

# 山茶油纳米乳液的制备、表征 及抗氧化性分析

蔡国强<sup>1,2</sup>, 徐雯雯<sup>2</sup>, 罗天骥<sup>2</sup>, 潘卫<sup>1,3</sup>, 张蕾<sup>1,2</sup>, 何一波<sup>1,3</sup>

(1. 浙江省绿色清洁技术及洗涤用品重点实验室, 浙江 丽水 323000; 2. 纳爱斯浙江科技有限公司, 杭州 310051; 3. 纳爱斯集团有限公司, 浙江 丽水 323000)

**摘要:**为扩大山茶油的商业应用范围,采用超声技术制备山茶油纳米乳液,通过单因素实验考察了羟丙基- $\beta$ -环糊精(HP- $\beta$ -CD)添加量、超声功率和超声时间对纳米乳液粒径和分散性指数(PDI)的影响,对山茶油纳米乳液的制备工艺进行了优化。通过扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、接触角及粒径测定等对山茶油纳米乳液形貌进行表征,并通过傅里叶红外光谱(FT-IR)表征其包埋效果。此外,考察了山茶油纳米乳液的长期物理稳定性和抗氧化性。结果表明:山茶油纳米乳液最佳制备工艺条件为HP- $\beta$ -CD添加量10%、超声功率500 W和超声时间15 min,在此条件下山茶油纳米乳液的平均粒径为66.01 nm;山茶油纳米乳液外观透明泛蓝光,粒径小且分布均一,HP- $\beta$ -CD/T80纳米晶的存在可能提高了乳液的稳定性;FT-IR结果表明山茶油被成功包裹;山茶油纳米乳液具有较好的长期物理稳定性,其对DPPH自由基和羟自由基的清除率显著高于同质量分数的山茶油乙醇溶液。综上,山茶油纳米乳液制备工艺简便可行,所得产品稳定性良好,且具有一定的抗氧化性。

**关键词:**山茶油;纳米乳液;超声技术;制备工艺;表征;抗氧化性

中图分类号:TS225.1;TS221 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)03-0146-07

## Preparation, characterization and antioxidant properties of oil-tea camellia seed oil nanoemulsion

CAI Guoqiang<sup>1,2</sup>, XU Wenwen<sup>2</sup>, LUO Tianji<sup>2</sup>, PAN Wei<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Lei<sup>1,2</sup>, HE Yibo<sup>1,3</sup>

(1. Key Laboratory of Green Cleaning Technology & Detergent of Zhejiang Province, Lishui 323000, Zhejiang, China; 2. NICE Zhejiang Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, China; 3. NICE Group Co., Ltd., Lishui 323000, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to expand the commercial application range of oil-tea camellia seed oil (CMO), ultrasonic technology was used to prepare CMO nanoemulsion. The effects of hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin (HP- $\beta$ -CD) addition amount, ultrasonic power and ultrasonic time on the particle size and polydispersity index (PDI) of the nanoemulsion were investigated by single factor experiment to optimize the preparation process of CMO nanoemulsion. The morphology of CMO nanoemulsion was characterized by scanning electron microscopy (SEM), transmission electron microscope (TEM), contact

angle and particle size measurements, and the encapsulating effect was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). In addition, the long-term physical stability and antioxidant activity of CMO nanoemulsion were investigated. The results showed that the optimal conditions for preparation of CMO nanoemulsion

收稿日期:2023-08-29;修回日期:2024-10-24

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划项目(2022C01174)

作者简介:蔡国强(1984),男,高级工程师,博士,主要从事化妆品配方技术开发和功能天然产物的研究工作(E-mail) caigq84@cnnice.com。

通信作者:何一波,高级工程师,硕士(E-mail) hyb@cnnice.com。

were obtained as follows: HP- $\beta$ -CD addition amount 10%, ultrasonic power 500 W and ultrasonic time 15 min. Under these conditions, the average particle size of CMO nanoemulsion was 66.01 nm. CMO nanoemulsion was transparent and bluish in appearance, with small particle size and uniform distribution. The existence of HP- $\beta$ -CD/T80 nanoparticles might improve the stability of the emulsion. FT-IR characterization showed that CMO was successfully encapsulated. CMO nanoemulsion had good long-term physical stability, and its scavenging rates of DPPH free radical and OH free radical were significant higher than those of CMO-ethanol solution with the same mass fraction of CMO. In conclusion, the preparation process of CMO nanoemulsion is simple and feasible, and the obtained product has good stability and certain antioxidant activity.

**Key words:** oil-tea camellia seed oil; nanoemulsion; ultrasonic technology; preparation process; characterization; antioxidant activity

山茶油,又称油茶籽油,是从油茶籽中获得的植物油,其含有丰富的不饱和脂肪酸,尤其是油酸和亚油酸,还含有多种天然的内源性抗氧化成分,如生育酚、植物甾醇、角鲨烯和山茶皂苷等<sup>[1-2]</sup>。山茶油具有抗氧化、调节血糖、抗肿瘤、抗炎、抗菌等功能,被广泛应用于食品、保健食品和化妆品等领域<sup>[3-4]</sup>。但山茶油中的不饱和脂肪酸受热、光、氧气等因素的影响而易氧化,并且山茶油水溶性差以致其很难均匀地分散在基质中,这限制了山茶油的商业使用范围,因此开发基于山茶油的递送体系对扩大其应用范围有重要意义。

纳米乳液是一种极具潜力的新型载体体系,具有提高活性成分稳定性、溶解度、生物利用率及赋予缓释作用等优点<sup>[5-7]</sup>。相较于普通乳液,纳米乳液因其液滴粒径小,通过布朗运动能够克服重力作用以致体系分散均匀,进而具有一定的动力学稳定性。根据外加能量来源的不同,纳米乳液的制备方法可分为低能乳化法和高能乳化法,其中,超声技术属于高能乳化法。超声技术主要是基于金属探头产生的超声波在液体中的空化效应,使分子间相互剧烈碰撞,从而形成局部高能以加速粒子运动,促进纳米乳液的形成<sup>[8]</sup>。通过超声技术制备纳米乳液具有操作高效简便、乳化剂含量低等特点。目前,已有关于山茶油纳米乳液的研究报道,如:孙亚欣等<sup>[9]</sup>通过微射流高压均质技术利用复合乳化剂(大豆分离蛋白与茶皂素)成功制备了山茶油纳米乳液;邓楚瑶等<sup>[10]</sup>通过高压均质法成功制备了基于山茶油、紫苏籽油和火麻仁油的川陈皮素纳米乳液。但目前以山茶油作为油相通过超声技术制备纳米乳液的研究较少。此外,羟丙基- $\beta$ -环糊精(Hydroxypropyl- $\beta$ -cyclodextrin, HP- $\beta$ -CD)是环糊精经结构改性的衍

生物,因其高溶解性、低毒安全等特点被广泛作为载体材料。因此,本文以 HP- $\beta$ -CD 为载体,通过超声技术制备山茶油纳米乳液,通过单因素实验对其制备工艺进行优化,并对山茶油纳米乳液进行表征及抗氧化性测定,以期山茶油产品的开发提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

山茶油(化妆品级),浙江山茶润生物科技有限公司;羟丙基- $\beta$ -环糊精(97%),聚山梨醇酯-80(T80),上海麦克林生化科技有限公司;磷酸水合物(99%),抗坏血酸( $V_c$ , 99%),阿达玛斯(中国)有限公司;1,1-二苯基-2-苦基阱(DPPH)自由基(97%),梯希爱(中国)有限公司;七水合硫酸亚铁(99%)、水杨酸(99%)、双氧水( $H_2O_2$ )(30%),中国医药集团有限公司;去离子水,实验室自制。

RO10 多点磁力搅拌器,德国 IKA 公司;SCIENTZ-IIID 超声细胞粉碎机,宁波新芝有限公司;LSP02-1B 双通道抽取-灌注型注射泵,保定迪创电子科技有限公司;LGJ-12 冷冻干燥机,北京松源有限公司;TENSOR II 傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司;Zetasizer Nano ZSE 纳米粒度分析仪,英国 Malvern 公司;DSA 20 接触角测量仪,德国 Kruss 公司;JEM-1400Flash 透射电子显微镜,日本电子株式会社;GeminiSEM500 场发射扫描电子显微镜,德国 Zeiss 公司;LUMiSizer 稳定性分析仪,德国 Lum 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 山茶油纳米乳液的制备

在室温下称取一定量的 HP- $\beta$ -CD,按 HP- $\beta$ -CD与去离子水的总添加量为 94%(以纳米乳液总质量计)与去离子水混合完全作为水相,将 T80

按添加量 4% 滴加至水相中,充分搅拌后按添加量 2% 滴加山茶油直至得到均一的体系,放入超声细胞粉碎机中在一定超声功率下超声一定时间,即得山茶油纳米乳液。以不添加山茶油的样品为空纳米乳液。将空纳米乳液经过 0.22  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤后,即得 HP- $\beta$ -CD/T80 纳米晶。

### 1.2.2 粒径的测定

将样品用去离子水稀释 10 倍,在  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$  条件下通过纳米粒度分析仪分别对样品粒径和多分散性指数(PDI)进行测定,每个样品平行测定 3 次。

### 1.2.3 扫描电子显微镜(SEM)表征

将山茶油纳米乳液放入  $-4^\circ\text{C}$  冰箱中预冷冻 24 h 后,在压力 0.1 MPa、温度  $-55^\circ\text{C}$  条件下冷冻干燥至少 24 h。将冻干后的样品固定在金属棒的导电双面胶上并喷金,以 10 kV 的加速电压在扫描电子显微镜上观察。

### 1.2.4 透射电子显微镜(TEM)表征

将待测样品用去离子水稀释 10 倍后滴至铜网上,于室温自然风干,用质量分数 2% 的磷钨酸溶液负染,再次自然风干后通过透射电子显微镜对样品进行观察。

### 1.2.5 接触角的测定

将 HP- $\beta$ -CD/T80 纳米晶均匀涂抹至干净的载玻片上,并在室温下风干成膜。随后,将山茶油滴在薄膜上直至完全浸透。采用接触角测量仪测试时,将载玻片放置在配有高速摄像头的载物台上,并且通过进样器将去离子水滴至载玻片,使其与薄膜接触形成接触角,最后用摄像头进行捕捉。

### 1.2.6 傅里叶红外光谱(FT-IR)表征

采用傅里叶红外光谱仪对山茶油纳米乳液进行包裹效果表征。室温下分别取山茶油、HP- $\beta$ -CD、山茶油纳米乳液置于 ATR 采样附件上,在光谱范围  $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$  下对样品进行光谱采集。

### 1.2.7 长期物理稳定性的测定

采用 LUMiSizer 稳定性分析仪对山茶油纳米乳液的长期物理稳定性进行模拟测试。取 400  $\mu\text{L}$  山茶油纳米乳液均匀注入样品皿中,在温度  $40^\circ\text{C}$ 、离心转速 4 000 r/min 下,每 30 s 记录 1 次样品的透射率的特征线,共 255 次。

### 1.2.8 抗氧化性测定

#### 1.2.8.1 DPPH 自由基清除实验

对质量分数 2% 的  $V_C$  水溶液、质量分数 2% 的山茶油乙醇溶液(与山茶油纳米乳液中山茶油含量一致)、空纳米乳液和山茶油纳米乳液进行 DPPH 自由基清除实验。

在室温下配制 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液,按照表 1 顺序在 96 孔板中依次添加试剂 1、2、3,在室温下避光放置 30 min 后于 517 nm 处测定吸光度,分别记为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,每个样品平行测试 3 次。按照式(1)计算 DPPH 自由基清除率( $P_{\text{DPPH}}$ )。

表 1 DPPH 自由基清除实验试剂组成

Table 1 Reagent composition of DPPH free radical scavenging experiment

组分	体积/ $\mu\text{L}$		
	试剂 1	试剂 2	试剂 3
待测样品	100		100
DPPH 溶液	100	100	
无水乙醇		100	100

$$P_{\text{DPPH}} = \frac{A_2 + A_3 - A_1}{A_2} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.8.2 羟自由基清除实验

对质量分数 2% 的  $V_C$  水溶液、质量分数 2% 的山茶油乙醇溶液、空纳米乳液和山茶油纳米乳液进行羟自由基清除实验。

在室温下配制 10 mmol/L 的  $\text{FeSO}_4$  水溶液、10 mmol/L 的水杨酸乙醇溶液和 0.01%  $\text{H}_2\text{O}_2$  水溶液,按照表 2 顺序在 96 孔板中依次添加试剂 1、2、3,在  $37^\circ\text{C}$  下避光放置 30 min 后于 510 nm 处测定吸光度,分别记为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ ,每个样品平行测试 3 次。按照公式(2)计算羟自由基清除率( $P_{\text{OH}}$ )。

表 2 羟自由基清除实验试剂组成

Table 2 Reagent composition of OH free radical scavenging experiment

组分	体积/ $\mu\text{L}$		
	试剂 1	试剂 2	试剂 3
$\text{FeSO}_4$ 溶液	50	50	50
水杨酸溶液	50	50	50
待测样品		50	50
无水乙醇	50		
$\text{H}_2\text{O}_2$ 溶液	50	50	
去离子水			50

$$P_{\text{OH}} = \frac{A_1 - A_2 + A_3}{A_1} \times 100\% \quad (2)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 山茶油纳米乳液制备工艺优化

在固定 HP- $\beta$ -CD 添加量 10%、超声功率 400 W、超声时间 10 min 的基础上进行单因素实验,考察 HP- $\beta$ -CD 添加量、超声功率、超声时间对山茶油纳米乳液粒径和 PDI 的影响,结果见图 1。

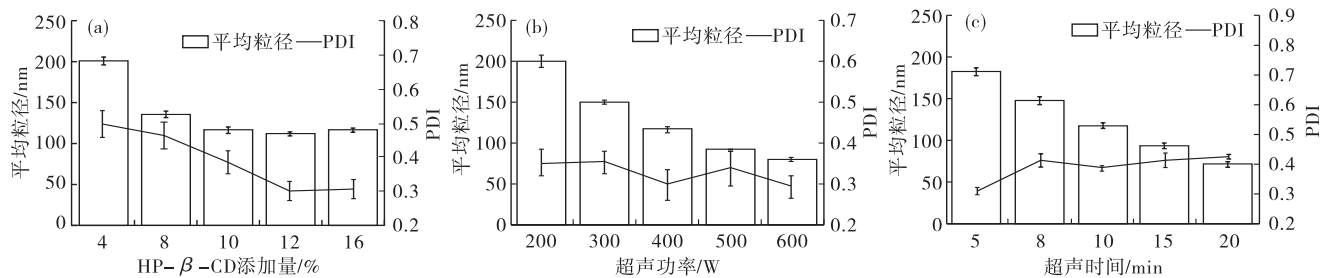


图1 山茶油纳米乳液制备单因素实验结果

Fig. 1 Single factor experiment results of preparation of oil-tea camellia seed oil (CMO) nanoemulsion

由图1a可知,随着HP-β-CD添加量从4%增加到10%,山茶油纳米乳液的平均粒径和PDI均逐渐减小。可能是因为HP-β-CD添加量不足导致在界面处油滴被覆盖不完全<sup>[11]</sup>,体系易聚结失稳;当提高HP-β-CD添加量时,足够的HP-β-CD与T80通过自组装形成纳米晶在油水界面吸附形成致密的界面膜,进而通过增加空间位阻来防止颗粒聚结以提高稳定性<sup>[12-13]</sup>。当HP-β-CD添加量大于10%时,山茶油纳米乳液的平均粒径和PDI变化均相对不大。因此,选择HP-β-CD添加量为10%。

由图1b可知,随着超声功率从200 W增大到600 W,山茶油纳米乳液的平均粒径先减小后趋于稳定,超声功率500 W与600 W时的平均粒径相差不大。超声功率过高会造成液滴间的碰撞过于频繁,从而破坏液滴结构,较小的液滴随着空化效应的增强被强制挤压、重新聚集,进而导致纳米乳液的平均粒径增大<sup>[14-15]</sup>。本研究中,随超声功率增大,PDI总体呈先降低后上升最后下降的趋势,这可能与超声过程中系统温度逐渐升高有关,其影响了液滴聚集,而当超声功率增加到600 W时,乳液体系变得更加稳定,进而减少了颗粒的聚集。因此,为了减少仪器的损耗和保证乳液的稳定性,选择超声功率为500 W。

由图1c可知,随着超声时间从5 min延长到20 min,山茶油纳米乳液的平均粒径呈先减小后逐渐平缓的趋势,超声时间15 min与20 min时的平均粒径相差不大。超声时间过长会使液滴发生长时间的碰撞,同时,过高的空化易导致形成不均匀的聚集,进而造成纳米乳液平均粒径增大<sup>[16-17]</sup>。随着超声时间的延长,山茶油纳米乳液的PDI呈逐步增加的趋势,这可能也是空化能引起的液滴聚集所致。因此,选择超声时间为15 min。

综上,山茶油纳米乳液的最佳制备条件为HP-β-CD添加量10%、超声功率500 W、超声时间15 min。

## 2.2 山茶油纳米乳液的表征

### 2.2.1 山茶油纳米乳液的形貌表征

对最佳条件下制备的山茶油纳米乳液进行形貌表征。山茶油纳米乳液的SEM及TEM形貌见图2,粒径分布见图3。HP-β-CD/T80纳米晶的TEM形貌和接触角测定结果见图4,粒径分布见图5。

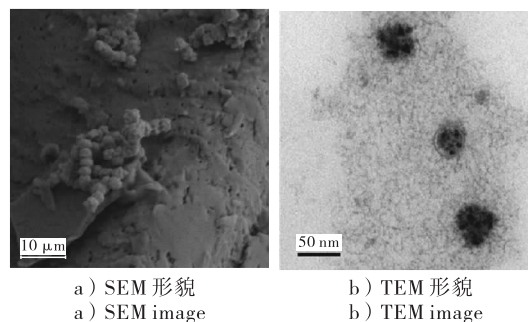


图2 山茶油纳米乳液的SEM和TEM形貌

Fig. 2 SEM and TEM images of CMO nanoemulsion

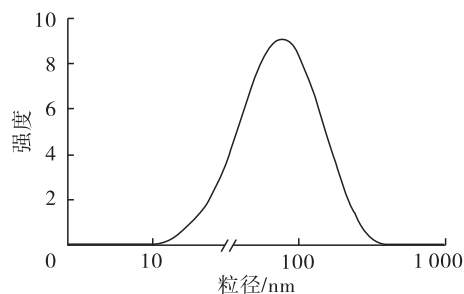
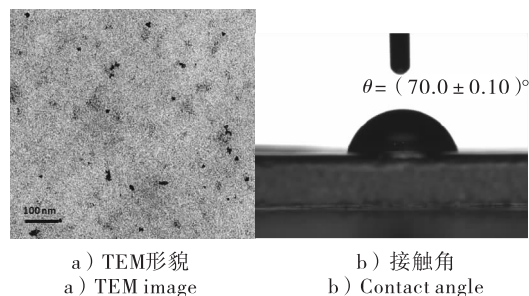


图3 山茶油纳米乳液的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of CMO nanoemulsion

图4 HP-β-CD/T80纳米晶的TEM形貌及接触角  
Fig. 4 TEM image and contact angle of HP-β-CD/T80 nanoparticles

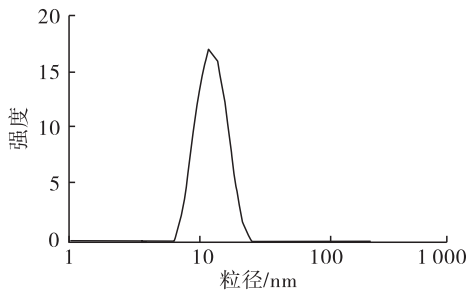


图5 HP- $\beta$ -CD/T80 纳米晶的粒径分布

Fig.5 Particle size distribution of HP- $\beta$ -CD/T80 nanoparticles

实验中观察到山茶油纳米乳液外观澄清透明,略泛蓝光,当一束光线透过纳米乳液时可以观察到一条光亮的“通路”,说明制备的纳米乳液具有丁达尔现象。

由图2可知,通过SEM可观察到山茶油纳米乳液颗粒呈圆球形,表面粗糙不平整,推测可能是由于油水界面吸附着HP- $\beta$ -CD/T80纳米晶。进一步通过TEM可观察到山茶油纳米乳液液滴表面吸附着纳米晶,且乳液粒径小于100 nm。由图3可知,山茶油纳米乳液平均粒径为66.01 nm,这与TEM观察到的结果一致。

在乳液制备过程中,HP- $\beta$ -CD分子首先与T80进行自组装,通过氢键作用进一步组装成具有两亲性的HP- $\beta$ -CD/T80纳米晶<sup>[18-20]</sup>。在山茶油的存在下,纳米晶吸附在油水界面上形成物理屏障以增加空间位阻来提高乳液的稳定性等<sup>[21]</sup>。由图4可知,HP- $\beta$ -CD/T80纳米晶的接触角较大,说明液滴能够较好地维持形状,结合图2可知,该纳米晶在油水界面上形成了一层致密的薄膜,从而表现出对山茶油较佳的乳化能力。HP- $\beta$ -CD/T80纳米晶呈类圆球形,其平均粒径为12.85 nm(见图5)。

### 2.2.2 山茶油纳米乳液的包裹效果表征

对最佳条件下制备的山茶油纳米乳液进行包裹效果表征。山茶油纳米乳液、山茶油及HP- $\beta$ -CD的FT-IR图如图6所示。

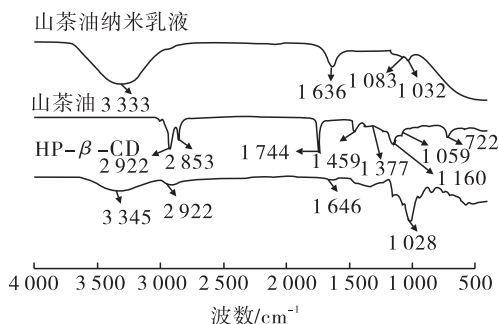


图6 山茶油纳米乳液、山茶油及HP- $\beta$ -CD的FT-IR图  
Fig.6 FT-IR spectra of CMO nanoemulsion, CMO and HP- $\beta$ -CD

如图6所示,在山茶油的FT-IR图中,2922  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于烷烃 $\text{CH}_2$ 反对称伸缩振动,2853  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于烷烃 $\text{CH}_2$ 对称伸缩振动,1744  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动,1459  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于 $\text{CH}_2$ 变角振动,1377  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于 $\text{CH}_3$ 对称变角振动,1160  $\text{cm}^{-1}$ 和1059  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸缩振动,722  $\text{cm}^{-1}$ 处的红外吸收峰归属于 $\text{CH}_2$ 面内摇摆振动。HP- $\beta$ -CD的特征峰主要集中在3345、2922、1646、1028  $\text{cm}^{-1}$ 处,其中3345  $\text{cm}^{-1}$ 和2922  $\text{cm}^{-1}$ 处分别是由HP- $\beta$ -CD的糖类OH伸缩振动和烷烃 $\text{CH}_2$ 反对称伸缩振动引起的。然而,在山茶油纳米乳液的谱图中,部分山茶油的特征峰表现出明显减弱甚至被掩盖消失。此外,在山茶油纳米乳液的谱图中观察到OH伸缩振动峰从3345  $\text{cm}^{-1}$ 偏移到3333  $\text{cm}^{-1}$ ,表明HP- $\beta$ -CD与山茶油之间形成了氢键作用增加<sup>[22]</sup>,这导致山茶油受到氢键的驱动被嵌入,进而减弱被包封分子的运动和信号强度,表明山茶油已被成功包裹<sup>[23]</sup>。

### 2.3 山茶油纳米乳液的长期物理稳定性

采用LUMiSizer稳定性分析仪跟踪山茶油纳米乳液在不同位置和时间上的透射率变化情况,从而模拟其长期物理稳定性,其中:样品皿底部和顶部的位置分别位于130 mm和105 mm处,弯液面的位置为108 mm<sup>[24]</sup>。样品透射率的特征线按时间顺序从下往上依次排列,每条曲线表示在给定时间内每个位置的传输情况。因此,曲线的密度代表了相分离所需的时间,即密度越大的谱图出现相分离现象所需要的时间更长<sup>[25-26]</sup>。山茶油纳米乳液的长期物理稳定性如图7所示。

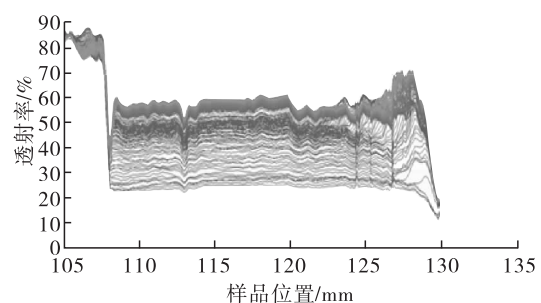


图7 山茶油纳米乳液的长期物理稳定性  
Fig.7 Long-term physical stability of CMO nanoemulsion

由图7可知,山茶油纳米乳液的传输图谱呈现密集分布,说明其具有较好的稳定性。在40  $^{\circ}\text{C}$ 下4000 r/min离心过程中,山茶油纳米乳液的峰面并

没有向顶部或底部移动,也证明了其较高的稳定性,不存在乳液上浮或沉降的现象。

#### 2.4 山茶油纳米乳液的抗氧化性

DPPH 自由基能够与苯环形成  $p-\pi$  共轭的单电子,当和抗氧化剂反应时含氮自由基会被清除,因此可通过吸光度的变化确定样品的 DPPH 自由基清除能力。通过 Fenton 反应使  $H_2O_2/Fe^{2+}$  体系产生羟自由基,进而与水杨酸反应生成显色化合物,因此可通过吸光度的变化确定样品的羟自由基清除能力。山茶油纳米乳液的 DPPH 自由基和羟自由基清除能力分别见图 8 和图 9。

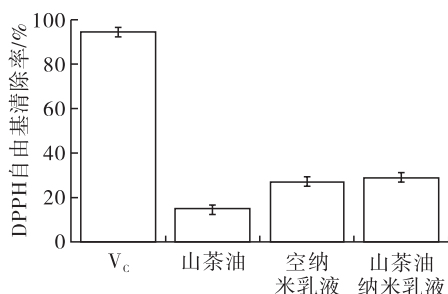


图 8 山茶油纳米乳液的 DPPH 自由基清除能力

Fig. 8 DPPH free radical scavenging ability of CMO nanoemulsion

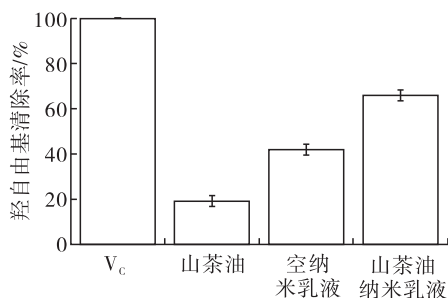


图 9 山茶油纳米乳液的羟自由基清除能力

Fig. 9 OH free radical scavenging ability of CMO nanoemulsion

由图 8 可知,相同质量分数下, V<sub>c</sub> 具有最强的 DPPH 自由基清除能力,其 DPPH 自由基清除率为 94.77%,山茶油的 DPPH 自由基清除率为 17.35%,空纳米乳液的为 27.58%,山茶油纳米乳液的为 29.55%。

由图 9 可知,相同质量分数下, V<sub>c</sub> 的羟自由基清除率为 99.94%,山茶油的为 19.26%,空纳米乳液的为 41.99%,山茶油纳米乳液的为 65.93%。山茶油纳米乳液清除 DPPH 自由基和羟自由基能力显著高于同质量分数的山茶油乙醇溶液,可能是因为纳米乳液粒径小,可以更高效地与自由基反应,从而表现出优异的清除效果<sup>[27]</sup>。因此,山茶油纳米乳液具有一定的抗氧化性,该纳米体系与山茶油之间的

相互作用有待后续进一步分析。

### 3 结论

本文采用超声技术制备山茶油纳米乳液,所得纳米乳液的平均粒径(66.01 nm)较小且分布均匀,HP- $\beta$ -CD/T80 纳米晶的存在可能提高了乳液的稳定性。通过 FT-IR 验证,山茶油被成功包裹,且形成该纳米乳液的主要驱动力为氢键。通过 LUMiSizer 稳定性分析仪测试发现,山茶油纳米乳液的传输图谱表现出密集分布,表明其具有较好的长期物理稳定性。通过抗氧化性能测试,山茶油纳米乳液清除 DPPH 自由基和羟自由基能力显著高于同质量分数的山茶油乙醇溶液,表明其具有一定的抗氧化能力。

#### 参考文献:

- [1] WANG X, ZENG Q, DEL MAR CONTRERAS M, et al. Profiling and quantification of phenolic compounds in *Camellia* seed oils: Natural tea polyphenols in vegetable oil [J]. *Food Res Int*, 2017, 102: 184-194.
- [2] 马宇晨,王光宜,刘乐乐,等. 植物油中内源性成分的抗氧化作用[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 119-130.
- [3] 程恒光,方婷欢,蒋晴,等. 高油酸葵花籽油与油茶籽油的抗炎抗刺激、抗湿疹功效比较[J]. *中国油脂*, 2024, 49(10): 62-65.
- [4] 李文昭,蒋晴,唐礼荣. 含山茶油保湿乳抗湿疹、抗炎的体外研究[J]. *香料香精化妆品*, 2022, (5): 113-117, 29.
- [5] 罗钰,修伟业,王峙力,等. 纳米乳液的制备方法及其应用研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(7): 5-9.
- [6] XIAO Z, ZHANG Y, NIU Y, et al. Cyclodextrins as carriers for volatile aroma compounds: A review [J/OL]. *Carbohydr Polym*, 2021, 269: 118292 [2023-08-29]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118292>.
- [7] SHARIFIMEHR S, SOLTANIZADEH N, GOLI S A H. Physicochemical properties of fried shrimp coated with bio-nano-coating containing eugenol and *Aloe vera* [J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2019, 109: 33-39.
- [8] 赵钰航,肖英琛,冯棋琴,等. 椰子油纳米乳液制备工艺条件优化[J]. *中国油脂*, 2024, 49(1): 67-70, 78.
- [9] 孙亚欣,郑晓燕,郑丽丽,等. 大豆分离蛋白-茶皂素复合乳化剂制备山茶油纳米乳液及其性质研究[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 27-34, 42.
- [10] 邓楚瑶,冯炜婷,陈亦璐,等. 基于功能性油脂的川陈皮素纳米乳液制备及消化特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(18): 201-206.
- [11] HASHIZAKI K, KAGEYAMA T, INOUE M, et al. Study on preparation and formation mechanism of *n*-alkanol/water emulsion using  $\alpha$ -cyclodextrin [J]. *Chem*

- Pharm Bull, 2007, 55(11): 1620 – 1625.
- [12] 王相凡, 李学红, 于国强, 等.  $\beta$ -环糊精稳定柠檬醛 Pickering 乳液的制备及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 124 – 129.
- [13] DICKINSON E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles[J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2010, 15(1/2): 40 – 49.
- [14] PÁEZ – HERNÁNDEZ G, MONDRAGÓN – CORTEZ P, ESPINOSA – ANDREWS H. Developing curcumin nanoemulsion by high – intensity methods: Impact of ultrasonication and microfluidization parameters [J]. LWT – Food Sci Technol, 2019, 111: 291 – 300.
- [15] WANG W, WANG R, YAO J, et al. Effect of ultrasonic power on the emulsion stability of rice bran protein – chlorogenic acid emulsion [J/OL]. Ultrason Sonochem, 2022, 84: 105959 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105959>.
- [16] JIN H, WANG X, CHEN Z, et al. Fabrication of  $\beta$ -conglycinin – stabilized nanoemulsion via ultrasound process and influence of SDS and PEG 10000 co – emulsifiers on the physicochemical properties of nanoemulsion [J]. Food Res Int, 2018, 106: 800 – 808.
- [17] 黄欢, 田燕, 刘一哲, 等. 椰子油纳米乳液制备工艺优化及其稳定性分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 10 – 19.
- [18] LECLERCQ L, COMPANY R, MÜHLBAUER A, et al. Versatile eco – friendly Pickering emulsions based on substrate/native cyclodextrin complexes: A winning approach for solvent – free oxidations [J]. Chem Sus Chem, 2013, 6(8): 1533 – 1540.
- [19] 李琳琳, 段尊斌, 朱丽君, 等. 基于修饰的 $\beta$ -环糊精的超分子体系研究及应用进展[J]. 应用化学, 2017, 34(2): 123 – 138.
- [20] 黄娟, 杨宇, 于海燕, 等. 环糊精超分子自组装包合机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 258 – 268.
- [21] XIAO Z, LIU Y, NIU Y, et al. Cyclodextrin supermolecules as excellent stabilizers for Pickering nanoemulsion[J/OL]. Colloid Surf, 2020, 588: 124367 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124367>.
- [22] JIANG L, PENG Y, YAN Y, et al. " Annular Ring" microtubes formed by SDS @  $2\beta$  – CD complexes in aqueous solution [J/OL]. Soft Matter, 2010, 6(8): 1731 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1039/b920608f>.
- [23] 陈程莉, 李丰泉, 刁倩, 等. 黑枸杞花青素微胶囊优化及理化特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 208 – 214.
- [24] DAMMAK I, DO AMARAL SOBRAL P J. Effect of different biopolymers on the stability of hesperidin – encapsulating O/W emulsions [J]. J Food Eng, 2018, 237: 33 – 43.
- [25] WANG X, LIU L, XIA S, et al. Sodium carboxymethyl cellulose modulates the stability of cinnamaldehyde – loaded liposomes at high ionic strength [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 93: 10 – 18.
- [26] BENJAMIN O, DAVIDOVICH – PINHAS M, SHPIGELMAN A, et al. Utilization of polysaccharides to modify salt release and texture of a fresh semi hard model cheese[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 75: 95 – 106.
- [27] 鲁妍, 聂琴, 赵海燕, 等. 光甘草定 – 烟酰胺纳米乳的制备与抗氧化效果[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 620 – 626.
- 
- (上接第 130 页)
- [51] SI H, CHEONG L Z, HUANG J, et al. Physical properties of soybean oleogels and oil migration evaluation in model praline system[J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93(8): 1075 – 1084.
- [52] HUANG Q, WU Y, XU X, et al. Designing novel ice creams using nut oil emulsion gels based on blueberry pectin and  $\text{CaCl}_2$  as fat replacers: Insights from physicochemical and sensory properties[J/OL]. Int J Biol Macromol, 2024, 279(Pt 4): 135344 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135344>.
- [53] LI L, LIU G. Corn oil – based oleogels with different gelation mechanisms as novel cocoa butter alternatives in dark chocolate[J]. J Food Eng, 2019, 263: 114 – 122.
- [54] WENDT A, ABRAHAM K, WERNECKE C, et al. Application of  $\beta$  – sitosterol +  $\gamma$  – oryzanol – structured organogel as migration barrier in filled chocolate products [J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(9): 1131 – 1140.
- [55] MORIANO M E, ALAMPRESE C. Organogels as novel ingredients for low saturated fat ice creams [J]. LWT – Food Sci Technol, 2017, 86: 371 – 376.
- [56] SILVA – AVELLANEDA E, BAUER – ESTRADA K, PRIETO – CORREA R E, et al. The effect of composition, microfluidization and process parameters on formation of oleogels for ice cream applications [J/OL]. Sci Rep, 2021, 11(1): 7161 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86233-y>.
- [57] MARANGONI A G, GARTI N. Edible oleogels: Structure and health implications [M]. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018.