

超高压均质对紫苏油纳米乳液稳定性的影响

李 杨¹ 胡 淼¹ 谢凤英^{1,2} 齐宝坤¹ 孙禹凡¹

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨市食品产业研究院, 哈尔滨 150028)

摘要: 采用大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)-磷脂酰胆碱作为表面活性剂,利用超高压均质技术制备紫苏油纳米乳液,探究不同 SPI 质量分数以及超高压均质压力对紫苏油纳米乳液稳定性的影响。结果表明:随着 SPI 质量分数和超高压均质压力的增加,紫苏油纳米乳液的平均粒径和 PDI 值逐渐降低,在 SPI 质量分数为 4%、均质压力 140 MPa 条件下紫苏油纳米乳液均一稳定,粒径最小为 241.03 nm,PDI 值最低为 0.13;经过 21 d 的储藏试验,用 Turbiscan 稳定性分析仪测定紫苏油纳米乳液的物理稳定性,在 SPI 质量分数 4%、均质压力 140 MPa 条件下,紫苏油纳米乳液未发生脂肪上浮或溶液聚集等现象,同时纳米乳液的平均粒径也未发生较大的变化,表明紫苏油纳米乳液在这一条件下具有较强的储藏稳定性。通过圆二色谱测定紫苏油纳米乳液中界面蛋白的二级结构变化,结果表明,超高压均质使 α -螺旋的相对含量降低,而无规卷曲和 β -折叠的相对含量升高,这说明界面蛋白的二级结构的变化对紫苏油纳米乳液的稳定性有一定的影响。

关键词: 紫苏油; 纳米乳液; 超高压均质; 稳定性

中图分类号: TS225.1; TS214.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2018)08-0381-07

Effect of Ultrahigh Pressure Homogenization on Stability of Perilla Oil Nanoemulsion

LI Yang¹ HU Miao¹ XIE Fengying^{1,2} QI Baokun¹ SUN Yufan¹

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Harbin Food Industry Research Institute, Harbin 150028, China)

Abstract: Perilla oil nanoemulsions, stabilized soybean protein isolated protein (SPI)-phosphatidyl choline, was prepared by using ultrahigh pressure homogenous technology. The effects of different SPI concentrations and ultrahigh homogenous pressures on stability of perilla oil nanoemulsions were researched. The results showed that with the increase of SPI concentration and ultrahigh homogenous pressure, the mean particle size and PDI were gradually decreased. The perilla oil nanoemulsions had the smallest mean particle size (230 nm) and the lowest PDI value (0.15) under the condition of 4% SPI concentration and 140 MPa ultrahigh homogenous pressure, which showed that the perilla oil nanoemulsions was homogeneous under this condition. After storage experiment for 21 d, perilla oil nanoemulsions had strong physical stability by using Turbiscan stability analyzer and no change of mean particle size at 4% SPI concentration and 140 MPa ultrahigh homogenous pressure. There was no fat separation or aggregation in the nanoemulsions with 4% SPI concentration and 140 MPa ultrahigh homogenous pressure. The content of α -helix was decreased gradually but the content of β -fold and random coil were increased by using circular dichroism spectrum, which demonstrated that the change of the secondary structure of interfacial protein had a certain effect on the stability of perilla oil nanoemulsion. Study on the stability of perilla oil nanoemulsion provided a theoretical basis for the development of novel nano foods and the industrialized production of nanoemulsions.

Key words: perilla oil; nanoemulsions; ultrahigh pressure homogenization; stability

收稿日期: 2018-04-12 修回日期: 2018-05-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31571876)、霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目(20152325210002)和中国博士后科学基金面上项目(2017M612315)

作者简介: 李杨(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究, E-mail: liyanghuangyu@163.com

0 引言

紫苏是唇形科一年生草本植物,多种植于亚洲国家^[1]。紫苏籽中含有 35%~45% 的油脂,90% 为不饱和脂肪酸,其中 α -亚麻酸的质量分数为 52.58%~61.98%。同时,紫苏油中含有 18 种氨基酸,必需氨基酸的含量较高,其中赖氨酸和甲硫氨酸明显高于小麦、玉米等常见经济植物^[2]。有研究表明^[3-4],紫苏油具有降血脂、抗氧化、抗衰老、提高免疫力、增强记忆力等功效。由于紫苏油几乎不溶于水,其生物利用率较低,且紫苏油中的主要活性物质是不饱和脂肪酸,结构中含有双键,导致其不稳定极易发生氧化酸败,尤其环境因素(温度、光照、催化剂等)会加剧不饱和脂肪酸氧化的过程^[5-6]。目前主要通过添加人工抗氧化剂或制备成软胶囊防止紫苏油氧化,提高其生物利用率,而人工抗氧化剂具有一定的毒副作用,软胶囊的粒径较大,吸收效率较低,未能达到所期望的效果。吴旭锦^[2]利用有机小分子表面活性剂(吐温 80)制备紫苏油纳米乳液,与传统的紫苏油相比可以提高紫苏油降低血脂的能力,但是有机小分子表面活性剂对人体健康有一定的影响,因此开发一种新的表面活性剂来稳定紫苏油纳米乳液具有重要的意义。

大豆分离蛋白(Soy bean protein isolate, SPI)因其具有多种功能特性而在食品工业中得以广泛的应用,其中乳化性是较为重要的功能特性,而单一的 SPI 由于受到结构影响,容易变质,限制了其在食品工业中作为乳化剂的应用^[7]。卵磷脂是一种双亲性的小分子表面活性剂,易在油水界展开,可降低表面张力。BECKWITH^[8]、NIEUWENHUYZEN 等^[9]研究发现,大豆蛋白与卵磷脂之间通过静电作用和疏水作用产生交互作用。有研究表明^[10-11],在乳液中添加磷脂酰胆碱可以提高乳液的乳化活性和乳化稳定性。同时利用超高压均质技术的空穴效应可以使蛋白的结构发生变化,使乳液的粒径降低,形成纳米乳液(粒径 10~500 nm),提高乳液的稳定性。

目前,鲜有人研究利用超高压均质技术,以 SPI、磷脂酰胆碱作为表面活性剂制备紫苏油纳米乳液技术及其相关性质。由于纳米乳液具有粒径小、性质稳定等特点,将紫苏油制成纳米乳液不仅可以延长紫苏油氧化变质的时间,同时还可以增大紫苏油在人体内的生物利用率,促进紫苏油在人体内的消化吸收。

本文以 SPI、大豆卵磷脂作为表面活性剂,以紫苏油作为油相,采用超高压均质技术制备紫苏油纳米乳液,探究不同 SPI 质量分数和超高压均质压力对紫苏油纳米乳液稳定性的影响,以期工业生

提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白 603,上海贺普实业有限公司;紫苏油,哈尔滨普润油脂有限公司;磷脂酰胆碱,北京索莱宝科技有限公司;磷酸氢二钠、磷酸二氢钠,北京新光化工试剂厂;其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

Mastersizer 2000 型粒度仪,英国马尔文仪器有限公司;GL-21M 型高速冷冻离心机,上海市离心机械研究所;FB-110T 型超高压均质机,上海励途机械设备有限公司;UTL2000 型乳化机,德国 IKA 仪器设备公司;TURBISCAN 型稳定性分析仪,北京朗迪森科技有限公司;J-810 型圆二色谱仪,日本 Jasco 公司。

1.3 紫苏油纳米乳液的制备

将不同浓度的大豆分离蛋白(质量分数 2%、3%、4%)溶液与磷脂酰胆碱在室温(25℃)下搅拌 2 h,使大豆分离蛋白与磷脂酰胆碱充分溶解并发生相互作用,在终溶液中加入 5% 的紫苏油,采用乳化机在 20 000 r/min 下乳化 3 min,得到粗乳液,之后在不同的高压均质压力(100、120、140 MPa)下进行再次乳化,其中高压均质的次数为 2 次。

1.4 平均粒径、PDI 值及 Zeta 电位

采用 Mastersizer 2000 型粒度仪测定紫苏油纳米乳液的平均粒径、PDI 值和 Zeta 电位。将不同条件下制备的紫苏油纳米乳液稀释 2 000 倍,其中颗粒折射率为 1.46,分散剂折射率为 1.33,吸收参数为 0.001^[12],测定温度为 25℃,平衡时间为 2 min,计算 3 次重复试验得到的平均值。

1.5 物理稳定性

参照吕长鑫等^[13]的方法,将被测样品放入样品池中,采用近红外光作为光源,在室温下,使用探头从样品池的底部到样品池的顶部每隔 1 min 测量一次,从底部到顶部的一次测量成为一次扫描,新鲜的紫苏油纳米乳液扫描 30 min,放置 21 d 后的紫苏油纳米乳液重新扫描 30 min。由于紫苏油纳米乳液外观不透明,本研究只讨论背散射光特征随时间的变化情况,分析紫苏油纳米乳液的物理稳定性。

1.6 储藏稳定性

紫苏油纳米乳液在常温下储藏,每隔 5 d 测定纳米乳液的平均粒径,持续观察 21 d,具体步骤如下:将紫苏油纳米乳液用 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液(pH 值 7.5)稀释 2 000 倍,用 Mastersizer 2000 型粒度仪测定,其中颗粒折射率为 1.46,分散剂折

射率为 1.33, 吸收参数为 0.001^[12], 测定温度为 25℃, 平衡时间为 2 min。

1.7 圆二色谱

新鲜的紫苏油纳米乳液在 10 000 g、室温下离心 30 min, 取出上层的乳化层, 将乳化层与冷冻的丙酮(按液料比 20 mL/g)在 -18℃ 下反应 2 h, 离心分离(10 000 g, 15 min, 4℃)得到沉淀的蛋白, 之后用丙酮清洗 5~6 次, 最后得到的蛋白沉淀进行冷冻干燥, 得到界面蛋白的粉末。

利用圆二色谱测定界面蛋白二级结构的变化, 将样品溶于 0.01 mol/L 磷酸盐缓冲溶液中(pH 值 7.4), 并用去离子水将样品浓度稀释到 0.5 mol/L, 25℃ 下, 以 100 nm/min 扫描速率在 190~260 nm 范围内扫描, 样品池光程为 1 mm, 分辨率 0.1 nm。采用 CDPro 曲线拟合软件对数据处理分析求得二级结构相对含量, 每组样品重复测定 3 次。

1.8 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件对数据进行处理, 所有试验均为 3 次重复试验, 用 Origin 8.5 软件绘制趋势曲线图。

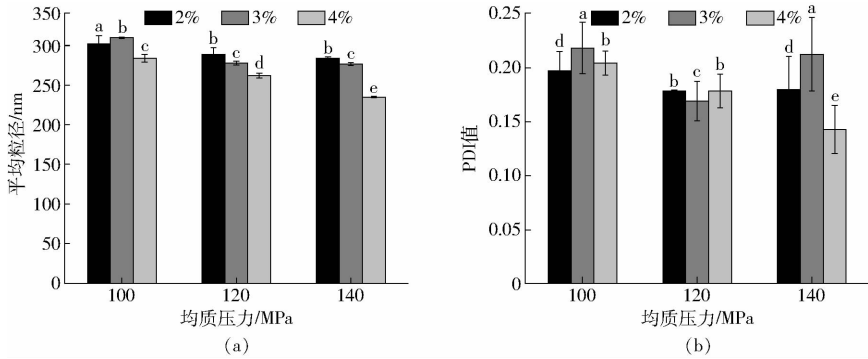


图 1 紫苏油纳米乳液的平均粒径及 PDI 值

Fig. 1 Average particle size and PDI value of perilla oil nanoemulsion

注: 图中不同字母表示差异显著, 下同。

2.2 纳米乳液的 ζ-电位

ζ-电位是用来表征油滴之间静电斥力的一种方法。从理论上来说, ζ-电位的绝对值小于 30 mV, 表明乳液的稳定性较弱, 而 ζ-电位的绝对值大于 30 mV, 表明乳液的稳定性较强^[18]。图 2 所示为紫苏油纳米乳液的 ζ-电位, 由图 2 可知, 随着 SPI 质量分数和高压均质压力的增加, 紫苏油纳米乳液的 ζ-电位逐渐降低, 其中在 SPI 质量分数 4%、均质压力 140 MPa 下紫苏油纳米乳液的 ζ-电位最低, 表明在此条件下紫苏油纳米乳液表面有较多的同种电荷, 彼此之间有较高的静电斥力, 防止液滴发生聚合, 因此在此条件下紫苏油纳米乳液有较高的稳定性。但所有条件下制备的紫苏油纳米乳液的 ζ-电位绝对值均低于 30 mV, SALVIA-TRUJILLO^[19] 等探究不同精

2 结果与分析

2.1 纳米乳液的粒径及 PDI 值

由图 1a 可知, 随着均质压力和 SPI 质量分数的增加, 纳米乳液的平均粒径逐渐降低, 当均质压力为 140 MPa、SPI 质量分数为 4% 时, 纳米乳液的平均粒径最小为 241.03 nm。图 1b 为纳米乳液的 PDI 值, PDI 值表征聚合物的分子量分布, PDI 值越小表示乳液分布得越均匀, 由图 1b 可知, 在 140 MPa、SPI 质量分数 4% 条件下纳米乳液的 PDI 值达到最低。PATIL 等^[14]、DEY 等^[15] 的研究结果发现, 随着表面活性剂浓度的增加, 纳米乳液的平均粒径逐渐降低, 这些结果与本文的试验结果相似。研究表明大豆分离蛋白具有良好的表面活性^[16], 以大豆分离蛋白作为纳米乳液的表面活性剂可以降低油水界面的界面张力, 并且随着浓度的增加, 大豆分离蛋白能够紧密包裹在油滴的表面, 防止油滴发生聚合现象, 增强油滴的稳定性; 纳米乳液中的紫苏油与原紫苏油相比, 表面积增加, 不仅可以防止紫苏油氧化, 同时也可以增加紫苏油的生物利用率^[17]。

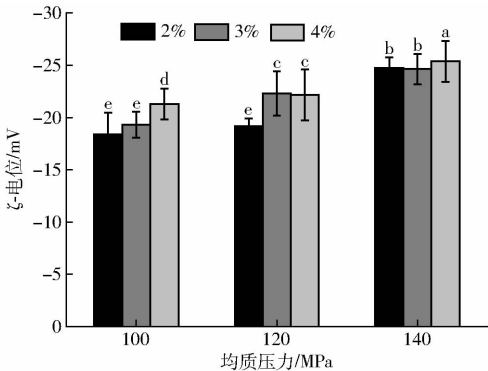


图 2 紫苏油纳米乳液的 ζ-电位

Fig. 2 Zeta-potential of perilla oil nanoemulsion

油纳米乳液的稳定性和抗菌特性时, 表明不同精油纳米乳液的 ζ-电位绝对值均低于 30 mV, DEY 等^[15] 也报道了利用芝麻分离蛋白制备的纳米乳液的 ζ-电

位在 $(-11.98 \pm 0.598) \text{ mV}$,绝对值低于 30 mV 。这可能是由于不同油脂之间的离子组成以及分散的水平不同所导致的^[20]。

2.3 物理稳定性

利用 Turbiscan 稳定性分析仪测定紫苏油纳米乳液的物理稳定性。Turbiscan 稳定性分析采用 880 nm 近红外光源,由于紫苏油纳米乳液属于不透明液体,因此只需检测样品的背散射光强度的变化率(BS),来反映样品的稳定性^[13]。Turbiscan 稳定性分析扫描的范围为 $0 \sim 40 \text{ mm}$,其中左边为样品的底部,右边为样品的顶部,左边曲线向上移动表明样品发生沉淀,右边曲线向上移动表明脂肪上浮,中间的曲线发生波动则表明有聚合现象^[21]。图 3、4 为不同的 SPI 质量分数和超高压均质压力对紫苏油纳米乳液物理稳定性的影响,其中图 3 为新制备的紫苏油纳米乳液 Turbiscan 稳定性分析结果,从图 3 可以看出所有样品左边曲线未出现向上移动的现象,说明样品没有发生沉淀;中间的曲线比较平缓并且无异常的波动,样品比较均匀未发生聚合现象;右边曲线未向上移动,表明无脂肪析出,综上所述,新制备的紫苏油纳米乳液具有较强的稳定性,未出现沉淀、脂肪上浮、聚合等现象。图 4 为紫苏油纳米乳液在室温下放置 21 d 后紫苏油纳米乳液的稳定性分析结果,从图 4 可以看出,不同 SPI 质量分数和超高压均质压力下制备的紫苏油纳米乳液在曲线的左侧

未向上移动,中间曲线也无波动现象,表明乳液未发生聚合和沉淀现象;而在右侧曲线部分,除了图 4g ~ 4i 以外,其他图中均出现了曲线上移的现象,说明有脂肪析出的现象,这可能是由于 SPI 的质量分数较低,未能将油滴完全包裹,而使油滴发生聚合,出现脂肪上浮的现象。而在图 4g ~ 4i 中,图 4i 的曲线最稳定,图 4i 为 4% SPI、140 MPa 下制备的紫苏油纳米乳液,表明在这一条件下制备的紫苏油纳米乳液具有较强的稳定性,这说明在 140 MPa 的高压均质下,4% 的 SPI 能够较好地覆盖在油滴的表面,防止油滴发生聚集^[22]。2.1 节、2.2 节的结果也证明了此结论。

2.4 储藏稳定性

图 5 为不同条件下制备的紫苏油纳米乳液在室温下储藏的平均粒径的变化。由图 5 可知,所有的紫苏油纳米乳液的样品在前 16 d 的平均粒径无明显变化,与新制备的紫苏油纳米乳液平均粒径相近。而在第 21 天时,紫苏油纳米乳液的粒径明显增加。图 5a 为在 2% SPI 条件下,不同高压均质压力下紫苏油纳米乳液平均粒径的变化,由图可知,紫苏油纳米乳液在 21 d 时,平均粒径增加至 400 nm 以上;图 5b 为在 3% SPI 条件下,不同高压均质压力下紫苏油纳米乳液平均粒径的变化,由图可知,紫苏油纳米乳液在 21 d 时,平均粒径明显的增加,但平均粒径低于 2% 条件下的紫苏油纳米乳液,产生此

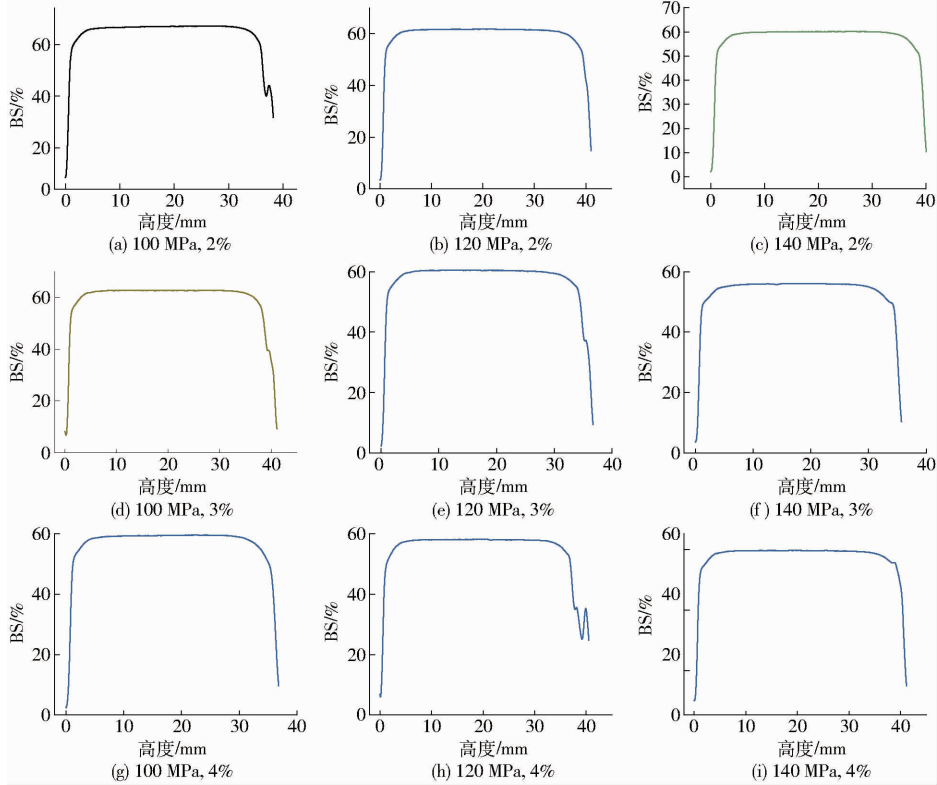


图 3 紫苏油纳米乳液的物理稳定性

Fig. 3 Physical stability of perilla oil nanoemulsions

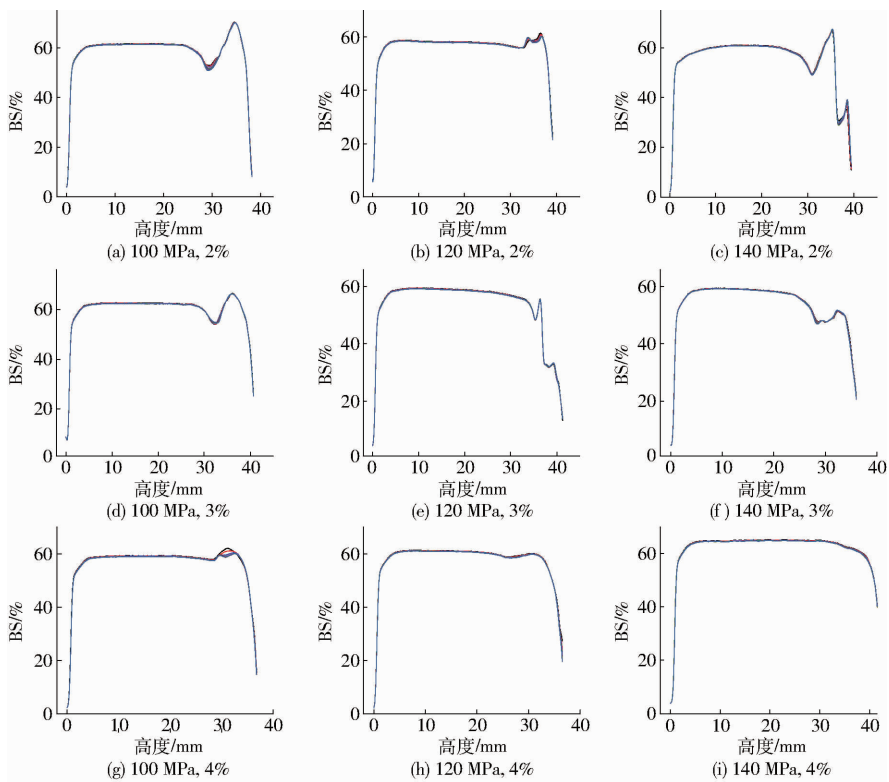


图 4 紫苏油纳米乳液室温下放置 21 d 后的物理稳定性

Fig. 4 Physical stability of perilla oil nanoemulsions after 21 d

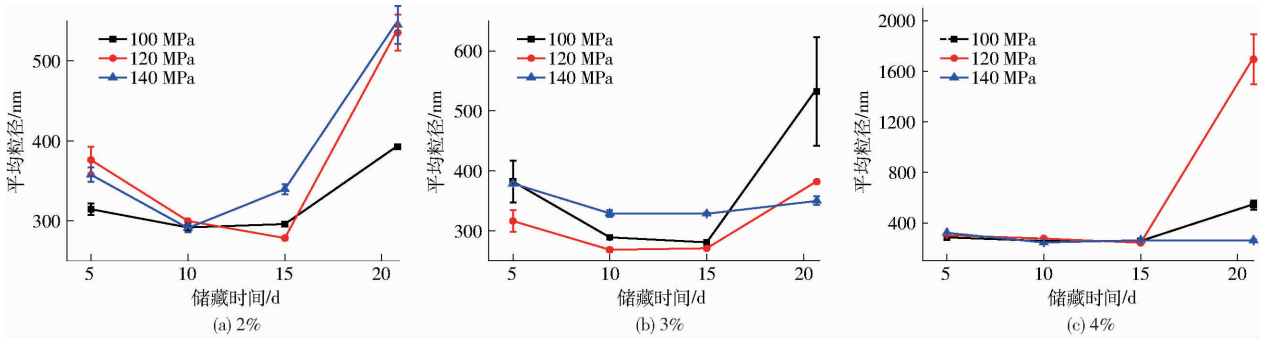


图 5 紫苏油纳米乳液的储藏稳定性

Fig. 5 Storage stability of perilla oil nanoemulsions

现象的原因可能是 SPI 的质量分数较低,不能将油滴完全包裹,油滴之间发生聚合,本文中 2.3 节的物理稳定性也表明在储藏 21 d 后紫苏油纳米乳液出现脂肪析出现象,图 5c 为在 4% SPI 条件下,不同高压均质压力下紫苏油纳米乳液平均粒径变化,由图可知,在 140 MPa 下紫苏油纳米乳液的平均粒径与新鲜的紫苏油纳米乳液平均粒径相当,这说明在此条件下,纳米乳液具有较好的物理稳定性和储藏稳定性,这可能是由于高压均质产生的压力作用、高频振荡和对流撞击等机械力诱导蛋白质结构发生改变,使蛋白更容易吸附在油水界面,形成均一稳定的紫苏油纳米乳液^[23]。

2.5 圆二色谱

圆二色谱是一种精准分析蛋白质二级结构的常用手段,能够在蛋白液体中直接测定^[24]。本文选择

能够反映肽键圆二色性的远紫外区(190 ~ 260 nm)光谱条件,对不同条件的紫苏油纳米乳液中界面蛋白二级结构进行分析。图 6 为紫苏油纳米乳液中界面蛋白的圆二图谱,表 1 为不同条件下紫苏油纳米乳液中界面蛋白二级结构相对含量变化。经超高压均质后,界面蛋白的结构发生了明显的变化,从表 1 可知,界面蛋白中的 α -螺旋相对含量较低, β -折叠和无规卷曲的相对含量较高,其中界面蛋白中的二级结构主要以无规卷曲为主。这可能是由于磷脂酰胆碱与 SPI 中的 α -螺旋结构结合。增加高压均质的压力 α -螺旋结构相对含量降低,这可能是高压均质产生的压力作用、高频振荡和对流撞击等机械力诱导蛋白质结构发生改变,从而改变界面蛋白在油滴表面的分布,进而影响紫苏油纳米乳液的稳定性。高压均质改变蛋白的结构,使得蛋白-磷脂酰胆碱具

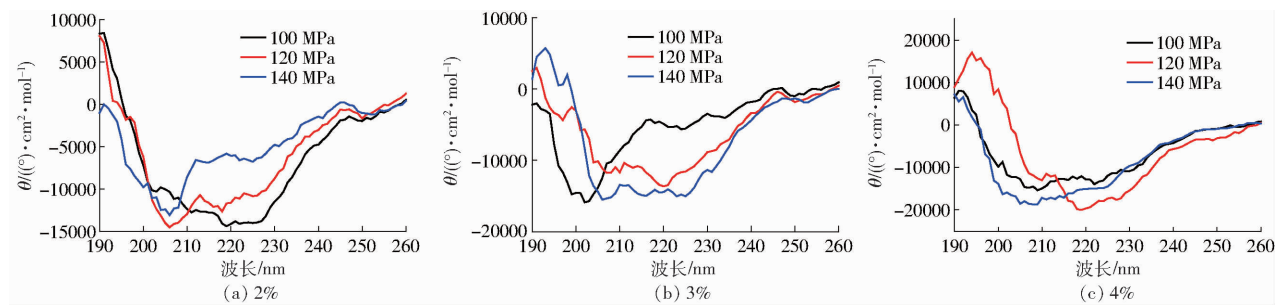


图 6 紫苏油纳米乳液界面蛋白圆二色谱

Fig.6 Circular dichroism spectrum of perilla oil nanoemulsions

表 1 界面蛋白二级结构相对含量

Tab.1 Secondary structure of interfacial protein

均质压力/MPa	SPI 质量分数/%	相对含量/%			
		α-螺旋	β-折叠	β-转角	无规卷曲
100	2	(7.8±0.8) ^a	(32.2±0.8) ^a	(18.1±0.3) ^c	(40.9±0.2) ^b
	3	(7.5±0.2) ^a	(28.0±0.9) ^c	(21.4±0.4) ^a	(43.2±0.3) ^a
	4	(7.3±0.3) ^b	(33.0±0.0) ^a	(18.1±0.6) ^b	(41.6±0.5) ^b
120	2	(6.8±0.6) ^c	(31.9±0.2) ^a	(19.0±0.5) ^b	(42.3±0.4) ^b
	3	(6.6±0.2) ^c	(32.0±0.3) ^a	(19.0±0.3) ^b	(42.5±0.3) ^b
	4	(6.7±0.1) ^c	(36.3±0.5) ^a	(17.2±0.6) ^c	(39.8±0.2) ^d
140	2	(5.9±0.4) ^d	(28.8±0.4) ^c	(21.2±0.5) ^a	(44.1±0.1) ^a
	3	(5.6±0.6) ^d	(34.1±0.1) ^b	(17.4±0.4) ^c	(42.9±0.5) ^a
	4	(5.7±0.4) ^d	(34.2±0.2) ^b	(16.6±0.1) ^d	(43.5±0.4) ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著。

有较好的均匀性和较强的乳化性,增强紫苏油纳米乳液的稳定性^[25]。

3 结束语

以 SPI-磷脂酰胆碱为表面活性剂,利用超高压均质技术制备紫苏油纳米乳液,研究紫苏油纳米乳

液的稳定性,得出以下结论:不同 SPI 质量分数和超高压均质压力对紫苏油纳米乳液的稳定性具有一定的影响,随着 SPI 质量分数和超高压均质压力的增加,紫苏油纳米乳液的稳定性逐渐增加;超高压均质通过改变紫苏油纳米乳液中界面蛋白的结构来影响紫苏油纳米乳液的稳定性。

参 考 文 献

1 ZHOU X J, YAN L L, YIN P P, et al. Structural characterisation and antioxidant activity evaluation of phenolic compounds from cold-pressed *Perilla frutescens*, var. *arguta*, seed flour[J]. Food Chemistry, 2014, 164(3):150.

2 吴旭锦. 紫苏子油纳米乳的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2008.

WU Xujin. The study on nanoemulsion of fructus perillae oil[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

3 陈亮, 王丽梅, 郭艳芬,等. 核桃油、紫苏油、α-亚麻酸、亚油酸对大鼠学习记忆的影响[J]. 中国油脂, 2011, 36(10):33-37.

CHEN Liang, WANG Limei, GUO Yanfen, et al. Effect of walnut oil, perilla oil, α-linolenic acid and linoleic acid supplementation on rats spatial learning and memory ability[J]. China Oils and Fats, 2011, 36(10):33-37. (in Chinese)

4 王丽梅, 叶诚, 吴晨,等. 紫苏油对衰老模型大鼠的抗衰老作用研究[J]. 食品科技, 2013(1):280-284.

WANG Limei, YE Cheng, WU Chen, et al. The effect of perilla oil on anti-aging for aging model rats[J]. Food Science and Technology, 2013(1):280-284. (in Chinese)

5 RINCONCERVERA M Á, VALENZUELA R, HERNANDEZRODAS M C, et al. Vegetable oils rich in alpha linolenic acid increment hepatic n-3 LCPUFA, modulating the fatty acid metabolism and antioxidant response in rats[J]. Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids, 2016, 111:25-35.

6 任亚浩. 不同剂量的紫苏油对大鼠血清胆固醇水平的影响及其机制探讨[D]. 北京:中国医科大学, 2008.

REN Yahao. Study on the effects and mechanism of different doses of perilla seed oil on the serum cholesterol level in rat[D]. Beijing: China Medical University,2008. (in Chinese)

7 李秋慧, 王中江, 李佳妮,等. 大豆蛋白-溶血磷脂 O/W 型复合乳液的乳化特性[J]. 食品科学, 2017, 38(3):20-25.

LI Qiuhui, WANG Zhongjiang, LI Jiani, et al. Emulsifying properties of soybean protein isolate-lysophosphatide oil-in-water (O/W) emulsion[J]. Food Science, 2017, 38(3):20-25. (in Chinese)

- 8 BECKWITH A C. Interaction of phosphatidylcholine vesicles with soybean 7S and 11S globulin proteins [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1984, 32(6):1397–1402.
- 9 NIEUWENHUYZEN W V, SZUHAJ B F. Effects of lecithins and proteins on the stability of emulsions[J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 1998, 100(7):282–291.
- 10 WANG S, SHI Y, TU Z, et al. Influence of soy lecithin concentration on the physical properties of whey protein isolate-stabilized emulsion and microcapsule formation[J/OL]. *Journal of Food Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.020>.
- 11 SUI X, BI S, QI B, et al. Impact of ultrasonic treatment on an emulsion system stabilized with soybean protein isolate and lecithin: its emulsifying property and emulsion stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63:727–734.
- 12 TANG C H, CHOI S M, MA C Y. Study of thermal properties and heat-induced denaturation and aggregation of soy proteins by modulated differential scanning calorimetry[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2007, 40(2):96.
- 13 吕长鑫, 李萌萌, 徐晓明, 等. 利用 Turbiscan 稳定性分析仪检测紫苏酸性乳饮料乳化稳定性[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(4):239–245.
- LÜ Changxin, LI Mengmeng, XU Xiaoming, et al. Application of Turbiscan for analysis on stability and emulsibility of purple perilla acid milk beverage[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2014, 14(4):239–245. (in Chinese)
- 14 PATIL L, GOGATE P R. Ultrasound assisted synthesis of stable oil in milk emulsion: study of operating parameters and scale-up aspects[J/OL]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 40(Pt A). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.07.001.
- 15 DEY T K, BANERJEE P, CHATTERJEE R, et al. Designing of ω -3 PUFA enriched biocompatible nanoemulsion with sesame protein isolate as a natural surfactant: focus on enhanced shelf-life stability and biocompatibility[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2018, 538:36–44.
- 16 毕爽, 马文君, 孙红波, 等. 高压均质对天然和热变性大豆蛋白-磷脂水包油型乳状液功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(1):74–79.
- BI Shuang, MA Wenjun, SUN Hongbo, et al. Functional properties of natural and denatured soybean-lecithin oil-in-water emulsions treated by high pressure homogenization[J]. *Food Science*, 2017, 38(1):74–79. (in Chinese)
- 17 YAO X, NIE K, CHEN Y, et al. The influence of non-ionic surfactant on lipid digestion of gum Arabic stabilized oil-in-water emulsion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 74:78–86.
- 18 VALLAR S, HOUVET D, FALLAH J E, et al. Oxide slurries stability and powders dispersion: optimization with zeta potential and rheological measurements[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1999, 19(6/7):1017–1021.
- 19 SALVIA-TRUJILLO L, ROJAS-GRAU A, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Physicochemical characterization and antimicrobial activity of food-grade emulsions and nanoemulsions incorporating essential oils[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43:547–556.
- 20 BONILLA J, ATARES L, VARGAS M, et al. Effect of essential oils and homogenization conditions on properties of chitosan-based films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1):9–16.
- 21 RAILOS V. Encapsulation of vitamin E in edible orange oil-in-water emulsion beverages: influence of heating temperature on physicochemical stability during chilled storage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 72:155–162.
- 22 ARANCIBIA C, MIRANDA M, MATIACEVICH S, et al. Physical properties and lipid bioavailability of nanoemulsion-based matrices with different thickening agents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 73: 243–254.
- 23 LI C, HUANG X, PENG Q, et al. Physicochemical properties of peanut protein isolate-glucomannan conjugates prepared by ultrasonic treatment. [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(5):1722.
- 24 李佳妮, 江连洲, 邹晓霜, 等. 花青素对大豆蛋白体外胃消化结构的影响[J/OL]. *食品科学*, 2017. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20170802.1552.118.html>.
- 25 毕爽, 李杨, 隋晓楠, 等. 高压均质对大豆蛋白-磷脂复合体系结构及理化/功能性质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(5):148–153.
- BI Shuang, LI Yang, SUI Xiaonan, et al. Effect of high pressure homogenization on structural, physicochemical and functional properties of soybean protein-lecithin composite system[J]. *Food Science*, 2017, 38(5):148–153. (in Chinese)