCCLEMENTS D. Emulsion design to improve the delivery of functional lipophilic components [J]. *Annu Rev Food Sci Technol*, 2010(1): 241 - 269.
- [7] KENTISH S, ASHOKKUMAR M. The physical and chemical effects of ultrasound [M]//FENG H, BARBOSA - CANOVAS G, WEISS J. *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*. New York: Springer, 2011:1 - 12.
- [8] SORIA A C, VILLAMIEL M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2010, 21(7):323 - 331.
- [9] SUI X N. Impact of ultrasonic treatment on an emulsion system stabilized with soybean protein isolate and lecithin: its emulsifying property and emulsion stability [J]. *Food Hydrocolloid*, 2016, 63:727 - 734.
- [10] MATSUMIYA K, TAKAHASHI W, INOUE T, et al. Effects of bacteriostatic emulsifiers on stability of milk - based emulsions [J]. *J Food Eng*, 2010, 96(2): 185 - 191.
- [11] WANG S J, SHI Y, TU Z C, et al. Influence of soy lecithin concentration on the physical properties of whey protein isolate - stabilized emulsion and microcapsule formation [J]. *J Food Sci Eng*, 2017, 207: 73 - 80.
- [12] BOS M A, VLIET T V. Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review [J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2001, 91(3): 437 - 471.
- [13] 江连洲, 寻崇荣, 刘军, 等. 大豆蛋白 - 磷脂酰胆碱纳米乳液超声制备工艺 [J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 136 - 147.
- [14] 李杨, 孙禹凡, 谢凤英, 等. 不同超声条件重组油体乳液制备及其稳定性研究 [J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11):380 - 386.
- [15] MA X B, YAN T Y, HOU F R, et al. Formation of soy protein isolate (SPI) - citrus pectin (CP) electrostatic complexes under a high - intensity ultrasonic field: linking the enhanced emulsifying properties to physicochemical and structural properties [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2019, 59: 104748 [2021 - 04 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104748>.
- [16] KWAAMBWA H, RENNIE A. Interactions of surfactants with a water treatment protein from *Moringa oleifera* seeds in solution studied by Zeta - potential and light scattering measurements [J]. *Biopolymers*, 2012, 97: 209 - 218.
- [17] ZOU H N, ZHAO N, LI S H, et al. Physicochemical and emulsifying properties of mussel water - soluble proteins as affected by lecithin concentration [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 163: 180 - 189.
- [18] FRELICHOWSKA J, BOLZINGER M A, VALOUR J P, et al. Pickering W/O emulsions: drug release and topical delivery [J]. *Int J Pharm*, 2009, 368(1): 7 - 15.
- [19] LI J F, LI Y T, GUO S T. The binding mechanism of lecithin to soybean 11S and 7S globulins using fluorescence spectroscopy [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2014, 23(6): 1785 - 1791.
- [20] CHA Y, SHI X, WU F, et al. Improving the stability of oil - in - water emulsions by using mussel myofibrillar proteins and lecithin as emulsifiers and high - pressure homogenization [J]. *J Food Eng*, 2019, 258: 1 - 8.
- [21] 王中江, 常宗明, 张翠, 等. 超声波及高压均质制备大豆蛋白 - 磷脂酰胆碱纳米乳液的特性比较 [J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 157 - 165.
- [22] WANG S N, YANG J J, SHAO G Q, et al. Dilatational rheological and nuclear magnetic resonance characterization of oil - water interface: impact of pH on interaction of soy protein isolated and soy hull polysaccharides [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 99: 105366 [2021 - 04 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105366>.
- [23] QIU C, WANG J P, QIN Y, et al. Characterization and mechanisms of novel emulsions and nanoemulsion gels stabilized by edible cyclodextrin - based metal - organic frameworks and glycyrrhizic acid [J]. *J Agric Food Chem*, 2019, 67(1): 391 - 398.

综合分析分值由高到低依次为云杂 2 号 > 云杂 3 号 > 云杂 1 号,其中云杂 2 号和云杂 3 号含油率均大于 18%,可作为优良油用品种发展。

参考文献:

- [1] 宁德鲁,杨卫明. 油橄榄良种选育与栽培[M]. 昆明:云南科技出版社,2013.
- [2] 邓明全,俞宁. 油橄榄引种栽培技术[M]. 北京:中国农业出版社,2011.
- [3] 金英姿,葛亮. 橄榄油的营养成分及其保健功能[J]. 农产品加工:学刊,2012(6):94-96.
- [4] 马君义,后春静,吕孝飞,等. 陇南油橄榄“皮瓜尔”果实活性成分动态变化[J]. 中国粮油学报,2020,35(3):102-109.
- [5] 邓煜. 中国油橄榄产业创新驱动发展的现状、趋势和对策[J]. 经济林研究,2018,36(2):117.
- [6] 朱申龙,傅庆林. 浙江省油橄榄产业现状与发展对策[J]. 浙江农业科学,2016,57(9):1361-1364.
- [7] 叶孝仪,杨卫明,张植中. 尖叶木樨榄嫁接油橄榄的效果调查[J]. 林业科技通讯,1981(3):12-15.
- [8] 国营元江红光林场. 尖叶榄嫁接油橄榄[J]. 林业科技通讯,1973(3):10-11.
- [9] 马婷,宁德鲁,杨卫明,等. 油橄榄新品种金叶佛樨榄的选育[J]. 中国果树,2014(6):3-4.
- [10] 马婷,徐田,宁德鲁,等. 油橄榄新品种“金叶佛樨榄”与其父母本生长与形态的比较研究[J]. 南方园艺,2015,26(4):1-3.
- [11] BOUCHAALA F C, LAZZEZ A, JABEUR H, et al. Physicochemical characteristics of extra virgin olive oil in function of tree age and harvesting period using chemometric analysis [J]. Sci Hort, 2014, 180: 52-58.
- [12] MANSOUR A B, FLAMINI G, SELMA Z B, et al. Comparative study on volatile compounds, fatty acids, squalene and quality parameters from whole fruit, pulp and seed oils of two Tunisian olive cultivars using chemometrics[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2015, 117(7):976-987.
- [13] 韩锐,邢文黎,孔维宝,等. 甘肃武都区 5 个主栽品种油橄榄果实的性状及品质研究[J]. 中国油脂,2017,42(4):140-144.
- [14] 张东,薛雅琳,朱琳,等. 我国油橄榄果及初榨橄榄油品质研究[J]. 中国粮油学报,2017,32(2):88-93.
- [15] 陈海云,耿树香,宁德鲁,等. 不同品种及成熟度油橄榄中脂肪酸的检测分析[J]. 广东农业科学,2012,39(24):111-113.
- [16] 杨丛华,宁德鲁,石卓功,等. 油橄榄在云南的果实生长发育特性分析[J]. 经济林研究,2020,38(1):177-183.
- [17] PIRAVI - VANAK Z, GHASEMI J, GHAVAMI M, et al. The influence of growing region on fatty acids and sterol composition of Iranian olive oils by unsupervised clustering methods[J]. J Am Oil Chem Soc, 2012, 89(3):371-378.
- [18] 闫辉强,后春静,马君义,等. 不同品种和成熟度的油橄榄果表型性状与脂肪酸组成及含量分析[J]. 中国油脂,2019,44(4):105-111.
- [19] 赵梦炯,姜成英,吴文俊,等. 油橄榄果实不同时期色泽和脂肪酸含量的动态变化[J]. 河北科技师范学院学报,2018,32(1):25-28.
- [20] 程子彰,贺靖舒,占明明,等. 油橄榄果生长与成熟过程中油脂的合成[J]. 林业科学,2014,50(5):123-131.
- [21] KONG W, HAN R, LIU N, et al. Dynamic assessment of the fruit quality of olives cultivated in Longnan (China) during ripening [J]. Sci Hort, 2019, 253:8-16.
- [22] 杨倩雨,郑浩,李志强,等. 油橄榄果实经济性状随成熟度的变化[J/OL]. 中国油脂,2021 [2021-09-13]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210288>.
- [23] YORULMAZ H O, KONUSKAN D B. Antioxidant activity, sterol and fatty acid compositions of Turkish olive oils as an indicator of variety and ripening degree [J]. J Food Sci Technol, 2017, 54(12):4067-4077.
- [24] ÖZEL B, UGUZ S S, KILERCIOGLU M, et al. Effect of different polysaccharides on swelling of composite whey protein hydrogels: a low field (LF) NMR relaxometry study[J/OL]. J Food Process Eng, 2017,40(3):e12465 [2021-04-22]. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12465>.
- [25] HANSEN C, THYBO A, BERTRAM H, et al. Determination of dry matter content in potato tubers by low-field nuclear magnetic resonance (LF-NMR) [J]. J Agric Food Chem, 2010, 58(9):10300-10304.
- [26] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Formulation of food emulsions using natural emulsifiers: utilization of quillaja saponin and soy lecithin to fabricate liquid coffee whiteners[J]. J Food Eng, 2017, 209:1-11.
- [27] LIU Y, GAJEWICZ - JAROMIN A, RODIN V, et al. Explanations for water whitening in secondary dispersion and emulsion polymer films[J]. J Polym Sci Pol Phys, 2016, 54:1658-1674.
- [28] WANG C, WANG X, LIU C Y, et al. Application of LF-NMR to the characterization of camellia oil-loaded pickering emulsion fabricated by soy protein isolate [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 112:106329 [2021-04-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106329>.
- [29] LIU F, TANG C H. Soy protein nanoparticle aggregates as Pickering stabilizers for oil-in-water emulsions [J]. J Agric Food Chem, 2013, 61(37):8888-8898.

(上接第 46 页)