

基于熊果酸的 W/O/W 型 Pickering 乳液制备方法

Preparation of W/O/W Pickering emulsion based on ursolic acid

刘冬雪¹ 肖茜¹ 刘成国¹ 罗洁¹ 罗扬² 周辉¹

LIU Dong-xue¹ XIAO Qian¹ LIU Cheng-guo¹ LUO Jie¹ LUO Yang² ZHOU Hui¹

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128;

2. 长沙市农产品质量监测中心, 湖南 长沙 410003)

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Agricultural Product Quality Monitoring Center of Changsha, Changsha, Hunan 410003, China)

摘要:目的:提高熊果酸的应用范围和生物利用率。方法:以熊果酸为乳化剂,果胶为外水相,采用两步法制备 W/O/W 型 Pickering 乳液。通过单因素试验优化 W/O 乳液制备条件,研究果胶质量浓度对 W/O/W 型 Pickering 乳液理化性质、微观结构、流变学特性及长期稳定性的影响。结果:W/O 乳液的最佳制备工艺为熊果酸质量浓度 4 g/100 mL、水油质量比 2:3、均质转速 9 000 r/min、均质时间 5 min;以果胶为外水相制备的双层乳液粒径均在 30~40 μm ,果胶质量浓度的增加使乳液的 zeta 电位绝对值、流变性能以及 4 $^{\circ}\text{C}$ 贮藏稳定性有着显著性的提高。结论:果胶质量浓度为 0.3,0.4,0.5 g/100 mL 时能够制备稳定的 Pickering 双层乳液。

关键词: W/O/W 型; Pickering 乳液; 熊果酸; 果胶; 稳定性

Abstract: **Objective:** This study aimed to improve the application range and bioavailability of ursolic acid. **Methods:** The W/O/W pickering emulsion was prepared by a two-step process with ursolic acid as emulsifier and pectin as external aqueous phase. The preparation conditions of W/O emulsion were optimized by a single factor experiment, and the effects of pectin mass concentration on physicochemical properties, microstructure, rheological properties and long-term stability of W/O/W pickering emulsion were studied. **Results:** The optimal preparation technology of W/O emulsion was ursolic acid mass concentration of 4 g/100 mL, water-oil mass ratio of 2:3, homogenization speed of 9 000 r/min, homogenization time of

5 min. The particle size of the double emulsion prepared with pectin as the external aqueous phase was between 30~40 μm . The absolute value of zeta potential, rheological property and storage stability of the emulsion at 4 $^{\circ}\text{C}$ were significantly improved with the increase of pectin mass concentration. **Conclusion:** The stable pickering double emulsion could be prepared when the mass concentration of pectin was 0.3, 0.4, 0.5 g/100 mL.

Keywords: W/O/W; Pickering emulsion; ursolic acid; pectin; stability

Pickering 乳液是指在互不相溶的两相界面上以固体颗粒作为乳化剂稳定的乳液^[1],一般可分为水包油(O/W)型、油包水(W/O)型以及多重(W/O/W, O/W/O)型乳液 3 种类型^[2],其中水包油包水(W/O/W)乳液是目前常见的一种乳液体系,被用于包埋、输送和保护生物活性成分、益生菌、风味物质等^[3]。由于乳液是一种热力学不稳定的体系,会随着时间的推移导致体系分层、絮凝、转相及破乳^[4],Pickering 乳液是由固体颗粒组成而非传统表面活性剂组成的稳定的新型乳液^[5],其稳定机制主要为固体颗粒吸附于油—水界面形成单层或多层界面膜,从而降低界面张力,达到稳定乳液的目的^[6],具有不可逆的界面吸附^[7]、较高的聚结稳定性^[8]、稳定粒径较大的液滴等优点。有研究^[9]发现,在外水相中添加多糖如果胶、结冷胶、刺槐豆胶、黄原胶等充当增稠剂或胶凝剂,可以通过增加外水相的黏度或改善外水相界面特性来改善多重乳液的稳定性。

熊果酸(Ursolic Acid)又名乌苏酸,是一种广泛存在于植物中的一类三萜类化合物^[10]。研究表明,熊果酸具有多种生物学活性,如抗氧化^[11]、抗病毒、抗肿瘤和保护心血管^[12-13],且毒性低,不良反应少^[14],具有广泛的开发前景,但水溶性差,生物利用度低^[15],在使用上受到限制。

基金项目:湖南省自然科学基金项目(编号:2021JJ40242)

作者简介:刘冬雪,女,湖南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:周辉(1980—),男,湖南农业大学副教授,博士。

E-mail:paradise917@163.com

收稿日期:2022-08-23

改回日期:2022-11-04

熊果酸也可作为药物、食品的 Pickering 乳化剂^[16],然而由熊果酸作乳化剂制备双重乳液的研究鲜少报道。

研究拟以熊果酸为乳化剂,以果胶为外水相,采用两步法制备 W/O/W 型 Pickering 双层乳液,研究果胶质量浓度对 Pickering 双重乳液形成、微观结构、粒径和 zeta 电位的影响,以期为熊果酸稳定的 W/O/W 乳液体系输送和控释食品功能成分提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

菜籽油:道道全粮油股份有限公司;
熊果酸:纯度 98%,西安瑞林生物科技有限公司;
脱脂乳粉:食品级,澳优乳业(中国)有限公司;
果胶:食品级,河南万邦实业有限公司。

1.2 仪器与设备

激光粒度仪:Master sizer 3000 型,英国 Malvern 公司;
电位测定仪:Nano-ZS 型,英国 Malvern 公司;
旋转流变仪:Kinexus pro+型,英国 Malvern 公司;
高速匀浆机:Ultra-Turrax® T25 型,德国 IKA 公司;
显微镜:DM2000 型,德国徕卡公司;
恒温磁力搅拌器:DF-101S 型,郑州市亚荣仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 W/O 单层乳液的单因素试验 以乳析指数为指标,固定熊果酸质量浓度为 3 g/100 mL、均质转速为 9 000 r/min、均质时间为 3 min,考察水油质量比($m_{\text{脱脂乳}}:m_{\text{菜籽油}}$ 为 1:2,1:3,2:3,3:5)对乳析指数的影响;固定 $m_{\text{脱脂乳}}:m_{\text{菜籽油}}$ 为 2:3、均质转速为 9 000 r/min、均质时间为 3 min,考察熊果酸质量浓度(1, 2, 3, 4, 5 g/100 mL)对乳析指数的影响;固定 $m_{\text{脱脂乳}}:m_{\text{菜籽油}}$ 为 2:3、熊果酸质量浓度为 3 g/100 mL、均质时间为 3 min,考察均质转速(6 000, 7 000, 8 000, 9 000, 10 000 r/min)对乳析指数的影响;固定 $m_{\text{脱脂乳}}:m_{\text{菜籽油}}$ 为 2:3、熊果酸质量浓度为 3 g/100 mL、均质转速为 9 000 r/min,考察均质时间(1, 2, 3, 4, 5 min)对乳析指数的影响。

1.3.2 乳析指数测定 将 5 mL 乳液转移到玻璃瓶中,用塑料盖密封后于室温下贮藏,放置 7 d 后测量乳液析出层高度。按式(1)计算乳析指数。

$$X = \frac{H_0}{H} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

X ——乳析指数, %;

H_0 ——析出层高度, mm;

H ——总体高度, mm。

1.3.3 W/O/W 双层乳液的制备 配制质量浓度为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g/100 mL 果胶溶液与最佳工艺制备

的初乳 W/O 按 $m_{\text{果胶}}:m_{\text{初乳}} = 3:2$ 的比例混合,以 6 000 r/min 剪切 2 min,制得 W/O/W 型多重乳液。

1.3.4 显微镜观察微观结构 取 10 μL 乳液滴加至载玻片上,盖玻片缓慢盖上防止产生气泡,用光学显微镜进行观察,获得乳液显微结构图像。

1.3.5 粒径和 zeta 电位的测定 乳液粒径用 Master sizer 3000 型激光粒度仪测定^[17],采用体积平均直径 $D_{[4,3]}$ 表征乳液粒径;采用 Nano-ZS 型电位测定仪测定乳液的 zeta 电位^[18],每个样品 3 组平行,结果取平均值。

1.3.6 W/O/W 双层乳液的流变特性 采用 Kinexus pro+型旋转流变仪进行测量。取 2 mL 待测乳液于旋转流变仪载物台上,选择 40 mm 的 2°锥形钢板夹具,设置平板转子与底盘之间的距离为 1 mm,温度 25 °C。在固定应变(1%)下,测量储能模量(G')和损耗模量(G'')随频率(0.1~10 Hz)的变化。在 0.1~100 s^{-1} 的剪切速率范围内测定乳液的表现剪切黏度。

1.3.7 4 °C 贮藏稳定性分析 测量贮藏 1, 7, 15, 30 d 后乳液的粒径和 zeta 电位,每个样品 3 组平行,结果取平均值。

1.3.8 数据分析 用 Excel 2019 和 Origin 2021 进行数据的处理、分析及绘图,显著性水平 $P < 0.05$ 。

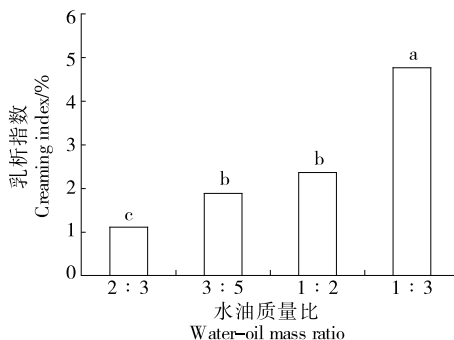
2 结果与分析

2.1 W/O 单因素试验

2.1.1 水油质量比对 W/O 单层乳液乳析指数的影响

由图 1 可知,随着油相体积的增大,乳析指数逐渐增大,当水油质量比为 2:3 时,乳析指数为 1.10%,与其他组有显著性差异($P < 0.05$);当油相比比例增加,油水界面所吸附的熊果酸固体颗粒的量减少,形成的界面张力不足以稳定水油界面使得乳液分层率增加,使乳液难以达到良好的稳定状态。因此,选择最佳油水质量比为 2:3。

2.1.2 熊果酸质量浓度对 W/O 单层乳液乳析指数的影响 由图 2 可知,随着熊果酸固体颗粒含量的增加,乳液



字母不同表示有显著性差异($P < 0.05$)

图 1 水油质量比对 W/O 乳析指数的影响

Figure 1 Effects of water-oil mass ratio on W/O creaming index

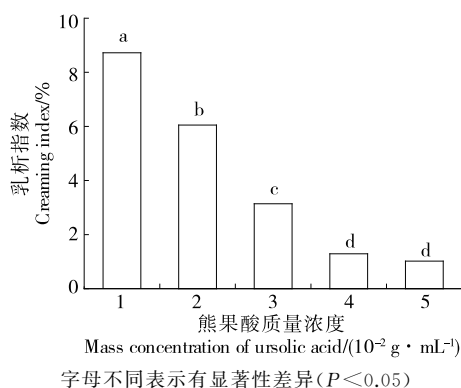


图2 熊果酸质量浓度对 W/O 乳析指数的影响

Figure 2 Effects of ursolic acid mass concentration on W/O creaming index

乳析指数呈先降低后趋于平稳的趋势,当熊果酸质量浓度为 4.5 g/100 mL 时,乳析指数为 1.29%,1.02%,无显著性差异($P>0.05$),可能是由于乳化过程中,熊果酸质量浓度高,其在 W/O 界面所能稳定的面积大,而低质量浓度的熊果酸能稳定 W/O 界面面积小,使得固体颗粒之间间隙相对增大^[19],造成油滴的聚集析出,最终导致乳析指数增大;当熊果酸增加到临界点时,多余的熊果酸分散在连续相中,不再吸附于水油界面稳定乳液,而是填充到乳液间隙中^[7],对乳液乳析指数的影响不显著。因此,选择最佳熊果酸质量浓度为 4 g/100 mL。

2.1.3 均质转速对 W/O 单层乳液乳析指数的影响 由图 3 可知,随着均质转速的增大,乳液乳析指数逐渐减小,当均质转速为 9 000~10 000 r/min 时,乳液的乳析指数不再出现显著性变化($P>0.05$),可能是由于均质转速的增大带来强烈的剪切力,减小了水分子之间迁移速率^[20],使乳液获得更有效的乳化,提高了乳液的稳定性。因此,选择最佳均质转速为 9 000 r/min。

2.1.4 均质时间对 W/O 单层乳液乳析指数的影响 由图 4 可知,乳液乳析指数随着均质时间的增加而减小,当

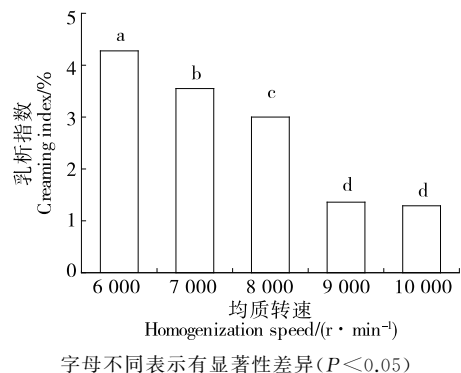


图3 均质转速对 W/O 乳析指数的影响

Figure 3 Effects of homogenization speed on W/O creaming index

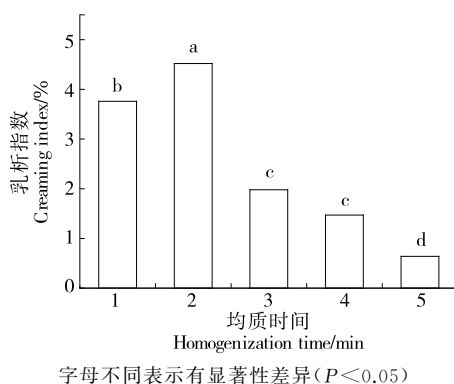


图4 均质时间对 W/O 乳析指数的影响

Figure 4 Effects of homogenization time on W/O creaming index

均质时间为 5 min 时,乳析指数为 0.64%,乳液稳定效果最佳,这是由于乳液的稳定性主要是依靠液滴之间的静电排斥力来维持^[21],均质时间的增加提高了 W/O 界面强度,从而使液滴之间的静电排斥力增强,提高了乳液的稳定性;相反,均质时间过短则达不到稳定乳液的目的,乳化过程结束后,油相便在贮藏过程中逐渐析出,导致乳液稳定性下降。因此,选择最佳均质时间为 5 min。

2.2 W/O/W 乳液光学显微镜镜下结构

以前期试验结果为基础,选择二次乳化转速 6 000 r/min,时间 2 min,以研究果胶质量浓度对 W/O/W 乳液稳定性的影响。不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液的光学显微结构见图 5。

由图 5 可知,W/O/W 乳液均有三相两膜结构^[22],分散状态较好,乳液液滴大多呈圆球形,且大小较为均匀。不同质量浓度的果胶都能够制备出稳定的 W/O/W 乳液,在 W/O/W 乳液内部包裹着大量的 W/O 小乳滴;在 4℃ 下放置 30 d 后,0.1、0.2 g/100 mL 的果胶溶液制备的乳液液滴变大,乳液出现明显的相分离,表明低质量浓度的果胶不足以形成致密的界面膜,因而很难保持 W/O/W 乳液的贮藏稳定性;当果胶质量浓度 ≥ 0.3 g/100 mL 时,乳液无水相析出,有着稳固的界面层屏障,可能是由于高质量浓度的果胶能够抵抗液滴之间的碰撞聚结、增强两相之间的界面膜强度^[23],使双重乳液具有优越的贮藏稳定性。

2.3 W/O/W 乳液粒径、zeta 电位分析

由图 6 可知,随着果胶质量浓度的增大,W/O/W 乳液的粒径无显著性差异,粒径大小为 $(36.2 \pm 2.0) \mu\text{m}$ 。果胶质量浓度对粒径无显著性影响,与显微镜结果基本一致,表明不同质量浓度的果胶均能制备出粒径分布均匀的乳液;而 W/O/W 乳液的电位绝对值呈增长趋势。当果胶质量浓度为 0.3、0.4、0.5 g/100 mL 时,乳液的 zeta 电位绝对值无显著性差异,可能是由于果胶为阴离子多糖^[24],当果胶质量浓度达到一定水平时,多余的果胶分散

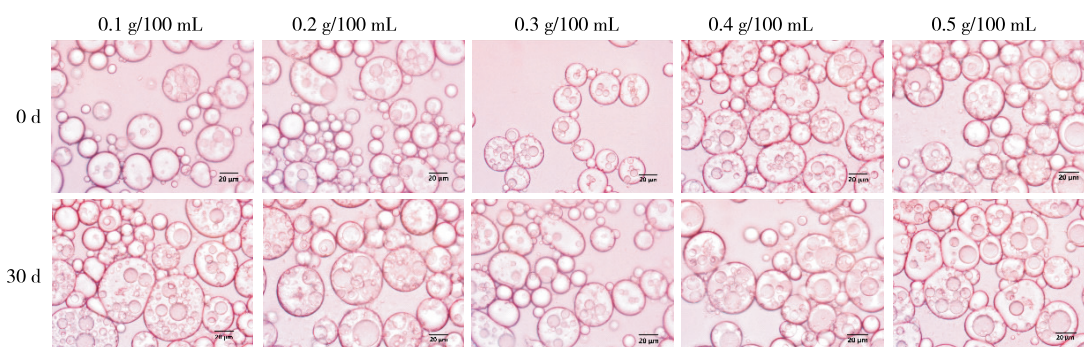


图5 不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液的显微镜图

Figure 5 Micrographs of W/O/W emulsions prepared with various mass concentrations of pectin

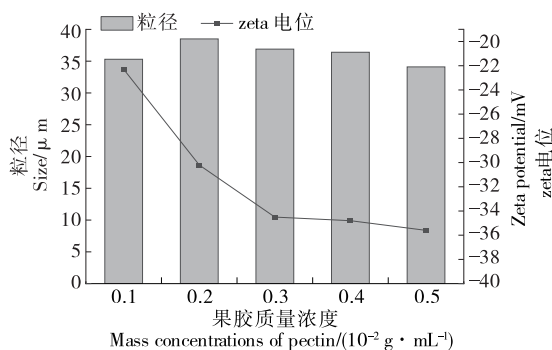


图6 不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液的粒径和 zeta 电位

Figure 6 Particle size and zeta potential of W/O/W emulsions prepared with various mass concentrations of pectin

于连续相中,不再吸附于水油界面,而是填充到乳液间隙中,所以过多的果胶存在并不会增加液滴的表面电荷。

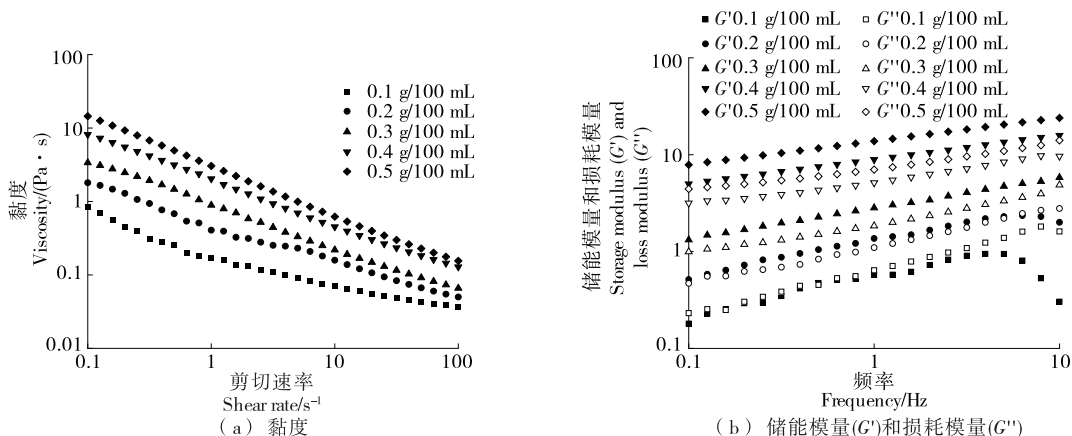
2.4 W/O/W 乳液流变特性分析

由图 7 可知,当剪切速率不断增加时,以不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液的表观黏度逐渐减小,呈现出剪切稀化的现象,说明该 W/O/W 乳液属于非牛顿假

塑性流体^[24]。同时,随着果胶质量浓度的增加,W/O/W 乳液的表观黏度呈逐渐增大的趋势,其流动性也相应地减弱,这是由于增大果胶浓度促使 W/O/W 乳液中外水相的稠度提高,使表观黏度逐渐增大,能够防止 W/O/W 乳液内部水油界面之间的液滴聚结,从而达到稳定效果;另外,对于不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液,其储能模量始终大于损耗模量,说明弹性主导 W/O/W 乳液网状结构的形成,双层乳液体系呈现为类弹性固体性质^[25],W/O/W 乳液的 G' 与 G'' 均随着外水相中果胶质量浓度的增大而增大,这归因于果胶质量浓度的增加形成了更加致密的网络结构,以上结果说明将果胶添加至连续相中可以一定程度上改善 W/O/W 乳液的稳定性、黏弹性及抗形变能力,而且果胶的加入有利于乳液液滴间形成致密的凝胶网络。

2.5 W/O/W 乳液 4 °C 贮藏稳定性分析

由图 8 可知,当果胶质量浓度较低(≤ 0.2 g/100 mL)时,乳液经 4 °C 贮藏 30 d 后双层乳液出现一定程度分层,粒径逐渐增大,zeta 电位绝对值在前 14 d 缓慢减小,第 30 天时显著减小,表明低质量浓度果胶不能维持乳液的长期稳定性,可能是由于低浓度外水相的双层乳液中含有

图7 不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液的黏度、储能模量(G')和损耗模量(G'')Figure 7 Viscosity, storage modulus (G') and loss modulus (G'') of W/O/W emulsions prepared with various mass concentrations of pectin

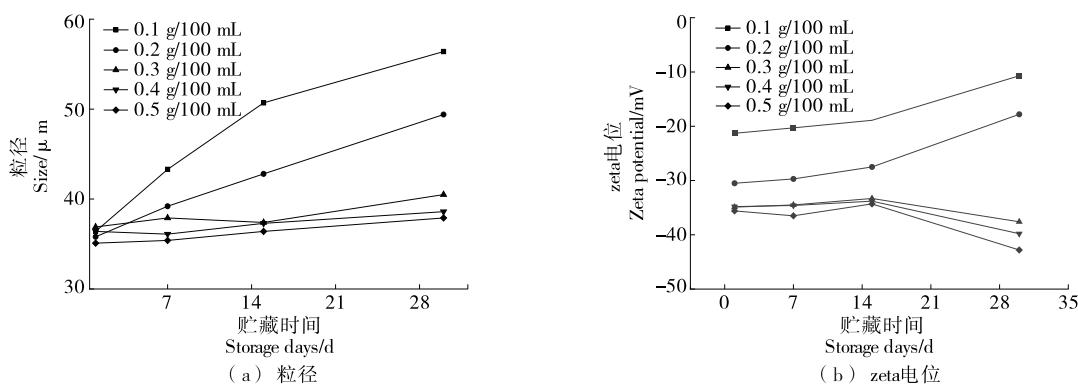


图 8 不同质量浓度果胶制备的 W/O/W 乳液贮藏期间的粒径和 zeta 电位

Figure 8 Particle size and zeta potential of W/O/W emulsions prepared with various mass concentrations of pectin during storage

较少果胶附着的界面不能提供足够的静电斥力来保证乳液的长期贮藏稳定性^[26]；当果胶质量浓度较高时，乳液经 4℃贮藏 30 d 后双层乳液无分层现象，粒径无显著性变化，zeta 电位绝对值从相对稳定到逐渐增大，表明果胶质量浓度的增加提高了双层乳液的稳定性，可能是由于双层乳液中外水相黏度不断增加，相互交联形成致密的网络结构，防止体系内部液滴的聚结^[27]，从而提高乳液的长期贮藏稳定性。

3 结论

试验研究了不同果胶质量浓度下，熊果酸作为 W/O/W 乳液的 Pickering 乳化剂对乳液稳定性的影响。结果表明，以熊果酸为新型乳化剂可以成功制备出具有优良长期贮藏稳定性的乳液，果胶质量浓度对 W/O/W 乳液稳定性提高有着明显的影响。由流变结果可知 W/O/W 乳液属于具有剪切变稀这一流变特性的非牛顿流体，当果胶质量浓度 ≥ 0.3 g/100 mL 时，虽然提高了体系的黏度和黏弹性，但并未显著改变乳液的粒径和 zeta 电位；控制果胶的质量浓度能够一定程度改善双重乳液的黏弹性。表明从乳液组分、结构和质地等角度出发，可以设计和构建具有新型功能化的乳液。

参考文献

- [1] QI J R, SONG L W, ZENG W Q, et al. Citrus fiber for the stabilization of O/W emulsion through combination of Pickering effect and fiber-based network [J]. Food Chemistry, 2020, 343: 128523.
- [2] FU D W, DENG S M, MCCLEMENTS D J, et al. Encapsulation of β -carotene in wheat gluten nanoparticle-xanthan gum-stabilized Pickering emulsions: Enhancement of carotenoid stability and bioaccessibility[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 80-89.
- [3] 骆正哲, 杨成. W/O/W 型 Pickering 乳液的制备及稳定性研究[J]. 日用化学工业, 2019, 49(8): 508-514.
- [4] 陈硕, 陈飞平, 唐传核. 植物球蛋白/姜黄素纳米复合物的制备及其对 O/W 型 Pickering 乳液氧化稳定性影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(12): 197-204.
- [5] CHEN S, CHEN F P, TANG C H. Fabrication of plant globulin/curcumin nano-complexes and their impact on physical and oxidative stability of oil-in-water Pickering emulsions[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(12): 197-204.
- [6] GUAN T, LIU B, WANG R, et al. The enhanced fatty acids flavor release for low-fat cheeses by carrier immobilized lipases on O/W pickering emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116(1): 106 651-106 659.
- [7] MAREFATI A, SJOO M, TIMGREN A, et al. Fabrication of encapsulated oil powders from starch granule stabilized W/O/W Pickering emulsions by freeze-drying[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 261-271.
- [8] 刘杏念, 王凌, 李斌, 等. 重质碳酸钙稳定的 O/W 型 Pickering 乳液及其粒度效应研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(4): 20-25, 112.
- [9] LIU X N, WANG L, LI B, et al. O/W Pickering emulsions stabilized by CaCO_3 and particle size effect[J]. Food & Machinery, 2019, 35(4): 20-25, 112.
- [10] ZEMBYLA M, LAZIDIS A, MURRAY B S, et al. Water-in-Oil Pickering emulsions stabilized by synergistic particle-particle interactions[J]. Langmuir, 2019, 35(40): 13 078-13 089.
- [11] DUFFUS L J, NORTON J E, S, ITH P, et al. A comparative study on the capacity of a range of food-grade particles to form stable O/W and W/O Pickering emulsions[J]. Journal of Colloid & Interface Science, 2016, 473: 9-21.
- [12] 谭世强, 马琳, 许永华, 等. 植物三萜类物质的生态学功能研究进展[J]. 人参研究, 2015, 27(3): 36-38.
- [13] TAN S Q, MA L, XU Y H, et al. Research advances in ecological activities of triterpenoids [J]. Ginseng Research, 2015, 27(3): 36-38.
- [14] 邹荣, 要辉, 胡隼, 等. 熊果酸纳米乳的制备及质量评价[J]. 中

- 南药学, 2019, 17(6): 830-835.
- ZOU R, YAO H, HU J, et al. Preparation and quality evaluation of ursolic acid nanoemulsion[J]. Central South Pharmacy, 2019, 17(6): 830-835.
- [12] QIU L, ZHAO X, ZU Y, et al. Ursolic acid nanoparticles for oral delivery prepared by emulsion solvent evaporation method: Characterization, in vitro evaluation of radical scavenging activity and bioavailability [J]. Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology, 2019, 47(1): 610-621.
- [13] 付亚玲, 高琳, 张东旭, 等. 齐墩果酸和熊果酸提取、分离与测定方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(2): 196-199.
- FU Y L, GAO L, ZHANG D X, et al. Advances in extraction separation and determination of oleanolic acid and ursolic acid[J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 196-199.
- [14] ALVARADO H L, ABREGO G, SOUTO E B, et al. Nanoemulsions for dermal controlled release of oleanolic and ursolic acids: In vitro, ex vivo and in vivo characterization [J]. Colloids and Surfaces B-Biointerfaces, 2015, 130: 40-47.
- [15] KASHYAP D, TULI H S, SHARMA A K. Ursolic acid (UA): A metabolite with promising therapeutic potential[J]. Life Sciences, 2016, 146: 201-213.
- [16] 韩保庆. 紫苏油、亚麻籽油及熊果酸复合纳米乳体系的构建及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 4-9.
- HAN B Q. Construction and performance of perilla oil linseed oil and ursolic acid composite nanoemulsion system[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 4-9.
- [17] 李春, 赵裕才, 陈晓倩, 等. 外水相中天然大分子对 W/O/W 型多重乳状液性质的影响 [J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 81-88.
- LI C, ZHAO Y C, CHEN X Q, et al. Effect of natural macromolecules of external aqueous phase on the properties of W/O/W type multiple emulsions[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(12): 81-88.
- [18] 王可心, 段庆松, 王依凡, 等. 米糠蛋白 O/W 及 W/O/W 乳液制备及界面稳定性[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 24-30.
- WANG K X, DUAN Q S, WANG Y F, et al. Preparation and interfacial stability of rice bran protein-stabilized O/W and W/O/W emulsions[J]. Food Science, 2021, 42(22): 24-30.
- [19] MEIRELLES A, COSTA A, CUNHA R L. Cellulosenanocrystals from ultrasound process stabilizing O/W Pickering emulsion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 158: 75-84.
- [20] 易醒, 罗俊溢, 骆叶晴, 等. 紫苏子油 O/W 型纳米微乳的制备及其氧化稳定性[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 185-192.
- YI X, LUO J Y, LUO Y Q, et al. Preparation and oxidation stability of perilla seed oil O/W nano-emulsion [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(4): 185-192.
- [21] ZHU Q M, QIU S, ZHANG H W, et al. Physical stability, microstructure and micro-rheological properties of water-in-oil-in-water (W/O/W) emulsions stabilized by porcine gelatin[J]. Food Chemistry, 2018, 253: 63-70.
- [22] BENETTI J V M, SILVA J T D, NICOLETTI V R. SPI microgels applied to pickering stabilization of O/W emulsions by ultrasound and high-pressure homogenization: Rheology and spray drying[J]. Food Research International, 2019, 122(AUG): 383-391.
- [23] 呼酷杰, 许虎君. 聚甘油脂肪酸酯 W/O/W 多重乳液的稳定性研究[J]. 日用化学工业, 2020, 50(5): 319-324.
- HU M J, XU H J. Study on the stability of polyglycerol fatty acid ester W/O/W multiple emulsion [J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2020, 50(5): 319-324.
- [24] 丁玲, 唐艺华, 张丽芬, 等. 花生蛋白-果胶复合乳液凝胶的流变学特性和微观结构[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 46-52.
- DING L, TANG Y H, ZHANG L F, et al. Rheological properties and microstructure of peanut protein-pectin composite emulsion gels[J]. Food Science, 2022, 43(16): 46-52.
- [25] 许馨予, 杨鸽隼, 贾斌, 等. 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶-没食子酸复合 Pickering 乳液制备及其稳定性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 42-51.
- XU X Y, YANG H J, JIA B, et al. Preparation and stability analysis of soy protein isolate-high methoxyl citrus pectin-gallic acid pickering emulsion[J]. Food Science, 2022, 43(24): 42-51.
- [26] ZHU C P, ZHANG H, HUANG G Q, et al. Whey protein isolate-low methoxyl pectin coacervates as a high internal phase Pickering emulsion stabilizer [J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2021, 42(7): 1 009-1 020.
- [27] ZHANG C, ZHU X X, ZHANG F P, et al. Improving viscosity and gelling properties of leaf pectin by comparing five pectin extraction methods using green tea leaf as a model material[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98(1): 112-132.
- WU Y S, GONG L, LIU Q H, et al. Study on temperature and humidity control ability of heating type heat pump drying system [J]. Food & Machinery, 2017, 33(10): 90-93.
- [28] 曾文良, 陈柏霖, 陈萱, 等. 闭式热泵干燥系统的除湿特性试验[J]. 食品与机械, 2020, 36(11): 101-104.
- ZENG W L, CHEN B L, CHEN X, et al. Experimental investigation of dehumidification characteristics of closed drying system with heat pump [J]. Food & Machinery, 2020, 36(11): 101-104.

(上接第 98 页)

- [21] 蒋小强, 关志强, 谢晶, 等. 水产品热泵干燥装置性能参数的理论分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(S1): 373-376.
- JIANG X Q, GUAN Z Q, XIE J, et al. Analysis on performance parameters of heat pump drying system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (S1): 373-376.
- [22] 吴耀森, 龚丽, 刘清化, 等. 加热型热泵干燥系统温湿度控制能力探讨[J]. 食品与机械, 2017, 33(10): 90-93.