

黄原胶对蔗糖酯乳浊液流变特性及稳定性的影响

赵强忠, 刘道林, 龙肇, 邝婉媚, 方敏, 赵谋明

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文研究了黄原胶浓度对蔗糖酯溶液水力学直径 D_H 、 ζ -电势及乳浊液粒径、 ζ -电势、显微结构、粘度、模量和乳析分层等指标的影响, 在此基础上探讨了黄原胶对蔗糖酯乳浊液流变特性及稳定性的影响。结果表明: 随着黄原胶浓度升高, 蔗糖酯-黄原胶复合溶液的 D_H 值逐渐增大, ζ -电势逐渐降低。乳浊液的粒径先增大后减小, ζ -电势没有显著的变化 ($p>0.05$), 乳浊液的粘度和模量逐渐增大。低黄原胶浓度 (0~0.01 wt%) 条件下, 乳浊液仅出现油析分层现象; 黄原胶浓度为 0.05 wt% 时, 由于排斥絮凝作用增强, 导致乳浊液的水析及油析分层最严重; 随着黄原胶浓度进一步升高, 由于弱凝胶网络结构的形成, 一定程度提高了乳浊液的稳定性; 且黄原胶浓度高于 0.15 wt% 时, 乳浊液仅出现水析分层现象。

关键词: 乳浊液; 黄原胶; 蔗糖酯; 流变特性; 稳定性

文章编号: 1673-9078(2014)4-93-98

Effect of Xanthan Gum on the Rheological Characteristic and Stability of Sucrose Ester-stabilized Emulsion

ZHAO Qiang-zhong, LIU Dao-lin, LONG Zhao, KUANG Wan-mei, FANG Min, ZHAO Mou-ming

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

Abstract: The influences of xanthan gum concentration on hydrodynamic diameter (D_H), ζ -potential of sucrose ester solutions and droplet size, ζ -potential, microstructure, viscosity, modulus and creaming index of sucrose ester-stabilized emulsions were studied. The effect of xanthan gum on the rheological characteristic and stability of sucrose ester-stabilized emulsion were also investigated. The results showed that D_H value of sucrose ester-xanthan gum solutions increased and ζ -potential decreased with the increase of xanthan gum concentration. ζ -potential of emulsions changed insignificantly ($p > 0.05$), while the droplet size increased firstly and decreased afterward, the viscosity and modulus increased with increasing xanthan gum concentration. The oil off was attributed to coalescence between fat droplets at low xanthan gum concentrations (0~0.01 wt%). The emulsion exhibited the worst stability when xanthan gum concentration was 0.05 wt% due to depletion flocculation. The stability of emulsion was improved with the increase of xanthan gum concentration due to the formation of weak gel network structure. There only existed serum phase when xanthan gum concentration was higher than 0.15 wt%.

Key words: emulsion; xanthan gum; sucrose ester; rheological characteristic; stability

乳浊液是一种热力学不稳定的体系, 为了得到稳定的乳浊液, 乳化剂和稳定剂是不可或缺的。在乳浊液的制备过程中, 具有表面活性的小分子乳化剂能快速吸附到油-水界面, 形成界面膜, 降低体系的界面自由能, 阻止液滴之间的聚结^[1]。多糖是食品乳浊液中常用的稳定剂, 其加入能增大乳浊液连续相的粘度或形成空间网络结构, 提高乳浊液的稳定性^[2]。

蔗糖脂肪酸酯 (sucrose fatty acid esters, 简称蔗糖

收稿日期: 2013-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20806030); 中央高校基本科研业务费项目 (2009ZM0286)

作者简介: 赵强忠 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品生物技术与食品乳浊体系

通讯作者: 赵谋明 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物技术

酯) 是一种非离子型表面活性剂, 具有非常好的生物降解性和毒理学性质^[3]。它以蔗糖分子中的游离羟基为亲水基团, 天然油脂中的脂肪酸链为憎水基团, 具有较好的乳化作用, 广泛应用于食品乳浊液与泡沫^[4]。

黄原胶又称汉生胶, 是由野油菜黄单胞杆菌 (又称甘蓝黑腐病菌) 分泌的一种胞外阴离子多糖, 是一种非吸附型多糖, 不能吸附到蛋白乳浊液的油滴上^[5-6]。黄原胶是食品体系广泛使用的稳定剂和增稠剂。在食品O/W乳浊液中, 黄原胶往往被添加在分散介质中以提高体系抗分层的能力。Krstonošić等人^[7]研究发现: 吐温乳浊液中添加0.2 wt%黄原胶能形成凝胶网络结构, 形成的乳浊液具有较好的稳定性。然而, 蛋白乳浊液中添加一定量的黄原胶则会引起液滴之间发生排斥絮凝, 导致乳浊液失稳^[8]。国外对黄原胶和牛乳

蛋白(酪蛋白和乳清蛋白等)之间的相互作用及其对乳浊液稳定性的影响有大量的文献报道,但关于黄原胶对非离子型乳化剂蔗糖酯稳定乳浊液稳定性的影响却未见报道。

本文通过测定蔗糖酯-黄原胶复合溶液水力学直径、 ζ -电势及乳浊液的粒径、 ζ -电势、显微结构、粘度、模量与乳析分层等指标,研究了黄原胶对蔗糖酯乳浊液的流变特性及稳定性的影响,从而对黄原胶的作用效果进行机理分析,为黄原胶在乳浊体系的应用提供一定的理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

蔗糖酯 S1170(食品级),三菱化工株式会社;黄原胶(食品级),法国罗地亚公司;金龙鱼食用玉米油,购自本地超市;其他试剂,均为分析纯。

1.2 仪器与设备

高速分散均质机 T25,德国 IKA 公司;电动搅拌机 RW20,德国 IKA 公司;APV-1000 高压均质机,丹麦 APV 公司;CX31 光学显微镜,奥林巴斯中国有限公司;Mastersizer 2000 激光粒度分析仪,英国 Malvern Instruments 有限公司;Nanoseries ZS 电势测定仪,英国 Malvern Instruments 有限公司;JJ500 电子分析天平,深圳市朗普电子科技公司;哈克 MARS III 流变仪,德国 Thermo-Scientific 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 蔗糖酯-黄原胶复合溶液的制备

准确称取一定质量的蔗糖酯分散在 5 mM PBS 缓冲液(pH 7)中,在 600 r/min 转速下于 60 °C 搅拌 0.5 h,确保其充分溶解;准确称取一定质量的黄原胶分散溶于 5 mM PBS 缓冲液,室温下 600 r/min 搅拌 1.5 h 以上,确保其充分水化。制备出蔗糖酯和黄原胶浓度分别为 2 wt% 和 1 wt% 的贮备液。

将蔗糖酯(1 wt%)、黄原胶(0~0.3 wt%)以一定比例混合,将样品于室温下搅拌 1 h 以上,确保混合均匀。

1.3.2 乳浊液的制备

将蔗糖酯(1 wt%)、黄原胶(0~0.3 wt%)和玉米油(20 wt%)混合,均质前将混合液经高速分散均质机在 10000 r/min 转速下剪切 1 min,得到预乳化的乳状液,然后在常温下于 20 MPa 高压均质一次。

1.3.3 粒度分布的测定

将蔗糖酯-黄原胶复合溶液用 5 mM PBS 缓冲液按 1:5 体积稀释,采用 Nanoseries ZS 电势测定仪测定蔗糖酯-黄原胶复合溶液的水力学直径 D_H 。

Mastersizer 2000 激光粒度分布仪是测定乳浊液中粒子大小分布的仪器。样品按 1:1000 (m/V) 用去离子水稀释,设定操作参数如下:

分析模式:通用;进样器名:Hydro 2000MU (A);颗粒折射率:1.476;颗粒吸收率:0.001;分散剂名:水;分散剂折射率:1.330;泵的转速:2200 r/min。体积平均直径:

$$d_{4,3} = \frac{\sum n_i d_i^4}{\sum n_i d_i^3} \quad (1)$$

注: n_i 是指直径为 d_i 的脂肪球的数量

1.3.4 显微结构的测定

在室温下,用奥林巴斯(Olympus)光学显微镜观察乳浊液的显微结构(目镜 10 \times ,物镜 40 \times)。

1.3.5 ζ -电势的测定

将蔗糖酯-黄原胶复合溶液用 5 mM PBS 缓冲液按 1:5 体积稀释,乳浊液用 5 mM PBS 缓冲液按 1:100 体积稀释,采用 Nanoseries ZS 电势测定仪测定溶液及乳浊液的 ζ -电势。测定温度 25 °C,每个样品重复测量 3 次取平均值。

1.3.6 流变特性的测定

实验采用哈克 MARS III 型流变仪测定乳浊液的剪切流变和频率扫描下的振荡流变特性,所用转子为 C60/1° Til,板间距设定为 0.052 mm。振荡频率扫描条件为:应力 0.01 Pa,测定温度 25 °C,振荡频率范围为 0.01~10 Hz。剪切流变测定条件为:剪切速率为 0.1~150 s⁻¹,持续时间 180 s,测定温度 25 °C,每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3.7 储存稳定性的测定

取 10 mL 乳浊液样品置于乳析管中,添加 0.02 wt% 叠氮钠抑制微生物的生长。将乳析管静置于室温环境下,定期对样品进行观察,记录乳浊液分层后样品顶部/底部的高度。乳浊液的稳定性用分层指数(Creaming Index, CI)表征。

$$CI/\% = (H_S/H_T) \times 100\% \quad (2)$$

注: H_S 为油析/水析的高度; H_T 为样品的总高度。

1.4 数据分析

所有实验均重复三次,数据均以平均值 \pm 标准偏差表示,采用统计软件 SPSS 12.0 进行单因素方差分析。p<0.05 为具有显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 黄原胶浓度对蔗糖酯-黄原胶溶液水力学直径 D_H 和 ζ -电势的影响

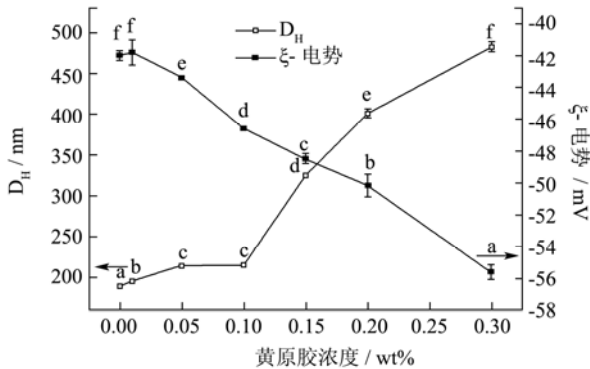


图1 黄原胶浓度对蔗糖酯-黄原胶溶液水力学直径 D_H 和 ζ -电势的影响

Fig.1 Effect of xanthan gum concentration on the hydrodynamic diameter D_H and ζ -potential of sucrose ester-xanthan gum solution

注：图中同一曲线上的不同字母表示显著性差异 ($p < 0.05$)。

图1为黄原胶浓度对蔗糖酯-黄原胶溶液水力学直径 D_H 和 ζ -电势的影响。由图可知，当黄原胶浓度低于0.1 wt%时，随着其浓度升高，蔗糖酯-黄原胶溶液的 D_H 值增长缓慢；当黄原胶的浓度高于0.1 wt%时，水溶液的 D_H 值随黄原胶浓度升高显著增大 ($p < 0.05$)。这可能是由于动态光散射的测量原理导致的。在动态光散射的测量中，用光谱仪直接测量的是胶粒在体系中的自扩散系数 (D)，在极稀的体系中，根据 Stokes-Einstein 方程 (3)，计算出粒子的有效水力学半径 (R_H)

$$D = kT / 3\pi\eta R_H \quad (3)$$

注：k 为波尔兹曼常数；T 为测量温度； η 为体系的粘度。

测量时，水的粘度默认为体系的粘度；然而，在实际的测量体系中，低浓度黄原胶 (0~0.1 wt%) 的加入能略微提高体系的粘度，从而使得仪器测量出的粒子自扩散系数偏小，相应计算出来的粒子水力学半径偏大；黄原胶浓度高于0.1 wt%时，因溶液中黄原胶的浓度达到缠结浓度导致黄原胶分子之间发生相互作用，使得溶液的粘度迅速增加，导致 D_H 值急剧增大 [9-10]。

从图1中可以看出，纯蔗糖酯溶液的电势为-42 mV，这是由于蔗糖酯中存在一定量的阴离子物质如脂肪酸，致使蔗糖酯溶液带有一定的负电荷 [4]。复合溶液的 ζ -电势随黄原胶浓度升高显著降低 ($p < 0.05$)，这是由于黄原胶本身带有阴离子电荷，随着溶液中黄

原胶浓度的增加，溶液的平均电势逐渐降低。

2.2 黄原胶浓度对乳浊液粒度分布和显微结构的影响

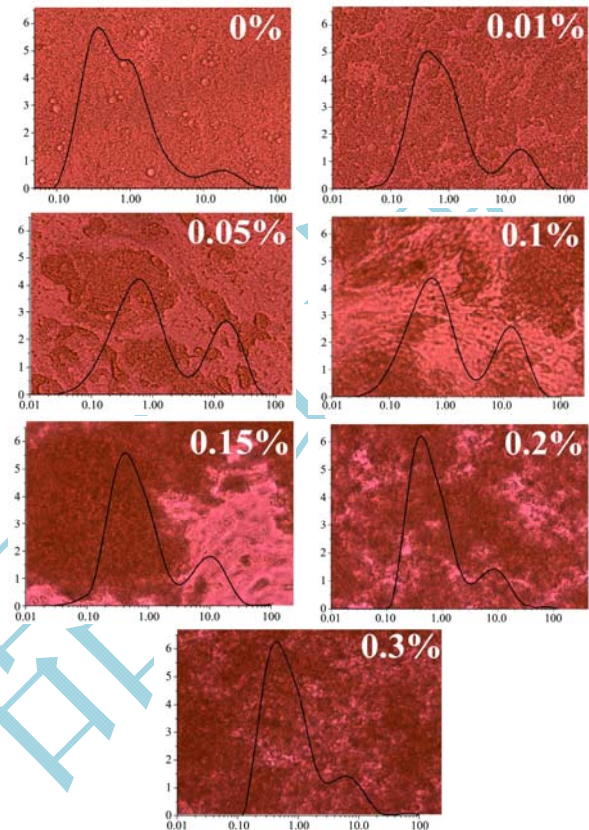


图2 黄原胶浓度对乳浊液粒度分布和显微结构的影响

Fig.2 Effect of xanthan gum concentration on the microstructure and particle size distribution of sucrose ester-stabilized emulsion

图2为黄原胶浓度对乳浊液粒度分布和显微结构的影响。从图2的粒度分布可以看出：所有样品粒度均呈双峰分布。当黄原胶浓度低于0.05 wt%时，随着黄原胶浓度的升高，大粒径的峰面积逐渐增大，而小粒径的峰面积则相应的减小；当黄原胶浓度高于0.05 wt%时，大粒径的峰面积逐渐减小，小粒径的峰面积则逐渐增大。由显微结构图可知，纯蔗糖酯稳定的乳浊液具有较大粒径的脂肪球，但脂肪球之间分布较均匀。这主要是因为蔗糖酯稳定的脂肪球之间发生了一定程度的聚结，但脂肪球之间较强的静电作用又使得小粒径脂肪球仍能保持相对稳定的状态。加入0.01~0.05 wt%黄原胶，乳浊液出现排斥絮凝现象，促进了脂肪球之间的相互聚结，大粒径脂肪球数量增多 [11]；当黄原胶浓度达到0.1 wt%时，乳浊液因絮凝作用形成了弱凝胶网络结构，且随着浓度的进一步增加，凝胶网络结构逐渐增强，乳浊液的粘度升高，减缓了

脂肪球的移动速率, 致使脂肪球间的碰撞机会减小, 脂肪球之间的聚结随之降低^[7], 大粒径的脂肪球数量减少, 这与粒度分布的结果一致。

2.3 黄原胶浓度对蔗糖酯乳浊液 ζ -电势和粒径的影响

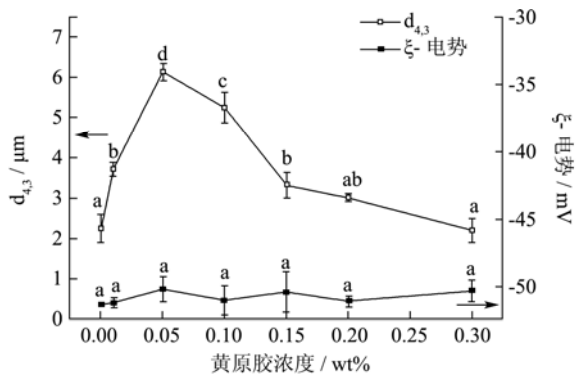


图3 黄原胶浓度对乳浊液 ζ -电势和 $d_{4,3}$ 的影响

Fig.3 Effect of xanthan gum concentration on the ζ -potential and $d_{4,3}$ value of sucrose ester-stabilized emulsion

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为黄原胶浓度对乳浊液 ζ -电势和体积平均粒径 $d_{4,3}$ 的影响。如图3所示, 黄原胶的加入对乳浊液的 ζ -电势无显著影响 ($p > 0.05$), 而蔗糖酯-黄原胶复合溶液的 ζ -电势随黄原胶浓度的增加逐渐减小(图1), 这表明黄原胶未吸附到蔗糖酯稳定的油-水界面。

由图3可知, 黄原胶浓度对乳浊液粒径影响显著 ($p < 0.05$)。当黄原胶浓度低于 0.05 wt% 时, 乳浊液粒径 $d_{4,3}$ 随其浓度升高而增大; 当浓度达到 0.05 wt% 时, 乳浊液的粒径 $d_{4,3}$ 达到最大值 6.134 μm ; 此后, 随着黄原胶浓度的进一步升高, 乳浊液粒径持续降低。可能的原因是: 低浓度 (0.01~0.05 wt%) 黄原胶能引起乳浊液的排斥絮凝, 促进脂肪球间的聚结, 从而使得粒径增大; 当黄原胶浓度进一步升高, 乳浊液的粘度升高, 减缓了脂肪球的移动速率, 致使脂肪球间的碰撞机会减小, 有利于阻止脂肪球之间的聚结, 粒径逐渐降低。然而, 有研究表明: 酪蛋白乳浊液中加入黄原胶并不影响粒径的大小^[12]。主要的原因是: 黄原胶没有吸附到酪蛋白稳定的油-水界面, 未能改变界面结构, 且酪蛋白稳定的脂肪球间具有较好的静电排斥作用及空间位阻作用, 能较好的阻止脂肪球之间的聚结, 从而使脂肪球大小基本保持一致。然而, 蔗糖酯稳定的脂肪球没有较强的空间位阻作用, 脂肪球之间的静电作用不能有效抑制聚结发生, 从而导致乳浊液粒径有显著的变化 ($p < 0.05$)。

2.4 黄原胶浓度对乳浊液流变特性的影响

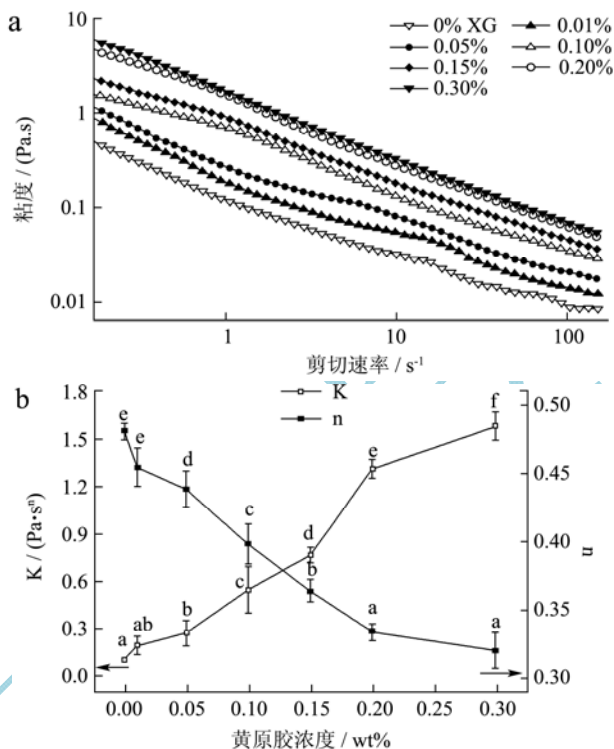


图4 黄原胶浓度对乳浊液粘度的影响

Fig.4 Effect of xanthan gum concentration on the viscosity of sucrose ester-stabilized emulsion

注: 图 b 中同一曲线上的不同字母表示显著性差异 ($p < 0.05$)。

图4是黄原胶浓度对乳浊液剪切流变特性的影响。从图4a可以看出, 乳浊液的表现粘度随着剪切速率的增大而降低, 为剪切变稀体系。随着黄原胶浓度的增加, 乳浊液的粘度逐渐升高。图4b为套用 Ostwald-de Waele 模型 $\tau = K(\dot{\gamma})^n$ 所得的各参数数据, 其中, K 值表示体系的稠度系数, n 值表示体系的流变特征指数。由图4(b)可知, 随着黄原胶浓度增加, K 值显著增大 ($p < 0.05$), n 值则显著减小 ($p < 0.05$), 即乳浊液的稠度显著增加, 乳浊液的剪切变稀效应显著增强。这是由于随着黄原胶浓度的增加, 一方面, 液相中黄原胶相互作用程度增强; 另一方面, 乳浊液的排斥絮凝作用增强, 导致脂肪球之间的相互作用增强, 使得脂肪球之间的零剪切粘度增加, 乳浊液的稠度增大, 剪切变稀效应加剧^[13]。

图5为黄原胶浓度对乳浊液频率扫描储存模量 $G'(a)$ 和损耗模量 $G''(b)$ 的影响。从图5可以看出, 与未加入黄原胶的乳浊液相比, 加入黄原胶乳浊液的模量明显增大, 并且随着黄原胶浓度的增加, 乳浊液的储存模量与损耗模量呈现明显增大的趋势, 这说明体系的凝胶网络结构逐渐增强。一方面, 随着黄原胶浓

度的增加,液相中黄原胶分子之间发生相互作用的几率增大,造成体系的模量增加;另一方面,随着黄原胶浓度的升高,脂肪球之间的排斥絮凝作用增强,形成的凝胶结构逐渐增强,导致模量增大。

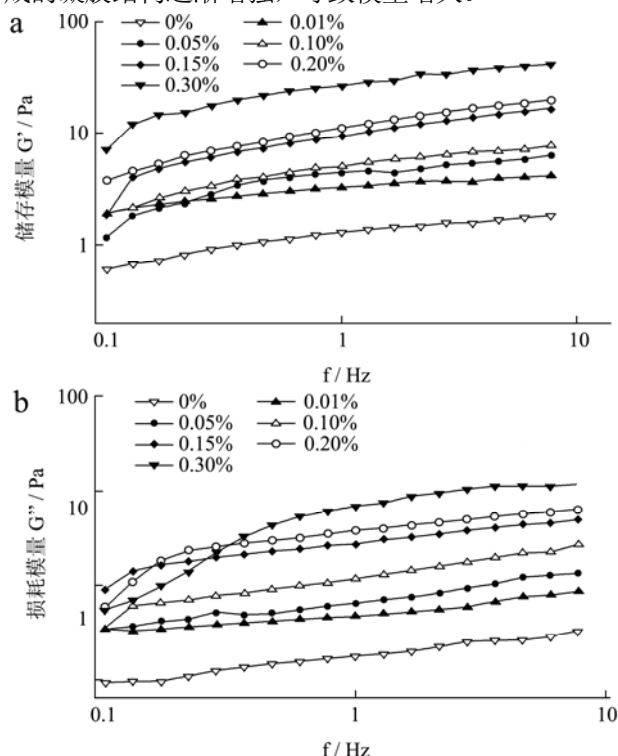


图5 黄原胶浓度对乳浊液储存模量 G' (a) 和损耗模量 G'' (b) 的影响

Fig.5 Effect of xanthan gum concentration on the storage modulus G' (a) and loss modulus G'' (b) of sucrose ester-stabilized emulsion

2.5 黄原胶浓度对乳浊液储存稳定性的影响

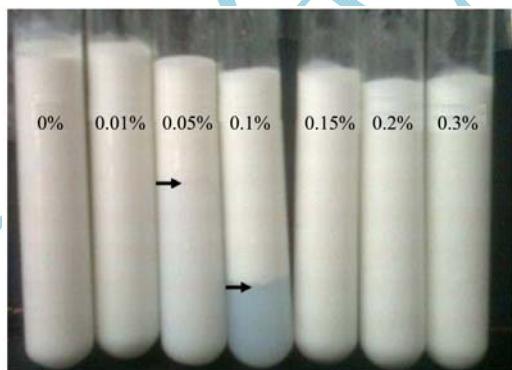


图6 黄原胶浓度对乳浊液储存1 d后外观的影响

Fig.6 Effect of xanthan gum concentration on the visual appearance of emulsions after 1 day storage

图6和表1是黄原胶浓度对乳浊液储存稳定性的影响。从图6可以看出,当黄原胶浓度为0.05~0.1 wt%时,乳浊液出现明显分层;加入0.05 wt%黄原胶的乳浊液,下层较浑浊;加入0.1 wt%黄原胶则出现透明

的水析层。当黄原胶浓度继续增加,乳浊液的稳定性增强。从表1可以看出,在储存过程中,当黄原胶浓度为0~0.01 wt%时,乳浊液在储存过程中无明显水析;当黄原胶浓度为0.05 wt%时,乳浊液的水析最严重;当黄原胶浓度进一步增加,乳浊液的水析显著降低 ($p < 0.05$)。当黄原胶浓度为0~0.1 wt%时,乳浊液在第2天就出现了一定程度的油析,且随着浓度的升高,油析分层逐渐增大;黄原胶的浓度达到0.05 wt%时,乳浊液油析分层最严重。当浓度高于0.15 wt%时,乳浊液在储存过程中均未出现油析。结合粒度分布和显微结构的结果,分析造成这种结果的主要原因如下:未加入黄原胶的蔗糖酯乳浊液出现大粒径脂肪球,且随着黄原胶浓度升高,粒径逐渐增大,大粒径脂肪球数量逐渐增多,表明随黄原胶浓度升高,排斥絮凝作用增强,脂肪球之间聚结作用逐渐增强,在宏观上表现为油析分层逐渐增大;黄原胶浓度为0.05 wt%时,乳浊液的大粒径脂肪球数量较多,乳浊液的粒径达到最大,乳浊液表现出较强的排斥絮凝,导致乳浊液水析及油析分层最严重;且根据Stokes公式,大粒径脂肪球的上浮速率比小粒径脂肪球快,从而导致乳浊液出现较为浑浊的水析层。当黄原胶浓度为0.1 wt%时,乳浊液的絮凝进一步加强,形成了一定的弱凝胶网络结构,使得大粒径脂肪球上浮速度减慢,致使乳浊液的水析与油析层均有所降低且乳浊液的底部水析层较为清晰^[14]。当黄原胶浓度达到0.15 wt%时,因液相黄原胶浓度达到缠结浓度导致液相中黄原胶分子间发生相互作用形成一定的网络结构,且排斥絮凝的加剧导致乳浊液形成较强的弱凝胶网络结构,乳浊液的粘度急剧增大,减缓了脂肪球的移动速率,致使脂肪球间的碰撞机会减小,使得乳浊液的稳定性有所提高,仅出现水析分层现象。

3 结论

3.1 当黄原胶浓度低于0.1 wt%时,随着其浓度升高,水溶液的 D_H 值增长缓慢;当黄原胶的浓度高于0.1 wt%时,溶液的 D_H 值随黄原胶浓度升高而迅速增大。蔗糖酯-黄原胶复合溶液的 ζ -电势随黄原胶浓度的升高逐渐降低。

3.2 黄原胶对蔗糖酯乳浊液的 ζ -电势无显著影响,即黄原胶未吸附到蔗糖酯稳定的油-水界面;蔗糖酯乳浊液的粒径随黄原胶浓度升高呈先增大后减小的趋势;加入黄原胶能明显提高乳浊液的粘度及模量。

3.3 当黄原胶浓度为0~0.01 wt%时,乳浊液只出现油析分层。黄原胶的浓度达到0.05 wt%时,乳浊液水析及油析分层均最严重;当黄原胶浓度达到0.1 wt%时,

形成弱凝胶网络结构,提高了乳浊液的稳定性。且黄原胶浓度高于 0.15 wt%时,乳浊液仅出现水析。

表 1 黄原胶浓度对乳浊液储存稳定性的影响 (分层指数/%)

Table 1 Effect of xanthan gum concentration on the storage stability of sucrose ester-stabilized emulsion

分层	黄原胶浓度/wt%	储存时间/d					
		1	2	3	5	7	30
水析层	0	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}
	0.01	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}
	0.05	56.72±1.49 ^{d,u}	61.19±1.84 ^{d,v}	62.69±1.79 ^{e,v}	68.66±1.89 ^{d,w}	68.66±2.09 ^{d,w}	73.13±2.59 ^{d,x}
	0.1	26.12±1.39 ^{c,u}	32.84±1.44 ^{c,v}	38.81±1.54 ^{d,w}	44.78±1.64 ^{c,x}	46.27±1.69 ^{c,x}	56.72±1.79 ^{c,y}
	0.15	1.49±0.45 ^{b,u}	4.48±0.55 ^{b,v}	7.46±0.94 ^{c,w}	11.94±0.97 ^{b,x}	14.93±1.04 ^{b,y}	35.92±1.65 ^{b,z}
	0.20	0 ^{a,u}	1.79±0.36 ^{a,v}	4.48±0.85 ^{b,w}	10.45±0.92 ^{b,x}	16.42±1.19 ^{b,y}	36.21±1.34 ^{b,z}
	0.30	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	2.99±0.35 ^{a,v}	11.94±0.98 ^{b,w}	14.93±1.04 ^{b,x}	37.21±1.39 ^{b,y}
油析层	0	0 ^{a,u}	2.24±0.35 ^{c,v}	4.03±0.75 ^{c,w}	6.27±0.68 ^{c,x}	7.16±1.19 ^{c,x}	7.46±1.49 ^{c,x}
	0.01	0 ^{a,u}	2.54±0.39 ^{c,v}	4.33±0.91 ^{c,w}	7.01±0.64 ^{c,x}	7.46±1.04 ^{c,x}	7.76±1.14 ^{c,x}
	0.05	0 ^{a,u}	2.69±0.42 ^{c,v}	4.48±0.54 ^{c,w}	7.01±0.69 ^{c,x}	7.46±1.29 ^{c,x}	7.81±1.24 ^{c,x}
	0.1	0 ^{a,u}	1.49±0.36 ^{b,v}	2.24±0.55 ^{b,v}	3.88±0.45 ^{b,w}	4.48±0.9 ^{b,w}	4.78±1.04 ^{b,w}
	0.15	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}
	0.2	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}
	0.3	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}	0 ^{a,u}

注:数据是以三次测定的平均值±标准偏差表示。每列数据不同上标(a-e)表示显著性差异(p<0.05),每行数据不同上标(u-z)表示显著性差异(p<0.05)。

参考文献

[1] 孙哲浩,黄剑波,赵谋明.小分子乳化剂对食物蛋白质乳化特性的影响[J].食品工业科技,2006,27(5):189-194
Sun Zhe-hao, Huang Jian-bo, Zhao Mou-ming. Effect of low-molecular weight emulsifier on the emulsifying properties of food protein [J]. Science and Technology of Food Industry. 2006, 27(5): 189-194

[2] Dickinson E. Interfacial structure and stability of food emulsions as affected by protein-polysaccharide interactions [J]. Soft Matter, 2008, 4: 932-942

[3] Chansanroj K, Betz G. Sucrose esters with various hydrophilic-lipophilic properties: Novel controlled release agents for oral drug delivery matrix tablets prepared by direct compaction [J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2010, 6(8): 3101-3109

[4] Choi, Jun Seung, Eric Andrew Decker, et al. Formulation and Properties of Model Beverage Emulsions Stabilized by Sucrose Monopalmitate: Influence of pH and Lyso-Lecithin Addition [J]. Food Research International, 2011, 44(9): 3006-3012

[5] Bouyer E, Mekhloufi G, Rosilio V, et al. Proteins, Polysaccharides, and Their Complexes Used as Stabilizers for Emulsions: Alternatives to Synthetic Surfactants in the Pharmaceutical Field [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2012, 436(1-2): 359-78

[6] 胡国华.功能性食品胶[M].北京:化学工业出版社,2004
Hu Guo-hua. Functional food gum [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004

[7] Krstonošić, Veljko, Ljubica Dokić, et al. Effects of Xanthan Gum on Physicochemical Properties and Stability of Corn Oil-in-Water Emulsions Stabilized by Polyoxyethylene (20) Sorbitan Monooleate [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(8): 2212-2218

[8] Hemar Y, Tamehana M, Munro P A, et al. Influence of xanthan gum on the formation and stability of sodium caseinate oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(4-6): 513-519

[9] Rodd A B, Dunstan D E, Boger D V. Characterization of xanthan gum solutions using dynamic light scattering and rheology [J]. Carbohydrate Polymers, 2000, 42: 159-174

[10] Wang F, Sun Z, Wang Y J. Study of xanthan gum/waxy corn starch interaction in solution by viscometry [J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15: 575-581

[11] 刘丽娅,赵强忠,孔静,等.黄原胶对酪蛋白酸钠乳液稳定性的影响[J].食品工业科技,2012,33(5):83-86
LIU Li-ya, ZHAO Qiang-zhong, KONG Jing, et al. Effect of xanthan gum on the stability of sodium caseinate emulsion [J].

- Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(5): 83-86
- [12] Moschakis T, Murray B T, Dickinson E. Microstructural evolution of viscoelastic emulsions stabilized by sodium caseinate and xanthan gum [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, 284: 714-728
- [13] Sandra C. Vázquez-Solorio, Darinka D., et al. Sosa-Herrera, et al. Rheological properties of emulsions containing milk proteins mixed with xanthan gum [J]. Procedia Food Science, 2011, 1: 335-339
- [14] Sun Changhui, Gunasekaran Sundaram, Richards Mark P. Effect of xanthan gum on physicochemical properties of whey protein isolate stabilized oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(4): 555-564

现代食品科技