DOI:10.12441/spyswjs.20220927004 [文章编号] 1673-1689(2024)10-0088-09

复配乳化剂对黄油基淡奶油品质的影响

朱亚成[1,2] 徐菲菲[2,3] 刘 飞[2,3] 夏熠珣[2,3] 陈茂深[2,3*] 钟 芳[2,3]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 江南大学未来食品科学中心,江苏 无锡 214122; 3. 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心,江苏 无锡 214122)

摘要:搅打淡奶油具有良好的起泡性和口感,在冰淇淋、面包、蛋糕等食品制作中应用广泛。淡奶油原料中的鲜稀奶油存在运输成本高和储藏时间短等问题,限制了其进一步发展。以黄油为脂肪来源制备黄油基淡奶油,考察了不同亲水亲油平衡(hydrophile lipophilic balance, HLB)值复配乳化剂(单硬脂酸甘油酯,蔗糖脂肪酸酯)对黄油基淡奶油搅打前粒径、表观黏度、微观结构和搅打后搅打时间、搅打起泡率、硬度、乳清泄漏率、黏弹性能等指标的影响,并从界面性质和结晶性质对研究结果予以解释。结果发现,当复配乳化剂HLB值为10时,乳液粒径为(7.80±0.87) μm,界面蛋白吸附量为(20.44±0.44) mg/m^2,稳定性良好,搅打时间居中,搅打起泡率为(167±2)%,乳清泄漏率为(15±2)%,黄油基淡奶油具有良好的搅打性能和储藏性能,为工业生产黄油基淡奶油提供理论依据。

关键词:黄油;搅打淡奶油;亲水亲油平衡值

Effects of Different HLB Value of Emulsifiers on the Quality of Butter-Based Whipped Cream

ZHU Yacheng[1,2] *XU Feifei*[2,3] *LIU Fei*[2,3] *XIA Yixun*[2,3] *CHEN Maoshen*[2,3*] *Zhong Fang*[2,3]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Wuxi 214122, China)

Abstract: Whipped cream, known for its excellent foaming properties and texture, is widely used in the production of ice cream, bread, and cakes. However, the high transportation costs and short shelf life associated with fresh cream in the composition of whipped cream limit its further development. This study prepared the butter-based whipped cream using butter as the fat source and investigated the impacts of emulsifiers with different hydrophilic-lipophilic balance (HLB) values (monoglyceride, sucrose fatty acid ester) on the particle size, apparent viscosity, and microstructure before whipping, as well as the impacts of whipping time, whipping foam rate, hardness, whey leakage rate, and rheological properties after whipping. The results were interpreted from the perspectives of interfacial properties and crystallization characteristics. It was found that when the HLB value of the blended emulsifiers was 10, the emulsion particle size was (7.80±0.87) μm, the interfacial protein adsorption amount was (20.44±0.44) mg/m², and the stability was good. The whipping time was moderate, the whipping foam rate was (167±2)%, and the whey leakage rate was (15±2)%. The butter-based whipped cream exhibited good whipping and storage properties, providing theoretical basis for the industrial production of butter-based whipped cream.

Keywords: butter; whipped cream; hydrophile lipophilic balance value

基金项目:国家自然科学基金项目(32272470,32072153)。

通信作者:陈茂深(1986—),男,博士,教授,硕士研究生导师,主要从事食品胶体研究。E-mail:chenmaoshen@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2022-09-27 **修回日期:**2022-10-23

随着国民经济不断发展，人们在收入水平提高的同时也对生活品质有更高的追求，奶油及其制品渐渐走上大众餐桌。从口感和风味上来说，消费者更偏爱动物奶油。动物奶油通常是以牛奶离心后的鲜稀奶油为原料，经乳化等一系列工艺后制得，打发后主要用于烘焙制品。已有很多关于淡奶油品质的研究：赵谋明等[1]从脂肪部分附聚率、搅打充气时间、搅打起泡率、泡沫硬度、泡沫稳定性等指标综合考虑，搅打淡奶油体系最适HLB值为6~8；李扬等[2]研究发现以胶束酪蛋白浓缩物和酪蛋白酸钙为原料的淡奶油，经二次均质后仍具有良好的搅打特性；孟宪霞[3]研究证明黄原胶对UHT搅打淡奶油黏度贡献最大，能显著降低搅打起泡率；Long等[4]研究报道，随均质压力从20 MPa升至50 MPa，淡奶油脂肪球界面蛋白吸附量显著降低。

鲜稀奶油在常温下呈液态，不利于运输和储藏，且对奶源具有较高要求，限制了淡奶油行业的发展。黄油和鲜稀奶油一样，是牛奶离心后的产物，其货架期长，常温下呈固态，降低了运输及储藏成本。目前国内已开展此方面的研究，袁佩佩等[5]发现当均质处理压力为10.0~15.0 MPa时，可有效提高黄油基淡奶油的乳液稳定性；阚传浦等[6]证明蔗糖酯SE1670和分子蒸馏单硬脂酸甘油酯在淡奶油乳液中展现出最佳的稳定作用，且适宜的添加比例均为0.2%~0.3%；代克克[7]以Tween 80、大豆磷脂和聚甘油酯组合制备的黄油基淡奶油能达到市售淡奶油的搅打性能。目前对黄油基淡奶油品质影响的研究仅聚焦在某一种或几种乳化剂上，没有涉及乳化剂HLB值对黄油基淡奶油的品质影响及机制研究。

作者以两种HLB值相差较大的乳化剂单硬脂酸甘油酯（亲油型乳化剂）和蔗糖脂肪酸酯（亲水型乳化剂）复配，探究其对黄油基淡奶油搅打前稳定性和搅打后品质的影响。考察最适乳化剂HLB值，以期为工业生产黄油基淡奶油提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

安佳脱脂乳粉、安佳无水奶油：新西兰恒天然集团；单硬脂酸甘油酯：山东滨州金盛新材料科技有限公司；蔗糖脂肪酸酯：上海鸿健食品配料有限公司；微晶纤维素、卡拉胶：河南万邦化工科技有限公司。

1.2 仪器和设备

流变仪：DHR3型，美国TA仪器公司；激光粒度仪：MAZ3000型，英国马尔文仪器公司；高压均质机：Panda Plus 2000型，意大利GEA公司；物性分析仪：TA-XT plus型，英国Stable Micro Systems公司；小熊打蛋器：DDQ-B01K1型，小熊电器股份有限公司；射线衍射仪：TA-XT plus型，德国布鲁克AXS有限公司；差示扫描量热仪（DSC）：204F1型，德国耐驰仪器制造有限公司；冷冻离心机：J20型，美国贝克曼公司；集热式恒温磁力搅拌器：DF-101T型，巩义市予华仪器有限责任公司；紫外可见光分光光度计：TU1080型，北京普析通用仪器有限责任公司；全自动表面张力仪：DCAT 25型，德国迪飞仪器公司；酶标仪：M2型，美国分子仪器公司。

1.3 试验方法

1.3.1 不同HLB值乳化剂的复配

参照申莉莉[8]的方法使用单硬脂酸甘油酯（HLB值=4）和蔗糖脂肪酸酯（HLB值=15）复配，HLB值分别设置为4、6、8、10、12、15共6个梯度，混合后的HLB值和所需乳化剂质量分数的计算见式（1）。

$$H_M=H_A\times\omega_A+H_B\times\omega_B \quad (1)$$

式中：

H_M——单硬脂酸甘油酯与蔗糖脂肪酸酯混合后的HLB值；

H_A——A乳化剂的HLB值；

H_B——B乳化剂的HLB值；

ω_A——A乳化剂的质量分数，%；

ω_B——B乳化剂的质量分数，%。

1.3.2 黄油基淡奶油乳液的制备

准确称取质量分数35.00%的无水黄油、质量分数6.08%的脱脂乳粉、质量分数0.30%的乳化剂、质量分数0.25%的微晶纤维素、质量分数0.02%的卡拉胶、质量分数58.35%的去离子水。油相包括无水黄油和亲油型乳化剂单硬脂酸甘油酯；水相包括亲水型乳化剂蔗糖脂肪酸酯、脱脂乳粉、微晶纤维素、卡拉胶和水。在60 ℃条件下使水相和油相物质充分溶解后混合，使用豆浆机剪切10 min后，以一级阀15 MPa、二级阀60 MPa的压力进行均质。均质后混合物进行巴氏杀菌，并迅速冷却至8 ℃，于4 ℃冰箱中保藏。

1.4 黄油基淡奶油乳液表观性质的测定

1.4.1 粒径分布

黄油基淡奶油在4 ℃条件下冷藏24 h，取适

量样品用超纯水按体积比1∶1 000稀释，用激光粒度分析仪测定粒径分布。激光粒度分析仪设定参数参照文献[9]。每个测试样品重复测定3次，结果取平均值。样品的加权平均粒径和粒径分布采用激光粒度分析仪进行分析。

1.4.2 表观黏度

采用流变仪配备40 mm平板测定黄油基淡奶油乳液表观黏度。设定参数如下：测试温度为4 ℃，测试间距为1 mm，测试模式为控制温度模式，剪切速率为0.01~100 s^{-1}，测试前每个样品平衡120 s，测试时长为300 s，重复测定3次后取平均值。

1.5 黄油基淡奶油乳液微观性质的测定

称取少量冷藏24 h后的黄油基淡奶油样品，用去离子水稀释50倍。移液枪吸取稀释后的样品置于载玻片中央，将盖玻片从侧面缓慢盖上以防止产生气泡，使用光学显微镜观察脂肪球的分布情况。使用配备数码相机的光学显微镜在400倍（物镜40×和目镜10×）下观察[10]。

1.6 黄油基淡奶油搅打性质的测定

1.6.1 搅打时间

称取300 g于4 ℃下冷藏24 h的黄油基淡奶油乳液样品，将材料放入打蛋缸内，使用打蛋器进行搅打，直至其表面失去光泽，顶部表面出现能够持续存在的细小波纹，并且在打蛋器顶端形成挺立的锥状，此时即可视为搅打完成。添加不同乳化剂的黄油基淡奶油样品分别打发，并记录从开始到搅打终点的时间。

1.6.2 搅打起泡率

取60 mL塑料杯，在电子天平上去皮后用其盛满搅打前黄油基淡奶油乳液样品，并用勺子刮去溢出的部分，称量并记录其质量。对其进行打发，打发结束时，使用同一塑料杯盛装奶油并记录其质量。搅打起泡率[11]计算见式（2）。

$$F=(m_1-m_2)/m_2\times 100\% \quad (2)$$

式中：

F——搅打起泡率，%；

m_1——搅打前乳液的质量，g；

m_2——相同体积搅打后黄油基淡奶油质量，g。

1.7 黄油基淡奶油稳定性的测定

1.7.1 硬度

用60 mL小塑料杯盛满搅打后的奶油，并用勺子刮去溢出的部分。利用物性分析仪绘制压力随时间变化的曲线图，将曲线开始平稳的数值作为搅打后黄油基淡奶油的硬度指标。平行测定3次，并计算其平均值。仪器设定参数如下：探头采用P/25，测试前和测试中速度均为1 mm/s，回程速度为5 mm/s，测定距离为30 mm，触发力为5 g[12]。

1.7.2 乳清泄漏率

称取5 g黄油基淡奶油样品于直径50 mm、35目金属筛上，下接烧杯。将黄油基淡奶油、筛网和烧杯在30 ℃培养箱中沉淀保存2 h，称取并记录最终筛下滴漏乳清的质量。乳清泄漏率[13]计算见式（3）。

$$W=M_1/M_2\times 100\% \quad (3)$$

式中：

W——乳清泄漏率，%；

M_1——黄油基淡奶油的初始质量，g；

M_2——乳清的质量，g。

1.7.3 黏弹性能

采用配备40 mm平板的流变仪测定黄油基淡奶油的黏弹性能。测定温度为10 ℃，测定间隙为3 mm，取适量搅打后黄油基淡奶油样品，置于控温板中央位置。测定模式如下：通过动态应变扫描确定黄油基淡奶油的线性黏弹性区域，保持频率为1 Hz，应力范围设定为0.01%~1.00%；动态频率扫描的频率范围设定为0.1~10.0 Hz，采用对数方式采集数据点，确保应力值维持在黏弹性区域的中心位置，并记录储能模量（G'）与损耗模量（G''）[10]。重复测试3次后取平均值。

1.7.4 裱花性能

取适量黄油基淡奶油装于裱花袋中，在纸杯上进行裱花，于室温下贮存裱花样品，每隔0.5 h拍照并观察奶油表面纹理、颜色、光泽和裱花样品挺立性的变化。

1.8 黄油基淡奶油乳液界面性质的测定

1.8.1 界面张力

按照黄油基淡奶油制作工艺配制油相与水相，分别于60 ℃条件下搅拌至乳化剂完全溶解。使用界面张力仪测定其界面张力。采用DCATS程序，选择界面张力及PT11标准铂金片测量。表面检测参数为：速度1 mm/s，质量阈值5 mg，轻相浸没深度13.0 mm，重相浸没深度3.5 mm，选择轻相拉片。停止和评估条件参数为：最长测量时间3 600 s，平均最后n次测量n=50；下降高度30 mm。

1.8.2　界面蛋白吸附量

参照Patton等[14]的方法，采用BCA试剂盒法测定界面蛋白吸附量。取适量黄油基淡奶油于4 ℃、10 000 r/min条件下离心45 min，收集下层清液过0.22 μm滤膜。以牛血清蛋白（BSA）为标准蛋白质测定离心前乳液及离心后下层清液中未吸附到界面的蛋白质。界面蛋白吸附量的计算见式（4）。

$$T=\frac{d_{32}(C_{\text{initial}}-C_{\text{serum}})(1-\Phi)}{6\Phi} \quad (4)$$

式中：

T——界面蛋白吸附量，mg/m^2；

d_{32}——乳液中油滴的面积平均粒径，μm；

Φ——黄油基淡奶油中油的体积分数，%；

C_{initial}——离心前黄油基淡奶油中蛋白质质量浓度，g/mL；

C_{serum}——离心后下清液中蛋白质质量浓度，g/mL。

1.9　黄油-乳化剂混合物结晶性质的测定

1.9.1　熔化及结晶过程

使用差示扫描量热法分析黄油与不同HLB值乳化剂混合物的熔化和结晶行为。将质量分数2%的乳化剂添加至无水黄油中，置于65 ℃的水浴中加热并搅拌，直至黄油完全熔化，得到黄油-乳化剂混合物。称取混合物5 mg，密封在坩埚中，使用空坩埚作为对照。DSC温度程序设定：以20 ℃/min由初始温度25 ℃升温至60 ℃，保持10 min；以5 ℃/min降温至4 ℃，保持10 min，得到结晶曲线；以5 ℃/min升温至60 ℃，得到熔化曲线[15]。用铟以5 ℃/min的加热速率进行校准。

1.9.2　晶型结构的测定

参照周绪霞等[16]的方法，用X射线衍射仪测定黄油及黄油-乳化剂混合物的晶型结构。采用陶瓷X光管，光管功率2.2 kW，接收靶为Cu靶，工作电压40 kV，电流40 mA，接收狭缝0.19 mm，扫描角度5°<2θ<30°，扫描速度12（°）/min，步长0.013°。

1.10　统计分析

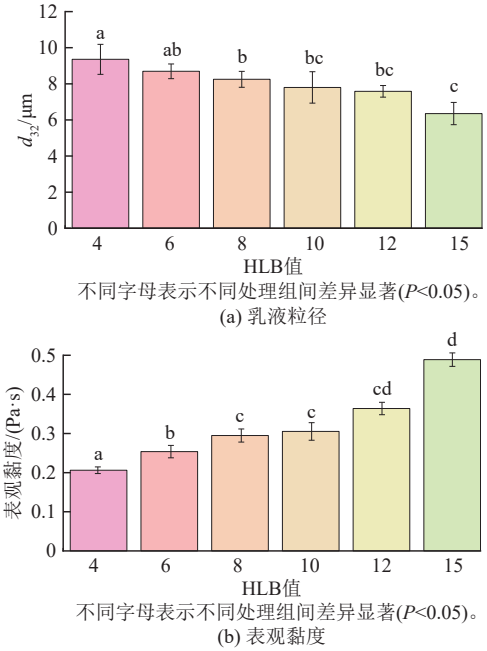
使用Origin Pro 8和Microsoft Excel 2019对数据进行处理、绘制和数学拟合。使用SPSS 23.0分析数据的显著性，P<0.05表示差异显著。显微图像由软件Micro-Shot Basic（1.0版）处理。

2　结果与讨论

2.1　不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油乳液表观性质的影响

乳液粒径与稳定性密切相关，粒径越小，乳液体系越易形成三维空间网状结构，增强乳液的稳定性。乳液粒径的大小还会影响脂肪相的结晶性能和脂肪的聚结。由图1（a）可知，随乳化剂HLB值的提高，乳液粒径呈逐渐降低的趋势。这可能是由于随着HLB值的升高，乳化剂亲水性增强，能快速包围脂肪球形成界面膜。

淡奶油的表观黏度反映了体系的物理稳定性，是评价淡奶油品质的主要指标。品质优良的淡奶油表观黏度往往处于一个适中的范围，因为较高的表观黏度影响乳液中脂肪的聚结，在淡奶油的搅打过程中乳脂肪聚结困难，导致打发时间延长。表观黏度较低时，乳液易过度聚结，影响淡奶油品质。乳化剂能够通过影响乳液脂肪球粒径的变化进而影响乳液的表观黏度，因此选择合适的乳化剂添加到乳液中对于黄油基淡奶油品质改善有重要作用。添加不同HLB值的乳化剂后，乳液在剪切速率为10 s^{-1}时的表观黏度的变化见图1（b）。随着乳化剂HLB值的升高，乳液的表观黏度呈逐渐上升趋势，



不同字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

(a) 乳液粒径

不同字母表示不同处理组间差异显著（P<0.05）。

(b) 表观黏度

图1　不同HLB值复配乳化剂对黄油基淡奶油表观性质的影响

Fig. 1　Effect of emulsifier blends of different HLB value on the appearance properties of butter-based whipped cream

这可能是由于乳液的粒径随着乳化剂HLB值的升高而逐渐减小。脂肪球的粒径较小，颗粒之间距离较近，因此堆积形成了具有特定空间结构的颗粒网络，增加了乳液的表观黏度。这一发现与谈文诗等[17]的研究结果一致。

2.2 不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油乳液微观结构的影响

乳脂肪的聚结程度对淡奶油品质有重大影响，能够直接影响淡奶油搅打时间、质构以及乳清泄漏率等淡奶油品质指标。借助乳液微观结构图可以更为直观地观察乳液体系中脂肪球的聚结状态，这对于研究乳液稳定性具有重要意义。添加不同HLB值乳化剂的乳液微观结构见图2。当乳化剂的HLB值为4时，乳液中的颗粒能够保持独立，展现出良好的分散性。随着乳化剂HLB值的增加，乳液中油滴聚集体开始出现，并且聚集现象逐渐严重。当乳化剂HLB值为15时，可以明显地观察到大颗粒聚集体的形成。研究表明当乳化剂HLB值较高时，乳化剂的亲水性增强，界面蛋白易被取代，导致界面膜变薄，因此脂肪球内的晶体更易穿透界面膜，与邻近的脂肪球交联，形成脂肪球聚集体[18]。

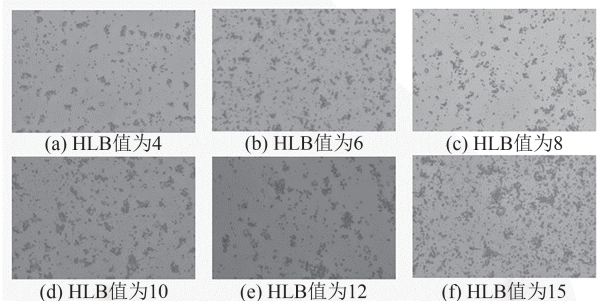


图2 不同HLB值乳化剂复配制备黄油基淡奶油乳液的微观结构

Fig. 2 Microstructure of butter-based whipped cream emulsions prepared with emulsifier blends of different HLB values

2.3 不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油搅打性和稳定性的影响

搅打时间是评判奶油品质的主要指标之一，主要影响乳脂肪的聚结能力。添加不同HLB值乳化剂的黄油基淡奶油的搅打时间见图3(a)。随乳化剂HLB值的升高，淡奶油乳液的搅打时间逐渐延长。这可能是因为乳液中脂肪球的粒径随乳化剂HLB值的升高逐渐减小，表观黏度增大，延缓了乳液中脂肪的迁移速率，乳液在短时间内聚结困难，导致乳液搅打时间延长。此外，随乳化剂HLB值的升高，其亲水性逐渐增强，导致乳液体系中形成的脂肪晶体较大，在搅打过程中难以刺破界面膜，脂肪聚结困难，搅打时间延长，这与Verstringe等[19]的研究结果一致。

搅打起泡率是评价淡奶油品质的重要指标，搅打起泡率越高，淡奶油品质越好。添加不同HLB值乳化剂的黄油基淡奶油的搅打起泡率见图3(b)。随乳化剂HLB值升高，黄油基淡奶油的搅打起泡率呈现先升高后降低的趋势，且在乳化剂HLB值为10时搅打起泡率最高。淡奶油的搅打起泡率主要受乳液油-水界面蛋白吸附量影响。乳液油-水界面蛋白具有良好的发泡性，蛋白质吸附量越高，乳液起泡性就越好。HLB值过低或过高时，乳化剂对界面蛋白的竞争吸附作用较强，界面蛋白吸附量较低。

淡奶油的硬度也是评价其品质的重要指标，不同HLB值乳化剂对黄油基淡奶油乳液硬度的影响见图3(c)。随乳化剂HLB值的升高，淡奶油的硬度呈现先降低后升高的趋势。表明相对于复配乳化剂，添加单一乳化剂的黄油基淡奶油硬度较高。当HLB值较低时，此时复配乳化剂中单硬脂酸甘油酯的质量分数较高。单硬脂酸甘油酯诱导晶型转化为β晶型的能力强，β晶型具有较强的刚性，当HLB值较低时乳液体系中β晶型质量分数较高，淡奶油的硬度较高。当HLB值较高时，在此状态下黄油基淡奶油的表观黏度较高，有助于形成凝胶网络结构[15]，这种结构更加稳定，因此淡奶油硬度较低。

淡奶油的泡沫稳定性是评价其品质的重要指标，其主要与乳清泄漏率有关。由图3(d)可知，随着乳化剂HLB值升高，黄油基淡奶油样品的乳清泄漏率呈先降低后升高的趋势。乳化剂HLB值为4时乳清泄漏率最高，这主要是由于亲油型乳化剂中单硬脂酸甘油酯占比较大，β晶型包裹液体油脂的能力很差，易导致乳清的泄漏。当HLB值为10~15，搅打奶油的乳清泄漏率随复配乳化剂HLB值的升高逐渐增大。这可能是因为脂肪发生部分聚集，突出的脂肪晶体刺穿了界面膜使得泡沫不稳定。

2.4 不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油黏弹性的影响

应变扫描能够反映黄油基淡奶油体系结构

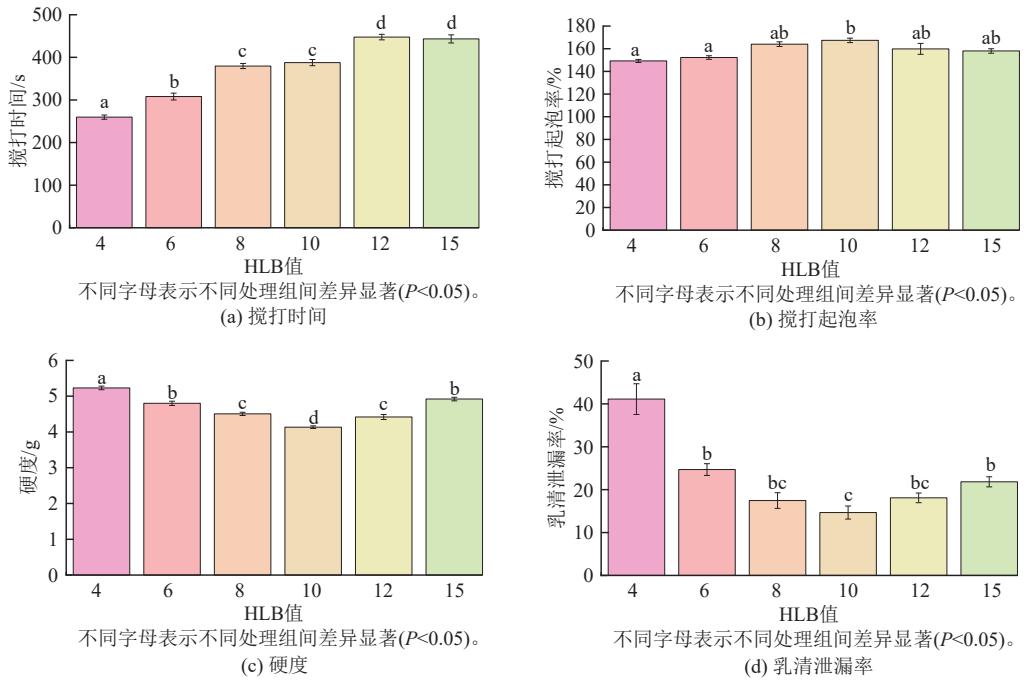


图 3　不同 HLB 值乳化剂复配对黄油基淡奶油搅打性和稳定性的影响

Fig. 3　Effects of emulsifier blends of different HLB values on whipping performance and stability of butter-based whipped cream

的稳定性，是评判淡奶油品质的重要指标之一。不同HLB值乳化剂对黄油基淡奶油应变扫描的影响见图4。在一定范围内，样品的黏弹性模量都随应力的增加先保持恒定，随后开始呈下降趋势。在特定的频率下，黏弹性模量不随应变的变化而变化，这表明在此应变区域内体系结构保持稳定，这段区域即为线性黏弹区域。当达到临界应变之后，样品的黏弹性模量开始逐渐下降，体系进入非线性黏弹区，完整结构遭到破坏。当乳化剂HLB值分别为10和12时，样品的线性黏弹区相对于其他HLB值的样品长，表明在这两个HLB值下，奶油的内部结构较完整，体系更加稳定。

奶油搅打后的口感、质地以及涂抹性能与黏弹性紧密相关。该研究选取了线性黏弹区域内的应变值，测定了黄油基淡奶油的黏弹性模量随频率的变化情况。随着频率的增强，样品的黏弹性模量的变化均为G'增强，G''下降。在所测频率范围内，所有黄油基淡奶油的G'均大于G''，样品的结构更偏向于弹性结构。当乳化剂HLB值为15时，样品的G'较高，形成的结构较为坚硬。这可能是由于在乳化剂HLB值为15时，脂肪聚结程度较高，形成的脂肪聚结网络结构更加稳定，与脂肪聚结程度的微观结构观察结果一致。

2.5　不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油裱花性能的影响

由图5可知，HLB值为8~12的淡奶油裱花时纹理清晰，且90 min内不发生明显塌陷。其他样品纹路不清晰，且随时间延长表面逐渐变粗糙。可能是因为HLB值为10时脂肪中β'晶型的比例最高，易形成最佳的三维空间网络结构。

2.6　不同HLB值乳化剂复配对黄油基淡奶油乳液界面性质的影响

油-水界面张力与乳状液的形成和稳定密切相关。不同HLB值乳化剂黄油基淡奶油乳液的油-水界面张力变化见图6(a)。乳化剂HLB值为4~10时，黄油基淡奶油的油-水界面张力呈上升趋势。乳化剂HLB值为4和6时，油-水界面张力偏低，这可能是由于此条件下复配乳化剂中单硬脂酸甘油酯的浓度较高，与蛋白质在油-水界面上的竞争性吸附作用较强[20]。此外，相较于蔗糖脂肪酸酯，单硬脂酸甘油酯的相对分子质量更小、扩散系数更高、移动速度更快，因此能快速吸附到油-水界面上，形成与蛋白质共同吸附的界面层，降低油-水界面张力。

在均质过程中，水相中的蛋白质会迅速吸附至油-水界面，形成一层黏弹性的界面膜，通过静电相互作用阻碍脂肪球颗粒间的聚集。在添加乳化剂

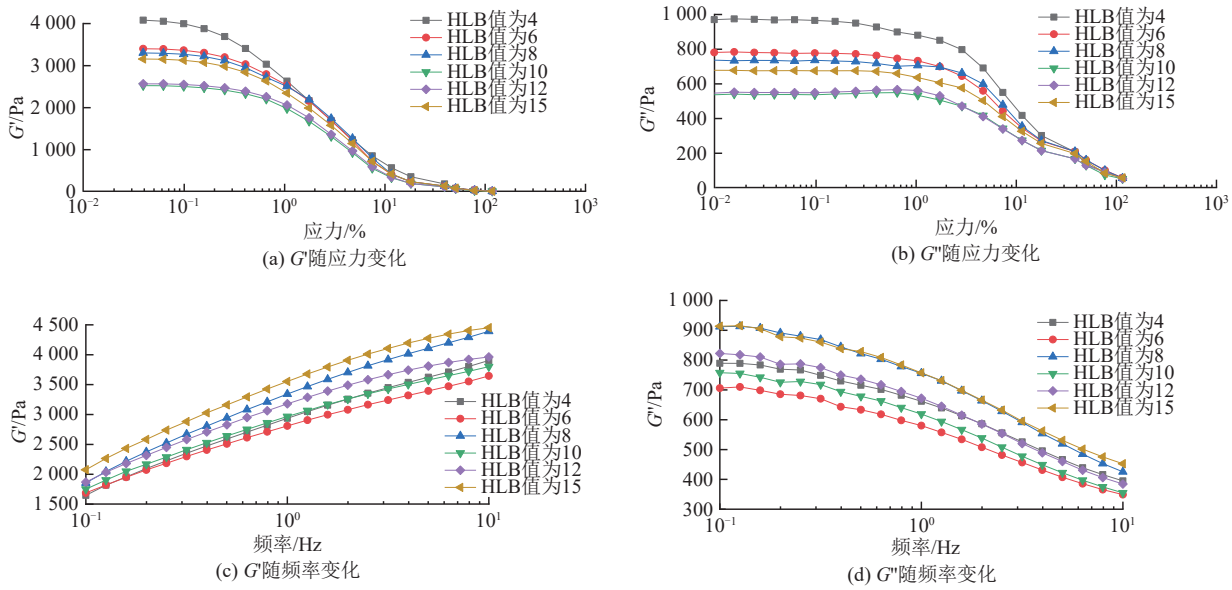


图 4　HLB 值乳化剂复配对黄油基淡奶油黏弹性的影响

Fig. 4　Effect of emulsifier blends of HLB values on the viscoelastic properties of butter-based whipped cream

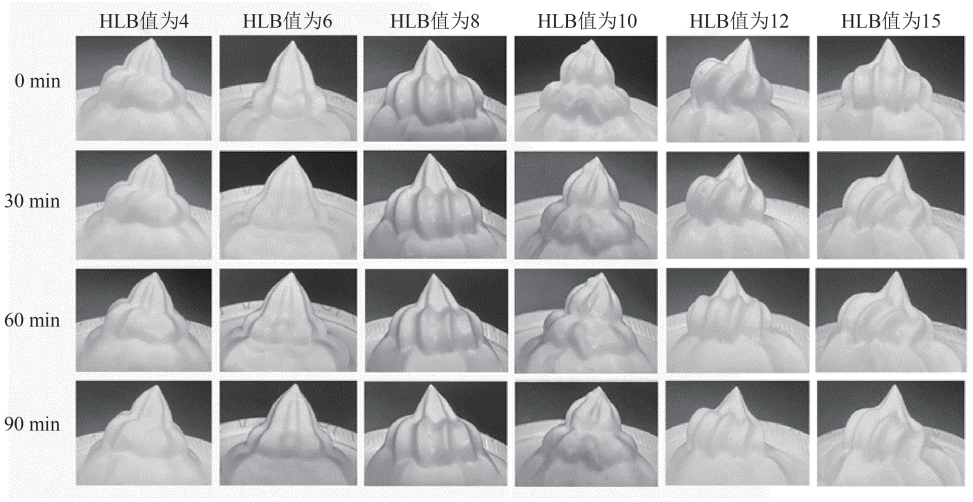


图 5　不同 HLB 值乳化剂复配制备的黄油基淡奶油塌陷情况

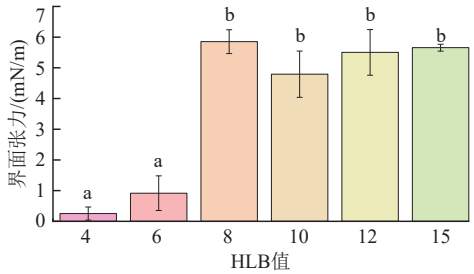
Fig. 5　Collapse of butter-based whipped cream prepared with emulsifier blends of different HLB values

后，乳液界面的蛋白质吸附量呈现下降趋势。这是由于乳化剂与脂肪球表面吸附的蛋白质之间发生竞争性吸附作用，导致部分蛋白质从界面膜上解吸，从而降低了界面膜的稳定性，形成具有不同功能性质的油-水界面膜[20]。添加不同 HLB 值乳化剂后，黄油基淡奶油乳液的界面蛋白吸附量见图 6(b)。随乳化剂 HLB 值的升高，乳液的界面蛋白吸附量呈现先上升后下降的趋势。这可能是因为不同乳化剂在界面膜处与蛋白质的竞争吸附作用程度不同，单硬脂酸甘油酯取代界面蛋白的能力强于蔗糖脂肪酸酯。乳化剂 HLB 值为 10 和 15 时，样品的界面蛋白吸附量逐渐下降，这可能是乳化剂之间存在竞争机制，复配乳化剂对界面蛋白吸附量的降低能力不如单一乳化剂。

2.7　不同 HLB 值乳化剂复配对黄油结晶性质的影响

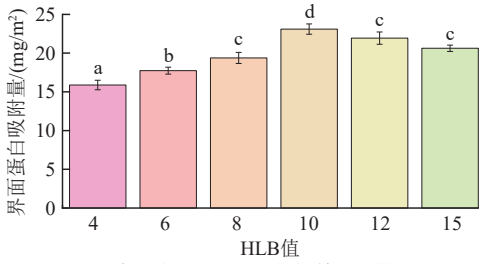
2.7.1　黄油结晶温度

由表 1 可知，黄油基淡奶油的初始结晶温度随着乳化剂 HLB 值的增加而呈现上升趋势，这可能与乳液中脂肪球粒径的减小有关。在脂肪球状液体开始结晶之前，每个脂肪球中至少形成 1 个晶核。此外，形成第 1 个晶核所需的温度与乳脂肪球的体积呈负相关，即脂肪球的粒径越小，所需的结晶温度就越高[21]。



不同字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05)。

(a) 界面张力



不同字母表示不同处理组间差异显著(P<0.05)。

(b) 界面蛋白吸附量

图 6　不同 HLB 值乳化剂复配对黄油基淡奶油界面特性的影响

Fig. 6　Effects of emulsifier blends of different HLB values on interfacial properties of butter-based whipped cream

表 1　不同 HLB 值乳化剂复配对黄油结晶温度的影响

Table 1　Effects of emulsifier blends of different HLB values on the crystallization temperature of butter

HLB 值	峰值温度/℃	初始结晶温度/℃
4	10.51±0.17^{a}	12.07±0.98^{a}
6	10.75±0.12^{a}	12.77±1.11^{a}
8	11.56±0.38^{b}	13.05±0.69^{b}
10	11.61±0.30^{b}	13.32±0.58^{b}
12	10.78±0.14^{a}	14.24±1.07^{c}
15	10.80±0.13^{a}	14.23±1.30^{c}

注：表中同列不同字母代表差异显著（P<0.05）。

2.7.2　黄油结晶晶型

由图 7 可知，与空白组相比，添加乳化剂的黄油体系 β' 晶型的峰强度明显升高。研究表明甘油三酯主要有 α、β 及 β' 共 3 种晶型，晶型稳定性由高到低为 $\beta>\beta'>\alpha$[7]。结果表明乳化剂的添加会影响黄油晶型的稳定性。

添加乳化剂的黄油体系中 β' 晶型占比显著升高，β 晶型占比显著降低，并且随着复配乳化剂 HLB 值的升高，黄油体系 β' 晶型占比呈先升高后降低的趋势，在 HLB 值为 10 时，β' 晶型占比达到最高。Miskandar 等[22]的研究表明，对于搅打奶油而言，β 晶型紧密粗大，会造成产品功能特性变差；

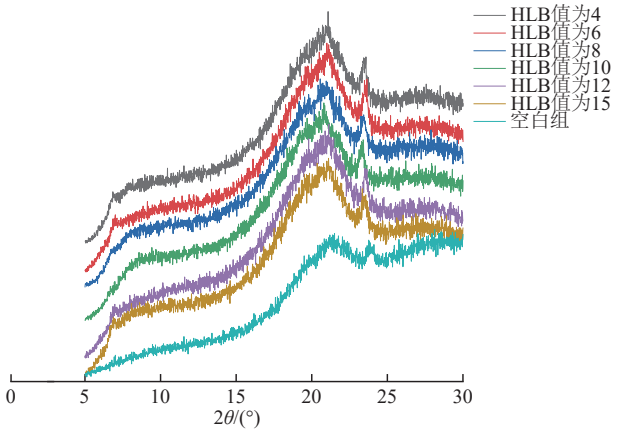


图 7　不同 HLB 值乳化剂复配对黄油结晶晶型的影响

Fig. 7　Effects of emulsifier blends of different HLB values on the crystalline forms of butter

β' 晶型晶体尺寸细小，易形成三维空间网格结构，是理想的晶体形态。结果表明添加乳化剂后，黄油基淡奶油的品质得到了显著改善，并且从 β' 晶型占比看来，当复配乳化剂 HLB 值为 10 时品质最好。

3　结论

作者通过不同 HLB 值乳化剂复配来制备高质量的黄油基淡奶油，结果显示在单硬脂酸甘油酯和蔗糖脂肪酸酯复配的乳化剂 HLB 值为 10 时，油-水界面张力和界面蛋白吸附量最大，乳液稳定性最优。乳化剂 HLB 值为 8 和 10 时，搅打后的黄油基淡奶油具有良好的质构和裱花性，且乳清泄漏率最低，泡沫结构最稳定，主要是由于此 HLB 值下脂肪的 β' 晶型占比较高。该研究为黄油基淡奶油在食品工业中的开发和应用提供了参考依据。

参考文献

[1] 赵谋明，赵强忠，王才华，等. 乳化剂的 HLB 值对搅打稀奶油搅打性能的机理研究[J]. 食品与生物技术学报，2005，24(6)：10-14.
ZHAO M M，ZHAO Q Z，WANG C H，et al. Effects of HLB value of emulsifiers on the whipping properties of the whipping cream and its mechanism [J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2005，24(6)：10-14.(in Chinese)

[2] 李扬，李妍，王筠钠，等. 酪蛋白种类和二次均质工艺对再制稀奶油搅打特性的影响[J]. 食品科学，2021，42(7)：106-112.
LI Y，LI Y，WANG Y N，et al. Effects of casein types and secondary homogenization on whipping properties of recombined cream[J]. Food Science，2021，42(7)：106-112.(in Chinese)

[3] 孟宪霞. UHT 搅打稀奶油加工工艺及配方的研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2012.

[4] LONG Z，ZHAO M M，ZHAO Q Z，et al. Effect of homogenisation and storage time on surface and rheology properties of whipping cream[J]. Food Chemistry，2012，131(3)：748-753.

[5] 袁佩佩，王文琼，周吉阳，等. 二次均质工艺中一次均质压力对黄油基搅打稀奶油品质的影响[J]. 现代食品科技，2021，37(10)：180-187.
YUAN P P，WANG W Q，ZHOU J Y，et al. Effects of first-stage homogenization pressure in two-stage homogenization on butter-based whipping cream quality[J]. Modern Food Science and Technology，2021，37(10)：180-187.(in Chinese)

[6] 阚传浦，李妍，李海梅，等. 乳化剂对以黄油为原料生产UHT搅打稀奶油稳定性的影响[J]. 中国乳品工业，2013，41(3)：8-11.
KAN C P，LI Y，LI H M，et al. Effect of emulsifier on stability of butter-based UHT whipping cream[J]. China Dairy Industry，2013，41(3)：8-11.(in Chinese)

[7] 代克克. 乳化剂对黄油基淡奶油品质的影响[D]. 广州：华南理工大学，2020.

[8] 申莉莉. 百里香微胶囊制备及抑菌效果和机理研究[D]. 武汉：华中农业大学，2015.

[9] 代克克，陈碧芬，黄丽华，等. 蛋白质用量对黄油基淡奶油搅打前乳液性质及搅打性能的影响[J]. 食品科学，2020，41(14)：23-29.
DAI K K，CHEN B F，HUANG L H，et al. Effects of protein concentration on emulsion properties before whipping and whipping properties of butter-based whipping cream[J]. Food Science，2020，41(14)：23-29.(in Chinese)

[10] 金燕. 乳化剂对棕榈仁油基搅打奶油品质改善及机理探究[D]. 无锡：江南大学，2018.

[11] CAO Z Y，LIU Z L，ZHANG H J，et al. Protein particles ameliorate the mechanical properties of highly polyunsaturated oil-based whipped cream：a possible mode of action[J]. Food Hydrocolloids，2020，99：105350.

[12] 王吉栋，郑远荣，刘振民，等. 复配乳化剂HLB值对稀奶油脂肪聚结及结晶的影响[J]. 食品科学，2022，43(12)：107-113.
WANG J D，ZHENG Y R，LIU Z M，et al. Effect of mixtures of emulsifiers with different HLB value on fat coalescence and crystallization of whipped cream[J]. Food Science，2022，43(12)：107-113.(in Chinese)

[13] PADIERNOS C A，LIM S Y，SWANSON B G，et al. High hydrostatic pressure modification of whey protein concentrate for use in low-fat whipping cream improves foaming properties[J]. Journal of Dairy Science，2009，92(7)：3049-3056.

[14] PATTON S，HUSTON G E. A method for isolation of milk fat globules[J]. Lipids，1986，21(2)：170-174.

[15] 郭雅佳，刘尊，宋佳，等. 乳化剂对富含甘油二酯的人造奶油乳化体系结晶行为的影响[J]. 中国油脂，2017，42(9)：60-65.
GUO Y J，LIU Z，SONG J，et al. Effect of emulsifiers on crystallization behaviors of diacylglycerol-enriched margarine emulsion[J]. China Oils and Fats，2017，42(9)：60-65.(in Chinese)

[16] 周绪霞，戚雅楠，丁玉庭. 黄油—代可可脂基奶油生产工艺优化及其晶型形成分析[J]. 食品科学，2018，39(12)：276-282.
ZHOU X X，QI Y N，DING Y T. Optimization of production process and crystallization characteristics of butter and cocoa butter replacer-based whipping cream[J]. Food Science，2018，39(12)：276-282.(in Chinese)

[17] 谈文诗，欧凯，刘冠辰，等. 高蛋白饮用型酸乳体系中微粒化乳清蛋白和物理改性淀粉对稳定性的影响[J]. 乳业科学与技术，2020，43(1)：1-4.
TAN W S，OU K，LIU G C，et al. Effect of microparticulated whey protein and physically modified starches on stability of high protein drinking yogurt system[J]. Journal of Dairy Science and Technology，2020，43(1)：1-4.(in Chinese)

[18] AKEN G A. Competitive adsorption of protein and surfactants in highly concentrated emulsions：effect on coalescence mechanisms[J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2003，213(2/3)：209-219.

[19] VERSTRINGE S，DANTHINE S，BLECKER C，et al. Influence of a commercial monoacylglycerol on the crystallization mechanism of palm oil as compared to its pure constituents[J]. Food Research International，2014，62：694-700.

[20] MUNK M B，ERICHSEN H R，ANDERSEN M L. The effects of low-molecular-weight emulsifiers in O/W-emulsions on microviscosity of non-solidified oil in fat globules and the mobility of emulsifiers at the globule surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2014，419：134-141.

[21] LOPEZ C，BOURGAUX C，LESIEUR P，et al. Thermal and structural behavior of milk fat：3. Influence of cooling rate and droplet size on cream crystallization[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2002，254(1)：64-78.

[22] MISKANDAR M S，MAN Y B C，RAHMAN R A，et al. Effects of emulsifiers on crystal behavior of palm oil blends on slow crystallization[J]. Journal of Food Lipids，2007，14(1)：1-18.

（责任编辑：闫林红）