

稀奶油乳液储藏期间稳定性变化 对其搅打性能的影响

谢朋凯¹, 崔利敏², 那尔布兰·阿依本¹, 金俊^{1,3}, 金青哲¹, 王兴国^{1,3}

(1. 江南大学食品学院, 食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江苏无锡 214122; 2. 内蒙古蒙牛奶酪有限责任公司, 呼和浩特 011517; 3. 中原食品实验室, 河南漯河 462300)

摘要:为评估 Turbiscan 稳定性分析法预测稀奶油乳液稳定性的准确度以及为科学预测稀奶油的搅打性能提供参考, 测定了稀奶油在 12 个月储藏期间乳液的离心乳析率、黏度、粒径和微观结构, 分析 Turbiscan 稳定性分析法评价的准确性, 同时测定储藏期间稀奶油搅打时间、起泡率、泄漏率和裱花性能, 并分析乳液性状与搅打性能间的相关性, 以研究乳液稳定性变化对稀奶油搅打性能的影响。结果表明:随着储藏时间的延长, 乳液的离心乳析率、黏度、粒径呈现逐渐增大的趋势, 失稳时间快于 Turbiscan 稳定性分析法所预测的结果;随着储藏时间的延长, 搅打时间缩短, 起泡率下降, 泄漏率不变(均为 0), 裱花性能下降;离心乳析率和黏度与搅打时间存在显著负相关关系($p < 0.01$), 离心乳析率、黏度和体积平均粒径与起泡率存在显著负相关关系($p < 0.01$), 表明稀奶油储藏过程中乳液的失稳会降低其搅打性能。综上, 稀奶油乳液在 0~6 个月储藏期内呈现渐进式失稳并伴随搅打性能适度下降, 但不影响使用价值, 而 9~12 个月储藏会导致体系严重失稳并引发搅打性能大幅度衰减, 显著降低产品使用价值。

关键词:稀奶油; 储藏; 乳液失稳; 搅打性能; 裱花

中图分类号:TS252.5; TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)06-0080-07

Effects of changes in stability on whipping performance of whipping cream emulsion during storage

XIE Pengkai¹, CUI Limin², AYIBEN Naerbulan¹, JIN Jun^{1,3},
JIN Qingzhe¹, WANG Xingguo^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Resources, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Inner Mongolia Mengniu Cheese Co., Ltd., Hohhot 011517, China; 3. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, Henan, China)

Abstract: In order to evaluate the accuracy of Turbiscan stability analysis in predicting the stability of whipping cream emulsion and to provide a reference for the scientific prediction of the whipping performance of whipping cream, the centrifugal creaming rate, viscosity, particle size and microstructure of whipping cream emulsion during 12 months storage were measured to analyze the accuracy of Turbiscan stability analysis. Concurrently, whipping time, overrun, leakage rate, and decoration performance were evaluated to investigate how emulsion destabilization impacts whipping performance. Correlation analysis were performed between emulsion properties and whipping performance. The results demonstrated that as storage time increased, the centrifugal creaming rate, viscosity, and particle size of the emulsion

gradually increased, with destabilization occurring faster than predicted by Turbiscan stability analysis. Whipping time, overrun and decoration performance decreased over storage, while the leakage rate unchanged (all at 0). Significant negative correlations were observed between

收稿日期:2024-04-23;修回日期:2025-03-04

基金项目:呼和浩特市“揭榜挂帅”重大科技项目(2023—揭榜挂帅—农—2)

作者简介:谢朋凯(1998),男,博士研究生,研究方向为稀奶油质量控制(E-mail) xiepk@stu2023.jnu.edu.cn。

通信作者:金俊,副研究员(E-mail) junjin@jiangnan.edu.cn。

centrifugal creaming rate/viscosity and whipping time ($p < 0.01$), as well as between centrifugal creaming rate/viscosity/volume-weighted mean particle size and overrun ($p < 0.01$), indicating that emulsion destabilization of whipping cream during storage directly compromised whipping performance. In summary, whipping cream emulsion exhibits progressive destabilization during 0–6 months of storage, accompanied by a moderate decline in whipping performance that do not critically impair functionality. However, storage 9–12 months triggers severe destabilization, leading to a substantial decline in key whipping performance, thereby substantially diminishing the product's practical value.

Key words: whipping cream; storage; emulsion destabilization; whipping performance; decoration

稀奶油被广泛用于蛋糕、甜点、冰淇淋、咖啡和糕点等休闲食品中^[1]。近年来,烘焙和新茶饮市场发展迅速,前者市场规模年复合增长率达 12.3%,后者市场规模年复合增长率更是高达 20%,因此预测稀奶油市场整体呈现长期稳定的增长趋势^[2-3]。

稀奶油属于典型的热力学不稳定体系,其乳液为水包油(O/W)型体系,而经搅打后相反转形成稳定的固-液-气三相泡沫体系^[3]。稀奶油乳液在储藏期间易发生析水、析油、结块等失稳现象,从而影响其使用时的搅打性能。Turbiscan 稳定性分析法可用于评价乳液稳定性并分析可能发生的失稳问题,多用于配方开发和工艺调整^[4]。Durand 等^[5]利用 Turbiscan 稳定性分析法比较了燕麦乳、米乳、豆乳和超高温瞬时灭菌(UHT)乳的粒径对体系稳定性的影响,发现燕麦乳和米乳的失稳主要表现为沉淀,而豆乳和 UHT 乳则主要表现为析油。Anihouvi 等^[6]利用 Turbiscan 稳定性分析法比较了不同月桂酸脂肪制备的 O/W 乳液的失稳情况,结果表明,脂肪上浮是造成乳液析水的主要原因。然而,对于部分高稳定性的稀奶油乳液体系,Turbiscan 稳定性指数之间的差异太小而难以精确评估乳液长期的储藏稳定性差异^[7]。此外,稀奶油体系构成复杂,其乳液稳定性的变化会直接影响搅打性能。Fredrick 等^[8]发现,易失稳稀奶油比高稳定性产品的搅打性能更好,乳液稳定性和搅打性能之间可能呈现负相关。但稀奶油储藏过程中乳液稳定性的变化与其搅打性能之间的关系并不明确,亟需探明货架期内稀奶油乳液的稳定性变化对其搅打性能的影响程度。本文以市售代表性稀奶油为研究对象,模拟货架期储藏环境,分析其乳液性状及搅打性能的变化,并对乳液性状指标与搅打性能进行相关性分析,以期科学预测稀奶油的搅打性能提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

市售代表性稀奶油(脂肪含量 35.0%,蛋白质

含量 1.7%,碳水化合物含量 4.2%)。

Turbiscan 稳定性分析仪,法国 Formulacion 公司;激光共聚焦显微镜,德国蔡司公司;离心机,德国 Eppendorf 公司;S3500 激光粒度分析仪,美国 Microtrac 公司;NDJ-8S 数字显示黏度计,中国力辰邦西仪器科技有限公司;搅打器,中国小熊电器股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 稀奶油乳液稳定性评价

将稀奶油放入 20 mL 测量池内,置于 Turbiscan 稳定性分析仪中测量样品的稳定性指数(TSI)。测量参数:温度 30℃,扫描频率 30 min/次,共分析 24 h。以样品初始 BS 为对照,分析不同时间背散射光强度(BS)的变化(ΔBS),以反映体系的变化。

1.2.2 稀奶油乳液货架期储藏实验

将稀奶油置于室温环境(25℃、相对湿度 40%)中储藏,分别于储藏 0 d、3 个月、6 个月、9 个月和 12 个月时取样,分别标记为 TE-0、TE-3、TE-6、TE-9 和 TE-12,待测。

1.2.3 储藏期间稀奶油乳液的性状分析

1.2.3.1 离心乳析率

将 10 mL 稀奶油在 4 000 r/min 下离心 8 min,测量下层乳清相的体积,按公式(2)计算离心乳析率(Y)。

$$Y = \frac{V_1}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_1 为析出乳清体积,mL; V 为稀奶油乳液总体积,mL。

1.2.3.2 黏度

采用 NDJ-8S 数字显示黏度计测量稀奶油乳液的黏度。测定条件:温度 20℃,转速 12 r/min,选用 2 号转子。

1.2.3.3 粒径

采用 S3500 激光粒度分析仪测定稀奶油乳液的粒径分布和大小[以体积平均粒径(MV)表示]。使

用去离子水作为分散相,样品和连续相的折射率分别设置为 1.590 和 1.330。每个样品重复测定 3 次,结果取平均值。

1.2.3.4 微观结构

采用激光共聚焦显微镜观测稀奶油乳液的微观结构。将 10 μL 0.02 g/100 mL 的尼罗红加到 100 μL 稀奶油乳液中,用去离子水稀释 10 倍进行测定。参数设置:激发光源为 Ar 灯,40 $\times$ 目镜,尼罗红激发光波长 488 nm,接收波长 500~755 nm。

1.2.4 储藏期间稀奶油乳液的搅打性能分析

1.2.4.1 搅打时间

取 100 g 稀奶油(中心温度 4~6 $^{\circ}\text{C}$)于搅打缸中,使用搅打器在 900 r/min 下进行搅打并计时,当奶油形成坚挺的泡沫时停止搅打,记录搅打时间。

1.2.4.2 起泡率

取相同体积的搅打前和搅打后的稀奶油,测定其质量,按公式(3)计算起泡率(X)。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_1 为搅打前稀奶油的质量,g; m_2 为搅打后稀奶油的质量,g。

1.2.4.3 泄漏率

取 10 g 搅打后的稀奶油置于 0.30 mm 孔径(50 目)筛上,下面接培养皿,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中储藏 2 h,测定培养皿中析出的乳清质量,按公式(4)计算泄漏率(W)。

$$W = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中: m_1 为析出乳清的质量,g; m_2 为搅打后稀奶油的质量,g。

1.2.4.4 裱花性能

将搅打后的稀奶油置于裱花枪中进行裱花,观察新鲜及室温下放置 2 h 后奶油表面的纹路清晰程度和形态的变化。

2 结果与分析

2.1 稀奶油乳液稳定性评价

Turbiscan 稳定性分析仪常用于乳浊液体系的析水、絮凝和聚结分析^[9]。当乳液的底部浓度降低时(析水),BS 会降低;而乳液顶部浓度增加时(油脂上浮),BS 会增加^[10]。初始稀奶油(TE-0)乳液的 Turbiscan 光谱图如图 1 所示。

由图 1 可知,随着测量时间的推移,样品底部出现凹峰,而样品顶部则出现凸峰。这是由于脂肪球因油水密度差而上浮,造成底部乳液的浓度减小, ΔBS 降低,析水为导致稀奶油乳液失稳的主要方

式;同时,顶部乳液的浓度增加,引起 ΔBS 升高,代表乳液易发生析油现象^[11]。

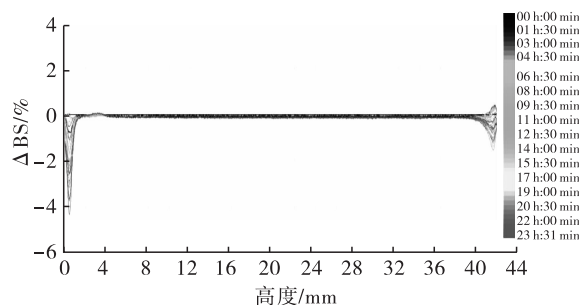


图 1 稀奶油乳液的 Turbiscan 光谱图

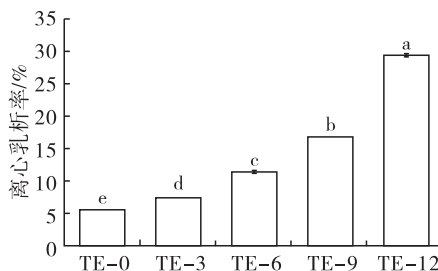
Fig. 1 Turbiscan spectrum of whipping cream emulsion

TSI 反映的是样品在整个储藏期间浓度和脂肪球粒径的变化幅度,TSI 越大,体系越不稳定。TE-0 的 TSI 值(0.32)很小,说明体系稳定。相关实验经验表明,一般 TSI 为 0.2 以下时约有 2 年的乳液稳定期,TSI 为 0.5 时约有 1 年的乳液稳定期,据此预测出该稀奶油乳液稳定期约为 1 年,但预测数据是否和实际变化相吻合还需进一步通过货架期储藏实验证明。

2.2 储藏期间稀奶油乳液的性状分析

2.2.1 离心乳析率

不同储藏时间稀奶油乳液的离心乳析率如图 2 所示。



注:不同字母表示具有显著差异($p < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences ($p < 0.05$). The same below

图 2 不同储藏时间稀奶油乳液的离心乳析率

Fig. 2 Centrifugal creaming rate of whipping cream emulsion at different storage time

离心乳析率可反映储藏期间稀奶油乳液稳定性的变化,其数值越大稳定性越低^[12]。由图 2 可知,TE-0、TE-3、TE-6、TE-9 的离心乳析率分别为 $(5.64 \pm 0.01)\%$ 、 $(7.51 \pm 0.01)\%$ 、 $(11.35 \pm 0.09)\%$ 和 $(16.90 \pm 0.01)\%$,而 TE-12 的离心乳析率则高达 $(29.31 \pm 0.11)\%$,这表明随着储藏时间的延长,稀奶油乳液失稳越严重。乳液在储藏过程中,脂肪球会在布朗运动下发生碰撞,随后脂肪球上浮并发生絮凝及部分聚结,进而导致乳液失稳并发生析水,离心乳析率变大^[11]。

2.2.2 黏度

不同储藏时间稀奶油乳液的黏度如图 3 所示。

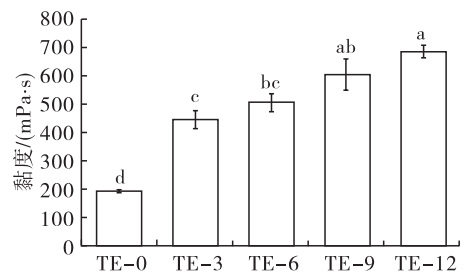


图 3 不同储藏时间稀奶油乳液的黏度

Fig.3 Viscosity of whipping cream emulsion at different storage time

储藏过程中稀奶油乳液的黏度变化可反映乳液稳定性的变化趋势^[2]。由图 3 可知,TE-0、TE-3、

TE-6、TE-9 和 TE-12 的黏度分别为 (192.50 ± 3.54) 、 (447.50 ± 45.96) 、 (506.00 ± 43.84) 、 (605.00 ± 77.78) mPa·s 和 (684.50 ± 22.50) mPa·s。说明储藏时间越长,稀奶油乳液黏度越大。脂肪球在布朗运动的作用下相互碰撞发生脂肪球上浮、絮凝和部分聚结,且乳脂肪在 20℃ 左右液油和固脂共存,乳脂肪的 β' 结晶可以形成尖锐的结晶区和致密的脂肪晶体网络,这促进了脂肪球之间部分聚结,并形成了由部分聚结体组成的更牢固的网络结构^[13-14]。因此,随着储藏时间延长,稀奶油乳液的黏度显著增加。

2.2.3 粒径分布和微观结构

不同储藏时间稀奶油乳液的粒径分布和微观结构分别如图 4、图 5 所示。

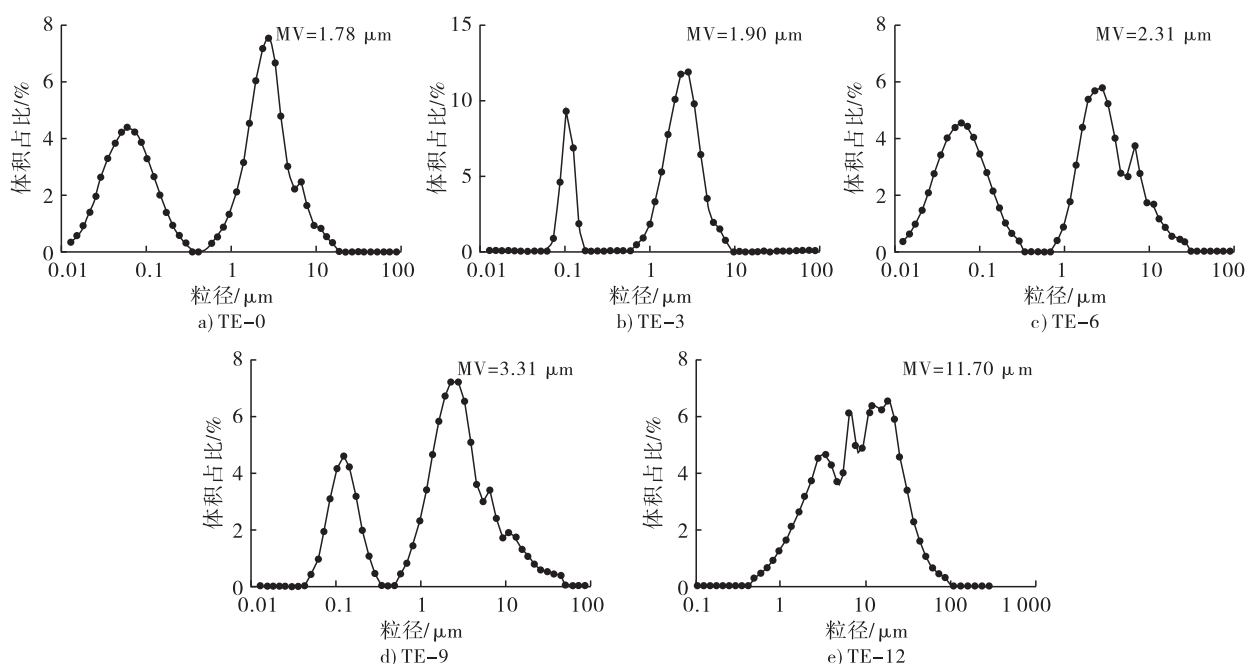


图 4 不同储藏时间稀奶油乳液的粒径分布

Fig.4 Particle size distribution of whipping cream emulsion at different storage time

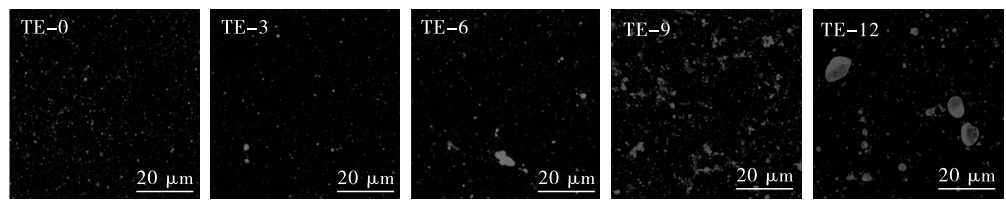


图 5 不同储藏时间稀奶油乳液的微观结构

Fig.5 Microstructure of whipping cream emulsion at different storage time

脂肪球的粒径分布可表征乳液的微观状态,通常粒径越小、粒径分布越呈正态分布,代表乳液稳定性越好。由图 4、图 5 可知,储藏过程中,稀奶油乳液的体积平均粒径逐渐变大,从新鲜稀奶油 TE-0 的 1.78 μm 到 TE-3、TE-6、TE-9 和 TE-12 的

1.90、2.31、3.31 μm 和 11.70 μm,且整个储藏期粒径呈双峰到多峰分布。稀奶油 TE-0、TE-3 粒径分布较均匀,且没有明显絮凝和不规则的聚集体。这主要是因为脂肪球粒径较小时,布朗运动为引起脂肪球碰撞的主要作用力,而小脂肪球的运动速率

较慢,碰撞频率较低,所以能够较好地保持乳液稳定^[15]。已有研究也发现,体积平均粒径为 1.91 μm 的脂肪球比体积平均粒径为 4.27 μm 的脂肪球失稳程度更低^[16]。储藏 6 个月后,稀奶油乳液的体积平均粒径增至 2.31 μm,且脂肪球已有聚集体出现,表现为少量絮凝。储藏 9 个月后,稀奶油乳液体积平均粒径增至 3.31 μm,出现大量脂肪球絮凝体。储藏 12 个月后,稀奶油乳液体积平均粒径增至 11.70 μm,出现大脂肪球团簇。这是因为油水密度差和布朗运动导致脂肪球上浮,脂肪球的堆积更为紧密;乳脂肪形成的 β' 结晶更易刺破脂肪球膜,可更快建立脂肪球之间的晶体连接,从而形成部分聚集体^[17]。

综上,在 0~9 个月储藏期内,稀奶油乳液的黏度、离心乳析率、体积平均粒径、微观结构都表明其具有较好的稳定性;经过 12 个月的储藏后,稀奶油乳液的离心乳析率、黏度、体积平均粒径总体都显著变大,微观结构表明其发生了明显的脂肪球聚结,乳液体系严重失稳。这与 2.1 根据 Turbiscan 光谱图和 TSI 值并结合相关实验经验预测得出的稀奶油乳液约有 1 年的稳定期,存在一定差异。这同时也表明 Turbiscan 方法预测长保质期稀奶油的乳液稳定性存在一定偏差。

2.3 储藏期间稀奶油乳液的搅打性能分析

不同储藏时间稀奶油乳液的搅打时间、起泡率、泄漏率如表 1 所示。

由表 1 可知:TE-0、TE-3、TE-6、TE-9 和 TE-12 的搅打时间分别为 (194.00 ± 5.00)、(120.00 ± 4.00)、(100.00 ± 5.00)、(63.50 ± 1.50) s 和 (55.00 ± 1.00) s,总体存在显著递减趋势;起泡率分别为 (167.45 ± 0.40)%、(158.89 ± 1.31)%、(154.81 ± 0.88)%、(124.17 ± 3.38)% 和 (113.28 ±

1.02)% ,总体也存在显著递减趋势。储藏过程中,稀奶油乳液的黏度、粒径和微观结构发生变化,乳液逐渐失稳,对稀奶油的搅打特性也产生相应影响。TE-0 搅打时间和起泡率均最大,这是因为 TE-0 脂肪球分布均匀,没有出现絮凝、部分聚结等失稳现象,需要较长时间的搅打才能使脂肪球发生去稳定,进而脂肪球形成稳定的部分聚结体,有效包裹气泡,相应的起泡率也最大^[18]。随着储藏时间的延长,稀奶油乳液发生不同程度的失稳,搅打时间和起泡率则降低。当储藏时间达到 12 个月时,从乳液黏度、粒径和微观结构(图 3、图 4 和图 5)可发现,TE-12 样品失稳严重,乳液脂肪球粒径显著增大,搅打仅需 (55.00 ± 1.00) s,此时脂肪球已不能很好地包裹气泡,起泡率也相应最低。泄漏率可反映泡沫的稳定性^[19]。6 个样品的泄漏率均为 0,说明储藏 12 个月稀奶油搅打形成的泡沫体系较为牢固,整体稳定性良好。

表 1 不同储藏期稀奶油乳液的搅打性能

Table 1 Whipping performance of whipping cream emulsion at different storage time

样品	搅打时间/s	起泡率/%	泄漏率/%
TE-0	194.00 ± 5.00 ^a	167.45 ± 0.40 ^a	0.00 ± 0.00 ^a
TE-3	120.00 ± 4.00 ^b	158.89 ± 1.31 ^b	0.00 ± 0.00 ^a
TE-6	100.00 ± 5.00 ^c	154.81 ± 0.88 ^b	0.00 ± 0.00 ^a
TE-9	63.50 ± 1.50 ^d	124.17 ± 3.38 ^c	0.00 ± 0.00 ^a
TE-12	55.00 ± 1.00 ^d	113.28 ± 1.02 ^d	0.00 ± 0.00 ^a

注:同列不同字母表示具有差异显著 ($p < 0.05$)

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

稀奶油裱花特性可以很好地表征搅打后泡沫体系的稳定性。不同储藏时间搅打稀奶油的裱花形态如图 6 所示。

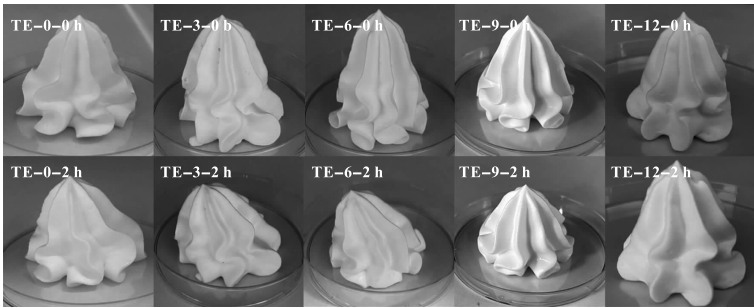


图 6 不同储藏时间搅打稀奶油的裱花形态

Fig. 6 Decoration forms of whipping cream at different storage times

由图 6 可知,在放置 0 h 时,TE-0、TE-3、TE-6 和 TE-9 的裱花纹路清晰,但均在放置 2 h 后出现不同程度坍塌现象。其中,TE-12 裱花纹路

模糊,裱花性能差。这是因为 TE-0、TE-3、TE-6 和 TE-9 的起泡率较高,泡沫组织结构细腻,而 TE-12 在搅打前已严重失稳,起泡率低,脂肪球无

法形成有效的部分聚结体以包裹气泡,泡沫结构不稳定。

2.4 稀奶油乳液指标与搅打指标的相关性分析

进一步分析稀奶油乳液性状与搅打性能间的相关性,结果如表 2 所示。

表 2 稀奶油乳液指标与搅打性能之间的皮尔逊相关系数
Table 2 Pearson correlation coefficient between whipping cream emulsion index and whipping performance

项目	离心乳析率	黏度	体积平均粒径
搅打时间	-0.808 **	-0.972 **	-0.612
起泡率	-0.943 **	-0.877 **	-0.809 **

注: **. $p < 0.01$
Note: **. $p < 0.01$

由表 2 可知,稀奶油乳液的体积平均粒径与起泡率存在显著负相关关系($p < 0.01$),与搅打时间存在负相关关系,但无显著性($p > 0.05$)。较大脂肪球更倾向于部分聚结,乳液更容易发生失稳^[20]。较大的脂肪球在搅打时具有较大的接触面积,从而提高搅打过程中脂肪球的碰撞频率^[21],使搅打时间缩短^[22-23]。

由表 2 还可知,离心乳析率、黏度与搅打时间、起泡率均存在显著负相关关系($p < 0.01$)。随着储藏时间的延长,脂肪球因油水密度差异和布朗运动引起的离心乳析率和黏度的增加,造成搅打时空气较难导入泡沫体系,进而导致起泡率大大下降^[24-25]。同时,乳液体系的失稳加速了搅打过程中脂肪球的部分聚结进程,使搅打时间显著缩短^[26]。具体表现为在 6 个月储藏期,乳液轻度失稳,对搅打性能影响不大;但储藏 9 个月后乳液失稳对搅打性能影响较大,表现为充气性能和裱花性能变差;储藏 12 个月后,乳液失稳程度发生剧烈变化,表现为脂肪球显著聚集,且起泡率降至最低,裱花性能降低,失去了使用价值。

3 结 论

通过 Turbiscan 稳定性分析法预测出析水为稀奶油乳液失稳的主要形式,但预测的稳定时间与实际的储藏结果存在偏差。随着储藏时间延长(0~6 个月),稀奶油乳液逐渐失稳,导致搅打性能变弱,但不影响其使用价值;而经 9~12 个月储藏,稀奶油乳液失稳加重,导致搅打性能急剧降低,表现为起泡率低、裱花性能弱,使用价值大幅降低。

参考文献:

[1] XIE P, HUANG M, LIU J, et al. Effects of spans on whipping capabilities of aerated emulsions: Reinforcement of fat crystal - membrane interactions [J/OL]. J Food Eng, 2024, 372: 112008[2024 - 04 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112008>.

[2] 陈雨杭, 谢朋凯, 范沁源, 等. 搅打稀奶油的乳液特征和打发性能研究 [J]. 中国油脂, 2021, 46 (12): 32 - 38.

[3] 陈雨杭. 油脂结晶影响可充气乳状液稳定性的研究 [D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2022.

[4] 杭锋, 艾连中, 郭本恒, 等. 多重光散射技术在乳体系稳定性分析中应用 [J]. 中国乳品工业, 2012, 40 (10): 36 - 41.

[5] DURAND A, FRANKS G V, HOSKEN R W. Particle sizes and stability of UHT bovine, cereal and grain milks [J]. Food Hydrocolloid, 2003, 17(5): 671 - 678.

[6] ANIHOUI P, DANTHINE S, KEGELAERS Y, et al. Comparison of the physicochemical behavior of model oil - in - water emulsions based on different lauric vegetal fats [J]. Food Res Int, 2013, 53(1):156 - 163.

[7] XU H, GAO Z, HUANG M, et al. Static stability of partially crystalline emulsions stabilized by milk proteins: Effects of κ - carrageenan, λ - carrageenan, ι - carrageenan, and their blends [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2024, 147: 109387 [2024 - 04 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109387>.

[8] FREDRICK E, HEYMAN B, MOENS K, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream: II. The effect on partial coalescence and whipping properties [J]. Food Res Int, 2013, 51(2): 936 - 945.

[9] XU H, FAN Q, HUANG M, et al. Combination of carrageenan with sodium alginate, gum arabic, and locust bean gum: Effects on rheological properties and quiescent stabilities of partially crystalline emulsions [J/OL]. Int J Biol Macromol, 2023, 253: 127561 [2024 - 04 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127561>.

[10] WANG P, CHEN C, GUO H, et al. Casein gel particles as novel soft Pickering stabilizers: The emulsifying property and packing behaviour at the oil - water interface [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 77: 689 - 698.

[11] XU H, YANG L, XIE P, et al. Static stability of partially crystalline emulsions: Impacts of carrageenan and its blends with xanthan gum and/or guar gum [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 223: 307 - 315.

[12] 高佳佳. 棕榈油基搅打稀奶油的制备及应用性能的研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2014.

[13] LIU P, HUANG L, LIU T, et al. Whipping properties and stability of whipping cream: The impact of fatty acid composition and crystallization properties [J/OL]. Food Chem, 2021, 347: 128997 [2024 - 04 - 23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128997>.

[14] MUNK M B, ANDERSEN M L. Partial coalescence in emulsions: The impact of solid fat content and fatty acid

- composition[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2015, 117(10): 1627–1635.
- [15] WANG Y, HARTEL R W, ZHANG L. The stability of aerated emulsions: Effects of emulsifier synergy on partial coalescence and crystallization of milk fat[J/OL]. J Food Eng, 2021, 291: 110257[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110257>.
- [16] 罗洁. 乳脂肪球的聚集特性与机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [17] BIASUTTI M, VENIR E, MARCHESINI G, et al. Rheological properties of model dairy emulsions as affected by high pressure homogenization[J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2010, 11(4): 580–586.
- [18] XIE P, JIN J, XU H, et al. Effects of sucrose esters on whipping capabilities of aerated emulsions[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2023, 144: 108933[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108933>.
- [19] 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.
- [20] FREDRICK E, WALSTRA P, DEWETTINCK K. Factors governing partial coalescence in oil-in-water emulsions[J]. Adv Colloid Interface Sci, 2010, 153(1/2): 30–42.
- [21] LI S, YE A, SINGH H. Seasonal variations in the characteristics of milk fat and the whipping properties of cream[J/OL]. Int Dairy J, 2022, 127: 105288[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2021.105288>.
- [22] ZENG D, CAI Y, LIU T, et al. Effect of sucrose ester S370 on interfacial layers and fat crystals network of whipped cream[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2021, 113: 106541[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106541>.
- [23] XIE P, JI G, JIN J, et al. Partial coalescence and whipping capabilities of dairy aerated emulsions as affected by inclusion of monoglycerides with different fatty acid species[J]. Int J Dairy Tech, 2023, 76(1): 81–92.
- [24] ZENG D, CAI Y, LIU T, et al. The effect of sucrose esters S1570 on partial coalescence and whipping properties[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 125: 107429[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107429>.
- [25] XIE P, CUI L, YU M, et al. Elucidation of microscopic mechanisms of tweens on whipping capabilities of aerated emulsions: Fat crystal-membrane interaction perspective[J/OL]. Food Biosci, 2024, 62: 105334[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2024.105334>.
- [26] XU H, YANG L, JIN J, et al. Elucidation on the destabilization mechanism of whipping creams during static storage[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 129: 107613[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107613>.
-
- (上接第 70 页)
- [17] 王培宇, 孙培东. 南瓜籽多肽的制备及其对人体皮肤细胞的体外作用[J]. 中国油脂, 2020, 46(6): 97–101.
- [18] LIANG F, SHI Y, SHI J, et al. A novel angiotensin-I-converting enzyme (ACE) inhibitory peptide IAF (Ile-Ala-Phe) from pumpkin seed proteins: In silico screening, inhibitory activity, and molecular mechanisms[J]. Eur Food Res Technol, 2021, 247(9): 2227–2237.
- [19] BUCKO S, KATONA J, POPOVIC L, et al. Functional properties of pumpkin (*Cucurbita pepo*) seed protein isolate and hydrolysate[J]. J Serb Chem Soc, 2016, 81(1): 35–46.
- [20] SUN Y, SHEN Y, DING J, et al. High ethanol tolerance of oil-in-water Pickering emulsions stabilized by protein nanoparticles[J/OL]. Colloid Surface A, 2022, 632: 127777[2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127777>.
- [21] BINKS B P. Particles as surfactants: Similarities and differences[J]. Curr Opin Colloid In, 2002, 7(1): 21–41.
- [22] ZHAO M, XIONG W, CHEN B, et al. Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH 12: Insight into protein structure[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2020, 103: 105626[2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105626>.
- [23] SUN F, ZONG W, LIU R, et al. Micro-environmental influences on the fluorescence of tryptophan[J]. Spectrochimica Acta A, 2010, 76(2): 142–145.
- [24] REN C, XIONG W, PENG D, et al. Effects of thermal sterilization on soy protein isolate/polyphenol complexes: Aspects of structure, *in vitro* digestibility and antioxidant activity[J]. Food Res Int, 2018, 112: 284–290.
- [25] LIANG F, SHI Y, SHI J, et al. Exploring the binding mechanism of pumpkin seed protein and apigenin: Spectroscopic analysis, molecular docking and molecular dynamics simulation[J/OL]. Food Hydrocolloid, 2023, 137: 108318[2024-03-25]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108318>.