

乳清蛋白变性和清酪蛋白比对再制稀奶油稳定性和搅打特性的影响

李月^{1,2}, 谢羽斐², 李扬², 李妍^{1,*}, 张列兵², 闫建国³

(1.北京工商大学食品与健康学院, 北京 100048; 2.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

3.宁夏塞尚乳业有限公司, 宁夏 银川 750200)

摘要: 通过调整乳粉中乳清蛋白(whey protein, WP)的变性程度以及WP和酪蛋白(casein, CN)的比例, 探究其对再制稀奶油乳液稳定性和搅打特性的影响。结果表明: WP变性程度为60%乳粉制备的稀奶油具有较好的乳液稳定性, 随变性程度进一步增加, 体系稳定性下降; WP变性程度增加, 有助于缩短搅打时间, 降低乳清泄漏率。在WP:CN=1:4(m/m)基础上, 增加WP比例, 乳液稳定性先提升后下降, 但均优于WP:CN=1:4时稀奶油的稳定性; 随WP比例增加, 稀奶油搅打时间缩短、乳清泄漏情况减轻, 但起泡率下降, 泡沫塌陷率增大。综上所述, WP变性程度为60%乳粉制备的稀奶油同时具有较好的乳液稳定性和打发性能; 当乳粉中WP:CN=2:4时, 稀奶油的稳定性最好, 当WP:CN=1:4时, 稀奶油的起泡性和泡沫稳定性更佳, 可根据实际需要调整WP与CN比例, 以改善稀奶油产品的功能特性。

关键词: 变性程度; 清酪蛋白比例; 稀奶油; 稳定性; 搅打特性

Effects of Whey Protein Denaturation and Whey Protein/Casein Ratio on the Stability and Whipping Properties of Recombined Cream

LI Yue^{1,2}, XIE Yufei², LI Yang², LI Yan^{1,*}, ZHANG Liebing², YAN Jianguo³

(1. School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;

2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

3. Ningxia Saishang Dairy Industry Co. Ltd., Yinchuan 750200, China)

Abstract: In this study, the effects of the denaturation degree of whey protein (WP) and whey protein/casein (WP/CN, m/m) ratio in milk powder on the emulsion stability and whipping properties of recombined cream were investigated. The results showed that the cream prepared from milk powder with 60% of WP denaturation had good emulsion stability, and the stability of the system decreased with increase in denaturation degree. An increase in the degree of WP denaturation shortened the whipping time and reduced the leakage rate of whey. The emulsion stability at a WP/CN ratio of 1:4 first increased and then decreased to a level higher than the initial one with increasing proportion of WP. In addition, the whipping time of the cream was shortened, and whey leakage was reduced, while foaming rate declined and bubble collapse rate increased. In summary, the cream prepared from milk powder with 60% of WP denaturation showed good emulsion stability and whipping properties; it had the best stability at a WP/CN ratio of 2:4 and better foaming capacity and foam stability at a WP/CN ratio of 1:4. Therefore, WP/CN ratio can be adjusted according to the practical needs to improve the functional characteristics of cream products.

Keywords: degree of denaturation; ratio of whey protein to casein; cream; emulsion stability; whipping properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230407-054

中图分类号: TS252.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)24-0068-07

收稿日期: 2023-04-07

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BEF02031); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-36)

第一作者简介: 李月(1999—)(ORCID: 0009-0009-0078-3096), 女, 硕士研究生, 研究方向为乳品科学及加工技术。

E-mail: leeyue990827@163.com

*通信作者简介: 李妍(1977—)(ORCID: 0000-0003-2956-5972), 女, 副教授, 博士, 研究方向为乳品科学及加工技术。

E-mail: liyan@btbu.edu.cn

引文格式:

李月, 谢羽斐, 李扬, 等. 乳清蛋白变性和酪蛋白比再制稀奶油稳定性和搅打特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(24): 68-74. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230407-054. <http://www.spkx.net.cn>

LI Yue, XIE Yufei, LI Yang, et al. Effects of whey protein denaturation and whey protein/casein ratio on the stability and whipping properties of recombined cream[J]. Food Science, 2023, 44(24): 68-74. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230407-054. <http://www.spkx.net.cn>

再制稀奶油是一种以无水奶油为脂肪来源, 添加乳蛋白、乳化剂等经乳化再制而成的水包油型乳液, 搅打充气后可膨胀发泡, 进而转变成具有可塑性的泡沫体系^[1-2]。再制稀奶油的特殊性使之需要具有良好的乳液稳定性和搅打起泡能力, 这与蛋白质的性质和其在界面的吸附情况有着重要关联。乳蛋白是稀奶油中重要的组成成分, 因具有良好的表面活性, 可吸附在油水界面降低界面张力^[3], 并在脂肪球表面形成界面膜, 通过空间位阻和静电排斥作用减少脂肪球间的聚合, 维持乳液稳定^[4]。在搅打过程中, 乳蛋白可吸附在气泡表面, 与部分聚结的脂肪球一起形成网络结构, 增强泡沫的稳定性^[3]。研究发现, 蛋白质种类、用量以及天然结构的改变都会影响稀奶油乳液的稳定性和搅打特性^[5-6]。

乳蛋白主要分为乳清蛋白(whey protein, WP)和酪蛋白(casein, CN)两大类, 二者分别占乳蛋白总质量的20%和80%左右, 其中CN是一组异质的磷酸化蛋白(α_{s1} -, α_{s2} -, β -和 κ -CN), 主要以高度水合的胶束形式存在于乳液中, 具有优良的起泡性; WP是一种较小的球状蛋白, 其分子间的交互作用和黏弹性能够赋予泡沫良好的稳定性^[7]。Dalgleish^[8]研究发现不同蛋白质在油水界面的吸附情况不同, WP形成的界面膜厚度为2 nm左右, 而CN能形成约12 nm厚的界面膜。Segall等^[9]利用乳清分离蛋白和酪蛋白酸钠制备水包油型乳液, 结果表明蛋白质含量在0.3%以上时二者均表现出良好的稳定性, 但乳清分离蛋白所稳定的乳液在搅打过程中更容易发生脂肪球的部分聚结。赵强忠^[5]发现控制乳蛋白总量不变, CN用量越大覆盖在脂肪球上形成的气泡膜越厚, 泡沫的硬挺性和稳定性均有所提升, 但膨胀率下降, 且难以在口腔中破泡, 增加WP用量可改善稀奶油的口感和光泽度。上述研究表明蛋白质特性不同, 对稀奶油稳定性和搅打性能的影响也不一样, 可以通过调整乳蛋白中WP与CN比例改善稀奶油的功能特性。

除此之外, WP还是一种热不稳定性蛋白, 在加工热处理过程中会发生不同程度的变性, 表现为高级结构展开, 内部疏水基团暴露, 蛋白质分子间发生聚集和絮凝^[10-11], 进而导致其功能特性也发生改变。Sajedi等^[12]发现变性的WP增加了乳浊液的黏度, 减少了搅打稀奶油脱水收缩的现象, 使最终产品具有更好的稳定性。Relkin等^[13]用预变性WP部分替代天然WP制备水包油型乳液, 发现

搅打后气泡尺寸更均匀, 脂肪球更多地附着到气泡表面, 脂肪球间的聚集程度也更大。孙颜君等^[14]通过热处理对WP浓缩物进行改性处理, 用其制备低脂稀奶油时发现改善了奶油的搅打性质。这些研究表明变性的WP确实会影响稀奶油的静态稳定和搅打特性, 但不同变性程度WP的乳粉在稀奶油中的差异尚有待探究。

本实验探究WP变性程度和WP与CN比例两方面因素变化对再制稀奶油乳液稳定性和搅打特性的影响, 旨在为再制稀奶油开发提供理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

无水奶油(含脂99.99%) 新西兰恒天然有限公司; 全乳蛋白浓缩物(milk protein concentrate 70, MPC70) 宁夏塞尚乳业; WP浓缩物(whey protein concentrate 34, WPC34) 美国Hilmar Ingredients公司; 脱脂乳 北京三元食品股份有限公司; 单硬脂酸甘油酯 美国FMC公司; 微晶纤维素(microcrystalline cellulose, MCC) 美国FMC公司。

1.2 仪器与设备

高压均质机 丹麦APV公司; LX-B35L灭菌锅 合肥华泰医疗设备有限公司; 1112-120 LUMiFuge稳定性分析仪 德国LUM公司; Mastersizer 3000激光粒径仪、Zetasizer Nano-ZS90电位仪 英国Malvern公司; Physica MCR 30流变仪 奥地利Anton Paar公司; K9860全自动凯氏定氮仪 济南海能仪器股份有限公司; TA-XT2i质构仪 北京盈盛泰科技有限责任公司; FE28pH计 瑞士Mettler Toledo公司; 756CRT紫外-可见光分光光度计 上海菁华科技仪器有限公司; TGL-20M冷冻离心机 长沙平凡仪器仪表有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

1.3.1.1 乳粉WP未变性程度测定

参考陈立红^[15]的分析方法。用分光光度计测定样品在420 nm波长处的透光率并带入标准曲线, 得到样品中未变性WP氮含量, 再通过公式修正得到样品在含水量为3.16%时未变性WP氮指数, 根据样品中WP总含量求得含水量为3.16%时WP未变性程度(%)。

1.3.1.2 不同WP变性程度稀奶油配方设计

本实验所用MPC70原有的WP变性程度为40.21%。将MPC70蛋白粉水化后经95℃热处理30 min使其WP完全变性,未处理蛋白与加热变性蛋白分别按3:0、2:1、1:2、0:3的质量比混合,得到WP变性程度为40.21%、60.14%、80.07%、100%的MPC,以此为蛋白源制备稀奶油。

1.3.1.3 不同WP与CN比例稀奶油配方设计

在总蛋白含量保持2%不变的前提下,用WPC34对MPC中蛋白组成的比例进行调整,使稀奶油中WP与CN质量比分别为1:4、2:4和3:4,以此为蛋白源制备稀奶油。

1.3.1.4 稀奶油制备工艺

脂肪含量35.5%、蛋白总量2%的稀奶油制备如下:将无水奶油升温至70℃,称取1 g单硬脂酸甘油酯加入无水奶油中,搅拌溶解,作为油相;称取上述调整好的蛋白粉20 g在45℃水温下搅拌水化(乳蛋白的加热变性在其水化后、与胶体混合前)30 min左右,称取1 g MCC高温高速剪切溶解,然后与蛋白、油相混合乳化制备乳液,加水定质量至1 000 g,经均质、灭菌、二次均质、冷却后于4℃冷藏待测。

1.3.2 乳液稳定性分析

1.3.2.1 平均粒径 $D_{3,2}$

使用粒径分析仪湿法测量稀奶油的平均粒径 $D_{3,2}$ 。在样品池中滴加样品,使遮光度处于10%~20%之间。检测器为Hydro LV,搅拌速率2 500 r/min;设置分散物质为脂肪,折射率1.6,颗粒密度1,吸收率0.1;设置分散剂为水,折射率1.330。

1.3.2.2 表观黏度

使用流变仪CC27探头测定乳液表观黏度。应用程序为RHEOPLUS/32 V3.21 21003635-33024。测试温度为25℃,剪切速率逐渐从0 s⁻¹升至200 s⁻¹,升速测试时间为420 s。

1.3.2.3 Zeta电位

取少量熟化后的奶油样品稀释500倍,置于Model DTS 1070C电位样品池中,采用电位分析仪测定其表面电位。测试参数设定:25℃,平衡时间120 s。

1.3.2.4 界面蛋白浓度

参考Yan Guosen等^[16]的方法,并稍作修改。取10 g样品,在10 000×g、4℃条件下离心1 h。离心后,上层为油相,吸取中层清液和下层蛋白,用凯氏定氮法测量液相中蛋白质含量,按式(1)计算界面蛋白浓度:

$$\text{界面蛋白浓度}/(\text{mg}/\text{m}^2) = \frac{\text{样品总蛋白质量}/\text{g} - \text{液相蛋白质量}/\text{g}}{\text{比表面积}/(\text{m}^2/\text{kg}) \times \text{样品质量}/\text{g}} \times 10^6 \quad (1)$$

式中:比表面积由MasterSizer 3000测定平均粒径 $D_{3,2}$ 时测定。

1.3.2.5 失稳系数

失稳系数由LUMiFuge稳定性分析仪测得。测试参数:25℃,4 000 r/min,光源近红外波长(865±5) nm;每30 s测量一次透光率,取值241次,测量时间为120 min。

1.3.3 搅打特性分析

1.3.3.1 搅打时间

称取4℃存放3 d后的稀奶油200 g左右,置于低温冷却的不锈钢缸中搅打。前30 s开搅拌器一档,30 s后转速开至最大继续搅打,直至稀奶油能够形成挺立的锥形,停止打发并记录时间。

1.3.3.2 搅打起泡率

参考李扬等^[17]的测定方法。搅打起泡率按式(2)计算:

$$\text{搅打起泡率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100 \quad (2)$$

式中: m_1 为同体积未搅打稀奶油的质量/g; m_2 为同体积已搅打稀奶油的质量/g。

1.3.3.3 乳清泄漏率

参考李扬等^[17]的测定方法。乳清泄漏率按式(3)计算:

$$\text{乳清泄漏率}/\% = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

式中: m_1 为称取打发稀奶油的质量/g; m_2 为泄漏液体的质量/g。

1.3.3.4 泡沫硬度

用质构仪挤压测试泡沫的硬度。测试量程250 N,触发力2.5 N,测试前速率50 mm/min,测试速率10 mm/min,挤压距离30 mm,回程速率50 mm/min,回程距离40 mm。

1.3.3.5 泡沫塌陷率

将打发后稀奶油裱花到盛满打发后稀奶油的糕点杯上,量取裱花奶油高度,与2 h后高度对比,按式(4)计算奶油的泡沫塌陷率:

$$\text{泡沫塌陷率}/\% = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100 \quad (4)$$

式中: H_1 为裱花后奶油高度/cm; H_2 为裱花2 h后的奶油高度/cm。

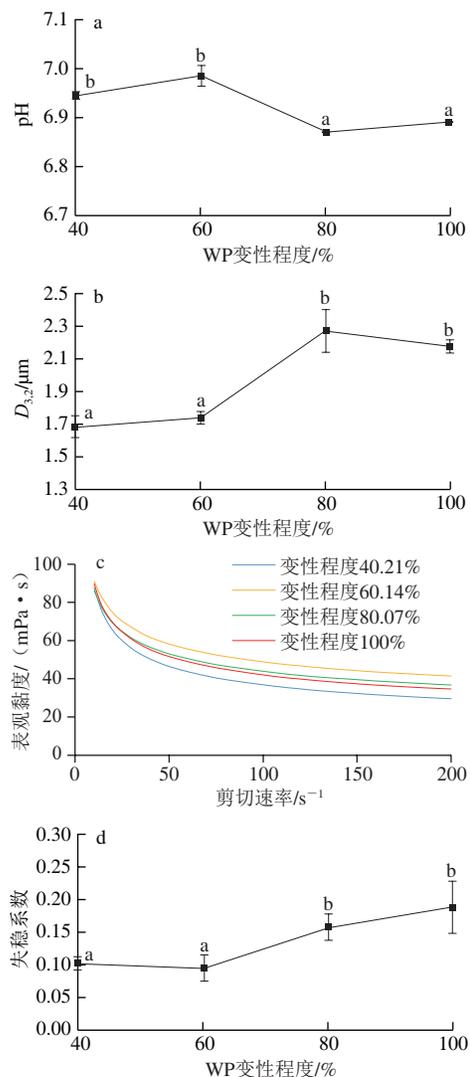
1.4 数据处理与分析

利用Excel 2016软件绘制数据图;利用SPSS 20.0软件中的单因素方差分析方法和T-检验进行显著性分析, $P < 0.05$,差异显著。

2 结果与分析

2.1 WP变性程度对再制稀奶油稳定性的影响

2.1.1 理化性质



a. pH值; b.粒径; c.表观黏度; d.失稳系数; 图3同。不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图1 WP变性程度对再制稀奶油理化性质的影响

Fig. 1 Effect of denaturation degree of WP on physicochemical properties of recombined cream

将具有不同WP变性程度的MPC作为蛋白源制备稀奶油, 分析体系pH值、平均粒径、表观黏度和失稳系数的变化, 考察WP变性程度对稀奶油稳定性的影响, 结果如图1所示。随WP变性程度增加, 稀奶油pH值在6.85~6.95之间, 总体呈现下降趋势(图1a); 稀奶油粒径变大, 变性程度为80.07%时粒径达(2.27±0.13) μm, 显著高于变性程度为40.21%时的(1.69±0.65) μm, 体系平均粒径均趋向2.1 μm左右(图1b)。由图1c可知, 稀奶油为假塑性流体, 表观黏度随剪切速率的增大而降低, 呈现

剪切稀化的流变行为^[18], 随着WP变性程度增加, 稀奶油黏度呈先增加后减小的趋势, 变性程度为60.14%时, 体系的黏度最大。稀奶油体系的失稳系数(图1d)随WP变性程度的增加而增大, 当变性程度大于80%时, 失稳系数显著增加, 稀奶油稳定性下降。

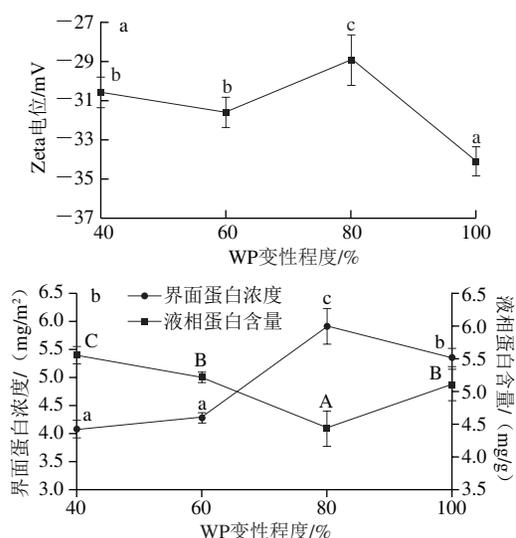
MPC热处理会导致乳液中溶解态的钙和磷部分转变成胶体态的磷酸钙, 此过程中会释放H⁺, 因而造成乳液体系pH值下降^[19]。由于pH值降低, 蛋白更加倾向于收缩状态, 同时变性WP自身聚集及其与CN的交联絮凝, 导致乳化效果减弱, 脂肪球容易发生聚结和聚集, 脂肪球粒径的增加验证了这一点。依据斯托克斯定律, 稀奶油体系中乳脂肪球粒径的大小对体系稳定性至关重要, 粒径过大, 容易产生脂肪上浮现象^[18], 使稀奶油体系不稳定, 本实验中失稳系数的升高也验证了此结论。蛋白质分子间交联程度随WP变性程度的增加而增大, 这给剪切带来更大的阻力, 所以低WP变性程度的乳液黏度呈上升趋势; 当WP变性程度达到80.07%时, 稀奶油粒径显著增加, 在分散相同一体积分数条件下液滴数目减少, 间距增大, 分子间牵引力减弱^[20], 且此时液相中蛋白浓度较低, 导致乳液黏度减小。通常乳状液黏度越高, 体系阻力越大, 脂肪球相互碰撞的几率越小, 因脂肪球聚集而引起分层失稳的概率也越低, 搅打前乳状液越稳定。结合高WP变性程度稀奶油黏度减小的同时失稳系数增加, 印证了乳液稳定性下降的事实。

通过加速稳定实验表征原始浓度的乳液重力分离情况, 由失稳系数表示, 其主要参考指标是颗粒的沉降速度, 失稳系数越大代表该体系经离心越容易分层, 稳定性越差。在本实验中, 变性程度为60%的WP制备的稀奶油平均粒径适中, 体系黏度较大, 同时具有较高的电位绝对值, 故其稳定性佳; 而高变性程度WP在加热过程中发生聚集, 形成的脂肪球粒径过大, 且此时体系黏度也减小, 故稳定性降低。综上所述, WP变性程度为60%的乳粉更适用于稀奶油的制备以保证乳液的稳定性。

2.1.2 界面特性

稀奶油的界面特性与奶油的稳定性和打发性密切相关。Zeta电位常用来表征乳状液液滴表面的带电特性, 它是对颗粒之间相互排斥或吸引力强度的度量^[21]。如图2a所示, 随WP变性程度增加, 稀奶油电位先升后降, 变性程度为40%~60%时, 体系的电位绝对值未有显著变化; 当WP变性增加至80%时, 电位绝对值减小, 随变性程度的增加电位绝对值也增大。此变化主要是受到乳脂肪球表面蛋白带电特性的影响, 蛋白质是一种两性电解质, 当乳液pH值高于其等电点时, 蛋白质带负电。结合图1a, 体系pH值下降时, 电位呈现上升趋势; pH值上升时, 电位呈现下降趋势, 符合蛋白质在不同pH值条件下的带电规律。通常, 处于高Zeta电位的粒子所带的表面电荷能够抑

制粒子聚集而增强稳定性,使乳液中的颗粒以稳定状态存在^[22]。当WP变性程度为80%时,稀奶油体系的电位绝对值最小,其失稳系数也较高;而当WP完全变性时电位绝对值最大,但其稳定性并非最佳,是因为乳液的稳定性受多因素影响而非单一电位的作用结果。



a. Zeta电位; b.界面蛋白浓度和液相蛋白含量。图4同。

图2 WP变性程度对再制稀奶油界面特性的影响

Fig. 2 Effect of WP denaturation degree on interface characteristics of recombined cream

界面吸附蛋白量和吸附层的尺寸也会影响乳浊液的稳定性。蛋白质分子的两亲性使之在稀奶油体系中具有较好的乳化性,其分子的疏水端能够靠近并接触脂肪球,亲水端暴露在水溶液体系中,从而乳化脂肪球,使之不易上浮。由图2b可知,随WP变性程度增加,稀奶油界面蛋白浓度先增加后减小,液相中蛋白含量呈先减小后增加的趋势。这是由于WP发生热变性时,WP自身及其与CN间会通过SH与S—S交换反应形成聚合物^[23],使吸附在乳脂肪球表面的蛋白含量增加。结合稀奶油粒径变化,WP变性程度较低时脂肪球粒径小,比表面积大,单位面积上的界面蛋白浓度相应较低;当变性程度达到80%时,脂肪球粒径明显增大,比表面积减小,单位面积蛋白浓度显著增加;WP完全变性时,形成的蛋白聚集体较大,不易吸附在脂肪球表面,故表现为液相蛋白含量增加,界面蛋白浓度降低。WP变性的发生增加了脂肪球表面界面膜的厚度,可以防止脂肪球间的聚集或聚结,但也造成平均粒径增大,使得体系稳定性下降。

2.2 WP变性程度对再制稀奶油搅打特性的影响

由表1可知,随WP变性程度的增加,稀奶油搅打时间缩短,搅打起泡率先下降后增加,维持在170%~182%的范围内。Boeckel等^[24]研究发现,较大的液滴在碰撞时更容易发生部分聚结。Relkin等^[13]的研究也发现用加热变性的WP替代部分天然WP,会使搅打产生的气泡尺寸更小更均匀,并且能促进脂肪球间的聚集。由表1可知,随

WP变性程度的增加,脂肪球粒径增大,容易发生部分聚结,因而缩短搅打时间。同时,稀奶油搅打起泡率的波动可能与体系黏度的波动有关,当乳液黏度较大时不利于空气混入,导致起泡率较低。通常稀奶油起泡率大于150%视为具有较好起泡性^[25],本研究中各组样品的起泡率虽有波动,但仍处于良好发泡范围内。

表1 不同WP变性程度的再制稀奶油搅打特性

Table 1 Whipping characteristics of recombined cream with different degrees of WP denaturation

WP变性程度/%	搅打时间/s	搅打起泡率/%	乳清泄漏率/%	泡沫硬度/N	泡沫塌陷率/%
40.21	188.25±11.23 ^c	181.44±2.84 ^b	4.28±0.72 ^c	12.42±3.41 ^b	29.59±3.29 ^a
60.14	157.25±14.24 ^b	173.01±3.73 ^a	0	7.29±0.33 ^a	32.35±8.08 ^a
80.07	142.25±2.50 ^{ab}	171.34±5.89 ^a	0	10.88±1.92 ^b	29.38±4.21 ^a
100	132.75±8.65 ^a	180.52±2.41 ^b	2.10±0.36 ^b	6.31±1.17 ^a	25.07±2.01 ^a

注:同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表1可知,WP变性程度增加有效降低稀奶油乳清泄漏率,且在变性程度为60.14%和80.07%时无泄漏。泡沫硬度受WP变性程度的影响较大,变性程度为40.21%和80.07%时泡沫硬度较大,分别为(12.43±3.41)N和(10.88±1.92)N,而变性程度为60.14%和100%时泡沫硬度显著下降至(7.29±0.33)N和(6.31±1.17)N。WP的变性程度对泡沫塌陷率无显著影响($P>0.05$)。

乳清泄漏率在一定程度上能反映泡沫的持水性和稳定性,本实验中乳清泄漏率的减小说明中高热变性WP使稀奶油体系的气泡结构更加稳定,不易发生液体泄漏、持水性能提升。结合搅打时间的缩短,表明脂肪部分聚结容易发生,而中高变性的WP间及与CN间形成聚集体,改变蛋白的吸附特性,所以乳清泄漏率下降可能与蛋白质和部分聚结的脂肪所形成稳固的网络结构有关。泡沫塌陷率可反映稀奶油搅打后体系包裹气泡完整性所持续的能力^[26],稀奶油搅打成型2h后,泡沫塌陷率保持在25%~33%范围内,即WP变性程度基本不影响稀奶油维持完整气泡的能力。

综上所述,WP变性程度为60%乳粉制备的稀奶油同时具有较好的乳液稳定性和搅打特性,更适合应用于再制稀奶油制备中。

2.3 WP与CN比例对再制稀奶油稳定性的影响

2.3.1 理化特性

利用WP浓缩物调整MPC中WP与CN比例并用于制备稀奶油,分析体系pH值、平均粒径、表观黏度和失稳系数的变化,考察WP与CN比例对稀奶油稳定性的影响,结果如图3所示。在WP:CN=1:4的基础上,增加WP的比例会使乳液pH值降低,由6.85±0.01明显下降至WP:CN为2:4时的6.71±0.01,接近乳的正常pH值6.7(图3a)。随WP比例的增加,脂肪球的平均粒径明显减小(图3b),乳液黏度略微提升(图3c),体系的失稳系数先减小后增大,但均小于WP:CN=1:4时体系的失稳系数,即乳浊液的稳定性提升(图3d)。

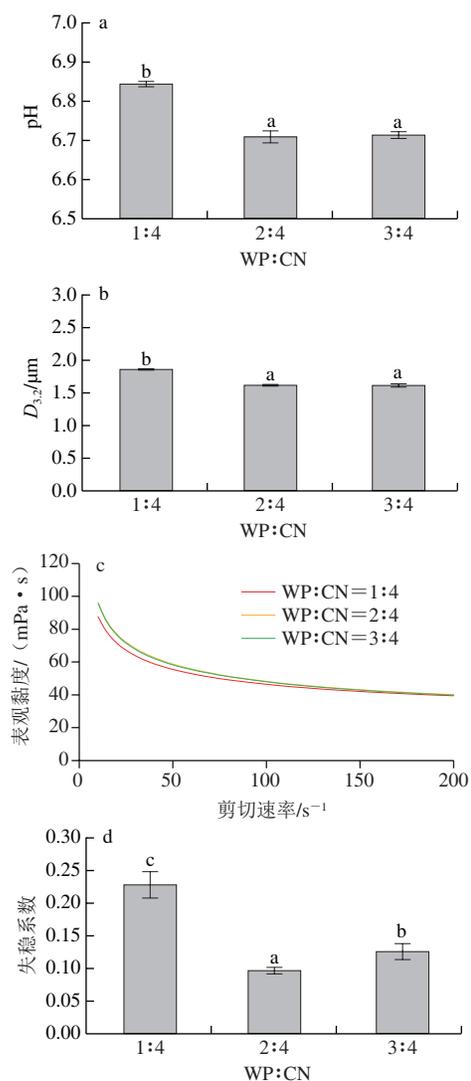


图3 清酪蛋白比例对再制稀奶油理化性质的影响
Fig. 3 Effect of WP/CN ratio on physicochemical properties of recombined cream

2.3.2 界面特性

如图4a所示,体系的电位绝对值随WP比例的增加而增大,WP:CN=1:4时电位的绝对值最小,这可能与高比例CN中所含的钙离子浓度有关,高浓度Ca²⁺会降低电双层排斥,从而减少空间排斥,导致电位相应较低^[27]。随WP比例增加,CN含量减少,Ca²⁺浓度相应降低,稀奶油体系的电位绝对值增大,失稳系数也有所减小,即乳液稳定性提升。

在实验范围内,WP:CN=1:4时的界面蛋白浓度最大,随着WP比例增加,稀奶油界面蛋白浓度减小,液相蛋白含量没有明显变化(图4b)。这可能与脂肪球粒径的变化有关,增加体系中WP比例,脂肪球粒径减小,比表面积增加,使得单位面积上的界面蛋白浓度减小。脂肪球粒径的减小同时也说明相比于胶束态的CN,WP具有更好的乳化效果,能稳定更多表面积^[28]。结合稀奶油连续相、分散相乳脂肪球的状态以及颗粒与连续相间相

互作用,随WP比例增加,稀奶油pH值趋向于乳的正常值6.7,脂肪球平均粒径减小、体系黏度和电位绝对值均增大,故体系稳定性提升。

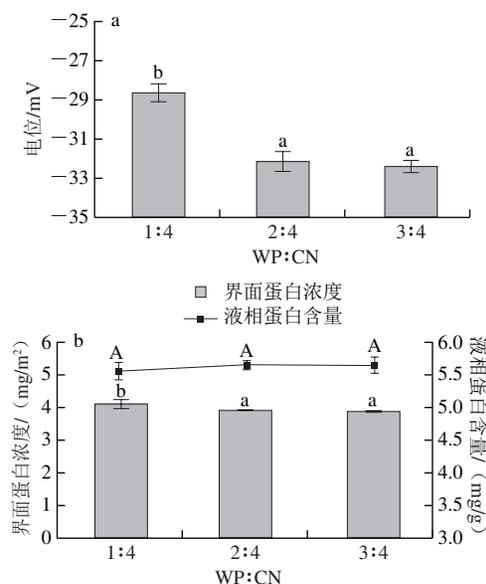


图4 清酪蛋白比例对再制稀奶油界面特性的影响
Fig. 4 Effect of WP/CN ratio on interface characteristics of recombined cream

2.4 WP与CN比例对再制稀奶油搅打特性的影响

2.4.1 搅打起泡性

由表2可知,在WP:CN=1:4的基础上,增加WP比例,搅打时间缩短,起泡率下降。蛋白质对于网络结构的形成和乳浊液的稳定具有关键作用,它能够与乳脂肪球共同形成具有一定黏弹性的界面膜以保护泡沫结构,但过度稳定则不利于在搅打过程中发生部分聚结。当WP:CN=1:4时,较高的CN含量使得脂肪球界面蛋白浓度较大,界面膜更稳定,使得搅打过程中因碰撞发生的脂肪球部分聚结相对较慢,所以搅打时间更久,随WP比例增加,界面吸附蛋白浓度降低,部分聚结更容易发生,搅打时间也相应缩短,这与Segall等^[9]的研究相似。WP比例增加,体系黏度也随之增大,空气不易进入乳液^[29],导致搅打起泡率下降。

表2 不同清酪蛋白比例再制稀奶油的搅打特性
Table 2 Whipping characteristics of cream recombined with different WP/CN ratios

WP:CN	搅打时间/s	搅打起泡率/%	乳清泄漏率/%	泡沫硬度/N	泡沫塌陷率/%
1:4	188.25±11.24 ^b	181.44±2.84 ^b	4.28±0.72 ^b	12.42±3.41 [†]	29.59±3.29 [‡]
2:4	140.75±9.91 [‡]	166.17±2.38 [‡]	1.71±0.73 [‡]	10.21±2.33 [‡]	49.69±4.43 ^b
3:4	151.00±10.80 [‡]	167.84±4.23 [‡]	1.39±0.47 [‡]	9.56±2.38 [‡]	47.36±3.48 ^b

2.4.2 泡沫稳定性

由表2可知,WP:CN为1:4时乳清泄漏率较大,增加体系中WP的比例能显著降低稀奶油的乳清泄漏率(P<0.05),即泡沫持水性提升。改变WP与CN比例对

稀奶油泡沫硬度基本上没有影响。搅打稀奶油的泡沫塌陷率在WP:CN=1:4时最小,即泡沫的稳定性较好,随着体系中WP比例的增加,泡沫塌陷率明显增大,结合图4b,可能是此时的界面蛋白浓度较小,所构成的泡沫结构易崩塌,导致相同时间内稀奶油泡沫塌陷率增加,这也说明CN含量高时所构成的网络结构更能稳定泡沫。

结果表明,不同酪蛋白比例对再制稀奶油乳液稳定性和搅打特性的影响不一致,可根据实际需要调整WP与CN比例,达到改善稀奶油产品功能特性的目的。如当制作蛋糕、布丁和奶油浓汤等产品时,稀奶油无需搅打,WP:CN=2:4的乳粉能提供较好的乳液的稳定性,更适合用于制备稀奶油;但当稀奶油用于蛋糕裱花和制备奶油盖等用途时,需要稀奶油具有较好搅打起泡性和泡沫保形性,所以WP:CN=1:4的乳粉更适合。

3 结论

WP变性程度和WP/CN变化均对稀奶油乳化稳定性和打发性能产生不同程度的影响。WP变性程度为60%制备的稀奶油具有较好的乳液稳定性(伴随较大黏度),随着变性程度进一步增加,乳液稳定性下降;WP变性程度增加,有助于缩短打发时间,减轻乳清泄漏率,改善泡沫持水性。结果表明,WP变性程度为60%的乳粉同时具有较好的乳液稳定性和搅打特性,更适合应用于再制稀奶油制备中。在牛乳自然酪蛋白比例(WP:CN=1:4)基础上,适当增加WP比例可提高乳液稳定性,WP:CN=2:4时稀奶油的稳定性最好;随着WP比例的增加,稀奶油搅打时间缩短,泡沫持水性提高,但起泡率下降,泡沫塌陷率也随之增大,即保形性下降,研究认为WP:CN=1:4时稀奶油的起泡性和泡沫稳定性更佳。可根据实际需要调整WP与CN的比例,以改善稀奶油产品的功能特性。

参考文献:

- [1] 李扬,李妍,李栋,等.搅打稀奶油的品质及其影响因素的研究进展[J].食品科学,2022,43(15):327-335. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210705-037.
- [2] LI Y, LI Y, YUAN D D, et al. The effect of caseins on the stability and whipping properties of recombined dairy creams[J]. International Dairy Journal, 2020, 105: 104658. DOI:10.1016/j.idairyj.2020.104658.
- [3] LOI C C, EYRES G T, BIRCH E J. Effect of milk protein composition on physicochemical properties, creaming stability and volatile profile of a protein-stabilised oil-in-water emulsion[J]. Food Research International, 2019, 120: 83-91. DOI:10.1016/j.foodres.2019.02.026.
- [4] ZHOU X L, SALA G, SAGIS L M C. Structure and rheological properties of oil-water and air-water interfaces stabilized with micellar casein isolate and whey protein isolate mixtures[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 133: 107946. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107946.
- [5] 赵强忠.搅打稀奶油的搅打性能和品质的变化规律及其机理研究[D].广州:华南理工大学,2006:1-14.
- [6] 李扬,李妍,王筠钠,等.酪蛋白和工艺对再制稀奶油稳定性的影响[J].食品科学,2020,41(15):1-7. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190805-05.
- [7] XIONG X Y, HO M T, BHANDARI B, et al. Foaming properties of milk protein dispersions at different protein content and casein to whey protein ratios[J]. International Dairy Journal, 2020, 109: 104758. DOI:10.1016/j.idairyj.2020.104758.
- [8] DALGLEISH D G. Conformations and structures of milk proteins adsorbed to oil-water interfaces[J]. Food Research International, 1996, 29(5): 541-547. DOI:10.1016/S0963-9969(96)00065-8.
- [9] SEGALL K I, GOFF H D. Influence of adsorbed milk protein type and surface concentration on the quiescent and shear stability of butterolemsions[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(10): 683-691. DOI:10.1016/S0958-6946(99)00143-0.
- [10] ZHANG L N, ZHOU R Y, ZHANG J Y, et al. Heat-induced denaturation and bioactivity changes of whey proteins[J]. International Dairy Journal, 2021, 123: 105175. DOI:10.1016/j.idairyj.2021.105175.
- [11] DU Q W, JI X H, LYU F, et al. Heat stability and rheology of high-calorie whey protein emulsion: effects of calcium ions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 114: 106583. DOI:10.1016/j.foodhyd.2020.106583.
- [12] SAJEDI M, NASIRPOUR A, KERAMAT J, et al. Effect of modified whey protein concentrate on physical properties and stability of whipped cream[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 36: 93-101. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.09.007.
- [13] RELKIN P, SOURDET S, SMITH A K, et al. Effects of whey protein aggregation on fat globule microstructure in whipped-frozen emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(7): 1050-1056. DOI:10.1016/j.foodhyd.2005.11.007.
- [14] 孙颜君,莫蓓红,郑远荣,等.热处理和调节pH改性乳清蛋白浓缩物对搅打稀奶油加工性质的影响[J].食品工业科技,2015,36(2):133-137. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.02.021.
- [15] 陈立红.未变性乳清蛋白的测定及其对产品特性的影响[D].天津:天津科技大学,2015:21.
- [16] YAN G S, WANG S Y, LI Y, et al. Effect of emulsifier HLB on aerated emulsions: stability, interfacial behavior, and aeration properties[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 351: 111505. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2023.111505.
- [17] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200302-027.
- [18] 宋志鑫,王文琼,袁佩佩,等.复配乳化剂协同作用对搅打稀奶油稳定性及搅打品质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(23):187-193. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033845.
- [19] 王辉,孙琦,刘鹭,等.热处理对牛乳中盐类组分及酪蛋白胶体特性的影响[J].食品科学,2012,33(23):75-78.
- [20] 王筠钠.脂肪结晶对稀奶油品质影响及机理研究[D].北京:中国农业大学,2021:43-44.
- [21] 李美玲.单甘酯对再制搅打稀奶油物理特性的影响[D].北京:中国农业大学,2020:37.
- [22] MCCLEMENTS D J. Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2007, 47(7): 611-649. DOI:10.1080/10408390701289292.
- [23] ERIC D. Caseins in emulsions: interfacial properties and interactions[J]. International Dairy Journal, 1999, 9(3): 305-312. DOI:10.1016/S0958-6946(99)00079-5.
- [24] BOEKEL M A J S V, WALSTRA P. Stability of oil-in-water emulsions with crystals in the disperse phase[J]. Colloids and Surfaces, 1981, 3(2): 109-118. DOI:10.1016/0166-6622(81)80071-6.
- [25] 温荣欣,范荣波.新型发泡稀奶油复合稳定剂优化研究[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2016,33(4):302-307.
- [26] 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. DOI:10.3168/jds.2008-1997.
- [27] ABDOLMALEKI K, MOHAMMADIFAR M A, MOHAMMADI R, et al. The effect of pH and salt on the stability and physicochemical properties of oil-in-water emulsions prepared with gum tragacanth[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 140: 342-348. DOI:10.1016/j.carbpol.2015.12.081.
- [28] 刘莹,赵路苹,杨旭凤,等.花生油体对植脂搅打稀奶油性质的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(12):113-119. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031857.
- [29] 袁佩佩,王文琼,周吉阳,等.复配蛋白质添加量对黄油基搅打稀奶油稳定性及搅打性能的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(12):161-165. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026282.