doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.044

薄荷油纳米乳液消化规律与稳定性研究

王中江¹ 张潇元¹ 车佳玲¹ 李 杨¹ OLGA O B² 江连洲¹ (1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 克麦罗沃国立大学食品学科与技术学院, 克麦罗沃 650056)

摘要:研究了薄荷油纳米乳液在体外模拟消化过程中乳液包埋对其平均粒径、ζ-电位、游离脂肪酸释放率以及薄荷 醇生物可利用度的影响。激光扫描 3D 共聚焦显微镜观察薄荷油纳米乳液的显微结构,研究发现薄荷油完全被 SPI 包埋,纳米乳液液滴呈球状形态,表明大豆蛋白完整地吸附于纳米乳液的油-水界面处,呈现出核壳状结构。高压 均质处理制备的薄荷油纳米乳液的游离脂肪酸释放率及薄荷醇生物可利用度远大于薄荷油的对照组。薄荷油纳 米乳液在模拟胃消化阶段,乳液的平均粒径、ζ-电位均变大,乳液的微观结构表明消化体系出现液滴聚合现象;在模 拟肠液消化后,薄荷油纳米乳液的界面蛋白被水解,油滴被消化,乳液的平均粒径减小、ζ-电位绝对值增加。通过多 重光散射稳定性分析仪检测薄荷油纳米乳液的稳定性,薄荷油稳定性指数为2.8,且检测过程中并未出现乳液上浮 和絮凝等现象。

关键词:薄荷油;纳米乳液;高压均质;生物可利用度;消化规律;稳定性 中图分类号:TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2018)10-0381-06

Investigation on Digestion Law and Stability of Peppermint Oil Nanoemulsion

 WANG Zhongjiang¹ ZHANG Xiaoyuan¹ CHE Jialing¹ LI Yang¹ OLGA O B² JIANG Lianzhou¹ (1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
 2. Federal State-owned Budgetary Educational Institution, Higher Vocational Education Kemerovo Institute of Food Science and Technology, Kemerovo 650056, Russia)

Abstract: Investigation was made on the effects of the peppermint oil nanoemulsion on the average particle size, zeta potential, turbidity, FFA release rate and the bioavailability of menthol in vitro simulated digestion process. It was found that peppermint oil was completely packed by SPI and nanoemulsion droplet was in the spherical shape by using confocal laser scanning 3D microscopy to observe the microstructure of peppermint oil nanoemulsion, indicating that the soybean protein was completely adsorbed at the oil-water interface of the nanoemulsion and presented a core shell structure. The results indicated that the FFA release rate and menthol bioavailability of the peppermint oil nanoemulsion prepared by high-pressure-homogenization were much higher than that in the control group of peppermint oil. In the simulated gastric digestion phase, the average particle size and the zeta potential of the nanoemulsion were increased, while the turbidity was decreased and the microstructure of the digestive emulsion showed the phenomenon of droplet polymerization. After the simulated intestinal juice was digested, the interfacial protein of peppermint oil nanoemulsion was hydrolyzed, the oil droplets were digested, the average particle size of the emulsion was decreased, and the absolute value of zeta-potential was increased. The stability of the peppermint oil nanoemulsion was checked by the Turbiscan stability analyzer, and the stability index was found to be 2.8. There was no emulsion floatation and flocculation occurred during the test.

Key words: peppermint oil; nanoemulsion; high pressure homogeneous; bioavailability; digestion law; stability

收稿日期: 2018-04-20 修回日期: 2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31671807、31571876)、山东省泰山产业领军人才工程高效生态农业创新类项目(LJNY201607)、 霍英东教育基金会高等院校青年教师基金项目(20152325210002)、黑龙江省现代农业产业技术协同创新体系岗位专家项目和 黄河三角洲学者项目

作者简介:王中江(1987—),男,讲师,博士,主要从事粮食、油脂及植物蛋白工程研究,E-mail: wzjname@126.com

通信作者:江连洲(1960—),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: jlzname@163.com

0 引言

薄荷油具有多种功效^[1],有着巨大的应用发展 空间与潜力。然而薄荷油易挥发,对空气、温度、光 的稳定性差以及其主要功能性成分在未到达目标位 置前,被机体迅速吸收,最终会导致营养素的生物利 用度降低等缺点^[2],极大限制了其在食品、保健品 等领域的应用。

纳米乳液乳化包埋体系具有独特的纳米级粒径 和较大的比表面积。除了能很好地提高精油类生物 活性物质的生物利用度以外,纳米乳化包埋体系具 有在储藏、运输过程中无絮凝、无聚集的优点^[3-4]。 MAJEED等^[5]以改性淀粉辛烯基琥珀酸酯化淀粉作 为乳化剂制备了不同粒径的丁香酚纳米乳液,通过 模拟体外胃肠道消化,表明小粒径的纳米乳液生物 利用度更高。RAO等^[6]通过模拟体外胃肠道消化, 研究了玉米油对β-胡萝卜素纳米乳液稳定性、脂肪 酸释放率及β-胡萝卜素生物利用度的影响。研究 表明油相中玉米油的存在不仅提高了机体内的消化 速度,同时提高了脂肪酸释放率以及β-胡萝卜素的 生物利用度。然而,目前国内外尚无关于薄荷油纳 米乳液的研究。

本文研究薄荷与纳米乳液经体外胃肠液消化后 其粒径、ζ-电位的变化以及游离脂肪酸释放率和薄 荷醇的生物利用度,以及包埋后薄荷油的稳定性,以 期为纳米乳化包埋技术制备的薄荷油纳米乳液应用 于营养素的体内运载提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI),蛋 白质量分数 89.21%,山东省高唐蓝山集团;磷脂酰 胆碱(Phosphatidyl choline, PC),北京索莱宝科技有 限公司;薄荷油、尼罗蓝、尼罗红、胃蛋白酶、胰蛋白 酶、猪胆酸盐, Sigma 公司;氢氧化钠、磷酸二氢钠、 磷酸氢二钠,均为分析纯试剂。

1.2 仪器与设备

T18 Basic 型高速分散机(德国 IKA 公司);实验 型高压均质机(英国 Stansted Fluid Power 公司);超 净工作台(美国 PE 公司);激光扫描 3D 共聚焦显微 镜(英国 Malvern 仪器有限公司);Zetasizer Nano ZSP 型纳米粒径电位仪(英国 Malvern 仪器有限公司); Agilent7890 - 5795C 型气相色谱-质谱联用仪(日本 HITACHI 公司);多重光散射稳定性分析仪(法国 Formulaction 公司)。

1.3 方法

1.3.1 薄荷油纳米乳液的制备

参照 LEE 等^[7]方法将 SPI 和 PC 溶于 0.1 mol/L、 pH 值 7.0 的磷酸盐缓冲液中,置于 25℃条件下连 续搅拌 120 min,形成水相,在高速分散机的搅拌下 把薄荷油作为油相加到水相中,20 000 r/min 剪切 5 min,形成粗乳液。将粗乳液通过高压均质机进一 步均质乳化即得薄荷油纳米乳液。高压均质处理的 方法及条件设定参照 SORGENTINI 等^[8]方法进行 一定修改。高压均质机均质压力为 80 MPa,均质次 数为 4 次,采用冰水浴保持低温。

1.3.2 纳米乳液激光扫描 3D 共聚焦显微镜成像

薄荷油纳米乳液体系激光共聚焦显微镜的检测 参照 PUPPO 等^[9]的方法。SPI 经尼罗蓝染液染色 后呈现绿色荧光,薄荷油经脂溶性荧光探针尼罗红 染色后呈现红色荧光。分别将尼罗红(0.01 g/mL) 和尼罗蓝(0.01 g/mL)溶解在丙醇中,漩涡混合 30 s 后对薄荷油纳米乳液染色 40 min。染色结束后取 10 μL 乳液于载玻片上,采用激光扫描 3D 共聚焦显 微镜观察薄荷油纳米乳液的微观结构。

1.3.3 纳米乳液体外模拟消化

根据人体消化道的构造以及蛋白和油脂在机体 内的消化特点,参照 WOOSTER 等^[10]的实验方法并 在其基础上进行改进后,构建一个胃肠道模型,以模 拟胃液、肠液消化。在整个实验过程中,消化乳液样 品置于 37℃恒温振荡摇床上,并通过磁力搅拌器持 续搅拌。

(1)模拟胃阶段

首先,取15 mL 薄荷油纳米乳液与135 mL 生理 盐水混合,持续搅拌10 min,通过0.1 mol/L 的盐酸 调节消化液的 pH 值至2.0,加入10 mL 质量浓度为 40 mg/mL 的胃蛋白酶。然后将溶液置于37℃的振 荡摇床中模拟胃液消化1h。

(2)模拟肠阶段

在经过模拟胃液消化 1 h 后,使用 0.1 mol/L NaOH 将消化液的 pH 值调至 7.5,并加入 45 mL 模 拟肠液(2 mg/mL 的胰酶与 12 mg/mL 的猪胆酸 盐),模拟肠液的消化。溶液的 pH 值用 pH - stat 法 自动滴定监测,在 37℃条件下反应 2 h,并通过滴加 0.2 mol/L NaOH 溶液保持 pH 值为 7.5,并记录 NaOH 消耗量。参照 NETZEL 等^[11]的研究方法,采 用与薄荷油纳米乳液中相同质量浓度的薄荷油作为 空白对照。

(3)游离脂肪酸释放率测定

模拟肠液的消化过程中,薄荷油在胰脂肪酶和 猪胆酸盐的作用下被水解为游离脂肪酸,一分子的

383

甘油三酯在完全消化时产生一分子的甘油单酯和两 分子的游离脂肪酸,因此根据随时间推移不断消耗 的 NaOH 体积计算出游离脂肪酸的释放率,公式为

$$Y_{1} = \frac{V_{\text{NaOH}} m_{\text{NaOH}} M_{\text{lipid}}}{2m_{\text{lipid}}} \times 100\%$$
(1)

式中 Y1---游离脂肪酸释放率,%

m_{lipid}——乳液中脂肪的总质量,g

m_{NaOH}——滴定时选用 NaOH 溶液的浓度, mol/L

*M*_{lipid}——脂肪分子的平均分子量,g/mol
 1.3.4 薄荷醇生物可利用度测定

将消化后的乳液置于离心机中,在4℃、10000g 条件下离心45min,上清液即为载有薄荷醇的透明 胶束层,利用高效液相色谱-质谱联用仪的方法即可 计算出薄荷醇的浓度,薄荷醇的生物可利用度计算 公式为

$$Y_2 = \frac{C_1}{C_2} \times 100\%$$
 (2)

式中 Y2----薄荷醇生物利用度,%

C1----胶束中薄荷醇浓度

C,——溶液中薄荷醇浓度

(1)高效气相色谱-质谱联用仪测定条件

气相色谱:采用 OV1701 型色谱柱(30 m× 0.25 mm×0.25 μm),进样量 10 μL,升温程序设定 为:40℃持续 3 min,然后以 4℃/min 的速度上升至 100℃,接着以 7℃/min 的速度上升至 240℃,持续 7 min,分流比设定 10:1。载气为氦气,流速设定为 0.8 mL/min,进样口温度设定为 250℃。

质谱:离子源温度设定为 200℃,检测器电压为 350 V,电子能量设定为 70 eV,灯丝发射电流 200 μA, 接口温度 250℃,扫描范围(质荷比)50~500。

(2)化合物鉴定

利用 Xcalibur 软件对实验数据进行分析。通过 计算机自动查找化合物,然后与谱库 NIST 和 Wiley 的化合物进行匹配度检测,再手动检索核对,选择匹 配度大于 800 的结果,采用归一化法得到样品中薄 荷醇的浓度。

1.3.5 消化纳米乳液平均粒径及ζ-电位测定

采用 Zetasizer Nano - 90 型粒径分析仪测定原 始纳米乳液及经胃液和肠液消化后液体的平均粒径 及ζ-电位。测定前先将乳液用0.1 mol/L、pH 值7.0 的磷酸盐缓冲溶液以1:1000 比例稀释,以防止多 个角度的散射效应。

1.3.6 消化乳液形态观察

吸取一滴乳液置于载玻片上,盖上盖玻片,用光

学显微镜观察外观形态,放大400倍并进行拍照。

1.3.7 薄荷油纳米乳液的稳定性分析

利用浓缩体系稳定性分析仪对薄荷油纳米乳液 的稳定性进行检测,通过两个同步探测器收集背散 射光和透射光,获得差值反射光量随时间的动态变 化情况,进而得到对纳米乳液的稳定性情况。取 20 mL 薄荷油纳米乳液置于仪器专用玻璃杯中,温 度保持在 55℃,每 30 min 扫描一次,共扫描 5 次,软 件通过光信号,计算纳米乳液的稳定性分析指数 (TSI 值)。

1.3.8 数据统计分析

每次试验做 3 次平行,结果用平均值 ±标准差 表示,利用 SPSS Statistics 22 软件对数据进行 ANOVA 差异显著性分析, P < 0.05 为显著性差异。 采用 Origin 9.1 软件进行数据分析、图表处理及图 谱分析处理。

2 结果与分析

2.1 纳米乳液形态的激光扫描 3D 共聚焦显微镜 成像

激光扫描 3D 共聚焦显微镜更为直观地显示了 薄荷油纳米乳液纳米级液滴均匀分布情况。其原理 是在荧光显微镜的基础上装上激光扫描装置,使用 激光集中扫描照射样品的表面,然后通过激发荧光 探针将聚焦平面的信息投射到检测器前面的共聚焦 孔中^[12]。并利用 3D 成像软件进行图像处理,进而 得到纳米乳液微观结构的荧光图像。本研究利用荧 光标记蛋白技术,通过尼罗红与尼罗蓝快速标记纳 米乳液的脂肪和蛋白质,检测薄荷油纳米乳液体系 对薄荷油的包埋效果。如图 1 所示,观察到大部分 离散的球形脂肪液滴直径在 10~200 nm 范围内,由 于尼罗蓝覆染 SPI 后激发的荧光呈绿色,结果表明 高压均质处理的 SPI 具有较好的乳化活性,可以形 成紧密的界面膜,呈现球状形态,提高了乳化体系的 稳定性。

2.2 纳米乳液在体外消化过程中的粒径和微观结构变化

薄荷油纳米乳液通过体外模拟消化模型后, 其乳化体系的组成和结构均出现了显著变化,同 时对乳液的理化稳定性影响较大。因此,在实验 过程中检测了薄荷油原始乳液的平均粒径以及经 过模拟胃液消化 60 min、模拟肠液消化 120 min 后 的平均粒径^[13],并且利用光学显微镜可更为直观 地显示乳液消化各阶段的微观结构,结果如图 2 所示。在体外模拟消化的整个过程中,乳液的平 均粒径呈现先增加后下降的变化趋势。基于 SPI







的薄荷油纳米乳液具有相对较小的粒径,同时油-水界面吸附着大量的蛋白,形成一层保护膜,保证 乳液能维持较稳定的状态。当乳液经过胃液时, 平均粒径显著增加,主要原因在于胃液中的胃蛋 白酶能水解吸附在薄荷油上的 SPI,另一方面当胃 液的 pH 值在 SPI 等电点附近且胃液中含有金属 离子时,液滴间的静电排斥作用下降,导致乳液裂 解或出现液滴聚合。这与 MALAKI 等^[14]的研究结 果一致。当乳液在肠液消化 120 min 后,乳液的平 均粒径降低到 300 nm,主要原因在于薄荷油被肠 液中的胰脂肪酶和猪胆酸盐水解成小液滴,同时 静电排斥作用的增强以及持续的机械振荡进一步 阻止了液滴出现聚合现象。KOSSENA 等^[15]研究 指出 β-胡萝卜素纳米乳液体外模拟肠液消化过程 中出现平均粒径增大的情况。而本文所研究的薄 荷油纳米乳液在肠液消化后没有出现液滴聚集现 象,结果表明 SPI-PC 的疏水作用对薄荷油纳米乳 液的油-水界面膜有一定的抗液滴聚合作用。

2.3 纳米乳液在体外消化过程中的ζ-电位变化

薄荷油纳米乳液经胃液、肠液消化前后的样品 中,ζ-电位也是决定乳液体外模拟消化过程中界面 组成变化的因素,不同消化阶段纳米乳液ζ-电位结 果表明消化乳液的ζ-电位绝对值整体呈现先下降后 上升的趋势。根据2.1节薄荷油纳米乳液的激光扫 描3D 共聚焦显微镜可以看出,在薄荷油纳米乳液 的油-水界面吸附了大量的 SPI,表明乳液在初始阶 段吸附大量负电荷。由于体外模拟的胃液 pH 值较 低以及高离子强度的静电屏蔽作用[16],乳液在进行 胃液消化过程中表面负电荷密度降低,进而导致ζ-电位绝对值下降。该结果与 TRONCOSO 等^[17]的研 究结论相一致。然而,在体外模拟胃液消化过程中, 消化液的 ζ-电位仍然呈负值, 这是因为 SPI - PC 的 疏水作用与 PC 表面分子的表面空间位阻作用导致 带负电荷的 PC 掩盖了 SPI 的正电荷。当薄荷油乳 液经过肠液时ζ-电位绝对值显著增大,分析原因如 下:薄荷油在脂肪酶水解后释放阴离子的游离脂肪 酸和单甘脂导致消化液的净电荷增加,同时在 pH 值为7.5的环境中,带负电荷的脂质、蛋白、胆盐等 物质极易取代蛋白吸附到油-水界面处,导致乳液经 过小肠液后带有大量的负电荷,然而胆盐、脂质的负 电荷量低于液滴界面蛋白,因此蛋白质被置换出界 面后,乳化体系总的界面负电荷量下降而没有回到 初始的ζ-电位。

2.4 纳米乳液的油脂消化分析

目前,国内外很多食品、药品领域学者利用 pHstat法检测体外模拟肠液消化过程中油脂的游离脂 肪酸释放率变化^[18]。通过测定模拟肠消化过程中 游离脂肪酸的释放率可以用来判断薄荷油纳米乳液 油相的水解程度与速率。消化乳液进入小肠后,甘 油三酯被胰脂酶和猪胆酸盐脂解生成甘油单酯、甘 油二酯和游离脂肪酸^[19],为了保持肠液消化体系在 pH值7.5条件下不变,需要不断加入NaOH中和水 解过程中生成的游离脂肪酸,同时通过计算此过程 中消耗 NaOH 的量计算游离脂肪酸释放率。图 3 为 薄荷油纳米乳液体外模拟消化过程中游离脂肪酸的 释放曲线。从该图可以看出,在游离脂肪酸的释放 率呈现先迅速增加后缓慢上升的变化趋势,而对于 空白对照薄荷油的游离脂肪酸释放率始终趋于平 缓,经过120 min 模拟肠液消化后,薄荷油纳米乳液 的游离脂肪酸释放率达到 104.3%, 与 SALVIA-TRUJILLO 等^[13]的研究结果一致,表明薄荷油纳米 乳液的油相在消化过程中能被完全水解。比较发现



图 2 纳米乳液消化前后的光学显微镜图像

Fig. 2 Optical microscope images of peppermint oil nanoemulsion before and after digestion

空白对照薄荷油的游离脂肪酸释放率仅为30.4%. 表明纳米乳化体系可以有效地提高油脂的游离脂肪 酸释放率。分析原因在于薄荷油脂解属于界面反 应,由于纳米乳化包埋体系中的油相在一定程度上 具有较大的表面积,油-水界面上吸附的蛋白减少, 空间位阻作用减弱,更有利于胰脂肪酶与油脂的接 触反应,从而提高脂解效率。同时胰酶中的磷脂酶 A,可促进消化 PC 结构中的 sn-2 键,生成 2-酰基溶 血磷脂,该消化产物可破坏磷脂乳化层结构,并且猪 胆盐中的胆固醇酶可激活胆固醇酶催化消化 PC,进 一步提高了游离脂肪酸释放率,由于猪胆汁盐可激 活胆固醇酶催化消化 PC,形成游离脂肪酸,因此纳 米乳化体系的游离脂肪酸释放率高于100%,也是 由于 PC 的消化所致。在对照组中,游离的油相不 溶于水,减缓了脂解的过程,降低了游离脂肪酸释 放率。



nanoemulsion in intestine digestion

2.5 纳米乳液中薄荷醇生物可利用度分析

薄荷油纳米乳液中的生物活性物质会在体外模 拟消化过程中变化。纳米乳化后的薄荷油会不断在 胰脂肪酶和猪胆酸盐作用下水解,并被载入到由胆 盐、PC、脂肪酸组成的混合胶束中,进而被小肠上皮 细胞吸收^[20]。因此可以通过测定胶束中薄荷醇的 浓度得到薄荷醇的生物可利用度。结果表明,与对 照组薄荷油中的薄荷醇生物可利用度 3.4% 比较, 采用纳米乳化体系包埋的薄荷醇生物可利用度为 84%,表明纳米乳化体系提高了薄荷醇的生物可利 用度,游离脂肪酸释放率的增加有利于被包埋生物 活性物质的生物可利用度的提高,YU 等^[21]的研究 结果也表明油相的水解程度与生物活性物质的生物 可利用度之间呈正相关。与其他类似生物活性物质 的研究比较,发现此结果要高于 WANG 等^[22]使用 月桂酸十甘油酯作为表面活性剂时的结果。 GOLDING 等^[23]发现, 生物活性物质在体外模拟消 化的胶束化过程中极易因界面上表面活性剂的竞相 吸附受到影响,在此过程中,胆盐和 PC 替换原有表 面活性剂分子而吸附到油-水界面处,形成胶束。因 此,表面活性剂组分与结构特性也影响生物活性物 质的胶束化过程。本文以 PC 作为表面活性剂,在 胶束形成过程中直接用于构建胶束,SPI 因生物酶 水解形成氨基酸与小分子多肽降低了油-水界面处 的吸附膜厚度,更容易被 PC 和胆盐替换,进而得到 更高的生物可利用度。

2.6 纳米乳液的稳定性分析

传统检测乳液稳定性的方法通常采用离心加速 实验,通过观察上浮层高度来判断乳液的稳定 性[24]。多重光散射稳定性分析技术采用激光光源 将薄荷油纳米乳液从底部扫描至顶部,在不利用外 界作用力的情况下通过光学传感器收集乳液样品的 透射光和背散射光随乳液高度和时间的变化,在较 短的时间内监测出乳液的稳定性并得到 TSI(稳定 性指数)值,具有实验进展快速、实验结果准确、客 观等优势^[25]。实验结果如图 4 所示,薄荷油稳定性 指数结果为 2.8,结果表明在扫描高度为0.085~ 4.97 mm 的样品瓶底部出现背散射光强度上升现 象,薄荷油纳米乳液的底部背散光强度范围为 33.34%~35.62%,表明薄荷油纳米乳液出现轻微 乳析现象,扫描高度在15~30 mm 范围内,乳液的 中部背散射光强度范围为 46.56% ~ 47.48%,表明 薄荷油纳米乳液很少有液滴聚合现象,扫描高度在 40~43.6 mm 范围内, 乳液的顶部背散射光强度在 38.73%~45.89%,结果表明薄荷油纳米乳液出现 脂肪液滴发生轻微的上浮^[26]。上述结果表明,在 8h的测量过程中,薄荷油纳米乳液仅出现了由分散 相与连续相的密度差引起的颗粒上浮现象,并未发 生粒径上的变化,这是因为 SPI 为非离子表面活性 剂,在乳液中不存在因电荷作用引起的液滴之间的 吸附或排斥。因此通过高压均质制备得到的薄荷油 纳米乳液稳定性良好。

3 结束语

本研究考察薄荷油纳米乳液在体外模拟消化 过程中乳液包埋对平均粒径、ζ-电位、游离脂肪酸 释放率以及薄荷醇生物可利用度的影响。激光扫 描 3D 共聚焦显微镜结果表明纳米乳液中薄荷油 完全被 SPI 包埋,呈核壳状结构。高压均质处理制 备的薄荷油纳米乳液的游离脂肪酸释放率及薄荷 醇生物可利用度远大于薄荷油的对照组。薄荷油 纳米乳液在模拟胃消化阶段,乳液的平均粒径、ζ-电位均变大,乳液的微观结构表明消化体系出现 液滴聚合现象;在模拟肠液消化后,薄荷油纳米乳



图 4 薄荷油纳米乳液的稳定性分析图

Fig. 4 Analysis diagrams of stability of peppermint oil nanoemulsion

液的界面蛋白被水解,油滴被消化,乳液的平均粒 径减小、ζ-电位绝对值增加。根据多重光散射稳定 性分析仪扫描图谱可知,薄荷油纳米乳液在55℃ 条件下检测 8 h 并未出现乳液上浮和絮凝等现象, 结果表明高压均质制备的纳米乳液具有良好的稳 定性。

参考文献

- 1 TASSOU C, KOUTSOUMANIS K, NYCHAS G J E. Inhibition of Salmonella enteritidis, and Staphylococcus aureus, in nutrient broth by mint essential oil[J]. Food Research International, 2000, 33(3-4):273-280.
- 2 EDRIS A E. Pharmaceutical and therapeutic potentials of essential oils and their individual volatile constituents: a review [J]. Phytotherapy Research, 2007, 21(4):308-323.
- 3 WOOSTER T J, GOLDING M, SANGUANSRI P. Impact of oil type on nanoemulsion formation and ostwald ripening stability [J]. Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids, 2008, 24(22):12758 12765.
- 4 BOUCHEMAL K, BRIANÇON S, PERRIER E, et al. Nano-emulsion formulation using spontaneous emulsification: solvent, oil and surfactant optimisation [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2004, 280(1-2):241-251.
- 5 MAJEED H, ANTONIOU J, HATEGEKIMANA J, et al. Influence of carrier oil type, particle size on invitro lipid digestion and eugenol release in emulsion and nanoemulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 52:415-422.
- 6 RAO J, DECKER E A, XIAO H, et al. Nutraceutical nanoemulsions: influence of carrier oil composition (digestible versus indigestible oil) on carotene bioavailability[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2013, 93(13):3175-3183.
- 7 LEE S J, MCCLEMENTS D J. Fabrication of protein-stabilized nanoemulsions using a combined homogenization and amphiphilic solvent dissolution/evaporation approach[J]. Food Hydrocolloids, 2010, 24(6):560-569.
- 8 SORGENTINI D A, WAGNER J R. Comparative study of structural characteristics and thermal behavior of whey and isolate soybean proteins [J]. Journal of Food Biochemistry, 1999, 23(5):489-507.
- 9 PUPPO M C, BEAUMAL V, CHAPLEAU N, et al. Physicochemical and rheological properties of soybean protein emulsions processed with a combined temperature/high-pressure treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(6):1079-1089.
- 10 WOOSTER T J, LI D, XU M, et al. Impact of different biopolymer networks on the digestion of gastric structured emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36(5):102-114.
- 11 NETZEL M, NETZEL G, ZABARAS D, et al. Release and absorption of carotenes from processed carrots (*Daucus carota*) using in vitro digestion coupled with a Caco-2 cell trans-well culture model[J]. Food Research International, 2011, 44(4):868 874.
- 12 HAMMER K A, CARSON C F, RILEY T V. Antimicrobial activity of essential oils and other plant extracts [J]. Journal of Applied Microbiology, 1999, 86(6):985-990.

WEN Desheng, SHANG Xudong, PAN Weiyuan, et al. Design and experiment on gear multi-pump and multi-motor driving system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 399 - 406. (in Chinese)

- 15 杨国来,田丽红,张友亮,等.大排量径向柱塞泵主要结构参数及流量脉动研究[J].液压气动与密封,2015,35(2):13-15.
- YANG Guolai, TIAN Lihong, ZHANG Youliang, et al. Research on main structure parameters and flow pulsation of large displacement radial piston pump[J]. Hydraulic & Pneumatic & Sealing, 2015,35(2):13-15. (in Chinese)
- 16 闻德生,刘巧燕,刘忠迅,等. 混合型多泵多速马达传动输出特性的研究[J]. 西安交通大学学报,2014,48(12):15-20.
- WEN Desheng, LIU Qiaoyan, LIU Zhongxun, et al. Study on transmission output characteristics of hybrid multi-pump multispeed motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014,48(12):15-20. (in Chinese)
- 17 闻德生,吕世君,杜孝杰,等.双定子液压马达差动连接理论分析[J].农业机械学报,2011,42(9):219-224.
 WEN Desheng, LÜ Shijun, DU Xiaojie, et al. Theoretical analysis of differential connection of double-stator hydraulic motor[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9): 219-224. (in Chinese)
- 18 闻德生,杨杰,郑珍泉,等.双定子对称型多泵多速马达理论特性分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(7):321-324.http: //www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140749&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j. issn.1000-1298.2014.07.049.

WEN Desheng, YANG Jie, ZHENG Zhenquan, et al. Theory analyses of double stator symmetrical type multi pump and multi speed motor [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 321-324. (in Chinese)

- 19 陈玉华, 卞祖亮, 陆玉春. 背压机组液压调节系统改进与实践[J]. 冶金动力, 2018(5): 37-40, 43.
 CHEN Yuhua, BIAN Zuliang, LU Yuchun. Improvement and practice of hydraulic regulating system of back pressure unit[J].
 Metallurgical Power, 2018(5): 37-40, 43. (in Chinese)
- 20 王雪丽. 基于 RBF 神经网络电液恒功率调速自整定 PID 控制[J]. 机床与液压, 2016, 44(22): 115-117. WANG Xueli. Self-tuning PID control based on RBF neural network electro-hydraulic constant power speed regulation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(22): 115-117. (in Chinese)

(上接第 386 页)

- 13 SALVIA-TRUJILLO L, QIAN C, MARTÃ N-BELLOSO O, et al. Influence of particle size on lipid digestion and β-carotene bioaccessibility in emulsions and nanoemulsions [J]. Food Chemistry, 2013, 141(2):1472-1480.
- 14 MALAKI N A, WRIGHT A J, CORREDIG M. Impact of interfacial composition on emulsion digestion and rate of lipid hydrolysis using different in vitro digestion models[J]. Colloids & Surfaces B Biointerfaces, 2011, 83(2):321-330.
- 15 KOSSENA G A, BOYD B J, PORTER C J H, et al. Separation and characterization of the colloidal phases produced on digestion of common formulation lipids and assessment of their impact on the apparent solubility of selected poorly water-soluble drugs[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2003, 92(3):634 - 648.
- 16 SALVIA-TRUJILLO L, MCCLEMENTS D J. Improvement of β-carotene bioaccessibility from dietary supplements using excipient nanoemulsions[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2016, 64(22): 4639 - 4647.
- 17 TRONCOSO E, AGUILERA J M, MCCLEMENTS D J. Influence of particle size on the in vitro digestibility of protein-coated lipid nanoparticles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 382(1):110-116.
- 18 DAHAN A, HOFFMAN A. Rationalizing the selection of oral lipid based drug delivery systems by an in vitro dynamic lipolysis model for improved oral bioavailability of poorly water soluble drugs [J]. Journal of Controlled Release, 2008, 129(1):1-10.
- 19 SUN J H, LIM B O, DECKER E A, et al. In vitro, human digestion models for food applications [J]. Food Chemistry, 2011, 125(1):1-12.
- 20 RIGOTTI A. Absorption, transport, and tissue delivery of vitamin E[J]. Molecular Aspects of Medicine, 2007, 28(5-6): 423-436.
- 21 YU H, SHI K, LIU D, et al. Development of a food-grade organogel with high bioaccessibility and loading of curcuminoids[J]. Food Chemistry, 2012, 131(1):48 - 54.
- 22 WANG P, LIU H J, MEI X Y, et al. Preliminary study into the factors modulating β-carotene micelle formation in dispersions using an in vitro digestion model[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 26(2):427-433.
- 23 GOLDING M, WOOSTER T J. The influence of emulsion structure and stability on lipid digestion [J]. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 2010, 15(1):90 - 101.
- 24 DYBOWSKA B E. The effects of temperature and homogenization pressure on flow characteristics of whey protein-stabilized O/W emulsions[J]. Milchwissenschaft, 2000, 55(4):194-197.
- 25 FLOURY J, DESRUMAUX A, LEGRAND J. Effect of ultra-high-pressure homogenization on structure and on rheological properties of soy protein-stabilized emulsions[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(9):3388-3395.
- 26 姚盛宇. 多重光散射技术研究乳液体系的稳定性和流变性[D]. 南宁:广西大学, 2016. YAO Shengyu. Study on the stability and rheological properties of emulsion system by multiple light scattering technology[D]. Nanning:Guangxi University, 2016. (in Chinese)