油脂化学

美藤果油水包油型乳液的制备及其稳定性研究

郭永生[1]，马传国[1,2]，刘　君[1,2]，段柱标[3]

（1. 河南工业大学 粮油食品学院，郑州 450001；2. 小麦和玉米深加工国家工程实验室，郑州 450001；3. 中国科学院西双版纳热带植物园，云南 勐腊 666303）

摘要： 应用高压匀质法制备美藤果油水包油型乳液。以乳液的平均粒径和分散系数（PDI）为指标，探究 Tween 乳化剂类型、油质量分数、乳化剂添加量、剪切速率及均质压力对乳液的平均粒径以及 PDI 的影响。通过测量储藏期内乳液的粒径变化、油相氧化程度（过氧化值和硫代巴比妥酸含量）、液滴的自扩散系数以及游离脂肪酸含量变化，进一步探究储藏期内乳液的物理、氧化以及水解稳定性。结果表明：制备乳液的优化工艺条件为 Tween60 添加量 1%、油质量分数 10%、剪切速率16 000 r/min、均质压力 40 MPa，此条件下制备的乳液平均粒径为（218.27 ± 2.21）nm，PDI 为 0.118 ± 0.002；该工艺条件下制备的美藤果油乳液在 14 d 的储藏期间内具有较好的耐受 pH、盐离子的物理稳定性和较高的氧化稳定性，并且未发生明显的水解作用。

关键词： 美藤果油；水包油型乳液；平均粒径；PDI；稳定性

中图分类号： TS225.1；TS201.2　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1003 - 7969（2019）10 - 0023 - 06

Preparation and stability of Sacha Inchi oil - in - water emulsion

GUO Yongsheng[1], MA Chuanguo[1,2], LIU Jun[1,2], DUAN Zhubiao[3]

(1. College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. National Engineering Laboratory for Wheat & Corn Further Processing, Zhengzhou 450001, China;
3. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, Yunnan, China)

Abstract: The Sacha Inchi oil - in - water emulison was prepared by high - pressure homogenization, and the effects of emulsifier, oil mass fraction, emulsifier dosage, shear rate and homogenous pressure on the droplet overage particle size and polydispersity index (PDI) of the emulsion were explored. Further studies on physical, oxidative and hydrolysis stabilities of emulsion during storage were carried out by analyzing the particle size, self - diffusion coefficient, oxidation stability (peroxide value and thiobarbituric acid value) and free fatty acid content. The results showed that the optimal conditions were determined as follows: Tween60 dosage 1%, oil mass fraction 10%, shear rate 16 000 r/min and homogeneous pressure 40 MPa. Under the optimal conditions, the droplet average particle size and PDI of the emulsion was (218.27 ± 2.21) nm and 0.118 ± 0.002, respectively. The emulsion stored for 14 d had good physical stability with high tolerance against pH and salt ion, and high oxidative stability, and performed no obvious hydrolysis effect.

Key words: Sacha Inchi oil; oil - in - water emulsion; average particle size; PDI; stability

---

收稿日期： 2019 - 03 - 20；**修回日期：** 2019 - 06 - 19

基金项目： 国家重点研发计划项目资助（2018YFD0401102）；河南省自然基金项目（162300410009）

作者简介： 郭永生（1991），男，硕士研究生，研究方向为油脂化学与工艺学（E-mail）1542317157@qq.com。

通信作者： 马传国，教授，博士生导师（E-mail）mcg@haut.edu.cn。

美藤果是一种原产于南美洲安第斯山脉的多年生藤本植物，于 2007 年左右被引入我国并试种成功[1]。美藤果油不仅含有较高的 ω - 3 和 ω - 6 不饱和脂肪酸[2-3]、维生素 E，而且具有较好的抑菌、消炎以及降血脂的作用[4-5]，因而受到人们的广泛关注。

除了传统的煎、炸、炒等食用方式，富含多不饱

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和脂肪酸的植物油在各类功能性食品、医药产品及护肤品中的应用成为一种趋势[6-7]。美藤果油中亚麻酸及亚油酸含量分别高达45%～50%和30%～35%，较高的不饱和度使美藤果油非常容易氧化[8]。目前部分文献报道了通过喷雾干燥微胶囊法包埋美藤果油的应用研究，显著抑制了美藤果油的氧化，并扩展了美藤果油在相关行业中的应用[9-10]。然而相关产品除了应用于纯油体系、粉剂体系，还可能涉及大量的多相多组分的油水分散体系，其中乳液体系是应用最为广泛的一种，如蛋黄酱、调味汁、色拉酱、口服液、功能性饮料、护肤乳液等[11-13]，因此研究美藤果油乳液的理化性能对促进美藤果油在食品、化妆品以及药品等领域中的应用具有必要性和重要意义。

乳液的物理及氧化稳定性不仅受制备方法及参数，乳化剂类型、配比及添加量，油质量分数的影响[14-16]，而且与植物油的组成及性质有关[17-18]。关于美藤果油乳液的制备及其稳定性研究目前文献报道较少。在各种乳液制备方法中，高压匀质法能在乳化剂添加量较低时制备出粒径更小的乳液[19]，是食品乳液最常用的制备方法之一。Tween类型非离子表面活性剂是食品级乳化剂，具有较高的食品安全性及乳化性能，是食品乳液中应用最为广泛的乳化剂之一。因此，本实验采用高压匀质法制备美藤果油乳液，以乳液的平均粒径及分散系数(PDI)为指标，探究Tween乳化剂类型、油质量分数、乳化剂添加量、剪切速率及均质压力的影响，优化制备工艺条件，并进一步研究储藏期内乳液的物理、氧化以及水解稳定性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

美藤果油，中国科学院西双版纳热带植物园提供；1,1,3,3-四乙氧基丙烷标准品、氢过氧化枯烯标准品以及Tween系列乳化剂(Tween20、Tween40、Tween60、Tween80)、硫代巴比妥酸(TBA)、三氯乙酸以及BHT，麦克林试剂公司；正己烷(色谱级)，天津市科密欧试剂公司。

ATS-Basic100高压均质机，德国ATS仪器公司；高速剪切分散乳化机，德国Fliko流体机械制造公司；Malvern Zetasizer Nano ZS90，英国马尔文仪器公司；Avance Ⅲ HD 500 MHz超导核磁共振谱仪，德国Bruker公司。

1.2 实验方法

1.2.1 美藤果油水包油型乳液的制备

取乳化剂溶于油中，混合均匀制备成油相，然后在室温下加入水相中，搅拌均匀；高速剪切乳化2 min得到初乳液，再经高压均质处理得到乳液，冷却后置于4 ℃冰箱中备用。

1.2.2 美藤果油水包油型乳液粒径及PDI的测定

将乳液利用磷酸盐缓冲溶液稀释400倍后，摇晃均匀，取稀释后样品，利用Malvern Zetasizer Nano ZS90测定其平均粒径及PDI。

1.2.3 美藤果油乳液储藏物理稳定性分析

将制备的乳液储藏在37 ℃恒温培养箱中，每隔一定时间取样测定其粒径及PDI。

1.2.4 美藤果油乳液中游离脂肪酸含量的测定[20]

称取一定质量的乳液，加入50 mL已中和的热乙醇溶液，利用氢氧化钠溶液进行滴定，直到出现粉色并在30 s内不褪色，记录消耗体积，利用下式计算游离脂肪酸含量(以油酸计)。

$$游离脂肪酸含量=(CV\times282)/(1\ 000\ m)\times100\%$$

式中：C为氢氧化钠的浓度，mol/L；V为消耗氢氧化钠溶液的体积，mL；m为乳液的质量，g。

1.2.5 美藤果油乳液和纯油体系氧化稳定性的对比分析

取适量的样品置于37 ℃的培养箱中，恒温储藏不同时间后测定其氧化产物。

1.2.5.1 初级氧化产物的测定

脂质氧化初级产物以脂质氢过氧化物含量表示。参照Panya等[21]的方法并进行一些改动：取适量的样品加入3 mL异辛烷-异丙醇混合溶剂(体积比2∶1)，涡旋振荡后在3 000 r/min条件下离心，取上层溶液并加入甲醇-正丁醇混合溶液(体积比2∶1)定容至5 mL，然后加入20 μL 3.94 mol/L硫氰酸钾和20 μL亚铁溶液(0.132 mol/L氯化钡、0.1 mol/L的盐酸和0.144 mol/L硫酸亚铁配制)，混合均匀，避光反应20 min，测定其在510 nm处吸光度。根据以氢过氧化枯烯(异丙苯过氧化氢)为标准品绘制的标准曲线，计算氢过氧化物的含量(以POV表示)。

1.2.5.2 次级氧化产物的测定

脂质氧化次级产物以硫代巴比妥酸的含量表示。参照Mei等[22]的方法并做些改动：取1 mL样品，加入5 mL蒸馏水、2 mL TBA溶液(15 g三氯乙酸、0.375 g硫代巴比妥酸、1.7 mL的浓盐酸以及89.2 g的水混合配制)和0.5 mL BHT溶液(质量浓度2 g/100 mL)，混合均匀后，沸水浴加热20 min，冷却至室温，加入7 mL正丁醇混合，3 000 r/min离心5 min，取上清液在532 nm处测定吸光度。根据以1,1,3,3-四乙氧基丙烷为标准品绘制的标准曲线，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

计算样品中硫代巴比妥酸含量。

1.2.5.3　乳液和纯油体系中美藤果油自扩散系数的测定

利用 500 MHz 超导核磁共振谱仪测定，测试参数“Ledbpgp”脉冲序列，等待时间 *D*1 设置为 3 s，扫描次数 32 次。

2　结果与讨论

2.1　美藤果油乳液制备单因素实验

2.1.1　Tween 系列乳化剂的影响

在乳化剂添加量 1%、油质量分数 10%、剪切速率 16 000 r/min、均质压力 40 MPa 条件下，考察 Tween 系列乳化剂对乳液平均粒径和 PDI 的影响，结果见图 1。

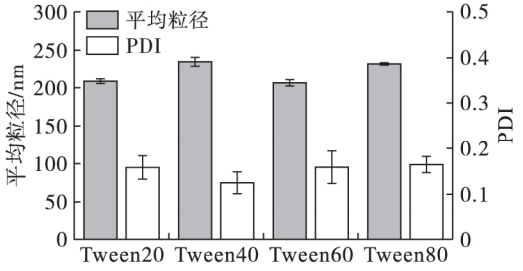

图 1　Tween 系列乳化剂对乳液平均粒径和 PDI 的影响

由图 1 可以看出：不同乳化剂制备的乳液的 PDI 没有明显的差异；乳液的平均粒径有所不同，其中 Tween60 制备的乳液平均粒径最小（206 nm），其他 3 种乳液的平均粒径分布在 208 ~ 234 nm 之间。Tween 系列乳化剂制备的乳液平均粒径的差异可能是由乳化剂 HBL 值的差异引起的；此外，4 种乳化剂在结构上的差异主要体现在脂肪酸酯种类的不同，可能影响乳化剂和油相之间的相容性，进而影响乳化剂的分配，从而影响乳液的粒径。因此，实验选择 Tween60 作为乳化剂。

2.1.2　油质量分数的影响

在 Tween60 添加量 0.5%、均质压力 30 MPa、剪切速率 13 000 r/min 条件下，考察油质量分数对乳液平均粒径和 PDI 的影响，结果见图 2。

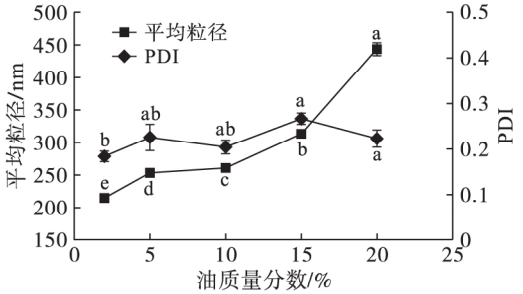

图 2　油质量分数对乳液平均粒径和 PDI 的影响

由图 2 可知：随着油质量分数由 2% 增大至 20%，乳液的 PDI 在 0.2 左右波动并且整体呈现较弱的增加趋势；随着乳液中油质量分数的增加，单位质量的表面活性剂所包裹的油量加大，体系须增大油滴粒径使体系的界面面积最小化以降低体系的表面能，因此乳液平均粒径随着油质量分数增大而增大。油质量分数为 2% ~ 10% 时，乳液平均粒径缓慢增大，油质量分数超过 10% 时，乳液平均粒径迅速增大，说明油质量分数超过 10%，在乳化剂添加量 0.5% 下液滴界面乳化剂分子吸附不足，界面张力开始显著增大，小液滴凝结为大液滴，体系粒径显著增大。考虑到乳液的粒径和 PDI，实验选择 10% 油质量分数作为后续的实验条件。

2.1.3　乳化剂添加量的影响

以 Tween60 为乳化剂，在油质量分数 10%、剪切速率 13 000 r/min、均质压力 30 MPa 条件下，考察乳化剂添加量对乳液平均粒径和 PDI 的影响，结果见图 3。

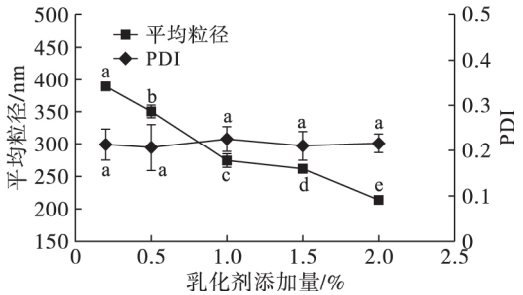

图 3　乳化剂添加量对乳液平均粒径和 PDI 的影响

由图 3 可知：在不同的乳化剂添加量下，乳液的 PDI 无显著差异且在 0.2 左右波动；乳液的平均粒径随着乳化剂添加量的增大逐渐减小，乳化剂添加量为 0.2% ~ 1% 时乳液平均粒径降低显著，乳化剂添加量为 1% ~ 2% 时乳液平均粒径降低趋势平缓。加大乳液中乳化剂添加量，更多的表面活性剂吸附到油滴界面上，降低界面张力的同时提高了界面膜的强度，因此乳液的粒径减小，界面面积增大。考虑到食品中乳化剂的用量，选择乳化剂添加量为 1% 作为后续的实验条件。

2.1.4　剪切速率的影响

在 Tween60 添加量 1%、油质量分数 10%、均质压力 30 MPa 条件下，考察剪切速率对乳液平均粒径和 PDI 的影响，结果见图 4。

由图 4 可知，随着剪切速率的增加，乳液的 PDI 没有显著的变化，而乳液的平均粒径呈先降低后升高的趋势，且在 16 000 r/min 时乳液的平均粒径最小。当剪切速率过快时，可能造成乳化剂难以定向到乳液的界面上，影响乳化剂的效率，从而使乳液的粒径增加；而在较低剪切速率时，形成的乳液液滴之

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间碰撞的概率加大，造成粒径增加。综上，选取剪切速率 16 000 r/min 为后续实验条件。

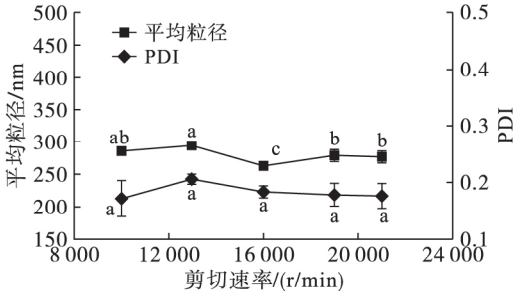

图 4 剪切速率对乳液平均粒径和 PDI 的影响

2.1.5 均质压力的影响

在 Tween60 添加量 1%、油质量分数 10%、剪切速率 16 000 r/min 条件下，考察均质压力对乳液平均粒径和 PDI 的影响，结果见图 5。

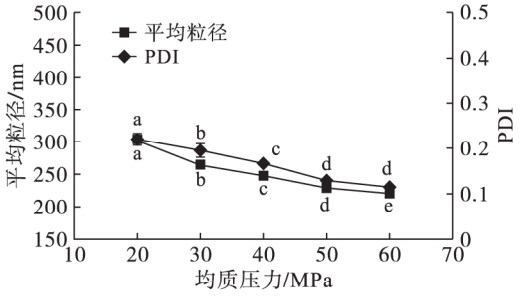

图 5 均质压力对乳液平均粒径和 PDI 的影响

由图 5 可知，在 20 ~ 60 MPa 均质压力下，随着均质压力的增加，乳液的 PDI 和平均粒径显著减小，说明随着均质压力的增加，体系外加能量加大，乳液的破碎程度加大，有利于乳化剂固定到界面上，形成具有更小粒径、更均一分布的乳液。但过高的均质压力可能会引起乳液温度显著提高，加大油脂氧化风险，因此选择均质压力 40 MPa 为实验条件。

根据单因素实验结果，确定制备乳液的优化工艺条件为 Tween60 添加量 1%、油质量分数 10%、剪切速率 16 000 r/min、均质压力 40 MPa，在此条件下制备的乳液平均粒径为(218.27 ± 2.21) nm、PDI 为 0.118 ± 0.002。

2.2 美藤果油乳液的物理稳定性

将最优条件下制备的乳液置于 37 ℃下储藏 2、6、10、14 d，观察其平均粒径和 PDI 的变化，结果见图 6。

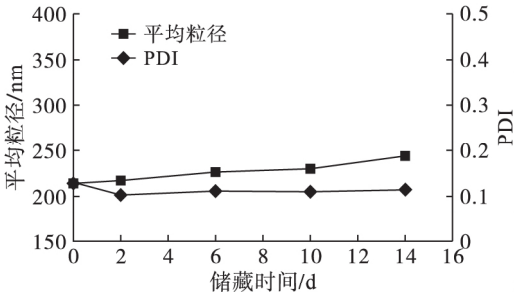

图 6 乳液平均粒径和 PDI 随储藏时间的变化

美藤果油乳液在 37 ℃下储藏 14 d，肉眼观察没有发生分层现象。由图 6 可知，乳液的平均粒径均在 210 ~ 240 nm 之间，且随储藏时间的延长呈现逐渐增加的趋势，说明随着储藏时间的延长，乳液中小粒径液滴逐渐凝结为大液滴，乳液的稳定性降低，这是乳液为热力学不稳定性体系的一种体现。但在 37 ℃、14 d 的储藏期内，PDI 在 0.15 以下，说明乳液在此期间保持较为稳定的物理特征。

储藏过程中，pH 和盐离子质量分数对乳液平均粒径和 PDI 的影响如表 1 所示。由表 1 可知，14 d 储藏期内，乳液在 pH 3、7 以及盐离子质量分数为 1.2% 条件下，乳液平均粒径保持在 230 nm 左右，PDI 保持在 0.11 ~ 0.16 之间，均无显著变化，且在储藏期间肉眼观察没有发生分层现象。这说明乳液物理乳化性质对 pH 以及盐离子有较好的耐受性。

表 1 37 ℃储藏过程中 pH 和盐离子质量分数对乳液平均粒径和 PDI 的影响

pH	氯化钠质量分数/%	平均粒径/nm			PDI		
		1 d	5 d	14 d	1 d	5 d	14 d
7	0	218.27 ± 2.21	225.13 ± 1.17	219.30 ± 2.17	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.00
7	0.4	225.43 ± 0.47	234.70 ± 3.48	224.06 ± 3.46	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.13 ± 0.00
7	0.8	218.53 ± 0.47	225.27 ± 1.76	217.30 ± 3.15	0.12 ± 0.04	0.15 ± 0.02	0.17 ± 0.02
7	1.2	230.90 ± 0.53	237.83 ± 3.86	226.70 ± 1.05	0.11 ± 0.01	0.13 ± 0.02	0.16 ± 0.02
3	0	229.43 ± 1.46	233.00 ± 1.68	229.27 ± 3.27	0.13 ± 0.01	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.02

2.3 美藤果油乳液的氧化稳定性

乳液体系中油相的氧化是影响乳液质量、风味、口感等特征的重要原因[23]。实验分别测定了 37 ℃、14 d 的氧化过程中美藤果油在乳液包埋体系与纯油体系过氧化值和硫代巴比妥酸含量，以比较美藤果油在乳液包埋体系与纯油体系中的氧化稳定性，结果见图 7。由图 7 可知，相对于纯油体系，水包油型乳液对美藤果油的氧化具有显著的延缓作用。实验分别测量了乳液和纯油体系中美藤果油甘油酯分子的自扩散系数，结果如表 2 所示。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

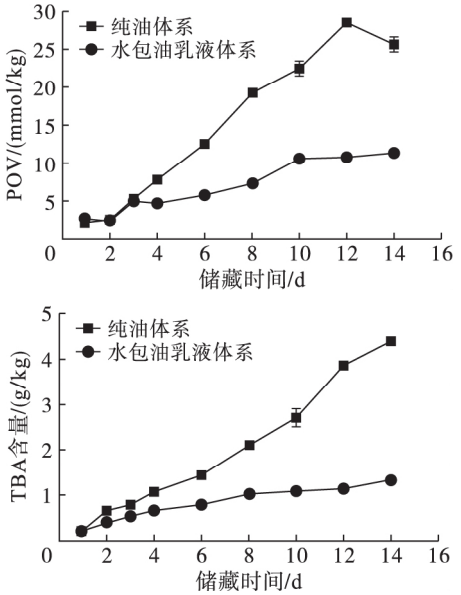

图 7　37 ℃下纯油体系和乳液体系中美藤果油的 POV 和 TBA 含量

表 2　美藤果油在纯油和乳液体系中自扩散系数对比　　m^2/s

项目	乳液体系	纯油体系
—CH═CH—	$1.71\times e^{-12}$	$9.36\times e^{-11}$
H—C—O—	$2.03\times e^{-12}$	$9.06\times e^{-11}$
H_2—C—O—	$1.88\times e^{-12}$	$9.39\times e^{-11}$
—CH═CH—CH_2—CH═CH—	$1.71\times e^{-12}$	$9.27\times e^{-11}$
—C(=O)—CH_2—	$1.71\times e^{-12}$	$9.21\times e^{-11}$
—CH═CH—CH_2—	$1.71\times e^{-12}$	$9.44\times e^{-11}$
—C(=O)—CH_2—CH_2—	$1.71\times e^{-12}$	$9.15\times e^{-11}$
—$(CH_2)_n$—	$1.73\times e^{-12}$	$9.40\times e^{-11}$
—CH_3	$1.74\times e^{-12}$	$9.74\times e^{-11}$
甘油酯分子	$1.77\times e^{-12}$	$9.34\times e^{-11}$

由表 2 可知，美藤果油甘油酯分子的自扩散系数从纯油体系中的 $9.34\times e^{-11}$ m^2/s 减少至乳液体系中的 $1.77\times e^{-12}$ m^2/s，降低了将近 2 个数量级。很显然，乳液体系中美藤果油被乳化剂包裹在液滴内，与氧气及促氧化物质的接触受到抑制，同时分子的运动性也显著减弱[24]；此外，美藤果油中含有较高的生育酚[3]，根据极性矛盾理论，亲脂性的抗氧化剂可能在水包油体系中具有更好的效果。因此，水包油型乳液作为美藤果油的一种包埋体系，具有延缓美藤果油氧化的作用。

2.4　美藤果油乳液中甘油酯的水解作用

水包油型乳液中含有较高含量的水，在某些条件下长期储藏乳液中的甘油酯会发生水解，从而造成乳液品质下降[25]。水解会造成乳液中游离脂肪酸含量发生变化，并且根据水解反应机理可知酸性条件可能促进水解作用。因此，测定了 pH 3、7 条件下乳液在储藏过程中游离脂肪酸含量的变化，结果见图 8。

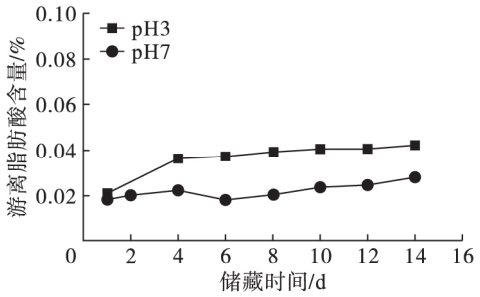

图 8　乳液储藏过程中游离脂肪酸含量的变化

由图 8 可知，在 pH 为 3 和 7 条件下乳液在 14 d 的储藏期内，游离脂肪酸含量并没有随着储藏时间的延长而发生明显的变化，说明美藤果油水包油型乳液没有发生明显的水解作用。乳液中美藤果油被包裹在液滴内，与水的接触面积较小，因而受水和 pH 影响小；同时分子运动性显著降低，因此水解作用受到抑制。

3　结　论

选择 Tween 系列表面活性剂作为乳化剂，应用高压匀质法制备美藤果油水包油型乳液。探究了 Tween 乳化剂类型、油质量分数、乳化剂添加量、剪切速率及均质压力对乳液平均粒径和 PDI 的影响。得到最佳的制备条件为：以 Tween60 为乳化剂，添加量 1%，油质量分数 10%，剪切速率 16 000 r/min，均质压力 40 MPa。在最佳条件下，制备的美藤果油乳液平均粒径为(218.27 ± 2.21) nm、PDI 为 0.118 ± 0.002。进一步研究储藏期内乳液的物理、氧化稳定性及水解作用，结果表明该工艺条件下制备的美藤果油乳液在 14 d 的储藏期间具有较好的耐受 pH 和盐离子的物理稳定性；由于乳液的包埋作用，使得美藤果油减少了与空气以及水的接触，同时降低了其分子的运动性，从而显著减缓了美藤果油的氧化速率以及乳液的水解。

参考文献：

[1] YANG C Y，LU W H，WEN Q M，et al. Germplasm characteristics of *Plukenetia volubilis* var. *brazilian* and its productive performance after introduction into Yuanjiang Dry-hot Valley of Yunnan，China [J]. J Bot Res，2015，4(5)：85-96.

[2] 刘付英. 美藤果及美藤果油的理化性质和油脂的脂肪酸组成分析 [J]. 中国油脂，2014，39(7)：95-97.

[3] 郭永生，马传国，刘君，等. 不同方法制备的美藤果油

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

品质研究[J]. 中国油脂，2018，43(2)：84－88.

[4] GONZALES G F，GONZALES C. A randomized，double－blind placebo－controlled study on acceptability，safety and efficacy of oral administration of Sacha Inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.) in adult human subjects [J]. Food Chem Toxicol，2014，65(1)：168－176.

[5] GONZALEZ－ASPAJO G，BELKHELFA H，HADDIOUI－HBABI L，et al. Sacha Inchi oil (*Plukenetia volubilis* L.)，effect on adherence of *Staphylococus aureus* to human skin explant and keratinocytes in vitro [J]. J Ethnopharmacol，2015，171：330－334.

[6] SKOUROLIAKOU M，DIMITRIS KONSTANTINOU M D，CHARALAMPOS AGAKIDIS M D，et al. Cholestasis，bronchopulmonary dysplasia，and lipid profile in preterm infants receiving MCT/ω－3－PUFA－containing or soybean－based lipid emulsions [J]. Nutr Clin Pract，2012，27(6)：817－824.

[7] WICHMANN M W，THUL P，CZARNETZKI H D，et al. Evaluation of clinical safety and beneficial effects of a fish oil containing lipid emulsion (Lipoplus，MLF541)：data from a prospective，randomized，multicenter trial [J]. Crit Care Med，2007，35(3)：700－706.

[8] 张和平，赵鹏，李涛，等. 美藤果油氧化稳定性研究及其货架期预测[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2016(1)：88－92.

[9] 杜冰，张嘉怡，谢蓝华，等. 一种富含不饱和脂肪酸的功能性酸奶：CN103783160A [P]. 2014－05－14.

[10] 潘炳阳. 炳阳. 一种含有欧米伽－3 的软糖及其制备方法：CN104431239A [P]. 2015－03－25.

[11] KWAK M S，AHN H J，SONG K W. Rheological investigation of body cream and body lotion in actual application conditions [J]. Korea－Aust Rheol J，2015，27(3)：241－251.

[12] SABAGHIAN S H，NATEGHI L，ALIMI M. The effect of different concentrations of vivapur MCG on the stability of fat－reduced，low－cholesterol mayonnaise emulsion [J]. Int J Biosci，2014，5(5)：107－112.

[13] TOROFUNES N，BOSCHFUST J，LATORREMORATALLA M L，et al. Isoflavone profile and protein quality during storage of sterilised soymilk treated by ultra high pressure homogenisation [J]. Food Chem，2015，167：78－83.

[14] NESTERENKO A，DRELICH A，LU H，et al. Influence of a mixed particle/surfactant emulsifier system on water－in－oil emulsion stability [J]. Colloids Surf A，2014，457：49－57.

[15] RAMISETTY K A，PANDIT A B，GOGATE P R. Ultrasound assisted preparation of emulsion of coconut oil in water：understanding the effect of operating parameters and comparison of reactor designs [J]. Chem Eng Process，2015，88(1)：70－77.

[16] SALVIA－TRUJILLO L，ROJAS－GRA A，SOLIVA－FORTUNY R，et al. Physicochemical characterization and antimicrobial activity of food－grade emulsions and nanoemulsions incorporating essential oils [J]. Food Hydrocolloid，2015，43：547－556.

[17] MCCLEMENTS D J. Reduced－fat foods：the complex science of developing diet－based strategies for tackling overweight and obesity [J]. Adv Nutr，2015，6(3)：338S－352S.

[18] HOMAYOONFAL M，KHODAIYAN F，MOUSAVI M. Modelling and optimising of physicochemical features of walnut－oil beverage emulsions by implementation of response surface methodology：effect of preparation conditions on emulsion stability [J]. Food Chem，2015，174：649－659.

[19] PERRIER－CORNET J，MARIE P，GERVAIS P. Comparison of emulsification efficiency of protein－stabilized oil－in－water emulsions using jet，high pressure and colloid mill homogenization [J]. J Food Eng，2005，66(2)：211－217.

[20] WIYANI L，ALADIN A，YANI S，et al. Stability of virgin coconut oil emulsion with mixed emulsifiers Tween 80 and Span 80 [J]. ARPN J Eng Appl Sci，2016，11(8)：5198－5202.

[21] PANYA A，LAGUERRE M，LECOMTE J，et al. Effects of chitosan and rosmarinate esters on the physical and oxidative stability of liposomes [J]. J Agric Food Chem，2010，58(9)：5679－5684.

[22] MEI L，MCCLEMENTS D J，WU J，et al. Iron－catalyzed lipid oxidation in emulsion as affected by surfactant，pH and NaCl [J]. Food Chem，1998，61(3)：307－312.

[23] CHAIYASIT W，ELIAS R J，MCCLEMENTS D J，et al. Role of physical structures in bulk oils on lipid oxidation [J]. Crit Rev Food Sci Nutr，2007，47(3)：299－317.

[24] PONGINEBBI L，NAWAR W W，CHINACHOTI P. Oxidation of linoleic acid in emulsions：effect of substrate，emulsifier，and sugar concentration [J]. J Am Oil Chem Soc，1999，76(1)：131－138.

[25] MCCLEMENTS D J. Food emulsions：principles，practices，and techniques [M]. Boca Raton：CRC Press，2015：371－373.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net