

大豆纤维稳定水包油型皮克林乳液的研究

赵强忠, 周海媚

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 近年来, 由于食品级皮克林乳液在开发新型功能食品方面表现出潜在应用价值, 关于食品级皮克林乳液的稳定剂的研究备受关注。本文主要研究了大豆纤维稳定玉米油的水包油型皮克林乳液的性质, 通过测定 ζ -电势、显微结构、乳液粒径变化、乳析指数、离心稳定性, 分析了大豆纤维浓度(c ; 0.125%~1.0%, m/m)和油相质量分数(Φ ; 10%~40%, m/m)对乳液稳定性的影响。结果表明: $\Phi=10\%$ 时, 随着大豆纤维的浓度增加乳液的粒径增大, 絮凝程度增加, 抗聚集稳定性和抗分层稳定性增强; $c=0.75\%$ 时, 随着油相质量分数增加乳液粒径显著增大, 乳液稳定性迅速下降, 且有明显油析现象出现。研究结果表明大豆纤维作为皮克林乳液的稳定颗粒有良好的潜力, 对进一步深入研究大豆纤维稳定的皮克林乳液有指导意义。

关键词: 大豆纤维; 皮克林乳液; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2016)10-39-44

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.10.007

Soybean Fiber as Particle Stabilizers for Oil-in-water Pickering Emulsions

ZHAO Qiang-zhong, ZHOU Hai-mei

(College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In recent years, there has been increasing interest in developing food-grade Pickering stabilizers due to their potential applications in formulations of novel functional foods. This study investigated the properties of soybean fiber as stabilizers for corn oil-in-water Pickering emulsions. The influence of soybean fiber concentrations [0.125~1.0% (m/m)] and oil mass fractions [Φ : 10~40% (m/m)] on emulsion stability was examined by measuring changes in size, microstructure, ζ -potential, creaming index, and centrifugal stability. The results showed that at Φ of 10%, increasing the concentration was favorable to formation of emulsions with bigger droplet size and flocculation degree and greater stability against coalescence and creaming. At concentrations of 0.75% and an increase in Φ , droplet size progressively increased, emulsion stability dropped rapidly, and the oil separated. These findings demonstrated that water-insoluble dietary soybean fiber exhibited good potential for use as a Pickering-type stabilizer. Furthermore, these results provided valuable insights for further research on the stability of Pickering emulsions stabilized by water-insoluble dietary soybean fiber.

Key words: water-insoluble dietary soybean fiber; Pickering emulsion; stability

皮克林乳液是一种由固体颗粒代替小分子表面活性剂或者蛋白质等具有表面活性的物质稳定乳液体系的新型乳液^[1]。其稳定机理是固体颗粒在油水界面的不可逆吸附形成的乳液液滴之间的空间位阻效应阻碍了液滴的聚并, 同时固体粒子之间相互缠结形成的网络结构在一定程度上增加了乳液的稳定性^[2]。由于皮克林乳液具有经济、低毒、环境友好、稳定性强等优良特性, 在化妆品、食品、制药、石油和废水处理等行业具有广阔的应用前景, 受到越来越多研究者的关注。

近年来, 国内外关于皮克林乳液在食品行业的研究工作主要集中于开发环境友好型可再生材料制备食

收稿日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31571883)

作者简介: 赵强忠 (1976-), 男, 教授, 博导, 研究方向: 食品生物技术、乳油体系稳定化

品级的纳米或微米级固体颗粒, 一些食品级的有机固体粒子如淀粉纳米晶体^[3]、壳聚糖纳米晶体颗粒^[4-5]、大豆蛋白颗粒^[6]、水不溶性玉米醇溶蛋白^[7]、固体脂质颗粒以及脂肪晶体^[8]等已被证明可以用来稳定皮克林乳液。固体纤维素粒子由于其可再生性和可持续性, 生物可降解性和生物相容性, 以及低碳排放和低密度等优良特性, 成为当下很多研究工作者感兴趣的对象。一些纤维素衍生物例如微晶纤维素、纤维素纳米晶体^[9]、细菌纤维素^[10]等已被证实可以吸附在油水界面稳定皮克林乳液。Wen^[11]等通过过硫酸铵水解玉米芯纤维素得到纳米微晶纤维素, 成功制备出稳定的右旋柠檬烯皮克林乳液。Winuprasith^[12]等利用从山竹果壳中提取制备出的微纤化纤维素 MFC, 制备的 O/W 型皮克林乳液具有很好的聚结稳定性和分层稳定性。

大豆纤维是一种资源丰富、来源广泛、价格低廉、

对环境友好,对人体无毒无害,可用于食品制造的可再生资源,主要成分为水不溶性的纤维素、半纤维素及木质素等。纤维素由D-葡萄糖通过 β -1,4-糖苷键结合而成无分支的链状大分子,该分子链沿着链长的方向平行排列,聚集成微纤丝状,具有较高的机械强度,大豆纤维素结构包括排列整齐的结晶区和排列不整齐的无定型区^[13]。由于其具有较大的比表面积和较高的长宽比,高强度和低密度等优良性质,有望成为水包油型乳液的皮克林型稳定剂。目前尚无关于大豆纤维稳定的皮克林乳液的报道,本文旨在通过研究大豆纤维制备的乳液的稳定性为进一步开发大豆纤维成为一种新型皮克林型稳定剂提供一些参考。

1 材料与方法

1.1 原料

金龙鱼玉米胚芽油:购自本地超市;大豆水不溶性膳食纤维(以下简称大豆纤维):广州华汇生物实业有限公司;十二烷基硫酸钠(SDS)、叠氮钠:分析纯,北京鼎国昌盛生物技术有限公司;实验中所用的其他试剂如硫酸、苯酚、石油醚等均为分析纯。

1.2 主要仪器和设备

高速分散均质机 T25:德国 IKA 公司;APV-1000 高压均质机:丹麦 APV 公司;Mastersizer 2000 激光粒度分析仪、Nanoseries ZS 电势测定仪:英国 Malvern Instruments Ltd;MD-130 显微镜,奥林巴斯中国有限公司;TDL80-2B 台式离心机:上海安亭科学仪器厂;754 分光光度计,上海光学仪器厂;FA 1104 型分析天平:上海精密科学仪器厂;JSM-6390LV 型扫描电子显微镜:日本 Hitachi 公司。

1.3 方法

1.3.1 大豆纤维形态与化学组成

大豆纤维为大豆经榨油后的豆粕,分离出大豆分离蛋白后的副产物-豆渣中提取得到的大豆纤维粉经过碱处理去蛋白、乙醇去杂质、喷雾干燥等工序预处理后得到的。大豆纤维先过 200 目筛,再过 500 目筛,称取一定质量筛后的大豆纤维分散液于去离子水中,于 50 MPa 高压均质 10 次以减小大豆纤维长度^[14],将此大豆纤维水分散液置于 4 °C 贮存备用。用扫描电子显微镜观察处理前后大豆纤维的形态。

1.3.2 乳液制备

上述大豆纤维水分散液与玉米油混合,用高速分散均质机在 11000 r/min 转速下剪切 1 min,再在 15000

r/min 转速下剪切 4 min,然后于 50 MPa 高压均质两次,加入 0.02% (m/V)叠氮钠以抑制微生物的生长,4 °C 贮藏。

1.3.3 ζ -电势的测定

样品用去离子水按 1:100 体积稀释,采用 Nanoseries ZS 电势测定仪测定大豆纤维水溶液及乳液的 ζ -电势。每种稀释样各取 1 mL 加入到电泳槽中,测定温度 25 °C,每个样品重复测量 3 次取平均值。

1.3.4 显微结构的测定

在室温下,用奥林巴斯光学显微镜观察乳状液的显微结构(目镜 10 倍,物镜 40 倍)取 2 μ L 稀释过的乳状液样品滴在载玻片上,盖上盖玻片,并确保盖玻片和载玻片中间没有气泡。将制备好的样品放置在显微镜下观察,找到有代表性的图片后,用显微镜自带的相机进行拍摄图片。

1.3.5 粒径和粒度分布的测定

采用 Mastersizer 2000 粒度分布仪测定乳液液滴的粒径大小。参数设置为:分析模式:通用;进样器名:Hydro 2000MU(A);颗粒折射率:1.520;颗粒吸收率:0.1;分散剂:水;分散剂折射率:1.330;泵的转速:2200 r/min。实验采用 $d_{4,3}$,即体积平均直径表征液滴粒度的大小。每个样品测量时重复 3 次,取平均值。

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3}$$

式中, d_i -乳状液液滴的直径; n_i -乳状液液滴的数量。

1.3.6 乳析指数的测定^[6]

取 10 mL 新配置好的的乳液置于 10 mL 具塞刻度试管中,添加 0.02% (m/V)叠氮钠抑制微生物的生长。将试管静置于室温(25 °C)环境下,每隔 24 h 对样品进行观察,记录乳液分层后样品底部清液层的高度。乳液的分层稳定性用乳析指数(Creaming index, CI)表征,每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

$$CI(\%) = (H_s / H_T) \times 100\%$$

式中: H_s -下清液层的高度; H_T -乳液的总高度。

1.3.7 离心稳定性的测定

在 2 mL 离心管中准确加入 2 mL 乳液,经 800 r/min 离心 10 min^[15],在距离心管底部 1 cm 处取样 30 μ L,加入 5 mL 0.1%的 SDS 溶液,混匀后在 500 nm 下测定吸光度,每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。乳液稳定性系数用如下公式计算:

$$\text{稳定系数} = A_t / A_0$$

式中: A_0 -离心前乳状液的吸光度; A_1 -离心后乳状液的吸光度。

1.3.8 数据分析

数据进行3次重复测定取平均值,采用 Origin 8.6 进行单因素方差分析并作图,实验数据以平均值±标准偏差表示。 $p < 0.05$ 为具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 大豆纤维组成和形态

表1为大豆纤维化学组成,从表可以看出,大豆纤维中纤维含量高达70.88%,是很好的纤维来源。图1为大豆纤维原样以及均质后的扫描电镜图,从图中可以看出大豆纤维呈棒状,均质后长度明显减小,表明均质能够有效缩短纤维长度,这一结果与 Thunnalin 等^[14]的研究结果一致。

表1 大豆纤维的化学组成

Table 1 Chemical compositions of soybean fiber

化学组成(m/m)%	大豆纤维
水分	6.9±0.13
蛋白质	13.9±0.09
脂肪	0.45±0.21
灰分	2.47±0.07
碳水化合物	5.4±0.07
纤维素	70.88±0.06

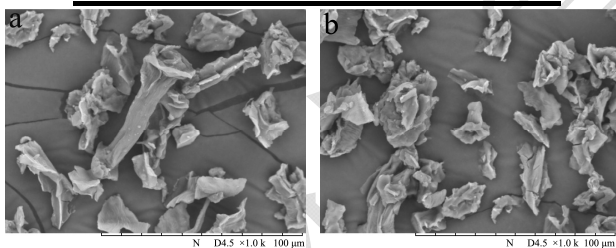


图1 均质前(a)后(b)大豆纤维的SEM图像

Fig.1 SEM micrographs of soybean fiber before (a) and after (b) homogenization

2.2 大豆纤维浓度对乳液 ζ -电势和纤维结构的影响

图2为不同大豆纤维浓度的大豆纤维水分散体和乳液的 ζ -电势,从图中可以看出,大豆纤维水分散体的 ζ -电势为负值,当大豆纤维浓度从0.125%增至0.25%时,其水分散体的 ζ -电势显著降低 ($p < 0.05$);当大豆纤维浓度增至0.75%时,其水分散体的 ζ -电势变化不显著 ($p > 0.05$);当大豆纤维浓度增至1.0%时,其水分散体的 ζ -电势显著降低 ($p < 0.05$)。这可能的

原因是:大豆纤维带有阴离子电荷- COO^- ,随着分散液中大豆纤维浓度的增加,分散液的平均电势逐渐降低^[14]。同时,乳液的 ζ -电势始终低于大豆纤维水分散体的,且随着大豆纤维浓度的增加而升高,当大豆纤维浓度从0.125%增至0.25%时,乳液的 ζ -电势变化不明显 ($p > 0.05$);当大豆纤维浓度增至0.75%时,乳液的 ζ -电势升高显著 ($p < 0.05$);进一步增加大豆纤维浓度至1.0%,乳液的 ζ -电势变化不明显 ($p > 0.05$)。这可能的原因是:大豆纤维粒子包覆在油滴表面时,疏水基团与油滴结合使亲水基团暴露导致液滴之间的静电排斥作用增加, ζ -电势降低;而随着大豆纤维浓度增加,包覆在乳液液滴表面的纤维粒子相互缠结,界面吸附的粒子与液相中粒子相互缠结,从而减少了暴露在外面的亲水基团的数量,液滴之间静电排斥作用减弱,乳液的 ζ -电势升高。

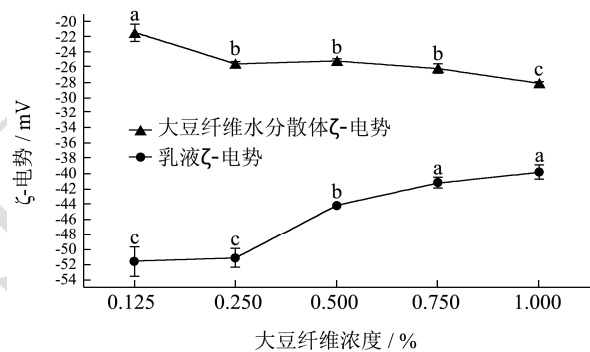
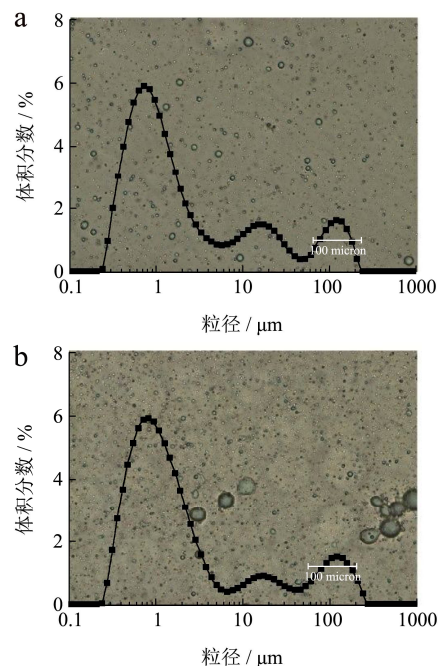


图2 大豆纤维浓度对其水分散体和乳液 ζ -电势的影响

Fig.2 Effect of soybean fiber concentration on ζ -potential of soybean fiber suspensions and soybean fiber-stabilized o/w emulsions

注:图中同一曲线上的不同字母表示显著性差异($p < 0.05$)。



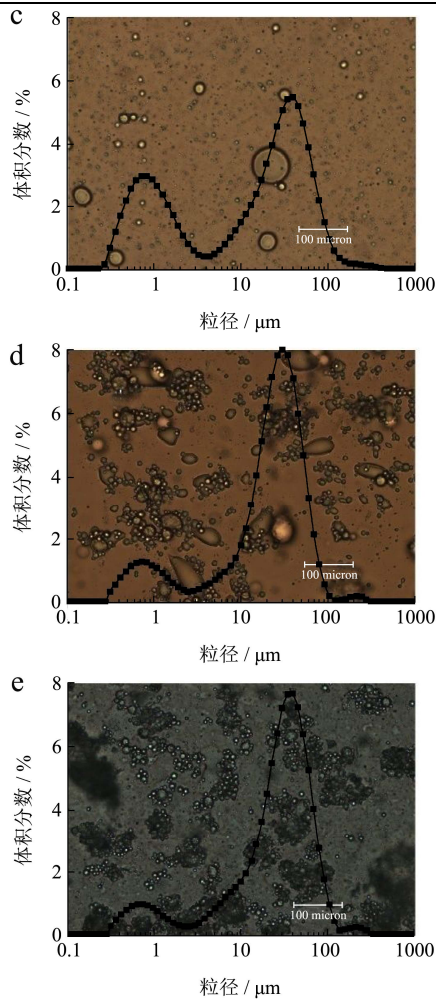


图3 不同浓度大豆纤维制备的乳液的粒径分布和显微结构

Fig.3 Particle-size distributions and microstructure of soybean fiber-stabilized O/W emulsions at different concentrations

注：从 a~e 浓度分别是 0.125%~1.0%。

不同浓度大豆纤维的乳液的粒径分布以及光学显微结构如图3所示。从图3可以看出，所有乳液液滴粒径都表现出相似的三峰分布，第一个峰的最频值大约集中在0.7~1.4 μm，第二个峰的最频值大约集中在15 μm左右，第三个峰的最频值大约集中在120~138 μm。当大豆纤维浓度从0.125%增加到1.0%，最频值逐渐向右移动，且第一个峰的峰高逐渐降低，第二个峰的峰高逐渐升高，即大粒径液滴数量增加，小粒径液滴数量减少。从内插的显微结构图也可看出，当大豆纤维浓度为0.125%时，乳液液滴粒径较小，液滴分布较均匀；当大豆纤维浓度为0.25%时，乳液出现少量大粒径液滴，且有少量液滴之间出现絮凝；当大豆纤维浓度为0.5%时，液滴粒径分布差异增大，有少量液滴之间的絮凝；当大豆纤维浓度为0.75%时，大粒径液滴数量增多，小液滴絮凝在大液滴周围；当大豆纤维浓度增至1.0%时，液滴进一步絮凝连成片状，且有成块物质出现。这可能原因是：大豆纤维水分散体

的粘度随着粒子浓度的增加而增加，阻碍了均质过程中粒子的移动以及在油水界面的吸附，降低了均质的效率，从而形成更大的油滴^[12]。此外，随着大豆纤维浓度增加，乳液的ζ-电势电负性降低，液滴之间静电排斥力减小，导致乳液的絮凝程度增加；另一方面，随着大豆纤维浓度增加，吸附在界面的大豆纤维粒子与液相中大豆纤维粒子相互粘连；最后，随着大豆纤维浓度增加，液相出现大量未被吸附的大豆纤维粒子，这些纤维粒子之间出现粘连，产生成块物质。

2.3 大豆纤维浓度对乳液液滴粒径和聚结稳定性的影响

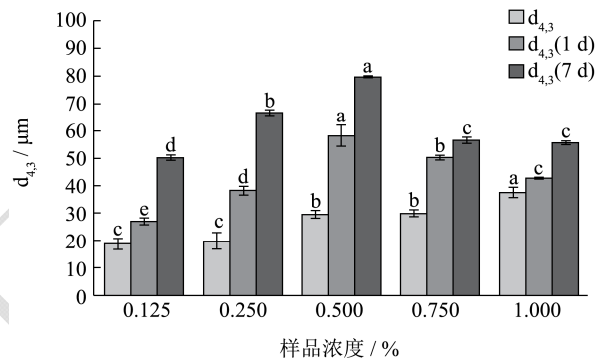


图4 分别贮藏0, 1和7 d之后不同大豆纤维浓度稳定的乳液的粒径的变化趋势

Fig.4 Changes in $d_{4,3}$ of soybean fiber-stabilized emulsions at different concentrations after storage for 0, 1, or 7 d

不同大豆纤维浓度稳定的乳液的粒径随时间变化趋势如图4所示。从图4可以看出，随着大豆纤维浓度增加，刚制备的乳液的 $d_{4,3}$ 总体呈增大趋势，当大豆纤维浓度从0.125%增至0.25%时，乳液 $d_{4,3}$ 增大不显著 ($p>0.05$)；当大豆纤维浓度增至1.0%时，乳液 $d_{4,3}$ 显著增加 ($p<0.05$)。这与显微结构的结果一致。乳液贮藏1 d后，当大豆纤维浓度从0.125%增至0.50%时，乳液 $d_{4,3}$ 显著增大 ($p<0.05$)；当大豆纤维浓度从0.50%增至1.0%时，乳液 $d_{4,3}$ 显著减小 ($p<0.05$)。贮藏7 d后乳液 $d_{4,3}$ 与贮藏1 d后的 $d_{4,3}$ 有着相同的变化趋势，而且，当大豆纤维浓度从0.125%增至0.50%时，贮藏7 d后乳液 $d_{4,3}$ 比贮藏1 d后的 $d_{4,3}$ 有明显的增大；当大豆纤维浓度从0.50%增至1.0%时，随着贮藏时间延长乳液 $d_{4,3}$ 变化不大，乳液的聚结稳定性较好。乳液聚结稳定性随着大豆纤维浓度的增加而提高，这可能的原因是：一方面随着大豆纤维浓度增加大豆纤维在油水界面的吸附密度增大，形成的界面膜增厚，导致液滴之间的空间位阻作用增强，从而有效地抑制了液滴与液滴之间的有效碰撞而发生的聚结^[16,17]；另一

方面随着大豆纤维浓度的增加，液滴表面覆盖的粒子之间相互缠结，液滴表面粒子与液相中的粒子之间相互缠结，乳液液滴之间絮凝，升高了连续相的粘度，减缓了液滴的迁移速度，致使液滴间的碰撞机会减小，液滴之间的聚结随之降低^[17]。

2.4 大豆纤维浓度对乳液分层稳定性的影响

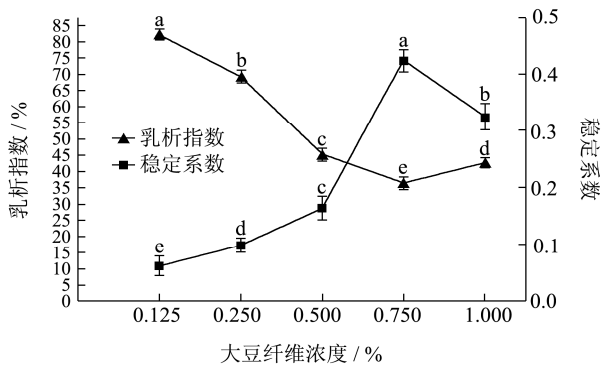


图5 大豆纤维浓度对乳液分层稳定性的影响

Fig.5 Effect of water-insoluble dietary soybean fiber concentration on the creaming stability of emulsions

图5为不同浓度大豆纤维的乳液的乳析指数(24 h后)以及离心稳定系数，从图5可以看出，当大豆纤维浓度低于0.75%时，随着大豆纤维浓度的增加，乳析指数下降，离心稳定系数增大；当大豆纤维浓度为0.75%时乳液的乳析指数最低，稳定系数最高；当大豆纤维浓度继续增加到1.0%时，乳析指数又升高，稳定系数减小。根据斯托克斯定律，提高分层稳定性可以通过减小液滴粒径、升高连续相粘度或者减小液滴和连续相之间的密度差来达到。可能原因是：一方面随着大豆纤维浓度增加液滴的粒径增大，但连续相中未吸附的粒子的存在形成了粒子和液滴之间的三维网络结构，升高了连续相的粘度，减缓了液滴的迁移；另一方面大豆纤维包覆在油滴表面增加了油滴的密度，减小了油滴和连续相的密度差，达到提高乳液的分层稳定性^[12,18]；此外，由于大豆纤维粒子在界面及液相中的相互缠结，促进了液滴之间的絮凝，从而导致过高浓度的大豆纤维降低了乳液的分层稳定性。

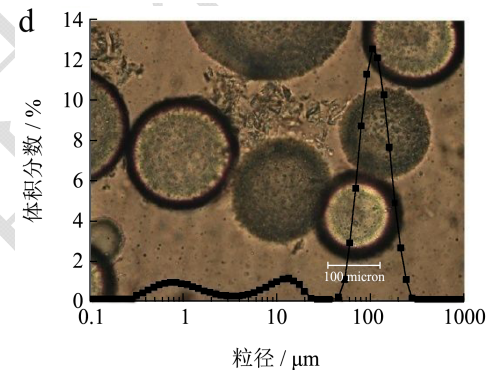
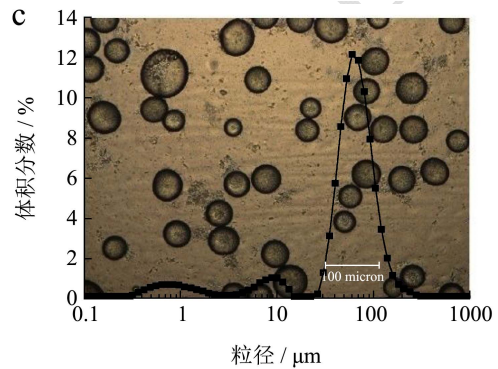
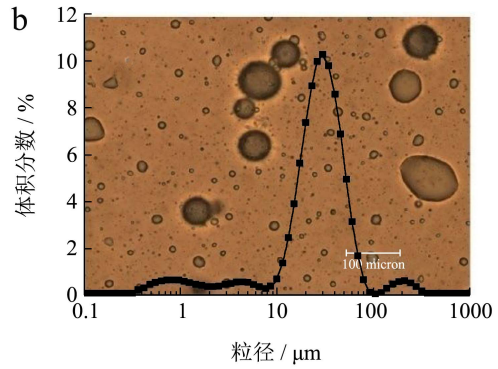
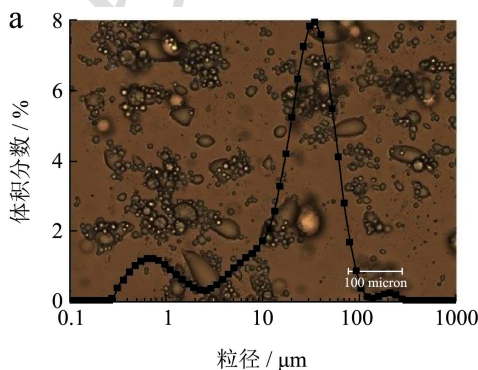


图6 不同油相质量分数的乳液的粒径分布和显微结构

Fig.6 Particle-size distributions and microstructure of emulsions at different oil-mass fractions

注：从a~d油相质量分数分别是10%~40%。

2.5 油相质量分数对乳液液滴粒径和稳定性的影响

在大豆纤维浓度为0.75%时，选择油相质量分数为10%、20%、30%、40%制备乳液，图6是不同油相质量分数的乳液的粒径分布和显微结构，从图可以看出，油相质量分数从10%增加到20%，峰高明显增加，油相质量分数继续增加到30%，峰高增加的同时最频值右移，由30 μm增加为60 μm，油相质量分数为40%时最频值显著增加到105 μm。显微结构也可看出随着油相质量分数增加，液滴粒径明显增大。当油相质量分数增至20%，如图6b所示，大液滴粒径增大，由于界面面积的增加，粒子展开吸附在界面上减

少了粒子间的缠结,使得液滴之间的静电排斥作用增强,絮凝有所下降。增加油相质量分数为30%时,如图6c所示,可以看出大粒径的液滴数量增多,而且液滴周围形成一层厚厚的吸附膜。当油相质量分数增至40%时,如图6d所示,液滴粒径明显增大,液滴周围形成一层吸附膜,同时可以看到液滴表面并未被完全包裹。

油相质量分数对乳液粒径变化的影响如图7所示,随着油相质量分数增加,乳液的 $d_{4,3}$ 总体呈增大趋势,这与图6中显微结构有相同的趋势,当油相质量分数增加到30%时,乳液 $d_{4,3}$ 由36.50 μm 显著增大到67.52 μm ($p<0.05$),当油相质量分数为40%时,乳液 $d_{4,3}$ 显著增加到102.31 μm ($p<0.05$);贮藏1 d后,乳液 $d_{4,3}$ 显著增大,油相质量分数大于10%的乳液的 $d_{4,3}$ 增幅明显大于油相质量分数为10%的乳液,而且出现明显的油析现象;之后随着贮藏时间延长乳液 $d_{4,3}$ 变化不大,贮藏7 d后油相质量分数为10%和20%的乳液 $d_{4,3}$ 仅有轻微的增大,而油相质量分数为30%和40%的乳液的 $d_{4,3}$ 稍有减小,这可能是由于油相质量分数较高时,乳液在贮藏过程中发生油析,大粒径油滴已经析出,导致所测乳液部分粒径稍有减小。粒径变化和显微结构都表明油相质量分数对乳液液滴粒径影响比较大,增加油相质量分数,乳液稳定性迅速下降,小液滴聚集成大液滴,这可能是由于高油相质量分数时油水界面面积增加,界面颗粒吸附率降低,界面膜厚度减小,空间位阻变小,因此油滴就会发生聚结,乳液粒径变大甚至出现油析分层现象,这与其他固体粒子如大豆蛋白粒子稳定的Pickering乳液的研究结果一致^[6]。

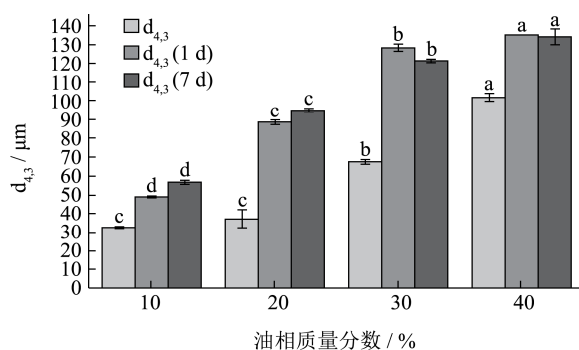


图7 分别贮藏0, 1和7 d之后不同油相质量分数的乳液粒径的变化趋势

Fig.7 Changes in $d_{4,3}$ of emulsions at different oil-mass fractions after storage for 0, 1, or 7 days

3 结论

研究了大豆纤维稳定的水包油型皮克林乳液中,

大豆纤维浓度(0.125%~1.0%)和油相质量分数(10%~40%)对乳液稳定性的影响,得出如下主要结论:

3.1 随着大豆纤维浓度增加,乳液粒径增大,絮凝程度增加,当大豆纤维浓度高于0.50%时,乳液的聚结稳定性较好,当大豆纤维浓度为0.75%时乳液的分层稳定性最好。

3.2 油相质量分数为10%时乳液的聚结稳定性比较好,增加油相质量分数,乳液液滴明显增大,且贮藏1 d后粒径迅速增大,甚至出现油析分层现象,乳液稳定性迅速下降。

3.3 大豆纤维通过吸附到油滴表面提供空间位阻效应和静电排斥力,阻止油滴聚集,保持乳液稳定,作为皮克林乳液的稳定颗粒有良好的潜力。

参考文献

- [1] Aveyard R, Binks B P, Clint J H. Emulsions stabilised solely by colloidal particles [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, 100(2): 503-546
- [2] Chevalier Y, Bolzinger M A. Emulsions stabilized with solid nano-particles: Pickering emulsions [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, 439: 23-34
- [3] Li C, Sun P, Yang C. Emulsion stabilized by starch nanocrystals [J]. *Starch-Staerke*, 2012, 64(6): 497-502
- [4] Tzoumaki M V, Moschakis T, Kiosseoglou V, et al. Oil-in-Water emulsions stabilized by chitin nanocrystal particles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(6): 1521-1529
- [5] Tzoumaki M V, Moschakis T, Scholten E, et al. *In vitro* lipid digestion of chitin nanocrystal stabilized O/W emulsions [J]. *Food & Function*, 2013, 4(1): 121-129
- [6] Liu F, Tang C H. Soy protein nanoparticle aggregates as Pickering stabilizers for Oil-in-Water emulsions [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2013, 61(37): 8888-8898
- [7] Folter J W, Ruijven M W, Velikov K P. Oil-in-Water Pickering emulsions stabilized by colloidal particles from the water-insoluble protein zein [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(25): 6807-6815
- [8] Gupta R, Rousseau D. Surface-active solid lipid nanoparticles as Pickering stabilizers for oil-in-water emulsions [J]. *Food & Function*, 2012, 3(3): 302-311
- [9] Kalashnikova I, Bizot H, Cathala B, et al. Modulation of cellulose nanocrystals amphiphilic properties to stabilize Oil-in-Water interface [J]. *Biomacromolecules*, 2012, 13(1): 267-275

- [10] Paraskevi P, Erminda T, Nikolaos K, et al. Bacterial cellulose as stabilizer of O/W emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014,53: 225-232
- [11] Wen C X, Yuan Q P, Liang H, et al. Preparation and stabilization of D-limonene Pickering emulsions by cellulose nanocrystals [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2014, 112: 695-700
- [12] Winuprasith T, Supphantharika M. Properties and stability of oil-in-water emulsions stabilized by microfibrillated cellulose from mangosteen rind [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 43: 690-699
- [13] 杨婧.膳食纤维的改性及应用研究[D].南昌:南昌大学,2012
YANG Jing. Studies on modification and application of diet fibers [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012
- [14] Winuprasith T, Supphantharika M. Microfibrillated cellulose from mangosteen (*Garcinia mangostana L.*) rind: Preparation, characterization, and evaluation as an emulsion stabilizer [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 32(2): 383-394
- [15] 崔健,郇金龙,王盼,等.温度、pH 和盐对乳清蛋白乳状液稳定性的影响[J].食品工业科技,2010,11:84-87
CUI Jian, LI Jin-Long, WANG Pan, et al. Influence of temperature, pH and salts on the stability of emulsions stabilized by whey protein [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2010, 11: 84-87
- [16] Liu F, Tang C. Emulsifying properties of soy protein nanoparticles: Influence of the protein concentration and/or emulsification process [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(12): 2644-2654
- [17] Song X Y, Pei Y Q, Zhu W, et al. Particle-stabilizers modified from indica rice starches differing in amylose content [J]. *Food Chemistry*, 2014, 153: 74-80
- [18] Song X Y, Pei Y Q, Qiao M W, et al. Preparation and characterizations of Pickering emulsions stabilized by hydrophobic starch particles [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 256-263