

油脂对植物基冰淇淋乳液性质及产品品质的影响

张贵金¹, 范军营², 尹永智², 逯彩云², 张 晖¹,

王兴国¹, 吴港城¹

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 大咖国际食品有限公司, 河南 焦作 454850)

摘要:为探究植物油在植物基冰淇淋中的应用情况,以4种不同脂肪酸特征的植物油替代无水奶油制作改性大豆分离蛋白冰淇淋,并以无水奶油乳蛋白冰淇淋作为对照,研究不同油脂的结晶特性及由其制作的冰淇淋的品质,并进一步考察其对冰淇淋乳液性质的影响。结果表明:富含中链脂肪酸的棕榈仁油、氢化椰子油和氢化棕榈仁油形成了针状的 β' 晶型,含有60.21%棕榈酸的棕榈油形成了圆形的 β 晶型;棕榈仁油含有16.37%油酸,晶体分布稀疏,氢化棕榈仁油硬脂酸含量较高,晶体较大;氢化椰子油合适的固体脂肪含量和较高的中链脂肪酸含量使其形成了密集的针状晶体,更易穿破界面膜并增加脂肪球的碰撞频率,促进了冰淇淋中脂肪的部分聚结;冰淇淋乳液均为非牛顿流体,在使用改性大豆分离蛋白后及凝冻搅打后,脂肪发生了絮凝和部分聚结,其黏度大幅提升;植物基冰淇淋乳液的储能模量大小与脂肪部分聚结度结果一致,且大于损耗模量;氢化椰子油改性大豆分离蛋白冰淇淋乳液的界面蛋白含量最低,为10.48 mg/m²,脂肪部分聚结度最高,为68.89%,且冰淇淋的膨胀率为66.15%,融化率为7.12%,滞后时间为212 s。综上,油脂的脂肪酸组成影响其结晶特性,进而影响冰淇淋的基本性质,氢化椰子油改性大豆分离蛋白冰淇淋的品质最好。

关键词:冰淇淋;油脂结晶特性;植物基冰淇淋;冰淇淋乳液

中图分类号:TS225.1;TS201.2 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)01-0089-09

Effect of vegetable oil on the properties of plant – based ice cream emulsion and the quality of products

ZHANG Guijin¹, FAN Junying², YIN Yongzhi², LU Caiyun², ZHANG Hui¹,
WANG Xingguo¹, WU Gangcheng¹

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China;
2. D. Co International Food Co., Ltd., Jiaozuo 454850, Henan, China)

Abstract: In order to investigate the application of vegetable oils in plant – based ice cream, four types of vegetable oils with different fatty acid characteristics were used to replace anhydrous butter in the preparation of modified soy protein isolate ice cream. With anhydrous butter dairy protein ice cream as control, the crystallization characteristics of different oils and the quality of the resulting ice cream were studied, and the impact of different oils on the properties of the ice cream emulsion was further examined. The results indicated that palm kernel oil, hydrogenated coconut oil, and hydrogenated palm kernel oil, which were rich in medium – chain fatty acids, formed needle – like β' crystals, while palm oil containing 60.21% palmitic acid formed round β crystals. Palm kernel oil, with 16.37% oleic acid,

exhibited sparse crystal distribution, whereas hydrogenated palm kernel oil had a higher stearic acid content, resulting in larger crystals. The appropriate solid fat content and higher medium – chain fatty acid content of hydrogenated coconut oil led to the formation of dense needle – like crystals, which more easily penetrated the

收稿日期:2023-12-28;修回日期:2024-07-28

基金项目:云南省科技厅科技计划项目(202102AE090055)

作者简介:张贵金(1998),男,在读硕士,研究方向为油脂及制品加工(E-mail)zhangguijin625@163.com。

通信作者:吴港城,副教授,博士(E-mail)gangcheng.wu@jiangnan.edu.cn。

interfacial membrane and increased the collision frequency of fat globules, promoting partial aggregation of fats in the ice cream. All ice cream emulsions were non-Newtonian fluids, and after the addition of modified soy protein isolate and freezing stirring, fat flocculation and partial aggregation occurred, significantly increasing the viscosity of the ice cream emulsion. The elastic modulus of the plant-based ice cream emulsion was consistent with the degree of partial aggregation and greater than the viscous modulus. The ice cream emulsion prepared with hydrogenated coconut oil and modified soy protein isolate had the lowest interfacial protein content, at 10.48 mg/m^2 , the highest degree of fat partial aggregation, at 68.89%, and the expansion rate, melting rate and melting lag time of the ice cream were 66.15%, 7.12%, and 212 s, respectively. In summary, the fatty acid composition of oils affects their crystallization characteristics, which in turn influences the basic properties of ice cream; the quality of ice cream prepared with hydrogenated coconut oil and modified soy protein isolate is the best.

Key words: ice cream; oil crystallization characteristics; plant-based ice cream; ice cream emulsion

冰淇淋是一种包含气泡、脂肪球和冰晶的冷冻充气水包油(O/W)型乳液,通常含有8%~14%的乳脂肪及4%左右的乳蛋白^[1-2]。然而,部分消费者由于乳糖不耐受、过敏以及纯素食主义倾向等原因,更倾向于植物基成分的冰淇淋,但由于牛奶和乳制品成分赋予的独特结构和风味,生产植物基冰淇淋仍是一项技术挑战,例如:使用大豆浓缩蛋白代替脱脂奶粉用于冰淇淋会显著降低冰淇淋的膨胀率,且使冰淇淋黏度从 $43.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 增加至 $137.9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ^[3];大量添加豌豆分离蛋白替代乳蛋白会对冰淇淋冷度、光滑度、颜色、外观、口感和气味产生负面影响^[4]。这是由于植物蛋白较大的相对分子质量影响蛋白质在脂肪球表面的吸附作用以及脂肪的结晶特性,导致脂肪部分聚结度降低,进而影响冰淇淋的质构^[5]。多项研究发现,通过改性植物蛋白优化蛋白质的结构和功能可以改善植物基冰淇淋品质,如:徐莹^[6]使用木瓜蛋白酶水解、转谷氨酰胺酶交联制备出高乳化活性的改性大豆分离蛋白,用其替代10%的乳蛋白制备的冰淇淋品质较好;Chen等^[5]使用木瓜蛋白酶处理大豆分离蛋白,其亚基结构被水解为分子质量小于20 kDa的小分子多肽,小分子多肽在冰淇淋老化过程中被甘油单酯置换,从而形成脂肪部分聚结、融化率高的冰淇淋。

现有研究表明,脂肪部分聚结是冰淇淋的主要失稳方式,对冰淇淋的质构有重要影响^[7]。部分聚结是指两个或两个以上脂肪球极限接近后,由脂肪晶体连接形成脂肪晶体网络的过程。脂肪晶体网络结构的差异,与不同脂肪酸组成的油脂形成不同的脂肪结晶特性有关^[8],例如,富含月桂酸和肉豆蔻酸的油脂形成较小的针状晶体,硬脂酸含量较高的油脂则形成大的球形晶体,以棕榈酸和油酸为主的

油脂形成稀疏的棒状晶体^[9]。但在已往的研究中,脂肪结晶特性对搅打乳液(奶油、稀奶油)的影响更多集中在室温或冷藏温度,如:Xie等^[10]基于乳化剂对脂肪结晶和界面特性的影响,改善稀奶油的搅打能力;陈雨杭^[11]研究了油脂的晶体尺寸、形态、晶型和所呈现的晶体网络结构对稀奶油稳定性和泡沫稳定性的影响规律。但关于脂肪结晶特性对冷冻充气乳液(冰淇淋)品质影响的报道较少。

目前,通过优化大豆蛋白结构和功能在冰淇淋制作中实现高脂肪部分聚结和高膨胀率已经得到充分的验证,但尚未有不同油脂对改性植物蛋白冰淇淋影响的研究。因此,本研究以4种不同脂肪酸特征的植物油(棕榈油、棕榈仁油、氢化椰子油和氢化棕榈仁油)替代无水奶油制作改性大豆分离蛋白基冰淇淋,研究不同油脂的结晶特性及其制备的冰淇淋品质,进而探究油脂对冰淇淋乳液性质的影响,期为植物基冰淇淋油脂的选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

大豆分离蛋白、卡拉胶、瓜尔豆胶、黄原胶,河南万邦实业公司;酪蛋白、蔗糖、氢化椰子油(HCNO)、分子蒸馏单甘酯、双乙酰酒石酸单双甘油酯,大咖国际食品有限公司;乳清蛋白,美国希尔玛公司;无水奶油(AMF)、棕榈仁油(PKO)、棕榈油(PS)、氢化棕榈仁油(HPKO),上海嘉里粮油工业有限公司;木瓜蛋白酶(酶活为 800 U/mg),源叶生物有限公司;双缩脲酸(BCA)蛋白浓度测定试剂盒,碧云天生物技术有限公司。

1.1.2 仪器与设备

D2-Phaser X 射线衍射仪,德国 Bruker AXS 公

司;Agilent 7820A 气相色谱仪,美国 Agilent 公司; PL-180 偏振光显微镜,上海光学仪器厂;AM4000 脉冲式核磁共振波谱仪,英国 Oxford 公司;TA.XTPlus 物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;S3500 激光粒度分析仪,英国马尔文仪器公司;M2 酶标仪,美国 Molecular Devices 公司;DHR-3 流变仪,美国 TA 仪器公司;LSM880 高分辨率激光共聚焦显微镜,德国 Laica 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油脂相关指标的测定

1.2.1.1 脂肪酸组成

脂肪酸组成的测定参考 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》。

1.2.1.2 固体脂肪含量(SFC)

SFC 的测定参考 GB/T 31743—2015《动植物油脂 脉冲核磁共振法测定固体脂肪含量 直接法》。

1.2.1.3 晶型

参考焦文娟等^[12]的方法,将油样在 90 °C 下放置 30 min 以消除结晶。然后在 4 °C 下结晶,采用 X 射线衍射(XRD)仪测定晶型。测定条件:电压 20 mA,电流 40 kV,扫描角度范围(2θ)5°~30°,扫描速度 2(°)/min。

1.2.1.4 晶体形态

将油样在 80 °C 完全熔化后,用毛细管取 10~15 μ L 置于载玻片上,盖上盖玻片。将制备的样品在 4 °C 下放置 24 h,然后用偏振光显微镜观察晶体形态。

1.2.2 大豆分离蛋白的改性

用去离子水配制 100 mg/mL 的大豆分离蛋白溶液,在 55 °C 下预热 1 h,加入大豆分离蛋白质量 0.5% 的木瓜蛋白酶,酶解 30 min,然后在 90 °C 灭酶 5 min,冷却至室温,调整酶解液 pH 至 7.0,再经 60 MPa 高压均质 1 次,冻干,即得改性大豆分离蛋白。

1.2.3 冰淇淋的制作

冰淇淋新鲜乳液的配方见表 1。根据表 1 按照水溶性原料、油溶性原料、稳定剂(卡拉胶、瓜尔豆胶、黄原胶,比例 2:2:1)和乳化剂(双乙酰酒石酸单双甘油酯和分子蒸馏单甘酯,比例 3:1)进行称量混合,其余用水补充→乳化(65 °C 水浴中以 1 000 r/min 搅拌 10 min)→杀菌(80 °C 水浴杀菌 10 min)→均质(两段式高压均质,一级压力为 15 MPa,二级压力为 3 MPa)→老化(4 °C,6 h)→凝冻(-16 °C,30 min)→硬化(-18 °C,48 h)工艺,分别制成 6 种冰淇淋,即无水奶油基乳蛋白冰淇淋(AMF-L)、无水奶油基

改性大豆分离蛋白冰淇淋(AMF-S)、棕榈油基改性大豆分离蛋白冰淇淋(PS-S)、棕榈仁油基改性大豆分离蛋白冰淇淋(PKO-S)、氢化椰子油基改性大豆分离蛋白冰淇淋(HCNO-S)、氢化棕榈仁油基改性大豆分离蛋白冰淇淋(HPKO-S)。

表 1 冰淇淋新鲜乳液配方

Table 1 Formula of ice cream fresh emulsion %

成分	AMF-L	AMF-S	PS-S	PKO-S	HCNO-S	HPKO-S
AMF	12	12	0	0	0	0
PS	0	0	12	0	0	0
PKO	0	0	0	12	0	0
HCNO	0	0	0	0	12	0
HPKO	0	0	0	0	0	12
乳蛋白	4	0	0	0	0	0
改性大豆分离蛋白	0	4	4	4	4	4
蔗糖	14	14	14	14	14	14
乳化剂	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
稳定剂	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

注:乳蛋白由 80% 酪蛋白和 20% 乳清蛋白组成

Note: Milk protein consists of 80% casein and 20% whey protein

1.2.4 冰淇淋基本性质的测定

1.2.4.1 膨胀率

凝冻前后分别量取等体积的冰淇淋乳液和冰淇淋成品,称其质量,分别记为 m_1 和 m_2 ,按式(1)计算冰淇淋膨胀率(y_1)。

$$y_1 = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

1.2.4.2 融化率

取 40 g 左右(m_3)的冰淇淋于筛孔孔径为 2.0 mm(10 目)的金属网上,下方放置透明的收集杯,并一起置于 35 °C 恒温箱中 5 min,称取收集杯中融化的冰淇淋质量(m_4),按式(2)计算冰淇淋融化率(y_2)。

$$y_2 = m_4 / m_3 \times 100\% \quad (2)$$

1.2.4.3 滞后时间

参考 Liu 等^[13]的方法测定冰淇淋的融化滞后时间。称取 40 g 冰淇淋置于筛孔孔径为 2.0 mm(10 目)的金属网上,下方放置透明的收集杯,并一起置于 35 °C 恒温箱中,计时,将冰淇淋第一滴融化液到达收集杯的时间记为融化滞后时间。

1.2.4.4 硬度

参考徐莹^[6]的方法测定冰淇淋的硬度。测定条件:测试前探头下降速度 2 mm/s,测试速度 3 mm/s,测试后探头回程速度 5 mm/s,测试距离 20 mm,触发力 20 g,探头类型 P/2。

1.2.5 冰淇淋乳液性质的测定

1.2.5.1 流变特性

采用流变仪测定样品的流变特性。测定条件:选用夹具为直径 40 mm 的平板,间距 500 μm ,剪切速率 0.1 ~ 100 s^{-1} ,测定温度 4 $^{\circ}\text{C}$ 。以剪切速率为横坐标,表观黏度为纵坐标,绘制表观黏度随剪切速率变化的曲线;同时建立黏度曲线幂律模型 ($\eta = K \cdot \dot{\gamma}^n$, 式中: η 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$; n 为流体特征指数)。在 0.1 ~ 10 Hz 下进行频率扫描,绘制储能模量 (G') 和损耗模量 (G'') 随频率变化的曲线。

1.2.5.2 粒径及脂肪部分聚结度(PCD)

参照徐莹^[6]的方法测定样品的粒径。用去离子水分别将冰淇淋老化乳液、融化乳液(冰淇淋常温融化得到)稀释 100 倍,然后采用激光粒度分析仪测定其体积平均粒径 ($D_{4,3}$)。

按上述方法以 1.0 g/100 mL 的十二烷基硫酸钠(SDS)溶液代替去离子水,测定 SDS 溶液稀释融化乳液的体积平均粒径 ($D_{4,3 \text{ SDS}}$) 和老化乳液的体积平均粒径 [$D_{4,3 \text{ SDS(E)}}$]。脂肪部分聚结度 (P) 按式(3)计算。

$$P = \frac{D_{4,3 \text{ SDS}} - D_{4,3 \text{ SDS(E)}}}{D_{4,3 \text{ SDS(E)}}} \times 100\% \quad (3)$$

1.2.5.3 界面蛋白含量的测定

参照 Xie 等^[10]的方法测定乳液的界面蛋白含量。将冰淇淋乳液在 10 000 $\times g$ 下离心 30 min 后,用注射器吸取下层清液并过膜,BCA 蛋白浓度测试盒测定其蛋白质含量。界面蛋白含量 (Γ) 按公式(4)计算。

$$\Gamma = \frac{(W_l - W_s) \times D_{3,2}}{6\Phi} \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: W_l 为原乳液中的蛋白质含量, g/L; W_s 为离心后所得下层清液中的蛋白质含量, g/L; $D_{3,2}$ 为脂肪球的比表面积平均粒径(激光粒度分析仪测定), μm ; Φ 为含油率。

1.2.5.4 微观结构

采用激光共聚焦显微镜观察冰淇淋乳液的微观结构。使用乙醇配制质量浓度为 0.02 g/100 mL 的尼罗红染料。取 3 mL 乳液样品,加入 30 μL 尼罗红染料,混匀,取一滴置于载玻片上,然后倒置在显微镜下,使用 60 倍油镜观察样品的微观结构。

2 结果与分析

2.1 脂肪酸组成对油脂结晶特性的影响

2.1.1 不同油脂的脂肪酸组成

油脂脂肪酸组成与其结晶特征密切相关,而油

脂结晶特征对冰淇淋乳液的流变特性及冰淇淋的膨胀率等有重要影响^[14]。4 种植物油与 AMF 的脂肪酸组成见表 2。

表 2 4 种植物油与无水奶油的脂肪酸组成

脂肪酸	AMF	PS	PKO	HCNO	HPKO
C6:0	1.32	ND	ND	ND	ND
C8:0	0.99	ND	3.04	5.12	3.87
C10:0	2.75	ND	3.03	2.67	3.42
C12:0	3.54	ND	46.99	48.45	42.44
C14:0	11.04	1.06	16.70	20.45	12.39
C16:0	35.11	60.21	8.95	11.56	9.05
C18:0	11.98	6.16	2.26	11.75	28.83
C18:1	25.16	27.23	16.37	ND	ND
C18:2	2.86	5.33	2.66	ND	ND

注:ND 表示未检出;AMF 中未列出少部分稀有脂肪酸(如奇数碳脂肪酸)

Note: ND indicates not detected, and a few rare fatty acids (such as odd-chain fatty acids) are not listed in AMF

由表 2 可知,5 种油脂的脂肪酸组成和含量差异较大。AMF 中饱和脂肪酸主要由 35.11% 的棕榈酸(C16:0)、11.98% 的硬脂酸(C18:0)和 11.04% 的肉豆蔻酸(C14:0)组成,而不饱和脂肪酸主要由 25.16% 的油酸(C18:1)组成,此外,AMF 中还含有奇数碳脂肪酸十五碳酸(C15:0)、十七碳酸(C17:0)和不饱和脂肪酸亚麻酸(C18:3)、十四碳一烯酸(C14:1)。PS 中主要为长链脂肪酸,含有 60.21% 的棕榈酸及 27.23% 的油酸。PKO、HCNO、HPKO 中主要由中链脂肪酸组成,分别含有 46.99%、48.45%、42.44% 的月桂酸(C12:0),三者间 C18:0 含量差别较大,分别为 2.26%、11.75% 和 28.83%,同时 PKO 中还含有 16.37% 的油酸。

2.1.2 不同油脂的 SFC

冰淇淋的理想品质主要取决于分布良好的微小冰晶所带来的细腻质地,以及入口时适宜的油腻感和黏稠感^[15],这与冰淇淋所用油脂的 SFC 有着密切关系。其中,油脂在 5 $^{\circ}\text{C}$ 下的 SFC 可以代表其在冷藏条件下的结晶能力,25 $^{\circ}\text{C}$ 下的 SFC 与油脂的熔融特性有关,35 $^{\circ}\text{C}$ 下的 SFC 决定了油脂食品的风味和口感^[11]。4 种植物油与 AMF 的 SFC 随温度的变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可知:在 0 ~ 10 $^{\circ}\text{C}$, AMF 的 SFC 呈较低的水平;随着温度升高,除 PS 外,其他植物油脂的

SFC 迅速下降,这可能与 PS 较高的棕榈酸含量有关,PS 中较高的 SFC 导致由其制取的冰淇淋入口即化感差;相较于 AMF,PKO、HCNO 在较短的温度范围内 SFC 曲线迅速下降,使由其制取的冰淇淋在低温时的质地更为立挺,口腔温度下融化速度快,入口即化感更强。

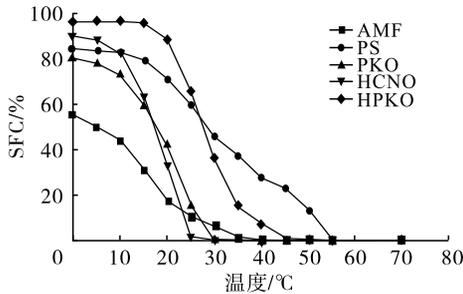


图1 4种植物油与AMF的SFC随温度的变化曲线

Fig.1 Temperature dependent SFC curves of 4 vegetable oils and anhydrous butter

除影响冰淇淋的风味和口感外,SFC对脂肪部分聚结至关重要,适宜的SFC可以得到更高的脂肪部分聚结度^[16],且最适SFC受油基和不同加工工艺的影响,如:Fuller等^[17]利用不同比例的HPKO和葵花籽油制备稀奶油,在SFC为90%时,脂肪部分聚结度最高;Hinrichs等^[18]研究发现乳脂奶油的SFC

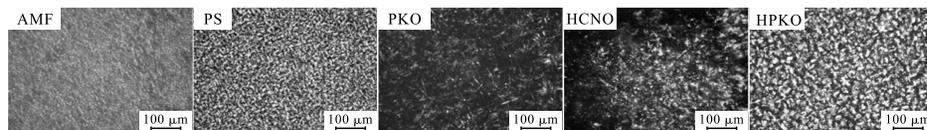


图3 4种植物油和AMF的晶体形态

Fig.3 Crystal morphology of 4 vegetable oils and anhydrous butter

由图2、图3可知:4℃下AMF的晶体细腻,分散排列,晶体之间的连接性较弱;PS含有大量的长链饱和脂肪酸,其在4.6 Å的衍射峰表明有β晶型的存在,出现圆形大尺寸结晶块;PKO、HCNO和HPKO表现为针状结晶,这可能与三者富含中链脂肪酸有关^[22-23],三者均以β'晶型为主,同时HCNO有部分α晶型。相对于PKO,HCNO的针状晶体更致密,这可能与HCNO有更合适的SFC和较高的中链脂肪酸含量有关,这与Chai等^[24]的研究结果相一致;相较于PKO、HCNO,HPKO展现出晶型更粗大的晶体形态,这可能与其较高的C18:0含量有关^[9];PKO晶体分布稀疏。

2.2 冰淇淋的基本性质

不同油脂制备的冰淇淋的基本性质见表3。

由表3可知:AMF-L的膨胀率最高,达到89.35%,5种使用改性大豆分离蛋白制作的冰淇淋

为25%时,脂肪部分聚结度最大;Davies等^[19]研究酪蛋白酸钠O/W型乳液的剪切失稳,发现油相中SFC为10%~50%时,脂肪部分聚结度达到最大。

2.1.3 不同油脂的晶型及晶体形态

XRD分析常用于研究油脂的同质多晶现象,其可获得脂链在层内的堆积情况,层内堆积会产生各种多态形式,其中短间距在4.2 Å和3.8 Å的衍射峰表现为β'晶型,短间距在4.15 Å和4.6 Å处的衍射峰分别表示α和β晶型^[20]。利用偏振光显微镜可以更直观地了解晶体形态及大小^[21]。4种植物油和AMF的XRD图如图2所示,晶体形态如图3所示。

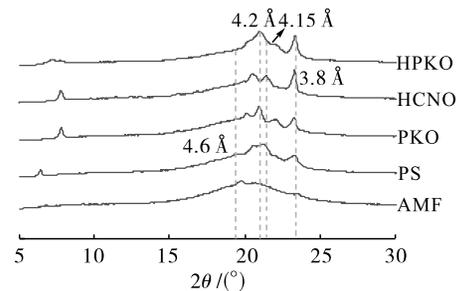


图2 4种植物油和AMF的XRD图

Fig.2 XRD patterns of 4 vegetable oils and anhydrous butter

中,HCNO-S的膨胀率最高,为66.15%,然后依次为AMF-S、PKO-S、HPKO-S、PS-S;观察冰淇淋的融化率和滞后时间发现,AMF-L的融化行为最好,而在使用改性大豆分离蛋白制作的冰淇淋中,AMF-S融化率大幅提升,同时滞后时间下降,融化行为表现较差。

表3 冰淇淋的基本性质

Table 3 Basic properties of ice cream

样品	膨胀率/%	融化率/%	滞后时间/s	硬度/g
AMF-L	89.35	3.94	235	148.34
AMF-S	64.15	10.25	158	227.78
PS-S	58.70	7.73	205	243.90
PKO-S	63.94	8.96	191	267.51
HCNO-S	66.15	7.12	212	327.29
HPKO-S	63.58	10.00	169	339.42

冰淇淋的硬度是评价其品质的重要指标,其硬度受膨胀率和体系黏度的影响^[25]。由表3可知,与

AMF-L 相比,AMF-S 的硬度较高。5 种使用改性大豆分离蛋白制作的冰淇淋的硬度均高于使用乳蛋白的,且不同油脂制备的冰淇淋的硬度存在差异,这可能与油脂的熔融性质、SFC 及脂肪酸组成有关,较高的 SFC 和晶体熔点会使搅打乳液的硬度提高^[9-10]。

2.3 冰淇淋乳液的性质

2.3.1 流变特性

不同油脂制备的冰淇淋乳液的流变特性见图 4,不同油脂制备的冰淇淋老化乳液和融化乳液的黏度曲线幂律模型常数分别见表 4 和表 5。

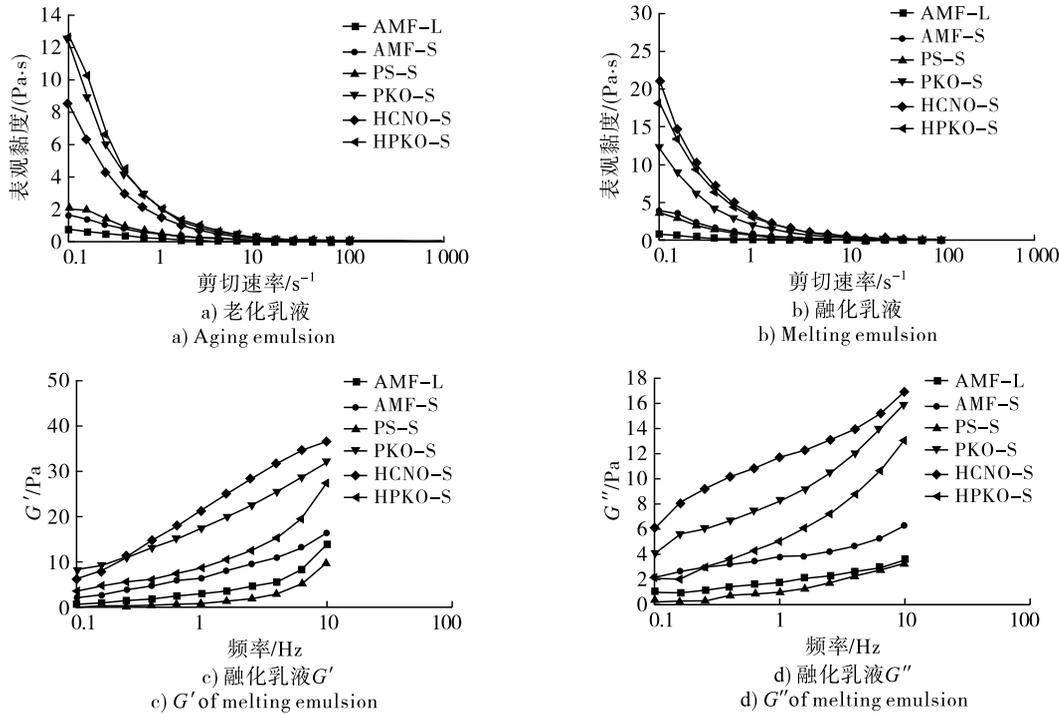


图 4 冰淇淋乳液流变特性

Fig.4 Rheological properties of ice cream emulsion

表 4 冰淇淋老化乳液的黏度曲线幂律模型常数

Table 4 Viscosity curve power-law model constant of ice cream aging emulsion

样品	n	K	R
AMF-L	0.370 ± 0.002	0.187 ± 0.005	0.989
AMF-S	0.461 ± 0.015	0.490 ± 0.008	0.996
PS-S	0.395 ± 0.005	0.395 ± 0.015	0.981
PKO-S	0.214 ± 0.018	2.063 ± 0.034	0.999
HCNO-S	0.243 ± 0.007	1.514 ± 0.001	0.999
HPKO-S	0.223 ± 0.016	2.212 ± 0.021	0.992

表 5 冰淇淋融化乳液的黏度曲线幂律模型常数

Table 5 Viscosity curve power-law model constant of ice cream melting emulsion

样品	n	K	R
AMF-L	0.307 ± 0.024	0.193 ± 0.013	0.992
AMF-S	0.363 ± 0.018	0.995 ± 0.005	0.989
PS-S	0.342 ± 0.060	0.875 ± 0.018	0.997
PKO-S	0.259 ± 0.015	2.265 ± 0.027	0.999
HCNO-S	0.211 ± 0.005	3.467 ± 0.015	0.999
HPKO-S	0.262 ± 0.008	3.391 ± 0.007	0.999

由图 4 和表 4 可知,随着剪切速率的增加,所有

样品的表观黏度均出现下降,表现出典型的剪切稀化特性,所有样品的流体特征指数(n)均小于 1,均为非牛顿流体^[26]。当乳蛋白被替换为改性大豆分离蛋白后,冰淇淋乳液的表观黏度均提升,与 Dervisoglu 等^[3]的研究结果相一致。富含中链脂肪酸的 PKO-S、HCNO-S、HPKO-S 乳液的表观黏度大于富含长链脂肪酸的 AMF-S、PS-S 乳液的,这是因为 AMF 和 PS 含有 30% 左右的不饱和脂肪酸,在测试温度下处于非结晶状态,而 PKO、HCNO、HPKO 含有较高的饱和脂肪酸含量,因此体系表观黏度更高。

由图 4 和表 5 可知,冰淇淋融化乳液仍为非牛顿流体,当用大豆分离蛋白替代乳蛋白后,冰淇淋融化乳液的 K 均有不同程度的提升,表现为表观黏度增大,这表明在凝冻搅打后,冰淇淋之间的脂肪发生了失稳。脂肪的失稳机制主要包括奥氏熟化、絮凝、聚结和乳析或沉降^[7],脂肪的聚结、部分聚结和絮凝都会导致乳液黏度提高^[11],过大的黏度不利于稳定泡沫的形成^[27]。

冰淇淋的口感、质构、涂抹性等性能与黏弹性密

切相关。由图4可知,随着频率的增加,所有样品的 G' 和 G'' 均增强。冰淇淋样品的 G' 均大于 G'' ,这表明样品的结构更偏向于弹性结构,并且可根据 G' 的大小判断出HCNO-S乳液的脂肪网络强度更大^[26]。

2.3.2 粒径

与普通乳液有所不同,冰淇淋乳液体系在生产之前要求静置下稳定,而在凝冻搅打时脂肪球要失稳并发生部分聚结,进而形成稳定的网络结构^[8]。冰淇淋乳液的粒径和脂肪部分聚结度如表6所示。

表6 冰淇淋乳液粒径和脂肪部分聚结度
Table 6 Particle size and partial aggregation degree of ice cream emulsion

样品	$D_{4,3}/\mu\text{m}$		PCD/%
	老化乳液	融化乳液	
AMF-L	0.884 ± 0.005	1.890 ± 0.011	56.21 ± 0.15
AMF-S	5.620 ± 0.157	7.730 ± 0.212	2.37 ± 0.39
PS-S	4.110 ± 0.124	5.650 ± 0.014	7.25 ± 1.99
PKO-S	2.884 ± 0.188	7.805 ± 0.502	34.59 ± 4.86
HCNO-S	2.657 ± 0.021	6.155 ± 0.799	68.89 ± 3.48
HPKO-S	3.070 ± 0.454	6.540 ± 0.325	18.25 ± 1.68

由表6可知,在冰淇淋老化乳液中,当用改性大豆分离蛋白替换乳蛋白后, $D_{4,3}$ 有不同程度的增大,AMF-S乳液的 $D_{4,3}$ 最大,显示出较差的乳液稳定性,表明AMF可能不适用于此改性大豆分离蛋白冰淇淋的制作。经过凝冻搅打后,冰淇淋融化乳液的 $D_{4,3}$ 均增加,结合冰淇淋融化乳液黏度的提高(图4),表明在此期间脂肪发生了失稳,但AMF-S和PS-S乳液的脂肪部分聚结度较低,推测其脂肪聚集体的形式为絮凝而不是部分聚结。PKO、HCNO、HPKO晶体形态为针状结晶,使其更易刺破蛋白界面膜,触发部分聚结,因此PKO-S、HCNO-S和HPKO-S显示出相较于PS-S和AMF-S更高的脂肪部分聚结度;但HPKO含有28.83%的C18:0,晶型更粗大,较PKO、HCNO更难导致脂肪球部分聚结,因此HPKO-S的脂肪部分聚结度低于PKO-S和HCNO-S;而HCNO晶体结构更致密,脂肪球的碰撞频率增加从而形成更高的部分聚结度。同时发现,植物基冰淇淋乳液的脂肪部分聚结度大小结果与 G' (图4)结果基本一致。

2.3.3 界面蛋白含量

水相中的蛋白质在均质的过程中会迅速吸附到油/水界面上,形成一层黏弹性的界面膜,并且会通过静电相互作用阻碍脂肪球颗粒间的聚集^[28]。不同油脂制备的冰淇淋老化乳液的界面蛋白含量如图5所示。

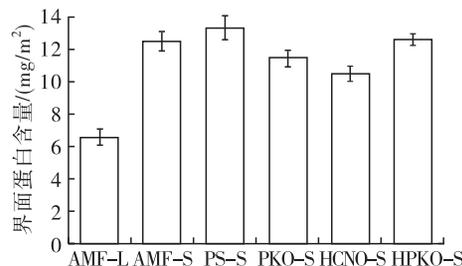


图5 冰淇淋老化乳液的界面蛋白含量

Fig.5 Interface protein content of ice cream aging emulsion

由图5可知,AMF-L老化乳液的界面蛋白含量最低,其次为HCNO-S、PKO-S、HPKO-S、AMF-S、PS-S。脂肪部分聚结度较高的乳液界面蛋白含量往往更低^[29],这是由于冰淇淋乳液中含有小分子乳化剂,乳化剂与吸附在脂肪球表面的蛋白质发生竞争性吸附作用,导致部分蛋白质从界面膜上解吸下来,界面膜强度降低,有利于脂肪的部分聚结^[30]。在改性大豆分离蛋白冰淇淋中HCNO-S乳液的界面蛋白含量最低,为 10.48 mg/m^2 ,这也是HCNO-S乳液脂肪部分聚结度最高的原因。

2.3.4 微观结构

不同油脂制备的冰淇淋乳液的微观结构如图6所示。

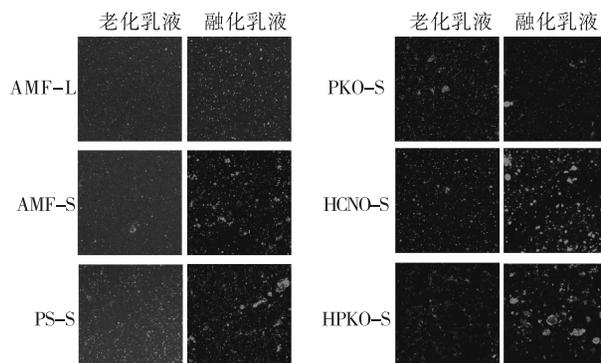


图6 冰淇淋乳液微观结构

Fig.6 Microstructure of ice cream emulsion

由图6可知:所有样品的老化乳液中的脂肪球都较小且稀疏,凝冻后,融化乳液的脂肪球有明显增大;用改性大豆分离蛋白替换乳蛋白后,脂肪球相互之间出现不同程度的脂肪失稳现象。其中HCNO-S凝冻后融化乳液中的脂肪球分布更为均匀,脂肪的部分聚结更为明显,这一结果与冰淇淋乳液的粒径分析结果相一致。

3 结论

不同的脂肪酸组成导致了不同的脂肪结晶特性,富含中链脂肪酸的PKO、HCNO、HPKO形成无序排列而聚结形成针状结晶,使脂肪晶体更易刺破蛋白界面膜,并与相邻脂肪晶体形成部分聚结;同时,

HCNO 更高的饱和中链脂肪酸含量,使晶体结构更致密,脂肪球的碰撞频率增加,从而形成更高的脂肪部分聚结度。对冰淇淋乳液的流变特性、粒径、界面蛋白含量和微观结构的测定同样证明了 HCNO - S 乳液具有最高的脂肪部分聚结度,导致 HCNO - S 有较好的质构特性。因此,油脂的脂肪酸组成会影响油脂的结晶特性,进而影响冰淇淋的基本性质。本研究可为油脂在植物基冰淇淋生产中的应用提供参考。

参考文献:

- [1] KASAPOGLU M, SAGDIC O, AVCI E, et al. The potential use of cold - pressed coconut oil by - product as an alternative source in the production of plant - based drink and plant - based low - fat ice cream: The rheological, thermal, and sensory properties of plant - based ice cream[J/OL]. *Foods*, 2023, 12(3): 650[2023 - 12 - 28]. <https://doi.org/10.3390/foods12030650>.
- [2] AMADOR J, HARTEL R, RANKIN S. The effects of fat structures and ice cream mix viscosity on physical and sensory properties of ice cream[J]. *J Food Sci*, 2017, 82(8): 1851 - 1860.
- [3] DERVISOGLU M, YAZICI F, AYDEMIR O. The effect of soy protein concentrate addition on the physical, chemical, and sensory properties of strawberry flavored ice cream[J]. *Eur Food Res Technol*, 2005, 221(3): 466 - 470.
- [4] GULER - AKIN M B, AVKAN F, AKIN M S. A novel functional reduced fat ice cream produced with pea protein isolate instead of milk powder [J/OL]. *J Food Process Pres*, 2021, 45(11): 15901 [2023 - 12 - 28]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15901>.
- [5] CHEN W, LIANG G, LI X, et al. Effects of soy proteins and hydrolysates on fat globule coalescence and meltdown properties of ice cream[J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 94: 279 - 286.
- [6] 徐莹. 高乳化稳定性大豆蛋白的酶法制备及在冰淇淋中的应用[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2013.
- [7] 陈雪, 刘立增, 刘爱国, 等. 脂肪球的部分聚结对冰淇淋品质的影响 [J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(6): 359 - 366.
- [8] 程金菊. 脂肪球的低温失稳机制及其对冰淇淋质构形成的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] 刘平利. 油脂结晶特性影响植脂奶油品质的作用机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 焦文娟, 李冰, 李琳, 等. 贮藏模式对脂肪结晶 O/W 乳液的结晶行为与宏观性能影响[J]. *现代食品科技*, 2021, 37(7): 155 - 161.
- [13] LIU X, SALA G, SCHOLTEN E. Effect of fat aggregate size and percentage on the melting properties of ice cream [J/OL]. *Food Res Int*, 2022, 160: 111709[2023 - 12 - 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111709>.
- [14] 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.
- [15] 段静静, 李冰, 李琳, 等. 棕榈油中间分提物 PMF 在软冰淇淋中的应用[J]. *食品科技*, 2017, 42(3): 204 - 211.
- [16] 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.
- [17] FULLER G T, CONSIDINE T, GOLDING M, et al. Aggregation behavior of partially crystalline oil - in - water emulsions: Part I: Characterization under steady shear [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 43: 521 - 528.
- [18] HINRICHS J, KESSLER H G. Fat content of milk and cream and effects on fat globule stability[J]. *J Food Sci*, 1997, 62(5): 992 - 995.
- [19] DAVIES E, DICKINSON E, BEE R. Shear stability of sodium caseinate emulsions containing monoglyceride and triglyceride crystals [J]. *Food Hydrocolloid*, 2000, 14(2): 145 - 153.
- [20] SHIN J A, AKOH C C, LEE K T. Production and physicochemical properties of functional - butterfat through enzymatic interesterification in a continuous reactor[J]. *J Agric Food Chem*, 2009, 57(3): 888 - 900.
- [21] 刘琴. 贮藏温度对速冻专用油脂结晶行为及物理性能的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [22] 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 [2023 - 12 - 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128997>.
- [23] 焦文娟. 脂肪晶体结构对脂肪结晶乳液消化性能的影响及机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [24] CHAI X, MENG Z, LIU Y. Relationship between lipid composition and rheological properties of colloidal fat crystal networks: A comparative study using chemometrics [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 118: 108814 [2023 - 12 - 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108814>.

- of Virchow's triad[J]. Clin Rheumatol, 2020, 39(9): 2529-2543.
- [3] 张珀, 邓云, 桂阳, 等. 抗血栓药物作用机制的研究进展[J]. 基层医学论坛, 2020, 24(25): 3682-3685.
- [4] 杨沁雨, 章泽恒. 血小板在炎症型血栓形成中的作用[J]. 中南药学, 2022, 20(3): 649-656.
- [5] 于莹. 浅析阿司匹林抗血小板治疗的药学服务[J]. 中国医药指南, 2018, 16(3): 296.
- [6] NARAN N H, CHETTY N. The *in vitro* effect of ridogrel on platelet function in normocholesterolaemic and familial hypercholesterolaemic type IIa subjects[J]. Thromb Res, 1997, 88(5): 399-407.
- [7] 杨颖, 蒋金法. 新型抗血小板药物研究进展[J]. 外科研究与新技术, 2014, 3(4): 263-266.
- [8] LEE D H, CHUN E J, HUR J H, et al. Effect of sarpogrelate, a selective 5-HT_{2A} receptor antagonist, on characteristics of coronary artery disease in patients with type 2 diabetes[J]. Atherosclerosis, 2017, 257: 47-54.
- [9] DE LUCA G, SAVONITTO S, VAN'T HOF A W J, et al. Platelet GP IIb-IIIa receptor antagonists in primary angioplasty: Back to the future[J]. Drugs, 2015, 75(11): 1229-1253.
- [10] 朱德昊. 浅谈华法林的抗凝作用[J]. 临床医药文献电子杂志, 2016, 3(40): 8091-8092.
- [11] TU M, CHENG S, LU W, et al. Advancement and prospects of bioinformatics analysis for studying bioactive peptides from food-derived protein: Sequence, structure, and functions[J]. Trac Trends Anal Chem, 2018, 105: 7-17.
- [12] CHABANCE B, JOLLÈS P, IZQUIERDO C, et al. Characterization of an antithrombotic peptide from kappa-casein in newborn plasma after milk ingestion[J]. Br J Nutr, 1995, 73(4): 583-590.
- [13] NASRI R, AMOR I B, BOUGATEF A, et al. Anticoagulant activities of goby muscle protein hydrolysates[J]. Food Chem, 2012, 133(3): 835-841.
- [14] ZHANG W, TIAN G, GENG X, et al. Isolation and characterization of a novel lectin from the edible mushroom *Stropharia rugosoannulata* [J]. Molecules, 2014, 19(12): 19880-19891.
- [15] 张明发, 沈雅琴, 朱自平, 等. 火麻仁的镇痛、抗炎、抗血栓形成作用研究[J]. 基层中药杂志, 1999(1): 13-15.
- [16] 魏月媛, 李理. 火麻仁的功效及使用安全性研究进展[J]. 食品工业, 2015, 36(7): 256-260.
- [17] 丛涛, 江雪媛, 赵霖, 等. 火麻仁蛋白质粉对生长期大鼠营养生理功能的影响研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(2): 60-69.
- [18] 卫萍, 游向荣, 张雅媛, 等. 火麻蛋白加工特性、改性及其活性肽研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 231-242.
- [19] 涂茂林, 冯立婷, 刘宏伟, 等. 酪蛋白抗血栓活性肽的制备及其鉴定[C]//中国食品科学技术学会. 中国食品科学技术学会第十三届年会论文摘要集. 北京: 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 大连工业大学食品科学与工程学院, 国家海洋食品工程技术研究中心, 2016.
- [20] 冯立婷. 酶解制备贻贝抗血栓肽及其作用机制初探[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

(上接第96页)

- [25] 颜蕾. 大豆蛋白水解物/黄原胶低脂冰淇淋制备及抗融品质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2021.
- [26] 杨焜婷. 豌豆蛋白结构修饰对冷冻充气乳液品质特性影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [27] 许馨予, 杨鹤隽, 贾斌, 等. 大豆分离蛋白-高酯柑橘果胶-没食子酸复合 Pickering 乳液制备及其稳定性分析[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 42-51.
- [28] 李天赐, 陈毅保, 刘昆仑, 等. 界面蛋白对水酶法提取植物油过程中乳状液稳定性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 188-195.
- [29] ZIAEIFAR L, LABBAFI MAZRAE SHAHI M, SALAMI M, et al. Effect of casein and inulin addition on physico-chemical characteristics of low fat camel dairy cream[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 117: 858-862.
- [30] 聂云青. 植物基酸性冷冻搅打乳液及其品质特性研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2022.